JAEA-Research
2006-086

JP0750154

JAEA-Research

HDB-3~8孔における岩盤力学的調査結果及び研究所設置地区の岩盤力学的概念モデル検討

The Results of the Investigation on Rock Mechanics in HDB-3~8 Boreholes and Study about the Rock Mechanical Model around the Horonobe URL Construction area

丹生屋 純夫　松井 裕哉

Sumio NIUNOYA and Hiroya MATSUI

地層処分研究開発部門
堆積岩工学技術開発グループ

Sedimentary Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

January 2007

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp/index.shtml）
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っております。

〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4　日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

HDB-3～8孔における岩盤力学的調査結果及び研究所設置地区の岩盤力学的概念モデル検討

日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット
丹生屋　純夫※、松井　裕哉

（2006年11月21日受理）

本報告は、北海道天塩郡幌延町に分布する珪質岩を対象とした幌延深地層研究計画の既存情報として平成14,15年度に実施したボーリング調査のうち力学的調査試験結果について述べるものである。調査の主目的は以下の通りである。

a) 地下施設設計に必要なデータを取得する。
b) 研究所設置地区内の岩盤力学的特性（岩石物性、原位置岩盤の力学物性および初期応力）を確認する。

研究所設置地区は、大曲断層（推定）により東西に2分された形になっているため、掘削したボーリング孔を断層西側（HDB-3,6,7 孔）、断層東側（HDB-4,5,8 孔）にグルーピングして各種調査試験結果を整理した。その結果、以下に示す知見が得られた。

1) 大曲断層西側では、岩石の物理、力学物性値は、地質的な区分の遷移層厚の約2倍の厚さ(約100m)の範囲において急激な変化を示した。また、ボーリング孔周辺の各物性値の深度方向の変化やその絶対値が良く一致していることから、当該領域では同じ岩盤物性値を有する地層が水平的に分布していることが分かった。
2) 大曲断層東側では、大曲断層西側と同様に岩石の物理・力学物性値は、地質的な区分と良く対応しているが、急激な変化を示す範囲は150m～200mと西側よりも厚いことが確認された。また、強度・変形特性については、西側に比べ局所的なバラツキが大きいことがわかった。
3) 調査結果を総合的に評価すると、力学的岩盤モデルを考えた場合、各種特性に影響を与える割れ目の存在は確認されているが、硬岩と比べ相対的に連続体に近い挙動を示すと考えられる。これは、堆積岩が軟質であるため割れ目面の剛性が小さく、存在している割れ目自体の規模も小さいためと推定される。
4) 全てのボーリング孔の物理・力学物性に関する調査結果から、物理・力学物性について、研究所設置地区及びその周辺では場所によらず深度方向に3つのZONEに区分できることが明らかになった。

幌延深地層研究センター（駐在）：〒098-3224　北海道天塩郡幌延町北進４３２－２
※技術開発協力員

The Results of the Investigation on Rock Mechanics in HDB-3～8 Boreholes and Study about the Rock Mechanical Model around the Horonobe URL Construction Area

Sumio NIUNOYA※ and Hiroya MATSUI

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received November 21, 2006)

The investigations of Horonobe URL(Underground Research Laboratory) project is subjected of the siliceous rocks in Horonobe-cho Tesio-gun Hokkaido. This paper shows the result of the rock mechanical investigations which have been carried out from 2002 to 2003 as a part of the project. The objectives of the rock mechanical investigation are follows

a) To obtain the data which were necessary for construction design of URL.

b) To confirm the distribution of rock mechanical properties in URL construction area.

Omagari fault divides the URL construction area into the blocks of west and east side. Accordingly, we grouped the rock mechanical data which were obtained from each laboratory tests and in-situ measurements in each block.

The results of the investigations are summarized as follows :

1) In the west side area of Omagari fault, the physical and mechanical properties are tends to decrease or increase abruptly within the rock mechanical transitional formation which was found to be about 100m thickness, twice that of geological formation.
2) In the east side area of Omagari fault, the thickness of rock mechanical transitional formation is from 150m to 200m which was found that it is thicker than that of the west side area. And in locally, the data of strength and deformation properties are varied more widely than data in the west side of Omagari fault.
3) To evaluate the research results comprehensively for constructing the rock mechanical model, there exist some fractures which influence the each mechanical properties. But we were able to suppose that the rock mechanical properties of sedimentary rock around the

Keywords: Horonobe URL Project, Rock Mechanics, Laboratory Test, In-situ Measurement, Rock Mechanical Model

※ Cooperative Staff

URL construction area behave nearly continuously as compare with that of hard rock, because that the intact part of rock around here is soft, and that the scale of fracture which was confirmed by geological investigation is too small to influence rock mechanical properties.

4) According to all of research results, we can explain about the rock physical and mechanical properties in common with regardless of location by separating the rock mass around URL construction area in 3 zones. And based on these results, we tried to construct the conceptual rock mechanical model of around URL construction area.

This is a blank page.

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　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3

3.　調査結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4
3.1　室内試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4
3.1.1　物理・力学試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4
3.1.2　AE 法による応力測定　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8
3.1.3　長期挙動評価に関する試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9
3.1.4　熱特性試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　10
3.2　原位置試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　12
3.2.1　水圧破砕法による応力測定　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　12
3.2.2　ボアホールブレークアウトから初期応力値の算定　・・・・・・・・・・・・　14
3.2.3　検層結果から算出した初期応力値　・・・・・・・・・・・・・・・・・・　17
3.2.4　初期応力測定結果まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　20
3.2.5　孔内載荷試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　21

4.　考察　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　22
4.1　研究所設置地区及びその周辺岩盤の力学的特性　・・・・・・・・・・・・・・　22
4.2　力学的概念モデル　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　24

5.　まとめと今後の課題　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　25

参考文献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　26

CONTENTS

1. INTRODUCTION ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

2. OUTLINE OF INVESTIGATIONS ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
2.1 PURPOSE OF INVESTIGATIONS ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
2.2 CONTENTS OF INVESTIGATIONS ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

3. RESULTS OF INVESTIGATION ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
3.1 LABORATORY TEST ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
3.1.1 PHYSICAL AND MECHANICAL TEST ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
3.1.2 STRESS MEASUREMENT BY AE METHOD ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
3.1.3 TEST FOR THE ESTIMATION OF LONG-TERM BEHAVIOR ・・・・・・・・・・・・ 9
3.1.4 THE FEVER CHARACTERISTIC TEST ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
3.2 IN-SITU TEST ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.2.1 STRESS MEASUREMENT BY HYDRAULIC FRACTURING TEST ・・・・・・・・・・ 12
3.2.2 INITIAL STRESS MEASURED
FROM INVESTIGATION OF BOREHOLE BREAKOUT ・・・・・・・・ 14
3.2.3 INITIAL STRESS CALCURATED BY IN-SITU LOGGING DATA ・・・・・・・・・・ 17
3.2.4 CONCLUSIONS OF INITIAL STRESS MEASUREMENTS ・・・・・・・・・・・・・ 20
3.2.5 PRESSUREMETER TEST ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21

4. CONSIDERATION ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22
4.1 DESTRIBUTION OF MECHANICAL PROPERTIES
FOR ROCK MASS SUBJECT OF INVESTIGATION ・・・・・・・・・・ 22
4.2 CONCEPTUAL MODEL OF ROCK MECHANIC
FOR URL CONSTRUCTION AREA ・・・・・・・・・ 24

5. SUMMARY ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25

REFERENCES ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（旧　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堆積岩を研究対象とした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進めている超深地層研究計画と同種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た。

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いる。本報告では、平成14、15年度に掘削したボーリング孔 HDB-3～8 孔において実施した力学的調査結果を述べるとともに、この結果から類推される研究所設置地区及びその周辺に分布する新第三紀堆積岩の力学的特徴を示す。

2. 調査概要

2.1 調査の目的

平成 13 年度までに実施された D-1[1]、平成 14, 15 年度に実施された HDB-1,2 孔における各種調査 [2]に基づき設定した研究所設置地区及びその周辺において、地下施設設計に必要なデータを取得すること、研究所設置地区内の岩盤力学的物性（岩石物性、原位置岩盤の力学物性および初期応力）がどのように分布しているかを確認するために、室内試験および原位置測定などの調査を行なった。特に当該研究所設置地区において、地下施設設計に必要なデータを取得し岩盤力学的観点の概念モデルを構築することに主眼を置き、合計 6 本のボーリング孔（HDB-3～HDB-8 孔：Horonobe Deep Borehole）で調査を実施した。各ボーリング孔の位置を Fig.2.1-1 に示す。

2.2 調査の内容

調査項目は、先に実施していた HDB-1,2 孔における室内力学試験の結果[2]と比較するため、ほぼ同じような試験項目としている。前調査と異なる点は、一般的に堆積岩に異方性があることが知られており、HDB-1,2 孔の AE 法による応力測定時にもそのような傾向が見られたことから、鉛直方向と水平方向より供試体を採取し、力学的異方性を調べるために一軸圧縮試験を実施している。さらに、地下施設設計に必要なデータ取得の観点から、施設設置場所に最も近い HDB-6 孔において、孔内載荷試験を実施している。

一般に鉛直方向が主応力方向の一つであると仮定した場合、大深度（深度 700m 程度）までの測定が可能な手法が水圧破砕法以外に無いこと、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が予想された。以上の理由から、初期応力測定は、水圧破砕法および岩石コアを用いた初期応力測定（AE 法）の両方を実施することとした。しかし、水圧破砕については HDB-1,2 孔において適用したワイヤーラインによる水圧破砕システムは孔内抑留の可能性があり、また泥水中での測定には適切でないと判断し、実施した HDB-3,6 孔では、TAM 社製の水圧破砕システムを使用した。このシステムでは、掘削ロッドに直接水圧破砕パッカーあるいは型取り用のインプレッションパッカーを装着し、パッカーへの注排水を、掘削ロッドを通じて行う方式であり、抑留の可能性はほとんど無い。

各孔における試験および調査項目などを Table.2.2-1、2.2-2 にまとめて示す。

3. 調査結果

3.1 室内試験

3.1.1 物理・力学試験

各孔における主な試験結果を Table.3.1.1-1 に記す。さらに、Fig.3.1.1-1、3.1.1-2 には室内試験より得られた物理物性値（見かけ比重、有効空隙率、含水比、弾性波速度）の深度分布を、Fig.3.1.1-3、3.1.1-4 には力学物性値（静弾性係数、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、静ポアソン比）の深度分布を示す。なお、図中には併せて、地質観察による地層区分を色分けで示している。

大曲断層の西側に位置する HDB-3,6 孔（Fig.2.2-1 参照）では、室内試験から得られた岩石コアの物理特性は、データ数が少ないながらも深度 250m 近辺から 450m にかけて急激に変化していることがわかる。具体的な特徴として見かけ比重が増加すると有効空隙率、含水比が減少する。弾性波速度は見かけ比重の増減傾向と同じであるが、その程度は大きなものではない。また、いずれの変化も、この区間及び前後の区間との繋がりにおいて、急激ではあるが連続性が認められる。一方、力学特性に関して HDB-3 孔では深度 400m～450m、HDB-6 孔では 250m～300m にかけて大きく変化している。物性値が急激に変化している範囲は、地質区分による珪藻質泥岩（ほぼ声問層に対応）から硬質頁岩（ほぼ稚内層に対応）への遷移帯に対して、物理・力学物性ともその 2 倍ほどの厚さを示している。

大曲断層の東側に位置する HDB-4,5,8 孔において、珪藻質泥岩層と遷移帯の境界と推定される深度は、地質観察によって、いずれも地表からの深度 100m 前後であり、遷移帯の厚さは 20～50m程度と考えられる。これは HDB-3 孔などの大曲断層西側に位置するボーリング孔で確認された遷移帯の深度より浅部ではあるが、物理・力学物性の傾向には大きな差異は認められない。しかし、物性値が急激に変化する範囲の厚さは、地質観察によって確認されている層厚の 3～4 倍ほどあると思われる。

研究所設置地区北西端に位置する HDB-7 孔では、深度 365m程度まで勇知層と呼ばれる砂岩層が分布し、それ以深はボーリング孔底部まで珪藻質泥岩（声問層に対応）が分布する。両層の物理・力学物性の変化は漸移的であるが、勇知層の砂岩では物理・力学物性とも深度依存性が小さく、これまで研究所設置地区で見られていた珪藻質泥岩、硬質頁岩およびそれらの遷移帯と比べて、力学的にはかなり脆弱な岩石であることがわかった。

次に、各物性値間の相関について検討した結果の一例を Fig.3.1.1-5～3.1.1-7 に、物性値間における相関係数を Table.3.1.1-2 に示す。

①物理物性値

Fig.3.1.1-5 に示した見かけ比重に対する有効空隙率、含水比のパラメータ間には地層の別に関わらず負の相関を確認することが出来た。具体的には、声問層の珪藻質泥岩、稚内層の硬質頁岩および HDB-7 孔における勇知層の砂岩において、見かけ比重が増加すると 2 つのパラメータとも減少する負の傾向を示し、相関係数は 0.7～0.99 と高い値を示した。ただし、HDB-5 孔の珪藻質泥岩層ではデータ数が少なく、相関性を明確に捉えるには至っていない。また、遷移帯についてはいずれのボーリング孔においてもデータ数が少ない（HDB-5 孔では無し）こともあり、その関係を評価するには至っていない。

一方、弾性波速度についてはボーリング孔によって結果のバラツキが生じている。そのバラツキは、特に S 波よりも P 波に多少大きく生じていると思われる。

②物理物性と力学物性

Fig.3.1.1-6 に示した見かけ比重および有効空隙率と各力学物性間の相関において、全体的には静ポアソン比以外の力学物性（静弾性係数 E_{50}、一軸圧縮強度）については、声問層の珪藻質泥岩では見かけ比重の増加に伴い力学物性が増加する傾向にあるが、稚内層の硬質頁岩では逆に減少する傾向を示している。相関性は岩種の違いよりも孔別の違いとして強く表れているように見え、HDB-3 孔における相関係数は 0.4～0.8 近くと相対的に高いが、HDB-4,5 孔については相関係数が 0.4 よりも低いものが大半を占めている。

有効空隙率と静弾性係数および一軸圧縮強度との相関では、珪藻質泥岩層における相関が高く、硬質頁岩層では低いという結果になっている。珪藻質泥岩層では、有効空隙率が増加すると静弾性係数と一軸圧縮強度は小さくなるが、硬質頁岩層の物性値の分布には系統的な相関性は見られない。

③力学物性

Fig.3.1.1-7 に示した力学物性間では、静弾性係数に対する弾性波速度および一軸圧縮強度の関係を調べている。

静弾性係数と弾性波速度の間には、P 波、S 波に大きな特徴の相違は無いと考えられる。各地層別のデータ数が少ないものの、総じて高い相関関係があることが示唆されている。

静弾性係数と一軸圧縮強度の間には、いずれのボーリング孔においても正の線形の相関が確認でき、その相関係数はおおよそ 0.6～0.9 となっている。その線形の勾配は HDB-7 孔を除いて、いずれのボーリング孔のいずれの地層においてもほぼ同等であり、各ボーリング孔周辺岩盤の強度－変形関係は場所によらず、大きく異ならないことが想定される。

HDB-3 孔の岩石コアを用いて実施したスレーキング試験および吸水膨張率測定試験はいずれもISRM指針Vol.1の2章　第2編「膨潤性、耐スレーキング性指数の試験法の指針」に記載されている手順に準拠して実施した。その結果をTable.3.1.1-3、Fig.3.1.1-8に示す。

耐スレーキング性指数は Id_1 で 94%以上、Id_2 で 91%以上を示した。基準の参考としてTable.3.1.1-4に示すGambelによる耐スレーキング特性の分類[12]によれば、1試料を除いてすべて「中～高程度の耐久性」となっている。また、深度400m以深に限定すると Id_2>95%を示し、「高耐久性」を示している。

吸水膨張性に関する試験より得られた結果をTable.3.1.1-5、Fig.3.1.1-9に示す。全試料の膨潤ひずみ指数は0.04%未満を、膨潤圧指数は0.005MPa以下を示した。特に250m以深では、1試料を除いて膨潤ひずみ指数、膨潤圧指数ともに0.005以下の数値を示す。これは、試験における測定限界に近く、ほぼ0と見なして良いと考えられる。

以上の結果より、当該地域の岩石は耐スレーキング性が高く、膨張性は小さいことがわかった。

次に、HDB-3、HDB-6孔のコアで実施した三軸圧縮試験結果を整理する。試験で得られた各条件別の軸差応力－軸ひずみの関係をFig.3.1.1-10～3.1.1-13に示す。これより得られた知見を以下に列挙する。

- HDB-3、HDB-6孔とも珪藻質泥岩層では、拘束圧が推定土被り圧以上になるとピーク強度が明確に出ない。低拘束圧では、不明瞭ではあるが5MPa前後のピーク強度を示した後、残留応力状態に移行している。
- 硬質頁岩層では、低・高拘束圧ともに珪藻質泥岩のコアで行った結果の3倍ほどの明瞭なピーク強度を確認することができ、その後残留応力へ移行している。
- 排水条件別に整理すると、HDB-3、HDB-6孔ともCD（圧密排水）、$\overline{CU}$（圧密非排水）条件においてピーク強度などの値に大小の差異はあるものの、応力とひずみの関係に差異は見られない。
- 載荷条件別に整理すると、ひずみ速度が速いケースでは、どの試験ケースもピーク強度が不鮮明となっている。特に珪藻質泥岩層では、弾完全塑性状態となっている。

また、HDB-3孔における平均有効主応力 $(\sigma 1+\sigma 3)/2$ と偏差応力 $(\sigma 1-\sigma 3)/2$ の関係をFig.3.1.1-14に示す[3]。モール・クーロンの破壊基準を考えた場合、珪藻質泥岩はピーク時および残留強度時の粘着力が内部摩擦角とともにCD（圧密排水）試験および$\overline{CU}$（圧密非排水）試験ともほぼ同じ値となっている。硬質頁岩では、内部摩擦角は大きく変わらないものの$\overline{CU}$試験の方がCD試験に比べ粘着力が2倍程度になっており、ピークおよび残留強度も同じ傾向であった。$\overline{CU}$試験結果はバラツキが大きく、相関性も相対的に低いことや同孔の硬質頁岩の一軸圧縮強度も同位置から採取した供試体の強度のバラツキが大きいことから、HDB-3孔から採取したコアに潜在的なき裂が含まれており、その影響が$\overline{CU}$試験に顕著に現われたものと考える。

HDB-6孔のコアで実施した三軸圧縮試験（$\overline{CU}$）で得られた平均有効主応力と偏差応力の関係をFig.3.1.1-15に示す。HDB-3孔におけるグラフFig.3.1.1-14と比較すると、HDB-6

孔では珪藻質泥岩、硬質頁岩における試験データ数が少ないこと、遷移層のデータを分けて整理していることから、正確な比較検討は出来ないが、分布している位置、相関直線の勾配ともほぼ同等の結果となっている。

HDB-1 孔の AE 測定の際に示唆された強度異方性に関する試験結果を Fig.3.1.1-16 に示す。具体的には、供試体採取方向を鉛直 1 方向、水平 2 方向として各供試体の室内物理・力学試験を行なった。結果として、弾性波速度には鉛直方向と水平方向の間に異方性はほとんど無く、静弾性係数と一軸圧縮強度で見ると、水平方向の力学特性は鉛直方向に比べ同等かあるいは大きくなる傾向が認められた。また、その異方性の主軸は東西方向および南北方向であると推定された。

3.1.2 AE法による応力測定

以前に実施したHDB-1,2孔におけるAE測定結果をFig.3.1.2-1に示す。算定された鉛直方向の応力成分が、単位体積重量から推定される土被り圧よりも低い値を示したことについて、次の要因を考えた。

ⅰ)岩石供試体の飽和状態

ⅱ)カイザー効果の時間依存性

ⅲ)水圧成分の影響

これらの要因を室内試験により別途検討するとともに、今回の試験では、試験方法の改善（AE測定時に影響が大きい周辺ノイズの除去）を行なった。最も懸念された要因であるカイザー効果の時間依存性について、繰り返し載荷によって人工的に先行応力を与え（6.6MPa、一軸圧縮強度の 40%）、除荷後の時間をパラメータとして再度先行応力が正しく評価できるかの確認を行なった。なお、対象岩石は非常に有効空隙率が大きく、乾燥しやすい性質があるため、その影響を除去するために水槽に供試体を水浸させて試験を実施した。その結果、人工応力載荷後、1 時間は応力が正しく評価できるものの、それ以降では測定結果は低い応力値を示した。

Table.3.1.2-1に測定結果を示す。本試験ではHDB-3孔の深度439.1mと、HDB-5孔の深度381.3m地点から採取した定方位コアを用いた試験を実施した。

HDB-3孔では、推定土被り圧6.7MPaに対し、鉛直応力の測定結果の平均値は7.9MPaであった。また、この深度のコアでは明瞭なカイザー効果が得られなかったために水平面内主応力は算定できなかった。

HDB-5孔では、測定深度における推定土被り圧7.0MPaに対し、鉛直応力の測定結果は平均値で4.8MPa、水平面内最大主応力が12.1MPa、最小主応力が2.8MPaとなった。また、最大主応力方向はN69.3Eとなった。

3.1.3 長期挙動評価に関する試験[4)]

坑道周辺岩盤の長期における変形挙動を考えた場合、岩石のクリープによる影響を考慮する必要がある。特に最小（定常）ひずみ速度と破壊時間との関係に着目して、研究所設置地区及びその周辺岩盤の一般性について検討する。

具体的には、クリープひずみ速度はデータのサンプリング間隔（時間）のクリープ軸ひずみの増分から算出し、クリープ開始時刻からの経過時間とクリープひずみ速度の両対数グラフより最小ひずみを求める。クリープ試験は、日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター保有の空圧式クリープ試験装置で行なった。

今回はGL-250mレベル（声問層：珪藻質泥岩）から供試体を5体、GL-500mレベル（稚内層：硬質頁岩）から8体をそれぞれ作成した。クリープ試験条件等を以下に記す。

試験環境　　：湿潤状態（強制脱気、飽和湿潤させた供試体）
試験装置　　：空気圧式長期クリープ試験機

なお、試験機周辺を発泡スチロールで覆い、温度変化を抑えていたが、エアコンの制御の能力上、最大で2℃／日の温度変化が確認された。

クリープ応力：多段階試験と一定応力クリープ試験を実施した。
応力条件や試験状況などをTable.3.1.3-1に示す。
ちなみに、採取深度におけるコアの一軸圧縮応力は以下の通り。
GL-250m：5.67MPa
GL-500m：6.26MPa

クリープ試験時の計測項目：単位体積重量、弾性波速度（P波、S波）、動弾性係数、動ポアソン比、クリープひずみ、試験機周辺の外気温

HDB-1,2孔のコアによるクリープ試験結果と併せてTable.3.1.3-2、Fig.3.1.3-1～3.1.3-3に示す。これらの結果より以下のことが分かった。

- 破壊が極めて短時間で起きたり、取得したデータに多少のばらつきが確認されたりしたが、破壊時間と最小ひずみ速度の関係は、両対数グラフ上において一般的とされている、傾き－1の直線傾向から大きくはずれることは無かった。
- コアの採取深度や岩種によらず、破壊時間と最小ひずみ速度関係は同じ傾向を示した。
- 岩石が破壊せずに試験を中断した場合もあったが、最小ひずみ速度に達したと判断可能な場合には、グラフより破壊時間を推定できる可能性がある。

3.1.4 熱特性試験

HDB-6 孔において採取した試料を用いて熱特性試験（比熱容量測定、熱伝導率測定、線膨張係数測定）を実施した。その結果、得られた知見を以下に示す。

・比熱容量

熱特性においては力学特性における関係と同様に岩層の違いが大きく影響するとの想定に基づき、珪藻質泥岩層と硬質頁岩層に区分して評価を行った。Fig.3.1.4-1 に各区分内の比熱容量の深度変化を示す。図中に記している ZONE1 は珪藻質泥岩層にほぼ対応し、ZONE3 は硬質頁岩層にほぼ対応している。さらに ZONE2 は珪藻質泥岩層から硬質頁岩層への遷移的区分を示している。また、50℃～60℃程度の温度を境に熱特性が変わる結果が得られているため、60℃を目安としてそれより温度が低い場合と高い場合で、それぞれグラフを作成している。

60℃以下の珪藻質泥岩層の場合、乾燥状態の岩石の比熱容量については、岩層や深度の違いに依存せずほぼ 0.8～0.9J/g･K となっている。一方、飽和状態･自然状態におけるそれは、深度の増加に伴い減少し珪藻質泥岩層では 1.5～2.7 J/g･K までの範囲で相対的に大きな変化を示している。

60℃以下の硬質頁岩層の場合でも、同様の変化の傾向であるが、その変化幅は 1.4～1.7 J/g･K 程度と小さくなる。

60℃以上の珪藻質泥岩層の場合、乾燥状態の比熱容量は変わらず 0.8～0.9J/g･K となっている。飽和・自然状態におけるそれは、60℃以下の試験結果と比べ深度変化傾向に大きな相違は無く大きくなる方向にシフトするが、深度変化傾向は温度によって若干異なってくる可能性がある。

・熱伝導率

Fig.3.1.4-2 左側に各 ZONE 内の熱伝導率の深度変化を示す。

60℃以下の場合、乾燥状態の岩石の熱伝導率については、珪藻質泥岩層では深度増加に伴い減少傾向となっているが、硬質頁岩層では深度の増加に伴い熱伝導率が増加する傾向が明瞭に見られる。飽和･自然状態の場合では、各層の熱伝導率の深度変化は乾燥状態のそれとほとんど同じ勾配で変化するが、絶対値はより高い値にシフトしている。

60℃以上の場合に見られる深度変化の特徴は 60℃以下の場合と大きく変わらないものの、硬質頁岩層における深度変化に伴う熱伝導率の深度変化が大きくなる傾向を示している。

乾燥状態と飽和･自然状態における熱電度率の差は、空隙中の空気と水の熱伝導率の差に起因していると解釈できる。

・線膨張係数

Fig.3.1.4-2 右側に各 ZONE 内の線膨張係数の深度変化を示す。

60℃以下の場合、珪藻質泥岩層では深度増加に伴い増加するが、硬質頁岩層では深度の増加に伴う変化はほとんど無く、ほぼ 15×10^{-6}/K 程度の一定値を取り、珪藻質泥岩層から硬質頁岩層への変化はかなり急激である。また、珪藻質泥岩層では温度の上昇に伴い線膨張係数は低下するが、深度変化の傾向は変わらない。

60℃以上の場合は、珪藻質泥岩層では 60℃以下の場合とほぼ同様の傾向を示すが、硬質頁

岩層における深度変化の傾向は60℃以下の場合と大きく異なる。すなわち、深度の増加に伴い線膨張係数が増加すると共に、その変化の割合は温度が高くなるほど大きくなる。

上記の変化は、温度が高くなると線膨張係数が小さくなり、ある温度から線膨張係数が負の値になる、つまり収縮することと関連している。珪藻質泥岩層では45℃を超える辺りから、深度が浅い所では線膨張係数が負の値を示し、温度の増加に伴い収縮を開始する温度は高くなる。また、岩石の温度が60℃を超えるような場合には珪藻質泥岩層のほぼ全域に渡って収縮挙動を示すと考えられる。硬質頁岩層では、100℃以下の範囲では収縮挙動を示すことは少ないものの、温度が高くなると深度変化に伴う線膨張係数の変化が大きくなる傾向にある。

3.2 原位置試験

3.2.1 水圧破砕法による応力測定[5)]

本試験に使用した装置は、前年度に実施したHDB-1,2孔で使用したシステムを改良したものであり、掘削ロッドの先端に型取りパッカーシステムおよび水圧破砕パッカーシステムを装着し、ロッドを通じての注排水を行うと共に全ての圧力・流量の測定を、孔口で制御するようにしたものである。Fig.3.2.1-1に使用した試験装置概念図を、Fig.3.2.1-2,3.2.1-3に各種パッカーの外観図を示す。破砕区間長は、全箇所共通で 1ft エクステンションを使用しており、その長さは 1.2m である。また、型取り試験は、型取りパッカーエレメントにゴム製のスリーブを被せておき、そのスリーブに孔壁のき裂・礫などの情報を傷として記録するものであり、試験毎に交換する。型取りスリーブを孔壁に圧着する時間は、約20分間である。その区間長は約1.2mで、破砕区間とほぼ同じ長さである。また、型取り試験では、き裂の方位測定を行なうため、ノンマグカラー（非磁性体）とイーストマン方位傾斜計を使用した。

測定深度は、HDB-1,2孔測定時と測定システムが異なること、試験点数が少ないことから詳細には比較できないことが予想されたが、岩種別にデータ取得し、主応力分布状態の特徴を概略確認するために、全てのボーリング孔において深度 250m（珪藻質泥岩）および 380 m（硬質頁岩）付近とした。

水圧破砕により発生したき裂の走向と発生時の圧力 P_b、見かけのき裂開口圧 P_r および閉口圧 P_s などは Table.3.2.1-1 に示す通りである。見かけのき裂開口圧は、数回繰返し実施した加圧サイクルのうち、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。HDB-3～6 孔の各測定深度における孔内水圧－時間曲線、再開口圧力および閉口圧力の読み取り状況を Fig.3.2.1-4～3.2.1-17 に示す。また、HDB-6孔における試験後のインプレッションパッカーによる人工き裂の型取り記録を Fig. 3.2.1-18, 3.2.1-19 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、それを孔の周方向に展開したものをトレースした結果である。

ここで上述の表、各図に示した 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（ブレークダウン）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。P_s は、水圧破砕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（水の圧入を停止する）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－時間曲線から P_s を求める方法[6)~8)]が数多く提案されている。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[9)]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砕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、Fig.3.2.1-20 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段階(StageⅠ)、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段階(StageⅡ)、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段階(StageⅢ)から構成され、圧力減衰速度の逆数は StageⅠおよび StageⅢにおける流体圧に関して線形である。そして、StageⅠ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砕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砕区間の水圧が P_s として求められる。

3.2.2 ボアホールブレークアウトから初期応力値の算定

ボーリング孔内で孔壁面に応力集中が発生し、地殻応力のうち差応力（$S_{Hmax}-S_{Hmin}$）が大きくなると孔壁の一方向のみが壊れるために起きる現象がボアホールブレークアウトと言われている。そのブレークアウトをBHTV検層の画像から読み取り、その挟み角度と断層の摩擦強度の理論により、その初期応力値の評価をHDB-6孔にて行なった。

① 深度523.0mのブレークアウトから求めた応力値の評価

地殻内部の主応力のうち、ひとつの主応力方向が鉛直方向と一致して、その大きさは土被り圧に等しいと仮定すると、断層が滑る時の有効主応力比は以下の式で表される。

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

ここで、S_1 と S_3 は最大・最小圧縮力である。μ は、断層の摩擦係数であり通常 0.6～1.0 と仮定するが、本解析では0.8とした。また、P_0は間隙水圧である。

深度 523.0mの正断層、逆断層および横ずれ断層の応力場において、最大・最小圧縮応力の取りうる範囲を(1)式により計算し、Fig.3.2.2-1のグラフ内に示す。図中の横軸に垂直な線分と水平な線分はオーバーバーデンの S_V の大きさを表し、(1)式で規定される初期応力場を正断層（NF)、逆断層（RF）および横ずれ断層（SS）に区分した。ここで S_V は密度検層結果より8.86MPaとした。$S_{Hmin} \leqq S_{Hmax}$ なので応力状態は、傾き1の直線よりも上部で表現される。

S_{Hmin} の下限を表す直線は、正断層が滑る応力条件が(1)式において $S_1=S_V$、$S_3=S_{Hmin}$ である。また、S_{Hmax} の上限に対応する直線は、逆断層が滑る応力条件で(1)式においては $S_1=S_{Hmax}$、$S_3=S_V$ である。さらに横ずれ断層が滑る応力条件は、(1)式によると $S_1=S_{Hmax}$、$S_3=S_{Hmin}$ である。

深度 523.0m のブレークアウトは、深度 529.5m で行なわれた水圧破砕測定結果と比較する意味で抽出した。この水圧破砕測定で求められた最小水平圧縮応力値の 9.6MPa を使用すると、図中に示される通りであり、そのことから逆断層の応力場の範囲であることが推定される。そして、図中から逆断層面内でのそれぞれの水平応力値の取り得る範囲は $8.9< S_{Hmin} <23.2$MPa であり、さらに $8.9< S_{Hmax} <23.2$MPa とかなりの広い範囲に及んでいる。

ボアホールブレークアウトの発生条件としてMohr-Coulombの破壊基準を導入すると、円周方向直応力 $\sigma_{\theta\theta}$ と半径方向の直応力 σ_{rr} の差により孔壁面に発生する応力集中が岩盤の強度Cを上回った時に圧縮破壊が生じると考えられている。

その破壊条件を以下に示す。

$$\sigma_{rr}=P-P_0$$
$$\sigma_{\theta\theta}=S_{H\max}+S_{H\min}-2\left(S_{H\max}-S_{H\min}\right)\cos 2\theta-2P_0-\Delta P \geq C \qquad (2)$$

$\sigma_{\theta\theta}$：円周方向直応力

θ：最大水平応力軸で計った回転角度

ΔP：孔内圧と間隙水圧との差圧

また、C の値は、室内試験から求められた一軸圧縮強度と孔内壁面の強度と同じ値であると仮定した。さらに間隙水圧は孔内圧と等しいと仮定してΔP=0とした。

孔壁周辺に起こる現象を、以下に示す3種類の場合に区分する。

- ブレークアウトが発生しない場合
- S_{Hmin}の方向のみにブレークアウトが発生する場合
- 孔壁全周にブレークアウトが発生する場合

ここでは、ブレークアウトがS_{Hmin}の方向にだけ発生するケースとして考えられ、(2)式によりその場合の条件式は以下のようになる。

$$S_{H\max} \geq 1/3(C + S_{H\min} + 2P_0) \quad (3)$$

Cの岩盤強度は最も近い深度500mでの岩石試験結果の平均値16.5MPaを使用した。先ほどのFig.3.2.2-1に(3)式から求めたブレークアウトが発生する範囲を破線で示す。また、S_{Hmin}としては深度529.5mでの水圧破砕試験結果である9.6MPaを使用すると、S_{Hmax}の下限は直線S_{Hmin}=9.6MPaと(3)式の交点と考えられ、S_{Hmax}の取り得る範囲は12.1～23.2MPaであることが推定される。

さらに応力値を絞り込むために、BHTV検層から読み取ったブレークアウトの挟み角度から応力値の推定を行なう。深度522.6～523.4mまで発生しているブレークアウトの測定画像とスケッチ図をそれぞれFig.3.2.2-2, 3.2.2-3に示す。図によるとブレークアウトの挟み角度は17°～40°までを持ち、その平均は26°である。ブレークアウトが発生し始める角度Φ_bにおける孔内壁面の接続応力$\sigma_{\theta\theta}$が岩盤強度Cに等しいとしてS_{Hmax}とS_{Hmin}の間には以下の関係が成り立つ。

$$S_{H\max} = bw - S_{H\min} mw \quad (4)$$

ここで、

$$bw = (C + 2P_0)/[1 - 2\cos(\pi - 2\phi_b)] \quad (5)$$

$$mw = [1 + 2\cos(\pi - 2\phi_b)]/[1 - 2\cos(\pi - 2\phi_b)] \quad (6)$$

$2\Phi_b$をBHTVによるブレークアウトの幅17°～40°までをFig.3.2.2-1中において変化させると、S_{Hmax}の取り得る範囲は12.2MPa～12.6MPaと読み取ることが出来、さらに平均中心角度が26.0°であるのでS_{Hmax}は、12.3MPaとなる。

② 深度592.5mのブレークアウトから求めた応力値の評価

深度592.5mにおいてもブレークアウトから前述した手法により、最大主応力値を求めるとFig.3.2.2-4となる。また、BHTV検層の画像とスケッチFig.3.2.2-5, 3.2.2-6から、ブレークアウトの挟み角度は、24°～60°を示しており、その平均は40°である。なお、Fig.3.2.2-7に深度592.5m付近の孔径断面図を示す。ただし、BHTVの測定能力が弱く、ブレークアウトの深部までの反射波は捕らえ切れていない。

また、最小水平応力値は、この深度に最も近い深度576.0mの10.0MPaの値を採用している。この図より、挟み角度40°の時は、12.7MPaと求められた。

③ 深度447.0mのブレークアウトから求めた応力値の評価

深度447.0mにおいてもブレークアウトから前述した手法により、最大主応力値を求めるとFig.3.2.2-8に示す通りとなる。また、BHTV検層の画像Fig.3.2.2-9から、ブレークアウ

トの平均挟み角度は60°と読み取れた。

また、最小水平応力値は、深度 351.0m と深度 529.0m で水圧破砕によって得られた最小水平圧縮応力値を線形補完した結果、8.1MPa の値を採用した。この図より挟み角度が60°の時は、8.5MPa と低い値であるが、これは 450m での室内岩石試験による一軸圧縮強度値が低いことによる結果である。

④ 深度 380.0m のブレークアウトから求めた応力値の評価

深度 380.0m においてもブレークアウトから前述した手法により、最大主応力値を求めると Fig.3.2.2-10 に示す通りとなる。また、BHTV 検層の画像 Fig.3.2.2-11 から、ブレークアウトの平均挟み角度は20°であった。

また、最小水平応力値は、深度 351.0m で水圧破砕によって得られた最小水平圧縮応力値の 6.3MPa の値を採用した。この図より挟み角度が20°の時は、10.5MPa と求められた。

3.2.3 検層結果から算出した初期応力値

物理検層の結果から初期応力のうち、最小水平圧縮応力値(S_{Hmin})の算出を試みた。それは、密度検層から上載岩圧による鉛直応力を求め、これに音波検層で得られた P・S 波速度から導いたポアソン比から、水平応力を算出する解析手法である。以下に原理について説明する。

地層内の応力は、従来重力のみによる作用と考えられてきた。つまり、岩石の平均密度をρとした時、地球の中心に向かう垂直主応力σ_zは以下のように与えられる。

$\sigma_z = \rho g h$　（g：重力加速度、h：深度）

他に二つの水平主応力σ_x、σ_yはポアソン比をνとした時、次のようになる。

$$\sigma_x = \sigma_y = (\nu/(1-\nu))\sigma_z$$

$$\sigma_z > \sigma_x \sigma_y$$

実際は、水平主応力は広域な地殻活動によって複雑化しているが、検層結果より導かれた初期応力には、そのような地殻活動を考慮していない。しかし、石油・天然ガス分野では生産の向上や、サンドトラブルなどのために実施するフラクチャリングのシミュレーションには、検層解析によるこれらの手法が大きく貢献している。

Fig.3.2.3-1 に示すように Z 方向の垂直応力σ_zは上載岩圧になり、XY 方向の水平応力σ_x、σ_yは、σ_z、孔隙率 Pp（Pore pressure）とポアソン比νにより次式で表される。

$$\sigma_x = \sigma_y = \nu/(1-\nu)\sigma_z + \nu/(1-\nu)\alpha Pp$$

ここで、αは Biot's constant で、岩石の体積圧縮率を C_d（体積弾性率の逆数）、岩石のマトリックスの圧縮率を C_{dm} とした時、$\alpha = 1 - C_{dm}/C_d$ で表される。地層に鉛直方向に掘削された孔井付近の応力を考えた場合、Fig.3.2.3-2 に示したように孔井の接線方向の応力σ_Θ（引張り応力、または圧縮応力）は、孔内水の圧力を P_m とした時、次式で表される。

$$\sigma_\Theta = 3\sigma_x - \sigma_y - P_m$$

ここで、孔壁に直交する方向の応力σ_rは孔内水圧力 P_m である。

地層がポーラスな場合、σ_Θ、σ_rの有効応力はそれぞれ次式のようになる。

$$\sigma_{\Theta e} = 3\sigma_x - \sigma_y - P_m - \alpha P_p$$

$$\sigma_{re} = P_m - \alpha P_p$$

また、孔壁に接する有効接線応力$\sigma_{\Theta e}$から、孔井のフラクチャ圧力を求めることができる。孔内水圧がある値に達したとき、有効接線応力$\sigma_{\Theta e}$が 0 になり、さらに孔内水圧が上昇すると有効接線応力は引張り応力に変化する。この時、孔壁には地層の引張り強度に左右されてフラクチャが発生する。

ここで、破砕圧力を P_b、引張り強度を T とした時、P_bは次式によって表される。

$$P_b = \alpha P_p + 2\nu/(1-\nu)\times(\sigma_z - \alpha P_p) + T$$

ここで、フラクチャが発生した後、孔内水圧を徐々に減少させて割れ目が閉じる時の圧力は、地層の最小水平圧縮力 S_{Hmin} と等しくなる。

この時の応力値は次式で表すことができる。

$$S_{H\min} = \alpha P_p + \nu/(1-\nu)\times(\sigma_z - \alpha P_p)$$

ここで、α の Biot's constant の値は 0.9 とした。また、P_p は静水圧に等しいと仮定した。

次に臨界降伏応力モデルから最大水平圧縮応力値（S_{Hmax}）を HDB-3,6 孔にて試みた。以下にその原理について説明する。

同一の孔井で水圧破砕法によって測定された応力値は、最大、最小主応力ともに、深度の増加に伴い大きくなる傾向にある。これは、測定点より上部に載っている岩石の重量により生ずる上載岩圧が、深度とともに増加するためである。増加する傾向は、単調な場合もあれば、ある深度で変化する場合もある。一般に岩盤密度が大きい硬岩中での応力値ではその変動が激しく、密度値が小さい軟岩中では応力値のばらつきが小さく、最大、最小応力値とも、深度とともに単調に増加する傾向がみられる[10),11)]。

塚原・池田[11)]は、岩盤の硬軟によって応力分布の形態が異なると考察した。硬い岩盤では、岩盤中の破砕部分と、割れ目のない硬い部分との物性の違いが著しいので、それを反映して応力分布の不均質の程度も大きくなり、それに対して軟らかい岩盤では場所による物性の違いが小さいため、応力分布も単調になる。したがって、軟らかい岩盤中の応力分布は、岩盤の平均的な物性を知ることにより推定できる可能性があると考えた。

さらに、岩盤中には微小き裂が無数に存在するので、摩擦強度以上のせん断応力が加われば既存の微小き裂が摩擦滑りを起こしてせん断応力を減少させると考え、摩擦滑りの発生に要するせん断応力は、深度の増加に伴い法線応力が高くなるのに比例して増大すると考えた。つまり、深度が 2 倍になれば静岩圧は 2 倍になり、法線応力もほぼ 2 倍になるので、摩擦滑りの発生に要するせん断応力（臨界降伏応力）も 2 倍になるということである。これを、臨界降伏応力モデルと称して多数の測定データを比較し検討がされている。

摩擦すべりが応力状態を支配する主要な機構になっている場合には、岩盤にかかっている応力値から算出される最大せん断応力と法線応力との間には一定の関連性が予想される。

Fig.3.2.3-3 は、一つのき裂面に作用するせん断応力 S_S と法線応力 S_N との関係を模式的に示したものである。この岩石の摩擦係数を μ とすると、実線で示される $S_S = \mu S_N$ は、ちょうど摩擦滑りの臨界応力状態を示している。S_S が臨界応力を越えると摩擦滑りが発生するので、実線より左上部域での応力状態は存在し得ない。つまり、岩盤中の微小き裂の摩擦滑りの臨界状態から応力状態が決められている場合は、その時の最大せん断応力と法線応力は線形の関係を示している。

なお、経験式として $S_S = \mu_0 + \mu S_N$ が一般によく使われているが、μ_0（粘着力とも呼ばれる）は、省略しても大筋は変わらないのでここでは μ_0 は省略している。

最大・最小主応力を使用して、差応力が最大になるような主応力の組み合わせのもとで最大せん断応力 $S_S=(S_{max}-S_{min})/2$ と法線応力 $S_N=(S_{max}+S_{min})/2-P_p$ の関係より、摩擦係数 μ を求める。摩擦係数 μ を知ることにより、地下岩盤に作用しているせん断応力 S_S と法線応力 S_N との比が分かるため、最大応力か最小応力のどちらか一方を知ることにより、他方は μ を使って求めることができる。ここでは、検層結果から求めた最小水平圧縮応力(S_{Hmin})の値を使用して、以下の式(池田・塚原、1989)により、最大応力値(本孔の場合は S_{Hmax})を算出した。その結果と水圧破砕試験結果の関係を Fig.3.2.3-4～3.2.3-7 に示す。図中には、検層結果から算出された水平圧縮応力値(S_{Hmin})も併せて示す。

$$S_{H\max} = (1+\mu)S_{H\min}/(1-\mu) - 2\mu P_p/(1-\mu)$$

Fig.3.2.3-4 によると、摩擦係数 μ=0.41 により導いた HDB-3 孔の S_{Hmax}(赤線)は、深度約 280m 付近まではほぼ上載岩圧に等しく、それ以深では徐々にそれとは差が開く傾向であり、応力バランスは $S_{Hmin}<S_v<S_{Hmax}$ の傾向である。図中の黒丸は水圧破砕から求められた最大水平圧縮応力値(S_{Hmax})であり、深度 392.5m での値が若干高い値を示しているものの概ね調和した値を示している。S_{Hmax}(赤線)によると、深度 500m 付近での S_{Hmax} の値はおよそ 10MPa と推定される。

Fig.3.2.3-7 によると、摩擦係数 μ=0.49 から導いた HDB-6 孔の S_{Hmax}(紫線)は、浅部については水圧破砕試験から求められた最大水平応力値とほぼ一致するが、それ以深ではその差が広がる傾向にあり、その値は約 2MPa である。

3.2.4 初期応力測定結果まとめ

各孔における試験結果を Table.3.2.4-1 に、また HDB-1,2 孔の結果も含めて大曲断層を基準に東西に分けて初期応力値をプロットしたグラフを Fig.3.2.4-1 上段に示す。図中には水圧破砕による結果とボアホールブレークアウトから算定した結果を併せてプロットしている。また、比較として単位体積重量から得られる土被り圧も併せてプロットし、ボーリング孔ごとに直線近似して示している。これらの近似直線は、いずれのボーリング孔ともほぼ一致している。

き裂の影響によって異なるケースもあるが、浅部の珪藻質泥岩から遷移層が分布すると思われる深度 400m 程度までは、ほとんどの最小主応力は単位体積重量から推定される土被り圧とほぼ等しいものとなっている。また、最大主応力と最小主応力の比については 1.2～1.65 の範囲にあり、各孔ともほとんど変化はない。断層西側の珪藻質泥岩層中では、深度にしたがって等方応力状態に近づいているが、遷移層からは最大･最小主応力比が急激に大きくなる傾向が見られる。また、断層西側、東側共通の特徴として深部に行くに従い、推定土被り圧が最大主応力側へシフトする傾向を示している。遷移層および硬質頁岩層は珪藻質泥岩層に比べ岩盤剛性が高いため、剛性が高い所に応力が集中している可能性がある。

また、測定から得られた最大主応力方向を、Fig.3.2.4-1 下段に示す。HDB-2 孔の結果を除くと、いずれの測定地点においても東西方向と判断でき、大曲断層の影響は見られない。一方、EMI や BHTV 検層から捉えたボアホールブレークアウトが深度に依存せず南北方向に生じていることが分かった。最大主応力はボアホールブレークアウトの発生方位と直交することを考慮すると、測定によって得られた最大主応力方向を裏付けるものと思われる。

3.2.5 孔内載荷試験[12)]

原位置岩盤の変形特性に関するデータの取得と室内試験結果における岩石変形特性との比較を行うためにHDB-6孔の地表～600m付近まで範囲中、計12深度で試験を実施した。

試験装置の概略をFig.3.2.5-1に示す。本装置はパッカーによる等圧分布載荷方式を採用しているが、大深度・大孔径ボーリング孔に対応し（適用可能孔径152～172mm、適用最大深度1,400m、パッカー最大圧力20MPa）、1mの試験区間内で異なる水平3方向の変位を同時に計測できることが特徴である。

Table.3.2.5-1に各試験深度の地質状況と得られた変形係数・弾性係数を、Fig.3.2.5-2にそれらの深度分布を示す。また、コアでの割れ目の発達状況との相関性を検討するため、各試験実施深度をコアのRQD90％を目安として、相対的に割れ目がない箇所と割れ目がある箇所に区分している。さらに、ボアホールブレークアウトなどの壁面性状も区分条件として考慮した。なお、図中には比較のため室内におけるコアを用いた一軸圧縮試験で得られた静弾性係数E_{50}の値も×印で併せてプロットしている。

原位置で割れ目がない箇所での孔内載荷試験結果で得られた変形係数や弾性係数と、ほとんど割れ目のないコアの一軸圧縮試験結果で得られたE_{50}の値を比較する。最も低い応力レベルの変形係数は、同一深度のE_{50}と概ね一致しており、裸孔の孔壁近傍の原位置岩盤は孔直交方向の応力が解放されインタクトなコアの一軸圧縮状態と大きな違いが無いことが想定できる。応力レベルが高くなると変形係数・弾性係数とも高くなり、三軸応力状態にある孔壁より奥側にある岩盤の変形特性が計測されていると考えられる。また、変形係数・弾性係数は深度方向に概ね線形に増加する傾向にあるが、深度300m付近を境に計測された変形係数・弾性係数の値が急激に増加する。深度300m付近は、声問層から稚内層へ移行する遷移層に相当することが分かっており、この急激な変形係数・弾性係数の変化は地質の変化に起因するものと考えられる。

Fig.3.2.5-3は、RQDと変形係数及び弾性係数について、地層別にグルーピングしたグラフである。同図より稚内層ではRQD及びBHTV検層による割れ目の有無に関わらず、変形係数及び弾性係数とも10^3MPaオーダーであった。これに対し、声問層及び遷移層の変形係数及び弾性係数は稚内層よりも最大1オーダー程度低く、RQDとの間に正の相関が認められた。特に孔壁画像観察で割れ目やボアホールブレークアウトが観察された箇所での試験結果は、割れ目の発達していない箇所に比べ明らかに低い値（10^2MPa以下）を示した。これらのことから、深部で固結度の高い堆積岩における原位置変形特性は、割れ目の有無に依存しない可能性があるが、比較的浅部で固結が十分進んでいない堆積岩では割れ目の発達により影響を受け、BHTV検層などで明らかに確認できる割れ目の他、コア採取時に確認できる微細な割れ目も変形特性に影響を及ぼす可能性があることを示唆するものと考えられる。

4. 考察

4.1 研究所設置地区及びその周辺岩盤の力学的特性

研究所設置地区は、大曲断層位置（推定）により東西に区分されているため、HDB-1～8孔を、断層西側（HDB-1,3,6 孔）、断層東側（HDB-4,5,8 孔）にグルーピングして各種調査試験結果を整理してFig.4.1-1に示すとともに、それぞれの特徴について比較検討を以下の通り行った[2),13)～15)]。なお、HDB-2孔は研究所設置地区外にあるため、HDB-7孔は地質区分が明らかに異なるためにグルーピングから除いている。

【大曲断層西側領域：HDB-1,3,6,(7)孔】

岩石の物理物性値、力学物性値は、地質的な区分の遷移層厚の約2倍の厚さ(約100m)の範囲において急激な変化を示した。深度方向の物性値変化が最も大きいのは前述の通り、珪藻質泥岩から硬質頁岩への遷移層の部分であり、次いで珪藻質泥岩、硬質頁岩の順となっている。このように変化の程度に大小はあるものの、いずれの岩層においても深度依存性が認められている。各物性値の深度方向の変化やその絶対値は、すべてのボーリング孔において非常に良く一致していることから、少なくとも大曲断層西側領域において調査したボーリング孔周辺では同じ岩盤物性値を有する地層が水平的に分布していることが想定される。また、原位置の物理検層結果で得られている密度の深度分布や絶対値においても同様の推定を行なうことができ、室内試験結果による評価の妥当性が示唆されている。

Fig.4.1-2において原位置の速度検層結果とコアの弾性波速度測定結果を比較すると、両者の値は良く対応している。すなわち、少なくとも大曲断層西側領域において調査したボーリング孔周辺に存在する割れ目が原位置岩盤の変形特性に与える影響は大きいものではないと思われる。

水圧破砕法で得られた最小主応力は、単位体積重量から推定される土被り圧とほぼ等しい。また、測定結果およびボーリング孔壁に発生したボアホールブレークアウトの状況から、水平面内最大主応力方向は深度200m以深の領域においてほぼ東西方向であると思われる。

HDB-6孔で実施した孔内載荷試験では、孔壁近傍の岩盤では孔直交方向の応力が解放されインタクトなコアの一軸圧縮状態と大きな違いが無いことが想定できる。応力レベルが高くなると変形係数・弾性係数とも高くなり、三軸応力状態にある孔壁より奥側にある岩盤の変形特性が計測されていると考えられる。また、深部で固結度の高い堆積岩における原位置変形特性は、割れ目の有無に依存しない可能性があるが、比較的浅部で固結が十分進んでいない堆積岩では割れ目の発達により影響を受け、BHTV検層などで明らかに確認できる割れ目の他、コア採取時に確認できるような微細な割れ目も変形特性に影響を及ぼす可能性がある。

【大曲断層東側領域：HDB-(2),4,5,8孔】

物性値の深度変化は、大曲断層西側領域と同様に地質的な区分と良く対応しているが急激な変化を示す範囲は150m～200mと西側領域よりも厚い。また、それとは別に室内試験から得られた物性値は、HDB-4,5孔の深度400m付近とHDB-8孔の深度200m付近で深度方向

の変化傾向が変わっている。これらの点では、割れ目が急激に増加することによって岩石物性にその影響を与えている可能性が高い。ただし、割れ目の少ない硬質頁岩の部分では深度方向の物性変化は小さい。強度・変形特性については、西側領域に比べ局所的なバラツキが大きい。特に深度 200m 程度までの浅い部分で顕著となる。圧裂引張強度は、測定深度によらず一軸圧縮強度の 1/10 程度の値となっている。速度検層結果とコアの弾性波速度測定結果については、定性的な変化傾向は西側領域の同様に良く一致している。しかし、室内試験と原位置での測定結果において多少の速度差が生じている範囲があることも確かであり、硬質頁岩が硬い為に相対的に岩盤中に存在する割れ目の影響が強く表れているものと思われる。また、密度検層結果を見ると HDB-4,5 孔とも定性的・定量的によく一致している。

水圧破砕法で得られた最小主応力は西側領域同様、土被り圧とほぼ等しい。また、深度 400 m程度までの範囲の水平面内最大主応力方向は概ね東西方向であるが、HDB-2 孔において得られた最大主応力方向はボアホールブレークアウトの方位から想定した結果とも深度によって異なったものとなった。

以上をまとめると、研究所設置地区内においては、原位置岩盤内に割れ目が存在し、その大小によって弾性波速度や力学特性あるいは透水特性にも多少の影響を与えていることは確認されたが、力学的観点から見た場合、硬岩と比べ相対的に連続体に近い挙動を示すと考えられる。これは、当該地域の堆積岩は岩盤自体が柔らかくかつ割れ目面の剛性も小さいこと、またそれに起因して発生する割れ目自体の規模も小さいためと考えられる。また、研究所設置地区及びその周辺に分布する岩盤は、深度方向に 3 つの物性 ZONE に区分することが可能であり、場所によらずほぼ同一の物理・力学物性を有することが明らかになった。

4.2 力学的概念モデル

Fig.4.2-1 に、4.1 に述べた結果に基づき構築した岩盤力学的概念モデルを示す。前節で述べた通り、物理･力学物性に関しては、3 つの ZONE に区分することで各 ZONE 内の物性分布を場所によらずほぼ統一的に説明できることを表現している。なお、ZONE1 は珪藻質泥岩の層にほぼ対応し、ZONE2 は珪藻質泥岩から硬質頁岩に移る遷移層、ZONE3 は硬質頁岩にほぼ対応するものである。

物性変化の傾向は、ZONE1 では緩やかに深度方向へ増加するが、ZONE2 では急激に増加する。ZONE3 に入るとまた緩やかに増加する。しかし、各 ZONE 境界では、その変化は繋がっており、連続的である。また、物性値の傾向は ZONE1 では単位体積重量は小さく、空隙率は大きい。ZONE2 では単位体積重量は小から大へ、空隙率は逆に大から小へと大きく変化する。ZONE3 では、ZONE2 の最深部における値から緩やかに深度依存性を示すことになる。

力学特性では ZONE1 は、低強度、小変形性。ZONE2 で低強度から高強度へ、小変形性から大変形性へ、それぞれ急激に変化する。ZONE3 では、ZONE2 からの強度を維持しながら多少の変化を示す。

物理･力学物性的に見た場合、大曲断層西側で ZONE2 の厚さは 100m 程度で地質的に定義される厚さよりも厚くかつほぼ一定の厚さで分布するような形となる。東側で ZONE2 の厚さは 200m 程度と考えられる。西側と同様に地質的に定義される厚さよりも厚くかつ、ほぼ一定の厚さで分布するような形となる。

5. まとめと今後の課題

本報告では、平成 14,15 年度に掘削した 6 本のボーリング孔を、大曲断層を境に西側と東側にグルーピングして調査試験結果を整理し、前年度に実施した 2 孔の調査結果を加えることにより研究所設置地区及びその周辺に分布する岩盤の力学的特性を検討した。その結果、以下に示す知見が得られた。

1) 大曲断層西側では、岩石の物理、力学物性値は、地質的な区分の遷移層厚の約 2 倍の厚さ(約 100m)の範囲において急激な変化を示すとともに、各物性値の深度方向の変化やその絶対値が良く一致していることから、調査したボーリング孔周辺では同じ岩盤物性値を有する地層が水平的に分布していることが想定された。
2) 大曲断層東側では、大曲断層西側と同様に地質的な区分と良く対応しているが、急激な変化を示す範囲は 150m～200m と西側領域よりも厚いことが予想された。また、強度・変形特性については、西側領域に比べ局所的なバラツキが大きいことがわかった。
3) 初期応力は，場所によらず水平面内最大主応力方向がほぼ東西である。水平面内最小主応力は概ね推定土被り圧に等しく最大主応力はその 1.2～1.65 倍の範囲内に分布する。これらの傾向は，大曲断層東西で大きく異ならない。
4) 調査結果を総合的に評価すると、力学的岩盤モデルとして考えた場合、各種特性に影響を与える割れ目の存在は確認されているが、硬岩と比べ相対的に連続体に近い挙動を示すと考えられる。これは、堆積岩が軟質であるため割れ目面の剛性が小さく、存在している割れ目自体の規模も小さいためと推定される。
5) 全てのボーリング孔の物理・力学物性に関する調査結果から、物理・力学物性について、研究所設置地区及びその周辺では場所によらず深度方向に 3 つの ZONE に区分できることが明らかになった。

これまで掘削したボーリング孔内において比較的浅部からボアホールブレークアウトと見られる現象が多く発現しており、坑道掘削時にも壁面に同様の破壊現象が生じる可能性がある。このような現象の発生メカニズムの検討は、幌延深地層研究計画の第 2 段階以降の掘削影響評価において重要なテーマとなる。また、第 2 次とりまとめで示された掘削影響領域の時間的変化を把握・評価するためには、岩盤の長期挙動特性の把握も必要である。今後は、これらの課題についても室内試験や数値解析による検討を行っていく予定である。

参考文献

1) 動力炉・核燃料開発事業団:“貯蔵工学センター立地環境調査－深層ボーリング報告書－”、動燃事業団技術資料(契約業務報告書)、PNC TJ1027 98－012(1987)

2) 核燃料サイクル開発機構:“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”、サイクル機構技術資料、JNC TN5400 2005-012(2005)

3) 松井　裕哉、山本　卓也:“幌延地域の新第三紀堆積岩の力学特性”、土木学会全国大会講演集(2004)

4) 核燃料サイクル開発機構:“堆積軟岩の長期挙動に関する調査試験研究（その２）”、サイクル機機構技術資料（委託研究成果報告書)、JNC TJ5400 2003-005(2004)

5) 松井　裕哉他:“新第三紀堆積岩を対象とした大深度における初期応力測定”、第 40 回地盤工学研究発表会(2005)

6) Lee M.Y. & Haimson B.C., Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameter, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 26, 447-456(1989)

7) Baumtartner J. & Zoback M.D., Interpretation of hydraulic fracturing pressure-time records using interactive analysis methods, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26,461-469(1989)

8) Vik G. & Tundbridge L., Hydraulic fracturing – a simple tool for controlling the safety of unlined high pressure shafts and headrace tunnels, Proc. of the Int. Symp. On Rock Stress and Rock Stress Measurements/Stockholm(1986).

9) Hayashi K. and Haimson B.C., Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination from hydraulic injection test data, J. Geophys. Res., 96,18311-18321(1991)

10)塚原　弘明、池田　隆司:“地殻応力値から推定した堆積岩岩盤中の応力状態”、地質学雑誌、95, 571-578(1989)

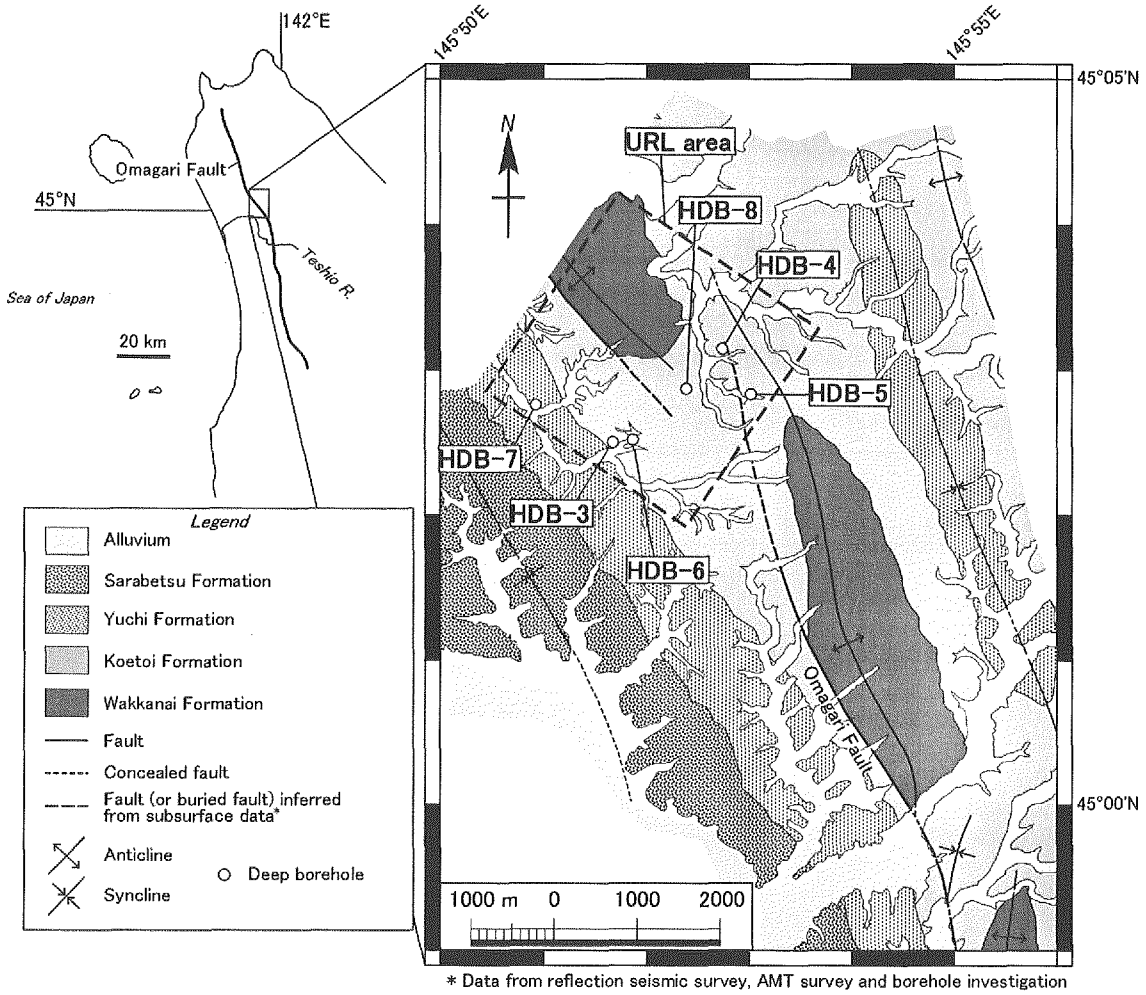
11)池田　隆司、塚原　弘明:“硬岩中の地殻応力値分布の特徴と支配因子”、資源と素材、107, 441-445(1991)

12)丹生屋　純夫他:“孔内載荷試験による深部堆積岩の変形特性評価”、第 40 回地盤工学研究発表会(2005)

13) 核燃料サイクル開発機構:“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 13 年度報告－”、サイクル機構技術資料、JNC TN 1400 2002-003(2002)

14) 核燃料サイクル開発機構:“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 14 年度報告－”、サイクル機構技術資料、JNC TN 1400 2003-004(2003)

15) 核燃料サイクル開発機構:“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 15 年度報告－”、サイクル機構技術資料、JNC TN 1400 2004-007(2004)



Quote from 1:50000 Topographical map of "Wakasakanai" "Teshio" "Onobbunai" "Kamisarufutsu" "Pinneshiri"
(Published by Geographical Survey Institute)

Fig.2.1-1 Location of boreholes

Table 2.2-1 Items of Test and Measurement

Borehole	Depth (m)	Laboratory tests					In-situ measurements	
		Physical properties	Mechanical properties	Estimation of long-term behavior	Thermal properties	Mesurement the initial stress by AE method	Hydraulic fracturing test	Load test in borehole
HDB-3	520	O	O	O	O	O	O	
HDB-4	520	O	O				O	
HDB-5	520	O	O				O	
HDB-6	620	O	O	O	O	O	O	O
HDB-7	520	O	O					
HDB-8	470	O	O					

Physical properties : specific gravity,absorption ratio,effective porosity,water content,unit weight
Mechanical properties : uniaxial compression,triaxial compression,brazillian test,consolidation test
Estimation of long-term behavior : creep test

Table 2.2-2 The number of specimens and the specification of each test

Items of test		Number of specimens						Specification of test	Remark
		HDB-3	HDB-4	HDB-5	HDB-6	HDB-7	HDB-8		
Physical properties	Effective porosity Water content Density	30	10	10	30	30	27	ISRM guide*1 Effective porosity(HDB-6);mercury press-in method(12specimens)	HDB-3,6,7,8 : every 50m deep, 3 virtical specimens HDB-4,5 : every 50m deep, 1virtical specimen
	Unit weight	30	10	10	30	30	27	ISRM guide*1 dimension : ϕ 50or35mm× height 100or70mm	Caliper method Using the specimen of uniaxiai compression test
	Slaking test	20	-----	-----	-----	-----	-----	ISRM guide*2	HDB-3 : every 50m deep, 2 specimens
	Expansion on water absorption test	20	-----	-----	-----	-----	-----	ISRM guide*2 dimension : ϕ 60mm×height 20mm	
	Expansive pressure test	20	-----	-----	-----	-----	-----		
	Elastic wave velocity	90	10	10	30	30	27	ISRM guide*3 dimension : φ50or35mm× height 100or70mm	HDB-3,6,7,8 : every 50m deep, virtical 3 specimens HDB-4,5 : every 50m deep, virtical 1 specimen
Mechanical properties	Uniaxial compression test	90	10	10	30	30	27	JIS MO302*4 dimension : φ 50or35mm×height 100or70mm	3specimens/1 series Also measure the poisson' ratio
	Triaxial compression test	5series 15	-----	-----	4series 24	-----	-----	No especial specifications dimension : ϕ 50or35mm×height 100or70mm	HDB-3 : 5 depths×3 kinds of confining pressure HDB-6 : 4 depths×2 kinds of confining pressure×3 kinds of strain rate
	Triaxial compression test	5series 15	-----	-----	4series 24	-----	-----		
	Brazillian test	90	10	10	30	-----	-----	JIS MO303*5 dimension : ϕ 50mm×height 100mm	HDB-3 : every 50m deep, virtical 3 lateral 6 specimens HDB-6 : same as HDB-3 HDB-4,5 : every 50m deep, virtical 1 specimen
	Measurement the initial stress by AE method	2series 16	-----	8	-----	-----	-----	No especial specifications dimension : ϕ 30mm×height 60mm	every depth : virtical 2 lateral 6 specimes HDB-3 : Also preliminary test carried out
Thermal properties	Thermal conductivity	5series 15	-----	-----	2series 6	-----	-----	No especial specifications dimension : ϕ 50mm×height 30mm	3 specimens/series saturated*6, natural*6, dried*7
	Specific heat capacity	5series 15	-----	-----	2series 6	-----	-----	No especial specifications dimension : ϕ 16mm×height 30mm	saturated, natural, dried (keep the temperature between room temperature and 120℃ constantly)
	Thermal expansion	5	-----	-----	2	-----	-----	No especial specifications dimension : ϕ 20mm×height 100mm	dried (keep the temperature between room temperature and 120℃ constantly)

*1 : Vol.1 2.1"Guidelines of water content, effective porosity, density, absorption ratio measurement"
*2 : Vol.1 2.2 "Guidelines of expansion and anti-slaking index measurement"
*3 : Vol.1 3. "Guidelines of elastic wave velocity of rock measurement"
*4 : Method of compression test of rock
*5 : Method of tensile test of rock
*6 : 50℃, 80℃ room temperature
*7 : 50℃、80℃, 120℃ room temperature

Table 3.1.1-1 The results of laboratory tests

Borehole	Stratum	Rock type	Physical properties						Mechanical properties			
			Specific gravity	Unit weight (kN/m3)	Water content (%)	Effective perosity (%)	Elastic wave velocity		Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Uniaxial compression strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
							P-wave (km/sec)	S-wave (km/sec)				
HDB-3	Koetoi	Diatomaceous mudstone	1.45～1.72	14.1～16.8	38.9～78.4	48.2～65.6	1.35～2.14	0.40～0.85	0.31～4.18	0.06～0.233	1.77～14.2	0.22～1.36
	Wakkanai	Transitional zone	1.85～1.93	17.9～18.9	22.9～27.8	36.6～40.2	2.21～2.62	0.98～1.26	2.57～5.44	0.111～0.390	5.82～35.0	0.89～3.91
		Hard shale	1.79～1.87	17.7～18.8	27.4～31.1	40.8～43.4	2.25～2.51	0.89～1.15	3.46～5.43	0.192～0.337	14.7～32.9	0.75～1.47
HDB-4	Koetoi	Diatomaceous mudstone	1.55～1.64	14.5～15.6	53.3～63.0	56.9～63.0	1.72～1.77	0.52～0.55	0.64～1.24	0.121～0.433	5.3～6.7	0.57～0.79
	Wakkanai	Transitional zone	1.78～1.79	14.4～15.1	34.7～35.5	46.4～47.3	2.08～2.13	0.87～0.92	3.55～6.55	0.312～0.442	9.7～13.8	1.62～2.17
		Hard shale	1.89～2.02	14.1～15.5	17.0～25.8	29.7～39.2	2.06～2.59	0.96～1.22	2.26～4.88	0.136～0.818	8.4～28.6	0.84～3.50
HDB-5	Koetoi	Diatomaceous mudstone	1.76～1.78	15.8～15.9	29.8～30.2	43.5～44.0	1.79～1.83	0.56～0.60	0.60～0.68	0.148～0.344	6.4～7.1	0.22～0.27
	Wakkanai	Transitional zone										
		Hard shale	1.79～2.04	17.4～19.6	19.8～32.4	33.4～44.5	2.14～2.44	0.92～1.18	2.33～3.78	0.066～0.300	10.4～32.1	1.17～2.99
HDB-6	Koetoi	Diatomaceous mudstone	1.50～1.60	15.2～16.0	57.7～71.8	58.5～63.8	1.61～1.69	0.43～0.50	0.20～0.52	0.121～0.232	2.8～5.5	0.40～0.51
	Wakkanai	Transitional zone	1.65～1.81	16.1～18.1	33.3～48.9	45.0～55.1	1.75～2.05	0.57～0.92	1.44～2.12	0.144～0.163	13.6～21.2	2.91～3.28
		Hard shale	1.79～1.99	17.3～19.4	22.0～33.0	35.8～44.7	1.89～2.21	0.79～1.03	0.89～2.53	0.109～0.288	6.3～22.9	0.73～2.65
HDB-7	Yuchi	Sandstone	1.84～1.98	18.5～19.5	25.9～34.9	40.9～47.9	1.72～1.87	0.20～0.49	0.04～0.33	0.138～0.547	0.4～2.7	
	Koetoi	Diatomaceous mudstone	1.65～1.75	16.1～17.0	40.6～50.0	50.5～55.1	1.76～1.84	0.52～0.61	0.30～0.66	0.182～0.441	1.9～2.8	
HDB-8	Koetoi	Diatomaceous mudstone										
	Wakkanai	Transitional zone	1.67～1.68	16.2～16.5	46.0～46.3	53.0～53.1	1.83～1.88	0.74～0.77	1.20～1.30	0.098～0.138	10.2～11.2	
		Hard shale	1.82～2.02	17.8～19.5	19.6～28.9	32.7～41.7	2.11～2.43	0.83～1.13	1.59～5.76	0.121～0.486	13.9～48.2	

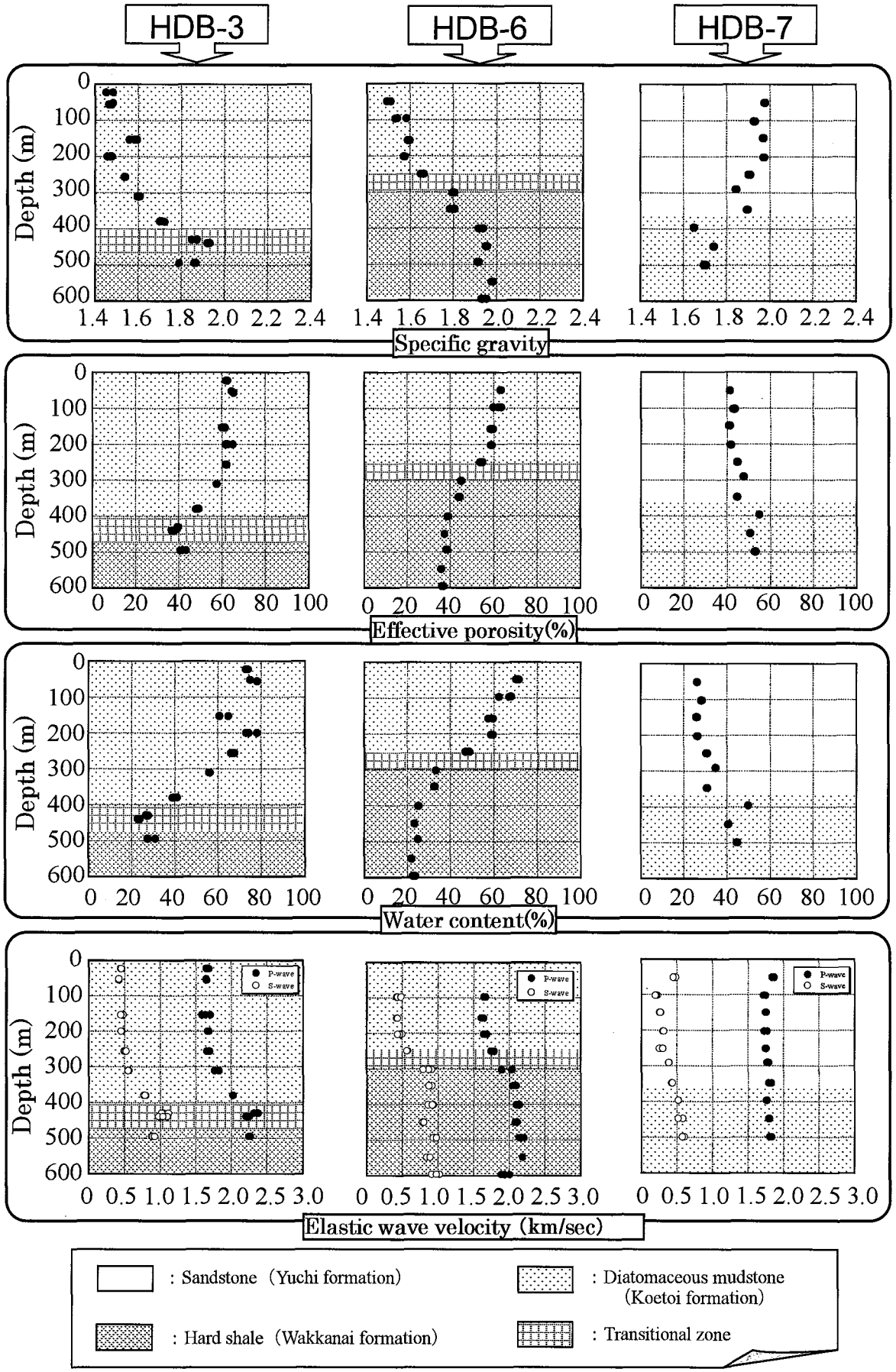


Fig. 3.1.1-1 Distribution of physical properties of rock (West side of Omagari fault)

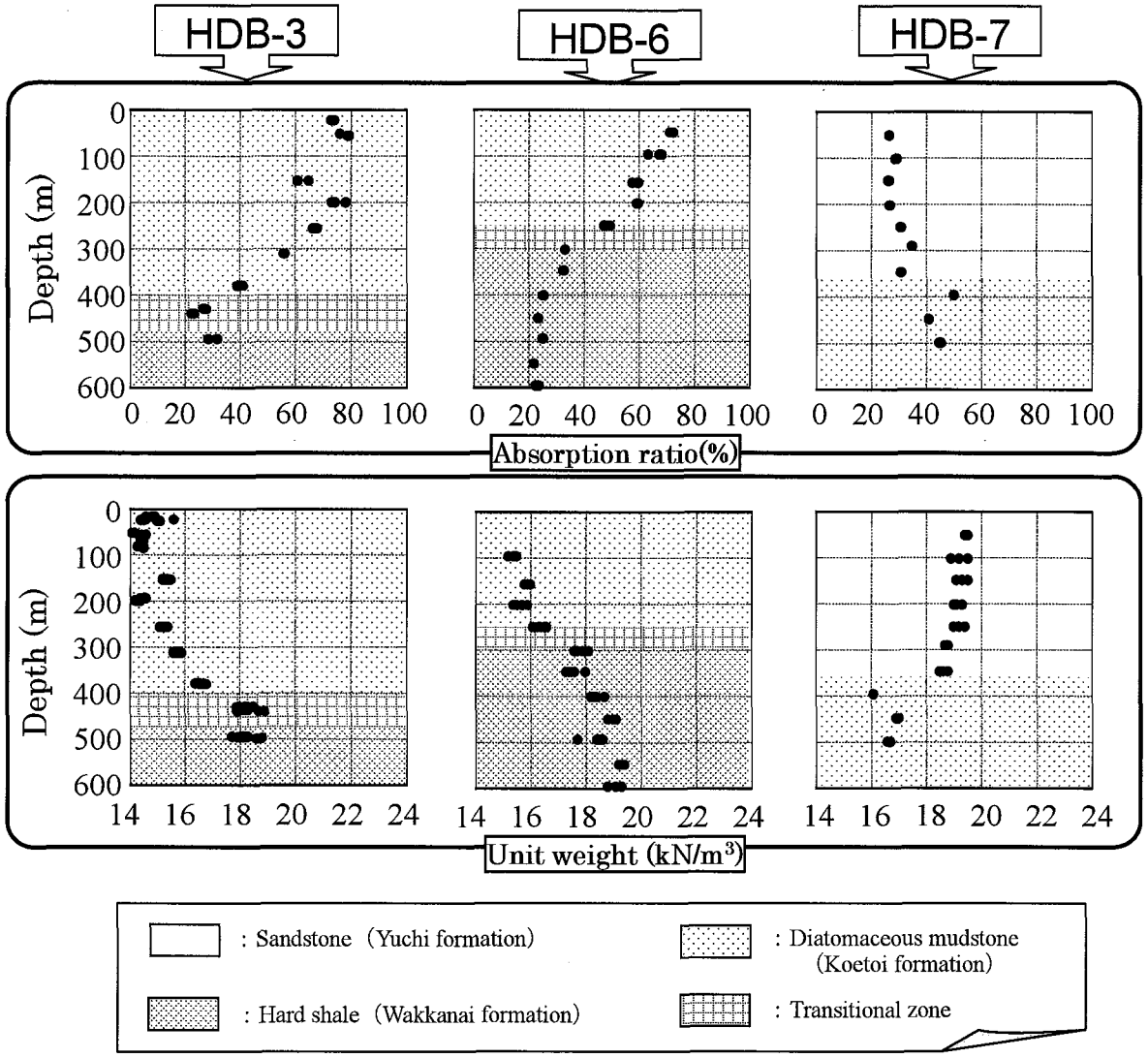


Fig. 3.1.1-1 Distribution of physical properties of rock (West side of Omagari fault ; continued)

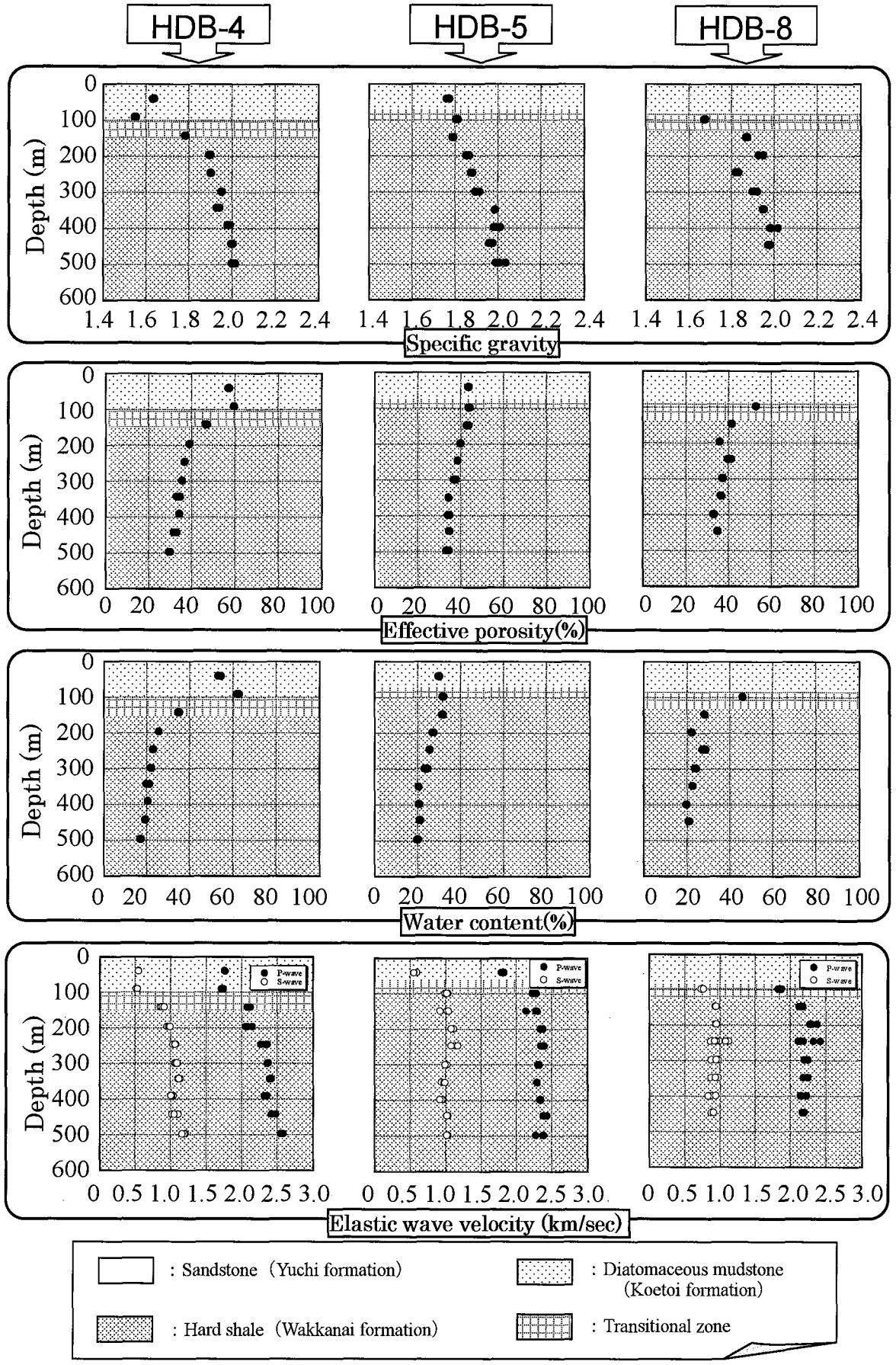


Fig. 3.1.1-2 Distribution of physical properties of rock (East side of Omagari fault)

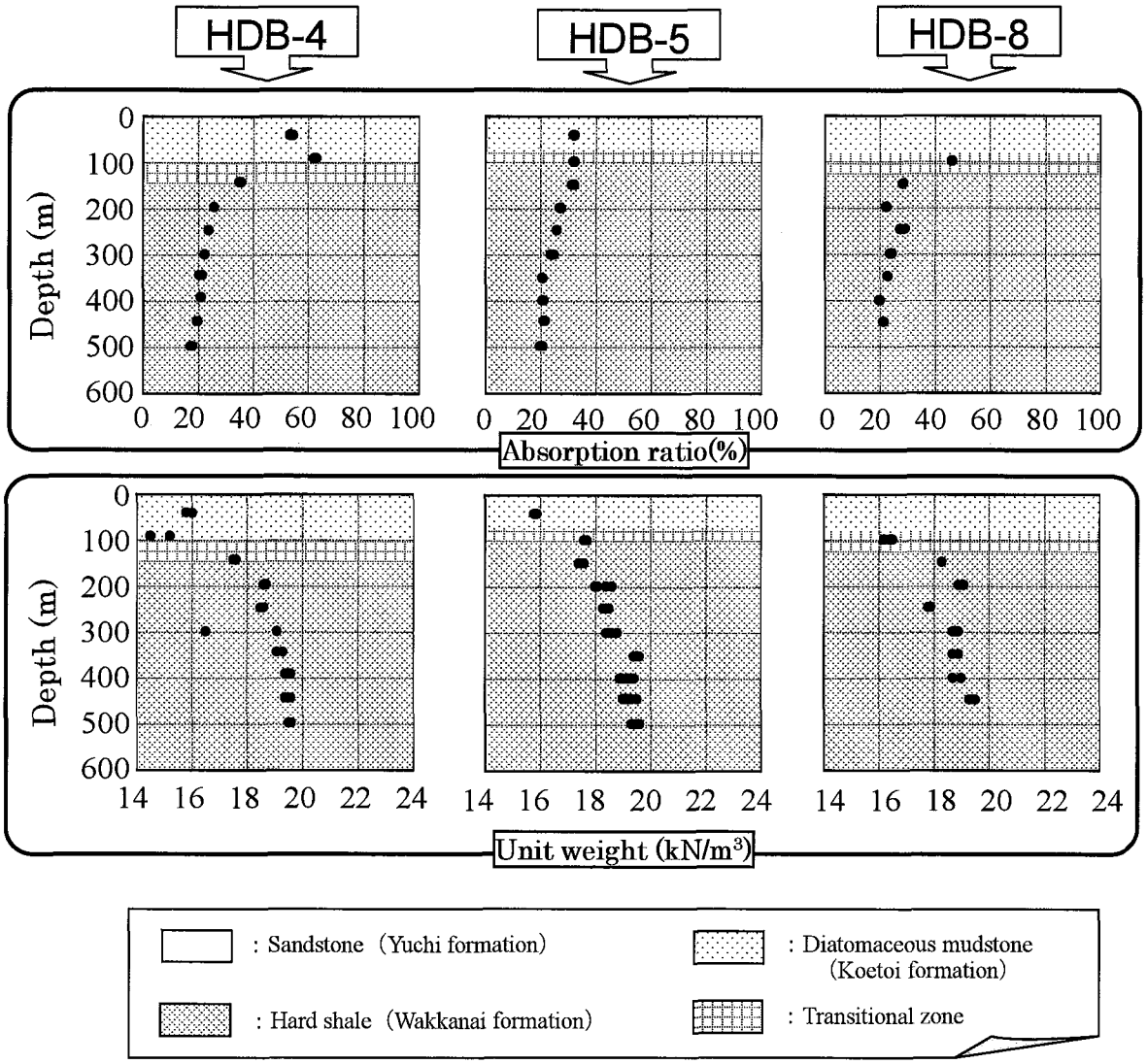


Fig. 3.1.1-2 Distribution of physical properties of rock (East side of Omagari fault:continued)

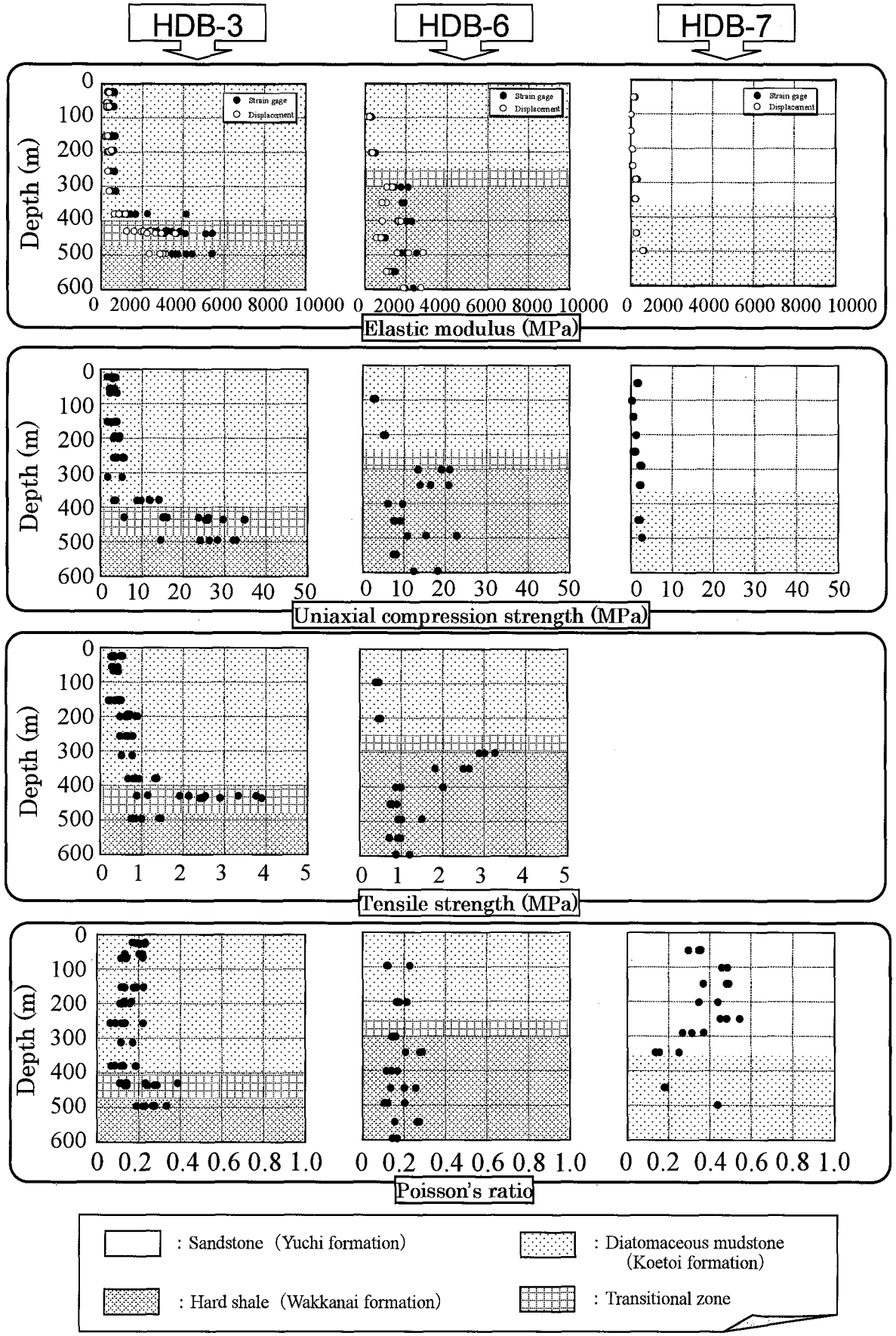


Fig. 3.1.1-3 Distribution of mechanical properties of rock (West side of Omagari fault)

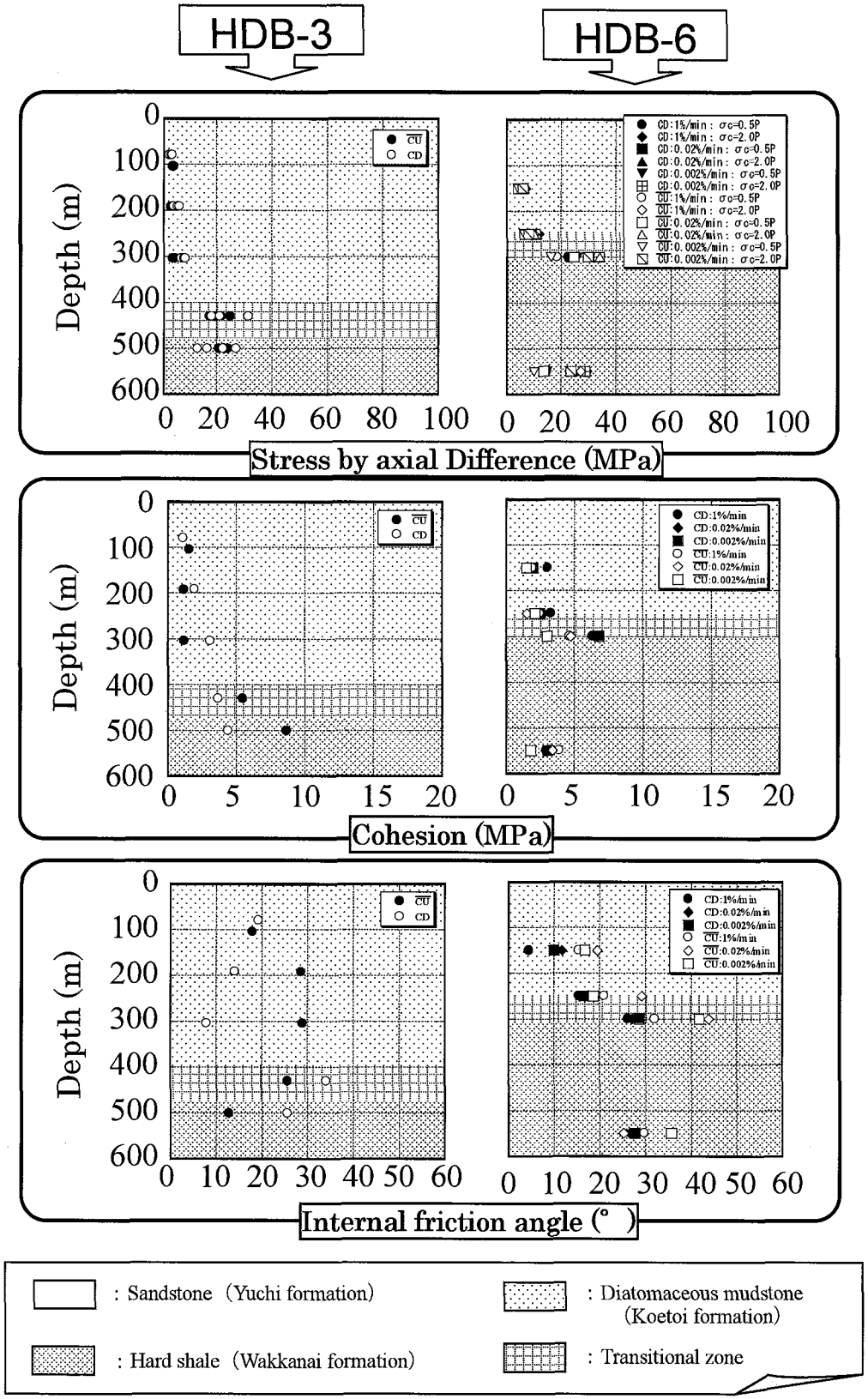


Fig. 3.1.1-3 Distribution of mechanical properties of rock (West side of Omagari fault:continued)

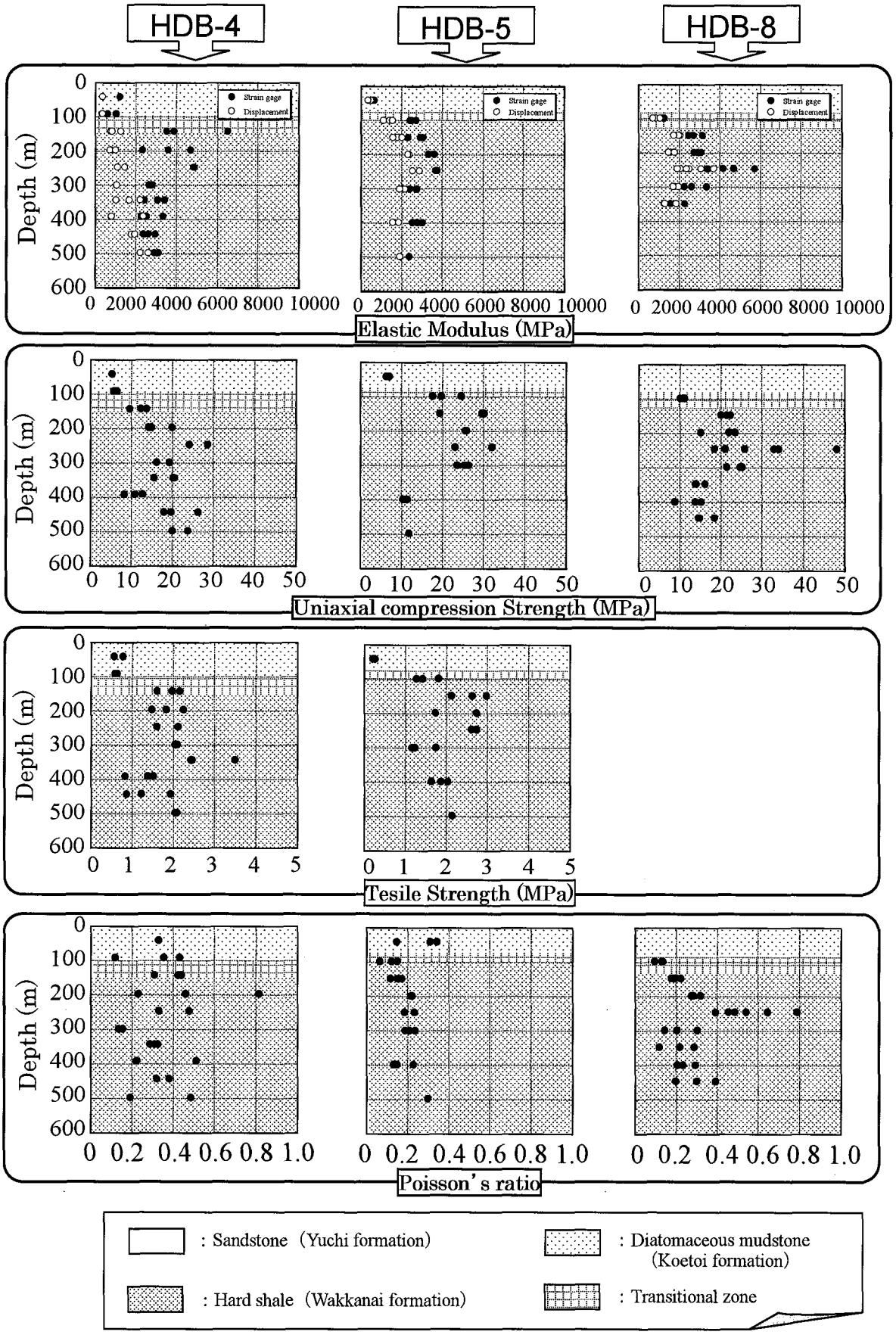


Fig. 3.1.1-4 Distribution of mechanical properties of rock (East side of Omagari fault)

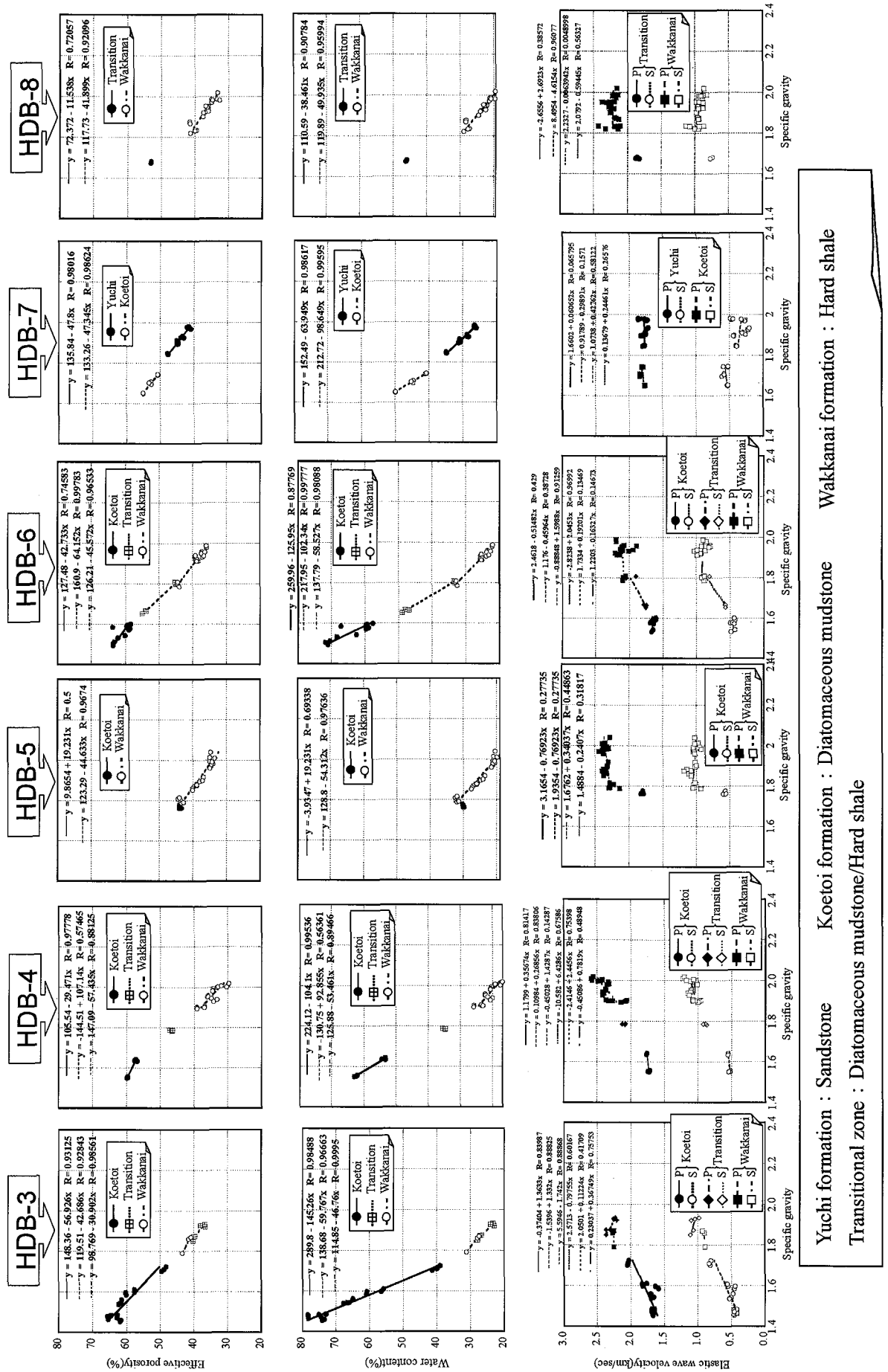


Fig. 3.1.1-5 Relationship between physical properties

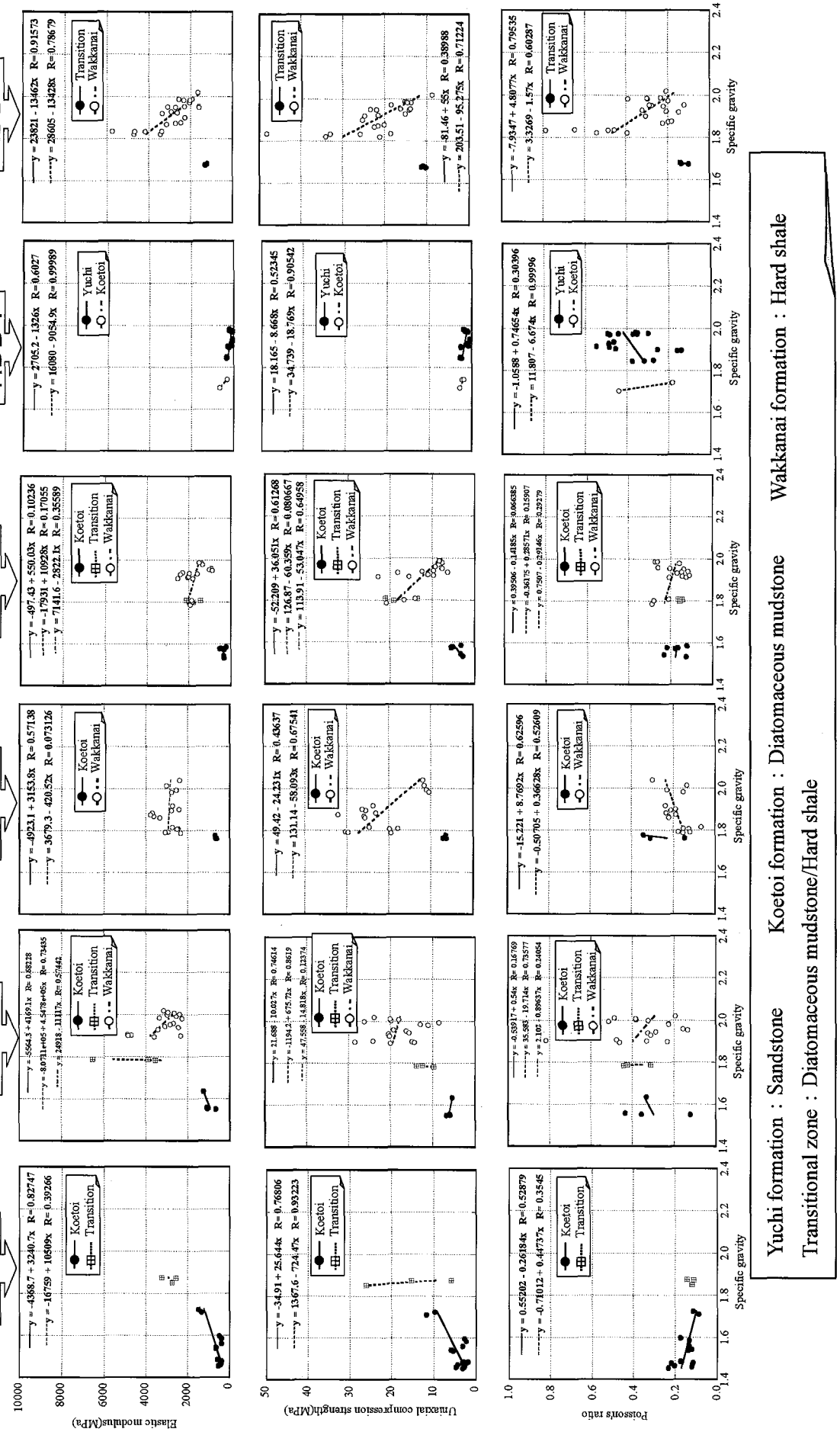
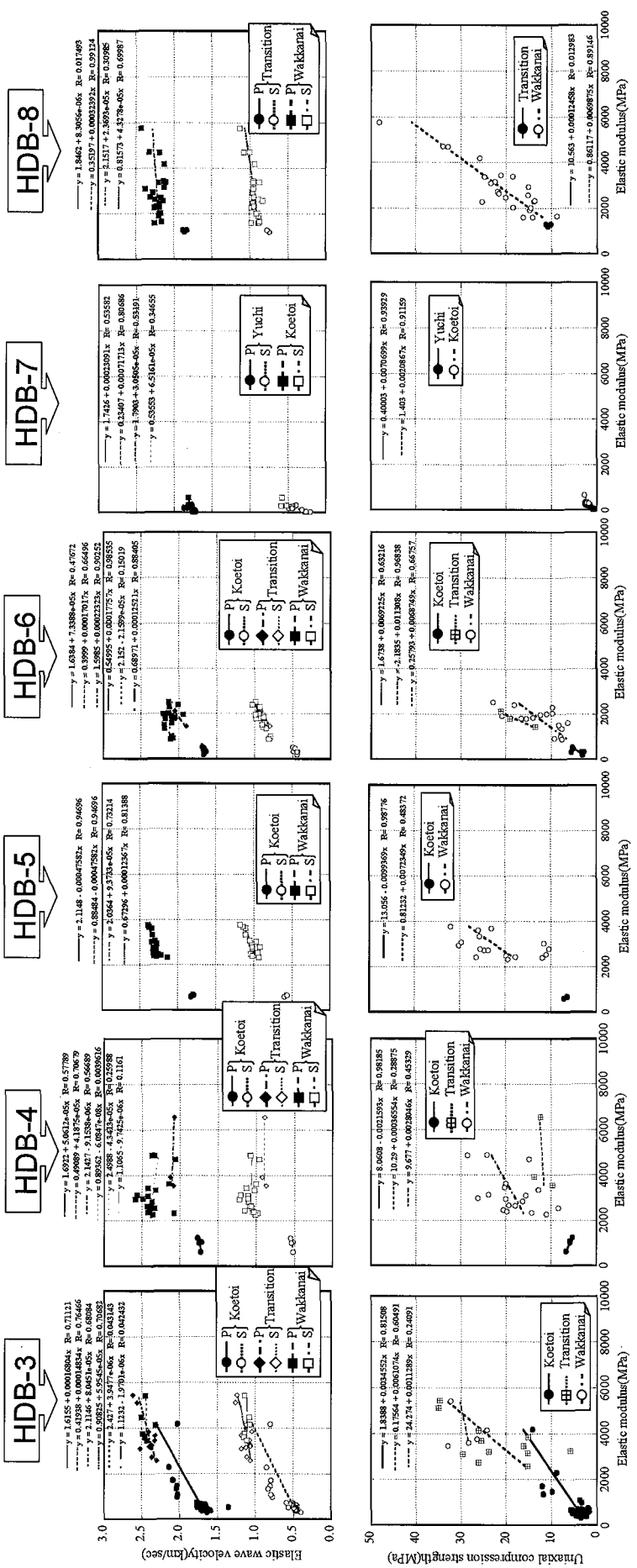


Fig. 3.1.1-6 Relationship between physical and mechanical properties



Yuchi formation : Sandstone　　Koetoi formation : Diatomaceous mudstone　　Wakkanai formation : Hard shale

Transitional zone : Diatomaceous mudstone/Hard shale

Fig. 3.1.1-7　Relationship between mechanical properties

Table 3.1.1-2 Correlation coefficient between properties

		HDB-3			HDB-4			HDB-5			HDB-6			HDB-7		HDB-8		
		Koetoi	Wakkanai		Koetoi	Wakkanai		Koetoi	Wakkanai		Koetoi	Wakkanai		Yuchi	Koetoi	Koetoi	Wakkanai	
		Diatomaceous mudston	Transitional zone	Hard shale	Diatomaceous mudstone	Transitional zone	Hard shale	Diatomaceous mudstone	Transitionala zone	Hard shale	Diatomaceous mudstone	Transitional zone	Hard shale	Sand stone	Diatomaceous mudstone	Diatomaceous mudstone	Transitional zone	Hard shale
For specific gravity	effective porosity	0.931	0.928	0.986	0.978	0.575	0.881	0.500	----	0.967	0.746	0.998	0.965	0.980	0.986	----	0.721	0.921
	water content	0.985	0.967	1.000	0.995	0.564	0.895	0.693	----	0.976	0.878	0.998	0.981	0.986	0.996	----	0.908	0.960
	P-wave	0.840	0.889	0.417	0.814	0.143	0.754	0.277	----	0.449	0.429	0.913	0.135	0.066	0.581	----	0.386	0.005
	S-wave	0.888	0.602	0.758	0.838	0.676	0.489	0.277	----	0.318	0.387	0.970	0.347	0.157	0.266	----	0.961	0.563
	elastic modulus	0.827	0.393	----	0.682	0.734	0.574	0.571	----	0.073	0.102	0.171	0.356	0.603	1.000	----	0.916	0.787
	uniaxial compression strength	0.768	0.932	----	0.746	0.862	0.124	0.436	----	0.675	0.613	0.081	0.696	0.523	0.905	----	0.390	0.712
	poisson's ratio	0.529	0.355	----	0.168	0.736	0.241	0.626	----	0.526	0.066	0.159	0.293	0.304	1.000	----	0.795	0.603
For elastic modulus	P-wave	0.711	0.681	0.043	0.578	0.567	0.260	0.947	----	0.732	0.477	0.903	0.150	0.536	0.532	----	0.017	0.310
	S-wave	0.765	0.707	0.042	0.707	0.004	0.116	0.947	----	0.814	0.665	0.985	0.884	0.807	0.347	----	0.991	0.700
	uniaxial compression strength	0.815	0.605	0.241	0.982	0.289	0.453	0.988	----	0.484	0.632	0.968	0.668	0.939	0.912	----	0.013	0.891

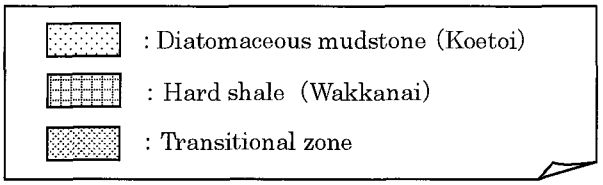
: Correlation coefficient (No less than 0.7)

Table.3.1.1-4 Classification of properties of anti-slaking by Gambel[12)]

Durability	residual dried volume after once rotating for ten minutes (%)	residual dried volume after twice rotating for ten minutes (%)
Extremely high	>99	>98
High	98-99	95-98
From medium to high	95-98	85-95
Midium	85-95	60-85
Low	60-85	30-60
Extremely low	<60	<30

Table.3.1.1-3 Results of the slaking test

Depth (m)	Anti-slaking index Id1(%)	Anti-slaking index Id2(%)
40.00～40.25	96.36	93.33
84.50～94.32	94.77	91.27
142.48～142.68	94.81	93.03
204.80～205.73	95.36	93.69
255.00～255.60	95.74	94.12
299.55～299.95	96.91	95.52
334.25～335.35	95.48	93.77
426.80～428.00	97.15	96.16
441.00～441.50	97.22	95.63
502.70～503.32	96.5	96.01



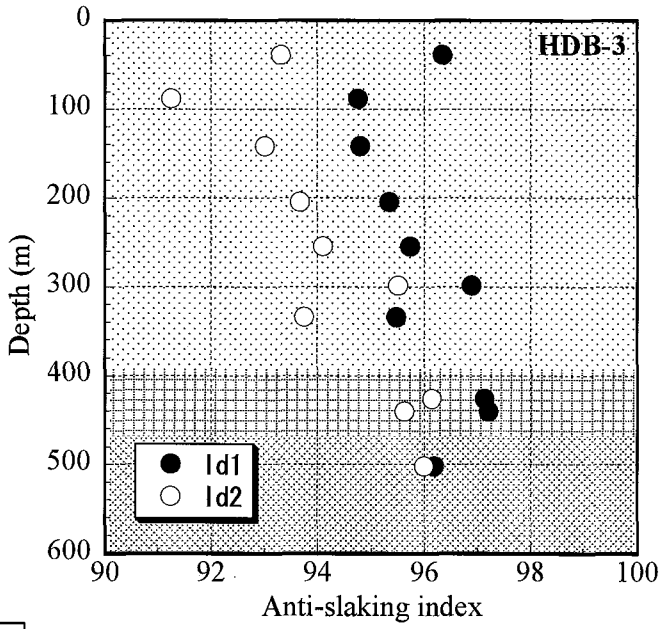


Fig.3.1.1-8 Distribution of anti-slaking index

Table 3.1.1-5 Results of the test for expansion on water absorption property

Depth (m)	Expansive strain index (%)	Expansive pressure (MPa)
30.88～31.00	0.025	0
106.07～106.90	0.028	0.002
142.20～142.48	0.035	0.001
205.00～205.13	0.031	0
255.00～255.34	0	0.003
299.55～299.95	0.003	0.003
335.35～335.75	0.005	0.005
429.38～430.00	0.005	0.003
440.30～441.00	0.025	0
502.70～503.32	0.003	0

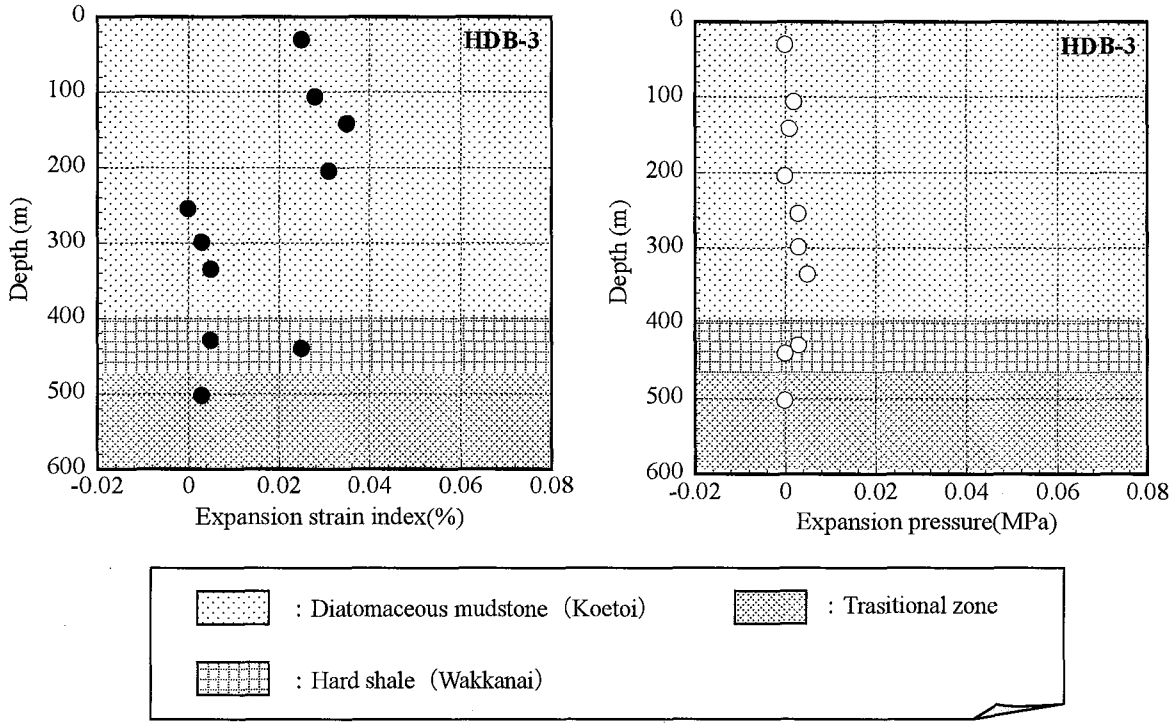


Fig. 3.1.1-9 Distribution of expansion strain index and expansion pressure

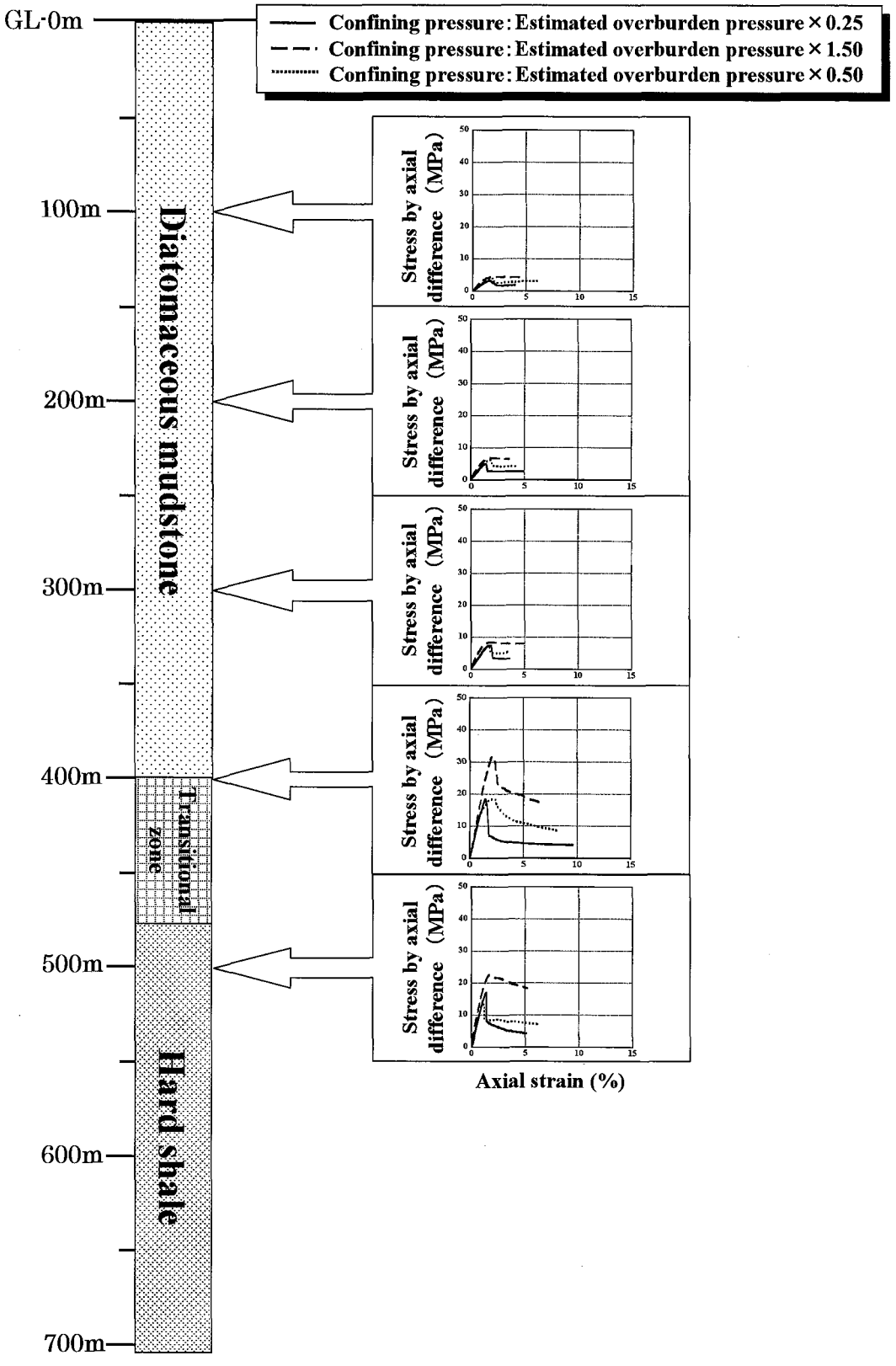


Fig. 3.1.1-10 Result of tri-axial test (HDB-3, CD test)

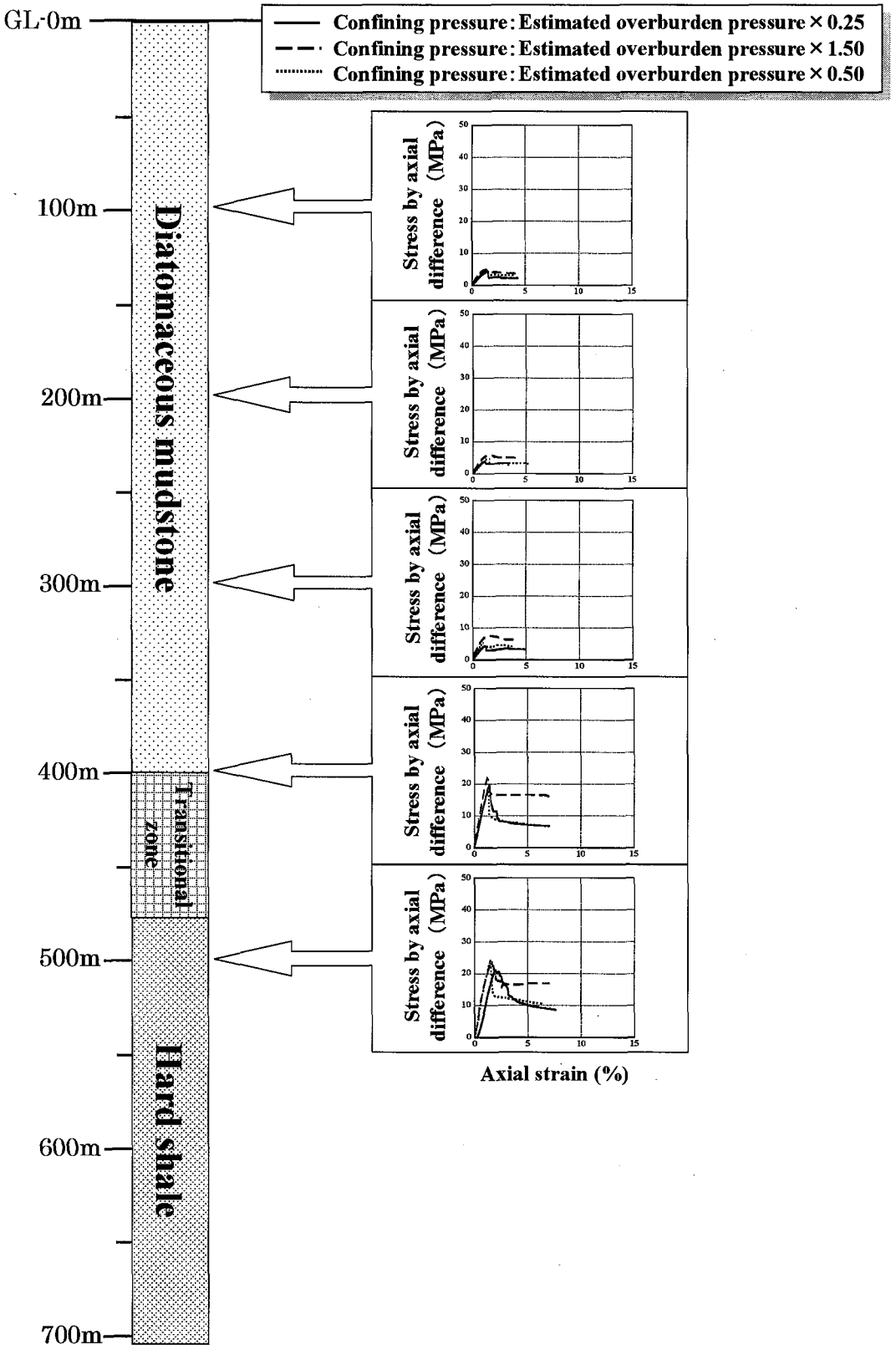


Fig. 3.1.1-11 Result of tri-axial test (HDB-3, $\overline{CU}$ test)

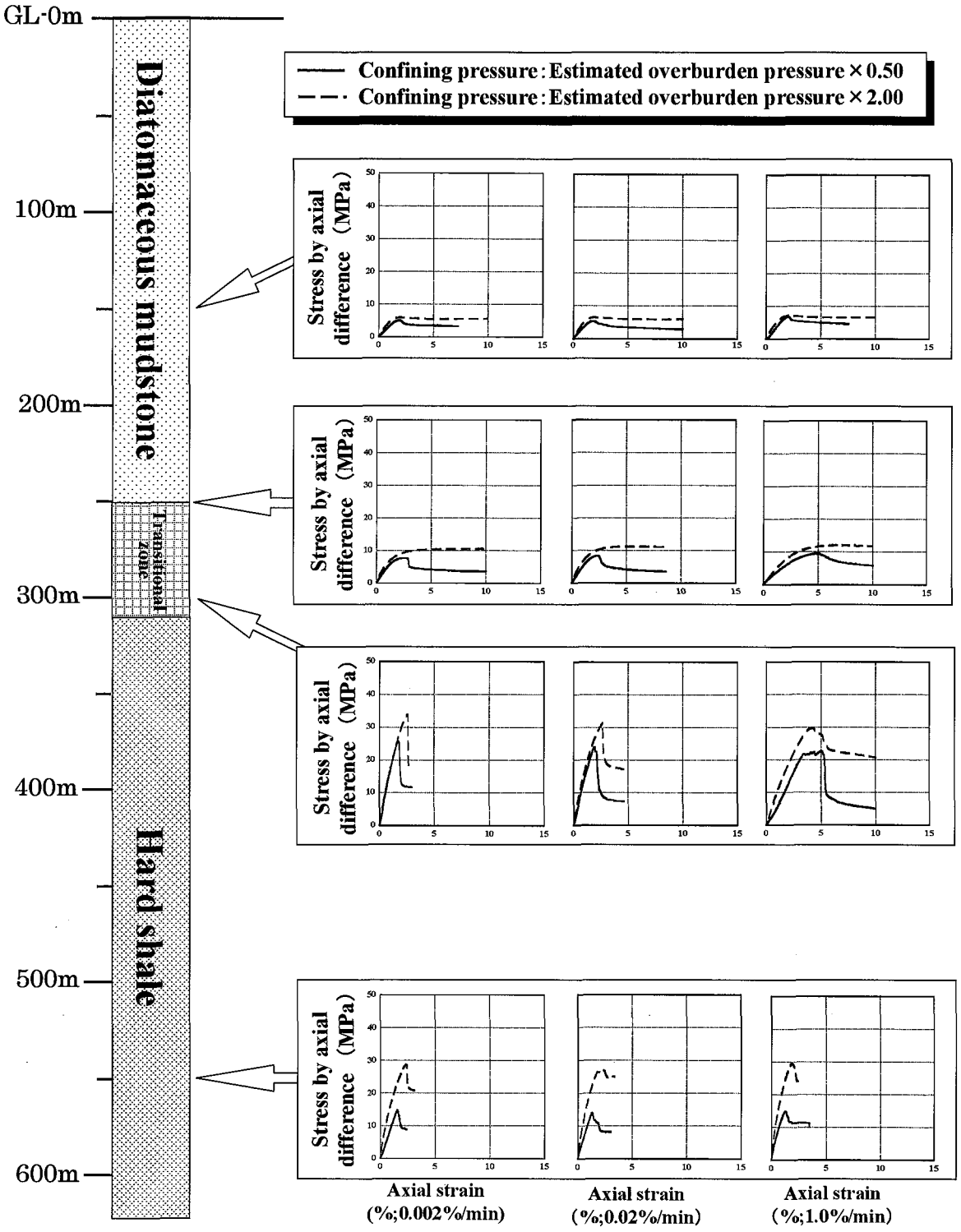


Fig. 3.1.1-12 Result of tri-axial test (HDB-6, CD test)

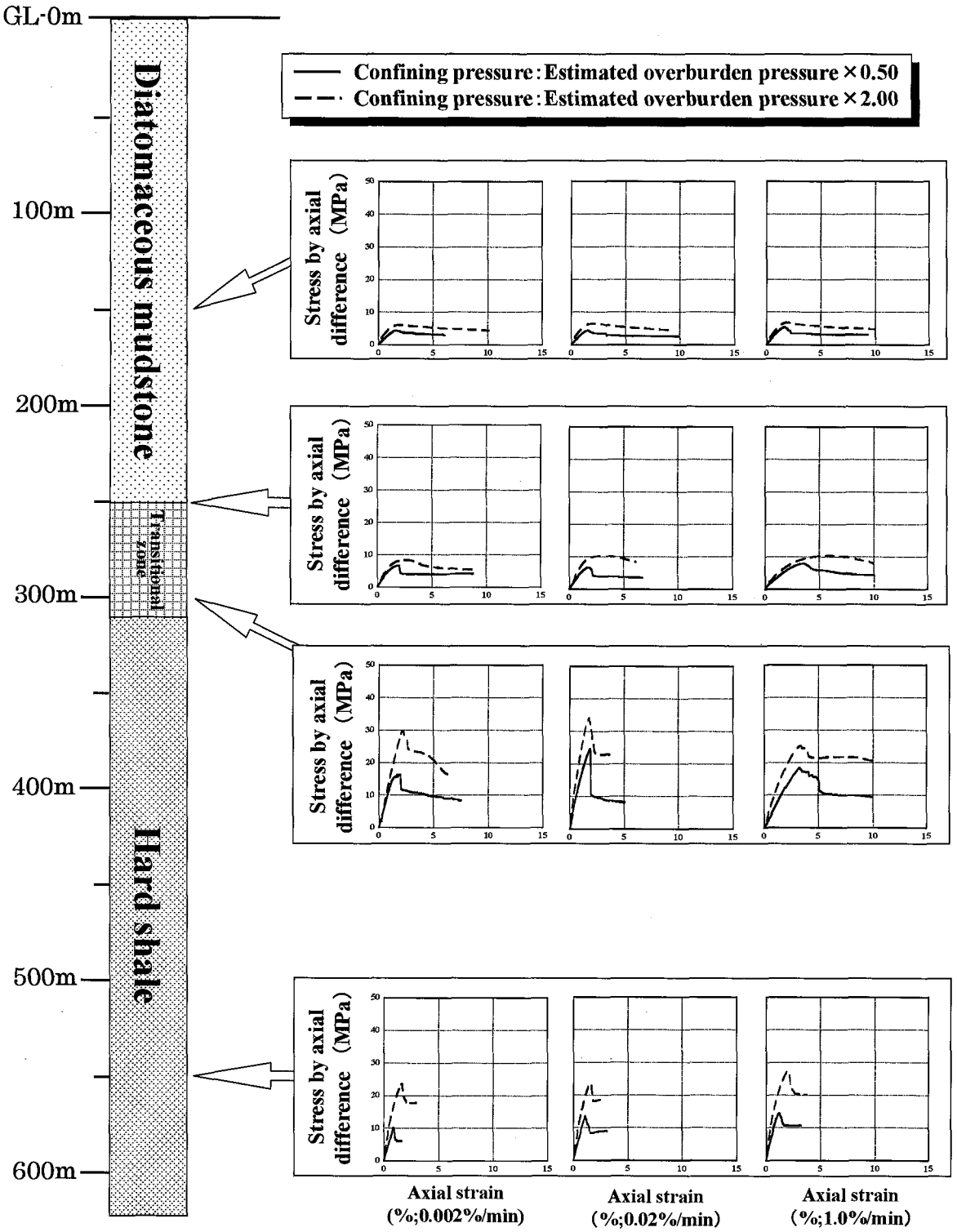
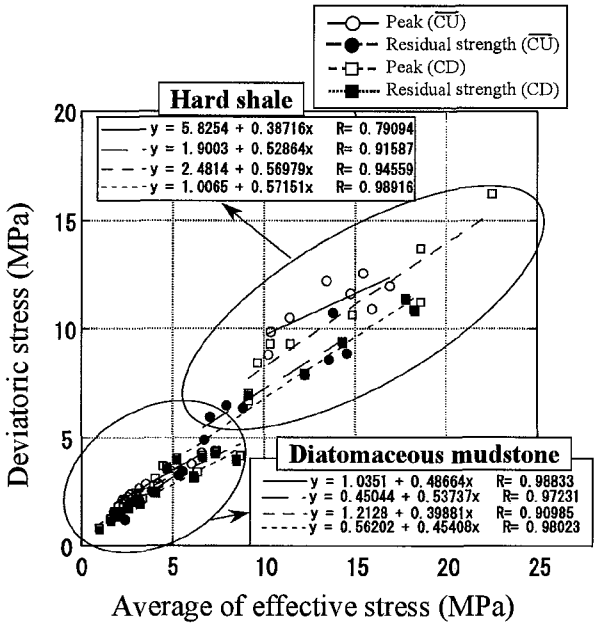


Fig. 3.1.1-13 Result of tri-axial test (HDB-6, $\overline{CU}$ test)



Diatomaseous mudstone			
		Cohesion (MPa)	Internal friction angle(Degree)
$\overline{CU}$ test	Peak strength	1.0	25.9
	Residual streng	0.5	28.3
CD test	Peak strength	1.2	21.7
	Residual streng	0.6	24.4
Hard shale			
		Cohesion (MPa)	Internal friction angle(Degree)
$\overline{CU}$ test	Peak strength	5.8	21.2
	Residual streng	1.9	27.9
CD test	Peak strength	2.5	29.7
	Residual streng	1.0	29.7

Fig. 3.1.1-14 Result of tri-axial test (HDB-3)

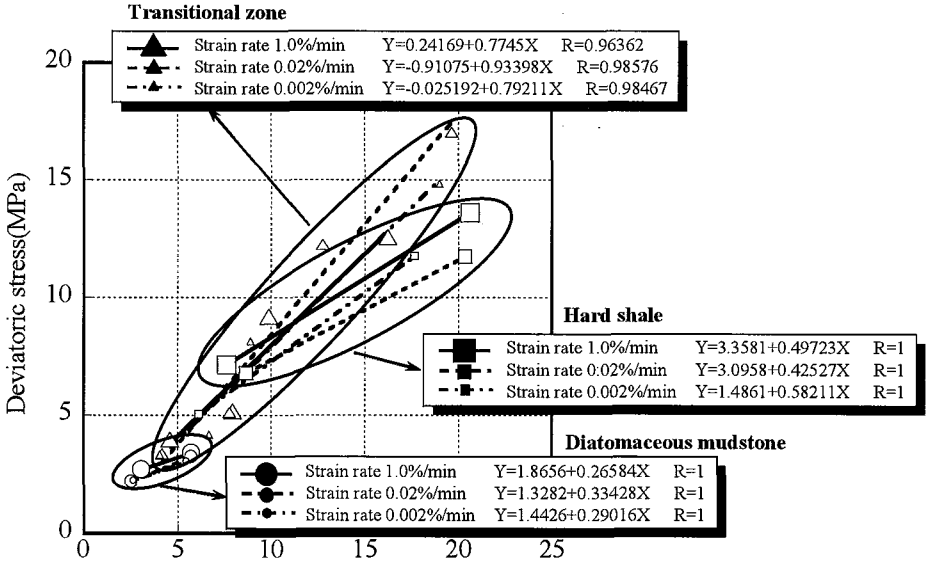


Fig. 3.1.1-15 Result of tri-axial test (HDB-6)

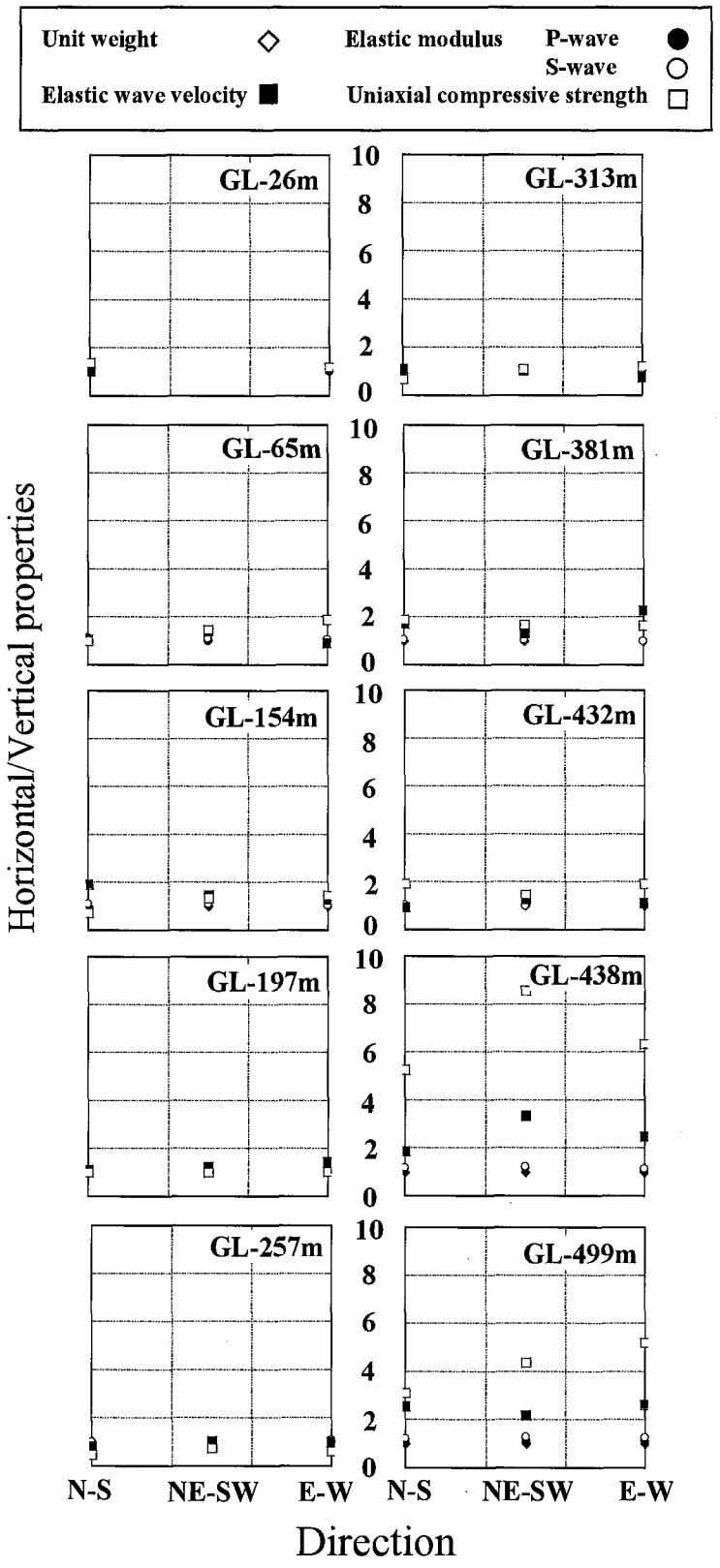


Fig.3.1.1-16 Anisotropy of rock mechanical property (HDB-3)

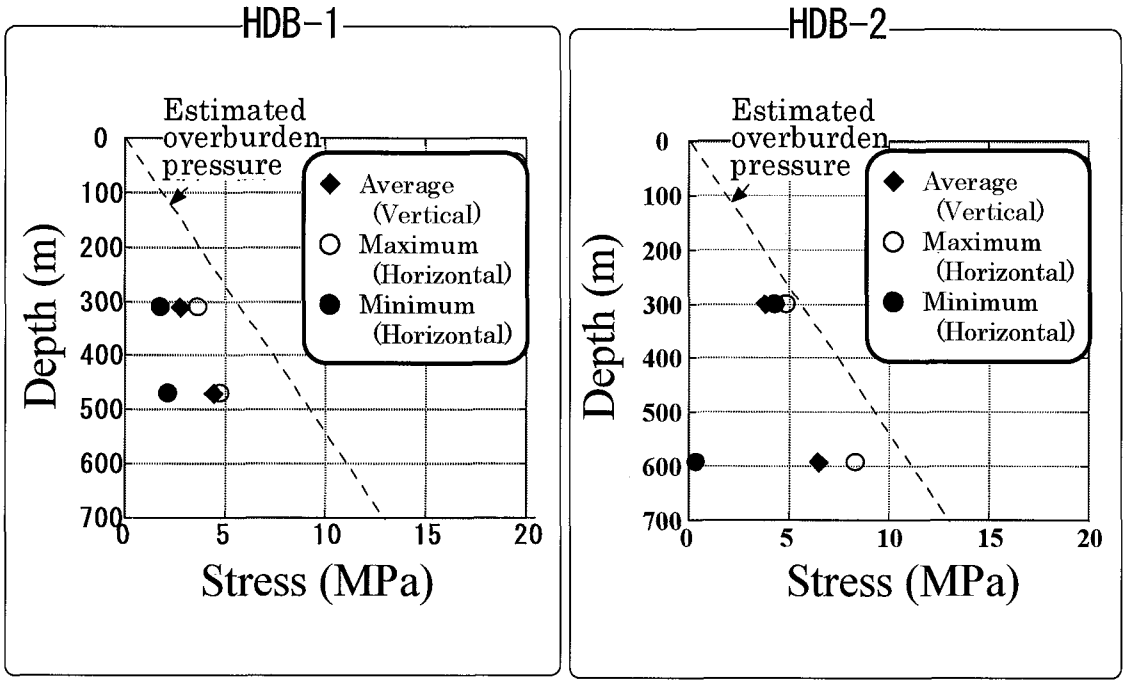


Fig.3.1.2-1 Measurement of initial stress by AE method (HDB-1,2)

Table.3.1.2-1 Results of measurement of initial stress by AE method

Borehole	Estimated overburden pressure	Vertical	Lateral						
		Average	NS (Average)	NW-SE (Average)	EW (Average)	NE-SW (Average)	Maximum principal stress	Minimum principal stress	Direction
	(MPa)								
HDB-3 (439.1m deep)	6.7	7.9	6.1	13.5	—	—	—	—	—
HDB-5 (381.3m deep)	7.0	4.8	3.2	5.6	11.7	13.0	12.1	2.8	N69.3° E

Table.3.1.3-1 The specification of creep test

Depth Rock type Stratum	Specimen	Unit weight γ (kN/m3)	P-wave Vp (km/s)	S-wave Vs (km/s)	Dynamic elastic modulus Ed (GPa)	Dynamic poisson's ratio ν d	Specification	Brief summary of result
GL-250m Diatomaceous mudstone Koetoi	HDB3251	15.79	1.74	0.52	1.27	0.45	Multiple-stage test that the creep stress increase each 1MPa/day.	Breakdown for 30 seconds at 1MPa creep stress. Total strain 4220μ Creep strain 690μ
	HDB3252	15.81	1.73	0.54	1.37	0.45	Multiple-stage test that the creep stress increase each 0.5MPa/day.	Breakdown for 13 seconds at 1.5MPa creep stress. Total strain 5720
	HDB3253	15.93	1.72	0.54	1.38	0.45	Multiple-stage test that the creep stress increase each 0.25MPa/day.	Breakdown for 7.7 hours at 1.75MPa creep stress. Total strain 6960
	HDB3254	15.88	1.74	0.56	1.47	0.44	Creep stress: 1.2MPa (80% of compression stress 1.5MPa gained by multiple-stage test)	Breakdown soon after loading.
	HDB3255	15.96	1.74	0.56	1.47	0.44	Multiple-stage test by each 0.1MPa/2day after loading for 3 months by 1.0MPa.	Breakdown for 1 day at 1.3MPa creep stress. Total strain 7030μ Creep strain 3830μ.
GL-500m Hard shale Wakkanai	HDB3501	18.72	2.25	0.98	5.01	0.38	Multiple-stage test that the creep stress increase each 1MPa/day.	Breakdown for 10.7 hours at 8.0MPa creep stress. Total strain 7550.
	HDB3502	18.67	2.27	1.08	5.98	0.35	Creep stress: 5.63MPa (90% of uniaxial compression stress 6.26MPa)	Never breakdown loading for 30 days. Totai strain 5700μ Creep strain 1650μ. And then, loading by 0.03MPa/sec breakdown at 9.76MPa. Total strain 7800μ.
	HDB3503	18.80	2.22	1.01	5.32	0.37	Creep stress: 7.81MPa (80% of uniaxial compression stress 9.76MPa)	Breakdown for 2 seconds. Total strain 6150μ.
	HDB3504	18.84	2.27	1.02	5.50	0.37	Creep stress: 6.83MPa (70% of uniaxial compression stress 9.76MPa)	Breakdown for 21 seconds. Total strain 6900 μ.
	HDB3505	18.81	2.25	1.04	5.63	0.36	Creep stress: 4.88MPa (50% of uniaxial compression stress 9.76MPa)	It's been 7 days since starting to load. Total strain 4680μ.

Table.3.1.3-2 Results of creep test

Specimen	Creep stress(MPa)	Stress ratio	Time of break or interruption (min)	State of the finish of test	Minimum velocity of strein	
					(1/min)	Logarithm
HDB-1-50	6.35	50.00	43200.000	Interruption	3.41000E-09	-8.46720
HDB-1-70	8.89	70.00	10080.000	Interruption	3.41000E-09	-8.46720
HDB-1-90	11.43	90.00	5.417	Break	8.84000E-05	-4.05350
HDB-2-50	6.35	50.00	27245.000	Break	3.60000E-09	-8.44370
HDB3251-1M	1.00	17.60	0.667	Break	4.63299E-04	-3.33410
HDB3255-1.1M	1.10	19.40	2930.000	Interruption	4.61000E-08	-7.33630
HDB3501	8.00	127.80	640.000	Break	1.16000E-07	-6.93550
HDB3505-4.88	4.88	78.00	46985.000	High possibility of break	7.74000E-09	-8.11130
HDB3505-5.37	5.37	85.80	1430.000	Interruption	4.65000E-08	-7.33250
HDB3505-5.86	5.86	93.60	1425.000	High possibility of break	4.65000E-08	-7.33250
HDB3505-6.34	6.34	101.30	27.000	Break	2.79000E-06	-5.55440

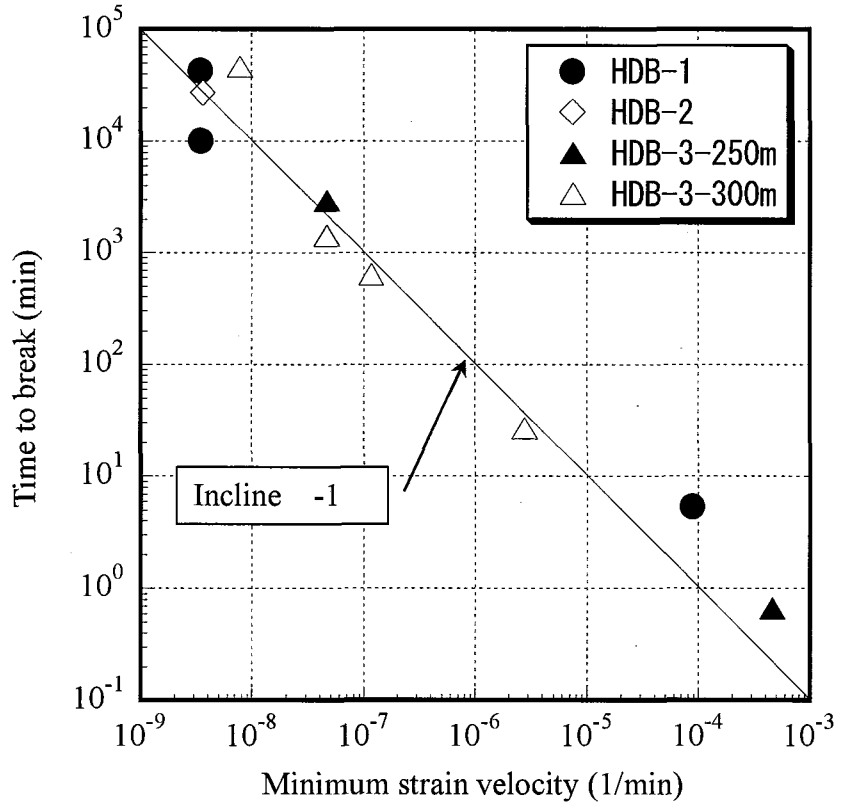


Fig.3.1.3-1 Relationship between minimum strain velocity and time to break of creep

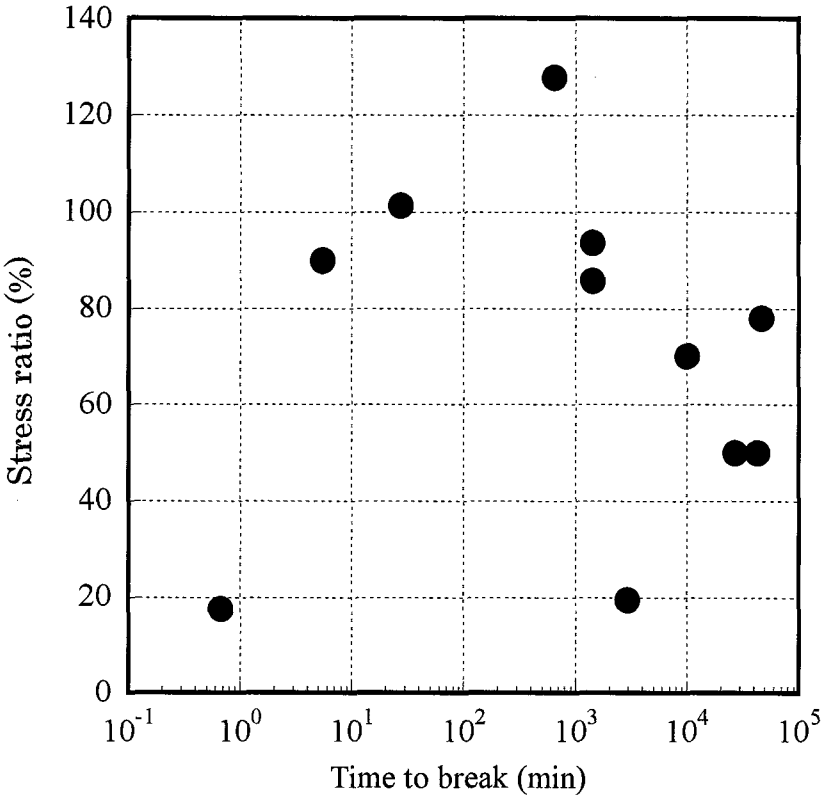


Fig.3.1.3-2 Relationship between stress ratio and time to break of creep

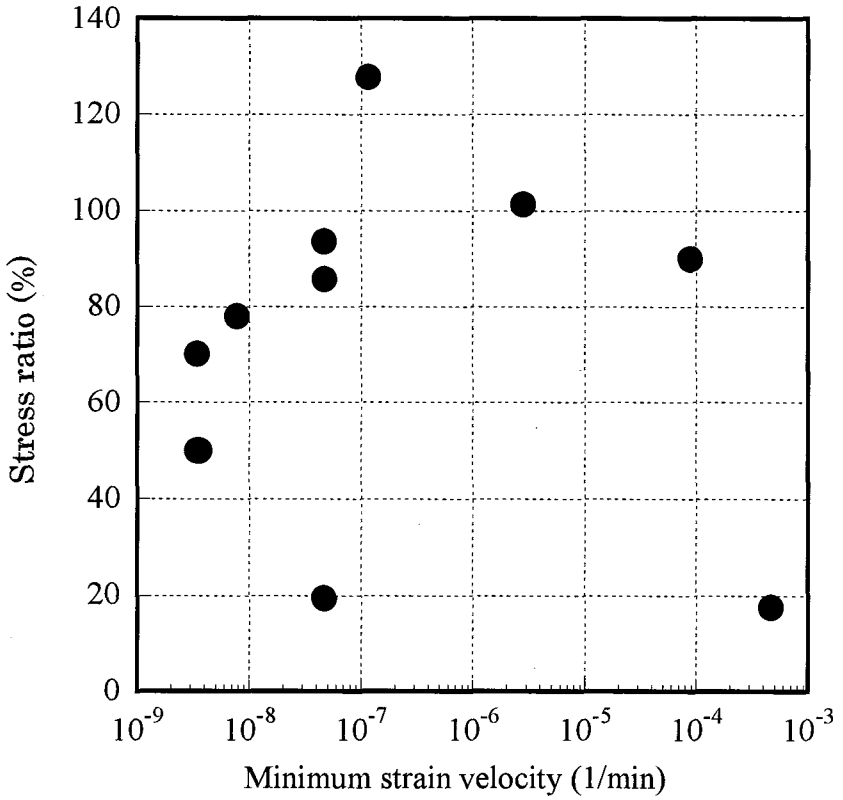


Fig.3.1.3-3 Relationship between stress ratio and minimum strain velocity

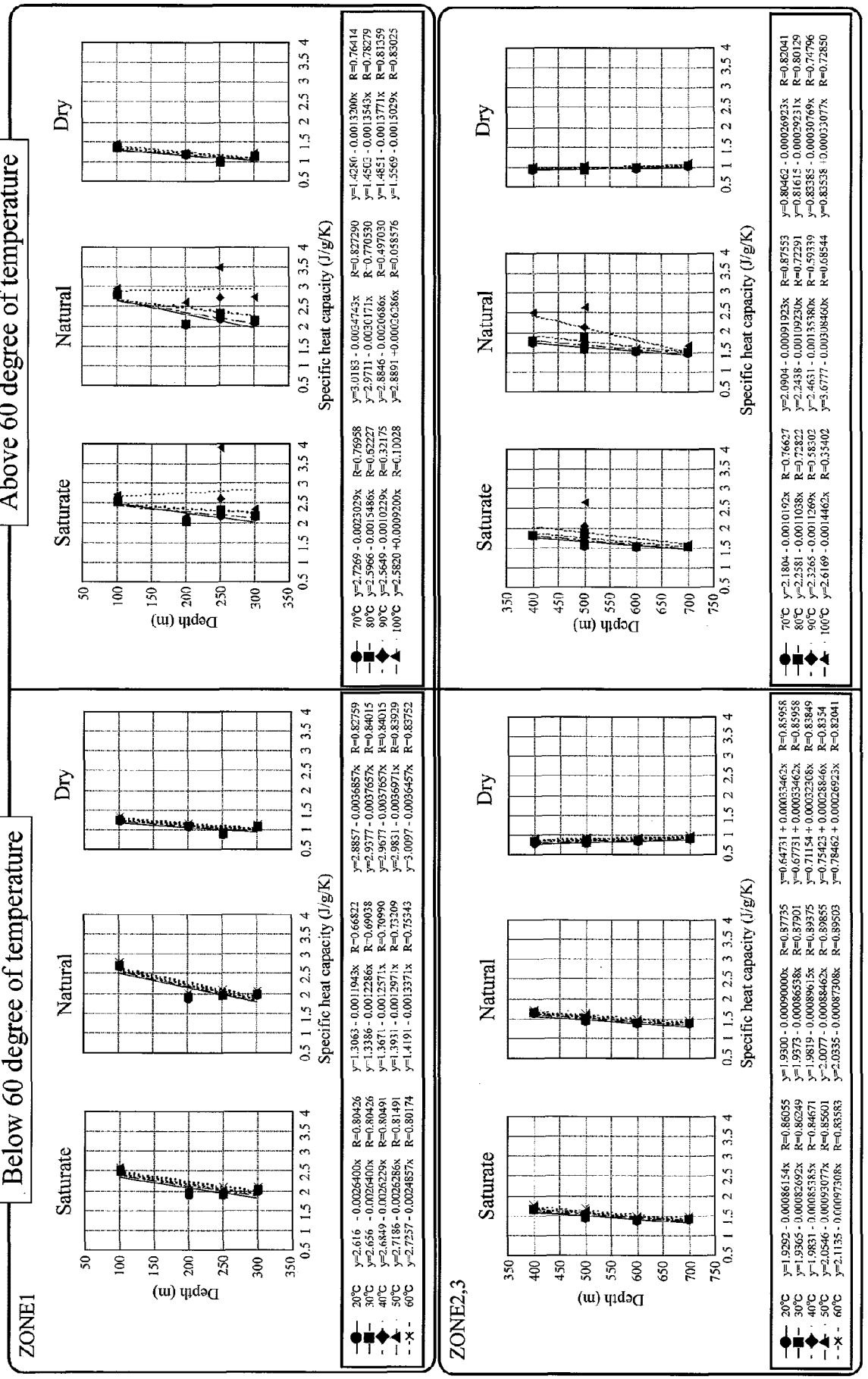


Fig.3.1.4-1 Fever characteristic test(Specific heat capacity)

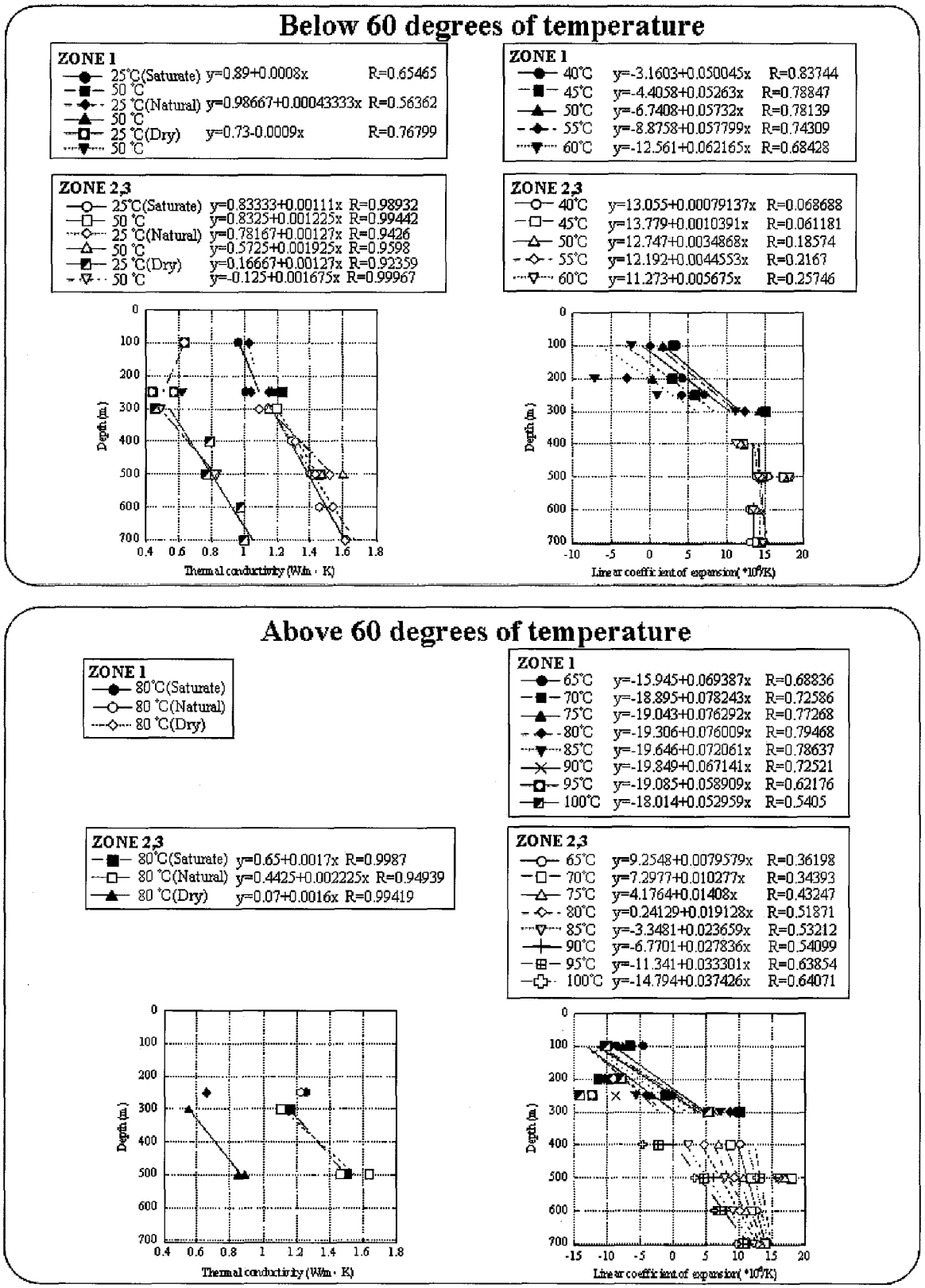


Fig.3.1.4-2 Fever characteristic test

(Left : Thermal conductivity Right : Linear coefficient of expansion)

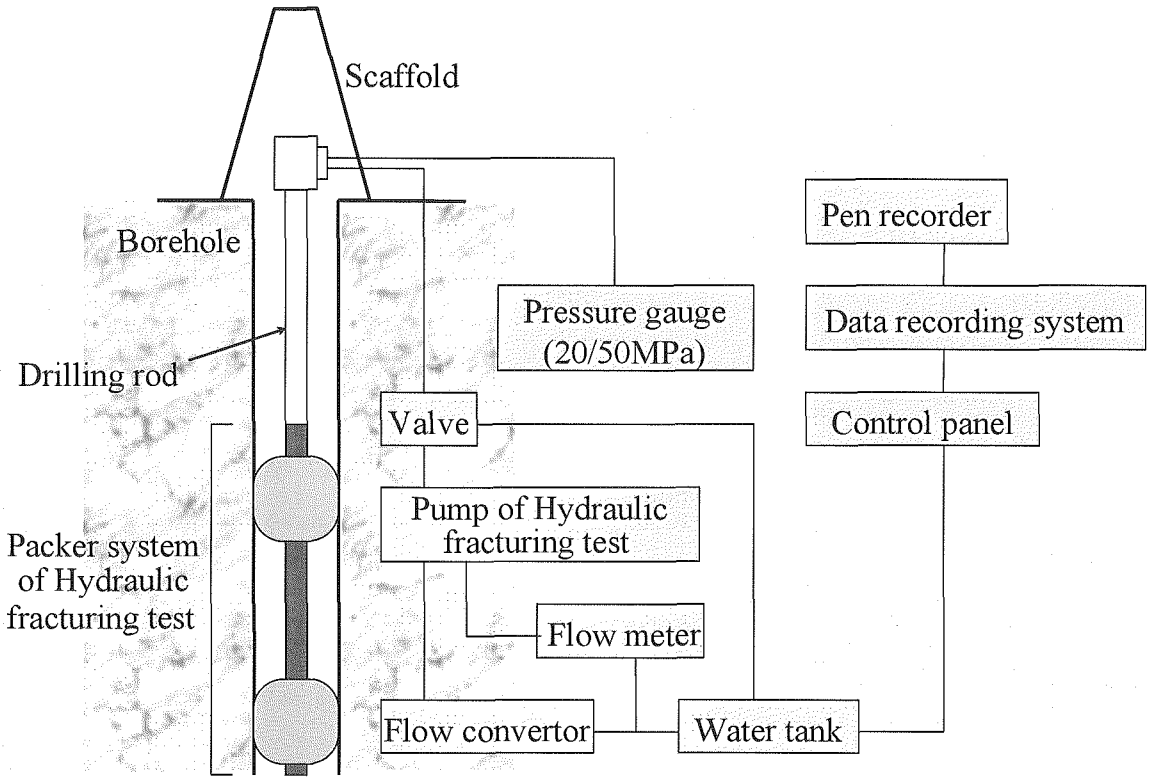


Fig.3.2.1-1 Device of hydraulic fracturing test

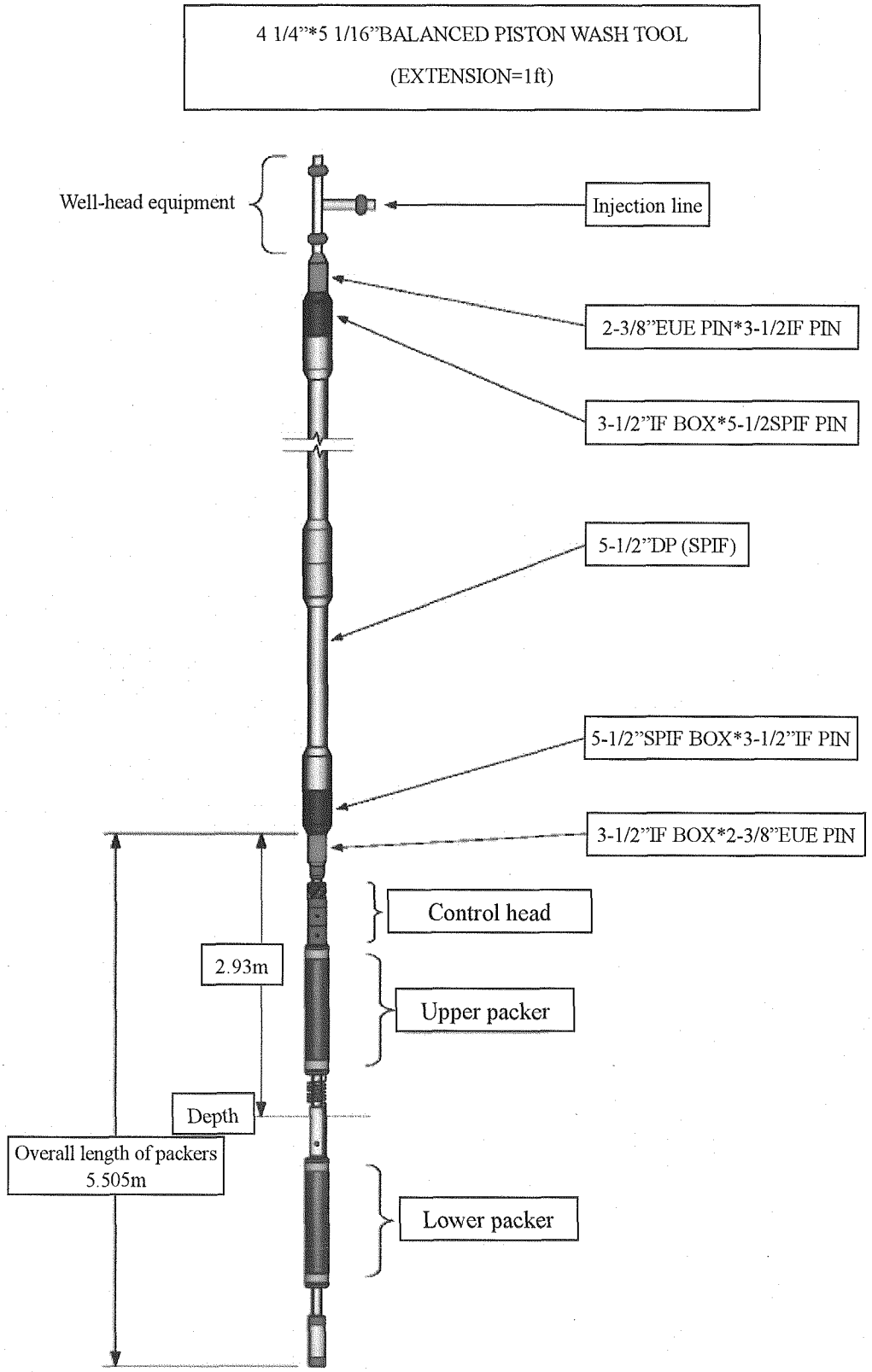


Fig.3.2.1-2 Formation of packer system of hydraulic fracturing test

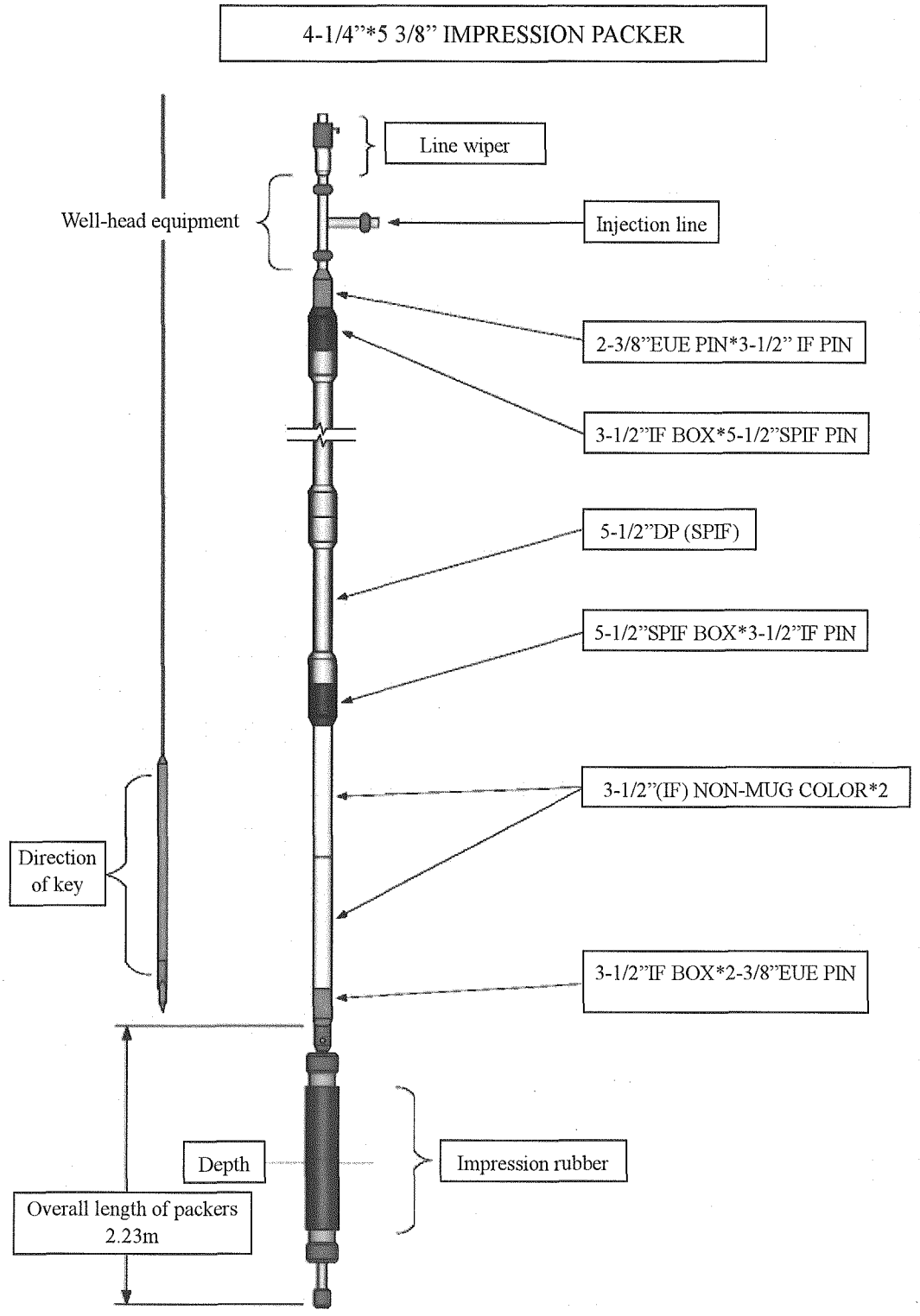


Fig.3.2.1-3 Formation of impression packer system

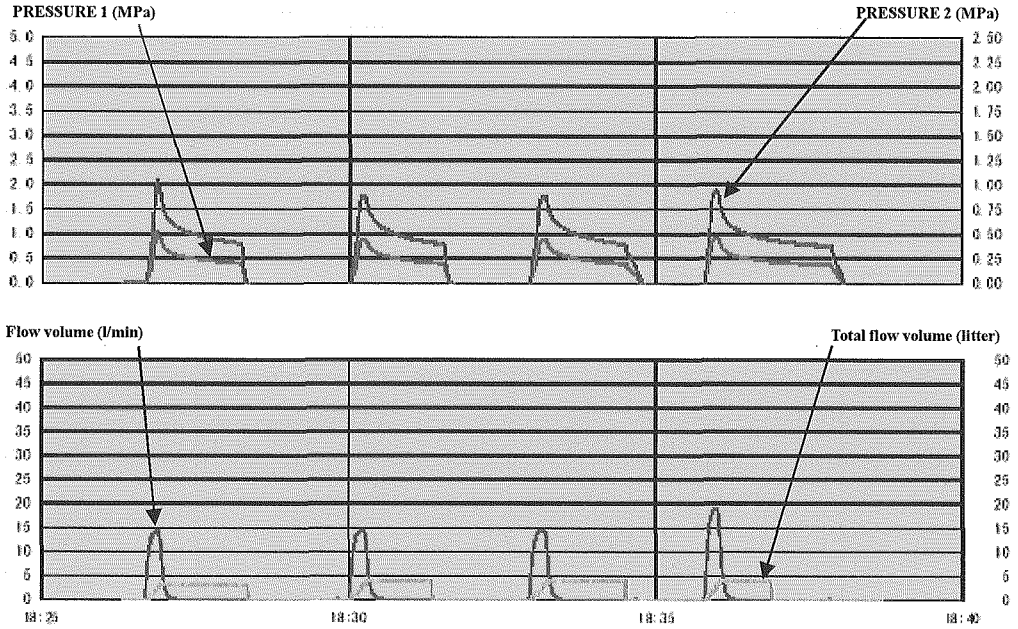
Table.3.2.1-1 Measurement data of hydraulic fracturing test

Borehole	Depth(m)	Direction of lateral maximum principal stress	Pressure (MPa)		
			Pb[*2]	Pr[*3]	Ps[*4]
HDB-3	263.5	E-W	3.6	3.3	3.4
	392.5	ENE-WSW	6.1	5.5	5.8
HDB-4	254.2	N62E	5.3	3.9	4.0
	359.0	ESE-W	5.4	4.9	5.2
HDB-5	249.8	E-W	4.6	3.5	3.8
	377.5	ENE-WSW	5.2	4.8	5.2
HDB-6	223.0	E-W	3.8	2.9	3.1
	256.0	E-W	4.4	3.4	3.4
	338.1	-[*1]	5.9	5.5	5.7
	351.0	E-W	7.0	5.8	6.3
	416.0	-[*1]	5.3	4.8	4.9
	529.5	ENE-WSW	11.4	9.6	9.7
	539.5	-[*1]	8.2	7.0	7.4
	576.0	E-W	14.7	9.4	9.9

*1 : Unmeasurement
*2 : Breakdown pressure
*3 : Reopening pressure
*4 : Shut-in pressure

263.5m

DATA of HDB-3



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (263.5m)

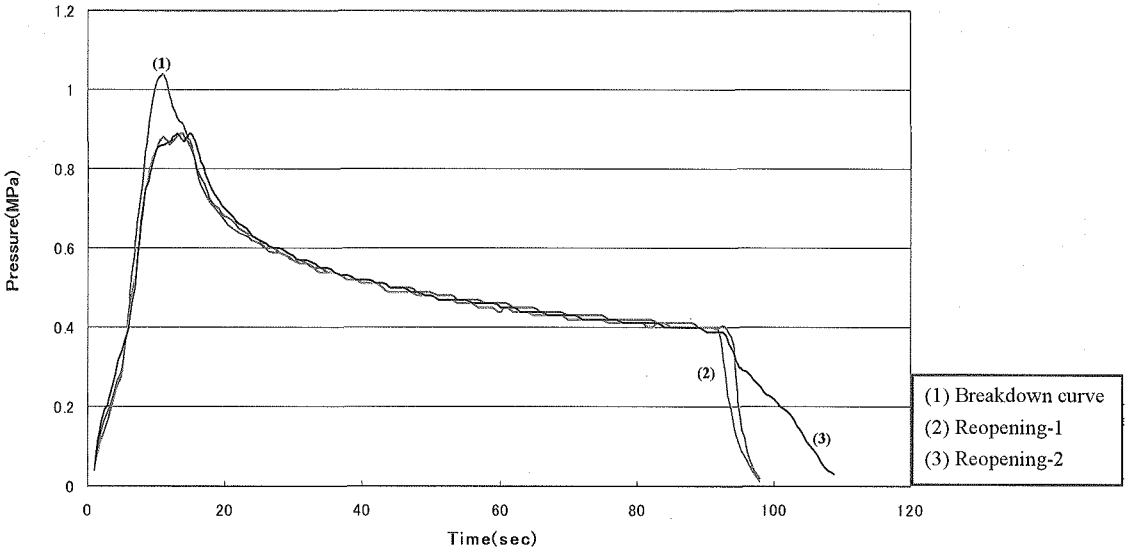
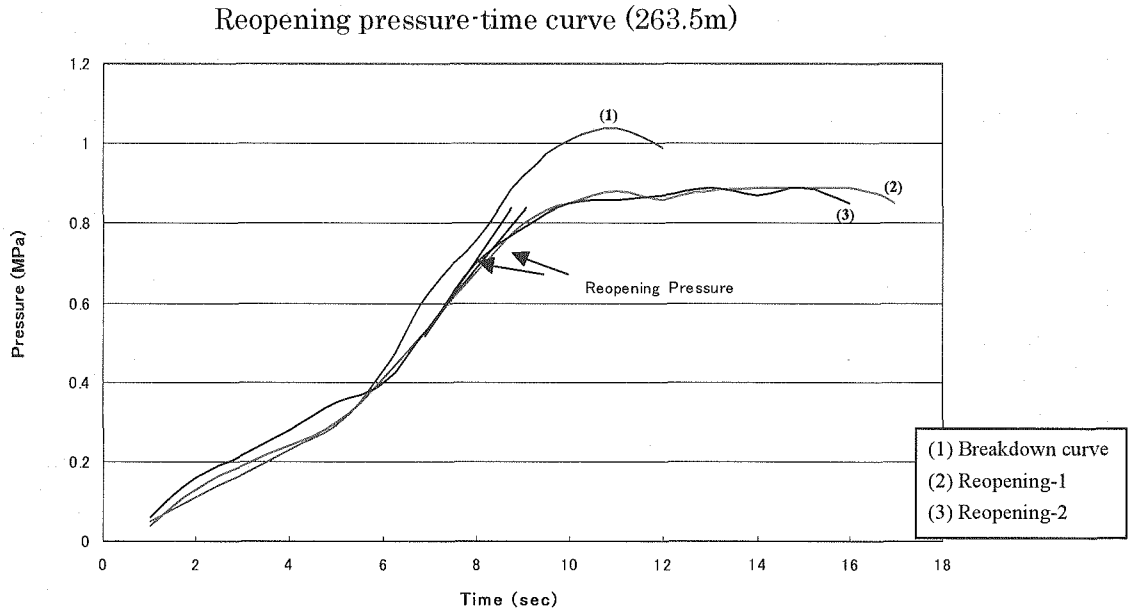


Fig.3.2.1-4 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-3,GL-263.5①)



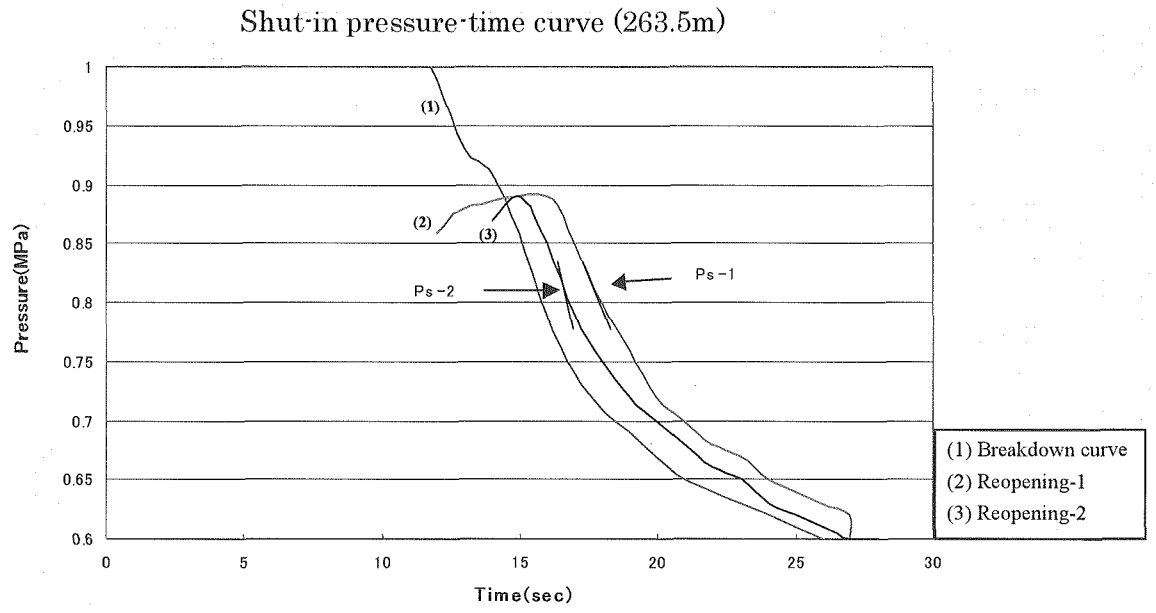
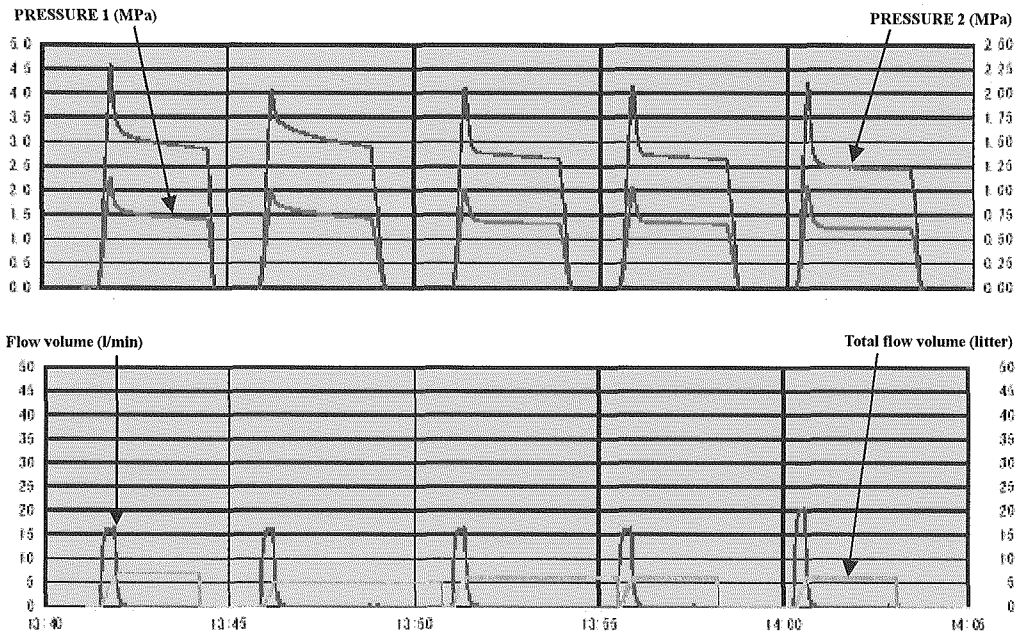


Fig.3.2.1-4 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-3,GL-263.5②)

392.5m

DATA of HDB-3



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (392.5m)

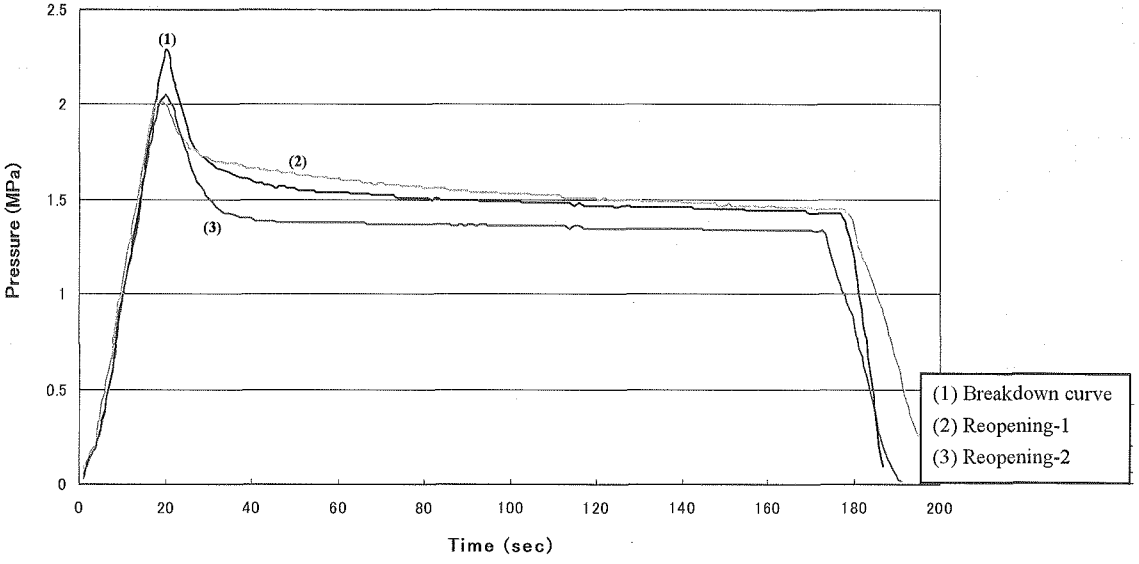


Fig.3.2.1-5 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-3,GL-392.5①)

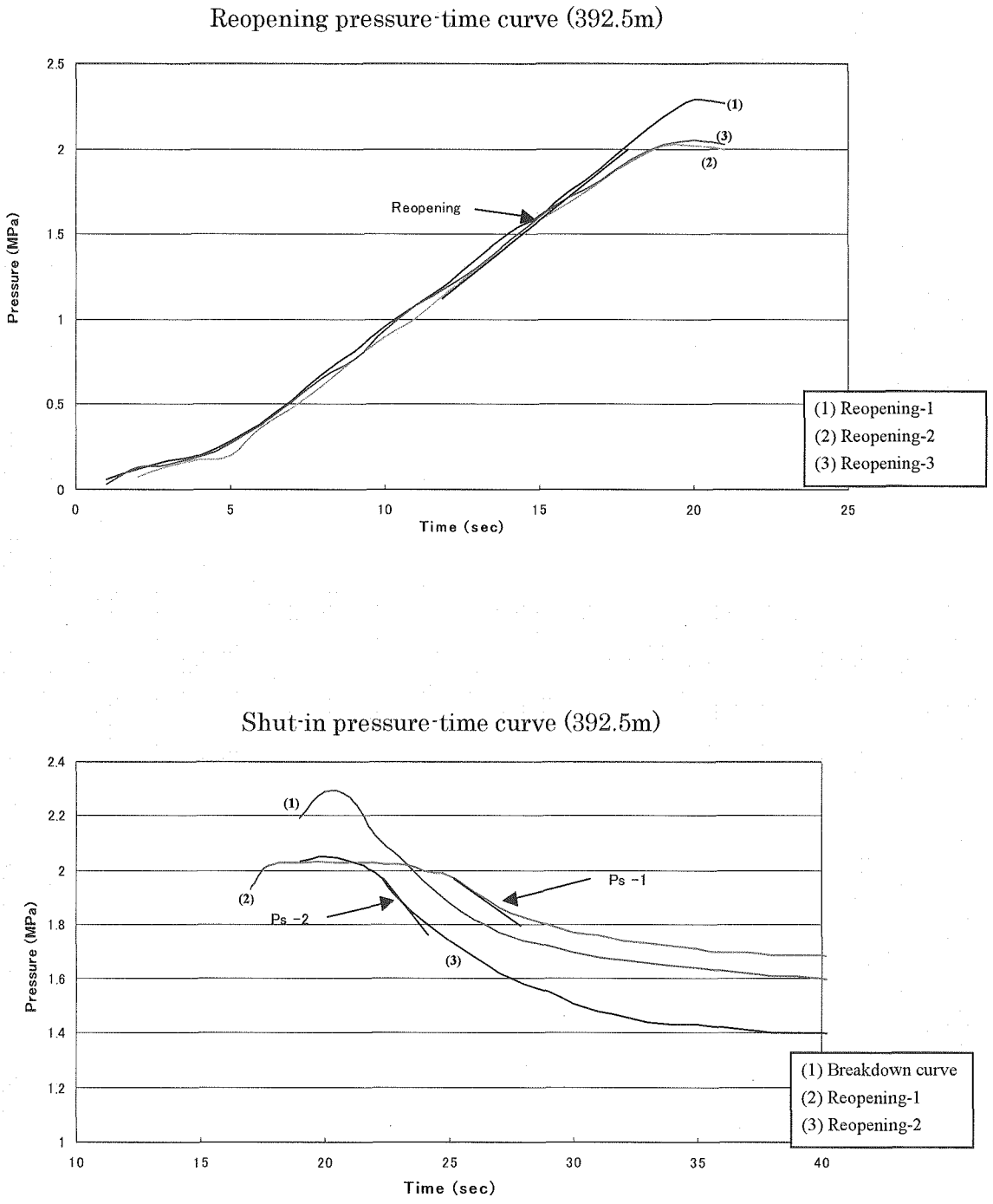
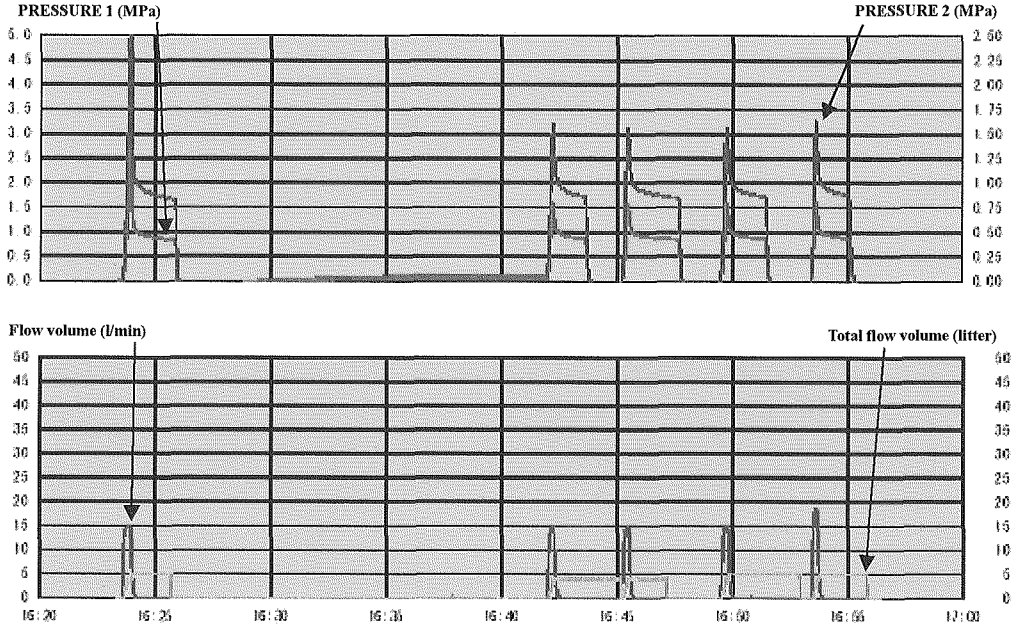


Fig.3.2.1-5 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-3,GL-392.5②)

254.2m

DATA of HDB-4



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (254.2m)

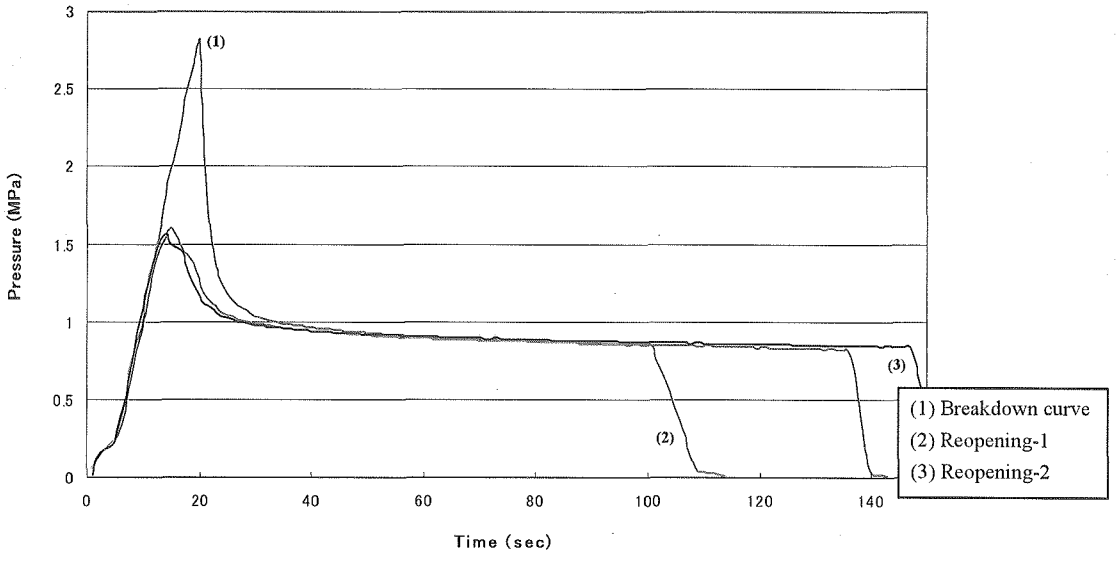
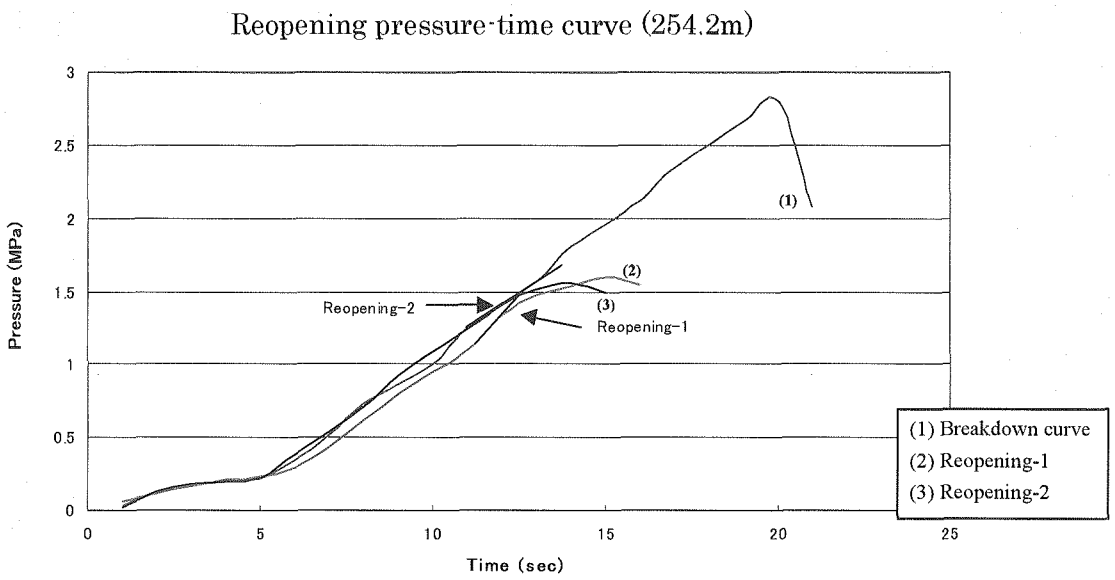


Fig.3.2.1-6 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-4,GL-254.2①)



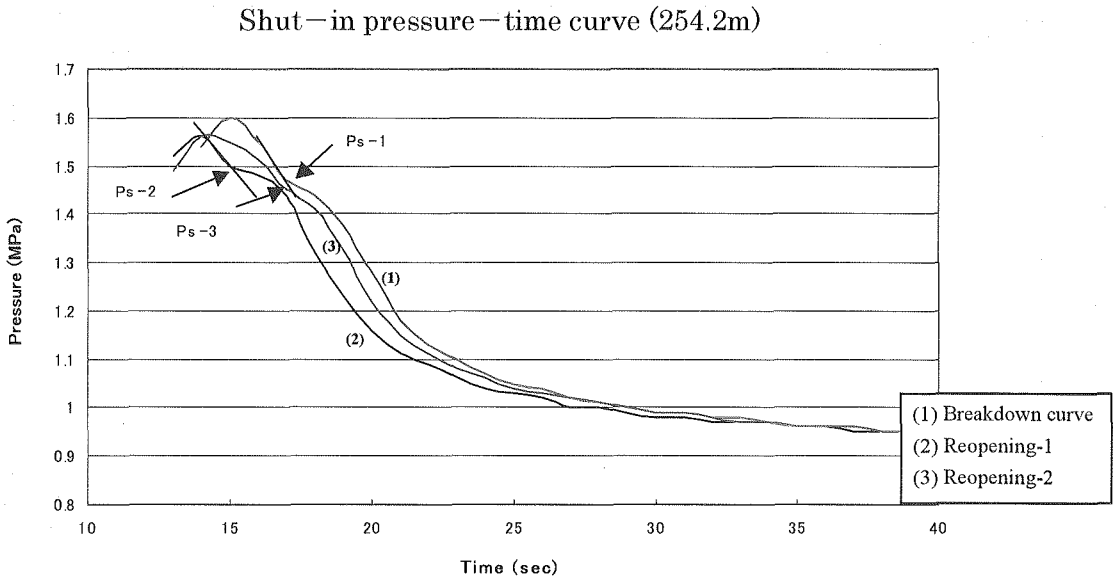
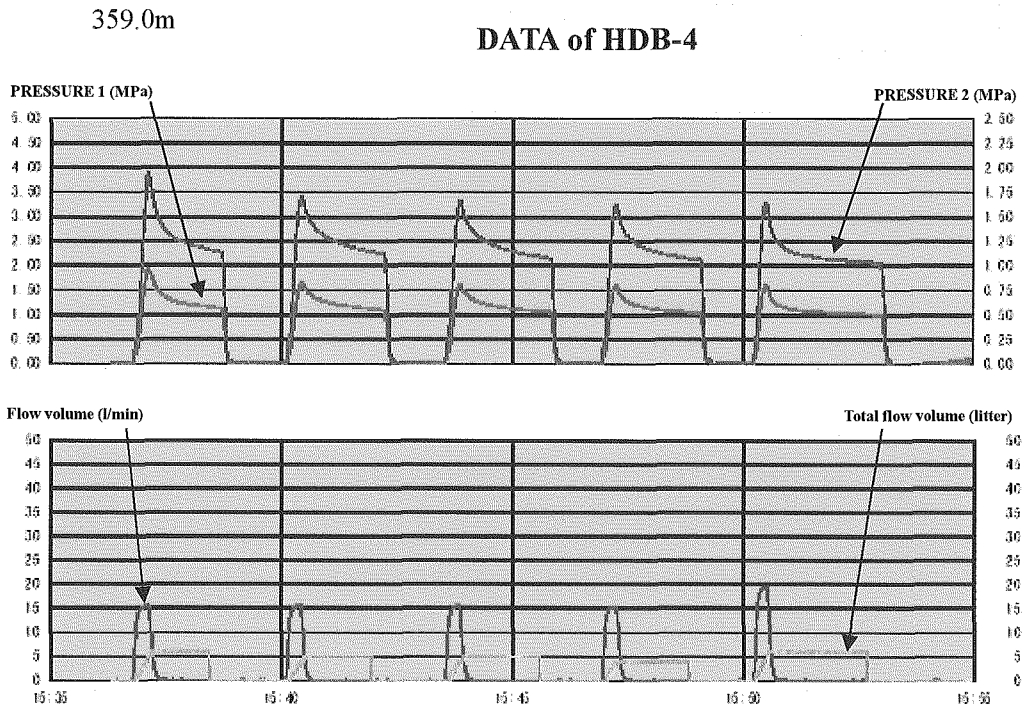


Fig.3.2.1-6 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-4,GL-254.2②)

359.0m



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (359.0m)

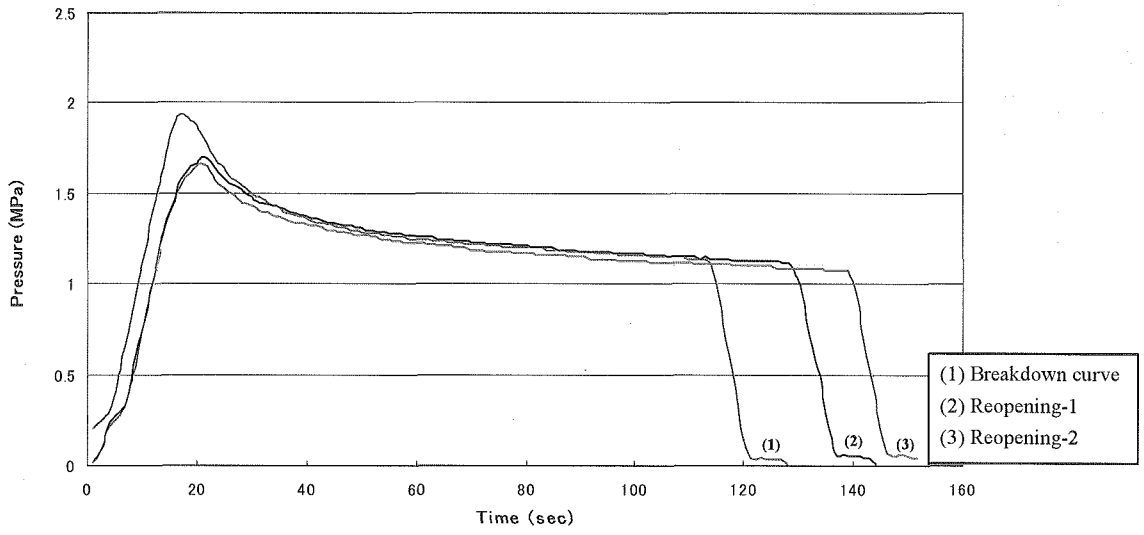
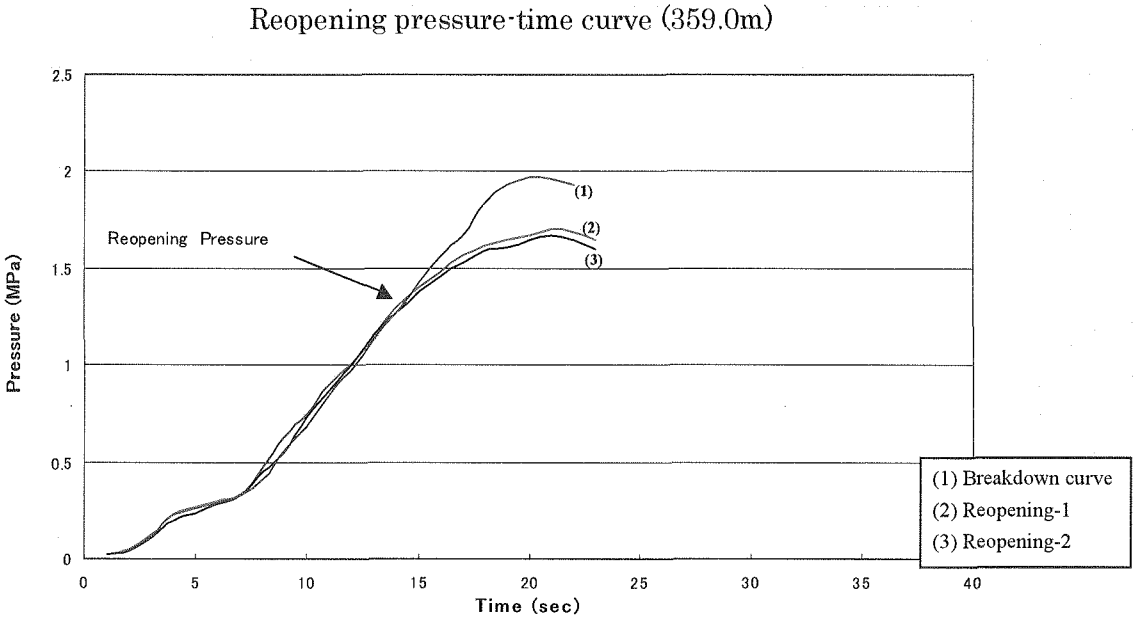


Fig.3.2.1-7 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-4,GL-359.0①)



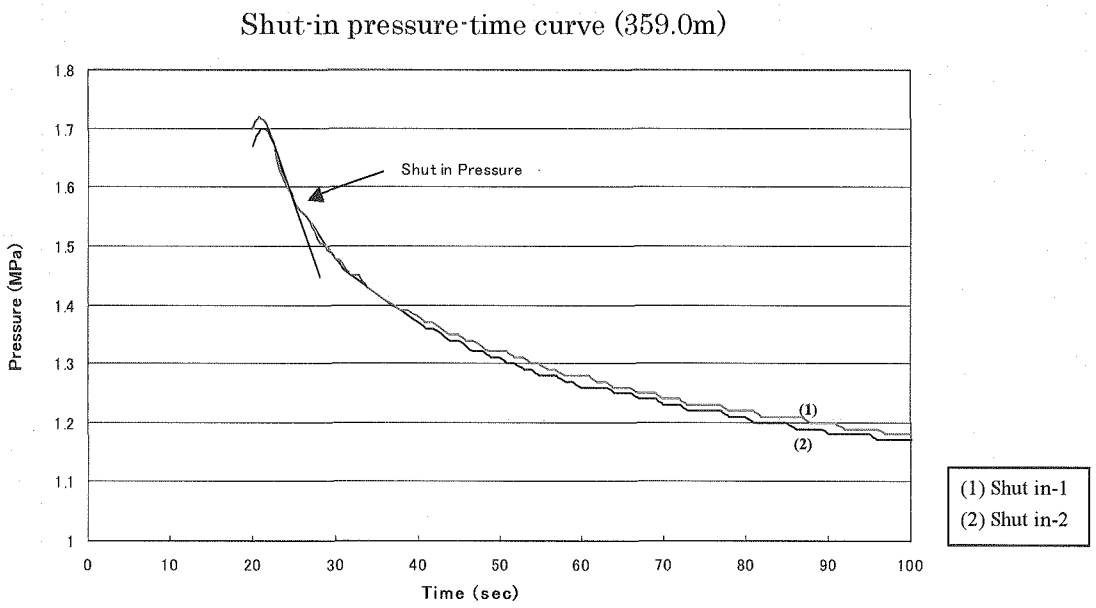
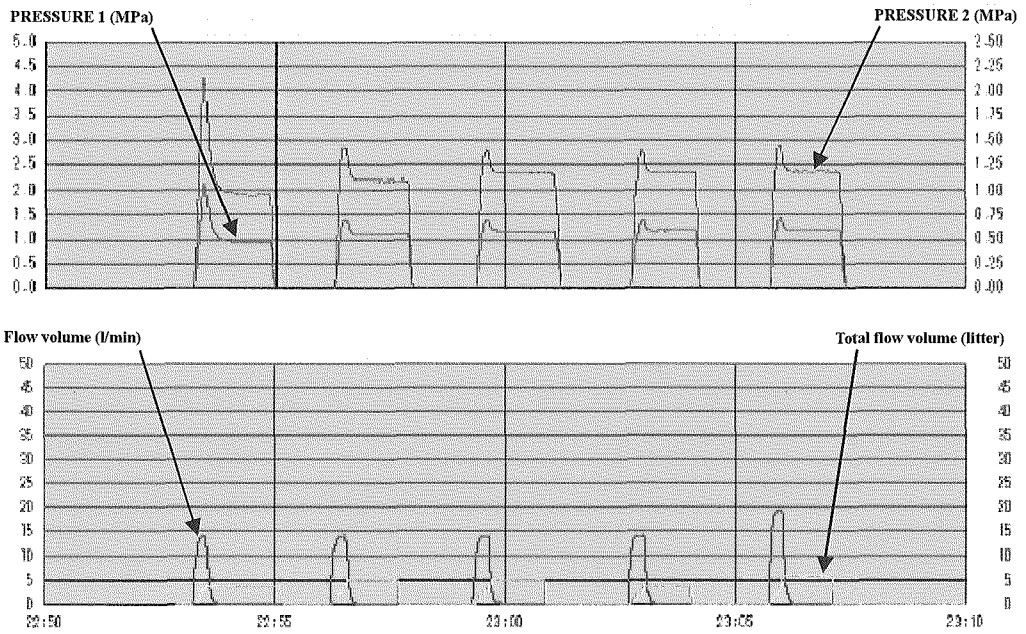


Fig.3.2.1-7 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-4,GL-359.0②)

249.8m

DATA of HDB-5



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (249.8m)

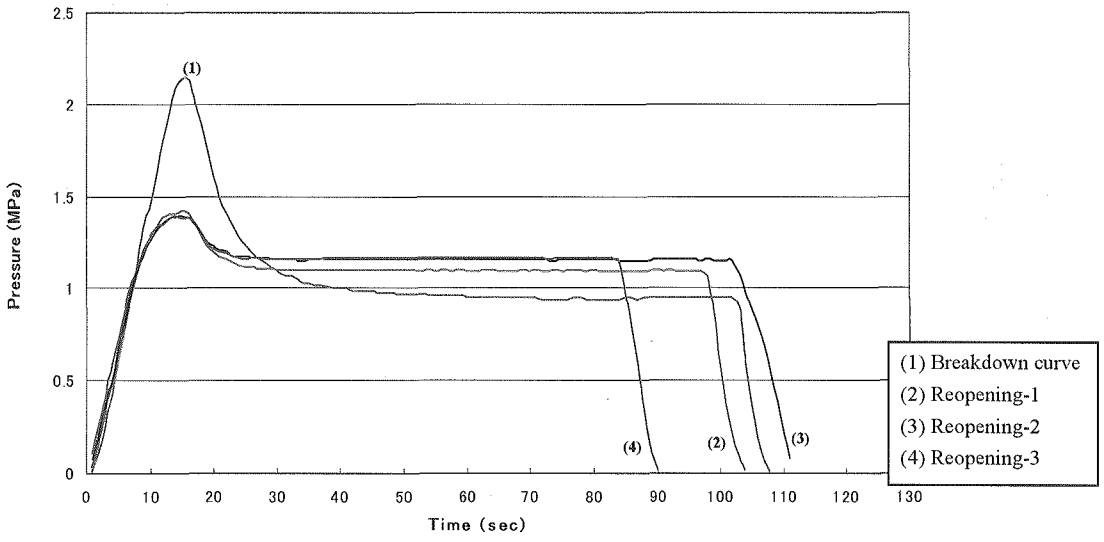
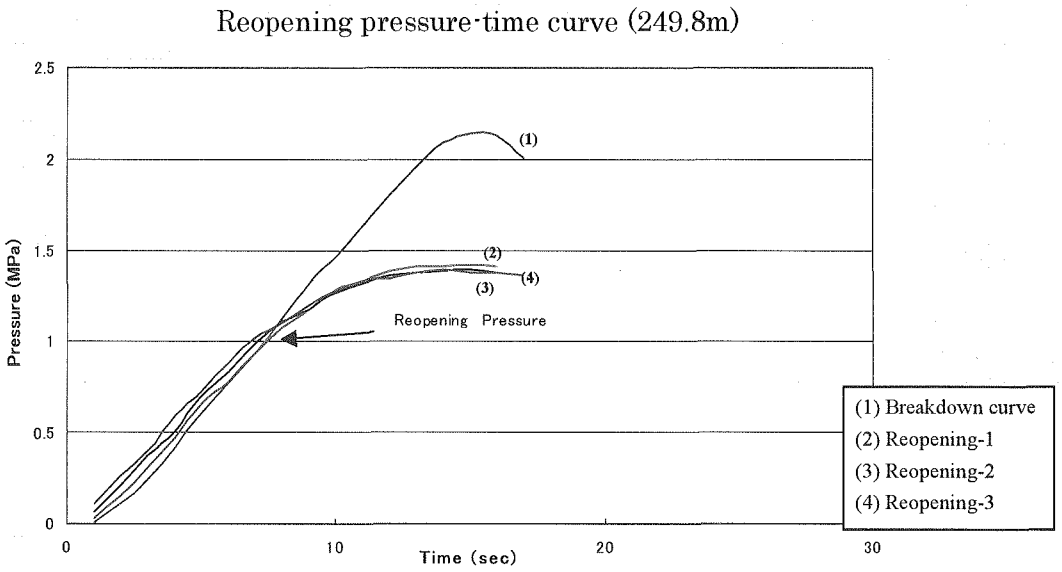


Fig.3.2.1-8 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-5,GL-249.8①)



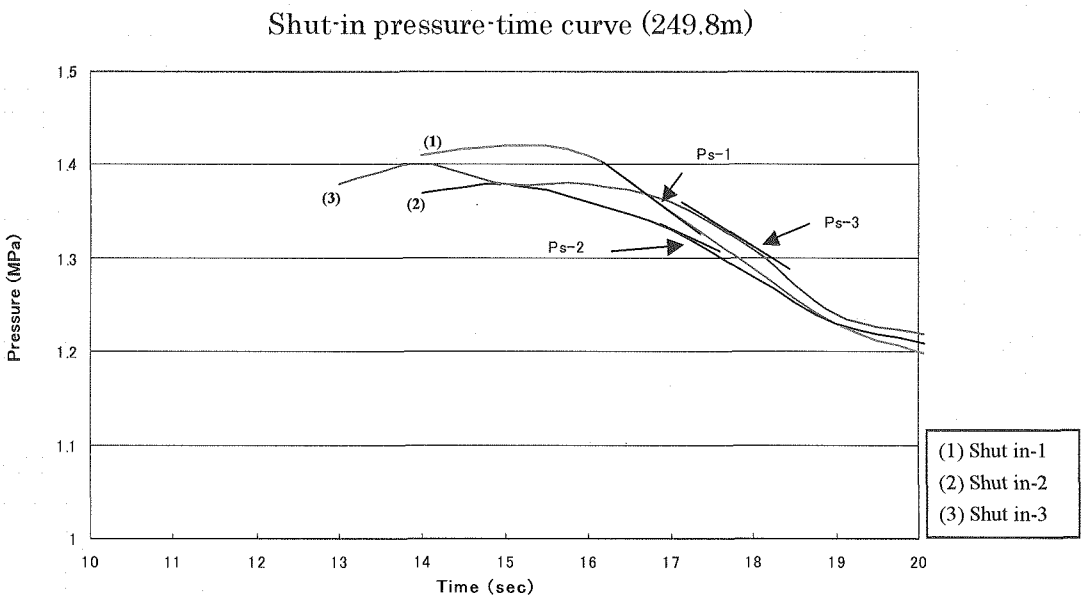
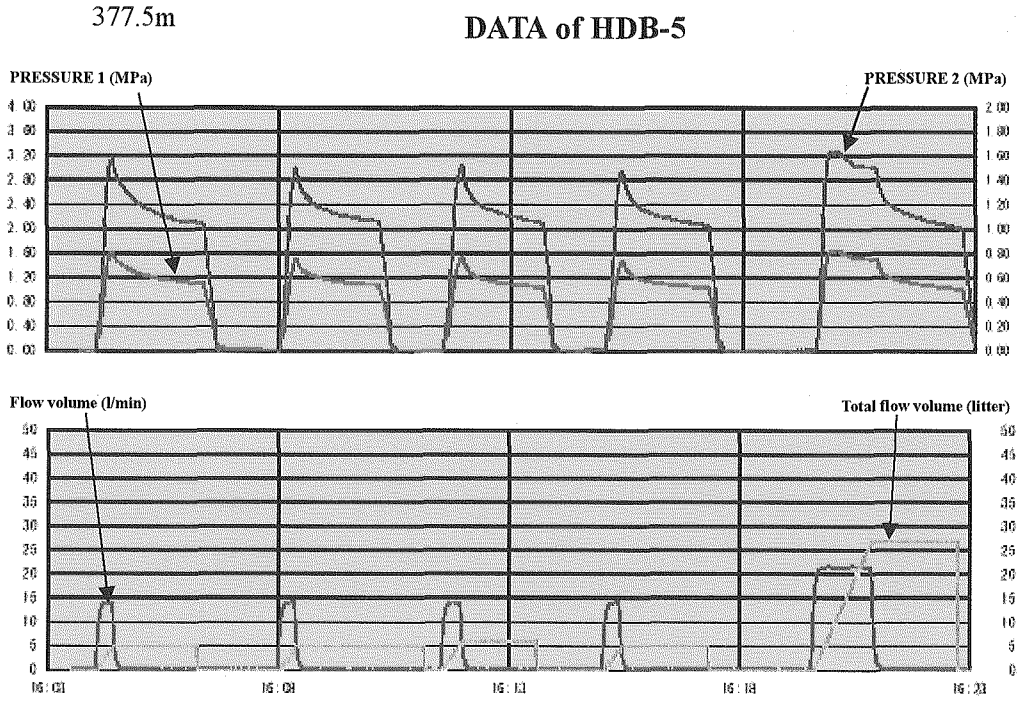


Fig.3.2.1-8 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-5,GL-249.8②)



Stress-Flow volume curve

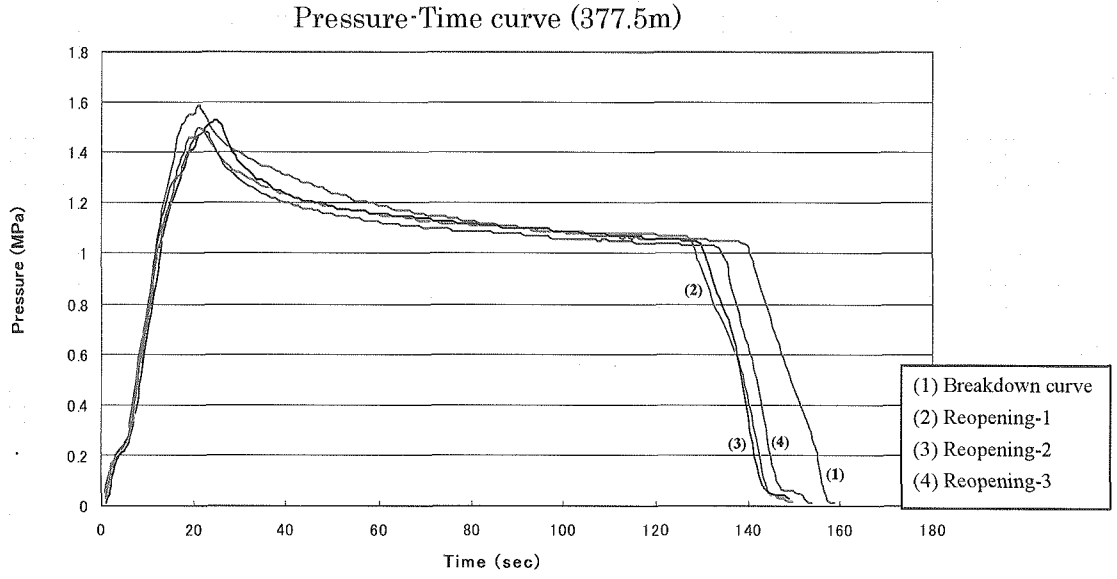
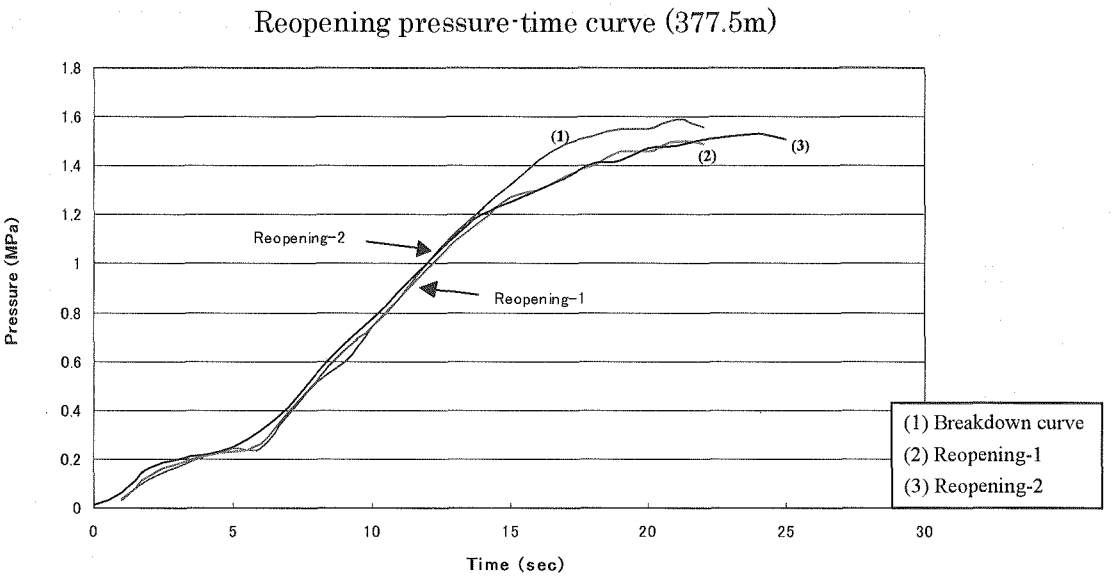


Fig.3.2.1-9 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-5,GL-377.5①)



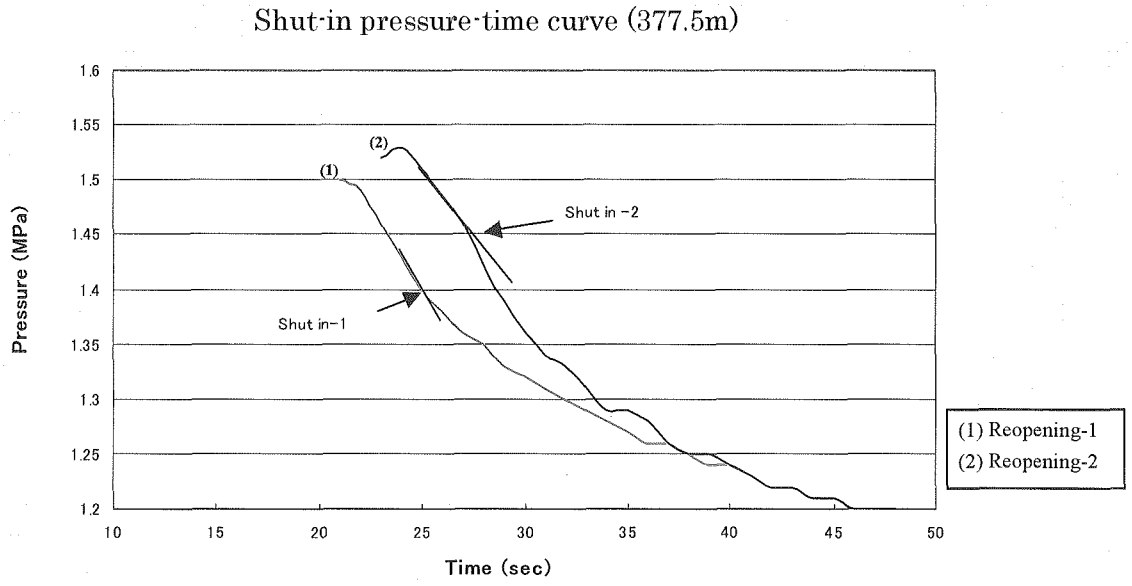
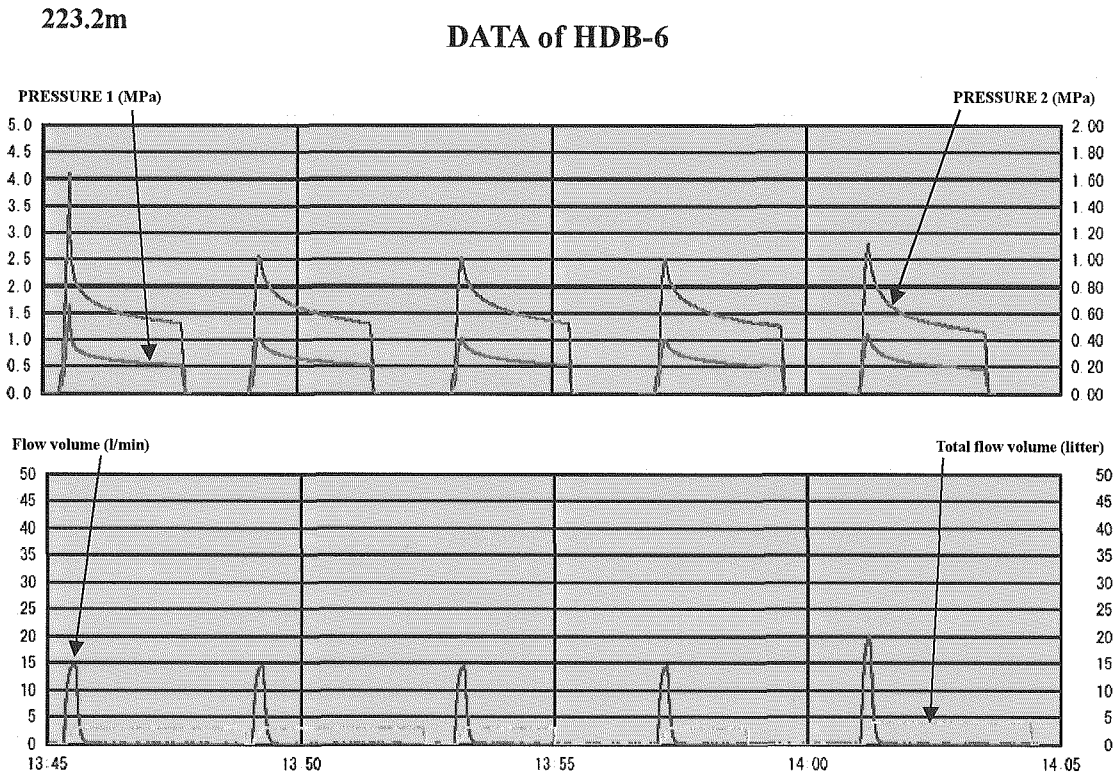


Fig.3.2.1-9 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-5,GL-377.5②)



Stress-Flow volume curve

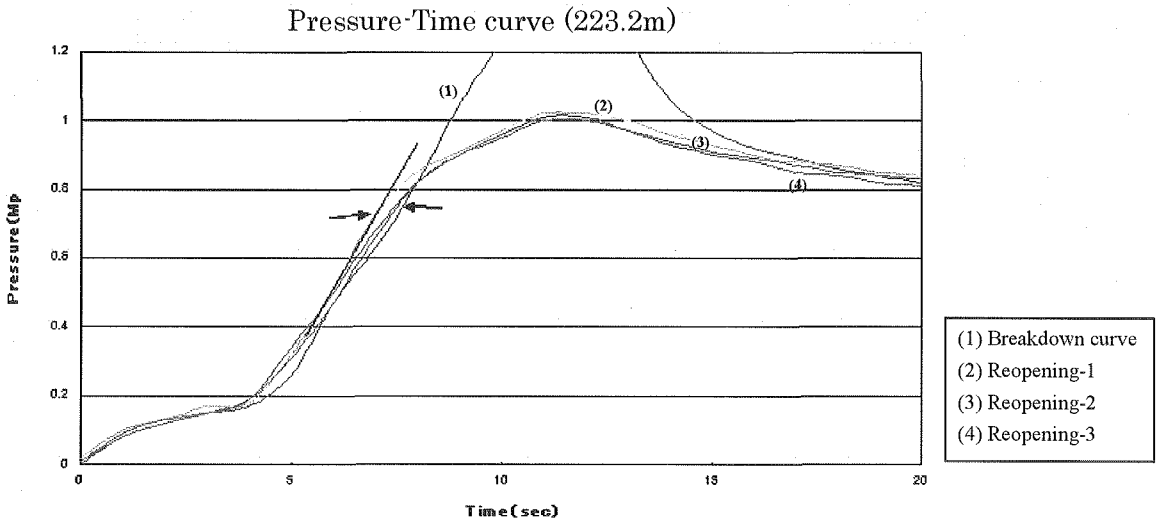
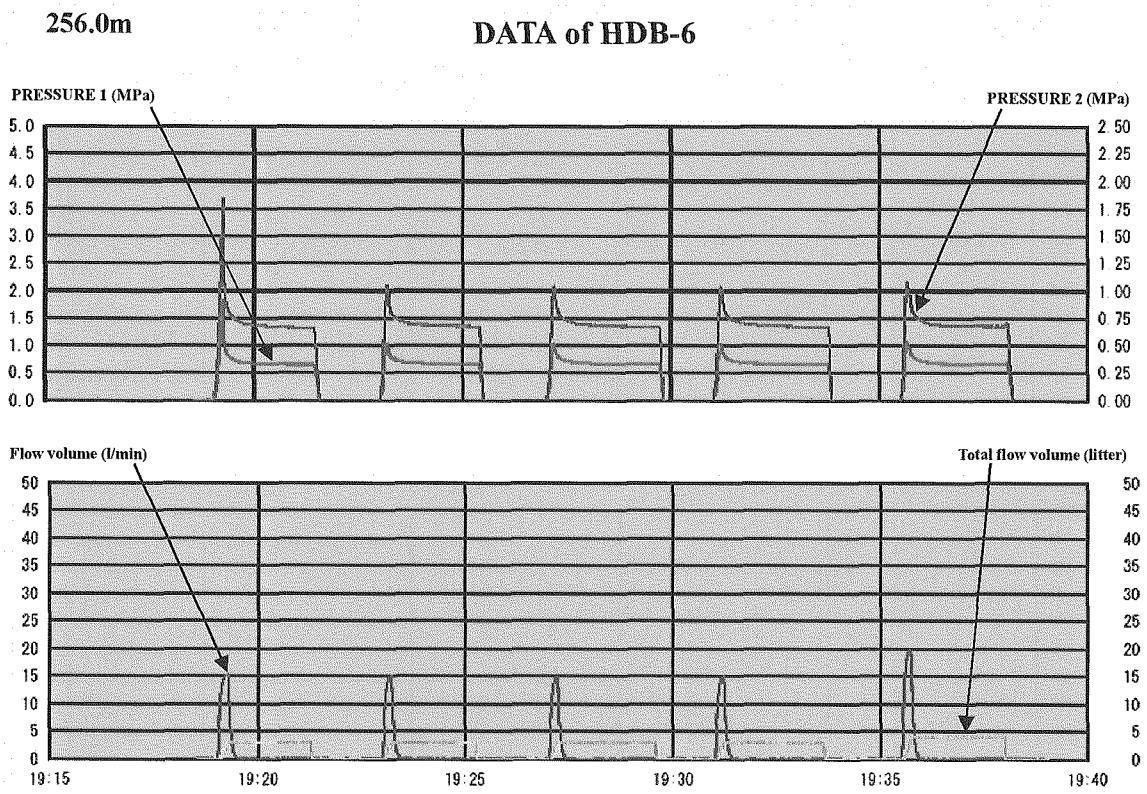


Fig.3.2.1-10 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-223.0)



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (256.0m)

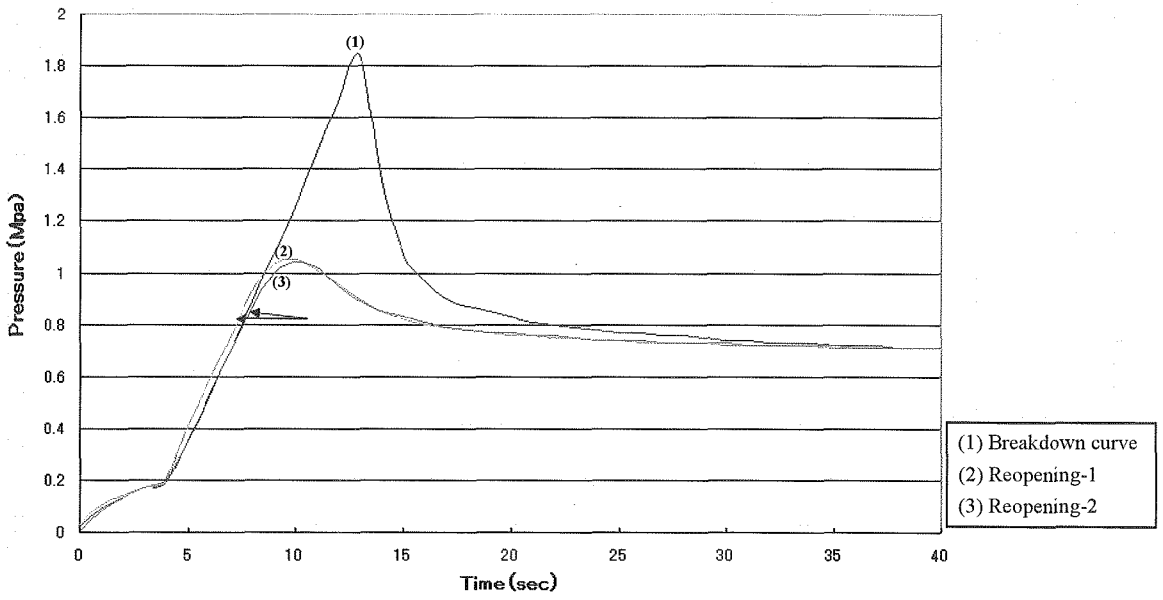
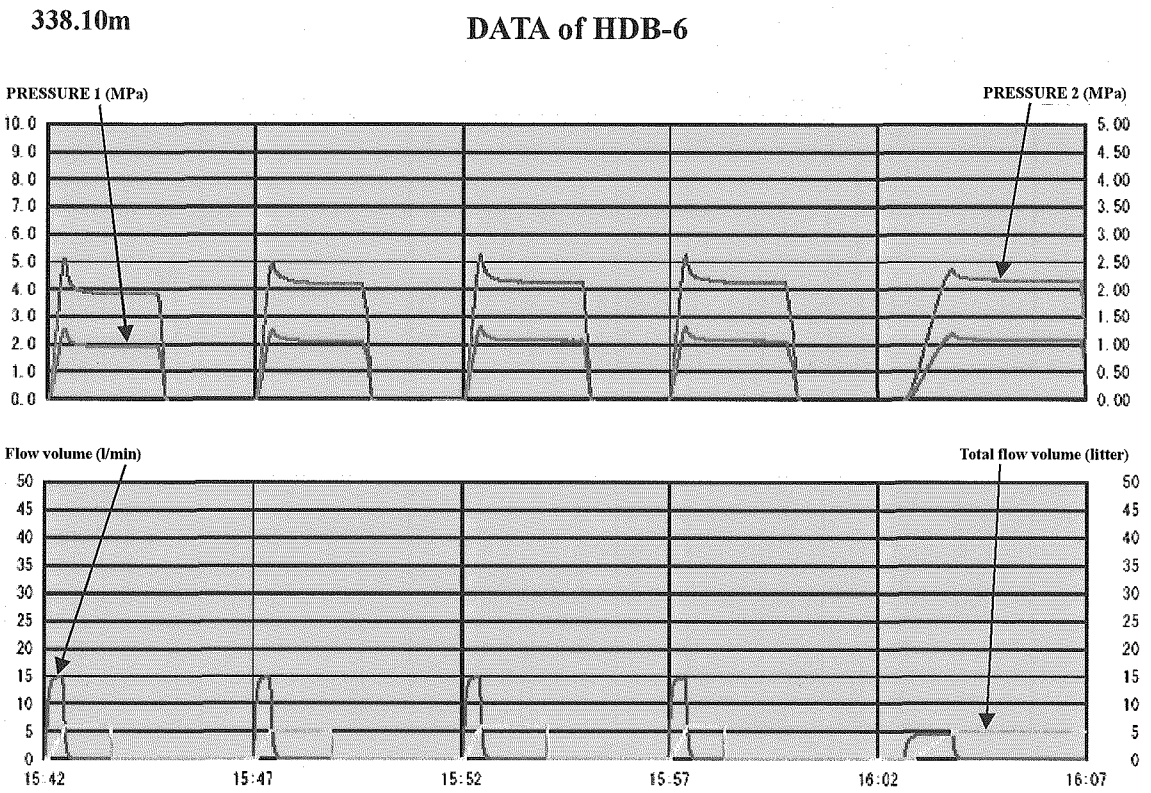


Fig.3.2.1-11 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-256.0)



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (338.1m)

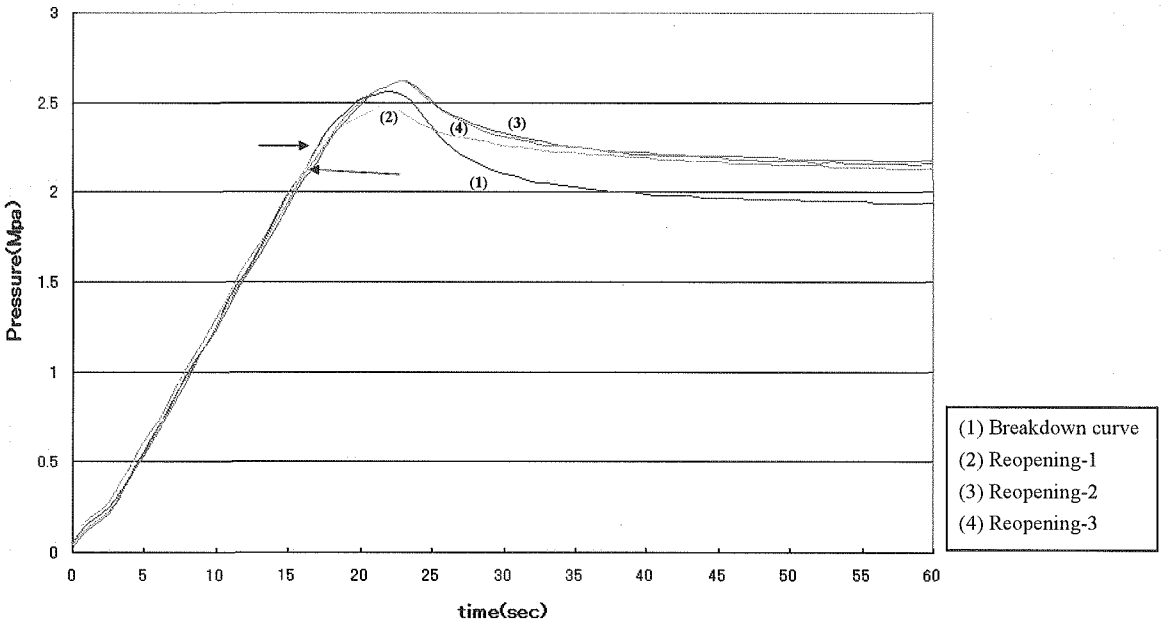
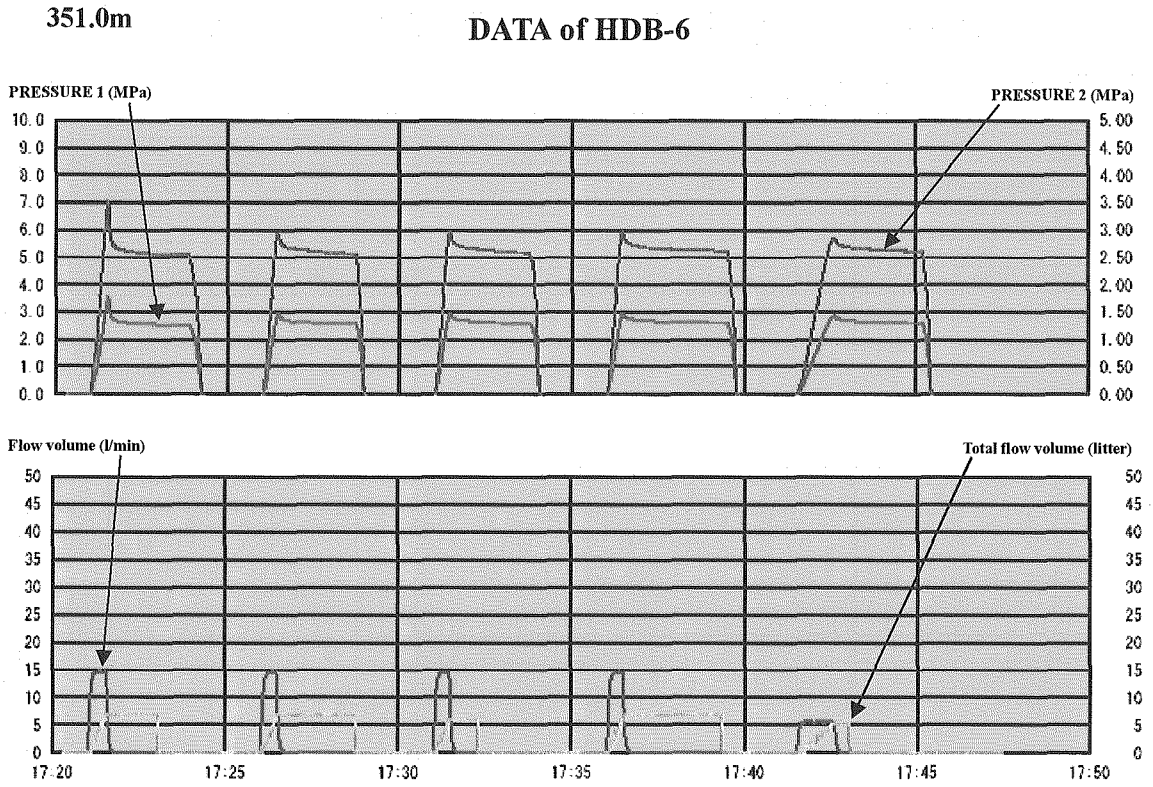


Fig.3.2.1-12 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-338.1)



Stress-Flow volume curve

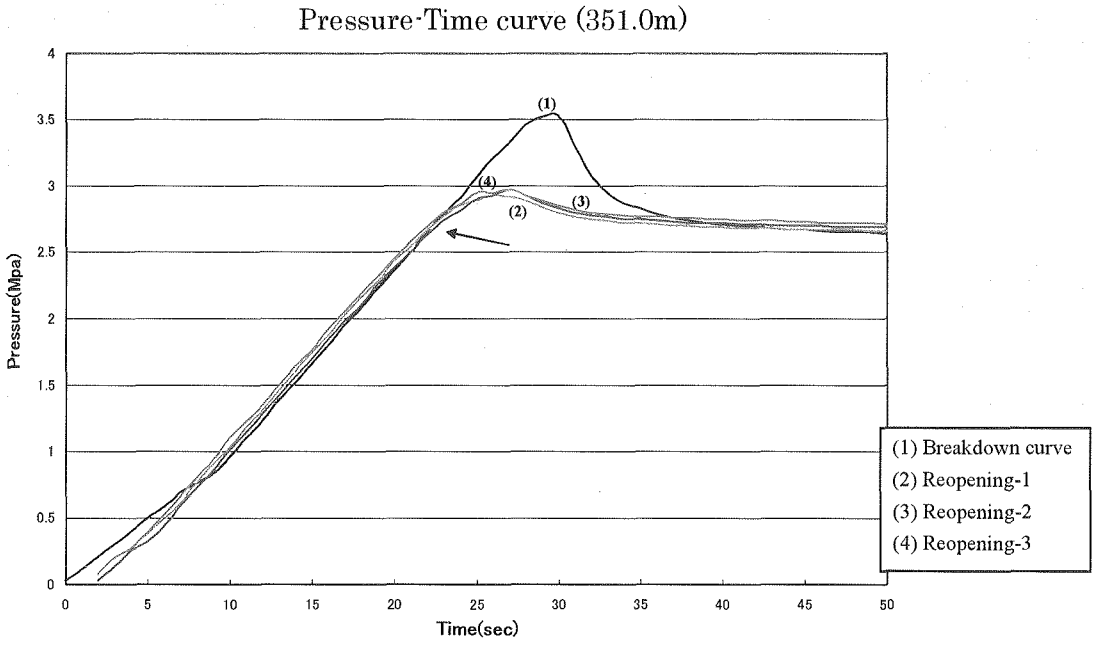
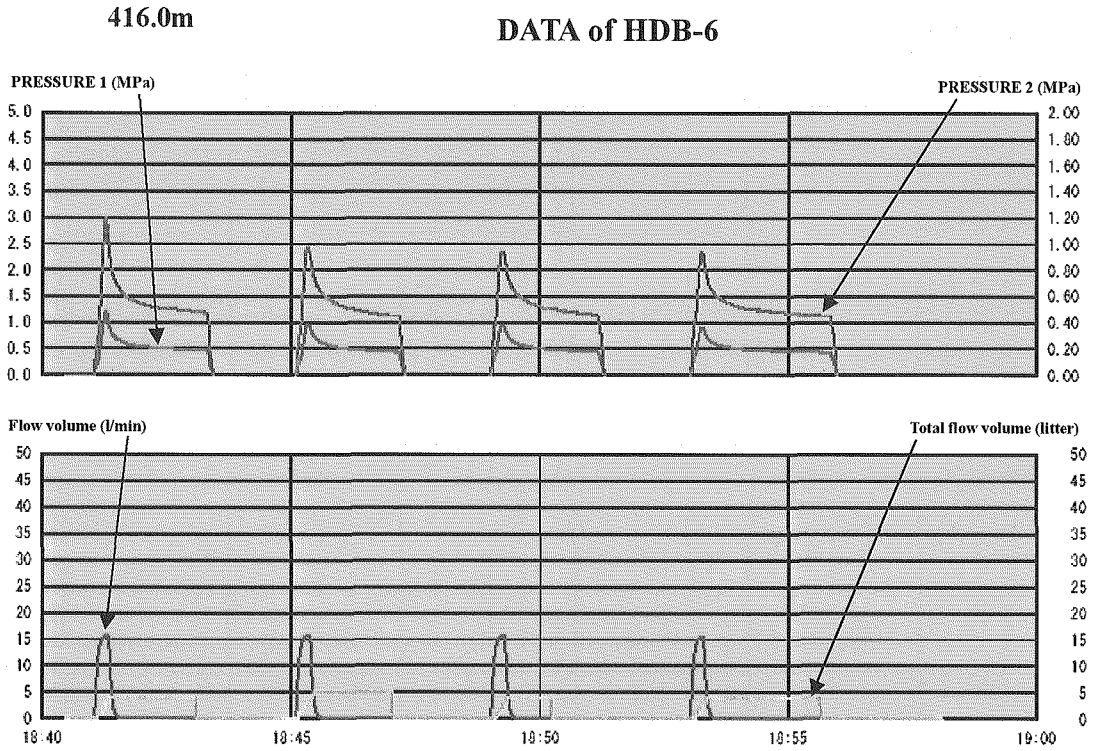


Fig.3.2.1-13 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-351.0)



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (416.0m)

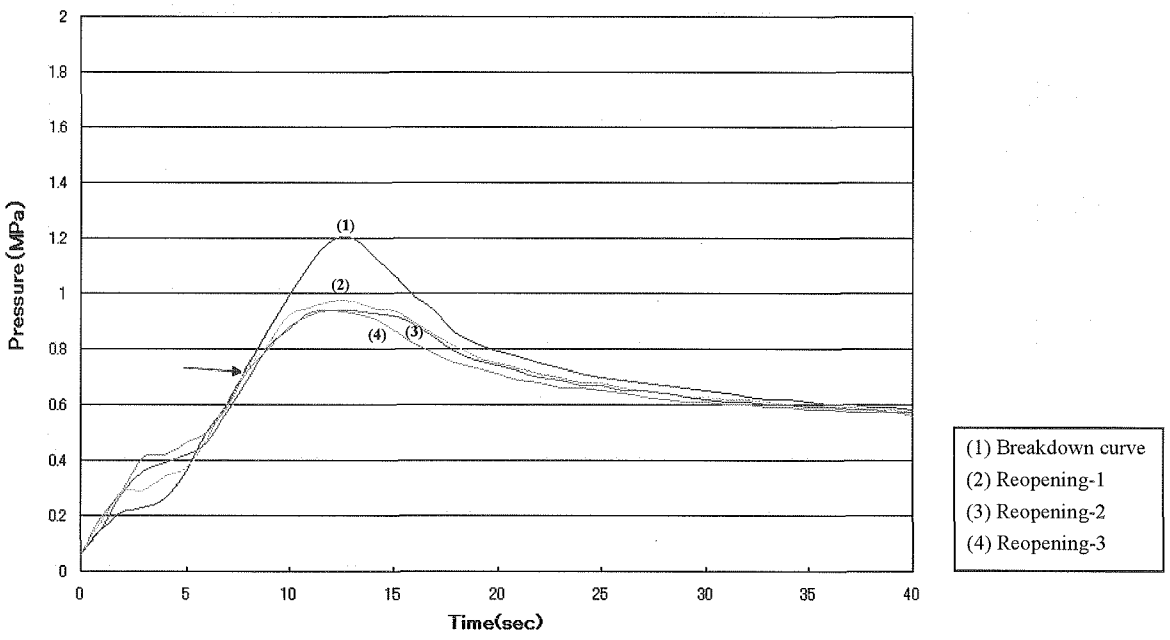
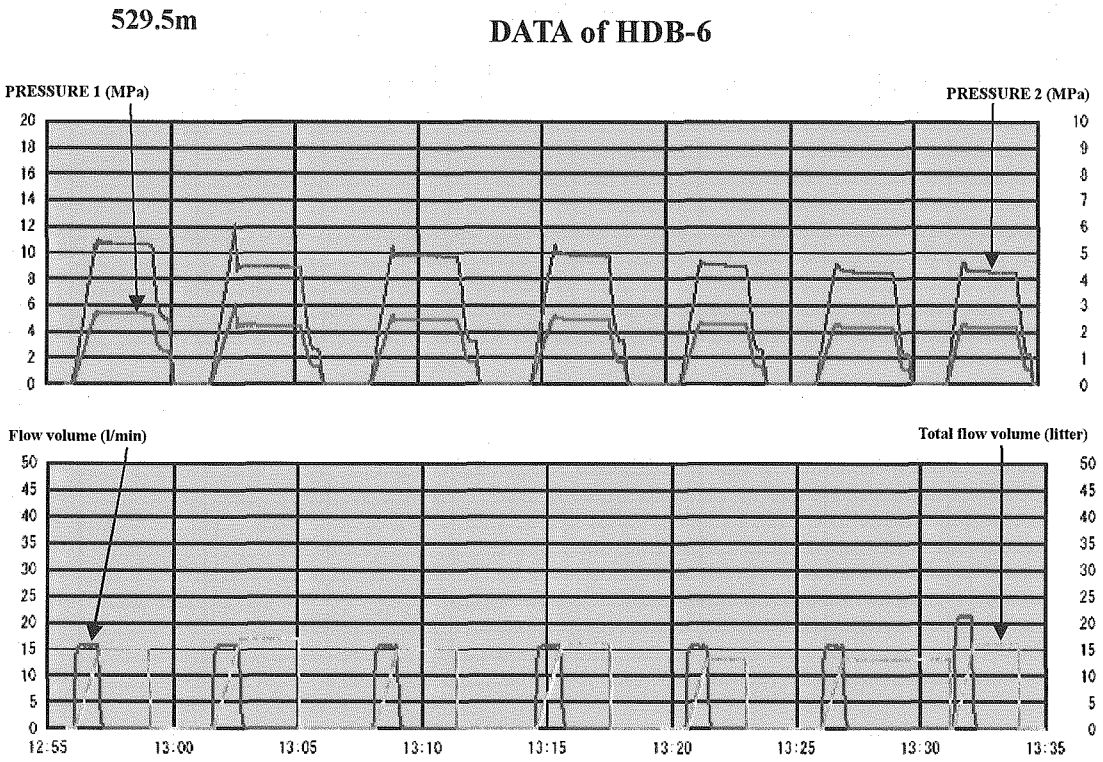


Fig.3.2.1-14 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-416.0)



Stress-Flow volume curve

Pressure-Time curve (529.5m)

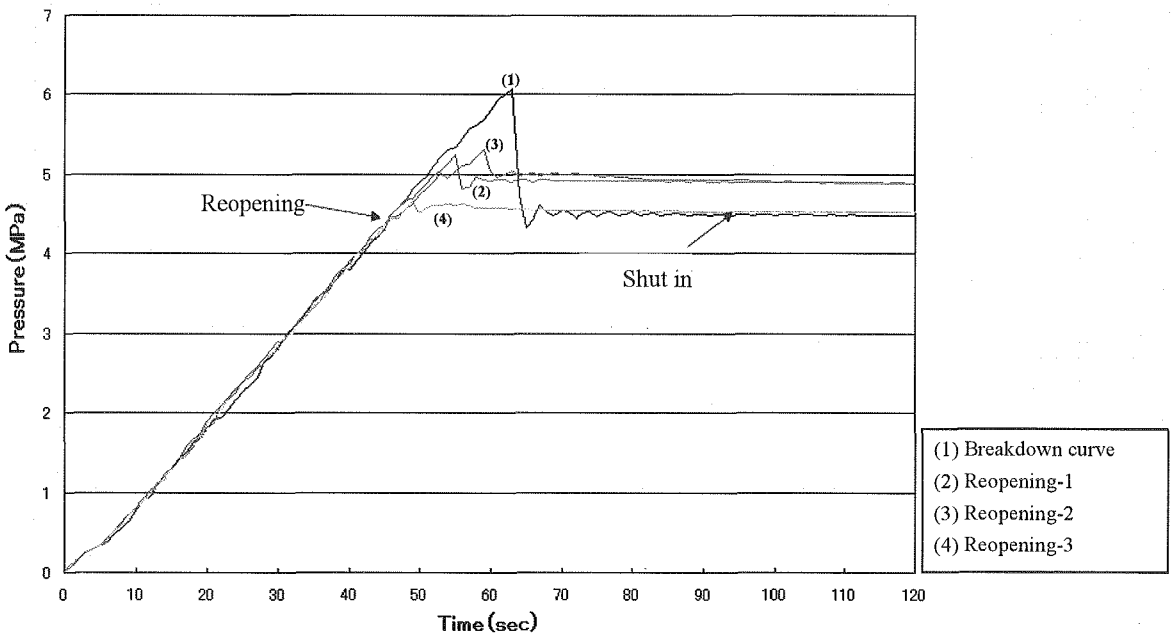
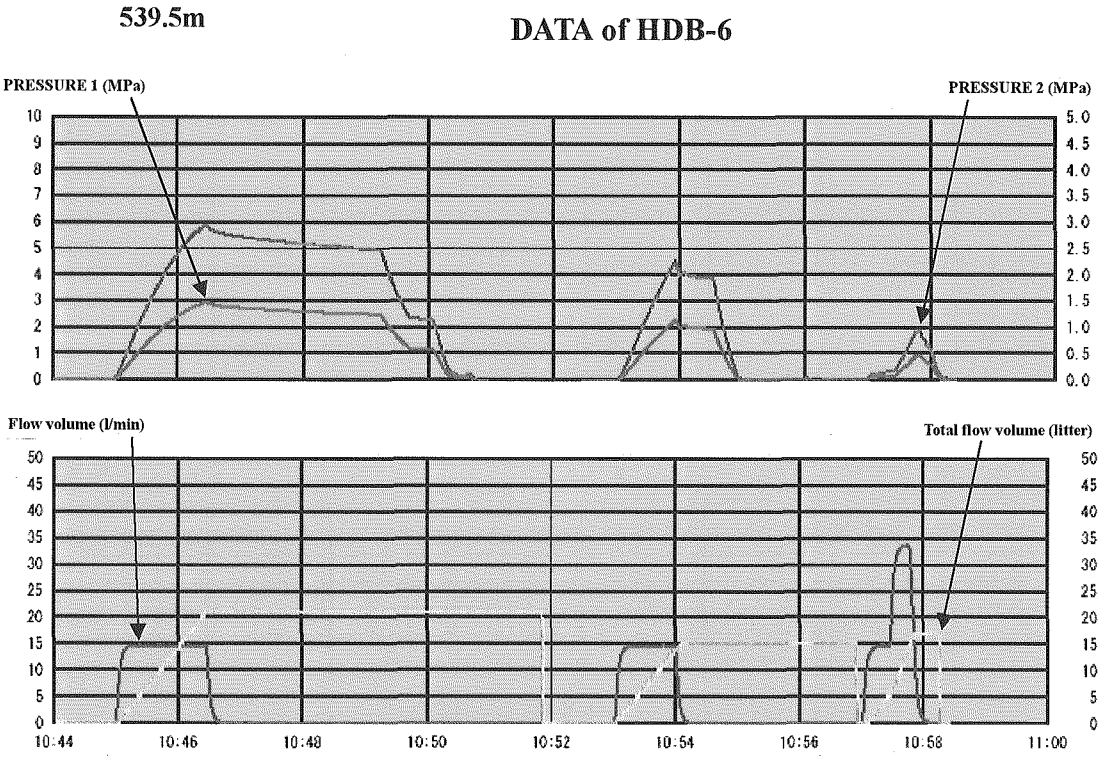


Fig.3.2.1-15 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-529.5)



Stress-Flow volume curve

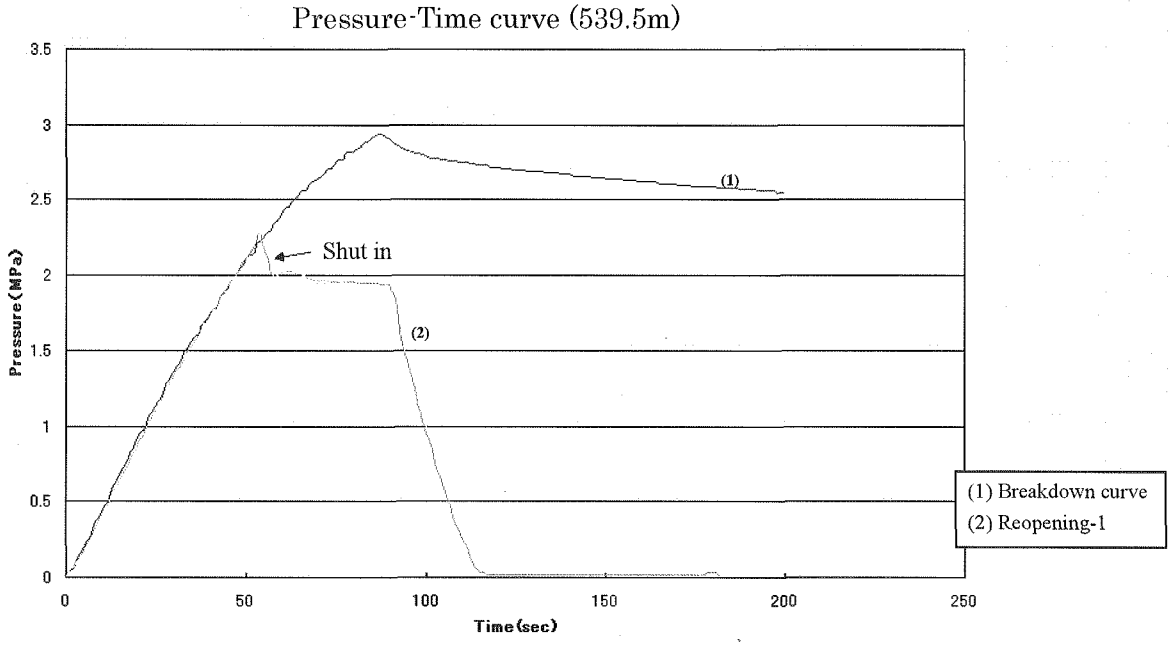
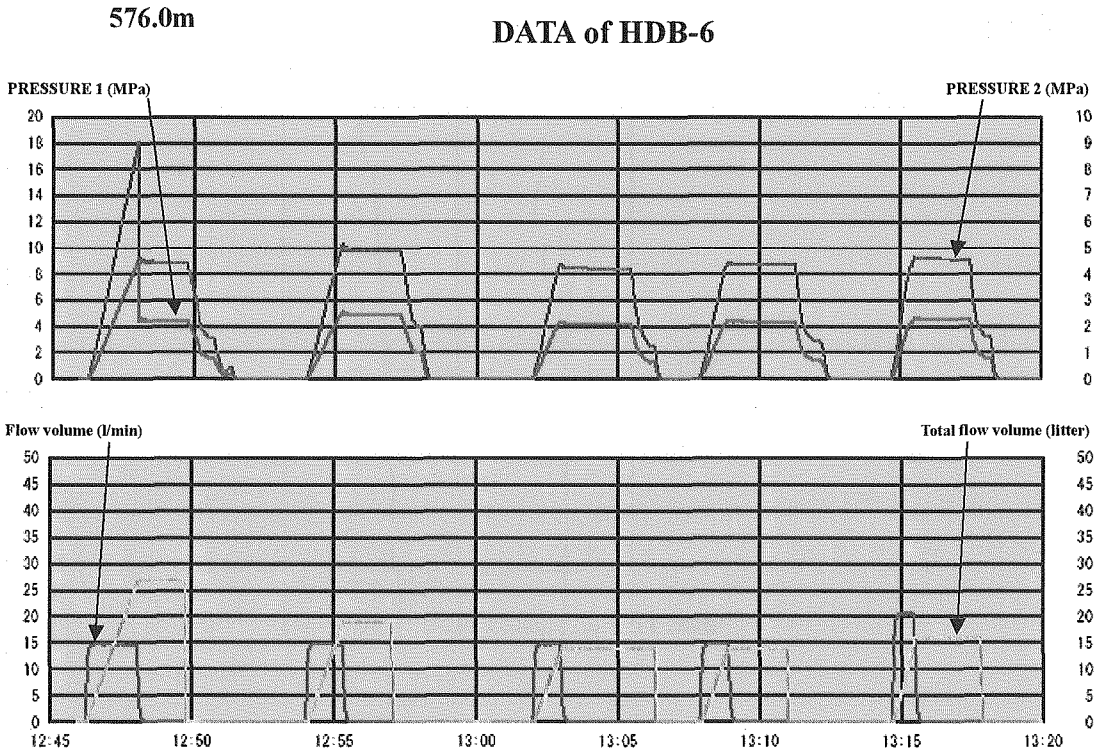


Fig.3.2.1-16 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-539.5)



Stress-Flow volume curve

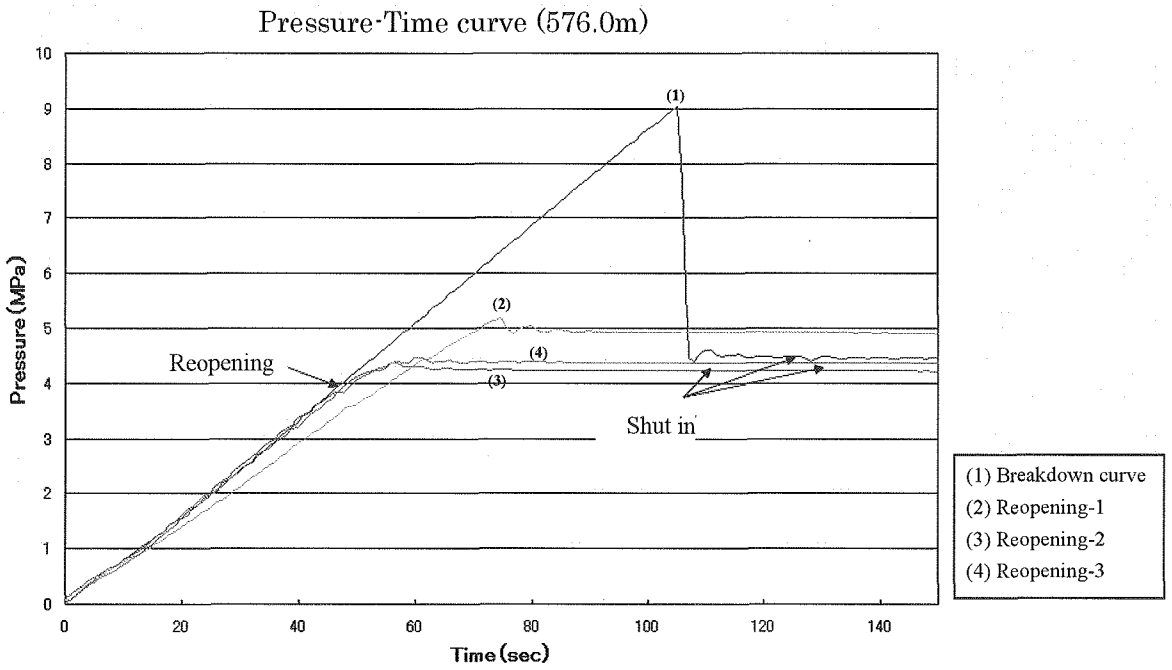


Fig.3.2.1-17 Curve data of hydraulic fracturing test (HDB-6,GL-576.0)

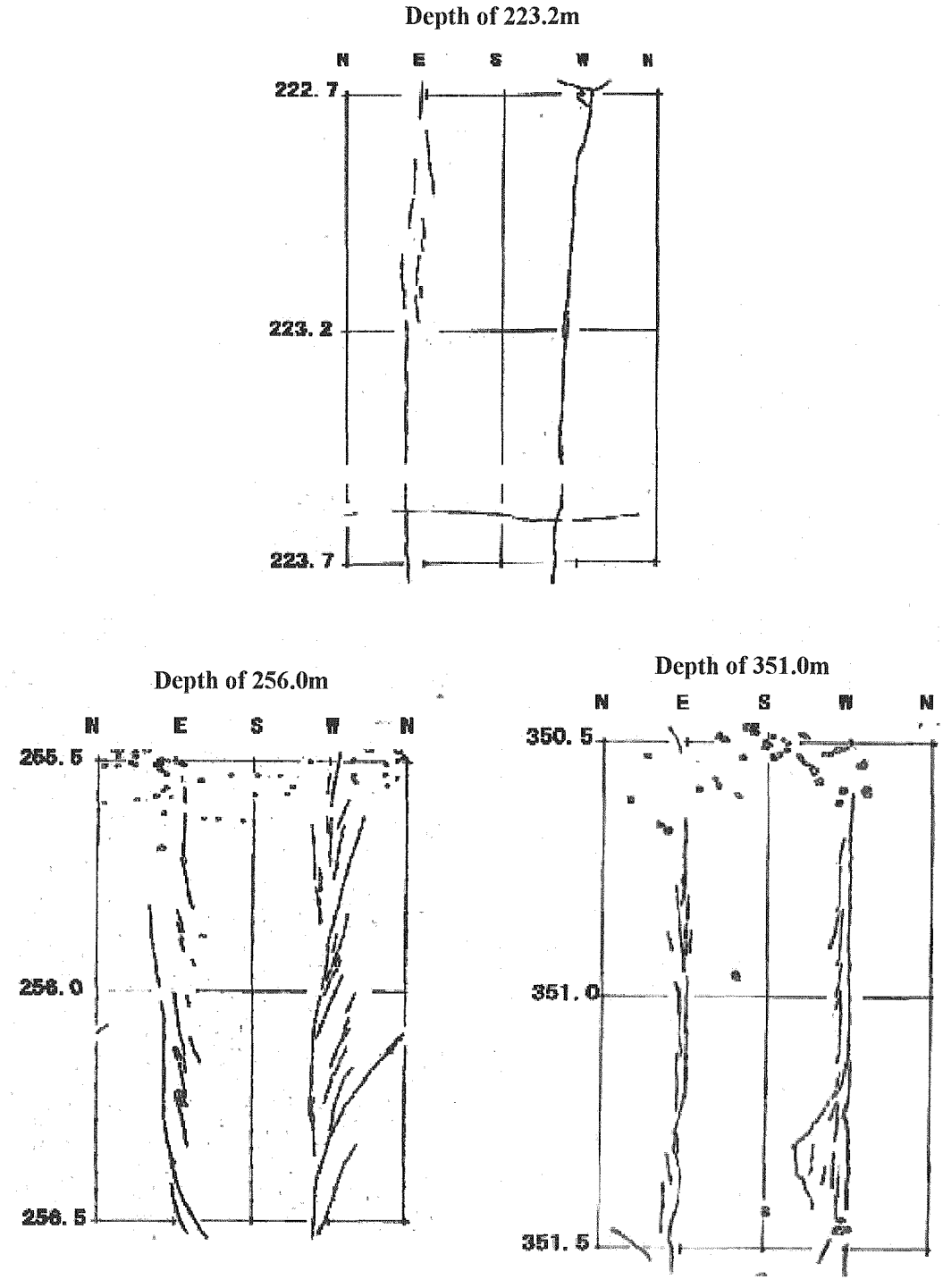
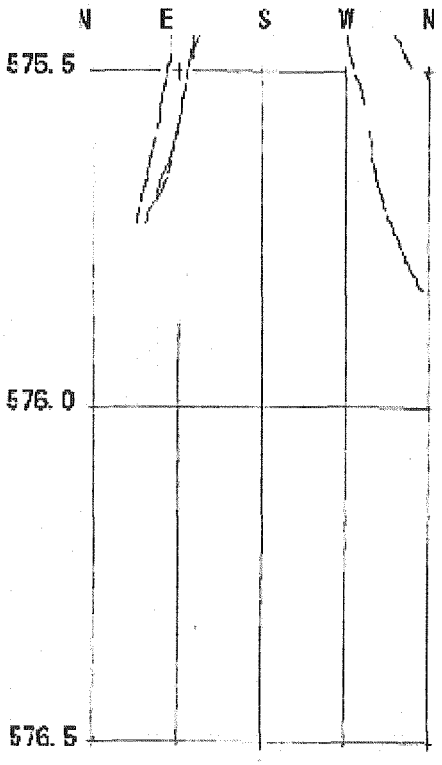


Fig.3.2.1-18 Trace of cracks after the hydraulic fracturing test (HDB-6①)

Depth of 576.0m



Depth of 529.5m

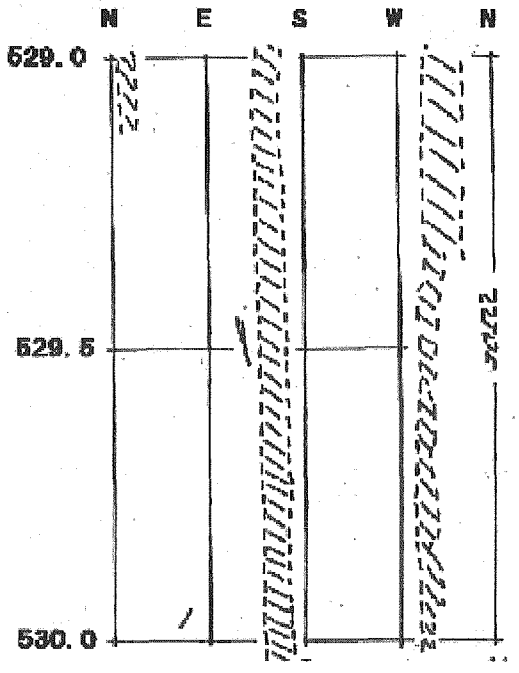


Fig.3.2.1-19 Trace of cracks after the hydraulic fracturing test (HDB-6②)

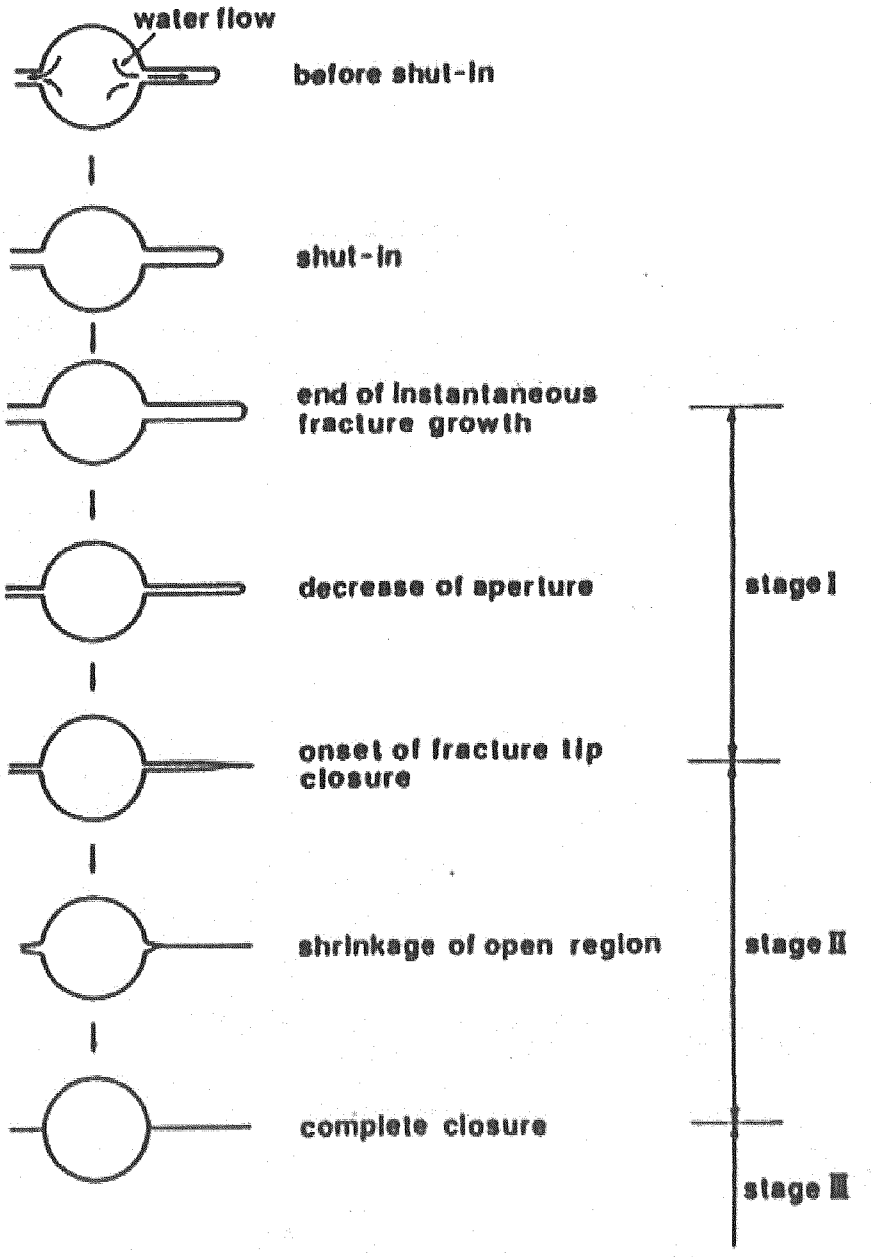


Fig.3.2.1-20 Behavior of crack during the hydraulic fracturing test[14)]

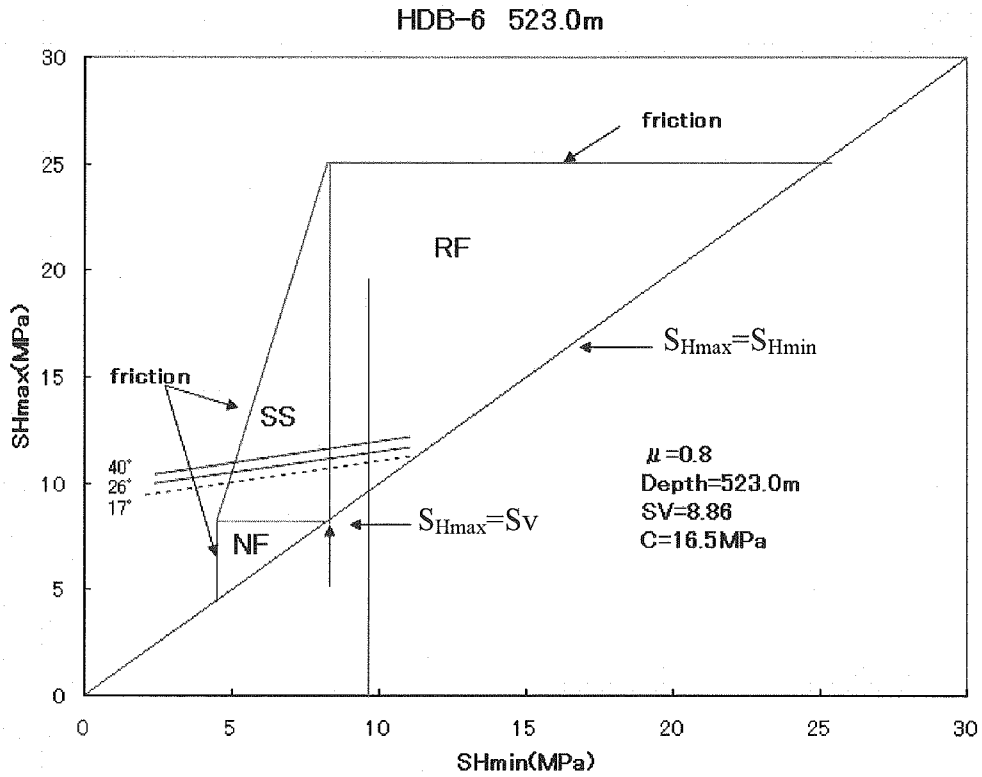


Fig.3.2.2-1 Range of maximum horizontal stress expected from the angle of breakout

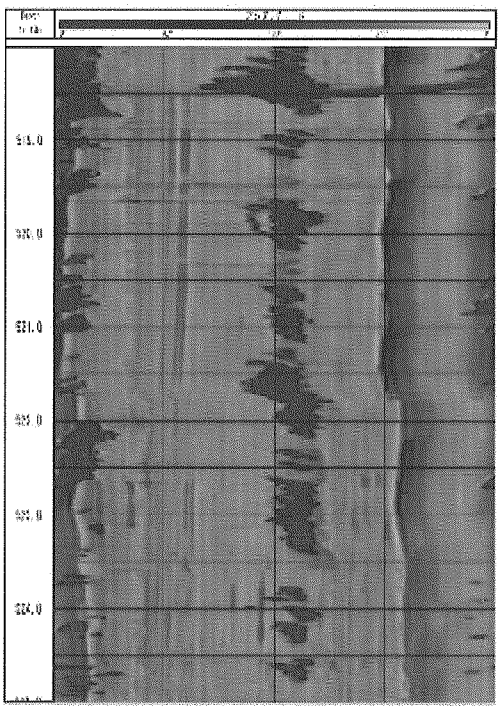


Fig.3.2.2-2 Image of breakout(BHTV)

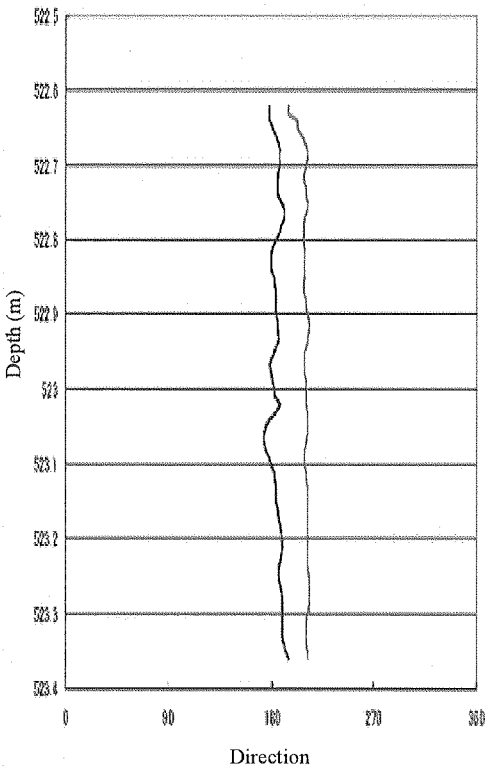


Fig.3.2.2-3 Trace of breakout

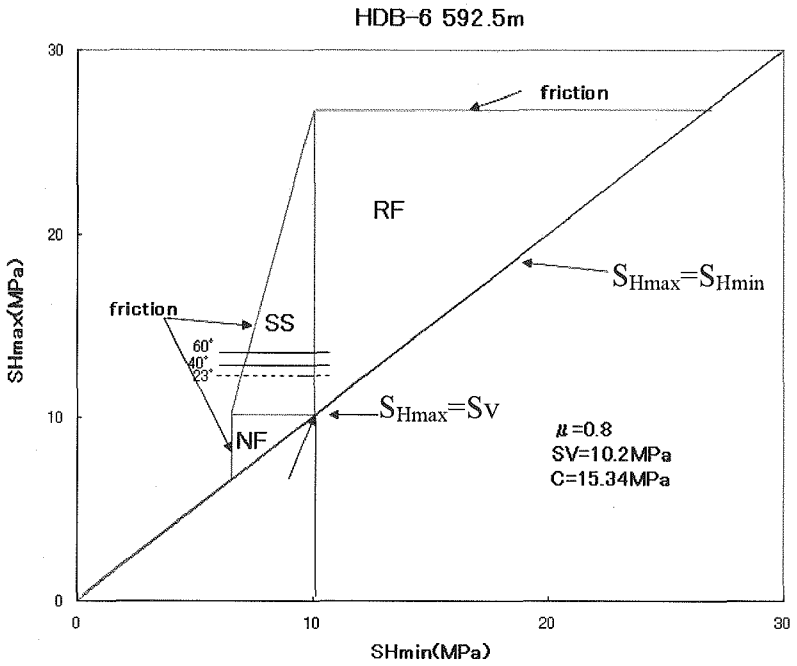


Fig.3.2.2-4 Range of maximum horizontal stress expected from the angle of breakout

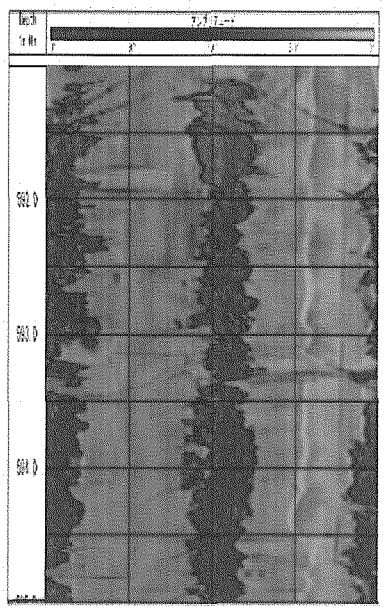


Fig.3.2.2-5 Image of breakout(BHTV)

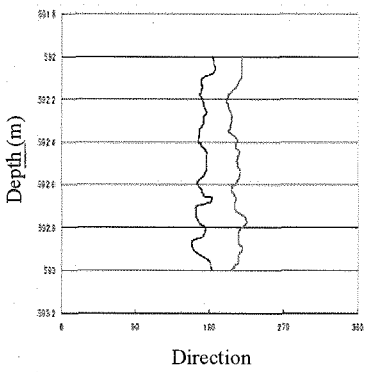


Fig.3.2.2-6 Trace of breakout

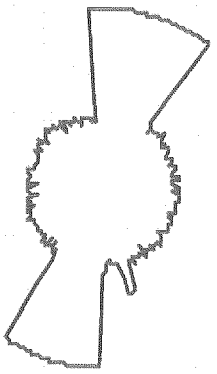


Fig.3.2.2-7 Cross-section of breakout

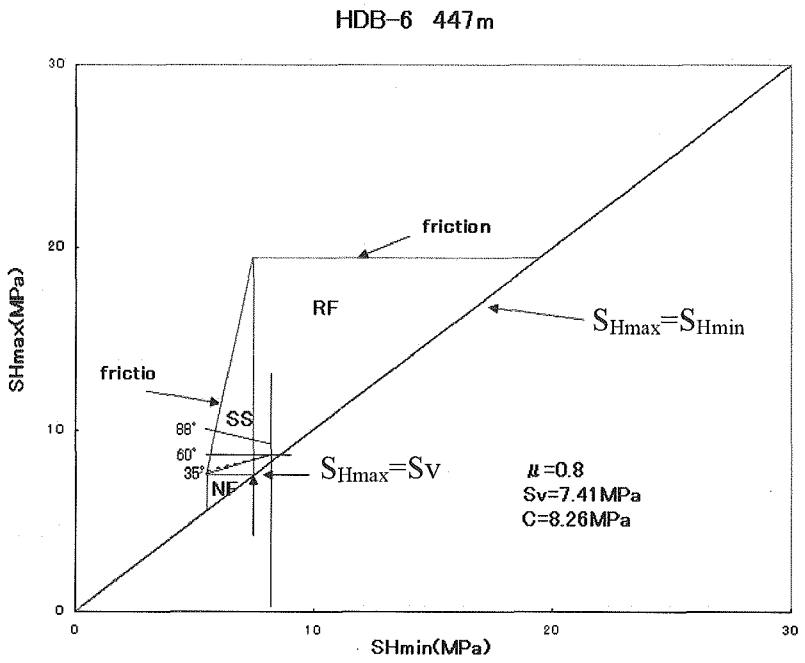


Fig.3.2.2-8 Range of maximum horizontal stress expected from the angle of breakout

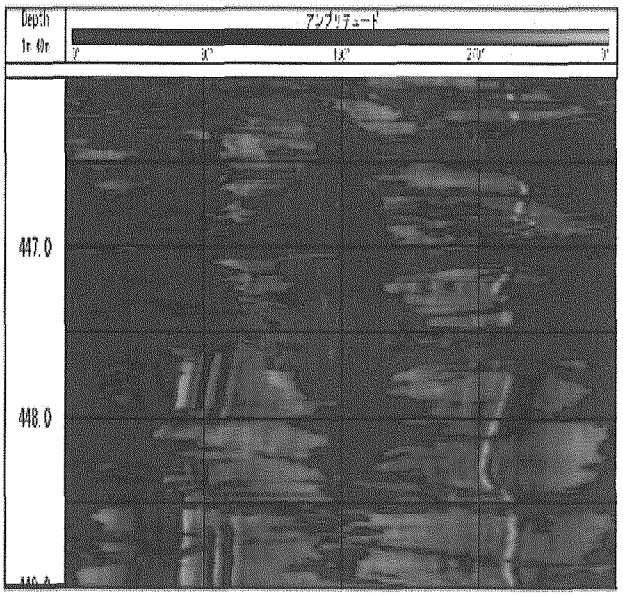


Fig.3.2.2-9 Image of breakout(BHTV)

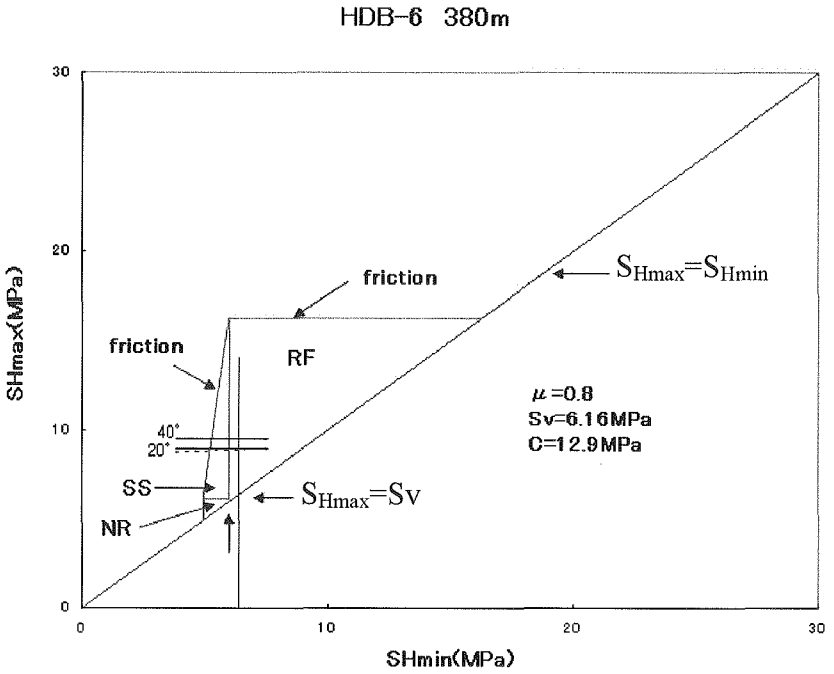


Fig.3.2.2-10 Range of maximum horizontal stress expected from the angle of breakout

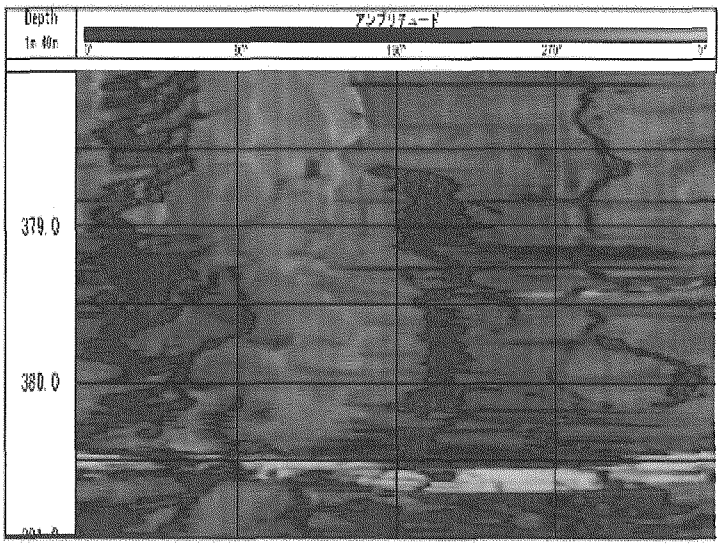


Fig.3.2.2-11 Image of breakout(BHTV)

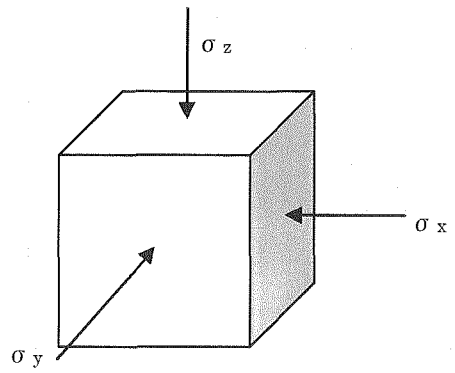


Fig.3.2.3-1 Stress of x,y and z directions

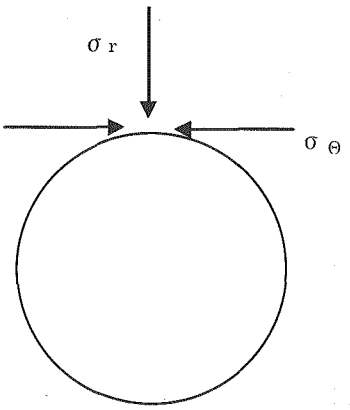


Fig.3.2.3-2 Stress around the circle

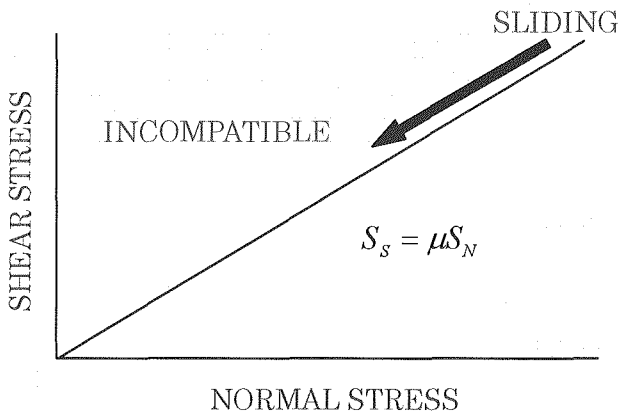


Fig.3.2.3-3 Relationship between shear stress S_S and normal stress S_N

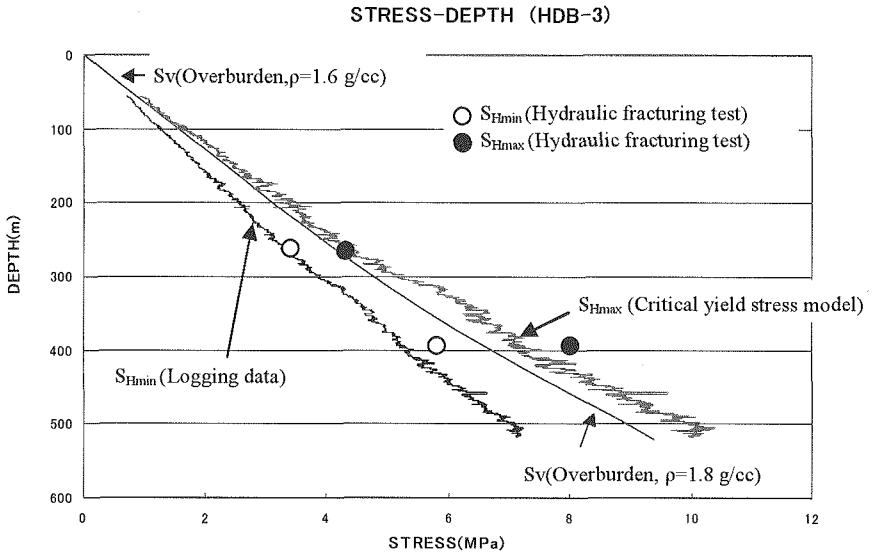


Fig.3.2.3-4 Comparison of estimated value with measured value of initial stress (HDB-3)

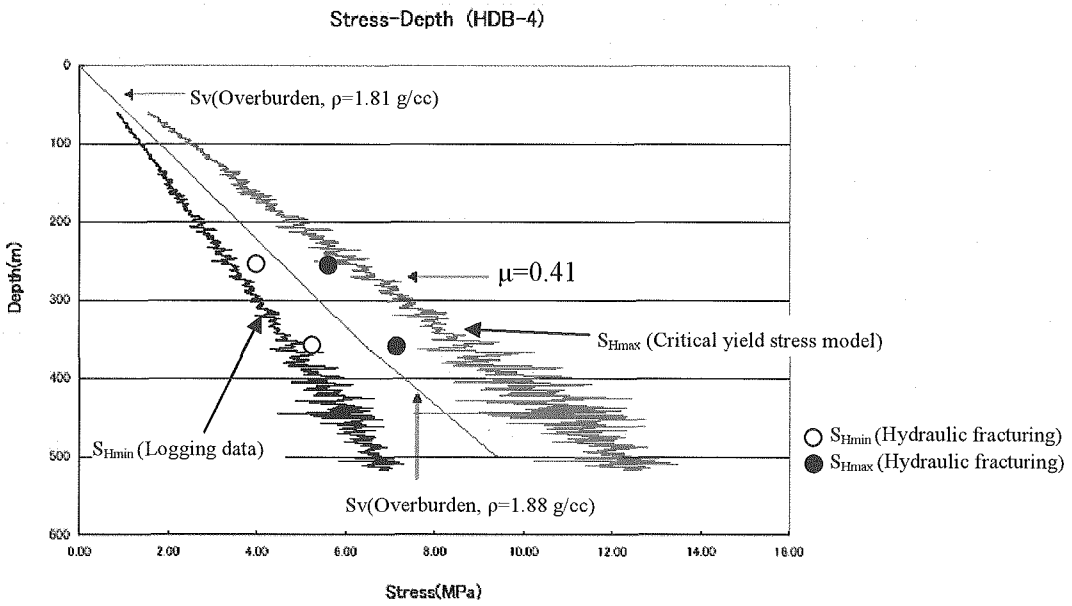


Fig.3.2.3-5 Comparison of estimated value with measured value of initial stress (HDB-4)

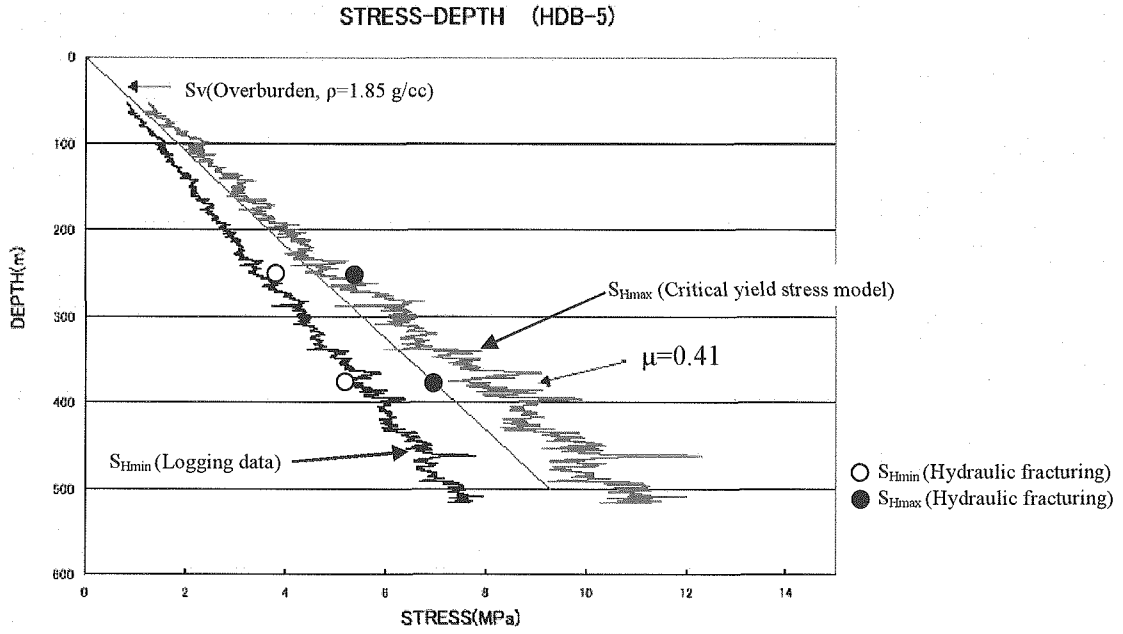


Fig.3.2.3-6 Comparison of estimated value with measured value of initial stress (HDB-5)

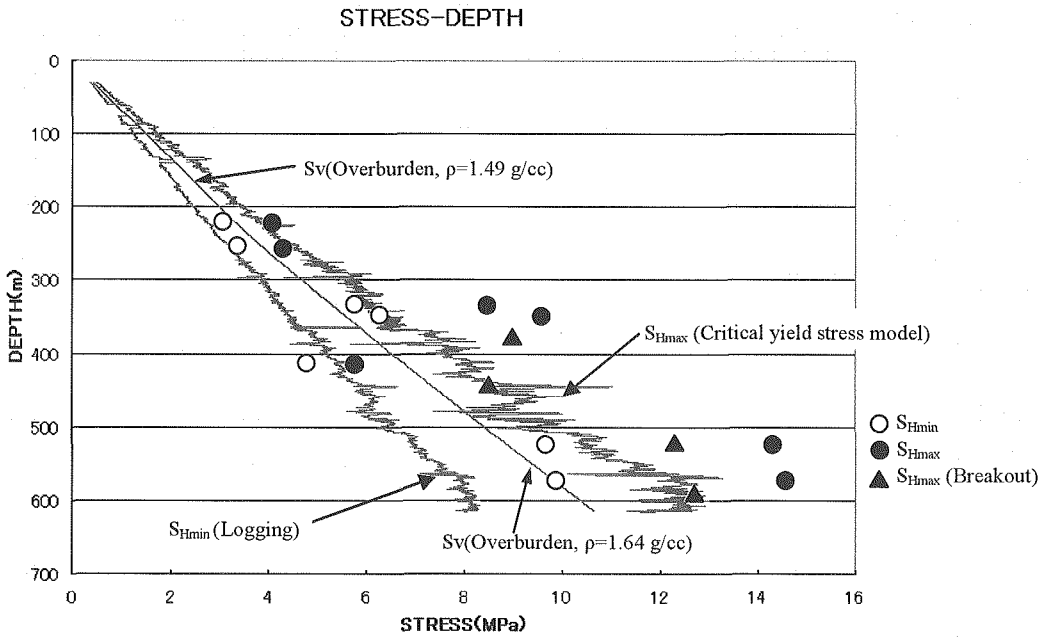


Fig.3.2.3-7 Comparison of estimated value with measured value of initial stress (HDB-6)

Table.3.2.4-1 Results of hydraulic fracturing test

Positional relationship with Omagari fault	Borehole	Depth (m)	Lateral maximum principal stress (MPa)	Lateral minimum principal stress (MPa)	maximum/minimum lateral principal stress ratio	Unit weight (g/cm3)	Estimated overburden pressure (MPa)	Direction of lateral maximum principal stress	Data of calcuration	Remark
West side	HDB-3	263.50	4.80	3.90	1.23	1.60	4.14	E-W	Hydraulic fracturing test	
		392.50	7.50	5.70	1.32	1.72	6.62	ENE-WSW	Hydraulic fracturing test	
	HDB-6	223.00	4.40	3.20	1.38	1.66	3.63	E-W	Hydraulic fracturing test	
		256.00	4.60	3.60	1.28	1.70	4.27	E-W	Hydraulic fracturing test	
		338.10	8.50	5.80	1.47	1.91	6.34	Unmeasurement	Hydraulic fracturing test	
		351.00	9.20	6.30	1.46	1.93	6.65	E-W	Hydraulic fracturing test	
		380.00	10.50	6.30	1.67	1.77	6.61	E-W	Borehole breakout	EMI
		416.00	5.80	4.90	1.18	1.89	7.69	Unmeasurement	Hydraulic fracturing test	
		447.00	8.50	8.10	1.05	2.05	8.99	E-W	Borehole breakout	EMI
		523.00	12.30	9.60	1.28	2.00	10.26	E-W	Borehole breakout	EMI
		529.50	14.50	9.60	1.51	1.99	10.35	ENE-WSW	Hydraulic fracturing test	
		539.50	11.70	8.20	1.43	2.00	10.58	Unmeasurement	Hydraulic fracturing test	
		576.00	14.60	10.00	1.46	2.03	11.44	Unmeasurement	Hydraulic fracturing test	
		592.50	12.70	10.00	1.27	1.97	11.46	E-W	Borehole breakout	EMI
East side	HDB-4	254.20	5.50	4.00	1.38	1.83	4.56	N62E	Hydraulic fracturing test	
		359.00	6.50	5.00	1.30	2.00	7.05	ESE-W	Hydraulic fracturing test	
	HDB-5	249.80	5.40	3.80	1.42	1.94	4.74	E-W	Hydraulic fracturing test	
		377.50	6.50	5.20	1.25	2.04	7.55	ENE-WSW	Hydraulic fracturing test	

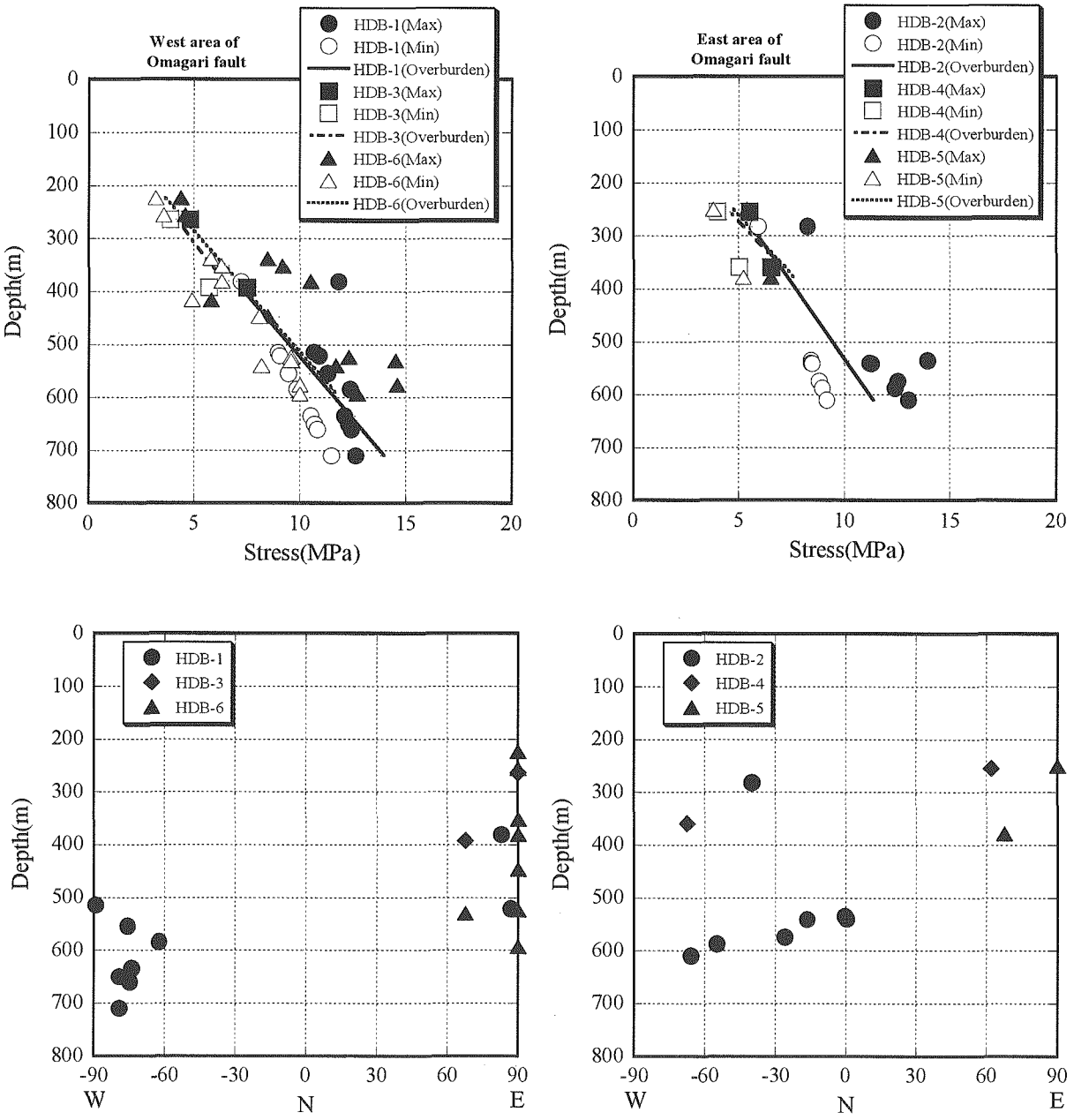


Fig.3.2.4-1 Results of hydraulic fracturing test
(Upper : Distribution of initial stress
Lower : Direction of horizontal maximum stress)

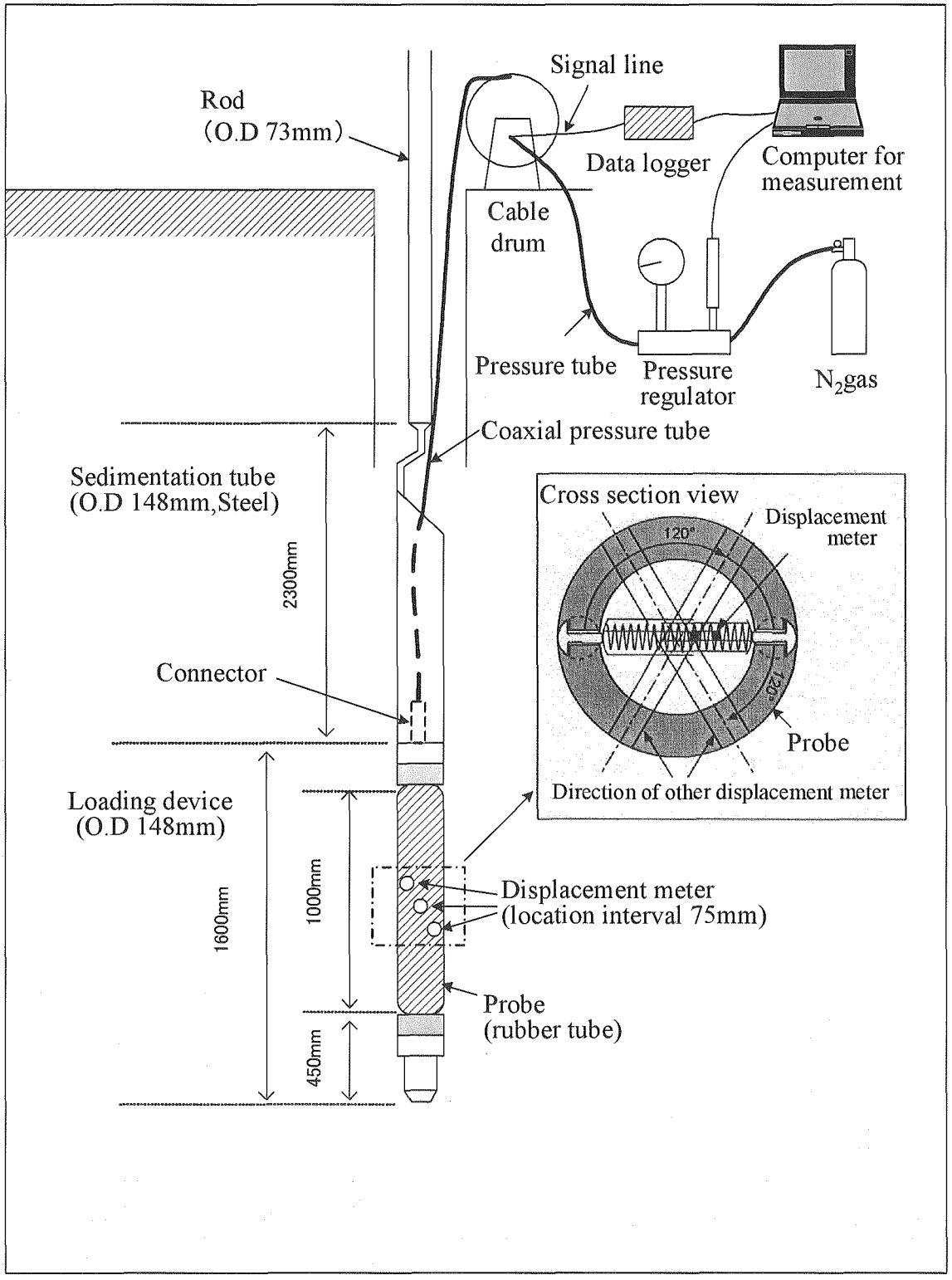


Fig.3.2.5-1 Pressure meter test of borehole

Table.3.2.5-1 Results of pressure meter test of borehole

Test number	Depth(m)	Geological condition around the borehole				Results of load test in the borehole									
		Formation	Rock type	RQD (Average %)	Remark	Initial pressure (MPa)	Yielding pressure (MPa)	Deformation modulus (MPa)				Elastic modulus (MPa)			E/D ratio
								D_1	D_2	D_3	Average D	E_1	E_2	Average E	
B6LT_01	184.0	Koetoi	Diatomaceous mudstone	90.8	Borehole breakout	2.3	—	99.0	180.0	390.0	223.0	340.0	420.0	380.0	1.7
B6LT_02	217.0	Koetoi	Diatomaceous mudstone	94.5		2.7	7.9	570.0	740.0	500.0	603.3	1480.0	1270.0	1375.0	2.3
B6LT_03	225.5	Koetoi	Diatomaceous mudstone	66.7	A few fracturing existing	2.7	—	78.0	84.0	81.0	81.0	180.0	180.0	180.0	2.2
B6LT_04	248.0	Koetoi	Diatomaceous mudstone	97.9		3.2	8.0	750.0	950.0	760.0	820.0	1640.0	1500.0	1570.0	1.9
B6LT_05	292.5	Trasitional zone		69.7	Relatively large aperture existing	3.6	—	150.0	—	—	150.0	270.0	290.0	280.0	1.9
B6LT_06	349.0	Wakkanai	Hard shale	98.3		4.0	8.8	2920.0	3110.0	1370.0	2466.7	4760.0	4150.0	4455.0	1.8
B6LT_07	400.0	Wakkanai	Hard shale	98.8		5.4	10.6	2360.0	1900.0	1960.0	2073.3	3140.0	2900.0	3020.0	1.5
B6LT_08	411.0	Wakkanai	Hard shale	87.0	Relatively large aperture existing	4.6	—	3610.0	2520.0	2440.0	2856.7	4930.0	4150.0	4540.0	1.6
B6LT_09	485.0	Wakkanai	Hard shale	100.0		5.1	11.9	2660.0	2520.0	1990.0	2390.0	4620.0	3720.0	4170.0	1.7
B6LT_10	494.6	Wakkanai	Hard shale	98.7	A few fracturing existing	5.2	—	3500.0	4060.0	5220.0	4260.0	5080.0	5020.0	5050.0	1.2
B6LT_11	540.0	Wakkanai	Hard shale	100.0		5.7	11.5	4450.0	3360.0	2940.0	3583.3	5910.0	4750.0	5330.0	1.5
B6LT_12	555.0	Wakkanai	Hard shale	99.2	Borehole breakout	6.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—

— : Unmeasurement

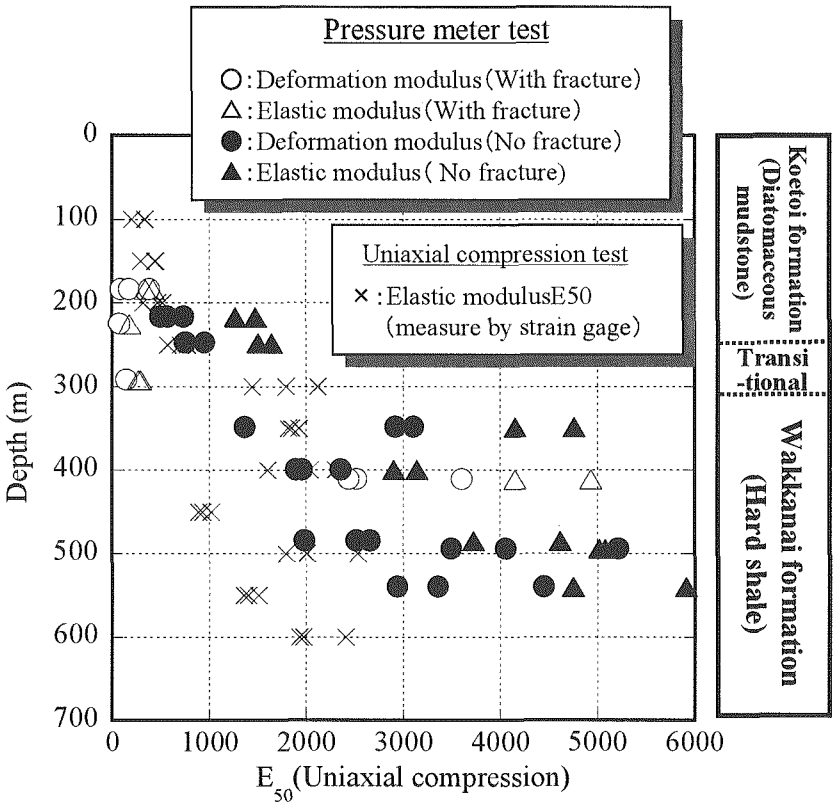


Fig.3.2.5-2 Distribution of modulus

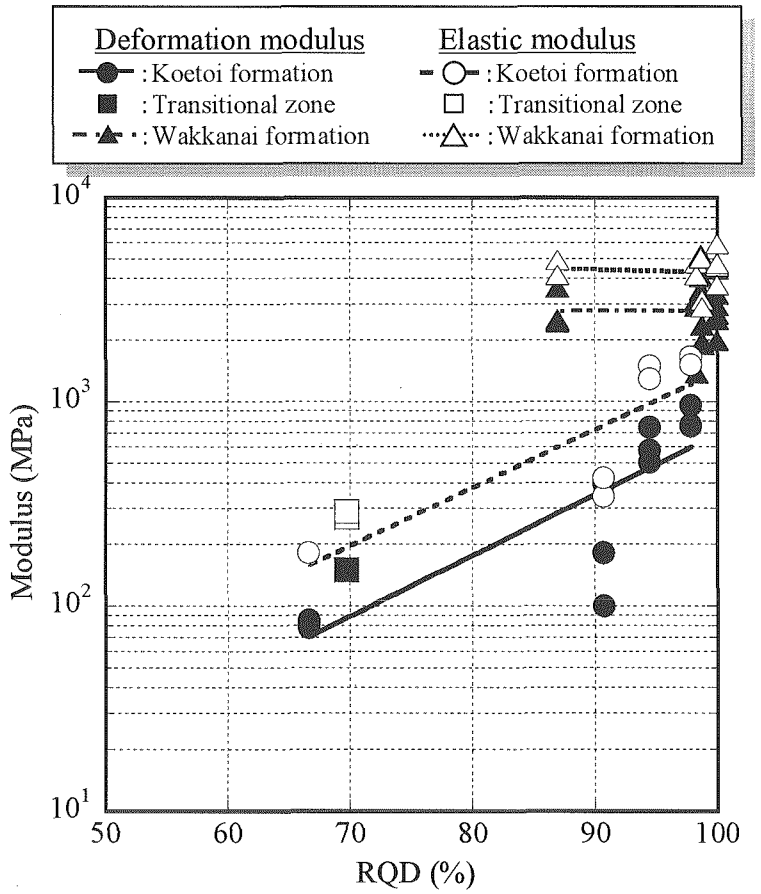


Fig.3.2.5-3 Relationship of modulus and RQD

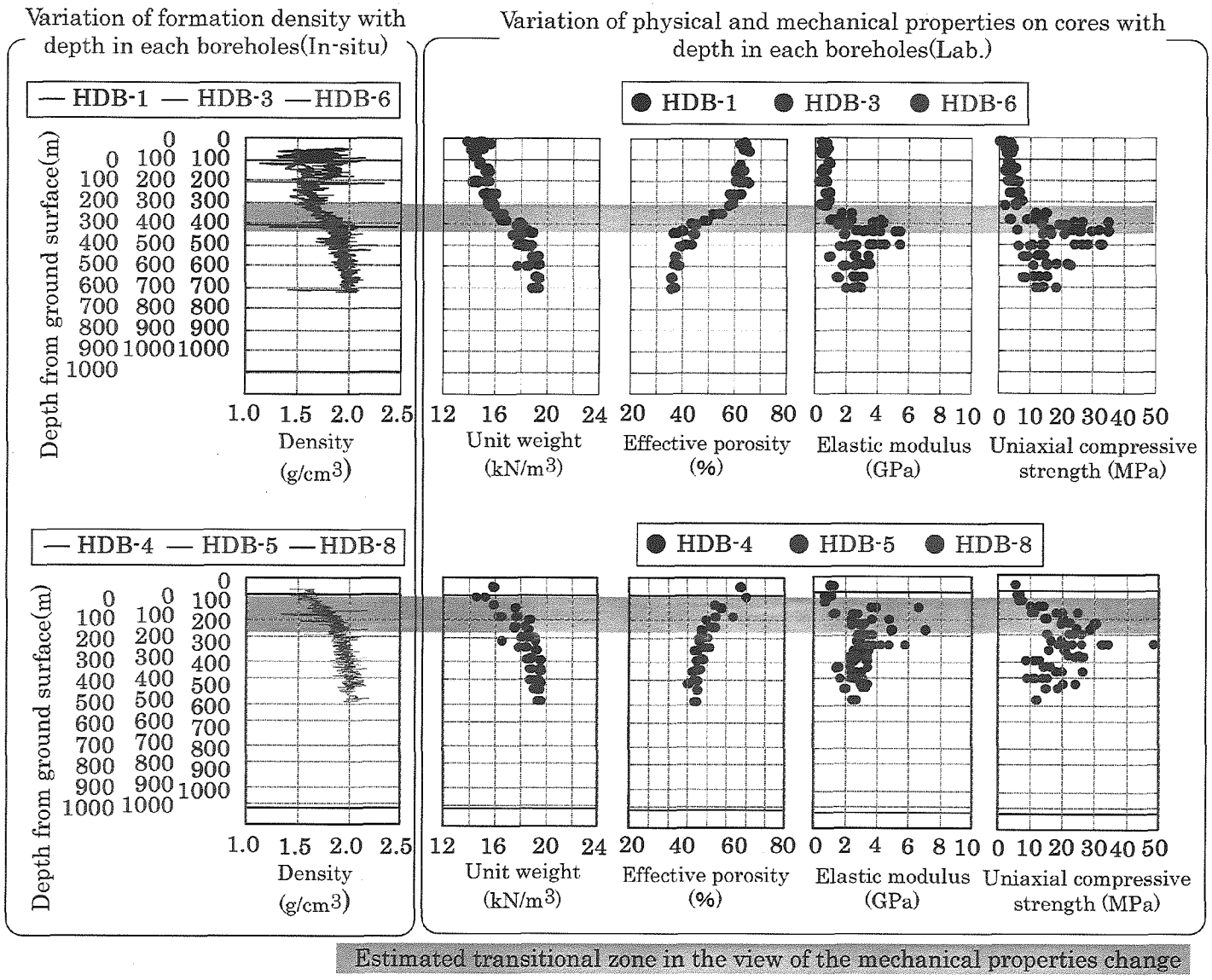


Fig.4.1-1 Distribution of mechanical properties of rock mass around the URL construction area

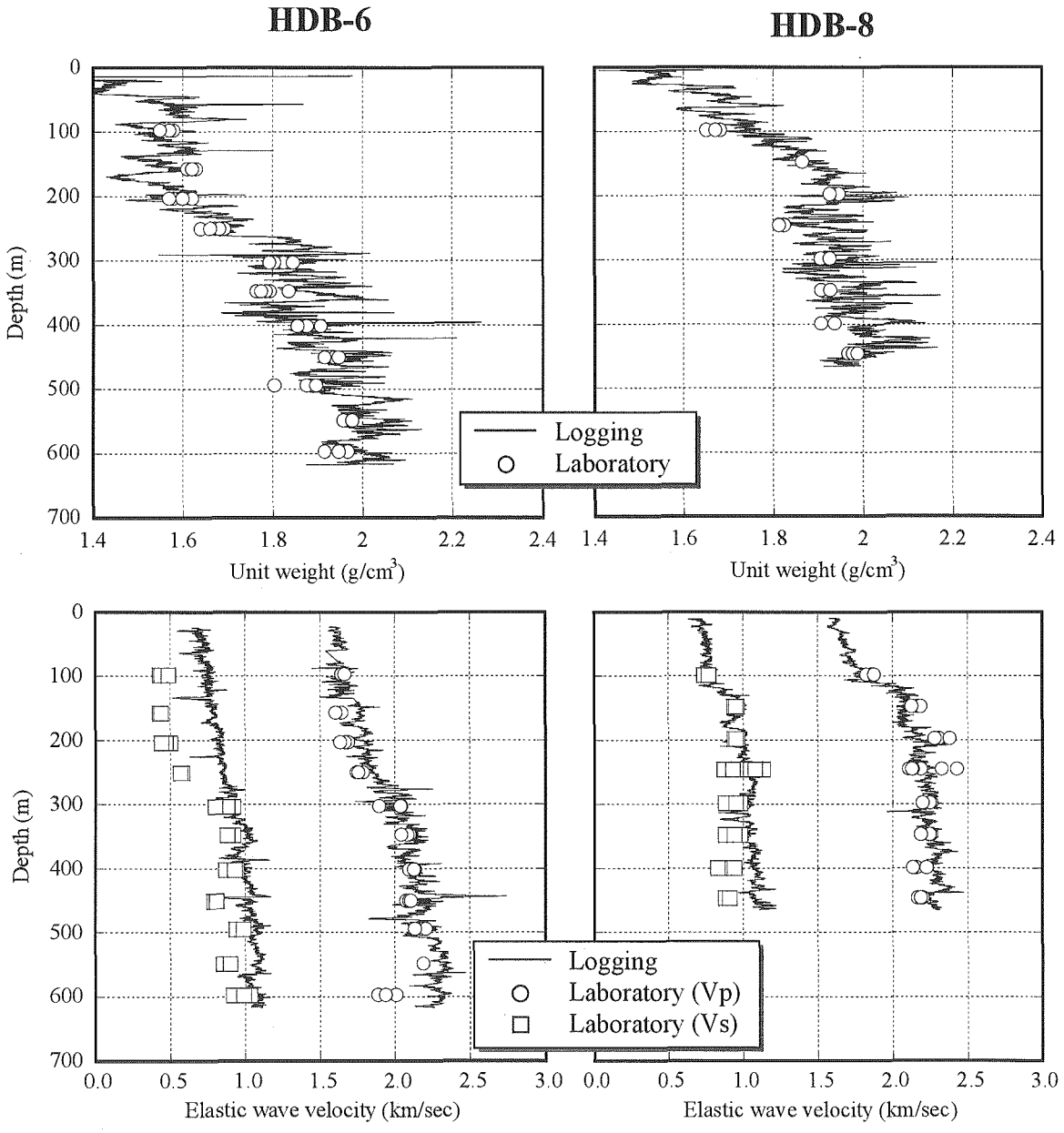


Fig. 4.1-2 Reference of logging data with laboratory test

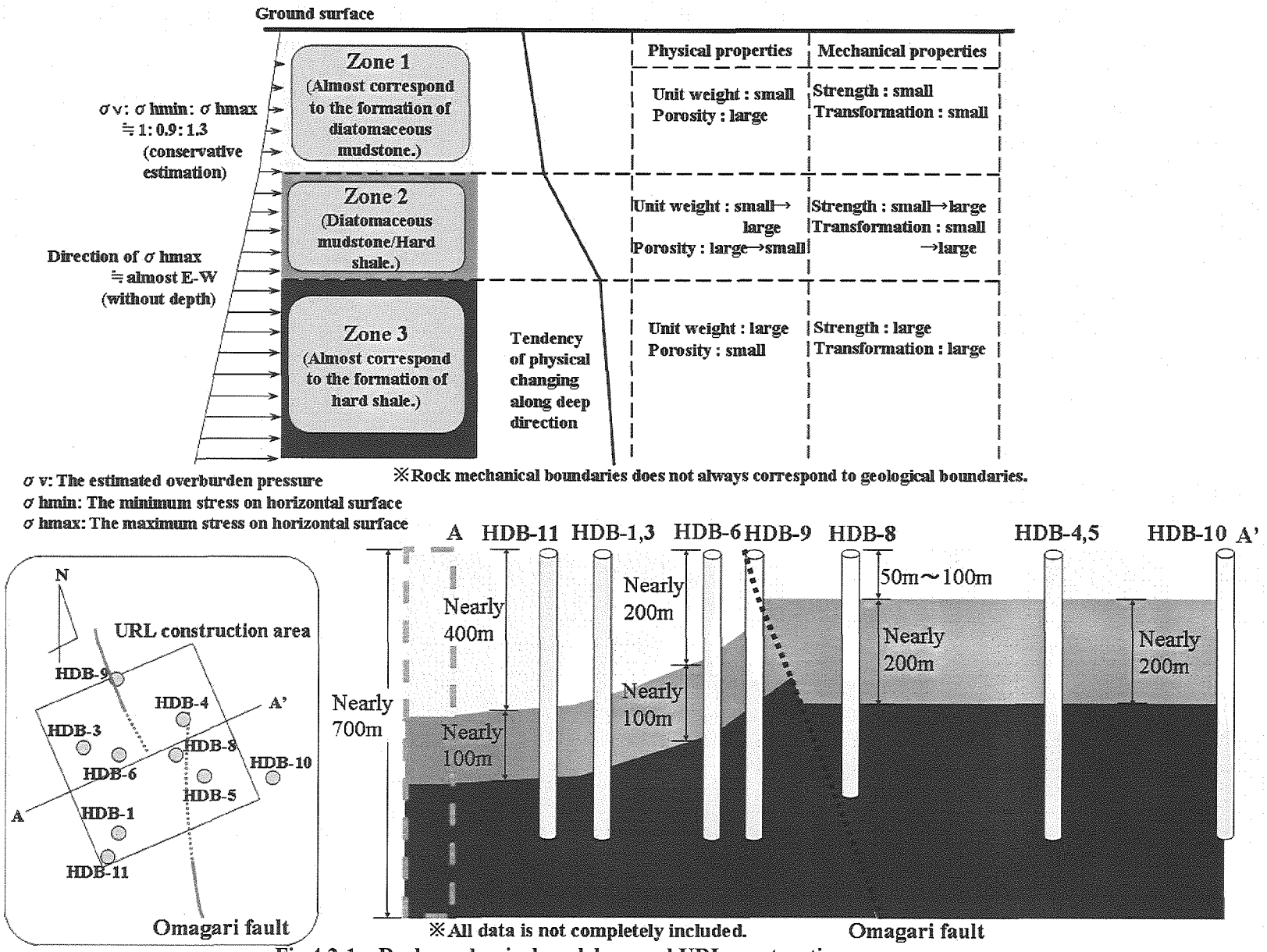


Fig.4.2-1 Rock mechanical model around URL construction area

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度（質量密度）	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	（数の）1	1

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表３．固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(a)	rad		$m \cdot m^{-1}=1$(b)
立体角	ステラジアン(a)	sr(c)		$m^2 \cdot m^{-2}=1$(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度(d)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表４に示されている。
(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“１”は明示されない。
(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表４．単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa・s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

表６．国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	’	1’ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	”	1” =(1/60)’ =(π/648000) rad
リットル	l、L	1l=1 $dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表７．国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19}J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27}kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11}m$

表８．国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 $dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	1ha=1 $hm^2=10^4m^2$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10^{-10}m
バーン	b	1b=100$fm^2=10^{-28}m^2$

表９．固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm^2=0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =$1cm^2/s=10^{-4}m^2/s$
ガウス	G	1 G ^10^{-4}T
エルステッド	Oe	1 Oe ^(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ^10^{-8}Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/$cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	1 ph=10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm/$s^2=10^{-2}m/s^2$

表10．国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
X線単位		1X unit=1.002×10^{-4}nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10^{-9}T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=$10^{-26}W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ		1 fermi=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第７版，1998 年改訂）