

釜石鉱山における 掘削影響領域の評価に関する研究 (平成6年度)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

概 要

1995年3月

清水建設株式会社
株式会社 大林組

~~この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理してください。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意してください。~~

~~This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.~~

~~本資料についての問い合わせは下記に願います。~~

~~〒509-51 岐阜県土岐市泉町寔林寺字園戸959-31~~

~~動力炉核燃料開発事業団~~

~~東濃地科学センター~~

~~技術開発課~~

釜石鉱山における掘削影響領域の評価に関する研究（平成6年度）

堀田政國^{*}、 木下直人^{**}
吉岡尚也^{***}、 永久和正^{****}

要旨

深部岩盤に坑道などの空洞を掘削すると、空洞周辺は掘削の影響を受けると考えられる。本研究では、釜石原位置試験第2フェーズとして、釜石鉱山250mレベル坑道（土被り730m）において、深部岩盤の掘削影響領域の評価に関する研究を実施する。対象となる岩盤はき裂を含む栗橋花崗閃緑岩である。

既存坑道および試錐孔を利用した調査・試験を実施し、既存の調査手法の有効性を検討するとともに、既存坑道周辺の掘削影響領域の特性および広がり の把握を試みた。物理探査としては、PS検層、弾性波探査（屈折法）、レーダー探査（反射法）、弾性波トモグラフィー探査を実施し、坑道周辺50cmまで掘削損傷領域であることが確認された。また、試錐孔内で実施された孔内載荷試験結果から掘削影響領域は、深度0.5m～1.0m程度であると評価された。本調査・試験を通じ、既存の調査手法の調査限界ならびに今後の機器改良の必要性が指摘された。

さらに、岩芯鑑定などから得られたき裂情報をもとに、き裂分類の指標として充填物の幅、充填物の種類、および変質の程度を抽出した。また、これら3つの分類指標から、き裂を10グループに分け、室内物性試験を実施することにより、き裂性岩盤のモデル化手法の確立の上での基礎的情報を取得した。

これらの結果に基づき、国内外の掘削影響試験の事例検討も踏まえて、平成7年度から実施予定の「新規坑道掘削にともなう掘削影響領域の評価」の詳細計画案を作成した。

本報告書は、清水建設株式会社と株式会社大林組が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：060D0245

事業団担当部課および担当者：環境技術開発推進本部地層科学研究グループ 武田精悦

※：清水建設株式会社電力・エネルギー本部技術第二部

※※：清水建設株式会社技術研究所地下技術研究部

※※※：株式会社大林組技術研究所土木第四研究室

※※※※：株式会社大林組土木技術本部技術第二部

Study on Evaluation of Excavation Disturbed Zone at Kamaishi Mine

M.Horita* N.Kinoshita**
N.Yoshioka*** K.Nagahisa****

Abstract

The rock around a cavern like a drift will be effected by the excavation of it. In this study, the excavation disturbed zone (EDZ) in deep rock is evaluated in the 250m-level drift at the Kamaishi Mine for the Kamaishi In-situ Experiments (Phase II). The rock at the site is Kurihashi grano-diolite with some joints.

The characteristics and extent of EDZ around an existing drift are evaluated by means of several investigation techniques and tests in the drift and boreholes. PS logings, elastic wave exploration (a deflection method), radar exploration (a reflection method), and elastic wave tomography are performed in order to test physical exploration methods. These investigation implied an EDZ of 50 cm exists around the existing 250m-level drift. The result of borehole jack test also implied 50 cm to 1m of EDZ around the drift. The limitation of the investigation methods and the necessity of improvement on the equipments are pointed out through these tests.

The width and kind of filling, and the degree of alternation are selected for the indices to classify joints based upon the joint information obtained from core inspection and so on. Joints are classified into 10 groups with these 3 indices, and are subjected to property tests in a laboratory. The classification and the property tests give fundamental information to build modelling methods of discontinuous rock.

"Evaluation of EDZ with excavation of a new drift" is planned in detail based on the above-mentioned results with some available information on excavation disturbance experiments performed in a granitic rock in Sweden, Canada, Switzerland, and Japan.

This work performed by Shimizu Corporation and Obayashi Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Geosciences Research Program, Radioactive Waste Management Project: Seietsu Takeda

* : Shimizu Corporation, Power & Energy Project division

** : Shimizu Corporation, Technical Research Institute

*** : Obayashi Corporation, Technical Research Institute

**** : Obayashi Corporation, Civil Engineering Technical Division

釜石鉱山における掘削影響領域の評価に関する研究（平成6年度）

担当者一覧表

	清水建設株式会社	株式会社大林組
実施責任者	飯塚友之助	村井喜一
実施担当者	堀田政國	吉岡尚也
研究業務担当者	木下直人	三上哲司
	中島 均	木梨秀雄
		永久和正
		玉野 達
		田中達也

釜石鉱山における掘削影響領域の評価に関する研究（平成6年度）

目 次

1. はじめに	1-1
2. 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験	2-1
2.1 調査・試験概要	2-1
2.2 物理探査	2-2
2.2.1 P S検層	2-2
2.2.2 坑内弾性波探査（屈折法）	2-4
2.2.3 レーダー探査（反射法）	2-7
2.2.4 弾性波トモグラフィ	2-10
2.3 孔内載荷試験	2-15
2.4 室内試験	2-20
2.5 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ	2-21
2.5.1 掘削影響領域の特性と広がり	2-21
2.5.2 調査手法の適用性の評価	2-23
参考文献	2-24
3. き裂物性試験および試験結果に基づくき裂の分類	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.2 き裂の分類	3-2
3.3 き裂の物性試験	3-4
3.3.1 試験方法	3-4
3.3.2 ラフネス測定結果	3-5
3.3.3 垂直載荷試験	3-6
3.3.4 せん断試験結果	3-6
3.3.5 き裂の特性試験結果	3-8
3.3.6 JRC ₀ の算出	3-9
3.4 き裂分類の指標と力学特性	3-10
3.4.1 き裂分類の指標と変形特性	3-10
3.4.2 き裂分類の指標と強度特性	3-10

3.4.3	き裂分類の指標とJCS ₀ ・JRC ₀	3-11
3.4.4	き裂に関するDEM解析への入力値の決定	3-12
3.5	まとめ	3-14
3.5.1	主な成果	3-14
3.5.2	今後の課題	3-14
	参考文献	3-15
4.	「新規坑道における掘削影響領域の評価」詳細実施計画案の検討 ..	4-1
4.1	掘削影響試験の目的と実施計画作成の手順	4-1
4.1.1	掘削影響試験の目的	4-1
4.1.2	実施計画作成の手順	4-1
4.2	各国の掘削影響領域の捉え方	4-3
4.2.1	スウェーデン (HRL)	4-3
4.2.2	カナダ (URL)	4-5
4.2.3	スイス (GTS)	4-5
4.2.4	釜石原位置試験における掘削影響試験	4-7
4.2.5	神岡鉱山における掘削影響試験	4-7
4.3	コンセプトの確立	4-12
4.4	試験坑道のレイアウトの設定	4-14
4.4.1	試験坑道の大きさ	4-14
4.4.2	試験坑道の方向	4-14
4.4.3	計測坑道と試験坑道の離間距離	4-14
4.4.4	試験坑道の長さ	4-16
4.4.5	試験坑道位置の選択	4-16
4.4.6	掘削工法の選択	4-17
4.5	計測項目の抽出と配置計画	4-18
4.5.1	目的	4-18
4.5.2	計測方針	4-18
4.5.3	期待される成果	4-22
4.6	掘削前後の調査・試験項目の抽出	4-23
4.6.1	事前調査項目の抽出	4-23
4.6.2	事後調査項目の抽出	4-25
4.7	実施計画の作成	4-28
4.7.1	計測坑道掘削手法の選定と掘削計画	4-28

4.7.2	試験坑道掘削手法の選定と掘削計画	4-28
4.7.3	調査試験用ボーリングの掘削計画	4-28
4.7.7	解析計画	4-30
4.7.5	全体工程のまとめ	4-36
	参考文献	4-38
5.	まとめ	5-1
5.1	既存坑道周辺の調査・試験と室内試験	5-1
5.1.1	物理探査	5-1
5.1.2	孔内載荷試験	5-2
5.1.3	室内試験	5-2
5.1.4	既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ	5-2
5.2	き裂物性試験および結果に基づくき裂の分類	5-4
5.3	「新規坑道における掘削影響領域の評価」詳細計画案の検討	5-5

目 次

図2.1.1	調査位置レイアウト	2-1
図2.2.1	P S 検層走時曲線	2-3
図2.2.2	坑内弾性波探査（屈折法）結果	2-5
図2.2.3	坑道壁面におけるき裂調査結果と 屈折法による弾性波伝播速度分布	2-6
図2.2.4	レーダ探査（反射法）結果	2-8
図2.2.5	送信波形と地中入射時の受信波形の関係	2-9
図2.2.6	トモグラフィ解析のフロー	2-10
図2.2.7	片走時解析で用いた波線（KDT-2孔発振・KDT-1孔受振）	2-11
図2.2.8	弾性波トモグラフィ解析結果 （KDT-2孔発振・KDT-1孔受振の片走時による解析）	2-12
図2.2.9	KDT-1孔およびKDT-2孔のポーリングコアにおける き裂分布とRQD値	2-14
図2.3.1	孔内載荷パターン	2-15
図2.3.2	孔内載荷試験結果（KDK-1～3, KM-2）	2-17
図2.3.3	孔内載荷試験結果からの掘削影響領域の算出（D1～2）	2-19
図3.1.1	本章の流れ	3-1
図3.4.1	充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j の関係	3-10
図3.4.2	充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係	3-10
図3.4.3	充填物の種類と JCS_0 の関係	3-11
図3.4.4	充填物の種類と JRC_0 の関係	3-11
図3.4.5	充填物の種類ごとのせん断強度の予測 （Mohr-Coulombの条件）	3-7
図3.4.6	充填物の種類ごとのせん断強度の予測 （Barton-Bandisモデル）	3-9
図4.1.1	実施計画作成フロー	4-2
図4.2.1	HRLの掘削計画と計測用ポーリング配置（平面図）	4-4
図4.2.2	HLWの計測用ポーリング配置（断面図）	4-4
図4.2.3	URLの掘削影響試験における計測配置	4-6
図4.2.4	釜石原位置試験KD-88坑における掘削影響試験	4-9

図4.2.5	釜石原位置試験KD-89坑における掘削影響試験	4-9
図4.2.6	神岡鉱山における掘削影響試験（その1）	4-11
図4.2.7	神岡鉱山における掘削影響試験（その2）	4-11
図4.3.1	掘削影響に関連する事象	4-13
図4.4.1	試験坑道断面	4-14
図4.4.2	計測坑道断面	4-14
図4.4.3	試験坑道ならびに計測坑道の基本レイアウト	4-15
図4.4.4	試験坑道候補地点	4-15
図4.5.1	掘削影響に係わる事象と調査・計測項目との対応	4-19
図4.5.2	計測断面配置図	4-20
図4.5.3	計器配置図（A-A断面）	4-21
図4.5.4	計器配置図（B-B断面）	4-21
図4.6.1	事前調査用ボーリング配置のまとめ	4-24
図4.6.2	事前調査用ボーリング配置のまとめ	4-26
図4.7.1	坑道掘削後における岩盤の変位状況 (FEM)	4-33
図4.7.2	坑道掘削後における岩盤の応力状態 (FEM)	4-33
図4.7.3	坑道掘削後における岩盤の変位状態 (DEM)	4-34
図4.7.4	坑道掘削後における岩盤の応力状態 (DEM)	4-34
図4.7.5	坑道掘削後におけるき裂の開口量 (DEM)	4-35
図4.7.6	坑道掘削後におけるき裂のせん断変位 (DEM)	4-35

表目次

表2.1.1	調査項目等一覧表	2-1
表2.1.2	室内試験項目一覧表	2-1
表2.2.1	KDT-1・2孔のP波・S波速度区分	2-2
表2.3.1	孔内載荷試験結果	2-16
表2.3.2	変形係数および弾性係数の深度分布から求めた掘削影響領域	2-19
表2.4.1	室内試験結果一覧	2-20
表3.2.1	試料の選定条件	3-3
表3.2.2	採取した試料の一覧	3-3
表3.3.1	ラフネス測定結果	3-5
表3.3.2	実験から得られた K_{ni} および K_{n5-10}	3-6
表3.3.3	き裂のせん断試験結果の一覧	3-7
表3.3.4	き裂の特性試験結果	3-8
表3.3.5	せん断試験結果から求めた JRC_0	3-9
表3.4.1	充填物の種類ごとの入力値	3-12
表4.2.1	HRLにおける掘削影響試験のまとめ	4-4
表4.2.2	URLにおける掘削影響試験のまとめ	4-6
表4.2.3	グリムセルにおける掘削影響試験のまとめ	4-8
表4.2.4	釜石鉱山における掘削影響試験のまとめ	4-8
表4.2.5	神岡鉱山における掘削影響試験のまとめ	4-10
表4.5.1	計測の種類と数量	4-20
表4.6.1	事前調査一覧表	4-24
表4.6.2	事後調査一覧表	4-26
表4.7.1	解析計画	4-31
表4.7.2	「新規坑道における掘削影響領域の評価」の実施工程表	4-37
表5.1	各種調査法による掘削影響領域の広がり	5-3

1. はじめに

深部岩盤に坑道などの空洞を掘削すると、空洞周辺は掘削の影響を受けると考えられる。本研究では、釜石原位置試験第2フェーズとして、釜石鉱山250mレベル（土被り730m）において、深部岩盤の掘削影響領域の評価に関する研究を実施する。対象となる岩盤は、栗橋花崗閃緑岩である。既存の坑道および試験孔を利用した調査・試験を実施し、既存の調査手法の有効性を検討するとともに、既存坑道周辺の掘削影響領域の特性および広がり の把握を試みる。また、コアを用いた室内物性試験を実施している。さらに、き裂の力学試験および特性試験を実施し、その結果に基づき、き裂を分類することにより、き裂性岩盤のモデル化手法確立の上での基礎的情報を取得する。さらに、これらの結果ならびに国内外の研究事例に基づき、平成7年度から実施予定の「新規坑道における掘削影響領域の評価」の詳細計画案を作成する。

第2章には既存坑道周辺の調査・試験の結果と室内物性試験の結果を示している。既存坑道周辺の物理探査としては、PS検層、弾性波探査（屈折法）、レーダー探査（反射法）および弾性波トモグラフィーを実施している。また、既存坑道から削孔した水平孔、鉛直孔、斜上向孔内において孔内載荷試験を実施し、岩盤物性の異方性の検討を行なっている。室内物性試験としては、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、圧裂試験、弾性波速度測定、間隙率測定を実施している。

第3章では、き裂の物性試験の試料抽出のためのき裂分類の手法とき裂に関する室内試験の結果を示している。き裂の分類に際しては、充填物の幅、充填物の種類、変質の程度、き裂面の粗さ、条線、き裂パターンを検討対象としている。き裂の力学試験としては、垂直載荷試験とせん断試験を実施している。また、き裂面の特性を調べる試験としては、シュミットハンマー試験、ティルト試験、粗さ（ラフネス）測定を実施している。

第4章においては上記の試験結果を踏まえて、「新規坑道における掘削影響領域の評価」の詳細実施計画案の検討を行なっている。ここでは、国内外の事例を検討し、本研究における掘削影響試験のコンセプトを確立し、さらに、試験坑道のレイアウト、坑道掘削前後の調査・試験項目の抽出、計測項目の抽出を行ない、実施計画案を提案している。さらに、岩盤挙動の予測、検証を行なう解析手法の計画を加えて、全体スケジュールを提示している。

第5章においては、今回実施した調査・試験、き裂分類およびき裂試験、掘削影響試験の詳細実施計画案の検討結果を総合評価してとりまとめている。

2. 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験

2.1 調査・試験概要

(1)調査項目および数量等

試験項目および数量等を表2.1.1、表2.1.2に示す。

表2.1.1 調査項目等一覧表

調査名	調査手法	数量	備考
(1)物理探査	①PS検層	ボーリング2孔, 孔長20m (原則として50cmピッチ)	水平孔 孔径φ76mm
	②坑内弾性波探査 (屈折法)	測線長30m (原則として50cmピッチ)	坑道壁面
	③レーダ探査(反射法)	測線長30m (原則として連続)	坑道壁面
	④弾性波トモグラフィ	20m×20mブロック 3方向 (原則として1mピッチ)	水平2孔 坑道壁面
(2)孔内載荷試験		3方向×3深度×3ボーリング孔=27測点	鉛直,水平,斜上向孔

表2.1.2 室内試験項目一覧表

調査手法	数量	試験基準
①弾性波速度試験	三式 (一式は供試体3個)	KDK S 0503 ¹⁾
②一軸圧縮試験	一式 (同上)	JIS M 0302 ²⁾
③高圧三軸試験	一式 (同上)	ISRMの指針 ³⁾
④圧裂試験	一式 (同上)	JIS M 0303 ⁴⁾

(2)原位置試験実施位置

各調査の坑内における調査地点を図2.1.1に示す。

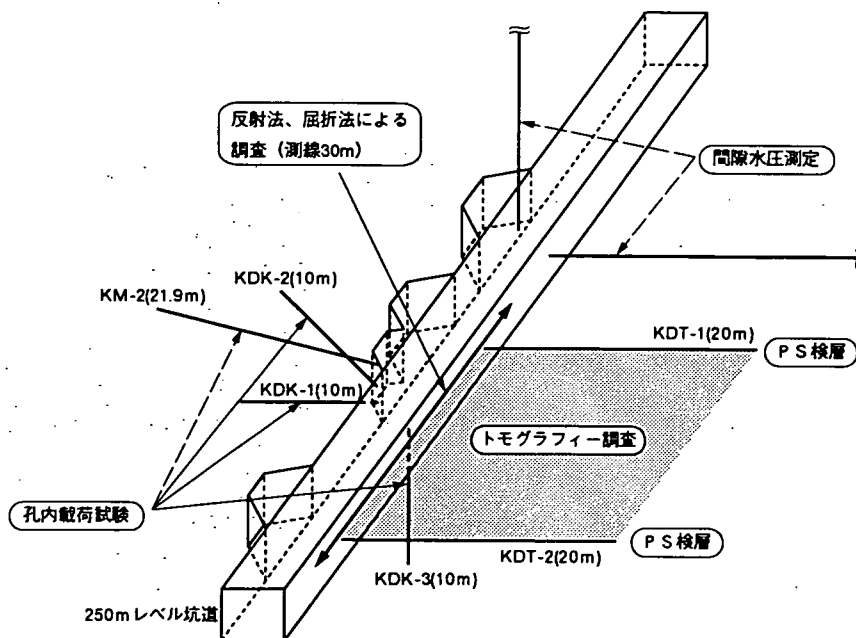


図2.1.1 調査位置レイアウト

2.2 物理探査

2.2.1 P S検層

2.2.1.1 目的

P S検層は、ボーリング孔を利用して岩盤のP波、S波速度分布を調べ、これらの速度分布や動的特性を指標とした掘削影響領域の広がりを把握することを目的とする。

2.2.1.2 測定方法および解析方法

坑道内の振源より発生した波動をKDT-1孔およびKDT-2孔中にセットした受振器で測定し、等間隔の深度で得られた記録を用いて各深度の記録中のP・S波の位相を追跡することによって地盤の伝搬速度分布を評価し、その地質解釈を行った。

2.2.1.3 調査結果

記録波形より読み取った初動走時を基に図2.2.1に示す走時曲線を作成した。図中の●印がP波走時、○印がS波走時を示す。図2.2.1によるとKDT-1孔におけるP波の走時曲線は坑壁からの深度0.75mに変曲点があり、S波の走時曲線は深度0.5mに変曲点があると判断することができる。一方、KDT-2孔の走時曲線から、S波についてはKDT-1孔と同様に深度0.5mで変曲点を確認されるものの、P波の変曲点は不明瞭で特定することができない。これらの走時曲線は変曲点の前後ではほぼ線形的に変化しており、相似直線の傾きよりP波、S波の速度が求められる。P波、S波の速度区分を表2.2.1に示す。

表2.2.1 KDT-1・2孔のP波・S波速度区分

ボーリング孔	P波		S波	
	深度(m)	速度(km/sec)	深度(m)	速度(km/sec)
KDT-1	0~0.75	3.0	0~0.5	1.5
	0.75以深	6.0	0.5以深	3.2
KDT-2	0~20	6.0	0~0.5	1.5
			0.5以深	3.4

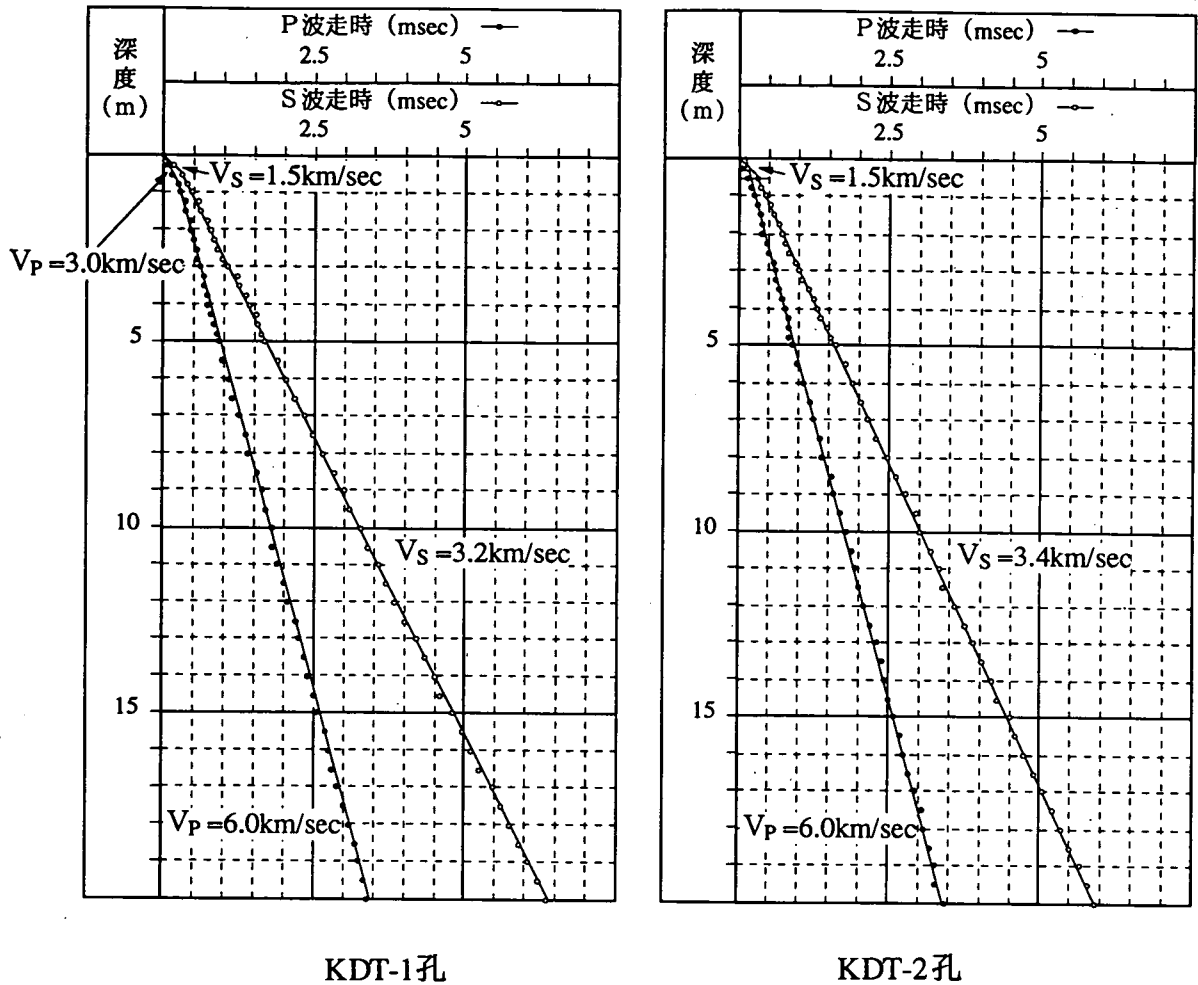


図2.2.1 P S検層走時曲線

2.2.1.4 考察

試験結果より、坑道掘削による既存き裂の開口や新規き裂の発生等に起因して、坑道壁面付近の岩盤の弾性波速度が低下しているものと考えられる。そして、表2.2.1の速度区分に示したように深度0.5~0.75m付近でKDT-1孔のP波と両孔のS波の速度が変化していることから、今回の調査地点の調査を実施した時点での掘削影響領域は、坑道壁面から深度0.5~0.75mの辺りまでであると考えられる。

2.2.2 坑内弾性波探査（屈折法）

2.2.2.1 目的

弾性波探査は人工的に起した弾性波を利用し、地下構造や地下の物質を推定する方法であり、探査深度と利用する波の性質により手法が異なる。

今回の屈折法は、坑道壁面より水平方向に対する速度層境界からの屈折波を解析するもので、この速度構造解析結果より掘削影響領域の範囲を把握することを目的とする。

2.2.2.2 測定方法および解析方法

掛矢によるスタッキング方式を起振源とした波動を、壁面上に等間隔でセットした複数の受振器を用いて測定する。そして、記録された波形を基に走時曲線を作成し、はぎとり法を用いて、二層目の弾性波速度と速度境界面を求めた。

2.2.2.3 調査結果

各発振源からの記録波形より初動走時を読み取り、走時曲線図（図2.2.2①）を作成した。この走時曲線図を基に、二層の速度構造を有する図2.2.2②の解析断面図を作成した。速度境界面の深度は場所によって多少の違いはあるが0.5m前後となっている。

なお、坑内弾性波探査（屈折法）では、測線長の10分の1から5分の1程度が探査可能な深度であることから、今回の調査では坑道壁面から深度3～6m位までが探査領域となる。

2.2.2.4 考察

図2.2.2②の断面図に示したように、岩盤中を伝わる弾性波の速度が異なる二つの層が存在し、その境界面の坑道壁面からの深度は0.5m付近となっている。また、坑道壁面より遠い側の層（第二層）の弾性波速度は全域において6.0km/secであるが、坑道壁面側の層（第一層）では調査測線の両端部分では3.0km/sec、中央付近で4.0～5.0km/secというように場所によって異なった値となっている。図2.2.3において調査領域の坑道壁面のき裂調査結果と弾性波速度分布を比較すると、き裂密度の高い領域はき裂密度が低い領域に比べて弾性波速度が遅くなっている。従って、坑内弾性波探査（屈折法）の結果から、弾性波速度を指標とした場合、坑道壁面から深度0.5m付近までを掘削影響領域とすることができ、その影響要因、すなわち弾性波の伝播速度が低下した一因として、既存き裂の開口等、き裂の影響を考慮することができる。

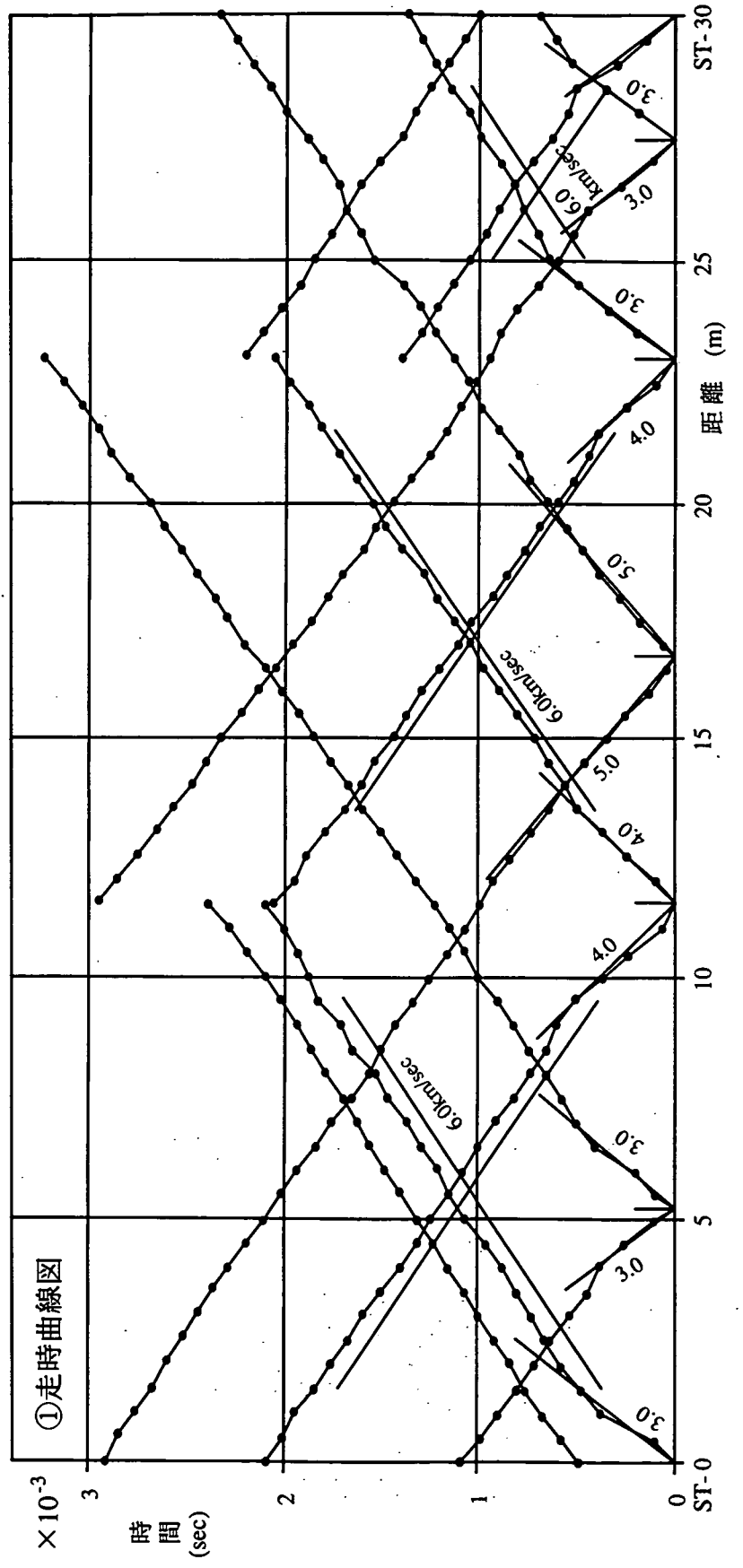
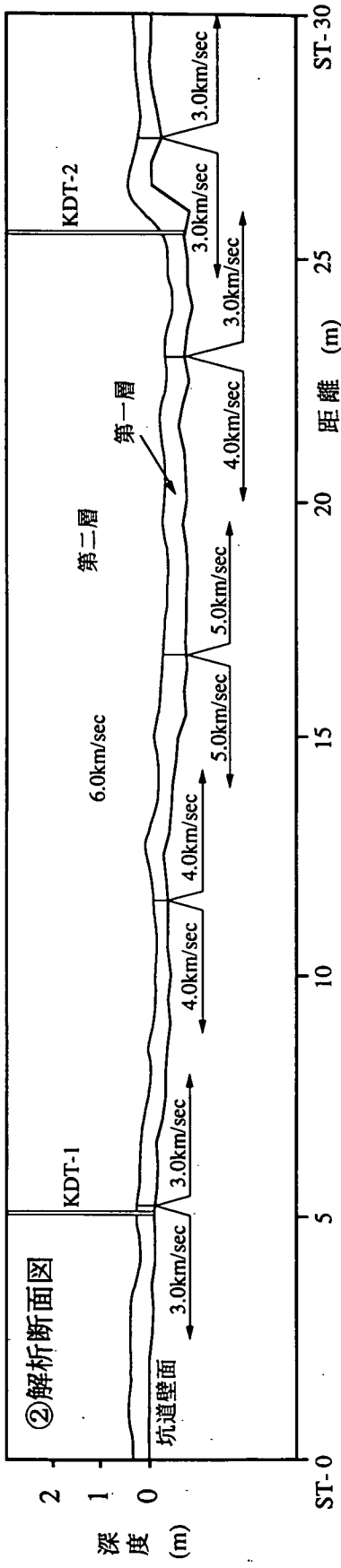
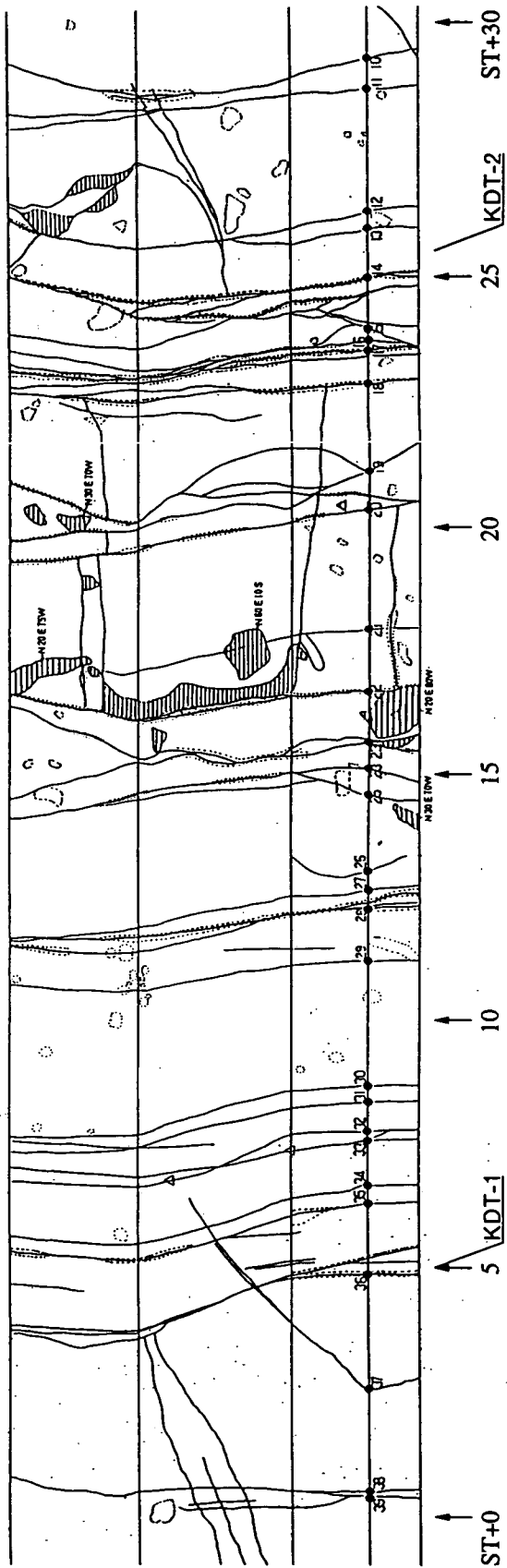
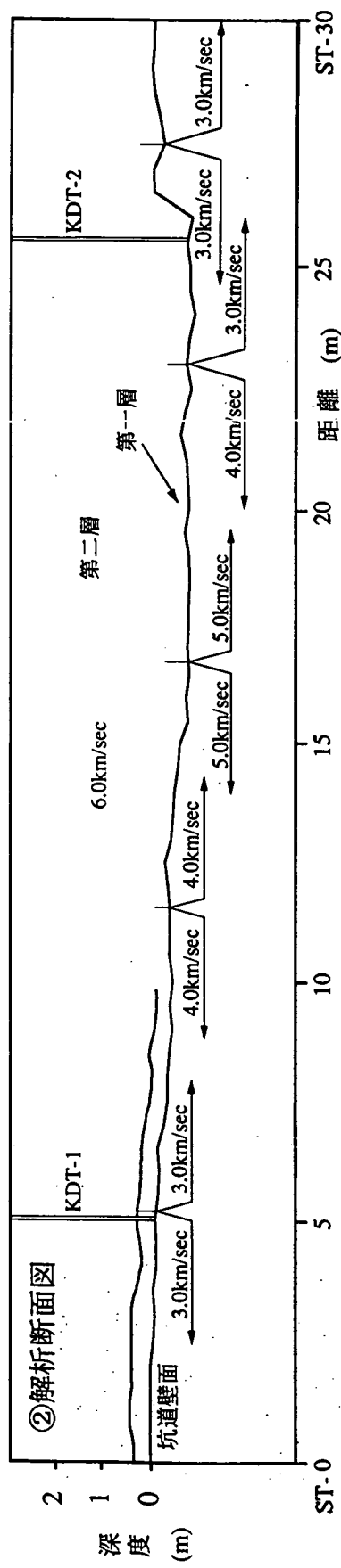


图2.2.2 彈性波探查 (屈折法) 結果



(a) 坑道壁面におけるき裂調査結果



(b) 屈折法による弾性波伝播速度分布

図2.2.3 坑道壁面におけるき裂調査結果と屈折法による弾性波伝播速度分布

2.2.3 レーダ探査（反射法）

2.2.3.1 目的

レーダ探査は、電磁波レーダ探査装置を用い、坑道壁面より水平方向に対する岩盤中の電気的特性の異なる境界からの反射波を受信する方法である。電磁波の反射・減衰は主に地盤中の電気的性質の異なる境界面において強く発生し、必ずしも地層境界で反射・減衰が発生するとは限らないが、多くの地層境界や地盤状況と結び付けて解釈することが可能である。従って、受信される反射波は地盤の特性を推定するために有効な材料となる。

レーダ探査は連続的な境界面を把握することができるため、岩盤掘削に伴う掘削影響領域の範囲を把握することを目的とする。

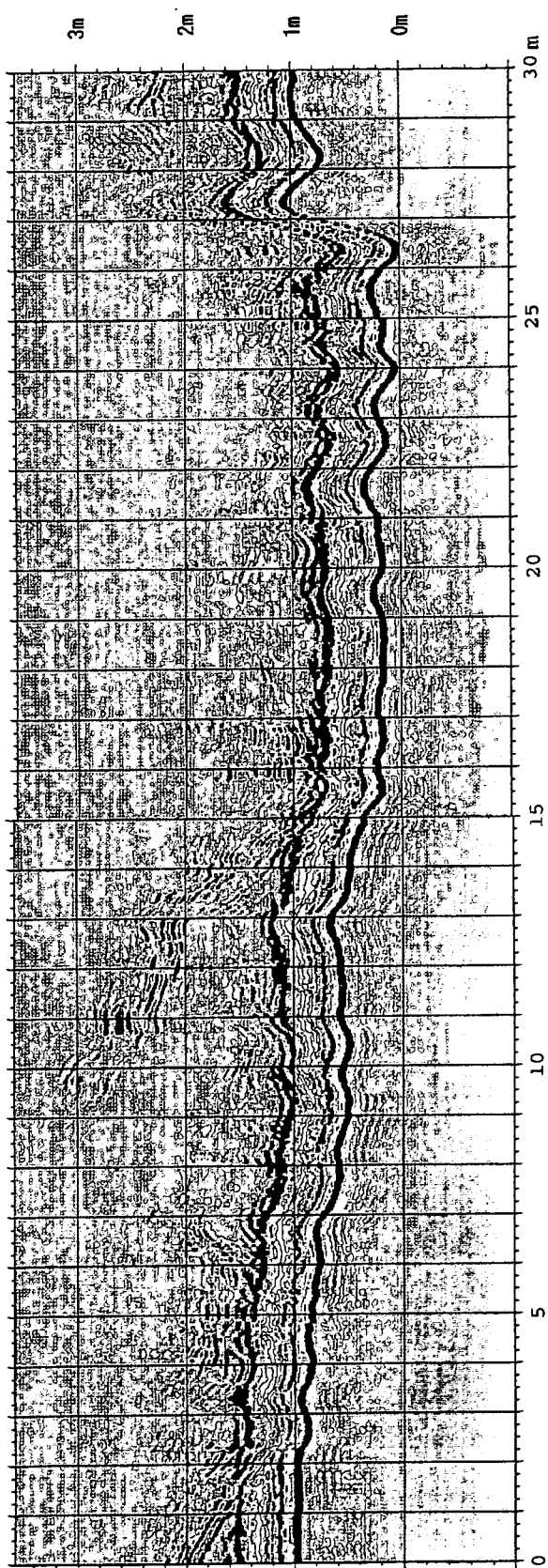
2.2.3.2 測定方法

送信アンテナから照射された送信信号（電磁波；周波数数百MHz帯）が地中を伝搬する際の電気的特性の異なる境界面（必ずしも地質で変化するとは限らない）で反射し、受信アンテナによって受信された反射信号により地下構造を推定する方法である。基本的な測定原理は弾性波等による反射法と同じであり、一定のサンプルレートにより得られる反射波形を、アンテナを移動測定することにより並べ対比するものである。大きな相違点は、高周波数帯である電磁波を用いることから、周波数帯域を幅を広くとることができ、これによって分解能が高い（情報量が多い）測定を可能にしている。

2.2.3.3 調査結果

今回の調査で得られたデータに対して振幅回復処理、デコンボリューション処理、マイグレーション処理等を行った後、図2.2.4①に示す反射断面図を作成した。

一般的に見た電磁波の反射・減衰は主に媒質中の電気・電磁的性質の異なる境界面において強く生じるが、受信される反射波には必ずしも地層境界だけで反射・減衰が発生するとは限らずノイズ（主にリングング、多重反射によるもの）が含まれていることが多い。これらに伴うノイズは解析処理段階である程度除去が可能であり、除去できない場合は解釈の段階で識別する必要がある。図2.2.4①ではノイズの除去処理を実施したにもかかわらず坑道壁面から深度0.3～0.5mまでの領域においてノイズを完全に除去することができず、ノイズが残存している。



①反射断面図



②解釈図

--- : 坑道壁面
 — : き裂または鉱物の変質部と
 考えられる反応

図2.2.4 レーダ探査（反射法）結果

2.2.4.4 考察

図2.2.4①における坑道壁面付近のノイズは、リングングによる影響が強いと考えられる。ここでリングングとは、送信波が減衰するときの周波数帯域の変化（周波数帯域が狭くなる）によって発生する波形の歪みであり、不要な継続振動である（図2.2.5参照）。リングングは反射波が発生するような送信波の減衰時には必ず発生し、特に地中入射時に起きる送信波の減衰によるものが強い。また、今回使用した地中レーダ探査装置はSTC(Sensitivity Timing Control)と呼ばれる可変増幅回路を有しており、低信号レベルの反射波を増幅させる際に発信時刻からの経過時間につれて発信波の増幅度を徐々に増大させる。STC機能により信号レベルが増幅される時間ポイントは地表面反射波が観測される時間ポイントよりも遅いため、特に地表面反射波の継続振動（リングング）がSTC機能により強調され、坑道壁面から深度0.3～0.5mまでの領域においてノイズの影響が強くなったものと考えられる。

図2.2.4①においてノイズの影響を考慮し、き裂や鉱物の変状部に影響されたと考えられる反射反応を抽出して図2.2.4②に示す解釈図に表した。この図ではノイズの影響で坑壁から深度0.5m付近までが不明瞭であるが、坑壁から深度1.0m付近までの領域では反射面が多く、深度1.0～2.5mの領域ではほとんど反射面が存在しないことから、深度1.0m付近までを掘削影響領域と考えることができる。

一方、今回探査を実施した坑道壁面には壁面にほぼ直交するき裂が卓越しているものの、アンテナの直下の反射波を評価するという手法の性質上、これらのき裂を捉えることはできなかった。

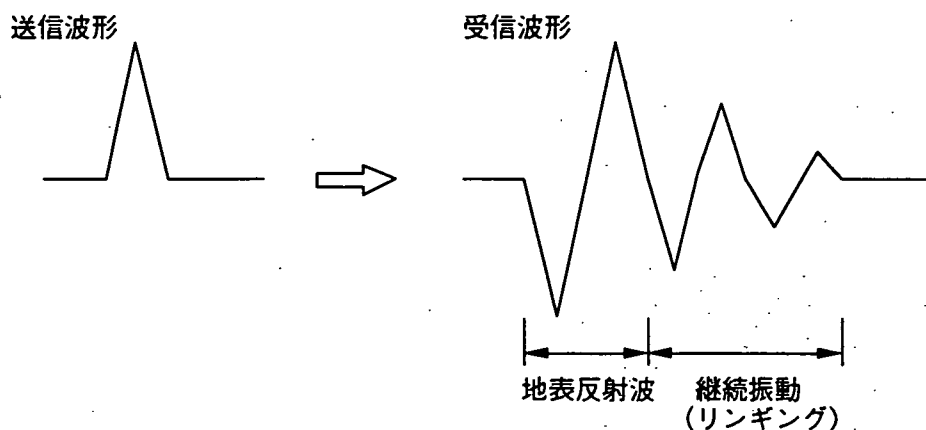


図2.2.5 送信波形と地中入射時の受信波形の関係

2.2.4 弾性波トモグラフィ

2.2.4.1 目的

発振点で人工的に起した波動（弾性波）は、地盤（岩盤）中を四方に伝搬する。このとき波動の伝搬の仕方は、伝搬途中の地盤状態に依存するため、震源から一定距離にある受振点で弾性波の波形を測定することによって、発振点・受振点間の平均的な地盤性状を把握することができる。さらに、震源位置を移動し、受振も複数点でアレイ測定したデータを総合的に解析することにより、地盤性状の2次元的な把握ができる。

この特性を利用した掘削影響領域の把握を目的として、弾性波トモグラフィによる探査を行った。

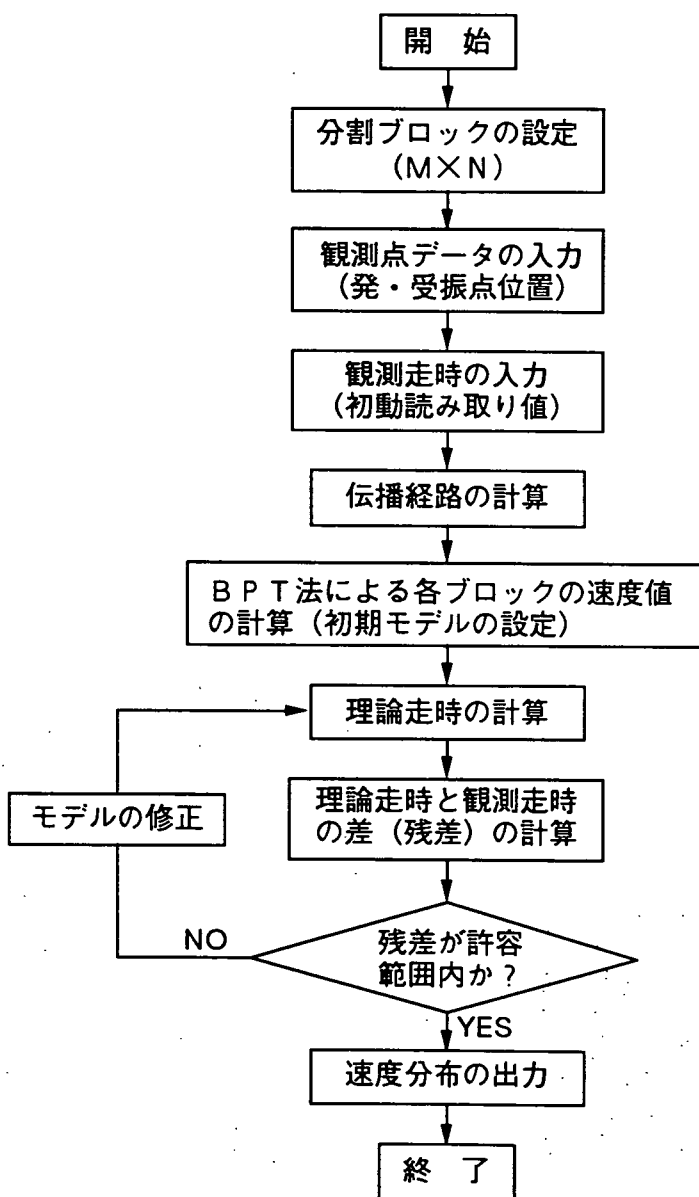


図2.2.6 トモグラフィ解析のフロー

2.2.4.2 測定方法および解析方法

調査は、坑道内の水平距離20.5mの深度20mの水平ボーリング孔間の水平面を対象とした。測定点はボーリング孔内および坑道壁面に設け、測定点間隔は水平孔、坑道壁面とも原則的に1.0mとした。ただし、坑道壁面より深度10mまでを0.5m間隔に狭めて測定した。

今回の探査では発振源としてスパーカー震源を適用し、起振点間隔は原則的に1.0mとした。ただし、測定間隔と同様に深度10mまでを0.5m間隔に狭めて測定した。

また、トモグラフィ解析は図2.2.6のフローに従って実施した。なお、モデルの修正には、代数的な反復解法の中のART法（代数的再構成法）を用いた。

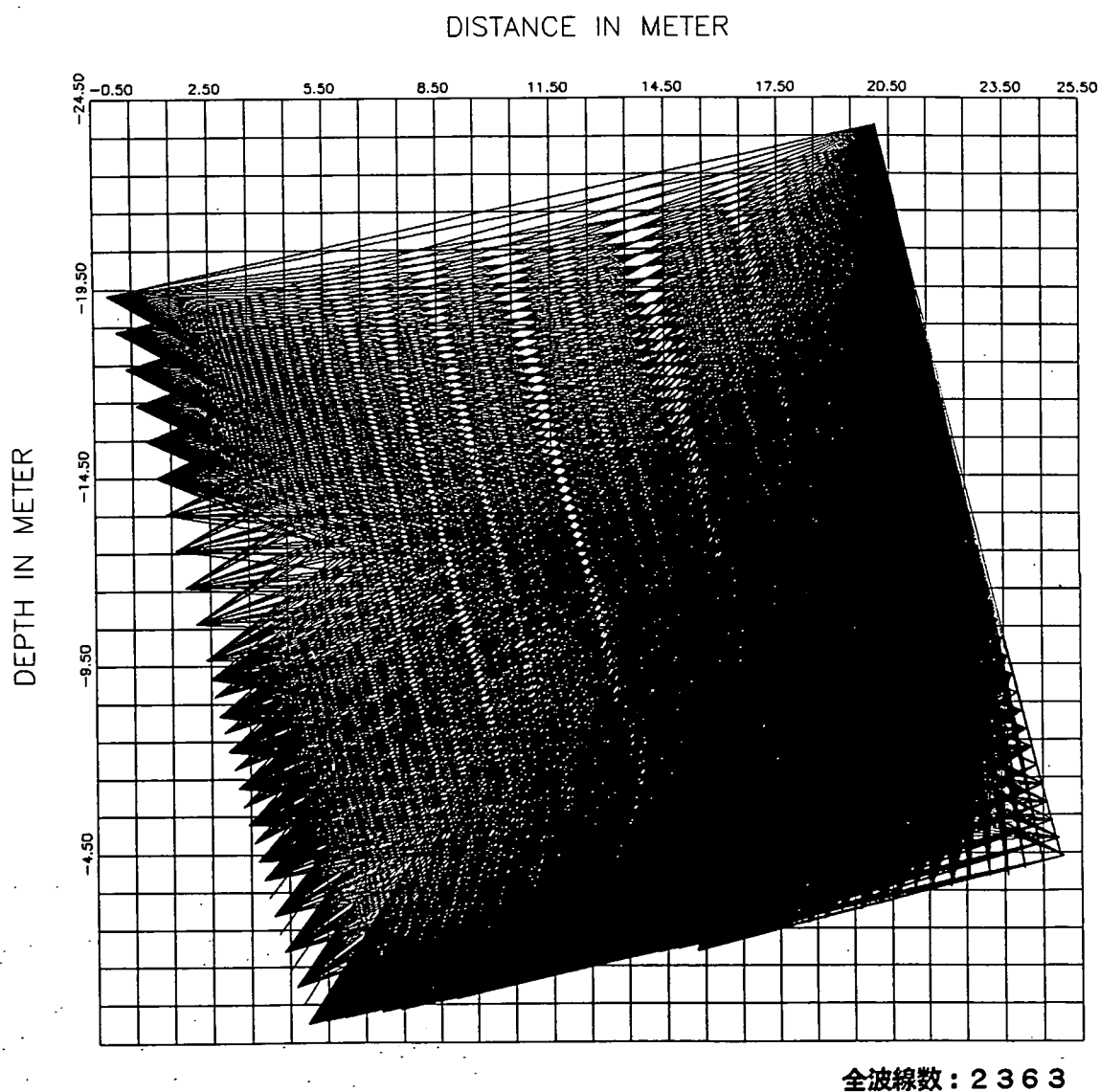


図2.2.7 片走時解析で用いた波線
(KDT-2孔発振・KDT-1孔受振)

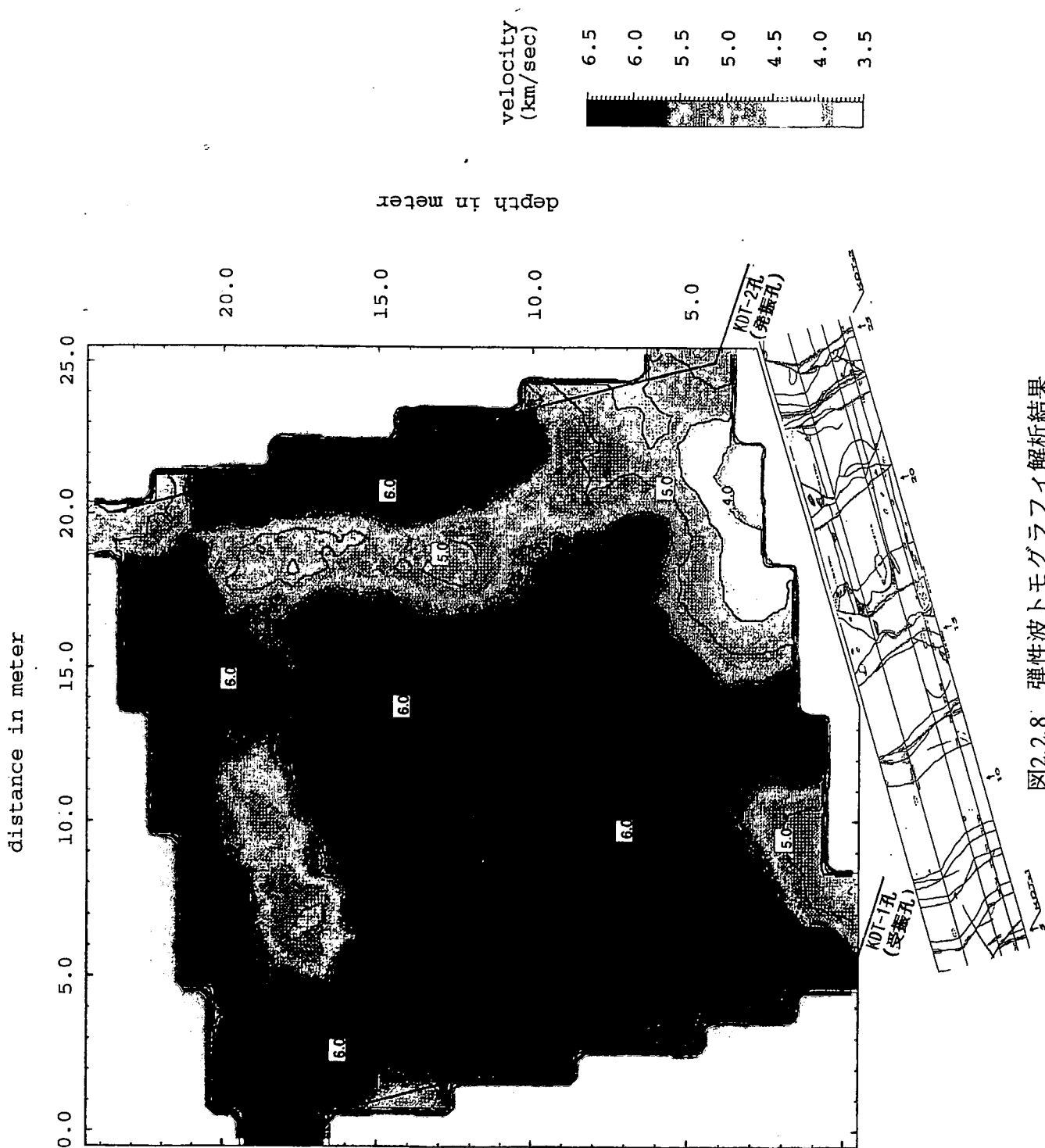


図2.2.8 弾性波トモグラフィ解析結果
(KDT-2孔発振・KDT-1孔受振の片走時による解析)

2.2.4.3 調査結果

図2.2.7に解析で用いた波線を示し、図2.2.8に解析結果を示す。図2.2.7は、KDT-2孔を発振孔とした場合の片走時による解析結果である。

図2.2.8によると、坑道壁面で特に弾性波速度が低下していることに加え、KDT-2孔の右側に沿った領域と坑道壁面からの深度15～20mの領域で若干の速度低下領域が存在している。また、坑道壁面の低速度領域は、KDT-1孔およびKDT-2孔の孔口付近で速度低下が大きく、両孔の間の領域では速度低下が小さい結果となっている。

2.2.4.4 考察

図2.2.9にKDT-1孔およびKDT-2孔のボーリングコア観察結果に基づくボーリングコアのき裂分布状況とRQD値を示す。図2.2.8と図2.2.9を比較すると、KDT-2孔のき裂分布と弾性波速度の分布状態はよく一致している。すなわち、き裂密度が高い部分での弾性波速度が遅く、き裂密度が低い領域では速くなっている。しかし、KDT-1孔のき裂分布と弾性波速度の分布に明瞭な一致はみられない。また、ボーリングコア観察結果やボアホールテレビ観察結果からも、KDT-1孔の孔底付近に示された弾性波速度の低下の原因となるものはみられない。ここで、図2.2.7において深度15～20mの領域で波線密度が小さくなっている。波線密度が低い領域において解析結果、すなわち弾性波速度の分布に対する信頼性は低くなる。従って、KDT-1孔のき裂分布と弾性波速度の分布が一致しないのは、解析結果においてKDT-1孔の孔底付近に虚像が現れている可能性が考えられる。

図2.2.3の坑道弾性波探査（屈折法）と図2.2.8の弾性波トモグラフィの結果を比較した場合、坑道壁面近傍における弾性波速度の分布では、KDT-1孔およびKDT-2孔の孔口付近で弾性波速度が小さく、両孔の間の領域では孔口付近に比べると少し大きくなっていることを示している。これは、坑道壁面のき裂の分布状態に注目した場合、き裂の多いところで弾性波速度がより小さくなる傾向がみられることから、弾性波速度の低下にき裂の存在が影響しているためであると考えられる。すなわち、き裂が掘削の影響を受けて開口することによって弾性波速度が低下すると考えれば、き裂の密度が高いほど掘削の影響による弾性波速度の低下の度合が大きくなることが予想される。しかし、KDT-1孔とKDT-2孔の間の坑道壁面における弾性波速度分布について屈折法の結果と弾性波トモグラフィの結果を詳細にみた場合、先に述べた坑道壁面のき裂分布に対しては弾性波トモグラフィの結果の方がよく一致している。

図2.2.8の弾性波トモグラフィの結果では、KDT-1孔およびKDT-2孔の孔奥で弾性波速度が低下している領域が存在していることを示している。一方、図2.2.1のP S検層および図2.2.2の坑道弾性波探査（屈折法）の試験結果には、このような領域は現れていない。これは、P S検層も屈折法も深度方向に弾性波速度が大きくなるような地層構造を捉えることはできるが、逆の場合はほとんど不可能であることと、屈折法は測線長の10分の1～5分の1程度の深度（今回の場合は、測線長30mであるから探査深度は3～6m）の探査が限界であることに起因している。

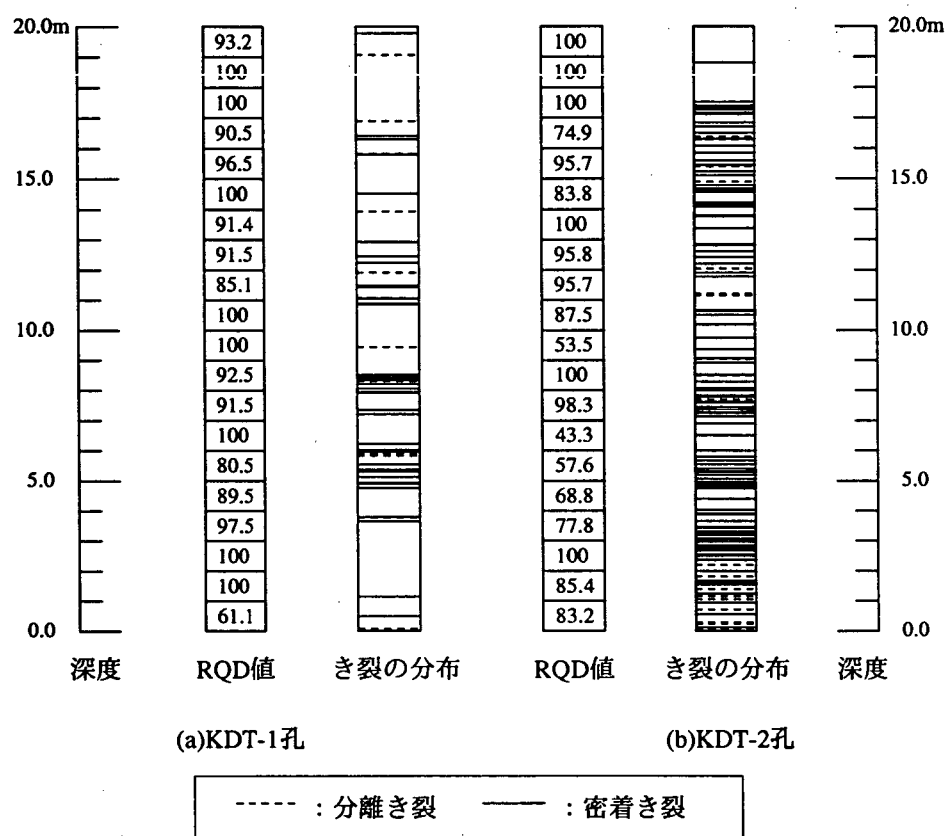


図2.2.9 KDT-1孔およびKDT-2孔の
ボーリングコアにおけるき裂分布とRQD値

2.3 孔内載荷試験

2.3.1 目的

孔内載荷試験は岩盤の変形特性に着目した掘削影響領域の範囲を評価するとともに、原位置における岩盤の変形特性の異方性を把握するために行った。

2.3.2 測定概要および解析方法

本調査においてはセンサー内臓式高圧タイプのKKTを用いて試験を実施した。

今回の原位置試験ではき裂の影響を受けない場所を測点として選定した。また、試験結果を基に岩盤の異方性を調査することを目的とし、基本的に同一深度において3方向での測定を行った。ただし、ゾンデを同一個所で回転させて3回測定する場合、必ず重複する領域が発生するため、载荷は弾性領域内とした。図2.3.1に载荷パターンを示す。

測定結果は荷重・変位曲線として整理し、この曲線からグッドマンの式を用いて変形係数および接線弾性係数を算出した。

2.3.3 調査結果

今回の試験で求められた変形係数および弾性係数を表2.3.1に示す。これらの値に動燃殿が別途実施したKM-2孔における試験結果を加え、深度毎の変化を図2.3.1に示す。

表2.3.1、図2.3.1によるとKDK-1孔とKDK-2孔の場合、例外はあるものの変形係数および弾性係数の値が坑道壁面に最も近い深度0.4mまたは0.5mの測点で最小となり、中間の深度1.0~1.5mの測点で最大となる傾向がある。一方、KDK-3孔の場合は変形係数および弾性係数の値は坑道壁面から離れるほど小さくなる傾向がみられる。

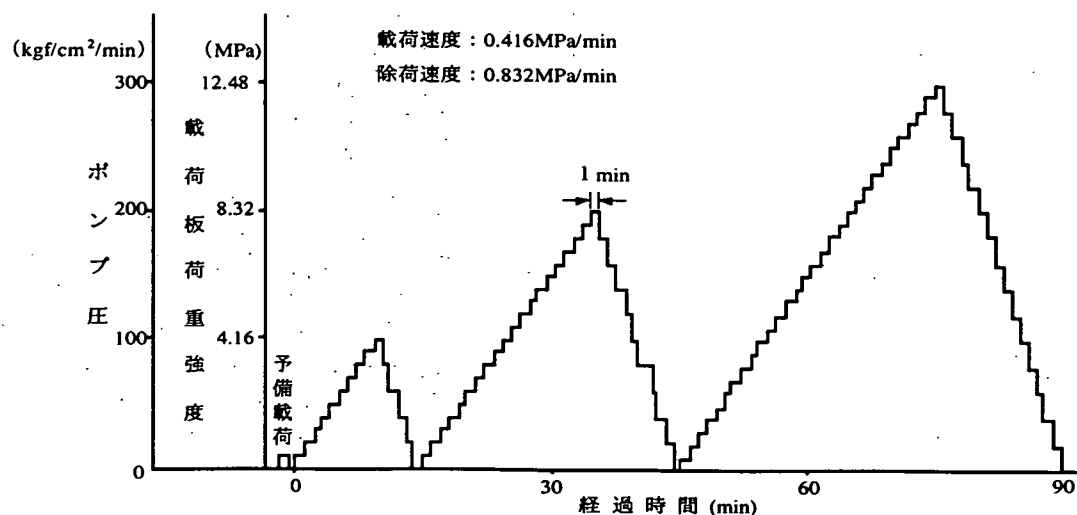


図2.3.1 孔内載荷パターン

表2.3.1 孔内載荷試験結果

ボーリング孔 No.	角度 (°)	深度 (m)	D1 (MPa)	D2 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E1/D1	E3/E2
KDK-1	0	3.8	3.20E+03	1.23E+04	1.04E+03	5.93E+03	1.39E+04	0.33	2.35
	120	3.8	3.82E+03	6.63E+03	1.85E+03	4.03E+03	9.65E+03	0.48	2.39
	240	3.3	4.12E+03	6.56E+03	3.03E+03	5.06E+03	8.32E+03	0.74	1.64
	90	1	1.32E+04	1.85E+04	5.04E+03	1.27E+04	1.72E+04	0.38	1.35
	120	1.3	7.06E+03	1.87E+04	4.98E+03	1.06E+04	1.86E+04	0.71	1.76
	240	1	6.25E+03	1.41E+04	2.01E+03	7.98E+03	1.58E+04	0.32	1.98
	0	0.5	3.75E+03	6.56E+03	1.85E+03	6.03E+03	1.21E+04	0.49	2.00
	120	0.5	1.91E+03	3.64E+03	1.44E+03	2.32E+03	4.20E+03	0.75	1.81
	240	0.5	2.35E+03	3.79E+03	1.98E+03	2.72E+03	5.76E+03	0.84	2.12
	KDK-2	0	3.4	8.84E+03	2.04E+04	6.19E+03	1.14E+04	2.93E+04	0.70
120		3.4	5.25E+03	1.09E+04	1.48E+03	6.77E+03	1.20E+04	0.28	1.77
240		3.4	1.16E+04	1.85E+04	8.43E+03	1.43E+04	1.87E+04	0.73	1.31
0		1.5	1.93E+04	3.90E+04	1.16E+04	1.91E+04	3.55E+04	0.60	1.86
120		1.5	4.08E+03	1.00E+04	3.64E+03	4.73E+03	1.48E+04	0.89	3.13
240		1.5	1.44E+04	2.63E+04	1.29E+04	2.21E+04	3.71E+04	0.90	1.68
0		0.4	7.88E+03	1.09E+04	5.34E+03	8.69E+03	7.88E+03	0.68	0.91
120		0.4	8.07E+03	1.33E+04	4.00E+03	8.84E+03	1.26E+04	0.50	1.42
270		0.4	1.03E+04	1.55E+04	6.19E+03	1.08E+04	1.53E+04	0.60	1.42
KDK-3		0	3.6	1.03E+04	2.65E+04	3.97E+03	1.85E+04	2.72E+04	0.39
	120	3.6	1.09E+04	2.63E+04	8.25E+03	1.14E+04	3.67E+04	0.76	3.22
	240	3.6	1.32E+04	2.28E+04	6.49E+03	1.71E+04	2.22E+04	0.49	1.30
	0	0.9	9.67E+03	1.85E+04	3.63E+03	1.55E+04	2.55E+04	0.38	1.65
	120	0.9	6.25E+03	8.35E+03	3.48E+03	7.03E+03	8.73E+03	0.56	1.24
	240	0.9	8.84E+03	1.85E+04	5.15E+03	1.24E+04	1.87E+04	0.58	1.52
	0	0.5	1.08E+04	1.69E+04	5.26E+03	1.18E+04	1.84E+04	0.49	1.57
	120	0.5	3.68E+03	1.67E+04	3.71E+03	1.24E+04	1.84E+04	1.01	1.49
	240	0.5	4.64E+03	5.57E+03	3.09E+03	5.01E+03	6.45E+03	0.67	1.29

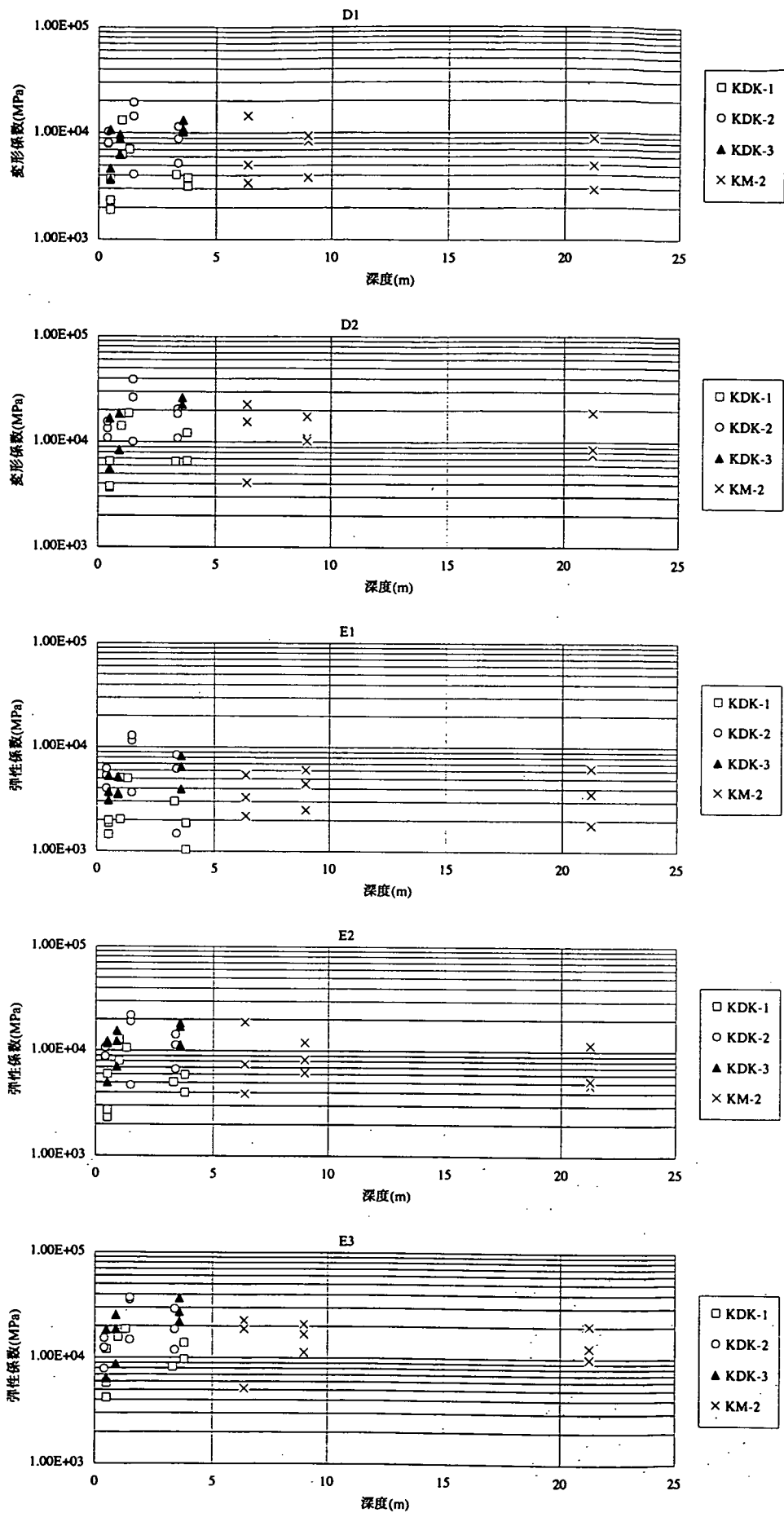


図2.3.2 孔内載荷試験結果 (KDK-1~3, KM-2)

2.3.4 考察

岩盤の異方性を評価するために载荷方向による変形係数および弾性係数の違いに注目したが、方向による顕著な差はみられない。しかし、KKTによって得られる弾性係数や変形係数には、岩盤の応力分布状況や载荷位置周辺のき裂等が及ぼす複雑な影響が含まれていることが予想され、このような要因を全て考慮しないと異方性の評価はできないものと考えられる。

図2.3.2によると各孔の変形係数および弾性係数の値は、孔によって多少の違いはあるものの、深度0.5m付近が最も小さく、深度2.0mまでは徐々に大きくなる傾向がみられる。しかし、3.0m以深では1.0~1.5m付近の増加のピーク値と同程度か、あるいはそれよりも低い値となっている。深度3.0m以深のデータの分布をみると、増加傾向も減少傾向もみられないことから、ぼらつきはあるがほぼ一定であるといえる。従って、図2.3.2において、3.0m以深のデータよりも小さい値を示す深度1.0m前後までの領域は、掘削の影響を受けて変形係数あるいは弾性係数が低下しているものと考えられる。また、深度2.0m付近の高い値を示す領域では、坑道掘削に伴う応力再配分によって応力が集中しているものと考えられる。

トンネル掘削による掘削影響領域を評価するために行われたKKTの結果⁵⁾によると、孔壁から直線の勾配が変化する2直線の交点までの間が掘削影響領域として判定できるとされている。そこで、深度2.0mまでのデータの回帰直線と、2.0m以深のデータの平均値（すなわち水平な直線）を求め、それらから掘削影響領域と健岩部の境界の深度（2直線の交点）を求めた。この結果を図2.3.3と表2.3.2に示す。

2直線の交点として得られた掘削影響領域の深度は1.0m前後であったが、深度2.0mまでの回帰線の相関係数は約0.5~0.7と低く、深度2.0m以深のデータについてもぼらつきが大きいことから、この1.0m前後という掘削影響領域の深度に対する信頼性はかなり低いと考えられる。

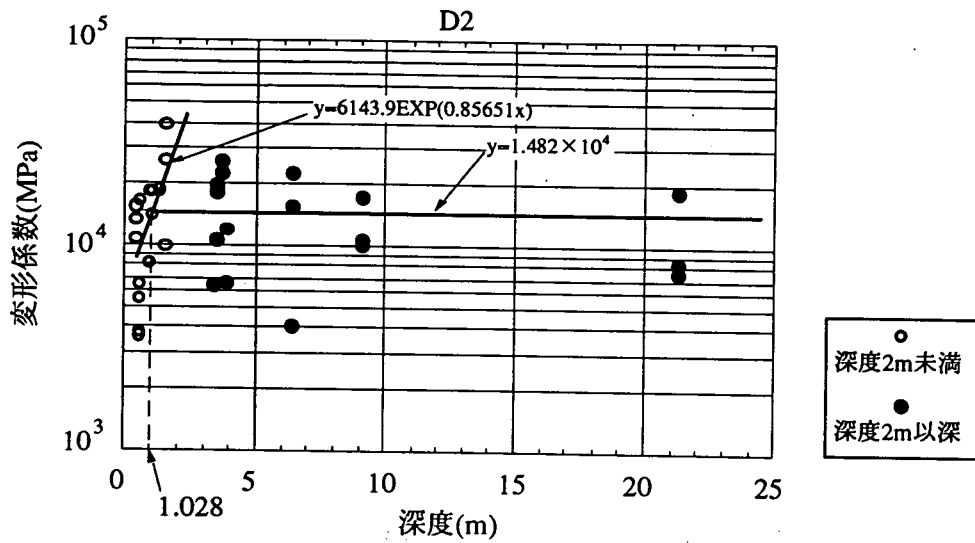
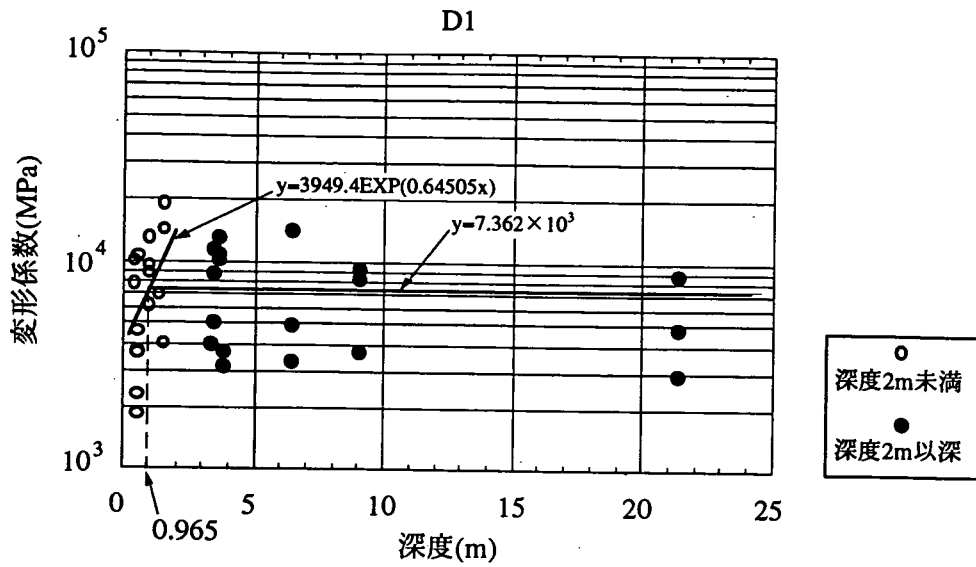


図2.3.3 孔内載荷試験結果からの掘削影響領域の算出 (D1~2)

表2.3.2 変形係数および弾性係数の深度分布から求めた掘削影響領域

	深度2mまでの回帰線	深度2m以深の直線	影響領域の深度(m)
D1	$y=3949.4EXP(0.64505x)$ R=0.49459	$y=7.362 \times 10^3$	0.965
D2	$y=6143.9EXP(0.85651x)$ R=0.62732	$y=1.482 \times 10^4$	1.028
E1	$y=2268.2EXP(0.70076x)$ R=0.60479	$y=4.240 \times 10^3$	0.893
E2	$y=5223.5EXP(0.6114x)$ R=0.50983	$y=9.605 \times 10^3$	0.996
E3	$y=6613.6EXP(0.91356x)$ R=0.69833	$y=1.761 \times 10^4$	1.072

y : 変形係数または弾性係数(MPa), x : 深度(m), R : 相関係数

2.4 室内試験

各種物性値を得るために、孔内載荷試験を実施したボーリング孔KDK-1~3のボーリングコアを用いた各種室内試験を実施した。その結果を表に示す。なお、高圧三軸試験結果より求められた内部摩擦角 (ϕ) は45° で、粘着力(C) は37MPaであった。

表2.4.1 室内試験結果一覧

試料No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
ボーリング孔 No.	KDK-1	KDK-2	KDK-3	KDK-1	KDK-2	KDK-3	KDK-3		
深度(m)	0.45~ 0.65	0.32~ 0.50	0.49~ 0.82	0.45~ 0.65	0.32~ 0.50	0.49~ 0.82	3.00~4.00		
高さ(cm)	12.090	12.135	12.080	5.935	5.700	5.878	10.175	10.040	9.840
直径(cm)	6.000	6.011	6.003	6.006	6.002	6.000	4.956	4.955	4.953
体積(cm ³)	341.836	344.368	341.895	168.144	161.271	165.975	196.285	193.602	189.593
質量(g)	949.28	461.34	954.15	461.34	445.46	464.58	545.5	536.2	524.3
湿潤密度 (g/cm ³)	2.777	2.744	2.795	2.744	2.762	2.799	2.779	2.770	2.765
有効間隙率(%)	1.87	1.09	1.48	0.87	1.57	1.06	1.38	0.71	1.25
含水比(%)	0.57	0.63	0.58	0.47	0.47	0.65	0.10	0.10	0.13
V _P (km/sec)	5.84	6.07	5.86	5.76	5.70	5.65	5.68	5.70	5.66
V _S (km/sec)	3.26	3.35	3.30	3.12	3.08	3.06	3.10	3.11	3.08
動ポアソン比	0.274	0.281	0.268	0.2928	0.294	0.292	0.288	0.288	0.290
動弾性係数 (×10 ⁴ MPa)	7.518	7.890	7.707	6.904	6.780	6.775	6.879	6.902	6.765
動剛性率 (×10 ⁴ MPa)	2.951	3.079	3.039	2.671	2.620	2.621	2.671	2.679	2.623
動体積弾性率 (×10 ⁴ MPa)	5.536	6.004	5.532	5.542	5.480	5.441	5.405	5.428	5.361
圧縮強度(MPa)	118.0	99.9	127.1	—	—	—	—	—	—
静弾性係数 (GPa)	59.2	58.9	62.1	—	—	—	—	—	—
静ポアソン比	0.252	0.269	0.279	—	—	—	—	—	—
側方向応力 (MPa)	—	—	—	—	—	—	9.831	19.637	39.251
圧縮強さ(MPa)	—	—	—	—	—	—	232.251	269.614	373.771
主応力差最大 時軸ひずみ(%)	—	—	—	—	—	—	0.50	0.50	0.65
引張強度(MPa)	—	—	—	6.17	8.48	10.6	—	—	—

2.5 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ

2.5.1 掘削影響領域の特性と広がり

ここでは、原位置試験結果を基に今回の調査領域における掘削影響領域の範囲と、その影響の程度についてまとめる。

(1)掘削影響領域の力学的特性に関する検討

掘削影響領域の力学的特性について、先に述べた原位置試験結果から、今回の試験サイトにおいて坑道壁面に掘削の影響を受けていると考えられる領域が存在することがわかる。この影響領域の大きさは、PS検層と坑内弾性波探査（屈折法）の結果を基に弾性波速度を指標とした場合、坑道壁面から深度0.5～0.75m程度までの範囲であり、レーダ探査（反射法）の結果からは深度約1.0mまでの範囲であると予想される。また、孔内載荷試験の結果によると、深度0.5～1.0mまでが影響領域であると考えられる。一方、掘削による影響の程度は、弾性波速度については約半分の値になっているといえるが、孔内載荷試験に関しては、試験で得られる変形係数および弾性係数の値のばらつきが大きく評価することは困難である。さらに、レーダ探査の場合は定量的な評価は不可能である。なお、弾性波トモグラフィの結果では、坑道壁面近傍以外にも低速度領域が存在し、掘削影響領域の広がりを見極めることは困難であるが、弾性波速度は最高が6.5km/secであるのに対して最低で3.5km/secの領域が存在した。

なお、室内試験では、各コア採取地点における物性値が得られたが、それらから掘削影響領域を評価することはできない。

(2) 既存坑道周りの水圧分布の評価

岩盤中に坑道を掘削すると坑道周りの水圧は低下する。既存坑道周りの水圧分布を把握するため、250mレベル坑道において、水平方向の水圧分布と垂直方向の水圧分布が動力炉・核燃料開発事業団殿により計測されている。

均質等方材料の連続式を用いると、円形坑道周りの水圧（水頭）分布は以下の式で示される。

$$u = A \ln \frac{r}{r_0}$$

ここで、 $A = 2.30 \{u_0 / \ln (R/r_0)\}$ である。水平孔(KDH-1)と垂直孔(KDH-2) 両孔の水圧計測値から最小自乗近似でAの値を定めると $A = 9.07$ となり近似式は

$$u = 9.07 \log \frac{r}{r_0}$$

となることがわかった。

この水圧計測地点の土被りは730mであり、この水頭分の水圧がかかるとすると $u_0 = 73 \text{ kgf/cm}^2$ となり、影響圏 $R = 1000 \text{ m}$ 、坑道半径 $r_0 = 1.5 \text{ m}$ とすると $A = 25.8$ となり、今回のAの値はほぼ3分の1の値を示している。今回の近似において、同様な影響圏を考える場合 $u_0 = 25.7 \text{ kgf/cm}^2$ と推定できる。

なお、今回の近似から離れたデータである KDH-1 の第一区間、および KDH-2 の第3、第4区間は破碎部ならびにき裂により水圧が低下している区間と考えられる。また、KDH-2 の第6区間については計測装置等のチェックも含めて検討が必要と思われる。

2.5.2 調査手法の適用性の評価

今回用いた原位置試験手法の掘削影響領域の評価に対する適用性を検討する。

(1) P S 検層

調査手法とともに評価方法も簡便で有効な手法であると考えられる。ただし、広範囲でのデータ収集には多数のボーリング孔を必要とする。また、弾性波速度分布が深度方向に弾性波速度が大きくなるような場合はその変化を捉えることができない。さらに、弾性波速度が速い領域で測定間隔を小さくして掘削影響領域を特定する精度を高くするためには、計測機器の精度の向上が望まれる。

(2) 坑内弾性波探査（屈折法）

調査手法が簡便な上に評価も容易なため、有効な手法であると考えられる。ただし、探査深度が測線長の10分の1から5分の1程度と測線長に対して浅い。また、弾性波速度分布が深度方向に弾性波速度が大きくなるような場合には、その変化を捉えることができないことと、弾性波速度が速い領域の調査に対して高精度の計測機器の開発が望まれることはP S検層の場合と同様である。

(3) レーダ探査（反射法）

坑道壁面近傍のノイズの影響を除去することができれば掘削影響領域の把握に有効であると考えられる。ただし、捉えられた反射面が、き裂によるものであるか地質の変化によるものであるか等の原因を特定することができないため、他の手法と組み合わせる必要がある。また、探査可能な深度が3m程度までであり、調査壁面と直交するようなき裂等については捉えることができない。

(4) 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィ探査は、解析モデルのセルの大きさ（今回の探査の場合には50cm四方）等を考慮すると、調査領域内のある程度の大きさをもつ地質構造が異なる領域の存在を捉えるためには有効であると考えられるが、掘削影響領域などの細部を知るためには不向きであると判断される。

(5) 孔内載荷試験

孔内載荷試験によって掘削影響領域を評価するには、応力集中等の掘削による影響を受けていない岩盤のデータを得ることの必要性から、比較的広い範囲で試験を行うことを必要とする。さらに、掘削の影響を受けている領域と受けていない領域の変化を捉えるためには、短い間隔での試験を必要とすると考えられる。また、平面での分布を得るためには、多数のボーリング孔での試験が必要であると考えられる。

孔内載荷試験で得られる変形係数や弾性係数は、応力分布やき裂分布等の影響を受けると予想され、試験位置や載荷方向などについて考慮する必要がある。

[参考文献]

- 1)建設省土木試験基準
- 2)土木関係JIS要覧, 新日本法規出版(株), pp.394-15~394-16
- 3)ISRM指針Vol.1, 岩の岩の力学連合会, 1982.9, pp.32~35, 1982.9
- 4)土木関係JIS要覧, 新日本法規出版(株), pp.394-17~394-18
- 5)土木学会: 孔内載荷試験法の現状と課題ー指針化の試みー, pp19~21,
1988.5

3. き裂物性試験および試験結果に基づくき裂の分類

3.1 はじめに

不連続性岩盤の挙動を予測する手法のひとつに、DEM（個別要素法）などの不連続体解析がある。DEM解析を実施するには、原位置に存在するき裂の力学特性を事前に把握する必要がある。そこで、本章では、き裂の分類指標と力学特性との関係を検討する。釜石鉱山においては、原位置のき裂の特性を把握するため坑道壁面の観察・岩芯鑑定（コア観察）・ポアホールTVによる孔内観察が行われた。これらの調査から得られたき裂の情報に基づいて、3.2節ではき裂を分類するための指標を抽出するとともに、き裂の力学試験に用いる試料の条件を決定する。そして、3.3節ではき裂の物性試験の結果について述べ、き裂の力学特性と分類指標の関係を調べる。本章の流れを図3.1.1に示す。

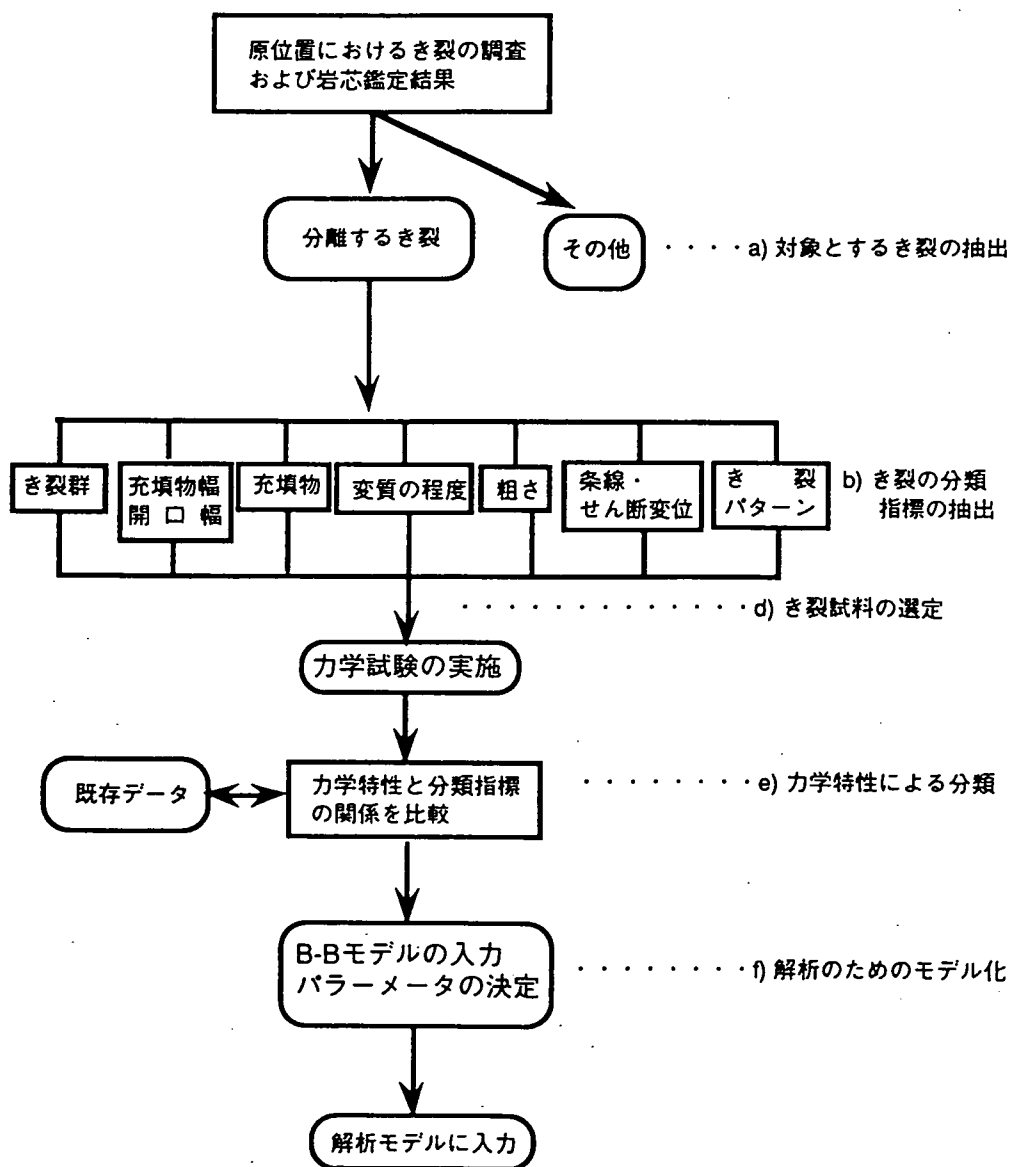


図3.1.1 本章の流れ

3.2 き裂の分類

まず、250m坑道内の8本のボーリング孔を対象とし、154本のき裂を抽出した。つぎに、図3.1.1中の(b)に示したき裂の諸特性に注目し、それらの分類方法、頻度分布、および力学特性との関係などを検討した。その結果、き裂分類の指標として以下の3つを選定した。

(1) 充填物の種類

充填物の種類からき裂をつぎの4つのタイプに分類した。

Aタイプ：充填物のほとんどが粘土鉱物で、母岩および充填鉱物の分離や破壊があるもの。

Bタイプ：充填物のほとんどが鉱物で、母岩および充填鉱物の分離や破壊がないもの。

Cタイプ：フィルム状の充填物を含むもの。あるいは充填物を含まず弱い変質があるもの。

Dタイプ：充填物を含まず変質がないもの。

(2) 変質の程度による分類

き裂の変質の程度を以下のように分類した。

強変質(IL)：き裂全周で初生鉱物の変質および母岩組織の乱れが認められる。

中変質(MD)：き裂全周で初生鉱物の変質、かつ一部で母岩組織の乱れが認められる。

弱変質(WK)：き裂全周で初生鉱物の変質が認められる。

微弱変質(VW)：き裂周辺の一部で初生鉱物の変質が認められるもの。

未変質(FS)：変質が全く認められないもの。

(3) 充填物の幅

充填物の幅とき裂長の関係が、おおよそ対数線形関係にあるという傾向¹⁾を考慮し、充填物の幅 w をつぎの5つに分類した。

a1: $w \leq 0.5\text{mm}$

a2: $0.5 < w < 2$

a3: $2 \leq w < 5$

a4: $5 \leq w < 10$

a5: $10 \leq w$

つぎに、き裂分類の指標を組み合わせることにより、室内試験のための試料の選定条件を検討した。この際、充填物の幅および変質の程度のそれぞれにお

いて、分類を組み合わせるにより、全体のグループ数の削減を図った。

まず、充填物の幅a1～a5をつぎのように組み合わせて、分類数を3つにした。

a1, a2, (a3+a4+a5)

さらに、変質の程度の組み合わせを変化させた結果、グループ数が最も少なく、グループから除外されるき裂が少ないものは、表3.2.1のようになる。表中の数字は頻度を示しており、数字に○印をしたものがグループを指す。この場合、3つのき裂分類の指標の組み合わせが10グループになる。表3.2.1に基づいて採取された試料を表3.2.2に示す。

表3.2.1 試料の選定条件

	a1				a2				a3, a4, a5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL,MD,WK	0	1	⑥	0	0	1	③	0	⑳	⑧	0	0
VW,FS	0	0	④⑥	⑱	0	⑭	⑨	0	⑧	⑰	0	0

表3.2.2 採取した試料の一覧

試料番号	ボーリング孔	深度 (m)	充填物の幅	充填物の種類	変質の程度
KM01	KDH-1	7.76	a1	C	VW
KM02	KDH-1	8.40	a3	B	WK
KM03	KDH-1	14.64	a4	A	FS
KM04	KDH-1	19.09	a1	D	VW
KM05	KDH-1	29.29	a3	B	VW
KM06	KDH-1	43.62	a2	C	FS
KM07	KDH-1	46.37	a4	B	FS
KM08	KDH-2	9.03	a2	C	WK
KM09	KDH-2	29.91	a2	C	VW
KM10	KDH-2	32.70	a1	C	WK
KM11	KDH-2	10.19	a2	B	FS
KM12	KDH-2	28.11	a4	A	WK
KM13	KDH-2	48.24	a1	D	FS
KM14	KDK-1	1.77	a5	A	IL
KM15	KDK-3	2.27	a1	C	FS
KM16	KDK-3	9.86	a3	B	FS

3.3 き裂の物性試験

3.3.1 試験方法

(1) ラフネス測定

ラフネス測定装置により、初期状態およびせん断試験後のき裂面の3次元形状を測定した。測定は楕円形のき裂断面内の長方形領域について行った。ローケータリングボードにより水平面内を0.5mm間隔で移動し、レーザー式変位計を用いて各点におけるき裂の凹凸面の高さ z を測定する。

測定結果から、せん断試験前後の凹凸形状の変化や、き裂面の粗さの指標が得られた。

(2) き裂の力学試験

き裂の力学試験として、垂直载荷試験、およびせん断試験を行った。

垂直载荷試験では、垂直応力の変化に伴うき裂の開閉挙動を調べた。この際、き裂面を傷めぬように垂直応力の範囲を0~10MPa程度とし、载荷および除荷を3回繰り返した。

せん断試験は3種類の一定の垂直応力のもとで実施した。3種類の垂直応力はそれぞれ、自重および0.3、0.5MPaとした。せん断試験は、せん断変位が7mmとなるまで行った。せん断速度は、ISRM指針²⁾を参考に、ピークせん断強度までを0.5mm/min、それ以後1mm/minを基準とした。また、せん断に伴うダイレーションは、上述の渦電流式変位センサーにより測定した。

(3) き裂の特性試験

き裂面の特性試験として試料の密度測定、シュミットハンマー試験およびテイルト試験を行った。

密度測定では、せん断試験に用いる試料の体積と乾燥重量を測定し、乾燥密度 ρ を求めた。

また、シュミットハンマー試験では、き裂面にシュミットハンマーを打撃し、その反発度からき裂面の圧縮強度 JCS_0 を求めた。なお、コア側面についても同様のことを行い、岩石部分の一軸圧縮強度を求めた。

テイルト試験では、き裂が滑り出す傾斜角 α を測定し、き裂面のラフネス係数 JRC_{OT} を求めた。また、コア側面についても同様のことを実施し、基本摩擦角 ϕ_b を求めた。

3.3.2 ラフネス測定結果

ラフネス測定の結果、せん断前後のき裂面の形状、せん断前後におけるせん断方向軸に対する凹凸高さの分布、およびそのヒストグラムが得られた。

また、き裂面の幾何学的な粗さの指標として、Tse&Cruden³⁾が提案する Z_2 、および表面積による粗さの指標 θ ⁴⁾を求めた。

せん断前後のラフネス測定の結果を表3.3.1にまとめる。

表3.3.1 ラフネス測定結果

試料番号	せん断前					せん断後				
	Z_{2s}	Z_{2d}	JRC_{2s}	JRC_{2d}	θ	Z_{2s}	Z_{2d}	JRC_{2s}	JRC_{2d}	θ
KM01 A	0.253	0.350	12.8	17.4	0.617	0.247	0.349	12.5	17.4	0.648
B	0.244	0.340	12.3	17.0	0.629	0.237	0.316	11.9	16.0	0.592
KM02 A	0.253	0.385	12.8	18.7	0.556	0.257	0.338	13.0	16.9	0.552
B	0.258	0.757	13.1	28.3	0.380	0.285	0.795	14.5	29.0	0.416
KM03 A	0.437	0.275	20.5	14.0	0.455	0.429	0.271	20.3	13.8	0.460
B	0.399	0.274	19.2	13.9	0.373	0.376	0.272	18.4	13.8	0.438
KM04 A	0.259	0.479	13.1	21.8	0.364	0.260	0.494	13.2	22.3	0.393
B	0.257	0.499	13.0	22.4	0.393	0.270	0.499	13.7	22.4	0.421
KM05 A	0.313	0.282	15.8	14.3	0.692	0.319	0.268	16.1	13.6	0.660
B	0.272	0.225	13.8	11.2	0.530	0.234	0.229	11.7	11.4	0.520
KM06 A	0.193	0.232	9.0	11.6	0.594	0.185	0.226	8.4	11.2	0.565
B	0.202	0.243	9.6	12.3	0.589	0.186	0.219	8.5	10.8	0.557
KM07 A	0.273	0.230	13.9	11.5	0.492	0.235	0.233	11.8	11.7	0.573
B	0.329	0.277	16.5	14.1	0.411	0.229	0.222	11.4	11.0	0.517
KM08 A	0.338	0.219	16.9	10.8	0.616	0.282	0.207	14.3	10.0	0.631
B	0.187	0.207	8.6	10.0	0.739	0.205	0.197	9.9	9.3	0.766
KM09 A	0.357	0.402	17.7	19.3	0.613	0.368	0.362	18.1	17.9	0.660
B	0.272	0.321	13.8	16.2	0.661	0.258	0.288	13.1	14.6	0.606
KM10 A	0.447	0.444	20.8	20.8	0.547	0.431	0.393	20.3	19.0	0.514
B	0.379	0.403	18.5	19.4	0.535	0.346	0.366	17.2	18.0	0.473
KM11 A	0.219	0.274	10.8	13.9	0.650	0.240	0.286	12.1	14.5	0.667
B	0.189	0.232	8.7	11.6	0.556	0.183	0.224	8.3	11.1	0.518
KM12 A	0.203	0.269	9.7	13.7	0.423	0.197	0.266	9.3	13.5	0.386
B	0.249	0.302	12.6	15.3	0.389	0.238	0.295	12.0	15.0	0.385
KM13 A	0.217	0.233	10.7	11.7	0.494	0.198	0.226	9.4	11.2	0.453
B	0.204	0.234	9.8	11.7	0.494	0.213	0.231	10.4	11.5	0.460
KM15 A	0.168	0.192	7.0	8.9	0.624	0.176	0.196	7.7	9.2	0.612
B	0.158	0.172	6.2	7.4	0.532	0.195	0.208	9.1	10.1	0.615
KM16 A	0.184	0.201	8.3	9.6	0.601	0.211	0.222	10.3	11.0	0.604
	0.361	0.420	17.8	20.0	1.054	0.251	0.297	12.7	15.1	0.835

3.3.3 垂直載荷試験結果

垂直載荷試験から、き裂の垂直応力の変化にともなう変形特性として、初期垂直剛性 K_{ni} 、および垂直応力の範囲が5~10MPaにおける垂直剛性 K_{n5-10} を求めた。実験から得られた K_{ni} 、および K_{n5-10} を表3.3.2に示す。

表3.3.2 実験から得られた K_{ni} および K_{n5-10}

試料番号	K_{ni} (MPa/mm)	K_{n5-10} (MPa/mm)
KM01	43.9	1640
KM02	42.9	1677
KM03	83.5	218.5
KM04	65.3	988.6
KM05	57.2	565.1
KM06	61.9	1152
KM07	57.3	444.6
KM08	90.6	84.0
KM09	52.7	1246
KM10	27.8	343.3
KM11	97.1	484.9
KM12	14.9	445.6
KM13	24.3	364.6
KM15	71.8	714.8
KM16	50.0	1031

3.3.4 せん断試験結果

実験の結果から、せん断応力~せん断変位関係、およびダイレーション~せん断変位関係を得た。また、3回のせん断試験の結果から、ピーク摩擦角 ϕ_j 、粘着力 c_j 、残留摩擦角 ϕ_r 、せん断剛性 K_s を求めた。せん断試験の結果を表3.3.3にまとめる。表3.3.4には、既存データ(PK1-1~1-4)の結果も示した。

今回の実験から得られたピークせん断強度は、既存データよりやや大きいことがわかった。これは、寸法効果のためと考えられる。せん断剛性 K_s は既存データと同様にばらつきが大きかった。また、残留摩擦角 ϕ_r は既存データよりやや大きくなっている。これは、せん断時の垂直応力のレベルが比較的小さいためと考えられる。

表3.3.3 き裂のせん断試験結果の一覧

試料番号	垂直応力 σ_n (MPa)	ピーク強度 τ_p (MPa)	せん断剛性 K_s (MPa/mm)	粘着力 c_j (MPa)	摩擦角 ϕ_j (deg.)	残留強度 τ_r (MPa)	残留摩擦角 ϕ_r (deg.)
KM01	0.075	0.301	3.27	0.156	62.9	0.182	47.2
	0.3	0.723	5.65			0.377	
	0.5	1.110	3.34			0.624	
KM02	0.062	0.215	8.38	0.069	67.0	0.148	44.2
	0.3	0.777	6.86			0.491	
	0.5	0.700	8.37			0.567	
KM03	0.075	0.197	4.44	0.097	41.3	0.172	41.3
	0.3	0.356	3.38			0.330	
	0.5	0.580	5.87			0.540	
KM04	0.075	0.205	13.0	0.116	57.1	0.144	48.6
	0.3	0.683	5.91			0.458	
	0.5	0.866	7.40			0.630	
KM05	0.075	0.228	3.40	0.115	52.5	0.219	52.0
	0.3	0.532	3.88			0.471	
	0.5	0.821	5.92			0.735	
KM06	0.075	0.209	4.45	0	71.1	0.189	49.8
	0.3	0.866	2.14			0.622	
	0.5	0.848	4.17			0.685	
KM07	0.075	0.303	5.95	0.177	54.0	0.169	45.9
	0.3	0.552	2.16			0.330	
	0.5	0.886	2.86			0.559	
KM08	0.075	0.210	2.31	0.119	53.4	0.150	38.6
	0.3	0.569	2.60			0.424	
	0.5	0.774	5.59			0.483	
KM09	0.075	0.392	3.02	0.291	55.9	0.176	51.6
	0.3	0.760	4.56			0.409	
	0.5	1.014	4.51			0.711	
KM10	0.075	0.137	2.25	0.071	55.6	0.084	53.4
	0.3	0.625	4.39			0.501	
	0.5	0.861	3.96			0.691	
KM11	0.075	0.147	0.94	0.062	58.3	0.107	49.7
	0.3	0.552	2.05			0.384	
	0.5	0.869	3.29			0.634	
KM12	0.075	0.118	3.72	0.068	49.9	0.104	44.3
	0.3	0.439	7.11			0.343	
	0.5	0.655	10.04			0.546	
KM13	0.075	0.199	8.63	0.107	50.2	0.138	51.9
	0.3	0.470	2.51			0.423	
	0.5	0.706	4.88			0.676	
KM15	0.075	0.189	0.81	0.138	42.4	0.162	41.0
	0.3	0.462	2.85			0.378	
	0.5	0.574	4.88			0.530	
KM16	0.075	0.202	0.84	0.111	49.2	0.148	47.2
	0.3	0.413	2.32			0.381	
	0.5	0.714	3.13			0.624	
PK1-1	0.072	0.181	0.57	0.121	42.5	0.141	33.2
	0.3	0.452	1.15			0.320	
	0.5	0.611	2.31			0.420	
PK1-2	0.076	0.267	1.36	0.211	51.5	0.134	49.5
	0.3	0.671	3.34			0.435	
	0.5	0.795	4.61			0.628	
PK1-3	0.074	0.189	0.70	0.091	59.9	0.122	55.0
	0.3	0.673	3.71			0.475	
	0.5	0.920	2.37			0.730	
PK1-4	0.074	0.235	5.47	0.121	57.2	0.145	52.4
	0.3	0.579	2.36			0.468	
	0.5	0.886	3.80			0.696	

3.3.5 き裂の特性試験結果

き裂の特性試験として、試料の密度測定、シュミットハンマーによる打撃測定、およびテイルト試験を実施した。その結果、き裂面の圧縮強度 JCS_0 、岩石の一軸圧縮強度 σ_c 、テイルト試験によるき裂面の粗さ係数 JRC_{OT} 、残留摩擦角 ϕ_r' 、基本摩擦角 ϕ_b が得られた。

試験結果の一覧を表3.3.4に示す。

表3.3.4 き裂の特性試験結果

試料番号	乾燥密度 γ (kN/m^3)	基本摩擦角 ϕ_b (deg.)	残留摩擦角 ϕ_r' (deg.)	一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	JCS_0 (MPa)	JRC_{OT}
KM01	26.98	34.1	28.7	119.1	61.2	4.0
KM02	26.98	34.1	27.9	141.1	39.6	2.0
KM03	27.42	34.1	22.6	101.1	27.1	4.3
KM04	27.42	34.1	28.9	119.3	62.6	4.6
KM05	26.74	34.1	30.8	83.3	58.9	2.8
KM06	26.86	34.1	28.2	105.7	53.2	6.4
KM07	23.87	34.1	28.4	78.0	43.7	7.0
KM08	24.36	34.1	30.0	76.3	50.6	4.9
KM09	27.68	34.1	27.2	122.8	52.1	6.0
KM10	27.57	34.1	26.2	131.5	47.8	7.3
KM11	26.70	34.1	29.3	126.0	68.7	4.2
KM12	26.82	34.1	26.4	158.3	54.9	4.5
KM13	28.14	34.1	30.0	129.4	77.0	4.0
KM14	27.40	34.1	33.4	103.4	54.0	3.2
KM15	27.35	34.1	29.1	132.4	70.0	3.0
KM16	26.97	34.1	30.1	121.7	74.4	3.5

3.3.6 JRC_0 の算出

せん断試験の結果から、各試料ごとに JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} を求めた。この際、残留摩擦角として、せん断試験結果から得られた ϕ_r （表3.3.3参照）を用いた。また、き裂長が10cmを基準としたパラメータに補正した。

せん断試験から求めた JRC_0 を表3.3.5に示す。

表3.3.5 せん断試験結果から求めた JRC_0

試料番号	JRC_{01}	JRC_{02}	JRC_{03}	AV. JRC_0
KM01	9.1	8.1	8.2	8.5
KM02	10.1	11.0	5.3	8.8
KM03	9.2	4.1	4.3	5.9
KM04	7.2	7.2	5.2	6.5
KM05	5.1	3.6	3.1	3.9
KM06	6.7	8.6	4.6	6.7
KM07	10.1	6.9	7.2	8.1
KM08	9.8	9.5	8.4	9.2
KM09	8.8	7.0	5.7	7.2
KM10	6.1	5.0	3.3	4.8
KM11	6.4	4.9	4.8	5.4
KM12	7.8	5.0	4.1	5.7
KM13	5.3	2.3	1.3	2.9
KM15	8.4	6.4	3.6	6.1
KM16	8.2	2.8	3.6	4.9
PK1-1	10.2	8.6	7.2	8.6
PK1-2	7.7	6.5	3.7	6.0
PK1-3	4.4	4.4	2.9	3.9
PK1-4	6.4	4.2	3.7	4.8

3.4 き裂分類の指標と力学特性

本節では、き裂分類の指標である充填物の幅、充填物の種類、変質の程度と、き裂の物性試験から得られた種々の力学特性の関係を検討した。

3.4.1 き裂分類の指標と変形特性

き裂の変形特性である垂直剛性 K_n およびせん断剛性 K_s と、き裂分類の指標の関係を検討した結果、いずれも一貫した傾向が得られなかった。

3.4.2 き裂分類の指標と強度特性

き裂の強度特性であるピーク摩擦角 ϕ_j 、粘着力 c_j 、および残留摩擦角 ϕ_r と、き裂分類の指標の関係を検討した。その結果、 ϕ_j および ϕ_r の平均値と充填物の種類の関係に図3.4.1および3.4.2のような傾向が認められた。また、 c_j と、き裂分類の指標の関係には一貫した傾向はなかった。

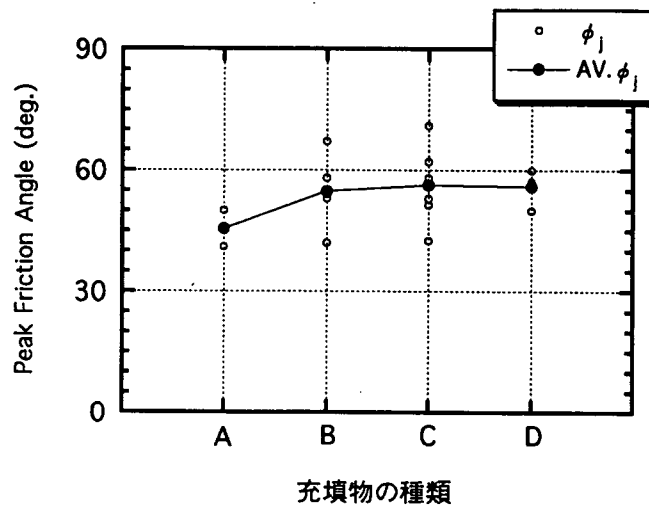


図3.4.1 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j の関係

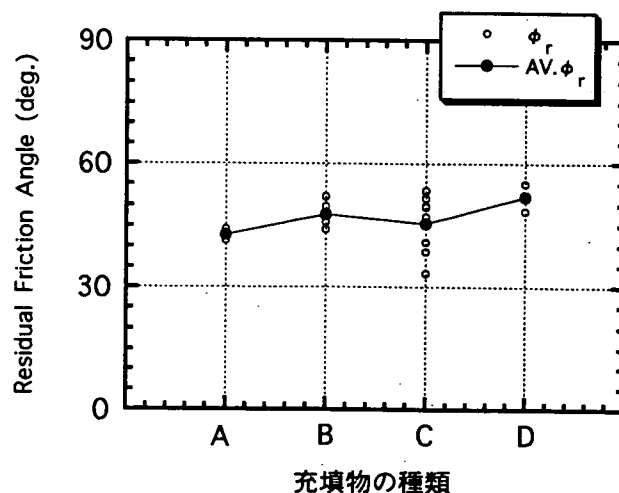


図3.4.2 充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係

3.4.3 き裂分類の指標と $JCS_0 \cdot JRC_0$

Barton-Bandisモデルのパラメータである $JCS_0 \cdot JRC_0$ と、き裂分類の指標の関係を検討した。その結果、 JCS_0 および JRC_0 の平均値と充填物の種類の関係に図3.4.3および3.4.4のような傾向が認められた。

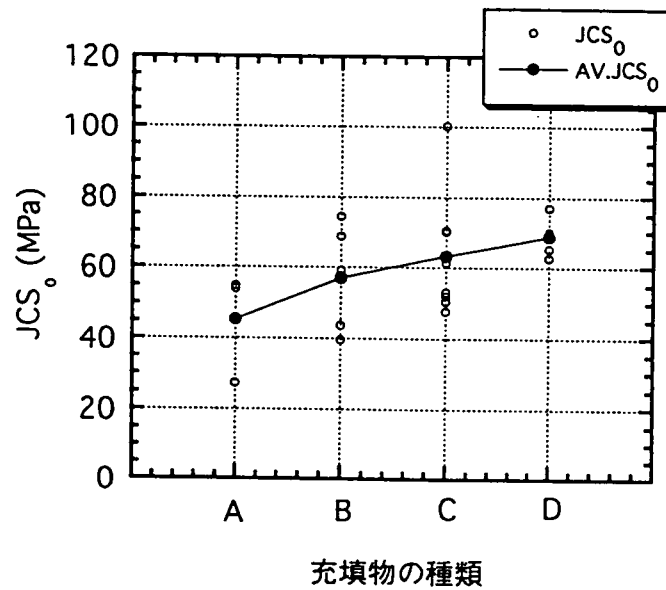


図3.4.3 充填物の種類と JCS_0 の関係

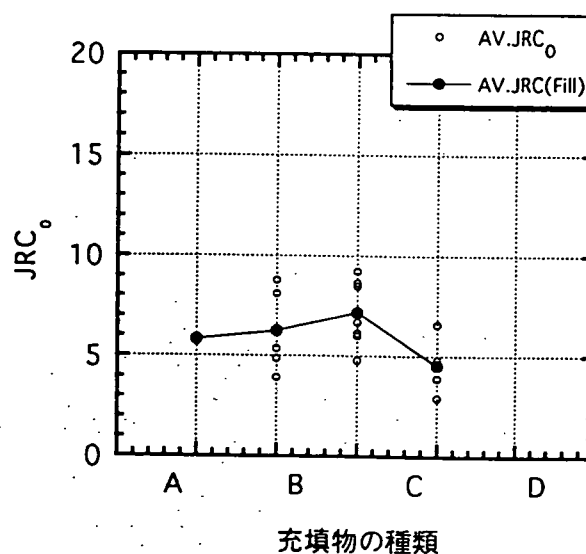


図3.4.4 充填物の種類と JRC_0 の関係

3.4.4 き裂に関するDEM解析の入力値の決定

3.4.1～3.4.3節における検討から、き裂の力学特性と各き裂分類の指標の関係に、高い相関性を伴う統一的な傾向は得られなかった。しかしながら、平均的な傾向から考えると、充填物の種類によりいくつかの解析の入力値を定めることができることがわかった。

今回の検討結果として、充填物の種類ごとに各入力値の平均を示すと、表3.4.1のようになる。ここで、 c_j 、 ϕ_j はき裂の強度特性をMohr-Coulombの条件で定める場合の入力値であり、 JRC_0 、 JCS_0 、 ϕ_r は、Barton-Bandisモデルを用いる場合の入力値である。これらの入力値から、充填物の種類ごとの平均値を用いてき裂のせん断強度を予測すると、図3.4.5および3.4.6のようになる。図3.4.5のMohr-Coulombの条件による予測では、Aのせん断強度が小さく、B,C,Dの強度はほぼ同等とみなせる。図3.4.6のBarton-Bandisモデルによる予測では、やはりAの強度が最小で、Dが最大、B,Cの強度はほぼ同等でA,Dの中間的な位置にある。また、図3.4.5および3.4.6を比較すると、A～Dのせん断強度の範囲はほぼ一致することがわかる。

以上から、き裂の強度特性については、充填物の種類ごとに分類して、Mohr-Coulombの条件およびBarton-Bandisモデルのいずれにおいても入力値が決まる。一方、変形特性の入力値であるについては、き裂分類の指標との関係に明瞭な傾向はなかった。現状では、従来行われているように全体の平均値が入力値となる。

表3.4.1 充填物の種類ごとの入力値

	A	B	C	D	平均値
垂直剛性 K_{ni} (MPa/mm)	49.2	60.9	58.1	44.8	53.25
せん断剛性 K_{s1} (MPa/mm)	4.0	3.9	2.3	7.0	4.3
摩擦角 ϕ_j (deg.)	45.5	54.8	57.0	56.0	53.3
粘着力 C_j (MPa)	0.08	0.11	0.14	0.11	0.11
残留摩擦角 ϕ_r (deg.)	42.9	47.8	45.5	52.0	47.1
JCS_0 (MPa)	45.3	57.1	63.2	68.8	58.6
JRC_0 (MPa)	5.3	6.2	7.1	4.5	5.9

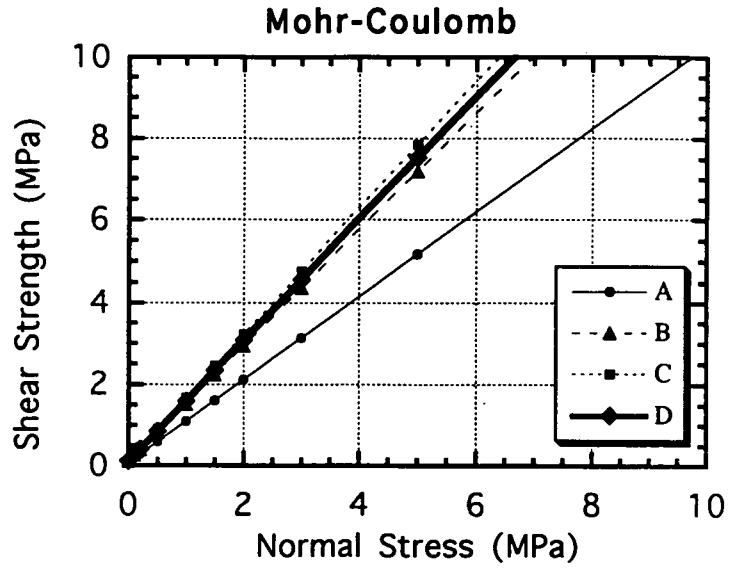


図3.4.5 充填物の種類ごとのせん断強度の予測 (Mohr-Coulombの条件)

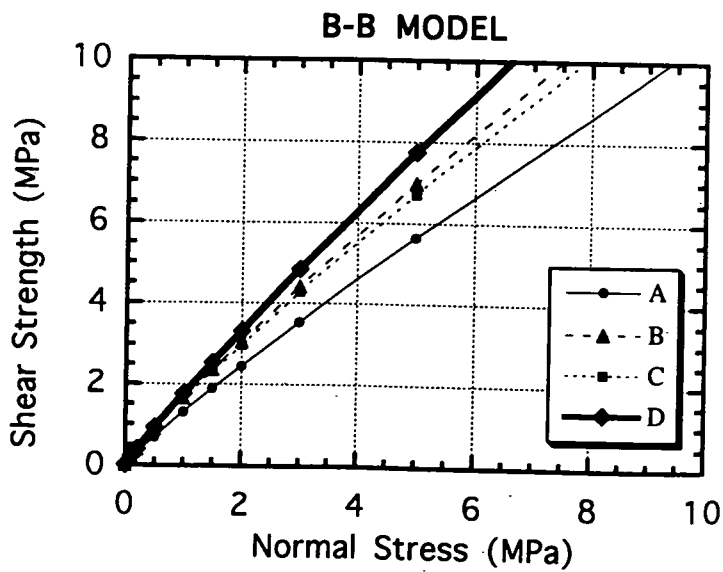


図3.4.6 充填物の種類ごとのせん断強度の予測 (Barton-Bandisモデル)

3.5 まとめ

3.5.1 主な成果

本章では、まず岩芯鑑定などから得られたき裂の情報をもとに、き裂分類の指標として充填物の幅、充填物の種類、および変質の程度を抽出した。また、これら3つの分類指標から、き裂を10グループに分け、室内物性試験を実施した。室内物性試験の結果から得られたき裂の力学特性、およびき裂分類の指標の関係について、以下のようなことがわかった。

1) き裂の変形特性を示す初期垂直剛性 K_{ni} およびせん断剛性 K_s は、いずれもき裂分類の指標との関係に一貫した傾向がなかった。したがって、解析に入力する際は、従来どおり平均値を用いることが考えられる。

2) 平均的な傾向から考えると、ピーク摩擦角 ϕ_j 、残留摩擦角 ϕ_r や JCS_0 、 JRC_0 と充填物の種類の間に関連が得られた。また、充填物の種類ごとに、Mohr-Coulombの条件およびBarton-Bandisモデルにより、き裂のせん断強度の予測値を把握することができた。

3) 充填物の幅および変質の程度に関しては、限られた条件下で力学特性との相関性が得られたが、全体の傾向との整合に乏しかった。

これまでに行われたDEM解析では、入力値を1種類としている例が多く、特定の指標との関係を検討した例はほとんどない。原位置のき裂には充填物を含んだものが少なくない。今回、入力値を分類する指標として、充填物の種類が抽出されたことは意義のあることと考えられる。

3.5.2 今後の課題

今回の検討結果から、次のことが今後の課題となる。

1) 初期垂直剛性 K_{ni} およびせん断剛性 K_s のばらつきの原因については明瞭な答えがでていないため、今後検討する必要がある。

また、せん断剛性 K_s の垂直応力に依存性について、せん断時の垂直応力の範囲を拡大して検討する必要がある。

2) 今回の実験結果から得られた残留摩擦角 ϕ_r が、既存データよりもやや大きいことについても、せん断時の垂直応力の範囲を拡大して検討する必要がある。

3) 今後、DEMの解析モデルの作成にあり、き裂の分布と分類したき裂の関係を検討する必要がある。解析でき裂の影響を反映するためには、解析領域のき裂分布を把握し、適切なき裂の力学特性を検討することが必要である。

参考文献

- 1) 菊地宏吉、水戸義忠、黒田英高：節理分布の統計的評価に基づく節理性岩盤のモデル化、第7回岩の力学 国内シンポジウム講演論文集、pp.151 - 156, 1987
- 2) Brown edition : Suggested method for Determining shear strength, Rock Characterization Testing and Monitoring ,ISRM Suggested Method, pp.129 - 140, Pergamon Press, 1981
- 3) Tse, R. & Cruden, D.M. : Estimating joint roughness coefficients, Int.J. Rock Mech.Mi.Sci. & Geomech.Abst.. Vol. 16, pp.303 - 307 , 1979
- 4) 木梨秀雄、畑浩二、藤原紀夫：岩盤ジョイント面の形状測定と粗さの定量化、土木学会第47回年講、1992

4. 「新規坑道における掘削影響領域の評価」詳細実施計画案の検討

4.1 掘削影響試験の目的と実施計画作成の手順

4.1.1 掘削影響試験の目的

深部岩盤中に坑道等の空洞を掘削すると、その空洞周辺は掘削の影響を受けた領域が形成されることが認識されており、空洞の設計・施工にあたってはこの掘削影響領域の評価が重要視されている。

これまで、国内外において、掘削影響領域の評価を目的として掘削影響試験が実施されてきたが、掘削影響領域に関連する要因の抽出、並びに掘削影響領域の定性的な把握にとどまり、信頼できる計測技術の欠如と統一されたデータベースの欠如が1988年のOECD/NEAの掘削影響試験に関わるワークショップで指摘された。¹⁾

以後、スウェーデンのHard Rock Laboratory (HRL)²⁾、カナダのUnderground Research Laboratory (URL)³⁾では、上記の反省点を踏まえ、再度掘削影響試験が試みられている。また、スイスのGrimsel Test Site (GTS)においても異なる方面から掘削影響試験の計画⁴⁾が進行中である。日本においても、釜石鉱山⁵⁾⁶⁾、神岡鉱山⁷⁾⁸⁾において、不連続岩盤を対象とした掘削影響試験が実施されている。

本研究においては、これまでの研究成果を踏まえ、以下の研究目的に沿った試験計画を作成する。即ち、き裂性の結晶質岩を対象として、

- 1) 掘削影響領域の特性・広がりを計測するシステムを開発する。
- 2) 掘削影響領域の特性・広がりのデータを取得する。
- 3) 掘削影響領域に関連するプロセスの重要性・関連性を評価する。

ここで、関連するプロセスとは、力学的には割れ目の発生や応力再配分、水理学的には、間隙水圧の変化等を含んでいる。

4.1.2 実施計画作成の手順

本研究における実施計画作成フローを図 4.1.1 に示す。

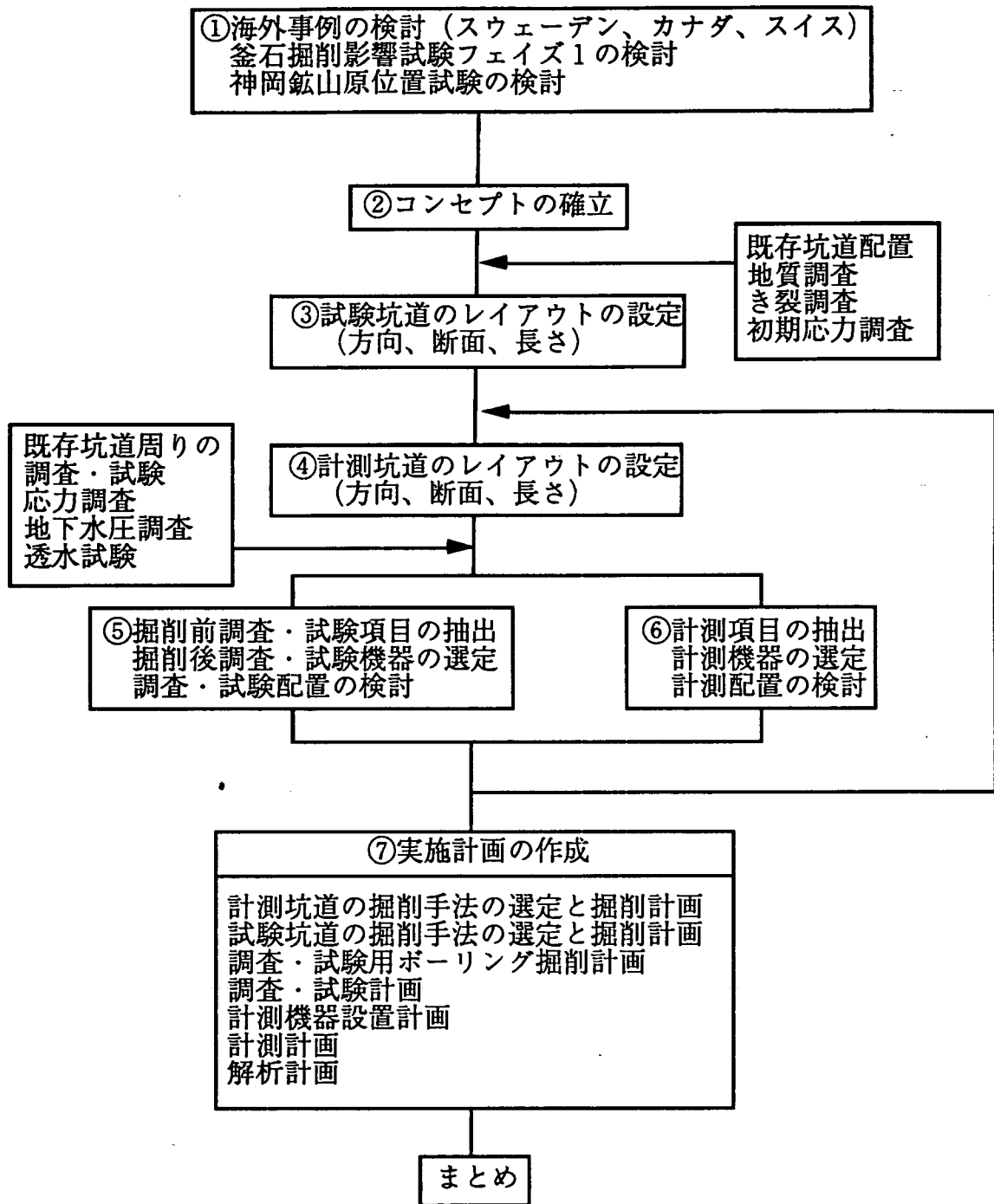


図4.1.1 実施計画作成フロー

4.2 各国の掘削影響領域の捉え方

本研究の掘削影響試験の実施計画の作成に先立ち、比較検討のために海外の掘削影響試験計画および国内の事例検討を行なう。海外事例としては、スウェーデンの Hard Rock Laboratory、カナダの Undergroud Research Laboratory、スイスの Grimsel Test Site における掘削影響試験を参照した。また国内における事例としては、釜石鉱山における原位置試験（Phase I）と神岡鉱山における岩盤調査を引用した。各事例とも、試験の具体的な目的、事前調査項目、掘削中の計測項目、事後調査項目、期待される結果についてまとめている。

また、比較検討するために、各事例とも以下の項目を抽出した。

- ①場所、②地質、③深度、④スケジュール、⑤目的、⑥初期応力、
- ⑦坑道断面、⑧坑道長さ、⑨掘削手法、⑩レイアウト、⑪事前調査項目、
- ⑫計測項目、⑬事後調査項目

4.2.1 スウェーデン（HRL）

スウェーデンの Hard Rock Laboratory (HRL) においては、掘削影響域の特性調査と掘削工法の依存性を調べるために2つの並設坑道を別々の工法（TBM掘削工法と普通発破工法）で掘削している。具体的な目的は、

- 1) 掘削損傷域の起源、特性、物性変化、広がり、工法依存性の検討
- 2) 掘削損傷域の水理特性の理解
- 3) 掘削損傷領域の計測装置および手法の検証

である。HLWにおける掘削影響試験計画についてまとめたものを表4.2.1に示している。また、図4.2.1と図4.2.2はそれぞれ掘削影響試験のための坑道周辺の計測用ボーリング配置の平面図と断面図を示している。

期待される結果としては、以下の項目をあげている。

- 1) 掘削による岩盤損傷状況（マクロおよびマイクロクラックの発生）
- 2) 掘削にともなう衝撃力の評価
- 3) 掘削手法によるき裂状態の比較（き裂密度、き裂特性）
- 4) 掘削損傷域の広がり（以下のパラメータに対して）

発生き裂密度、マイクロクラック、AE、電磁波、弾性波速度、
温度変化、透水性

- 5) 掘削手法による坑内湧水量の比較
- 6) 掘削損傷領域評価のための計測手法の検証
- 7) 掘削手法最適化のためのデータ取得

表4.2.1 HRLにおける掘削影響試験のまとめ

1	場所：スウェーデン、エスボ
2	地質：Dionite
3	深度：430m
4	スケジュール：1994～1995
5	目的：掘削工法の違いによる影響 EDZの定量評価のための手法の検証 EDZの発生原因・特性変化の程度・広がり・掘削工法依存性
6	初期応力
7	坑道断面 円形 ($\phi = 3.0\text{m}$)
8	長さ
9	掘削手法：機械掘削と発破工法
10	レイアウト 図4.2.1参照 離間距離 (TBM坑道とD&B坑道) 25m
11	事前調査項目 ・コア観察、BTV、温度 ・弾性波トモグラフィ、レーダートモグラフィ ・透水実験
12	計測項目 ・岩盤内変位、内空変位 ・応力計測 ・AE測定 ・振動測定
13	事後調査 ・透水試験 (計測坑道から+試験坑道から)

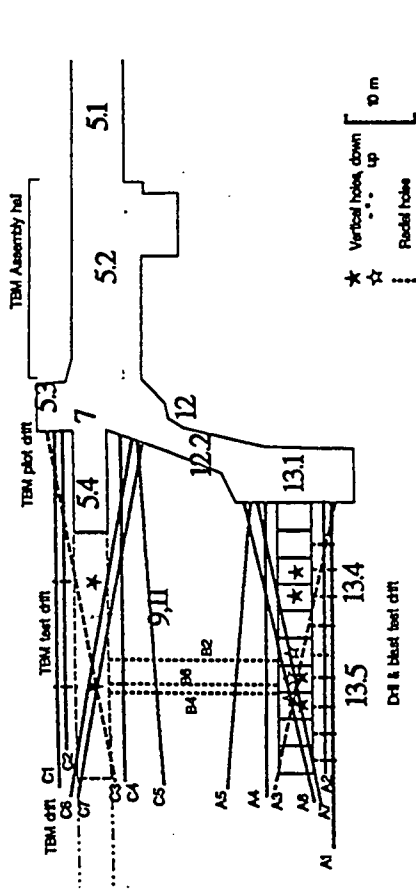


図4.2.1 HRLの掘削計画と計測用ボーリング配置 (平面図)

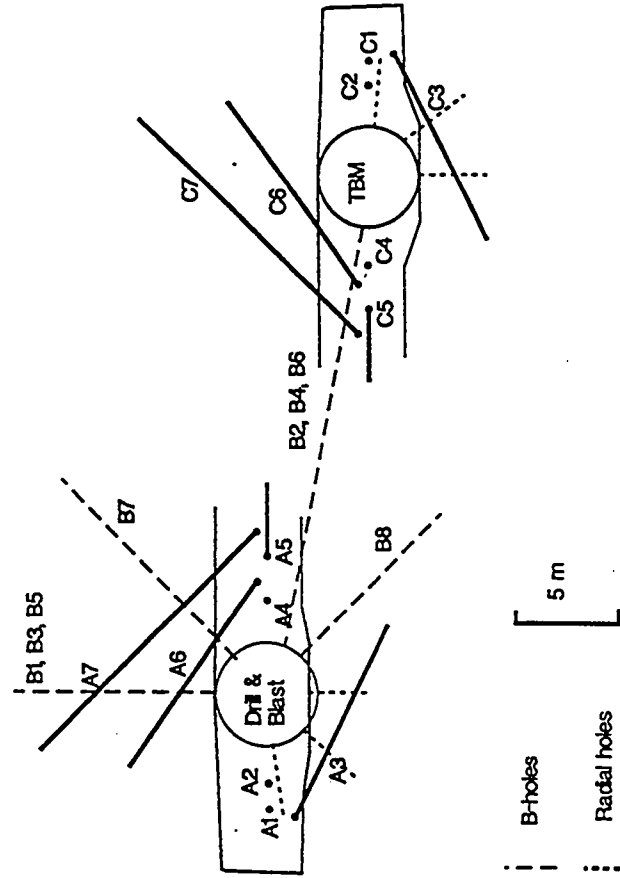


図4.2.2 HLWの計測用ボーリング配置 (断面図)

4.2.2 カナダ (URL)

カナダの Underground Research Laboratory (URL) の深度420mで実施された掘削影響試験の目的は、空洞掘削にともなう応力解放に対する岩盤挙動を精度よく計測することである。このため、以下に示すように他の要因をできるだけ少なくする努力を行い、試験精度を上げている。

- 1) き裂の無いゾーンを選ぶ。
- 2) 掘削損傷域を極力小さくする。(ラインドリリング+水圧スプリッター工法)
- 3) 温度の影響を無くする(温度調整ベンチレーション)
- 4) 試験坑軸方向は最大主応力軸に垂直方向(岩盤挙動最大)

URLにおける掘削影響試験計画についてまとめたものを表4.2.2に示している。また、図4.2.3にはURLの掘削影響試験(Mine-by Experiment)の計測器の配置計画を示している。掘削損傷領域の調査というよりも、トンネル工学における”塑性域(ゆるみ域)”の特性調査に近い試験計画である。

期待される結果としては、

- 1) 坑道掘削にともなう応力開放に対する連続体としての岩盤挙動の把握
- 2) 掘削損傷域の確認(AE計測)
- 3) 掘削損傷域の応力の確認(EDEX計測)
- 4) 計測機器の検証
- 5) 掘削による応力解放にともなう透水性の変化の確認

が挙げられている。

4.2.3 スイス (GTS)

スイスにおける掘削影響領域は、空洞から母岩への遷移領域として位置づけられ、地下水流動と物質以降に影響をおよぼす特性変化を持つ領域として試験対象となっている。

したがって、掘削影響試験の目的は、水理特性の変化する領域の広さと特性変化の評価である。試験の課題としては、

- 1) 掘削影響領域の調査手法の開発
- 2) 坑道周辺の軸方向流れの評価手法の開発

である。

期待される出力としては、

- 1) 掘削影響領域の広がり
- 2) 掘削影響領域の水理特性(異方性、連続性、坑軸方向透水性)

表4.2.2 URLにおける掘削影響試験のまとめ

1	場所：カナダ、ホワイトシエル
2	地質：unfractured granitic rock
3	深度：420m
4	スケジュール：1992
5	目的：応力解放による岩盤挙動の把握
6	初期応力： $\sigma_1=55\text{MP}$ $\sigma_2=48\text{MP}$ $\sigma_3=14\text{MP}$ $\sigma_1/\sigma_2=4$
7	坑道断面：円形 ($\phi=3.5\text{m}$)
8	長さ：46m (ピッチ 0.5m×3区間+1.0m区間)
9	掘削手法：機械掘削+ラインドリング+ハイドロローリックスプリット
10	レイアウト 図4.2.3参照 計測坑道との離間距離20m
11	事前調査項目 <ul style="list-style-type: none"> ・クロスホール弾性波探査
12	計測項目 <ul style="list-style-type: none"> ・変位計 (変位) 計測坑道から Excavation Damage Extensometer (新規坑道) (1m領域の変位) ・三軸歪セル (応力変化) ・AE/MSシステム (発生亀裂位置) ・内空変位
13	事後調査 <ul style="list-style-type: none"> ・Connected Permeability Test 床面

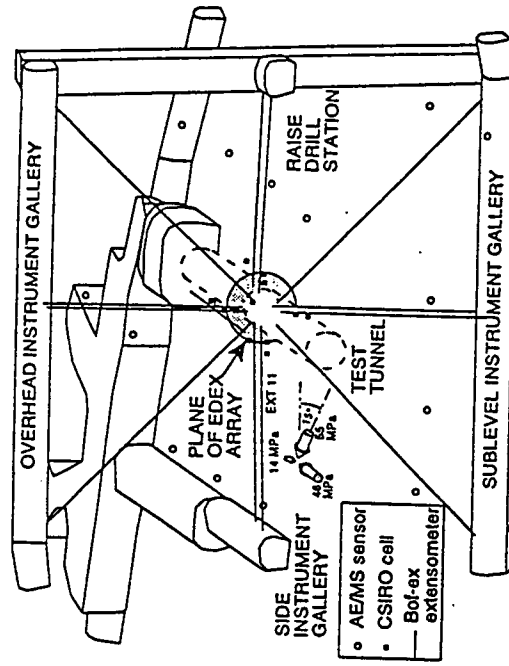


図4.2.3 URLの掘削影響試験における計測配置

3) 掘削影響領域の特性調査手法の検討データ

4) 岩盤モデリングの検証のためのデータベース

が挙げられている。グリムゼルにおける掘削影響試験のまとめを表4.2.3に示している。

4.2.4 釜石原位置試験における掘削影響試験

釜石鉱山においては2度にわたって掘削影響試験が実施されている。対象岩盤は栗橋花崗岩閃緑岩である。試験位置は土被り約300mの500m坑道内で実施されている。試験坑道はき裂卓越方向に直交する方向と平行な方向に掘削され、掘削の影響が対比されている。また、掘削手法も普通発破工法とスムーズブラスティング工法で実施され、工法の違いも検討されている。ここでの掘削影響試験の目的を列挙すると以下のようである。

- 1) 坑道掘削にともなう力学的・水理学的な影響を把握する。
- 2) き裂の卓越方向に対する掘削影響挙動を把握する。
- 3) 掘削工法の違いを検討する。
- 4) 既存の調査・計測手法の適用性を検討する。

表4.2.4には釜石鉱山における掘削影響試験のまとめを示している。図4.2.4においては、き裂の卓越方向と直交する方向に掘削されたKD-88坑道周辺の調査・計測用のボーリング配置を示している。一方、図4.2.5においては、き裂の卓越方向に沿った方向に掘削されたKD-89坑道周辺の調査・計測用のボーリング配置を示している。

4.2.5 神岡鉱山における掘削影響試験

神岡鉱山においてはき裂性の片麻岩／変深成岩の混成岩を対象とした掘削影響試験が実施されている。実施場所は深度175mの位置にある。ここにおける、掘削影響試験の目的は、以下のとおりである。

- 1) 不連続岩盤の挙動評価
- 2) 支保設計手法の確立
- 3) 岩盤掘削時の挙動計測
- 4) 岩盤計測手法の適用性試験

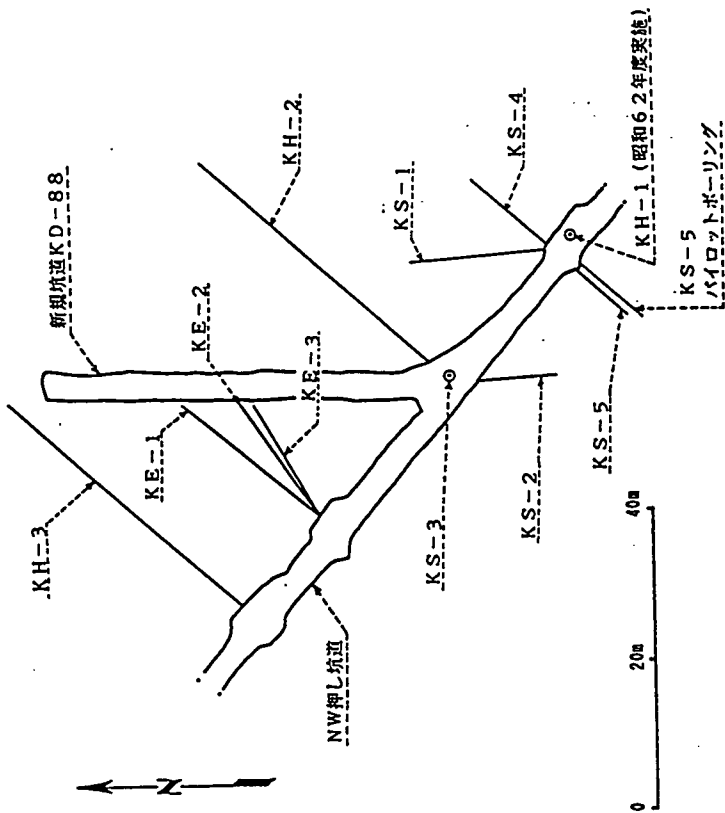
表4.2.5には神岡鉱山における掘削影響試験のまとめを示している。計測坑道は図4.2.6に示すような幌型の坑道で構成し、その中央に5m×4mの幌型断面の坑道を掘削する。計測結果を踏まえて、不連続岩盤のモデル化、三次元解析モデル作成、解析手法の適用性検討が事後検討項目にあがっている。

表4.2.3 グリムセルにおける掘削影響試験のまとめ

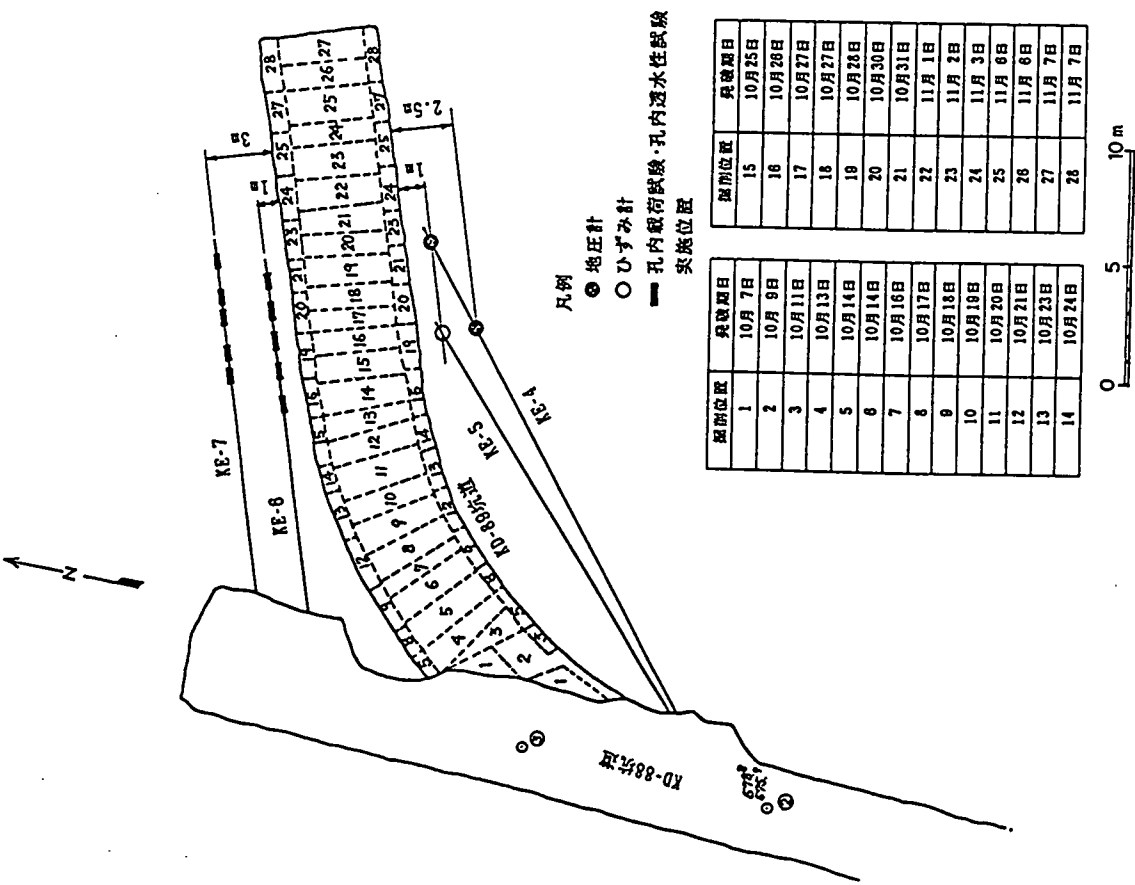
1	場所：スイス、グリムセル
2	地質：花崗岩
3	深度：450m
4	スケジュール：1994～1996
5	目的：EDZの広がりの評価する。 調査手法・モデル化手法の開発
6	初期応力： $\sigma_1=28\text{MP}$ $\sigma_2=12\text{MP}$ $\sigma_3=12.6\text{MP}$
7	坑道断面：円形 ($\phi=3.5\text{m}$)
8	長さ：
9	掘削手法：機械掘削
10	レイアウト：未定
11	事前調査項目 ・地質調査 ・初期応力
12	計測項目
13	事後調査 (EDZの存在の確認) ・試験坑からのポーリング ・透水試験 (単孔、孔間) ・トレーサー ・弾性波探査 ・AE計測
14	特記 前回 EDZ=1.5m～3m 今回 1.0mぐらいを予想している。

表4.2.4 釜石鉱山における掘削影響試験のまとめ

1	場所：釜石鉱山
2	地質：栗橋花崗閃緑岩
3	深度：300m
4	スケジュール：1988 (KD-88坑) 1989 (KD-89坑)
5	目的：力学・水理学的な掘削影響の把握 掘削工法や割れ目の卓越方向に対する影響の把握 現在の調査試験技術の適用性
6	初期応力： $\sigma_1=19.2\text{MPa}$ $\sigma_2=17.09\text{MPa}$ $\sigma_3=6.03\text{MPa}$
7	坑道断面：KD-88坑 (3.0m×2.5m) KD-89坑 (5.0m×3.0m)
8	長さ：KD-88坑 (51m) KD-89坑 (30.5m)
9	掘削手法：普通発破 (KD-88) スームスブラスディング (KD-89) (ピッチ1.3m)
10	レイアウト：割れ目に直交 (KD-88)、割れ目に平行 (KD-89) 計測坑道からの離間18m、計測坑道からの離間15m
11	事前調査項目 ・亀裂調査 (坑壁、コア、BTV) ・初期応力 ・孔内載荷試験 ・透水試験
12	計測項目 ・ひずみ ・地圧
13	事後調査 ・孔内載荷試験 ・透水試験



孔名	R.Q.D. (%)	コア採取率 (%)	目的	孔径 (mm)	延試験長 (m)
KH-2	87	100	物理試験 低圧カルマン試験	78	80.7
KH-3	85	100			
KS-1	84	98	岩盤応力測定	167	62.8
KS-2	98	100			
KS-3	93	100			
KS-4	87	99			
KS-5	99	100			
KE-1	97	99	坑道掘削に伴う 物性変化、地圧変化 ひずみ変化	76.5	57.0
KE-2	90	99			
KE-3	98	100			



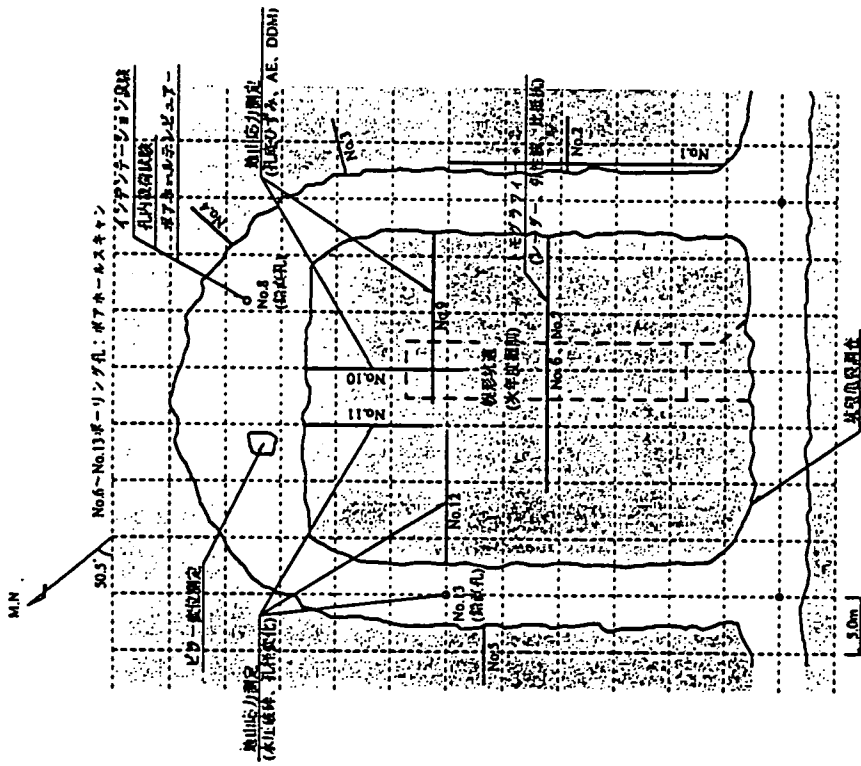
掘削位置	完成期日
1	10月7日
2	10月8日
3	10月11日
4	10月13日
5	10月14日
6	10月14日
7	10月16日
8	10月17日
9	10月18日
10	10月18日
11	10月20日
12	10月21日
13	10月23日
14	10月24日
15	10月25日
16	10月28日
17	10月27日
18	10月27日
19	10月28日
20	10月30日
21	10月31日
22	11月1日
23	11月2日
24	11月3日
25	11月6日
26	11月6日
27	11月7日
28	11月7日

図4.2.4 釜石原位置試験KD-88坑における掘削影響試験

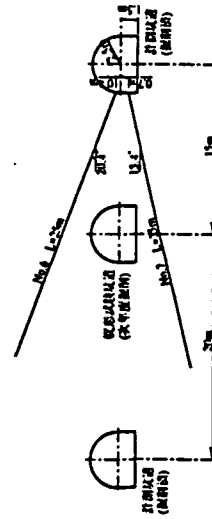
図4.2.5 釜石原位置試験KD-89坑における掘削影響試験

表4.2.5 神岡鉱山における掘削影響試験のまとめ

1	場所：神岡鉱山
2	地質：片麻岩／変深成岩、混成岩
3	深度：175m
4	スケジュール：1993年掘削
5	目的：不連続岩盤挙動評価および支保設計手法の確立
6	初期応力： $\sigma_1=5.04\text{MPa}$ $\sigma_2=1.88\text{MPa}$ $\sigma_3=1.22\text{MPa}$
7	坑道断面：梟形（5m×4m）
8	坑道長さ：30m
9	掘削手法：発破工法
10	レイアウト：図4.2.6参照 U字型、計測坑道からの離間15m
11	事前調査項目 <ul style="list-style-type: none"> ・亀裂調査（坑壁、ボーリングコア、ボアホールTV） ・初期応力（水圧破碎、孔底ひずみ法、AE、DDM） ・孔内載荷試験 ・トモグラフィ（レーダー、弾性波、比抵抗） ・ピラー変形試験 ・事前解析
12	計測項目 <ul style="list-style-type: none"> ・孔底ひずみ計 ・地中変位計 ・ジョイント変位計
13	事後調査 <ul style="list-style-type: none"> ・三次元解析モデル ・不連続岩盤モデル

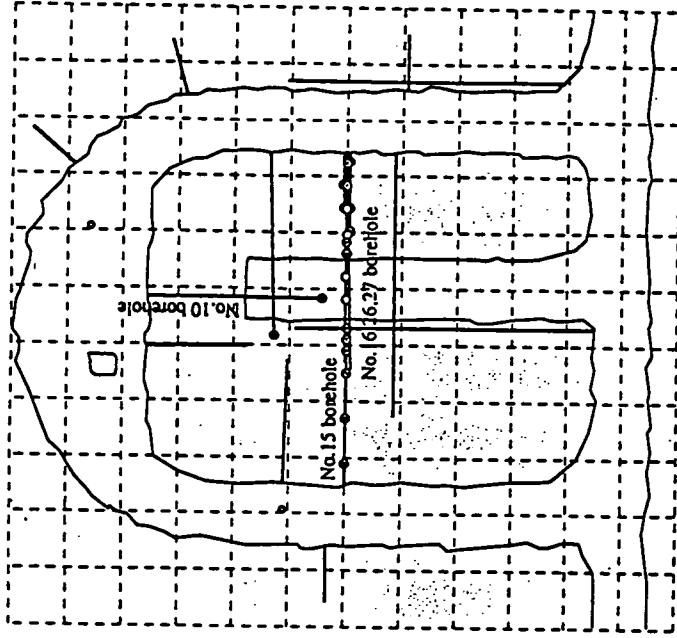


試験場平面図



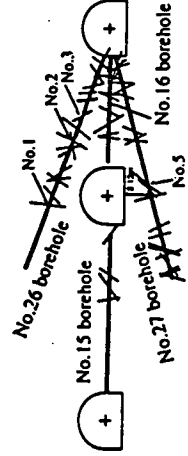
トモグラフィー試験断面

図4.2.6 神岡鉦山における掘削影響試験 (その1)
 (連帯共同研究: 通商産業省工業技術院
 資源環境技術総合研究所、(株)大林組)



●: 孔底ひずみゲージ
 ●: 地中変位計
 ○: ジョイント変位計

試験場平面図



ジョイント変位計測断面

図4.2.7 神岡鉦山における掘削影響試験 (その2)
 (連帯共同研究: 通商産業省工業技術院
 資源環境技術総合研究所、(株)大林組)

4.3 コンセプトの確立

動力炉・核燃料開発事業団では、これまでの原位置試験ならびに国内外の事例検討を踏まえて、図4.3.1に示すように、掘削影響に関する事象をまとめている。12) 本研究においても、この考え方を踏襲して、以下の目的で「新規坑道掘削にともなう掘削影響領域の評価」の詳細実施計画について検討している。すなわち、

- 1) 掘削に伴って発生する現象を把握し、掘削影響領域の広がりを把握する。
- 2) 掘削に伴って発生する現象と掘削影響領域の特性との関係を把握する。
- 3) 既存の計測および解析手法の掘削影響評価に対する適用性を評価する。
- 4) 掘削損傷領域の特性・広がり掘削工法との関係を評価する。

これまでの掘削影響試験の結果、掘削に伴って発生する現象としては、

- 1) 坑道周辺の掘削損傷域の発生
- 2) 坑道周辺の応力場の変化
- 3) 坑道周辺の間隙水圧の低下

が報告されている。

ここで、掘削損傷領域を評価する物理特性としては、き裂密度、弾性波速度、透水性、力学特性（変形定数、強度定数）があげられる。母岩と掘削損傷域の物理特性の相異が検討され、掘削損傷領域の物理特性データとしてまとめられる。

また、応力再配分領域の場の特性は岩盤内変位、ひずみ、応力計測により把握される。また、応力再配分領域における透水性の変化はき裂の開口幅の変化とともに直接計測される。

坑道周辺の岩盤挙動について総合評価するため、また、各々のプロセスの関連性を評価するためには不連続岩盤のモデル化と数値解析が不可欠である。今回の計画では、不連続岩盤のモデル化および解析のためのデータを供給するとともに、モデルの妥当性ならびに解析手法の検証のためのデータベースも供給する。

掘削工法の違いによる損傷領域の広がり特性変化の相異を検討するために、本計画においては、普通発破工法とスムーズプラスティング工法を適用する。掘削損傷域の評価手法は上述のとおりであるが、掘削損傷の度合いを計るパラメータ取得を目的として振動計測ならびにAE計測を計画する。

今回の試験では、計測手法および評価手法の有効性の検証データを与えることも目的としている。

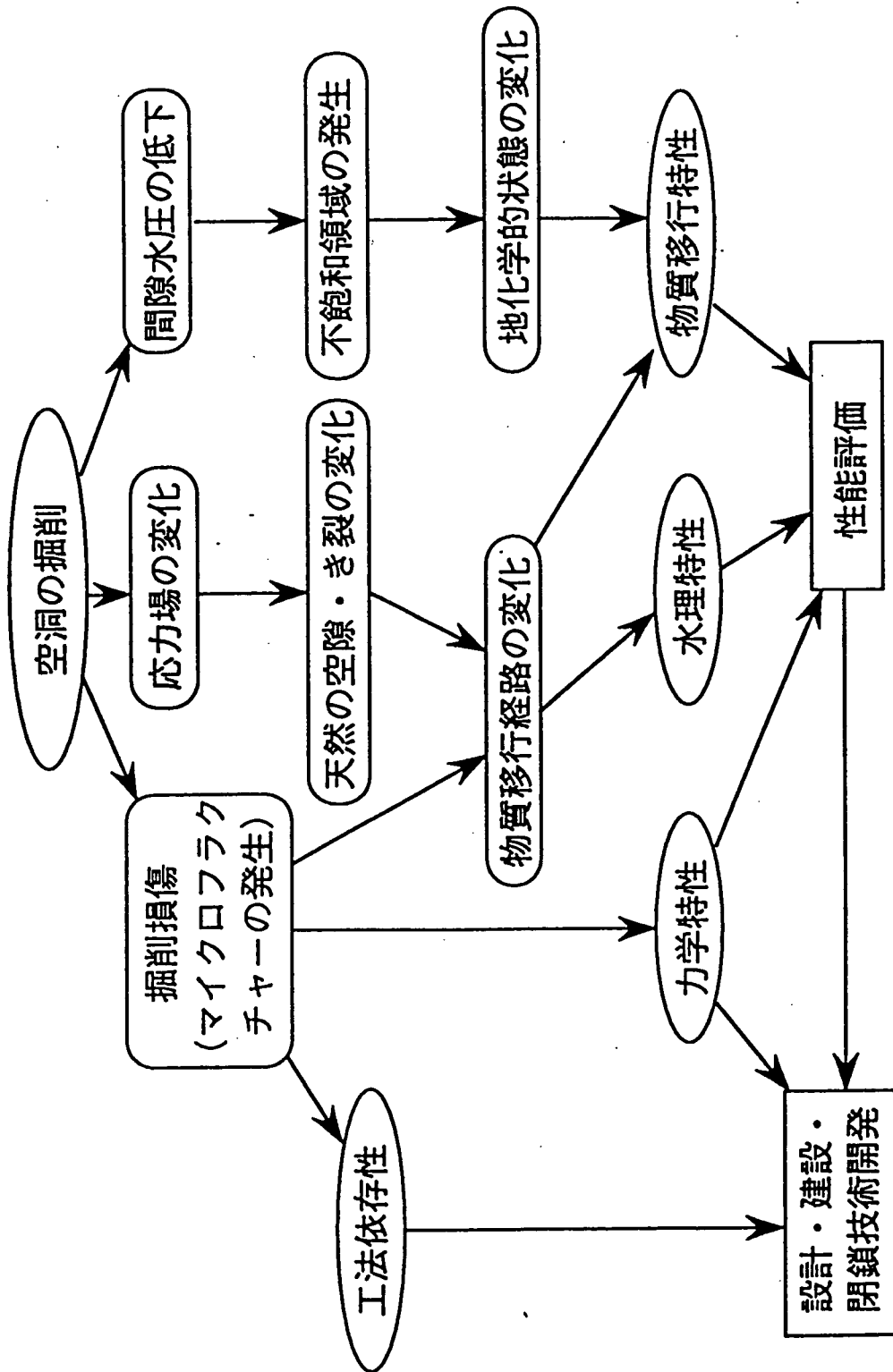


図4.3.1 掘削影響に関連する事象
(動力炉・核燃料開発事業団提案¹²⁾)

4.4 試験坑道のレイアウトの設定

4.4.1 試験坑道の大きさ

HR Lでは直径3.0mの円形断面、URLとGTSでは3.5mの円形断面、釜石のPhase Iでは5.0m×3.0mの矩形断面、神岡では5.0m×4.0mの幌形断面が採用されている。

本研究では可能な限り大きな断面として、動力炉・核燃料開発事業団が結晶質岩盤の坑道断面として示している5.0m×5.0mの幌形断面（図4.4.1）を提案する。⁹⁾

なお、計測坑道の断面は作業に支障のない大きさものとして、釜石鉱山の標準坑道断面である3.0m×2.5mの矩形断面（図4.4.2参照）とする。

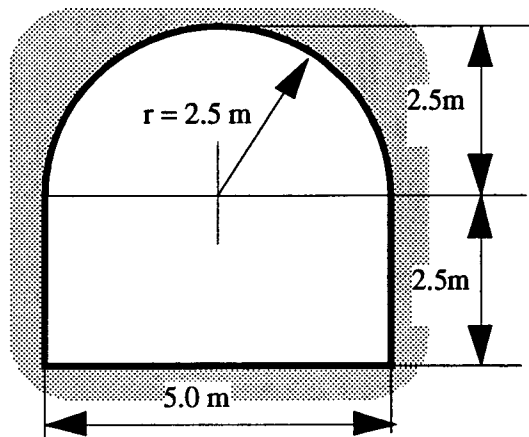


図4.4.1 試験坑道断面

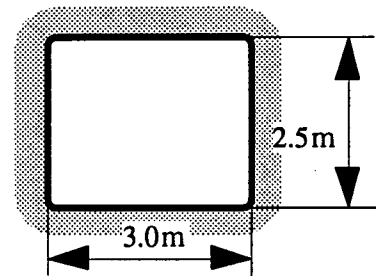


図4.4.2 計測坑道断面

4.4.2 試験坑道の方向

試験坑道の方向は解析との対比を行うのに都合のよい方向として、卓越する不連続面群に沿った方向を選択した。既存坑道ならびに試験坑道の配置を考慮すると、試験坑道を既存坑道と直交する方向に配置すると、図4.4.1に示すように最もシンプルなレイアウトとなる。

4.4.3 計測坑道と試験坑道の離間距離

掘削影響試験の実施位置の選定に際しては、既存坑道および計測坑道の掘削にともなう応力再配分の影響を受けないように配慮する必要がある。通常、坑道掘削時の応力再配分領域（掘削によって応力状態が変化する領域）は、坑道

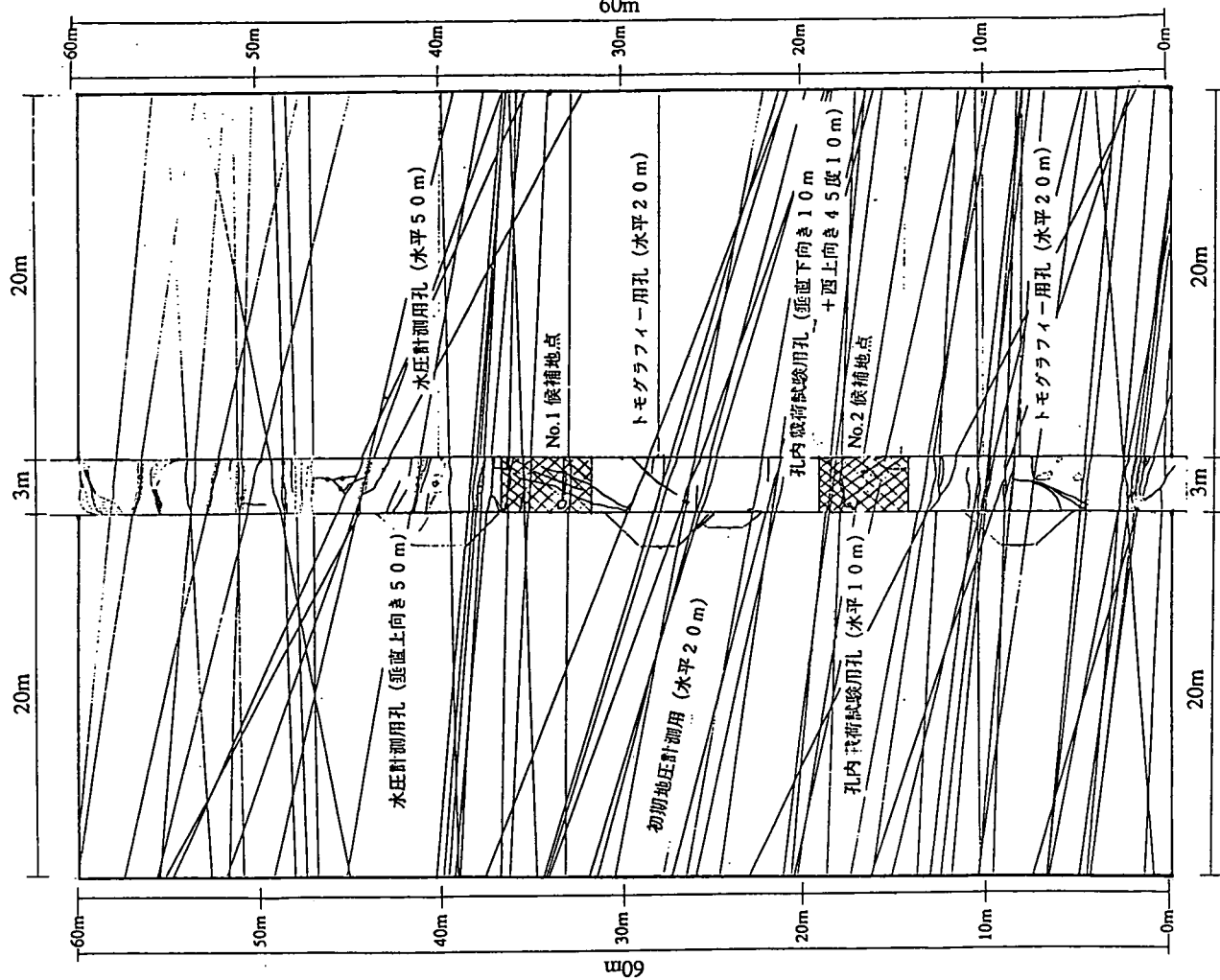


図4.4.4 試験坑道候補地点

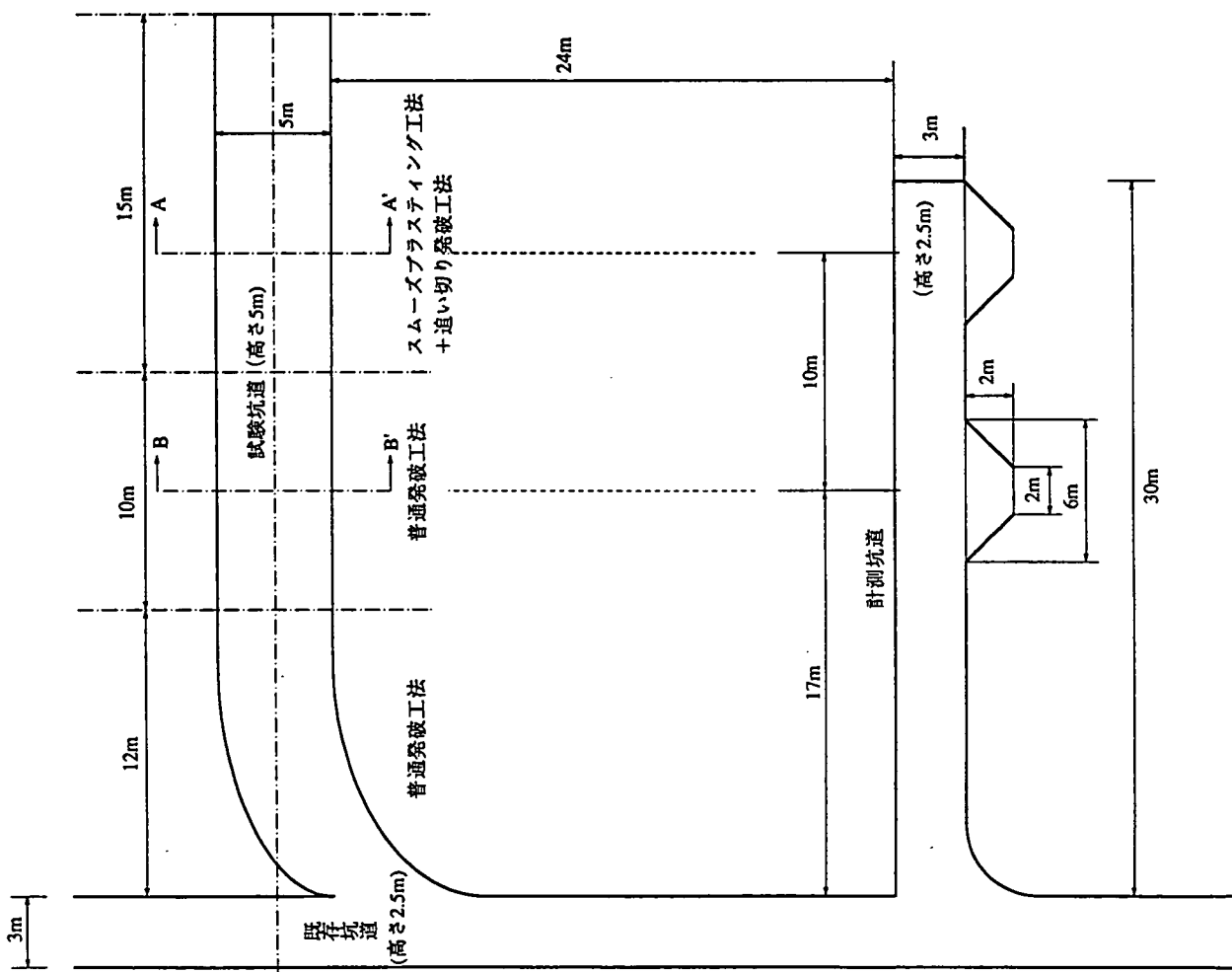


図4.4.3 試験坑道ならびに計測坑道の基本レイアウト

の直径2～3倍程度であると考えられている。したがって、2つの坑道の応力再配分領域が重ならない（相互に干渉しない）ようにするためには、試験坑道と計測坑道との距離を、坑道の直径の4～6倍以上にする必要がある。また、既存坑道から、坑道の直径2～3倍以上離れた位置に計測断面を設ける必要がある。一方、ボーリング孔を利用して計測機器を設置する場合、削孔長が長くなるほど、所定の位置に精度良く計測機器を設置することが困難になる。したがって、できるだけ正確な測定を行うという立場からは、試験の実施位置と計測坑道および既存坑道との距離が短いことが望ましい。

本計画では試験坑道断面の幅は5 m、計測坑道断面の幅は3 mであるので離間距離は16 m～24 m以上が望ましい。また、既存坑道の断面幅は3 mであるので計測断面は既存坑道坑壁から6～9 m離れることが望ましい。

以上を配慮し、本研究では図4.4.1に示すように計測坑道と試験坑道の離間距離は24 mとし、坑道の施工性も配慮して計測断面は既存坑道の坑壁から17 mならびに27 mに設置した。

4.4.4 試験坑道の長さ

試験坑道の長さはAA計測断面から2Dに相当する10 mの掘削を考慮して37 mとしている。また、計測坑道の長さはAA断面へのボーリング孔掘削に支障のない長さとして30 mに設定している。

4.4.5 試験坑道位置の選択

試験坑道位置の選択にあたっては

- ①坑道の断面内に数本以上の不連続面が存在する位置を選ぶ。
- ②大規模不連続面や不連続面の集中帯が存在しない位置を選ぶ。

更に、試験坑道断面が同じ程度に不連続面を含むように選ぶ。今回の場合、試験坑道が既存坑道と直交するため、既存坑道の壁面き裂観察を参照し、既存坑道に直交するき裂群の位置に注目した。¹⁰⁾前述の図4.4.2には2つの候補地点を示している。

①No.1候補地点

基点から31 m～36 mの地点である。この区間には5本のき裂を含んでいる。すべて閉口き裂であるが1本のき裂は小規模な破碎帯の態を示す。¹¹⁾

②No.2候補地点

基点から14 m～19 mの地点である。この区間も5本のを含む。このうち3本は開口き裂である。¹¹⁾この地点の難点は計測坑道との離間距離が取りに

くい点にある。水圧計測用のKDH-1から計測坑道を1 mだけ離すとすると、計測坑道と試験坑道の離間距離は17 mとなる。

以後の事前調査ならびに計測計画の設計にあたってはNo.1候補地点を想定して計画を作成している。

4.4.6 掘削工法を選択

岩盤の掘削手法としては、普通発破工法、スムーズプラスティング工法、ラインドリリング工法、トンネルボーリングマシン（TBM）を用いた機械掘削工法が考えられる。ただし、本研究の試験位置が坑口から遠く離れており、ボーリングマシンの導入が困難なこと、試験坑道が短くTBMの経費率が悪いことから機械掘削の導入は難しいものと思われる。また、ラインドリリング工法は他の発破工法に比べて工期が非常にかかることから今回の計画には適当でないとし、今回は普通発破工法とスムーズプラスティング工法を採用することを提案する。

どちらの工法も全断面掘削を基本とするが、岩盤への損傷の程度を軽減するためスムーズプラスティング工法では追切り発破を併用する。

なお、計測坑道は基本的には普通発破工法を用いるが、掘削手法や掘進長、薬量、掘進能率の検証のための試験区間を設け、掘削手法の予備調査を実施することとする。

4.5 計測項目の抽出と配置計画

4.5.1 目的

本研究の目的は前述のとおり以下の4点である。

- 1) 掘削に伴って発生する現象を把握し、掘削影響領域の広がりを把握する。
- 2) 掘削にともなって発生する現象と掘削影響領域の特性との関係を把握する。
- 3) 既存の計測および解析手法の掘削影響評価に対する適用性を評価する。
- 4) 掘削損傷領域の特性・広がり掘削工法との関係を評価する。

ただし、掘削影響領域を考える場合、対象とする物理特性が異なると、その領域も異なると考えるため、計測項目を明確にして、計測器の選択と配置を考える必要がある。

図4.5.1には、掘削影響に係わる事象と調査・計測項目との対応を示している。4.3節でも述べたとおり、空洞周辺には、掘削損傷領域、応力再配分領域、水圧低下領域が発生すると考えられるため、計測計画にあたっては各領域の発生メカニズムとその特性の把握についての配慮が必要である。図4.5.1においては、ハッチをかけた項目が、今回の試験において対象としている事象である。

なお、トンネル工学の分野では応力再配分領域を2つに分け、弾性領域と塑性領域（ゆるみ域）として計測が行なわれている。本研究は上記掘削損傷領域と応力再配分領域を対象としている。また、水圧低下領域の調査は、本試験とは別の研究で実施されているため、今回の計画では主たる対象とはしていない。

4.5.2 計測方針

本研究の目的に対応して、計測目的を以下のように分けて、計測項目の抽出を行う。

- 1) 掘削損傷領域の発生メカニズムとその特性を調べる。
- 2) 応力再配分領域の広がり・特性を調べる。
- 3) 事前計画・モデリング・解析のためのデータを与える。
- 4) 掘削工法の影響を調べる。

表4.5.1には計測の種類と数量をまとめている。各計測器の配置状況は図4.5.2に示すとおりである。各調査・計測は主としてA A'断面、および、B B'断面の2断面で集中的に実施し、掘削工法による比較はこの両断面での計測値の比較として示される。図4.5.3と図4.5.4には計測断面A AおよびB Bにおける計測器の配置状況を示している。

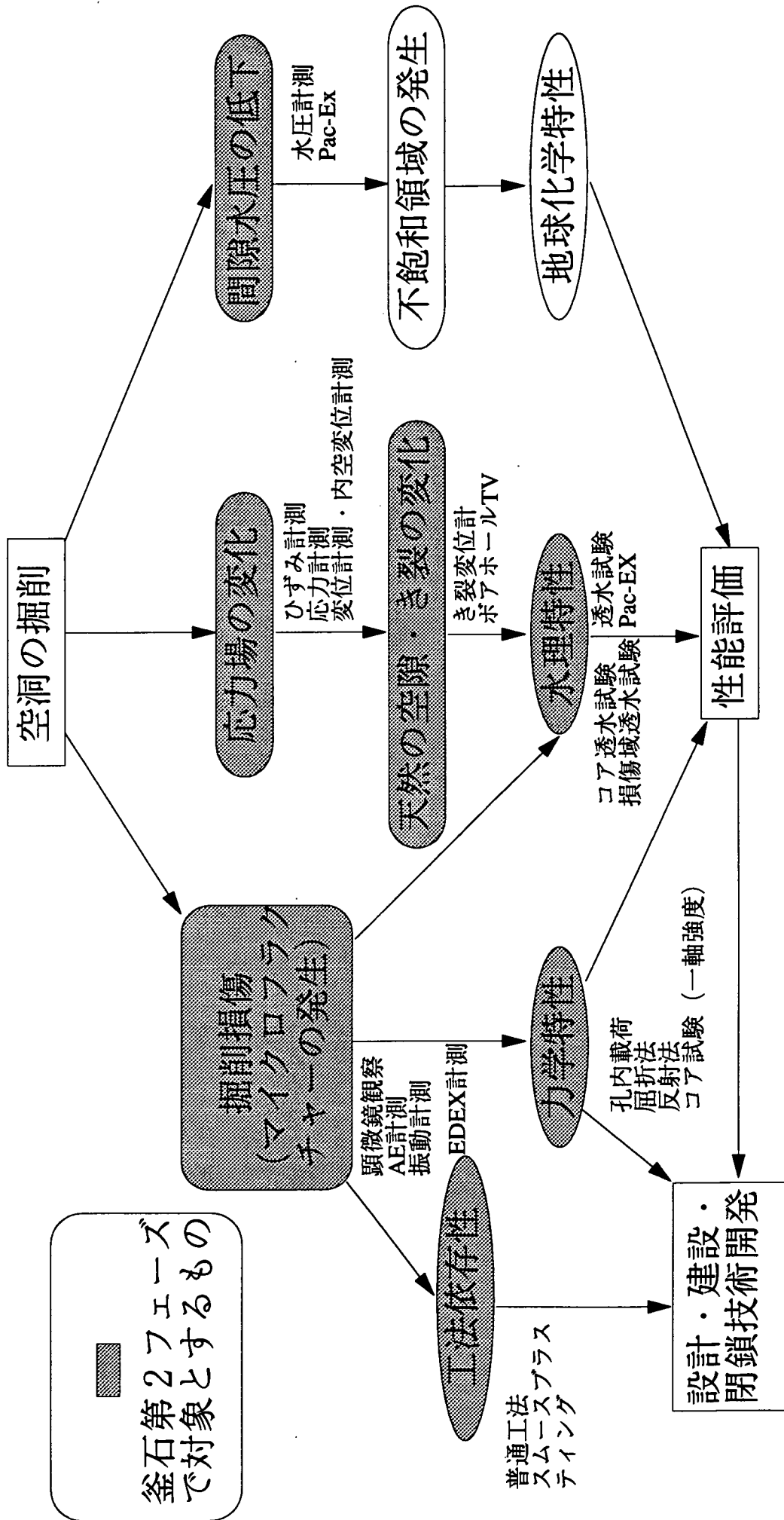


図4.5.1 掘削影響に係わる事象と調査・計測項目との対応

表4.5.1 計測の種類と数量

計器の種類	仕様・数量	
	A-A断面(Main)	B-B断面(Sub)
地中変位計	24m×5深度・・・1孔	—
ひずみ計	27m×5深度×3成分・・・3孔 24m×3深度×3成分・・・1孔 24m×6深度×3成分・・・2孔	17m×1深度×3成分・・・3孔
多成分7*7*7ひずみ計	27m×1深度×3成分・・・1孔	—
温度計	24m×3深度・・・1孔	—
AE計	27m×2深度・・・3孔	17m×2深度・・・3孔
振動計	24m×5深度・・・1孔	24m×5深度・・・1孔
き裂変位計	24m×3深度・・・1孔 28m×3深度・・・1孔	—
Pac-Ex計	24m×1深度・・・1孔 28m×3深度・・・1孔	—
地中変位計	7m×5深度・・・5孔	7m×5深度・・・3孔
多成分7*7*7ひずみ計	6m×5深度・・・1孔	—
応力計 (CSIRO)	1m×1深度×12成分・・・3孔 0.5m×1深度×12成分・・・3孔	—
ワイヤリ-ブ-ブ	2測線	2測線
亀裂変位計(坑壁)	2点	—

- 地中変位アンカー
- ひずみ計
- 多成分ボアホールひずみ計
- ボーリング孔口
- △ 振動計
- AE計

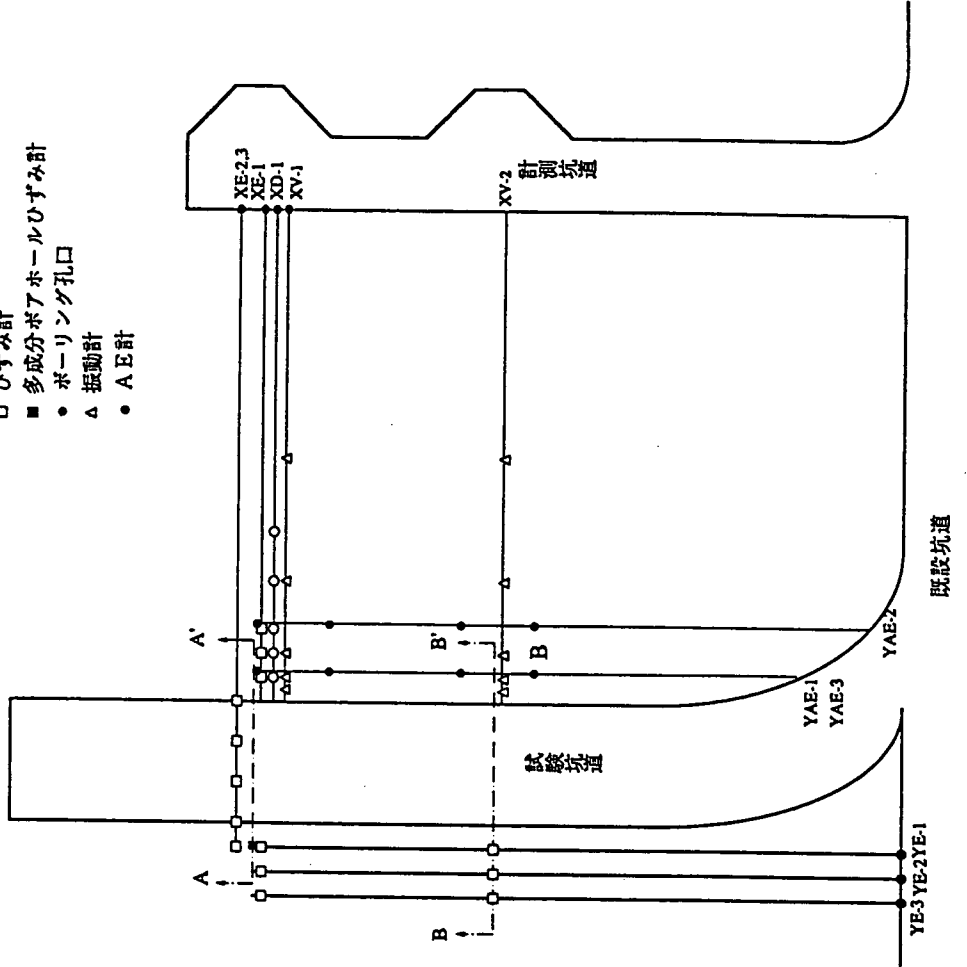


図4.5.2 計測断面配置図

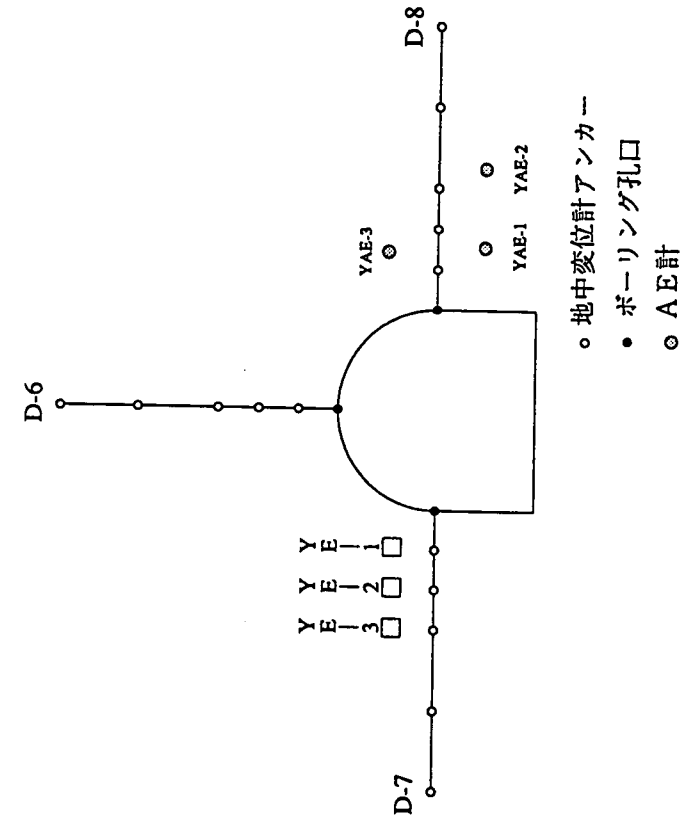


図4.5.4 計器配置図 (B-B断面)

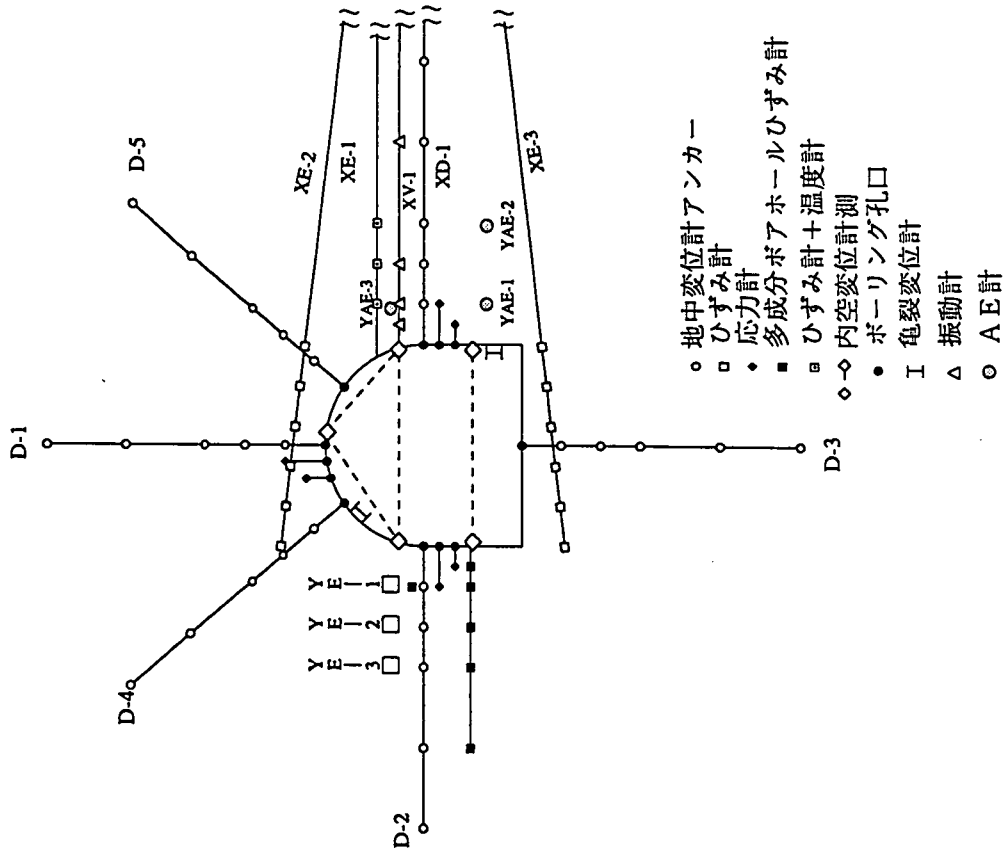


図4.5.3 計器配置図 (A-A断面)

4.5.3 期待される成果

これまでの計測により期待される成果は以下の通りである。

- 1) 掘削損傷領域の広がり異なる物理特性により評価する。すなわち、A E、応力変化、き裂密度、電磁波、弾性波速度、透水性、力学特性が計測され、母岩と掘削損傷域との相異が検討されるとともに、掘削影響領域の物理特性データとしてまとめられる。
- 2) 応力再配分領域の変位分布、ひずみ（応力分布）が計測される。これは、き裂分布の影響を反映した不連続性、異方性、不均質性を反映したものになる可能性がある。この変位分布およびひずみ分布からき裂の開口度合いが検討される。
- 3) 応力再配分領域におけるき裂の変位および透水性の変化が直接計測される。
- 4) 岩盤内変位分布、ひずみ分布、および透水試験結果により間接的にき裂の開口度合いと透水性の関連性が検討される。
- 5) 不連続岩盤のモデル化および解析のためのデータを供給するとともに、モデルの妥当性ならびに解析手法の検証のためのデータベースも供給する。
- 6) 掘削工法の違いによる損傷領域の広がり特性変化の相異が検討される。
- 7) 掘削損傷域ならびに応力再配分領域の計測手法、評価手法の検証データを与える。

4.6 掘削前後の調査・試験項目の抽出

4.6.1 事前調査項目の抽出

1) 事前調査の目的

事前調査の目的は掘削影響領域の岩盤構造・き裂状況の把握と坑道掘削前の岩盤特性ならびに場の特性（圧力、水圧）を把握することである。この調査データは以下のように利用される。

- ①掘削影響試験のための試験坑道の詳細設計・計測計画の作成のためのデータを与える。
- ②掘削影響試験前後の岩盤特性ならびに場の特性の変化を比較するための掘削前の岩盤特性ならびに場の特性のデータを与える。
- ③試験坑道掘削の事前解析のための岩盤のモデル化に必要な岩盤特性データを与えると同時に、初期条件、境界条件の一部を与える。
- ④掘削影響試験時の計測手法、調査手法について試行データを与える。
- ⑤掘削手法についての試行データを与える。

事前調査項目を表4.6.1にまとめている。また、各ボーリング位置ならびに試験位置を図4.6.1に示している。

2) 詳細試験計画のための事前調査

既存坑道からのボーリング調査、計測坑道でのき裂調査ならびに計測坑道からのボーリング調査（コア観察、BTVを含む。）が実施される。

3) 掘削前後の状態比較のための事前調査

試験坑道の坑壁からそれぞれ1 mおよび3 m離して既存坑道から試錐孔を掘り、コア観察、BTV、透水試験、PS検層、孔内載荷試験を実施する。試験坑道掘削後も同じ位置で同じ試験を実施し、掘削の影響を検討する。さらに、坑道断面での垂直方向のき裂を想定して、透水試験、トモグラフィー調査が試験坑道掘削前後で実施され、比較検討される。

4) 事前解析のための事前調査

事前解析（力学解析）のための岩盤モデル化に必要なデータは、前述のボーリング調査ならびに既存坑道と計測坑道における岩盤・き裂調査により供給される。また、トモグラフィー調査の結果も岩盤構造のモデル化に利用される。岩盤特性とき裂特性についてはPS検層や孔内載荷試験の原位置試験データと室内物性試験のデータから決定される。一方、初期条件および境界条件につい

表4.6.1 事前調査一覽表

目的	調査位置	備考
岩盤・き裂調査	Y-1, Y-2, X-1, X-2 既存坑道・計測坑道坑壁	コア観察、BTV、PS検層
初期応力調査	Y-1	
間隙水圧調査	X-3	
トモグラフィー調査	XT-1, XT-2	
掘削前状態調査	YK-1, YK-2 XK-1 XK-2 XK-3 XK-4	透水試験、PS検層 坑内載荷試験 透水試験 透水試験 透水試験 透水試験
計測器試行調査	Y-3 X-4 X-5 X-6 X-8 X-9	ひずみ計 多成分ひずみ計 地中変位計 応力計 き裂変位計 Pac-Ex計
調査手法検討調査	計測坑道坑壁 X-7 コア試料	屈折法、反射法 室内試験
掘削手法予備調査	計測坑道	発破手法、掘進長、薬量 発破パターン

- 地中変位アンカー
- ひずみ計
- 多成分ボアホールひずみ計
- ボーリング孔口

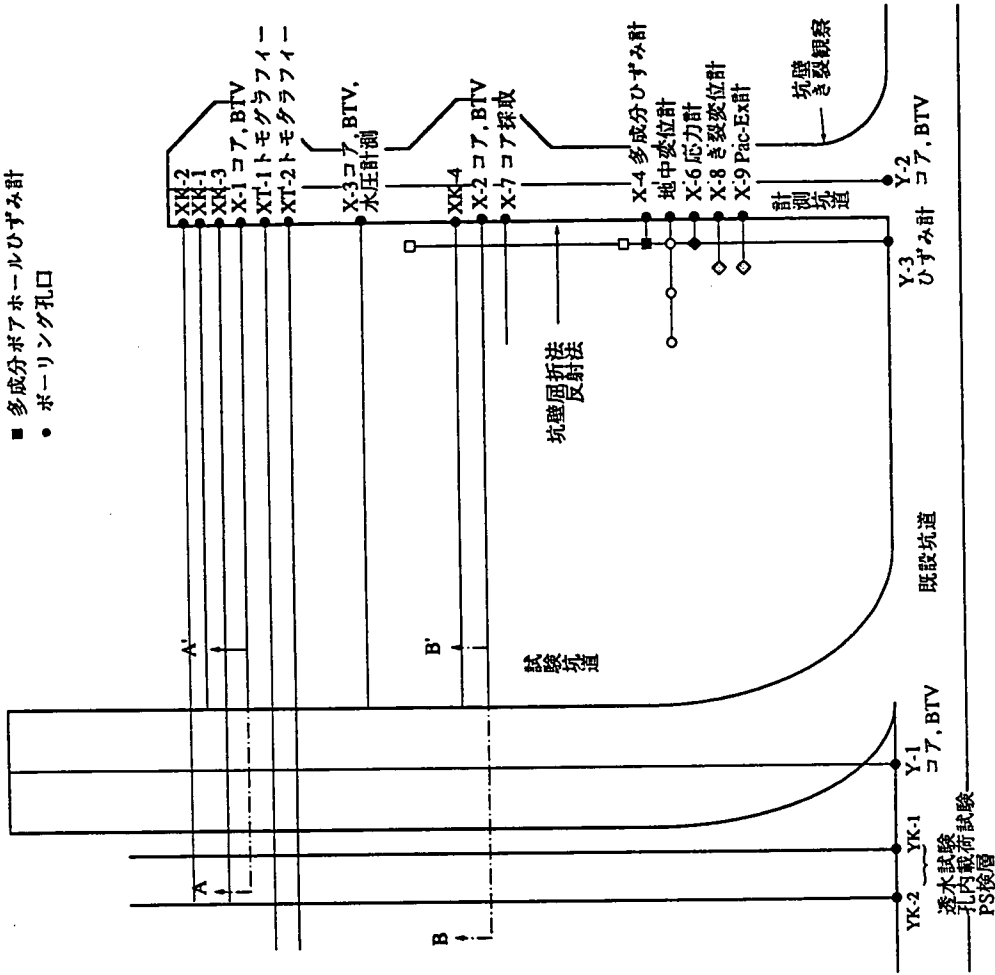


図4.6.1 事前調査用ボーリング配置のまとめ

ては前述の水圧計測ならびに初期応力調査結果を検討して設定する。

5) 計測手法、調査手法の試行調査

掘削影響試験に用いられる主な計器の精度ならびに信頼性を計測坑道掘削時に検証すること、ならびに、新規坑道掘削時の掘削損傷域の程度を調査する手法を計測坑道内で試行することを目的とする。

試行を予定している計器はひずみ計、多成分ひずみ計、地中変位計、応力計、き裂変位計である。計測坑道掘削完了後、坑壁において弾性波探査（屈折法）とレーダー探査（反射法）の試行を行うとともに、坑壁から削孔したボーリングボーリングコアを用いた力学試験（一軸強度、割裂強度、弾性波速度）、透水試験、顕微鏡観察を実施する。

6) 掘削試行試験

計測坑道掘削時に掘削手法、掘進長、薬量、発破パターンを変えた掘削の試行を行い、坑壁の状態、余掘りの状態、掘進能率等を検討して、試験坑道掘削の最適手法を設定する。

4.6.2 事後調査項目の抽出

1) 事後調査の目的

事後調査の目的は、坑道掘削後の岩盤特性ならびに場の特性（圧力、水圧）を把握し、掘削前の岩盤特性ならびに場の特性との比較を行うことにより、掘削損傷領域の広がりと特性を評価するとともに、応力再配分領域の特性を評価することである。この調査データは以下のように利用される。

- ①掘削影響試験前後の岩盤特性ならびに場の特性の変化を比較するための掘削後の岩盤特性ならびに場の特性のデータを与える。
- ②新規坑道周辺の岩盤特性のデータを与える。

事後調査項目を表4.6.2にまとめている。また、各ボーリング位置ならびに試験位置を図4.6.2に示している。

2) 掘削前後の状態比較のための事後調査

事前調査で用いた同じボーリング孔においてBTV、透水試験、PS検層、孔内載荷試験を実施する。また、事前調査との比較のために同じ区間において透水試験、トモグラフィ調査を実施する。

表4.6.2 事後調査一覧表

目的	調査位置	備考
岩盤・き裂調査	試験坑道坑壁	
間隙水圧調査	X-3	(既設)
トモグラフィー調査	XT-1, XT-2	(既設)
掘削後状態調査	YK-1, YK-2	透水試験、PS検層、BTV 坑内載荷試験 (既設)
	X-10, X-11	透水試験、PS検層、BTV 坑内載荷試験 (新設)
	Z-1, Z-2	透水試験、PS検層、BTV 坑内載荷試験 (新設)
	XK-1	透水試験 (既設)
	XK-2	透水試験 (既設)
コア採取	XK-3	透水試験 (既設)
	XK-4	透水試験 (既設)
	X-12, X-13	一軸、弾性波、透水、顕微鏡
	Z-3, Z-4	一軸、弾性波、透水、顕微鏡
物理探査	X-14, X-15	異方性試験
	Z-5, Z-6	異方性試験
	計測坑道坑壁	屈折法、反射法

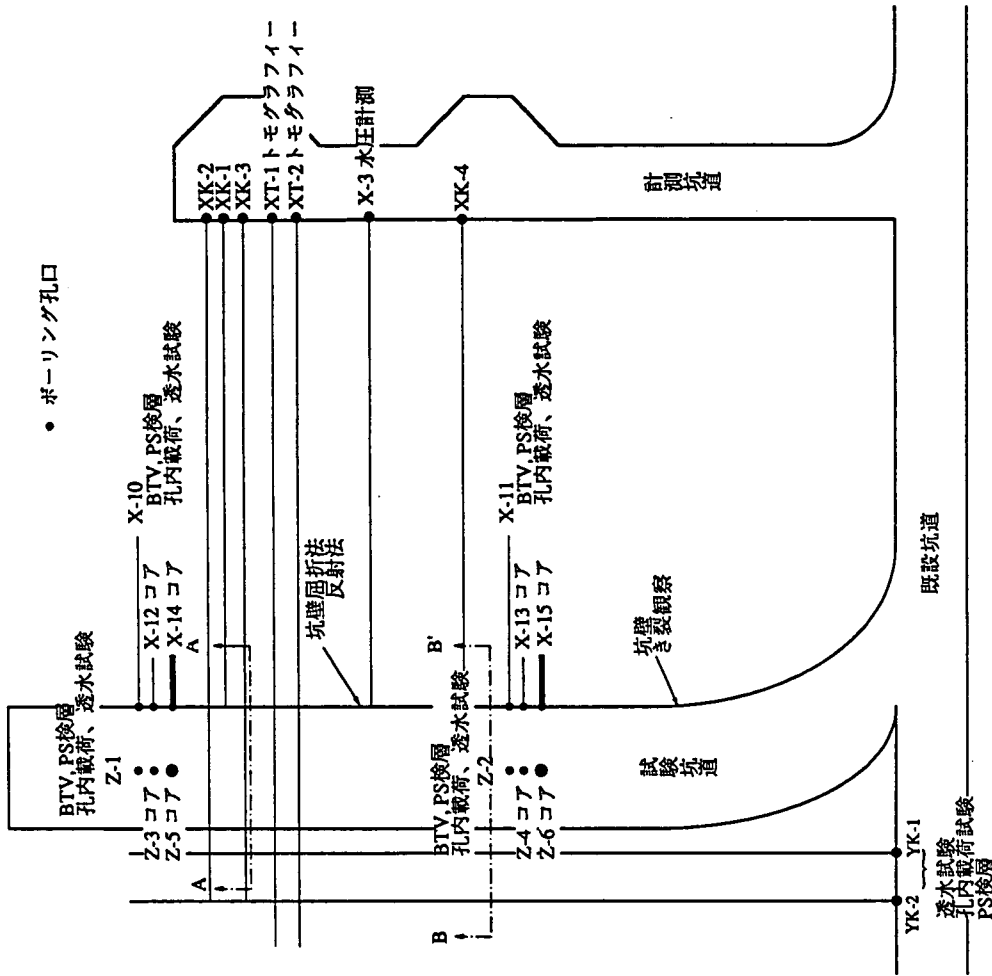


図4.6.2 事前調査用ボーリング配置のまとめ

3) 新規坑道周辺の岩盤特性調査のための事後調査

試験坑道掘削後は試験坑道内からの調査が可能である。調査項目の一部に関してはすでに本年度「既存坑道周りの調査」として試行済である。調査項目を大別すると以下のようになる。

① 試験坑道でのき裂調査

試験坑道掘削時の切羽のき裂調査を参考にしながら、試験坑道坑壁のき裂観察を行う。また、坑壁において弾性波探査（屈折法）、レーダー探査（反射法）を実施し、掘削損傷領域の検討データを得る。

② 試験坑道からのボーリング調査

試験坑道からのボーリング調査としては、ボーリングコア観察、B T V観察、P S検層、孔内載荷試験、透水試験、ボーリングコアによる室内試験を行う。掘削工法の比較データを得るため、各調査ともA A、B B両断面において実施する。 $\phi = 76\text{mm}$ の試料を用いて、連続的に一軸圧縮試験、弾性波速度試験、透水試験、顕微鏡観察を実施する。 $\phi = 218\text{mm}$ の試料は異方性試験のための試料であり、このコアから掘削損傷域内外での3方向の試料を抜取り、一軸圧縮試験、弾性波速度試験、透水試験を実施する。

4.7 実施計画の作成

4.7.1 計測坑道掘削手法の選定と掘削計画

計測坑道の断面は前節で示したとおり幅3m×高さ2.5mの矩形断面とする。計測坑道の長さは30mとし、排水のため0.5%の上り勾配とする。掘削手法は全断面で普通発破工法とする。発破孔穿孔は2連ジャンボおよびレグドリルで行い、穿孔長は1.3mとする。なお、比較の為に穿孔パターンを2とおり、薬量を3とおりに変えた試行発破を途中で実施する。

平均掘削速度は0.8m/日であり、4m/週程度となり30mの掘削では2ヵ月～2.5ヵ月の工程であるが、掘削準備等を考慮すると約3箇月の工期を要する。但し、これは切羽の亀裂スケッチ等の工程を含んでいない。

4.7.2 試験坑道掘削手法の選定と掘削計画

試験坑道の断面は幅5m×高さ2.5mの幌形断面であるが、既存坑道からのアクセス部（約12m）では高さ2.5mから5mまで変化する。試験坑道の長さは全長36mであり、アクセス部12m、普通発破工区10m、スムーズブラスティング工区15mとし、計測坑道と同様0.5%の上り勾配とする。

アクセス部ならびに普通発破工区は全断面掘削とする。また、スムーズブラスティング工区はスムーズブラスティングと追切り発破を併用する。

普通発破工法での掘削速度は0.8m/日、4m/週程度であり、アクセス部ならびに普通発破工区全22mの掘削は1ヵ月～1.5ヵ月かかる。また、スムーズブラスティング工法での平均掘削速度は0.5m/日（2日で1m）であり、2m/週程度となる。15mの工区の掘削には1ヵ月～1.5ヵ月かかる。したがって、試験坑道の前掘削には掘削準備も含めると4ヵ月～4.5ヵ月が必要である。

これには亀裂のスケッチの工程ならびにAA'、BB'の各計測断面におけるボーリングならびに計器の設置工程が含まれていない。

4.7.3 調査試験用ボーリングの掘削計画

調査試験用のボーリングは前述のとおり、3つのグループに分けられる。

① 既存坑道から計測坑道・試験坑道に平行なボーリング

前述のとおり、事前調査用ボーリングおよび計測用ボーリングは合計8孔で総延長は275mである。削孔にかかる日数は3ヶ月～4ヶ月かかる。

② 計測坑道からのボーリング

事前調査用ボーリングおよび計測用ボーリングを含め、計測坑道から

のボーリングは短いものも含めて全22本、総延長で488mとなる。削孔にかかる日数は5ヶ月～7ヶ月である。

③ 試験坑道からのボーリング

AA' 断面でのボーリングは15本で延長59.5mであり、BB' 断面でのボーリングは4本で延長33mである。試験坑道からの掘削は短いものが中心であり、AA断面で1ヶ月、BB断面で3週間程度である。

以上をまとめるとボーリング本数は51本で、総延長は856mとなる。

削孔の順序としては、既存坑道からのボーリングが最初に行われる。計測坑道の掘削後に計測坑道からのボーリングが実施される。このうちの事前調査用の多成分歪み計、地中変位計、応力計は計測坑道の切羽が到着した時点で削孔される。また、試験坑道から掘削されるボーリングも切羽が到着した時点で削孔される。

4.7.4 解析計画

1) はじめに

釜石鉱山250mレベル坑道において、試験坑道の掘削影響試験が計画されている。試験坑道の掘削に先立っては、数値解析を行い掘削時の周辺岩盤の挙動を把握しておく必要がある。

岩盤に関する解析手法はいくつか存在するが、空洞掘削時の岩盤の挙動等を完璧に再現できるものはない。解析の入力値や解析モデルの決定方法あるいは解析の簡便さ、適用実績等を考えると、現状では有限要素法(FEM)がもっとも有力な方法となっている。しかし、不連続性岩盤においては、原位置のき裂が空洞掘削時の岩盤挙動に影響を及ぼすと考えられる。そのため、き裂の幾何学特性や力学特性を考慮できるクラックテンソル(FEM-CT)等の等価連続体解析や、個別要素法(DEM)などの不連続体解析を用いる必要があると考えられる。ここでは、平成7～9年度における試験坑道の掘削解析として、2次元FEMおよびDEMの実施を提案する。

2) 目的

解析の目的は、試験坑道掘削のシミュレーションを行い、周辺岩盤の挙動を予測することである。解析結果は各種の計測値と比較する。

3) 実施内容

実施する解析の内容は以下のとおりである。

(1) 2次元FEM弾塑性解析

計画されている計測断面を対象として、試験坑道の掘削による周辺岩盤の応力状態や変位、塑性域等を調べる。解析において岩盤は弾塑性体とする。破壊基準として、Drucker-Pragerの条件を用いる。

(2) 2次元DEM解析 (UDEC-BB解析)

計画されている計測断面を対象として、き裂の配置および力学特性を考慮した2次元DEM解析を行う。FEMと同様に試験坑道の掘削による周辺岩盤の応力状態や変位を調べる。また、試験坑道周辺のき裂の挙動についても調べる。解析において岩盤(ブロック)は弾塑性体とする。また、き裂の力学特性はBarton-Bandisジョイントモデルで評価する。

4) 実施方法

FEMおよびDEM解析は、計測坑道や試験坑道の掘進および各種の原位置試験・計測の実施に伴い、平成7～9年度において以下の表4.7.1のように行う。

表4.7.1 解析計画

	現場のスケジュール	解析のスケジュール
平成7年度	計測坑道の掘削	*既存データから解析モデルを作成 *FEM、DEM解析（その1）を実施
平成8年度	試験坑道の掘削、計測の実施	*FEM、DEM解析（その1）の結果と計測結果とを比較 *き裂や岩盤物性などのデータを追加して新たな解析モデルを検討
平成9年度		*FEM、DEM解析（その2）を実施 *FEM、DEM解析（その2）の結果と計測結果とを比較

解析（その1）：

FEM,DEMを実施する。岩盤やき裂に関する入力値は本年度までに取得されている情報により決定する。DEMにおいて、試験坑道の計測断面周辺のき裂配置は、既存坑道のき裂調査結果からモデル化する。

解析（その2）：

計測坑道やボーリングによる岩盤の力学特性やき裂の配置・力学特性を考慮して新たに解析モデルを作成する。この際、ボーリングコアを利用して岩石やき裂の室内試験を行い、解析の入力値の見直しを図る。DEMにおいて、試験坑道周辺のボーリング孔のき裂情報を追加して解析モデルに考慮する。また、実在するき裂を解析モデルに直接取り込む。

5) 解析ステップ

FEMおよびDEMとも解析を次の3つのステップに分けて実施する。

- *STEP1：初期地圧の負荷
- *STEP2：既設坑道および計測坑道の掘削
- *STEP3：試験坑道の掘削

6) 入力条件およびパラメータ

*初期地圧：

原位置における初期地圧計測結果を利用する。

*岩盤の力学特性：

孔内載荷試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験の結果を利用して、弾性係数、ポアソン比および強度定数である粘着力と内部摩擦角を決める。

*** き裂配置：**

既設坑道き裂の調査結果から、き裂の方向、間隔（密度）、き裂長の分布を求める。さらに、試験坑道周辺のボーリングより実在するき裂の配置を把握する。

*** き裂の力学特性：**

き裂に関する室内試験結果を利用し、せん断剛性 K_s 、JRC、JCSなどを決定する。

7) 室内試験の実施

平成7年度以降に得られるボーリングコアを用いて、以下の室内試験を実施する。

*** 一軸圧縮試験：**

一軸圧縮強度、弾性係数、ポアソン比を求める。

*** 三軸圧縮試験：**

粘着力および内部摩擦角を求める。

*** き裂の力学試験**

き裂のせん断強度、せん断剛性、粗さ係数(JRC)、圧縮強度(JCS)などを求める。

以上の室内試験の結果を解析（その2）の情報として加える。

6) 期待される成果

*** 試験坑道の掘進に伴う周辺岩盤の応力状態や変位の変化、塑性域等を把握する。**

*** 各解析の結果を比較することで、岩盤の異方性やき裂の影響等を把握する。**たとえば、坑道の内空変位が初期地圧やき裂の影響で異方性を呈することが予想される。また、坑道周辺の岩盤のゆるみをFEM弾塑性解析においては塑性域、DEM解析においてはき裂の開口やすべりとして把握できる。

*** FEMおよびDEM解析の結果と計測結果を比較し、き裂の影響を調べる。**

以下に解析結果の例を示す。

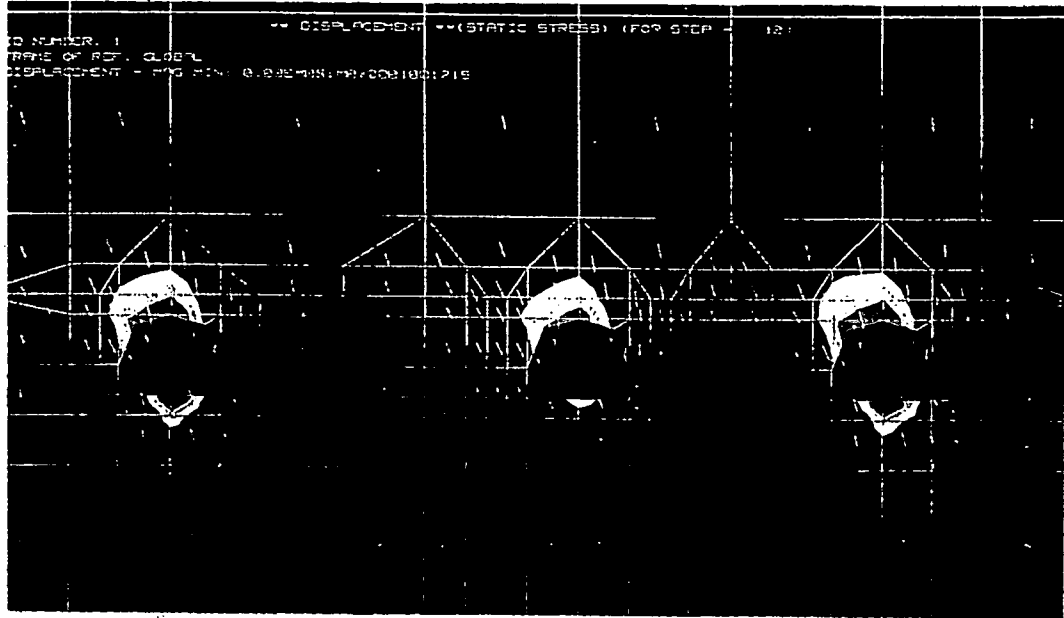


図4.7.1 坑道掘削後における岩盤の変位状況 (FEM)

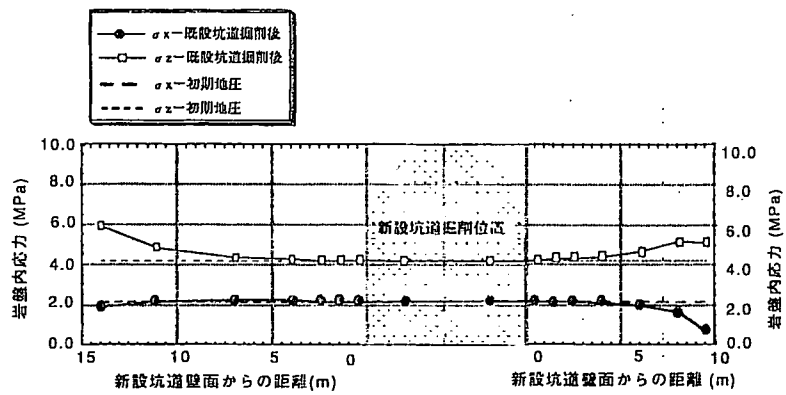


図4.7.2 坑道掘削後における岩盤の応力状態 (FEM)

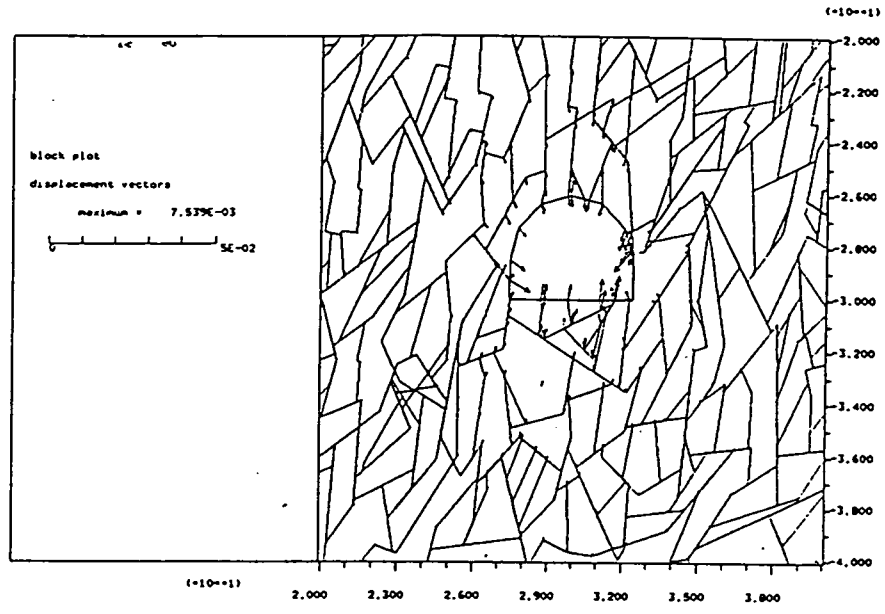


図4.7.3 坑道掘削後における岩盤の変位状態 (DEM)

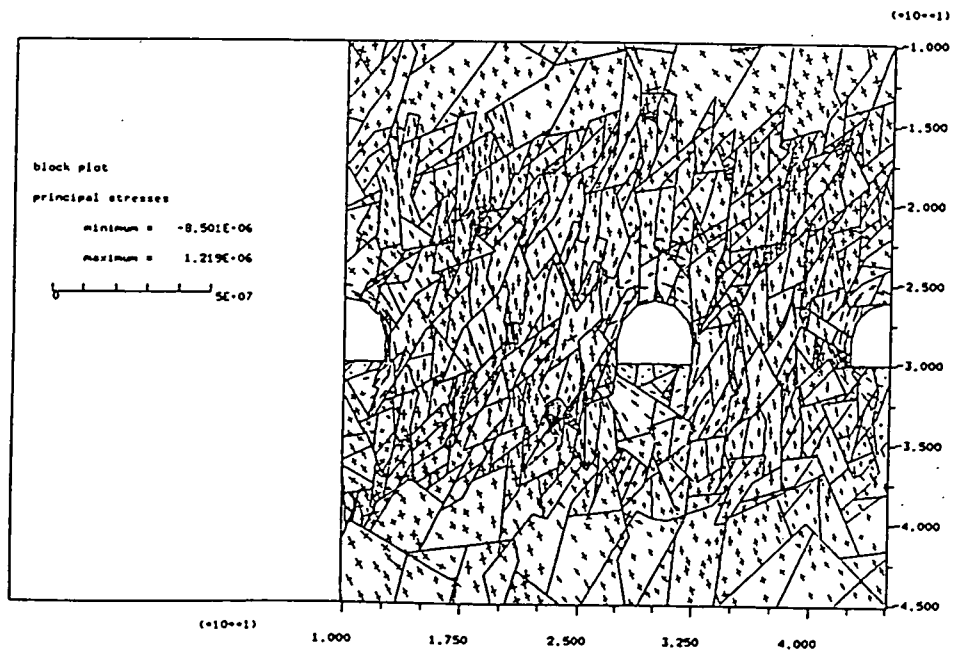


図4.7.4 坑道掘削後における岩盤の応力状態 (DEM)

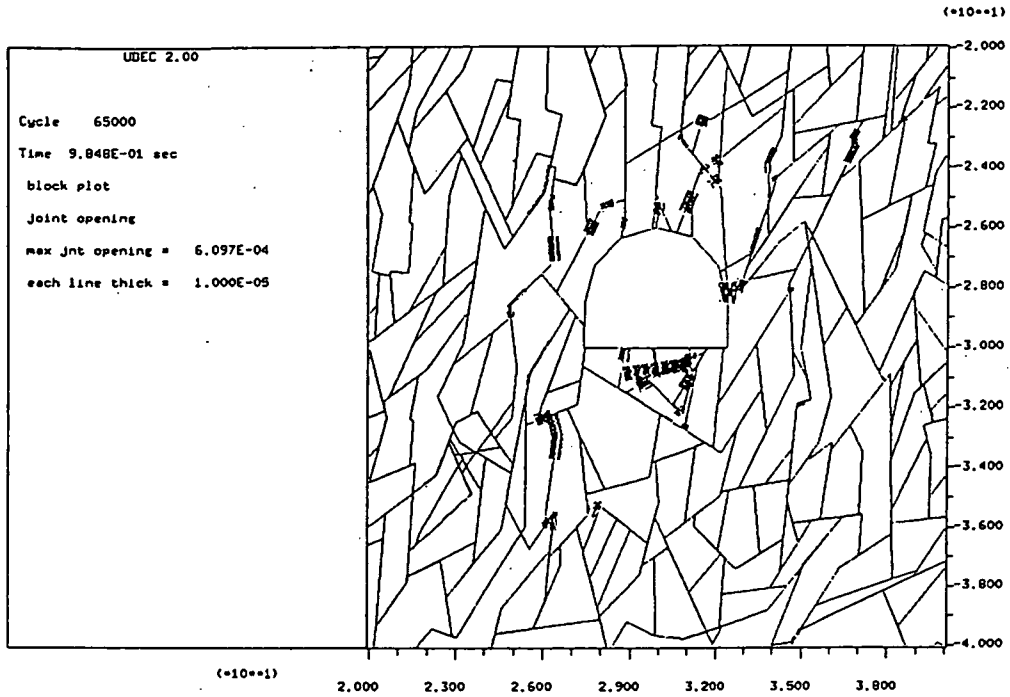


図4.7.5 坑道掘削後におけるき裂の開口量 (DEM)

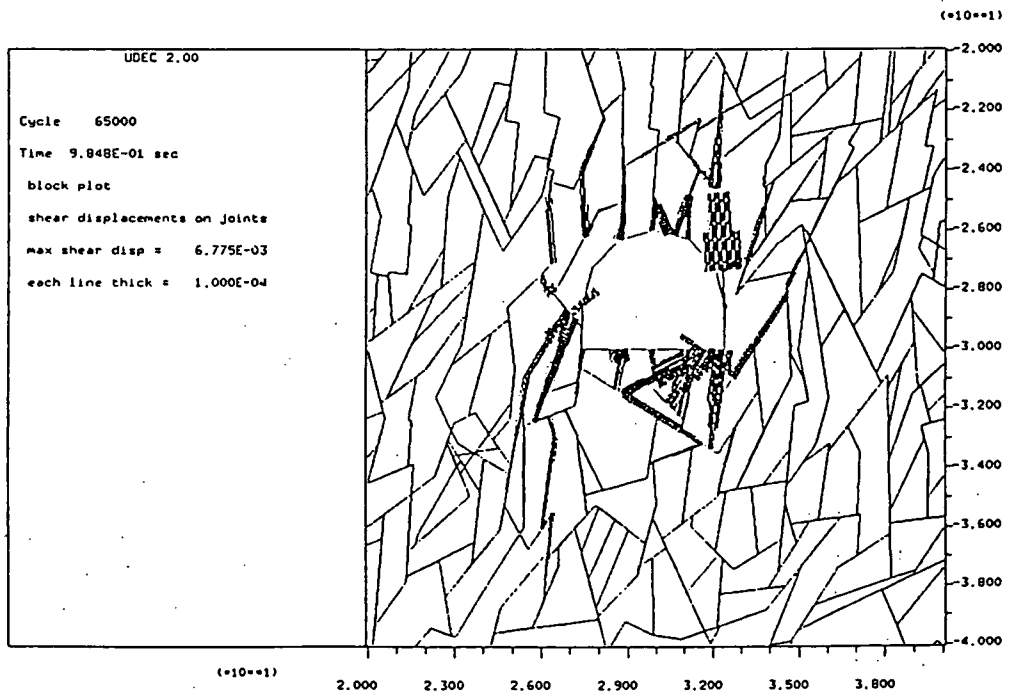


図4.7.6 坑道掘削後におけるき裂のせん断変位 (DEM)

4.7.5 全体工程のまとめ

これまでの実施計画をまとめて全体の工程表を表4.7.2に示す。ここには、3年間の間に以下の作業を配置した。すなわち、

- 1) 坑道掘削およびボーリング削孔
 - ・ 計測坑道掘削
 - ・ 試験坑道掘削
 - ・ 既存坑道からのボーリング
 - ・ 計測坑道からのボーリング
 - ・ 試験坑道からのボーリング
- 2) 事前調査
- 3) 事後調査
- 4) 計器の設置
- 5) 計測作業
- 6) 解析作業
- 7) 室内試験
- 8) 総合評価

表4.7.2 「新規坑道における掘削影響領域の評価」の実施工程表

	1995			1996			1997			1998	
	7月	10月	1月	4月	7月	10月	1月	4月	7月	10月	1月
	4月										
計測坑道掘削 試験坑道掘削 既存坑道から 計測坑道から 試験坑道から		□						□			
						□					
		□									
			□								
						□	□				
事前調査		□			□						
事後調査											
計器の設置						□			○	○	
計測											
解析											
室内試験											
総合評価											

参考文献

- 1) "Executive Summary and Conclusions", Proc. of NEA Workshop on Excavation Response in Geological Repositories for Radioactive Waste, pp.11-15, 1989.
- 2) "Äspö Hard Rock Laboratory, Test plan for ZEDEX-ZONE of Excavation Disturbance Experiment., Release 1.0", International Corporation Report 94-02, SKB, 1994.
- 3) "Detailed Measurements of Deformation in the Excavation Disturbed Zone", Int. J. Rock Mech, Min Sci & Geomech. Abstr. Vol.30, No7, pp.1511-1514, 1993.
- 4) "Grimsel Rock Laboratory / Investigation phase IV (1994-1996)", Joint International Committee Test Program, 21th Oct., 1994.
- 5) "花崗岩における原位置試験（昭和63年度）” 動燃事業団委託研究報告書、PNC SJ4380 89-002, pp.241～261, 1989.
- 6) "花崗岩における原位置試験（平成元年度）” 動燃事業団委託研究報告書、PNC SJ4380 90-002, pp.95～115, 1990.
- 7) "地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価（その1）”, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.343-348, 1994.
- 8) "神岡鉱山におけるジョイント標定と特性評価、ジョイント変位計の開発”, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.731-736, 1994.
- 9) 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 —平成3年度— 動力炉・核燃料開発事業団、PNC TN1410 92-081, pp.3-58, 1992.
- 10) 動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書「掘削影響試験のためのき裂性岩盤のモデル化に関する研究」平成6年3月、pp.1-97.
- 11) 釜石鉱山250mレベル坑道における割れ目特性の予察的調査、動力炉・核燃料開発事業団中部事業所、PNC TN7410 93-032, pp.13-42, 1993.
- 12) 掘削影響試験の計画立案に係わる補足試料、動力炉・核燃料開発事業団、12月、1994.

5. 本研究のまとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

5.1 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験

各種調査手法の掘削影響領域の評価に対する適用性の検討と、既存坑道周辺の掘削影響領域の特性と広がりデータの取得を目的とし、釜石鉱山250m坑道において各種原位置試験を実施するとともにボーリングコアを用いた室内試験を行った。

5.1.1 物理探査

5.1.1.1 P S 検層

P S 検層では、P波速度は深度0.75mを境にして、3.0km/secから6.0km/secに変化している。同様に、S波は深度0.5～0.75mを境にして、速度が1.5km/secから3.2～3.4km/secに変化している。この結果より、掘削影響領域の範囲は坑道壁面から深度0.5～0.75mまでであると判断することができる。

5.1.1.2 坑内弾性波探査（屈折法）

坑内弾性波探査（屈折法）では、深度0.5m付近を境にしてP波速度が3.0～5.0km/secから6.0km/secに変化しており、掘削影響領域が深度0.5m程度であると考えられる。

5.1.1.3 レーダ探査（反射法）

レーダ探査（反射法）の結果から推定される掘削影響領域は、深度約1.0m以下の領域であると考えられるが、その特性については特定できない。

5.1.1.4 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィの解析結果によると、坑道壁面近傍に弾性波速度が低下した領域が存在するが、その分布は不均質なものであり、掘削影響領域として深度を決定することは困難である。また、弾性波速度は最高6.5km/secに対して3.5km/secの領域が存在している。速度分布はボーリングコア（KDT-2孔）によるRQD値とほぼ対応している。

5.1.2 孔内載荷試験

孔内載荷試験によって得られる変形係数と弾性係数の値が、深度0.5m前後で最低になっていることと、相関係数が低い回帰直線の交点より求められた掘削影響領域と健岩部の境界面の深度が約1.0mであることから、掘削影響領域は深度0.5～1.0m程度までであると予測される。また、今回の試験結果からは顕著な異方性は認められなかった。

5.1.3 室内試験

超音波速度試験結果から、岩石のP波速度の平均が5.77km/secであり、S波速度の平均が3.16km/secであることがわかった。

一軸圧縮強度の平均は115.0MPa、静弾性係数の平均は60.1GPa、そして静ポアソン比の平均は0.267であった。

高圧三軸試験で得られた側方向応力と圧縮強さの関係より、内部摩擦角 $C=37\text{MPa}$ 、粘着力は $\phi=45^\circ$ を得た。

圧裂引張試験による引張強度の平均は、8.42MPaであった。

5.1.4 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ

原位置試験結果を基に今回の調査領域における掘削影響領域の範囲と、その影響の程度について以下の知見を得た。

5.1.4.1 掘削影響領域の特性と広がり

推定される掘削影響領域は、P S検層および坑内弾性波探査（屈折法）では深度0.5～0.75mまでであり、レーダ探査（反射法）では深度1.0m程度までである。弾性波トモグラフィでは特定できないが、孔内載荷試験からは深度0.5～1.0mまでが掘削影響領域であると考えられる。また、掘削による影響の程度については、弾性波速度の場合、約半分になっている。弾性波速度分布と既存坑道のき裂分布はほぼ対応している。

以上の結果をもとめると、各種調査から表5.1のような掘削影響領域の広がりが把握できた。

表5.1 各種調査手法による掘削影響領域の広がり

調査手法	坑壁からの距離(m)		
	0	0.5	1
PS検層	[Hatched area from 0 to approximately 0.8]		
坑内弾性波探査（屈折法）	[Hatched area from 0 to 0.5]		
レーダ探査（反射法）	[Hatched area from 0 to 1]		
弾性波トモグラフィ	特定できない		
孔内载荷試験	[Hatched area from 0 to 1]		
室内試験 RQD	特定できない		

5.1.4.2 調査手法の適用性の評価

PS検層による調査手法および評価方法は有効である。ただし、広範囲な探査にはボーリング孔を多数必要とする。

坑内弾性波探査（屈折法）も調査手法および評価方法は有効である。ただし、探査深度が測線長の10分の1から5分の1となる。

レーダ探査（反射法）は、ノイズの影響を除去することができれば有効な手法となる。ただし、その評価には、他の手法と組み合わせることが必要である。

弾性波トモグラフィは、岩盤内の深部を把握するための有効性には問題があると考えられる。

孔内载荷試験で掘削影響領域を捉えるためには、多数の測点を必要とする。

5.2 き裂物性試験および試験結果に基づくき裂の分類

個別要素法(DEM)などによりき裂を考慮した解析を行う場合、き裂の幾何学的な分布や力学特性を考慮することが必要となる。第3章において、岩芯鑑定などから得られたき裂の情報をもとに、き裂に関する種々の特性から、き裂分類の指標として充填物の幅、充填物の種類、および変質の程度を抽出した。また、室内物性試験を実施し、その結果から得られたき裂の力学特性とき裂分類の指標の関係を検討した。

その結果、以下のようなことがわかった。

1) 種々のき裂の力学特性と、き裂分類の指標の関係は、データのばらつきが大きく、高い相関性を伴った統一的な傾向は得られなかった。しかし、平均的な傾向から考えると、き裂の強度特性である、ピーク摩擦角 ϕ_j 、残留摩擦角 ϕ_r や、 JCS_0 、 JRC_0 と充填物の種類間に有意な関係が得られた。したがって、充填物の種類ごとに、解析の入力値を決めることができる。

2) 一方、き裂の変形特性である初期垂直剛性 K_{ni} およびせん断剛性 K_s については、いずれもき裂分類の指標との関係に一貫した傾向がなかった。したがって、解析に入力する際は、従来どおり平均値を用いることが考えられる。

3) 充填物の幅および変質の程度に関しては、限られた条件下で力学特性との相関性が得られたが、全体の傾向との整合に乏しかった。

4) これまでに行われたDEM解析では、入力値を1種類としている例が多く、特定の指標との関係を検討した例はほとんどない。原位置のき裂には充填物を含んだものが少なくない。今回、入力値を分類する指標として、充填物の種類が抽出されたことは意義のあることと考えられる。

ただし、今回の実験に用いた試料は、充填物の幅が10mm以下、変質の程度がFS,VW,WKのものがほとんどであった。

5) 今後の課題として、せん断試験時の垂直応力の範囲を広げることや、き裂の変形特性の分類が挙げられた。また、解析モデルの作成にあたっては、分類したき裂が原位置においてどのように分布しているかを検討する必要がある。特に、充填物の幅が10mmを上回るき裂や、変質の程度がMD,IL(中～強程度)のき裂の力学特性については把握していない。このようなき裂が、掘削する坑道の周辺に存在する場合は、実験による検討を要する。

5.3 「新規坑道における掘削影響領域の評価」 詳細計画案の検討

1) 各国の掘削試験の目的を参照し、以下の研究目的に沿った調査・試験計画を作成した。

- ・掘削影響領域の特性・広がりを計測するシステムを開発する。
- ・掘削影響領域の特性・広がりのデータを取得する。
- ・掘削影響領域に関連するプロセスの重要性・関連性を評価する。

2) 国内外の事例検討により、掘削影響に係わる事象を抽出し、本試験のコンセプトを確立した。本試験では研究対象領域を掘削損傷領域と応力再配分領域に限定した。

3) 対象岩盤のき裂状況、坑道掘削による応力再配分領域の広がり、計測計画等を配慮して、試験坑道のレイアウトを設定した。

4) 試験コンセプトに沿って、坑道掘削前後の調査・試験項目を抽出した。

5) 本研究の目的に対応して、計測目的を以下のように設定して、計測項目の抽出、機器配置を行った。

- ・掘削損傷領域の発生メカニズムとその特性を調べる。
- ・応力再配分領域の広がり・特性を調べる。
- ・事前計画・モデリング・解析のためのデータを与える。
- ・掘削工法の影響を調べる。

6) 坑道掘削、ボーリング掘削、事前事後調査、計測計画、解析計画、総合評価計画を配慮して全体工程を作成した。

釜石鉾山における
掘削影響領域の評価に関する研究
(平成6年度)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1995年3月

清水建設株式会社
株式会社 大林組

~~この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行なわないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理してください。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意してください。~~

~~This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.~~

~~本資料についての問い合わせは下記に願います。~~

~~〒509-51 岐阜県土岐市泉町寔林寺字園戸959-31~~

~~動力炉・核燃料開発事業団~~

~~東濃地科学センター~~

~~技術開発課~~

釜石鉱山における掘削影響領域の評価に関する研究（平成6年度）

堀田政國^{*}、 木下直人^{**}
吉岡尚也^{***}、 永久和正^{****}

要旨

深部岩盤に坑道などの空洞を掘削すると、空洞周辺は掘削の影響を受けると考えられる。本研究では、釜石原位置試験第2フェーズとして、釜石鉱山250mレベル坑道（土被り730m）において、深部岩盤の掘削影響領域の評価に関する研究を実施する。対象となる岩盤はき裂を含む栗橋花崗閃緑岩である。

既存坑道および試錐孔を利用した調査・試験を実施し、既存の調査手法の有効性を検討するとともに、既存坑道周辺の掘削影響領域の特性および広がり の把握を試みた。物理探査としては、PS検層、弾性波探査（屈折法）、レーダー探査（反射法）、弾性波トモグラフィー探査を実施し、坑道周辺50cmまで掘削損傷領域であることが確認された。また、試錐孔内で実施された孔内載荷試験結果から掘削影響領域は、深度0.5m～1.0m程度であると評価された。本調査・試験を通じ、既存の調査手法の調査限界ならびに今後の機器改良の必要性が指摘された。

さらに、岩芯鑑定などから得られたき裂情報をもとに、き裂分類の指標として充填物の幅、充填物の種類、および変質の程度を抽出した。また、これら3つの分類指標から、き裂を10グループに分け、室内物性試験を実施することにより、き裂性岩盤のモデル化手法の確立の上での基礎的情報を取得した。

これらの結果に基づき、国内外の掘削影響試験の事例検討も踏まえて、平成7年度から実施予定の「新規坑道掘削にともなう掘削影響領域の評価」の詳細計画案を作成した。

本報告書は、清水建設株式会社と株式会社大林組が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：060D0245

事業団担当部課および担当者：環境技術開発推進本部地層科学研究グループ 武田精悦

※：清水建設株式会社電力・エネルギー本部技術第二部

※※：清水建設株式会社技術研究所地下技術研究部

※※※：株式会社大林組技術研究所土木第四研究室

※※※※：株式会社大林組土木技術本部技術第二部

Study on Evaluation of Excavation Disturbed Zone at Kamaishi Mine

M.Horita* N.Kinoshita**
N.Yoshioka*** K.Nagahisa****

Abstract

The rock around a cavern like a drift will be effected by the excavation of it. In this study, the excavation disturbed zone (EDZ) in deep rock is evaluated in the 250m-level drift at the Kamaishi Mine for the Kamaishi In-situ Experiments (Phase II). The rock at the site is Kurihashi grano-diolite with some joints.

The characteristics and extent of EDZ around an existing drift are evaluated by means of several investigation techniques and tests in the drift and boreholes. PS logings, elastic wave exploration (a deflection method), radar exploration (a reflection method), and elastic wave tomography are performed in order to test physical exploration methods. These investigation implied an EDZ of 50 cm exists around the existing 250m-level drift. The result of borehole jack test also implied 50 cm to 1m of EDZ around the drift. The limitation of the investigation methods and the necessity of improvement on the equipments are pointed out through these tests.

The width and kind of filling, and the degree of alternation are selected for the indices to classify joints based upon the joint information obtained from core inspection and so on. Joints are classified into 10 groups with these 3 indices, and are subjected to property tests in a laboratory. The classification and the property tests give fundamental information to build modelling methods of discontinuous rock.

"Evaluation of EDZ with excavation of a new drift" is planned in detail based on the above-mentioned results with some available information on excavation disturbance experiments performed in a granitic rock in Sweden, Canada, Switzerland, and Japan.

This work performed by Shimizu Corporation and Obayashi Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison:Geosciences Research Program,Radioactive Waste Management Project:Seietsu Takeda

- * : Shimizu Corporation, Power & Energy Project division
- ** : Shimizu Corporation, Technical Research Institute
- *** : Obayashi Corporation, Technical Research Institute
- **** : Obayashi Corporation, Civil Engineering Technical Division

釜石鉱山における掘削影響領域の評価に関する研究（平成6年度）

担当者一覧表

	清水建設株式会社	株式会社大林組
実施責任者	飯塚友之助	村井喜一
実施担当者	堀田政國	吉岡尚也
研究業務担当者	木下直人	三上哲司
	中島 均	木梨秀雄
		永久和正
		玉野 達
		田中達也

釜石鉱山における掘削影響領域の評価に関する研究（平成6年度）

目 次

1. はじめに	1-1
2. 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験	2-1
2.1 調査・試験概要	2-1
2.2 物理探査	2-3
2.2.1 坑道壁面測量	2-3
2.2.2 P S 検層	2-5
2.2.3 坑内弾性波探査（屈折法）	2-21
2.2.4 レーダー探査（反射法）	2-29
2.2.5 弾性波トモグラフィ	2-36
2.3 孔内載荷試験	2-54
2.4 室内試験	2-72
2.4.1 室内試験用供試体	2-72
2.4.2 弾性波速度試験	2-73
2.4.3 一軸圧縮試験	2-76
2.4.4 高圧三軸試験	2-78
2.4.5 圧裂試験	2-81
2.4.6 室内試験のまとめ	2-83
2.5 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ	2-84
2.5.1 掘削影響領域の特性と広がり	2-84
2.5.2 調査手法の適用性の評価	2-93
参考文献	2-95
3. き裂物性試験および試験結果に基づくき裂の分類	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.2 き裂の分類	3-3
3.2.1 ボーリングコアからのき裂の抽出	3-3
3.2.2 き裂分類の指標の抽出	3-4
3.2.3 き裂分類の指標の選択	3-23

3.2.4	き裂試料の選定条件の決定	3-25
3.3	き裂の物性試験	3-31
3.3.1	試験方法	3-31
3.3.2	ラフネス測定結果	3-39
3.3.3	垂直載荷試験	3-47
3.3.4	せん断試験結果	3-50
3.3.5	き裂の特性試験結果	3-57
3.3.6	JRC ₀ の算出	3-60
3.4	き裂分類の指標と力学特性	3-63
3.4.1	き裂分類の指標と変形特性	3-63
3.4.2	き裂分類の指標と強度特性	3-82
3.4.3	き裂分類の指標とJCS ₀ ・JRC ₀	3-100
3.4.4	き裂に関するDEM解析への入力値の決定	3-125
3.5	まとめ	3-133
3.5.1	主な成果	3-133
3.5.2	今後の課題	3-135
	参考文献	3-136
4.	「新規坑道における掘削影響領域の評価」詳細実施計画案の検討	4-1
4.1	掘削影響試験の目的と実施計画作成の手順	4-1
4.1.1	掘削影響試験の目的	4-1
4.1.2	実施計画作成の手順	4-2
4.2	各国の掘削影響領域の捉え方	4-5
4.2.1	スウェーデン (HRL)	4-5
4.2.2	カナダ (URL)	4-10
4.2.3	スイス (GTS)	4-14
4.2.4	釜石原位置試験における掘削影響試験	4-17
4.2.5	神岡鉱山における掘削影響試験	4-21
4.3	コンセプトの確立	4-25
4.4	試験坑道のレイアウトの設定	4-28
4.4.1	試験坑道の大きさ	4-28
4.4.2	試験坑道の方向	4-29
4.4.3	計測坑道と試験坑道の離間距離	4-29
4.4.4	試験坑道の長さ	4-29

4.4.5	試験坑道位置の選択	4-31
4.4.6	掘削工法の選択	4-31
4.5	計測項目の抽出と配置計画	4-37
4.5.1	目的	4-37
4.5.2	計測方針	4-37
4.5.3	掘削損傷領域の調査	4-39
4.5.4	応力最配分領域の調査	4-43
4.5.5	事前計画・モデリング・解析のための調査	4-57
4.5.6	掘削工法の影響を調べる調査	4-57
4.5.7	計測配置のまとめ	4-58
4.5.8	期待される成果	4-58
4.6	掘削前後の調査・試験項目の抽出	4-64
4.6.1	事前調査項目の抽出	4-64
4.6.2	事後調査項目の抽出	4-73
4.7	実施計画の作成	4-80
4.7.1	計測坑道掘削手法の選定と掘削計画	4-80
4.7.2	試験坑道掘削手法の選定と掘削計画	4-80
4.7.3	調査試験用ボーリングの掘削計画	4-81
4.7.4	解析計画	4-85
4.7.5	全体工程のまとめ	4-91
	参考文献	4-93
5.	まとめ	5-1
5.1	既存坑道周辺の調査・試験と室内試験	5-1
5.1.1	物理探査	5-1
5.1.2	孔内載荷試験	5-2
5.1.3	室内試験	5-2
5.1.4	既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ	5-2
5.2	き裂物性試験および結果に基づくき裂の分類	5-4
5.3	「新規坑道における掘削影響領域の評価」詳細計画案の検討	5-5

目 次

図2.1.1	釜石鉱山の概要と調査位置レイアウト	2-2
図2.2.1	探査地点配置図	2-4
図2.2.2	P S 検層フローチャート	2-6
図2.2.3	P S 検層方法の概念図	2-7
図2.2.4	P S 検層記録波形 (KDT-1 : P 波)	2-12
図2.2.5	P S 検層記録波形 (KDT-1 : S 波)	2-13
図2.2.6	P S 検層記録波形 (KDT-2 : P 波)	2-14
図2.2.7	P S 検層記録波形 (KDT-2 : S 波)	2-15
図2.2.8	P S 検層走時曲線 (KDT-1)	2-16
図2.2.9	P S 検層走時曲線 (KDT-2)	2-17
図2.2.10	P 波速度と S 波速度の関係	2-19
図2.2.11	各種の岩石が持つ P 波と S 波の速度	2-20
図2.2.12	坑内弾性波 (屈折法) 測定方法の概念と起振点位置	2-21
図2.2.13	壁面への受振器設置方法	2-22
図2.2.14	はぎとり法	2-23
図2.2.15	坑内弾性波探査 (屈折法) における記録波形 (発振 : ST+5.5, 受振 : ST+11.5 ~ 23.0)	2-26
図2.2.16	坑内弾性波探査 (屈折法) 結果	2-27
図2.2.17	坑道壁面におけるき裂調査結果と弾性波伝播速度分布	2-28
図2.2.18	電磁波レーダ探査装置の構成	2-30
図2.2.19	レーダ探査の測定方法の概念と断面画像例	2-30
図2.2.20	反射波の強度と色彩	2-31
図2.2.21	反射波の映像特性	2-32
図2.2.22	各種岩石・鉱物の比誘電率	2-33
図2.2.23	レーダ探査 (反射法) 結果	2-34
図2.2.24	送信波形と地中入射時の受信波形の関係	2-35
図2.2.25	弾性波トモグラフィ測定点配置図	2-37
図2.2.26	弾性波トモグラフィ波線図	2-38
図2.2.27	弾性波トモグラフィ測定方法及び孔内水保持方法の概念	2-39
図2.2.28	トモグラフィ解析のフロー	2-41

図2.2.29	波線（パス）とブロックのモデル図	2-43
図2.2.30	トモグラフィにおけるインバージョン法	2-43
図2.2.31	ハイドロフォンによる記録波形	2-45
図2.2.32	地震計による記録波形	2-46
図2.2.33	弾性波トモグラフィ解析結果 （KDT-2孔発振・KDT-1孔受振の片走時による解析）	2-47
図2.2.34	弾性波トモグラフィ解析結果（往復走時による解析）	2-48
図2.2.35	片走時解析で用いた波線（KDT-2孔発振・KDT-1孔受振）	2-49
図2.2.36	往復走時解析で用いた波線	2-50
図2.2.37	KDT-1孔およびKDT-2孔のボーリングコアにおける き裂分布とRQD値	2-53
図2.3.1	高圧型KKTシステム	2-55
図2.3.2	KKT荷重状態	2-55
図2.3.3	KKTゾンデ回転角とき裂がなす角度の概念図	2-55
図2.3.4	孔内荷重パターン	2-58
図2.3.5	KKT荷重・変位曲線例	2-59
図2.3.6	KKT荷重・変位曲線	2-60
図2.3.7	孔内荷重試験結果（KDK-1）	2-62
図2.3.8	孔内荷重試験結果（KDK-2）	2-63
図2.3.9	孔内荷重試験結果（KDK-3）	2-64
図2.3.10	孔内荷重試験結果（KDK-1～3）	2-66
図2.3.11	孔内荷重試験結果（KDK-1～3, KM-2）	2-67
図2.3.12	掘削影響領域が存在する場合の深度と変形係数の関係	2-68
図2.3.13	孔内荷重試験結果からの掘削影響領域の算出（D1～2）	2-69
図2.3.14	孔内荷重試験結果からの掘削影響領域の算出（E1～3）	2-70
図2.4.1	弾性波速度測定実施状況	2-74
図2.4.2	一軸圧縮試験実施状況	2-76
図2.4.3	高圧三軸試験実施状況	2-79
図2.4.4	破壊包絡線図	2-80
図2.4.5	圧裂試験実施状況	2-81
図2.5.1	水圧計測用ボーリングKDH-1及びKDH-2の配置図	2-86
図2.5.2	KDH-1孔とKDH-2孔の水圧分布	2-90
図2.5.3	間隙水圧分布の対数近似（KDH-1とKDH-2のデータを使用）	2-92
図3.1.1	き裂分類の流れ	3-2

図3.2.1	250mレベル坑道におけるボーリング孔の配置	3-3
図3.2.2	坑道内壁面およびボーリング孔内のき裂の極密度コンター	3-5
図3.2.3	分離するき裂と分離しないき裂の極密度コンター	3-5
図3.2.4	充填物の種類のヒストグラム	3-6
図3.2.5	変質程度によるヒストグラム	3-7
図3.2.6	充填物の幅によるヒストグラム	3-9
図3.2.7	粗さによるヒストグラム	3-10
図3.2.8	条線およびせん断変位の有無と粗さ	3-11
図3.2.9	き裂パターン	3-12
図3.2.10	き裂パターンのヒストグラム	3-13
図3.2.11	き裂の端形状のパターン	3-14
図3.2.12	充填物の幅と充填物の種類の関係	3-27
図3.3.1	き裂の物性試験の流れ	3-33
図3.3.2	ラフネス測定装置の概要	3-34
図3.3.3	簡易せん断試験装置の概要	3-34
図3.3.4	せん断試験前後の垂直応力～変位関係	3-35
図3.3.5	シュミットハンマー（軽量コンクリート用）外観	3-36
図3.3.6	シュミットハンマーの反発度と一軸圧縮強度の関係	3-37
図3.3.7	テイルト試験器	3-37
図3.3.8	せん断試験の前後におけるき裂面の3次元形状	3-41
図3.3.9	せん断試験の前後のせん断方向に対する凹凸高さの分布	3-42
図3.3.10	せん断試験の前後における凹凸高さのヒストグラム	3-43
図3.3.11	Z_2 の算出方法	3-44
図3.3.12	き裂の表面積の算出	3-44
図3.3.13	測定間隔とき裂の表面積の変化の関係	3-45
図3.3.14	せん断前後の Z_{2s} 、および Z_{2d} の比較	3-45
図3.3.15	せん断前後の JRC_{Z_s} 、および JRC_{Z_d} の比較	3-46
図3.3.16	せん断前後の θ の比較	3-46
図3.3.17	垂直応力～変位関係	3-48
図3.3.18	き裂の垂直剛性の算出	3-48
図3.3.19	せん断応力～せん断変位関係および ダイレーション～せん断変位関係	3-54
図3.3.20	せん断応力～せん断変位関係および ダイレーション～せん断変位関係	3-55

図3.3.21	ピーク摩擦角 ϕ_j および粘着力 c_j の算出	3-56
図3.3.22	ピークせん断強度の既存データとの比較	3-56
図3.3.23	き裂の特性試験のデータシート	3-58
図3.3.24	JRC_0 と Z_2 の関係	3-62
図3.3.25	き裂面の粗さの指標 θ と JRC_0 の関係	3-62
図3.4.1	充填物の幅と垂直剛性の関係	3-64
図3.4.2(a)	充填物の幅と垂直剛性 (B-VW,FS) の関係	3-65
図3.4.2(b)	充填物の幅と垂直剛性 (C-IL,MD,WK) の関係	3-66
図3.4.2(c)	充填物の幅と垂直剛性 (C-VW,FS) の関係	3-66
図3.4.3	充填物の種類と垂直剛性の関係	3-67
図3.4.4(a)	充填物の種類と垂直剛性 (a1-VW,FS) の関係	3-67
図3.4.4(b)	充填物の種類と垂直剛性 (a2VW,FS) の関係	3-68
図3.4.4(c)	充填物の種類と垂直剛性 (a3,a4,a5-IL,MD,WK) の関係	3-68
図3.4.4(d)	充填物の種類と垂直剛性 (a3,a4,a5-VW,FS) の関係	3-69
図3.4.5	変質の程度と垂直剛性の関係	3-69
図3.4.6(a)	変質の程度と垂直剛性 (a3,a4-B) の関係	3-70
図3.4.7(b)	変質の程度と垂直剛性 (a4-A) の関係	3-70
図3.4.7(c)	変質の程度と垂直剛性 (a1-C) の関係	3-71
図3.4.7(d)	変質の程度と垂直剛性 (a1-D) の関係	3-71
図3.4.7(e)	変質の程度と垂直剛性 (a2-C) の関係	3-74
図3.4.7 (a)	充填物の幅とせん断剛性 K_{s1} の関係	3-74
図3.4.7 (b)	充填物の幅とせん断剛性 K_{s2} の関係	3-74
図3.4.7 (c)	充填物の幅とせん断剛性 K_{s3} の関係	3-74
図3.4.8 (a)	充填物の幅とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (B-VW,FS)	3-75
図3.4.8 (b)	充填物の幅とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (C-IL,MD,WK)	3-75
図3.4.8 (c)	充填物の幅とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (C-VW,FS)	3-75
図3.4.9 (a)	充填物の種類とせん断剛性 K_{s1} の関係	3-76
図3.4.9 (b)	充填物の種類とせん断剛性 K_{s2} の関係	3-76
図3.4.9 (c)	充填物の種類とせん断剛性 K_{s3} の関係	3-76
図3.4.10 (a)	充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a1-VW,FS)	3-77
図3.4.10 (b)	充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a2-VW,FS)	3-77

図3.4.10 (c) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a3, a4, a5-IL, MD, WK) ……	3-78
図3.4.10 (d) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a3, a4, a5-VW, FS) ……	3-78
図3.4.11 (a) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1} の関係 ……	3-79
図3.4.11 (b) 変質の程度とせん断剛性 K_{s2} の関係 ……	3-79
図3.4.11 (c) 変質の程度とせん断剛性 K_{s3} の関係 ……	3-79
図3.4.12 (a) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a1-C) ……	3-80
図3.4.12 (b) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a1-D) ……	3-80
図3.4.12 (c) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a2-C) ……	3-80
図3.4.12 (d) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a4-A) ……	3-81
図3.4.12 (e) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a3, a4-B) ……	3-81
図3.4.13 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j の関係 ……	3-83
図3.4.14 (a) 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j (B-VW, FS)の関係 ……	3-84
図3.4.14 (b) 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j (C-IL, MD, WK)の関係 ……	3-84
図3.4.14 (c) 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j (C-VW, FS)の関係 ……	3-84
図3.4.15 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j の関係 ……	3-85
図3.4.16 (a) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a1-VW, FS)の関係 ……	3-85
図3.4.16 (b) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a2-VW, FS)の関係 ……	3-86
図3.4.16 (c) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a3, a4, a5-IL, MD, WK)の関係 ……	3-86
図3.4.16 (d) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a3, a4, a5-VW, FS)の関係	3-86
図3.4.17 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j の関係 ……	3-87
図3.4.18 (a) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a1-C)の関係 ……	3-87
図3.4.18 (b) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a1-D)の関係 ……	3-88
図3.4.18 (c) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a2-C)の関係 ……	3-88
図3.4.18 (d) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a3-B)の関係 ……	3-89
図3.4.18 (e) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a4-A)の関係 ……	3-89
図3.4.19 (a) 充填物の幅、種類とピーク摩擦角 ϕ_j の関係 ……	3-90
図3.4.19 (b) 充填物の種類、幅とピーク摩擦角 ϕ_j の関係 ……	3-90
図3.3.20 (a) 粘着力 c_j と充填物の幅の関係 ……	3-92
図3.3.20 (b) 粘着力 c_j と充填物の種類の関係 ……	3-92
図3.3.20 (c) 粘着力 c_j と変質の程度の関係 ……	3-92
図3.4.21 充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係 ……	3-94

図3.4.22 (a)	充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (B-VW,FS)	3-94
図3.4.22 (b)	充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (C-IL,MD,WK)	3-95
図3.4.22 (c)	充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (C-VW,FS)	3-95
図3.4.23	充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係	3-96
図3.4.24 (a)	充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a1-VW,FS)	3-96
図3.4.24 (b)	充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a2-VW,FS)	3-97
図3.4.24 (c)	充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4, a5 - IL,MD, WK)	3-97
図3.4.24 (d)	充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4, a5 - VW,FS)	3-97
図3.4.25	変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係	3-98
図3.4.26 (a)	変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a1 - C)	3-98
図3.4.26 (b)	変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a1 - D)	3-98
図3.4.26 (c)	変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a2 - D)	3-99
図3.4.26 (d)	変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4, a5 - A)	3-99
図3.4.26 (e)	変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4, a5 - B)	3-99
図3.4.27 (a)	充填物の幅と JCS_0 の関係	3-102
図3.4.27 (b)	充填物の幅と JCS_0 の関係 (B-VW,FS)	3-102
図3.4.27 (c)	充填物の幅と JCS_0 の関係 (C-IL,MD,WK)	3-103
図3.4.27 (d)	充填物の幅と JCS_0 の関係 (C-VW,FS)	3-103
図3.4.28	充填物の種類と JCS_0 の関係	3-104
図3.4.29 (a)	充填物の種類と JCS_0 の関係 (a1-VW,FS)	3-104
図3.4.29 (b)	充填物の種類と JCS_0 の関係 (a2-VW,FS)	3-104
図3.4.29 (c)	充填物の種類と JCS_0 の関係 (a3,a4, a5 - IL,MD, WK)	3-105
図3.4.29 (d)	充填物の種類と JCS_0 の関係 (a3,a4, a5 - VW,FS)	3-105
図3.4.30	変質の程度と JCS_0 の関係	3-106
図3.4.31 (a)	変質の程度と JCS_0 の関係 (a1 - C)	3-106
図3.4.31 (b)	変質の程度と JCS_0 の関係 (a1 -D)	3-107
図3.4.31 (c)	変質の程度と JCS_0 の関係 (a2 -C)	3-107
図3.4.31 (d)	変質の程度と JCS_0 の関係 (a3,a4 - B)	3-108
図3.4.31 (e)	変質の程度と JCS_0 の関係 (a4 - A)	3-108
図3.4.32 (a)	充填物の幅、種類と JCS_0 の関係	3-109
図3.4.32 (b)	充填物の幅、変質の程度と JCS_0 の関係	3-109
図3.4.32 (c)	充填物の種類、変質の程度と JCS_0 の関係	3-109
図3.4.33 (a)	充填物の幅と σ_c / JCS_0 の関係	3-110

図3.4.33 (b)	充填物の種類と σ_c / JCS_0 の関係	3-110
図3.4.33 (c)	変質の程度と σ_c / JCS_0 の関係	3-110
図3.4.34 (a)	充填物の幅と JRC_{01} の関係	3-113
図3.4.34 (b)	充填物の幅と JRC_{02} の関係	3-113
図3.4.34 (c)	充填物の幅と JRC_{03} の関係	3-114
図3.4.34 (d)	充填物の幅と $AV.JRC_0$ の関係	3-114
図3.4.35 (a)	充填物の幅と JRC_0 の関係 (B-VW,FS)	3-115
図3.4.35 (b)	充填物の幅と JRC_0 の関係 (C-IL,MD,WK)	3-115
図3.4.35 (c)	充填物の幅と JRC_0 の関係 (C-VW,FS)	3-115
図3.4.36 (a)	充填物の種類と JRC_{01} の関係	3-116
図3.4.36 (b)	充填物の種類と JRC_{02} の関係	3-116
図3.4.36 (c)	充填物の種類と JRC_{03} の関係	3-117
図3.4.36 (d)	充填物の種類と $AV.JRC_0$ の関係	3-117
図3.4.37 (a)	充填物の種類と JRC_0 の関係 (a3,a4,a5 - IL,MD,WK)	3-118
図3.4.37 (b)	充填物の種類と JRC_0 の関係 (a3,a4,a5 - VW,FS)	3-118
図3.4.37 (c)	充填物の種類と JRC_0 の関係 (a1 - VW,FS)	3-119
図3.4.37 (d)	充填物の種類と JRC_0 の関係 (a2 - VW,FS)	3-119
図3.4.38 (a)	変質の程度と JRC_{01} の関係	3-120
図3.4.38 (b)	変質の程度と JRC_{02} の関係	3-120
図3.4.38 (c)	変質の程度と JRC_{03} の関係	3-121
図3.4.38 (d)	変質の程度と $AV.JRC_0$ の関係	3-121
図3.4.39 (a)	変質の程度と JRC_0 の関係 (a1 - C)	3-122
図3.4.39 (b)	変質の程度と JRC_0 の関係 (a1 - D)	3-122
図3.4.39 (c)	変質の程度と JRC_0 の関係 (a2 - C)	3-123
図3.4.39 (d)	変質の程度と JRC_0 の関係 (a3,a4 - B)	3-123
図3.4.39 (e)	変質の程度と JRC_0 の関係 (a4 - A)	3-124
図3.4.40(a)	充填物の種類によるせん断強度の予測 (Mohr-Coulombの条件)	3-128
図3.4.40(b)	充填物の種類によるせん断強度の予測 (Barton-Bandisモデル)	3-128
図3.4.41(a)	充填物の幅によるせん断強度の予測 (Mohr-Coulombの条件)	3-129
図3.4.41(b)	充填物の幅によるせん断強度の予測 (Barton-Bandisモデル)	3-129

図3.4.42(a)	変質の程度によるせん断強度の予測 (Mohr-Coulombの条件) ……	3-130
図3.4.42(b)	変質の程度によるせん断強度の予測 (Barton-Bandisモデル) ……	3-130
図3.4.43(a)	充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測 ……	3-131
図3.4.43(b)	充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測 ……	3-131
図3.4.43(c)	充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測 ……	3-132
図3.4.43(d)	充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測 ……	3-132
図4.1.1	実施計画作成フロー ……	4-3
図4.2.1	HRL (スウェーデン) の概観 ……	4-6
図4.2.2	HRLの掘削影響試験対象域 (深度300m～460mレベル) ……	4-6
図4.2.3	HRLの掘削計画と計測用ボーリング配置 (平面図) ……	4-7
図4.2.4	HLWの計測用ボーリング配置 (断面図) ……	4-7
図4.2.5	URL (カナダ) の概観 ……	4-12
図4.2.6	URLの掘削影響試験における計測配置 ……	4-13
図4.2.7	釜石原位置試験KD-88坑における掘削影響試験 ……	4-18
図4.2.8	釜石原位置試験KD-89坑における掘削影響試験 ……	4-19
図4.2.9	神岡鉱山における掘削影響試験 (その1) ……	4-22
図4.2.10	神岡鉱山における掘削影響試験 (その2) ……	4-23
図4.3.1	掘削影響に関連する事象 ……	4-26
図4.4.1	試験坑道断面 ……	4-28
図4.4.2	計測坑道断面 ……	4-28
図4.4.3	試験坑道ならびに計測坑道の基本レイアウト ……	4-30
図4.4.4	試験坑道候補地点 ……	4-33
図4.4.5	候補地点のき裂状況 (250mレベル坑道壁面の割れ目分布) ……	4-34
図4.5.1	掘削影響に係わる事象と調査・計測項目との対応 ……	4-38
図4.5.2	AE計測計配置 ……	4-40
図4.5.3	振動計測配置 ……	4-42
図4.5.4	計器配置図 (A-A断面) ……	4-46
図4.5.5	変位計配置図 (A-A断面) ……	4-47
図4.5.6	変位計配置図 (B-B断面) ……	4-49
図4.5.7	岩盤内ひずみ計配置図 (A-A断面) ……	4-51
図4.5.8	岩盤内ひずみ計配置図 (B-B断面) ……	4-51
図4.5.9	き裂変位計配置 (A-A断面) ……	4-53

図4.5.10	Pac-EX計配置 (A-A断面)	4-54
図4.5.11	坑壁面き裂変位計配置 (A-A断面)	4-56
図4.5.12	計測断面配置図	4-59
図4.5.13	計器配置図 (A-A断面)	4-60
図4.5.14	計器配置図 (B-B断面)	4-61
図4.6.1	詳細試験計画のための事前調査.....	4-65
図4.6.2	掘削前後の状態比較のための事前調査.....	4-66
図4.6.3	計測手法・調査手法の試行試験のためのボーリング配置のまとめ	4-68
図4.6.4	事前調査用ボーリング配置のまとめ.....	4-72
図4.6.5	掘削前後の状態比較のための事後調査.....	4-74
図4.6.6	新規坑道周辺の後事後調査.....	4-75
図4.6.7	事前調査用ボーリング配置のまとめ.....	4-79
図4.7.1	坑道掘削後における岩盤の変位状況 (FEM)	4-88
図4.7.2	坑道掘削後における岩盤の応力状態 (FEM)	4-88
図4.7.3	坑道掘削後における岩盤の変位状態 (DEM)	4-89
図4.7.4	坑道掘削後における岩盤の応力状態 (DEM)	4-89
図4.7.5	坑道掘削後におけるき裂の開口量 (DEM)	4-90
図4.7.6	坑道掘削後におけるき裂のせん断変位 (DEM)	4-90

表目次

表2.1.1	調査項目等一覧表	2-1
表2.1.2	室内試験項目一覧表	2-1
表2.2.1	測量機械仕様	2-3
表2.2.2	主な機器仕様一覧表	2-8
表2.2.3	P S 検層で観測された波の周波数	2-10
表2.2.4	KDT-1・2孔のP波・S波速度区分	2-11
表2.2.5	動弾性常数計算結果	2-11
表2.2.6	主な機器仕様一覧表	2-22
表2.2.7	主な機器仕様一覧表	2-31
表2.2.8	弾性波トモグラフィ機器仕様	2-40
表2.3.1	各種KKT一覧表	2-54
表2.3.2	今回の試験で用いたKKTの仕様	2-54
表2.3.3	孔内載荷試験結果	2-61
表2.3.4	載荷位置の変更箇所	2-65
表2.3.5	変形係数および弾性係数の深度分布から求めた掘削影響領域	2-71
表2.4.1	室内試験供試体	2-72
表2.4.2	弾性波速度試験装置仕様	2-73
表2.4.3	弾性波速度試験結果	2-74
表2.4.4	V_P , V_S の最大値、最小値および平均値	2-74
表2.4.5	弾性波速度の既存データ	2-75
表2.4.6	一軸圧縮試験装置仕様	2-76
表2.3.7	一軸圧縮試験結果	2-77
表2.4.8	一軸圧縮試験結果の既存データ	2-77
表2.4.9	高圧三軸装置仕様	2-78
表2.4.10	高圧三軸試験結果	2-79
表2.4.11	三軸圧縮試験結果の既存データ	2-80
表2.3.12	圧裂試験結果	2-81
表2.4.13	圧裂試験結果の既存データ	2-82
表2.4.14	室内試験結果一覧	2-83
表2.5.1	間隙水圧観測用パッカーの設置位置と孔内状況及び水圧	2-87

表2.5.2	水圧対数近似のための集計表	2-91
表3.2.1(a)	き裂情報の一覧 (き裂群 I)	3-15
表3.2.1(b)	き裂情報の一覧 (き裂群 I')	3-16
表3.2.1(c)	き裂情報の一覧 (き裂群 II)	3-17
表3.2.1(d)	き裂情報の一覧 (き裂群 II)	3-18
表3.2.1(e)	き裂情報の一覧 (き裂群 II')	3-19
表3.2.1(f)	き裂情報の一覧 (き裂群 III)	3-20
表3.2.1(g)	き裂情報の一覧 (その他)	3-21
表3.2.1(h)	き裂情報の一覧 (その他)	3-22
表3.2.2	充填物の種類ごとの充填物の幅	3-9
表3.2.3	き裂の端形状	3-14
表3.2.4	神岡鉱山におけるき裂特性	3-23
表3.2.5	分類指標の組み合わせと頻度	3-27
表3.2.6	A 案・A' 案・A" 案	3-28
表3.2.7	B 案・B' 案・B" 案	3-29
表3.2.8	採取した試料の条件および個数	3-30
表3.2.9	採取した試料の一覧	3-30
表3.3.1	き裂の物性試験に使用する機器の性能一覧	3-38
表3.3.2	ラフネス測定結果	3-40
表3.3.3	実験から得られた K_{ni} および K_{n5-10}	3-49
表3.3.4	種々のき裂の K_{ni}	3-49
表3.3.5	き裂のせん断試験結果一覧	3-52
表3.3.6	種々のき裂の K_s	3-53
表3.3.7	き裂の特性試験の結果	3-59
表3.3.8	せん断試験結果から求めた JRC_0	3-61
表3.4.1	充填物の種類ごとの入力値	3-126
表3.4.2	V _{mi} の計算に用いる定数	3-127
表3.5.1	き裂の分類指標と力学特性の関係	3-134
表4.2.1	HRLの計測用ボーリングの目的と仕様	4-8
表4.2.2	HRLにおける掘削影響試験のまとめ	4-11
表4.2.3	URLにおける掘削影響試験のまとめ	4-15
表4.2.4	グリムセルにおける掘削影響試験のまとめ	4-16
表4.2.5	釜石鉱山における掘削影響試験のまとめ	4-20
表4.2.6	神岡鉱山における掘削影響試験のまとめ	4-24

表4.4.1	割れ目のチェックリスト（その1）	4-35
表4.4.2	割れ目のチェックリスト（その2）	4-36
表4.5.1	計測の種類と数量	4-62
表4.5.2	計測用ボーリング一覧表	4-63
表4.6.1	事前調査一覧表	4-70
表4.6.2	事前調査ボーリング一覧表	4-71
表4.6.3	事後調査一覧表	4-77
表4.6.4	事後調査ボーリング一覧表	4-78
表4.7.1	解析計画	4-86
表4.7.2	「新規坑道における掘削影響領域の評価」のスケジュール表	4-92
表5.1	各種調査手法による掘削影響領域の広がり	5-3

1. はじめに

深部岩盤に坑道などの空洞を掘削すると、空洞周辺は掘削の影響を受けると考えられる。本研究では、釜石原位置試験第2フェーズとして、釜石鉱山250mレベル（土被り730m）において、深部岩盤の掘削影響領域の評価に関する研究を実施する。対象となる岩盤は、栗橋花崗閃緑岩である。既存の坑道および試験孔を利用した調査・試験を実施し、既存の調査手法の有効性を検討するとともに、既存坑道周辺の掘削影響領域の特性および広がり の把握を試みる。また、コアを用いた室内物性試験を実施している。さらに、き裂の力学試験および特性試験を実施し、その結果に基づき、き裂を分類することにより、き裂性岩盤のモデル化手法確立の上での基礎的情報を取得する。さらに、これらの結果ならびに国内外の研究事例に基づき、平成7年度から実施予定の「新規坑道における掘削影響領域の評価」の詳細計画案を作成する。

第2章には既存坑道周辺の調査・試験の結果と室内物性試験の結果を示している。既存坑道周辺の物理探査としては、PS検層、弾性波探査（屈折法）、レーダー探査（反射法）および弾性波トモグラフィを実施している。また、既存坑道から削孔した水平孔、鉛直孔、斜上向孔内において孔内載荷試験を実施し、岩盤物性の異方性の検討を行なっている。室内物性試験としては、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、圧裂試験、弾性波速度測定、間隙率測定を実施している。

第3章では、き裂の物性試験の試料抽出のためのき裂分類の手法とき裂に関する室内試験の結果を示している。き裂の分類に際しては、充填物の幅、充填物の種類、変質の程度、き裂面の粗さ、条線、き裂パターンを検討対象としている。き裂の力学試験としては、垂直載荷試験とせん断試験を実施している。また、き裂面の特性を調べる試験としては、シュミットハンマー試験、テイルト試験、粗さ（ラフネス）測定を実施している。

第4章においては上記の試験結果を踏まえて、「新規坑道における掘削影響領域の評価」の詳細実施計画案の検討を行なっている。ここでは、国内外の事例を検討し、本研究における掘削影響試験のコンセプトを確立し、さらに、試験坑道のレイアウト、坑道掘削前後の調査・試験項目の抽出、計測項目の抽出を行ない、実施計画案を提案している。さらに、岩盤挙動の予測、検証を行なう解析手法の計画を加えて、全体スケジュールを提示している。

第5章においては、今回実施した調査・試験、き裂分類およびき裂試験、掘削影響試験の詳細実施計画案の検討結果を総合評価してとりまとめている。

2. 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験

2.1 調査・試験概要

(1)調査項目および数量等

原位置試験項目および数量等を表2.1.1に、室内試験項目および数量等を表2.1.2に示す。

表2.1.1 調査項目等一覧表

調査名	調査手法	数量	備考
(1)物理探査	① P S 検層	ボーリング2孔, 孔長20m (原則として50cmピッチ)	水平孔 孔径φ76mm
	②坑内弾性波探査 (屈折法)	測線長30m (原則として50cmピッチ)	坑道壁面
	③レーダ探査 (反射法)	測線長30m (原則として連続)	坑道壁面
	④弾性波トモグラフィ	20m×20mブロック 3方向(原則として1mピッチ)	水平2孔 坑道壁面
(2)孔内載荷試験		3方向×3深度×3ボーリング孔 =27測点	鉛直, 水平, 斜上向孔

表2.1.2 室内試験項目一覧表

調査手法	数量	試験基準
①弾性波速度試験	三式(一式は供試体3個)	KDK S 0503 ¹⁾
②一軸圧縮試験	一式(同上)	JIS M 0302 ²⁾
③高圧三軸試験	一式(同上)	ISRMの指針 ³⁾
④圧裂試験	一式(同上)	JIS M 0303 ⁴⁾

(2)原位置試験実施位置

釜石鉱山の位置・地質・坑道と各調査の坑内における調査地点を図2.1.1に示す。

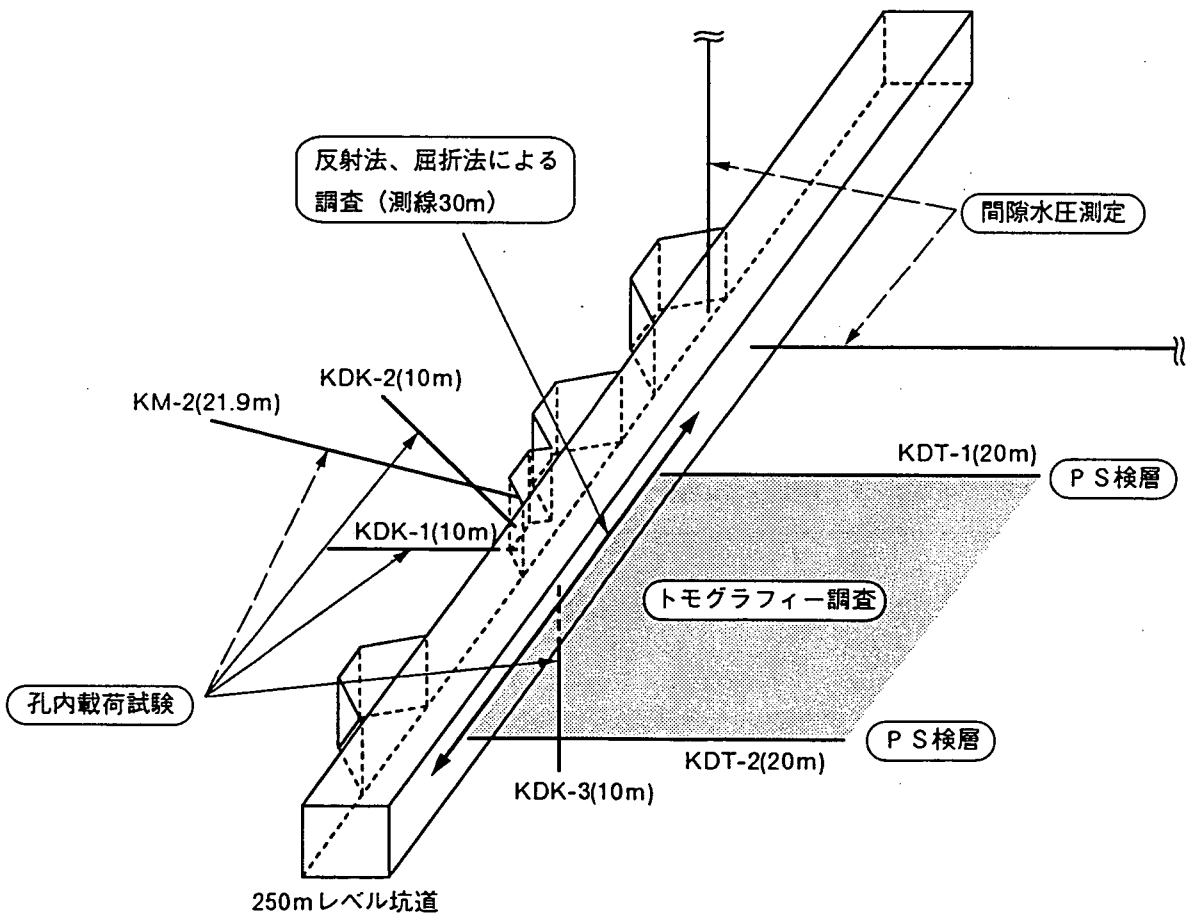
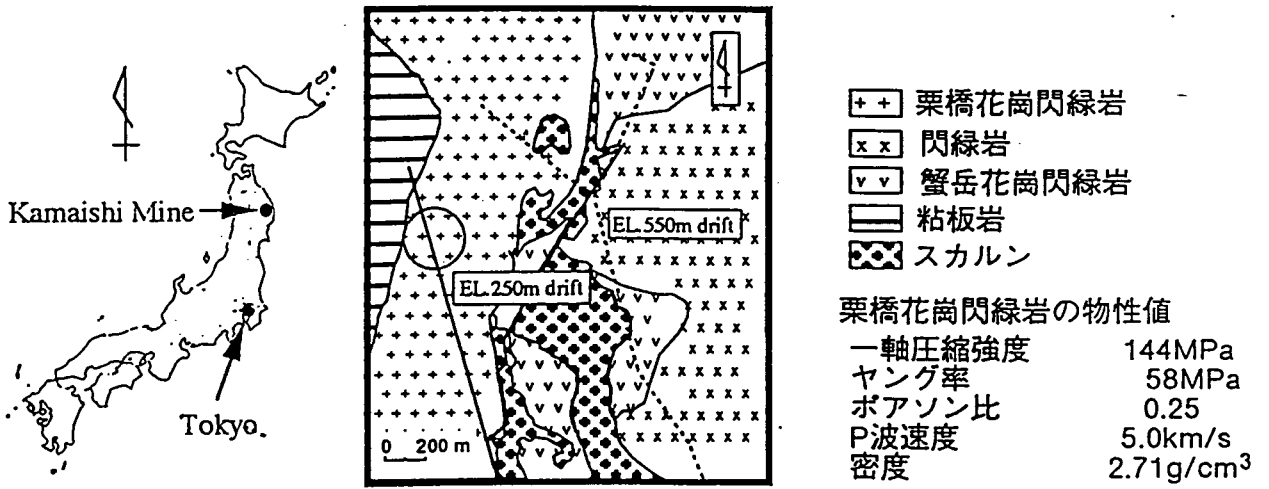


図2.1.1 釜石鉱山の概要と調査位置レイアウト

2.2 物理探査

2.2.1 坑道壁面測量

2.2.1.1 目的

坑道壁面や試錐孔内における物理探査の探査結果を解析する際に、測線距離などを知る上で測定点の位置を正確に把握することが必要となる。そこで、坑道壁面上の測定点の測量を実施し、この測量結果と動燃殿が実施されたボーリング孔の孔曲り測定結果より測定点の位置関係を求めた。

2.2.1.2 測量方法

(1)測量方法

P S検層および弾性波トモグラフィで用いたボーリング孔の孔口と坑内弾性波探査（屈折法）および弾性波トモグラフィで受振器を坑壁に固定するために設置したアンカーの位置に対し、光波測距儀による測量を実施した。

(2)使用機器

使用する光波測距儀は角度と距離を測ることができ、それらのデータからそれぞれの測点の任意の座標系における座標値を求めることができる。今回の測量で用いた光波測距儀の仕様を表2.2.1に示す。

表2.2.1 測量機械仕様

項目	型式	仕様	メーカー
光波測距儀	SET2	距離 範囲：2,700m (3素子APプリズム使用時) 精度：±(5+2ppm×測定距離)mm 測角 最小表示：1" 精度：水平角 2", 鉛直角 4" 国土地理院認定機 2級中距離型光波測距儀 2級経緯儀	SOKKIA

2.2.1.3 測量結果

得られた測量データと動燃殿が実施したボーリング孔の孔曲り測定結果をボーリング孔の孔口の座標値を基準として足し合わせることにより、ボーリング孔内の測定点と坑道壁面の測定点の位置関係が明らかになり、測線距離の算出が可能となる。

孔曲り測定結果と坑道壁面の測量結果を基に作成した探査地点配置図を図2.2.1に示す。ここで、KDT-1孔の孔口より北側約5mにある最端の測点をST+0、KDT-2孔の孔口より南側約4.5mにある反対側の端の測点をST+30とし、この2点間の壁面上の点をST+0からの距離 α を用いて「ST+ α 」で表わすこととする。

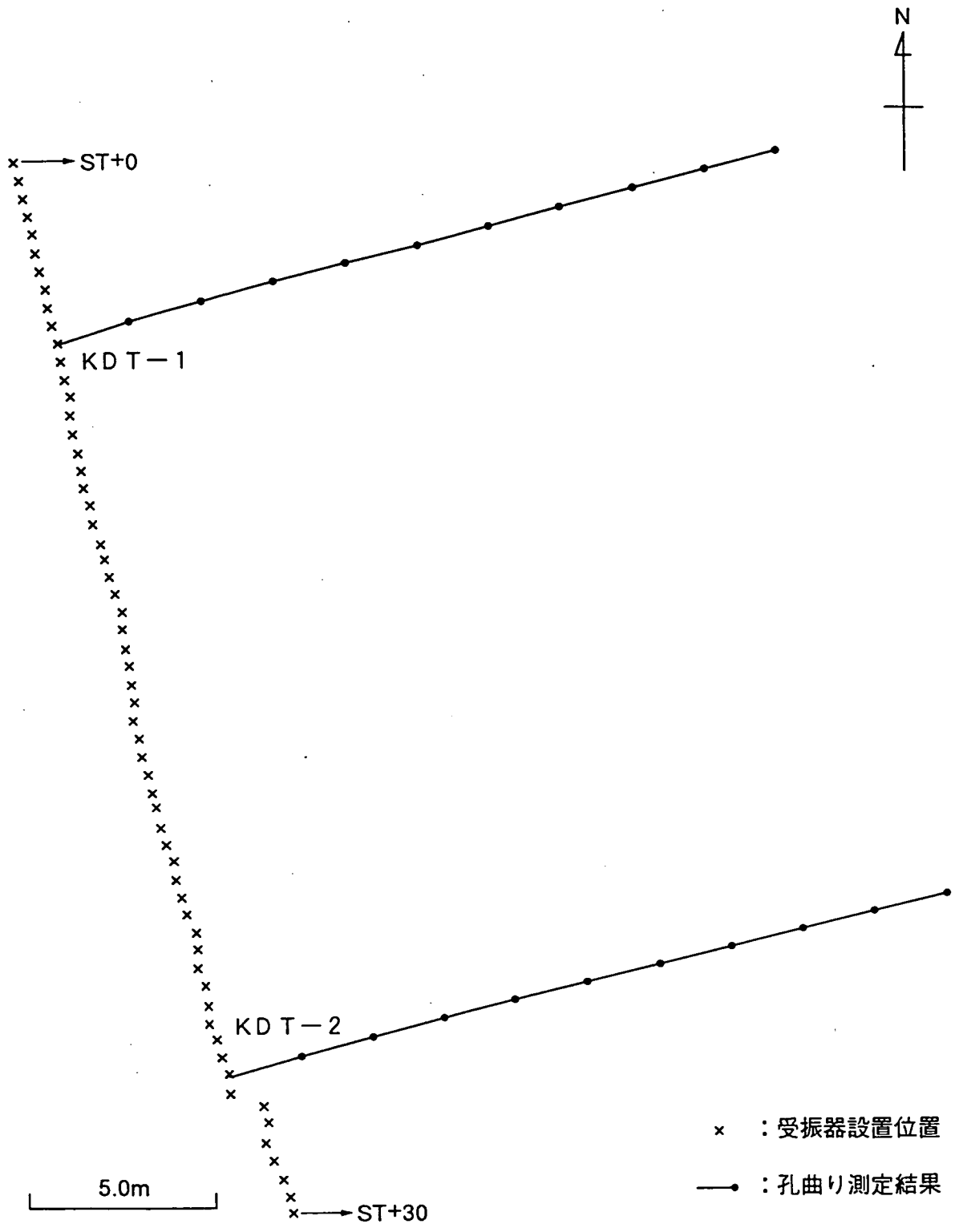


図2.2.1 探査地点配置図

2.2.2 P S検層

2.2.2.1 目的

P S検層は、ボーリング孔（今回は坑道内の水平孔とする）を利用して岩盤のP波、S波速度分布を調べ、これらの速度分布や動的特性を指標とした掘削影響領域の広がりを把握することを目的とする。

2.2.2.2 測定方法および解析方法

(1)測定方法

坑道内の振源より発生した波動を孔内にセットした受振器で測定し、各深度で得られた記録のP・S波の位相を追跡することによって岩盤の伝搬速度分布を評価し、その地質解釈を行った。今回の測定方法は以下のとおりである。

(a) 調査地点は坑道内より水平方向に掘削された2ヶ所のボーリング孔（KDT-1孔、KDT-2孔）とした。ボーリング孔口の間隔は20.5mであった。

(b) 測定は受振器を原則的に0.5m間隔ごとに孔中にセットし、起振と受振を繰り返して孔底深度（20m）まで実施した。ただし、孔口より5mまでの測定間隔は坑道の掘削影響領域を考慮して0.25mに狭めた。受振器は上下、水平2成分の計3成分のものを使用し、圧着方式の装置を用いてこれを孔壁にセットした。

(c) 起振は板たたき法と掛矢によるハンマリング方式を用いた。P波の発生は調査水平孔より1m離れた地点の坑道壁面を掛矢で強打する方式とし、S波の発生は調査水平孔より1m離れた地点で坑道壁面より反力を取った厚板（0.6m×0.3m×0.065m）を設置して、板の両端（位相の反転を確認）を掛矢で強打する方式とした。

厚板の設置状況を良好に保つため岩盤と厚板の間にはモルタルを充填し不陸をなくすようにした。測定時のフローチャートを図2.2.2に示す。また、測定方法の概念を図2.2.3に示す。

(d) 起振された波動は、岩盤内を伝播し、その後受振器に達する。受振器で検出された振動は、電気信号に変換され、地上のアンプで増幅された後にデジタル装置で収録した。またモニター記録器により記録状況をチェックした。

(e) 記録のS/N比の状況に応じてスタッキング方式*による測定を行った。

*スタッキング方式：記録をn回重ねるもので、これによりS/N比は \sqrt{n} 倍に増加する。

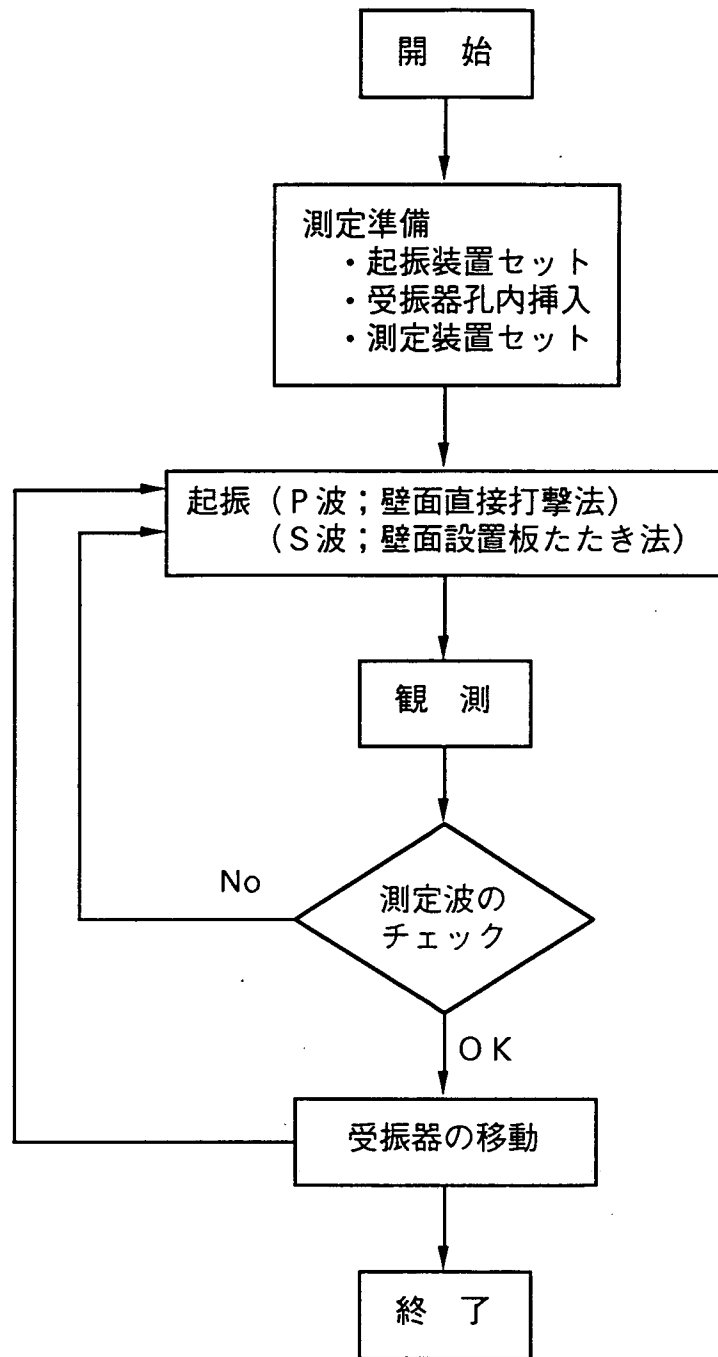
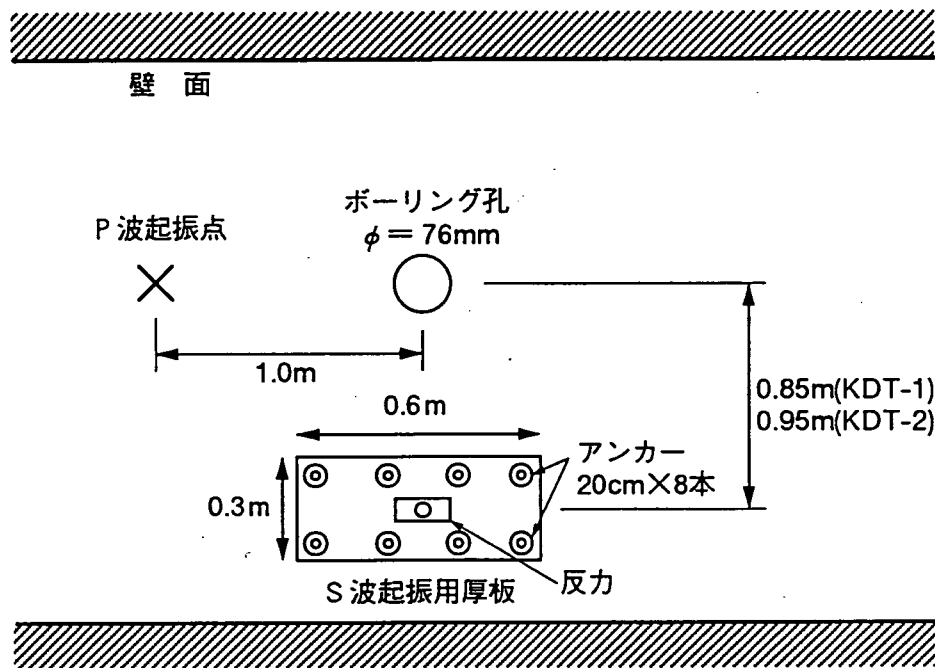
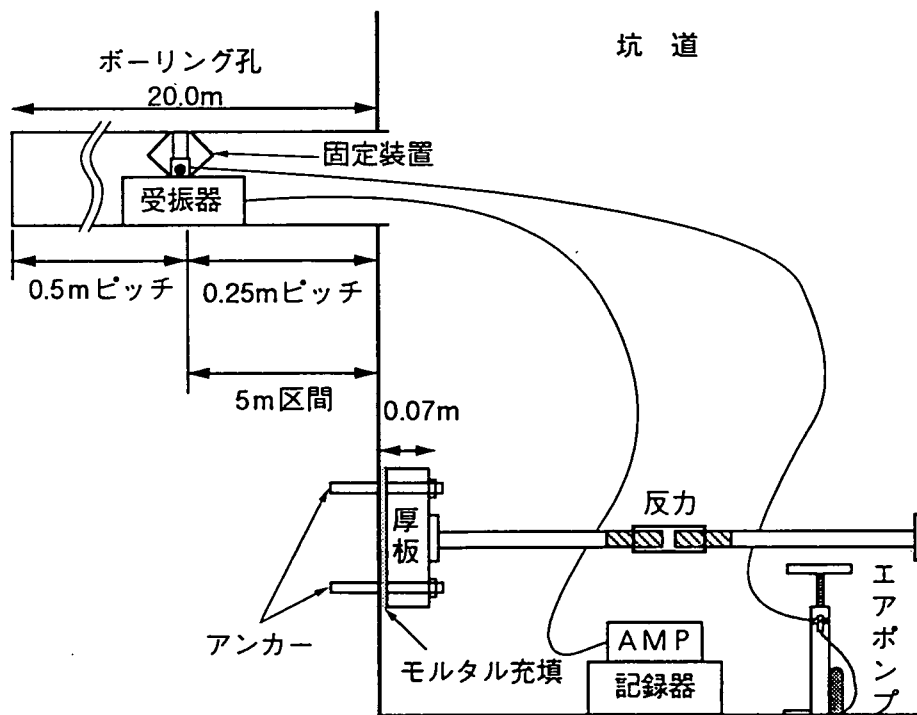


図2.2.2 P S検層フローチャート



(a) 正面図



(b) 断面図

図2.2.3 P S検層方法の概念図

(2)使用機器

使用機器は7成分のデジタル収録ができる装置であり、モニター記録器も備え、データ収録状況がチェックできるものである。表2.2.2に主な機器の仕様を示す。

なお、サンプリングレートは $50\mu\text{sec}$ (20KHz)とした。これは岩盤の弾性波速度を 6.0km/s と仮定した場合、 $0.25\sim 0.5\text{m}$ 測定ピッチの距離変化で $40\sim 83\mu\text{sec}$ の分解能が必要であった。

表2.2.2 主な機器仕様一覧表

項目	型式	仕様	メーカー
増幅器	MTA-0722	チャンネル数 7ch 利 得 20~116db(4dbステップ) 入力インピーダンス 10K Ω 出力インピーダンス 60 Ω 周波数特性 VEL 0.18~100Hz DIS 積分開始 0.8Hz SEISMIC 16~300Hz フィルター LPF 25, 100Hz CAL発振器 1.5Hz正弦波 電 源 7.5V (UMI \times 10本) 重 量 7kg 外形寸法 410(W) \times 226(D) \times 145(H)mm	B. S社
ホアホーリック アーム式受振器	SPUM2-6 型	固有周波数 28Hz 感 度 0.2V/INCH/sec インピーダンス 215 Ω 3成分 (上下1, 水平2) \times 1 アーム式圧着方式 (空圧) ガスボンベ, コントローラー等 外形寸法 65mm 重 量 4.8kg \times 2	Geo- Space
地上固定用 ピック	HS-J	固有周波数 28Hz インピーダンス 215 Ω	Geo- Space
記録装置	PC-9801 ns/T80	A/D変換 16bit チャンネル数 16チャンネル R A M 640K フロッピーディスク 1M/640Kバイト両用 ディスドライブ 3.5インチ2ドライブ ディスプレイ NTN型白液晶 電 源 D.C12V	NEC
S波発生	板たたき	坑道壁面反力, 板設置 (0.6m \times 0.3m \times 0.065m)	
P波発生	ハンマリング	坑道壁面直接打撃 (水平孔より約2.0m離れ)	

(3)解析方法

P S 検層の解析概要を以下に示す。

(a) P 波, S 波伝播速度

P S 検層により得られたデジタル記録はパソコン (PC-9801) を用いて各深度毎に波形のトレース図を作成した。さらにこのトレース図から S 波であることを位相反転で確認し、S 波が確認された後にその位相の伝達時間を求めた。P 波については初動の位相を確認し、S 波と同様の方法で伝達時間を求めた。次に、伝達時間と伝搬距離の関係をグラフ化した走時曲線を作成し、その傾きから岩盤の P 波と S 波の速度分布を求めた。なお、P 波速度、S 波速度、伝搬距離は、次式から求めた。

伝播距離 (R) ;

$$R = \sqrt{a^2 + z^2} \quad (\text{m}) \quad (2.2.1)$$

ただし、 a ; 起振点から調査孔までの水平距離 (m)

z ; 測定深度 (m)

P 波速度 (V_p) ;

$$V_p = \frac{R}{T_p} \quad (\text{m/sec}) \quad (2.2.2)$$

ただし、 T_p ; P 波の伝搬時間 (sec)

S 波速度 (V_s) ;

$$V_s = \frac{R}{T_s} \quad (\text{m/sec}) \quad (2.2.3)$$

ただし、 T_s ; S 波の伝搬時間 (sec)

(b) 動弾性定数

動弾性定数は、波形より得られた P 波速度 (V_p)、S 波速度 (V_s) と単位体積重量 (γ_t)、重力加速度 (g) m/s^2 から次式によって求められる。

動ポアソン比

$$\nu = \frac{\frac{V_P^2}{2V_S^2} - 1}{\frac{V_P^2}{V_S^2} - 1} \quad (2.2.4)$$

動弾性係数

$$E = \frac{\gamma_t(3V_P^2 - 4V_S^2) \cdot V_S^2}{g(V_P^2 - V_S^2)} \quad (2.2.5)$$

ただし、 γ_t ; 単位体積重量 (kgf/cm³)

動剛性率

$$G = \frac{\gamma_t \cdot V_S^2}{g} \quad (2.2.6)$$

動体積弾性率

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.2.7)$$

2.2.2.3 調査結果

図2.2.4～7にKDT-1孔およびKDT-2孔におけるP S 検層の記録波形を示す。また、今回の調査で得られた波形の周期より換算した周波数を表2.2.3に示す。周波数は、KDT-1孔の調査において発生したP波の周波数がやや高い値となっている。この周波数の相違は、起振点のごく近くの壁面の岩盤性状に起因していると考えられる。

表2.2.3 P S 検層で観測された波の周波数

ボーリング孔	P波周波数 (Hz)	S波周波数 (Hz)
KDT-1	500～600	300～400
KDT-2	200～300	200～300

記録波形より初動走時 (図中黒丸印) の読み取りを行った。そして、起振点が試錐孔の孔口から約1m離れているため、送・受振点間の距離の補正を行うことによって、図2.2.8、9に示す走時曲線が得られた。図中の●印がP波走時、○印がS波走時を示す。なお、P S 検層で用いたデータ収録装置はサンプリングレートが50 μsecであり、そのため、記録波形の初動を読み取る際の最小目盛が50 μsecとなる。従って、例えば50 μsecという読み取り値の場合、実際に

は25~75 μ secという幅をもち、最大で25 μ secの誤差を有することになる。受振点の深度0.25mで測定されたP波走時は、KDT-1孔、KDT-2孔とも50 μ secであることからわかるように、この誤差は、測定深度が浅い場合に測定結果に与える影響が大きくなる。

図2.2.8によるとKDT-1孔におけるP波の走時曲線は坑壁からの深度0.75mに変曲点があり、S波の走時曲線は深度0.5mに変曲点があると判断することができる。一方、図2.2.9のKDT-2孔の走時曲線では、S波についてはKDT-1孔と同様に深度0.5mで変曲点が認められるものの、P波の変曲点は不明瞭で特定することができない。これらの走時曲線は変曲点の前後ではほぼ線形的に変化しており、走時曲線の傾きよりP波、S波の速度が求められる。P波、S波の速度区分を表2.2.4に示す。

表2.2.4 KDT-1・2孔のP波・S波速度区分

ボーリング孔	P波		S波	
	深度(m)	速度(km/sec)	深度(m)	速度(km/sec)
KDT-1	0~0.75	3.0	0~0.5	1.5
	0.75以深	6.0	0.5以深	3.2
KDT-2	0~20	6.0	0~0.5	1.5
			0.5以深	3.4

(2.2.4)式~(2.2.7)式を用いて求めた動弾性定数を表2.2.5に示す。ここで、坑道壁面から走時曲線の変曲点までの領域を第一層、変曲点以深の領域を第二層とする。すなわち、KDT-1孔の場合、坑道壁面から深度0.5~0.75mまでを第一層とし、深度0.5~0.75m以深を第二層とする。KDT-2孔の場合、P波の変曲点が特定できないため、S波の変曲点位置である深度0.5mまでを第一層、深度0.5m以深を第二層とする。また計算では、今回実施した岩石試験の供試体より得られた値の平均値2.78kgf/cm³を単位体積重量として用いた。

表2.2.5 動弾性定数計算結果

ボーリング孔	領域	動ポアソン比 ν	動弾性係数 E(GPa)	動剛性率 G(GPa)	動体積弾性率 K(GPa)
KDT-1	第一層	0.33	16.69	6.26	16.66
	第二層	0.30	74.14	28.49	62.09
KDT-2	第一層	0.33	16.69	6.26	16.66
	第二層	0.26	81.27	3.22	57.27

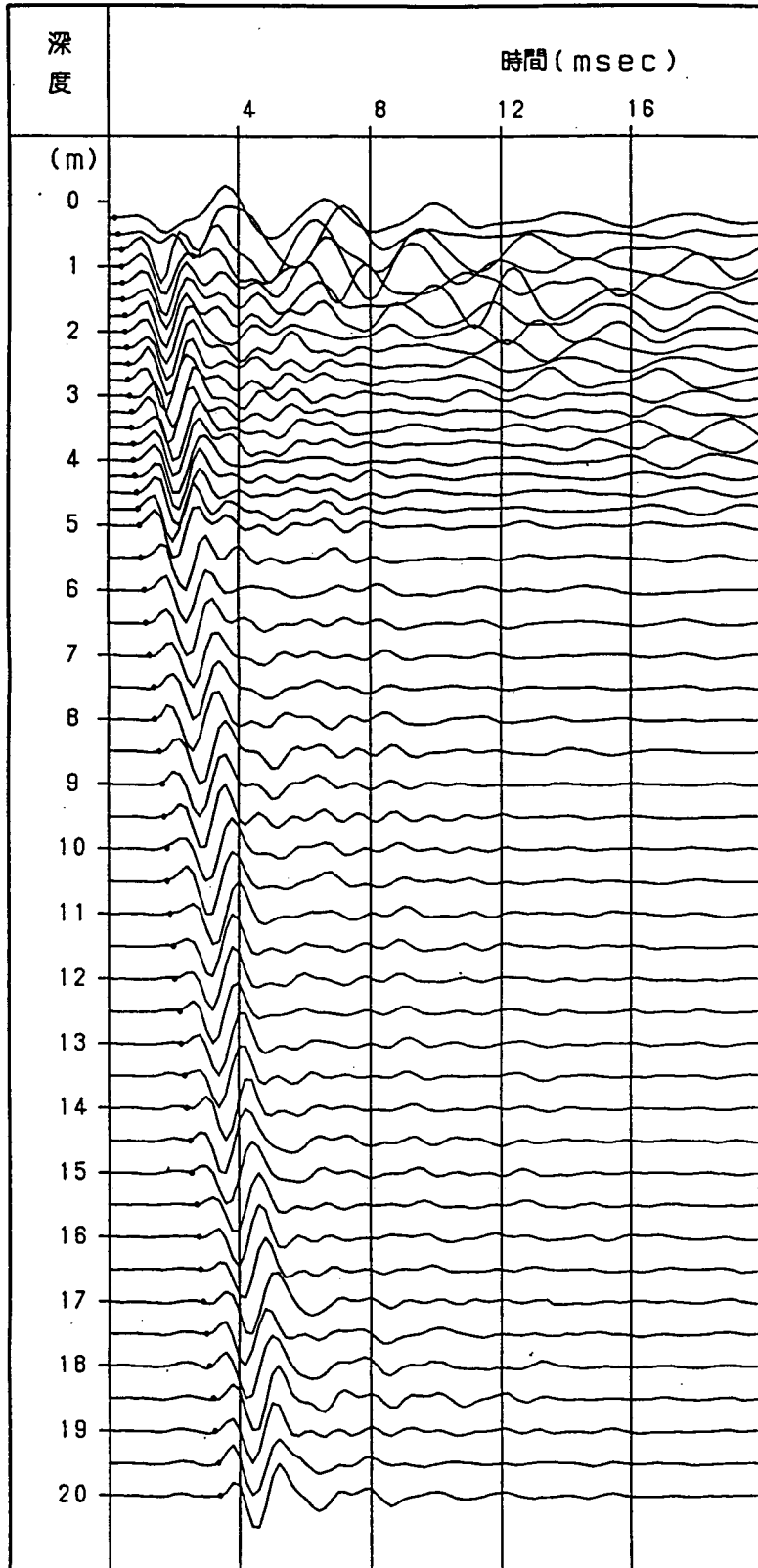


図2.2.4 P S 検層記録波形 (KDT-1 : P 波)

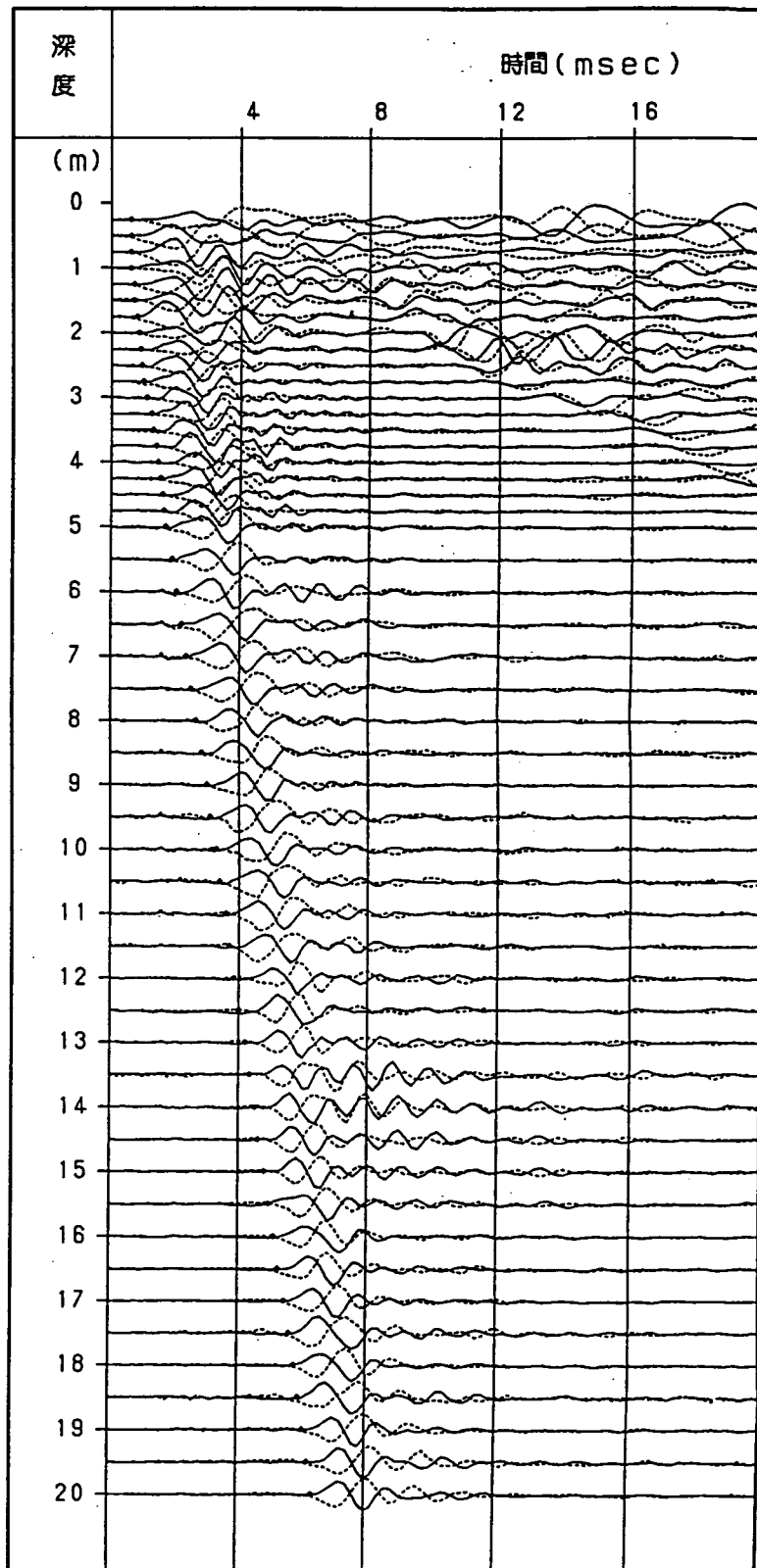


図2.2.5 P S 検層記録波形 (KDT-1 : S波)

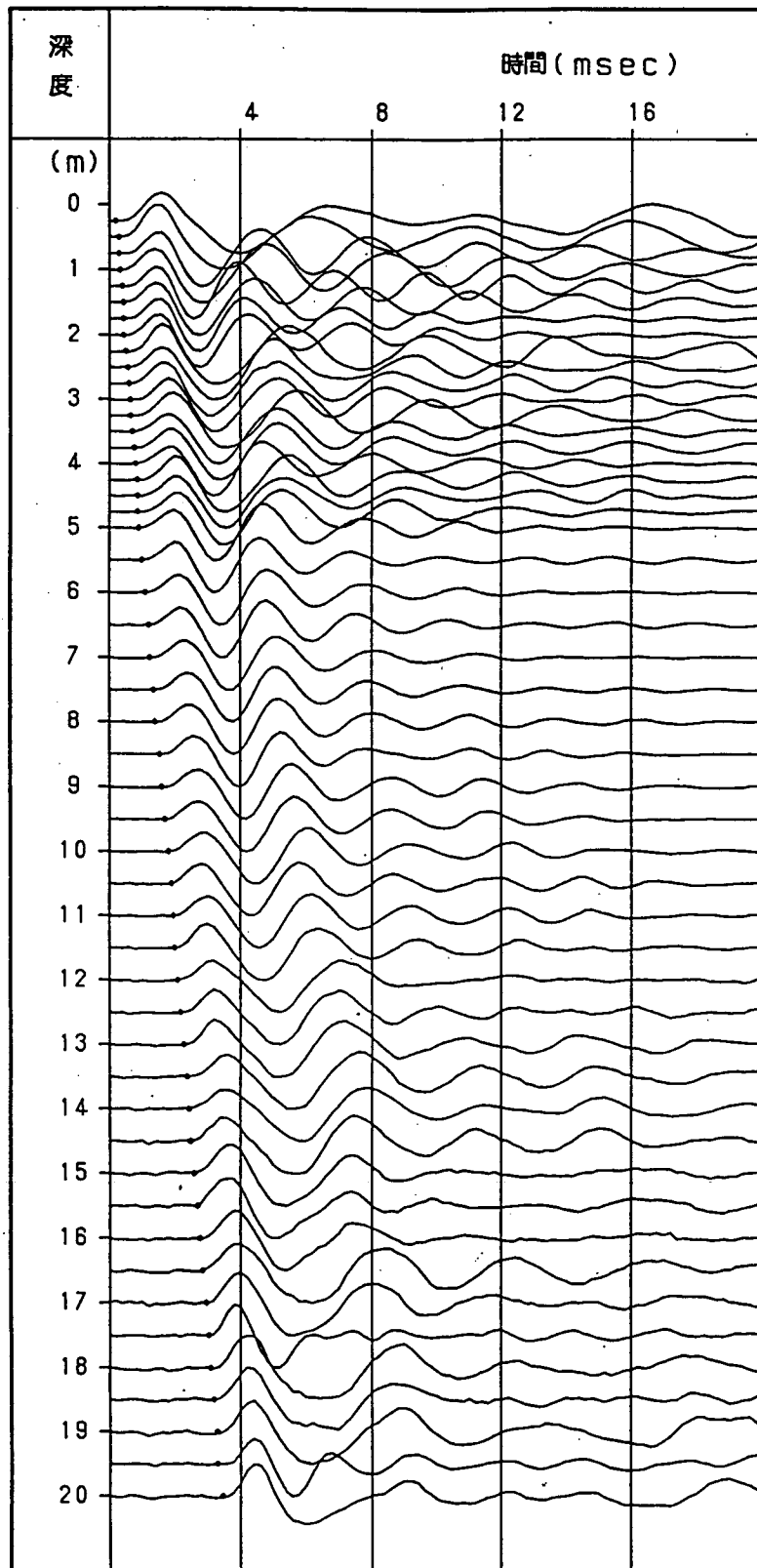


図2.2.6 P S 検層記録波形 (KDT-2 : P 波)

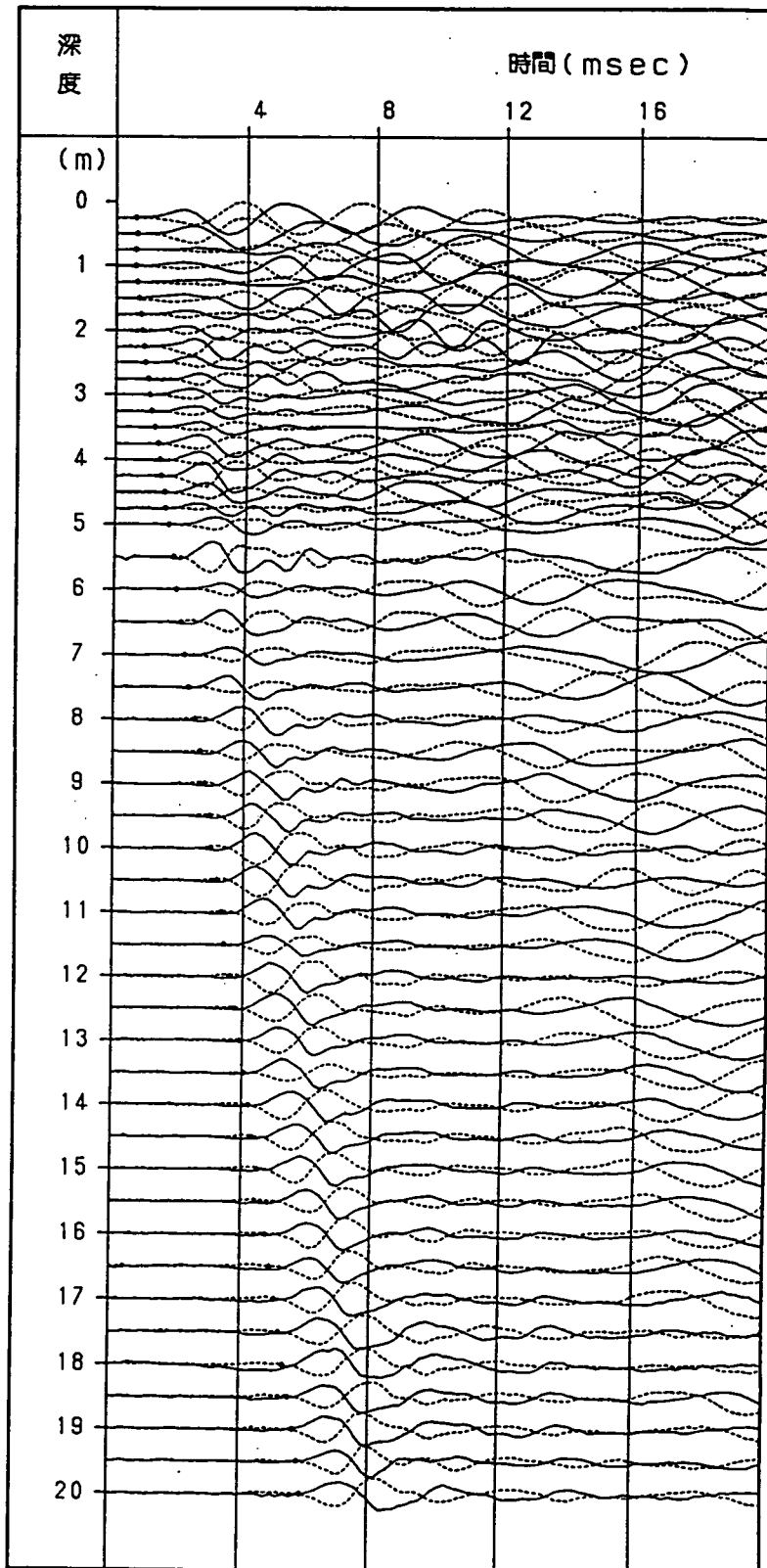


図2.2.7 P S 検層記録波形 (KDT-2 : S 波)

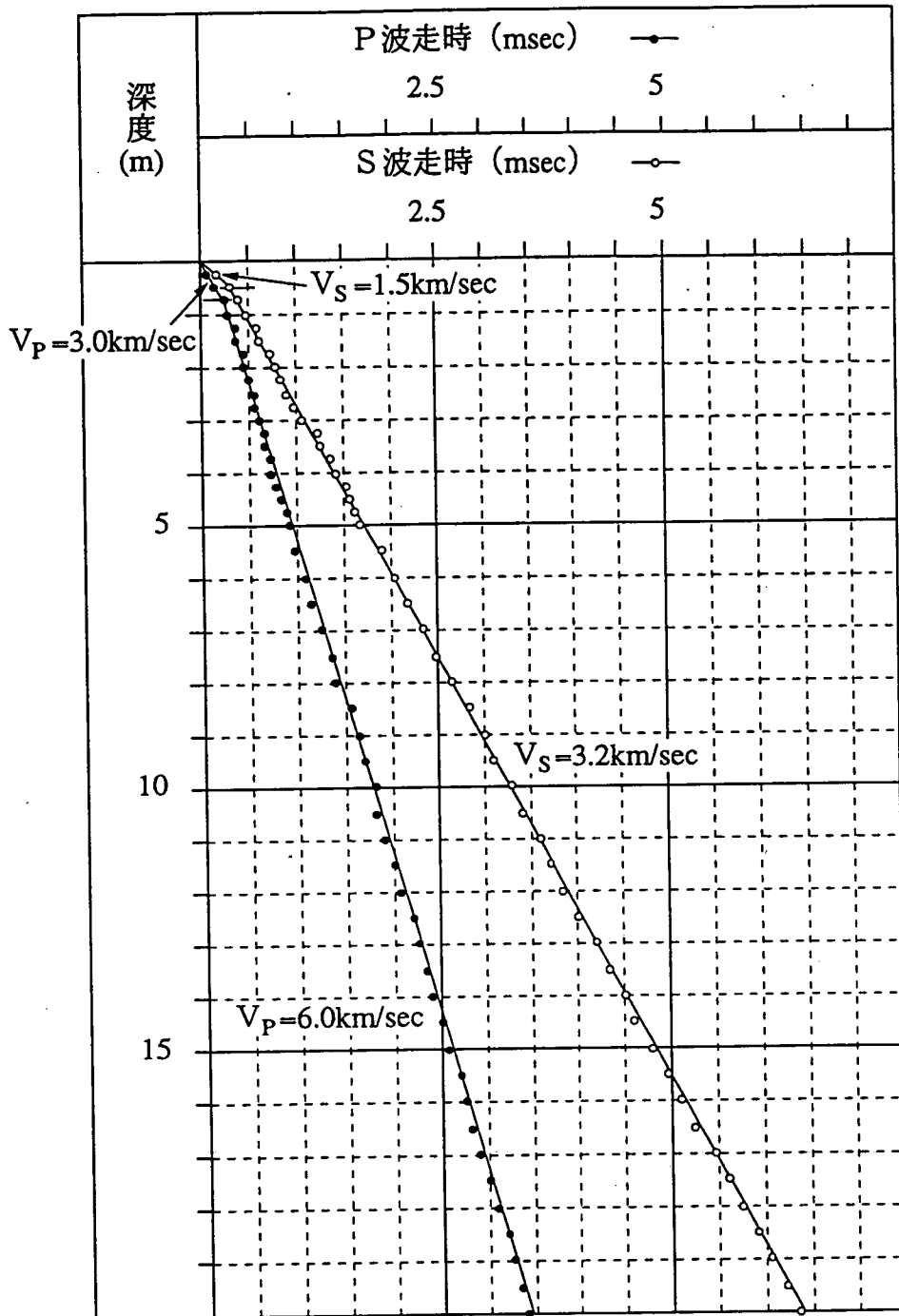


図2.2.8 P S 検層走時曲線 (KDT-1)

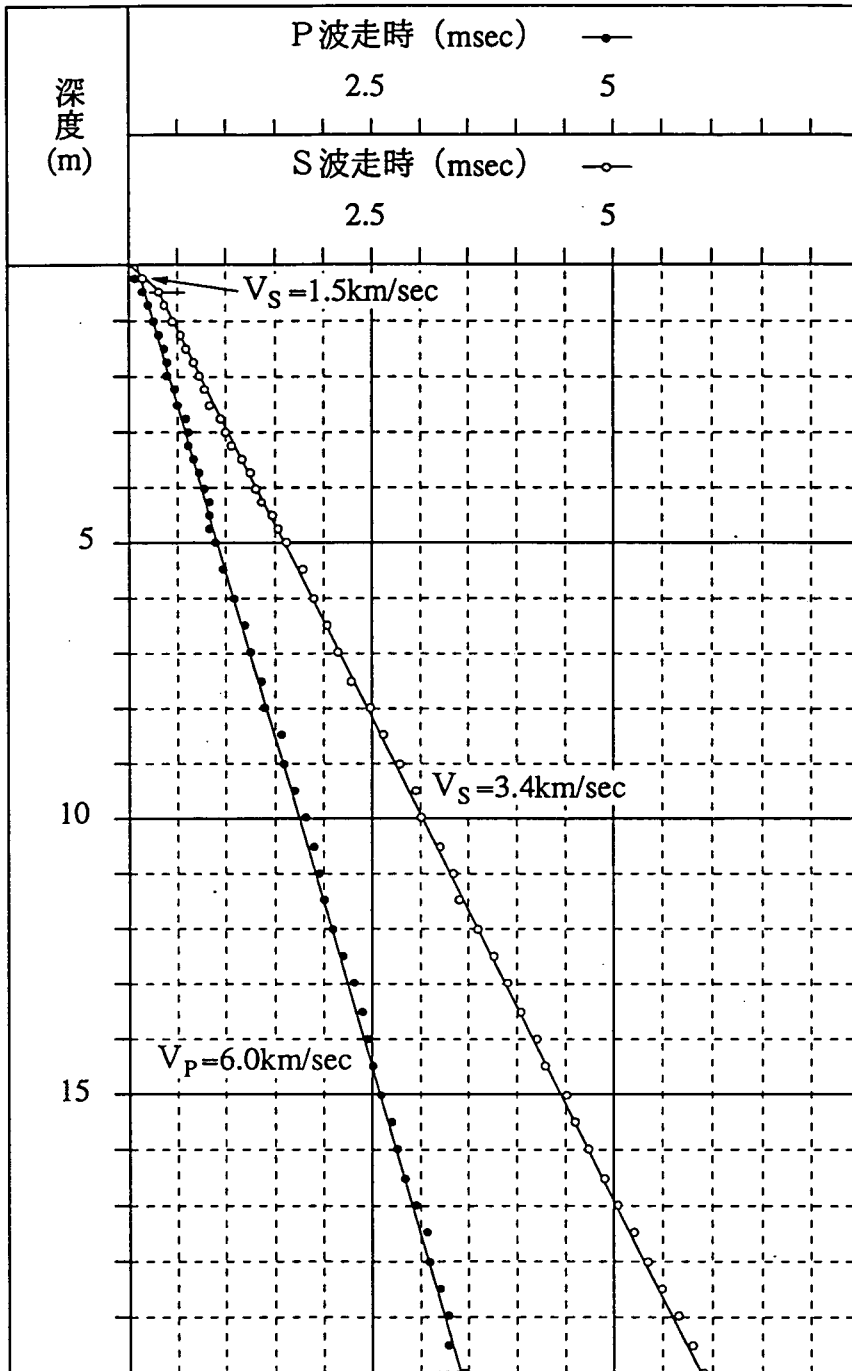


図2.2.9 P S検層走時曲線 (KDT-2)

2.2.2.4 考察

図2.2.10に各種岩石のP波速度とS波速度の一般的な関係を示す。図中の σ はポアソン比を表す。今回の調査結果は図2.2.10において深成岩累・半深成岩累が分布する領域内に存在し、妥当な値であると判断することができる。ここで、ポアソン比は一軸圧縮試験で得られたポアソン比の平均値0.267を用いて判断している。

次に、各種の岩石が持つP波とS波の速度を図2.2.11に示す。図2.2.11によると花崗岩類におけるP波速度は3.0～6.0km/secの範囲にあり、S波速度は2.0～3.5km/secの範囲である。これに対し、今回の試験結果の第二層の領域におけるP・S波速度値は、共に花崗岩類の速度分布の中で最も高い範囲に属している。一方、第一層のP・S波速度は第二層における速度の約半分の値であり、P波速度の場合は花崗岩累の速度分布の最下位に属しているものの、S波速度は下回る値となっている。

以上のことから、坑道掘削による既存き裂の開口や新規き裂の発生等に起因して、坑道壁面付近の岩盤の弾性波速度が低下しているものと考えられる。そして、表2.2.4の速度区分に示したように深度0.5～0.75m付近でKDT-1孔のP波と両孔のS波の速度が変化していることから、今回の調査地点の調査を実施した時点での掘削影響領域は、坑道壁面から深度0.5～0.75mの辺りまでであると考えられる。一方、コア観察、BTV観察から深度0.5～0.75mの辺りに顕著な岩盤の特性は見られなかった。

今回の調査では坑道壁面から深度5mまでの測定間隔が0.25mであったが、掘削影響領域と考えられる坑道壁面から深度0.5～0.75mまでの間に測点が1～2点しかなく、掘削影響領域と健岩部の境界と影響領域での影響の程度（弾性波速度の変化）を明確にするためには測点数が不十分であると考えられる。しかし、今回の調査領域のように弾性波速度が速い岩盤の場合、起振点から近い測点においての初動の読み取りが困難となる。これは、デジタル記録方式のサンプリングレートが50 μ secが最小であるため分解能の読取誤差となり、起振点からの離れが25cmで時間差は約42 μ secとなることから、これより近い距離での読取が困難となる。また、測定システムの起動時により100 μ sec以内の時間に入力される信号は収録器自体が持つノイズの発生により記録の読取が困難である。従って約0.6m以内の至近距離では記録時の誤差が生じる。よって測定間隔をこれ以上小さくするためにはさらに高精度の測定器の開発が必要となる。

また、既存坑道は掘削後かなりの時間が経過しており、その間に浮き石の撤

去等が十分になされていることから掘削の影響を受けた領域が狭くなっており、さらにその把握を困難にしているものと考えられる。

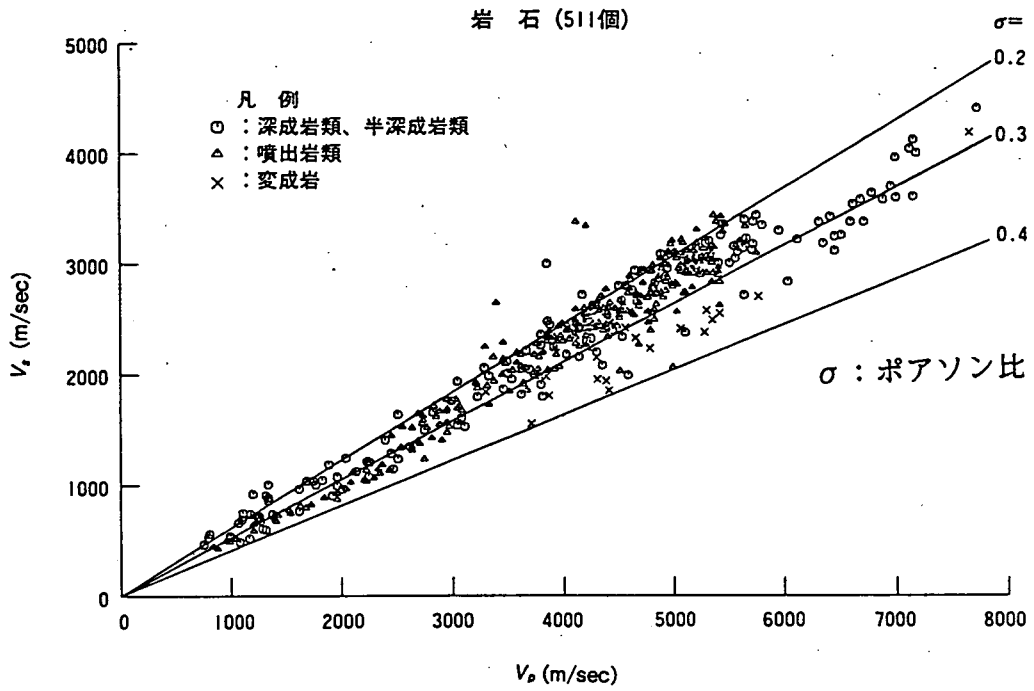


図2.2.10 P波速度とS波速度の関係⁵⁾

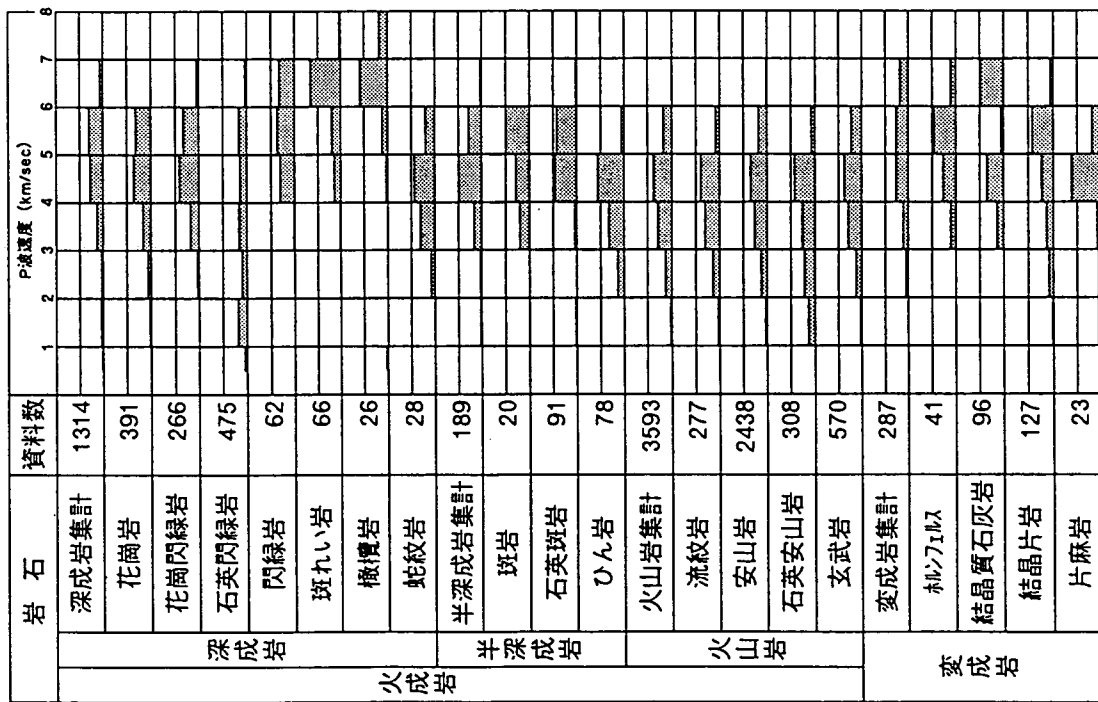
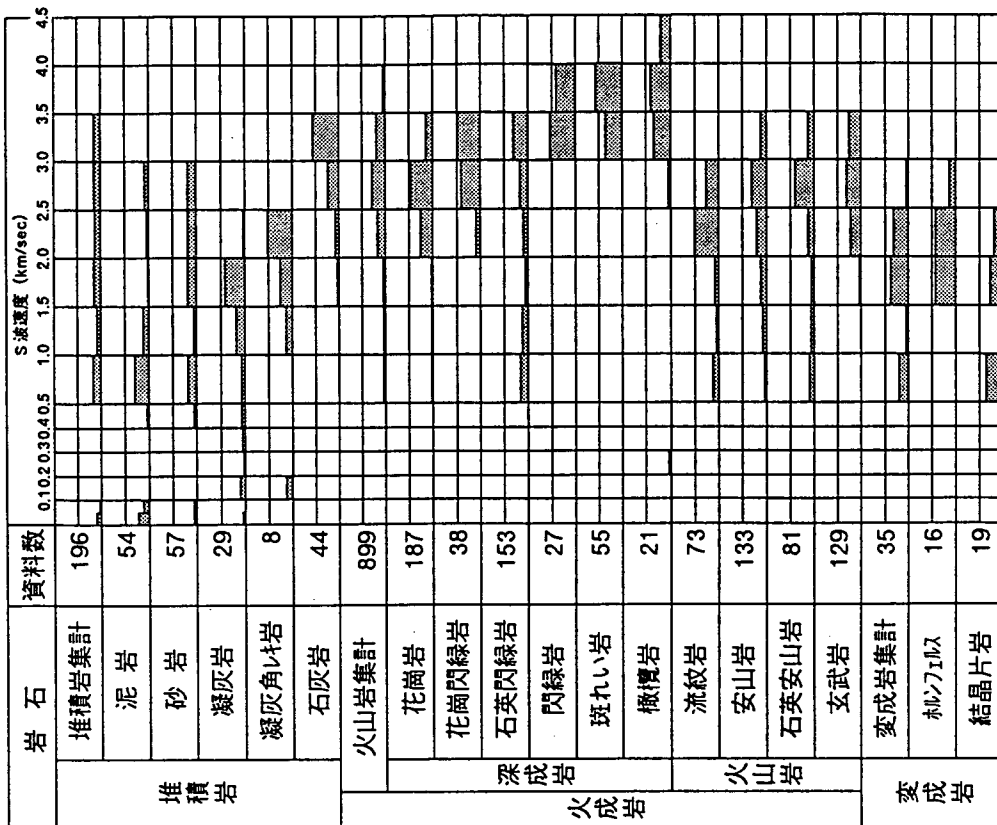


図2.2.11 各種の岩石を持つP波とS波の速度⁶⁾

2.2.3 坑内弾性波探査（屈折法）

2.2.3.1 目的

弾性波探査は人工的に起した弾性波を利用し、地下構造や地下の物質を推定する方法であり、探査深度と利用する波の性質により手法が異なる。

今回の屈折法は、坑道壁面より水平方向に対する速度層境界からの屈折波を解析するもので、この速度構造解析結果より掘削影響領域の範囲を把握することを目的とする。

2.2.3.2 測定方法および解析方法

(1)測定方法

振源より発生した波動を壁面上に等間隔でセットした複数の受振器を用いて測定する。今回の測定方法は、以下のとおりとした。なお、坑内弾性波探査（屈折法）では、測線長の10分の1から5分の1程度が探査可能な深度であることから、今回の調査では坑道壁面から深度3～6m位までが探査領域となる。

- (a) 調査地点は坑道内の水平孔間の距離20.5mにKDT-1孔の孔口の左側5mとKDT-2孔の孔口の右側4.5mの範囲を加えた30mの壁面上（ST+0～ST+30）に測線を設定した。
- (b) 測定には24成分の弾性波探査装置を用い、1展開は11.5mを原則として実施した。測定方法の概念を図2.2.12に示す。
- (c) 起振源は掛矢によるスタッキング方式を用いた。起振点間隔は原則として6mとし、必要に応じて遠隔起振点を設けた（図2.2.12参照）。
- (d) 受振器は水平・上下兼用型を用いて0.5m間隔ごとに壁面アンカー方式でセットした。図2.2.13に壁面の受振器設置方法を示す。
- (e) 起振された波動は岩盤内を伝播し、その後受振器に達する。受振器で検出された振動は電気信号に変換され、地上のアンプで増幅された後、記録装置でデジタル収録した。また、モニター記録器により記録状況をチェックした。

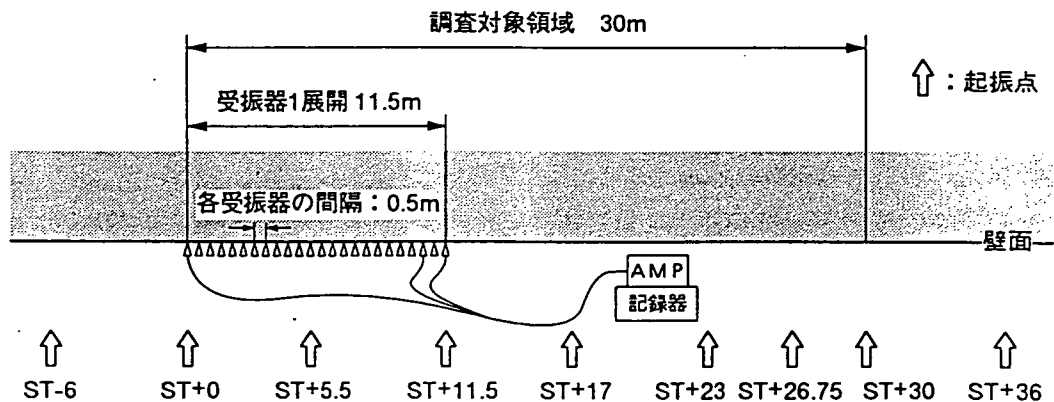


図2.2.12 坑内弾性波（屈折法）測定方法の概念と起振点位置

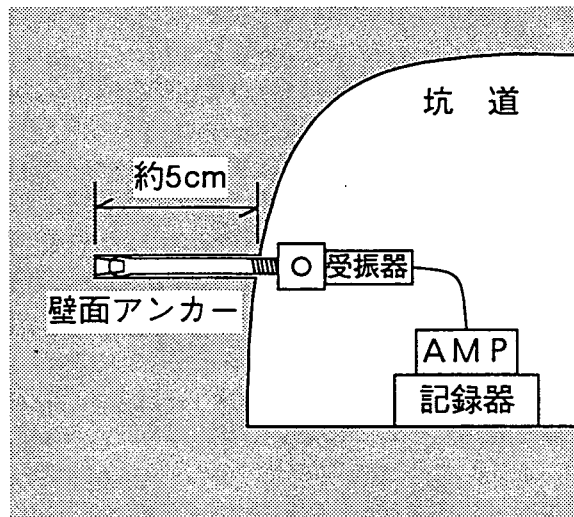


図2.2.13 壁面への受振器設置方法

(2)使用機器

使用機器のデジタル収録装置は24チャンネルを有し、モニター記録器も備え、データ収録状況がチェックできるものである。表2.2.6に主な機器の仕様を示す。なお、測定時のサンプリングレートは50 μ sec (20kHz)とした。

表2.2.6 主な機器仕様一覧表

項目	型式	仕様	メーカー
地震探査装置 (屈折法)	McSEIS-170F	チャンネル数 24ch 利 得 34~80db(8dbステップ) 入力インピーダンス 600 Ω サンプリングレート 25,50,100,200,500, 1000,2000 μ sec メモリサイズ 1024ワード A/D分解能 12ビット プリンター印字 サーマル方式 電 源 DC10.5~13.5V 重 量 7kg	OYO
受 振 器	HS-J	使用個数 24個 固有周波数 28Hz インピーダンス 215 Ω	Geo-Space
P 波 発 生	ハンマリング	坑道壁面直接打撃	

(3)解析方法

弾性波屈折法探査の解析概要を以下に示す。

(a)走時曲線作成

測定により得られたデジタル記録はパソコン等を用いて各測定点波形のトレース図を作成する。このトレース図よりP波の初動走時を読み取り、各起振点に対する走時曲線図を作成する。

(b)掘削影響領域推定断面作成

図2.2.14において震源Aから受振点Pに至る屈折波走時を T_{AP} 、震源BからPに至る屈折波走時を T_{BP} 、AB間の全走時を T_{AB} とすれば、

$$T_{AP} = \frac{Z_A \cos \theta}{V_1} + \frac{A'P'}{V_2} + \frac{Z_P \cos \theta}{V_1} \quad (2.2.8)$$

$$T_{BP} = \frac{Z_B \cos \theta}{V_1} + \frac{B'P'}{V_2} + \frac{Z_P \cos \theta}{V_1} \quad (2.2.9)$$

$$T_{AB} = \frac{Z_A \cos \theta}{V_1} + \frac{A'B'}{V_2} + \frac{Z_B \cos \theta}{V_1} \quad (2.2.10)$$

である。

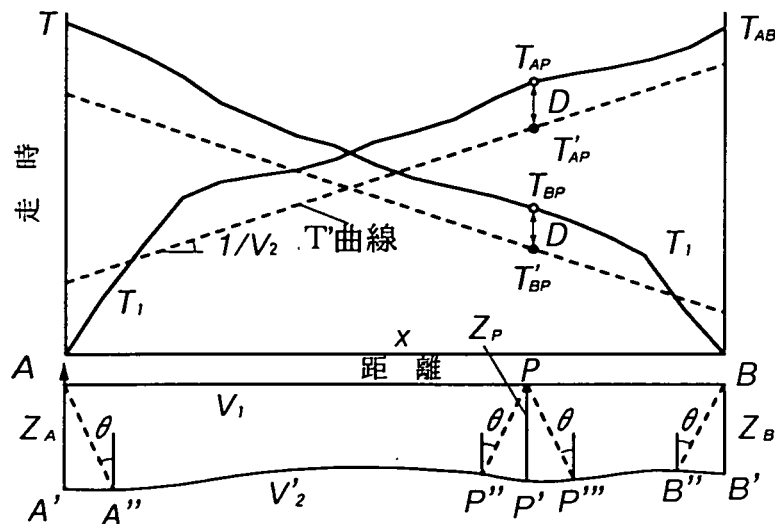


図2.2.14 はぎとり法⁷⁾

第二層の凹凸が比較的緩やかで

$$A'B' \doteq A'P' + B'P' \doteq AB$$

とみなせるとし、 $(T_{AP} + T_{BP} - T_{AB})/2$ という量を考え、これを D とすると、
(2.2.8)～(2.2.10)式より

$$D = \frac{Z_p \cos \theta}{V_1} \quad (2.2.11)$$

となる。 T_{AP} 、 T_{BP} から D を減じたものを T'_{AP} 、 T'_{BP} とすると、

$$T'_{AP} = T_{AP} - D = \frac{Z_A \cos \theta}{V_1} + \frac{A'P'}{V_2} \quad (2.2.12)$$

$$T'_{BP} = T_{BP} - D = \frac{Z_B \cos \theta}{V_1} + \frac{B'P'}{V_2} \quad (2.2.13)$$

となる。ここで、 $A'P' \doteq AP = x$ とすると、

$$T'_{AP} = \frac{Z_A \cos \theta}{V_1} + \frac{x}{V_2} \quad (2.2.14)$$

$$T'_{BP} = \frac{Z_B \cos \theta}{V_1} + \frac{(AB - x)}{V_2} \quad (2.2.15)$$

となって T'_{AP} と T'_{BP} から第二層の速度 V_2 が求められる。このように、二つの震源によって得られた走時曲線を用いて、第二層以下の速度と深度走時を求める方法をはぎとり法という。

(2.2.11)式より受振点 P における第一層の厚さは

$$Z_p = D \cdot \frac{V_1}{\cos \theta} \quad \left(\sin \theta = \frac{V_1}{V_2} \right) \quad (2.2.16)$$

で求められる。これを用いて掘削影響領域の推定断面図を作成する。

2.2.3.3 調査結果

今回の調査で得られた代表的な記録波形を図2.2.15に示す。また、記録波形の周波数は500～1500Hzであり、起振点および起振点と測点間の距離によるばらつきがみられた。この周波数の相違については起振点付近での岩盤壁面のき裂等に関係し、また、受振点の距離により低周波数が卓越すると考えられる。

各発振源からの記録波形より初動走時を読み取り、坑道壁面の凹凸を考慮した上で縦軸に走時、横軸に測線上の受振点位置をプロットして走時曲線図（図2.2.16①）を作成した。この走時曲線図において各走時曲線の変曲点が1カ所しか存在しないことから、調査領域の速度層は二層構造であるといえる。ここで、この二つの層を坑道壁面側より第一層、第二層とする。第一層の弾性波速度は走時曲線図より走時曲線毎に値（3.0～5.0km/sec）が得られた。そして、走時曲線図に対してはざとり法を用いることによって第二層における弾性波の伝播速度は6.0km/secであることがわかった。また、第一層と第二層の境界面の深度、すなわち第一層の層厚を各測定点毎に求め、図2.2.16②の解析断面図を作成した。この境界面の深度は場所によって多少の違いはあるが0.5m前後となっている。

2.2.3.4 考察

図2.2.16②の断面図に示したように、調査を実施した岩盤では、岩盤中を伝わる弾性波の速度が異なる二つの層が存在し、その境界面の坑道壁面からの深度は0.5m付近となっている。また、坑道壁面より遠い側の層（第二層）の弾性波速度は全域において6.0km/secであるが、坑道壁面側の層（第一層）の場合、調査測線の両端部分では3.0km/sec、中央付近で4.0～5.0km/secというように場所によって異なった値となっている。図2.2.17において調査領域の坑道壁面のき裂調査結果¹²⁾と図2.2.16②の解析断面図を比較している。き裂の分布状況は、KDT-1孔およびKDT-2孔の孔口周辺でき裂が卓越しており、両孔の中間領域では減少している。これは、第一層における弾性波速度の違いと傾向が一致しており、き裂の卓越している領域の方がき裂の少ない領域に比べて弾性波速度が遅くなっている。従って、坑内弾性波探査（屈折法）の結果から、弾性波速度を指標とした場合、坑道壁面から深度0.5m付近までを掘削影響領域とすることができ、その影響要因、すなわち弾性波の伝播速度が低下した一因として、き裂調査から既存き裂の開口（代表的な幅5mm）と充填物（最大で10mm）の影響と考えられる。

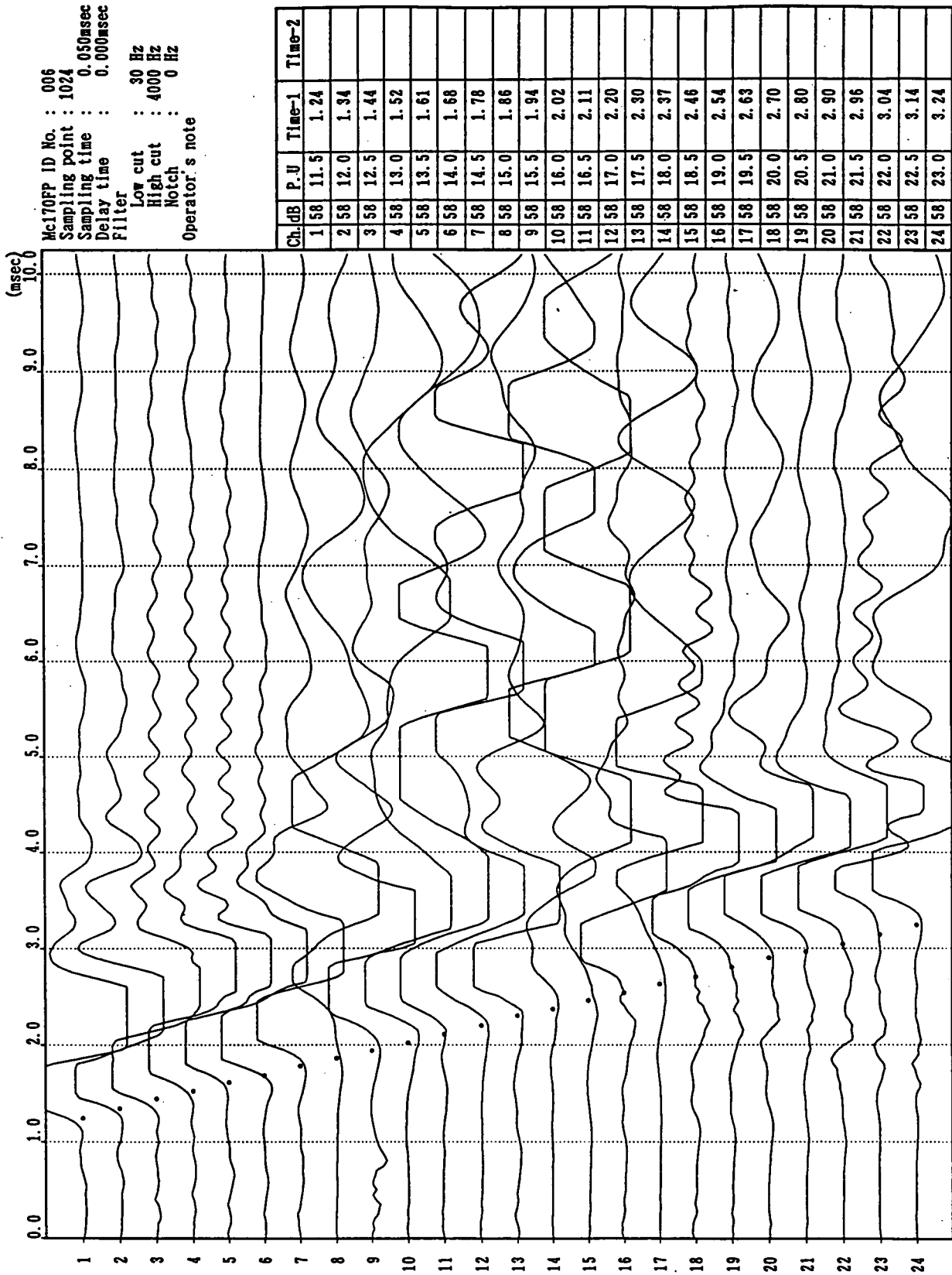


図2.2.15 坑内弾性波探査（屈折法）における記録波形
 （発振：ST+5.5，受振：ST+11.5~23.0）

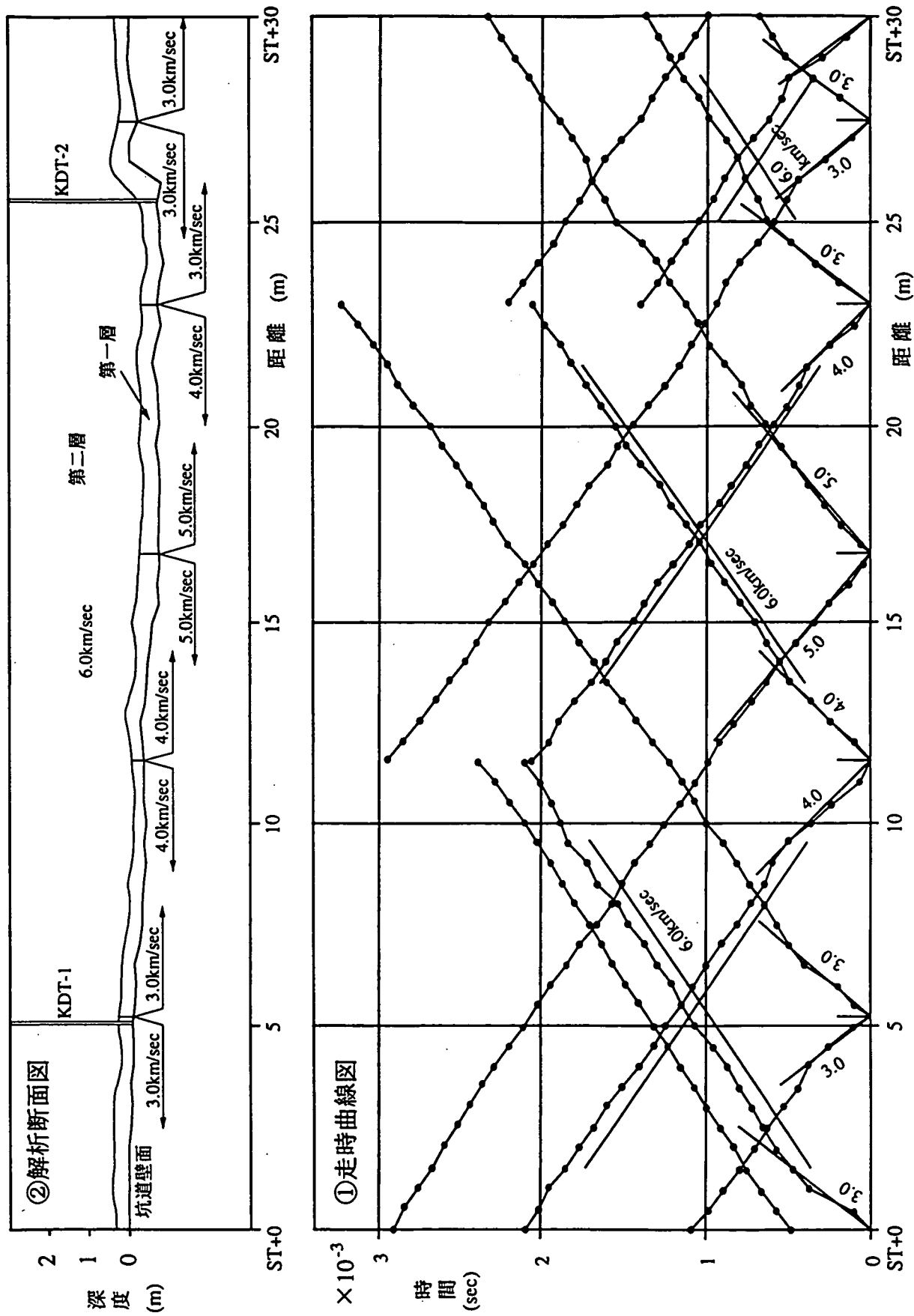
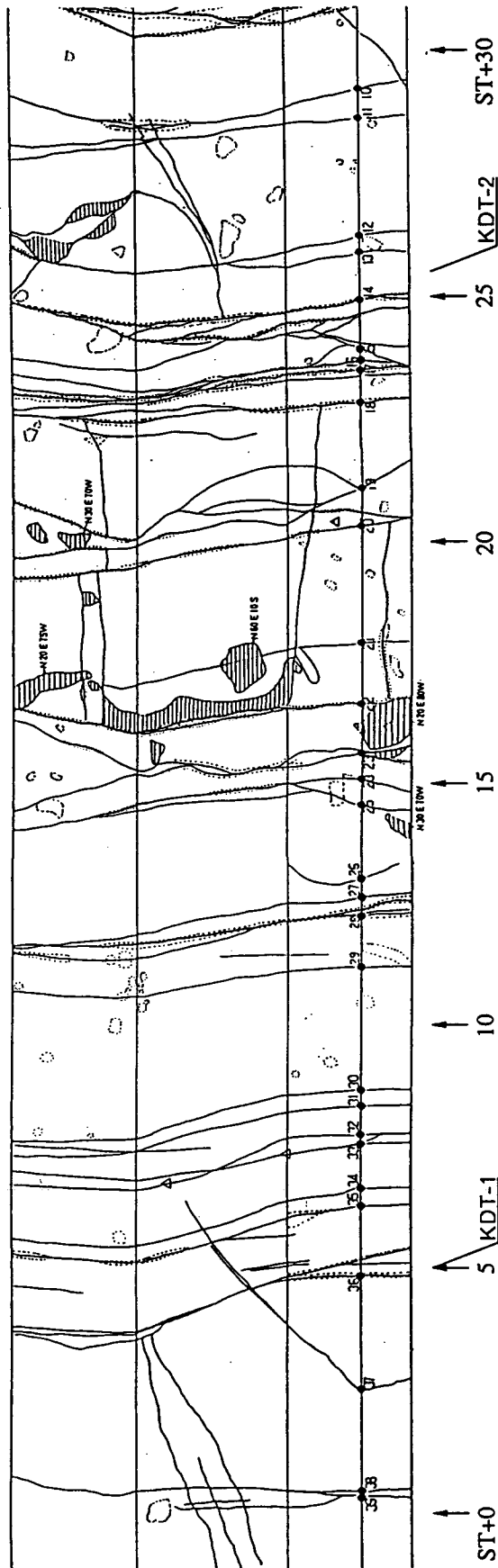
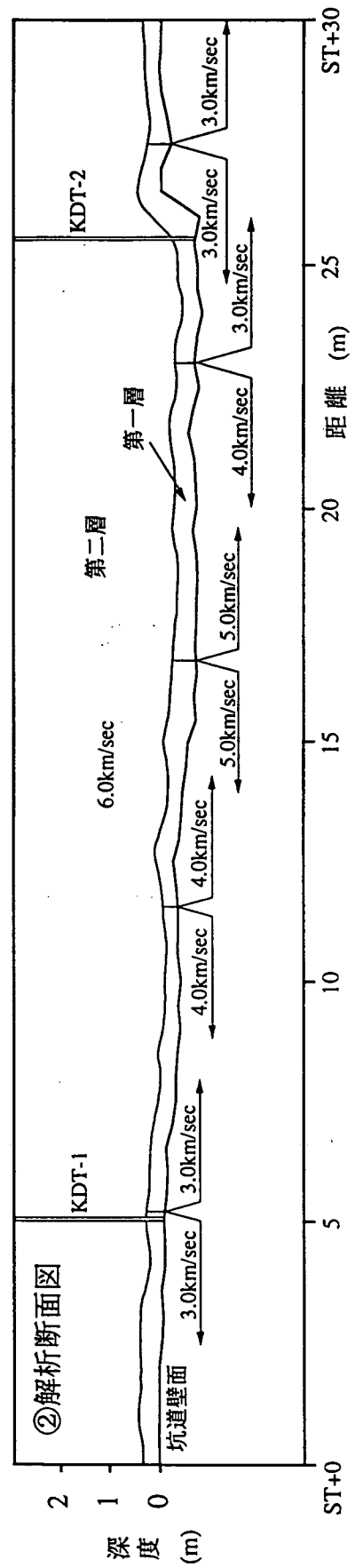


图2.2.16 弹性波探查 (屈折法) 结果



(a)坑道壁面におけるき裂調査結果



(b)屈折法による弾性波伝播速度分布

図2.2.17 坑道壁面におけるき裂調査結果と屈折法による弾性波伝播速度分布

2.2.4 レーダ探査（反射法）

2.2.4.1 目的

地中に向かって送信した電磁波（レーダ）は、岩盤特性により反射・減衰を繰り返して進む。レーダ探査は、この現象を利用した電磁波（レーダ）探査装置を用い、坑道壁面より水平方向に対する岩盤中の電気的特性の異なる境界からの反射波を受信する方法である。電磁波の反射・減衰は主に岩盤中の電気的性質の異なる境界面において強く発生し、必ずしも地層境界で反射・減衰が発生するとは限らないが、多くの地層境界や岩盤状況と結び付けて解釈することが可能であることから、受信される反射波は岩盤の特性を推定するために有効な材料となる。

レーダ探査は連続的な境界面を把握することができるため、この測定結果により岩盤掘削に伴う掘削影響領域の範囲を把握することを目的とする。

2.2.4.2 測定方法および解析方法

(1)測定方法

送信アンテナから照射された電磁波（周波数数百MHz帯）が岩盤内を伝搬する際の電気的特性の異なる境界面（必ずしも地質で変化するとは限らない）で反射し、受信アンテナによって受信された反射波により地下構造を推定する方法である。基本的な測定原理は弾性波等による反射法と同じであり、一定のサンプルレートにより得られる反射波形を、アンテナを移動測定することにより並べ対比するものである。大きな相違点は電磁波と呼ぶ非常に周波数の高い信号源を使用していることである。従って高周波数帯の帯域幅を広くとることにより分解能の高く情報量の多い測定を可能にしている。以下に主な測定仕様を示す。

- (a) 調査地点は、弾性波探査測線と同じとし、坑道内の水平孔間（調査孔）の距離20.5mにKDT-1孔の孔口の左側5m、KDT-2孔の孔口の右側4.5mを加えた30m（ST+0～ST+30）の坑道壁面上に測線を設定した。
- (b) 測定には図2.2.18に示す構成のレーダ探査装置を用いて実施した。測定方法の概念を図2.2.19に示す。
- (c) 計測される岩盤情報は、CRT画面上に探査測線の断面画像をリアルタイムに表示した。また、この表示画像を距離信号とともにデータレコーダーにも収録し、室内にて断面画像を再生し、岩盤中からの特異な反射情報による映像パターンを判読した（図2.2.19）。

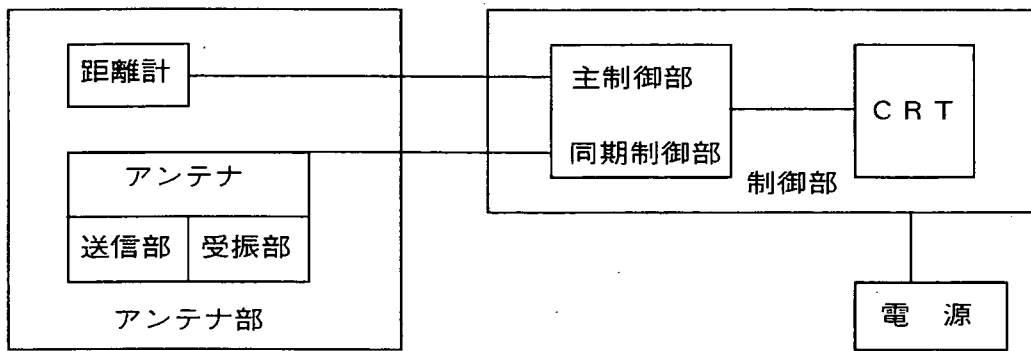


図2.2.18 電磁波（レーダ）探査装置の構成

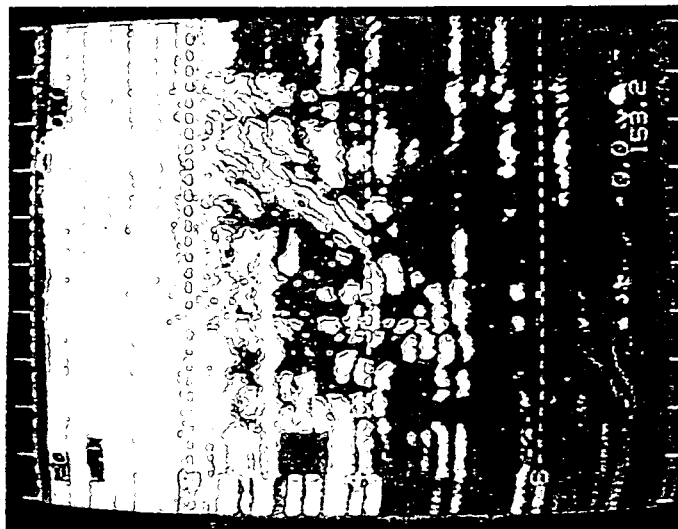
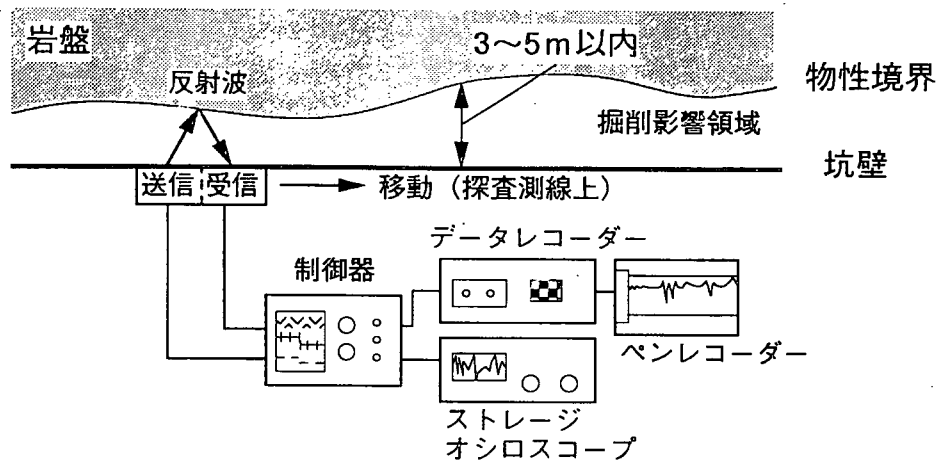


図2.2.19 レーダ探査の測定方法の概念と断面画像例

(2)使用機器

今回の探査に用いた機器の主な仕様を表2.2.7に示す。

表2.2.7 主な機器仕様一覧表

項目	型式	仕様	メーカー
制御部	KSD-8	利得 65dB ± 3dB STC 20dB ± 3dB 表示 11インチCRT (8色) 256×256ビット(画素密度) 生データ・処理データ 距離計に同期して表示 (または時間表示) 信号処理 空間フィルター法 差分法 出力 10mVpp~10Vpp	(株)光電製作所
アンテナ部 (送信・受信 一体)		中心周波数 1000MHz 送信パルス 1nsec モノサイクルパルス 出力 130V	(株)光電製作所
収録器 (データレコーダ)	RD135T	チャンネル 8ch 記録・再生 多重化PCM記録再生 周波数特性 48kHz/24kHz/12kHz 切り換え	ティアック(株)

(3)解析方法

レーダ探査における解析は、地中レーダ探査装置を用いて得られたデータをCRT (カラーブラウン管) 表示し、このレーダ映像を写真化して反射体の特異な映像パターンを判読した。このCRT表示は上下左右256本のビットラインによって交差表現される。通常的地盤状況はきわめて複雑であり、多くの情報を提供してくれるが、あまりにも複雑な地質を多くの色彩で表現すると、人間の判断を誤らせる恐れがある。従って、3原色の合成による8色に限定して表示している。表示される反射波の強度 (反射波の振幅の大きさ) は大きいほうから順に、赤→黄→白→青の色彩で示している (図2.2.20参照)。

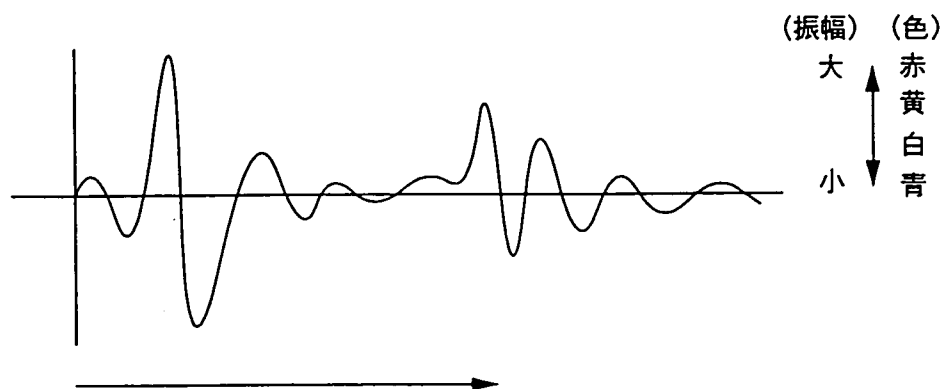


図2.2.20 反射波の強度と色彩

地表面から射出される電波は、アンテナを中心にして深度の増加とともに円形状に広がり、アンテナを頂点とした円錐形をなしている。その入射角は 11° であるが、反射波がもっとも強く表れるのは中心角 45° 前後であると考えられている。また、入射波・反射波ともに時間計測され、たとえば図2.2.21のように 100nsec ($1\text{nsec}=10^{-9}\text{sec}$)の範囲は、アンテナ直下での水平線よりも円錐の外辺に向かうほど地表面に近いところを表している。

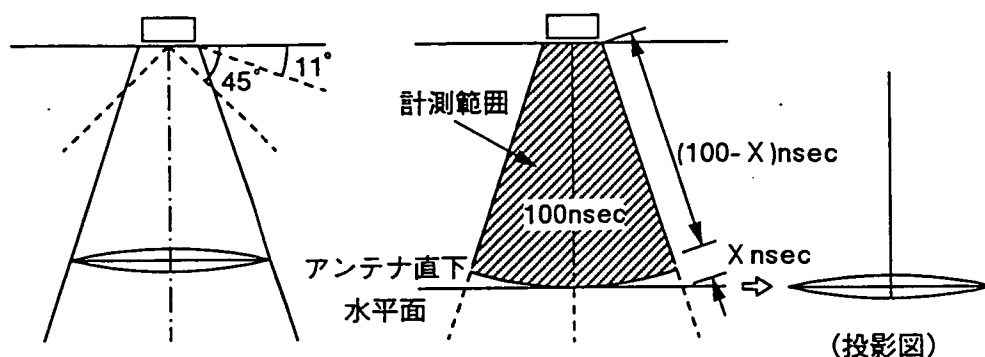


図2.2.21 反射波の映像特性

2.2.4.3 調査結果

レーダ探査では計測時の記録波形に対する深度方向の単位は時間であり、反射面までの到達時間で表わされる。これを深度に変換するために、現地にてセパレート型の送・受信器を用いて電磁波の伝播速度を測定した(透過測定)。

透過測定の結果より、以下のように調査領域の岩盤の平均的な電磁波伝播速度を算出し、この伝播速度から比誘電率を算出した。

$$\begin{aligned} \text{伝播速度 (V)} &: \text{距離差} / \text{初動時間差} \\ &= 0.824(\text{m}) / 7.014 \times 10^{-9}(\text{sec}) \\ &= 1.17 \times 10^8(\text{m/sec}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{比誘電率 } (\epsilon_r) &: (\text{光速} / \text{伝播速度})^2 \\ &= (2.998 \times 10^8(\text{m/sec}) / 1.17 \times 10^8(\text{m/sec}))^2 \\ &= 6.57 \end{aligned}$$

比誘電率は電磁波レーダ探査に用いられる物性値であり、主に電気・電磁的性質の違いを表現している。図2.2.22に各種岩石および鉱物の比誘電率を示す。今回得られた比誘電率は、図中の花崗岩(乾燥状態)の数値の範囲内にある。

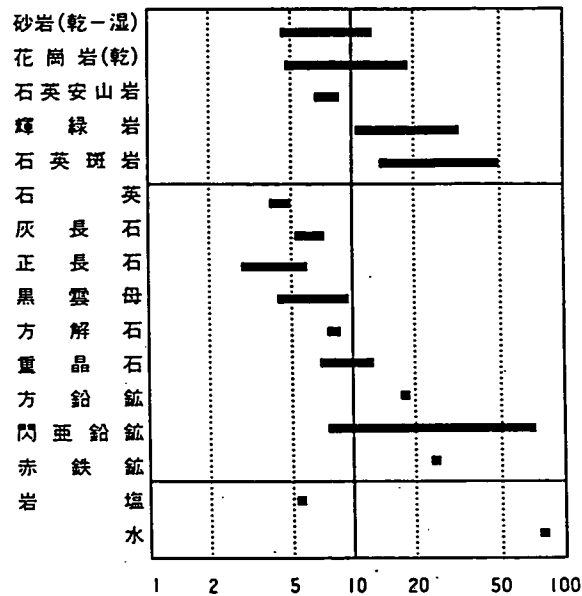
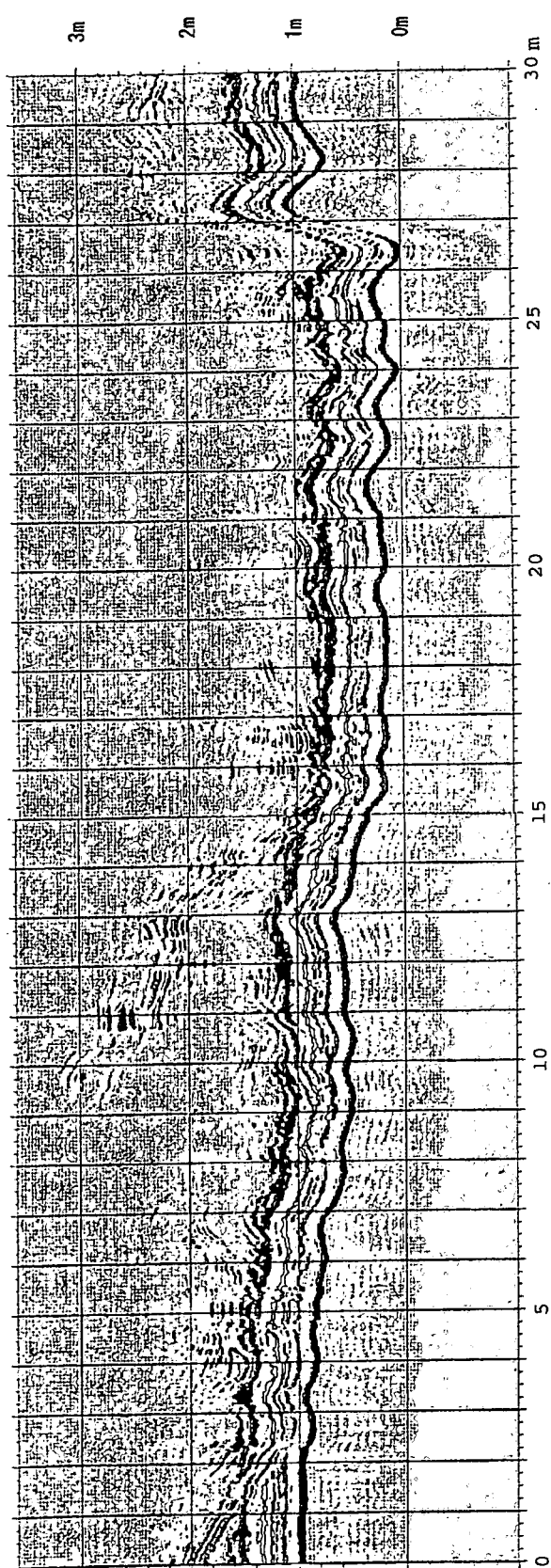


図2.2.22 各種岩石・鉱物の比誘電率⁸⁾

今回の調査で得られたデータに対して振幅回復処理、デコンボリューション処理、マイグレーション処理等を行った後、図2.2.23①に示す反射断面図を作成した。一般的に見た電磁波の反射・減衰は、主に媒質中の電気・電磁的性質の異なる境界面において強く生じるが、受信される反射波は必ずしも地層境界だけで反射・減衰が発生するとは限らず、ノイズ（主にリングング、多重反射によるもの）が含まれていることが多い。このようなノイズは解析処理段階である程度除去が可能であるが、除去できない場合は解釈の段階で識別する必要がある。図2.2.23①ではノイズの除去処理を実施したにもかかわらず坑道壁面から深度0.3~0.5mまでの領域においてノイズを完全に除去することができず、ノイズが残存している。

2.2.4.4 考察

図2.2.23①における坑道壁面付近のノイズは、リングングによる影響が強いと考えられる。ここでリングングとは、送信波が減衰するときの周波数帯域の変化（周波数帯域が狭くなる）によって発生する波形の歪みであり、不要な継続振動である（図2.2.24参照）。リングングは反射波が発生するような送信波の減衰時には必ず発生し、特に地中入射時に起きる送信波の減衰によるものが強い。また、今回使用した地中レーダ探査装置はSTC(Sensitivity Timing Control)と呼ばれる可変増幅回路を有しており、この機能は弱いレベルの反射波を増幅させるために、発信時刻から時間が経過するほど反射波のレベルの増幅度を徐々に増大させる。



①反射断面図



--- : 抗道壁面

— : き裂または鉱物の変質部と
考えられる反応

②解釈図

図2.2.23 レーダ探査（反射法）結果

このSTC機能により信号レベルが増幅される時間ポイントは、地表面反射波が観測される時間ポイントよりも遅いため、特に地表面反射波の継続振動（リングング）がSTC機能により強調され、坑道壁面から深度0.3～0.5mまでの領域においてノイズの影響が強くなったものと考えられるが、STC機能を使用しない場合は地表面反射に伴うリングングが著しく増大し、この反射波の表れる時間ポイントよりも遅い時間ポイントの反射波が検出不可能であると考えられる。

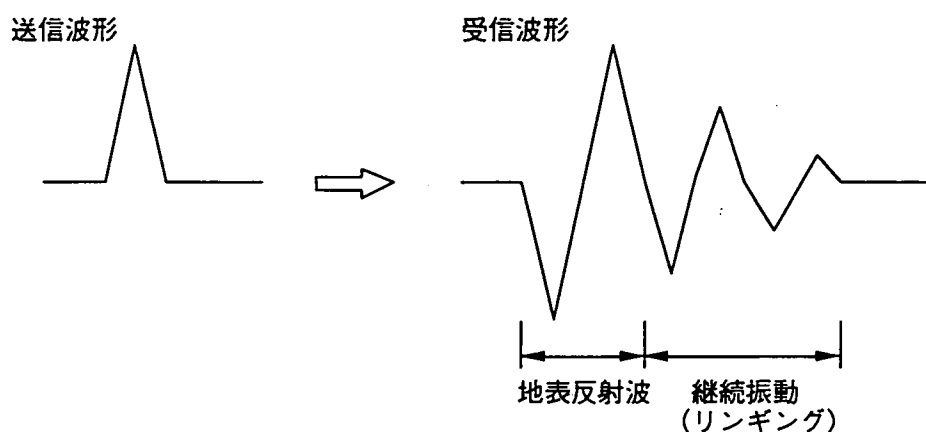


図2.2.24 送信波形と地中入射時の受信波形の関係

図2.2.23①においてノイズの影響を考慮し、き裂や鉱物の変状部に影響されたと考えられる反射反応を抽出して図2.2.23②に示す解釈図に表した。この図ではノイズの影響で坑壁から深度0.5m付近までが不明瞭であるが、深度0.5～2.5mの間で反射面が存在していることを示している。ここで、ST+10～15において深度2.5m付近の反射面が捉えられていることから、今回の探査では深度2.5mまでの評価は可能であると判断できる。そこで、坑壁から深度1.0m付近までの領域では反射面が多く、深度1.0～2.5mの領域ではほとんど反射面が存在しないことから、深度1.0m付近までを掘削影響領域と考えることができる。また、ST+0～2およびST+10～15のそれぞれの区間において坑道壁面と約40度で交わる顕著な反射面が存在しているが、図2.2.17の坑道壁面のき裂分布図と対比しても図2.2.17では坑道と直交するき裂がほとんどであり、これら斜めの反射面に対応するき裂は存在していない。しかし、坑道壁面におけるき裂の走行傾斜が壁面内部でも保持されている保証はなく、この顕著な反射面がき裂でないとは断定できない。

一方、今回探査を実施した坑道壁面には壁面にほぼ直交するき裂が卓越しているものの、アンテナの直下の反射波を評価するという手法の性質上、これらのき裂を捉えることはできなかった。

2.2.5 弾性波トモグラフィ

2.2.5.1 目的

発振点で人工的に起した波動（弾性波）は、岩盤中を四方に伝搬する。このときの波動の伝搬の仕方は、伝搬途中の岩盤状態に依存するため、震源から一定距離にある受振点で弾性波の波形を測定することによって、発振点・受振点間の平均的な岩盤性状を把握することができる。さらに、震源位置を移動し、受振も複数点でアレイ測定したデータを総合的に解析することにより、地盤性状の2次元的な把握ができる。

弾性波速度は一軸圧縮強度などの岩盤の力学的特性と相関があることが知られており、弾性波の伝搬特性を精度よく調べることで岩盤の特性を把握することができる。同じ弾性波を使った探査法でも、屈折法や反射法は地下構造（弾性波の速度構造）がおおむね水平成層構造に近いことを前提として解析が行われるのに対し、トモグラフィ法ではこのような制約がなく、地質構造が水平方向に複雑に変化したり、局所的な不均一性が予想される場合にも有効である。

これらの特性を利用した掘削影響領域の把握を目的として、弾性波トモグラフィによる探査を行った。

2.2.5.2 測定方法および解析方法

(1)測定方法

今回の弾性波トモグラフィ探査の実施上の仕様と測定方法を以下に示す。

- (a) 調査は、坑道内の水平距離20.5mの深度20mの水平ボーリング孔間の水平面を対象とし、測定点はボーリング孔内および坑道壁面に設けた。
- (b) 測定点間隔は水平孔、坑道壁面とも原則的に1.0mとした。ただし、坑道壁面より深度10mまでを0.5m間隔に深度10～20mまでを1.0m間隔に測定し、坑道壁面では全地点とも0.5m間隔で測定した。
- (c) 今回の探査では発振源として、
 - ①火薬を用いないために孔壁を痛めない、
 - ②雷管に比べて作業効率がよい、
 - ③花崗岩の高い周波数特性に対応しているため伝播効率がよい、
 - ④無指向性のハイドロフォン（地震計は指向性がある）もまた周波数特性が高いため、スパーカーとの相性がよい、等の理由からスパーカー震源を適用した。起振点間隔は原則的に1.0mとした。ただし、測定間隔と同様に深度10mまでを0.5m間隔に狭めて測定した。
- (d) 受振方法は、水平孔内では多連のハイドロフォンケーブル（6～12個）と

し、坑道壁面では水平・上下動兼用型の受振器（12～24個）による。壁面での受振器の固定は、坑内弾性波探査（屈折法）と同様にアンカー方式とした（図2.2.3.2参照）。

- (e) 測定は24成分の弾性波探査装置を用い、1展開は12mを原則とし、予め受振器を受振用水平孔及び坑道壁面の測定点にセットした後、発振孔の1地点で起振して1波形記録をデジタル信号で収録した。そして、発振点を順次ずらして、同様に起振を繰り返して測定を行った。ただし、水平孔での受振は、吊り下げ方式のハイドロフォン受振ケーブルを用いるため、測定には孔内水が必要となるので、孔内水が保持できる様に対策を施した。受振ケーブル及びスパーカー震源は、孔内水保持対策の前に、非導電性の押し込み棒に沿わせて孔内に挿入した。図2.2.25に測定点配置図、図2.2.26に今回測定を実施した全線、図2.2.27に測定方法と孔内水保持方法の概念を示す。

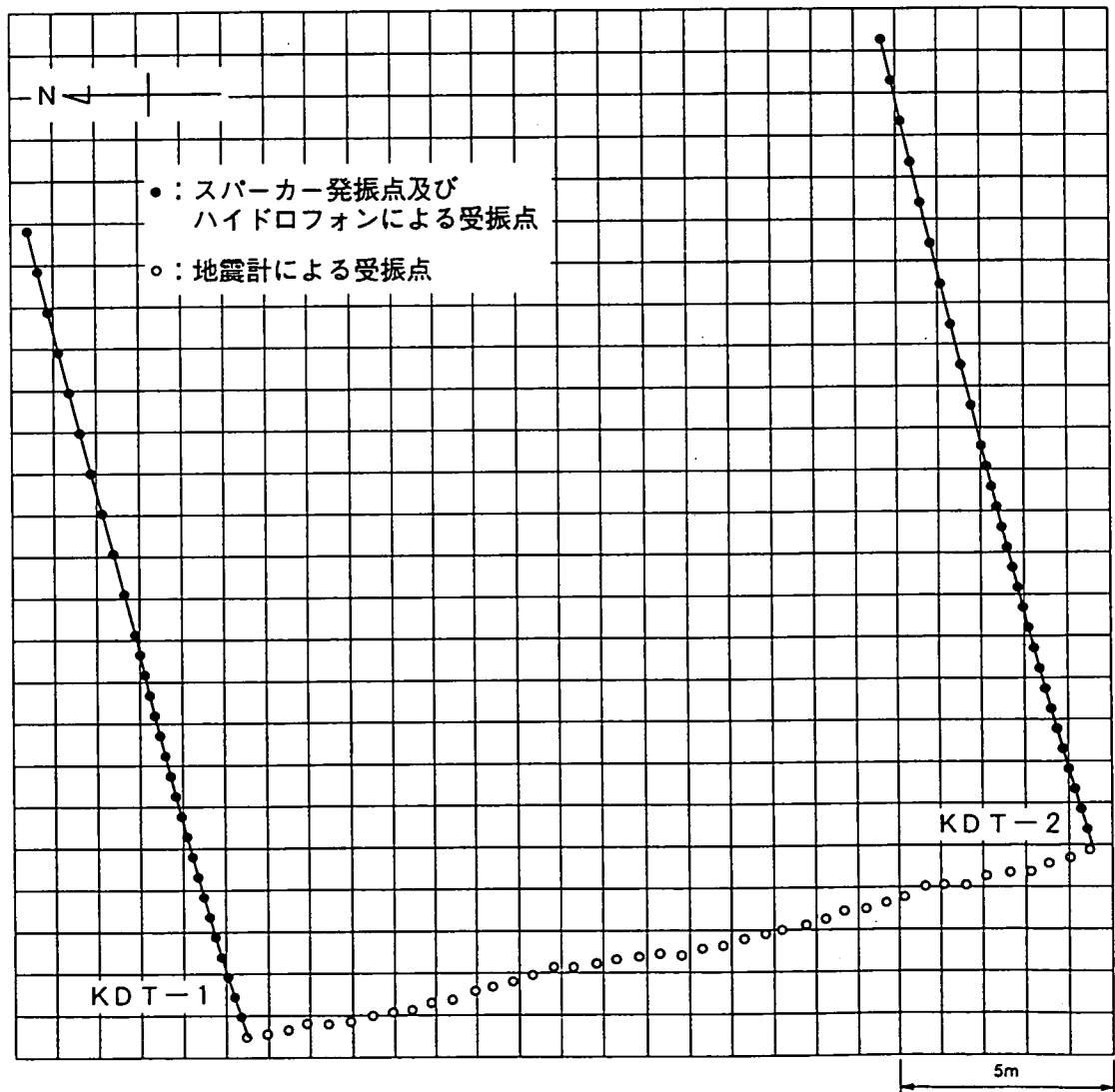
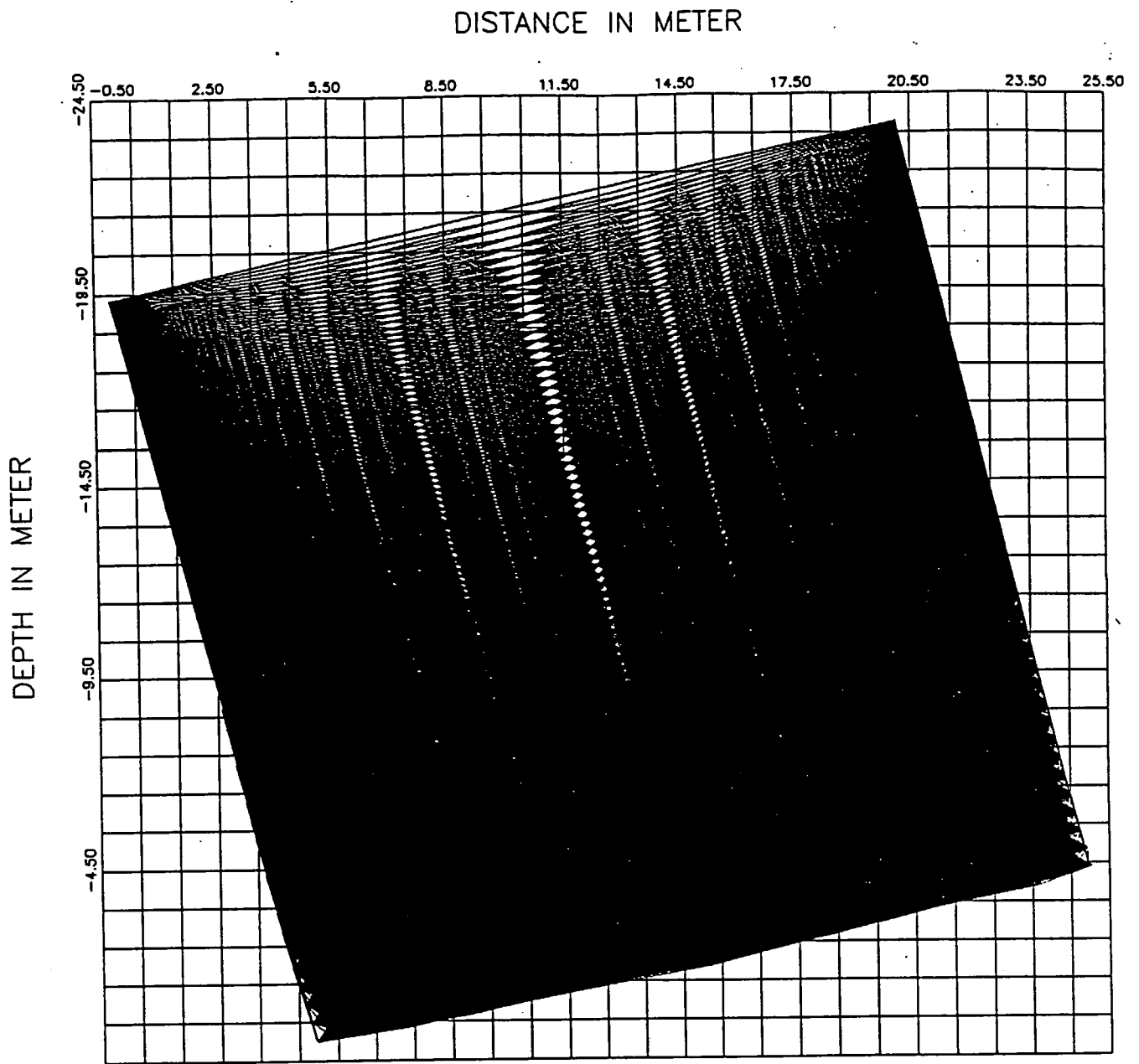
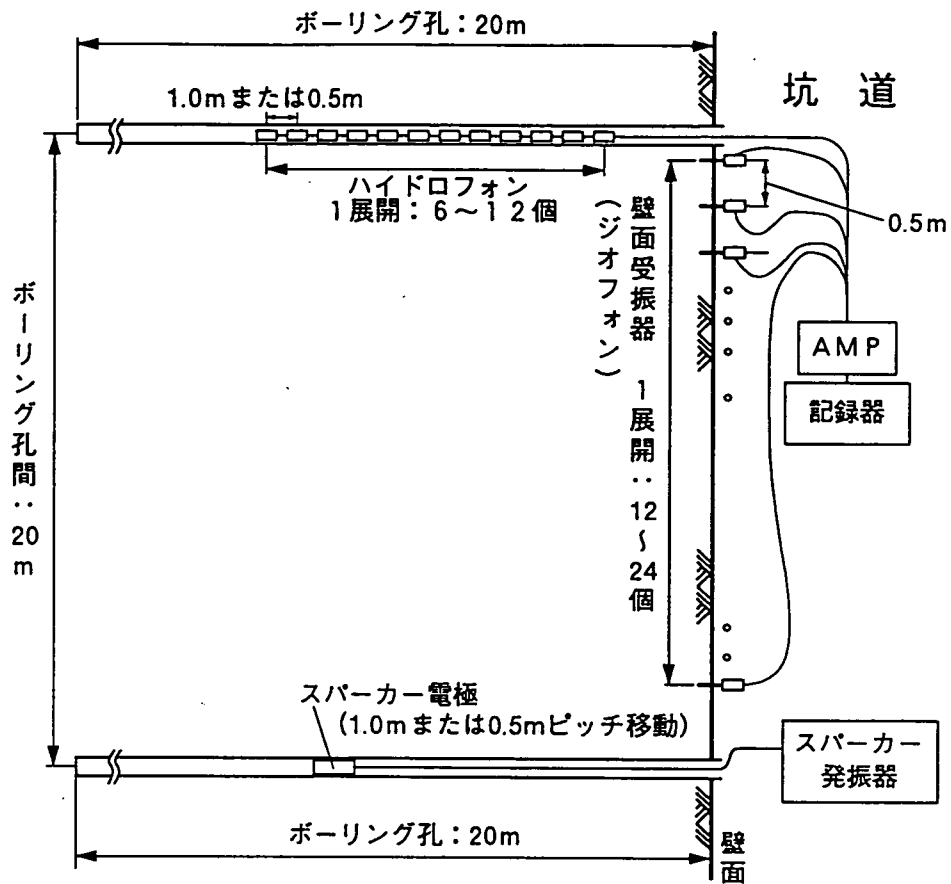


図2.2.25 弾性波トモグラフィ測定点配置図

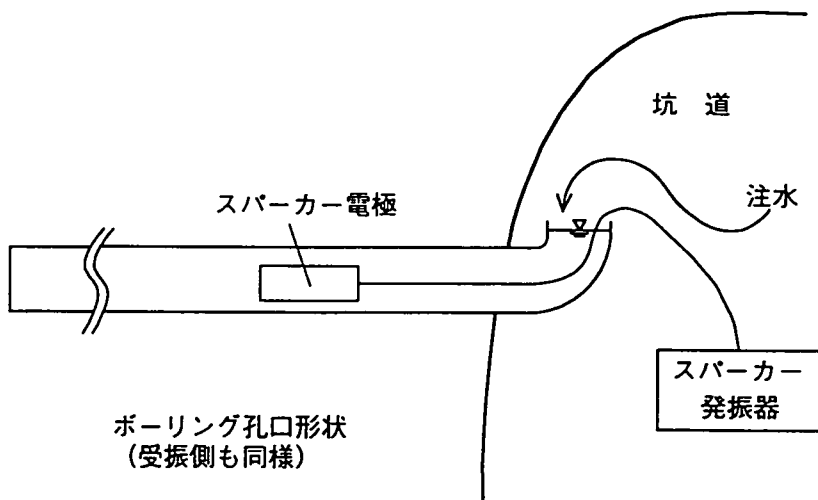


全波線数 : 6970

図2.2.26 弾性波トモグラフィ波線図



(a)弾性波トモグラフィ測定方法



(b)孔内水保持方法

図2.2.27 弾性波トモグラフィ測定方法及び孔内水保持方法の概念

(2)使用機器

使用機器のデジタル収録装置は24成分を有し、モニター記録器も備え、データ収録状況がチェックできる。なお、サンプリングレートはP S検層と同様に弾性波速度と測定点間隔の関係により50 μ sec (20kHz) とした。

この装置はマルチチャンネル化され、受振器からの信号を一度に複数個記録することができる。ここで受振信号は、プリンターで可視記録にされると同時にデジタル化されてフロッピーディスクに収録できる。表2.2.8に主な機器の仕様を示す。

表2.2.8 弾性波トモグラフィ機器仕様

項 目	型 式	仕 様	メーカ-
測定・記録器	McSEIS-170F	成分数 12or24 入力インピーダンス 600 Ω 利 得 34~80db 8ステップ サンプリングレート 25,50,100,200,500,1000, 2000 μ SEC メモリーサイズ 1024ワード A/D分解能 12ビット プリンター印字 サーマル方式 電 源 DC10.5~13.5V 重 量 16kg 固有周波数 14Hz	OYO
孔内受振器 (ハイドロフォン)	12連式 (AQ-2)	音圧感度 -202.5dB 加速度感度 -60dB 周 波 数 1~10KHz	ベントス
壁面用受振器 (ジオフォン)	HS-J	使用個数 48個 固有周波数 28Hz インピーダンス 215 Ω	Geo- Space
起振器 スパーカー	231	発振エネルギー 1000ジュール	EG&G

(3)解析方法

トモグラフィ解析のフローを図2.2.28に示し、以下に解析手順を示す。

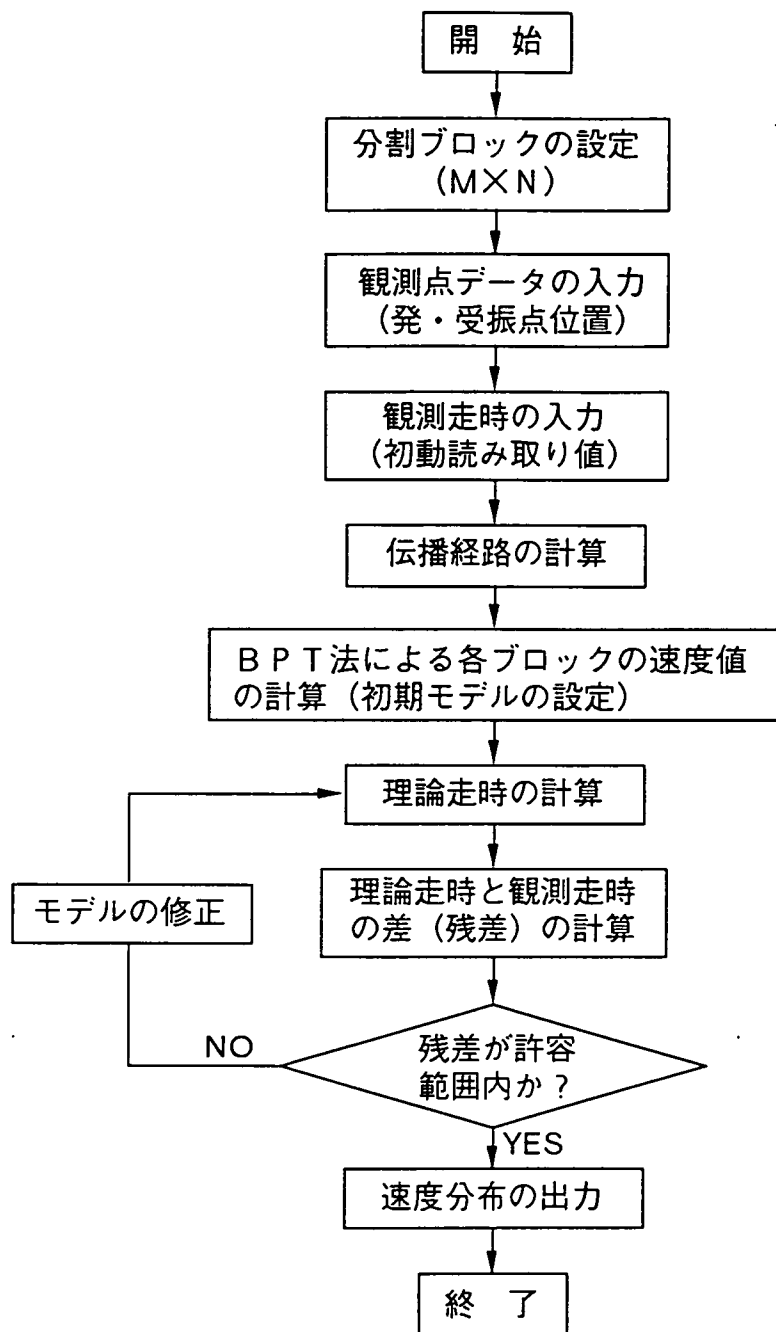


図2.2.28 トモグラフィ解析のフロー

(a) 分割ブロックの設定

トモグラフィ解析は、測定対象とする地盤をブロックに分割し、それぞれのブロック内の物理量（弾性波速度）を測定データから求める。そこで、調査領域を含み、それよりやや大きめの矩形領域を解析領域として、それをブロックに分割する。今回の解析では1.0m四方のブロックに分割した。

(b) データセットの作成

解析は、各測定データについて弾性波の初動到達時間を用いて行い、初動到達時間は、発・受振点間で得られた波形データより読み取る。そして、発振点毎にデータを表示するなどして異常値がないかをチェックし、読取値の修正・削除（データの品質管理）を行う。これらの観測走時と測量および孔曲り測定によって得られた発・受振点の位置座標より、解析に用いるためのデータセットが得られる。

(c) 初期モデルの設定

計算のスタートとなる近似速度モデル値を設定する。最も簡単な方法として均一な構造からスタートすることもできるが、ここでは逆投影法(BPT法：Back Projection Technique)と呼ばれる手法により、一意的に各ブロックの物理量を定めることとした。BPT法とは直線波線を仮定し、各波線について測定データからスローネス（速度の逆数）を求め、各セルについてそのセルを横切る全ての波線の長さで重みをかけて平均することによって、そのセルのスローネスを求める方法である。図2.2.29に示す2つの調査孔の間の断面をN個のセルに分割するとき、 i 番目の波線長を L_i 、 i 番目の波線が j 番目のセルを横切る長さである波線長を l_{ij} で表わすこととし、各セルに与えられる物理量（スローネス）を q_j で表わす。さらに受振側の i 番目の波線に対応する観測量を f_i とすると、BPT法によるセル内の物理量は次式で与えられる。

$$q_j = \frac{\sum_i (f_i \cdot l_{ij} / L_i)}{\sum_i l_{ij}} \quad (2.2.17)$$

ここで、 $f_i \cdot l_{ij} / L_i$ は i 番目の観測量（スローネス）のうち、 j 番目のセルに分配された観測量（スローネス）であり、 i 番目の波線が通過したセルについてそれぞれのセルに分配された観測量の総和を求めると f_i に一致する。従って、(2.2.17)式よりBPT法は、 j 番目のセルを通過する観測量総和を波線長の総和で割った値としてセル内の物理量を定義しており、セル内の平均的な物性を与えることになる。

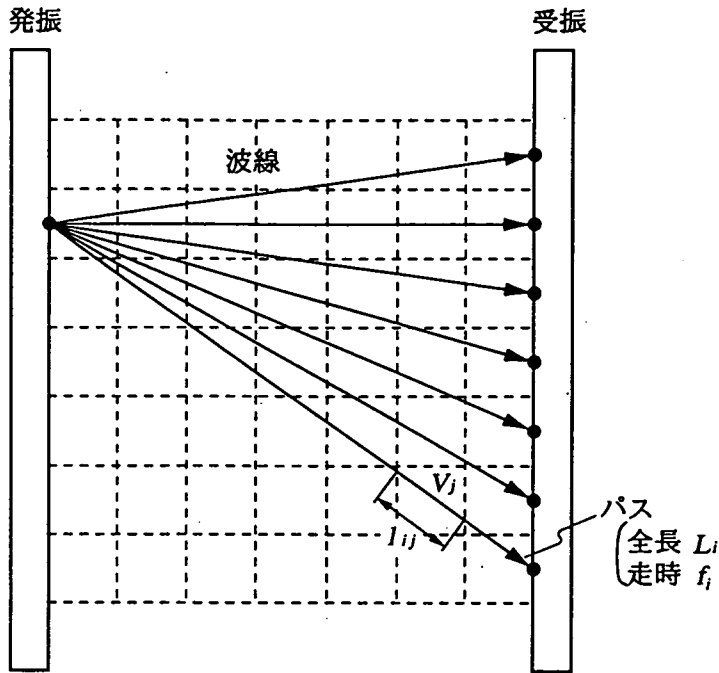


図2.2.29 波線（パス）とブロックのモデル図

(d) 理論走時の計算

速度モデルが決定されると、これを基にスネルの法則に従い波線経路と理論的弾性波到達時間（理論走時）を算出する。

(e) 測定値と理論走時との差（残差）の計算

測定データの初動走時と理論走時の差を残差と呼ぶ。残差が小さいほどモデルは実際と合致していると考えられ、残差がある許容範囲内に入ると計算を終了する。

(f) モデルの修正

残差が許容範囲に入らなければ、残差を小さくするためのモデル修正量を計算し、速度モデルを修正して(c)に戻る。モデルの修正に際して、得られた地震波弾性記録から岩盤の弾性波速度分布を再構成するインバージョンの方法には、図2.2.30に示される方法がある。

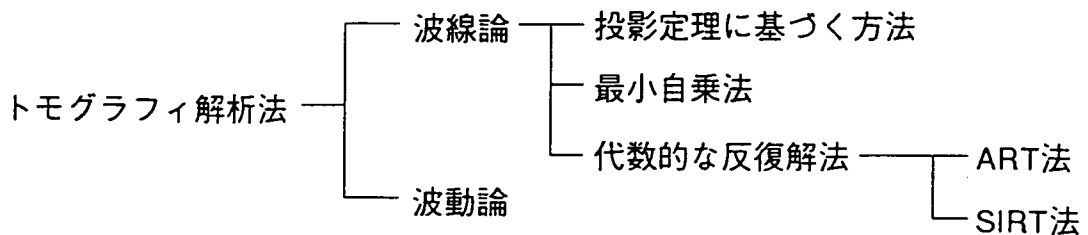


図2.2.30 トモグラフィにおけるインバージョン法

今回の調査結果に対しては、代数的な反復解法を用いることとした。この代数的な反復解法にはART法とSIRT法がある。ART法（代数的再構成法）は各波線の走時を計算する毎にスローネスを更新する方法であり、SIRT法（同時反復法）はいったん全ての波線について走時を求め、各波線に対するスローネスの誤差をブロック毎に求めながらスローネスを更新していく方法である。ART法とSIRT法について解析結果を比較すると、SIRT法は全体を平滑化する傾向がみられ、ART法は局所的な相違を際立たせる傾向がある。そこで今回は、掘削影響領域と健岩部の違いを知るという目的からART法を用いることとした。

2.2.5.3 調査結果

図2.2.31、32に今回の調査で観測された代表的な記録波形を示す。図2.2.31はボーリング孔内のハイドロフォンで観測された波形であり、図2.2.32は坑道壁面の地震計による波形である。図2.2.31では3～4msecでP波初動、6～7msecでS波初動が観測されている。同様に図2.2.32では3～4msecでP波初動、4～6msecでS波初動が観測されている。ハイドロフォンと地震計は周波数特性が異なるため、記録波形の振幅に違いがみられ、ハイドロフォンの方が振幅が小さい。また、P波の周波数はおよそ3000～4500Hzであり、S波の周波数はおよそ2000～3000Hzであった。このように、ハイドロフォンと地震計を使用した場合、振幅および周波数に相違が表れるがどちらもS波が明瞭であることからP波よりもS波の振幅が大きく、かつ周波数も低い。そのため測定として有利な点が多いと考えられる。従って今後においてS波を利用した測定方法も有用であると考えられる。

記録波形から読み取った初動と測点位置の座標値を基に、解析した結果を図2.2.33と図2.2.34に示す。図2.2.33はKDT-2孔を発振孔とした場合の片走時による解析結果であり、図2.2.34は両孔を発振孔とした往復走時による解析結果である。また、この解析で用いた波線をそれぞれ図2.2.35および図2.2.36に示す。

図2.2.33と図2.2.34はいずれも同様の傾向を示しており、坑道壁面で特に弾性波速度が低下していることに加え、KDT-2孔の右側に沿った領域と坑道壁面からの深度15～20mの領域で若干の速度低下領域が存在している点が一致している。また、坑道壁面の低速度領域は、KDT-1孔およびKDT-2孔の孔口付近で速度低下が大きく、両孔の間の領域では速度低下が小さい結果となっている。

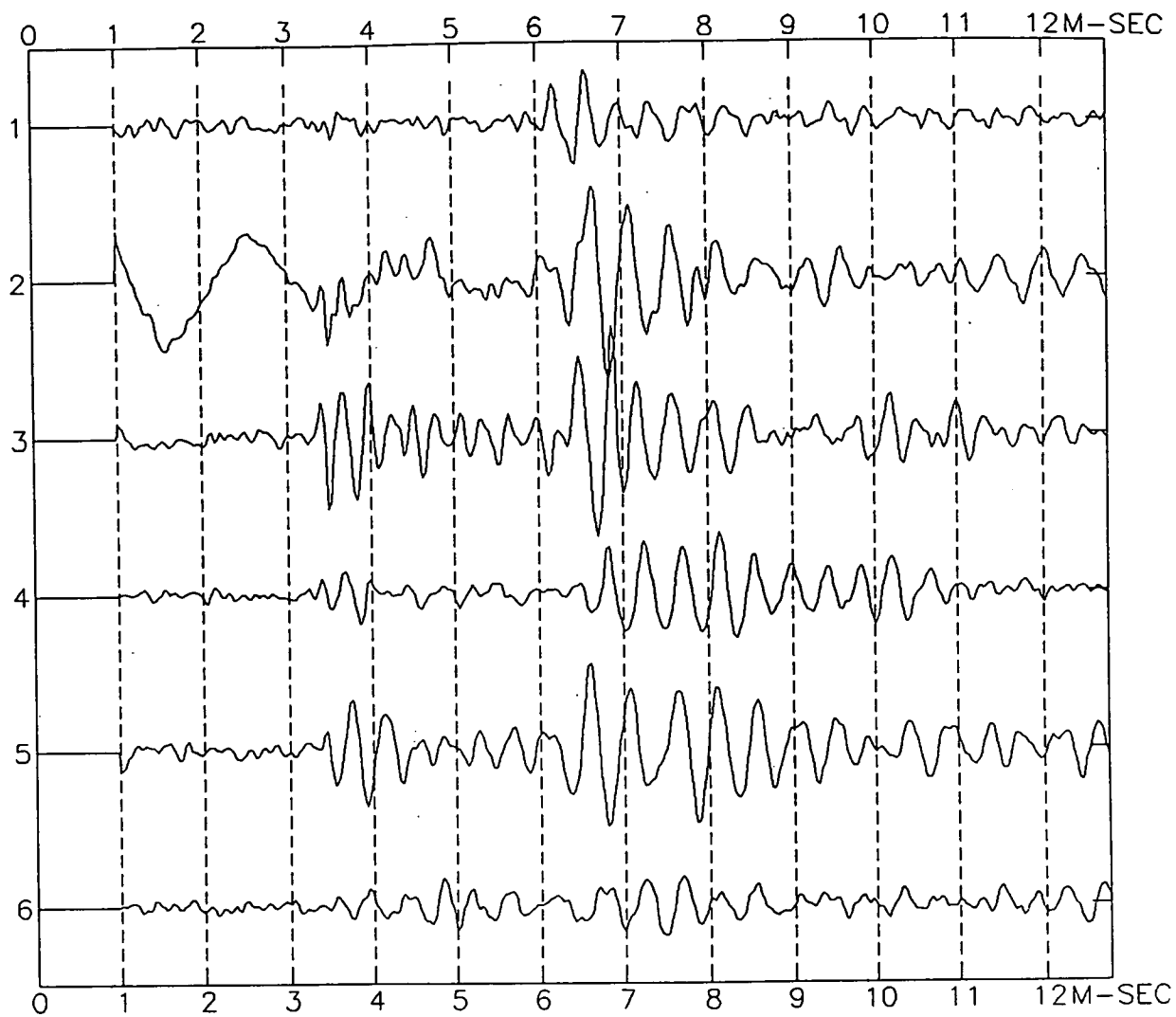


図2.2.31 ハイドロフォンによる記録波形

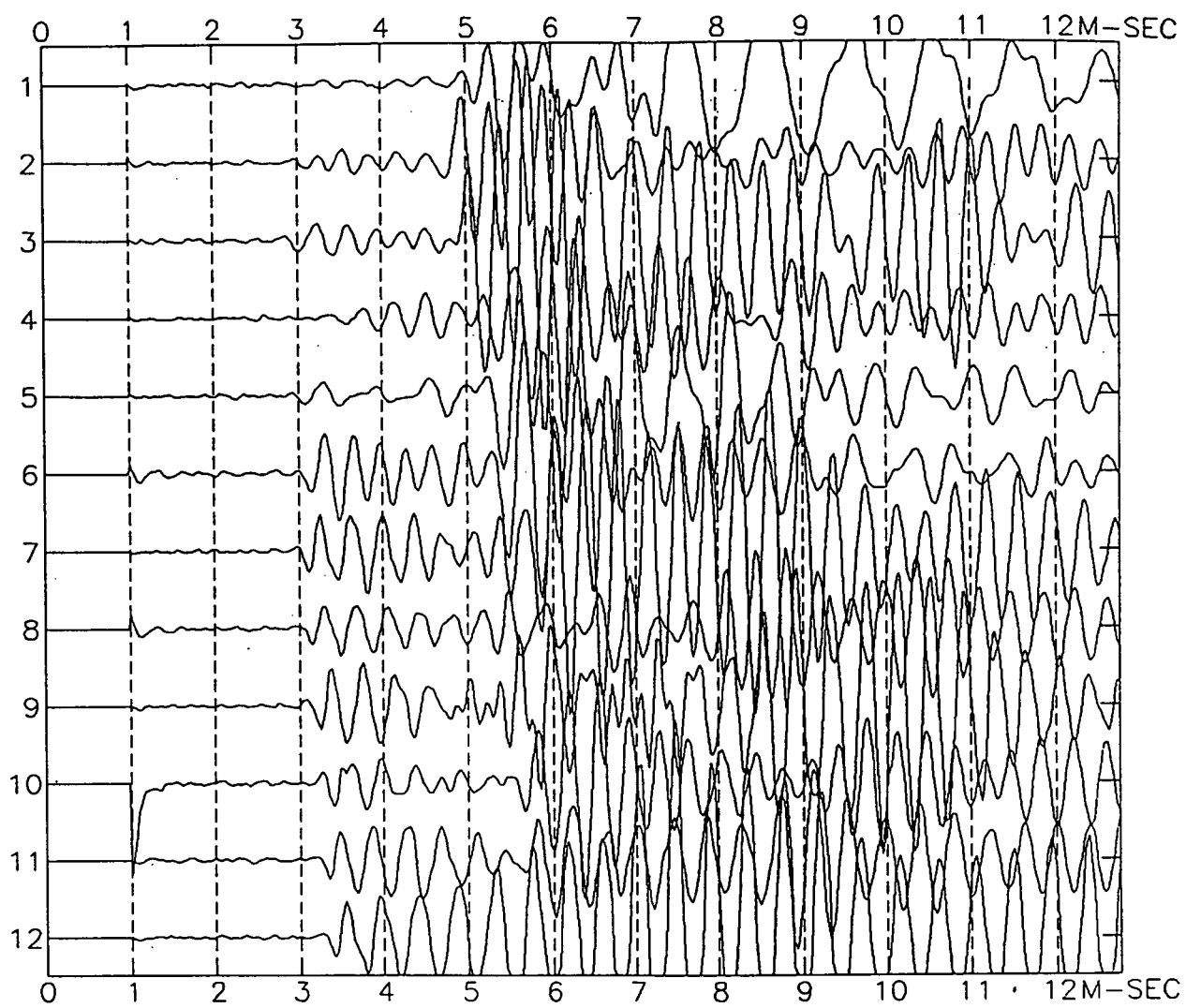


図2.2.32 地震計による記録波形

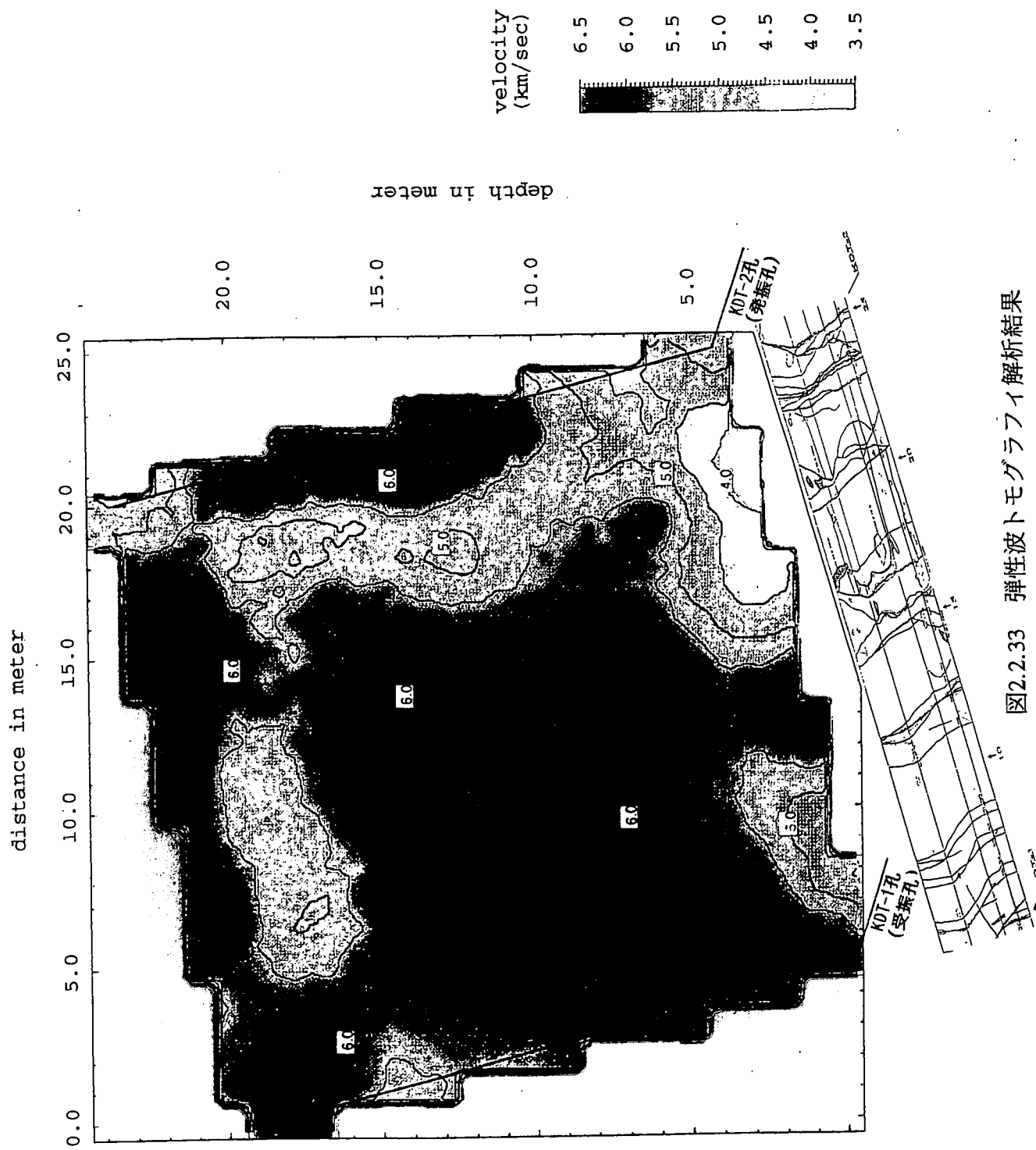


図2.2.33 弾性波トモグラフィ解析結果
(KDT-2孔発振・KDT-1孔受振の片走時による解析)

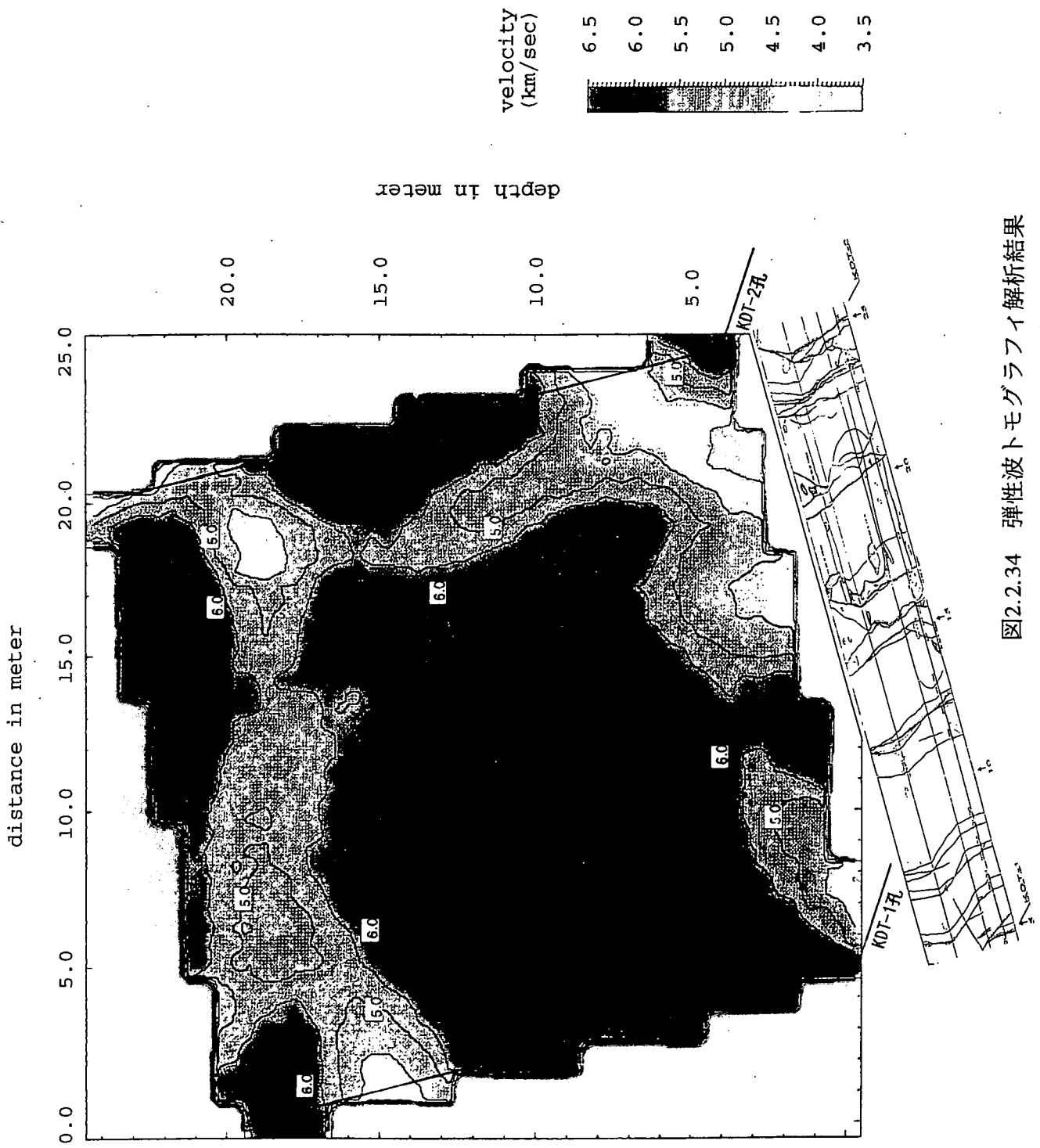
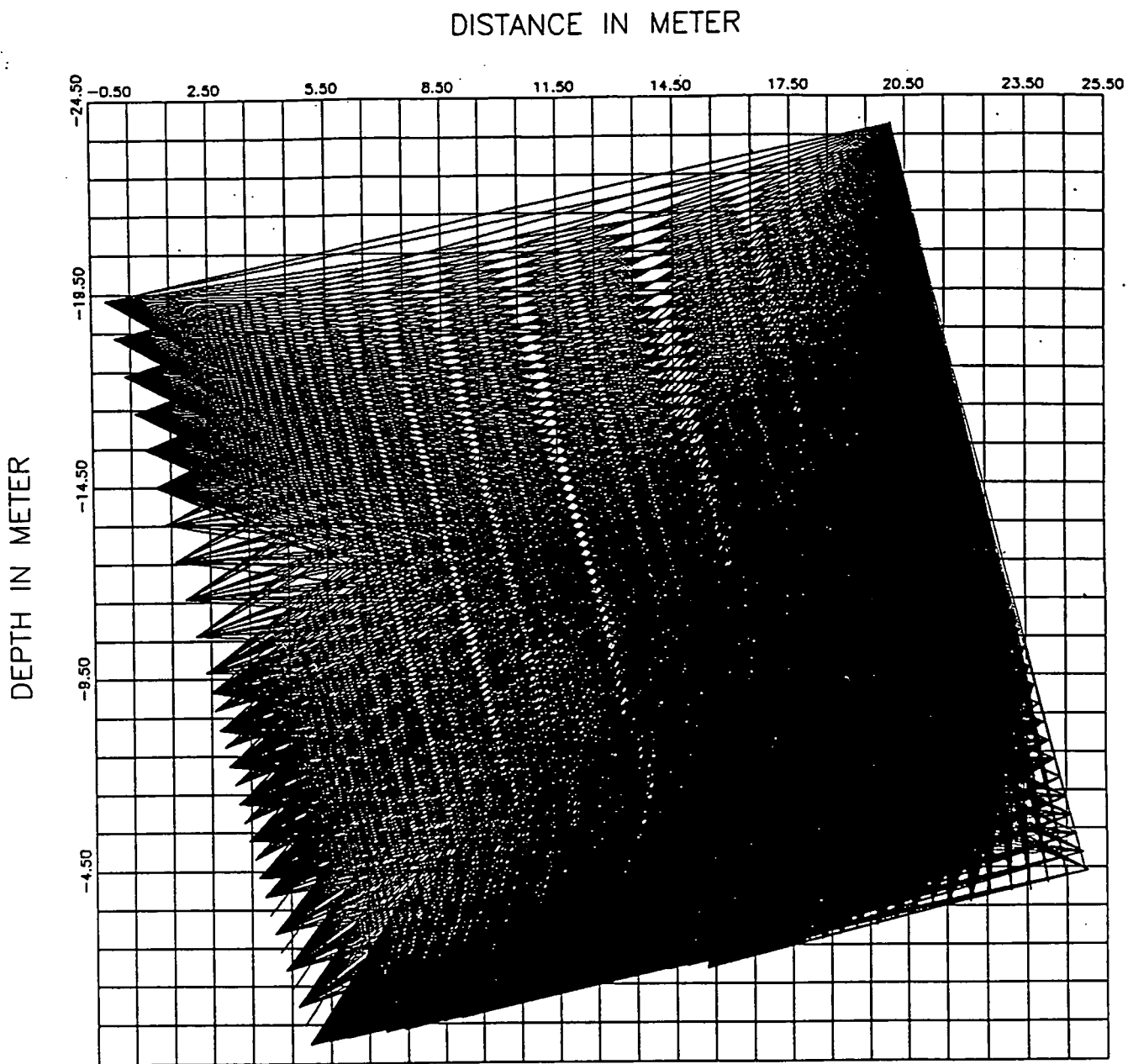
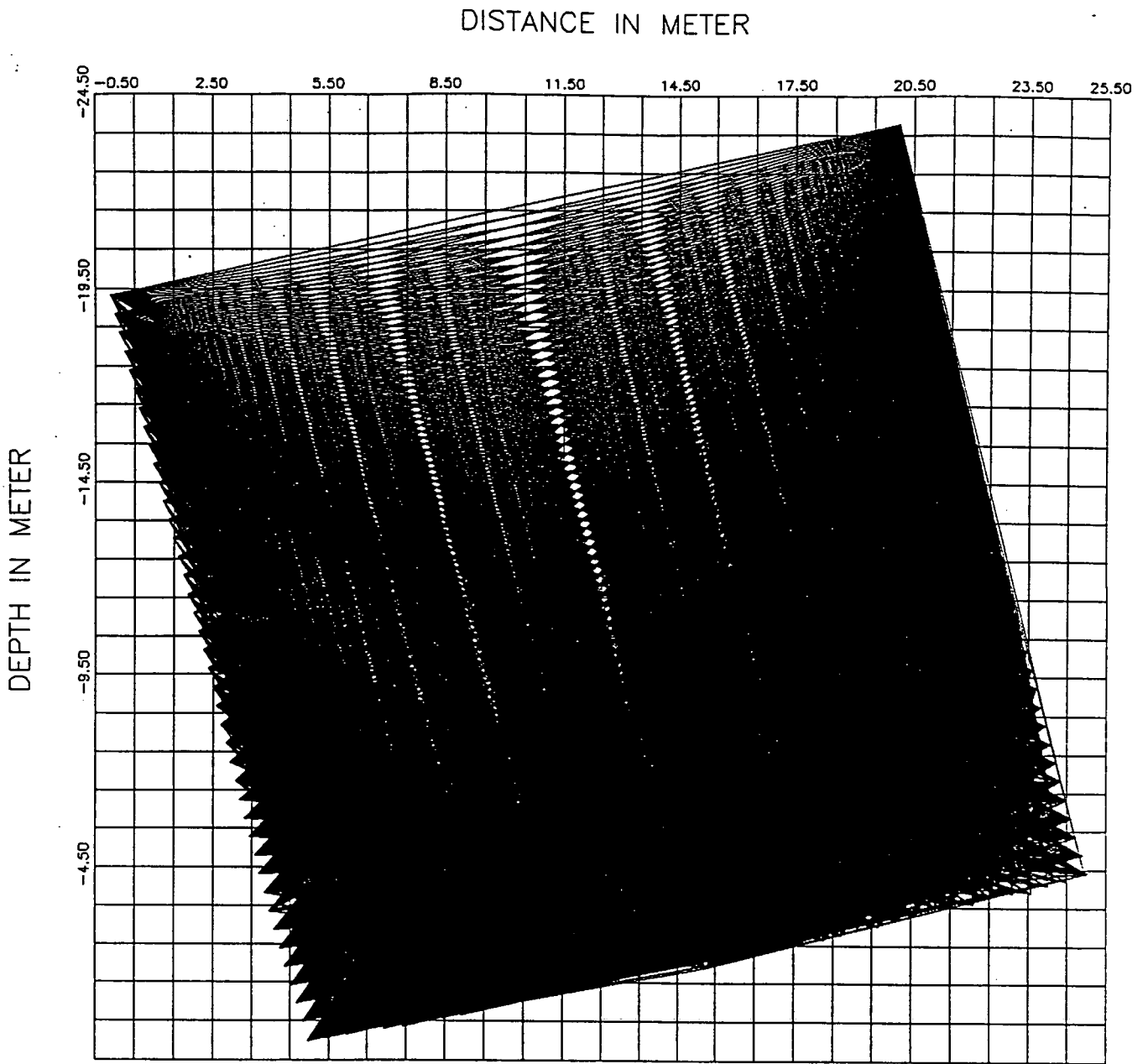


図2.2.34 弾性波トモグラフィ解析結果
(往復走時による解析)



全波線数：2363

図2.2.35 片走時解析で用いた波線
(KDT-2孔発振・KDT-1孔受振)



全波線数 : 4 2 1 9

図2.2.36 往復走時解析で用いた波線

2.2.5.4 考察

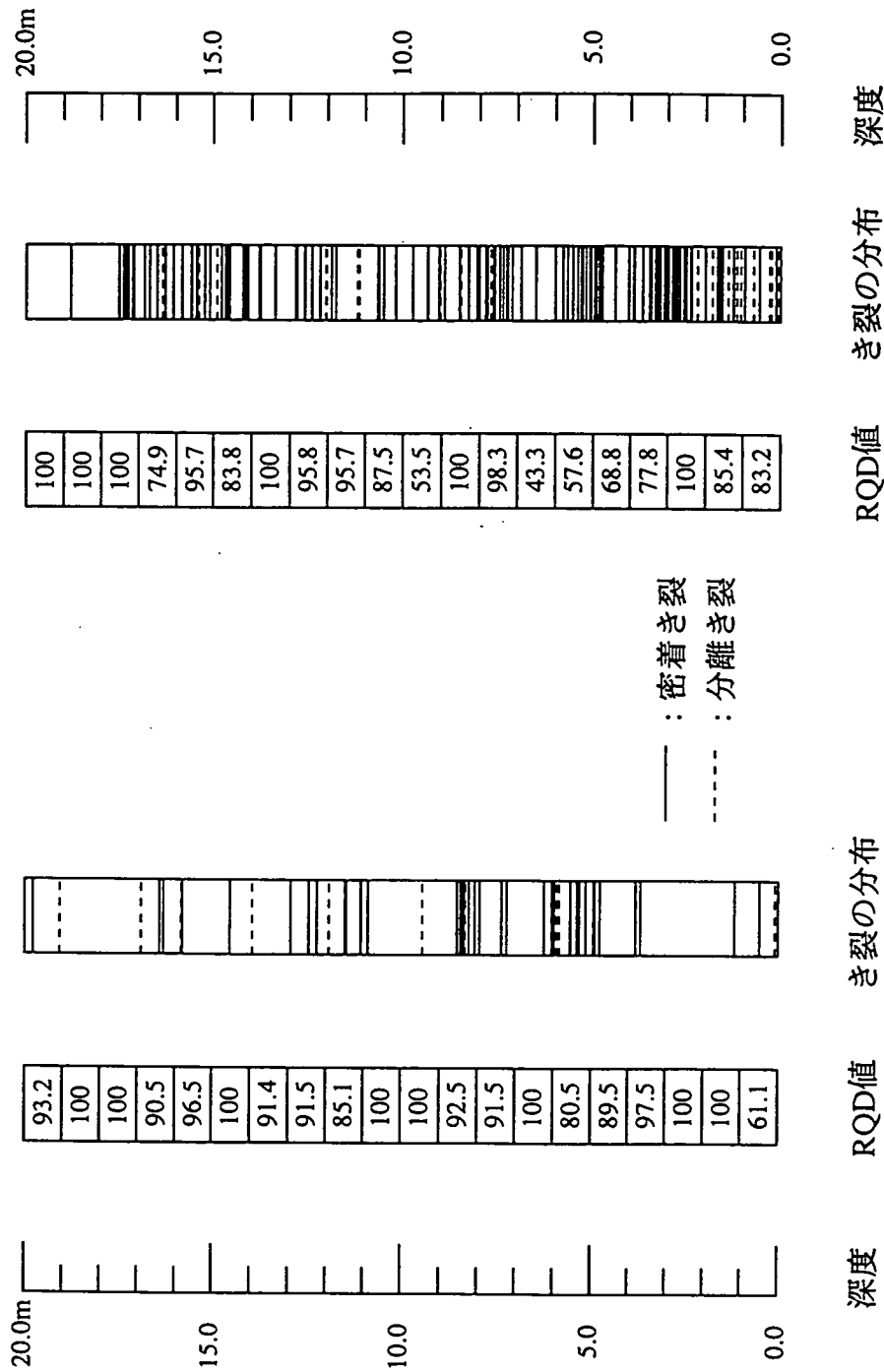
図2.2.33と図2.2.34を用いて往復走時による解析結果と片走時による解析結果を比較すると、坑道壁面付近の弾性波伝播速度の分布状況はほとんど変わらず、坑道壁面からの深度15～20mの領域での低速度帯の分布に違いがみられる。この速度分布が異なる領域は、図2.2.35および図2.2.36において波線密度が小さい領域と一致している。波線密度はその値が小さいほど一つのデータが有する誤差が解析結果に与える影響が大きくなることが予想され、そのために、波線密度が小さい領域では、往復走時による解析結果と片走時による解析結果との違いが強調されるような結果になったものと考えられる。

図2.2.37にKDT-1孔およびKDT-2孔のボーリングコア観察結果に基づくボーリングコアのき裂分布状況とRQD値を示す。図2.2.37と図2.2.33または図2.2.34を比較すると、KDT-2孔のき裂分布と弾性波速度の分布状態はよく一致している。弾性波トモグラフィ結果から深度7mを境界としRQDが73.7(平均値)の領域では弾性波速度が遅く、RQDが91.2(平均値)の領域では速くなっていると思われる。

一方、KDT-1孔のき裂分布と弾性波速度の分布はRQD値と弾性波速度はともに高い分布を示しているが、ボーリングコア観察結果やボアホールテレビ観察結果からも、KDT-1孔の孔底付近に示された弾性波速度の低下の原因となるものはみられない。ここで、先に述べたように、図2.2.35および図2.2.36において深度15～20mの領域で波線密度が小さくなっている。波線密度が低い領域では、解析結果、すなわち弾性波速度の分布に対する信頼性は低くなる。従って、KDT-1孔のき裂分布と弾性波速度の分布が一致しないのは、解析結果においてKDT-1孔の孔底付近に虚像が現れている可能性が原因として考えられる。

図2.2.17の坑道弾性波探査（屈折法）の結果と図2.2.33～34の弾性波トモグラフィの坑道壁面近傍と比較した場合、坑道壁面近傍における弾性波速度の分布状態がどちらの結果もKDT-1孔およびKDT-2孔の孔口付近で弾性波速度が小さく、両孔の間の領域では孔口付近に比べると少し大きくなっている。これは、坑道壁面のき裂の分布状態に注目した場合にき裂の卓越しているところで弾性波速度がより小さくなる傾向がみられることから、弾性波速度の低下にき裂の存在が影響しているためであると考えられる。すなわち、き裂が掘削の影響を受けて開口することによって弾性波速度が低下すると考えれば、き裂が卓越するほど掘削の影響による弾性波速度の低下の度合いが大きくなることが予想される。また、KDT-1孔とKDT-2孔の間の坑道壁面近傍における弾性波速度分布について弾性波探査（屈折法）の結果と弾性波トモグラフィの結果を詳細にみた

場合、弾性波探査（屈折法）の結果は、ある区間での平均的な弾性波速度層を示している。一方、弾性波トモグラフィの結果では、各ブロック区間（1.0m×1.0mブロック）の弾性波速度分布を示している。このような手法の相違を考慮すると先に述べた坑道壁面近傍のき裂分布に対しては弾性波トモグラフィの結果の信頼性は高いと考えられる。



(a)KDT-1孔

(b)KDT-2孔

図2.2.37 KDT-1孔およびKDT-2孔のボーリングコアにおけるき裂分布とRQD値

2.3 孔内載荷試験

2.3.1 目的

孔内載荷試験は、岩盤の変形特性に着目した掘削影響領域の範囲の評価と、原位置における岩盤の変形特性の異方性の把握を目的として行った。

2.3.2 測定概要および解析方法

(1)測定概要

孔内載荷試験には等分布載荷法と等変位載荷法があるが、前者の場合、異方性を評価できないため、今回の試験には等変位載荷法であるKKTを使用した。このKKTには表2.3.1に示すように種々のタイプがあり、本調査においてはセンサー内蔵式高圧タイプを用いて試験を実施した。今回使用したKKTの仕様を表2.3.2に示す。

表2.3.1 各種KKT一覧表

各種KKT	適用地盤	本体(mm) 外径×長さ	載荷板(mm) 幅×長さ	ピストン最大 ストローク(mm)	最大加圧力 (kgf/cm ²)	備 考
標準型 KKT	土砂地盤	85×480	85×300	24	50	トリマー付 圧力計、変位計内蔵
		85×540	85×300	18	50	
動的KKT	土砂地盤	85×540	60×300	18	10	トリマー付 圧力計、変位計内蔵
高圧型 KKT	岩 盤	65×410	30×250	16	330	— 圧力計、変位計内蔵
		65×500	30×300	8.5	240	
		40×500	30×300	8	90	
超高圧 KKT	岩 盤	65×410	30×250	16	660	— 圧力計、変位計内蔵
		65×500	30×300	8.5	480	

表2.3.2 今回の試験で用いたKKTの仕様

タイプ	変位量検出法	載荷板寸法 幅、長さ(mm)	載荷曲線率 β (°) 最大加圧力(kgf/cm ²)	校正係数	
				cp (圧力)	cd (変位)
内蔵タイプ	歪みゲージ型	40×260	32.3° 212.05	0.4241	0.0500

図2.3.1にKKTの概要を示す。KKTによる試験は、図2.3.1および図2.3.2に示すように孔壁に剛板を油圧ジャッキにより載荷して測定を行うものである。通常のKKTではピストンで加圧したときに逆流するオイルの量をスタンドパイプで測ることによって変位を測定し、載荷圧力はポンプに取り付けられた圧力計によって測定するが、今回の試験で用いた試験機はゾンデ内に内蔵された圧力計と歪みゲージ型変位計で圧力と変位を測定した。

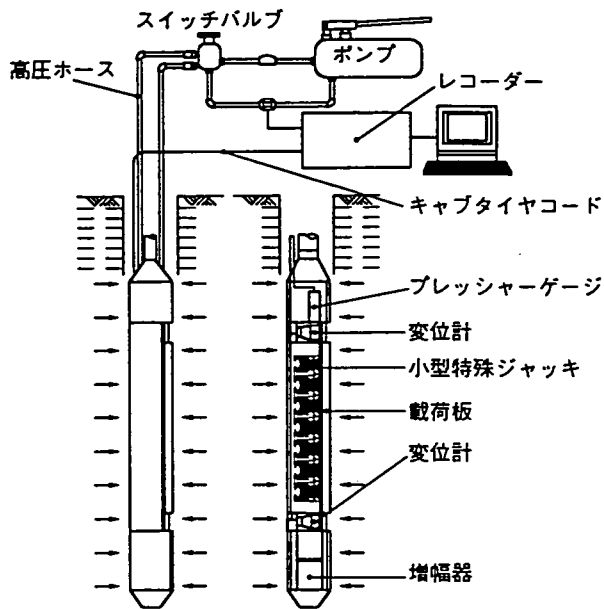


図2.3.1 高圧型KKT

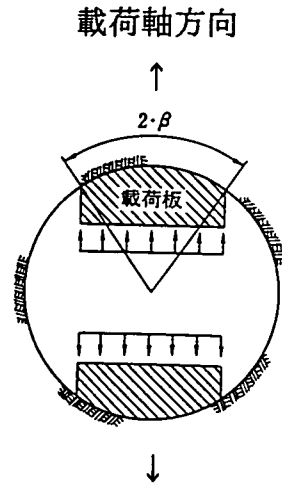


図2.3.2 KKT載荷状態⁹⁾

図2.3.3に、KKT載荷面とき裂面のなす角度における概念図を示す。図中の γ が、載荷面とき裂のなす角度になる。き裂に平行なボーリング孔内で、ゾンデを回転させた場合、き裂と載荷面となす角度は $0^\circ \sim 90^\circ$ の任意の値をとるのに対して、き裂に垂直なボーリング孔内では、ゾンデをいくら回転させても、き裂となす角度が 90° しか取れない事を考えれば、き裂に対してのボーリング孔の向きにより、載荷面とき裂のなす角度の範囲が限定されてしまう。

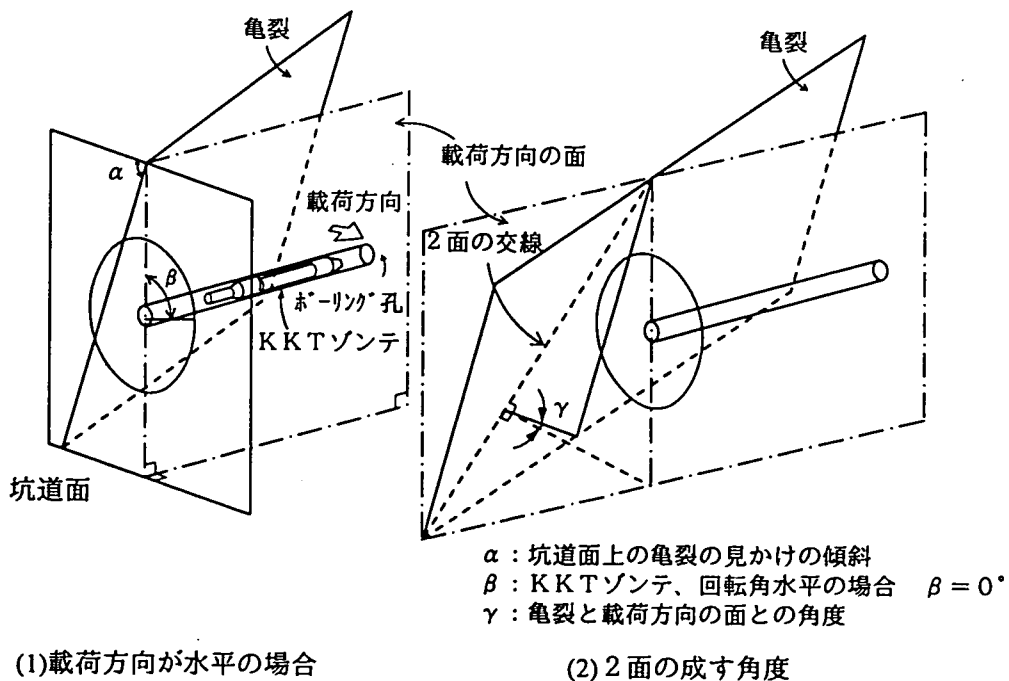


図2.3.3 KKTゾンデ回転角とき裂がなす角度の概念図

このようにき裂が存在する場合、岩盤の変形特性の評価が難しいということと、掘削影響との関連性の評価が困難であるため、今回の原位置試験ではき裂の影響を受けない場所を測点として選定した。

また、今回の試験では、孔内載荷試験結果を基に岩盤の異方性を調査することを目的とし、基本的に同一深度において3方向での測定を行った。載荷方向は、水平孔（KDK-1孔）および斜め上向き孔（KDK-2孔）の場合、載荷板が伸縮する方向を、ボーリング孔軸と平行な鉛直面とボーリング孔に垂直な面との交線と一致させて0°方向とし、この0°を基準とした孔口から孔奥に向かって右まわりの120°と240°方向の3方向を基本とした。鉛直下向き孔（KDK-3）の場合は試験を実施した坑道の坑道軸と平行なN13°Wの方向を0°方向とし、残りの2方向は他の2孔と同様の方法で決定した。試験順序は、試験中に孔壁が崩壊した場合、その地点より奥での試験が不可能となるために孔奥から順次行い、載荷方向は0°→120°→240°の順で実施した。ゾンデを同一個所で回転させて3回測定する場合、前述したゾンデの2β（2.3.1式、図2.3.2参照）が64.7°であり、載荷面両方を合わせると129.2°となる。これを3回行えば、必ず重複する領域が発生するため、孔内載荷試験は弾性領域内で行う必要がある。そこで、試験位置における弾性領域の上限を以下の計算にて設定した。

岩盤の引張強度 σ_t と載荷圧 P の関係は、ポアホールジャッキの場合次式で与えられている。

$$\sigma_t = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{P}{R} + 2 \cdot P_1 \quad (2.3.2)$$

ここに、 σ_t ：	材料の引張強度	(kgf/cm ²)
P ：	載荷圧／載荷板長さ	(kgf/cm)
R ：	孔半径	(cm)
P_1 ：	等方原位置応力	(kgf/cm ²)

ここで安全側に考慮し、 $P_1=0$ とし、 $\pi=3.14$ と $R=3.8$ を代入し、式を変形すると次式のようなになる。

$$P = \sigma_t \times \frac{3.14 \times 3.8}{2} \quad (2.3.3)$$

P は単位長さ当たりの載荷圧であり、載荷板は幅4cmであるので、単位面積あたりの荷重を出すために両辺を4で割ると、以下のような P と σ_t の関係式が求められる。

$$P = \sigma_1 \times 1.4915 \quad (2.3.4)$$

従って、既知の資料より栗橋花崗閃緑岩の新鮮な部分の圧裂引張強度が約75～94kgf/cm²の範囲に分布しているため、下限の75kgf/cm²を用いて計算すると

$$\text{載荷板荷重強度(kgf/cm}^2\text{)} \cong 112 \text{ kgf/cm}^2$$

となる。この場合、原位置等方応力として土被り圧も考慮すると、土被り約730m、比重2.7より、197.1kg/cm²となる。これは、(2.3.2)式の $2 \cdot P_1$ の項となる。従って、載荷板荷重強度(kgf/cm²)は以下のようになる。

$$112 + 197.1 = 309.1 \text{ kg/cm}^2$$

これを較正係数を用いてポンプ圧に直すと

$$309.1 \div 0.4241 \cong 728.8 \text{ kgf/cm}^2$$

となる。しかし、これは圧裂引張強度の最低値からの計算値であり、あくまでもき裂が無いテストピースにおける計算値である。従って、実際の岩盤はき裂の存在により、強度が低下していると考えられ、安全率を2とすると、

$$728.8 \div 2 = 364.4 \text{ kgf/cm}^2$$

となるので、載荷圧の上限を300kgf/cm²（ポンプ圧）とし、図2.3.4に示す載荷パターンにて繰返し載荷試験を行った。図に示したように、まず載荷板をあらかじめ孔壁に接触させるためにポンプ圧10kgf/cm²（載荷板荷重強度0.416MPa）で1分間の予備載荷を行い、載荷板は開いた状態で圧力を0kgf/cm²に戻した。次に、再度ポンプ圧10kgf/cm²にし、この状態で1分間保持した後さらにポンプ圧10kgf/cm²を加え1分間保持した。これを繰り返してポンプ圧100kgf/cm²（載荷板荷重強度4.16MPa）に達した後、ポンプ圧を20kgf/cm²づつ0kgf/cm²まで加圧の場合と同様に1分間隔で減圧した。そして、ポンプ圧のピーク200kgf/cm²（載荷板荷重強度8.32MPa）、300kgf/cm²（同12.48MPa）と増加して載荷・除荷を繰り返した。

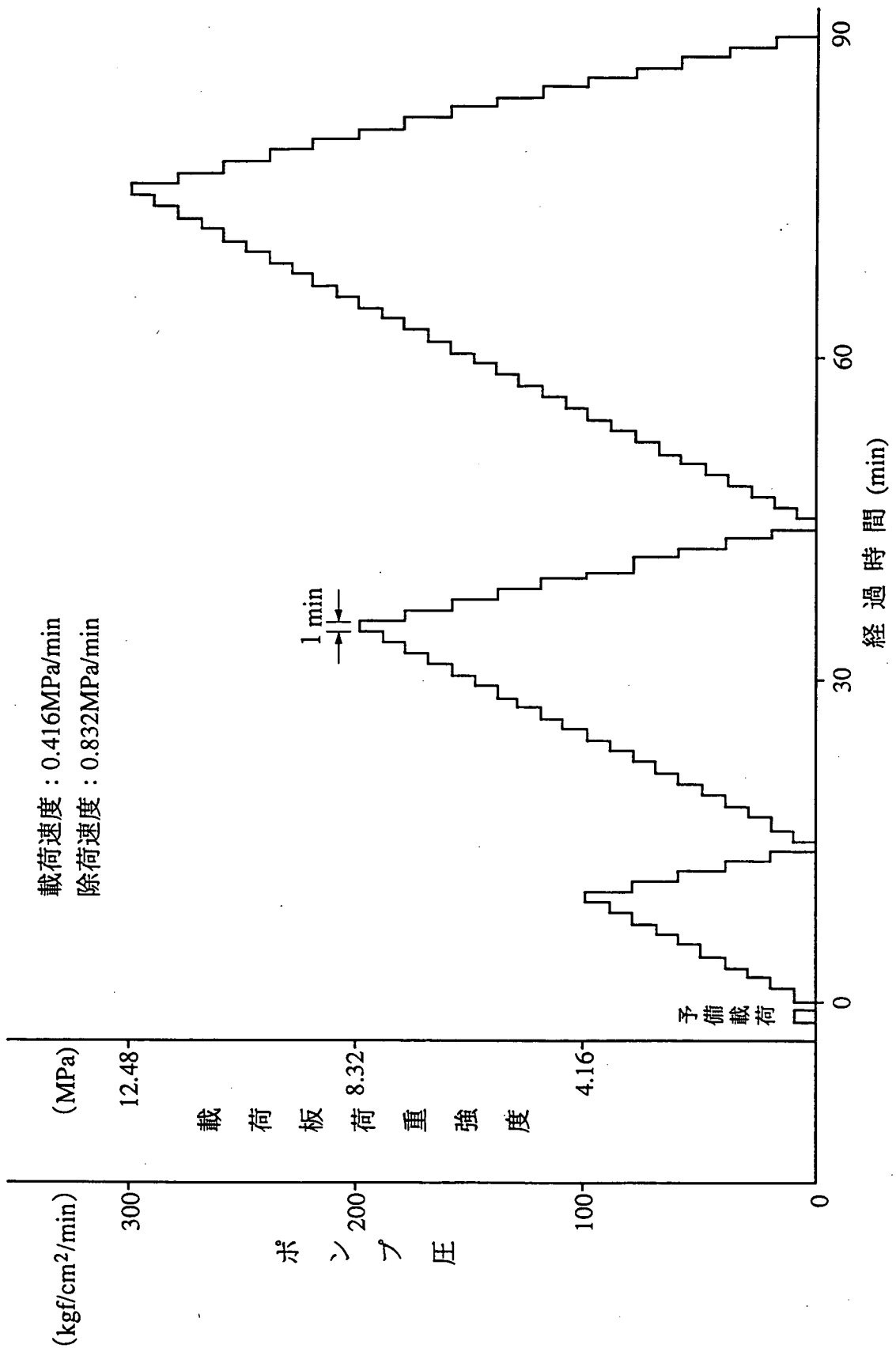


図2.3.4 孔内載荷パターン

(2)解析方法

測定結果は図2.3.5に示すような荷重・変位曲線として整理し、この曲線から下記に示すグッドマンの式を用いて変形係数および接線弾性係数を算出した。

[グッドマンの式]

$$E(D) = \frac{d}{2} \phi(\nu, \beta) \frac{\Delta p}{\Delta r} \quad (2.3.1)$$

- ここに、
- $E(D)$: 弾性 (変形) 係数 (kgf/cm²)
 - d : 初期ボーリング孔径 (cm)
 - $\phi(\nu, \beta)$: 岩盤のポアソン比 ν と 載荷曲線率 β により定まる定数
 - Δp : 荷重増分 (kgf/cm²)
 - Δr : 荷重増分 (Δp) における変位増分 (cm)

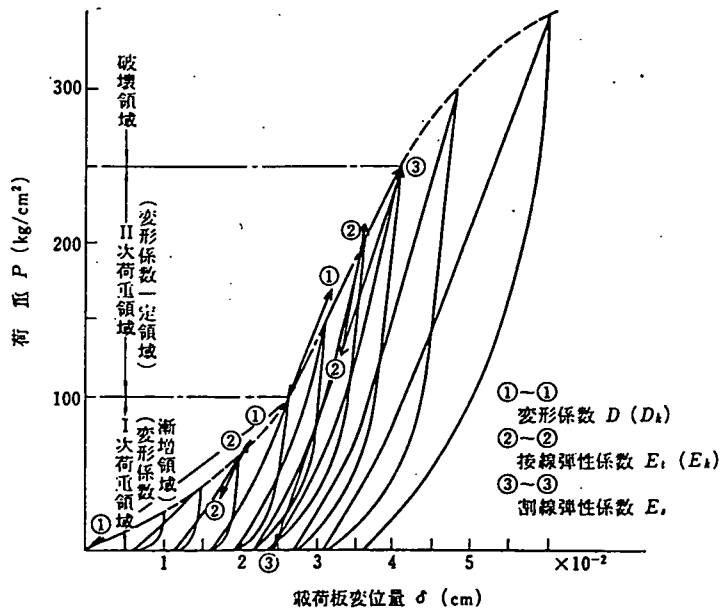
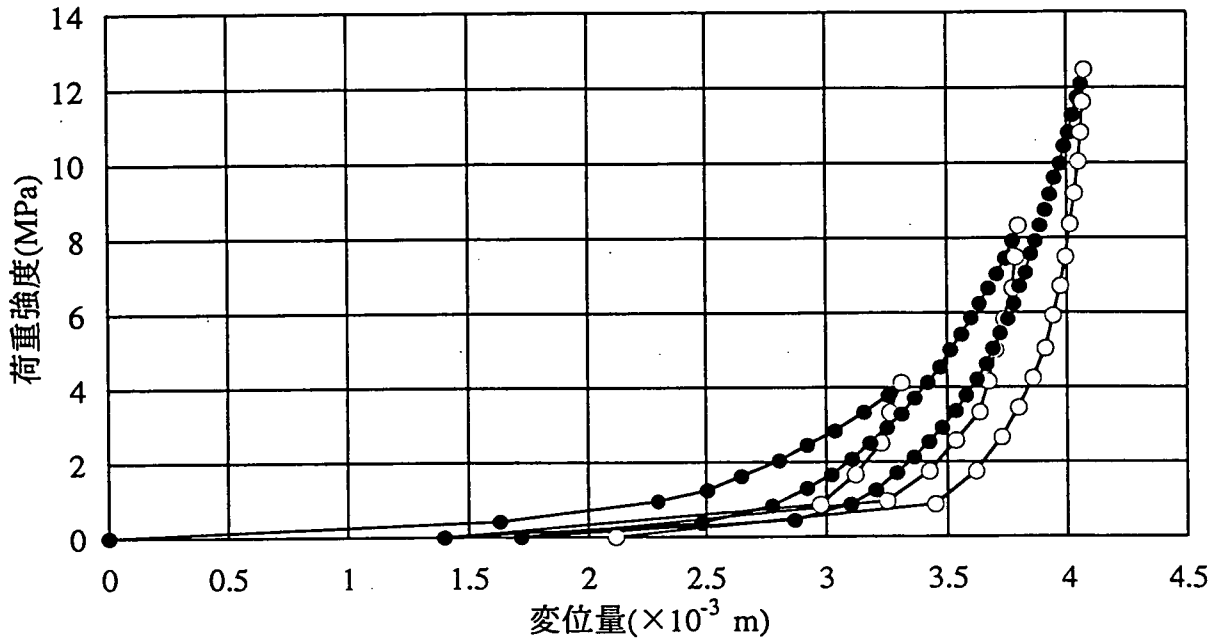


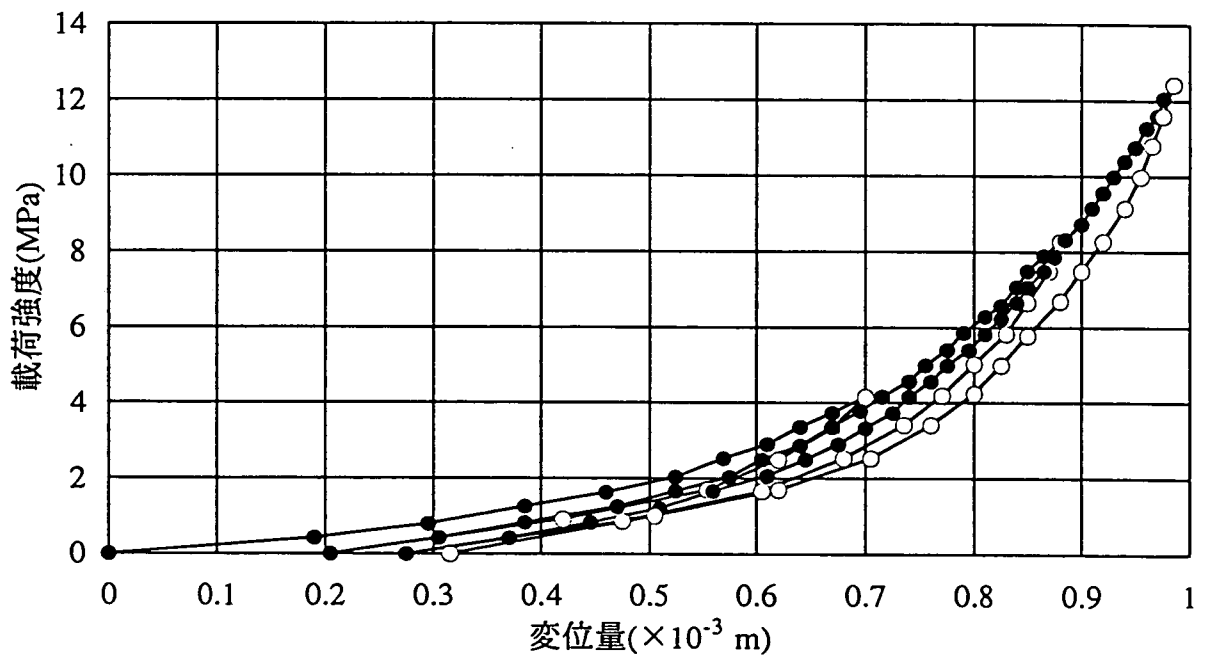
図2.3.5 荷重・変位曲線例¹⁰⁾

2.3.3 調査結果

今回の試験で得られた代表的な荷重・変位曲線を図2.3.6に示す。図中の●は荷重を、○は除荷を示す。これらの荷重・変位曲線より求められた変形係数および弾性係数を表2.3.3に示し、これらの値の深度毎の変化を図2.3.7～9に示す。なお、深度は長さ25cmの荷荷板の中央を基準としている。



(a)KDK-1孔 深度3.8m 120° 方向



(b)KDK-3孔 深度0.5m 0° 方向

図2.3.6 荷重・変位曲線

表2.3.3 孔内載荷試験結果

ボーリング孔 No.	角度 (°)	深度 (m)	D1 (MPa)	D2 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E1/D1	E3/E2
KDK-1	0	3.8	3.20E+03	1.23E+04	1.04E+03	5.93E+03	1.39E+04	0.33	2.35
	120	3.8	3.82E+03	6.63E+03	1.85E+03	4.03E+03	9.65E+03	0.48	2.39
	240	3.3	4.12E+03	6.56E+03	3.03E+03	5.06E+03	8.32E+03	0.74	1.64
	90	1	1.32E+04	1.85E+04	5.04E+03	1.27E+04	1.72E+04	0.38	1.35
	120	1.3	7.06E+03	1.87E+04	4.98E+03	1.06E+04	1.86E+04	0.71	1.76
	240	1	6.25E+03	1.41E+04	2.01E+03	7.98E+03	1.58E+04	0.32	1.98
	0	0.5	3.75E+03	6.56E+03	1.85E+03	6.03E+03	1.21E+04	0.49	2.00
	120	0.5	1.91E+03	3.64E+03	1.44E+03	2.32E+03	4.20E+03	0.75	1.81
	240	0.5	2.35E+03	3.79E+03	1.98E+03	2.72E+03	5.76E+03	0.84	2.12
	KDK-2	0	3.4	8.84E+03	2.04E+04	6.19E+03	1.14E+04	2.93E+04	0.70
120		3.4	5.25E+03	1.09E+04	1.48E+03	6.77E+03	1.20E+04	0.28	1.77
240		3.4	1.16E+04	1.85E+04	8.43E+03	1.43E+04	1.87E+04	0.73	1.31
0		1.5	1.93E+04	3.90E+04	1.16E+04	1.91E+04	3.55E+04	0.60	1.86
120		1.5	4.08E+03	1.00E+04	3.64E+03	4.73E+03	1.48E+04	0.89	3.13
240		1.5	1.44E+04	2.63E+04	1.29E+04	2.21E+04	3.71E+04	0.90	1.68
0		0.4	7.88E+03	1.09E+04	5.34E+03	8.69E+03	7.88E+03	0.68	0.91
120		0.4	8.07E+03	1.33E+04	4.00E+03	8.84E+03	1.26E+04	0.50	1.42
270		0.4	1.03E+04	1.55E+04	6.19E+03	1.08E+04	1.53E+04	0.60	1.42
KDK-3		0	3.6	1.03E+04	2.65E+04	3.97E+03	1.85E+04	2.72E+04	0.39
	120	3.6	1.09E+04	2.63E+04	8.25E+03	1.14E+04	3.67E+04	0.76	3.22
	240	3.6	1.32E+04	2.28E+04	6.49E+03	1.71E+04	2.22E+04	0.49	1.30
	0	0.9	9.67E+03	1.85E+04	3.63E+03	1.55E+04	2.55E+04	0.38	1.65
	120	0.9	6.25E+03	8.35E+03	3.48E+03	7.03E+03	8.73E+03	0.56	1.24
	240	0.9	8.84E+03	1.85E+04	5.15E+03	1.24E+04	1.87E+04	0.58	1.52
	0	0.5	1.08E+04	1.69E+04	5.26E+03	1.18E+04	1.84E+04	0.49	1.57
	120	0.5	3.68E+03	1.67E+04	3.71E+03	1.24E+04	1.84E+04	1.01	1.49
	240	0.5	4.64E+03	5.57E+03	3.09E+03	5.01E+03	6.45E+03	0.67	1.29

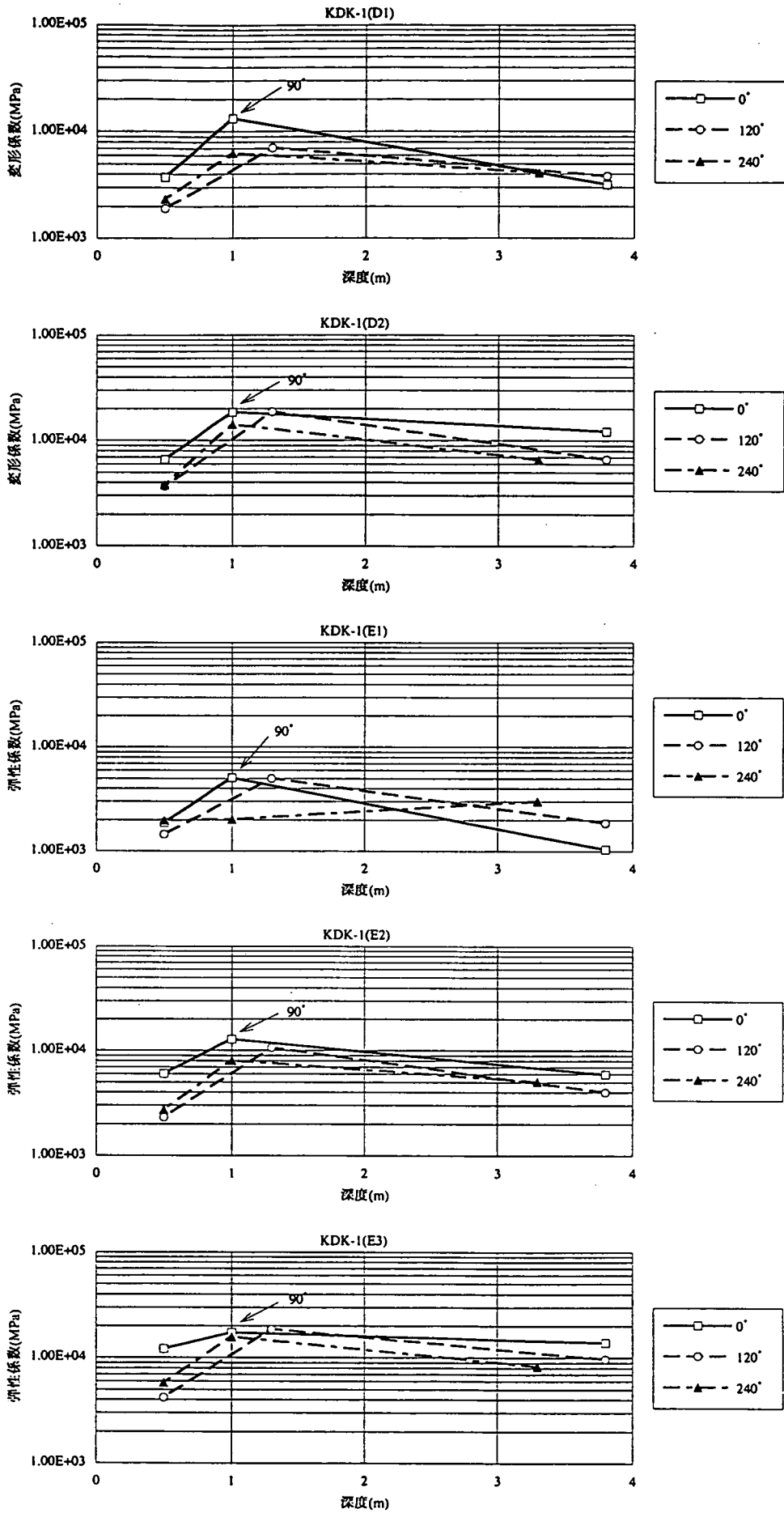


图2.3.7 孔内载荷试验结果 (KDK-1)

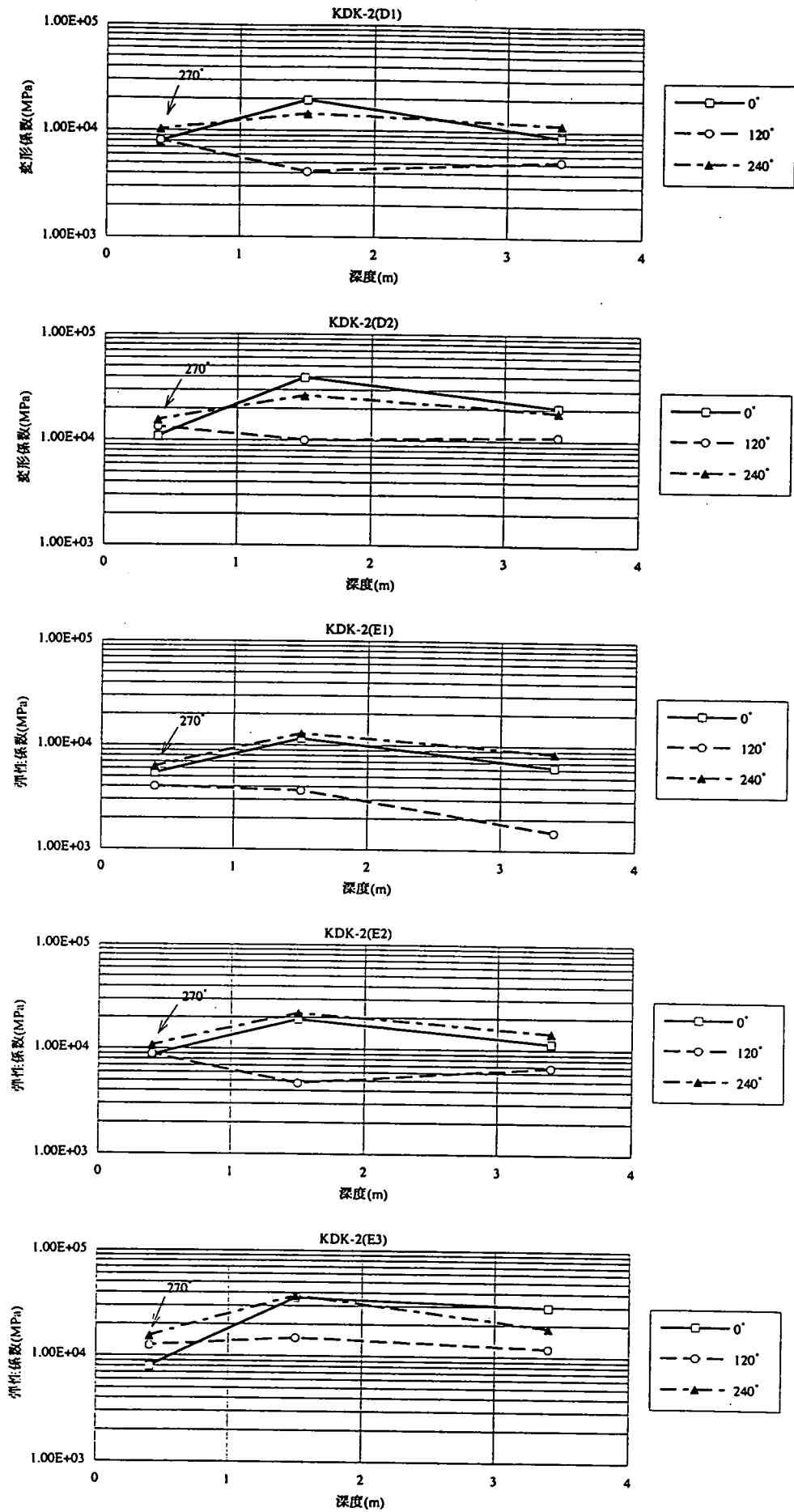


図2.3.8 孔内載荷試験結果 (KDK-2)

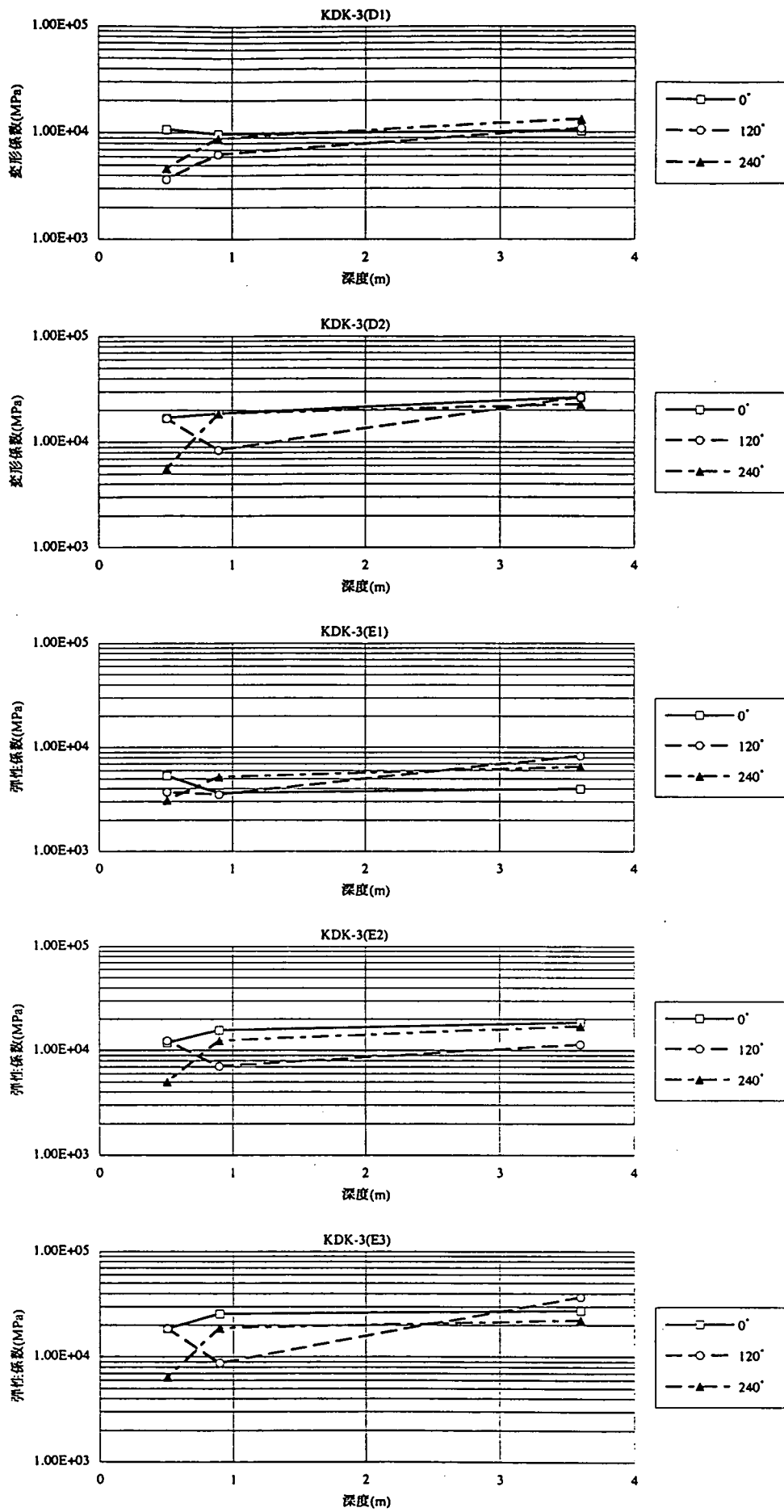


図2.3.9 孔内載荷試験結果 (KDK-3)

ポンプ圧100kgf/cm²までの载荷を1段階、同様に200, 300kgf/cm²までの载荷を2, 3段階とすると、表2.3.3と図2.3.7~9において、 D_i ($i=1,2$) は i 段階と $i+1$ 段階の荷重・载荷曲線のピーク値より求められる変形係数を示し、 E_j ($j=1\sim3$) は j 段階の接線弾性係数を示す。

いくつかの測点において、孔壁表面の不均質、孔壁のゆるみ等が原因であると予想される载荷開始直後の低载荷圧下での急激な変位増加が生じた。このような測点については、基本的に同一深度で120°間隔の3方向で試験を行う予定であったが、载荷方向または载荷深度の変更を行った。この変更箇所を表2.3.4に示す。

表2.3.4 载荷位置の変更箇所

ボーリング孔	変更前		変更後	
	深度(m)	方向(°)	深度(m)	方向(°)
KDK-1	1.0	0	1.0	90
	1.0	120	1.3	120
	3.8	240	3.3	240
KDK-2	0.4	240	0.4	270

表2.3.3、図2.3.7~9によるとKDK-1孔とKDK-2孔の場合、例外はあるものの変形係数と弾性係数の値が坑道壁面に最も近い深度0.4mまたは0.5mの測点で最小となり、中間の深度1.0~1.5mの測点で最大となる傾向がある。一方、KDK-3孔の場合は、変形係数と弾性係数の値は坑道壁面から離れるほど大きくなる傾向がみられる。

2.3.4 考察

測定概要で述べたようにゾンデを同一個所で回転させて3回測定した場合、必ず重複する領域が発生する。もし、先に行われた試験で孔壁が痛められると、その後で実施される試験から得られる変形係数および弾性係数の値が前の試験値よりも小さくなることが予想される。しかし、図2.3.7~9において同一深度での载荷順序(0°→120°→240°)に対してそのような傾向は認められないため、少なくとも試験結果に影響を与えるような孔壁の変化はなかったと考えられる。

次に、岩盤の異方性を評価するために载荷方向による変形係数および弾性係数の違いに注目したが、図2.3.7~9からは方向による顕著な差はみられない。しかし、KKTによって得られる弾性係数や変形係数には、岩盤の応力分布状況や载荷位置周辺のき裂等が及ぼす複雑な影響が含まれていることが予想され、このような要因を全て考慮しないと異方性の評価はできないものと考えられる。

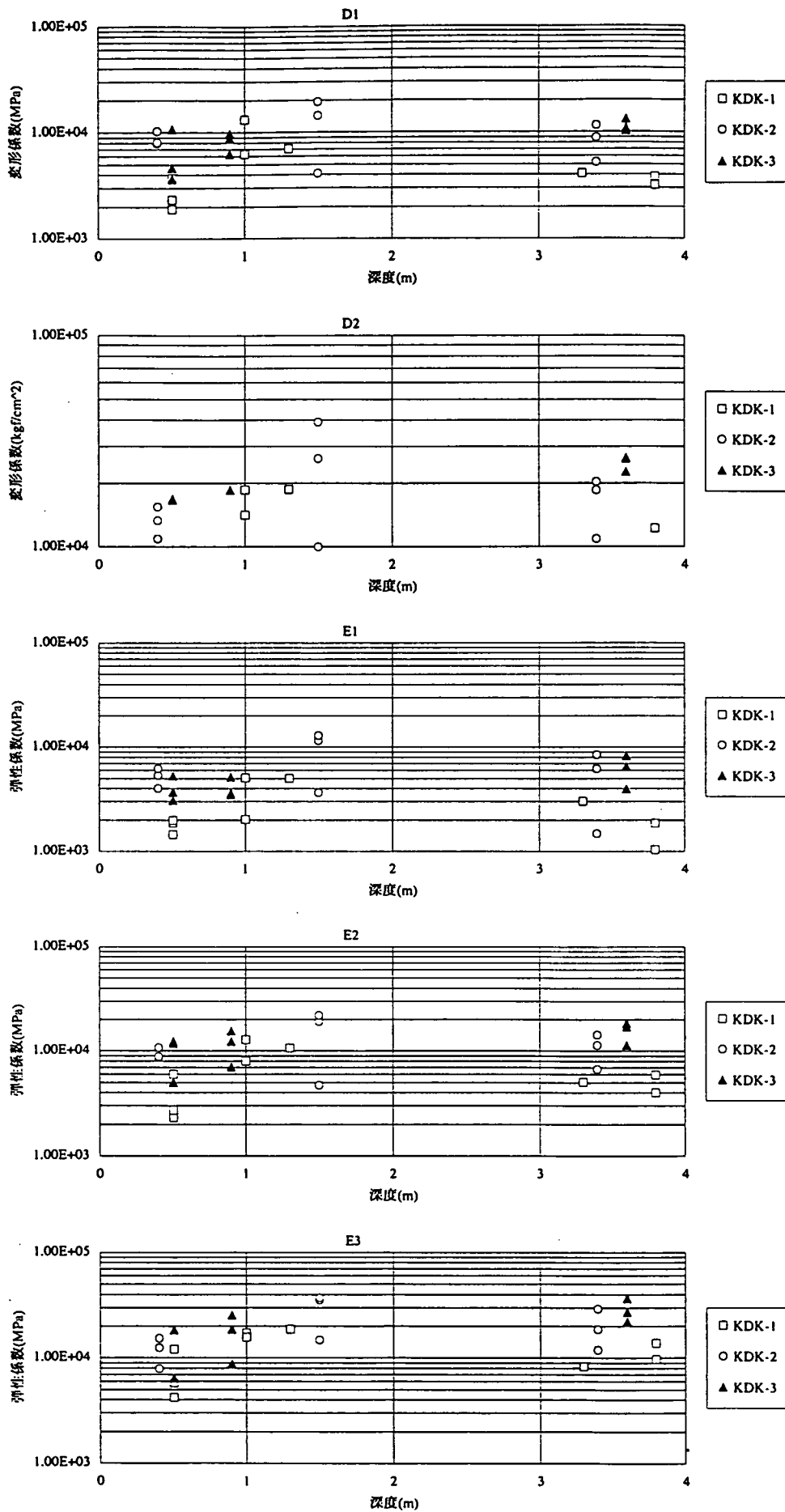


図2.3.10 孔内載荷試験結果 (KDK-1~3)

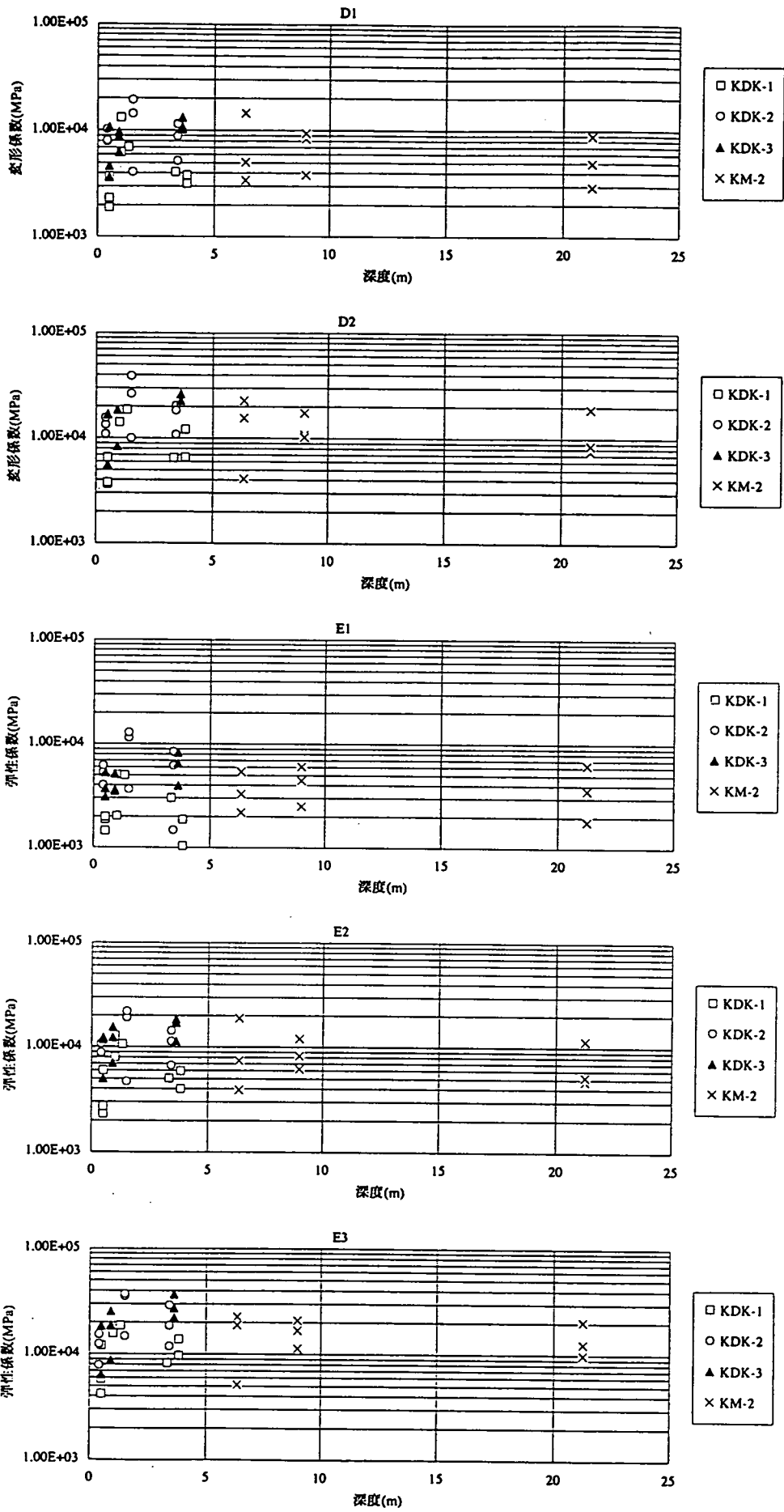


図2.3.11 孔内載荷試験結果 (KDK-1~3, KM-2)

図2.3.7～9を載荷方向の区別無く表示すると図2.3.10のようになる。図2.3.10によると各孔の変形係数および弾性係数の値は、孔によって多少の違いはあるものの、深度0.5m付近が最も小さく、深度2.0mまでは徐々に大きくなる傾向がみられる。しかし、3.0m以深では1.0～1.5m付近の増加のピーク値と同程度か、あるいはそれよりも低い値となっている。

次に、今回の試験深度より深い位置での試験値を考慮に入れるため、動燃殿が別途実施したKM-2孔での試験結果を加えて図2.3.11に示す。図2.3.11において深度3.0m以深のデータの分布をみると、増加傾向も減少傾向もみられないことから、ばらつきはあるもののほぼ一定であるといえる。

従って、図2.3.10および図2.3.11において、3.0m以深のデータよりも小さい値を示す深度1.0m前後までの領域は、掘削の影響を受けて変形係数あるいは弾性係数が低下しているものと考えられる。また、深度2.0m付近の高い値を示す領域では、坑道掘削に伴う応力再配分によって応力が集中しているものと考えられる。

トンネル掘削による掘削影響領域を評価するために行われたKKTの結果¹¹⁾によると、図2.3.12のように孔壁から直線の勾配が変化する2直線の交点までの間が掘削影響領域として判定できるとされており、今回の試験結果はこの図と同様の傾向を示している。そこで、深度2.0mまでのデータの回帰直線と、3.0m以深のデータの平均値（すなわち水平な直線）を求め、それらから掘削影響領域と健岩部の境界の深度（2直線の交点）を求めた。この結果を図2.3.13～14および表2.3.5に示す。

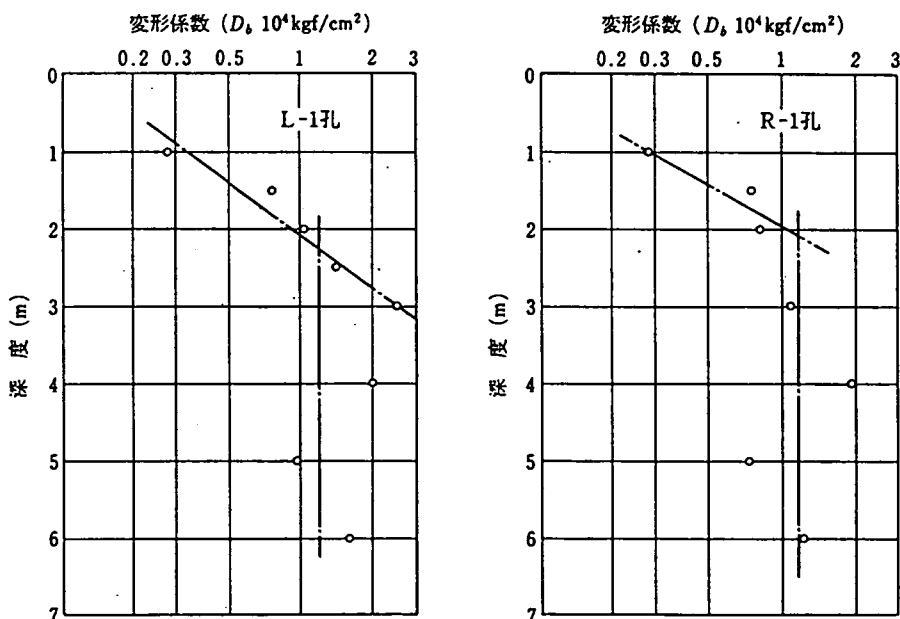


図2.3.12 掘削影響領域が存在する場合の深度と変形係数の関係¹¹⁾

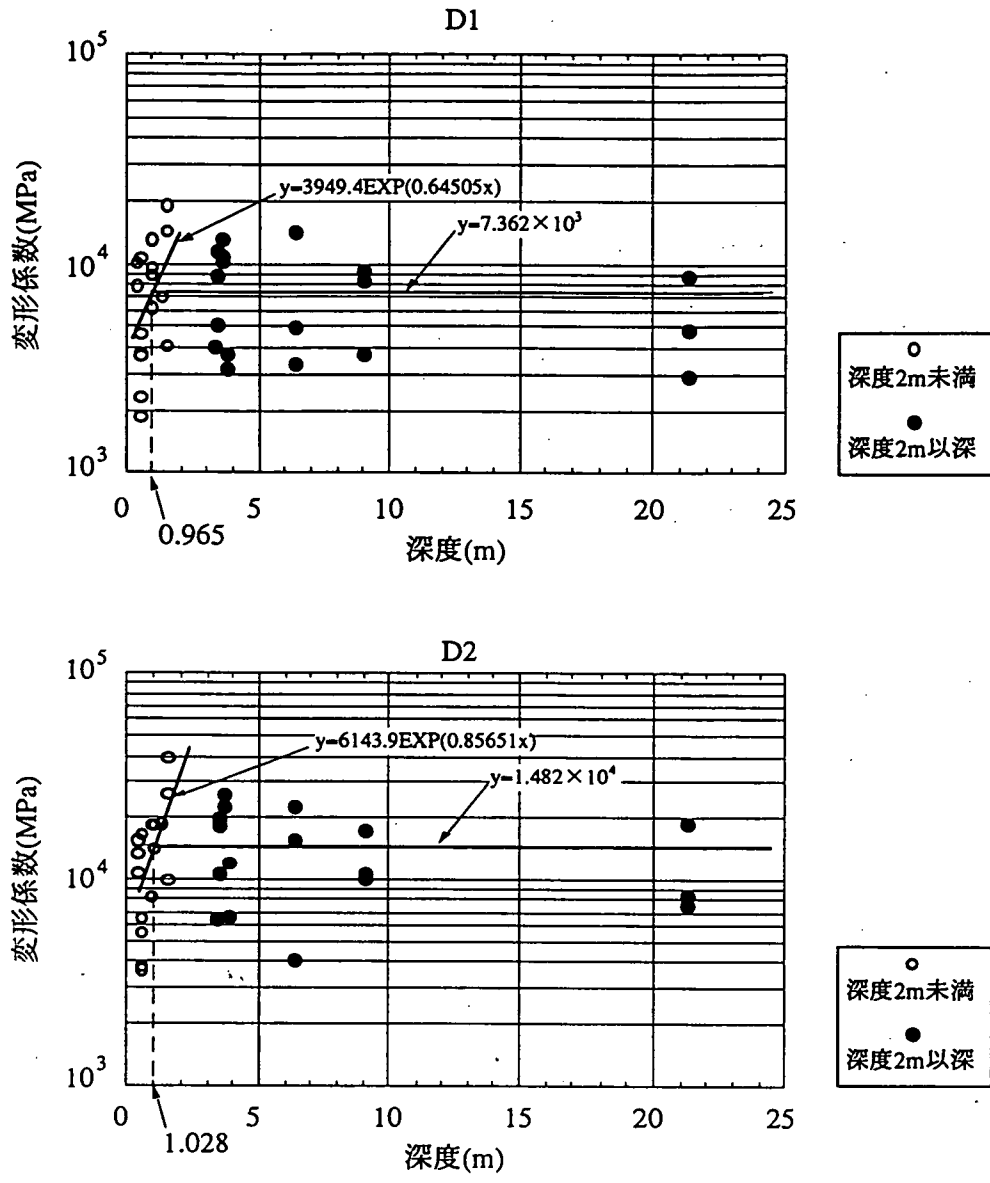


図2.3.13 孔内載荷試験結果からの掘削影響領域の算出 (D1~2)

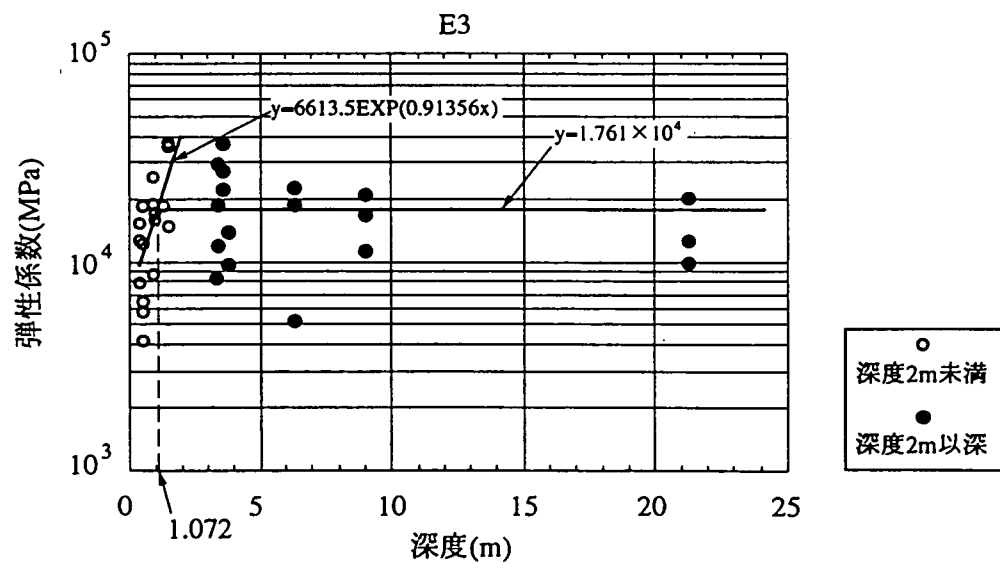
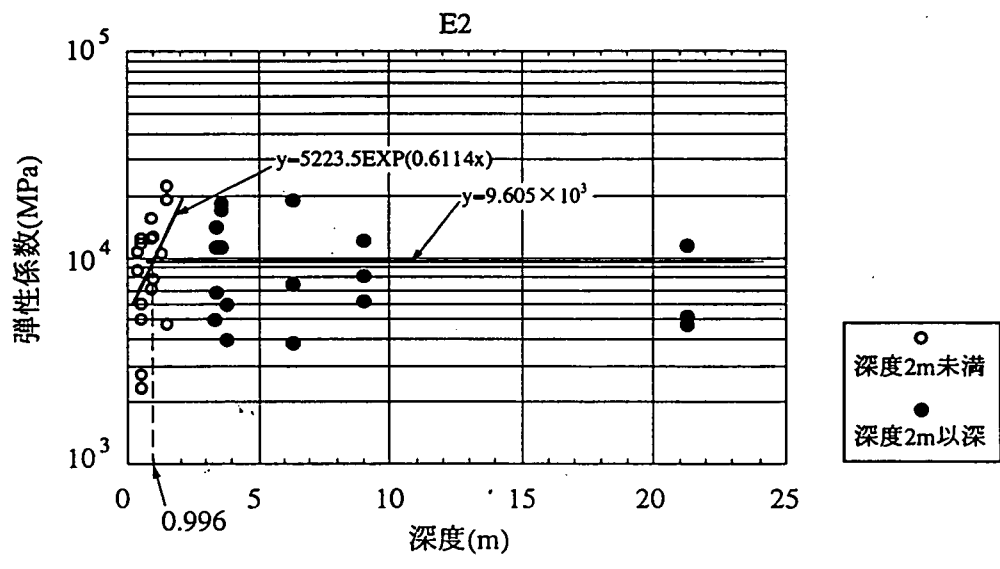
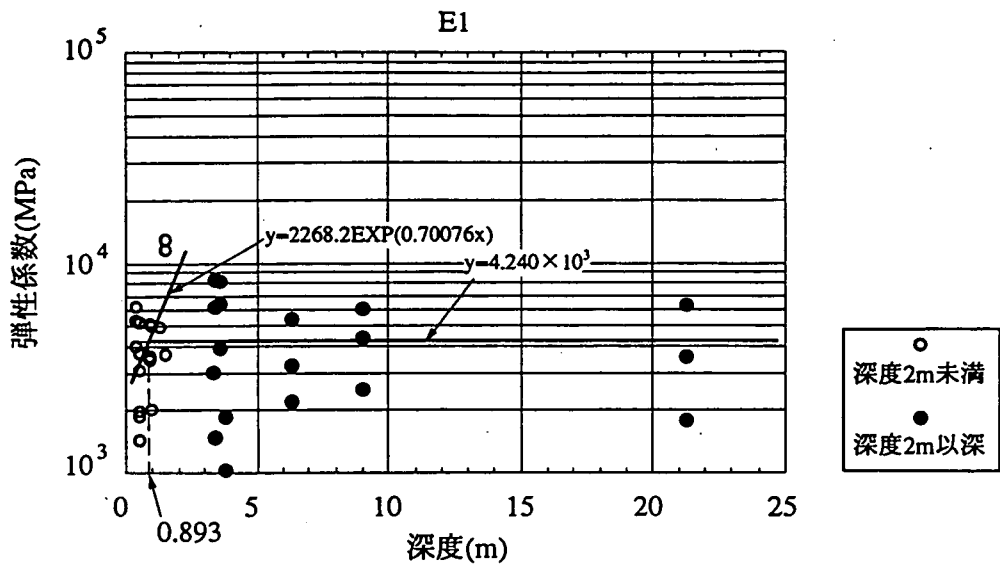


図2.3.14 孔内载荷試験結果からの掘削影響領域の算出 (E1~3)

表2.3.5 変形係数および弾性係数の深度分布から求めた掘削影響領域

	深度2mまでの回帰線	深度2m以深の直線	影響領域の深度(m)
D1	$y=3949.4\text{EXP}(0.64505x)$ R=0.49459	$y=7.362 \times 10^3$	0.965
D2	$y=6143.9\text{EXP}(0.85651x)$ R=0.62732	$y=1.482 \times 10^4$	1.028
E1	$y=2268.2\text{EXP}(0.70076x)$ R=0.60479	$y=4.240 \times 10^3$	0.893
E2	$y=5223.5\text{EXP}(0.6114x)$ R=0.50983	$y=9.605 \times 10^3$	0.996
E3	$y=6613.6\text{EXP}(0.91356x)$ R=0.69833	$y=1.761 \times 10^4$	1.072

y : 変形係数または弾性係数(MPa), x : 深度(m), R : 相関係数

2直線の交点として得られた掘削影響領域の深度は1.0m前後であった。しかし、表2.3.5に示したように深度2.0mまでのデータから求めた回帰線の相関係数は約0.5~0.7と低く、深度2.0m以深のデータについてもばらつきが大きいことから、この1.0m前後という掘削影響領域の深度に対する信頼性はかなり低いと考えられる。

2.4 室内試験

2.4.1 室内試験用供試体

今回の室内試験は、原位置試験結果と併せて掘削影響領域の評価に用いるとともに、事前解析を行う際の岩盤物性の入力データを得ることを目的としている。そこで、室内試験に用いる試料の採取は以下の点を考慮して実施した。

- (a)全ての供試体は孔内載荷試験の実施位置と対応させる。
- (b)弾性波速度試験は全ての供試体に対して実施する。
- (c)一軸圧縮試験および圧裂試験は掘削影響領域内のデータを得るために浅い深度の試料を用いる。
- (d)高圧三軸試験は事前解析に用いる岩盤の物性（内部摩擦角、粘着力）を得ることを目的としているため、健岩部のデータを必要としている。従って、深い深度の同一地点から採取する。

これらに基づいて試料を採取した供試体の採取位置と実施した試験項目を表2.4.1に示す。

表2.4.1 室内試験供試体

試料No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
ボーリング孔 No.	KDK-1	KDK-2	KDK-3	KDK-1	KDK-2	KDK-3	KDK-3		
深度(m)	0.45~ 0.65	0.32~ 0.50	0.49~ 0.82	0.45~ 0.65	0.32~ 0.50	0.49~ 0.82	3.00~4.00		
弾性波速度 試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○
一軸圧縮試験	○	○	○						
高圧三軸試験							○	○	○
圧裂試験				○	○	○			

2.4.2 弾性波速度試験

2.4.2.1 目的

本試験は岩石の動的な特性を把握するために、超音波を用いて弾性波速度を求めることを目的としている。また、得られた岩石の弾性波速度と先に述べたP S検層や弾性波速度試験の結果と比較・検討を行う。

2.4.2.2 試験方法および結果の整理方法

(1)試験方法

弾性波速度試験には超音波パルスが岩石試料内部を伝播する速度を直接測る透過法と境界面での反射パルスを利用する反射法があるが、今回はパルスの波長に比して十分に長い岩石試料を透過する超音波によって速度を決定する前者の方法を用いた。

今回の試験で用いた機器の仕様を表2.4.2に示す。

表2.4.2 弾性波速度試験装置仕様

機器名	機種名	メーカー	備考
パルス発生器	NSPG-50A	開発電子（株）	
振動子	USD-30WN	開発電子（株）	100KHz
	UPD-30W		100KHz
シンクロスコープ	SS-6611	岩崎通信機（株）	

(2)結果の整理方法

弾性波速度試験では、試験で得られる弾性波の透過時間と供試体の長さからP波およびS波の速度 V_P 、 V_S が求められる。また、(2.2.4)～(2.2.7)式を用いて V_P 、 V_S と単位体積重量 γ_v から動弾性係数が求められる。

2.4.2.3 試験結果

図2.4.1に試験状況を示すとともに、表2.4.3に今回の試験で得られた弾性波速度と動弾性係数を示す。また、平均値等を表2.4.4に示す。

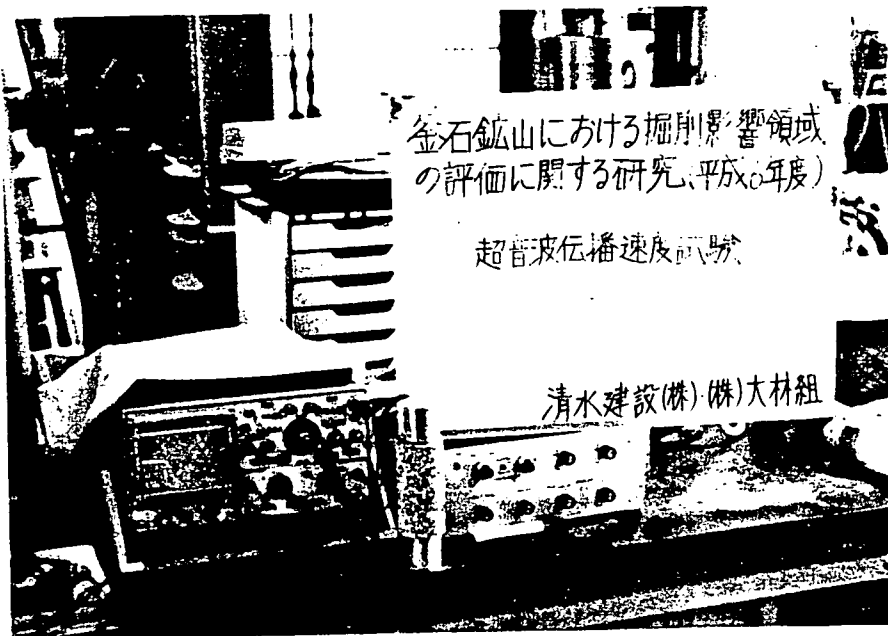


図2.4.1 弾性波速度試験実施状況

表2.4.3 弾性波速度試験結果

ボーリング孔 No.	KDK-1		KDK-2		KDK-3				
	①	④	②	⑤	③	⑥	⑦	⑧	⑨
試料No.	①	④	②	⑤	③	⑥	⑦	⑧	⑨
深度(m)	0.45~0.65		0.32~0.50		0.49~0.82		3.00~4.00		
湿潤密度 (g/cm ³)	2.777	2.744	2.744	2.762	2.795	2.799	2.779	2.770	2.765
V _P (km/sec)	5.84	5.76	6.07	5.70	5.86	5.65	5.68	5.70	5.66
V _S (km/sec)	3.26	3.12	3.35	3.08	3.30	3.06	3.10	3.11	3.08
動ポアソン比	0.274	0.292	0.281	0.294	0.268	0.292	0.288	0.288	0.290
動弾性係数 (×10 ⁴ MPa)	7.518	6.904	7.890	6.780	7.707	6.775	6.879	6.902	6.765
動剛性率 (×10 ⁴ MPa)	2.951	2.671	3.079	2.620	3.039	2.621	2.671	2.679	2.623
動体積弾性率 (×10 ⁴ MPa)	5.536	5.542	6.004	5.480	5.532	5.441	5.405	5.428	5.361

表2.4.4 V_P, V_Sの最大値、最小値および平均値

	全体				1.00m以下 平均値	3.00m以深 平均値
	最大値	最小値	平均値	標準偏差		
V _P (km/sec)	6.07	5.65	5.77	0.136	5.85	5.68
V _S (km/sec)	3.30	3.06	3.16	0.110	3.22	3.10

2.4.2.4 考察

表2.4.5に文献調査結果による花崗岩類と既存の試験結果による栗橋花崗岩の弾性波速度値を示す。

表2.4.5 弾性波速度の既存データ

岩 種		V_P (km/sec)	V_S (km/sec)
花 崗 岩 類 (日本全国： 文献調査)	個数	320	46
	最大値	9.30	3.44
	最小値	2.60	0.05
	-----	-----	-----
	平均值	4.81	2.55
	標準偏差	0.91	0.57
栗 橋 花 崗 岩	個数	162	23
	最大値	5.77	2.93
	最小値	1.91	1.25
	-----	-----	-----
	平均值	5.00	2.51

表2.4.4において深度1.0m以下と3.0m以深の平均值を比較すると、 V_P 、 V_S の値が共に深度1.0m以下の方が若干大きいですが、試料数が少ないことを考慮すると両者に違いはないといえる。岩石試験において浅部と深部で弾性波速度が変わらないことは、浅い領域では掘削の影響を受けて弾性波速度が低下しているPS検層や弾性波探査（屈折法）の結果に対応していない。しかし、試験に用いた供試体は、き裂の存在しないところから採取されているため、このような結果になったものと考えられる。

次に、表2.4.4と表2.4.5の比較を行うと、今回の試験結果は花崗岩累の中では最大値よりは小さいが、比較的高いところに位置している。栗橋花崗岩の中では V_P 、 V_S 共に最大値を上回る結果となっている。これらのことから今回の試料採取位置の岩石の弾性波速度がかなり速いものであることがわかる。

2.4.3 一軸圧縮試験

2.4.3.1 目的

一軸圧縮強度を求めるとともに解析で用いる物理定数（変形係数）を得ることを目的とする。

2.4.3.2 試験方法

本試験はJISの「M0302-岩石の圧縮強さ試験方法」²⁾に基づいて実施した。試験装置の仕様を表2.4.6に示す。

表2.4.6 一軸圧縮試験装置仕様

機器名	機種名	メーカー	備考
圧縮試験器	MAC-100	(株) 森試験器製作所	最大荷重100t
荷重計	CLP-100S	(株) 東京測器研究所	
動ひずみ測定器	DPM-611A	(株) 共和電業	
ひずみゲージ	KFG-10-120-D16-11,他	(株) 共和電業	
計測、記録装置	PC-286VG	エプソン	

2.4.3.3 試験結果

図2.4.2に試験状況を示すとともに、表2.3.7に試験結果を示す。

今回の試験結果では、採取したボーリング孔が異なるにもかかわらず一軸圧縮強度、静弾性係数、静ポアソン比のそれぞれの値が近い結果となっている。

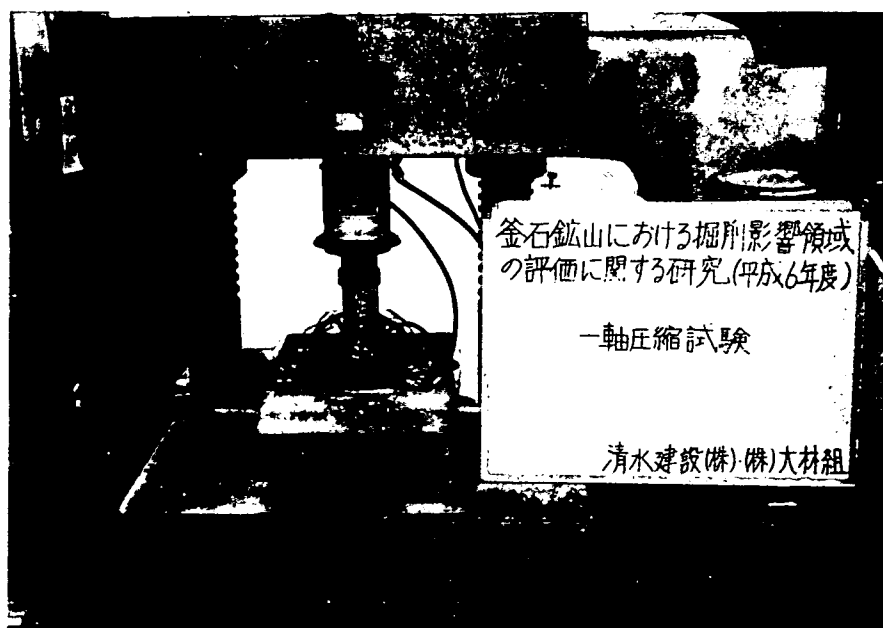


図2.4.2 一軸圧縮試験実施状況

表2.3.7 一軸圧縮試験結果

ボーリング孔No.	KDK-1	KDK-2	KDK-3
試料No.	①	②	③
深度(m)	0.45~0.65	0.32~0.50	0.49~0.82
高さ(cm)	12.090	12.135	12.080
直径(cm)	6.000	6.011	6.003
体積(cm ³)	341.836	344.368	341.895
質量(g)	949.28	461.34	954.15
含水比(%)	0.57	0.63	0.58
圧縮強度(MPa)	118.0	99.9	127.1
静弾性係数(GPa)	59.2	58.9	62.1
静ポアソン比	0.252	0.269	0.279

2.4.3.4 考察

表2.4.8に文献調査結果による花崗岩類と既存の試験結果による栗橋花崗岩に関する一軸圧縮強度、静弾性係数、静ポアソン比を示す。

今回の試験結果と表2.4.8の値を比較すると、静弾性係数と静ポアソン比は栗橋花崗岩の中で平均的な値であるが、一軸圧縮強度は若干小さくなっている。しかし、既存データが試料の採取された場所に依存しているかどうか評価できないため、一軸圧縮強度が小さくなっているのが掘削による影響であるかどうかは判断できない。

表2.4.8 一軸圧縮試験結果の既存データ

岩 種		一軸圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	静ポアソン比
花 崗 岩 類 (日本全国： 文献調査)	個数	172	145	38
	最大値	281.5	77.5	1.12
	最小値	15.8	0.00	0.06
	-----	-----	-----	-----
	平均値	139.1	24.1	0.29
	標準偏差	59.5	18.1	0.17
栗 橋 花 崗 岩	個数	134	132	126
	最大値	176.5	140.2	0.36
	最小値	45.8	22.2	0.13
	-----	-----	-----	-----
	平均値	144.4	58.2	0.25

2.4.4 高圧三軸試験

2.4.4.1 目的

三軸圧縮応力下における岩石の強度を測定することを目的とし、この試験によって破壊包絡線を決めるのに必要な値を得る。この包絡線から求められる内部摩擦角 ϕ とみかけの粘着力（せん断強度） C は事前解析における入力値として用いられる。

2.4.4.2 試験方法

本試験はISRM指針の「4. 岩石の三軸圧縮試験法の指針」³⁾に基づいて実施した。

試験時の側方向圧力は、試料採取位置の土被り（約730m）と単位体積重量（約27kN/m³）から計算される上載圧約20MPaより $\sigma=100\text{kgf/cm}^2$ （ $\approx 20\text{MPa}$ ）とし、0.5 σ 、 σ 、2 σ の3段階とした。

高圧三軸装置の仕様を表2.4.9に示す。

表2.4.9 高圧三軸装置仕様

機種名	メーカー	備考
MIS-235-5-77	(株) 圓井製作所	高剛性電気油圧サーボ方式 载荷フレーム形式：一体型 最大軸要領荷重：200tf（ $\phi=100\text{mm}$ ） 150tf（ $\phi=50\text{mm}$ ） 三軸セル最大側圧：500kgf/cm ² 試験試料寸法： $\phi 50 \times 100\text{mm}$ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 载荷ストローク：60mm 载荷速度：0.02～2mm/min 圧力検出法 軸圧：油圧センサー 側圧：油圧センサー 油圧装置 油圧力：210kgf/cm ² 油温冷却：水冷式 制御方式：電気油圧サーボ 軸圧制御内容：変位制御、荷重制御、 応力制御、ひずみ制御、 比例制御、他 データ収録：油圧等各センサーにADコンバータ付属収録用マイコンソフトにより収録

2.4.4.3 試験結果

図2.4.3に試験状況を示すとともに、表2.4.10に試験結果を示す。

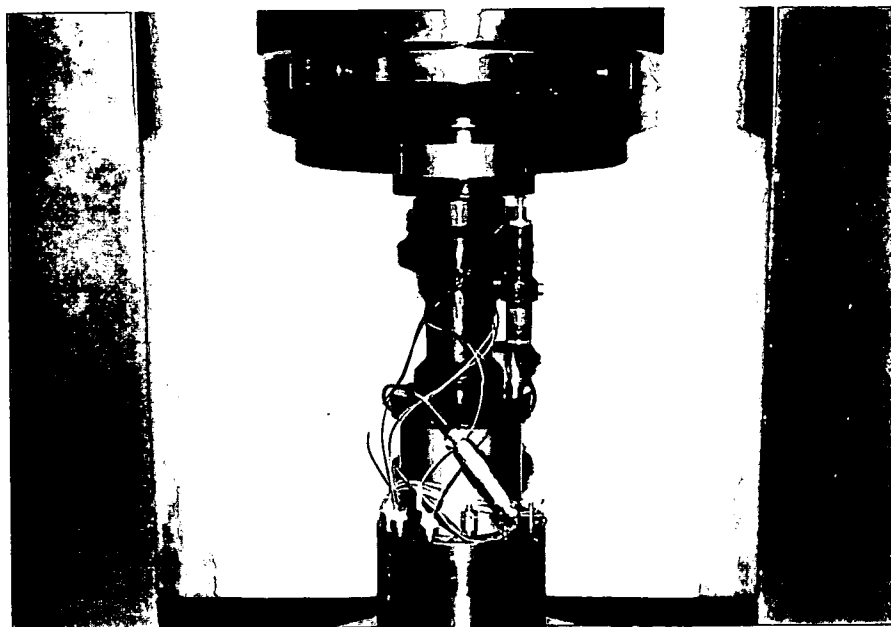


図2.4.3 高圧三軸試験実施状況

表2.4.10 高圧三軸試験結果

ボーリング孔No.	KDK-3		
深度(m)	3.00~4.00		
コアNo.	⑦	⑧	⑨
高さ(cm)	10.175	10.040	9.840
直径(cm)	4.956	4.955	4.953
体積(cm ³)	196.285	193.602	189.593
質量(g)	545.5	536.2	524.3
含水比(%)	0.10	0.10	0.13
側方向応力(MPa)	9.831	19.637	39.251
圧縮強さ(MPa)	232.251	269.614	373.771
主応力差最大時の軸ひずみ(%)	0.50	0.50	0.65

表2.4.9の結果を基に図2.4.4に示すような破壊包絡線を描き内部摩擦角 ϕ とみかけの粘着力（せん断強度）Cを得た。

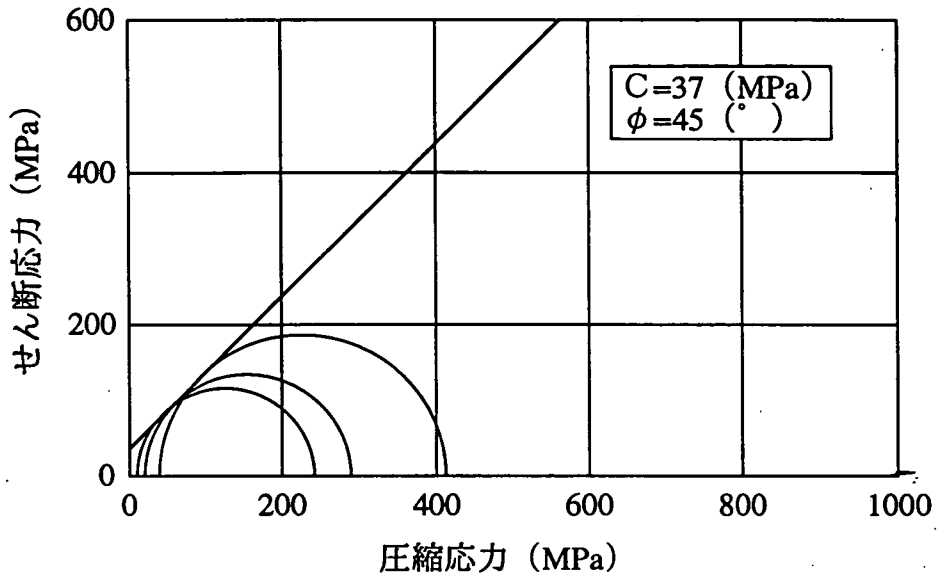


図2.4.4 破壊包絡線図

2.4.4.4 考察

文献調査結果による花崗岩類と既存の試験結果による栗橋花崗岩に関する三軸圧縮試験結果のデータを表2.4.11に示す。

表2.4.10によると今回の試験結果は、せん断強度は既存のデータの最大値よりも大きな値を示しているが、それとは対照的に内部摩擦角は既存データの範囲でも小さい側に位置している。

表2.4.11 三軸圧縮試験結果の既存データ

岩 種		せん断強度 (MPa)	内部摩擦角 ($^{\circ}$)
花 崗 岩 類 (日本全国： 文献調査)	個数	23	10
	最大値	35.0	61.0
	最小値	3.7	43.0
	平均值	20.0	52.0
	標準偏差	9.4	6.1
栗 橋 花 崗 岩	個数	4	4
	最大値	29.9	55.9
	最小値	18.1	50.3
	平均值	23.3	52.6

2.4.5 圧裂試験

2.4.5.1 目的

岩石試料の引張強度を求めることを目的とする。

2.4.5.2 試験方法

本試験はJISの「M0303-岩石の引張強さ試験方法」⁴⁾に基づいて実施した。

なお、圧裂試験装置は一軸圧縮試験と同じ（株）森試験器製作所製のMAC-100を用いた。

2.4.5.3 試験結果

図2.4.5に試験状況を示すとともに、表2.3.12に試験結果を示す。

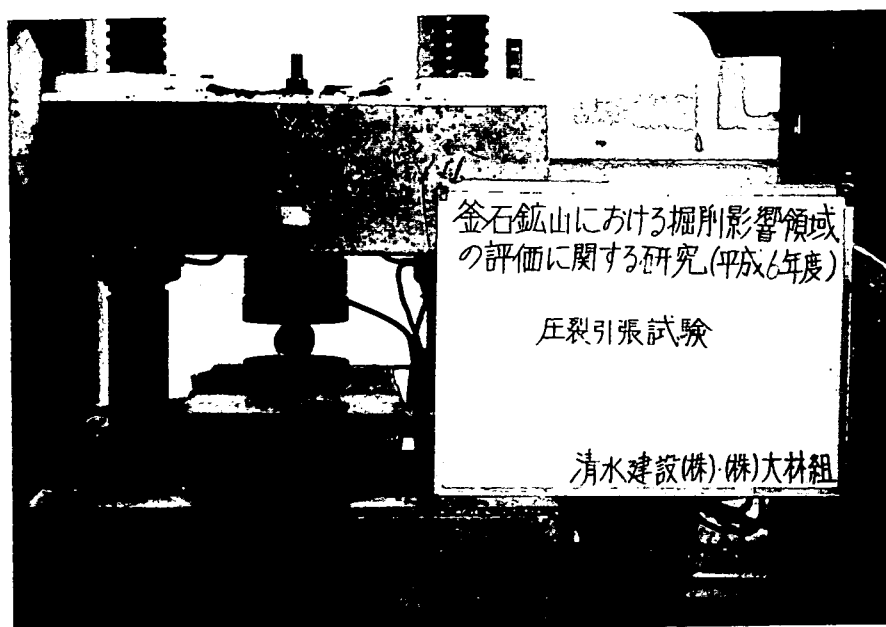


図2.4.5 圧裂試験実施状況

表2.3.12 圧裂試験結果

ボーリング孔No.	KDK-1	KDK-2	KDK-3
試料No.	④	⑤	⑥
深度(m)	0.45~0.65	0.32~0.50	0.49~0.82
高さ(cm)	5.935	5.700	5.878
直径(cm)	6.006	6.002	6.000
体積(cm ³)	168.144	161.271	165.975
質量(g)	461.34	445.46	464.58
含水比(%)	0.47	0.47	0.65
引張強度(MPa)	6.17	8.48	10.6

2.4.5.4 考察

文献調査結果による花崗岩類と既存の試験結果による栗橋花崗岩に関する圧裂試験結果のデータを表2.4.12に示す。

表2.4.13を比較する比較した場合、今回の試験結果（平均=8.41）は平均的な値を示している。

表2.4.13 圧裂試験結果の既存データ

岩 種		引張強度 (MPa)
花 崗 岩 類 (日本全国： 文献調査)	個数	58
	最大値	94.2
	最小値	0.2
	----- 平均値	11.9
	標準偏差	17.3
栗 橋 花 崗 岩	個数	34
	最大値	11.6
	最小値	5.8
	----- 平均値	6.9

2.4.6 室内試験のまとめ

各室内試験の結果を表2.4.14にまとめて示す。なお、高圧三軸試験結果より求められた内部摩擦角および粘着力は、 $\phi = 45^\circ$ および $C = 37\text{MPa}$ であった。

表2.4.14 室内試験結果一覧

試料No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
ボーリング孔 No.	KDK-1	KDK-2	KDK-3	KDK-1	KDK-2	KDK-3	KDK-3		
深度(m)	0.45~ 0.65	0.32~ 0.50	0.49~ 0.82	0.45~ 0.65	0.32~ 0.50	0.49~ 0.82	3.00~4.00		
高さ(cm)	12.090	12.135	12.080	5.935	5.700	5.878	10.175	10.040	9.840
直径(cm)	6.000	6.011	6.003	6.006	6.002	6.000	4.956	4.955	4.953
体積(cm ³)	341.836	344.368	341.895	168.144	161.271	165.975	196.285	193.602	189.593
質量(g)	949.28	461.34	954.15	461.34	445.46	464.58	545.5	536.2	524.3
湿潤密度 (g/cm ³)	2.777	2.744	2.795	2.744	2.762	2.799	2.779	2.770	2.765
有効間隙率(%)	1.87	1.09	1.48	0.87	1.57	1.06	1.38	0.71	1.25
含水比(%)	0.57	0.63	0.58	0.47	0.47	0.65	0.10	0.10	0.13
V_P (km/sec)	5.84	6.07	5.86	5.76	5.70	5.65	5.68	5.70	5.66
V_S (km/sec)	3.26	3.35	3.30	3.12	3.08	3.06	3.10	3.11	3.08
動ポアソン比	0.274	0.281	0.268	0.2928	0.294	0.292	0.288	0.288	0.290
動弾性係数 ($\times 10^4\text{MPa}$)	7.518	7.890	7.707	6.904	6.780	6.775	6.879	6.902	6.765
動剛性率 ($\times 10^4\text{MPa}$)	2.951	3.079	3.039	2.671	2.620	2.621	2.671	2.679	2.623
動体積弾性率 ($\times 10^4\text{MPa}$)	5.536	6.004	5.532	5.542	5.480	5.441	5.405	5.428	5.361
圧縮強度(MPa)	118.0	99.9	127.1	—	—	—	—	—	—
静弾性係数 (GPa)	59.2	58.9	62.1	—	—	—	—	—	—
静ポアソン比	0.252	0.269	0.279	—	—	—	—	—	—
側方向応力 (MPa)	—	—	—	—	—	—	9.831	19.637	39.251
圧縮強さ(MPa)	—	—	—	—	—	—	232.251	269.614	373.771
主応力差最大 時軸ひずみ(%)	—	—	—	—	—	—	0.50	0.50	0.65
引張強度(MPa)	—	—	—	6.17	8.48	10.6	—	—	—

2.5 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ

2.5.1 掘削影響領域の特性と広がり

ここでは、原位置試験結果を基に今回の調査領域における掘削影響領域の範囲と、その影響の程度についてまとめる。

(1)掘削影響領域の力学的特性に関する検討

掘削影響領域の力学的特性について、先に述べた原位置試験結果から得られる知見を以下に示す。

- (a) P S 検層の結果と坑道弾性波探査（屈折法）の結果より、調査領域の弾性波速度分布について坑道壁面から深度0.5～0.75m付近までの低速度（3.0～5.0km/sec）領域とそれ以深の高速度（6.0km/sec）領域に分けることができる。また、弾性波トモグラフィの結果においても坑道壁面近傍に低速度領域が存在することが示されている。
- (b) 坑道弾性波探査（屈折法）と弾性波トモグラフィの結果における坑道壁面近傍の弾性波速度の分布状態は、どちらの場合もき裂の分布状況と対応していることを示している。
- (c) 弾性波トモグラフィの結果では、KDT-1孔およびKDT-2孔の孔奥で弾性波速度が低下している領域が存在していることを示している。しかし、この領域における波線密度が低いことを考慮すると、その結果に対する信頼性は低いと考えられる。
- (d) レーダ探査（反射法）ではノイズの影響で坑道壁面から深度0.5m程度までが不明瞭な結果となったものの、深度1m付近を境として反射面が減少していることから、坑道壁面付近が掘削による影響を受けているものと予想される。
- (e) 孔内載荷試験結果を基に掘削影響領域と健岩部との境界が深度1.0m付近に存在すると算出されたが、データのばらつきが大きいためその信頼性は低い。しかし、深度0.5m付近の変形係数および弾性係数の値が最小値を示していることから、少なくとも深度0.5mまでは掘削の影響を受けていると考えられる。

以上のことから、今回の試験サイトにおいて坑道壁面に掘削の影響を受けていると考えられる領域が存在することがわかる。この影響領域の大きさは、P S 検層と坑内弾性波探査（屈折法）の結果を基に弾性波速度を指標とした場合

は坑道壁面から深度0.5～0.75m程度までの範囲であり、レーダ探査（反射法）の結果からは深度約1.0mまでの範囲であると予想される。また、孔内載荷試験の結果に基づくと、深度0.5～1.0mまでが影響領域であると考えられる。一方、掘削による影響の程度は、弾性波速度については約半分の数値になっているといえるが、孔内載荷試験に関しては、試験で得られる変形係数および弾性係数の値のばらつきが大きいため、評価することは困難である。さらに、レーダ探査の場合、定量的な評価は不可能である。なお、弾性波トモグラフィの結果では、坑道壁面近傍以外の深部にも低速度領域が存在する。これを今回の調査のみで掘削影響領域と解釈するのは困難であるが、その分布の範囲として弾性波速度の最高で6.5km/secに対して最低で3.5km/secの領域が分布していることが把握できた。

なお、室内試験では、各コア採取地点における物性値が得られたが、掘削影響領域を評価することは数少ないサンプリング個数からは困難であると考えられる。

(2) 既存坑道周りの水圧分布の評価

岩盤中に坑道を掘削すると坑道周りの水圧は低下する。既存坑道周りの水圧分布を把握するため、250mレベル坑道において、水平方向の水圧分布と垂直方向の水圧分布が動燃により計測されている。

図2.5.1には水圧計測用のボーリングKDH-1（水平）とKDH-2（垂直）の配置とパッカー位置、計測区間の模式図を示している。各孔とも6箇所の計測区間を持ち、各水圧計は既存坑道内で同じ高さに設置され連続計測されている。各計測区間の状況ならびに平成7年1月での水圧計測値は、表2.5.1にまとめられている。

均質等方材料の連続式を用いると、円形坑道周りの水圧（水頭）分布は以下の式で示される。¹²⁾

$$H = \left(H_0 / \ln \frac{R}{r_0} \right) \ln \frac{r}{r_0} \quad (2.5.1)$$

ここで、 r は坑道中心から測られた距離、 r_0 は坑道半径、 R は水圧の影響半径である。また、 H は r における水頭、 H_0 は R における水頭である。同様に水圧表示では、

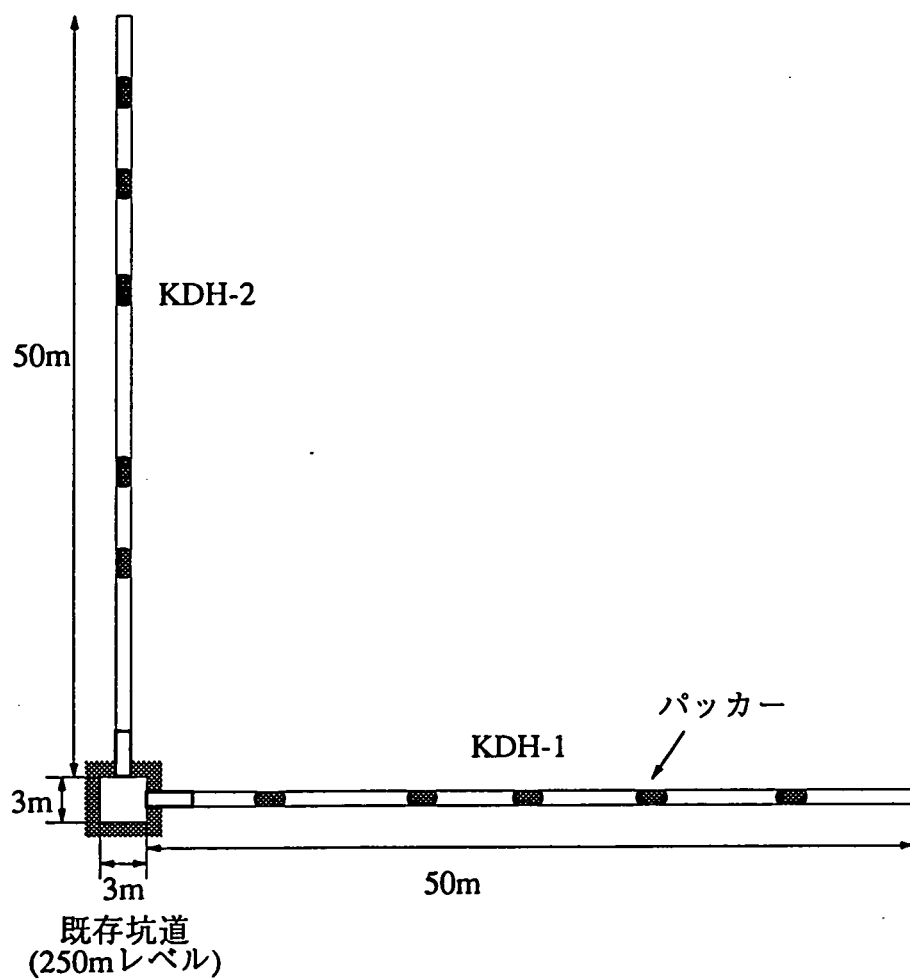
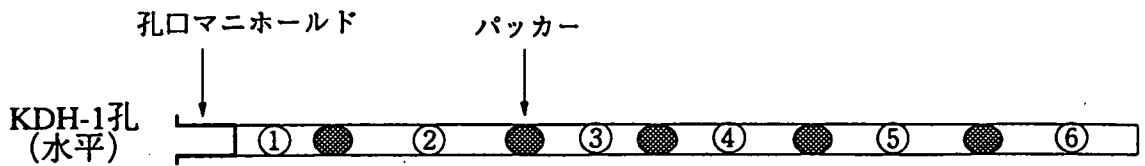
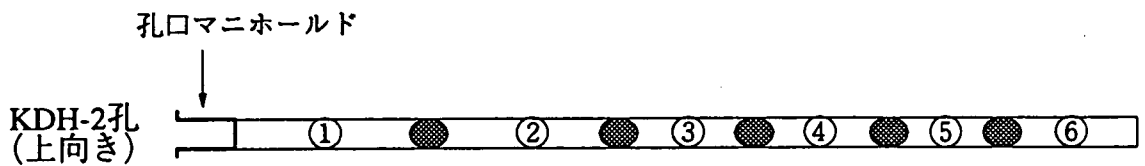


図2.5.1 水圧計測用ボーリングKDH-1及びKDH-2の配置図

表2.5.1 間隙水圧観測用パッカーの設置位置と孔内状況及び水圧
(資料提供：動力炉・核燃料開発事業団殿)



測定区間 (深度)	① (3~7m)	② (9~17m)	③ (19~24m)	④ (26~32m)	⑤ (34~41m)	⑥ (43~50m)
孔内状況						
破碎部	○	○	○	○	○	○
高角度のき裂		○		○	○	○
その他						
水圧(kgf/cm ²)	0	8.8	11.8	10.5	11.6	13.0



測定区間 (深度)	① (3~12m)	② (14~18m)	③ (20~29m)	④ (31~36m)	⑤ (38~42m)	⑥ (44~50m)
孔内状況						
破碎部			○			
高角度のき裂	○	○	○			
その他			湧水き裂	中角度の き裂	低角度の き裂	ほとんど き裂無し
水圧(kgf/cm ²)	8.6	10.4	6.3	0.0	14.2	3.9

水圧は平成7年1月6日現在の計測値

$$u = \left(u_0 / \ln \frac{R}{r_0} \right) \ln \frac{r}{r_0} \quad (2.5.2)$$

と示される。ここで、 u は r における水圧、 u_0 は R における水圧である。 R としては 500~1000m を採用することが多い。¹³⁾

図2.5.2は表2.5.1の水圧データを r/r_0 でプロットしたものである。ここで、 $r_0=1.5m$ を用いている。この水圧分布から (2.5.2) 式に基づく対数近似が可能であり、

$$u = A \ln \frac{r}{r_0} \quad (2.5.3)$$

とすることができる。ここで、 $A = 2.30 \{ u_0 / \ln (R/r_0) \}$ である。なお、図中、水平孔(KDH-1)の第1区間、垂直孔(KDH-2)の第3区間、第4区間、第6区間の水圧はこの近似曲線から離れていると考えられるため、対数近似を行なうにあたっては、これら4区間のデータを除外している。最小自乗近似でAの値を定めるためには、以下の式を用いる。

$$A = \frac{\sum_i \{ u_i \log (r_i / r_0) \}}{\sum_i \{ \log (r_i / r_0) \}^2} \quad (2.5.4)$$

ここで u_i は坑道中心からの距離 r_i 離れた位置での水圧の値である。表2.5.2にはAを計算するための集計表を示している。これによると、

$$A = 110.79 / 12.21 = 9.07 \quad (2.5.5)$$

として与えられる。すなわち、近似式は

$$u = 9.07 \log \frac{r}{r_0} \quad (2.5.6)$$

近似の状況は、図2.5.3に示している。この図には除外した4区間の水圧も含めて、計測水圧は計測区間の中心で代表させている。なお、前述の図 2.5.2 には計測水圧に重ねて、この近似曲線を破線で示している。

この水圧計測地点の土被りは730 mであり¹²⁾、この水頭分の水圧がかかるとすると $u_0 = 73 \text{ kgf/cm}^2$ となり、影響圏 $R = 1000 \text{ m}$ 、坑道半径 $r_0 = 1.5 \text{ m}$ とすると $A = 25.8$ となり、今回のAの値はほぼ3分の1の値を示している。今回の近似において、同様な影響圏を考える場合 $u_0 = 25.7 \text{ kgf/cm}^2$ と推定できる。

なお、今回の近似から離れたデータである KDH-1 の第一区間、および KDH-2 の第3、第4区間は破碎部ならびにき裂により水圧が低下している区間と考えられる。また、KDH-2 の第6区間については計測装置等のチェックも含めて検討が必要と思われる。

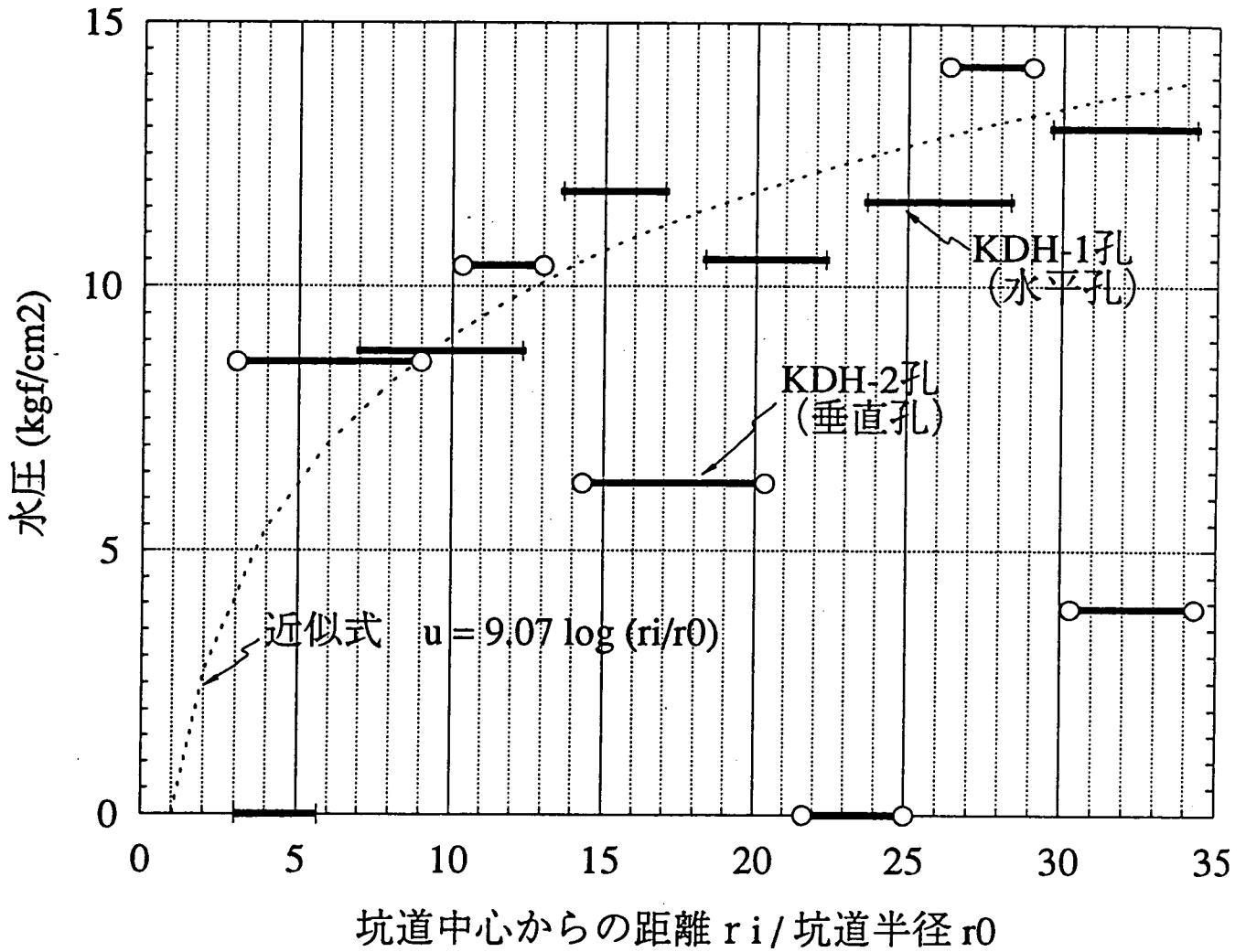


図 2.5.2 KDH-1孔とKDH-2孔の水圧分布

表2.5.2 水圧対数近似のための集計表

計測区間 (深度)		計測水圧 u_i kgf/cm ²	X_i ($=r_i/r_0$)	$\log X_i$	$u_i \log X_i$	$(\log X_i)^2$
KDH-1 (水平孔)	① 3~7m	0	4.33	0.64	-0-----	--0.41--
	② 9~11m	8.8	9.67	0.99	8.71	0.98
	③ 17~24m	11.8	15.33	1.19	14.04	1.42
	④ 26~32m	10.5	20.33	1.31	13.76	1.71
	⑤ 34~41m	11.6	26.00	1.41	16.36	1.99
	⑥ 43~50m	13.0	32.00	1.51	19.63	2.28
KDH-2 (垂直孔)	① 3~12m	8.6	6.0	0.78	6.71	0.61
	② 14~18m	10.4	11.67	1.07	11.13	1.14
	③ 20~29m	6.3	17.33	1.24	-7.81--	-1.54--
	④ 31~36m	0.0	23.33	1.37	-0.0---	-1.88--
	⑤ 38~42m	14.2	27.67	1.44	20.45	2.07
	⑥ 44~50m	3.9	32.33	1.51	-5.89--	-2.28--
(合計)					110.79	12.21

注1： r_i は坑道中心から計測区間中心までの距離である。

r_0 は坑道の半径として1.5mを用いた。

注2： $\Sigma(u_i \log X_i)$, $\Sigma(\log X_i)^2$ の計算ではKDH-1の①区間、KDH-2の③、④、⑥区間の値を除外して加算している。

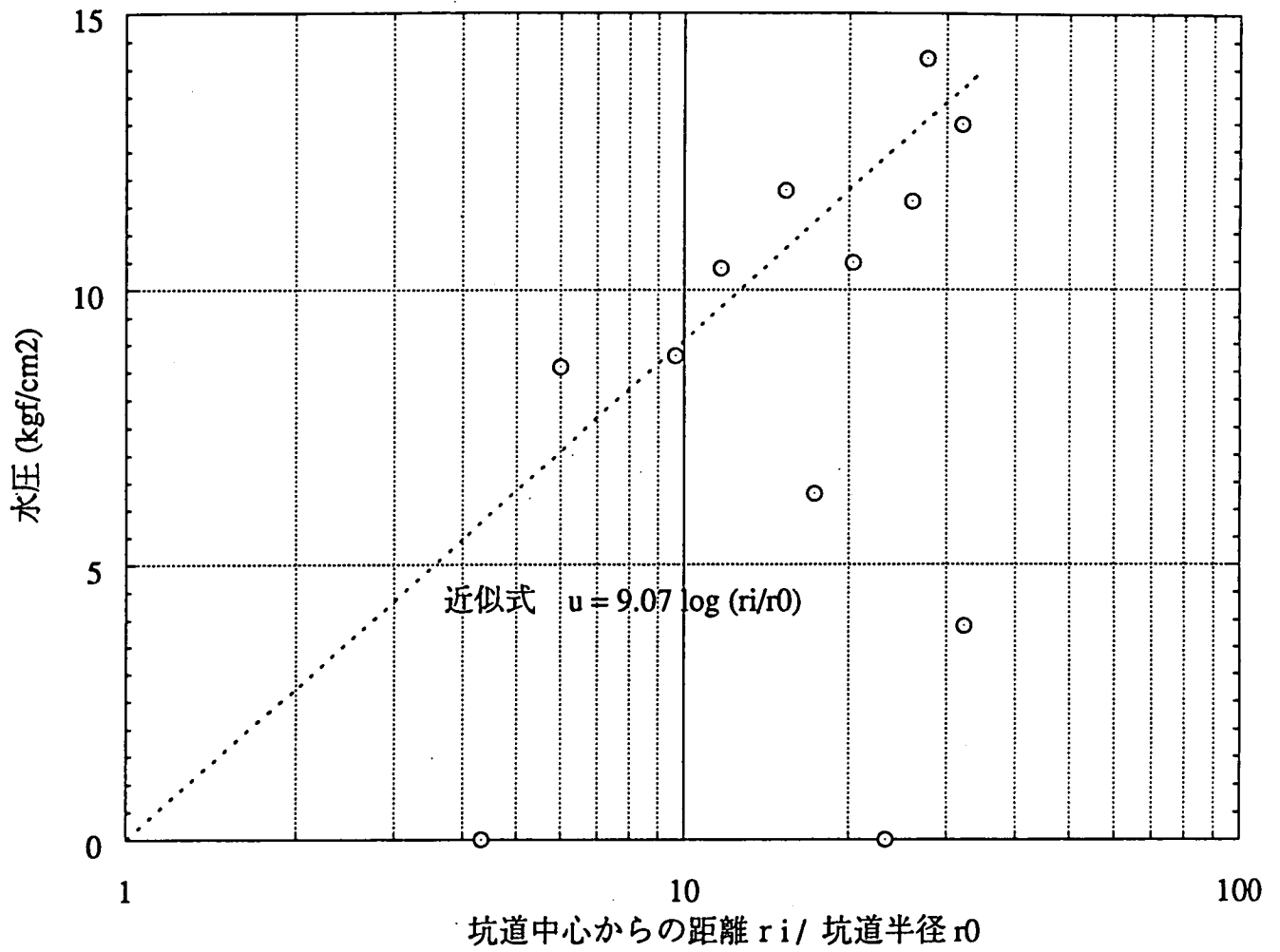


図 2.5.3 間隙水圧分布の対数近似
(KDH-1とKDH-2のデータを使用)

2.5.2 調査手法の適用性の評価

今回用いた原位置試験手法によって掘削影響領域の評価を行う場合のその適用性について評価する。

(1) P S 検層

調査手法とともに評価方法も簡便で有効な手法であると考えられる。調査によって得られる速度分布はボーリング孔軸上のものであり、広範囲なデータを得るためには多数のボーリング孔を必要とする。また、弾性波速度分布が深度方向に弾性波速度が大きくなるような場合は、その変化を捉えることができない。さらに、今回の試験サイトのように弾性波速度が速い領域では、測定間隔に機器の大きさから限界があり（最小0.25m）、測定間隔を小さくして掘削影響領域を特定する精度を高くするためには計測機器の開発が望まれる。

(2) 坑内弾性波探査（屈折法）

P S 検層と同様に、調査手法はこれまでの実績と評価も容易なため、有効な手法であると考えられる。ただし、探査深度が測線長の10分の1から5分の1程度であり、深度方向に調査領域を広げるためには深度長に対してかなり長い測線を必要とする。また、弾性波速度分布が深度方向に弾性波速度が大きくなるような場合には、その変化を捉えることができないことと、弾性波速度が速い領域の調査に対して高精度の計測機器の開発が望まれることはP S 検層の場合と同様である。

(3) レーダ探査（反射法）

今回実施したレーダ探査では、ノイズの影響から坑道壁面近傍の状態を把握することが困難であった。従って、坑道壁面近傍のノイズの影響を除去することができれば掘削影響領域の把握に有効であると考えられる。ただし、捉えられた反射面が、き裂によるものであるか地質の変化によるものであるか等の原因を特定することができないため、他の手法と組み合わせる必要がある。また、探査可能な深度が3m程度までであるとともに、調査壁面と直交するようなき裂等については捉えることができない。

(4)弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィ探査は、解析モデルのセルの大きさ（今回の探査の場合は1.0m四方）等を考慮すると、調査領域内の1.0～2.0m程度の大きさをもつ地質構造が異なる領域の存在を捉えるためには有効であると考えられるが、深部地質構造は解析能力上、信頼性が低下するのが現状である。また、測定領域外近傍に測定データを乱す物質が存在する場合に、これがノイズになり実際の分布を歪めた解析結果となる可能性もある。さらに、発震時刻の高精度検知のためにサンプリングとダイナミックレンジの記録装置の開発の必要性がある。

(5)孔内載荷試験

孔内載荷試験の試験結果は、載荷板によって載荷されている場所（巨視的にみると点と考えられる）における情報として与えられる。従って、孔内載荷試験によって掘削影響領域を評価するには、応力集中等の掘削による影響を受けていない岩盤のデータを得ることが必要である。そのためには比較的広い範囲で試験を行い、掘削の影響を受けていないと考えられる不変的な領域を捉えることである。しかし、このようにして得られる影響領域は、ボーリング孔軸上の分布であり、平面での分布を得るためには、P S 検層と同様に多数のボーリング孔での試験、あるいは他の手法による調査との組み合わせが必要であると考えられる。また、孔内載荷試験で得られる変形係数や弾性係数は応力分布やき裂分布、および不均質性等の影響を受けることが予想され、孔壁の乱れ等によって測定値はばらつき、代表値を決定することは困難になる。このばらつきを最小限にするため試験前にB T V 観察、孔径測定等によってチェックし、試験位置や載荷方向などについて考慮する必要性がある。

[参考文献]

- 1)建設省土木試験基準.
- 2)土木関係JIS要覧, 新日本法規出版(株), pp.394-15~394-16.
- 3)ISRM指針Vol.1, 岩の力学連合会, 1982.9, pp.32~35, 1982.9.
- 4)土木関係JIS要覧, 新日本法規出版(株), pp.394-17~394-18.
- 5)物理探査学会: 図解 物理探査, pp212, 1992.6.
- 6)物理探査学会: “土と岩”の弾性波速度-測定と利用-, pp137~138, 1990.5.
- 7)物理探査技術協会: 物理探査用語辞典, pp282~283, 1979.5.
- 8)物理探査学会: 図解 物理探査, pp216, 1992.6.
- 9)土木学会: 孔内載荷試験法の現状と課題-指針化の試み-, pp76, 1988.5.
- 10)三木幸蔵: わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出版会, pp238, 1988.11.
- 11)土木学会: 孔内載荷試験法の現状と課題-指針化の試み-, pp19~21, 1988.5.
- 12) P N C T N 7410 93-032: 釜石鉱山250mレベル坑道における割れ目特性の予察的調査, 1993.

3. き裂の物性試験および試験結果に基づくき裂の分類

3.1 はじめに

トンネル・地下発電所・岩盤内石油タンク等の地下空洞は、結晶質岩を母岩とする岩盤内に掘削されることが多い。このような岩盤は断層や節理をはじめとする数多くの様々な規模や形態を有するき裂が存在することから、一般に不連続性岩盤と呼ばれている。不連続性岩盤はき裂を含んだ構造体と考えることができ、その力学的挙動は母岩の力学特性とき裂の力学特性が複合されたものとなって現れると考えられる。

従来、空洞掘削時の岩盤の力学的挙動を解析するのにFEM（有限要素法）が用いられている。FEMでは岩盤を連続体として扱う。FEMの範疇において、き裂の影響を考慮する代表的な手法としてクラックテンソルや損傷テンソル等が挙げられる。これらの手法は、き裂の幾何学特性や力学特性を定量化して岩盤を等価な異方弾性体に置き換えるものである。

一方、岩盤を不連続体として扱う手法としてはDEM（個別要素法）などの不連続体解析がある。DEMにおいて岩盤はき裂で分割されるブロックの集合体としてモデル化される。DEM解析を実施するには、原位置に存在するき裂の力学特性を事前に把握しておく必要がある。

従来、DEMなどの不連続体解析においては、き裂の力学特性に関するパラメータが1種類で入力されていることが多い^{1),2)}。この理由として、対象とする原位置から十分なき裂の情報が得られないことや、室内試験の結果として得られるデータに、ばらつきがあることが考えられる。また、解析において、き裂の物性に注目した検討よりは、むしろ土被りや初期地圧のパターンに注目した検討がなされている²⁾。これまでは、サイトごとのき裂について平均的な物性値を入力していることが多く、き裂を分類して入力値を検討した例はほとんどない。

そこで本章では、き裂の分類指標と力学特性との関係を検討する。

釜石鉱山においては、原位置のき裂の特性を把握するため坑道壁面の観察・岩芯鑑定（コア観察）・ボアホールTVによる孔内観察が行われた。これらの調査から得られたき裂の情報に基づいて、3.2節ではき裂を分類するための指標を抽出するとともに、き裂の力学試験に用いる試料の条件を決定する。そして、3.3節では原位置のボーリングコアに含まれるき裂の力学試験結果について述べ、3.4節においてき裂の力学特性と分類指標の関係を調べる。

き裂分類の流れを図3.1.1に示す。図中のa)~f)に示した各検討項目について、以下に概要を述べる。まず、a)では原位置のき裂調査および岩芯鑑定結果の情

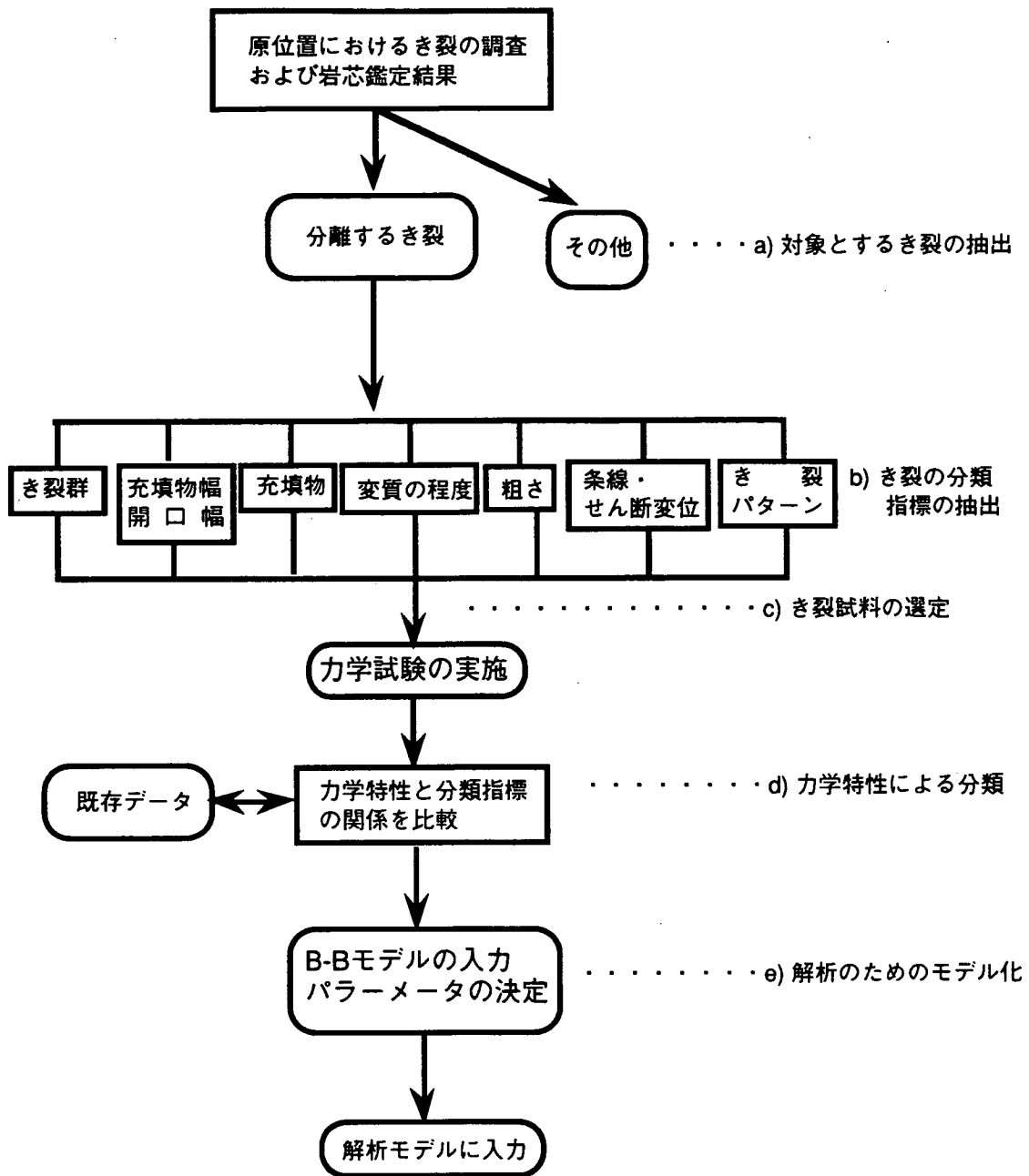


図3.1.1 き裂分類の流れ

報をもとに、対象とするき裂を抽出する。b)では抽出された個々のき裂の諸特性について検討し、き裂分類の指標を決定する。c)ではき裂分類の指標に基づいて、き裂の力学試験の試料を選定する。つぎにき裂の力学試験を実施する。d)ではき裂の力学試験から得られた力学特性と、き裂分類の指標の関係を調べる。e)では分類されたグループごとにB-Bモデルの入力パラメータが決定される。

3.2 き裂の分類

3.2.1 ボーリングコアからのき裂の抽出

一般に、ボーリングコアに含まれるき裂には、断層・節理・破碎帯・片理・葉理など様々な形態や規模のものがある。DEMやクラックテンソル解析などでは、岩盤の力学的挙動への影響が大きいと考えられる断層や節理などが考慮される。ISRMの指針では、断層と節理を原位置におけるせん断変位の有無で区別している。岩芯鑑定においては、き裂面の条線やコア側面の鉱脈のずれから、原位置におけるせん断変位の有無を判定している。今回対象としている地点の周辺には、特に厚い粘土充填物や破碎帯を伴った大規模な断層が存在しない。そこで、今回は個々のき裂を断層や節理と区別せず、以下の条件により選定する。

- 1) ボーリングコアにおいて分離するき裂
- 2) 上記1)のうちボアホールTVで検出されず、かつ岩芯鑑定において変質と充填物の認められないき裂を除外する。

ここでは、条件1)のみであるとコアリング時に機械的に割れてできるき裂を含む可能性があるため、条件2)を設定した。したがって、これら2つの条件を満足するき裂が天然のき裂であると考えられる。結果として、8本のボーリング孔のコアを対象として、154本のき裂が選定された。これら154本のき裂の情報を表3.2.1(a)~(h)にまとめる。また、今回対象としている250mレベル坑道の8本のボーリング孔の配置を図3.2.1に示す。

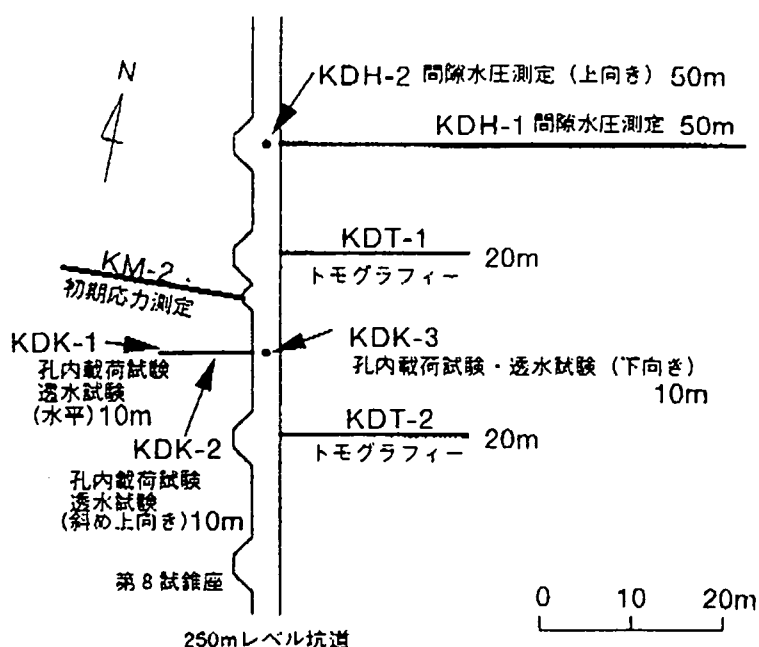


図3.2.1 250mレベル坑道におけるボーリング孔の配置

3.2.2 き裂分類の指標の抽出

(1) き裂の走向・傾斜とき裂群

DEM解析においてき裂の幾何学的な配置をモデル化する際、調査が到らない領域のき裂の方向の分布を確率論的に推定する方法³⁾を用いる。したがって、対象とする個々のき裂の走向傾斜を把握しておく必要がある。

250mレベル坑道における440m区間、および調査の対象となる領域のボーリング孔内におけるき裂の極密度コンターを図3.2.2に示す⁴⁾。図3.2.2より、比較的広い範囲の坑道と、より狭い範囲のボーリング孔におけるき裂方向の分布が、よく一致していることがわかる。これら2つの極密度コンターから図中に示したようにI~IVの4つのき裂群が認められる。このうち、図3.2.2の右図の全ボーリング孔の極密度コンターでは、き裂群IVは極が明確ではないのでき裂群として扱わないことにし、き裂群I~IIIに含まれないき裂とあわせて「その他」に分類した。各き裂の走向傾斜から、き裂群I~IIIについては、それぞれの極密度コンター5%以上の領域に含まれるか否かで分類し、5~10%の領域にあるものはI'、II'、III'とした。

なお、分離するき裂の極密度コンター（図3.2.3参照）においても、き裂群I~IIIが認められる。また、分離しないき裂に関しては、き裂群IおよびIIが認められる。

一方、き裂群とき裂の力学特性の関係については明確ではない。き裂群がどのような成因により成立ったかなどの点も不明である。また、同一のき裂群に属するき裂には様々な特性のものがあると考えられる。

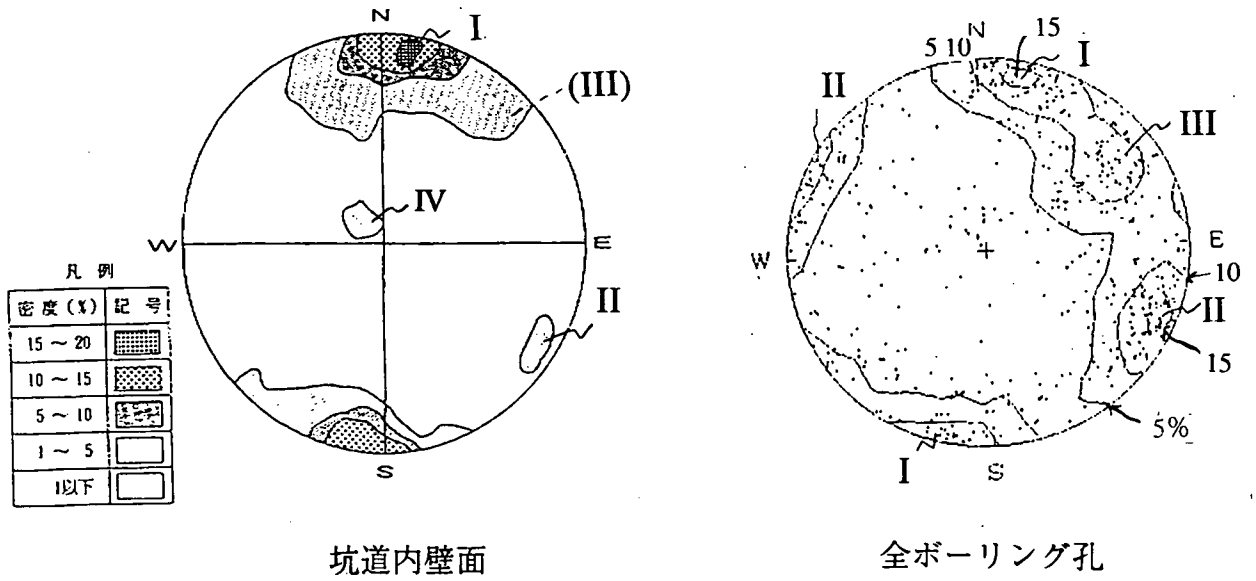


図3.2.2 坑道内壁面およびボーリング孔内のき裂の極密度コンター

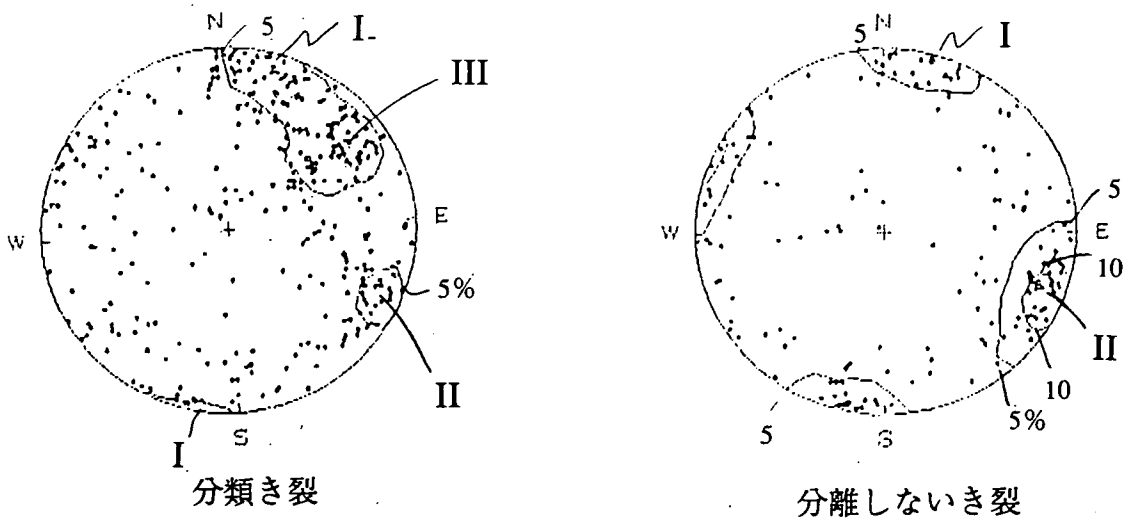


図3.2.3 分離するき裂と分離しないき裂の極密度コンター

(2) 充填物の種類

今回対象としているき裂は、全体の約88%が充填物を狭在している。岩芯鑑定では、充填物の種類からき裂をつぎの4つのタイプに分類している。

Aタイプ：充填物のほとんどが粘土鉱物で、母岩および充填鉱物の分離や破壊があるもの。

Bタイプ：充填物のほとんどが鉱物で、母岩および充填鉱物の分離や破壊がないもの。

Cタイプ：フィルム状の充填物を含むもの。あるいは充填物を含まず弱い変質があるもの。

Dタイプ：充填物を含まず変質がないもの。

これら4つのタイプのヒストグラムを図3.2.4に示す。充填物の種類として最も多いのはCであり全体の43%を占める。以下Bが27%、Aが18%、Dが12%の順である。充填物の種類により、き裂の力学特性が異なる可能性がある。

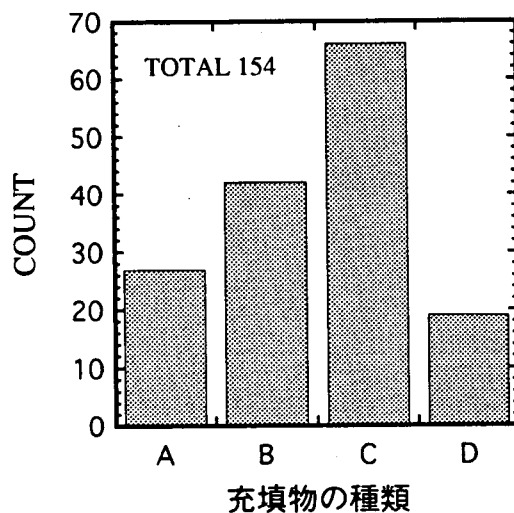


図3.2.4 充填物の種類のヒストグラム

(3) 変質の程度による分類

岩芯鑑定において、ボーリングコアに現れたき裂の変質の程度による分類が以下のように行われている。

強変質(IL)：き裂全周で初生鉱物の変質および母岩組織の乱れが認められる。

中変質(MD)：き裂全周で初生鉱物の変質、かつ一部で母岩組織の乱れが認められる。

弱変質(WK)：き裂全周で初生鉱物の変質が認められる。

微弱変質(VW)：き裂周辺の一部で初生鉱物の変質が認められるもの。

未変質(FS)：変質が全く認められないもの。

変質の程度によるヒストグラムを図3.2.5に示す。全体の87%が、WK～FSの変質が弱いき裂である。き裂の変質により、圧縮性が増大したり、あるいはせん断強度が低下するなどの影響が考えられる。

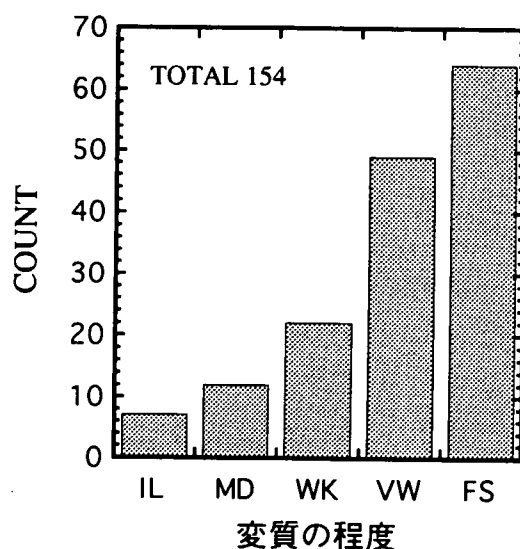


図3.2.5 変質程度によるヒストグラム

(4) 開口幅

き裂の開口幅は、ボーリング孔内（ボアホールテレビ）、および坑道内壁面で観察される。ボアホールテレビの結果によれば、合計1045本がき裂として検出され、そのうち開口幅の認められたものが33本であった。これら33本を岩芯鑑定で照合したところ、分離するき裂は18本で、そのうち充填物を伴うものが16本であった。したがって、実際に空隙を伴う開口を呈するき裂は、わずか2本のみであった。き裂のほとんどが充填物を伴うため、開口幅ではなく充填物の幅に着目することにする。

(5) 充填物の幅

粘土状の充填物を挟在するき裂は、せん断強度や変形が著しく劣ることも考えられる。しかし、実際に軟弱な粘土状の充填物を全く乱さない状態でコアを採取することは非常に難しい。一方、鉱物などの充填物の場合は比較的採取しやすい。神岡地下実験場の例では、原位置における充填物の幅が大きいき裂ほどせん断強度が小さかった⁵⁾。また、充填物の幅の増大に伴ってき裂長が大きくなる傾向が認められた。したがって、充填物の幅が大きいものほどき裂長が大きく、せん断強度が小くなる傾向が把握された。

充填物の種類ごとの充填物の幅の分布を表3.2.2に示す。ここでは、対数軸を意識して充填物の幅 w をつぎの5つに分けている。

a1: $w \leq 0.5\text{mm}$

a2: $0.5 < w < 2$

a3: $2 \leq w < 5$

a4: $5 \leq w < 10$

a5: $10 \leq w$

これは、充填物の幅とき裂長の関係が、おおよそ対数線形関係にあるという傾向⁶⁾を考慮したためである。

充填物の幅のヒストグラムを図3.2.6に示す。全体の約半数はa1に属する。

き裂のせん断強度への影響およびき裂長との相関性を考慮すると、充填物の幅は重要な指標と考えられる。

表3.2.2 充填物の種類ごとの充填物の幅

き裂群	充填物の種類	充填物の幅 a (mm)					計
		a1	a2	a3	a4	a5	
		$0 \leq a \leq 0.5$	$0.5 < a < 2$	$2 \leq a < 5$	$5 \leq a < 10$	$10 \leq a$	
I	A	0	0	5	5	5	15
	B	0	4	0	4	3	11
	C	8	2	0	0	0	10
	D	1	0	0	0	0	1
II	A	0	0	1	2	1	4
	B	0	9	8	4	0	21
	C	25	7	0	0	0	32
	D	7	0	0	0	0	7
III	A	0	0	0	0	0	0
	B	0	1	2	1	0	4
	C	6	0	0	0	0	6
	D	2	0	0	0	0	2
その他	A	0	0	2	1	5	8
	B	1	1	3	1	0	6
	C	13	3	2	0	0	18
	D	9	0	0	0	0	9
計		72	27	23	18	14	154

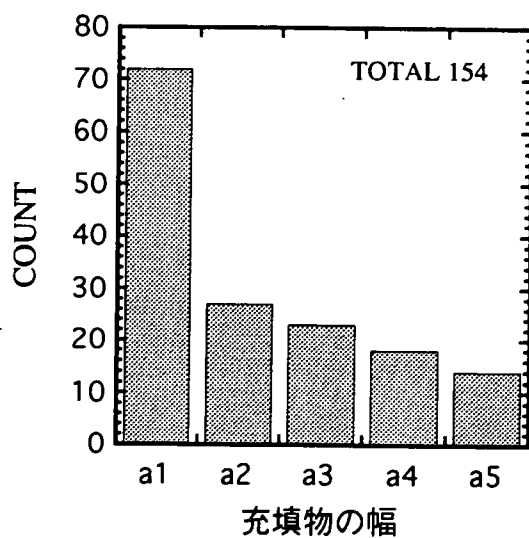


図3.2.6 充填物の幅によるヒストグラム

(6) き裂面の粗さ

岩芯鑑定では、き裂面の粗さをつぎの4つに分類している。

- 滑らか ~ P
- やや滑らか ~ S
- やや粗い ~ I
- 粗い ~ C

き裂群ごとの粗さのヒストグラムを図3.2.7に示す。PおよびSの滑らかなき裂が全体の約86%を占め、C（粗い）と判定されたき裂が約12%ある。

Bartonらをはじめとする研究において、き裂面の粗さがせん断強度などの力学特性に影響することが指摘されている⁷⁾。また、き裂面の形状を計測し粗さの定量化を行い、せん断強度などとの相関性を検討した研究もいくつかある^{8),9),10)}。一方、岩芯鑑定におけるの粗さの分類は目視によるものなので、き裂面の形状の定量的な測定やせん断試験との比較が必要である。

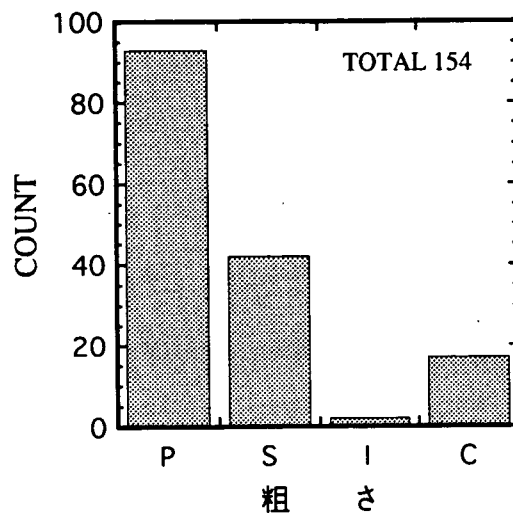


図3.2.7 粗さによるヒストグラム

(7) き裂面の条線およびせん断変位量

き裂のせん断変位量とは、原位置におけるき裂の滑りの痕跡をボーリングコア側面の鉱物脈などのずれなどを手がかりに求めるものである。また、き裂面の条線は原位置でき裂がせん断変位した際の痕跡と考えるものである。これらの指標から、過去に受けたせん断によりき裂の粗さが消失することなどが考えられる。

条線およびせん断変位の有無と粗さの関係を図3.2.8に示す。全体の約35%のき裂に条線やせん断変位の痕跡が認められた。しかし、条線やせん断変位の痕跡がないき裂でも滑らか (P,S) と判定されたものが多数あるので、条線の有無からき裂の力学特性に与える影響を予測するのは困難である。したがって、ここでは条線やせん断変位の有無はき裂分類の指標としない。

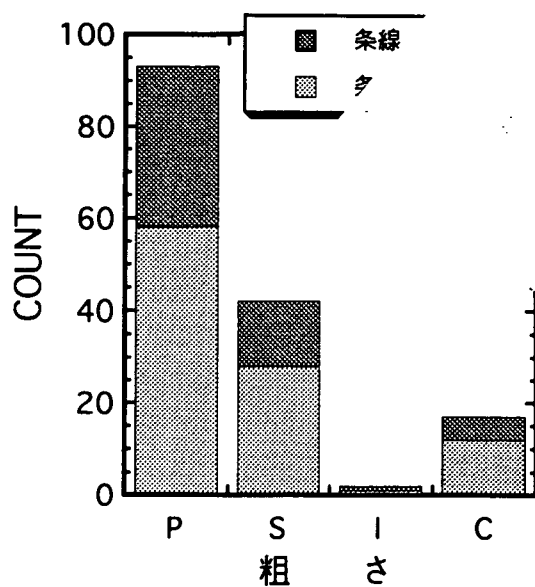


図3.2.8 条線およびせん断変位の有無と粗さ

(8) き裂パターン

き裂パターンとは、き裂面の形状や、き裂から派生してできたヘアークラックの形態を分類したものである。岩芯鑑定において用いたき裂パターンの分類を図3.2.9に示す。図3.2.9に示された基本グループP・C・I・Sは、き裂面の粗さと等価な意味を持つ。すなわち、この基本パターンに示された形状は、詳細な凹凸を無視した場合の大まかなき裂の面形状と考えられる。

今回の岩芯鑑定の結果によると、き裂パターンの分布は図3.2.10のようであった。全体の約95%は基本パターンPであり、特にPmは全体の65%を占める。せん断強度に影響すると考えられる基本パターンは、ほとんどすべてのき裂について同一とみなせるので、き裂分類の指標としない。

基本グループ	副パターン			
	毛状割れ目を伴わないパターン	短い毛状の割れ目を伴うパターン	長い毛状の割れ目を伴うパターン	不連続な割れ目パターン
P (Planar)	Pm	Pl	Pj	Pd
C (Curved)	Cm	Cl	Cj	Cd
I (Irregular)	Im	Il	Ij	—
S (Stepped)	Sm	Sl	Sj	Sd

図3.2.9 き裂パターン

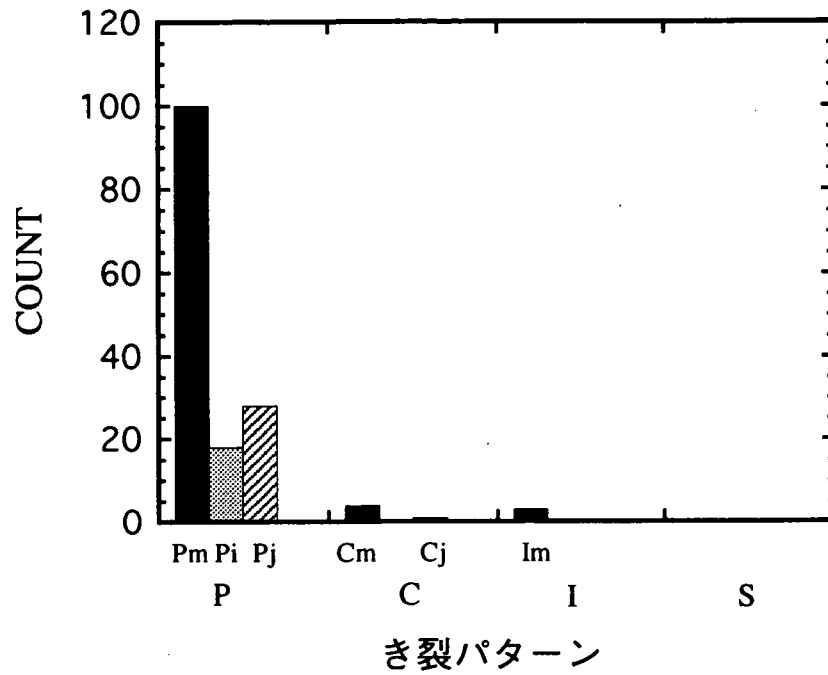


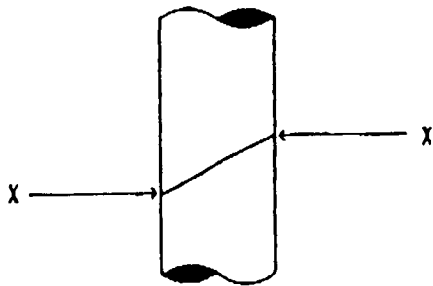
図3.2.10 き裂パターンのヒストグラム

(9) き裂の端形状

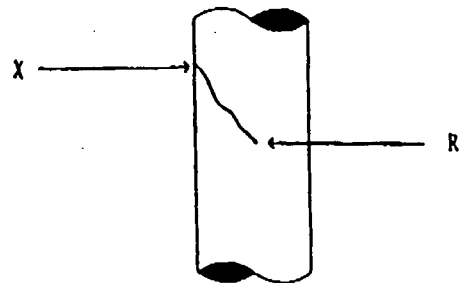
岩芯鑑定では、き裂の両端それぞれの形態をつぎの4パターンに分類している（図3.2.11参照）。今回抽出したき裂については、表3.2.3のようになっている。表3.2.3によれば、XXのみを対象としてよい。したがって、き裂の端形状はき裂分類の指標としない。

表3.2.3 き裂の端形状

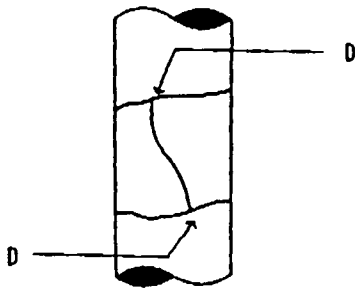
き裂端形状	き 裂 群				計
	I	II	III	その他	
XX	36	64	12	40	152
XD	0	0	0	1	1
X?	1	0	0	0	1
計	37	64	12	41	154



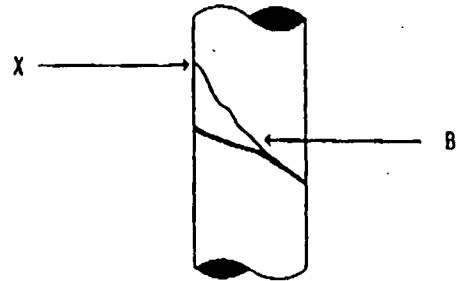
端の形状 XX



端の形状 XR



端の形状 DD



端の形状 XB

図3.2.11 き裂の端形状のパターン

表3.2.1(a) き裂情報の一覧 (き裂群 I)

充填物の幅	孔番号	深 度	走向傾斜	変 質 分 類	充填物		粗 さ	き 裂 パ ター ン	条 線	せん断 変 位	備 考
					分類	幅(mm)					
a1	KDH-1	22.25	N75W86S	VW	C	<0.5	P	Pm	○		長径 9cm
	KKM-2	18.10	EW 90	VW	C	0.0	P	Pm			
	KKM-2	18.25	EW 90	VW	C	0.0	P	Pm			
	KKM-2	18.29	EW 90	VW	C	0.0	P	Pm			
	KKM-2	18.39	EW 90	VW	C	0.0	P	Pm			
	KDH-1	37.71	N56W70S	FS	C	0.5	P	Pm	○		長径 8cm
KDH-1	36.36	N67W80S	FS	C	0.5	C	Pm			長径 8cm	
a2	KDH-1	43.12	N87W83N	VW	B	1.4	S	Pm			長径 22cm
	KDH-1	48.00	N66W73SW	FS	B	0.8	P	Pm			長径 10cm
	KDH-1	4.59	N78W87NE	FS	B	1.5	C	Pm			長径 12cm
	KDH-1	41.74	N59W89SW	FS	C	1.2	S	Pm	○		
a3	KDH-1	22.57	N66W85S	MD	A	2.8	S	Pj	○		長径 8cm
a4	KDK-2	0.83	N86W76SW	IL	A	7.2	P	Pj	○		長径 19cm
	KDH-1	22.67	N81W89N	MD	A	9.0	S	Pj			長径 13cm
	KKM-2	19.10	N66W88SW	IL	B	7.3	P	Pi			長径 15cm
	KDH-1	23.95	N79W86N	WK	B	7.0	C	Pm			
	KDT-2	5.09	N80W77SW	FS	B	9.0	C	Im			長径 15cm
a5	KDK-1	8.05	N74W86SE	IL	A	18.6	P	Pi			長径 10cm
	KDH-1	44.46	N78W86S	MD	A	24.2	P	Pi			長径 13cm
	KDT-1	0.49	N86W88SW	MD	A	20.0	P	Pj	○		長径 29cm
	KDH-1	48.50	N74W74S	WK	A	13.0	S	Pj	○		長径 11cm
	KDH-1	39.38	N88W87S	FS	A	78.0	P	Pj			長径 29cm
	KDT-2	16.85	N83W88NE	IL	B	12.0	P	Pm	○		長径 16cm

表3.2.1(b) き裂情報の一覧 (き裂群 I')

充填物の幅	孔番号	深 度	走向傾斜	変質分類	充填物		粗さ	き裂パターン	条線	せん断変位	備 考
					分 類	幅(mm)					
a1	KDH-1	20.23	N50W72NE	FS	C	<0.5	P	Pm			
	KDK-1	9.75	N19E75SE	VW	D	0.0	S	Pi			
a2	KDT-2	5.55	N88E86NW	FS	B	1.8	C	Im			長径 30cm
	KDH-2	8.29	N73W76NE	VW	C	<1.0	P	Pm	○		長径 27cm
a3	KDH-2	21.44	N67W61SW	WK	A	3.4	S	Pj			長径 10cm
	KDH-1	24.03	N54W89NE	WK	A	>4.0	C	Pi	○		
	KDT-2	6.89	N88E86NE	FS	A	3.7	P	Pi			長径 36cm
a4	KDH-1	34.30	N77W81N	MD	A	9.2	P	Pj	○		長径 12cm
	KDH-1	4.24	N75W75NE	VW	A	6.2	P	Pj	○		長径 14cm
	KDH-1	3.66	EW66N	VW	B	5.0	S	Pm			長径 19cm
a5	KDK-1	1.77	EW81SE	IL	A	14.3	S	Pi	○		長径 40cm
	KDH-1	12.48	N74W84NE	MD	A	18.0	P	Pm			
	KDT-2	9.74	EW76SE	IL	B	13.0	C	Pj			長径 26cm
	KDH-1	4.06	N76W64NE	WK	B	20.0	I	Pj	○		長径 11cm

表3.2.1(c) き裂情報の一覧 (き裂群 II)

充填物の幅	孔番号	深度	走向傾斜	変質分類	充填物		粗さ	き裂パターン	条線	せん断変位	備考
					分類	幅(mm)					
a1	KDH-1	16.31	N19E70W	WK	C	0.5	P	Pi	○		
	KDH-1	18.17	N28E79W	WK	C	0.5	P	Pm			
	KDH-1	7.30	N34E74NW	VW	C	<0.5	P	Pm	○		
	KDT-1	15.80	N11E83NW	VW	C	0.5	P	Pm			
	KKM-2	20.86	N18E86NW	VW	C	<0.5	P	Pm			
	KDH-1	37.19	N12E86W	VW	C	<0.5	S	Pm			
	KKM-2	21.06	N17E80NW	VW	C	<0.5	S	Pm			
	KDK-1	5.87	N12E77NW	VW	C	0.5	S	Pm			
	KDK-2	7.96	N15E79NW	VW	C	0.5	S	Pm			
	KDH-1	29.79	N31E79NW	VW	C	0.5	C	Pm			
	KDT-1	7.93	N18E82NW	FS	C	0.5	P	Pm			
	KDT-1	8.07	N19E87NW	FS	C	0.5	P	Cm			
	KDT-2	14.08	N12E75NW	FS	C	0.5	P	Pm			
	KDH-1	12.80	N18E71W	FS	C	<<0.5	P	Pm	○		
	KDH-1	17.57	N43E89SE	FS	C	0.5	P	Pm	○		長径 10cm
	KDH-1	14.48	N20E74W	FS	C	0.5	P	Pm	○		長径 24cm
	KDH-1	14.93	N20E71W	FS	C	<0.5	P	Pm			
	KKM-2	1.76	N7E80NW	FS	C	0.5	S	Pm			
	KKM-2	21.45	N22E89SE	VW	D	0.0	P	Pm			
	KDH-1	8.90	N28E88SE	VW	D	0.0	P	Pm			
KDH-1	26.56	N27E84NW	VW	D	0.0	S	Pm				
KDT-1	5.88	N30E88NW	FS	D	0.0	P	Im				

表3.2.1(d) き裂情報の一覧 (き裂群 II)

充填物の幅	孔番号	深 度	走向傾斜	変 質 分 類	充填物		粗 さ	き 裂 パ タ ー ン	条 線	せん断 変 位	備 考
					分 類	幅(mm)					
a2	KDH-1	20.34	N21E78NW	FS	B	0.8	P	Pm			
	KDH-1	35.48	N16E77W	FS	B	1.0	P	Pm			
	KDH-1	32.40	N31E82NW	FS	B	1.4	P	Pm			
	KDH-1	35.05	N17E82W	FS	B	1.1	P	Pm	○		
	KDH-1	30.12	N24E73W	FS	B	0.8	P	Pj			
	KDH-1	32.82	N17E69W	WK	C	0.6	P	Pm			
	KDH-1	6.47	N31E79NW	WK	C	1.0	P	Pj	○		
	KKM-2	17.08	N31E90SE	FS	C	1.4	P	Pm	○		
	KDK-3	4.59	N22E75NW	FS	C	0.6	P	Pm	○		長径 22cm
	KDH-1	25.26	N21E85W	FS	C	1.9	S	Pm			
a3	KDH-1	29.29	N19E75W	VW	B	2.0	P	Pm			
	KDH-1	25.24	N51E85SE	FS	B	2.1	P	Pm			
	KDK-3	9.86	N15E65NW	FS	B	3.8	P	Pm			
	KDH-1	47.02	N20E85W	FS	B	2.2	P	Pm			長径 8cm
a4	KDH-1	35.00	N28E83NW	FS	A	5.8	P	Pm	○		
	KDH-1	14.64	N14E85W	FS	A	8.4	P	Pm	○		
	KKM-2	16.47	N32E78NW	FS	B	5.0	S	Pj	○		
a5	KDH-1	6.59	N37E76NW	VW	A	13.2	P	Pm	○		

表3.2.1(e) き裂情報の一覧 (き裂群 II')

充填物の幅	孔番号	深度	走向傾斜	変質分類	充填物		粗さ	き裂パターン	条線	せん断変位	備考
					分類	幅(mm)					
a1	KDH-2	32.70	N39E67SE	WK	C	0.5	P	Pj			長径 12cm
	KDH-1	0.46	N6E72NW	VW	C	<0.5	P	Pm			
	KDK-2	7.15	N12E84SE	VW	C	0.0	S	Pm			
	KDK-1	7.47	N31E83SE	VW	C	0.5	S	Pm			
	KDH-1	15.61	N28E50W	VW	C	<0.5	S	Pj	○		
	KDH-1	17.38	NS78W	VW	C	<0.5	S	Pj	○		
	KDH-1	46.51	N43E75NW	FS	C	<0.5	C	Pm			
	KDH-1	9.13	N14E86SE	VW	D	0.0	P	Pm			
	KDT-2	15.40	N2W84SW	FS	D	0.0	S	Pm			
KDH-1	32.50	N26E75E	FS	D	0.0	S	Cm				
a2	KDH-1	42.08	N50E68NW	MD	B	1.4	C	Pj	○		長径 11cm
	KDH-1	7.15	N28E78SE	VW	B	1.0	P	Pm	○		
	KDH-1	9.66	N51E90	FS	B	0.7	P	Pm			長径 12cm
	KDH-1	41.36	N51E84NW	FS	B	1.2	S	Pm			長径 17cm
	KDH-1	43.62	N3E88W	FS	C	<0.9	P	Pm	○	○	
	KDT-2	15.44	N2W84NE	FS	C	0.6	P	Pm			
a3	KDH-1	8.40	N38E88NW	WK	B	3.5	P	Pm			長径 8cm
	KDH-1	9.05	N43E86SE	FS	B	2.5	S	Pm			長径 8cm
	KDK-2	6.47	N42E65NW	FS	B	2.2	S	Pm			
	KDK-2	6.53	N25E55NW	FS	B	2.7	S	Cm			
a4	KDH-1	10.34	N41E55NW	FS	A	<4.8	P	Pi	○	○	長径 15cm
	KDH-1	6.77	N37E76SE	WK	B	7.0	C	Pm			長径 8cm
	KDH-1	5.75	N36E78SE	FS	B	8.7	C	Pm	○		
	KDH-1	9.79	N24E58SE	FS	B	5.8	C	Pj	○		長径 12cm

表3.2.1(f) き裂情報の一覧 (き裂群 III)

充填物の幅	孔番号	深 度	走向傾斜	変 質 分 類	充 填 物		粗 さ	き 裂 パ ター ン	条 線	せん断 変 位	備 考
					分 類	幅(mm)					
a1	KDH-1	13.25	N37W87NE	FS	C	<0.5	P	Pm	○	○	
	KDH-1	36.90	N47W79SW	FS	C	<0.5	C	Pm	○		
	KDK-2	4.12	N29W76SW	FS	C	<0.5	P	Pm			
	KDH-1	19.09	N44W81SW	VW	D	0	P	Pm			
	KDT-2	1.16	N29W57SW	VW	D	0	P	Pm			
a2	KDH-1	35.14	N15W67W	FS	B	0.9	S	Pi	○		
a3	KKM-2	14.25	N44W88SW	VW	B	2.5	P	Pi			

き裂情報の一覧 (き裂群 III')

充填物の幅	孔番号	深 度	走向傾斜	変 質 分 類	充 填 物		粗 さ	き 裂 パ ター ン	条 線	せん断 変 位	備 考
					分 類	幅(mm)					
a1	KDH-1	0.76	N15W79SW	VW	C	<0.5	P	Pm			
	KDH-1	7.76	N5W76E	VW	C	<0.5	P	Pm			
	KDH-1	20.72	N9W63SW	VW	C	<0.5	P	Pm			
a3	KDH-1	42.53	N41W43SW	MD	B	<2.9	S	Pi			
a4	KDH-1	46.37	N41W60SW	FS	B	5.0	P	Pi	○		

表3.2.1(g) き裂情報の一覧 (その他)

充填物の幅	孔番号	深 度	走向傾斜	変 質 分 類	充填物		粗さ	き 裂 パターン	条線	せん断 変位	備 考
					分 類	幅(mm)					
a1	KDK-3	5.48	N75E78SE	MD	B	0.5	P	Pm	○		
	KDH-2	7.26	N51W65NE	WK	C	<0.5	P	Pj	○		長径 12cm
	KDH-2	10.34	N11W59SW	WK	C	0.5	S	Cj	○		長径 28cm
	KDH-2	28.24	N3W37NE	WK	C	0.5	S	Pj			
	KDH-1	0.76	N44W66NE	VW	C	<0.5	P	Pm			
	KDH-1	1.15	N9W88SW	VW	C	<0.5	P	Pm	○		
	KDH-1	32.00	N6E72E	VW	C	<0.5	P	Pm	○		
	KDH-2	6.76	N71E58NW	VW	C	<0.5	P	Pm	○		長径 9cm
	KDK-3	3.25	N68E20SE	VW	C	0.5	P	Pm			
	KDH-2	10.91	N2W49SW	VW	C	0.5	S	Pi			長径 9cm
	KDH-2	29.19	N2E19SE	VW	C	<0.5	S	Pm			
	KDK-3	2.77	N16E44NW	FS	C	<0.5	P	Pm			
	KDH-2	16.13	N9E20SE	FS	C	0.5	C	Pm			
	KKM-2	8.79	N42W74NE	FS	C	<0.5	I	Pm			
	KDT-1	19.07	N17W81NE	VW	D	0	P	Pm			
	KDT-2	2.21	N38W12SW	VW	D	0	P	Pm			
	KDT-2	7.70	N31W85NE	VW	D	0	P	Pm			
	KDH-2	39.10	N16E22NW	FS	D	0	P	Pm			
	KDH-2	48.24	EW13S	FS	D	0	P	Pm			
	KDT-2	0.25	N24W78NE	FS	D	0	P	Pm			
KDT-2	0.29	N17W83NE	FS	D	0	P	Pm				
KDT-2	0.05	N16W51SW	FS	D	0	S	Pm				
KDH-1	18.56	N15W53W	FS	D	0	C	Pm				
a2	KDT-2	10.19	N36E90SE	FS	B	1.2	P	Pm			
	KDH-2	9.03	N56E3SE	WK	C	1.5	P	Pm			

表3.2.1(h) き裂情報の一覧 (その他)

充填物の幅	孔番号	深 度	走向傾斜	変 質 分 類	充填物		粗さ	き 裂 パターン	条線	せん断 変位	備 考
					分 類	幅(mm)					
a2	KDH-2	2.48	N73E70NW	VW	C	1.8	S	Pj			長径 23cm
	KDH-2	29.91	N70E29SE	VW	C	0.6	S	Pj			
a3	KDH-1	43.83	N71W77N	MD	A	3.6	S	Pi	○		長径 9cm
	KDH-2	38.52	N48E20SE	WK	A	4.9	P	Pm	○	○	
	KDT-2	10.50	N49E10SE	FS	B	4.3	P	Pm			
	KDH-2	6.96	N71E64NW	FS	B	3.9	S	Pm	○		長径 12cm
	KDH-1	31.00	N61E84N	FS	B	3.1	C	Pm			長径 8cm
	KDK-2	3.81	N40E43NW	WK	C	2.5	P	Pm			
	KDH-2	2.21	N80E73NW	WK	C	3.6	S	Pj	○		長径 24cm
a4	KDH-2	28.11	N25E53SE	WK	A	5.4	P	Pj			長径 9cm
	KDH-1	21.05	N10W64W	WK	B	8.0	S	Pm			
a5	KDH-2	26.80	N73E71NW	IL	A	13.2	P	Pj			長径 12cm
	KDH-1	31.02	N76W39N	MD	A	17.3	P	Pm	○		
	KDK-1	2.63	N65E85SE	MD	A	15.8	S	Pj	○		長径 26cm
	KDH-2	7.77	N75W67NE	WK	A	14.0	P	Pj	○		長径 12cm
	KDH-1	3.25	N88W54NE	VW	A	18.0	S	Pj	○		長径 18cm

3.2.2 き裂分類の指標の選択

前節3.2.1の(1)～(10)において、おもに岩芯鑑定の調査項目を中心にき裂分類の指標を検討した。これまでのところ、き裂分類の指標として重要と考えられるものを以下に示す。

- * き裂群 (I,II,III,その他)
- * 充填物の種類 (A,B,C,D)
- * 変質の程度 (IL,MD,WK,VW,FS)
- * 充填物の幅 (a1,a2,a3,a4,a5)
- * き裂面の粗さ (P,S,I,C)

前節において、これらがき裂の力学特性に何らかの影響を与える可能性が考察された。ここでBartonらおよび神岡鉱山の研究から、上記の5つの指標とき裂の力学特性の関係を考えてみる。

まず、神岡鉱山の研究⁴⁾では充填物の幅とき裂の力学パラメータについて表3.2.4のような結果が得られた。表3.2.4より、JRCおよびJCSについてはクラス2とクラス3の間での違いが大きく、また充填物の幅が小さいほど K_s が大きくなっている。さらに、き裂の力学特性だけでなくき裂の幾何学特性であるトレース長とも相関性があった¹²⁾。また、DEMのモデル化においては充填物の幅(または開口幅)からき裂の長さを推定することが必要となる¹³⁾。したがって、き裂分類の指標として充填物の幅を優先しておく必要がある。

表3.2.4 神岡鉱山におけるき裂特性

充填物の幅 W(mm)	クラス1 $W \leq 0.5$	クラス2 $0.5 < w < 2.0$	クラス3 $2.0 \leq w$
き裂面の圧縮強度 JCS_0 (MPa)	47.8	51.0	37.8
き裂面の粗さ係数 JRC_0	9.5	9.4	3.3
せん断剛性 K_{si} (MPa/mm)	4.57	2.16	1.07
残留摩擦角 ϕ_r (deg.)	26.6	27.0	24.1

Bandisら¹⁴⁾はき裂の風化の程度について以下のような分類を提案している。

- ・新鮮 (F : fresh)
- ・やや風化 (SW : slightly weathered)
- ・中程度の風化 (MW : moderately weathered)
- ・風化 (W : weathered)

また、これらの風化の程度のカテゴリに対し、岩石の一軸圧縮強度 σ_c とき裂面の圧縮強度JCSの比の関係を以下のように評価している。

- ・ MW : $1.2 < (\sigma_c / JCS) \leq 2$
- ・ W : $2 < (\sigma_c / JCS)$

これは、き裂の風化の程度が大きいとJCSが低下することに着目した評価である。このような風化に関する評価は、今回の調査で着目しているき裂の変質の程度との関連が考えられる。そこで、変質の程度をき裂分類の指標とする。

つぎに、充填物の種類については既存の研究例がなく、き裂の力学特性との関係が不明である。しかし、き裂の圧縮性やせん断特性はき裂面を構成する材料の特性に依存すると考えられるため、充填物の種類をき裂分類の指標に加味する。

き裂群についても、き裂の力学特性との関係が不明である。き裂群は同一の成因から発生することが推測されるが、力学特性が同一になることが判断できない。ここではき裂群をき裂分類の指標から除外する。

き裂面の粗さについては、BartonらがJRCとして評価しているように、多くの研究でせん断強度等のき裂の力学特性への影響が指摘されている。しかし、前節の図3.2.7に示したように、P（滑らか）およびS（やや滑らか）のき裂が大半を占める。したがって、PおよびSを今回対象としているき裂の代表的な粗さと考えることができるため、粗さをき裂分類の指標から除外する。ただし、ラフネス測定の結果から得られる粗さの指標については、いくつかの検討を行う。

以上から、き裂分類の指標として、つぎの3つを選択する。

- * 充填物の種類 (A,B,C,D)
- * 変質の程度 (IL,MD,WK,VW,FS)
- * 充填物の幅 (a1,a2,a3,a4,a5)

3.2.4 き裂試料の選定条件の決定

前節までに3つのき裂分類の指標を選択した。本節では、き裂分類の指標を組み合わせることにより、室内試験のための試料の選定条件を検討する。

3つの指標の組み合わせに対し、対象となる154個のき裂は表3.2.5のように分類される。表中の数値はそれぞれの分類に当てはまるき裂の個数を示している。3つの指標の組み合わせは合計100とおりで、このうち1つでも該当するき裂があるのが35とおりとなる。しかし、グループ数が多く、各グループ間の頻度の差が大きい。グループ数をできるだけ少なくすることを念頭に、各指標内の区分を再検討する。また、これまでの検討から充填物の幅を優先して検討する。

まず、充填物の幅 $a_1 \sim a_5$ をつぎのように組み合わせる。

A案： a_1, a_2+a_3, a_4+a_5

B案： $a_1, a_2, a_3+a_4+a_5$

A案では各グループの頻度の差をできるだけ小さくすることを考慮した。また、B案は神岡の場合と同じ方法である。ここで、充填物の幅と充填物の種類の関係は図3.2.12のようになる。A案およびB案いずれの場合もグループ数が6～7つに限定されることがわかる。そこで、A案およびB案それぞれについて変質の程度の組み合わせを変化させると、表3.2.6および表3.2.7のようになる。表中の数字は頻度を示しており、数字に○印をしたものがグループを指す。これらのうち、グループ数が最も少なく、グループから除外されるき裂が少ないものはB"案である。B"案では3つのき裂分類の指標の組み合わせが10グループになる。そこで、B"案を室内試験に用いる試料の選定条件とする。

試料の選定条件を表3.2.8に示す。表3.2.8に示すように、まずき裂は充填物幅による3つのグループに分類され、つぎに充填物の種類により6つのグループに分類される。さらに、変質の程度により合計10グループに分類される。これら10グループに属するき裂を採取し、室内試験を行う。試験後に得られるき裂の力学特性について各グループごとの比較を行う。また、今年度は追加検討として各グループ内のばらつきを調べるため、同じグループから変質の程度の異なる複数の試料を選定し、力学試験の結果と照合する。以下に追加検討するための試料の選定条件を示す。

- ・ $a_1 - C - (VW, FS)(46個)$ のうちVW (28個)、FS(18個)から1個ずつ
- ・ $a_1 - D - (VW, FS)(19個)$ のうちVW (10個)、FS(9個)から1個ずつ
- ・ $(a_3, a_4, a_5) - A - (IL, MD, WK)(21個)$ のうちIL(4個)、MD(9個)、WK (8個)からそれぞれ1個ずつ
- ・ $(a_3, a_4, a_5) - A - (VW, FS)(8個)$ のうちVW (3個)、FS(5個)から1個ずつ

以上から、各グループのうち個数の多いa1-C-(VW,FS)とa1-D-(VW,FS)の変質の程度を分けて複数のき裂を選定し、同じグループにおけるき裂の力学特性のばらつきを検討する。また、(a3,a4,a5)-Aについてはすべての変質の程度を選定してき裂の力学特性を比較する。

このような条件で試料を選定することにより、き裂の力学試験の結果から次の項目を比較することができる。

- 1) 充填物の幅によるき裂の力学特性への影響
 - C-(IL,MD,WK)のa1とa2、
 - C-(VW,FS)のa1とa2、
 - B-(VW,FS)のa2と(a3,a4,a5)
- 2) 充填物の種類によるき裂の力学特性への影響
 - a1-(VW,FS)のCとD、
 - a2-(VW,FS)のBとC、
 - (a3,a4,a5)-(IL,MD,WK)のAとB、
 - (a3,a4,a5)-(VW,FS)のAとB
- 3) 変質の程度によるき裂の力学特性への影響
 - a1-Cの(IL,MD,WK)とVWとFS、
 - a1-DのVWとFS、
 - a2-Dの(IL,MD,WK)と(VW,FS)、
 - (a3,a4,a5)-AのIL,MD,WK,VW,FS
 - (a3,a4,a5)-BのWKとFS

以上の項目については、次節において検討する。

室内試験のために採取した試料の一覧を表3.2.9に示す。

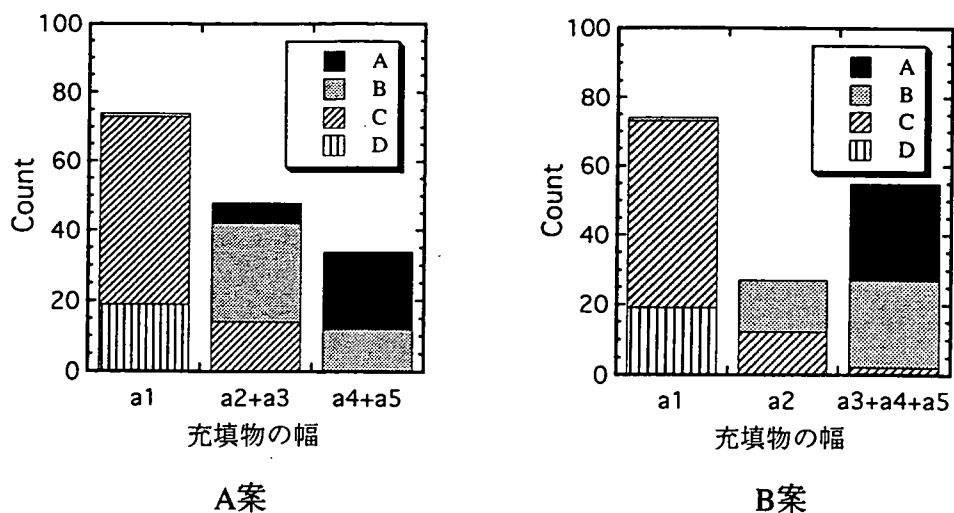


図3.2.12 充填物の幅と充填物の種類の関係

表3.2.5 分類指標の組み合わせと頻度

充填物の幅		a1				a2				a3				a4				a5				小計
充填物の種類		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	
変質の程度	IL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	3	2	0	0	7
	MD	0	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	12
	WK	0	0	6	0	0	0	3	0	3	1	2	0	1	3	0	0	3	0	0	0	22
	VW	0	0	28	10	0	2	3	0	0	2	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	49
	FS	0	0	18	9	0	12	6	0	1	9	0	0	3	5	0	0	1	0	0	0	64
小計		0	1	52	19	0	15	12	0	6	13	2	0	8	10	0	0	14	2	0	0	154

表3.2.6 A案・A'案・A"案

	a 1				a 2, a 3				a 4, a 5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0
MD	0	1	0	0	2	2	0	0	7	0	0	0
WK	0	0	6	0	4	1	5	0	4	3	0	0
VW	0	0	28	10	0	4	3	0	3	1	0	0
FS	0	0	18	9	1	21	6	0	4	5	0	0

A 案

	a 1				a 2, a 3				a 4, a 5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL,MD	0	1	0	0	2	2	0	0	(11)	(3)	0	0
WK,VW	0	0	(34)	(10)	(4)	(5)	(8)	0	(7)	(4)	0	0
FS	0	0	(18)	(9)	1	(21)	(6)	0	(4)	(5)	0	0

(15グループ)

A' 案

	a 1				a 2, a 3				a 4, a 5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL,MD,WK	0	1	(6)	0	(6)	(3)	(5)	0	(15)	(6)	0	0
VW	0	0	(28)	(10)	0	(4)	(3)	0	(3)	1	0	0
FS	0	0	(18)	(9)	1	(21)	(6)	0	(4)	(5)	0	0

(17グループ)

A" 案

	a 1				a 2, a 3				a 4, a 5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL,MD,WK	0	1	(6)	0	(6)	(3)	(5)	0	(15)	(6)	0	0
VW,FS	0	0	(46)	(19)	1	(25)	(9)	0	(7)	(6)	0	0

(12グループ)

表3.2.7 B案・B'案・B''案

	a1				a2				a3, a4, a5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0
MD	0	1	0	0	0	1	0	0	9	1	0	0
WK	0	0	6	0	0	0	3	0	8	4	0	0
VW	0	0	28	10	0	2	3	0	3	3	0	0
FS	0	0	18	9	0	12	6	0	5	14	0	0

(13グループ)

B案

	a1				a2				a3, a4, a5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL,MD	0	1	0	0	0	1	0	0	⑬	④	0	0
WK,VW	0	0	③④	⑩	0	2	⑥	0	⑪	⑦	0	0
FS	0	0	⑱	⑨	0	⑫	⑥	0	⑤	⑭	0	0

(12グループ)

B'案

	a1				a2				a3, a4, a5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL,MD,WK	0	1	⑥	0	0	1	③	0	⑳	⑧	0	0
VW	0	0	⑳	⑩	0	2	③	0	③	③	0	0
FS	0	0	⑱	⑨	0	⑫	⑥	0	⑤	⑭	0	0

(15グループ)

B''案

	a1				a2				a3, a4, a5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
IL,MD,WK	0	1	⑥	0	0	1	③	0	⑳	⑧	0	0
VW,FS	0	0	④⑥	⑱	0	⑭	⑨	0	⑧	⑰	0	0

(10グループ)

表3.2.8 採取した試料の条件および個数

	充填物の幅				
	a1	a2	a3	a4	a5
IL	—	—	—	—	A(1)
MD	—	—	—	—	—
WK	C(1)	C(1)	B(1)	A(1)	—
VW	C(1),D(1)	C(1)	B(1)	—	—
FS	C(1),D(1) [C(2),D(2)]*	B(1),C(1)	B(1)	A(1),B(1)	—

表3.2.9 採取した試料の一覧

試料番号	ボーリング孔	深度 (m)	充填物の幅	充填物の種類	変質の程度
KM01	KDH-1	7.76	a1	C	VW
KM02	KDH-1	8.40	a3	B	WK
KM03	KDH-1	14.64	a4	A	FS
KM04	KDH-1	19.09	a1	D	VW
KM05	KDH-1	29.29	a3	B	VW
KM06	KDH-1	43.62	a2	C	FS
KM07	KDH-1	46.37	a4	B	FS
KM08	KDH-2	9.03	a2	C	WK
KM09	KDH-2	29.91	a2	C	VW
KM10	KDH-2	32.70	a1	C	WK
KM11	KDH-2	10.19	a2	B	FS
KM12	KDH-2	28.11	a4	A	WK
KM13	KDH-2	48.24	a1	D	FS
KM14	KDK-1	1.77	a5	A	IL
KM15	KDK-3	2.27	a1	C	FS
KM16	KDK-3	9.86	a3	B	FS

3.3 き裂の物性試験

3.3.1 試験方法

ここでは、前節で選定したき裂の試料を用いて行う物性試験の方法と結果について述べる。き裂の物性試験の流れを図3.2.1に示す。

(1) ラフネス測定

ラフネス測定装置により、初期状態およびせん断試験後のき裂面の3次元形状を測定した。測定は楕円形のき裂断面内の長方形領域について行った。ラフネス測定装置の概要を図3.3.2に示す。図中に示したように、ロケーティングボードにより水平面内を0.5mm間隔で移動し、レーザー式変位計を用いて各点におけるき裂の凹凸面の高さ z を測定する。凹凸面の高さ z は、測定開始点を0としてそれより上方を+値、下方を-値で表す。この装置では、毎秒約3点の測定が可能である。

測定に関する一連の制御は、パーソナルコンピュータで行う。また、測定データはデータロガーを介してパーソナルコンピュータに取り込まれる。測定の際、パーソナルコンピュータの画面上で、測定値をモニタリングする。

測定結果から、せん断試験前後の凹凸形状の変化や、き裂面の粗さの指標が得られる。

(2) き裂の力学試験

き裂の力学試験として、垂直載荷試験、およびせん断試験を行った。これらは、図3.3.3に示す簡易せん断試験機を用いて実施した。

垂直載荷試験では、垂直応力の変化に伴うき裂面の開閉挙動を調べた。この際、き裂面を傷めぬように垂直応力の範囲を0~10MPa程度とし、載荷および除荷を3回繰り返した。き裂の垂直変位は、渦電流式変位センサーにより測定した。図3.3.3のように、き裂を挟んだ一方に渦電流式変位センサーを、他方に薄い鉄板製の反射板を設置した。渦電流式変位センサーをき裂の近傍に設置することにより、岩石やモルタル部等の変形を含まない、き裂部分のみの閉塞量が測定できる。渦電流式変位センサーと反射板の間隔は2~3mm程度とした。垂直載荷試験の結果、き裂の初期垂直剛性 K_{ni} および垂直応力~変位関係が得られた。

つぎに、せん断試験は3種類の一定の垂直応力のもとで実施した。原位置において空洞の掘削面近傍の岩盤は低拘束圧下でせん断され、ジョイントの滑りやダイレーションなどが起こると考えられる。また、同じ試料で3回のせん断を行うことも考慮して、3種類の垂直応力はそれぞれ、自重および0.3、

0.5MPaとした。せん断試験は、せん断変位が7mmとなるまで行った。せん断速度は、ISRM指針¹⁴⁾を参考に、ピークせん断強度までを0.5mm/min、それ以後1mm/minを基準とした。また、せん断に伴うダイレーションは、上述の渦電流式変位センサーにより測定した。この結果、き裂の力学特性値としてせん断剛性 K_s 、ピークせん断強度 τ_p 、ピーク摩擦角 ϕ_p 、残留強度 τ_r 、残留摩擦角 ϕ_r 、JRC₀などが得られる。

なお、垂直荷重試験およびせん断試験の順序について、予備的な検討を行った。すなわち、せん断試験により、き裂面を傷めることが予想されたため、せん断試験の前後において垂直荷重試験を実施し、き裂面の凹凸の消失によるき裂の開閉挙動への影響を調べた。せん断試験前後の垂直応力～変位関係を図3.3.4に示す。この図から、せん断後の垂直変位はせん断前のおよそ3分の1となることがわかった。そこで、垂直荷重試験はせん断試験の前に実施することとした。なお、垂直荷重試験がせん断試験に与える影響を検討する方法がない。このため、垂直荷重試験においては垂直応力の範囲を0～10MPa程度としている。

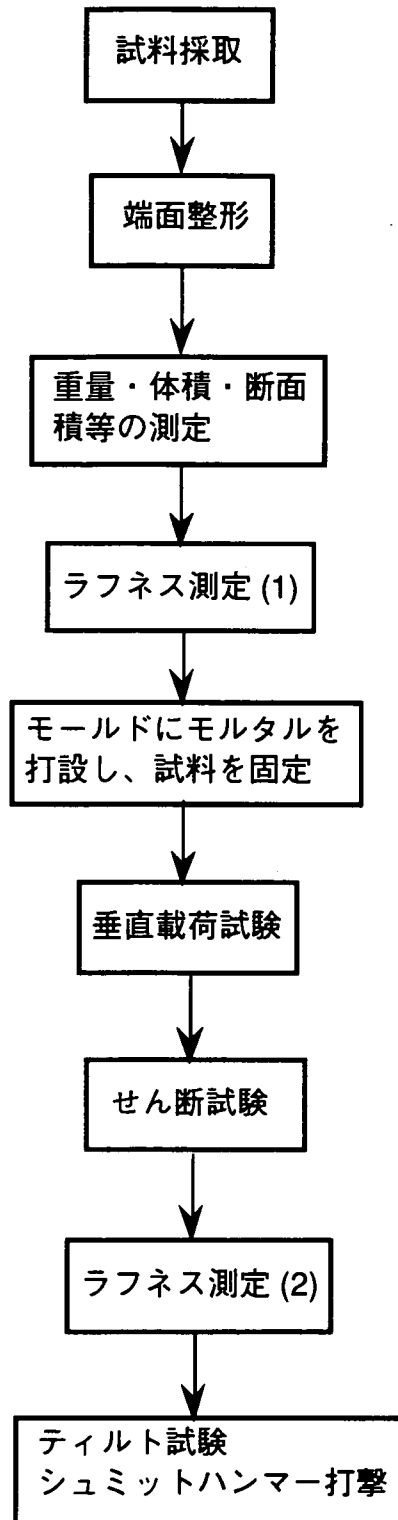


図3.3.1 き裂の物性試験の流れ

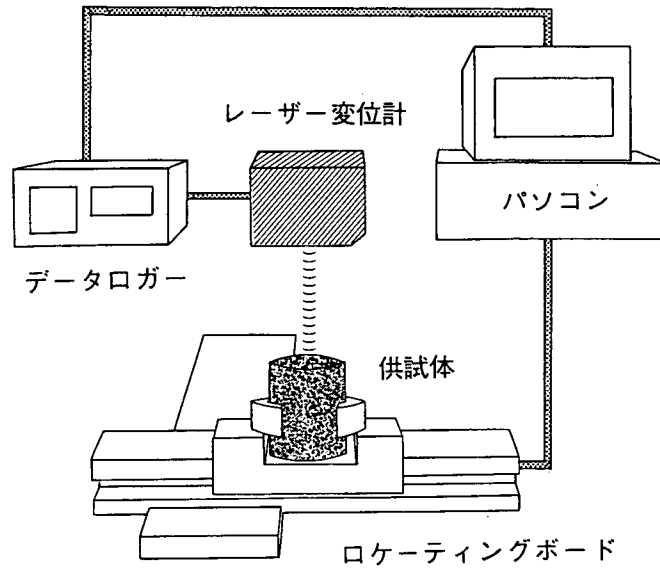


図3.3.2 ラフネス測定装置の概要

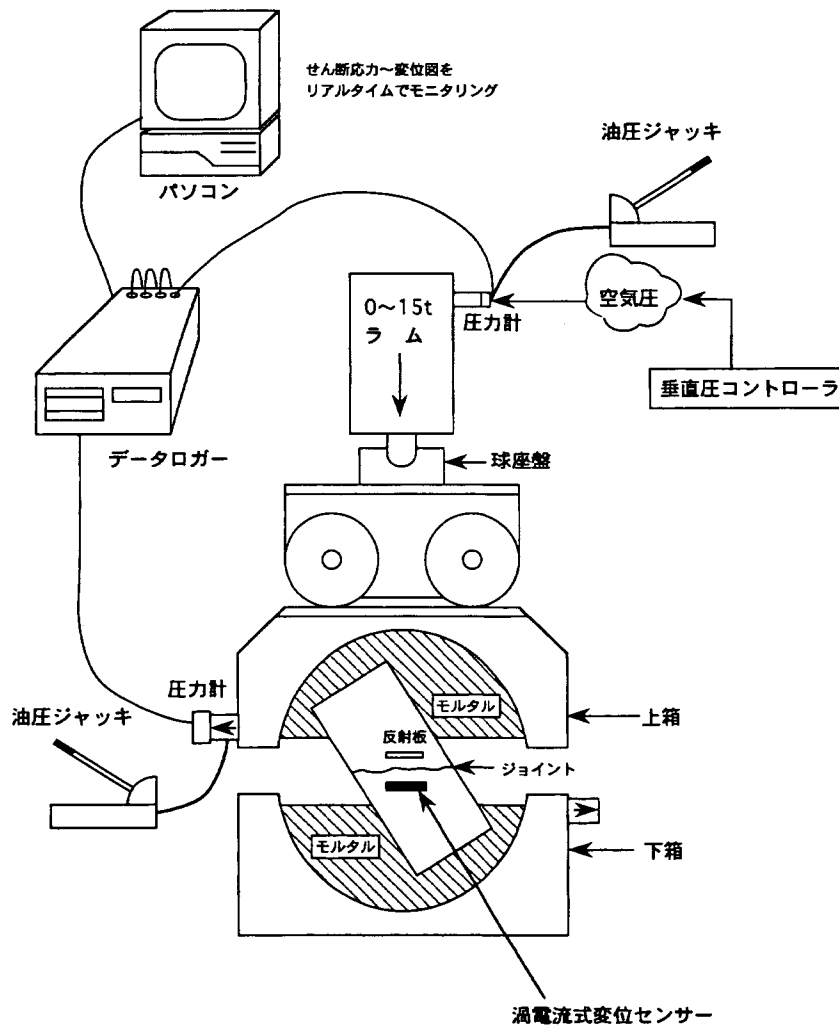


図3.3.3 簡易せん断試験装置の概要

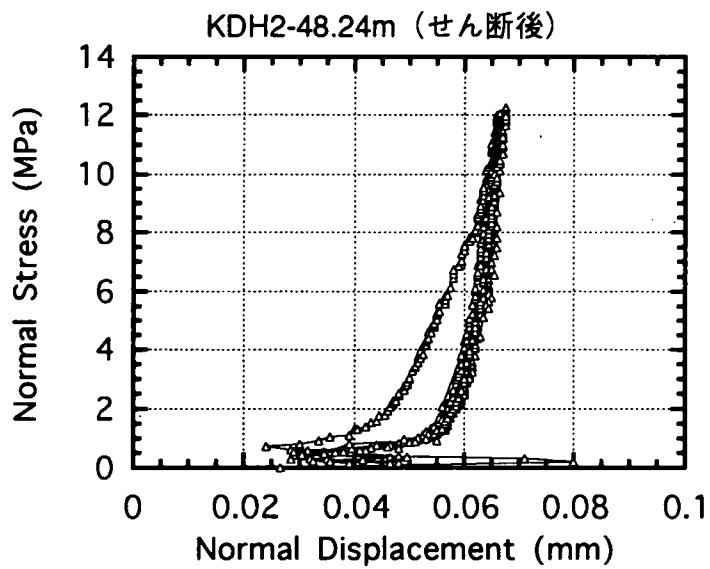
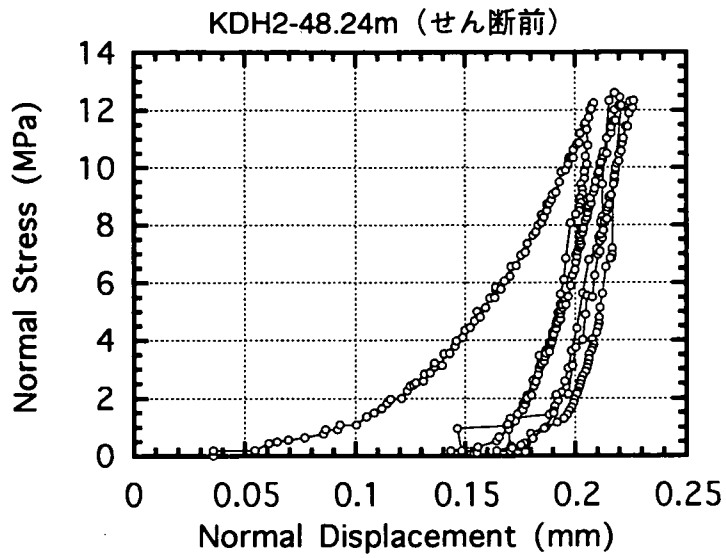


図3.3.4 せん断試験前後の垂直応力～変位関係

(3) き裂の特性試験

き裂面の特性試験として試料の密度測定、シュミットハンマー試験およびテイルト試験を行う。これら一連の試験結果は、データシートにまとめる。

試料の密度測定では、せん断試験に用いる試料の体積と乾燥重量を測定し、乾燥密度 ρ を求める。

シュミットハンマー試験では、き裂面に軽量コンクリート用のシュミットハンマー（図3.3.5参照）を打撃し、その反発度を求める。打撃は各き裂面につき20回以上実施し、上位10ヶの反発度の平均値を求める。岩石の一軸圧縮強度とシュミットハンマーによる反発度の関係を図3.3.6に示す。図3.3.6に示す関係よりき裂面の圧縮強度 JCS_0 を求める。なお、コア側面についても同様のことを行い、岩石部分の圧縮強度を求める。

テイルト試験では、テイルト試験器（図3.3.7参照）を用いて、き裂が滑り出す傾斜角 α を測定する。テイルト試験はき裂の上下を入れ替え各試料につき20回実施し、上位10ヶの傾斜角の平均値を求める。この結果、き裂面のラフネス係数 JRC_0' を求める。なお、今回はこれらき裂面に関する特性試験をせん断試験後に行う。したがって、テイルト試験から得られるラフネス係数を JRC_0' と表記し、せん断試験から求める JRC_0 とは区別した。

また、コア側面についても同様のことを実施し、基本摩擦角 ϕ_b を求める。

以上の結果、試料の密度 ρ 、き裂面の圧縮強度 JCS_0 、ラフネス係数 JRC_0' 、および基本摩擦角 ϕ_b が得られる。

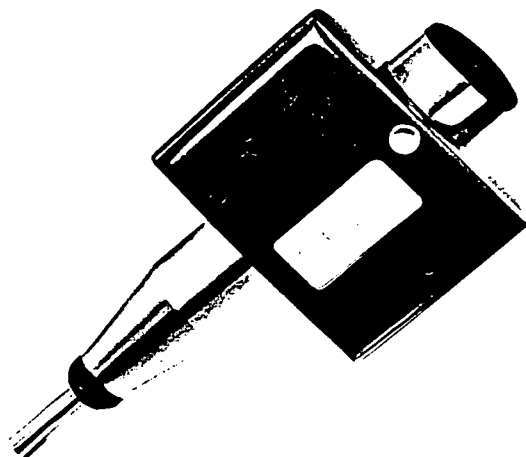


図3.3.5 シュミットハンマー（軽量コンクリート用）

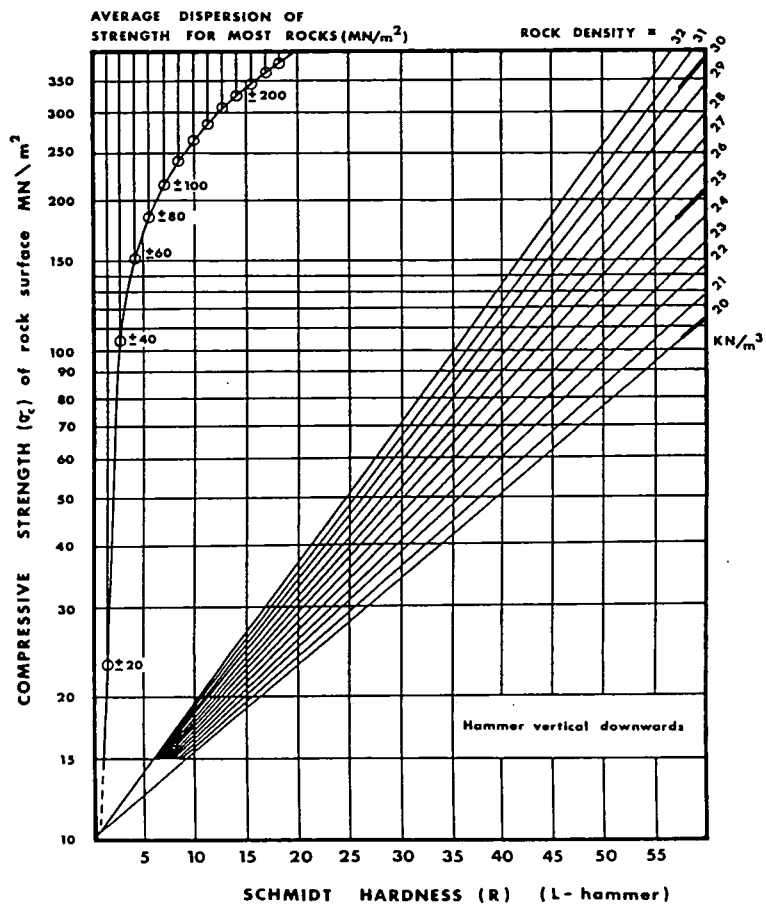


図3.3.6 シュミットハンマーの反発度と一軸圧縮強度の関係

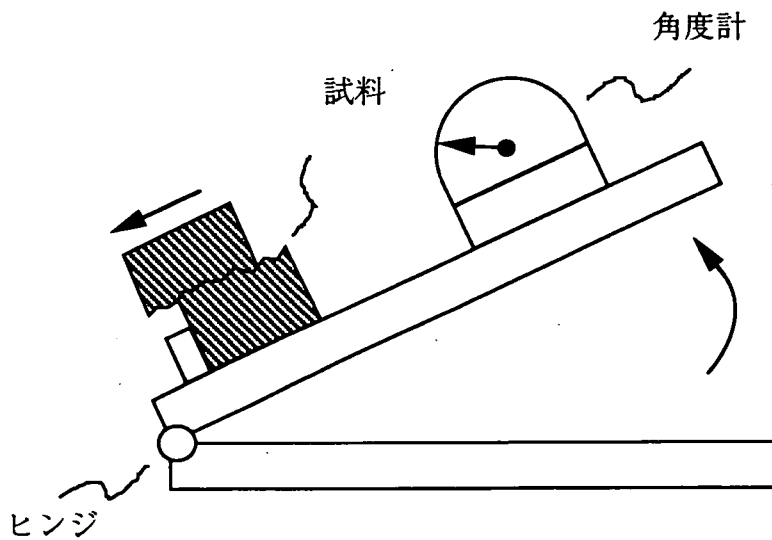


図3.3.7 ティルト試験器

以上（１）～（３）に述べたき裂の物性試験に使用する機器の性能を、表3.3.1にまとめる。

表3.3.1 き裂の物性試験に使用する機器の性能一覧

試験名	機器名称	型式	仕様
ラフネス測定	ラフネス測定器	自社製	—————
	ロケータインダボード	NSK XY-HS0020-902	可動範囲200mm、 位置決め精度0.03mm
	レーザー式 変位計	キーエンス LB-1010	測定範囲10mm、分解能4 μ m、 スポット径0.1～0.3mm
シュミットハンマー試験	シュミットハンマー	シュミット社 L型	衝撃エネルギー0.075mkg、 測定範囲 10～60MPa (計量コンクリート用)
テイルト試験	テイルト試験機	自社製	角度計：読み取り精度 1°
垂直載荷試験 および せん断試験	簡易せん断 試験機	ロックテスト社 PHI-10	載荷ラム：最大垂直荷重 10 ton 最大せん断荷重 15 ton
	圧力計	東京測器 PW-500	測定範囲 49MPa、分解能 0.1MPa
	高感度変位計	東京測器 CDP-10	測定範囲 10mm、分解能 1 μ m
	渦電流式変位計	キーエンス AH-614	測定範囲 5mm、分解能 4 μ m

3.3.2 ラフネス測定結果

ラフネス測定により得られた、せん断前後のき裂面の形状を図3.3.8に示す。また、せん断前後におけるせん断方向軸に対する凹凸高さの分布、およびそのヒストグラムを図3.3.9、図3.3.10に示す。ここで、AおよびBは一組のき裂のいずれかの面を指している。図3.3.9、図3.3.10において、せん断前のき裂面AおよびBを比較することにより、噛み合わせの程度を把握することができる。また、せん断によりき裂面の凸部が消失したことが確認できる。

つぎに、き裂面の幾何学的な粗さの指標として、Tse&Cruden⁸⁾が提案する Z_2 、および表面積による粗さの指標 θ ¹⁵⁾を求める。

まず、 Z_2 はき裂面のせん断方向に沿った勾配の2乗の平方根平均であり(図3.3.11参照)、次式で求める。

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N(Dx)^2} \sum_{i=1}^N (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (3.3.1)$$

ここで、 N は測定点数、 D_x は測定間隔、 z は各測定点における凹凸高さである。さらにTse&Cruden⁸⁾は、 Z_2 とBartonらのき裂面の粗さ係数 JRC につきの関係を見出している。

$$JRC_Z = 32.20 + 32.47 \log_{10} Z_2 \quad (3.3.2)$$

ここで、 JRC_Z は室内試験から求める JRC_0 と区別するため、添字に Z を付記した。ラフネスの測定結果から、き裂面内のせん断軸方向に対し Z_{2s} 、 JRC_{Zs} およびせん断軸と直交する方向の Z_{2d} 、 JRC_{Zd} をそれぞれ算出した。

一方、粗さの指標 θ は、き裂面の表面積に関するフラクタル特性値である。き裂面の表面積 A は、図3.3.12に示すように求める。まず、隣接する4つの測定点は3次元空間内にあるため同一平面内にはない。そこで隣接する4点がなす表面形状を2つの三角形で表す。個々の三角形の面積の総和を、き裂面の表面積 A とする。ここで、フラクタル理論における”粗視化の度合いを変えてフラクタル次元を定義する方法”を用いる(図3.3.13参照)。物体の表面積を測る場合、測定の基準範囲を小さくするにしたがって、より微小な部分の面積が考慮される。測定間隔の変化にともなう表面積の変化率を、フラクタル次元で表すことができる。一般に、物体表面のフラクタル次元は、表面の起伏の度合いが増すにつれ大きくなる。ただし、表面積そのものでフラクタル次元を求めると、異なるき裂による差が非常に小さくなるため、図3.3.13のように投影面積に対する表面積の変化率を粗さの指標としている。表面積による粗さの指標 θ

は、次式のように得られる。

$$\theta = \frac{\log_e \left| \frac{A}{\bar{A}} - 1 \right|}{\log_e s} \quad (3.3.2)$$

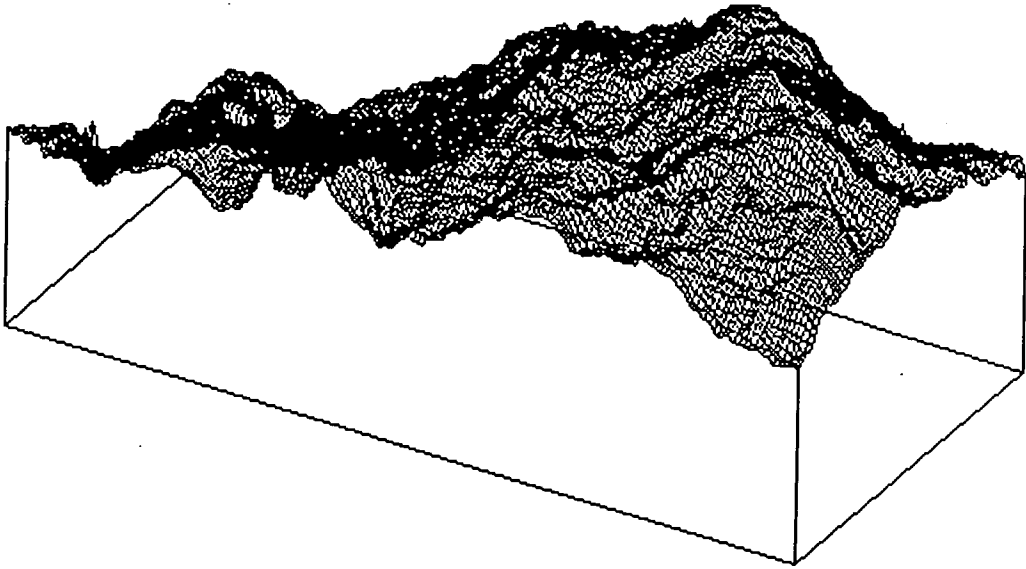
ここで、 s は測定間隔、 \bar{A} は測定領域の水平面への投影面積である。

せん断前後のラフネス測定の結果を表3.3.2にまとめる。これらの結果をせん断前後で比較したものが図3.3.14～3.3.16である。データが45°線の上側にあるものは、せん断後の値がせん断前より大きいことを示す。これは、せん断時にき裂面の鉱物が剥離したことによる。観察によると、凸部の鉱物の剥離に伴い凹部ができている。

表3.3.2 ラフネス測定結果

試料番号	せん断前					せん断後				
	Z_{2s}	Z_{2d}	JRC_{zs}	JRC_{zd}	θ	Z_{2s}	Z_{2d}	JRC_{zs}	JRC_{zd}	θ
KM01 A	0.253	0.350	12.8	17.4	0.617	0.247	0.349	12.5	17.4	0.648
B	0.244	0.340	12.3	17.0	0.629	0.237	0.316	11.9	16.0	0.592
KM02 A	0.253	0.385	12.8	18.7	0.556	0.257	0.338	13.0	16.9	0.552
B	0.258	0.757	13.1	28.3	0.380	0.285	0.795	14.5	29.0	0.416
KM03 A	0.437	0.275	20.5	14.0	0.455	0.429	0.271	20.3	13.8	0.460
B	0.399	0.274	19.2	13.9	0.373	0.376	0.272	18.4	13.8	0.438
KM04 A	0.259	0.479	13.1	21.8	0.364	0.260	0.494	13.2	22.3	0.393
B	0.257	0.499	13.0	22.4	0.393	0.270	0.499	13.7	22.4	0.421
KM05 A	0.313	0.282	15.8	14.3	0.692	0.319	0.268	16.1	13.6	0.660
B	0.272	0.225	13.8	11.2	0.530	0.234	0.229	11.7	11.4	0.520
KM06 A	0.193	0.232	9.0	11.6	0.594	0.185	0.226	8.4	11.2	0.565
B	0.202	0.243	9.6	12.3	0.589	0.186	0.219	8.5	10.8	0.557
KM07 A	0.273	0.230	13.9	11.5	0.492	0.235	0.233	11.8	11.7	0.573
B	0.329	0.277	16.5	14.1	0.411	0.229	0.222	11.4	11.0	0.517
KM08 A	0.338	0.219	16.9	10.8	0.616	0.282	0.207	14.3	10.0	0.631
B	0.187	0.207	8.6	10.0	0.739	0.205	0.197	9.9	9.3	0.766
KM09 A	0.357	0.402	17.7	19.3	0.613	0.368	0.362	18.1	17.9	0.660
B	0.272	0.321	13.8	16.2	0.661	0.258	0.288	13.1	14.6	0.606
KM10 A	0.447	0.444	20.8	20.8	0.547	0.431	0.393	20.3	19.0	0.514
B	0.379	0.403	18.5	19.4	0.535	0.346	0.366	17.2	18.0	0.473
KM11 A	0.219	0.274	10.8	13.9	0.650	0.240	0.286	12.1	14.5	0.667
B	0.189	0.232	8.7	11.6	0.556	0.183	0.224	8.3	11.1	0.518
KM12 A	0.203	0.269	9.7	13.7	0.423	0.197	0.266	9.3	13.5	0.386
B	0.249	0.302	12.6	15.3	0.389	0.238	0.295	12.0	15.0	0.385
KM13 A	0.217	0.233	10.7	11.7	0.494	0.198	0.226	9.4	11.2	0.453
B	0.204	0.234	9.8	11.7	0.494	0.213	0.231	10.4	11.5	0.460
KM15 A	0.168	0.192	7.0	8.9	0.624	0.176	0.196	7.7	9.2	0.612
B	0.158	0.172	6.2	7.4	0.532	0.195	0.208	9.1	10.1	0.615
KM16 A	0.184	0.201	8.3	9.6	0.601	0.211	0.222	10.3	11.0	0.604
	0.361	0.420	17.8	20.0	1.054	0.251	0.297	12.7	15.1	0.835

(せん断前)



(せん断後)

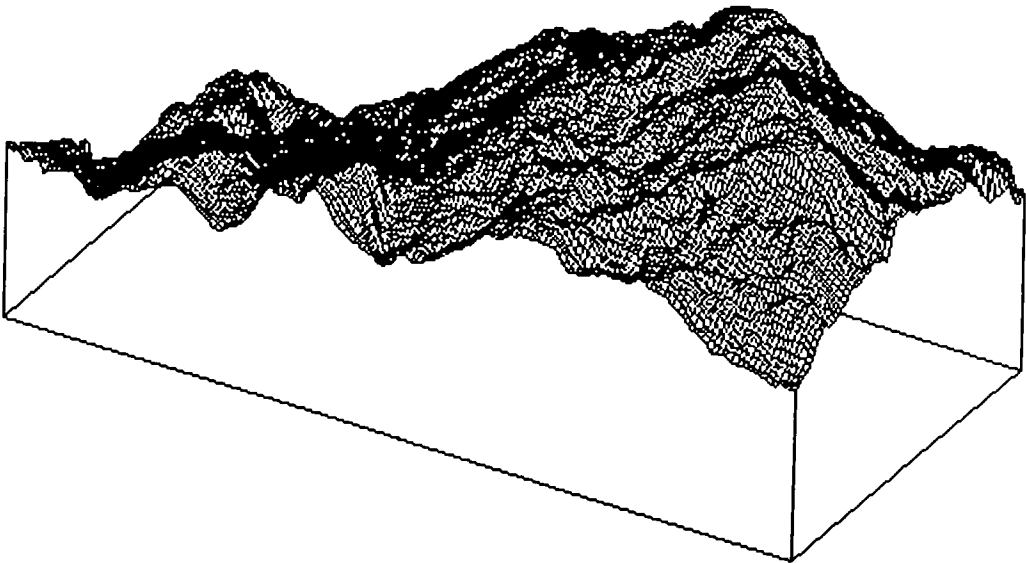


図3.3.8 せん断試験の前後におけるき裂面の3次元形状

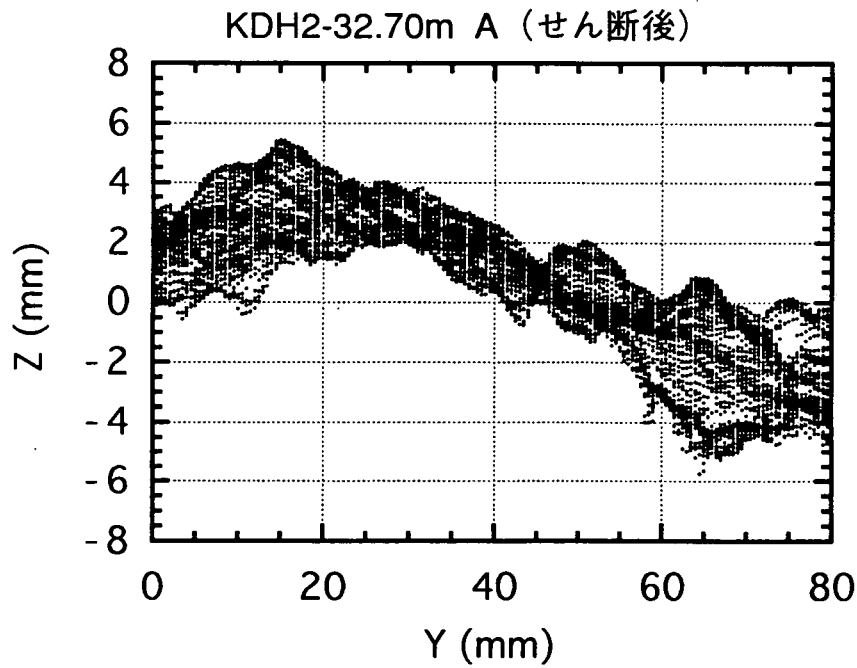
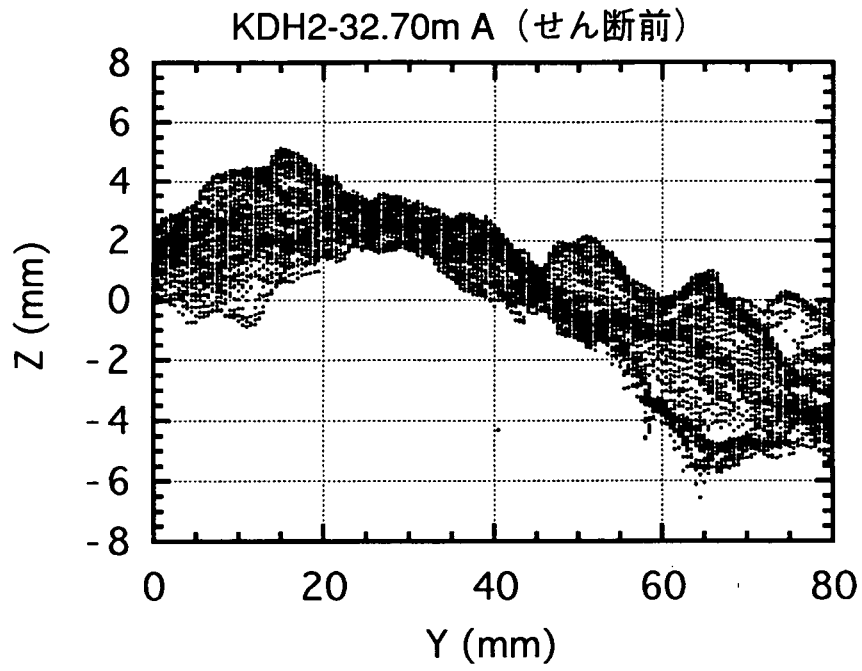


図3.3.9 せん断試験の前後のせん断方向に対する凹凸高さの分布

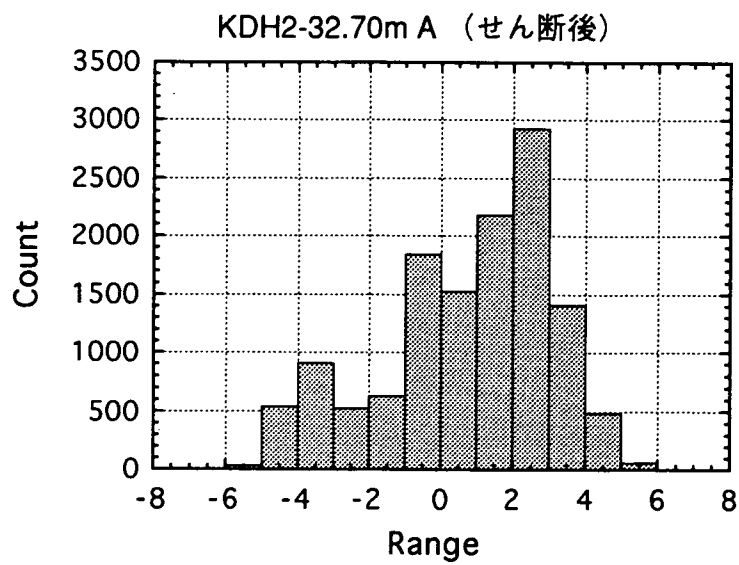
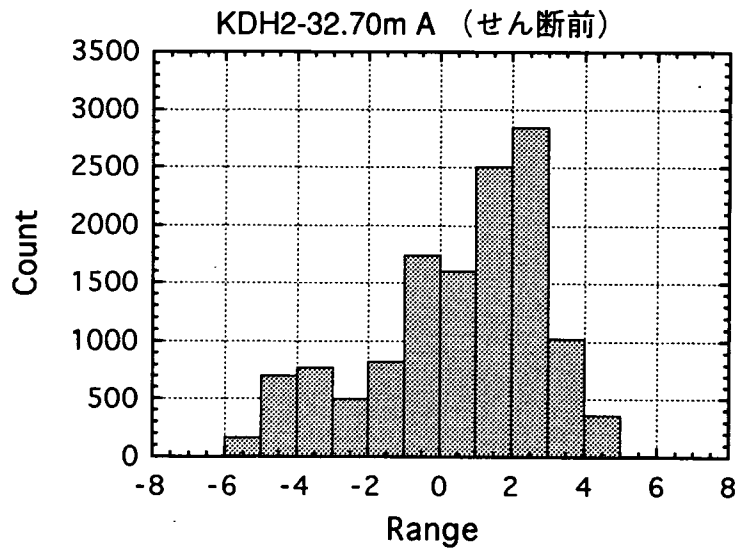


図3.3.10 せん断試験の前後における凹凸高さのヒストグラム

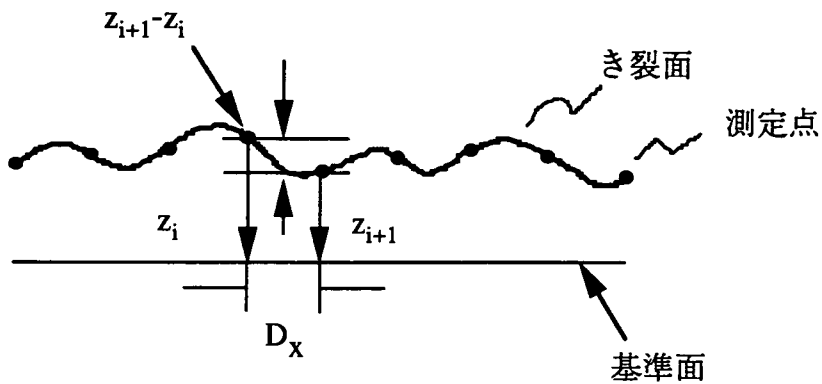
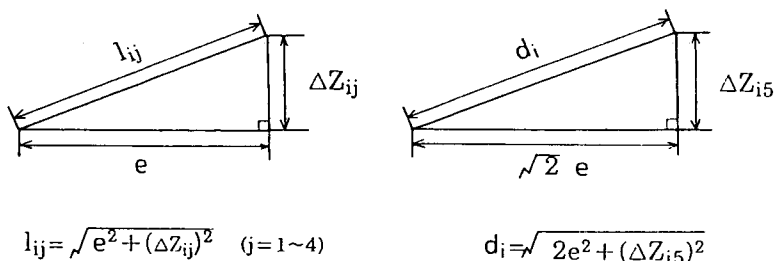
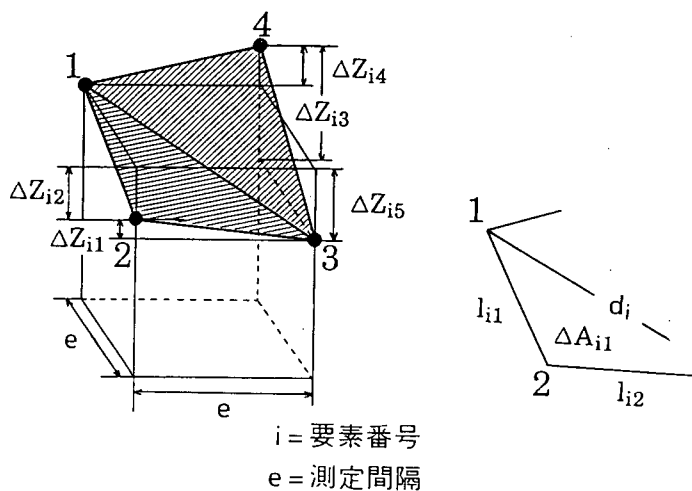


図3.3.11 Z_2 の算出方法



$$l_{ij} = \sqrt{e^2 + (\Delta Z_{ij})^2} \quad (j=1\sim 4)$$

$$d_i = \sqrt{2e^2 + (\Delta Z_{i5})^2}$$

$$A = \sum_i (\Delta A_{i1} + \Delta A_{i2})$$

$\rightarrow \frac{A}{A} - 1$ に着目する

図3.3.12 き裂の表面積の算出

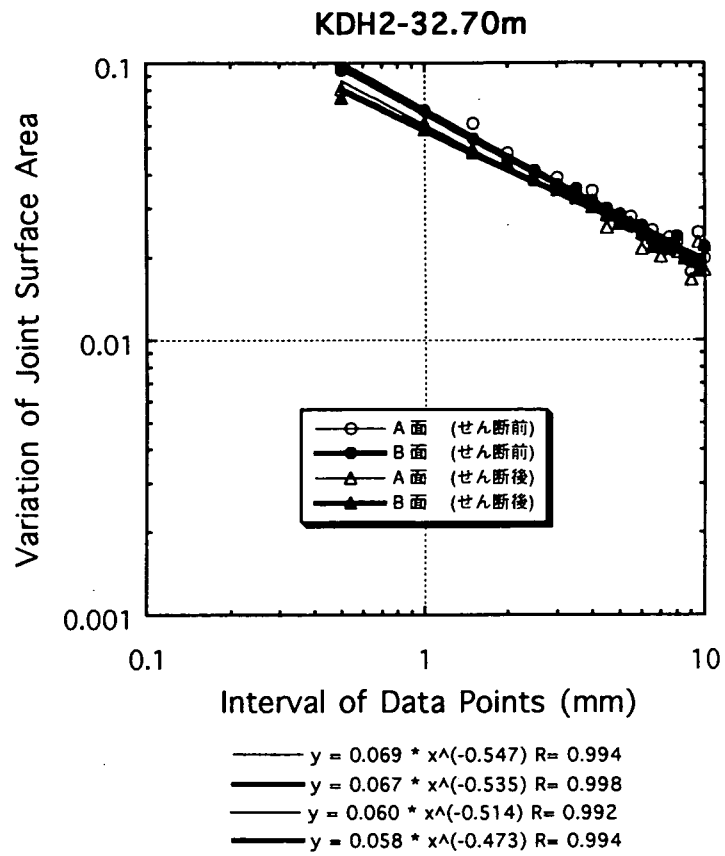


図3.3.13 測定間隔とき裂の表面積の変化の関係

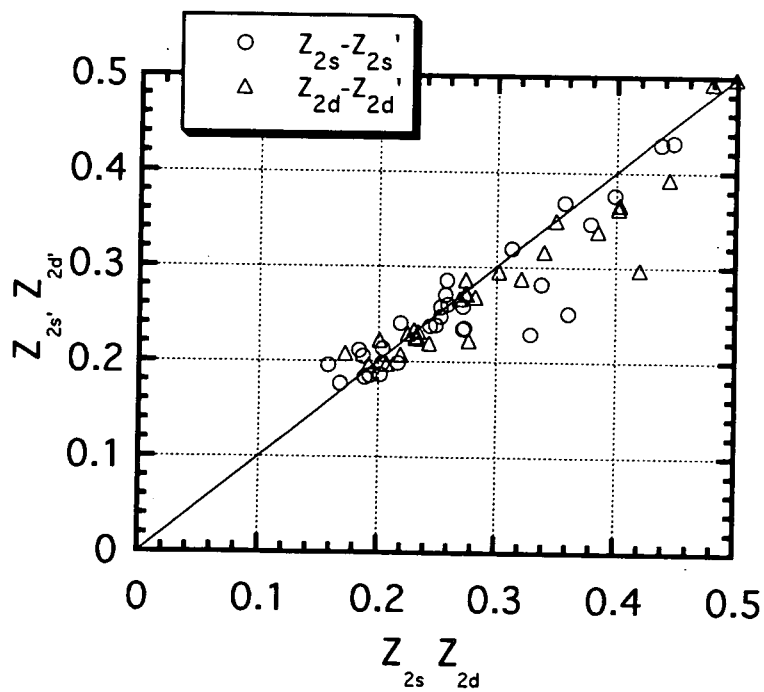


図3.3.14 せん断前後の Z_{2s} 、および Z_{2d} の比較

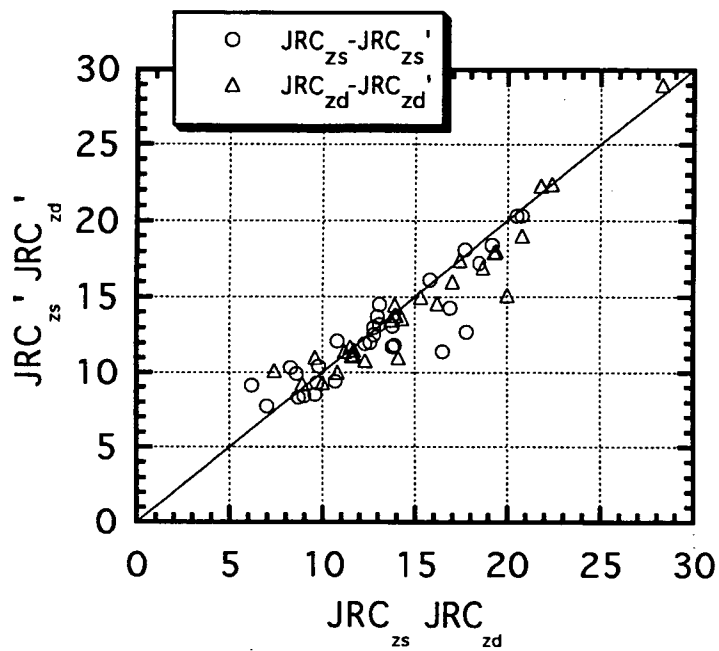


図3.3.15 せん断前後の JRC_{zs} および JRC_{zd} の比較

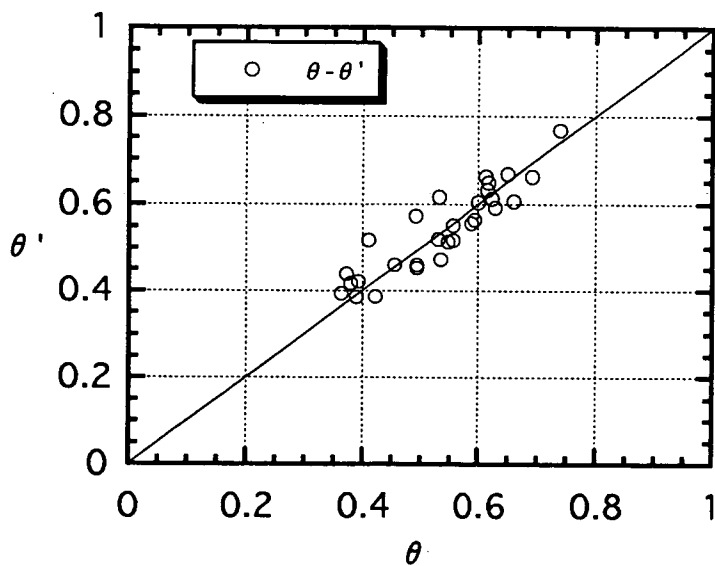


図3.3.16 せん断前後の θ の比較

3.3.3 垂直載荷試験

ある初期地圧の岩盤内に空洞を掘削すると、空洞周辺の岩盤の応力は再配分され二次的な状態へと変化する。円形断面の立坑の掘削にともなう原位置ひずみ計測¹⁶⁾によると、立坑断面の接線方向ではひずみが増加し、半径方向のひずみは減少するという結果が認められた。これは応力再配分による接線方向応力の増加と半径方向応力の解放を示唆している。また、同時に実施した、FEM解析においても同様の結果が得られた。このような応力変化のもとでは、き裂は開閉し、せん断抵抗の低下や透水性の増大などの現象を引き起こすと考えられる。垂直応力の変化にともなうき裂の挙動は、せん断に伴うダイレーション挙動とともに岩盤のゆるみを考える上で重要である。

垂直載荷試験から得られた垂直応力～変位関係を図3.3.17に示す。Bartonら¹⁷⁾は、ジョイントの開閉挙動が一般に非線形で双曲線形状を呈することを指摘している。この傾向は、図3.3.17に示す今回の実験結果でも同様である。実験では載荷、および除荷を3回繰り返しているが、1回目の載荷による閉塞量が最も大きい。1回目の載荷による閉塞量に比べ、2回目以降の閉塞量は小さく、ほぼ同じ経路をたどる場合が多い。今回は、き裂の垂直応力にとまなう変形特性として、初期垂直剛性 K_{ni} 、および垂直応力の範囲が5～10MPaにおける垂直剛性 K_{n5-10} を求めた（図3.3.18参照）。実験から得られた K_{ni} 、および K_{n5-10} を表3.3.3に示す。また、参考のために、Bartonら¹³⁾が実験から求めた K_{ni} を表3.3.4に示す。表3.3.4には岩種、風化の状態、および K_{ni} の範囲が示されている。この結果から、 K_{ni} の値にはばらつきがあり、必ずしも風化の程度に応じて低下しないことがわかる。

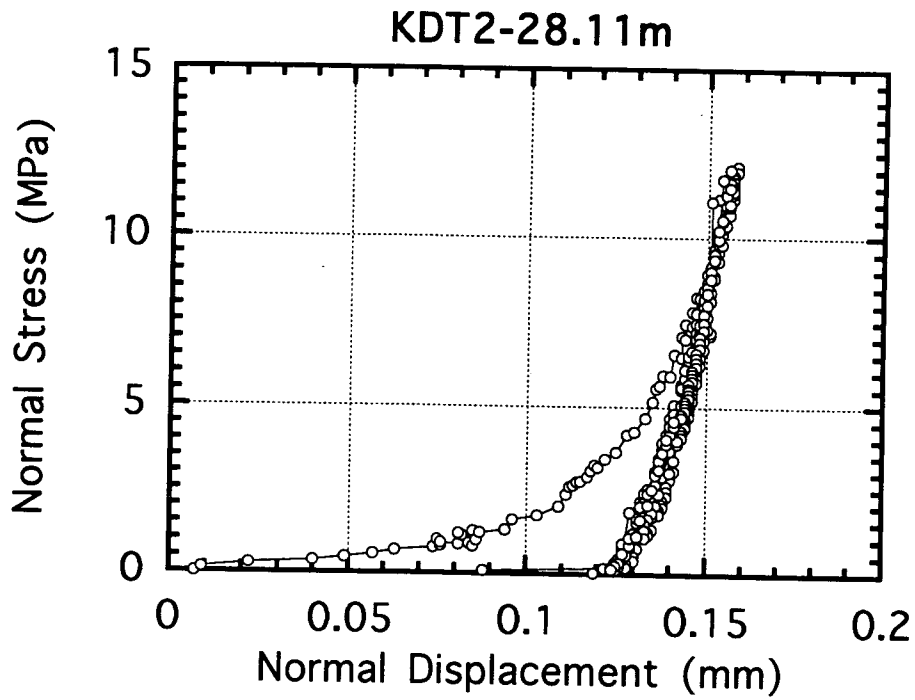


図3.3.17 垂直応力～変位関係

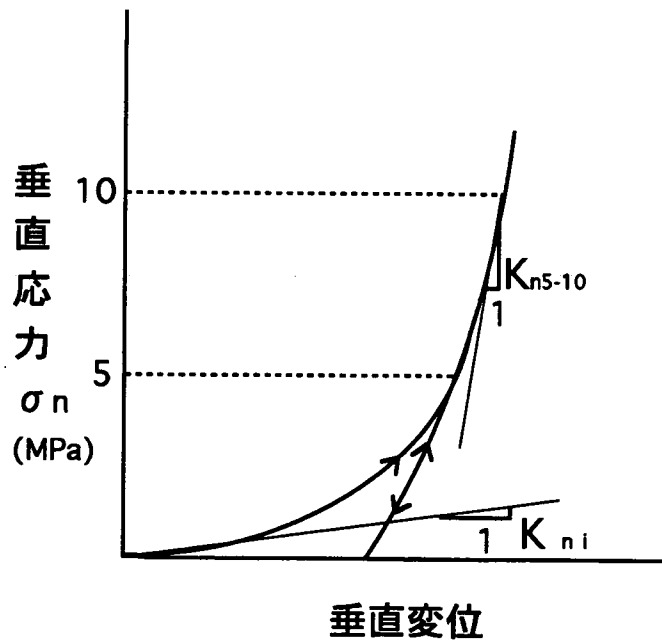


図3.3.18 き裂の垂直剛性の算出

表3.3.3 実験から得られた K_{ni} および K_{n5-10}

試料番号	K_{ni} (MPa/mm)	K_{n5-10} (MPa/mm)
KM01	43.9	1640
KM02	42.9	1677
KM03	83.5	218.5
KM04	65.3	988.6
KM05	57.2	565.1
KM06	61.9	1152
KM07	57.3	444.6
KM08	90.6	84.0
KM09	52.7	1246
KM10	27.8	343.3
KM11	97.1	484.9
KM12	14.9	445.6
KM13	24.3	364.6
KM15	71.8	714.8
KM16	50.0	1031

表3.3.4 種々のき裂の K_{ni} (Bandisら¹⁴⁾)

岩種 Rock Type	き裂の風化状態*) Weathering State	K_{ni} (MPa/mm)
粘板岩	F	24.1~46.5
	W	11.6~13.8
閃緑岩	F	21.7~26.7
	W	8.1~13.4
石灰岩	F~SW	7.9~30.6
	MW	4.9~70.2
	W	3.8~12.9
シルト岩	F	14.0~25.9
	MW	10.5~11.2
	W	6.9~14.2
砂岩	F~SW	3.6~22.7
	MW	4.3~25.6
	W	2.3~4.7

*) P.3-23を参照されたし

3.3.4 せん断試験結果

岩盤内に空洞が掘削されると応力が再配分される。この際、潜在するき裂は、拘束圧が低下したり、あるいはせん断応力の増加により滑りを起こす場合がある。せん断試験では、拘束圧に相当する垂直応力が一定に保たれた状態でせん断応力を作用させ、き裂のせん断強度などを求める。実験の結果から得られたせん断応力～せん断変位関係、およびダイレーション～せん断変位関係を図3.3.19に示す。この図から、せん断が開始されるとピーク値まではせん断応力が急激に増加し、ついでピーク強度に達した後せん断応力は減少し、残留強度に達することがわかる。通常、せん断の開始からピーク強度に達するまでの挙動は、弾性的なものとなし、その勾配をせん断剛性 K_s で表す。ピーク強度は、垂直応力の増大に伴い大きくなる。また、せん断に伴うダイレーションは、ピーク強度に達すると発生する。ダイレーションは垂直応力の増大とともに小さくなっている。この結果から、せん断にともないき裂が開口することがわかる。したがって、き裂のせん断が透水性の増大を引き起こすことが予想される。また、垂直応力の減少に伴い、ダイレーションが増大することから、空洞の掘削面の近傍において透水性が増大することが予想される。

なお、同一の試料を用いて3回のせん断を実施したため、垂直応力が増加してもせん断強度が増加しない場合もあった（図3.3.20参照）。

3回のせん断試験の結果から、ピークせん断強度 τ_{p1} 、 τ_{p2} 、 τ_{p3} が得られ、き裂のピーク摩擦角 ϕ_j および粘着力 c_j を求めた。垂直応力～せん断強度の関係を図3.3.21に示す。この図からMohr-Coulombの条件式により ϕ_j および c_j が得られた。ただし、図3.3.20のような場合は、 $\sigma_n=0.5\text{MPa}$ の点を無視して ϕ_j を求めた。き裂には引張り力に対する抵抗性がないが、 c_j はき裂の凹凸面の乗り上げに必要な、付加的な初期抵抗成分と考えられている¹⁸⁾。

なお、同様に残留強度 τ_{r1} 、 τ_{r2} 、 τ_{r3} から、残留摩擦角 ϕ_r を求めた。また、せん断開始からピーク強度までの直線部の傾きとしてせん断剛性 K_s を求めた。せん断試験の結果を表3.3.5にまとめる。表3.3.5には、既存データ(PK1-1～1-4)の結果も示した。

せん断強度～垂直応力の関係について、既存データ^{15), 19), 20)}と比較したものを図3.3.22に示す。今回の試験結果は、既存データの分布範囲の上位に位置し、□印で示した花崗岩の既存データに比べてもやや大きくなっている。この一因として、今回の試料のき裂長が、既存データに比べ小さいことが考えられる。Bandisら²¹⁾は、多くの実験結果に基づいて、き裂のせん断強度やせん断剛性に寸法効果が認められることを指摘している。

つぎに、せん断剛性 K_s に関する Bandisら¹³⁾の既存データを表3.3.6に示す。ここで、 K_s は初期接線せん断剛性を表しており、ここでは単にせん断剛性と呼ぶことにする。表3.3.6よりせん断剛性 K_s は垂直剛性と同様にかんがりのばらつきがあることがわかる。今回の実験結果では、垂直応力の範囲が0.05~0.5MPaに対して、せん断剛性 K_s が0.81~13.0 MPa/mmであった。既存データに花崗岩のデータがないことから、正確な比較はできないが、今回得られた K_s もばらつきがある。また、Bandisら¹³⁾はせん断剛性が垂直応力に依存することを指摘している。表3.3.6によると、今回得られた K_s は必ずしも垂直応力とともに増大していない。これは、同一の試料で3回のせん断を実施したためと考えられる。したがって、せん断剛性の相互比較を行う場合、 K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} の順に優先して考えた方がよい。

残留摩擦角 ϕ_r は、今回の試験結果では38.6~53.4°となっている。既存のデータ^{7),18)}によれば、き裂の ϕ_r はおよそ25~40°程度である。また、Bartonらの予測式から求めた ϕ_r' は22.6~33.4°であった。実験から求めた ϕ_r は、既存データや ϕ_r' よりやや大きくなっている。この理由として、今回せん断試験を実施した垂直応力の範囲が、0.062~0.5MPaの比較的低いレベルであることが考えられる。この点は、垂直応力を2~5MPa程度としてせん断試験を実施することにより解明されると考えられる。

表3.3.5 き裂のせん断試験結果一覧

試料番号	垂直応力 σ_n (MPa)	ピーク強度 τ_p (MPa)	せん断剛性 K_s (MPa/mm)	粘着力 c_j (MPa)	摩擦角 ϕ_j (deg.)	残留強度 τ_r (MPa)	残留摩擦角 ϕ_r (deg.)
KM01	0.075	0.301	3.27	0.156	62.9	0.182	47.2
	0.3	0.723	5.65			0.377	
	0.5	1.110	3.34			0.624	
KM02	0.062	0.215	8.38	0.069	67.0	0.148	44.2
	0.3	0.777	6.86			0.491	
	0.5	0.700	8.37			0.567	
KM03	0.075	0.197	4.44	0.097	41.3	0.172	41.3
	0.3	0.356	3.38			0.330	
	0.5	0.580	5.87			0.540	
KM04	0.075	0.205	13.0	0.116	57.1	0.144	48.6
	0.3	0.683	5.91			0.458	
	0.5	0.866	7.40			0.630	
KM05	0.075	0.228	3.40	0.115	52.5	0.219	52.0
	0.3	0.532	3.88			0.471	
	0.5	0.821	5.92			0.735	
KM06	0.075	0.209	4.45	0	71.1	0.189	49.8
	0.3	0.866	2.14			0.622	
	0.5	0.848	4.17			0.685	
KM07	0.075	0.303	5.95	0.177	54.0	0.169	45.9
	0.3	0.552	2.16			0.330	
	0.5	0.886	2.86			0.559	
KM08	0.075	0.210	2.31	0.119	53.4	0.150	38.6
	0.3	0.569	2.60			0.424	
	0.5	0.774	5.59			0.483	
KM09	0.075	0.392	3.02	0.291	55.9	0.176	51.6
	0.3	0.760	4.56			0.409	
	0.5	1.014	4.51			0.711	
KM10	0.075	0.137	2.25	0.071	55.6	0.084	53.4
	0.3	0.625	4.39			0.501	
	0.5	0.861	3.96			0.691	
KM11	0.075	0.147	0.94	0.062	58.3	0.107	49.7
	0.3	0.552	2.05			0.384	
	0.5	0.869	3.29			0.634	
KM12	0.075	0.118	3.72	0.068	49.9	0.104	44.3
	0.3	0.439	7.11			0.343	
	0.5	0.655	10.04			0.546	
KM13	0.075	0.199	8.63	0.107	50.2	0.138	51.9
	0.3	0.470	2.51			0.423	
	0.5	0.706	4.88			0.676	
KM15	0.075	0.189	0.81	0.138	42.4	0.162	41.0
	0.3	0.462	2.85			0.378	
	0.5	0.574	4.88			0.530	
KM16	0.075	0.202	0.84	0.111	49.2	0.148	47.2
	0.3	0.413	2.32			0.381	
	0.5	0.714	3.13			0.624	
PK1-1	0.072	0.181	0.57	0.121	42.5	0.141	33.2
	0.3	0.452	1.15			0.320	
	0.5	0.611	2.31			0.420	
PK1-2	0.076	0.267	1.36	0.211	51.5	0.134	49.5
	0.3	0.671	3.34			0.435	
	0.5	0.795	4.61			0.628	
PK1-3	0.074	0.189	0.70	0.091	59.9	0.122	55.0
	0.3	0.673	3.71			0.475	
	0.5	0.920	2.37			0.730	
PK1-4	0.074	0.235	5.47	0.121	57.2	0.145	52.4
	0.3	0.579	2.36			0.468	
	0.5	0.886	3.80			0.696	

表3.3.6 種々のき裂の K_s (Bandisら¹³⁾)

岩種 Rock Type	き裂の風化状態*) Weathering State	垂直応力の範囲 (MPa)	K_s (MPa/mm)
粘板岩	F	0.54~2.28	5.6~12.6
	W	0.40~1.45	2.8~7.5
閃緑岩	SW	0.26~2.11	8.2~19.0
	W	0.28~1.11	3.6~9.1
石灰岩	SW	0.23~1.84	8.0~50.5
	MW	0.24~1.90	4.1~17.3
	W	0.25~1.53	1.0~10.5
砂岩	F	0.25~2.36	2.2~37.6
	SW	0.25~2.07	8.7~41.9
	MW	0.24~2.04	1.2~6.2
	W	0.50~1.96	2.1~6.5

*) P.3-23を参照されたし

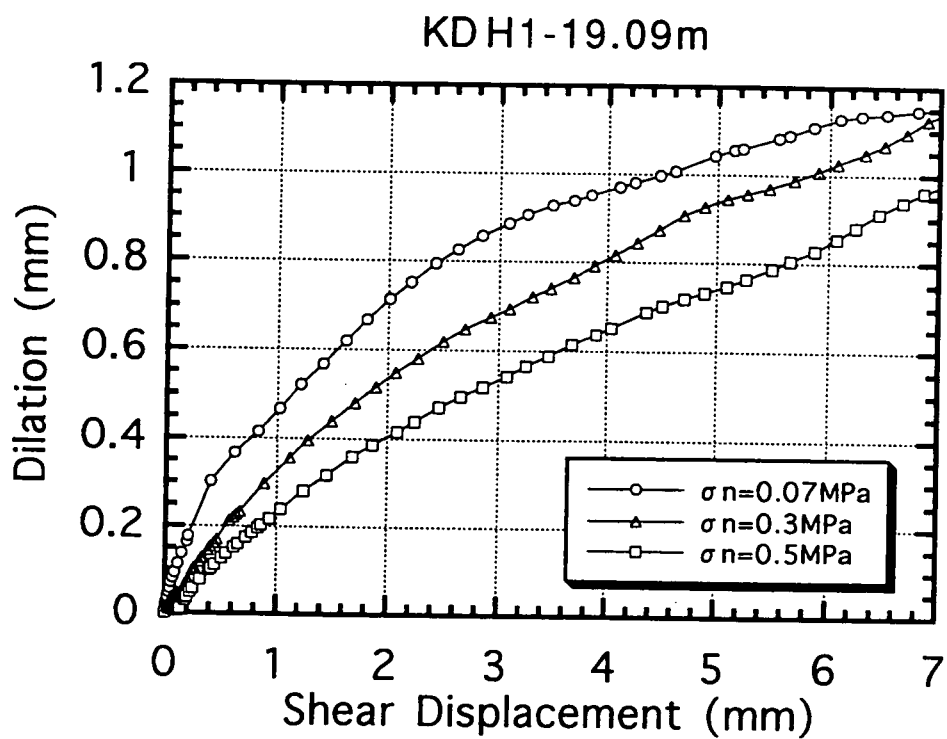
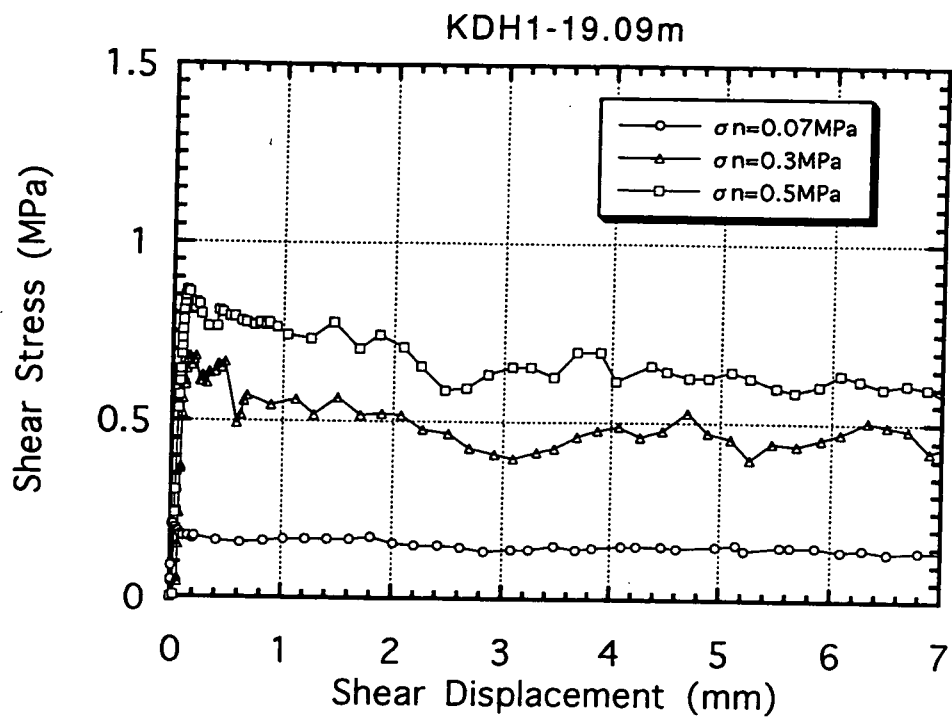


図3.3.19 せん断応力～せん断変位関係および
ダイレーション～せん断変位関係

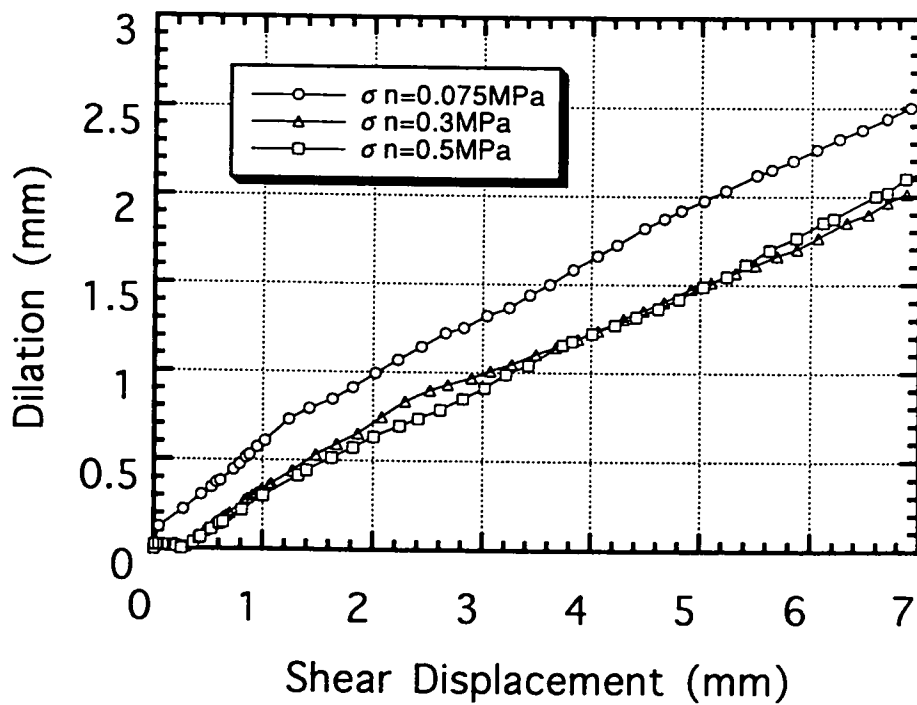
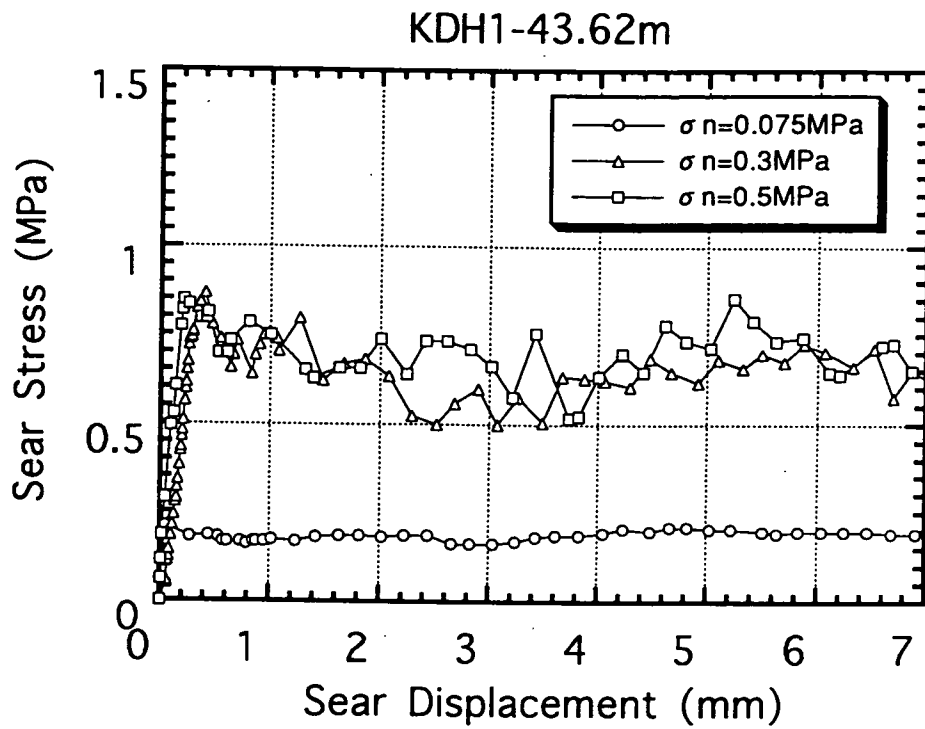


図3.3.20 せん断応力～せん断変位関係および
ダイレーション～せん断変位関係

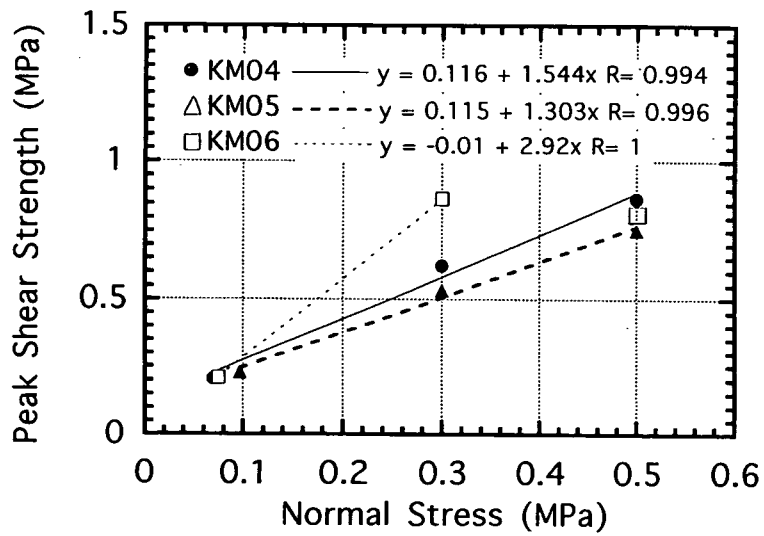


図3.3.21 ピーク摩擦角 ϕ_j および粘着力 c_j の算出

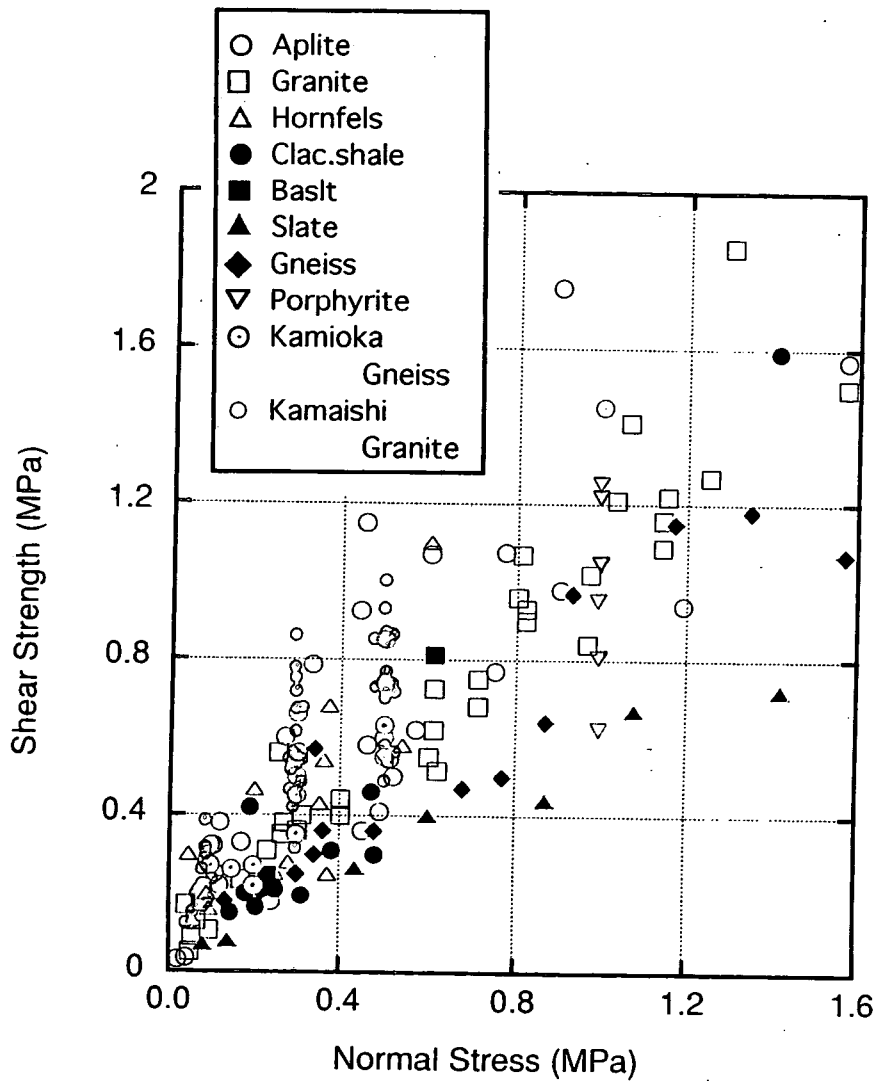


図3.3.22 ピークせん断強度の既存データとの比較

3.3.5 き裂の特性試験結果

個々のき裂の特性試験として、試料の密度測定、シュミットハンマーによる打撃測定、およびテイルト試験を実施した。結果は図3.3.23に示すようなデータシートにまとめた。Bartonらはこれらの簡便な試験から、き裂の力学パラメータである JRC_0 や JCS_0 を求めることを提案している。

まず、シュミットハンマーの反発度 r から、 JCS_0 が以下のように求められる。

$$\log_{10} JCS_0 = 0.00088 \cdot \gamma \cdot r + 1.01 \quad (3.3.3)$$

ここで、 γ は試料の乾燥密度である。また、同様にボーリングコア側面の反発度 R から、岩石の一軸圧縮強度 σ_c が求められる。

つぎに、テイルト試験の結果から、次式により JRC_{0T} が求められる。

$$JRC_{0T} = \frac{\alpha - \phi_r'}{\log_{10} \frac{JCS_0}{\sigma_n}} \quad (3.3.4)$$

ここで、 α はテイルト試験において、き裂の滑りが起こる傾斜角である。また、 ϕ_r' は残留摩擦角であり、次式により求める。

$$\phi_r' = \phi_b + 20 (r/R - 1) \quad (3.3.5)$$

ここで、 ϕ_b は基本摩擦角で、ボーリングコア側面のテイルト試験から得られる傾斜角である。なお、 JRC_{0T} および ϕ_r' はせん断試験の結果から求める JRC_0 および ϕ_r と区別する。

試験結果の一覧を表3.3.7に示す。

ジョイント特性データシート

1. 諸元

FILE NAME : KM01	
採取地	釜石鉱山 250mL 坑道
ボーリング No.	KDH1
深 度 (m)	7.76
岩 種	花崗岩
走向・傾斜	N5W76E

	A 面	B 面
平均長径 (cm)	6.458	6.474
平均短径 (cm)	5.996	6.008
代表長さ (cm)	6.458	6.474
断面積 (cm ²)	30.82	30.53

2. 試料の特性

	A 面	B 面
重量 (g)	462.3	462.3
容 積 (cm ³)	168.0	168.0

密度 = 9.8067 * $\frac{\text{重量}}{\text{容 積}}$

$\rho_A = 26.98 \text{ kN/m}^3$

$\rho_B = 26.98 \text{ kN/m}^3$

$\rho = 26.98 \text{ kN/m}^3$

シュミットハンマー反発度 (乾燥切断面)

RA	45	41	41	46	48	48	48	46	44	44	A.V.RA	45.1
RB	46	46	46	47	50	50	44	40	39	38	A.V.RB	44.6

一軸圧縮強度 $\sigma_c = 10^{(0.00088R\rho + 1.01)} = 119.1 \text{ (MPa)}$ $R = 44.9$

基本摩擦角：コア側面のティルト試験 (2方向)

ϕ_b	33	34	34	35	34	36	33	34	34	34	A.V. ϕ_b	34.1
----------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---------------	------

$\phi_b = 34.1^\circ$

3. ジョイントの特性

シュミットハンマー反発度

r_A	37	38	36	36	35	34	31	32	30	30	A.V. r_A	33.9
r_B	38	36	34	33	30	30	28	28	29	28	A.V. r_B	31.4

$JCS_0 = 10^{(0.00088r\rho + 1.01)} = 61.2 \text{ (MPa)}$ $r = 32.7$

残留摩擦角 $\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R} = 28.7^\circ$

ジョイントのティルト試験 (2方向)

α_A	45	44	44	44	45	44	44	44	44	44	A.V. α_A	44.2
α_B	55	49	52	53	52	52	52	52	52	52	A.V. α_B	52.1

$\alpha = 48.2^\circ$

上側ジョイントの質量：W = 389.2 (g)

接触面積：A = 30.53 (cm²)

$\sigma_{n0} = 0.000098067 \cdot W \cdot \cos \alpha / A = 8.3 \times 10^{-4} \text{ (MPa)}$

$JRC_0 = (\alpha - \phi_r) / \{\log_{10} (JCS_0 / \sigma_{n0})\} = 4.0$

図3.3.23 き裂の特性試験のデータシート

表3.3.7 き裂の特性試験の結果

試料番号	乾燥密度 γ (kN/m ³)	基本摩擦角 ϕ_b (deg.)	残留摩擦角 ϕ_r' (deg.)	一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	JCS ₀ (MPa)	JRC _{0T}
KM01	26.98	34.1	28.7	119.1	61.2	4.0
KM02	26.98	34.1	27.9	141.1	39.6	2.0
KM03	27.42	34.1	22.6	101.1	27.1	4.3
KM04	27.42	34.1	28.9	119.3	62.6	4.6
KM05	26.74	34.1	30.8	83.3	58.9	2.8
KM06	26.86	34.1	28.2	105.7	53.2	6.4
KM07	23.87	34.1	28.4	78.0	43.7	7.0
KM08	24.36	34.1	30.0	76.3	50.6	4.9
KM09	27.68	34.1	27.2	122.8	52.1	6.0
KM10	27.57	34.1	26.2	131.5	47.8	7.3
KM11	26.70	34.1	29.3	126.0	68.7	4.2
KM12	26.82	34.1	26.4	158.3	54.9	4.5
KM13	28.14	34.1	30.0	129.4	77.0	4.0
KM14	27.40	34.1	33.4	103.4	54.0	3.2
KM15	27.35	34.1	29.1	132.4	70.0	3.0
KM16	26.97	34.1	30.1	121.7	74.4	3.5

3.3.6 JRC_0 の算出

ここでは、せん断試験の結果から、個別要素解析の入力パラメータである JRC_0 を求める。

せん断試験で得られたピークせん断強度 τ_p から JRC_0 を求めるには、式3.3.4において α を $\tan^{-1}(\tau_p / \sigma_n)$ とする。

$$JRC_0 = \frac{\tan^{-1} \frac{\tau_p}{\sigma_n} - \phi_r}{\log_{10} \frac{JCS_0}{\sigma_n}} \quad (3.3.6)$$

また、残留摩擦角として、せん断試験結果から得られた ϕ_r (表3.3.5参照) を用いる。ここで、 JRC_0 はき裂長が10cmを基準としたパラメータである。そこで、まず式3.3.6より各き裂ごとに JRC_0^* を求める。つぎに、き裂長が10cmに対応する値として次式²¹⁾により JRC_0 を求める。

$$JRC_0 = JRC_0^* (10/L_0)^{-0.02JRC_0^*} \quad (3.3.7)$$

ここで、 L_0 (cm)はせん断試験に用いた試料のき裂長である。

以上のようにして、せん断試験から求めたを表3.3.8に示す。表3.3.8において、3回のせん断試験の JRC_0 を垂直応力が小さい順に JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} としている。表3.3.7および表3.3.8から、テイルト試験による JRC_{0T} は、せん断試験による JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} よりも小さくなっていることがわかる。これは、テイルト試験が3回のせん断試験の後で行われたためと考えられる。

式3.3.6に示したように、 JRC_0 は実験結果から求めている。視点を変えると、Bartonらのせん断強度の予測式において、他のパラメータはすべて実験から決まるので、 JRC_0 のみが独立なパラメータではないといえる。したがって、当初Bartonらが示したき裂のプロファイル⁷⁾のように、 JRC_0 は単にき裂面の幾何学的な粗さを定量化したパラメータではない。ここで、き裂面の粗さの指標 Z_2 および θ と JRC_0 の関係を図3.3.24および3.3.25に示す。これらの結果、 JRC_0 は幾何学的な粗さとの相関性が小さいことがわかる。Hsiungら²²⁾は、原位置から採取したき裂について、せん断試験から求めた JRC_0 とフラクタル次元や Z_2 等の幾何学特性とを比較している。その結果、同一のき裂面内において JRC_0 がばらつくことを示し、各パラメータの値に違いがあることを指摘している。この理由として、き裂の噛み合わせの程度、あるいはき裂面の有効接触率などが関係するものと考えられている。

表3.3.8 せん断試験結果から求めた JRC_0

試料番号	JRC_{01}	JRC_{02}	JRC_{03}	$AV.JRC_0$
KM01	9.1	8.1	8.2	8.5
KM02	10.1	11.0	5.3	8.8
KM03	9.2	4.1	4.3	5.9
KM04	7.2	7.2	5.2	6.5
KM05	5.1	3.6	3.1	3.9
KM06	6.7	8.6	4.6	6.7
KM07	10.1	6.9	7.2	8.1
KM08	9.8	9.5	8.4	9.2
KM09	8.8	7.0	5.7	7.2
KM10	6.1	5.0	3.3	4.8
KM11	6.4	4.9	4.8	5.4
KM12	7.8	5.0	4.1	5.7
KM13	5.3	2.3	1.3	2.9
KM15	8.4	6.4	3.6	6.1
KM16	8.2	2.8	3.6	4.9
PK1-1	10.2	8.6	7.2	8.6
PK1-2	7.7	6.5	3.7	6.0
PK1-3	4.4	4.4	2.9	3.9
PK1-4	6.4	4.2	3.7	4.8
PK1-5	10.0	9.5	7.3	8.9

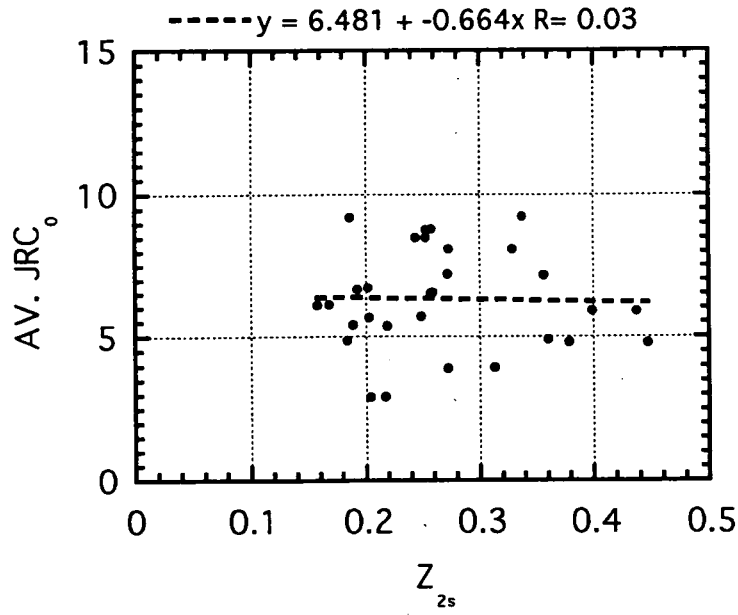


図3.3.24 JRC₀とZ₂の関係

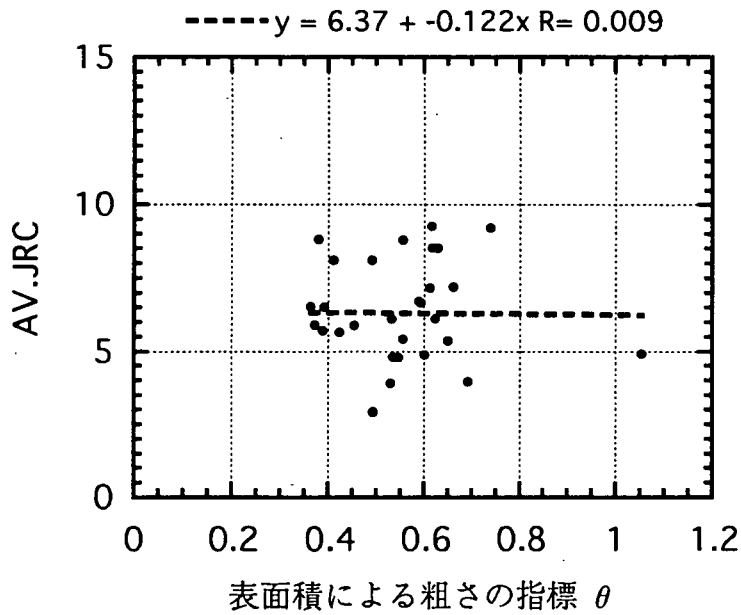


図3.3.25 き裂面の粗さの指標 θ と JRC₀ の関係

3.4 き裂分類の指標と力学特性

3.4.1 き裂分類の指標と変形特性

室内試験の結果、き裂の変形特性として垂直剛性 K_{ni} および K_{n5-10} 、せん断剛性 K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} が得られている。以下では、これらの変形特性と、き裂分類の指標の関係について述べる。

(1) 垂直剛性

i) 充填物の幅と垂直剛性

すべてのき裂について、垂直剛性 K_{ni} 、 K_{n5-10} と充填物の幅の関係を示したものが図3.4.1である。図3.4.1では、 K_{n5-10} 、 K_{ni} ともばらつきが大きく、充填物の幅との相関性は小さい。平均値から判断すると、 K_{n5-10} はa1～a3でほぼ一定で、a4で低下する傾向が認められる。 K_{ni} はa2がやや大きく、そのほかは差が小さい。

そこで、3.2.3節で行った分類（表3.2.8参照）に基づき、充填物の種類および変質の程度が同じであるグループ内の K_{ni} 、 K_{n5-10} と充填物の幅の関係を示したものが図3.4.2(a)～(c)である。図3.4.2(a)と(c)については、データのばらつきが小さく、 K_{ni} と K_{n5-10} の変化は比較的小さい。しかし、図3.4.2(b)では、 K_{ni} 、 K_{n5-10} ともa2がa1の約3倍となっている。

以上から、 K_{ni} 、 K_{n5-10} と充填物の幅の関係については、一貫した傾向を見出すことができない。

ii) 充填物の種類と垂直剛性

つぎに、すべてのき裂について、垂直剛性 K_{ni} 、 K_{n5-10} と充填物の種類の関係を示したものが図3.4.3である。やはり、同じ充填物の種類でのデータのばらつきが大きい。平均値から判断すると、 K_{n5-10} はAで小さくそのほかは比較的差が小さくなっている。また、 K_{ni} は比較的差が小さい。そこで、充填物の幅および変質の程度が同じであるグループ内の K_{ni} 、 K_{n5-10} と充填物の種類の関係を示したものが図3.4.4(a)～(d)である。図3.4.4(a)では、 K_{ni} 、 K_{n5-10} ともDはCより小さくなっている。図3.4.4(b)では、 K_{ni} はCがBより小さいが、 K_{n5-10} については逆の傾向となっている。図3.4.4(c)および(d)を比較すると、 K_{n5-10} はAがBより小さく、 K_{ni} は相反する傾向となっている。

以上から、 K_{ni} と充填物の種類の関係については、一貫した傾向が得られない。平均的にはA～Dまで K_{ni} の差が小さい。 K_{n5-10} については、A、B、Cの順に上昇し、Dでやや低下する傾向にある。

iii) 変質の程度と垂直剛性

つぎに、すべてのき裂について、垂直剛性 K_{ni} 、 K_{n5-10} と変質の程度の関係

を示したものが図3.4.5である。平均値から判断すると、はFS,VW,WKの順に低下し、 K_{n5-10} についてはVWでFS,WKよりも大きくなっている。

また、充填物の幅と変質の程度が同じであるグループ内の K_{ni} 、 K_{n5-10} 、および充填物の種類の関係を示したものが図3.4.6(a)~(e)である。 K_{ni} については、図3.4.6(a)~(c)において図3.4.5に示した平均値と同様の傾向であるが、図3.4.6(d),(e)においては、平均値と矛盾する傾向となっている。 K_{n5-10} については、図3.4.6(c)~(d)において平均値と同様の傾向であるが、図3.4.6(a),(b)においては、平均値と矛盾する傾向となっている。以上から、 K_{ni} 、 K_{n5-10} と変質の程度の関係については、一貫した傾向を見出すことができない。

以上、垂直剛性とき裂分類の指標の関係を検討した。今回得られたデータの範囲では、垂直剛性とき裂分類の指標に明瞭な関係が得られなかった。Barton-Bandisモデルの入力値である初期垂直剛性 K_{ni} については、現状では平均値を用いることが適切と考えられる。

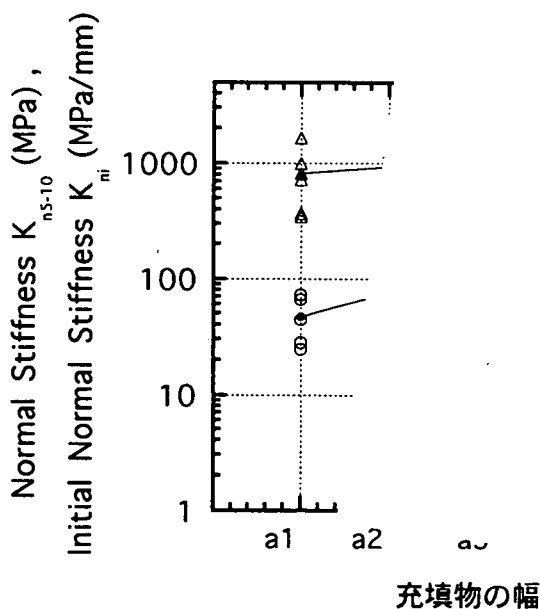


図3.4.1 充填物の幅と垂直剛性

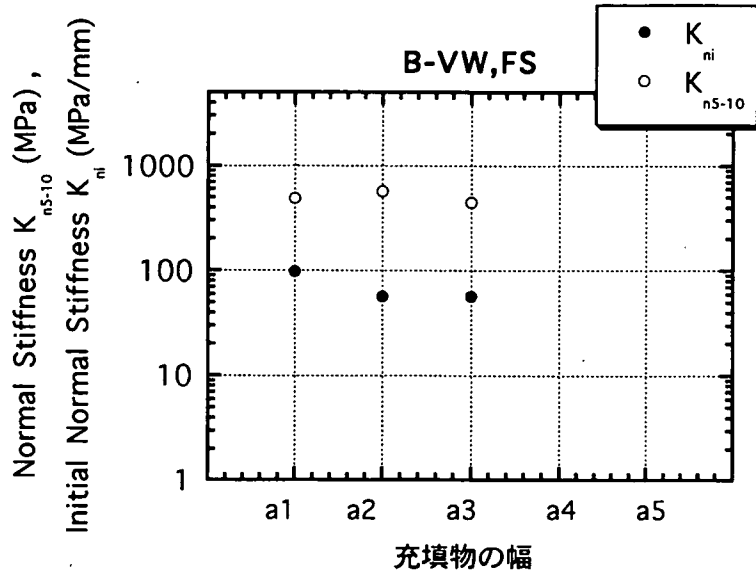


図3.4.2(a) 充填物の幅と垂直剛性 (B-VW,FS)

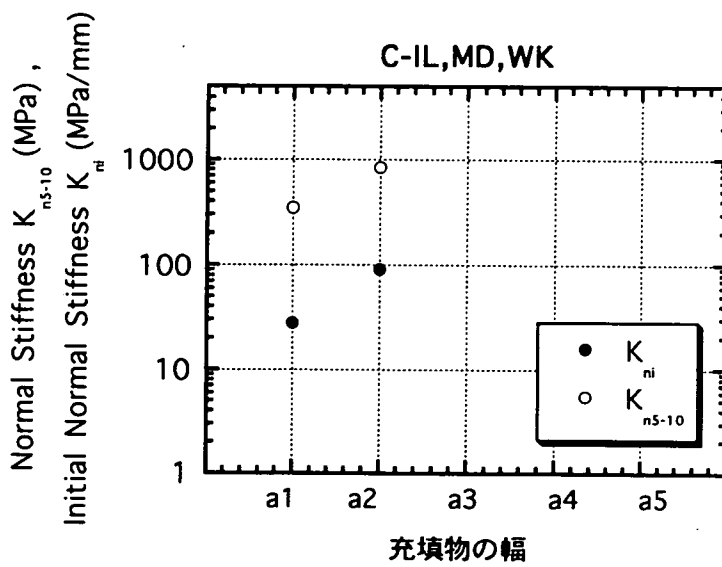


図3.4.2(b) 充填物の幅と垂直剛性 (C-IL,MD,WK)

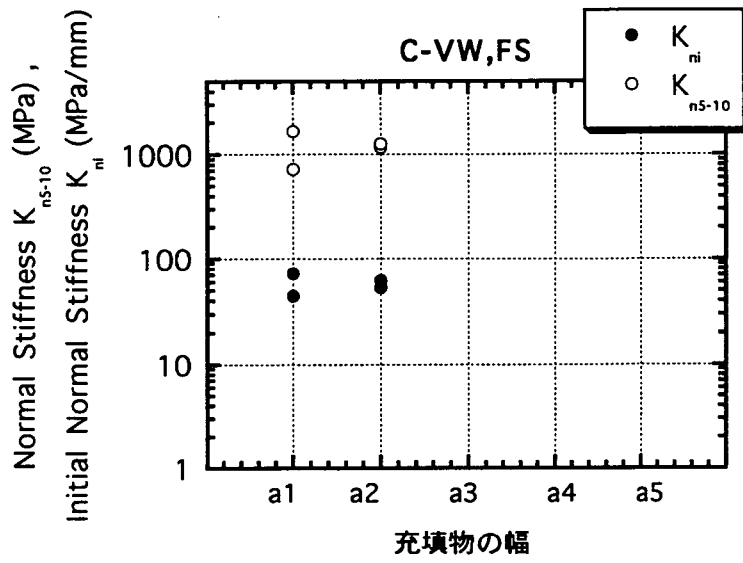


図3.4.2(c) 充填物の幅と垂直剛性 (C-VW,FS)

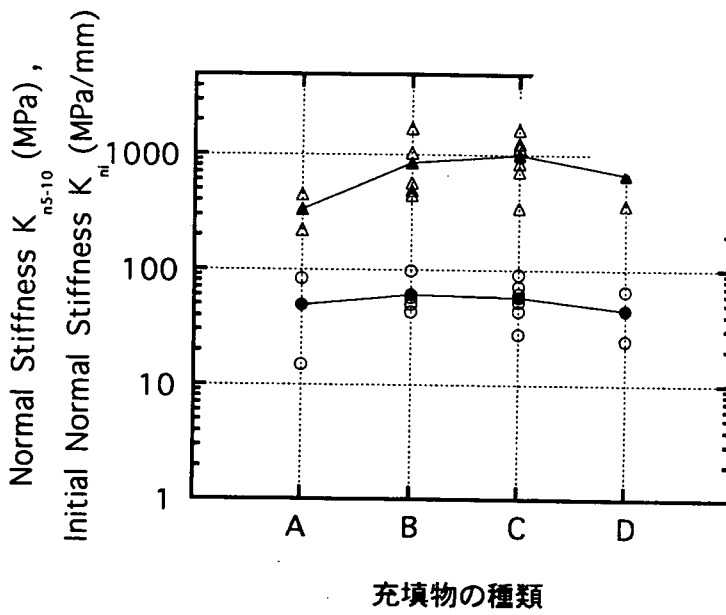


図3.4.3 充填物の種類と垂直剛性

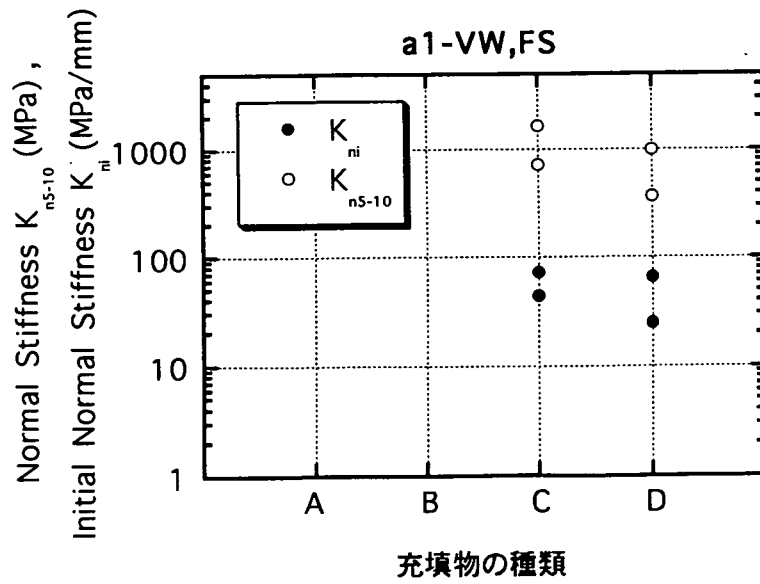


図3.4.4(a) 充填物の種類と垂直剛性 (a1-VW,FS)

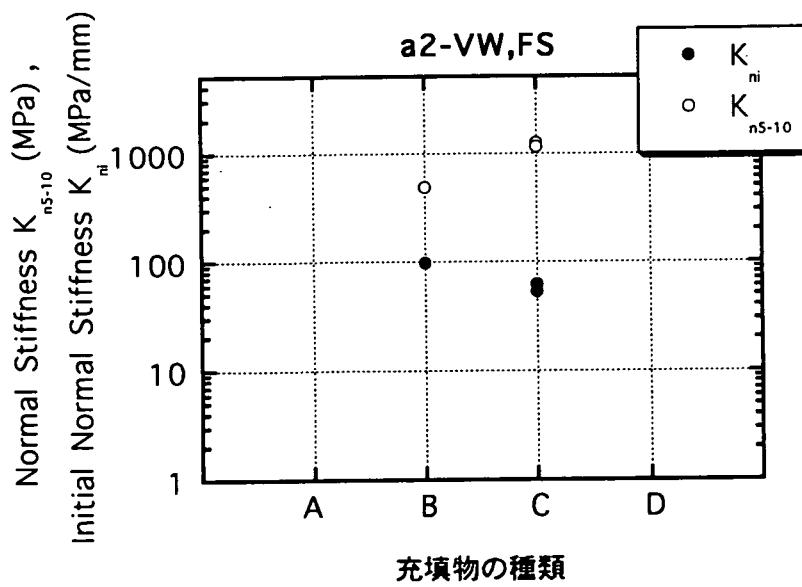


図3.4.4(b) 充填物の種類と垂直剛性 (a2VW,FS)

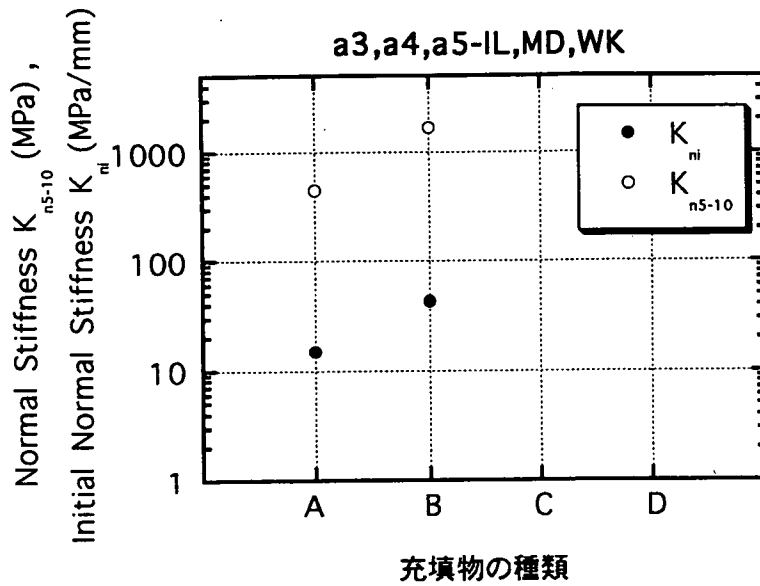


図3.4.4(c) 充填物の種類と垂直剛性 (a3,a4,a5-IL,MD,WK)

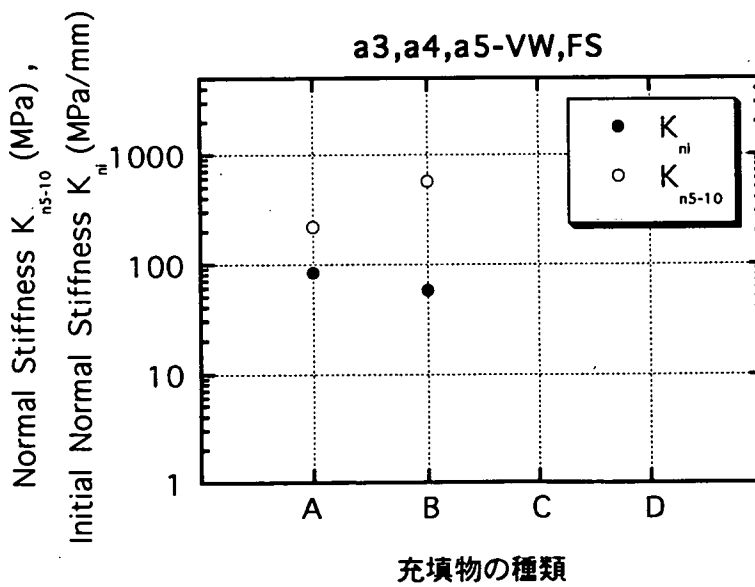


図3.4.4(d) 充填物の種類と垂直剛性 (a3,a4,a5-VW,FS)

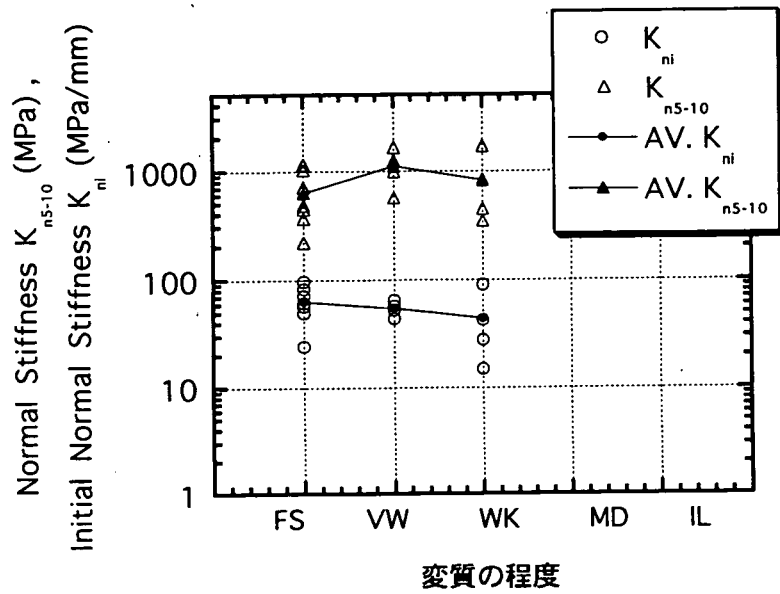


図3.4.5 変質の程度と垂直剛性

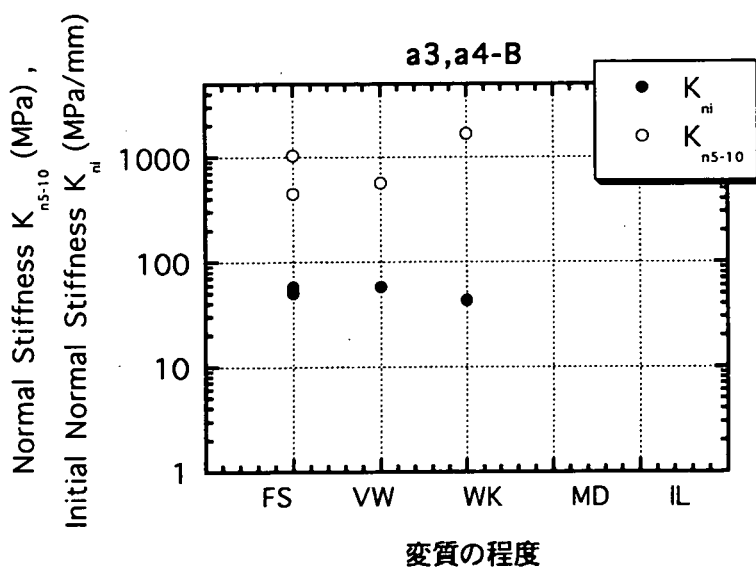


図3.4.6(a) 変質の程度と垂直剛性 (a3,a4-B)

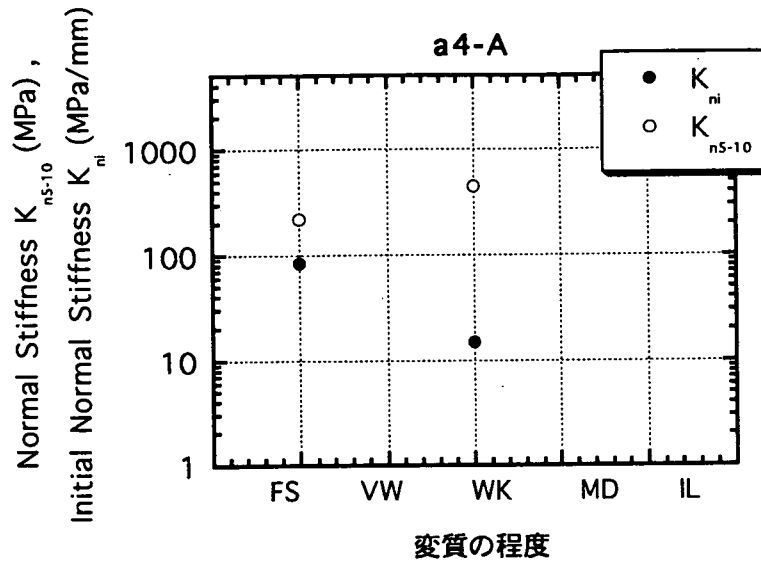


図3.4.7(b) 変質の程度と垂直剛性 (a4-A)

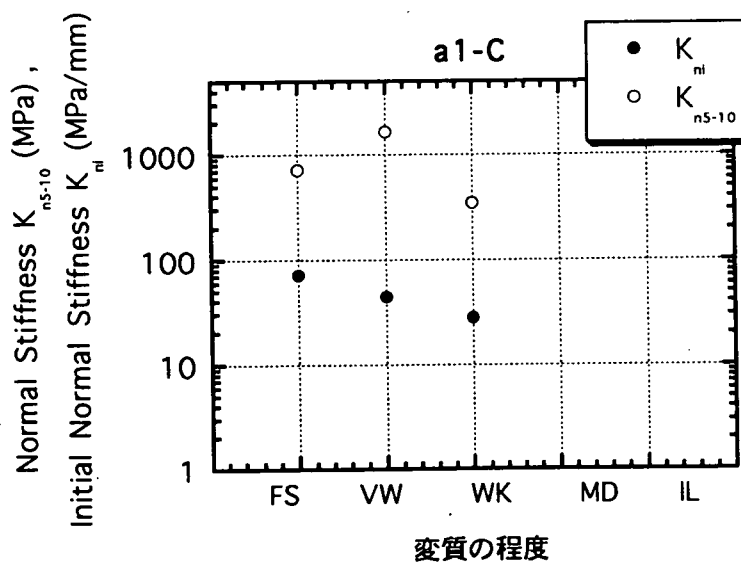


図3.4.7(c) 変質の程度と垂直剛性 (a1-C)

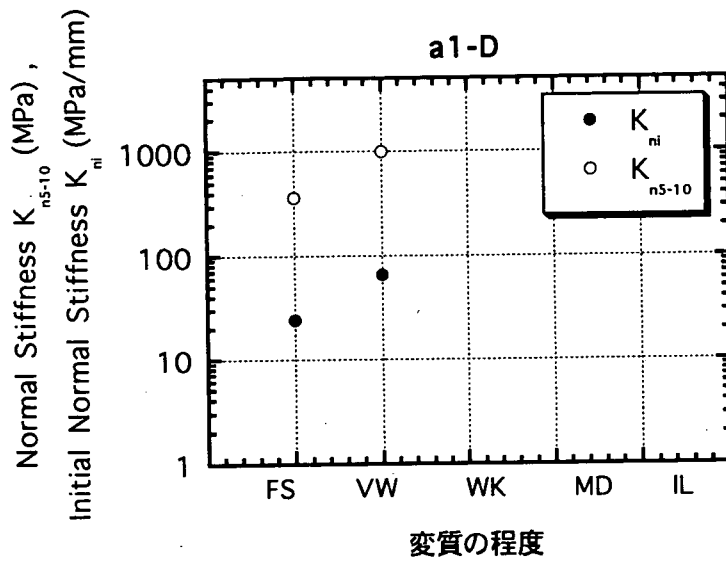


図3.4.7(d) 変質の程度と垂直剛性 (a1-D)

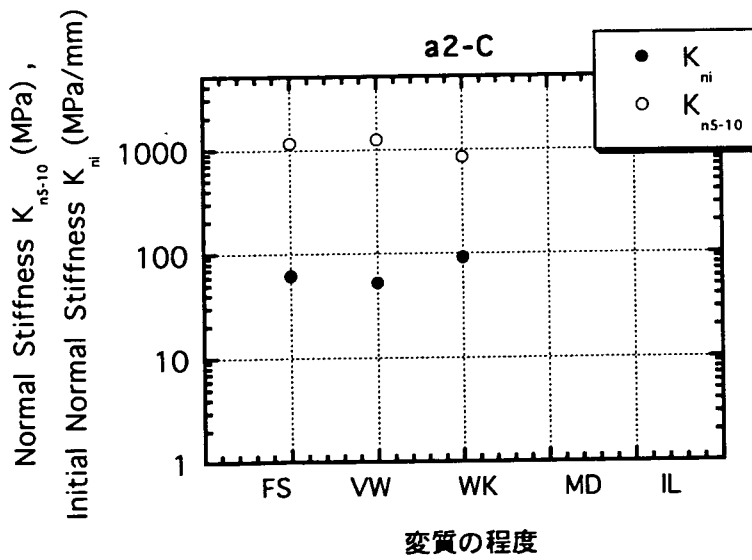


図3.4.7(e) 変質の程度と垂直剛性 (a2-C)

(2) せん断剛性

本研究では、各試料につき3回のせん断を実施しており、せん断剛性としてそれぞれ K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} が得られている。3.3.4節で考察したように、同一の試料を用いて3回のせん断を実施したため、せん断剛性については K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} の順に優先して、以下に、せん断剛性とき裂分類の指標の関係を検討する。

i) 充填物の幅とせん断剛性

すべてのき裂についてせん断剛性 K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} と充填物の幅の関係を示したものが図3.4.7(a)～(c)である。 K_{s1} の平均値から判断すると、a1とa2に比べa3とa4のせん断剛性がやや大きくなっているが、データのばらつきの程度に比べその差は比較的小さい。この傾向は、せん断剛性が充填物の幅の増大とともに低下した神岡鉱山の結果⁴⁾(表3.2.4参照)と異なっている。

充填物の種類および変質の程度が同一であるグループ内の、せん断剛性と充填物の幅の関係を示したものが図3.4.8(a)～(c)である。図3.4.8(a)から、a2とa3を比較すると K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} ともa3の方が大きいことがわかる。a3とa4を比較すると K_{s1} についてはa4の方が大きくなっている。図3.4.8(b),(c)よりa1とa2の K_{s1} を比較すると、(b)ではほぼ等しいが、(c)ではa2の方がやや大きくなっている。

以上から、せん断剛性はa2に比べa3、a4でやや大きくなる傾向があるものの、a1とa2の関係については一貫した傾向が見出せない。

ii) 充填物の種類とせん断剛性

すべてのき裂についてせん断剛性 K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} と充填物の種類の関係を示したものが図3.4.9(a)～(c)である。 K_{s1} の平均値から判断すると、A～Cに比べDのせん断剛性が大きくなっていることがわかる。

充填物の幅および変質の程度が同一であるグループ内の、せん断剛性と充填物の種類の関係を示したものが図3.4.10(a)～(d)である。図3.4.10(a)では、図3.4.9(a)に示した平均値の傾向と同様にDの K_{s1} はCより大きくなっている。また、図3.4.10(b)～(d)より、A,B,Cについては一貫した傾向が得られない。

以上から、せん断剛性 K_{s1} を優先して考えると、A～Cの K_{s1} よりもDの K_{s1} はやや大きくなる傾向が見出された。

iii) 変質の程度とせん断剛性

すべてのき裂についてせん断剛性 K_{s1} 、 K_{s2} 、 K_{s3} と変質の程度を示したものが図3.4.9(a)～(c)である。 K_{s1} の平均値から判断すると、VWがFSとWKに比べやや大きくなっていることがわかる。これは変質の程度が大きいほどせ

せん断剛性は低下するという予想と矛盾する。

充填物の幅および種類が同一であるグループ内の、せん断剛性と変質の程度を示したものが図3.4.11(a)～(e)である。これら5つの図では、変質の程度が大きくなると、せん断剛性が低下するものと増大する両方の傾向が認められる。したがって、変質の程度とせん断剛性には一貫した傾向が認められない。

以上、せん断剛性 K_{s1} を優先して、き裂分類の指標との関係を検討した。その結果、充填物の幅について、a2の K_{s1} よりa3,a4の K_{s1} がやや大きいこと、および充填物の種類について、Dが他より大きくなる傾向があった。しかし、充填物の幅と K_{s1} 、および充填物の種類と K_{s1} の関係はいずれも全体的に一貫性がなく、傾向が不明瞭である。したがって、現状では解析の入力値として K_{s1} の平均値を用いることが適切と考えられる。

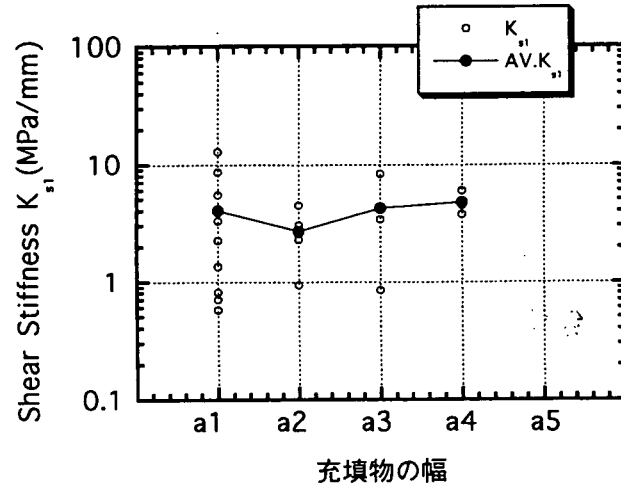


図3.4.7 (a) 充填物の幅とせん断剛性 K_{s1} の関係

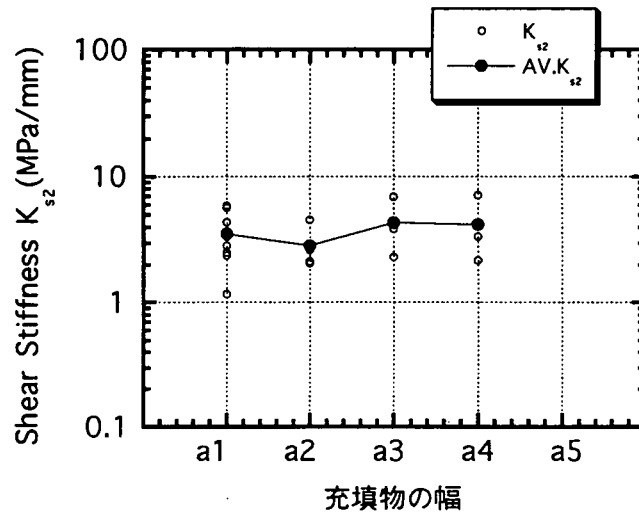


図3.4.7 (b) 充填物の幅とせん断剛性 K_{s2} の関係

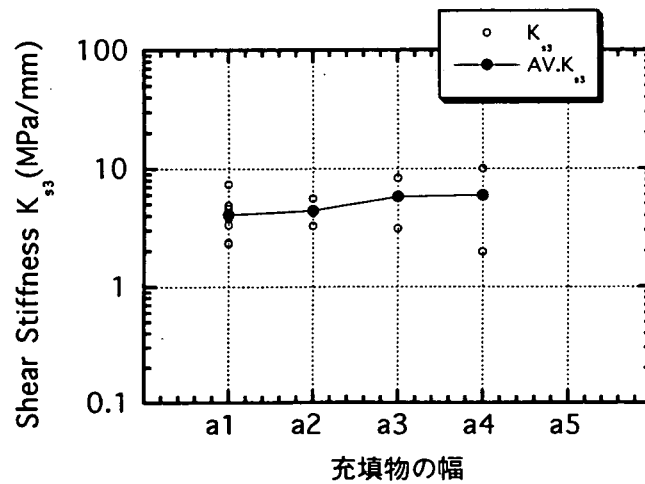


図3.4.7 (c) 充填物の幅とせん断剛性 K_{s3} の関係

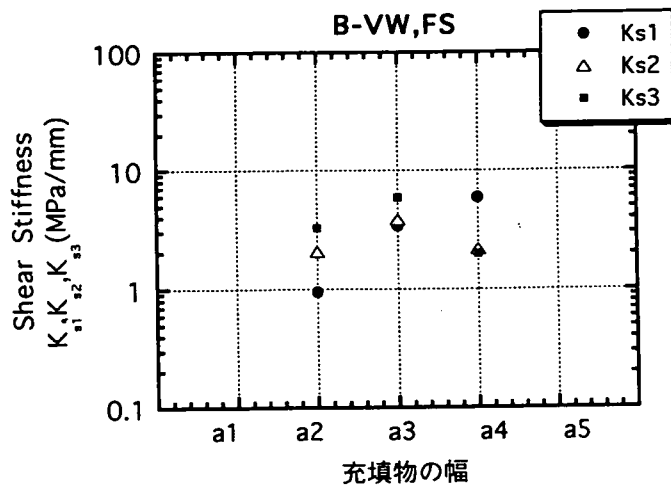


図3.4.8 (a) 充填物の幅とせん断剛性 K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} の関係 (B-VW,FS)

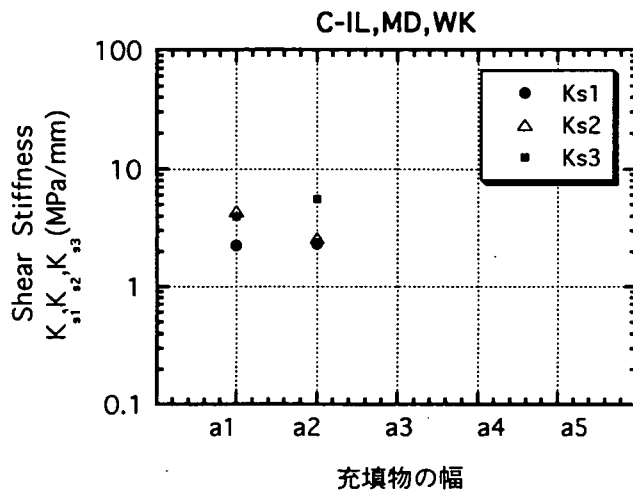


図3.4.8 (b) 充填物の幅とせん断剛性 K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} の関係 (C-IL,MD,WK)

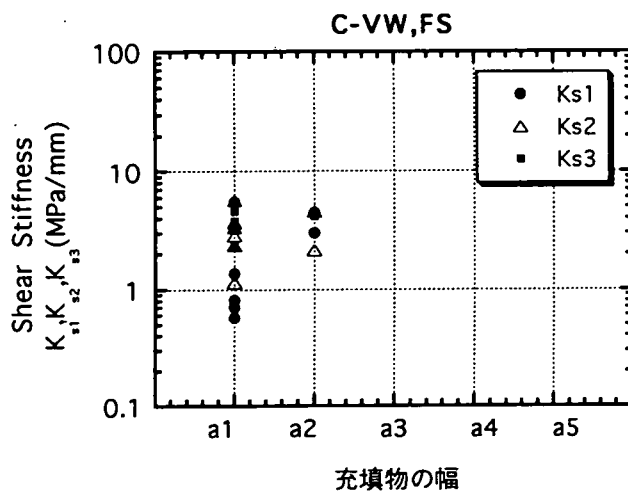


図3.4.8 (c) 充填物の幅とせん断剛性 K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} の関係 (C-VW,FS)

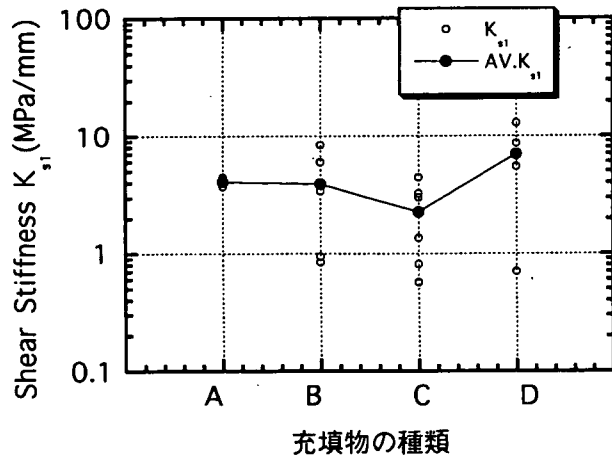


図3.4.9 (a) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s1} の関係

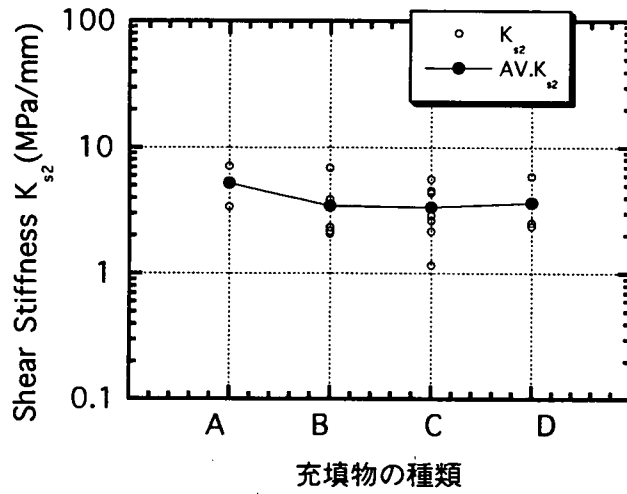


図3.4.9 (b) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s2} の関係

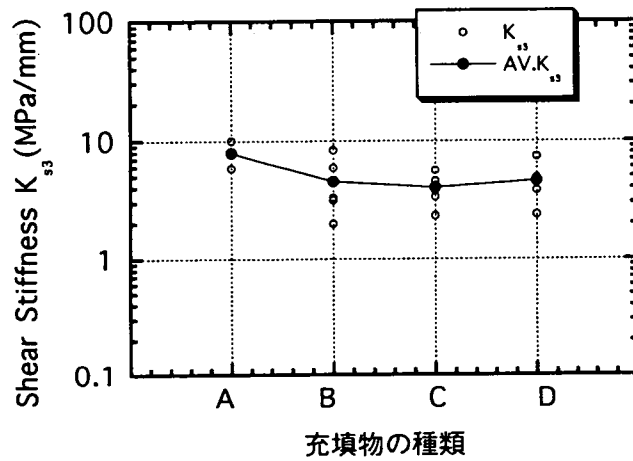


図3.4.9 (c) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s3} の関係

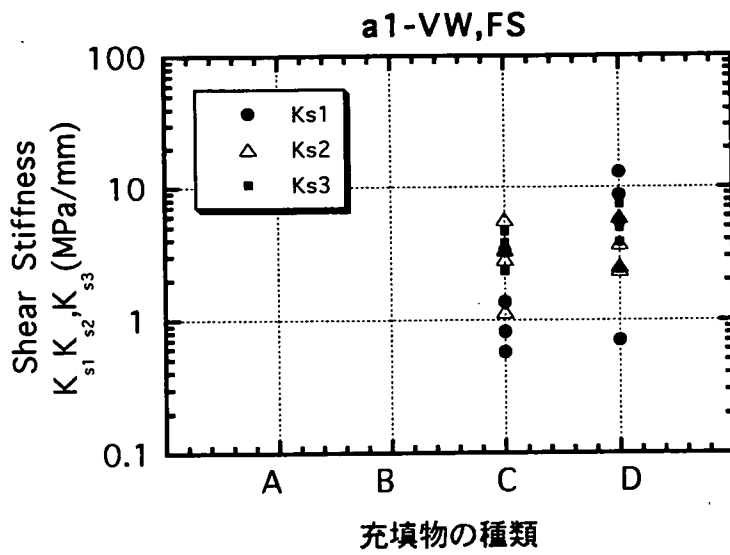


図3.4.10 (a) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a1-VW,FS)

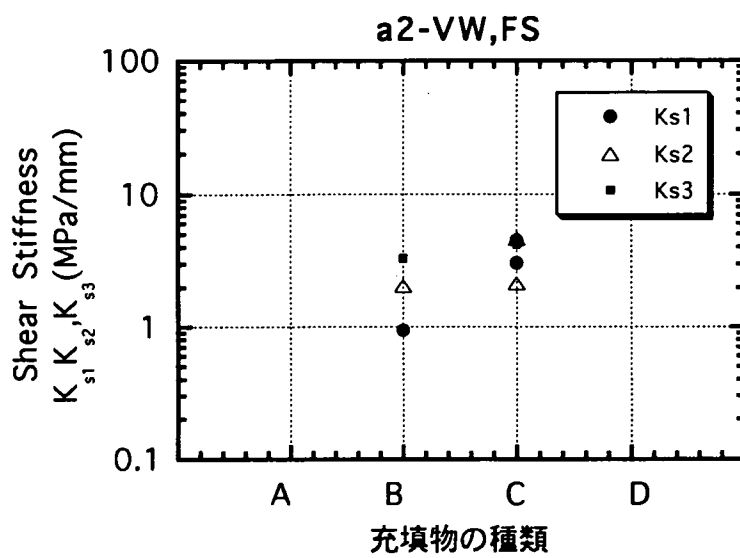


図3.4.10 (b) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a2-VW,FS)

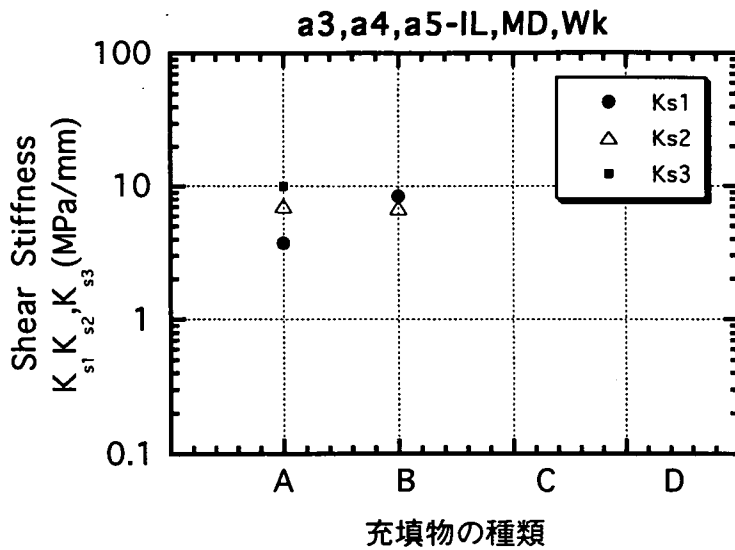


図3.4.10 (c) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a3,a4, a5-IL, MD, WK)

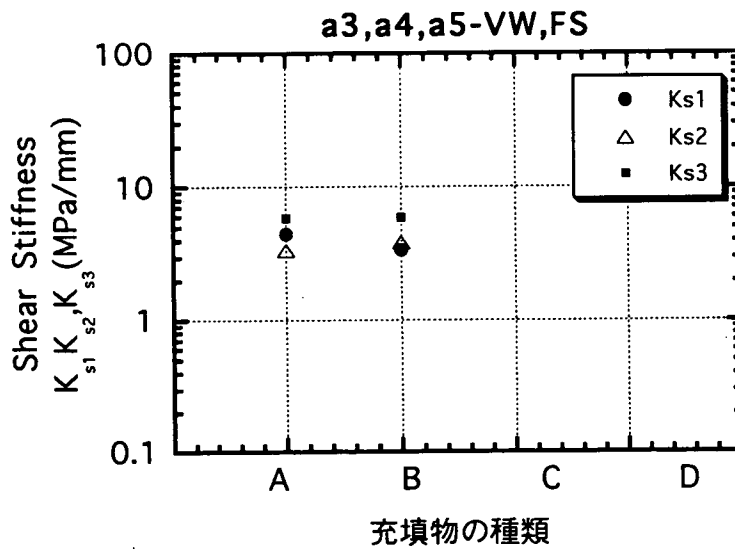


図3.4.10 (d) 充填物の種類とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a3,a4, a5-VW, FS)

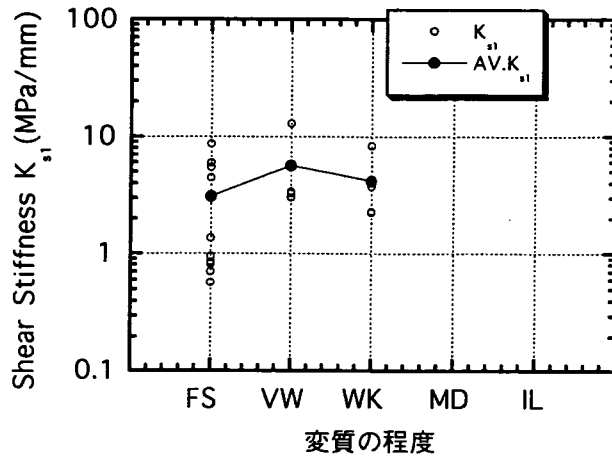


図3.4.11 (a) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1} の関係

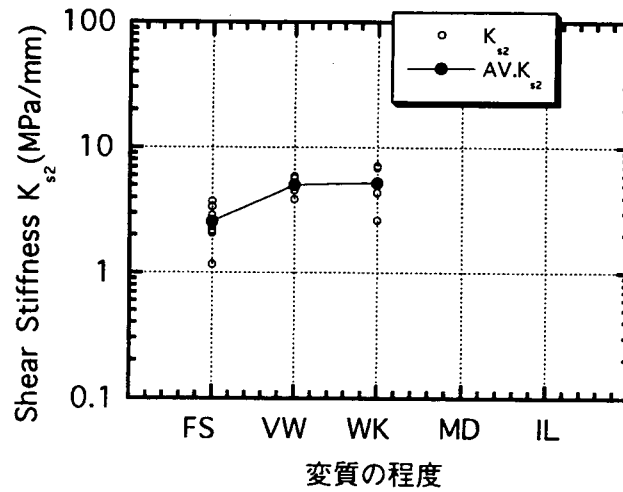


図3.4.11 (b) 変質の程度とせん断剛性 K_{s2} の関係

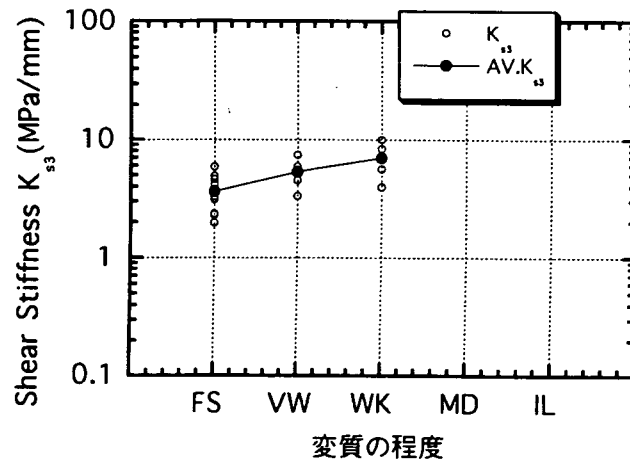


図3.4.11 (c) 変質の程度とせん断剛性 K_{s3} の関係

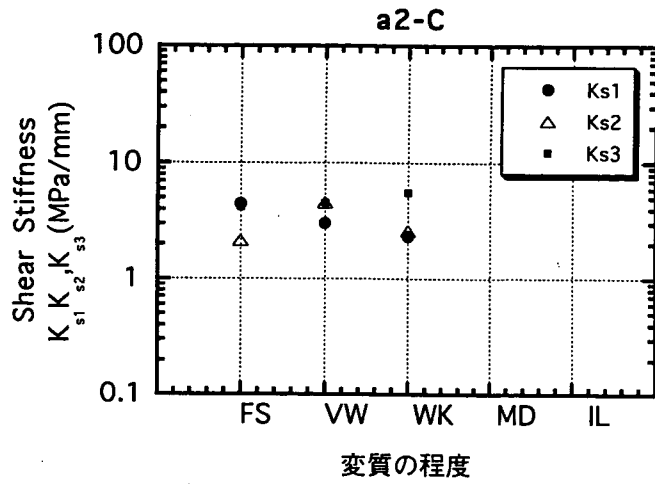


図3.4.12 (a) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} の関係 (a1-C)

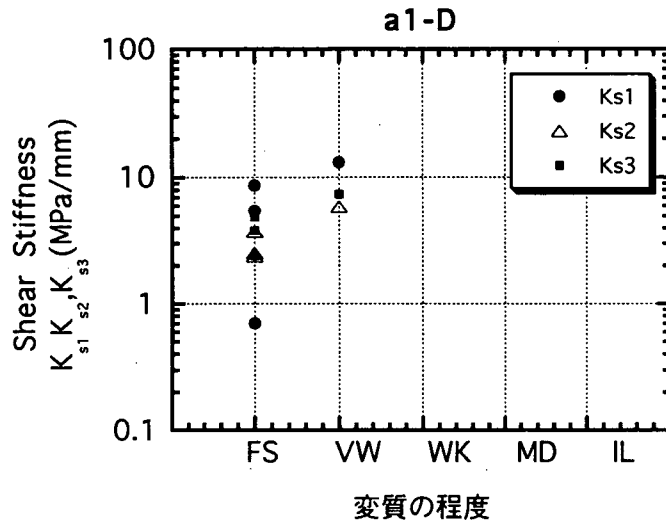


図3.4.12 (b) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} の関係 (a1-D)

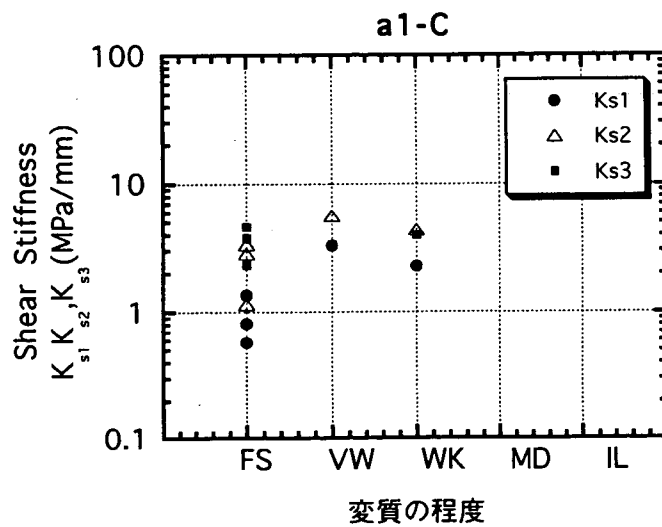


図3.4.12 (c) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} の関係 (a2-C)

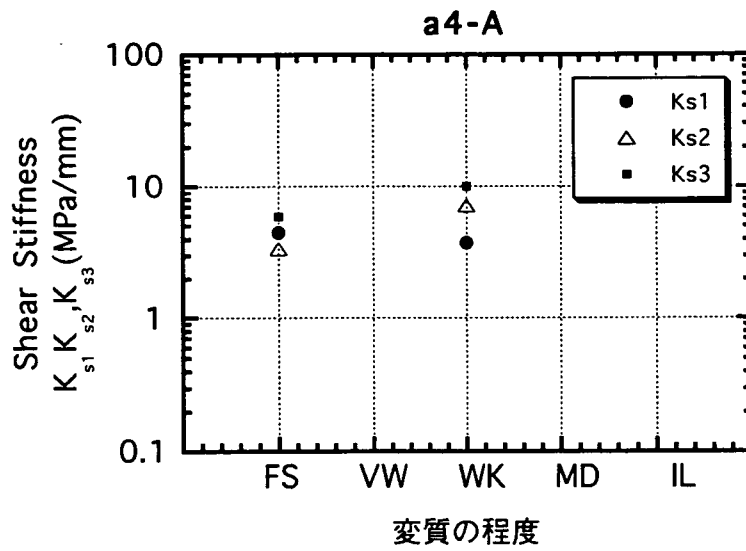


図3.4.12 (d) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a4-A)

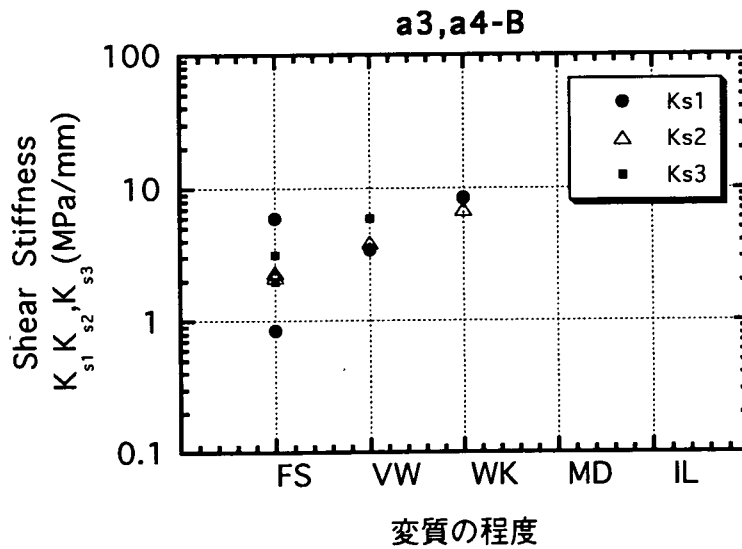


図3.4.12 (e) 変質の程度とせん断剛性 K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} の関係 (a3, a4-B)

3.4.2 き裂分類の指標と強度特性

き裂の室内試験から強度特性として、ピーク摩擦角 ϕ_j 、粘着力 c_j 、および残留摩擦角 ϕ_r が得られている。以下では、これらの強度特性とき裂分類の指標の関係について検討する。

(1) ピーク摩擦角 ϕ_j

i) 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j

すべてのき裂のピーク摩擦角と充填物の幅の関係を図3.4.13に示す。この図から、各充填物の幅ごとの ϕ_j にばらつきが認められ、最大で約25° の差がある。平均値から判断すると、 ϕ_j は a_2 が a_1 よりやや大きく、 a_3 、 a_4 へと低下している。

充填物の種類および変質の程度が同じグループについて、 ϕ_j と充填物の幅の関係を示したものが図3.4.14(a)~(c)である。図3.4.14(a)では、 a_2 に比べ a_3 、 a_4 の ϕ_j がやや小さくなる傾向が認められる。しかし、その差は図3.4.13におけるデータのばらつきに比べると小さい。また、図3.4.14(b)および(c)では、 a_1 と a_2 における ϕ_j の大小関係が逆である。以上から判断すると、充填物の幅が a_2 (0.5mm) より大きい範囲では、幅の増大とともに ϕ_j は低下する傾向が認められる。

ii) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j

すべてのき裂のピーク摩擦角と充填物の種類の関係を図3.4.15に示す。この図から、各充填物の種類ごとの ϕ_j にばらつきが認められ、最大で約30° の差がある。平均値から判断すると、B,C,Dにおける ϕ_j はほぼ一定とみなすことができ、AにおいてはB,C,Dに比べて小さくなる傾向が認められる。

充填物の幅および変質の程度が同じグループについて、 ϕ_j と充填物の種類の関係を示したものが図3.4.16(a)~(d)である。図3.4.16(a)~(d)の傾向は、図3.4.15における平均値の傾向と同様であることがわかる。したがって、B,C,Dのき裂の ϕ_j はほぼ一定で、Aのき裂はやや小さくなる傾向が見出された。

iii) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j

すべてのき裂のピーク摩擦角と変質の程度を関係を図3.4.17に示す。この図から、FSのき裂の ϕ_j はばらつきが大きいことがわかる。平均値から判断すると、変質の程度による ϕ_j の変化は小さいことがわかる。

充填物の幅および種類が同じグループについて、 ϕ_j と変質の程度を関係を示したものが図3.4.18(a)~(e)である。図3.4.18(a)~(d)から、それぞれの傾向が矛盾することがわかる。したがって、今回のデータから、ピーク摩擦角と変質の程度の関係については、一定の傾向が得られない。

以上、き裂分類の指標とピーク摩擦角 ϕ_j の関係を検討した。その結果、充填物の幅が a2 (0.5mm) より大きい範囲で、幅の増大とともに ϕ_j が低下する傾向が認められた。また、充填物の種類が B, C, D のき裂の ϕ_j は平均的にほぼ一定とみなすことができ、B, C, D に比べ A のき裂の ϕ_j は小さいという傾向が認められた。そこで、充填物の幅、種類、 ϕ_j の関係を示すとそれぞれ図 3.4.19(a)、(b) のようになる。図 3.4.19(a) では、充填物の幅とピーク摩擦角の関係のうち充填物の種類が同じものを点線および実線で結んでいる。このように充填物の種類を考慮しても a1 より a2 のほうがピーク摩擦角が大きく、さらに a3, a4 では a2 のピーク摩擦角より小さくなる傾向は図 3.4.13 と同様である。ただし、この傾向は、充填物の幅の増大により強度が低下するということには矛盾している。

一方、図 3.4.19(b) においては、充填物の種類が A のピーク摩擦角は B, C, D より小さく、それに比べ B, C, D のピーク摩擦角の差は小さいという傾向が認められる。これは、図 3.4.15 の傾向に対応している。

この結果、現状では充填物の種類により平均的な ϕ_j を定めることが適切と考えられる。

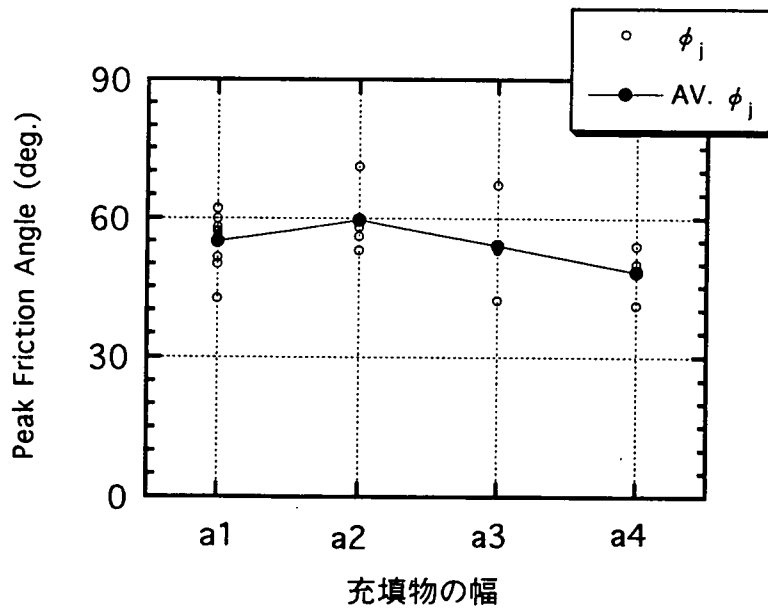


図 3.4.13 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j

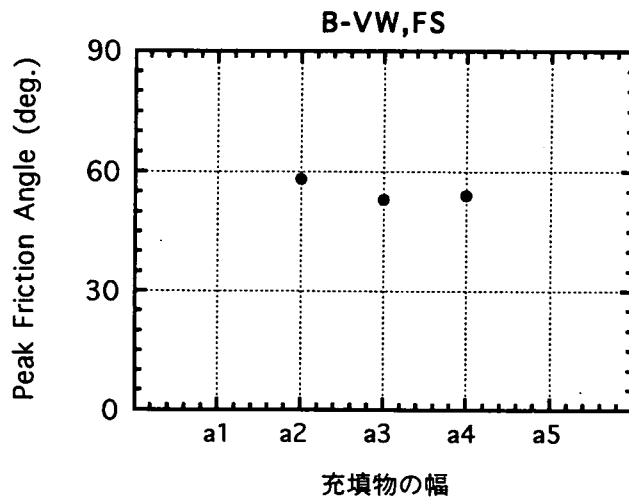


図3.4.14 (a) 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j (B-VW,FS)

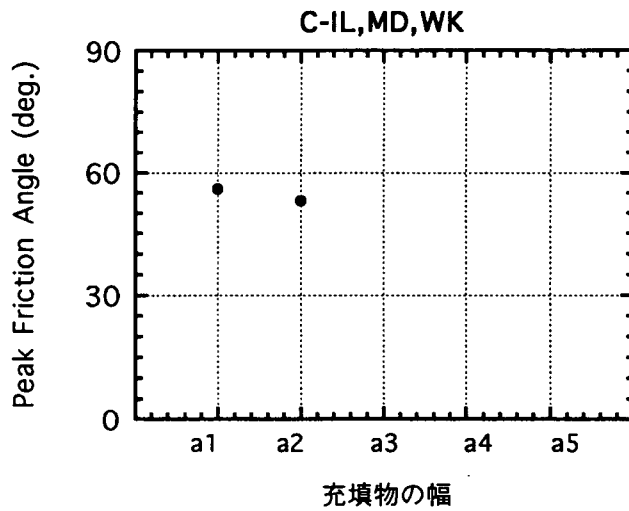


図3.4.14 (b) 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j (C-IL,MD,WK)

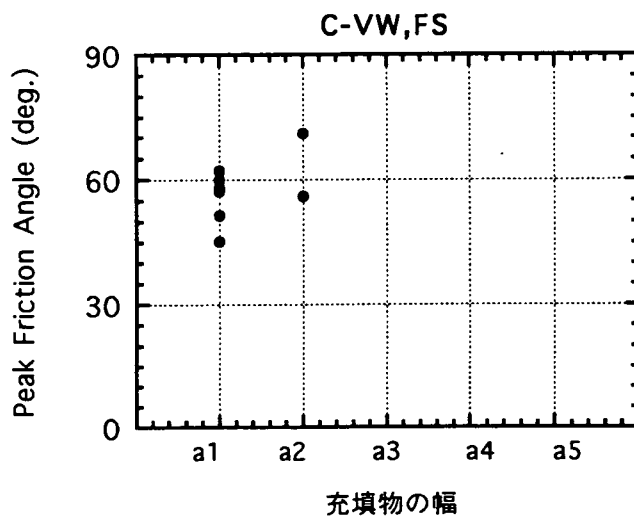


図3.4.14 (c) 充填物の幅とピーク摩擦角 ϕ_j (C-VW,FS)

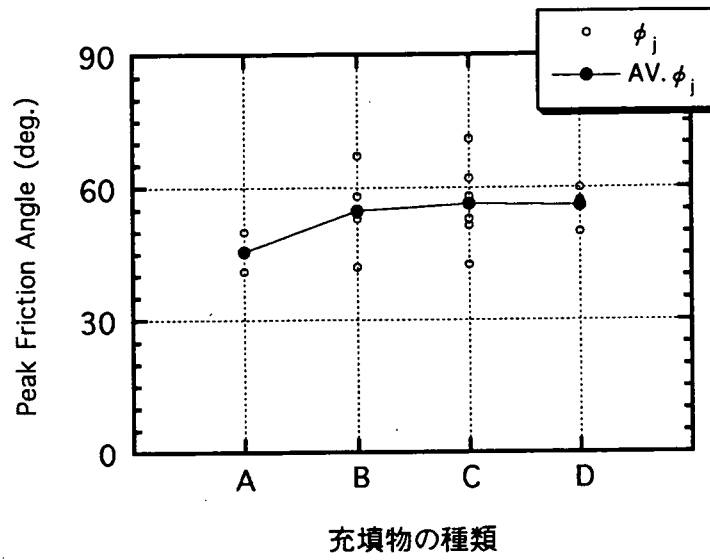


図3.4.15 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j

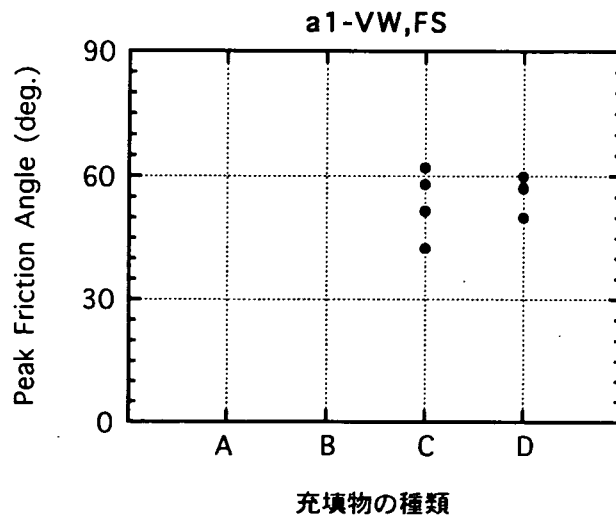


図3.4.16 (a) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a1-VW,FS)

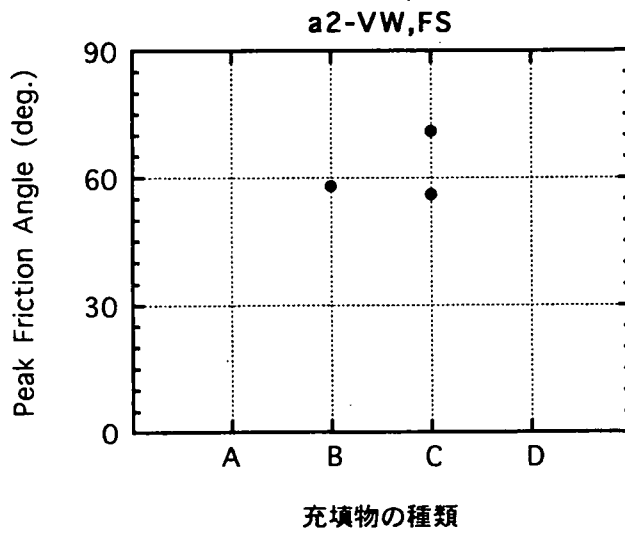


図3.4.16 (b) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a2-VW,FS)

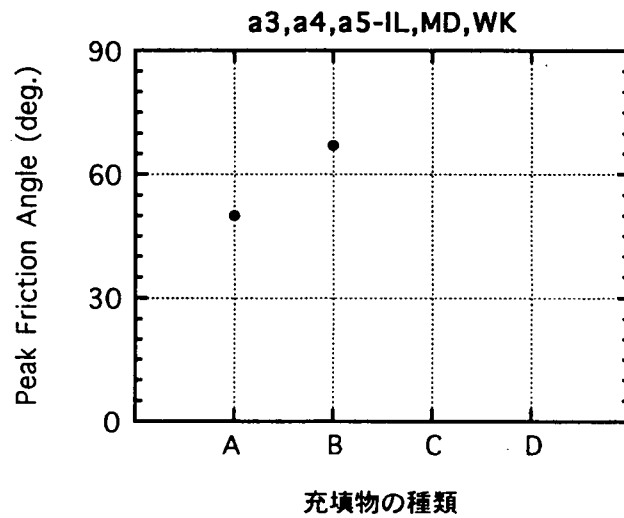


図3.4.16 (c) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a3,a4,a5-IL,MD,WK)

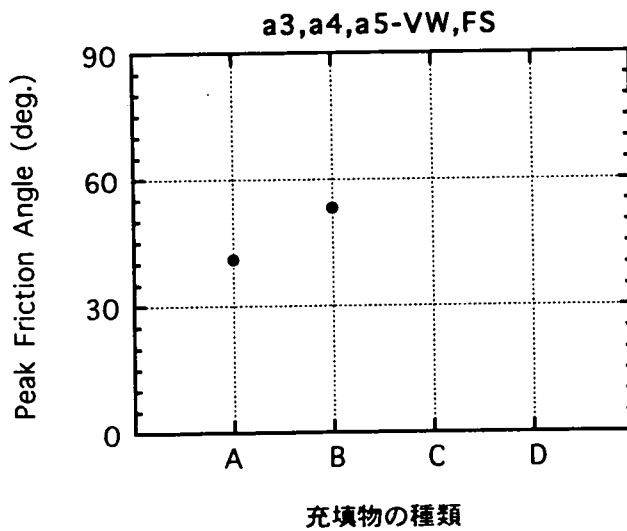


図3.4.16 (d) 充填物の種類とピーク摩擦角 ϕ_j (a3,a4,a5-VW,FS)

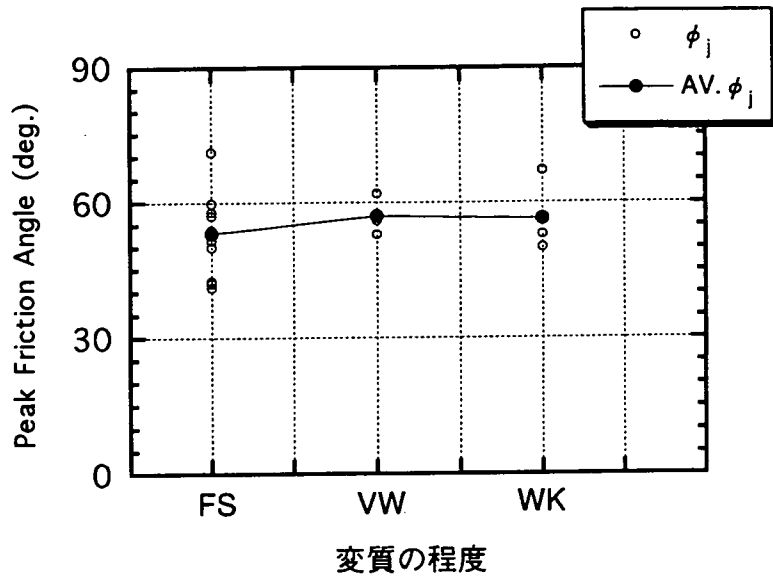


図3.4.17 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j

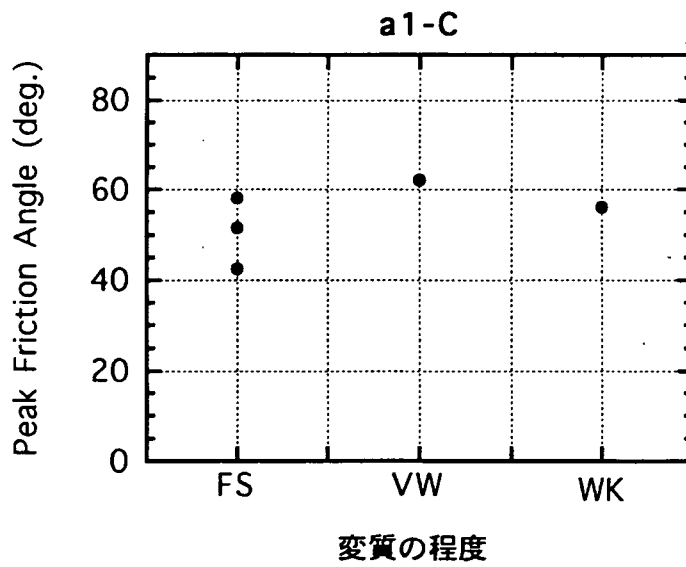


図3.4.18 (a) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a1-C)

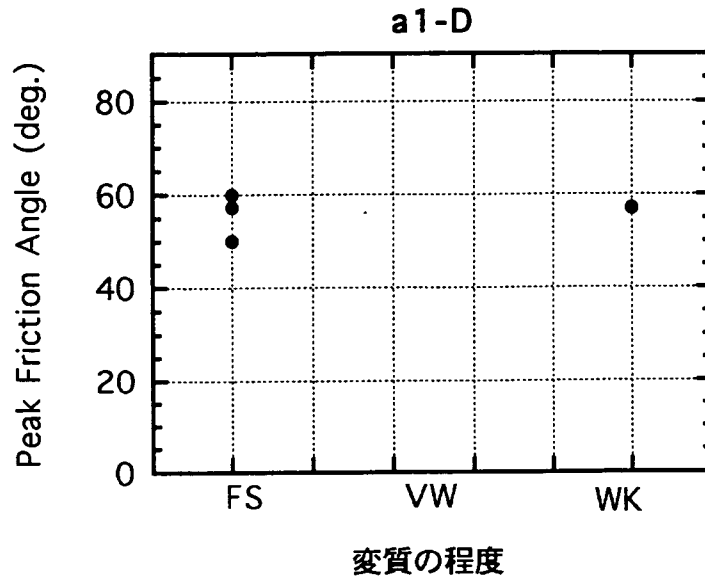


図3.4.18 (b) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a1-D)

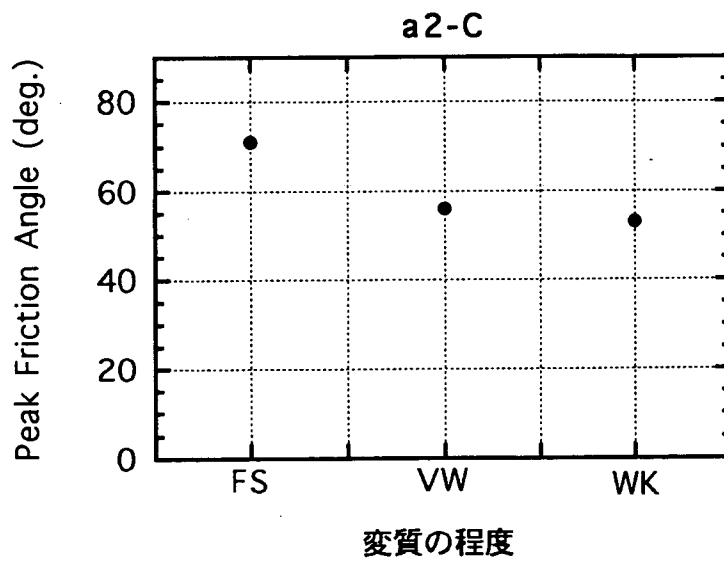


図3.4.18 (c) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a2-C)

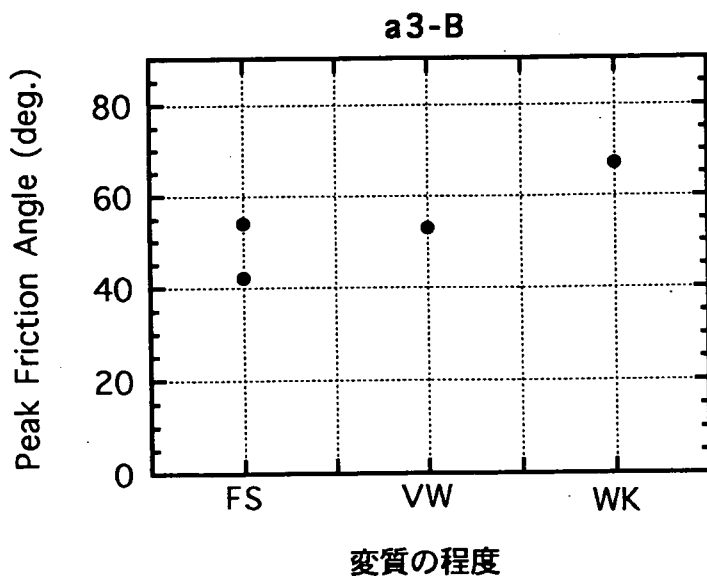


図3.4.18 (d) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a3-B)

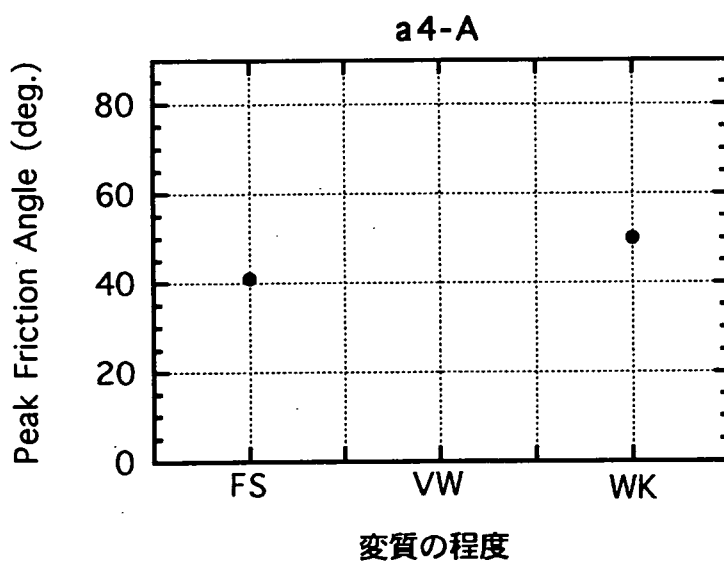


図3.4.18 (e) 変質の程度とピーク摩擦角 ϕ_j (a4-A)

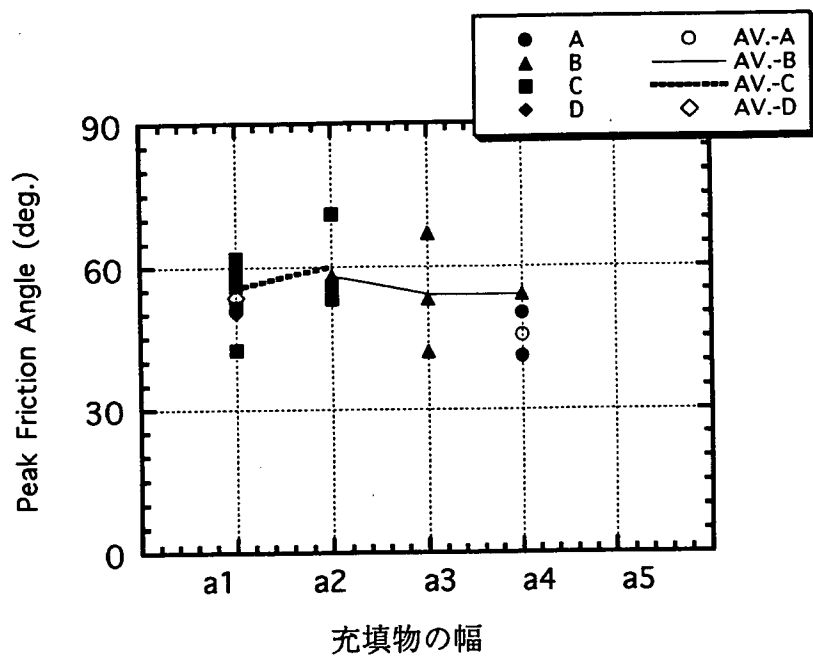


図3.4.19 (a) 充填物の幅、種類とピーク摩擦角 ϕ_j の関係

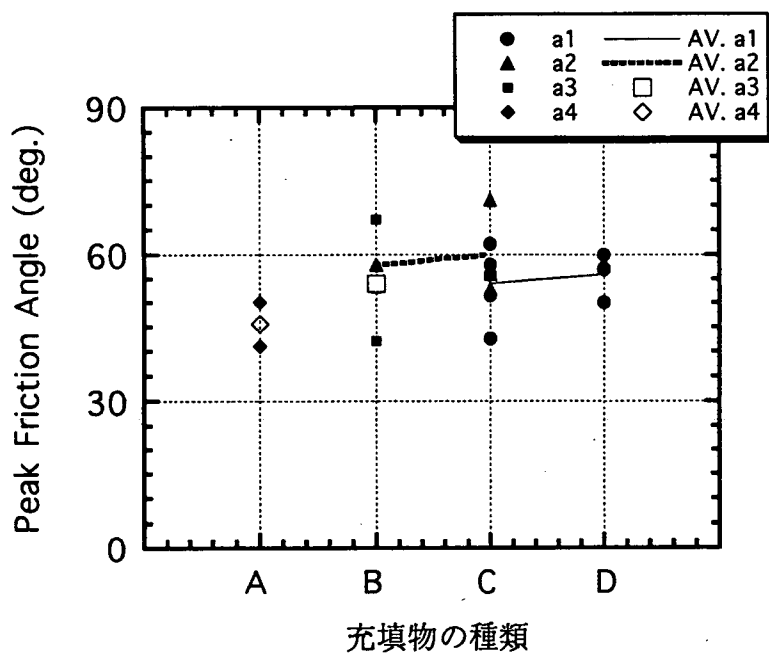


図3.4.19 (b) 充填物の種類、幅とピーク摩擦角 ϕ_j の関係

(2) 粘着力 c_j

粘着力 c_j と各分類指標の関係を図3.4.20 (a)～(c)に示す。これらより、 c_j についてもデータがばらつくことがわかる。しかしながら、 c_j は、3.3.4節の図3.3.21に示したようにピーク摩擦角 ϕ_j と対になって求められる。したがって、 c_j と ϕ_j は同じ指標に基づいて分類する必要があるため、 ϕ_j と同様に充填物の種類にしたがって定めることとする。

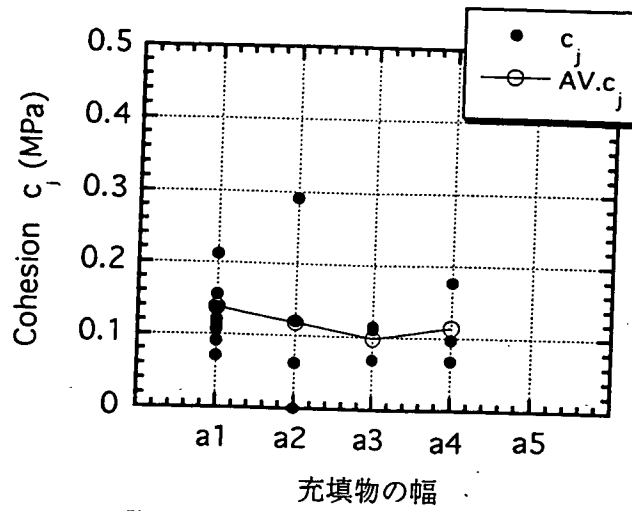


図3.3.20 (a) 粘着力 c_j と充填物の幅の関係

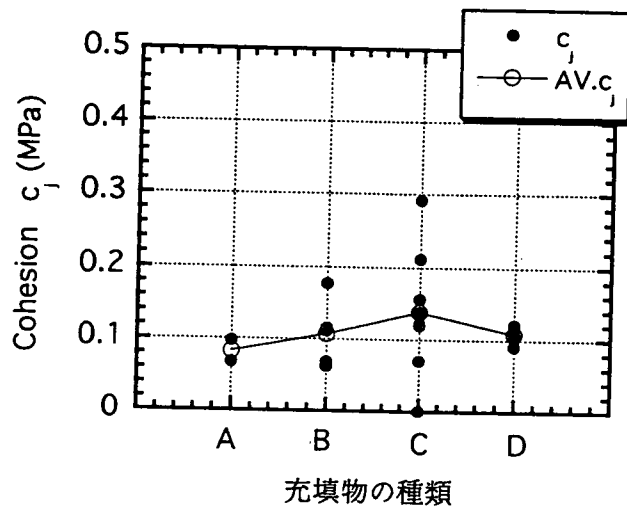


図3.3.20 (b) 粘着力 c_j と充填物の種類の関係

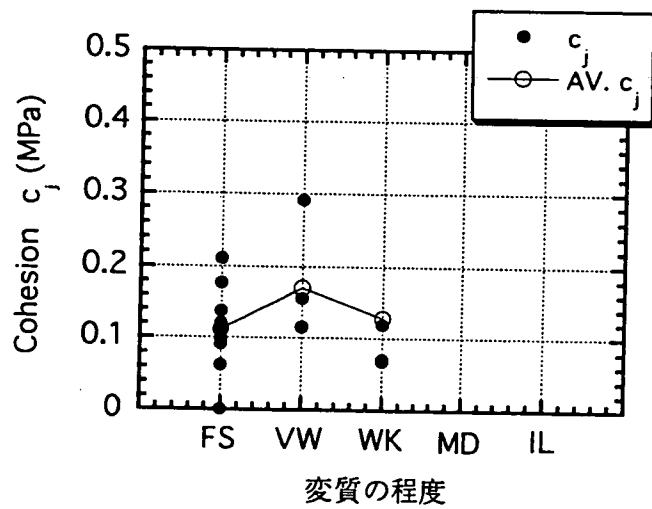


図3.3.20 (c) 粘着力 c_j と変質の程度の関係

(3) 残留摩擦角 ϕ_r

i) 充填物の幅と残留摩擦角

すべてのき裂について、充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係を示したものが図3.4.21である。図3.4.21では、データに多少のばらつきがあるが、平均的には充填物の幅の変化に伴う ϕ_r の変化は小さいことがわかる。この傾向は、神岡鉱山の結果⁵⁾と同様である。

充填物の種類と、変質の程度が同一のグループについて、充填物の幅と ϕ_r の関係を示したものが図3.4.22 (a)~(c)である。図3.4.22 (b)ではa1とa2の ϕ_r に約25°の差があり、図3.4.21の平均的な傾向と異なる。一方、図3.4.22 (a)、(c)では ϕ_r の差が小さくなっており、図3.4.21の平均的な傾向と同様である。この結果、充填物の種類と、変質の程度が同一のグループにおける ϕ_r と充填物の幅の関係は一貫した傾向が得られないが、平均的に見ると ϕ_r は充填物の幅によらずほぼ一定とみなせる。

ii) 充填物の種類と残留摩擦角

すべてのき裂について、充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係を示したものが図3.4.23である。図3.4.23の平均値から、BおよびCでは ϕ_r がほぼ等しいことがわかる。一方、Aにおける ϕ_r はB、Cに比べてやや小さく、Dではやや大きくなっている。

充填物の幅と、変質の程度が同一のグループについて、充填物の種類と ϕ_r の関係を示したものが図3.4.24(a)~(d)である。図3.4.24(a)~(d)から、図3.4.23に示した平均値と同様の傾向が得られる。したがって、充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係については、平均的にはBおよびCでは ϕ_r がほぼ等しく、かつAにおける ϕ_r はB、Cに比べてやや小さく、Dではやや大きくなるという傾向が得られた。

iii) 変質の程度と残留摩擦角

すべてのき裂について、変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係を示したものが図3.4.25である。図3.4.25では、特にFSにおけるばらつきが大きい。平均的には全体の差が小さいことがわかる。

充填物の幅と種類が同一のグループについて、変質の程度と ϕ_r の関係を示したものが図3.4.26(a)~(e)である。図3.4.26(a)~(e)を比較すると、互いの傾向に一貫性がないことから、変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係には一貫した傾向は得られない。

以上から、残留摩擦角 ϕ_r は、充填物の種類により分類して決定することが適切と考えられる。

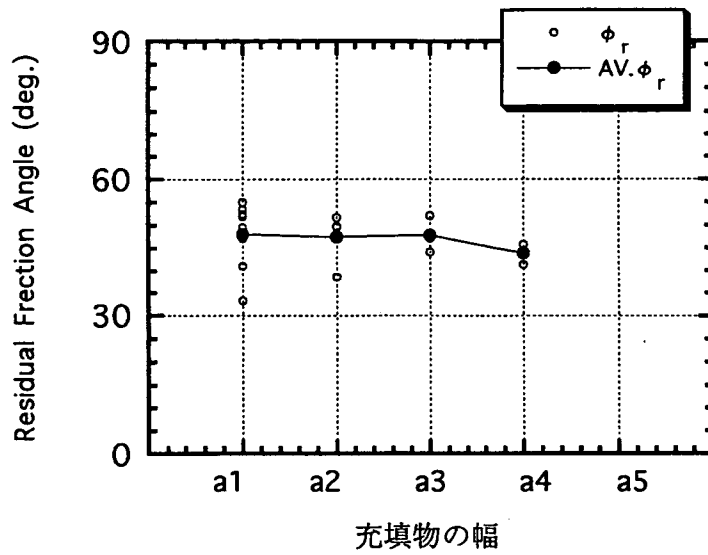


図3.4.21 充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係

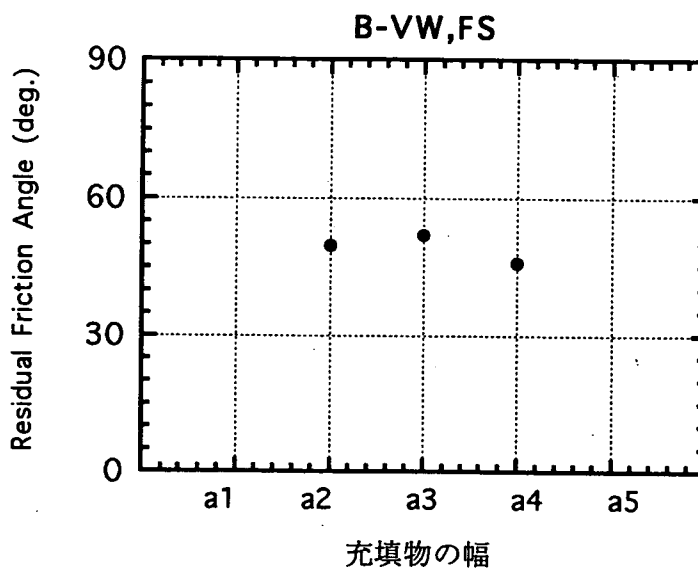


図3.4.22 (a) 充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (B-VW,FS)

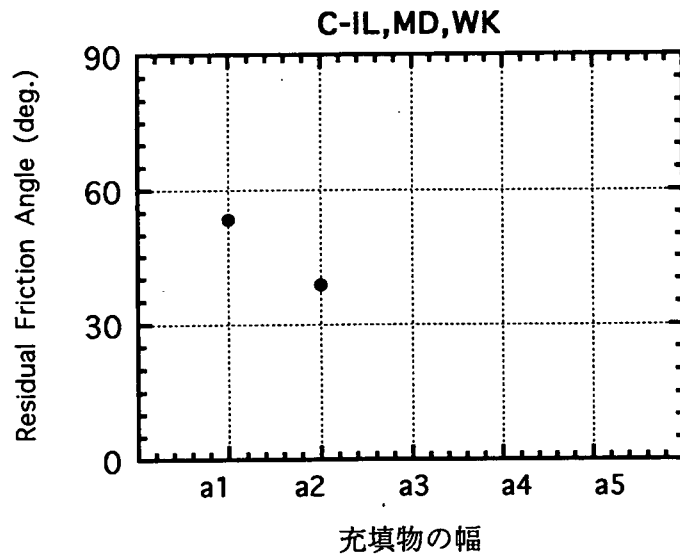


図3.4.22 (b) 充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (C-IL,MD,WK)

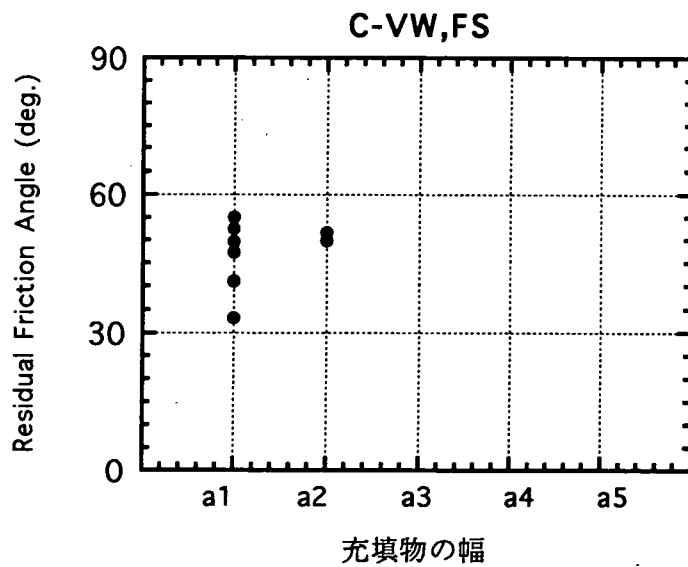


図3.4.22 (c) 充填物の幅と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (C-VW,FS)

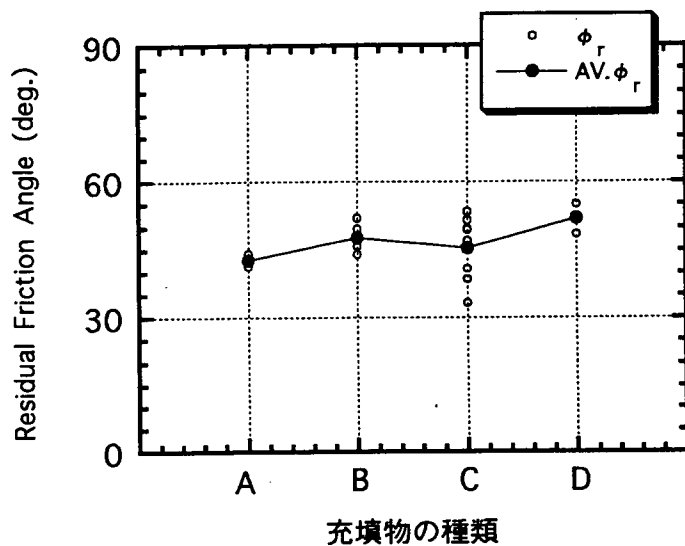


図3.4.23 充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係

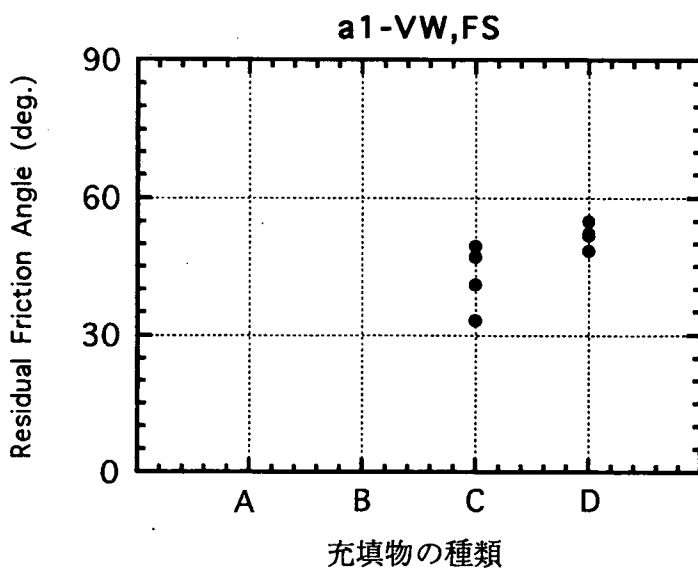


図3.4.24 (a) 充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a1-VW,FS)

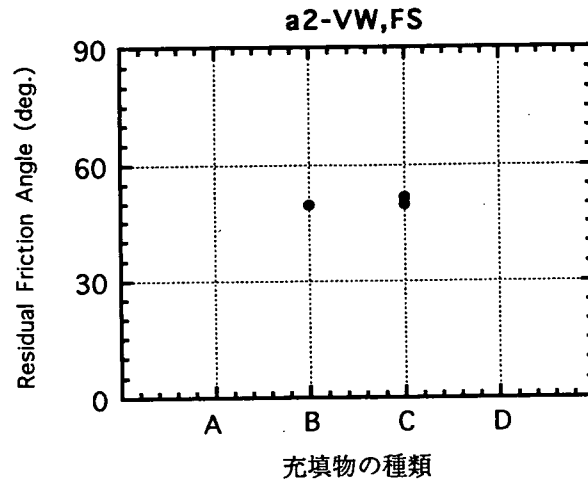


図3.4.24 (b) 充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a2-VW,FS)

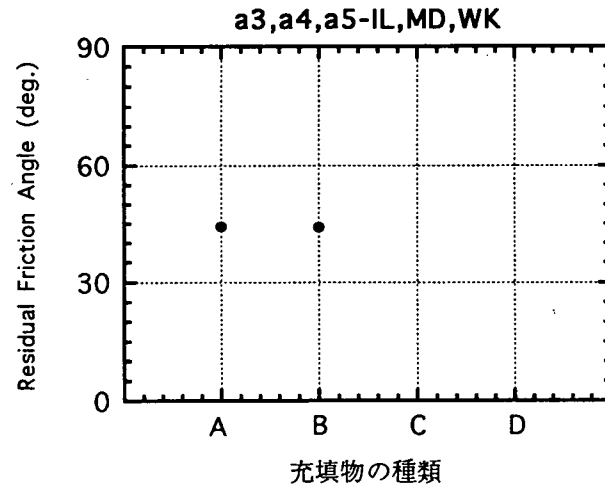


図3.4.24 (c) 充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4,a5 - IL,MD,WK)

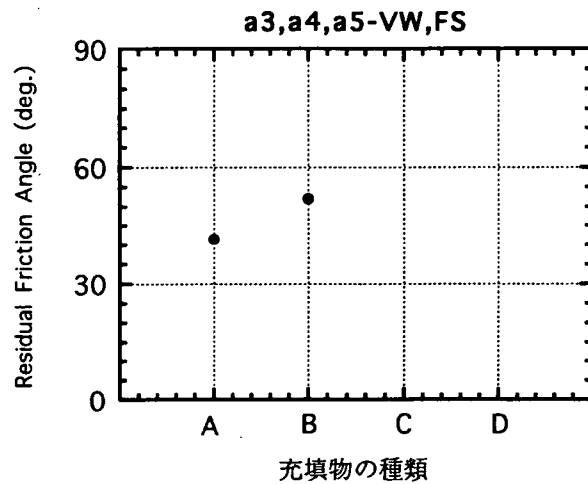


図3.4.24 (d) 充填物の種類と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4,a5 - VW,FS)

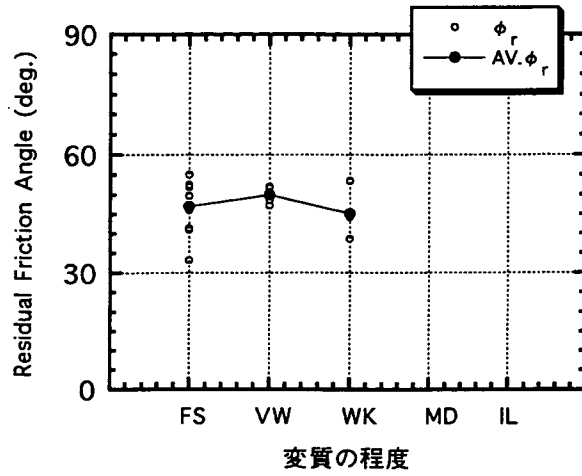


図3.4.25 変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係

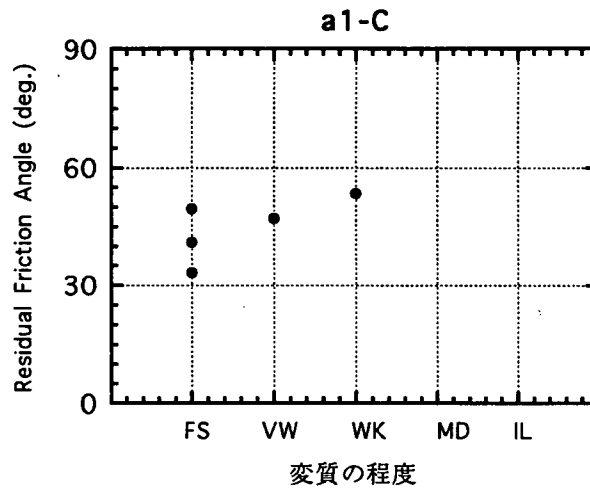


図3.4.26 (a) 変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a1 - C)

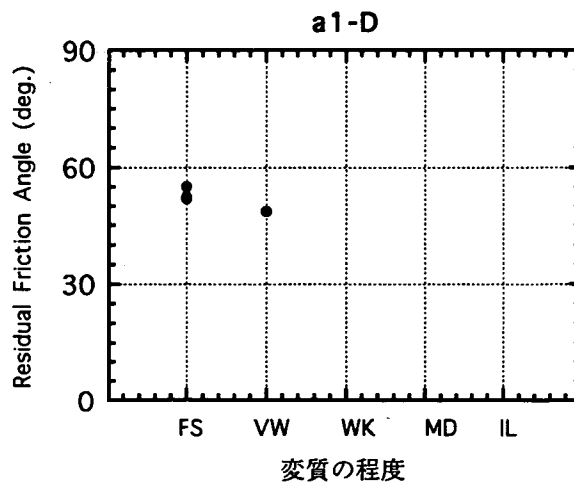


図3.4.26 (b) 変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a1 - D)

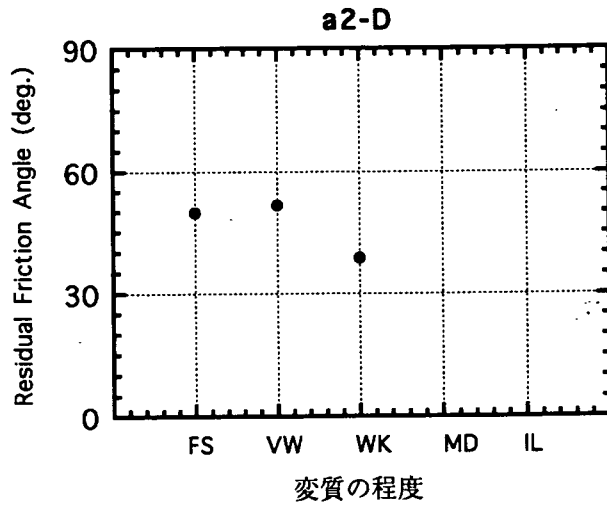


図3.4.26 (c) 変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a2 - D)

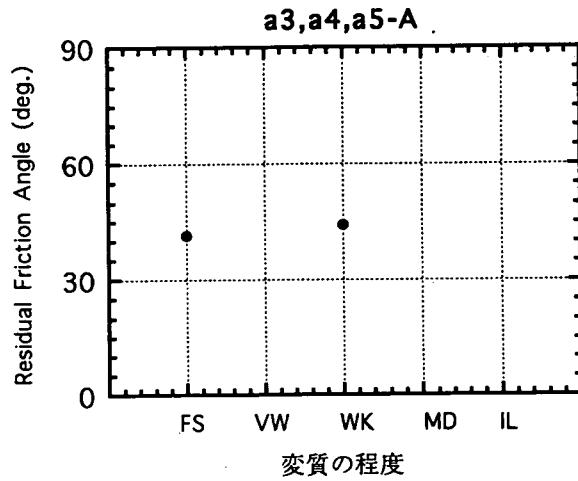


図3.4.26 (d) 変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4,a5 - A)

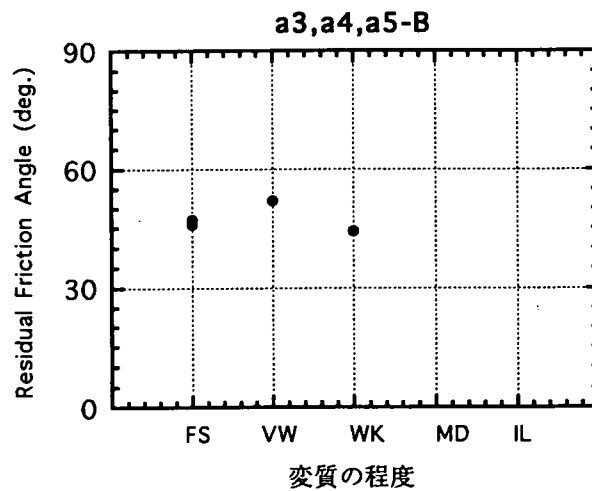


図3.4.26 (e) 変質の程度と残留摩擦角 ϕ_r の関係 (a3,a4,a5 - B)

3.4.3 き裂分類の指標と $JCS_0 \cdot JRC_0$

き裂のせん断試験およびき裂の特性試験より、Barton-Bamdisのジョイントモデルのパラメータである JCS_0 、および JRC_0 が得られている。以下では、これらのパラメータとき裂分類の指標の関係を検討する。

(1) き裂面の圧縮強度 JCS_0

i) 充填物の幅と JCS_0

すべての試料について、充填物の幅と JCS_0 の関係を図3.4.26に示す。充填物の幅ごとの JCS_0 はばらついており、a1では最大値が最小値の約2倍となっている。平均値によると、a1に比べa2、a3の JCS_0 は小さく、a4はさらに小さくなる傾向にある。この傾向は、神岡鉱山の結果⁵⁾ (表3.2.4参照) とはやや異なる。神岡鉱山の結果では、充填物の幅がa3以上のき裂の JCS_0 が、a2の JCS_0 よりも小さくなった。また、充填物の幅がa1とa2の JCS_0 はほぼ一定であった。

充填物の種類と変質の程度が同一であるグループについて、充填物の幅と JCS_0 の関係を示したものが図3.4.27(a)~(c)である。図3.4.27(a)~(c)より、a1~a4の範囲において、 JCS_0 が充填物の幅とともに低下する傾向のあることがわかる。

ii) 充填物の種類と JCS_0

すべての試料について、充填物の種類と JCS_0 の関係を図3.4.28に示す。充填物の種類ごとの JCS_0 はばらついており、Cでは最大値が最小値の約2倍となっている。平均値によると、 JCS_0 は充填物の種類がA,B,C,Dの順に増大することがわかる。

充填物の幅と変質の程度が同一であるグループについて、充填物の種類と JCS_0 の関係を示したものが図3.4.29(a)~(d)である。図3.4.29(a)~(c)では、 JCS_0 は充填物の種類がA,B,C,Dの順に減少しており、図3.4.28の平均値の傾向と矛盾している。このように、充填物の幅と変質の程度が同一であるグループにおいては充填物の種類と JCS_0 の関係については、 JCS_0 は充填物の種類がA,B,C,Dの順に増大する傾向と矛盾する。一方、図3.4.28のように平均的には JCS_0 は充填物の種類がA,B,C,Dの順に増大する傾向が明瞭であり、かつ、この傾向は予想と一致している。

iii) 変質の程度と JCS_0

すべての試料について、変質の程度と JCS_0 の関係を図3.4.30に示す。図3.4.30より、変質の程度がFSにおいて、 JCS_0 のばらつきが非常に大きく、最大値が最小値の約5倍となっている。平均値によると、 JCS_0 は変質の程度がFS,VW,WKの順に低下することがわかる。

充填物の幅と種類が同一であるグループについて、変質の程度と JCS_0 の関係を示したものが図3.4.31(a)~(e)である。これらのうち、図3.4.31(e)以外は図3.4.30の平均値の傾向と一致している。したがって、変質の程度がFS, VW, WKの範囲において、 JCS_0 が低下する傾向が得られた。

ここで、 JCS_0 に対して充填物の幅、充填物の種類、および変質の程度のうち2つの指標を組み合わせて表すと、それぞれ図3.4.32(a)~(c)のようになる。図3.4.32(a)は JCS_0 と充填物の幅・種類との関係を示している。これより、同一の充填物の種類で見ると、a1~a4の範囲では充填物の幅が増大するにつれ JCS_0 が小さくなる傾向が見られるが、a4とa5においては逆になっていることがわかる。図3.4.32(b)は JCS_0 と充填物の幅・変質の程度との関係を示している。この図においては、3者間の相関性は認められない。また、図3.4.32(c)は JCS_0 と充填物の種類・変質の程度との関係を示している。この図では、変質の程度がFSの場合、充填物の種類がA, B, Cの順に JCS_0 が増大する傾向が認められるが、その他については JCS_0 との関係が明確に整理できない。

このように、いずれの指標を組み合わせてた場合も、 JCS_0 と間に矛盾のない傾向が得られない。現状では、図3.4.28示した充填物の種類ごとの平均値の傾向を利用し、解析に入力する JCS_0 を決定することが適切と考えられる。

さらに、き裂の風化の程度を示したBandisら⁴⁾の分類(3.2.3節参照)について検討してみる。Bandisらは、シュミットハンマーを用いて得た一軸圧縮強度 σ_c と、き裂面の JCS_0 の比 σ_c/JCS_0 をき裂面の風化の程度の指標と考えた。今回のデータから、 σ_c/JCS_0 とき裂分類の指標の関係を示したものが図3.4.33(a)~(c)である。このうち、図3.4.33(c)より σ_c/JCS_0 は充填物の種類がA, B, C, Dの順に風化の程度が小さくなっている。Bandisら¹³⁾の分類では、岩石の一軸圧縮強度 σ_c とき裂面の圧縮強度JCSの比の関係を以下のように評価している。

- ・ F~SW (新鮮~やや風化) : $(\sigma_c/JCS) \leq 1.2$
- ・ MW (中程度の風化) : $1.2 < (\sigma_c/JCS) \leq 2$
- ・ W (風化) : $2 < (\sigma_c/JCS)$

この分類によれば、充填物の種類A, B, Cは「風化」、Dは「中程度の風化」と評価される。このことから、き裂が充填物を有することは、風化によりき裂の力学特性が劣化することと同等の影響があることを示唆していると考えられる。

以上の考察を踏まえると、充填物の種類がA, B, C, Dの順にき裂面の圧縮強度 JCS_0 が大きくなる傾向は妥当と考えられる。

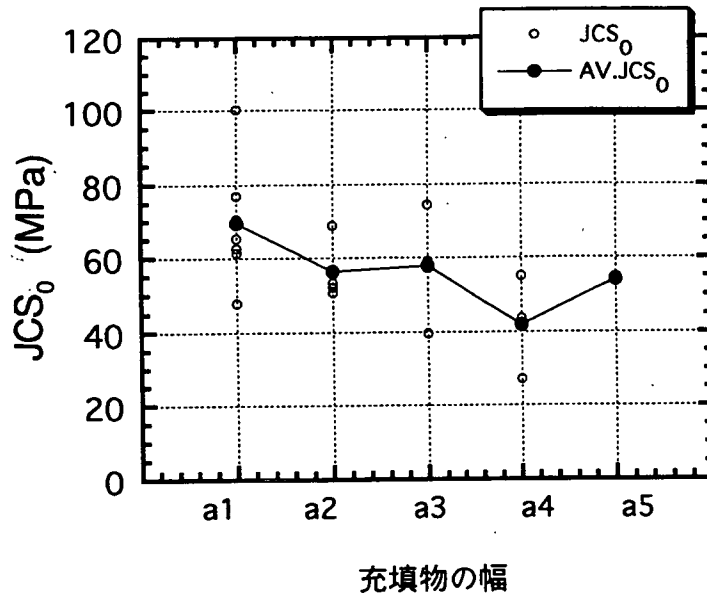


図3.4.27 (a) 充填物の幅と JCS_0 の関係

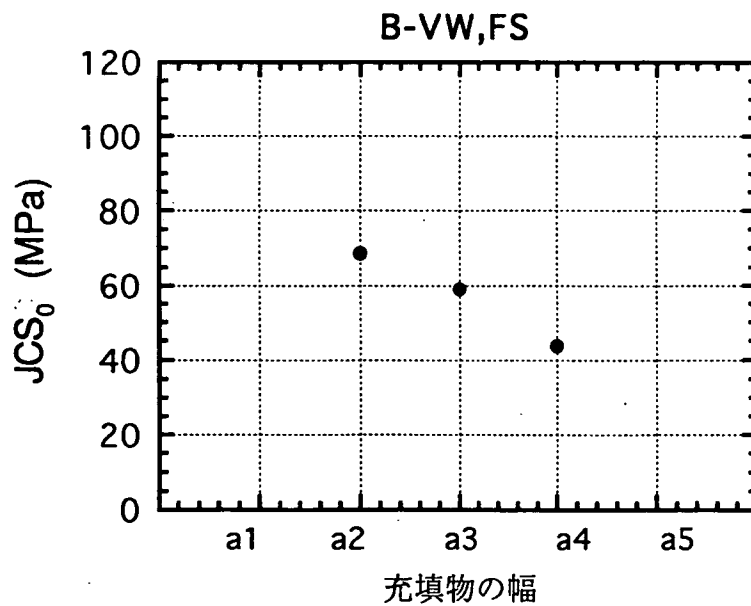


図3.4.27 (b) 充填物の幅と JCS_0 の関係 (B-VW,FS)

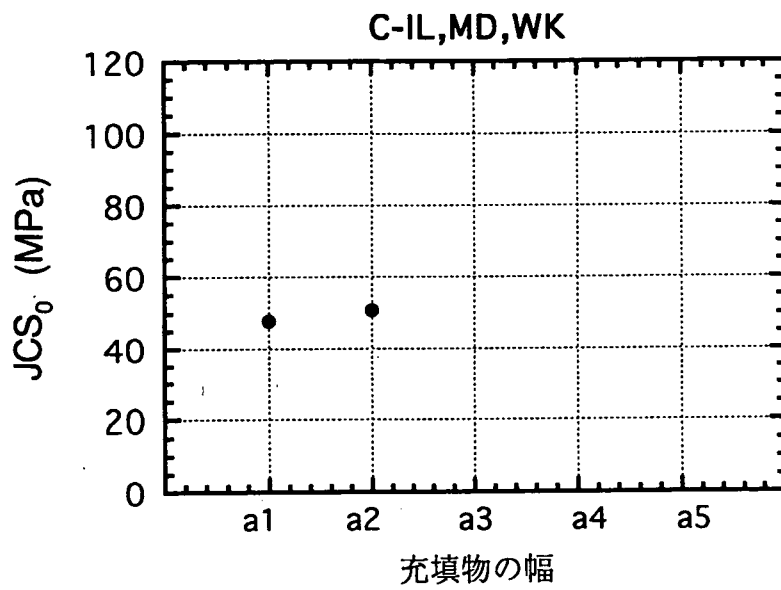


図3.4.27 (c) 充填物の幅と JCS_0 の関係 (C-IL,MD,WK)

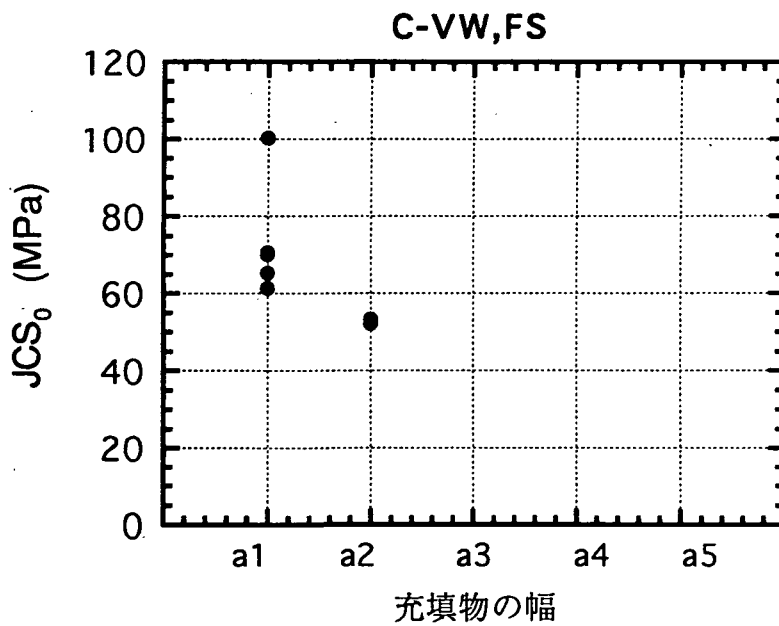


図3.4.27 (d) 充填物の幅と JCS_0 の関係 (C-VW,FS)

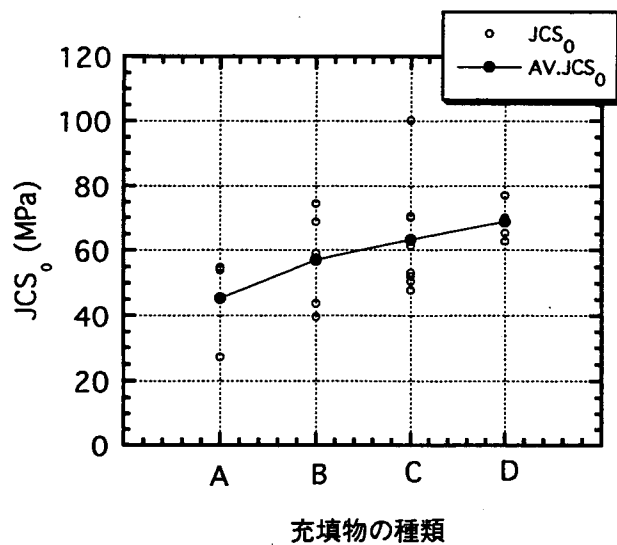


図3.4.28 充填物の種類と JCS_0 の関係

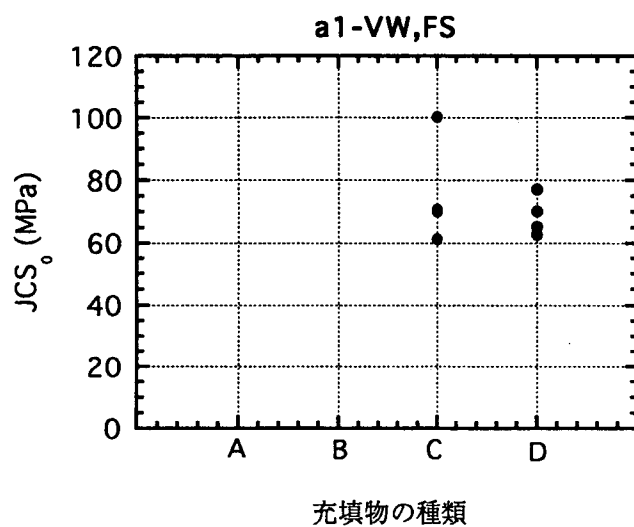


図3.4.29 (a) 充填物の種類と JCS_0 の関係 (a1-VW,FS)

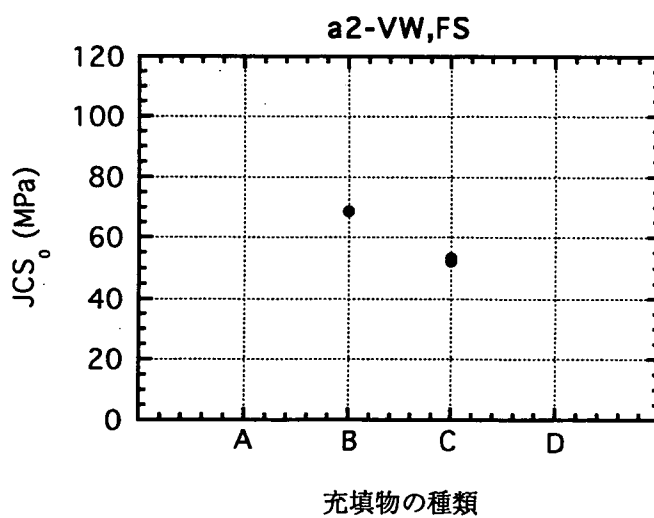


図3.4.29 (b) 充填物の種類と JCS_0 の関係 (a2-VW,FS)

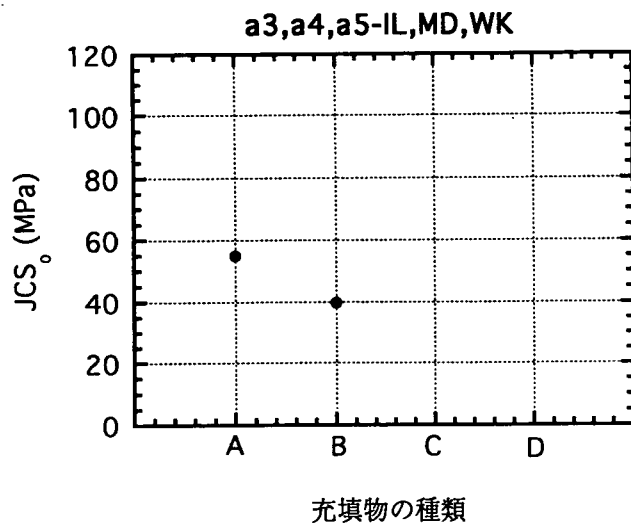


図3.4.29 (c) 充填物の種類と JCS_0 の関係 (a3,a4,a5 - IL,MD,WK)

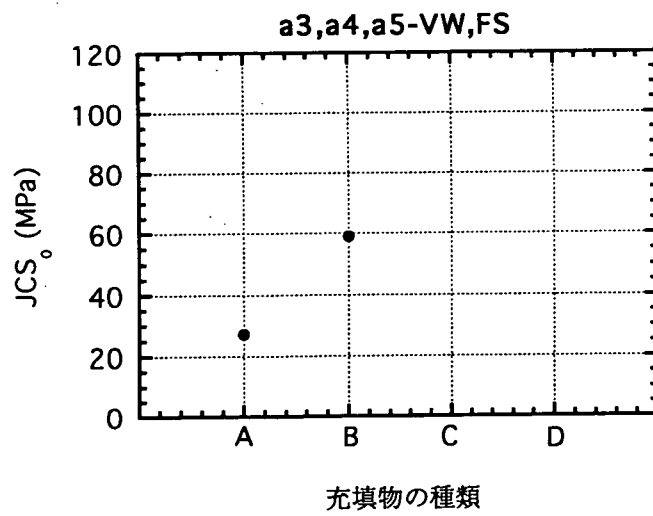


図3.4.29 (d) 充填物の種類と JCS_0 の関係 (a3,a4,a5 - VW,FS)

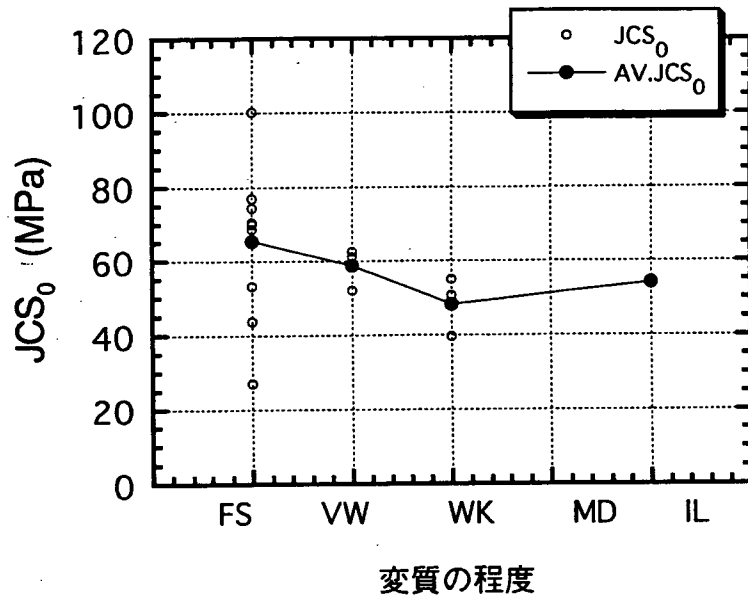


図3.4.30 変質の程度と JCS_0 の関係

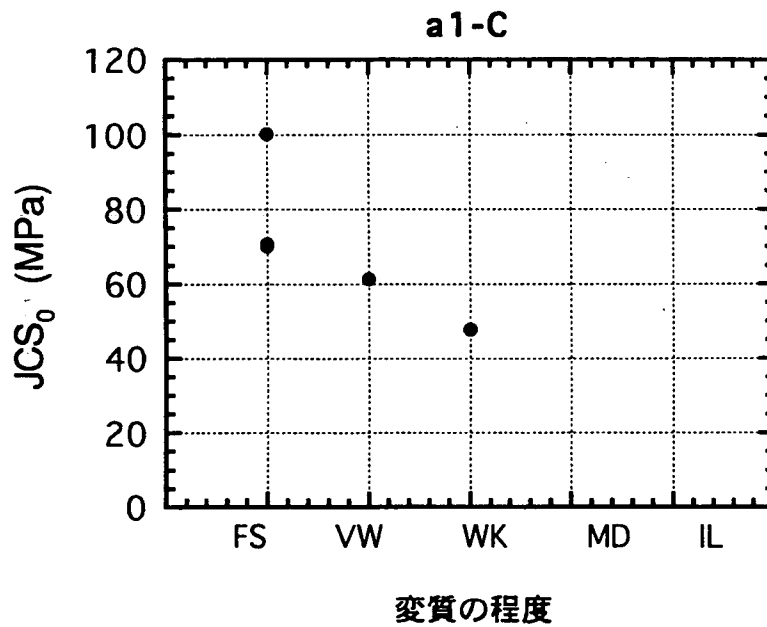


図3.4.31 (a) 変質の程度と JCS_0 の関係 (a1 - C)

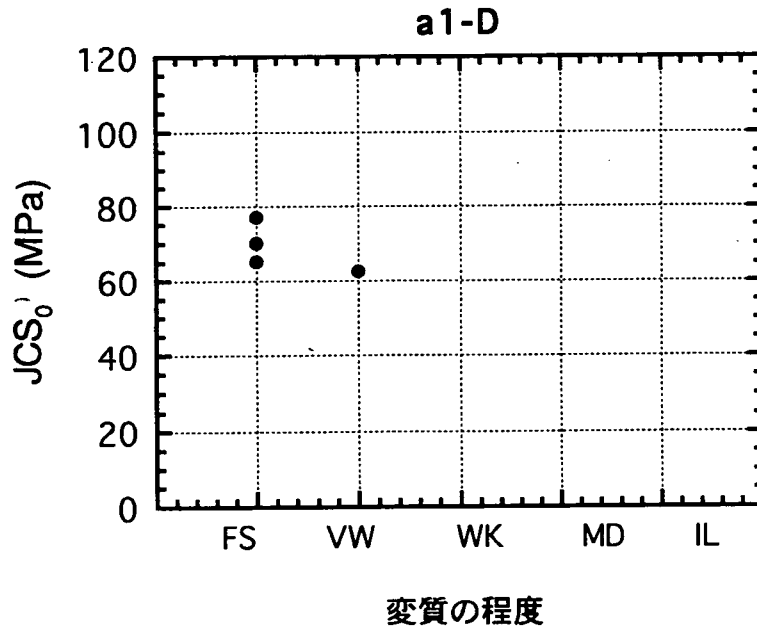


図3.4.31 (b) 変質の程度と JCS_0 の関係 (a1 -D)

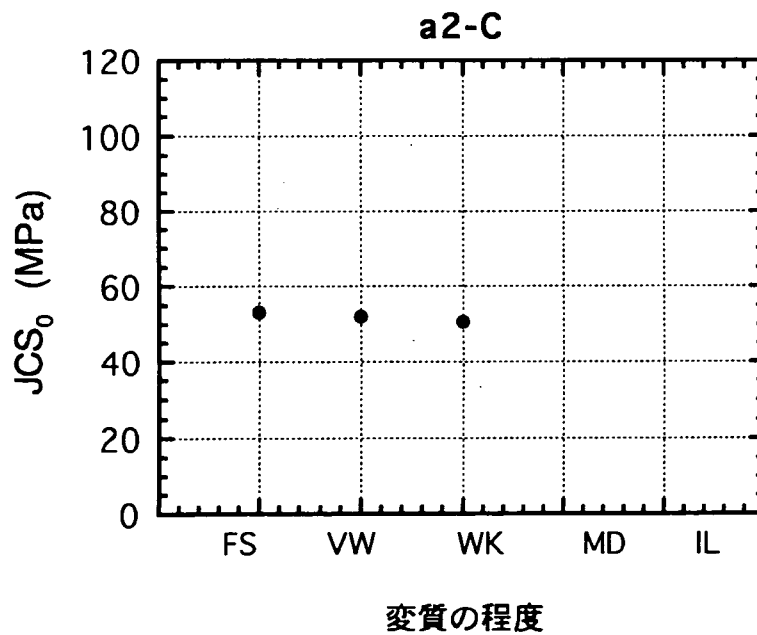


図3.4.31 (c) 変質の程度と JCS_0 の関係 (a2 -C)

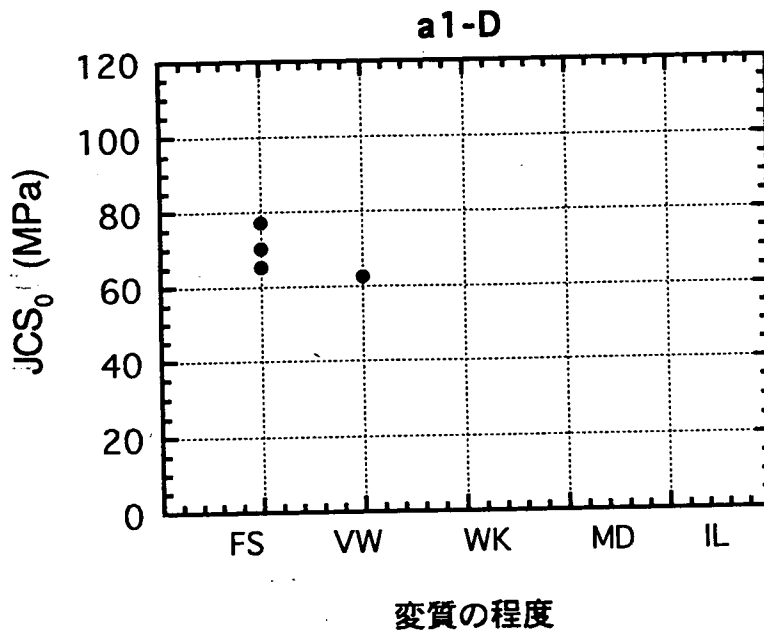


図3.4.31 (d) 変質の程度と JCS_0 の関係 (a3,a4 - B)

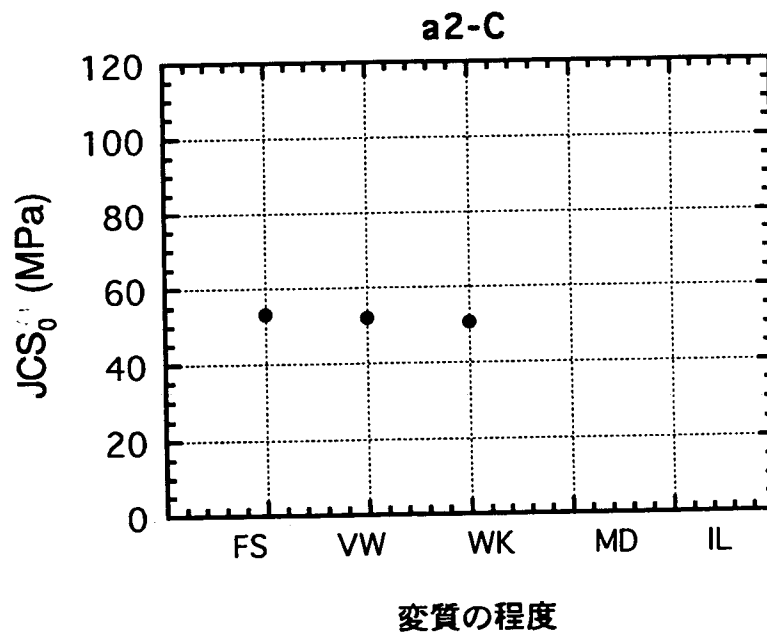


図3.4.31 (e) 変質の程度と JCS_0 の関係 (a4 - A)

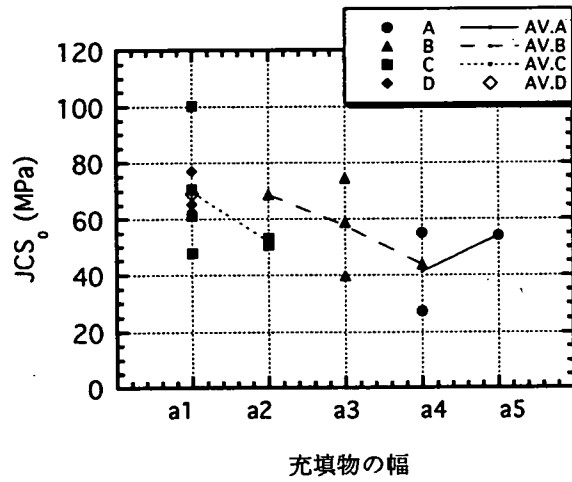


図3.4.32 (a) 充填物の幅、種類と JCS_0 の関係

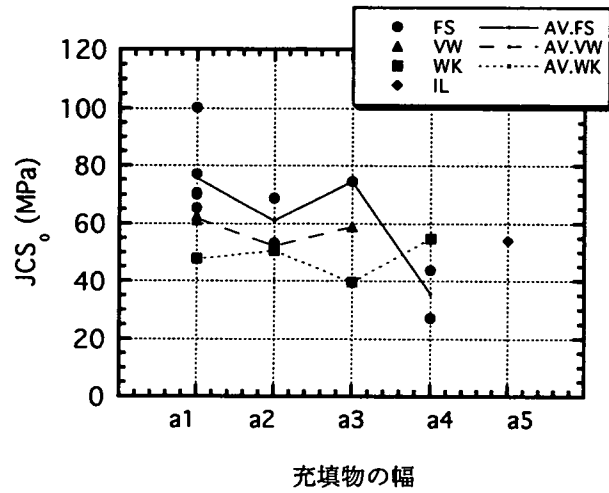


図3.4.32 (b) 充填物の幅、変質の程度と JCS_0 の関係

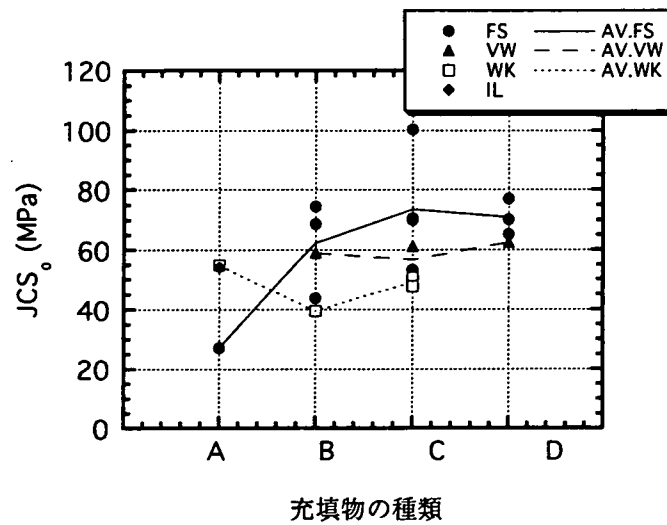


図3.4.32 (c) 充填物の種類、変質の程度と JCS_0 の関係

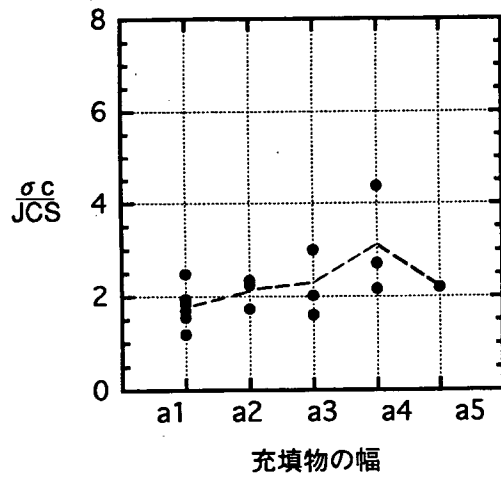


図3.4.33 (a) 充填物の幅と σ_c / JCS_0 の関係

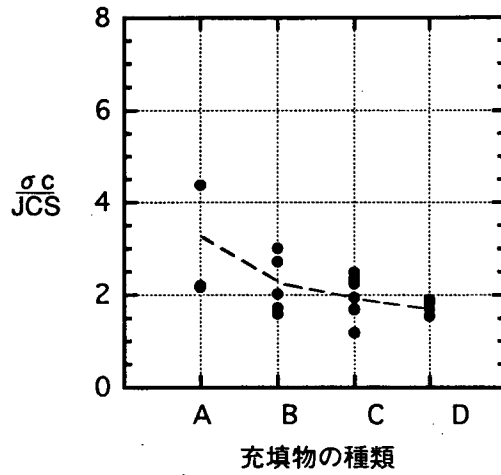


図3.4.33 (b) 充填物の種類と σ_c / JCS_0 の関係

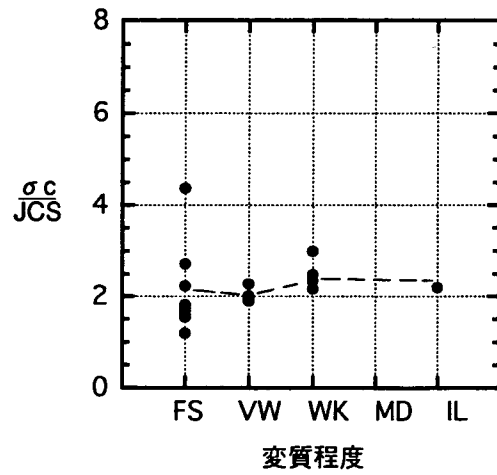


図3.4.33 (c) 変質の程度と σ_c / JCS_0 の関係

3.4.4 き裂分類の指標と JRC_0

JRC_0 については3回のせん断試験から JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} 、およびこれらの平均値 $AV.JRC_0$ が得られている。以下では、これらのパラメータとき裂分類の指標との関係を検討する。

i) 充填物の幅と JRC_0

すべてのき裂に対して、 JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} 、および $AV.JRC_0$ と充填物の幅の関係を図3.4.34(a)～(d)に示す。図3.4.34(a)～(d)において、同一の充填物の幅ごとのデータのばらつきは3～8程度である。また、図3.4.34(a)～(d)において、各充填物の幅ごとの平均値の傾向は様々であり、かつ神岡鉱山の傾向と一致しない。神岡鉱山の結果⁵⁾(表3.2.4参照)では、充填物の幅が a_2 以下の JRC_0 が a_3 以上の JRC_0 より大きく、 a_1 と a_2 の JRC_0 はほぼ等しかった。図3.4.34(d)に示した JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} 、の平均値 $AV.JRC_0$ によると、充填物の幅によらずほぼ一定と考えることもできる。

さらに、充填物の種類と変質の程度が同一のグループごとに、充填物の幅と JRC_0 の関係を示したものが図3.4.35(a)～(c)である。これらを詳しく検討しても、充填物の幅と JRC_0 の関係に、一貫した傾向が得られない。

ii) 充填物の種類と JRC_0

すべてのき裂に対して、 JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} 、および $AV.JRC_0$ と充填物の種類の間関係を図3.4.36(a)～(d)に示す。図3.4.36(a)～(d)において、同一の充填物の種類ごとのデータのばらつきは2～8程度である。また、図3.4.36(a)～(d)の平均値から判断すると、共通する傾向はDの JRC_0 がCより小さいことである。また、図3.4.36(b)～(d)においては、いずれもA,B,Cの順に JRC_0 が大きくなっている。

さらに、充填物の幅と変質の程度が同一のグループごとに、充填物の種類と JRC_0 の関係を示したものが図3.2.37(a)～(d)である。これらを比較すると、図3.2.37(b)以外は図3.4.37(b)～(d)の平均的な傾向と一致することがわかる。

ii) 変質の程度と JRC_0

すべてのき裂に対して、 JRC_{01} 、 JRC_{02} 、 JRC_{03} 、および $AV.JRC_0$ と変質の程度の間関係を図3.4.38(a)～(d)に示す。図3.4.38(a)～(d)において、同一の変質の程度ごとのデータのばらつきは4～7程度である。また、図3.4.38(a)～(c)における平均値の傾向は一定ではない。図3.4.38(d)に示したように、全体の傾向としては、FS,VW,WKの順にやや大きくなっている。

さらに、充填物の幅と種類が同一のグループごとに、変質の程度と JRC_0 の関係を示したものが図3.2.39(a)～(e)である。これらを比較すると、それぞれが

全く異なった傾向であり、一貫性がないことがわかる。

以上、き裂分類の指標と JRC_0 の関係を検討した。その結果、充填物の幅および変質の程度と JRC_0 には一定の関係が見いだせなかった。一方、充填物の種類と JRC_0 の平均的な傾向として、 JRC_0 は A, B, C の順に大きく、D の JRC_0 は C よりも小さくなる。ここで、D の JRC_0 が C よりも小さくなる傾向については、図 3.4.23 の ϕ_r と充填物の種類の関係、および図 3.4.28 の JCS_0 と充填物の種類の関係から理解することができる。すなわち、D のき裂の ϕ_r と JCS_0 は、C に比べて大きく、この結果、式 3.3.6 より求める JRC_0 が小さくなる。3.3.6 節でも述べたように、 JRC_0 は単にき裂の幾何学的な粗さを定量化したパラメータではないことが理解できる。

以上から、 JRC_0 は JCS_0 の場合と同様に充填物の種類ごとに定めることができる。

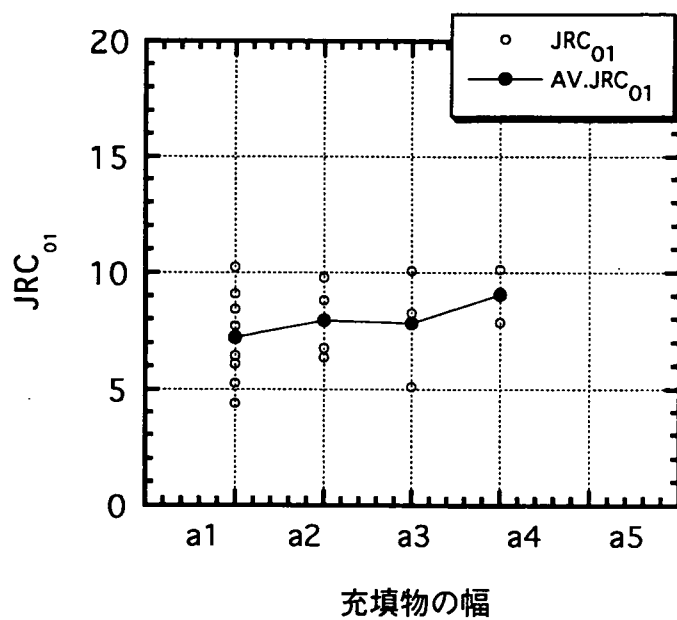


図3.4.34 (a) 充填物の幅と JRC_{01} の関係

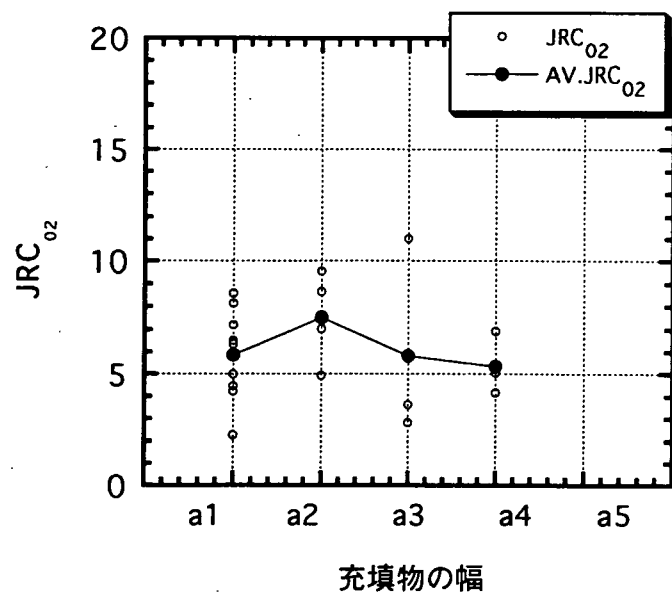


図3.4.34 (b) 充填物の幅と JRC_{02} の関係

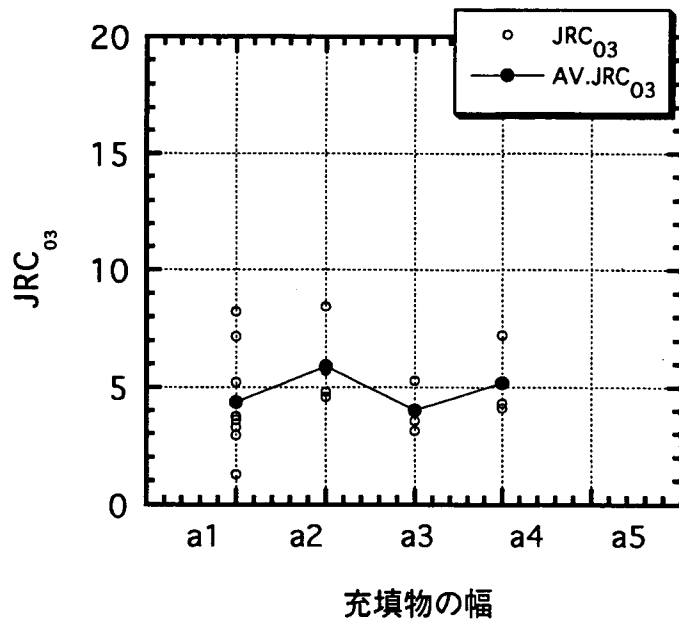


図3.4.34 (c) 充填物の幅と JRC_{03} の関係

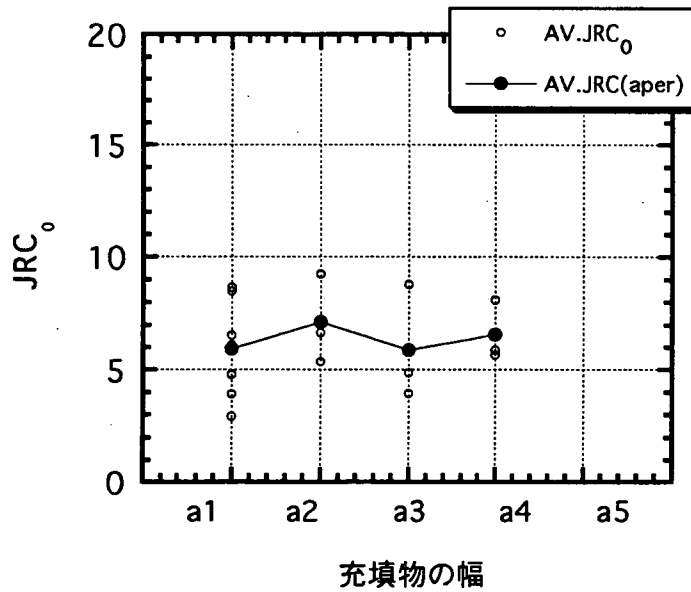


図3.4.34 (d) 充填物の幅と $AV.JRC_0$ の関係

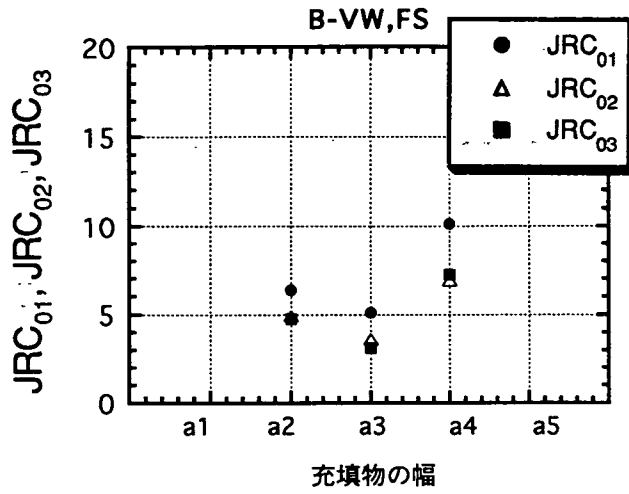


図3.4.35 (a) 充填物の幅と JRC_0 の関係 (B-VW,FS)

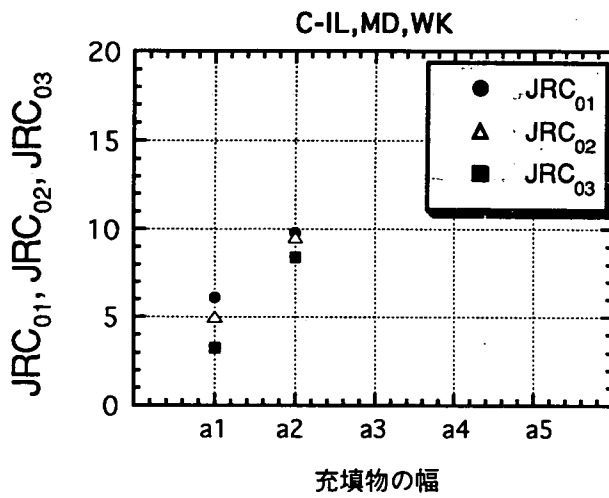


図3.4.35 (b) 充填物の幅と JRC_0 の関係 (C-IL,MD,WK)

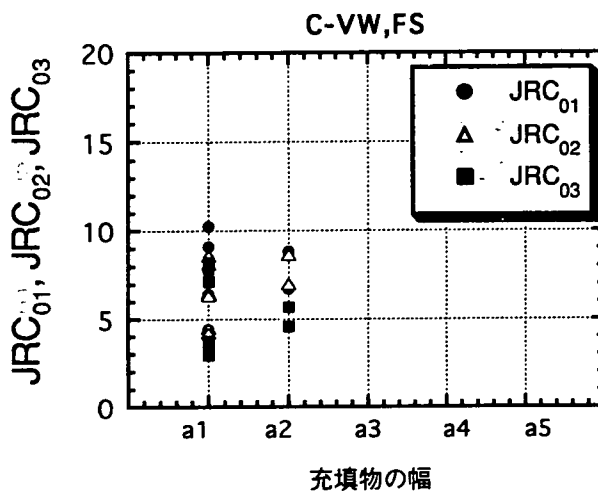


図3.4.35 (c) 充填物の幅と JRC_0 の関係 (C-VW,FS)

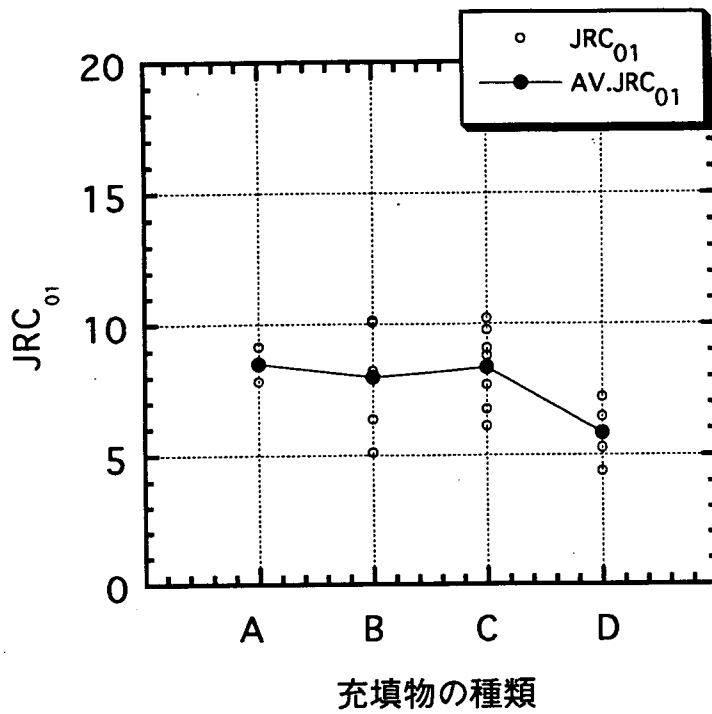


図3.4.36 (a) 充填物の種類と JRC_{01} の関係

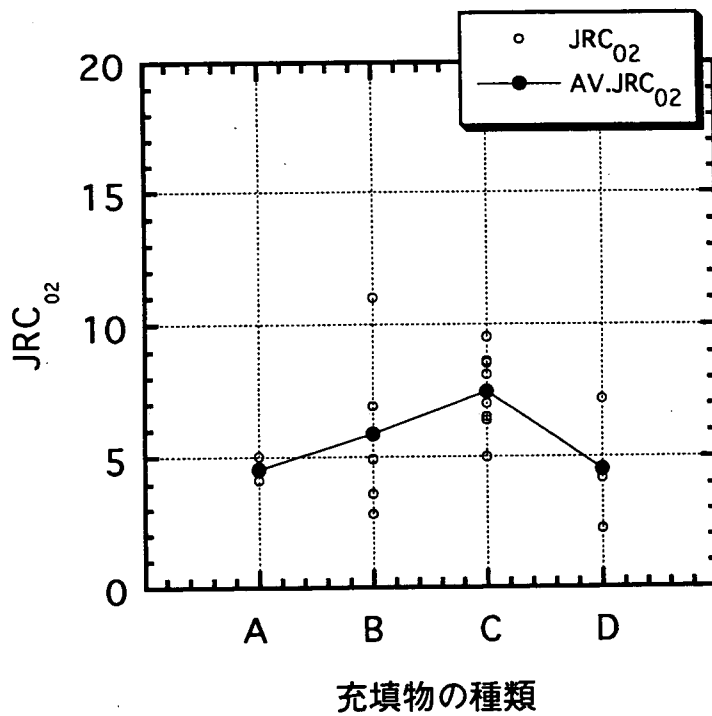


図3.4.36 (b) 充填物の種類と JRC_{02} の関係

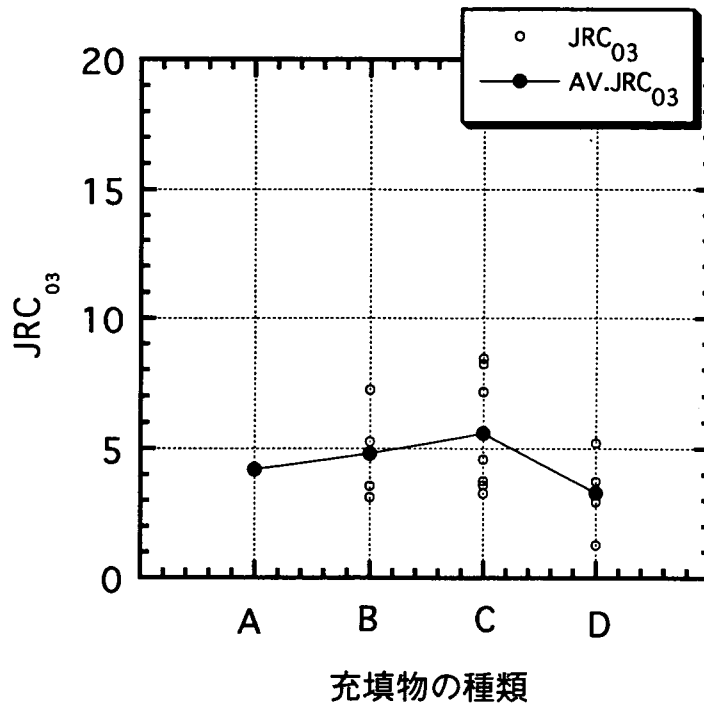


図3.4.36 (c) 充填物の種類と JRC_{03} の関係

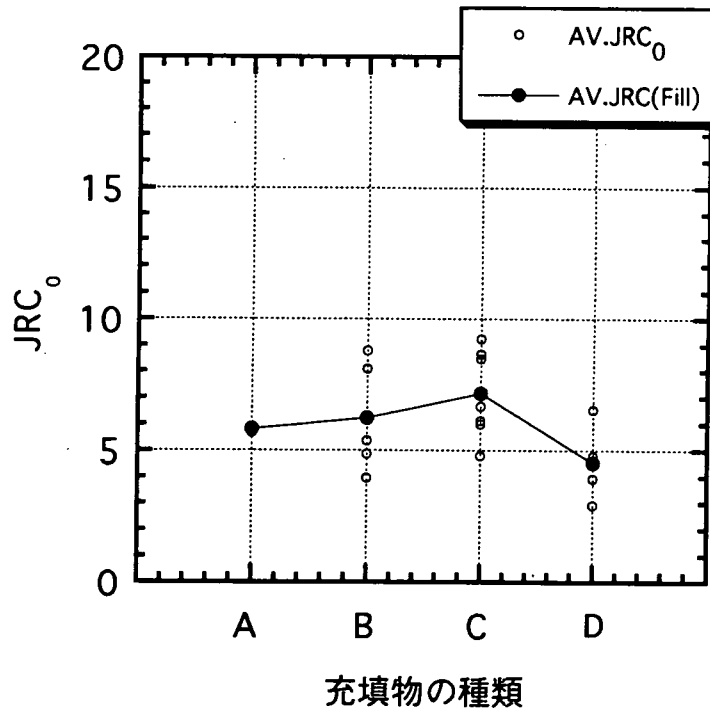


図3.4.36 (d) 充填物の種類と $AV.JRC_0$ の関係

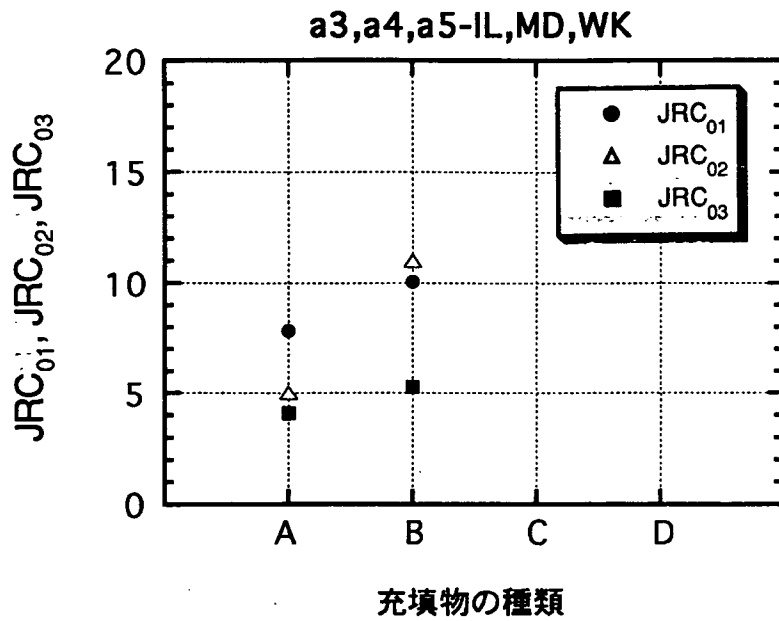


図3.4.37 (a) 充填物の種類と JRC_0 の関係 (a3,a4,a5 - IL,MD,WK)

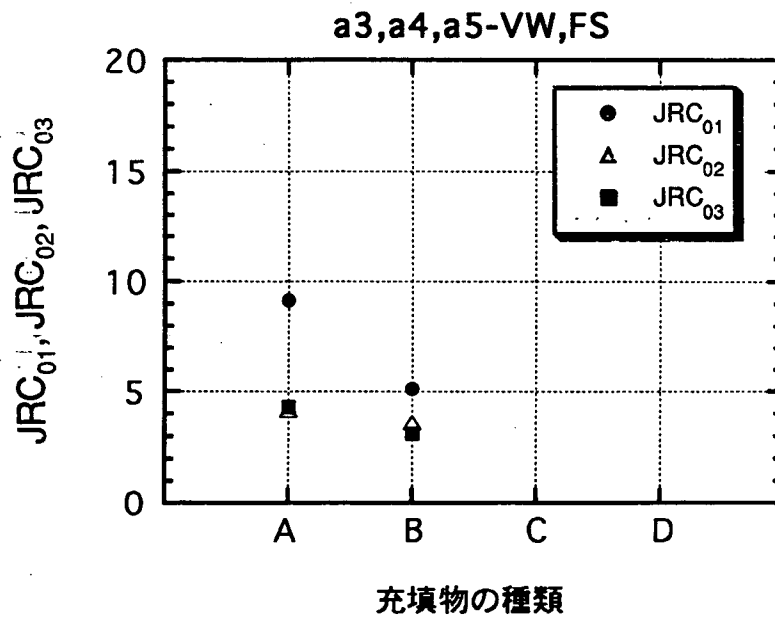


図3.4.37 (b) 充填物の種類と JRC_0 の関係 (a3,a4,a5 - VW,FS)

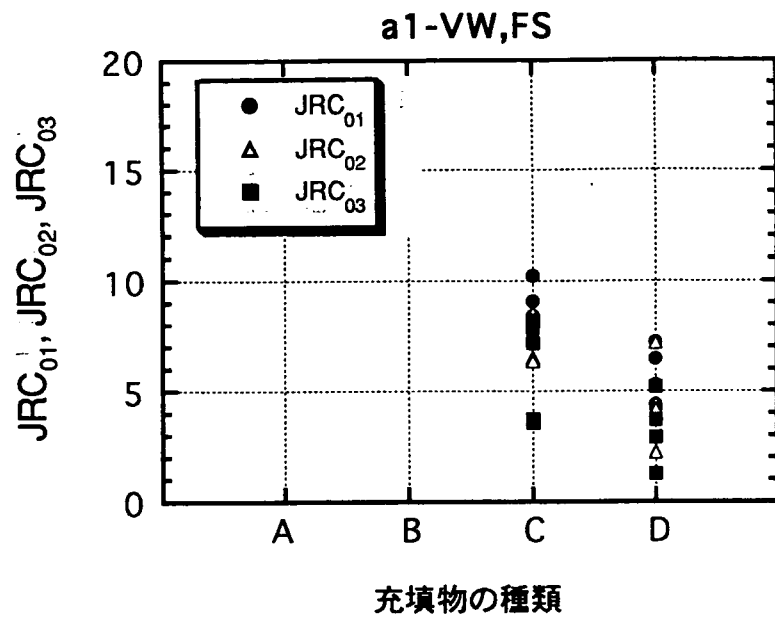


図3.4.37 (c) 充填物の種類と JRC_0 の関係 (a1 - VW,FS)

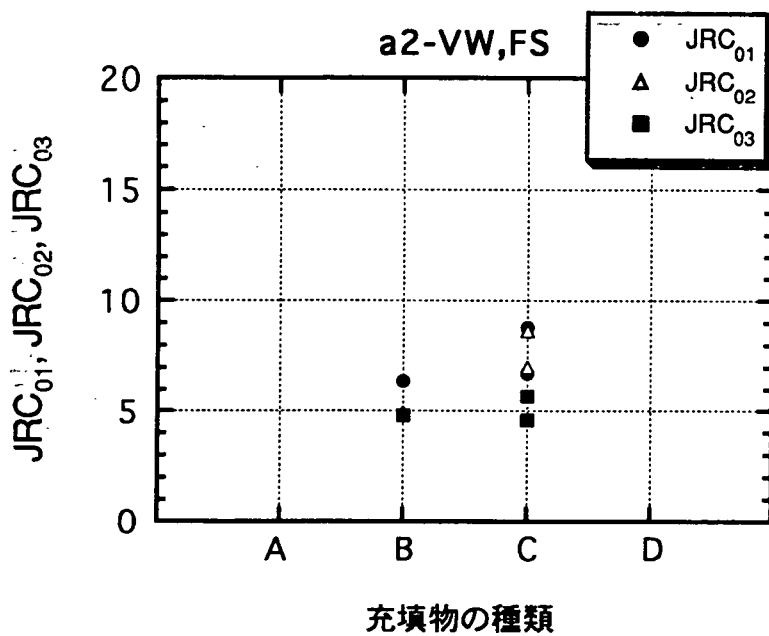


図3.4.37 (d) 充填物の種類と JRC_0 の関係 (a2 - VW,FS)

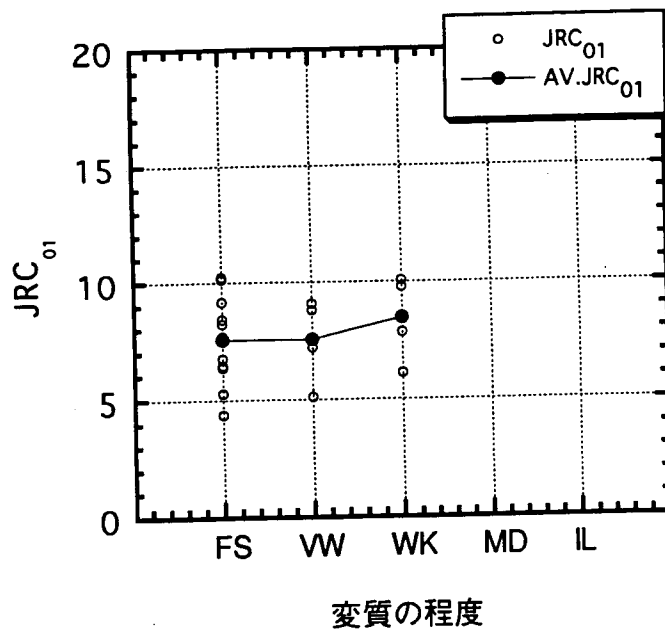


図3.4.38 (a) 変質の程度と JRC_{01} の関係

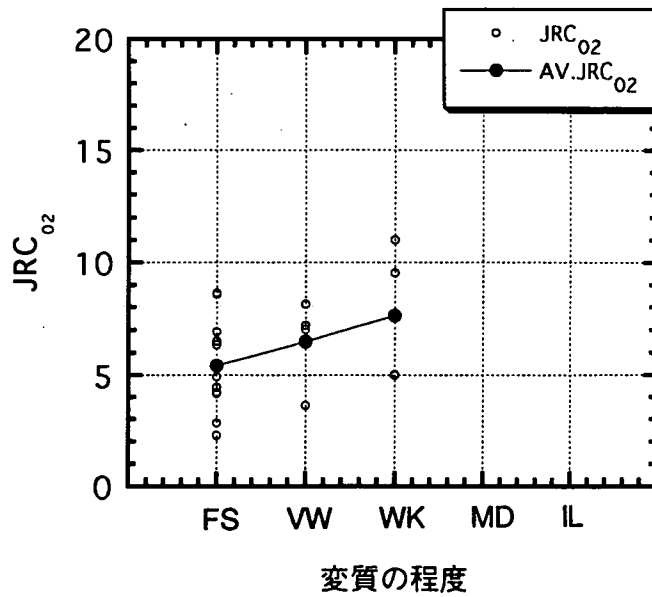


図3.4.38 (b) 変質の程度と JRC_{02} の関係

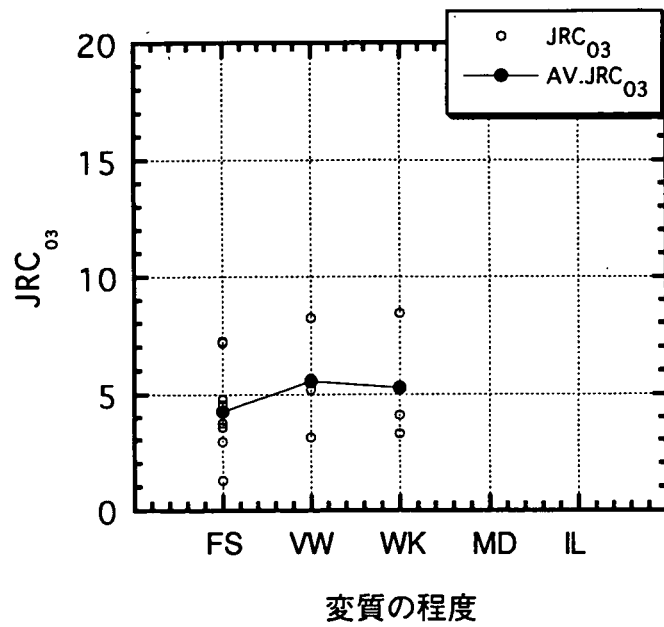


図3.4.38 (c) 変質の程度と JRC_{03} の関係

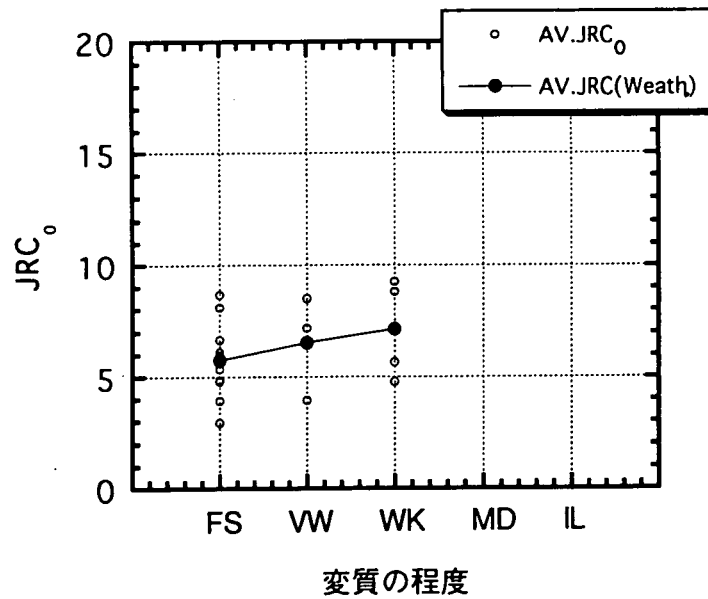


図3.4.38 (d) 変質の程度と $AV.JRC_0$ の関係

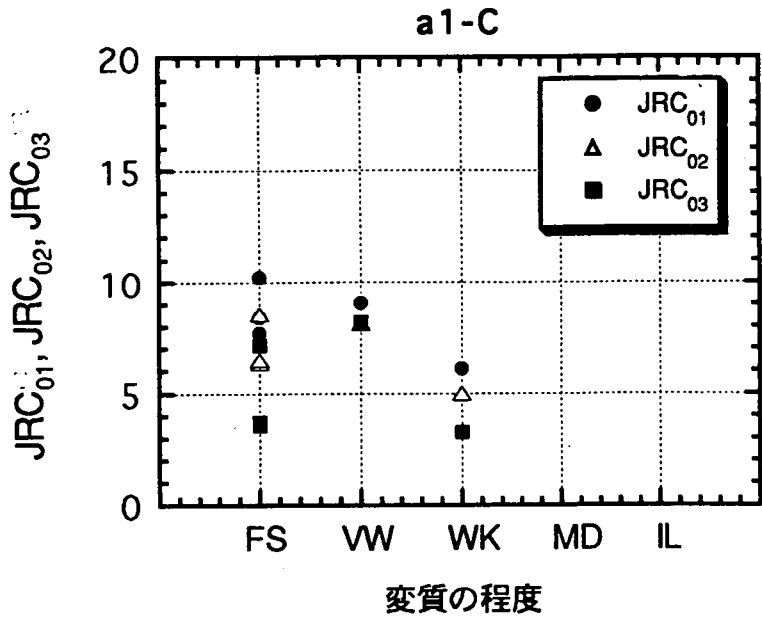


図3.4.39 (a) 変質の程度と JRC_0 の関係 (a1 - C)

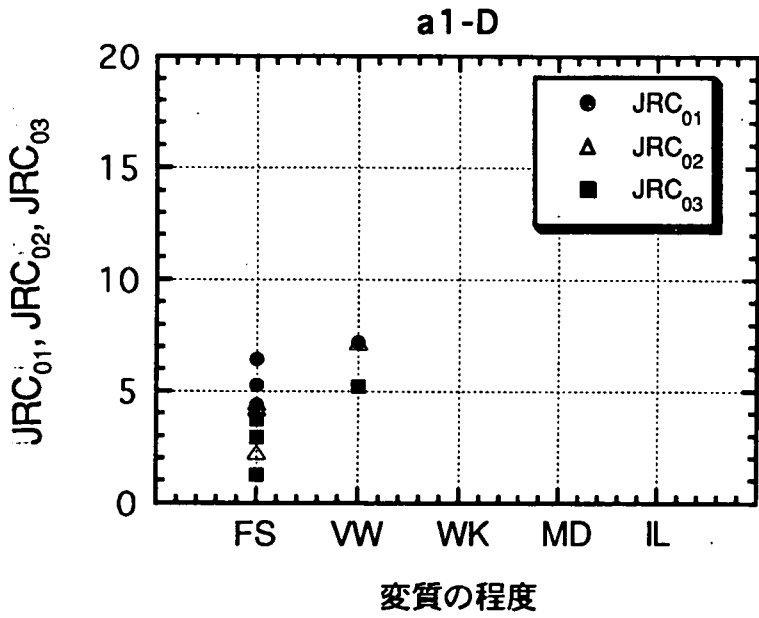


図3.4.39 (b) 変質の程度と JRC_0 の関係 (a1 - D)

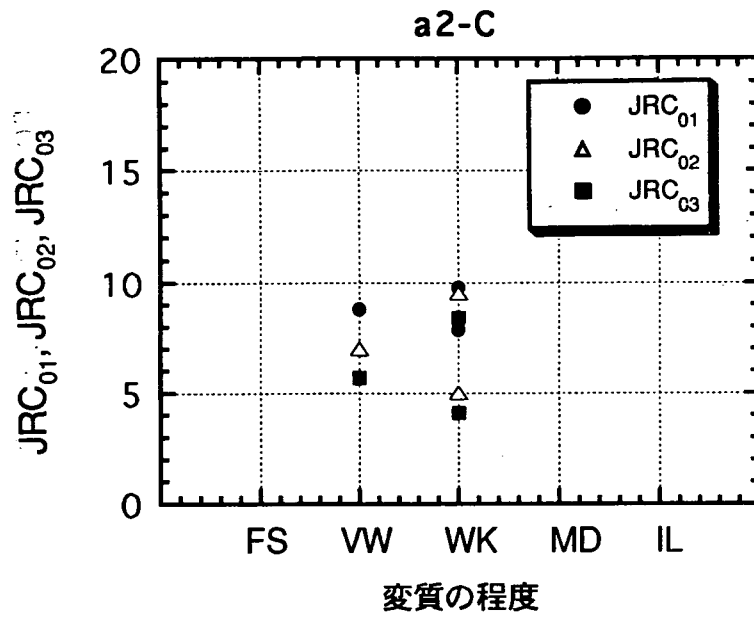


図3.4.39 (c) 変質の程度と JRC_0 の関係 (a2 - C)

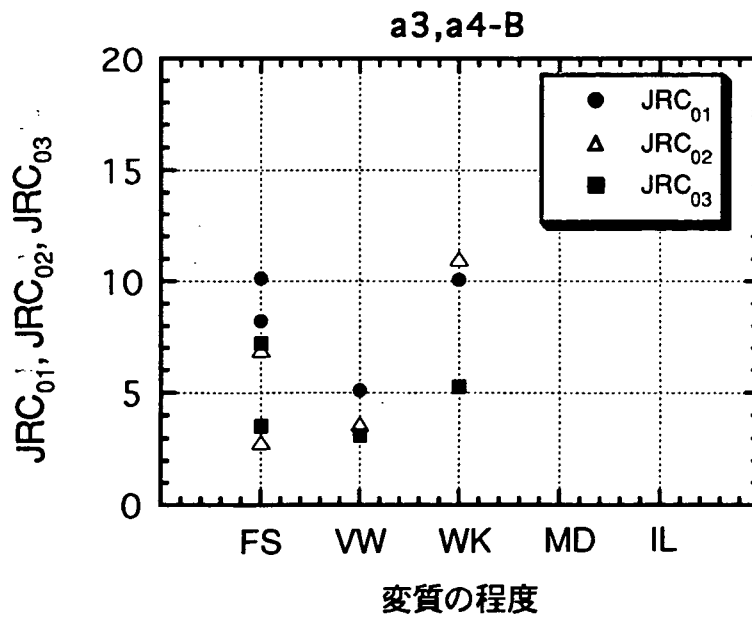


図3.4.39 (d) 変質の程度と JRC_0 の関係 (a3,a4 - B)

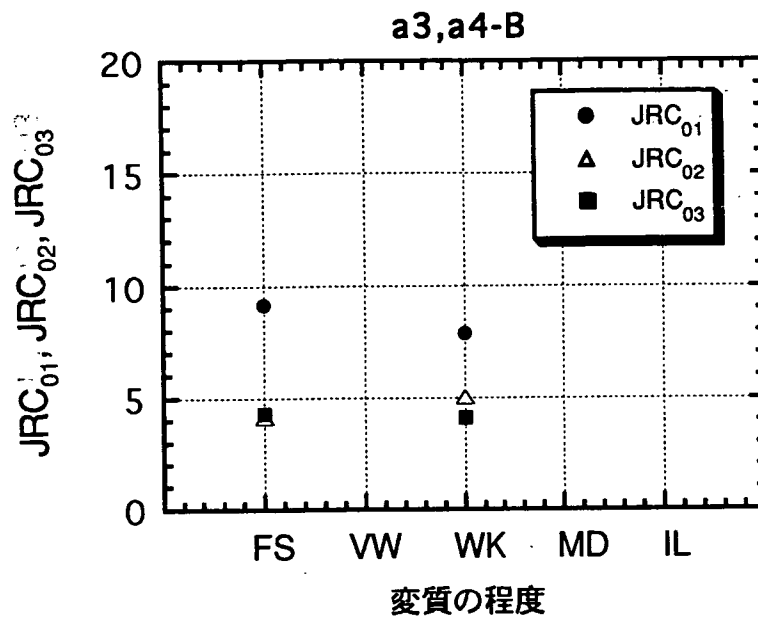


図3.4.39 (e) 変質の程度と JRC_0 の関係 (a4 - A)

3.4.4 き裂に関するDEM解析への入力値の決定

今回のき裂の物性に関する室内試験から得られた、き裂の変形・強度パラメータ、および JRC_0 、 JCS_0 は、DEM解析の入力値となる。3.4.1～3.4.3節において、き裂の力学特性と、き裂分類の指標の関係を検討した結果から、つぎの傾向が得られた。

- 1) 初期垂直剛性 K_{ni} およびせん断剛性 K_{s1} は、データのばらつきが大きく、き裂分類の指標との関係に一貫した傾向が得られなかった。
- 2) ピーク摩擦角 ϕ_j は、充填物の種類により分類して決定することができる。また、粘着力 c_j は ϕ_j とともに求められることから、充填物の種類ごとの平均値により分類することができる。
- 3) 残留摩擦角 ϕ_r は、充填物の種類により分類して決定することができる。
- 4) JCS_0 については、3つのき裂分類の指標との間にいくつかの傾向が得られた。このうち、充填物の種類と JCS_0 の平均値の関係は最も明瞭であった。
- 5) JRC_0 については、充填物の種類と JRC_0 の平均的な傾向から決定することが適切と考えられた。
- 6) 充填物の幅および変質の程度に関しては、限られた条件下で力学特性との相関性が得られたが、全体の傾向との整合に乏しかった。

以上から、き裂の力学特性とき裂分類の指標の関係に、高い相関性は得られなかった。しかしながら、平均的な傾向から考えると、充填物の種類によりいくつかのパラメータを分類できることがわかった。以下に、き裂の強度特性および変形特性の観点からDEM解析の入力値について考察する。

今回の検討結果として、充填物の種類ごとに各入力値の平均を示すと、表3.4.1のようになる。

表3.4.1 充填物の種類ごとの入力値

	A	B	C	D	平均値
垂直剛性 K_{ni} (MPa/mm)	49.2	60.9	58.1	44.8	53.25
せん断剛性 K_{s1} (MPa/mm)	4.0	3.9	2.3	7.0	4.3
摩擦角 ϕ_j (deg.)	45.5	54.8	57.0	56.0	53.3
粘着力 C_j (MPa)	0.08	0.11	0.14	0.11	0.11
残留摩擦角 ϕ_r (deg.)	42.9	47.8	45.5	52.0	47.1
JCS_0 (MPa)	45.3	57.1	63.2	68.8	58.6
JRC_0 (MPa)	5.3	6.2	7.1	4.5	5.9

ここで、 c_j 、 ϕ_j はき裂の強度特性をMohr-Coulombの条件で定める場合の入力値であり、 JRC_0 、 JCS_0 、 ϕ_r は、Barton-Bandisモデルを用いる場合の入力値である。Mohr-Coulombの条件およびBarton-Bandisモデルにおけるせん断強度の予測式⁷⁾はそれぞれ以下のようになる。

$$\tau = \sigma_n \tan \left(JRC_0 \log_{10} \frac{JCS_0}{\sigma_n} + \phi_r \right) \quad (3.4.1)$$

$$\tau = c_j + \sigma_n \tan \phi_j \quad (3.4.2)$$

式(3.4.1)および(3.4.2)から、充填物の種類ごとの平均値を用いてき裂のせん断強度を予測すると、図3.4.40(a)および(b)のようになる。図3.4.40(a)のMohr-Coulombの条件による予測では、Aのせん断強度が小さく、B,C,Dの強度はほぼ同一とみなせる。図3.4.40(b)のBarton-Bandisモデルによる予測では、やはりAの強度が最小で、Dが最大、B,Cの強度はほぼ同等でA,Dの中間的な位置にある。また、図3.4.40(a)および(b)を比較すると、A～Dのせん断強度の範囲はほぼ一致することがわかる。一方、坑道掘削時には、掘削面近傍の垂直応力がより小さい状態（空洞の規模や初期地圧の条件によるがたとえば0～1MPa程度）においてき裂の滑りが起こることを加味すると、解析の際はA～CおよびDの2種類に強度を分類することも考えられる。

なお、同様に充填物の幅ごと、および変質の程度ごとにせん断強度を予測したものを図3.4.41(a),(b)および図3.4.42(a),(b)に示す。図3.4.41(a),(b)の場合、充填物の幅の増大とともにき裂の強度が低下する傾向が認められない。また、図3.4.42(a),(b)においては、変質の程度に伴いき裂の強度が低下する傾向が認められない。

つぎに、き裂の変形特性について考察する。Barton-Bandisモデルにおけるき裂の垂直応力 σ_n と垂直変位 v_s の関係は次式で示される¹³⁾。

$$\sigma_n = \frac{v_c \cdot K_{ni}}{1 - v_c / V_{mi}} \quad (3.4.3)$$

ここで、 K_{ni} は初期垂直剛性で、最大閉塞量 V_{mi} は載荷サイクルに伴い変化し、次式で求める。

$$V_{mi} = A_i + B_i \cdot JRC_0 + C_i (JCS_0 / E_0)^{D_i} \quad (3.4.4)$$

ここで、 A_i , B_i , C_i および D_i は繰返しの載荷履歴に依存して決まる定数で、載荷サイクル数 $i=1\sim 4$ に関して Bandis ら¹³⁾ は表3.4.2のように提案している。

表3.4.2 V_{mi} の計算に用いる定数

定 数	サイクル1	サイクル2	サイクル3	サイクル4
A	-0.296	-0.1005	-0.1031	-0.1031
B	-0.0056	-0.0073	-0.0074	-0.0074
C	2.241	1.0082	1.135	1.135
D	-0.245	-0.230	-0.251	-0.251

ただし、サイクル4以降は V_{mi} が変化しないとする。

式(3.4.3)により、充填物の種類のき裂の垂直応力 σ_n ~ 垂直変位 v_s 関係を予測したものが図3.4.43(a)~(d)である。ただし、初期垂直剛性 K_{ni} としは表3.4.1における平均値53.25MPaを用いた。今回実施した垂直載荷試験では、垂直応力が10MPaにおける3回目の載荷時の変位量が、0.03~0.22mmの範囲にあった。図3.4.43(a)~(d)に示した予測値では、0.2~0.45mm程度あり、実験値よりも大きくなっている。したがって、垂直応力~変位関係については、実験データの追加を図るとともに今後の検討を要する。

つぎに、き裂の変形特性の一つであるせん断剛性については、データにばらつきがあり、充填物の種類との関係も明瞭でなかった。現状では、すべてのき裂の平均値を解析の入力値とすることが考えられる。

以上から、き裂の強度特性については、充填物の種類ごとに分類して、Mohr-Coulombの条件およびBarton-Bandisモデルのいずれにおいても入力値が決まる。一方、変形特性については、き裂分類の指標との関係に明瞭な傾向はなかった。現状では、従来行われているように全体の平均値が入力値となる。

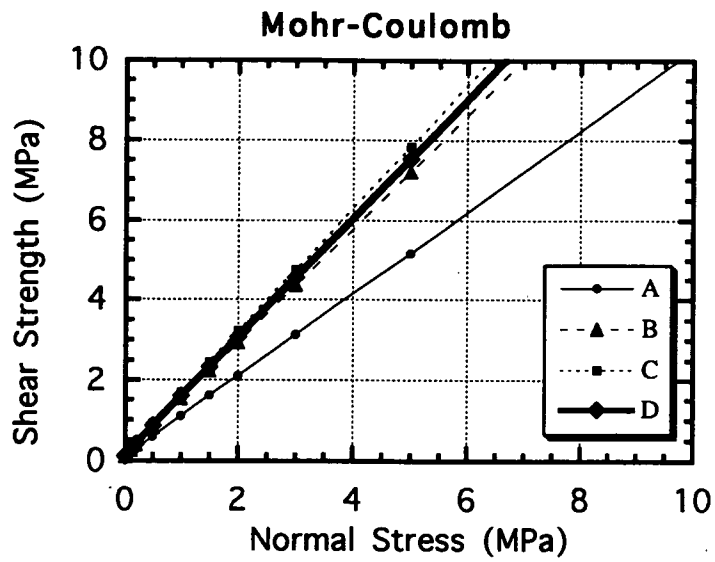


図3.4.40(a) 充填物の種類によるせん断強度の予測 (Mohr-Coulombの条件)

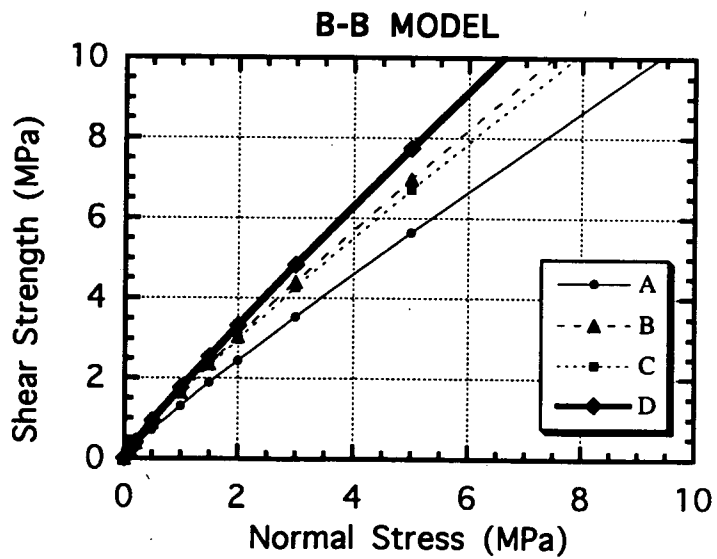


図3.4.40(b) 充填物の種類によるせん断強度の予測 (Barton-Bandisモデル)

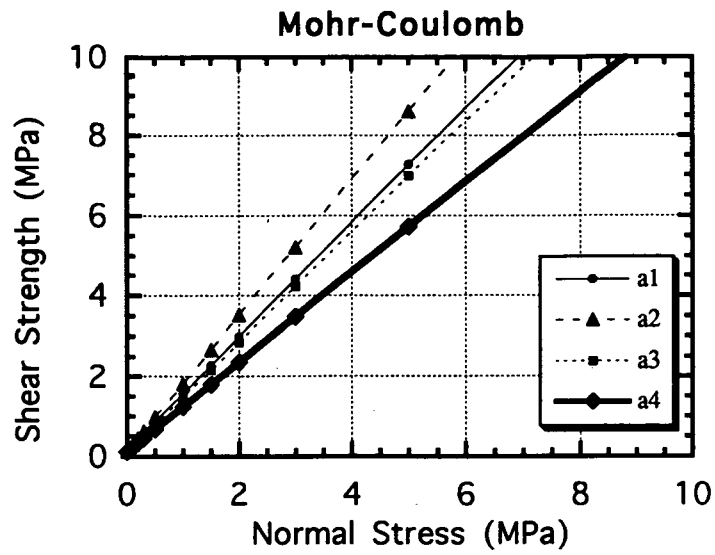


図3.4.41(a) 充填物の幅によるせん断強度の予測 (Mohr-Coulombの条件)

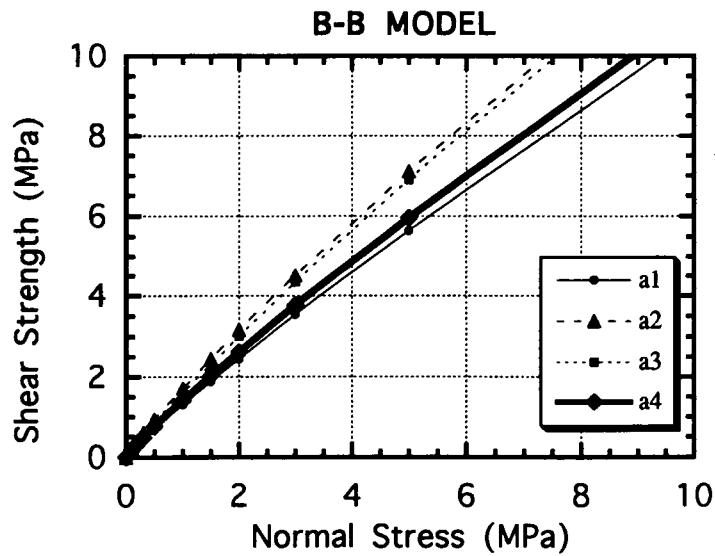


図3.4.41(b) 充填物の幅によるせん断強度の予測 (Barton-Bandisモデル)

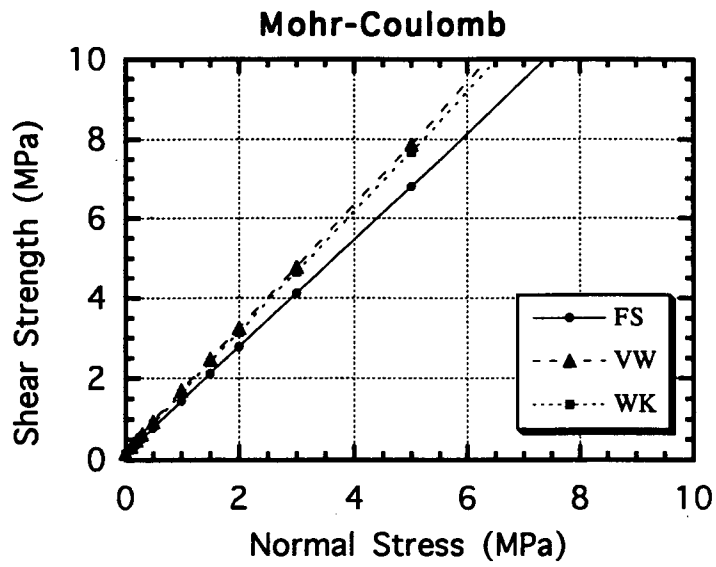


図3.4.42(a) 変質の程度によるせん断強度の予測 (Mohr-Coulombの条件)

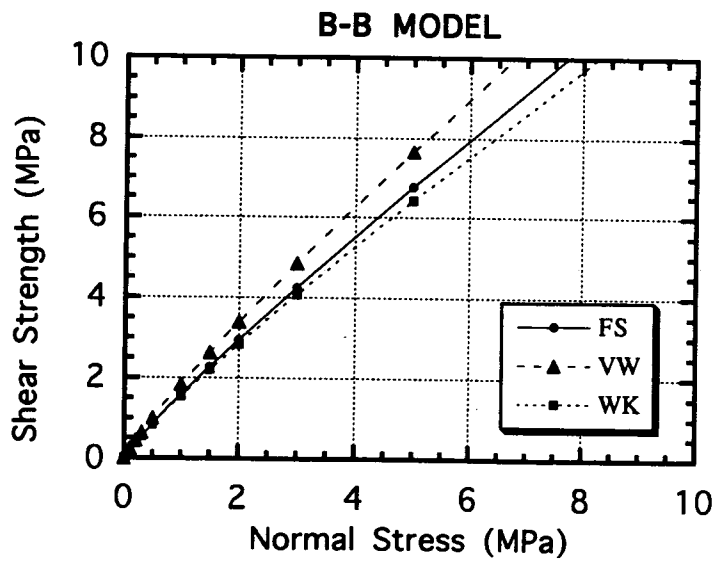


図3.4.42(b) 変質の程度によるせん断強度の予測 (Barton-Bandisモデル)

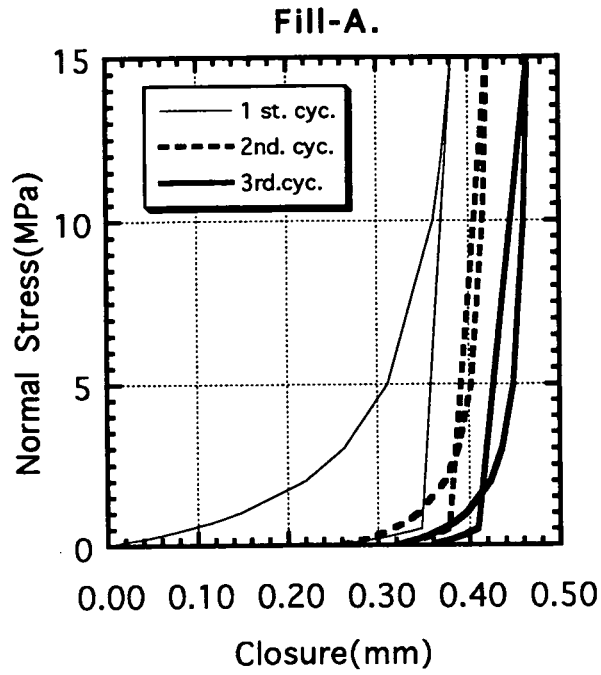


図3.4.43(a) 充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測

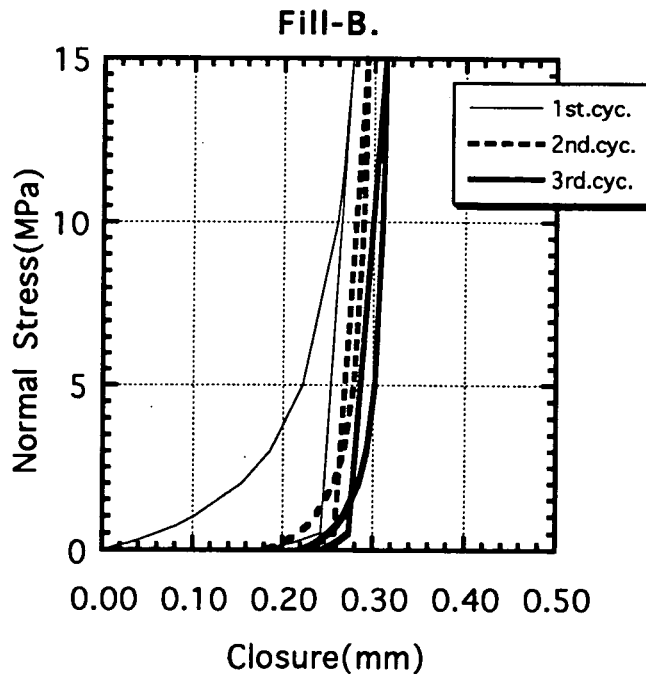


図3.4.43(b) 充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測

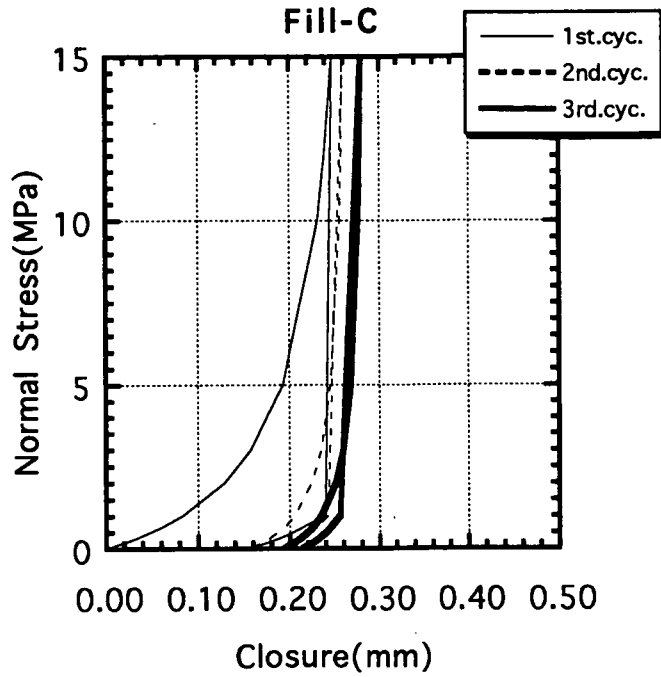


図3.4.43(c) 充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測

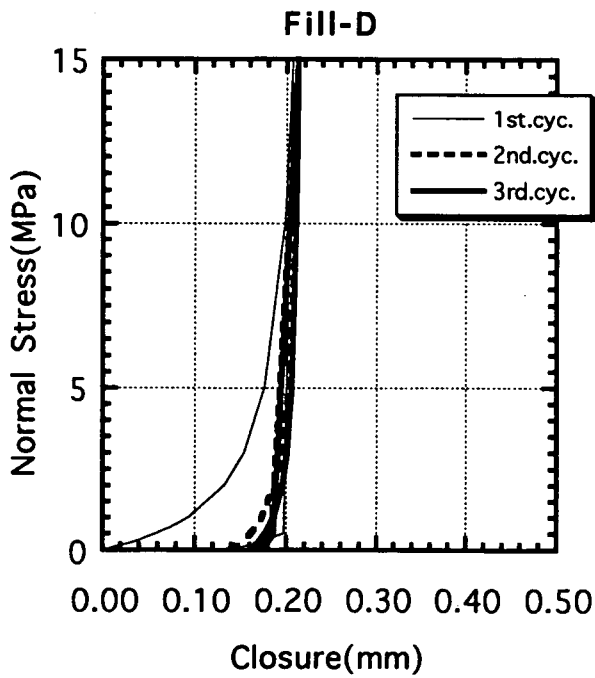


図3.4.43(d) 充填物の種類による垂直応力～変位関係の予測

3.5 まとめ

3.5.1 主な成果

本章では、まず岩芯鑑定などから得られたき裂の情報をもとに、DEM解析をするためのき裂分類の指標として充填物の幅、充填物の種類、および変質の程度を抽出した。また、これら3つの分類指標から、き裂を10グループに分け、室内物性試験を実施した。室内物性試験の結果から得られたき裂の力学特性、およびき裂分類の指標の関係を検討した。その結果をまとめると表3.5.1のようになる。表3.5.1において、各分類指標に対し力学パラメータの平均値との間に相関性が認められるものに○印、力学パラメータの範囲を限定した場合に相関性が認められるものに△印、相関性が認められないものに×印を記した。

個々の力学特性値に関して、以下のようなことがわかった。

- 1) き裂の変形特性を示す垂直剛性 K_n およびせん断剛性 K_s は、いずれもき裂分類の指標との関係に一貫した傾向がなかった。したがって、解析に入力する際は、従来どおり平均値を用いることが考えられる。
- 2) ピーク摩擦角 ϕ_j は、充填物の種類により分類して決定することができる。また、粘着力 c_j は ϕ_j とともに求められることから、充填物の種類ごとの平均値により分類することができる。
- 3) 残留摩擦角 ϕ_r は、充填物の種類により分類して決定することができる。
- 4) JRC_0 については、充填物の種類と JRC_0 の平均値の傾向から決定することが適切と考えられた。
- 5) JCS_0 については、充填物の種類と JCS_0 の平均値の傾向から決定することが適切と考えられた。

また、全般的な傾向としては、以下のことがわかった。

- 6) き裂の力学特性とき裂分類の指標の関係には、データのばらつきがあった。また、当初分類した10グループ内でのばらつきが大きく、分類指標を多くすると、力学特性との関係を把握するのが困難であった。
- 7) 結果として、き裂の力学特性とき裂分類の指標の関係に、高い相関性のある統一的な傾向は得られなかった。
- 8) 平均的な傾向から考えると、ピーク摩擦角 ϕ_j 、残留摩擦角 ϕ_r や JCS_0 、 JRC_0 と充填物の種類の間に関連が得られた。したがって、充填物の種類ごとに、これらの入力値を決めることができる。
- 9) 充填物の幅に関しては、限られた条件下で力学特性との相関性が得られたが、全体の平均的な傾向との整合に乏しかった。

10) 変質の程度いずれの力学特性とも相関性が認められなかった。したがって、き裂分類の指標としては有効ではない。

これまでに行われたDEM解析では、入力値を1種類としている例が多く、特定の指標との関係を検討した例はほとんどない。原位置のき裂には充填物を含んだものが少なくない。今回、入力値を分類する指標として、充填物の種類が抽出されたことは意義のあることと考えられる。

表3.5.1 き裂の分類指標と力学特性の関係

		充填物の幅	充填物の種類	変質の程度
変形特性	垂直剛性 K_n	?	?	?
	せん断剛性 K_s	?	?	?
強度特性	ピーク摩擦角 ϕ_j	Δ	\bigcirc	?
	粘着力 c_j	Δ	Δ	?
	残留摩擦角 ϕ_r	?	\bigcirc	?
粗さ係数 JRC_0		?	\bigcirc	?
き裂面の圧縮強度 JCS_0		Δ	\bigcirc	?

3.5.2 今後の課題

今回の検討結果から、次のことが今後の課題となる。

1) 従来から、き裂に限らず岩盤に関する物性値は、ある程度のばらつきを伴うことが指摘されている。今回の実験結果によれば、き裂の変形特性を示す初期垂直剛性 K_{ni} およびせん断剛性 K_s のばらつきが大きかった。ばらつきの原因については明瞭な答えがでていないため、今後検討する必要がある。

また、せん断剛性 K_s は垂直応力に依存することが指摘されている。今回の実験では、同一の供試体により3回のせん断試験を実施した。また、3回のせん断試験の結果から、強度パラメータを求める目的などがあったため、垂直応力のレベルを最大0.5MPaとした。このため、せん断剛性 K_s の垂直応力依存性が明瞭でない場合もあった。したがって、垂直応力の範囲を拡大し、1回のせん断により検討する必要がある。

2) 今回の実験結果から得られた残留摩擦角 ϕ_r は、既存データよりもやや大きかった。この理由として、せん断時の垂直応力の範囲が小さく、応力レベルが低いことが考えられる。このことから、今後せん断時の垂直応力の範囲を拡大して検討する必要がある。

3) ここでは、充填物の種類が入力値を分類する指標として抽出されたが、充填物の種類と、充填物の幅や変質の程度の関係が明らかにならなかった。今後データを蓄積するとともに、分類指標の見直しが必要と考えられる。

4) 今後解析を実施するにあたって、き裂分布とき裂分類の関係などを含めて不連続性岩盤をモデル化するための手法を検討する必要がある。不連続性岩盤を対象としてモデル化を行う場合、不確定要因が多いことは事実であるが、解析モデルを少しでも現実に近づけるためには、解析領域のき裂分布をできるだけ詳細に把握し、適切な解析モデルやき裂の力学特性を検討することが必要となる。

参考文献

- 1) Makurat A., N.Barton,G.Vik : Jointed rock mass modelling, Proc. of the Int. Sympo.on RockJoints , pp.647 - 656, BALKEMA, 1990
- 2) Barton N. et al. : Predicted and Measured Performance of the 62m Span Norwegian OlympicIce Hockey Cavern at Gjovik , Int.J. Rock Mech.Mi.Sci. & Geomech. Abstr.. Vol.31,No.6, pp.617 - 641 , 1994
- 3) 大西有三、鍵本宏之、西野賢治：岩盤節理情報の処理とその浸透流解析への適用について、土木学会論文報告集、第376号、第3部門-6、pp.241 - 247,1986
- 4) 動燃事業団中部事業所：釜石鉱山250mレベル坑道における割れ目特性の予察的調査、PNC TN7410 93-032、1993
- 5) 小杉昌幸、永久和正、石原治幸、緒方義弘：神岡鉱山におけるジョイント標定と特性評価・ジョイント変位計の開発、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.731 - 736, 1994
- 6) 菊地宏吉、水戸義忠、黒田英高：節理分布の統計的評価に基づく節理性岩盤のモデル化、第7回岩の力学 国内シンポジウム講演論文集、pp.151 - 156, 1987
- 7) Barton. N and V Choubey : The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mechanics , Vol.10,No.1/2,pp. 1-54, 1977
- 8) Tse, R. & Cruden,D.M. : Estimating joint roughness coefficients, Int.J. Rock Mech.Mi.Sci. & Geomech.Abst.. Vol.16, pp.303 - 307 , 1979
- 9) Xianbin Yu & Vayassade B. : Joint profiles and their roughness parameters, Int.J. Rock Mech. Mi. Sci. & Geomech.Abst.. Vol.28,No.4, pp.333 - 336 , 1991
- 10) 吉中龍之進、清水昭男、新井元：岩盤不連続面の粗さの指標について、第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、 pp.386 - 389, 1987
- 11) 白旗秀紀、玉井昭雄、金田勉：調査結果に基づく亀裂群の定量化と亀裂分布予測手法、第9回岩の力学国内シンポジウム、 pp.283 - 288, 1994
- 12) 木梨秀雄、白旗秀紀、永久和正、玉野達、田中達也：原位置き裂調査に基づく岩盤内き裂分布の推定とDEM解析への応用、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、 pp.431 - 435, 1995
- 13) Bandis S., Lumsden A. & Barton N. : Fundamentals of rock joint deformation, Int.J. Rock Mech.Mi. Sci. & Geomech.Abst.. Vol.20,No.6, pp.249 - 268 , 1983
- 14) Brown edition : Suggested method for Determining shear strength, Rock Characterization Testing and Monitoring ,ISRM Suggested Method,

- pp.129 - 140, Pergamon Press, 1981
- 15) 木梨秀雄、畑浩二、藤原紀夫：岩盤ジョイント面の形状測定と粗さの定量化、土木学会第47回年講、1992
 - 16) 吉岡尚也、杉原弘造、木梨秀雄、畑浩二、丸山誠：堆積岩地山での立坑掘削に伴うひずみの原位置計測とその数値解析、材料、第42巻、第474号、pp.324 - 328、1993
 - 17) Barton. ,S.Bandis,Bakhtar : Strength,Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. , Vol.22,No. 3,pp.121-140,1985
 - 18) Ian Farmer : Engineering Behaviour of Rocks, Chapman & Hall Ltd., 1983
 - 19) Bandis S. : Engineering Properties and Characterization of Rock Discontinuities , Comprehensive Rock Engineering, Vol.1,pp.155 - 183
 - 20) 木梨秀雄、吉岡尚也、畑浩二、藤原紀夫：岩盤ジョイントの力学的挙動と力学モデル、大林組技術研究所報告書、No.63617-8、1993
 - 21) Bandis S.,Lumsden A.C.&Barton N.: Experimental study of scale effect on shear behavior of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol.13 pp.255 - 279, 1981
 - 22) Hsiung S.M.,Ghosh A.,Ahola M.P.: Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination, Int. J. Rock Mech.Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol.30,No.7, pp.825 - 829, 1993

4. 「新規坑道における掘削影響領域の評価」詳細実施計画案の検討

4.1 掘削影響試験の目的と実施計画作成の手順

4.1.1 掘削影響試験の目的

深部岩盤中に坑道等の空洞を掘削すると、その空洞周辺は掘削の影響を受けた領域が形成されることが認識されており、空洞の設計・施工にあたってはこの掘削影響領域の評価が重要視されている。

これまで、国内外において、掘削影響領域の評価を目的として掘削影響試験が実施されてきたが、掘削影響領域に関連する要因の抽出、並びに掘削影響領域の定性的な把握にとどまり、信頼できる計測技術の欠如と統一されたデータベースの欠如が1988年のOECD/NEAの掘削影響試験に関わるワークショップで指摘された。¹⁾

以後、スウェーデンのHard Rock Laboratory (HRL)、カナダのUnderground Research Laboratory (URL)では、上記の反省点を踏まえ、再度掘削影響試験が試みられている。また、スイスのGrimsel Test Site (GTS)においても異なる観点から掘削影響試験の計画が進行中である。

スウェーデンの掘削影響試験の目的は、掘削影響領域を定量的に評価する手法の開発、掘削影響領域の発生原因・特性変化の程度と広がり、掘削手法の依存性の把握である。ここではボーリングマシンを用いた坑道と発破工法の坑道が平行に掘削され、相互比較できるように計画されている。²⁾

カナダのURLにおける掘削影響試験は、空洞掘削に伴う応力解放に対する岩盤挙動をできるだけ精度よく計測することを目的にしている。他の要因をできるだけ少なくするために、き裂の無い領域を選び、掘削損傷の影響を避けるために機械掘削を採用している。³⁾

スイスのGTSは、掘削影響域の透水性に着目し、調査手法の開発とモデル化手法の開発を目的とした計画を立てている。⁴⁾

日本においても、釜石鉱山、神岡鉱山において、不連続岩盤を対象とした掘削影響試験が実施されている。釜石鉱山においては、岩盤の力学的、水理学的な掘削影響の把握、掘削工法や割れ目の卓越方向に対する影響の定性的把握、現有調査試験技術の適用性の把握を目的とした掘削影響試験が実施されている。

5) 6) 一方、神岡鉱山においては、不連続性岩盤の挙動評価および支保設計手法の確立を目的として、現有の調査手法の適用性の把握と岩盤のモデル化が試みられている。^{7) 8)}

本研究においては、これまでの研究成果を踏まえ、以下の研究目的に沿った試験計画を作成する。即ち、き裂性の結晶質岩を対象として、

- 1) 掘削影響領域の特性・広がり計測システムを開発する。
- 2) 掘削影響領域の特性・広がりデータを取得する。
- 3) 掘削影響領域に関連するプロセスの重要性・関連性を評価する。

ここで、関連するプロセスとは、力学的には割れ目の発生や応力再配分、水理学的には、間隙水圧の変化等である。

4.1.2 実施計画作成の手順

本研究における実施計画検討手順としては以下のように示される。

- ①海外事例ならびに国内の原位置試験の現状検討
- ②コンセプトの確立
- ③試験坑道のレイアウトの設定
- ④計測坑道のレイアウトの設定
- ⑤試験坑道掘削前後の試験項目の抽出と試験計画の作成
- ⑥試験坑道掘削中ならびに掘削後の計測項目の抽出と計測計画の作成
- ⑦掘削影響試験実施計画の作成

実施計画作成フローを図 4.1.1 に示す。

海外の事例としては、花崗岩系岩盤で掘削影響試験を実施、もしくは実施計画をたてているスウェーデン、カナダ、スイスの掘削影響試験の概要を参照し、試験状況、試験計画、計測計画についてまとめる。また、国内の事例としては釜石鉦山原位置試験フェイズ1の掘削影響試験および神岡鉦山における原位置試験を参照する。試験コンセプトにより坑道配置、計測計画、調査・試験計画が大きく変わる可能性があるため、試験計画作成に入る前に試験目標を明確に設定するとともに、本研究の位置づけを行う。

試験坑道のレイアウトの設定に関しては、既存坑道の配置、地質状況、き裂状況、ならびに初期応力状況を配慮する。また、岩盤の解析モデル化についても考慮する。坑道断面の大きさは掘削影響域の大きさと関わりが深いと考えられるため、計測手法ならびに計測精度を考慮して設定する。坑道長さについては掘削計画を配慮するとともに、安定な掘削領域を発生させるために十分な長さであるよう設定する。

計測坑道のレイアウトは、既存坑道および試験坑道の配置ならびに計測・調査・試験計画を配慮して決定する。

計測項目ならびに調査・試験項目の抽出にあたっては、海外の掘削影響試験を参照し、本研究のコンセプトに照らして抽出する。計測機器および調査・試

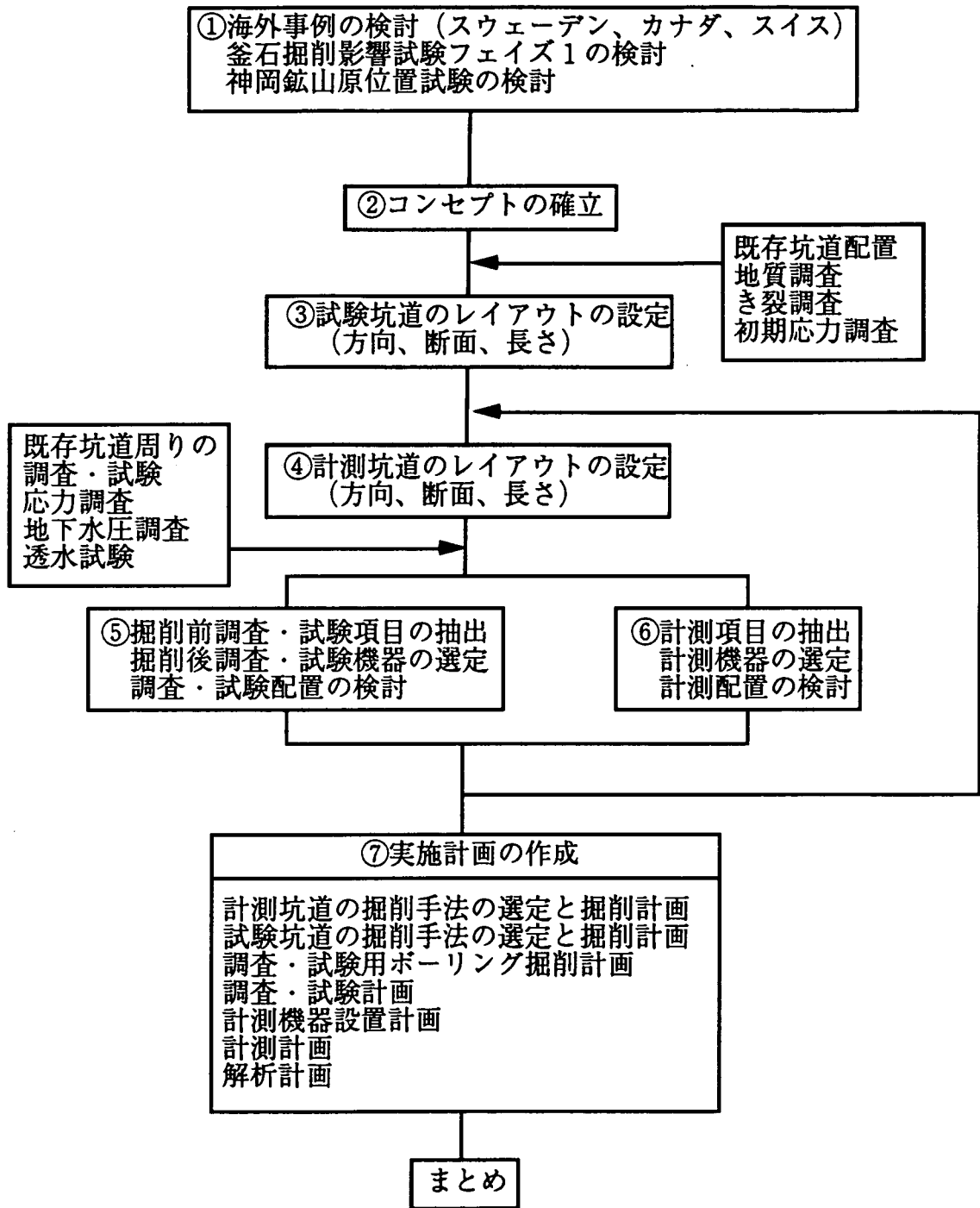


図4.1.1 実施計画作成フロー

験機器の選定にあたっては、既存の岩盤調査実績ならびに今回の研究の中で実施される既存坑道周りの調査・試験結果を参照する。同様に、計測配置や調査・試験配置についてもこの調査・試験結果を参照する。なお、事前の応力分布調査、ならびに地下水圧分布調査は計測機器の選定ならびに配置計画に大きく影響する。

掘削影響試験の実施計画の作成にあたっては、計測坑道ならびに試験坑道の掘削手法の選定と掘削計画、調査試験用ボーリングの掘削計画、調査・試験計画、計測機器設置計画ならびに計測計画を作成する。

掘削影響領域の評価のためには数値解析手法の開発も重要な項目である。したがって、調査試験計画と平行して、岩盤のモデル化ならびに数値解析計画も作成する。

4.2 各国の掘削影響領域の捉え方

本研究の掘削影響試験の実施計画の作成に先立ち、比較検討のために海外の掘削影響試験計画および国内の事例検討を行なう。海外事例としては、スウェーデンの Hard Rock Laboratory、カナダの Undergroud Research Laboratory, スイスの Grimsel Test Site における掘削影響試験を参照した。また国内における事例としては、釜石鉱山における原位置試験 (Phase I) と神岡鉱山における岩盤調査を引用した。各事例とも、試験の具体的な目的、事前調査項目、掘削中の計測項目、事後調査項目、期待される結果についてまとめている。

また、比較検討するために、各事例とも以下の項目を抽出した。

- ①場所、②地質、③深度、④スケジュール、⑤目的、⑥初期応力、
- ⑦坑道断面、⑧坑道長さ、⑨掘削手法、⑩レイアウト、⑪事前調査項目、
- ⑫計測項目、⑬事後調査項目

4.2.1 スウェーデン (HRL)

スウェーデンの Hard Rock Laboratory (HRL) においては、掘削影響域の特性調査と掘削工法の依存性を調べるために2つの並設坑道を別々の工法 (TBM掘削工法と普通発破工法) で掘削している。具体的な目的は、

- 1) 掘削影響域の起源、特性、物性変化、広がり、工法依存性の検討
- 2) 掘削影響域の水理特性の理解
- 3) 掘削影響領域の計測装置および手法の検証

である。図 4.2.1にはHRLの概観を示している。また、図 4.2.2 には掘削影響試験が実施された深度 300~460mレベルの状況を示している。

図4.2.3と図4.2.4はそれぞれ掘削影響試験のための坑道周辺の計測用ボーリング配置の平面図と断面図を示している。また、表4.2.1には各ボーリング孔の目的と使用をまとめている。

事前調査項目としては、

- 1) 電磁波探査 (地質構造)
- 2) 弾性波トモグラフィー (き裂分布)
- 3) 透水試験 (透水性)
- 4) コア観察 (き裂分布)
- 5) 初期応力調査 (初期応力)

が予定されている。

掘削影響領域は、初期応力の大きさや方向に依存するだけでなく、母岩の力学特性や構造 (き裂密度や方向) に依存すると考えられるため、異方性ならび

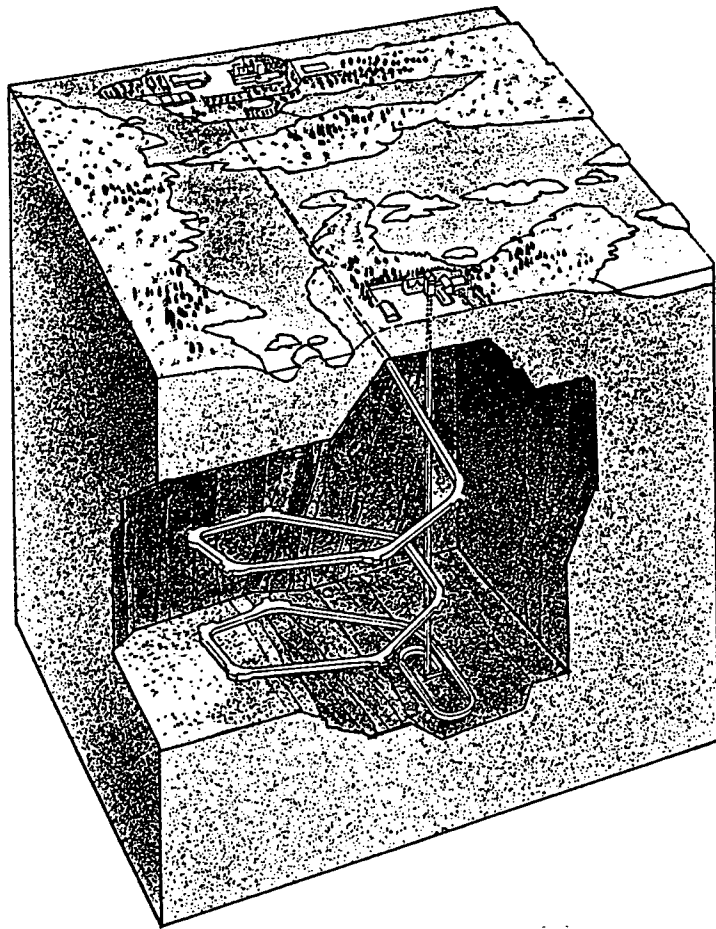


図4.2.1 HRL (スウェーデン) の概観

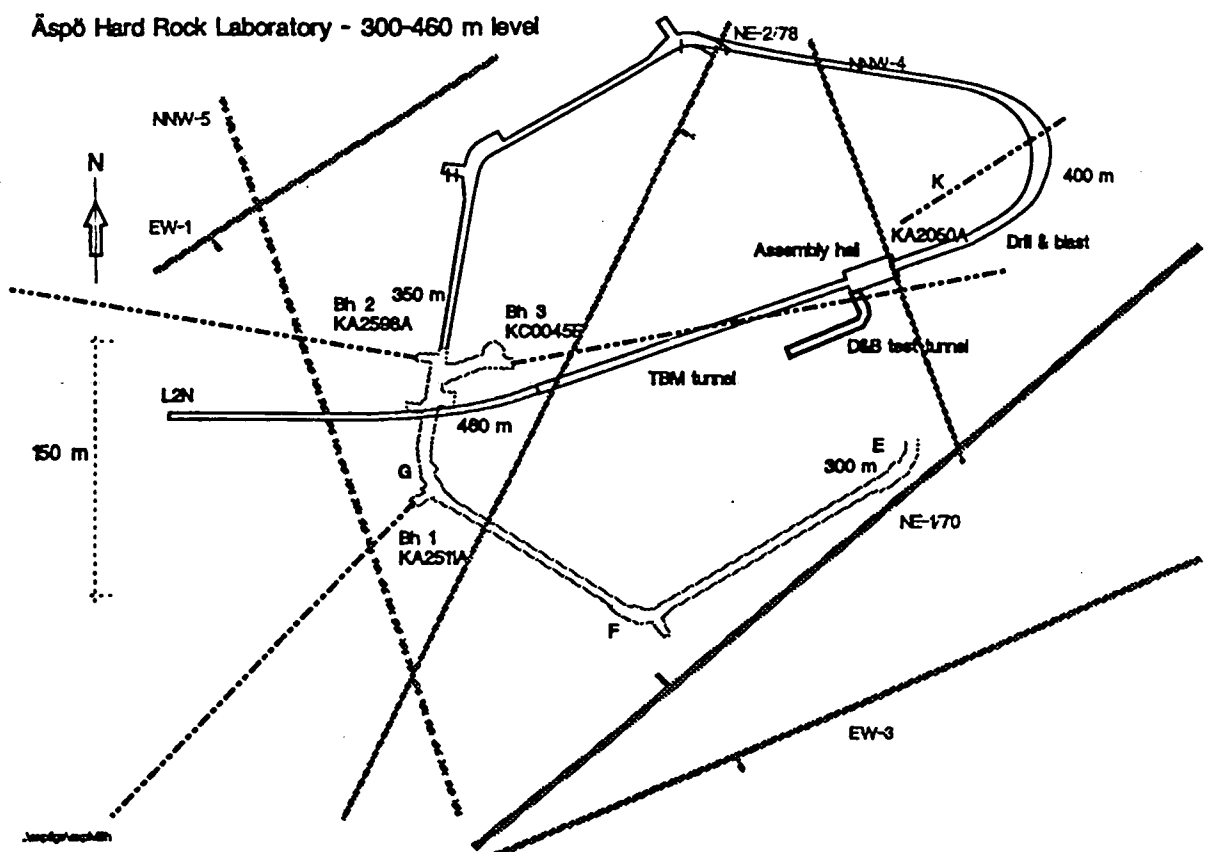


図4.2.2 HRLの掘削影響試験対象域 (深度300m~460mレベル)

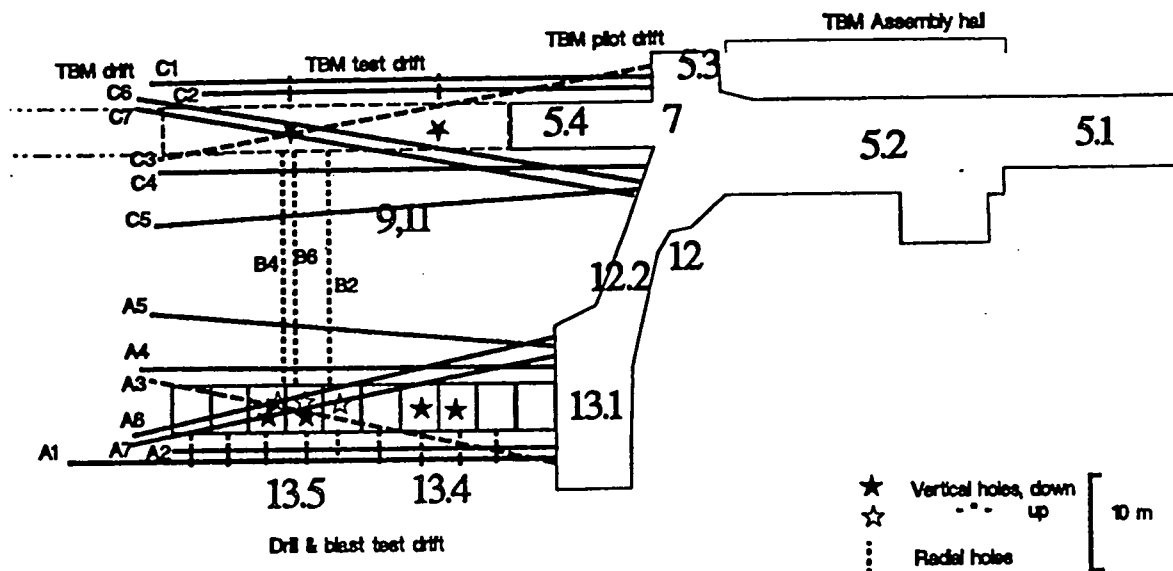


図4.2.3 HRLの掘削計画と計測用ボーリング配置（平面図）

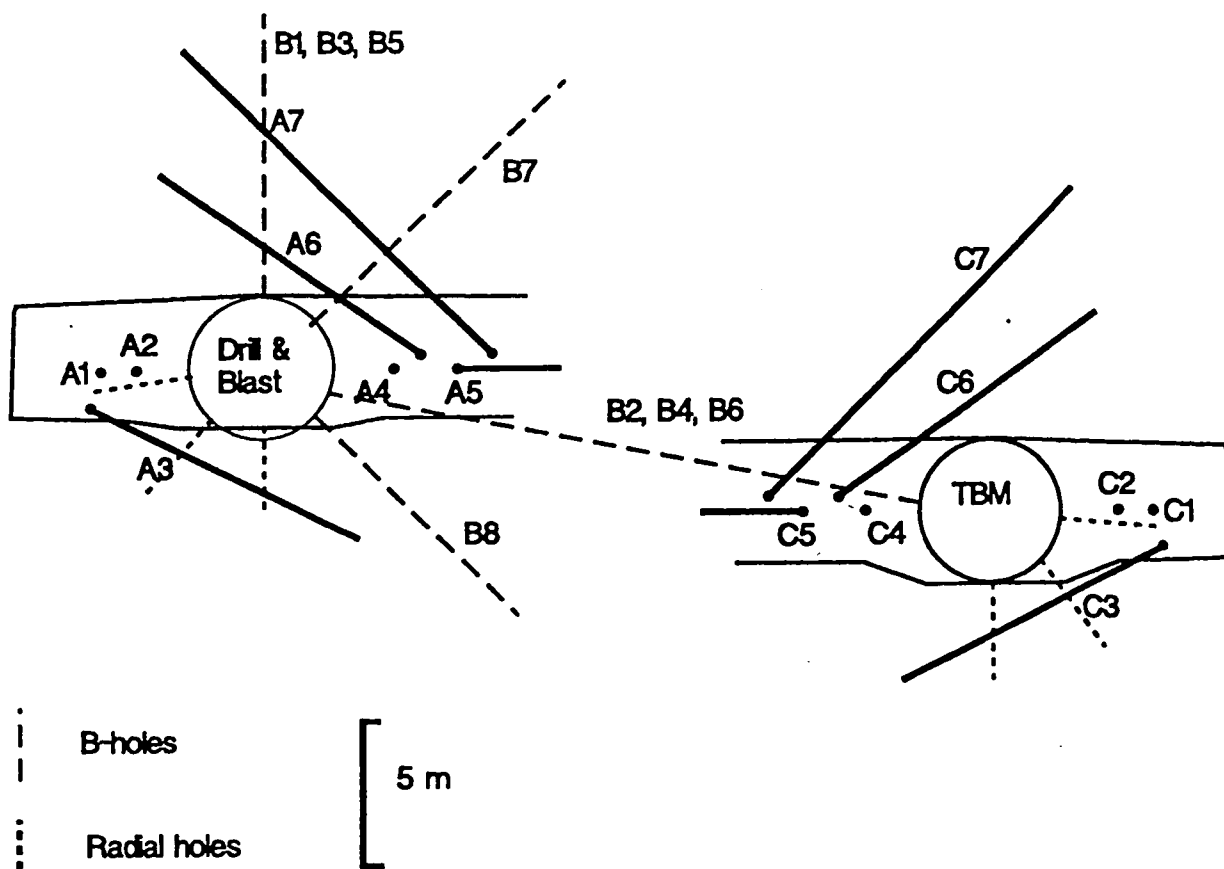


図4.2.4 HLWの計測用ボーリング配置（断面図）

表4.2.1 HRLの計測用ボーリングの目的と仕様

Borehole number	Purpose	Orientation, location	Diameter (mm)	Length (m)
A1	vibration monitoring	horizontal, sidewall	86	40
A2	AE, directional radar	horizontal, sidewall	56	40
A3	AE, directional radar	plunging, floor	56	45
A4	AE, seismic, permeability	horizontal, sidewall	56	40
A5	seismic, permeability	horizontal, sidewall	56	40
A6	AE, seismic, directional radar	inclined, arch	56	45
A7	Seismic	inclined, arch	56	45
B1	seismic	radial, up; from D&B	56	10
B2	seismic, permeability	radial, horizontal; from TBM	56	25
B3	seismic	radial, up; from D&B	56	10
B4	seismic, permeability	radial, horizontal; from TBM	56	25
B5	MPBX	radial, up; from D&B	76	15
B6	MPBX	radial, horizontal; from TBM	76	25
B7	MPBX	radial, 45° up; from D&B	76	15
B8	MPBX	radial, 45° down; from D&B	76	15
C1	vibration monitoring	horizontal, sidewall	86	40
C2	AE, directional radar	horizontal, sidewall	56	40
C3	AE, directional radar	plunging, floor	56	45
C4	AE, seismic, permeability	horizontal, sidewall	56	40
C5	seismic, permeability	horizontal, sidewall	56	40
C6	AE, seismic, directional radar	inclined, arch	56	45
C7	Seismic	inclined, arch	56	45
C8	stress	horizontal (not at drift)	86	20
Radial	P-wave velocity, borehole resonance, permeability	radial: down, 45° down, horizontal	86	3

に不均質性の影響を受けるものと思われる。そこで、水理特性に最も大きな影響を及ぼすと考えられるき裂の方向に着目し、掘削影響領域の異方性が計測できるように計器の配置を設計している。

また、掘削損傷領域は掘削工法により影響を受けると考えられるため、2工法（普通発破工法とスムーズプラスディング工法）の工区を設けて、計測値の違いを比較するよう計画している。

掘削中の計測項目は、

- 1) 加速度（掘削衝撃の程度を調べる）
- 2) 温度
- 3) AE計測（クラックの発生領域を調べる）
- 4) 内空変位
- 5) 岩盤内変位

事後調査項目としては、

- 1) 坑内観察（き裂分布を調べる）
- 2) 透水試験（坑軸方向ならびにラジアル方向の透水性を調べる）
- 3) 弾性波トモグラフィ（損傷域を調べる）
- 4) P波および電磁波探査（損傷域を調べる）
- 5) 詳細透水試験（注水区間5 cm）（損傷域を調べる）
- 6) BTV観察（損傷域を調べる）
- 7) 室内コア試験（損傷域を調べる）

等方圧縮、透水、AE、空隙率、一軸、弾性波、マイクロクラック観察が計画されている。

期待される結果としては、以下の項目をあげている。

- 1) 掘削による岩盤損傷状況（マクロおよびマイクロクラックの発生）
- 2) 掘削にともなう衝撃力の評価
- 3) 掘削手法によるき裂状態の比較（き裂密度、き裂特性）
- 4) 掘削損傷域の広がり（以下のパラメータに対して）
 - －発生き裂密度
 - －マイクロクラック
 - －AE
 - －電磁波、弾性波速度
 - －温度変化
 - －透水性
- 5) 掘削手法による坑内湧水量の比較

6) 掘削損傷領域評価のための計測手法の検証

7) 掘削手法最適化のためのデータ

URLにおける掘削影響試験計画についてまとめたものを表4.2.2に示している。

4.2.2 カナダ (URL)

カナダの Underground Research Laboratory (URL) の深度420mで実施された掘削影響試験の目的は、空洞掘削にともなう応力解放に対する岩盤挙動の精度よい計測である。このため、以下に示すように他の要因をできるだけ少なくする努力を行い、試験精度を上げている。

- 1) き裂の無いゾーンを選ぶ。
- 2) 掘削損傷域を極力小さくする。(ラインドリリング+水圧スプリッター工法)
- 3) 温度の影響を無くする。(温度調整ベンチレーション)
- 4) 試験坑軸は最大主応力軸に垂直方向(岩盤挙動を最大に発生させる)

図4.2.5にはURLの概観を示すとともに、掘削影響試験(Mine-by Experiment)の実施された試験位置を示している。

事前調査項目としては

- ・クロスホール弾性波探査(岩盤構造)

が上げられている。

坑道掘削中の計測項目としては以下の項目を上げている。

- 1) 地中変位(16孔)
- 2) 三軸ひずみ(応力変化)
- 3) AE計測(マイクロクラック発生領域)
- 4) EDEX計測(Excavation Damage Extensometer)

各計測計の配置計画は図4.2.6に示されている。

また、事後調査項目としては、以下の項目を上げている。

- 1) クロスホール弾性波探査
- 2) 坑道下盤の透水試験

以上の地中変位計測以外は、試験坑の周辺1mのゾーンの計測に集中している。掘削損傷領域の調査というよりも、トンネル工学における”塑性域(ゆるみ域)”の特性調査というべきである。

期待される結果としては、

表4.2.2 HRLにおける掘削影響試験のまとめ

1	場所：スウェーデン, エスポー
2	地質：Diorite
3	深度：430m
4	スケジュール：1994～1995
5	目的：掘削工法の違い EDZの定量評価のための手法の検証 EDZの発生原因・特性変化の程度・広がり と掘削工法依存性
6	初期応力
7	坑道断面 円形 ($\phi = 3.0\text{m}$)
8	長さ
9	掘削手法：機械掘削と発破工法
10	レイアウト 図4.2.3参照 離間距離 (TBM坑道とD&B坑道) 25m
11	事前調査項目 ・コア観察、BTV、温度 ・弾性波トモグラフィー、レーダートモグラフィー ・透水実験
12	掘削中の計測項目 ・岩盤内変位、内空変位 ・応力計測 ・AE測定 ・振動測定
13	事後調査 ・透水試験 (計測坑道および試験坑道から掘削した試錐において)

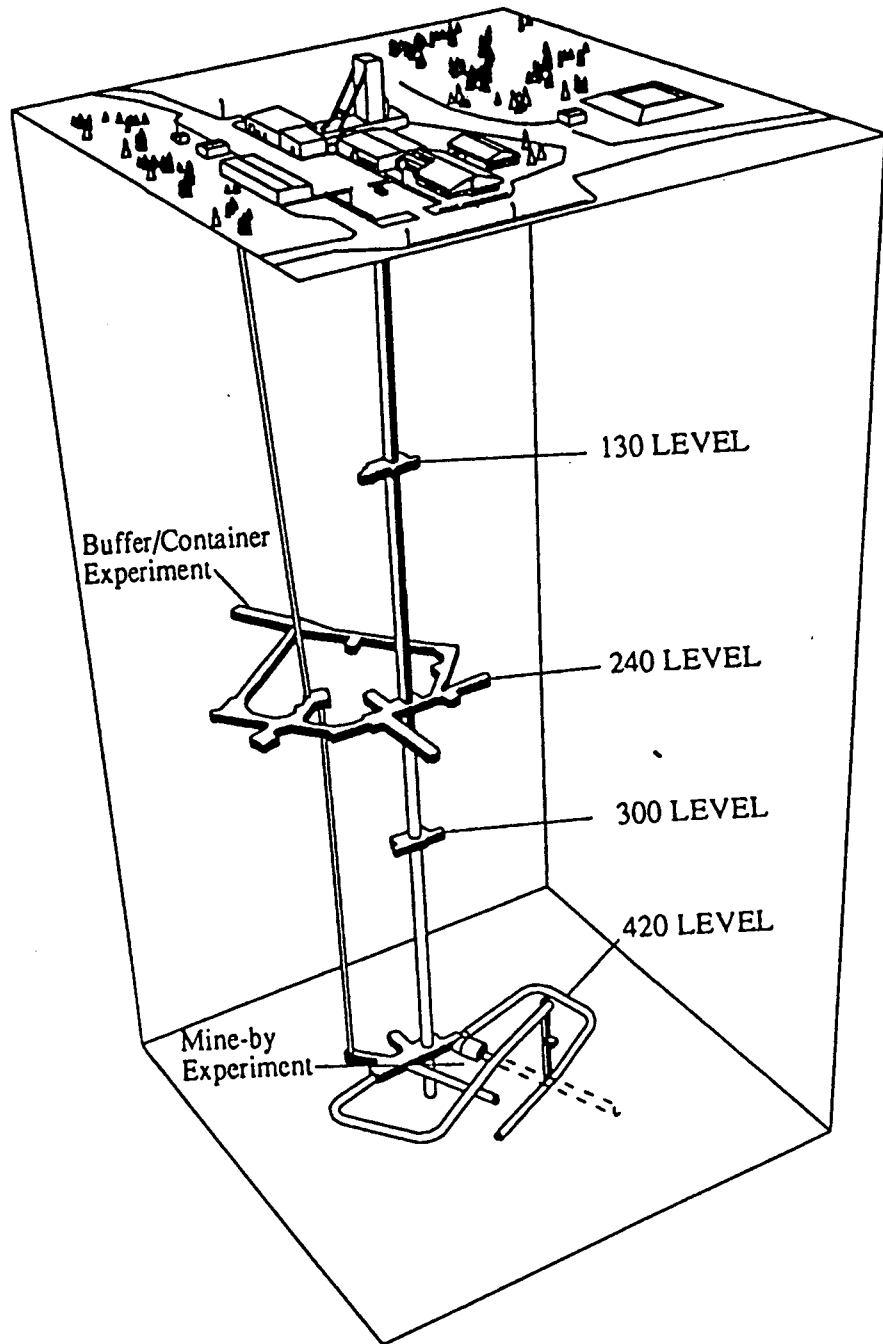


図4.2.5 URL (カナダ) の概観

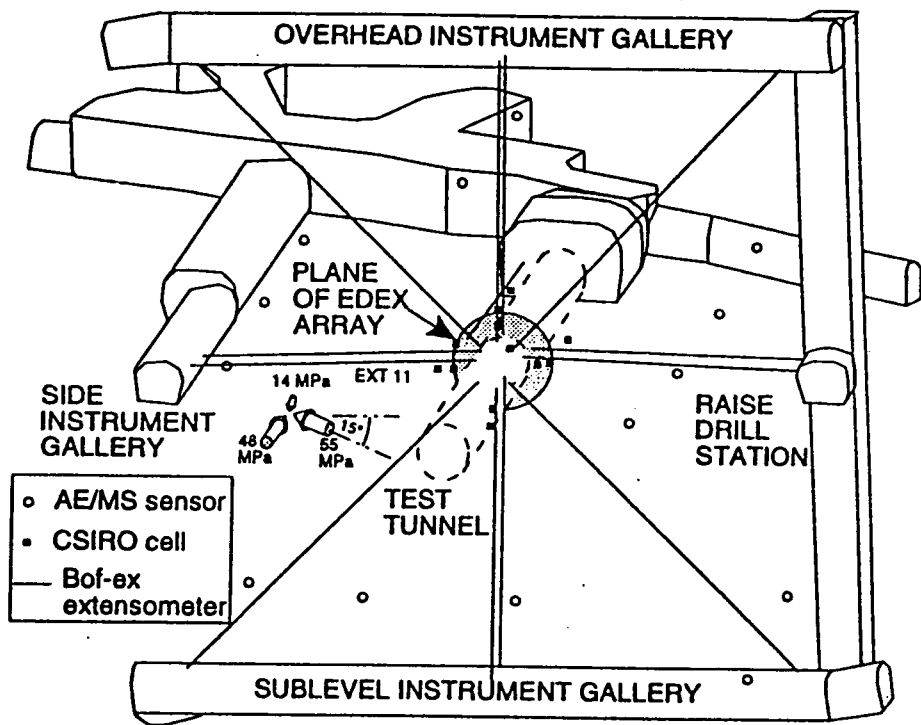


図4.2.6 URLの掘削影響試験における計測配置

- 1) 坑道掘削にともなう応力解放に対する連続体としての岩盤挙動の把握
- 2) 掘削損傷域の計測（A E計測）
- 3) 掘削損傷域の応力の計測（EDEX計測）
- 4) 計測機器の検証
- 5) 掘削による応力解放にともなう透水性の変化の確認

このURLにおける掘削影響試験のまとめを表4.2.3に示している。

4.2.3 スイス（GTS）

スイスにおける掘削影響領域は、空洞から母岩への遷移領域として位置づけられ、地下水流動と物質移行に影響をおよぼす特性変化を持つ領域として試験対象となっている。

したがって、掘削影響試験の目的は、水理特性の変化する領域の広さと特性変化の評価である。試験の課題としては、

- 1) 掘削影響領域の調査手法の開発
- 2) 坑道周辺の軸方向流れの評価手法の開発

である。

まずは、既存坑道周辺に掘削影響領域が存在するかどうかを以下の手法で調査する。

- 1) 水理学的調査
- 2) 地球物理学的調査
- 3) 岩盤力学的調査

これらはすべて既存坑道から掘削した2～3mの放射状ボーリング孔内で実施される。水理学的調査は、単孔、クロスホール試験を含む。また、地球物理学的手法はクロスホール弾性波探査、電磁波探査を含む。

期待される出力としては、

- 1) 掘削影響領域の広がり
- 2) 掘削影響領域の水理特性（異方性、連続性、坑軸方向透水性）
- 3) 掘削影響領域の特性調査手法の検討データ
- 4) 岩盤モデリングの検証のためのデータベース

を与えるものである。

グリムゼルにおける掘削影響試験のまとめを表4.2.4に示している。

表4.2.3 URLにおける掘削影響試験のまとめ

- 1 場所：カナダ、ホワイトシエル
- 2 地質：unfractured granitic rock
- 3 深度：420m
- 4 スケジュール：1992
- 5 目的：応力解放による岩盤挙動の把握
- 6 初期応力： $\sigma_1=55\text{MP}$ $\sigma_2=48\text{MP}$ $\sigma_3=14\text{MP}$ $\sigma_H/\sigma_V=4$
- 7 坑道断面：円形 ($\phi=3.5\text{m}$)
- 8 長さ：46m (ピッチ 0.5m×3 区間+1.0m区間)
- 9 掘削手法：ラインドリリング+ハイδροリックスプリット
- 10 レイアウト 図4.2.6参照 計測坑道との離間距離20m
- 11 事前調査項目
 - ・クロスホール弾性波探査
- 12 掘削中の計測項目
 - ・変位計 (変位) 計測坑道から
Excavation Damage Extensometer (新規坑道)
(1m領域の変位)
 - ・三軸歪セル (応力変化)
 - ・AE/MSシステム (発生亀裂位置)
 - ・内空変位
- 13 事後調査
 - ・Connected Permeability Test 床面

表4.2.4 グリムセルにおける掘削影響試験のまとめ

1	場所：スイス、グリムゼル
2	地質：花崗岩
3	深度：450m
4	スケジュール：1994～1996
5	目的：EDZの広がりを評価する。 調査手法・モデル化手法の開発
6	初期応力： $\sigma_1=28\text{MP}$ $\sigma_2=12\text{MP}$ $\sigma_3=12.6\text{MP}$
7	坑道断面：円形 ($\phi = 3.5\text{m}$)
8	長さ：
9	掘削手法：機械掘削
10	レイアウト
11	事前調査項目 ・地質調査 ・初期応力
12	掘削中の計測項目 (明確な記述なし)
13	事後調査 (EDZの存在の確認) ・試験坑からのボーリング ・透水試験 (単孔、孔間) ・トレーサー ・弾性波探査 ・AE計測
14	特記 今回はEDZ=1.5m～3m、今回は1.0mぐらいを予想している。

4.2.4 釜石原位置試験における掘削影響試験

釜石鉱山においては2度にわたって掘削影響試験が実施されている。対象岩盤は栗橋花崗岩閃緑岩である。試験位置は土被り約260mの550mレベル坑道内で実施されている。試験坑道はき裂卓越方向に直交する方向と平行な方向に掘削され、掘削の影響が対比されている。また、掘削手法も普通発破工法とスムーズプラスチック工法で実施され、工法の違いも検討されている。ここでの掘削影響試験の目的を列挙すると以下のようなものである。

- 1) 坑道掘削にともなう力学的・水理学的な影響を把握する。
- 2) 坑道方向に対するき裂卓越方向の影響を検討する。
- 3) 掘削工法の違いを検討する。
- 4) 既存の調査・計測手法の適用性を検討する。

図4.2.7においては、き裂の卓越方向と直交する方向に掘削されたKD-88坑道周辺の調査・計測用のボーリング配置を示している。一方、図4.2.8においては、き裂の卓越方向に沿った方向に掘削されたKD-89坑道周辺の調査・計測用のボーリング配置を示している。

事前調査項目としては、以下のものが実施された。

- 1) き裂調査（既存坑壁、試錐コア、BTV）
- 2) 初期応力計測
- 3) 孔内載荷試験
- 4) 孔内透水試験

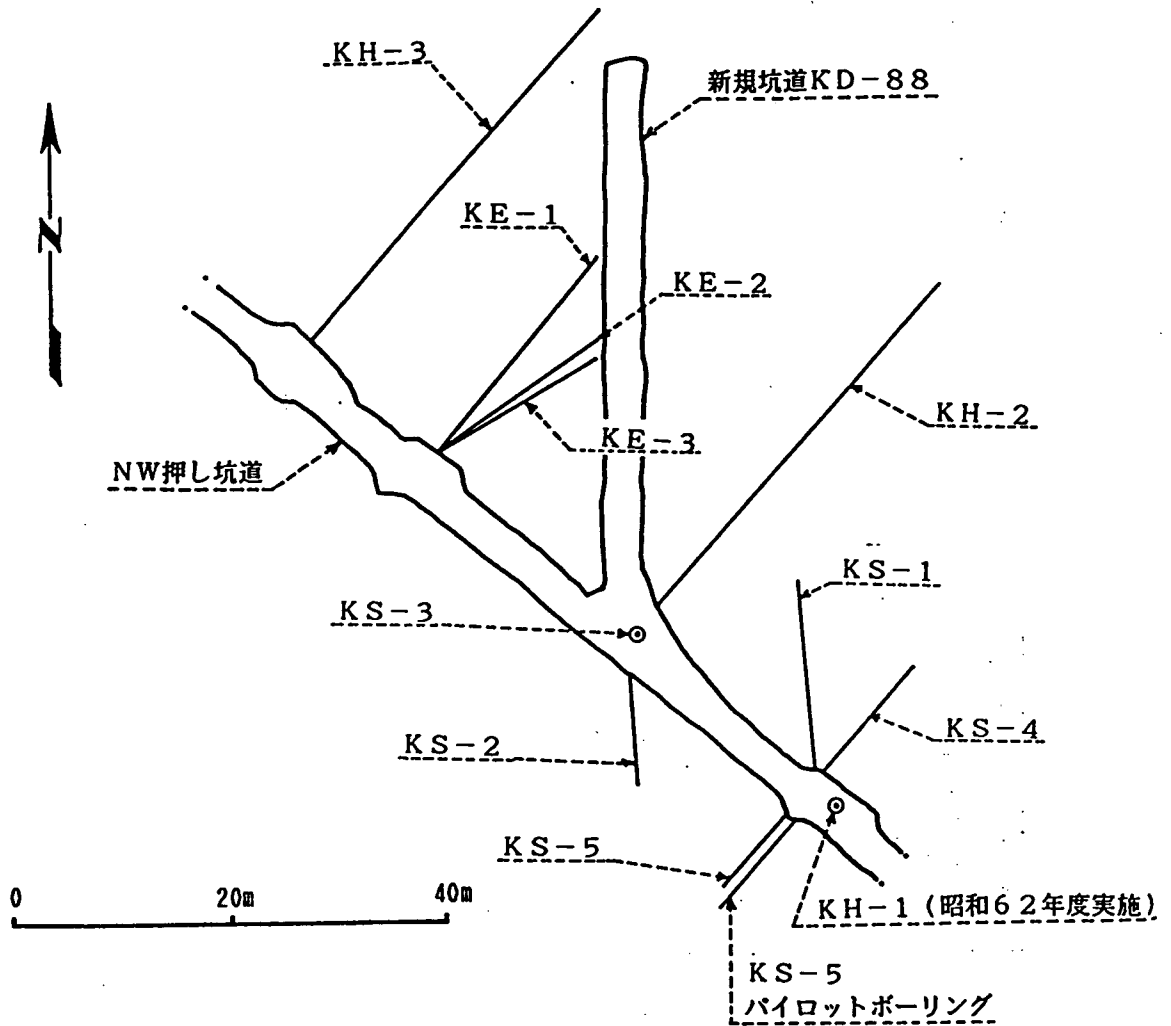
坑道掘削中の計測項目としては、限られた個数ではあるが以下のものが実施された。

- 1) 岩盤ひずみ
- 2) 岩盤応力変化

事後調査としては、事前調査と対比するために以下の項目を実施している。

- 1) 孔内載荷試験
- 2) 孔内透水試験

表4.2.5には釜石鉱山における掘削影響試験のまとめを示している。



孔名	R. Q. D. (%)	コア採取率 (%)	目的	孔径 (mm)	延試錐長 (m)
KH-2	87	100	物理検層	78	80.7
KH-3	85	100	低圧ルジオン試験		
KS-1	84	98	岩盤応力測定	167	62.8
KS-2	98	100		78	10.6
KS-3	93	100		50	13.8
KS-4	87	99			
KS-5	99	100			
KE-1	97	99	坑道掘削に伴う	76.5	57.0
KE-2	90	99	物性変化、地圧変化		
KE-3	98	100	ひずみ変化		

図4.2.7 釜石原位置試験KD-88坑における掘削影響試験

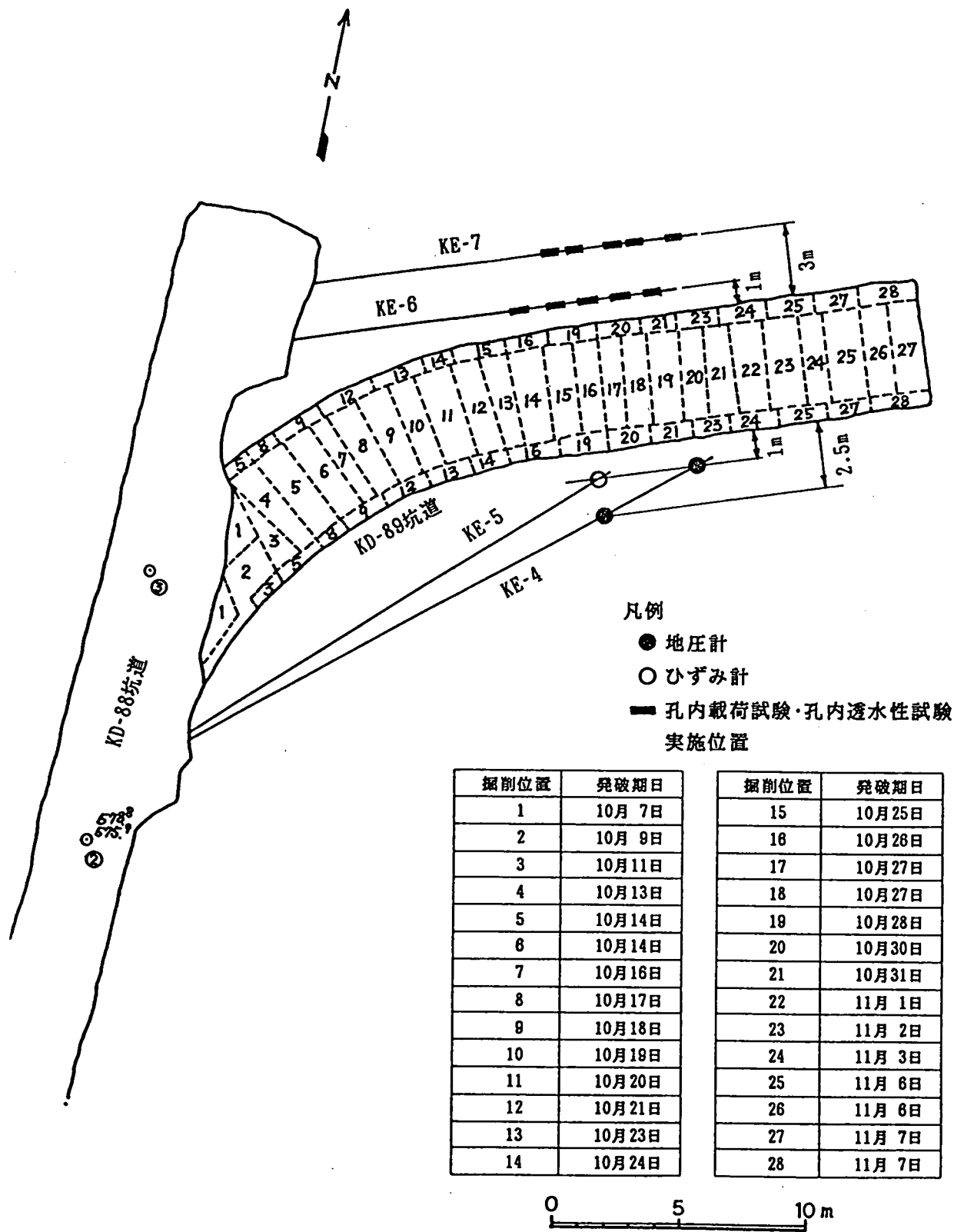


図4.2.8 釜石原位置試験KD-89坑における掘削影響試験

表4.2.5 釜石鉱山における掘削影響試験のまとめ

1	場所：釜石鉱山
2	地質：栗橋花崗閃緑岩
3	深度：260m
4	スケジュール：1988（KD-88坑） 1989（KD-89坑）
5	目的：力学・水理学的な掘削影響の把握 掘削工法や割れ目の卓越方向に対する影響の把握 現有の調査試験技術の適用性
6	初期応力： $\sigma_1=19.2\text{MPa}$ $\sigma_2=17.09\text{MPa}$ $\sigma_3=6.03\text{MPa}$
7	坑道断面：KD-88坑（3.0m×2.5m） KD-89坑（5.0m×3.0m）
8	長さ：KD-88坑（51m） KD-89坑（30.5m）
9	掘削手法：普通発破（KD-88） スムーズプラスディング（KD-89）（ピッチ1.3m）
10	レイアウト：割れ目に直交（KD-88）、割れ目に平行（KD-89） 計測坑道からの離間18m、計測坑道からの離間15m
11	事前調査項目 ・亀裂調査（坑壁、コア、BTV） ・初期応力 ・孔内載荷試験 ・透水試験
12	掘削中の計測項目 ・ひずみ ・地圧
13	事後調査 ・孔内載荷試験 ・透水試験

4.2.5 神岡鉱山における掘削影響試験

神岡鉱山においてはき裂性の片麻岩／変深成岩の混成岩を対象とした掘削影響試験が実施されている。実施場所は深度175mの位置にある。ここにおける掘削影響試験の目的は、

- 1) 不連続岩盤の挙動評価
- 2) 支保設計手法の確立
- 3) 岩盤掘削時の挙動計測
- 4) 岩盤計測手法の適用性試験

である。

計測坑道は図4.2.9に示すような幌型の坑道で構成し、その中央に5 m×4 mの幌型断面の坑道を掘削する。

事前調査項目は図4.2.9に配置を示す通り、

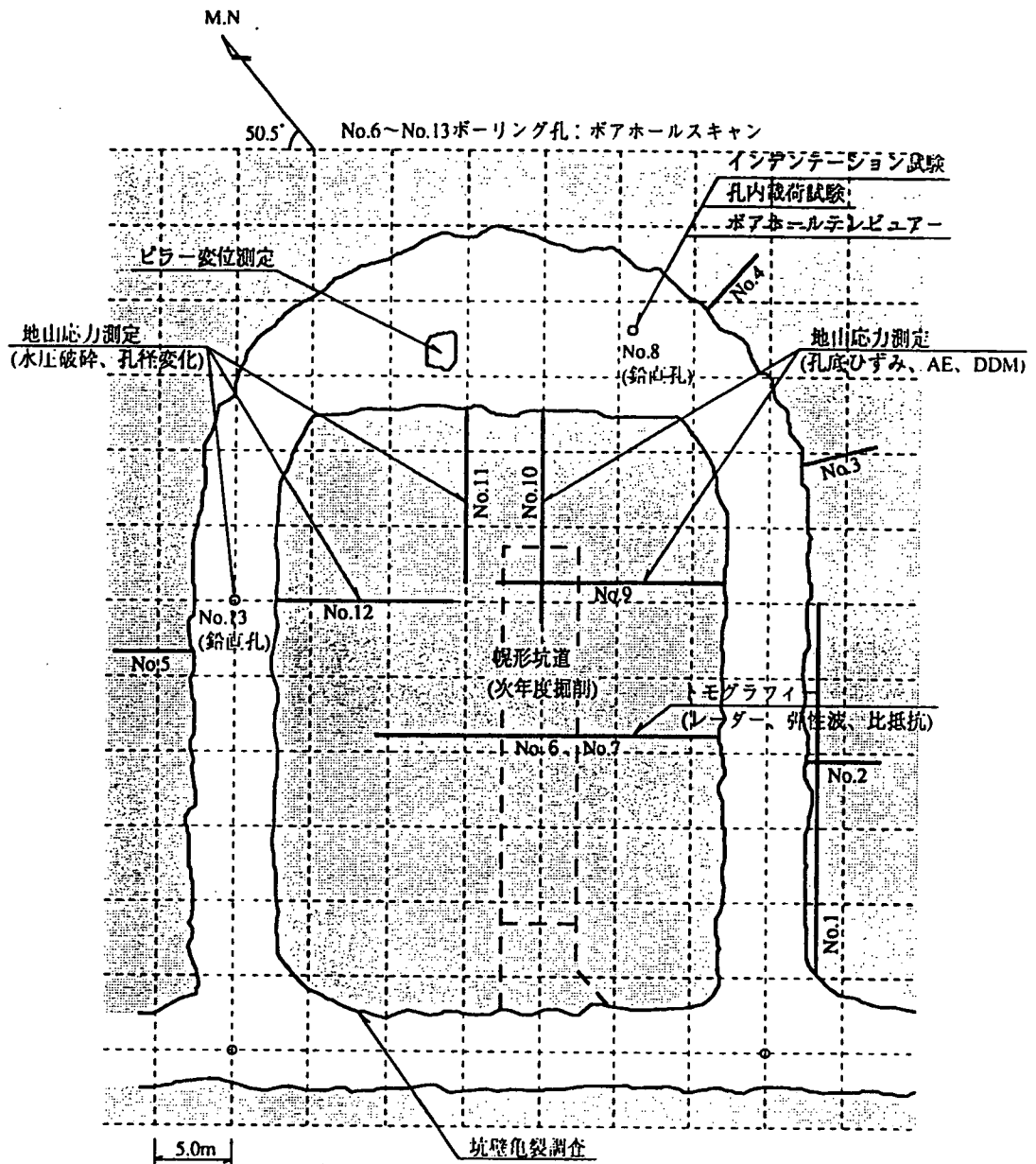
- 1) き裂調査（孔壁、試錐コア、BTV）
- 2) 初期応力（水圧破碎法、孔底ひずみ法、AE法、DDM法）
- 3) 孔内載荷試験
- 4) トモグラフィ（レーダー、弾性波、比抵抗）
- 5) ピラー変形試験

である。また、試験坑道掘削中の計測項目としては、

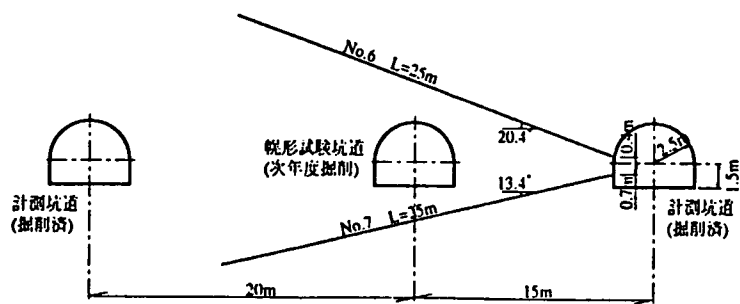
- 1) 孔底ひずみ計測
- 2) 地中変位計測
- 3) ジョイント変位計測

を実施している。

以上の計測結果を踏まえて、不連続岩盤のモデル化ならびに三次元解析モデル作成、ならびに解析手法の適用性検討が事後検討項目に挙がっている。

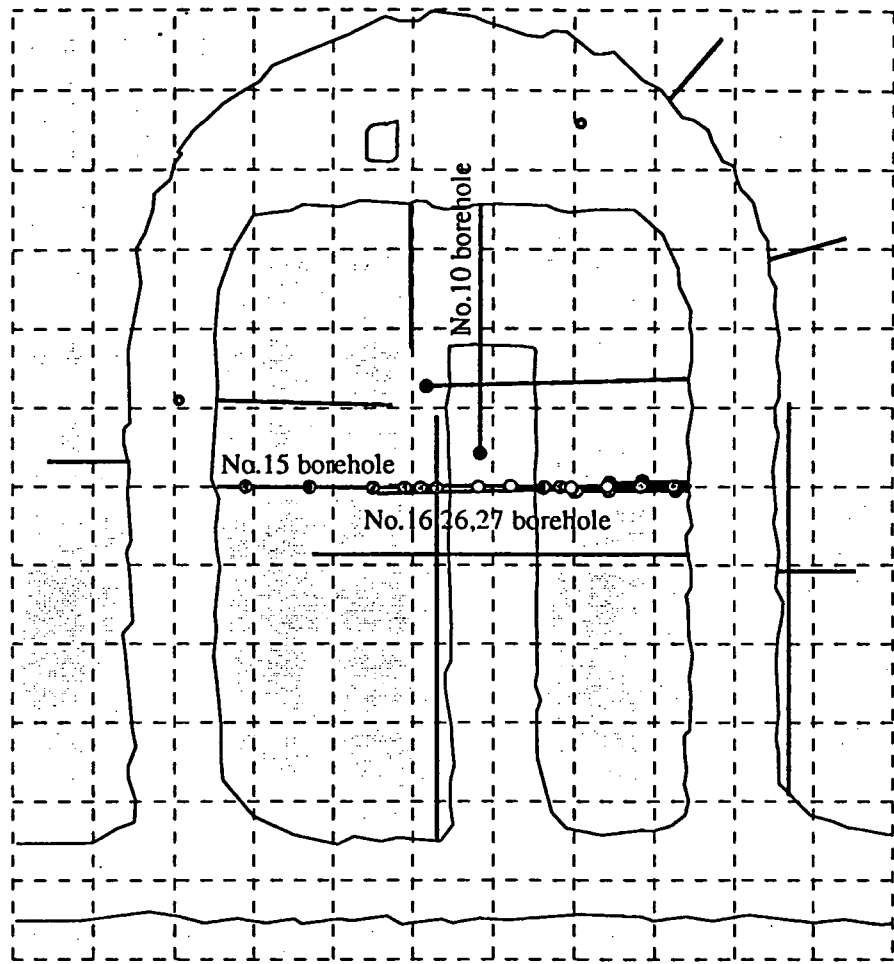


試験場平面図



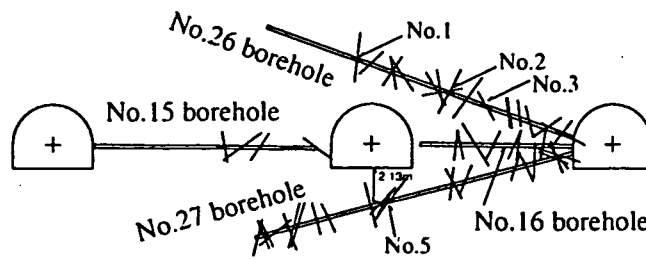
トモグラフィー試験断面

図4.2.9 神岡鉱山における掘削影響試験 (その1)
 (連帯共同研究: 通商産業省工業技術院
 資源環境技術総合研究所、(株)大林組)



- : 孔底ひずみゲージ
- ⊙ : 地中変位計
- : ジョイント変位計

試験場平面図



ジョイント変位計測断面

図4.2.10 神岡鉱山における掘削影響試験 (その2)
 (連帯共同研究: 通商産業省工業技術院
 資源環境技術総合研究所、(株)大林組)

表4.2.6 神岡鉱山における掘削影響試験のまとめ

- 1 場所：神岡鉱山
- 2 地質：片麻岩／変深成岩、混成岩
- 3 深度：175m
- 4 スケジュール：1993年掘削
- 5 目的：不連続岩盤挙動評価および支保設計手法の確立
- 6 初期応力： $\sigma_1=5.04\text{MPa}$ $\sigma_2=1.88\text{MPa}$ $\sigma_3=1.22\text{MPa}$
- 7 坑道断面：幌形（5m×4m）
- 8 坑道長さ：30m
- 9 掘削手法：発破工法
- 10 レイアウト：図4.2.9参照、U字型、計測坑道からの離間15m
- 11 事前調査項目
 - ・亀裂調査（坑壁、ボーリングコア、ボアホールTV）
 - ・初期応力（水圧破碎、孔底ひずみ法、AE、DDM）
 - ・孔内載荷試験
 - ・トモグラフィ（レーダー、弾性波、比抵抗）
 - ・ピラー変形試験
 - ・事前解析
- 12 掘削中の計測項目
 - ・孔底ひずみ計
 - ・地中変位計
 - ・ジョイント変位計
- 13 事後調査
 - ・三次元解析モデル
 - ・不連続岩盤モデル

4.3 コンセプトの確立

動力炉・核燃料開発事業団では、これまでの原位置試験ならびに国内外の事例検討を踏まえて、図 4.3.1 に示すように、掘削影響に関する事象をまとめている。¹²⁾ 本研究においても、この考え方を踏襲して、以下の目的で「新規坑道掘削にともなう掘削影響領域の評価」の詳細実施計画について検討している。すなわち、

- 1) 掘削に伴って発生する現象を把握し、掘削影響領域の広がりを把握する。
- 2) 掘削に伴って発生する現象と掘削影響領域の特性との関係を把握する。
- 3) 既存の計測および解析手法の掘削影響評価に対する適用性を評価する。
- 4) 掘削損傷領域の特性・広がり掘削工法との関係を評価する。

これまでの掘削影響試験の結果、掘削に伴って発生する現象としては、

- 1) 坑道周辺の掘削損傷域の発生
- 2) 坑道周辺の応力場の変化
- 3) 坑道周辺の間隙水圧の低下

が報告されている。

ここで、掘削損傷領域を評価する物理特性としては、き裂密度、弾性波速度、透水性、力学特性（変形定数、強度定数）があげられる。母岩と掘削損傷域の物理特性の相異が検討され、掘削損傷領域の物理特性データとしてまとめられる。

また、応力再配分領域の場の特性は岩盤内変位、ひずみ、応力計測により把握される。この応力再配分領域は、き裂分布の影響を反映した不連続性、異方性、不均質性を示す可能性があるため、計器の配置にはき裂の位置、方向、密度等を配慮する必要がある。また、岩盤内変位、ひずみ分布ともき裂を考慮した評価が不可欠である。また、応力再配分領域における透水性の変化はき裂の開口幅の変化とともに直接計測される。

坑道周辺の岩盤挙動について総合評価するため、また、各々のプロセスの関連性を評価するためには不連続岩盤のモデル化と数値解析が不可欠である。今回の計画では、不連続岩盤のモデル化および解析のためのデータを供給するとともに、モデルの妥当性ならびに解析手法の検証のためのデータベースも供給する。

掘削工法の違いによる損傷領域の広がり特性変化の相異を検討するために、本計画においては、普通発破工法とスムーズプラスティング工法を適用する。

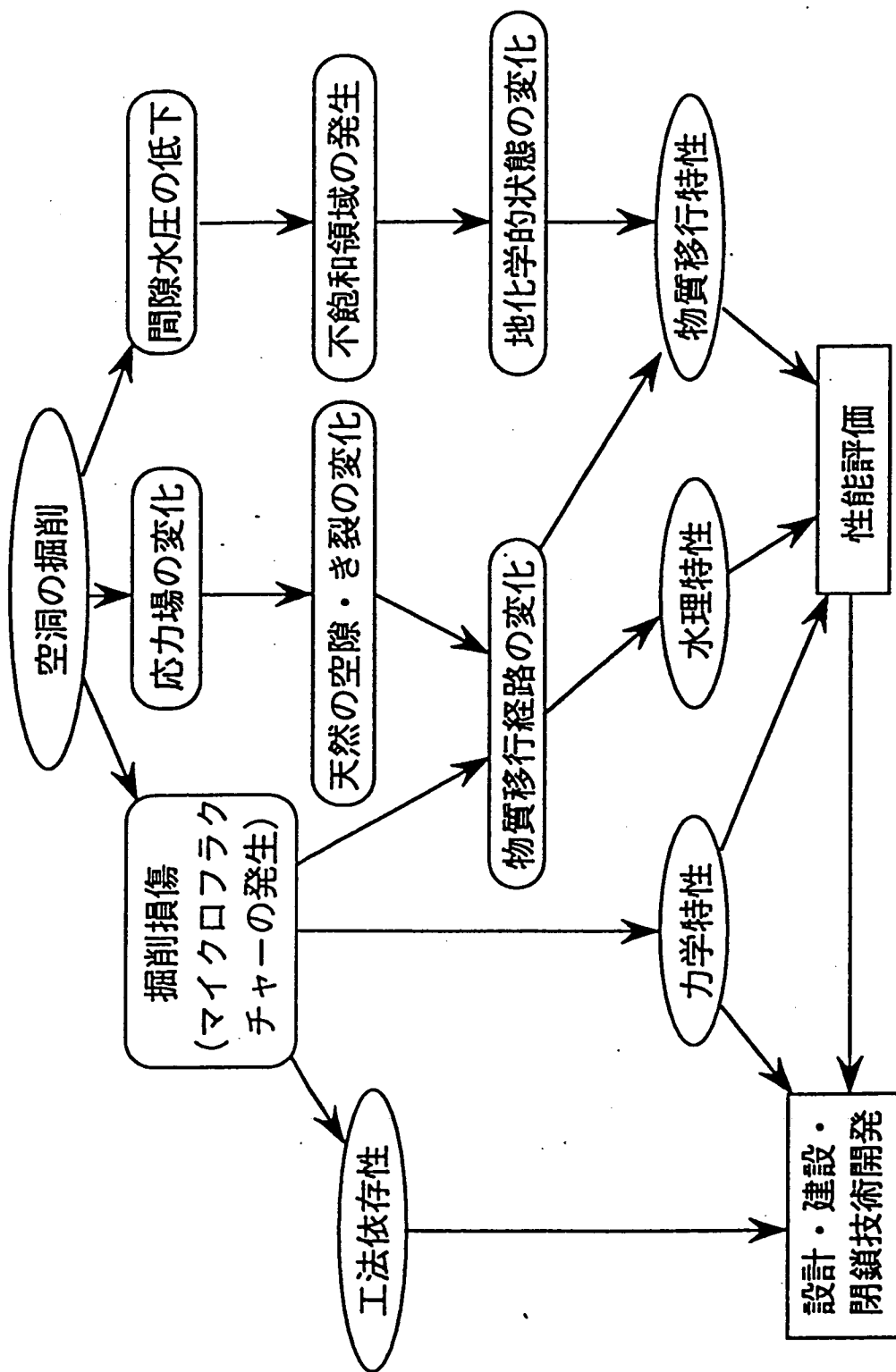


図4.3.1 掘削影響に関連する事象
(動力炉・核燃料開発事業団提案12)

掘削損傷域の評価手法は上述のとおりであるが、掘削損傷の度合いを計るパラメータ取得を目的として振動計測ならびにA E計測を計画する。

掘削損傷域ならびに応力再配分領域の計測手法、評価手法については各国ともまだ検討段階であるが、1988年にカナダにおいて開かれたOECD/NEAの放射性廃棄物の地層処分における掘削影響に関するシンポジウムならびに1993年に行われた釜石における原位置試験国際シンポジウムにおいて、原位置試験のデータの共有化、統一評価の方針で意見が一致している。今回の試験では、計測手法および評価手法の有効性の検証データを与えることも目的としている。

4.4 試験坑道のレイアウトの設定

4.4.1 試験坑道の大きさ

一般に、坑道の掘削断面積が大きくなるに従って、力学特性に関する掘削影響領域の広がりが大きくなると考えられる。例えば、道路トンネルや鉄道トンネルにおけるゆるみ層厚の測定結果でも、単線断面におけるゆるみ層厚と複線断面又は新幹線断面におけるゆるみ層厚を比較すると、後者の方が明らかにゆるみ層厚が厚いという結果が得られている。したがって、可能な限り坑道の掘削断面を大きくした方が、掘削影響領域の広がりが顕著になり、計測が容易になると考えられる。特に今回試験対象としている岩盤は非常に良好であり、坑道の断面が小さいと、ほとんど掘削影響領域が計測されない可能性もある。

HRLでは直径3.0mの円形断面、URLとGTSでは3.5mの円形断面、釜石のPhase Iでは5.0m×3.0mの矩形断面、神岡では5.0m×4.0mの幌形断面が採用されている。

本研究では可能な限り大きな断面として、動力炉・核燃料開発事業団が結晶質岩盤の坑道断面として示している5.0m×5.0mの幌形断面（図4.4.1）を提案する。⁹⁾

なお、計測坑道の断面は作業に支障のない大きさものとして、釜石鉱山の標準坑道断面である3.0m×2.5mの矩形断面（図4.4.2参照）とする。

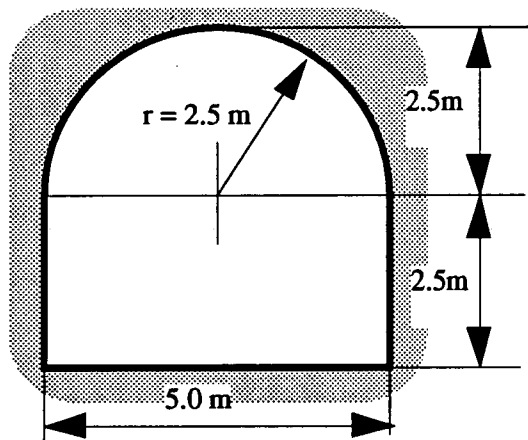


図4.4.1 試験坑道断面

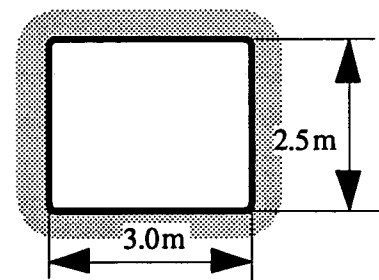


図4.4.2 計測坑道断面

4.4.2 試験坑道の方向

試験坑道の方向は、解析断面で卓越き裂の挙動が評価できるように、卓越する不連続面群に沿った方向を選択した。既存坑道ならびに試験坑道の配置を考慮し、試験坑道と計測坑道を既存坑道と直交する方向に配置すると、図 4.4.3 に示すようなレイアウトとなる。

4.4.3 計測坑道と試験坑道の離間距離

掘削影響試験の実施位置の選定に際しては、既存坑道および計測坑道の掘削にともなう応力再配分の影響を受けないように配慮する必要がある。通常、坑道掘削時の応力再配分領域（掘削によって応力状態が変化する領域）は、坑道の直径 2～3 倍程度であると考えられている。したがって、2つの坑道の応力再配分領域が重ならない（相互に干渉しない）ようにするためには、試験坑道と計測坑道との距離を、坑道の直径の 4～6 倍以上にする必要がある。また、既存坑道から、坑道の直径 2～3 倍以上離れた位置に計測断面を設ける必要がある。一方、ボーリング孔を利用して計測機器を設置する場合、削孔長が長くなるほど、所定の位置に精度良く計測機器を設置することが困難になる。したがって、できるだけ正確な測定を行うという立場からは、試験の実施位置と計測坑道および既存坑道との距離が短いことが望ましい。

本計画では試験坑道断面の幅は 5 m、計測坑道断面の幅は 3 m であるので離間距離は 16 m～24 m 以上が望ましい。また、既存坑道の断面幅は 3 m であるので計測断面は既存坑道坑壁から 6～9 m 離れることが望ましい。

以上を配慮し、本研究では図 4.4.3 に示すように計測坑道と試験坑道の離間距離は 24 m とし、坑道の施工性も配慮して計測断面は既存坑道の坑壁から 17 m ならびに 27 m に設置した。

4.4.4 試験坑道の長さ

試験坑道の長さは AA 計測断面から 2D（D：坑道径）に相当する 10 m の掘削を考慮して 37 m としている。また、計測坑道の長さは AA 断面へのボーリング孔掘削に支障のない長さとして 30 m に設定している。

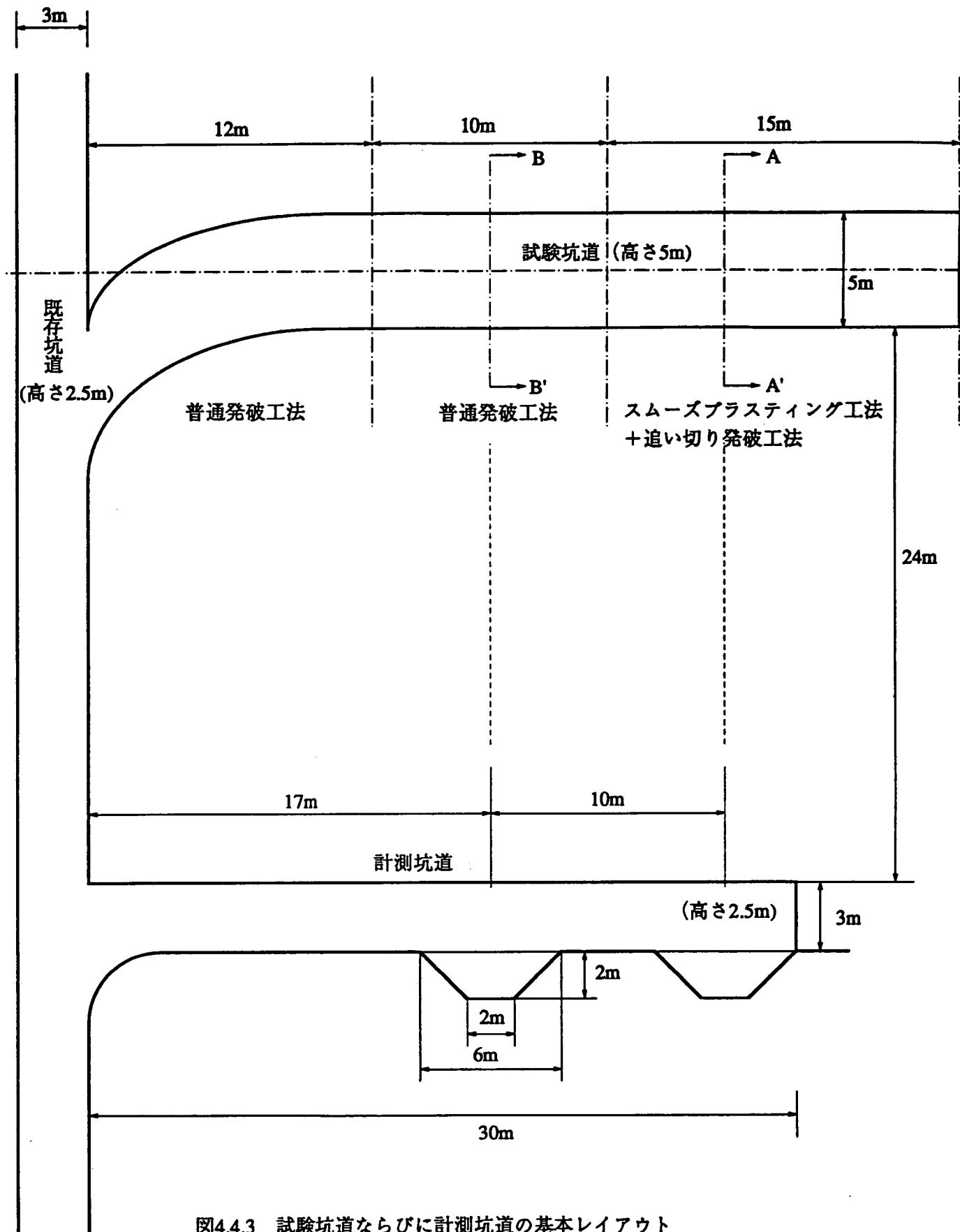


図4.4.3 試験坑道ならびに計測坑道の基本レイアウト

4.4.5 試験坑道位置の選択

試験坑道位置の選択にあたっては

①坑道の断面内に数本以上の不連続面が存在する位置を選ぶ。

②大規模不連続面や不連続面の集中帯が存在しない位置を選ぶ。

①の理由は、き裂数が少ないと不連続体としての挙動が現われにくいし、一方、き裂が多すぎると個別のき裂面の影響を特定しにくくなるためである。また、②の理由は、大規模不連続面やき裂群は力学特性の評価が困難と考えられるためである。

更に、試験坑道掘削中は発破振動やAE計測を計画しているため、試験坑道断面が同じ程度に不連続面を含むように選ぶ。今回の場合、試験坑道が既存坑道と直交するため、既存坑道の壁面き裂観察を参照し、既存坑道に直交するき裂群の位置に注目した。¹⁰⁾ 図4.4.4には2つの候補地点を示している。

①No.1候補地点

基点から31m～36mの地点である。図4.4.5に示すようにき裂番号No.38からNo.42を含むことになる。すべて閉口き裂であるがNo.42は小規模な破碎帯の態を示す。き裂の状態は表4.4.2に示されている。¹¹⁾

②No.2候補地点

基点から14m～19mの地点である。図4.5.5に示すようにき裂番号No.21からNo.25を含む。このうちNo.23、No.24、No.25は開口き裂である。(表4.4.1参照)¹¹⁾ この地点の難点は計測坑道との離間距離が取りにくい点にある。水圧計測用のKDH-1孔から計測坑道を1mだけ離すとすると、計測坑道と試験坑道の離間距離は17mとなる。

以後の事前調査ならびに計測計画の設計にあたってはNo.1候補地点を想定して計画を作成している。

4.4.6 掘削工法の選択

岩盤の掘削手法としては、普通発破工法、スムーズプラスティング工法、ラインドリリング工法、トンネルボーリングマシン(TBM)を用いた機械掘削工法が考えられる。ただし、本研究の試験位置が坑口から遠く離れており、ボーリングマシンの導入が困難なこと、試験坑道が短くTBMの経費率が悪いことから機械掘削の導入は難しいものと思われる。また、ラインドリリング工法は他の発破工法に比べて工期が非常にかかることから、今回の試験には適当で

ないとし、今回は普通発破工法とスムーズプラスティング工法を採用することを提案する。

どちらの工法も全断面掘削を基本とするが、岩盤への損傷の程度を軽減するためスムーズプラスティング工法では追切り発破を併用する。

発破の影響を比較するため、図4.4.3に示すようにスムーズプラスティング工区にはAA'断面、普通発破工区にはBB'断面を設けて掘削の影響を計測する。

なお、計測坑道は基本的には普通発破工法を用いるが、掘削手法や掘進長、薬量、掘進能率の検証のための試験区間を設け、掘削手法の予備調査を実施することとする。

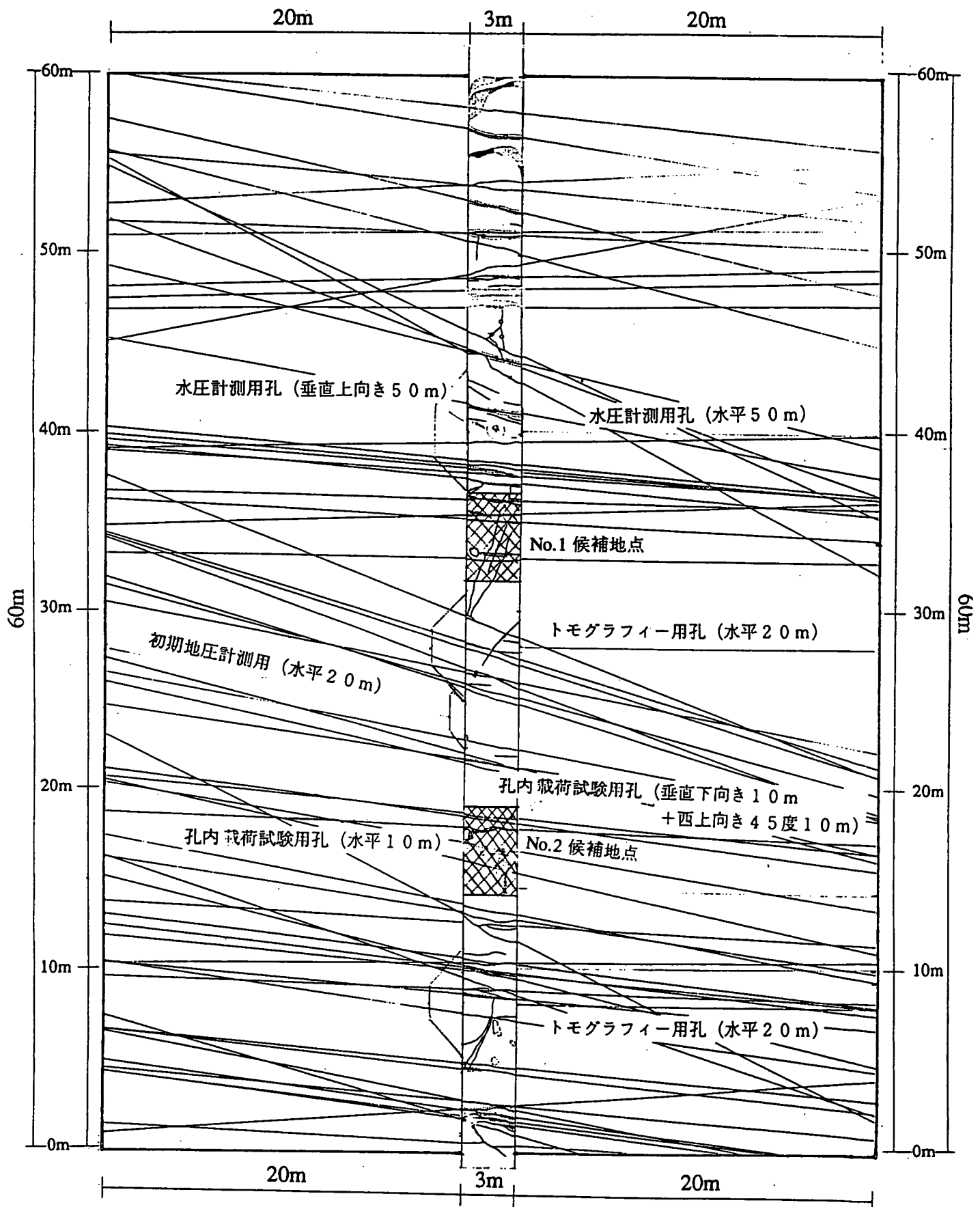


図4.4.4 試験坑道候補地点

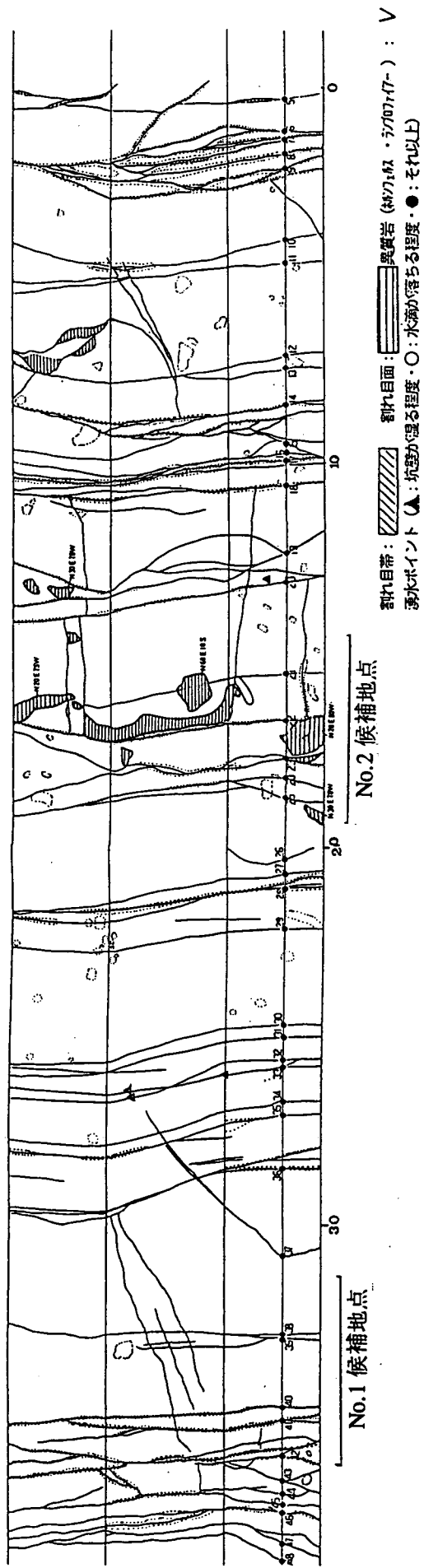


図4.4.5 候補地点のき裂状況 (250mレベル坑道壁面の割れ目分布)

表4.4.1 割れ目のチェックリスト (その1) II)

割れ目 No.	起点から の距離 (m)	タイプ	走向傾斜	開口の 有無 (mm)	条線		変質部		充填磁物			湧水 程度	
					有無	方向	有無	幅 (cm)	幅 (cm)	有無	色		
21	15.4	I	N80W85S	×	×	—	○	1	○	0.3	○	白	×
22	16.8	P	N80W80S	×	×	—	○	14	○	6	○	白, ピンク, 緑, 灰	×
23	17.8	C	N80W80S	1	○	N55W	○	10	○	2.5	○	白, 灰	×
24	18.3	C	N70W75N	1	○	N55W	○	5	○	3	○	白, 緑, 灰	×
25	18.7	P	N70E80N	1	○	N80W	×	—	○	0.8	○	白, 緑, 灰	×
26	20.3	P	N30E76W	1	×	—	×	—	×	—	×	—	×
27	20.7	P	EW80S	○	×	—	○	5	○	0.5	○	白	×
28	21.1	P	N80W76S	○	—	—	○	20	○	20	○	白, 灰	×
29	22.15	P	N80W76S	×	—	—	○	2	○	3	○	白, 灰	×
30	24.7	P	N80W80S	5	—	—	○	1	○	0.5	○	白	×
31	25	P	N80W80S	5	○	N20E	×	—	○	0.5	○	白	×
32	25.6	P	N80W80S	5	—	—	○	1	○	1	○	白, 灰	×
33	25.8	P	N80W88S	5	—	—	○	2	○	1	○	白, 灰	△
34	26.7	P	N80W88S	×	×	—	×	—	○	0.1	○	白	×
35	27.05	P	N80W82S	×	×	—	○	5	○	2	○	白, 緑	△
36	28.5	P	N80W80S	×	×	—	○	10	○	5	○	白, 緑	△

No.2 候補地点

表4.4.2 割れ目のチェックリスト (その2) II)

割れ目 No.	起点からの距離 (m)	タイプ	走向傾斜	開口の有無 (mm)	条線		変質部		充填鉱物			湧水程度
					有無	方向	有無	幅 (cm)	有無	幅 (cm)	色	
37	30.85	C	N65E78N	×	—	×	—	×	—	—	白, 緑	×
38	32.95	P	EW90	×	—	×	—	×	—	—	—	×
39	33.1	P	N80E90	×	—	×	—	×	—	—	—	×
40	34.9	P	N10W90	×	—	○	5	○	1	—	白, 緑	×
41	35.3	P	N5W78S	×	—	○	10	○	5	—	白, 緑, 茶	×
42	36.0~36.4	破碎帯	EW80S	×	NS	○	3	○	10	—	白, 緑, 茶	×
43	36.85	P	EW70N	2	NS	○	—	×	—	—	—	×
44	37.2	I	N75E85N	×	N10W	○	—	×	—	—	—	×
45	37.5	P~I	EW80N	×	NS	○	—	×	2	—	白	×
46	37.7	P	N75W80N	×	N30E	○	10	○	1	—	白, ピンク	×
47	38.5	P	N80W80N	×	N25E	○	—	×	1	—	白	×
48	39.0	P	N80W64N	×	N40E	○	—	×	—	—	—	×
49	39.55	P	EW90	×	75E	○	—	×	—	—	—	×
50	40.1	C~P	N70W85S	2	—	—	—	×	—	—	緑, 灰	×
51	40.4	P	EW80N	×	—	×	—	×	—	—	—	×
52	41.1	P	N70W60N	1	—	×	—	×	0.1	—	緑, 灰	×

No.1 候補地点

4.5 計測項目の抽出と配置計画

4.5.1 目的

本研究の目的は前述のとおり以下の4点である。

- 1) 掘削に伴って発生する現象を把握し、掘削影響領域の広がりを把握する。
- 2) 掘削にともなって発生する現象と掘削影響領域の特性との関係を把握する。
- 3) 既存の計測および解析手法の掘削影響評価に対する適用性を評価する。
- 4) 掘削損傷領域の特性・広がり掘削工法との関係を評価する。

ただし、掘削影響領域を考える場合、対象とする物理特性が異なると、その領域も異なると考えるため、計測項目を明確にして、計測器の選択と配置を考える必要がある。

図4.5.1には、掘削影響に係わる事象と調査・計測項目との対応を示している。4.3節でも述べたとおり、空洞周辺には、掘削損傷領域、応力再配分領域、水圧低下領域が発生すると考えられるため、計測計画にあたっては各領域の発生メカニズムとその特性の把握についての配慮が必要である。図4.5.1においては、ハッチをかけた項目が、今回の試験において対象としている事象である。

なお、トンネル工学の分野では応力再配分領域を2つに分け、弾性領域と塑性領域（ゆるみ域）として計測が行なわれている。本研究は上記掘削損傷領域と応力再配分領域を対象としている。また、水圧低下領域の調査は、本試験とは別の研究で実施されているため、今回の計画では主たる対象とはしていない。

4.5.2 計測方針

本研究の目的に対応して、計測目的を以下のように分けて、計測項目の抽出を行う。

- 1) 掘削損傷領域の発生メカニズムとその特性を調べる。
- 2) 応力再配分領域の広がり・特性を調べる。
- 3) 事前計画・モデリング・解析のためのデータを与える。
- 4) 掘削工法の影響を調べる。

各調査・計測は主として前述の図4.4.3におけるAA'断面、および、BB'断面の2断面で集中的に実施し、掘削工法による比較はこの両断面での計測値の比較として示される。なお、本節においては、試験坑道掘削中の計測計画を中心に説明し、次節において掘削前後の試験計画について説明する。

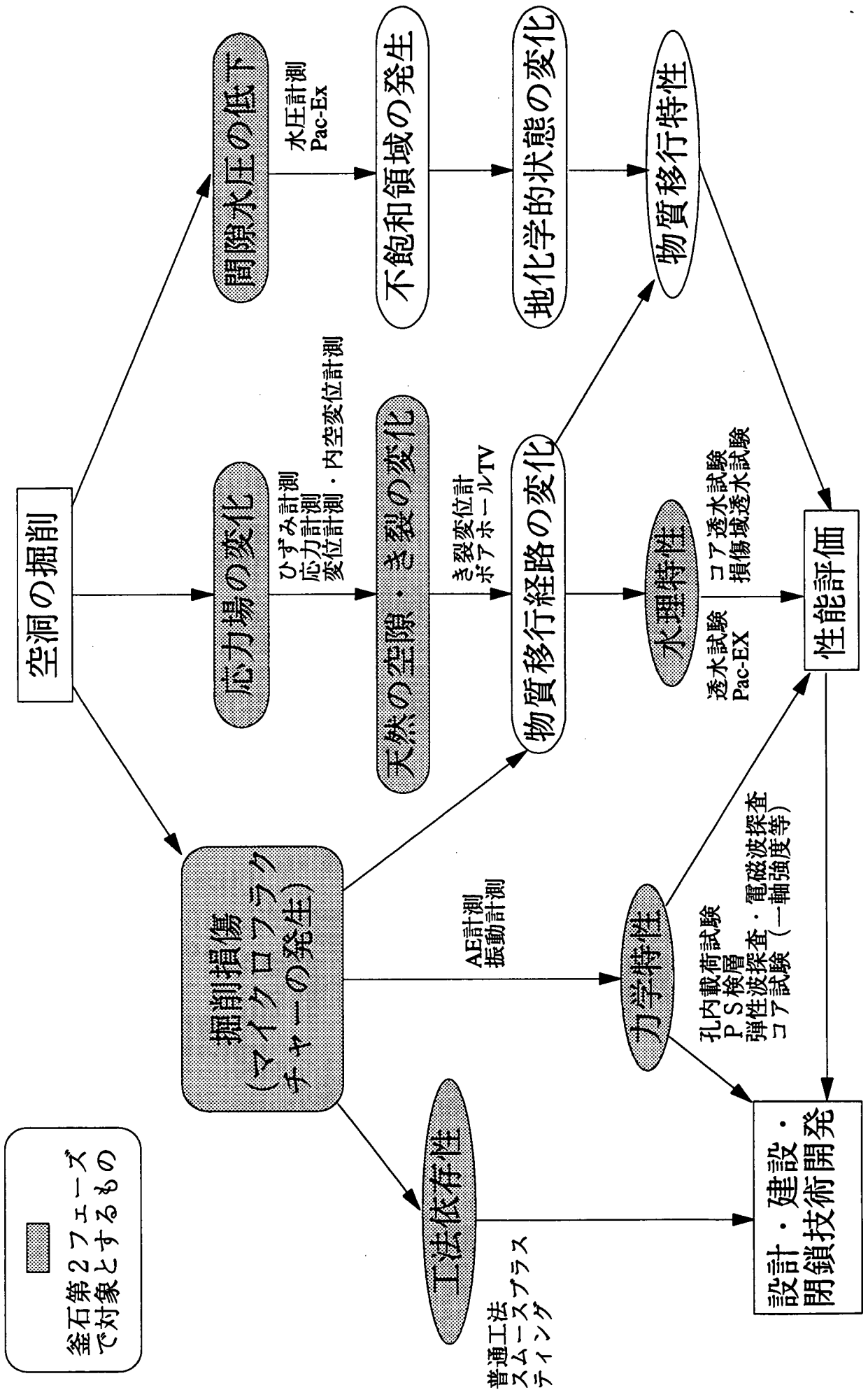


図4.5.1 掘削影響に係わる事象と調査・計測項目との対応

4.5.3 掘削損傷領域の調査

掘削損傷領域の発生メカニズムとその特性の調査のための計測項目は以下のとおりである。

- 1) A E計測 (掘削中)
- 2) 振動計測 (掘削中)
- 3) P S検層 (掘削後)
- 4) 弾性波探査・電磁波探査 (掘削後)
- 5) 透水試験 (掘削後)
- 6) 室内力学試験 (掘削後)

A E計測は計測断面 A A'、B B'で各6点ずつ実施し、掘削中のマイクロクラックの発生の程度と位置を評価する。

発破工法による掘削衝撃の大きさを把握するため、振動計測 (加速度計測) を実施し、掘削損傷領域の特性変化との関連性を検討する。A A'断面では5深度、B B'断面では2深度で計測を実施し、発破工法の相異を検討する。

P S検層は坑道掘削終了後坑道壁面から試錐を実施し、その孔内で実施される。弾性波速度の違いにより、損傷域の範囲を把握する。

また、坑道壁面に沿って弾性波探査、電磁波探査を実施し、損傷域の範囲を把握する。

透水試験は、深度2mの放射ボーリング内で10cmピッチで実施する。また、坑軸方向の平行なボーリング間で孔間透水試験を実施し、坑軸方向の透水性を評価する。

ボーリングコアを用いた室内試験では、一軸圧縮試験、引張試験、A E試験、弾性波試験、透水試験、マイクロクラック観察を深度別試料で実施する。

この内、P S検層、弾性波探査・電磁波探査、透水試験、室内力学試験については、次節の「掘削前後の調査・試験項目の抽出」で説明しているため、ここでは坑道掘削中の計測項目であるA E計測と振動計測の配置について説明する。

1) A E計測

目的 : 試験坑道掘削中の坑道側壁周辺のき裂発生ならびにき裂開口時に発生するA E波を計測し、掘削影響を検討する。

試験仕様 : 既存坑道から試験坑道に平行なボーリング YAE-1, YAE-2, YAE-3の3孔に各2個ずつの計6個のA E計を設置する。(図5.5.2参照)

ただし、B B'断面掘削中はこの6個のA E計はB B'断面側壁部に設

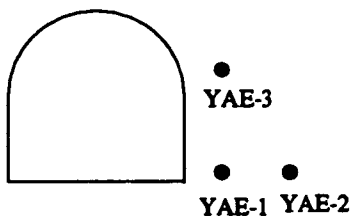
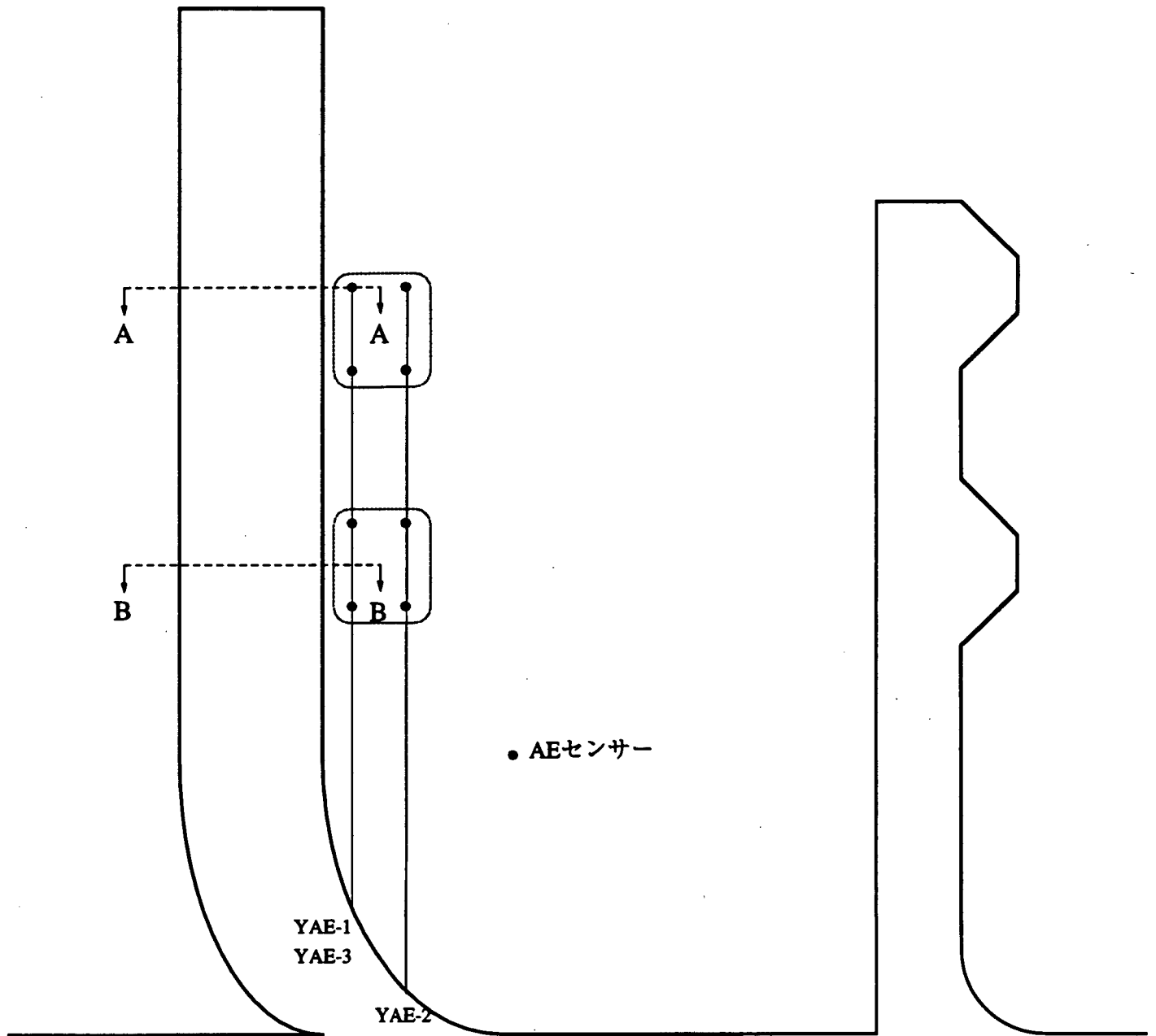


図4.5.2 AE計測計配置

置し、計測終了後回収し、AA'断面掘削に備えてAA'断面側壁部に設置し直す。計測終了後は回収する。

計測密度：BB'断面では試験坑道深度12m～22mまでの掘削の間連続計測

AA'断面では試験坑道深度22m～37mまでの掘削の間連続計測

計測限界：適用なし

計測精度：適用なし

A E計仕様：

計測器：A Eセンサー（フィジカルアコースティック社）

応答周波数範囲：0～60KHz

結果の反映：

- ・AA'（スムーズブラッシング工法適用断面）、BB'（普通発破工法適用断面）両断面の側壁部におけるA E波発生状況の比較
- ・側壁部のA E事象の坑道の半径方向分布

2) 振動計測

目的：試験坑道掘削中に岩盤に加えられる発破振動を計測し、掘削時の衝撃力を評価する。

計測仕様：計測坑道から試験坑道への水平ボーリング（XV-1,XV-2）に設置。

XV-1はAA'断面に対応し、5深度（試験坑道坑壁から50cm、1m、2m、5m、10m）に設置。XV-2はBB'断面に対応し、2深度（試験坑道坑壁から1m、2m）に設置（図4.5.3参照）。

計測密度：計測は試験坑道掘削深度12mから37m（掘削終了）までの連続計測とする。

加速度計仕様

品名：加速度計601（ティアック）

測定範囲：±10000G

応答周波数範囲：0～30000Hz

固有周波数：60KHz

感度：3pC/G

結果の反映：

- ・AA断面の深度別の発破振動減衰の状況
- ・AA断面の掘削影響域内の衝撃力の推定
- ・掘削手法（普通発破工法とスムーズブラッシング工法）の違いによる振動計測値の比較（深度1mと2mの2深度で比較）

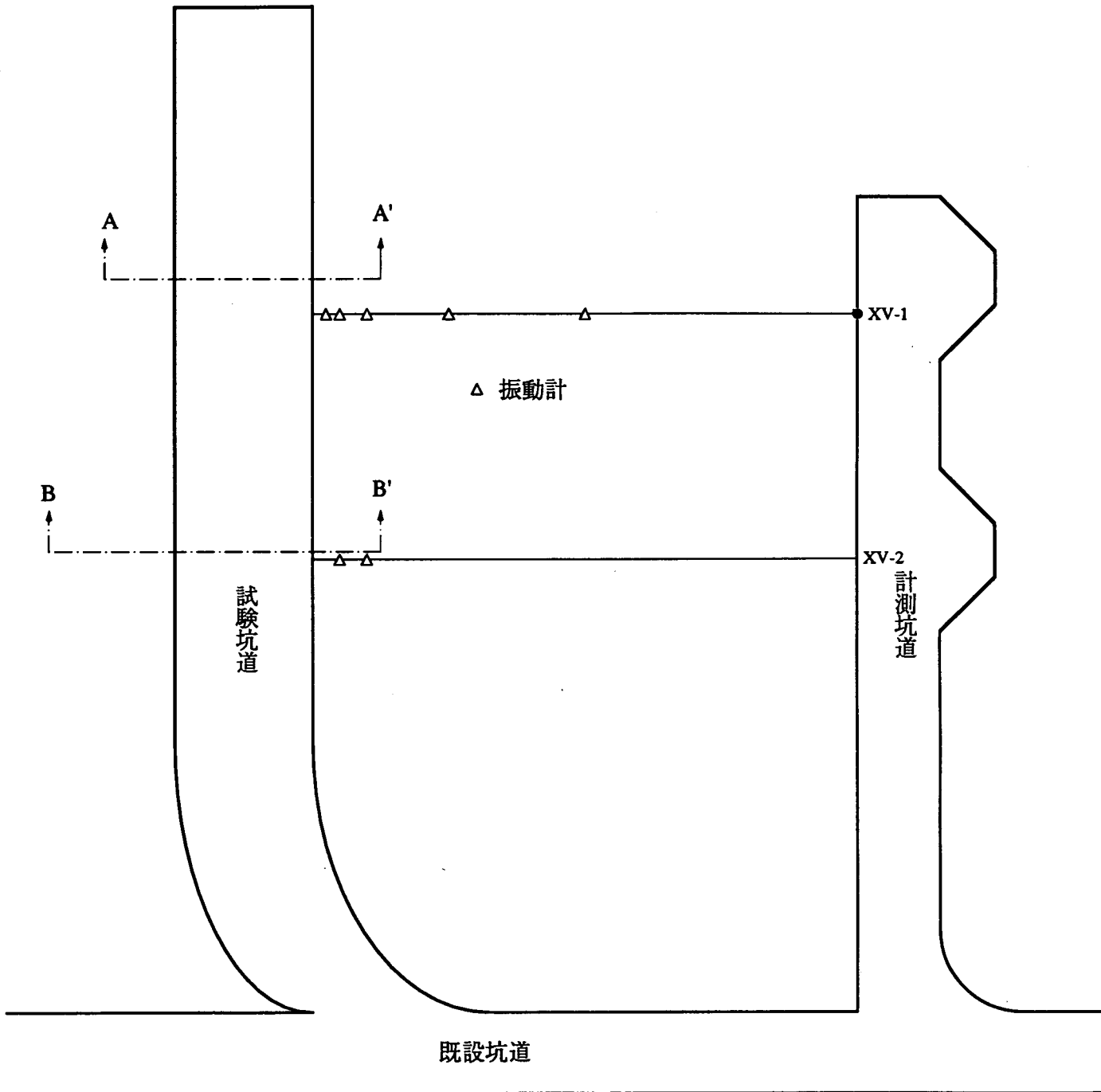


図4.5.3 振動計測配置

4.5.4 応力再配分領域の調査

空洞掘削にともなうき裂性岩盤の挙動は、き裂の方向および密度により大きく異なる。また、均質な連続体と異なり、変位、応力・ひずみ分布が不連続になる可能性も配慮しなければならない。

応力再配分領域の計測項目としては、

- 1) 岩盤内変位計測
- 2) ひずみ計測
- 3) 応力計測
- 4) 新たなき裂の発生、既存き裂の変位（開口、すべり等）計測
- 5) き裂の特性変化計測

が挙げられる。

岩盤内変位は連続体としての岩盤が応力再配分によって変形する変位と、き裂の開口ならびにすべりによる変位の総合したものが計測される。特に、異方性および不均質性の不連続体としての挙動を描写する基本データとしての変位分布を与えることになる。

岩盤内のひずみ分布はき裂により不連続になると考えられる。特に、応力解放域のひずみおよび応力は小さくなるので、トンネル工学では”ゆるみ域”の同定手法として、このひずみ計測が行われている。き裂面と交差する方向で不連続性を発生しやすいため、多点の計測が必要になる。また、き裂面に作用する応力の評価にも用いられるため、き裂の透水性を間接的に評価できる可能性がある。

応力変化は掘削前に三軸ひずみセルを設置し、試験孔掘削後にオーバーコアリングして応力変化を計測する。不均質性を配慮し、AA断面の天端ならびに左右壁に深度0.5m、1.0mにそれぞれ設置する。これは坑道周りの掘削影響域の応力変化を計測することになる。

新たなき裂の発生ならびに既存き裂の変位（開口）を調べる手法としては、

- 1) ボアホールTV観察（掘削前後）、ボーリングコア観察（掘削後）
- 2) き裂変位計測
- 3) 岩盤内変位計測
- 4) 内空変位計測
- 5) AE計測

が挙げられる。

試験坑道に平行に掘削されたボーリング孔（坑壁から1m、2m、3m）内

でのポアホールTV観察により新規き裂の発生ならびにき裂開口の状況を試験坑道掘削前後で比較可能である。また、新規き裂の発生状況は坑道掘削後坑内からの放射状ボーリングコア観察によるき裂密度と比較できる。

き裂変位を直接計る手法としてはボーリング孔内設置のき裂変位計ならびに坑壁設置のき裂変位計がある。一般に、坑壁の接線方向に平行なき裂は開口し、坑壁に垂直（放射方向）なき裂は閉口するといわれており、坑道軸に平行なき裂群でも、天端で変位を計測する場合と側壁で変位を計測するのでは全く異なる挙動（一方は閉口、一方は開口）をする可能性がある。この変位計測をより有効に評価するためには、できるだけ近傍において岩盤内変位計測とひずみ計測が行われていることが望ましい。

前述の岩盤内変位は往々にしてき裂の集合体としての開口変位を示唆している。特に、ひずみ計測（弾性変形を示す）をベースに間接的に変位分布を評価すると、き裂の開口度合いを評価できる可能性がある。

内空変位計測は岩盤変位分布の境界値を示し、全体の変位データの検証データとなる。

A E計測は新たなき裂の発生ならびにき裂面に沿っての変形度合いの指標となる。

岩盤き裂の特性変化に対しては、以下の調査手法が用いられる。

- 1) 透水試験
- 2) 物理探査
- 3) 孔内載荷試験
- 4) 室内コア試験

岩盤の透水試験は掘削の前後で実施されるが、単に坑壁からの深度だけをパラメータにするのではなく、ボーリングの方向を変えることにより異方性の検討が可能になる。また、前述の変位計測ならびにひずみ計測の近傍で実施することにより、き裂の開口度合いとの対比、き裂面に作用する応力との関連性を検討できる。なお、前述の孔内き裂変位計に組み込まれた透水試験器(Pac-Ex)を用いると、き裂変位と透水性の関係を直接計測することが可能となる。

物理検層、物理探査としては試験坑道掘削前後のPS検層、弾性波探査、電磁波探査による物性の変化が計測可能である。

孔内載荷試験も掘削前後の岩盤力学的の物性の変化を示す指標となる。

同様に、ボーリングコアを用いた室内力学試験も物性変化の評価に有効である。

坑道掘削中の計測項目として、岩盤内変位計測、ひずみ計測、応力計測、お

よび、き裂変位計測について以下に説明する。なお、き裂の特性変化に関する試験については次節において説明する。

1) 岩盤内変位計測 (AA断面)

目的：試験坑道掘削中の周辺岩盤の変位分布を計測する。

計測仕様：1)計測坑道から試験坑道に垂直に掘削したボーリングXD-1孔には試験坑道掘削前に設置 (図4.5.4参照)。

2)試験坑道の切羽がAA断面に達した時に掘削する放射状のボーリングD-1,D-2,D-3,D-4,D-5に試験坑道掘削再開前に設置する (図4.5.4参照)。

計測密度：1)XD-1は試験坑道掘削前に計測を開始し、坑道掘削終了まで連続計測。

2)D-1,D-2,D-3,D-4,D-5は試験坑道掘削切羽がAA断面に達した時に設置されるので、設置後から試験坑道掘削終了まで連続計測。

変位計仕様：

計測器：電気式地中変位計EM-E型 (東亜測器)

計測限界：100mm

計測精度：0.025³mm

結果の反映：

- ・ AA断面における坑道周辺の変位分布
- ・ ひずみ計測との対比 (D-2の変位計測とYE-1,2,3及びHI-7のひずみ計測、D-1,4,5の変位計測とXE-2のひずみ計測)

2) 岩盤内変位計測 (BB断面)

目的：試験坑道周辺の岩盤変位分布の計測。

計測仕様：試験坑道の切羽がBB断面に達した時に、放射状ボーリングD-6,D-7,D-8を掘削し、設置 (図4.5.5参照)。

計測密度：計器設置後 (試験坑道切羽がBB断面) から試験坑道掘削終了後まで連続計測。

変位計仕様：

計測器：電気式地中変位計EM-E型 (東亜測器)

計測限界：100mm

計測精度：0.025mm

結果の反映：

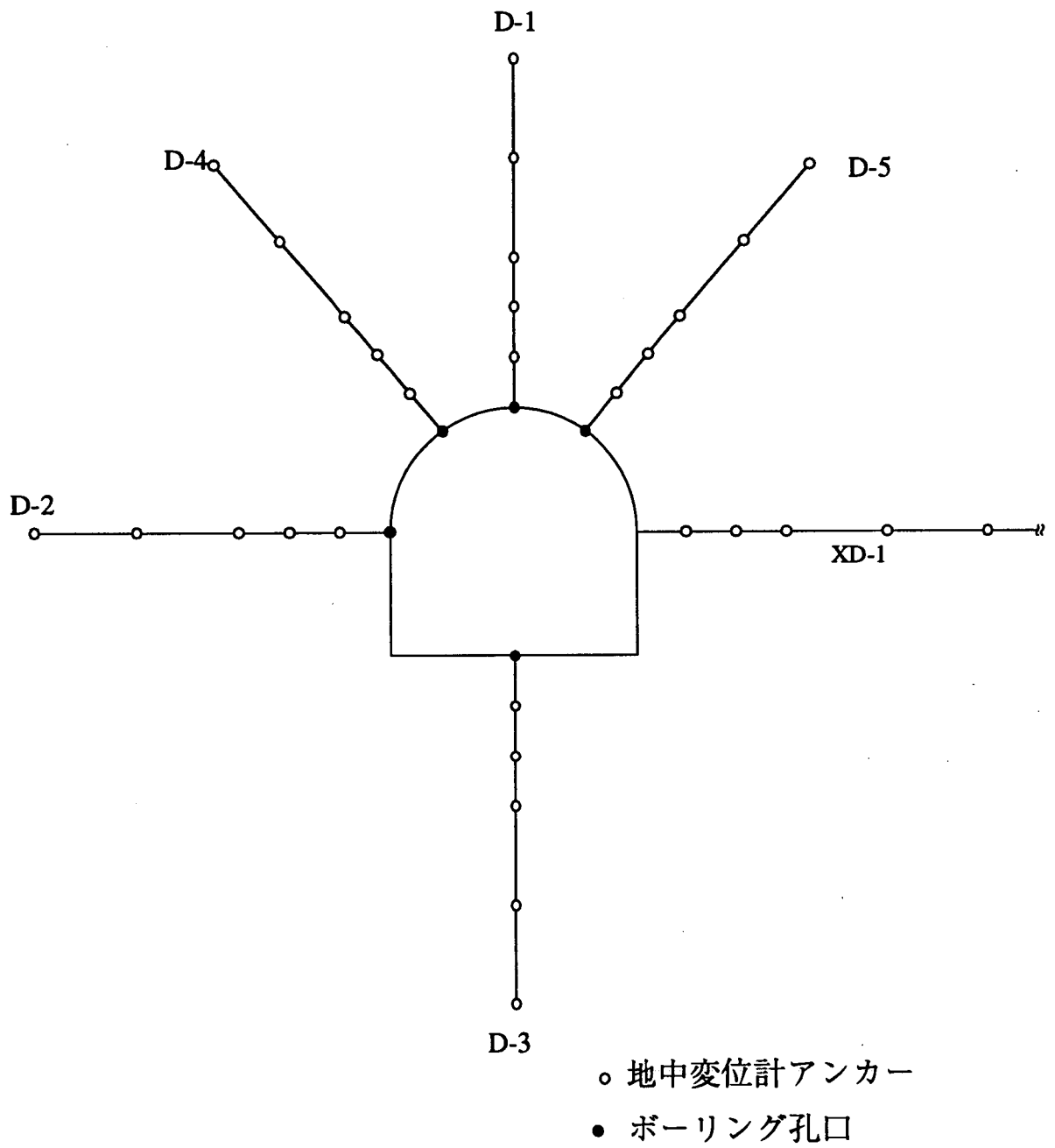
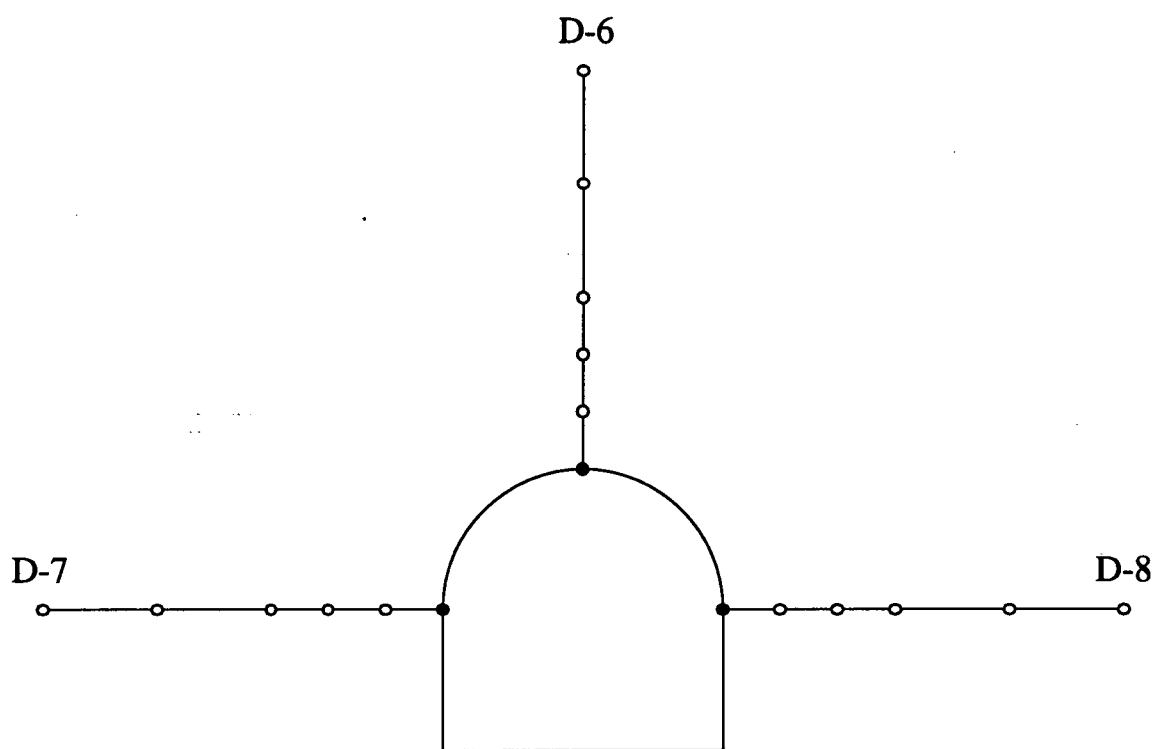


図4.5.4 変位計配置図 (A-A'断面)



- 地中変位計アンカー
- ボーリング孔口

図4.5.5 変位計配置図 (B-B'断面)

- ・ BB断面における坑道周辺の変位分布
- ・ AA断面の変位との対比
- ・ ひずみ計測との対比 (D-7 の変位計測と YE-1,2,3 のひずみ計測)

3) 岩盤内ひずみ計測 (AA断面)

目的 : 試験坑道掘削にともなう試験坑道周辺の岩盤内ひずみを計測し、試験坑道周辺の応力分布を推定する。

計測仕様 : 1) 既存坑道から掘削された試験坑道に平行なボーリング YE-1, YE-2, YE-3 のひずみ計及び YE-1 の多成分ひずみ計は AA 断面内 (X-Z 断面内) の 3 ひずみ成分 ($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xz}$) を計測するため、試験坑道掘削前に設置。図 4.5.6 参照。

2) 計測坑道から試験坑道に直交するように掘削された XE-1 (側壁)、XE-2 (天端)、XE-3 (下盤) のボーリング内のひずみ計は X-Y-Z 方向の直交 3 成分 ($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_z$) とし、試験坑道掘削前に設置。XE-1 のひずみ計には温度計を併設する。

3) 試験坑道から掘削する HI-7 に設置する多成分ひずみ計にはボーリング軸に直交する断面 (Y-Z 断面) 内の 3 成分 ($\epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{yz}$) を計測するために、切羽が AA 断面に達した時に設置する。このひずみ計は試験坑道掘削終了後に深度 2 m までオーバーコアリングし、応力計測用に用いる。

計測密度 : 1) YE-1, YE-2, YE-3, XE-1, XE-2, XE-3 は試験坑道掘削開始 2 週間前から計測開始、試験坑道掘削終了まで連続計測。

2) HI-7 は試験坑道切羽が AA 断面に到達した時に設置されるため、設置後から試験坑道掘削終了まで連続計測。

ひずみ計仕様

計測器 : 埋込型ひずみ計 KM-30 (東京測器)

計測限界 : $\pm 5000 \times 10^{-6}$

計測精度 : $\pm 10^{-6}$

多成分ひずみ計仕様

計測器 : 多成分ひずみ計 NBS90 (東京大学地震研究所)

計測限界 : $\pm 1000 \times 10^{-6}$

計測精度 : $\pm 10^{-6}$

温度計仕様

計測器 : 温度センサー TK-F (東京測器)

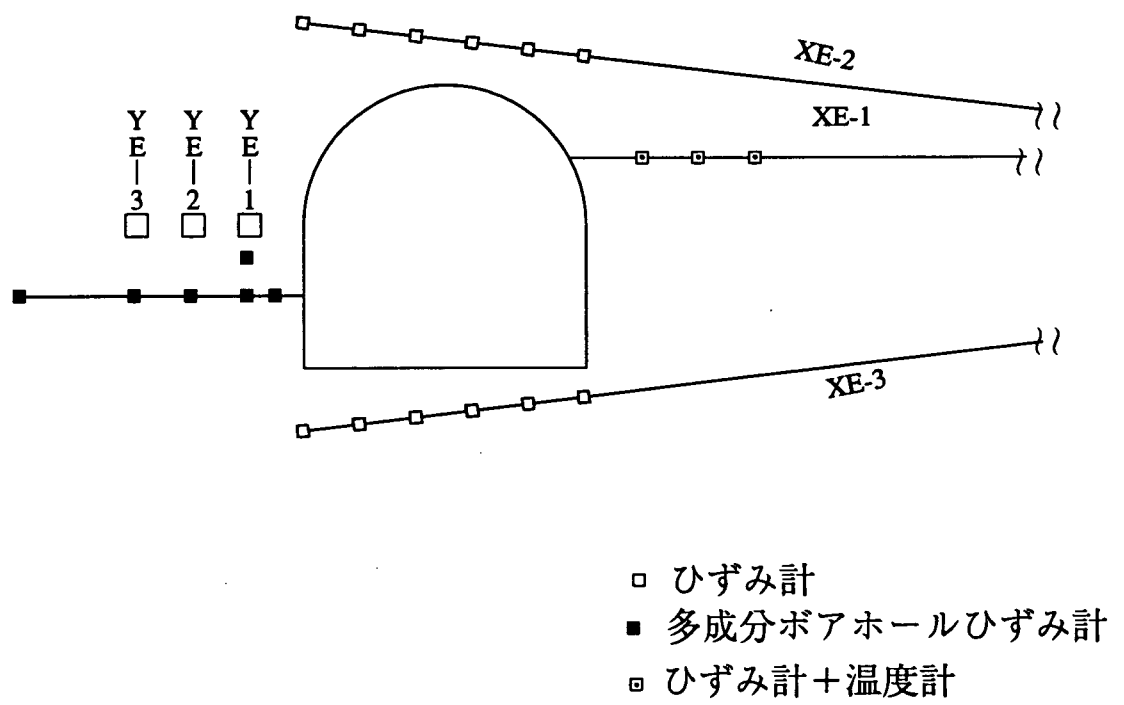


図4.5.6 岩盤内ひずみ計配置図 (A A'断面)

感 度 : $140 \times 10^6 / ^\circ\text{C}$

計測限界 : $-20^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$

結果の反映 :

- ・坑道周辺のひずみ分布を与える。XE-1とYE-1,2,3は坑道側壁の半径方向のひずみ分布、XE-2,3は坑道天端ならびに下盤の接線方向のひずみ分布を与えるとともに、き裂を横切る方向のひずみ分布を与える。
- ・HI-7のひずみ計はひずみと応力との対応を検討するために用いる。
- ・YE-1の多成分ひずみ計は、他のひずみ計のドリフトをチェックするためと、坑道掘削にともなう応力解放率を検討するデータを与える。
- ・温度計はひずみ計の温度補正確認と、掘削に伴う温度変化のデータを与える。

4) 岩盤内ひずみ計測 (BB断面)

目 的 : 試験坑道掘削にともなう試験坑道周辺の岩盤内ひずみ計測を行う。

計測仕様 : YE-1, YE-2, YE-3にBB断面内 (X-Z断面内) の3ひずみ成分 (ϵ_x , ϵ_z , γ_{xz}) を計測するため、試験坑道掘削前に設置。図4.5.7参照。

計測密度 : 試験坑道掘削開始2週間前から計測開始、試験坑道掘削終了まで連続計測。

ひずみ計仕様

計測器 : 埋込型ひずみ計 KM-30 (東京測器)

計測限界 : $\pm 5000 \times 10^6$

計測精度 : $\pm 10^6$

結果の反映 :

- ・坑道の側壁の水平方向のひずみ分布を与える。
- ・AA断面とBB断面のひずみ分布の対比データを与える。

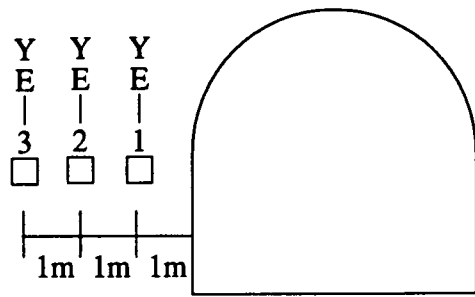
5) 応力計測

目 的 : 試験坑道周辺の掘削損傷領域の応力変化を測定する。

試験仕様 : 試験坑道のAA断面において、坑道の両側壁および天端から50cmおよび1mの位置に応力セルを設置 (図5.5.8参照)。試験坑道掘削終了後ただちにオーバーコアし、応力解放法により応力を算定する。

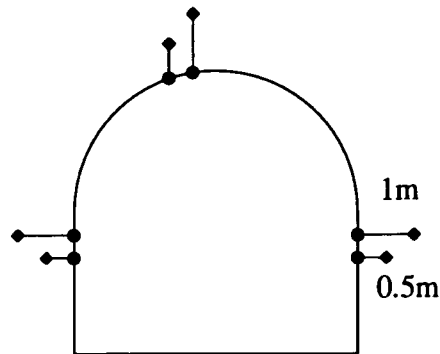
計測密度 : 切羽がAA断面に達したときに設置し、掘削終了まで連続計測
坑道掘削後オーバーコアリングして、計器を回収

計測器 : Hollow Inclusion Stress Cell (SCIRO型)



□ 岩盤内ひずみ計

図4.5.7 岩盤内ひずみ計配置図 (BB'断面)



● 応力計

図4.5.8 応力計配置図 (AA'断面)

計測限界：1000kgf/cm²以下

計測精度：0.1kgf/cm²

寸法：埋設孔計38mm、オーバーコア径140～150mm

結果の反映：

- ・坑道掘削に伴う応力解放の状況を把握する。
- ・ひずみ計測と比較し、坑壁からの応力解放の度合いを検討する。

6) き裂変位計測(1)

目的：試験坑道掘削中の坑道周辺き裂の挙動を把握する。

計測仕様：計測坑道から試験坑道への水平ボーリング (XC-1) ならびに、計測坑道から試験坑道の下盤部への斜め下向きボーリング (XC-2) に各3個づつき裂を挟むように設置する。(図4.5.9参照) 試験場の岩盤の状況から垂直き裂を対象とする。計測はき裂を挟む両側の岩の相対変位を変位センサ三方向検出し、き裂のせん断変位ベクトルと開口変位を評価する。

計測密度：試験坑道掘削深度12mから37m (掘削終了) までの連続計測

計測器：ジョイント変位計 (大林組)

計測限界：±2.5mm (差動トランス変位センサ) ±10mmのものも開発中

計測精度：±1μm

適用ボーリング径：66,76,86mm

結果の反映：

- ・坑道掘削に伴い、坑道の半径方向と接線方向でき裂の開口状況を比較する。
- ・坑道の半径方向、接線方向でのき裂の開口状況の変化を計測する。
- ・透水試験を併用して、き裂の開口状況と透水性の変化との関係を検討する。

7) き裂変位計測(2) / Pac-EX 計測

目的：試験坑道掘削中の坑道周辺き裂の開口状況を計測するとともに注水試験を実施し、き裂の透水性の変化を評価する。

計測仕様：計測坑道から試験坑道への水平ボーリング (XC-3) ならびに、計測坑道から試験坑道の下盤部への斜め下向きボーリング (XC-4) に各1個づつき裂を挟むように設置する (図4.5.10参照)。計測項目は坑道掘削中のき裂の開口変位、間隙水圧の変化である。坑道掘

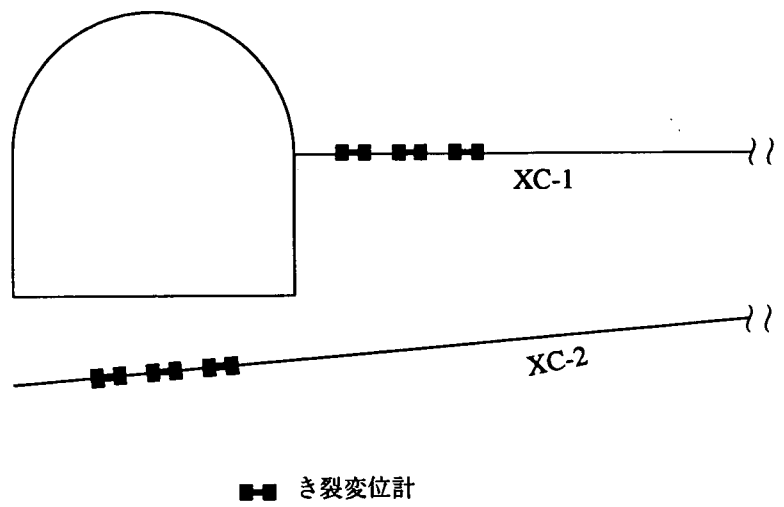


図4.5.9 き裂変位計配置 (A A'断面)

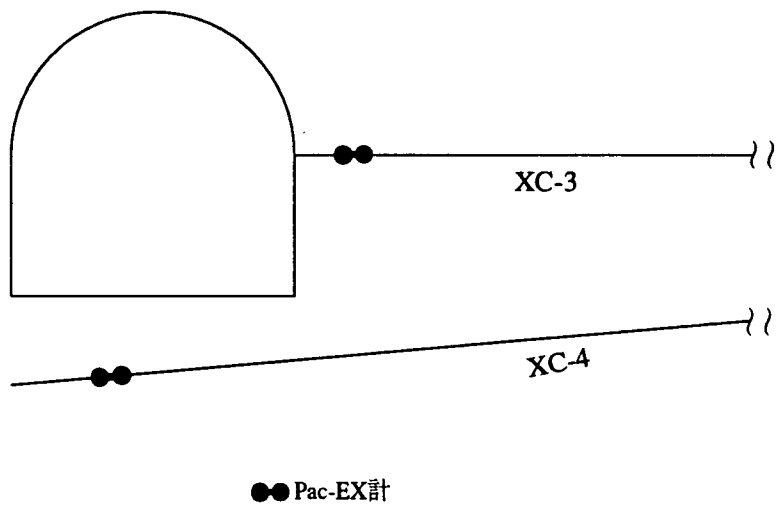


図4.5.10 Pac-EX計配置 (A-A断面)

削の前後で、計測区間における注水試験が可能である。

計測密度：坑道掘削中の連続計測

Pac-EX計仕様

- ・計測器：Pac-EX (AECL)
- ・変位計
 - 計測限界：1.0mm
 - 計測精度：0.0001mm
- ・水圧計
 - 計測限界：20 kgf/cm²
 - 計測精度：0.01 kgf/cm²
- ・注水試験
 - 注水限界：100 cc/min.
 - 計測限界：0.1cc/min
 - 計測精度：0.1cc
- ・適用ボーリング径：76mm

結果の反映：

- ・坑道掘削にともない坑道の半径方向と接線方向でき裂の開口状況を比較する。
- ・き裂の開口変位と間隙水圧の関係を検討する。
- ・き裂の開口状況透水性の変化を検討する。

8) き裂変位計測(3) / 坑道壁面き裂変位計

目的：試験坑道掘削中の試験坑道坑壁面のき裂の挙動を把握する。

計測仕様：試験坑道の切羽がAA断面に達した時点で、坑道頂部ならびに側壁に現れたき裂に対して、壁面き裂変位計を設置する(図4.5.11参照)。設置以後の坑道掘削に伴うき裂の開口変位を計測する。

計測密度：試験坑道のAA断面から掘削終了までの連続計測

計測器：壁面き裂変位計 KG-2A (or 5A)

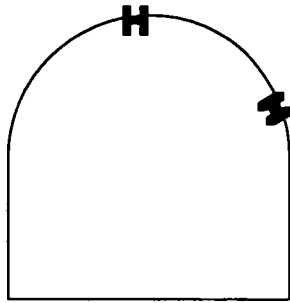
計測限界：±2mm (or ±5mm)

計測精度：0.7μm (1.25μm)

設置状況：坑壁にボルトで設置

結果の反映：

- ・坑道掘削に伴う坑壁でのき裂開口状況の把握。
- ・坑壁と岩盤内部のき裂の開口状況の比較データを与える。



H 壁面き裂変位計

図4.5.11 坑壁面き裂変位計配置 (A-A断面)

4.5.5 事前計画・モデリング・解析のための調査

事前計測・モデリング・事前調査のための岩盤構造データは、ボーリング調査ならびに既存坑道および計測坑道における岩盤・き裂調査により供給される。岩盤特性とき裂特性については、P S 検層や孔内載荷試験の原位置試験データや室内物性試験のデータから決定される。一方、初期条件および境界条件については水圧計測ならびに初期応力計測結果を検討して設定する。

解析モデルの妥当性ならびに解析手法の検証のためのデータベースとしては前述の計測より、

- 1) 内空変位
- 2) 岩盤内変位分布
- 3) ひずみ (応力) 分布

が用いられ、不連続性、不均質性、異方性をどの程度表現できるかが検討される。

4.5.6 掘削工法の影響を調べる調査

本研究では掘削工法の影響を調べるために、2つの工区に分けて掘削手法を変え坑道掘削を実施する。一方は、普通発破工法で施工し、もう一方はスムーズプラスティング工法を用いる。両工区の比較は4.5.4節で述べた掘削損傷領域の調査項目すべてについて実施する。すなわち、

- 1) A E 計測
- 2) 応力変化
- 3) き裂密度 (坑内、孔内)
- 4) 電磁波、弾性波探査
- 5) 透水性
- 6) 力学特性 (コア試験)

である。また、坑壁の余掘り状態や壁面状態についても比較する。

なお、応力再配分領域の特性は掘削工法にあまり依存しないものと考え、今回は簡単な変位計測だけをB B断面で実施し、A A'断面のような総合的な調査はB B'断面では実施しない。

4.5.7 計測配置のまとめ

計測器の配置は実際のき裂状況により異なるが、前述のとおり、本計画においては計測坑道軸方向に平行な走行でほぼ垂直なき裂が1本/mで存在するものと仮定して、計測計画をたてている。

図4.5.12においては新規坑道掘削前の、既存坑道ならびに試験坑道からの計測器の設置状況を示している。

また、図4.5.13および図4.5.14にはそれぞれA A断面ならびにB B断面のすべての計測器配置を示している。

また、各計測項目は試験坑道外から設置するものと試験坑道内から設置するものに分けて表4.6.1にまとめている。更に、必要なポーリングを一覧表にしたものを表4.6.2に示している。

4.5.8 期待される成果

これまでの計測により期待される成果は以下の通りである。

- 1) 掘削損傷領域の広がりを異なる物理特性により評価する。すなわち、A E、応力変化、き裂密度、弾性波速度、透水性、力学特性が計測され、母岩と掘削損傷域との相異が検討されるとともに、掘削影響領域の物理特性データとしてまとめられる。
- 2) 応力再配分領域の変位分布、ひずみ（応力分布）が計測される。これは、き裂分布の影響を反映した不連続性、異方性、不均質性を反映したものになる可能性がある。この変位分布およびひずみ分布からき裂の開口度合いが検討される。
- 3) 応力再配分領域におけるき裂の変位および透水性の変化が直接計測される。
- 4) 岩盤内変位分布、ひずみ分布、および透水試験結果により間接的にき裂の開口度合いと透水性の関連性が検討される。
- 5) 不連続岩盤のモデル化および解析のためのデータを供給するとともに、モデルの妥当性ならびに解析手法の検証のためのデータベースも供給する。
- 6) 掘削工法の違いによる損傷領域の広がりと特性変化の相異が検討される。
- 7) 掘削損傷域ならびに応力再配分領域の計測手法、評価手法の検証データを与える。

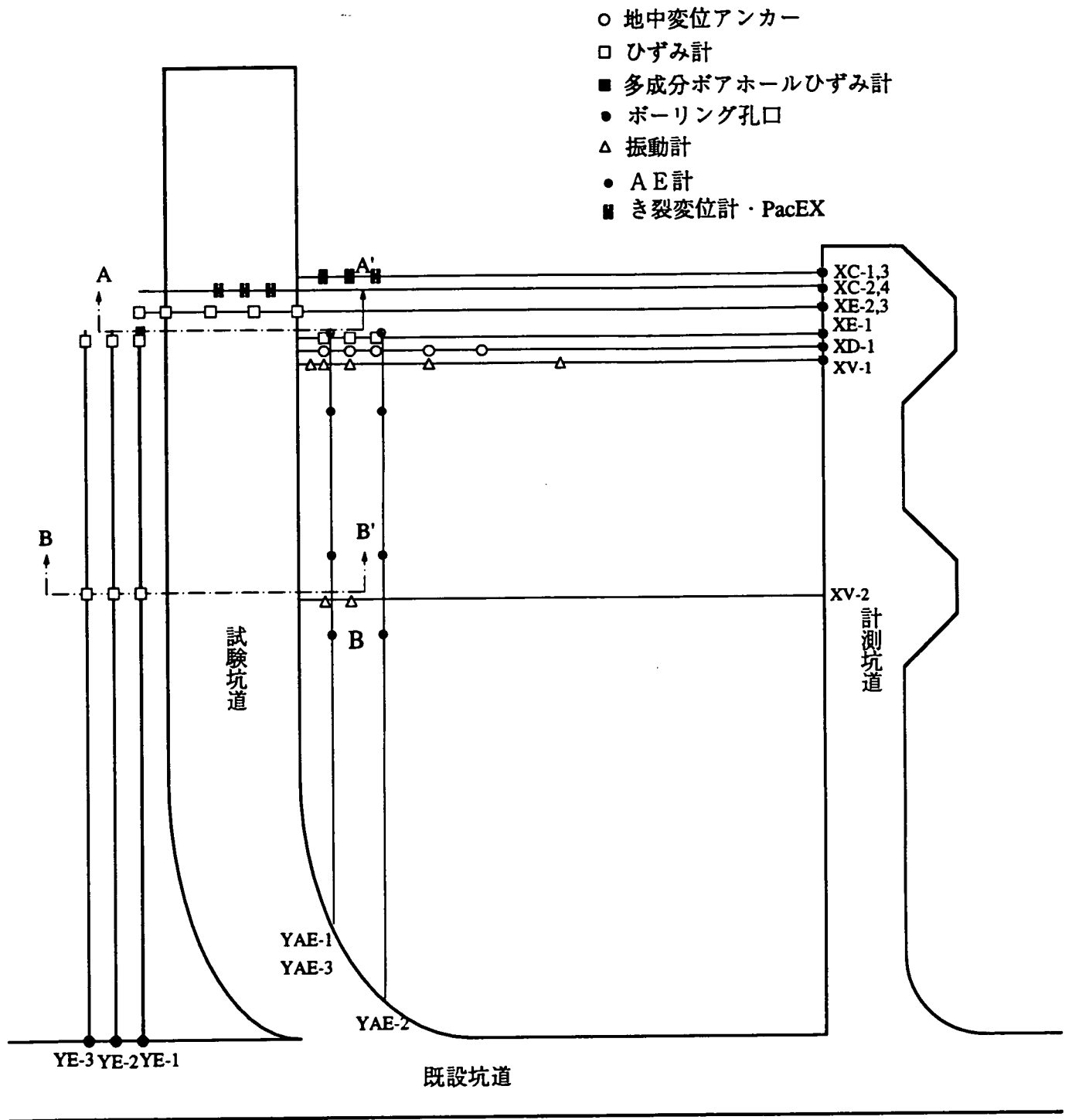


図4.5.12 計測断面配置図

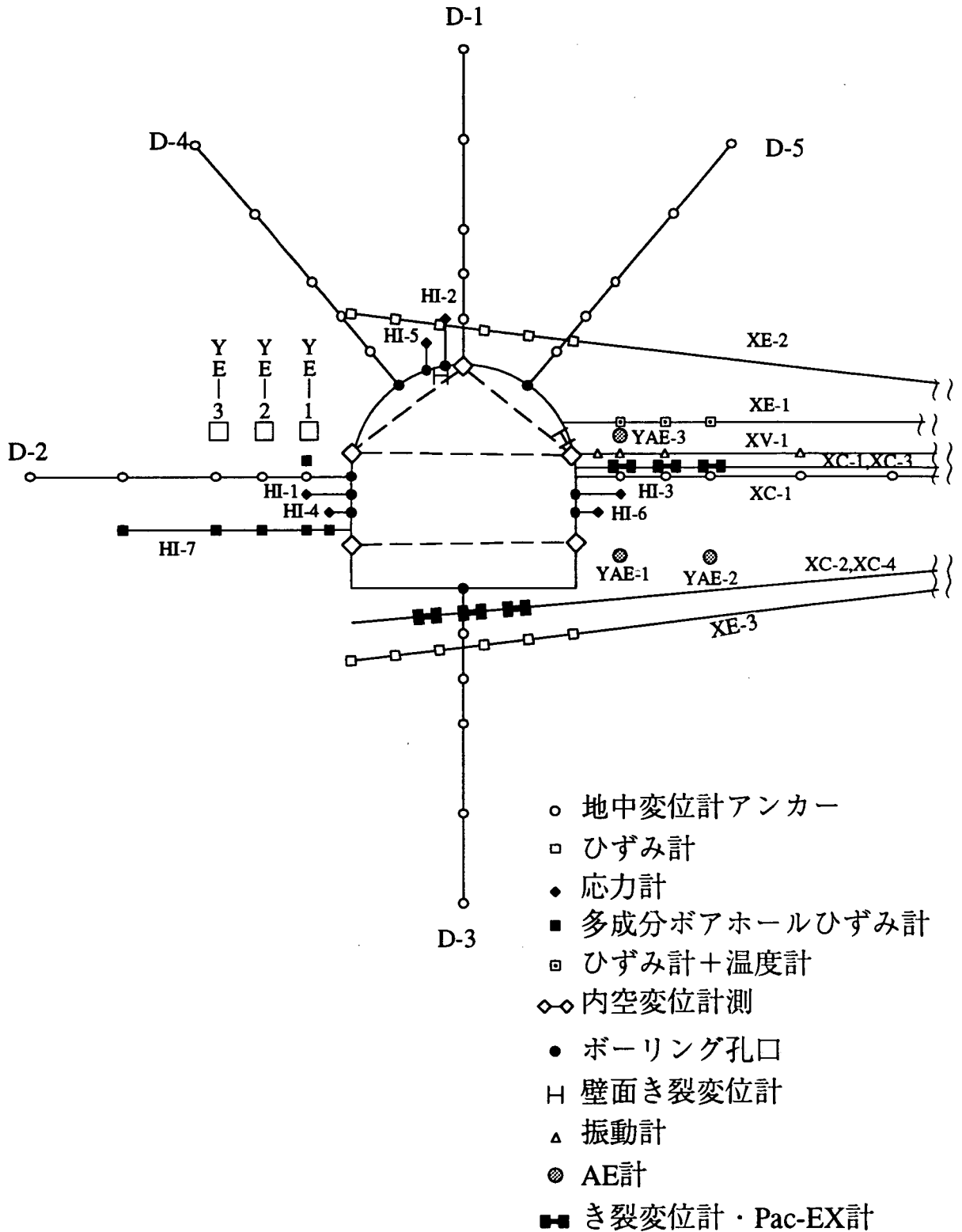


図4.5.13 計器配置図 (A A'断面)

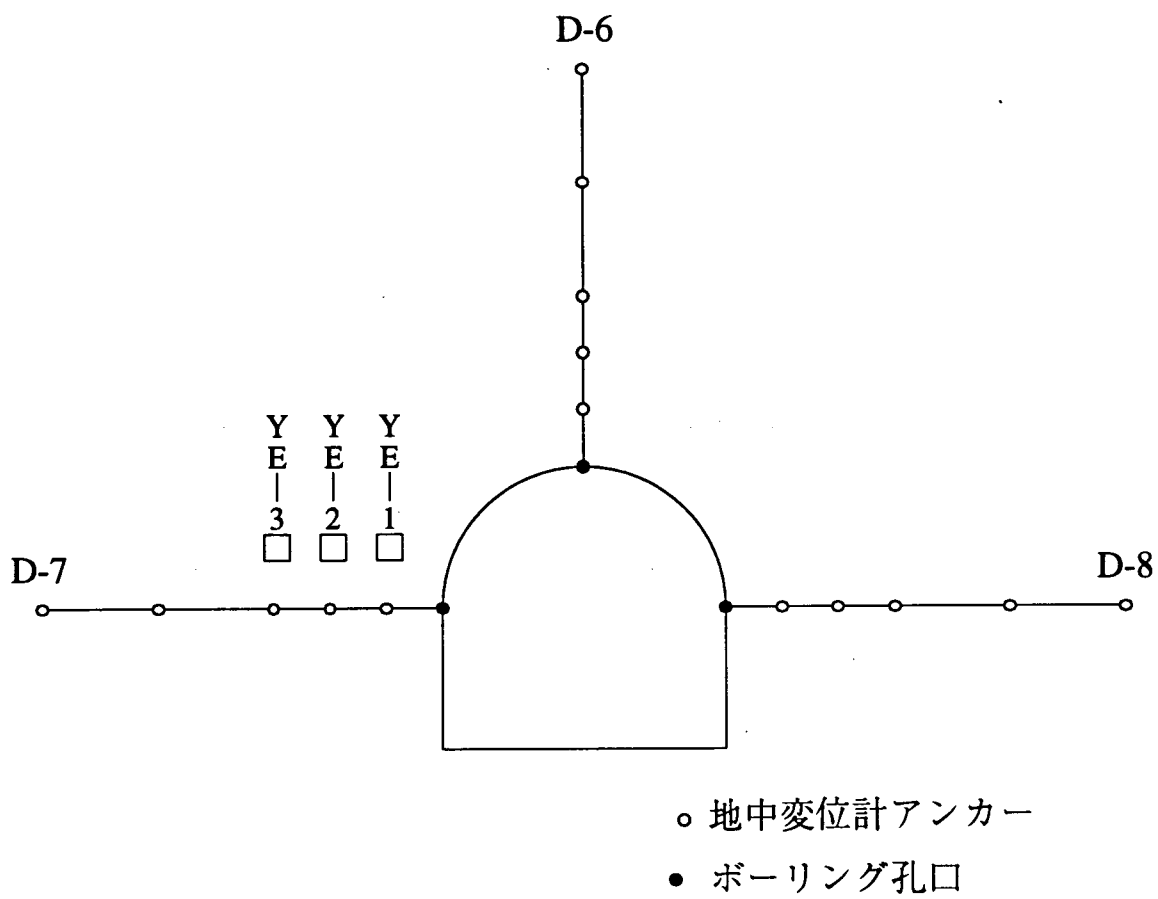


図4.5.14 計器配置図 (B B'断面)

表4.5.1 計測の種類と数量

計 器 の 種 類		仕 様 ・ 数 量	
		A-A'断面(Main)	B-B'断面(Sub)
試 験 坑 外 よ り 設 置	地中変位計	24m×5 深度 1 孔	—
	ひずみ計	27m×5 深度×3 成分 . . . 3 孔	17m×1 深度×3 成分 . . . 3 孔
		24m×3 深度×3 成分 . . . 1 孔	
		24m×6 深度×3 成分 . . . 2 孔	
	多成分ホールひずみ計	27m×1 深度×3 成分 . . . 1 孔	
	温度計	24m×3 深度 1 孔	—
	A E 計	27m×2 深度 3 孔	17m×2 深度 3 孔
	振動計	24m×5 深度 1 孔	24m×5 深度 1 孔
	き裂変位計	24m×3 深度 1 孔	—
		28m×3 深度 1 孔	
Pac-Ex計	24m×1 深度 1 孔	—	
	28m×3 深度 1 孔		
試 験 坑 内 よ り 設 置	地中変位計	7m×5 深度 5 孔	7m×5 深度 3 孔
	多成分ホールひずみ計	6m×5 深度 1 孔	
	応力計 (CSIRO)	1m×1 深度×12成分 . . . 3 孔	—
		0.5m×1 深度×12成分 . . 3 孔	
	マイクロリーフメータ	2 測線	2 測線
亀裂変位計 (坑壁)	2 点	—	

表4.5.2 計測用ボーリング一覧表

	孔番	目的	孔径(ϕ mm)	掘進長(m)	掘削方法	備考
既設坑道	YE-1	ひずみ計	76	28	ボーリング	
	YE-2	ひずみ計	76	28	ボーリング	
	YE-3	ひずみ計	76	28	ボーリング	
	YAE-1	A E計	86	28	ボーリング	
	YAE-2	A E計	86	28	ボーリング	
	YAE-3	A E計	86	28	ボーリング	
計測坑道	XE-1	ひずみ計	76	24	ボーリング	
	XE-2	ひずみ計	76	28	ボーリング	
	XE-3	ひずみ計	76	28	ボーリング	
	XD-1	地中変位計	76	24	ボーリング	
	XC-1	き裂変位計	76	24	ボーリング	
	XC-2	き裂変位計	76	28	ボーリング	
	XC-3	Pac-Ex計	76	24	ボーリング	
	XC-4	Pac-Ex計	76	28	ボーリング	
	XV-1	振動測定	76	24	ボーリング	
	XV-2	振動測定	76	24	ボーリング	
試験坑道	D-1	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	D-2	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	D-3	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	D-4	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	D-5	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	D-6	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	D-7	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	D-8	地中変位計	ϕ 66	7	ボーリング	
	HI-1	応力計	ϕ 38	1	ボーリング	
	HI-2	応力計	ϕ 38	1	コアドリル	
	HI-3	応力計	ϕ 38	1	コアドリル	
	HI-4	応力計	ϕ 38	0.5	コアドリル	
	HI-5	応力計	ϕ 38	0.5	コアドリル	
	HI-6	応力計	ϕ 38	0.5	コアドリル	
HI-7	多成分ひずみ計	ϕ 76	6	ボーリング		

4.6 掘削前後の調査・試験項目の抽出

4.6.1 事前調査項目の抽出

1) 事前調査の目的

事前調査の目的は掘削影響領域の岩盤構造・き裂状況の把握と坑道掘削前の岩盤特性ならびに場の特性（圧力、水圧）を把握することである。この調査データは以下のように利用される。

- ①掘削影響試験のための試験坑道の詳細設計・計測計画の作成のためのデータを与える。
- ②掘削影響試験前後の岩盤特性ならびに場の特性の変化を比較するための掘削前の岩盤特性ならびに場の特性のデータを与える。
- ③試験坑道掘削の事前解析のための岩盤のモデル化に必要な岩盤特性データを与えると同時に、初期条件、境界条件の一部を与える。
- ④掘削影響試験時の計測手法、調査手法について試行データを与える。
- ⑤掘削手法についての試行データを与える。

2) 詳細試験計画のための事前調査（図4.6.1 参照）

①既存坑道からの試錐調査

試験坑道予定位置ならびに計測坑道予定位置でボーリング調査を実施する。（Y-1, 37m, Y-2, 30m）この孔ではコア観察、BTV、PS検層を実施する。また、試験坑道予定位置のY-1を用いて初期応力調査を実施する。また、コアは、室内試験用の供試体として用いる。

②計測坑道でのき裂調査

計測坑道掘削時の掘削切羽のき裂調査と坑道壁面のき裂調査を実施する。

③計測坑道からのボーリング調査

計測坑道からAA断面、BB断面に対してボーリング調査を実施する。（X-1, 24m, X-2, 24m）この孔ではコア観察とBTVを実施する。また、AA断面とBB断面の中間にボーリング孔（X-3, 24m）を配し、コア観察とBTVを実施した後に間隙水圧の計測を行う。さらにAA断面において試験坑道予定位置の事前弾性波および比抵抗トモグラフィー調査を実施する。そのためAA断面においてXT-1, XT-2（ともに38m）のボーリング調査を実施する。（コア観察、BTVを含む。）

3) 掘削前後の状態比較のための事前調査（図4.6.2 参照）

試験坑道の坑壁からそれぞれ1mおよび3m離して既存坑道から試錐孔を掘

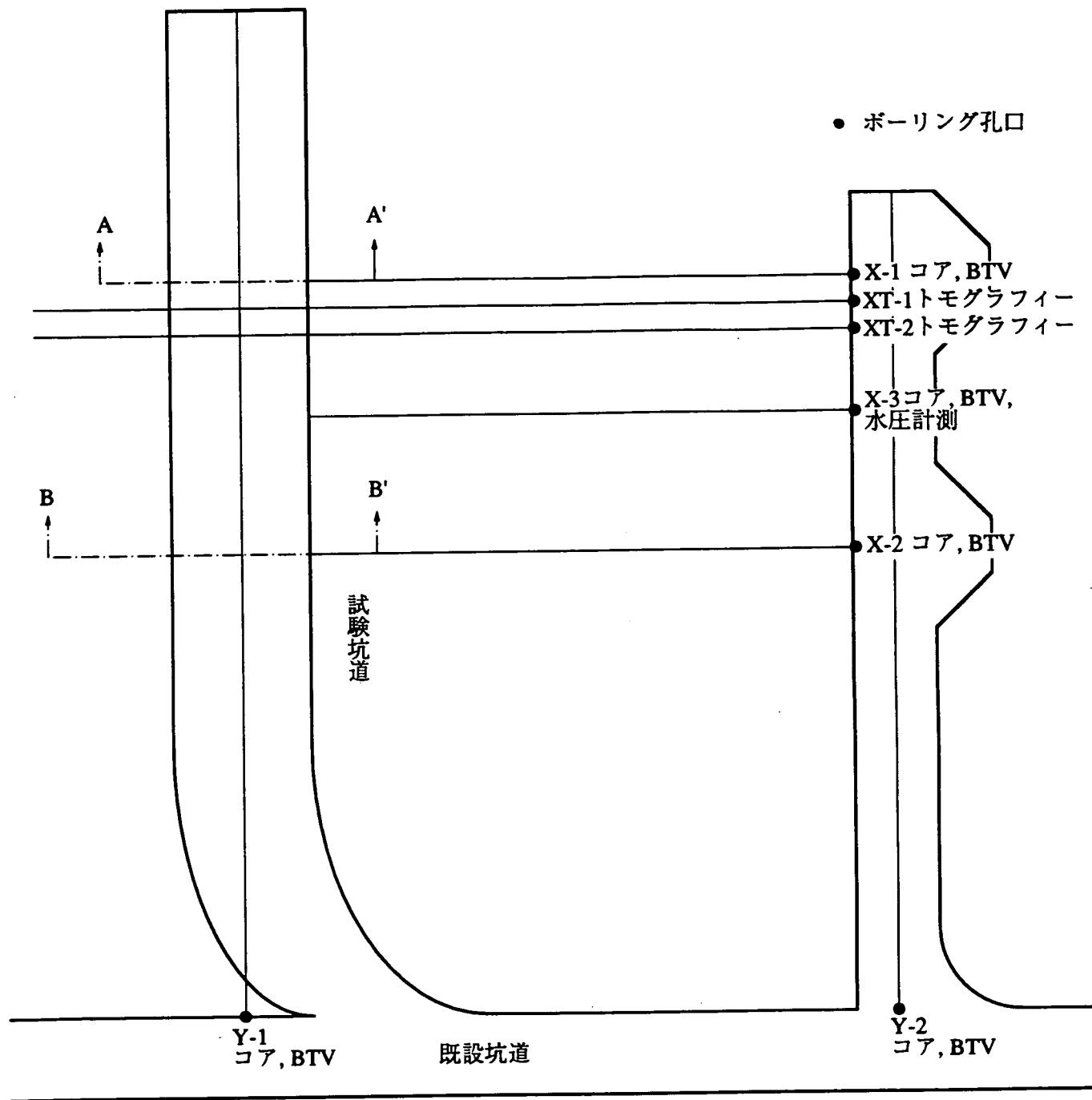


図4.6.1 詳細試験計画のための事前調査

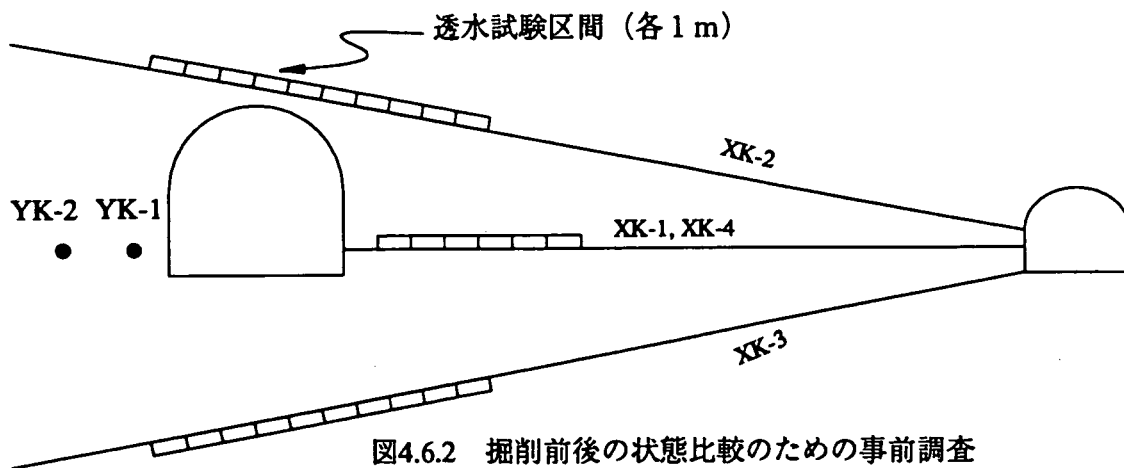
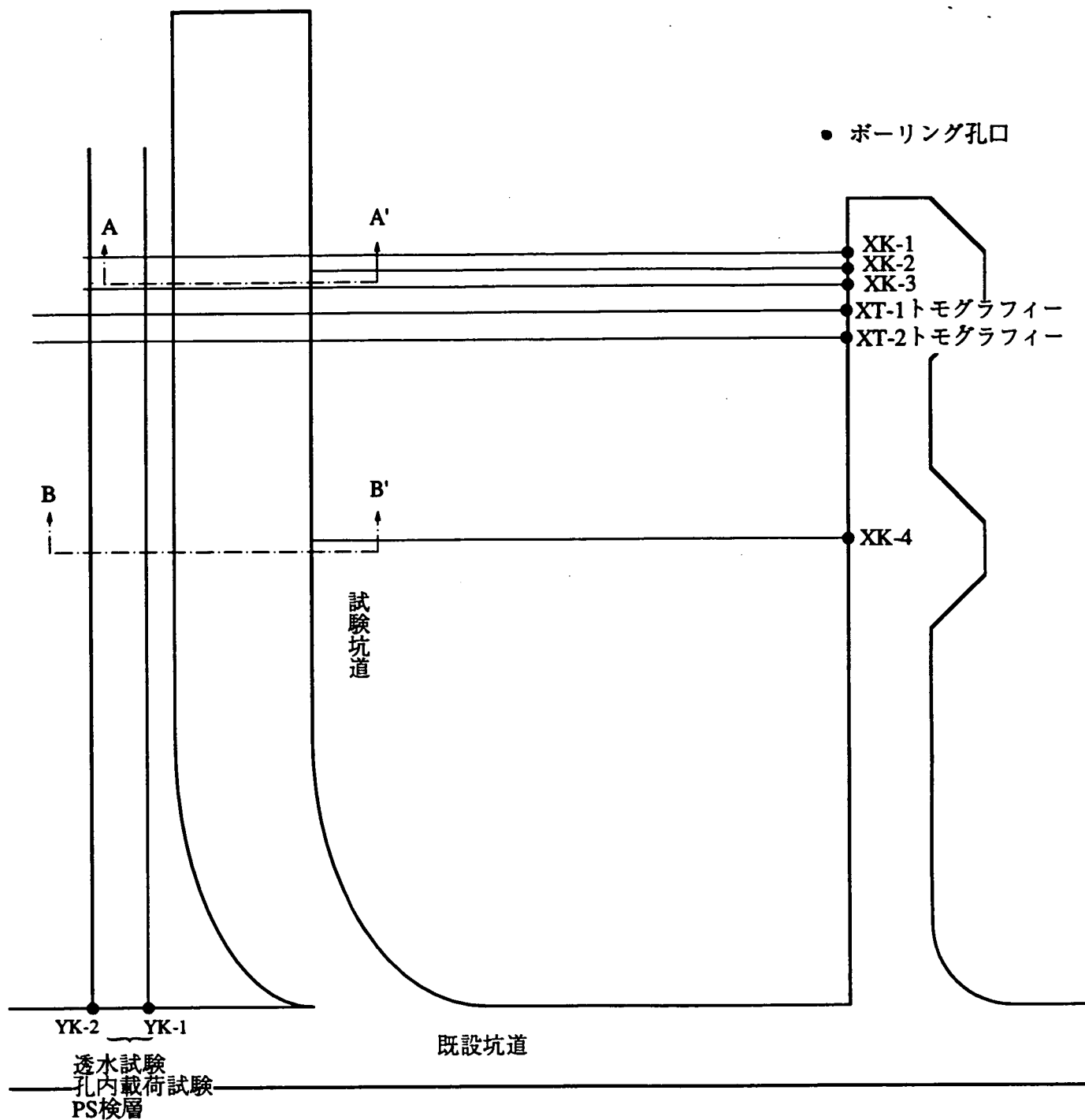


図4.6.2 掘削前後の状態比較のための事前調査

り（YK-1, YK-2, 各32m, コア観察、BTV）、透水試験、PS検層、孔内載荷試験を実施する。試験坑道掘削後も同じ位置で同じ試験を実施し、掘削の影響を検討する。さらに、透水試験に関しては坑道断面での垂直方向のき裂を想定してKX-1、KX-2、KX-3、KX-4で実施する。また、前述のXT-1とXT-2で実施されるトモグラフィー調査も試験坑道掘削前後で実施され、比較検討される。

4) 事前解析のための事前調査

試験坑道掘削前の事前解析（力学解析）のための岩盤モデル化に必要な岩盤構造に関するデータは、前述のボーリング調査ならびに既存坑道と計測坑道における岩盤・き裂調査により供給される。また、トモグラフィー調査の結果も岩盤構造のモデル化に利用される。岩盤特性とき裂特性についてはPS検層や孔内載荷試験の原位置試験データと室内物性試験のデータから決定される。一方、初期条件および境界条件については前述の水圧計測ならびに初期応力調査結果を検討して設定する。

5) 計測手法、調査手法の試行調査（図4.6.3参照）

掘削影響試験に用いられる主な計器の精度ならびに信頼性を計測坑道掘削時に検証すること、ならびに、新規坑道掘削時の掘削損傷域の程度を調査する手法を計測坑道内で試行することを目的とする。

試行を予定している計器はひずみ計、多成分ひずみ計、地中変位計、応力計、き裂変位計である。ひずみ計は既存坑道からのボーリング孔（Y-3, 20m）内に2点設置する。多成分ひずみ計は計測坑道からのボーリング孔（X-4, 1m）に1点設置する。同じ断面でボーリング孔（X-5, 5m）に地中変位計（3点）を設置する。また、応力計をボーリング孔（X-6, 1m）に設置する。また、坑壁にき裂変位計を2箇所設置し、計測坑道掘進時の各計器の反応を確認する。

計測坑道掘削完了後、坑壁において弾性波探査（屈折法）とレーダー探査（反射法）の試行を行うとともに、坑壁からのボーリング（X-7, 5m）のボーリングコアを用いた力学試験（一軸強度、引張強度、弾性波速度）、透水試験、顕微鏡観察を実施する。

6) 掘削試行試験

計測坑道掘削時に掘削手法、掘進長、薬量、発破パターンを変えた掘削の試行を行い、坑壁の状態、余掘りの状態、掘進能率等を検討して、試験坑道掘削の最適手法を設定する。

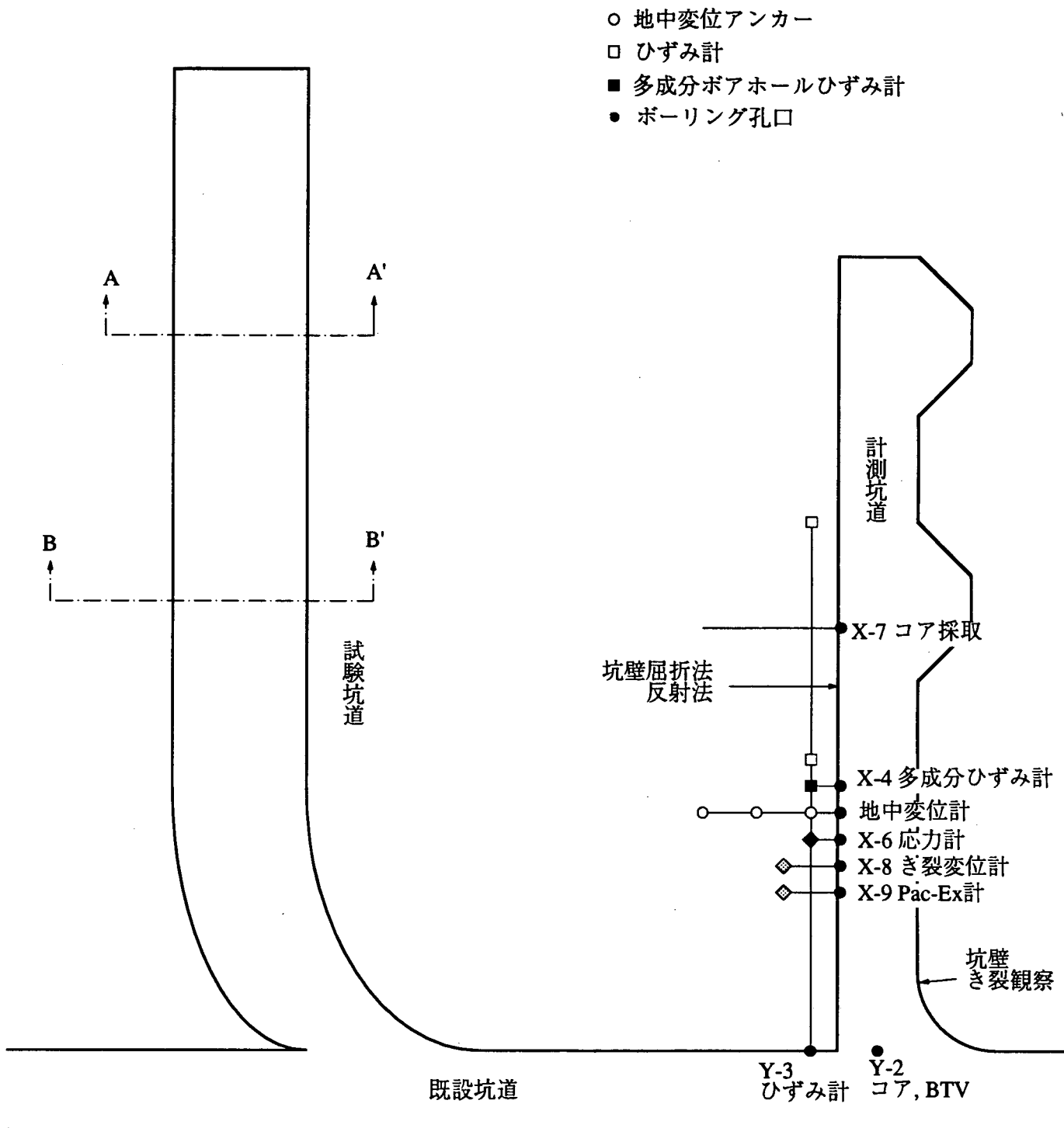


図4.6.3 計測手法・調査手法の試行試験のためのボーリング配置のまとめ

以上の調査項目をまとめたものを表4.6.1 にまとめている。また、必要なボーリングの仕様を表4.6.2に示すとともに、各ボーリング位置ならびに試験位置を図4.6.4 に示している。

表4.6.1 事前調査一覧表

目的	調査位置	備考
岩盤・き裂調査	Y-1, Y-2, X-1, X-2 既存坑道・計測坑道坑壁	コア観察、BTV、PS検層
初期応力調査	Y-1	
間隙水圧調査	X-3	
トモグラフィー調査	XT-1, XT-2	
掘削前状態調査	YK-1, YK-2 XK-1 XK-2 XK-3 XK-4	透水試験、PS検層 孔内載荷試験 透水試験 透水試験 透水試験 透水試験
計測器試行調査	Y-3 X-4 X-5 X-6 X-8 X-9	ひずみ計 多成分ひずみ計 地中変位計 応力計 き裂変位計 Pac-Ex計
調査手法検討調査	計測坑道坑壁 X-7 コア試料	屈折法、反射法 室内試験
掘削手法予備調査	計測坑道	発破手法、掘進長、薬量 発破パターン

表4.6.2 事前調査ボーリング一覧表

	孔番	目的	孔径(ϕ mm)	掘進長(m)	掘削方法	備考
既設坑道	Y-1	コア、BTV、初期応力	76	37	ボーリング	
	Y-2	コア、BTV	76	30	ボーリング	
	Y-3	コア、BTV	76	20	ボーリング	
	YK-1	透水試験	76	32	ボーリング	
	YK-2	透水試験	76	32	ボーリング	
計測坑道	X-1	コア、BTV	76	20	ボーリング	
	X-2	コア、BTV	76	20	ボーリング	
	X-3	コア、BTV、水圧計測	76	20	ボーリング	
	X-4	多成分ひずみ計	76	1	ボーリング	
	X-5	地中変位計	66	5	ボーリング	
	X-6	応力計	38	1	コアドリル	
	X-7	コア試験供試体採取	76	5	ボーリング	
	X-8	き裂変位計	76	2	ボーリング	
	X-9	Pac-Ex計	76	2	ボーリング	
	XK-1	透水試験	76	24	ボーリング	
	XK-2	透水試験	76	32	ボーリング	
	XK3	透水試験	76	32	ボーリング	
	XK4	透水試験	76	24	ボーリング	
	XT-1	トモグラフィ	76	30	ボーリング	
	XT-2	トモグラフィ	76	30	ボーリング	

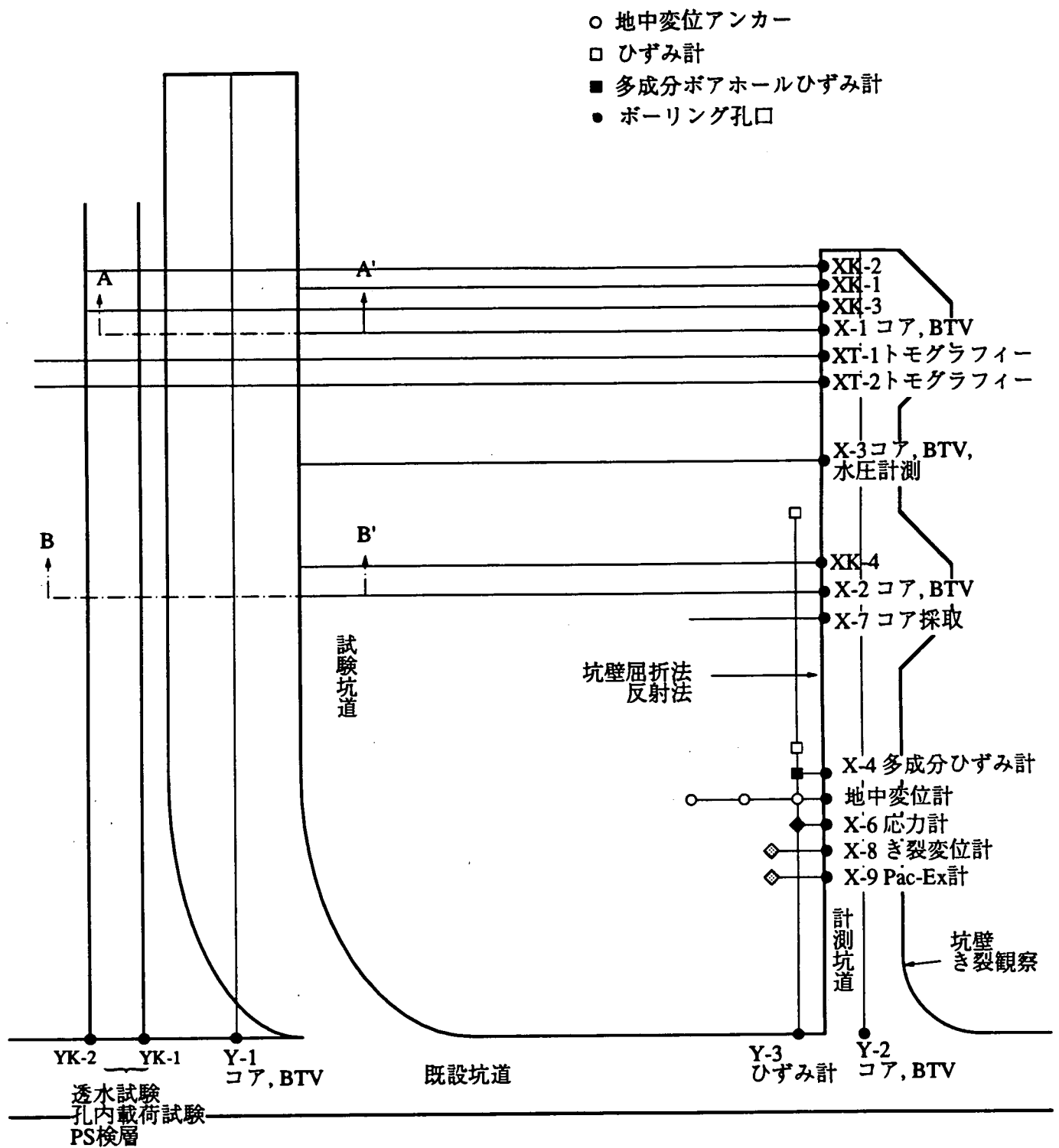


図4.6.4 事前調査用ボーリング配置のまとめ

4.6.2 事後調査項目の抽出

1) 事後調査の目的

事後調査の目的は、坑道掘削後の岩盤特性ならびに場の特性（圧力、水圧）を把握し、掘削前の岩盤特性ならびに場の特性との比較を行うことにより、掘削損傷領域の広がりと特性を評価するとともに、応力再配分領域の特性を評価することである。この調査データは以下のように利用される。

- ①掘削影響試験前後の岩盤特性ならびに場の特性の変化を比較するための掘削後の岩盤特性ならびに場の特性のデータを与える。
- ②新規坑道周辺の岩盤特性のデータを与える。

2) 掘削前後の状態比較のための事後調査（図4.6.5 参照）

事前調査で用いたYK-1、YK-2孔においてBTV、透水試験、PS検層、孔内載荷試験を実施する。また、既存のXK-1、XK-2、KX-3、XK-4において、事前調査との比較のために同じ区間において透水試験を実施し、掘削の影響を検討する。また、既存のXT-1とXT-2においても事前調査用と同様にトモグラフィ調査を実施する。

3) 新規坑道周辺の岩盤特性調査のための事後調査（図4.6.6 参照）

試験坑道掘削後は試験坑道内からの調査が可能である。調査項目の一部に関してはすでに本年度「既存坑道周りの調査」として試行済である。調査項目を大別すると以下ようになる。

① 試験坑道でのき裂調査

試験坑道掘削時の切羽のき裂調査を参考にしながら、試験坑道坑壁のき裂観察を行う。また、坑壁において弾性波探査（屈折法）、レーダー探査（反射法）を実施し、掘削損傷領域の検討データを得る。

② 試験坑道からのボーリング調査

試験坑道からのボーリング調査としては、ボーリングコア観察、BTV観察、PS検層、孔内載荷試験、透水試験、ボーリングコアによる室内試験を行う。掘削工法の比較データを得るため、各調査ともAA、BB両断面において実施する。各断面とも坑壁から水平方向（X-10、X-11、ともに $\phi = 76\text{mm} \times 7\text{m}$ ）と下盤から垂直方向（Z-1、Z-2、ともに $\phi = 76\text{mm} \times 7\text{m}$ ）にボーリングを実施する。

また、室内試験のためのコア採取を目的として水平方向（X-12、X-13

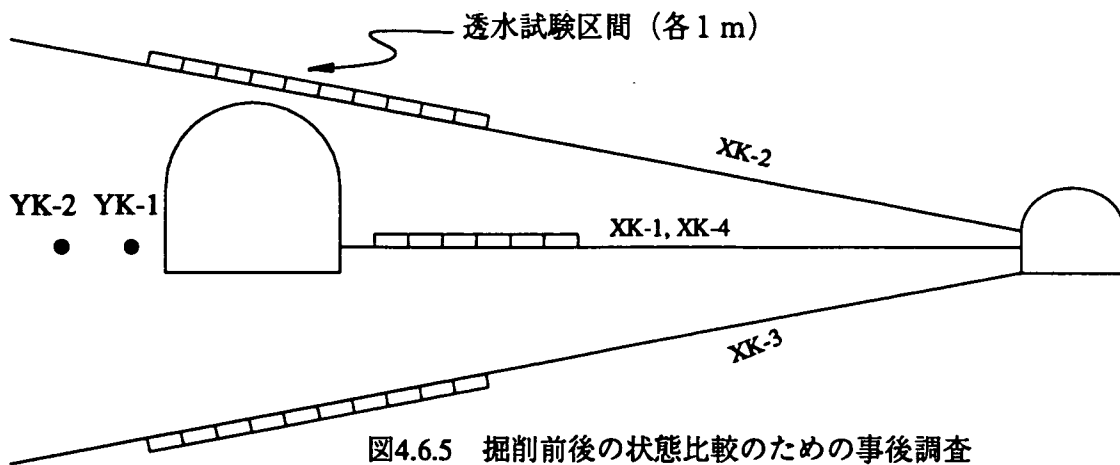
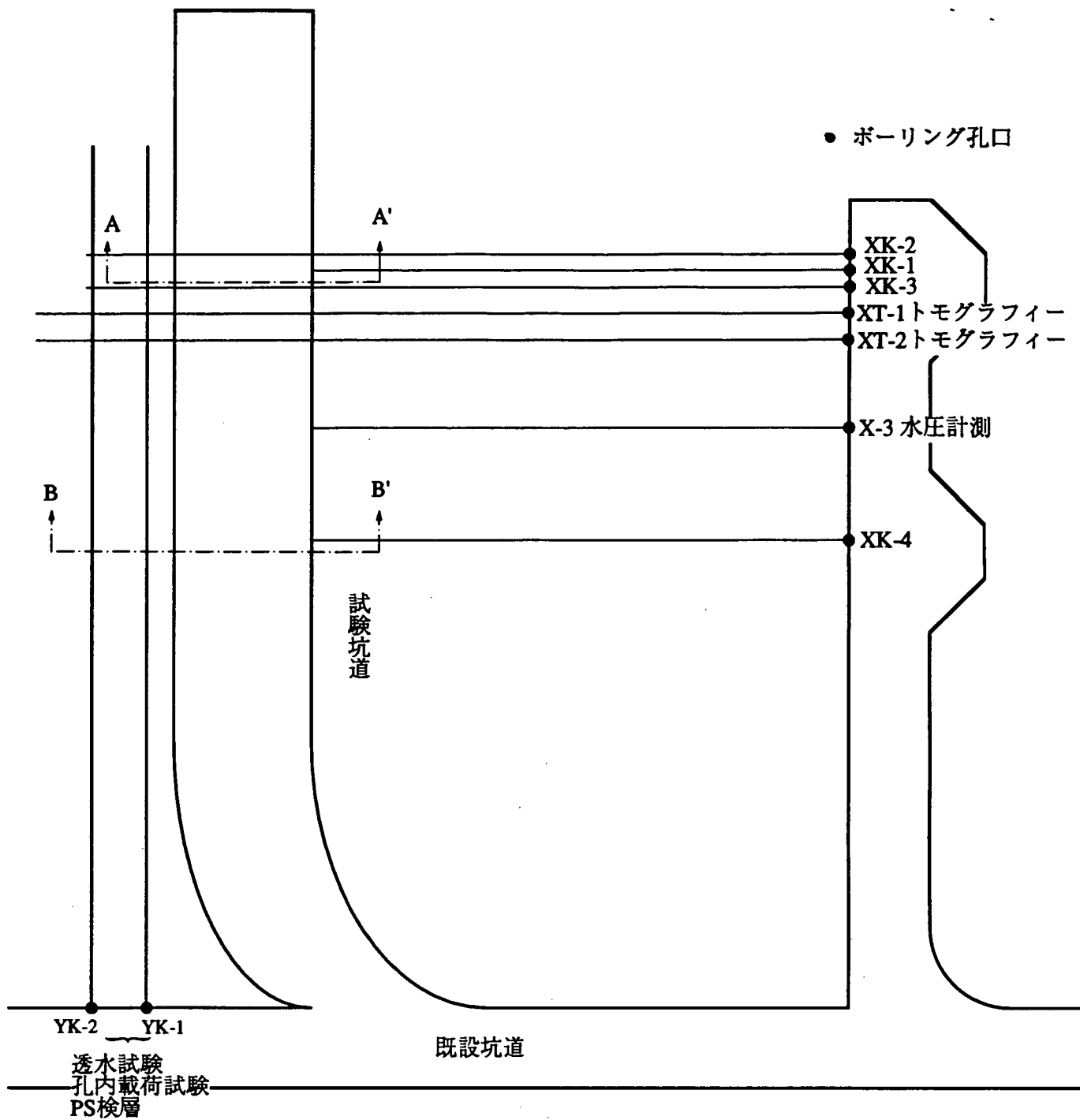


図4.6.5 掘削前後の状態比較のための事後調査

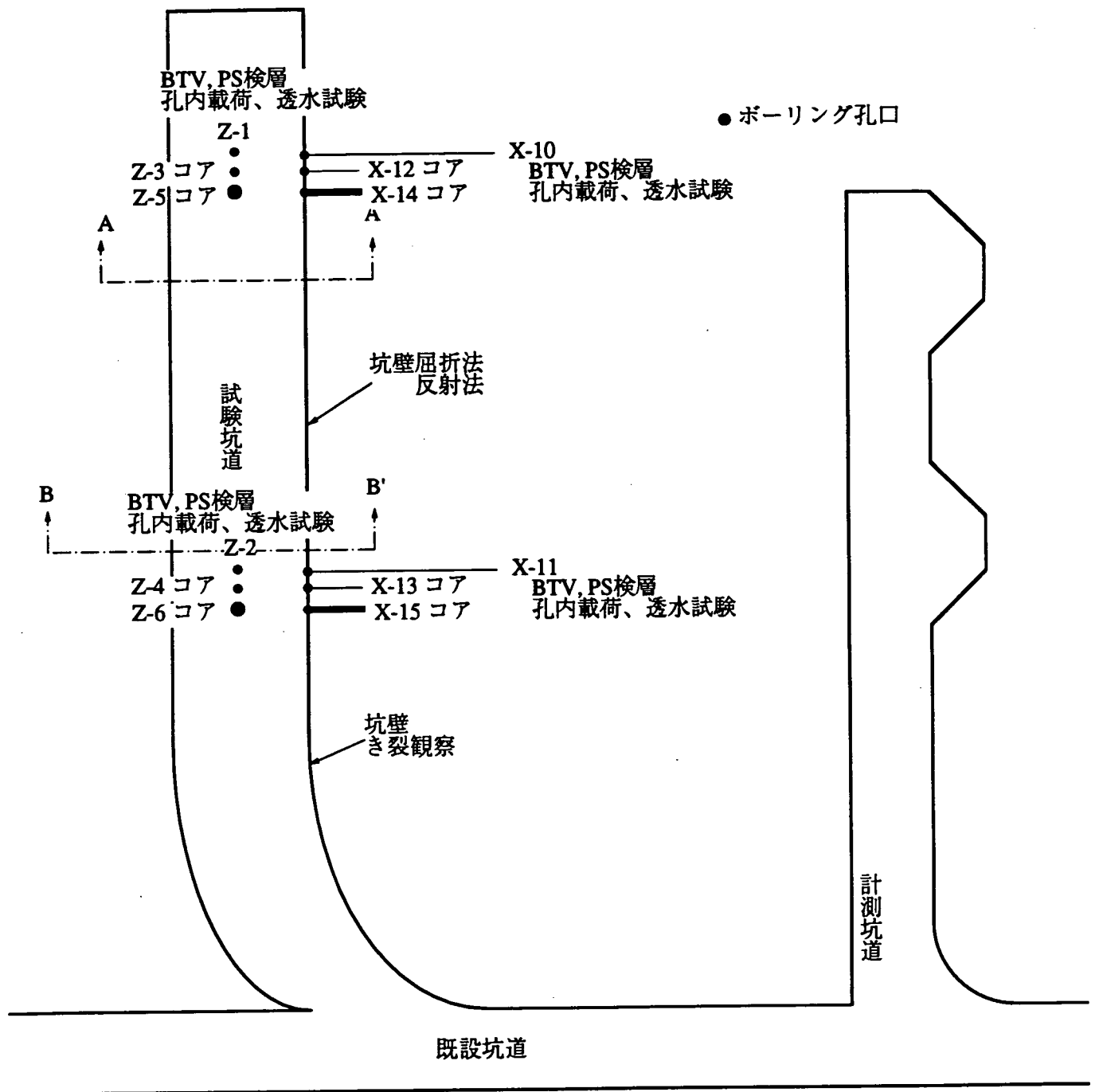


図4.6.6 新規坑道周辺の事後調査

ともに $\phi = 76\text{mm} \times 2\text{m}$ と X-14、X-15 とともに $\phi = 218\text{mm} \times 2\text{m}$) と垂直方向 (Z-3、Z-4 とともに $\phi = 76\text{mm} \times 2\text{m}$ と Z-5、Z-6 とともに $\phi = 218\text{mm} \times 2\text{m}$) のボーリングを実施する。 $\phi = 76\text{mm}$ の試料を用いて、連続的に一軸圧縮試験、弾性波速度試験、透水試験を実施する。 $\phi = 218\text{mm}$ の試料は異方性試験のための試料であり、このコアから掘削損傷域内外での3方向の試料を抜取り、一軸圧縮試験、弾性波速度試験、透水試験を実施する。

以上の調査項目をまとめたものを表4.6.3 にまとめている。また、必要なボーリングの仕様を表4.6.4に示すとともに、各ボーリング位置ならびに試験位置を図4.6.7 に示している。

表4.6.3 事後調査一覧表

目的	調査位置	備考
岩盤・き裂調査	試験坑道坑壁	
間隙水圧調査	X-3	(既設)
トモグラフィー調査	XT-1, XT-2	(既設)
掘削後状態調査	YK-1, YK-2	透水試験、P S 検層、B T V 孔内載荷試験 (既設)
	X-10, X-11	透水試験、P S 検層、B T V 孔内載荷試験 (新設)
	Z-1, Z-2	透水試験、P S 検層、B T V 孔内載荷試験 (新設)
	XK-1	透水試験 (既設)
	XK-2	透水試験 (既設)
	XK-3	透水試験 (既設)
	XK-4	透水試験 (既設)
コア採取	X-12, X-13	一軸、弾性波、透水、顕微鏡
	Z-3, Z-4	一軸、弾性波、透水、顕微鏡
	X-14, X-15	異方性試験
	Z-5, Z-6	異方性試験
物理探査	計測坑道坑壁	屈折法、反射法

表4.6.4 事後調査ボーリング一覧表

	孔番	目的	孔径(φ mm)	掘進長(m)	掘削方法	備考
既設坑道	YK-1	透水試験	76	32	ボーリング	(既設)
	YK-2	透水試験	76	32	ボーリング	(既設)
計測坑道	X-3	水圧計測	76	20	ボーリング	(既設)
	XK-1	透水試験	76	24	ボーリング	(既設)
	XK-2	透水試験	76	32	ボーリング	(既設)
	XK-3	透水試験	76	32	ボーリング	(既設)
	XK-4	透水試験	76	24	ボーリング	(既設)
	XT-1	トモグラフィ	76	38	ボーリング	(既設)
	XT-2	トモグラフィ	76	38	ボーリング	(既設)
新規坑道	X-10	BTV, PS、孔内載荷、透水	76	7	ボーリング	(新設)
	X-11	BTV, PS、孔内載荷、透水	76	7	ボーリング	(新設)
	X-12	コア採取	76	2	ボーリング	(新設)
	X-13	コア採取	76	2	ボーリング	(新設)
	X-14	コア採取	218	2	ボーリング	(新設)
	X-15	コア採取	218	2	ボーリング	(新設)
	Z-1	BTV, PS、孔内載荷、透水	76	7	ボーリング	(新設)
	Z-2	BTV, PS、孔内載荷、透水	76	7	ボーリング	(新設)
	Z-3	コア採取	76	2	ボーリング	(新設)
	Z-4	コア採取	76	2	ボーリング	(新設)
	Z-5	コア採取	218	2	ボーリング	(新設)
	Z-6	コア採取	218	2	ボーリング	(新設)

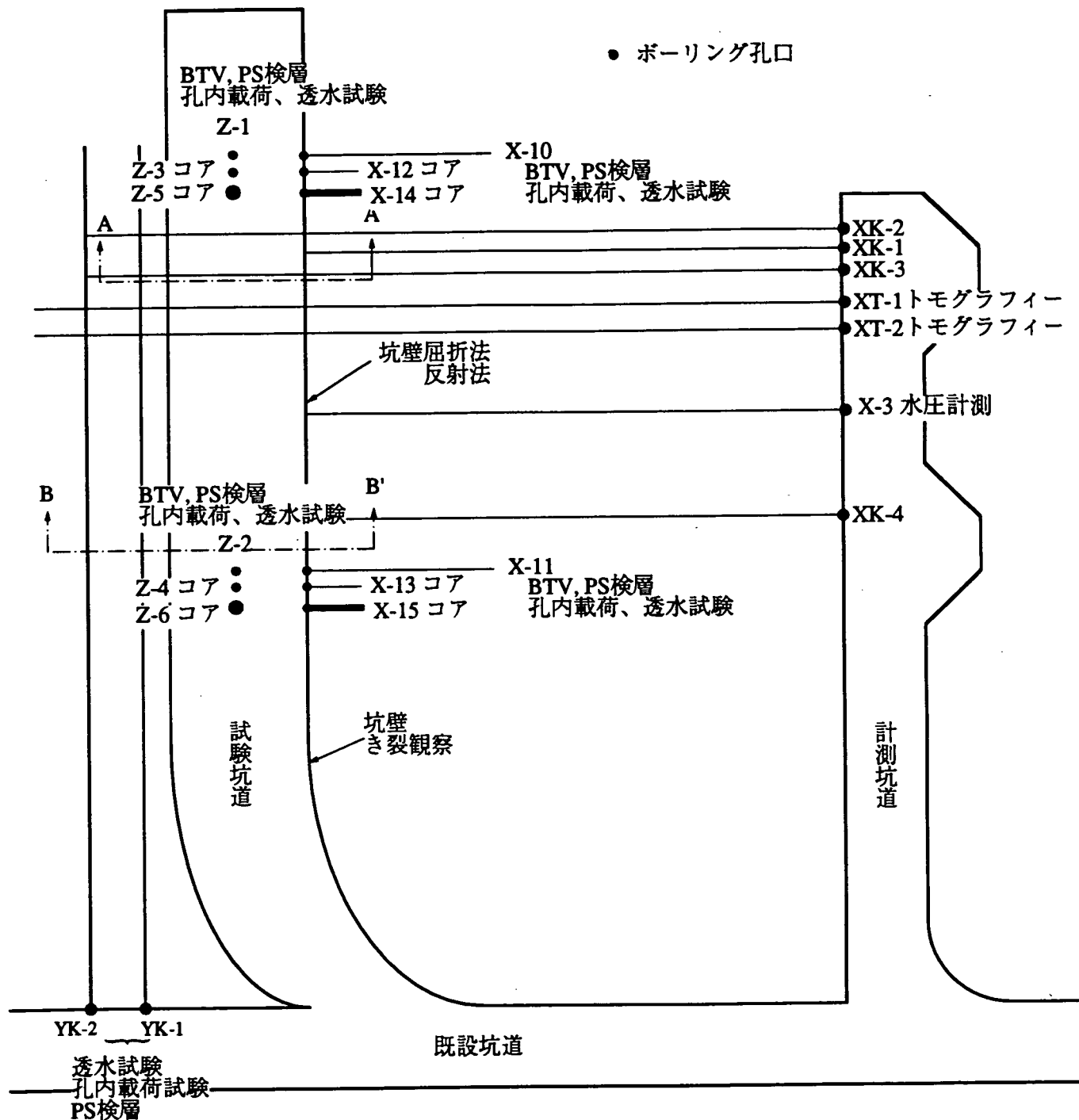


図4.67 事後調査用ボーリング配置のまとめ

4.7 実施計画の作成

4.7.1 計測坑道掘削手法の選定と掘削計画

計測坑道の断面は前節で示したとおり幅3m×高さ2.5mの矩形断面とする。計測坑道の長さは30mとし、排水のため0.5%の上り勾配とする。掘削手法は全断面で普通発破工法とする。発破孔穿孔は2連ジャンボおよびレグドリルで行い、穿孔長は1.3mとする。なお、比較の為に穿孔パターンを2とおり、薬量を3とおりに変えた試行発破を途中で実施する。

平均掘削速度は0.8m/日であり、4m/週程度となり30mの掘削では2ヵ月～2.5ヵ月の工程であるが、掘削準備等を考慮すると約3箇月の工期を要する。但し、これは切羽のき裂スケッチ等の工程を含んでいない。

4.7.2 試験坑道掘削手法の選定と掘削計画

試験坑道の断面は幅5m×高さ5mの幌形断面であるが、既存坑道からのアクセス部（約12m）では高さ2.5mから5mまで変化する。試験坑道の長さは全長36mであり、アクセス部12m、普通発破工区10m、スムーズブラスティング工区15mとし、計測坑道と同様0.5%の上り勾配とする。

アクセス部ならびに普通発破工区は全断面掘削とする。また、スムーズブラスティング工区はスムーズブラスティングと追切り発破を併用する。

普通発破工法での掘削速度は0.8m/日、4m/週程度であり、アクセス部ならびに普通発破工区全22mの掘削は1ヵ月～1.5ヵ月かかる。また、スムーズブラスティング工法での平均掘削速度は0.5m/日（2日で1m）であり、2m/週程度となる。15mの工区の掘削には1ヵ月～1.5ヵ月かかる。したがって、試験坑道の前掘削には掘削準備も含めると4ヵ月～4.5ヵ月が必要である。

これにはき裂のスケッチの工程ならびにAA',BB'の各計測断面におけるボーリングならびに計器の設置工程が含まれていない。

4.7.3 調査試験用ボーリングの掘削計画

調査試験用のボーリングは前述のとおり、3つのグループに分けられる。

- ① 既存坑道から計測坑道・試験坑道に平行なボーリング
 ・事前調査用ボーリング

	孔径(mm)	掘進長(m)	用途
Y-1	76	37	コア、BTV、初期応力
Y-2	76	30	コア、BTV
Y-3	76	20	コア、BTV、ひずみ計（試行）
YK-1	76	32	透水試験
YK-2	76	32	透水試験
YP-1	76	20	Pac-EX（試行）

- ・計測用ボーリング

	孔径(mm)	掘進長(m)	用途
YE-1	76	28	歪み計
YE-2	76	28	歪み計
YE-3	76	28	歪み計
YK-1	76	20	振動計（試行）

以上 合計8孔で総延長は275mである。削孔にかかる日数は3ヶ月～4ヶ月かかる。

② 計測坑道からのボーリング

・事前調査用ボーリング

	孔径(mm)	掘進長(m)	用途
X-1	76	24	コア、BTV
X-2	76	24	コア、BTV
X-3	76	24	コア、BTV、水圧計測
X-4	76	1	多成分歪み計 (試行)
X-5	66	5	地中変位計 (試行)
X-6	38	1	応力計 (試行)
X-7	76	5	コア試験供試体採取・PS検層・孔内載荷
XT-1	76	34	トモグラフィー
XT-2	76	34	トモグラフィー
XK-1	76	24	透水試験
XK-2	76	31	透水試験
XK-3	76	31	透水試験
XK-4	76	24	透水試験

・計測用ボーリング

	孔径(mm)	掘進長(m)	用途
XE-1	76	24	歪み計
XE-2	76	29	歪み計
XE-3	76	29	歪み計
XD-1	76	24	地中変位計
XV-1	76	24	振動計
XV-2	76	24	振動計
XZ-1	76	24	AE計
XZ-2	76	24	AE計
XZ-3	76	24	AE計
XP-1	76	24	Pac-EX
XP-2	76	29	Pac-EX
			小計 279m

以上より計測坑道からのボーリングは短いものも含めて全22本、総延長で

488mとなる。

削孔にかかる日数は5ヶ月～7ヶ月である。

③ 試験坑道からのボーリング

・ AA' 断面

	孔径(mm)	掘進長(m)	用 途
D-1	66	7	地中変位計
D-2	66	7	地中変位計
D-3	66	7	地中変位計
D-4	66	7	地中変位計
D-5	66	7	地中変位計
HI-1	38	1	応力計
HI-2	38	1	応力計
HI-3	38	1	応力計
HI-4	38	0.5	応力計
HI-5	38	0.5	応力計
HI-6	38	0.5	応力計
HI-7	76	6	多成分歪み計
K-1	76	12	透水試験
ED-1	76	1	EDEX計測計
ED-2	76	1	EDEX計測計
小計			59.5m

・ BB' 断面

	孔径(mm)	掘進長(m)	用 途
D-6	66	7	地中変位計
D-7	66	7	地中変位計
D-8	66	7	地中変位計
K-2	76	12	透水試験
小計			33m

以上、試験坑道からの掘削は短いものが中心であり、AA断面で1ヶ月、BB断面で3週間程度である。

以上をまとめるとボーリング本数は51本で、総延長は856mとなる。

削孔の順序としては、既存坑道からのボーリングが最初に行われる。計測坑道の掘削後に計測坑道からのボーリングが実施される。このうちの事前調査用の多成分歪み計、地中変位計、応力計は計測坑道の切羽が到着した時点で削孔される。また、試験坑道から掘削されるボーリングも切羽が到着した時点で削孔される。

4.7.4 解析計画

1) はじめに

釜石鉱山250mレベル坑道において、試験坑道の掘削影響試験が計画されている。試験坑道の掘削に先立っては、数値解析を行い掘削時の周辺岩盤の挙動を把握しておく必要がある。

岩盤に関する解析手法はいくつか存在するが、空洞掘削時の岩盤の挙動等を完璧に再現できるものはない。解析の入力値や解析モデルの決定方法あるいは解析の簡便さ、適用実績等を考えると、現状では有限要素法(FEM)がもっとも有力な方法となっている。しかし、不連続性岩盤においては、原位置のき裂が空洞掘削時の岩盤挙動に影響を及ぼすと考えられる。そのため、き裂の幾何学特性や力学特性を考慮できるクラックテンソル(FEM-CT)等の等価連続体解析や、個別要素法(DEM)などの不連続体解析を用いる必要があると考えられる。ここでは、平成7～9年度における試験坑道の掘削解析として、2次元FEMおよびDEMの実施を提案する。

2) 目的

解析の目的は、試験坑道掘削のシミュレーションを行い、周辺岩盤の挙動を予測することである。解析結果は各種の計測値と比較する。

3) 実施内容

実施する解析の内容は以下のとおりである。

(1) 2次元FEM弾塑性解析

計画されている計測断面を対象として、試験坑道の掘削による周辺岩盤の応力状態や変位、塑性域等を調べる。解析において岩盤は弾塑性体とする。破壊基準として、Drucker-Pragerの条件を用いる。

(2) 2次元DEM解析 (UDEC-BB解析)

計画されている計測断面を対象として、き裂の配置および力学特性を考慮した2次元DEM解析を行う。FEMと同様に試験坑道の掘削による周辺岩盤の応力状態や変位を調べる。また、試験坑道周辺のき裂の挙動についても調べる。解析において岩盤(ブロック)は弾塑性体とする。また、き裂の力学特性はBarton-Bandisジョイントモデルで評価する。

4) 実施方法

FEMおよびDEM解析は、計測坑道や試験坑道の掘進および各種の原位置試験・計測の実施に伴い、平成7～9年度において以下の表4.7.1のように行う。

表4.7.1 解析計画

	現場のスケジュール	解析のスケジュール
平成7年度	計測坑道の掘削	*既存データから解析モデルを作成 *FEM、DEM解析（その1）を実施
平成8年度	試験坑道の掘削、 計測の実施	*FEM、DEM解析（その1）の結果 と計測結果とを比較 *き裂や岩盤物性などのデータを追加 して新たな解析モデルを検討
平成9年度		*FEM、DEM解析（その2）を実施 *FEM、DEM解析（その2）の結果 と計測結果とを比較

解析（その1）：

FEM,DEMを実施する。岩盤やき裂に関する入力値は本年度までに取得されている情報により決定する。DEMにおいて、試験坑道の計測断面周辺のき裂配置は、既存坑道のき裂調査結果からモデル化する。

解析（その2）：

計測坑道やボーリングによる岩盤の力学特性やき裂の配置・力学特性を考慮して新たに解析モデルを作成する。この際、ボーリングコアを利用して岩石やき裂の室内試験を行い、解析の入力値の見直しを図る。DEMにおいて、試験坑道周辺のボーリング孔のき裂情報を追加して解析モデルに考慮する。また、実在するき裂を解析モデルに直接取り込む。

5) 解析ステップ

FEMおよびDEMとも解析を次の3つのステップに分けて実施する。

- *STEP1：初期地圧の負荷
- *STEP2：既設坑道および計測坑道の掘削
- *STEP3：試験坑道の掘削

6) 入力条件およびパラメータ

*初期地圧：

原位置における初期地圧計測結果を利用する。

*岩盤の力学特性：

孔内載荷試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験の結果を利用して、弾性係数、ポアソン比および強度定数である粘着力と内部摩擦角を決める。

*き裂配置：

既設坑道き裂の調査結果から、き裂の方向、間隔（密度）、き裂長の分布を求める。さらに、試験坑道周辺のボーリングより実在するき裂の配置を把握する。

*き裂の力学特性：

き裂に関する室内試験結果を利用し、せん断剛性 K_s , JRC, JCSなどを決定する。

7) 室内試験の実施

平成7年度以降に得られるボーリングコアを用いて、以下の室内試験を実施する。

*一軸圧縮試験：

一軸圧縮強度、弾性係数、ポアソン比を求める。

*三軸圧縮試験：

粘着力および内部摩擦角を求める。

*き裂の力学試験

き裂のせん断強度、せん断剛性、粗さ係数(JRC)、圧縮強度(JCS)などを求める。

以上の室内試験の結果を解析（その2）の情報として加える。

6) 期待される成果

*試験坑道の掘進に伴う周辺岩盤の応力状態や変位、塑性域等を把握する。

*各解析の結果を比較することで、岩盤の異方性やき裂の影響等を把握する。

たとえば、坑道の内空変位が初期地圧やき裂の影響で異方性を呈することが予想される。また、坑道周辺の岩盤のゆるみをFEM弾塑性解析においては塑性域、DEM解析においてはき裂の開口やすべりとして把握できる。

*FEMおよびDEM解析の結果と計測結果を比較し、き裂の影響を調べる。

以下に解析結果の例を図6-1～6-6に示す。図6-1は、FEM解析による坑道掘削時の周辺岩盤の変位コンターおよび変位ベクトルである。図6-2は、FEM解析による坑道周辺の応力変化を示している。図6-3はDEM解析による坑道掘削時の変位ベクトルである。図6-4は、DEM解析による坑道掘削時の主応力ベクトルである。図6-5は、DEM解析による坑道掘削時のき裂の開口量の分布を示している。図6-6は、DEM解析による坑道掘削時のき裂のせん断変位の分布を示している。

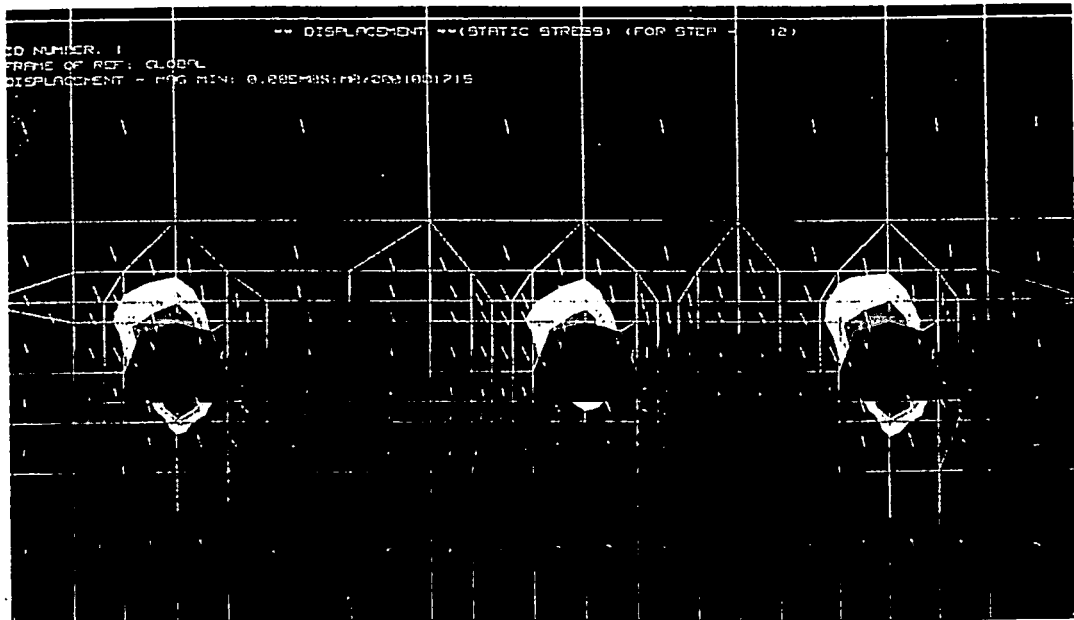


図4.7.1 坑道掘削後における岩盤の変位状況 (FEM)

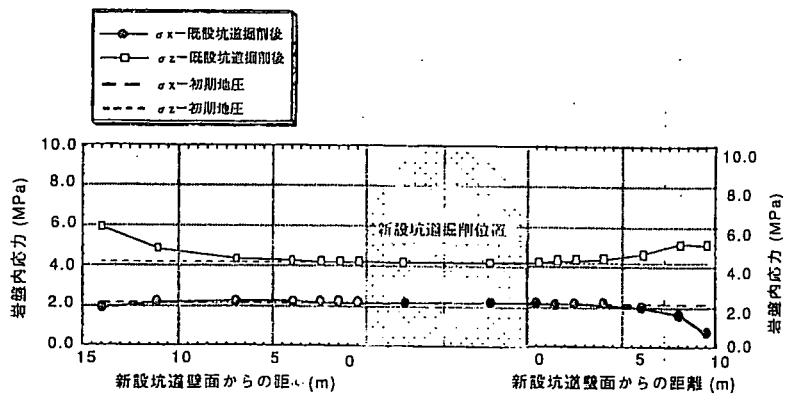


図4.7.2 坑道掘削後における岩盤の応力状態 (FEM)

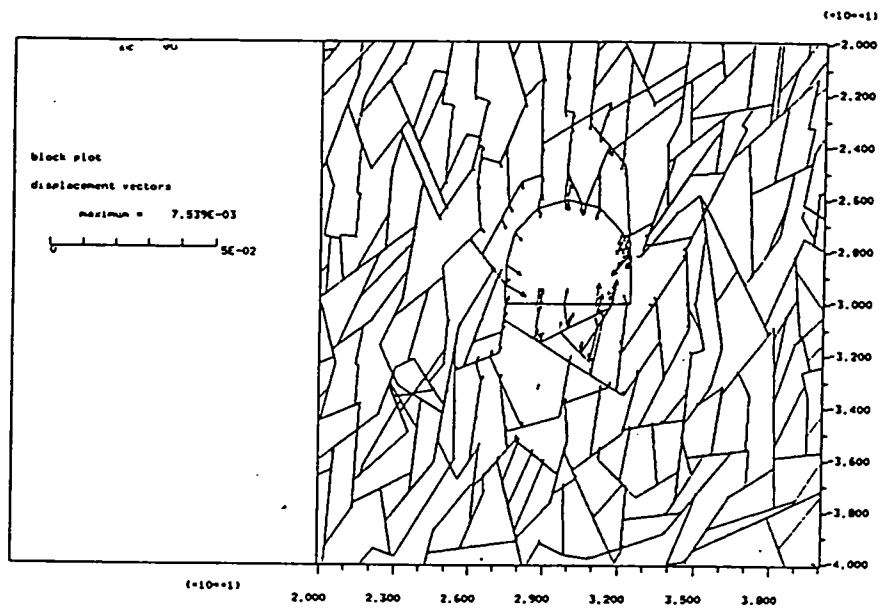


図4.7.3 坑道掘削後における岩盤の変位状態 (DEM)

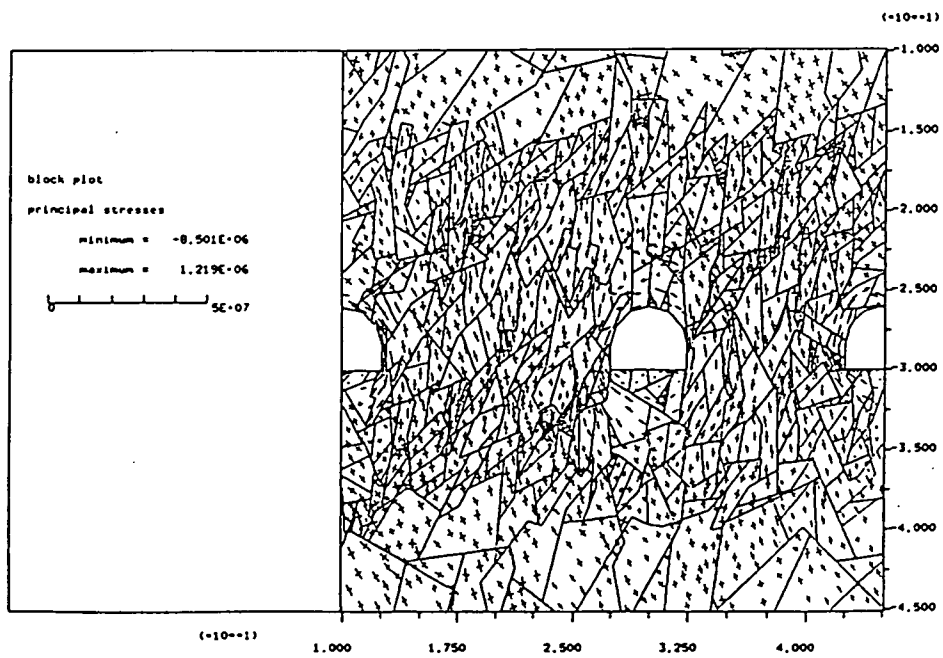


図4.7.4 坑道掘削後における岩盤の応力状態 (DEM)

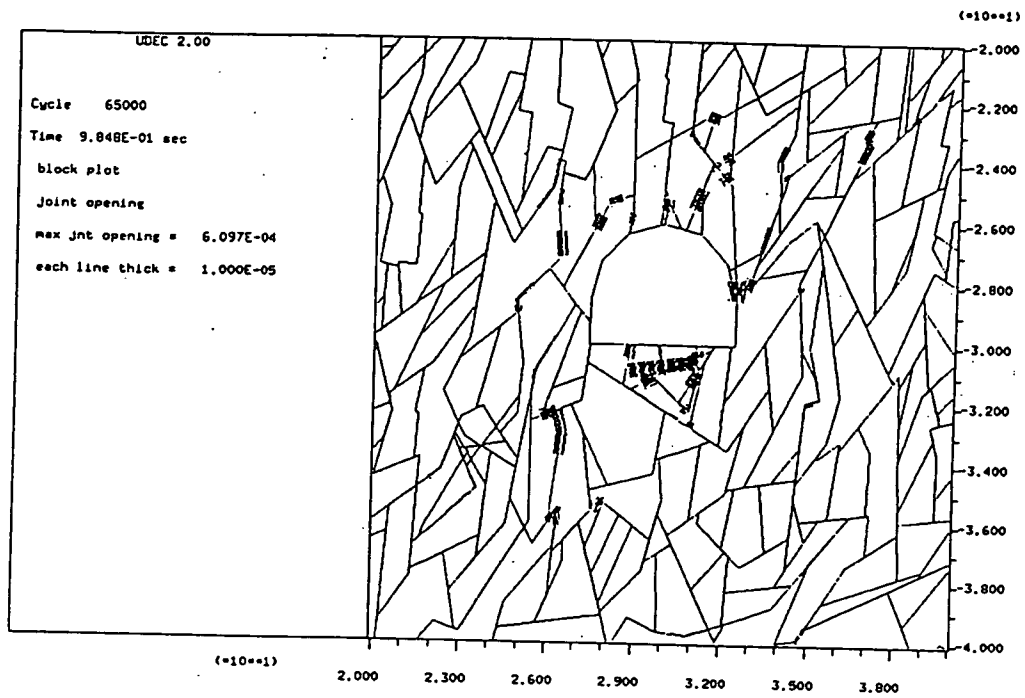


図4.7.5 坑道掘削後におけるき裂の開口量 (DEM)

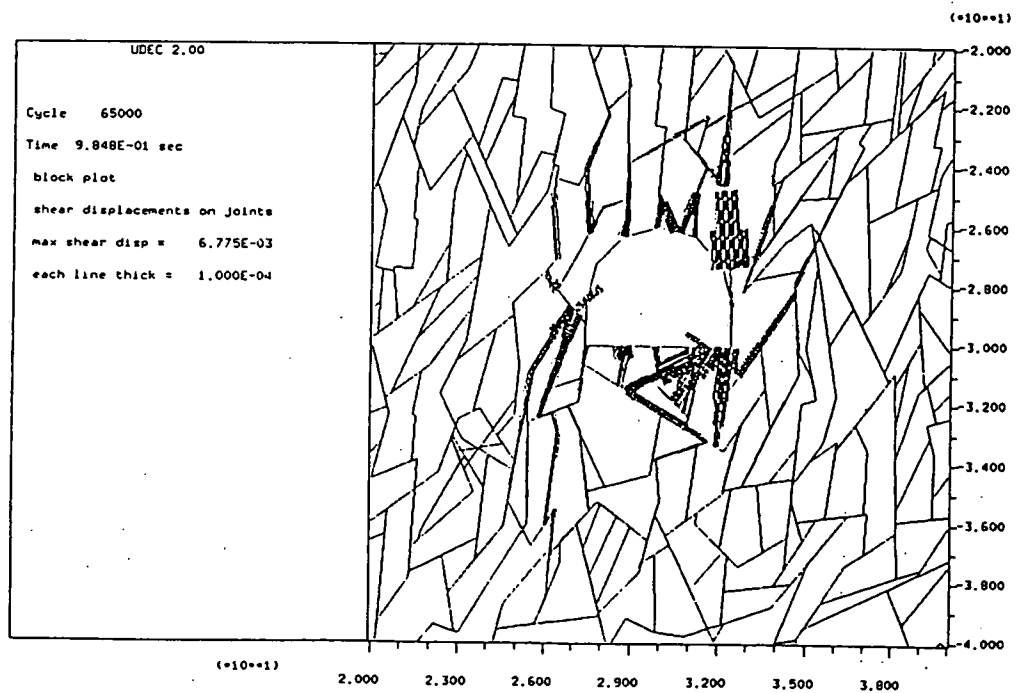


図4.7.6 坑道掘削後におけるき裂のせん断変位 (DEM)

4.7.5 全体工程のまとめ

これまでの実施計画をまとめて全体の工程表を表4.7.2に示す。ここでは、3年間の間に以下の作業を配置した。すなわち、

1) 坑道掘削およびボーリング削孔

- ・ 計測坑道掘削
- ・ 試験坑道掘削
- ・ 既存坑道からのボーリング
- ・ 計測坑道からのボーリング
- ・ 試験坑道からのボーリング

2) 事前調査

3) 事後調査

4) 計器の設置

5) 計測作業

6) 解析作業

7) 室内試験

8) 総合評価

表4.7.2 「新規坑道における掘削影響領域の評価」の実施工程表

	1995			1996			1997			1998		
	4月	7月	10月	1月	4月	7月	10月	1月	4月	7月	10月	1月
計測坑道掘削			□									
試験坑道掘削						□						
既存坑道から			□									
計測坑道から			□									
試験坑道から							□	□				
事前調査			□			□						
事後調査											□	
計器の設置							□				□	
計測												
解析												
				□								□
室内試験			□									
総合評価												

参考文献

- 1) "Executive Summary and Conclusions", Proc. of NEA Workshop on Excavation Response in Geological Repositories for Radioactive Waste, pp.11-15, 1989.
- 2) "Äspo Hard Rock Laboratory, Test plan for ZEDEX-ZONE of Excavation Disturbance EXperiment., Release 1.0", International Corporation Report 94-02, SKB, 1994.
- 3) "Detailed Measurements of Deformation in the Excavation Disturbed Zone", Int. J. Rock Mech, Min Sci & Geomech. Abstr. Vol.30, No7, pp.1511-1514, 1993.
- 4) "Grimsel Rock Laboratory / Investigation phase IV (1994-1996)", Joint International Committee Test Program, 21th Oct., 1994.
- 5) "花崗岩における原位置試験（昭和63年度）” 動燃事業団委託研究報告書、PNC SJ4380 89-002, pp.241~261, 1989.
- 6) "花崗岩における原位置試験（平成元年度）” 動燃事業団委託研究報告書、PNC SJ4380 90-002, pp.95~115, 1990.
- 7) "地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価（その1）", 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.343-348, 1994.
- 8) "神岡鉱山におけるジョイント標定と特性評価、ジョイント変位計の開発", 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.731-736, 1994.
- 9) 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 -平成3年度- 動力炉・核燃料開発事業団、PNC TN1410 92-081, pp.3-58, 1992.
- 10) 動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書「掘削影響試験のためのき裂性岩盤のモデル化に関する研究」平成6年3月、pp.1-97.
- 11) 釜石鉱山250mレベル坑道における割れ目特性の予察的調査、動力炉・核燃料開発事業団中部事業所、PNC TN7410 93-032, pp.13-42, 1993.
- 12) 掘削影響試験の計画立案に係わる補足資料、動力炉・核燃料開発事業団、12月、1994.

5. 本研究のまとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

5.1 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験

各種調査手法の掘削影響領域の評価に対する適用性の検討と、既存坑道周辺の掘削影響領域の特性と広がりデータの取得を目的とし、釜石鉱山250m坑道において各種原位置試験を実施するとともにボーリングコアを用いた室内試験を行った。

5.1.1 物理探査

5.1.1.1 P S 検層

P S 検層では、P波速度は深度0.75mを境にして、3.0km/secから6.0km/secに変化している。同様に、S波は深度0.5～0.75mを境にして、速度が1.5km/secから3.2～3.4km/secに変化している。この結果より、掘削影響領域の範囲は坑道壁面から深度0.5～0.75mまでであると判断することができる。

5.1.1.2 坑内弾性波探査（屈折法）

坑内弾性波探査（屈折法）では、深度0.5m付近を境にしてP波速度が3.0～5.0km/secから6.0km/secに変化しており、掘削影響領域が深度0.5m程度であると考えられる。

5.1.1.3 レーダ探査（反射法）

レーダ探査（反射法）の結果から推定される掘削影響領域は、深度約1.0m以下の領域であると考えられるが、その特性については特定できない。

5.1.1.4 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィの解析結果によると、坑道壁面近傍に弾性波速度が低下した領域が存在するが、その分布は不均質なものであり、掘削影響領域として深度を決定することは困難である。また、弾性波速度は最高6.5km/secに対して3.5km/secの領域が存在している。速度分布はボーリングコア（KDT-2孔）によるRQD値とほぼ対応している。

5.1.2 孔内載荷試験

孔内載荷試験によって得られる変形係数と弾性係数の値が、深度0.5m前後で最低になっていることと、相関係数が低い回帰直線の交点より求められた掘削影響領域と健岩部の境界面の深度が約1.0mであることから、掘削影響領域は深度0.5～1.0m程度までであると予測される。また、今回の試験結果からは顕著な異方性は認められなかった。

5.1.3 室内試験

超音波速度試験結果から、岩石のP波速度の平均が5.77km/secであり、S波速度の平均が3.16km/secであることがわかった。

一軸圧縮強度の平均は115.0MPa、静弾性係数の平均は60.1GPa、そして静ポアソン比の平均は0.267であった。

高圧三軸試験で得られた側方向応力と圧縮強さの関係より、内部摩擦角 $C=37\text{MPa}$ 、粘着力は $\phi=45^\circ$ を得た。

圧裂引張試験による引張強度の平均は、8.42MPaであった。

5.1.4 既存坑道周辺の調査・試験と室内試験のまとめ

原位置試験結果を基に今回の調査領域における掘削影響領域の範囲と、その影響の程度について以下の知見を得た。

5.1.4.1 掘削影響領域の特性と広がり

推定される掘削影響領域は、P S検層および坑内弾性波探査（屈折法）では深度0.5～0.75mまでであり、レーダ探査（反射法）では深度1.0m程度までである。弾性波トモグラフィでは特定できないが、孔内載荷試験からは深度0.5～1.0mまでが掘削影響領域であると考えられる。また、掘削による影響の程度については、弾性波速度の場合、約半分になっている。弾性波速度分布と既存坑道のき裂分布はほぼ対応している。

以上の結果をもとめると、各種調査から表5.1のような掘削影響領域の広がりが把握できた。

表5.1 各種調査手法による掘削影響領域の広がり

調査手法	坑壁からの距離(m)		
	0	0.5	1
PS検層	[Hatched area from 0 to approximately 0.8]		
坑内弾性波探査(屈折法)	[Hatched area from 0 to 0.5]		
レーダ探査(反射法)	[Hatched area from 0 to 1]		
弾性波トモグラフィ	特定できない		
孔内载荷試験	[Hatched area from 0 to 1]		
室内試験 RQD	特定できない		

5.1.4.2 調査手法の適用性の評価

PS検層による調査手法および評価方法は有効である。ただし、広範囲な探査にはボーリング孔を多数必要とする。

坑内弾性波探査(屈折法)も調査手法および評価方法は有効である。ただし、探査深度が測線長の10分の1から5分の1となる。

レーダ探査(反射法)は、ノイズの影響を除去することができれば有効な手法となる。ただし、その評価には、他の手法と組み合わせることが必要である。

弾性波トモグラフィは、岩盤内の深部を把握するための有効性には問題があると考えられる。

孔内载荷試験で掘削影響領域を捉えるためには、多数の測点を必要とする。

5.2 き裂物性試験および試験結果に基づくき裂の分類

個別要素法(DEM)などによりき裂を考慮した解析を行う場合、き裂の幾何学的な分布や力学特性を考慮することが必要となる。第3章において、岩芯鑑定などから得られたき裂の情報をもとに、き裂に関する種々の特性から、き裂分類の指標として充填物の幅、充填物の種類、および変質の程度を抽出した。また、室内物性試験を実施し、その結果から得られたき裂の力学特性とき裂分類の指標の関係を検討した。

その結果、以下のようなことがわかった。

1) 種々のき裂の力学特性と、き裂分類の指標の関係は、データのばらつきが大きく、高い相関性を伴った統一的な傾向は得られなかった。しかし、平均的な傾向から考えると、き裂の強度特性である、ピーク摩擦角 ϕ_j 、残留摩擦角 ϕ_r や、 JCS_0 、 JRC_0 と充填物の種類の間に関連関係が得られた。したがって、充填物の種類ごとに、解析の入力値を決めることができる。

2) 一方、き裂の変形特性である初期垂直剛性 K_{ni} およびせん断剛性 K_s については、いずれもき裂分類の指標との関係に一貫した傾向がなかった。したがって、解析に入力する際は、従来どおり平均値を用いることが考えられる。

3) 充填物の幅および変質の程度に関しては、限られた条件下で力学特性との相関性が得られたが、全体の傾向との整合に乏しかった。

4) これまでに行われたDEM解析では、入力値を1種類としている例が多く、特定の指標との関係を検討した例はほとんどない。原位置のき裂には充填物を含んだものが少なくない。今回、入力値を分類する指標として、充填物の種類が抽出されたことは意義のあることと考えられる。

ただし、今回の実験に用いた試料は、充填物の幅が10mm以下、変質の程度がFS, VW, WKのものがほとんどであった。

5) 今後の課題として、せん断試験時の垂直応力の範囲を広げることや、き裂の変形特性の分類が挙げられた。また、解析モデルの作成にあたっては、分類したき裂が原位置においてどのように分布しているかを検討する必要がある。特に、充填物の幅が10mmを上回るき裂や、変質の程度がMD, IL (中～強程度) のき裂の力学特性については把握していない。このようなき裂が、掘削する坑道の周辺に存在する場合は、実験による検討を要する。

5.3 「新規坑道における掘削影響領域の評価」 詳細計画案の検討

1) 各国の掘削試験の目的を参照し、以下の研究目的に沿った調査・試験計画を作成した。

- ・掘削影響領域の特性・広がりを計測するシステムを開発する。
- ・掘削影響領域の特性・広がりのデータを取得する。
- ・掘削影響領域に関連するプロセスの重要性・関連性を評価する。

2) 国内外の事例検討により、掘削影響に係わる事象を抽出し、本試験のコンセプトを確立した。本試験では研究対象領域を掘削損傷領域と応力再配分領域に限定した。

3) 対象岩盤のき裂状況、坑道掘削による応力再配分領域の広がり、計測計画等を配慮して、試験坑道のレイアウトを設定した。

4) 試験コンセプトに沿って、坑道掘削前後の調査・試験項目を抽出した。

5) 本研究の目的に対応して、計測目的を以下のように設定して、計測項目の抽出、機器配置を行った。

- ・掘削損傷領域の発生メカニズムとその特性を調べる。
- ・応力再配分領域の広がり・特性を調べる。
- ・事前計画・モデリング・解析のためのデータを与える。
- ・掘削工法の影響を調べる。

6) 坑道掘削、ボーリング掘削、事前事後調査、計測計画、解析計画、総合評価計画を配慮して全体工程を作成した。