

AN-1号孔及びMIU-1号孔における力学特性調査結果

平成11年4月

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

地層科学研究グループ

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319 - 1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaragi 319-1194,

Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 1999

AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における力学特性調査結果

松井裕哉*

要旨

本調査は、岐阜県瑞浪市月吉地区に分布する土岐花崗閃緑岩を対象とした超深地層研究所計画の地表からの調査の一部として平成10年度に実施したものである。その目的は、①地表からの調査段階における初期的な岩盤力学的概念モデルを構築する、②超深地層研究所の設計に必要な力学的特性を把握する、の2点である。

調査は、大きく室内試験と原位置試験に分かれている。室内試験としては、AN-1 号孔及び MIU-1 号孔のコアを用いた物理試験と力学試験、ならびに MIU-1 号孔のコアを用いた AE 法による応力測定を地表～深度 1000m の範囲で実施した。原位置試験としては、水圧破碎法による初期応力測定を AN-1 号孔にて実施した。得られた結果の概要は、以下の通りである。

- 1)AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における室内物性試験及び力学試験結果から、土岐花崗岩の各物性値の深度方向の分布は一樣ではなく、物性値の分布傾向は、0～300m, 300～700m, 700m 以深で異なると推定される。
- 2)AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における応力測定結果から、鉛直方向の応力分布は、3 深度を除き土被り圧とほぼ等しく、水平面内の応力状態は、推定土被り圧と測定結果の比較から、0～300m, 300～700m, 700m 以深で異なることがわかった。また、最大主応力の方向は、地表～300m の範囲までは NS 方向、それ以深は NW 方向に変化していることがわかった。深度 300m 以深の最大主応力方向は、測地学的な最大圧縮軸の方向とほぼ一致しており、広域応力場をある程度反映したものと考えられる。
- 3)岩手県釜石鉱山の栗橋花崗閃緑岩と比較した場合、岩石マトリックスの有効空隙率が 1 %と大きく、密度が小さくなっている。また、強度・変形特性（一軸圧縮強度等）については、栗橋花崗閃緑岩とほぼ同等であり、釜石原位置試験で観察された応力集中による坑道周辺岩盤への物理的損傷等の力学的な現象は、超深地層研究所建設時でも起こりうる可能性が高いと考えられる。
- 4)坑道掘削に伴う応力集中による坑道周辺岩盤の物理的な損傷の発生可能性を検討した結果、深度 500m 以深で立坑や坑道壁面近傍に応力集中による岩盤の損傷が発生する可能性があると考えられる。

The results of the investigation on Rock mechanics in AN-1 and MIU-1 boreholes

Hiroya MATSUI*

Abstract

The investigations on Rock mechanics in AN-1 and MIU-1 have been carried out in 1998 as a part of the investigations in pre-investigation phase in MIU(Mizunami Underground Research Laboratory) project. The objectives of the investigation are: ①to develop the conceptual model on rock mechanics in pre-investigation phase in MIU project, ②to obtain the mechanical data of Toki granite for the design of MIZUNAMI Underground Research Laboratory.

The investigations in AN-1 and MIU-1 consist of three part :

- ①Laboratory tests for the mechanical properties of rock matrix in AN-1 and MIU-1 boreholes.
- ②Stress measurement in laboratory with AE method in MIU-1 borehole.
- ③In-situ stress measurement with hydraulic fracturing in AN-1 borehole.

The results of the investigations are summarized as follows :

- The distribution of rock mechanical properties for Toki granite is not unique and can be approximated by forth term polynomial equation. The distribution of each properties for Toki granite has different trend with each section, where are until 300m, from 300 to 700m and over 700m.
- The vertical component of stress tensors are almost equal to the overburden pressure based on the results of stress measurement with AE method. The stress state from surface to 1000m depth is divided into three part, such as reverse fault type (0~300m), transitional stress regime (300~700m) and strike-slip faulting type (700~1000m). The average direction of maximum principal stresses from surface to 300m depth is found to be N-S and the direction from 300m depth was N-W direction. The direction is correspond with the direction of maximum compressive axis derived from triangular survey with the region.
- Toki granite is larger in the effective porosity and lower in density than that of Kamaishi granodiorite. The magnitude of stress with depth is almost agree with it measured in Kamaishi mine. The results indicate that the damage induced stress concentration around a drift and shaft is possible to occur in MIZUNAMI URL.
- The damage index(Di) is calculated based on the results of the stress measurement in AN-1 and MIU-1. The results show that the damaged zone by the stress concentration will be created deeper than 500m depth around the shaft and drift of MIZUNAMI URL.

* Japan Nuclear Cycle development institute (JNC)

目次

	ページ
1. はじめに	1
2. 目的	1
3. 調査位置及び地質構造	1
4. 正馬様洞用地内における既存の力学特性調査	2
5. AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における力学特性に関する調査項目	5
6. 調査結果	7
6.1 室内試験結果	7
6.2 初期応力測定結果	18
7. 考察	22
7.1 釜石鉱山における力学特性調査結果との比較	22
7.2 広域的な応力場との比較	25
7.3 地質構造と岩盤物性値及び応力状態との関係	26
7.4 坑道掘削時に生じる現象について	27
8. まとめ	29
9. 今後の予定	30
10. 参考文献	30

1.はじめに

核燃料サイクル開発機構は、岐阜県瑞浪市正馬様洞用地にて超深地層研究所計画を遂行している。本計画は、現在地表からの調査を実施しているが、本調査の中で主として岩盤の力学的な場のモデルの構築や超深地層研究所の設計・施工を目的として、正馬様洞地区に分布する土岐花崗岩の岩盤力学的特性に関する調査を実施している。

本資料は、東濃地科学センターが正馬様洞地区において、現在までに実施した土岐花崗岩を対象とした力学特性に関する調査結果をとりまとめたものである。

2.目的

本調査の目的は、以下の2点である。

- ①地表からの調査段階における初期的な岩盤力学的概念モデルを構築する。
- ②超深地層研究所の設計に必要な力学的特性を把握する。

3.調査位置及び地質構造

調査対象領域は、岐阜県瑞浪市に位置する正馬様洞用地である。調査対象地域は、表層部（層厚数 m～100m）に新第三紀の堆積岩が分布し、それ以深は基盤となる土岐花崗岩より構成されている。本調査を行った AN-1 号孔、MIU-1 号孔の位置と既存の調査結果に基づき構築された第1次の地質構造概念モデル¹⁾を図 3.1 に示す。AN-1,MIU-1 号孔とも深度約 1000m の深さまで掘削した地表からの鉛直下向きの試錐孔である。

地形から推定される構造については、東濃地域には、NW-SE 方向及び NE-SW 方向のリニアメントが発達しており、一部 EW 方向のリニアメントが認められ、用地内には、航空写真判読により正馬川沿いに NW-SE 方向のリニアメントが認められる。また、用地外北方には、SPOT 及び LANDSAT で判読された E-W 方向のリニアメントが認められ、これは用地付近に存在する月吉断層の地上位置と調和的である。その他、用地外東方には SPOT 及び LANDSAT で判読された NNE-SSW 方向のリニアメントが認められる²⁾。

また、AN-1, 3 号孔におけるコア観察、BTV 及び各種の検層結果より、幾つかの割れ目密集帯が存在していることが確認されている³⁾。

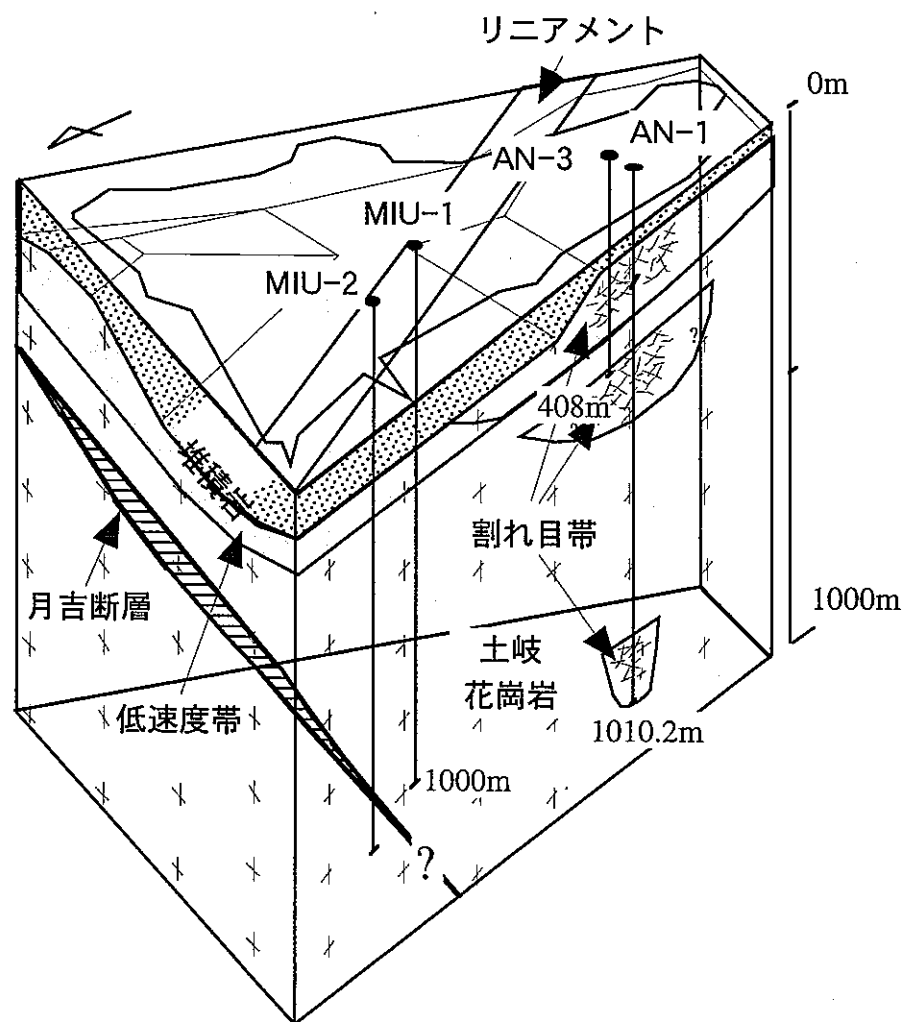


図 3.1 正馬様洞用地を対象とした第 1 次地質構造概念モデル

4.正馬様洞用地内における既往の力学特性調査結果

正馬様洞用地内では、平成5年度に大深度対応孔内载荷試験装置開発のための基礎的なデータを取得することを目的として、AN-1号孔の地表～深度200mの範囲で室内試験及び孔内载荷試験を実施している。この測定では孔内载荷試験装置としてKKTと呼ばれる等変位型の载荷試験装置を使用した。同装置の载荷区間長は25cmである。原位置岩盤の変形係数D及び弾性係数Eは、以下に示す式を用いて算出している⁴⁾。ただし、ポアソン比は0.25として計算した。

$$E, D = \frac{d}{2} \times \phi(v, \beta) \times \frac{\Delta P}{\Delta r}$$

ここで、E, D はそれぞれ原位置岩盤の弾性係数、変形係数であり、d は試錐孔直径、 ΔP 及び Δr は孔内载荷試験時の圧力増分と変位増分、 ϕ はポアソン比と試錐孔の曲率より決まる定数である。

図3.2に室内試験結果及び孔内载荷試験結果を示す。試験は、ジョイントを载荷区間を含む場所と含まない場所で計3ヶ所ずつ実施しているが、図中では载荷方向でのみ区別している。

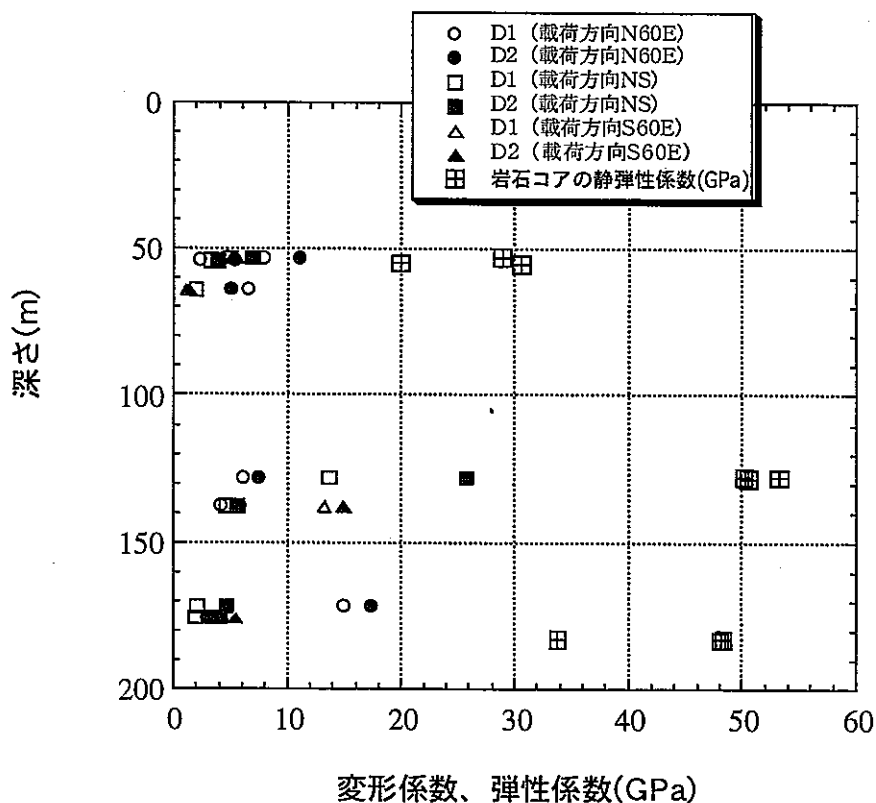


図 3.2 孔内载荷試験結果と室内力学試験結果の比較

図 3.2 では、荷重～変位曲線から得られた変形係数 D_1 （応力レベル 5～20MPa）、 D_2 （応力レベル 20～35MPa）と、ほぼ同一深度から採取した岩石コアを用いた一軸圧縮試験より求めた弾性係数 E_{50} を並記しているが、原位置で測定された岩盤の変形係数 D_1 、 D_2 は、割れ目が載荷区間内に存在しない場合にも、室内試験の結果から得られた E_{50} と比較すると 1/2～1/3 程度の値となった。これは、載荷区間前後に存在する割れ目や孔壁付近に分布する微少クラックの影響を受けたためと考えられる。一軸圧縮強度は、平均的には 126MPa 程度となるが、バラツキが非常に大きい（64～184MPa の範囲）。地表面から深度 200m までの範囲は、後述するが割れ目が多数存在することから岩石マトリックス部においても多数のマイクロクラックが内包されている可能性が高く、バラツキの大きい要因となっていると考えられる。

5.AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における力学特性に関する調査項目 ^{5),6),7)}

これらの試錐孔及び採取した岩石コアを用いて、以下の調査を実施した。

- ・ AN-1 号孔における室内力学試験及び初期応力測定
- ・ MIU-1 号孔における室内力学試験及び初期応力測定

室内力学試験に関しては、AN-1 号孔で原則として 50m ピッチ、MIU-1 号孔で 100m ピッチで供試体のサンプリングを実施し、物理試験及び力学試験を実施した。また、これらの試験の他、熱物性試験を実施している。試験手法等の仕様を表 5.1 に示す。

表 5.1 AN-1 号孔、MIU-1 号孔における室内物理試験及び力学試験の仕様一覧

AN-1孔	試験名	試験項目	試験仕様	数量	備考	
	物理試験	空隙率	ISRMの指針に準拠	20	一軸圧縮供試体のみ	
		含水比	ISRMの指針に準拠	20		
		カサ比重	ISRMの指針に準拠	20		
		見かけ比重	ISRMの指針に準拠	20		
		弾性波速度測定 (P,S波)	受発信子 200kHz	20		
	力学試験	一軸圧縮試験	荷重制御 (3kgf/cm ² /s) 軸ひずみ、横ひずみは ひずみゲージにより測定	20	一部、三軸圧縮試験を実施	
		圧裂試験		40		
	熱特性試験	熱伝導率測定	非定常細線加熱比較法 (測定範囲:室温～70°)	20		
		比熱容量測定	断熱連続加熱法 (測定 範囲:室温～300°)	20		
熱膨張率測定		押し棒式熱膨張測定法 (測定範囲:室温～300°)	20			
MIU-1孔	試験名	試験項目	試験仕様	数量	備考	
	物理試験	空隙率	ISRMの指針に準拠	180		
		含水比	ISRMの指針に準拠			
		密度	ISRMの指針に準拠	210		
		単位体積重量	JGS T 191-1990			
		弾性波速度測定 (P,S波)	ISRMの指針に準拠	180		
	力学試験	一軸圧縮試験	JIS M0302	90		
		圧裂試験	JIS M0303	30		
		三軸圧縮試験	ISRMの指針に準拠	30×3=90		
	熱特性試験	熱伝導率測定	JIS R2618	30	3封圧:10,20,30 MPa	
		比熱容量測定	断熱連続加熱法 (測定 範囲:室温～300°)	30		
		熱膨張率測定	JIS R2617	30		
	その他	帯磁率測定	特になし	30		
		比抵抗測定	特になし (既存の研究 事例に準拠)	30		

初期応力測定に関しては、AN-1 号孔にて深度 1000m までの範囲で水圧破碎法による応力測定を、MIU-1 号孔では岩石コアを用いた AE 法及び DRA 法による応力測定を実施した。本調査では、AE 法によって鉛直土被り方向の応力を求めるとともに、それに直交する水平面内の主応力方向と主応力値を水圧破碎法による測定から決定した。これは、大深度対応でかつ 1 つの試錐孔を用い 3 次元応力を測定可能な測定手法が現状存在しないことと、既存の研究事例^{8),9)}から鉛直土被り方向を主応力方向の一つであると仮定することができるためである。表 5.2 に適用した各初期応力測定手法の仕様を示す。

表 5.2 初期応力測定仕様一覧

	測定手法	目的	使用機器	備考
AN-1孔	水圧破碎法	水平面内の応力状態を2次元的に把握する。	ストラドルバックカー 1本 (ウレタンゴム製、耐圧30MPa) インプレッションバックカー 1本 (ウレタンゴム製、耐圧30MPa) ケーブルウインチ 1台 (1.5kW、1000m対応) 高圧ポンプ 3台 (HP-500W、3.5 l/min、35MPa) 制御システム (パソコン) 1台 (PC-9801T) A/Dコンバーター 1台 (ADC-116C) シグナルコンディショナー 1台 (CDA-230C) 圧力変換器 1台 (PGM-500KD、測定範囲49.03MPa) 流量計 1台 (MP-MCF-SLE、測定範囲 6.0 l/min) 坑井方位傾斜儀計 1台 (TYPE-SS、最小読み取り誤差1°)	試験箇所：20点(49m, 199m, 249m, 309m, 351m, 404m, 498.5m, 564m, 600m, 651m, 700m, 790m, 850m, 900m, 941m, 991m)
MIU-1孔	AE法	鉛直土被り方向の応力状態を把握する。	多目的材料試験機 1台 (MTS、最大圧縮容量150t、剛性:7×10 ⁹ N/m) AE計測器 1台 (トランスデューサー140kHz共振型、プリアンプ40dB固定) ひずみ測定器 1台 (TDS-301) オシロスコープ 1台 (DS-6121A) 制御システム (パソコン) 1台 (PC-9801RX) ロードセル 1台 (LU-5TE、容量5t) ひずみゲージ (PEL-10-11)	試験箇所：10箇所 (196m, 297m, 409m, 504m, 590m, 674m, 799m, 896m, 932m, 990m) 予備試験により以下の値を設定 閾値：VH 230mV, VL 210mV 感度：90dB 試料採取後2日以内に測定を実施 DRA法による応力測定もあわせて実施

6.調査結果

6.1 室内試験結果

(1)MIU-1 号孔のコアを用いた室内力学試験結果⁵⁾

図 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 は、取得した各物性値と深度との関係を示したものである。バラツキの大きい箇所も見られるが、各物性値の分布範囲は概略下記の通りである。なお、空隙率が極端に大きく測定された岩石コア（2%以上）は、土岐花崗岩のマトリックス部の物性値を示していない可能性が高いと判断し、以降の図から削除している。

比重	: 2.61~2.64
有効空隙率	: 1.0~1.8%
含水比	: 0.3~0.7%程度
P,S 波速度	: 5.0~5.8km/sec 程度 (P 波速度) 2.8~3.0km/sec 程度 (S 波速度)
弾性係数(E_{50})	: 45~65GPa
一軸圧縮強度	: 130~250MPa
ポアソン比	: 0.3~0.37
粘着力	: 20~26MPa
内部摩擦角	: 50~60°

ここでは、測定データのバラツキが大きいため、取得された各物性値と深度の関係をより明確にするために、相対的に最も相関係数の値が高い4次多項式で近似した結果も図中に並記している。

単位体積重量や圧裂強度、粘着力については、深度方向に周期的に変化するような分布傾向を示していることが図 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 から読み取れる。また、全般的には、深度 300m 程度より浅い部分と、300~700m 程度の地点、700m 程度より深い部分で物性値の深度方向の変化傾向が異なっていると判断される。

図 6.1.4, 6.1.5 に測定した各物性値間の相関性を検討した結果を示す。相関係数が相対的に高い ($R=0.5$ 以上) のものは、含水比~有効空隙率、比重~有効空隙率、有効空隙率~P 波速度であった。また、P 波速度~弾性係数の相関係数も 0.4 程度となり、相対的に高い。これらの関係は、有効空隙率が大きいほど同体積での比重は減少し、岩石の変形性は大きくなることを示してしており、一般的な知見と矛盾しない。

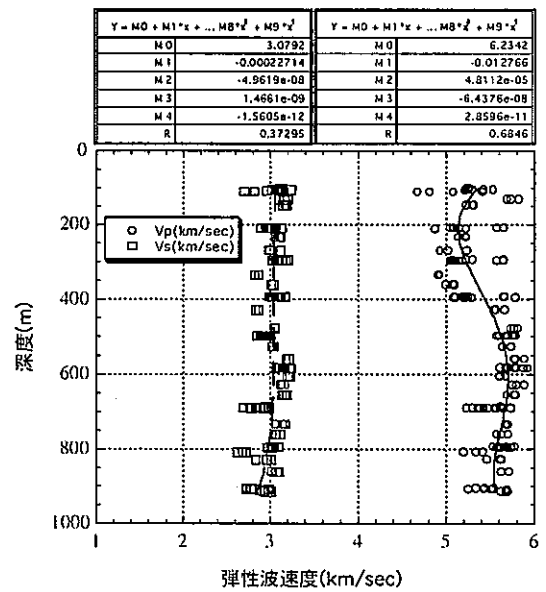
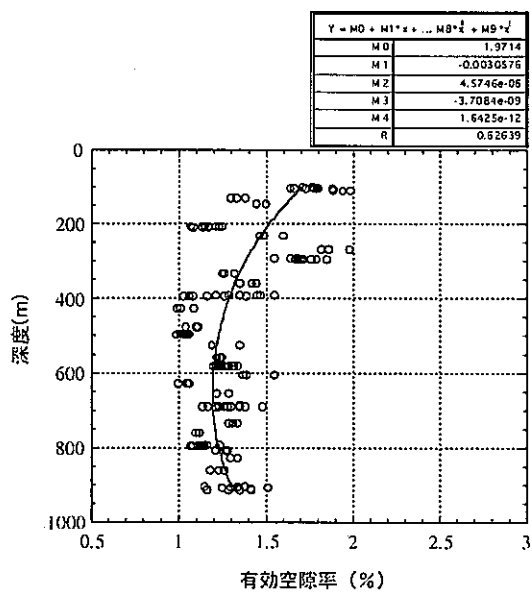
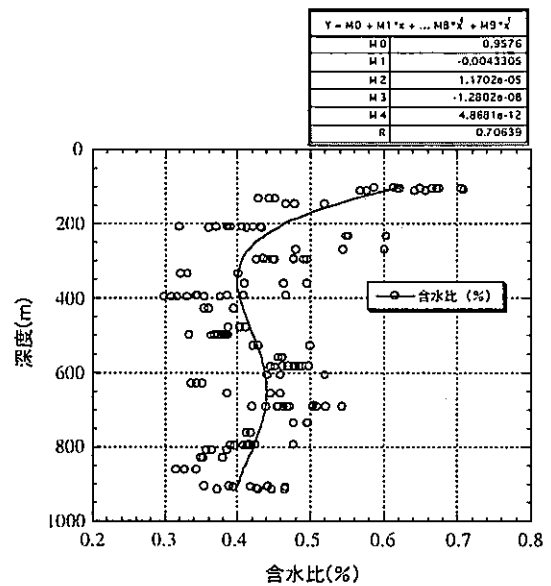
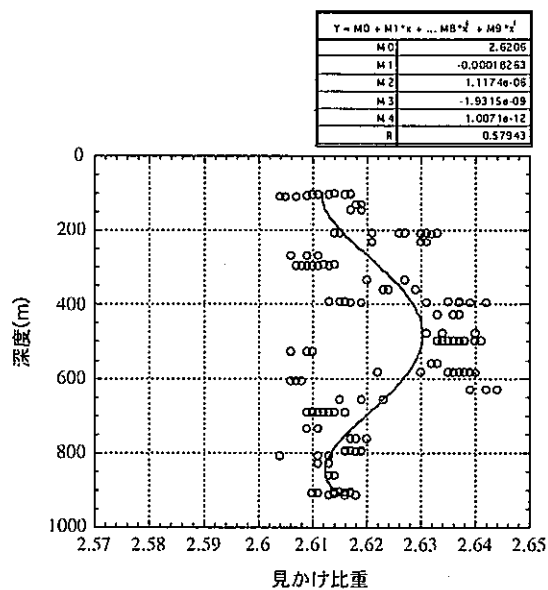


図 6.1.1 岩石の物理学的物性値とその深度方向の変化(MIU-1 号孔)

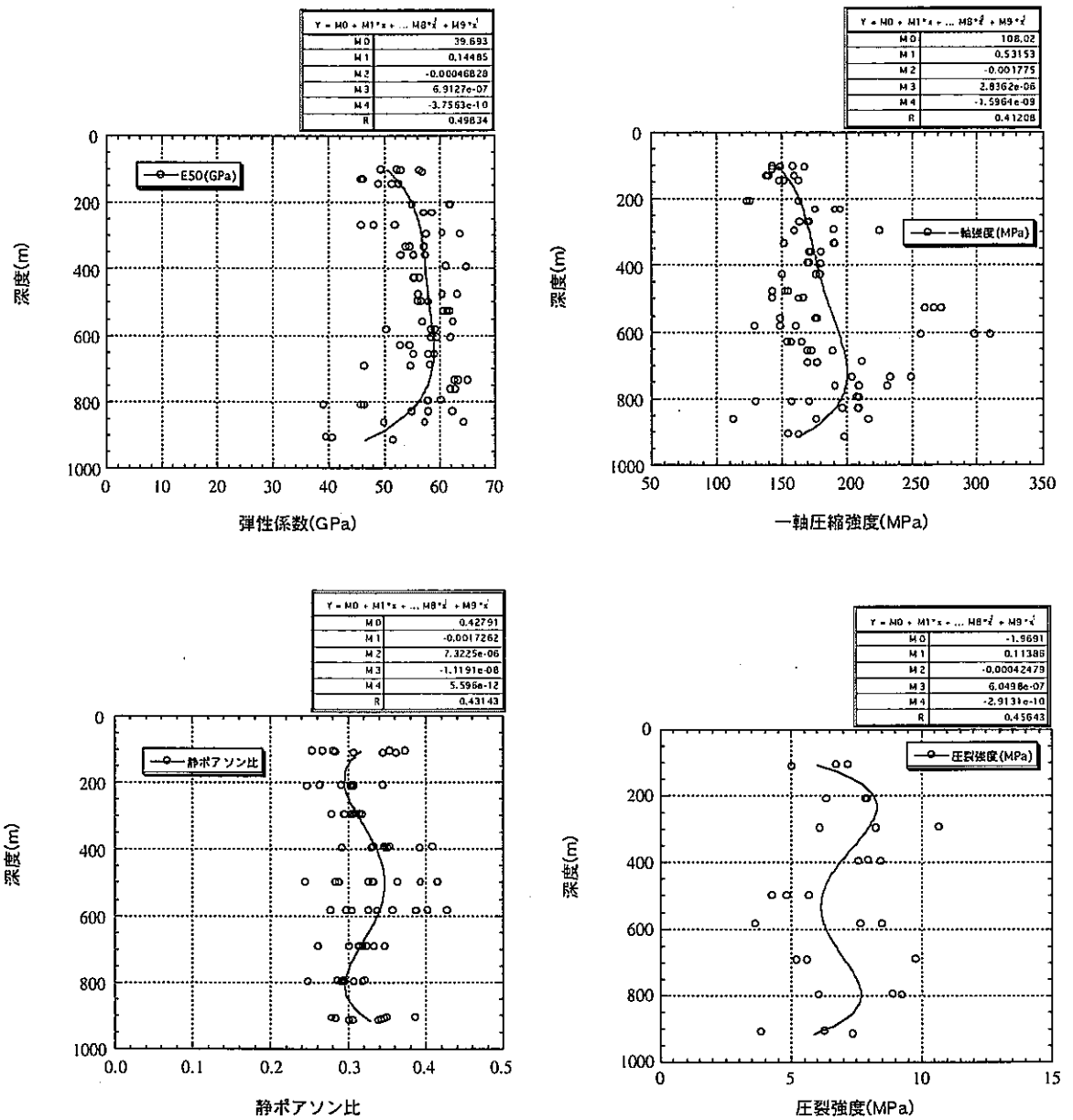


図 6.1.2 岩石の力学的物性値とその深度方向の変化(MIU-1 号孔)

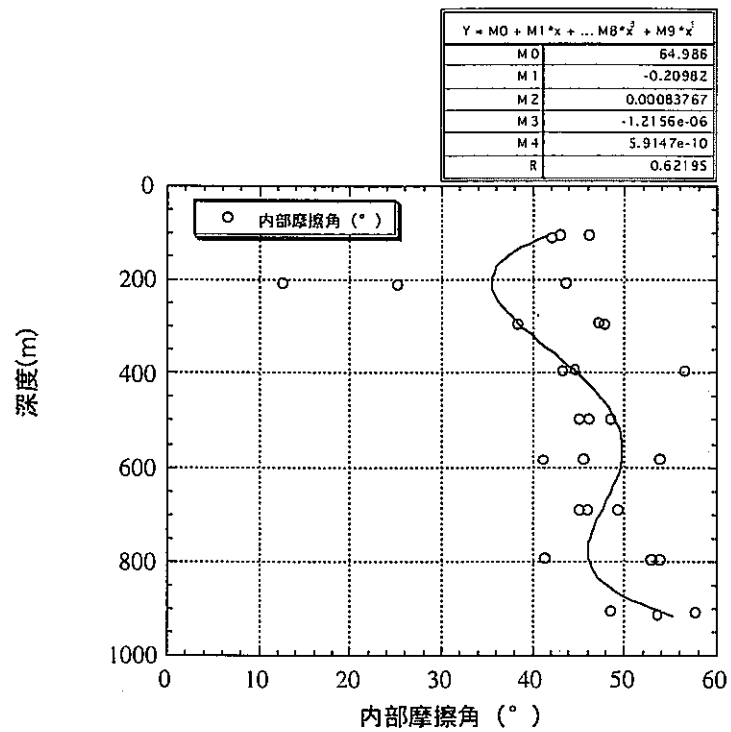
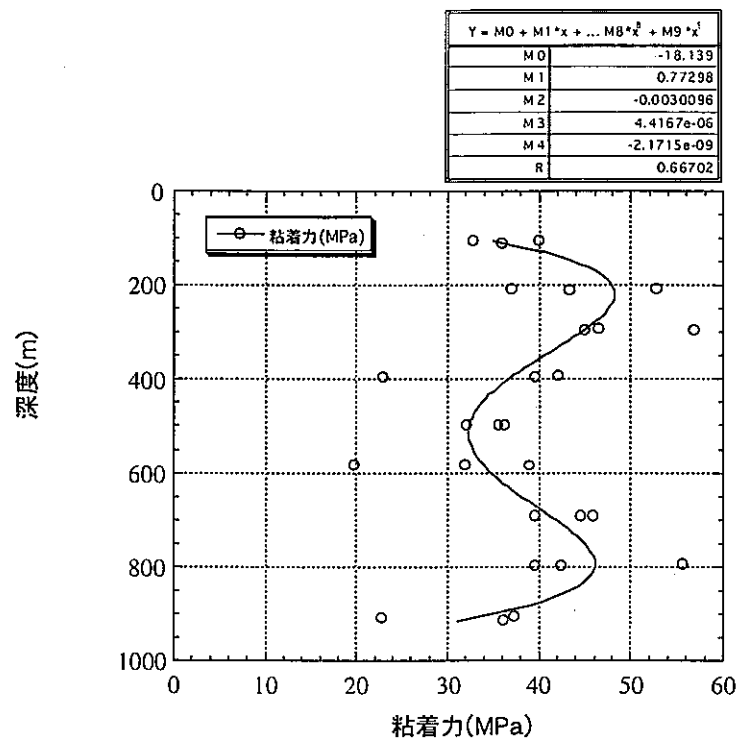


図 6.1.3 岩石の力学的物性値とその深度方向の変化(MIU-1 号孔)

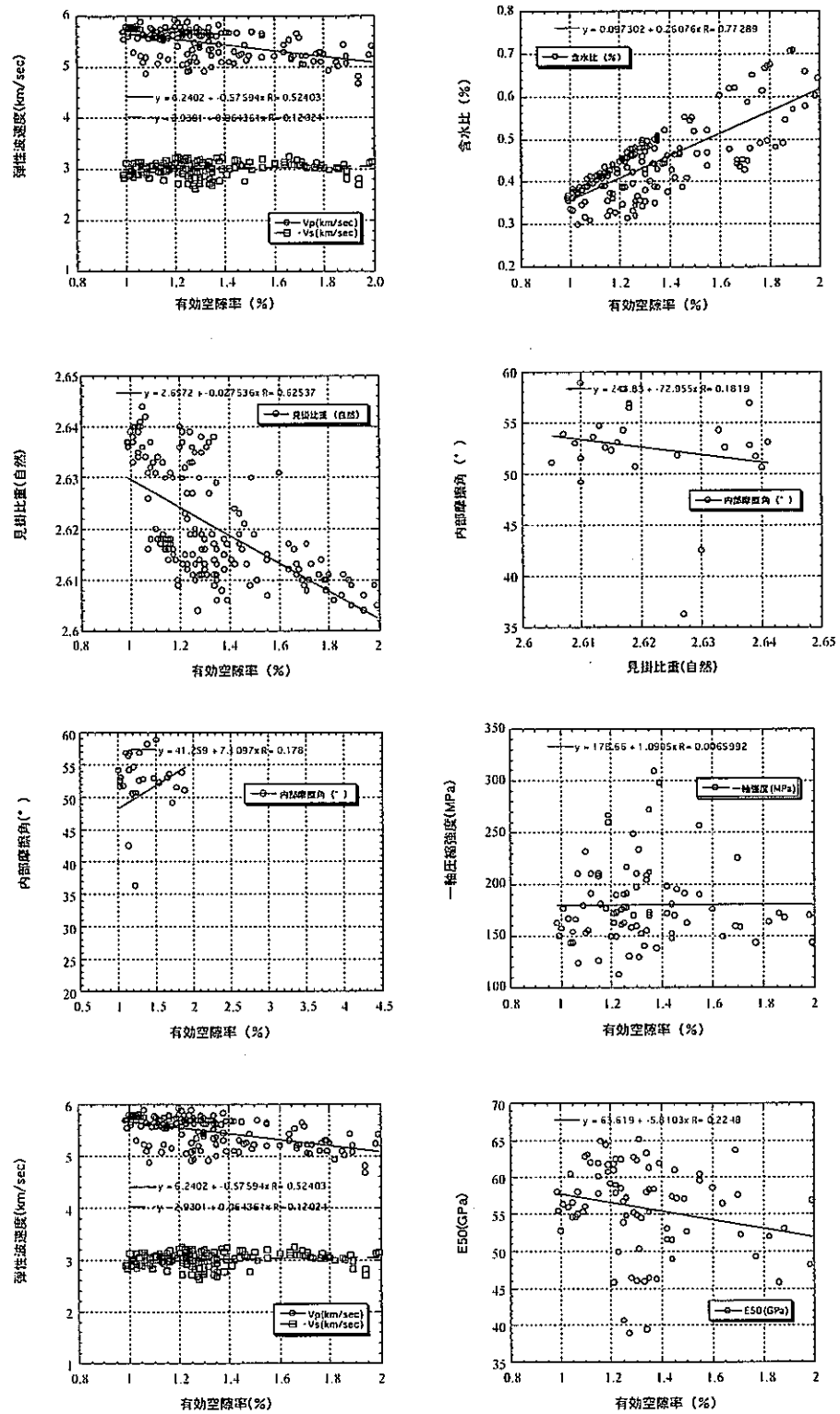


図 6.1.4 各物性値間の相関性の検討結果 (1)

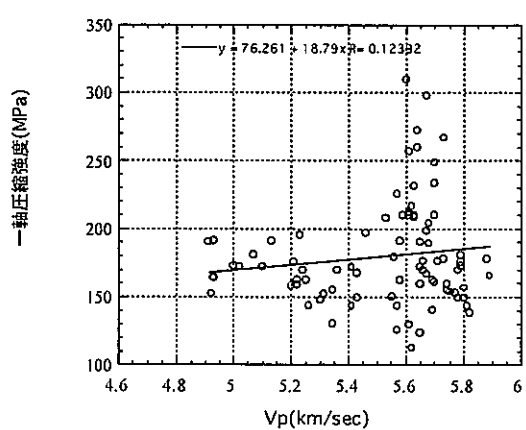
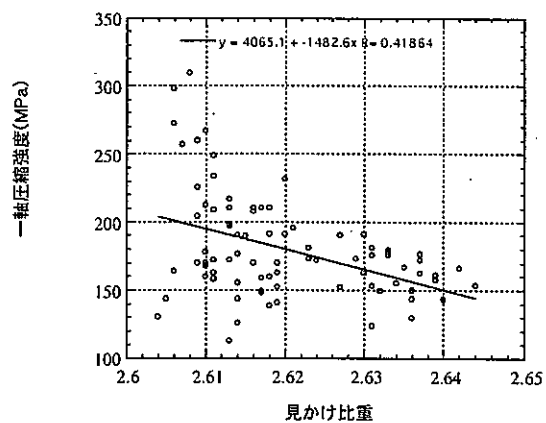
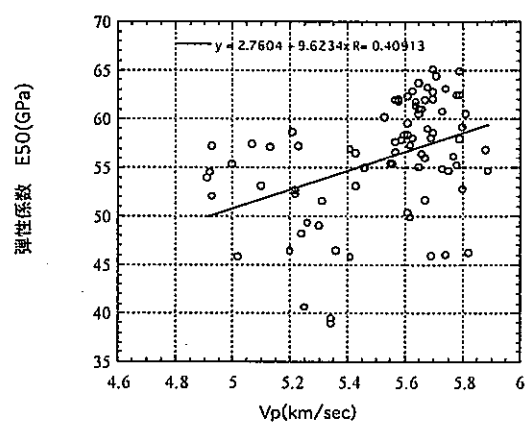
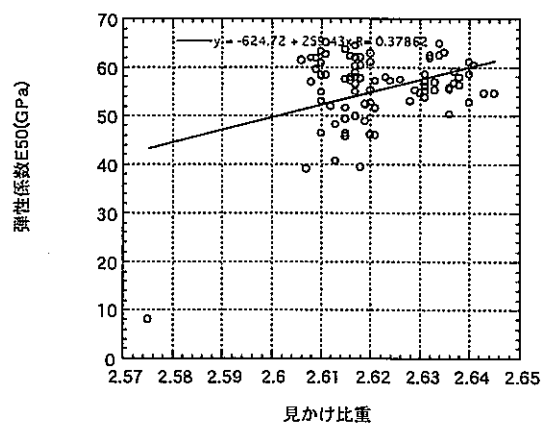


図 6.1.5 各物性値間の相関性の検討結果 (2)

(2)AN-1 号孔のコアを用いた室内力学試験結果⁶⁾

図 6.1.6, 6.1.7 は、各物性値と深度との関係を示したものである。バラツキの大きい箇所も見られるが、各物性値の概略的な分布範囲は下記の通りである。なお、空隙率が極端に大きく測定された岩石コア（2%以上）は、MIU-1 の結果と同様、土岐花崗岩のマトリックス部の物性値を示していない可能性が高いと判断し、以降の図から削除している。

比重	: 2.59~2.62
有効空隙率	: 1.0~1.8%
含水比	: 0.15~0.30%程度
P,S 波速度	: 4.0~5.0km/sec 程度 (P 波速度) 2.2~2.7km/sec 程度 (S 波速度)
弾性係数(E50)	: 34~60GPa
一軸圧縮強度	: 120~240MPa
ポアソン比	: 0.3~0.37

取得された各物性値と深度の関係は、MIU-1 号孔と同様、4 次多項式で近似している。深度方向の分布を見ると、MIU-1 号孔の結果と同様、深度 300m 程度より浅い部分と、300~700m 程度の地点、700m より深い部分で物性値の深度方向の変化傾向が異なっているが MIU-1 号孔での結果で見られるような周期的な変化ではない。

図 6.1.8, 6.1.9 に MIU-1 と同様、岩石の各物性値間の相関関係を検討した結果を示す。相関係数が 0.5 以上のものは、含水比~空隙率及び比重~一軸圧縮強度であった。特に、比重と一軸圧縮強度については、明瞭な負の相関性（比重が重くなるほど一軸圧縮強度が低下する）が認められた。MIU-1 号孔の室内試験結果においても、相関性は低いが同様に負の相関性が認められた。通常、比重が増えれば岩石コアは緻密になり強度は高くなると考えられるため、結果の解釈には鉱物粒子の分布特性や配向性、マイクロクラックの分布特性等の詳細なデータが必要であると考えられる。

MIU-1 号孔の試験結果と比べると得られている各物性の値そのものは MIU-1 孔の結果と大きく異ならないと考えられるが、各物性値間の相関性や深度方向の物性値の周期性が見られない。この原因としては、MIU-1 号孔及び AN-1 号孔地点での土岐花崗岩の岩質の違いや、本室内試験に用いられた岩石コアが AN-1 号孔掘削後 10 年余り経過したものであること等の影響が考えられる。

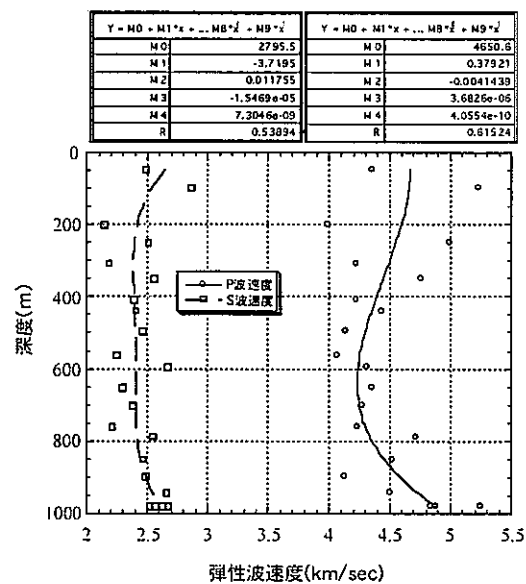
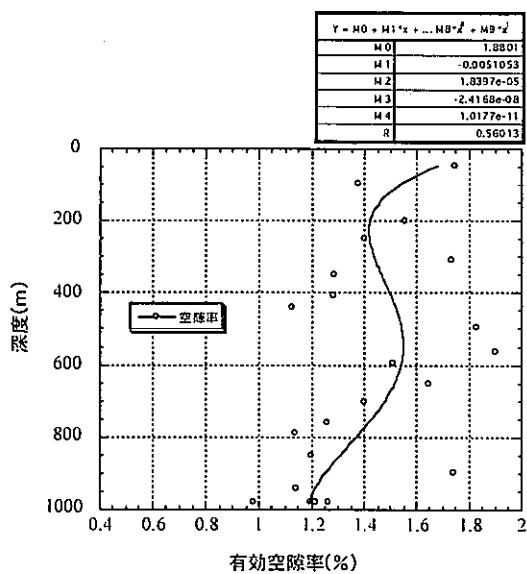
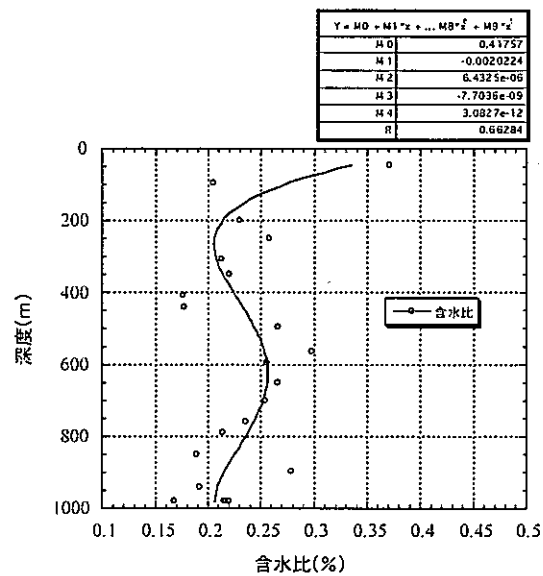
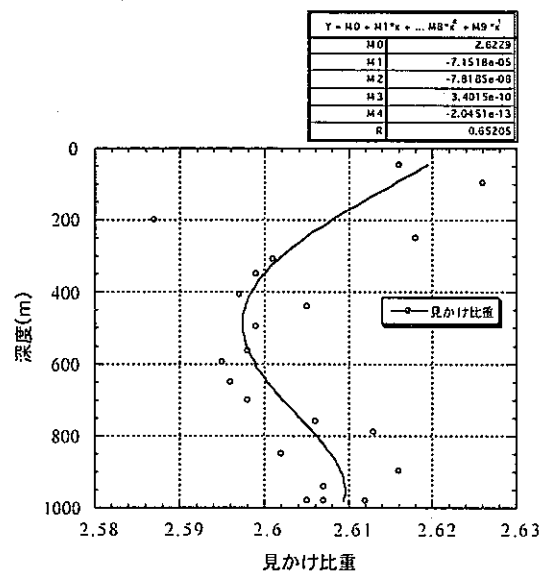


図 6.1.6 岩石の物理的物性値とその深度方向の変化(AN-1 号孔)

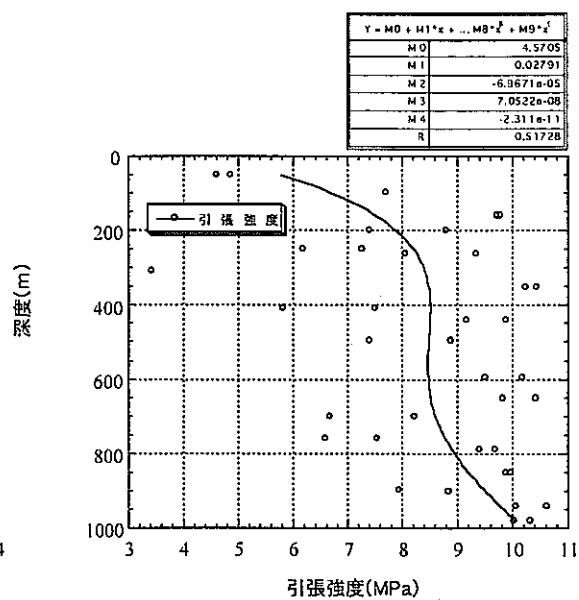
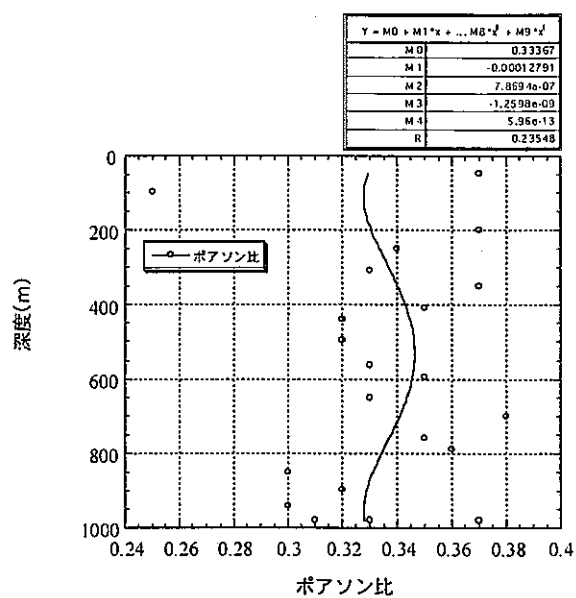
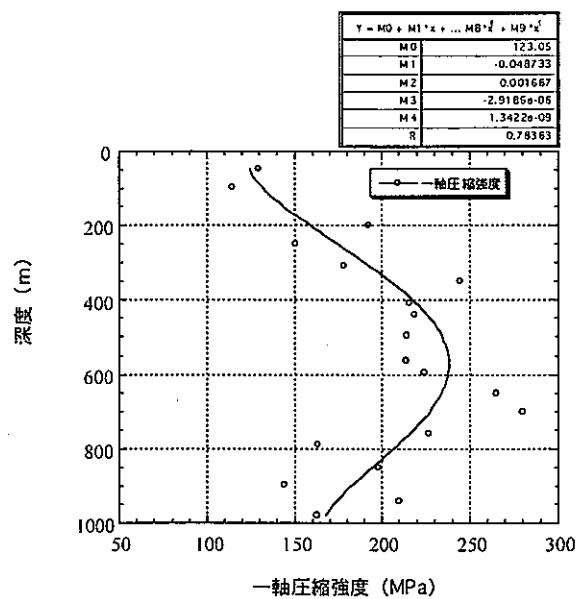
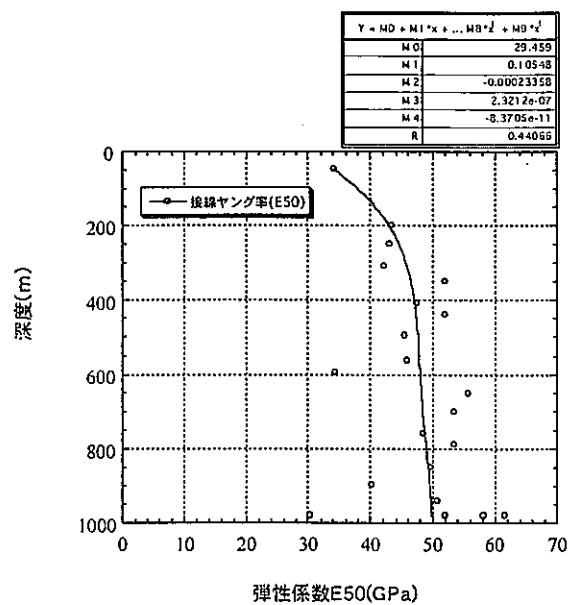


図 6.1.7 岩石の力学的物性値とその深度方向の変化(AN-1 号孔)

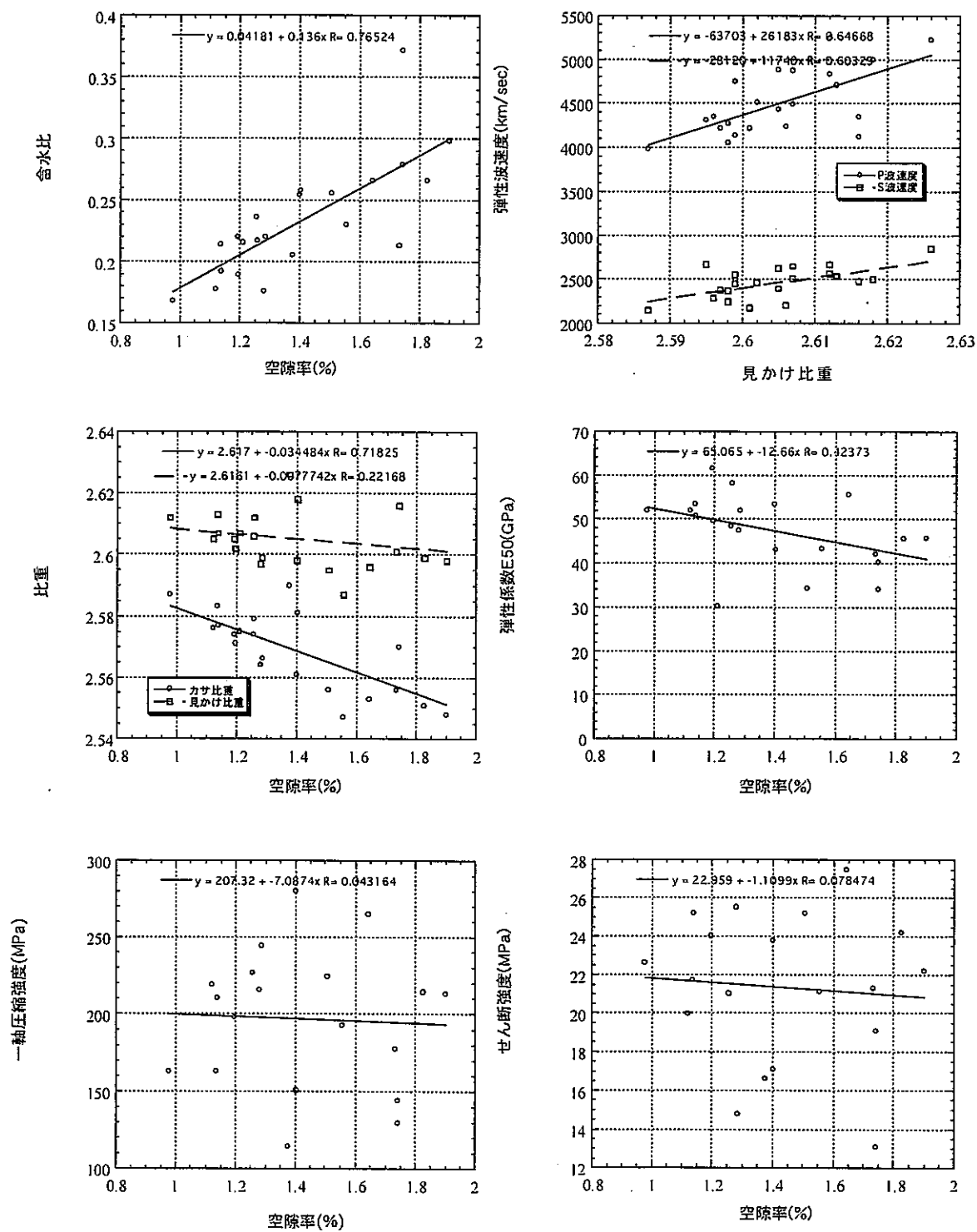


図 6.1.8 各物性値間の相関性の検討結果 (1)

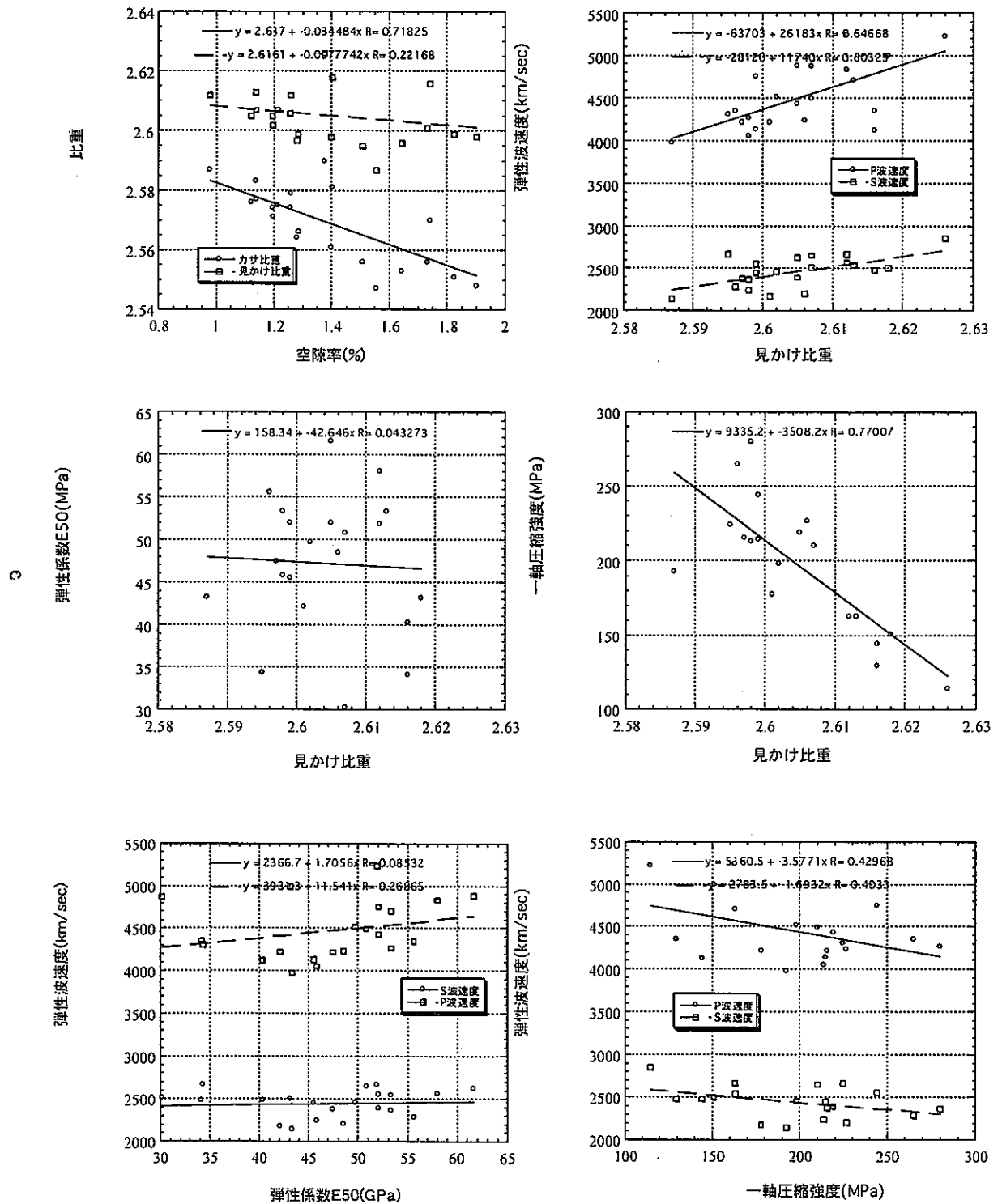


図 6.1.9 各物性値間の相関性の検討結果 (2)

6.2 初期応力測定結果

1)MIU-1 号孔における測定結果⁷⁾

本孔では、AE 法による応力測定を実施した。また、測定に際し、DRA 法による応力値の同定も試みている。図 6.2.1 に AE 法及び DRA 法から算定された深度方向の応力分布を示す。AE 法による測定は、カイザー効果の時間依存性¹⁰⁾を考慮し、コア採取後 2～3 日以内に測定を終了するよう配慮した。

AE 法の結果では、深度 590m、896m、990m の地点で、応力値が推定土被り圧の 1/2～1/5 に評価された。土被り圧より小さく評価された 3 深度においては、試料採取深度前後に亀裂が多く存在するとともに、亀裂面の軟質化が認められたこと、さらに AN-1 号孔の応力測定結果において応力環境の不連続が生じる位置や特異な応力値を示した深度に近いこと等から、地殻変動等による局所的な応力変化があった可能性が考えられる。

一方、DRA 法による応力値の算定では、5 回のくり返し载荷を行い、1～5 回目の繰返し時の応力～ひずみ曲線の組み合わせを用いて、差ひずみを算出した。しかし、多くの場合、初期応力が評価可能な上に凸の曲線が得られなかったことや、差ひずみの分布に非常にばらつきが多かったことから、評価された応力値は信頼性が高いとは言えない。この要因については現状では把握できていない。

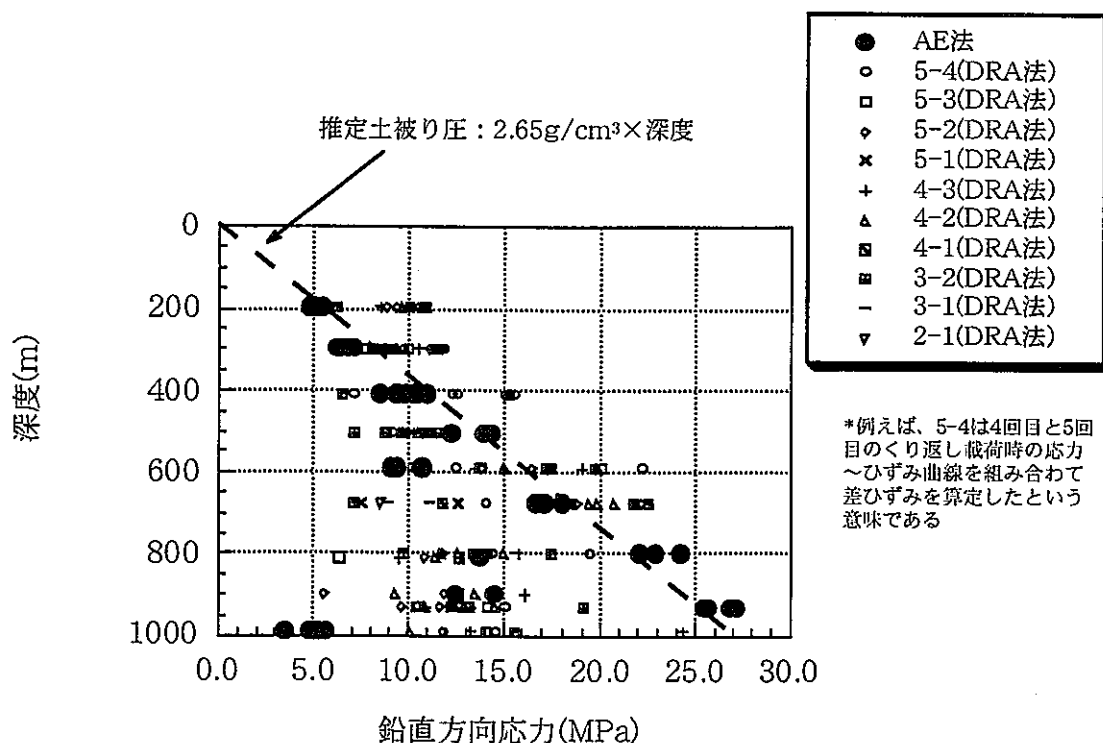


図 6.2.1 AE 法及び DRA 法により算定された鉛直方向の初期応力 (MIU-1 号孔)

さらに、AE 法については、土岐花崗岩を用いてカイザー効果の時間依存性を調べ、本測定から得られた応力値が十分な信頼性を有することを確認している¹¹⁾。

以上の検討結果から AE 法の結果は信頼性が高いと判断できる。また、応力値が低く評価された 3 深度のデータを除いた鉛直応力と深度との関係は、 $\sigma_v = 0.027H$ の関係となった。これは、推定される土被り圧の深度勾配とほぼ等しい。

2) AN-1 号孔における測定結果⁶⁾

図 6.2.2 に水圧破碎法の結果から算定された最大・最小主応力値の深度分布を、図 6.2.3 に最大主応力方向の深度変化をそれぞれ示す。ここでは、理論的な仮定を満たす縦亀裂が造成された測定結果のみを示している。また、AN-1 号孔のような深度が深い試錐孔での測定結果は、岩盤中の間隙水圧を考慮するか否かで算定される最大主応力値が大きく異なるため、図 6.2.2 には両者の値(σ_{Hmax} , σ_{Hmin})を示している。図 6.2.3 に示される誤差範囲は、造成された縦亀裂を最小二乗法により直線近似した際に得られる誤差範囲を示す。

図 6.2.2 より、AN-1 号孔周辺の岩盤の応力状態は、応力的には深度 0~300, 300~700m, 700~1000m の 3 つのエリアに大きく区分されると考えられる。すなわち、深度 0~300m の範囲では、応力状態が $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ となるいわゆる逆断層型の応力状態であり、深度 300~700m の範囲では応力状態が $\sigma_H > \sigma_h \approx \sigma_v$ 、深度 700m 以深では、 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ の横ずれ断層型となっている。また、図 6.2.3 を見ると、最大主応力方向は、深度 300m までは NS 方向であるが、それ以深は NW 方向へと変化している。

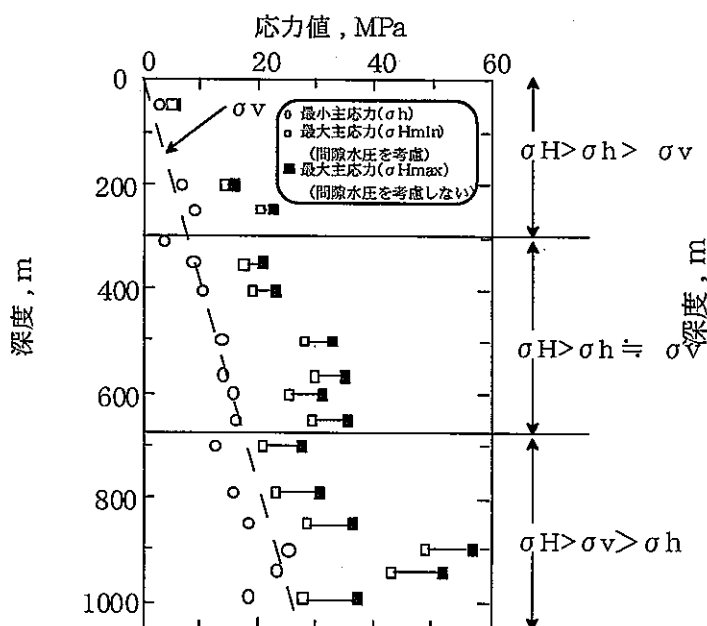


図 6.2.2 深度方向の水平面内応力分布

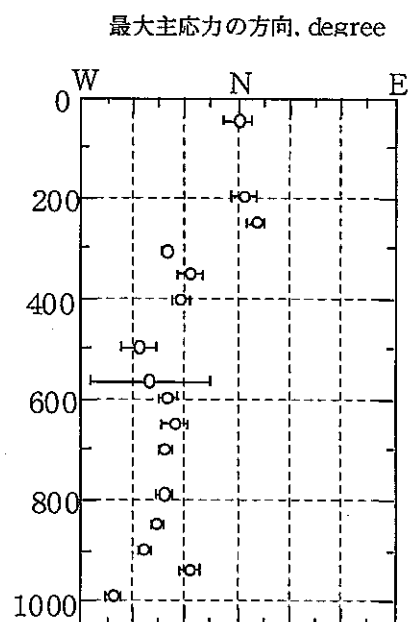


図 6.2.3 深度別の最大主応力方向

AN-1 号孔は深度 1000m まで掘削した試錐孔であるため、深部では孔周辺にかなり大きな応力集中が生じていると考えられる。このため、上記測定結果に基づき、ボアホールブレイクアウトの発生可能性について検討した。ボアホールブレイクアウトの発生する応力条件は、以下の式であらわされる。

$$S_H \geq \frac{1}{3}(C + S_h + 2P_0) : S_H \text{ (最大主応力方向) にボアホールブレイクアウトが発生する条件}$$

$$S_h \geq \frac{1}{3}(C + S_H + 2P_0) : \text{孔全周に渡ってボアホールブレイクアウトが発生する条件}$$

ここで、 C は岩石の一軸圧縮強度(=150MPa)、 S_h 及び S_H は水平面内の最小及び最大主応力、 P_0 は孔内の水圧である。上の式は、最小主応力方向にボアホールブレイクアウトが発生する条件を示しており、下の式は試錐孔壁全面にボアホールブレイクアウトが発生する条件を表す。

上記の条件式から導かれるボアホールブレイクアウトの発生する応力条件を図示したものが図 6.2.4 である。同図から、現在の AN-1 号孔の応力状態において深度 1000m までの範囲でボアホールブレイクアウトが発生する可能性はほとんどないことがわかる。

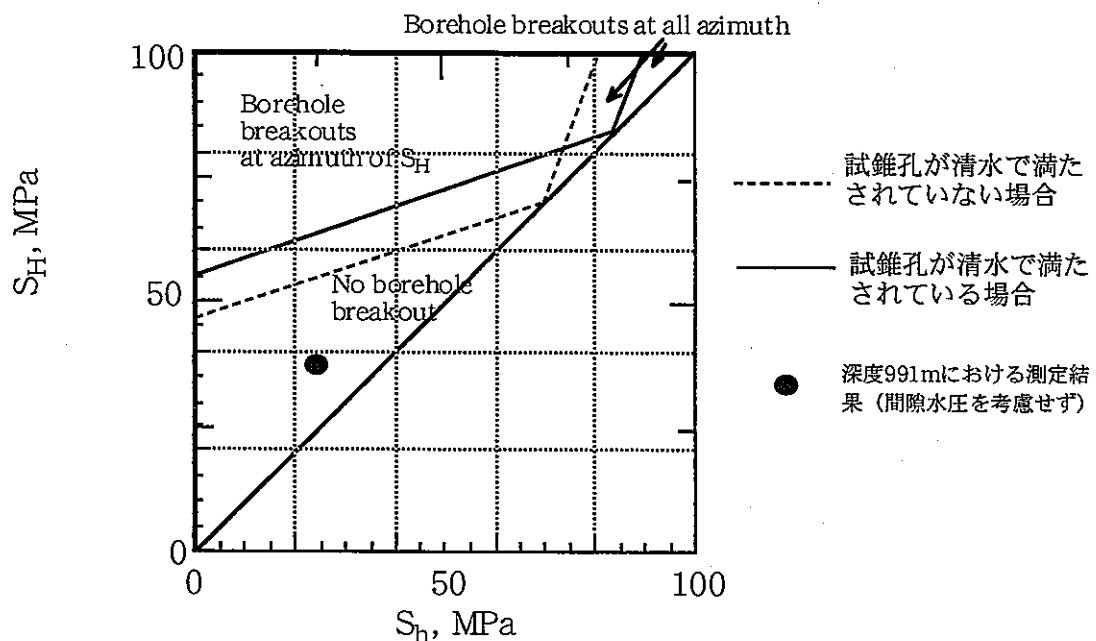


図 6.2.4 ボアホールブレイクアウトの発生する応力条件

図 6.2.5 は、上記の式と以下の式を連立させて解くことにより、ボアホールブレイクアウトが発生する深度と一軸圧縮強度との関係を示したものである。

$$\frac{(S_1 - P_0)}{(S_3 - P_0)} = \left[(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu^2 \right] \quad \psi = \frac{(S_2 - S_3)}{(S_1 - S_3)}$$

ここで、左式はある応力状態において断層がすべる条件を規定した式であり、右式は中間主応力の影響を考慮する際に導入するパラメータである。ここでは、AN-1 号孔の深度 700m 以深で見られる横ずれ断層型の応力環境を想定し、 $S_1 = \sigma_{II}$ 、 $S_2 = \sigma_{III}$ 、 $S_3 = \sigma_{I}$ とし、断層の摩擦係数 μ は 0.8 を仮定した。また、測定結果から ψ の値はおよそ 0.35 程度と見積もられた。

深度 700m 以深からの横ずれ断層型の応力環境においては、AN-1 号孔の深度 1000m 付近から採取した岩石の一軸圧縮強度（約 150MPa）を目安とした場合、ボアホールブレイクアウトの発生深度は 1500m 程度となる。この結果からも、深度 1000m 程度でボアホールブレイクアウトが起こる可能性は非常に低いと考えられる。

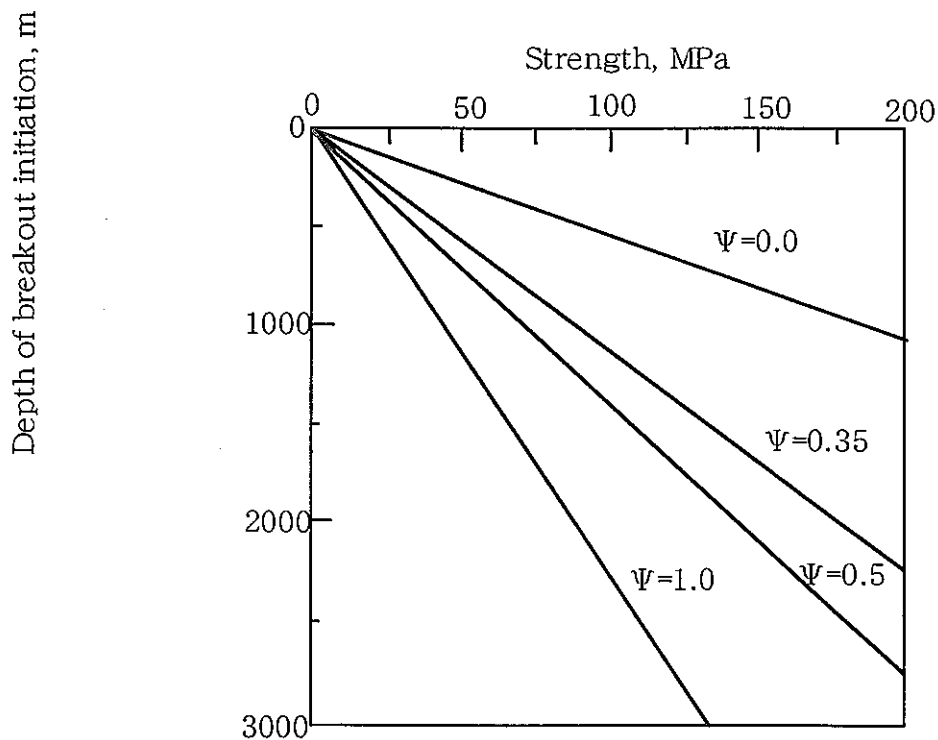


図 6.2.5 ボアホールブレイクアウトの発生する深度と岩石の一軸圧縮強度との関係

7. 考察

MIU-1 号孔及び AN-1 号孔で得られた室内力学試験結果及び応力測定結果を、以下の観点から考察する。

7.1 釜石鉱山における力学特性調査結果との比較

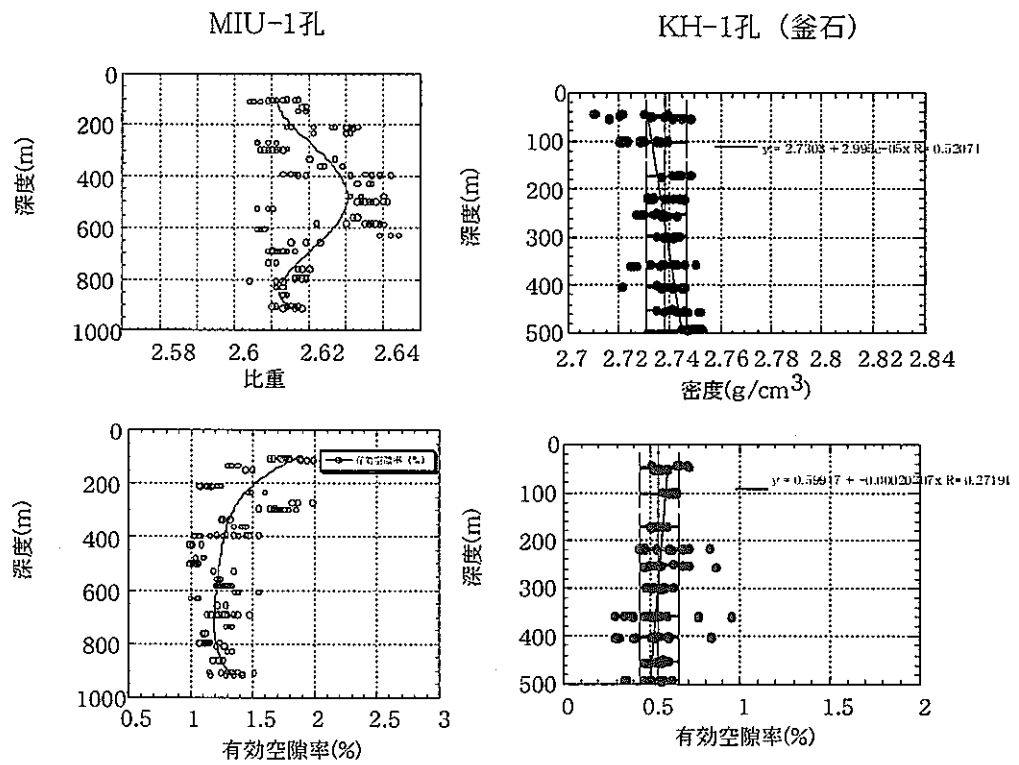
1) 岩石の力学特性

図 7.1 に釜石鉱山 550m レベル坑道より掘削した KH-1 孔（鉛直下向き孔、深度 500m）の室内力学試験結果¹²⁾と MIU-1 号孔における室内試験結果との比較結果を示す。

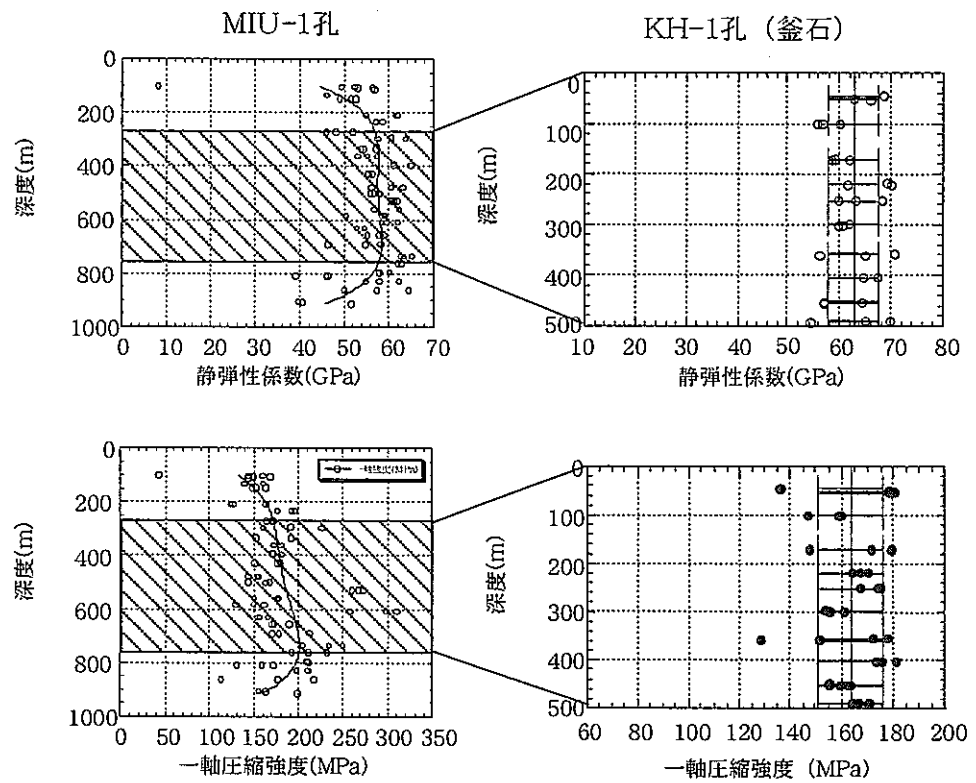
各物性値の分布の傾向は、大きく異なる。KH-1 孔は釜石鉱山内の海拔 550m レベルに位置する坑道（土被り約 230m 地点）より掘削されているため、地表～深度 230m までの測定結果はないが、それ以深の変化についても KH-1 孔は深度に応じて大きく変化するような傾向は見られていないのに比べ、AN-1 号孔及び MIU-1 号孔では明らかに深度に応じて物性値の変化の傾向が異なる。

岩石の物理的な物性値については、栗橋花崗閃緑岩と比較すると、単位体積重量が小さく有効空隙率が多い。得に、有効空隙率は栗橋花崗閃緑岩の平均値の 2 倍程度の値を示す。また、弾性波速度についても、土岐花崗岩の方が若干小さくなる傾向を示す。

土岐花崗岩の力学的な物性値は、地表～深度 1000m までの平均値で表すと、MIU-1 号孔の結果では、弾性係数 (E_{50}) が $56.0 \pm 5.9 \text{ GPa}$ で一軸圧縮強度が $180.1 \pm 38.3 \text{ MPa}$ 、AN-1 号孔の結果では弾性係数 (E_{50}) が $47.3 \pm 8.1 \text{ GPa}$ で一軸圧縮強度が $197.2 \pm 44.7 \text{ MPa}$ となる。これらの値は、栗橋花崗閃緑岩の平均的な弾性係数や一軸圧縮強度と比べ、弾性係数で 10~20% 程度小さく一軸圧縮強度は逆に大きい。しかし、力学物性値の分布が深度方向に一様でないことを考慮すると、安全側の評価として、一軸圧縮強度は栗橋花崗閃緑岩とほぼ同程度と判断される。また、同様の理由により、圧裂強度、粘着力及び内部摩擦角の値は、栗橋花崗閃緑岩とほぼ同等と判断される。



a)岩石の物理的特性の比較



b)岩石の力学的特性の比較

図 7.1 栗橋花崗閃緑岩と土岐花崗岩の岩石物性値の比較(MIU-1 号孔、KH-1 孔)

2) 岩体中の初期応力状態

図 7.2 は、AN-1 号孔及び KH-1 孔で実施した水圧破碎法による初期応力測定結果¹²⁾の比較を示したものである。550m レベル坑道は、地表から深度 260m に位置しているため、比較の部分は、地表からの深度を合わせた形で表示している。

測定された応力値は、地形条件は大きく異なるものの、地表からの同程度の深度においてほぼ同程度の値を示している。また、最大と最小主応力の比に関しても、1.5～2 倍程度であり、これらの値も釜石鉱山での測定結果とほぼ同等である。主応力方向に関しては、KH-1 孔の調査では深度によらずほぼ南北方向であった。しかし、AN-1 号孔では深度 300m 以深から 45 度程度最大主応力方向が変化している。

1),2)の検討結果から、現状では土岐花崗岩体の力学特性及び応力状態はほぼ釜石鉱山の原位置試験場の環境とほぼ同等であると判断される。逆にいえば、釜石鉱山で実施した掘削影響試験等で観察された現象（小規模な山はね等や応力集中による破壊現象）は超深地層研究所でも起こりうる可能性が高いと判断される。

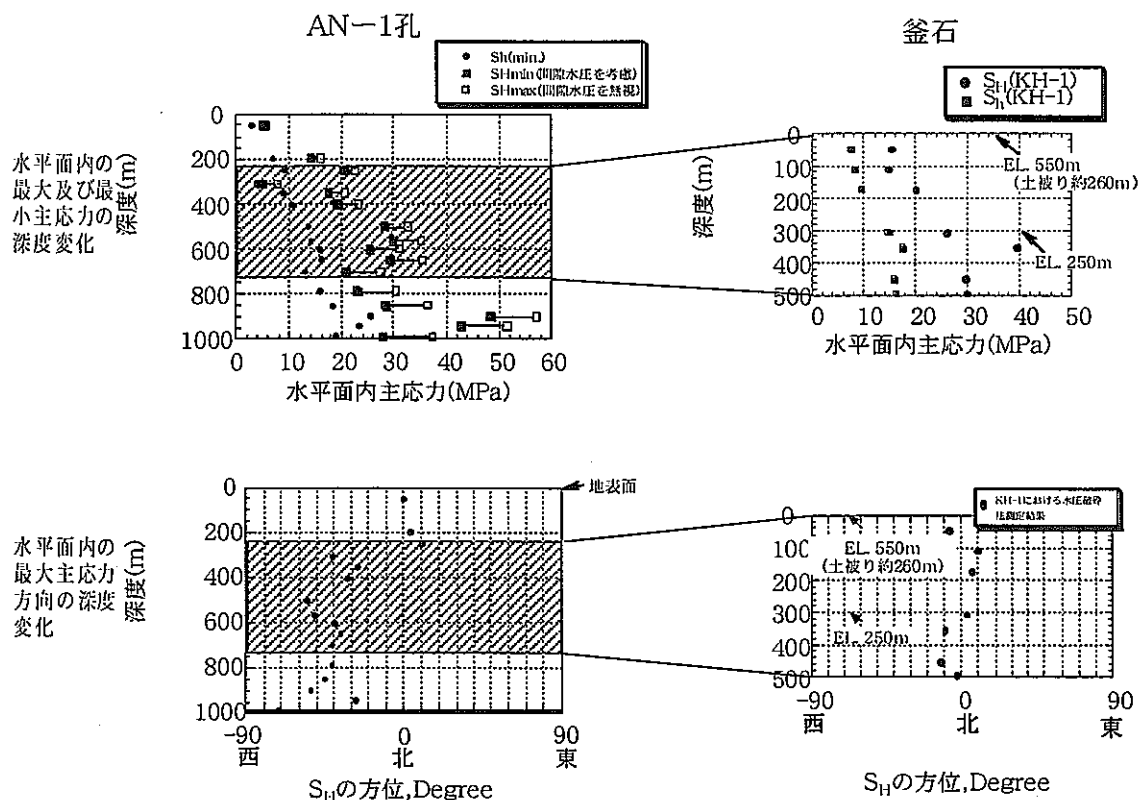


図 7.2 釜石鉱山及び正馬様洞地区における初期応力測定結果の比較

(AN-1 号孔及び KH-1 孔)

7.2 広域的な応力場との比較

図 7.3 に AN-1 号孔で得られた水平面内主応力方向と月吉断層の方向ならびに測地学的に得られた正馬様用地周辺の最大圧縮方向¹³⁾を示す。

この比較より、300m 以深での最大主応力の方向は、地質的に推定される月吉断層の方向とほぼ直交する方向にあたる。また、応力状態については、深度 300m より浅い部分では逆断層型になっており、これは東濃鉱山にて実施している深度 200m までの応力測定結果と調和的である。これらの結果は、月吉断層が逆断層であることと矛盾しない。

一方、AN-1 号孔の深度 300m 以深の主応力方向は、測地学的に得られる広域的な最大主ひずみ方向とほぼ一致していることから、広域的な応力環境をある程度反映したものと考えることができる。深度 300m 付近における主応力方向の回転の理由は現状では明らかでないが、AN-1 号孔の深度 300m までは割れ目の頻度がそれ以深に比べ多いことから、深度 300m までは地表面（自由面）の存在や割れ目の影響によるマスとしての岩盤の剛性劣化により、ある方向の応力が解放され現状の応力場が形成された可能性が考えられる。

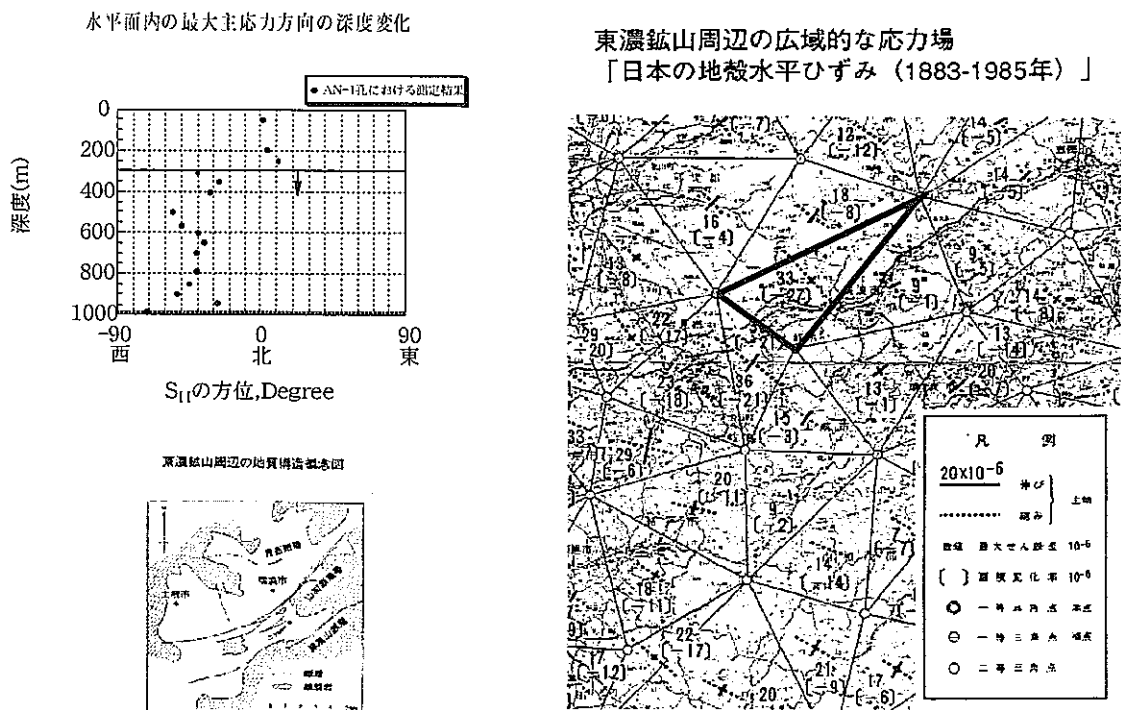


図 7.3 水圧破碎法で得られた最大主応力方向の深度変化と正馬様洞を含む広域的な応力場との比較

7.3 地質構造と岩盤物性値及び応力状態との関係について

図 7.4 に AN-1 号孔及び MIU-1 号孔において実施した BTV 観察結果に基づく割れ目調査結果を示す。MIU-1 号孔の結果では、深度 300m を境に割れ目の卓越方向が明瞭に変化していることが読み取れる。一方、AN-1 号孔における割れ目分布は、MIU-1 号孔ほどの明瞭な変化はあらわれていない。

割れ目の頻度分布を見ると、AN-1 号孔、MIU-1 号孔とも、割れ目頻度の増減傾向の違いから、深度 0~300m、深度 300~800m、深度 800m~の 3つの領域に分割できる。また、深度 300m 程度までは、MIU-1 号孔と AN-1 号孔の割れ目頻度差が相対的に小さいが、それ以深では両孔の間に 2 倍以上の大きな差が生じている。この結果は、先に示した岩石物性値の深度方向の変化傾向や AN-1 号孔における応力測定結果で得られた 3つの応力環境の異なる領域とほぼ対応している。

これらの結果から土岐花崗岩中の割れ目頻度分布の違いや応力状態及び岩石物性値の間には何らかの関連性があると判断できるが、現時点では明確な解釈はない。

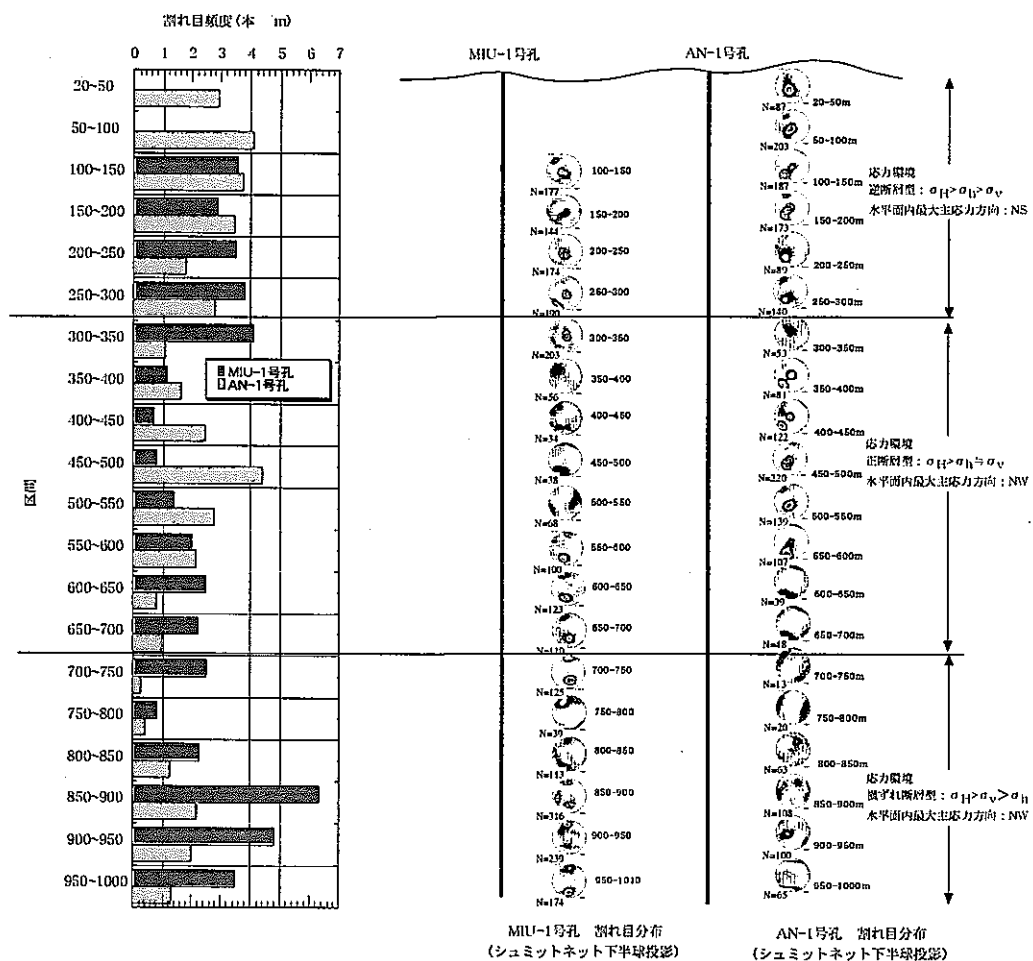


図 7.4 AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における割れ目調査結果

7.4 坑道掘削時に生じる現象について

図 7.5 は、カナダ AECL が地下研究施設(URL)で実施した Mine-By experiment と呼ばれる掘削影響試験で得られた知見に基づく、坑道掘削時に応力集中により生じるダメージの有無の概略的な評価結果である。図中のダメージインデックスと呼ばれるパラメータは、坑道掘削時の坑壁の接線応力と一軸圧縮強度で定義されるパラメータ¹⁾であり、次式であらわされる。

$$D_i = \sigma_{\theta\theta} / \sigma_c$$

ここで、 $\sigma_{\theta\theta}$ ：坑道壁面接線方向の応力成分 $=3\sigma_H - \sigma_h - P_0$ （間隙水圧）

σ_c ：一軸圧縮強度（=150MPa）

Mine-by experiment はほとんど割れ目のない岩盤中に坑道を掘削して行われ、坑道掘削時に応力集中による坑道壁面の破壊現象が観察された。Martin らは、観察結果と応力解析結果より求められたダメージインデックスとの関係性を評価している。土岐花崗岩体は、亀裂性岩盤であり、Mine-by experiment のサイトとは地質的な状況が異なるが、釜石における掘削影響試験の結果から、亀裂性岩盤であっても応力集中による坑道壁面の破壊現象が生じたという結果に基づき第1次の簡便な評価として実施した。

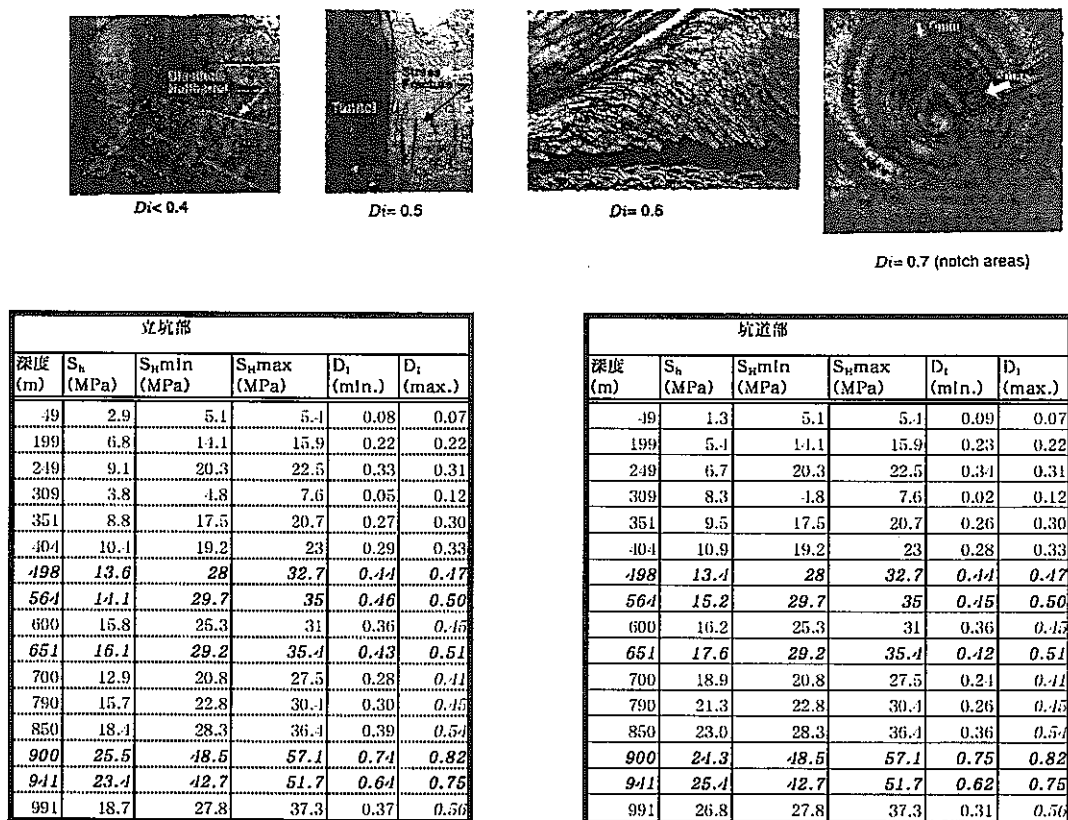


図 7.5 AN-1 及び MIU-1 の測定結果から算定されたダメージインデックス

この検討結果より、深度 500m を越えるとアクセス立坑壁面部で応力集中によるマイナーな破壊が生じる可能性があり、得に深度 900m 前後の高い応力が測定されている地点では坑道形状が変化するほどの破壊が生じる可能性がある。また、鉛直方向が主応力方向となりほぼ被り圧と等しいと仮定した場合は、坑道を水平面内の最小主応力方向に平行に掘削した場合に、やはり深度 500m 以深で坑道壁面にて応力集中による破壊が起こる可能性があるという結果が得られた。

現状では正確な 3 次元主応力方向が不明なため、この評価結果はあくまで参考値程度の意味しかないが、このような現象が起こりうる可能性に関しては留意しておく必要がある。

8.まとめ

AN-1 号孔及び MIU-1 号孔において実施した種々の試験結果より得られた、土岐花崗岩の力学的特性に関する知見をまとめると以下ようになる。

- ・ AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における室内物性試験及び力学試験結果から、土岐花崗岩の各物性値の深度方向の分布は一様ではなく、その分布傾向は、0～300m, 300～700m, 700m 以深で異なることがわかった。
- ・ AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における応力測定結果から、鉛直方向の応力分布は、3 深度を除き土被り圧とほぼ等しく、水平面内の応力分布は、推定土被り圧や測定結果の比較から、0～300m, 300～700m, 700m 以深で異なる可能性があることがわかった。また、最大主応力の方向は、地表～300m の範囲までは NS 方向、それ以深は NW 方向に変化している可能性がある。深度 300m 以深の最大主応力方向は、測地学的な最大圧縮軸の方向とほぼ一致しており、広域応力場をある程度反映したものと考えられる。
- ・ 以上の結果から、正馬様用地の土岐花崗岩の力学特性に関しては、深度 1000m の範囲を対象とした場合、概ね 3 つの力学物性および応力状態の異なるゾーン（深度 300m までの範囲、300～700m、700m 以深）に分けることができる可能性がある。
- ・ 釜石鉱山に分布している栗橋花崗閃緑岩と工学的物性値を比較すると、有効空隙率が 1 % と大きく密度が小さくなっているが、一軸圧縮強度については、栗橋花崗閃緑岩とほぼ同等であった。また、釜石鉱山における応力測定結果と比較すると、深度方向の応力値の変化は釜石鉱山のそれとほぼ同等である。これらの結果から、釜石原位置試験で観察された力学的な現象は、超深地層研究所でも起こりうる可能性が高いと考えられる。
- ・ 既存の研究成果に基づき、坑道掘削に伴う応力集中によるダメージの発生可能性を検討した。その結果、深度 500m 以深で、立坑及び坑道部分に応力集中に伴う岩盤損傷が発生する可能性がある判断される。

9.今後の予定

力学特性調査に関しては、本報告で示した MIU-1,AN-1 号孔における測定結果より月吉断層南側の土岐花崗岩における力学物性と初期応力状態をある程度把握することができた。

今後は、断層と交差する試錐孔である MIU-2 孔において室内力学試験および初期応力測定を実施する予定である。

10.参考文献

- 1) Sugihara, K. et.al. (1999) : In-situ experiments on Rock Stress Condition and Excavation Disturbance in JNC's Geoscientific Research Program in Japan , International workshop on the rock mechanics of nuclear waste repositories, Colorado, USA
- 2) 小林公一、小出馨(1995) : リニアメントの分布特性に基づく地質構造区分、日本応用地質学会中部支部研究発表会講演予稿集, pp.13~16
- 3) 吉田英一、大澤英昭、柳澤孝一、山川稔(1991): 深部花崗岩中の割れ目解析 -岐阜県東濃地域に分布する花崗岩類を例にして-, 応用地質学会誌 Vol.30 No.3 pp.11~22
- 4) 土質工学会編(1989): 岩の調査と試験, pp.285~292
- 5) 核燃料サイクル開発機構(1998): MIU-1 号孔のコアを用いた室内試験, JNC TJ 7440 99-018
- 6) 核燃料サイクル開発機構(1998): AN-1 号孔における水圧破碎法による初期応力測定, JNC TJ7420 99-013
- 7) 核燃料サイクル開発機構(1998): MIU-1 号孔のコアを用いた地圧測定, JNC TJ 7440 98-003
- 8) Yin, J. , Cornet, F.H.(1995): Integrating hydraulic data and focal plane solution for regional stress determination, Proc. International Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth pp.13-18, Tokyo
- 9) Brady, M. , Zoback, M.D. (1993) : Compressive and tensile failure of boreholes arbitrarily-included to principal stress axis: application to the KTB borehole , Germany, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., pp.1035-1038
- 10) 小島隆、松本浩二(1994): 低応力レベルにおける岩石のカイザー効果に関する基礎的研究, 資源と素材 Vol.110 pp.435~440
- 11) 核燃料サイクル開発機構(1998): 土岐花崗岩を対象とした AE 法のカイザー効果時間依存性の調査, JNC TJ7420 99-012

- 12) 核燃料サイクル開発機構(1998):釜石原位置試験総括報告書, JNC TN7410 99-001
- 13) 国土地理院編(1990):日本の地殻水平ひずみ
- 14) C.D. Martin et.al.(1996):Designing an effective excavation damaged zone cut-off in high stress environment, Proceeding of EDZ workshop in international conference on deep geological disposal of radioactive waste pp.155~164 , Manitoba, Canada.