

堆積岩地山における立坑周りの 力学的・水理学的な特性変化

松井 裕哉
杉原 弘造
佐藤 稔紀
吉岡 尚也

1992年12月

動力炉・核燃料開発事業団
中部事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31
動力炉・核燃料開発事業団
中部事業所 技術開発課

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1992

堆積岩地山における立坑周りの 力学的・水理学的な特性変化

松井裕哉* 杉原弘造* 佐藤稔紀* 吉岡尚也*

要旨

地下発電所や道路トンネル等の構造物を岩盤内に掘削すると、その空洞周辺にはゆるみ領域が生じることがある。このゆるみ領域を定量的に把握することは、地下の大規模構造物の経済的な設計・施工、その長期安定性を評価する上で重要である。

このため、動燃事業団では新第三系の堆積岩中に実規模の立坑（内径6m、深さ152.3m）を掘削し、立坑掘削による周辺岩盤への影響と地下水流动への影響を把握するためのさまざまな調査・試験を実施した。この研究は立坑掘削影響試験と呼ばれ、平成元年度より開始され、平成3年9月までに立坑掘削工事を終了した。

本論で述べる内容は、立坑掘削影響試験の一環として実施した周辺岩盤の力学的・水理学的特性の変化に関する調査研究の一部である。この調査研究の目的は、岩盤の持つ力学的・水理学的特性に着目し、立坑掘削に伴うその変化を捉えることにより、立坑周辺に生じるゆるみ領域を把握することである。

現時点までにこれらの調査・試験で得られたデータを解析・評価した結果、以下の知見が得られた。

- ①掘削に伴う応力再配分やき裂の発生によって、立坑周辺岩盤に力学的・水理学的特性の変化が引き起こされることがわかった。
- ②その範囲は、岩盤壁面から1m程度である。
- ③立坑周辺の岩盤では、き裂の閉塞や岩盤の塑性化により非回復な変形量の増加が生じると考えられる。その非回復な変形量を表現する永久変形係数という概念を用い計測結果を検討した結果、永久変形係数は岩盤がゆるんだ領域を把握するための一つの指標となることがわかった。

* 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所 環境地質課

Mechanical and hydrological variation of rock mass
around a shaft excavated in Neogene sedimentary rocks

Hiroya MATSUI * , Kozo SUGIHARA * , Toshinori SATO * and Hisaya YOSHIOKA *

ABSTRACT

As a result of underground excavation to construct an underground facility, an excavation disturbed zone (EDZ) is often generated in rock mass around a shaft and a drift.

In order to design and construct an underground facility, and to evaluate its long-term stability, it is necessary to understand the phenomena related to excavation disturbance.

PNC(Power Reacter and Nuclear Fuel Development Corporation) excavated a shaft of 6m diameter and 152.3m depth in Neogene sedimentary rocks, and studied the influence induced by the shaft excavation on rock mass and ground-water flow around the shaft. This project was named SEE (Shaft Excavation Effects) project, and was carried out from 1978 to 1991.

This report described a part of the SEE Project , focusing on mechanical and hydrological variation of rock mass around the shaft.

The current conclusions were summarized as follows :

- ① Mechanical and hydrological variation of rock mass around the shaft was induced by stress redistribution and fracturing around the shaft.
- ② The zone where mechanical and hydrological characteristics were varied was extended about 1m from shaft wall.
- ③ It is considered that unrecoverable deformation is generated in rock mass around a shaft because of fracturing and plastic deformation.

We introduced a concept of permanent deformation modulus to take account of the unrecoverable deformation , and estimated the results of borehole jack tests. Consequently, we found the permanent deformation modulus was useful to identify the EDZ.

* Waste Isolation Research Section , Chubu Works , PNC

目次

	ページ
1. 序	1
2. 本研究に関連した既存の研究	2
3. 研究の目的	5
4. 調査・試験地点の地質概要	6
4. 1 地質概要	6
4. 2 岩石の性質	6
5. 調査・試験内容	8
5. 1 調査・試験位置	9
5. 2 調査・試験項目	10
5. 3 調査・試験方法	11
6. 調査・試験結果と考察	12
6. 1 A断面における調査・試験結果と考察	13
6. 1. 1 ボアホールテレビ観察の結果と考察	13
6. 1. 2 超音波パルス試験の結果と考察	15
6. 1. 3 孔内載荷試験の結果と考察	17
6. 1. 4 透水試験の結果と考察	21
6. 2 B断面における調査・試験結果と考察	24
6. 2. 1 ボアホールテレビ観察の結果と考察	24
6. 2. 2 孔間弾性波試験の結果と考察	29
6. 2. 3 孔内載荷試験の結果と考察	31
6. 2. 4 透水試験の結果と考察	35
7. 結び	39
8. 今後の課題	40
9. 謝辞	41
10. 参考文献	42

1. 序

近年、我が国では、大規模な石油地下備蓄基地や地下発電所といった地下構造物が多数建設されている。土木工学の分野では、これらの構造物の設計・施工を能率的かつ経済的に行うために”ゆるみ領域”（ゆるみ領域については第6章参照）の範囲を把握することが重要な研究テーマとなっている。

また、ゆるみ領域内の物性データの取得とその発生メカニズムの解明は、地下深部における空洞の建設技術の開発あるいはその長期安定性を評価する上で重要である。

ゆるみ領域を対象とした研究としては、杉原・二宮(1990)¹⁾が、新第三系の堆積岩中ににおける掘削影響評価試験により、坑道周辺では力学的・水理学的な物性が変化すること、また室内試験結果に基づく数値解析により岩盤挙動の予測がある程度可能であることを示した。一般にこのような研究は、ゆるみ領域が空洞の安定性に大きな影響を与えるトンネルなどの水平坑を対象としたものが多く、地表と地下空洞を接続する役目を果たす立坑についてはほとんど検討されていないのが現状である。しかし、地下構造物の長期的な安定性を考えた場合、立坑周辺岩盤にゆるみ領域が発生するとその部分が水みちとなり、地下構造物の長期的な安全性を低下させる可能性がある。従って、立坑の掘削によって引き起こされる力学的・水理学的な特性の変化を把握しておくことは、深部に地下構造物を建設する際に建設技術の開発や構造物の長期的な安定性を評価する上で必要である。

動力炉・核燃料開発事業団では、新第三系の堆積岩盤中に立坑を掘削し、これにより引き起こされる影響の研究を行っている。この研究は立坑掘削影響試験と名付けられ、平成元年度より開始した。研究の成果の一部については既に報告^{2) 3)}している。

2. 本研究に関連した既存の研究

現在、実規模の坑道掘削を行って掘削影響に関する研究を進めている主な国は、スウェーデン、スイス、カナダ、ベルギーがある。スウェーデン、スイス、カナダは花崗岩を、ドイツでは岩塩層を、ベルギーでは粘土質岩を対象に研究が進められている。

各国の研究成果については、1987年に掘削影響に関するワークショップ⁴⁾ (OECD/NEA) が開催され、掘削影響試験に関する現状についての報告があった。その報告の中で述べられた知見を以下に紹介する。

スウェーデン

調査サイト : ストリッパ鉱山

対象岩種 : 花崗岩

掘削方法 : 発破

[得られた主な知見]

- ①掘削により坑道周辺に半径方向にスキンゾーンと呼ばれる低透水性の領域が発生した。
- ②大型緩衝材試験用坑道では、坑道周辺0.5 ~1m幅で坑道軸方向の平均透水係数は 10^{-7} ~ 10^{-6} m/secであった。
- ③トンネルプラグ試験（立坑の埋め戻し試験の一種）用坑道では、坑道底盤と側壁部で約0.3 ~0.5mの深さまで、発破の影響により割れ目が発生した。

スイス

調査サイト : グリムゼルテストサイト

対象岩種 : 花崗岩

掘削方式 : 機械掘削 (TBM)

[得られた主な知見]

- ①掘削された坑道において、割れ目帶では透水性の増加が見られたものの、中程度（一軸圧縮強度で50~100MPa）あるいは健全な岩盤（一軸圧縮強度で100MPa以上）では透水性に変化が見られなかった。

カナダ

調査サイト : マントバ州URL (Underground Research Laboratory)

対象岩種 : 花崗岩

掘削方式 : 発破

[得られた主な知見]

- ①坑道径が約4mの水平坑道において、掘削影響試験が実施された。その結果、掘削による損傷範囲は側壁・天端部で0.5m以下であり、この領域では透水性は高くない。また、床面では、1m以上の領域が影響を受け、この領域の透水性は高くなっている。
- ②アクセス用立坑掘削（深度225～445m）に伴う調査では、2つの割れ目帯を除き岩盤内に割れ目はほとんど認められなかった。
- ③2つの割れ目帯の間で水圧破碎やオーバーコアリングによる応力測定を行った結果、最大主応力値は土被り圧の2～10倍であった。また、最大主応力と最小主応力の比は2であった。

ドイツ

調査サイト : アッセⅡ

対象岩種 : 岩塩

掘削方式 : 発破

[得られた主な知見]

- ①オーバーコアリング、ひずみ計、水圧破碎、フラットジャッキによる掘削後の応力測定では、水圧破碎による測定値が有限要素法による予測値と近かった。また、水圧破碎法による応力の測定結果から、空洞壁面から10m離れると応力再配分の影響を受けないことが判明した。
- ②コンバージェンスとエクステンソメーターによる変位測定結果では、掘削から4年間連続的に変位が増加しているが、これは2次クリープであると考えられる。
- ③岩塩層のクリープ変形についてはかなりの精度で予測ができ、その結果として応力再分配過程の予測も可能である。
- ④アッセ岩塩層において2次元の熱応力FEM解析を実施し、原位置でのボアホールを用いた加熱試験用坑道での地中変位測定の結果と比較した。解析結果は、加熱試験開始後に実測された地中変位とよく一致した。

ベルギー

調査サイト : モルテストサイト

対象岩種 : 粘土質岩

掘削方式 : 発破

[得られた主な知見]

- ①厚い粘土質岩層では、地山強度比とせん断強度比が支保の必要性を決める指標となる。
- ②粘土質岩のような低強度の岩盤の場合、制御発破は、岩盤の局所的な不均質性から難しいため、掘削工法としては岩盤への衝撃を最小限に抑える全断面機械掘削機が適当である。
- ③支保は掘削後速やかに行うことが、空洞の長期安定性を確保する上で重要である。
- ④内空変位に関しては、水平坑（直径2m、長さ7m）では、掘削後一ヶ月の間に最大2.5cmの変位が生じ、その後空洞に生じる変位は緩やかに増加している。この変位挙動が収束するまでには数ヶ月～数年の期間を要す。
- ⑤原位置での地山応力状態は等方的である。

以上各国の現段階での知見をまとめると、1)掘削による岩盤への影響範囲は、坑道径あるいは掘削手法等により異なるが、だいたい数m程度の範囲に限られる、2)き裂が多い場所では、掘削に伴い、空洞周辺に透水係数の大きく変化する領域が生じる、3)長期的あるいは熱的に引き起こされる岩盤の変形挙動に関しては、現存の解析手法によりある程度定量的な評価が可能であるという結論であった。しかし、掘削に伴って発生するゆるみ領域は、対象とする岩盤、き裂の有無、掘削工法、支保形態などによって異なり、その解析手法についても一般に認められたものがないのが現状である。

3. 研究の目的

岩盤中に空洞を掘削することは、岩盤という材料を取り除く作業である。従って、岩盤の力学的な平衡状態が乱され、空洞周辺部にはゆるみ領域が発生する。一方、空洞を掘削するためには、空洞内に流れ込む地下水を排水する必要がある。そのため周辺の地下水流动に変化が生じる。

立坑掘削影響試験は、上述した空洞近傍の岩盤が受ける力学的・水理学的影响及び空洞周辺地域の地下水流动に与える影响を解明するために実施された。この立坑掘削影響試験は、前者の影响を解明するための「岩盤挙動調査」と、後者の影响を解明するための「水理調査」の2項目に分けられる。

岩盤挙動調査では、周辺岩盤の变形挙動に関する調査と周辺岩盤の力学的・水理学的な特性変化に関する調査を実施した。本論では、周辺岩盤の力学的・水理学的な特性変化に関する調査で得られた結果の一部について述べる。

4. 調査・試験が行われた地点の地質概要

4. 1 地質概要

調査・試験は、動燃事業団中部事業所が所有する東濃鉱山の敷地内で行われた。この地点の地質概要を図-1に示す。東濃鉱山の地質は、基盤に約7000万年前に形成された土岐花崗岩、その上に約2千万年前に堆積した土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層、そして約500万年前に堆積した瀬戸層からなっている。土岐夾炭累層は、礫岩、凝灰質砂岩・泥岩・炭質物からなっている。明世累層は、凝灰質中粒～細粒砂岩からなる。瀬戸層は未固結層であり、花崗岩及びチャートなどの礫を多く含んでいる。

また、この地点には走行N80E傾斜60°Sの月吉断層がある。この断層は、南側の地層が北側の地層の上に衝上している逆断層で、垂直落差は約30mという特徴を有している。

4. 2 岩石の性質

立坑を掘削する前の事前調査として、ボーリングを立坑の中心部に行った。この調査ボーリングにより採取されたコアを用いて、物理的な性質と力学的な性質を調べるための室内試験を実施した。その結果を表-1に示す。物理的な性質である単位体積重量は、明世累層が約18.4kN/m³、土岐夾炭累層が約19.0kN/m³であった。また、含水比は明世累層が約34%、土岐夾炭累層が約31%であった。一方、力学的な性質は、明世累層での一軸圧縮強度は約6.5MPa、静弾性係数約2600MPaであった。また、土岐夾炭累層では一軸圧縮強度が約6.3MPa、静弾性係数約1900MPaであった。また、静ポアソン比は、どの層とも約0.3であった。

表-1 室内岩石試験結果

地層名	岩石名	試験深度 m	単位体積 重量 kN/cm ³	含水比 %	飽和度 %	静弾性係数 MPa	海ポアソン 比	一軸圧縮強度 MPa	三軸圧縮試験		透水係数 cm/sec
									C (MPa)	ϕ (°)	
明世累層	砂岩	22~25	20.0	22.7	94.1	3070	0.31	7.52	2.05	16.6	9.59×10^{-7}
	泥岩	41~44	16.8	44.5	93.0	2160	0.29	5.56	2.25	16.7	7.91×10^{-9}
土岐夾炭累層	凝灰質 泥岩	68~73	18.3	35.7	92.4	540	0.37	3.03	0.75	31.5	4.05×10^{-10}
	含礫砂岩	90~96	18.4	39.6	99.9	2070	0.27	6.43	1.94	24.0	1.01×10^{-11}
	砂岩	108~111	19.2	27.3	89.3	3530	0.33	8.42	0.68	39.4	1.24×10^{-10}
	砂岩	132~137	19.9	22.7	89.2	1500	0.30	7.42	4.08	12.9	1.76×10^{-10}

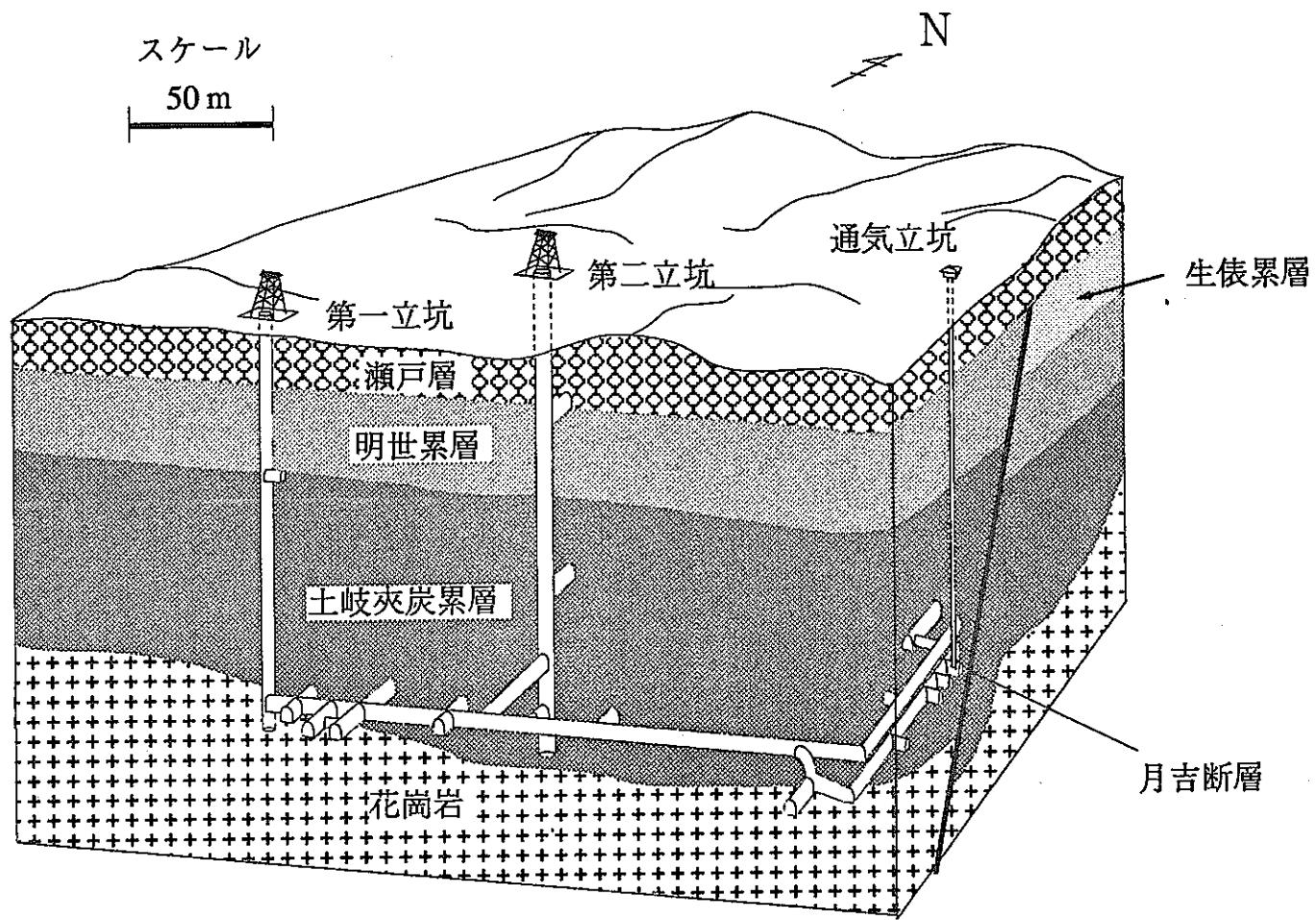


図-1 東濃鉱山における地質概要図

5. 調査・試験内容

立坑掘削影響試験を実施するために掘削された立坑の断面図を図-2に示す。立坑の規模は仕上がり内径が6m、深さが152.3m（立坑部150m、ピット部2.3m）である。また、立坑の掘削方法には、立坑坑口部を除いて1掘進長(1.2m)ごとに覆工コンクリートを打設するショートステップ工法を用いた。覆工コンクリートの厚さは坑口から深さ5mまでが1.5mでそれ以深は0.4mである。掘削方式には発破を用いた。

この立坑掘削に伴う周辺岩盤の力学的・水理学的な特性変化を調べるため、A、B、Cと称する断面においてボアホールテレビ観察、孔内載荷試験、透水試験、超音波パルス測定、孔間弾性波試験等を実施した。各断面、各計測項目の設定理由は以下の通りである。

A断面

明世累層での立坑掘削に伴う力学的・水理学的特性の変化を把握する。

〔調査項目〕

- ・孔内載荷試験（弾性係数などの変化を調べることにより、立坑掘削による周辺岩盤への力学的な影響を把握する。）
- ・透水試験（透水係数の変化を調べることにより、立坑掘削による周辺岩盤の水理学的な影響を把握する。）
- ・ボアホールテレビ観察（ボーリング孔壁を直接観察し、立坑掘削に伴うき裂の変化を把握する）
- ・超音波パルス試験⁵⁾（P波速度(V_p)の変化を調べることにより、立坑掘削前後のき裂の変化を把握する）

B断面

明世累層と土岐夾炭累層に測定ポイントを設けることで、各層での立坑掘削による力学的・水理学的な影響を把握する。

〔調査項目〕

- ・孔内載荷試験
- ・透水試験
- ・ボアホールテレビ観察
- ・孔間弾性波試験（ V_p の変化を調べることにより、立坑掘削により影響を受けた範囲を把握する。）

C断面

月吉断層上・下盤にそれぞれ測点を設けることにより、断層の上・下盤での立坑掘削による力学的・水理学的影響を把握する。

[調査項目]

- ・孔内載荷試験
- ・透水試験
- ・ボアホールテレビ観察
- ・孔間レーダー（電磁波速度の変化を調べることにより、立坑掘削により影響を受ける範囲を把握する。）
- ・連続ひずみ測定（ひずみ計を埋設し岩盤内のひずみ変化を調べることにより、立坑掘削に伴う周辺岩盤の挙動を把握する。）

本論では、A、B断面における測定結果について述べる。

5. 1 調査・試験位置

本論で述べるA、B断面の位置及び試験レイアウトを図-2に示す。

A断面では、立坑壁から東方向と西方向に径76mm、長さ6mのボーリング孔を1孔づつ掘削した。東向きのボーリング孔をA-1孔、西向きのボーリング孔をA-2孔と呼ぶ。

B断面では、第一計測坑道(GL-45.5mレベルに掘削された水平坑)から、立坑に平行な鉛直下向きのボーリング孔を4孔掘削した。これらのボーリング孔は、いずれも径76mm、長さ23mで立坑内壁から立坑半径方向に各々0.8m, 1.3m, 2.3m, 3.3m離れている。それぞれB-1, B-2, B-3, B-4孔と呼ぶ。

試験レイアウト

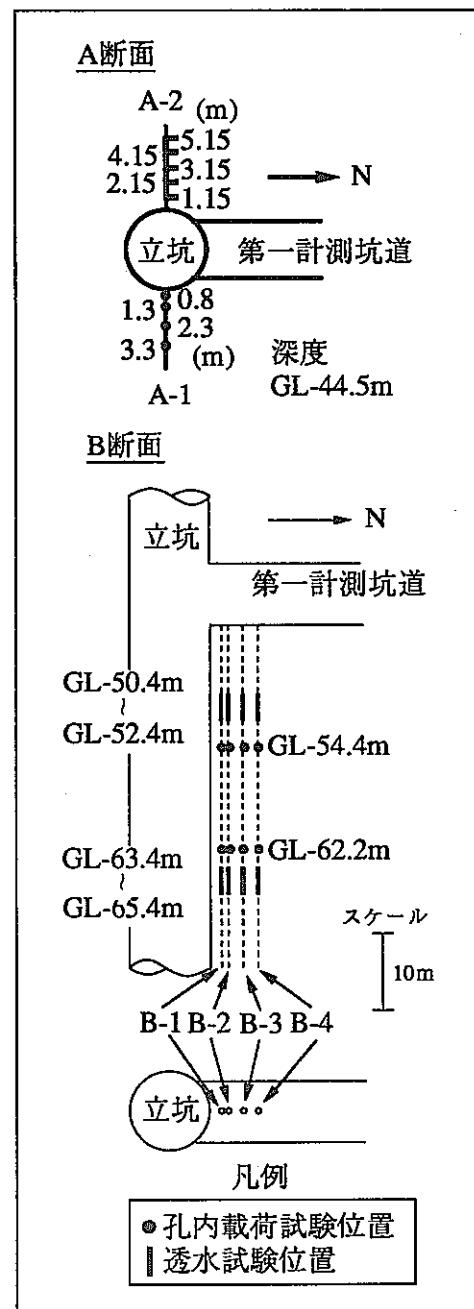
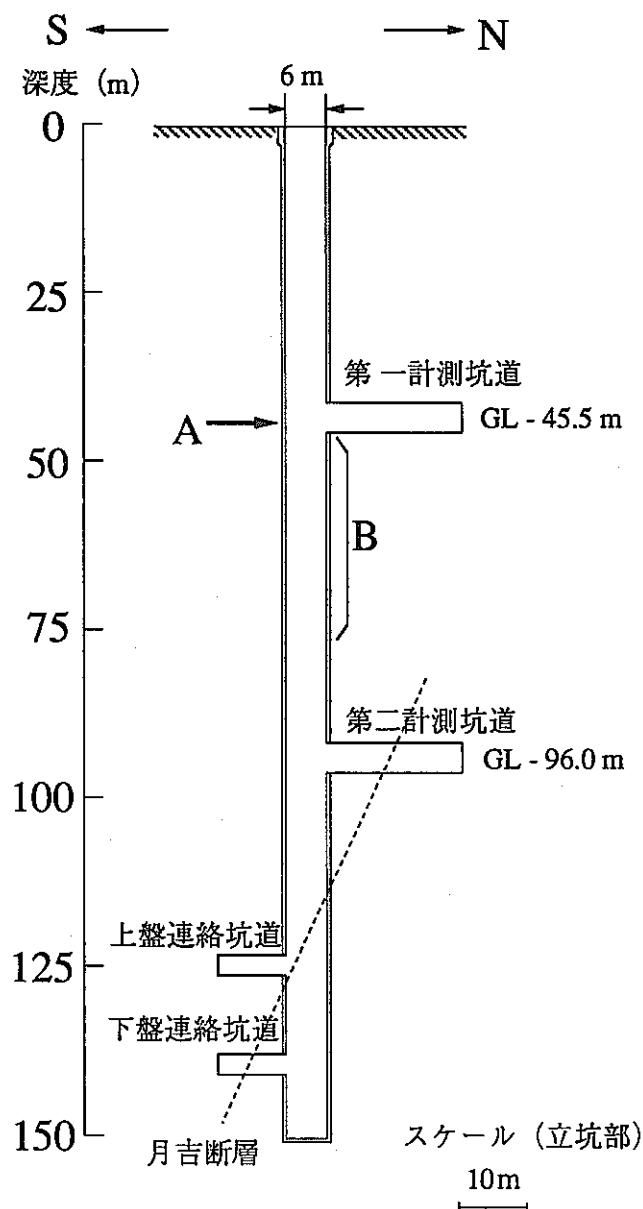


図-2 A,B断面における力学的・水理学的特性変化に関する調査位置図

5. 2 調査・試験方法

調査・試験方法は、以下の手順で実施した。

- 1) 計測断面まで立坑を掘削する。
- 2) 計測用のボーリング孔を掘削した後、計測断面以深の立坑部を掘削する前に掘削前の測定（初期値の測定）を実施する。
- 3) 初期値の測定後、立坑掘削を再開する。
- 4) 立坑掘削が、計測断面に影響を及ぼさなくなったと考えられる時点で、掘削後の測定を実施する。掘削後の測定は、掘削前の測定と同一のポイントで実施する。
- 5) 掘削前後の計測結果を比較して、掘削影響を評価する。

例として、B断面における空洞周辺岩盤の力学的・水理学的特性の変化の調査・試験方法を図-3に示す。

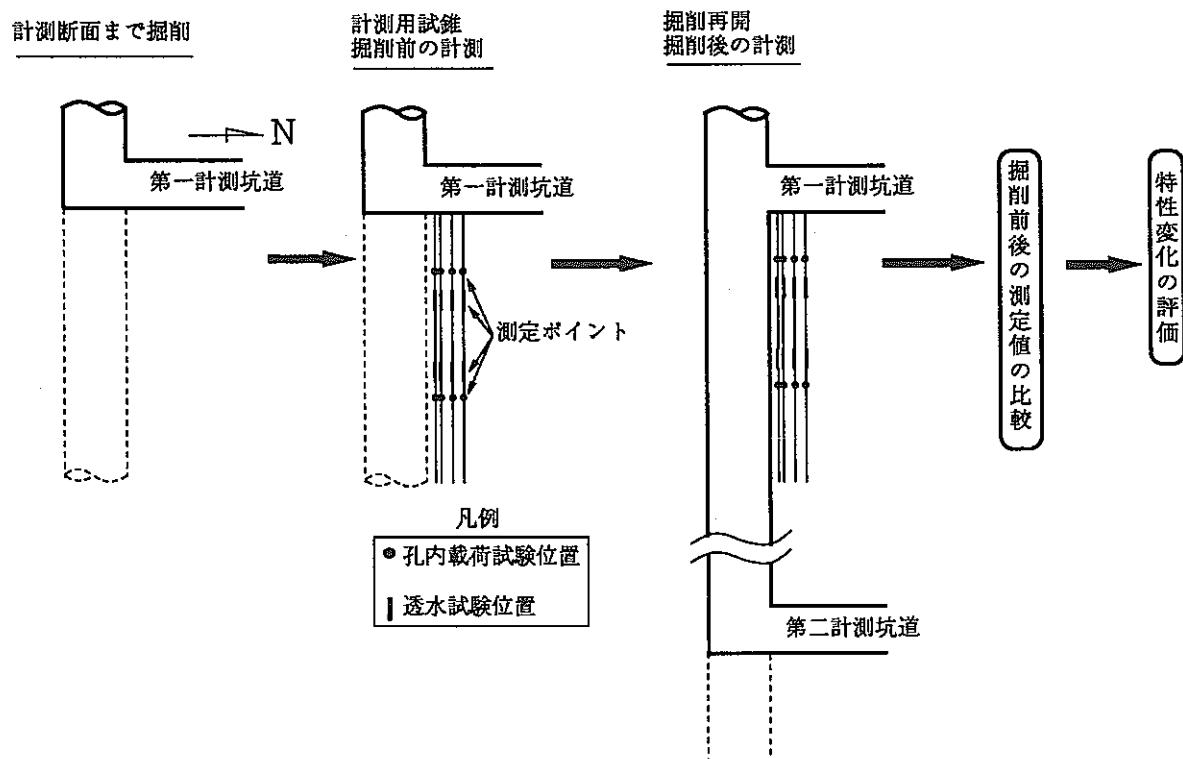


図-3 B断面における特性変化の調査方法の例

6. 調査・試験結果とその考察

調査・試験結果を示す前に、本研究での調査・試験の対象となる「ゆるみ領域」の定義について述べる。桜井⁸⁾は、「ゆるみ」とは一般的には潜在的あるいは新たに発生したクラックが開口することによって生じた状態であると述べている。谷本⁷⁾は、ある不連続面に作用する接触圧力が減少し、これに伴い不連続面の開口幅が増加し密着が不十分となることが「ゆるみ」であるとしている。今田⁸⁾は、「ゆるみ」とは、トンネルの場合、不連続面がトンネルの掘削により分離あるいは移動し、耐荷力を失った状態になったことを意味するものであるとしている。このように、専門家の間でもゆるみ領域の定義は様々である。従って、その予測手法及び計測方法についても、一般的に認められた方法がないのが現状である。本論では、掘削により岩盤のもつ力学的・水理学的特性が低下した領域をゆるみ領域と解釈する。

また、今回実施された各試験のうち孔内載荷試験、透水試験、超音波パルス試験で得られた測定結果の整理を行う際に、以下に述べる点を考慮した。一般に同一の母集団から抽出した試料を用いて同一の測定を実施しても、その測定結果には程度の大小はあるもののバラツキが存在する。このバラツキが生じる原因には、系統的誤差（測定器の欠陥、測定理論のあやまり、測定者のくせなどによるもの）と偶然的誤差（主として測定試料自身のばらつき）による 2つがある。前者は、測定精度などの向上によりある程度取り除くことができるが、後者は試料自身のバラツキによることが多いので取り除くことができない。今回の各試験でも、一様な岩盤から得られたと考えられる初期値にバラツキがあった。このため、初期値に関しては上述した誤差範囲を明確にするため統計的な手法¹⁴⁾により変動範囲を設定した。また、初期値が一様な岩盤から得られたものと考えられるかどうかについての判定も行った。

6. 1 A計測断面

6. 1. 1 ボアホールテレビ観察の結果と考察

立坑掘削前と立坑掘削後のボアホールテレビ観察による坑壁面の展開図を図-4に示す。図-4は、鉛直下向きから展開したものであり、破線は掘削前に観察されたき裂、実線は掘削後に開口幅が変化したあるいは新たに発生したき裂を示す。今回使用した測定装置では、き裂の開口幅の最小読み取り値は0.1mmである。

掘削前の調査では、A-1孔では、5本程度（き裂頻度で1m/本）、A-2孔では、3本（き裂頻度で0.6本/m）のき裂が観察された。また、き裂の開口幅はA-1孔では0.1～0.3mm、A-2孔では、0.1～0.2mmであった。

掘削後の調査では、A-1孔で新たに発生したき裂は観察されなかった。また、A-2孔においては2本観察されたが、透水試験区間に発生したき裂の開口幅は、0.1mm程度であった。また、掘削前に観察されたき裂に開口幅の変化は認められなかった。以上から、A断面では、発破によるき裂の発生や変化を伴う岩盤の損傷は少なかったと考えられる。

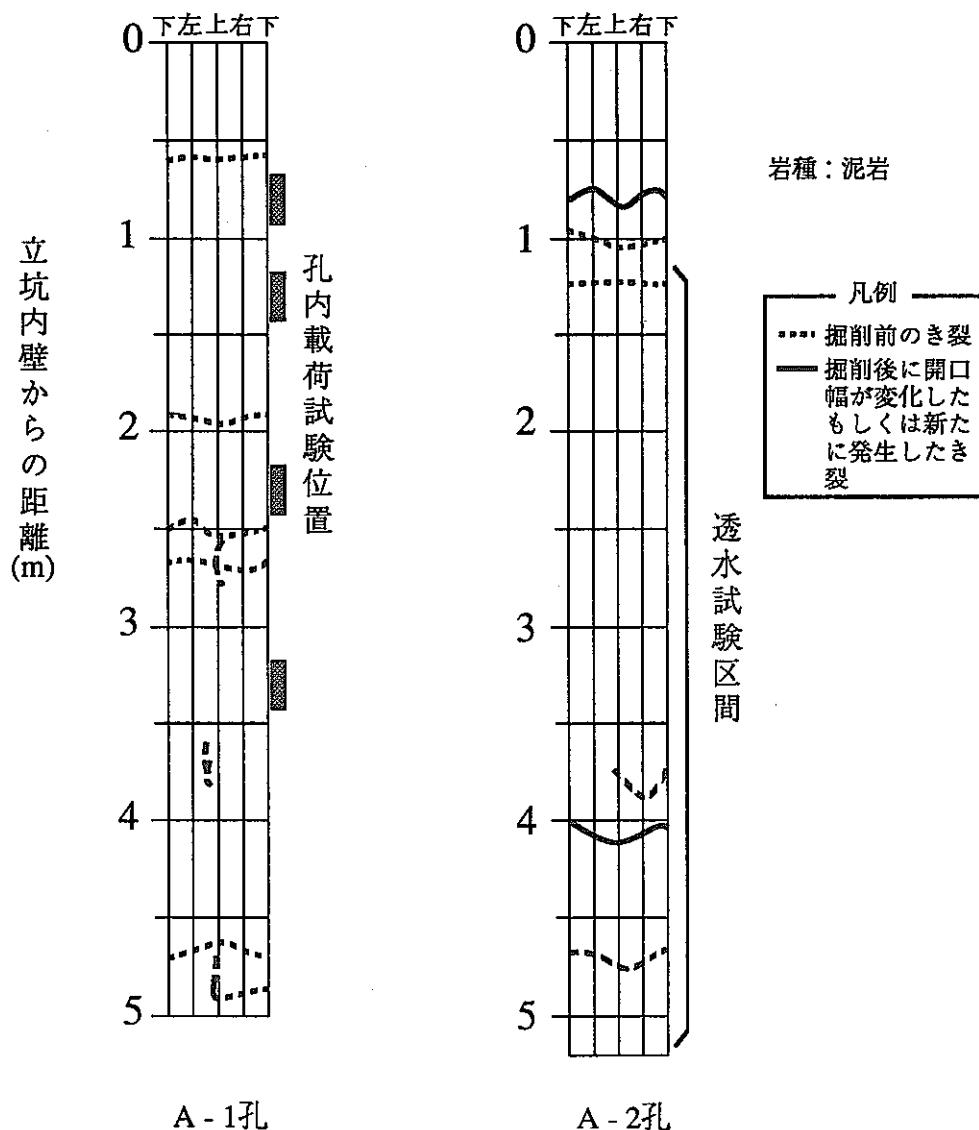


図-4 A断面におけるボアホールテレビ観察による孔壁面の展開図

6. 1. 2 超音波パルス試験の結果と考察

掘削前後で得られた超音波パルス試験結果を図-5に示す。図は、縦軸にP波速度を横軸に立坑壁からの距離をとって示している。□印を結んだ実線は掘削前の測定結果を、×印を結んだ破線は掘削後の測定結果をそれぞれ示す。図中の斜線部分は、掘削前の試験結果に基づき、初期値の変動範囲を示したものである。掘削後の測定値がこの範囲より低下した場合は、岩盤がゆるんだと考えられる。

掘削前の測定で得られたP波速度は、数点の例外はあるがA-1,A-2両孔とも 1.8~2.0 km/sの範囲内である。

掘削後の測定では、A-1孔では、掘削前の速度から変化はなかった。また、A-2孔では立坑壁面から1m以深の区間で掘削後のP波速度が速くなっているが、その変化は最大で5%とわずかであった。このため、本試験では、P波速度の変化からき裂開口幅の変化を捉えるまでにはいたらなかった。この速度変化がなかった理由は、以下のように考えられる。里ら⁹⁾は、三軸圧縮試験中の載荷方向及びそれに直交する方向の弾性波速度の変化を調べた。その結果、0~50MPaの軸差応力の変化で、載荷方向（最大主応力方向）のP波速度が0.3km/sec(10%)程度増加するという結果を得ている。これに対し、超音波パルス測定を実施した地点は、土被りが浅く(GL-45m)掘削によって生じる応力変化は最大1MPa程度と推定される。従って、掘削によって生じた再配分応力による応力変化が小さかったため、A断面の岩盤ではP波速度がほとんど変化しなかったと考えられる。

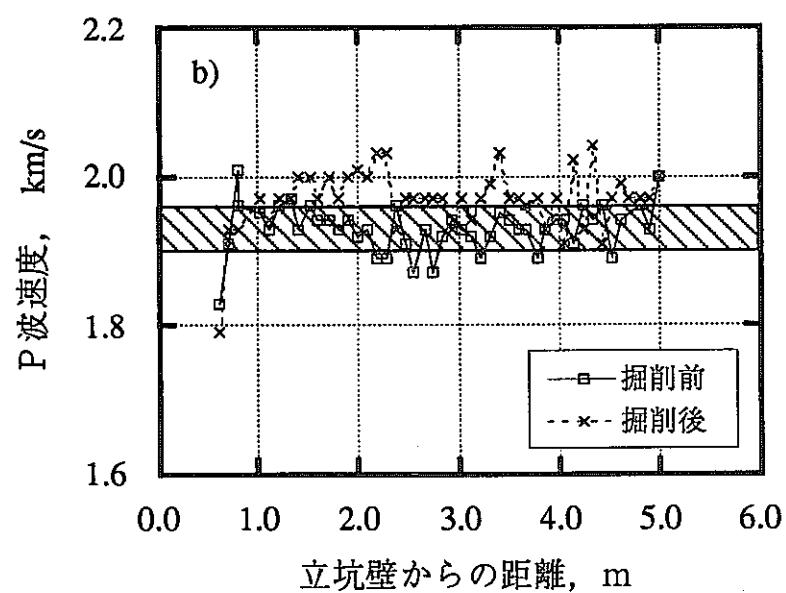
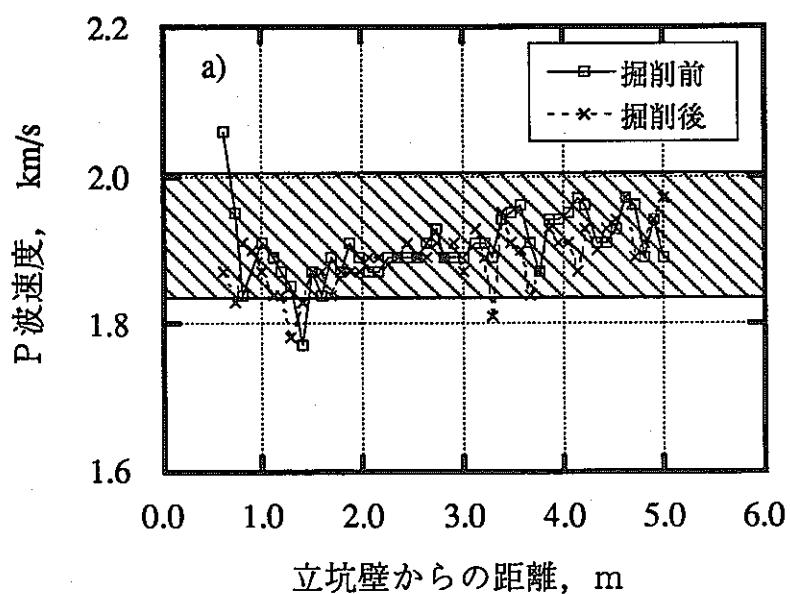


図-5 A断面における超音波パルス試験結果
a) A-1孔 , b) A-2孔

6. 1. 3 孔内載荷試験の結果と考察

孔内載荷試験では、硬岩用のKKT と呼ばれる剛板による等変位載荷試験機により試験を実施した。掘削前後の孔内載荷試験により得られた荷重～変位曲線を図-6 に示す。実線は掘削前の結果を、破線は掘削後の試験結果を示す。また、荷重～変位曲線より求められた掘削前後の永久変形係数を図-8 に示す。通常、孔内載荷試験の結果は、文献14) に示されるようにある載荷・除荷のサイクルでの接線弾性係数という形で整理され、構造物の設計計算などに用いられている。しかし、接線弾性係数は、①人的な誤差が入り値の信頼性が低くなる、②弾性係数を求める応力レベルによりその値が異なる、という問題点がある。さらに、弾性係数は、岩盤の可逆的（弾性的）な挙動を表すパラメータであるのに対し、ゆるみ領域では、き裂の発生あるいは塑性域の発生などにより非回復な変形量が増加すると考えられる。従って、その非回復な変形量の増加を表現でき応力レベルに依存しない永久変形係数を用いて掘削影響を評価した。永久変形係数の決定法を図-7 に示す。

掘削前の各測定ポイントで得られた永久変形係数の値にバラツキがあった。ボアホールテレビ観察の結果から、載荷区間にはき裂のないことが確認されている。従って、この永久変形係数のバラツキは、不均質性が影響していると推定される。この不均質性によるバラツキの影響を除去するため、初期値の変動幅を求め図-8 に斜線で示した。永久変形係数は、岩盤の非回復な変形に関して定義されるものであるため、掘削後の測定値がこの範囲より低下した場合には、非回復な変形量（永久変形量）が増加し岩盤がゆるんだと考えられる。

掘削後の測定では、0.8m の測定で永久変形係数が低下し、逆に1.3m と3.3m のポイントでは、永久変形係数が増加するという結果が得られた。この結果から、0.8m のポイントは岩盤のゆるみ領域であると考えられる。また、岩盤が連続体であるならば、掘削によって塑性領域が生じると弾性部分との境界付近には大きな応力集中が生じることが理論的に知られている。従って、1.3m 付近には、ゆるみ領域と弾性的に挙動する岩盤の境界があることが推定される。つまり、0.8m のポイントはゆるみ領域内であるため、永久変形係数が低下し、1.3m の地点では、応力集中によって岩盤中の間隙の閉塞が生じ、永久変形量が減少したため永久変形係数が増加した可能性がある。また、石田ら¹⁰⁾ は、原位置でのAE 及びひずみ計の測定結果から、空洞規模に係わらず掘削に伴う応力集中により、2本程度の柱（応力集中帯）を形成する傾向が認められたと報告している。3.3m の地点で永久変形係数が増加したのはこのような現象が生じた可能性もあると考えられる。

以上の考察から、岩盤のゆるみあるいは掘削によって生じる応力集中が、立坑周辺岩盤の力学的特性の変化を引き起こす要因として考えられる。しかし、これらの要因が立坑周辺岩盤の力学的な特性の変化にどの程度影響を与えているかは、現在までに取得されているデータだけでは評価できないため、室内試験などにより応力変化と岩盤の力学的特性の変化について検討していく必要がある。

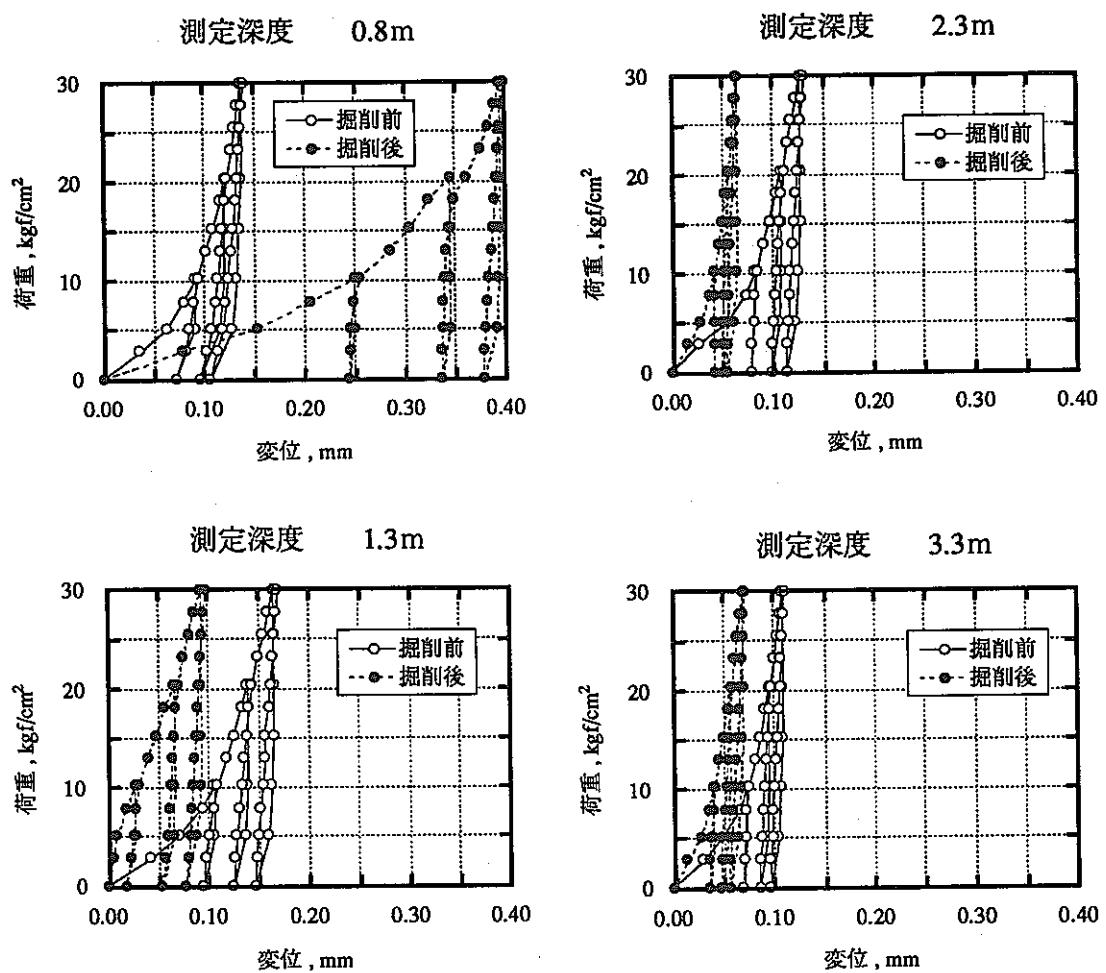
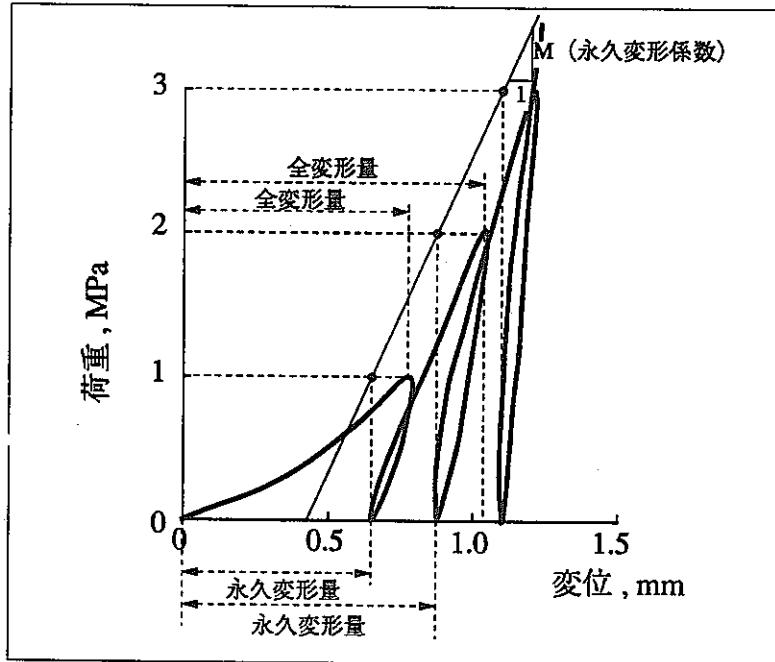


図-6 A断面における孔内載荷試験により得られた
荷重～変位曲線



孔内載荷試験による荷重～変位曲線

図-7 永久変形係数の概念とその求め方

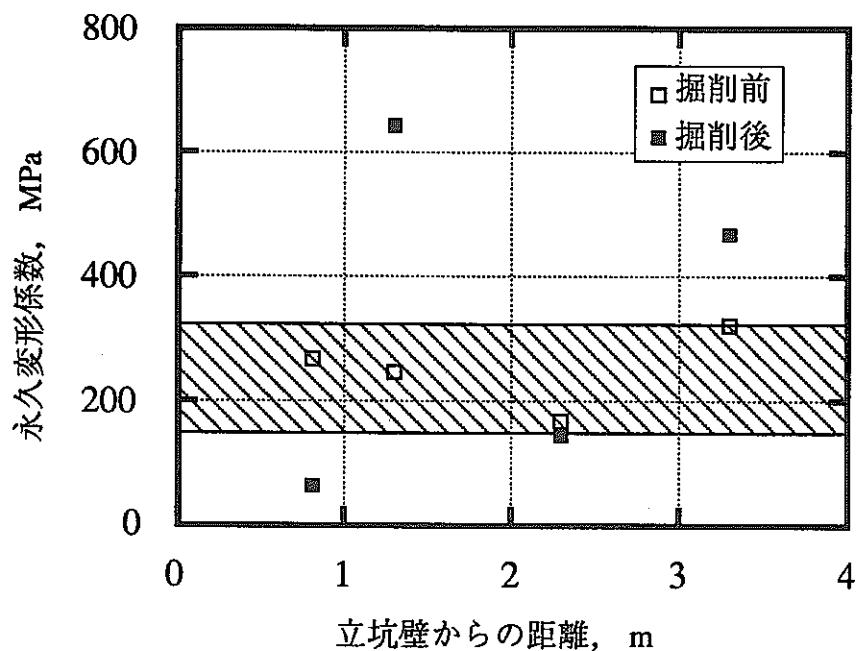


図-8 A断面における孔内載荷試験結果

6. 1. 3 透水試験の結果と考察

透水試験により得られた掘削前後の注入圧～注水量曲線を図-9に示す。また、注入圧～注入量曲線より求められる透水係数を図-10に示す。今回は、低圧ルジオン試験装置で透水係数を測定した。

掘削前の試験では、測定区間ごとの透水係数にバラツキがある。このバラツキも孔内載荷試験での結果と同様に岩盤の不均質性が影響を及ぼしていると考えられる。従って、この不均質性によるバラツキの影響を除去するため、初期値の変動幅を求め、図-10に斜線で示した。掘削後の測定値がこの範囲より高くなかった場合は、岩盤がゆるんだと考えられる。

掘削後の測定では、全透水試験区間において掘削前より掘削後の方が透水係数が低くなっている。この理由については以下のように考えられる。弾性理論解(Kirsch の解)¹¹⁾を用いて計算した結果では、立坑壁面から1mの地点で、0.9MPaの偏差応力が生じると考えられる。これを室内試験で得られた応力～ひずみ関係と比較すると、0.03%程度の体積ひずみ（破壊時の体積ひずみの約1/3）が生じることになる。つまり、掘削に伴う応力集中により岩盤中に体積ひずみ（言い換えれば間隙の閉塞）が生じ、掘削後の透水係数が低下した可能性がある。2.15～3.15mの区間で掘削前後の透水係数に変化が見られなかったのは、掘削前の透水係数が低く（間隙率が小さい）、相対的に影響が小さかったためと考えられる。これらの考察については、今後室内試験などにより確認しておく必要がある。

なお、永久変形係数が低下した部分は、装置の構造上測定できず、岩盤がゆるんだと思われる領域の透水性の評価を行うことはできなかった。

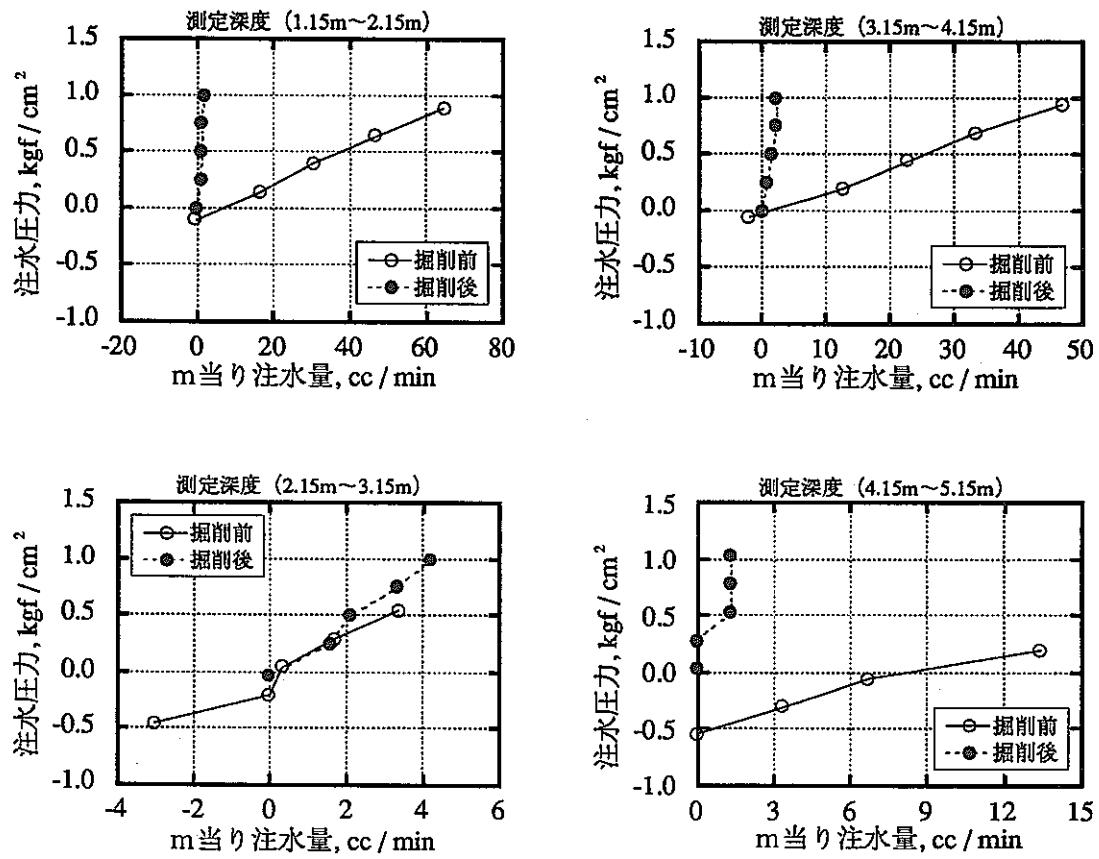


図-9 A断面における透水試験より得られた注入圧～注水量曲線

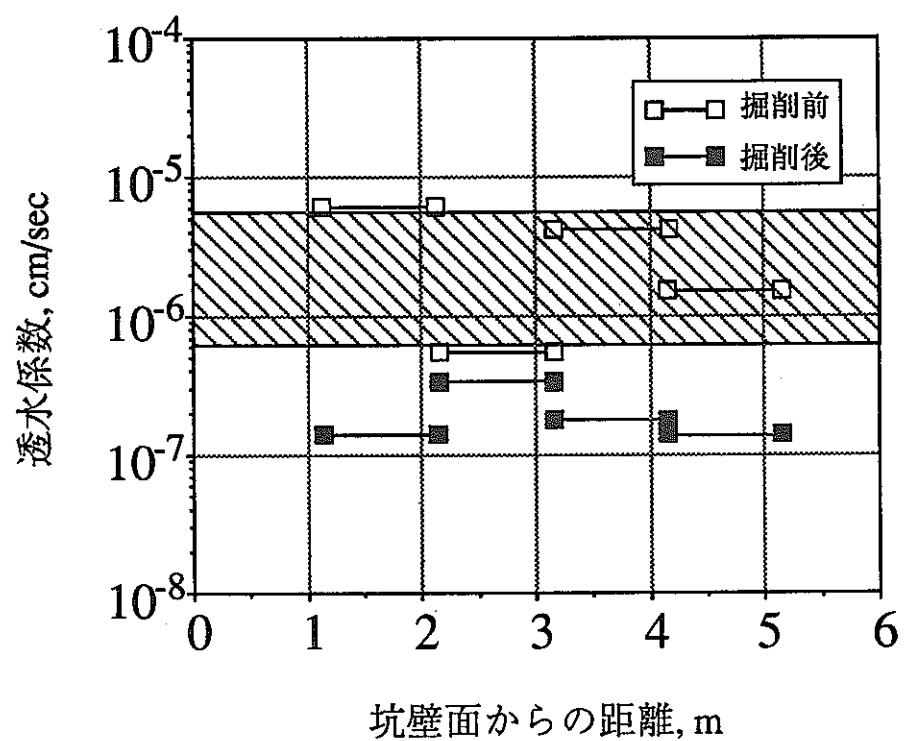


図-10 A断面における透水試験結果

6. 2 B断面

6. 2. 1 ボアホールテレビ観察の結果と考察

B断面の透水試験区間及び孔内載荷試験区間に於けるボアホールテレビ観察結果を図-11, 12に示す。図-11, 12は、孔壁観察の結果を南側から展開した図である。点線は掘削前に観察されたき裂を、実線は掘削後に開口幅が変化したあるいは新たに発生したき裂を示している。

掘削前の観察では、測定深度約15m(GL-60.5m)の所で、凝灰質砂岩層(明世累層)と凝灰質泥岩層(土岐夾炭層)の境界面が認められた。凝灰質砂岩層で、B-1～B-4孔まで合計44本のき裂が観察され、き裂の幅は、0.1～0.6mm程度であった。また、凝灰質泥岩層で65本、き裂の幅は0.1～0.4mm程度であった。各測定孔でのき裂頻度、平均き裂間隔等については表-2に示す。き裂頻度は、明世累層に比べ、土岐夾炭層の方が高い。

掘削後の観察では、凝灰質砂岩層においてB-1孔では約15本の既存のき裂の開口あるいは新たなき裂の発生が確認されたのに対し、B-2～B-4孔の各孔ではそれぞれ4本程度であった。また、凝灰質泥岩層では、B-1とB-2孔ではそれぞれ15本程度、B-3とB-4孔では8本程度の開口幅の変化したき裂あるいは新たに発生したき裂が観察された。また、明世累層に比べ、土岐夾炭層では掘削後に変化の見られたき裂あるいは新たに発生したき裂が多い。き裂の変化の発生は、坑壁に近いボーリング孔ほど大きいことから発破による岩盤の損傷が原因と考えられる(表-2)。

特に、B-1孔の透水試験区間に於ける孔軸方向に縦割れの特異な形状のき裂が観察された。この原因として以下のことが考えられる。B断面では、立坑壁面に最も近いB-1孔にき裂が集中して発生している。そのため、立坑掘削時の発破が岩盤に及ぼす影響を検討した。図-13は、今回の立坑掘削に用いられた装薬量で発破した場合に生じる最大振動速度と発破孔からの距離との関係を示したものである。斜線部は、岩盤が破壊すると言われる最大振動速度の範囲を示している。この図から、装薬孔から60cm程度の距離まで岩盤が破壊する可能性があることがわかった。従って、B-1孔で観察された縦割れのき裂は発破によって岩盤に生じたき裂である可能性が高い。また、掘削後に観察された他のき裂は、発破により潜在的に存在していた小さなき裂が開口したものと考えられる。

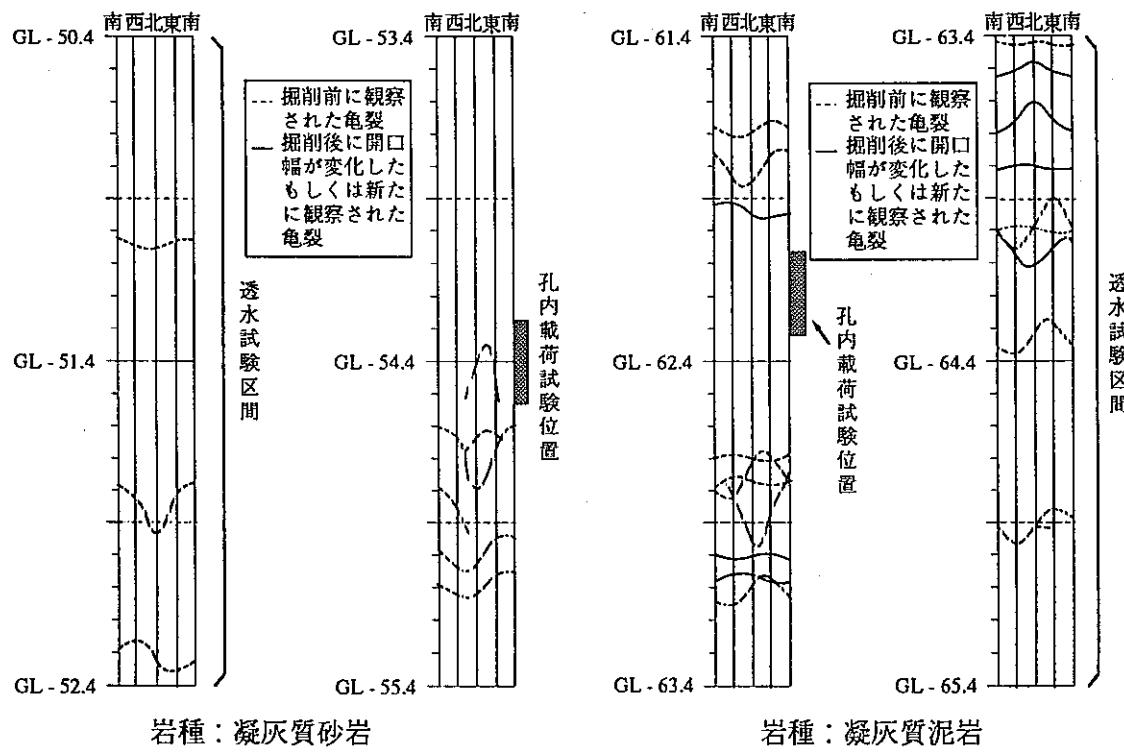
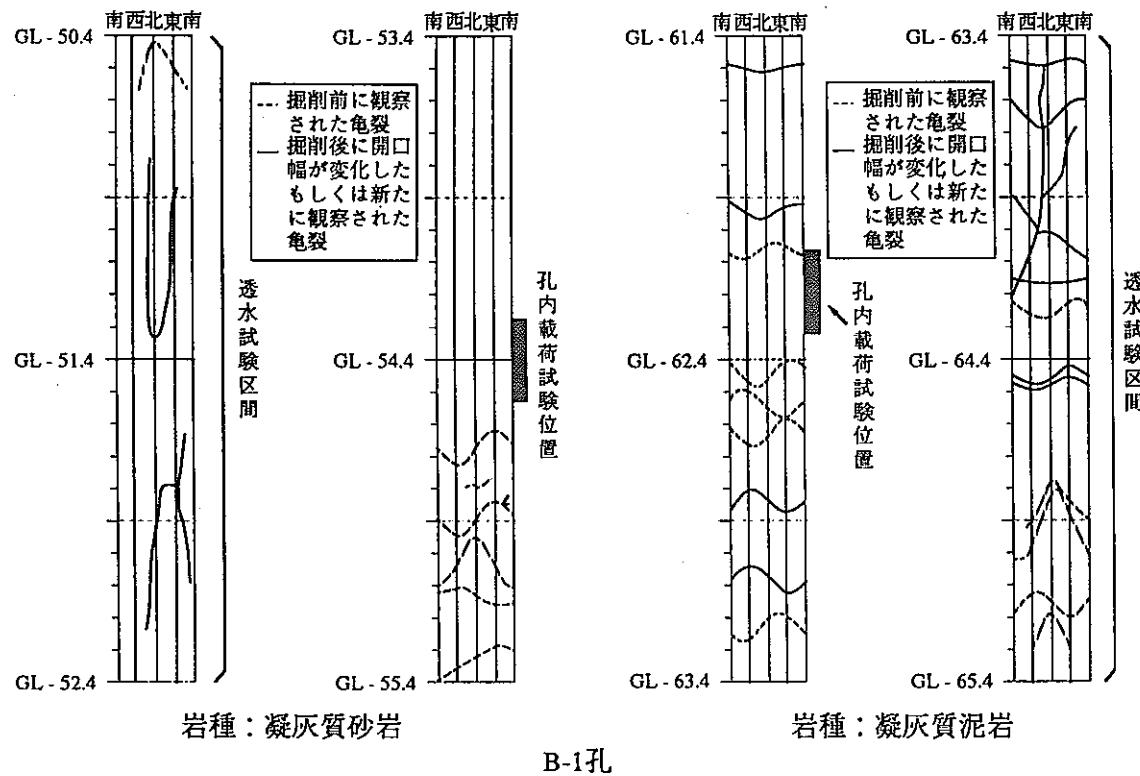


図-11 B断面におけるポアホールテレビ観察による
孔壁面の展開図
(孔内載荷試験及び透水試験区間)

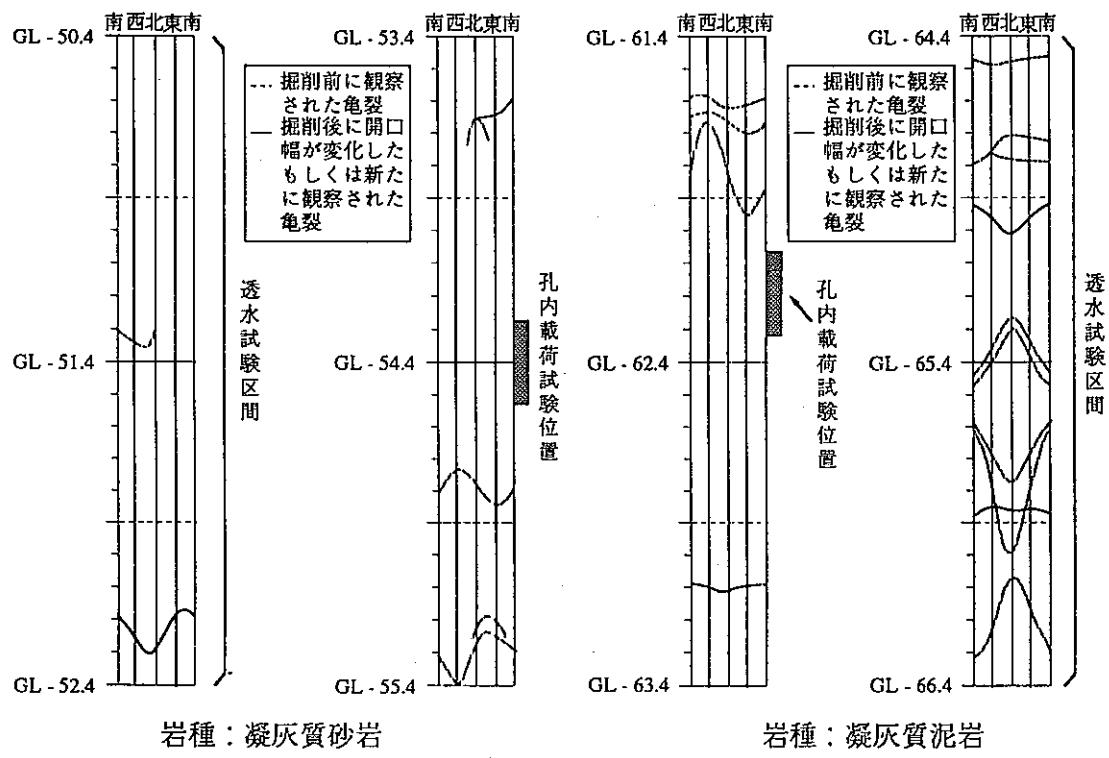
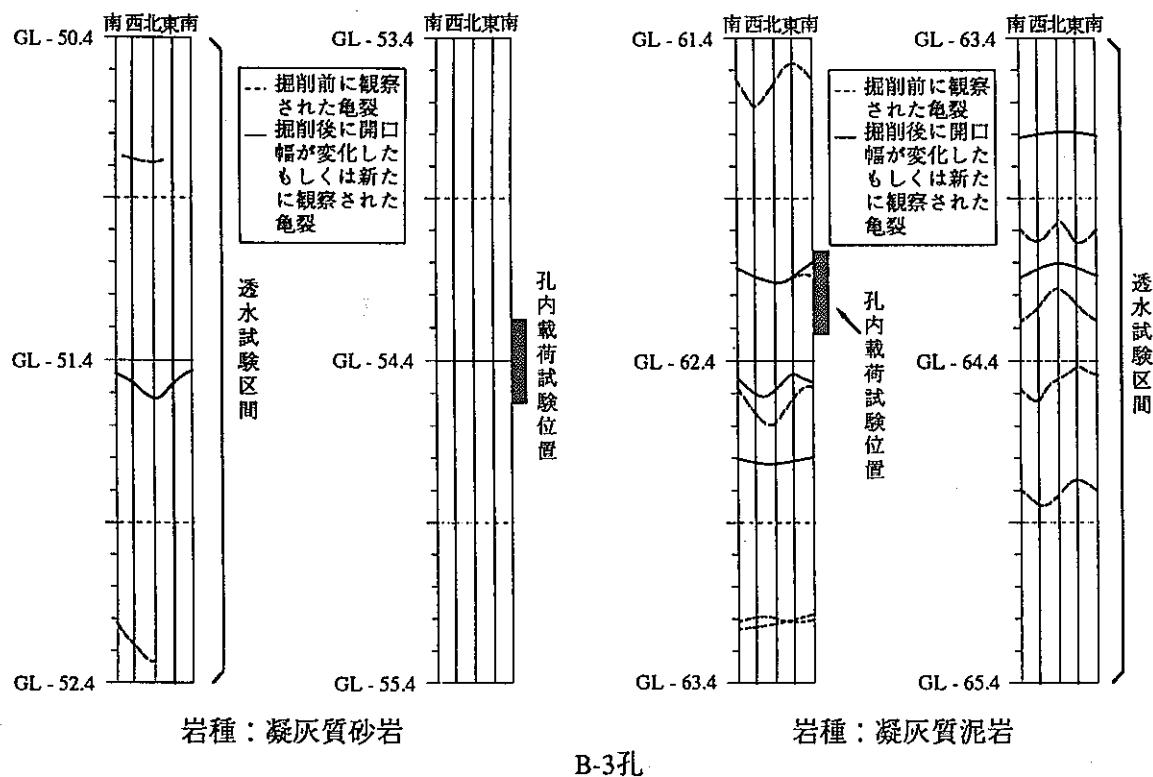


図-12 B断面におけるボアホールテレビ観察による
孔壁面の展開図
(孔内載荷試験及び透水試験区間)

表2 掘削前後でのボアホールテレビ観察結果

			B-1孔	B-2孔	B-3孔	B-4孔
B断面上部 (凝灰質砂岩) 深度 2~14m	観察された キ裂(本)	掘削前	13	15	4	12
	新たに観察 されたキ裂 (本)	掘削後	15 (10~13mの 地点に集中 している)	4 (10~12mの 地点に集中 している)	3	4
	キ裂頻度 (本/m)	掘削前	1.1	1.3	0.1	1.0
		掘削後	2.3	1.4	1.3	1.4
	キ裂間隔 (m)	掘削前	0.9	0.8	3.0	1.0
		掘削後	0.4	0.7	0.8	0.7
B断面下部 (凝灰質泥岩) 深度 14~22m	観察された キ裂(本)	掘削前	15	20	14	16
	新たに観察 されたキ裂 (本)	掘削後	13 (18~19mの 地点に集中 している)	8 (18~19mの 地点に集中 している)	6 (17~19mの 地点に集中 している)	8 (14~15m, 18~ 21mの地点に 集中している)
	キ裂頻度 (本/m)	掘削前	1.8	2.5	1.8	2.0
		掘削後	3.3	2.6	2.4	2.6
	キ裂間隔 (m)	掘削前	0.5	0.4	0.6	0.5
		掘削後	0.3	0.4	0.4	0.4

装薬量と最大振動速度の関係（経験式）¹²⁾

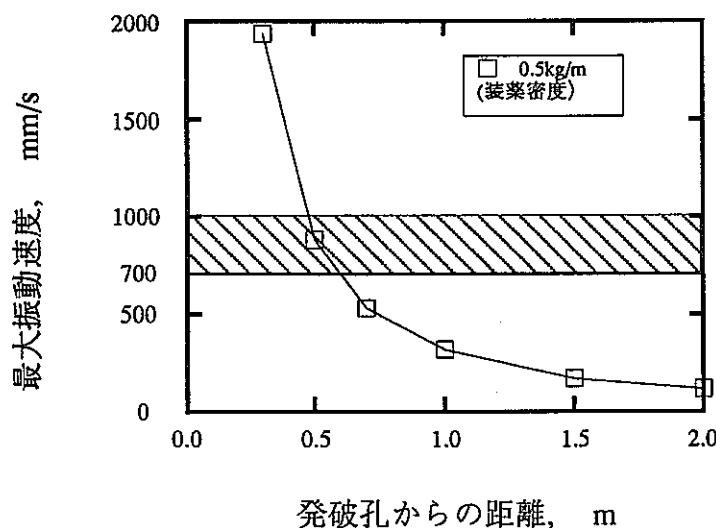
$$V = \frac{k \cdot W^\beta}{R^\alpha}$$

$k = 500 \sim 1000$
 $\alpha = 0.7$
 $\beta = 1.5 \sim 2.0$

V : 最大発破振動速度 (mm / sec)

W : 装薬量 (kg)

R : 発破孔からの距離 (m)



□ 岩盤が破壊する最大振動速度の下限値の範囲

図-13 最大振動速度と発破孔からの距離との関係

6. 2. 2 孔間弾性波試験の結果と考察

B断面での掘削前後の孔間弾性波測定結果を図-14に示す。図-14は、縦軸に第一計測坑道底盤からの深度、横軸に掘削前後の弾性波速度及び掘削前後での速度変化率をとって示したものである。□印を結んだ実線は掘削前の測定結果を、×印を結んだ破線は掘削後の測定結果をそれぞれ示す。

掘削前の測定では、弾性波速度は2.2～2.6km/sec程度であった。また、掘削前は、水面は第一計測坑道底盤（ボーリング孔口レベル：GL-45.5m）にあり、岩盤は水理的に飽和状態であったと考えられる。

掘削後の測定では、B-1～B-2孔間の深度約15m(GL-60.5m)以浅の部分で30～50%程度の弾性波速度の低下が見られた。また、B-1～B-2孔間では、地下水位が第一計測坑道底盤から約17m(GL-62.5m)まで下がった状態での測定であった。このような弾性波速度の変化を引き起こす一つの要因としては立坑周辺岩盤での応力再配分が考えられる。しかし、里ら⁸⁾の研究を参考にすると、弾性波速度の変化幅は最大25%程度であるため、応力再配分だけで測定結果を説明することはできない。従って、この変化が生じた理由は、以下のように考えられる。一般に岩石中の水分量の変化は、弾性波速度に大きな影響を及ぼす。斎藤ら¹³⁾は、結晶質岩を用い、飽和度、有効空隙率、P波速度の関係を調べた。その結果、岩石の有効空隙率が大きい場合には、わずかな飽和度の変化が弾性波速度に大きな影響を及ぼすことが明らかにされている。この研究で得られたP波速度～飽和度曲線を参考にすると、B断面付近の岩盤とほぼ同程度の間隙率（約56%）を有する場合には、飽和度が70～80%程度に下がった時点で最低速度を示し、その時点でのP波速度は飽和状態の時の速度の約半分である。また、B-1～B-2孔間では、計測断面付近で採取されたコアの間隙率が約56%と大きく、地下水位が低下しているため岩盤の飽和度の変化が生じやすい状態であったと想像される。従って、30～50%ものP波速度の低下は、岩盤の飽和度の低下が主要因である可能性が高いと考えられる。しかし、斎藤らの実験は結晶質岩を対象としており、第三系堆積岩においても室内試験等により飽和度とP波速度との関係を明確にしておく必要がある。

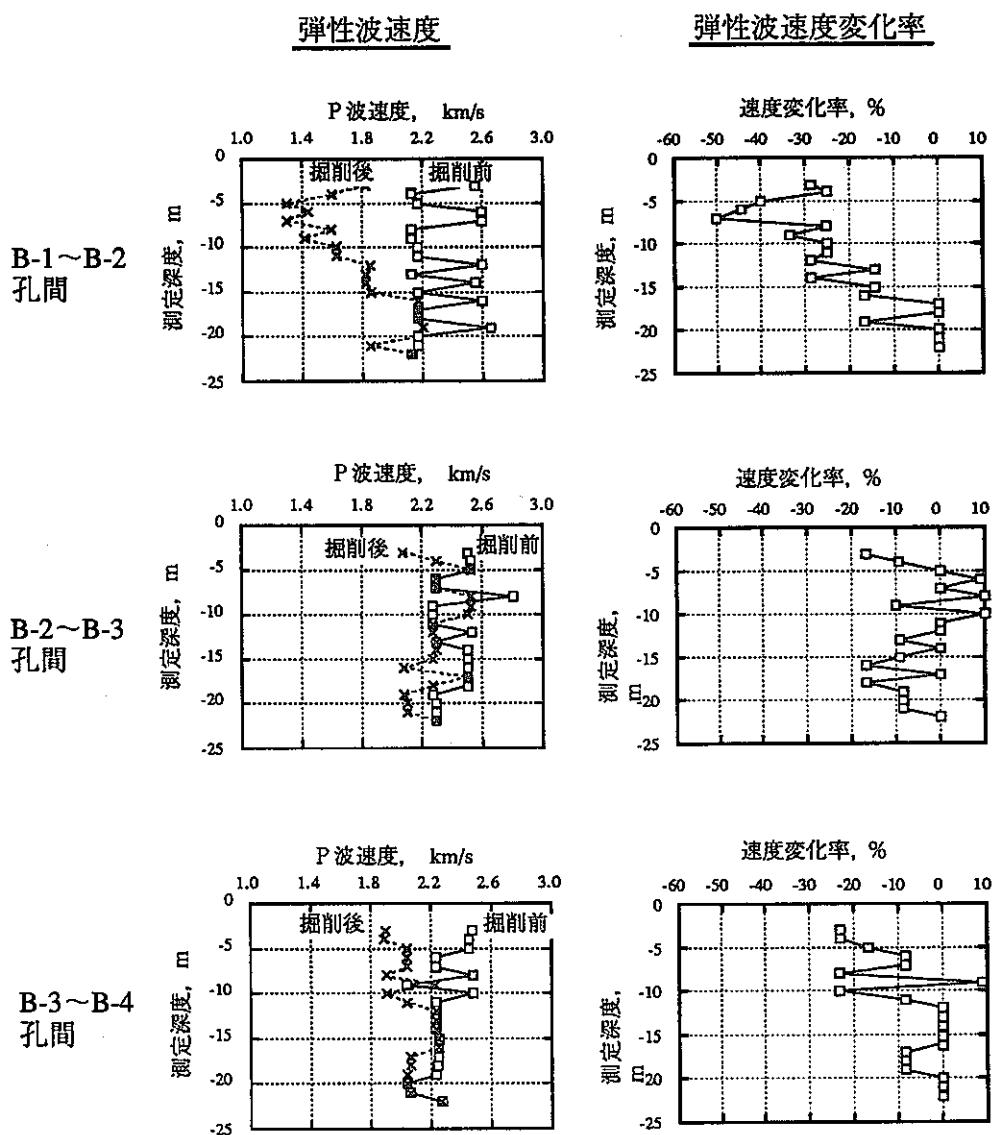


図-14 B断面における孔間弾性波測定結果

6. 2. 3 孔内載荷試験の結果と考察

B断面における孔内載荷試験によって得られた荷重～変位曲線を、図-15, 16に示す。実線は掘削前の結果を、破線は掘削後の試験結果を示す。また、荷重～変位曲線より求められた永久変形係数を図-17に示す。掘削前の試験では、永久変形係数にバラツキが見られたため、初期値の変動幅を求め、図中に斜線で示した。

掘削後の試験では、B断面上部（明世累層）で、B-3孔(2.3m)までの範囲内で掘削後の方が永久変形係数が増加している。また、B断面下部（土岐夾炭累層）では、1.3mのポイントで永久変形係数が増加している。これは以下の理由によると考えられる。B断面上部（明世累層）では、ボアホールテレビ観察の結果載荷区間及びその近傍には、開口幅の変化したき裂や新たに発生したき裂は認められていない（図-11, 12）。そのため、掘削に伴う応力再配分により、載荷区間及びその近傍の岩盤に空隙の閉塞が生じ、永久変形量が減少したため永久変形係数が増加した可能性がある。一方、B断面下部（土岐夾炭累層）において1.3mの地点で永久変形係数が増加したこと、上述の理由によると考えられる。また、他の3点(0.8m, 2.3m, 3.3m)では、掘削後に載荷区間及びその近傍に開口幅の変化した既存のき裂あるいは新たなき裂の存在が確認されている（図-11, 12）。従って、これらの既存のき裂の開口あるいは新たなき裂の発生により、その載荷区間及びその近傍の応力集中が緩和され永久変形係数に影響が表れなかったと考えられる。これらの考察についてもA断面と同様に室内試験などを実施し、応力集中と岩盤の力学的特性変化との関係を明らかにしておく必要がある。

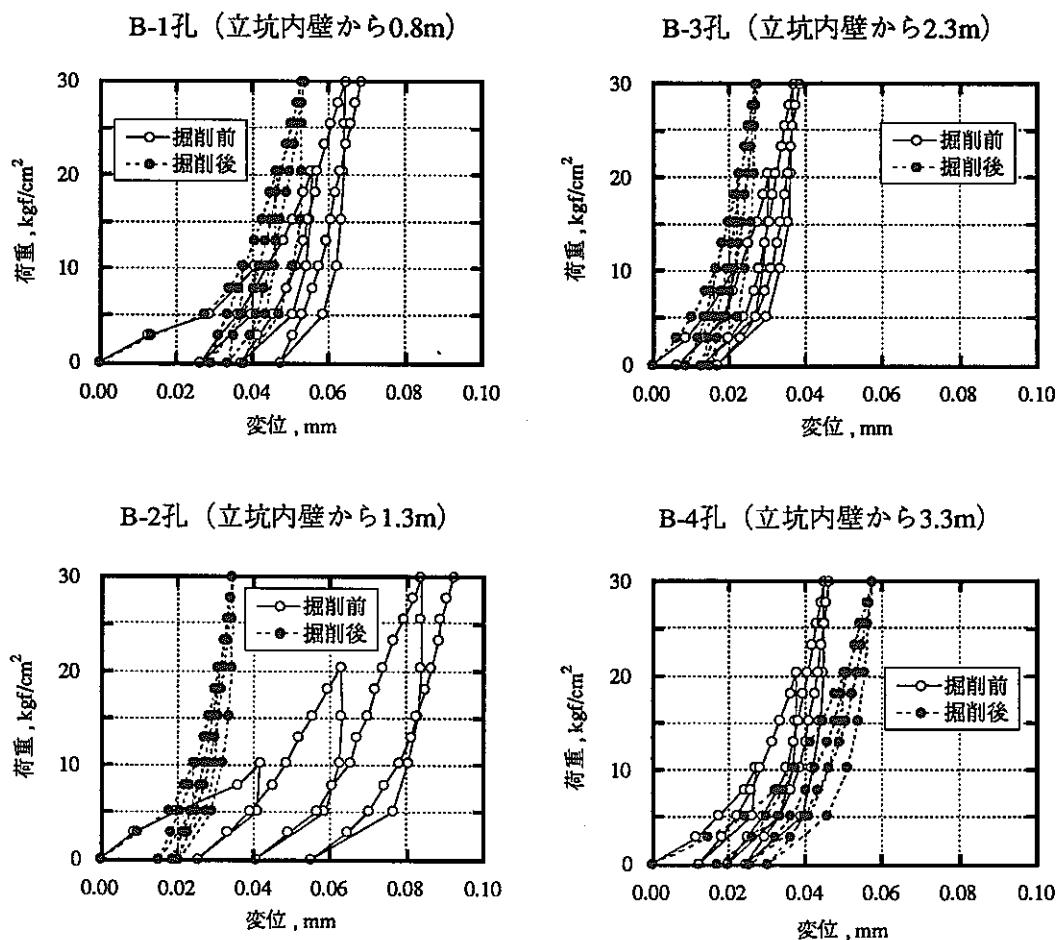


図-15 B断面における孔内載荷試験より得られた荷重～変位曲線

測定深度 GL-54.4m (凝灰質砂岩)

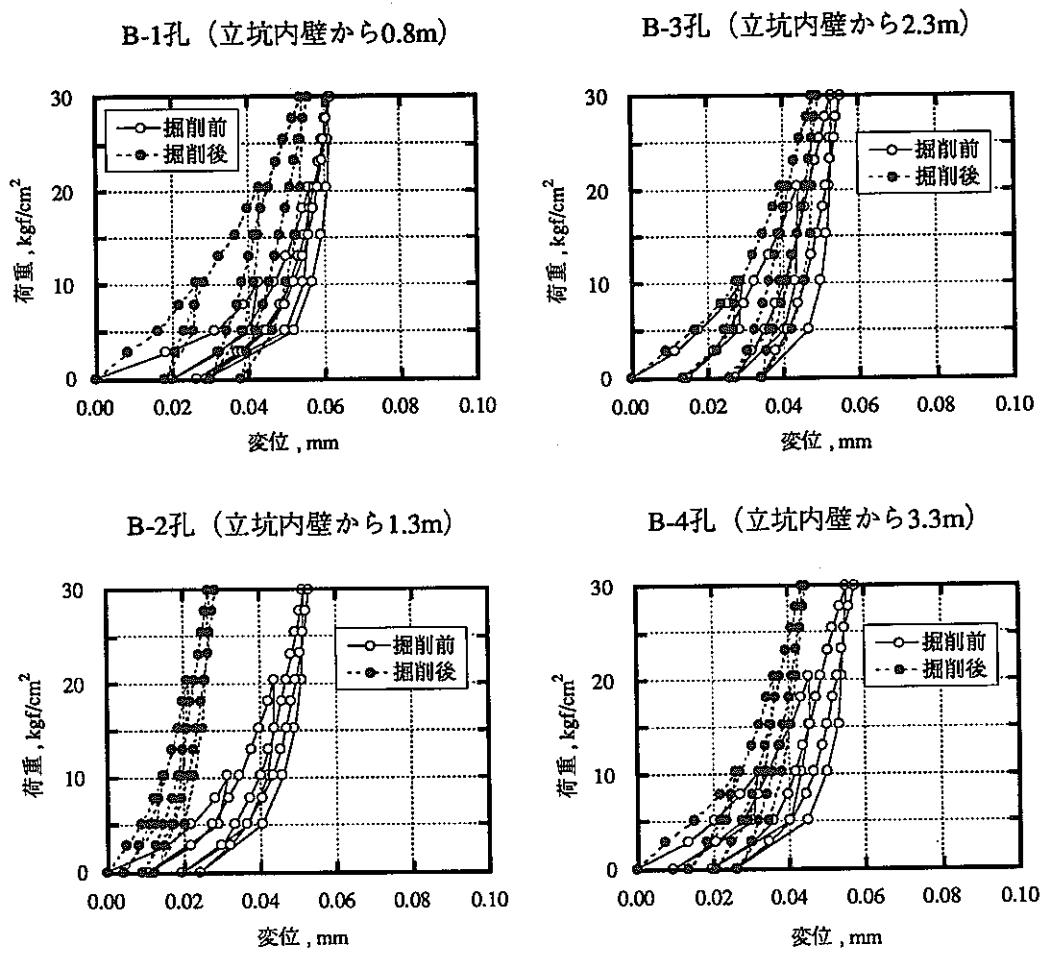
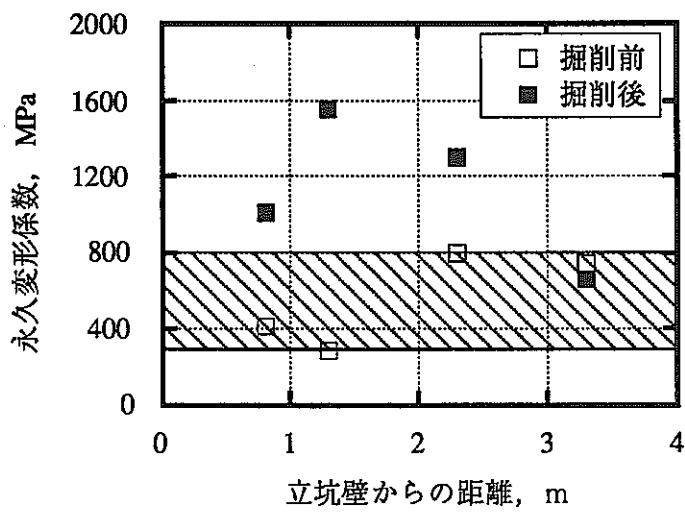
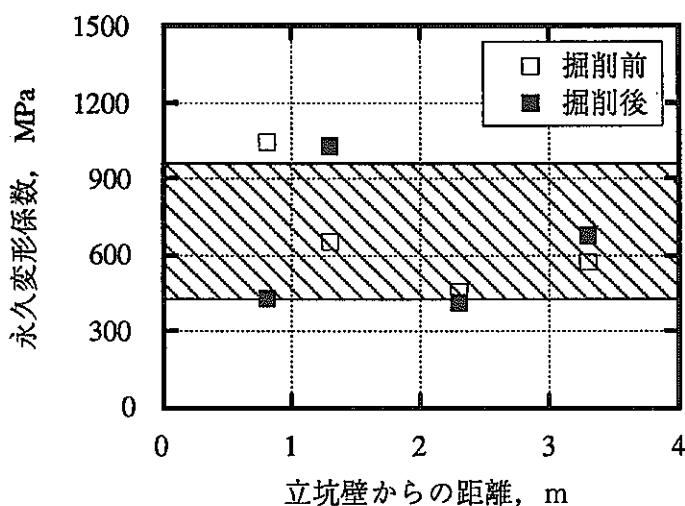


図-16 B断面における孔内載荷試験より得られた荷重～変位曲線

測定深度 GL-62.2m (凝灰質泥岩)



GL-54.4m: 凝灰質砂岩



GL-62.2m: 凝灰質泥岩

図-17 B断面における孔内載荷試験結果

6. 2. 4 透水試験の結果と考察

B断面で得られた掘削前後での注入圧～注入量曲線を図-18, 19に示す。また、注入圧～注水量曲線より得られた透水係数を図-20に示す。

掘削前の試験では、特にB-3孔の明世累層で得られた透水係数が、 $3.42 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ であり、他に比べ2オーダー異なっていた。また、B-2孔の土岐夾炭累層で得られた透水係数も $5.49 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ と他に比べ高い値であった。6章の冒頭で述べたように、全測定点の値から標準偏差を求め変動範囲を設定して、これらの測定値が一様な岩盤から得られたものかどうかについて判定した¹³⁾。その結果、これらの値は、同じ岩盤から得られた測定値とは認められないという判定であった。従って、これらの値を除いた3区間の測定結果から初期値の変動幅を求め、図-17に斜線で示した。

掘削後の測定では、0.8m以内では明世累層、土岐夾炭累層とも2オーダー以上透水係数が高くなっている。これは以下の理由によると考えられる。0.8mの地点（B-1孔）ではボアホールテレビ観察により、ボーリング孔内の透水試験区間に縦割れのき裂の発生が確認された（図-11）。従って、0.8mの地点で透水係数が高くなったのは、透水試験区間に発生した縦割れのき裂が原因であると考えられる。また、明世累層の測定では3.3mの地点で透水係数が上がったが、これは新たなき裂の発生が主要因であると考えられる（図-12）。

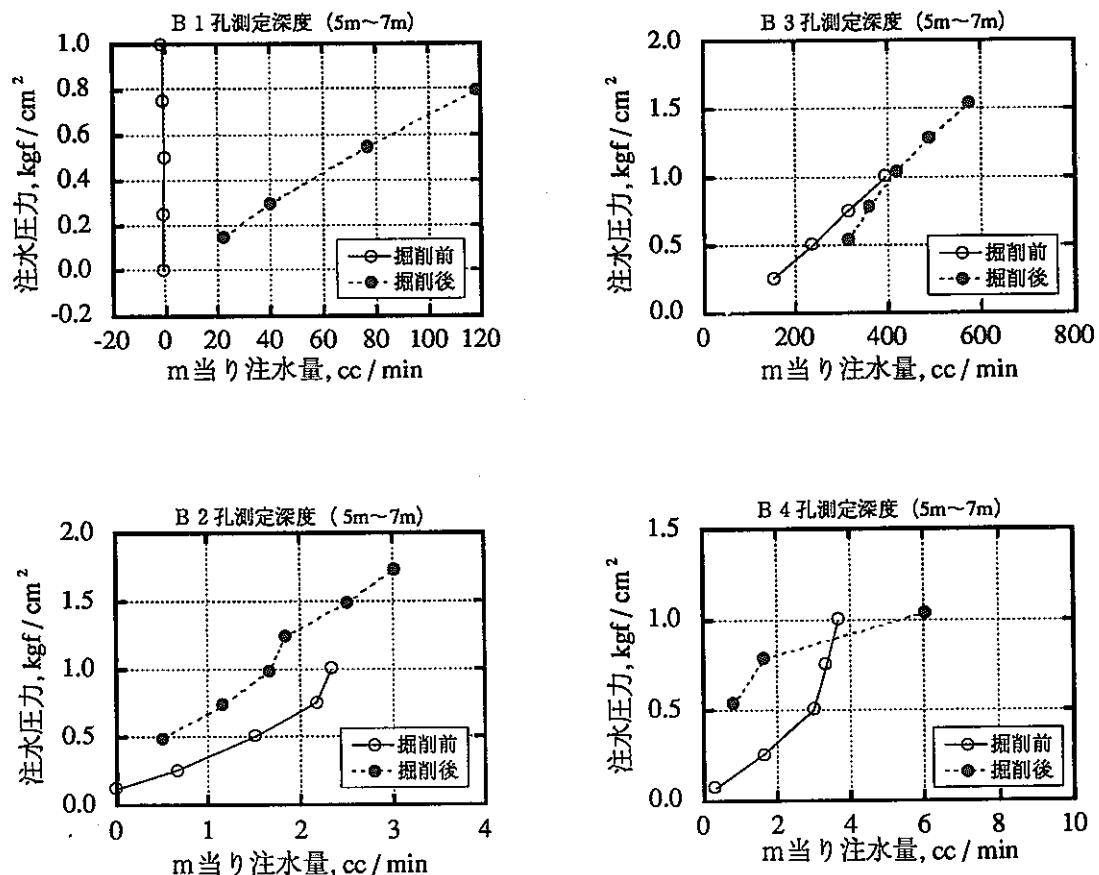


図-18 B断面上部における透水試験結果（注入圧～注水量曲線）

測定深度 GL-50.5m~52.5m (凝灰質砂岩)

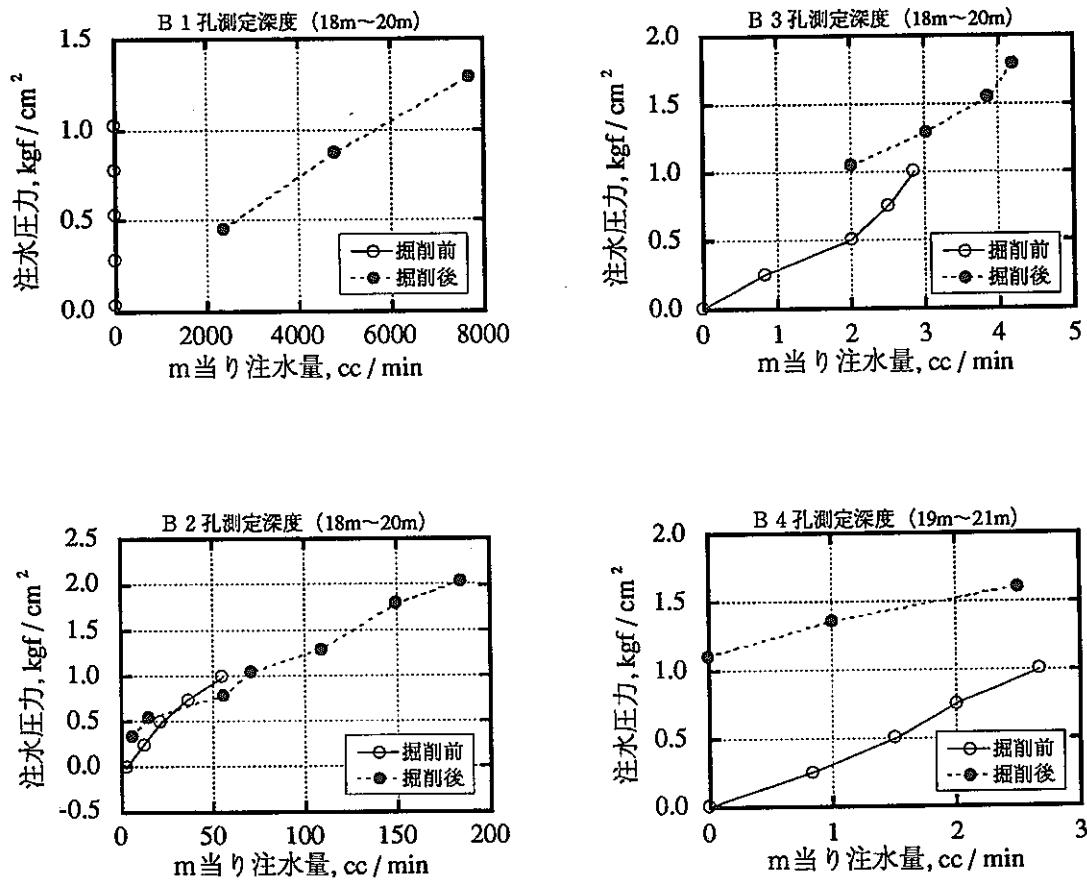


図-19 B断面下部における透水試験結果（注入圧～注水量曲線）

測定深度 GL-63.5m～65.5m (凝灰質泥岩)

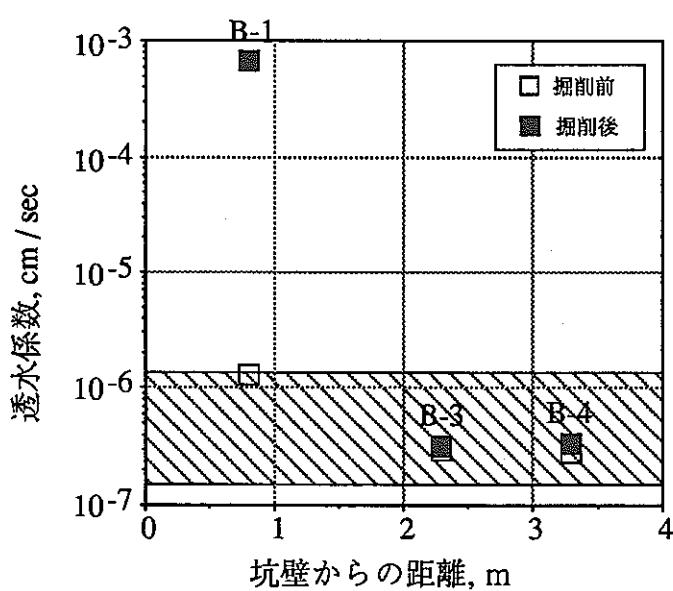
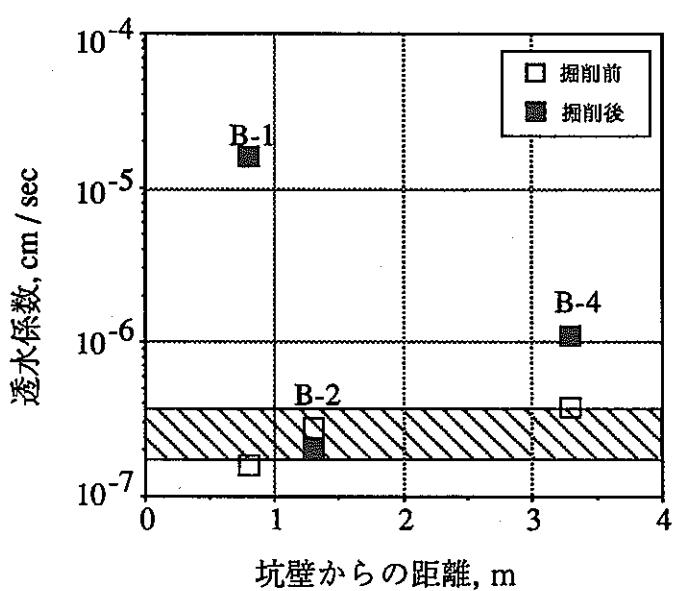


図-20 B断面における透水試験結果

7. 結び

本研究では、第三系堆積岩を対象として立坑掘削に伴う周辺岩盤の力学的・水理学的特性の変化を調べる調査・試験を実施し、ゆるみ領域の評価を試みた。

その結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) A断面では、立坑掘削前後で発破によると思われる岩盤の損傷（き裂の発生あるいは既存のき裂の開口）はなかった。孔内載荷試験では、立坑壁面から0.8mの地点で永久変形係数が低下し、1.3mと3.3mの地点では増加した。また、透水試験では掘削後の透水係数が全区間で低くなかった。以上の結果から、力学的・水理学的な特性の変化が生じた範囲は、岩盤壁面から1.0m（立坑壁から1.4m）程度と考えられる。また、これらの現象を考察した結果、A断面では掘削に伴う応力再配分により立坑周辺岩盤に力学的・水理学的特性の変化が引き起こされている可能性が示された。
- 2) B断面では、岩盤壁面から1.0m程度まで発破によると思われる岩盤の損傷が認められた。孔内載荷試験では、明世累層で永久変形係数が3.3mの地点まで増加し、土岐夾炭累層では、0.8mの地点で永久変形係数が低下し1.3mの地点では逆に増加した。透水試験では、両岩相（明世累層、土岐夾炭累層）とも立坑壁面から0.8mの地点で透水係数が高くなかった。弾性波測定では、B-1～B-3孔間（立坑壁面から0.8～1.3m）の15m以浅の部分で30～50%もの弾性波速度の低下が見られた。以上の結果から、力学的・水理学的特性の変化が生じた領域は、岩盤壁面から1.0m（立坑壁から1.4m）程度と考えられる。これらの現象を考察した結果、B断面では、①発破で生じたき裂②掘削に伴う応力再配分③飽和度の低下などにより、立坑周辺岩盤に力学的・水理学的特性の変化が引き起こされていることが推定された。
- 3) 1), 2) より、立坑掘削により岩盤の力学的・水理学的特性が変化した領域（ゆるみ領域を含む）範囲は A断面、B断面とも岩盤壁面から1.0m（立坑壁から1.4m）程度であることがわかった。
- 4) ゆるみ領域では、き裂あるいは塑性域の発生に伴い、岩盤の非回復な変形量が増加すると考えられる。このため、非回復な変形量の増加を表現できる永久変形係数を用いて測定結果を検討した。その結果、永久変形係数はゆるみ領域を把握する上で一つの指標となることがわかった。

8. 今後の課題

第三系堆積岩盤で実施した立坑掘削影響試験の力学的・水理学的特性変化に関する調査・試験データの一部（A, B断面）を解析した結果、既存の調査・試験手法を用いることにより掘削による立坑周辺岩盤の力学的・水理学的特性の変化した領域（ゆるみ領域を含む）をある程度捉えることができた。

しかし、立坑の掘削が周辺岩盤に及ぼす影響をより定量的に把握するためには、以下に示す問題点を解明する必要がある。

- ①岩盤のゆるみや応力変化と力学的・水理学的特性の変化との関係
- ②堆積岩盤における飽和度と弾性波速度との関係
- ③岩盤のゆるみ領域内の物性値を取得できる手法の開発（特に透水性）

以上のような問題点のうち、③については、ゆるみ領域の透水性を把握するための水理試験装置を開発しつつある。その他の問題点を解明するために実施すべき検討課題としては、以下の項目が上げられる。

- ①第三系堆積岩の透水性や変形性の変化と応力集中の関係を調べる三軸応力下での透水試験の実施。
- ②第三系堆積岩において飽和度が弾性波速度に及ぼす影響を調べる室内試験の実施。

9. 謝辞

結果の解析・評価については、山口大学水田義明教授、鳥取大学木山英郎教授、京都大学谷本親伯助教授、名古屋大学市川康明助教授、東京大学大久保誠介助教授の各先生方に貴重な御意見を戴いた。また、原位置計測は、大成建設、大林組、清水建設、鹿島建設への委託研究として実施した。ここに記して感謝の意を表する。

10. 参考文献

- 1) 杉原弘造, 二宮康郎: 堆積岩盤中における掘削影響評価 —掘削による緩み領域の計測・評価手法の開発—, 1990 , PNC TR/GE 89-07
- 2) 杉原弘造: 立坑掘削影響試験, 第 7回放射性廃棄物セミナー資料集 , pp. 87 ~127, 1991
- 3) 今井久, 柳沢孝一, 大澤英明, 渡辺邦夫 :立坑掘削の地下水流動予測解析, 第23回岩盤シンポジウム講演論文集 pp. 317 ~321, 1991
- 4) Excavation Response in Geological Repositories for Radioactive Waste (Proceedings of an NEA work shop , Paris , 1989)
- 5) 小林良二, 杉本文男 :回転接触子型岩盤割れ目検知計による現場試験, 日本鉱業学会誌 96-1107 pp. 307~312 , 1980
- 6) 桜井春輔 :トンネル・地下空洞における岩盤の緩みとは?
, 第23回岩盤シンポジウム講演論文集 pp. 378~379, 1991
- 7) 谷本親伯 :岩盤不連続面から見たトンネル周辺のゆるみ現象
, 第23回岩盤シンポジウム講演論文集 pp. 380~381, 1991
- 8) 今田徹 :トンネル・地下空洞における岩盤の緩み - 粒状体地山の場合を中心として-, 第23回岩盤シンポジウム講演論文集 pp. 382~383, 1991
- 9) 里優, 飯星茂: 軸差応力の増減に対する岩石の応答の違いについて, 第22回岩盤シンポジウム講演論文集 pp. 311~315 , 1990
- 10) 石田毅, 金川忠, 土山茂希, 百瀬洋一: 高周波AE測定による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の観測, 第23回岩盤シンポジウム講演論文集 pp. 311~315 , 1991
- 11) 大西有三, 谷本親伯 訳: 「わかりやすい岩盤力学」 第 7章 ,1990
- 12) 小野寺透, 吉中龍之進, 斎藤直忠, 北川隆 訳: 岩盤地下空洞の設計と施工 , 第10章 ,1965
- 13) 斎藤徳美, 阿部司, 九里尚一: 火成岩の風化による空隙組織の変化と弾性波速度との関係, 物理探鉱 第28巻3号 pp. 11 ~21, 1975
- 14) (社)日本材料学会: 建設材料実験 第 3章 , 1987
- 15) 土質工学会: 岩の調査と試験 第31章 pp. 285~292, 1990

—技術レポートリスト—

- TR/GE 89-01 清水和彦：地質環境データベースシステムの開発研究（基本設計），
PNC TN7410 89-029
- TR/GE 89-02 仙波毅・尾方伸久・坪田浩二：ボアホールレーダの我が国における花崗岩岩盤への適用試験， PNC TN7410 90-003
- TR/GE 89-03 武田精悦（訳）：国際ストリバプロジェクト， PNC TN7410 90-004
- TR/GE 89-04 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状， 検層技術(1)，
PNC TN7410 90-005
- TR/GE 89-05 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状， 検層技術(2)，
PNC TN7410 90-006
- TR/GE 89-06 大澤英昭・吉田英一：深部花崗岩中の割れ目解析－花崗岩岩盤における割れ目特性およびその分布特性に関する研究－，
PNC TN7410 90-007
- TR/GE 89-07 杉原弘造・二宮康郎：堆積岩盤中における掘削影響評価－掘削による緩み領域の計測・評価手法の研究開発－，
PNC TN7410 90-009
- TR/GE 89-08 柳澤孝一：広域地下水流动調査の現状について， PNC TN7410 90-021
- TR/GE 89-09 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験・研究－ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その1）－，
PNC TN7410 90-019
- TR/GE 90-01 今井久・柳澤孝一：3次元飽和不飽和浸透流解析プログラムTAGSACの概要， PNC TN7410 90-026

TR/GE 90-02 野原壯・瀬尾俊弘・落合洋治：ウラン鉱床を利用したナチュラルアナロジ研究（その1）－ウラン系列核種の放射非平衡について， PNC TN7410 91-030

TR/GE 90-03 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験研究－ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その2）－， PNC TN7410 91-017

TR/GE 90-04 柳澤孝一・今井久・斎藤章・大澤英昭・中島誠：立坑掘削影響試験における地下水流动影響予測解析， PNC TN7410 91-013

TR/GE 90-05 清水和彦：地質環境の長期的隔離能に係わる天然事象について(1)
－気候変動と海面変動－， PNC TN7410 91-010

TR/GE 91-01 Yoshida, H., M. Yui and T. Shibutani: A Study of Influence Factor on Uranium Fixation in the Tono Uranium Deposit, Japan,
PNC TN7410 91-061

TR/GE 91-02 中野勝志・斎藤章・花木達美：難透水性岩石を対象とした室内透水試験装置の開発， PNC TN7410 91-050

TR/GE 91-03 尾方伸久・大澤英昭・仙波毅・柳澤孝一：多変量統計解析手法を用いた結晶質岩盤の割れ目解析， PNC TN7410 92-001

TR/GE 91-04 石丸恒存・清水和彦：地質環境の長期的隔離性能に係わる天然事象について(2)－火山活動－， PNC TN7410 91-031

TR/GE 91-05 仙波毅・尾方伸久・長谷川健・岩崎浩・渡辺邦夫：ボアホールレーダーによる結晶質岩盤中の割れ目帶調査－釜石鉱山原位置試験場における調査について－， PNC TN7410 92-005

TR/GE 92-01 柳澤孝一，古屋和夫，大澤英昭，若松尚則，梅田浩司：我が国における地盤の透水性に関する調査・研究（その1），
PNC TN7410 92-015

- TR/GE 92-02 佐藤稔紀・石丸恒存・杉原弘造・清水和彦：文献調査による我が国の
岩石の物理的特性に関するデータの収集, PNC TN7410 92-018
- TR/GE 92-03 瀬尾俊弘, 清水和彦：我が国における地下水の水質に関するデータの
収集・解析, PNC TN7410 92-017
- TR/GE 92-04 柳澤孝一, 今井久, 古屋和夫, 若松尚則, 梅田浩司：我が国を対象とした
地下水流动解析－その1 中部日本を対象にした地下水流动解
析－, PNC TN7410 92-019
- TR/GE 92-05 柳澤孝一, 若松尚則, 梅田浩司, 今井久, 古屋和夫：我が国における
水理地質学的特性に関する調査・研究,
PNC TN7410 92-012