

深部岩盤における初期応力測定プローブの改良

および原位置適用試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

平成15年3月

同和工営株式会社

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

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaragi 319-1194,
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

深部岩盤における初期応力測定プローブの改良および原位置適用試験

加藤春實*

要 旨

深部岩盤の初期応力測定適用試験に用いる付帯装置を改良あるいは新たに製作し、これらの装置とサイクル機構が開発した初期応力測定プローブとを組み合わせ、東濃地科学センター東濃鉱山敷地内に掘削した 02SE-04 孔 (HQ-WL) の深度 122.7m, 142.7m, 157.0m, 173.5m および 192.0m において原位置適用試験を実施した。本試験を実施するにあたって、新たにワイヤラインタイプのプローブ運搬・切離し装置を開発し、ワイヤラインタイプのパイロット孔掘削装置を導入した。これによって、深部岩盤を対象とした応力解放試験の作業効率を格段に高めることができた。さらに、原位置適用試験を通じて明らかになった従来のグリューカプセルの問題を解決するために、グリューカプセルの機構に改良を加え、深部岩盤に掘削されたパイロット孔に確実に SI セルを接着できるようにした。しかしながら、5 深度で実施した応力解放試験は、天然き裂のためにオーバーコアが分離したため、正常な解放ひずみは測定されなかった。採取されたオーバーコアと、SI セルを設置するための接着剤を用いて繰り返し载荷試験をおこない、これらの力学特性を調査した。その結果、当該コアは風化の影響のために深度 160m 付近まで塑性的な変形挙動を示すこと、また、パイロット孔で放出された接着剤が弾性体とみなせるまでに、調査後 3 日を要することを明らかにした。

02SE-04 孔の深度 125.8m から深度 168.0m において水圧破碎法による初期応力測定をおこなった。測定に使用した水圧破碎システムは、加圧系の体積を十分に小さくすることによって、き裂の開口圧を精度良く測定し、信頼性の低いとされていた最大水平応力の測定精度を格段に向上させるように開発されたものである。5 深度で実施された水圧破碎試験のうち、2 深度でボーリング孔軸と平行な縦き裂が発生した。これらの深度で評価された初期応力状態は $S_v < S_h < S_H$ の逆断層型であり、最大水平主応力の方位はほぼ N60° E であった。

本報告書は、同和工営株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の成果に関するものである。

機構担当課室：東濃地科学センター 地質環境研究グループ

*：同和工営株式会社 ジオサイエンス事業部

+： S_v , S_h および S_H は、それぞれ鉛直方向の被り地圧、水平面内の最小主応力および最大主応力である。

**Improvement of an automatic *in situ* stress measurement probe
and it's application in the field test**

Harumi Kato*

ABSTRACT

The overcoring tests in the vertical borehole 02SE-04(a standard HQ-WL) were made at depths of 122.7m, 142.7m, 157.0m, 173.5m and 192.0m by using modified equipments and an automatic probe developed by Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC). By adopting a newly developed wire line type probe carrier and pilot hole drilling tool, it was ensured that quick accomplishment of steps followed during overcoring at great depth was possible. Modifications to a glue capsule were carried out to achieve successful grouting of the SI cell in the pilot hole at great depths. Since cracks developed along the planes of weakness during the overcoring, none of the tests at the five depths provided valid measurement. In order to determine the elastic properties of the overcore and epoxy cement, cyclic loading test was made. The test revealed that the core taken down to a depth of 160m possessed plastic property. It was also found that long periods of up to three days were required for the epoxy cement extruded in the pilot hole to change into elastic material.

Hydraulic fracturing tests were also conducted in the borehole 02SE-04 at depths ranging from 125.8m to 168.0m. At two depths, fractures parallel to the borehole axis were induced. The test results indicated that the stress regime at the two depths was reverse faulting tectonic environment ($S_v < S_h < S_H^*$) and the orientation of the hydraulic fracture trace in 02SE-04 was found to give an average azimuth for the maximum horizontal stress S_H of N60° E.

This work was performed up by Dowa Engineering Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Geoscience Research Group, Tono Geoscience Center.

* : Dowa Engineering Co., Ltd., Geoscience Consulting Division.

+ : S_v , S_h and S_H are vertical stress, minimum horizontal and maximum horizontal stress, respectively.

目 次

1. 件名	1
2. 目的および試験の概要	1
3. 作業範囲	1
4. 原位置試験場所	2
5. 初期応力測定プローブの改良および原位置適用試験	3
5.1 初期応力測定適用試験に用いる付帯装置の改良	3
5.1.1 プローブ降下・切り離し装置	3
5.1.2 アッパーセルリテーナー	6
5.1.3 パイロット孔掘削装置	7
5.1.4 SIセル	9
5.1.5 グリューカプセル	9
5.1.6 封圧試験装置	11
5.2 02SE-04 孔における初期応力測定適用試験	12
5.2.1 応力解放法の試験手順	12
5.2.2 試験結果	16
(1) 深度 122.7m における応力解放試験	16
(2) 深度 142.7m における応力解放試験	18
(3) 深度 157.0m における応力解放試験	19
(4) 深度 173.5m における応力解放試験	21
(5) 深度 192.0m における応力解放試験	23
5.2.3 接着剤の充填状態	25
5.3 繰り返し載荷試験による岩石および接着剤の力学特性評価	26
5.3.1 試験装置	27
5.3.2 試験方法	28
5.3.3 試験結果	32
(1) 岩石試験片	32
(2) 接着剤	37
a. 接着剤の応力-ひずみ曲線	37
b. 接着剤の弾性率	37
5.4 結言	41
6. 水圧破碎法による初期応力測定	42
6.1 水圧破碎試験概要および試験区間の選定	42
6.2 試験装置	43
6.3 試験方法	45
6.4 解析方法	48

6.4.1	従来の初期応力評価手順	48
6.4.2	き裂開口圧力と初期応力の関係	49
6.4.3	真のき裂開口圧力を測定するための水圧破碎システム	49
6.5	試験結果	51
6.6	解析結果	54
6.7	結言	56
7.	結論	57
	参考文献	58

付表目次

表 5.1	SI セルの仕様	9
表 5.2	深度 122.7m における応力解放試験	17
表 5.3	深度 142.7m における応力解放試験	18
表 5.4	深度 157.0m における応力解放試験	20
表 5.5	深度 173.5m における応力解放試験	22
表 5.6	深度 192.0m における応力解放試験	24
表 5.7	岩石試験片の湿潤状態における寸法および重量	28
表 5.8	接着剤試験片の寸法	31
表 5.9	岩石の除荷時のヤング率とポアソン比	33
表 5.10	接着剤の除荷時のヤング率とポアソン比	40
表 6.1	測定機器一覧	43
表 6.2	02SE-04 孔における水圧破碎試験の測定結果	53
表 6.3	02SE-04 孔における最小水平応力 S_h 、最大水平応力 S_H および最大水平応力の方位 ϕ	54

付図目次

図 4.1	02SE-04 孔位置図	2
図 5.1	プローブ降下・切離し装置	5
図 5.2	パイロット孔掘削編成図	8
図 5.3	グリューカプセル組立図	10
図 5.4	封圧試験測定系統図	11
図 5.5	ワイヤラインタイプのプローブ降下・切り離し装置およびパイロット孔掘削装置を使用した応力解放法の試験手順	15
図 5.6	深度 192.0m から採取されたオーバーコアの切断面	25
図 5.7	繰り返し一軸載荷試験における試験装置および測定系統	27
図 5.8	岩石試験片 A	29
図 5.9	岩石試験片 B	29
図 5.10	岩石試験片 C	30
図 5.11	岩石試験片 D	30
図 5.12	岩石試験片 E	31
図 5.13	樹脂試験片 A および B	31
図 5.14	岩石試験片 A の応力-ひずみ曲線	34
図 5.15	岩石試験片 B の応力-ひずみ曲線	34
図 5.16	岩石試験片 C の応力-ひずみ曲線	35
図 5.17	岩石試験片 D の応力-ひずみ曲線	35

図 5.18	岩石試験片 E の応力-ひずみ曲線	36
図 5.19	接着剤試験片 A の応力-ひずみ曲線	38
図 5.20	接着剤試験片 B の応力-ひずみ曲線	39
図 5.21	接着剤の弾性率と調合後の経過日数の関係	40
図 6.1	ワイヤライン方式による水圧破碎システム	44
図 6.2	水圧破碎法による初期応力測定手順	47
図 6.3	シャットイン後のき裂閉口挙動	53
図 6.4	02SE-04 孔における水圧破碎試験結果	55

APPENDIX

APPENDIX I	圧力-時間および流量-時間曲線	A-1
APPENDIX II	水圧破碎試験深度におけるボーリング孔壁面のき裂のスケッチ	A-4
APPENDIX III	圧力-総流量 Q_{total} の関係	A-8
APPENDIX IV	シャットイン後の圧力減衰速度の逆数と圧力の関係	A-10
APPENDIX V	写真集	A-14

1. 件名

深部岩盤における初期応力測定プローブの改良および原位置適用試験

2. 目的および試験の概要

核燃料サイクル開発機構（以下サイクル機構）東濃地科学センターでは、地層科学研究の一環として、地下深部岩盤の3次元初期応力測定手法の開発を実施している。サイクル機構では、これまでに深度1000m対応の応力解放法による初期応力測定プローブの設計および製作を完了し、昨年度までに深度20mのボーリング孔における原位置適用試験により、装置の適用性を確認している。

本件は、サイクル機構が開発した1000m対応の初期応力測定プローブを用いて、深度200mのボーリング孔において初期応力測定を実施し、装置の適用性を確認することを目的として、原位置適用試験に必要な装置の改良、深度200mのボーリング孔における原位置適用試験を実施する。また、試験を実施した地点での初期応力状態を把握し、原位置適用試験結果の妥当性を確認することを目的として、水圧破碎法による初期応力測定を実施する。

3. 作業範囲

本件の作業範囲は以下に示すとおりである。本報告書は、これらの業務内容に関する章から構成される。

- (1) 初期応力測定プローブおよび付帯装置の改良
- (2) 深部岩盤における初期応力測定プローブを用いた初期応力測定適用試験
- (3) 深度100m～200m間の土岐花崗岩中の3深度における水圧破碎法による初期応力測定
- (4) 初期応力評価解析の実施

4. 原位置試験場所

原位置試験を実施した場所は、岐阜県土岐市泉大字河合字賤洞 1221-8 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 東濃鉦山敷地内である。応力解放試験および水圧破碎試験を実施したボーリング孔は、地表から鉛直にボーリングされた直径 98mm、深度 200m の 02SE-04 孔 (HQ-WL 孔) であり、全長にわたって裸孔である。地表から深度 103m までは土岐夾炭累層の粗粒砂岩～細粒砂岩、礫岩およびシルト質砂岩から構成され、深度 103m 以深の土岐花崗岩と不整合に接している。02SE-04 孔の掘削位置は図 4.1 に示すとおりである。

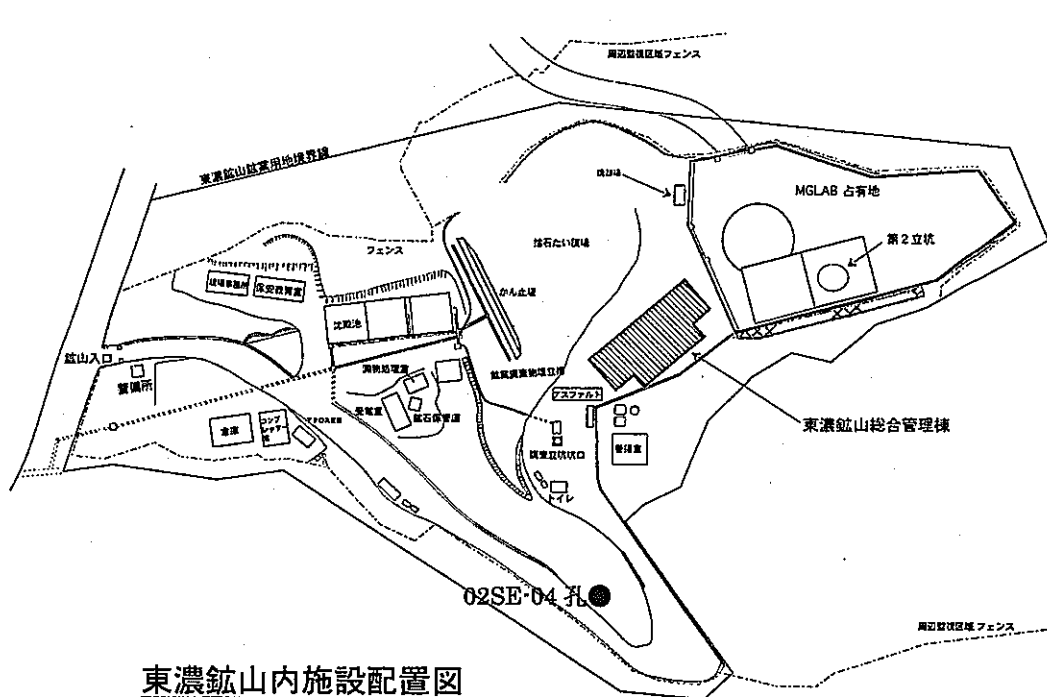


図 4.1 02SE-04 孔位置図

5. 初期応力測定プローブの改良および原位置適用試験

5. 1 初期応力測定適用試験に用いる付帯装置の改良

02SE-04 孔 (HQ-WL 孔) で初期応力試験を実施するために、プローブ降下・切り離し装置、アッパーセルリテーナー、パイロット孔掘削装置、SIセル (Solid Inclusion Cell, 中実円柱状埋設型計測装置)、グリューカプセルおよび封圧試験装置などの初期応力測定適用試験に用いる付帯装置を改良あるいは新たに製作した。02SE-04 孔における試験深度は 100m~200m であり、昨年度の最大試験深度が 19.4m であるのと比較するとかなり深い。さらに、パイロット孔の直径が 20mm から 35mm に増大した点も昨年度の試験条件と異なっている。

5. 1. 1 プローブ降下・切り離し装置

昨年度製作したプローブ降下・切り離し装置は、地表においてワイヤーラインコアバーレルのインナーチューブ内に初期応力測定プローブ全体を収納した後、HQ-WL ロッドを継ぎ足しながらボーリング孔底まで降下させるように設計されていた。今年度は深度数百メートルのボーリング孔における応力解放法をおこなうために、図 5.1 に示すような機構の異なる 2 タイプのプローブ降下・切り離し装置を新たに製作した。これらの装置は、初期応力測定プローブ全体を大深度ボーリング孔の中心に保持し、SI セルを直径 35mm のパイロット孔に確実に挿入できる構造となっている。すなわち、

タイプ (1) 初期応力測定プローブを、インナーチューブではなく構造が単純なステアリングロッドに収納した後、HQ-WL ロッドを継ぎ足しながら HQ ボーリング孔底まで降下させ、切り離す装置 (図 5.1(a)参照)。

タイプ (2) ステアリングロッドに収納した初期応力測定プローブを、ワイヤーラインによってロッド先端のコアバーレルまで降下させ、切り離す装置 (図 5.1(b)参照)。

ボーリングロッドの出し入れに伴って孔壁から孔底へ崩壊物が落下する地層を対象とする場合、パイロット孔に崩壊物が浸入するのでタイプ (1) の装置は使用できない。一方、タイプ (2) の装置は、初期応力測定装置をボーリングロッドの内部を通してコアバーレルまで降下させるので、降下に伴う付帯作業によってパイロット孔に崩壊物が落下することはない。さらに、ボーリングロッドを出し入れする必要がないので短時間で初期応力測定プローブを孔底まで降下させることができる。

初期応力測定プローブを切り離す機構は、いずれの装置においてもシャーピン切断方式とした。すなわち、プローブを収納するアッパーセルリテーナーの上部にはアルミニウム製のシャーピンヘッドが接続されており、これはシャーピン (M4 ネジ) によってステアリングロッドに固定されている。プローブ降下・切り離し装置を孔底に降ろすと、SI セル下部のグリューカプセルがパイロット孔で収縮した後、アッパーセルリテーナーの先端が HQ ボーリング孔の孔底に接触しシャーピンが切断され、プローブはステアリングロッドから切り離される。その後、ボーリングロッドを引き上げるとアッパーセ

ルリテナーは自重によってステアリングロッドの中をスライドし、HQ ボーリング孔底に放出される。

初期応力測定プローブ設置後、プローブ降下・切り離し装置を回収するとき、タイプ（１）の装置では、HQ-WL ロッド全体を揚管しなければならない。一方、タイプ（２）の装置では、ワイヤーラインによって短時間に回収できる。

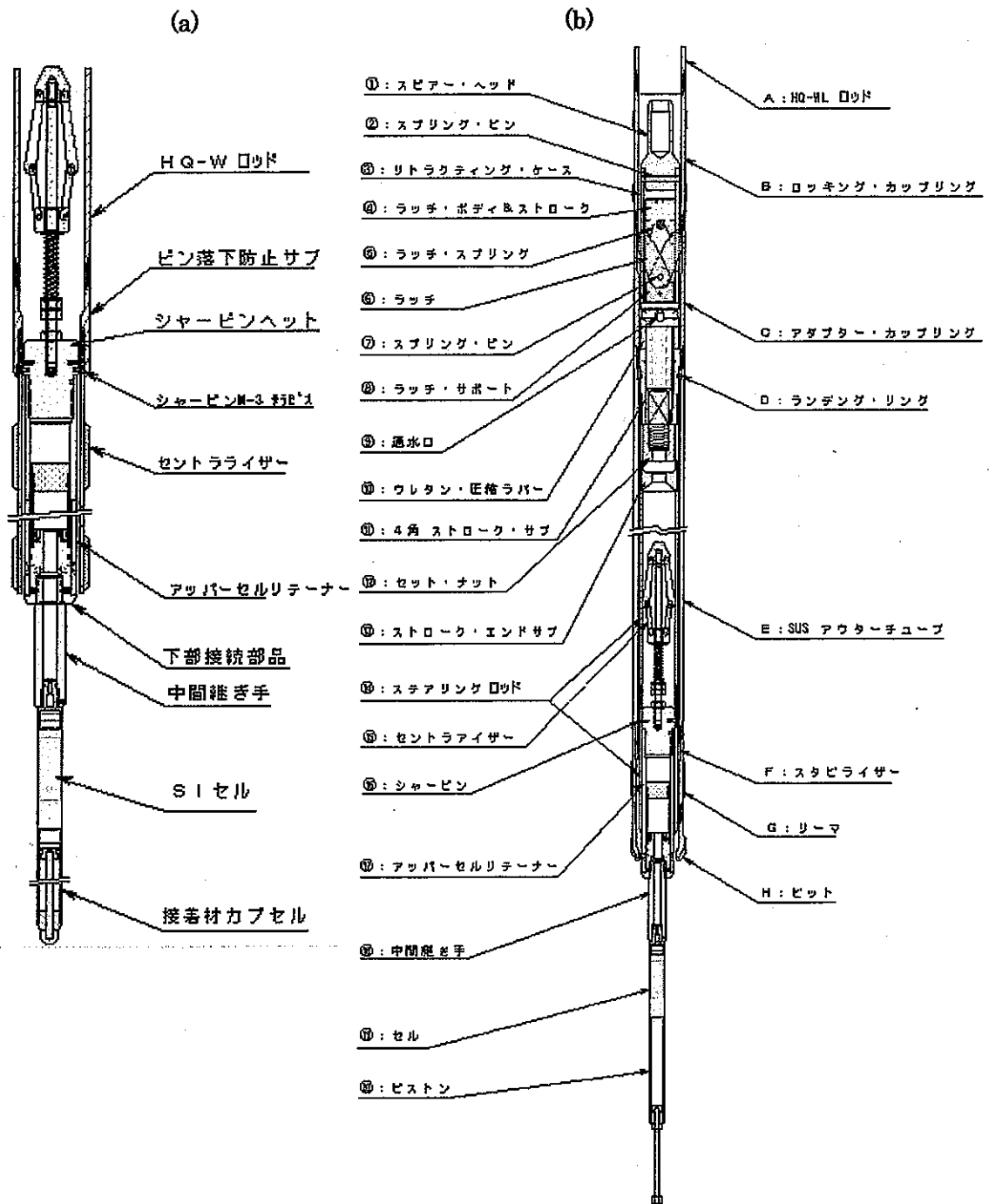


図 5.1 プロブ降下・切り離し装置

5. 1. 2 アッパーセルリテナー

昨年度はアッパーセルリテナーがコアバーレルから脱落しない構造とした。今年度は抑留事故を避けるために、プローブを切り離した後、コアバーレルとボーリングロッドは安全な深度まで引き上げ、プローブを含むアッパーセルリテナー全体をHQボーリング孔底に残すこととした。このため、アッパーセルリテナーは、初期応力測定プローブとインナーチューブとのクリアランスを調整するとともに、初期応力測定プローブの長軸とボーリング孔軸とを一致して直立させるためのセントライザーを備えた構造とした。

セントライザーは、プローブ降下・切り離し装置にプローブを収納するときには直径が収縮し、シャープピンを切断してアッパーセルリテナーがステアリングロッドの中からHQボーリング孔に放出されるとばねの復元力によってその直径が拡大する。これによってHQボーリング孔壁にセントライザーが接触し、プローブをボーリング孔の中心に保持することができる。さらに、オーバーコアリングのためにコアバーレルを降ろすと、セントライザーの直径は収縮してHQ-WLビットを通過し、アッパーセルリテナー全体がインナーチューブに収納される。なお、アッパーセルリテナーの材質は、初期応力測定プローブに内蔵された方位計に影響を及ぼさないように SUS-316 およびアルミニウムとした。

5. 1. 3 パイロット孔掘削装置

今年度は、パイロット孔掘削装置によってボーリングできるパイロット孔の直径と深さを、それぞれ 35mm および 600mm 程度とした。今年度のパイロット孔の直径は昨年度よりも 15mm 大きい。これは、ボーリング孔の深度が増加するにつれてパイロット孔掘削ビットに伝達させるビット荷重の調整がむずかしくなるため、パイロット孔掘削ロッドの直径を大きくしてその強度を高めなければロッドを破損させる可能性があるからである。さらに、適切な掘進率を得るためには、ビットの直径が小さくなるほどビットの回転速度を高めなければならないが、同一の回転数でも直径のより大きいビットの方がより大きな周速が得られるという利点がある。一方、パイロット孔の深さを昨年度よりも 200mm 程度深い 600mm 程度としたのは、HQ ボーリング孔底の応力集中域の外に SI セルを設置できるようにするためである。

深度数百メートルの HQ ボーリング孔の孔底から、孔軸を一致させて直径 35mm、長さ 600mm 程度のパイロット孔を掘削するために、図 5.2 に示すような機構の異なる 3 タイプの掘削装置を導入した。

タイプ (1) HQ-WL ロッド先端のレジューサーの中心に、直径 30mm、長さ 600mm のロッドおよび直径 35mm のノンコアパイロット孔掘削ビットを接続し、HQ-WL ロッドを継ぎ足しながらボーリング孔底まで降ろす掘削装置 (図 5.2(a)参照)。

タイプ (2) ステアリングロッド先端のレジューサーの中心に上記のパイロット孔掘削ロッドおよび掘削ビットを接続した後、HQ-WL ロッド内をボーリングロッド先端のコアバーレルまで自由落下させ、HQ-WL コアバーレルにパイロット孔掘削ビットを設置する掘削装置 (図 5.2(b)参照)。

タイプ (3) タイプ (2) の掘削装置において、パイロット孔のコアリングがおこなえるように、直径 35mm の小型ダブルコアバーレルを装着した掘削装置 (図 5.2(c)参照)。

パイロット孔掘削後、ボーリングロッドを引き上げるときに孔壁から孔底に向かって崩壊物が落下する地層を対象とする場合、掘削したパイロット孔に崩壊物が浸入するのでタイプ (1) のパイロット孔掘削装置は使用できない。一方、タイプ (2) および (3) のパイロット孔掘削装置は、固定した HQ-WL ロッドの中を通してワイヤーラインによって回収される。このため、掘削装置回収に伴う付帯作業によってパイロット孔に崩壊物が落下する可能性は小さい。また、HQ-WL ロッドの中を自由落下させてパイロット孔掘削装置を設置するとともに、同装置の回収をワイヤーラインでおこなうため、パイロット孔掘削にかかる作業時間を大幅に短縮できる。

ノンコアビットを用いるタイプ (1) および (2) の掘削装置を用いると、パイロット孔底にコアが残ることはないので、パイロット孔の長さを比較的容易に管理できる。しかし、ボーリングコアは得られないので、SI セルを設置する位置の岩盤に天然き裂

が含まれているかどうかを判断することは困難である。一方、タイプ(3)の掘削装置を用いると、ダブルコアバーレルに採取されたボーリングコアから、SIセルを設置する位置の天然き裂に関する情報が得られる。このため、天然き裂を含まない岩盤を確実に選定して応力解放試験をおこなうことができる。ただし、パイロット孔底に若干のボーリングコアが残ることがあるので、パイロット孔の長さを厳密に管理する必要がある場合には、再度、ノンコアビットを用いて孔底のコアを切削して除去しなければならない。

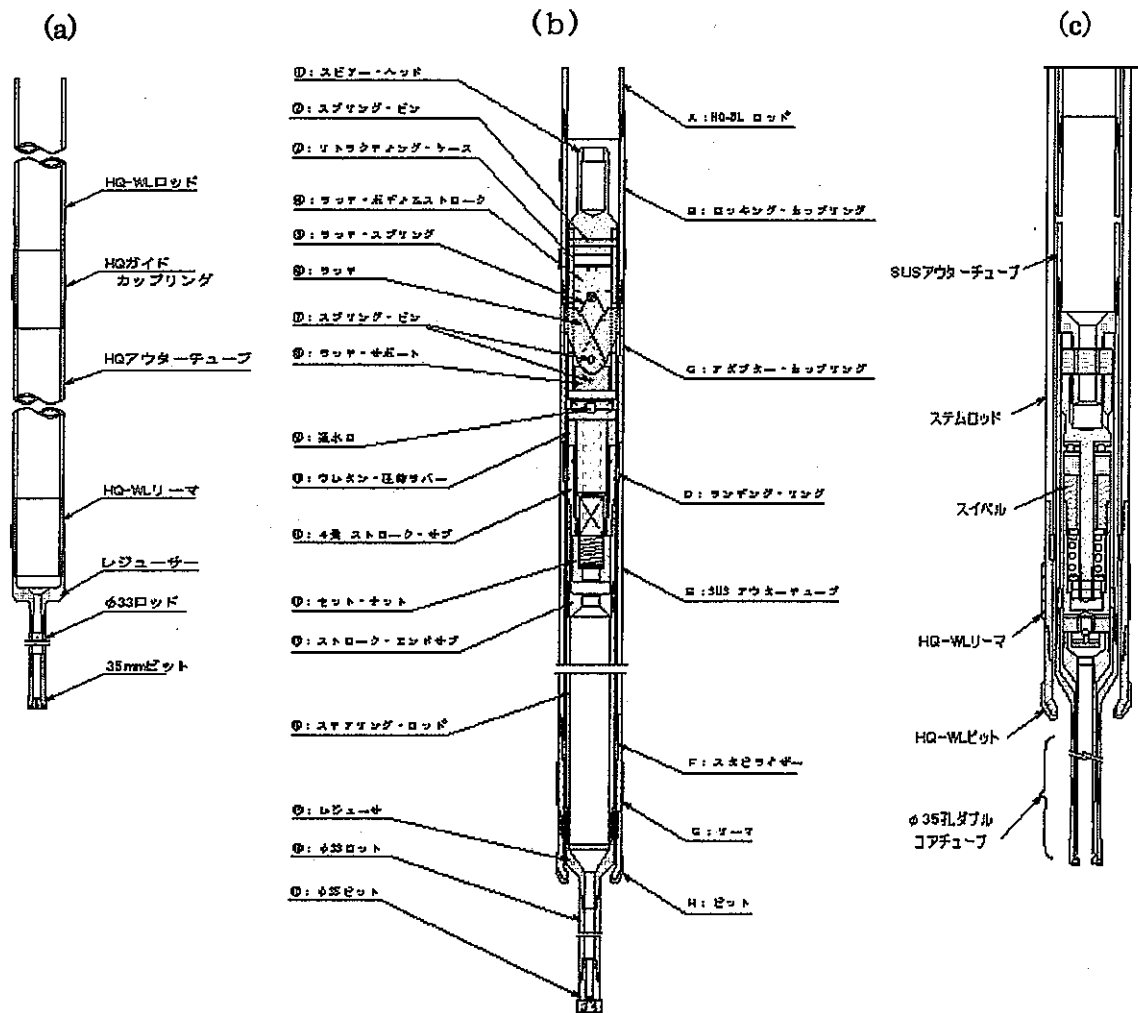


図 5.2 パイロット孔掘削編成図

5. 1. 4 SIセル

初期応力測定に使用したSIセルの仕様は、表5.1に示すとおりである。直径35mmのパイロット孔を対象としたSIセルの直径は30mmとした。なお、SIセルとHQボーリング孔底の距離を離し、SIセルで測定されるひずみにHQボーリング孔底の応力集中が影響を及ぼさないようにするため、SIセルと初期応力測定プローブとの間に長さ120mmの中間継手を介した。

表5.1 SIセルの仕様

マトリックス	材質：ナガセエレクトックス(熱製注型用エポキシ樹脂)
ひずみゲージ	共和電業(株)製ひずみゲージ 120Ω 2線式 (ゲージ長5mm、ベース長10mm)
温度ゲージ	東京測器製温度ゲージ TFL-8 抵抗120Ω
コネクター	ヒロセ電気社製超小型プッシュプルタイプ丸型コネクター 12極
設計概略図 (単位 mm)	

5. 1. 5 グリューカプセル

接着剤(ナガセエレクトックス(熱製注型用エポキシ樹脂))をパイロット孔内まで運搬し、かつSIセルの側面とパイロット孔壁の間隙を充てる機構を有するグリューカプセルとして、図5.3に示すような3つのタイプを製作した。

タイプ(1) 昨年度まで使用してきた従来のCSIRO(Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization, オーストラリア政府の機関)式のグリューカプセルを、直径35mmのパイロット孔に適用できるようにスケールアップしたタイプ。

タイプ(2) 接着剤が孔底に向かって漏れることを防ぐためのシールの信頼性を高めるために、従来の発泡シートのかわりに(1)のグリューカプセルの外周にゴム製のシールを取り付けるとともに、接着剤の容量を増やしたタイプ。

タイプ(3) グリューカプセル内のピストンがパイロット孔の孔底に向かって移動し、グリューカプセルの最下部(パイロット孔の孔底)に位置する孔から接着剤が放出されるタイプ。

ここで、タイプ(1)と(2)のCSIRO式のグリューカプセルは、接着剤の放出孔がSIセルに接近したカプセルの上部に位置する。グリューカプセルをパイロット孔に

挿入し、細いピストンロッドの先端がパイロット孔の孔底に達すると、シリンダー（グリューカプセル）がパイロット孔の孔底に向かって移動し接着剤を放出する。このときグリューカプセルはパイロット孔内部の水を孔口に向かって排除しながら接着剤を放出することになる。このため、SIセルとパイロット孔壁の間隙に排出された接着剤が水とともにHQボーリング孔に向かって吹き上げられる可能性がある。一方、タイプ（3）のグリューカプセルは、接着剤の入ったカプセルがパイロット孔底に到達し、パイロット孔内部の大部分の水が排除された後、パイロット孔底から孔口に向かって接着剤が放出される。したがって、グリューカプセルが適切に設置されればSIセルとパイロット孔壁の間隙の水を接着剤によってほぼ完全に置換することができる。

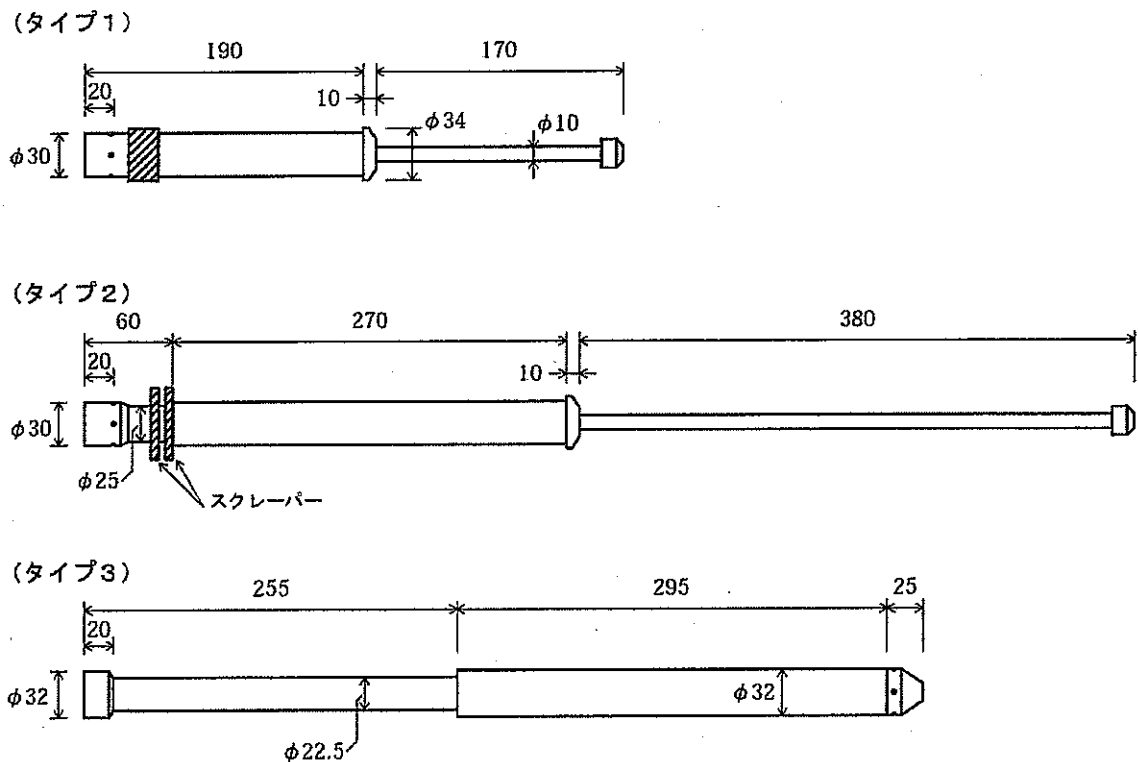


図 5.3 グリューカプセル組立図（材質:アルミニウム, 単位 mm）

5. 1. 6 封圧試験装置

初期応力測定プローブおよびオーバーコアを回収後、オーバーコアの SI セル埋設部分に周圧を載荷し、ひずみ感度試験を実施するための封圧試験装置を製作した。封圧試験装置は、オーバーコアを收容してコアに載荷する周圧を保持するためのアルミ製円筒容器および加圧媒体である油を密閉するエンドキャップから構成される。オーバーコアの表面と封圧容器内壁の間にハンドポンプによって油を満たし、周圧を発生させる。載荷時、高圧の油がオーバーコアに浸透することを防ぐために、コアの表面はあらかじめ熱収縮チューブで被覆する。図 5.4 は、封圧試験における測定系統図である。周圧は封圧容器に設置した圧力変換器によって測定し、SI セルのひずみとともに静ひずみ計を介してパーソナルコンピュータに記録する。

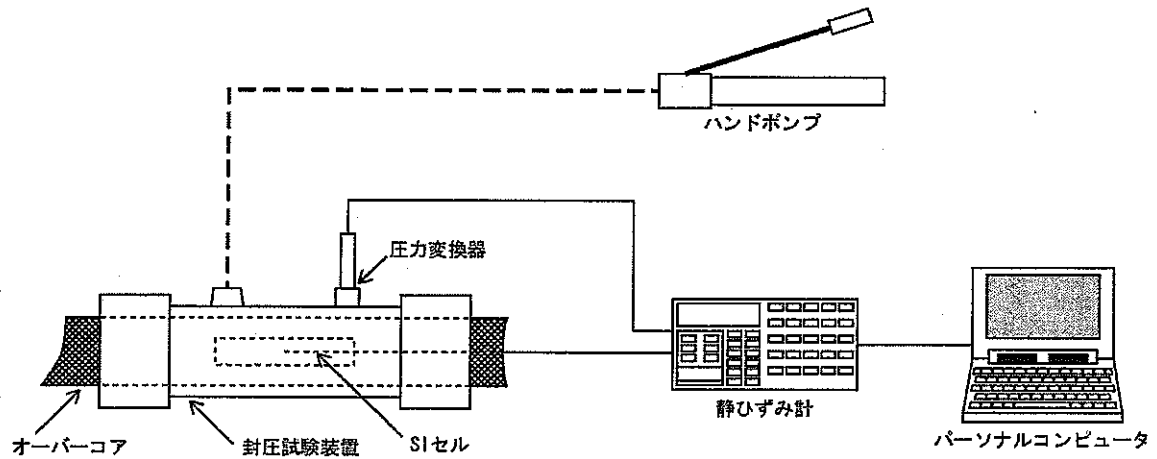


図 5.4 封圧試験測定系統図

5. 2 02SE-04 孔における初期応力測定適用試験

初期応力測定適用試験は、02SE-04 孔の 5 深度で実施した。以下に、応力解放法の試験手順と試験結果について述べる。

5. 2. 1 応力解放法の試験手順

02SE-04 孔における初期応力測定適用試験の手順は、以下に示すとおりである。なお、各深度における試験工程は、第 1 日目がパイロット孔掘削、第 2 日目が孔内洗浄および SI セルの設置、第 3 日および第 4 日が接着剤の硬化養生、第 5 日目がオーバーコアリングおよび初期応力測定プローブとオーバーコアの回収である。

(1) パイロット孔の掘削

所定の深度まで HQ オーバーコアリング孔を掘削した後、パイロット孔掘削ビットによって長さ 600mm 程度のパイロット孔を掘削する。ただし、タイプ (1) のパイロット孔掘削装置を用いる場合、HQ-WL ロッド先端にレジューサーを介してノンコアパイロット孔掘削ビットを接続し、HQ-WL ロッドを継ぎ足しながらボーリング孔底まで降ろす。また、タイプ (2) および (3) のパイロット孔掘削装置を用いる場合、パイロット孔掘削ビットを接続したステアリングロッドは HQ-WL ロッド内を降下し、コアバレルにパイロット孔掘削ビットにセットされる。

(2) 初期応力測定プローブのパラメータの設定

ステンレス製耐圧容器から取り出した初期応力測定プローブを、RS232C ケーブルでパーソナルコンピュータと接続し、適当なターミナルプログラム（例えば Windows のアクセサリにあるターミナルプログラム）を使って以下の項目を設定する。

- ① リアルタイムクロック
- ② サンプリング間隔
- ③ タイマー
- ④ メモリクリア
- ⑤ ステータスチェック

タイマーがスタートしたことを確認してから、初期応力測定プローブをステンレス製耐圧容器に収納する。

(3) アッパーセルリテーナーおよびインナーチューブの組立

まず、中間継手を接続した SI セルと初期応力測定プローブのコネクタとを接続する。次に中間継手を初期応力測定プローブ先端に挿入し、SI セルが脱落しないようにセットボルトで固定する。このとき、SI セルの基準ゲージの方向が初期応力測定プローブに設定した座標軸の方向と一致するようにする。SI セルを装着した初期応力測定プローブをアッパーセルリテーナーに挿入し、アッパーセル固定ナットで固定する。そして、アッパーセルリテーナーをステアリングロッドに挿入し、ステアリングロッドの外側からシャープピンヘッドに M4 のシャープピンをねじ込んで固定する。シャープピンの材質と本数（最大 2 本）は、現場の状況に適合したせん断荷重が得られるように選定する。最後

に、タイプ（１）のプローブ降下・切り離し装置を用いる場合はステアリングロッドをHQ-WL ロッドに接続し、全体をワイヤーで吊り上げた状態で保持する。また、タイプ（２）の装置の場合はステアリングロッドをインナーチューブに接続し、インナーチューブ全体をワイヤーで吊り上げた状態で保持する。

（４） 接着剤の調整

SI セルの外周とパイロット孔壁面との間隙を充填するための接着剤を製作する。まず、アラルダイト CY230 およびハードナーHY965（いずれもナガセエレクトクス^{（株）}製）を、精密天秤（SHIMADZU 製 ELECTRONIC BALANCE TYPE BL-220H 容量 220g、読み取り精度 0.001g）によって計量しながら重量比率 5：1 の割合で混合し、プラスチック容器の中で十分に攪拌する。次に液状のエポキシ樹脂の入ったプラスチック容器を真空ベッセルに入れ、真空ポンプ（^{（株）}大阪空気機械製作所製真空ポンプ MODEL CV-2）でベッセルの中の空気を吸引しながら真空下で 30 分から 60 分間脱泡する。これによってエポキシ樹脂を攪拌したときに混入した気泡を除去する。

（５） インナーチューブの設置

脱泡した接着剤をグリュウカプセルに装てんする。このときエポキシ樹脂の中に空気ができるだけ混入しないように、グリュウカプセルを傾斜させ、液状のエポキシ樹脂がアルミパイプの内壁を静かに伝わって入るようにする。接着剤を装てんしたグリュウカプセルを、ワイヤーで吊り下げた状態の SI セルの先端にねじ込む。タイプ（１）のプローブ運搬・切り離し装置を用いる場合は、HQ-WL ロッドを継ぎ足しながら HQ ボーリング孔底までプローブを降下させる。一方、タイプ（２）の場合は、プローブを収納したステアリングロッドを、ワイヤーラインによって HQ-WL ロッドの中を降下させ、孔底のコアバーレルにセットする。

（６） SI セルの接着

ボーリングロッドを操作しながらステアリングロッドを HQ オーバーコアリング孔底までゆっくりと降下させる。まず、パイロット孔に SI セルが入り、グリュウカプセルの先端がパイロット孔の孔底に到達すると、液状エポキシ樹脂がグリュウカプセルから排出され始め、SI セルとパイロット孔壁の間を充填する。さらにコアチューブを降下させると、アッパーセルリテーナーの先端がオーバーコアリング孔底に接触する。ボーリングロッドを通してステアリングロッドに荷重をかけると、ステアリングロッドとシャーピンヘッドを固定していたシャーピンが切断され、アッパーセルリテーナーはステアリングロッドの中をスライドする。シャーピンを切断した後、抑留事故を避けるために安全な深度までボーリングロッドを引き上げるとアッパーセルリテーナーはステアリングロッドから放出される。このとき上部のセントラライザーが拡張し、プローブはボーリング孔の中心に保持される。この状態で液状のエポキシ樹脂が硬化し、弾性体とみなせるまで約 3 日間以上放置する。

(7) 方位測定

初期応力測定プローブに設定したタイマースタートの時刻になっても、鉄製部品の磁性が初期応力測定プローブの方位計に影響を及ぼさない位置にコアバーレルを保持し、プローブの正しい方位が記録されるまで数分間待機する。

(8) オーバーコアリング

ダイヤモンドビットの先端がオーバーコアリング孔底に達したら、70cm程度オーバーコアリングをおこなう。初期応力測定プローブの測定項目は以下のとおりであり、サンプリング間隔は2秒に設定した。

- ①測定日時, yy/mm/dd hh:mm:ss
- ②ひずみデータ, 8成分のレコーダ A/D 値
- ③温度データ, レコーダ A/D 値
- ④傾斜, X, Y 方向2成分, レコーダ A/D 値
- ⑤地磁気, 地磁気3成分のレコーダ A/D 値

所定の長さのオーバーコアリングが終了したら、コアバーレルを若干引き上げてコアリフターとオーバーコアの摩擦力によってコアを岩盤から切り離す。

(9) 初期応力測定プローブとオーバーコアの回収

ボーリングロッドにオーバーショットを投入しインナーチューブを引き上げ、初期応力測定プローブとオーバーコアが入ったインナーチューブを回収する。インナーチューブ先端のコアリフターを外し、オーバーコアとアッパーセルリテーナーを引き出す。中間継手を固定していたセットボルトを緩め、初期応力測定プローブから中間継手とオーバーコアを切り離す。

(10) 測定データのダウンロード

アッパーセルリテーナーのアッパーセル固定ナットを外し、ステンレス製耐圧容器を取り出す。ステンレス製耐圧容器から初期応力測定プローブ取り出し、測定データをパーソナルコンピュータにダウンロードする。

(11) ひずみ感度試験

初期応力測定プローブおよびオーバーコアを回収後、ただちにひずみ感度試験を実施する。すなわち、オーバーコアのひずみゲージセル埋設部分に周圧を載荷し、周圧とSIセルのひずみとの関係を測定する。

以上に述べたの試験手順のうち、パイロット孔の掘削から初期応力測定プローブの回収までを模式的に示すと図 5.5 のようになる。ただし、ここで示した試験手順は、ワイヤライントイプのプローブ運搬・切り離し装置およびパイロット孔掘削装置を使用したときのものである。

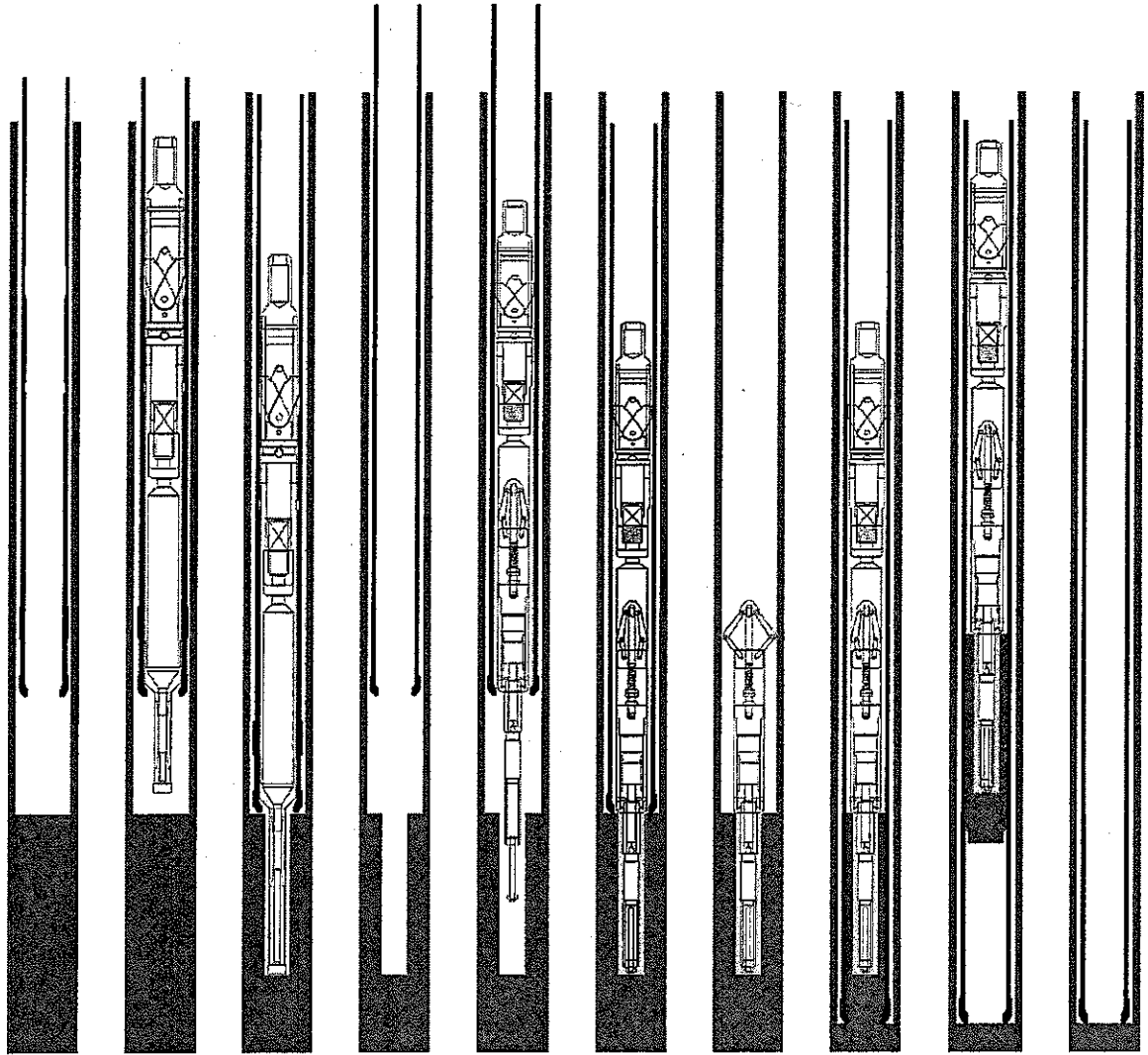


図 5.5 ワイヤラインタイプのプローブ降下・切り離し装置およびパイロット孔掘削装置を使用した応力解放法の試験手順

5. 2. 2 試験結果

02SE-04 孔における応力解放試験は不整合面以下の土岐花崗岩内で5回実施された。それぞれのオーバーコアリング孔底の深度は 122.7m, 142.7m, 157.0m, 173.5m および 192.0m であり、ほぼ 20m 間隔に試験深度を選定した（以下では、応力解放試験の深度をオーバーコアリング孔底の深度で表記する）。

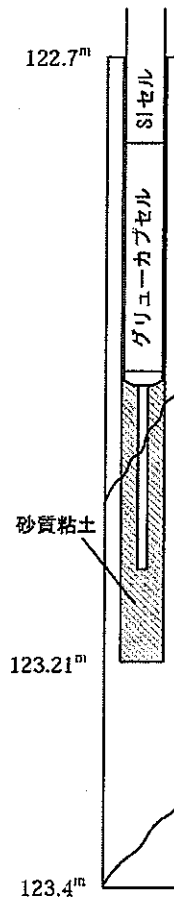
(1) 深度 122.7m における応力解放試験

深度 122.7m の応力解放試験で使用したプローブ降下・切り離し装置、パイロット孔掘削装置およびグリューカプセルは表 5.2 に示すとおりである。ここでは、タイプ (1) のパイロット孔掘削装置によって深さ 51cm のパイロット孔を掘削した。その後、約 30 分掘削水を循環させて孔底を洗浄し、パイロット孔掘削装置を回収するためにすべてのボーリングロッドを揚管した。そして、タイプ (1) のプローブ降下・切り離し装置に装着した SI セルをボーリングロッドによって孔底まで運搬し、SI セルを設置した。このとき、予定深度よりも 20cm 浅い深度でシャープピンが切断した。オーバーコアリングによって回収したオーバーコアの中心には孔軸を一致させたパイロット孔が掘削されていたが、パイロット孔の中間から孔底まで砂質の粘土で充てんされており、タイプ (1) のグリューカプセルの先端はパイロット孔の途中で止まっていた。この砂質の粘土は、ボーリングロッドでプローブを降下させるとき、不整合面よりも上部の堆積層の崩壊物がパイロット孔底に沈積したものであると考えられた。グリューカプセルのピストン先端は孔底に到達しておらず、ほとんどの接着剤はカプセルの中で硬化していた。表 5.2 のスケッチに示すように、オーバーコアの中間と先端部には天然のき裂があって、コアはこれらの天然き裂で分断されていた。

表 5.2 深度 122.7m における応力解放試験

深度	122.7m
パイロット孔掘削装置	タイプ (1)
グリューカプセル	タイプ (1)
プローブ降下・切り離し装置	タイプ (1)

[回収されたオーバーコアのスケッチ]



(2) 深度 142.7m における応力解放試験

深度 142.7m の応力解放試験で使用したプローブ降下・切り離し装置、パイロット孔掘削装置およびグリューカプセルは表 5.3 に示すとおりである。ここでは、タイプ (2) のパイロット孔掘削装置を HQ-WL ロッド中を降下させてコアバーレルにセットし、深さ 50cm のパイロット孔を掘削した。その後、約 30 分掘削水を循環させて孔底を洗浄し、ワイヤーラインによってパイロット孔掘削装置を回収した。次に、タイプ (2) のプローブ降下・切り離し装置に装着した初期応力測定プローブを、ワイヤーラインによって孔底のコアバーレルまで降下させ、SI セルをパイロット孔に挿入・接着した。オーバーコアリングによって回収されたオーバーコアのスケッチは表 5.3 に示すとおりである。パイロット孔の約 1/3 に粘土が充てんしており、それよりも上部のパイロット孔の壁面にも粘土が付着していた。タイプ (1) のグリューカプセルのピストンは完全に収縮していたが、放出された接着剤はパイロット孔の中にほとんど残っていなかった。オーバーコアの下部と先端部には天然のき裂があって、コアはこれらの天然き裂で分断されていた。

表 5.3 深度 142.7m における応力解放試験

深度	142.7m
パイロット孔掘削装置	タイプ (2)
グリューカプセル	タイプ (1)
プローブ降下・切り離し装置	タイプ (2)
[回収されたオーバーコアのスケッチ]	

(3) 深度 157.0m における応力解放試験

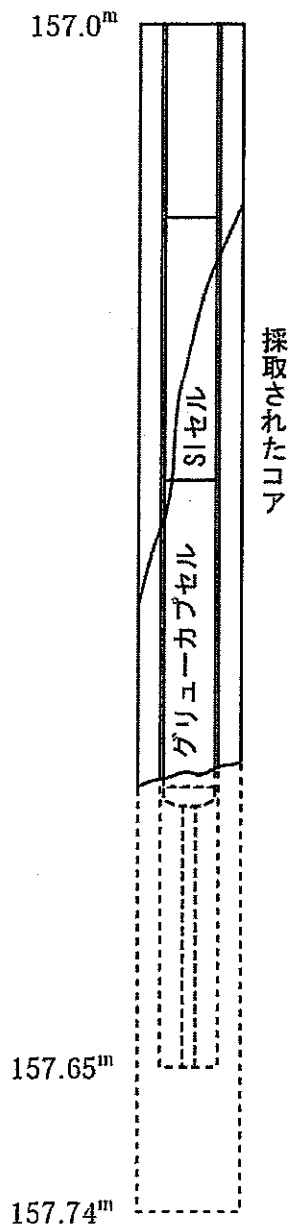
深度 157.0m の応力解放試験で使用したプローブ降下・切り離し装置、パイロット孔掘削装置およびグリューカプセルは表 5.4 に示すとおりである。ここでは、タイプ (2) のパイロット孔掘削装置を HQ-WL ロッド中を降下させてコアバーレルにセットし、深さ 65cm のパイロット孔を掘削した。パイロット孔をこれまでよりも長くした理由は、パイロット孔に入る可能性がある粘土質の崩壊物を、SI セル接着部分よりも下部に堆積させるためである。さらに、パイロット孔内部の堆積物の量をできるだけ少なくするため、約 3 時間清水を循環させて洗浄を行った後、タイプ (2) のプローブ降下・切り離し装置に装着した初期応力測定プローブをワイヤーラインによって孔底のコアバーレルまで運搬し、SI セルをパイロット孔に挿入・接着した。なお、このとき用いたタイプ (1) のグリューカプセルは、パイロット孔の延長に伴ってピストンロッドを長くするとともに、接着剤の漏れを防ぐために発泡シートを 2 段にした。

オーバーコアリングによって回収されたコアのスケッチは表 5.4 に示すとおりである。パイロット孔の内部はほぼ完全に洗浄されており、堆積物はなかった。グリューカプセルのピストンは完全に収縮していたが、放出された接着剤は中間継手からグリューカプセルの先端までの全体にわたって付着し、発泡シートによるシールの信頼性は低いことが認められた。オーバーコアには、SI セル接着位置と交差する天然の開口き裂があった。感度試験を実施したが、SI セルとパイロット孔との接着が不完全であったため、周圧とひずみの関係に関するデータを取得することはできなかった。

表 5.4 深度 157.0m における応力解放試験

深度	157.0m
パイロット孔掘削装置	タイプ (2)
グリューカプセル	タイプ (1)
プローブ運搬・切り離し装置	タイプ (2)

[回収されたオーバーコアのスケッチ]



(4) 深度 173.5m における応力解放試験

ここでは、発泡シートの接着剤シール機構の信頼性が高くなかったことに鑑み、シール材として機械的強度のより大きいゴムシートを装着したタイプ(2)のグリュウカプセルを製作した。そして、このカプセルを用いた室内試験をおこなった。その結果、ピストンロッドが孔底に到達すると接着剤が排出され始めるが、同時にシリンダーの移動によって排除された水が孔口に向かって流動するので、接着剤を吹き上げてしまうことが明らかになった。また、シール材の強度を高めても、シールよりも下部に封じ込められたパイロット孔の水圧が高まり、ついには高圧の水がシールと孔壁の間を吹き上がって接着剤と混合することが認められた。以上のことから、カプセル上部から接着剤を排出するCSIROタイプのグリュウカプセルは、原理的に大深度応力解放の適用に問題があることが判明した。そこで、接着剤と孔内水が混じるという問題を回避するために、タイプ(3)のグリュウカプセルを適用した。

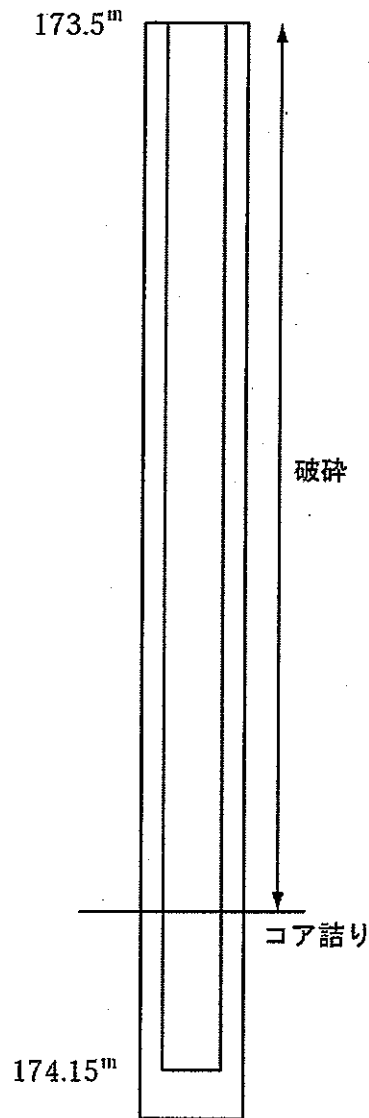
深度 173.5m の応力解放試験で使用したプローブ降下・切り離し装置、パイロット孔掘削装置およびグリュウカプセルは表 5.5 に示すとおりである。ここでは、タイプ(2)のパイロット孔掘削装置をHQ-WL ロッド中を降下させてコアバーレルにセットし、深さ 65cm のパイロット孔を掘削した。その後、約 3 時間清水を循環させて孔底を洗浄し、ワイヤーラインによって掘削装置を回収した。次に、タイプ(2)のプローブ降下・切り離し装置に装着した初期応力測定プローブを、ワイヤーラインによって孔底のコアバーレルまで降下させ、SI セルをパイロット孔に挿入・接着した。接着剤の養生の後、オーバーコアリングのためにコアバーレルを降下させたが、HQ ボーリング孔底から 40cm 上部でコアバーレルがロッドの自重だけで降りなくなった。このためロッドをゆっくりと回転させながら HQ ボーリング孔底までビットを降ろした。オーバーコアリングを 55cm 掘削したところでコア詰まりが発生したため、応力解放試験を中断した。

表 5.5 のスケッチに示すように、回収されたオーバーコアは天然き裂のために細かく破砕され、コアの形状をとどめていなかった。SI セルは粉碎されて洗い流されていた。グリュウカプセルの上部は HQ-WL ビットによって切削され、中央部分で曲がっていた。プローブに記録されていたひずみデータは、オーバーコアリングの以前に SI セルが折損し断線していたことを示していた。以上のことから、SI セルとグリュウカプセルはいったんパイロット孔に入ったものの、シャープピンが切断した後、ステアリングロッドの中に引っかかったアッパーセルリテーナーとともにある高さまで引き上げられ、その後、ステアリングロッドの中をスライドして HQ ボーリング孔底に落下し、折損したものと予想された。

表 5.5 深度 173.5m における応力解放試験

深度	173.5m
パイロット孔掘削装置	タイプ (2)
グリューカプセル	タイプ (3)
プローブ運搬・切り離し装置	タイプ (2)

[回収されたオーバーコアのスケッチ]



(5) 深度 192.0m における応力解放試験

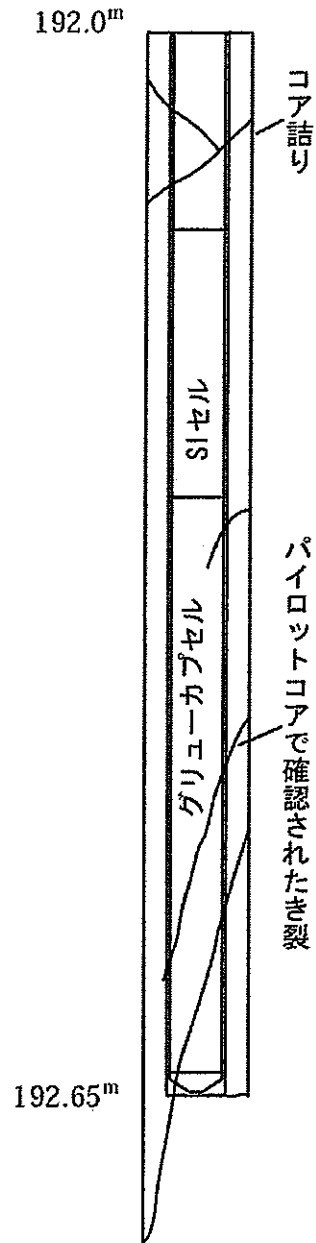
これまで述べた 4 回の応力解放試験では、採取されたオーバーコアはすべて天然のき裂によって分断され、長い棒状のコアは得られていなかった。このことは、仮に初期応力測定プローブと試験のための付帯装置がすべて正常に作動していたとしても、岩盤を連続した線形等方弾性体と仮定している応力解放法では初期応力状態を評価できなかったことを意味する。そこで、深度 192.0m における応力解放試験では、SI セル設置に先立ってオーバーコアとなる岩盤にどのように天然き裂が分布しているかを調査することを目的として、コアリングが可能なタイプ (3) のパイロット孔掘削装置を用いた。本試験で用いた付帯装置などは表 5.6 に示すとおりである。

まず、タイプ (3) のパイロット孔掘削装置を HQ-WL ロッドに投入してセットし、深さ 65cm のパイロット孔を掘削した。採取されたボーリングコアは、機械的な衝撃や振動によって長さ 2cm~6cm に短く分離していたが、SI セル接着予定位置よりも下部の孔底に近い部分のみに天然き裂が認められた。このことから、き裂を含まない岩盤に SI セルを接着することが可能であると判断された。次に、タイプ (2) のノンコアビットを装着した掘削装置によって、パイロット孔底に残ったコアを粉碎し排除した。ボーリング孔内の水を清水に置換した後、タイプ (2) のプローブ降下・切り離し装置を用い、タイプ (3) のグリューカプセルを装着した SI セルを設置した。設置後 3 日目に応力解放試験を開始したところ、10cm 掘り進んだところでコア詰まりが発生した。回収したインナーチューブには、初期応力測定プローブと長さ 10cm のオーバーコアが捕獲されていたが、中間継手よりも下部の SI セルとグリューカプセルはパイロット孔の中に残されたままであった。再度ボーリングをおこなって回収したオーバーコアのスケッチは表 5.6 のようである。SI セルはほぼき裂を含まない部分に設置され、パイロット孔のボーリングコア先端部で確認されていた天然き裂はオーバーコアにも見いだされた。ただ、パイロット孔の孔口近くにおいてコア詰まりの原因となった天然き裂は、パイロット孔から得られたボーリングコアからは検出できなかった。

表 5.6 深度 192.0m における応力解放試験

深度	192.0m
パイロット孔掘削装置	タイプ (3)
グリューカプセル	タイプ (3)
プローブ運搬・切り離し装置	タイプ (2)

[回収されたオーバーコアのスケッチ]



5. 2. 3 接着剤の充填状態

SI セルとパイロット孔の間に充填された接着剤の充填状態を調査するために、深度 192.0m から採取されたオーバーコアを、コア軸を含む平面に沿って 2 つに分割した。2 分割したオーバーコアの切断面は図 5.6 に示すとおりである。ここで、図のパイロット孔の右側（孔底側）がグリュウカプセルの一部、左側（孔口側）が中間継手で切断した SI セルである。まず、この切断面を概観すると、SI セルが接着された部分には天然き裂が存在せず、パイロット孔のコアボーリングによって検出されていた孔底付近のき裂は予想どおりに避けられている。ただし、パイロット孔軸とオーバーコアの孔軸は完全に一致しておらず、パイロット孔はオーバーコアボーリング孔軸からそれていることが認められた。この結果は、このような偏芯を防ぐためにパイロット孔の掘削方法に改善の余地があることを示している。

次に、接着剤の充填状態をみると、タイプ 3 のグリュウカプセルから放出された接着剤は SI セルとパイロット孔の間隙を充填し、かつ中間継手まで到達している。このことから、タイプ 3 のグリュウカプセルの充填機構は、従来の CSIRO タイプのグリュウカプセルの問題点を解決するとともに、大深度ボーリング孔底においてほぼ予想どおりに機能したといえる。ただし、SI セルとパイロット孔壁の間の一部に空隙がみられる。さらに、中間継手に近い位置（左側）の接着剤は、一部が白色を呈していることから、孔口側（左側）の接着剤は水と混じり合ったと考えられる。また、SI セルの中心軸はパイロット孔の中心軸から偏芯しており、SI セルの設置方法にも改善の余地があることが判明した。

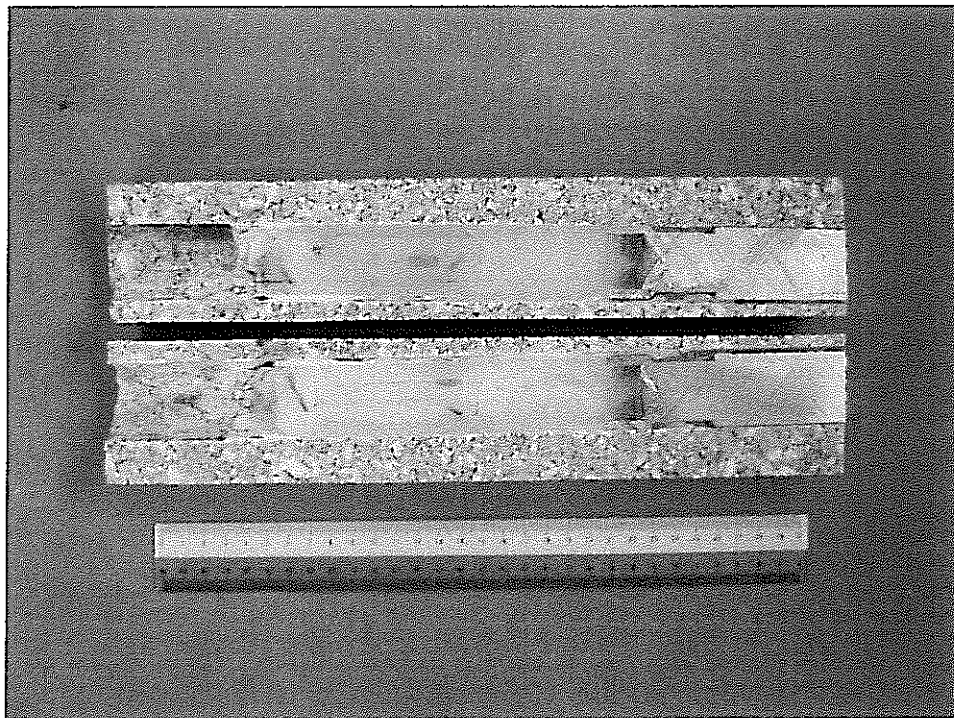


図 5.6 深度 192.0m から採取されたオーバーコアの切断面

5. 3 繰り返し載荷試験による岩石および接着剤の力学特性評価

応力解放法による初期応力測定において、岩石と接着剤の弾性率を正しく評価することは、原位置における解放ひずみを精度良く測定することと同様に、きわめて重要である。なぜならば、水圧破碎法などの応力を直接に測定する方法と異なり、応力解放法では応力の解放にともなうひずみを計測するので、算定される初期応力の精度はヤング率、ポアソン比などの弾性率の正確な情報に大きく依存するからである。

ここでは、02SE-04 孔から採取したボーリングコアおよび接着剤を用いた繰り返し一軸載荷試験をおこない、それぞれのヤング率とポアソン比を評価した。なお、採取深度によってボーリングコアの力学特性も変化することが考えられたので、繰り返し載荷試験に用いたボーリングコアは、オーバーコアリングを行なった深度のできるだけ近傍から採取した。また、接着剤は SI セルのボディーと同一の樹脂であるが、調合した後の時間、温度および養生条件に依存して弾性率が変化することが明らかになっている^[1]。そこで、まず、接着剤を調合した後、異なる温度条件下で 24 時間硬化させた。次に、孔内水温と同一の温度に設定した恒温槽の中で、48 時間、72 時間、96 時間、120 時間および 144 時間硬化させ、各経過時間における試験片を用いて繰り返し載荷試験をおこない、弾性率の時間依存性と初期の養生条件が弾性率に及ぼす影響を調査した。

5. 3. 1 試験装置

繰り返し一軸載荷試験の測定システムは、図 5.7 に示すとおりである。載荷装置はサーボ・コントロール式材料試験機 (MTS 社製 : 315 型) である。荷重は試験機内蔵のロード・セル (MTS 社製 : Model661.31F-01) によって測定し、岩石試験片および接着剤から製作した試験片の軸ひずみと横ひずみは、円柱型試験片の側面に 180° 間隔に接着した 2 枚の 2 軸直交ひずみゲージ (ゲージ長 10mm) あるいは 4 枚の単軸ゲージで検出した。ひずみゲージで測定したデータは動ひずみ計 (共和電業社製 : DPM 712A) を介して、また、ロード・セルおよび周変位計で測定したデータは直接、デジタルコントローラを介してパーソナルコンピュータに記録した。

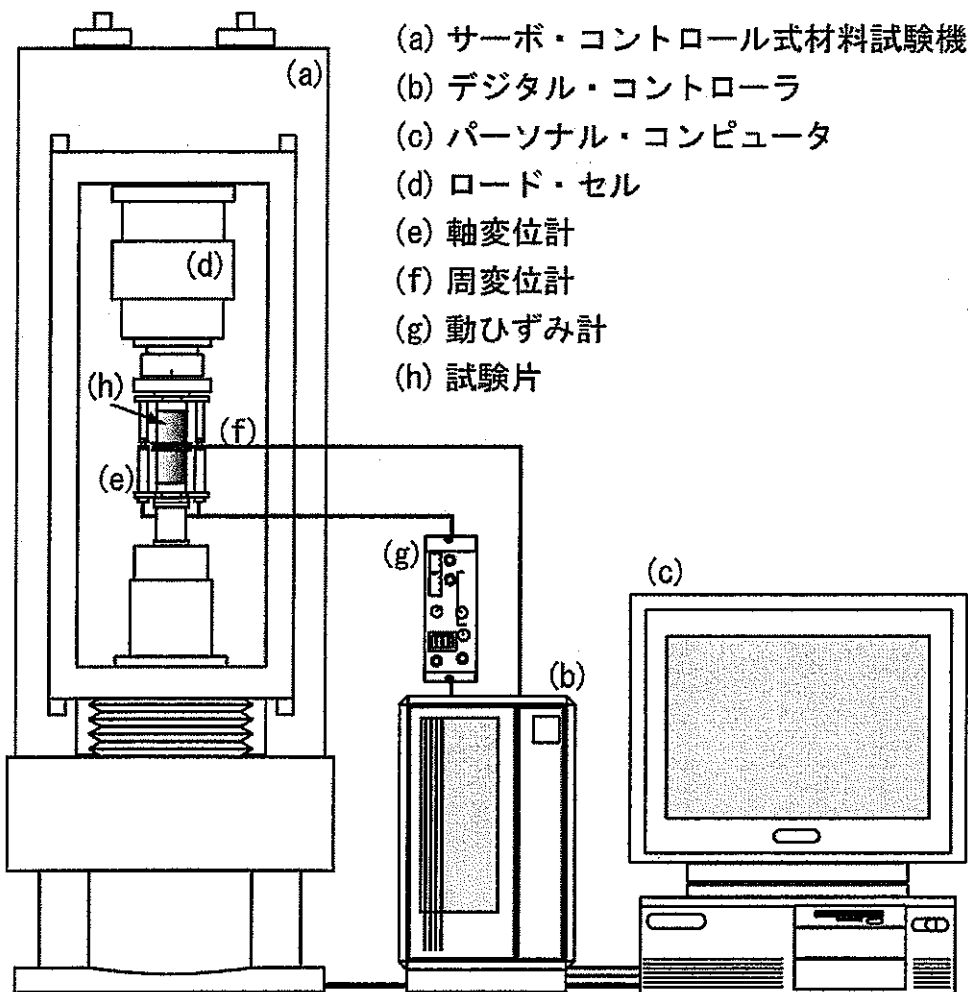


図 5.7 繰り返し一軸載荷試験における試験装置および測定系統

5. 3. 2 試験方法

ボーリングコアから試験片を製作するときは、送付された 02SE-04 孔の HQ ボーリングコアをその長軸と垂直に切断し、両端面を平面研削盤によって平行度 1/20mm 以下に成形した。成形後、室内で一昼夜自然乾燥させ、ひずみゲージを接着し、試験に供した。岩石試験片の個数は全部で5個であり、採取深度、直径、長さおよび重量は表 5.7 に示すとおりである。ただし、岩石試験片 A および C は、風化が比較的進んでいたためにボーリングコアの表面は滑らかでなかった。このため、まずひずみゲージを貼り付ける位置に 2 液混合型ポリエステル系接着剤 (PC-12、共和電業製) を塗布し、表面の凹凸を充てんした後に研磨してひずみゲージを接着した。また、岩石試験片 D は、ボーリングコアの中央にき裂が生じていたために、ボーリングコアを再度コアリングして、直径 33.6mm の試験片を製作した。図 5.8 から図 5.12 は、成形後の岩石試験片である。

一方、接着剤からは、調合後 24 時間までの養生条件を変えた 2 種類の試験片を製作した。すなわち、剥離剤を塗布した内径 30mm のアクリルパイプに、5.2.1(4)と同様の要領で混合脱泡したエポキシ樹脂を流し込み、ひとつの試験片は約 20℃の室内で、もうひとつの試験片は約 18℃の水中で 24 時間養生した。以下、前者を樹脂試験片 A、後者を樹脂試験片 B と呼ぶ。24 時間後、硬化した接着剤をアクリルパイプから取り出し、ボーリングコアと同一の要領で端面成形した。接着剤は時間の経過に伴って硬化が進行するので、端面成形した試験片はひずみゲージ貼付後、すぐに試験に供した。第 1 回目の繰り返し載荷試験終了後、試験片を 02SE-04 孔の孔内水温とほぼ等しいと考えられる 18℃に設定した恒温槽に保管し、24 時間間隔に 6 日間、同様の試験を繰り返した。表 5.8 は接着剤から成形した試験片の寸法である。図 5.13 は樹脂試験片 A と B である。

岩石の繰り返し載荷試験における載荷および除荷の速度は 3.75MPa/min とし、15MPa の最大応力まで載荷した後、ほぼ 0MPa まで除荷した。この最大応力は、02SE-04 孔の深度 200m 付近における最大水平応力とほぼ等しいと予想された大きさである。一方、接着剤から製作した試験片の繰り返し載荷試験では、最大応力を 4MPa に設定した。本試験では、いずれの試験片においても載荷・除荷の過程を 5 回繰り返した。

表 5.7 岩石試験片の湿潤状態における寸法および重量

試験片	採取深度(m)	直径(mm)	長さ(mm)	重量(g)
A	123.42~123.80	63.40	160.80	1280
B	142.00~142.47	61.20	157.10	1180
C	157.50~158.00	63.40	154.75	1260
D	172.00~172.30	33.60	75.10	171.31
E	194.00~194.30	63.15	158.35	1300



图 5.8 岩石試驗片 A

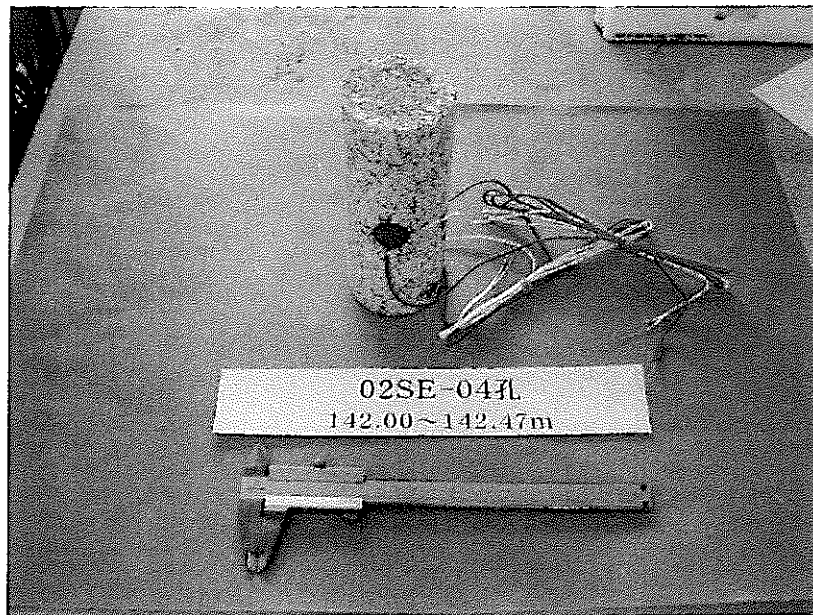


图 5.9 岩石試驗片 B



图 5.10 岩石試驗片 C

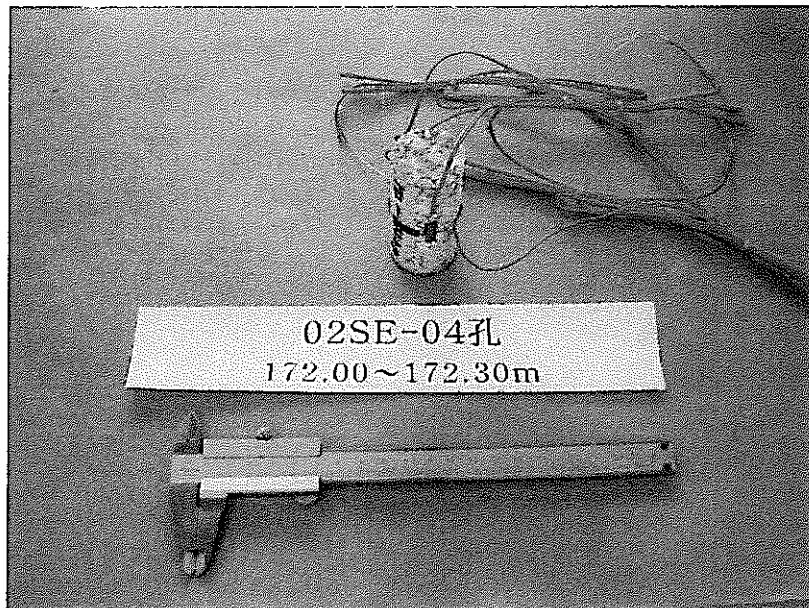


图 5.11 岩石試驗片 D

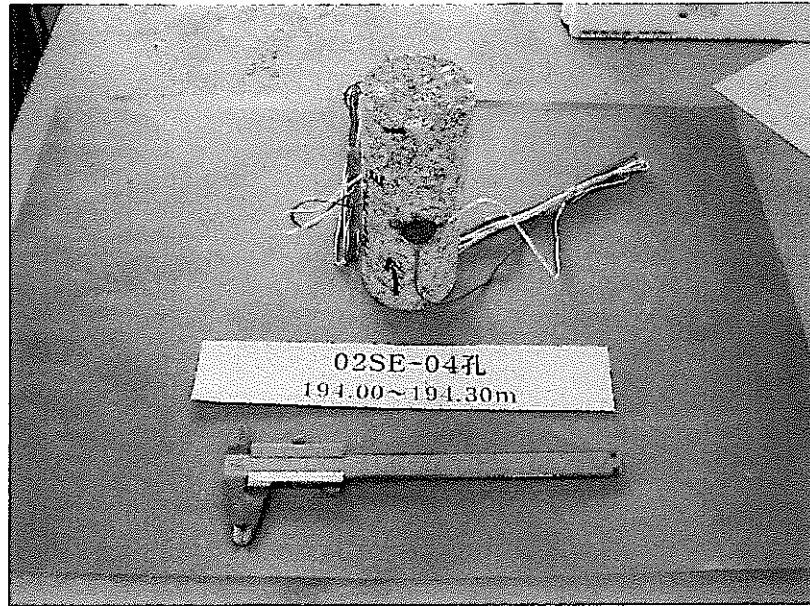


図 5.12 岩石試験片 E

表 5.8 接着剤試験片の寸法

試験片	直径(mm)	長さ(mm)	備 考
樹脂試験片 A	29.40	59.80	最初の 24 時間を室内で養生
樹脂試験片 B	29.80	59.10	最初の 24 時間を約 18℃の水中で養生

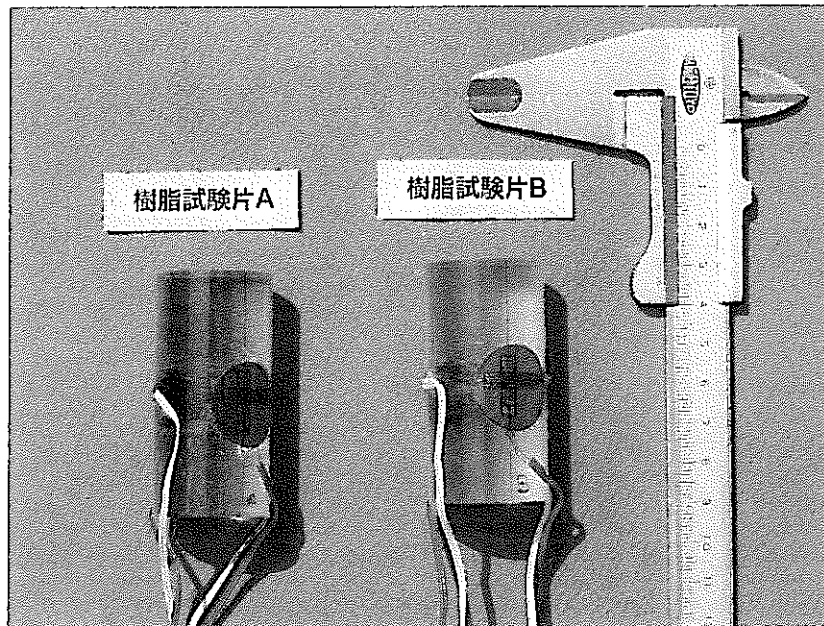


図 5.13 樹脂試験片 A および B

5. 3. 3 試験結果

(1) 岩石試験片

a. 岩石試験片の応力-ひずみ曲線

繰り返し载荷試験における応力-ひずみ曲線は、図 5.14 から図 5.18 のとおりである。ここで、グラフの右上には試験片名を表すアルファベット記号と試験片の採取深度が示されている。このアルファベット記号は表 5.7 に記載された試験片と対応する。応力-ひずみ曲線において圧縮応力および縮みひずみは正である。体積ひずみ ε_v は、計測された軸ひずみ ε_y と横ひずみ ε_x から次式を用いて算出した。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_y + 2 \varepsilon_x \quad (5.1)$$

以下に、各岩石試験片の応力-ひずみ曲線について述べる。図 5.14 の岩石試験片 A の応力-ひずみ曲線は、第 1 回目の载荷において応力が 2~3MPa に達するまでに軸ひずみは著しく増大し、除荷後の残留ひずみも 1890 μ ひずみと大きい。これは、試験片内部の空隙が閉塞するときの典型的な圧密曲線と考えられる。また、応力が 5MPa 付近に達すると体積ひずみは圧縮から膨張側に反転し、15MPa に近づくと急増する。しかも、载荷を繰り返すごとに体積ひずみは膨張側に増大する。このことから、岩石試験片 A の一軸圧縮強度は 15MPa よりもわずかに大きく、繰り返し载荷によって徐々に破壊が進行していくものと考えられる。このことより、採取深度の最も浅い岩石試験片 A は著しく風化しており、軟岩に近い変形挙動を示したものと考えられる。

図 5.15 は岩石試験片 B の応力-ひずみ曲線である。第 1 回目の载荷における低応力下での軸ひずみの増加量は、岩石試験片 A と比較するとそれほど大きくない。しかし、除荷後の残留ひずみは極めて大きい。また、横ひずみは 4MPa 付近から急増し始め、除荷後もほとんど回復しない。この応力-ひずみ曲線が正しいとすると、横ひずみの挙動およびその残留ひずみの量から、この岩石試験片はき裂あるいは破壊が試験片全体に広がりやすく、土のような塑性体の挙動を示しているといえる。ただし、本载荷試験では、試験片のひずみ測定をその表面に接着したひずみゲージによっておこなったので、応力-ひずみ曲線にひずみゲージ接着位置の局所的なひずみ挙動が現れている可能性もあると考えられる。

図 5.16 は岩石試験片 C の応力-ひずみ曲線である。1 回目の载荷において、応力が 3~4MPa に達するまでに軸ひずみは大きく増大し、除荷後の残留ひずみも大きい。これは、岩石試験片 A と同様に、空隙が閉塞するときの典型的な圧密曲線である。ただし、岩石試験片 A と比較すると残留ひずみは小さく、体積ひずみは 10MPa 付近で圧縮から膨張側に反転し、载荷を繰り返すごとに膨張側に増大する。すなわち、この試料は 15MPa の繰り返し载荷によって、徐々に破壊が進行していると考えられる。

図 5.17 は岩石試験片 D の応力-ひずみ曲線である。この試験片の応力-ひずみ曲線は岩石試験片 C と類似しているが、体積ひずみは载荷を繰り返すごとに圧縮側に増大する。すなわち、この岩石試験片は 15MPa の载荷では破壊せず、強度は岩石試験片 C

よりも大きいといえる。

図 5.18 は採取深度の最も深い岩石試験片 E の応力-ひずみ曲線である。2 回目以降の荷重で生じた残留ひずみは 10μ ひずみよりも小さく、2 回目以降の荷重と除荷における変形挙動は極めて弾性的である。このことから、岩石試験片 E は 5 つの岩石試験片のうちで最も新鮮な花崗岩であるといえる。

b. 岩石試験片の弾性率

繰り返し荷重試験の結果をまとめると表 5.9 のとおりである。ここで、ヤング率およびポアソン比は、オーバーコアリングによる応力解放を模擬するために第 1 回目の除荷過程における応力-ひずみ曲線から求めた。これは、荷重が反復されるにつれて試験片 A, B および C で破壊が進行する変形挙動がみられたからである。第 1 回目の除荷過程の応力-ひずみ曲線のうち、最大応力 (15MPa) の 50%における応力 (7.5MPa) の $\pm 5\%$ ($\pm 0.75\text{MPa}$) の区間における軸ひずみから最小 2 乗法によって直線の傾きを求め、これを除荷時のヤング率とした。また同様に、同区間での横ひずみから同様にして直線の傾きを求め、軸ひずみの傾きを横ひずみの傾きで除した値を除荷時のポアソン比とした。

表 5.9 をみると、全体として採取深度が深くなるにつれてヤング率は急激に大きくなる傾向が認められる。また、ポアソン比は採取深度が深くなるにつれて小さくなり、大気中で軸方向に荷重される試験片の、横方向への変形性は小さくなる。ただし、第 1 回目の荷重によって岩石試験片の空隙が閉塞し、除荷後に比較的大きな残留ひずみが生じるとともに、2 回目以降の繰り返し荷重によって徐々に破壊が進行する試験片 A, B, C などは塑性体としての変形挙動を示していることから、このような岩石の応力-ひずみ曲線の傾きを弾性論のヤング率として扱うことには問題があるように思われる。

表 5.9 岩石の除荷時のヤング率とポアソン比

試験片	採取深度(m)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
A	123.42~123.80	7.03	0.34
B	142.00~142.47	6.92	0.47
C	157.50~158.00	15.34	0.33
D	172.00~172.30	22.53	0.25
E	194.00~194.30	58.99	0.16

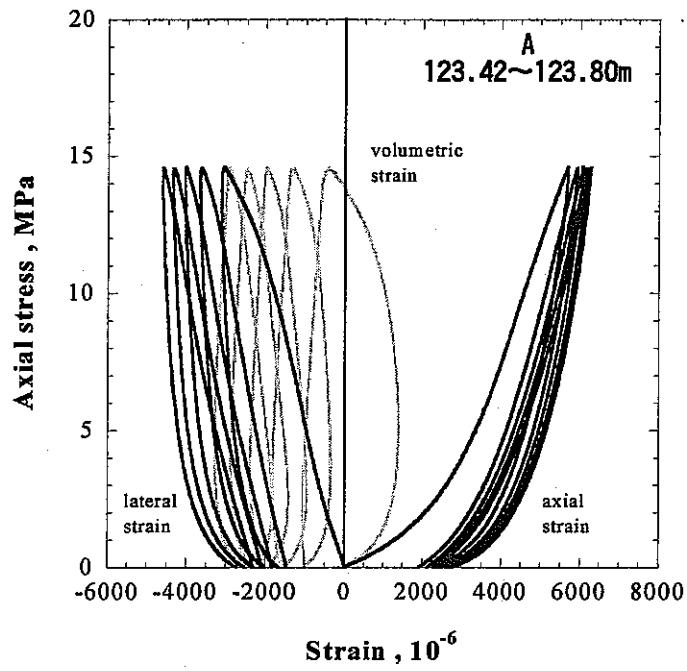


図 5.14 岩石試験片 A の応力-ひずみ曲線

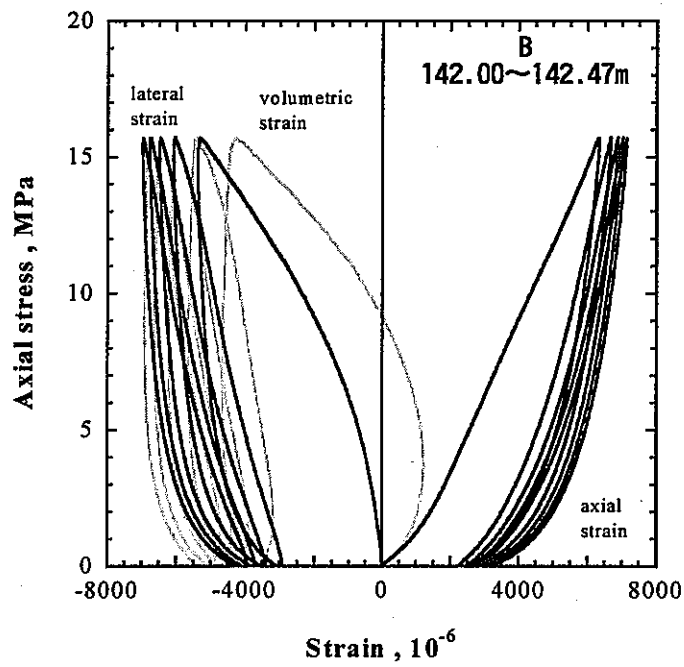


図 5.15 岩石試験片 B の応力-ひずみ曲線

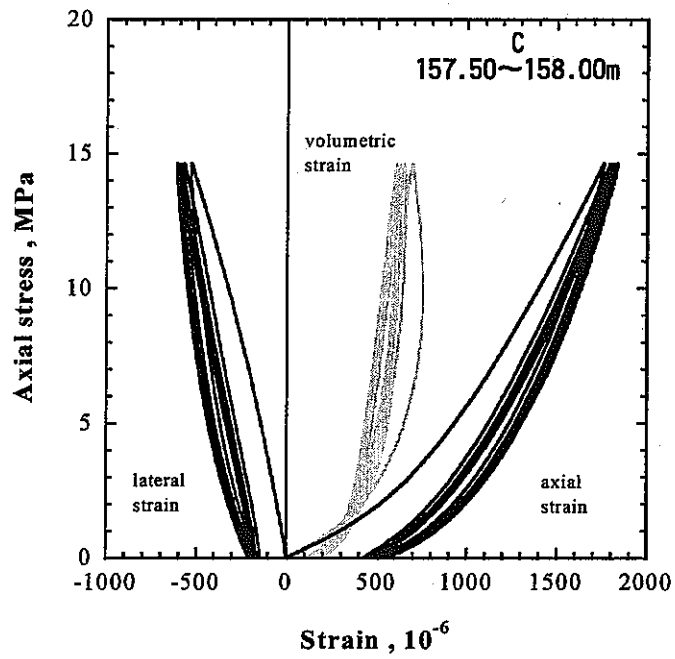


図 5.16 岩石試験片 C の応力-ひずみ曲線

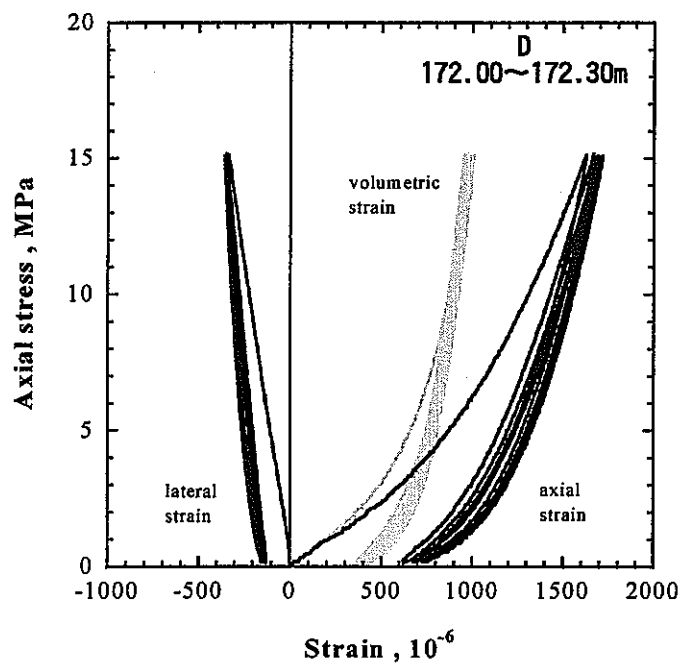


図 5.17 岩石試験片 D の応力-ひずみ曲線

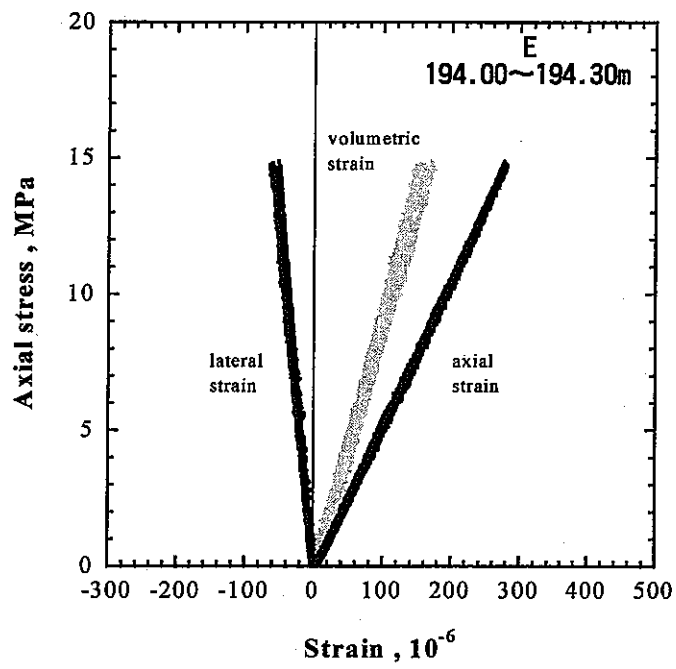


図 5.18 岩石試験片 E の応力-ひずみ曲線

(2) 接着剤

a. 接着剤の応力-ひずみ曲線

硬化開始後 24 時間毎の繰り返し載荷試験における樹脂試験片 A および B の応力-ひずみ曲線は図 5.19 および図 5.20 のとおりである。ここで、樹脂試験片 A は最初の 24 時間を約 20℃の室内で、樹脂試験片 B は最初の 24 時間を約 18℃の水中でそれぞれ硬化させ、それ以降はいずれも 18℃の温度に設定した恒温槽で養生した。

まず、図 5.19 の樹脂試験片 A の応力-ひずみ曲線をみると、24 時間後の応力-ひずみ曲線は第 1 回目の載荷によって 100 μ ひずみ程度の残留ひずみが生じるものの、全体的な変形挙動はほぼ線形である。24 時間以降の載荷試験における応力-ひずみ曲線も殆ど同様の線形な挙動を示すことから、樹脂試験片 A は調合後 24 時間で低粘性体から弾性体へと変化したといえる。

次に、図 5.20 の樹脂試験片 B の応力-ひずみ曲線をみると、24 時間後の応力-ひずみ曲線は体積ひずみがきわめて小さいことが読み取れる。すなわち、一軸圧縮による試験片の体積変化は殆どなく、軸方向に変形した分だけ横方向に変形し、しかもその変形は殆ど回復していない。これは、あたかも粘土のような塑性体の変形挙動である。しかし、時間の経過とともに樹脂は硬化し、72 時間以降の繰り返し載荷における応力-ひずみ曲線はいずれも殆ど線形であって除荷時に生じる残留ひずみは小さい。しかも、体積ひずみは小さく、軸方向に変形した分だけ横方向に変形し、その変形は殆ど完全に回復している。これは、あたかもゴムのような完全弾性体の変形挙動である。このことから、樹脂試験片 B が低粘性体から弾性体に変化するまで、調合後 72 時間を要したといえる。

b. 接着剤の弾性率

樹脂試験片、すなわち接着剤の繰り返し載荷試験の結果をまとめると表 5.10 のようである。除荷時のヤング率およびポアソン比は岩石試験片の場合と同一の手法によって求めた。ここで、樹脂試験片 B の 24 時間および 48 時間後のヤング率が見かけ上大きいのは、除荷時の応力-ひずみ曲線の傾きが急であることによるが、これは圧縮時の変形がわずかしか回復しないという塑性体としての変形挙動による。したがって、これらの硬化段階における接着剤の弾性率は暫定的な数値であるとみるべきである。

図 5.21 は、接着剤のヤング率およびポアソン比と調合後の日数の関係である。樹脂試験片 A と B は、いずれもアラルダイト CY230 とハードナー HY965 を重量比率 5 : 1 の割合で混合して製作したが、この図は調合後 72 時間までの弾性率が接着剤の温度によって大きく変化することを示している。72 時間以降は、いずれの試験片の弾性率もほぼ一定となることから、この図からもパイロット孔で放出された接着剤が弾性体に変化するまでに、調合後少なくとも 3 日を要することがわかる。

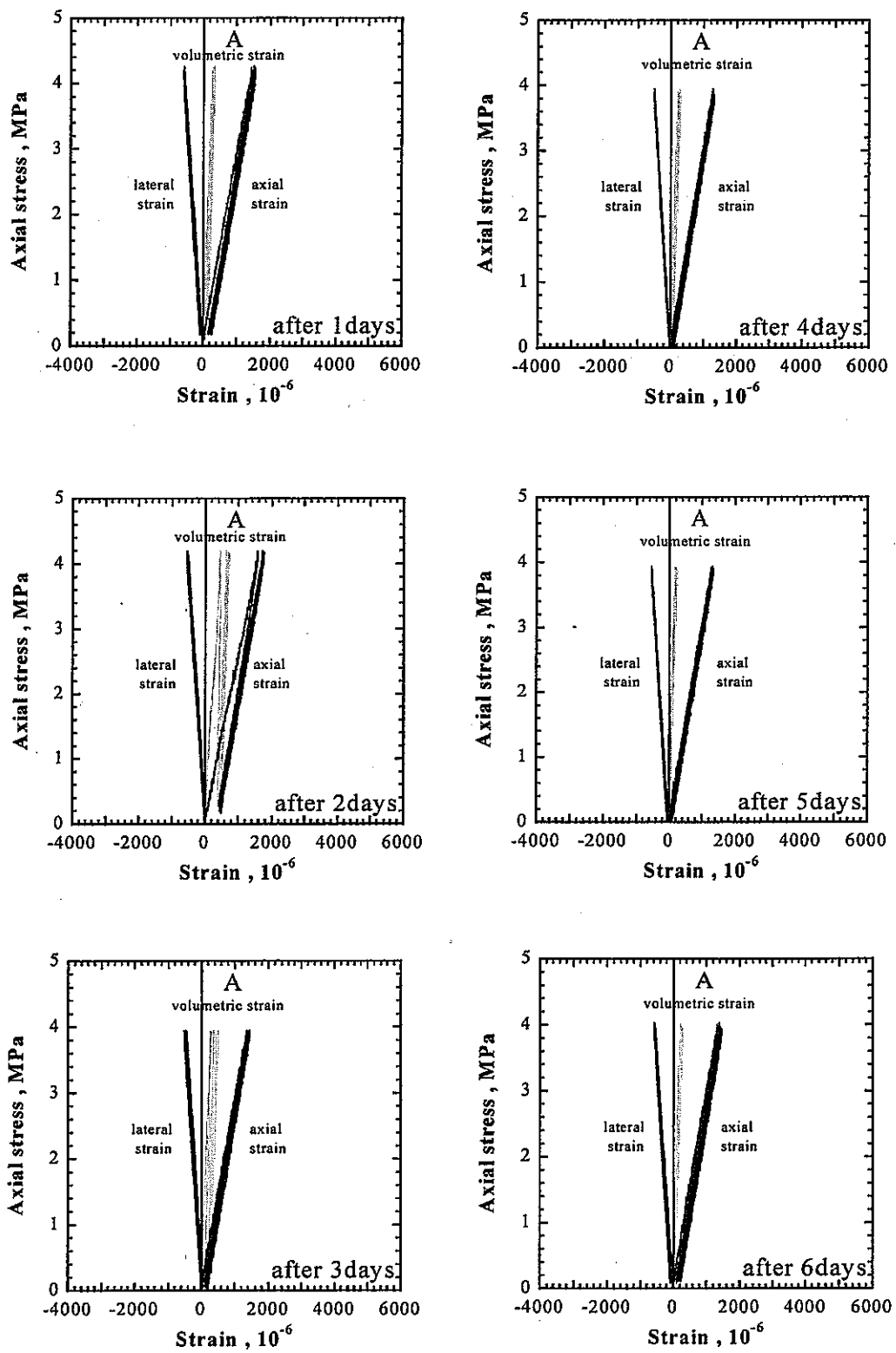


図 5.19 接着剤試験片 A の応力-ひずみ曲線

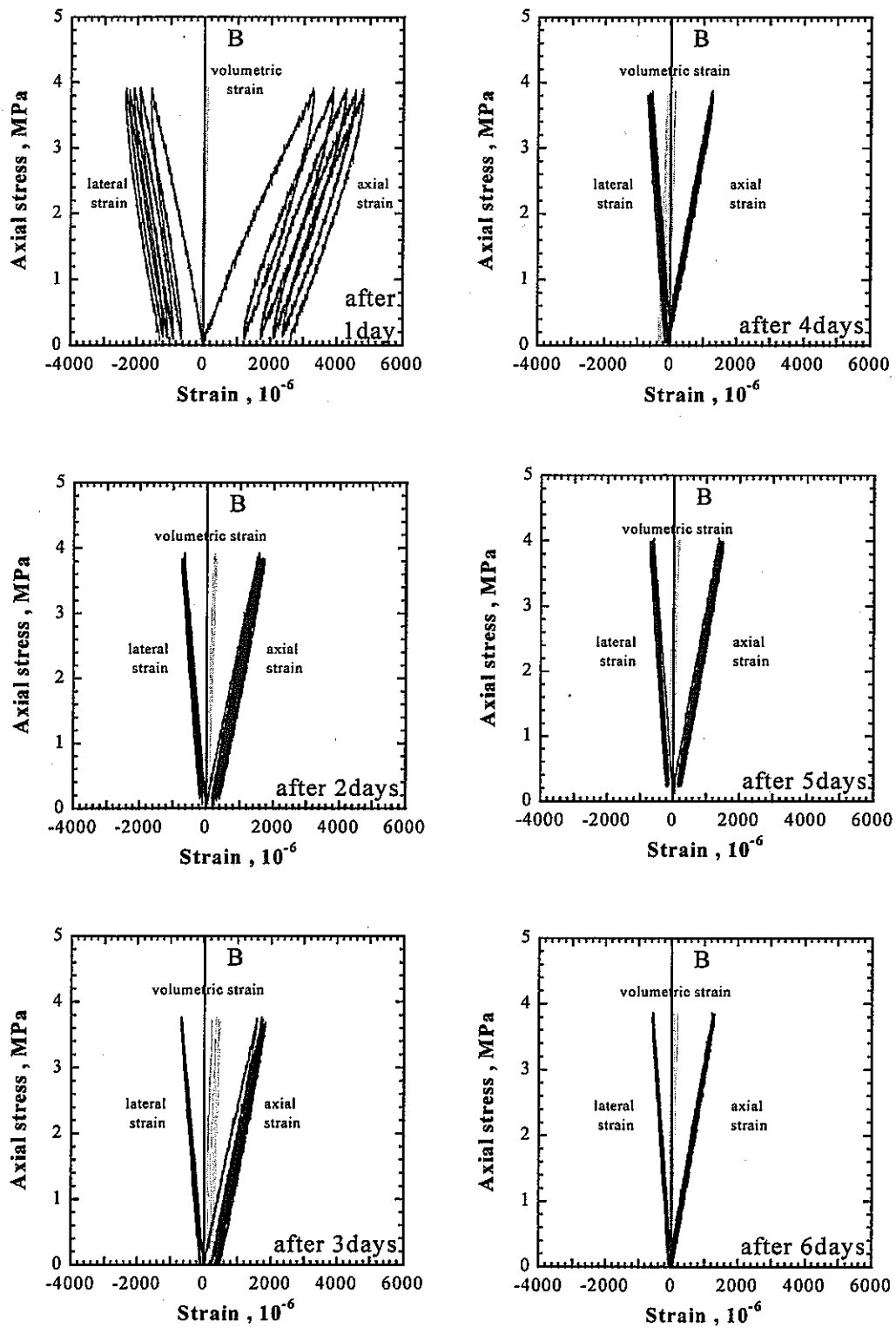


図 5.20 接着剤試験片 B の応力-ひずみ曲線

表 5.10 接着剤の除荷時のヤング率とポアソン比

経過時間	樹脂試験片 A		樹脂試験片 B	
	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
24	4.12	0.40	9.24	0.17
48	4.93	0.50	6.49	0.32
72	3.74	0.42	4.67	0.40
96	4.04	0.41	4.35	0.36
120	4.36	0.39	4.57	0.37
144	4.06	0.39	4.31	0.38

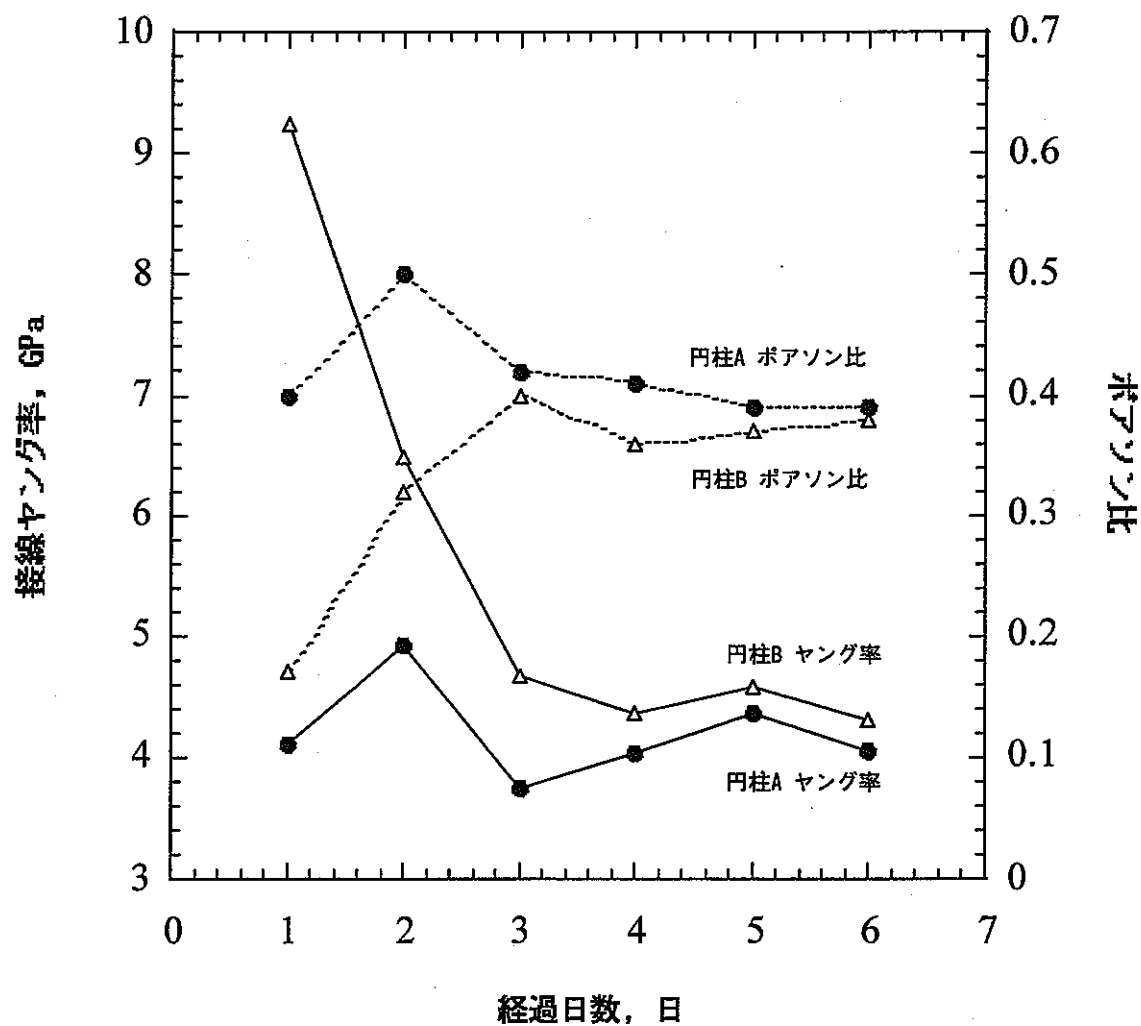


図 5.21 接着剤の弾性率と調合後の経過日数の関係

5. 4 結言

プローブ降下・切り離し装置, アッパーセルリテーナー, パイロット孔掘削装置, SIセル, グリューカプセルおよび封圧試験装置などの初期応力測定適用試験に用いる付帯装置を改良あるいは新たに製作した。これらの装置とサイクル機構が開発した初期応力測定プローブとを組み合わせ, 東濃地科学センター東濃鉱山敷地内に掘削した 02SE-04 孔 (HQ-WL) の深度 122.7m, 142.7m, 157.0m, 173.5m および 192.0m において原位置適用試験を実施した。本試験の過程で, 新たにワイヤラインタイプのプローブ降下・切離し装置およびパイロット孔掘削装置を導入した。これによって, 深部岩盤を対象とした応力解放試験の作業効率を格段に高めることができた。さらに, 原位置適用試験を通じて明らかになった従来のグリューカプセルの問題を解決するために, グリューカプセルの機構に改良を加え, 深部岩盤に掘削されたパイロット孔に確実に SI セルを接着できるようにした。しかしながら, 5 深度で実施した応力解放試験は, 天然き裂のためにオーバーコアが分離したため, 正常な解放ひずみは測定されなかった。最後に, 繰返し載荷試験によってオーバーコアと接着剤の力学特性を調査した。これによって, 当該コアは風化の影響のために深度 160m 付近まで塑性的な変形挙動を示すこと, また, パイロット孔で放出された接着剤が弾性体とみなせるまでに, 調合後 3 日を要することを確認した。

6. 水圧破碎法による初期応力測定

初期応力は一般構造物における負荷応力に相当するもので、地下空間設計における最も重要なパラメータであり、地下構造物の安全性、寿命などを支配する主要因子である²⁾。岩盤の初期応力測定法としては、応力解放法、水圧破碎法、応力補償法、ボーリングコアを用いる手法などがある。このうち水圧破碎法³⁾⁴⁾は、地表あるいは坑道から掘削したボーリング孔のある区間をパッカーによって密閉し、この密閉区間に水を圧入してボーリング孔の壁面を引張応力によって破壊させ、き裂を岩盤内に進展させるものである。この方法は、応力解放法と異なりオーバーコアリングを必要とせず、地表付近から相当深いところまで適用できる点で他の測定方法に勝る長所を有している。しかも、岩盤内部の広い範囲に比較的容易にき裂を進展させることができるので、ボーリング孔まわりの平均的な応力分布を調査するのに適している。このため、地下深部の初期応力の計測・評価に水圧破碎法が最も一般的に用いられている。

6. 1 水圧破碎試験概要および試験区間の選定

水圧破碎法は等方均質弾性体中の円孔まわりの応力分布に基礎を置いて解析理論が構築されているので、試験区間は岩盤に割れ目のない位置を選定する必要がある。また、孔径がピットゲージよりも小さくなっている地点では、試験装置が抑留される場合がある。このため、02SE-04孔のキャリパー検層とコア鑑定の結果に基づいて、孔壁が安定しており、かつできるだけき裂の少ない区間を選定して水圧破碎試験を実施するようにした。その結果、水圧破碎試験の試験深度として、125.8m, 130.7m, 142.3m, 156.4m および 168.0m の5点が選定された。

6. 2 試験装置

試験に使用した水圧破碎システムの配管および配線図は図6.1のようである。また、用いた主要機器名をまとめて表6.1に示す。このパッカーシステムは、大深度においてしかも小規模な設備によって水圧破碎ができるように開発されたもので、樹脂製高圧ホース、ワイヤラインおよびストラドルパッカー（破碎用パッカー）から構成される⁶⁾。ストラドルパッカーには、パッカーエレメントへの加圧から加圧区間への加圧へと流路を切り替えるためのプッシュプルバルブが設置されている。このためパッカーシステムにつながる高圧ホースは1本で済み、大深度のボーリング孔への適用が容易である。後で述べるように、見かけのき裂開口圧から真のき裂開口圧を近似的に評価して最大水平応力 S_H の大きさを評価するには、加圧系の体積をできるだけ小さくする必要がある。本パッカーシステムはストラドルパッカーの上部に小型流量計を設置しているので、小型流量計の下流における加圧系体積 V は約 $1.1 \times 10^{-3} \text{m}^3$ (=1.1リットル) と小さい。これにより、き裂の開口圧を精度良く測定でき、従来、信頼性の低いとされていた最大水平応力の測定精度が格段に向上した⁶⁾。ボーリング孔内の水圧および圧入流量は、それぞれストラドルパッカーに内蔵した圧力変換器と前述の小型流量計によって測定し、A/D変換される。そして、A/D変換された出力はアーマードケーブルを通じて地表のパーソナルコンピュータまで転送され、パーソナルコンピュータに記録される。データのサンプリング周波数は5Hzである。

表6.1 測定機器一覧

測定機器	メーカー	数量
ストラドルパッカー, ウレタンゴム, 耐圧 20MPa	同和工営 (株)	1本
インプレッションパッカー, ウレタンゴム, 耐圧 20MPa	同和工営 (株)	1本
ケーブルウィンチ, 1.5kW, 1500m用	物理計測 (株)	1台
高圧ポンプ, JRX-110-400, 11kW, 10000cc/min, 最高吐出圧力 40MPa	荏原製作所製	1台
システムコントローラー, PC-9801T	日本電気 (株)	1台
シグナルコンディショナー, CDA-230C	(株) 共和電業	1台
圧力変換器, PGM-500KD, 測定範囲 49.03MPa	(株) 共和電業	1台
流量計 (地表), MP-MCF-SLE, 測定範囲 5000cc/min	流体工業 (株)	1台
流量計 (孔内), MF 30, 測定範囲 500cc/min	Japan Flow Control Co.	1台
坑井方位傾斜儀計, TYPE-SS, 最小読取り精度 1°	(株) 村田製作所	1台

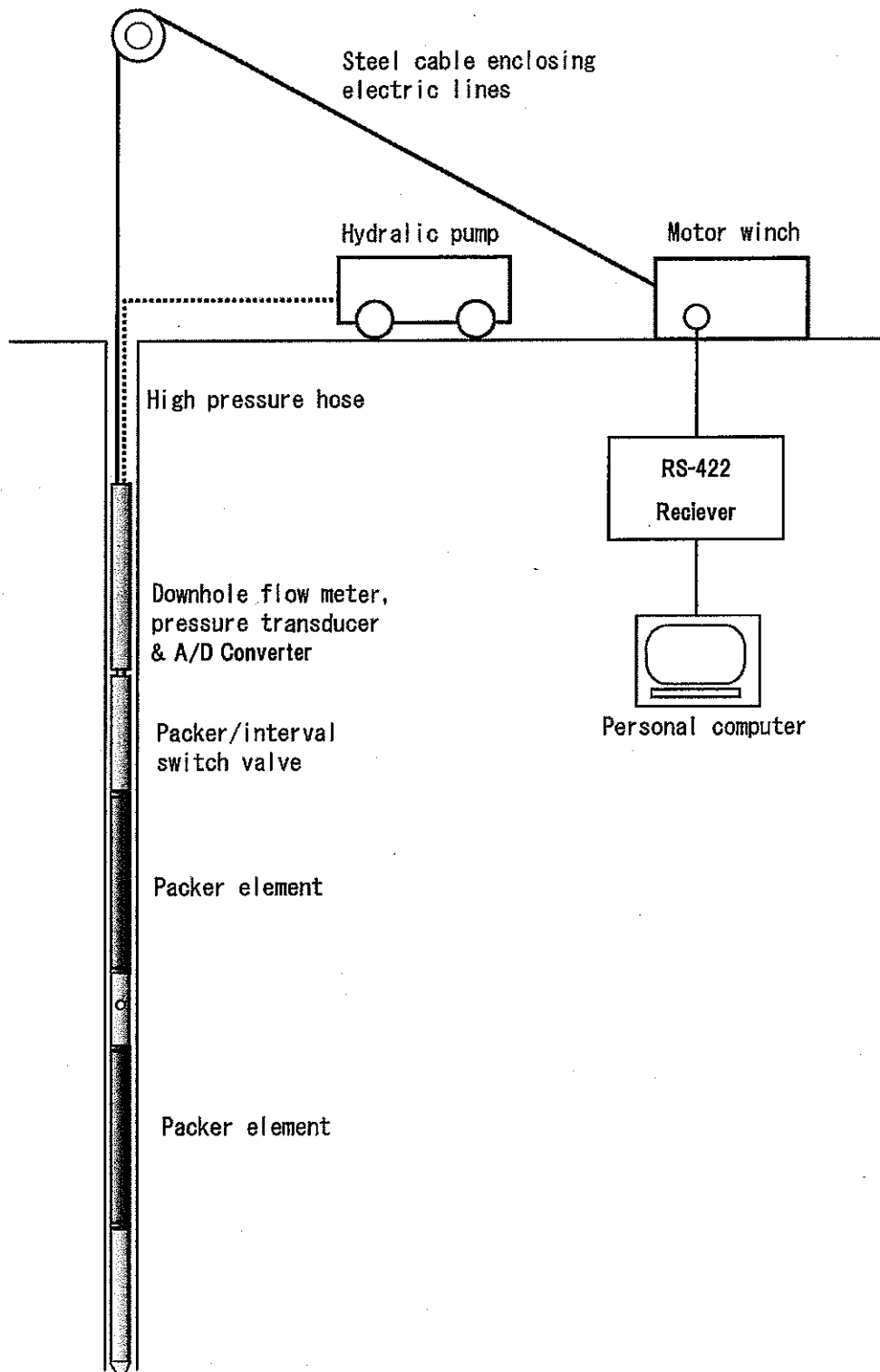


図 6.1 ワイヤライン方式による水圧破碎システム

6. 3 試験方法

水圧破碎法によって初期応力を計測・評価する手順を、図 6.2 にしたがって説明すると以下のとおりである。

(1) ダミーパッカーによるボーリング孔径の調査

岩盤内部に存在する断層、天然き裂および岩質が変化する箇所とボーリング孔とが交差するところでは、ボーリング孔壁面からの崩壊物や壁面の変形によってボーリング孔径が小さくなったり閉塞する場合がある。そのような箇所ではパッカーが自重で降下できないばかりか抑留される恐れがある。そこで、まずストラドルパッカーとその直径が同じダミーパッカーをボーリング孔内の所定の深度まで降下させ、パッカーが自重だけで通過できるだけの直径が確保されているかを調査する。

(2) 水圧破碎前の孔壁の型取り

ボーリングコアの目視による鑑定、RQD の深度分布およびキャリパー検層の結果を総合的に判定し、天然き裂が少なく孔壁の安定した区間を選定する。このようにして選定した位置で、インプレッションパッカー（型取りパッカー）を用いた水圧破碎前の孔壁の型取りをおこない、天然き裂の状態をさらに詳しく調査する。インプレッションパッカーの表面は可塑性のチューブによって被覆されているので、所定の深度でパッカーエレメントを膨張させ、その表面をボーリング孔壁面に押し付けることで壁面の凹凸がチューブの表面に記録される。ボーリング孔壁面に多数の天然き裂が認められた場合は、これをできるだけ避けるためにさらに別の試験地点を探す。

(3) 水圧破碎試験

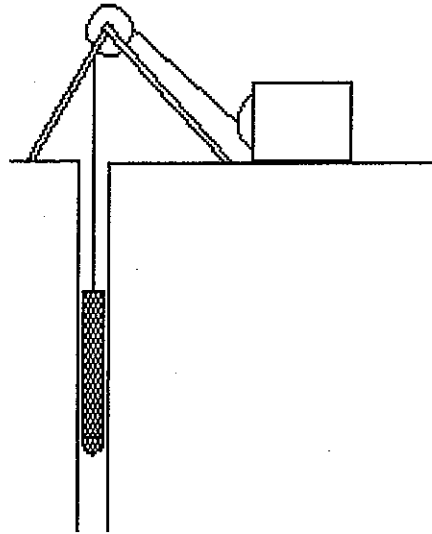
地表に設置したポンプと加圧配管で接続したストラドルパッカーをボーリング孔内に挿入し、測定対象深度まで降下させる。その後、ストラドルパッカーのパッカーエレメントと呼ばれる部分に水を圧入してそれを膨らませ、ボーリング孔壁面に密着させることにより、二つのパッカーエレメントによってはさまれた加圧区間を隔離する。以上のセットアップ終了後、①加圧配管を通して地表のポンプから加圧区間に一定の流量（500～3000cc/min）で水を圧入する、②加圧配管の途中にあるバルブを閉じ、水の圧入を停止する（以下、この操作をシャットインと呼ぶ）、③加圧系の圧力を開放する、等の操作を行うことにより、加圧区間のボーリング孔壁面からき裂が発生、進展し、またそのき裂が開口、閉口する。最初の加圧サイクルにおいて水を圧入してボーリング孔内の水圧を上昇させていくと、破碎圧（breakdown pressure）と呼ばれる水圧 P_b を越えた直後にボーリング孔内の水圧は急激に減少する。そこでシャットインして水の圧入を停止すると、ボーリング孔内の水圧は下降し、やがて、き裂閉口圧（shut-in pressure）と呼ばれる水圧 P_s に落ちつく¹⁾。一方、二回目以降の加圧サイクルにおいて、き裂開口圧（reopening pressure）と呼ばれる水圧 P_r に達

したところでボーリング孔内の水圧と時間の関係が線形から非線形に変わる^図。このようにして水の圧入、シャットイン、水の排出を数回繰り返す、三種類の水圧データ、すなわち破碎圧、き裂閉口圧、ならびにき裂開口圧を測定する。

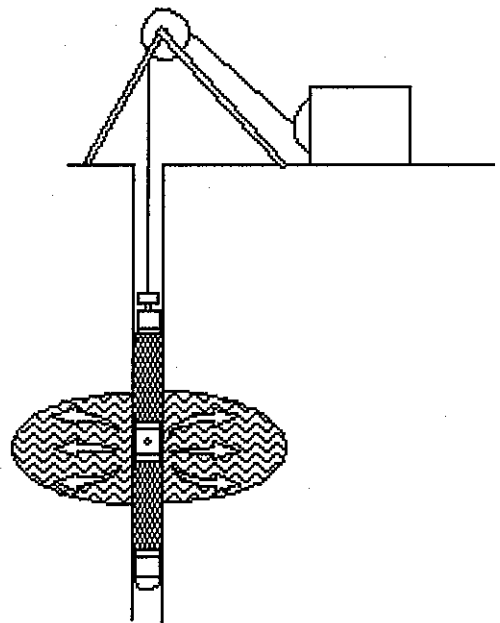
(4) 破碎後の型取りによる人工き裂の方位測定

水圧破碎後、再びインプレッションパッカーを用いて加圧区間の型取りをおこなう、(2)で得られたき裂のトレースと比較することにより新たに造成されたき裂を判定する。このインプレッションパッカーの下端には坑井方位傾斜儀計が取り付けられているので、熱収縮チューブの表面に印された基準線の方位が測定される。この方位とき裂のトレースから、造成された新たなき裂の走向傾斜を決定することができる。

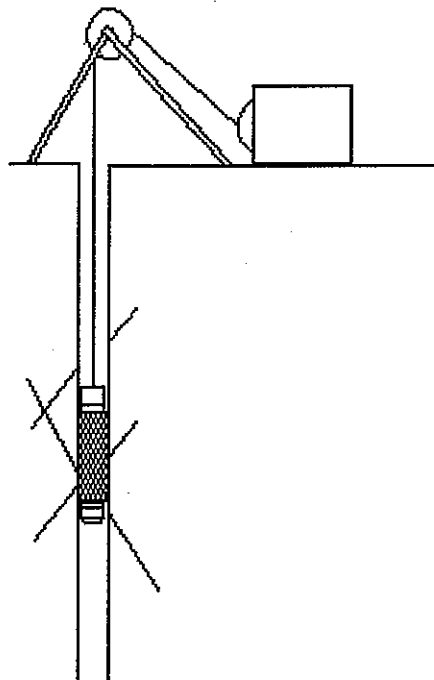
(1) ダミーパッカー挿入



(3) 水圧破碎試験



(2) 破碎前の型取り



(4) 破碎後の型取り

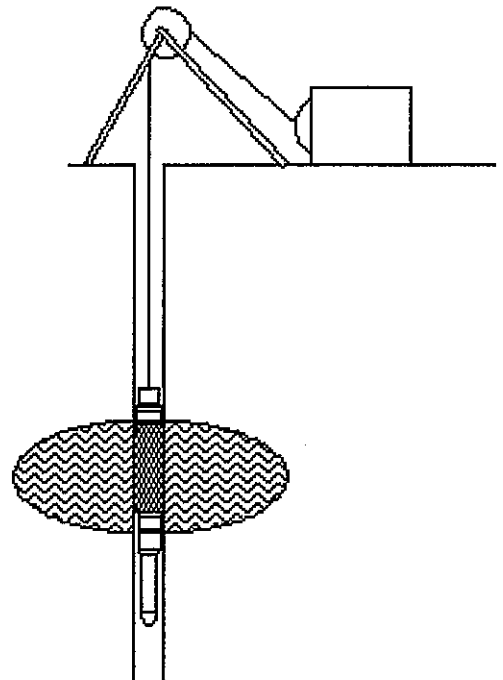


図 6.2 水圧破碎法による初期応力測定手順

6. 4 解析方法

6. 4. 1 従来の初期応力評価手順

水圧破碎試験によって測定した各観測データから、初期応力の大きさおよび方向を評価する手順は次のとおりである。ただし、初期応力の主軸の一つがボーリング孔軸に一致しており、かつ、水圧破碎によりボーリング孔軸と平行ないわゆる縦き裂が形成された場合を考える。また、岩体中の間隙水圧は0であるものとする。このとき、ボーリング孔内の水圧が破碎圧 P_b に達したときに、ボーリング孔壁に作用する周方向引張応力が岩体の引張強度 T に達してボーリング孔壁からき裂が発生するものと考え、また、シャットイン後、き裂内水圧とき裂面垂直方向の初期圧縮応力が平衡したときにボーリング孔内の水圧の降下が停止すると考えれば、 P_b および P_s と初期応力との関係がそれぞれ次式のように与えられる^{[7][9]}。

$$P_b = 3S_h - S_H + T \dots\dots\dots (6.1)$$

$$P_s = S_h \dots\dots\dots (6.2)$$

ここに、 S_H および S_h ($S_H \geq S_h$) はボーリング孔と直交する面内に作用する初期主応力である。なお、式 (6.1) と式 (6.2) を含め、以下、初期応力は圧縮を正とする。式 (6.1) と式 (6.2) において T を既知とすると、未知量は初期圧縮応力 S_H および S_h の二つになる。したがって、両式の間係を用いれば、 P_b と P_s の測定値から S_H および S_h の大きさを決定できる。ここで、ボーリング孔中心から見たときのき裂の方向が S_H の作用方向である。

ところで、岩体は天然物でありその特性は場所ごとに異なる。この傾向は引張強度 T について特に顕著であるため、式 (6.1) を用いて初期応力を正しく評価するためには、き裂を作成した現位置岩体の T を正確に評価することが前提となる。しかし、ボーリングコアの回収にはマイクロクラックの進展など、必ず不可逆的なプロセスを伴うことから、原位置岩体の T を正確に評価することは容易でない。一方、もし、再加圧時にボーリング孔内の水圧がき裂再開口圧 P_r に達したときにき裂が開口し始め、このき裂の開口が $T=0$ のボーリング孔壁からき裂が発生する現象と等価であるものと仮定すると次式が成立する^{[8][10]}。

$$P_r = 3S_h - S_H \dots\dots\dots (6.3)$$

したがって、破碎圧 P_b の代わりにき裂開口圧 P_r を用い、上式と式 (6.2) の関係を利用すれば、引張強度 T と無関係に S_H および S_h の大きさを決定できることになる。このため、式 (6.3) が Zoback ら^[8] および Bredehoeft ら^[10] によって提案されて以来、水圧破碎法では式 (6.2) と式 (6.3) に基づいて初期応力を評価することが一般的になり、さらに、初期応力の評価に現位置岩体の物性値を必要としないことが水圧破碎法の大きな特長とされてきた。

6. 4. 2 き裂開口圧力と初期応力の関係

これまで数多くのフィールド実験や室内実験が実施されてきた結果、き裂開口圧が圧入流量の大きさに依存して変化すること^{[10][11]}、その一方で本来異なるはずのき裂開口圧とき裂開口圧が計測実施地域によらず常に近い傾向にある^{[12][13]}といった従来の理論に反する実験事実が徐々に明らかになってきた。さらに、式(6.3)の背景にはき裂が開口するまで加圧水はき裂内に進入しないという仮定があるのに対して、Cornet^[14]およびZobackら^[15]は、水圧破碎室内実験の結果から、き裂が閉じていても加圧水がき裂内に浸入し得ることを明らかにした。これは、き裂が閉じていても、向かい合うき裂面上の凹凸が完全にかみ合わず、かみ合わない部分が連なって水の通路となるためである。このため伊藤ら^[16]は、Cornet^[14]およびZobackら^[15]の実験結果を基に、き裂開口以前よりボーリング孔からき裂内に加圧水が進入することを考慮した数値解析および室内実験を実施してき裂開口圧の物理的意味を再検討し、その結果から次のことを明らかにしている。すなわち、再加圧時にき裂が開口し始めるときのボーリング孔内の水圧(以下、真のき裂開口圧と呼ぶ)は、初期応力および圧入流量によらず従来の理論、つまり、式(6.3)で与えられているき裂開口圧の半分となることである。したがって、式(6.3)の代わりに次式を用いて初期応力を評価すれば良いことになる。

$$P_{ro} = (3S_h - S_H) / 2 \dots\dots\dots (6.4)$$

ここに、 P_{ro} は真のき裂開口圧である。

6. 4. 3 真のき裂開口圧力を測定するための水圧破碎システム

伊藤ら^[16]は、き裂が開口してもすぐにはボーリング孔内の水圧と時間の関係に顕著な変化は現れず、き裂開口圧、つまりボーリング孔内の水圧と時間との関係が明らかに非線形になり始めるときのボーリング孔内の水圧(以下、見かけのき裂開口圧と呼ぶ)は真のき裂開口圧よりも大きくなること、そして、見かけのき裂開口圧は本質的にき裂閉口圧に等しい水圧であることを明らかにしている。これらのことは、測定のむずかしい岩体物性値 T を用いないことを前提とすると、き裂閉口圧の測定値と式(6.2)から S_h の大きさを評価できても、何らかの方法で真のき裂開口圧を測定できなければ、き裂線方向に作用する初期応力 S_H の大きさを評価できないことを意味する。

このため、伊藤ら^[17]は真のき裂開口圧を用いて初期応力を評価することを目的として、数値シミュレーションに基づき、真のき裂開口圧と見かけのき裂開口圧との間に差が生じる原因について詳細に検討した。この結果、見かけき裂開口圧力が真のき裂開口圧よりも大きく、き裂閉口圧に近くなるのは主に加圧システム内の水の体積が大きいことが原因であり、その体積を適切に選択すれば、見かけのき裂閉口圧から真のき裂開口圧を近似的に評価できることを明らかにした。さらに、見かけのき裂開口圧から式(6.3)あるいは式(6.4)によって初期応力 S_H の大きさを評価した場合につい

て、見かけのき裂開口圧が式 (6.3) で与えられる圧力あるいは真のき裂開口圧に等しくないために生じる S_H の評価結果の誤差の範囲を明らかにした。例えば、流量調整バルブより下流側でき裂が閉じた状態での加圧系内の水の体積 V が $2 \times 10^{-3} \text{m}^3$ (= 2000cc) であるような水圧破碎システムを用いる場合、ボーリング孔を $2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{sec}$ (=120cc/min) の一定流量 Q で加圧すると、 S_H/S_h が 2 以下の範囲では、約 20% 以下の誤差の範囲内で真のき裂開口圧を評価できる。したがって、き裂開口圧を使って S_h の大きさを決定するものとすれば、その結果と、加圧系体積 V の十分小さい水圧破碎システムを用いて十分に小さい圧入流量で測定した見かけのき裂開口圧 (≒真のき裂開口圧) から、式 (6.4) の関係に従って S_H の大きさを評価できる。

6. 5 試験結果

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 6.2 に示すとおりである。水圧破碎試験中のボーリング孔内の水圧-時間曲線, 流量-時間曲線は APPENDIX I に示すとおりである。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 APPENDIX II 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。深度 125.8m および深度 130.7m では, 明らかにボーリング孔軸を含む縦き裂が生じ, 深度 142.3m ではボーリング孔軸と交差する天然の横き裂が開口した。深度 156.4m および深度 168.0m では, ボーリング孔壁面に母線と斜交するき裂が多数存在する。これら 2 深度におけるボーリング孔内の水圧-時間曲線にはブレイクダウン現象 (水圧の急降下) が見られないことと, 後で述べる P_s が小さいことから, 水圧破碎試験では横き裂が開口した可能性が高いと考えられる。すなわち, ボーリング孔軸と垂直な平面内の応力状態は, 縦き裂が生じた深度 125.8m および深度 130.7m における水圧破碎試験から評価される。

ここで, 表 6.2 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 $q(t)$ が一定であればボーリング孔内の水圧の経時変化が線形から非線形に変わる時のボーリング孔内の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} に対して線形に増加するはずである。したがって, この場合, $P-Q_{total}$ 関係が線形から非線形に変わるときのボーリング孔内の水圧として見かけのき裂開口圧が求められる。ただし, 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 $P-Q_{total}$ 関係もそれに依っ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発生 (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。APPENDIX III は APPENDIX I の結果をボーリング孔内の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ボーリング孔内の水圧が評価された見かけのき裂開口圧 P_r である。ただし, 深度 125.8m では, 第 1 目から第 3 回目までの加圧サイクルにおけるボーリング孔内の水圧の立ち上がりに重なり部があるものの, 第 4 回目から第 7 回目の加圧サイクルでは, より早い段階からボーリング孔内の水圧がずれていて重なり部分ははっきりしていない。これは, 第 4 回目から第 7 回目の加圧サイクルにおける流量が小さいために孔壁その他からの

リークの影響が大きく現れたためと思われる。そこで、第1回目から第3回目の加圧サイクルのボーリング孔内の水圧から P_r を読み取った。深度 130.7m でも、前記と同様の理由から第1回目と第2回目の加圧サイクルのボーリング孔内の水圧から P_r を読み取った。

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ボーリング孔内の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ボーリング孔内の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、シャットイン後のボーリング孔内の水圧の減衰速度は急激に低下しないので P_s をボーリング孔内の水圧-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^{[18][19][20]}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^[21]はボーリング孔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 6.3 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ボーリング孔内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 (APPENDIX IV 参照)。

ただし、上記の関係は縦き裂の場合に成立する。横き裂の場合にはボーリング孔周りの応力集中の影響が出にくいために、き裂先端が閉じ始めた瞬間に孔壁と交差するき裂の部分まで閉じる。したがって、第2段階が現れない^[22]。このことは、シャットイン後のボーリング孔内の水圧とその圧力減衰速度の逆数との関係が、3直線ではなく2直線(第1段階および第3段階)で近似でき、2直線の交点がき裂閉口圧となることを意味する。以上より、縦き裂が生じた深度 125.8m および深度 130.7m におけるボーリング孔内の水圧と圧力減衰速度の逆数との関係は3直線で近似し、横き裂が生じたと考えられるその他の深度では2直線で近似し、それぞれ P_s を評価した。なお、圧入流量が小さいと見かけのき裂閉口圧も小さくなると同時に飽和圧力も低下して P_s に近づく^[23]。その結果、もしもボーリング孔内の水圧が P_s に近いレベルで飽和すると、シャットイン後のボーリング孔内の水圧は P_s よりも小さくなる。このため、小さな圧入流量で加圧したときのボーリング孔内の水圧から P_s を検出することはできないことが考えられる。このことから、深度 142.3m、深度 156.4m および深度 168.0m では、

圧入流量が大きい第1回目と第2回目の加圧サイクルにおけるボーリング孔内の水圧のシャットイン曲線から P_s を評価した。

水圧破碎法によって造成された縦き裂の走向は、APPENDIX II に示したき裂のトレースにボーリング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^[18]。

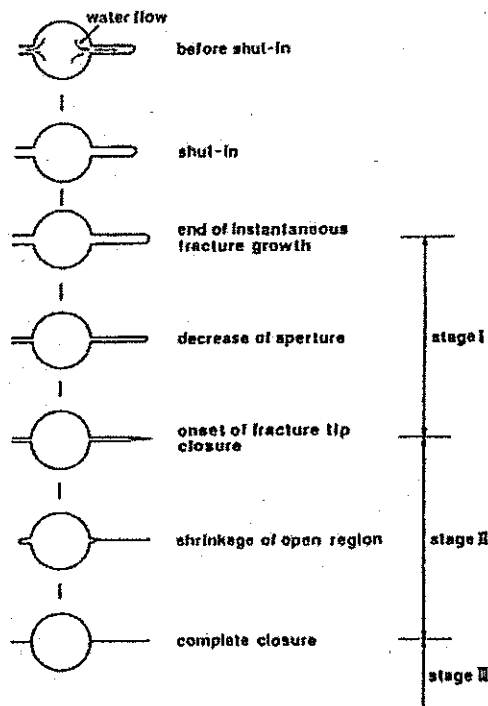


図 6.3 シャットイン後のき裂閉口挙動^[21]

© American Geophysical Union.

表 6.2 02SE-04 孔における水圧破碎試験の測定結果

試験深度 (m)	最大水平応力の方位 ϕ_i (deg)*	破碎圧 P_b (MPa)	見かけき裂開口圧 P_f (MPa)	き裂閉口圧 P_s (MPa)								
				1回	2回	3回	4回	5回	6回	7回	8回	平均
125.8	52.4	13.23	1.8	6.5	6.5	5.4	6.0	5.3	4.6	5.4	4.8	5.6
130.7	69.4	15.77	1.8	9.5	8.3	5.6	7.2	6.1	5.5			7.0
142.3	—	12.97	—	5.4	5.4	—	—	—	—			5.4
156.4	—	14.69	—	6.4	6.8	—	—	—	—			6.6
168.0	—	8.30	—	3.7	3.5	—	—	—	—			3.6

*: ϕ_i は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である。

6. 6 解析結果

ここでは、ボーリング孔軸が初期応力の主軸の一つに一致しているものと仮定して初期応力を評価した。まず、表 6.2 のき裂開口圧 P_s の平均値と式 (6.2) の関係より、ボーリング孔軸に直交する水平面内に作用する初期応力の最小値 S_h が求まる。また、加圧系体積の十分に小さい水圧破碎システムを用いて十分に小さい圧入流量で測定した見かけのき裂開口圧 P_r の平均値が、真のき裂開口圧の大きさに等しいものと仮定すると、その値と式 (6.4) の関係からボーリング孔軸に直交する水平面内に作用する初期応力の最大値 S_H が求められ、さらに、ボーリング孔の中心から見たときに縦き裂の方向がその作用方向となる。これらの結果をまとめると表 6.3 のとおりである。図 6.4 は、縦軸にボーリング孔の深度を、横軸に水平応力とたてき裂の方位をとって測定結果をまとめたものである。

縦き裂が生じた深度 125.8m および深度 130.7m では、評価された初期応力状態の信頼性は比較的高いと考えられる。これらの深度における初期応力環境は $S_v < S_h < S_H$ の逆断層型である。また、最大水平応力の方位はほぼ N50° E である。02SE-04 孔に接近して掘削された 98SE-01 孔では、地表から深度 200m にわたって水圧破碎法による初期応力測定が実施されている¹²⁾。98SE-01 孔の不整合面よりも下部の応力環境は逆断層型であり、02SE-04 孔の深度 130m 付近の測定結果と一致する。しかし、02SE-04 孔の深度 130m 付近の最大水平応力の方位が N50° E であるのに対して、98SE-01 孔の不整合面から深度 200m までの 6 深度の最大水平応力の方位はおおむね N60° W を中心に分布していた。この食い違いが 02SE-04 孔に沿って分布する岩盤の局所的な応力不均一によるかどうかを明らかにするためには、さらに多くの測定データを蓄積して評価する必要があるように思われる。

表 6.3 02SE-04 孔における最小水平応力 S_h 、最大水平応力 S_H
および最大水平応力の方位 ϕ

ボーリング孔 の深度(m)	水平主応力(MPa)		最大水平応力 S_H の方位 ϕ (deg) *	鉛直応力(MPa) S_v^{++}
	S_h	S_H		
125.8	5.6	13.2	45.4	3.2
130.7	7.0	17.4	62.4	3.3
142.3	—	—	—	3.6
156.4	—	—	—	4.0
168.0	—	—	—	4.3

*: ϕ_i は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である。

++: 岩盤の密度を 2.6gf/cm³ と仮定して推定した鉛直応力である。

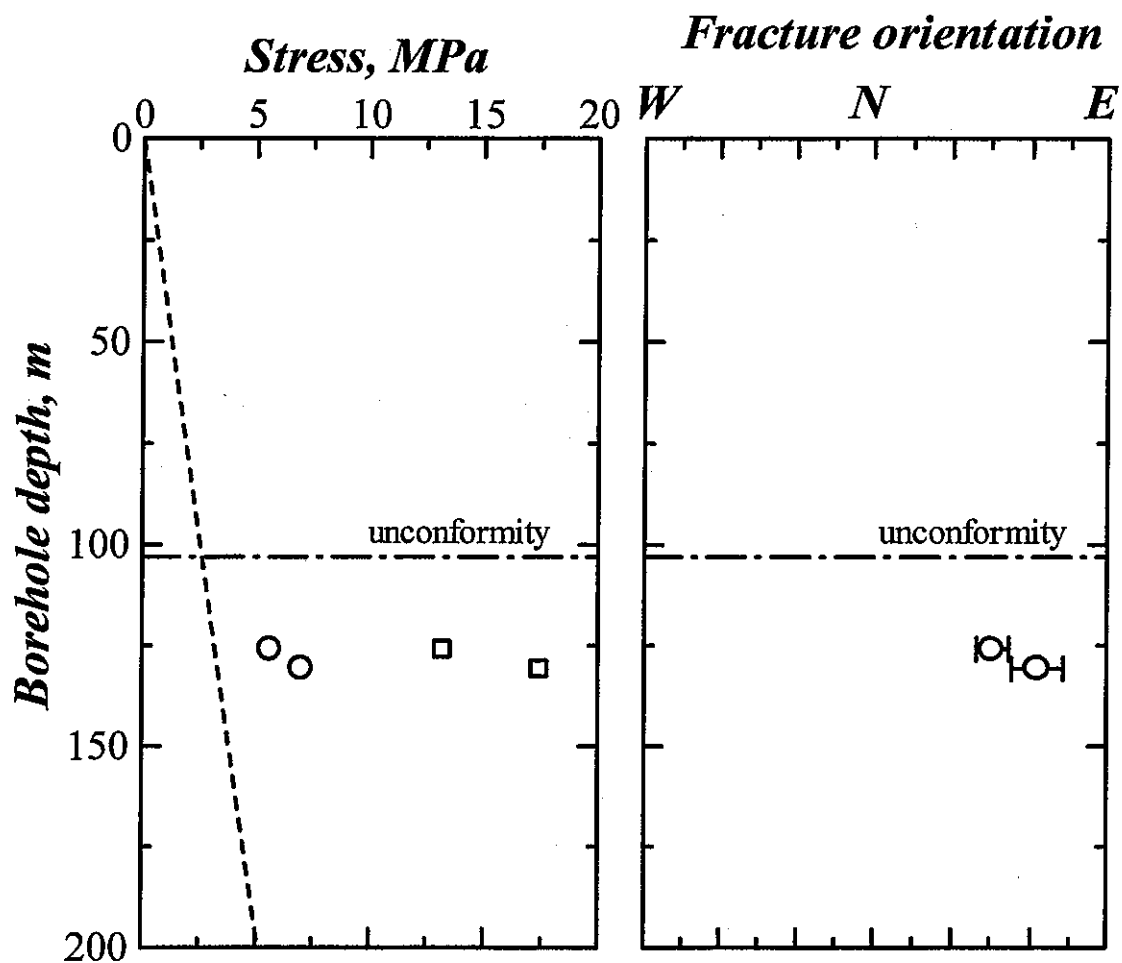


図 6.4 02SE-04 孔における水圧破砕試験結果。左側の応力と深度の関係において、○印は最小水平応力、□印は最大水平応力、点線は岩盤の密度を 2.6gf/cm^3 と仮定して推定した鉛直応力である。

6. 7 結言

02SE-04 孔の深度 125.8m から深度 168.0m において水圧破碎法による初期応力測定をおこなった。測定に使用した水圧破碎システムは、加圧系の体積を十分に小さくすることによって、き裂の開口圧を精度良く測定し、信頼性の低いとされていた最大水平応力の測定精度を格段に向上させるように開発されたものである^[6]。

5 深度で実施された水圧破碎試験のうち、2 深度でボーリング孔軸と平行な縦き裂が発生した。これらの深度で評価された初期応力状態は $S_v < S_h < S_H$ の逆断層型であり、最大水平主応力の方位はほぼ N50° E であった。

7. 結論

深部岩盤の初期応力測定適用試験に用いる付帯装置を改良あるいは新たに製作し、これらの装置とサイクル機構が開発した初期応力測定プローブとを組み合わせ、東濃地科学センター東濃鉦山敷地内に掘削した 02SE-04 孔 (HQ-WL) の深度 122.7m, 142.7m, 157.0m, 173.5m および 192.0m において原位置適用試験を実施した。本試験を実施するにあたって、新たにワイヤラインタイプのプローブ降下・切離し装置を開発するとともに、ワイヤラインタイプのパイロット孔掘削装置を導入した。これによって、深部岩盤を対象とした応力解放試験の作業効率を格段に高めることができた。さらに、原位置適用試験を通じて明らかになった従来のグリュウカプセルの問題を解決するために、グリュウカプセルの機構に改良を加え、深部岩盤に掘削されたパイロット孔に確実に SI セルを接着できるようにした。しかしながら、5 深度で実施した応力解放試験は天然き裂のためにオーバーコアが分離したため、正常な解放ひずみは測定されなかった。応力解放試験の成功率を向上させるためには、パイロット孔のコアリングが可能な掘削装置を用いてボーリングコアを採取し、SI セルを接着する位置に天然き裂を含まないことを確認することは必須であると考えられる。原位置試験終了後、採取されたオーバーコアと、SI セルを設置するための接着剤を用いて繰返し載荷試験をおこない、これらの力学特性を調査した。その結果、当該コアは風化の影響のために深度 160m 付近まで塑性的な変形挙動を示すこと、また、パイロット孔で放出された接着剤が弾性体とみなせるまでに、調合後 3 日を要することを確認した。

上記の適用試験終了後、02SE-04 孔の深度 125.8m から深度 168.0m において水圧破碎法による初期応力測定をおこなった。測定に使用した水圧破碎システムは、加圧系の体積を十分に小さくすることによって、き裂の開口圧を精度良く測定し、信頼性の低いとされていた最大水平応力の測定精度を格段に向上させるように開発されたものである。5 深度で実施された水圧破碎試験のうち、2 深度でボーリング孔軸と平行な縦き裂が発生した。これらの深度で評価された初期応力状態は $S_v < S_b < S_H$ の逆断層型であり、最大水平主応力の方位はほぼ N50° E であった。

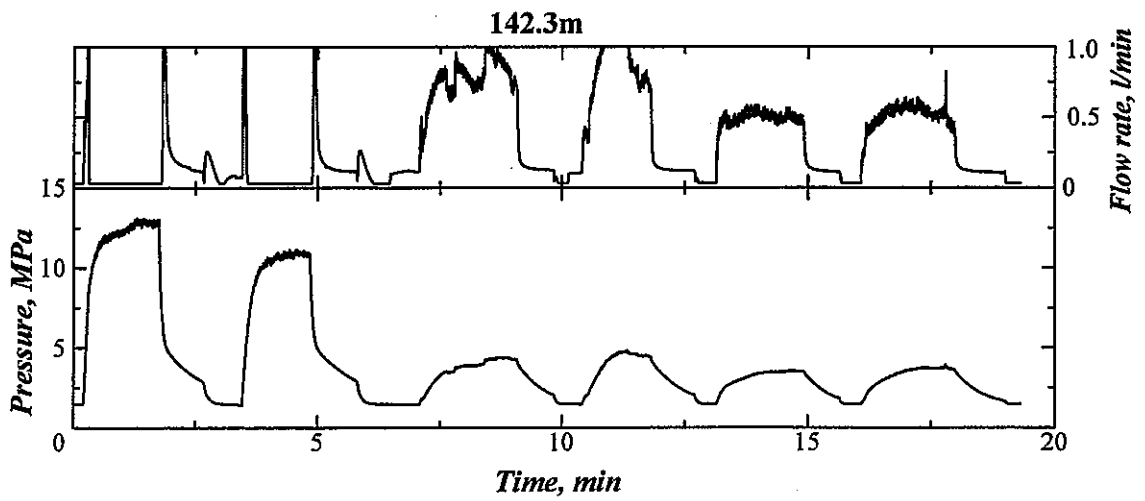
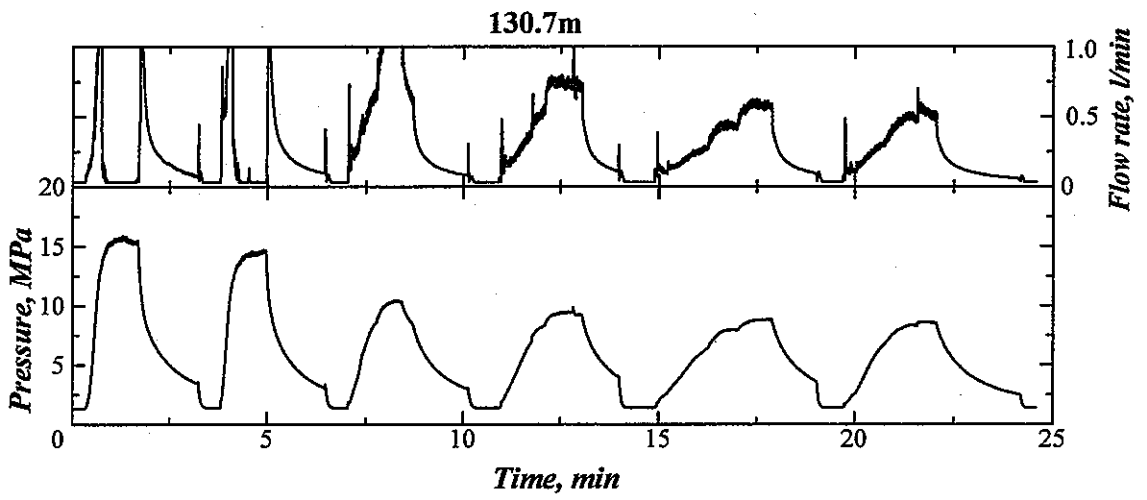
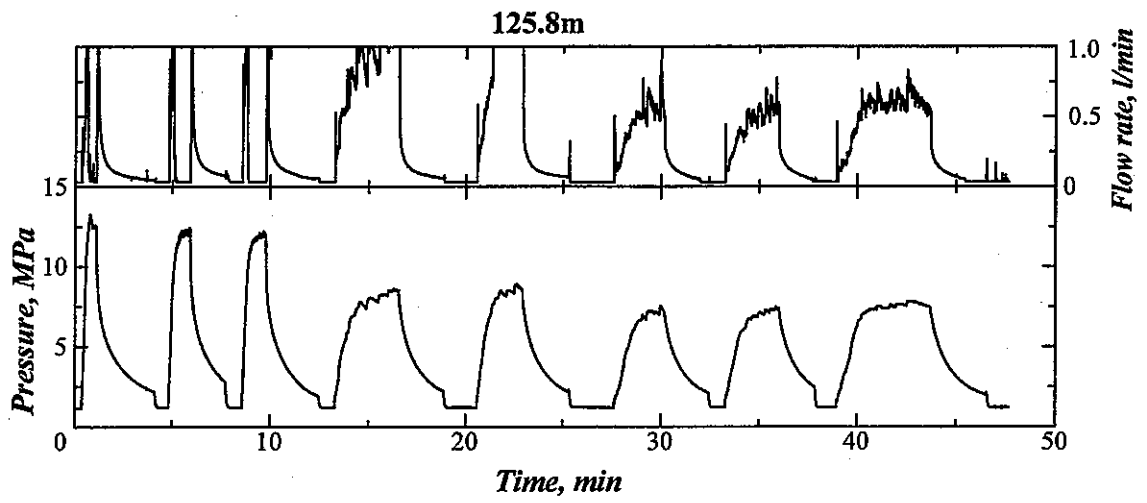
参考文献

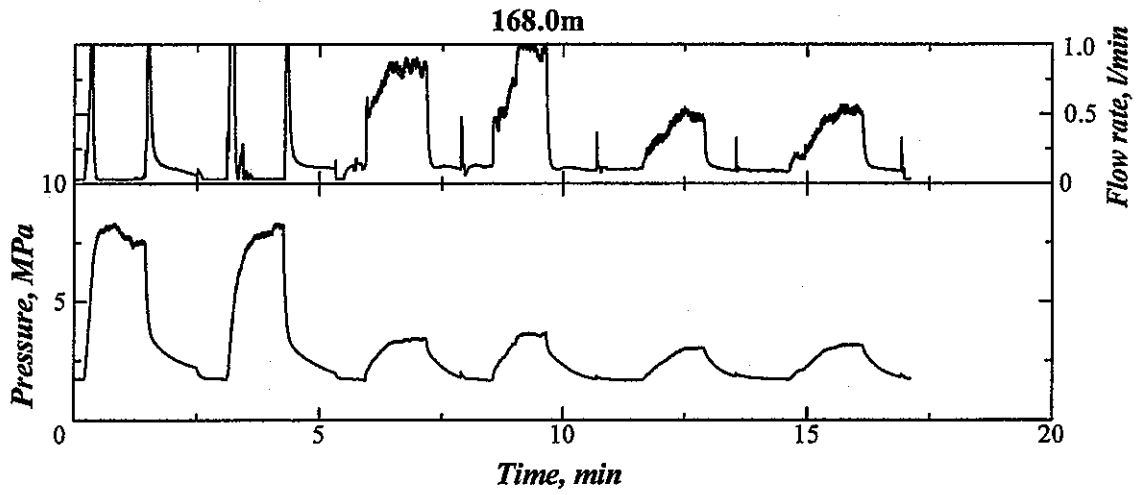
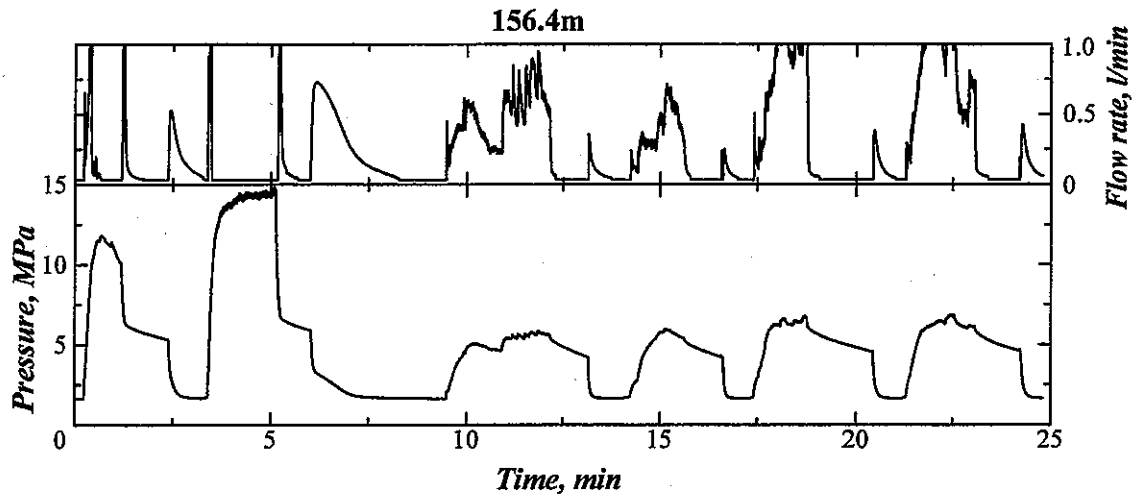
1. 加藤春實, “深部岩盤における初期応力測定プローブを用いた原位置試験”, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書: 同和工営株式会社), JNC TJ7400 2002-008, (2002)
2. 菅原勝彦, “岩盤応力測定に関する研究の動向”, 資源と素材, Vol.114, p.834-844, (1998)
3. Zoback, M.D., et al., “Preliminary Stress Measurements in Central California Using the Hydraulic Fracturing Technique”, *Pure Appl. Geophys.*, 115, p.135-152, (1977)
4. Hayashi, K., et al., “In Situ Stress Determination by Hydraulic Fracturing – A Method Employing an Artificial Notch”, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.197-202, (1989)
5. 加藤春實, 水田義明, “ワイヤラインによる水圧破碎システムの開発と実践”, 資源と素材, Vol.116, p.61-63, (2000)
6. 伊藤高敏, 他, “水圧破碎法における真のき裂開口圧測定による最大初期応力評価法とその実用化システムの開発”, 西日本岩盤工学シンポジウム, (2001)
7. Kehle, R.O., “The Determination of Tectonic Stresses through Analysis of Hydraulic Well Fracturing”, *J. Geophys. Res.*, 69, p.259-273, (1964)
8. Hardy, M.P. and Asgian, M.I., “Fracture Reopening During Hydraulic Fracturing Stress Determinations”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.489-497, (1989)
9. Hubbert, M.K. and Willis, D., “Mechanics of Hydraulic Fracturing”, *AIME Trans.*, 210, p.153-168, (1957)
10. Breadhoeft, J.D., et al., “Hydraulic Fracturing to Determine the Regional In Situ Stress Field”, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, p.250-258, (1986)
11. Ikeda, R. and Tsukahara, H., “Hydraulic Fracturing Technique in Deep Wells and In Situ Stress at Depth”, *Proc. 2nd Int. Wkshp Hydr. Fract. Stress Measur.*, Minneapolis, p.141-165, (1988)
12. Lee, M.Y. and Haimson, B.C., “Statistical Evaluation of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Parameters”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.447-456, (1989)
13. Cheung, L.S. and Haimson, B.C., “Laboratory Study of Hydraulic Fracturing Pressure Data – How Valid is Their Conventional Interpretation?”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.595-604, (1989)
14. Cornet, F.H., “Analysis of Injection Tests for In Situ Stress Determination”, *Proc. Wkshp Hydr. Fract. Stress Measur.*, Menlo Park, p. 414-443, (1982)
15. Zoback, M.D., et al., “Laboratory Hydraulic Fracturing Experiments in Intact and Pre – fractured Rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 14, p.49-58, (1977)
16. 伊藤高敏, 林一夫, “水圧破碎地殻応力計測における縦き裂開口挙動の解析”, 日本機械学会論文集(A)編, 57, p.1715-1719, (1991)
17. 伊藤高敏, 他, “水圧破碎地殻応力計測法におけるき裂開口圧に及ぼす諸因子の影響”, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 176-180, (1995)
18. Lee M.Y. and Haimson B.C., “Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameter”, *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.447-456, (1989)
19. Baumgartner J. and Zoback M.D., “Interpretation of hydraulic fracturing pressure-time records using interactive analysis methods”, *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.461-469, (1989)

20. Vik G. and 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)
21. 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, p.18311-18321,(1991)
22. Ito, T. and Hayashi, K., "Characteristics of shut-in curves of transverse cracks in hydraulic fracturing stress measurements", Geothermal Resources Council Transactions , 16, p.651-656,(1992)
23. Ito, T., et al., "Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 36 (6), p.811-826,(1999)
24. 加藤春實, "98SE-01 孔における水圧破砕法による初期応力測定", サイクル機構技術資料 (契約業務報告書: 同和工営株式会社) ,JNC TJ7400 99-004,(1999)

APPENDIX I

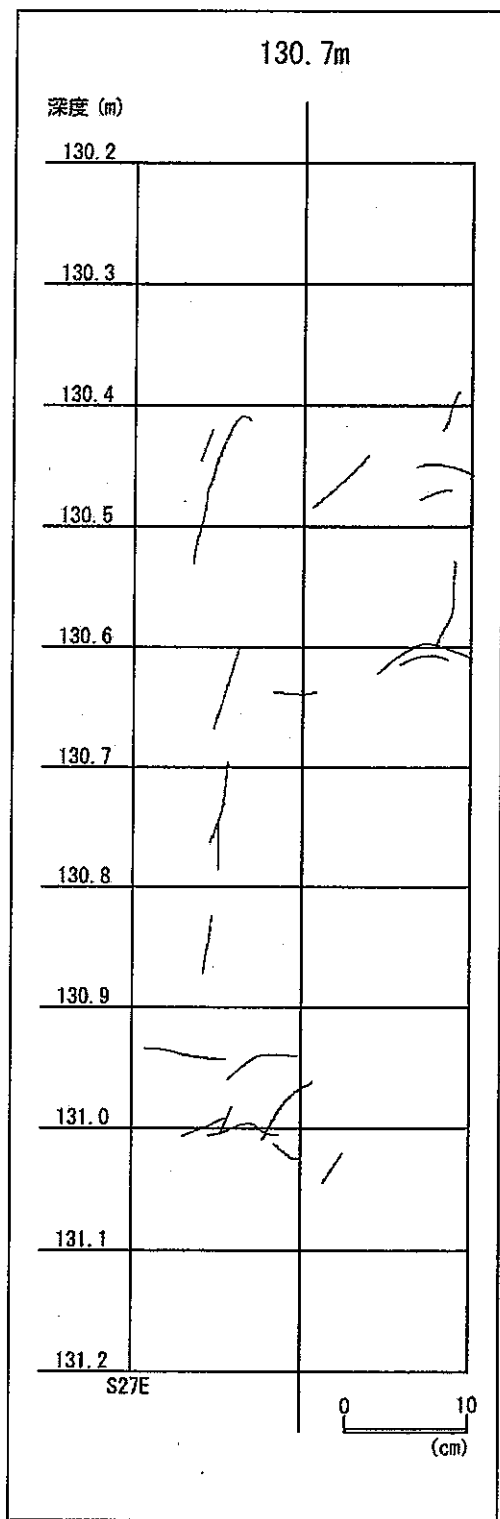
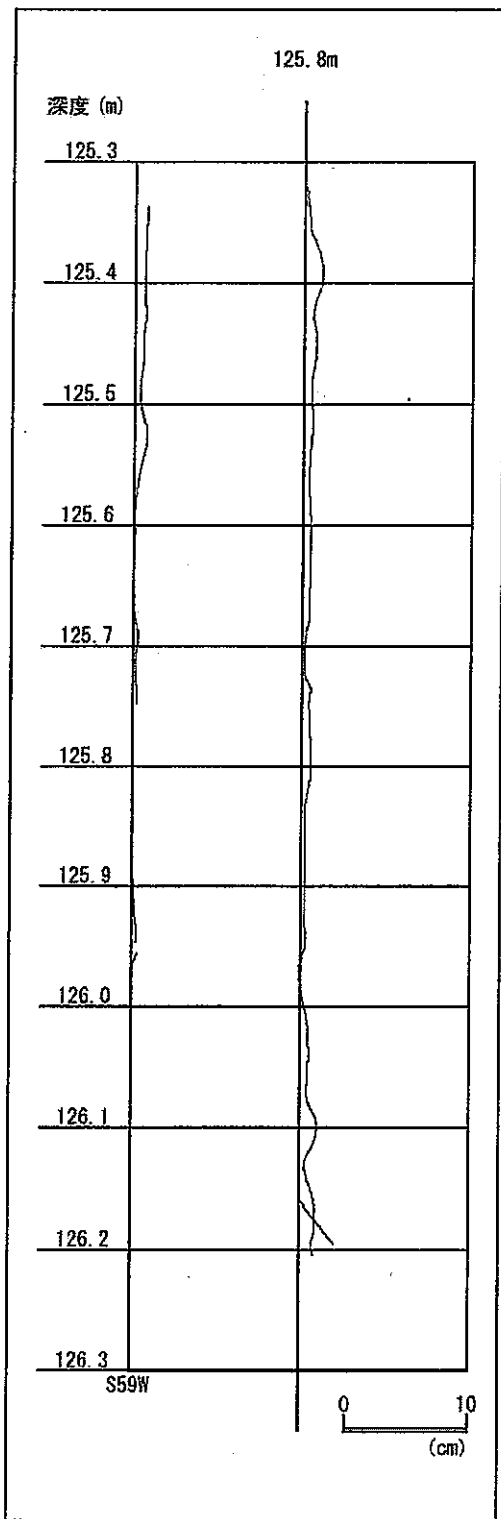
圧力—時間および流量—時間曲線

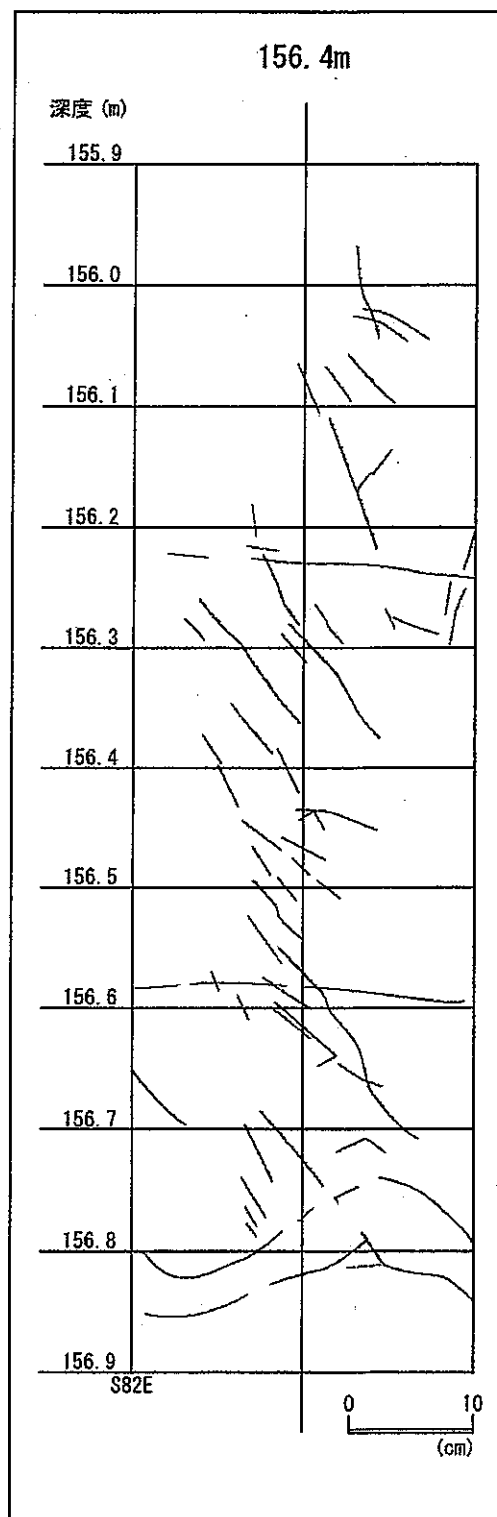
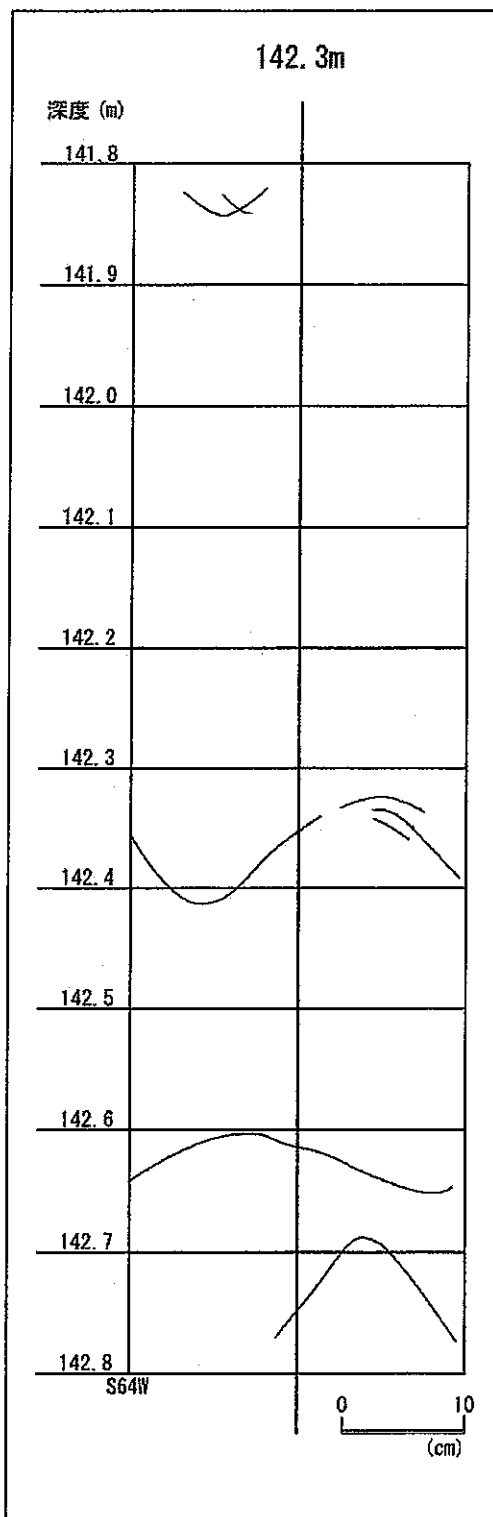


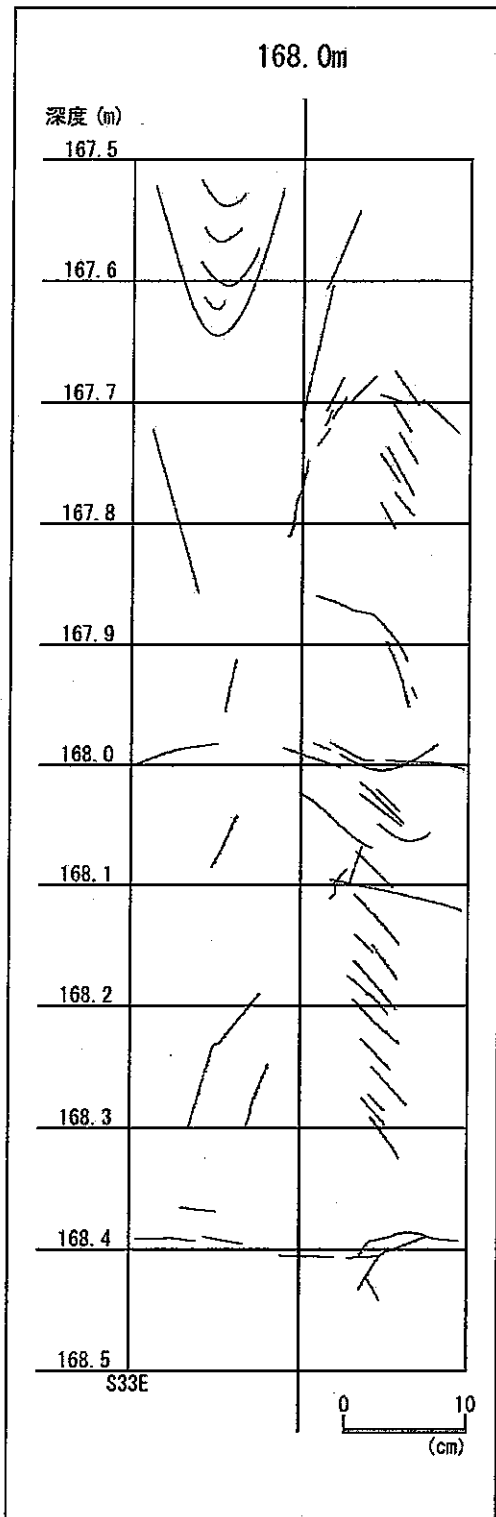


APPENDIX II

水圧破碎試験深度におけるボーリング孔壁面のき裂のスケッチ

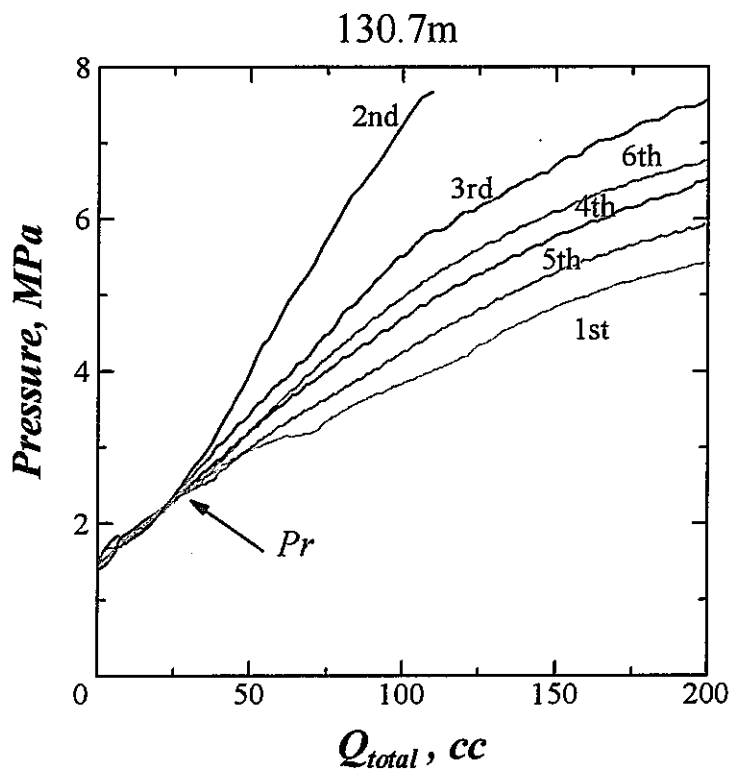
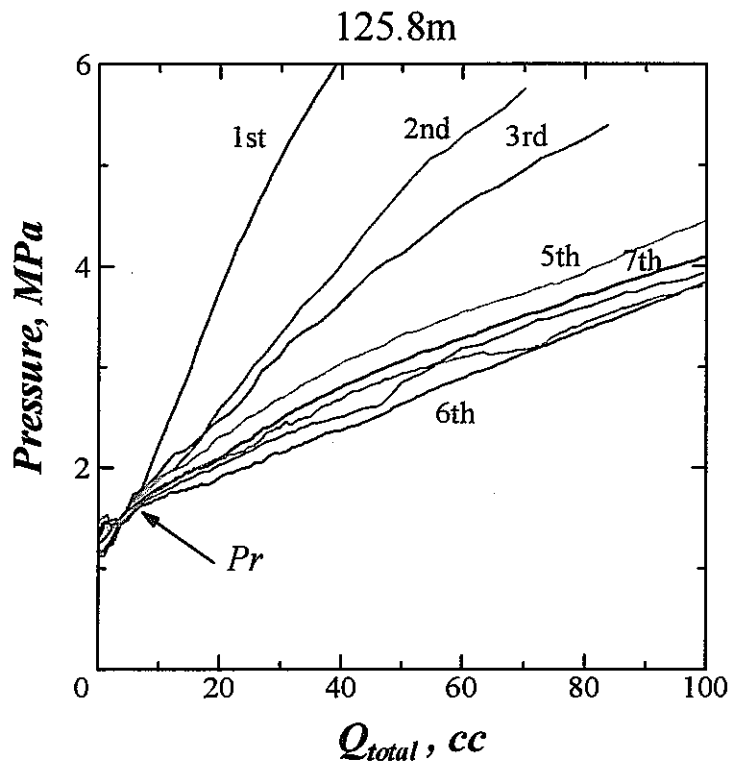






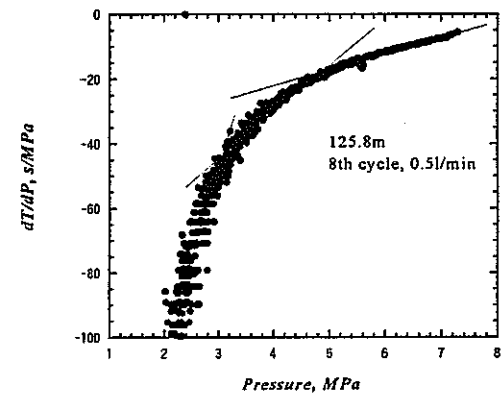
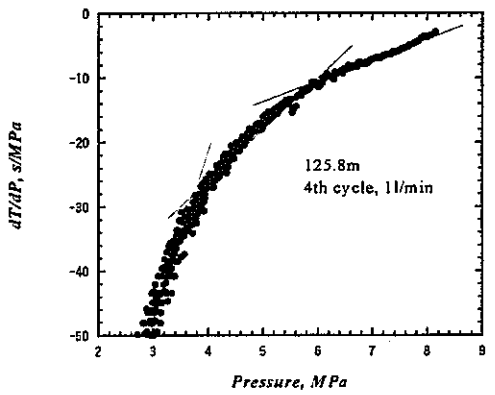
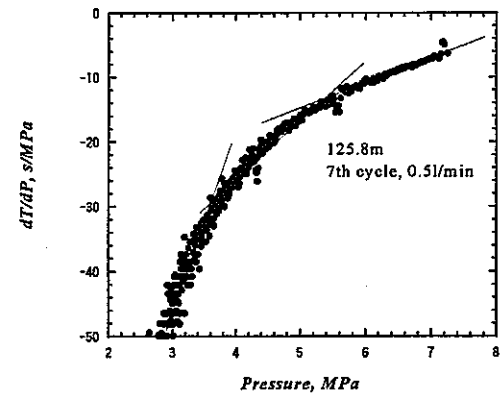
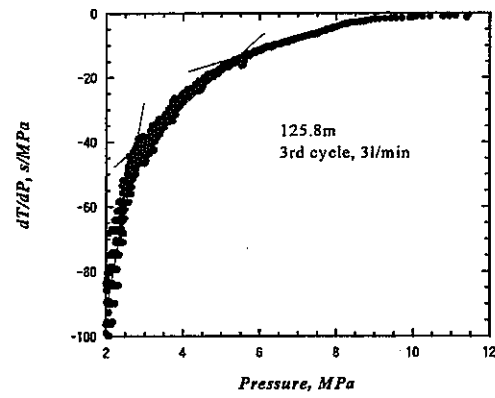
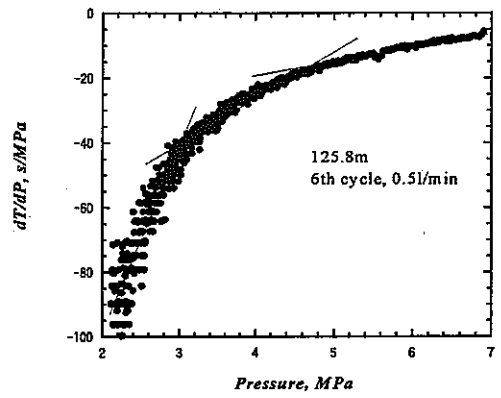
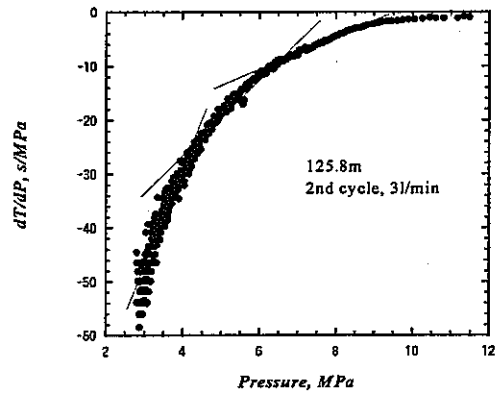
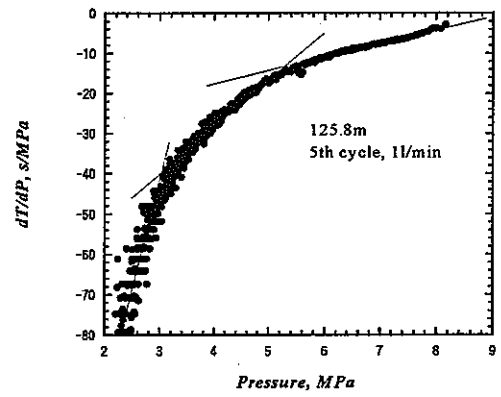
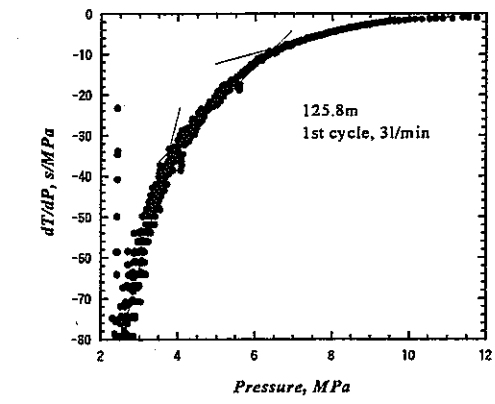
APPENDIX III

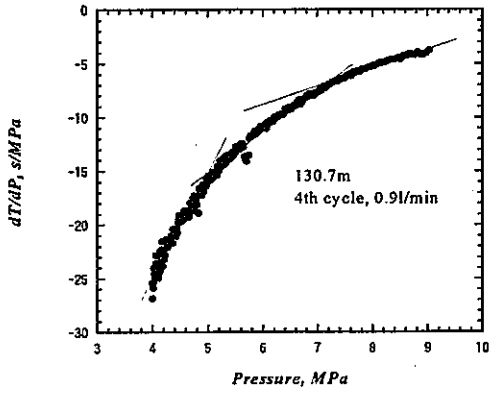
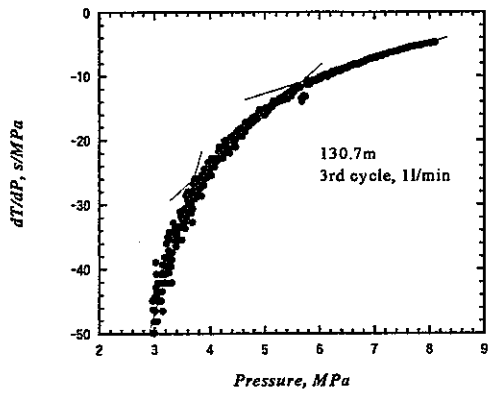
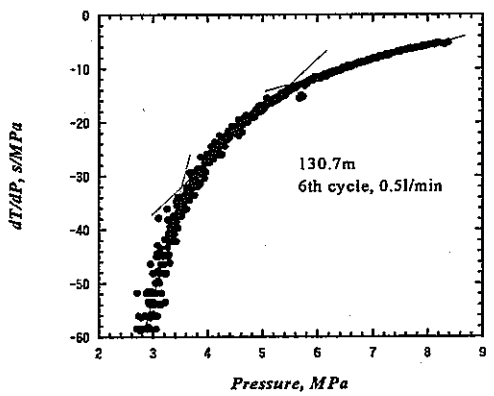
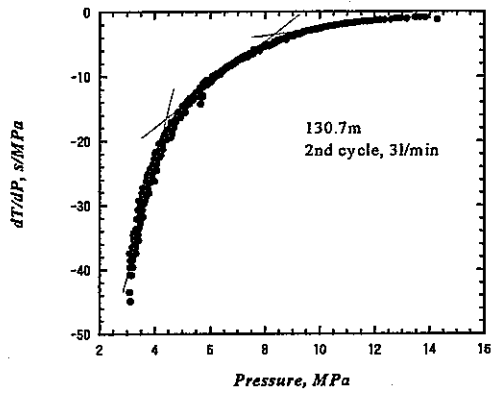
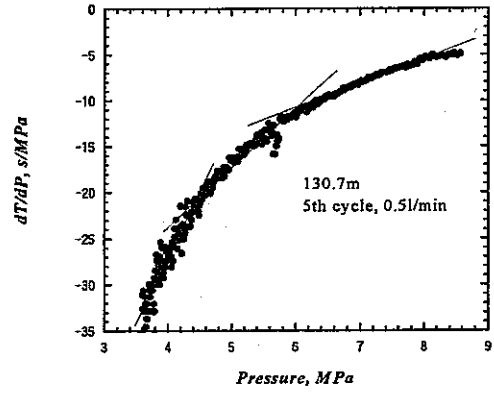
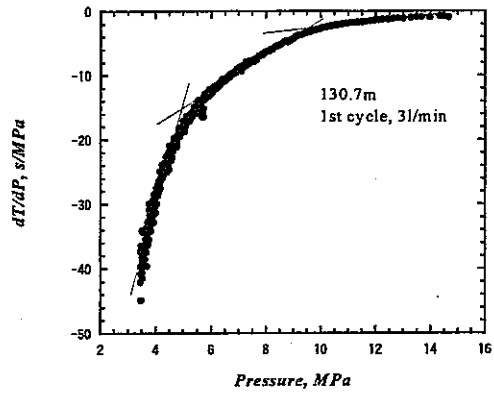
圧力—総流量 Q_{total} の関係

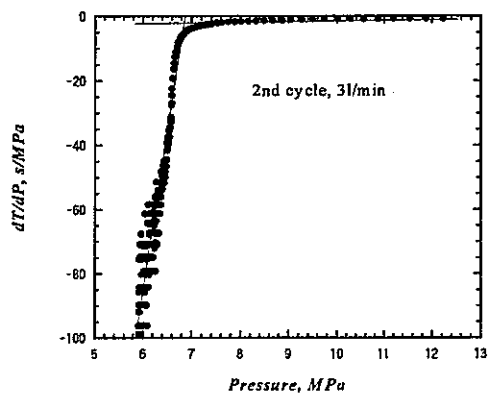
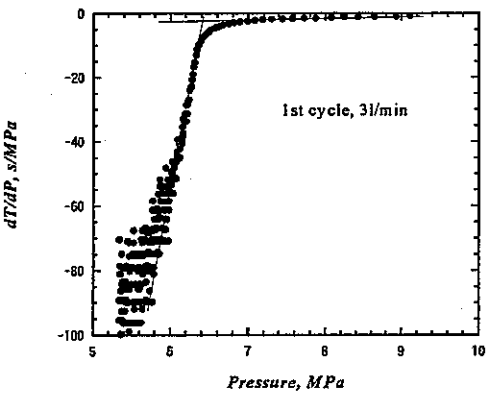
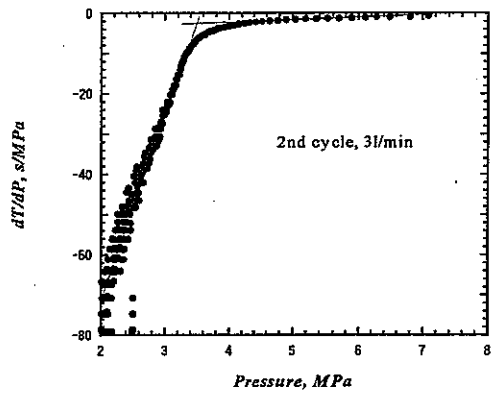
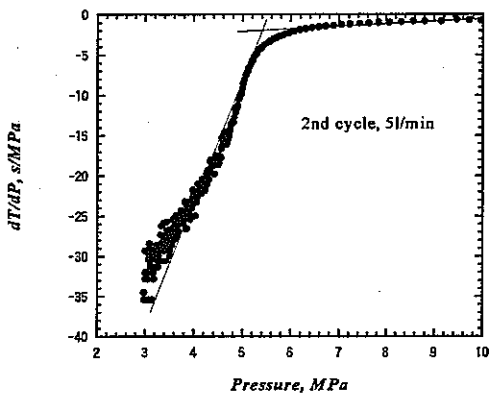
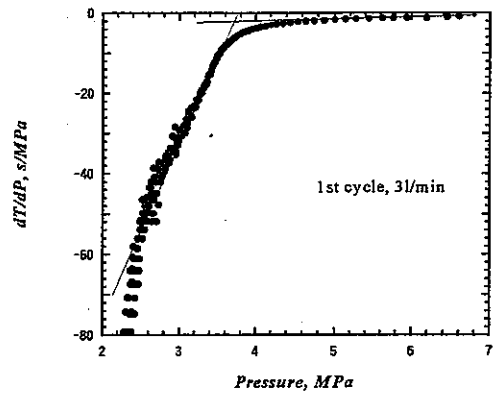
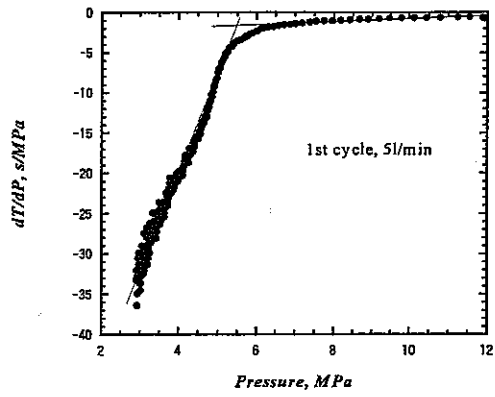


APPENDIX IV

シャットイン後の圧力減衰速度の逆数と圧力の関係

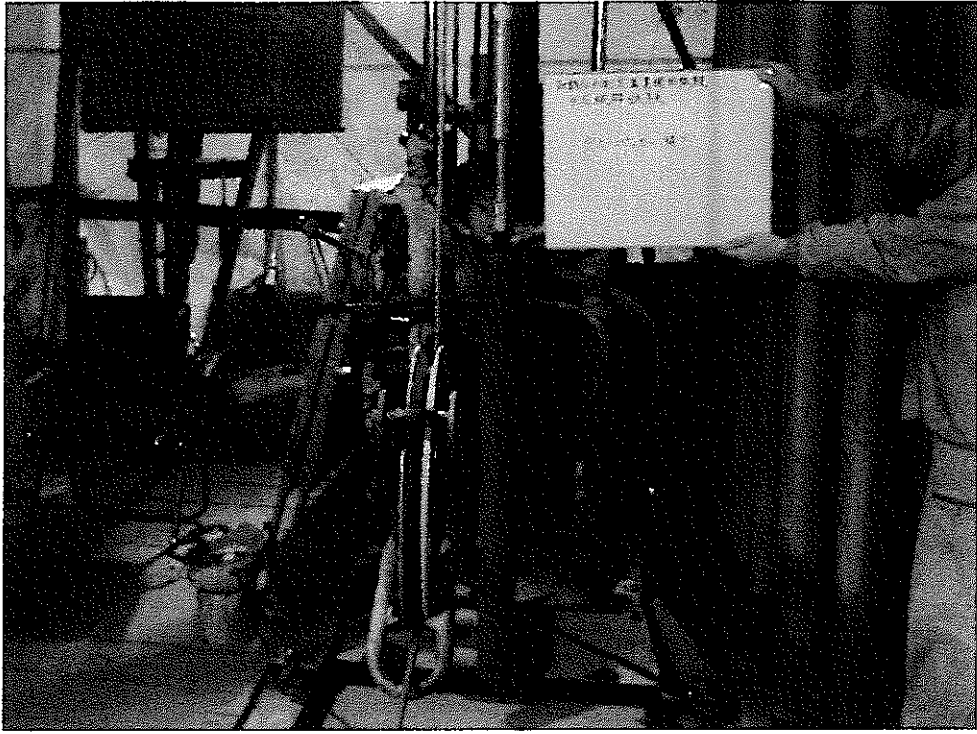




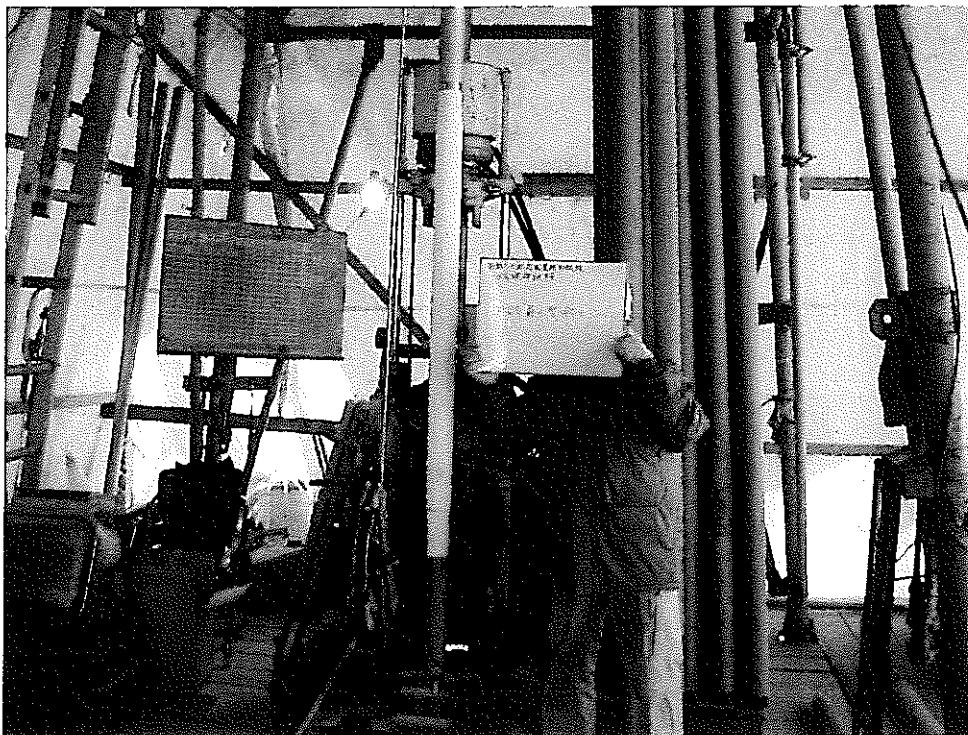


APPENDIX V

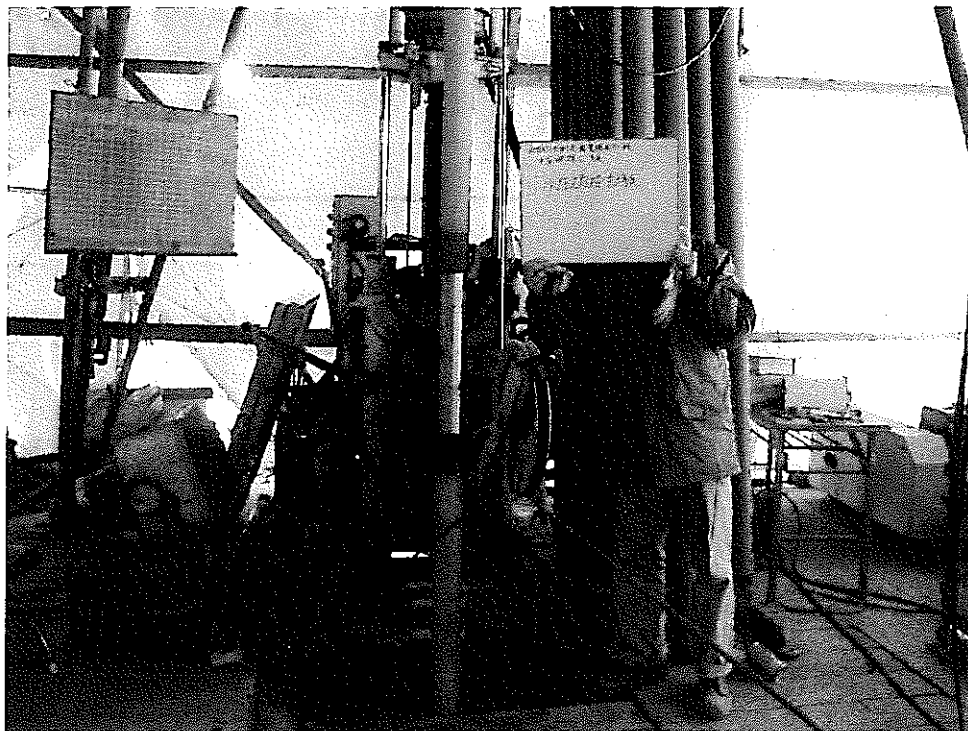
写真集



ダミーパッカーの降下



破砕前の型取り



水圧破碎試験



破碎後の型取り