

# 99SE-02孔における水圧破碎法による

## 初期応力測定

(核燃料サイクル開発機構 契約業務)

平成12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下さい。

〒319 - 1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

Japan

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

2000

## 99SE-02孔における水圧破碎法による初期応力測定

加藤春實\*

## 要 旨

核燃料サイクル開発機構は、東濃鉱山領域を例として、東濃鉱山敷地内の地表から掘削されたボーリング孔において初期応力測定を行ない、三次元的な初期応力状態の評価方法について研究を実施している。本調査ではその一環として99SE-02孔において水圧破碎法による初期応力測定を実施した。そして、今回実施された99SE-02孔の結果と、TM-1孔、TM-2孔および98SE-01孔でこれまでに行なわれた水圧破碎試験の結果とを総合的に比較検討した。得られた知見をまとめると次の通りである。

- (1) 99SE-02孔における $S_h$ の大きさは、上部の新第三紀堆積層と下部の基盤花崗岩との不整合面を境にして不連続的に増大し、一方、 $S_H$ の深度に対する全体的な増加傾向はほぼ線形であった。
- (2) 99SE-02孔における水平面内の最大主応力の方位は、岩盤の種類、月吉断層および不整合面などの地質構造にかかわらず全体としてN30Wを中心分布しており、当該地域における地殻水平ひずみの最大圧縮方向と調和的であった。
- (3) 99SE-02孔における応力環境は地表から深度127.0mまでの新第三紀堆積層で $S_H > S_v \approx S_h$ の遷移型、152.7mの不整合面よりも下部の土岐花崗岩で $S_H > S_h > S_v$ の逆断層型であった。
- (4) 東濃鉱山の99SE-02孔、98SE-01孔、TM-1孔およびTM-2孔における初期応力の大きさは、軟らかい新第三紀の堆積層で小さく、硬い基盤花崗岩で大きい。これは変形特性の異なる不均質な地質構造が初期応力の不連続的な分布として現れたと考えられる。
- (5) 月吉断層を貫く99SE-02孔、TM-1孔およびTM-2孔における水平面内の最大主応力の方位は、断層の影響を受けていないように見え、これは断層充填物の剛性が周辺岩盤のそれと大きく違わないためであると推定される。
- (6) 4本のボーリング孔の位置は60m~130m程度しか離れていないが、測定された最大主応力の方向の分布傾向は個々のボーリング孔で異なっていた。これは、各ボーリング孔で測定された初期応力状態が広域的な応力場ではなく、地質構造などの影響を受けた局所的な応力場を反映しているためでないかと推定された。

---

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結果である。

契約番号：11C0499

サイクル機構担当グループおよび担当者：東濃地科学センター 地層科学研究グループ  
グループリーダー 武田精悦

\*：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。

## ***In situ* stress measurement in 99SE-02 borehole using hydraulic fracturing**

**H.Kato**

### **ABSTRACT**

In order to study characterization techniques of 3 Dimensional state of *in situ* stress, Japan Nuclear Cycle Development Institute has been measuring *in situ* stress using boreholes drilled from ground surface of Tono mine area. As part of the study, hydraulic fracturing tests were conducted in vertical borehole 99SE-02 at Tono mine. The following conclusions were reached by comparing the results of stress measurements obtained from 99SE-02 with those obtained from TM-1, TM-2 and 98SE-01.

- (1) In 99SE-02, the minimum horizontal stress jump occurs while crossing the surface of unconformity separating upper sedimentary formations and lower granitic basement. The magnitude of maximum stress increases in an almost linear fashion over the whole length of the borehole.
- (2) In 99SE-02, the maximum horizontal stress was found to be approximately N30W orientation regardless of geological structures and heterogeneities. The N30W orientation is consistent with the result obtained from plate motion survey within the region.
- (3) The hydraulic fracturing tests in 99SE-02 revealed a change in stress regime from transitional stress regime ( $S_H > S_h \approx S_v^+$ ) in the sedimentary formations to reverse faulting ( $S_H > S_h > S_v$ ) in granite while crossing the unconformity.
- (4) The minimum horizontal stress determined from the shut-in pressure of hydraulic fracturing tests in 99SE-02, 98SE-01, TM-1 and TM-2 was found to be lower in softer Neogene sedimentary formations and higher in stiffer granitic basement. This may be attributed to the difference in stiffness between the sedimentary formations and the granitic basement.
- (5) In 99SE-02, TM-1 and TM-2, the orientation of *in situ* stresses have not change locally while crossing Thukiyoshi fault. This may be responsible for the fault material with similar properties as the surrounding rock.
- (6) The stress orientations in the four boreholes are different although the distance between the boreholes is ranging only from 60m to 130m. Geological structures and heterogeneities may disturb the regional stress field and make the local stress field in each borehole different from the regional stress field.

---

This report has been drawn up by Dowa Engineering Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Agreement No.: 11C0499

JNC Liaison: Seietsu Takeda, Geological Environment Research Section, 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. 水圧破碎試験	1
1.1 目的	1
1.2 測定位置	1
1.3 水圧破碎法	2
1.4 測定方法	4
1.5 計測システム	7
1.6 測定結果	8
1.6.1 ダミーパッカーの降下および破碎前の型取り	8
1.6.2 水圧破碎試験結果	9
1.6.3 解析結果	11
1.7 三次元応力場における水圧破碎き裂の傾き	15
1.7.1 水圧破碎き裂の発生に関する理論解析	15
1.7.2 99SE-02 孔における初期応力測定結果に基づいた解析結果	16
1.8 結言	19
引用文献	20
2. 東濃鉱山周辺の初期応力分布	21
2.1 4本のボーリング孔について	21
2.2 各ボーリング孔における初期応力分布	23
2.3 結言	27
引用文献	27
3. 結論	28

## 付表目次

表 1.5.1 測定機器一覧	7
表 1.6.1 99SE-02 孔における水圧破碎試験の測定結果	10
表 1.6.2 99SE-02 孔における水平面内の最小主応力 $S_h$ 、最大主 応力 $S_{Hmax}$ 、 $S_{Hmin}$ および最大主応力の方位 $\phi$	11
表 2.1.1 各ボアホールの概要	21

## 付図目次

図 1.2.1 99SE-02 孔位置図	1
図 1.3.1 ワイヤライン方式による水圧破碎システム	3
図 1.4.1 水圧破碎法による初期応力測定手順	6
図 1.6.1 水平面内の最大および最小主応力とボアホール深度の関係	13
図 1.6.2 99SE-02 孔で誘起されたき裂の走向とボアホール深度の関係	14
図 1.7.1 三次元応力場における水圧破碎き裂の発生位置	16
図 1.7.2 三次元応力状態とボーリング孔軸の関係	18
図 1.7.3 ボーリング孔軸の主応力軸に対する傾きと水圧破碎き裂の傾斜角の関係	18
図 2.1.1 各ボーリング孔の位置図	22
図 2.1.2 各ボアホールと月吉断層および不整合面との位置関係	22
図 2.2.1 水平面内の最大および最小主応力とボアホール深度の関係	25
図 2.2.2 ヤング率 $Ea$ および $Eb$ の要素から構成される岩盤の応力	23
図 2.2.3 水平面内の最大主応力の方位とボアホール深度の関係	26

## APPENDIX

APPENDIX I キャリパー検層結果	AP-1
APPENDIX II 試験位置の BTV 観察結果	AP-12
APPENDIX III 圧力-時間、流量-時間曲線	AP-24
APPENDIX IV 水圧破碎によって造成されたき裂のスケッチ	AP-36
APPENDIX V Breakdown および re-opening における圧力-時間曲線の 重ね合わせ	AP-40
APPENDIX VI Shut-in 後の圧力減衰速度の逆数と圧力の関係	AP-47
APPENDIX VII 写真集	AP-52

## 別冊資料

99SE-02 孔コア観察結果

# 1. 水圧破碎試験

## 1.1 目的

核燃料サイクル開発機構は、東濃鉱山領域を例として、東濃鉱山敷地内の地表から掘削されたボーリング孔において初期応力測定を行ない、三次元的な初期応力状態の評価方法について研究を実施している。本調査はその一環として 99SE-02 孔を利用して水圧破碎試験を行ない、初期応力（水平面内の最大および最小主応力値および主応力方向）と深度の関係を深さ 200m までの区間で測定することを目的とする。

## 1.2 測定位置

測定は東濃鉱山敷地内の 99SE-02 孔（深度 200m）で実施した（図 1.2.1 参照）。99SE-02 孔は、直径 101mm の HQ ボアホールで孔内水位は地表から 49.31m の位置にある。孔口から深度 152.7m までは、泥岩、細粒砂岩などの新第三紀の堆積岩から構成され、深度 55m でボーリング孔は月吉断層と交差する。152.7m 以深は基盤の土岐花崗岩体であり、上位の堆積岩と不整合に接している。なお、99SE-02 孔から採取された岩芯のコア観察結果およびコアの写真を別冊資料「岩芯観察記録—99SE-02 号孔—」としてまとめた。

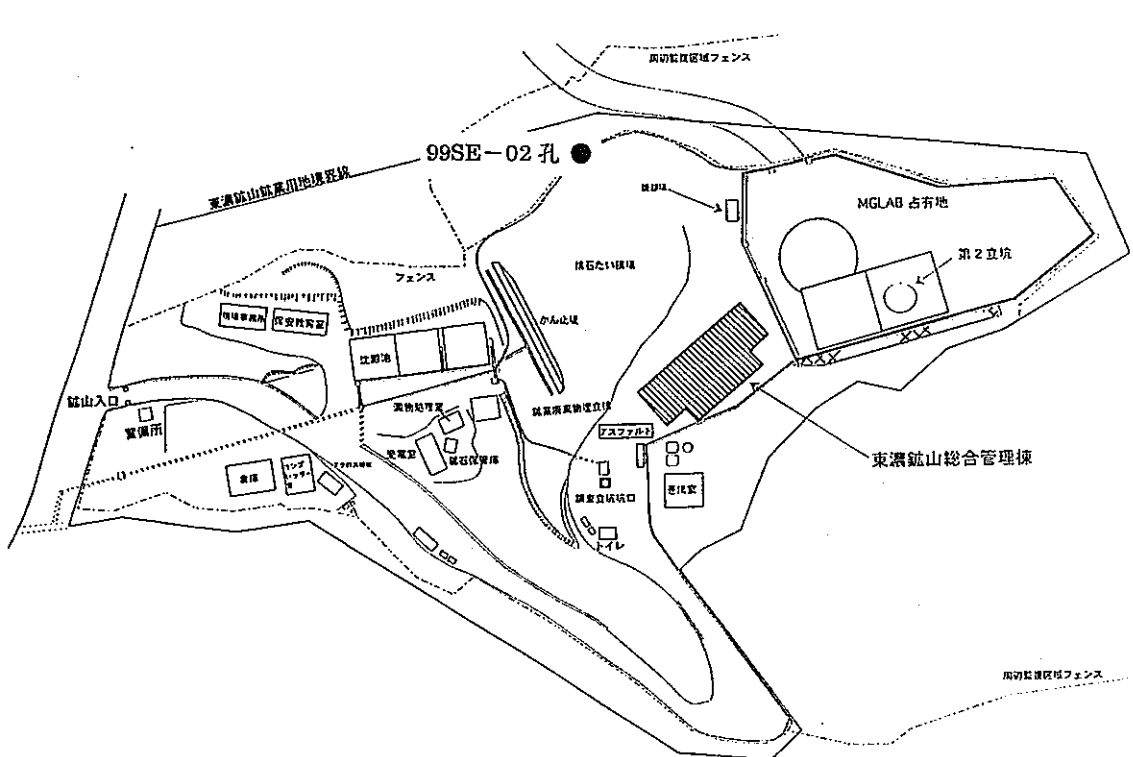


図 1.2.1 99SE-02 孔位置図

### 1.3 水圧破砕法

地下空間の利用において、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、地下空間設計の第1因子であり、地下構造物の安定性、安全性、寿命などを支配する主要因子である<sup>[1]</sup>。岩盤の初期応力測定法としては、応力解放法、水圧破砕法、応力補償法、ボーリングコアを用いる手法などが行なわれている。このうち水圧破砕法は、地表あるいは坑道からボーリングされ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引張応力によってボーリング孔の壁面を破壊し、き裂を岩盤内に進展させ、実験中の水圧の変化から初期応力を測定するものである。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、接近点から相当深い所にも容易に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。また、破壊条件を観測方程式としているので、応力の評価に弾性定数を必要とせず直接に応力を測定できる。

水圧破砕法による初期応力測定においては、人間が地下深部に降りていき、坑道からボーリングされた比較的浅いボーリング孔を利用して計測を行なう場合がある。このとき用いられるパッカーは、ゴムパッカーと破碎区間への流路が独立した2本の圧力系統から構成されている。このシステムは比較的簡単な試験設備であるから経済的に計測できるという利点はあるが、人力によってプローブを出し入れするので、適用できるボーリング孔の長さは最大でも30m程度であるという欠点がある。一方、地下空洞の建設にとりかかる前の初期応力測定、地熱開発あるいは地震予知のための初期応力測定においては、地表から大深度のボーリング（たとえば深度500m）を行なわなければならない。しかし、石油掘削のための技術や設備をそのまま応用した従来の方法によれば、掘削やぐら、掘削パイプ、動力などの大規模な設備が必要である。また、従来の水圧破砕システムでは、パッカーを膨張させるための流路と破碎のための流路の切り替えが非可逆的であったため、ボーリング孔内で連続的に水圧破砕を行なうことはできなかった。

このような問題を解決するために、大深度においてしかも小規模な設備によって水圧破砕ができる測定システムが開発された<sup>[2]</sup>。このシステムは図1.3.1に示すように、高圧ホース、ワイヤラインおよびストラドルパッカー（水圧破砕用パッカー）から構成され、ゴムパッカーへの加圧から破碎区間への加圧へと流路を切り替えるためのプッシュ・プルバルブと呼ばれる機構を備えている。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。また、ボーリング孔内の水位が低い場合でもホース内に残っている流体の水頭によってパッカーが膨張したままにならないように、パッカーにはリリースバルブが取り付けられている。さらに、破碎区間の流体圧はストラドルパッカーの近傍に設置された圧力変換器によって測定するので、この流体が長い高圧ホースの中を通過することによって生じる圧力降下は測定される圧力にほとんど影響をおよぼさない。



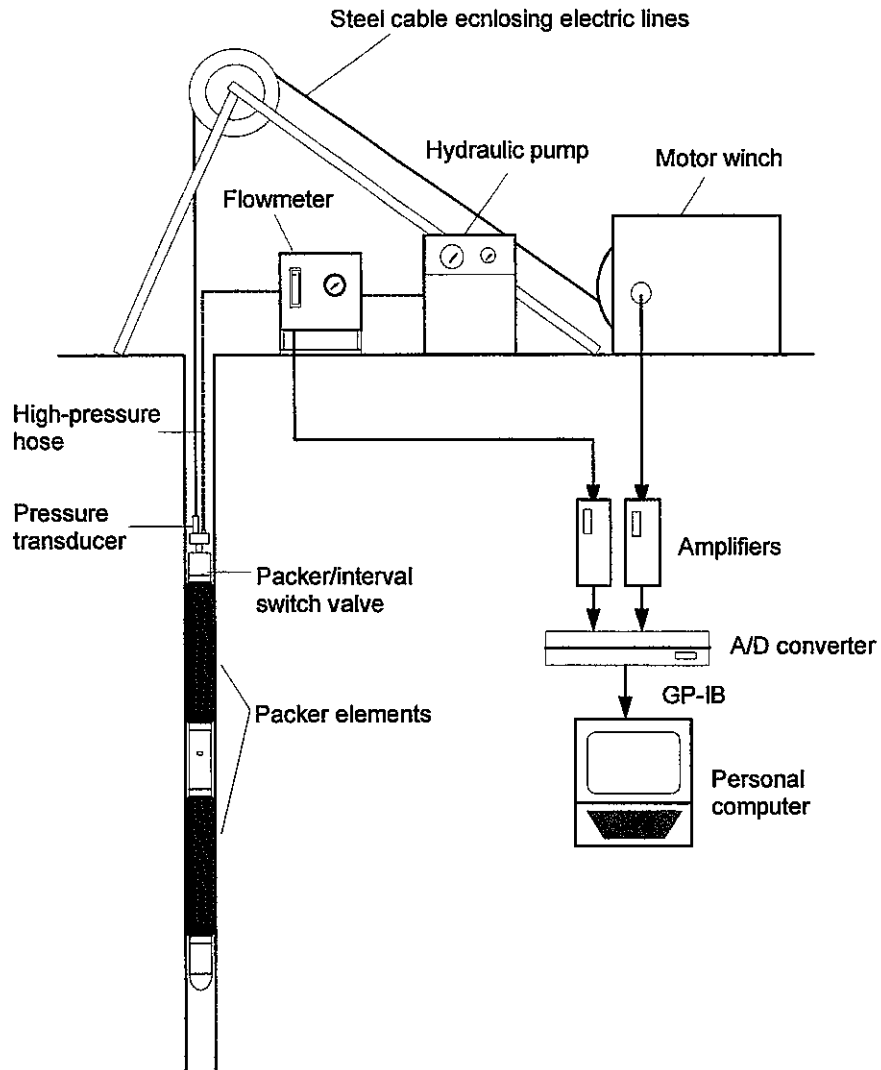


図 1.3.1 ワイヤライン方式による水圧破碎システム

## 1.4 測定方法

プッシュ・プルバルブシステムを用いた水圧破碎試験の手順を図 1.4.1 にしたがって説明する。

### (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の直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ボーリング孔径が確保されているかを調査する。

### (2) 水圧破碎前の孔壁における型取り

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試験位置として選定する。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（ボーリング孔壁面の凹凸を写し取るためのゴムパッカー）を用いた水圧破碎前の孔壁の型取りを行ない、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、所定の深度でインプレッションパッカーを膨張させ、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。インプレッションパッカーの膨張圧力は岩盤および初期応力の状態によって異なるが、通常、5 から 10MPa で、保持時間は約 30 分である。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、これを避けるためにさらに別の試験位置を探す。

### (3) 水圧破碎試験

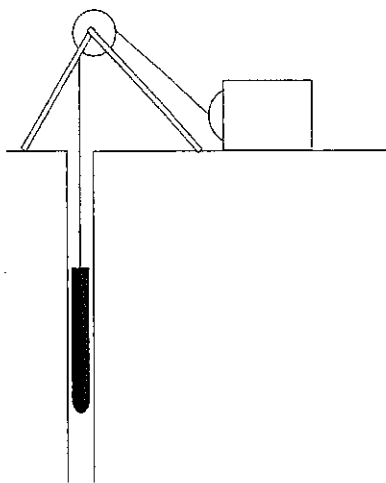
所定の深度までストラドルパッカーを降ろし、水圧破碎試験を行なう。まず、ゴムパッカーを膨らませて加圧区間を確保する。そしてストラドルパッカーの加圧区間に比較的大きな流量（3~6l/min）で破碎流体（清水）を圧入し、破碎区間の水圧を上昇させる。ボーリング孔の壁面にき裂が生じて破碎区間の圧力が急激に低下したら高圧ポンプによる流体の圧入を停止し、圧力の経時変化を観測する。その後、地表の圧力パネルのバルブを操作して加圧区間に通じる流路を大気に解放し、き裂に圧入されていた破碎流体を排出する。次に再び同じ流量で流体を圧入し、先に生じたき裂がボーリング孔壁面において再開するときの圧力  $P_r$  (Re-opening pressure) を測定する。き裂の再開は最低 4 回実施して、圧力-時間挙動の再現性を調べる。水圧破碎によって誘起されたき裂を再開してからポンプを停止し、加圧区間に通じる流路のバルブを大気に解放すると破碎区間の圧力は低下し、き裂は再び閉じようとする。このためき裂に圧入されていた破碎流体は破碎区間に逆流する。このとき大気に解放されているバルブを閉じると破碎区間の圧力は回復する(Pressure rebound)。造成されたき裂に

破碎流体が封じ込められて岩盤あるいはボーリング孔へのリークが少ない場合、特に明瞭な圧力の回復がみられるので、このような破碎区間では造成されたき裂に作用する法線応力と破碎流体の圧力が釣り合うときの圧力  $P_s$  (Shut-in pressure) が容易に決定できることが多い。

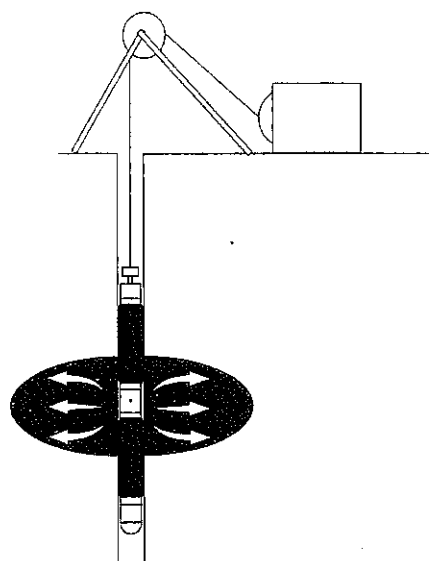
#### (4) 破碎後の型取りによる人工き裂の方位測定

水圧破碎後、再びインプレッションパッカーを用いて破碎地点の壁面における型取りを行ない、(2) で得られたインプレッションと比較することにより新たに造成されたき裂が判定される。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、インプレッションの表面に印された基準線の方位が測定される。したがって、インプレッションの表面に写し取られたき裂の走向傾斜を決定することができる。

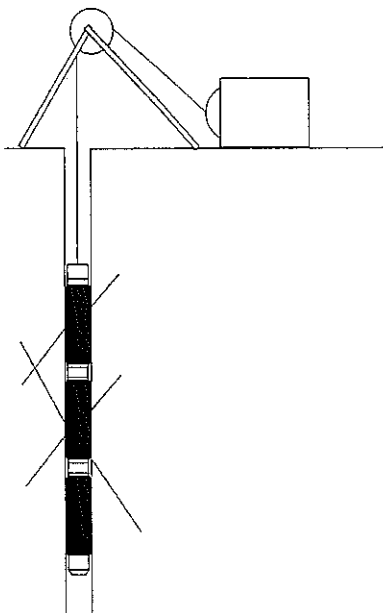
(1) Inserting a dummy packer.



(3) Hydraulic fracturing.



(2) Impression test before hydrofrac.



(4) Impression test after hydrofrac .

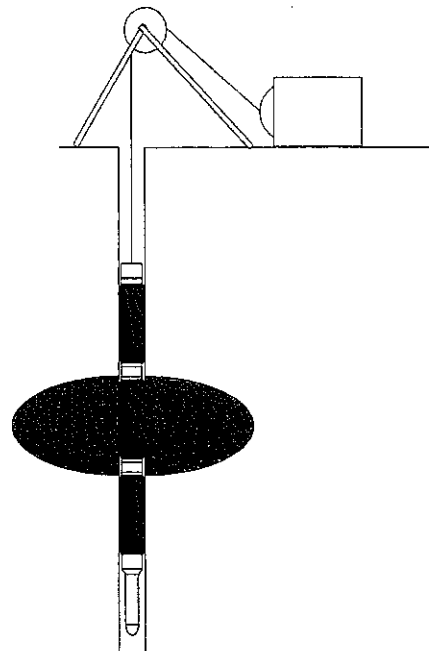


図 1.4.1 水圧破砕法による初期応力測定手順

## 1.5 計測システム

水圧破碎試験のための計測システムは、図 1.3.1 に示す通りである。破碎流体は圧縮空気動高圧ポンプによって流量計および高圧ホースを通じてストラドルパッカーの加圧区間まで送られる。ボーリング孔の破碎区間における破碎流体の圧力は、ケーブルヘッドに内蔵された圧力変換器によって測定され、そのデータはアーマードケーブルを通じて地表の動ひずみ測定器まで転送される。破碎区間への圧入流量は圧力パネルに設置された流量計によって測定される。動ひずみ測定器および流量計の出力はいずれも A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに転送され記録される。データの取り込み速度は 50ms である。水圧破碎によって誘起された人工き裂の方位は、インプレッションおよびインプレッションパッカーの下端に取り付けられた坑井方位傾斜儀計のデータから決定される。

水圧破碎試験に用いた主な計測機器は表 1.5.1 のようである。

表 1.5.1 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 30MPa	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 30MPa	同和工営 (株)	1 本
ケーブルウィンチ、1.5kW、1000m 用	同和工営 (株)	1 台
高圧ポンプ、JHP-500W、3.5l/min、35MPa	(株) フジキン	2 台
システムコントローラー、PC-9801T	日本電気 (株)	1 台
A/D コンバーター、ADC-116C	(株) 共和電業	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、MP-MCF-SLE、測定範囲 6.0l/min	流体工業 (株)	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

## 1.6 測定結果

### 1.6.1 ダミーパッカーの降下および破碎前の型取り

ストラドルパッカーと直径の等しい重量 30kg のダミーパッカーは、孔口から深度 200m までスムーズに降下し、この深度範囲で孔壁からの地層の押し出しあるいは崩壊物によって孔径の減少した箇所や閉塞した箇所はないことが確認された。

天然き裂の影響を受けない測定データを得るために、水圧破碎試験はボーリング孔のできるだけ天然き裂の少ない区間で実施することが望ましい。このため、ボーリングコア柱状図に記載された RQD の深度分布、キャリパー検層結果 (APPENDIX I) および BTV 観察結果 (APPENDIX II) に基づいて、天然き裂が少ないと判定された次の 11 深度で水圧破碎前の型取りを行なった。すなわち、深度 40、45、75、79、87、105、127、162、189.5、200 および 206m である。

99SE-02 孔は HQ サイズ (直径 101mm) のビットで掘削されたが、キャリパー検層の結果は、孔口から 152.7m までの堆積層でボーリング孔の直径がビットのゲージ直径よりも拡大していることを示していた。このため、深度 152.7m よりも浅いところでは、拡大したボーリング孔の直径に適合するように直径の大きなゴムパッカーを使用した。次に述べる水圧破碎試験においても、破碎前の型取りと同様に、測定深度のボーリング孔の直径に応じて直径の異なるゴムパッカーを使用した。

## 1.6.2 水圧破碎試験結果

水圧破碎試験は、深度 39.0m から 205.0m にわたって 11 回行なった。造成されたき裂のタイプ（縦き裂、横き裂、人工き裂、天然き裂）、き裂の走向および傾斜、ボーリング孔壁面において最初にき裂が発生するときの圧力  $P_b$  (Breakdown pressure)、それを同じ流量で再開するときの圧力  $P_r$  (Re-opening pressure)、造成されたき裂に作用する法線応力と破碎流体の圧力が釣り合うときの圧力  $P_s$  (Shut-in pressure)などは表 1.6.1 のようである。試験を実施した深度が 1.6.1 で述べた破碎前の型取りの深度と若干異なる場合があるのは、破碎前の型取り結果に基づいて天然き裂のより少ない深度を選定したためである。水圧破碎試験中の圧力-時間曲線、流量-時間曲線および破碎前後の型取りから判定された人工き裂および天然き裂は APPENDIX III および IV に示す通りである。

ここで、表 1.6.1 に示した  $P_b$ 、 $P_r$  および  $P_s$  の決定方法について述べる。まず  $P_b$  は第 1 回目の加圧サイクルにおける最高圧力として求められる。 $P_r$  は、第 1 回目の加圧サイクルによってボーリング孔の壁面にき裂が生じるときに得られる圧力-時間曲線と、次に同一の流量でそのき裂を再開したときに得られる圧力-時間曲線とを重ね合わせ、後者の曲線が前者の曲線からそれるとききの圧力として求めることができる<sup>[3][4]</sup>。ただし、き裂を再開するときの圧力-時間曲線は、再開を何回か繰り返し、ボアホール壁面における岩盤の引張強度  $T$  が完全にゼロとなった後の曲線を用いなければならない。各深度で測定された第 1 回目およびき裂を再開したときの圧力-時間曲線を重ね合わせた図を APPENDIX V に示す。

$P_s$  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破碎流体の圧力が釣り合うときの圧力である。ポンプを停止(shut-in)した後の破碎区間の圧力-時間曲線に明瞭な変曲点がみいだされるとき、すなわち shut-in 直後いったん急激に低下した圧力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、shut-in 後の圧力の減衰速度は急激に低下しないので  $P_s$  を圧力-時間曲線の変曲点として決定することはむずかしい。そこで圧力-時間曲線から図式的に  $P_s$  を求めるいくつかの方法<sup>[4][5][6][7]</sup>が提案されているが、ここでは決定方法の基礎となる理論が明快な Hayashi and Haimson<sup>[7]</sup>の方法を用いた。この方法では、shut-in 後の圧力-時間曲線から求められるボーリング孔の水圧とその時間変化率の逆数との関係を 3 直線で近似し、高圧側の 2 直線の交点におけるボーリング孔の水圧が  $P_s$  として求められる (APPENDIX VI 参照)。ただし、深度 75.0m、79.0m、105.0m および 127.0m では、shut-in 後の圧力の減衰が比較的緩やかだったので、圧力-時間曲線から直接  $P_s$  を求めた。

表 1.6.1 をみると、 $P_b$ 、 $P_r$  および  $P_s$  の大きさは不整合面を境にしてはっきりと異なり、上部の新第三系の堆積岩中で小さく、下部の基盤花崗岩中で大きい。例えば、 $P_b$  の平均値は明世累層および土岐夾炭層でそれぞれ 2.2MPa および 2.4MPa であるのに対し、土岐花崗岩で 7.0MPa である。また、初期応力の最小主応力の大きさとみなされる  $P_s$  の平均値は、堆積岩中で 1.8MPa、花崗岩中では 3.8MPa である。 $P_b$  の大きさが花崗岩で大きい

理由は、花崗岩の引張強度が堆積岩よりも大きいからであり、 $P_b$ がやはり花崗岩中で大きいのは、堆積岩中の初期応力よりも花崗岩中の初期応力が大きいためである。 $P_b$ と $P_r$ の差として求めた破砕区間の引張強度 $T$ についても $P_b$ と同様の傾向が認められ、花崗岩の平均引張強度は堆積岩の4倍以上である。

縦き裂の走向および横き裂の走向傾斜は、インプレッションに写し取られたこれらのき裂のトレースに最も適合する平面を最小二乗法によって決定して求めた<sup>[4]</sup>。99SE-02孔においては、深度105.0mの土岐夾炭層で既存の天然き裂が再開したのを除くと、他のすべての深度でボーリング孔軸を含む新たな縦き裂が誘起された。ただし、深度75.0mおよび79.0mでは、水圧破砕試験後のボーリング孔壁面で写し取られた人工の縦き裂はボーリング孔軸と平行な直線ではなく、母線と6.0~9.5°の緩い角度で斜交する多数の短いき裂（エシェロンタイプのき裂）から構成されていた（APPENDIX IV参照）。このことは、明世累層下部の深度75~79m付近で、初期応力の主軸のひとつがボーリング孔軸と一致せず、若干傾いていることを示唆している。初期応力の主軸とボーリング孔軸のなす角度については1.7節でさらに詳しく検討する。

表 1.6.1 99SE-02 孔における水圧破砕試験の測定結果

ボアホール の深度 (m)	岩石	人工き裂の タイプ <sup>+</sup>		き裂の 方位 $\phi_i$ (deg) <sup>++</sup>	測定圧力など(MPa)				備考
		L/T	N/J		$P_b$	$P_r$	$P_s$	T	
39.0	明世累層	L	N	32.3	1.3	0.8	1.0	0.5	
44.0	明世累層	L	N	-36.7	3.5	2.6	1.5	0.9	
75.0	明世累層	L	N	-13.8	1.9	1.3	1.8	0.6	エシェロンタイプ
79.0	明世累層	L	N	-20.4	2.0	1.5	1.7	0.5	エシェロンタイプ
87.0	土岐夾炭層	L	N	-38.8	2.4	2.0	1.4	0.4	
105.0	土岐夾炭層	L	J	22.3	2.4	2.1	2.1	0.3	
127.0	土岐夾炭層	L	N	-28.1	2.3	1.5	2.1	0.8	
162.0	花崗岩	L	N	32.5	8.1	4.4	3.6	3.7	
188.5	花崗岩	L	N	-50.5	5.1	2.8	3.2	2.3	
199.0	花崗岩	L	N	-18.9	7.2	3.9	3.9	3.3	
205.0	花崗岩	L	N	-58.5	7.5	5.5	4.5	2.0	

$P_b$ : Break down pressure.  $P_r$ : Re-opening pressure.

$P_s$ : Shut-in pressure. T: Tensile strength;  $T=P_b-P_r$ .

+ : Long, Transverse, N および J はそれぞれ縦き裂、横き裂、新たに造成されたき裂および既存のき裂を意味する。

++:  $\phi_i$  は縦き裂の走向を磁北から時計まわりに測定した角度である。



### 1.6.3 解析結果

ここでは、ボーリング孔軸がひとつの主応力軸の方向と一致していると仮定し、円孔まわりの弾性解を用いる解析方法に基づいて各測定深度における水平面内の主応力を求める。

Break down pressure  $P_b$ 、ボーリング孔軸と直交する水平面内の最大主応力  $S_H$ 、最小主応力  $S_h$ 、pore pressure  $P_o$  および破砕区間の岩盤の引張強度  $T$  から、よく知られた次式が導かれる。

$$P_b = 3 S_h - S_H - P_o + T \quad \dots\dots\dots (1.6.1)$$

水圧破砕によって生じた縦き裂をボーリング孔壁面において再開するときの圧力を  $P_r$  ( $T=0$ ) とすると

$$P_r = 3 S_h - S_H - P_o \quad \dots\dots\dots (1.6.2)$$

したがって、多孔質岩盤における水平面内の最大主応力の下限  $S_{Hmin}$  は次式で与えられる。

$$S_{Hmin} = 3 S_h - P_r - P_o \quad \dots\dots\dots (1.6.3)$$

空隙率の小さい結晶質岩盤に対する水平面内の最大主応力の上限  $S_{Hmax}$  は  $P_o$  を無視することによって次式のように推定される。

$$S_{Hmax} = 3 S_h - P_r \quad \dots\dots\dots (1.6.4)$$

ここで、最小主応力  $S_h$  は shut-in pressure  $P_s$  として水圧破砕試験における圧力-時間曲線から決定され、次式で表される。

$$S_h = P_s \quad \dots\dots\dots (1.6.5)$$

表 1.6.1 の  $P_r$  および  $P_s$  を式 (1.6.3) から (1.6.5) に代入して水平面内の最大主応力  $S_H$  および最小主応力  $S_h$  を求めると表 1.6.2 のようである。ただし、 $P_o$  は 99SE-02 孔の地下水面（孔口からの深度 49.31m）から水圧破砕深度までの水頭圧に等しいと仮定した。

表 1.6.2 99SE-02 孔における水平面内の最小主応力  $S_h$ 、最大主応力  $S_{Hmax}$ 、 $S_{Hmin}$  および最大主応力の方位  $\phi$

Borehole depth(m)	Principal stress(MPa)			Direction of $S_H$ * $\phi$ (deg)
	$S_h$	$S_{Hmin}$	$S_{Hmax}$	
39.0	1.0	2.2	2.2	32.3
44.0	1.5	1.9	1.9	-36.7
75.0	1.8	3.8	4.1	-13.8
79.0	1.7	3.3	3.6	-20.4
87.0	1.4	1.8	2.2	-38.8
105.0	2.1	3.7	4.2	22.3
127.0	2.1	4.0	4.8	-28.1
162.0	3.6	5.3	6.4	32.5
188.5	3.2	5.4	6.8	-50.5
199.0	3.9	6.3	7.8	-18.9
205.0	4.5	6.5	8.0	-58.5

\*:  $\phi$  は磁北から時計まわりに計った回転角度。

まず、水平面内の主応力の大きさをボーリング孔の深度の関数として表示すると図 1.6.1 のようである。ここで、○印は水平面内の最小主応力  $S_h$ 、□印は  $P_o$  を考慮して式 (1.6.3)

から求めた水平面内の最大主応力  $S_{Hmin}$ 、そして■印は式 (1.6.4) から求めた最大主応力  $S_{Hmax}$  である。点線は堆積岩の平均単位体積重量を  $17.0\text{kN/m}^3$  とし、花崗岩のそれを  $25.5\text{kN/m}^3$  として求めた<sup>[8]</sup> 被り地圧  $S_v$  の大きさを示している。

前節で述べたように、 $S_h$  の大きさ (すなわち  $P_g$ ) は上部の堆積層と下部の基盤花崗岩の不整合面 (152.7m) よりも深くなると不連続的に増大する。しかし、 $S_H$  の増加傾向には  $S_h$  のような不整合面を境にした不連続的な分布傾向は認められないようであり、深度 87.0m の土岐夾炭層上部でいったん減少するものの、深度に対する全体的な増加傾向はほぼ線形である。深度 55m にある月吉断層を挟んだ初期応力の分布傾向にはきわだった変化は認められないようである。この原因として、断層による初期応力の擾乱が断層のごく近傍に限定されていて、最も断層に近い試験深度 (断層から約 20m) にまで及んでいないか、あるいは初期応力分布が月吉断層の影響を受けていないことが考えられる。初期応力に及ぼす月吉断層の影響を詳細に調査するためには、断層により近接した位置で多数の測定を行なわねばならないが、断層の近傍ではボーリング孔の壁面が崩壊しやすいために水圧破碎試験を行なうことは困難である。なお、初期応力の環境は、地表から深度 127.0m までの新第三紀堆積層で  $S_H > S_v \approx S_h$  の遷移型、152.7m の不整合面よりも下部の土岐花崗岩で  $S_H > S_h > S_v$  の逆断層型である。

次に、各深度において決定された水平面内の最大主応力  $S_H$  の方位とボーリング孔の深度の関係を描くと図 1.6.2 のようである。ここで、○印は破碎後の型取りのレプリカに写し取られたき裂のうち人工の縦き裂と判定されたき裂の走向であり、ボーリング孔軸と垂直な水平面内の最大主応力の方向と一致する。レプリカを母線にそって切り開いて展開し、レプリカに写し取られた人工の縦き裂のトレースをボーリング孔軸と平行な辺からの距離として離散化したとき、それらの距離の標準偏差を角度に変換したものが横軸に平行な誤差棒である。なお、深度 105.0m の土岐夾炭層では、破碎後のき裂の型取りから天然き裂が再開したと判断されたので、このき裂の方位は括弧で囲んで表示した。

図 1.6.2 をみると、試験深度の最も浅い深度 39.0m と不整合面に近接した深度 162.0m における最大主応力の方向は N30E であるが、残り 8 深度における最大主応力の方位は岩盤の違い (堆積層および基盤花崗岩)、月吉断層および不整合面などの地質構造にかかわらず N30W を中心に分布しており、当該地域における地殻水平ひずみの最大圧縮方向<sup>[9]</sup> と調和的である。

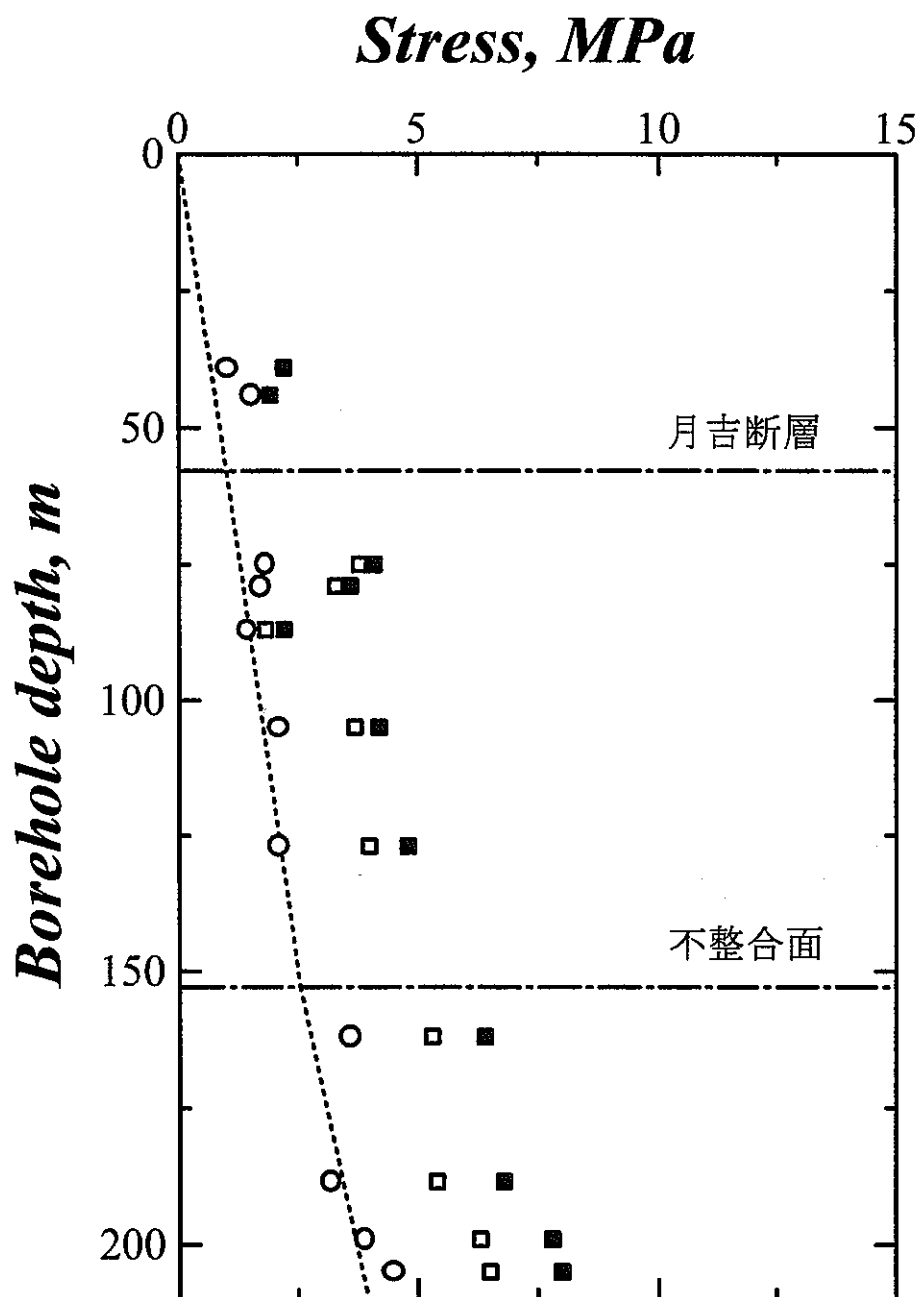


図 1.6.1 水平面内の最大および最小主応力とボアホール深度の関係  
 点線は密度検層の結果から求めた被り地圧  $S_v$  である。○印は最小主応力  $S_h$ 、□印は  $S_{hmin}$ 、■印は  $S_{hmax}$  である。

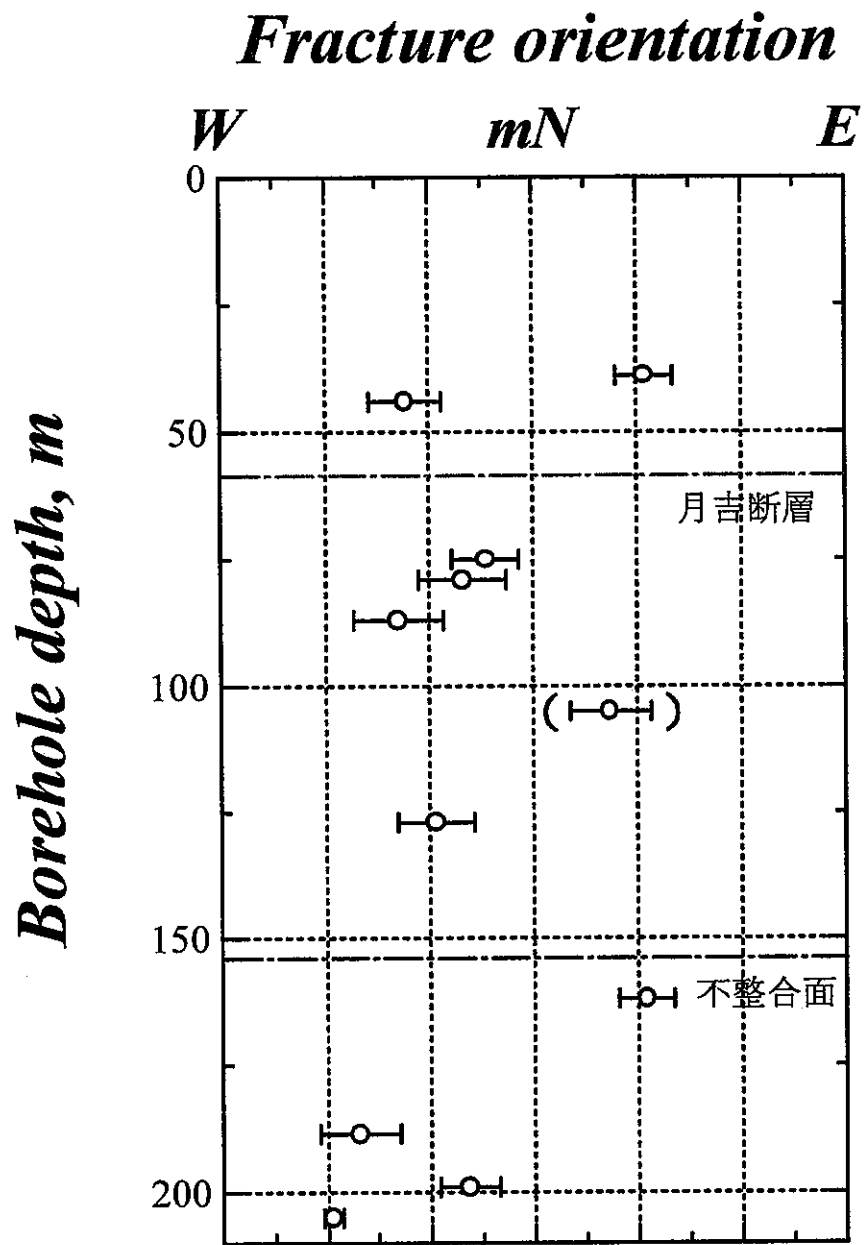


図 1.6.2 99SE-02 孔で誘起されたき裂の走向とボアホール深度の関係

### 1.7 三次元応力場における水圧破碎き裂の傾き

99SE-02 孔の深度 75.0m および 79.0m で誘起された人工き裂は、ボーリング孔壁面の母線に対して 6.0~9.5° の緩い角度で斜交し、エシェロン型を呈していた。このことは、1.6.3 で述べた古典的な応力測定理論の仮定と異なり、深度 75.0~79.0m 付近でボーリング孔軸と主応力軸の方向が一致していないことを示している。

三次元応力場においてすべての主応力軸とボーリング孔軸とが傾斜する場合には、ボーリング孔壁上の最大引張応力はボーリング孔軸と傾斜した方向に生じるので、水圧破碎き裂が発生する初期の段階には、その最大引張応力の方向と直角の方向に多数の微小き裂が発生し、最終的にこれらが孔軸方向に連結する<sup>[10][11]</sup>。したがって、発生するき裂の位置やき裂の発生する圧力は、厳密にはボーリング孔軸に垂直な平面の応力のみから導かれるものと異なる。

この節では、99SE-02 孔軸と主応力軸が斜交する角度を推定することを目的として、まず三次元応力状態におかれたボーリング孔で水圧破碎試験を行なったとき、孔壁に発生するき裂の傾斜角とき裂が発生するときの圧力の関係について述べ、次に 99SE-02 孔の深度 75.0~79.0m 付近で実際に測定された初期応力状態と岩盤の力学特性からエシェロン型のき裂の傾きを計算する。

#### 1.7.1 水圧破碎き裂の発生に関する理論解析<sup>[9][10]</sup>

図 1.7.1 に示すように、ボーリング孔軸を z 軸とし、x および y 軸をボーリング孔軸と垂直な平面内にとる。さらに、円柱座標系 (x, θ, z) を設定すると、ボーリング孔壁の応力は次式で与えられる。ここで、P はボーリング孔内からの流体圧、ν は等方性岩盤のポアソン比である。

$$\begin{aligned} P_\theta &= \sigma_x + \sigma_y - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - P \\ P_z &= -2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4\nu\tau_{xy} \sin 2\theta + \sigma_z \\ P_{\theta z} &= -2\tau_{xz} \sin \theta + 2\tau_{yz} \cos \theta \end{aligned} \quad (1.7.1)$$

ボーリング孔壁面の最小主応力  $\sigma_M$  は、式 (1.7.1) のボーリング孔軸方向の応力  $P_z$ 、接線応力  $P_\theta$  およびせん断応力  $P_{\theta z}$  から式 (1.7.2) のように表せる。

$$\sigma_M = \frac{1}{2} \left\{ (P_\theta + P_z) - \sqrt{(P_\theta - P_z)^2 + 4P_{\theta z}^2} \right\} \quad (1.7.2)$$

したがって、ボーリング孔壁への流体圧 P による载荷によって  $\sigma_M$  が岩盤の引張強度 T と等しくなった位置  $\theta_M$  に最初のき裂が発生する。このき裂は一般にボーリング孔軸に平行でなく、 $\sigma_M$  と垂直な方向に発生し、ボーリング孔軸に対する傾斜角  $\gamma_m$  は、 $\theta_M$  におけるボーリング孔壁の応力成分から次式を用いて計算される。

$$\gamma_m = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2P_{\theta z}}{P_\theta - P_z} \right) \quad (1.7.3)$$

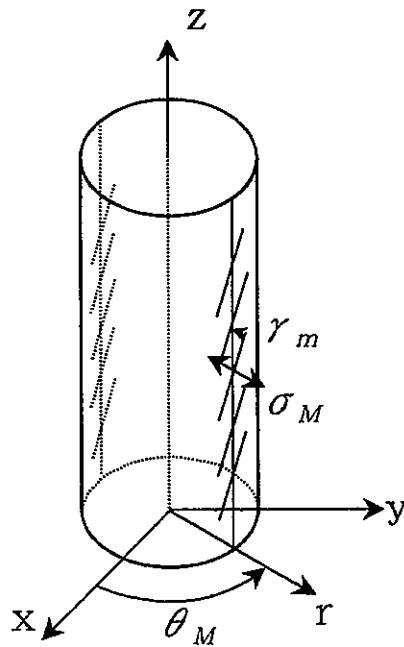


図 1.7.1 三次元応力場における水圧破砕き裂の発生位置

### 1.7.2 99SE-02 孔における初期応力測定結果に基づいた解析結果

ボーリング孔軸に対する傾斜角  $\gamma_m$  は、主応力値、主応力軸に対するボーリング孔の方位、岩盤の引張強度およびポアソン比によって変化する。ここでは、水圧破砕試験によって求めた深度 75.0m および 79.0m の初期応力値を岩盤内の主応力値と仮定し、任意の方向を向いたボーリング孔に形成される水圧破砕き裂の傾斜角度を求めた。すなわち、最小主応力  $\sigma_3$ 、中間主応力  $\sigma_2$  および最大主応力  $\sigma_1$  を、それぞれ深度 75.0m および 79.0m における被り地圧  $S_V$  の平均値、最小主応力  $S_h$  の平均値、そして最大主応力  $S_{Hmin}$  と  $S_{Hmax}$  の平均値として求め、 $\sigma_1 = S_H = 3.7\text{MPa}$ 、 $\sigma_2 = S_h = 1.75\text{MPa}$ 、 $\sigma_3 = S_V = 1.2\text{MPa}$  とした。また、岩石の引張強度およびポアソン比は、明世累層の平均的な値である 0.8MPa および 0.26 を採用した。

図 1.7.2 に示すように、主応力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  の方向を X、Y、Z 軸に一致させ、ボーリング孔の方位を  $\alpha$  および  $\beta$  で表す。ここで、 $\alpha$  はボーリング孔軸と XY 平面のなす角度、 $\beta$  はボーリング孔軸を XY 平面に投影した直線から X 軸までの角度である。また、図 1.7.1 のボーリング孔に関する x、y、z 軸のうち、y 軸は XY 平面に含まれる。XYZ 座標系の主応力成分  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  を xyz 座標系に変換し、さらにこれらを r  $\theta$  z 座標系に変換し、式 (1.7.1)、(1.7.2) および (1.7.3) から  $\sigma_M$  が岩盤の引張強度  $T$  に達するときのボーリング孔内部の水圧  $P$  と水圧破砕き裂の傾斜角  $\gamma_m$  を求めた。

縦軸に  $\alpha$ 、横軸に  $\beta$  をとって傾斜角  $\gamma_m$  の等値線を描くと図 1.7.3 のようである。ボーリング孔軸の主応力軸に対する傾きによってき裂の傾斜角  $\gamma_m$  は  $0^\circ \sim 35^\circ$  の範囲で変化し、 $\alpha = 34^\circ$ 、 $\beta = 0^\circ$  付近で最大値をとることが読み取れる。

99SE-02 孔のようにボーリング孔軸が鉛直である場合、 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=90^\circ$  のときボーリング孔軸は中間主応力軸（図 1.7.2 の Y 軸）と一致し、初期応力状態は横ずれ断層型、 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$  のとき最大主応力軸（図 1.7.2 の X 軸）と一致し正断層型、そして $\alpha=90^\circ$ （ $\beta$ は任意）のとき最小主応力軸（図 1.7.2 の Z 軸）と一致し逆断層型の初期応力環境となる。いずれの場合においても水圧破碎き裂の傾斜角 $\gamma_m$ は $0^\circ$ であり、ボーリング孔軸と平行になる。99SE-02 孔の 87.0m 以下における水圧破碎試験によって誘起された縦き裂はボーリング孔軸とほぼ平行であって、かつ初期応力状態は横ずれ断層型を示しているから、87.0m 以下におけるボーリング孔軸と主応力軸との関係は図 1.7.3 において $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=90^\circ$  の点で表されると考えられる。

99SE-02 孔の深度 75.0m および 79.0m で誘起されたエシェロンタイプのき裂の傾斜角 $\gamma_m$ は $6.0\sim 9.5^\circ$ であったので、ここでは図 1.7.3 において前述の傾斜角を包含する $\gamma_m=5^\circ\sim 10^\circ$ の分布範囲から 99SE-02 孔軸と主応力軸との傾きがどの程度あるかを検討する。まず、図 1.7.3 において $\gamma_m$ が $5^\circ\sim 10^\circ$ である範囲は横軸にほぼ平行な 2 つの帯状に分布していることが認められる。すなわち、 $\alpha$ が $4^\circ\sim 12^\circ$ 、 $\beta$ が $0^\circ\sim 90^\circ$ （以下 A 帯と呼ぶ）および $\alpha$ が $40^\circ\sim 86^\circ$ 、 $\beta$ が $0^\circ\sim 90^\circ$ の範囲である。深度 75.0m および 79.0m における初期応力の環境が逆断層型であることを考慮すると、この深度におけるボーリング孔軸は XY 平面よりも最小主応力軸（図 1.7.2 の Z 軸）の方向により接近していると考えられ、 $\alpha$ は $45^\circ$ 以上であると推定される。したがって、ボーリング孔軸と主応力軸の関係を表す角度 $\alpha$ および $\beta$ が取り得る範囲は、A 帯において $\alpha$ が $45^\circ\sim 86^\circ$ 、 $\beta$ が $2^\circ\sim 90^\circ$ という広い範囲にわたる。ボーリング孔軸が最小主応力軸の方向にどの程度まで接近しているかを知ることができれば、 $\alpha$ および $\beta$ をより狭い範囲で推定することができる。例えば $\alpha$ が $70^\circ$ 以上であれば、 $\alpha$ は $70^\circ\sim 86^\circ$ 、 $\beta$ は $56^\circ\sim 90^\circ$ である。しかしながら、本測定の場合、初期応力の大きさ、初期応力環境およびき裂の傾斜角だけから $\alpha$ と $\beta$ をこれ以上狭い範囲に限定することは困難であると考えられる。

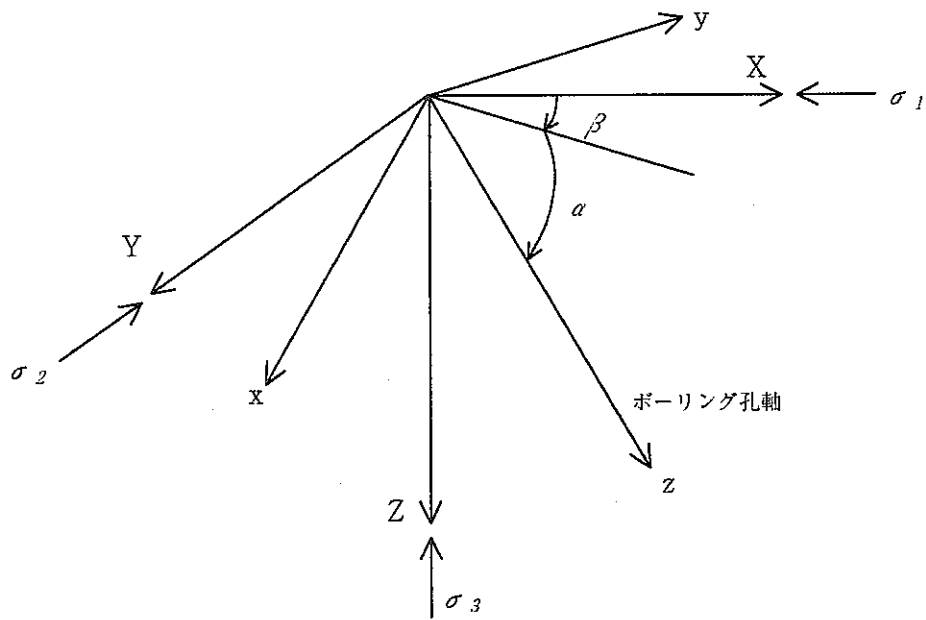


図 1.7.2 三次元応力状態とボーリング孔軸の関係

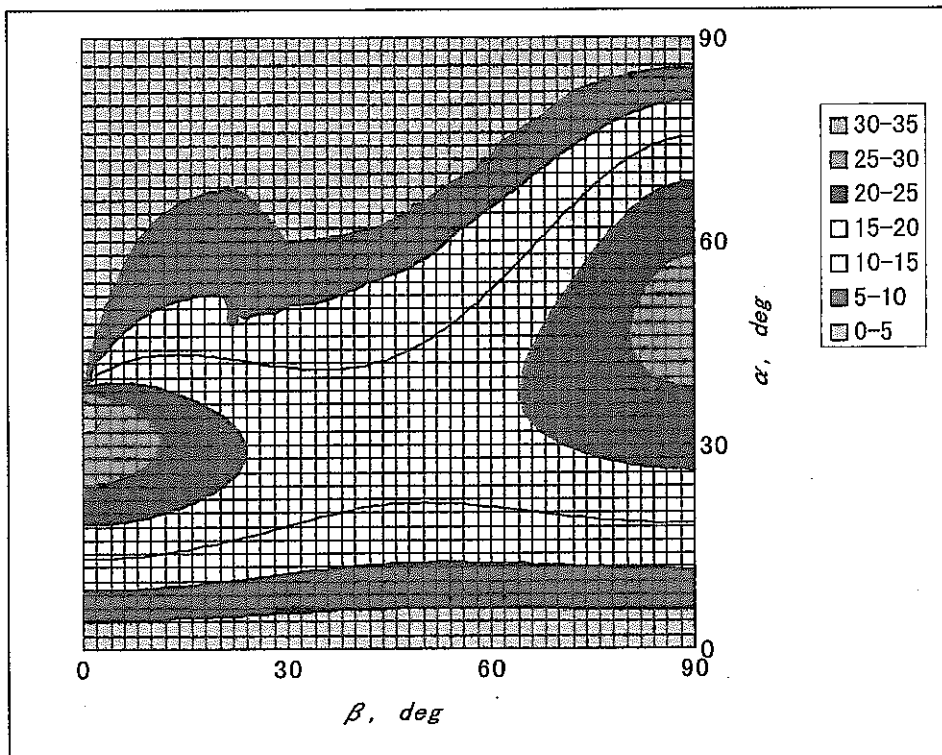


図 1.7.3 ボーリング孔軸の主応力軸に対する傾きと水圧破碎き裂の傾斜角  $\gamma_m$  の関係。等値線の単位は度である。



## 1.8 結言

核燃料サイクル開発機構は、東濃鉾山領域を例として、東濃鉾山敷地内の地表から掘削されたボーリング孔において初期応力測定を行ない、三次元的な初期応力状態の評価方法について研究を実施している。本調査ではその一環として、99SE-02 孔で水圧破碎試験を行ない、11 深度でボアホール軸を含む縦き裂が誘起された。 $S_h$  の大きさは上部の新第三紀堆積層と下部の基盤花崗岩との不整合面を境にして不連続的に増大し、一方、 $S_H$  の深度に対する全体的な増加傾向はほぼ線形であった。応力環境は地表から深度 127.0m までの新第三紀堆積層で  $S_H > S_v \approx S_h$  の遷移型、152.7m の不整合面よりも下部の土岐花崗岩で  $S_H > S_h > S_v$  の逆断層型であった。最大主応力の方位は岩盤の種類（上位から堆積層および基盤花崗岩）、月吉断層および不整合面などの地質構造にかかわらず全体として N30W を中心に分布しており、当該地域における地殻水平ひずみの最大圧縮方向と調和的であった。最後に、深度 75.0m および 79.0m で誘起されたエシェロンタイプの縦き裂とボーリング孔壁面の母線との傾きから、この深度におけるボーリング孔軸と主応力軸とのなす角度が取り得る範囲を推定した。

## 引用文献

1. 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.
2. Rummel F., Baumgartner J. and Alheid H. J., Hydraulic fracturing stress measurements along the eastern boundary of SW-German Block, Proc. of a Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements, U.S. National Committee of Rock Mechanics, National Academy Press, Washington, D.C., p.3-17, 1981.
3. Haimson B.C., Near surface and deep hydrofracturing stress measurements in Waterloo quartzite, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, p.81-88, 1980.
4. Lee M.Y. & Haimson B.C., Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameter, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.6, p.447-456, 1989.
5. Baumgartner J. & Zoback M.D., Interpretation of hydraulic fracturing pressure-time records using interactive analysis methods, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.6, p.461-469, 1989.
6. 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.
7. 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.
8. 畑 浩二, 98SE-01 孔のコアを用いた AE 法による初期応力測定, JNC TJ7400 99-001, 1999.
9. <http://cais.gsi-mc.go.jp/HIZUMI/JPG/chubu100.jpg>
10. Kuriyagawa M., Kobayashi H., Matsunaga I., Yamaguchi T. and Hibiya K., Application of hydraulic fracturing to three dimensional in-situ stress measurements, Proc. 2<sup>nd</sup> Workshop on hydraulic fracturing stress measurement, p.307-340, 1988.
11. 佐久間彰三, 菊池慎二, 中村哲也, 水田義明, ダブルフラクチャリング法による 3 次元応力場の決定, 土木学会論文集, No.448/III-19, p.9-18, 1992.

## 2. 東濃鉱山周辺の初期応力分布

東濃鉱山敷地内では、99SE-02 孔の他に 98SE-01 孔、TM-1 孔および TM-2 孔という 3 本の NQ ボーリング孔においても深度 200m までの水圧破碎法による初期応力測定が行なわれている。これらのボーリング孔は、いずれも下部の基盤花崗岩およびそれを不整合に覆う上部の新第三紀の堆積層を貫いている。ここでは、99SE-02 孔を含めた 4 本の近接したボーリング孔で測定された初期応力状態について述べ、東濃鉱山周辺の深度 200m までの初期応力分布について考察する。

### 2.1 4 本のボーリング孔について

4 本のボーリング孔は、99SE-02 孔、TM-1 孔、TM-2 孔および 98SE-01 孔の順に北から南に分布し、99SE-02 孔と 98SE-01 孔の孔口の位置はほぼ南北に、TM-1 孔と TM-2 孔はほぼ東西に配列している。これらのボーリング孔の孔口の位置関係は図 2.1.1 および図 2.1.2 に示す通りである。孔口のおよその標高は 99SE-02 孔が 285m、TM-1 孔が 288m、TM-2 孔が 255m そして 98SE-01 孔が 264m である。各ボアホールの孔口の標高、月吉断層までの深度、不整合面までの深度などをまとめると表 2.1.1 の通りである。

4 本のボーリング孔の孔口の位置は水平距離で 60m~130m 程度しか離れていないが、ボーリングコアが断層の上盤あるいは下盤から採取されたかに注目すると、鉛直方向の岩盤の構成は各ボアホールで異なっている。これは、図 2.1.2 に示すように、月吉断層と地表面とがなす交差線から各ボアホールの孔口までの垂直距離がそれぞれ異なっているからである。

表 2.1.1 各ボアホールの概要

ボアホール名	99SE-02 孔	TM-1 孔	TM-2 孔	98SE-01 孔
鉛直方向の岩盤の構成 (上から下へ)	上盤の堆積層 月吉断層 下盤の堆積層 下盤の花崗岩	上盤の堆積層 月吉断層 下盤の堆積層 下盤の花崗岩	上盤の堆積層 上盤の花崗岩 月吉断層 下盤の花崗岩	上盤の堆積層 上盤の花崗岩
孔口の標高	285m	288m	255m	264m
上部堆積層と花崗岩との境界 (孔口から)	152.7m	190m	88m	109m
月吉断層の深度	55m	130m	126m	交差せず
孔口からの水位	43.91m	50m	18m	65.2m

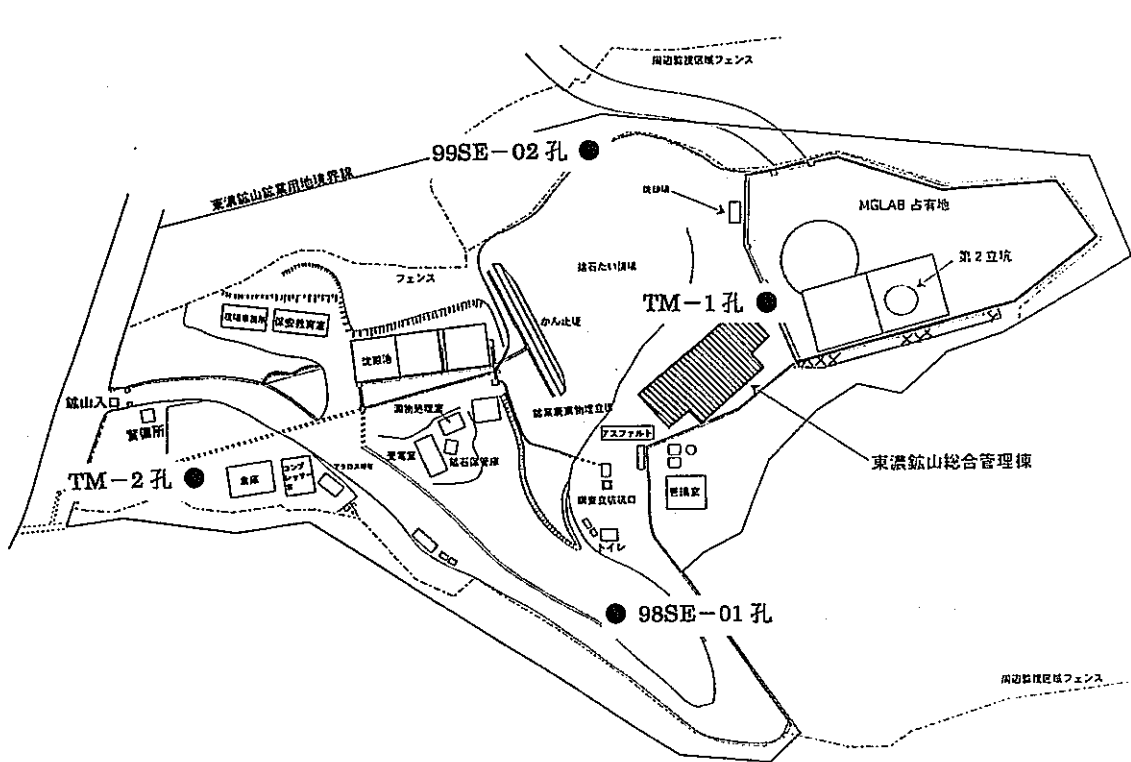


図 2.1.1 各ボーリング孔の位置図

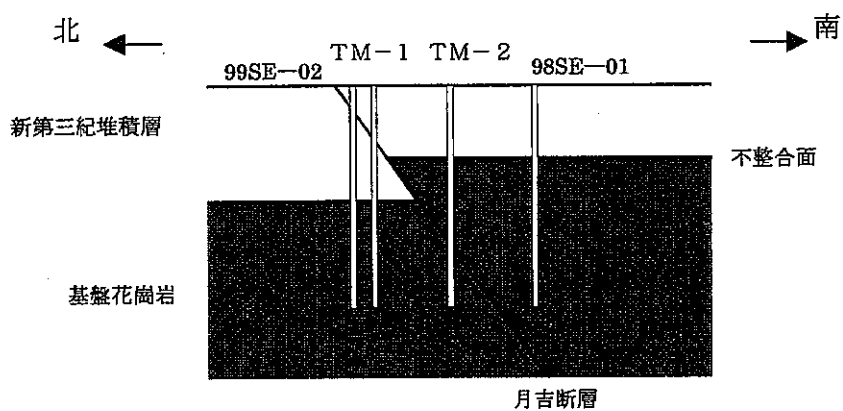


図 2.1.2 各ボアホールと月吉断層および不整合面との位置関係

## 2.2 各ボーリング孔における初期応力分布

各ボーリング孔において測定された水平面内の主応力の大きさと深度との関係を示すと図 2.2.1 のようである。図中の○印、□印および■印の意味は図 1.6.1 と同じである。図中の点線は被り地圧の大きさであり、TM-2 孔および 98SE-01 孔においては密度検層の結果から、また TM-1 孔および 99SE-02 孔においては岩石の平均密度から求めた。各グラフの右枠に印された波線と太い実線は、それぞれ不整合面と月吉断層の深度を示している。

各ボーリング孔に共通している初期応力分布の傾向として、新第三紀の堆積層と基盤花崗岩における応力環境がはっきりと異なっていることが指摘できる。すなわち、波線で示した不整合面よりも上部の堆積層中では  $S_H > S_v \approx S_h$  の遷移型、そして下部の基盤花崗岩中で  $S_H > S_h > S_v$  の逆断層型である。初期応力の大きさも不整合面を境にして不連続的な分布をしており、いずれのポアホールにおいても堆積層および風化花崗岩で小さく、下部の基盤花崗岩で大きい。

このような初期応力の不連続的な分布傾向は、軟らかい堆積層とそれよりも相対的に硬い基盤花崗岩の変形特性の違いに起因するものと考えられる。例えば、図 2.2.2 のようなヤング率の異なる 2 つの物質 a および b から構成される単純な不均質弾性体を考える。この物体の面積  $A=A_a+A_b=L \times 1$  の境界に力  $F$  が作用して一様な変位が生じると、各要素に生じる応力はそれぞれ次式で表される。ただし、 $A_a = w_a \times 1$  などである。

$$\sigma_a = \sigma_{av} E_a L / (w_a E_a + w_b E_b) \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\sigma_b = \sigma_{av} E_b L / (w_a E_a + w_b E_b)$$

ここで、 $\sigma_{av}$  は平均応力で  $F/A$  に等しく、 $E_a$  および  $E_b$  は各要素のヤング率である。式(2.1)から、各要素の応力の大きさはヤング率の大きさによって異なり、ヤング率の小さい軟らかな要素には小さな応力が、そしてヤング率の大きい要素にはより大きな応力が生じることがわかる。なお、99SE-02 孔、TM-1 孔、および TM-2 孔は、それぞれ深度 55m、130m および 126m で月吉断層を貫いているが、初期応力の大きさの分布傾向がこの逆断層を境にして変化しているようにはみえない。

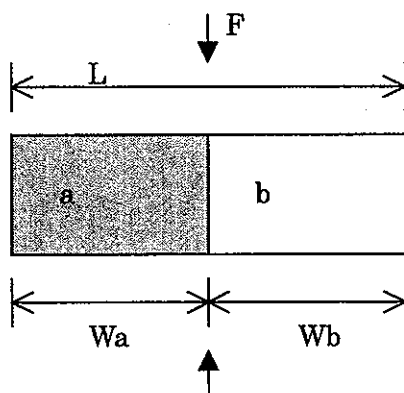


図 2.2.2 ヤング率  $E_a$  および  $E_b$  の要素から構成される岩盤の応力

次に、各ボアホールにおいて測定された水平面内の最大主応力の方位分布を示すと図 2.2.3 のようである。各グラフの右枠に印された波線と実線は、図 2.2.1 と同様に不整合面と月吉断層の深度を示している。各ボアホールの位置は比較的狭い範囲に分布しているにもかかわらず、最大主応力の方位分布は個々のボアホールごとに異なっている。すなわち、TM-2 孔の場合、上部の堆積層および基盤花崗岩における最大主応力の方位は N30W であって、初期応力の方位は地層の不均質性および月吉断層の影響を受けていない。98SE-01 孔では深度 109m の不整合面を境にして、上部の堆積層と下部の基盤花崗岩における最大主応力の方位が約 90 度食い違っている。TM-1 孔では深度 80m 付近の堆積層内部とそれよりも深い深度における主応力方向が約 90 度食い違っている。しかし、深度 80m 付近には断層などの地質的な不連続面は存在しない。80m よりも深部には月吉断層と不整合面が存在するが、最大主応力の方向はほとんど変化せず、N-S 方向である。99SE-02 孔における最大主応力の方位の分布傾向は TM-2 孔と類似していて、岩盤の種類（上位から堆積層および基盤花崗岩）、月吉断層および不整合面などの地質構造にかかわらず全体として N30W を中心に分布しており、当該地域における地殻水平ひずみの最大圧縮方向と調和的である。

以上のように、近接した個々のボアホールにおける最大主応力の方位分布がそれぞれ異なった傾向を示すのは、明らかに当該地域における初期応力状態が一様でなく狭い範囲で大きく変化していることを示唆している。言い換えれば、各ボアホールで測定された初期応力状態は広域的な応力場ではなく、地質構造および地質的な不均質性を反映した局所的な初期応力状態であるといえる。このような局所的な主応力方向の変化傾向を解明するためには、地表の地形ばかりでなく、ボアホールの位置と断層との正しい位置関係、新第三紀の堆積層に覆われた基盤花崗岩の不整合面の詳しい形状（標高および広がり）および岩盤の詳細な力学特性なども加味して検討を行なう必要があるように思われる。

次に、月吉断層が水平面内の主応力方向に影響を及ぼしていない原因について考える。いま、月吉断層を平面的な広がりを持つ単一の断層と仮定すると、この断層近傍の岩盤内部の主応力方向がどのような挙動を示すかは断層充填物と周辺岩盤との力学的な性質に依存する<sup>[1]</sup>。すなわち、

- (1) 断層に充填物が存在せずに空洞になっている場合、最大主応力方向は断層に平行になり、
- (2) 充填物の力学的な性質が周辺の岩盤と等しければ、断層近傍の最大主応力の方向は周辺岩盤のそれと一致し、そして、
- (3) 断層の充填物の剛性が周辺岩盤よりも大きければ、最大主応力方向は断層に対して垂直になる。

したがって、99SE-02 孔、TM-1 孔および TM-2 孔が月吉断層を貫いているにもかかわらず、水平面内の最大主応力の方向が月吉断層を挟んでほとんど変化していない原因は、断層充填物の力学的性質が周辺の岩盤のそれと大きくちがわないためでないかと推定される。

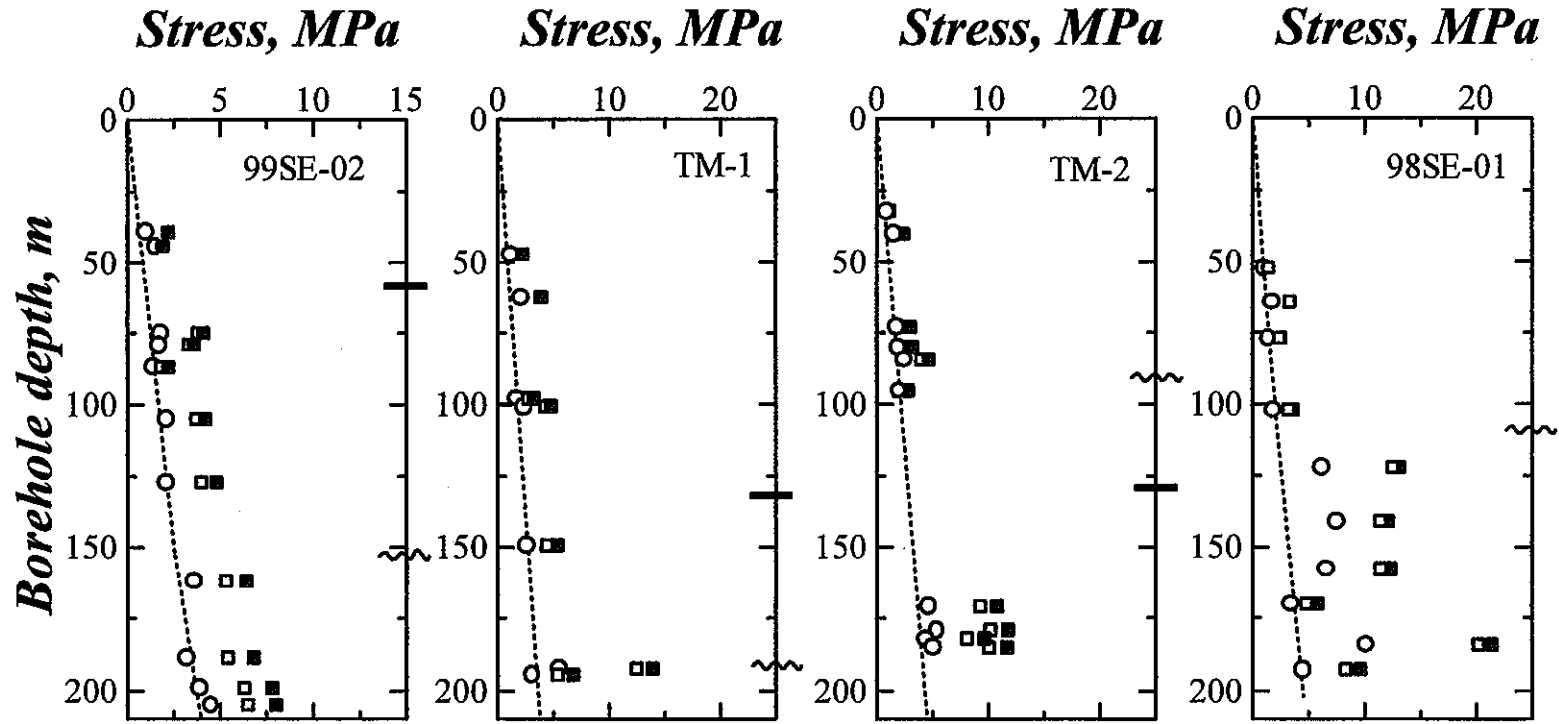


図 2.2.1 水平面内の最大および最小主応力とボアホール深度の関係  
点線は被り地圧  $S_v$  である。○印は最小主応力  $S_{hmin}$ 、□印は  $S_{hmin}$ 、■印は  $S_{hmax}$  である。グラフの右側に印された波線と実線は、それぞれ不整合面および月吉断層の深度を示している。

## Fracture orientation

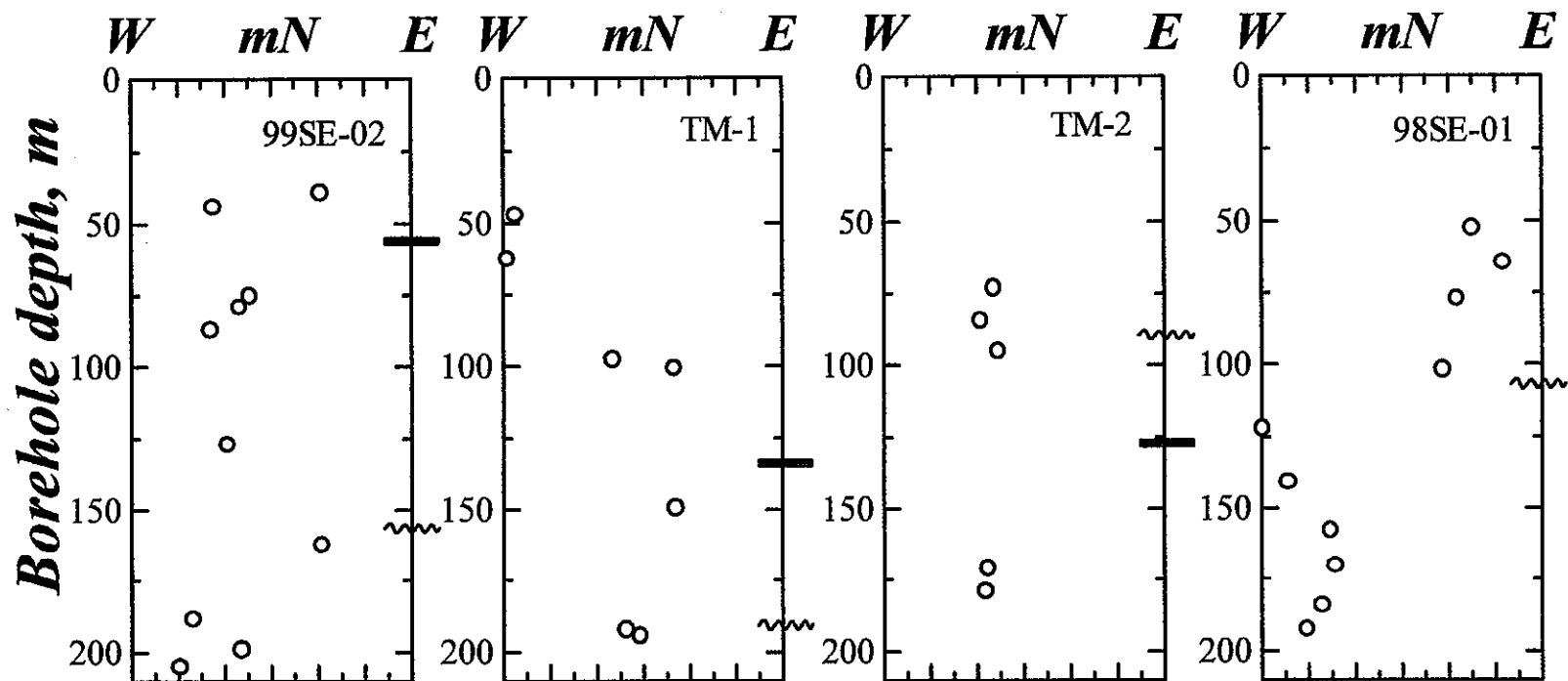


図 2.2.3 水平面内の最大主応力の方位とボアホール深度の関係。グラフの右枠に印された波線と実線は、それぞれ不整合面および月吉断層の深度を示している。



### 2.3 結言

東濃鉾山敷地内の 99SE-02 孔、98SE-01 孔、TM-1 孔および TM-2 孔で行なわれた水圧破碎試験結果について述べた。各ボーリング孔において測定された初期応力の大きさは、軟らかい新第三紀の堆積層で小さく、硬い基盤花崗岩で大きい。これは変形特性の異なる不均質な地質構造が初期応力の不連続的な分布として現れたと考えられる。月吉断層を貫く 99SE-02 孔、TM-1 孔および TM-2 孔における水平面内の最大主応力の方位は、断層を挟んで変化していないように見える。これは、断層充填物の力学的性質が周辺岩盤のそれと大きく違わないためであると推定される。最後に、4 本のボーリング孔の孔口の水平距離は 60m~130m 程度しか離れていないが、測定された最大主応力の方向の分布は個々のボーリング孔で異なっていた。これは、各ボーリング孔で測定された初期応力状態が広域的な応力場ではなく、地質構造などの影響を受けた局所的な応力場を反映しているためでないかと推定された。

### 引用文献

1. Hudson J.A. and Cooling C.M., In situ rock stresses and their measurement in the UK-Part I. The current state of knowledge. Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, p.363-370, 1988.

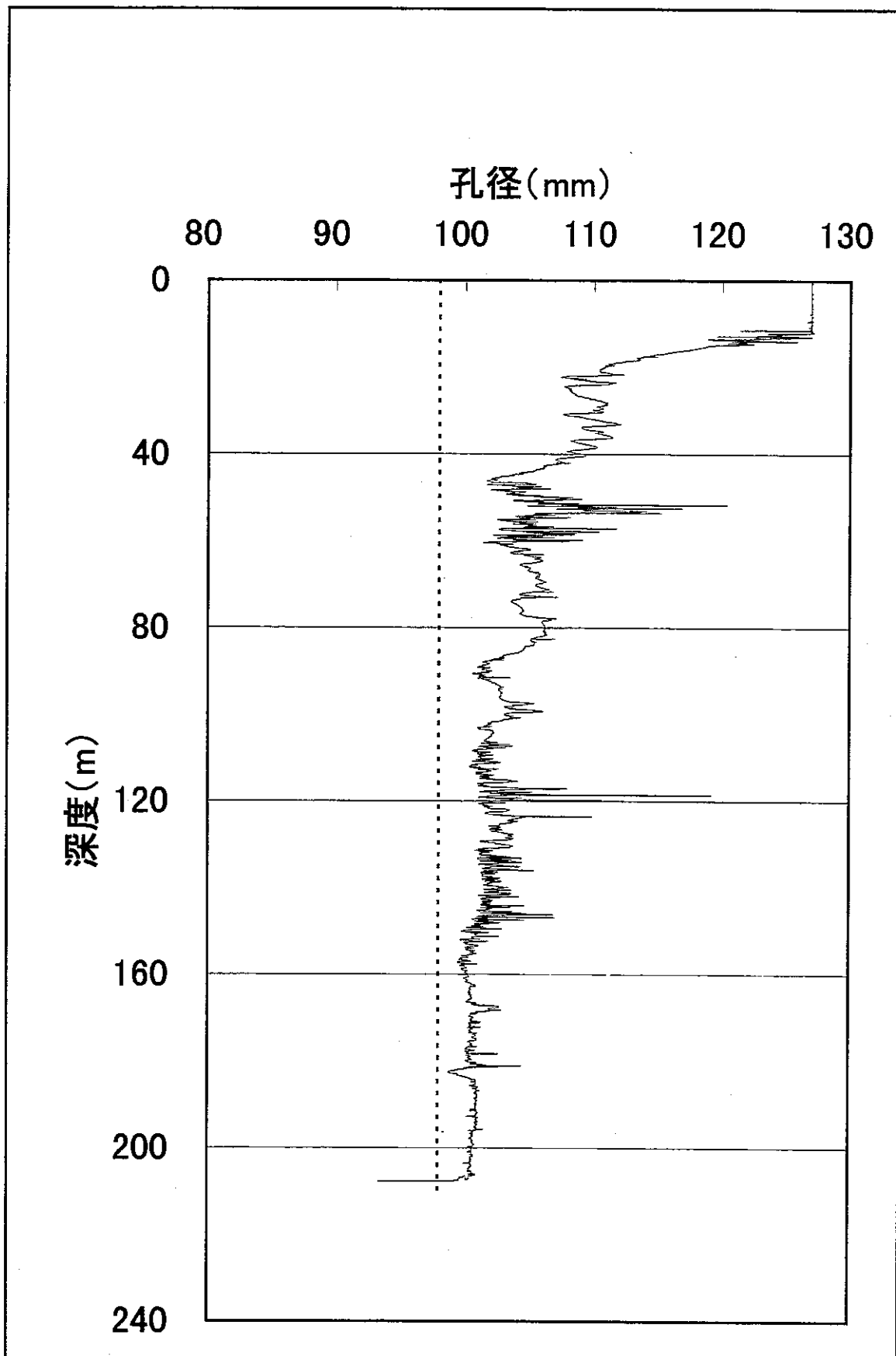
### 3. 結論

核燃料サイクル開発機構は、東濃鉱山領域を例として、東濃鉱山敷地内の地表から掘削されたボーリング孔において初期応力測定を行ない、三次元的な初期応力状態の評価方法について研究を実施している。本調査ではその一環として、99SE-02 孔において水圧破碎法による初期応力測定を実施した。そして、今回実施された 99SE-02 孔の結果と、TM-1 孔、TM-2 孔および 98SE-01 孔でこれまでに行われた水圧破碎試験の結果とを総合的に比較検討した。得られた知見をまとめると次の通りである。

- (1) 99SE-02 孔における  $S_h$  の大きさは、上部の新第三紀堆積層と下部の基盤花崗岩との不整合面を境にして不連続的に増大し、一方、 $S_H$  の深度に対する全体的な増加傾向はほぼ線形であった。
- (2) 99SE-02 孔における水平面内の最大主応力の方位は、岩盤の種類（上位から堆積層および基盤花崗岩）、月吉断層および不整合面などの地質構造にかかわらず全体として N30W を中心に分布しており、当該地域における地殻水平ひずみの最大圧縮方向と調和的であった。
- (3) 99SE-02 孔における応力環境は地表から深度 127.0m までの新第三紀堆積層で  $S_H > S_v \approx S_h$  の遷移型、152.7m の不整合面よりも下部の土岐花崗岩で  $S_H > S_h > S_v$  の逆断層型であった。
- (4) 東濃鉱山の 99SE-02 孔、98SE-01 孔、TM-1 孔および TM-2 孔における初期応力の大きさは、軟らかい新第三紀の堆積層で小さく、硬い基盤花崗岩で大きい。これは変形特性の異なる不均質な地質構造が初期応力の不連続的な分布として現れたと考えられる。
- (5) 月吉断層を貫く 99SE-02 孔、TM-1 孔および TM-2 孔における水平面内の最大主応力の方位は、断層の影響を受けていないように見え、これは断層充填物の剛性が周辺岩盤のそれと大きく違わないためであると推定される。
- (6) 4 本のボーリング孔の位置は 60m~130m 程度しか離れていないが、測定された最大主応力の方向の分布傾向は個々のボーリング孔で異なっていた。これは、各ボーリング孔で測定された初期応力状態が広域的な応力場ではなく、地質構造などの影響を受けた局所的な応力場を反映しているためでないかと推定された。

# APPENDIX I

キャリパー検層結果



付図 99SE-02孔におけるキャリパー検層結果図

















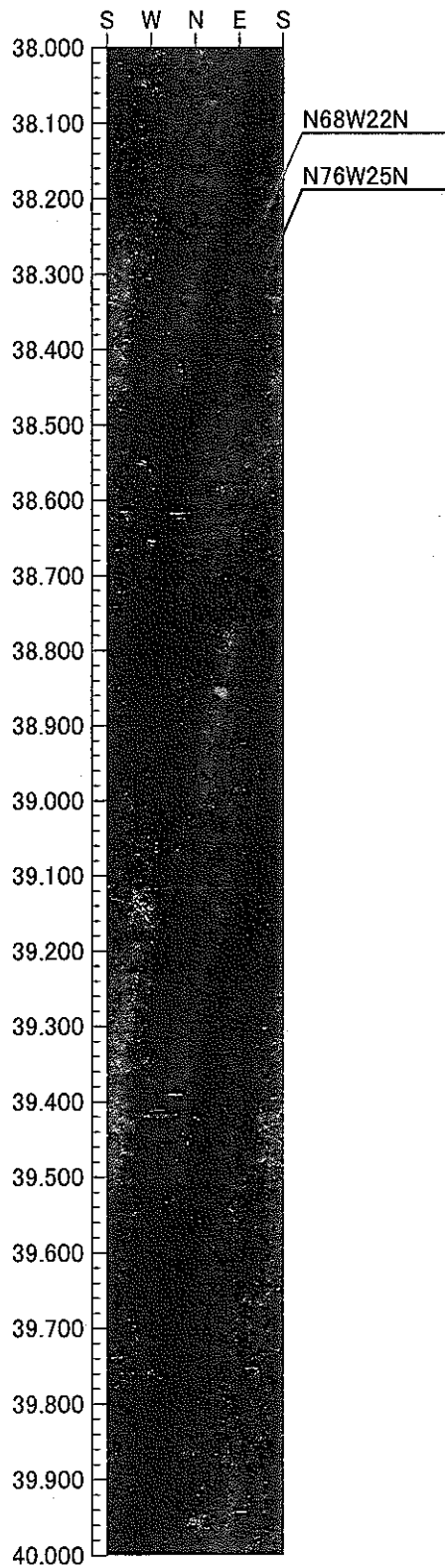


付表 99SE-02孔におけるキャリバ-検査結果一覧表(9/9)

深度(m)	孔径(mm)	深度(m)	孔径(mm)	深度(m)	孔径(mm)	深度(m)	孔径(mm)	深度(m)	孔径(mm)	深度(m)	孔径(mm)
189.22	101.0	192.42	101.0	195.62	100.9	198.82	100.7	202.02	100.7	205.22	100.5
189.26	101.0	192.46	100.9	195.66	101.0	198.86	100.7	202.06	100.6	205.26	100.5
189.30	100.9	192.50	100.9	195.70	101.0	198.90	100.7	202.10	100.6	205.30	100.5
189.34	100.9	192.54	100.8	195.74	101.5	198.94	100.7	202.14	100.5	205.34	100.5
189.38	100.9	192.58	100.9	195.78	101.3	198.98	100.7	202.18	100.5	205.38	100.4
189.42	100.9	192.62	100.6	195.82	101.3	199.02	100.7	202.22	100.5	205.42	100.3
189.46	100.9	192.66	100.9	195.86	100.8	199.06	100.7	202.26	100.5	205.46	100.6
189.50	100.9	192.70	100.9	195.90	100.8	199.10	100.7	202.30	100.5	205.50	100.5
189.54	100.9	192.74	100.2	195.94	100.9	199.14	100.7	202.34	100.5	205.54	100.6
189.58	100.9	192.78	100.9	195.98	100.7	199.18	100.7	202.38	100.5	205.58	100.6
189.62	100.9	192.82	100.9	196.02	100.4	199.22	100.7	202.42	100.5	205.62	100.6
189.66	100.9	192.86	100.7	196.06	100.7	199.26	100.8	202.46	100.5	205.66	100.6
189.70	101.0	192.90	100.9	196.10	100.8	199.30	100.7	202.50	100.5	205.70	100.6
189.74	101.0	192.94	101.0	196.14	100.7	199.34	100.7	202.54	100.5	205.74	100.6
189.78	100.9	192.98	101.1	196.18	100.6	199.38	100.7	202.58	100.5	205.78	100.6
189.82	100.8	193.02	101.1	196.22	100.7	199.42	100.7	202.62	100.5	205.82	100.7
189.86	100.9	193.06	101.1	196.26	100.7	199.46	100.7	202.66	100.6	205.86	100.7
189.90	100.9	193.10	100.9	196.30	100.7	199.50	100.7	202.70	100.6	205.90	100.5
189.94	100.9	193.14	101.0	196.34	100.7	199.54	100.7	202.74	100.5	205.94	100.8
189.98	100.9	193.18	101.0	196.38	100.7	199.58	100.7	202.78	100.5	205.98	100.8
190.02	101.0	193.22	101.0	196.42	100.6	199.62	100.7	202.82	100.5	206.02	100.8
190.06	101.0	193.26	100.9	196.46	100.6	199.66	100.7	202.86	100.5	206.06	100.9
190.10	101.0	193.30	100.9	196.50	100.7	199.70	100.4	202.90	100.5	206.10	100.5
190.14	101.0	193.34	100.9	196.54	100.7	199.74	100.7	202.94	100.5	206.14	100.4
190.18	100.9	193.38	100.9	196.58	100.7	199.78	100.3	202.98	100.5	206.18	100.8
190.22	100.9	193.42	101.0	196.62	100.6	199.82	100.6	203.02	100.5	206.22	100.9
190.26	100.9	193.46	100.9	196.66	100.5	199.86	100.6	203.06	100.6	206.26	100.9
190.30	100.9	193.50	100.9	196.70	100.7	199.90	100.6	203.10	100.6	206.30	100.6
190.34	100.9	193.54	100.9	196.74	100.6	199.94	100.6	203.14	100.5	206.34	100.8
190.38	100.9	193.58	101.0	196.78	100.6	199.98	100.6	203.18	100.5	206.38	100.7
190.42	100.9	193.62	101.0	196.82	100.7	200.02	100.6	203.22	100.5	206.42	100.7
190.46	100.9	193.66	101.0	196.86	100.7	200.06	100.5	203.26	100.5	206.46	100.5
190.50	100.9	193.70	101.0	196.90	100.7	200.10	100.6	203.30	100.5	206.50	100.5
190.54	100.9	193.74	100.9	196.94	100.7	200.14	100.6	203.34	100.5	206.54	100.0
190.58	100.9	193.78	100.9	196.98	100.6	200.18	100.6	203.38	100.3	206.58	100.0
190.62	100.9	193.82	101.0	197.02	100.7	200.22	100.6	203.42	100.5	206.62	100.0
190.66	100.9	193.86	101.0	197.06	100.7	200.26	100.6	203.46	100.5	206.66	100.0
190.70	100.9	193.90	100.9	197.10	100.7	200.30	100.6	203.50	100.5	206.70	99.7
190.74	100.9	193.94	101.0	197.14	100.6	200.34	100.6	203.54	100.0	206.74	100.0
190.78	100.9	193.98	101.0	197.18	100.6	200.38	100.6	203.58	100.0	206.78	100.0
190.82	100.9	194.02	101.1	197.22	100.7	200.42	100.6	203.62	100.5	206.82	99.9
190.86	100.9	194.06	100.9	197.26	100.7	200.46	100.6	203.66	100.5	206.86	99.8
190.90	100.9	194.10	100.9	197.30	100.7	200.50	100.6	203.70	100.5	206.90	99.7
190.94	100.9	194.14	100.9	197.34	100.7	200.54	100.6	203.74	100.5	206.94	99.8
190.98	100.9	194.18	100.8	197.38	100.7	200.58	100.6	203.78	100.5	206.98	99.7
191.02	100.7	194.22	100.9	197.42	100.6	200.62	100.6	203.82	100.5	207.02	99.7
191.06	100.9	194.26	100.9	197.46	100.6	200.66	100.6	203.86	100.5	207.06	99.7
191.10	100.9	194.30	100.9	197.50	100.5	200.70	100.6	203.90	100.5	207.10	99.6
191.14	100.5	194.34	101.0	197.54	100.5	200.74	100.6	203.94	100.6	207.14	99.6
191.18	101.0	194.38	101.0	197.58	100.6	200.78	100.4	203.98	100.6	207.18	99.6
191.22	100.9	194.42	101.0	197.62	100.6	200.82	100.6	204.02	100.6	207.22	99.6
191.26	100.9	194.46	101.0	197.66	100.6	200.86	100.5	204.06	100.6	207.26	99.6
191.30	101.0	194.50	100.9	197.70	100.5	200.90	100.5	204.10	100.6	207.30	99.6
191.34	101.0	194.54	101.0	197.74	100.6	200.94	100.5	204.14	100.6	207.34	99.6
191.38	100.9	194.58	100.9	197.78	100.4	200.98	100.3	204.18	100.6	207.38	99.6
191.42	100.5	194.62	101.0	197.82	100.6	201.02	100.4	204.22	100.6	207.42	99.6
191.46	101.0	194.66	101.0	197.86	100.6	201.06	100.6	204.26	100.6	207.46	99.6
191.50	101.0	194.70	101.0	197.90	100.6	201.10	100.6	204.30	100.5	207.50	99.6
191.54	101.0	194.74	101.0	197.94	100.6	201.14	100.6	204.34	100.5	207.54	99.3
191.58	100.9	194.78	101.0	197.98	100.6	201.18	100.6	204.38	100.5	207.58	99.3
191.62	100.9	194.82	101.0	198.02	100.6	201.22	100.6	204.42	100.4	207.62	99.0
191.66	101.0	194.86	101.0	198.06	100.6	201.26	100.6	204.46	100.4	207.66	98.8
191.70	101.0	194.90	100.9	198.10	100.6	201.30	100.6	204.50	100.4	207.70	98.0
191.74	101.0	194.94	100.9	198.14	100.6	201.34	100.6	204.54	100.4	207.74	95.4
191.78	101.0	194.98	100.9	198.18	100.6	201.38	100.6	204.58	100.5	207.78	93.3
191.82	101.0	195.02	100.8	198.22	100.7	201.42	100.6	204.62	100.4		
191.86	101.0	195.06	100.9	198.26	100.6	201.46	100.6	204.66	100.4		
191.90	101.0	195.10	100.9	198.30	100.7	201.50	100.5	204.70	100.5		
191.94	101.0	195.14	100.9	198.34	100.7	201.54	100.5	204.74	100.4		
191.98	101.1	195.18	100.9	198.38	100.7	201.58	100.7	204.78	100.3		
192.02	100.9	195.22	100.9	198.42	100.6	201.62	100.7	204.82	100.4		
192.06	100.9	195.26	101.0	198.46	100.6	201.66	100.6	204.86	100.4		
192.10	101.0	195.30	100.9	198.50	100.6	201.70	100.7	204.90	100.4		
192.14	100.9	195.34	100.9	198.54	100.6	201.74	100.6	204.94	100.4		
192.18	101.0	195.38	100.8	198.58	100.6	201.78	100.7	204.98	100.4		
192.22	101.0	195.42	101.0	198.62	100.6	201.82	100.7	205.02	100.4		
192.26	100.9	195.46	101.0	198.66	100.6	201.86	100.6	205.06	100.4		
192.30	100.9	195.50	100.9	198.70	100.6	201.90	100.6	205.10	100.4		
192.34	101.0	195.54	101.0	198.74	100.6	201.94	100.7	205.14	100.3		
192.38	100.9	195.58	100.9	198.78	100.6	201.98	100.6	205.18	100.5		

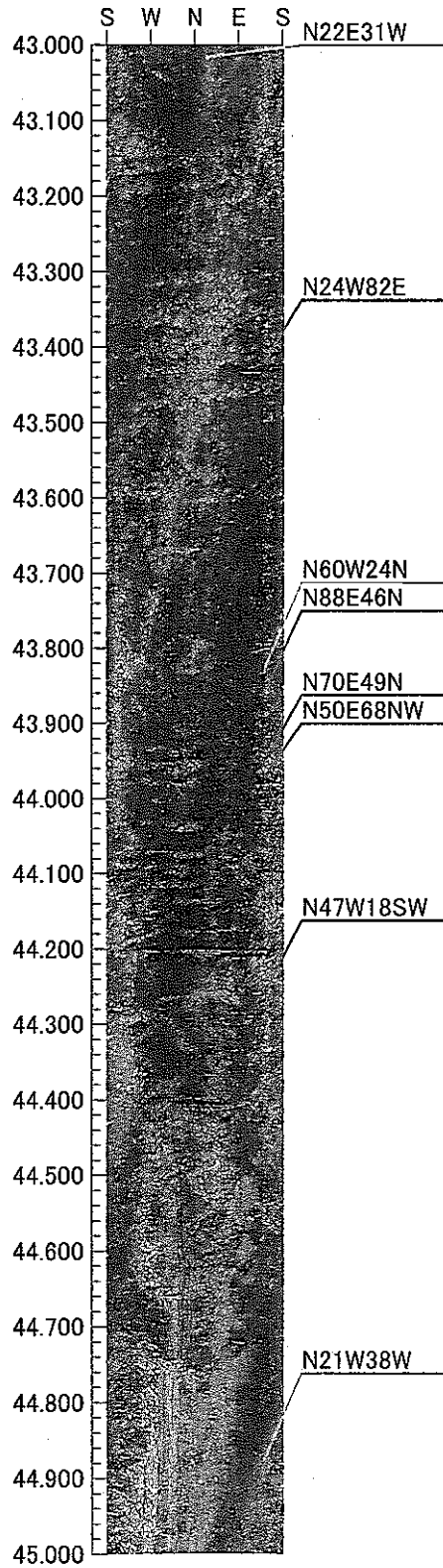
## APPENDIX II

試験位置の BTV 観察結果

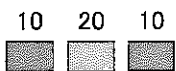


付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (1 / 1 1 : 39m )

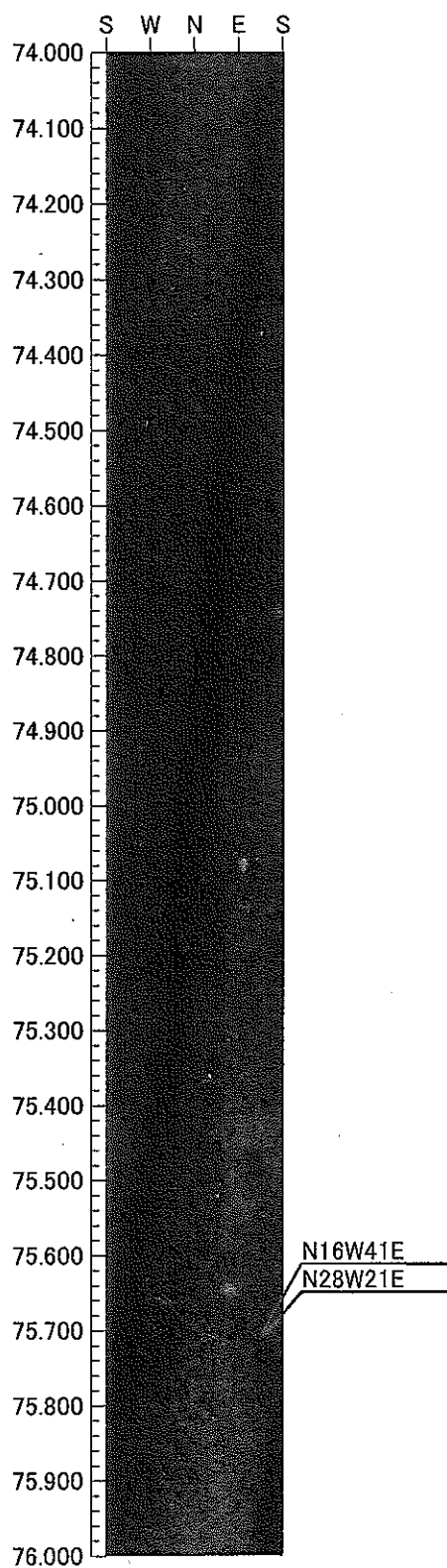




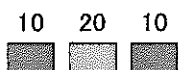
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (2 / 1 1 : 44m )

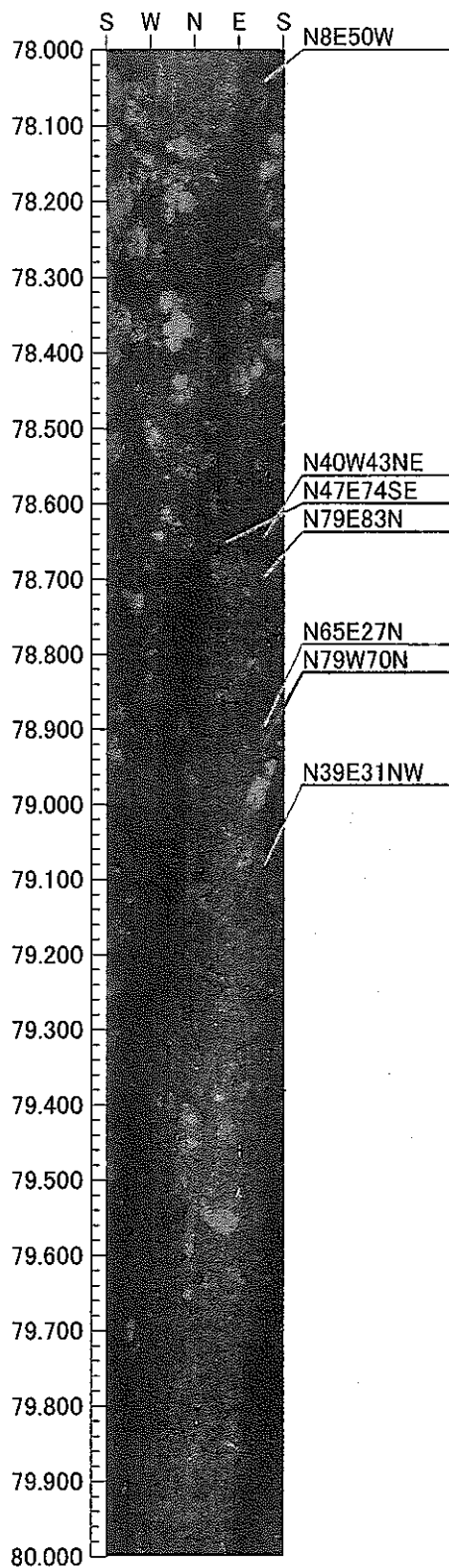






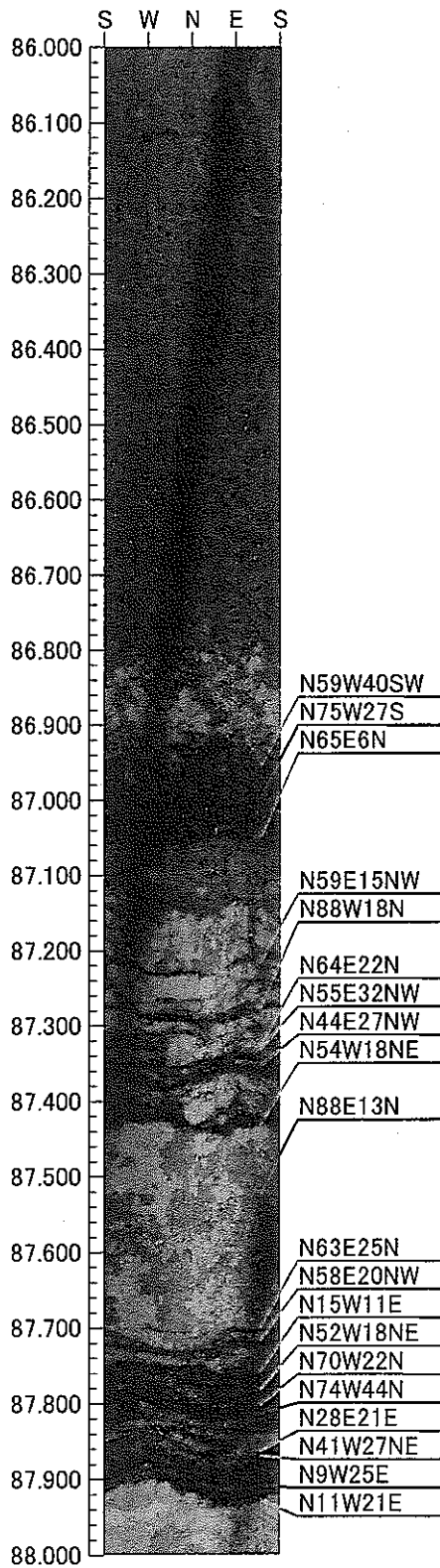
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (3 / 1 1 : 75m )



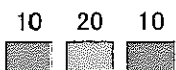


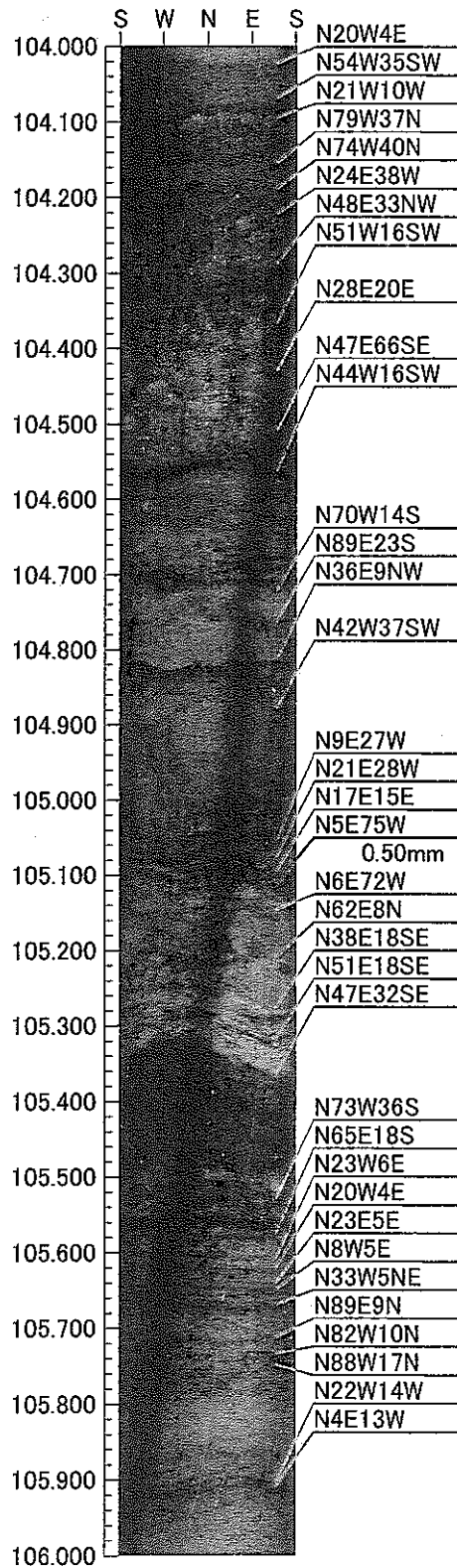
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (4 / 1 1 : 79m )



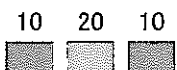


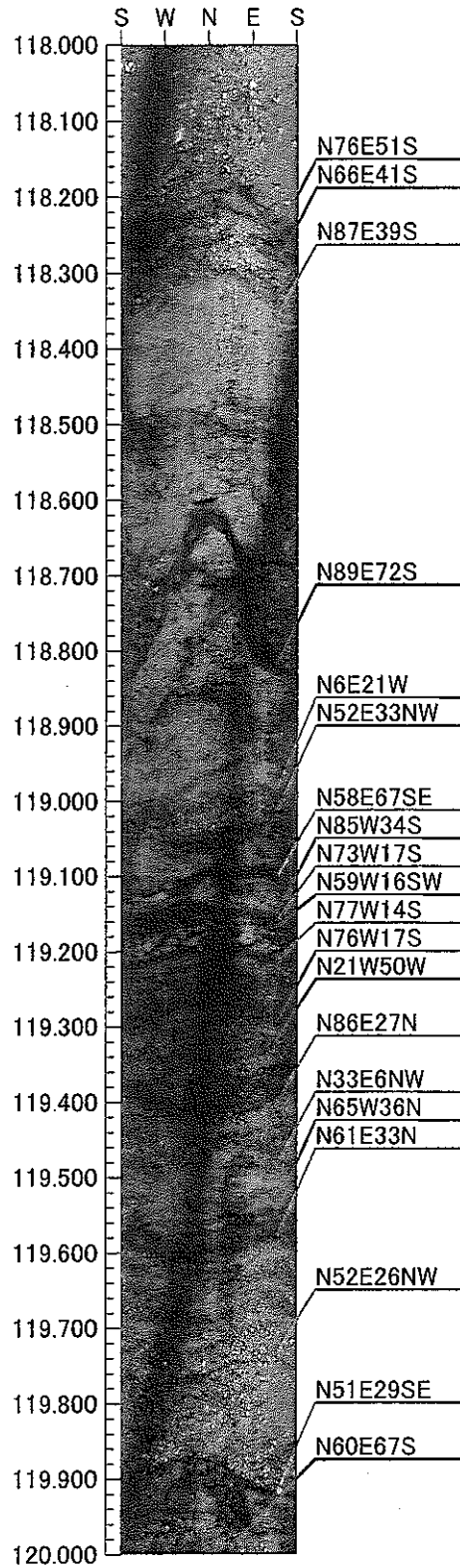
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (5 / 11 : 87m)





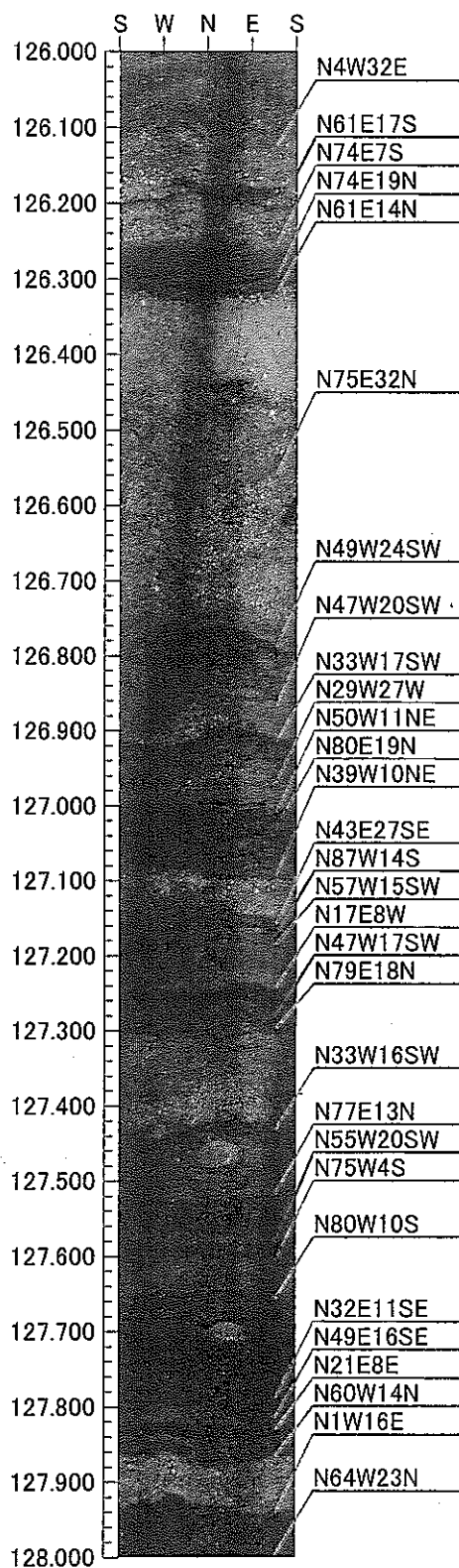
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (6 / 11 : 105m)



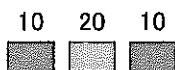


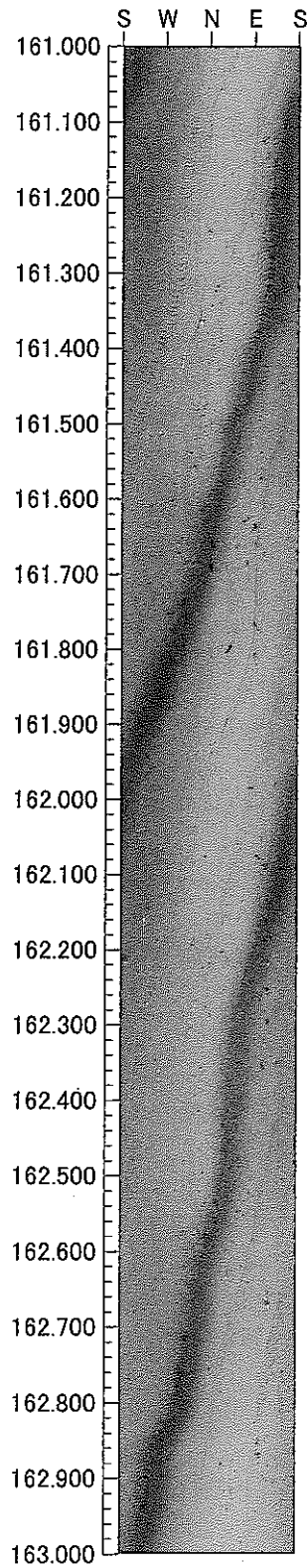
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (7 / 11 : 119m)



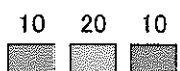


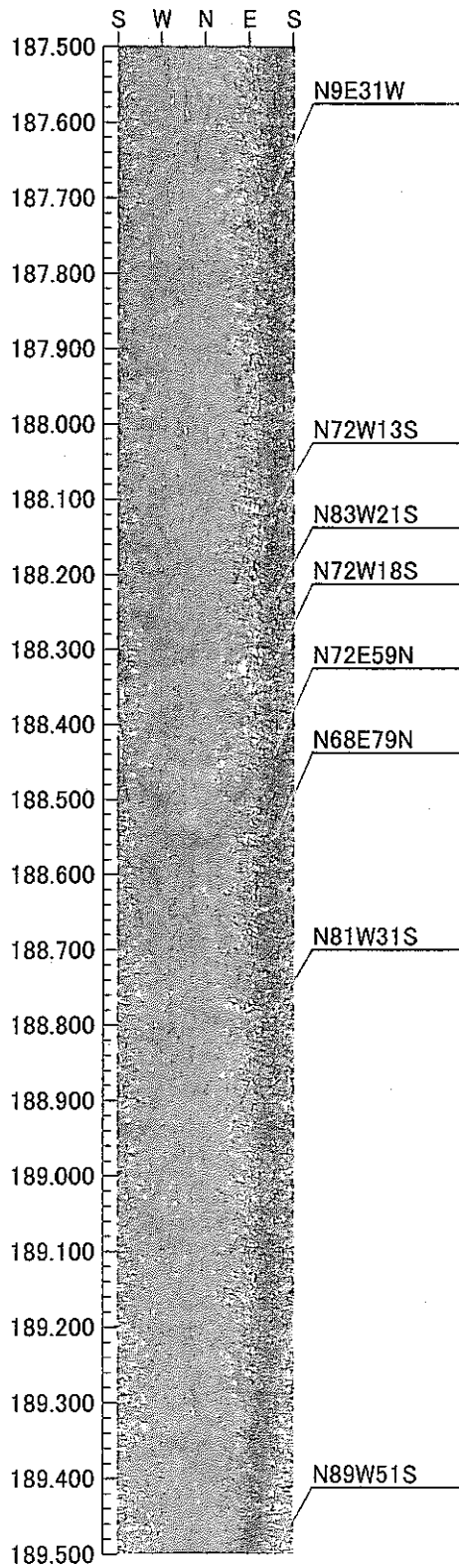
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (8 / 11 : 127m)



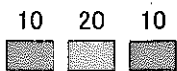


付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (9 / 11 : 162m)

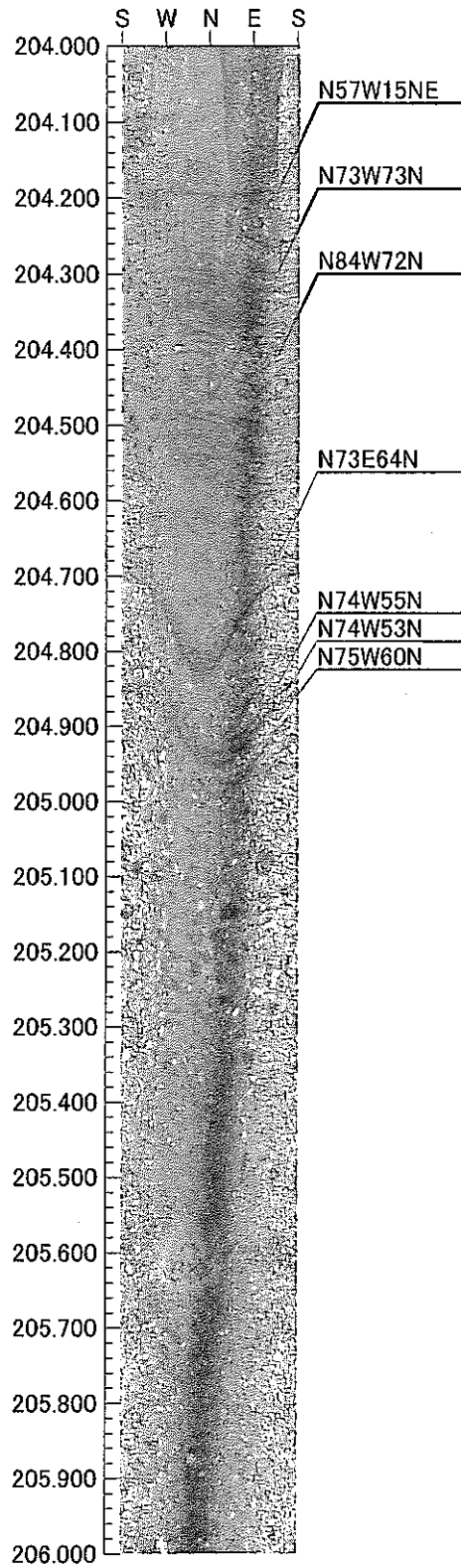




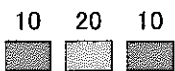
付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (10 / 11 : 188.5m)







付図 99SE-02 孔における水圧破碎試験位置の岩盤状況 (11 / 11 : 205m)



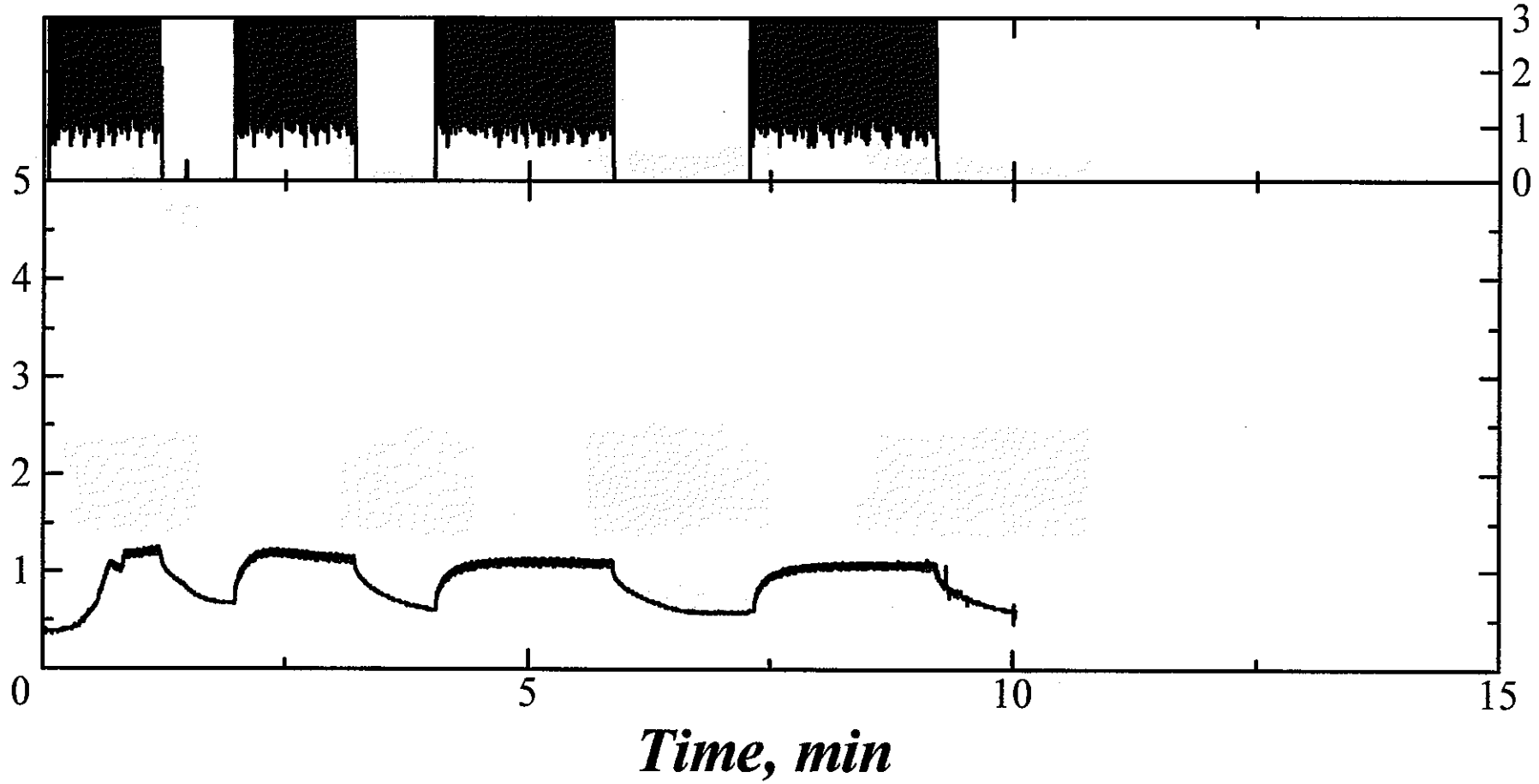
## APPENDIX III

圧力-時間、流量-時間曲線

A P - 25

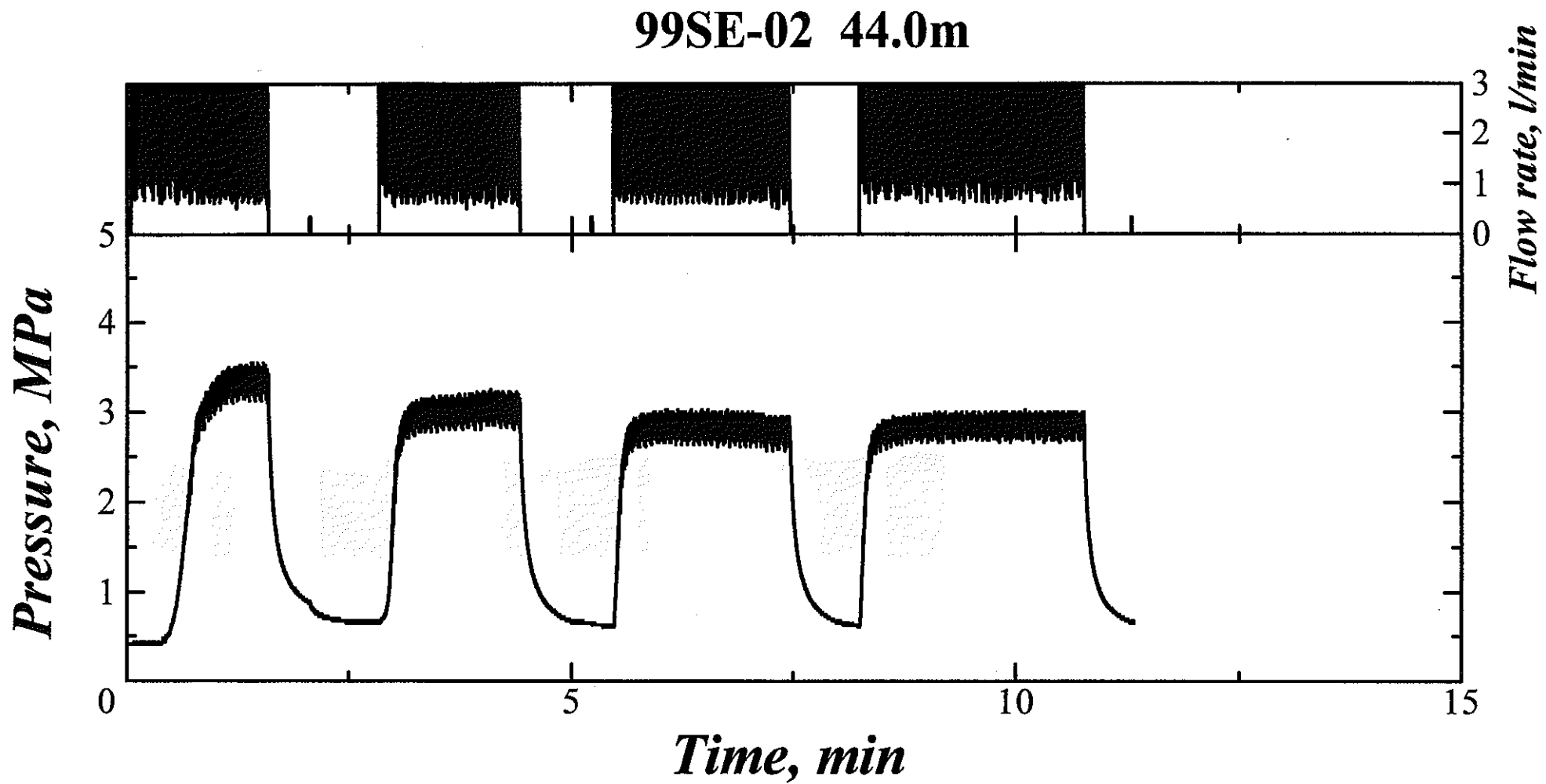
*Pressure, MPa*

**99SE-02 39.0m**



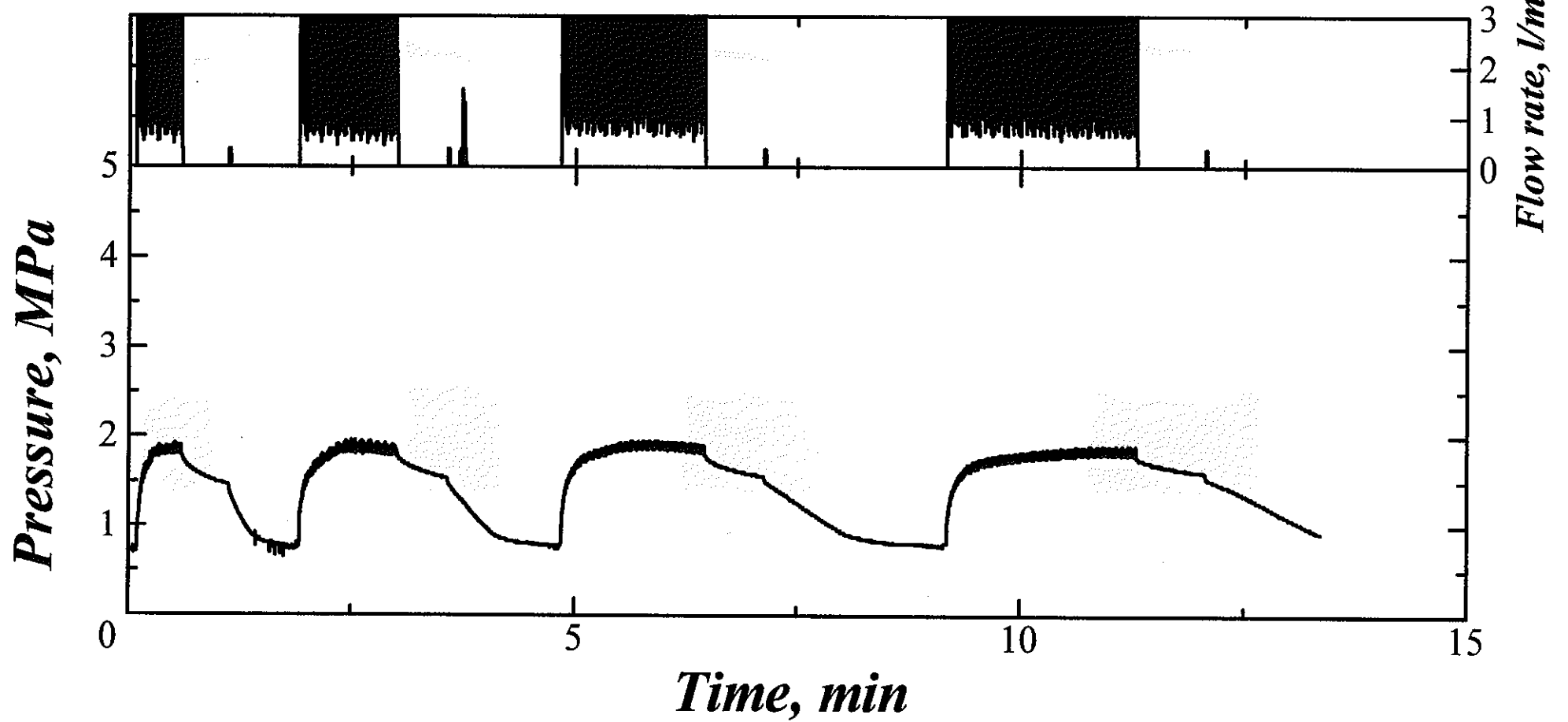
*Flow rate, l/min*

AP-26



AP-27

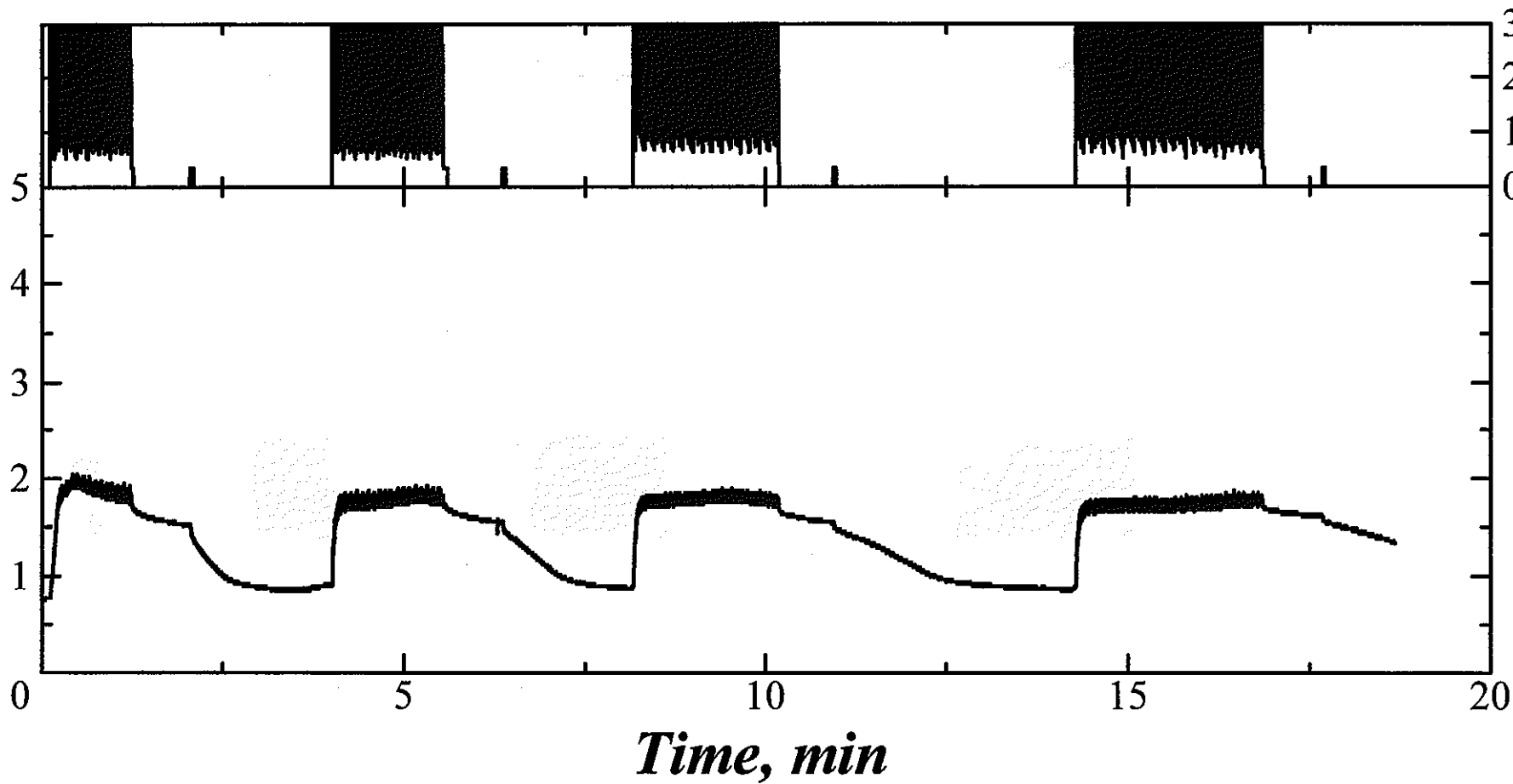
### 99SE-02 75.0m



AP-28

*Pressure, MPa*

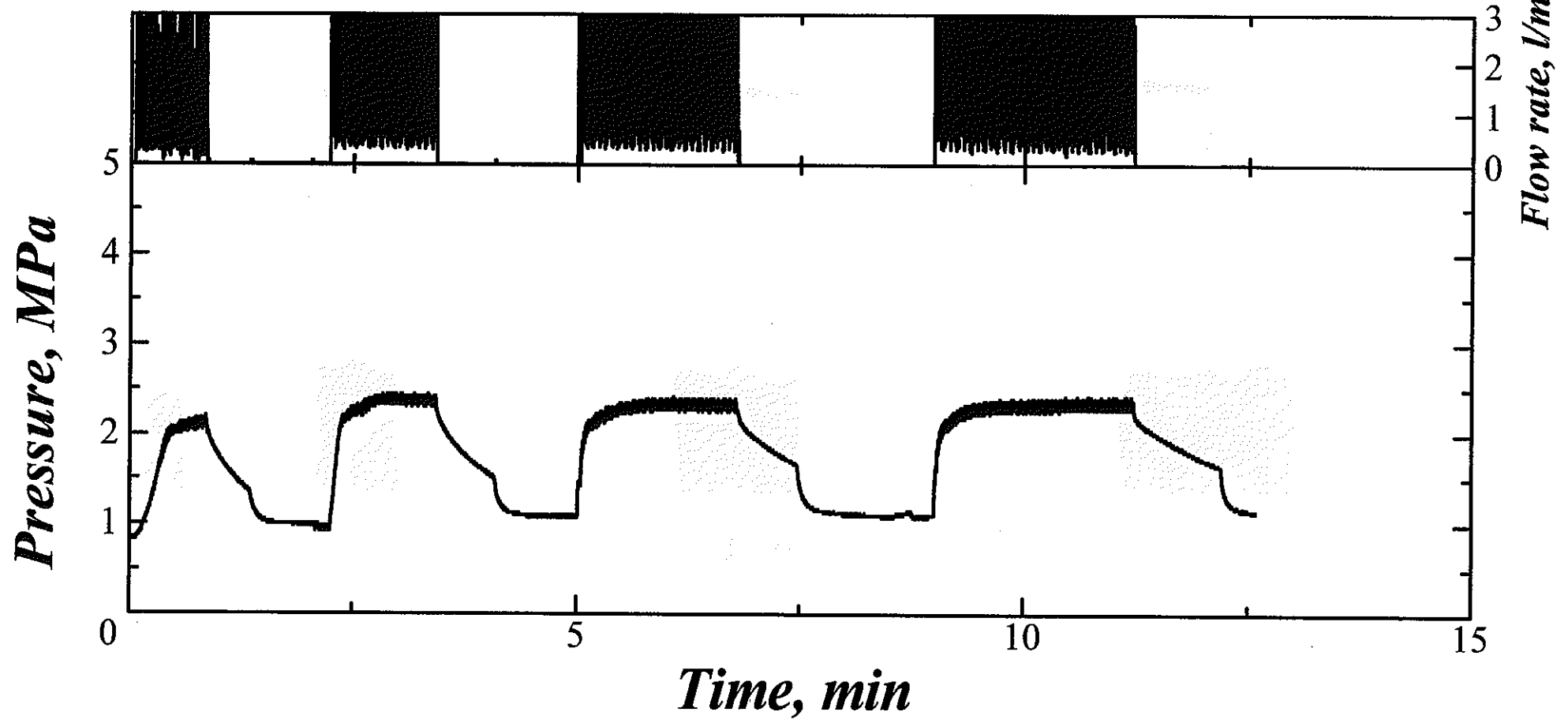
**99SE-02 79.0m**



*Flow rate, l/min*

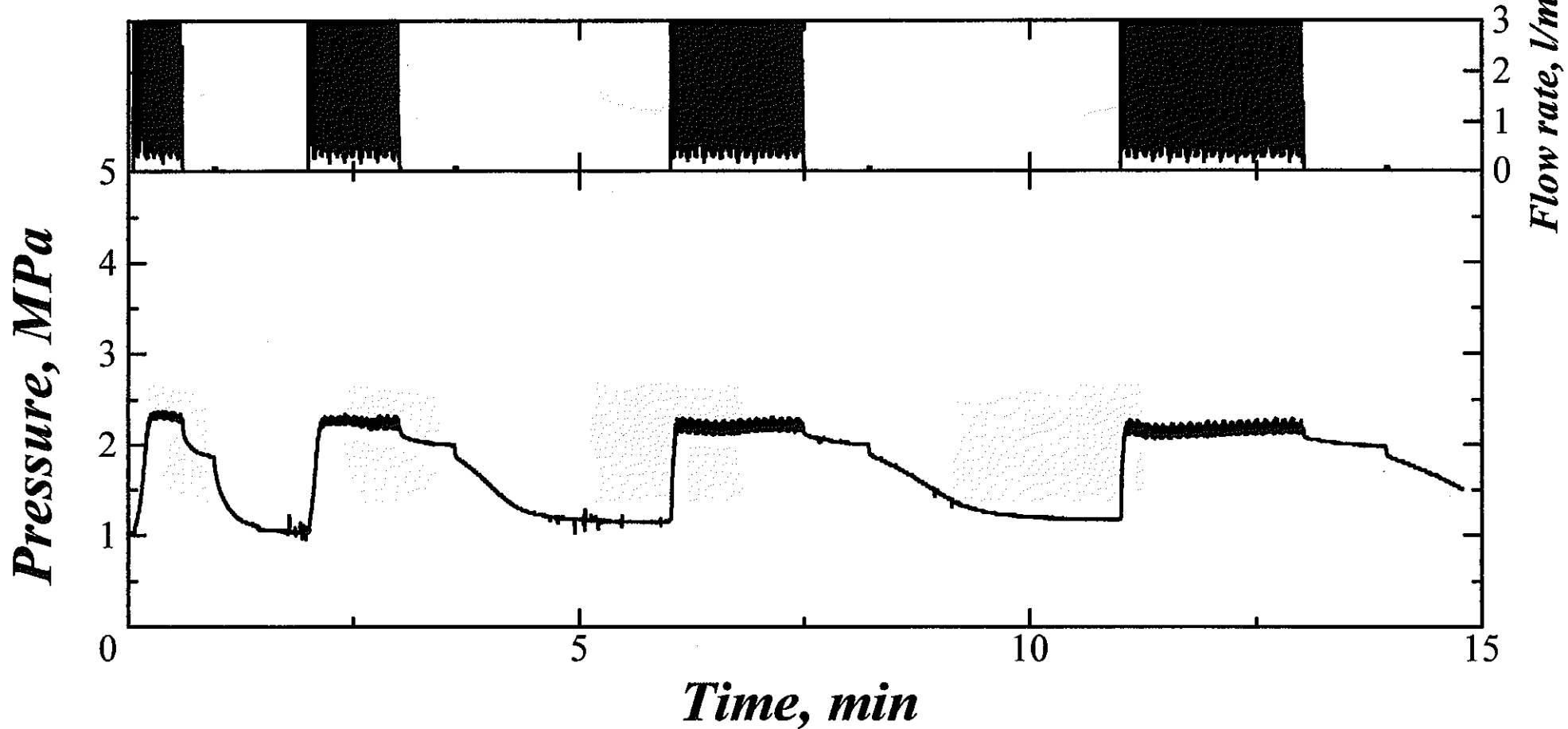
# 99SE-02 87.0m

AP-29



AP-30

### 99SE-02 105.0m

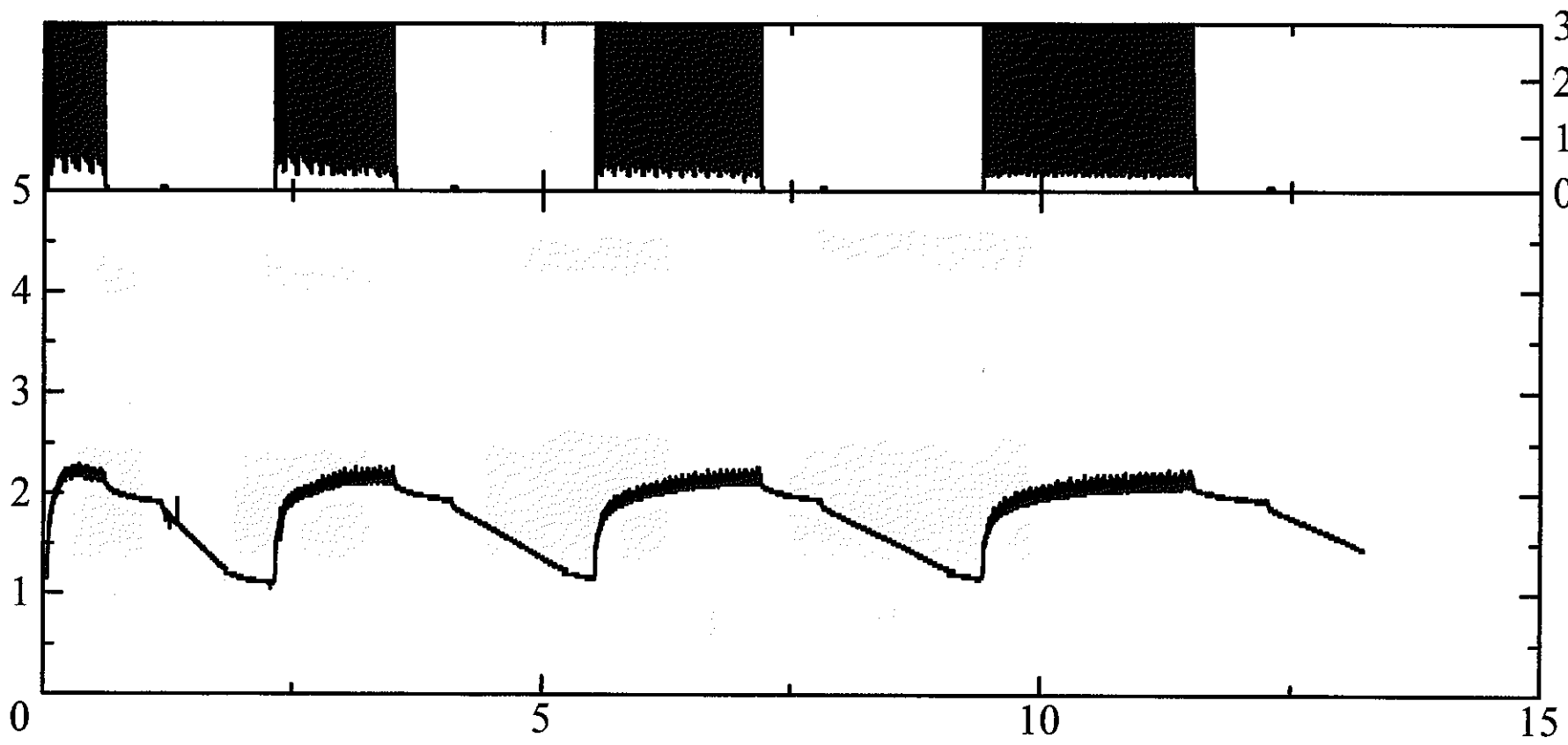




99SE-02 127.0m

AP-31

Pressure, MPa

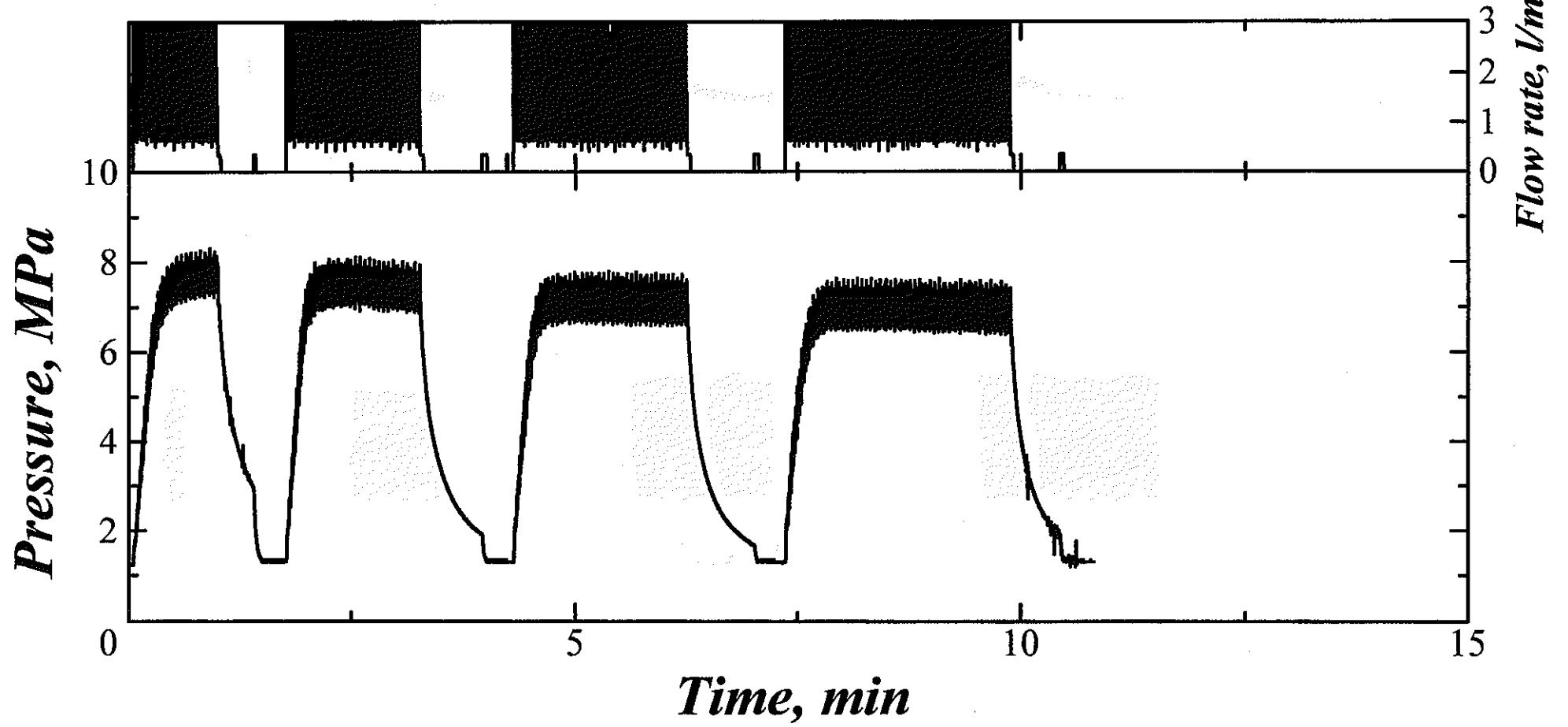


Flow rate, l/min

Time, min

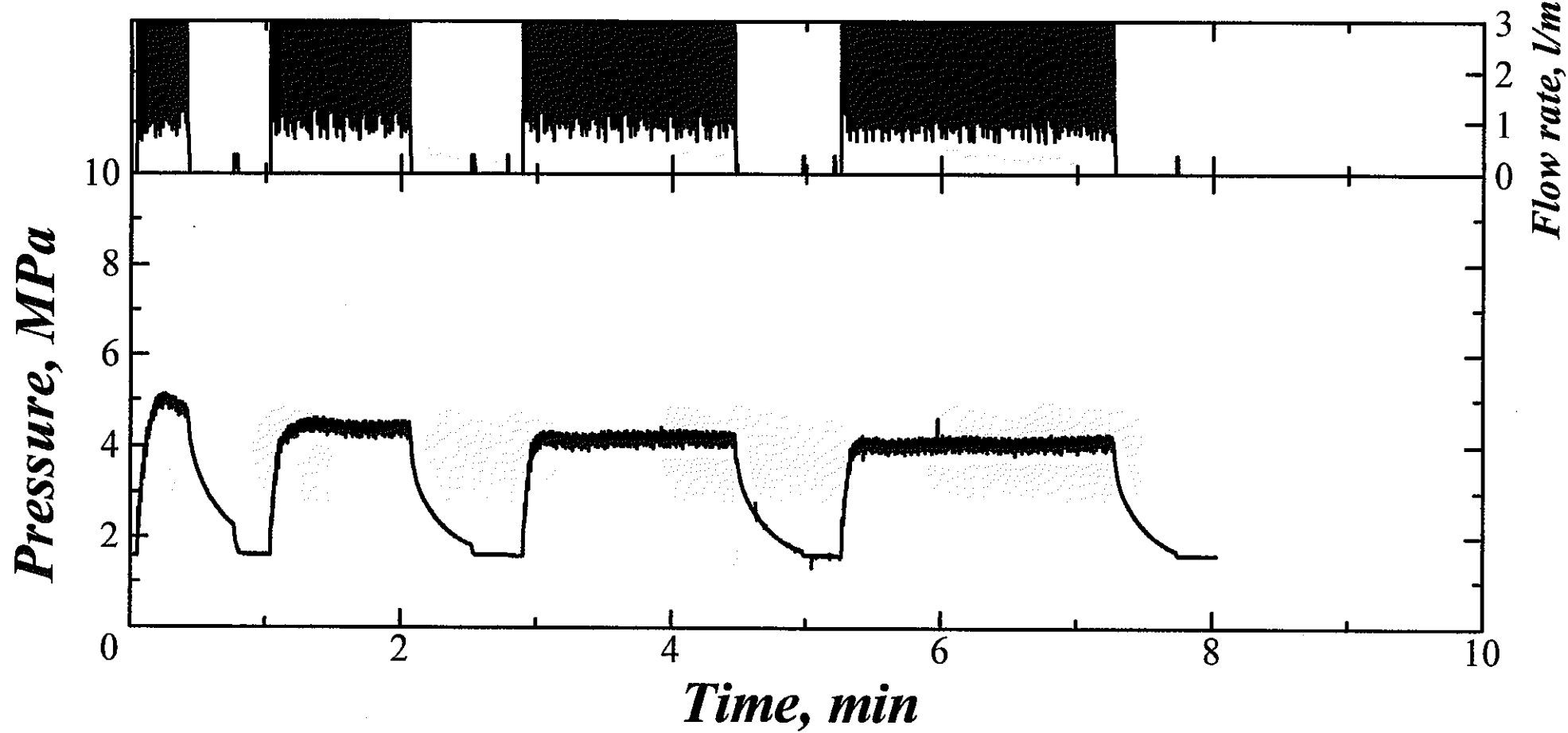
AP-32

### 99SE-02 162.0m



AP-33

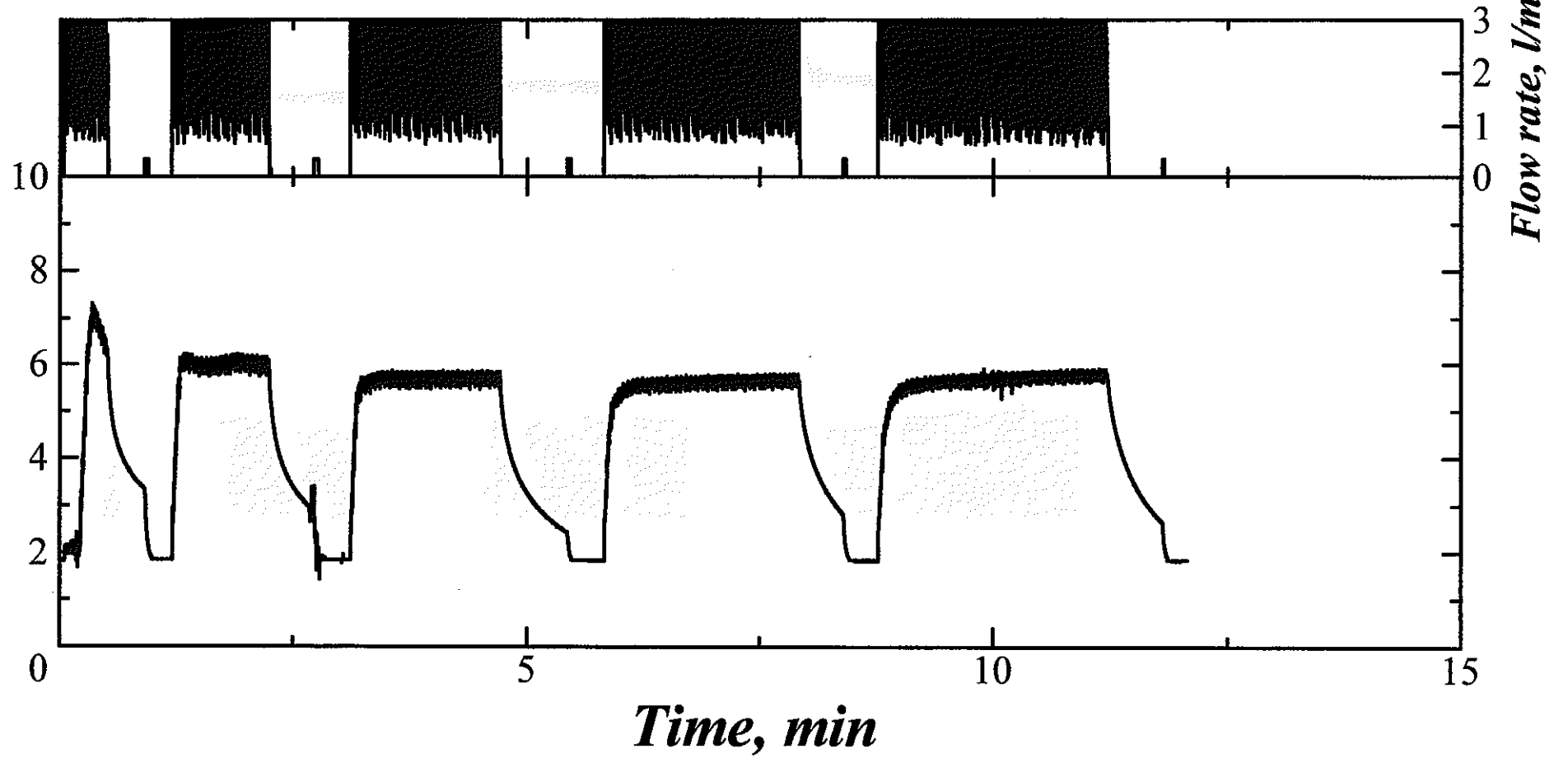
### 99SE-02 188.5m



AP-34

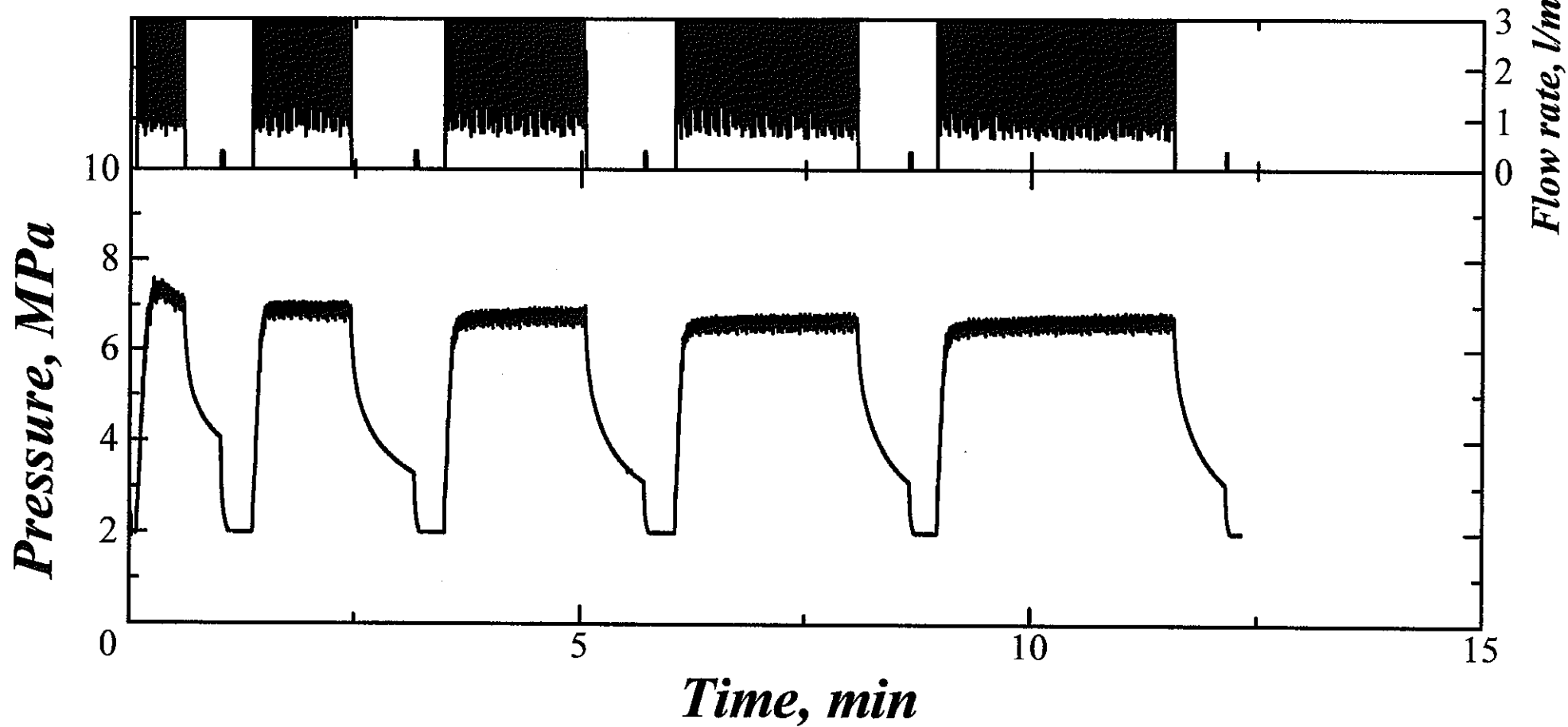
*Pressure, MPa*

**99SE-02 199.0m**



A.P. - 35

### 99SE-02 205.0m

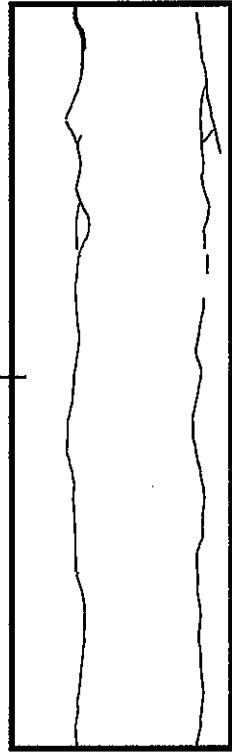


## APPENDIX IV

水圧破碎によって造成されたき裂のスケッチ  
赤色に着色したき裂が人工き裂

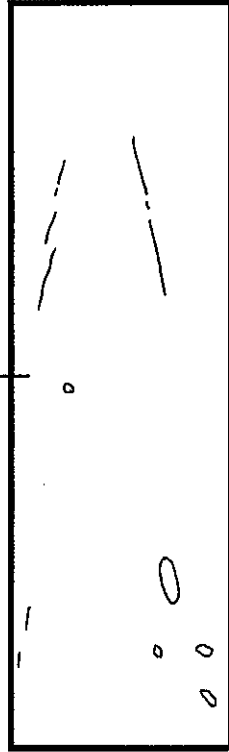
AP-37

39.0m



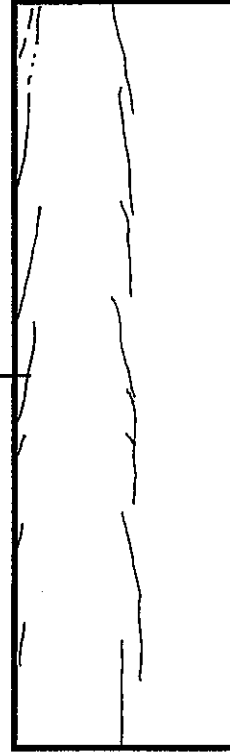
S24E

44.0m



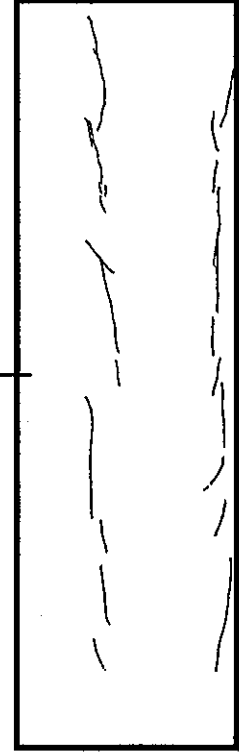
N19E

75.0m



N6W

79.0m

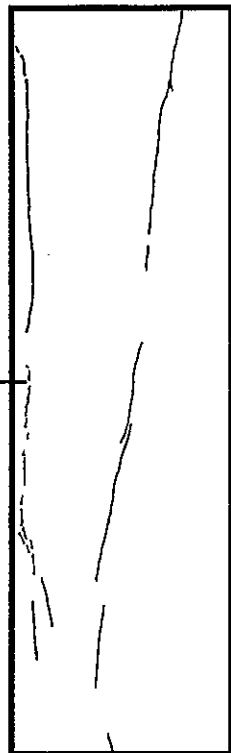


N56W

0 50cm

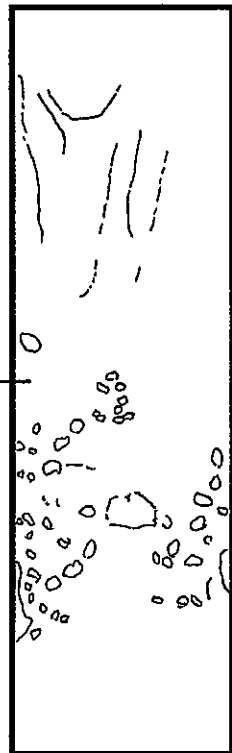
AP-38

87.0m



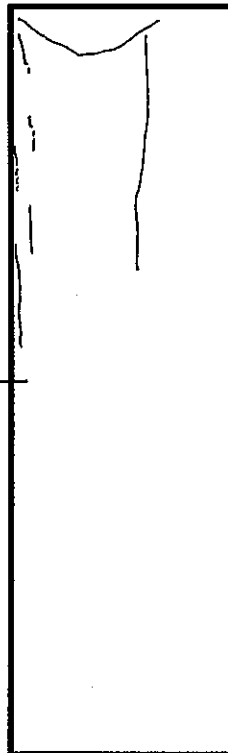
S9E

105.0m



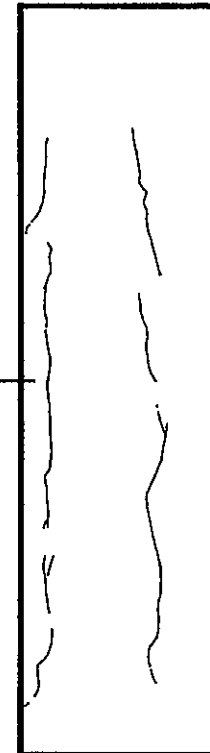
N52E

127.0m



N1E

162.0m



N79E

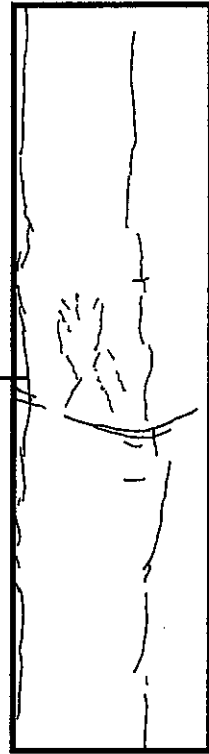
0 50cm

A horizontal scale bar with a vertical line at the left end labeled '0' and a vertical line at the right end labeled '50cm'. The bar is a simple horizontal line connecting these two points.



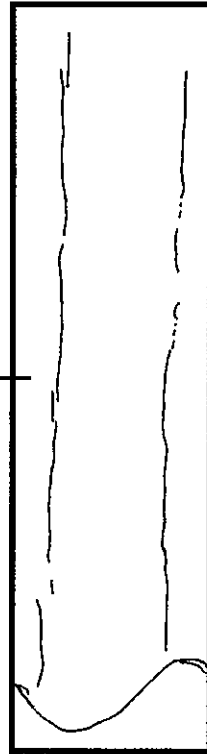
AP-39

188.5m



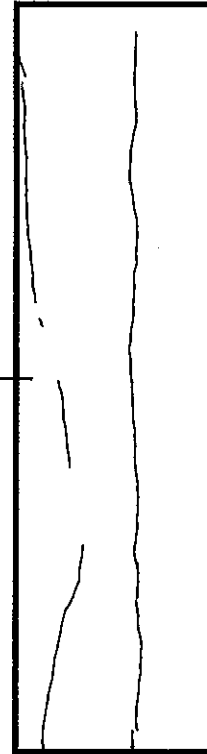
N25W

199.0m



S76W

205.0m

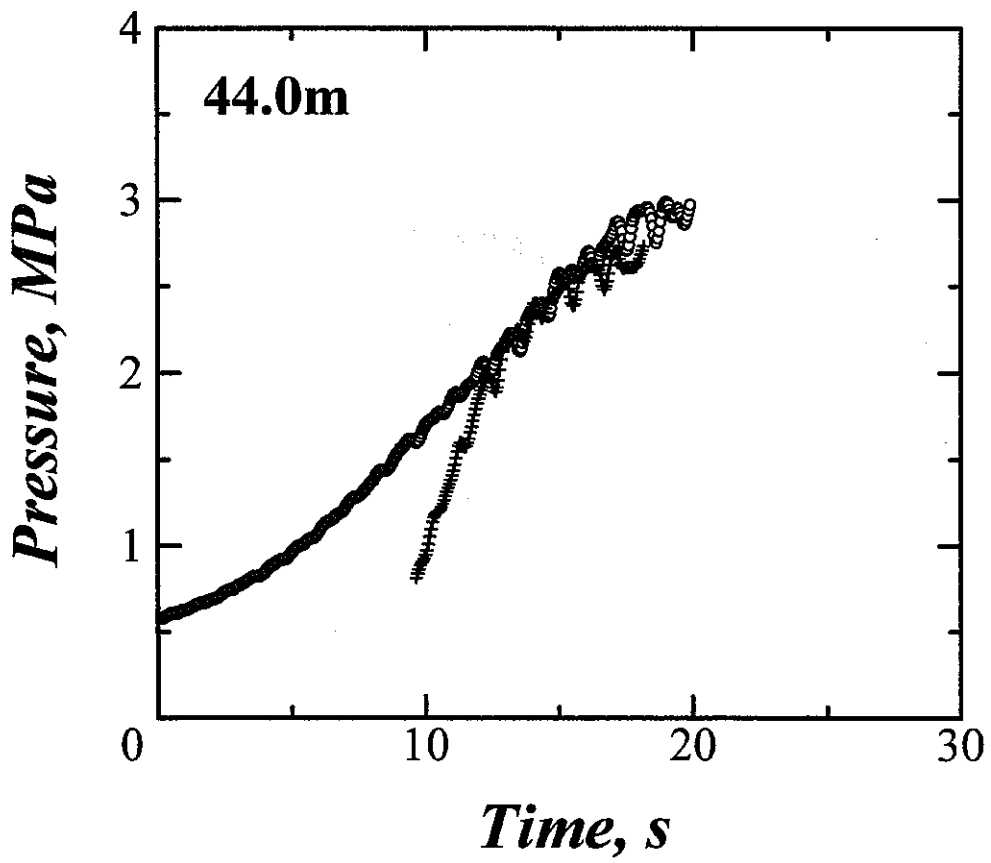
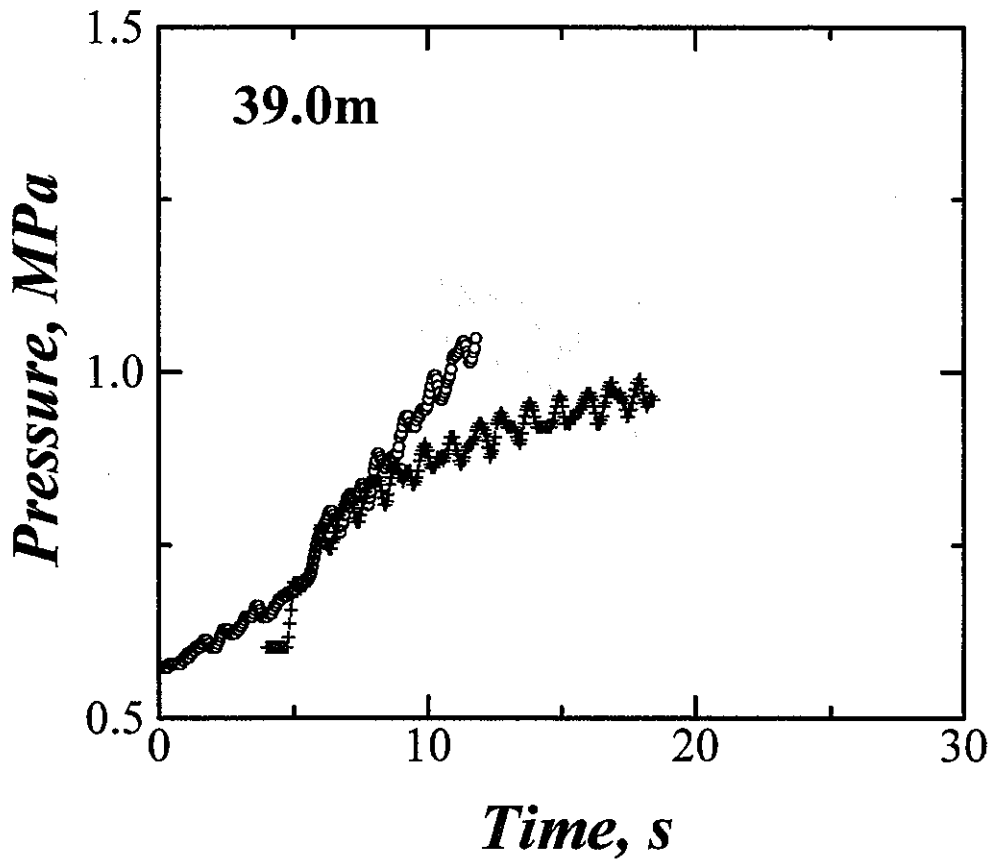


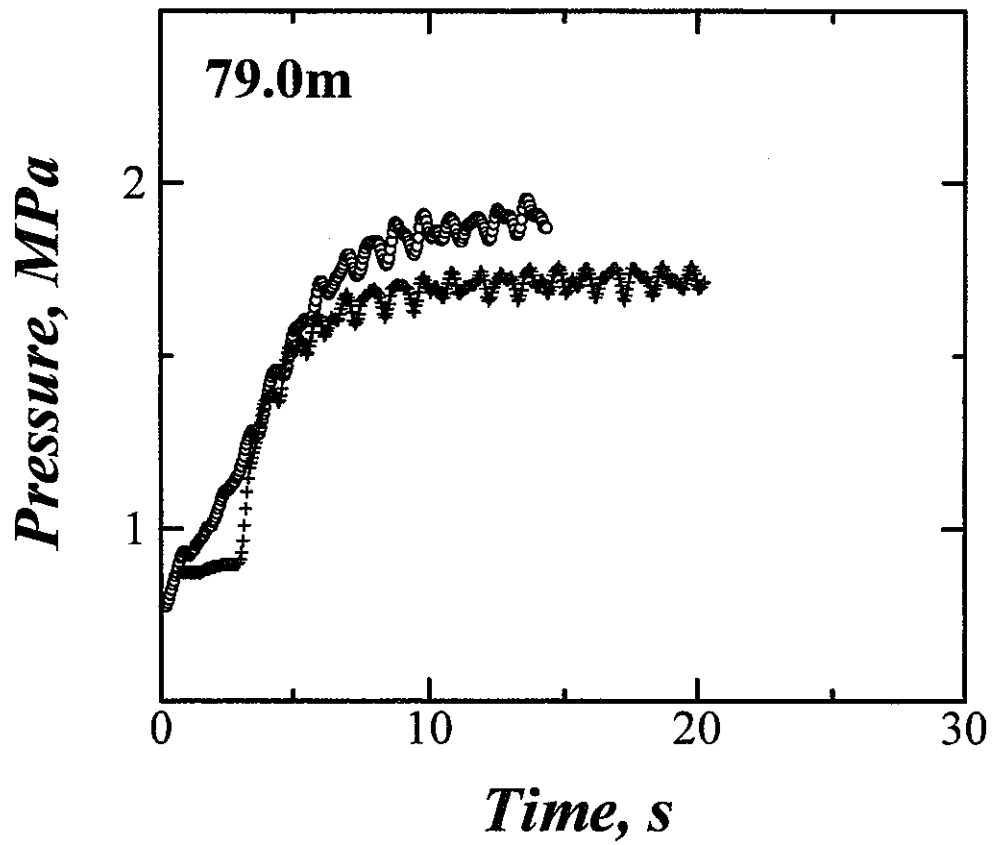
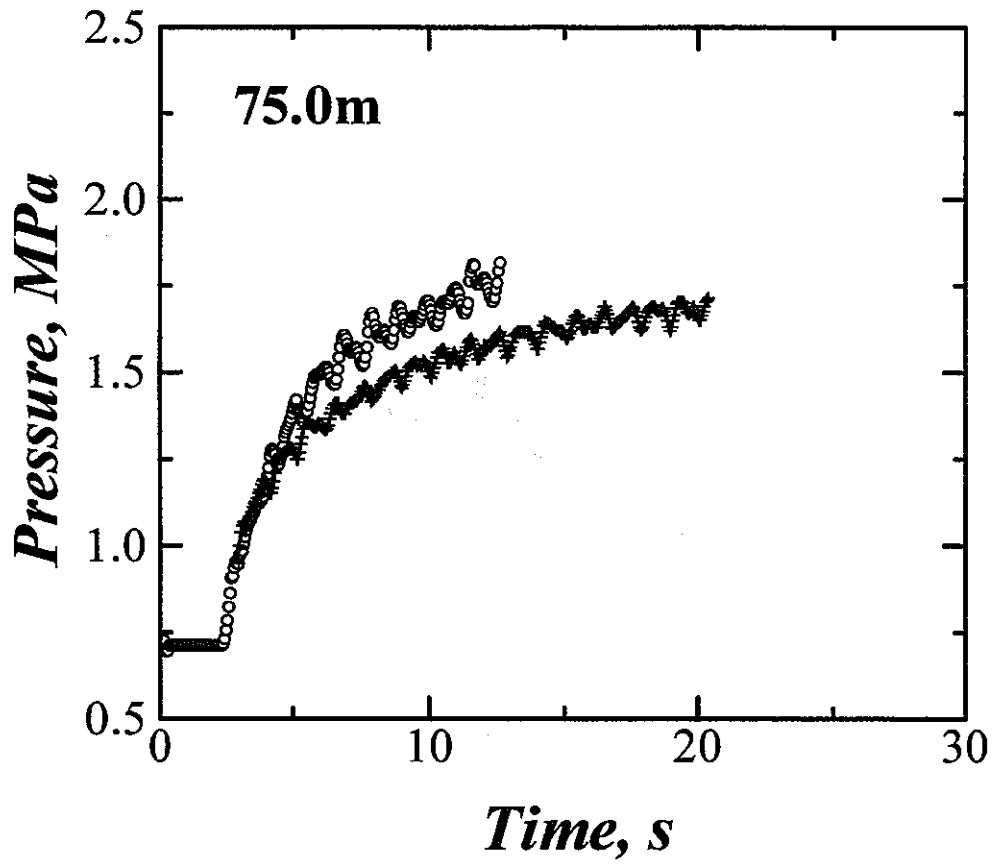
S35E

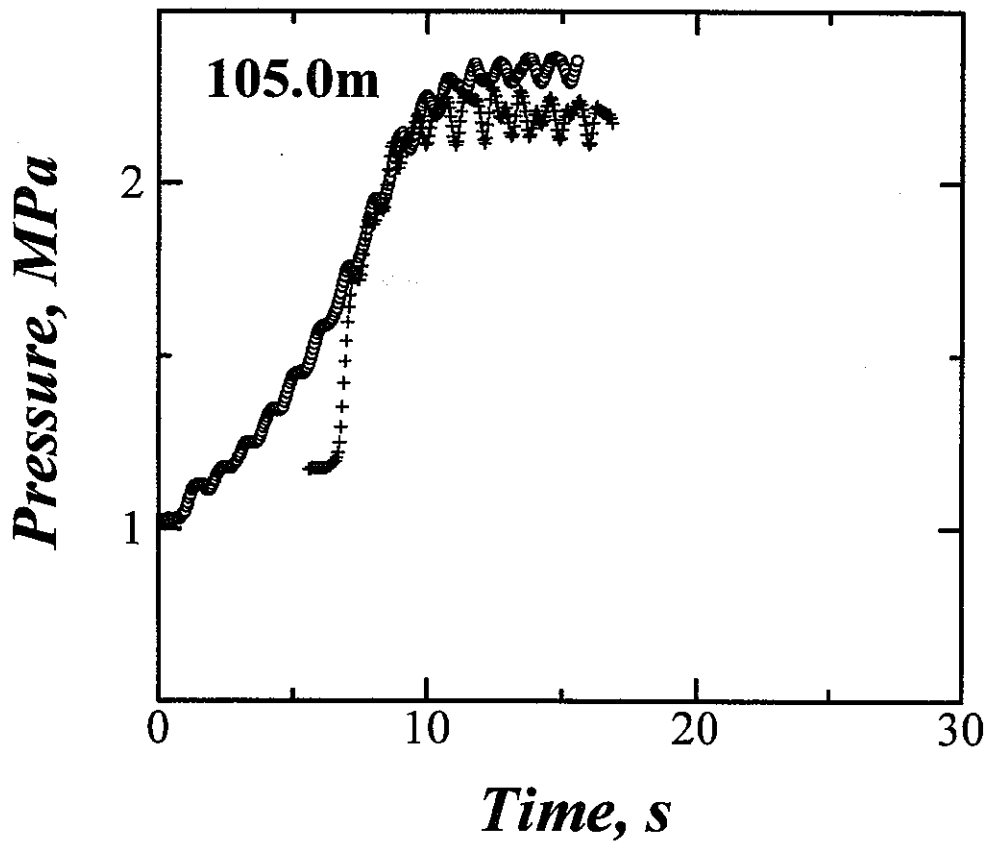
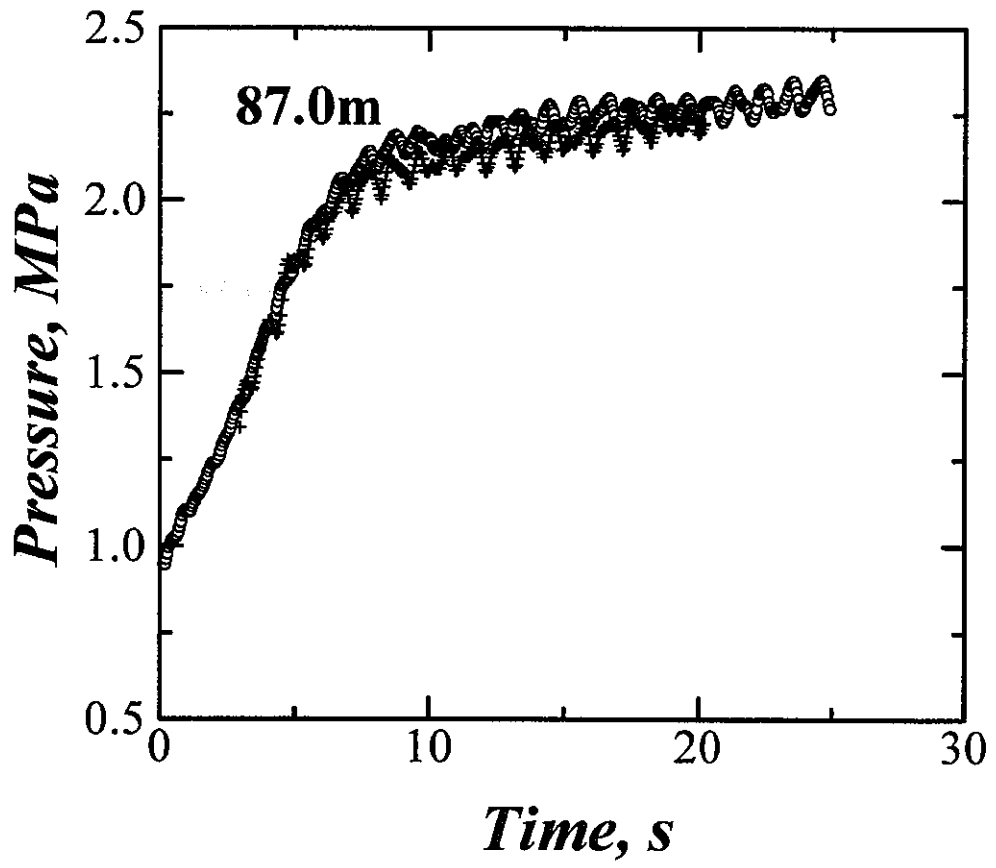


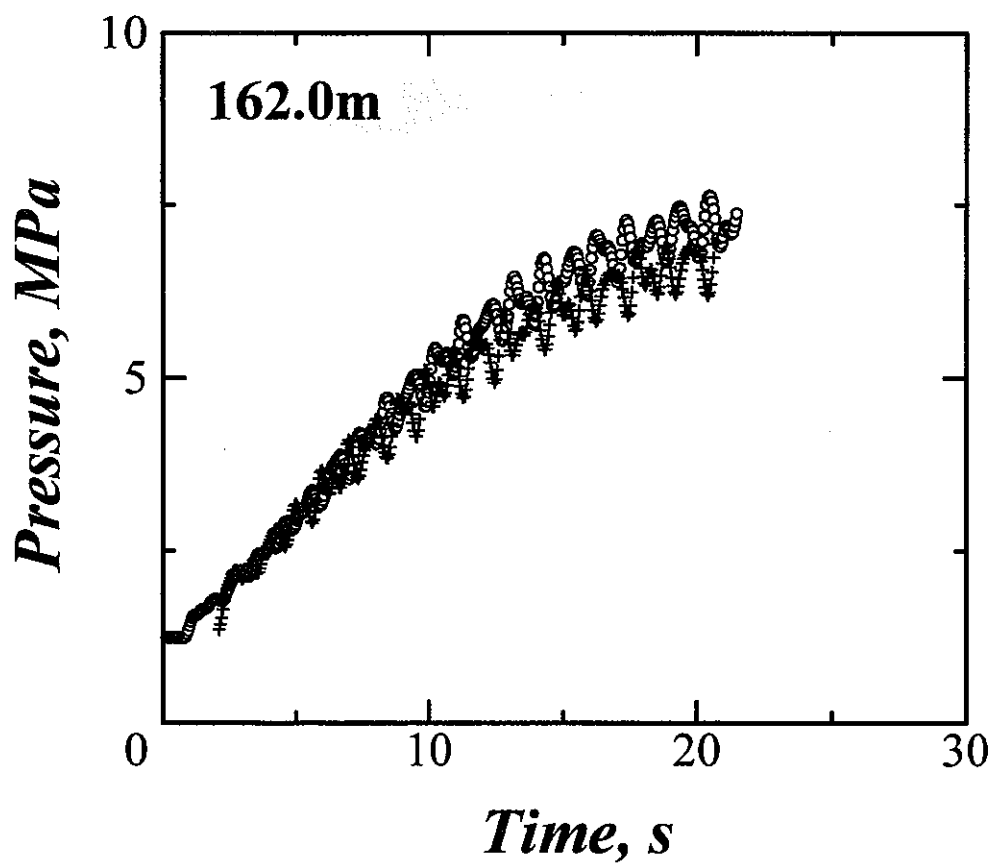
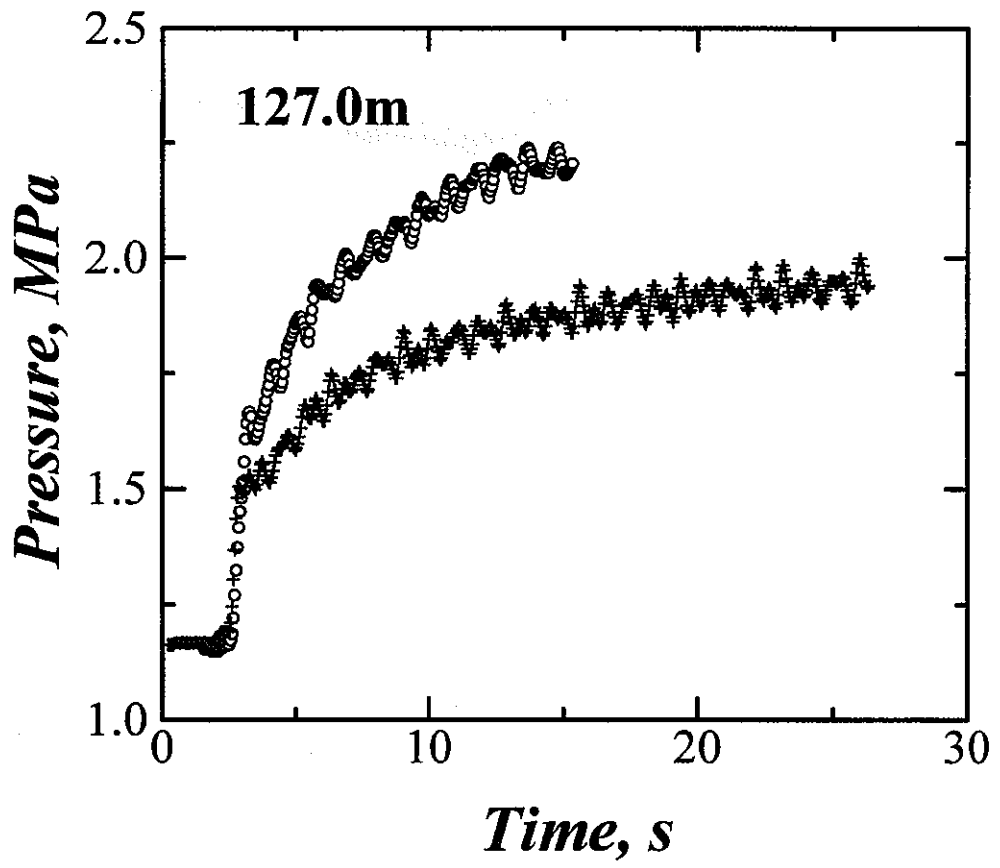
## APPENDIX V

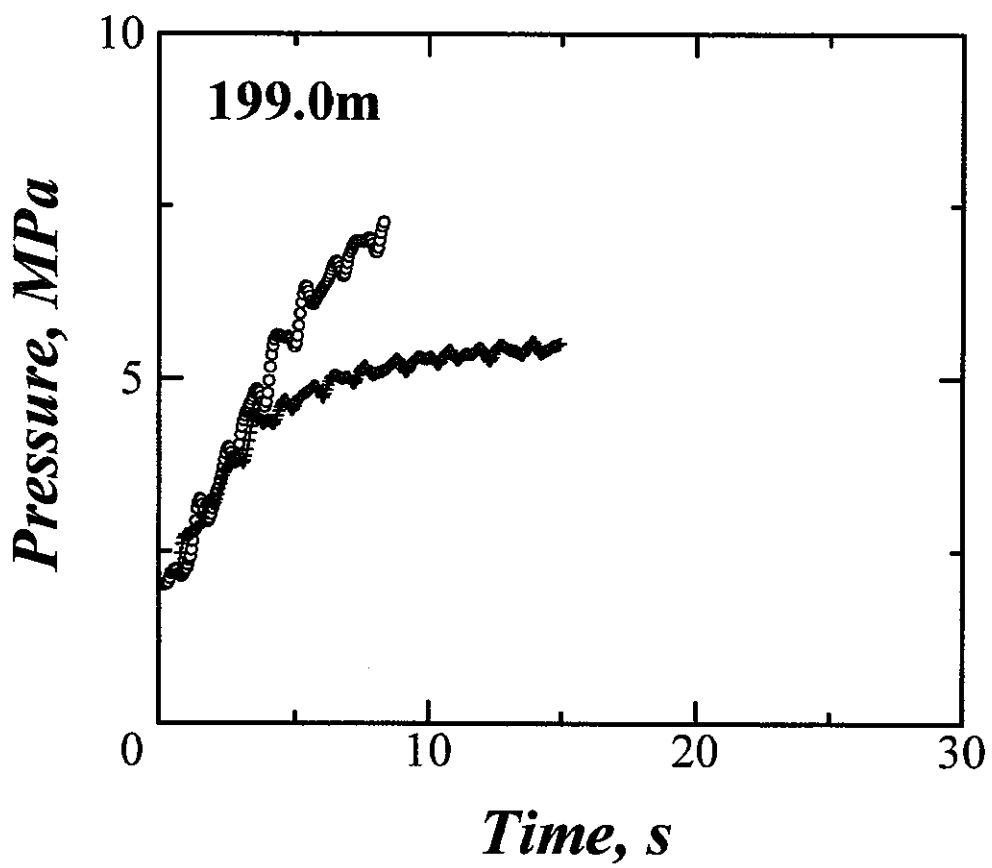
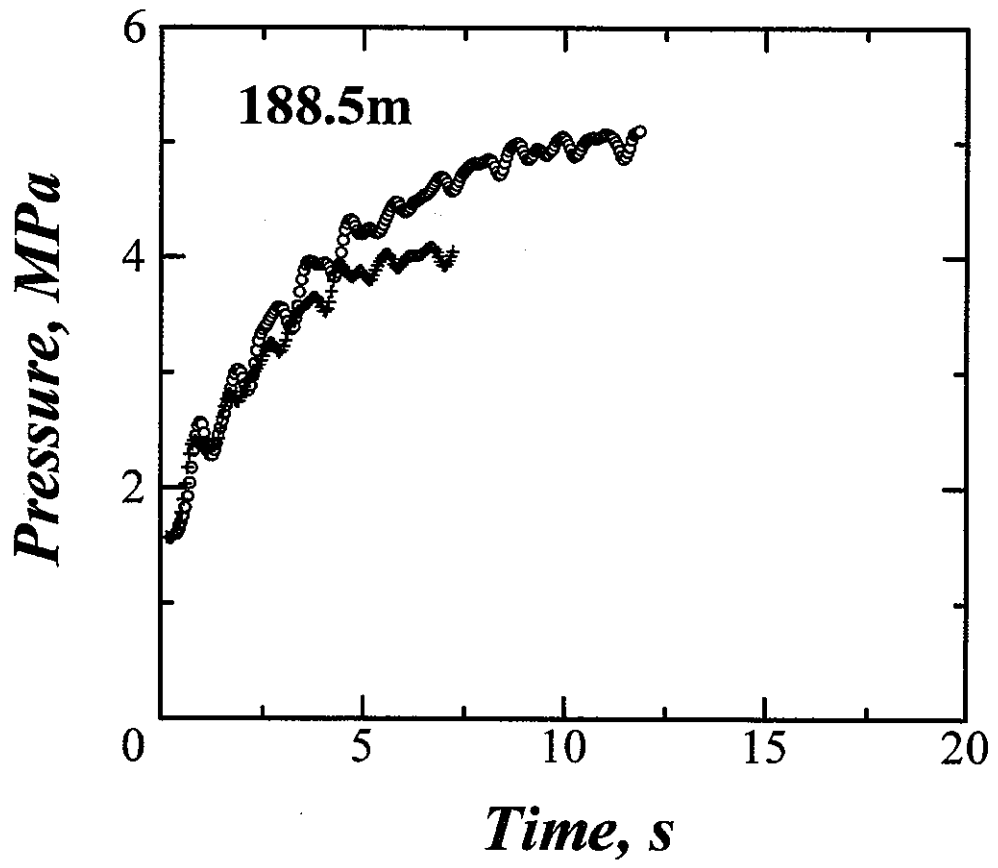
Breakdown および re-opening における圧力-時間曲線の重ね合わせ

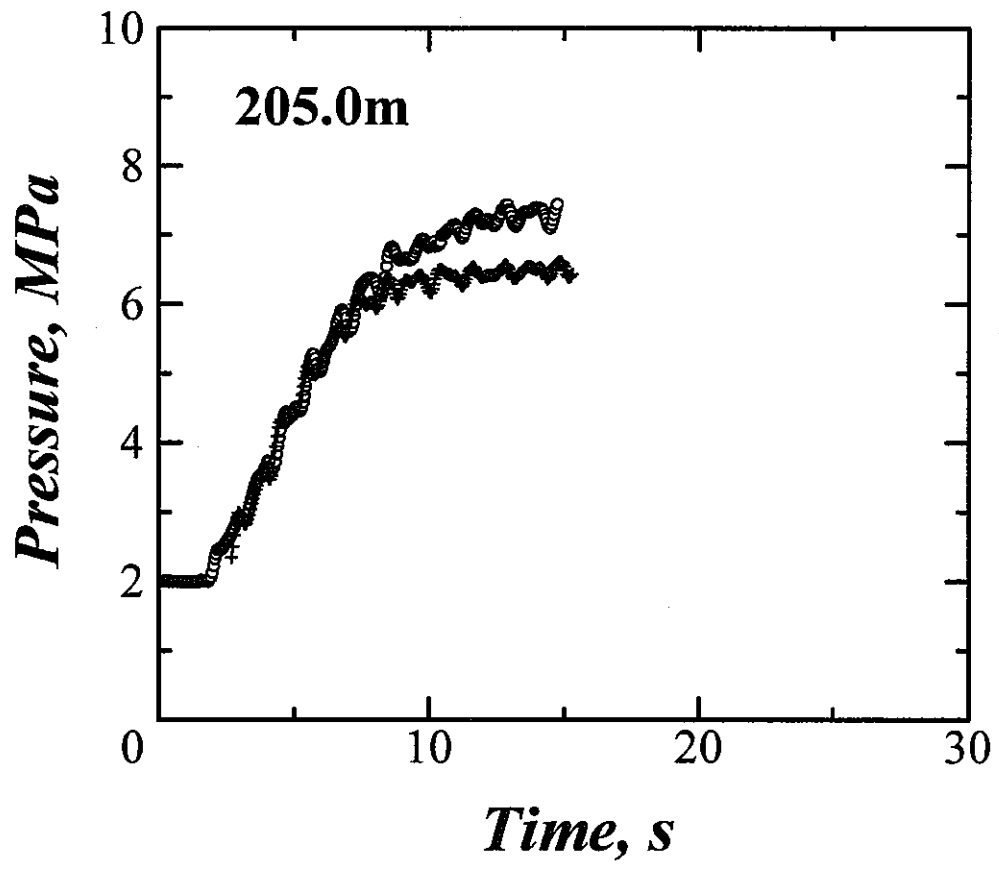








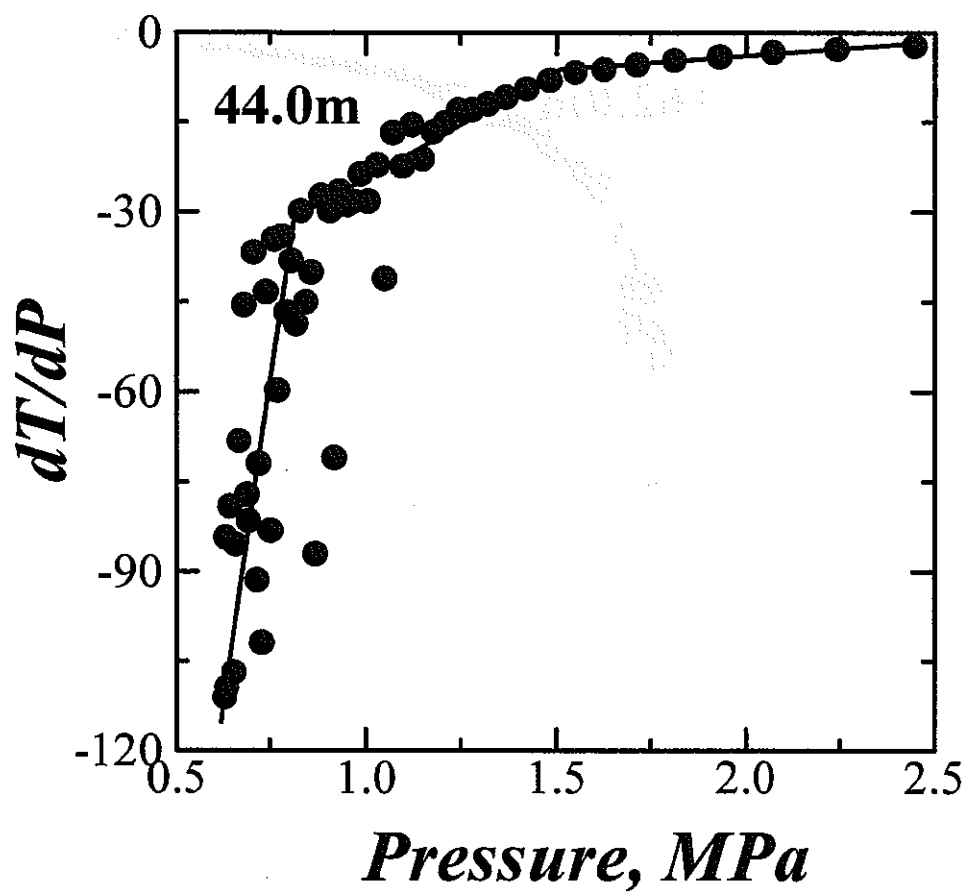
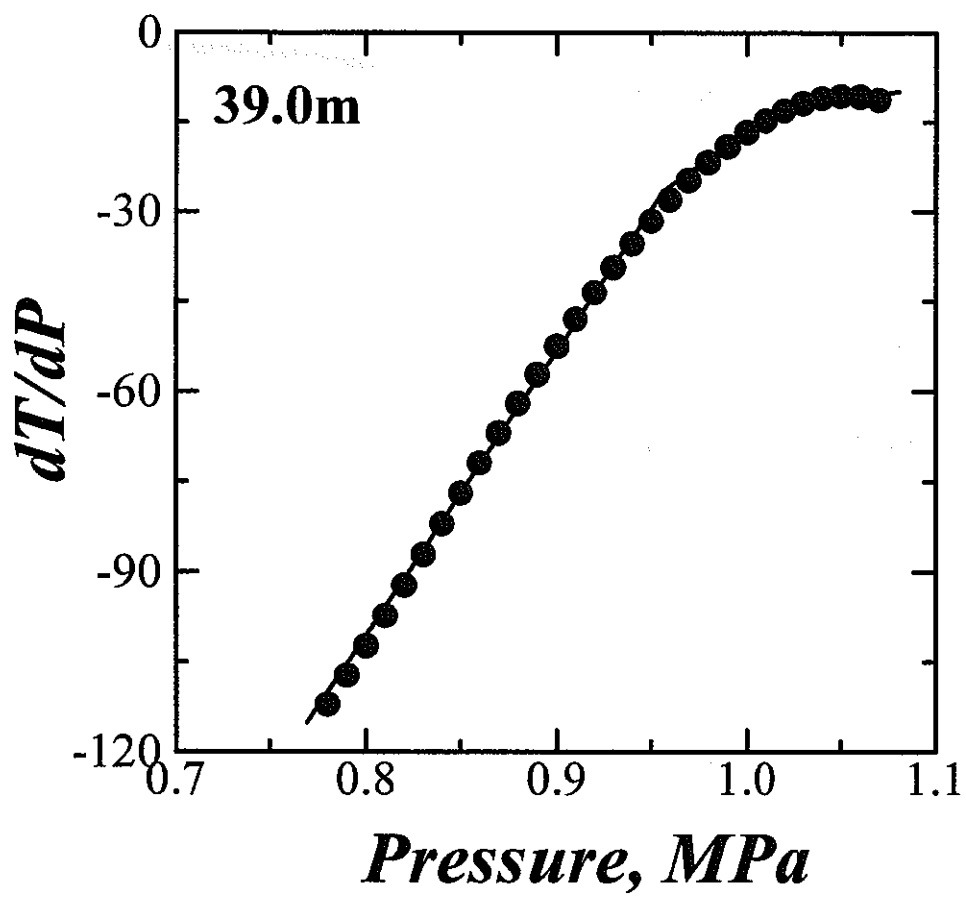


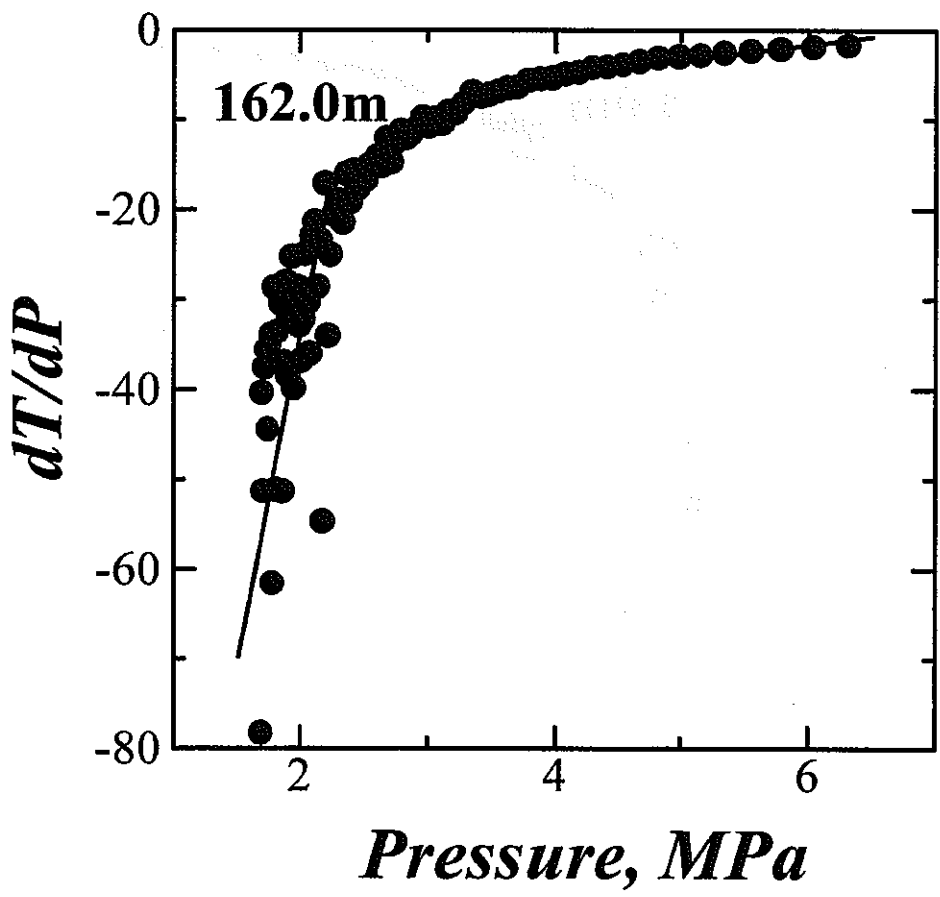
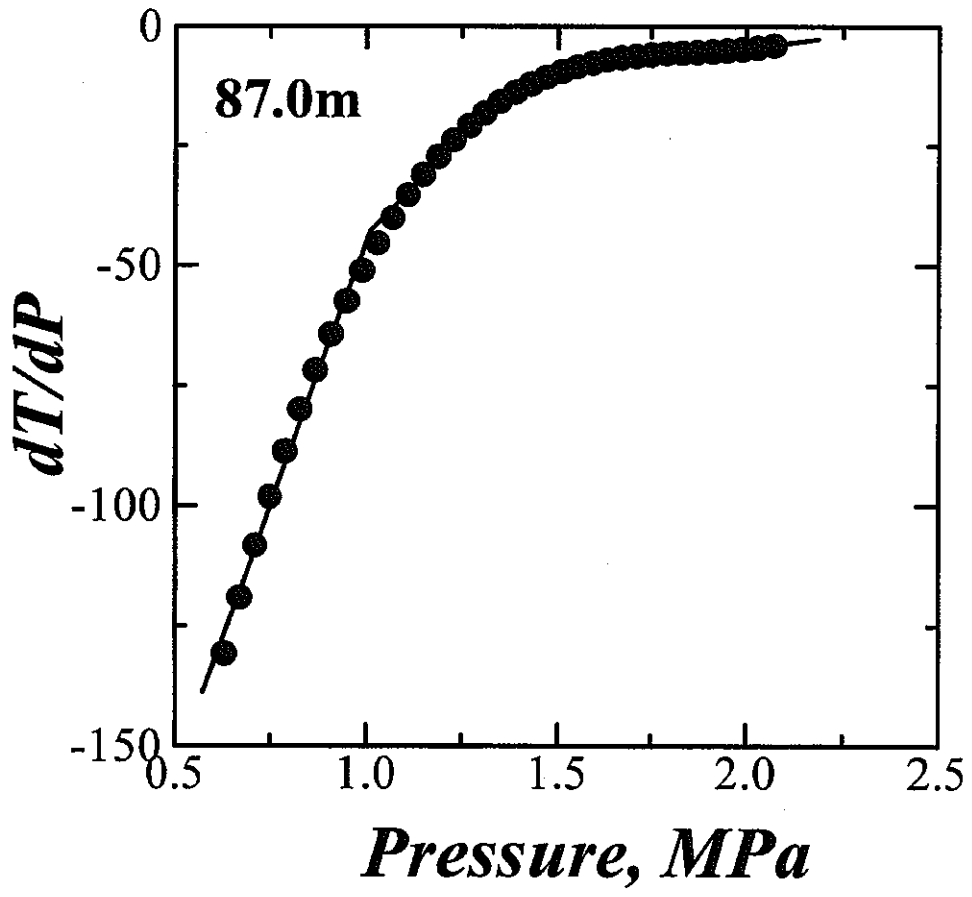


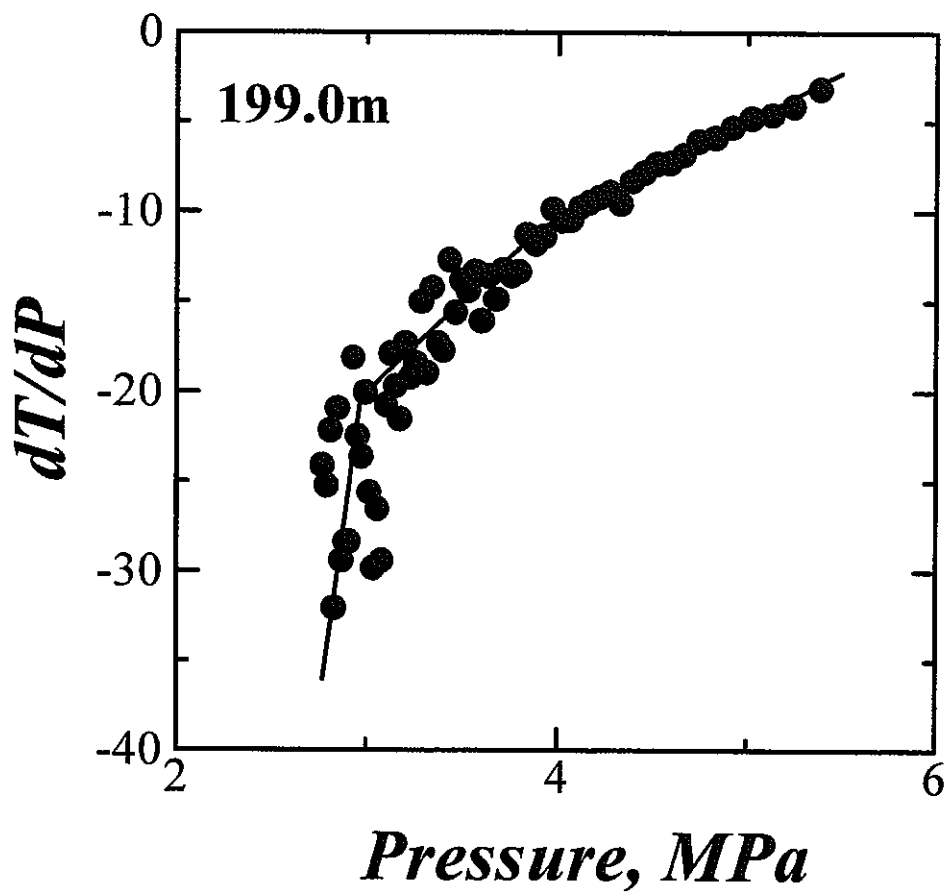
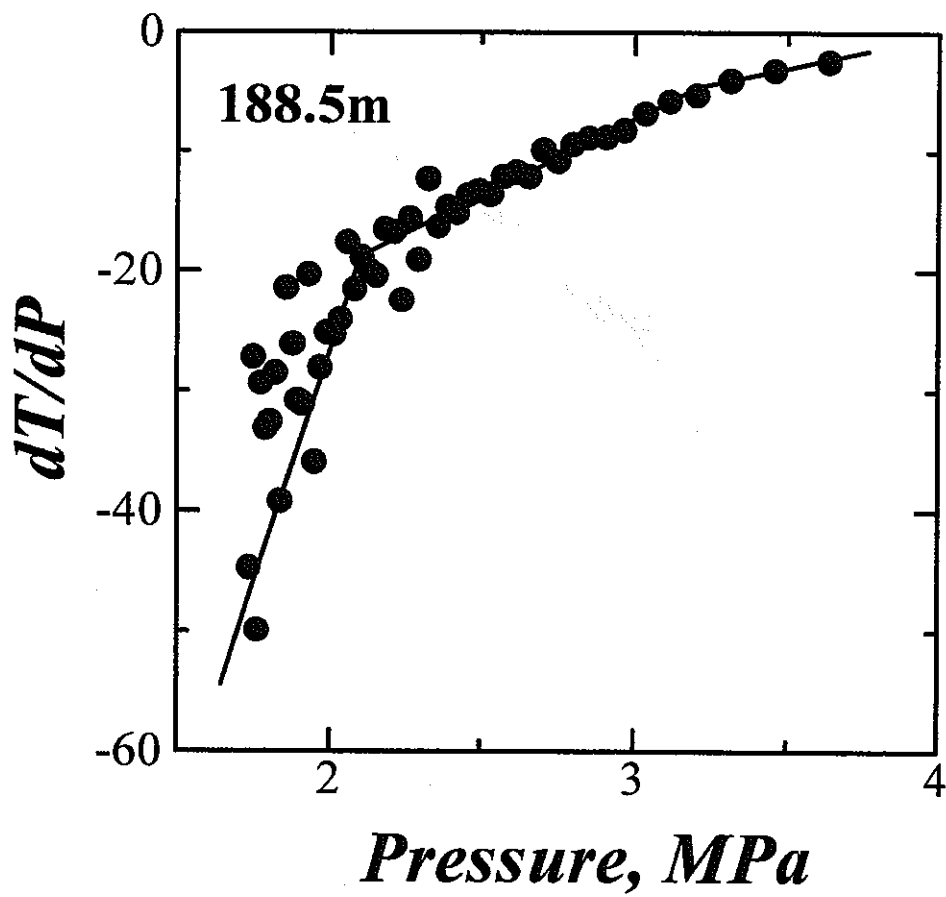


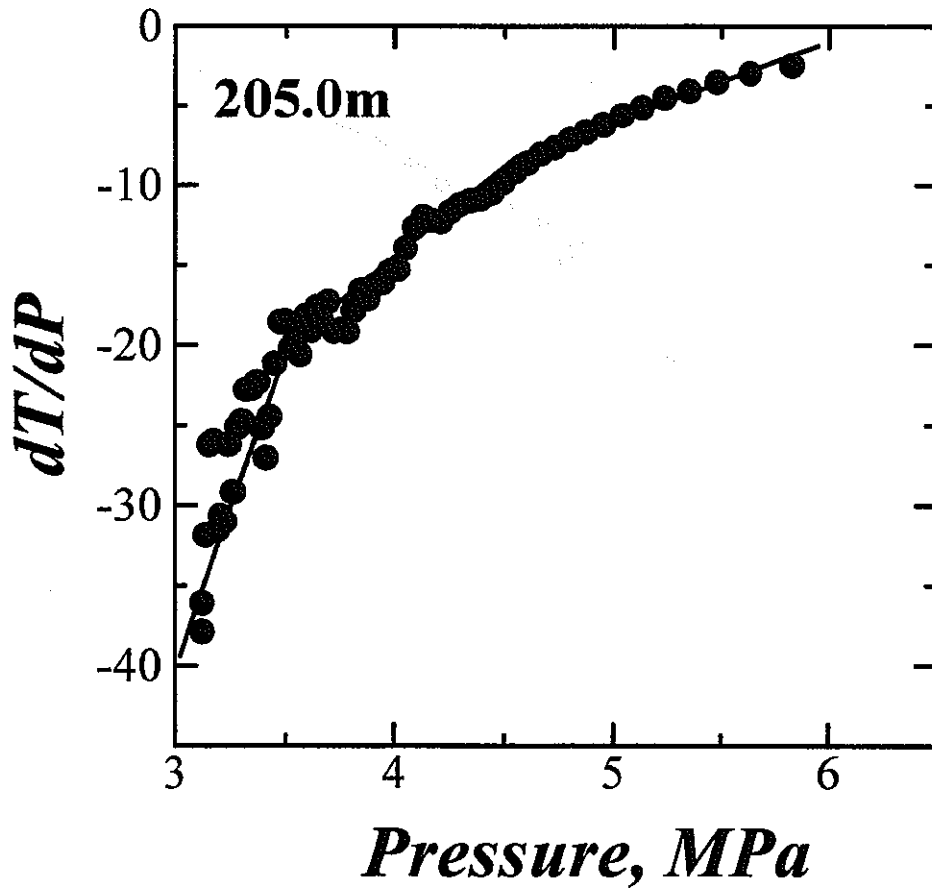
## APPENDIX VI

Shut-in 後の圧力減衰速度の逆数と圧力の関係





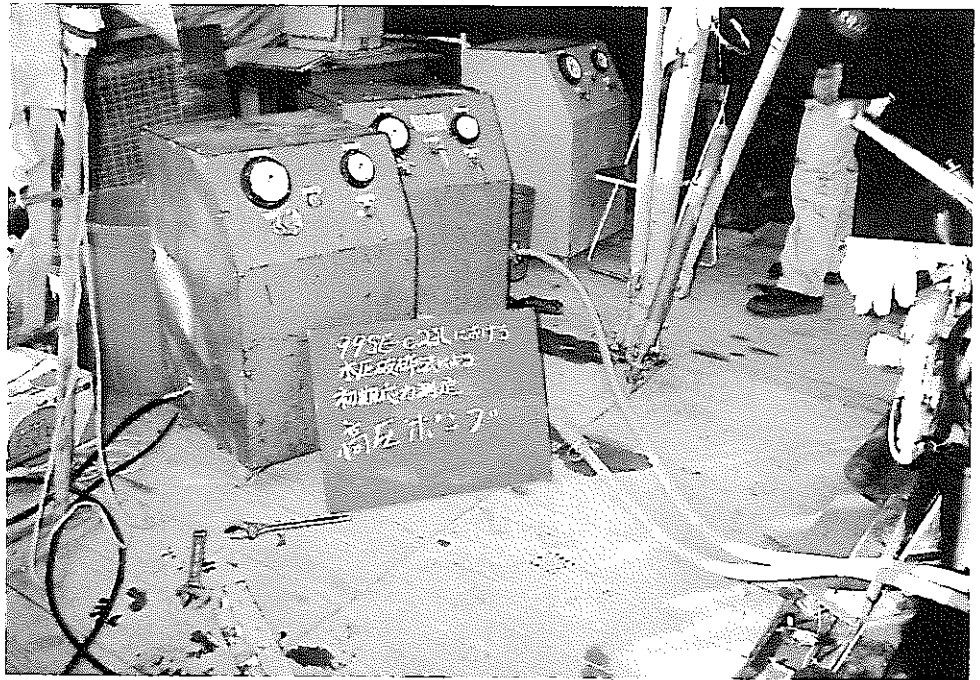




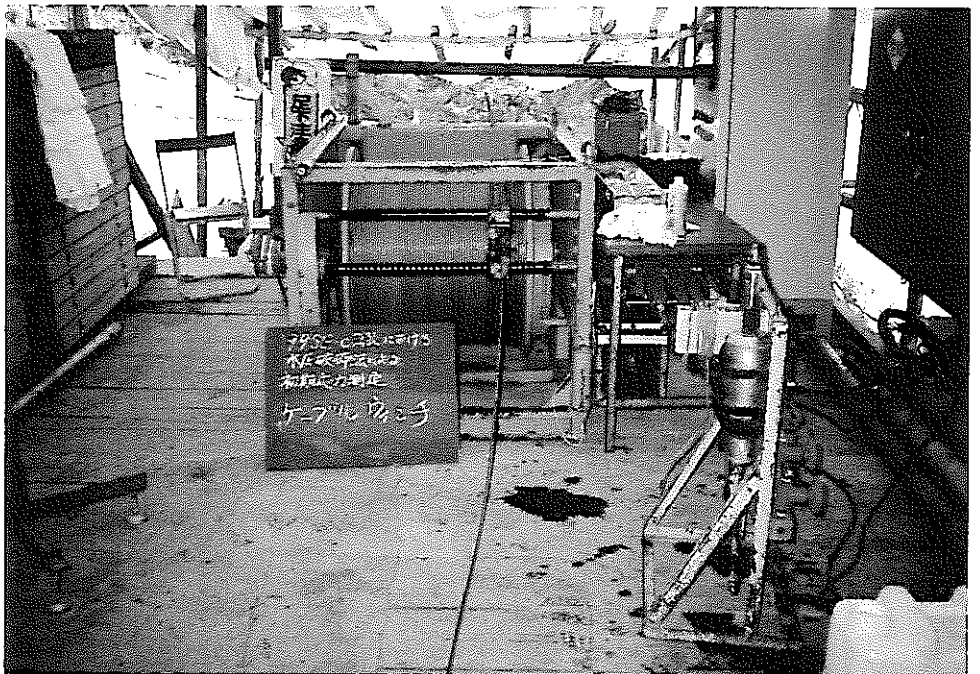
# APPENDIX VI

写真集

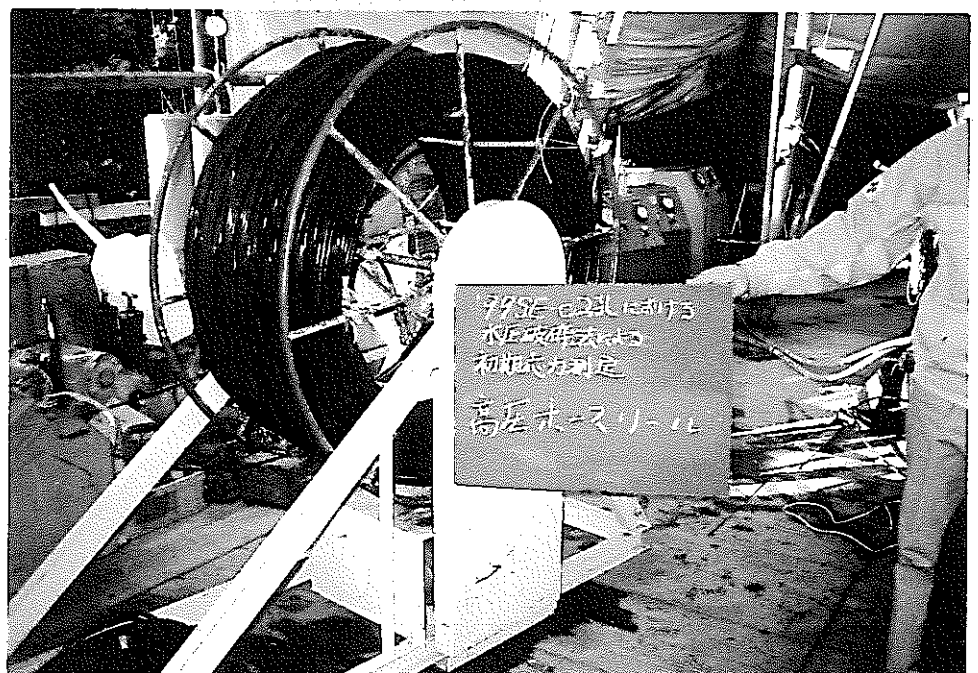
水圧破碎用高圧ポンプ



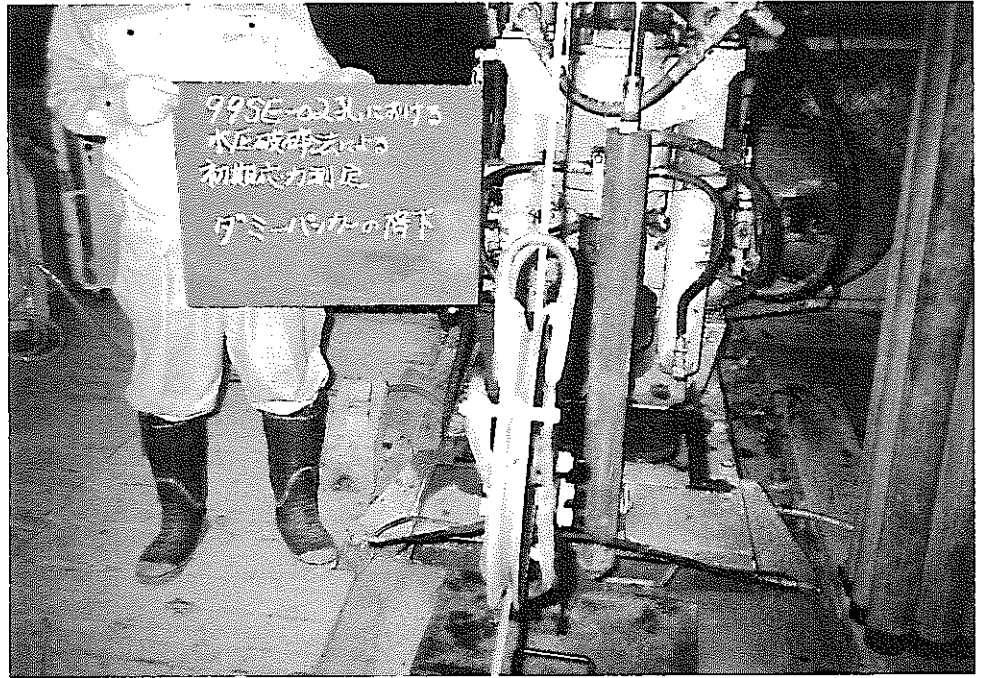
水圧破碎用ケーブル  
ウィンチおよび圧力  
パネル



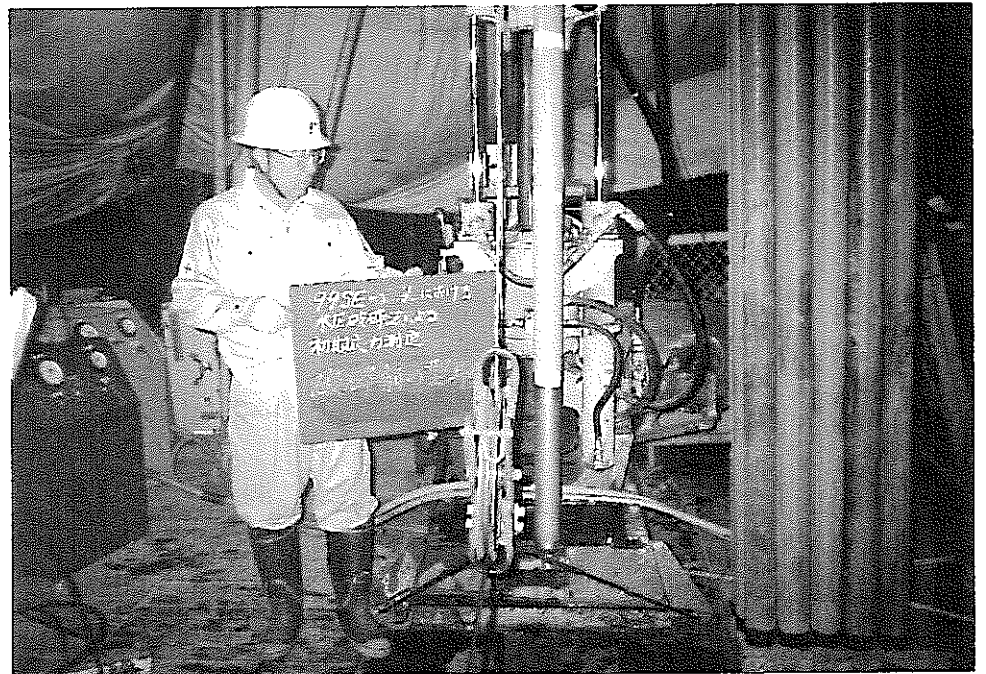
高圧ホースリール



ダミーパッカーの降下

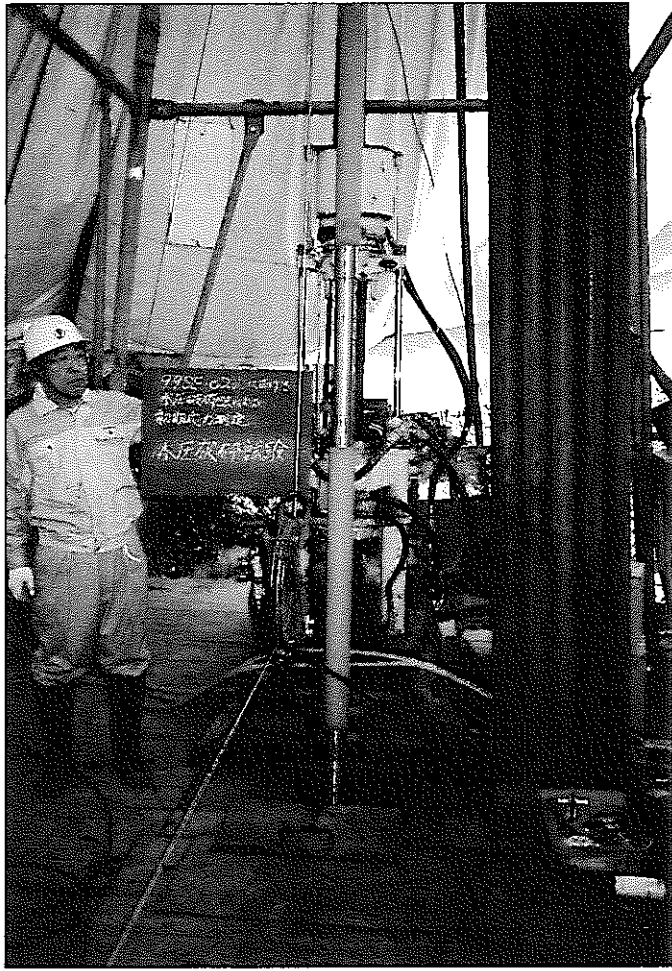


破砕前の型取り





水圧破碎試験



破碎後の型取り

