

JNC TN5400 2005-012

分置

研究所設置地区選定のための
HDB-1,2 孔における岩盤力学的調査
(研究報告書)

平成 17 年 8 月

核燃料サイクル開発機構
幌延深地層研究センター 深地層研究グループ

本資料の全部または一部を複写・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

©核燃料サイクル開発機構
Japan Nuclear Cycle Development Institute
2005

研究所設置地区選定のための HDB-1, 2 孔における岩盤力学的調査

丹生屋 純夫*、松井 裕哉*

要旨

本調査は、北海道天塩郡幌延町に分布する第三紀珪質岩を対象とした深地層研究計画の初期情報として平成 13 年度に実施したものである。主な目的を以下に示す。

- ①深度 700m 程度までの範囲での地質構造及び岩盤物性データの取得
- ②幌延町内に研究対象となる地層が、研究可能な厚さをもって分布することと、対象地層の岩盤中に安全に地下施設が建設できることの概略確認

この深地層研究計画以前の昭和 62 年度に、幌延町において孔長 1,355m のボーリング孔 (D-1 孔) において各種地質調査を実施している。その中の岩盤力学関連の調査結果は、本報告書を作成する上で幌延深地層研究計画の初期段階の情報として活用した重要なデータであり、参考データとして HDB-1, 2 孔の結果と併せて示すものである。

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、両孔のコアを用いた物理試験と力学試験、及び AE 法による応力測定、熱特性試験などを実施した。原位置試験としては、水圧破碎法による初期応力測定を HDB-1, 2 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) 参考データである D-1 孔における室内物理試験及び力学試験結果から、ボーリング孔周辺の岩盤には深度 400m を境に 2 つの異なる物性（空隙率、弾性係数など）を有するゾーンが存在することが推定された。そしてこれらは地質構造と、ほぼ対応していることがわかった（更別層、勇知層）。
- 2) HDB-1 孔では深度 320m、420m を境に、HDB-2 孔では 40m、270m を境にそれぞれ 3 つの異なる物性を有するゾーンが存在することが推定された（声間層、遷移帯（稚内層上部）、稚内層）。
- 3) 幌延町内に分布する堆積岩（勇知層、更別層、声間層、稚内層）の物理・力学物性は国内に分布する新第三紀堆積岩に比べ特殊なものではないと考えられるが、吸水率と有効空隙率は国内の堆積岩に比べ大きくなっている。
- 4) HDB-1, 2 孔の応力測定結果から、水平面内最大主応力と最小主応力の比は 1.5 倍程度であり、ほぼ同様の結果となった。最大主応力方向は HDB-1 孔では深度によらずほぼ東西方向となったが、HDB-2 孔では深度方向とともにボアホールブレイクアウトの位置が変化しており、深度によって最大主応力方向が異なることが示唆された。

*核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター 深地層研究グループ

**The investigation on Rock mechanics in HDB-1 and HDB-2 boreholes
in order to select the URL area**

Sumio Niunoya*, Hiroya Matsui*

Abstract

The investigations in HDB-1, HDB-2 have been carried out in 2001 as a part of the surface-based investigation phase in Horonobe URL (Underground Research Laboratory) project. The objectives are : ①to obtain the rock mechanical data in order to confirm the safety construction of the URL until 1,000m deep ②to confirm the existence of sedimentary rock with enough thickness to be studies. Before starting of this project, other investigations were already carried out in D-1 borehole in Horonobe. The results of rock mechanical investigations in D-1 are important data for the early of this project. So that, we show the results of investigations in D-1 as the referential data for these in HDB-1, HDB-2.

The rock mechanical investigations consist of laboratory tests and in-situ stress measurement. As the laboratory tests, we tried to carry out rock physical and mechanical tests and AE measurement. And as the in-situ stress measurement, we tried to carry out Hydraulic Fracturing test.

The results of the investigations are summarized as follows :

- 1) According to the results of laboratory tests in D-1 borehole, two zones which have different mechanical properties were found. The boundary was at about 400m, and these zones correspond with Yuchi, Sarabetsu formation respectively.
- 2) In HDB-1, HDB-2 boreholes which were drilled in Koetoi, Wakkanai formations the area can be divided into three zones which has different mechanical properties. The boundaries are at about 320m, 420m in HDB-1, and are at about 40m, 270m in HDB-2.
- 3) The obtained the rock mechanical properties in Horonobe are not specific compared to that of sedimentary rock with same age in Japan.
- 4) The results of stress measurement with hydraulic fracturing test showed that the ratio between maximum stress and minimum stress is approximately 1.5 in both boreholes. The directions of maximum stresses were almost E-W with no dependence on the depth in HDB-1. In HDB-2, the direction of maximum stress possibly changes in each depth.

*Japan Nuclear Cycle development institute(JNC) Horonobe Underground Research Center Geotechnical Science and Engineering Group

目次

1. はじめに	1
2. 調査概要	2
2.1 調査の目的	2
2.2 調査の内容	4
3. 調査結果	6
3.1 室内試験	6
3.1.1 物理・力学試験	6
3.1.2 AE 法による応力測定	21
3.1.3 熱特性試験	23
3.2 原位置試験	26
3.2.1 水圧破碎法による応力測定	26
3.2.2 インプレッションパッカーによる ボアホールブレイクアウトの調査	35
3.2.3 EMI 検層の結果を用いた ボアホールブレイクアウトの調査	37
3.2.4 試験結果まとめ	42
4. 考察	43
4.1 調査対象岩盤の力学的物性分布	43
4.2 HDB-1, 2 孔近傍に分布する新第三紀堆積岩の特徴	46
4.3 HDB-1, 2 孔近傍の応力場について	54
5. まとめ	57
6. 今後の予定	57
7. 参考文献	58

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構は、平成 12 年度から北海道天塩郡幌延町において幌延深地層研究計画を進めている。本計画は、岐阜県瑞浪市において結晶質岩を対象に実施中の超深地層研究所計画と同様のプロジェクトであり、下記の 3 段階を経て進められることとなっている。

- ・ 地上からの調査研究段階（第 1 段階）
- ・ 坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第 2 段階）
- ・ 地下施設での調査研究段階（第 3 段階）

この第 1 段階では、幌延町内において文献などの既存情報、試錐調査、空中物理探査及び地上物理探査等の調査を行い地層や断層、地層の透水性、地下水の水質、溶存ガス量、地層の力学的強度に関するデータの確認や社会的条件も併せて主な調査研究の集中領域（以下、研究所設置地区と呼ぶ）を選定する。さらに上記をはじめとする詳細な調査を行い、研究所設置地区を対象とした地質構造モデルの構築及び研究所建設に伴う地質環境の変化予測を行なうこととしている。

幌延町内において地上からの調査を実施していく主な領域（以下、研究所設置地区と呼ぶ）を選定した後、その地区においてボーリング等による詳細な調査を行い、研究所設置地区を対象とした地質構造モデルの構築及び研究所建設に伴う地質環境変化の予測を行うこととしている。

このうち岩盤力学関連の調査は、幌延の堆積岩を対象とした場合の地下施設建設の可能性及び地下施設建設に伴う掘削影響の予測を主たる目的として実施してきた。本報告では、平成 13 年度に掘削した HDB-1,2 孔の力学的調査結果を整理して述べるとともに、これらの結果から類推される幌延町に分布する堆積岩の特徴を示す。

なお、この深地層研究計画が開始される以前の昭和 62 年度に、幌延町において孔長 1,355m のボーリング孔（D-1 孔）において各種地質調査が実施されている。その中の岩盤力学関連の調査結果は、本報告書を作成する上で幌延深地層研究計画の初期段階の情報として重要なデータであり、活用した参考データとして HDB-1,2 孔の結果と併せて整理して示すものである。

2. 調査概要

2.1 調査の目的

研究所設置地区については、研究の対象となる新第三紀の堆積岩層が十分な厚さをもって存在すること、地下施設を安全に建設できることが基本的な要件となる²⁾。研究所設置地区の選定に当たっては、まず文献などの既存情報に基づき、新第三紀の主に泥岩からなる増幌層（上部）、稚内層及び声問層を選定の対象地層とし、これらの地層が500m程度の深さに十分な厚さをもって分布すると推定される研究所設置対象区域（A区域、B1区域、B2区域、C区域）を抽出した（図 2.1-1 参照）。これらの区域から研究所設置地区を選定するために、主に以下の項目について調査を実施した。

- ・ 空中物理探査（磁気、電磁気および自然放射能）
- ・ 地上物理探査
- ・ 地質調査
- ・ ボーリング調査

実施した2本（HDB-1,2 孔）のボーリング調査は、幌延町における地質層序に関するデータや地下水に関するデータ、地層の力学的強度やガスに関するデータを取得するために実施したものである。本報告は、上記項目のうち力学的特性を概略的に把握するために、主に得られたデータを整理して述べるものである。また、1章において記述した通り、昭和62年度に幌延町内で実施したD-1 孔におけるボーリング調査結果をHDB-1,2 孔の調査計画を検討する上で参考に行っているため、併せてそれらの結果も示す。

HDB-1,2 孔はいずれも掘削深度720mで、幌延町内に研究対象となる地層が十分な厚さをもって分布することと、対象地層の岩盤中に安全に地下施設が建設できることの概略確認、最終的な研究所用地の選定に資するデータの取得を主目的としており、HDB-1 孔はB1 区域にHDB-2 孔はB2 区域において鉛直に掘削されたボーリング孔である。また参考であるD-1 孔は、掘削深度1,355mの鉛直ボーリング孔であり、このボーリング調査時にも深度1,000m程度までの地質構造および岩盤物性データを取得した。

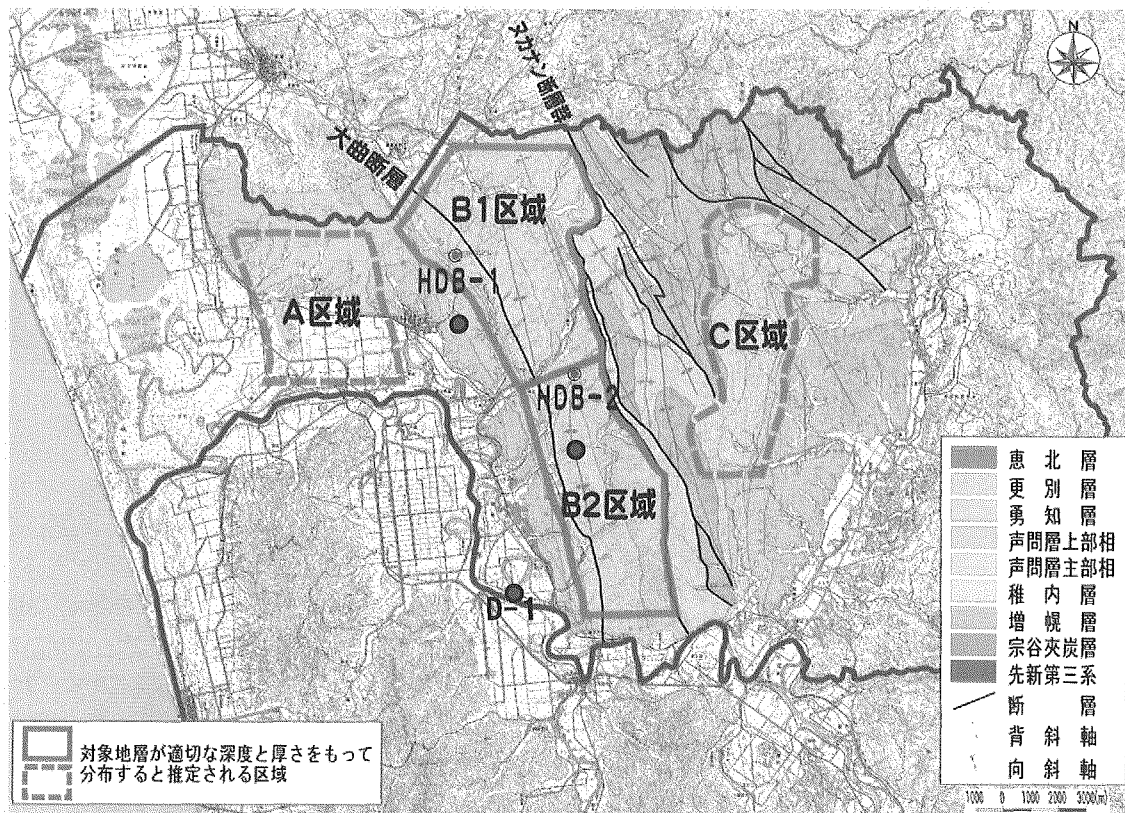


図 2.1-1 研究所設置対象区域とボーリング孔位置

2.2 調査の内容

D-1 孔における調査結果より、孔を中心とする周辺の地層は、深度 1,000m までの範囲で堆積岩に区分されると考えられた。そのため、岩盤としても原位置での亀裂が少なく、連続体に近い特徴を持つとの想定に基づき、HDB-1,2 孔では室内試験による物性試験を中心とした。両孔において実施した調査項目を表 2.2-1 に、各孔での室内試験の項目、数量及び仕様を表 2.2-2、2.2-3 に示す。オールコアリングによって削孔した HDB-1,2 孔において、全長の中から深度約 50m ピッチでコアを選定し試験を行った。

HDB-1,2 孔における初期応力測定については、一般的に鉛直方向が主応力方向の一つであるという仮定が可能であること、深度 700m までの測定が可能な手法が他に無いことから水圧破碎法を用いることとし、また堆積岩であるため掘削した孔が時間経過とともに縮小し、原位置測定が不可能な事態が発生することも想定し、岩石コアを用いた AE 法による初期応力測定も併せて実施することとした。

表 2.2-1 実施試験項目一覧

孔番号	孔長(m)	室内試験				原位置試験
		基本物性試験	力学特性試験	熱特性試験	AE法による初期応力測定	水圧破碎法による初期応力測定
D-1	1,355	○	○			
HDB-1	720	○	○	○	○	○
HDB-2	720	○	○		○	○

基本物性試験：見かけ比重、吸水率、有効空隙率、含水比、単位体積重量
力学特性試験：一軸圧縮、三軸圧縮、圧裂引張、圧密

表 2.2-2 実施試験仕様及び数量 (D-1 孔)

試験項目	数量	試験仕様	備考
物理試験	53	建設省「土木試験基準」に準拠	見かけ比重(自然、乾燥、湿潤)、含水比、飽和度、吸水率、有効空隙率
弾性波速度測定	53	国鉄地質調査標準示方書(第10条)に準拠	Model 5210, SONIC VIEWER, 応用地質製を使用
一軸圧縮試験	106	JIS MO302に準拠 供試体サイズ: 5×10cm 載荷方式: ひずみ制御 載荷速度: 0.1%/min	
圧裂引張試験	53	JIS MO303に準拠	載荷速度0.1mm/min
三軸圧縮試験 (CD試験)	214	JIS MO302に準拠 供試体サイズ: 5×10cm 載荷方式: ひずみ制御 載荷速度: 0.1%/min バックプレッシャー: 0.1～0.3MPa 試験時の最大ひずみ: 15%	圧密圧力及び側圧: 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0MPaから有効土被り圧を考慮し1深度当たり4種類を選択

表 2.2-3 実施試験仕様及び数量 (HDB-1,2 孔) ³⁾

試験項目		数量(1孔当たり)	試験仕様	備考
物理試験	空隙率	17	ISRM指針Vol.1 2章 第1編「含水比、空隙率、密度、吸水性等の試験法の指針」	一軸圧縮試験供試体近傍から採取した不定形試料で実施。
	含水量・含水比			
	密度(湿潤・自然・乾燥状態)			
	単位体積重量	51	ISRM指針Vol.1 2章 第1編「含水比、空隙率、密度、吸水性等の試験法の指針」 寸法: $\phi 50$ or 35 mm $\times$ 高さ100or70mm	キャリパー(ノギス)法。一軸圧縮試験用供試体等で実施。
	スレーキング試験	28	ISRM指針Vol.1 2章 第2編「膨張性、耐スレーキング性指数の試験法の指針」	
	吸水膨張試験	28	ISRM指針Vol.1 2章 第2編「膨張性、耐スレーキング性指数の試験法の指針」 寸法: $\phi 60$ mm $\times$ 高さ20mm	
	膨張圧試験	28		
力学試験	弾性波速度試験	51	ISRM指針Vol.1 3章「岩石の弾性波速度測定法の指針」 寸法: $\phi 50$ or 35 mm $\times$ 高さ100or70mm	一軸圧縮試験用供試体で実施。
	一軸圧縮試験	17シリーズ 51	「JIS MO302 岩石の圧縮強さ試験法」 寸法: $\phi 50$ or 35 mm $\times$ 高さ100or70mm	1シリーズ3供試体 静ポアソン比も測定。
	三軸圧縮試験(CU試験)	7シリーズ 28	特に規格による基準は存在せず 寸法: $\phi 50$ or 35 mm $\times$ 高さ100or70mm	1シリーズ4供試体 拘束圧: 土被り圧相当の静水圧の0.25,0.5,1.0,2.0倍の4種類。飽和に現地水を使用。
	三軸圧縮試験(CD試験)	7シリーズ 28		
	圧裂引張試験	7	「JIS MO303 岩石の引張強さ試験法」 寸法: $\phi 50$ mm $\times$ 高さ100mm	1シリーズ1供試体
熱特性試験	初期応力測定(AE計測)	2シリーズ 16	特に規格による基準は存在せず 寸法: $\phi 30$ mm $\times$ 高さ60mm	鉛直・水平4方向 $\times$ 2供試体 供試体採取後、3日以内に実施。センサーは供試体中央部。含水状態を保持。
	熱伝導率測定	7シリーズ 21	特に規格による基準は存在せず 寸法: $\phi 50$ mm $\times$ 高さ30mm	1シリーズ3供試体 次の条件で実施。飽和(室温、50℃、80℃) 自然(室温、50℃、80℃) 乾燥(室温、50℃、80℃、120℃) 飽和には現地水を使用。
	比熱容量測定	7シリーズ 21	特に規格による基準は存在せず 寸法: $\phi 16$ mm $\times$ 高さ30mm	飽和、自然、乾燥の3状態で実施(連続的に室温 $\sim$ 120℃)。現地水を使用。
その他	熱膨張率測定	7	特に規格による基準は存在せず 寸法: $\phi 20$ mm $\times$ 高さ100mm	乾燥状態で実施(連続的に室温 $\sim$ 120℃)。
	帯磁率測定	7	特に規格による基準は存在せず 寸法: $\phi 25$ mm $\times$ 高さ25mm	測定サイズ: $\phi 25$ mm
	比抵抗測定	21	特に規格による基準は存在せず 寸法: $\phi 50$ mm $\times$ 高さ100mm	飽和、自然、乾燥の3状態で実施。現地水を使用。

3. 調査結果

3.1 室内試験

3.1.1 物理・力学試験^{3), 4)}

HDB-1,2 孔及び D-1 孔における主な物性値の深度分布状況を図 3.1.1-1 に示す。また、得られた各孔の物性値を表 3.1.1-1 に示す。なお、図中には、現時点の地質観察による区分に基づいて各地層を色分けで併せて示している。ここで、D-1 孔では調査直後は深度 886.6m 付近から声間層が現われているとされていたが、現在の地質区分では、更別層、勇知層の 2 層のみが現われていると解釈されている。

比較参考である D-1 孔のデータにおいて、更別層では深度の増大とともに見かけ比重は増大し、有効空隙率は減少する。勇知層の上部では、各パラメータについて深度方向に大きな変動は認められないが、下部では多少の増大傾向を示す。しかし、更別層に比べればその変動幅は小さい。弾性波速度の変化は、更別層にほぼ対応する上層範囲では深度方向にあまり大きな変動は認められないが、勇知層にほぼ対応する下層範囲では深度方向に 1km/sec 程度の変化が生じており、上記物性値の変化とはむしろ逆の傾向となっている。上述の通り、物理物性値に変化が生じる境界、深度約 400m は地質観察による地層区分境界と合致する。

HDB-1 孔は、地質的には浅部に声間層、深部に稚内層が分布しており、稚内層上部に珪藻質泥岩から硬質頁岩に移行する遷移帯が存在する。物理物性値分布では地表から深度 320m 程度までは一様に増大、あるいは減少する傾向を示しているが、そこからの約 100m に存在する遷移帯においては勾配が変わり急激な変化を示す。そして深度 420m 付近より深部の硬質頁岩層（稚内層）では再び緩やかな増大、減少傾向を示している。特に遷移帯では、見かけ比重が深度の増大と共に増大し、有効空隙率は減少している。ただし、全体としての深度方向分布はほぼ連続的に生じており、深度の増大と共にほぼ線形的な物性値の変化が認められる。その変化量は単位体積重量で 4.0kN/m³ 程度、有効空隙率で 20% 程度、含水比・吸水率で約 40% と極めて大きい。弾性波速度についても、これらの物理物性値と同様の変化を示している。

HDB-2 孔は地質観察によって比較的浅部（地表～約 40m）に声間層、以深は稚内層が分布しており、その稚内層中の上部約 220m の範囲に珪藻質泥岩から硬質頁岩への遷移帯が存在していることが分かっている。物理物性値の分布から見ると、深度約 40m から深度約 150m の範囲において、物性値の急激な変化が見られる。全体としては、声

問層を除くと、深度方向の物性値の変化に明瞭な規則性は無いように見える。変化は単位体積重量で 2.0kN/m^3 程度、有効空隙率・含水比および吸水率は数%程度であり、HDB-1 孔の遷移帯に比べると小さい。弾性波速度についても、深度 200m と 600m 付近で最大値を取り、深度 400m 付近で極小値を示す。

図-3.1.1-2 に示す力学物性値は、物理物性値と同様、各地層別に異なる深度変化を表している。D-1 孔の更別層が分布する範囲では、礫岩、砂岩、泥岩及び亜炭が互層となっており、静弾性係数 E_{50} 、一軸圧縮・圧裂引張強度、粘着力は深度方向にほとんど変化がないものの、内部摩擦角は深度と共に急激に増大する。平均的な静弾性係数 E_{50} 、一軸圧縮強度はそれぞれ 100MPa 、 2MPa と非常に小さく、岩石としては脆弱な部類に入る。勇知層が分布する範囲では砂岩によって構成されており、力学特性は、深度 600m 付近を除くと E_{50} 、一軸圧縮・圧裂引張強度、粘着力が深度と共に緩やかに増大する傾向を示しており、弾性波速度にも同様に表れている。内部摩擦角は、更別層における傾向とは逆に深度の増大に伴い減少した後、深度約 $1,000\text{m}$ を境に増大傾向を示している。圧裂引張強度は、一軸圧縮強度のほぼ $1/10$ 規模で一致していることがわかる。

HDB-1 孔は、全体的な傾向として、深度 400m 付近を除くと、深度の増大に伴い静弾性係数や一軸圧縮強度が増大している。深度 400m 付近では、静弾性係数および一軸圧縮強度が全体の傾向から外れ極端に大きくなっている。この範囲は物理物性が急激に増大している範囲に当たる。各地層別に見ると、静弾性係数および一軸圧縮強度について、深度方向に大きな変化が生じているのは珪藻質泥岩から硬質頁岩へ移行する遷移帯であり、その変化量は珪藻質泥岩層と比較すると静弾性係数で 8 倍、一軸圧縮強度で 10 倍程度の増大を示す。遷移帯の上下についてはそれほど顕著な変化は見られない。静ポアソン比については、珪藻質泥岩層および遷移帯では深度の増大とともに減少していくが硬質頁岩層において再び増大する。なお、静弾性係数 E_{50} の深度グラフ中、●印は供試体に貼り付けたひずみゲージによる測定による値、○印は外部の試験装置に取り付けた変位計より求めたものである。これらの値を比較すると、岩種や深度によらずひずみゲージから求められる値は外部変位計による値より 1.5 倍程度大きな値を示した。

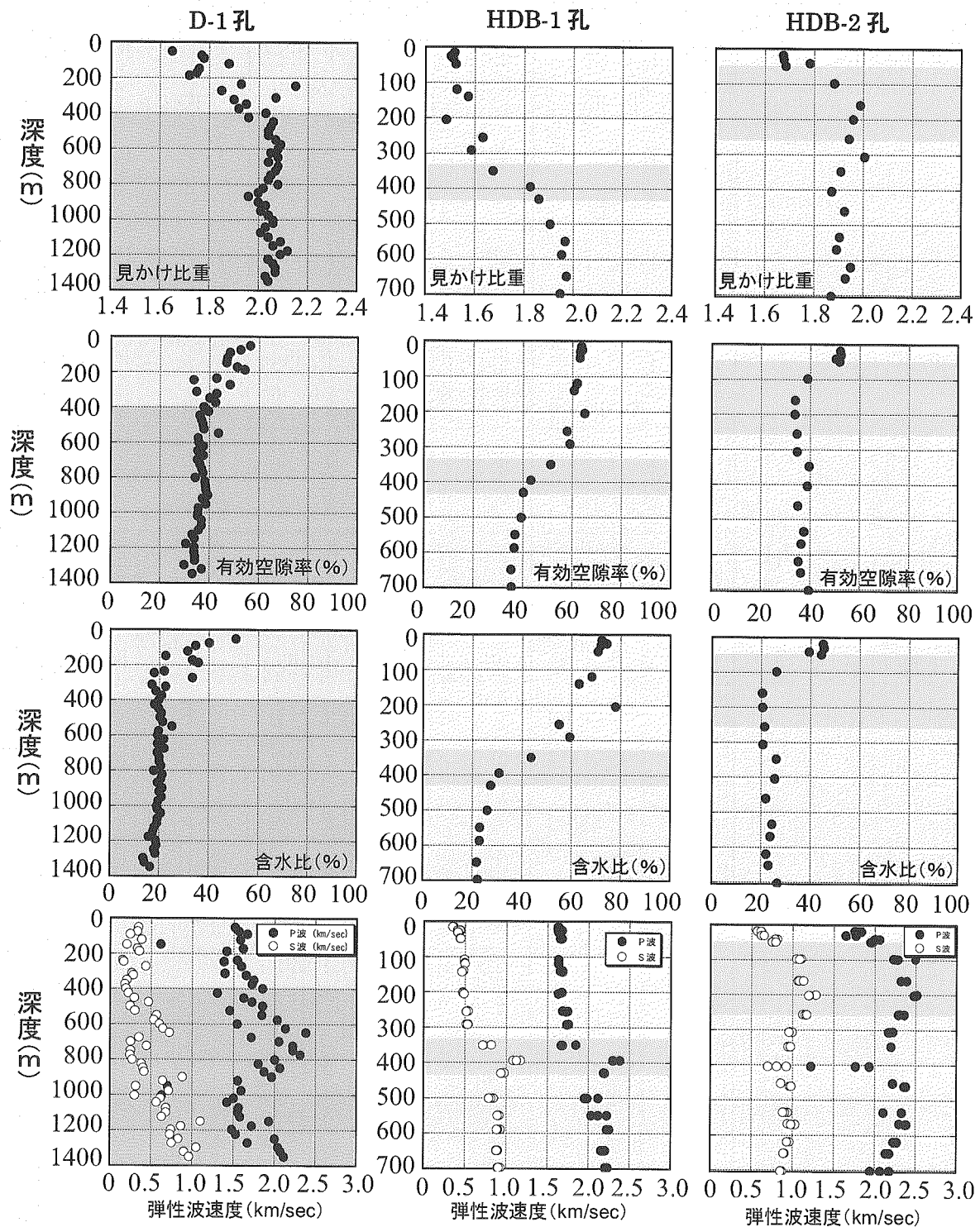
HDB-2 孔の力学特性は、全体的な傾向として、HDB-1 孔のような深度増大とともに力学物性値が増大するような傾向は認められず、HDB-1 孔とは逆に深度 300~400m 程度で極小値を示す。また、HDB-1 孔の試験深度と比べ、同一深度での測定値のバラツキが大きいことも特徴である。地層別に見ると珪藻質泥岩層は地表~深度約 40m の非常に浅い領域にのみ分布しているが、HDB-1 孔で見られたように深度の増大とともに

静弾性係数および一軸圧縮強度とも増大する傾向が認められる。一方、硬質頁岩層では深度方向の変化に規則性は見られず、深度 100～200m で最大値を、深度 300～400m で最小値をとり、その差は静弾性係数で最大 3 倍程度、一軸圧縮強度でも最大で 3 倍ほどである。静ポアソン比については、深度方向に大きな変化は無く、珪藻質泥岩層（声間層）、遷移帯（稚内層上部）、硬質頁岩層（稚内層）とも 0.2～0.3 程度の範囲に分布している。

図 3.1.1-3 に三軸圧縮試験で得られた力学物性値の分布を示す。拘束圧のレベルや排水条件に応じて静弾性係数、軸差応力は異なるものの、傾向は一軸圧縮試験と類似している。すなわち、HDB-1 孔では全体的に深度とともに静弾性係数および軸差応力が増大しているのに対し、HDB-2 孔ではそのような明瞭な傾向は見られないこと、地層別に見ると珪藻質泥岩層では深度増大に伴う静弾性係数・軸差応力分布が明瞭であるのに対し、硬質頁岩層ではそのような傾向が見られない。

表 3.1.1.1 室内試験結果一覧

孔番号	地層	岩種	基本物性値					力学特性値				
			見かけ比重	単位体積重量 [kN/m ³]	含水比 [%]	有効空隙率 [%]	弾性波速度		静弾性係数 E50 [GPa]	静ポアソン比	一軸圧縮 強度 [MPa]	圧裂引張 強度 [MPa]
							P波 [km/sec]	S波 [km/sec]				
D-1	更別層	砂岩・礫岩	1.6~2.2	/	17.2~44.5	35.0~60.0	1.40~1.70	0.20~0.50	0~0.30	/	0~3.0	/
	勇知層	砂岩	1.9~2.1	/	12.5~21.3	30.0~43.0	1.40~2.50	0.25~1.20	0~1.30	/	0~18.0	/
HDB-1	声問層	珪藻質泥岩	1.49~1.63	13.8~16.0	55.1~78.1	58.1~65.2	1.63~1.76	0.35~0.55	0.38~0.94	0.220~0.467	1.44~7.35	0.27~0.45
	稚内層	珪藻質泥岩/ 硬質頁岩	1.68~1.83	16.3~17.9	31.0~44.1	43.3~51.4	1.67~2.39	0.72~1.18	1.66~4.33	0.201~0.232	11.7~34.9	2.99
		硬質頁岩	1.86~1.97	18.2~19.4	22.0~27.6	35.5~40.3	1.96~2.26	0.80~0.98	2.30~3.93	0.168~0.275	10.6~31.8	2.05~2.71
HDB-2	声問層	珪藻質泥岩	1.68	16.2~16.6	45.1~45.6	52.2~52.5	1.65~1.84	0.57~0.66	0.56~1.03	0.207~0.325	5.1~9.8	/
	稚内層	珪藻質泥岩/ 硬質頁岩	1.69~1.99	16.2~19.5	20.6~44.4	33.9~51.9	1.95~2.52	0.75~1.29	1.41~6.35	0.209~0.337	8.9~31.4	1.25~2.95
		硬質頁岩	1.87~2.01	18.0~19.6	20.9~26.8	34.9~39.7	1.23~2.39	0.71~1.04	1.60~5.22	0.157~0.336	8.7~22.6	0.69~2.64



: 砂岩・礫岩層 (更別層)
 : 珪藻質泥岩層 (声間層)
 : 硬質頁岩層 (稚内層)

: 砂岩層 (勇知層)
 : 珪藻質泥岩/硬質頁岩遷移帯 (稚内層上部)

(最新の地質区分に従いグラフ中に表示)

図 3.1.1-1 物理試験結果

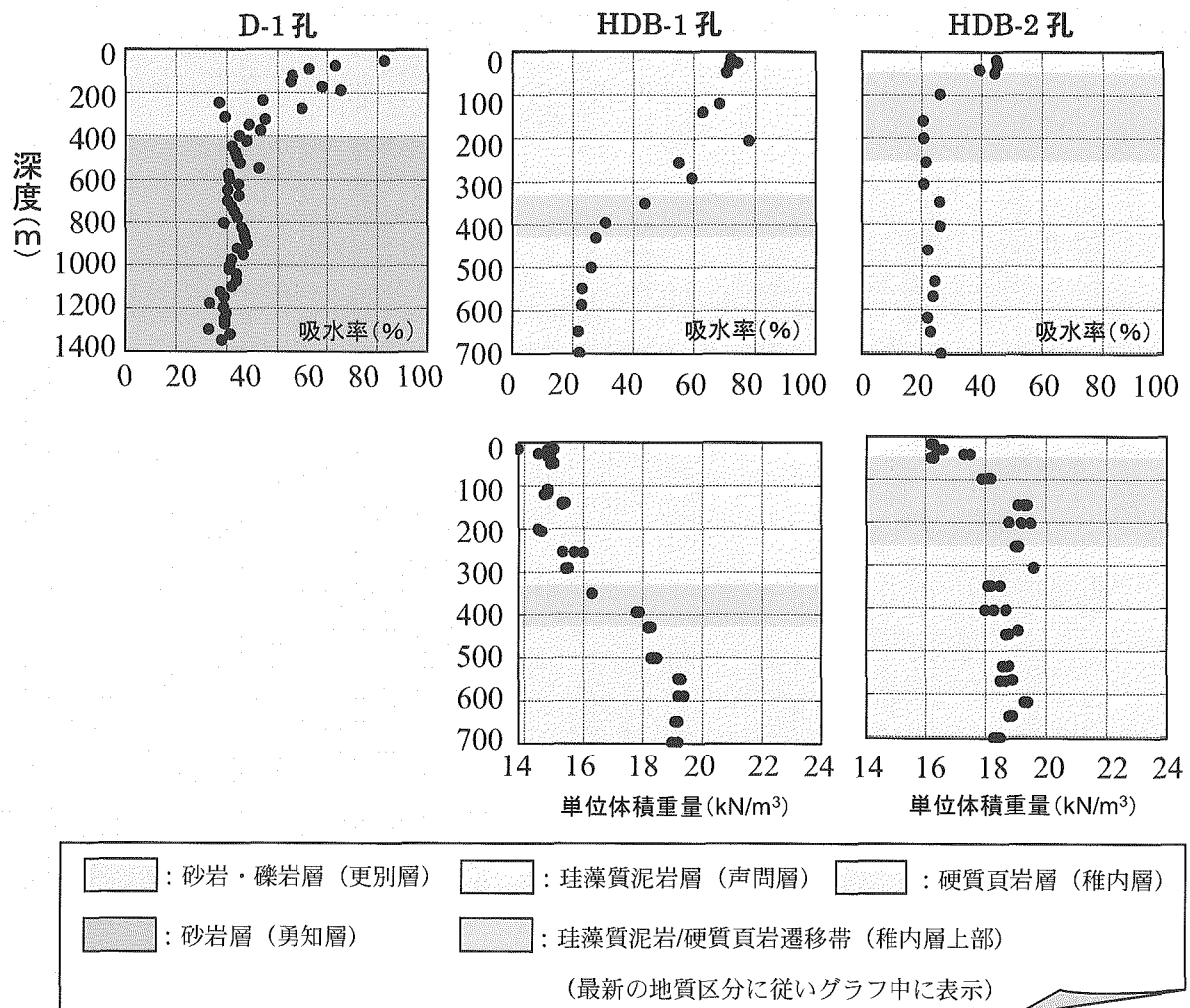


図 3.1.1-1 物理試験結果 (続き)

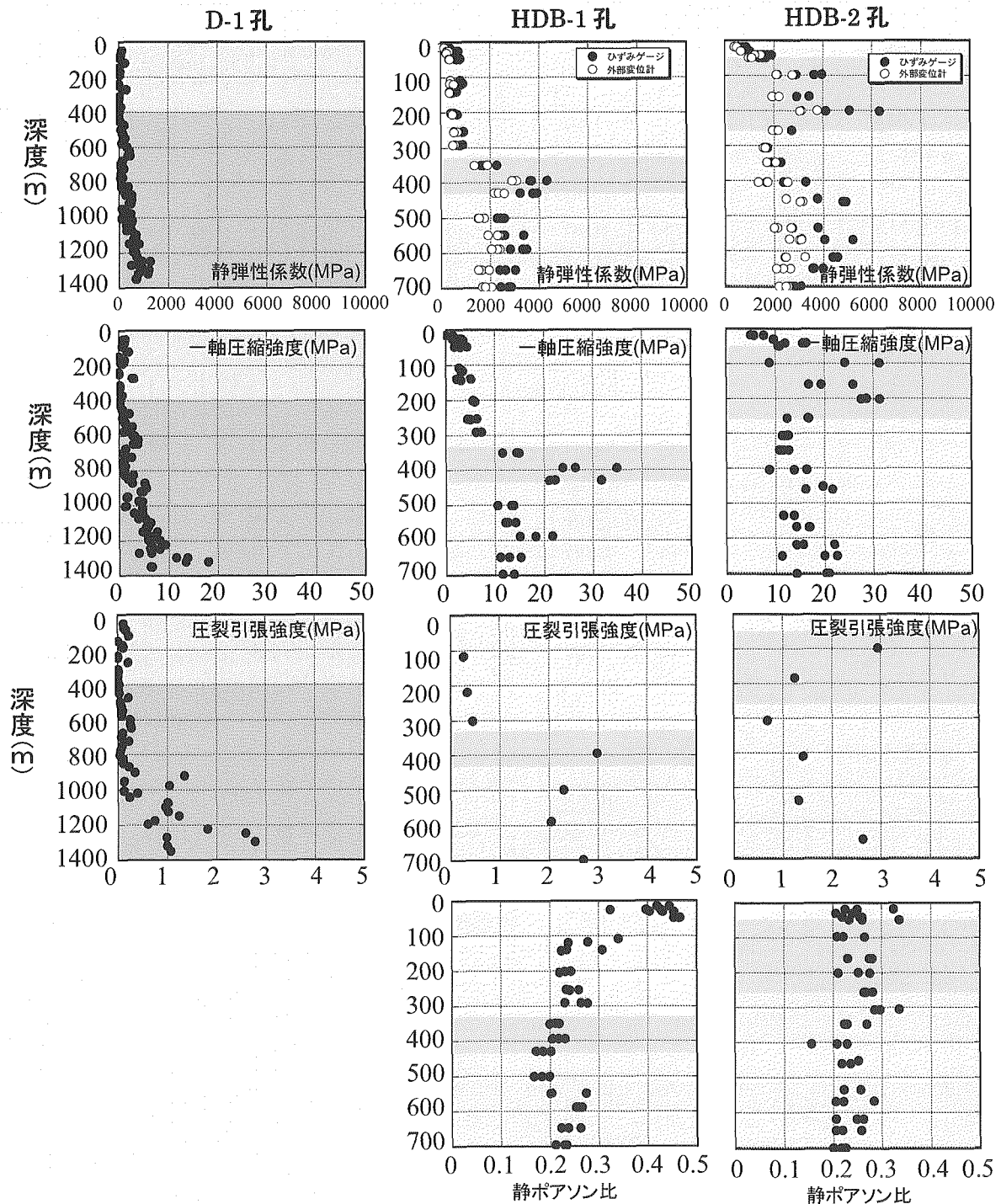


図 3.1.1-2 力学試験結果

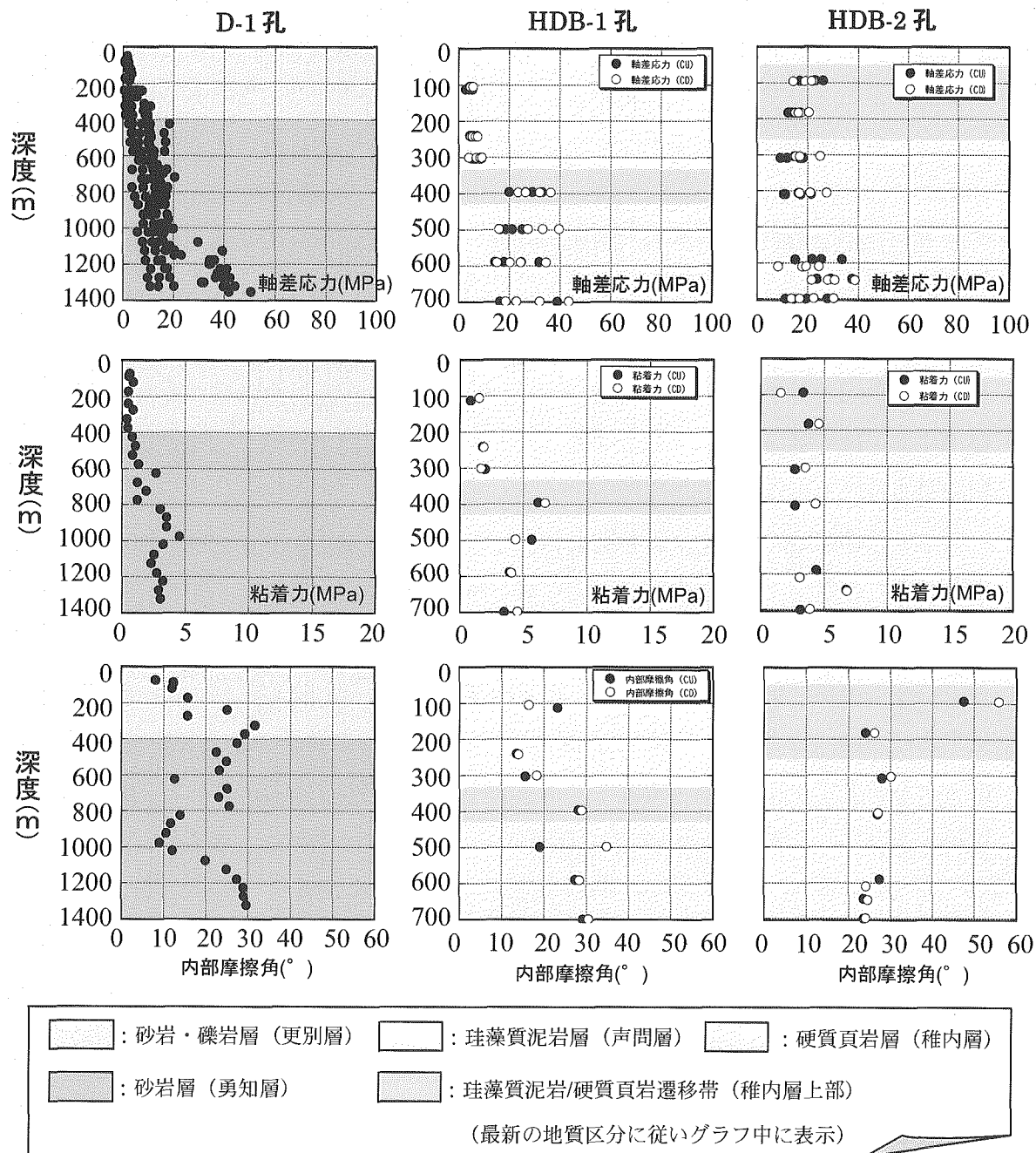


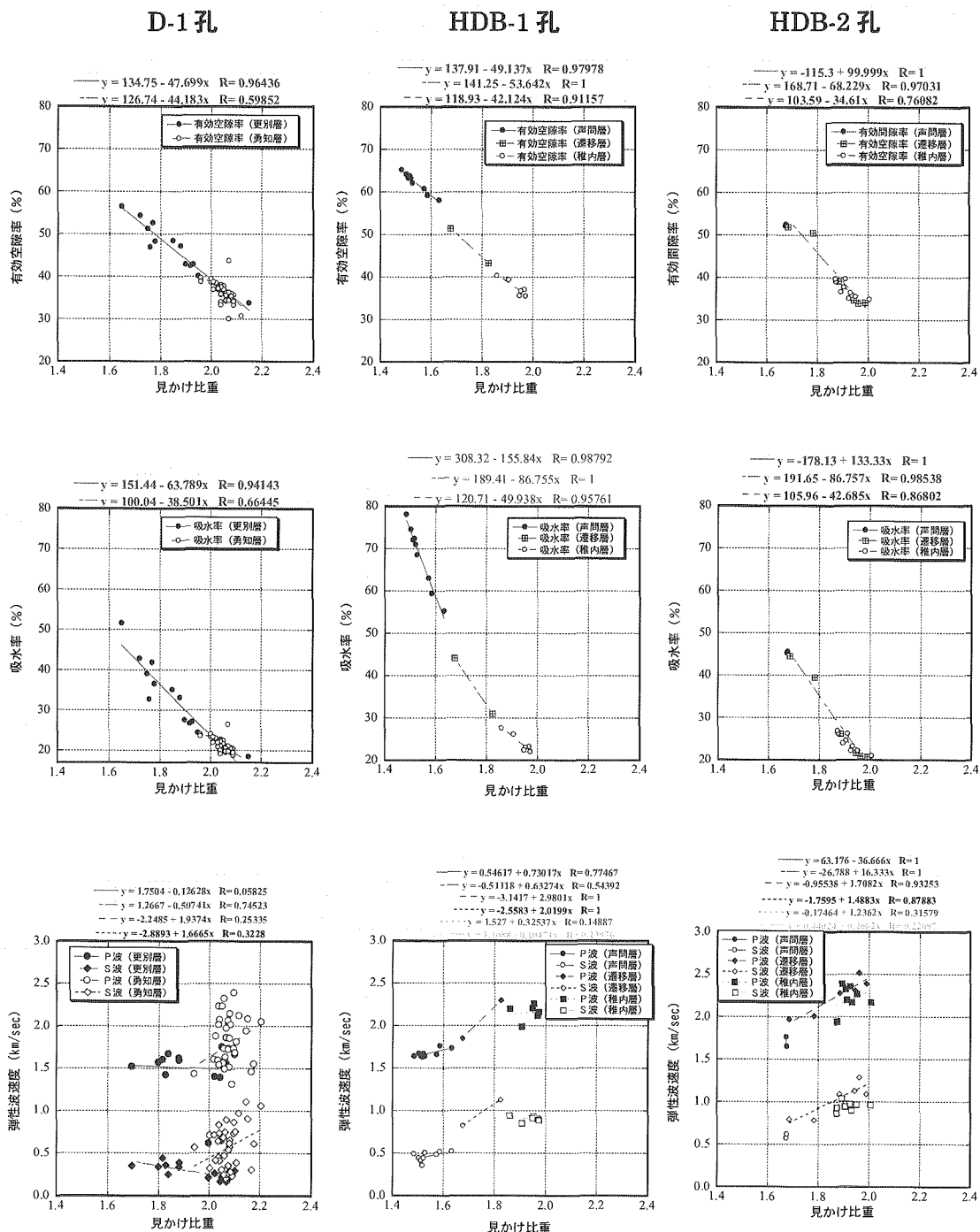
図 3.1.1-3 三軸圧縮試験結果

一般に、岩石の物理物性（密度、空隙率、弾性波速度）と力学物性（静弾性係数、一軸圧縮強度）には、相関があることが知られている。このため、各物性値間における相関性について検討する。図 3.1.1-4(1),(2),(3),(4)に検討結果を示す。

図 3.1.1-4(1)物理物性値の間では、多少のバラツキはあるものの、比較的高い相関性を確認することができる。具体的には、見かけ比重が大きくなると有効空隙率、吸水率および含水比は小さくなる傾向がある。また、弾性波速度は見かけ比重がおおきくなると増大し、有効空隙率が大きくなると減少する。

図 3.1.1-4(2)物理物性値と力学物性値の間では、D-1 孔ではいずれの地層範囲においても相関係数がおおむね0.5前後となり、全体的にあまり良好な関係は得られていない。しかし、図 3.1.1-4(3)において弾性波速度、特にS波速度をパラメータとした場合、0.75～0.99 という高い相関係数が得られた。一方、HDB-1,2 孔における珪藻質泥岩層および遷移帯では相関係数 0.5～0.75 であったが、硬質頁岩層ではバラツキが大きく、その相関を明瞭につかむことは出来なかった。

図 3.1.1-4(4)は三軸圧縮試験を対象としたものであるが、D-1 孔では、地層の違いによらず、変形係数・弾性係数 E_{50} およびせん断強度は拘束圧との相関が高く、拘束圧依存性が高い。HDB-1,2 孔では岩種によらず、拘束圧の増大に伴いほぼ線形的に増大していることが分かる。HDB-1 孔では、珪藻質泥岩層において三軸圧縮試験における排水条件の違いによらずほぼ同一の値を示しているが、遷移帯および硬質頁岩層では、同一拘束圧下での静弾性係数は小さくせん断強度は大きい。HDB-1 孔と HDB-2 孔を比較すると、同一岩種のデータでも HDB-2 孔の方がバラツキは大きくなった。



更別層：砂岩・礫岩層
勇知層：砂岩層

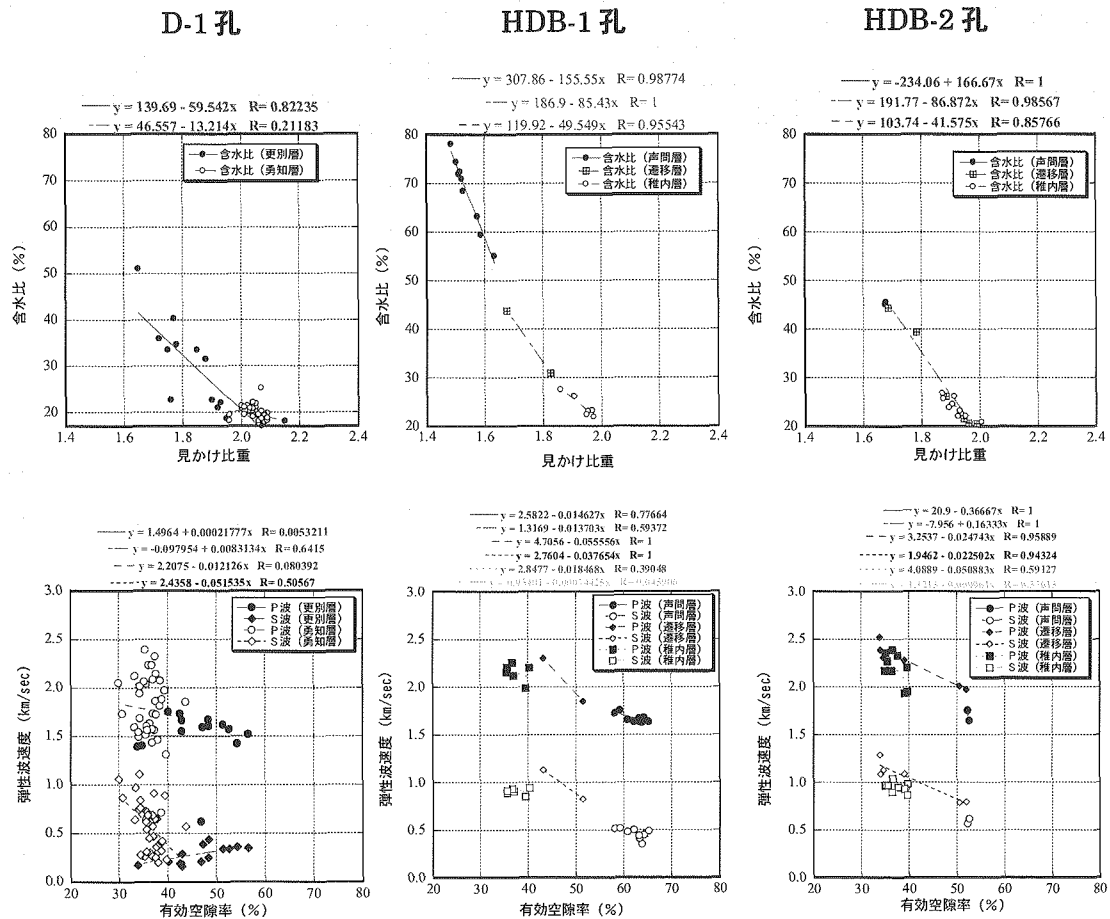
声間層：珪藻質泥岩層

稚内層：硬質頁岩層

遷移帯：珪藻質泥岩/硬質頁岩（稚内層上部）

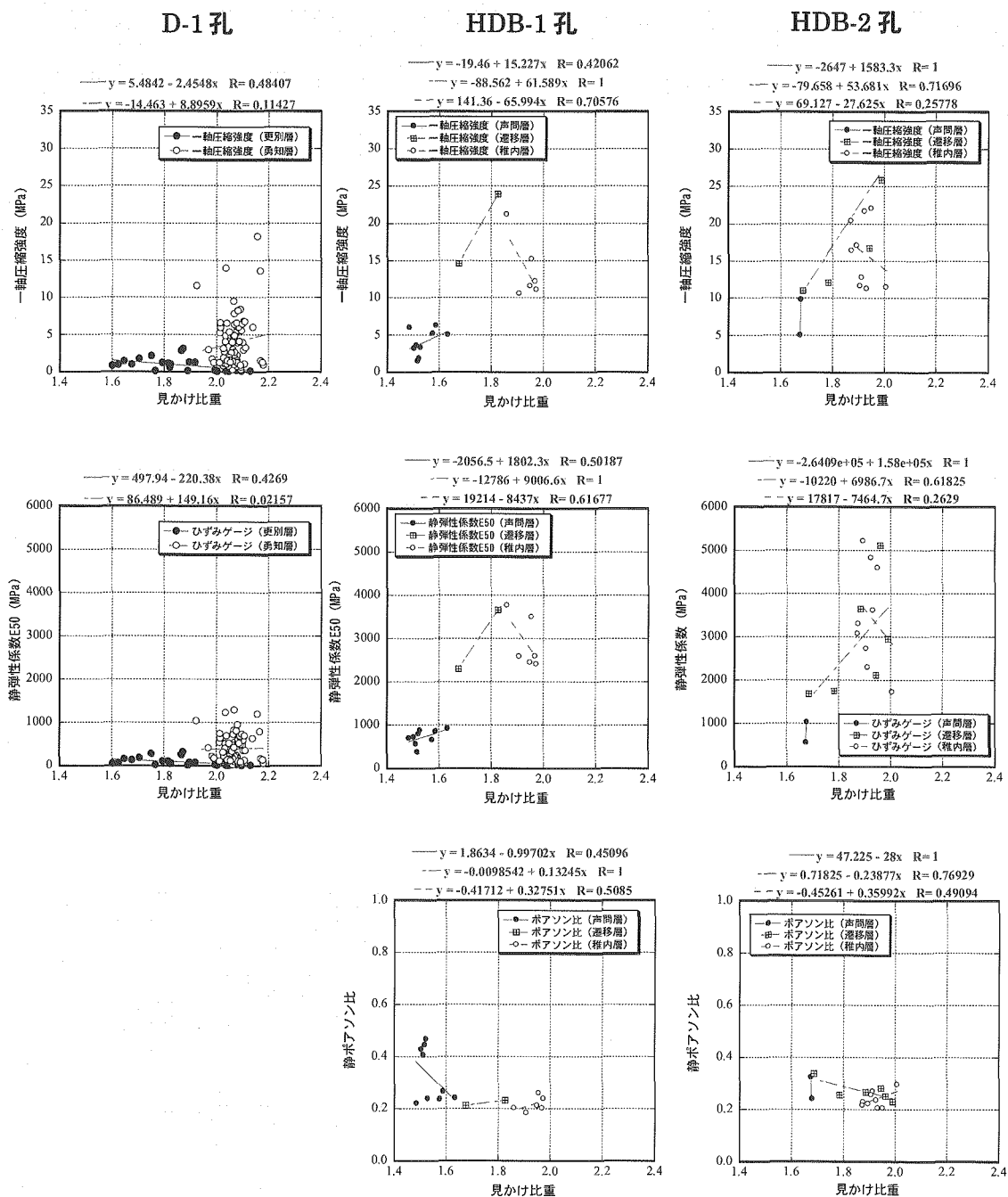
（最新の地質区分に従いグラフ中に表示）

図 3.1.1-4(1) 各物性値間の相関性（物理－物理）



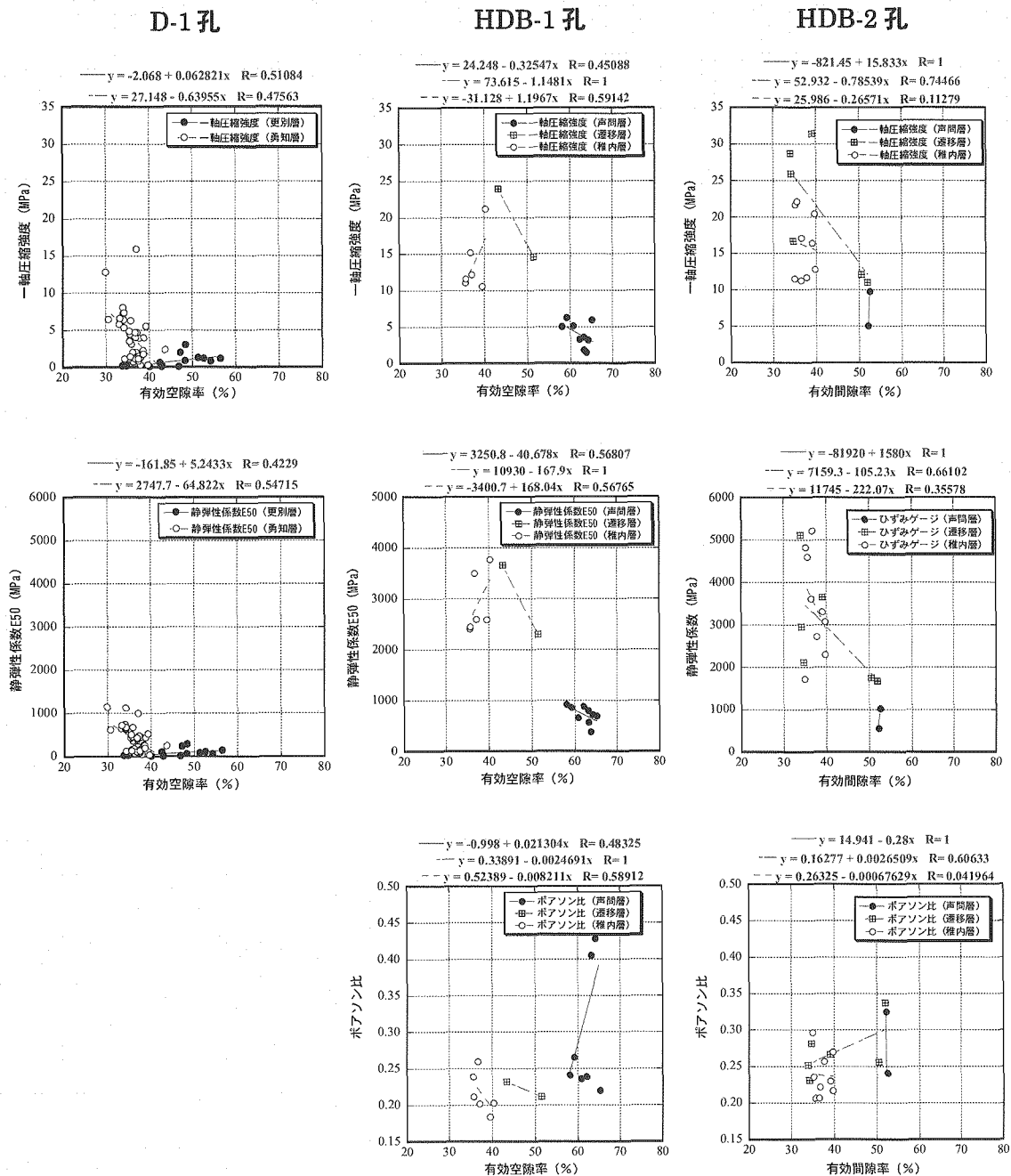
更別層：砂岩・礫岩層 声間層：珪藻質泥岩層 稚内層：硬質頁岩層
勇知層：砂岩層 遷移層：珪藻質泥岩/硬質頁岩（稚内層上部）
（最新の地質区分に従いグラフ中表示）

図 3.1.1-4(1) 各物性値間の相関性（物理－物理；続き）



更別層：砂岩・礫岩層 声問層：珪藻質泥岩層 稚内層：硬質頁岩層
勇知層：砂岩層 遷移帯：珪藻質泥岩/硬質頁岩（稚内層上部）
（最新の地質区分に従いグラフ中に表示）

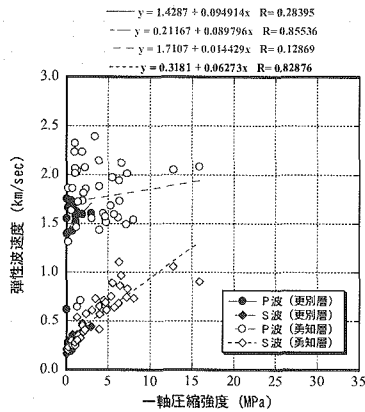
図 3.1.1-4(2) 各物性値間の相関性（物理－力学）



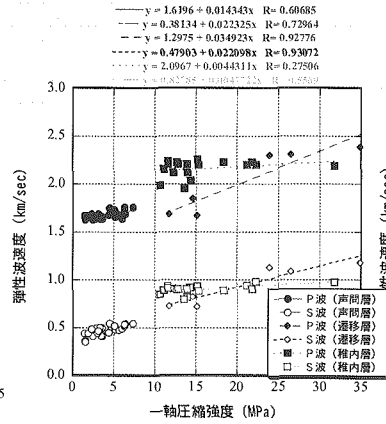
更別層：砂岩・礫岩層 声間層：珪藻質泥岩層 稚内層：硬質頁岩層
 勇知層：砂岩層 遷移層：珪藻質泥岩/硬質頁岩（稚内層上部）
 （最新の地質区分に従いグラフ中に表示）

図 3.1.1-4(2) 各物性値間の相関性（物理－力学；続き）

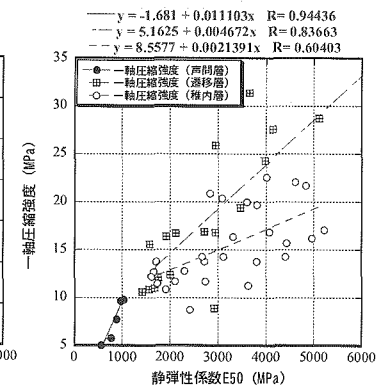
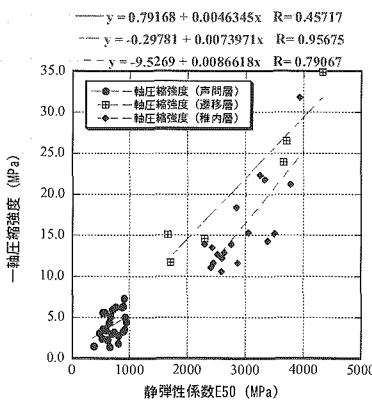
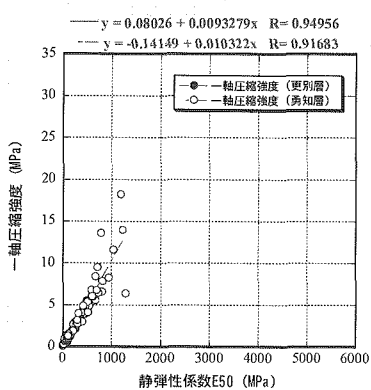
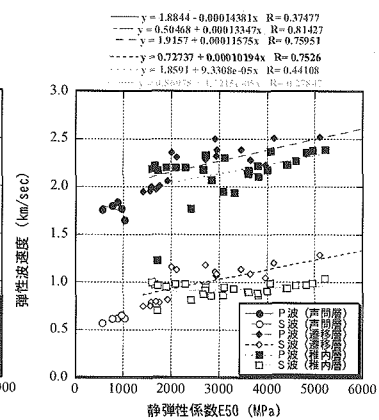
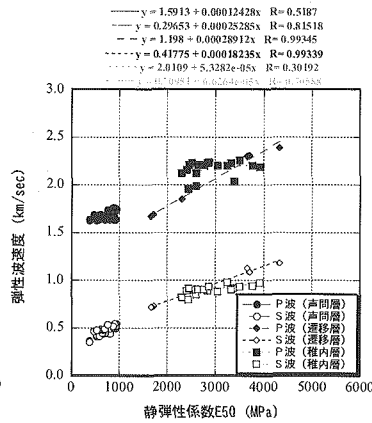
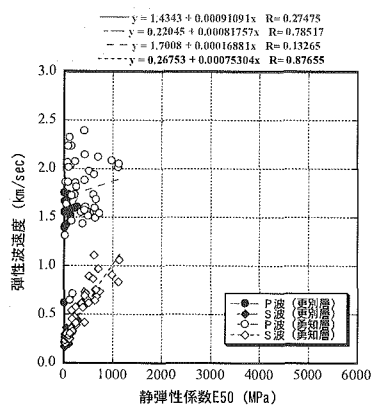
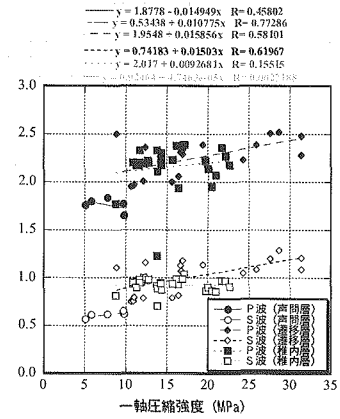
D-1 孔



HDB-1 孔



HDB-2 孔



更別層：砂岩・礫岩層

声間層：珪藻質泥岩層

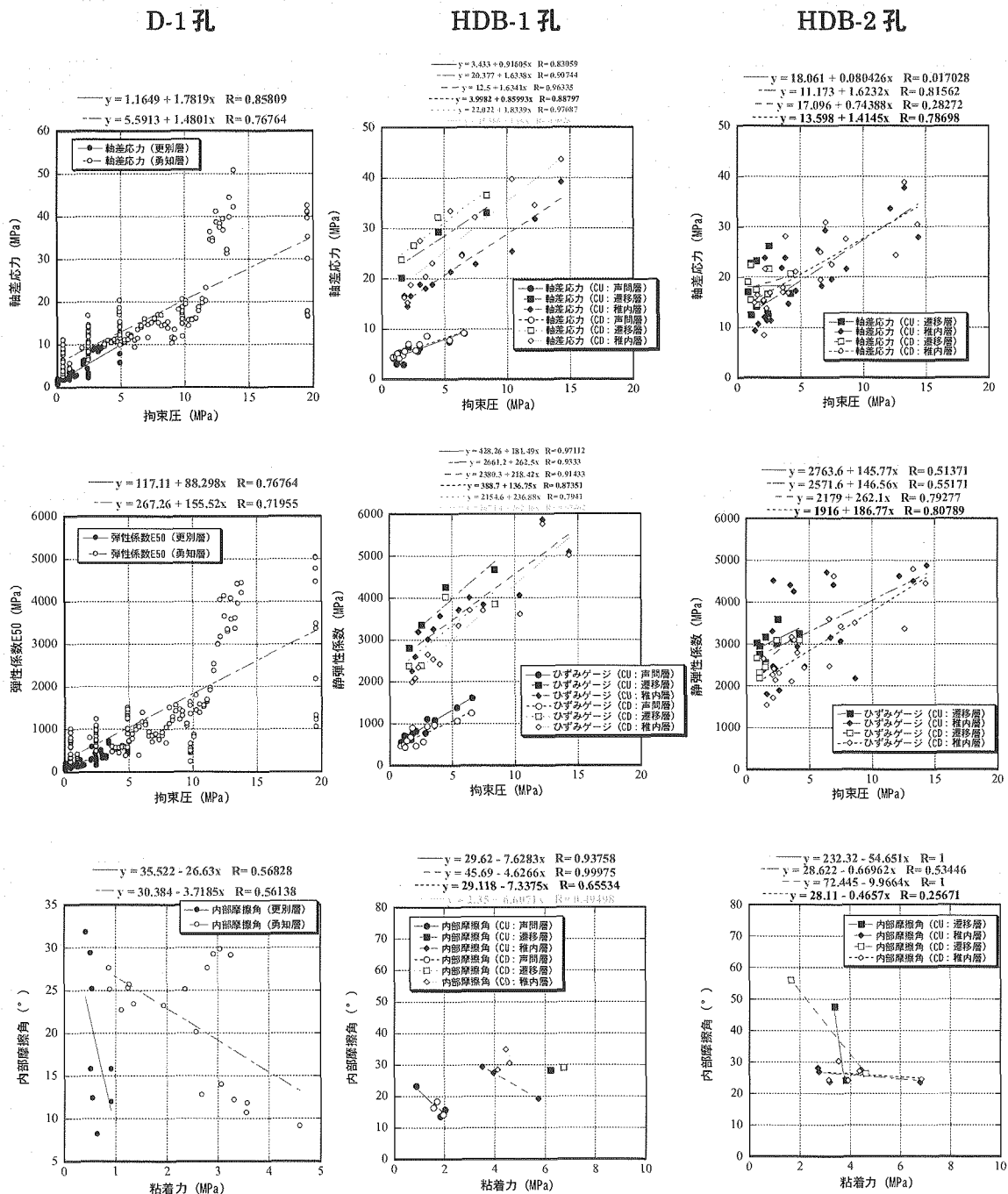
稚内層：硬質頁岩層

勇知層：砂岩層

遷移帯：珪藻質泥岩/硬質頁岩（稚内層上部）

（最新の地質区分に従いグラフ中に表示）

図 3.1.1-4(3) 各物性値間の相関性（力学-力学）



更別層：砂岩・礫岩層 声間層：珪藻質泥岩層 稚内層：硬質頁岩層
 勇知層：砂岩層 遷移帯：珪藻質泥岩/硬質頁岩（稚内層上部）
 （最新の地質区分に従いグラフ中に表示）

図 3.1.1-4(4) 各物性値間の相関性（三軸圧縮試験）

3.1.2 AE 法による応力測定

HDB-1 孔の深度 309.70m～310.62m、HDB-2 孔の深度 297.20～298.00m の岩石コアを用い、AE 法によって鉛直および水平面内主応力値の測定を実施した。深度変化を図 3.1.2-1 に示す。AE 法で測定された鉛直応力は、単位体積重量から推定される土被り圧よりも小さく、HDB-1 孔で半分程度、HDB-2 孔では 6～8 割の値を示している。後述する水圧破碎法による応力測定から得られた水平面内最大・最小主応力と鉛直応力の関係は、HDB-1,2 孔とも水平最大主応力値>鉛直応力>水平最小主応力値の関係になり、応力環境としては横ずれ断層型を示す。しかし、HDB-1 孔では深度の増大に伴う水平面内主応力の増大が少ない。東濃鉱山の堆積岩を対象として実施した AE 法による応力測定では、鉛直方向はほぼ土被り圧に等しい値を示している⁵⁾。これらの結果を比較すると、HDB-1,2 孔の測定結果は明らかに低い値を示しており、その原因を検討する必要がある。現時点で考えられる要因を以下に挙げる。

- ・ カイザー効果の時間依存性
- ・ 一軸圧縮強度に近い応力を測定する
- ・ 有効応力と全応力の違い(水圧が作用しているか否か)

また今回の試験では、载荷初期から AE が頻発するパターンと、ある応力レベルに達した時点から AE 発生数が急増するパターンの 2 傾向が表れた。AE 法によって応力値を算定できるパターンは後者である。前者の原因については明らかではないが、载荷初期段階から AE が発生する例は、金川ら⁵⁾、木山ら⁷⁾、土木学会岩盤力学委員会⁸⁾等によって報告されている。金川らによると供試体内部に微小き裂や潜在き裂が存在する場合や、ボーリングコア採取時の応力解放によって、供試体内に微小き裂が生じる場合には、载荷初期段階から AE が数多く発生するとしている。今回の測定においても、このような理由により载荷初期段階から AE が発生する可能性は高いと考えられる。

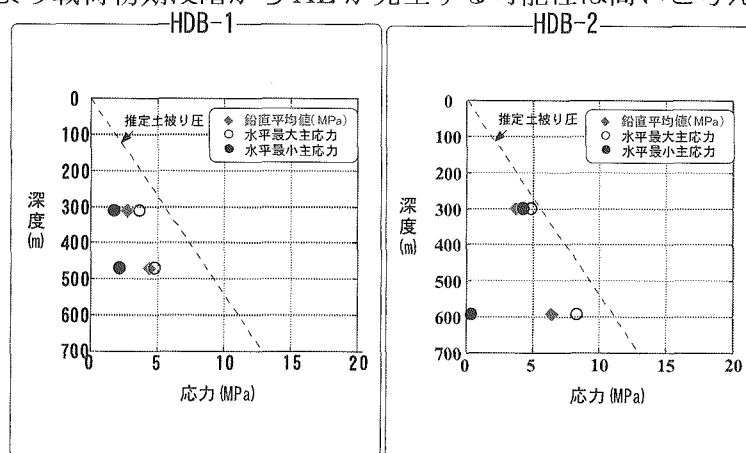


図 3.1.2-1 AE 法による初期応力測定結果

なお本試験では鉛直方向と水平 3 方向の供試体を用い供試体が破壊するまで試験を継続したため、各方向の一軸圧縮強度も求められている。その結果を図 3.1.2-2 に示す。HDB-1 孔の結果を見ると、基準軸（ラミネーションの走向方向）からの方位が変化すると、若干一軸圧縮強度が変化する傾向が認められるが、その変化は少ない。水平方向のコアの一軸圧縮強度は、鉛直方向の半分から 8 割程度の強度であるが、深度の変化による強度比の変化はほとんど無い。他方、HDB-2 孔は水平面内の方位変化による一軸圧縮強度の変化が大きくかつ強度のバラツキ自体も大きい。また、深度方向の強度変化も顕著であり、深度 300m 付近における一軸圧縮強度では鉛直方向よりも水平方向の方が大きい、深度 600m 付近では逆の傾向を示している。これらの結果から、鉛直／水平方向の岩石強度に異方性が存在する可能性が示唆された。

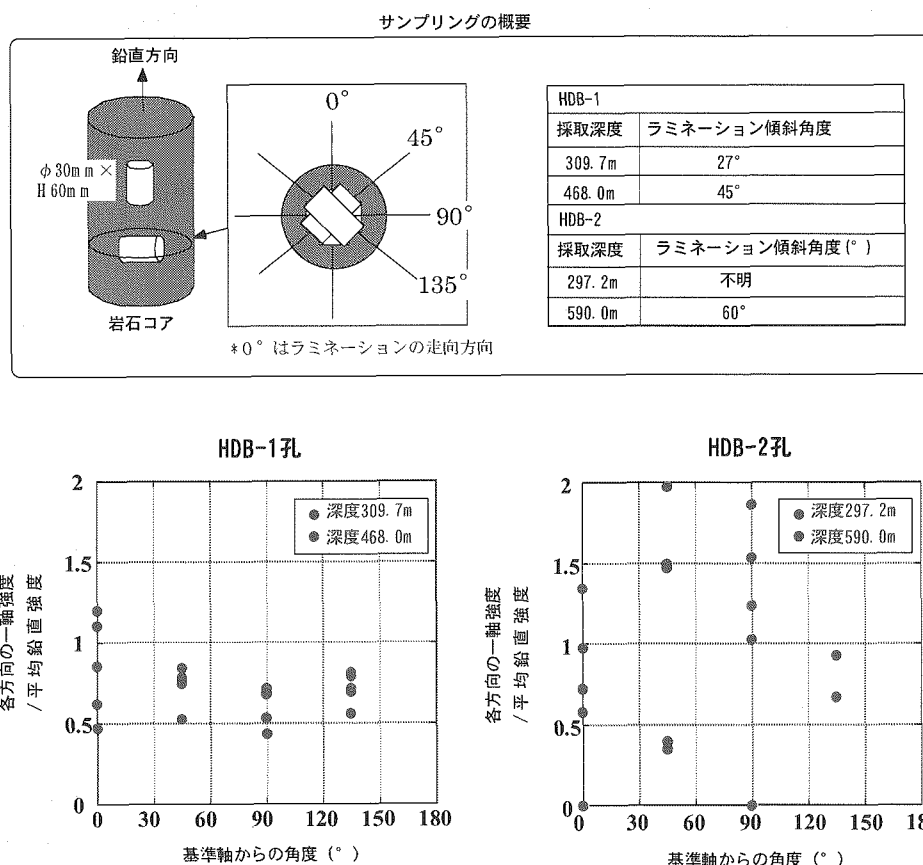


図 3.1.2-2 一軸圧縮試験より求められた
強度異方性

3.1.3 熱特性試験

図 3.1.3-1、3.1.3-2 に各種熱特性試験の結果を示す。図 3.1.3-1 に示す線膨張係数は、10℃毎に算定しかつ昇温過程と降温過程の両方で測定している。HDB-1 孔の 300m より深い所と HDB-2 孔の岩石コアでは $0 \sim 15 \times 10^{-6}/K$ の範囲において、昇温過程では 60℃ 程度で線膨張係数がピークを取り、その後温度上昇に伴い減少する。これは、60℃ までは固体部分において熱膨張が支配的なのに対し、60℃ 以上になると固体部分の熱膨張のみならず岩石内の微小クラックの発生が起こり、空隙が増大するため熱膨張量とそれらの空隙の増大量が相殺され結果として線膨張係数が減少を示したと思われる。また、降温過程では温度降下とともに線形的に減少する。値の変化は、昇温過程よりも変動幅が小さく $10 \sim 15 \times 10^{-6}/K$ 程度の範囲に分布する。これは一旦冷えて昇温過程で発生した微小クラックが閉じた状態から計測をしているため、その影響が相対的に小さいものと考えられる。初期値についてはほとんど変わらない。深度 300m 地点より浅い部分では非常に特異な挙動を示し、70℃ まではコアが収縮する方向にそれ以上の温度ではコアが膨張する方向に転じる。この要因については現状では不明である。

図 3.1.3-2 上段に熱伝導率測定結果を示す。これより、自然状態における測定結果は飽和状態において測定した結果に近いものとなっている。一方、乾燥状態の熱伝導率は自然及び飽和状態のそれに比べ小さくなっている。乾燥状態と水分を含んだ状態での値が大きく異なるのは、有効空隙率が高いことによると考えられる。乾燥状態の値は、HDB-1 孔の深度 300m 程度までの地点については水分を含んだ状態の半分程度、HDB-1 孔の深度 300m 地点より深い所と HDB-2 孔では、乾燥状態の値は、水分を含んだ状態の $2/3$ 程度となっている。

HDB-1 孔と HDB-2 孔では深度方向の値の変化傾向は異なっており、HDB-1 孔では深度の増大とともに熱伝導率も増大するが、HDB-2 孔では明瞭な傾向はなく値の深度方向の変化も小さい。

図 3.1.3-2 下段に示す比熱容量測定結果に関しては、上記の線膨張係数や熱伝導率と同様の特徴が認められる。すなわち、HDB-1 孔の深度 300m 地点までの比熱容量は、HDB-1 孔の深度 300m 以深及び HDB-2 孔の値に比べ小さい。また、HDB-1 孔については深度の増大とともに比熱容量の値が小さくなる傾向を示すが、HDB-2 孔ではほとんど変化はない。20℃～100℃ までの温度変化に伴う比熱容量の値の変化は $0.2 J/g \cdot K$ 程度であり大きくない。

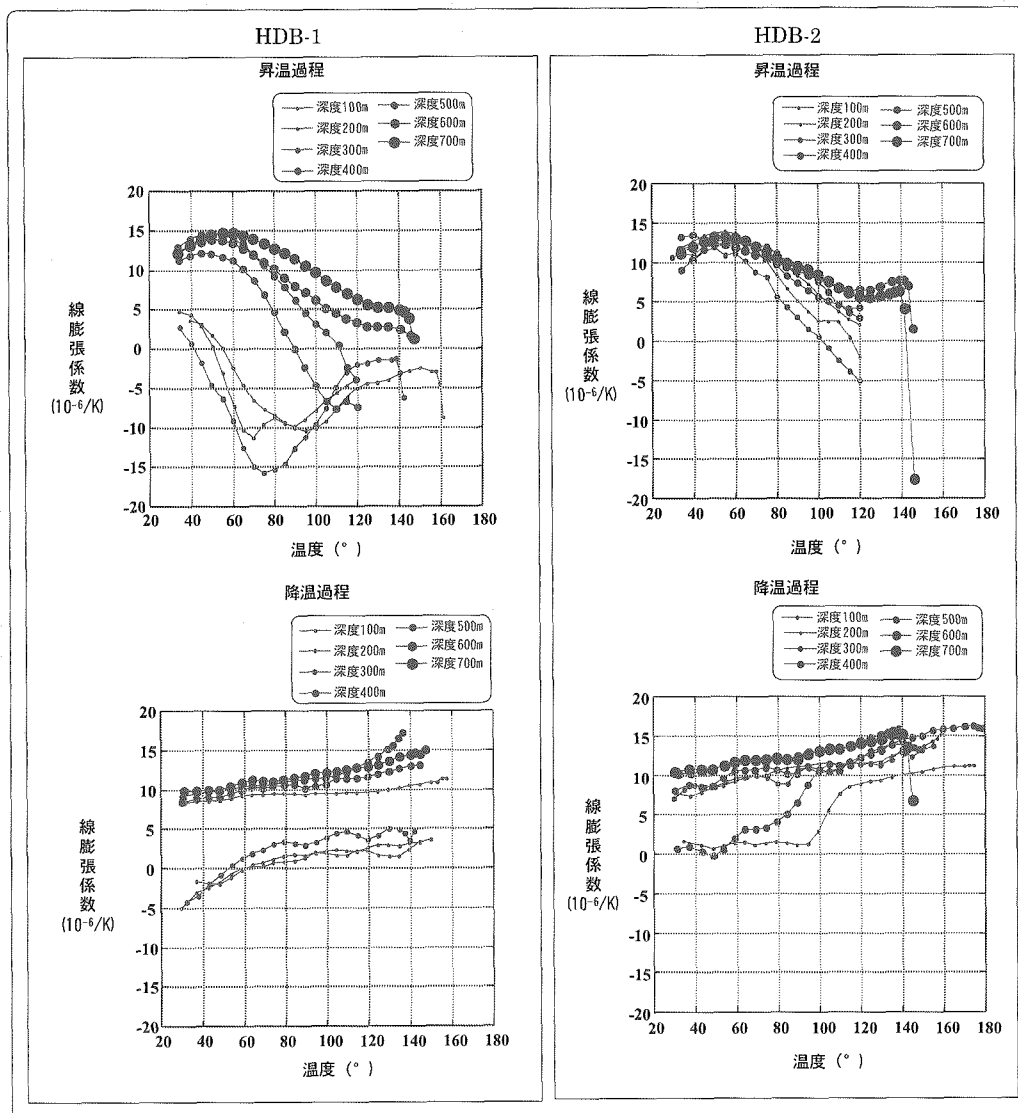


図 3.1.3-1 熱特性試験結果（線膨張係数）

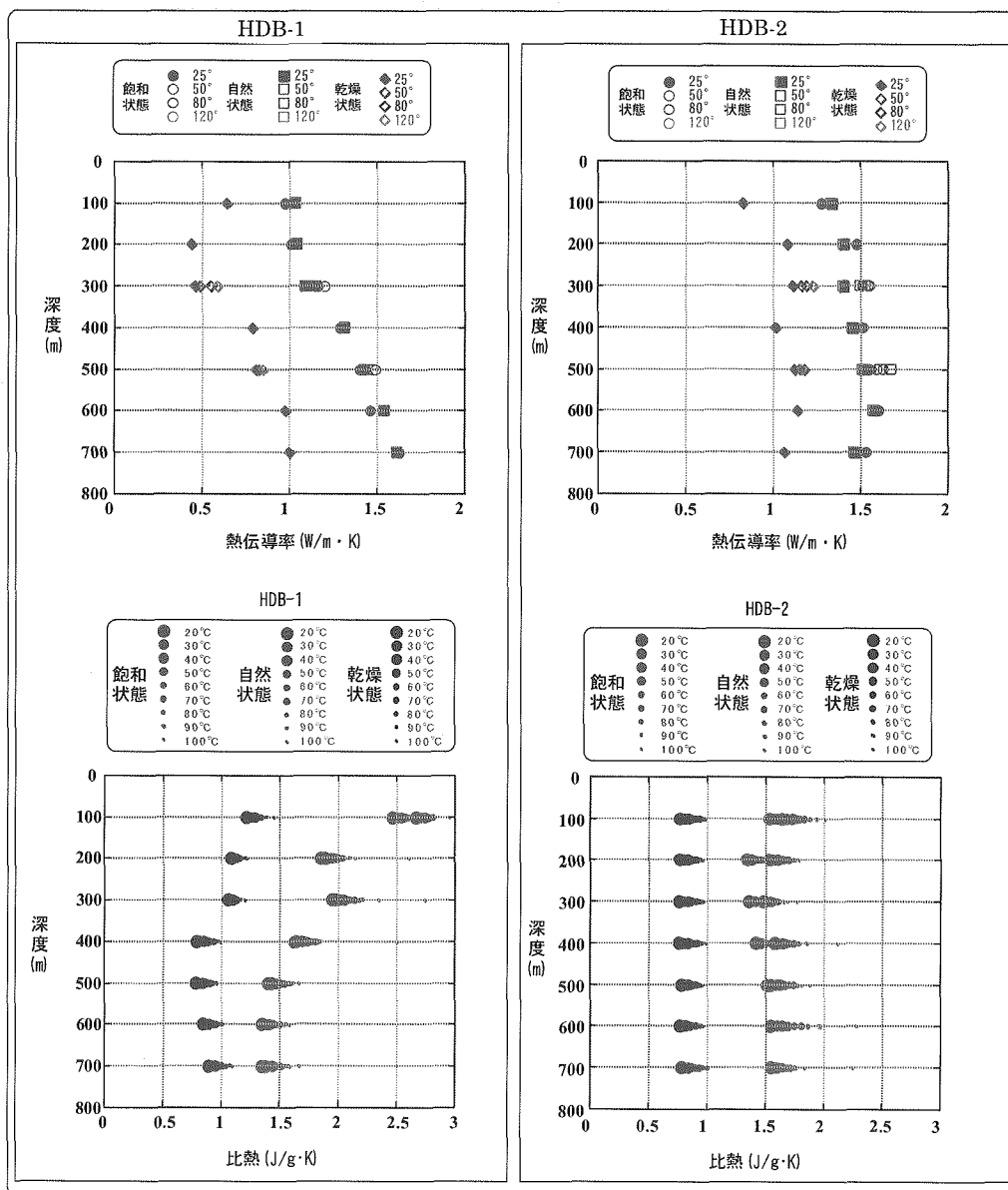


図 3.1.3-2 熱特性試験結果 (上段：熱伝導率 下段：比熱容量)

その他の特性として、図 3.1.3-3 に示す帯磁率測定結果については、両孔とも特徴的な変化は認められず、2~5LF 程度の範囲で値がばらつく。また、図 3.1.3-4 に示す比抵抗測定結果については、HDB-1,2 孔とも深度 400m 以深では測定限界に近い非常に小さい比抵抗値を取る。深度 400m より浅い領域では HDB-1 孔の方が HDB-2 孔よりも比抵抗値が大きくかつ、深度の増大に伴い比抵抗値が低下する傾向を示す。

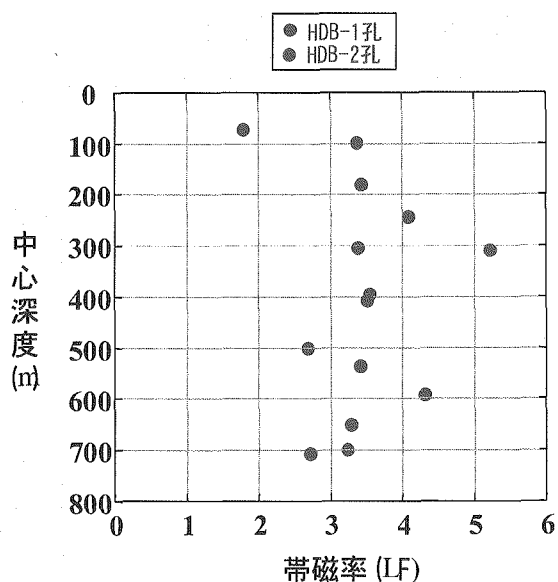


図 3.1.3-3 帯磁率測定結果

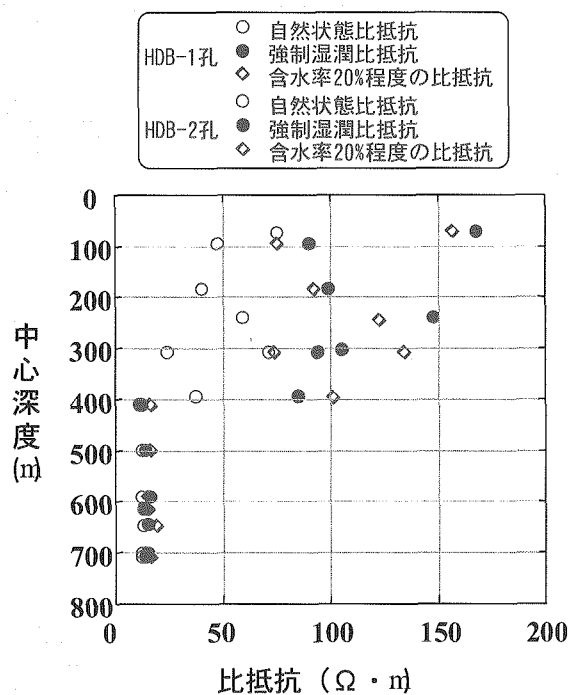


図 3.1.3-4 比抵抗測定結果

3.2 原位置試験

3.2.1 水圧破碎法による応力測定

本調査では HDB-1,2 孔とも当初 3 深度で測定を実施する予定であったが、使用した測定システムでは孔内抑留の危険があったため、測定を 2 深度ずつに変更した。試験位置は、密度検層、キャリパー検層、EMI 検層および BHTV 画像観察の結果から亀裂が少なく、孔壁が安定している箇所を選定している。なお、直接測定ができなかった代替手段として EMI 検層で把握されたボアホールブレイクアウトからの応力値評価のため、各孔ともインプレッションパッカーによる孔壁の型取り作業を、1 深度ずつ実施している。

水圧破碎により造成されたき裂の走向、見かけのき裂開口圧 P_r 、き裂閉口圧 P_s などは表 3.2.1-1 に示す通りである。ここで、見かけのき裂開口圧は孔壁面から十分に縦き裂が進展していると考えられる第 2 回目以降の加圧サイクルにおける孔内水圧と流量の関係から評価した。水圧破碎試験中の孔内水圧－時間曲線、流量－時間曲線は図 3.2.1-1 に示す通りである。また、インプレッションパッカーによる人工き裂の型取りの記録を図 3.2.1-2 に示す。これらは、パッカーエレメントに熱収縮チューブを巻きつけてき裂の型取りをした後、そのチューブに軸方向の切れ目を入れてパッカーからはがし、それを周方向に展開したものをトレースした結果である。

ここで、表 3.2.1-1 に示した P_r 、 P_s および縦き裂の走向の決定方法について述べる。まず、見かけのき裂開口圧 P_r は、圧入流量 $q(t)$ が一定であれば孔内水圧の経時変化が線形から非線形に変わる時の孔内水圧として定義される。しかし、圧入流量が変動する場合であっても、坑底流量計より下流部分の、加圧区間の孔壁の変形を含むコンプライアンス C が水圧によらず一定であれば、き裂が開かない状態での加圧区間水圧 P は総流量 Q_{total} に対して線形に増大するはずである。したがって、 $P-Q_{total}$ 関係が線形から非線形に変わるときの孔内水圧として見かけのき裂開口圧が求められる。しかし、 C が水圧に依存して変化する場合は、き裂が開かないときの $P-Q_{total}$ 関係もそれに応じて非線形なものとなるはずである。このことを考慮して、見かけのき裂開口圧 P_r の決定においては、第 1 回目の加圧サイクルにおけるき裂初生（ブレイクダウン）の $P-Q_{total}$ 曲線と、2 回目以降の再加圧時のそれを重ね合わせ、後者が前者からずれ始めた点を P_r として読み取った。図 3.2.1-3 および図 3.2.1-4 は、図 3.2.1-1 の結果を孔内

水圧と加圧開始からの総流量の関係に描きなおし、第 1 回目の加圧サイクルにおける $P-Q_{total}$ 曲線と、2 回目以降の再加圧時のそれを重ね合わせたものである。図中の矢印で示された孔内水圧が評価された見かけのき裂開口圧 P_r である。

表 3.2.1-1 HDB-1 孔における水圧破碎試験の測定結果

深度(m)	水平面内 最大主応 力方向 (deg)	測定圧力(MPa)										
		Pb	見かけき裂開口圧Pr					き裂閉口圧Ps				
			第2回	第3回	第4回	第5回	平均	第2回	第3回	第4回	第5回	平均
381.0	83.1	11.55	5.15	4.93	4.75		4.94	7.44	7.12	7.13		7.23
585.0	-62.3	11.95	7.78	9.45		8.62	8.62	9.88		9.85	9.88	9.87
281.9	-39.6	8.33	4.60	4.83	4.76	4.76	4.74	5.73	5.72	6.06	6.11	5.91
535.5	-0.1	10.01	5.96	5.38	5.40	5.97	5.68	8.55	8.23	8.51	8.44	8.43

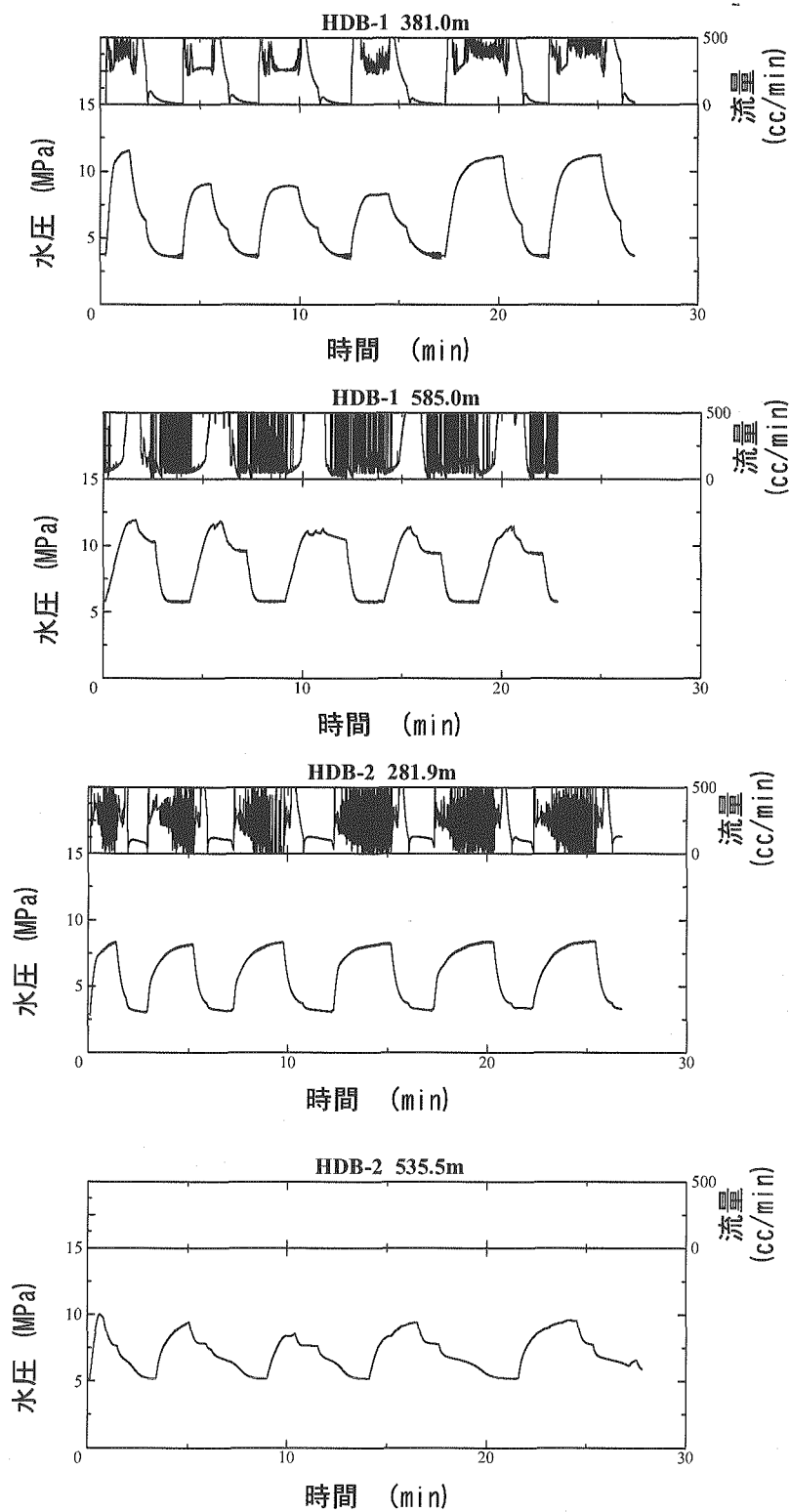
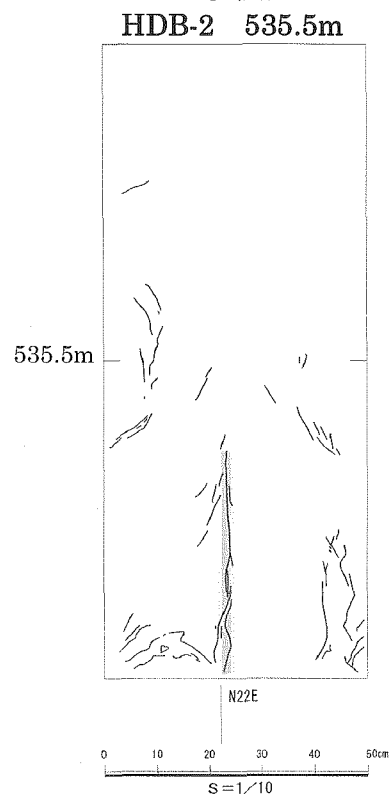
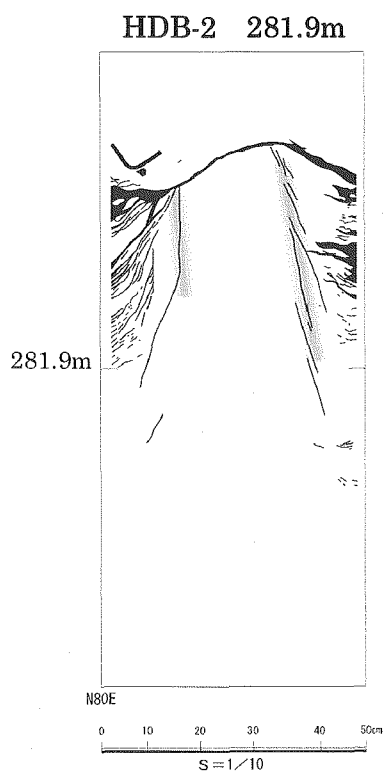
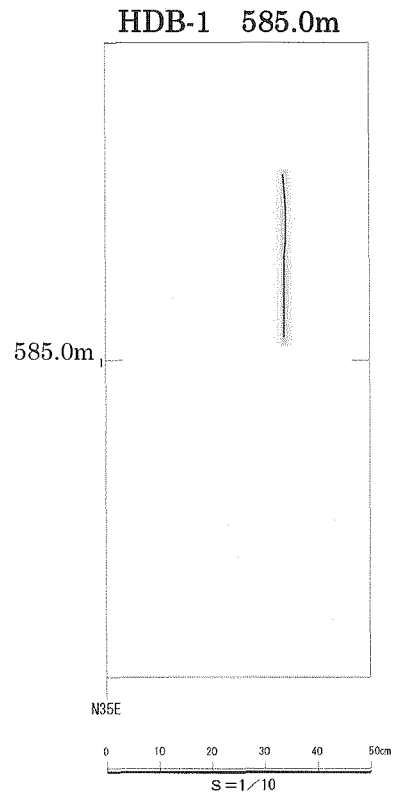
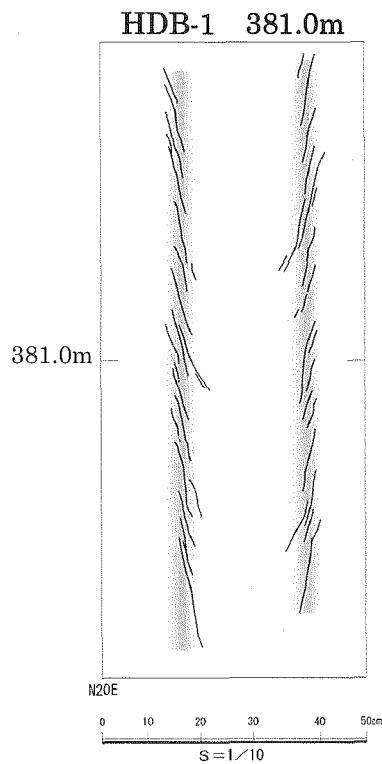


図 3.2.1-1 孔内水圧－時間曲線および流量－時間曲線



※シェード部分；水圧破碎法によって生じた縦き裂。

図 3.2.1-2 水圧破碎によって生じたき裂のスケッチ

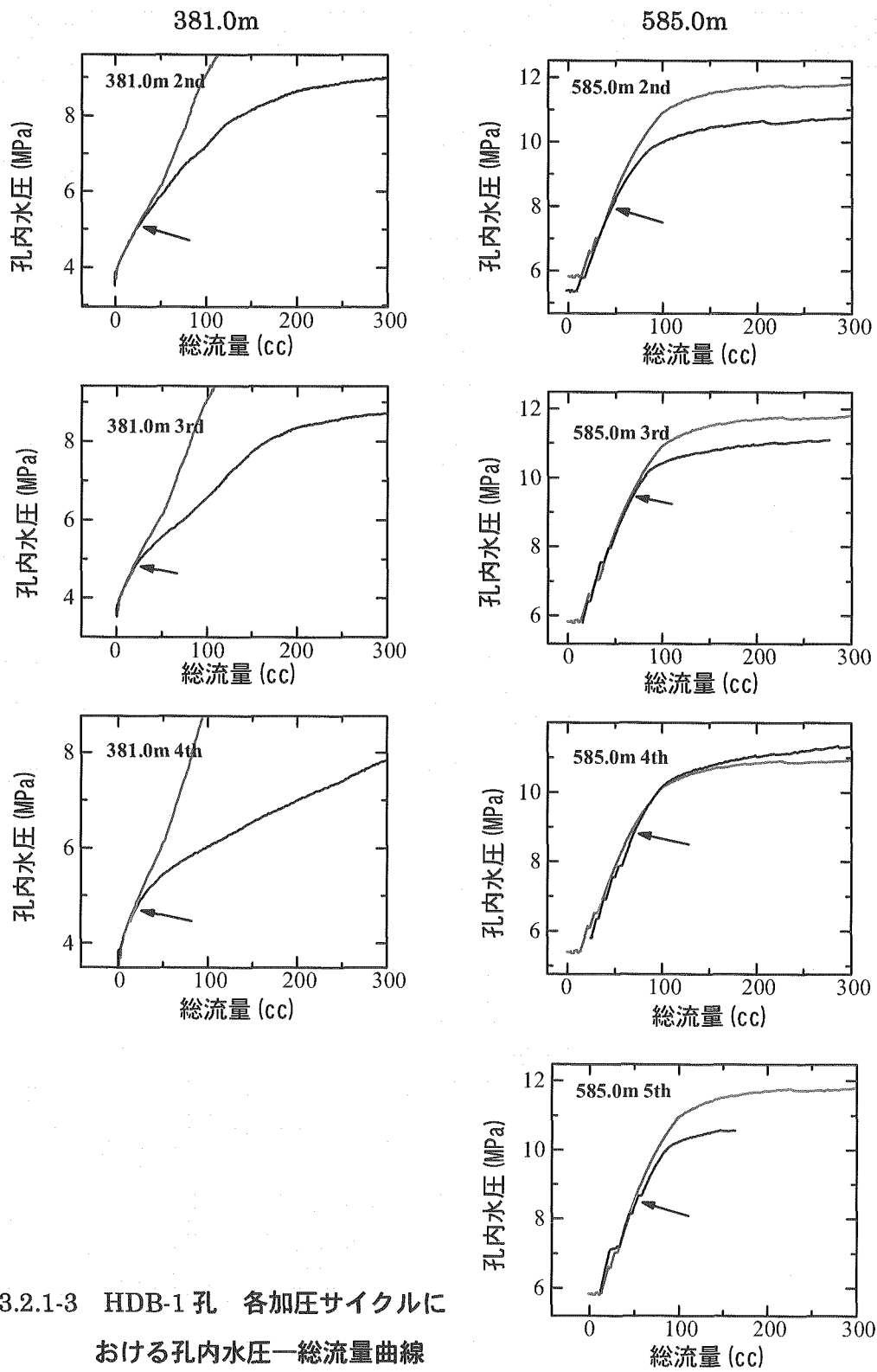


図 3.2.1-3 HDB-1 孔 各加圧サイクルにおける孔内水圧—総流量曲線
(矢印で示した孔内水圧が見かけき裂開口圧)

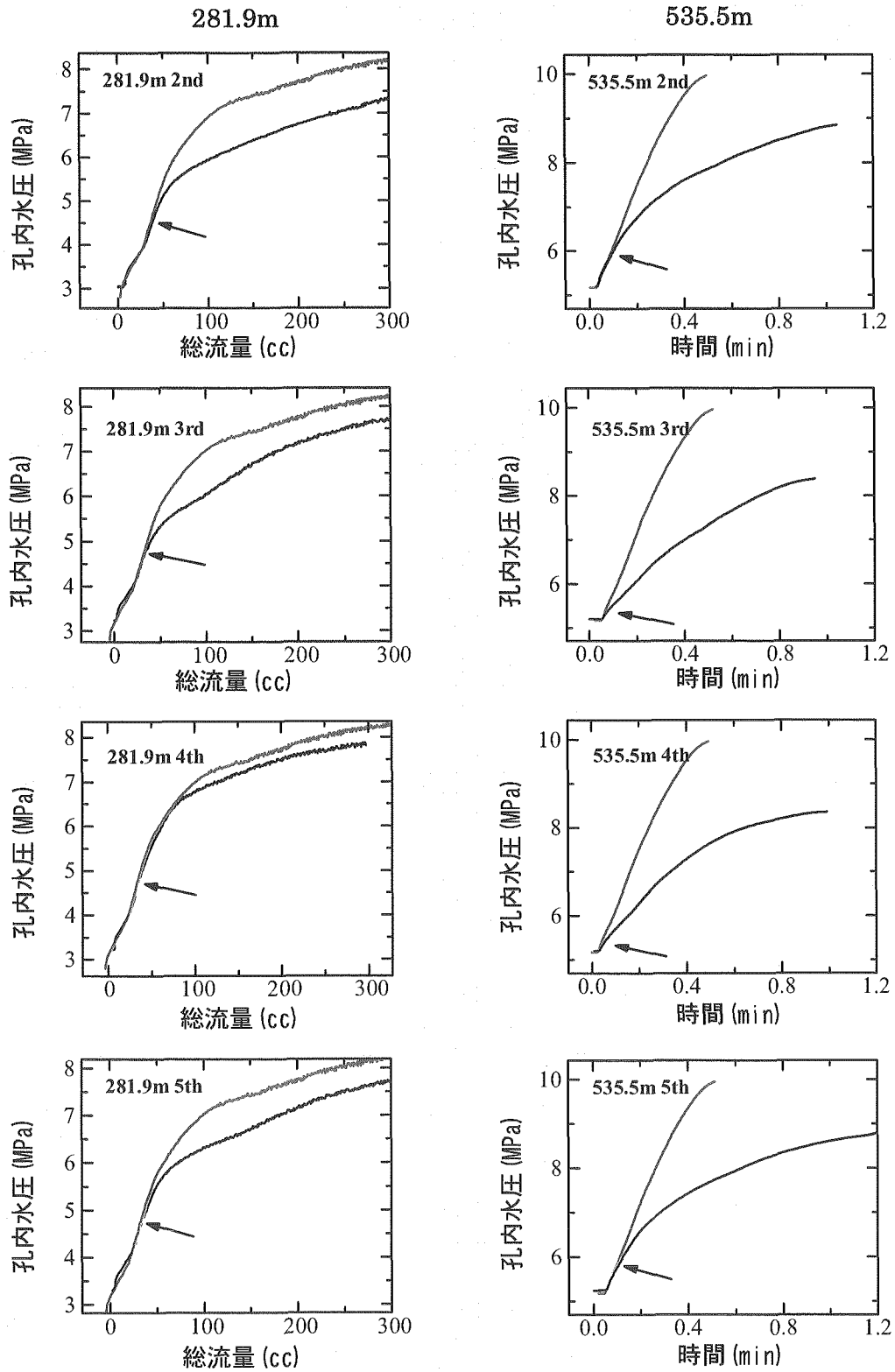


図 3.2.1-4 HDB-2 孔 各加圧サイクルにおけるボアホール水圧—総流量(時間) 曲線
(矢印で示したボアホール水圧が見かけき裂開口圧)

P_s は、水圧破碎によって誘起されたき裂に作用する法線応力と孔内水圧が釣り合うときの圧力である。シャットインした直後、いったん急激に低下した孔内水圧がそれ以降時間とともにほとんど低下しないとき P_s は比較的容易に決定できる。しかし多くの場合、シャットイン後の孔内水圧の減衰速度は急激に低下しないので P_s を孔内水圧-時間曲線の変曲点として決定することはむずかしい。このためシャットイン後の圧力-時間曲線

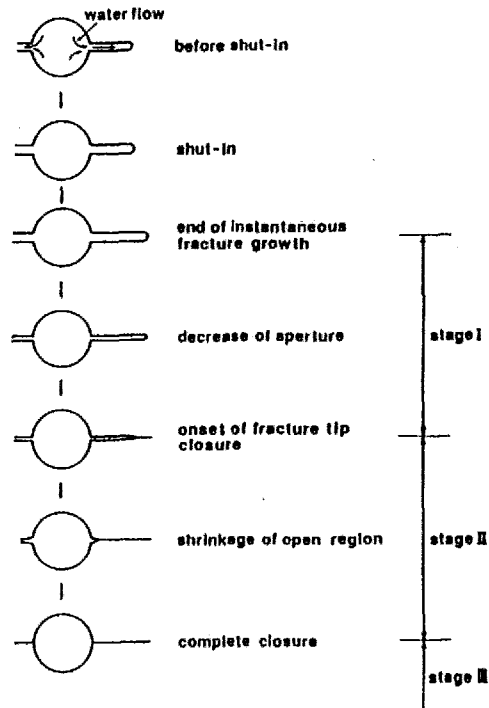


図 3.2.1-5 シャットイン後のき裂閉口挙動

から P_s を求める方法^{[16][17][18]}が数多く提案されていた。これらは経験的なもので、確定的な方法は存在しなかった。しかし、Hayashi and Haimson^[19]は孔井から発生したき裂の閉口挙動の解析を線形弾性論、破壊力学およびシャットイン後の破碎流体のマスバランスに基づいて理論解析し、シャットイン曲線とき裂閉口挙動との関係を明らかにした。すなわち、シャットイン後のき裂閉口過程は、図 3.2.1-5 に示すように、き裂の伸長が停止してき裂先端が閉じるまでの第 1 段階、き裂先端が閉じた直後からき裂全体が完全に閉じるまでの第 2 段階、そして、き裂全体が完全に閉じてから試験が終了するまでの第 3 段階から構成され、圧力減衰速度の逆数は第 1 および第 3 段階における流体圧に関して線形である。そして、第 1 段階の終了時における圧力が P_s となる。この方法では、一般にシャットイン後の圧力-時間曲線から求められる破碎区間の水圧とその圧力減衰速度の逆数との関係を 3 直線で近似し、高圧側の 2 直線の交点における破碎区間の水圧が P_s として求められる（図 3.2.1-6 および図 3.2.1-7 参照）。

水圧破碎法によって造成された縦き裂の走向は、図 3.2.1-2 にシェードで示したき裂のトレースに孔軸を含む平面を最小自乗法によって当てはめて決定した^[16]。

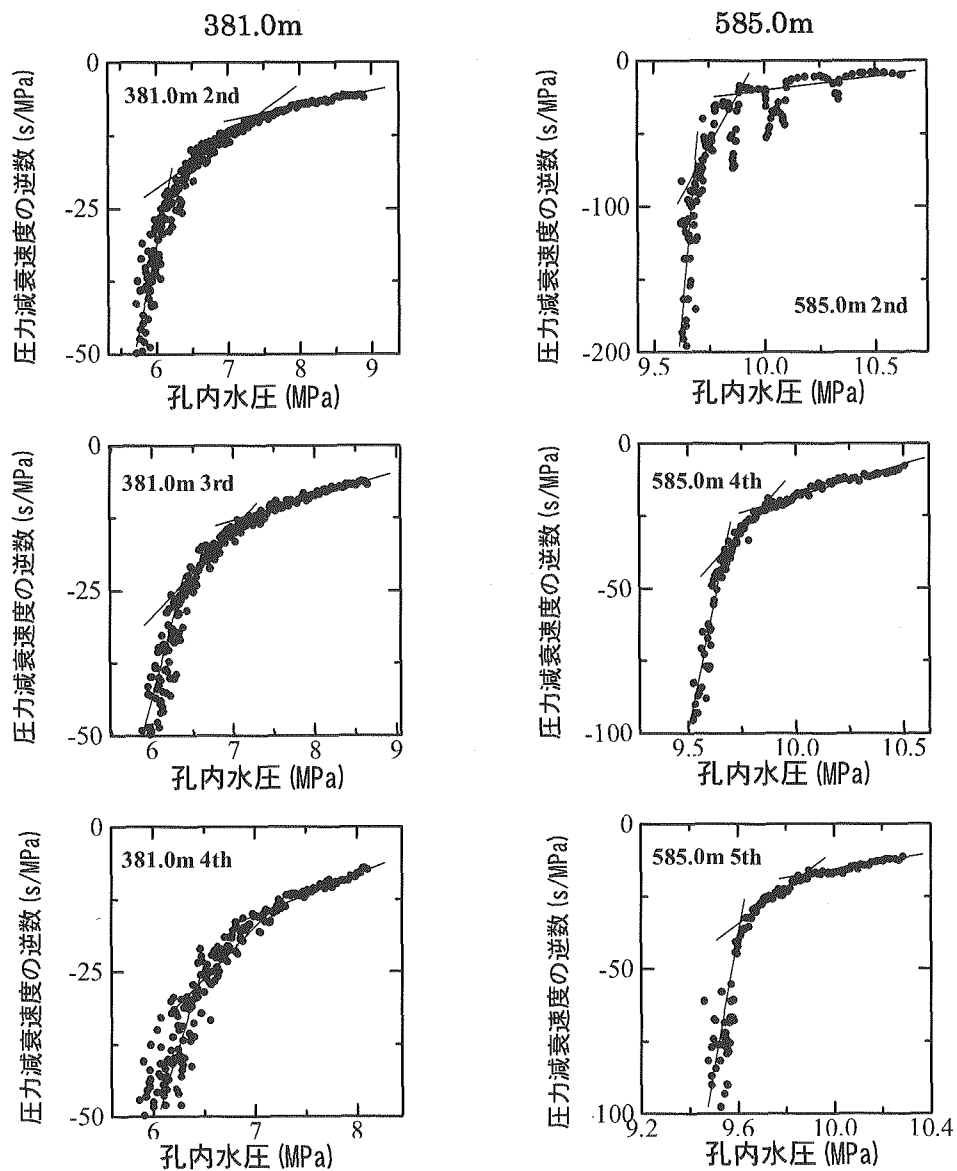


図 3.2.1-6 HDB-1 孔 各加圧サイクルにおける圧力減衰速度の逆数—孔内水圧曲線
(シャットイン後)

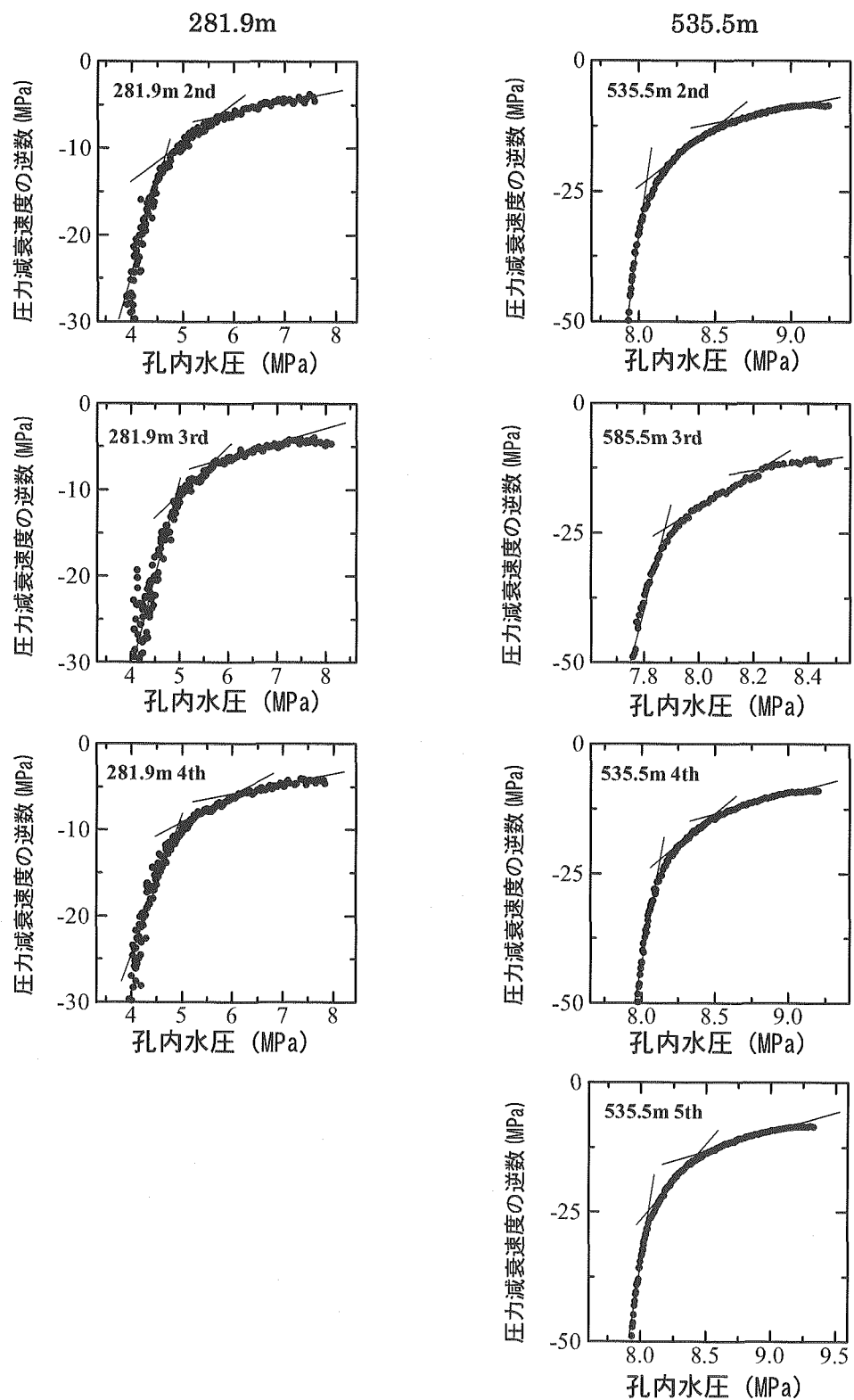


図 3.2.1-7 HDB-2 孔 各加圧サイクルにおける圧力減衰速度の逆数—孔内水圧曲線
(シャットイン後)

3.2.2 インプレッションパッカーによるボアホールブレイクアウトの調査

孔壁面に生じたボアホールブレイクアウトの型取りを1深度ずつ行い、EMI 検層結果の確認及びブレイクアウトが生じた方位とその形状を調査した。図 3.2.2-1 は、インプレッションパッカーによるブレイクアウトの型取りの記録であるが、この結果から EMI 検層で見られた孔軸方向の微小亀裂の集中部がボアホールブレイクアウトであることが確認できた。HDB-1 孔の深度 585.0 m では、破碎前の型取りでボアホールブレイクアウトの一部が記録されたので、参考としてこのスケッチも併せて示した。ただし、破碎前の型取りでは坑井方位傾斜儀計を使用しないので、この場合、ブレイクアウトの方位は不明である。

ボアホールブレイクアウトの形状と方位を評価するときは、まず、円孔周方向に展開した熱収縮チューブに約 1 cm 間隔で孔軸方向と直交する直線を引く。この直線がボアホールブレイクアウトのトレースと交差すると、トレースによって挟まれる直線の長さからボアホールブレイクアウトの幅が求まる。さらに、この直線の midpoint からボアホールブレイクアウトの中心点が求まる。そして、このようにして求めた多数のボアホールブレイクアウトの中心点に、孔軸を含む平面を最小自乗法によって当てはめ、ボアホールブレイクアウトの方位を決定する。ボアホールブレイクアウトの方位は最小水平応力の方位と一致するので、最大水平応力はボアホールブレイクアウトの方位と直交する方位として求められる。

ボアホールブレイクアウトの形状を表現するひとつの指標として、前述のようにして求めたボアホールブレイクアウトの幅を採用することが考えられる。この幅をボアホールブレイクアウトの挟み角度 $2\phi_b$ に換算し、その頻度分布を図 3.2.2-2 に示す。HDB-1 孔の深度 521.5 m におけるボアホールブレイクアウトの挟み角度は平均 33.4° 、標準偏差は 12.5° で、HDB-2 孔の深度 540.5m における挟み角度は平均 42.3° 、標準偏差は 27.0° である。

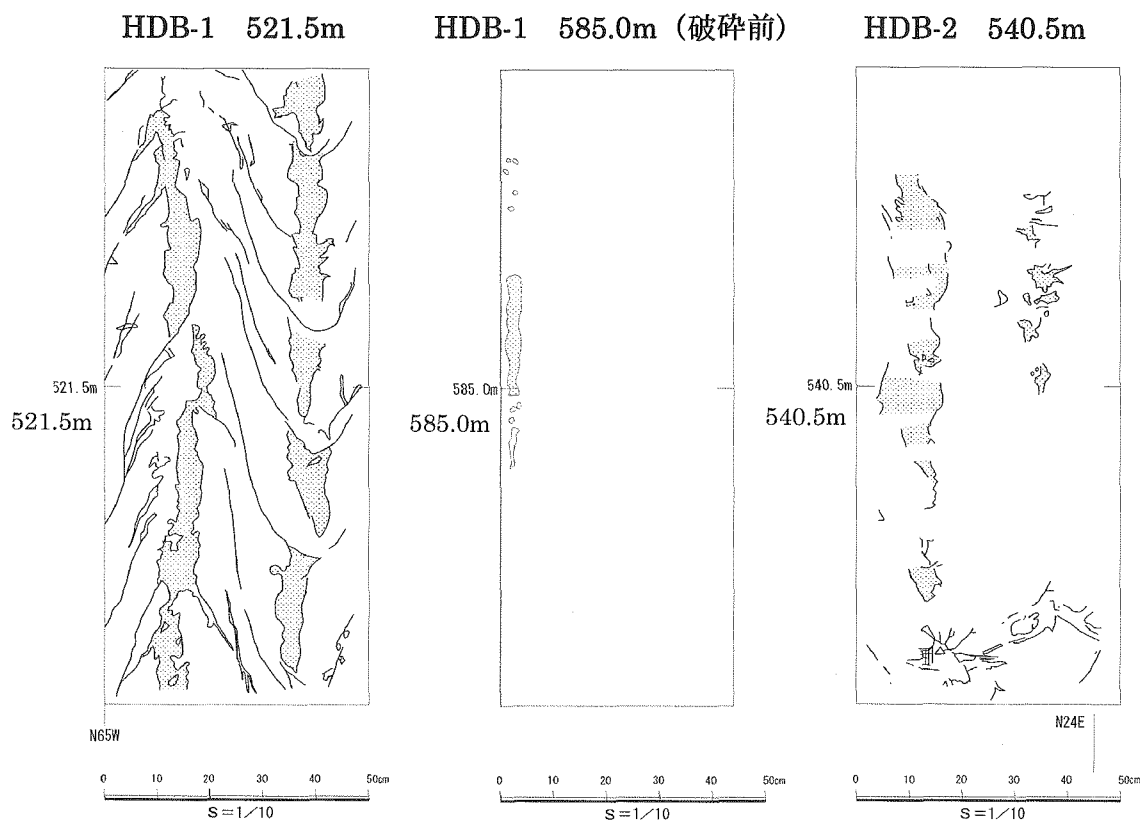


図 3.2.2-1 インプレッションパッカーによって写し取ったボアホールブレイクアウトのスケッチ (HDB-1 孔 深度 585.0m では方位の測定は行われていない)

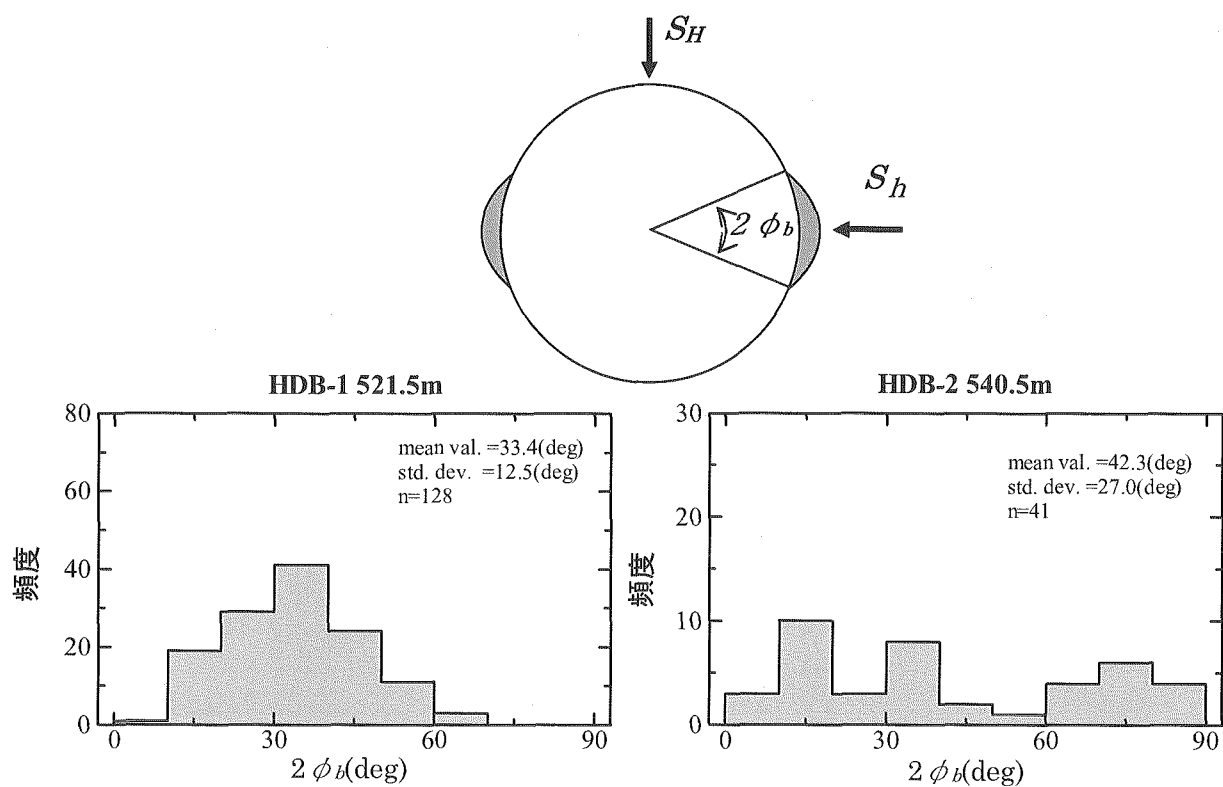


図 3.2.2-2 ボアホールブレイクアウトの挟み角度 $2\phi_b$ の頻度分布

3.2.3 EMI 検層の結果を用いたボアホールブレイクアウトの調査

HDB-1 孔では、EMI 検層が行われており、広い深度範囲にわたって孔壁面の凹凸に関する情報が収集されている。EMI 検層によってボアホールブレイクアウトの方位と形状が精度良く測定できれば、初期応力の方位と大きさに関する情報を広い範囲にわたって効率よく取得できると考えられる。ただし、インプレッションパッカーを用いた孔壁の型取り結果と比較すると EMI 検層の解像度は低いので、例えばボアホールブレイクアウトの挟み角度を EMI 画像から求める場合、どの程度の誤差が生じるかをあらかじめ評価しておく必要がある。そこで、ここでは、最初に前章で述べた深度 521.5m のインプレッションパッカーによるボアホールブレイクアウトの調査結果と、その近傍の深度 515m 付近の深さ 5m にわたる EMI 画像を用いたボアホールブレイクアウトの調査結果とを比較検討する。次に、HDB-1 孔の他の深度で収集された EMI 画像から求めたボアホールブレイクアウトの調査結果を示す。

EMI 画像からボアホールブレイクアウトの形状と方位を評価するときは、まず、図 3.2.3-1 に示すように、所定の深度の EMI 画像をプリントアウトし、トレース用紙にブレイクアウトの輪郭を写し取る。そして、掘削深度で言うと約 4.5cm 間隔で孔軸方向と直交する直線を引く。その後の処理は、熱収縮チューブに写し取られたボアホールブレイクアウトの場合とまったく同じである。なお、データサンプリングの密度は、熱収縮チューブの場合は孔軸方向の長さ約 1.2m に対して 1cm 間隔、EMI 画像では長さ約 5m に対して 4.5cm 間隔であるから、ほぼ等しい。このようにして求めたボアホールブレイクアウトの頻度分布を示すと図 3.2.3-2 に示す通りである。これを図 3.2.2-2 と比較すると、EMI 画像から読み取った挟み角度は、インプレッションパッカーによって調査した挟み角度の 66% と小さいことが認められる。これは、ボアホールブレイクアウトの周縁部では、孔壁面から岩盤内部への破壊領域が浅いために凹凸のコントラストが弱く、EMI 検層の解像度では孔井形状の変化として検出できないからと考えられる。また、EMI 画像から得られたデータ数が 58 個と少ないのは、画像の孔軸方向に縦縞のすじが現れているために、ボアホールブレイクアウトのトレースが完全に描けないからと考えられる。平均値に対する標準偏差の割合は、それぞれ 37% および 39% とばらつきの程度はほぼ等しいと言える。一方、ボアホールブレイクアウトから評価された最大主応力の方位(真北から時計回りを正とする)は、インプレッションパッカーの場合が 87.1° 、EMI 画像の場合が -89.3° と殆ど一致する。以上のことから、EMI 画像から評価されるブレイクアウトの挟み角度はかなり小さくなる傾向があるものの、その方位はインプレッションパッカーの結果と一致するといえる。

最後に、深度 515m、555m、635m および 650m を中心とした長さ 5m の範囲の EMI 画像を用いて測定したボアホールブレイクアウトの挟み角度の頻度分布図を図 3.2.3-3 に、調査結果の一覧を表 3.2.3-1 示す。最も深い深度 710m を除くと、挟み角度の平均値は 22° から

28° とほぼ等しい。深度 710m のデータ数が 34 個と少ないのは、ボアホールブレイクアウトが孔軸方向に連続的に分布せず、小規模なボアホールブレイクアウトがまばらに分布するためである。EMI 画像のボアホールブレイクアウトから求めた挟み角度と最大水平応力の方位をまとめて示すと表 7.5.2 のようである。最大主応力の方位は深度 515.0m から深度 710m の間で E-W 方向であり、殆ど変化しない。

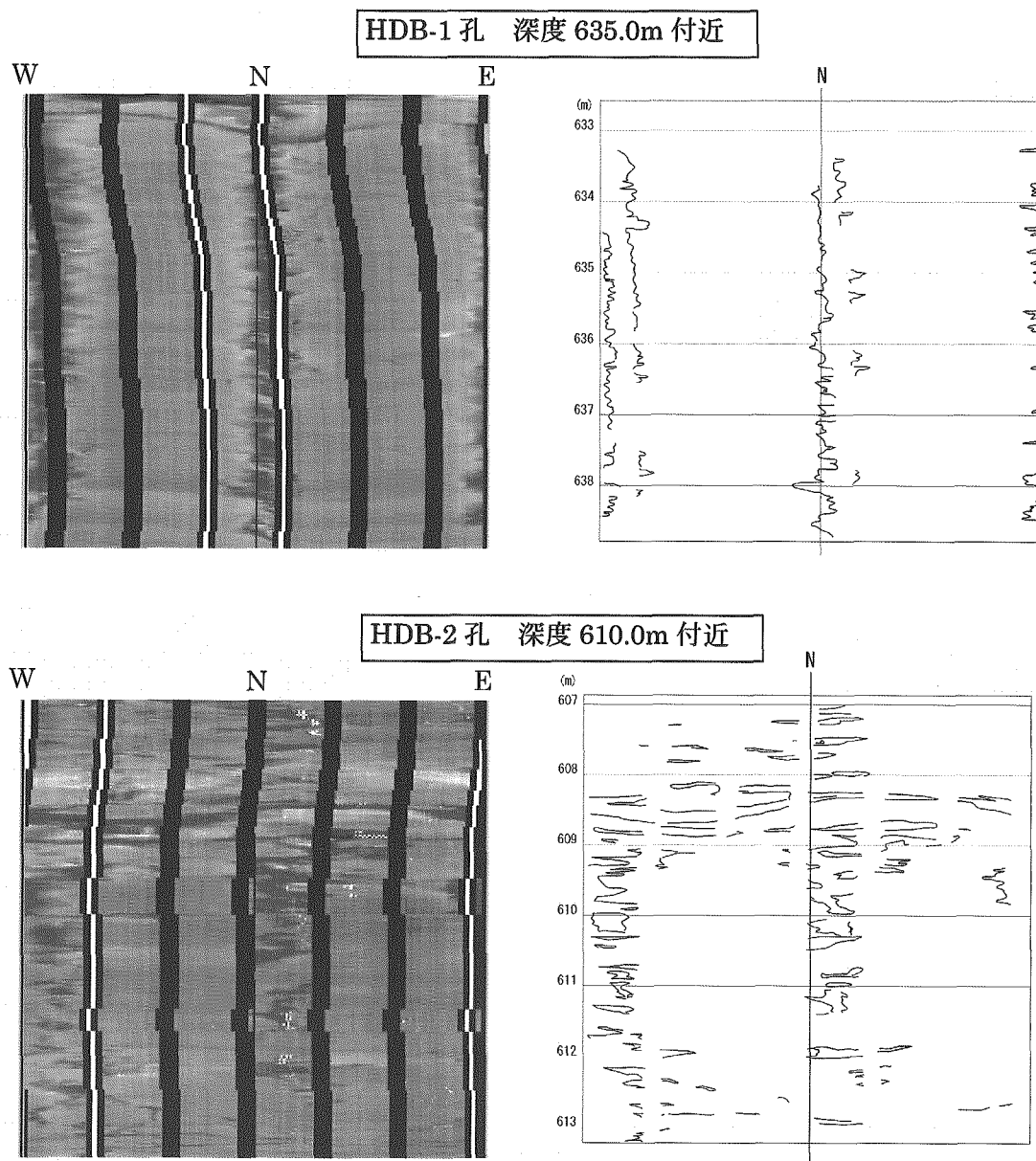


図 3.2.3-1 EMI 画像（左）およびボアホールブレイクアウトのトレース（右）

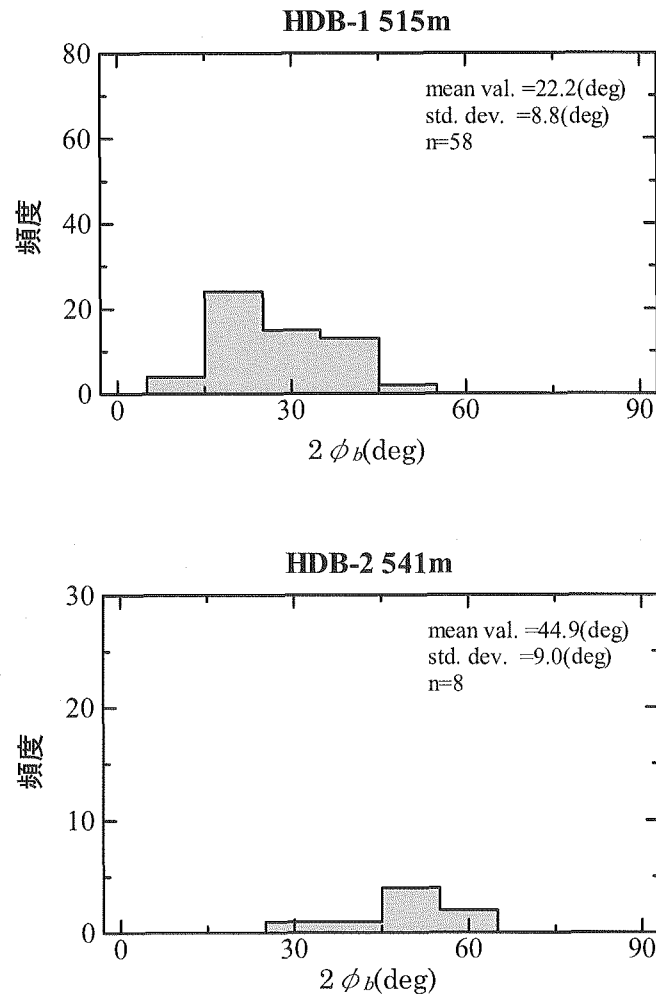


図 3.2.3-2 EMI 検層によって調査したボアホールブレイクアウトの
挟み角度 $2\phi_b$ の頻度分布

表 3.2.3-1 EMI 画像を用いたボアホールブレイクアウトの調査結果

	深度 (m)	水平面内最大主 応力方向 (deg)*	応力方向の 標準偏差 (deg)	挟み角度 (deg)	挟み角度の 標準偏差 (deg)
HDB-1	515.0	-89.3	6.4	22.2	8.8
	555.0	-75.7	5.7	28.5	8.0
	635.0	-74.0	5.0	22.6	6.0
	650.0	-79.1	3.1	24.0	5.3
	660.0	-74.8	4.1	26.7	8.3
	710.0	-79.2	9.1	17.1	5.9
HDB-2	541.0	-16.5	13.7	44.9	9.0
	575.0	-25.9	7.4	35.3	17.8
	588.0	-54.8	9.1	23.4	7.4
	610.0	-65.5	4.2	21.7	8.9

* : 最大水平応力の方位を真北から時計まわりに測定した角度。

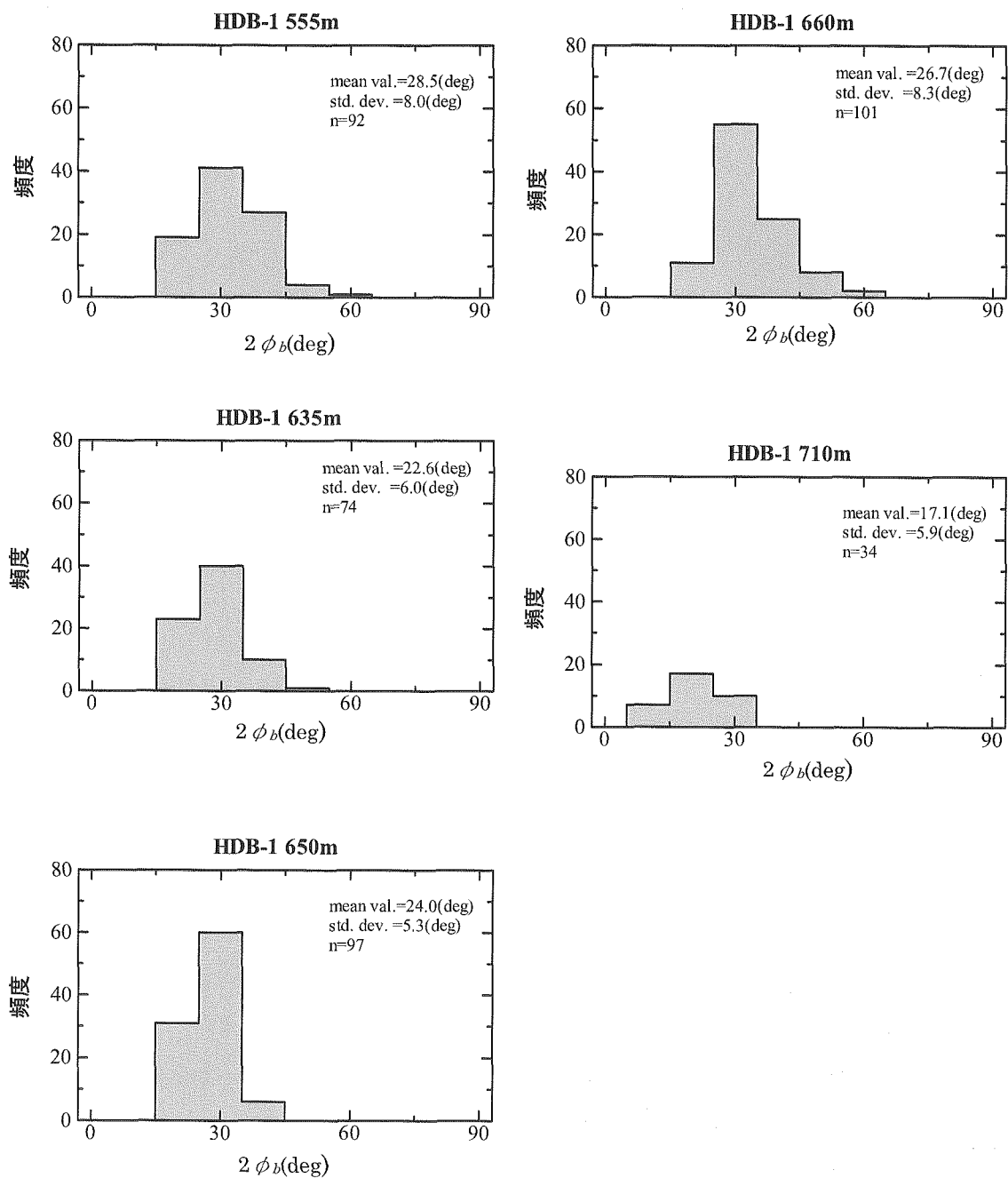


図 3.2.3- 3(1) EMI 画像から求めたボアホールブレイクアウトの挟み角度 $2\phi_b$ の頻度
(HDB-1 孔)

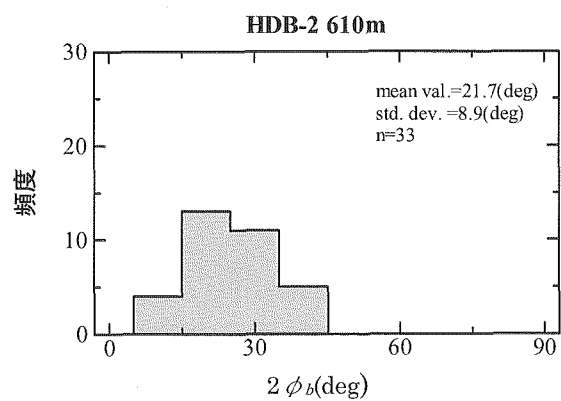
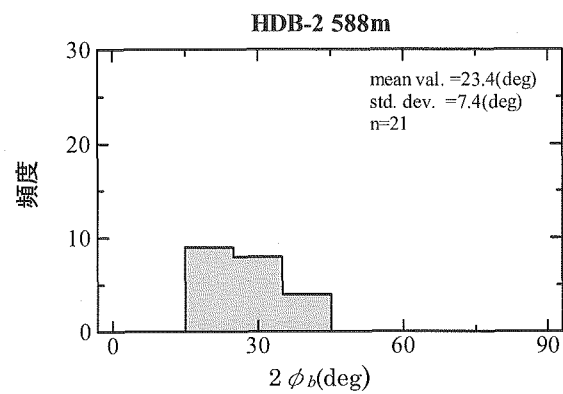
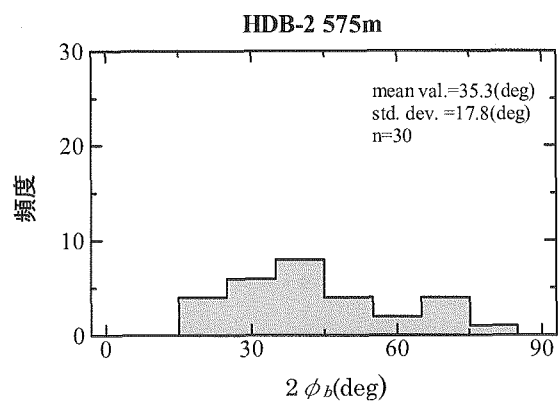


図 3.2.3- 3(2) EMI 画像から求めたボアホールフレークアウトの挟み角度 $2\phi_b$ の頻度
(HDB-2 孔)

3.2.4 応力測定結果まとめ

応力測定結果を表 3.2.4-1 に示す。表中の斜文字で示した欄は水圧破碎による結果を示し、その他は EMI 画像などからボアホールブレイクアウトを解析した結果を示している。

これによると、比較的浅部において密度検層から推定される土被り圧は最小主応力値とほぼ同等な値を示しているが、深部に行くにしたがって推定土被り圧は最大主応力値に近づいていく傾向を示している。この傾向は HDB-1、HDB-2 の両孔に現れている。また、水平面内最小主応力値に対する最大主応力値の比を算定すると 1.25 倍～1.65 倍であった。また、HDB-1 孔における最大主応力方向はほぼ東西であり、地震のメカニズム解から推定される本調査領域の最大圧縮軸とおおよそ合致するが、HDB-2 孔の結果は N39.6W であり、それとは異なる結果となった。

表 3.2.4-1 水圧破碎法による初期応力測定結果

試錐孔	深度(m)	水平面内 最大主応力 (MPa)	水平面内 最小主応力 (MPa)	水平面内 最大/最小 主応力比率	単位体積重量 (g/cm ³)	推定土被り圧 (MPa)	最大主応力 方位	算定方法	備考
HDB-1 (大曲断層 西側)	381.00	11.80	7.23	1.63	1.87	6.99	N83E	水圧破碎データ	
	515.00	10.67	8.96	1.19	1.99	10.05	N89.3W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	521.50	10.93	9.05	1.21	1.90	9.71	N87.1E	ボアホールブレイクアウトデータ	型取り
	555.00	11.30	9.48	1.19	1.92	10.45	N75.7W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	585.00	12.37	9.87	1.25	2.00	11.50	N62.3W	水圧破碎データ	
	635.00	12.11	10.52	1.15	2.02	12.56	N74W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	650.00	12.28	10.71	1.15	2.00	12.73	N79.1W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	660.00	12.41	10.84	1.14	2.00	12.97	N74.8W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	710.00	12.64	11.49	1.10	1.98	13.78	N79.2W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
HDB-2 (大曲断層 東側)	281.90	8.25	5.91	1.40	2.03	5.62	N39.6W	水圧破碎データ	
	535.50	13.94	8.43	1.65	1.94	10.21	N0.1W	水圧破碎データ	
	540.50	11.19	8.43	1.33	1.88	9.94	N0.5E	ボアホールブレイクアウトデータ	型取り
	541.00	11.27	8.48	1.33	1.92	10.19	N16.5W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	575.00	12.52	8.82	1.42	1.89	10.67	N25.9W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	588.00	12.38	8.95	1.38	1.90	10.95	N54.8W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像
	610.00	13.03	9.17	1.42	1.91	11.42	N65.8W	ボアホールブレイクアウトデータ	EMI画像

4. 考察

4.1 調査対象岩盤の力学的物性分布

D-1 孔において、深度 1,355m の範囲では大略 2 つの範囲に区分することが出来る。上層範囲（地表～400m）は更別層にほぼ対応する砂岩・礫岩などの互層であり、下層範囲（400m～1,355m）は砂岩が分布する勇知層にほぼ対応する。既往の文献⁹⁾によれば、D-1 孔の底部に珪藻質泥岩による声間層が存在する可能性が示唆されていたが、その後の詳細な地質調査により D-1 孔は上述の通り勇知層と更別層の 2 層のみ分布していることが判明しており、力学的調査の結果もほぼ現在の地質区分に対応しているものと考えられる。

HDB-1 孔においては、力学的には 350m 付近と 450m 付近を境界として岩盤の物理・力学的性質が異なるゾーンが存在すると考えられる。これは、現在の地質区分では珪藻質泥岩層、硬質頁岩に関する遷移帯にほぼ対応している。HDB-2 孔においても、物理・力学特性の観点から HDB-1 孔と同様の 3 つのゾーン区分が可能であるが、最浅ゾーンの部分は相対的に薄い。

図 4.1-1、4.1-2 に核燃料サイクル開発機構が第 2 次とりまとめにおいてとりまとめた国内に分布する新第三紀堆積岩（凝灰岩・泥質岩）の諸物性の頻度分布⁹⁾と、幌延町において調査対象となった岩盤（勇知層、更別層、声間層、稚内層）のそれを比較したものを示す。

物理物性では、自然密度、含水率及び P 波速度に関しては、D-1 孔（勇知層、更別層）及び HDB-1,2 孔（声間層、稚内層）のデータは、最頻値やその分布範囲が第 2 次とりまとめで示されている岩石物性の分布と類似している。吸水率と有効空隙率は、第 2 次とりまとめで示される物性値の値に比べ大きい範囲に分布しており、幌延町に分布している岩石の特徴の一つとして捉えられる。

力学物性に関しては、各物性値（静弾性係数、圧裂引張強度、一軸圧縮強度、静ポアソン比及び内部摩擦角）とも、第 2 次とりまとめに示される物性値の最頻値の位置及び分布範囲とほぼ同じであり、力学特性に関しては国内に分布する新第三紀堆積岩のそれと大きく変わらないと判断される。

以上の結果から、幌延町内に分布する堆積岩（勇知層、更別層、声間層、稚内層）は国内に分布する堆積岩に比べ特殊なものではないと考えられる。しかし、吸水率と有効空隙率は国内の堆積岩に比べ大きくなっており、幌延町内に分布する岩石の特徴として位置づけられる。

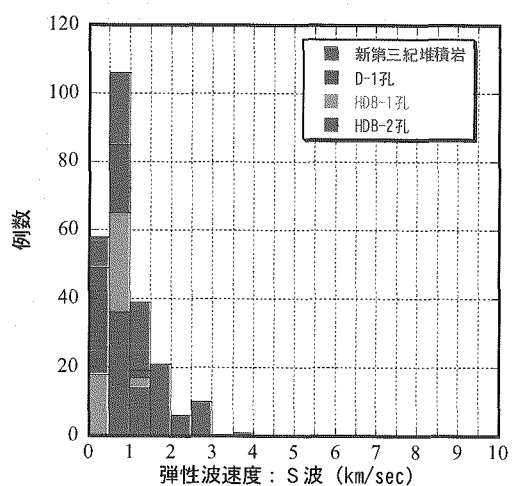
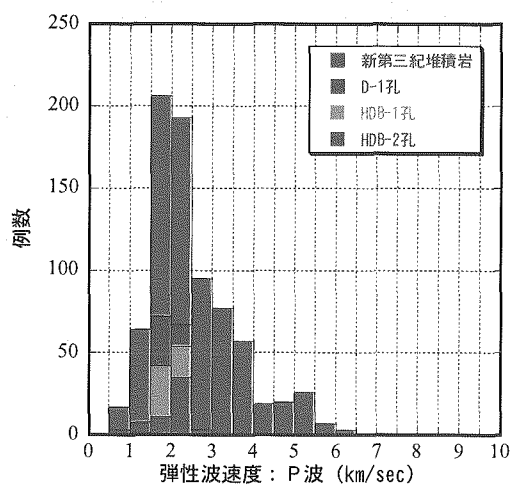
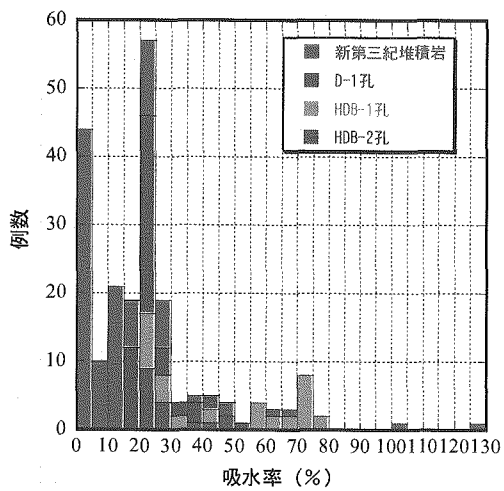
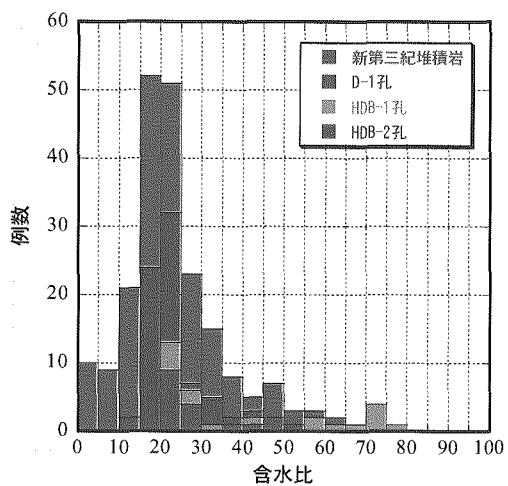
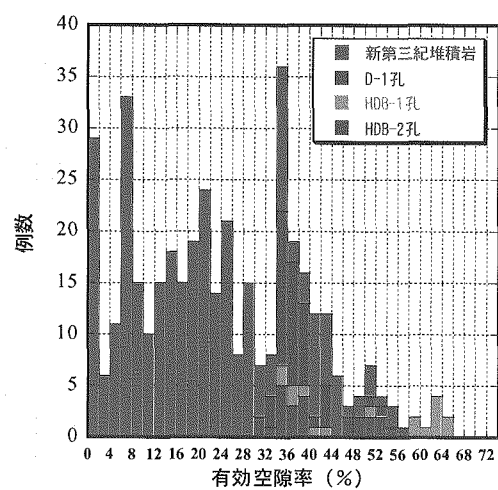
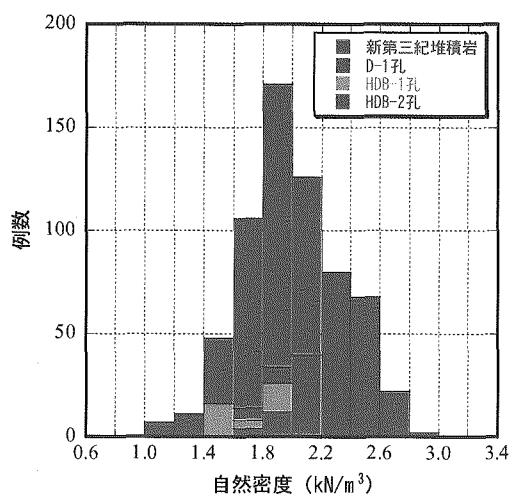


図 4.1-1 国内に分布する堆積岩との比較 (物理物性値)

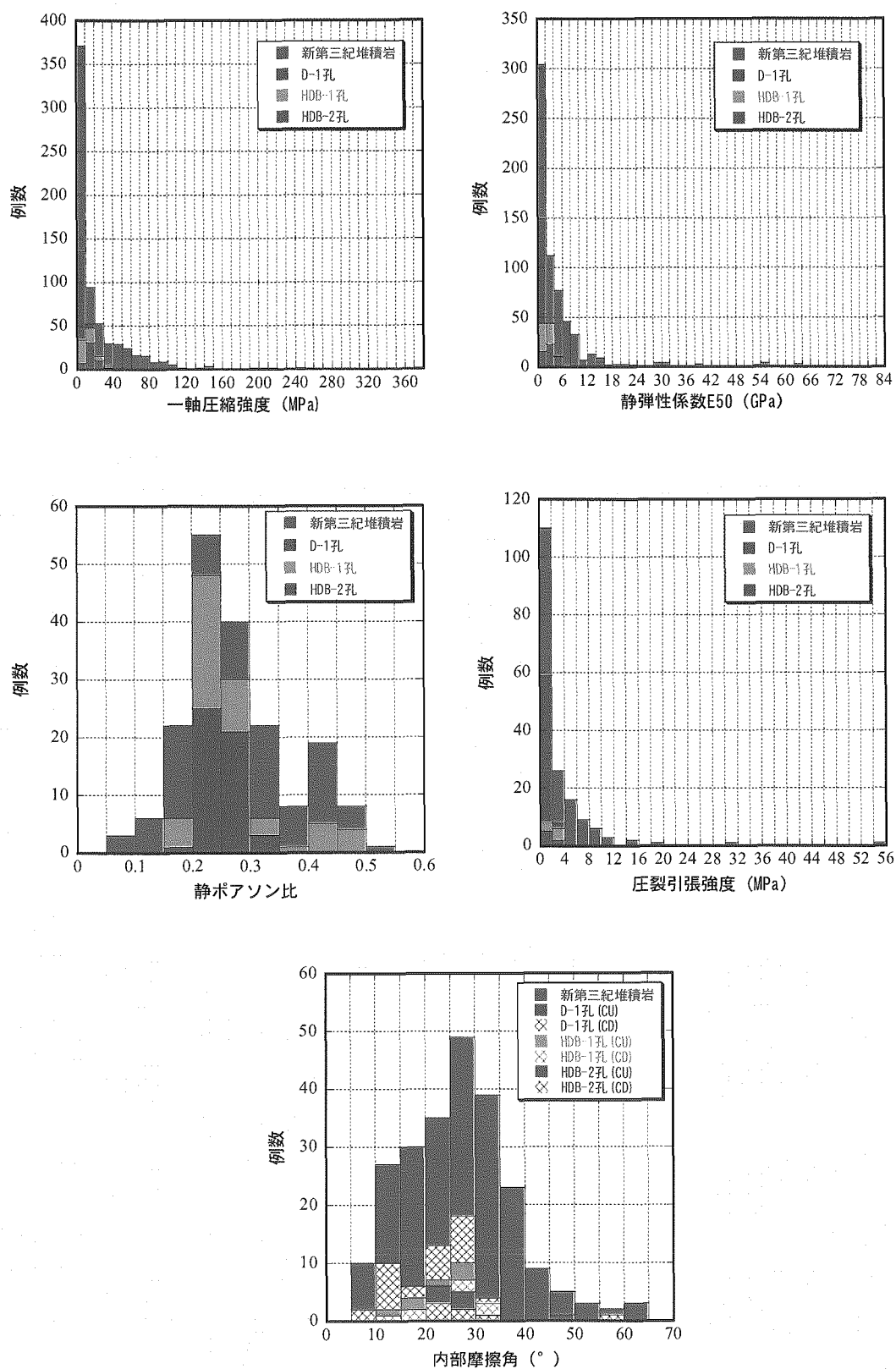


図 4.1-2 国内に分布する堆積岩との比較（力学物性値）

4.2 HDB-1, 2 孔近傍に分布する新第三紀堆積岩の特徴

4.1 に示したように、得られた物性値としては国内の新第三紀堆積岩と大きく異ならない。ここでは三軸圧縮試験結果および検層結果と室内試験による物理特性の比較結果に基づき、さらに研究対象地層として声間層・稚内層の岩石の力学的特徴を検討する。

声間層・稚内層は、地質学的には珪藻質泥岩、硬質頁岩と呼ばれる岩石で構成されており、いずれも珪藻が海底あるいは湖底で堆積し圧密されてできたものとされている。教科書的な特徴¹⁰⁾としては、珪藻質岩の三軸圧縮状態での剪断特性は、シルト質泥岩の特徴がより顕著になる、つまり、圧密排水試験(三軸 CD 試験)においては、せん断過程における鋭い降伏応力の存在と、拘束圧の増大に伴う降伏強度の低下、およびそれに伴う変形剛性の著しい低下などが挙げられている。しかし、これは非常に高間隙率の状態(70%以上)の珪藻質泥岩の例である。本プロジェクトで対象としている声間層・稚内層の岩石の有効空隙率は、概ね 30~60%程度の範囲にあり、CD 試験時の応力~ひずみ曲線は、前述したような特徴(拘束圧の増大に伴う降伏強度の低下、およびそれに伴う変形剛性の著しい低下)は見られず、むしろ泥岩に近い状態を示した。泥岩では、CU 試験の応力~ひずみ曲線は、CD 試験時のそれよりも曲線性が大きいと書かれているが、今回の試験結果はむしろ逆の傾向を示す。軸差強度およびピーク強度時の破壊ひずみも非排水せん断よりも排水せん断時の方が大きい。これは、非排水せん断時には岩石の骨格構造以外の間隙水の圧縮およびそれに伴う大きな過剰間隙水圧の発生による有効応力の減少がこのような応力ひずみ関係の相違をもたらす一つの要因になっていると考えられる。

図 4.2-1~4 に HDB-1, 2 孔における CD, CU 条件別で実施した三軸圧縮試験結果をそれぞれ示す。この結果から見た珪藻質泥岩と硬質頁岩の差異を整理すると以下ようになる。

- ・ 応力~ひずみ曲線は、珪藻質泥岩の方が硬質頁岩に比べ曲線性が強い。また、珪藻質泥岩は今回実施した拘束圧の範囲内(推定土被り圧の 2 倍程度まで)では、拘束圧が高くなるとひずみ軟化型から弾完全塑性型の応力~ひずみ曲線に移行するが、硬質頁岩は拘束圧が高くなってもひずみ軟化挙動を引き続き示す。
- ・ ピーク強度時の破壊ひずみはあまり大きく違わないが、ほぼ同一レベルの拘束圧下のピーク強度は硬質頁岩層の方が 3~4 倍程度大きい。
- ・ ピーク後の挙動を見ると、珪藻質泥岩はあまり拘束圧の大きさに依存せず、ほぼ一定値(5MPa 程度)にすぐに収束する傾向にあるが、硬質頁岩は拘束圧の上昇とともに残留強度も上昇し、かつ軸ひずみの増大に伴い残留強度が漸次減少するような傾向を示す。

このような挙動の違いから以下のような特徴が推察される。

- ・珪藻質泥岩と硬質頁岩の変形挙動の違いは、岩石内に存在する空隙の比率に大きく依存していると考えられる。
- ・珪藻質泥岩と硬質頁岩のピーク応力後の挙動の違いは、破壊時の剪断面の形態あるいは強度差にあると考えられる。つまり、珪藻質泥岩は軟質であるため剪断面の形状は滑らかでありかつ、できたときの凹凸は変形の進行とともにすぐに消失し一定の値になるが、硬質頁岩は相対的に硬質なため剪断面の形状で凹凸が激しく形成時の面の凹凸が消失するまでにかなりの変形量が必要となるためと考えられる。

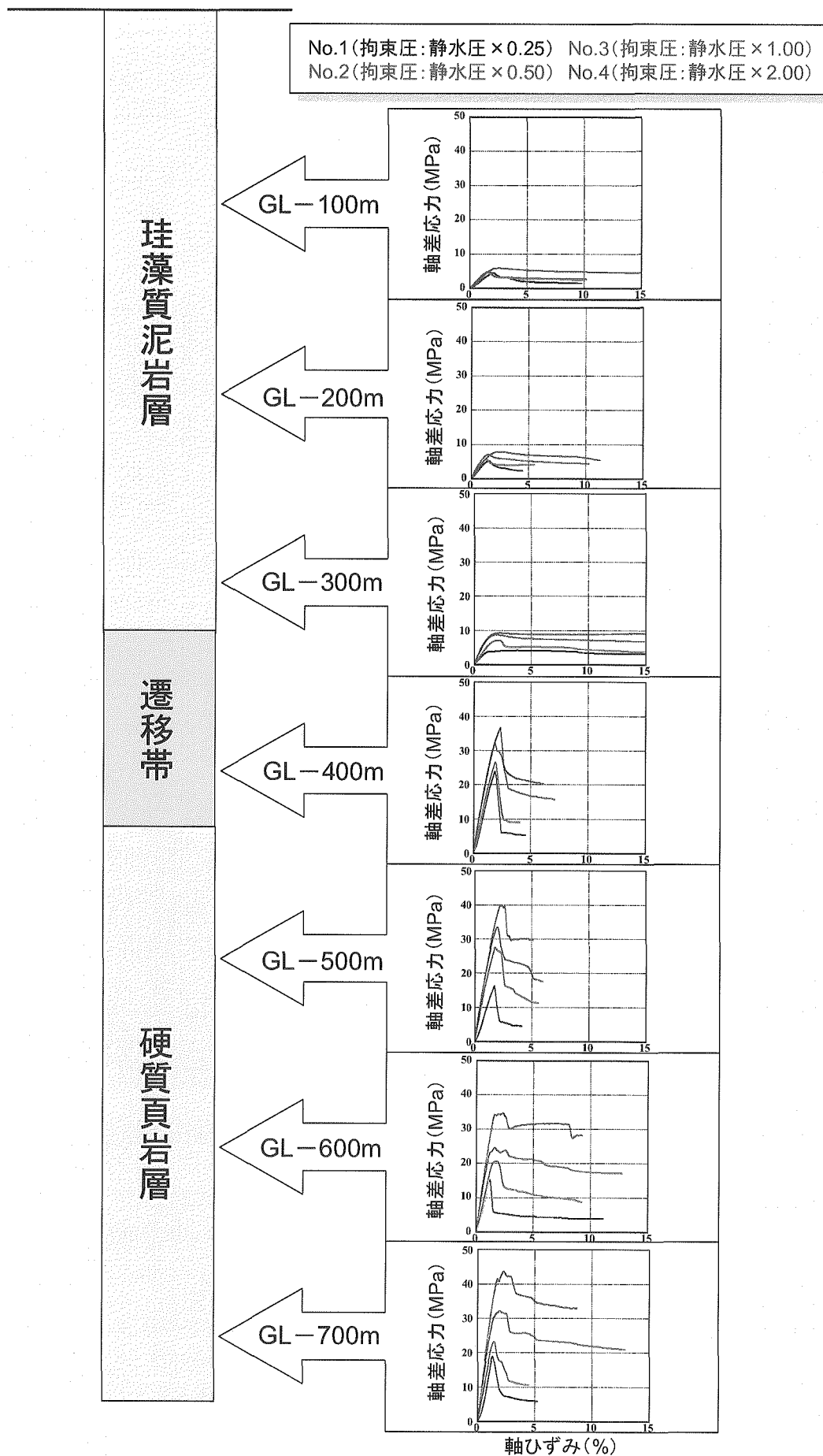


図 4.2-1 三軸試験結果 (HDB-1 孔、CD 条件)

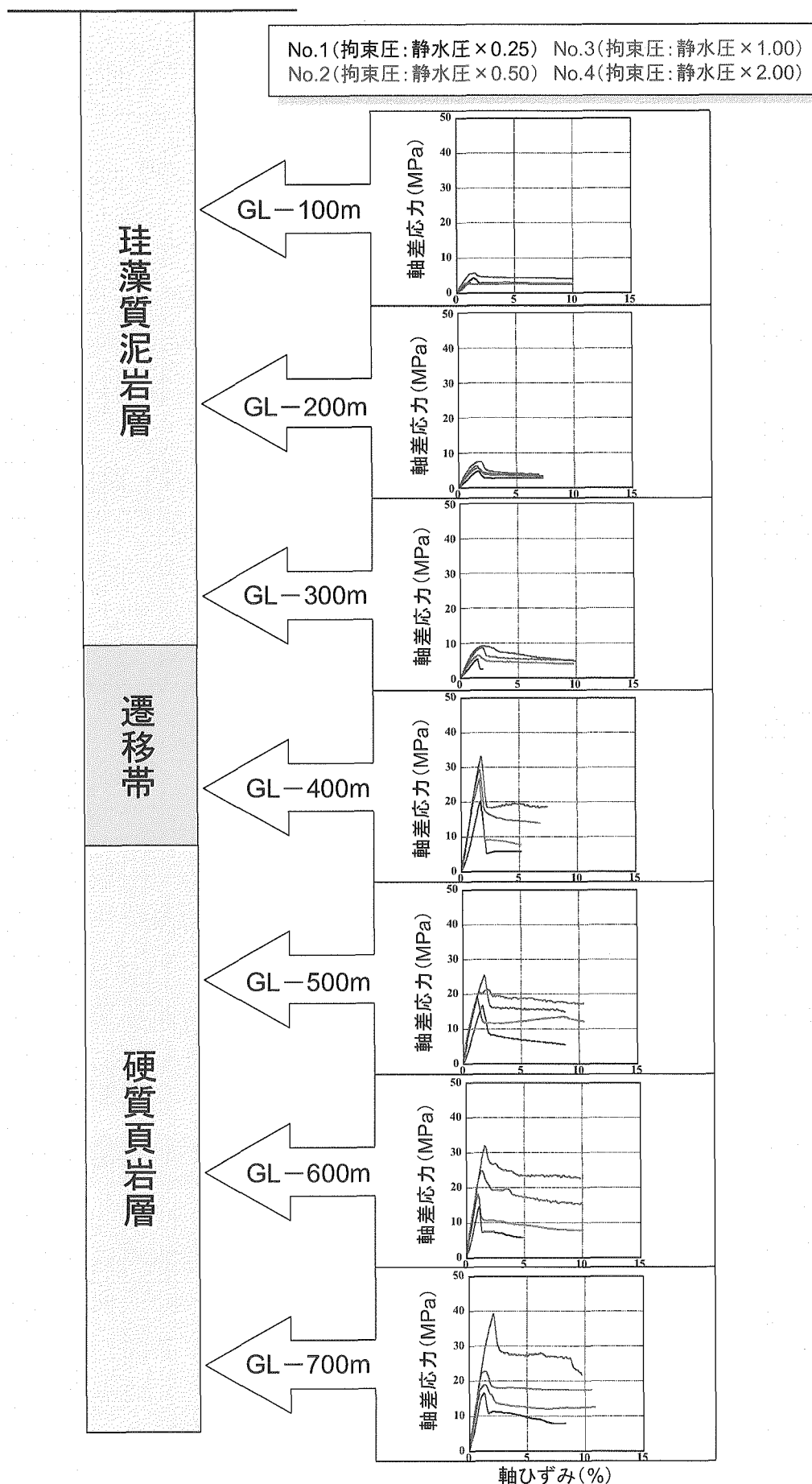


図 4.2-2 三軸試験結果 (HDB-1 孔、CU 条件)

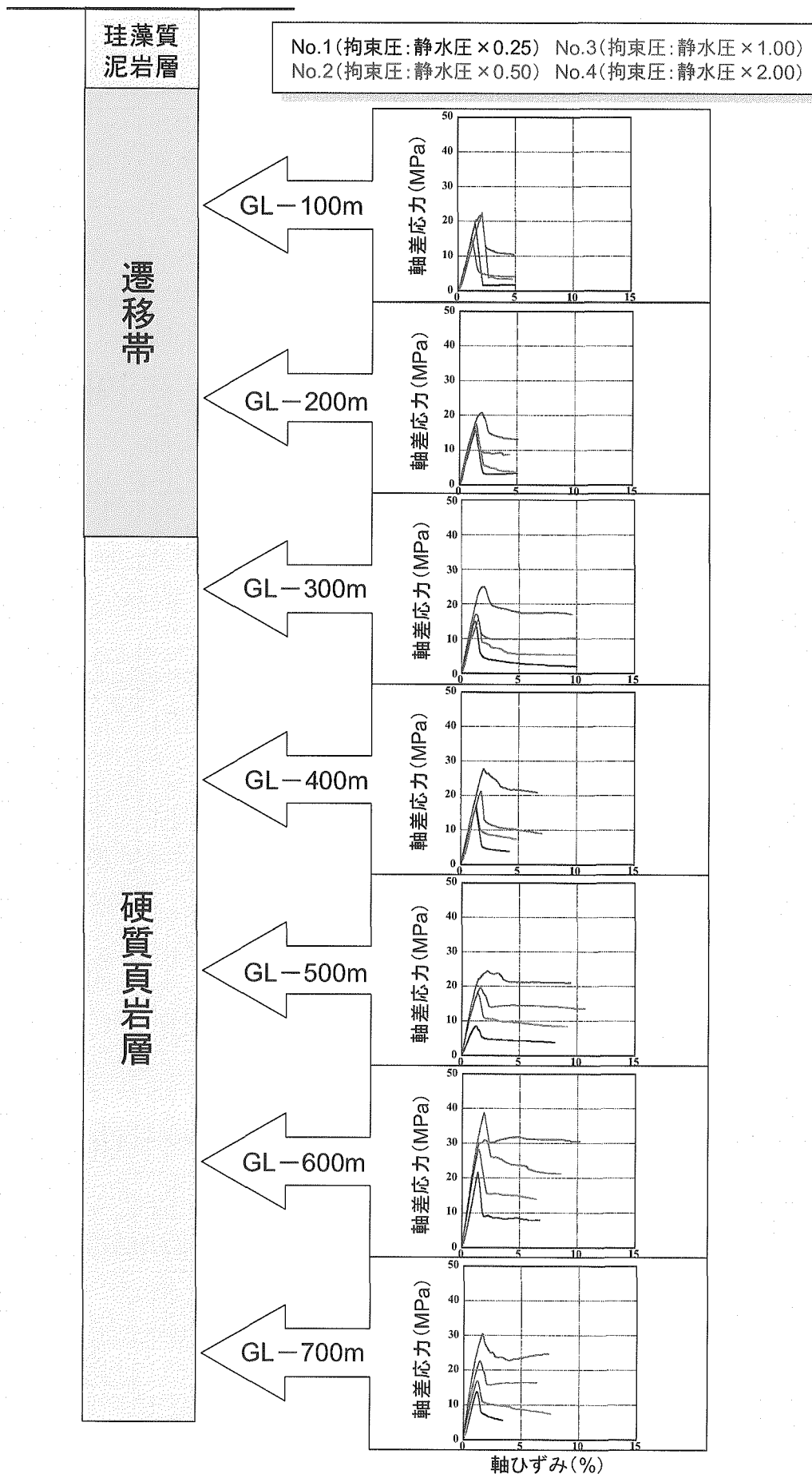


図 4.2-3 三軸試験結果 (HDB-2 孔、CD 条件)

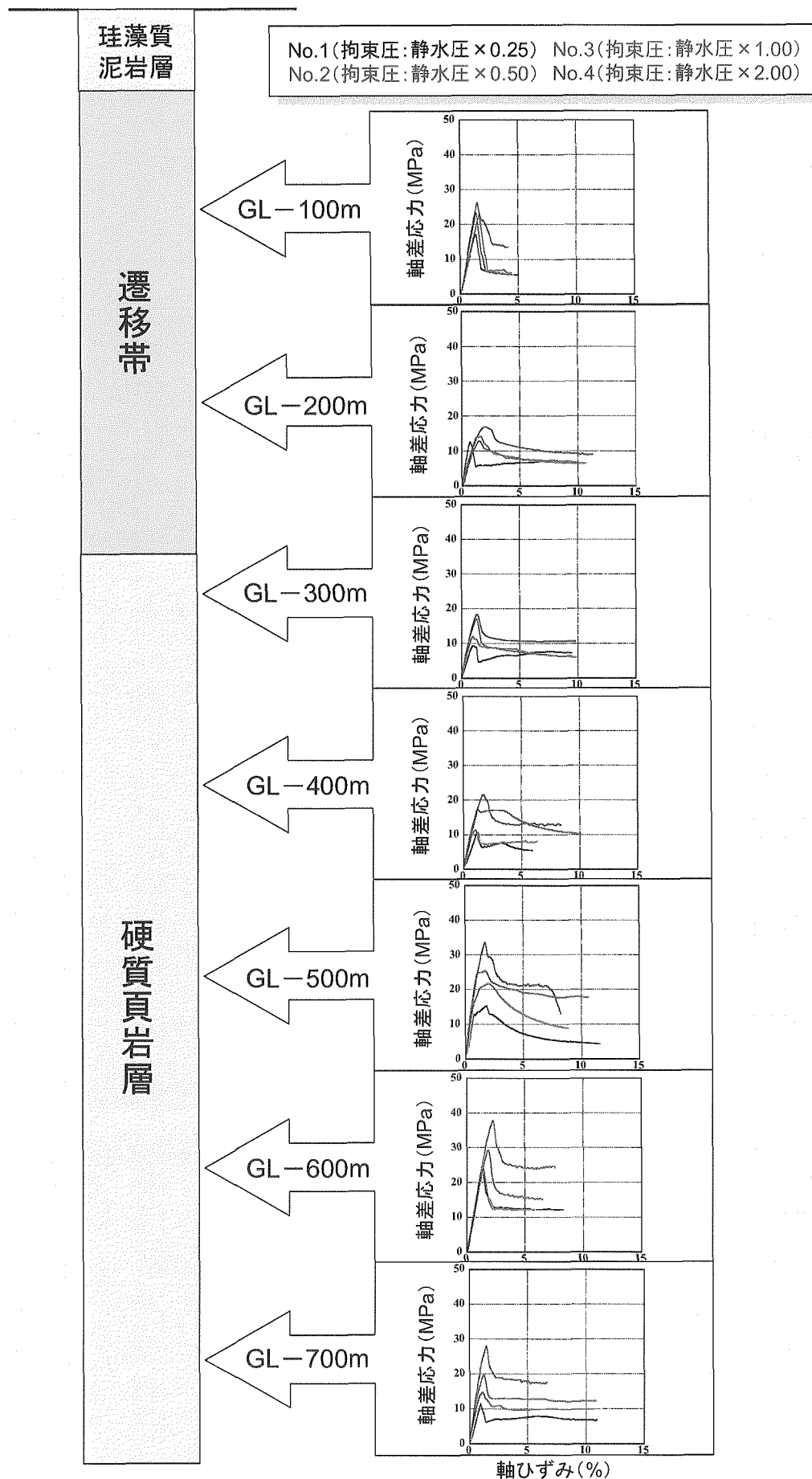


図 4.2-4 三軸試験結果 (HDB-2 孔、CU 条件)

次に、各種検層結果と室内試験結果との比較検討を行う。

図 4.2-5 は、室内試験結果と原位置の検層結果を深度分布で重ね合わせたものである。図中上段が密度、下段が弾性波速度について重ね合わせたものである。HDB-1 孔における室内試験と原位置検層の密度比較を見ると、珪藻質泥岩層において大きな差異が確認できるが、遷移帯以深では良好な一致を見ることができる。これは、HDB-1,2 孔とも浅部の掘削には清水を使用していたため大きな孔径拡大が、特に HDB-1 孔で生じ、原位置検層の精度が悪いためと考えられる。HDB-2 孔においては、珪藻質泥岩層が地表から 40m 程度までしか分布しておらず、HDB-1 孔と比較する上で十分なデータ数を取得することが出来なかった。しかしながら、遷移帯以深では HDB-1 孔と同様に良好な一致を確認することができた。これらの結果から、物理検層から算定された密度と室内試験のそれは、おおむね等しいと考えられた。

HDB-1 孔における弾性波速度に関する比較を見ると、P 波では深度方向に一貫して良好な一致を確認することが出来るが、S 波は特に 400m 付近より浅い珪藻質泥岩層で、室内試験における測定値が常に下回っている結果となった。この原因として密度比較で推定した空隙及び含水状態の変化が影響していることも考えられるが、何故 S 波のみに差異が現れるのか、明確な原因は不明である。一方、HDB-2 孔においては、S 波において良好な一致を確認することができるが、P 波においては、室内試験値が検層結果より上回っている傾向を深度 100m～400m 程度の範囲で示した。この原因を次のように考えた。硬質頁岩のような比較的硬い岩石では割れ目のような弱部に、その破壊が支配される。室内試験に用いた供試体はできるだけ割れ目が含まれない箇所を選定して作成される。一方、原位置における検層作業は割れ目も含んだ岩盤を対象に測定されるため、相対的に岩盤中に存在する割れ目の影響が強く現れ、室内における値と差異が生じるものと思われる。

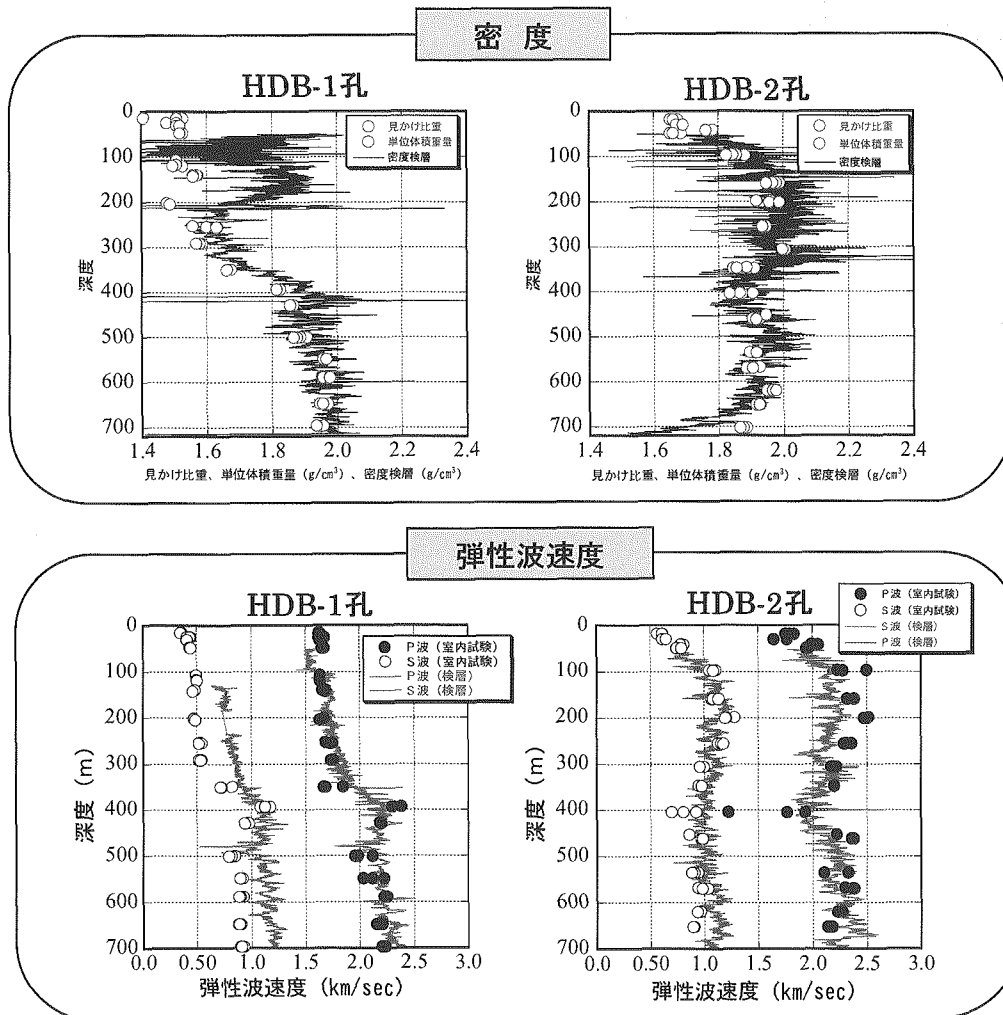


図 4.2-5 室内試験と検層結果の比較

4.3 HDB-1, 2 孔近傍の応力場について

図 4.3-1 に各孔における水平面内最大主応力値、最小主応力値および密度検層から推定される土被り圧を深度方向にプロットしたものを示す。また、図 4.3-2 には水平面内最小主応力値に対する最大主応力値の比を深度に対してプロットしたものを、図 4.3-3 には最大主応力方向を深度に対してプロットしたものを示す。

これらより、HDB-1, HDB-2 で実施した初期応力測定等の結果を考察すると以下ようになる。

(両孔に共通すること)

- ・比較的に浅い部分において応力環境は、 σ_H (最大主応力値) $>$ σ_h (最小主応力値) $>$ σ_v (推定土被り圧) となっており、逆断層型を示している。しかし、深度が深くなると応力環境は次第に $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ となり横ずれ断層型に変化している。データ数が少ないため、応力環境が変化する境界深度を明確に把握することは出来ないが、最小主応力値を結んだ直線と推定土被り圧を結んだ直線が交差する深度は、HDB-1 孔で深度約 400m、HDB-2 孔で深度約 300m である。
- ・水平面内最大主応力値と最小主応力値の比は、ほとんど 1.5 倍程度以内に収まっている。具体的には、HDB-1 孔では深度 381m 地点で示した 1.63 が最も大きい。深度 515~710m までの区間では、水圧破碎及びボアホールブレイクアウト解析とも 1.1~1.25 の範囲である。HDB-2 孔では、深度 535.5m 地点での主応力比が 1.65 程度であるが、その他の深度で応力比は 1.33~1.42 程度である。

(両孔の違い)

- ・絶対値で比較すると HDB-2 孔における最大主応力値が若干大きい。鉛直応力と水平最小主応力値の比は、HDB-1 孔は最大 1.1 倍程度であり、それらはほぼ等しいと考えられる。HDB-2 孔では、最大 1.25 倍程度鉛直応力が最小主応力値に対して大きめに出ている。
- ・HDB-1 孔では水圧破碎試験の結果、ボアホールブレイクアウト結果とも深度の低下と共に比率も線形に低く変化している。これに対し、HDB-2 孔では深度と比率の間に相関を見ることが出来なかった。
- ・最大主応力の方位については、HDB-1 孔の方は深度 381.0m 地点では 83.1°、深度 515.0~710m の間での最大主応力の方位は -74~87.1° であり、深度によらずほぼ東西方向に最大主応力方向が存在すると考えられる。一方、HDB-2 孔では、深度 281.9m 地点では -39.6°、深度 535.5m~610m の間では -65.8~0.5° であり、深度 535.5m~610m の間ではボアホールブレイクアウトの位置が深度増大とともに変化している。

この水圧破碎試験結果と比較検討を行うために実施した AE 計測試験を行っている。この時に認められた強度異方性については、堆積構造に起因すると思われ、今後も岩石の力学異方性についてデータを収集していく必要がある。

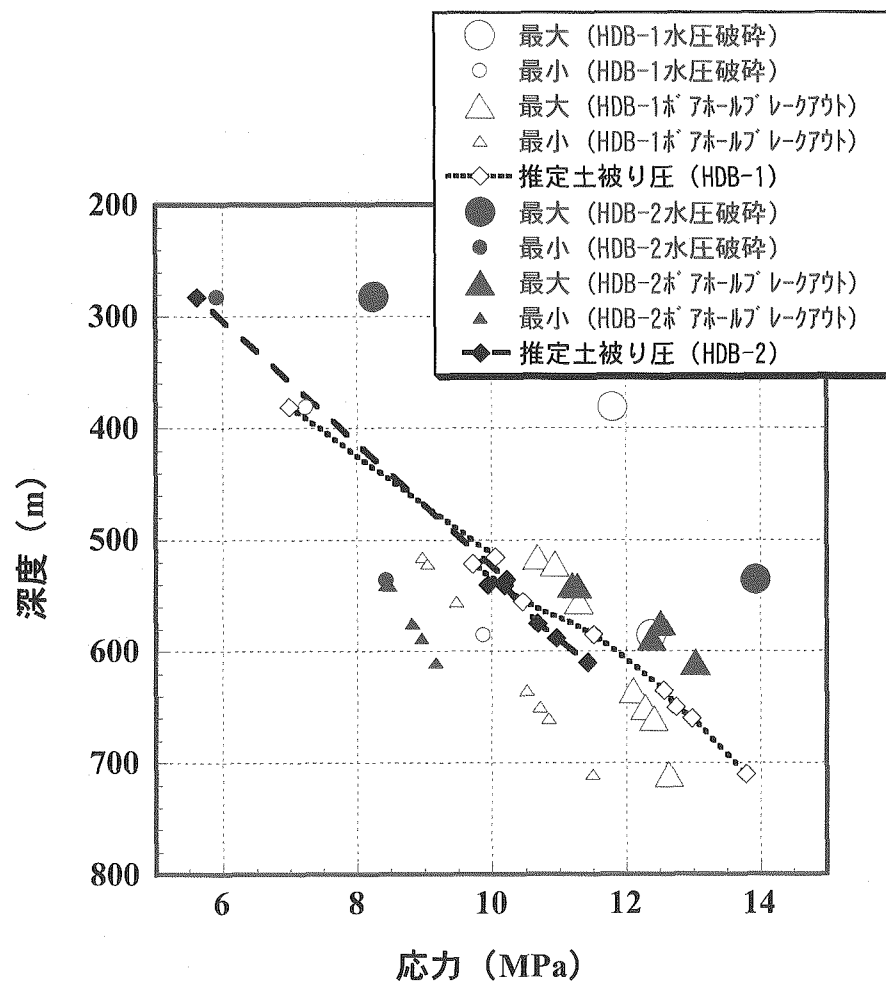


図 4.3-1 水圧破碎法による初期応力測定結果

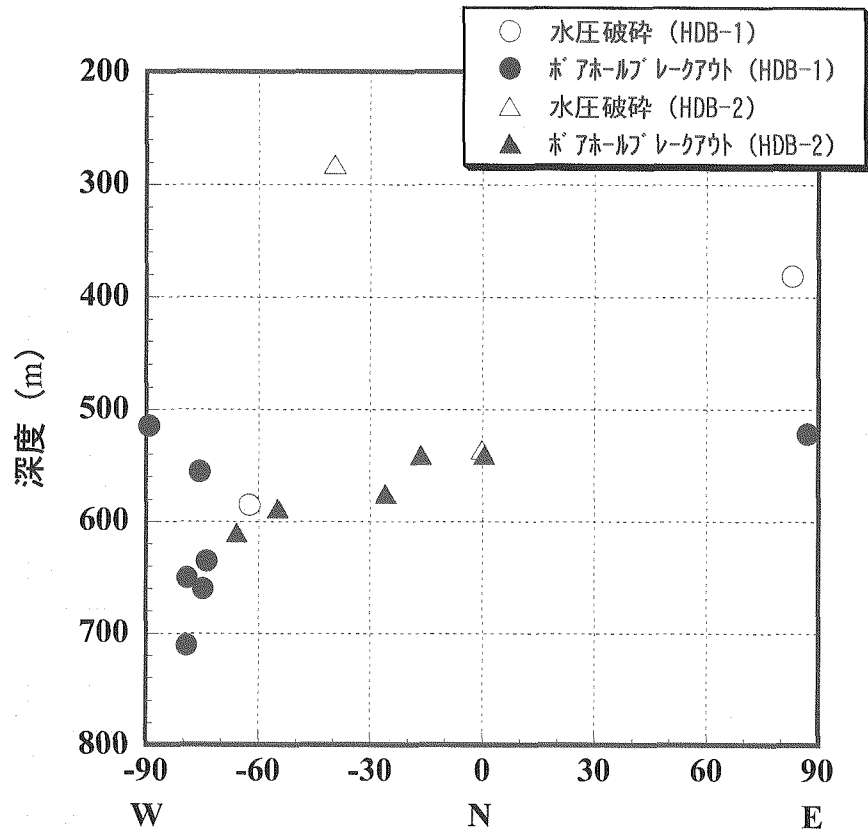


図 4.3-2 水平面内における最大主応力方向測定結果

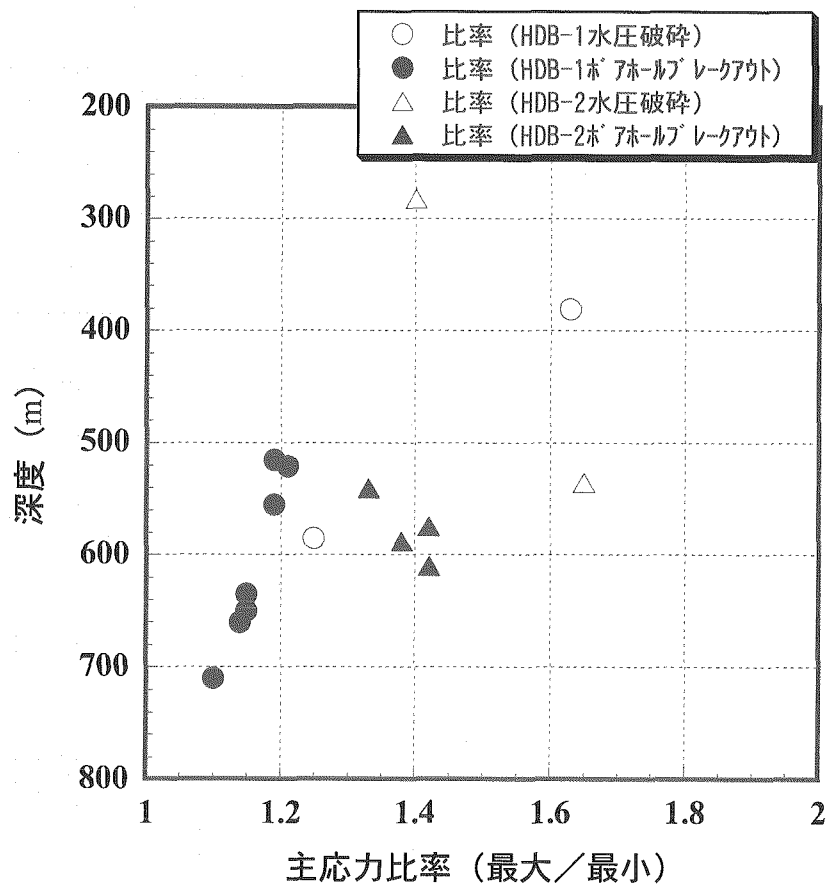


図 4.3-3 水平面内における主応力比率算定結果

5. まとめ

HDB-1,2 孔及び比較参考としての D-1 孔における調査結果により幌延町に分布する岩石・岩盤の力学的特徴として以下のような事項が挙げられる。

- ・ 幌延町内に分布する砂岩・礫岩（勇知層、更別層）、珪藻質泥岩（声間層）及び硬質頁岩（稚内層）の堆積岩は、国内に分布する新第三紀の堆積岩に比べ特殊なものではないと考えられる。しかし、吸水率と有効空隙率は国内の堆積岩に比べ大きな値を示しており、幌延町内に分布する岩石の特徴として位置づけられる。
- ・ 応力－ひずみ関係において、珪藻質泥岩は今回実施した三軸圧縮試験における拘束圧（推定土被り圧の 2 倍程度まで）では、高拘束圧でひずみ軟化型から弾完全塑性型に移行するが、硬質頁岩では拘束圧が高くなってもひずみ軟化型を引き続き示す。
- ・ 室内試験結果と原位置検層結果との比較において、おおむね一致することが確認できた。また一部、割れ目の影響という原因が明確な差異が確認された。しかし、HDB-1 孔の弾性波速度のうち S 波についてのみ、深度 400m 以浅の珪藻質泥岩にて測定値が室内試験値を下回っている結果が得られ、原因を明確にすることが出来なかった。
- ・ 初期応力測定を行なった結果、比較的浅い部分における応力環境は逆断層型を示し、深度が深くなると次第に横ずれ断層型に変化していることがわかった。また、水平面内最大主応力値と最小主応力値の比は、ほとんど 1.5 倍程度以内に収まっている。最大主応力方向は、HDB-1 孔では深度によらずほぼ東西方向に存在すると考えられるが、HDB-2 孔ではポアホールブレイクアウトの位置が深度増大とともに変化しており、その影響で最大主応力方向が異なっている。

6. 今後の予定

次段階として、以下に挙げる項目を考慮し調査を行っていく。

- ・ 研究所設置地区内において、地下施設建設予定地の選定。

地下施設建設予定地における、深度方向の詳細な地質構造と岩盤力学特性の把握（各地層および地層間の遷移帯の力学特性）。

- ・ 力学特性と初期応力場との関連性。

大曲断層の地下施設建設計画への力学的観点からみた影響の程度。

7. 参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団(1987): 貯蔵工学センター立地環境調査ー深層ボーリング報告書ー、動燃事業団技術資料(契約業務報告書)、PNC TJ1027 98-012
- 2) 核燃料サイクル開発機構(2001): 幌延深地層研究計画 平成 13 年度調査研究計画, サイクル機構技術資料, JNC TN1410 2001-003
- 3) 核燃料サイクル開発機構(2002): 幌延深地層研究センターにおける試錘調査(HDB-1 孔), サイクル機構委託研究成果報告書, JNC TJ 1400 2002-010
- 4) 核燃料サイクル開発機構(2002): 幌延深地層研究センターにおける試錘調査(HDB-2 孔), サイクル機構委託研究成果報告書, JNC TJ 1400 2002-011
- 5) 金川 忠, 林 正夫, 仲佐博裕(1977): 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み, 土木学会論文報告集, 第 258 号, pp.63-75
- 6) 金川 忠他(2002): AE 地圧測定法の適用性の拡大, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, A15
- 7) 木山 保他(1990): 原位置試験および室内試験による地圧の推定, 第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.315-320
- 8) 土木学会岩盤力学委員会(1992): 初期地圧測定法の現状と課題, 土木学会
- 9) 核燃料サイクル開発機構(1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー分冊 2 地層処分の工学技術、サイクル機構技術資料、JNC TN1400 99-022
- 10) 社団法人地盤工学会: 土質基礎工学ライブラリー30「堆積軟岩の工学的性質とその応用」、平成 10 年 8 月 (第 4 刷発行)