

花崗岩における岩盤工学に関する調査試験研究 (その4)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1995年3月

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
ㄗ	J1559 95-001	1995.8.22

この資料は技術管理室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

社団法人 システム総合研究所

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容遺漏がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

花崗岩における岩盤工学に関する調査試験研究（その4）

社団法人 システム総合研究所
理事長 榎木 義一

要 旨

本研究は、岩盤物性と地殻応力に関する研究の一環として、結晶質岩系の花崗岩について、岩盤工学の基礎的研究、すなわち岩盤応力、岩盤の長期安定性、岩盤の割れ目の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を二つに分けて実施した。その一つは、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、もう一つは、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、それぞれシリアーダで行った。前者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、後者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、それぞれシリアーダで行った。前者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、後者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、それぞれシリアーダで行った。

本研究は、岩盤物性と地殻応力に関する研究の一環として、結晶質岩系の花崗岩について、岩盤工学の基礎的研究、すなわち岩盤応力、岩盤の長期安定性、岩盤の割れ目の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を二つに分けて実施した。その一つは、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、もう一つは、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、それぞれシリアーダで行った。前者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、後者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、それぞれシリアーダで行った。

本研究は、岩盤物性と地殻応力に関する研究の一環として、結晶質岩系の花崗岩について、岩盤工学の基礎的研究、すなわち岩盤応力、岩盤の長期安定性、岩盤の割れ目の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を二つに分けて実施した。その一つは、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、もう一つは、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、それぞれシリアーダで行った。前者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、後者は、岩盤の透水性や止水性の変化、岩盤内単一不連続面の基本的物理的性質、室内での試験に基づく基礎的・理論的な研究を、それぞれシリアーダで行った。

本報告書は、社団法人システム総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。
契約番号：060D0159
事業団担当部課室および担当者：環境技術開発推進本部 地層科学研究グループ
主幹 武田 精悦

報告書番号：060D0159
報告書名：地層科学研究グループ

（以下に報告書の本文が記載されていますが、画像が非常に低解像度で、文字がほとんど判読不能です。本文は、地層科学研究に関する技術的・科学的な内容と推定されます。）

花崗岩における岩盤工学に関する調査試験研究専門委員会
構 成 員

委員長	岩手大学	工学部建設環境工学科	教授	関本 善則
委員	秋田大学	鉱山学部資源・素材工学科	教授	山下 秀
委員	北海道大学	工学部資源開発工学科	教授	石島 洋二
委員	九州大学	工学部環境システム工学センター	教授	江崎 哲郎
委員	東北大学	工学部資源工学科	教授	松木 浩二

(順不同、敬称略)

目 次

花崗岩における岩盤工学に関する調査研究（その4）

1. 岩盤内割れ目の透水性および止水に関する研究	1
1. 1 はじめに	
1. 2 今後の計画と現地試験	
1. 2. 1 注入材料	
1. 2. 2 試験孔	
1. 3 注入試験の手順と結果の評価	
1. 3. 1 パッカー及び注入装置	
1. 3. 2 M孔を用いた注入試験	
1. 3. 3 L孔を用いた注入試験	
1. 4 観察孔の掘削と観察結果	
1. 5 まとめ	
1. 6 今後の課題	
2. 岩盤の圧縮破壊過程におけるき裂の進展に関する研究	23
2. 1 はじめに	
2. 2 岩石試料ならびに試験片	
2. 3 試料の基礎的物性値	
2. 4 クリープ試験	
2. 4. 1 試験方法	
2. 4. 2 クリープ試験結果	
2. 5 岩石の内部構造の観察	
2. 5. 1 解析方法	
2. 5. 2 画像解析結果	
2. 6 討論	
2. 6. 1 岩石のクリープ挙動の特徴	
2. 6. 2 載荷応力割合とひずみ速度の最小値との関係	
2. 6. 3 クリープ破壊と一軸圧縮破壊との関係	
2. 7 まとめ	
2. 8 今後の課題	
3. 坑道周辺岩盤の力学的状況の精密調査	47
3. 1 はじめに	
3. 2 孔壁変形法を用いた下向きの地圧測定	
3. 2. 1 測定場所	
3. 2. 2 測定方法	
3. 2. 3 測定作業	
3. 2. 4 測定結果	
3. 3 き裂の性状に関する弾性波を中心とした測定	
3. 3. 1 測定項目	
3. 3. 2 坑道周辺岩盤の壁面上の開口き裂の性状の計測方法	
3. 3. 3 坑道周辺岩盤の壁面上の開口き裂の性状の計測結果	
3. 3. 4 ボアホールを利用した弾性波速度の計測と結果	
3. 4 まとめ	
3. 5 今後の課題	

4. 単一不連続面の Shear-Flow coupling 特性試験	83
4. 1 はじめに	
4. 2 様々な垂直応力下で先行履歴を与えた人工的不連続面の Shear-Flow coupling	
4. 2. 1 Shear-Flow coupling 実験装置	
4. 2. 2 試験体	
4. 2. 3 不連続面の作成法	
4. 2. 4 実験方法	
4. 2. 5 透水係数の決定方法	
4. 2. 6 AE計測システムおよび計測方法	
4. 2. 7 Case 1の実験結果および考察	
4. 2. 8 Case 2の実験結果および考察	
4. 3 せん断変位に注目して先行履歴を与えた人工的不連続面の Shear-Flow coupling	
4. 3. 1 実験方法	
4. 3. 2 K_s , K_n の定義	
4. 3. 3 5-5 Not Opened Case の実験結果および考察	
4. 3. 4 10-5 Not Opened Case の実験結果および考察	
4. 3. 5 5-5 Opened Case の実験結果および考察	
4. 3. 6 表面形状の定量化	
4. 3. 7 凹凸計測システム	
4. 3. 8 凹凸の計測方法	
4. 3. 9 凹凸の評価方法	
4. 3. 10 計測結果および考察	
4. 4 自然の不連続面の Shear-Flow coupling 特性	
4. 4. 1 不連続面表面の性状	
4. 4. 2 Shear-Flow coupling 実験装置	
4. 4. 3 試験体の作成	
4. 4. 4 実験結果	
4. 4. 5 実験結果および考察	
4. 4. 6 凹凸の計測方法	
4. 4. 7 計測結果および考察	
4. 5 まとめ	
5. ボーリングコアを用いた高信頼性三次元地圧計測法の開発	169
5. 1 はじめに	
5. 2 16素子円錐孔底ひずみ法による地圧測定	
5. 2. 1 応力測定理論	
5. 2. 2 測定方法	
5. 2. 3 測定位置	
5. 2. 4 回収コアの一軸圧縮試験	
5. 2. 5 測定結果	
5. 3 コアを用いた地圧計測	
5. 3. 1 概要	
5. 3. 2 ASR法による計測結果	
5. 3. 3 DSCA法による計測結果	
5. 3. 4 DRA法による計測結果	
5. 3. 5 AE法による計測結果	
5. 4 円錐孔底ひずみ法とコア法との比較	
5. 5 まとめ	
5. 6 今後の課題	

1. 岩盤割れ目の透水性及び止水に関する研究

1. 1 はじめに

岩盤内に空間を構築した際、岩盤発達する割れ目を伝って地下空間へ湧出する地下水を抑止するために、一般的には適当な材料を割れ目に充填するいわゆるグラウトが行われる。その時、空間の周囲の一定範囲内の岩盤割れ目のみをグラウトによって止水し、その外側は従前通り変化なく地下水を流動させる考え方、すなわち岩盤内のグラウトによる変化を最小限に止めるために、グラウトの範囲をコントロールする工法を目指し、現地試験を主体とする研究を行ってきた。

その第一の課題は、岩盤割れ目に充填するグラウト材料を、ある範囲すなわち一定距離だけ進んだ場所で固結させる方法の確立であった。薬剤注入（薬注）が諸般の事情から使用できない今日、最も現実的な方法として微粒子セメント+固化剤+水を充填材に用いた1.5～2ショットの注入法を採用、最適混合比、W/Cなどの項目について試験を繰り返した。その結果、最終目的である止水については、いずれの試験においても達成することができたが、材料の到達距離すなわち固結時間は割れ目内の水の存在の有無、水の流動状態によって大きく変動し、設計仕様通りの固結時間の実現はかなり困難であった。この原因は、注入孔口を出た材料の混合比が地下水に遭遇した瞬間に、W/Cを中心に变化してしまうため、技術的な改善では簡単に回避できない問題である。

そこで、第二の課題として、充填材料を最初から攪拌槽で予備調整し、1ショットで注入する方法に変更して実験を進めた。この工法は、最初の1.5ショット工法に比較すると、現場の状況すなわち隣接孔への材料の漏出状況を見てW/Cの調節がその場で容易にできること、固化剤を含めて設計仕様を変更した材料を順次注入する Stage Injection が可能であることなどかなり改善ができたが、反面、依然として割れ目からの湧水とくに噴出水に遭遇すると、固化時間が大幅に変化することは避けられなかった。また、固化後の充填材の一軸圧縮強度が低く、24時間強度でわずか数 kg/cm^2 しか発現できない場合もあって、大きな課題として残った。

昨年は、固化剤をそれ自体の固結時間の調節が可能で、しかも1～2時間の材令強度が $10.20 \text{ kg}/\text{cm}^2$ に達する超速硬性セメント（ジェットセメント J E T）に変えて試験を行った。試験は、孔を三分割し、それぞれの区間で充填材の設計仕様を変化させ注入した。その結果、NO.1 区間では、最初にW/C 167%で 65.5ℓ を注入、2 Stage ではW/C 300%で追いかけて注入したところ、湧水は止まり、ルジオン値も $19.8 (\text{Lu})$ から $9.2 (\text{Lu})$ に減少し効果的な結果を得た。

NO.2区間では、1 Stage 及び 2 Stageに基材のMC 2: J E T 1、W/C 300%の材料をそれぞれ 38ℓ 、 138ℓ 注入し、ついで 3 Stage目にW/C 200%のMCのみを 41ℓ 続けて注入、4 Stage目にW/C 300%でMC+J E Tを 127ℓ 注入した。この意図は、最初に濃度の低いもの又は基材のみを注入して小さな割れ目への進入を図り、続いて濃度の高いもの又は固化材を注入して先の材料の固結を図ることにあった。しかし、結果は必ずしも有効でなかった。この原因は、W/C 300%という薄い溶液であったため、割れ目を充填するために必要な量が不足したためと推定される。

NO.3区間では、NO.2区間と同様に、MCのみW/C 200%で先行して注入し、ついで固

化の目的でW/C 300%のMC+JETを追いかけて 235ℓ 注入した。ルジオン値も 4.8 (Lu)から 2.9(Lu)まで低下し、一応評価される結果を残した。

1. 2 今年の計画と現地試験

1. 2. 1 注入材料

昨年の結果から、注入材料に要求されることは、開口幅の大きな割れ目が存在すると、他の開口幅の小さい割れ目に優先して充填することが明らかになったので、この割れ目に対抗するためには固結の能力を持った注入材料が必要と判断した。そして、小さな割れ目に対しては、できるだけ微粒子からなる材料を低濃度で、しかも分散剤を使用して材料粒子間の凝集を防ぎ、良好な懸濁液の状態で注入することが必要条件である。また、試験孔のルジオンテストの結果によれば、岩盤内に掘削された10 mの孔では、透水係数換算で 10^{-4} とかなり高い値を示しているので、現在使用している各種の懸濁液の注入材では、 10^{-5} 程度までしか改善が期待できなく、 10^{-6} オーダーまでの改良は恐らく薬液など他の方法によらねば達成できないであろうと思われる。しかし、充填後の材料の強度は、材料と混合比の選択によって、基材として用いているセメントの強度にかなり近づく期待が持てると考える。

以上の経験から、今年使用する材料は、基材としてはMCを継続し、添加材には新しくカオリン（インドネシア産）の使用を試みることにした。表1-1は、種々の配合比とゲルタイムの測定結果を示したものである。

表によると、ゲルタイム 30分を目安に考えると、MCに対するカオリンの添加量は、40%~20%、W/C 150%以下がこれに該当することになる。そして、この配合比で作成した試料の一軸圧縮強度の測定結果は、表1-2の通りで、ジェットセメントを添加した昨年の結果に比較して 1/20 程度の強度しか発現しなかった。

基材のMCに対するカオリンの添加比率を 10%とし、固化剤（アロフィックスSS）とゲルタイム調整剤を加え、W/C 200%で測定したゲルタイム及び粘性係数の測定結果を表1-3に示す。粘性係数 11 (cp)では、実用上からみると限界に近い粘度と思われる（蜂蜜液状の粘度）、注入時にはさらにW/Cを大きくする必要があると思われた。

今回の使用材料には新しく開発中の材料スーパーファスナー（SF）について、ゲルタイム、粘性の測定を行った結果を表1-4に示す。それをみると粘性は小さい値を示したが、ゲルタイムは想像を大幅に上回る 150分となった。このSFの成分は、開発中の材料であるため公表されていない。そこで、一応の推定を行うため粉末X線解析法により分析を試みた結果が図1-1である。図の上の方に示したのがMCのパターンであり、下がSFの回折パターンである。両者を重ねると 20~30度に違いがみられる。文献によると、この特徴的な相違により後者は Sulfo-aluminous clinkerとよばれる物質と判断された。さらに、このSFは、乾燥によるひび割れを防ぎ、硬化に際して膨脹する性質を有すると報告されている

以上、材料に関する室内実験から、今回の現地試験で使用するグラウト材料は、MC+カオリンを主体に、W/Cを変化させて濃度、粘性を調整し、さらに状況に応じて分散剤、固化剤、ゲルタイム調整剤を加えたもの及びSFを使用することとした。

1. 2. 2 試験孔

現地試験における試験孔の掘削は、これまでと同様の釜石鉾山大峰 550 mL NW坑道の花崗岩体中で行った。これまでの試験孔、確認孔との位置関係を図1-2に示す。図中にL孔とあるのは前年の確認孔（空孔）、M孔とあるのが今回の試験孔である。試験孔の孔長は10 m、孔径70 mmで、これまでの孔と同様に坑道奥部へ向かって45度の角度で掘削した。この箇所A~Mの全孔中湧水のみられる孔は、図に黒丸で示すように9孔あり、例えば、M孔でルジオンテストを実施中に隣接のL孔の湧水量の増加が確認されるなど、この地区に発達する割れ目は相互に連絡していることが窺える。また、M孔にはわずかに湧水がみられるが、計測できるほどの量ではなかった。一方、L孔の湧水量は0.72/minであった。L、M孔についてボアホールカメラを用い湧水箇所の確認を行ったところ、両孔共一か所が確認できた。その位置を図1-3に示す。

ついで、孔内状況の把握のためM孔のボーリングコアの観察を行った。結果は、図1-3に明らかなように、コアの亀裂各所に前回までのグラウト材の付着が確認され、割れ目を伝わってかなりの距離をグラウト材が移動していることがわかった。しかしながら、グラウト材は付着が確認されるだけで、割れ目を充填し固化していたのかどうかは、ボーリングのビット及び循環水のためにグラウト材が洗い流されてしまっているため、確認できなかった。

コアのRQDの観察結果を表1-5に示す。表にみられるように、L孔では、口元から1~2 m、6~7 mの箇所でRQDの値が小さく亀裂頻度が高いことを示しているが、M孔ではそれほど亀裂頻度に変動はみられなかった。

L孔とM孔の両孔について実施したルジオンテストの結果を表1-6に示す。表から両孔を比較すると、RQDの小さい箇所が認められるL孔の方がルジオン値が高く、両評価値間には強い相関が認められる。

1. 3 注入試験の手順と結果の評価

1. 3. 1 パッカー及び注入装置

ルジオンテスト及びグラウト材注入に使用した装置のうち、パッカーは昨年と同様のもので、窒素ガスボンベから調整弁を通じて所要圧に減圧しパッカーに供給する方式である。注入装置は、昨年までは2ショットに対応できるダブルシリンダー式の試作グラウトポンプを用いたが、本年は当初から1ショット注入の計画であったので、アジテータ付きの業務用の注入装置を使用した。図1-4にその概念的なレイアウトを示す。

1. 3. 2 M孔を用いた注入試験

図1-3に示す位置に穿孔されたM孔を用いて今年の注入試験を実施した。M孔には口元から0.58 m及び1.72 mの位置に湧水が認められたが、計測できるだけの湧水量ではなかったため、湧水量計測は行わずルジオンテストのみ実施した。なお、注入にあたってM孔を孔奥部分（Aゾーン）と孔前部分（Bゾーン）に二分分割し、W/Cを変えて孔奥部分で3段階に分割し、孔前部分では1段階で行った。

(1) Aゾーンの注入試験

1st stage

ボアホールカメラとボーリングコアの観察結果を参考に、口元から 5m の位置にパッカーを設置し、設定注入圧力 20 kg/cm^2 、設定流量 20 l/min 、グラウト材の配合をMC1 とカオリンについては1 : 1の比率で混合、それにMCヘルパーを混合比 0.02 を加え、W/C 1000 (配合比Ⅰ)の比較的薄い材料をもって注入を開始した。開始後 25 min でパッカーが抜けたので、位置を口元から 4.5 mに変更し、設定注入圧力 5.5 kg/cm^2 、設定流量 20 l/min として注入再開をした。再開 10 min 後に再度パッカーが抜けたので、位置を口元から 4.1 mに変更し、設定注入圧力 11.7 kg/cm^2 、設定流量 20 l/min として続行した。その後、注入開始後60 min程度経過したあたりから、I, J孔間の本研究とは別の研究のサンプリングの目的で穿孔した浅い孔からグラウトが漏出しはじめ、また、I孔からも若干のグラウトのリークがみられたが、L孔からの湧水量には殆ど変化は認められなかった。

2nd stage

注入開始後 120 min経過したところで、図1-5にみられるように、急速に注入量が減少した。この現象は割れ目への充填が進行したためと解釈し、割れ目へのグラウト材の充填密度を高める目的で、W/C 400%の配合比(配合比Ⅱ)に変えた材料の注入を続行した。40 min経過してもI, J間のサンプリング孔からの材料の漏出が止まらないので、濃度を高め、W/C 100%の配合比(配合比Ⅲ)に変更して注入を続けた。

3rd stage

配合比Ⅲを注入して 30 min程度経過したところで、I, J間のサンプリング孔からの漏出が減少しはじめ、その状況が 10 min程継続したのち漏出が止まったのを確認し、注入を終了した。

(2) Bゾーンの注入試験

パッカー位置を口元から 1 mに移動し、M孔の残りの部分を使って、グラウト注入圧力 10 kg/cm^2 、設定流量 60 l/min 、W/C 400% (配合比Ⅱ)で注入を開始した。

注入開始後 20 min程度経過したあたりから、L孔及びL孔左壁面からグラウトが漏出したが、壁面の漏出は約 5 min程で止まった。その後、30 min程度経ってK孔右上からグラウトのリークしているのが認められたが、注入開始後 60 min経過、総注入量 42.6 l に達した時点で漏出が止まった。

注入孔を水洗いし、孔内の湧水状態を肉眼観察したところ、全く湧水がみられずグラウトが成功したことを確認できた。

1. 3. 3 L孔を用いた注入試験

M孔と同様にL孔をA, Bゾーンに二分割し、グラウト材として開発中のスーパーファスナー(SF)を使用、W/C 100%で注入した。

(1) Aゾーンの注入試験

パッカーを口元から 4 mの位置(区間長 6.25 m)にセットしグラウトを開始した。この時、パッカーから手前の区間では湧水箇所から 93.7 ml/min の湧水がみられた。

注入開始後、J孔よりグラウト材の漏出が始まったが、木栓で孔口を塞ぐ漏れ止めを行い、そのまま続行した。その後、60 min経過したあたりからK孔の右壁面より多少の漏出がみられた。70 min経過してK孔の壁面から漏出していたグラウト材が硬化し始めている

のが確認され、漏出がなくなった。そして、注入量が0となり注入圧も上昇したので注入を停止した。注入パイプを引き抜き、孔内を点検したところ、グラウト材で完全に充填されていたので、口元から1 mの位置にパッカーを移設してルジオンテストを行った。結果は、表1-7の通り、注入前29.3 (Lu)が注入後2.23 (Lu)となり、約13分の1とかなり透水性の改善がみられた。

M孔でMC+カオリンの注入を行った際、壁面から漏出した材料はなかなか硬化しなかったが、L孔で使用した新材料のSFは、比較的早く漏出が止み固結がみられた。この原因は、SFが乾燥によるひび割れを防ぎ、硬化の際に膨脹する性質を有するため、本研究の目的に合致する材料として、今後試験を続ける必要がある。

(2) Bゾーンの注入試験

口元から1 mの位置にパッカー設置し、W/C 200%、MC+カオリン 1:1の配合比(配合Ⅳ)を注入した。注入後まもなくL孔右上のサンプリング孔及びD孔から材料の漏出がみられた。2時間経過後したところで、K孔右からの流出が止んだ。これは、設定通りのゲルタイムであった。

1. 4 観測孔の掘削と観察結果

注入試験終了後、約1ヶ月後に、L孔とM孔の中間に観測孔N孔を掘削した。そして、ボアホールカメラ及びボーリングコアをもとにグラウトの効果について観察を行った。

N孔では、口元から5 mから手前のゾーンでは、割れ目へのグラウト材の付着は7ヶ所で確認されたのに対して、5 mから奥のゾーンではグラウト材の付着が認められたのはわずか3ヶ所に過ぎなかった。このことは、手前のゾーンで開口型の割れ目が多いのに対し、奥のゾーンでは閉口型割れ目が多いことを意味してはいるが、コアの観察が完了していないので、今後ボアホールカメラの観察結果と合わせて確認する必要がある。

1-5 まとめ

今回のL及びM孔の二つの試験孔を使用し、さらに二つの新材料を用いて行った注入試験の結果をまとめると、つぎの通りである。

(1) 新しい材料のMC+カオリンと試験的に用いたスーパーファスナー(SF)ともそれぞれ有効な材料であることが確認された。この実験の目標は、冒頭に述べてあるように、割れ目に地下水が存在し、場合によっては流動しているケースでもグラウトが可能な方法と適合材料の開発にある。割れ目の開口幅がミリオーダーの大きい割れ目の場合には、流体によって運ばれた微粒子が単に沈殿作用のみでグラウトすることを期待するとするならば、本研究の目的とする一定範囲で材料を固結させてグラウトすることは達成不能である。したがって、ゲルタイムを有する材料の開発が必要となる。しかし、流水の存在する割れ目では、既に述べたように、設計仕様が急速に変化しゲルタイムをコントロールできず、今後努力するとしても至難である。そこで、ついでこの目的に近い材料として、今回、基材のMCとカオリンを組み合わせることで粘性の大きい流体を作り、沈殿を促進し、MCのセメントとしての水和反応と、硬化による充填グラウト材料の強度の発現を期待して試験を行った。結果は、坑壁に漏出していたグラウト材料が固結し、昨年までの試験ではなか

なか期待できなかつた漏出が停止する現象をみることができ、しかも、L坑の 2nd stage では実験室の結果による設計仕様のゲルタイムと一致をみた。繰り返し実験によって再現性を確認した結果でないので、今後待つところがあるが、定性的には満足する結果を得たと言えよう。

(2) 割れ目の開口幅がミクロンオーダーの狭い場合とか閉口割れ目の場合は、グラウト材料はそれに見合う微粒子であることが必要である。今回使用したMCは、平均粒子径が $4\ \mu\text{m}$ で、普通ポルトランドセメントの平均粒子径 $20\ \mu\text{m}$ の $1/5$ で最大径も $10\ \mu\text{m}$ とかなり小さい。また、カオリンは粘土であるので粒子径はさらに小さく、開口幅の小さい割れ目の充填材としては、理想的ではないにしても、効果が期待できる材料である。さらに、W/Cの大きい、すなわち薄い液体で使用することで細孔への注入が可能となり、しかもグラウト効果が実験で確かめられたことは、MC+カオリンの混合材料の実用化に向けて期待を持つことができる。

(3) グラウト材料が割れ目に充填され固結したのちは、岩盤に近い強度を持ち、割れ目壁への付着力も大きければ大きいほど理想的である。しかし、今回の仕様材料の室内試験では、前年のシリカヒュームを添加した材料に遠く及ばない強度、すなわち $10\ \text{kg/cm}^2$ 以下の一軸圧縮強度しか発揮できなかった。今後はセメントの強度に近づくためシリカの添加を考慮した試験を継続する必要がある。

(4) L及びM孔において、グラウト前後にルジオンテストを行った結果、今回のグラウトによって1オーダー以上のルジオン値の改善が確認できた。一般にこの程度の透水性の改善は、グラウトの成功の判定基準とされているので、今回の試験で実用化への前進が図られたと判断できる。この原因としては、W/Cの大きい、そして微粒子の材料を用いた結果と思われる。

1. 6 今後の課題

今回の現地試験を中心とした試験結果の検討から、今後に残された課題として、つぎの事項があげられる。

- (1) 割れ目の止水をより確実にするために、硬化寸前まで流動性を維持できるグラウト材料の開発が必要である。
- (2) 今回MCの添加材として用いたカオリンは、注入材の流動性を増加させると共に注入後の安定性に優れているが、強度の面で劣るため、注入材固結後の強度増強に他の添加材、混合比及びW/Cの決定などが今後の課題となった。
- (3) 割れ目の開口幅に関するボアホールカメラの結果は、まだ整理が終了していないけれども、最も基本的な課題であるので、岩盤内分布と合わせて継続すべき課題である。
- (4) 透水性の向上を図り、 10^{-6} の透水係数の実現するために、微粒子の割れ目への進入を容易にする小型で取扱いの便利な、高圧グラウトポンプの開発が今後の課題である。

表1-1 種々の混合比におけるゲルタイムの測定

A・M・C	添加材	水	水セメント比	ゲルタイム	粘性係数	備考
(g)	(g)	(ml)	(%)		(cp)	
10	90	300	300	未固化	145	
		200	200	未固化	-	
20	80	300	300	未固化	178	
		200	200	未固化	-	
60	40	170	170	1'07'00"	-	
		160	160	55'00"	-	
		155	155	34'00"	-	
		150	150	12'20"	-	採用
65	35	150	150	1'04'00"	-	
		140	140	13'20"	-	
70	30	150	150	未固化	-	
		135	135	20'00"	-	採用
75	25	150	150	未固化	-	
		140	140	未固化	-	
		130	130	39'30"	-	
		125	125	6'25"	-	
80	20	120	120	43'15"	-	
		115	115	7'15"	-	採用
		110	110	6'40"	-	
90	10	150	150	未固化	-	
		125	125	未固化	-	
		100	100	7'40"	-	

*水温は、14 ± 1 °C に設定した

**水セメント比300以下では、粘性係数は測定不能

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{AMC} + \text{カオリン (添加材)}} \times 100 (\%)$$

表1-2 注入材の一軸圧縮強度測定結果

NO.		1	2	3
養成方法		静止	静止	静止
配 合 比	AMC (g)	70	80	60
	カオリン (g)	30	20	40
	水 (ml)	135	115	150
水セメント比 (%)		135	115	150
ゲルタイム		20' 00"	7' 15"	12' 20"
圧縮強さ (kg/cm ²)	4日目	1.22	1.21	1.23
	7日目	1.28	1.21	1.31
	14日目	1.33	1.45	1.29
	21日目	1.32	1.15	1.60
	28日目	1.44	1.38	1.46
	35日目	1.50	1.47	1.47
	42日目	1.53	1.49	1.36

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{AMC} + \text{カオリン (添加材)}} \times 100 (\%)$$

*この材料の配合比では、水セメント比が300%以上でなければ粘性係数は測定できなかった。

表1-3 ゲルタイム及び粘性測定結果

AMC (g)	添加剤 (g)	ゲルタイム調整剤 (g)	ASS (ml)	水 (ml)	水セメント比 (%)	ゲルタイム	粘性係数 (cp)	備考
90	10	5	15	185	200	未固化	8.9	
			20	180	200	未固化	5.6	
		7.5	15	185	200	未固化	7.8	
		10	20	180	200	36'	11.0	採用
			25	175	200	未固化	9.5	
			30	170	200	23' 10'	9.0	
			30	220	250	10'	4.1	
			40	160	200	22'	13.5	
			50	150	200	20'	15.0	
		15	20	180	200	未固化	11.2	
		20	40	160	200	3'	測定不能	
92.5	7.5	7.5	15	185	200	63'	15	
			20	180	200	11'	6.5	
95	5	10	40	160	200	未固化	4.8	◎
			30	170	200	22'	5.2	◎

* 水温は14±1℃に設定した

** ◎印は上に水が分離

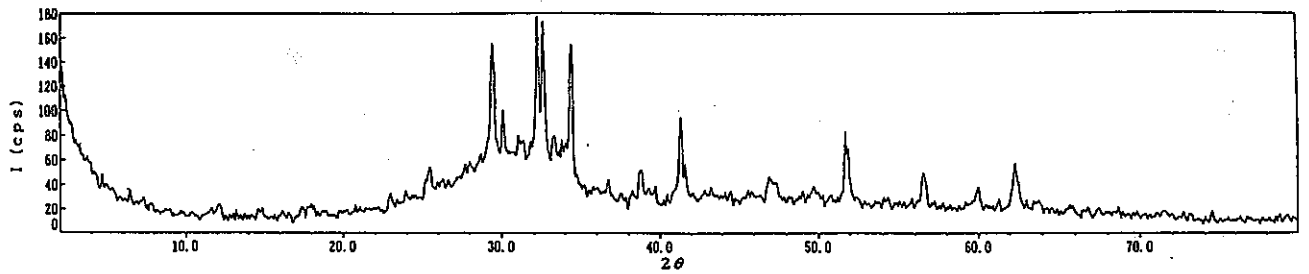
***全体的な傾向として混合後10分前後で緩いゲル状になる

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水} + \text{ASS}}{\text{AMC} + \text{カオリン (添加材)}} \times 100 (\%)$$

表1-4 注入材の一軸圧縮強度測定結果

NO.		5
養成方法		静止
配合比	S.F (g)	100
	水 (ml)	100
水セメント比 (%)		100
ゲルタイム		150'
粘度 (cp)		18
圧縮強さ (kg/cm ²)	4日目	2.49
	7日目	2.50
	14日目	2.38
	21日目	3.19
	28日目	3.96

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{S.F (ス-ハ-ファスター)}} \times 100 (\%)$$



obs. peaks

syn. peaks

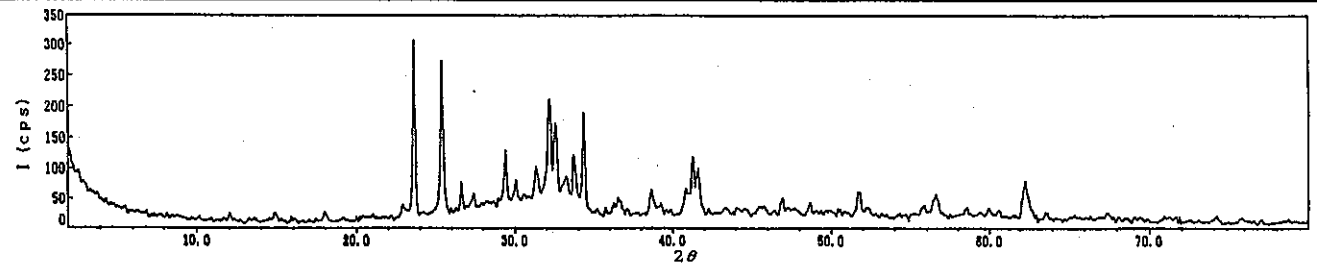
13- 272 $Ca_{1.4}MgAl_2Si_1.6O_{10}$

1

16- 441 $Ca-Fe-Al-S-Si-O$

2

Sample :YK95214/MC



obs. peaks

syn. peaks

13- 272 $Ca_{1.4}MgAl_2Si_1.6O_{10}$

1

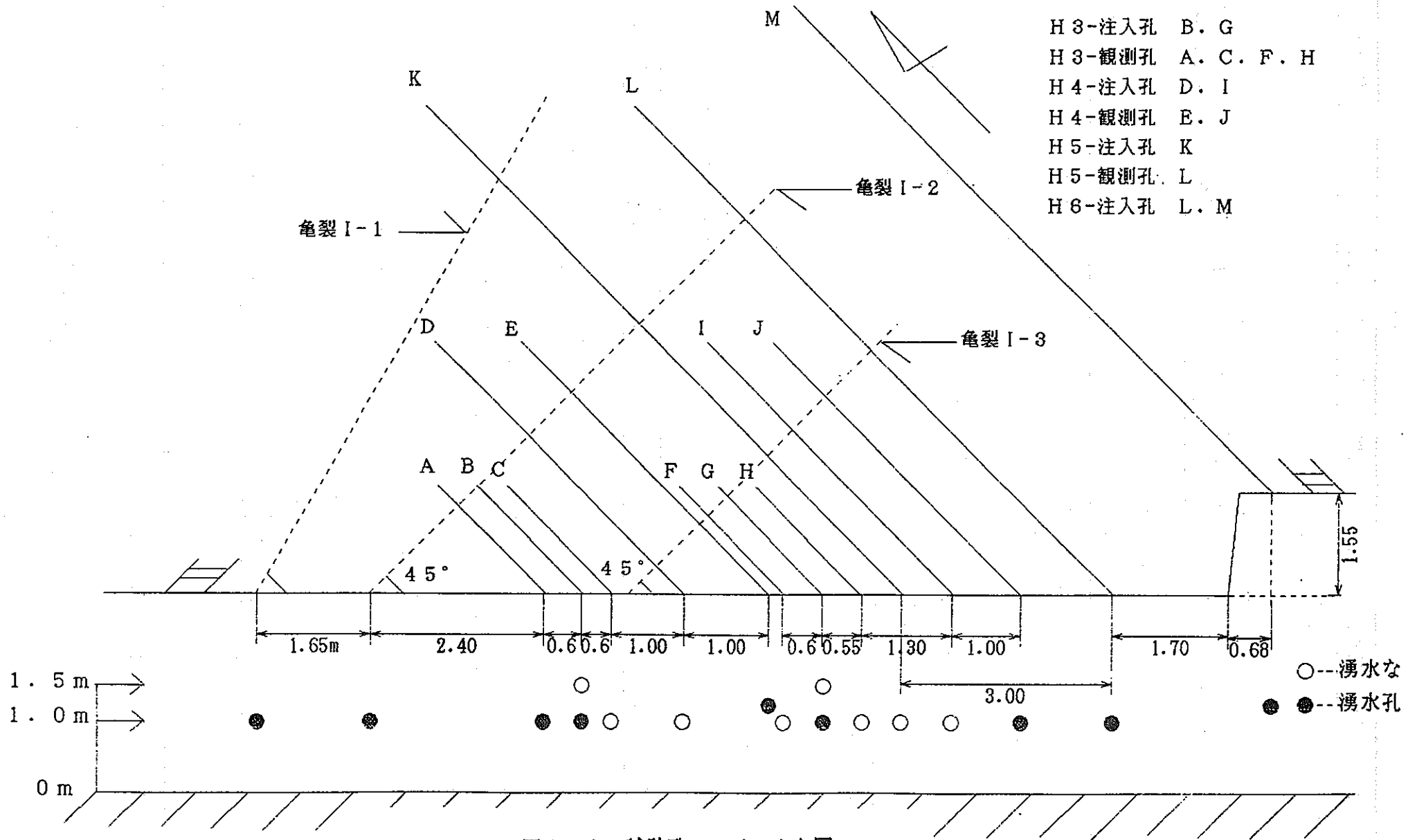
16- 441 $Ca-Fe-Al-S-Si-O$

2

Sample :YK95214/SUPER.F

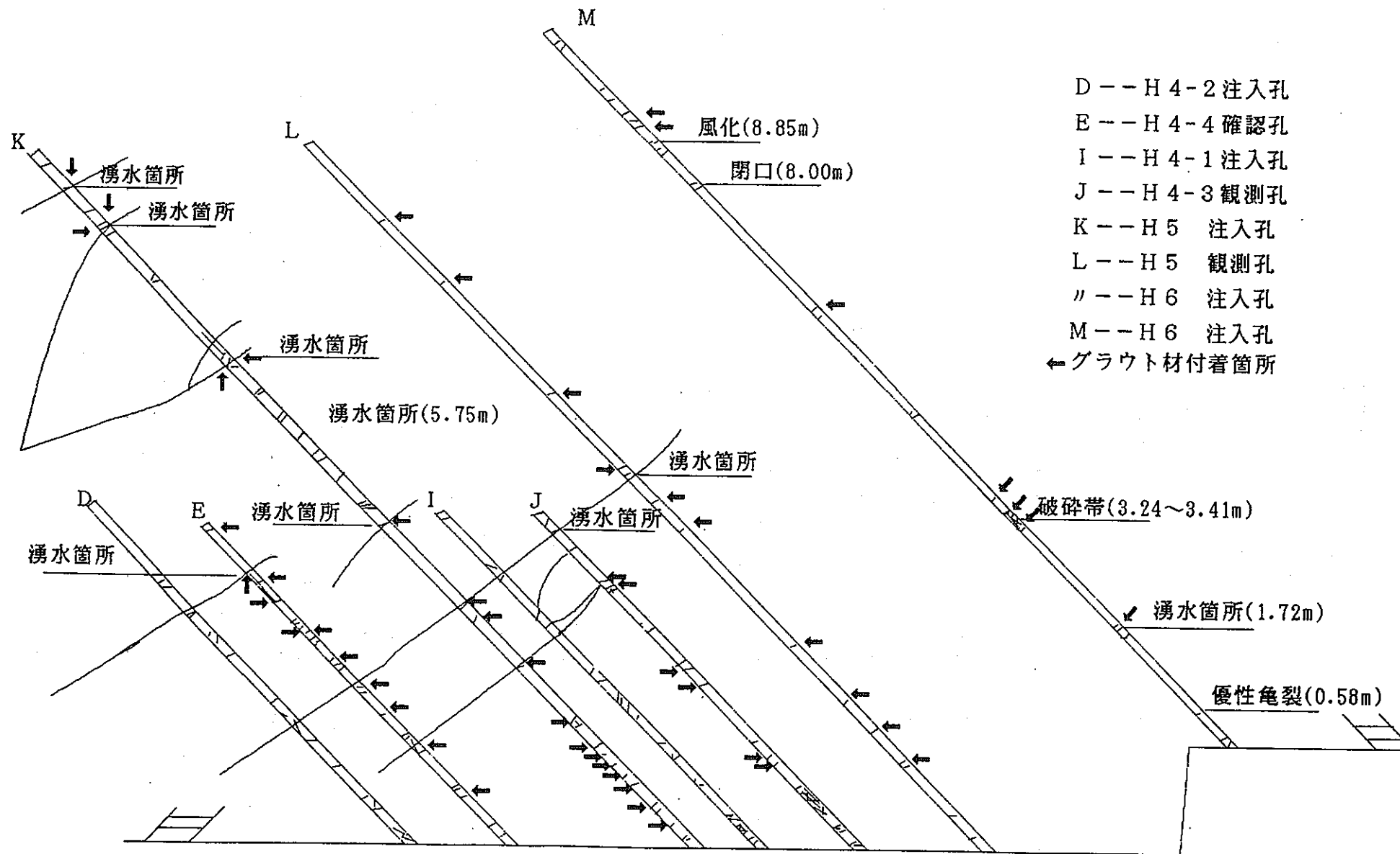
Sulfo-aluminous
clinker

☒ 1-1 スーパーファースターのX線解析



- H 3-注入孔 B. G
- H 3-観測孔 A. C. F. H
- H 4-注入孔 D. I
- H 4-観測孔 E. J
- H 5-注入孔 K
- H 5-観測孔 L
- H 6-注入孔 L. M

図1-2 試験孔のレイアウト図



- D -- H 4-2 注入孔
- E -- H 4-4 確認孔
- I -- H 4-1 注入孔
- J -- H 4-3 観測孔
- K -- H 5 注入孔
- L -- H 5 観測孔
- // -- H 6 注入孔
- M -- H 6 注入孔
- ← グラウト材付着箇所

図1-3 孔内湧水箇所とグラウト材付着箇所

表1-5 L孔のRQD

掘進長 (m)	RQD	岩盤良好
0 ~ 1	$\frac{30.5+11.5+23.5+15.3}{100.1} \times 100 = 80.7 (\%)$	良 い
1 ~ 2	$\frac{23.5+10.5}{110.0} \times 100 = 30.9 (\%)$	悪 い
2 ~ 3	$\frac{10.5+60.5+11.0}{89.7} \times 100 = 91.4 (\%)$	非常によい
3 ~ 4	$\frac{21.5+21.5+35.5}{99.7} \times 100 = 78.7 (\%)$	非常によい
4 ~ 5	$\frac{10.5+18.1+22.3+23.5+17.9}{98.3} \times 100 = 93.9 (\%)$	非常によい
5 ~ 6	$\frac{10.5+14.2+30.0+30.5}{88.7} \times 100 = 96.1 (\%)$	非常によい
6 ~ 7	$\frac{23.5}{104.0} \times 100 = 22.6 (\%)$	非常に悪い
7 ~ 8	$\frac{85.5+15.0}{100.5} \times 100 = 100.0 (\%)$	非常によい
8 ~ 9	$\frac{64.7+27.5}{101.2} \times 100 = 91.1 (\%)$	非常によい
9 ~ 10	$\frac{15.5+17.5+43.0+44.5+14.5}{135.0} \times 100 = 100.0 (\%)$	非常によい

表1-6 M孔のRQD

掘進長	RQD	岩盤良好度
0 ~ 1	$\frac{35.5+14.5+22.0}{100.0} \times 100 = 72.0 (\%)$	普通
1 ~ 2	$\frac{68.0+13.5+14.5}{108.0} \times 100 = 88.9 (\%)$	良い
2 ~ 3	$\frac{49.0+23.0+20.0}{93.5} \times 100 = 98.4 (\%)$	非常に良い
3 ~ 4	$\frac{12.0+25.0+25.5+13.0+12.0}{100.0} \times 100 = 87.5 (\%)$	良い
4 ~ 5	$\frac{32.0+48.5+12.0}{100.0} \times 100 = 92.5 (\%)$	非常に良い
5 ~ 6	$\frac{100.0}{100.0} \times 100 = 100 (\%)$	非常に良い
6 ~ 7	$\frac{27.5+73.0}{107.5} \times 100 = 93.5 (\%)$	非常に良い
7 ~ 8	$\frac{49.0+44.0}{93.0} \times 100 = 100 (\%)$	非常に良い
8 ~ 9	$\frac{10.5+25.5+38.0+13.5+15.5}{103.5} \times 100 = 99.5 (\%)$	非常に良い
9 ~ 10	$\frac{37.0+41.5+26.0}{117.0} \times 100 = 89.3 (\%)$	良い

表1-7 L、M孔のルジオン値

ルジオン値計算式

$$L u = \frac{10 Q}{P L} (L u) \text{-----} (1)$$

L u : ルジオン値 (L u)

Q : 注入量 (ℓ / m i n)

P : 注入圧力 (k g / c m²)

L : 試験区間長 (m)

$$1 (L u) \cong 1 \times 10^{-5} (c m / s e c)$$

本試験におけるルジオン値

孔	試験区間長 (m)	注入量 (ℓ/min)	注入圧力 (kg/cm ²)	ルジオン値 (L u)
M	5. 2 1	7. 6 0	1 0. 0	1. 4 6
	5. 2 1	4. 3 2	3. 0	1. 5 7
	9. 2 1	6. 2 0	5. 0	2. 3 8
L	6. 2 5	1 8. 3	1. 0	2 9. 3

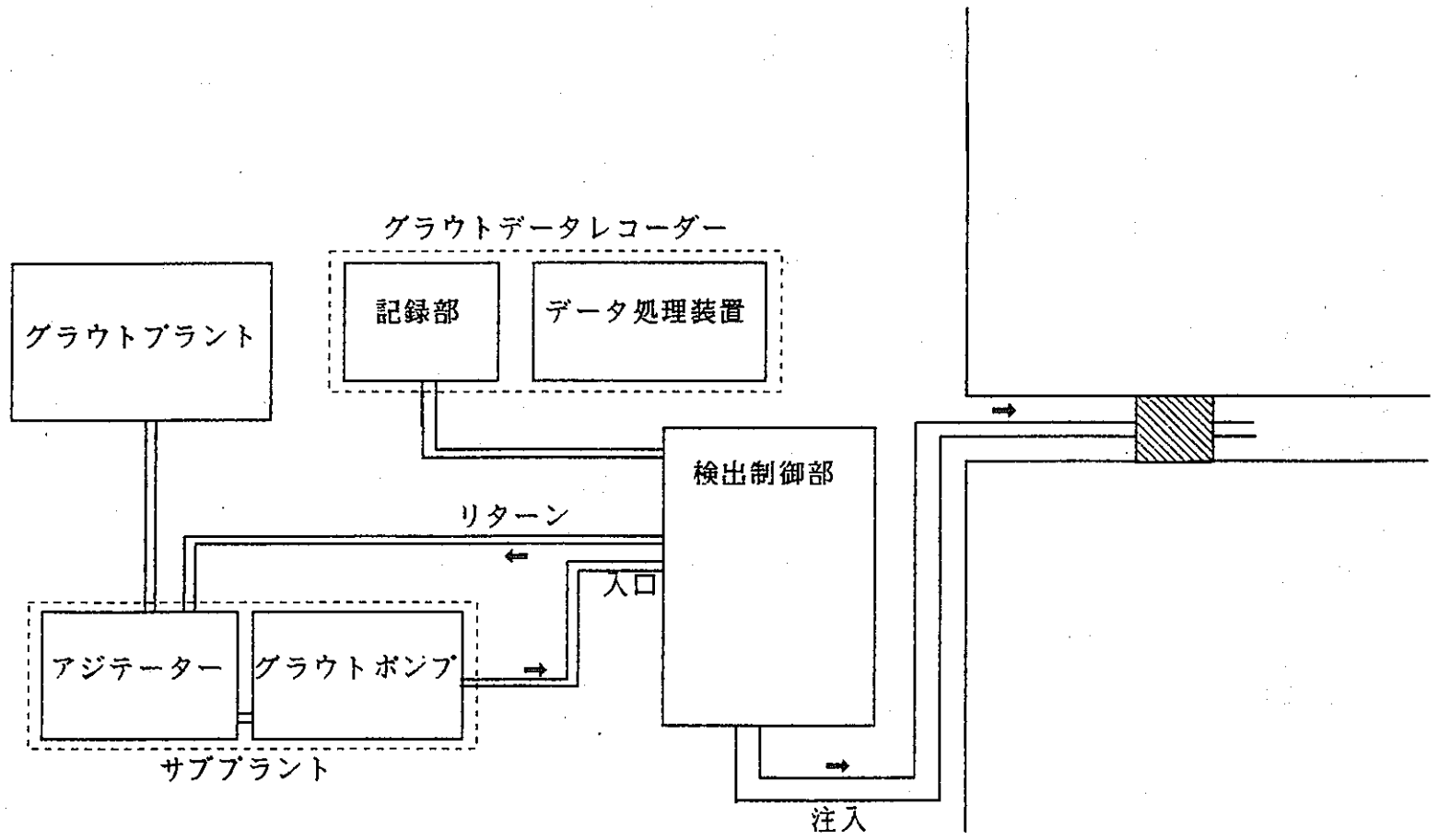


図1-4 グラウト注入機器の概念図

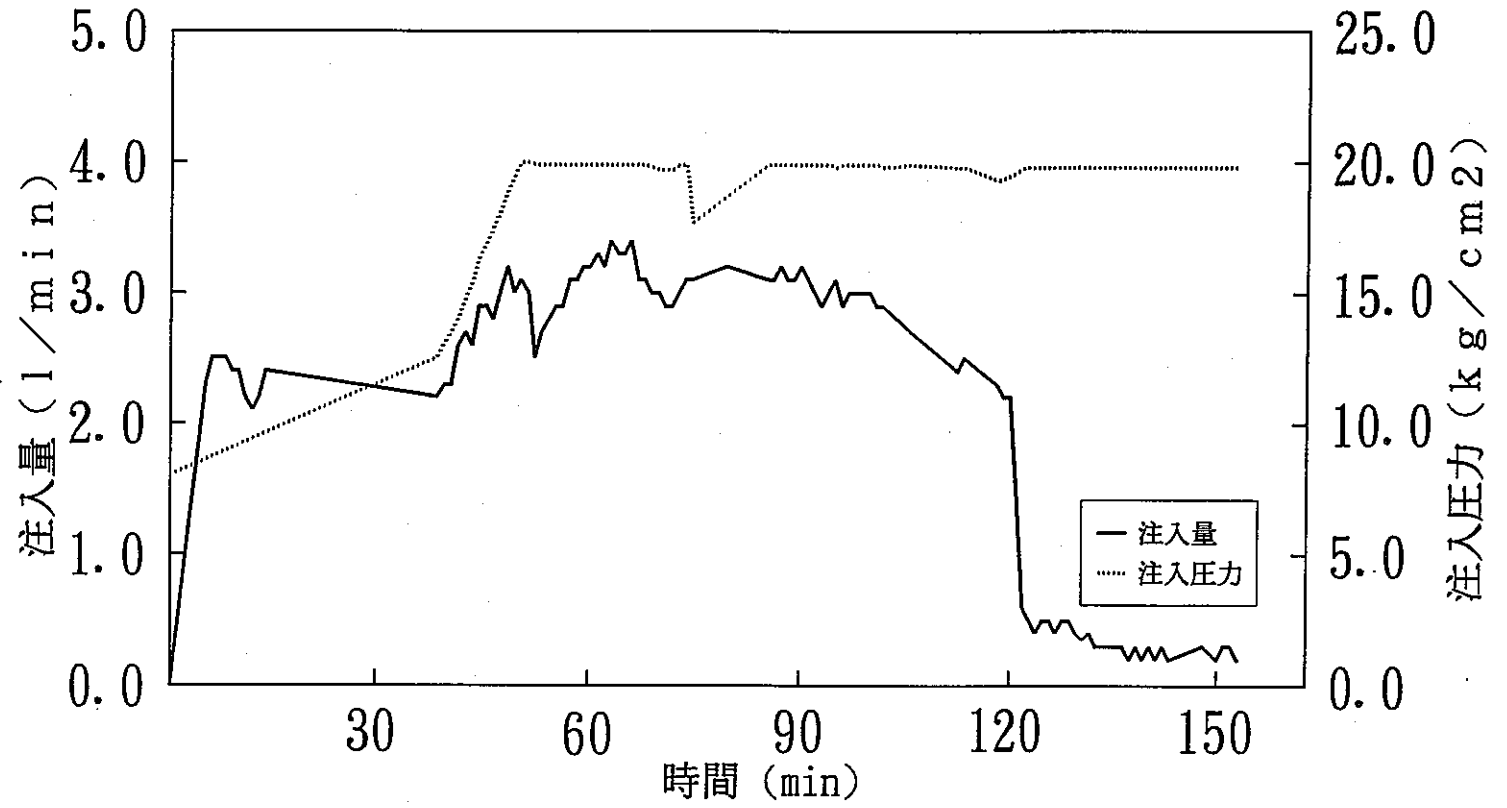
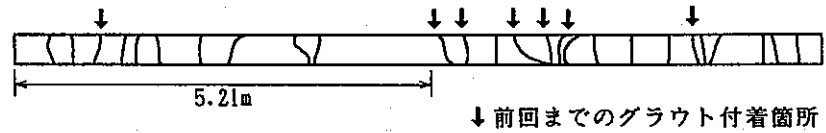


図1-5 M孔1st stageの注入量と注入圧力

表1-8 注入試験結果 (M孔)

1st Stage



配合割合と注入量

	MC	カオリン	MCヘルパー	水	水セメント比	注入量 (ℓ)
I	1	1	0.02	20	1000	178.5
II	"	"	"	8	400	120.0
III	"	"	"	2	100	16.0

MC、カオリン、MCヘルパー、水は重量比

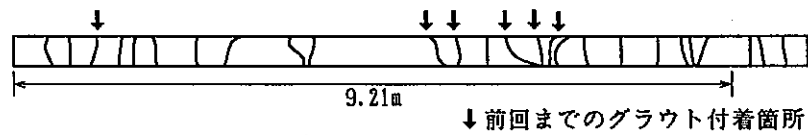
$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{MC} + \text{カオリン}} \times 100 (\%)$$

グラウト材注入におけるルジオン値変化

Stage	注入前 Lu	*)注入後 Lu
1st	1.46	0.09

*)...2nd Stage終了後のLu

2nd Stage



配合割合と注入量

	MC	カオリン	MCヘルパー	水	水セメント比	注入量 (ℓ)
IV	1	1	0.02	8	400	42.6

MC、カオリン、MCヘルパー、水は重量比

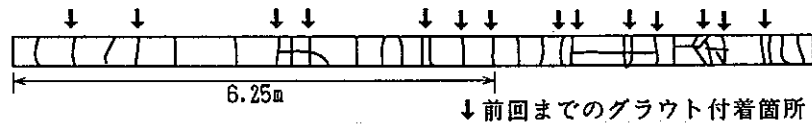
$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{MC} + \text{カオリン}} \times 100 (\%)$$

グラウト材注入におけるルジオン値変化

Stage	注入前 Lu	1st 終了後	注入後 Lu
2nd	1.46	0.70	0.06

表1-9 注入試験結果 (L孔)

1st Stage



配合割合と注入量

	スーパーファスナー	水	水セメント比	注入量 (ℓ)
V	1	1	100	180.0

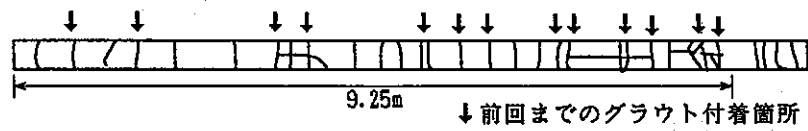
MC、カオリン、MCヘルパー、水は重量比

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{S. F}} \times 100 (\%)$$

グラウト材注入におけるルジオン値変化

Stage	注入前Lu	注入後Lu
1st	29.3	2.23

2nd Stage



配合割合と注入量

	MC	カオリン	MCヘルパー	水	水セメント比	注入量 (ℓ)
VI	1	1	0.02	4	200	380.0

MC、カオリン、MCヘルパー、水は重量比

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{MC} + \text{カオリン}} \times 100 (\%)$$

グラウト材注入における止水率

Stage	注入前 (ℓ/min)	注入後 (ℓ/min)	止水率 (%)
1st	微量	0.0	100

2. 岩盤の圧縮破壊過程における亀裂の進展に関する研究

2.1 はじめに

恒久的な地下構造物を構築するためには、その構造となる岩石・岩盤について、適切な方法で、長期安定性評価を行っておく必要がある。

その評価方法、すなわち、岩石の時間に依存した力学的挙動を調べる方法の一つとしてクリープ試験がある。しかし、岩石のクリープ破壊機構については依然として不明な点も多い。

本研究では、クリープ試験における岩石の力学的特性を詳細に把握し、さらに一軸圧縮載荷後およびクリープ載荷後の試験片について顕微鏡観察用薄片を作製し、岩石の内部構造（空隙、亀裂）の変化について画像解析を行って定量的に把握し、総合的に検討した。

2.2 岩石試料ならびに試験片

岩石試料は、栗橋花崗岩（釜石鉱山：250mレベル坑道原位置試験場で採取）である。

試験片は、岩石ブロックからボーリング・マシンにより直径約30mm（一軸圧縮試験用、繰り返し載荷・除荷試験用）、約20mm（クリープ試験用、繰り返し載荷・除荷試験用）のコアを採取し、採取したコアを岩石用カッターにより長さ約65mm、45mmに切断したものである。また、切断したコアの両端面を平面研削盤により研削し、それぞれ長さ約60mm、40mmの試験片を作製した。試験片は自然状態で7日間乾燥させ、乾燥剤の入らないデシケータ中に保存し試験に供した。

2.3 試料の基礎的物性値

試料とした栗橋花崗岩において測定した比重、含水率、吸水率、空隙率、圧裂引張強度、一軸圧縮強度の平均値を表3-1に示す。また、一軸圧縮試験および繰り返し載荷・除荷試験の結果を図3-1、3-2に示す。図において、カイザー効果が認められなくなる点を降伏点とすると降伏応力として約70%を得る。

表3-1 基礎試験結果による物性値

比 重				吸水率 (%)	含水率 (%)	空隙率 (%)	圧裂引張試験	
試験数	強制乾燥	飽和含水	自然乾燥				試験数	強度 (MPa)
5	2.80	2.81	2.80	0.13	0.21	0.37	5	8.45

一 軸 圧 縮 試 験				ヤング率 (GPa)	ポアソン比
試験数	試験片	ひずみ速度	強 度 (MPa)		
5	20x40	10 ⁻⁵	136.6	7.16	0.27
5	20x40	10 ⁻⁴	160.5	6.87	0.25
5	30x60	10 ⁻⁵	135.2	6.68	0.23

2. 4 クリープ試験

2.4.1 試験方法

クリープ試験では、クリープ応力を一軸圧縮強度(160.5MPa)の80%、75%、70%、65%、60%、55%、50%の载荷応力割合に設定して载荷し、縦・横ひずみの計測と一部にAE観測を行った。この際、 10^6 秒(約11日)程度の载荷で破断しなかった場合は試験を打ち切った。

クリープ载荷装置(丸東製作所製レバー式クリープ試験機;最大荷重容量5 ton)は、恒温室(日立冷熱株式会社製)内に設置し、エアコンディショナーにより室内を温度一定(24℃)に保ってクリープ载荷を行った。

ひずみの観測は2軸型ストレイン・ゲージを試験片の相対する2側面に貼りつけて行った。

2.4.2 クリープ試験結果

クリープ試験における载荷応力割合と破壊までの時間(寿命時間)との関係を図4-2-1に示す。

同図において、载荷応力割合が小さくなるにしたがって破壊までの時間は長くなる傾向が見られるが、試験片ごとに大きなバラツキがある。

図4-2-2に縦ひずみ、横ひずみと経過時間との関係を示す。

本試験においては縦ひずみがうまく計測できなかったが、横ひずみにおいて载荷応力割合が大きいものほど初期ひずみの値が大きく、2次クリープ過程での傾きも大きい傾向が見られる。その後、試験片はひずみが加速的に増加する3次クリープを経て破壊に至る。

横ひずみ速度と経過時間との関係を図4-2-3に示す。

この図において、ひずみ速度は時間の経過と共にはじめ減少していき、最小点を経て再びひずみ速度が増加し試験片は破断に至ることがわかる。ここで、载荷応力割合が小さいものほど、ひずみ速度の最小となる値も小さくなる傾向が見られる。

図4-2-4に横ひずみ速度が最小になる値とその時の時間との関係を示す。

この図から各点を結んだ直線の勾配がほぼ-1になることが確認できる。これは、縦ひずみ速度においてこれまでに確認されていたが、今回、横ひずみ速度でも確認できた。

図4-2-5~4-2-21に各試験のクリープ線図及び横ひずみ速度と経過時間の関係を示す。

これらの図から1次、2次、3次クリープの領域が確認できる。また、AEを計測した試験では、AEの発生は载荷開始時から1次クリープ区間で確認できる。2次クリープ区間では、AEは雑音と考えられる程度しか観測されずほとんど発生しないといえる。その後、3次クリープへの移行点付近から再びAEが活発になることがわかる。

2. 5 岩石の内部構造の観察

本研究では、一軸圧縮試験及びクリープ試験後の試験片から顕微鏡観察用薄片を作製し、画像解析により内部構造の変化を検討した。対象とした試験片は以下のものである。

- ・ インタクトな試験片
- ・ 一軸圧縮強度(135.2MPa)の65%、75%、100%まで载荷したもの
- ・ 2次クリープ、2次クリープ後半、3次クリープまで载荷したもの

2.5.1 解析方法

試験手順は、①载荷終了後に蛍光剤を浸透させ試験片から作製した顕微鏡用薄片に紫外線を照射し顕微鏡からCCDカメラを介しパーソナルコンピューターへ取り込む。(一軸圧縮試験及びインタクト試料;26×12mm部分、クリープ試験;6.5×6.5mm部分)。②取り込んだ画像に対し画像処理を行い、亀裂部分を抽出し、その長さ、方向を計測する。

2.5.2 画像解析結果

1) 亀裂の方向

図5-2-1に亀裂の方向の分布を示す。ここでは、載荷軸方向が 90° になるように表してある。

一軸圧縮載荷による亀裂の変化をみると、100%まで載荷を行った試験片で 90° 方向の亀裂が増加している。このことから破壊の最終段階では、亀裂は主に載荷軸方向に延びていくものと考えられる。

クリープ載荷後の薄片においては、2次クリープ過程のものからは、亀裂の分布に特定の傾向は見られないが、2次クリープ後半のものでは亀裂がほぼ載荷軸方向に分布することが確認できる。しかし、この実験では3次クリープ過程のものでは顕著な傾向は見られなかった。

2) 亀裂の長さ

図5-2-2に亀裂の長さの分布を示す。

一軸圧縮載荷後においては、圧縮応力が増加することによって亀裂が増加していき、破壊強度まで達すると長い亀裂が形成されていくことが確認できる。

クリープ載荷後のものでは2次クリープ後半で $500\sim 1000\mu\text{m}$ と $2000\mu\text{m}$ 程度の亀裂が増加しているのがわかる。

3) 亀裂の長さや方向

図5-2-3に亀裂の長さや方向の関係を示す。

一軸圧縮強度まで載荷したものでは長い亀裂が載荷軸方向に分布していることが認められる。

クリープ載荷後の薄片についても、長い亀裂が載荷軸方向付近に分布している。

以上の結果から、一軸圧縮載荷の場合は強度破壊に近い段階まで載荷した場合に、載荷軸方向の亀裂の成長・連結が認められ、クリープ載荷では2次クリープ後半で3次クリープ直前から載荷軸方向の亀裂が目立っており、3次クリープ段階は、一軸圧縮における強度破壊後におけるポストフェイラー段階に対応していることが考えられる。

2.6 討 論

2.6.1 岩石のクリープ挙動の特徴

これまでの研究において^{1), 2)}、砂岩など堆積岩類で、その内部に含まれる空隙の割合が比較的大きい岩石に対してクリープ載荷を行った場合、以下の点が明らかにされている。

- 1) クリープ載荷応力比を変えた場合、応力比が $70\%Sc\sim 75\%Sc$ 以上のとき1ヶ月程度以内の寿命時間で破壊に至る。この限界点は筆者らの定義した岩石の降伏点に対応する。
- 2) クリープ変形挙動において、載荷応力比が大きくなるとクリープ寿命は短くなり、軸ひずみ速度の最小値は大きくなる。また、載荷応力比が小さくなるとこれらは逆の傾向を示す。
- 3) クリープ変形における軸ひずみ速度-載荷時間との関係は、時間軸を実時間で表すとクリープの1次、2次、3次過程を比較的明確に区分することができる。
- 4) 軸ひずみ速度があまり変化しない区間として2次クリープ過程を定義すると、この区間はクリープ寿命(破壊までの全載荷時間)の90%以上を占める。したがって、このときのひずみ速度をクリープにおける平均軸ひずみ速度と見なすことができる。
- 5) 軸ひずみ速度-載荷時間の関係を対数で表示し、ひずみ速度が最小値を示す点および3次クリープへの移行点を連ねる線を描くと、それぞれ傾きが -1 に近い直線となる。

- 6) クリープ過程において3次クリープへの移行点付近からAEの発生が活発となる。
7) 顕微鏡薄片を作成し内部構造の変化を観察した結果、1次クリープの開始から2次クリープ過程は、試験片に元来含まれている微小な空隙が圧密されて行く段階であること、3次クリープの開始点付近から顕著な亀裂の伸張と連結が認められる。

以上のうち6)のAE発生挙動は、7)に示した顕著な亀裂の発生に対応しているものと考えられる。ただし、7)のうち空隙が圧密される過程は、栗橋花崗岩など元来含まれる空隙の少ない岩石で成立するかどうかは、現状で確認できていない。

2.6.2 載荷応力割合とひずみ速度の最小値との関係

上記の2)~5)の関係を具体的に以下に示し検討する。

図2-6-1は、砂岩に対する異なる応力比での載荷における対数経過時間と軸ひずみ速度との関係を示している。

図において、載荷応力比が大きくなるとクリープ寿命は短くなり、軸ひずみ速度の最小値が大きくなり、また、載荷応力比が小さくなるとこれらは逆の傾向を示している。

図2-6-2は、上記の試験における対数経過時間と軸ひずみ速度の最小値とを関係点として表示しそれらについて勾配が-1の直線を引いたものである。また、図は省略するが、対数経過時間と3次クリープへの移行点における軸ひずみ速度の変化点を図示すると同様に-1の直線関係を示す結果が得られている。

前記3)、4)に記したように最小軸ひずみ速度はほぼ平均軸ひずみ速度見なすことができるので、それぞれの試験結果について、平均軸ひずみ速度×3次クリープへの移行点までの載荷時間を求めるとほぼ一定の値となる。

上記の乗算は意味的に「=クリープひずみ(量)」を表すことから、クリープにおいて3次クリープへの移行はクリープ域ひずみ(=塑性ひずみ)が、岩種により異なる値をとるが、ほぼ一定値に達することが条件になっているものと考えられる。

2.6.3 クリープ破壊と一軸圧縮破壊との関係

すでに報告した試験結果²⁾において、図2-6-3に示すように、軸ひずみ速度が減少する段階でまだその最低点に達していない試験片は再載荷後も一軸圧縮強度に変化はないが、その最低点を過ぎるまで載荷した試験片は一軸圧縮強度が低下することが示されている。

この結果はクリープ破壊と一軸圧縮破壊との関係を以下のように関係付けることで矛盾なく説明することができる。

図2-6-4は上記の来待砂岩で得られた、一軸圧縮における完全応力-ひずみ線図(Post-failure領域は一部想定図)および一軸圧縮繰り返し載荷・除荷試験における応力-ひずみ線図を重ねて示したものである。

クリープ試験は、例えばクリープ応力 σ_{cr} を一定に保ったまま変形を生じさせている試験であり、クリープ・パスはクリープ開始点aから時間の経過と共にひずみが増し、順次b→cを辿りg点でPost-failure曲線に達すると以降Uの線図を辿ることが、すでに木山³⁾によって確認されている。

図2-6-3に示したクリープ実験は、例えば載荷を中止した時点を図2-6-4のクリープ応力 σ_{cr} 上のb点とすれば、以降載荷を増加させれば繰り返し載荷・除荷試験で描かれた線図と同じ経路を辿り、b'を経て強度破壊点に達すると考えられるので一軸圧縮強度に変化がなかったことは説明できる。また再載荷点がfであれば荷重増に伴ってf'点でPost-failure曲線に接し、以降はその線図上を辿るので、このときの強度は減少したことも説明できる。

以上は2.5.2に述べた試験片の内部構造の変化点と対応しているものと考えられるが、この変化点がクリープ・パス(σ_{cr} 上のa→g)のどの点に対応するかについては、さらに内部構造の変化およびひずみ速度線図の変化点の確認実験と対応させながら検討中である。

2. 7 ま と め

本研究では、岩石の破壊に伴う力学的挙動、内部構造の変化を検討するためにクリープ試験及び一軸圧縮試験とクリープ試験後の試験片から薄片を作製し観察した。

その結果、クリープ载荷によって試験片は1次、2次、3次クリープの過程を経て破断に至るが、この時、AEやひずみ速度の挙動をモニターすることによって、クリープ変形の詳細な確認ができる。

また、薄片の内部構造の観察からクリープ破壊の進行とともに亀裂が成長していくのが部分的にはあるが確認できた。すなわち、クリープ破壊を次のように説明できる。AEの計測や薄片の観察から2次クリープ段階までは亀裂の成長もあまり活発でなく塑性ひずみが蓄積される過程と考えられる。次に、ひずみ速度が増加を示す3次クリープの開始点付近から、岩石の内部において亀裂の進展、またそれらが連結し最終的に巨視的な破壊に至る。これは、3次クリープ領域におけるAEの発生に増加がみられることから妥当なものだと考えられる。また、一軸圧縮試験後の薄片からも破壊強度の65%、75%、100%において荷重の増加によって亀裂の増加がみられた。特に、岩石の降伏点（破壊強度の約70%）前後の65%から75%の間で亀裂が増加するのが確認できるがインタクトな試料とあまり変わらない結果となった。

このことは今後再試験で確認する必要がある。

2. 8 今後の課題

本年度は栗橋花崗岩の一軸圧縮クリープおよび一軸圧縮圧縮における内部構造を変化について検討した。しかし、現時点では、試験片への樹脂の浸透、薄片作製などにおいて、まだ適切な方法を会得したとはいえない。また、画像処理に関しても亀裂の抽出は極めて難しく、かなりの誤差を含んでいることが考えられる。

なお、本研究では各試験後の薄片から内部構造について検討したが、同一試験片から各破壊過程における薄片を作製し解析することは不可能であり、それらの潜在的な亀裂分布を同様に考えることには疑問が残る。また、同一試験片内でも切断する場所によって亀裂の分布は違ってくると考えられる。そこで、今後画像解析を行うにあたって今回以上にサンプル数を増やしたり、同じ試験片から複数枚の薄片を作製する必要がある。さらに、ひずみやAEの計測においてAE発生位置評定と内部構造の解析とを関連づけて検討し、岩石の破壊機構を究明することが必要であるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 山下秀ほか；資源と素材, Vol.110,11, pp879-882, (1994)
- 2) S.Yamashita etc.; Proc.of MMIJ/AusIMM J. Symp.(1994)
- 3) 木山保ほか；資源・素材学会, 1994春季大会要旨集, pp101-102

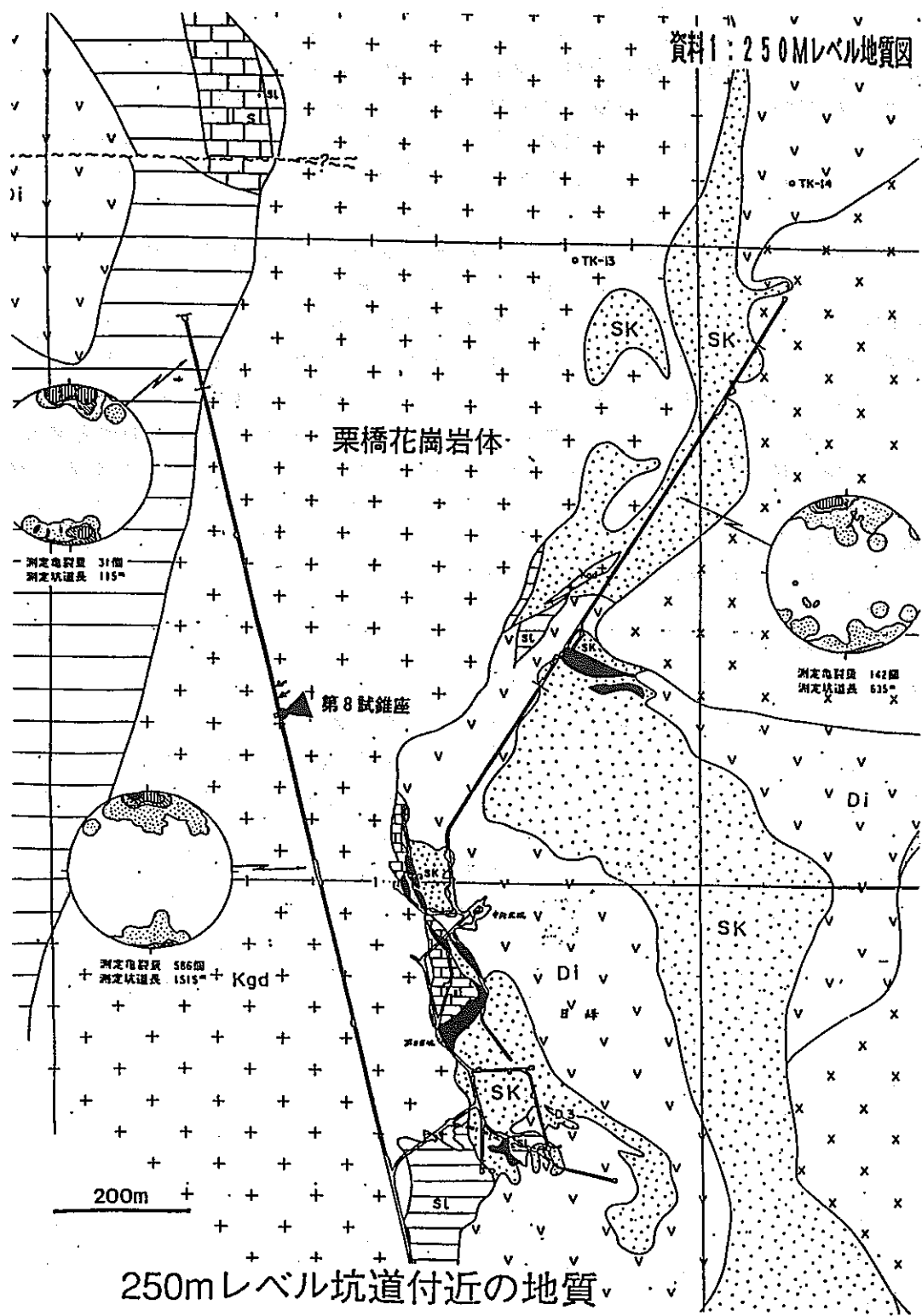


図2-1 試料採取場所の地質図

250Mレベル坑道割れ目概査結果, S=1/200

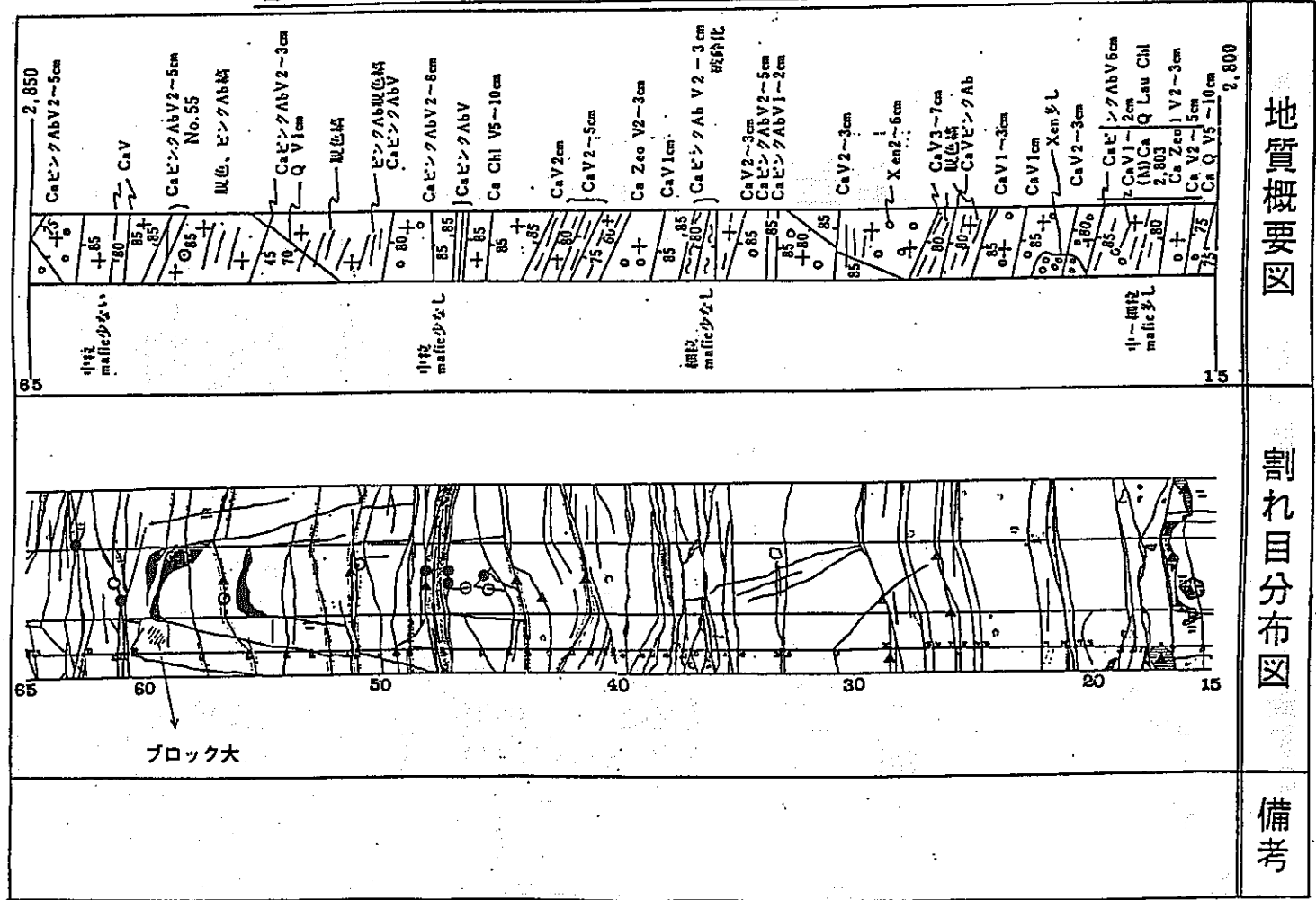


図 2-2 坑道割れ目概査結果と採取場所

2.50 Mレベル坑道割れ目概査結果, S = 1 / 200

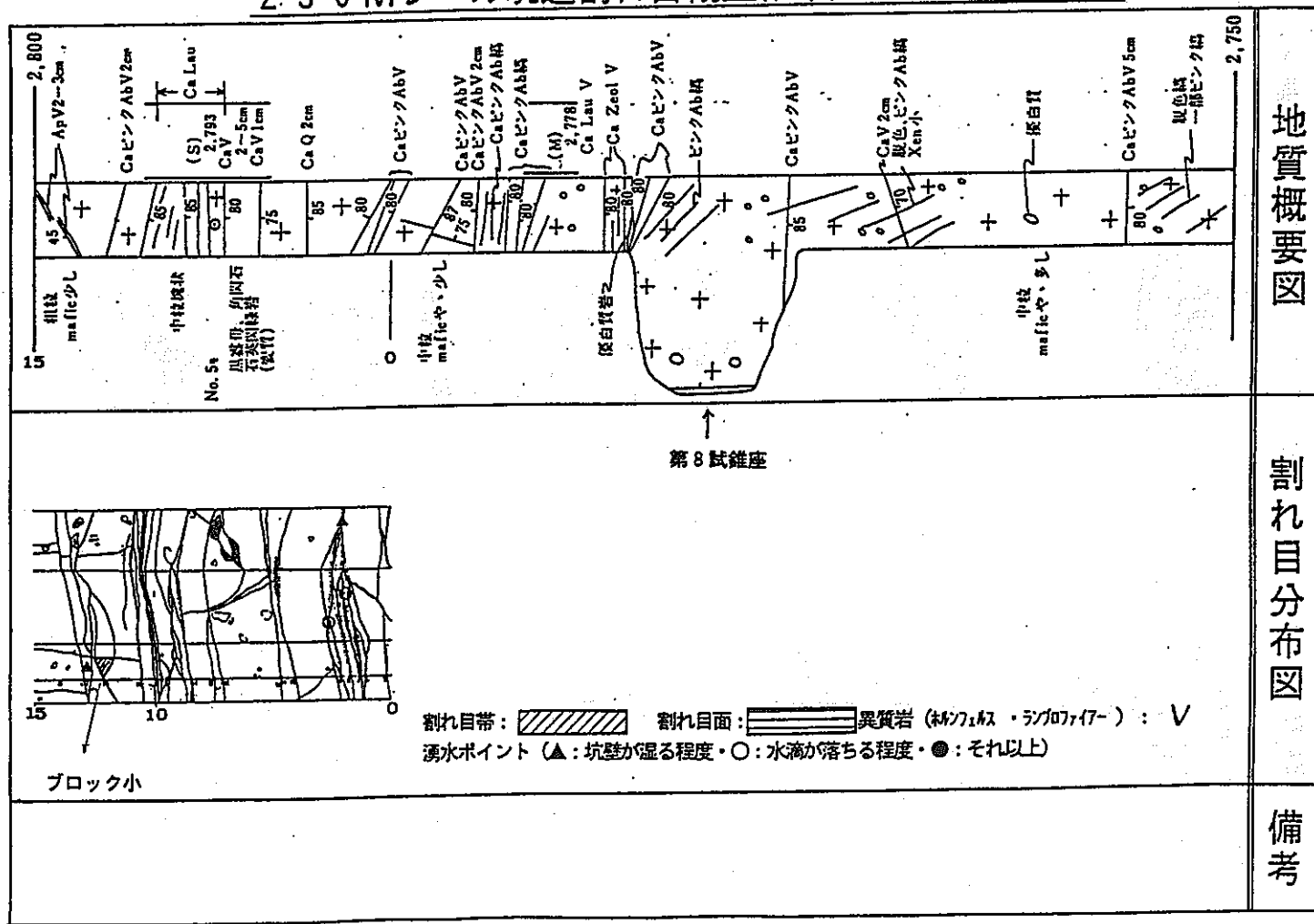


図 2-3 坑道割れ目概査結果と採取場所

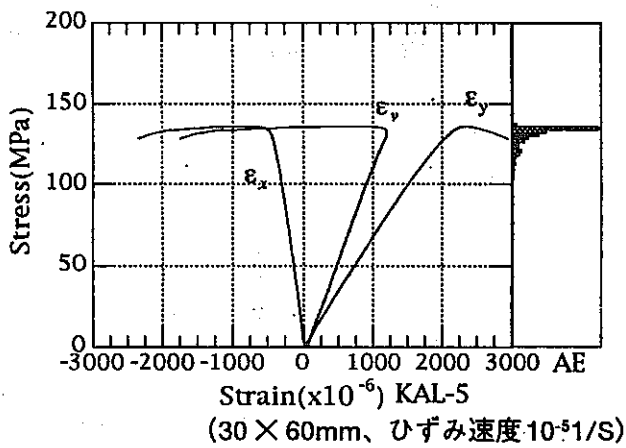
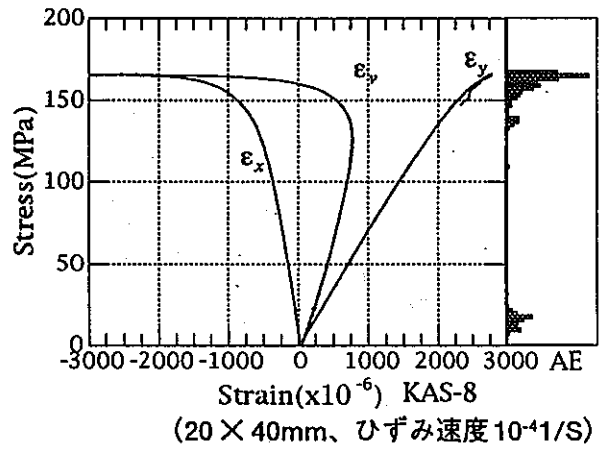
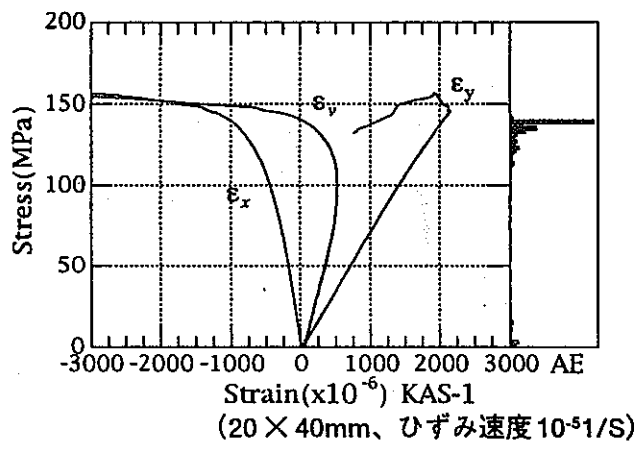


図 3-1 一軸圧縮試験結果

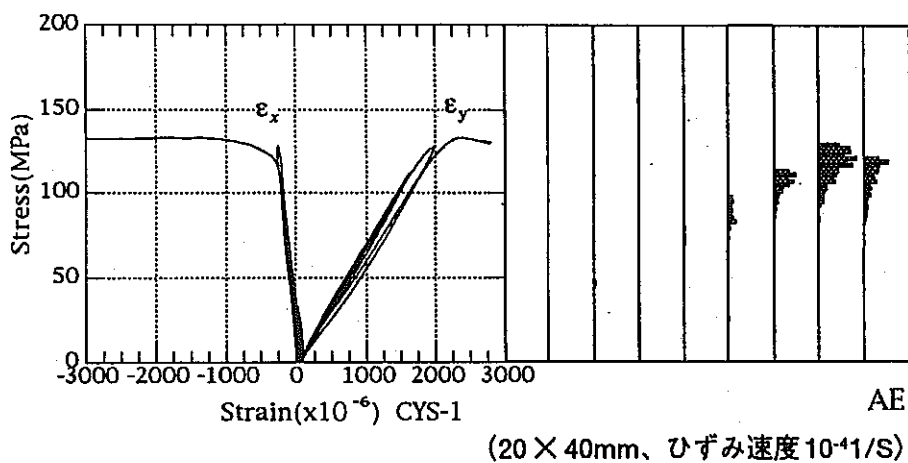


図 3-2 繰り返し载荷除荷試験結果

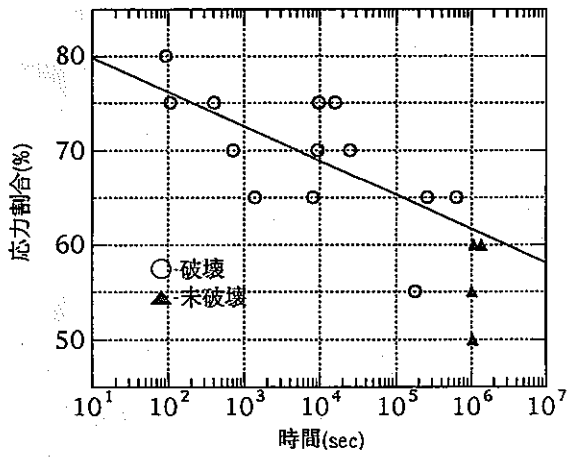


図.4-2-1 応力割合と破断時間の関係

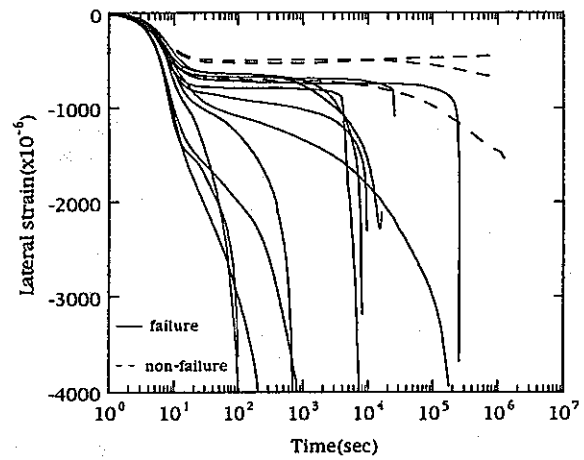
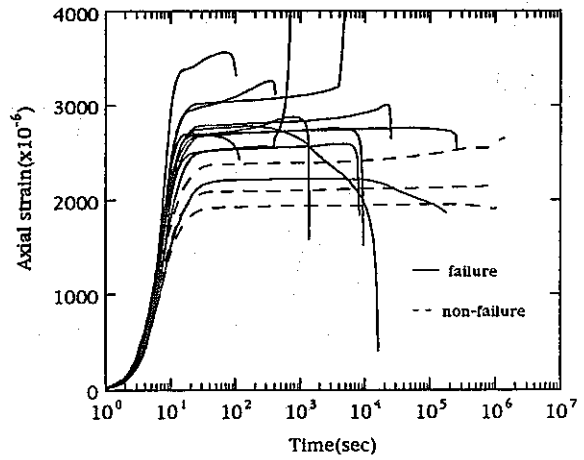


図.4-2-2 対数時間クリープ線図

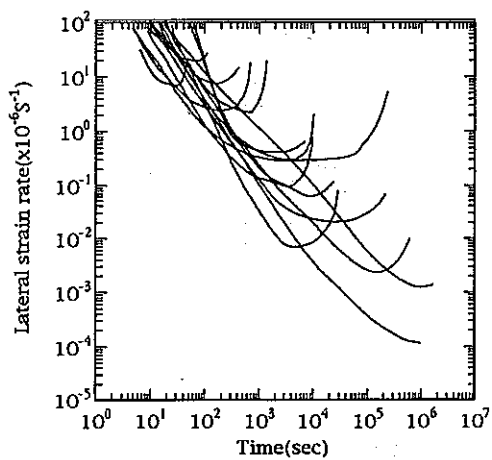


図.4-2-3 横ひずみ速度と経過時間の関係

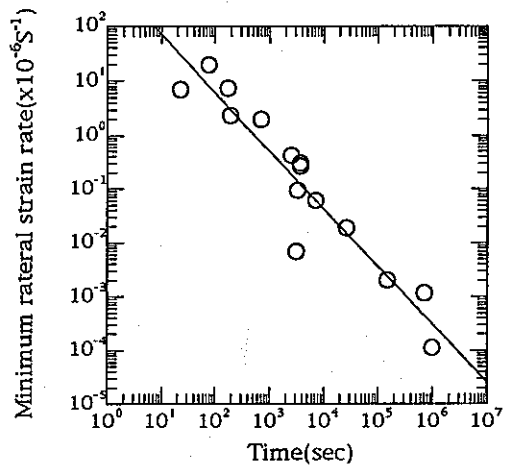


図.4-2-4 最小横ひずみ速度と時間の関係

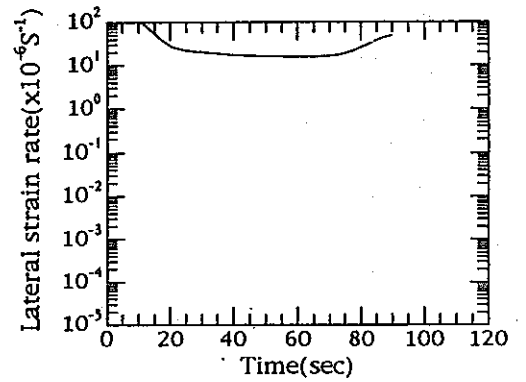
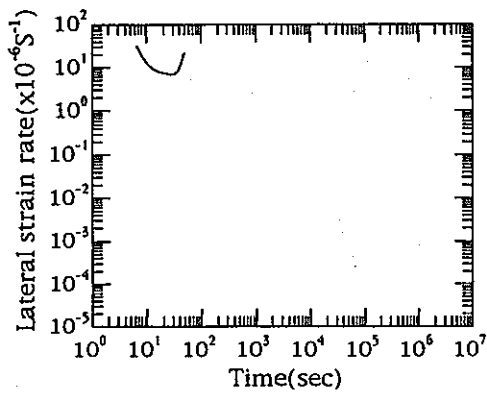
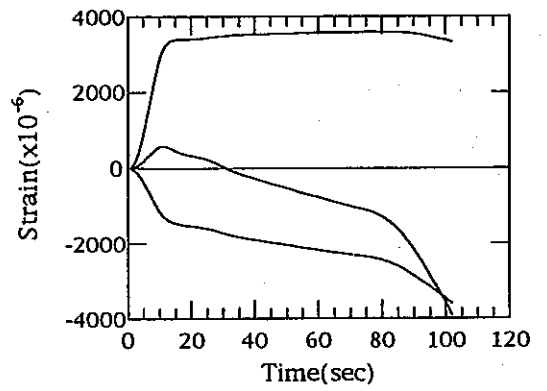
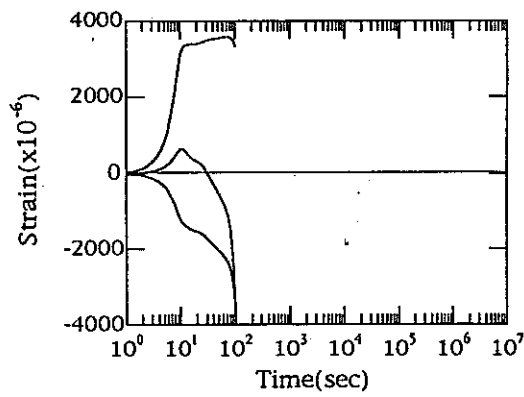


図.4-2-5 クリープ試験結果 (C80-1)

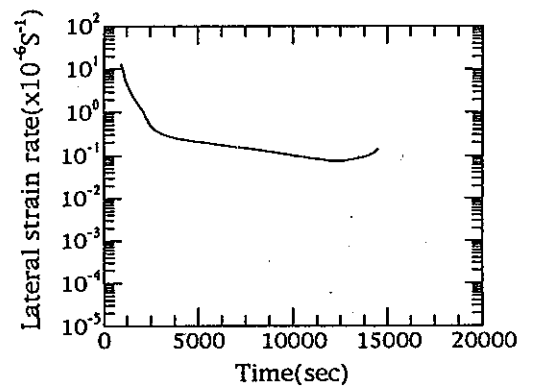
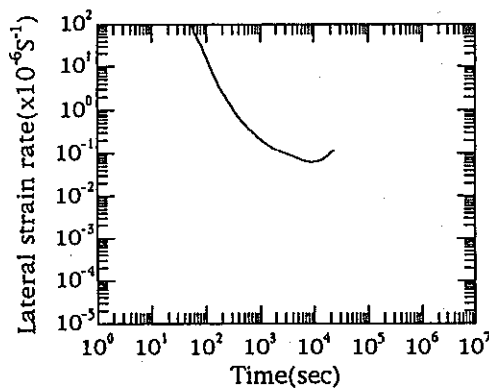
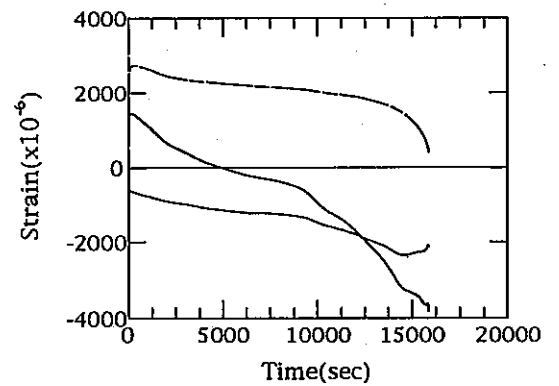
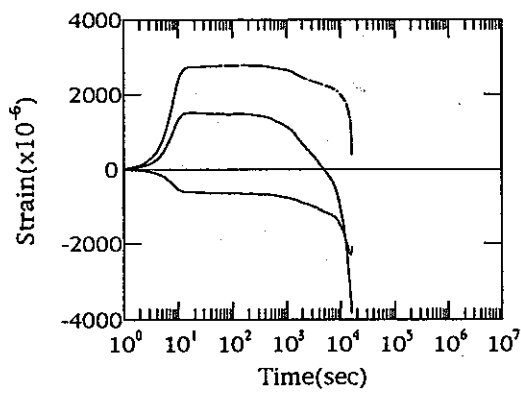


図.4-2-6 クリープ試験結果 (C75-1)

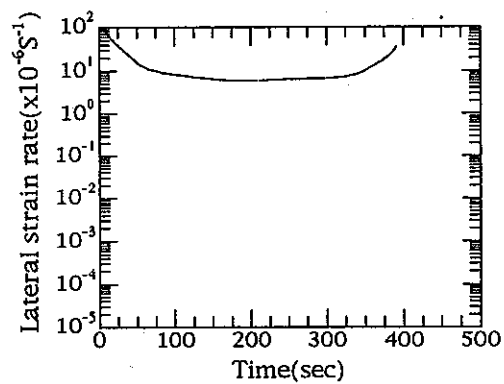
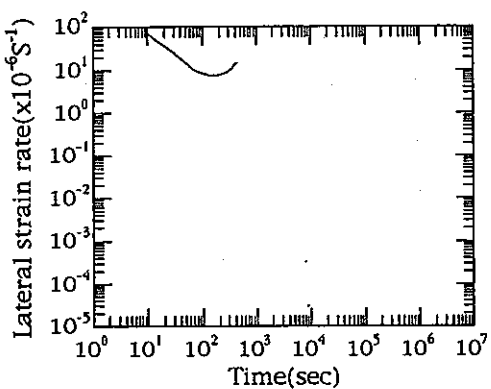
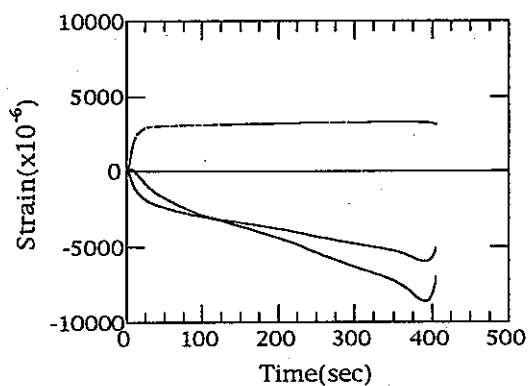
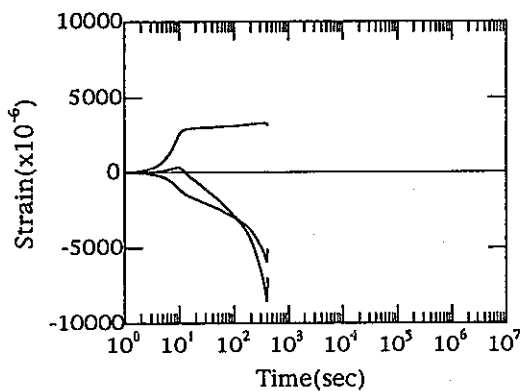


図.4-2-7 クリープ試験結果 (C75-2)

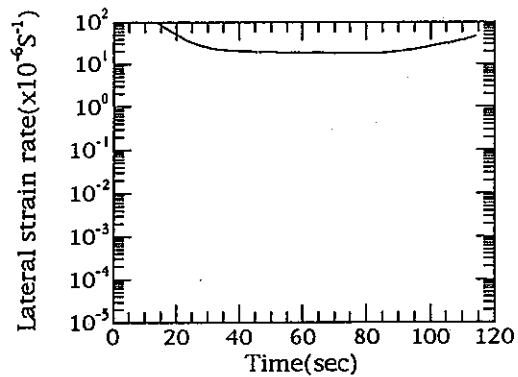
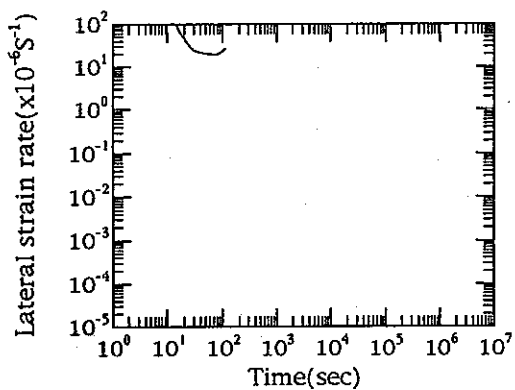
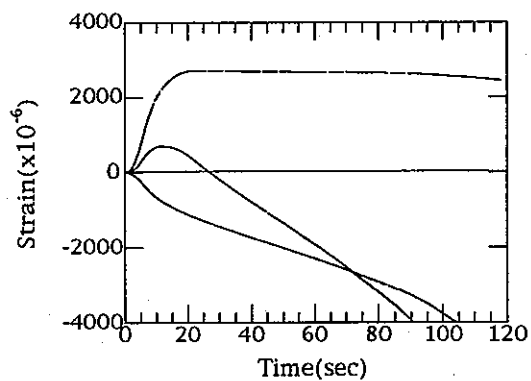
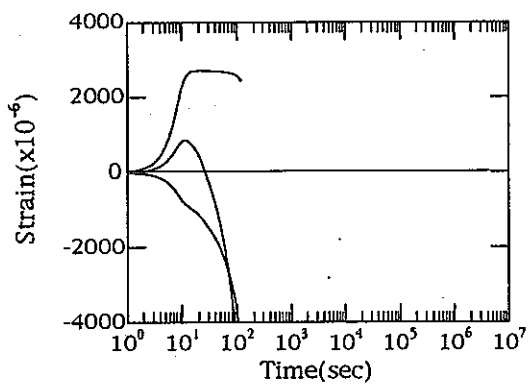


図.4-2-8 クリープ試験結果 (C75-3)

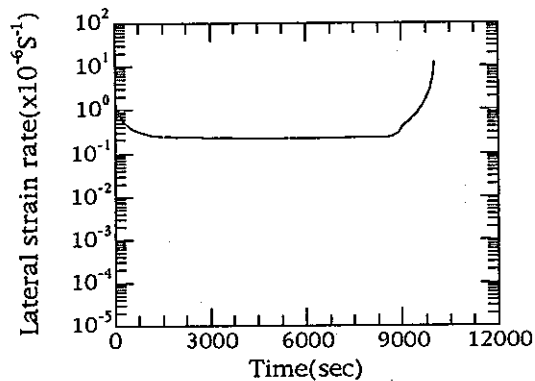
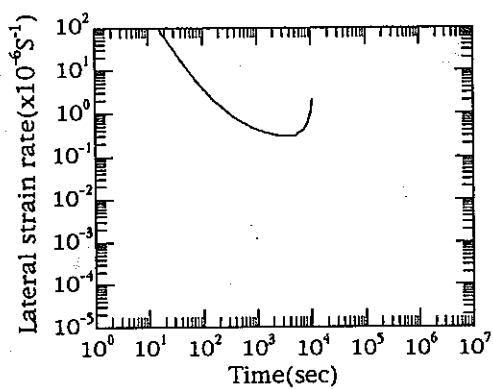
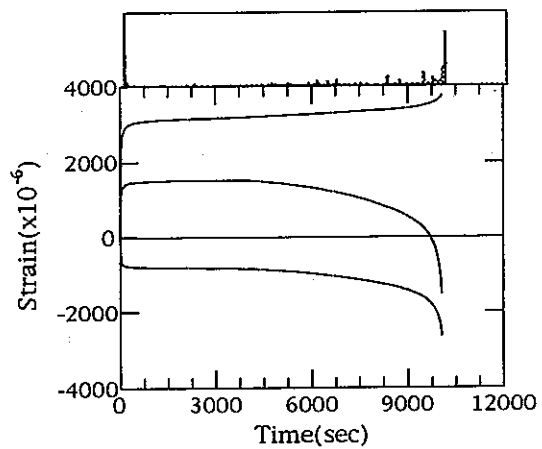
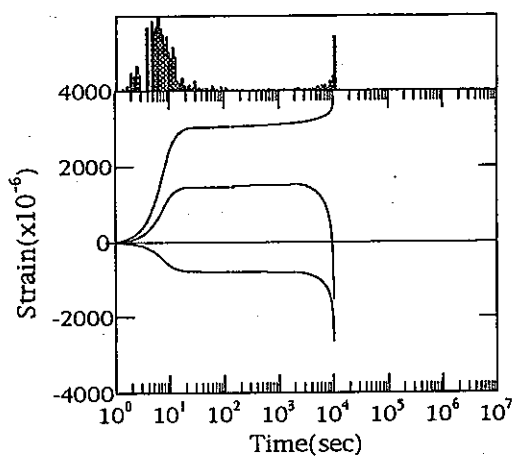


図.4-2-9 クリープ試験結果 (C75-4)

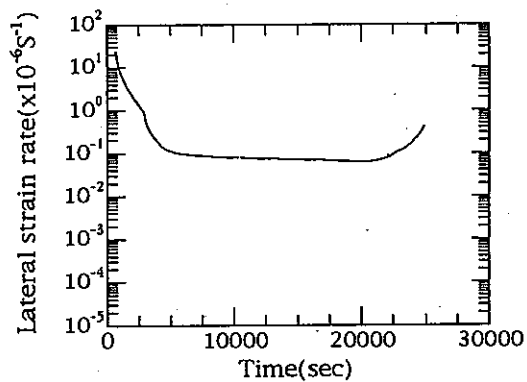
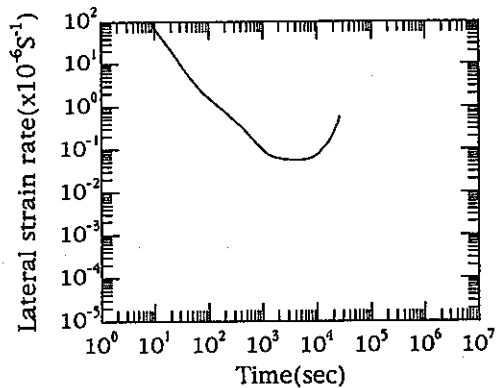
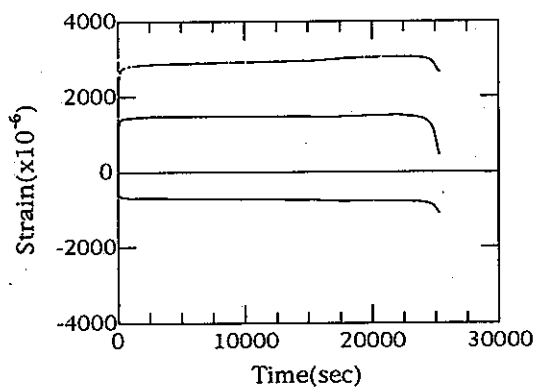
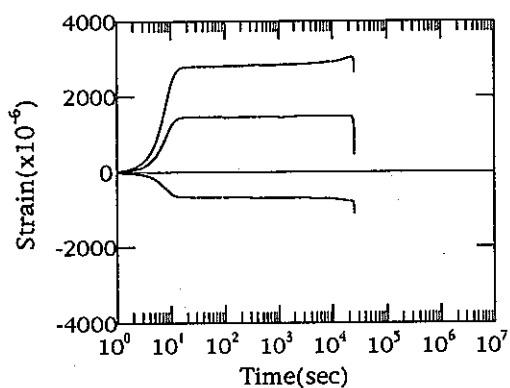


図.4-2-10 クリープ試験結果 (C70-1)

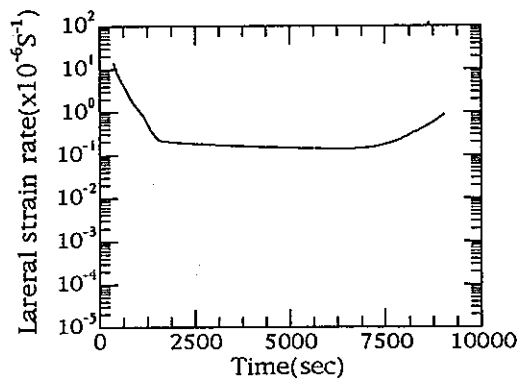
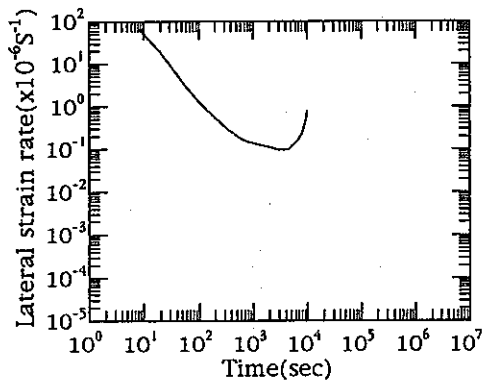
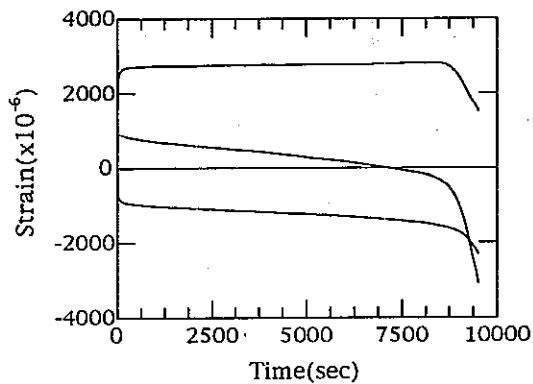
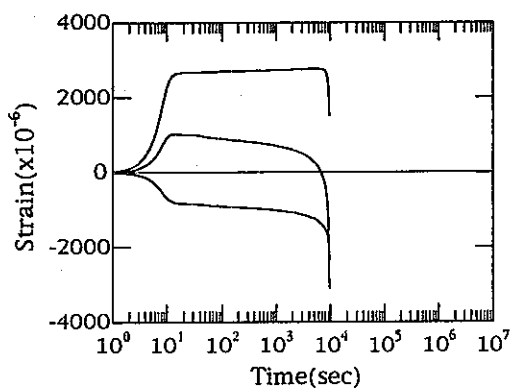


図.4-2-11 クリープ試験結果 (C70-2)

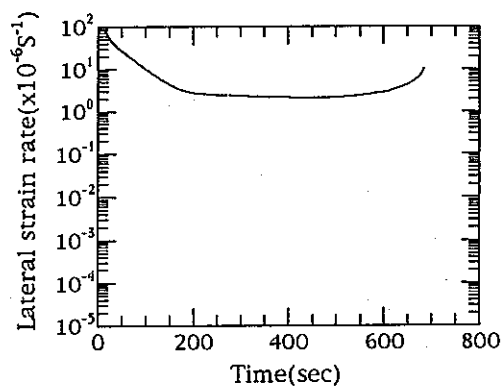
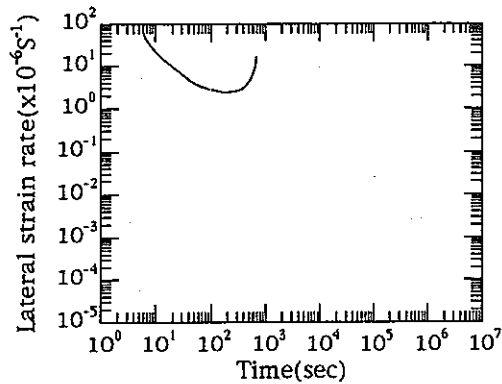
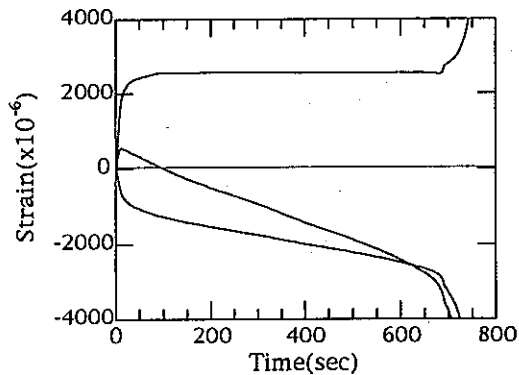
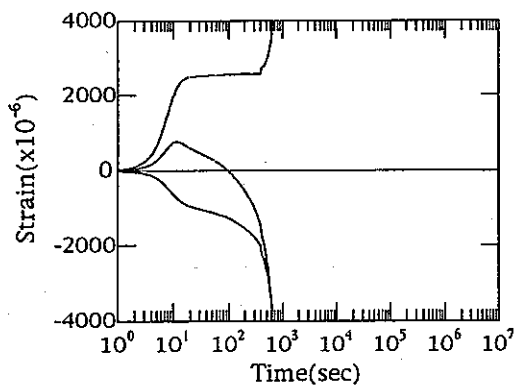


図.4-2-12 クリープ試験結果 (C70-3)

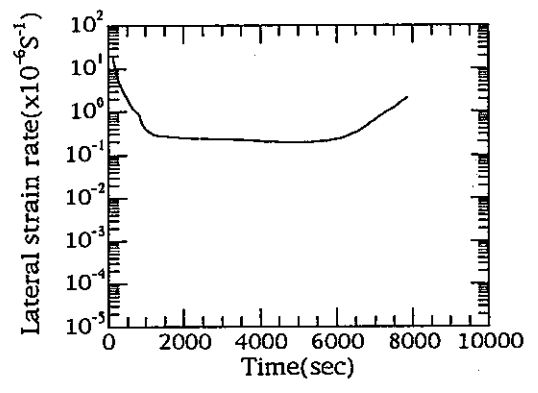
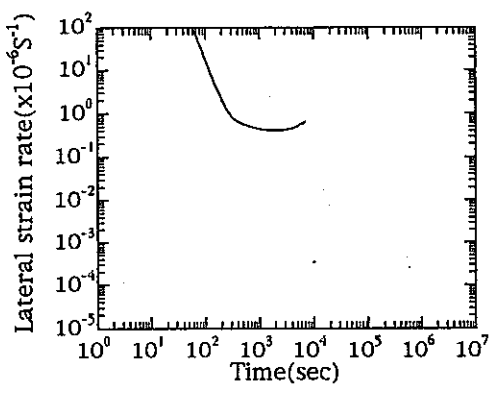
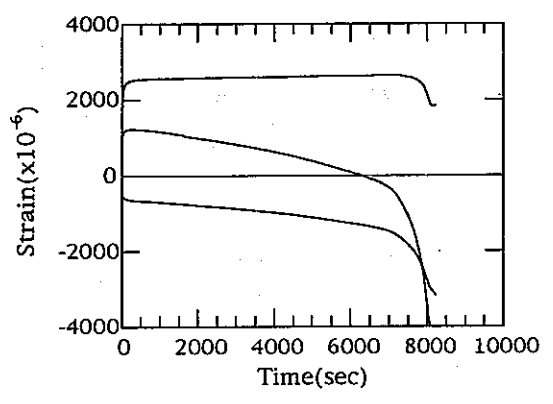
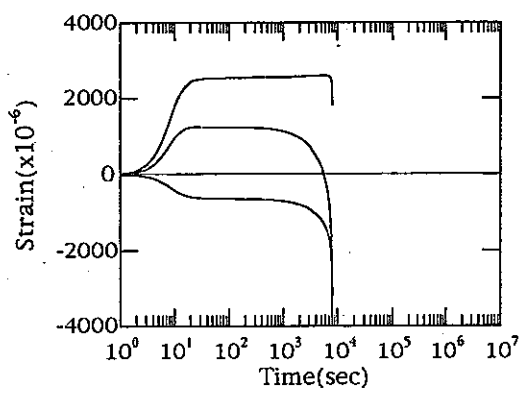


図.4-2-13 クリープ試験結果 (C65-1)

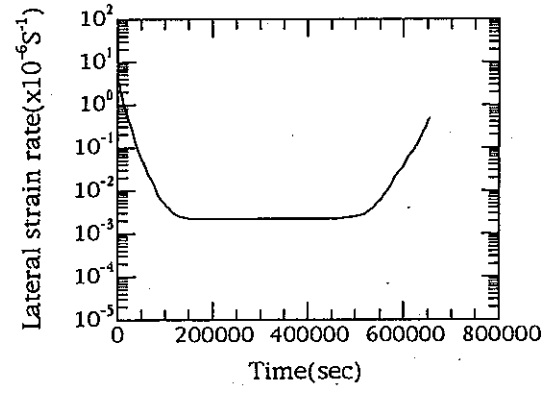
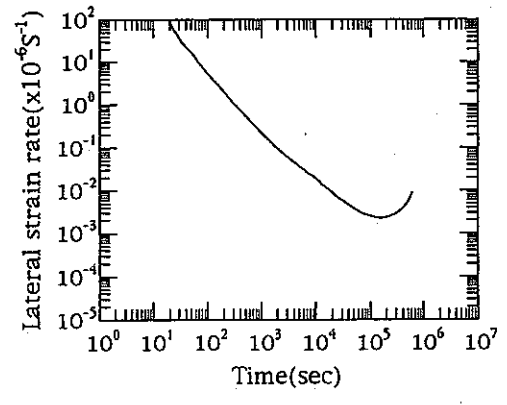
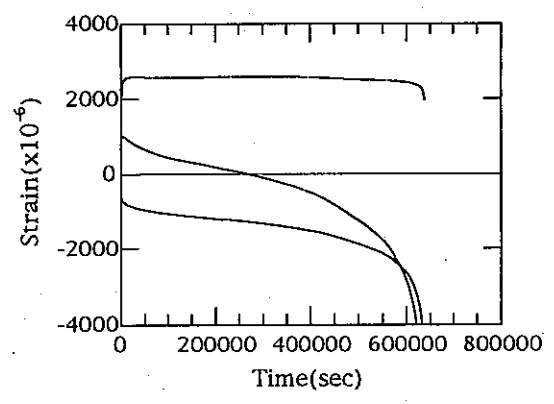
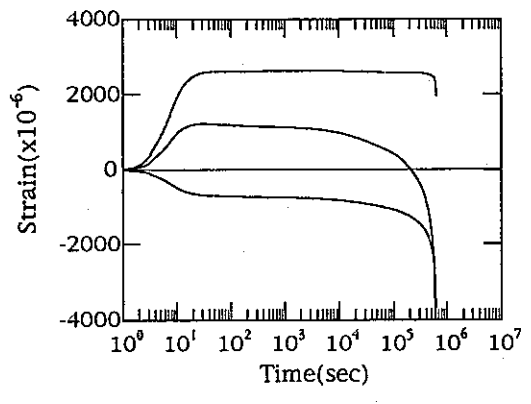


図.4-2-14 クリープ試験結果 (C65-2)

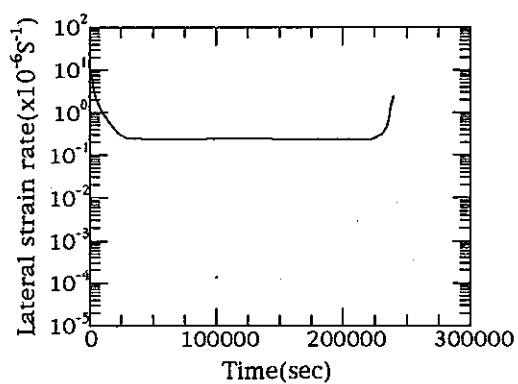
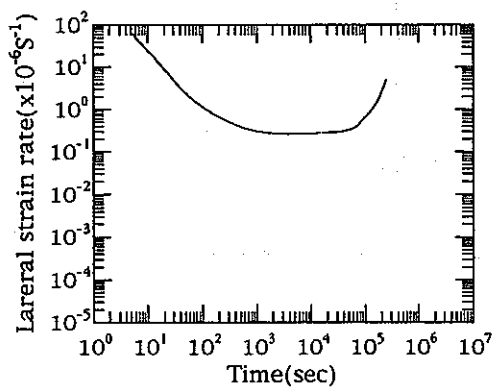
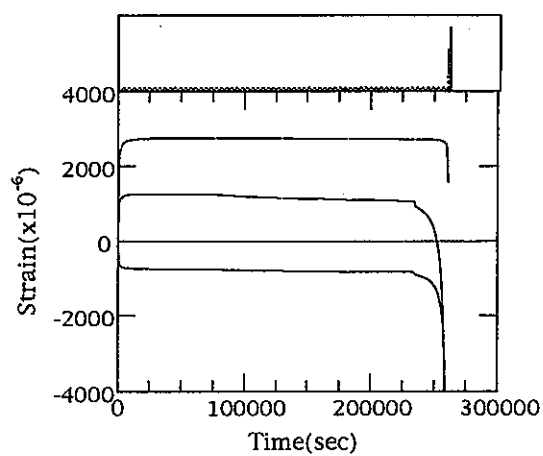
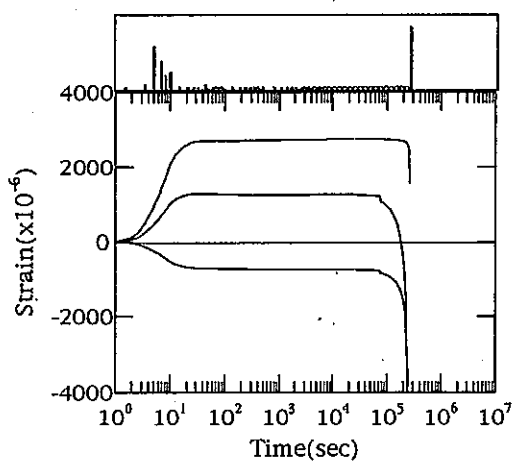


図.4-2-15 クリープ試験結果 (C65-3)

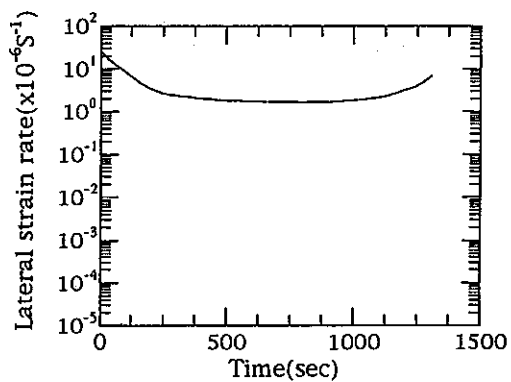
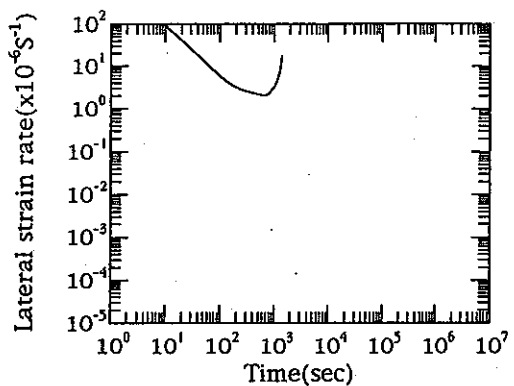
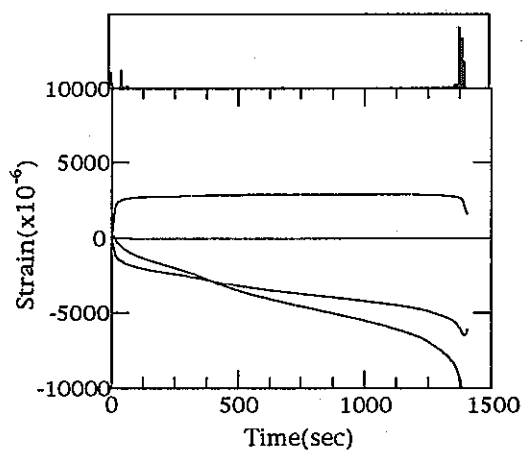
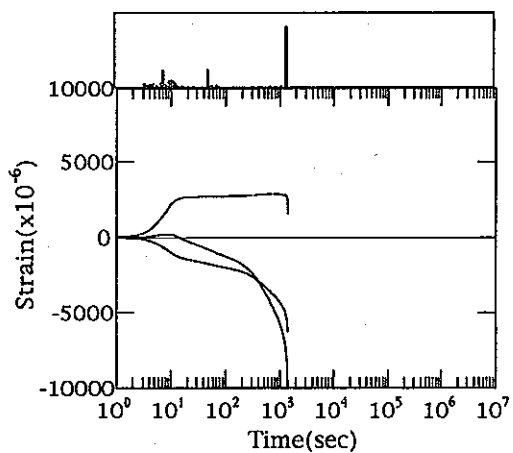


図.4-2-16 クリープ試験結果 (C65-4)

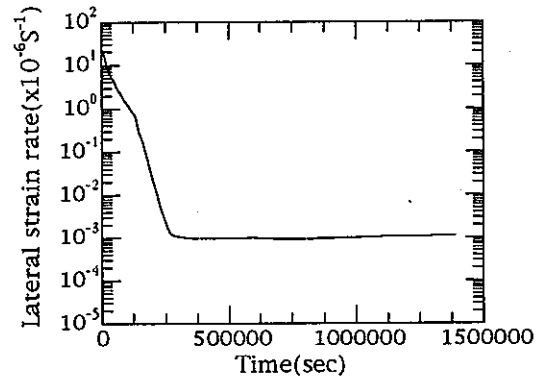
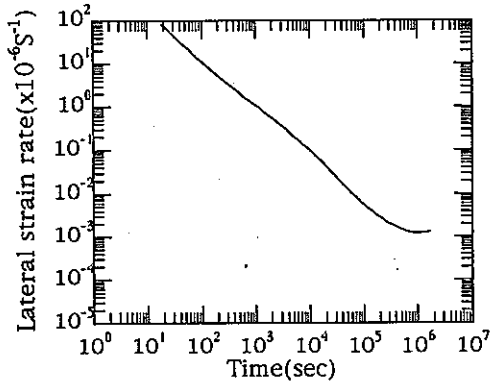
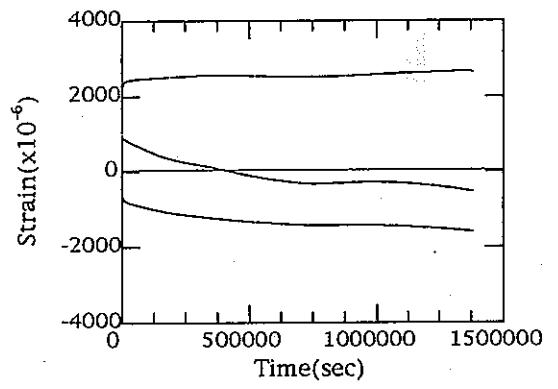
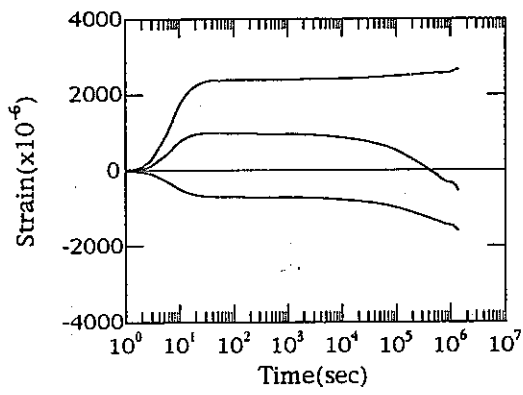


図.4-2-17 クリープ試験結果 (C60-1)

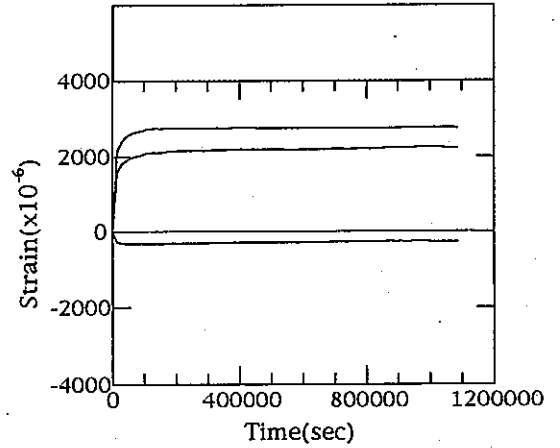
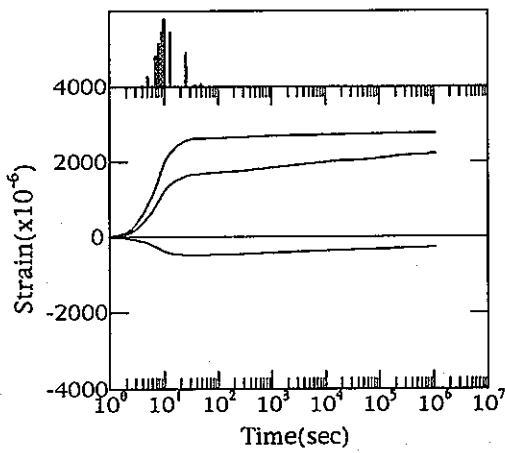


図.4-2-18 クリープ試験結果 (C60-2)

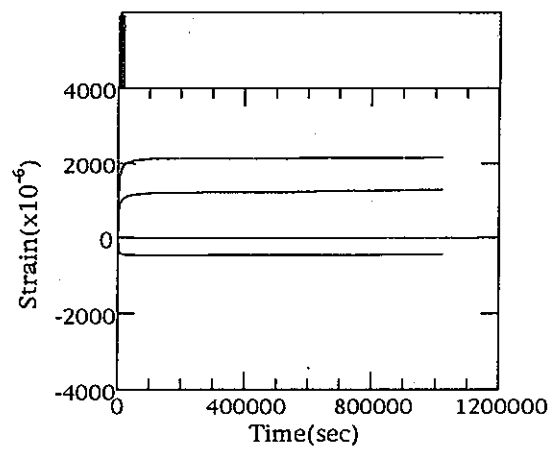
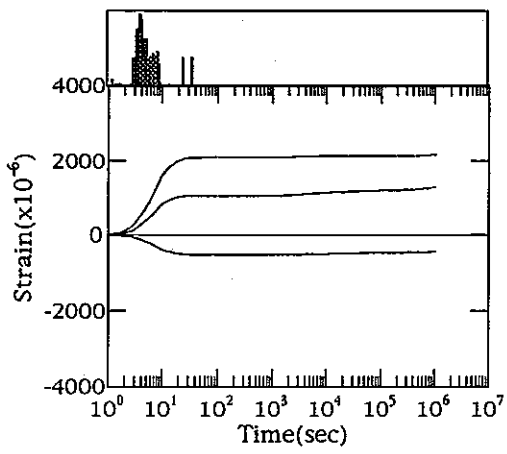


図.4-2-19 クリープ試験結果 (C55-1)

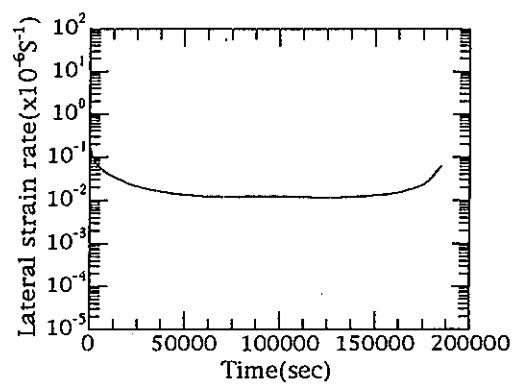
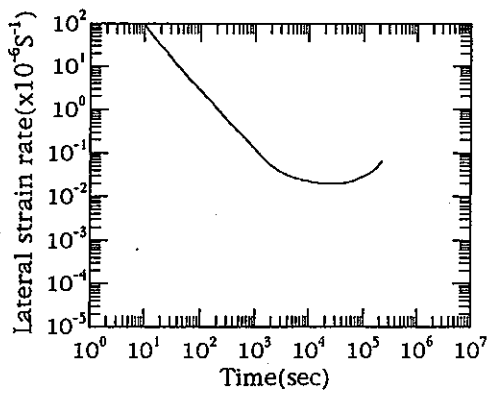
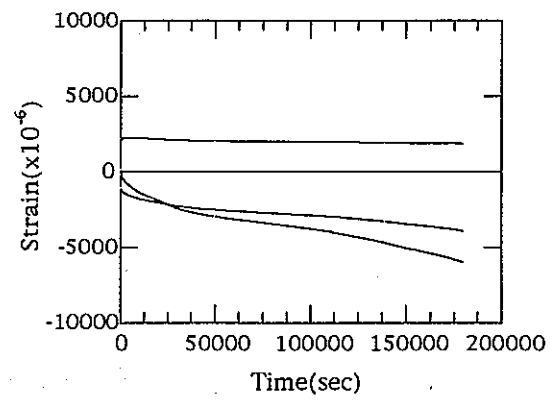
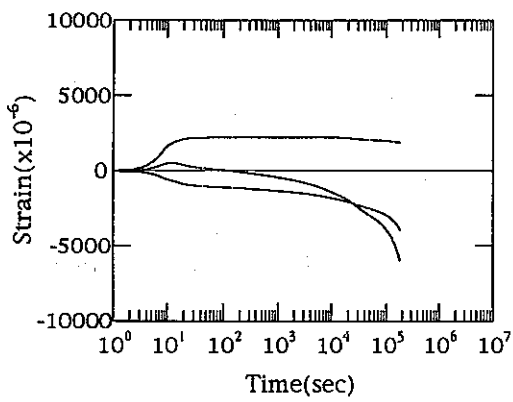


図.4-2-20 クリープ試験結果 (C55-2)

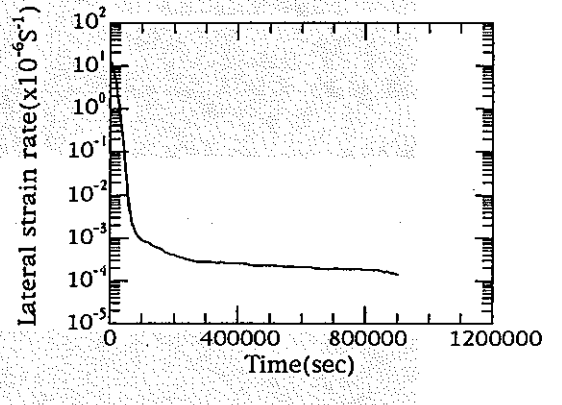
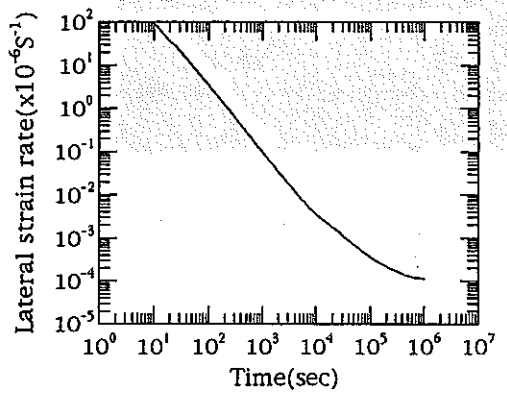
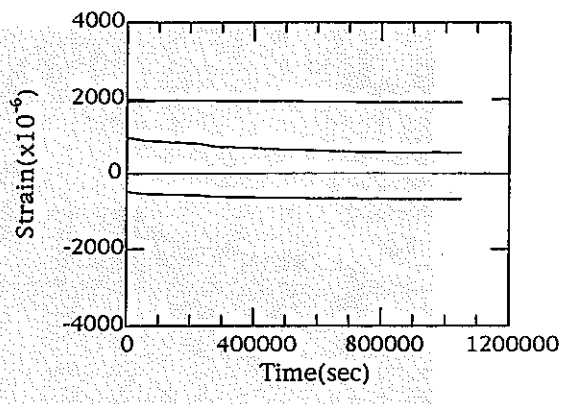
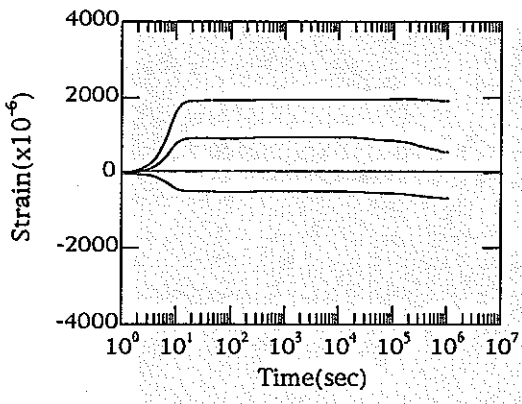


図.4-2-21 クリープ試験結果 (C50-1)

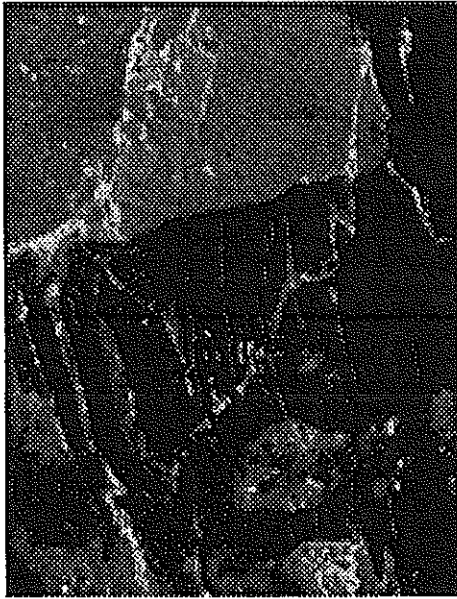


図.5-1-1 CCD カメラから入力した画像

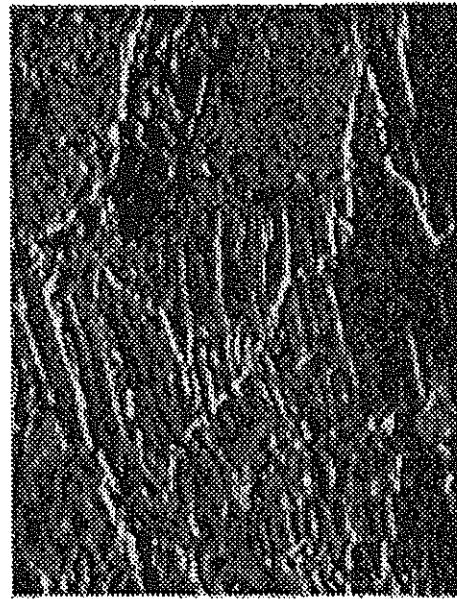
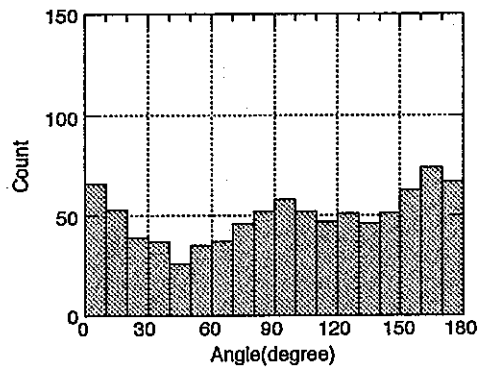


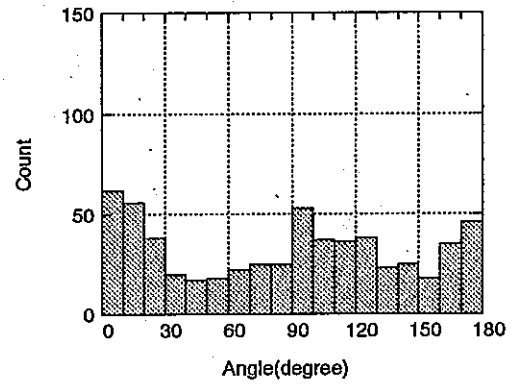
図.5-1-2 フィルター処理後の画像



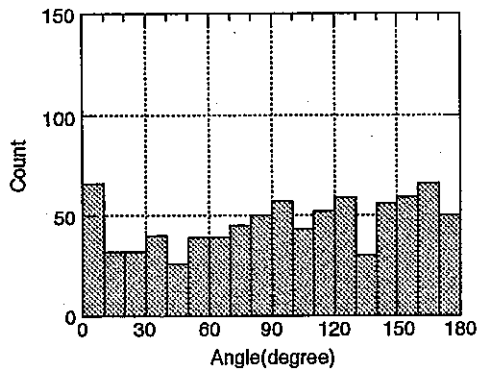
図.5-1-3 亀裂を抽出した画像



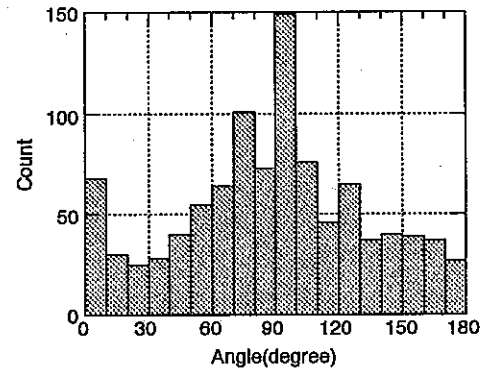
intact



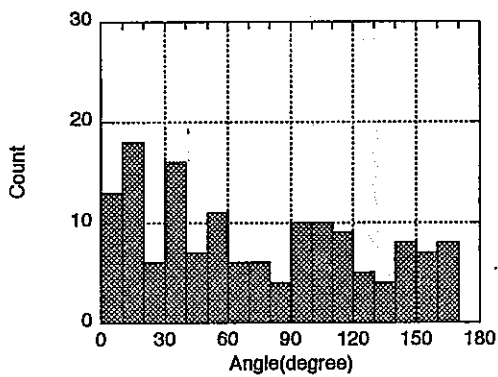
一軸 (65%)



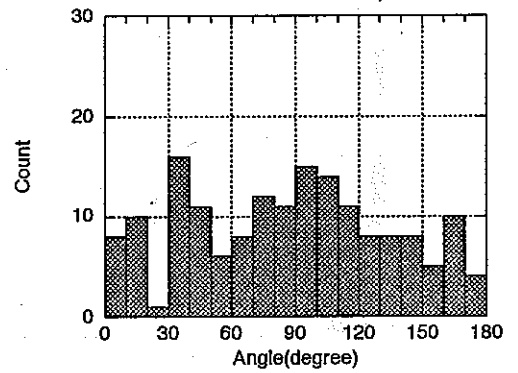
一軸 (75%)



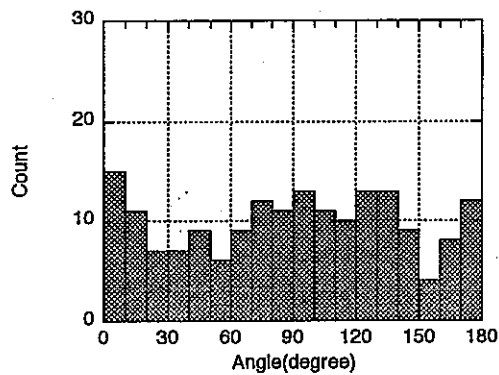
一軸 (100%)



2次クリープ

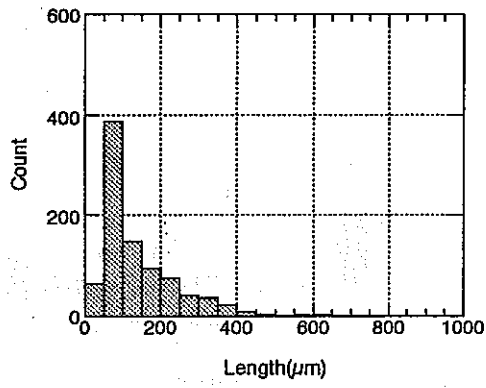


2次クリープ後半

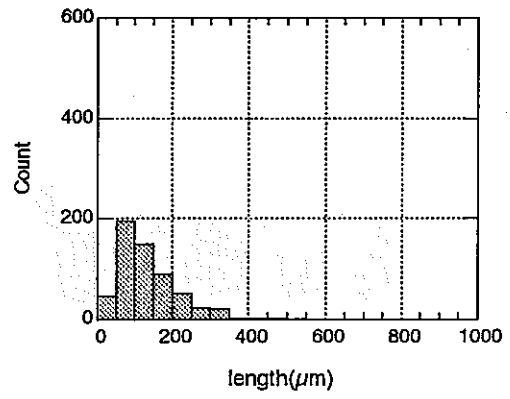


3次クリープ

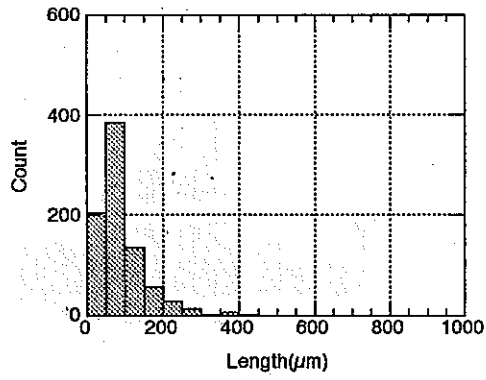
図.5-2-1 亀裂方向の分布



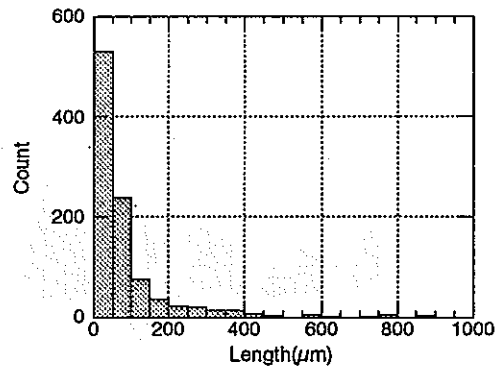
intact



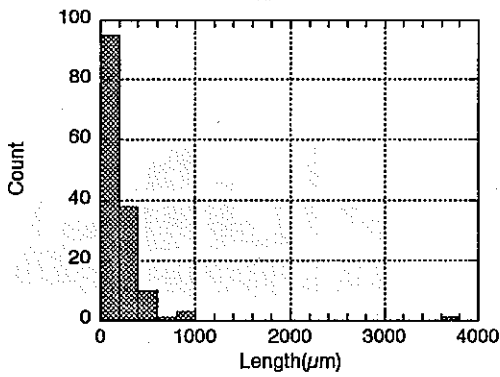
一軸 (65%)



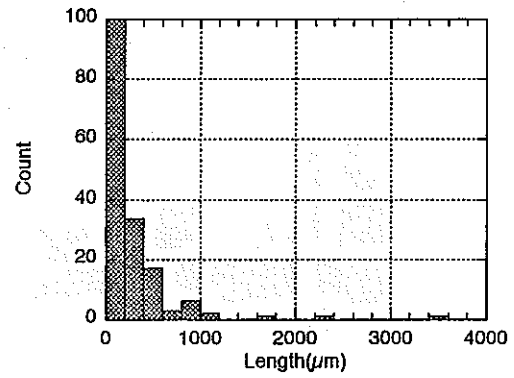
一軸 (75%)



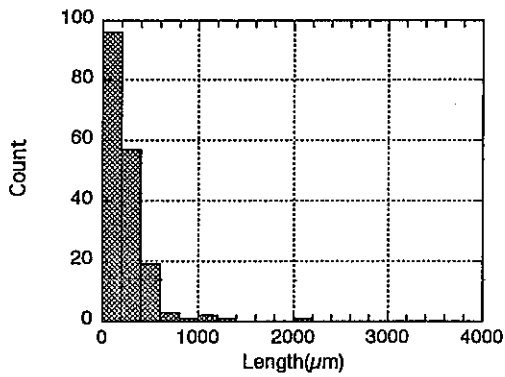
一軸 (100%)



2次クリープ

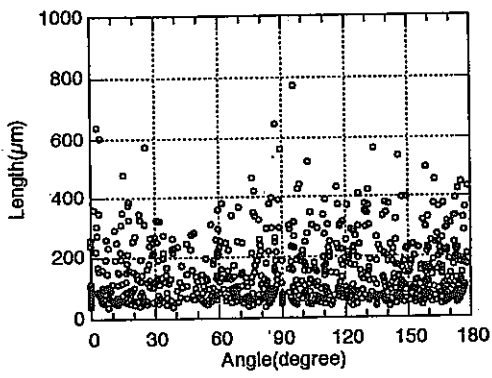


2次クリープ後半

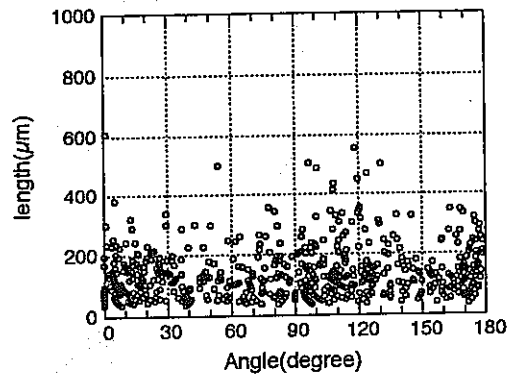


3次クリープ

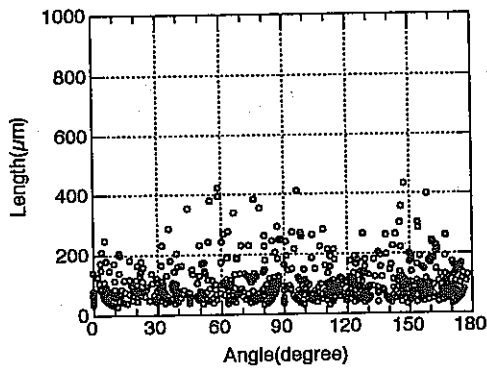
図.5-2-2 亀裂長さの分布



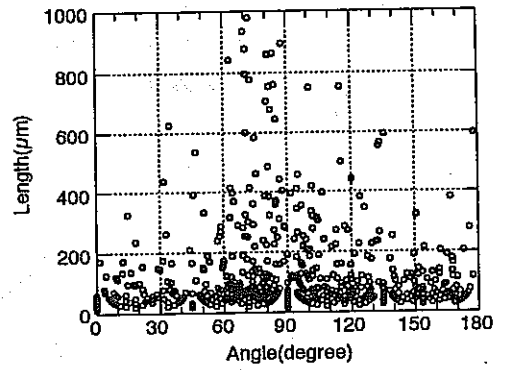
intact



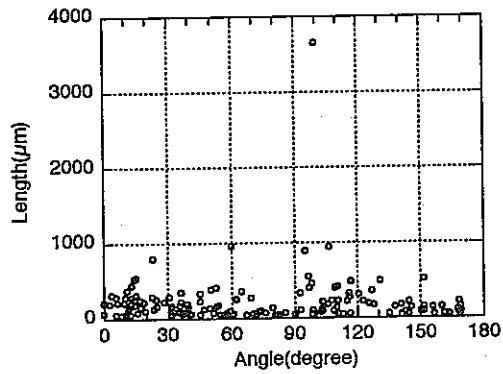
一軸 (65%)



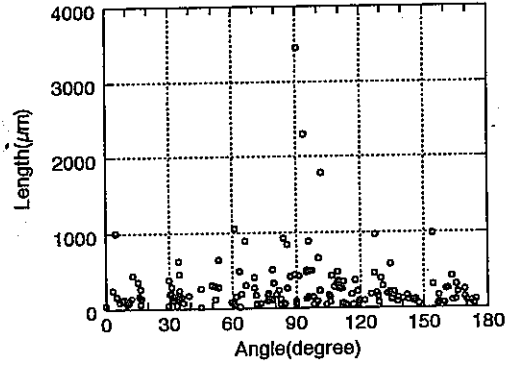
一軸 (75%)



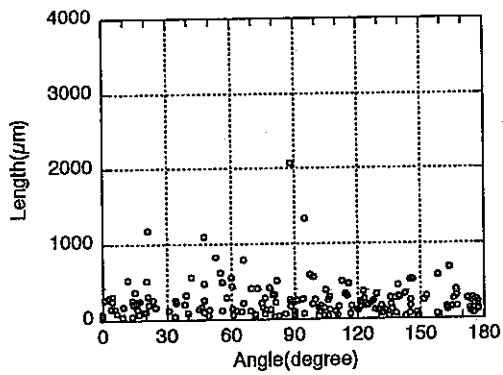
一軸 (100%)



2次クリープ



2次クリープ後半



3次クリープ

図 5-2-3 亀裂長さと方向の関係

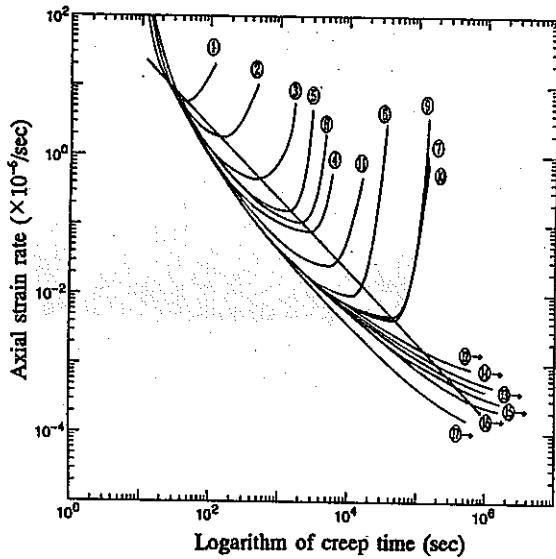


図2-6-1 対数クリープ経過時間と軸ひずみ速度の関係 (来待砂岩)

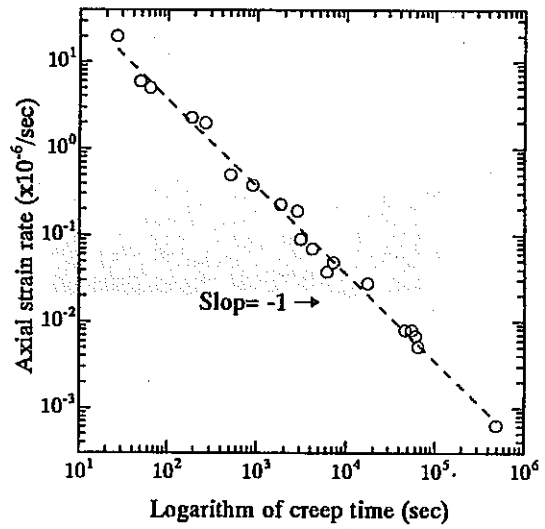


図2-6-2 対数クリープ経過時間と軸ひずみ速度最小値との関係 (来待砂岩)

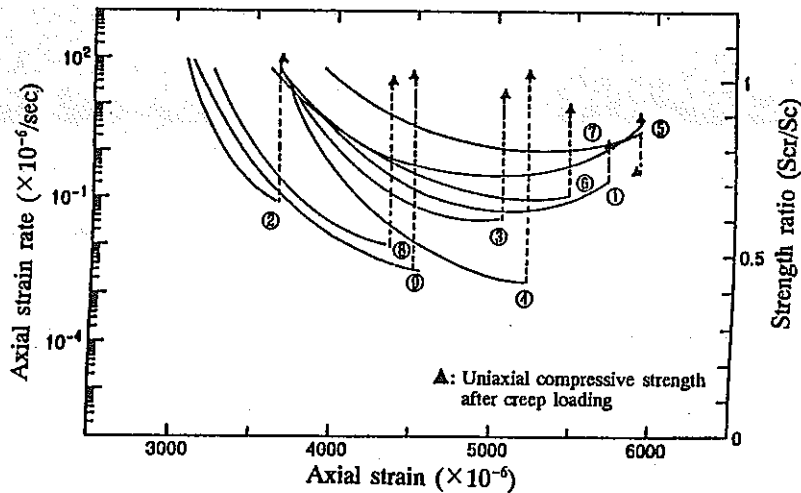


図2-6-3 軸ひずみと軸ひずみ速度および載荷後の一軸圧縮強度比の関係 (来待砂岩)

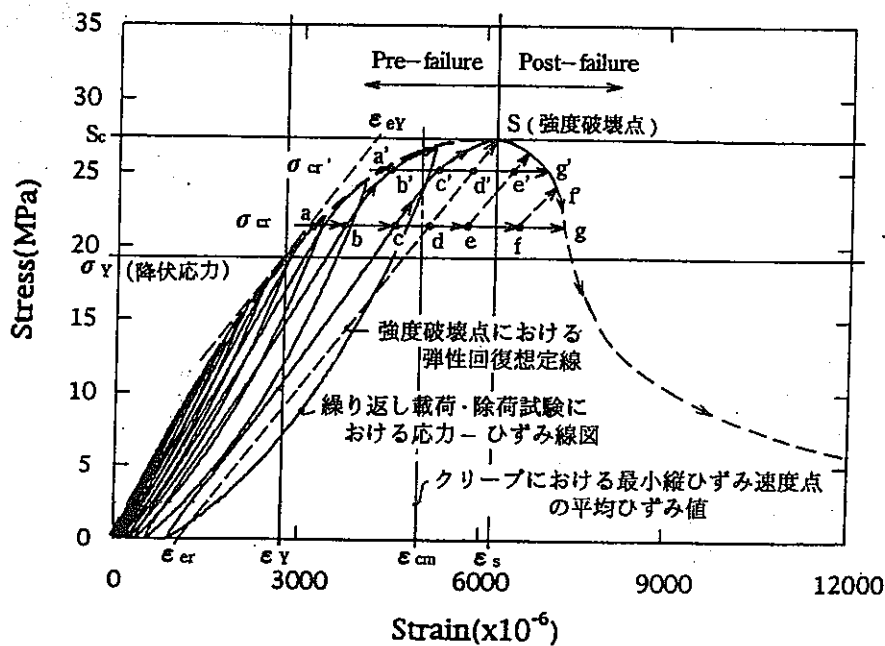


図2-6-4 クリープ載荷と一軸圧縮載荷との関係

3. 坑道周辺岩盤の力学的状況の精密調査

3. 1 はじめに

次の2つの原位置測定に関して、諸計器の開発、室内試験を経た上で、釜石鉾山 250m レベルの花崗閃緑岩中の坑道において原位置計測を行った。

- ・孔壁変形法を用いた下向きの地圧測定
- ・き裂の性状に関する弾性波を中心とした測定

測定断面は、図-3-1に示すように、250L坑道に設けた。この断面は昨年実施した測定断面から、手前（坑口側）に向かって16.1m離れている。

3. 2 孔壁変形法を用いた下向きの地圧測定

3. 2. 1 測定場所

地圧測定のための孔（A孔と呼ぶ）の孔の孔口は、踏前（床）から30cmの高さの西側側壁に設け、傾斜を -48° 、水平面内では坑道奥に向かった坑軸から 83° とした（図-3-2）。

3. 2. 2 測定方法

径100mmの孔底の中心から、径40mmのコアビットを用いてボアホールを20~25cmの長さだけ作孔する。得られたコアを観察して岩盤の状態を調べ、この測点で測定できるかどうかを判断する。

測定可能と判断されたならば、ボアホール内の所定の位置に測定器を挿入する。測定器のケーブルをボーリングロッド、ボーリング機械を経て坑内の測定記録装置に接続する。その後、外径100mmのコアビットで20~25cmの長さだけ作孔する。このオーバーコアリングにともなう孔壁の変形を記録する。

この一連の作業を1サイクルとして、坑道壁面から奥に向かって繰り返す。

3. 2. 3 測定作業

A孔においては、坑壁から25cmの深さまで、径100mmのめくらボアホールを作孔した。この部分のコアは坑道掘削時の発破等の影響により、著しく損傷しており、測定ができない状態であった。

坑壁からの深さ25～50cm(測点①;深さ37.5cm)、深さ50～70cm(測点②;深さ60cm)で得られたオーバーコアリングに伴う径変化を図-3-3、4に示す。

深さ70～90cm(測点③;深さ80cm)では、データをコンピューターに取り込むのに失敗したため、測定値の経時変化を得ることができなかった。

深さ90cm以深ではボーリングマシンの不調により、測定を中止した。

孔壁変形法では、同一測定孔で3次元の応力状態を得るのに、相異なる3方向の孔径変化、孔壁に沿う軸ひずみ、相異なる2方向の斜径変化の合計6成分を測定対象とする。この内で、斜径変化を計るセンサーは開発が遅れ、原位置計測に間に合わなかった。また、軸ひずみの測定は深度90cmで試みたが、上記のように、ボーリング機械の不調で測定データを得るに至らなかった。

測点が坑壁から90cmより以浅では、地圧応力が近似的に測定軸に対して平面応力状態になっていると仮定できる。ここでは、この仮定を基に以下の解析を進めた。

3. 2. 4 測定結果

孔径変化量から、対応する地圧を求めた結果を表-3-1に示す。ここでは、便宜上、ボアホール軸をz軸、これに垂直な断面内の水平方向をx軸、これに垂直な方向をy軸とする。計算に必要な岩盤のヤング率E、ポアソン比 ν 、測定孔径dは次の値を用いた。

$$E = 60 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.2$$

$$d = 40 \text{ mm}$$

測点①では、x軸から反時計回りに113.8°傾いた方向に、大きさ9.26MPaの引張応力が生じているという結果が得られた。地圧応力は通常、圧縮と考えられるので、この意味で異常といえる。測点①周辺の岩心は多くのき裂を含んでおり、

コアはこれによって塊状もしくは円盤状に分かれていた。このことと測定値の異常は関係があるものと考えられる。

測点②における地圧は、最大、最小主応力共に圧縮の値を示している。得られた岩心は円盤状もしくは短柱状をなし、測点①に比べ、損傷は少ない。測定箇所のかぶりは約600mであるから、かぶり圧は-15MPa程度である。測点②における地圧の最大、最小主応力は-12.4、-17.1MPaとなっており、かぶり圧に近い値をとっている。

測点③では、地圧の最大、最小主応力として-5.3、-13.0MPaを得た。測点③の岩心は $z = 85\text{cm}$ 付近でき裂に沿って斜めに二分され、長柱状をなしていた。

測点④で得られた岩心は y 軸と z 軸のなす面に一致した縦き裂が観察された。

3. 3 き裂の性状に関する弾性波を中心とした測定

3. 3. 1 測定項目

坑道周辺岩盤の壁面上のき裂の性状を明らかにするために、昨年度は、坑道壁面に $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ の測定領域を設定し、この領域内の開口き裂を測定対象とした。これに対して、今年度は坑道壁面上に坑道を一周するように測線を設定し、この線上を切る開口き裂を測定対象にした。そして、各き裂について、長さ、角度、開口量、および、き裂深さ、き裂と測定面のなす角を計測した。

また、坑壁から奥に向かう岩盤内の弾性波速度の分布を測定した。

3. 3. 2 坑道周辺岩盤の壁面上の開口き裂の性状の計測方法

坑道を一周するように設定した測線上の開口き裂の総数は12本であった(図-3-5、6)。各々について、油性マジックで印をつけ存在位置を明確にさせた後、測定を行った。一つのき裂の計測が終了する度に、それを確認する目的で、き裂にカラスプレーを吹き付けた。

計測は次の要領で行った。

1) 坑壁表面上のき裂長さはスチールテープ、測線とき裂のなす角度は分度器で計った。

- 2) 開口幅はCCDカメラ(100倍の対物レンズ付き)で撮影しビデオテープに記録し、坑外で影像をモニタ画面に出して計測した。
- 3) き裂の深さとき裂と測定面のなす角は、弾性波の初動極性の変化を利用した方法で測定した。

3. 3. 3 坑道周辺岩盤の壁面上の開口き裂の性状の計測結果

(1) き裂の開口幅 t

図-3-7~13は、CCDカメラで撮影した画像のカラーコピーと、モニター画面のスケッチ例である。岩盤表面には凹凸がある。一方、カメラの焦点深度は浅い。このため、き裂の開口部は奥に光が届かず黒い像になって写る。また、全長に亘るき裂の鮮明な画像を得るのは困難で、画像はやや不鮮明になっている。ただし、モニターの画像はカラーコピーよりも数段見鮮明であり、測定はモニター画面で行った。

き裂の開口状態は次のような2つのグループに分類できる。

- 1) 開口幅がほぼ一様になっている場合：き裂2、3、4が典型例である。き裂1の画面両端のき裂幅は、図-3-7に示すように、ほぼ等しい。中央では表面の岩片が剥離しており、その影響で幅が大きいようにみえる。したがって、き裂1も幅が一様なグループに入る。
- 2) 開口幅が次第に大きくなっている場合：き裂10が典型例で(図-3-11~13)、き裂の端部が観察されていると考えられる。

要するに、開口き裂はほぼ一定の開口幅を持っていると考えてよい。このようにして求めたき裂の開口幅は、図-3-14に示すように、大きさが1mm以上の例は2つしかなく、残りは1mm以下になっている。小さいものほど多く分布している。

(2) 測線とき裂のなす角度 η

測線から時計回りに測った角度 η は、図-3-15に示すように、 0° 前後のものと 180° 前後のものが多い。

(3) 表面上のき裂長さ L

図-3-16に示すように、ほとんどが40cm以下で、短いものほど多く分布している。

(4) き裂深さ d

き裂深さ d は、図-3-17に示すように、ほとんどが20cm以下である。

(5) 壁面とき裂のなす角 γ (図3参照)

角 γ は、図-3-17に示すように、 0° と 90° 前後のものが多い。前者は浮き石の一部を形成している。この範疇に入るき裂は、その開口幅が大きいという特徴があり、幅が1mm以上のものはいずれもこのグループに入る。

各計測値間の相関について述べる。き裂長さ L と開口量 t 、き裂長さ L とき裂深さ d 、開口量 t とき裂深さ d の間には正の相関がみられる(図-3-1.8~2)。また、き裂角度 γ とき裂深さ d の間には負の相関がみられる(図-3-2.1)。

計測した各き裂について、角度 α 、 γ 等から、き裂面の法線の向きを求め下半球にステレオ投影した(図-3-2.2)。昨年度の計測結果と同様に、き裂は走向、傾斜が類似した3つのグループA、B、Cに分類できる。グループAは坑道壁面にほぼ平行、Bはほぼ水平、Cは坑道軸にほぼ垂直であり、これらは互いにほぼ直交している。これらは現場で観察された互いに直交した3系統の石目に対応するものと思われる。

3. 3. 4 ボアホールを利用した弾性波速度の計測と結果

今年度は次のような方法を採用した(図-3-2.3)。発振子はボアホール口元の岩盤表面に固定し、ここでインパルスハンマーを岩盤表面に押しつけ、頭部を市販のハンマーで打撃する方法によって発振する。受振子はボアホール内の任意の地点にパイプで送り込む。所定の位置に達したならば、防水処理を施したセンサー(加速度ピックアップ: リオン社製 PV-85、周波数帯域 1~7000Hz)を、ピストンで孔壁に押しつける(図-3-2.4)。

発振波形と受振波形の立ち上がりの時間差から伝播時間を求め、図-3-2.5に示す走時曲線を描いた。この曲線より弾性波速度は、深度12cm~30cm、55cm~70cm、85cm~100cmで約4.0km/sとなっている。他の部分はこれよりもいくぶん遅くなっている。これは、き裂等の影響によるものと解釈できる。なお、0cm~12cmの部分はデータ数も少なく、測定はあまり信頼できないため、破線で示した。

3. 4 まとめ

- 1)地圧測定については、今年度より、下向きの測定が可能な孔壁変形法を開発することにし、その現場適用試験を行った。測定自体は、接着作業がないだけ、能率よく作業を進められる見通しを得た。
- 2)岩盤表面に現れた開口き裂の性状を明らかにする測定をした。かかるき裂の大部分は、坑道の掘削に伴って発生したもので、深度が浅い。その深度を計るために開発した弾性波の初動極性の変化を利用する方法は有用であることがわかった。
- 3)弾性波速度分布から、き裂の密度に関する情報が得られるといわれている。今年度実施した測定で得られた弾性波分布は、この可能性を示唆するものであるといえよう。

3. 6 今後の課題

今後の課題を箇条書きに列挙する。

- 1)地圧測定に関しては、孔壁変形法により3次元応力を決定するためのセンサーの開発が遅れている。測定精度が高く、現場作業性に優れたセンサーの開発を急ぐ必要がある。
- 2)地圧を下向きに測定する場合、ボーリング機械の設置法が問題になる。一般に、下盤はずりが堆積し、機械が固定しにくい。この問題は現場との検討を経て解決する必要がある。
- 3)岩盤表面に現れた開口き裂の性状を明らかにする測定技術は、実用化の目処が付いたといえる。しかし、かかるき裂の大部分は、坑道の掘削に伴って発生したものである。地層科学的に重要なき裂は、閉じていたり、開口部が充填された(天然の)不連続面である。この測定に次の技術開発の目標を設定しなければならない。弾性波速度分布の測定は、この要請を満たせる可能性がある。このためには、孔内で弾性波の発振-受振をする測定システムが必要になる。孔

内で剛性の分布を計る孔内載荷試験、硬さ試験についても検討を進める必要がある。

表 - 3 - 1 各測点における測定結果

測点	σ_1	σ_2	θ°
①	9.3	-1.1	113.8
②	-12.4	-17.1	71.7
③	-5.3	-13.0	61.9

備考 θ (最大主応力方向) は x 軸から反時計回りに測った σ_1 の向き
地圧応力は引張を正とした。

地圧応力は、孔径変化量 U_1 、 U_2 、 U_3 を基に以下の式を用いて評価した。なお、 U_2 、 U_3 は、基準となる方向に対して時計回りに 60° 、 120° 傾いた方向の孔径変化量である。 U_1 は基準方向の孔径変化量である。

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{1}{1-\nu^2} \cdot \frac{E}{3d} (U_1 + U_2 + U_3)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{1}{1-\nu^2} \cdot \frac{\sqrt{2}E}{6d} [(U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_1 - U_3)^2]^{1/2}$$

$$\tan 2\theta = -\frac{\sqrt{3}(U_2 - U_3)}{2U_1 - U_2 - U_3}$$

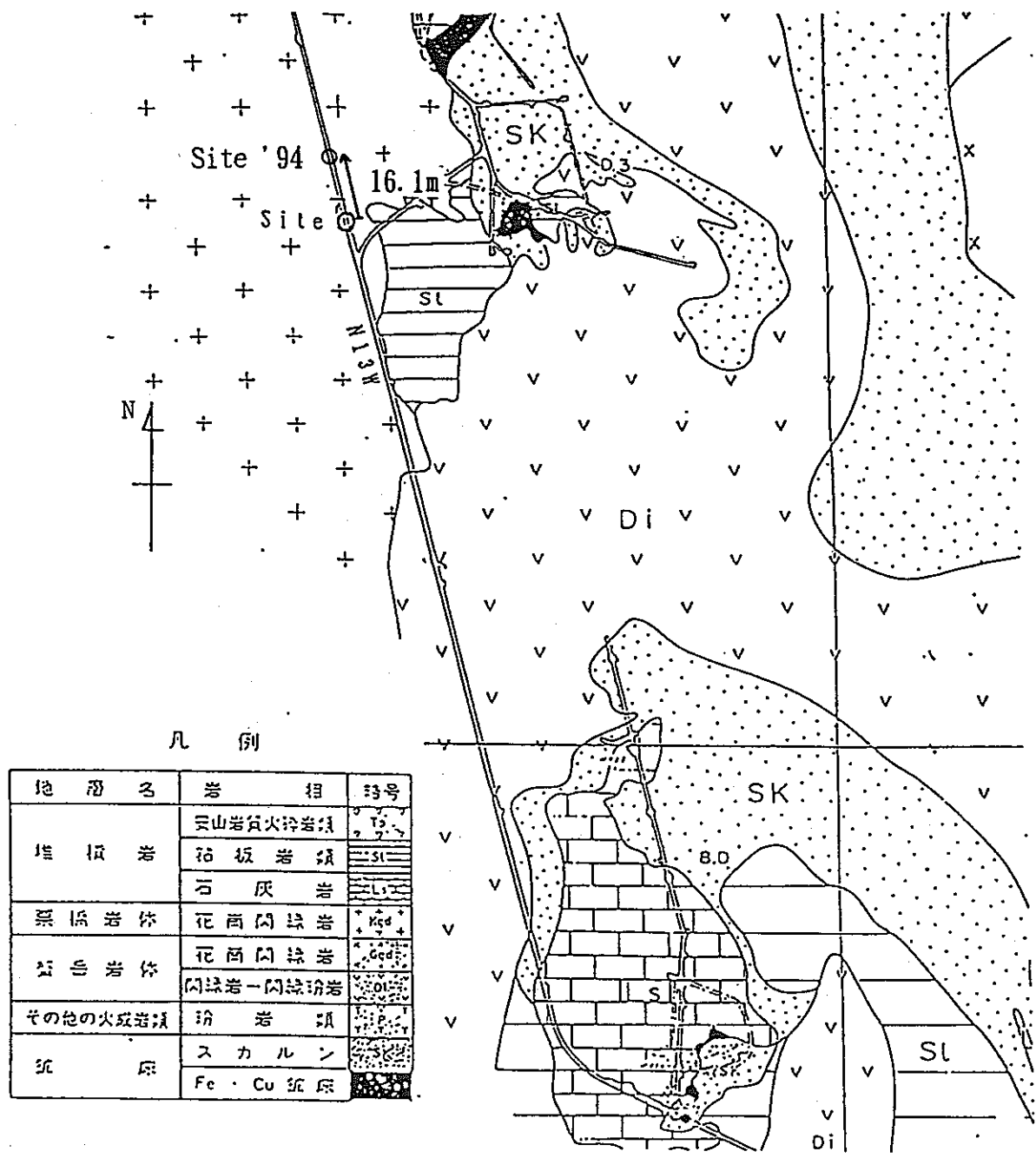


図 - 3 - 1 計測現場周辺の地質図。

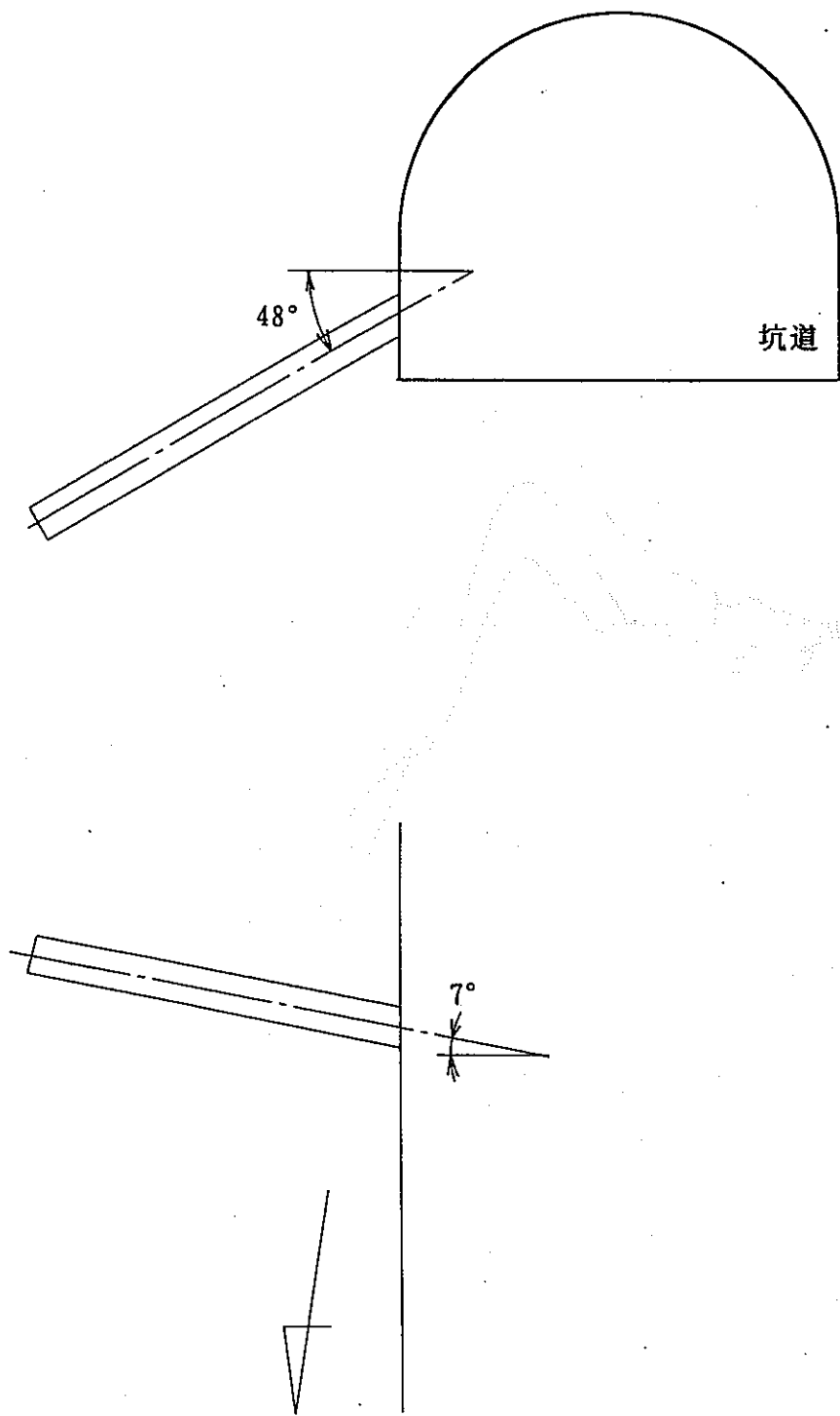


図 - 3 - 2 計測孔（最初、地圧の測定に、次に、弾性波分布の測定に使用された）。（上）断面図、（下）平面図

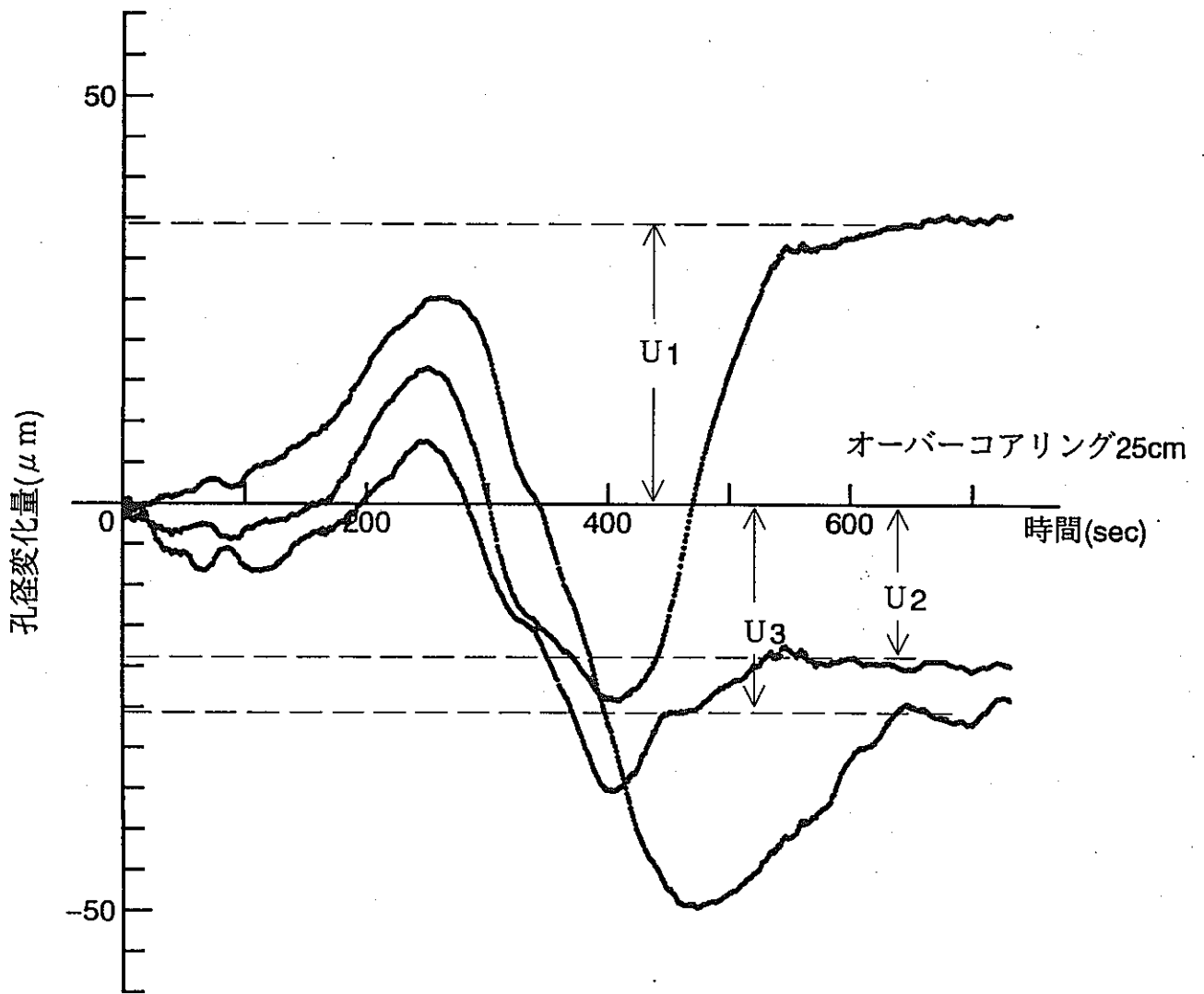


図 - 3 - 3 測点①におけるオーバーコアリングに伴う3方向の孔径変化

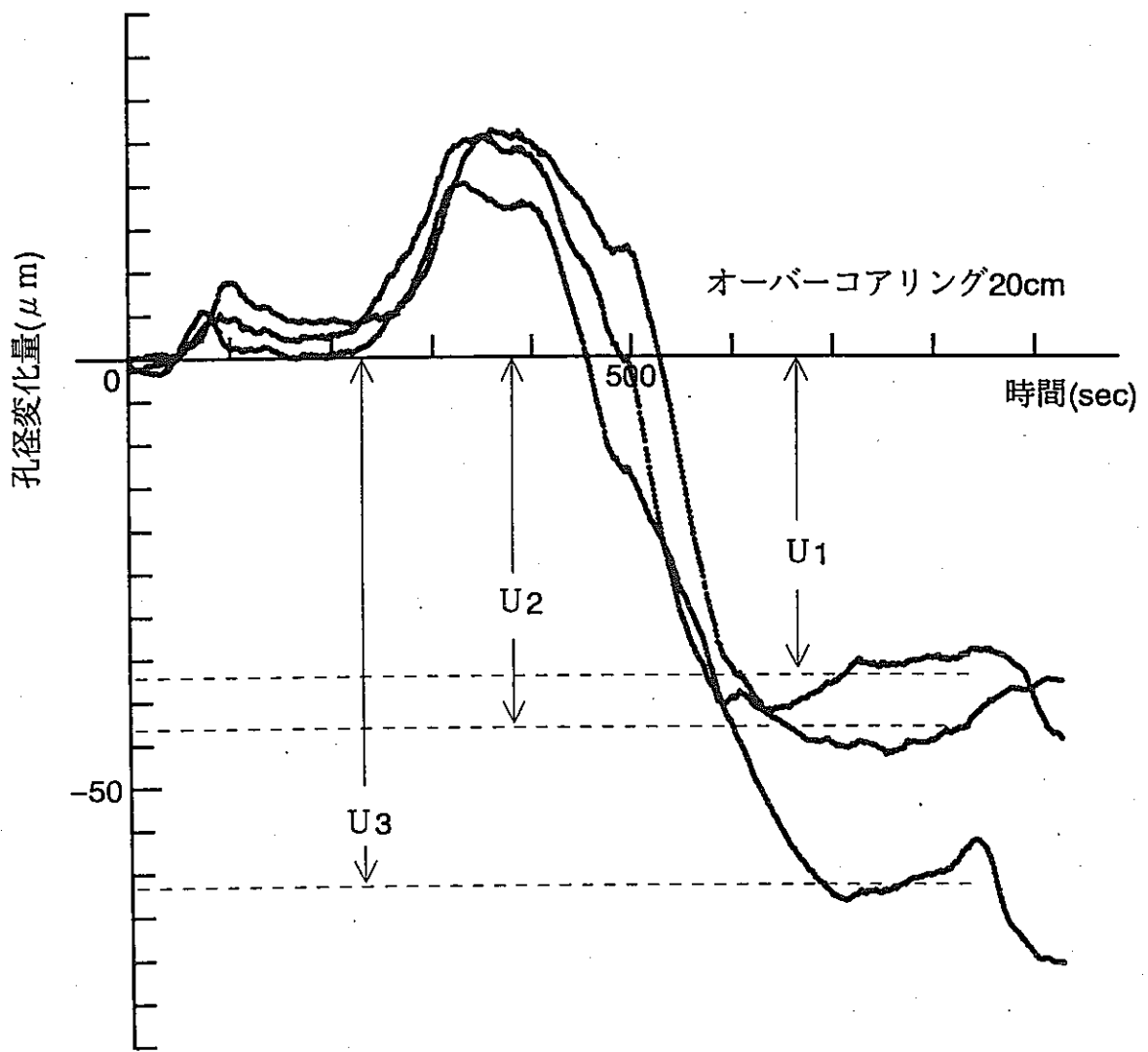


図-3-4 測点②におけるオーバーコアリングに伴う3方向の孔径変化

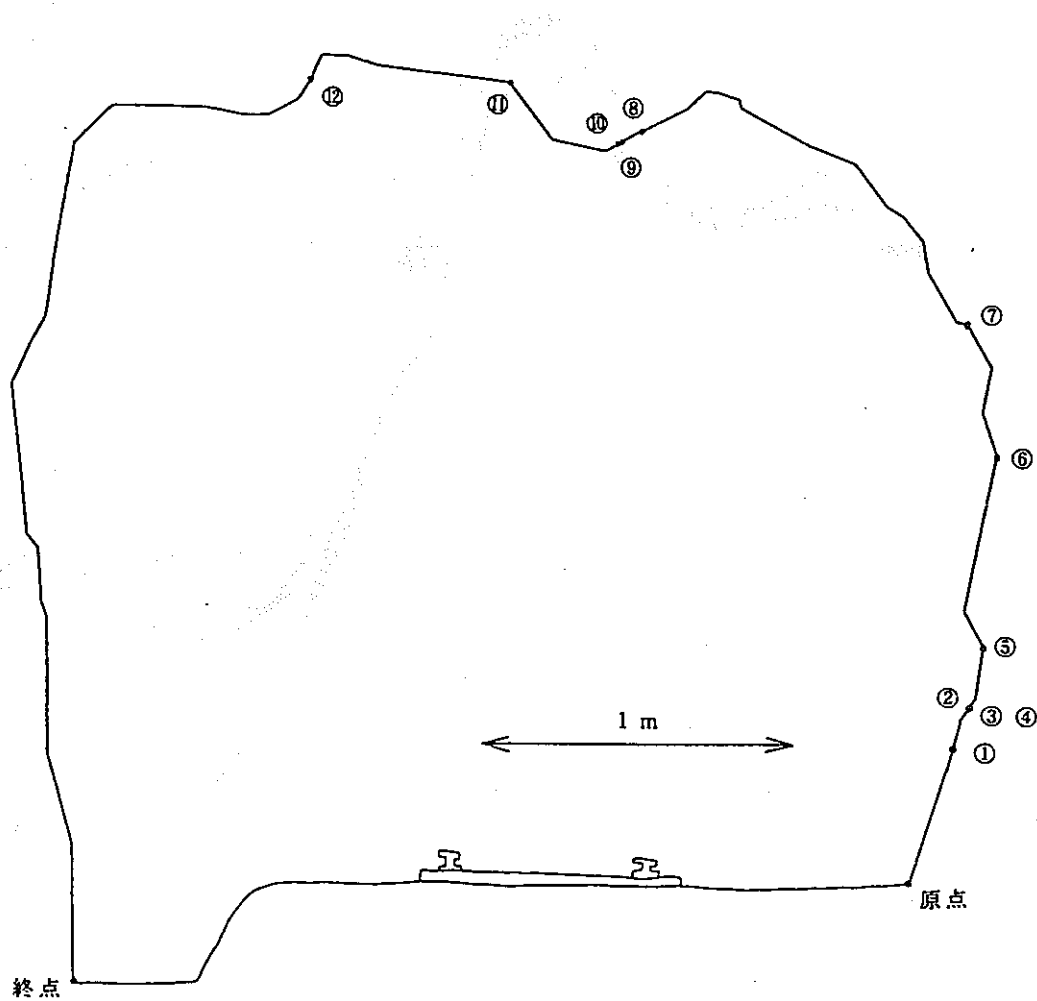


図 - 3 - 5 開口き裂を測定した測線の（坑道奥に向かって見た）断面図。

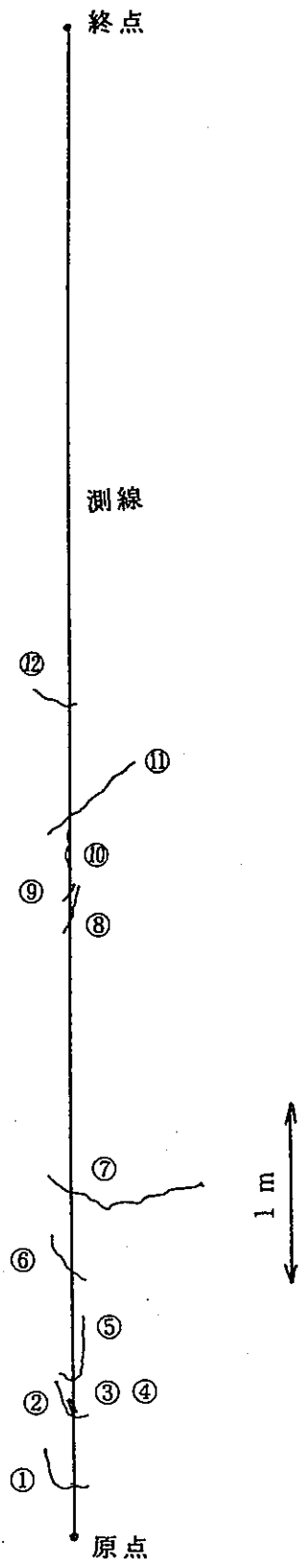


図 - 3 - 6 測線の展開図。測線上に現れた開口き裂が示されている。

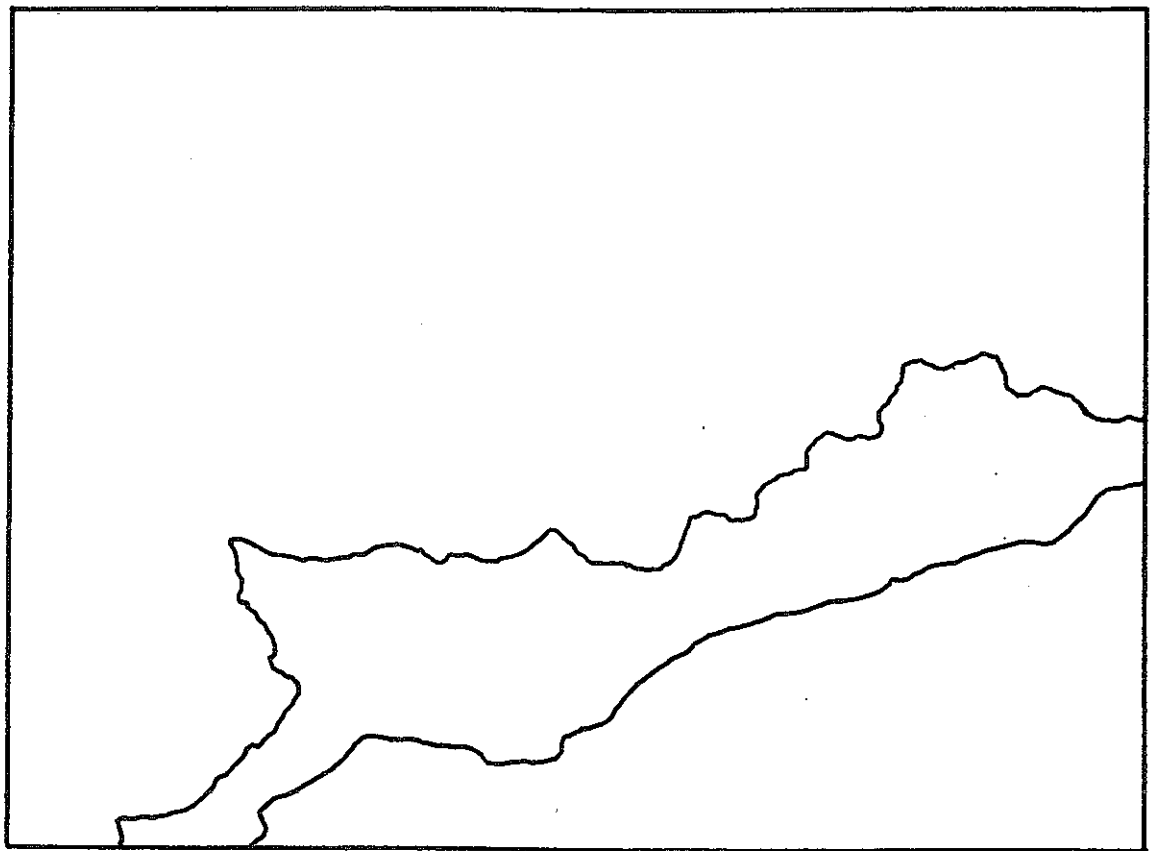
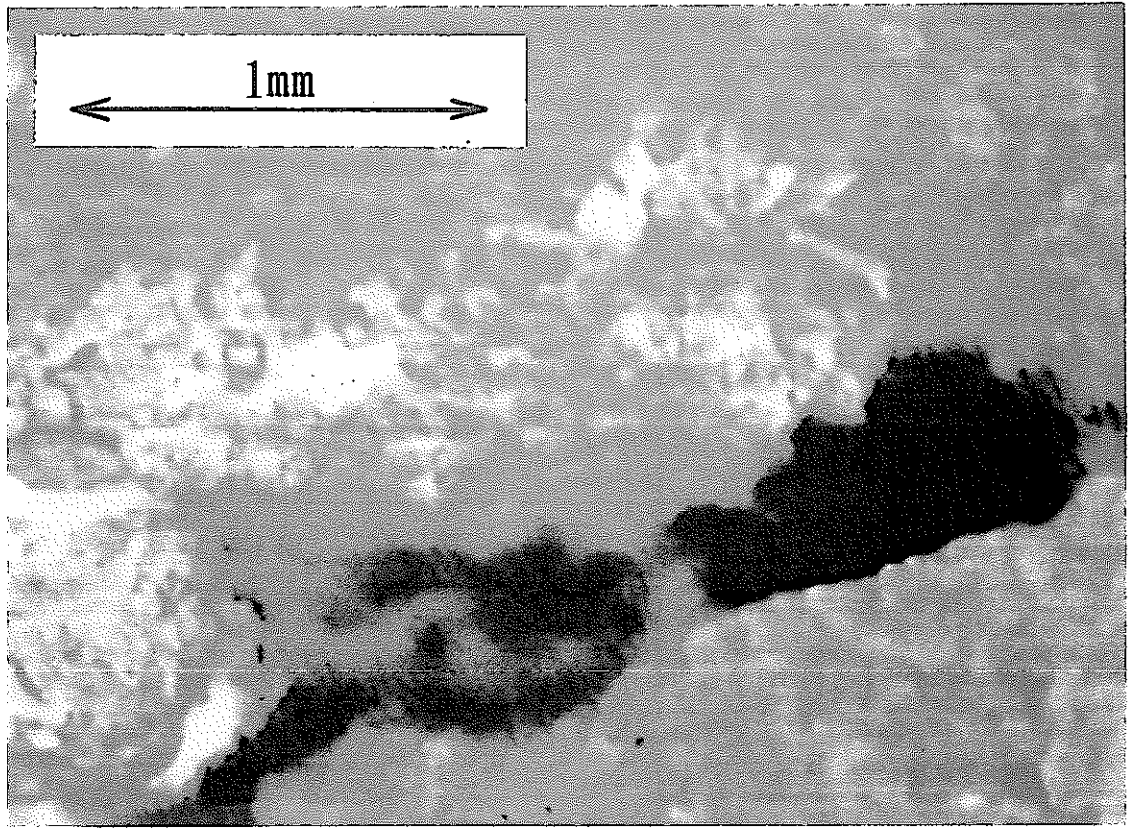


図 - 3 - 7 CCDカメラで撮影されたき裂1の画像(上)とスケッチ(下)

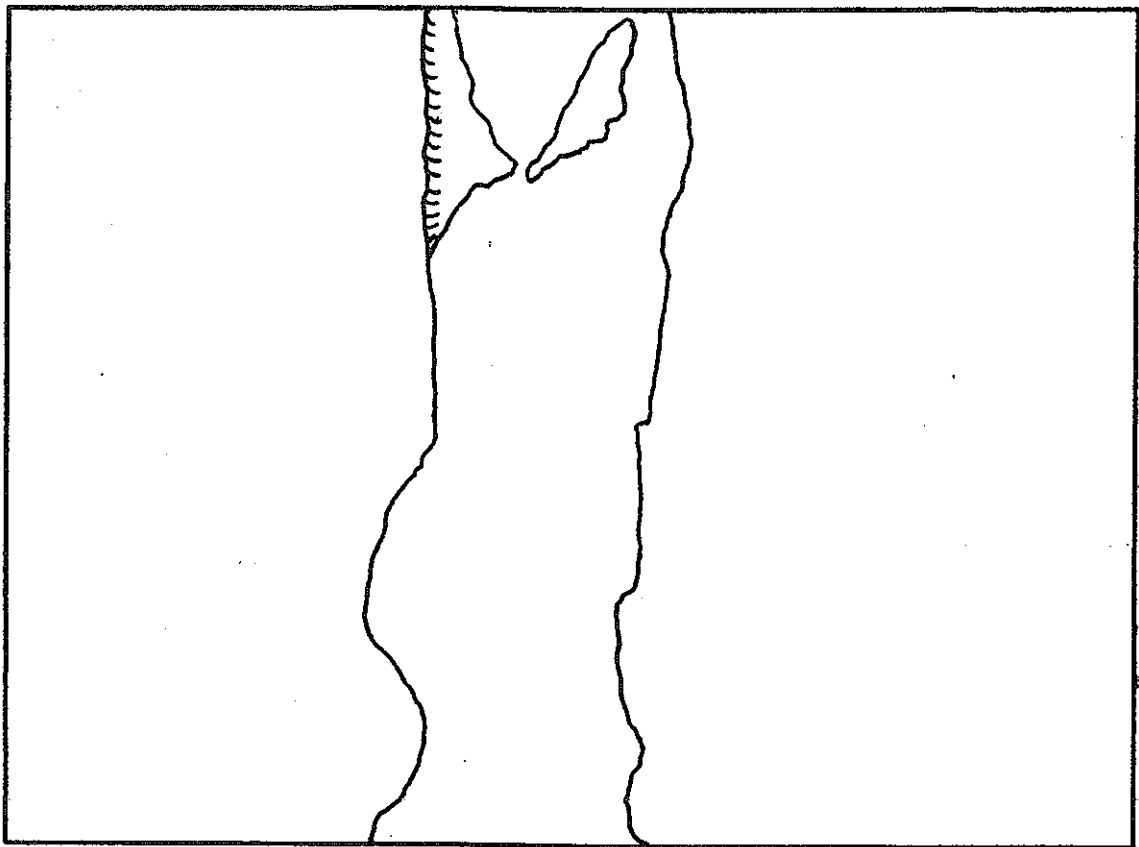
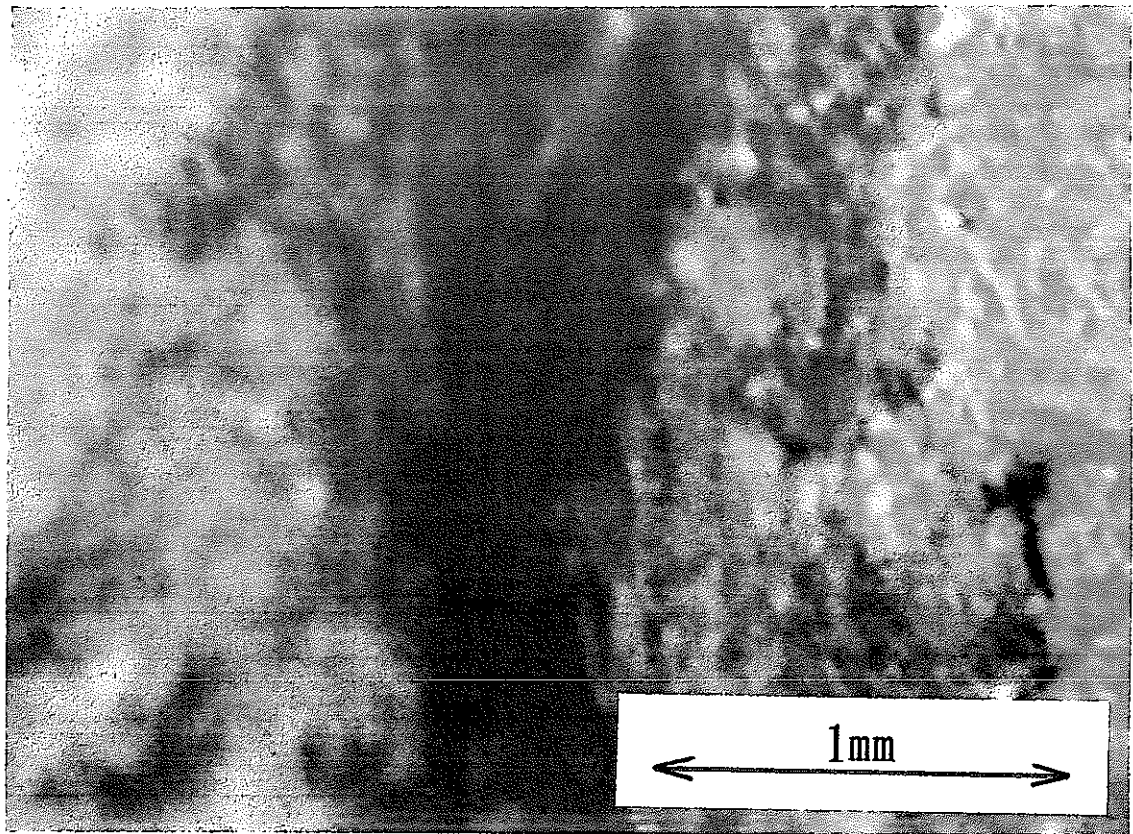


図 - 3 - 8 CCDカメラで撮影されたき裂2の画像(上)とスケッチ(下)

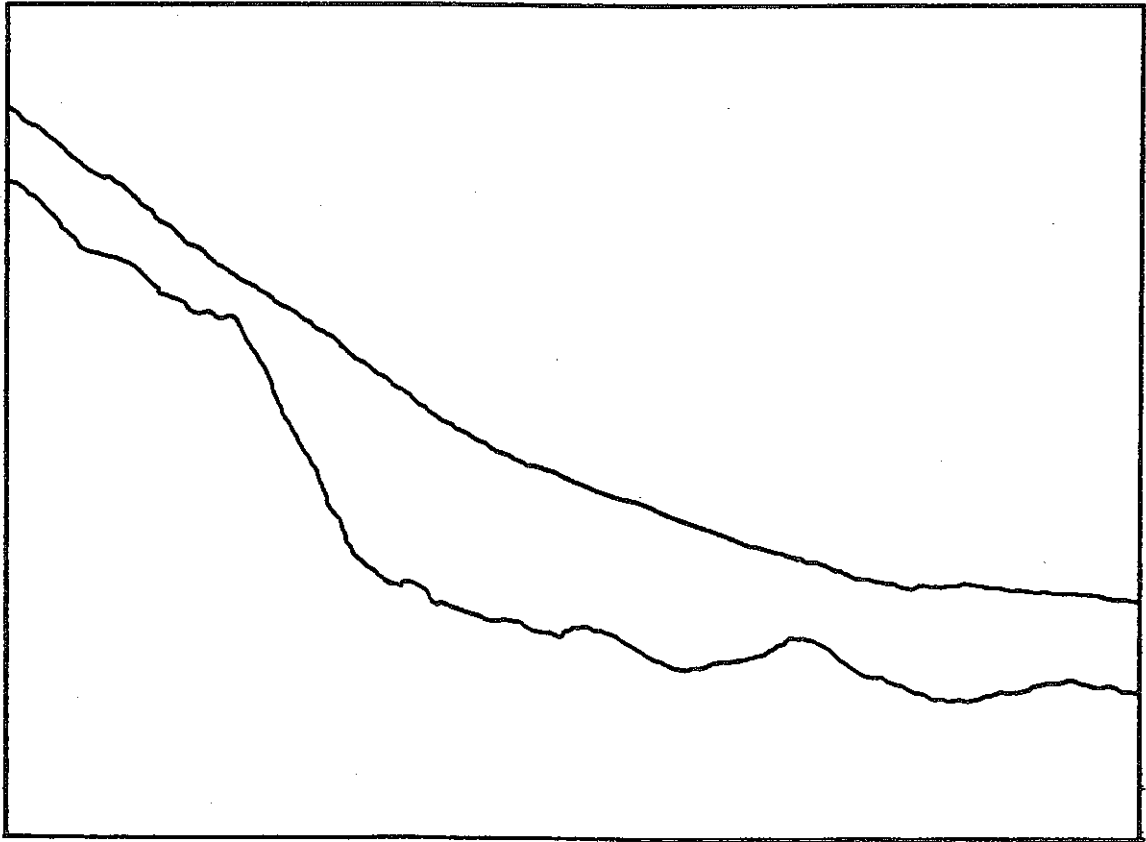
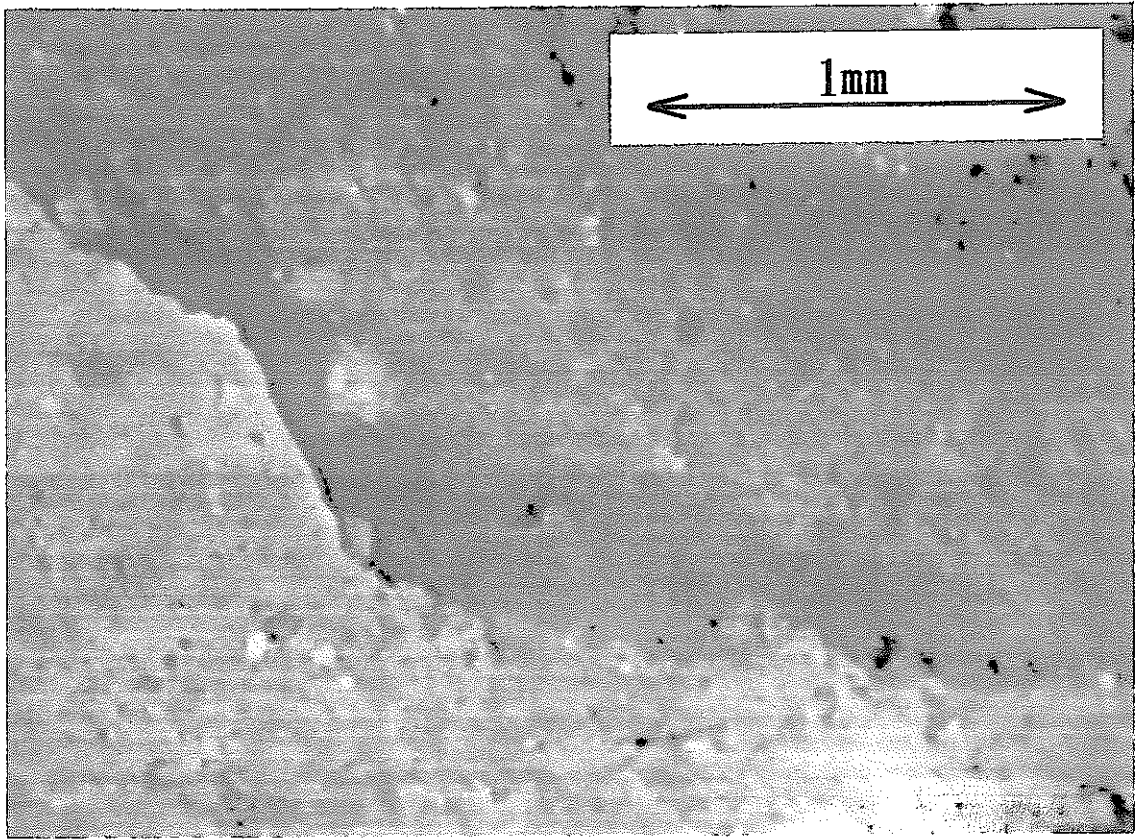


図 - 3 - 9 CCDカメラで撮影されたき裂3の画像(上)とスケッチ(下)

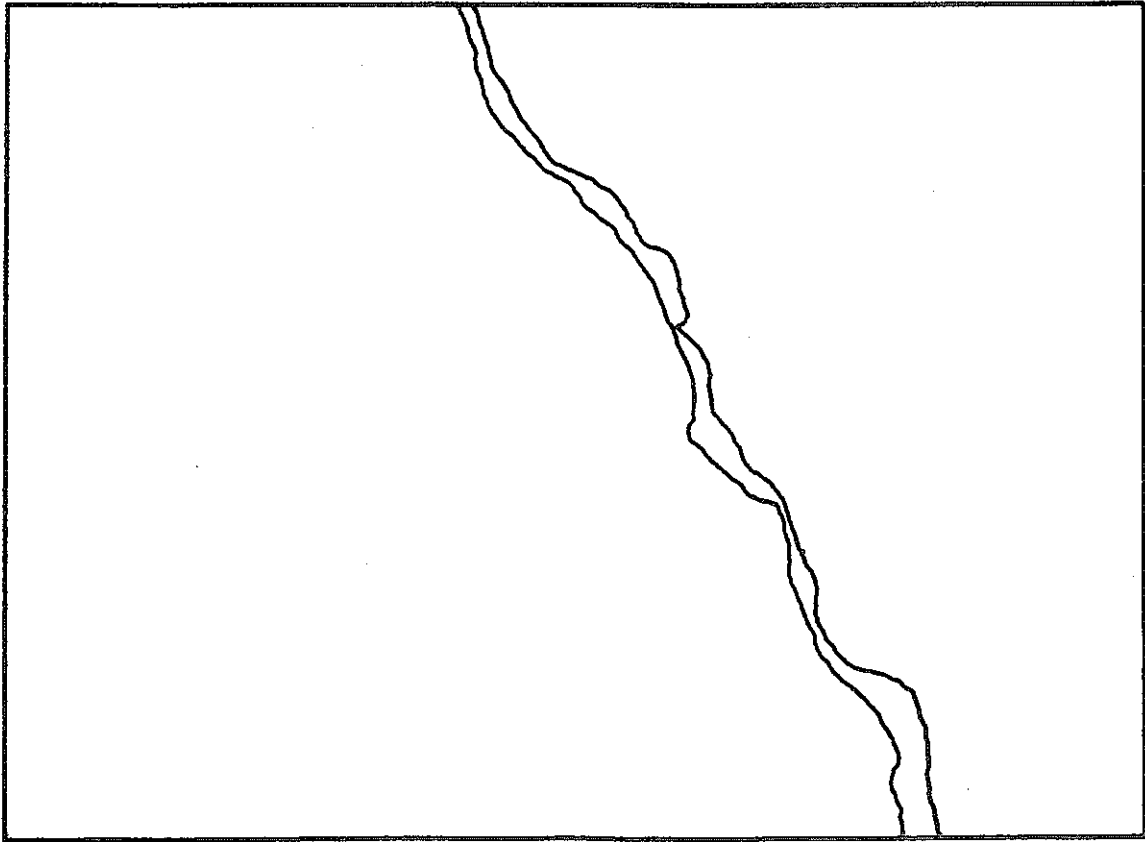
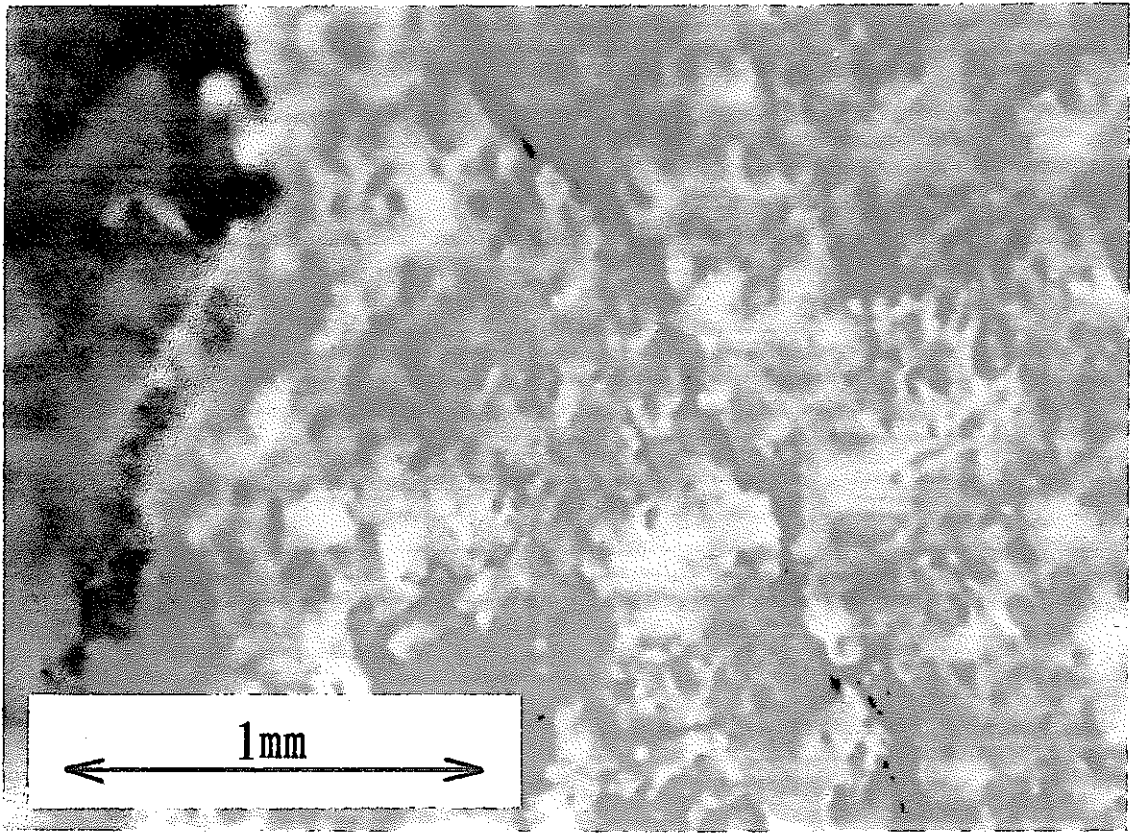


図 - 3 - 1 0 C C D カメラで撮影されたき裂 4 の画像 (上) とスケッチ (下)

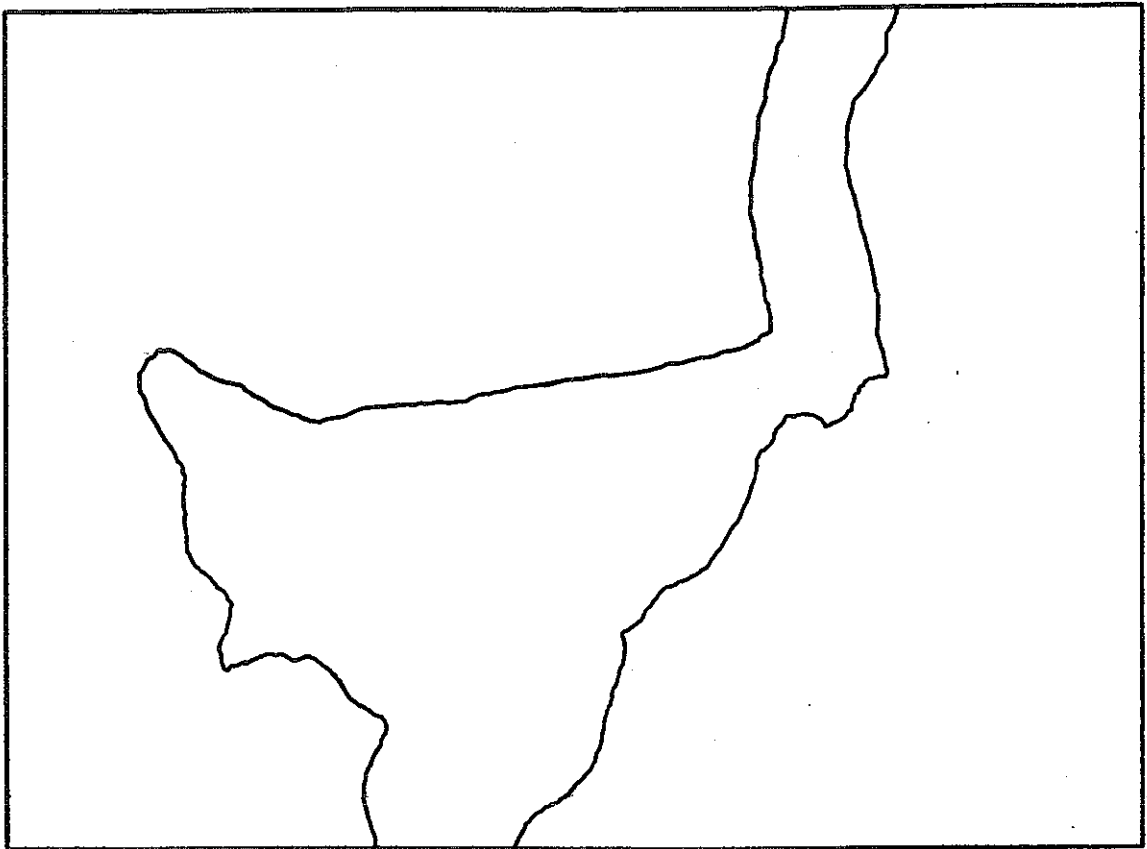
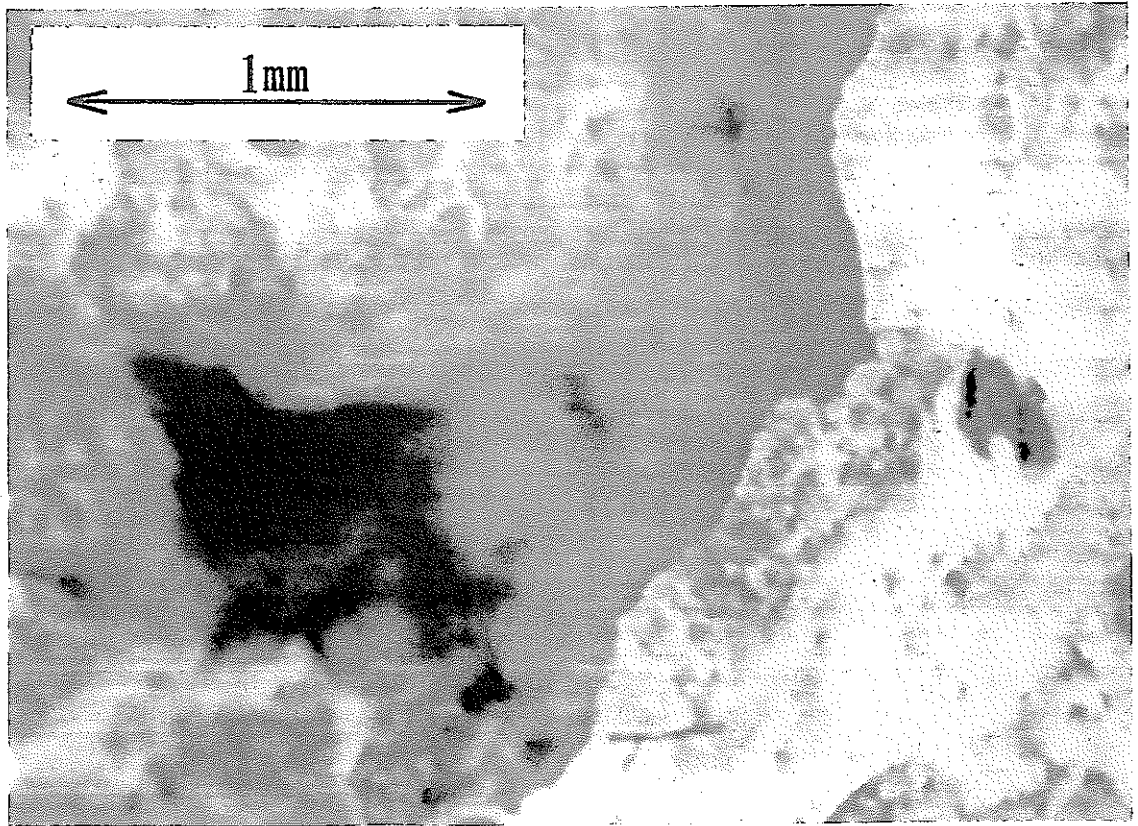


図-3-11 CCDカメラで撮影されたき裂10の画像(上)とスケッチ(下)
(き裂10の像は図11~13の3毎に分かれて示されている)

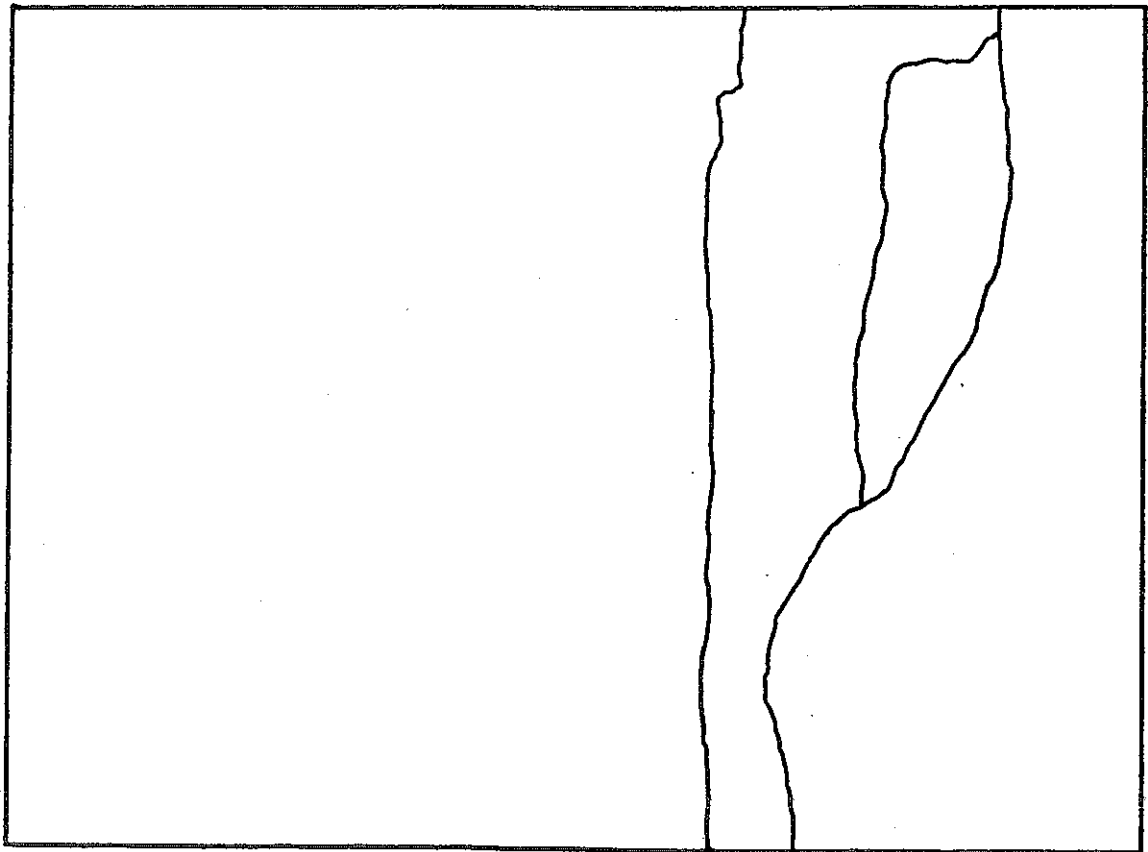
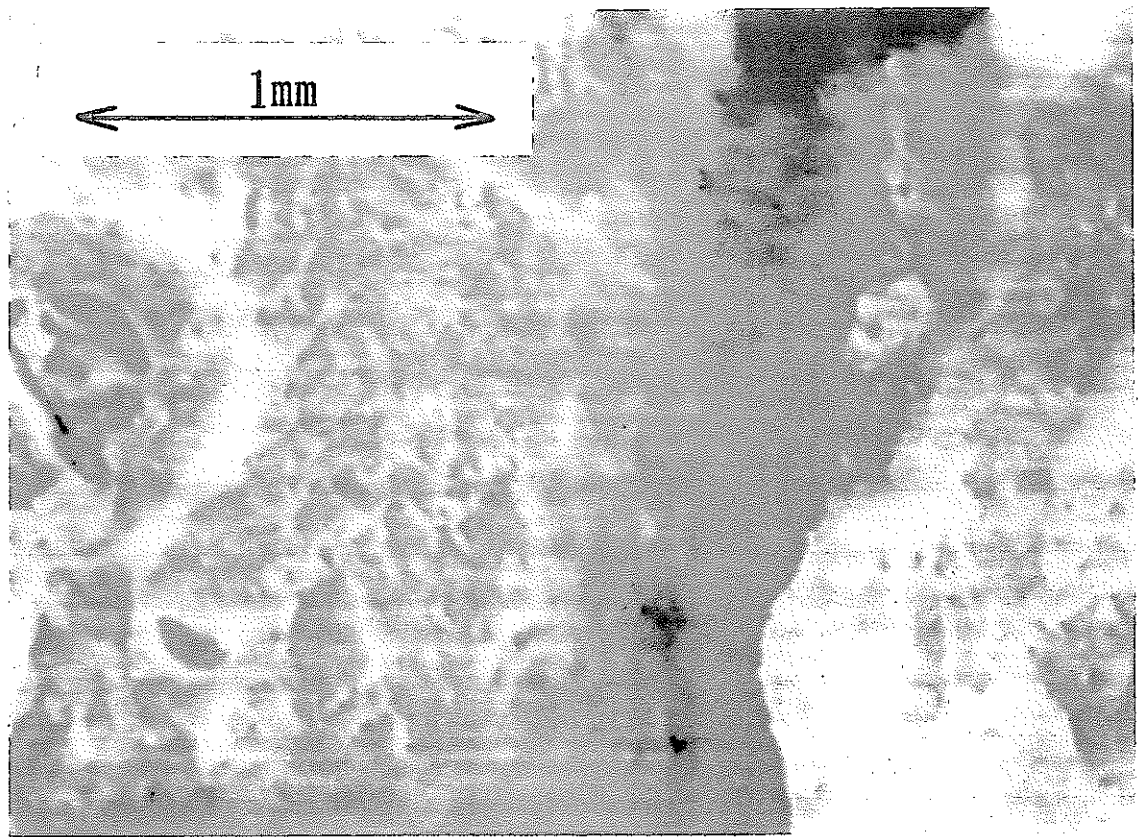


図-3-12 CCDカメラで撮影されたき裂10の画像(上)とスケッチ(下)

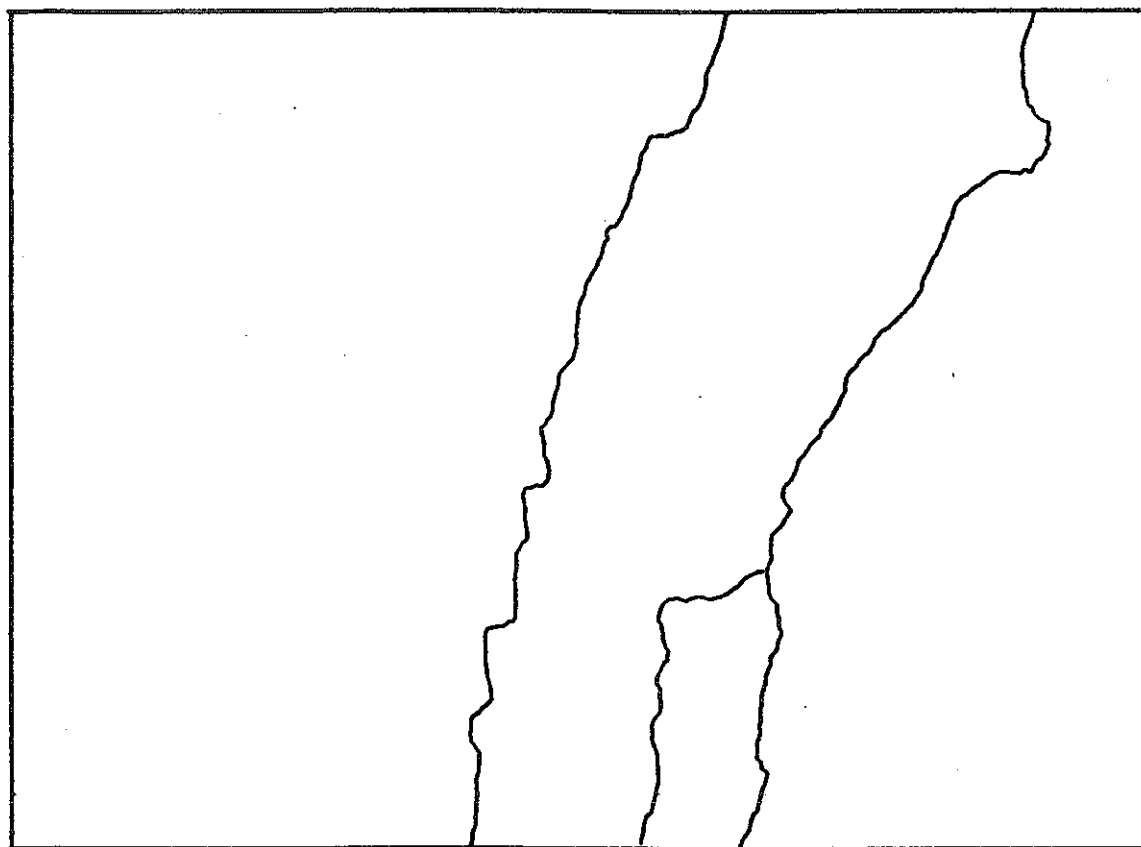
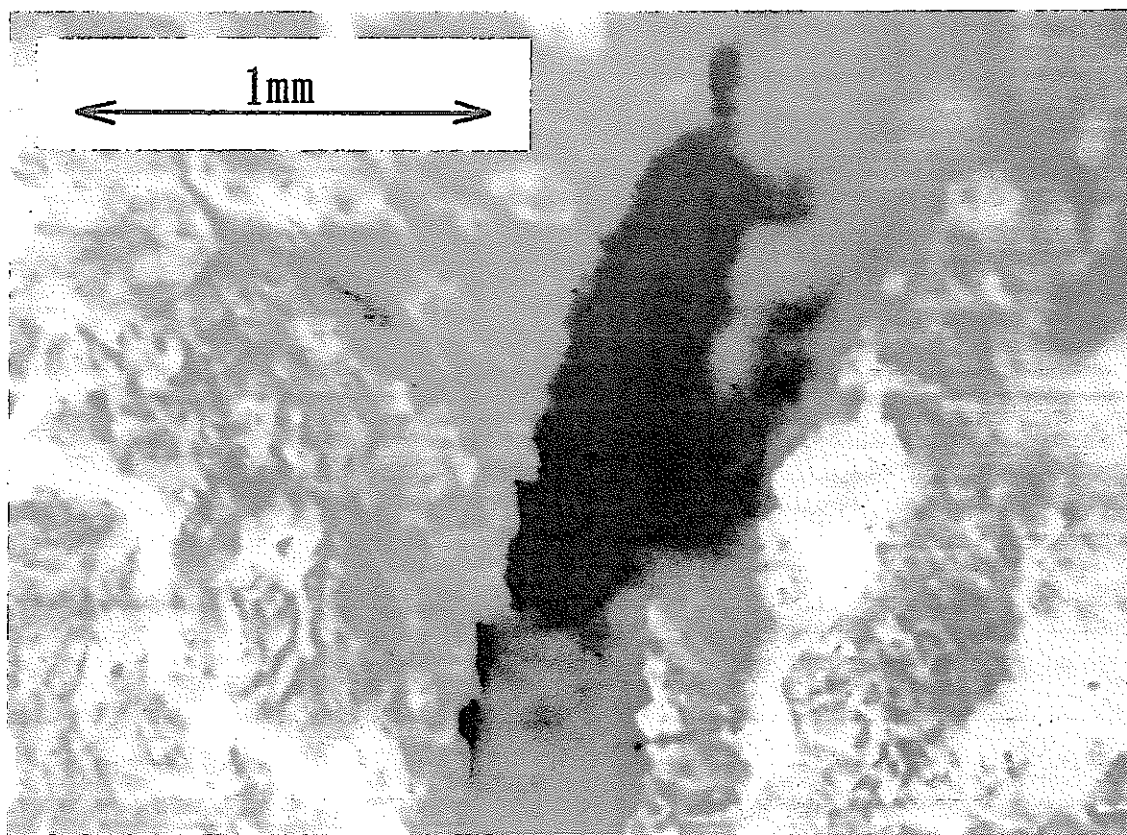


図 - 3 - 1 3 C C D カメラで撮影されたき裂 1 0 の画像 (上) とスケッチ (下)

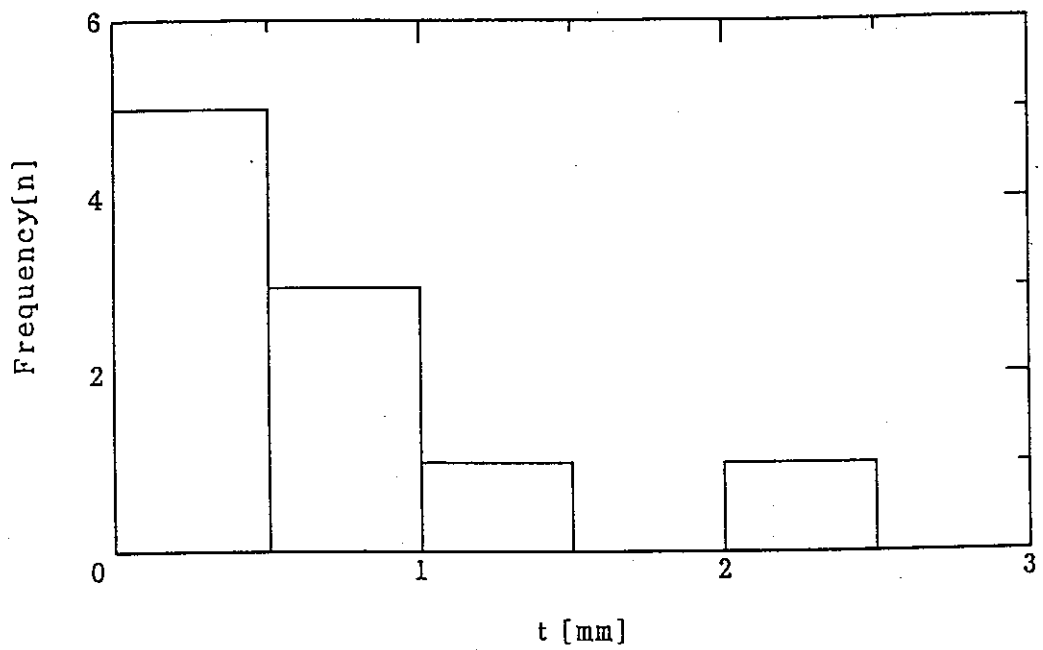


図 - 3 - 1 4 き裂の開口量 t の度数分布

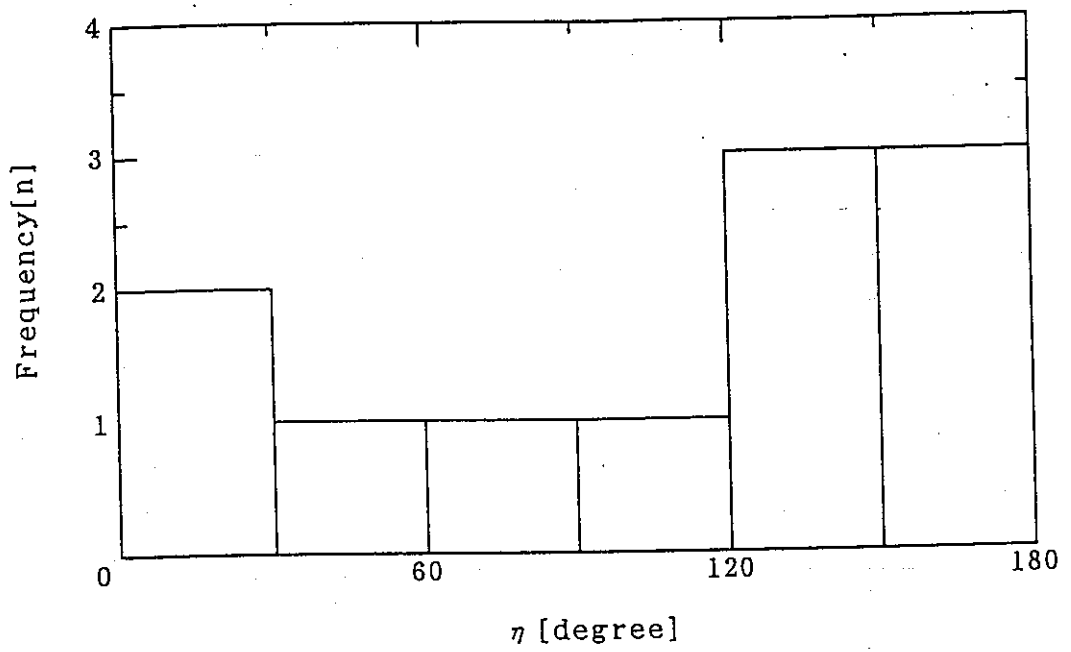


図 - 3 - 1 5 き裂の測線に対する角度 η の度数分布

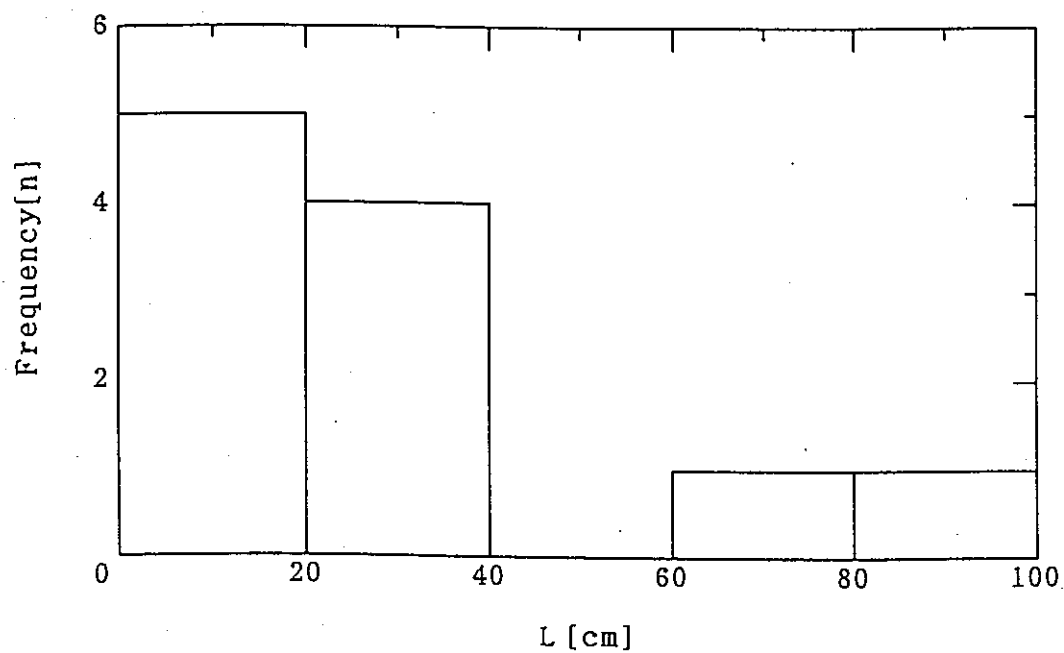


図 - 3 - 1 6 き裂長さ L の度数分布

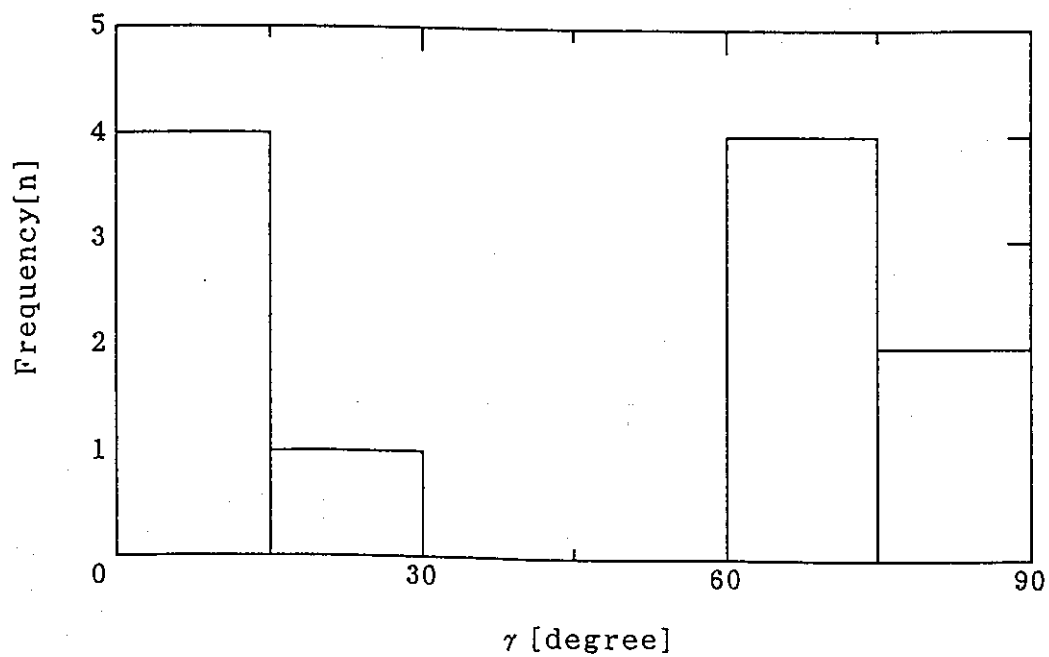


図 - 3 - 1 7 き裂の岩盤表面に対する角度 γ の度数分布

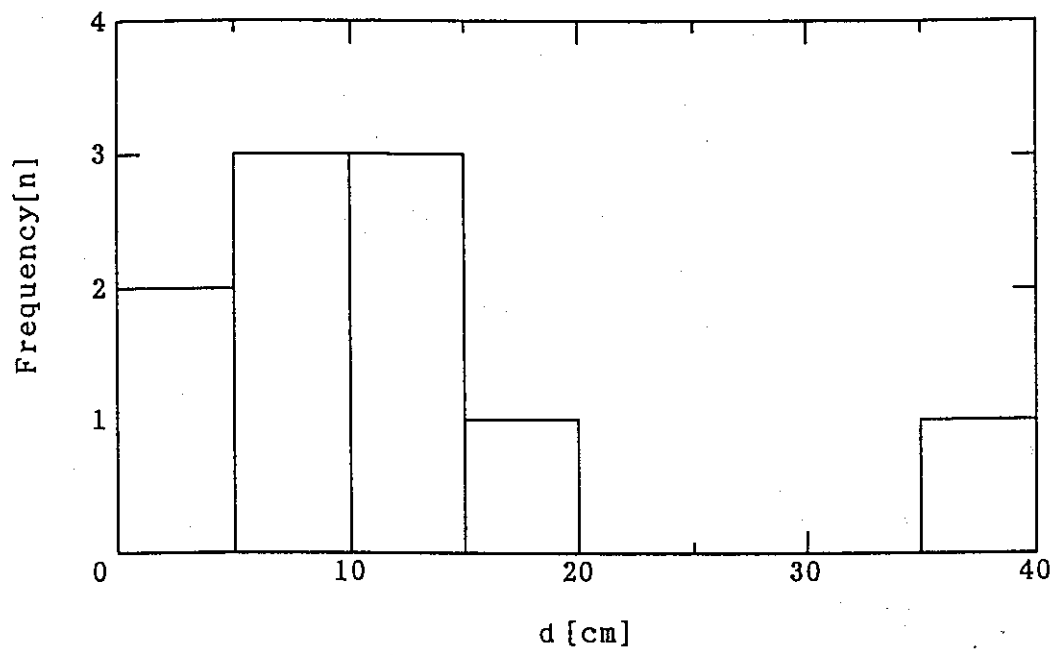


図 - 3 - 1 8 き裂深さ d の度数分布

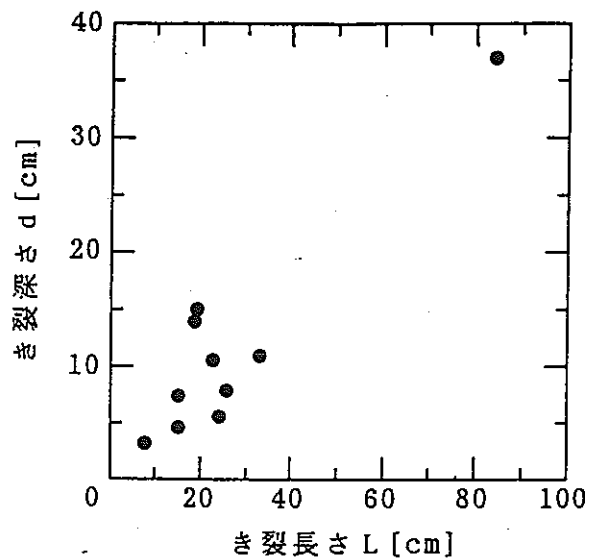
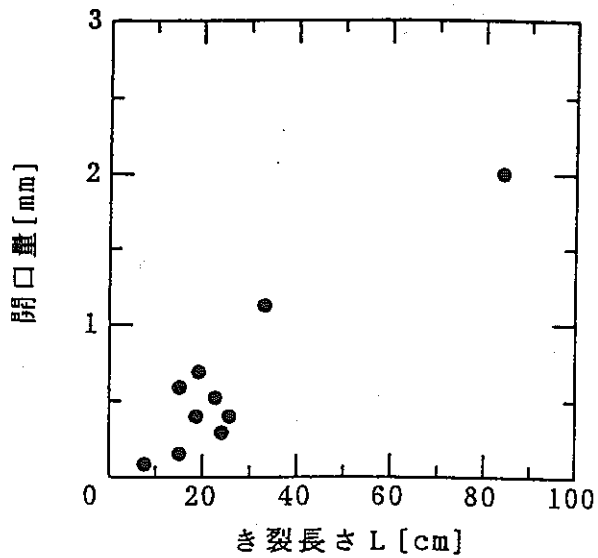


図-3-19 長さ L と開口量 t の相関 図-3-20 長さ L と深さ d の相関

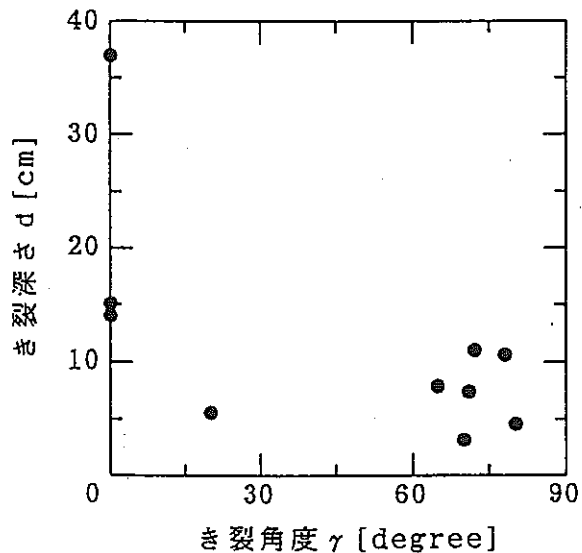
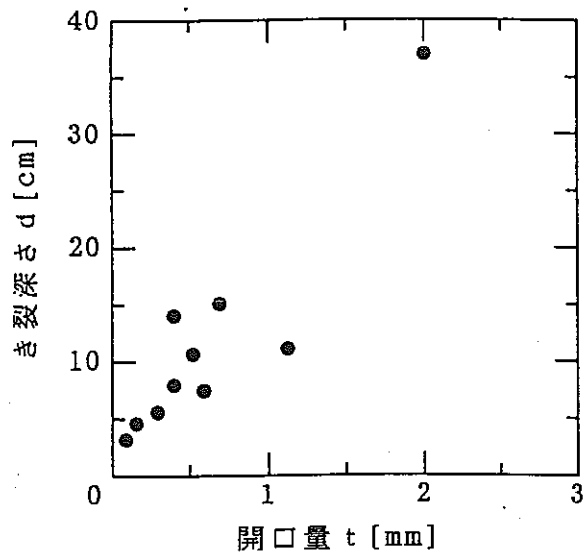


図-3-21 開口量 t と深さ d の相関 図-3-22 角度 γ と深さ d の相関

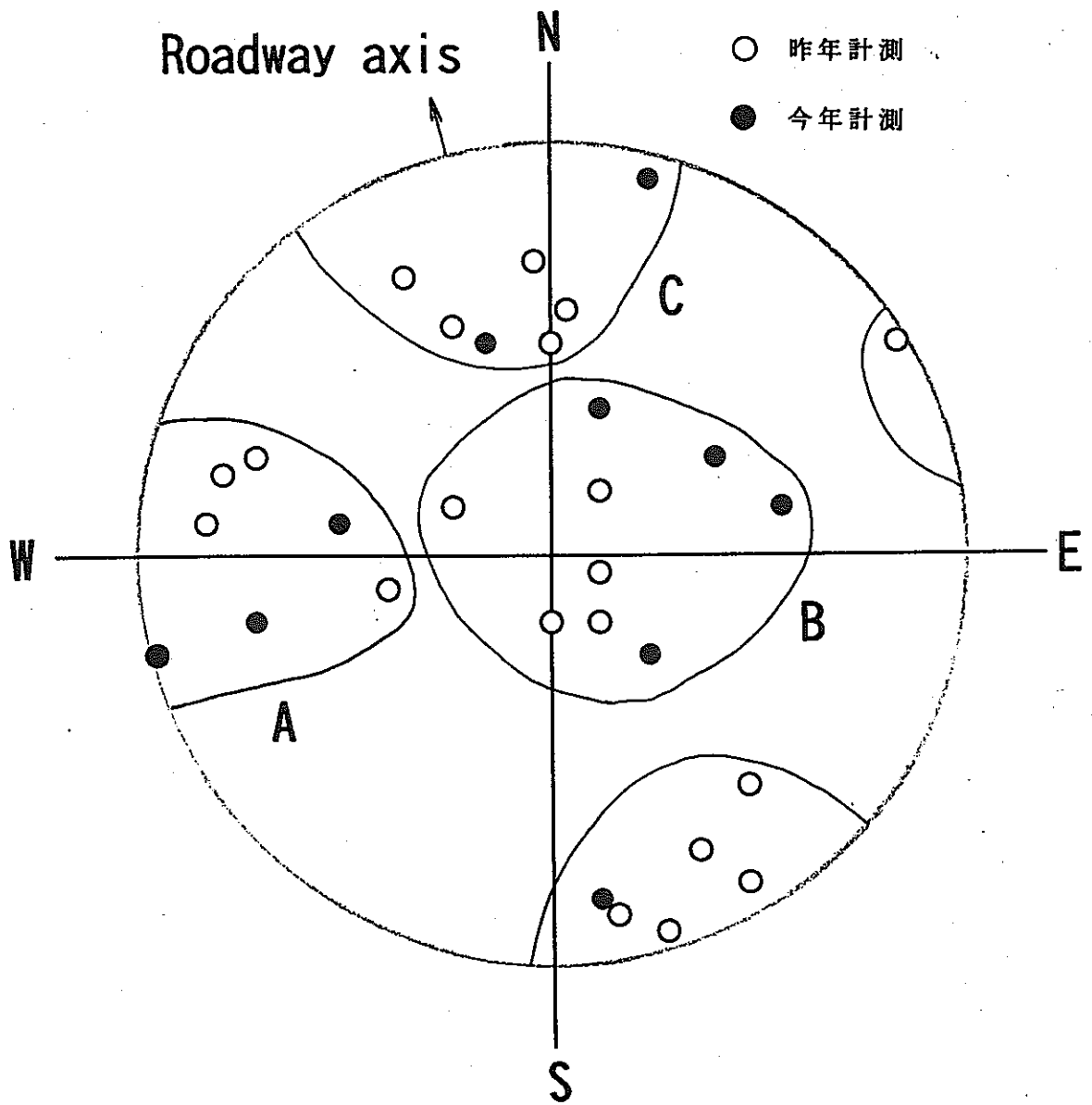


図 - 3 - 2 3 き裂の法線のなす方向の分布 (下半球ステレオ投影)

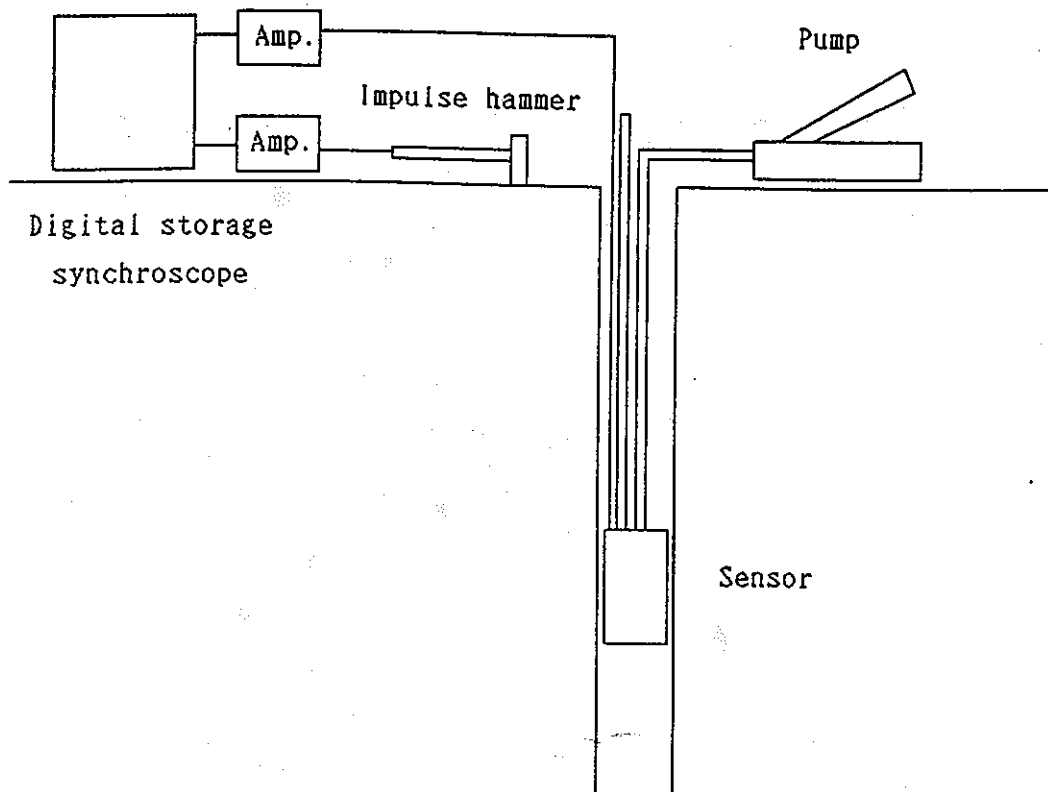


図 - 3 - 2 4 弾性波速度の計測システム

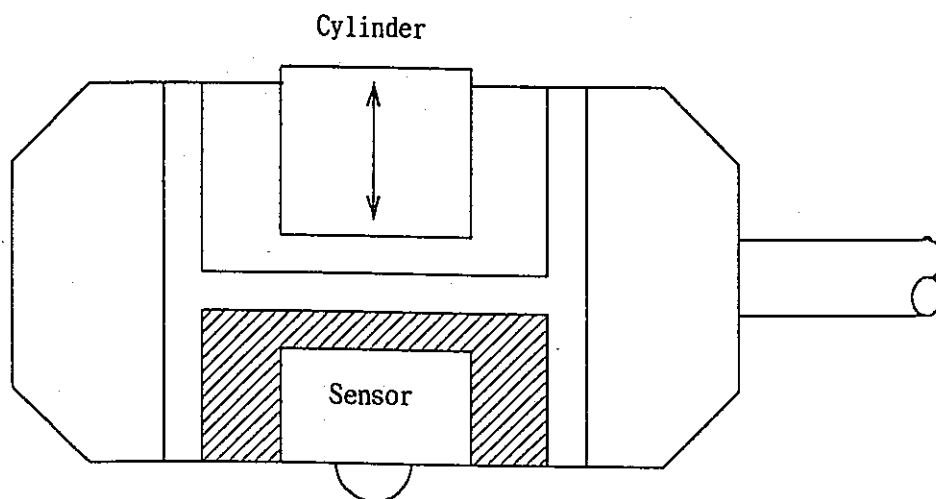


図 - 3 - 2 5 受信子の概念図

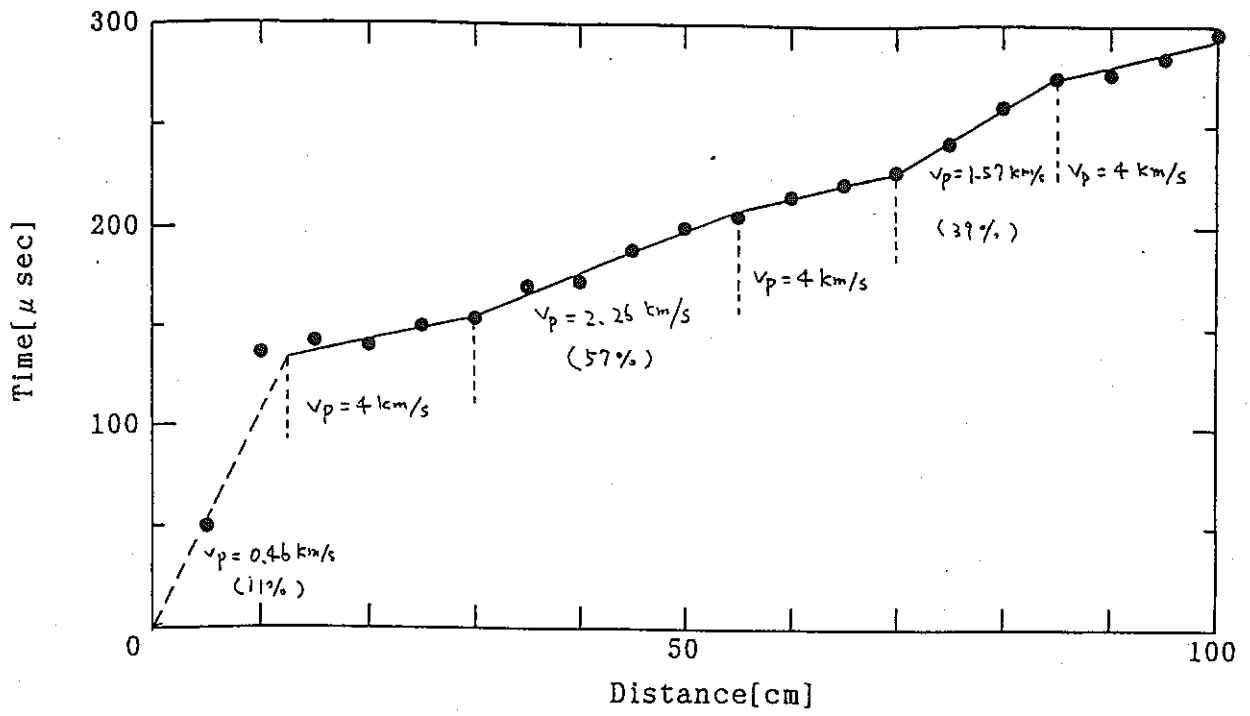


図 - 3 - 2 6 弾性波の走時曲線

4. 単一不連続面の Shear-flow coupling 特性試験

4. 1 はじめに

現場における岩盤不連続面は様々な応力状態の下でせん断履歴を受けており、これらの履歴を室内実験により推測することが、深部地下の不連続面の特性を評価するために是非必要である。しかし現場の不連続面はせん断面積、壁面強度、凹凸の形状等にばらつきがあり、またサンプルの数も限られているので各要素の定量的評価は困難である。そこで4. 2, 4. 3では、ある程度の再現性を確保するために花崗岩中に作成した人工的不連続面を用いて様々な条件下で先行履歴を与え、さらにその先行履歴を受けた試験体を用いて様々な条件下でShear-Flow Coupling実験を行った。そして先行履歴での様々なパラメータの違いにより不連続面の諸特性にどのような変化が見られるかを基礎的に調査した。注目するパラメータとして4. 2では垂直応力を、4. 3ではせん断変位を取り上げその影響度を詳しく調べた。また4. 4では、まず、現場採取の任意形状の試験体に対応できるせん断容器を開発し、現場より採取した自然の不連続面を用いて効果的に実験を行う方法を考案した。そして、Shear-Flow Coupling 実験、およびそれに並行してAE計測を行い、自然の不連続面の力学的特性と透水特性、および両者の関係を調べた。さらに、せん断前、実験終了後の不連続面の表面形状をレーザー変位計を用いて計測し、せん断履歴の凹凸表面に及ぼす影響について検討した。

4. 2 様々な垂直応力下で先行履歴を与えた人工的不連続面の Shear-flow coupling特性

4. 2. 1 Shear-Flow Coupling 実験装置

本研究で使用する Shear-Flow Coupling 実験装置は、大別して直接せん断装置部、透水加圧装置部、計測・制御装置部および不連続面作成装置部からなり、試験体に人工的な不連続面を作成し、その不連続面に垂直応力、せん断応力を任意に加えることができる。さらに、垂直応力特性、せん断特性の計測と同時にこれらの応力の各段階において不連続面に動水勾配を与え、この時の流量を計測することにより、不連続面の透水試験を行うことができる。図4-1に実験装置および図4-2にシステム全体の概略図を示す。

(1)直接せん断装置

せん断容器は下箱が移動する構造になっており、上箱はせん断容器を挟み込む形で設置されたせん断荷重計測用の2個のロードセル（引張・圧縮両用型、容量各20ton）を組み込んだロッドによって支持されている。ロッドは十分長く、両端取付部がリンク構造で上箱の上下移動および回転が許されるが水平方向の動きは拘束されている。下箱には透水実験のための給水孔（直径6mm）が設けられており、透水した水は試験体内部を通過して不連続面内を放射状に浸透し、せん断面より約5mm上に設けられた

堰から定水位で越流される。載荷はせん断方向、垂直方向ともに油圧サーボ方式であり、制御は、それぞれ変位制御、荷重制御によって行われる。最大載荷能力は、せん断載荷は前進方向40ton、後退方向35tonであり、垂直載荷は200tonである。

(2) 透水加圧装置および計測・制御装置

透水実験は定水位法で行う。その加圧は自動給水のできる容量約10リットルの容器の高さを調節することにより行った。透水量の計測には、透水係数の数オーダーの変化に対応するため、電子天秤（AND社製 FX3000、最小読み取り精度10mg、最大秤量3,100g、安定所要時間約2.5秒）を使用しており、RS-232Cによってパソコンに接続されている。計測は、流量に応じて、10-60秒間の平均流量を重量で計測し、その値がほぼ一定になったことをパソコンのCRT上で確認した後、10回程度計測を行いその平均値を透水量とした。垂直変位の計測は、上箱の4隅に設置した4個の変位計（東京測器製 CDP-10、精度 $1,000^6 \mu/\text{mm}$ ）を用いて行い、上箱の垂直変位および回転変位を計測した。ロードセル、変位計から得られたせん断、垂直方向の荷重および変位に関するデータはデータロガーを経由してパソコン上に自動記録される。

(3) 不連続面作成装置

不連続面の作成を圧裂で行うと、激しい破壊を生じるので不連続面が大きく離れてしまったり、破片が飛散したりして試験体によって不連続面のばらつきが大きく、その幅の測定も正確とは言えない。そこで、試験体をせん断容器内にセットした後で不連続面を作成することとし、そのために水平方向に一对の油圧ジャッキ（最大載荷能力10ton）が載荷装置に付設されている。また、ジャッキの先端には鋼製のくさびが取り付けられている。

4. 2. 3 試験体

使用した岩石は、韓国南原産花崗岩（比重2.61、吸水率0.37%、飽和状態での一軸圧縮強度162MPa）で、縦120mm、横100mm、高さ80mmの直方体である（図4-3）。試験体高さの中央位置には不連続面の作成を容易にするために、深さ10mm、幅1mmのスリットが試験体の4側面に入れられている。したがって、せん断面の大きさは、100×80mmである。また、試験体下部の中央には、透水実験のための給水孔（直径6mm）が不連続面まで貫通している。

4. 2. 4 不連続面の作成法

まず、試験体をせん断容器内にセットした後、その後の垂直荷重載荷に対して履歴が無視できる程度の垂直荷重（約20ton）を加え、さらに水平方向からくさびを介してスリットに圧裂を生じる荷重以上（約6ton）の載荷を行う。次に、その水平方向の荷重を一定に保ちながら垂直荷重を徐々に除荷することにより安定した状態で試験体を破断させた。その際、垂直変位-垂直応力の関係はX-Yレコーダで監視・記録される。その例を図4-4に示す。破断後、垂直変位および垂直荷重が急激に増加するが、サー

ボ機構によって直ちに平衡状態が保たれて、間隙幅のばらつきも比較的小さく抑えられている。不連続面の初期の間隙幅は、この状態から実験を行う所定の垂直応力(1,5,10,20MPa)まで載荷し、不連続面作成以前の垂直変位との差をとることにより決定される。

4. 2. 5 実験方法

本節では垂直応力に注目してCase1, Case2の二つのケースの実験を行った。

Case1の実験は、まず先行履歴として垂直応力5MPaのもと、せん断速度約0.1mm/secで、変位12mmに達した後、逆方向にせん断し、変位0mmの状態まで戻す。その履歴を受けた試験体を使って、それぞれ垂直応力1,5,10,20MPaで、最大変位20mmのせん断を行う。(以後、これらの試験体を5MPa - 1MPa, 5MPa - 5MPa, 5MPa - 10MPa, 5MPa - 20MPaと表現する。)

次にCase2の実験は、先行履歴として垂直応力1,5,10,20MPaのもとで先の条件と同様の履歴を与えた試験体を用いて、垂直応力5MPaのもとで最大変位20mmのせん断を行う。(以後、これらの試験体を1MPa - 5MPa, 5MPa - 5MPa, 10MPa - 5MPa, 20MPa - 5MPaと表現する。)

また、透水量の計測は、せん断途中の各段階で一時的にそのせん断変位を保って行った。

4. 2. 6 透水係数の決定方法

本実験では、直方体の試験体を使用していること、放射流で透水させていること、せん断変位によって透水面積が変化するなどの理由から、直接透水係数を求めることができない。したがって、以下に示すような差分法を用いた近似的手法により透水面の水頭分布を求め、それを用いて間接的に透水係数を求めた。

(1)まず、透水面の水頭分布を求めるにあたり、透水面を単位間隙幅を持つ平行平板と仮定し、透水面をメッシュに分割した(図4-5)。また、垂直方向の流速は無視し、メッシュ間のそれがその間の水頭勾配に比例するものと考えた。一つの任意のメッシュ $S_{i,j}$ とそれにとり合うメッシュ、 $S_{i-1,j}$, $S_{i+1,j}$, $S_{i,j-1}$, $S_{i,j+1}$ を取り出すと、 $S_{i,j}$ メッシュにおけるX,Y方向の流量変化 $\Delta Q_x, \Delta Q_y$ は、以下で示される。

$$\begin{aligned} \Delta Q_x &= \Delta Y \cdot C \cdot \left\{ (h_{i-1,j} - h_{i,j}) / \Delta X - (h_{i,j} - h_{i+1,j}) / \Delta X \right\} \\ \Delta Q_y &= \Delta X \cdot C \cdot \left\{ (h_{i,j-1} - h_{i,j}) / \Delta Y - (h_{i,j} - h_{i,j+1}) / \Delta Y \right\} \\ C &= gd^3 / 12 \nu \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

ここで

$\Delta X, \Delta Y$: X, Y方向のメッシュの幅

$h_{i,j}$: メッシュ $S_{i,j}$ における水頭値

C : メッシュ相互の透水性に関する係数

g : 重力加速度
 d : 平行平板の間隙幅
 ν : 水の動粘性係数

定常状態では、

$$\Delta Q_x + \Delta Q_y = 0 \quad (4.2.2)$$

であるので、 $\Delta X = \Delta Y = \Delta$ とすると、

$$h_{i,j} = (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) / 4 \quad (4.2.3)$$

が成立する。

従って、注水孔および不連続面の端部の境界条件を設定することにより、単位間隙幅における不連続面の水頭分布を求めることができる。実際の計算では、まず初期水頭を各メッシュに仮定し、収束するまで計算を繰り返す逐次近似法を用いている。初期水頭は実験時の水頭値と管路の摩擦等による損失水頭の差で与えられる。なお、損失水頭 Δh は測定された流量 Q を次式に代入することで得られる。

$$\Delta h = 0.383 \cdot Q + 0.0199 \cdot Q^2 \quad (4.2.4)$$

上式は、せん断箱上部および試験体を取り除いた無負荷の状態で行った透水試験結果(図4-6)に最小2乗法を適用して経験的に求めたものである。

(2) 一番外側の任意のメッシュ $S_{s(i,j)}$ における水頭値を $h_{s(i,j)}$ 、出力側の水頭値を h_D とすると、 $S_{s(i,j)}$ からの流量 $Q_{s(i,j)}$ はダルシー則より、

$$Q_{s(i,j)} = d \cdot C \cdot (h_{s(i,j)} - h_D) / \Delta \quad (4.2.5)$$

で表される。したがって全流量 Q_c は、

$$Q_c = \sum Q_{s(i,j)} \quad (4.2.6)$$

で表される。一般に平行平板流れでは、流量 Q は間隙幅 d の3乗に比例する (Cubic Law)。

$$Q = A \cdot d^3 \quad (4.2.7)$$

従って、式(4.2.7)に、計算により得られた流量 Q_c と単位間隙幅を代入することによ

り、比例定数 A が求められる。

(3)比例定数の定まった式(4.2.7)に実際の計測によって得られた流量を代入し、水理の間隙幅 e を逆算する。さらに、得られた間隙幅 e を式 $ge^2/12v$ に代入することで不連続面の透水係数は決定される。

4. 2. 7 AE計測システムおよび計測方法

本計測は、Shear-flow coupling実験と並行して行われる。使用したAE計測システムは、NF回路設計ブロック社製のMAGIC(Multi-channel Acoustic-emission Graphic Imaging Computer)システムで、センサー(AE-906:応答周波数0.4-2.0MHz)、プリアンプ(AE-912:増幅率40dB)、ローカルプロセッサ(9600:4チャンネル、外部パラメータ入力可)、およびパソコンにより構成されている(図4-7)。実験時において、試験体はせん断箱で覆われているためセンサーを直接取り付けることができない。そこで、せん断箱の前後左右に感熱式の接着剤を用いて4つのセンサーを取り付けることにした。センサーによって検出されたAE信号はプリアンプで40dB増幅された後、ローカルプロセッサ内のディスクリミネータに送られる。ここで、所定のディスクリレベルを越えた波形についてのみAEイベントが発生され、パルス方式の事象計数法により計数される。収集されたイベントデータはGPIBを介してパソコンに送られる。また、AEの取り込みと同時に外部パラメータとしてせん断変位を入力した。これによって、せん断変位の増加に伴うAEが記録される。

4. 2. 8 Case1の実験結果および考察

(1)せん断応力-せん断変位の関係

図4-8に、せん断応力-せん断変位曲線を示す。まず、4本の試験体の先行履歴に差異がないことが分かる。履歴を与えた不連続面では、履歴以下の垂直応力下のみならず全ての垂直応力下においてピークは現れず、残留応力に達する。これは、初めに与えた履歴によって凹凸の表面が滑らかになっていることが原因と考えられる。また、履歴を与えた不連続面と履歴のない不連続面の残留せん断応力は s 一致した。

(2)垂直変位-せん断変位の関係

図4-9に、垂直変位-せん断変位曲線を示す。ここでは、不連続面の初期の間隙幅を垂直変位の初期値としている。履歴を与えた不連続面に関して、せん断変位12mmまでは履歴のない不連続面に比べて全ての場合でダイレーションは小さくなっているが、せん断変位12mm以降はその限りではない。このことから、せん断変位12mmまでは明らかに初めに与えた履歴(垂直応力5MPa, せん断変位12mm)の影響を受けていることが分かる。また、先行履歴よりも小さな垂直応力を与えた場合(5MPa-1MPa)は、履歴のない1MPaに比べて挙動は大きく変化し、大きな垂直応力を与えた場合(5MPa-20MPa)は、履歴のない20MPaに比べて変化の割合が小さくなっている。

(3)透水性係数—せん断変位の関係

図4-10に、透水性係数とせん断変位の関係を示す。順番に5MPa-1MPaと1MPa, 5MPa-10MPaと10MPa, 5MPa-20MPaと20MPaを比較した図を示す。履歴のない不連続面では、せん断初期において透水性係数は少し減少した後、急激に1~2オーダー増加する。これに対し履歴を与えた不連続面では、せん断前より1~1.5オーダー透水性係数が大きい。そして、せん断初期において透水性係数はゆるやかに減少し、その後増加して一定値になるが、その増加量は履歴のない不連続面に比べて小さい。これらの違いは、凹凸表面が履歴によって破壊され滑らかになっているので、凹凸の乗り上げが小さくなっていること、および凹凸の噛み合いが悪くなっていることが原因と考えられる。また5MPa-20MPaが20MPaに比べて透水性係数が全体的に大きくなっている。これは、不連続面を作成した際の初期間隙幅が大きかったことが影響しているものと考えられる。また、5MPa-1MPaは先に受けた5MPaの影響を大きく受け、履歴のない人工的不連続面の1MPaの時に比べてダイレーションがかなり小さくなっている。このことから先に与えた履歴よりも小さな垂直応力で再度履歴を与えた場合、先に与えた履歴の影響を大きく受けていることが分かる。また、5MPa-20MPaにおいてせん断変位12mmからダイレーションが急激に減少している。これは、先行履歴(5MPaでせん断変位12mm)によって破壊されなかった周期の大きな凹凸が基底部から大きく破壊されたことが原因と考えられる。

(4)AEイベントとせん断変位の関係

図4-11にAEイベントとせん断変位の関係を示す。全てのケースにおいてAEイベントはせん断開始直後にピークを示している。また5MPa-1MPa, 5MPa-5MPa, 5MPa-10MPaの場合、ピーク後のAEイベントは非常に少ない。これは、せん断が凹凸の破壊をほとんど伴わず、乗り上げながら進行していったことが原因と考えられる。一方、5MPa-20MPaの場合は、ピーク後にもかなり多くのイベントが発生しており、せん断による凹凸の破壊が継続的に行われたと考えられる。

(5)せん断変位に対する、せん断応力、垂直変位、透水性係数およびAEイベントの関係

図4-12に垂直応力5MPaでのせん断変位に対する、せん断応力、垂直変位、透水性係数およびAEイベントの関係を示す。実線は履歴を受けた不連続面(先行履歴5MPa-12mm)、破線は履歴を受けていない不連続面の挙動をそれぞれ示す。まず、せん断変位0mmの状態において、履歴を受けた不連続面は受けていないものに比べて噛み合いが悪くなっているため、その透水性係数、ジョイントの開口がともに大きくなっている。次にせん断初期の状態においては、履歴を受けた不連続面も受けていない不連続面も両面の凹凸が密着しせん断方向に変形するため、透水性係数、ダイレーションは少し減少するが、履歴を受けた不連続面の減少率は履歴を受けていないものに比べて小さい。その後履歴を受けた不連続面は、凹凸が緩やかに乗り上げ始め、透水性係数は滑らかに上昇していき、ダイレーションもそれに類似した挙動を示す。そしてAE

イベントはピークを示す。またせん断応力はピークを示さず残留応力に漸近する。これに対し、履歴を受けていない不連続面は凹凸が急激に乗り上げるため、透水係数、ダイレーションもそれに呼応して急激に上昇する。そしてせん断応力がピークに達した後、凹凸が激しく破壊され、AEイベントは履歴を受けたものに比べて発生が多く、かつかなり大きなピークを示す。

4. 2. 9 Case2の実験結果および考察

(1)せん断応力-せん断変位の関係

図4-13に、せん断応力-せん断変位曲線を示す。また、図4-14に、先行履歴（垂直応力1,5,10,20MPa,せん断変位12mm）におけるせん断応力-せん断変位曲線を示す。図4-12において、履歴を受けていない5MPaはピークを示すのに対し、履歴を与えたものは全てにおいてピークを示さず、残留応力に達する。また残留応力に達するまでのせん断変位は、先行履歴の垂直応力が増加するに従い大きくなっていく。これは、先行履歴の垂直応力が大きくなるにしたがって凹凸表面が滑らかになっていることを反映していると考えられる。

(2)垂直変位-せん断変位の関係

図4-15に、垂直変位-せん断変位曲線を示す。また、図4-16に、先行履歴（垂直応力1,5,10,20MPa,せん断変位12mm）における垂直変位-せん断変位曲線を示す。図4-13において、先行履歴よりも大きな垂直応力を与えた場合(1MPa-5MPa)は先行履歴の影響が小さく、履歴を受けていない5MPaの挙動と類似した傾向を示している。これに対して、5MPa-5MPa, 10MPa-5MPa, 20MPa-5MPaに関しては、5MPaとはかなり異なった挙動を示しているが、これら3種類の挙動は類似した傾向を示している。このことから、垂直応力1MPa付近の低い垂直応力では乗り上げのみでせん断が起これ凹凸はほとんど破壊されず、そして、垂直応力5MPa付近で凹凸が激しく破壊され滑らかになりそれ以降の垂直応力では摩擦によって表面が削られていっているものと考えられる。また、10MPa-5MPaと20MPa-5MPaを比べると、せん断変位12mm付近で、ダイレーションが逆転している。これは、不連続面を作成した際の初期間隙幅、および凹凸の形状の違いが原因と考えられる。

(3)透水係数-せん断変位の関係

図4-17に、透水係数-せん断変位の関係を示す。5MPa-5MPa, 10MPa-5MPa, 20MPa-5MPaは比較的小さなせん断変位において滑らかに減少した後に増加している。そして、せん断変位12mm付近で増加の割合が上昇し、その後一定値に収束する。これに対し、1MPa-5MPaは、せん断初期で比較的急激に増加し、一定値に収束している。また、これらの傾向はダイレーションの傾向と類似している。

4. 3 せん断変位に注目して先行履歴を与えた人工的不連続面の Shear-flow coupling 特性

4. 3. 1 実験方法

本節では実験を通して行うNot Opened Caseと不連続面作成後、先行履歴後、実験終了後にそれぞれ試験体をせん断容器から取り出し不連続面の凹凸を計測するOpened Caseの二つのケースの実験を行った。

まずNot Opened Caseに関して不連続面作成後、先行履歴として垂直応力5MPaの下で所定のせん断変位(2, 4, 6, 10mm)までせん断速度約0.1mm/secでせん断を行った後に垂直応力を除荷し、せん断変位0mmの状態まで戻す。そしてさらにその先行履歴を受けた試験体を用いて垂直応力5MPaの下で最大変位20mmのせん断を行う。(以後このケースを5-5 Not Opened Case, これらの試験体をそれぞれ5-2 Not Opened, 5-4 Not Opened, 5-6 Not Opened, 5-10 Not Openedと表現する。)また先行履歴の垂直応力を10MPaとし、それ以外は同様な実験も行った。(以後このケースを10-5 Not Opened Case, これらの試験体をそれぞれ10-2 Not Opened, 10-4 Not Opened, 10-6 Not Opened, 10-10 Not Openedと表現する。)

次にOpened Caseに関して基本的な実験の手順は、先行履歴での垂直応力を5MPaで行ったNot Opened Caseと同様であるが、不連続面作成後、先行履歴後、それぞれ試験体をせん断容器から取り出し不連続面の凹凸を計測した後に再びせん断容器に戻し、実験を行う点が異なっている。(以後このケースを5-5 Opened Case, これらの試験体をそれぞれ5-2 Opened, 5-4 Opened, 5-6 Opened, 5-10 Openedと表現する。)

透水試験およびAEの計測に関しては前節と同様である。

4. 3. 2 K_s , K_n の定義

せん断剛性(K_s), 垂直剛性(K_n)は、それぞれせん断方向変位, 垂直方向変位の増分に対するせん断応力, 垂直応力の増分で定義され、これらは不連続面がせん断方向, 垂直方向に変形を起こしやすいか, 起こしにくいかを評価する一つの指標として重要な意味をもつ。すなわち, ある不連続面のせん断剛性, 垂直剛性が大きいと, その不連続面はせん断方向, 垂直方向に変形を起こしにくいことになる。せん断剛性, 垂直剛性に影響を与える代表的なパラメータとして, 垂直応力, 凹凸の粗さ, 凹凸壁面の強度が挙げられ, これらパラメータの相違によってせん断剛性, 垂直剛性の値は大きく変化する。凹凸の粗さに関しては, 特になり面の角度が, せん断剛性, 垂直剛性に大きく影響することが知られている。

せん断剛性, 垂直剛性の具体的な定義には大きく分けて, secant modulus法とlocal modulus法の二つがある。secant modulus法は, せん断応力-せん断変位曲線, あるいは垂直応力-垂直変位曲線上のある点と原点を結んだ直線の傾きを求めることによって定義する方法で, これに対しlocal modulus法とは曲線上のある点における接線の傾きを求めることによって定義する方法である。それぞれの関係が弾性的である場合secant modulus法, local modulus法どちらを用いても剛性は同じになるが曲線的に表される場合, その値にはかなりの違いがでてくる。せん断剛性に関してはピークの有無やピークの形の違い, さらにどの点でのせん断剛性を求めるのかによって定義の方法

がさらにいくつか考えられる。今回の実験ではせん断剛性に関してはピークが現れる場合はピークせん断応力の、現れない場合は残留せん断応力の1/2の点でsecant modulus法を用いてを求めた。また垂直剛性に関しては各垂直応力でsecant modulus法、local modulus法の両方で求めた。

4. 3. 3 5-5 Not Opened Case の実験結果および考察

(1) せん断応力—せん断変位の関係

図4-19, 図4-18に先行履歴および本実験におけるせん断応力—せん断変位曲線をそれぞれまとめて、図4-20に一つの試験体ごと個別に示す。図4-18において全ての先行履歴でピークを示しており、せん断剛性およびピーク後の挙動はほぼ一致する。図4-18において全てのケースで先行履歴の影響により突出したピークを示さず、また、せん断剛性、残留応力はほぼ一致している。せん断応力の最大値は先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって小さくなっている。図4-20においてそれぞれの挙動は先行履歴の挙動に追従した傾向にある。5-5 Not Opened Caseの全体的な傾向として先行履歴の影響が多少認められるが、その影響度は小さい。これは先行履歴での垂直応力が不連続面の表面強度に対して小さかったため凹凸の破壊が少なかったことが原因であると考えられる。

(2) 垂直変位—せん断変位の関係

図4-22, 図4-21に先行履歴および本実験における垂直変位—せん断変位曲線をそれぞれまとめて、図4-23に一つの試験体ごと個別に示す。図4-21において先行履歴で受けたせん断変位が大きくなるにしたがってダイレーションが小さくなり、せん断初期における垂直変位の減少区間が長くなる傾向にある。これは先行履歴の影響により凹凸が滑らかになったことが原因と考えられる。しかし5-6 Not Openedに関してはこれらの傾向は当てはまらない。これはせん断前の不連続面の状態が他に比べて粗かったためと考えられる。全体的な傾向としてはせん断応力—せん断変位の関係で述べたように先行履歴の影響が明確に現れているとは言えない。

(3) 透水係数—せん断変位の関係

図4-25, 図4-24に先行履歴および本実験における垂直変位—せん断変位曲線をそれぞれまとめて、図4-26に一つの試験体ごと個別に示す。図4-25において全ての先行履歴でせん断初期に鋭く減少した後、急激に増加する。図4-24において全てのケースの残留域における透水係数はほぼ一致する。せん断前の透水係数は先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって大きくなる傾向にある。またせん断初期において透水係数は少し減少した後上昇していくが、減少する区間は先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって長くなっている。これは先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって凹凸のかみ合いが悪くなっていることが原因と考えられる。

(4) AE イベント—せん断変位の関係

図4-27にAE イベントーせん断変位の関係を一つの試験体ごとに個別に示す。先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがってAE イベントの総数は減少し、ピークは小さくなり、また、ピークを示す時のせん断変位は大きくなる。これらは先行履歴の影響により周期の小さな凹凸が削られ凹凸表面が滑らかになったことが原因と考えられる。

(5) 垂直応力ー垂直変位, 垂直応力ー垂直剛性の関係

図4-28に垂直応力 (1, 2, 3, 4, 5MPa) に対する垂直変位の関係, およびそれぞれの回帰曲線を示す。先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって各垂直応力に対する垂直変位は大きくなっている。図4-29, 図4-30にそれぞれの垂直応力 (1, 2, 3, 4, 5MPa) に対する垂直剛性の関係を示す。図4-29ではsecant modulus法, 図4-30ではlocal modulus法によって垂直剛性を求めている。secant modulus法から求めた図4-29では先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって垂直剛性は小さくなっていく傾向を示すがlocal modulus法から求めた図4-30ではかなりばらつきが見られる。

4. 3. 4 10-5 Not Opened Case の実験結果および考察

(1) せん断応力ーせん断変位の関係

図4-32, 図4-31に先行履歴および本実験におけるせん断応力ーせん断変位曲線をそれぞれまとめて, 図4-33に一つの試験体ごと個別に示す。図4-32においてせん断応力は全ての先行履歴でピークを示しており, せん断剛性およびピーク後の挙動はほぼ一致する。図4-31においてせん断応力は全てのケースでピークを示さない。これは先行履歴の影響により凹凸が削られ表面が滑らかになっていることおよびゲージが隙間に形成されていることが原因と考えられる。また残留応力は全てのケースにおいて一致する。せん断剛性は5-5 Not Opened Case の場合は先行履歴のせん断変位にかかわらずほぼ一定の値を示すが, 10-5 Not Opened Case の場合, 先行履歴のせん断変位が4~6mm付近で大きく減少している (図4-34)。これは, 5-5 Not Opened Case の場合, 凹凸の壁面強度に対する垂直応力が小さかったため凹凸がほとんど破壊されず, 乗り上げた状態でせん断されていたのに対し, 10-5 Not Opened Case の場合, 乗り上げた凹凸が局所的な応力により, 大きく破壊されたことが原因と考えられる。

(2) 垂直変位ーせん断変位の関係

図4-36, 図4-35に先行履歴および本実験における垂直変位ーせん断変位曲線をそれぞれまとめて, 図4-37に一つの試験体ごと個別に示す。図4-35においてまず, せん断初期において, 全てのケースで垂直変位は少し減少する。これは不連続面上下が密着し, 凹凸がせん断方向に変形するためであると考えられる。この時の最小値は履歴変位が小さいほど小さいせん断変位で生じる。また, 垂直変位が減少する区間が10-2 Not Opened, 10-4 Not Openedに比べて10-6 Not Opened, 10-10 Not Openedは長くなっている。これは先行履歴で与えたせん断変位が大きくなるにしたがい, 凹凸のかみ合いが悪くなっているためであると考えられる。その後, 全てのケースでダイレーション

が生じるが、10-10 Not Openedは他の3つのケースに比べその増加率は小さい。これは10-10 Not Openedが他の3つのケースに比べて先行履歴による破壊が大きいためであると考えられる。

(3) 透水係数—せん断変位の関係

図4-39、図4-38に先行履歴および本実験における透水係数—せん断変位曲線をそれぞれまとめて、図4-40に一つの試験体ごと個別に示す。図4-39において透水係数は、全ての先行履歴でせん断初期に鋭く減少した後、急激に増加する。図4-38においてせん断前の透水係数は10-2 Not Opened, 10-4 Not Opened, 10-6 Not Openedに関しては先行履歴で与えたせん断変位が大きくなるにしたがって大きくなるが10-10 Not Openedに関してはその限りではない。これは10-10 Not Openedが他のケースに比べてゲージが多く発生しているためであると考えられる。次にせん断初期において、全てのケースで透水係数は少し減少した後増加する。10-2 Not Opened, 10-4 Not Openedは透水係数が鋭く減少した後急激に増加するのに対し、10-6 Not Opened, 10-10 Not Openedは比較的緩やかに減少した後増加していく。その後、せん断が進むにしたがって、10-2 Not Opened, 10-4 Not Opened, 10-6 Not Openedは類似した挙動を示しながら増加し残留域に達するのに対し、10-10 Not Openedは他の3つの挙動に比べて緩やかに増加しながら残留域に達する。また、全てのケースでその残留値はほぼ一致する。以上の挙動はダイレーション挙動と類似した点が多いが、ゲージの影響等により類似とは言い切れない。

(4) AE イベント—せん断変位の関係

図4-41にAE イベント—せん断変位の関係を一つの試験体ごとにそれぞれ個別に示す。図4-41においてAE イベントの総数は先行履歴で与えたせん断変位が大きくなるにしたがって少なくなる。これは先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがい、凹凸が多く破壊されていることを示している。また全てのケースでせん断変位2mm付近で第一のピーク、先行履歴で与えたせん断変位の直後で第二のピークを示す。最初のピークに関しては凹凸が乗り上げた後、局所的な応力により凹凸が破壊されたこと、第二のピークに関しては先行履歴で破壊されなかった凹凸が新たに破壊されたことがそれぞれ原因と考えられる。

(5) 垂直応力—垂直変位、垂直応力—垂直剛性の関係

図4-42に垂直応力 (1, 2, 3, 4, 5MPa) に対する垂直変位の関係をプロットし、曲線回帰した図を示す。先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって各垂直応力に対する垂直変位は大きくなっている。図4-43, 図4-44に垂直応力 (1, 2, 3, 4, 5MPa) に対する垂直剛性の関係を示す。図4-43はsecant modulus法, 図4-44はlocal modulus法によって垂直剛性を求めた。secant modulus法, local modulus法ともに先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって垂直剛性は小さくなっており、これは凹凸表面がせん断によって脆くなったこと、および隙間にゲージが形成されたことが原因と考えら

れる。

4. 3. 5 5-5 Opened Case の実験結果および考察

(1) せん断応力—せん断変位の関係

図4-46, 図4-45に先行履歴および本実験におけるせん断応力—せん断変位曲線をそれぞれまとめて, 図4-47に一つの試験体ごと個別に示す。図4-46においてせん断応力は全ての先行履歴でピークを示しており, せん断剛性およびピーク後の挙動はほぼ一致する。また, 図4-18に示す5-5 Not Opened Caseでは, 全てのケースでせん断応力はピーク示さなかったのに対し, 図4-45では全てのケースにおいてピークを示している。これは先行履歴を与えた後に試験体を取り出し, ゲージを除去したことにより凹凸のかみ合いが良くなったことが原因と考えられる。

(2) 垂直変位—せん断変位の関係

図4-49, 図4-48に先行履歴および本実験における垂直変位—せん断変位曲線をそれぞれまとめて, 図4-50に一つの試験体ごと個別に示す。図4-48で垂直変位はまずせん断初期において全てのケースで少し減少するが, その減少区間はほぼ等しくなっている。その後先行履歴でのせん断変位が大きくなるにしたがって大きなダイレーションを示すが5-2 Not Openedに関してはせん断変位7mm付近からダイレーションの傾向を示さなくなっている。これはせん断前の不連続面の凹凸が他に比べて滑らかだったことが原因だと考えられる。

(3) 透水係数—せん断変位の関係

図4-52, 図4-51に先行履歴および本実験における垂直変位—せん断変位曲線をそれぞれまとめて示す。図4-52において透水係数は全ての先行履歴でせん断初期に鋭く減少した後, 急激に増加する。図4-51において全てのケースの残留域における透水係数はほぼ一致する。せん断前において透水係数は先行履歴のせん断変位に関係なくほぼ一致している。また5-5 Not Opened Caseではせん断初期において透水係数は少し減少した後上昇していくが, ここではその傾向が見られない。これは透水係数を1mmごとに計測したため, せん断初期における小さな減少を計測できなかったのではないかと考えられる。

4. 3. 6 表面形状の定量化

(1) パワースペクトル

岩盤不連続面の力学的特性, 水理的特性を調べるにあたり表面形状の評価方法が問題となるが, その評価方法の一つとしてパワースペクトルがよく利用される。パワースペクトルの基本的な性質として, プロファイルの凹凸間隔や振幅(凹凸の高さ)によるパワースペクトルの変化が挙げられるがその変化の特徴を以下に述べる。

1. パワースペクトルの振幅が大きければ卓越振動を保持しながら, パワースペクト

ルはそのまま上側に平行移動する。つまり、振幅の大きさによりパワーの強さは左右される。

2.規則的なプロファイルにおいて、凹凸形状が同じであれば、凹凸間隔（周期に相当）が大きくなるほど、周波数特性は低い周波数側へ平行移動する。

規則的な粗さを有するモデルについてパワースペクトルのピーク値を結んだ直線による評価方法がよく用いられる。しかし実際の不規則なプロファイルについては、その周波数特性からも分かるように、規則的モデルのような明確なピークが現れないためどの点をプロットするかを決定できない。そのため、周波数特性における振幅成分が白色雑音の影響を受ける10-2mm以下のものを除いたすべての点についてプロットし、最小二乗法で近似した直線を用いる。

(2) フラクタル

フラクタルとは、海岸線などのような特徴的な長さ（例えば球なら半径、人なら身長といったそのものに付随する長さの代表的なもの）を持たない物を計測するために起こった概念であるが、近年、不連続面の粗さを定量化する一手法としてよく利用されるようになった。フラクタル特性を持つものはそのフラクタル次元 D_f によって特徴づけられ、フラクタル次元の概念を使って実際の表面粗さを正確に評価するには、そのフラクタル次元をいかにして正しく決定するかが重要となってくる。フラクタル次元の求め方は、ディバイダー法とスペクトル法の二つに大きく分類される。

(1) ディバイダー法

ディバイダー法とは、円によりプロファイルを分割することによってフラクタル次元を求める方法で以下にその詳細を述べる。

まずプロファイルの一端から末端を分割する半径 r の円の数 $N(r)$ を数えると、 $N(r)$ と r の関係は次式で表される。

$$N(r) \propto r^{-D_f} \quad (4.3.1)$$

r と $N(r)$ をlog座標でプロットするとその勾配の絶対値がフラクタル次元 D_f となる。しかし、 D_f が1.0に近くなると r の変化が表現しにくいこと、また r の個数が十分でないと正確なフラクタル次元が求められないことなどの問題があるため、その問題を解消するために式(4.2.1)を以下のように改める。

1.プロットした $r \cdot N(r)$ の傾きの変化を強調するため、式(4.3.1)の両辺に r をかける。

$$r \cdot N(r) \propto r^{1-D_f} \quad (4.3.2)$$

2.式(4.2.2)の左辺は、円と測線の交差する点をそれぞれ結んでできた折れ線の数を多くする（半径 r を小さくすること）、また、残余 ϵ_r ($\epsilon_r < r$) を左辺に加えることによって正しいプロファイル長に近づく。

$$(r \cdot N(r) + \epsilon r) \propto r^{1-Df} \quad (4.3.3)$$

3.全体の長さ $r \cdot N(r) + \epsilon r$ の対数が r の対数に対応して、プロットされれば、その傾きに1を加えた値の絶対値が Df となる。

(2)スペクトル法

スペクトル法にはバリオグラム法とピリオドグラム法がある。

(a)バリオグラムを使って求める方法

バリオグラム $\tau(r)$ は、自然地形のフラクタル次元を求めるために、多くの研究者によって利用され、それは曲線における測点の高さの増加量の二乗平均として定義される。

$$\tau(r) = \frac{1}{N-r} \sum_{i=1}^{N-r} (x_i - x_{i+r})^2 \quad (4.3.4)$$

$\tau(r)$: バリオグラム

x_i : 水平線からのずれ幅

N : データ点の総数

r : ラグ

Oreyはフラクタルな形状を持つ試料にバリオグラムを用いて $\tau(r) = r^{2H}$ の関係式が成り立つことを示した。この時、フラクタル次元は $Df = 2 - H$ で表され、またバリオグラムとラグの $\log\text{-}\log$ プロットの傾き s を用いて $Df = 2 - s/2$ と表現される。

(b)ピリオドグラムを使って求める方法。

またフラクタル次元は、パワースペクトルと周波数 f の $\log\text{-}\log$ プロットの傾きからも計算できる。stochasticな過程のパワースペクトルは、一連の周波数帯に分けられた分散として考えられる。また、制限された周波数帯のスペクトル曲線のもとで、強さはその面積に比例する。ピリオドグラムのアンサンブル平均は、分散の増加と自己相関関数とを結び付けるパワースペクトル密度関数 $S_v(f)$ を生じる。パワースペクトル密度はウィナー：ヒンチの式より2点の自己相関関数 $G_v(r)$ と結び付けられる。

$$G_v(r) = \int_0^\infty s_v \{ \cos(2\pi ft) \} df \quad (4.3.5)$$

上式を正確に決定するためにはラグが非常に長く、データが定常、相関である必要がある。多くの自然プロファイルは、周波数が増加するに従って、パワースペクトルは減少する（これをred noise スペクトルと呼ぶ）。また、ガウス分布に従う白色雑音の場合では（この場合 $Df=2$ ）、パワースペクトルは、全周波数を通して一定となる。

4. 3. 7 凹凸計測システム

不連続面の凹凸を計測するための完全自動計測システムを構築した(図4-53)。本計測システムは、精密X-Y位置決めテーブル(日本トムソン社製, ストローク長120mm×120mm, 繰り返し位置決め精度±0.002mm), およびレーザー変位計(キーエンス社製, スポット径0.05mm, 分解能0.5 μ m)からなり, 試験体をテーブル上に固定し, コントローラーによる自動制御でテーブルを移動させることによって, 不連続面の表面形状を1次元のまたは2次元に計測することができる。レーザー変位計によって測定された不連続面のプロファイルは電気信号に変換され, ひずみ計(東京測器社製, TDS-301)にアナログ出力される。ひずみ計とパソコンはGP-IBでつながれており, データはデジタル量として取り込まれる。

4. 3. 8 凹凸の計測方法

前節で述べた計測システムを用いて, 5-5 Opened Caseに関してせん断による凹凸の変化状況を調べるため不連続面作成後, 先行履歴後, 実験終了後にそれぞれ不連続面両面の表面形状を上下両面について計測した, その際, 4本の測線(長さ80mm)を上下面の同じ位置に設け, 測定間隔0.05mmでせん断方向のみ一次的に読み取った。なお, 計測の際, せん断時に発生したゲージは軽く流し落とすことにした。

4. 3. 9 凹凸の評価方法

本章では測線長80mm, 測定間隔0.05mm, 測点1602点の一次元プロファイルを不規則波形として捉え, そのパワースペクトル密度分布を求めた。この時, プロファイルの最大波長はプロファイルの長さに一致するが, 最小波長はサンプリング定理により, サンプリング間隔の二倍で抑えられる。今回, 測点1602点の中から1024点のサンプリングを行ったので, 最大波長, 最小波長はそれぞれ54.8mm, 0.1mmとなり, 周波数帯は約 $10^5 \mu\text{m}^{-1} \sim 10^2 \mu\text{m}^{-1}$ となる。パワースペクトルの計算は, トレンドを除去した後, ハニング窓関数をかけたFFTにより求めた。

4. 3. 10 計測結果および考察

図4-54に5-2 Opened, 5-4 Opened, 5-6 Opened, 5-10 Openedそれぞれに対する不連続面作成後, 先行履歴後, 実験終了後の3つの凹凸プロファイルを重ねたものを示す。ここでは実際に計測した4本の測線のうち代表例としてLine1について考察をすすめる。まず, 先行履歴のせん断変位が大きくなるにしたがって凹凸の破壊は局所的な範囲からプロファイル全体に広がっていく。また, 凹凸のり面にはせん断によって破壊されやすい部分と破壊されにくい部分があることがわかる。これは今回の計測がせん断方向に一次的に行われたため, 凹凸のり面の方向によってせん断応力を受けやすい部分と受けにくい部分が発生したことが原因と考えられる。図4-55に5-2 Opened, 5-4 Opened, 5-6 Opened, 5-10 Openedそれぞれに対する不連続面作成後, 先行履歴後, 実験終了後のパワースペクトル密度分布を示す。全体的な傾向として, 先行履歴, 本実験とせん断履歴を積み重ねるにしたがって, パワーは低下し, また高周波の周期の短

い波が減少し、ピークを結んだ直線の傾きが大きくなる傾向にある。以上の傾向は図4-54に示す凹凸プロファイルとの関係から、凹凸表面がせん断により滑らかになっていく過程を表していることがわかる。

4. 4 自然の不連続面の Shear-flow coupling 特性

4. 4. 1 不連続面表面の性状

ボーリングにより採取した花崗閃緑岩の不連続面表面を観察することにより、次のようなことが明かとなった。

不連続面表面には幅2~5mmの細脈が発達している。この細脈部は鏡肌(スリッケンサイト)になっていて、サンプルの採取時以前に不連続面はすでにせん断履歴を受けており、上下面の噛み合いが最も良い状態から、スリッケンサイトの方向(コア軸に対して約20°傾斜した方向)に約12mmほど変位していることが分かった。さらに、細脈部は暗緑灰色鉱物が盤際側に発達し、中央部に白色鉱物を伴っている。白色鉱物は乳白色不透明で、針で容易に傷がつく軟らかい鉱物と、傷がつきにくいやや硬い鉱物の2種類が識別された。

4. 4. 2 Shear-Flow Coupling 実験装置

本実験では、基本的に4. 2で述べた実験装置を使用する。しかし、本実験装置の一部であるせん断容器は、直方体に整形した岩石試験体(縦120mm, 横100mm, 高さ80mm)用に設計されており、現場からボーリングにより採取した円柱形のサンプルを安定した状態で固定することはできない。そこで、今回、現場採取の任意形状の試験体に対応できるせん断容器を開発し、後述の方法で型枠に現場サンプルを埋め込んだ後、そのまません断容器にセットして実験を行うことを可能にした。せん断容器の内径は、縦148mm, 横130mm, 高さ138mmで、試験体をセットしたときせん断面に確保される隙間幅は最大10mmである。また、摩擦による水頭の損失を低減するため、下箱に設けた給水孔(8mm)を従来のせん断容器のもの(6mm)に比べて大きくした。

4. 4. 3 試験体の作成

サンプルの採取地は釜石鉱山550mL, NW坑道で、坑道周辺は硬質岩盤(花崗閃緑岩)で覆われている。対象となる不連続面は坑道壁面にほぼ鉛直方向に現れており、それが直径約100mmのボーリングコアのほぼ中央に入るように採取された。その一軸圧縮強度は171MPa, 比重は2.74である。採取されたサンプルは次の手順で型枠に埋め込まれた(図4-56)。

(1)前述のとおり、自然の不連続面はすでにせん断履歴を受けており、スリッケンサイトの方向に変位している。そこで本実験では、不連続面が生成されたときの状態からせん断を開始するため、サンプル上下片を不連続面の噛み合いが最も良い位置に戻して粘着テープで固定した。そして、型枠の内寸法に合うように岩石カッターで適

当な寸法に整形した。型枠にはみぞ型鋼を利用しており、その外寸法は $148 \times 130 \times 61.5\text{mm}$ である。

(2)型枠の両側面にテフロンシートを貼ったプレートを取付け、そこに埋め込み材料を流し込んでサンプル下部を固定した。このプレートは埋め込み材料の流出を防止し、また、型枠上下のズレを解消する役割を果たす。埋め込み材料にはエポキシ樹脂と珪砂を1:2の比で混合したSBモルタル(ショーボンド建設社製、硬化時の圧縮強度約 50MPa)を用いた。また、不連続面への埋め込み材料の侵入を防ぐために、幅 10mm のバンテージを不連続面に沿って巻いた。なお、サンプルを埋め込む際、不連続面表面のスリッケンサイトの方向が型枠の長手方向、つまり、せん断方向に一致するように留意した。

(3)次に、同様の方法でサンプル上部を固定した。その際、上下部間に一定の隙間を確保するために幅 10mm のスペイサーを用いた。埋め込み材料が硬化した後、スペイサーおよび両側面のプレートを取り外し、バンテージ、粘着テープをカットした。その後、透水実験のための給水孔(直径 8mm)を試験体下部から不連続面まで貫通させた。

以上の手順で円柱形サンプルを埋め込み二つの試験体を作成した。(以後これらの試験体をN1, N2と表現する)なおN1, N2のせん断面積はそれぞれ 106cm^2 , 117cm^2 である。

4. 4. 4 実験方法

本節では、まず実験前に前節で述べた二つの試験体の凹凸の形状を計測した後、垂直応力 5MPa の下、最大変位 20mm のShear-Flow Coupling 実験を行った。そして実験終了後、試験体をせん断容器から取り出し、凹凸の計測を行った。N1に関して実験終了後の凹凸は大きく破壊され、またダイレクションの傾向もほとんど示さなくなったため、ここで実験を終了した。N2に関してはダイレクションの傾向を示したため、凹凸を計測した後、再びせん断容器に戻し、さらに垂直応力 10MPa の下、最大変位 20mm のShear-Flow Coupling 実験を行った。そして実験終了後、凹凸を計測した。

4. 4. 5 実験結果および考察

(1) せん断応力-せん断変位の関係

図4-57, 図4-58にN1, N2のせん断応力-せん断変位曲線をそれぞれ示す。全てのケースでせん断応力はピークを示さず、残留応力に達する。垂直応力 5MPa の時N1, N2の残留応力はほぼ一致する。N1, N2のどちらもせん断初期において弾性的な挙動をした後、せん断剛性が減少し、残留域に達するが、N1に比べてN2は弾性的挙動を示すせん断応力の範囲がかなり小さくなっている。これは、せん断前の凹凸の形状がN1に比べてN2が滑らかなため凹凸の乗り上げが早く起こったことが原因と考えられる。またせん断剛性が減少していき、残留域に達するまでのせん断変位はN1に比べてN2

が大きくなっている。このことは上下面の凹凸が乗り上げ初めてから乗り上げてしまうまでの区間が長くなっていることを示しており、N1に比べてN2の凹凸が周期の長い滑らかな凹凸によって支配されていることを裏付けている。

(2) 垂直変位－せん断変位の関係

図4-59、図4-60にN1、N2の垂直変位－せん断変位曲線をそれぞれ示す。N1において垂直変位はせん断初期に少し減少した後、増加してダイレクションの傾向を示すが、せん断変位13mm付近から再び減少している。これはせん断変位13mm付近で周期の大きな凹凸が基底部から破壊されたためであると考えられる。これに対しN2は垂直応力5MPa、10MPaのどちらもせん断初期で緩やかに垂直変位が減少した後、増加し、せん断変位20mmまで一貫してダイレクションの傾向を示す。これは凹凸の初期形状、および現場で受けた先行履歴の違いによりN2の凹凸がN1に比べて滑らかであったことが原因と考えられる。また垂直応力5MPaに比べて垂直応力10MPaではダイレクションはかなり小さくなり、せん断初期における垂直変位が減少する区間は長くなっている。このことから垂直応力10MPaでは凹凸がせん断によって滑らかになり、周期の大きな凹凸による影響を強く受けていることがわかる。また、垂直応力5MPaでのN2のダイレクション挙動は、4.2のCase2における5MPa-5MPa、10MPa-5MPa、20MPa-5MPaの場合のそれと類似している。このことから自然の不連続面が現場で5MPa～20MPaの履歴を受けたことが推測される。

(3) 透水係数－せん断変位の関係

図4-61、図4-62にN1、N2の透水係数－せん断変位曲線をそれぞれ示す。せん断前の透水係数はどちらのケースも4.3の図4-38に示す10-5 Not Opened Caseと比べて約1オーダー大きくなっている。これは自然の不連続面の凹凸表面が風化等の影響により剥離しているため人工的な不連続面に比べてかみ合いが悪くなっていることが原因と考えられる。N1において透水係数はせん断初期に少し減少した後、増加するが、せん断変位13mm付近から再び減少する。これに対し、N2は垂直応力5MPa、10MPaのどちらもせん断初期で透水係数は緩やかに減少した後、上昇していく。以上のような傾向は垂直変位－せん断変位曲線の挙動とよく相関している。また自然の不連続面は風化の影響により人工的な不連続面に比べて壁面強度が低下しており、そのことがせん断中に多くのグージが発生させ、透水係数を低下させる原因となっている。また垂直応力5MPaでのN2の透水挙動は(2)と同様に4.2のCase2における5MPa-5MPa、10MPa-5MPa、20MPa-5MPaの場合のそれと類似していることから、自然の不連続面が過去に5MPa～20MPaの履歴を受けたことが推測される。

(4) AE イベント－せん断変位の関係

図4-63、図4-64にN1、N2のAEイベント－せん断変位の関係をそれぞれ示す。N1において、AEイベントはせん断初期にピークを示した後はかなり少なくなっている。これに対し、N2はN1のようなピークは示さずせん断初期から一貫してAEの発生量は

少ない。これはN2がN1に比べて凹凸が滑らかなため、凹凸の接触点に破壊が起こるまでの局所的応力が作用しなかったためだと考えられる。また、N2において垂直応力の違いによるAEの発生量にはほとんど変化が見られなかった。これは、垂直応力の増加によってAEの発生量は増加すると考えられるが、垂直応力5MPaの時に比べて垂直応力10MPaの時は凹凸が滑らかになっているためAEの発生量が抑制されていると考えられる。また、自然の不連続面のAEの発生量は4.3の図4-41に示す10-5 Not Opened Caseと比べて10分の1以下となっている。このことから自然の不連続面では風化により凹凸の表面がかなり脆く、また滑らかになっておりその結果、凹凸のせん断による変化に関して凹凸の破壊に比べて凹凸の磨耗による損出が支配的になっていると考えられる。

4.4.6 凹凸の計測方法

本節では4.3で述べた計測システムを用いて、履歴を与えた人工的な不連続面と現場で履歴を受けた自然の不連続面に関してせん断履歴による凹凸の変化状況を調べるために不連続面の凹凸をせん断前、せん断履歴後にそれぞれ上下両面について計測した。与えたせん断履歴は人工的不連続面ではまず先行履歴として垂直応力5MPaの下でせん断変位12mm、その後、垂直応力5MPaの下でせん断変位20mmであり（以後Art.Jointとする）、また、現場で約12mmのせん断履歴を受けた自然の不連続面ではまず垂直応力5MPaの下でせん断変位20mm、その後、垂直応力10MPaの下、せん断変位20mmである（以後Nat.Joint）。凹凸の計測はせん断方向（X方向）、およびそれに直交する方向（Y方向）について各4本ずつ一次元的に行った（図4-65）。測線長はX方向70mm、Y方向60mmであり、また測定間隔は0.05mmとした。なお、計測の際、せん断時に発生したグージは軽く流し落とすことにした。

4.4.7 計測結果および考察

図4-66にArt.Joint、Nat.Jointそれぞれに対するせん断前、および各せん断履歴後の3つの凹凸プロファイルを重ねたものを示す。ここでは計測したXY方向それぞれ4本の測線のうち代表例としてLine1について考察をすすめる。まず、Art.JointのX方向に関して、凹凸のり面にはせん断によって破壊されやすい部分と破壊されにくい部分があることがわかる。これは凹凸のり面の方向によってせん断応力を受けやすい部分と受けにくい部分が発生したことが原因と考えられる。これに対しArt.JointのY方向に関して、凹凸の破壊はせん断履歴により全体に広がっている。これはY方向ではX方向のように凹凸のり面の方向によってある範囲だけに応力の集中が起こることなく一様に破壊が起こったためと考えられる。次にNat.Jointに関してX方向、Y方向ともに垂直応力5MPaで凹凸は基底部から激しく破壊され凹凸がかなり滑らかになっていることがわかる。その後垂直応力10MPaでは凹凸の変化状況に関して凹凸の破壊に比べて凹凸表面の磨耗の影響度が強くなっていることがわかる。これらArt.Joint、Nat.Jointの違いはNat.Jointが現場でかなり風化されているため凹凸表面の強度がかなり低下していることが主な原因と考えられる。図4-67にArt.Joint、Nat.Jointそれぞれに対するせ

ん断前，および各せん断履歴後のパワースペクトル密度分布を示す．Art.Joint, Nat.Jointを合わせた全体的な傾向として，せん断履歴を積み重ねるにしたがって，パワーは低下し，また高周波の周期の短い波が減少し，ピークを結んだ直線の傾きが急になる傾向にある．以上の傾向は図4-66に示す凹凸プロファイルとの関係から，凹凸表面がせん断により滑らかになっていく過程を表していることがわかる．次にArt.Joint, Nat.Jointの相互関係に関してはArt.Joint (After Preceding History)とNat.Joint (Before Shear), Art.Joint (After Experiment)とNat.Joint (Normal Stress 5MPa) がせん断履歴の条件に関してそれぞれ対応する．図4-67のArt.Joint Line 1XとNat.Joint Line 1Xのそれぞれ対応する凹凸に関して，パワーはArt.Joint Line 1Xに比べてNat.Joint Line 1Xは約1オーダー小さくなっており，また，図4-67のArt.Joint Line 1YとNat.Joint Line 1Yのそれぞれに対応する凹凸に関して，パワーはArt.Joint Line 1Yに比べてNat.Joint Line 1Yは約1オーダーから2オーダー小さくなっている．これらのことは図4-66において視覚的に見た場合，Nat.Joint LineがArt.Joint Lineに比べて凹凸が明らかに滑らかなことを裏付けている．

4.5 まとめ

以前，江崎ら（1991）は岩盤不連続面内を流れる地下水の透水性の評価を行うために，インタクトな岩盤中に人工的に作成した単一不連続面を用いて，Shear-flow coupling 実験を行い，現場において不連続面が生起しせん断されていく過程を再現し，その時のせん断特性，透水特性を詳細に調べた．しかし現場の不連続面は，どのような条件下でせん断履歴を受けたかわからないことが多く，室内実験により得られたデータを現場に適用する際，パラメータ，およびその値をいかにして評価し，設計値を決定するかが問題となってくる．そこで本研究ではまず履歴を与えた人工的不連続面を用いて，垂直応力，およびせん断変位の違いによって岩盤不連続面のせん断特性，透水特性がどのように変化するかを基礎的に調べるとともに，有用なデータの集積を行った．そして自然の岩盤不連続面から得られた実験データと比較し，現場の不連続面が過去にどのような条件下で履歴を受けたかを推定するための手段の確立をめざした．以下に本研究から得られた知見を各節ごとに列挙する．

第2節

(1) 履歴をうけるとせん断応力はピークを示さない．また，先行履歴時の垂直応力より大きな垂直応力下でせん断させた場合においてもせん断応力はピークを示さなくなる．

(2) 履歴のない人工的不連続面は，せん断初期において少し垂直変位が減少した後，ダイレーションの傾向を示すが，履歴を与えた不連続面の垂直変位は，せん断初期において緩やかに減少した後，ダイレーションの傾向を示す．

(3) 先行履歴の垂直応力が大きくなるほどせん断初期の垂直変位の減少領域が大きくなる．

(4) 履歴のない不連続面の透水係数はせん断初期において鋭く減少した後，急激

に増加するのに対し、履歴を受けた不連続面は緩やかに減少した後、増加していく。これは凹凸が先行履歴により、凹凸表面が滑らかになっていることが原因と考えられる。

(5) ダイレーションと透水係数は相関が大きい。

(6) 先行履歴が同じ場合、AEイベントは垂直応力が大きくなるにしたがって多くなる。

(7) 先行履歴の垂直応力が大きいほど、せん断剛性は小さくなる。

(8) 先行履歴より小さな垂直応力でせん断を行った場合、ダイレーションおよび透水係数は履歴のない時の挙動にしたがうが、先行履歴より大きな垂直応力でせん断させた場合、その挙動は大きく変化する。

(9) 履歴のある不連続面のAEイベントは履歴のない不連続面のそれと比べるとかなり少なくなる。

第3節

(10) せん断応力に関して、先行履歴の垂直応力が5MPaの場合、履歴せん断変位の影響はほとんどなく、せん断剛性、残留せん断応力はほぼ一致する。

(11) 垂直変位に関して、先行履歴の垂直応力が5MPaの場合、履歴せん断変位が大きくなるにしたがって、せん断初期における、減少領域は大きくなる。

(12) 透水係数に関して、先行履歴の垂直応力が5MPaの場合、履歴せん断変位が大きくなるにしたがって、せん断前の透水係数は大きくなる傾向にある。

(13) 履歴せん断変位が大きくなるにしたがってAEイベントは大きなピークを示し、またAEイベントの総数も多くなる。

(14) せん断剛性に関して、5-5 Not Opened Caseの場合、履歴せん断変位による差異はほとんどないが10-5 Not Opened Caseの場合、履歴せん断変位が大きくなるにしたがってせん断剛性は小さくなる傾向にあり、履歴せん断変位がひずみ軟化領域(4mmと6mm)の間で大きく変化する。

(15) 垂直変位に関して、先行履歴の垂直応力が10MPaの場合、5MPaの時と同様に、せん断初期において、履歴せん断変位が大きくなるにしたがってダイレーションの減少領域が大きくなる傾向にあるが、その傾向がより顕著に現れている。また履歴せん断変位が10mmの場合、その挙動は他の挙動と比べて大きく異なる。

(16) 透水係数に関して、先行履歴の垂直応力が10MPaの場合、5MPaの時と同様に、せん断前において、履歴せん断変位が大きくなるにしたがって大きくなる傾向にある。また履歴せん断変位が10mmの場合、その挙動は他の挙動と大きく異なり、その傾向はダイレーション挙動とよく相関する。

(17) せん断応力に関して、実験を連続して行ったNot Opened Caseの場合、ピークを示さないが、不連続面作成後、ゲージを取り除いたOpened Caseの場合ピークを示す。

第4節

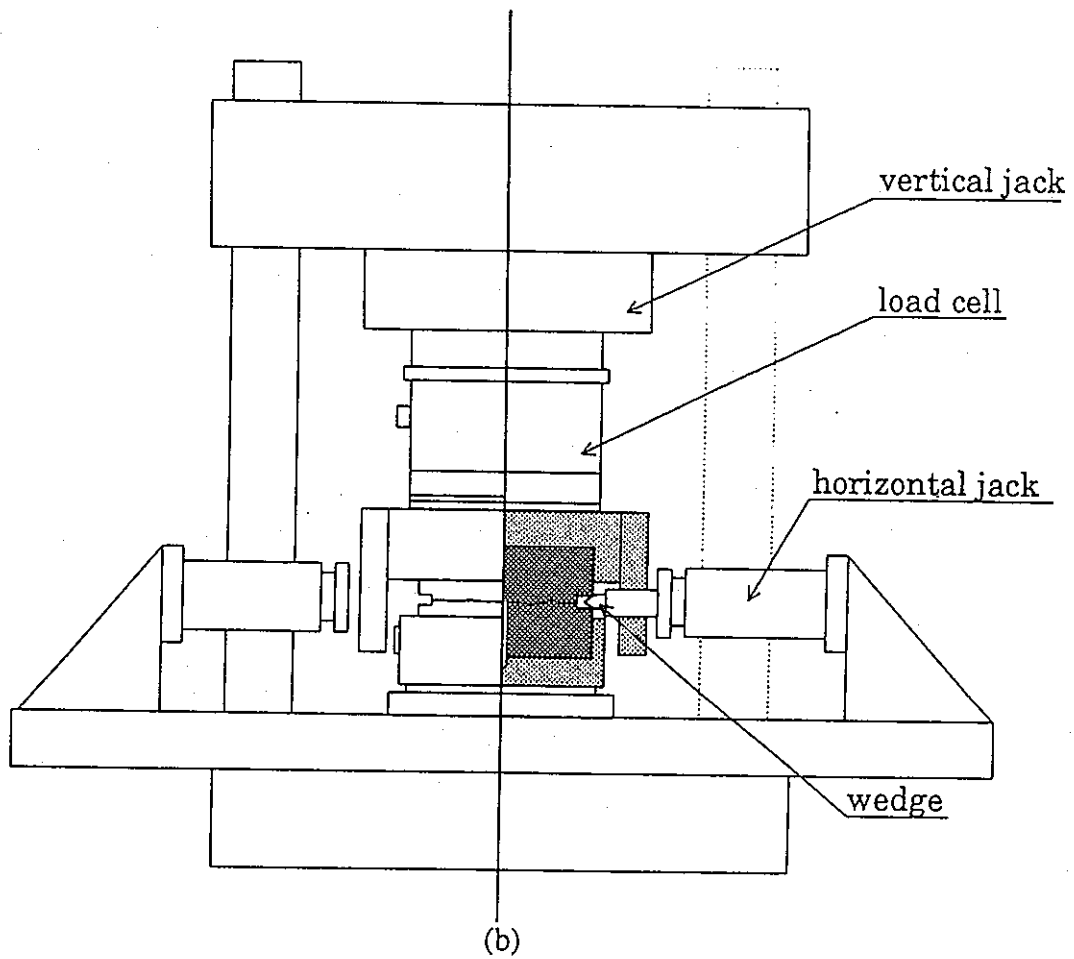
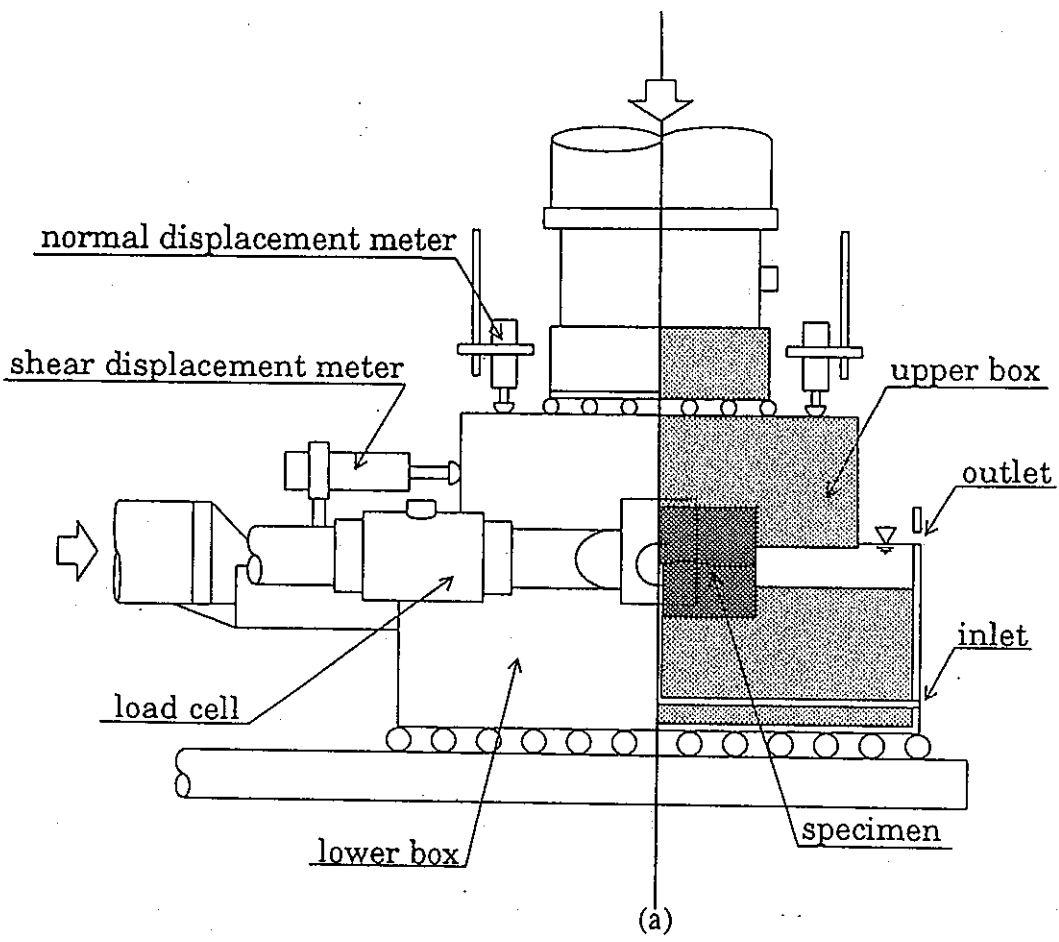


图4-1 Shear-flow coupling test apparatus (a)side view, (b)front view.

(18) 自然の不連続面のせん断応力に関して、その残留応力は第三章のCase2のそれと比べて若干小さくなる。

(19) 自然の不連続面の垂直変位に関して、せん断初期における垂直変位の減少領域がかなり大きくなっている。また第三章のCase2に示すダイレーション挙動と比較することにより、自然の不連続面が現場で5MPa~20MPaの先行履歴を受けていることが推測される。

(20) 自然の不連続面の垂直剛性は、第四章の10-5 Not Opened Case に示す履歴せん断変位が10mmの時と比べて若干小さくなっている。

(21) 自然の不連続面の透水挙動は、第三章のCase2の5MPa - 5MPa, 10MPa - 5MPa, 20MPa - 5MPaの挙動と類似しており、自然の不連続面が5MPa~20MPaの履歴を受けていることが推測される。

(22) 自然の不連続面は、風化によって壁面強度が低下しており、(18) (20) に述べたようにせん断剛性、残留強度、AEイベントの低下が生じる。

(23) 履歴せん断変位が大きくなるにしたがって凹凸の破壊は局所的破壊から、全体的破壊に移行していく。また凹凸面にはその方向によってせん断されやすい方向とされにくい方向がある。

(24) パワースペクトル密度に関して、せん断前とせん断後ではパワーが低下する。このことは凹凸プロファイルがせん断によって滑らかになったことを示していると考えられる。

4.6 今後の課題

・自然の不連続面は現場で風化を受けており、壁面強度が低下している。そのため履歴変位、および履歴応力が少し大きく見積もられていると考えられる。今後は風化の影響を考慮した評価方法を検討する必要がある。

・自然の不連続面に関して、今回は、現場で受けたせん断変位をかみ合いの状態に戻して実験を行ったが、現場でずれた状態からの実験も行う必要がある。

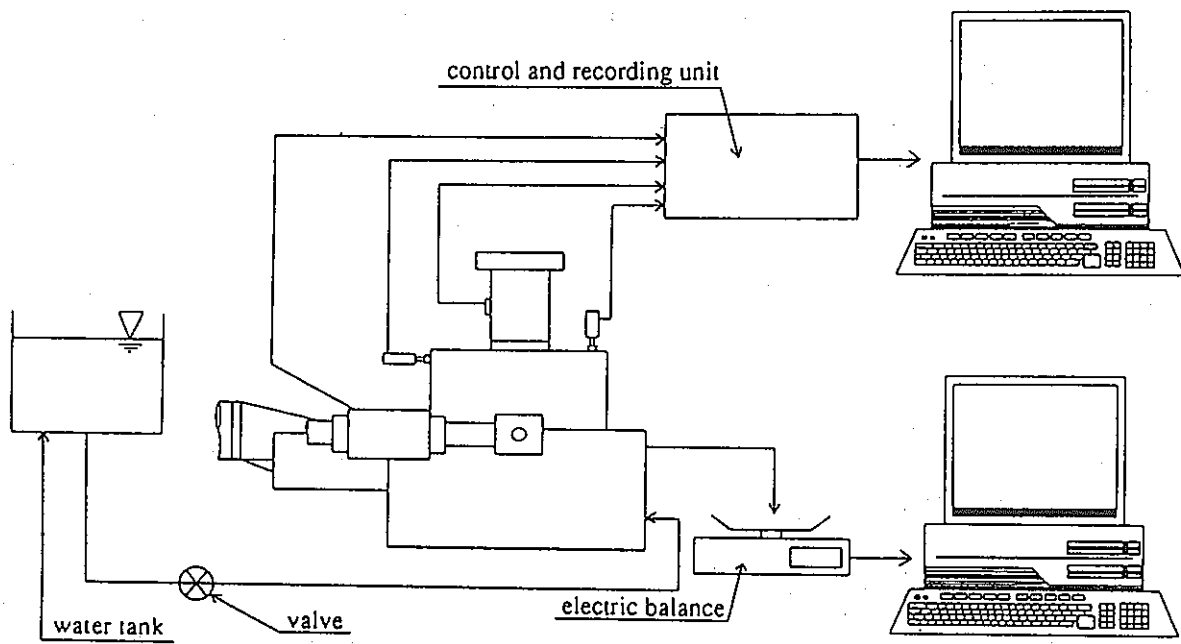


图4-2 Schematic view of shear-flow coupling test system.

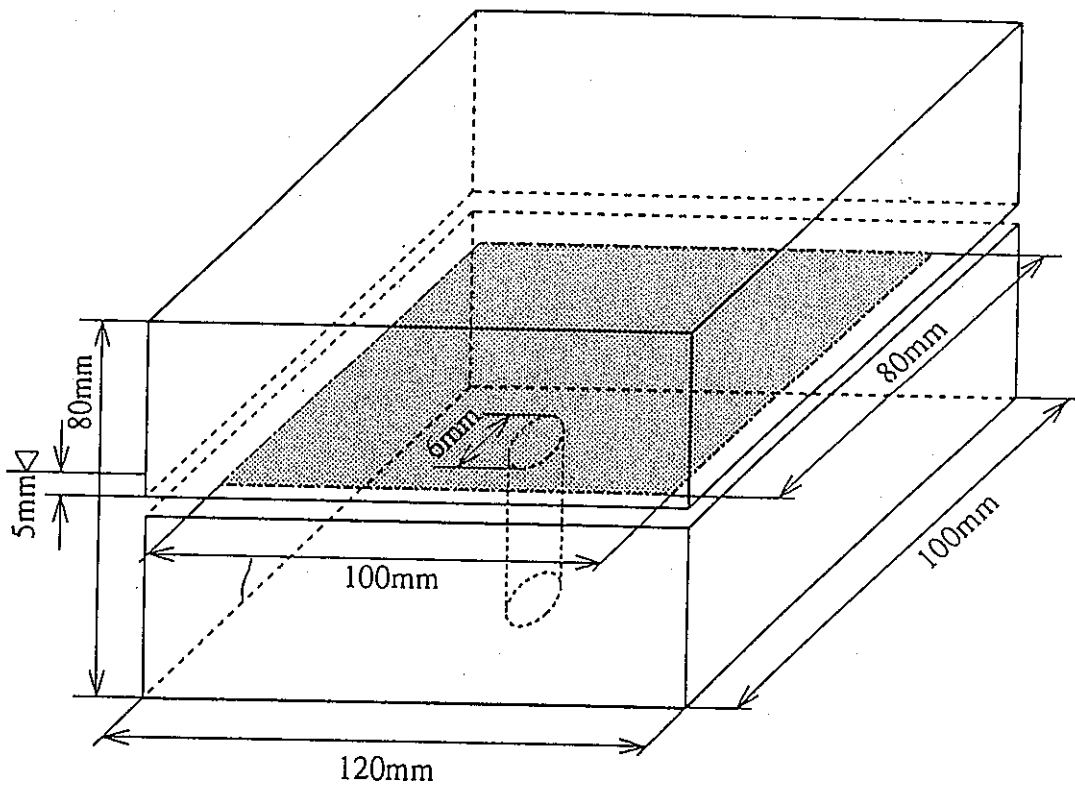


图4-3 Specimen from Nangen, Korea

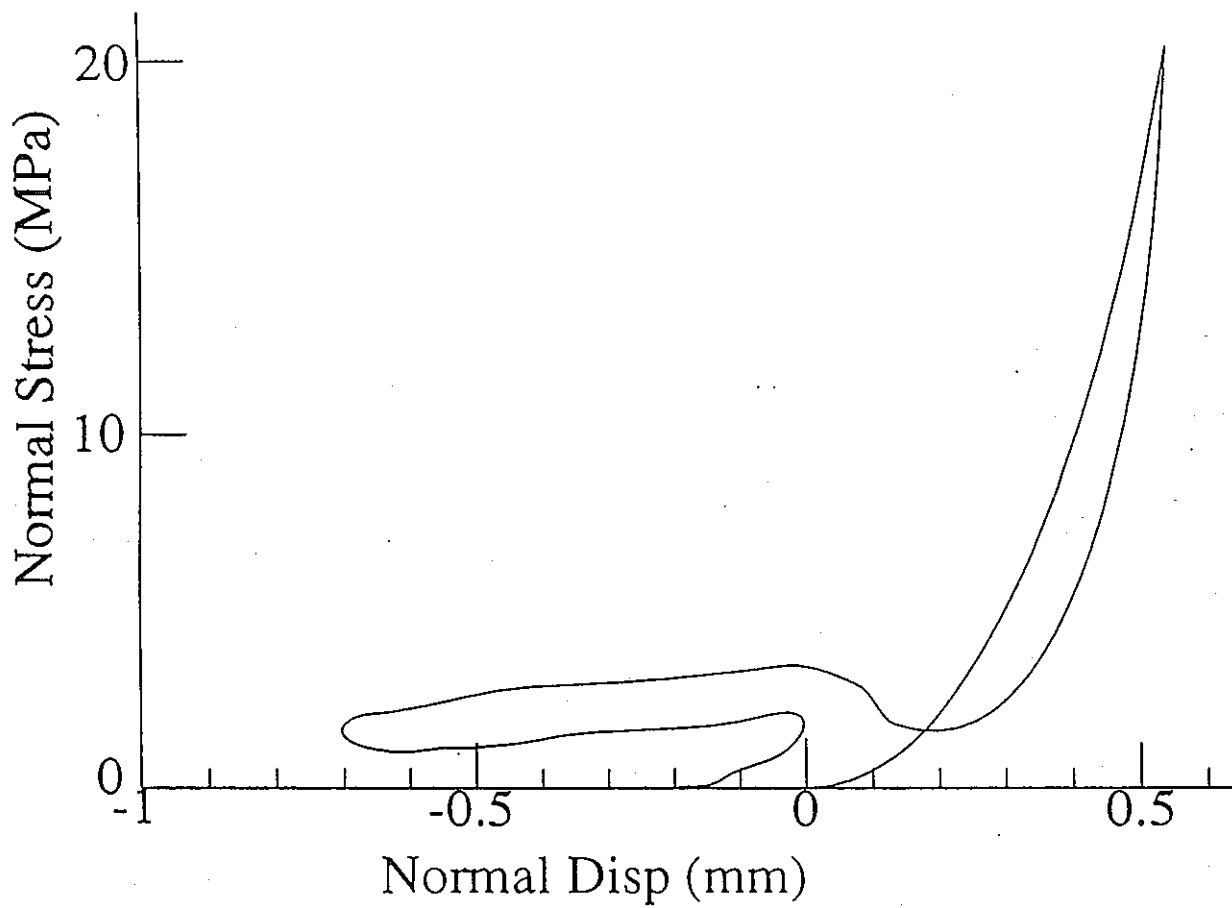


图4-4 Normal stress vs. normal displacement curves at the time of break

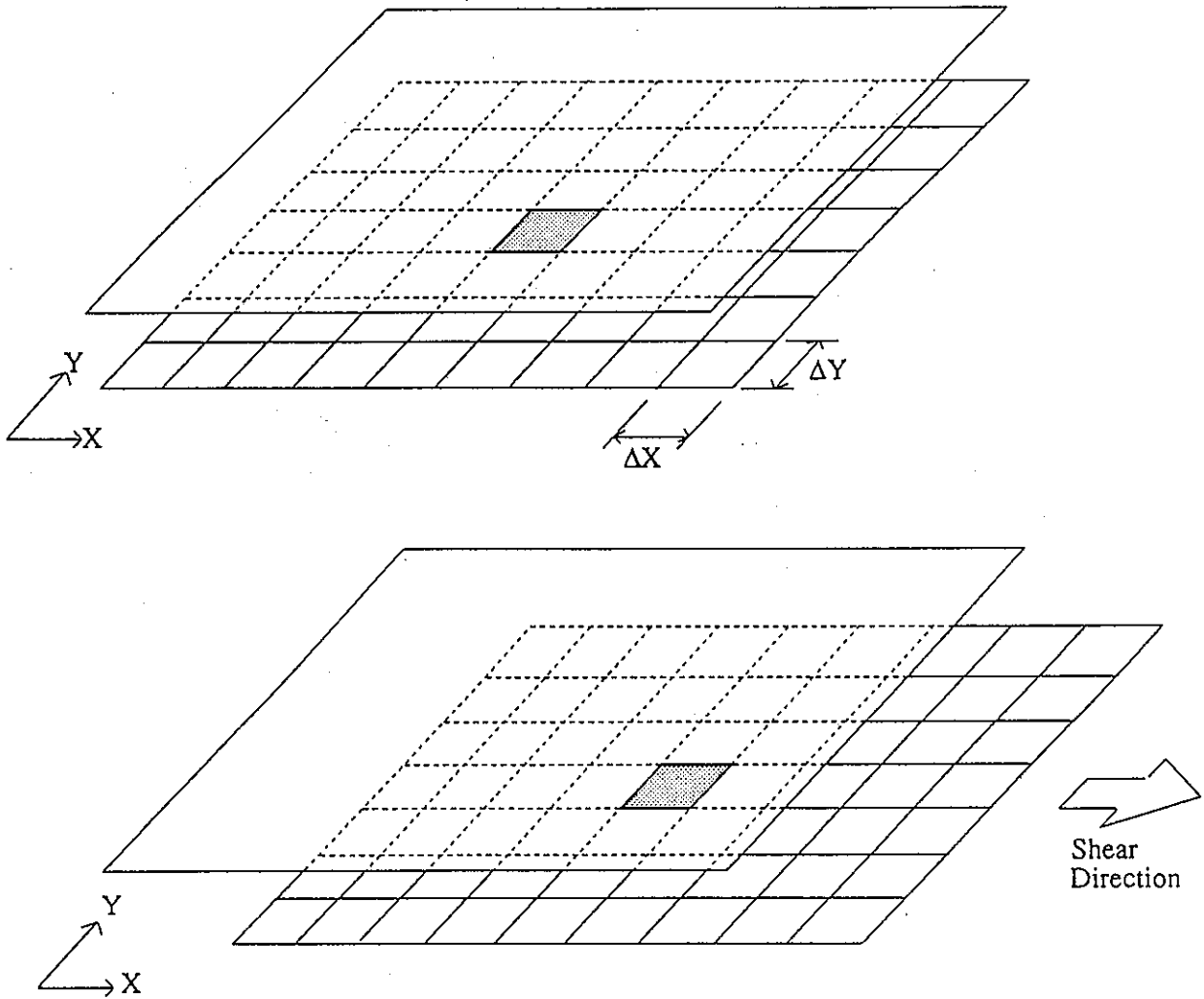


图4-5 Fracture model divided into square meshes for calculation of hydraulic conductivity.

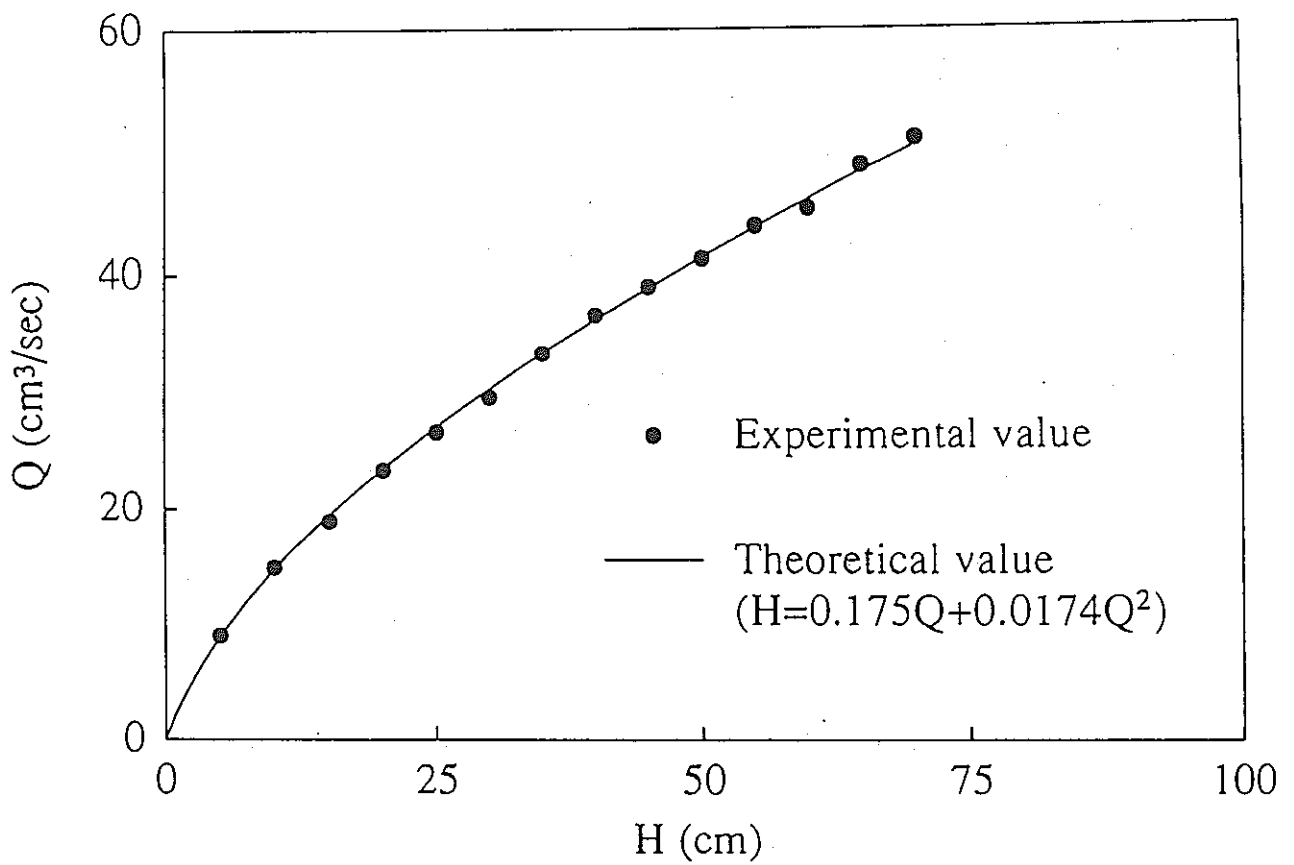


图4-6 Relationship between flow rate and water head obtained from flow test when normal stress is not applied.

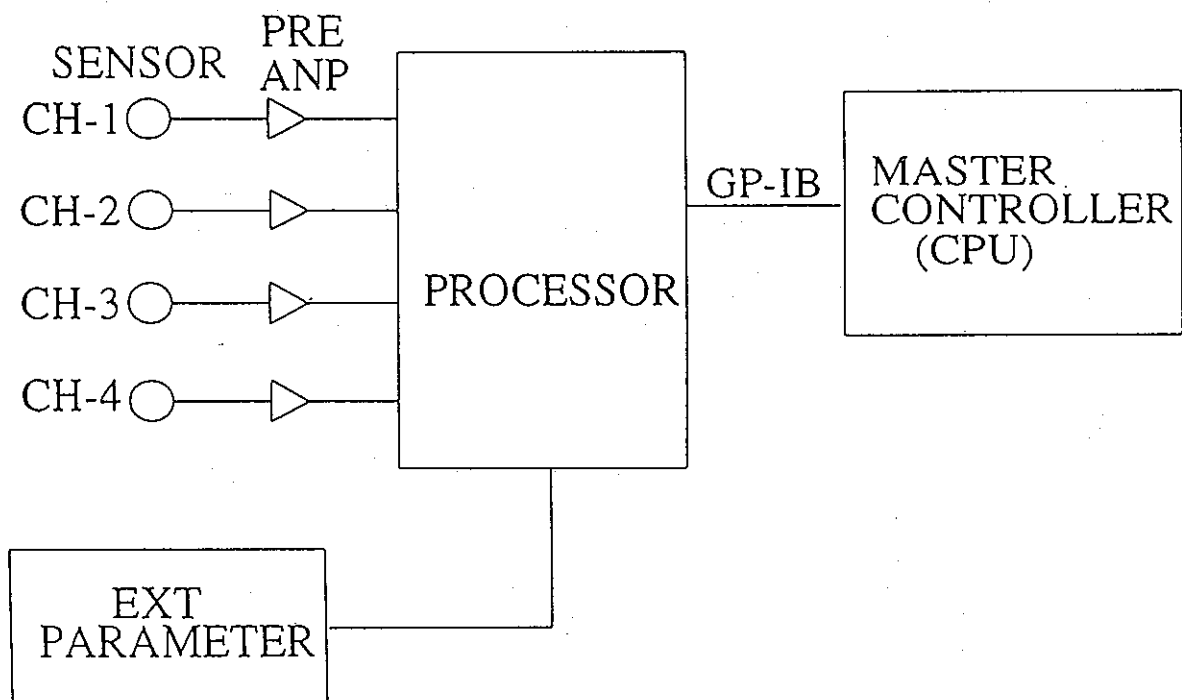


图4-7 Schematic view of AE measurement system.

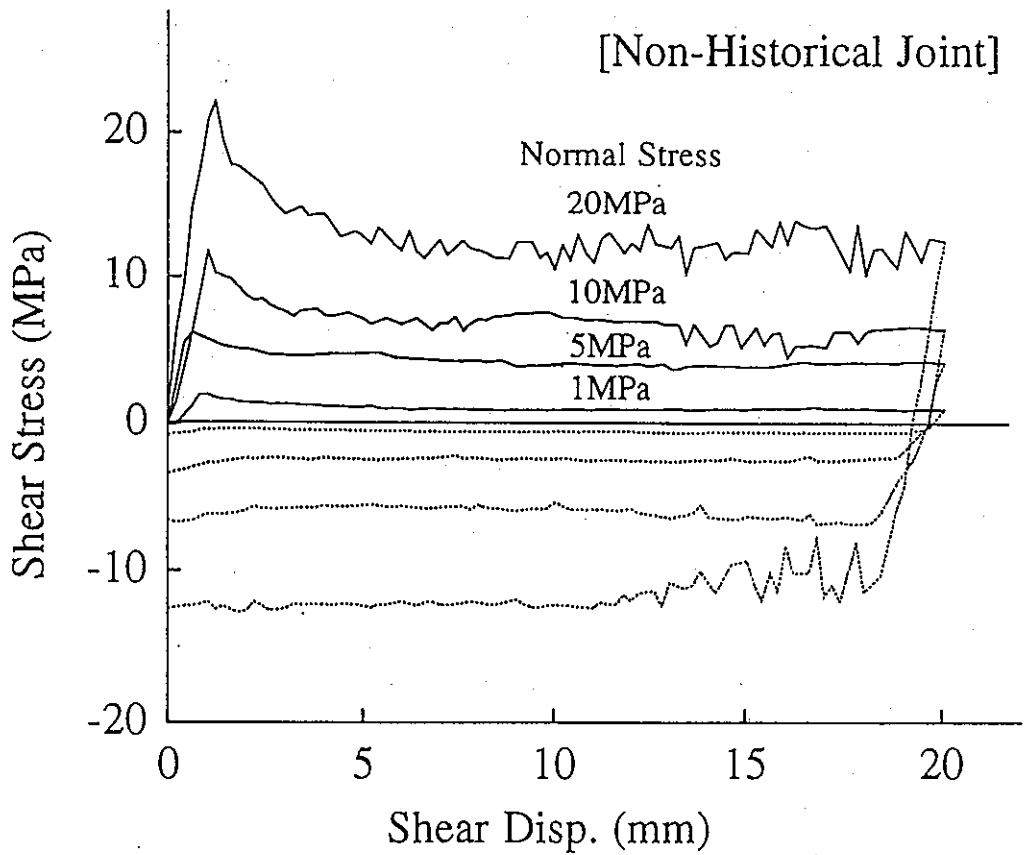
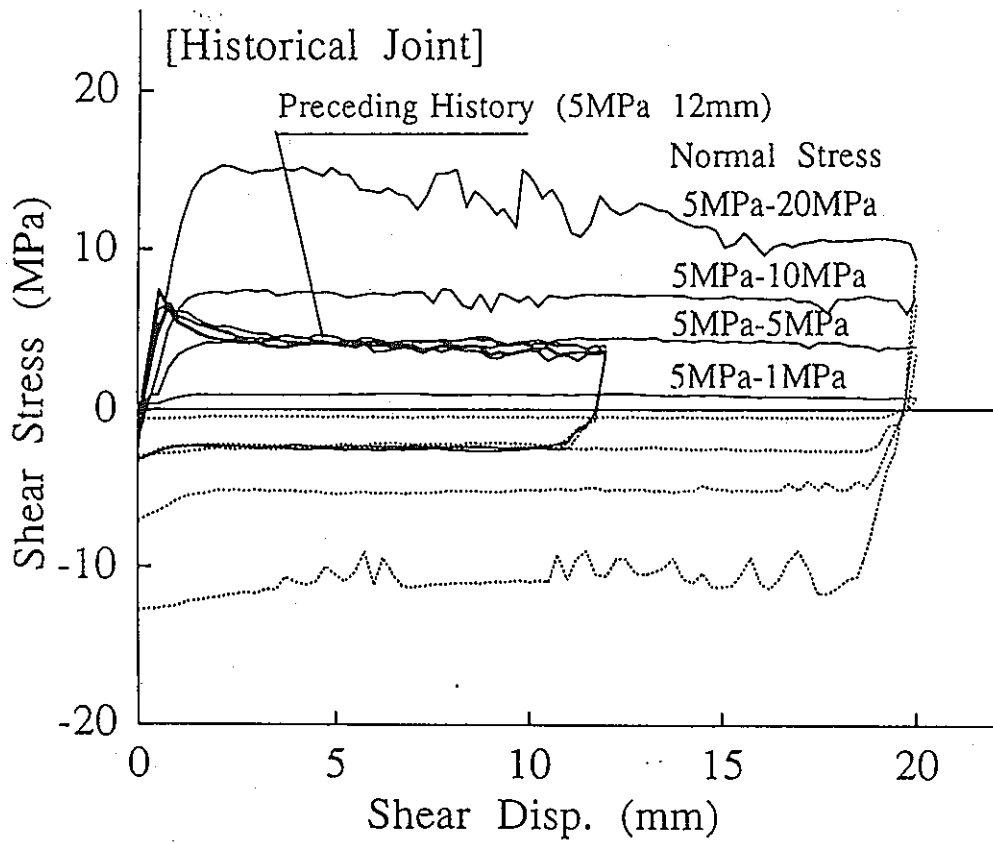


图4-8 Shear stress vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses of 1, 5, 10 and 20MPa.

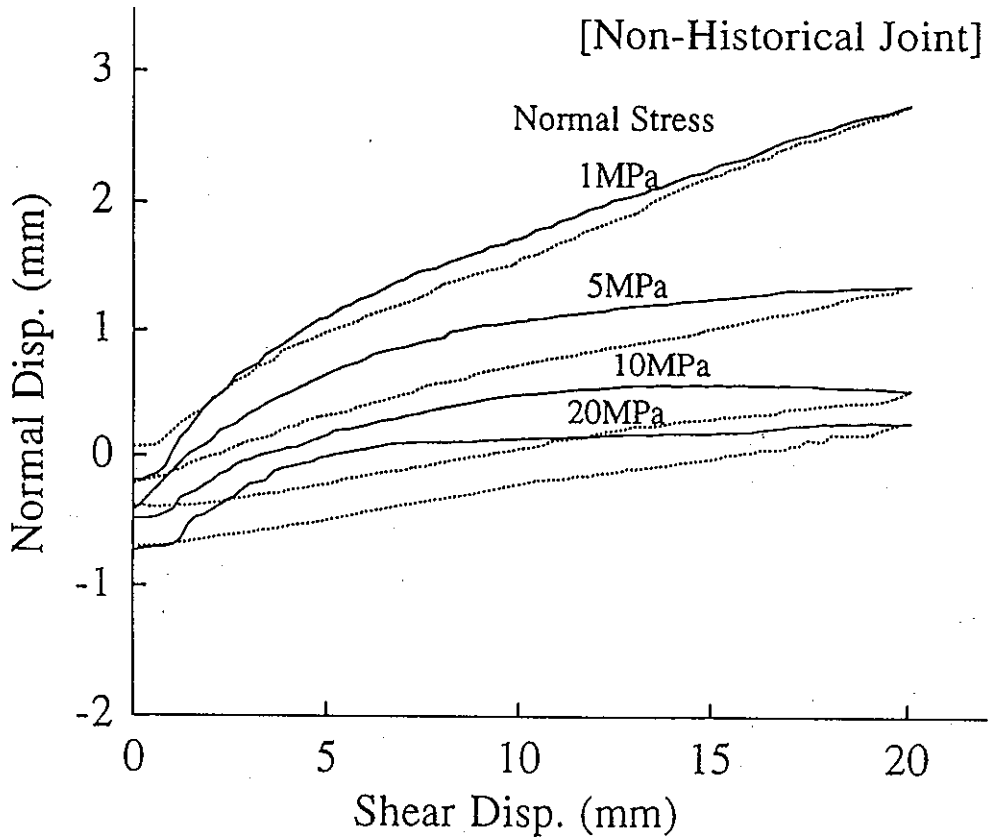
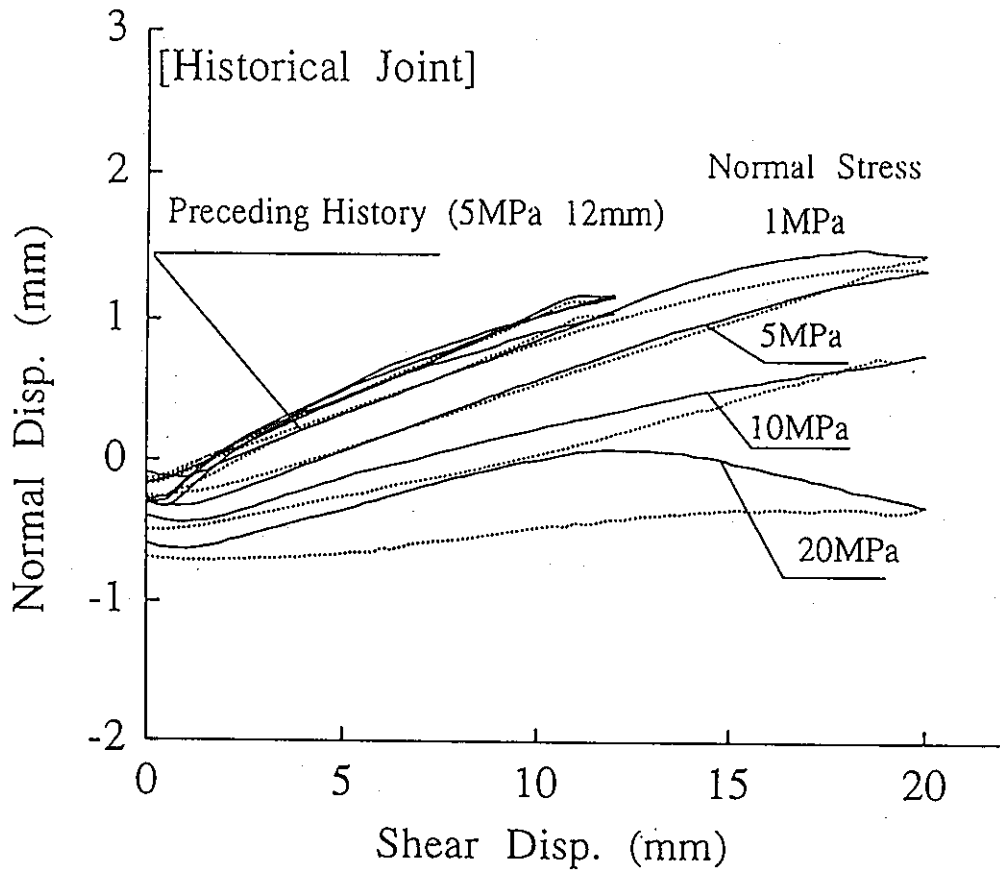
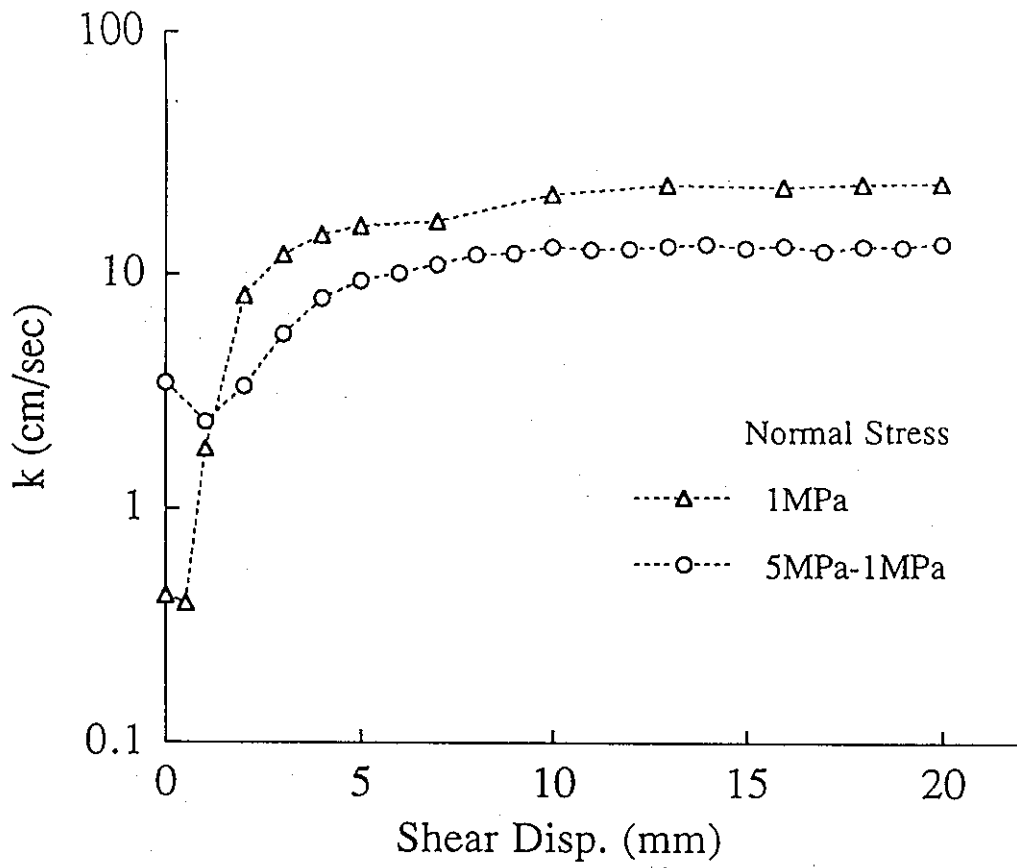
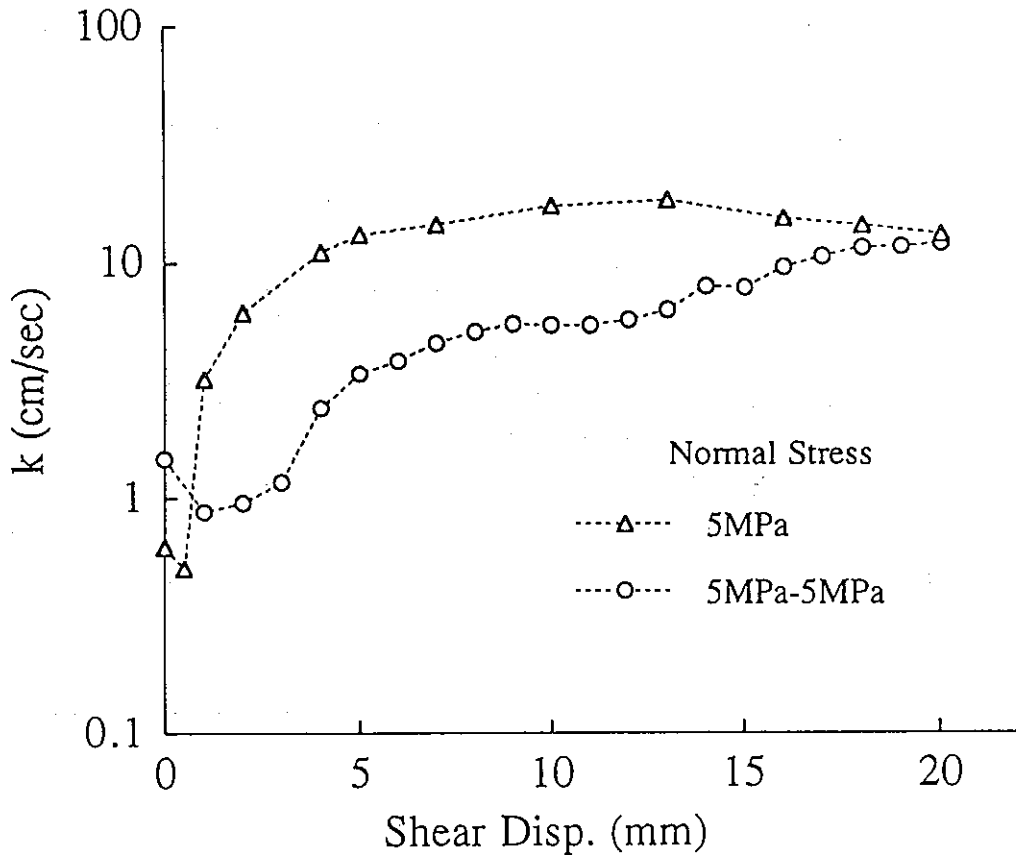


图4-9 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses of 1, 5, 10 and 20MPa.

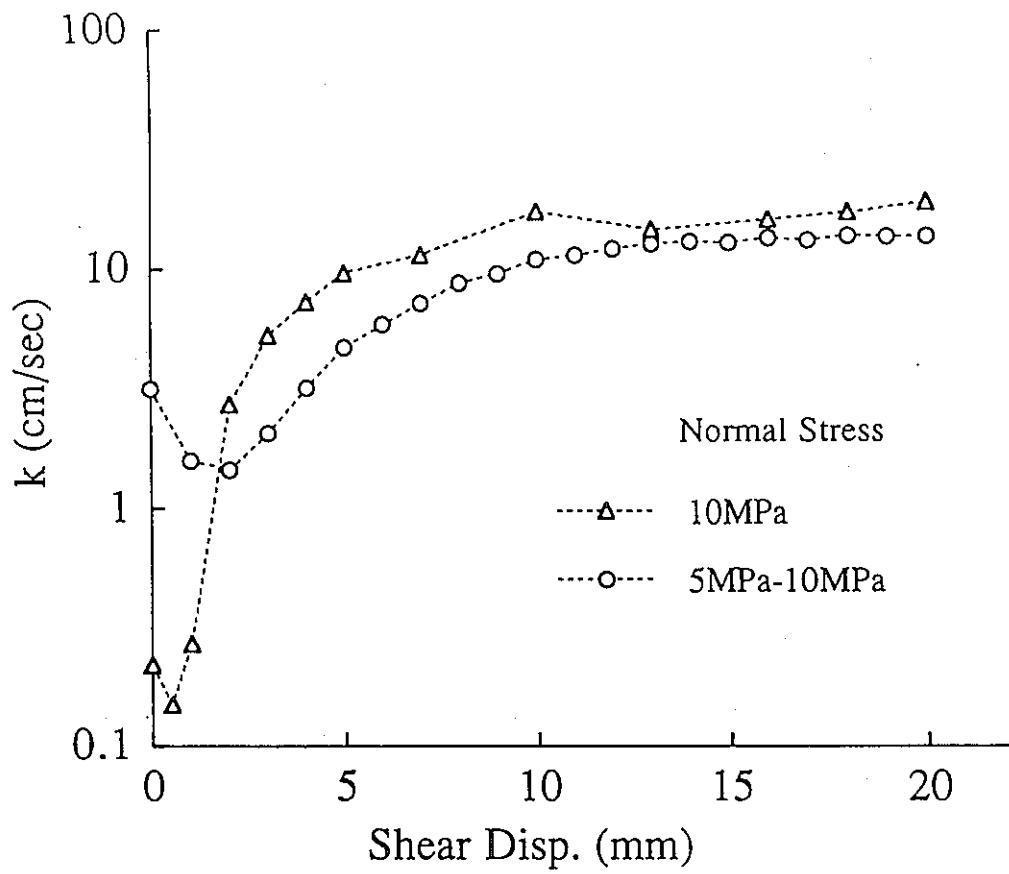


(a)

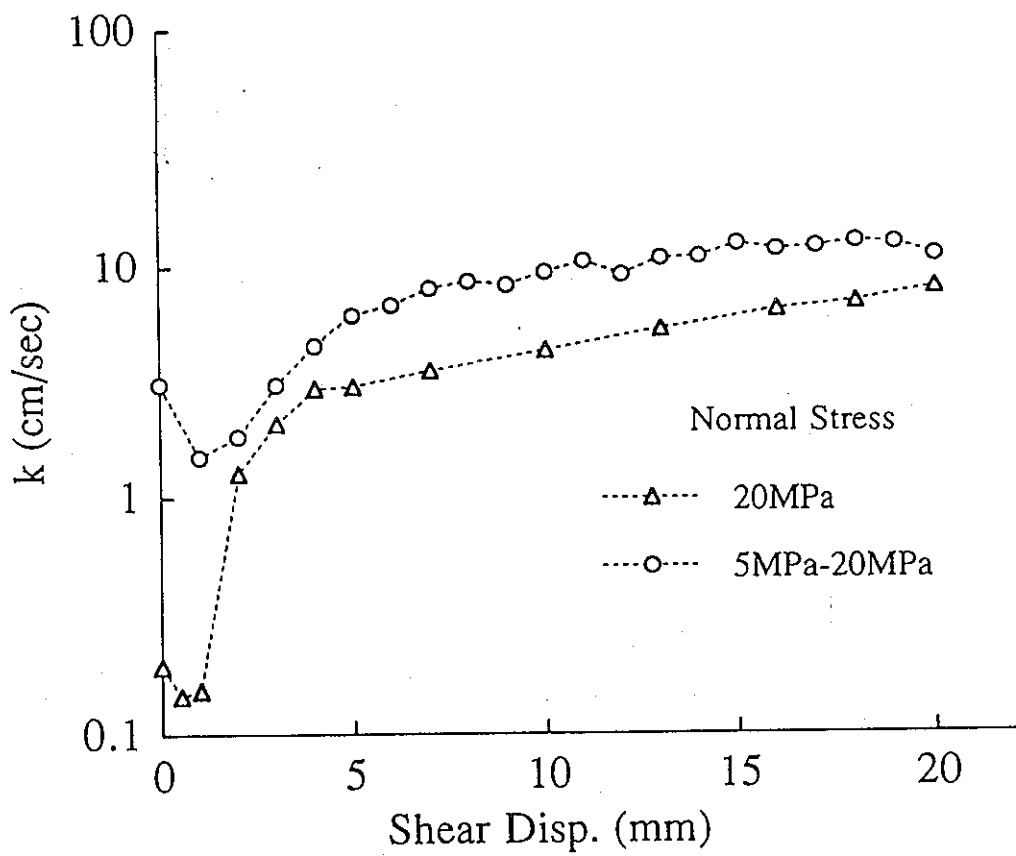


(b)

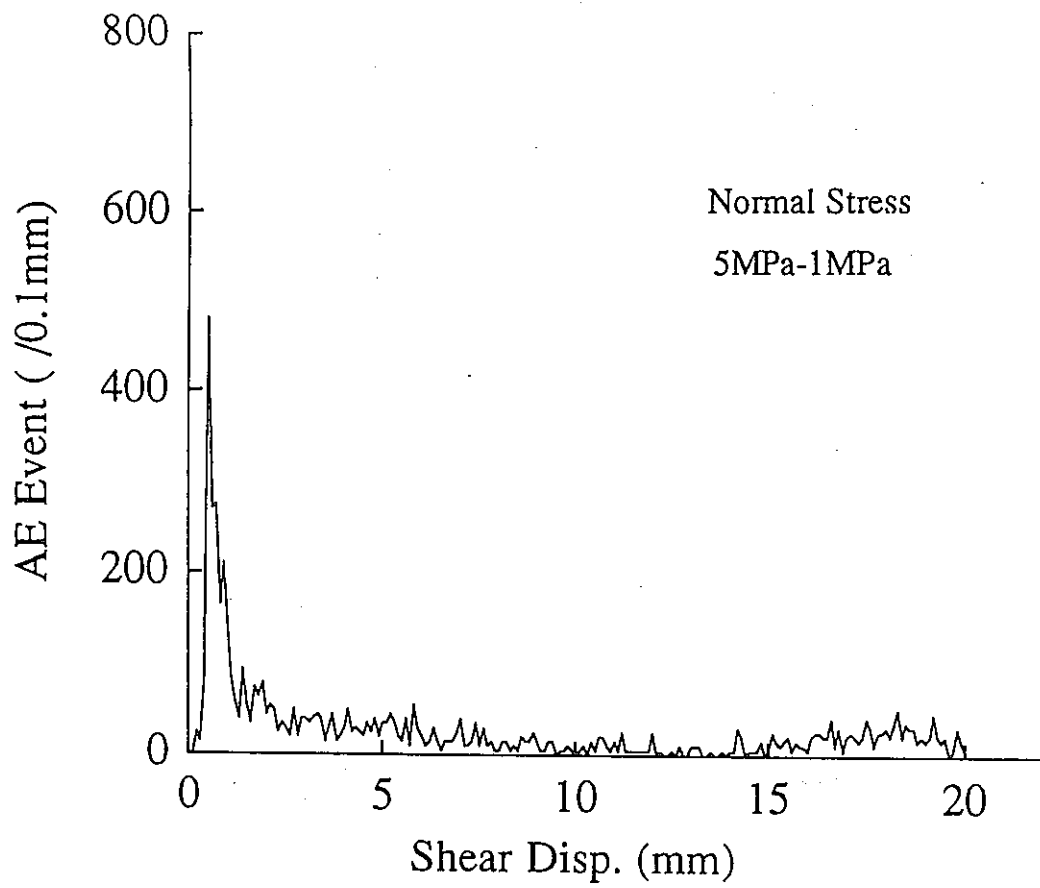
图 4-10 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams of historical joint and non-historical joint, for constant normal stresses of 1, 5, 10 and 20MPa.



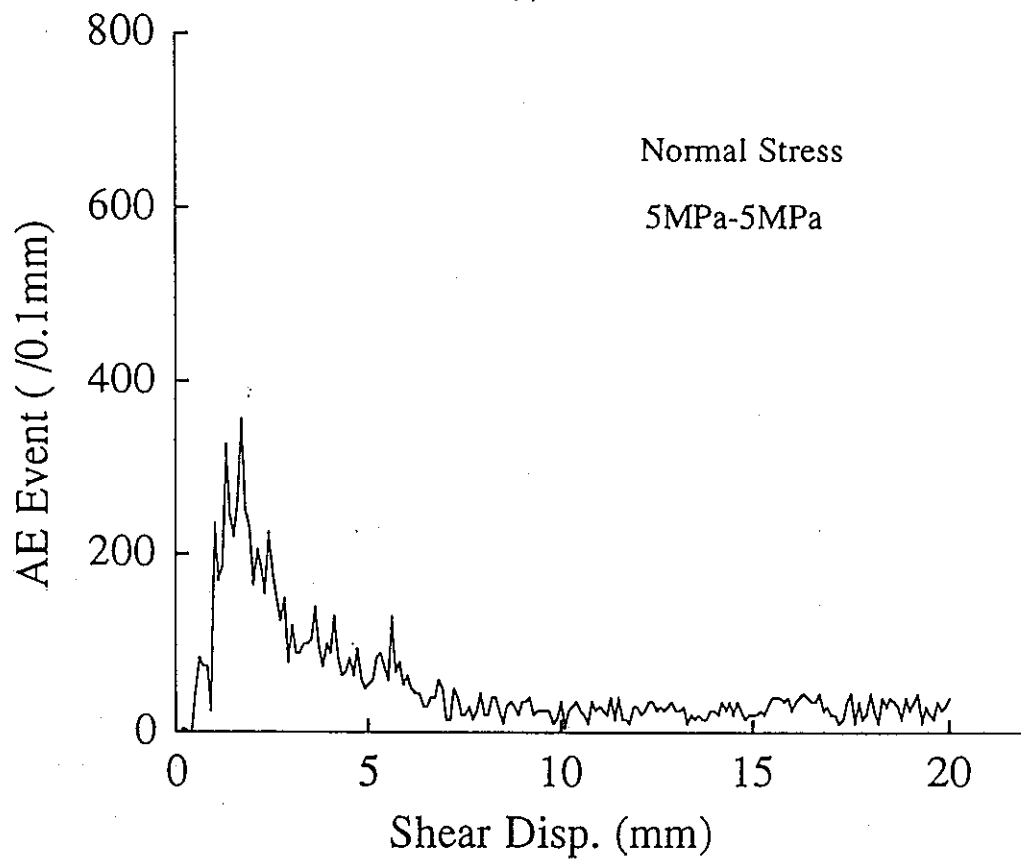
(c)



(d)

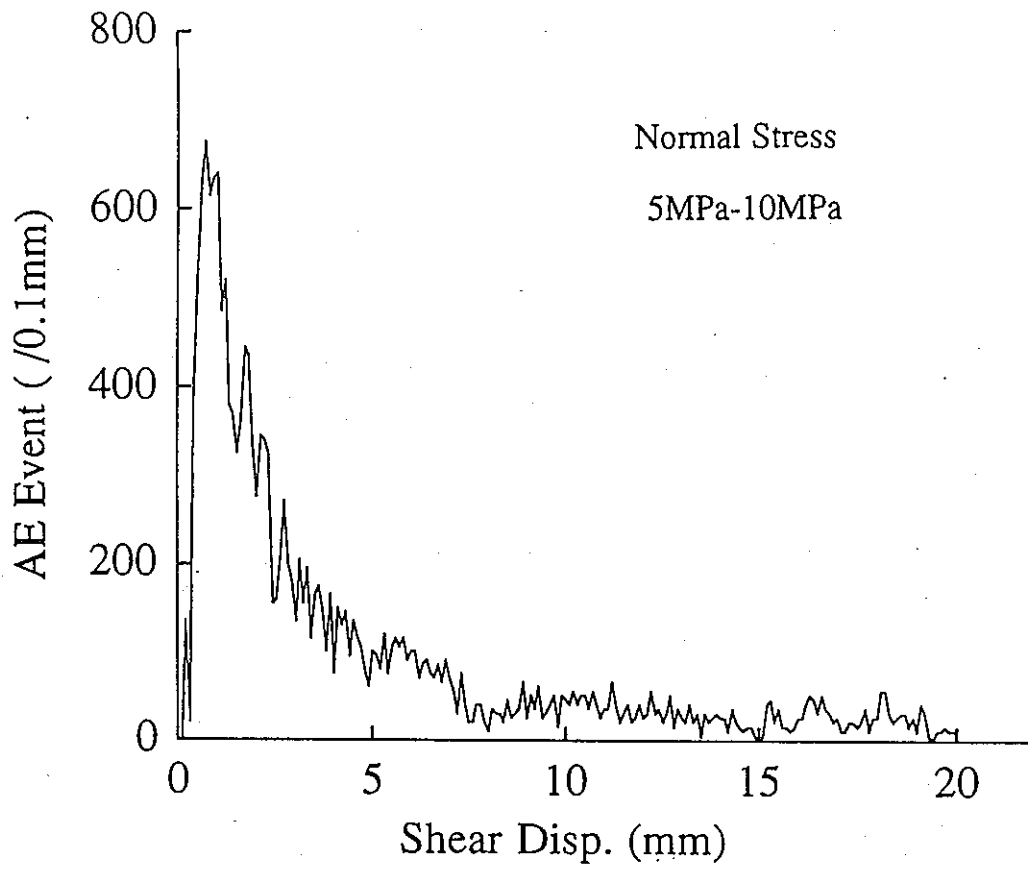


(a)

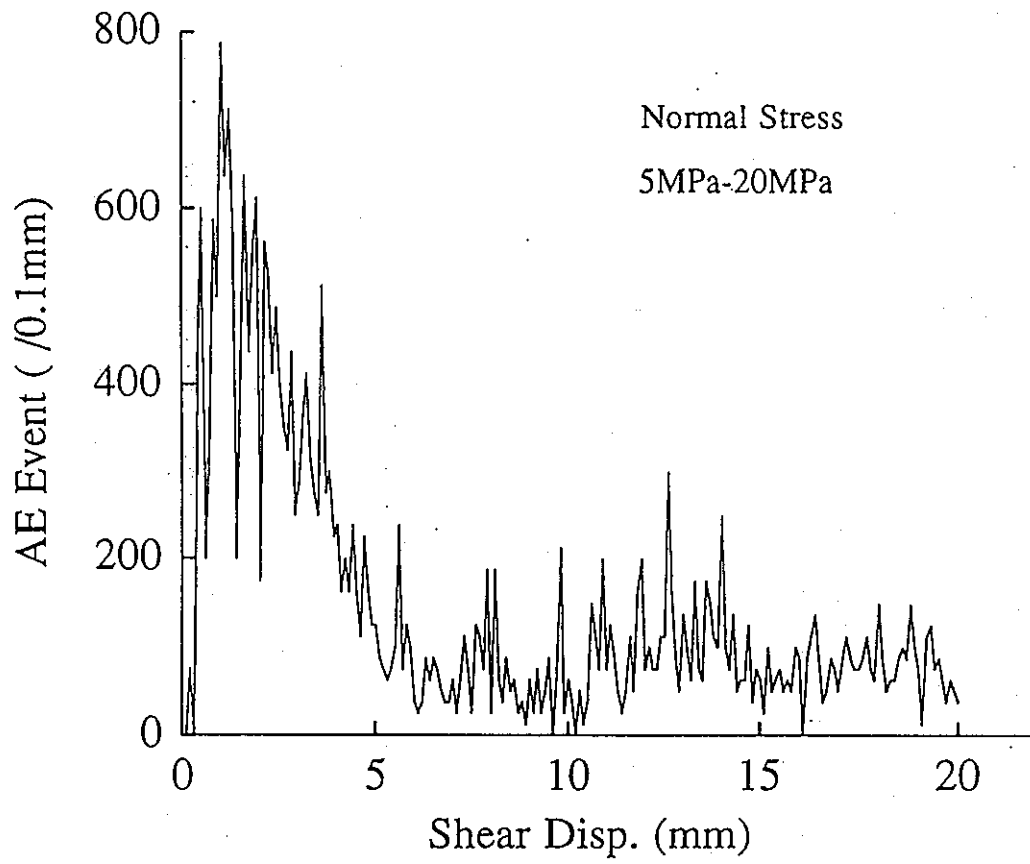


(b)

图4-11 Relationship between AE event count and shear displacement of historical, for constant normal stress of 1, 5, 10 and 20MPa.



(c)



(d)

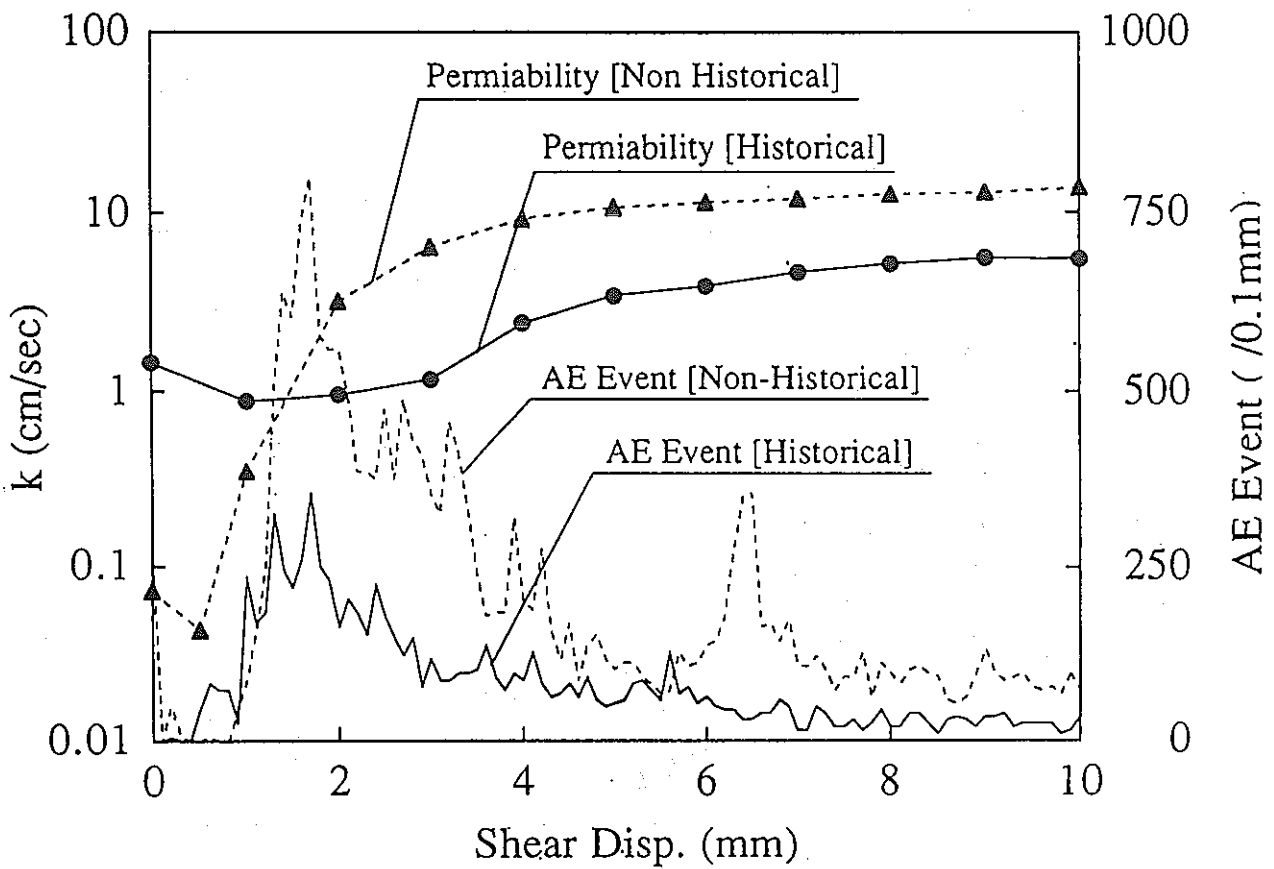
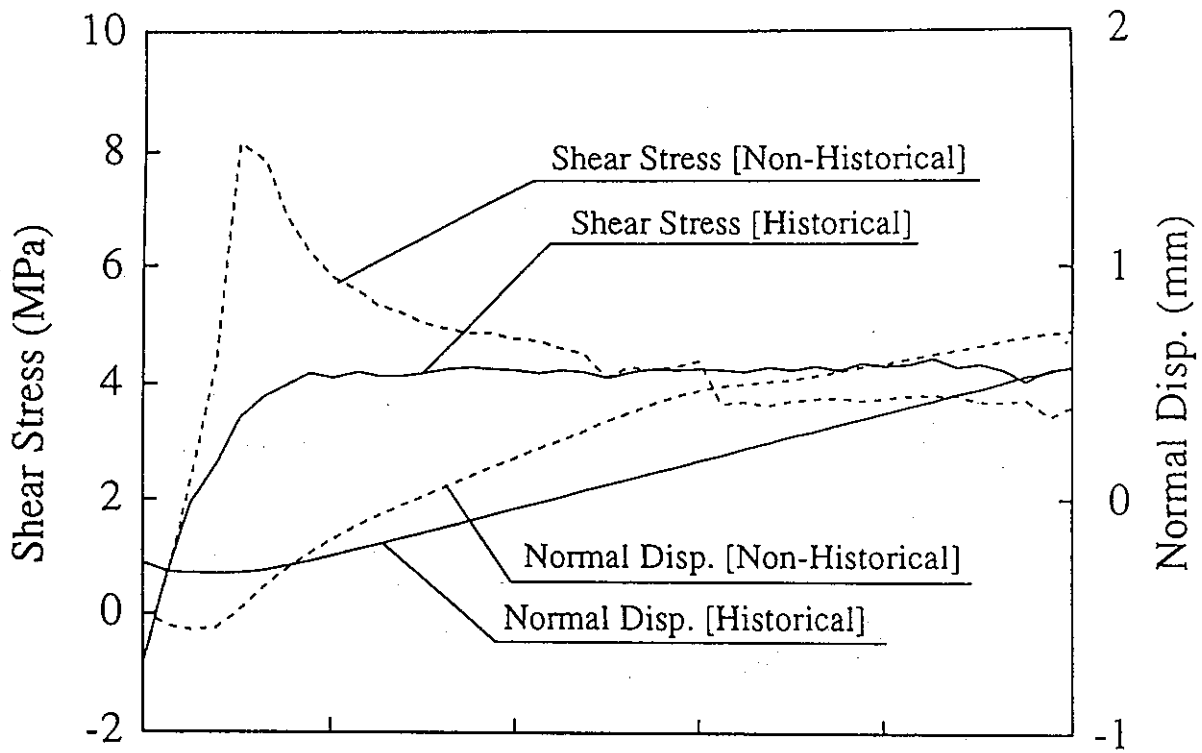
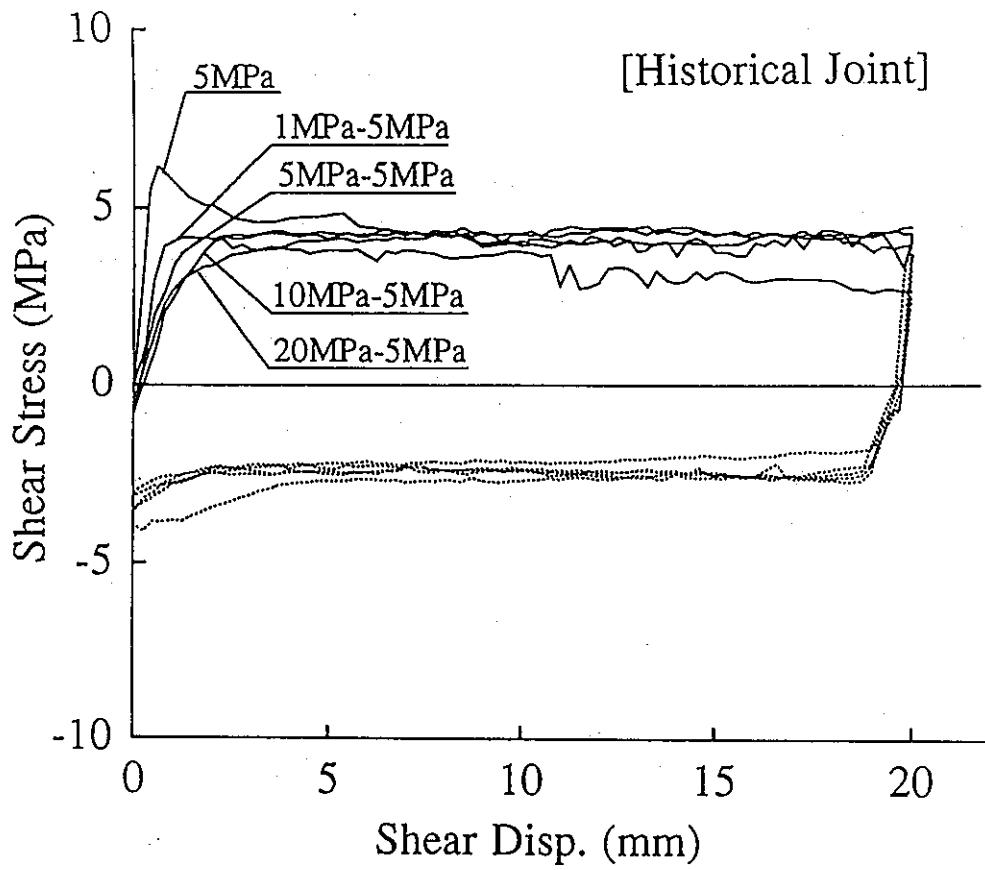
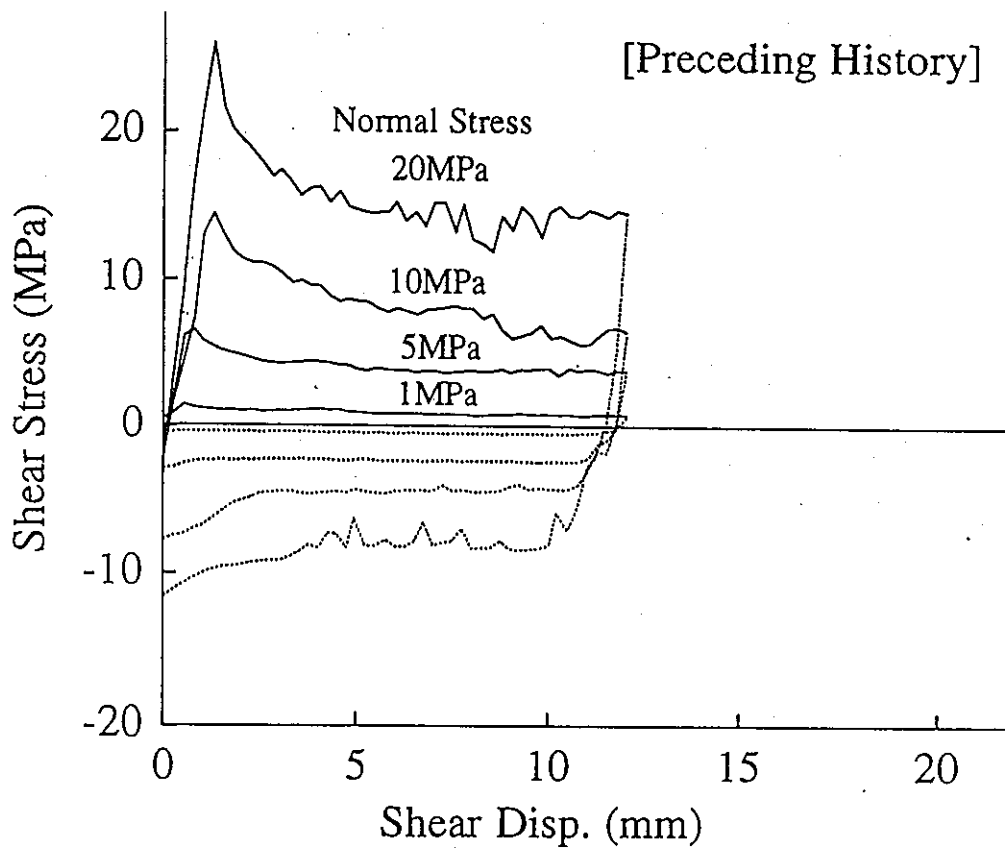


图4-12 Shear-dilation flow characteristics, and AE event count for the normal stress of 5MPa.(solid line :historical joint, broken line :non-historical joint)



☒4-13 Shear stress vs. shear displacement curves, for different preceding history.



☒4-14 Shear stress vs. shear displacement curves of preceding history, for different constant normal stresses of 1, 5, 10 and 20MPa.

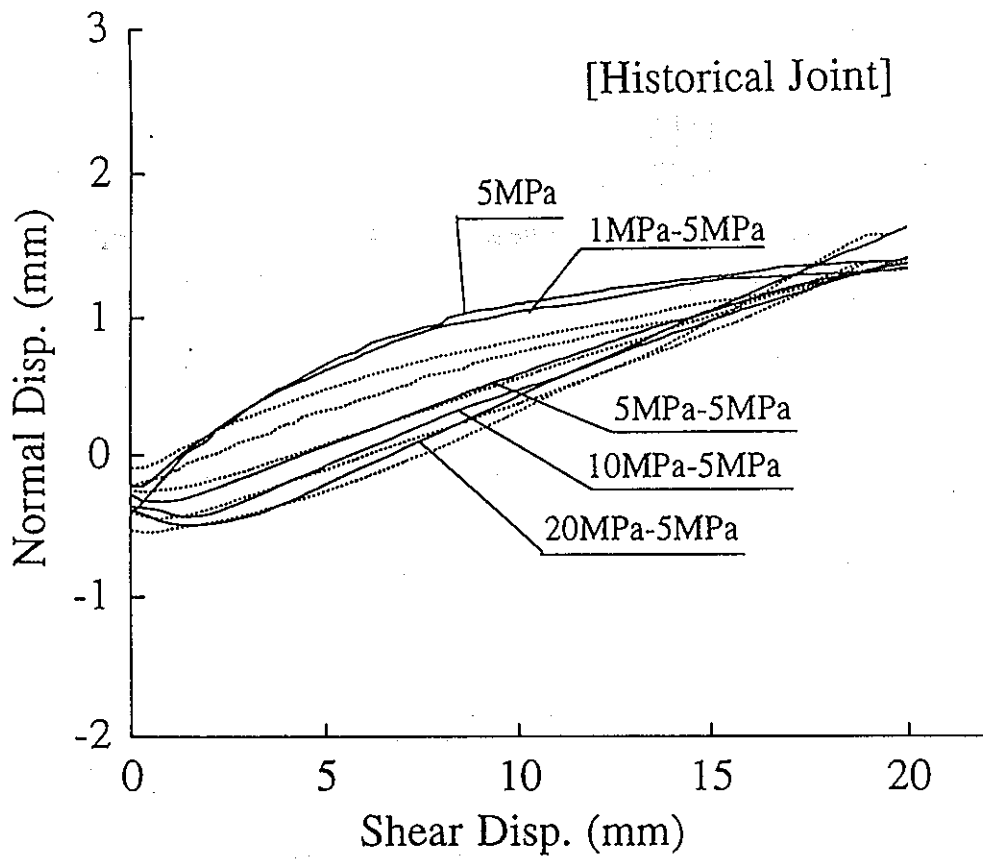


图 4-15 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different preceding history

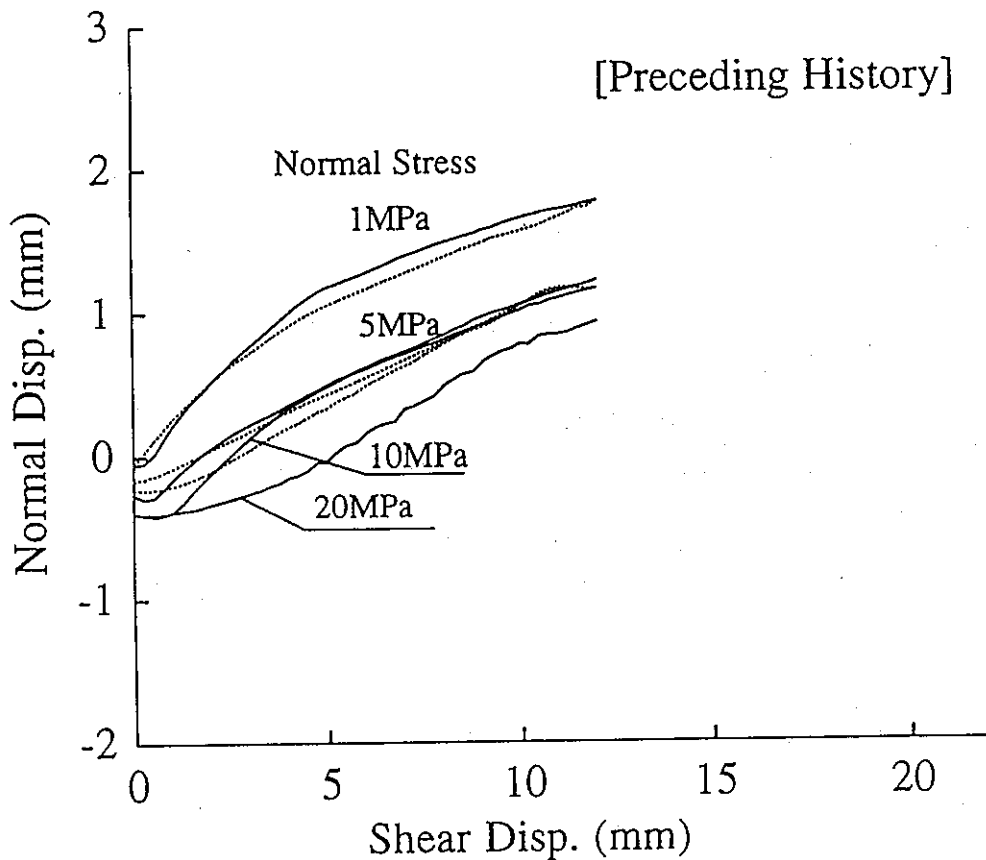


图 4-16 Normal displacement vs. shear displacement curves of preceding history, for different constant normal stresses of 1, 5, 10 and 20MPa.

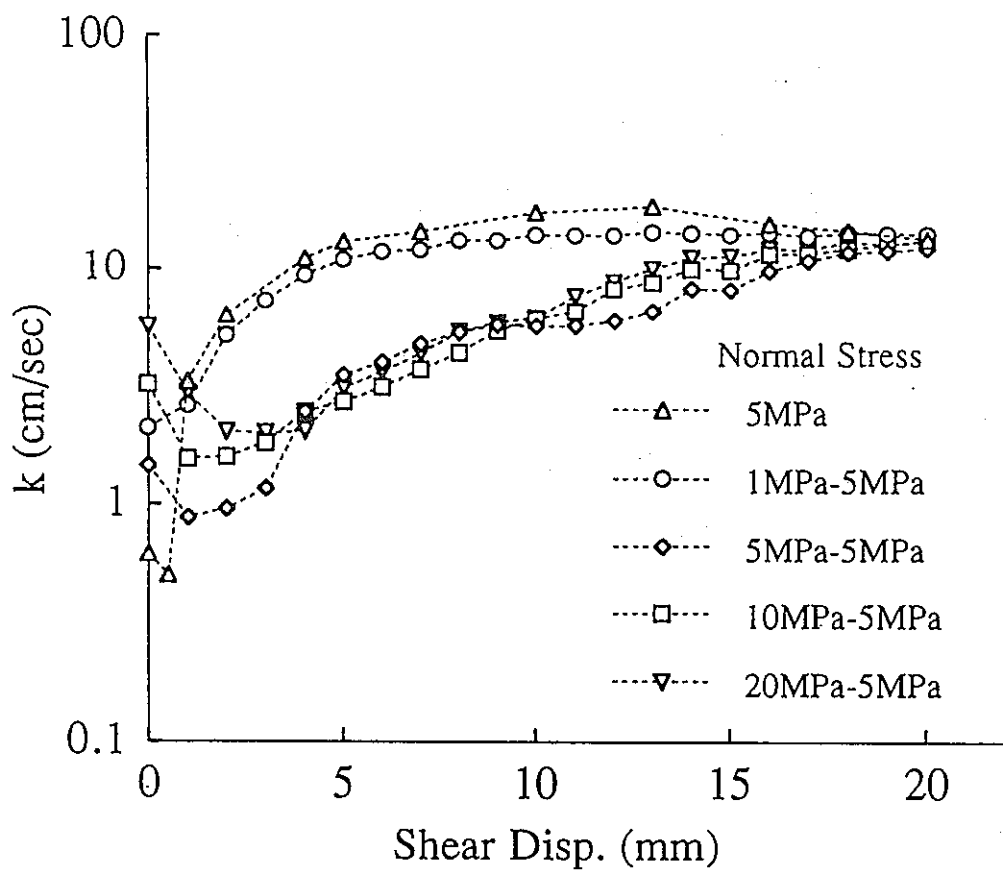


图4-17 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different preceding history.

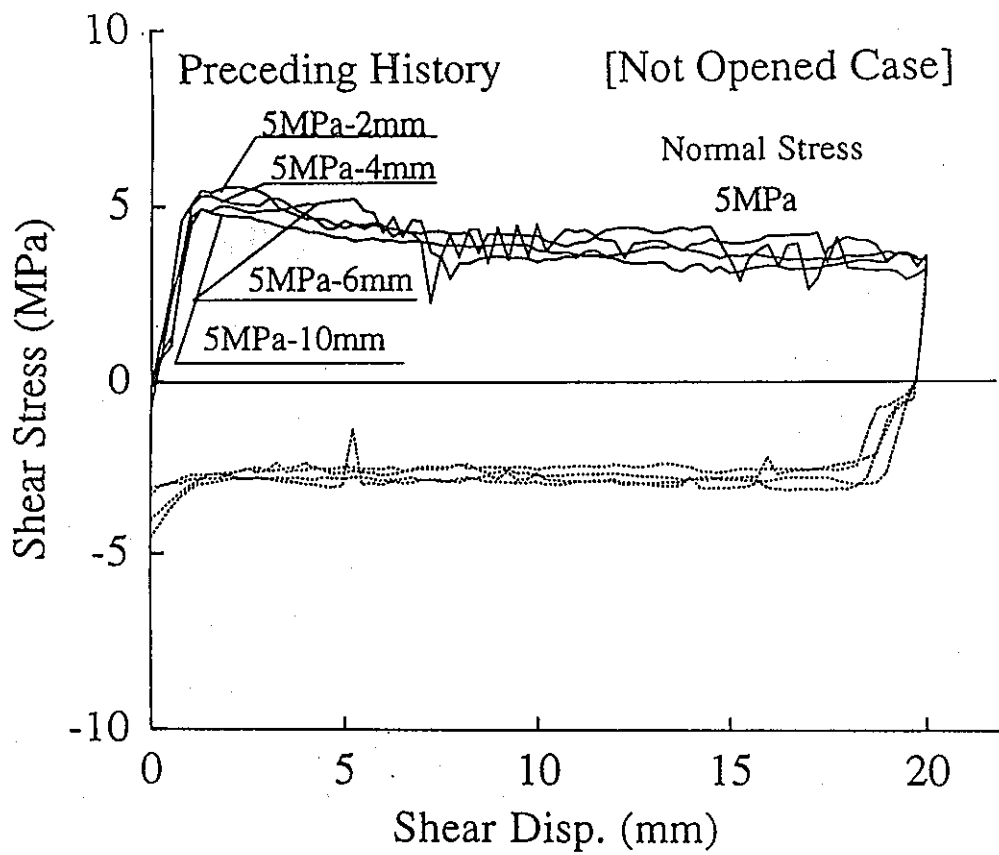


图4-18 Shear stress vs. shear displacement curves, for different preceding history.

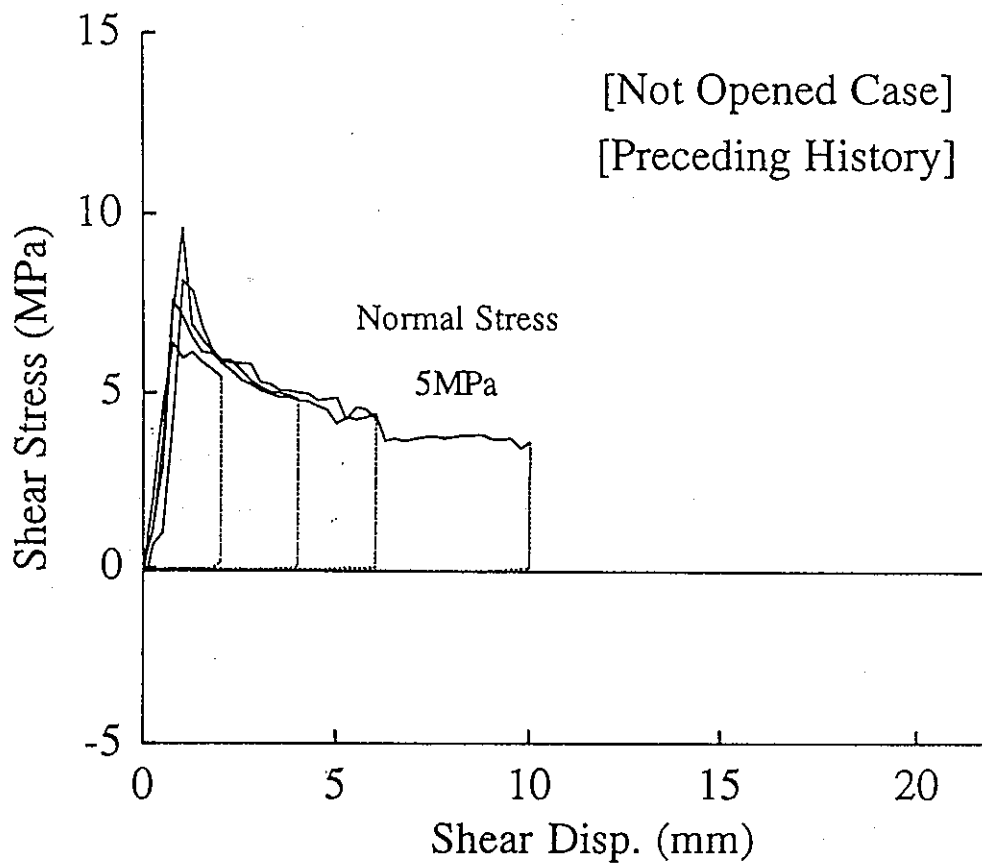
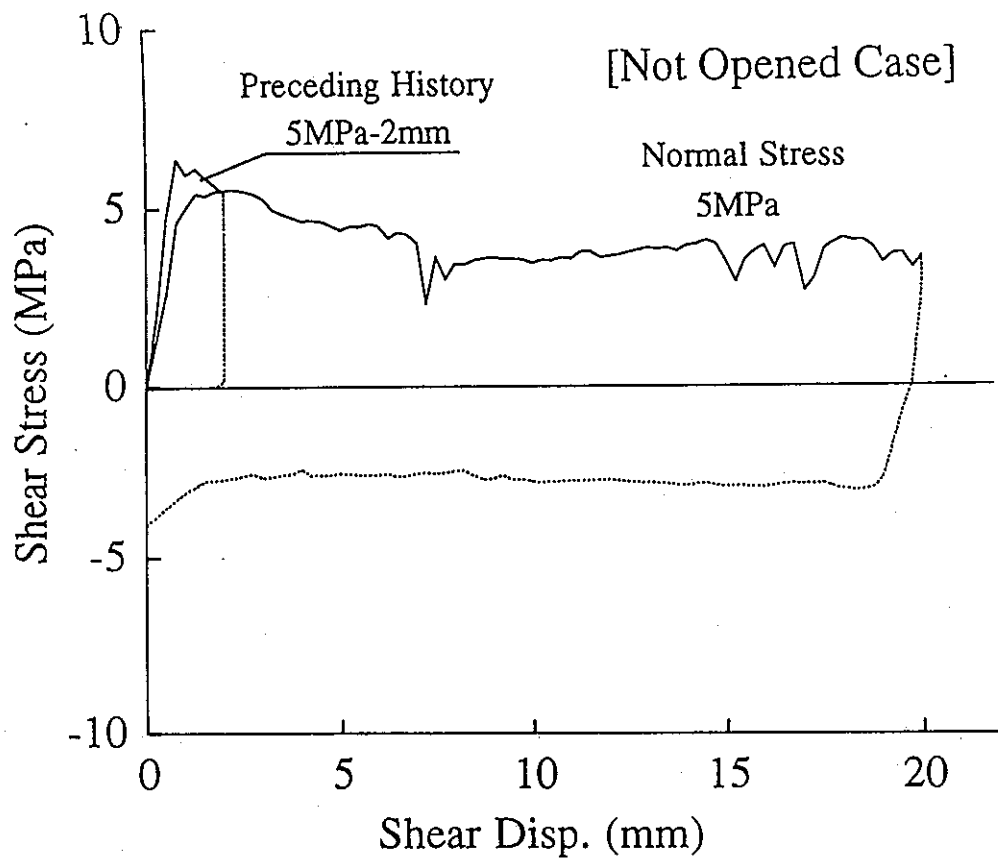
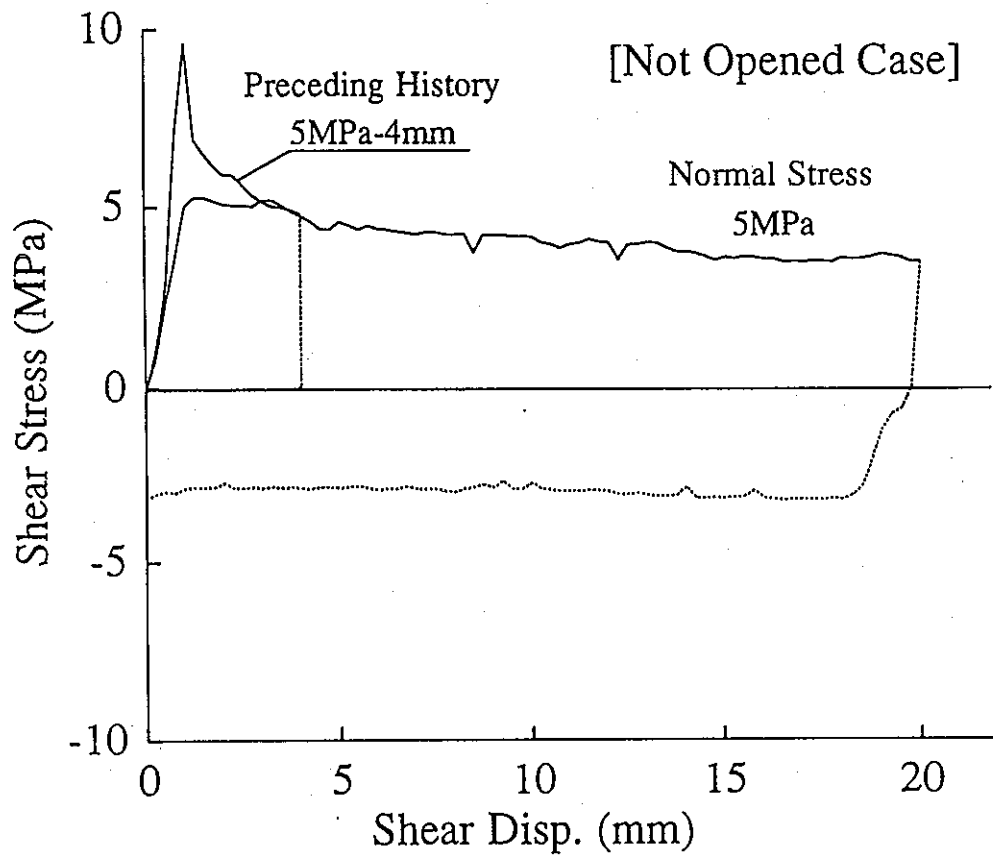


图4-19 Shear stress vs. shear displacement curves of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

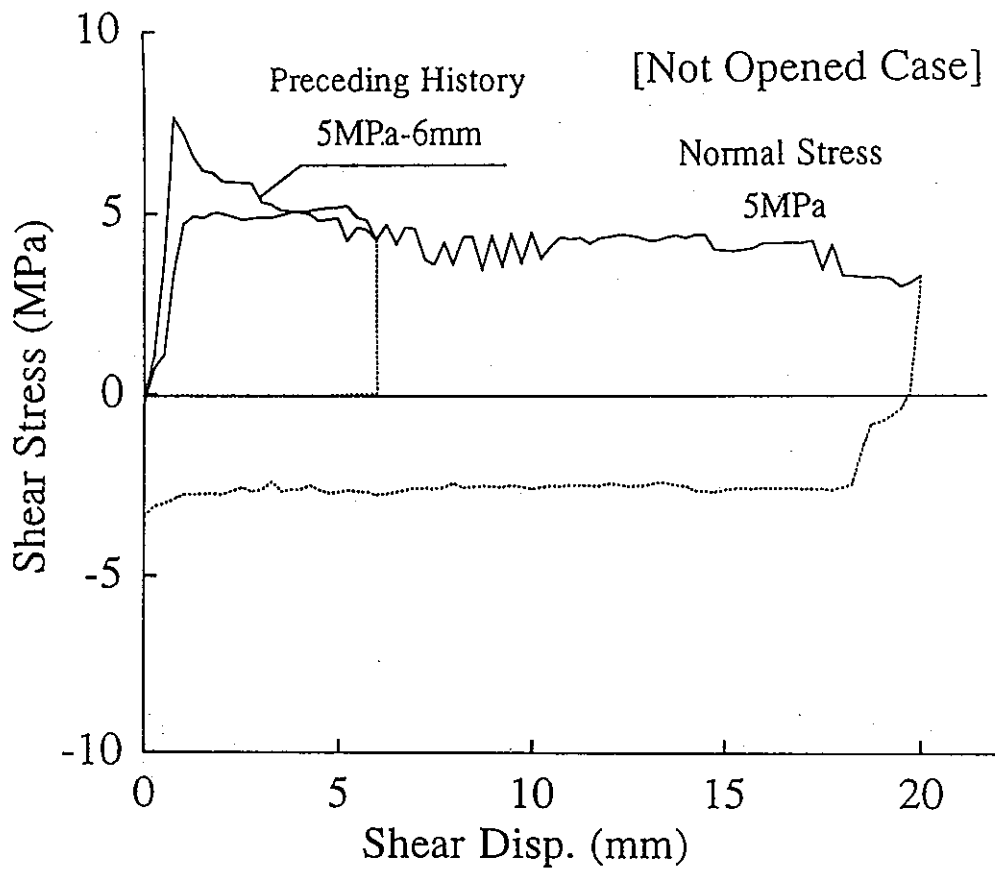


(a)

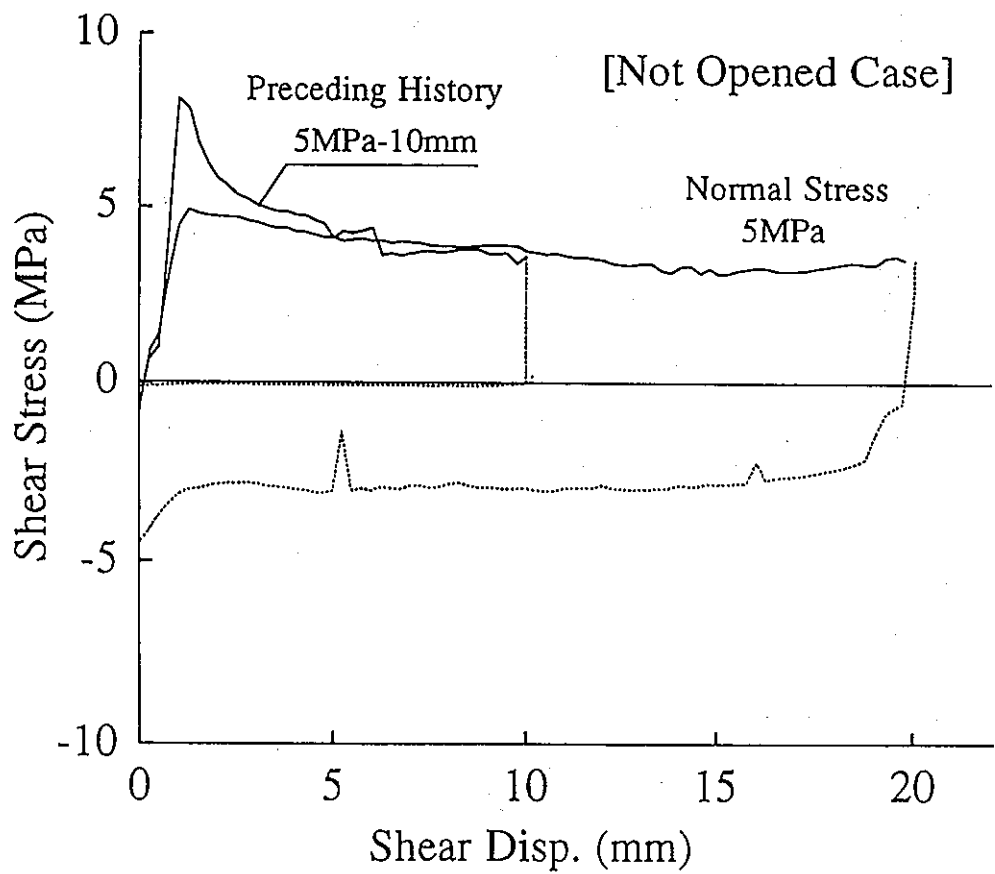


(b)

☒4-20 Shear stress vs. shear displacement curves, for each preceding history.



(c)



(d)

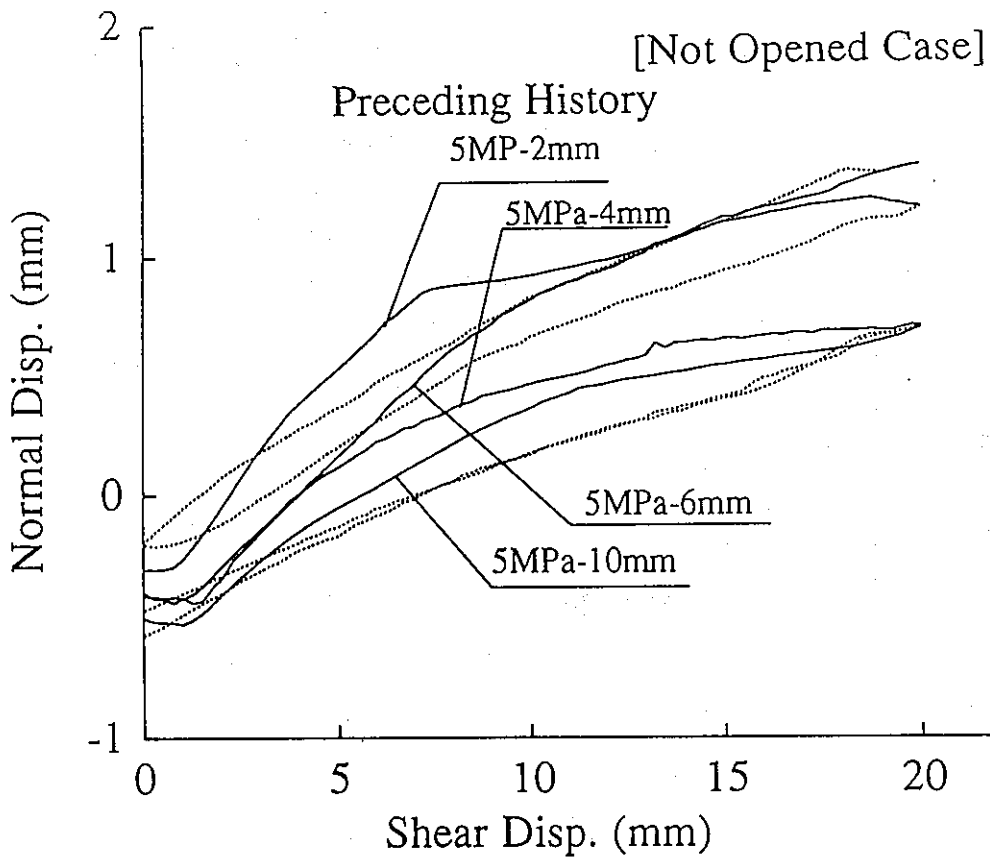


图 4-21 Normal displacement vs. shear displacement curves, for constant normal stresses of 1, 5, 10 and 20MPa.

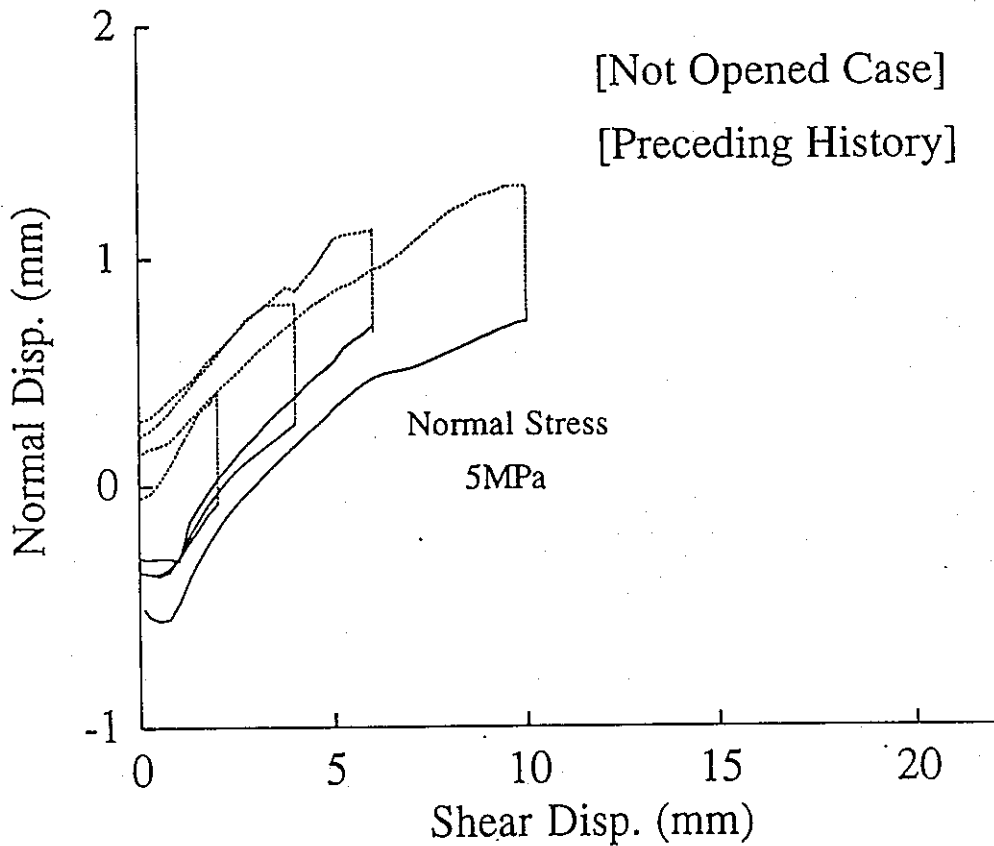
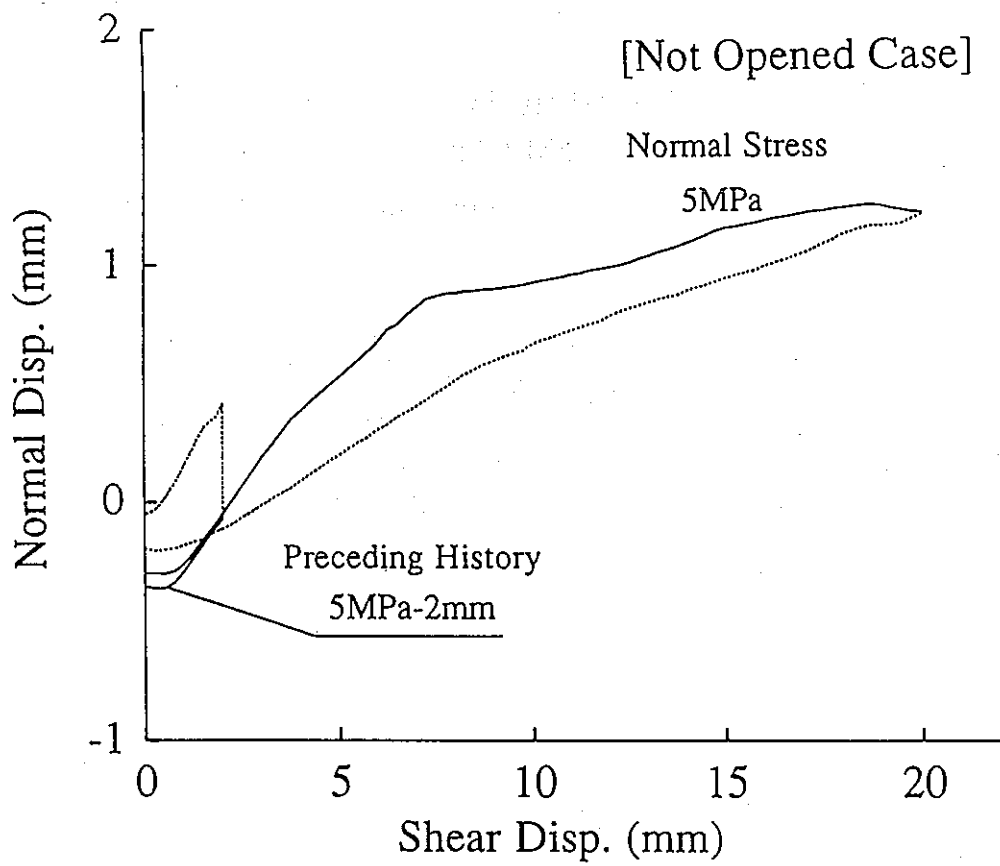
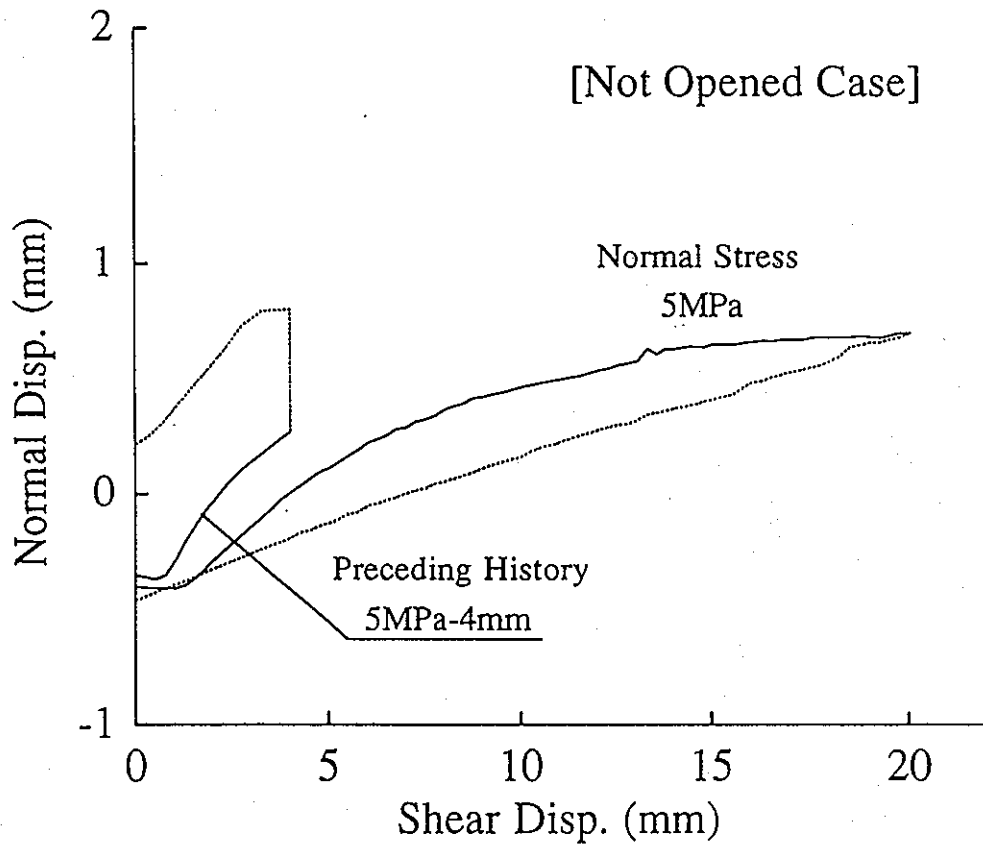


图 4-22 Normal displacement vs. shear displacement curves of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

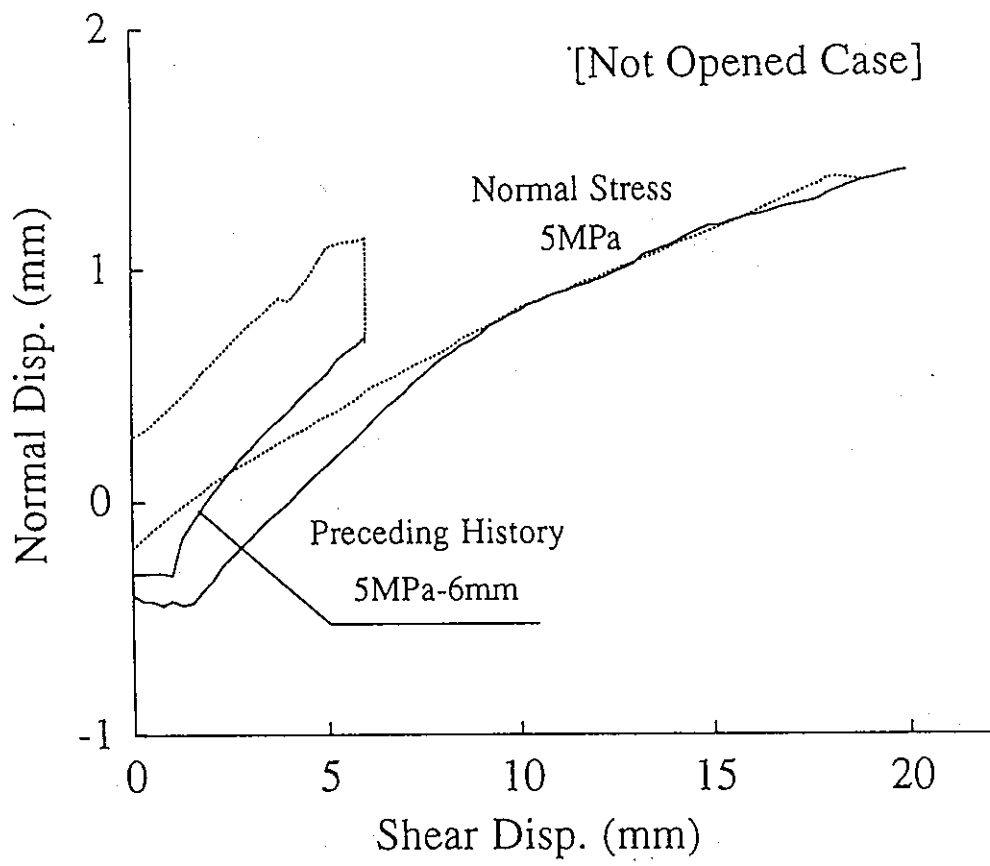


(a)

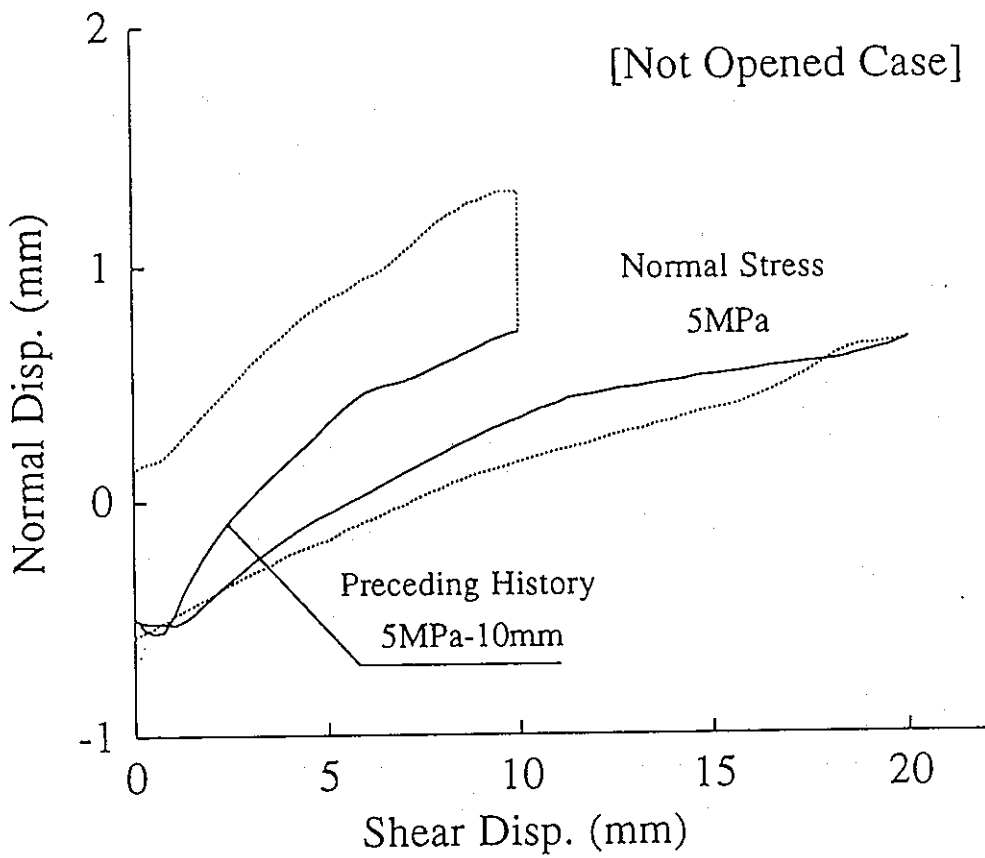


(b)

图4-23 Normal displacement vs. shear displacement curves, for each preceding history.



(c)



(d)

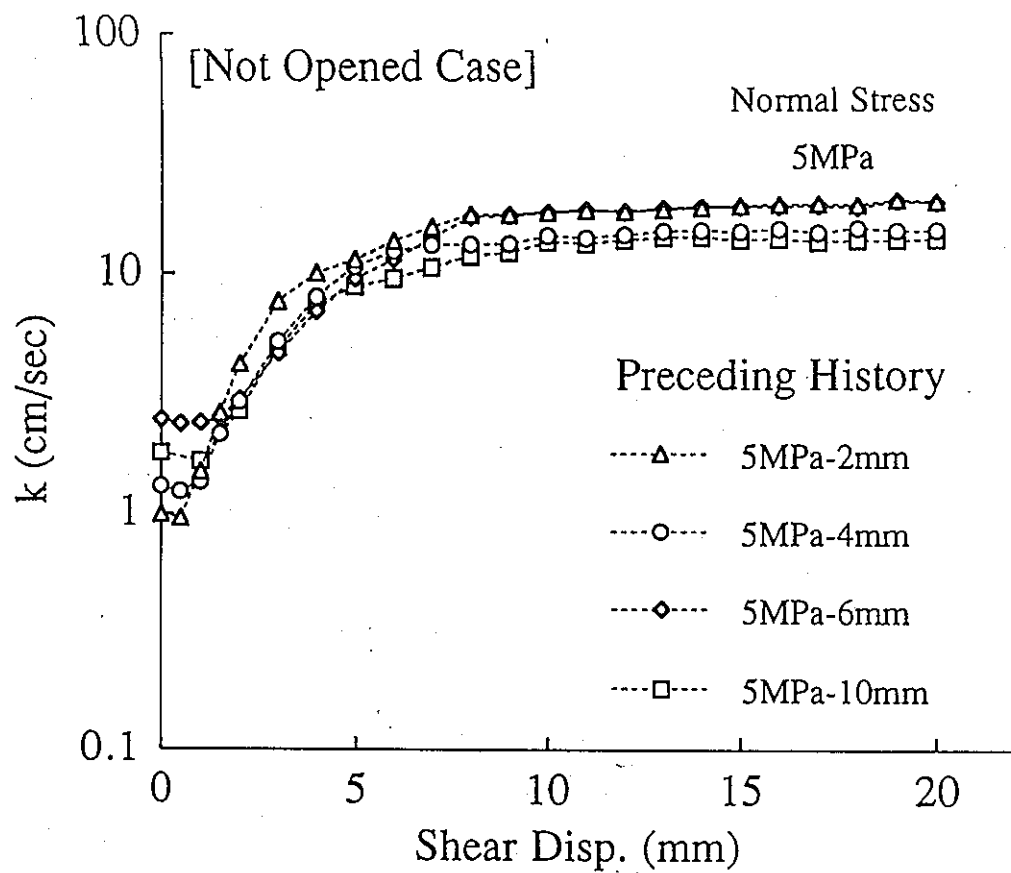


图4-24 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different preceding history.

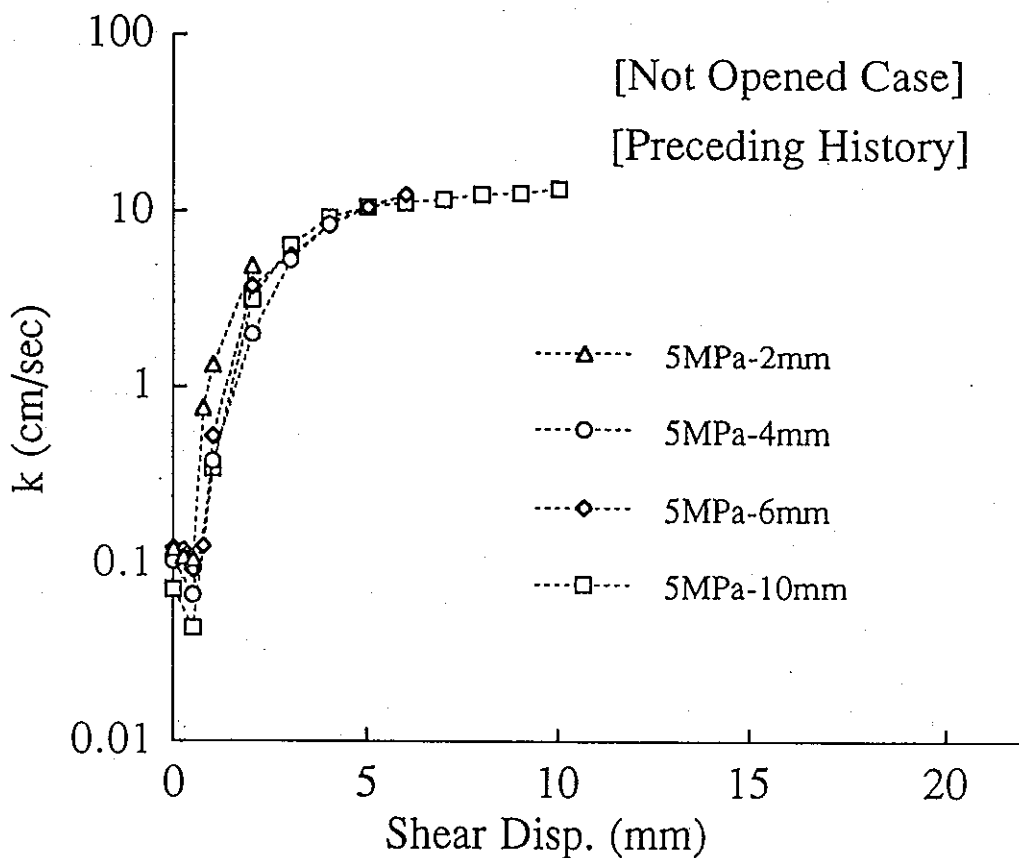
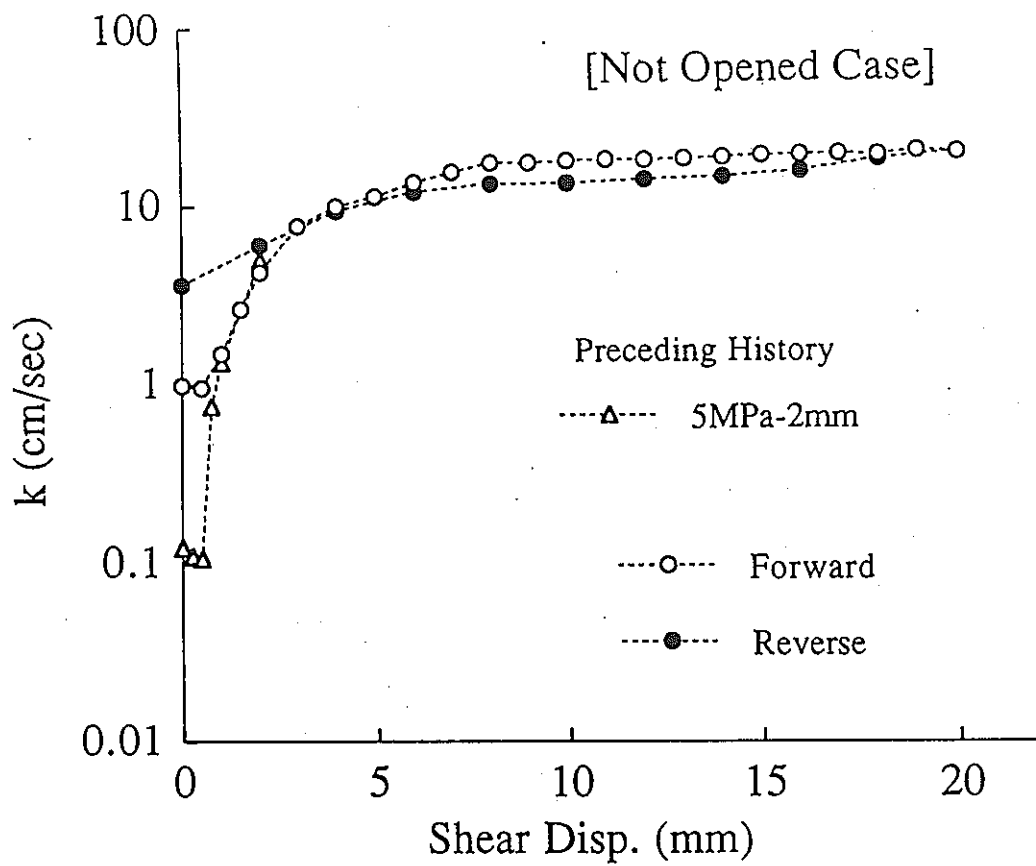
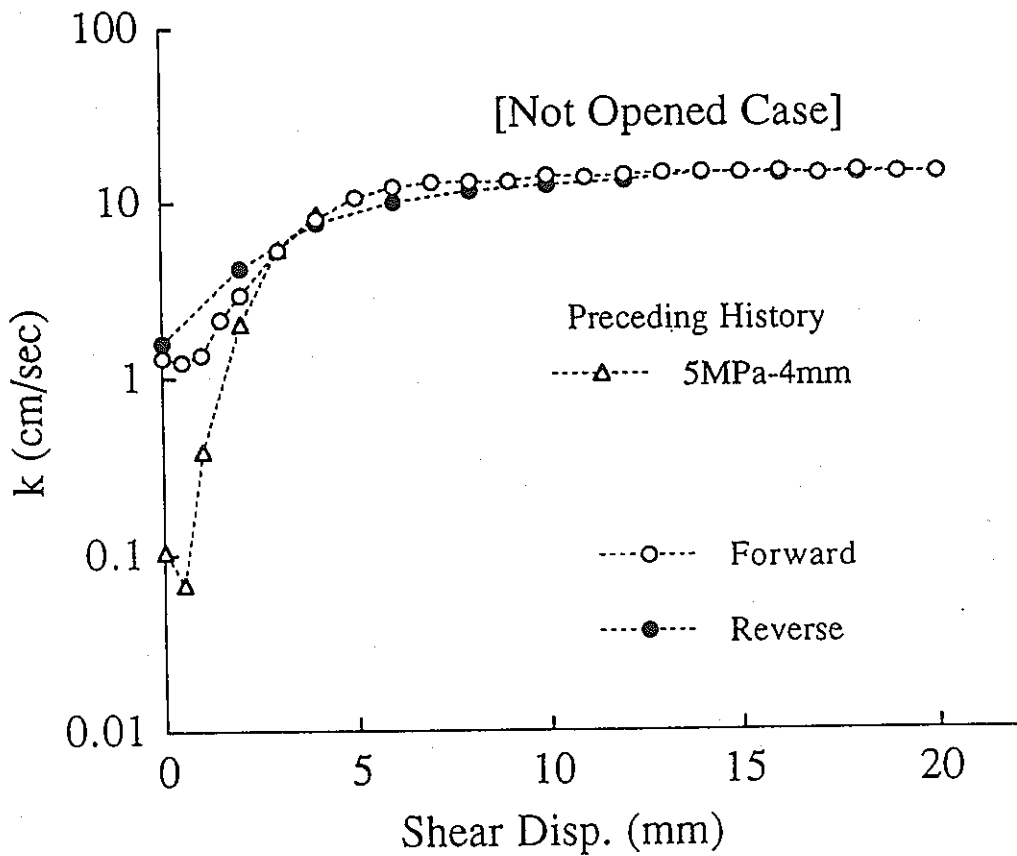


图4-25 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

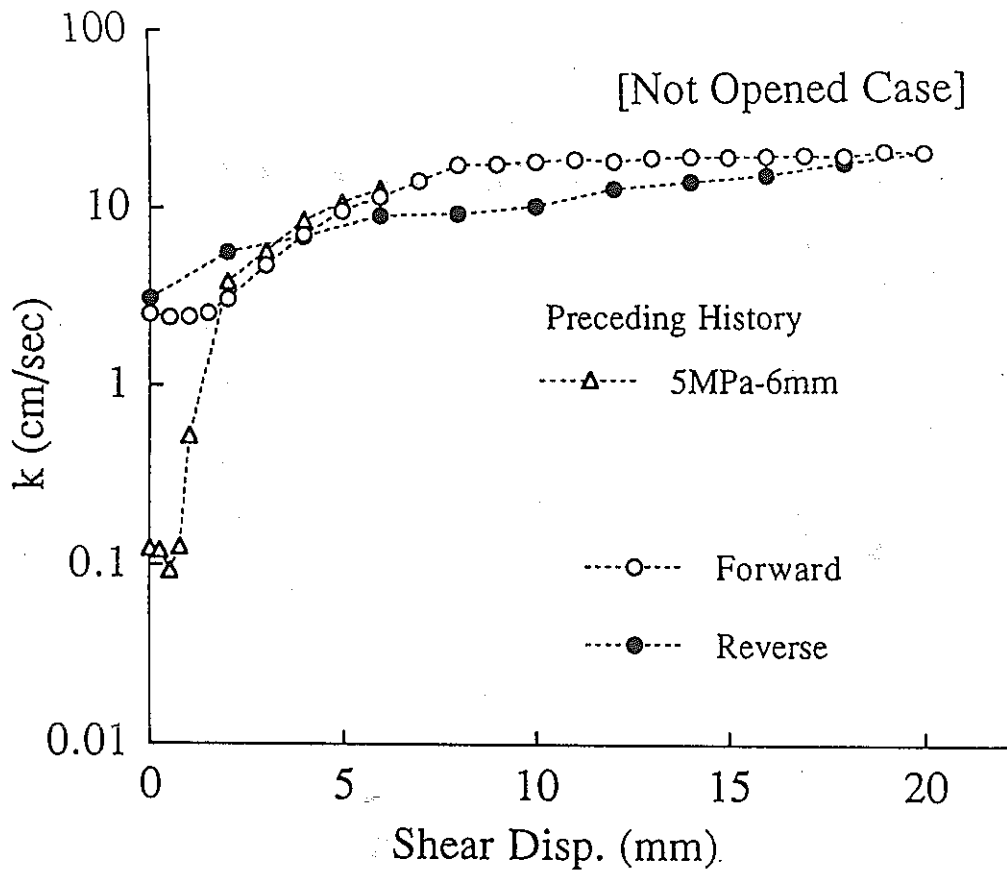


(a)

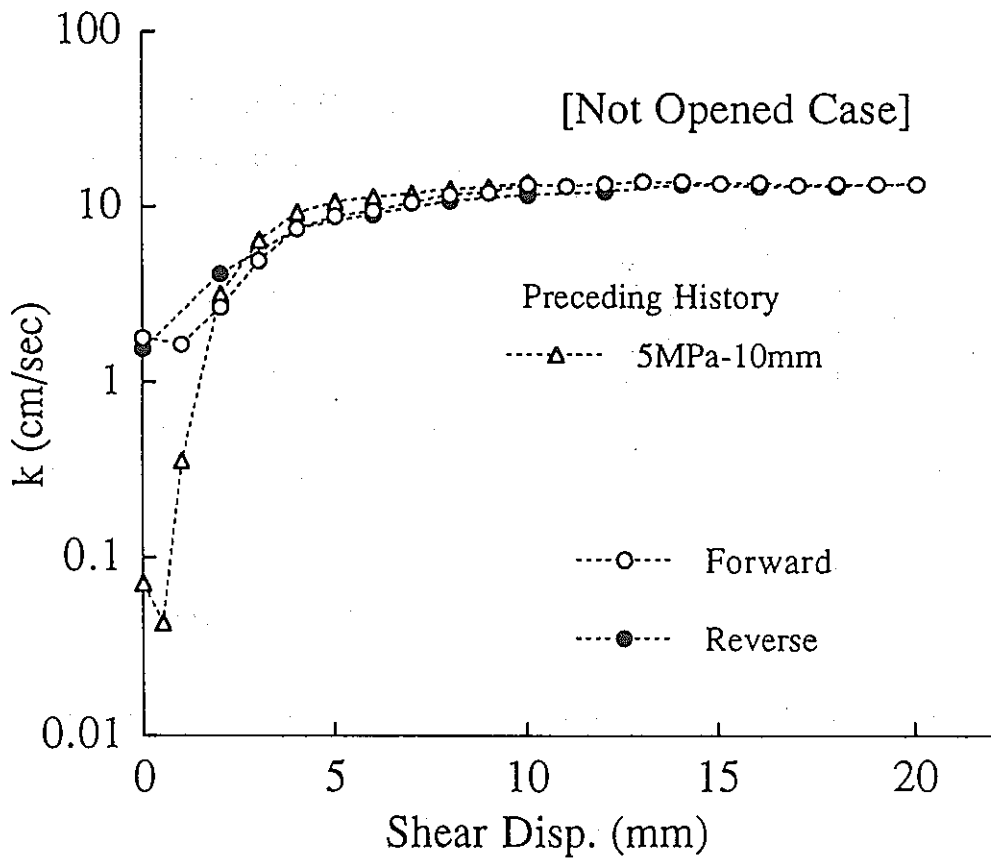


(b)

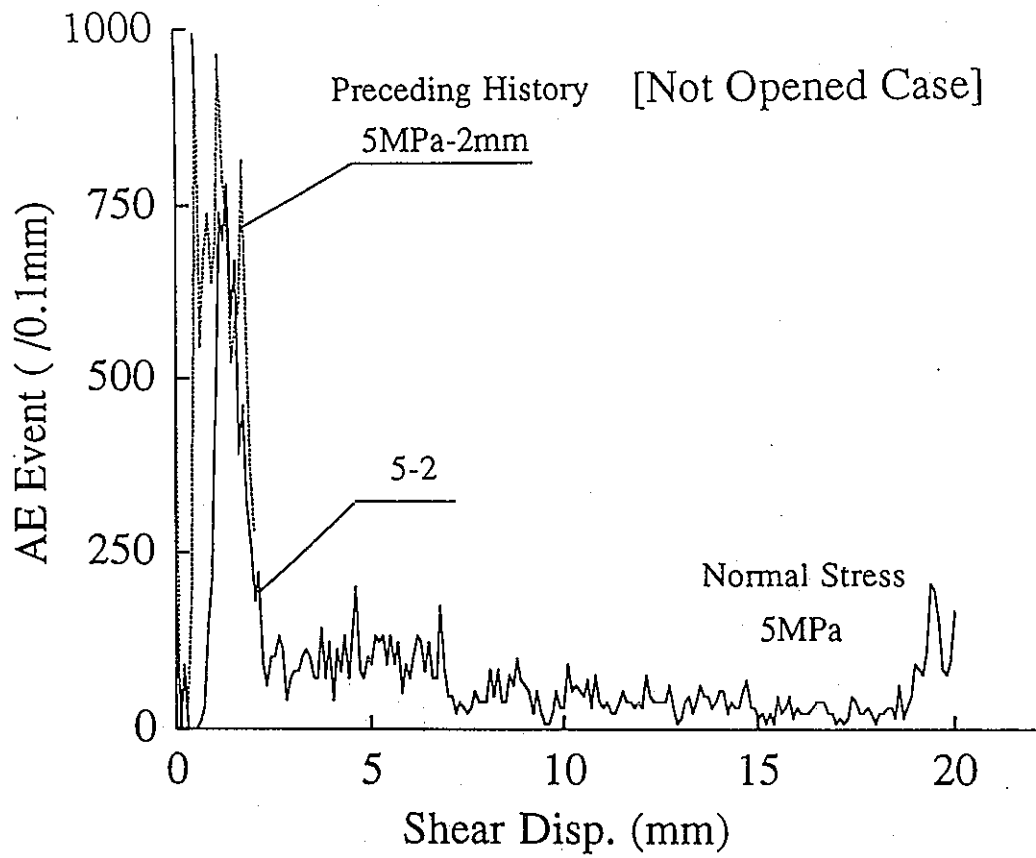
图4-26 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for each preceding history.



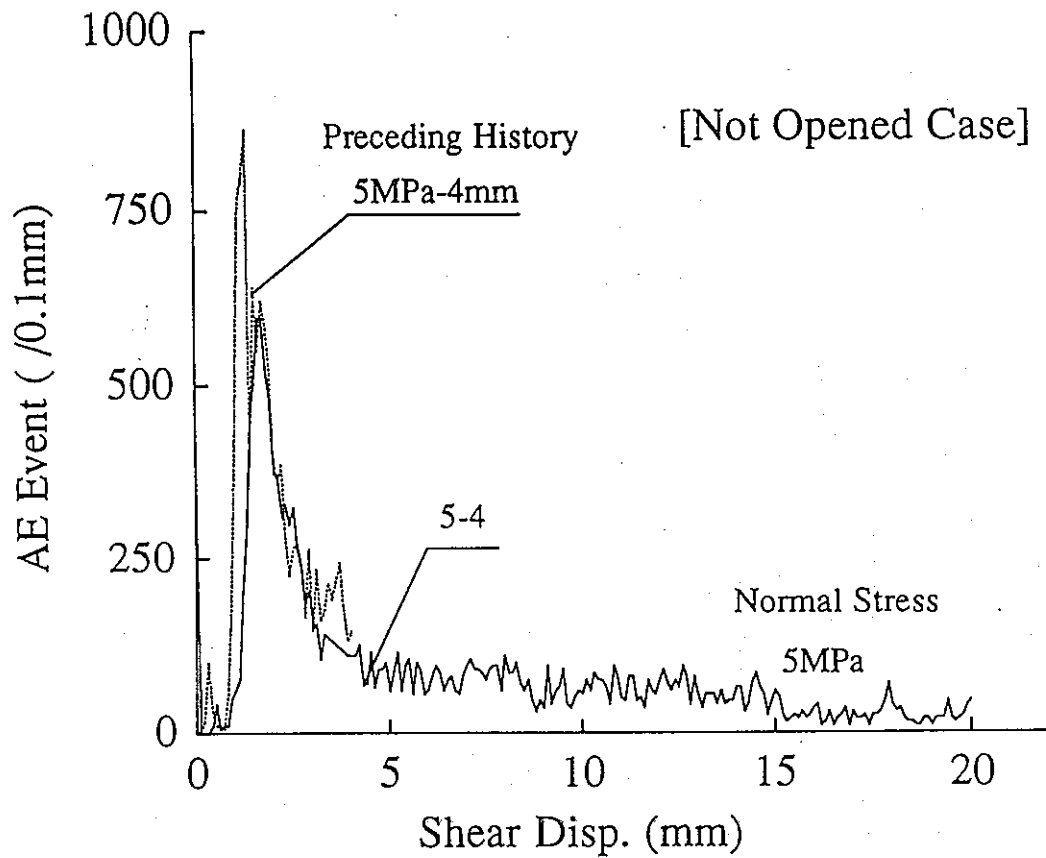
(c)



(d)

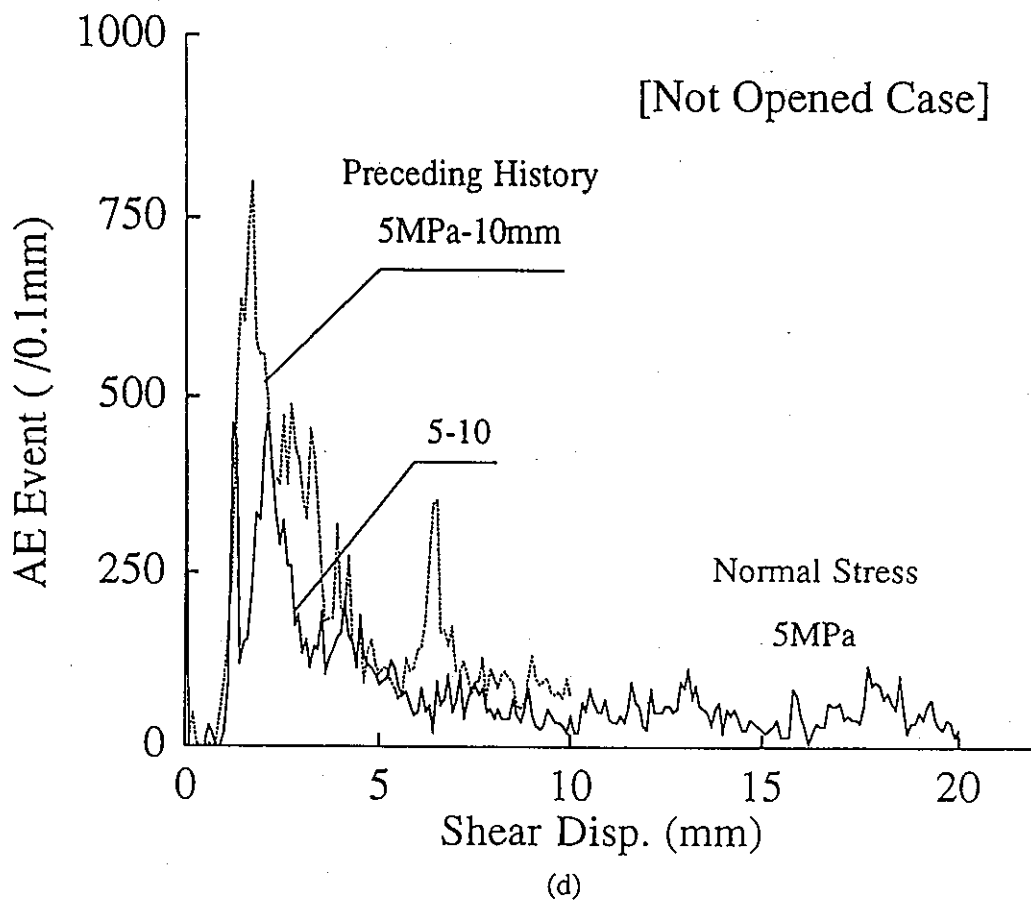
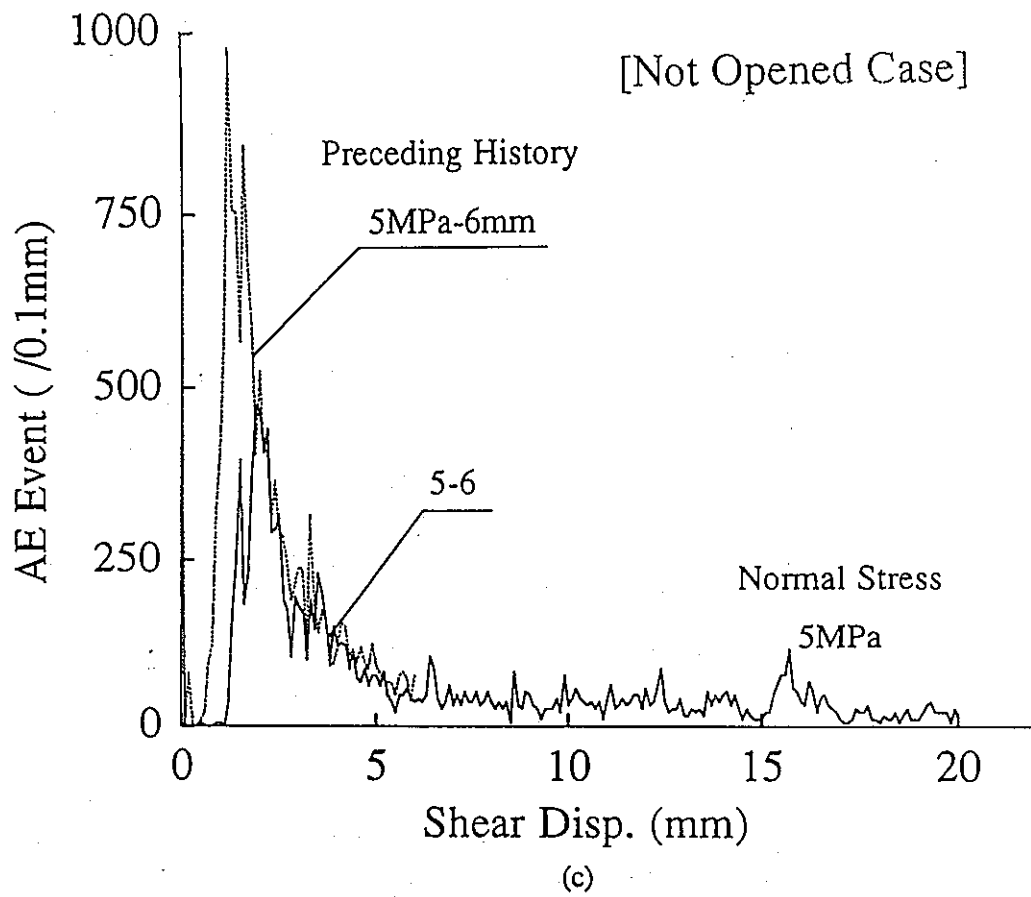


(a)



(b)

图4-27 Relationship between AE event count and shear displacement, for each preceding history.



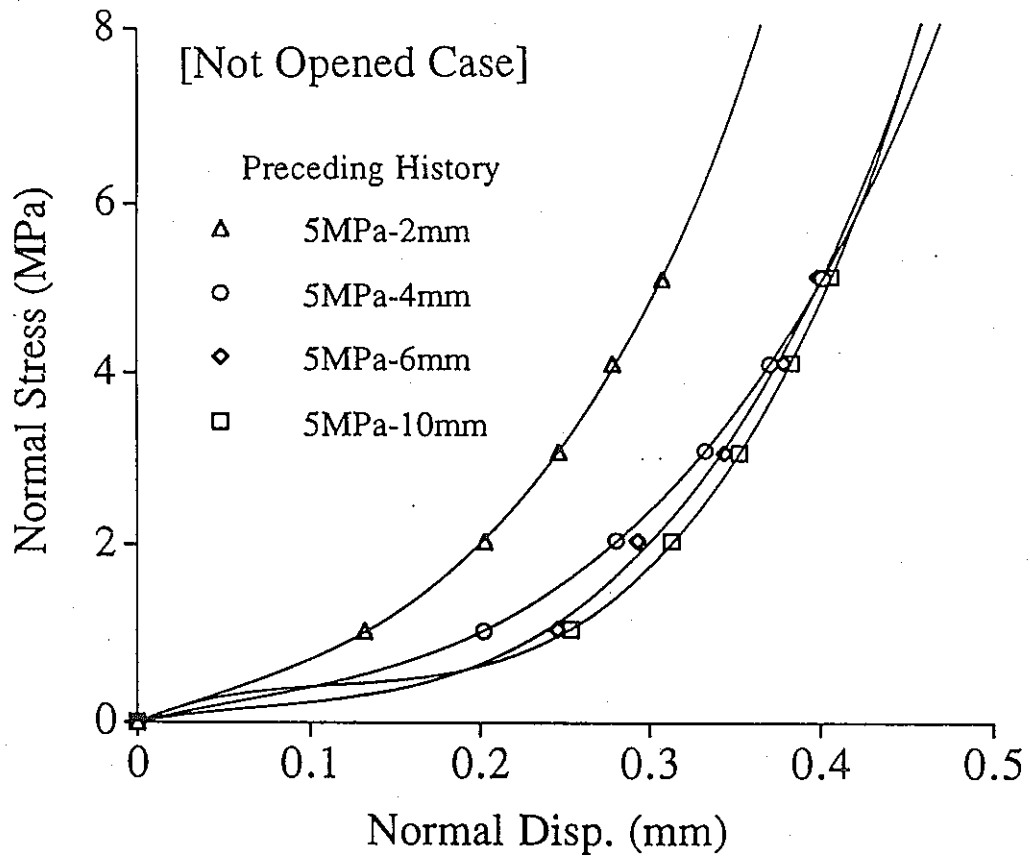


图4-28 Relationship between normal stress and normal displacement, for different preceding history.

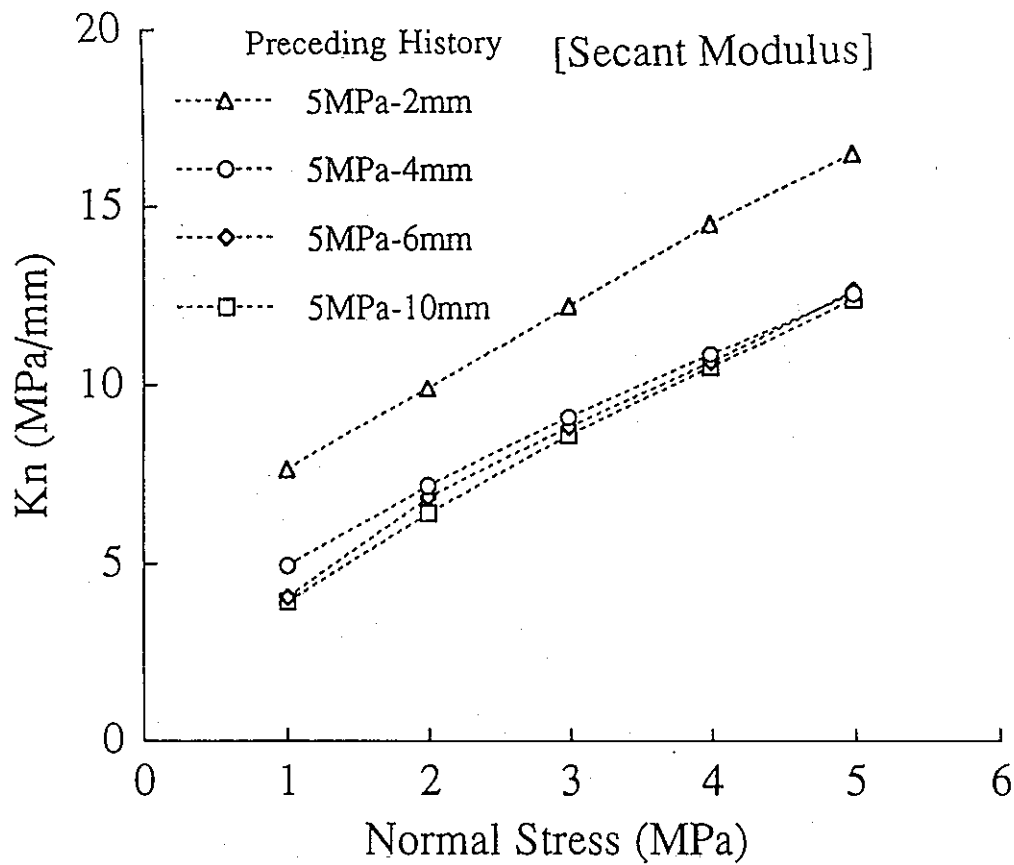


图4-29 Relationship between normal stiffness(K_n) and normal stress, obtained from secant modulus.

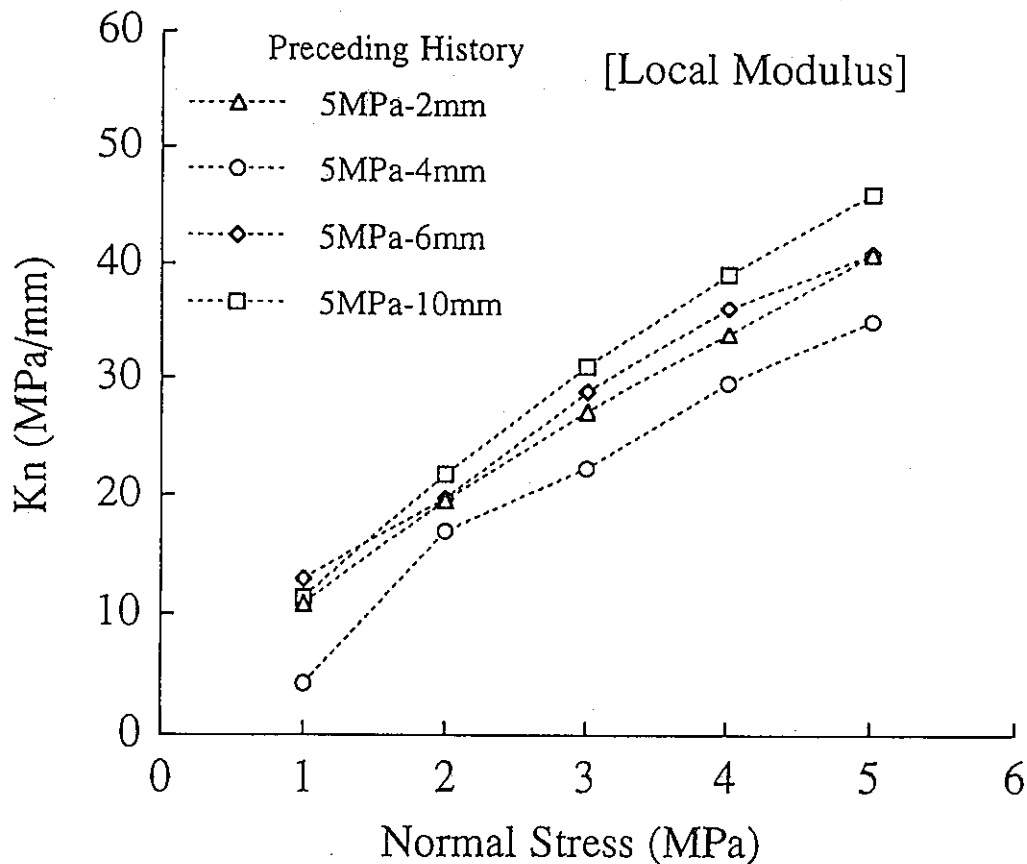


图4-30 Relationship between normal stiffness(K_n) and normal stress, obtained from local modulus.

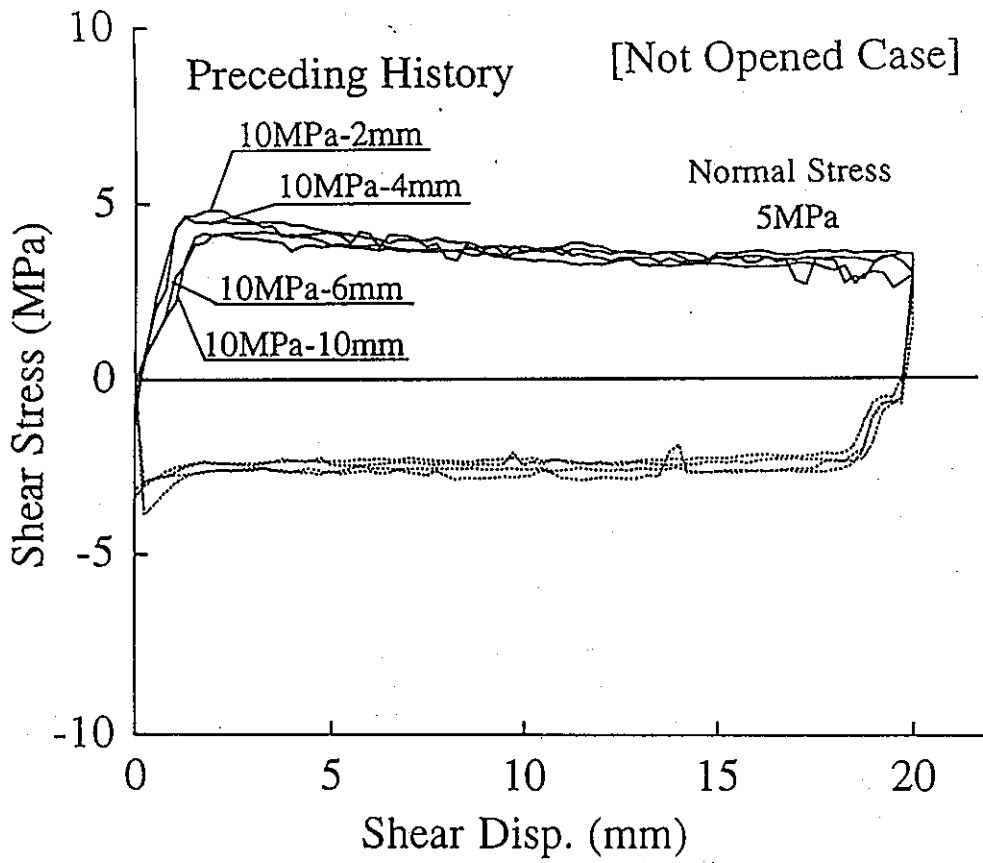


图4-31 Shear stress vs. shear displacement curves, for different preceding history.

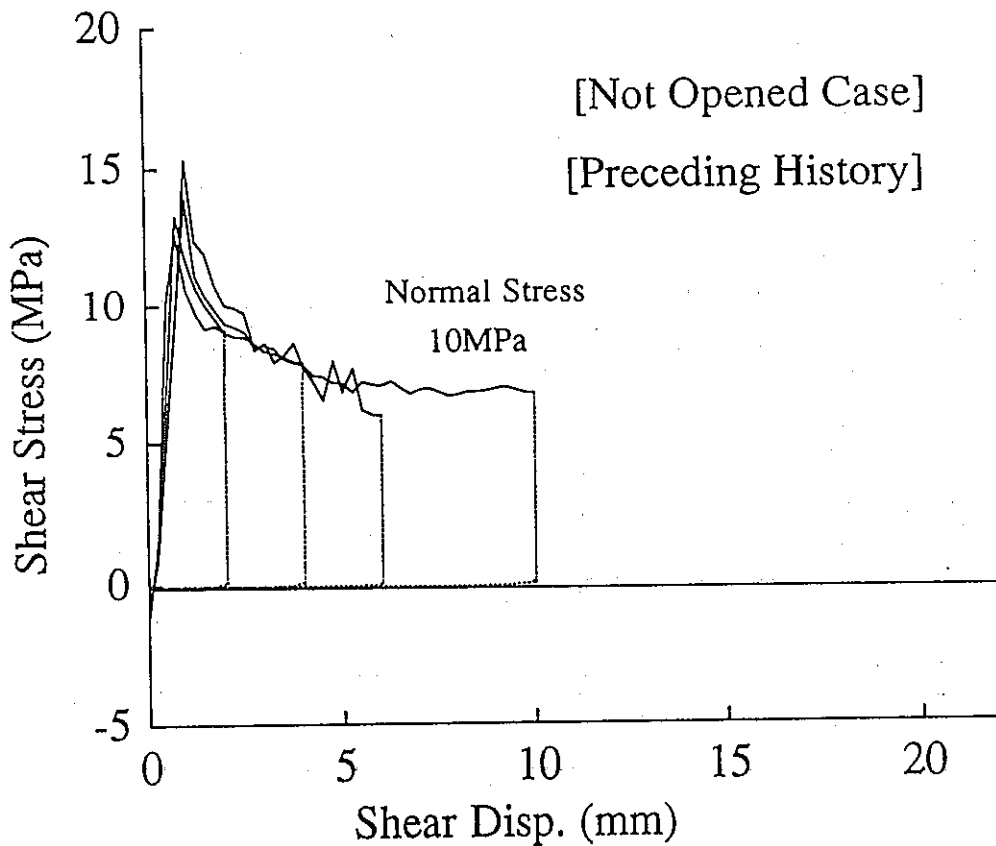
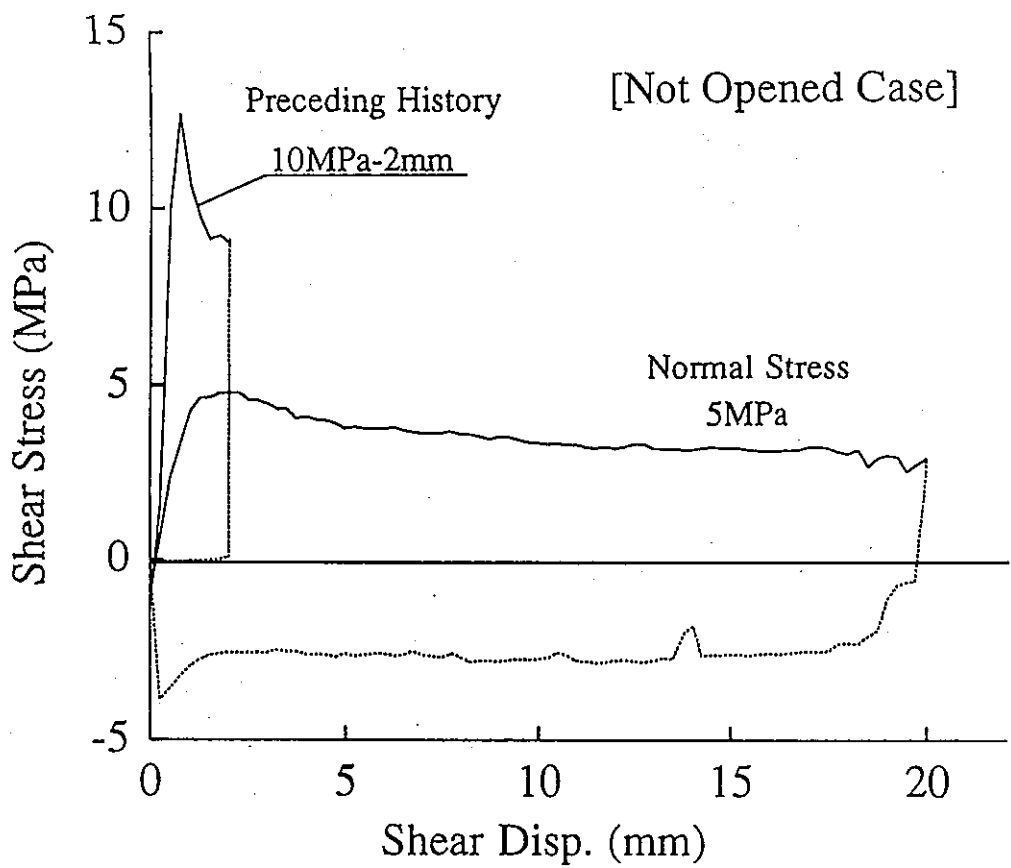
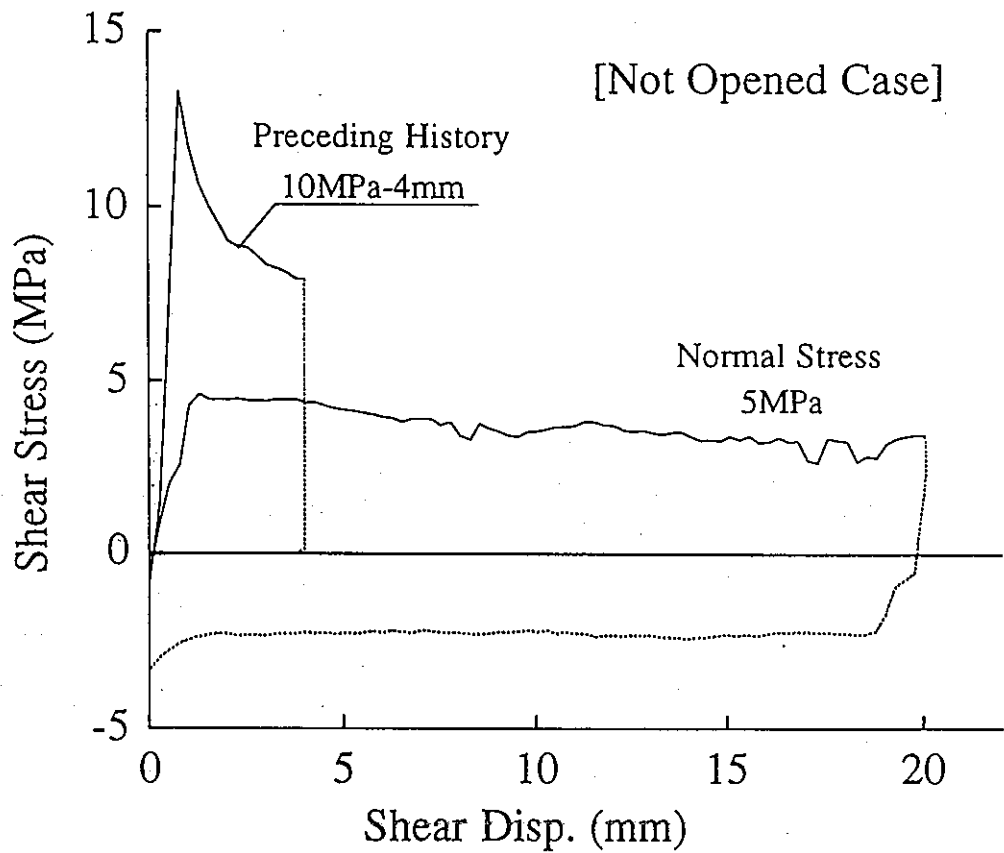


图4-32 Shear stress vs. shear displacement curves of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

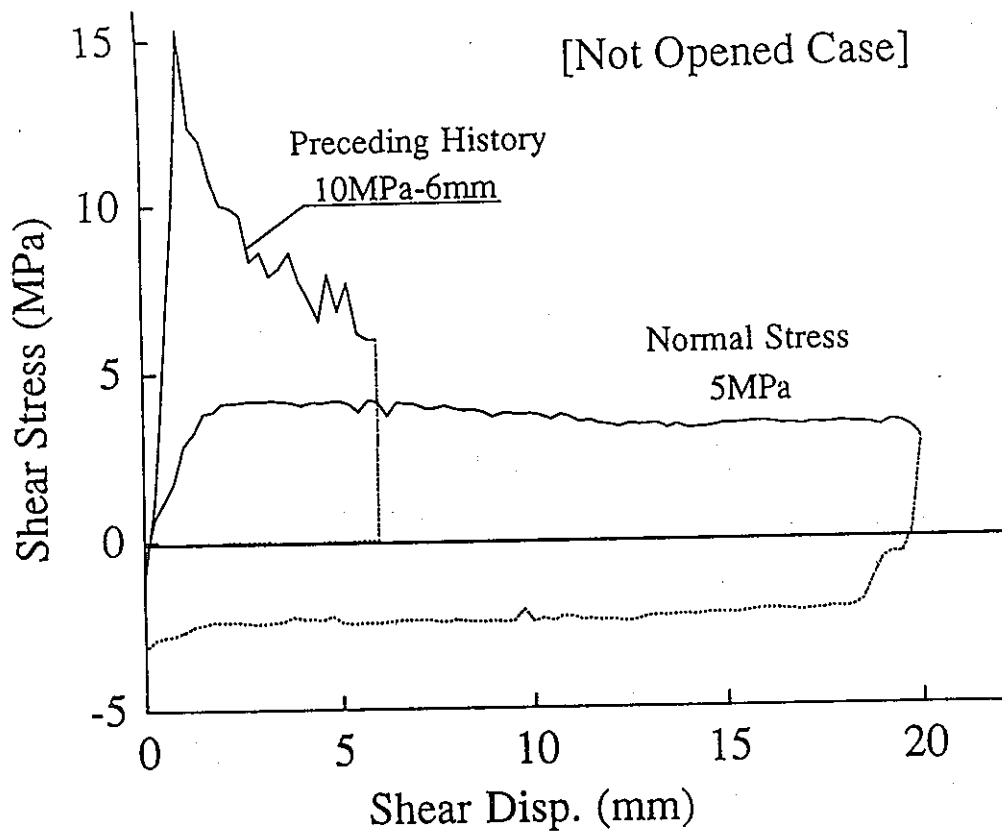


(a)

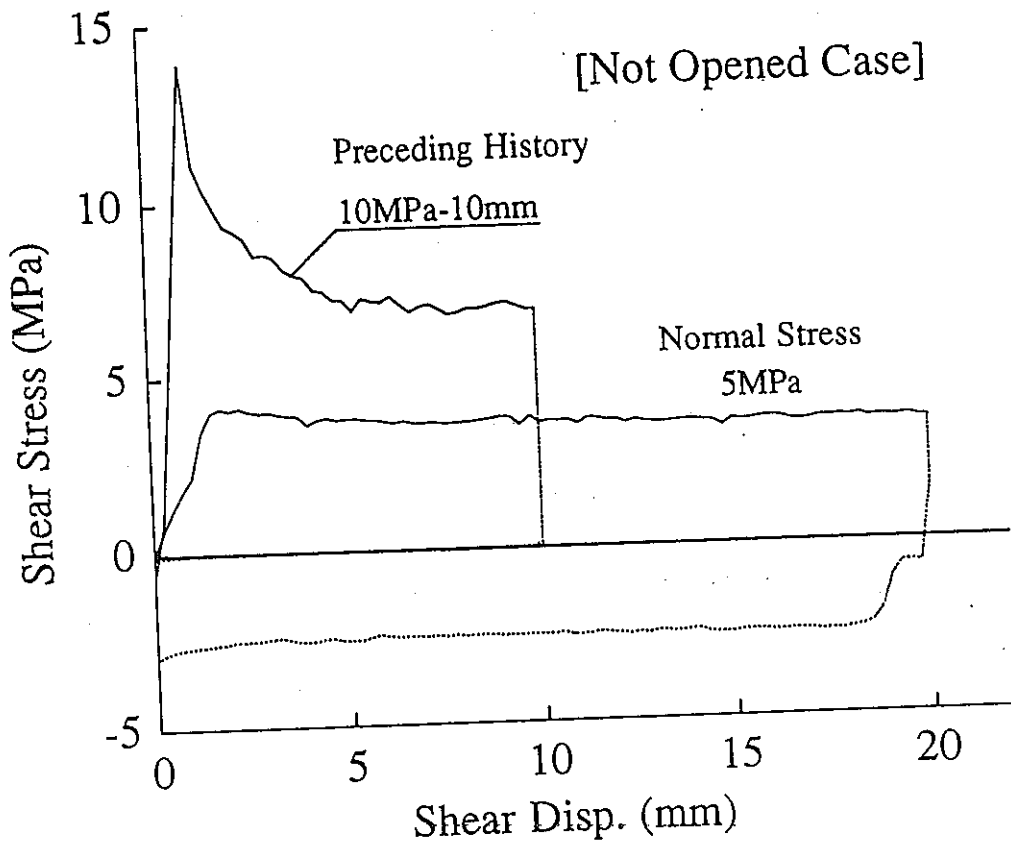


(b)

图4-33 Shear stress vs. shear displacement curves, for each preceding history.



(c)



(d)

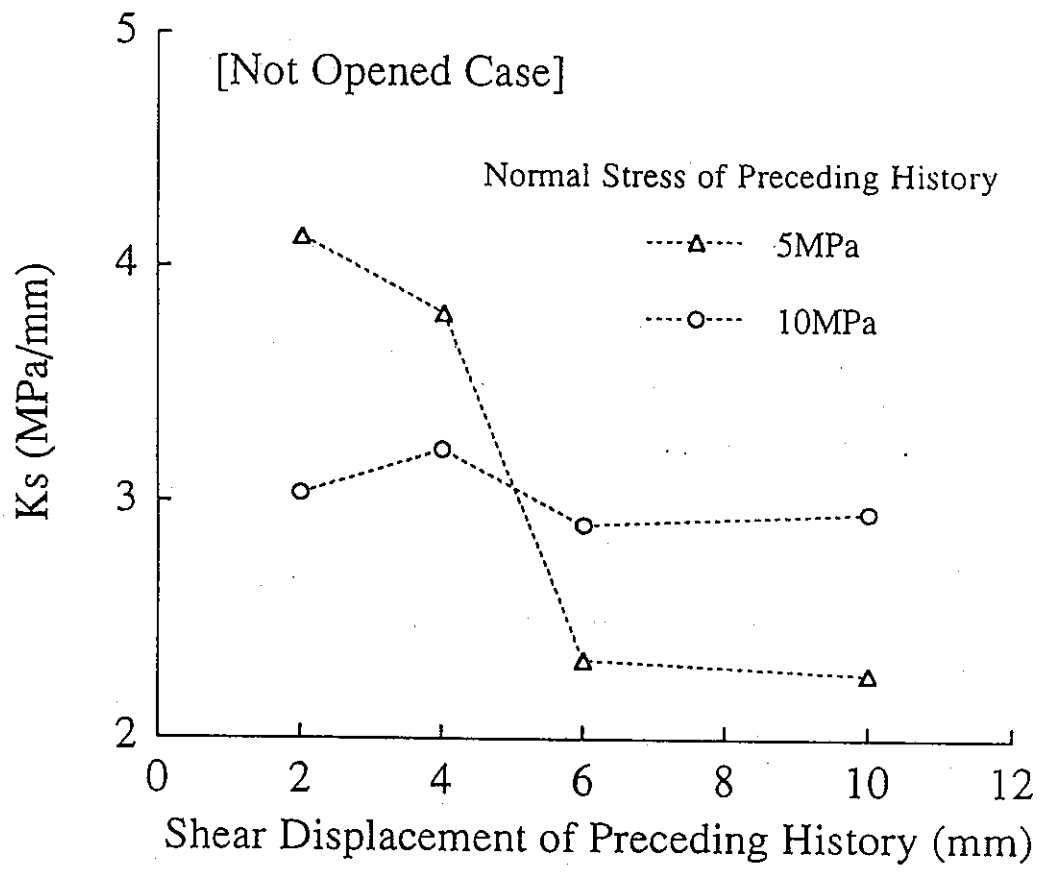


图4-34 Relationship between shear stiffness(K_s) and shear disp. of preceding history, obtained from secant modulus.

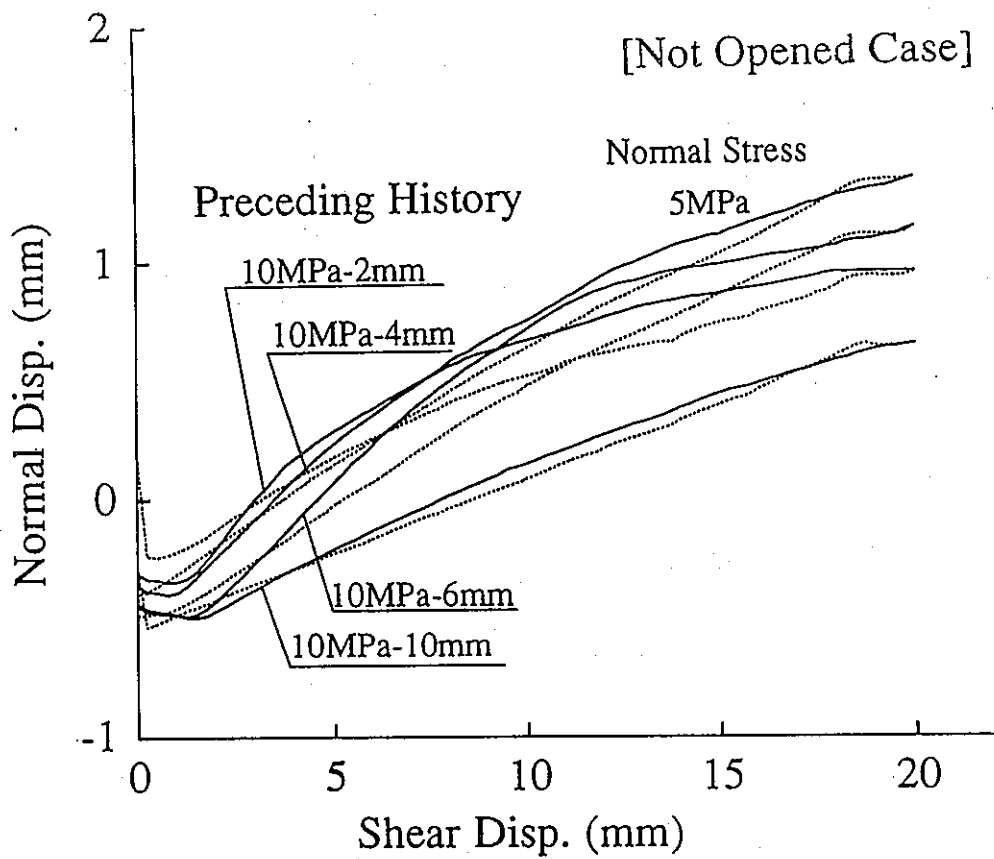


图 4-35 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different preceding history.

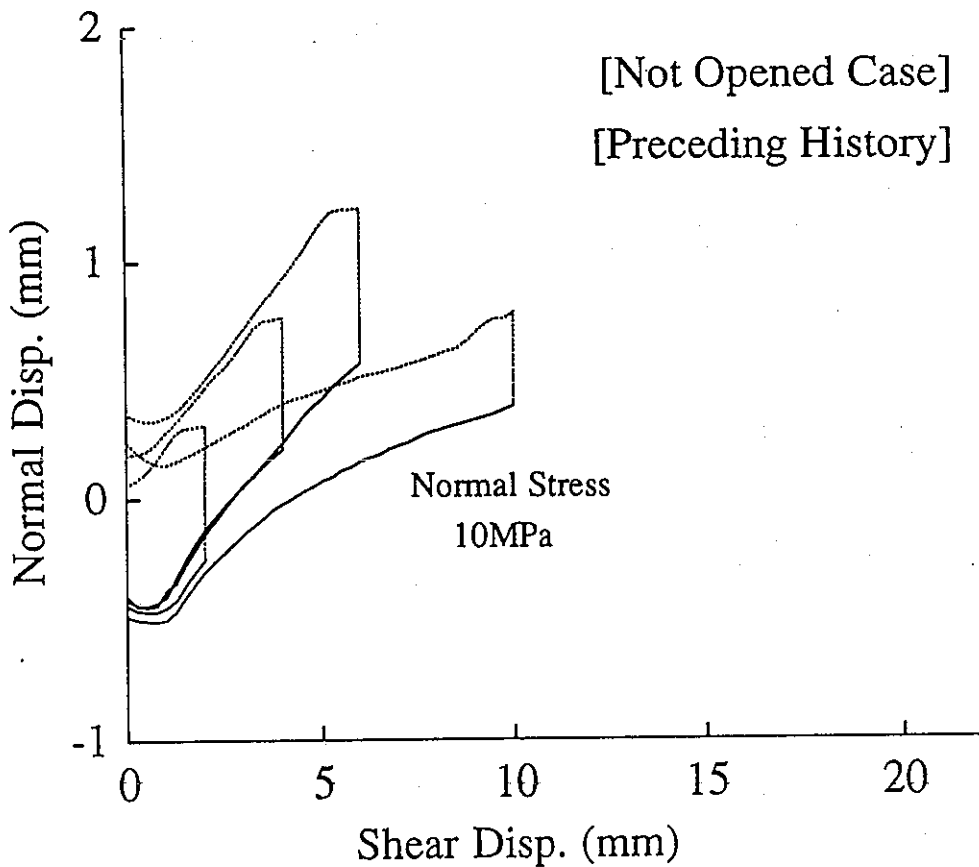
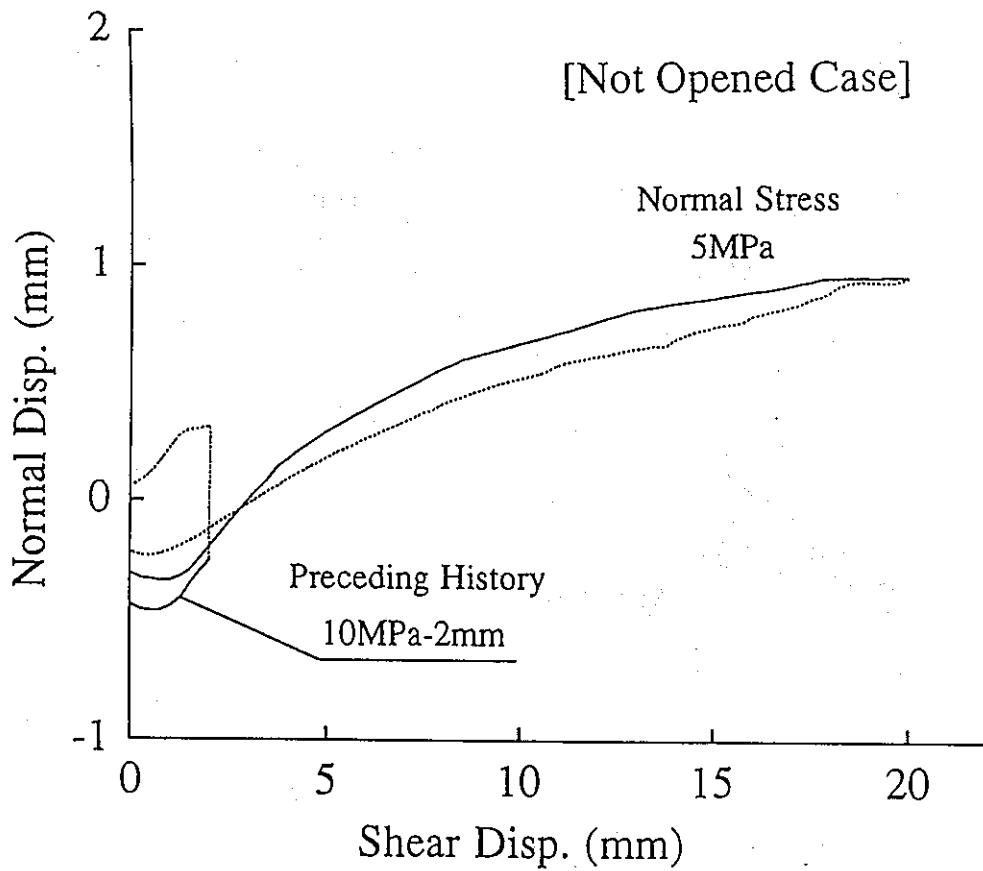
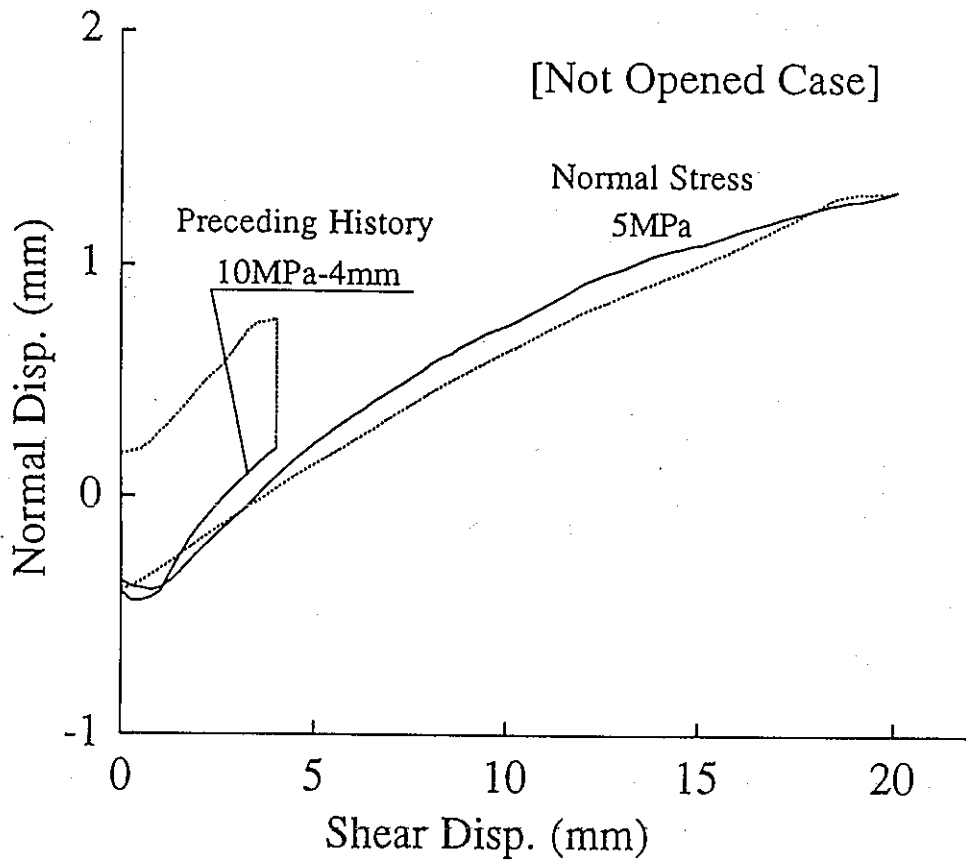


图 4-36 Normal displacement vs. shear displacement curves of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

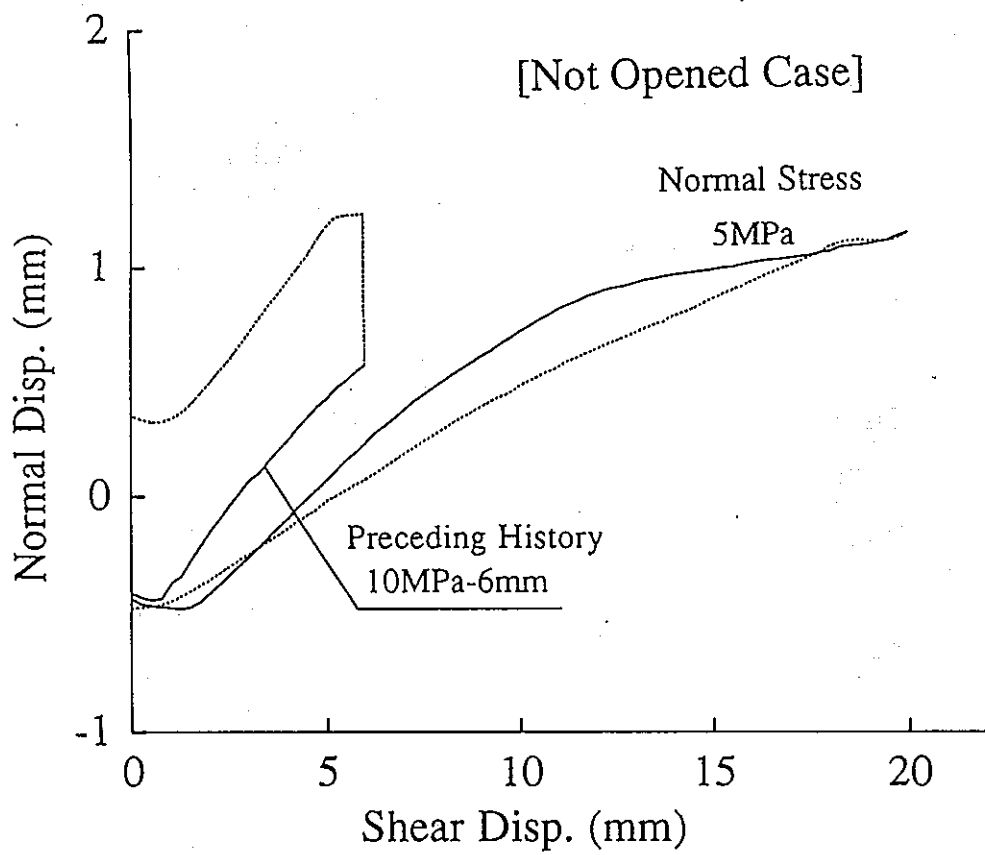


(a)

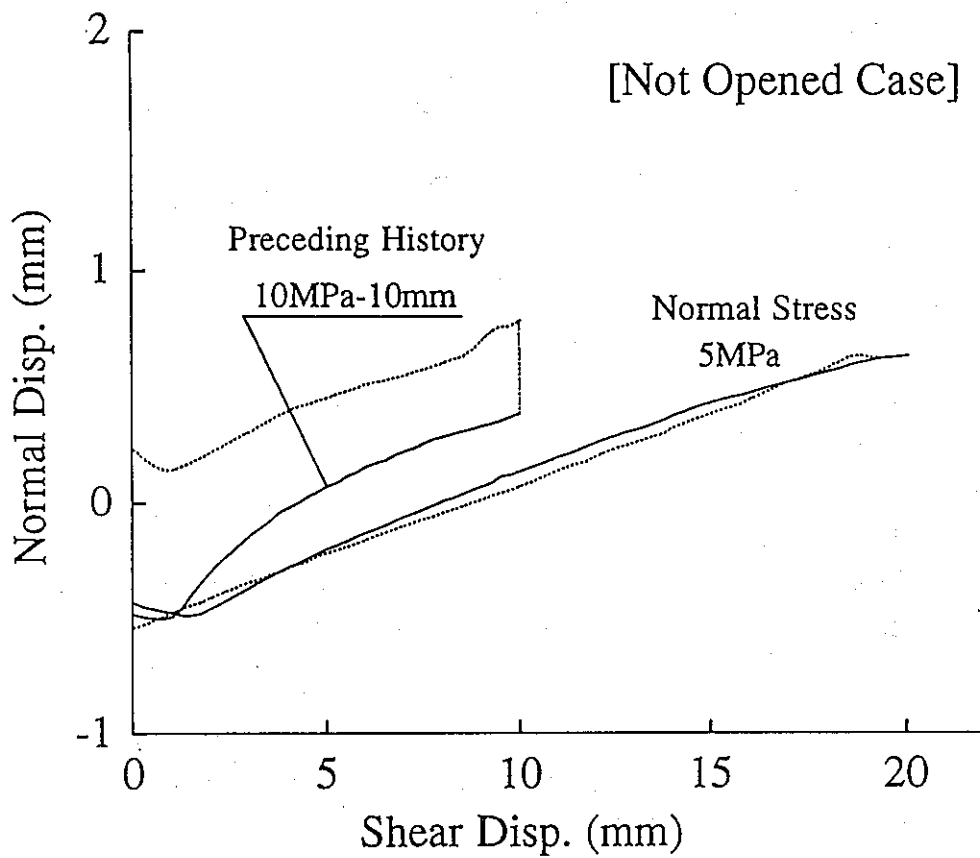


(b)

图4-37 Normal displacement vs. shear displacement curves, for each preceding history.



(c)



(d)

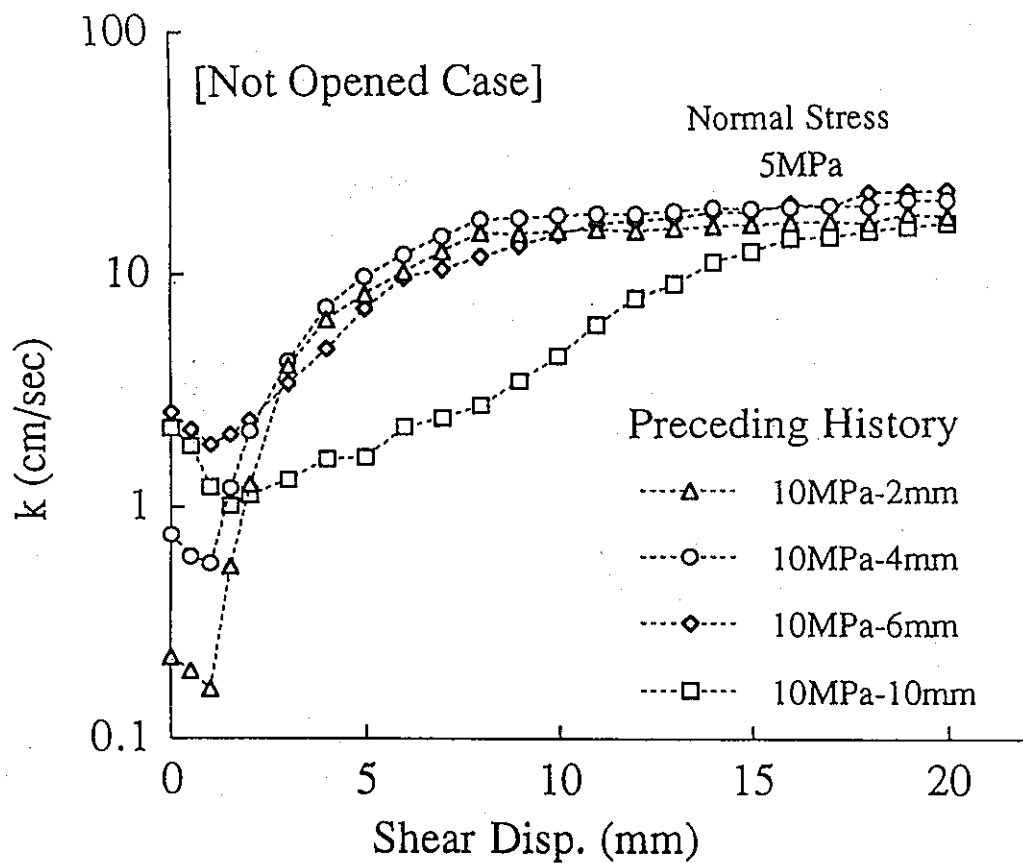


图4-38 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different preceding history.

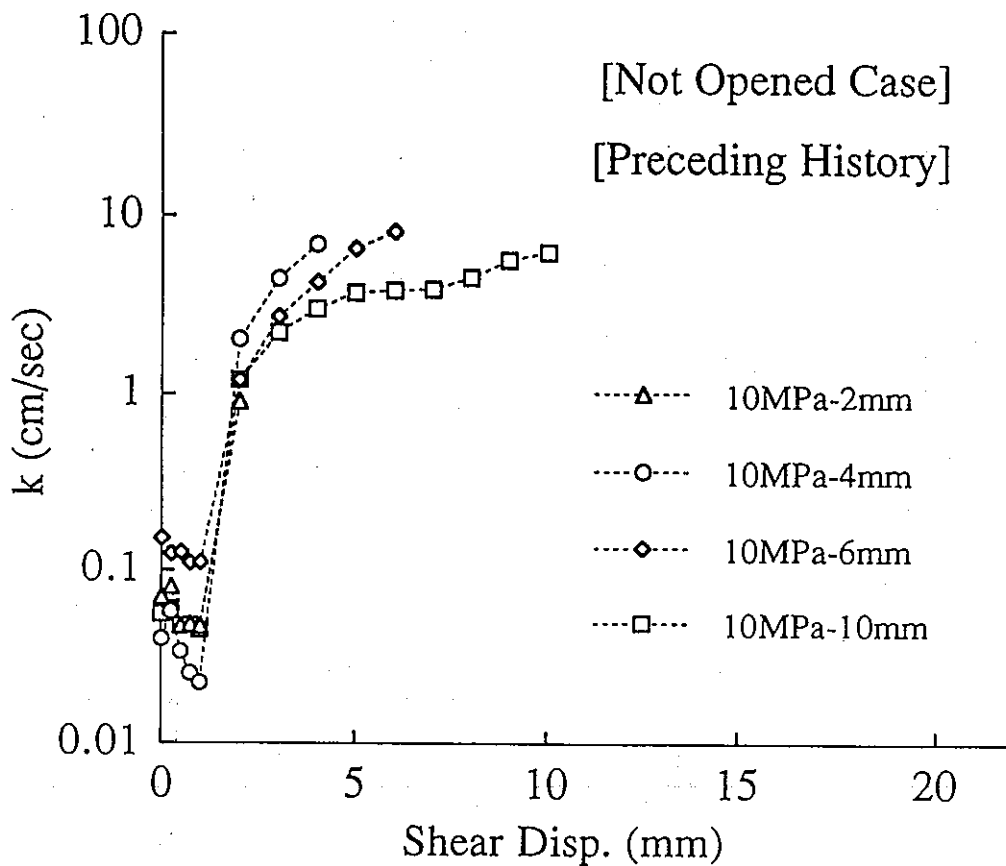
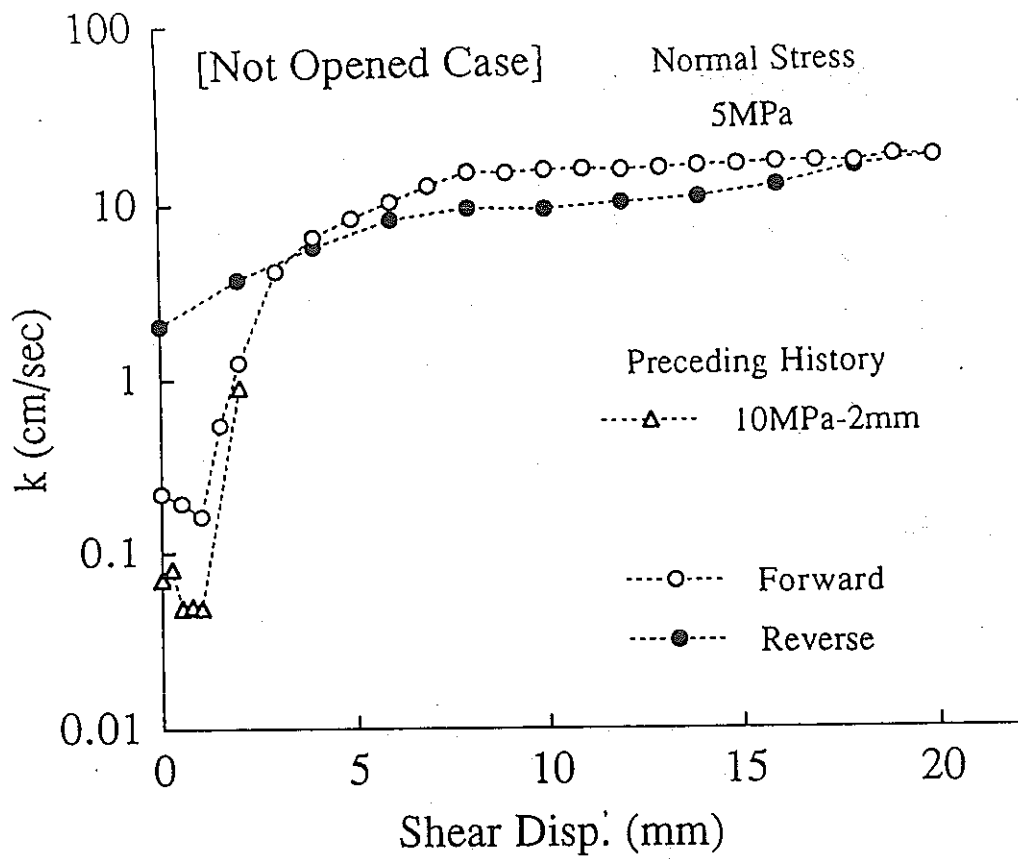
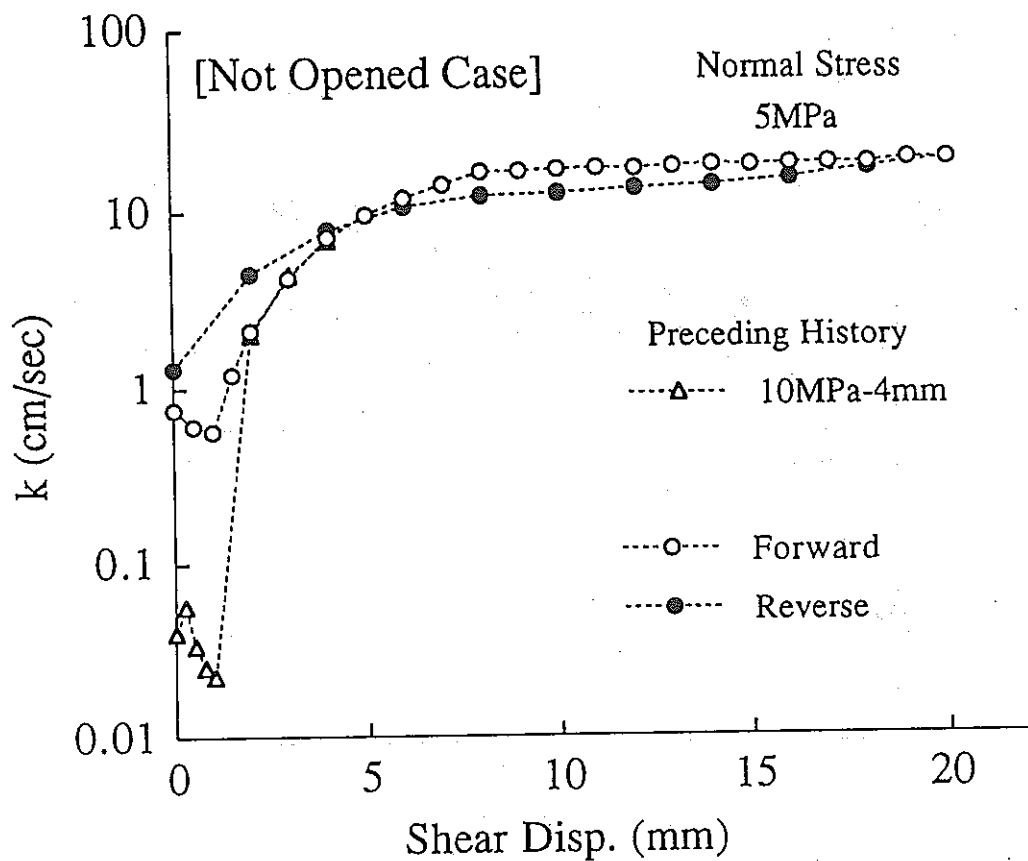


图4-39 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

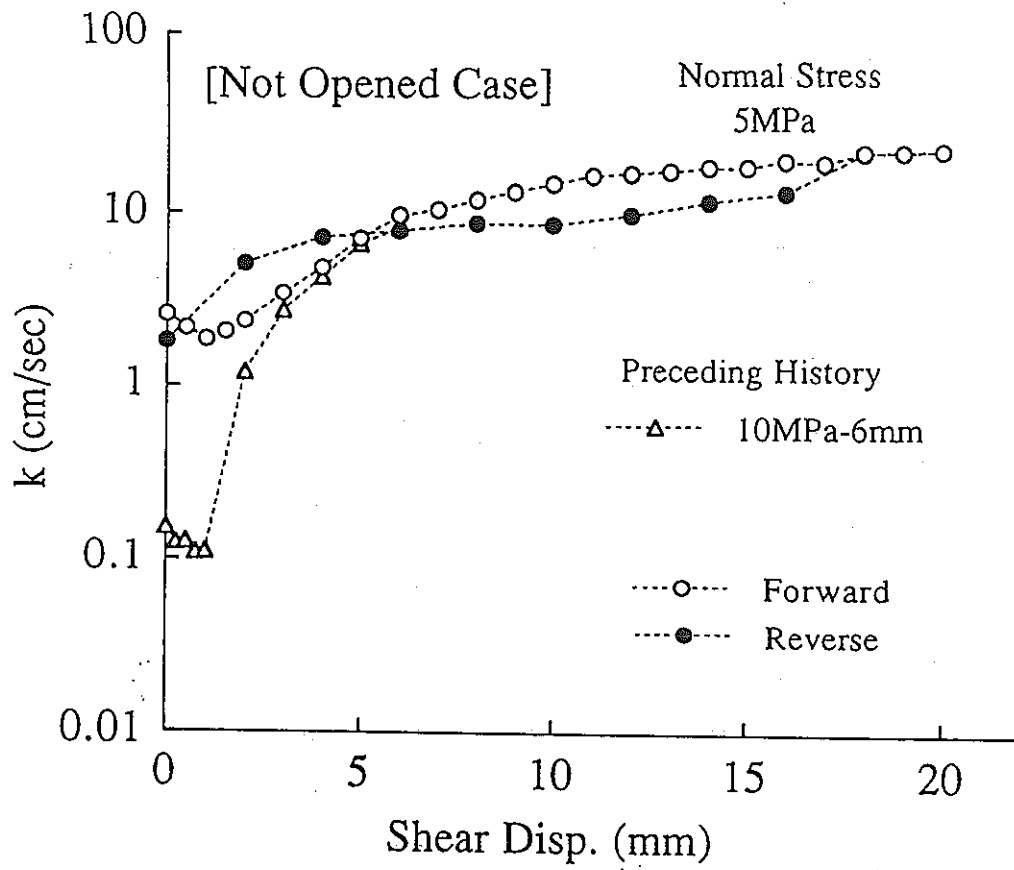


(a)

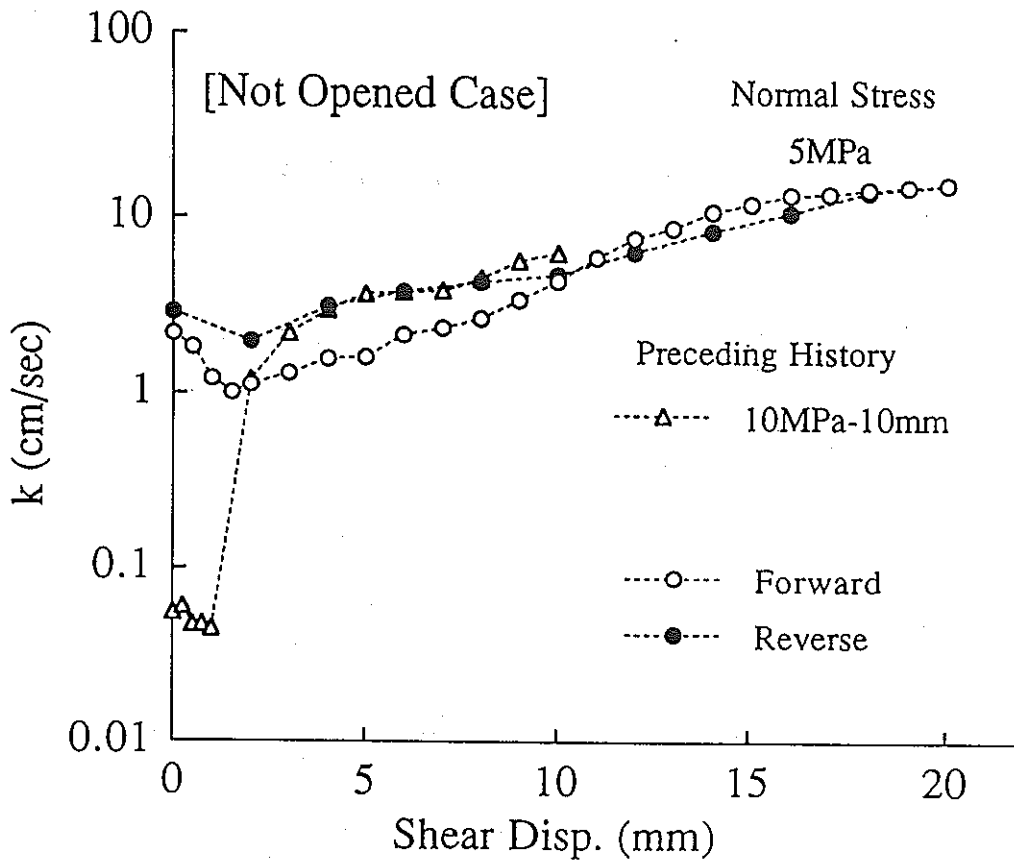


(b)

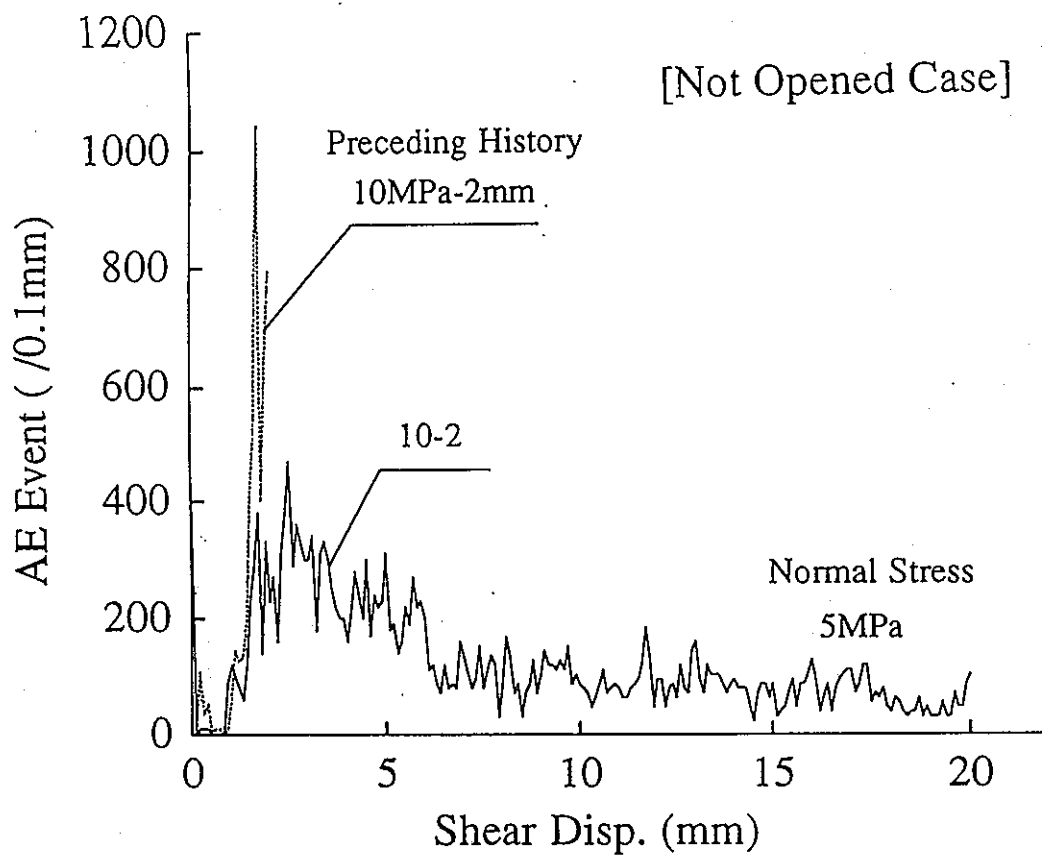
图4-40 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for each preceding history.



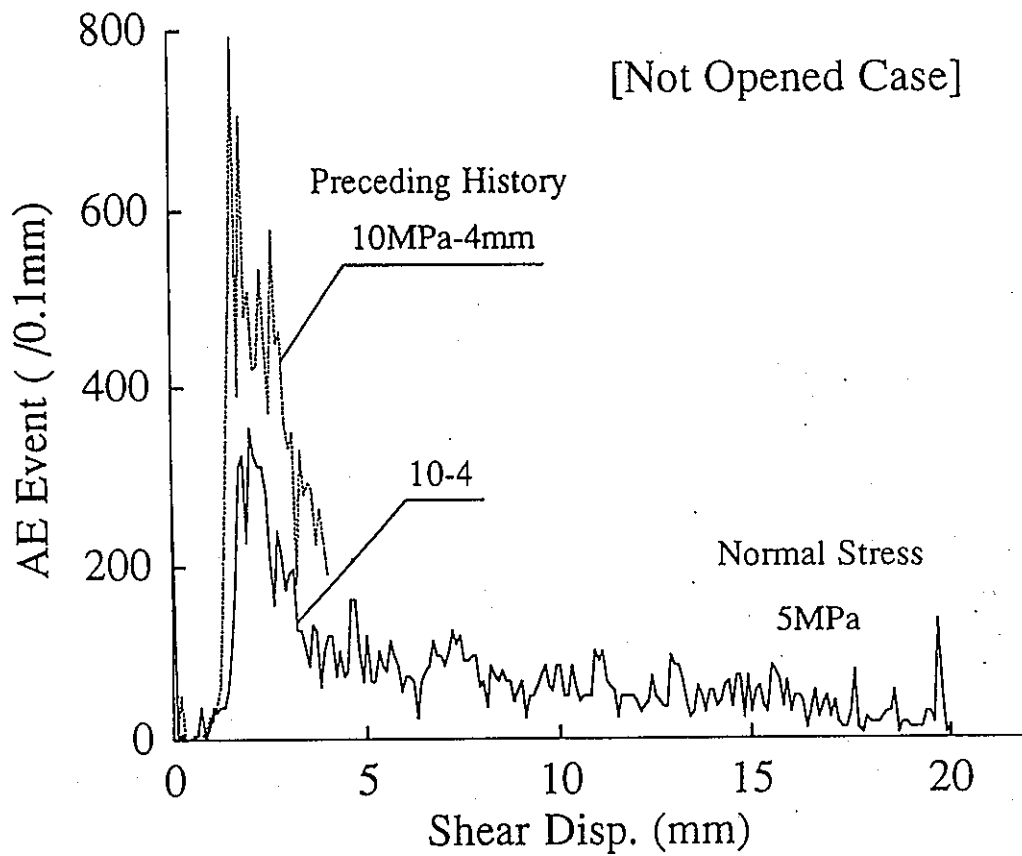
(c)



(d)

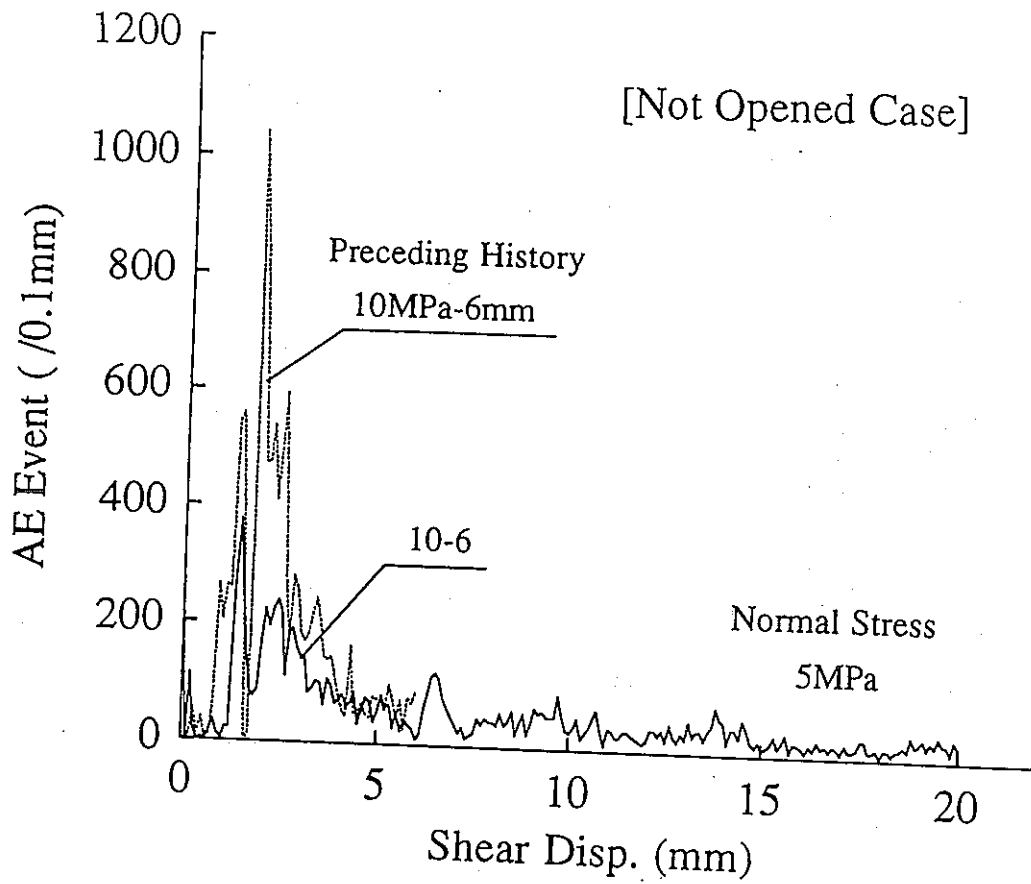


(a)

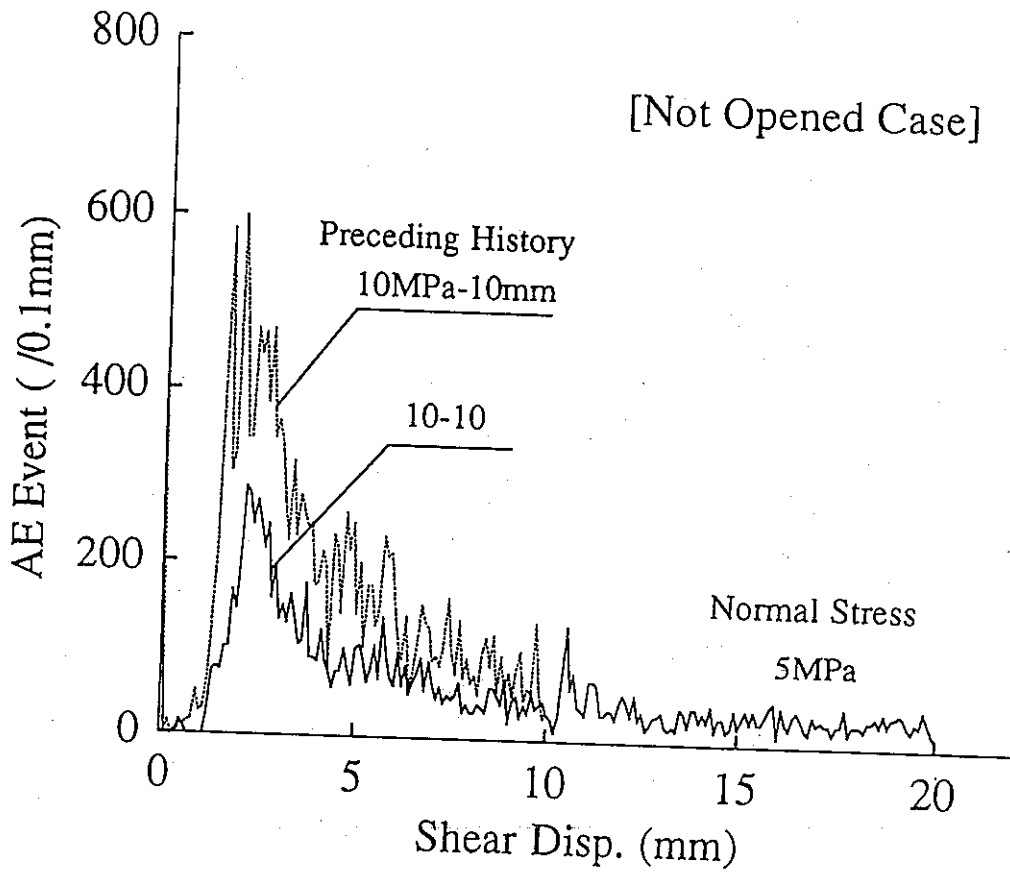


(b)

☒4-41 Relationship between AE event count and shear displacement, for each preceding history.



(c)



(d)

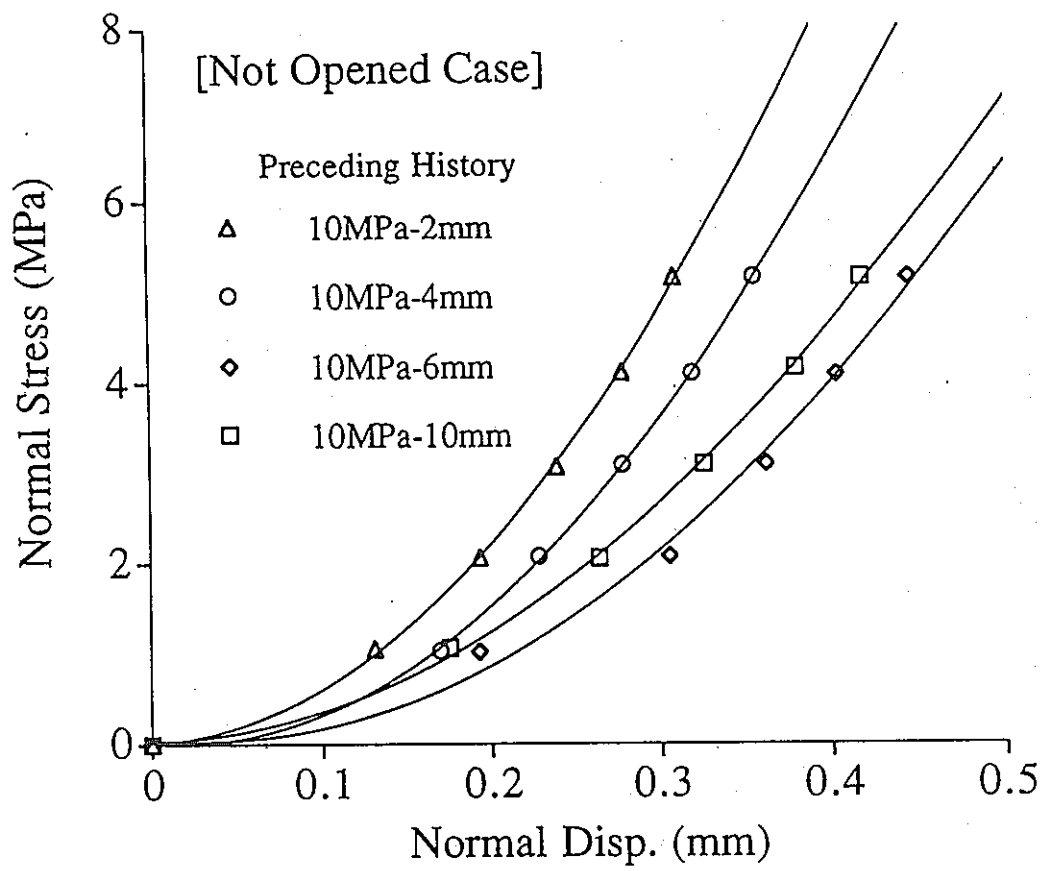


图4-42 Relationship between Normal stress and Normal displacement, for different preceding history.

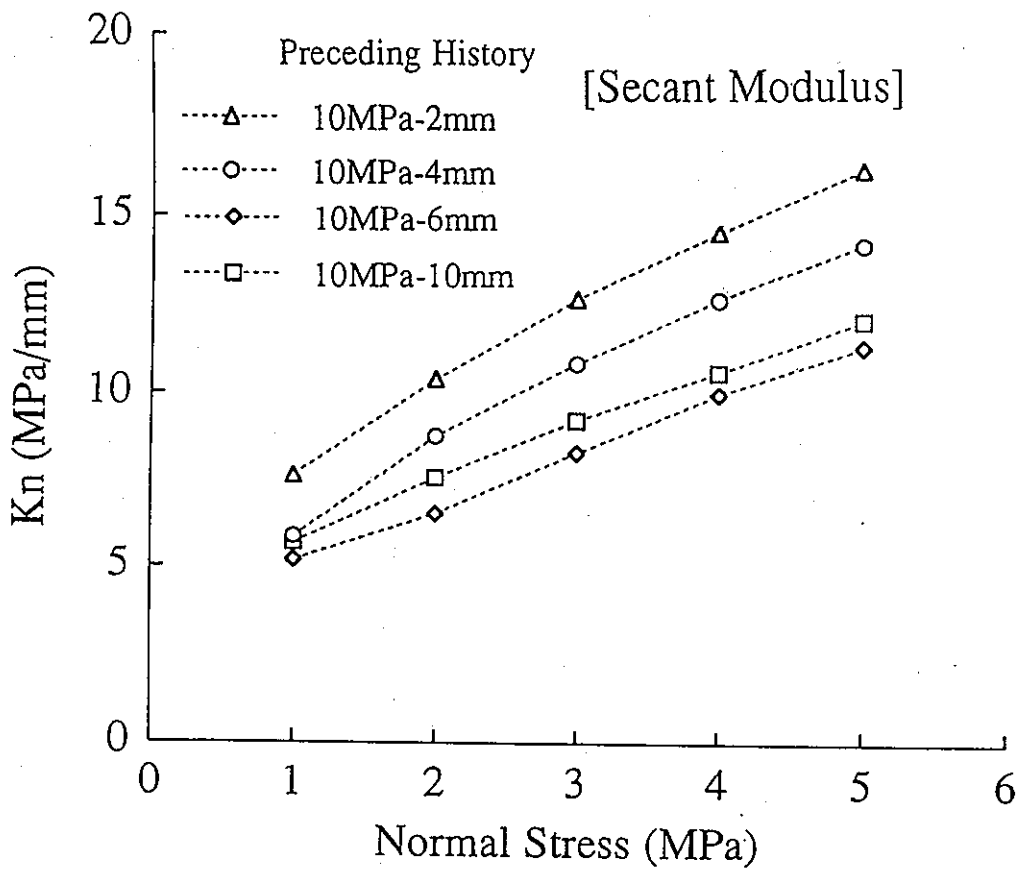


图4-43 Relationship between normal stiffness (K_n) and normal stress, obtained from secant modulus.

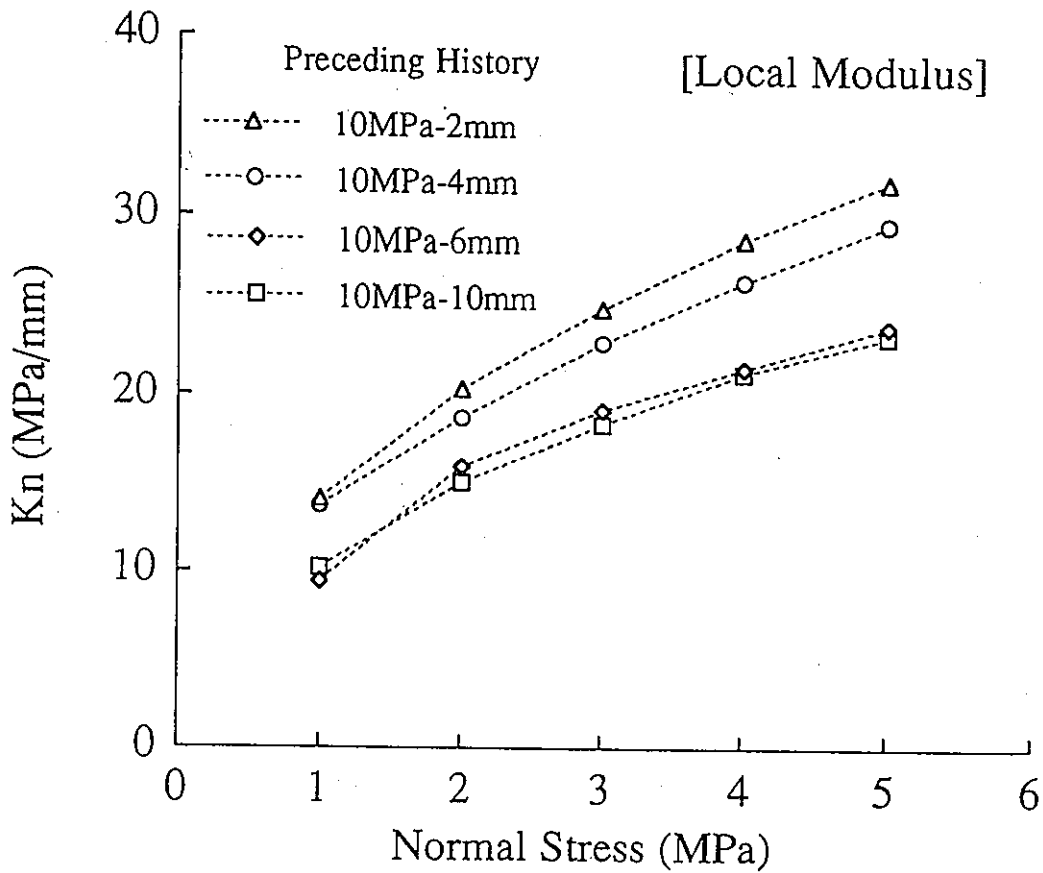
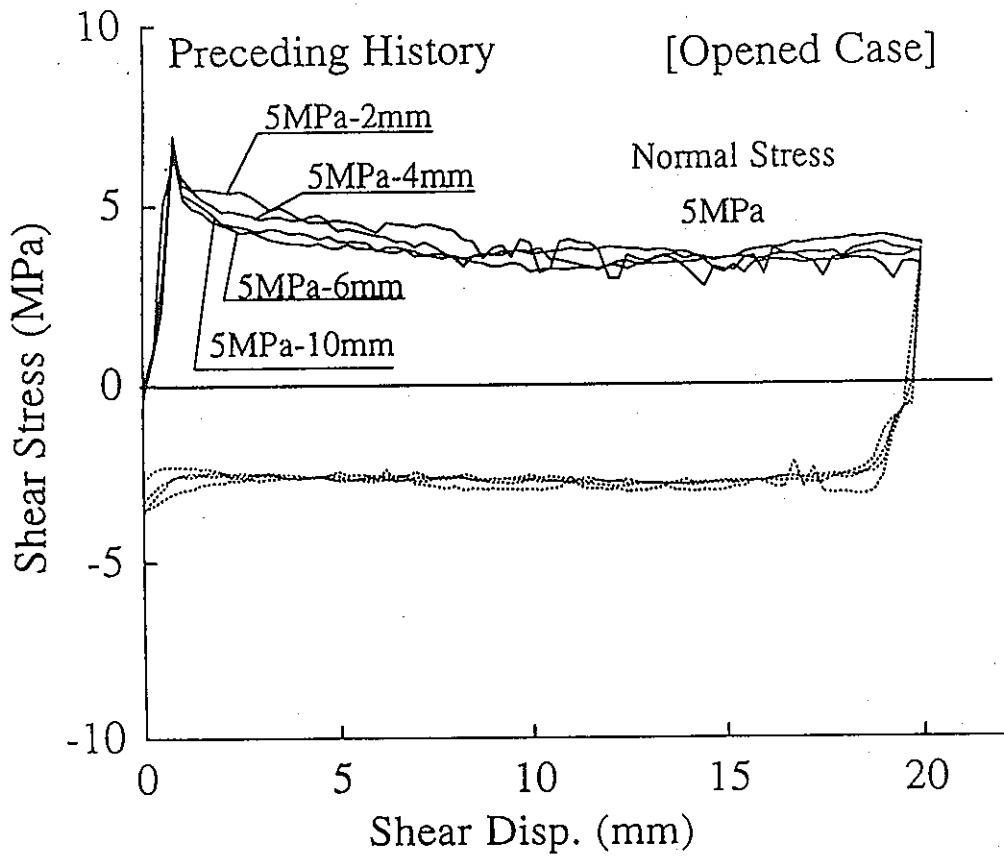
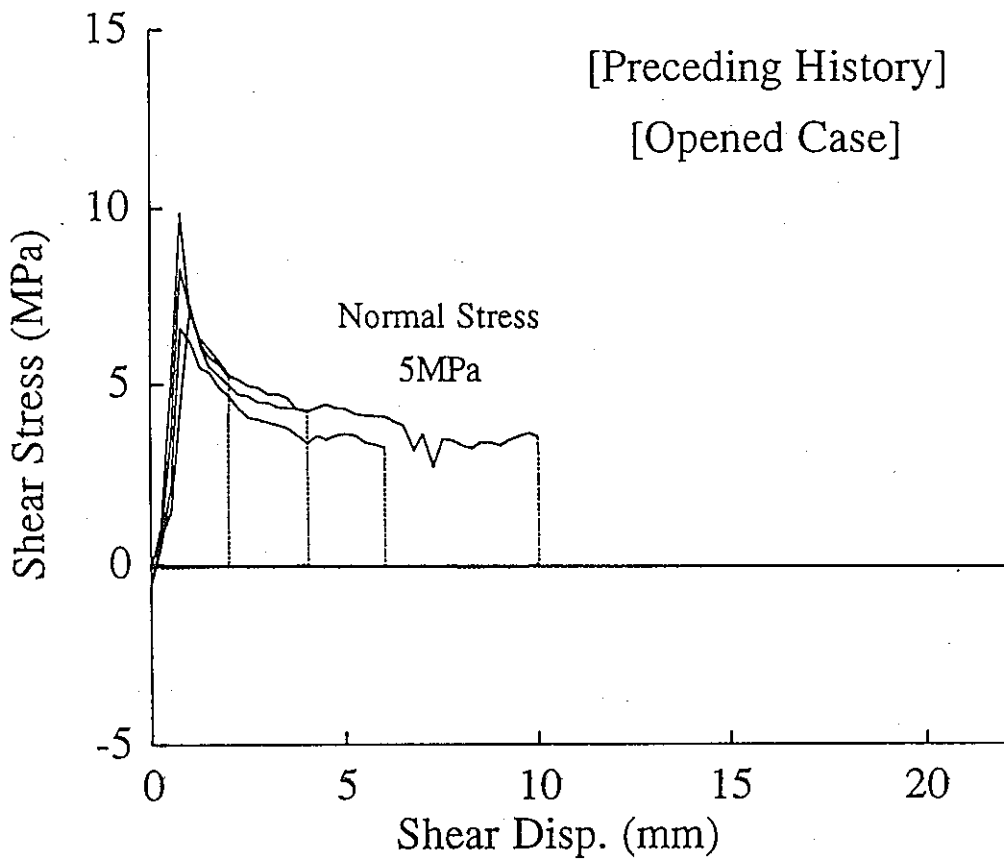


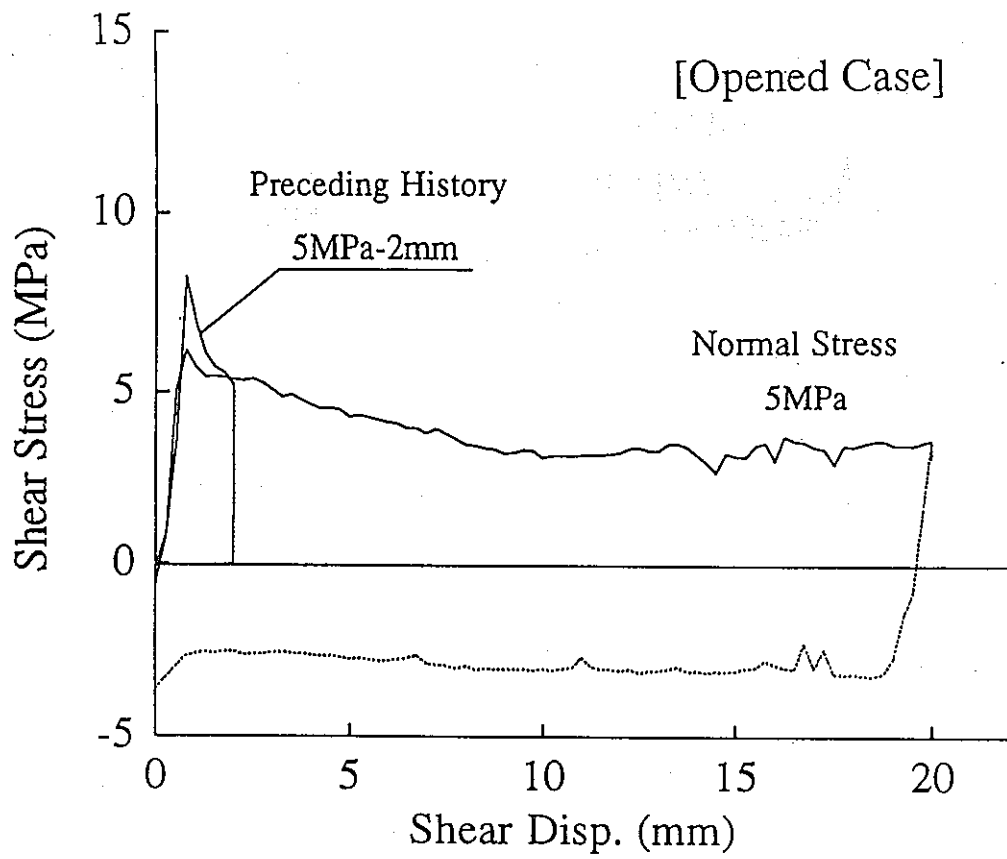
图4-44 Relationship between normal stiffness (K_n) and normal stress, obtained from local modulus.



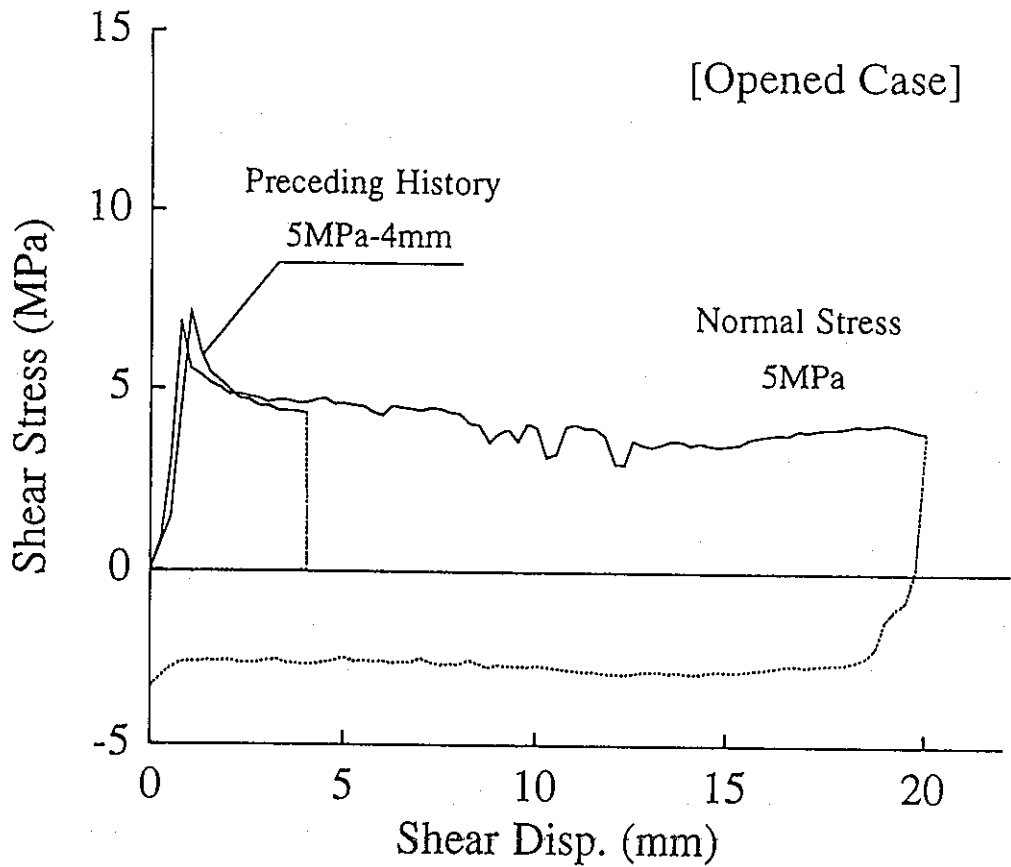
⊠ 4-45 Shear stress vs. shear displacement curves, for different preceding history.



⊠ 4-46 Shear stress vs. shear displacement curves of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

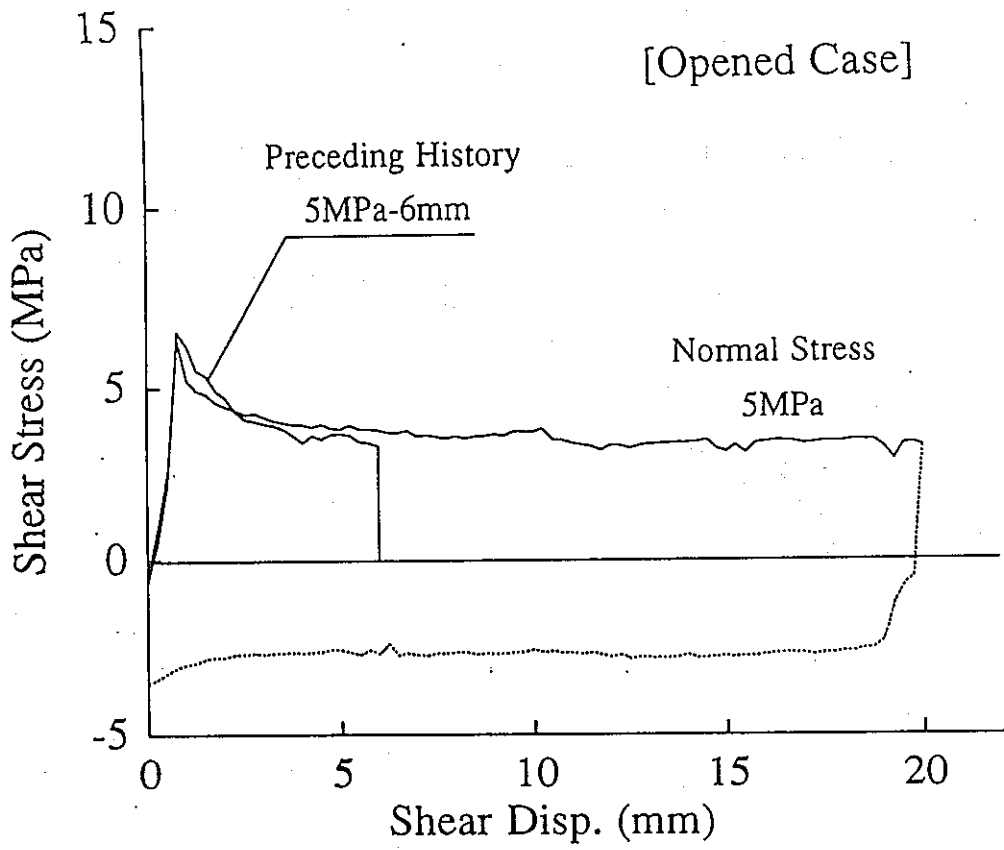


(a)

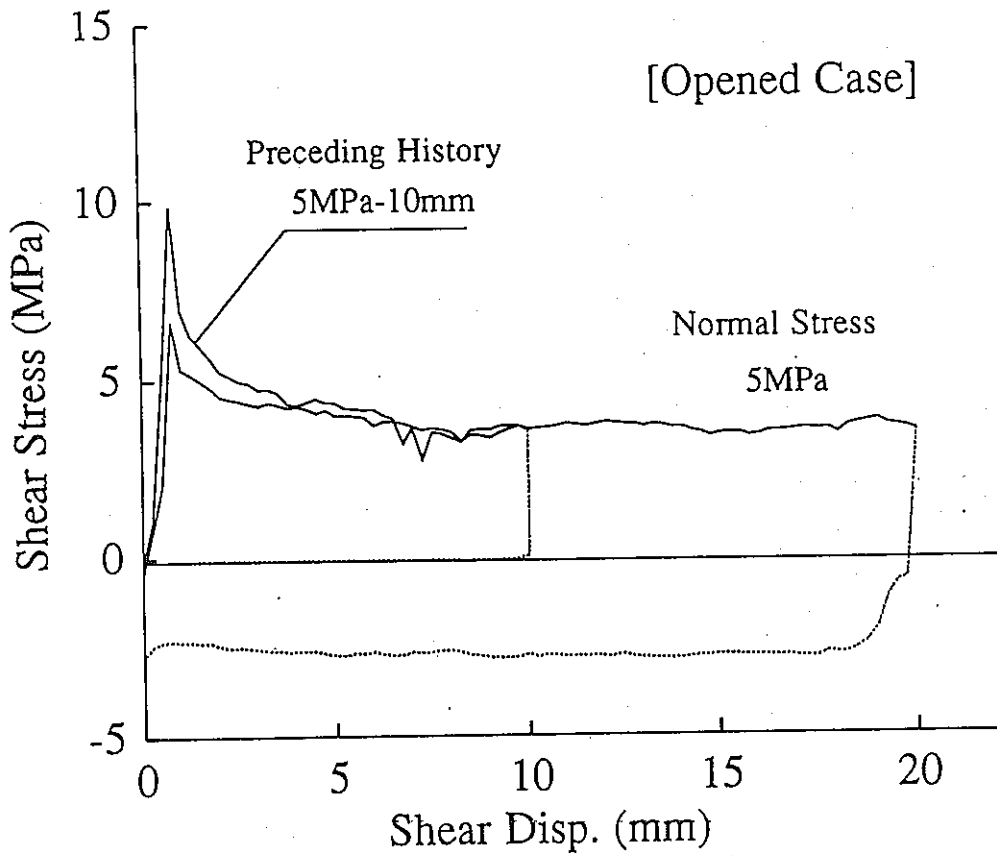


(b)

图4-47 Shear stress vs. shear displacement curves, for each preceding history.



(c)



(d)

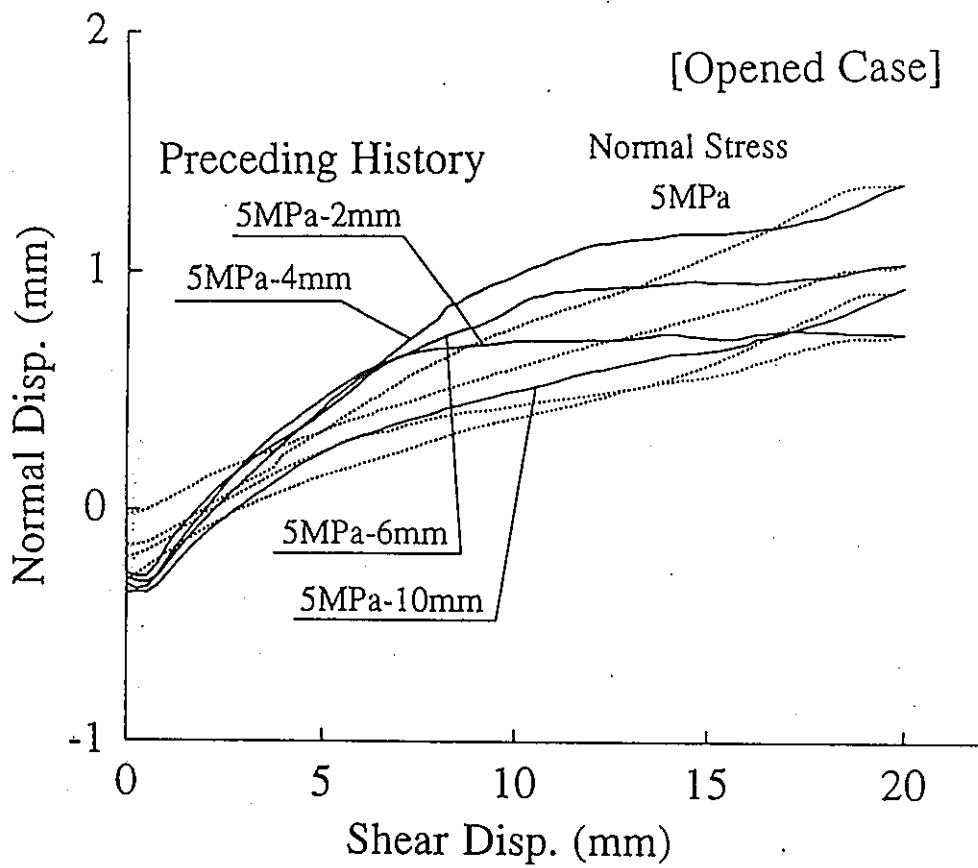


图 4-48 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different preceding history.

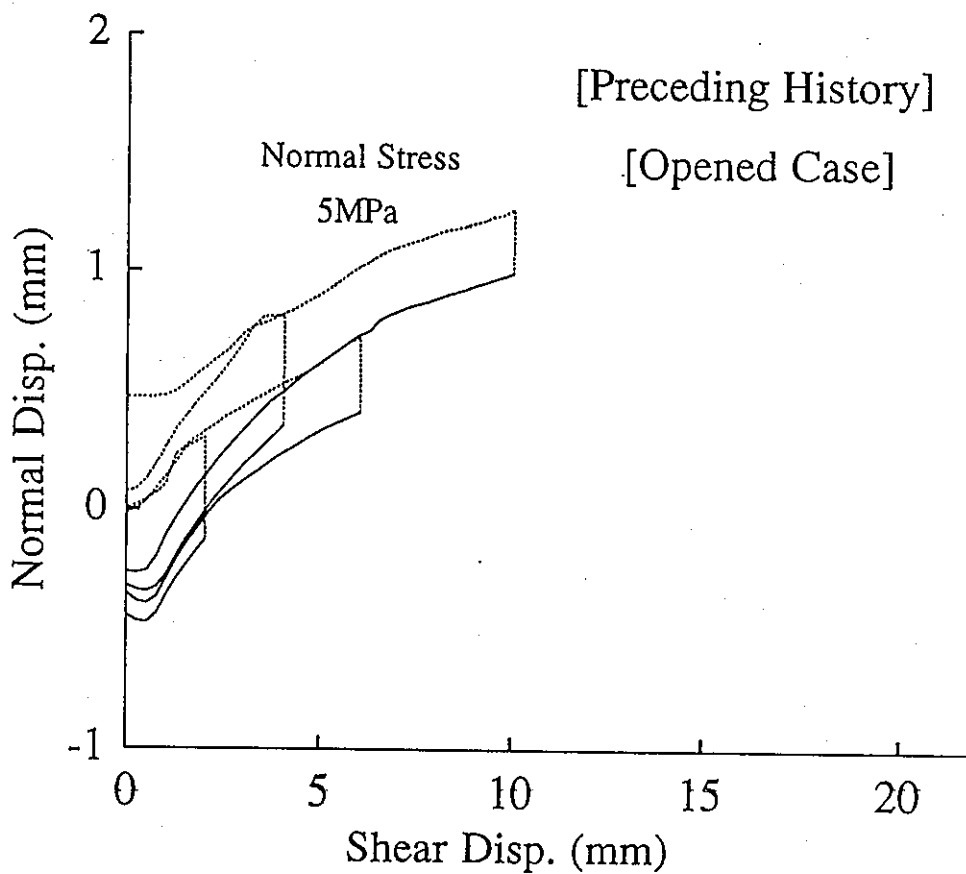
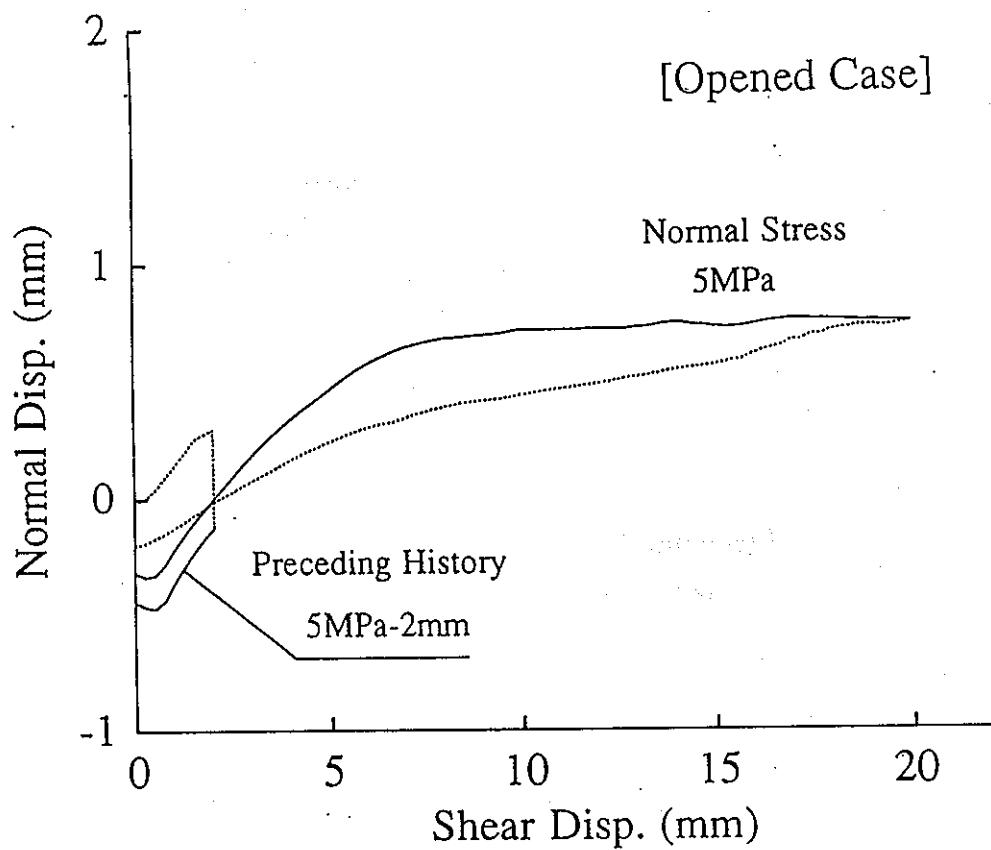
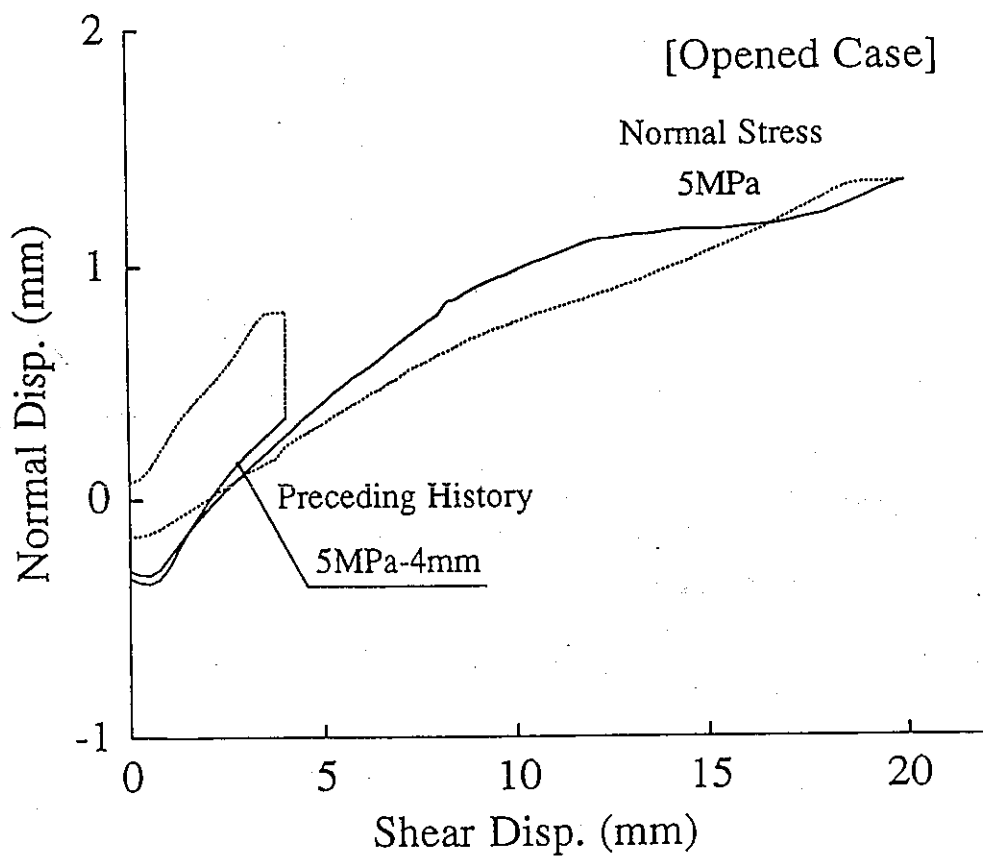


图 4-49 Normal displacement vs. shear displacement curves of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

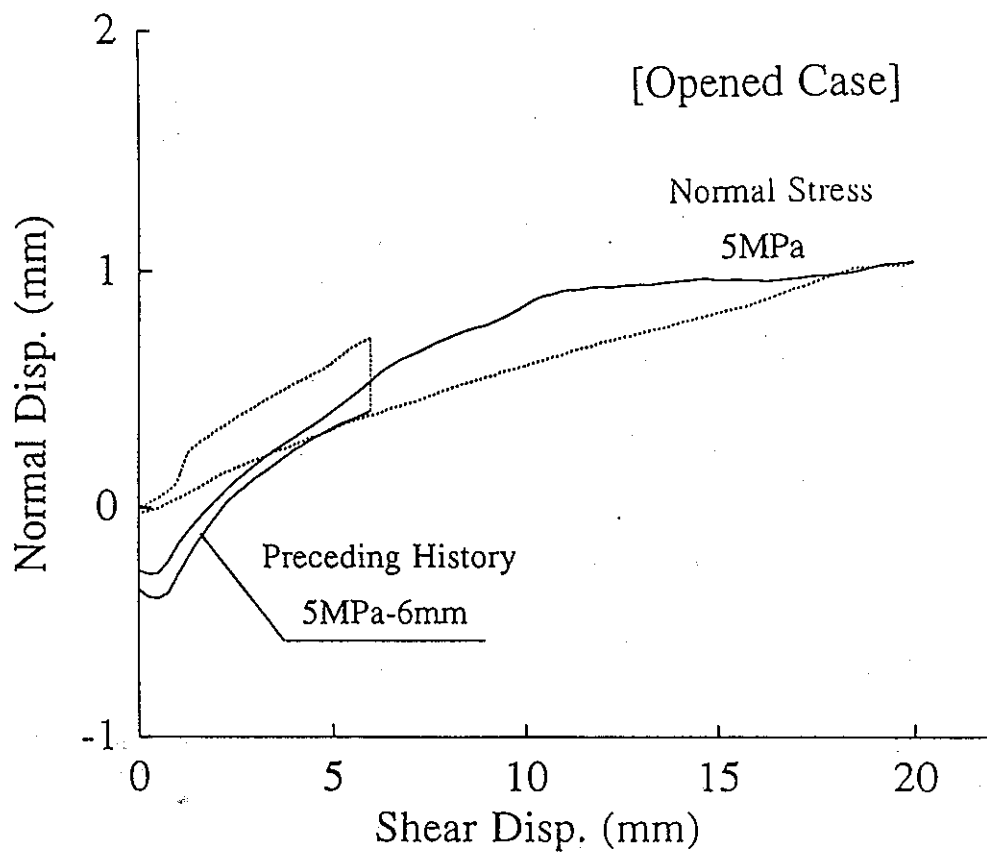


(a)

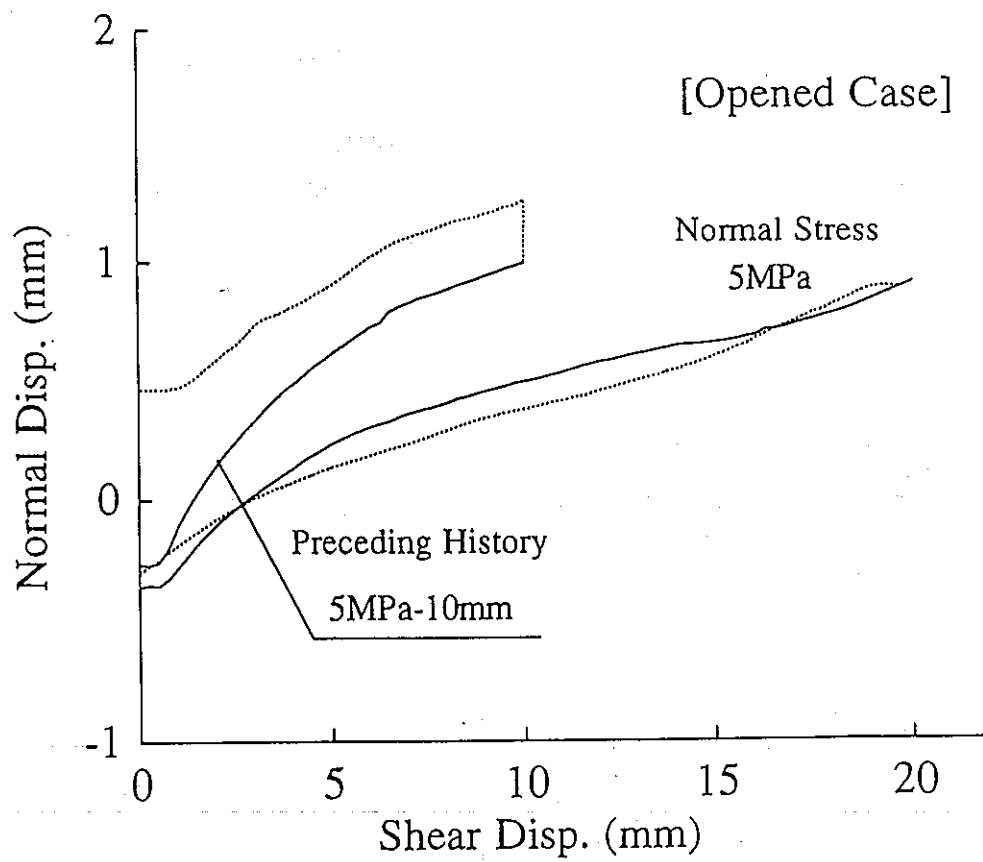


(b)

图4-50 Normal displacement vs. shear displacement curves, for each preceding history.



(c)



(d)

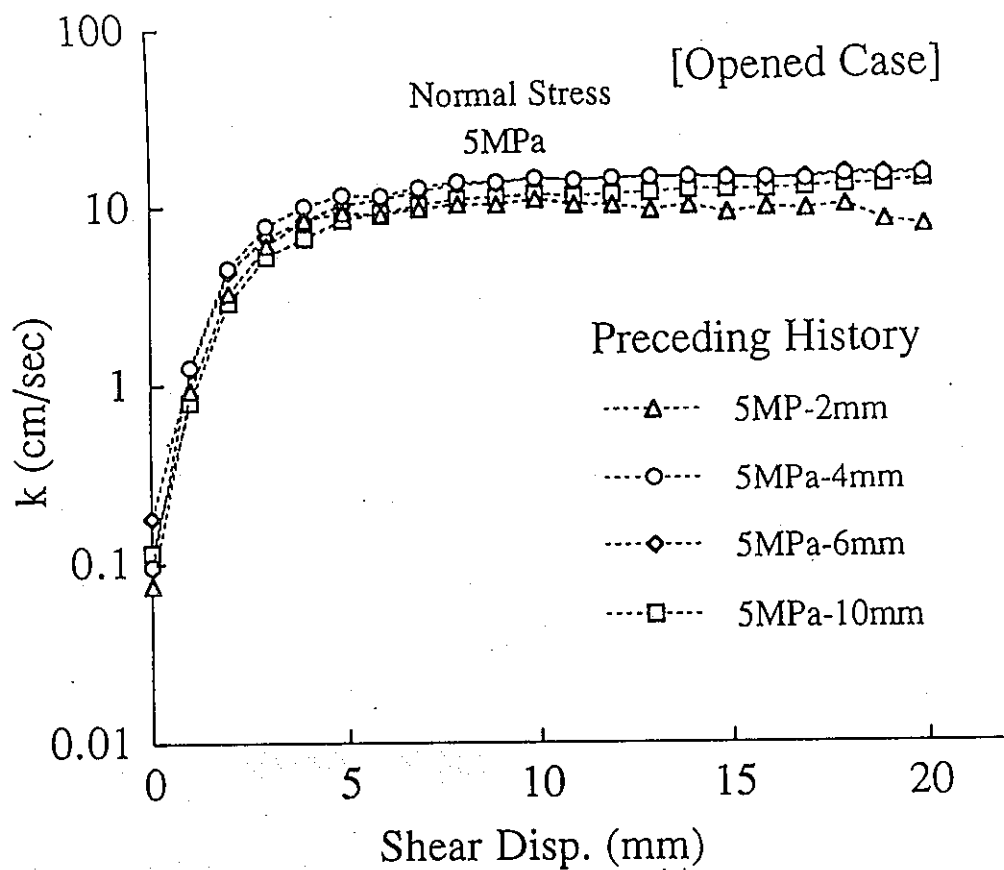


图4-51 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different preceding history.

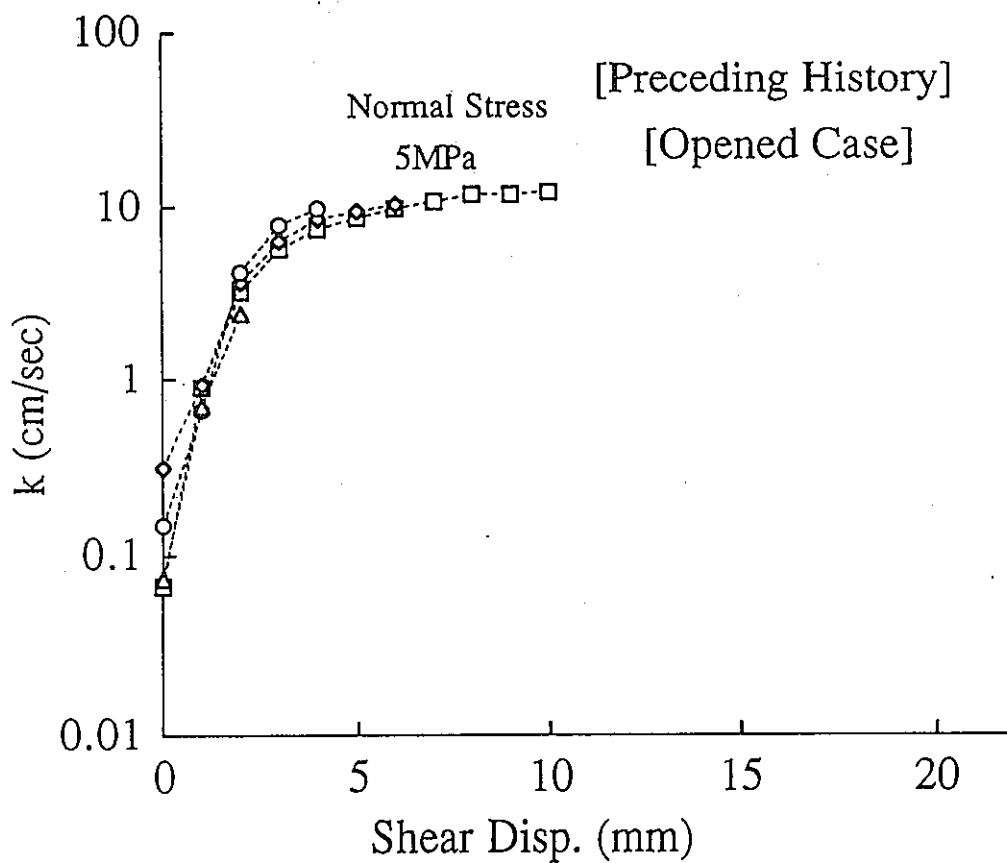


图4-52 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams of preceding history, for different shear displacement of 2, 4, 6 and 10mm.

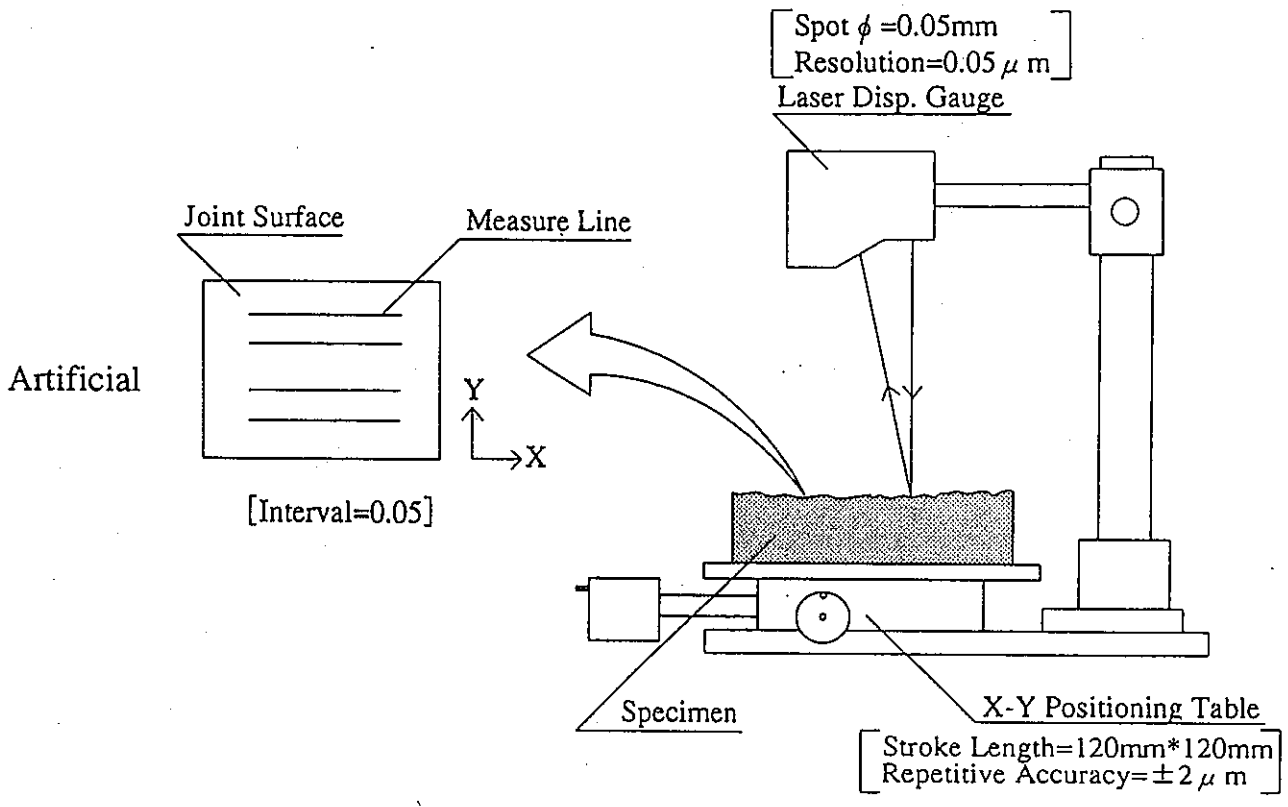
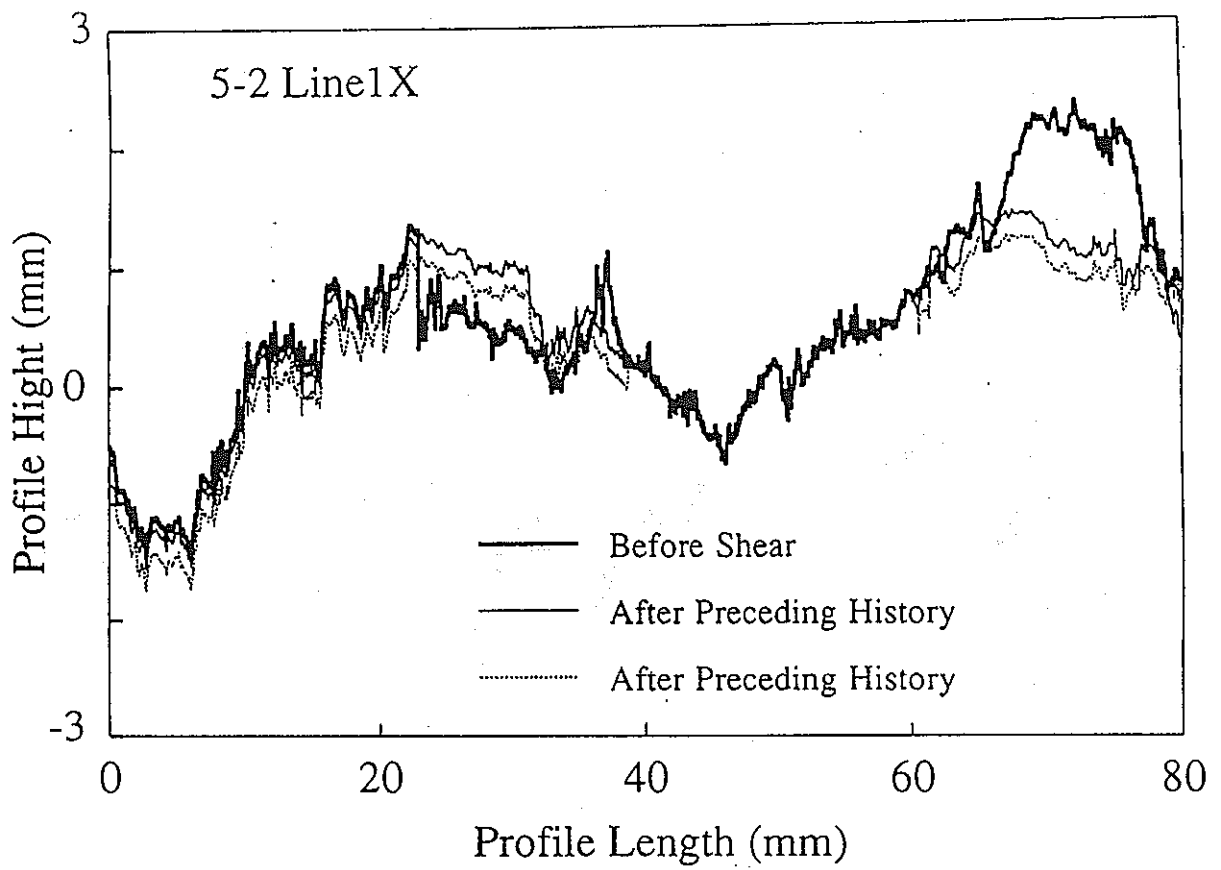
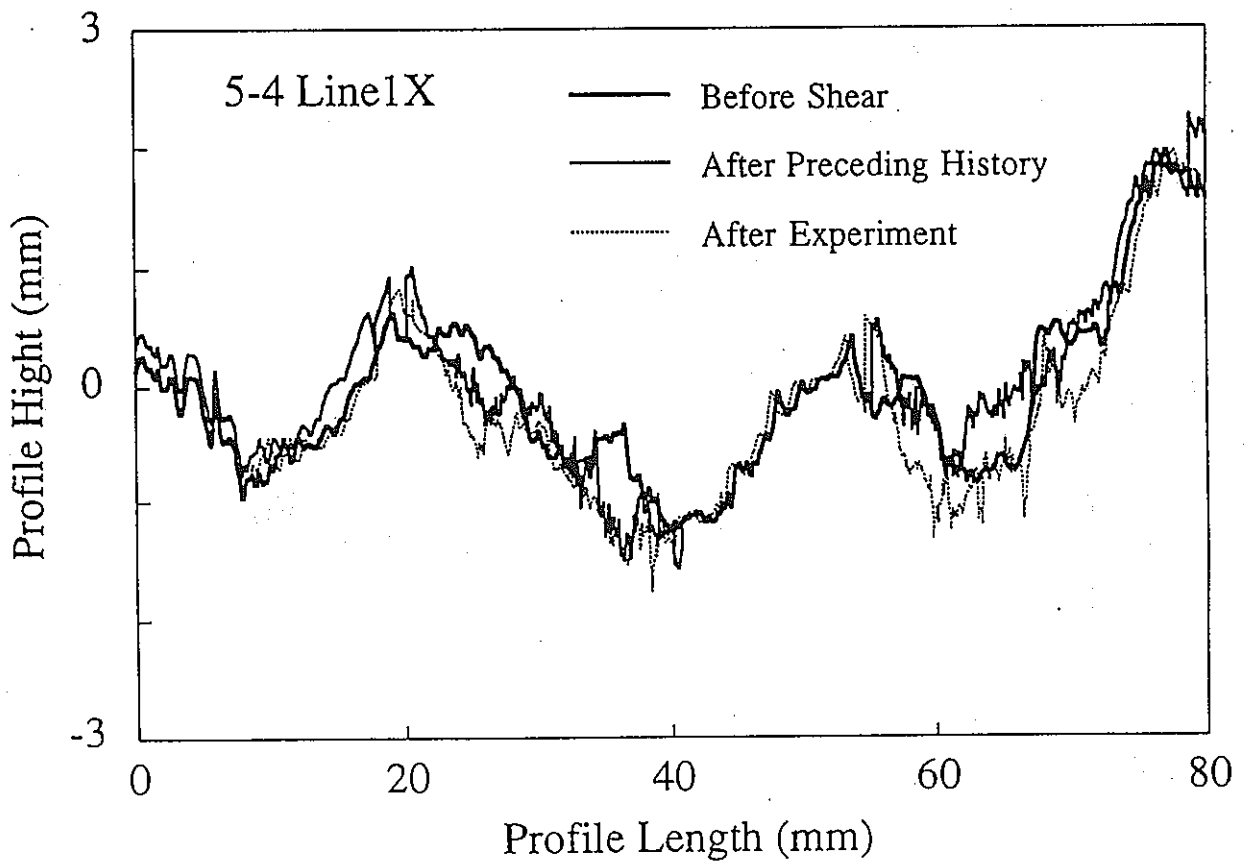


图4-53 Schematic view of the measuring for fracture surface profiles.

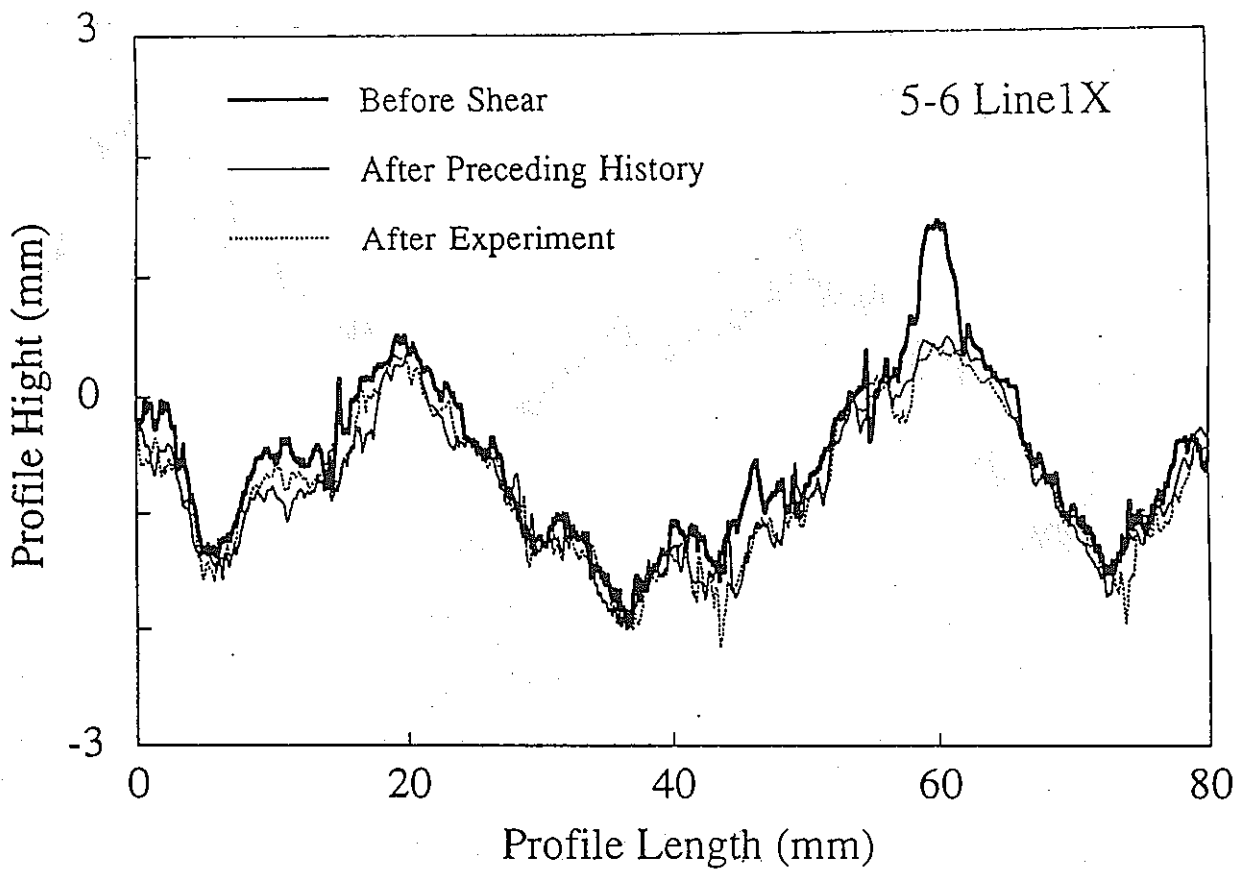


(a)

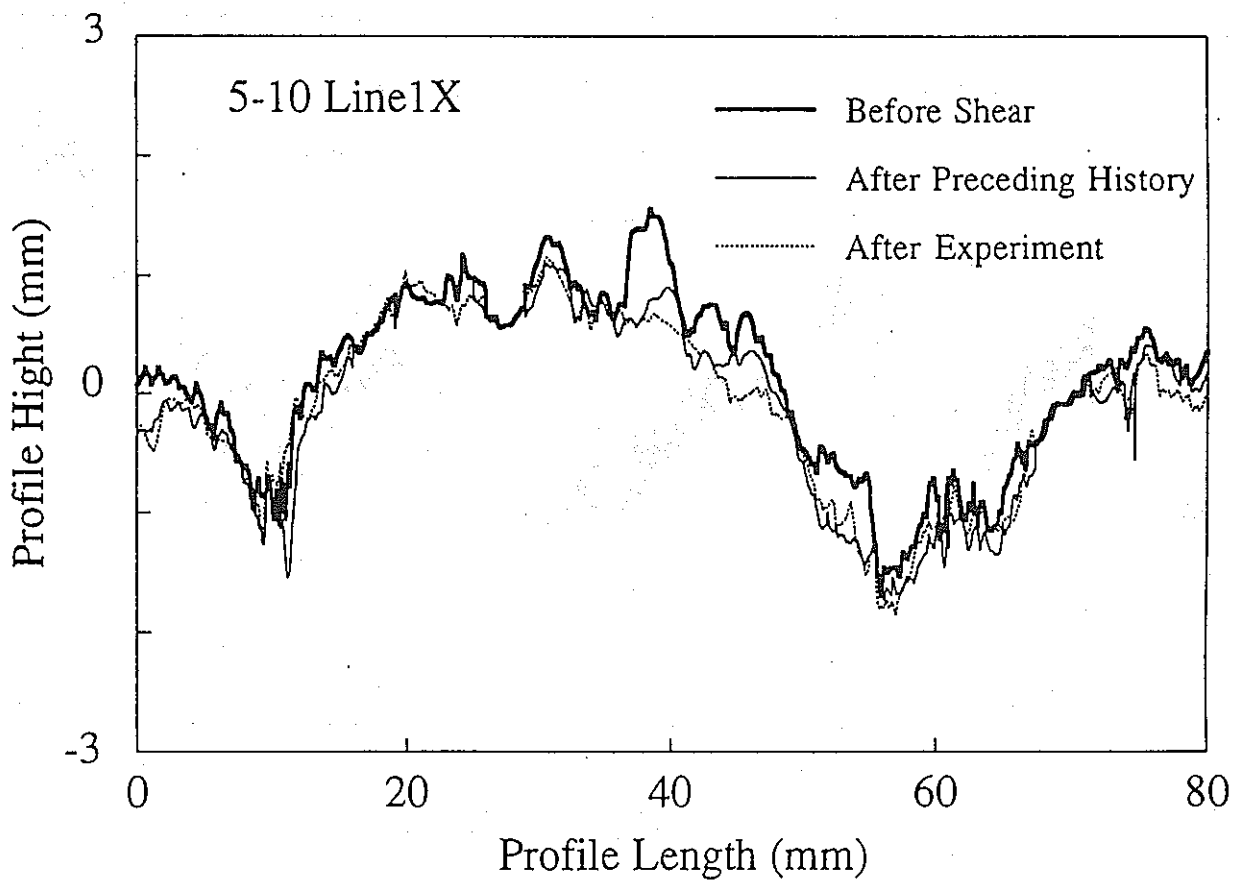


(b)

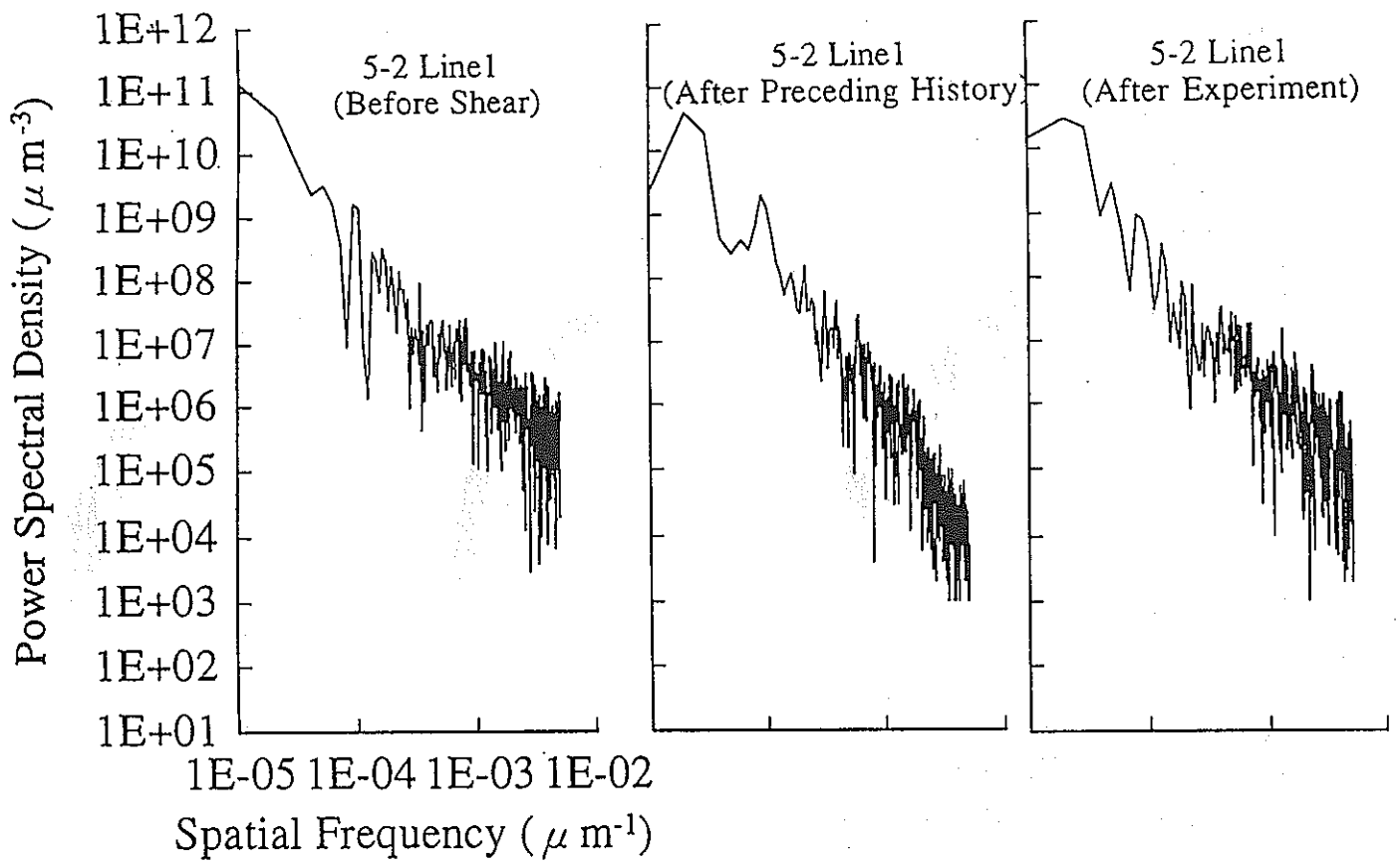
☒ 4-54 Roughness profiles obtained from the measurement of joint surfaces



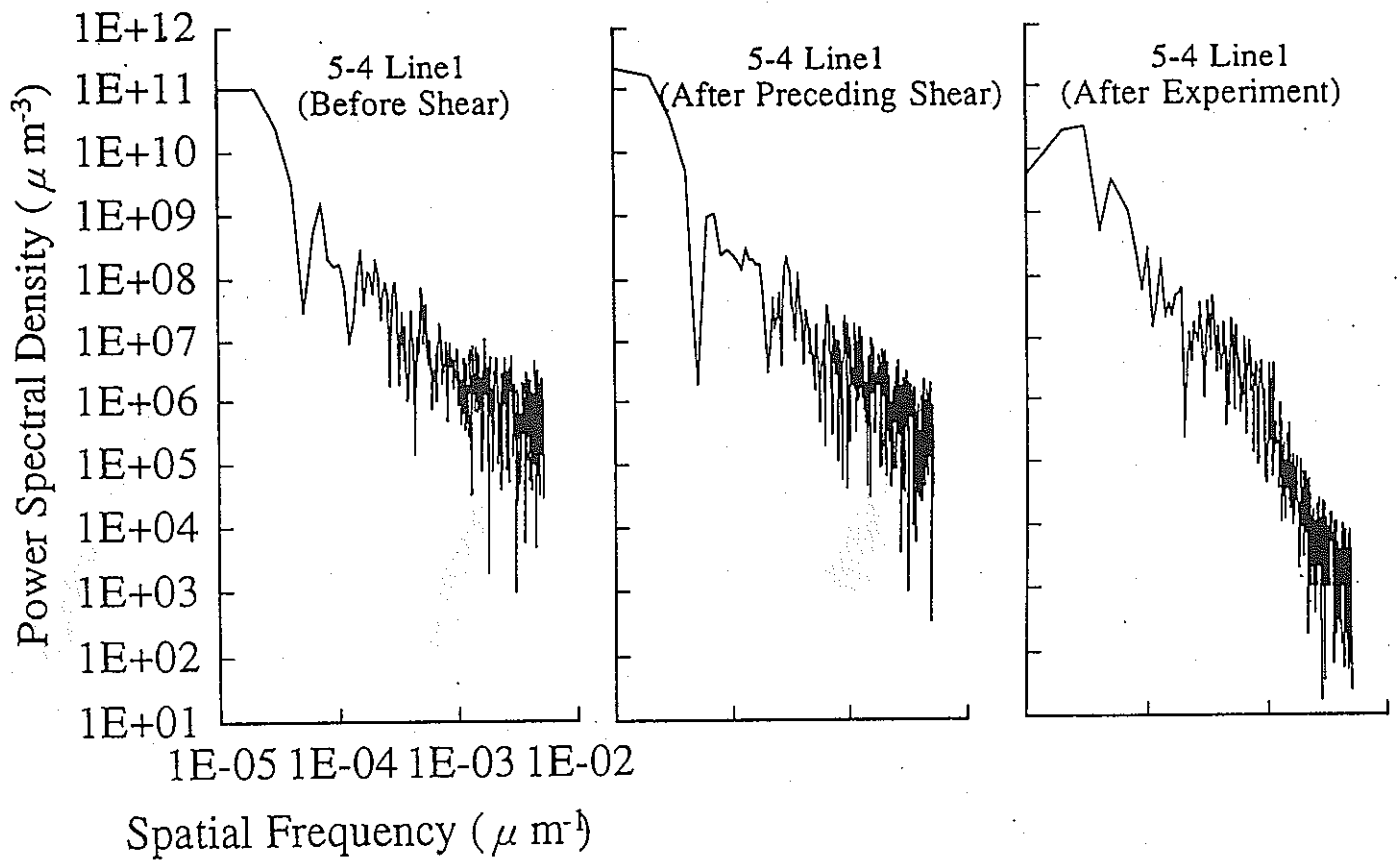
(c)



(d)

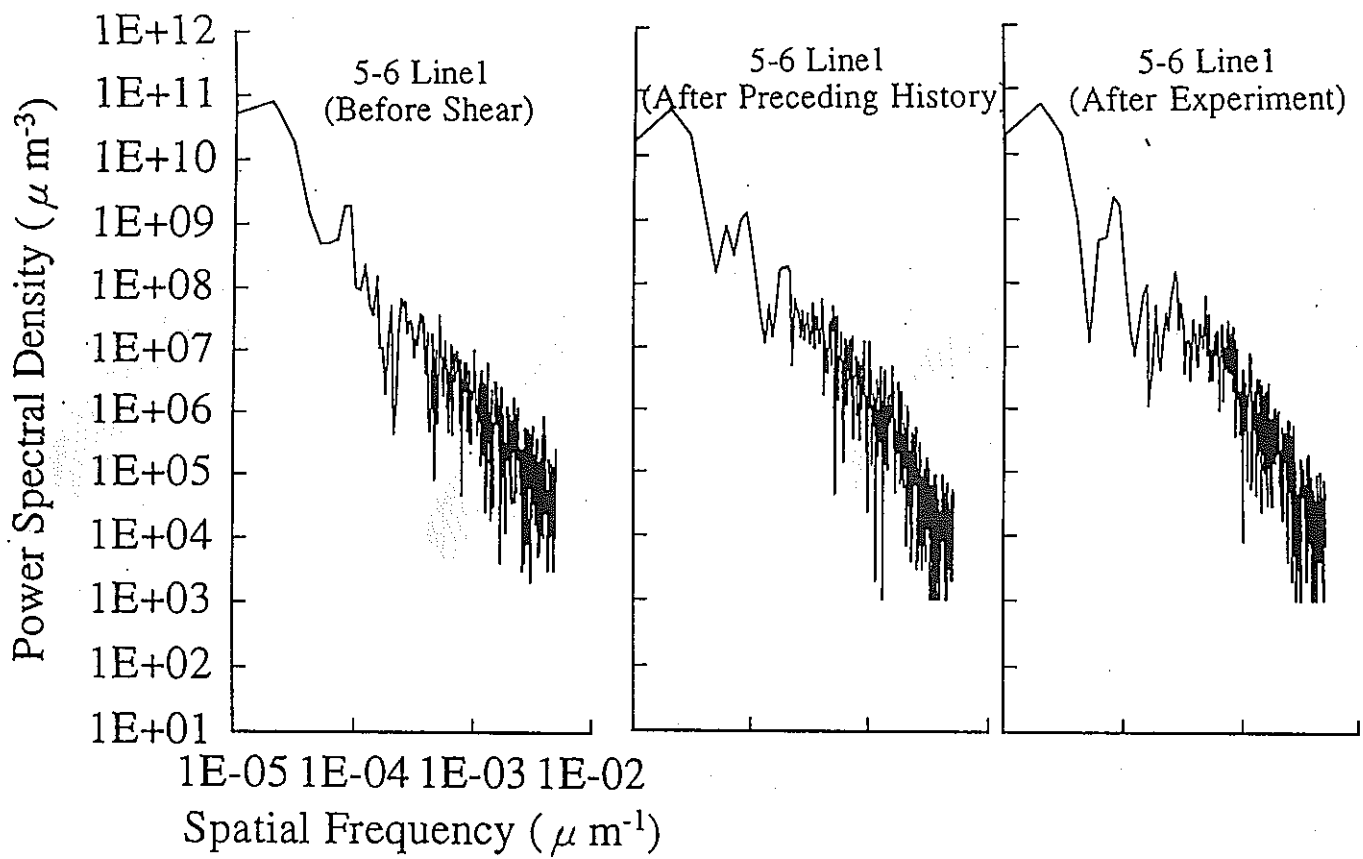


(a)

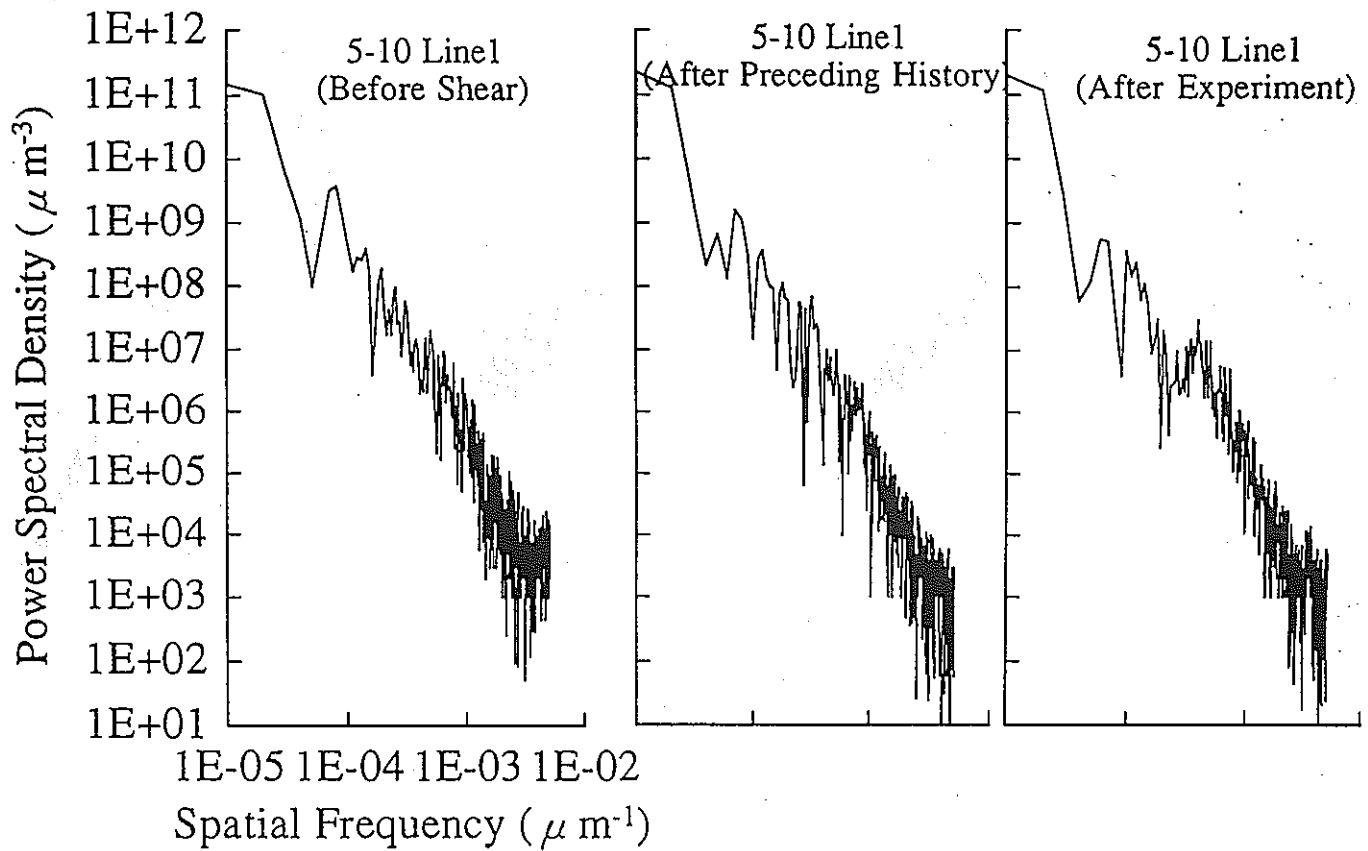


(b)

图4-55 Power spectral density vs. spatial frequency diagrams, for different preceding history



(c)



(d)

Preparation of Specimen Natural Joint

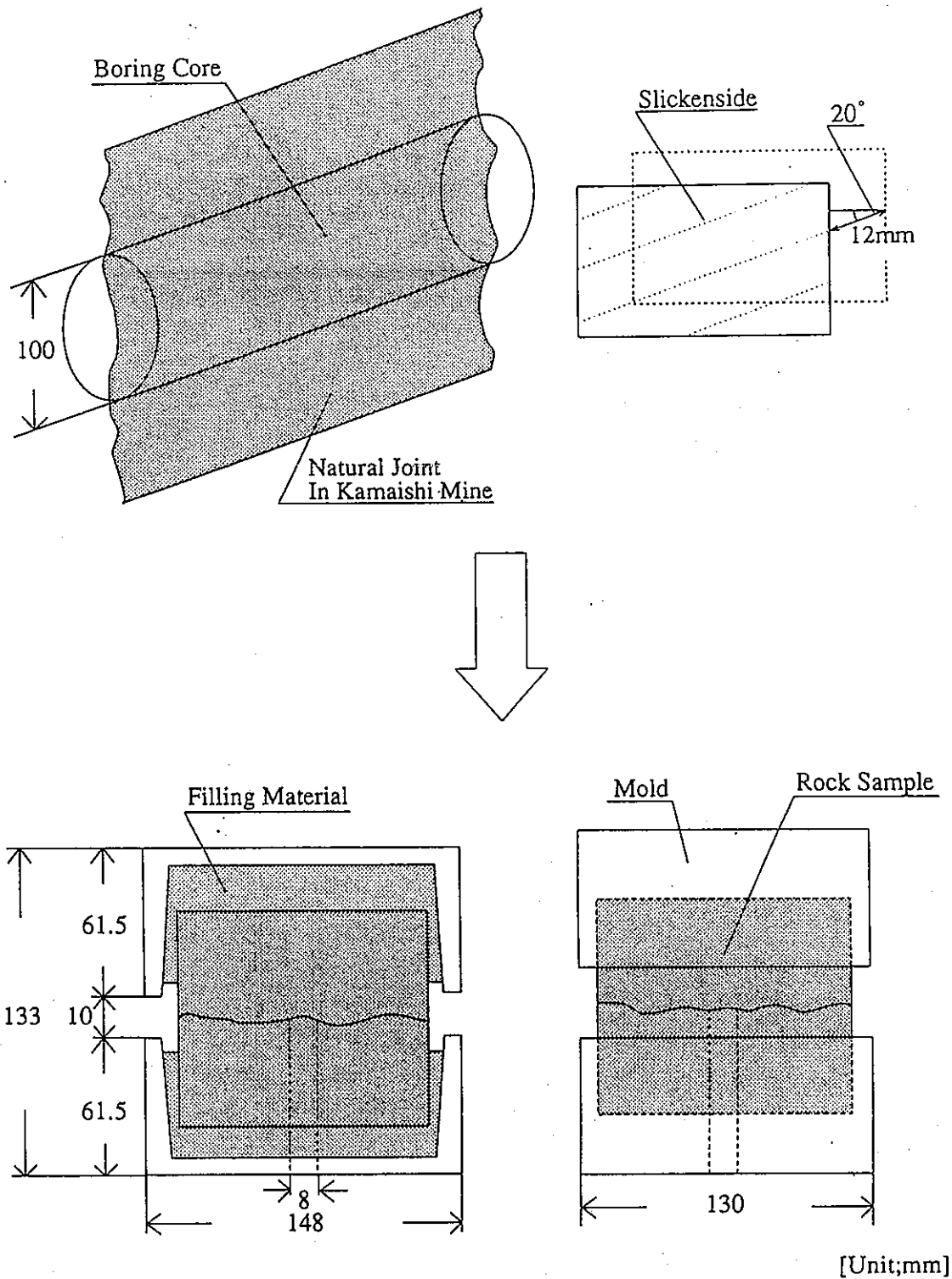


图4-56 Preparation of specimen having a natural joint sampled from Kamaishi Mine.

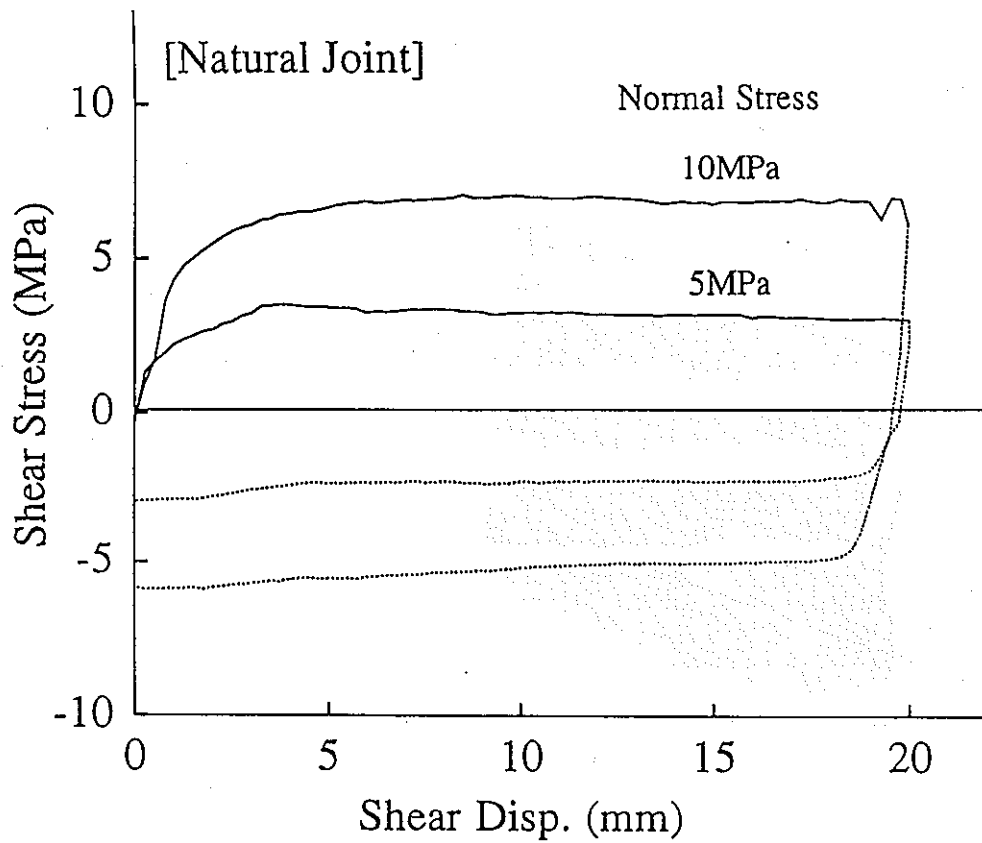


图4-57 Shear stress vs. shear displacement curves, for constant normal stress of 5MPa.

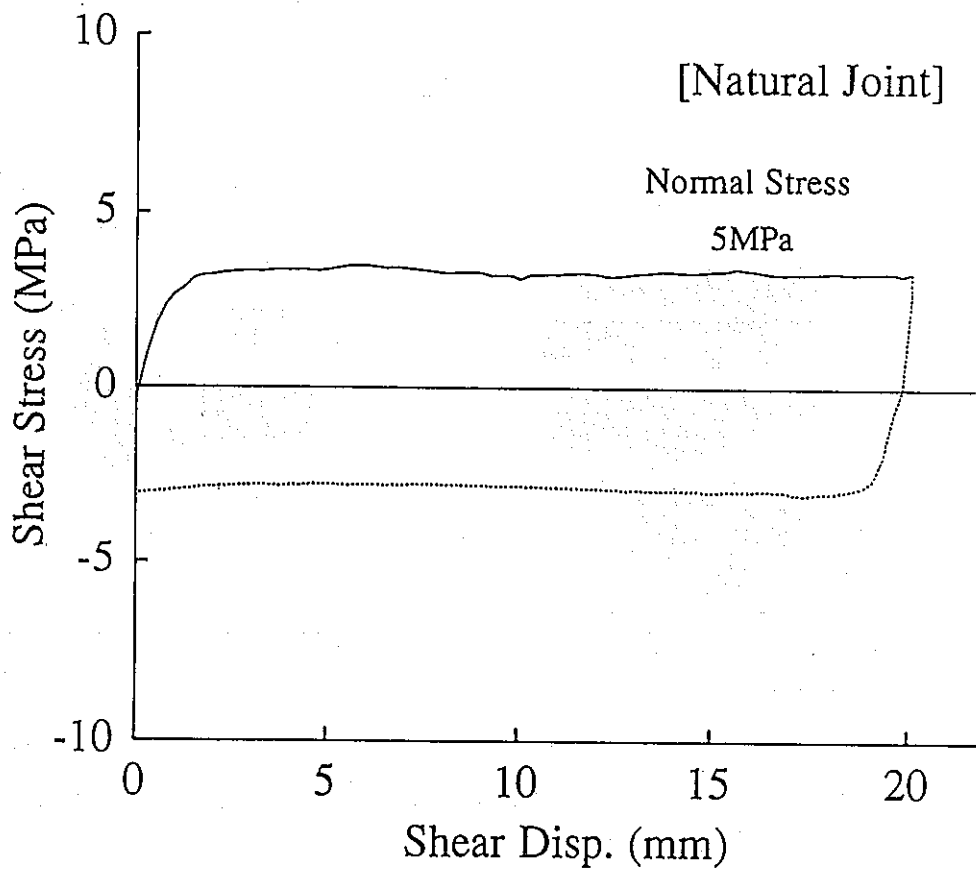


图4-58 Shear stress vs. shear displacement curves, for constant normal stress of 5,10MPa.

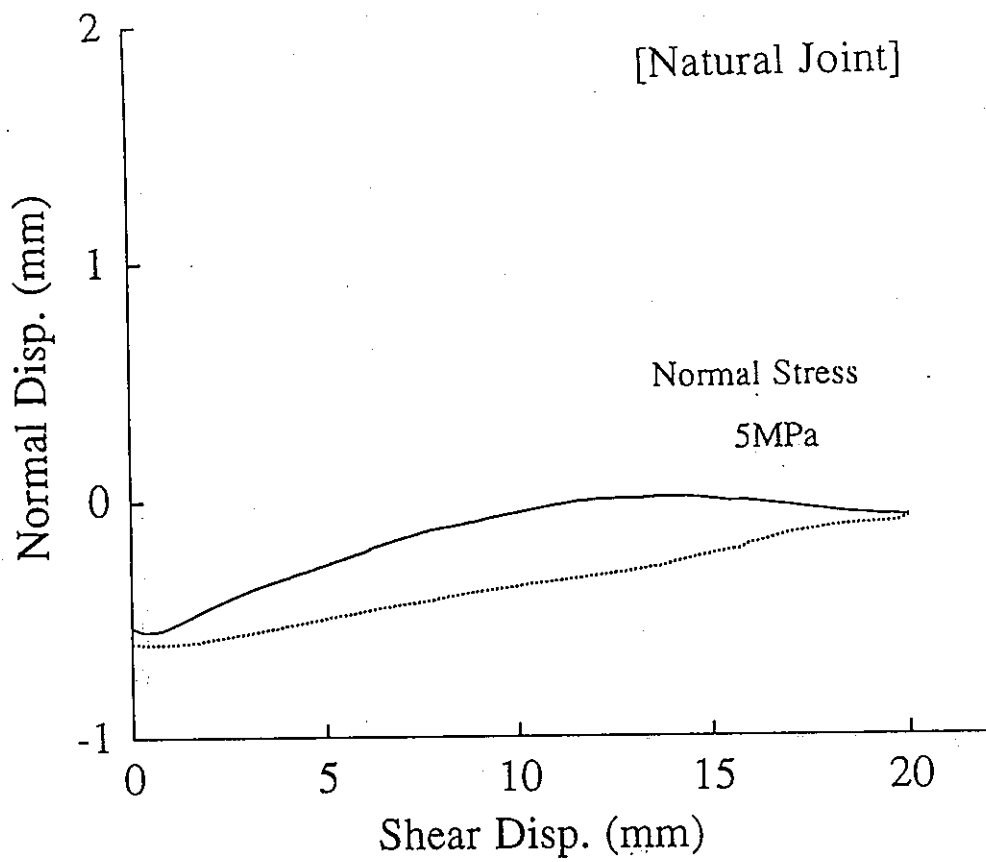


图 4-59 Normal displacement vs. shear displacement curves, for constant normal stress of 5MPa.

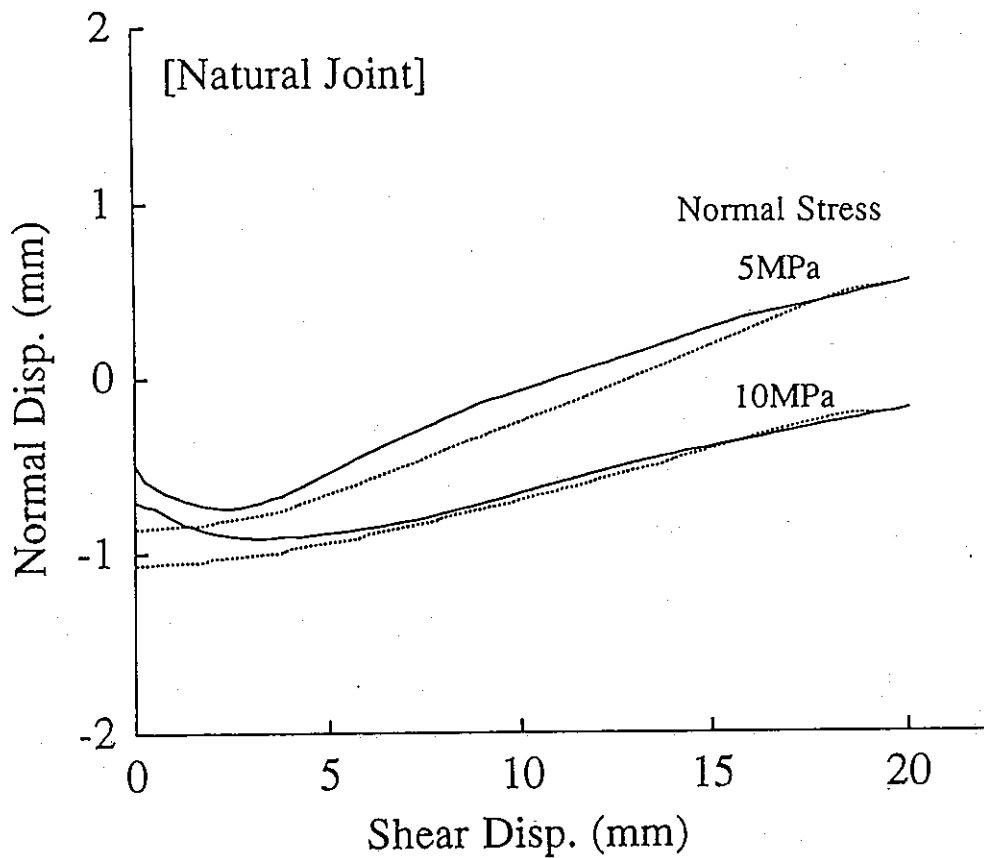
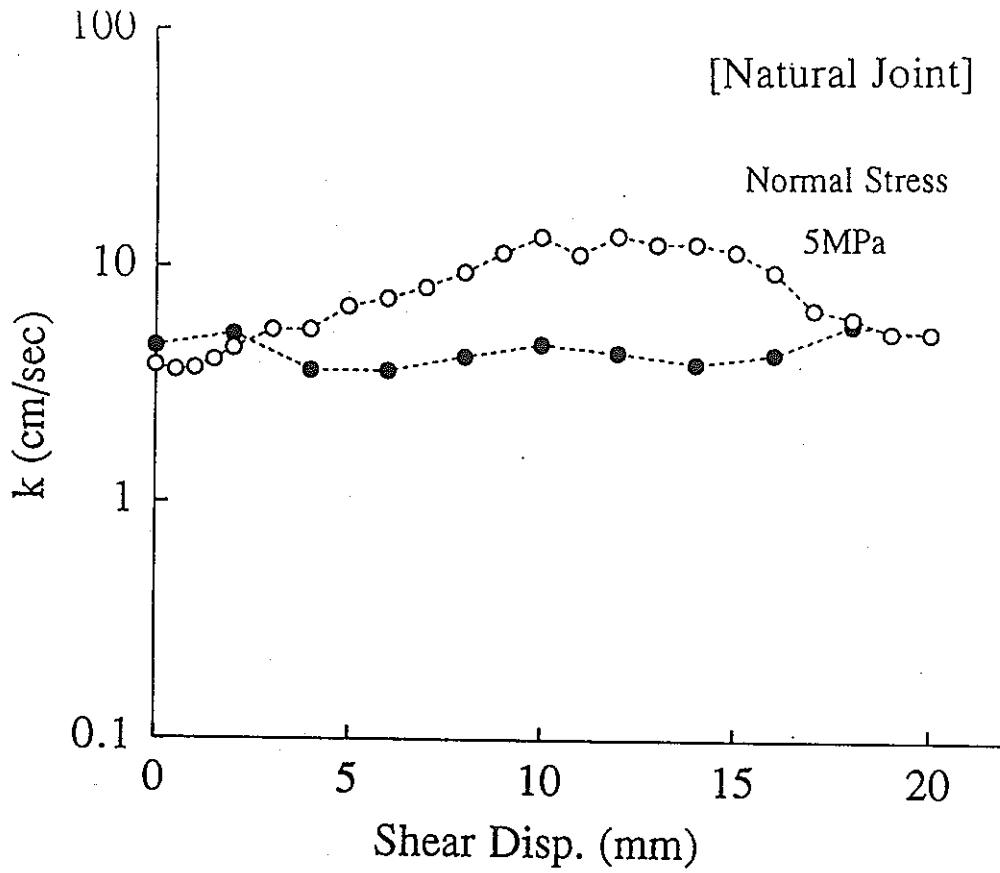
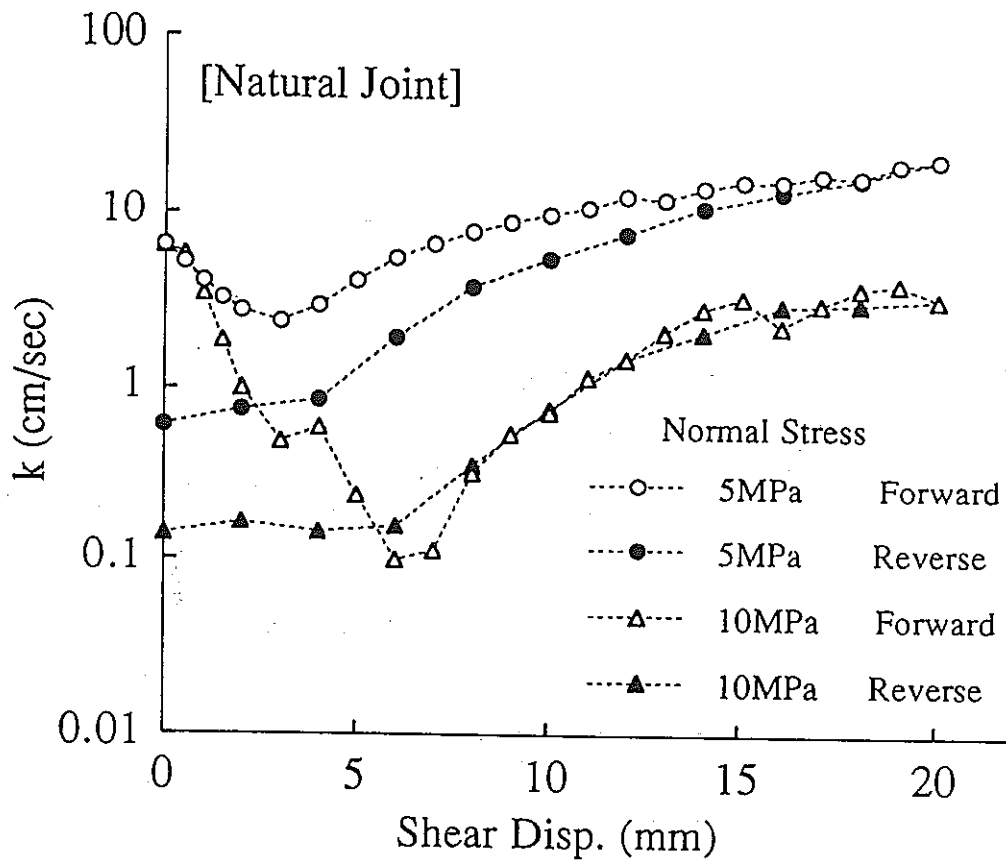


图 4-60 Normal displacement vs. shear displacement curves, for constant normal stress of 5,10MPa.



4-61 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for constant normal stress of 5MPa.



4-62 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for constant normal stress of 5,10MPa.

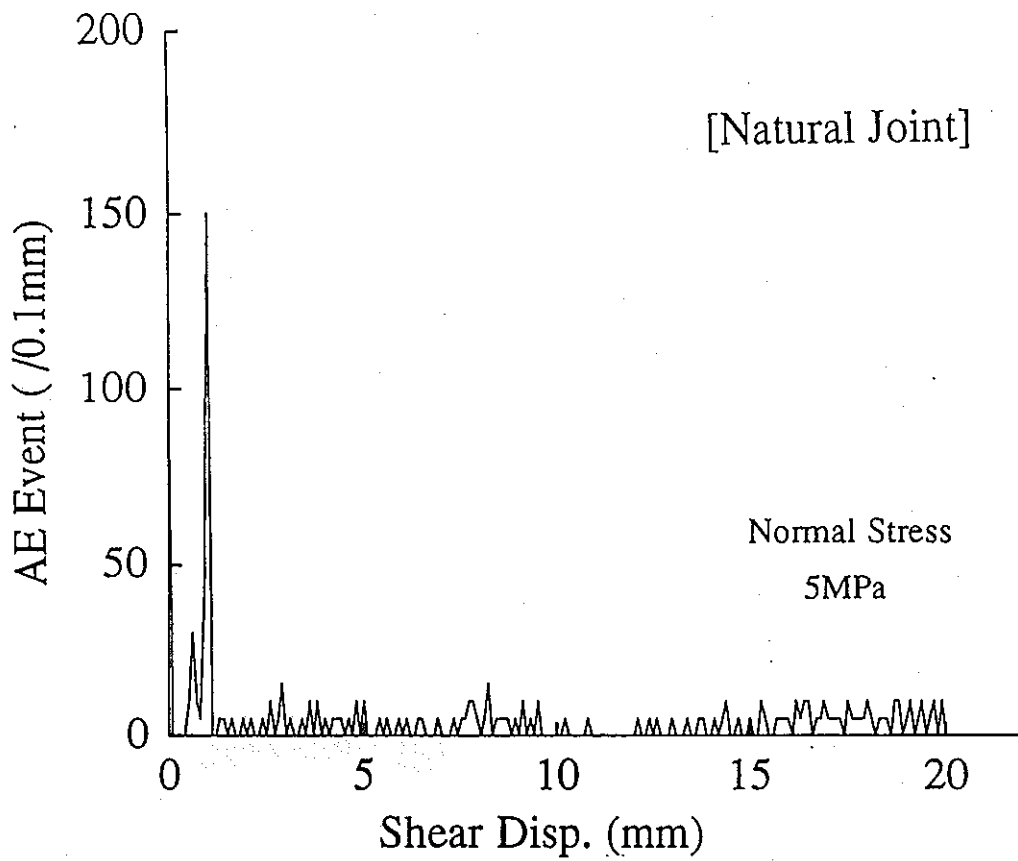


图4-63 Relationship between AE event count and shear displacement, for constant normal stress of 5MPa.

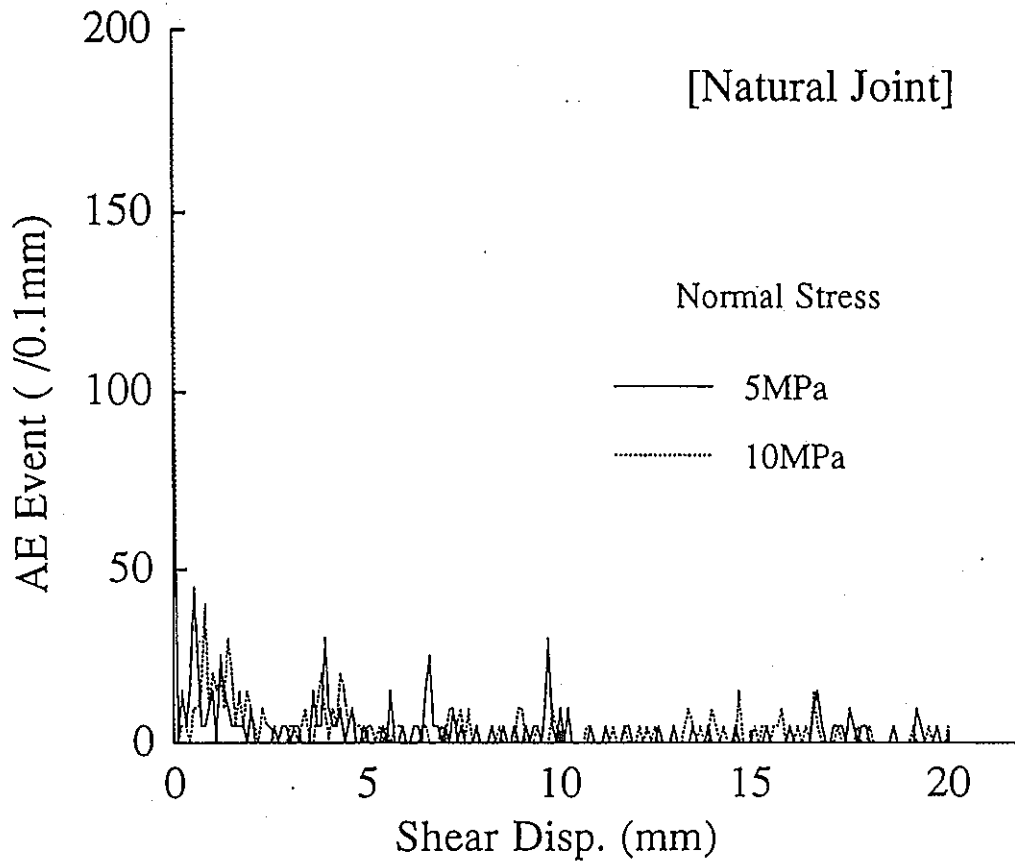


图4-64 Relationship between AE event count and shear displacement, for constant normal stress of 5,10MPa.

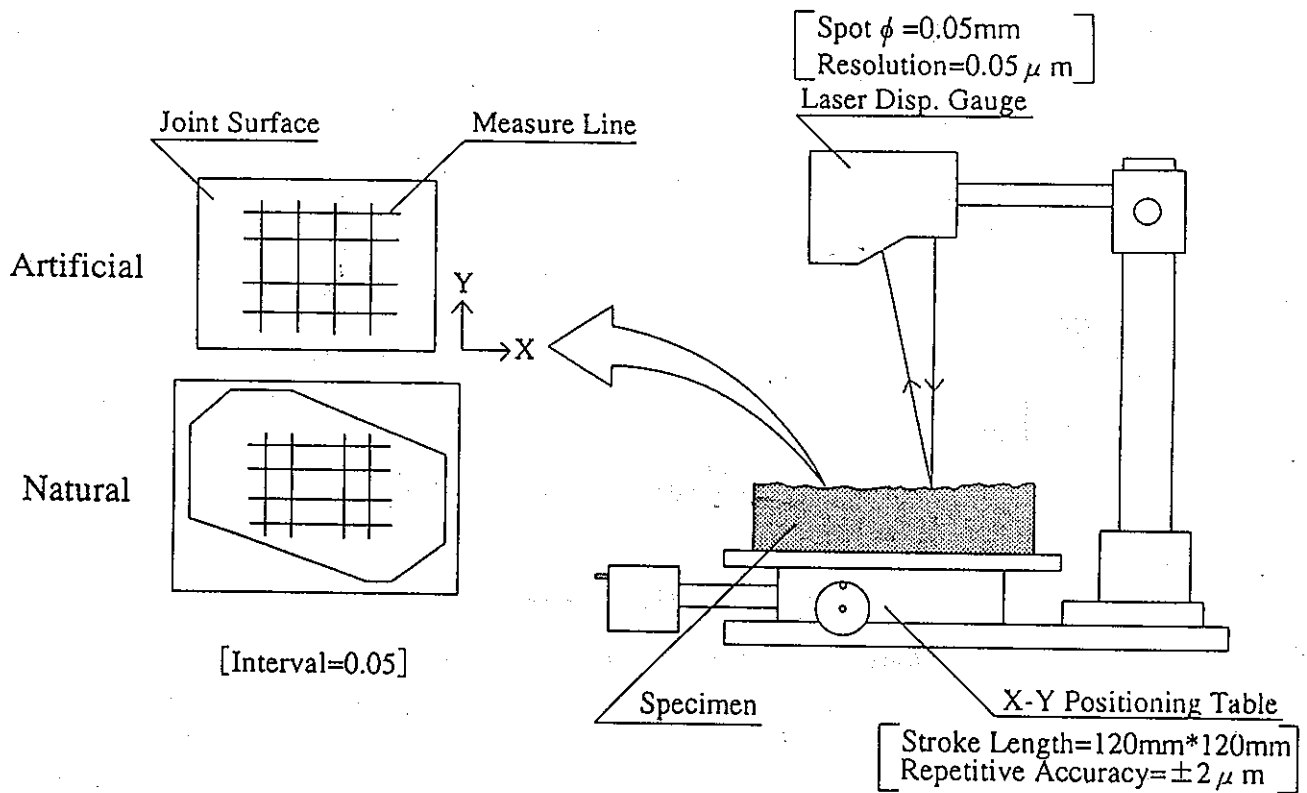
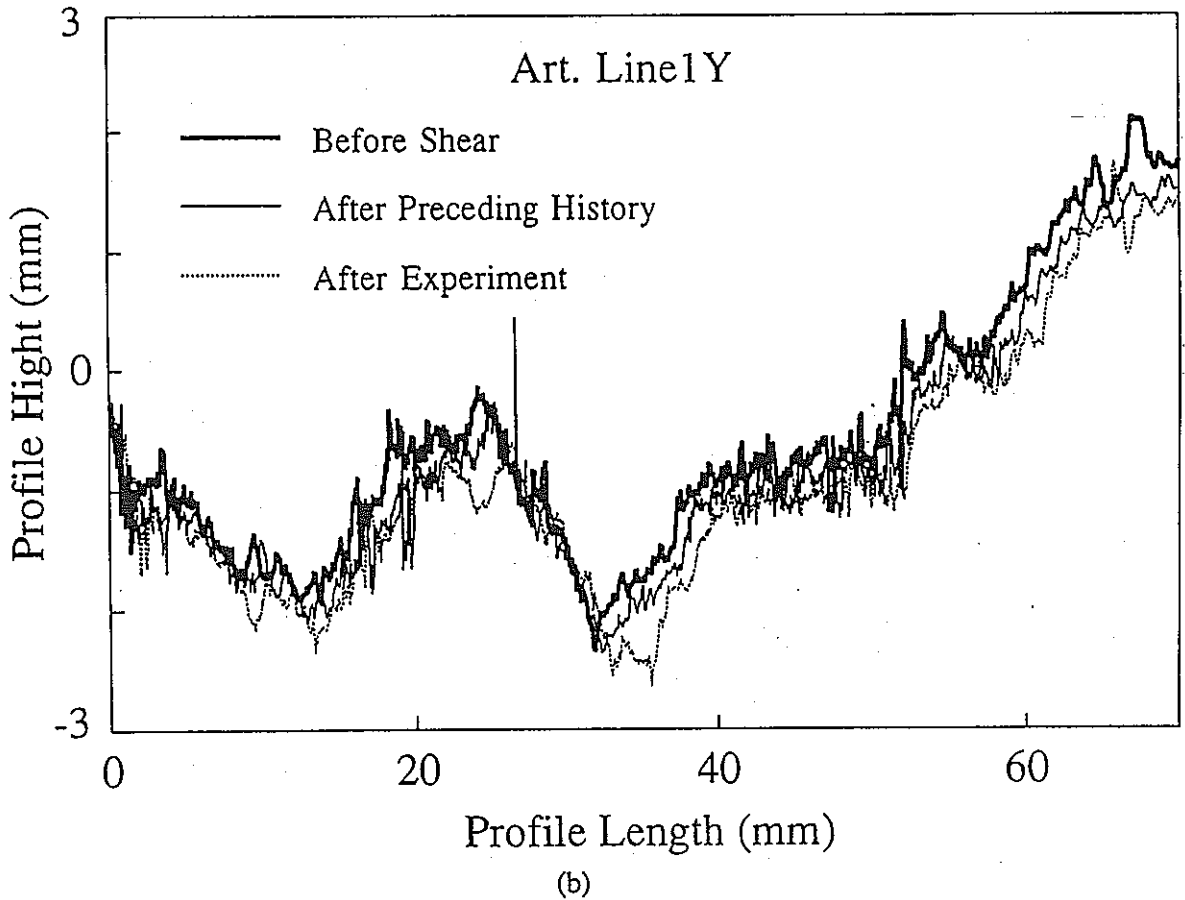
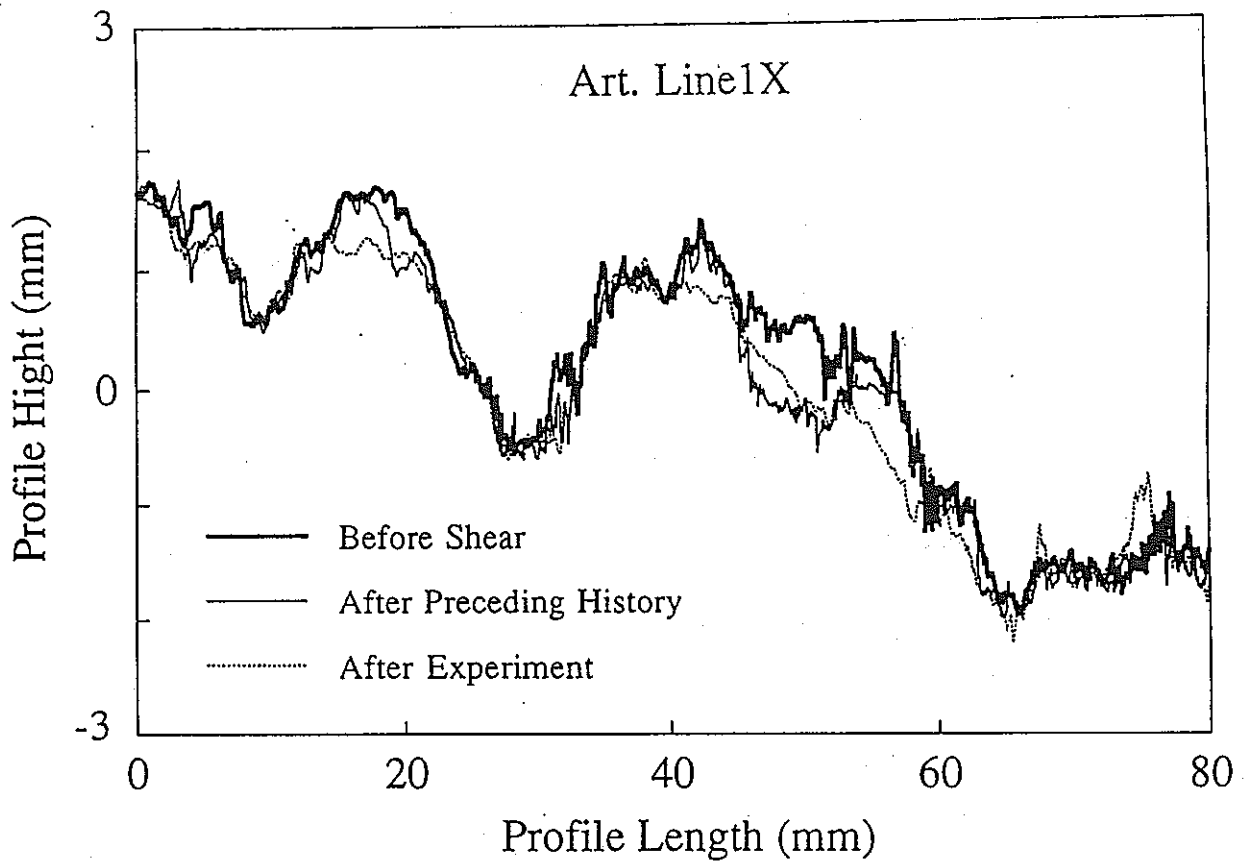
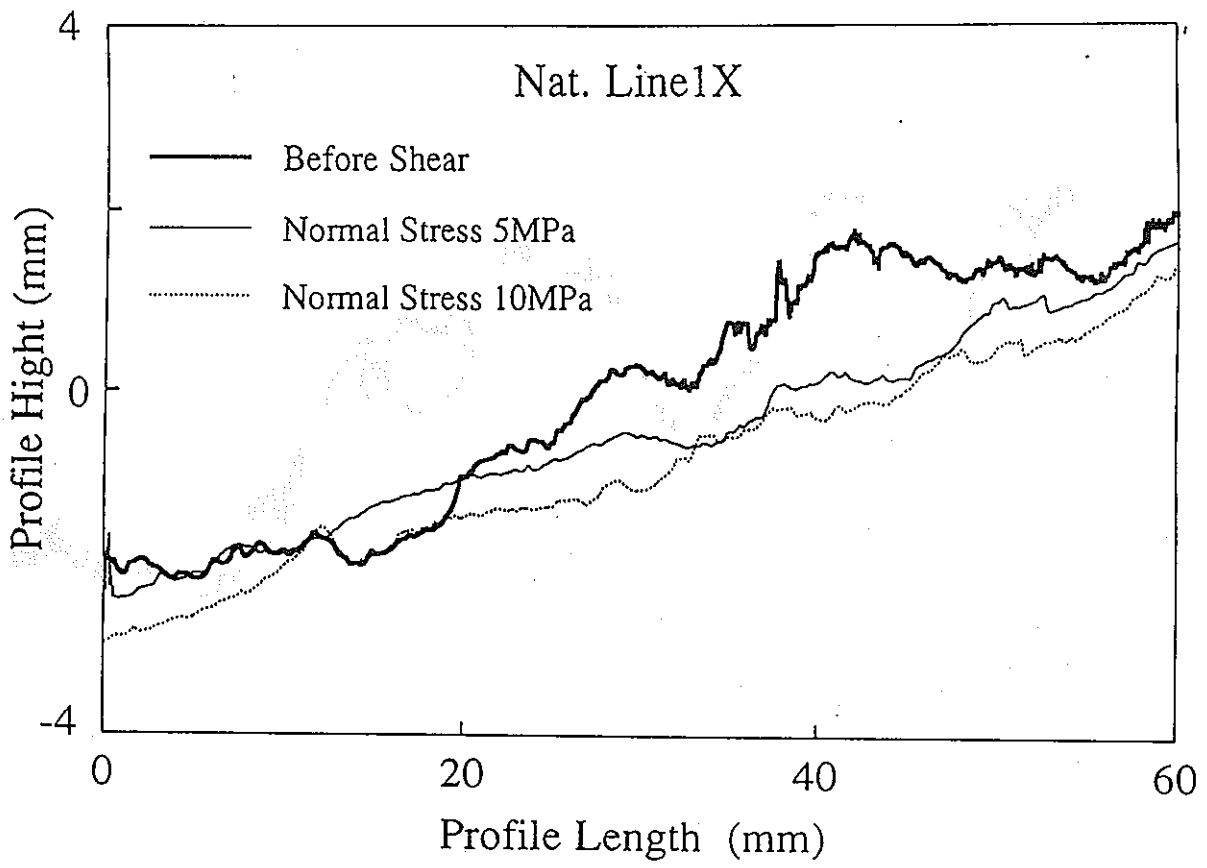


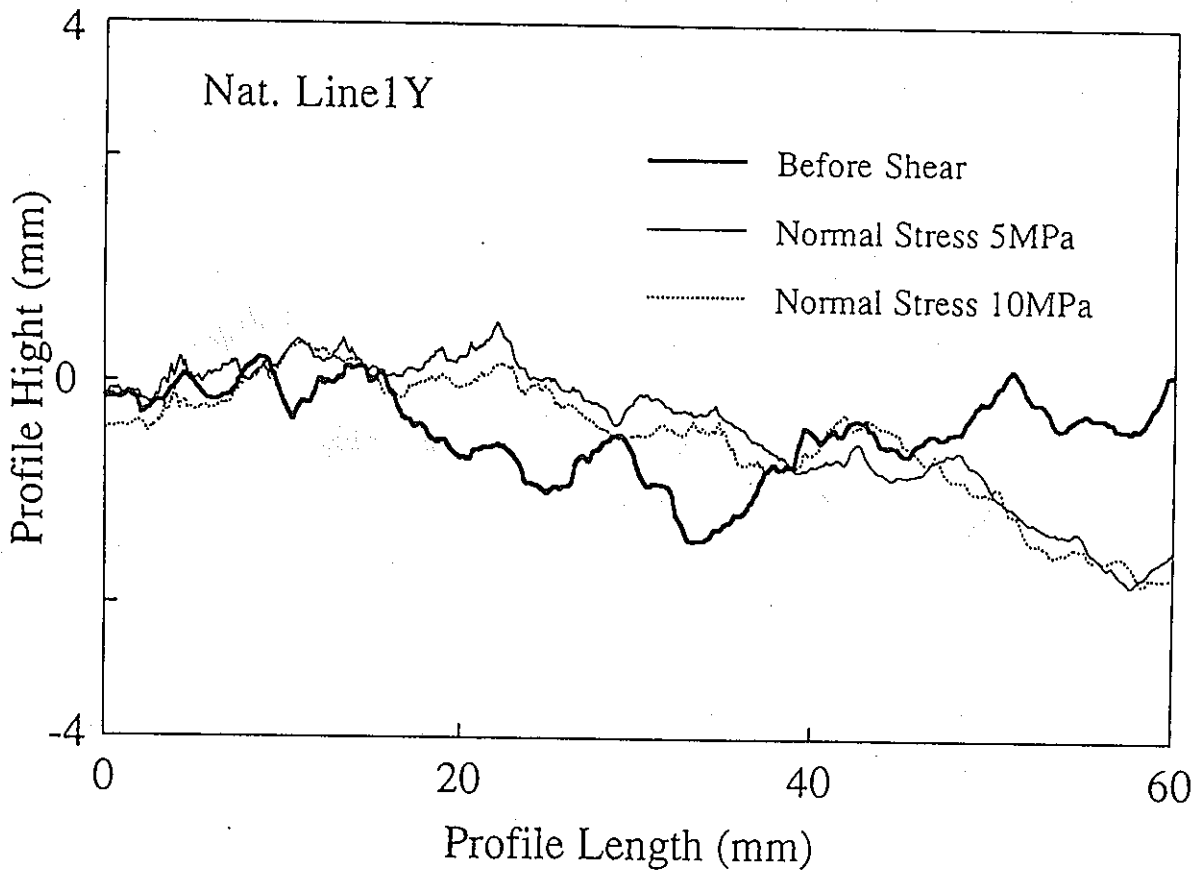
图4-65 Schematic view of the measuring for fracture surface profiles.



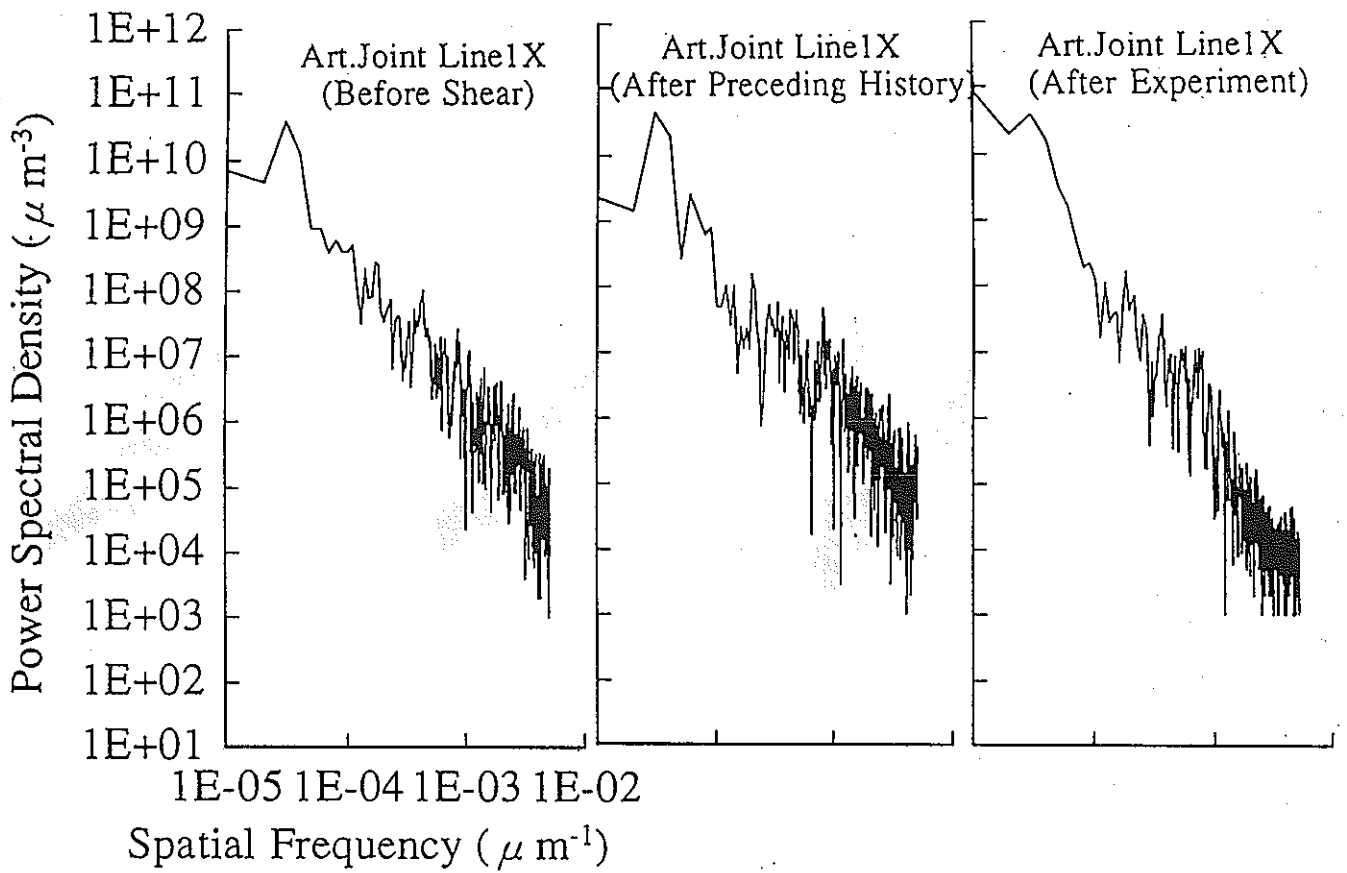
4-66 Roughness profiles obtained from the measurement of joint surfaces.



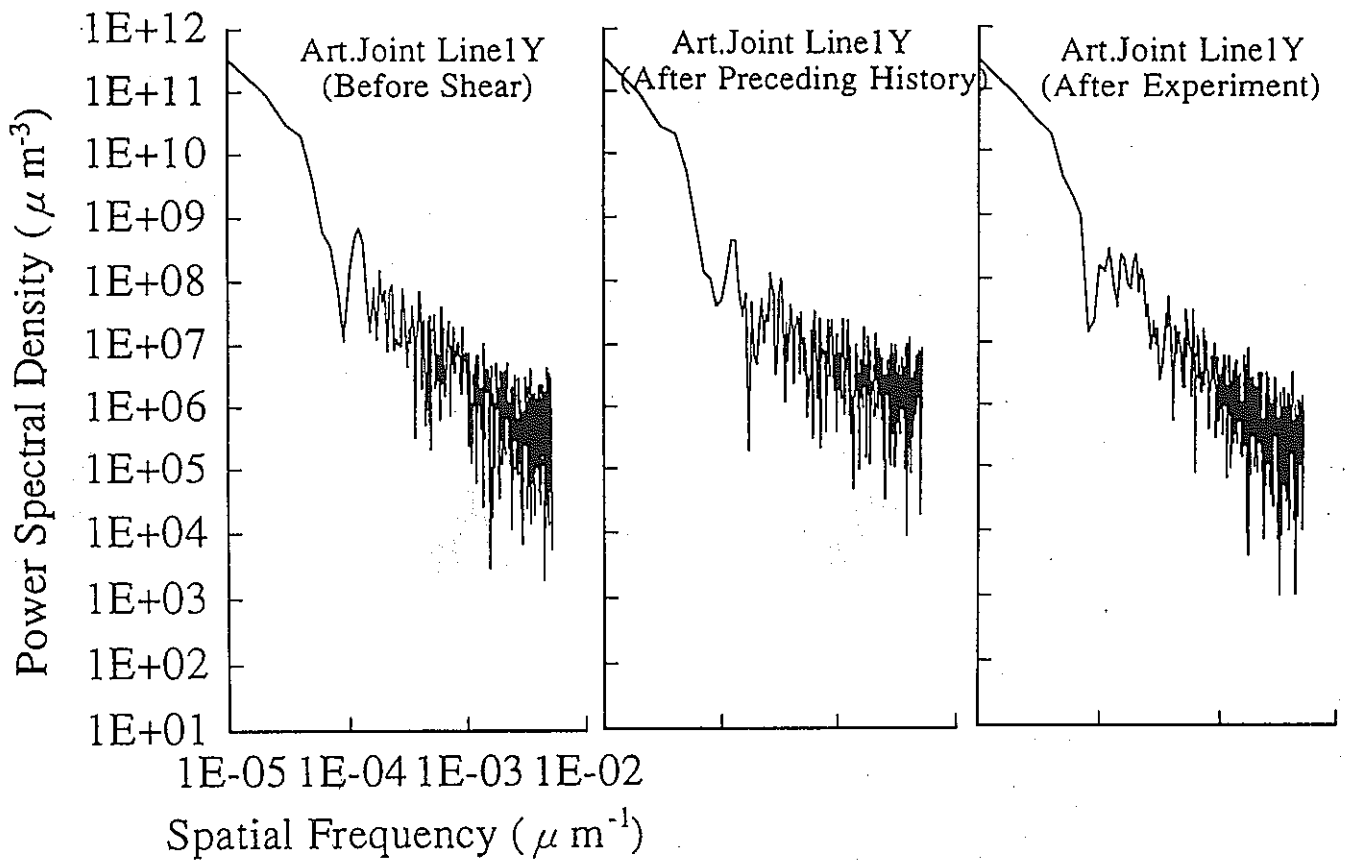
(c)



(d)

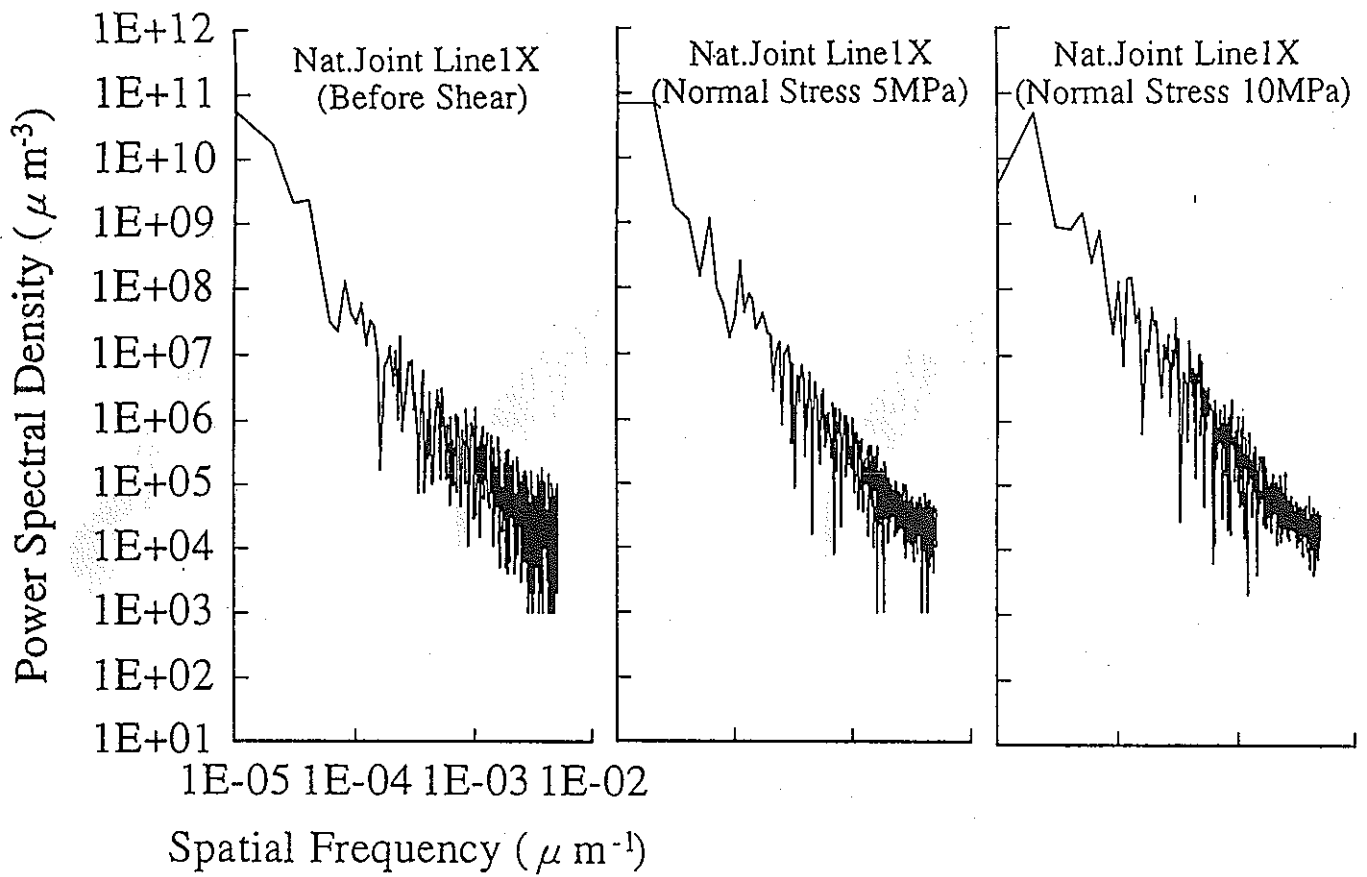


(a)

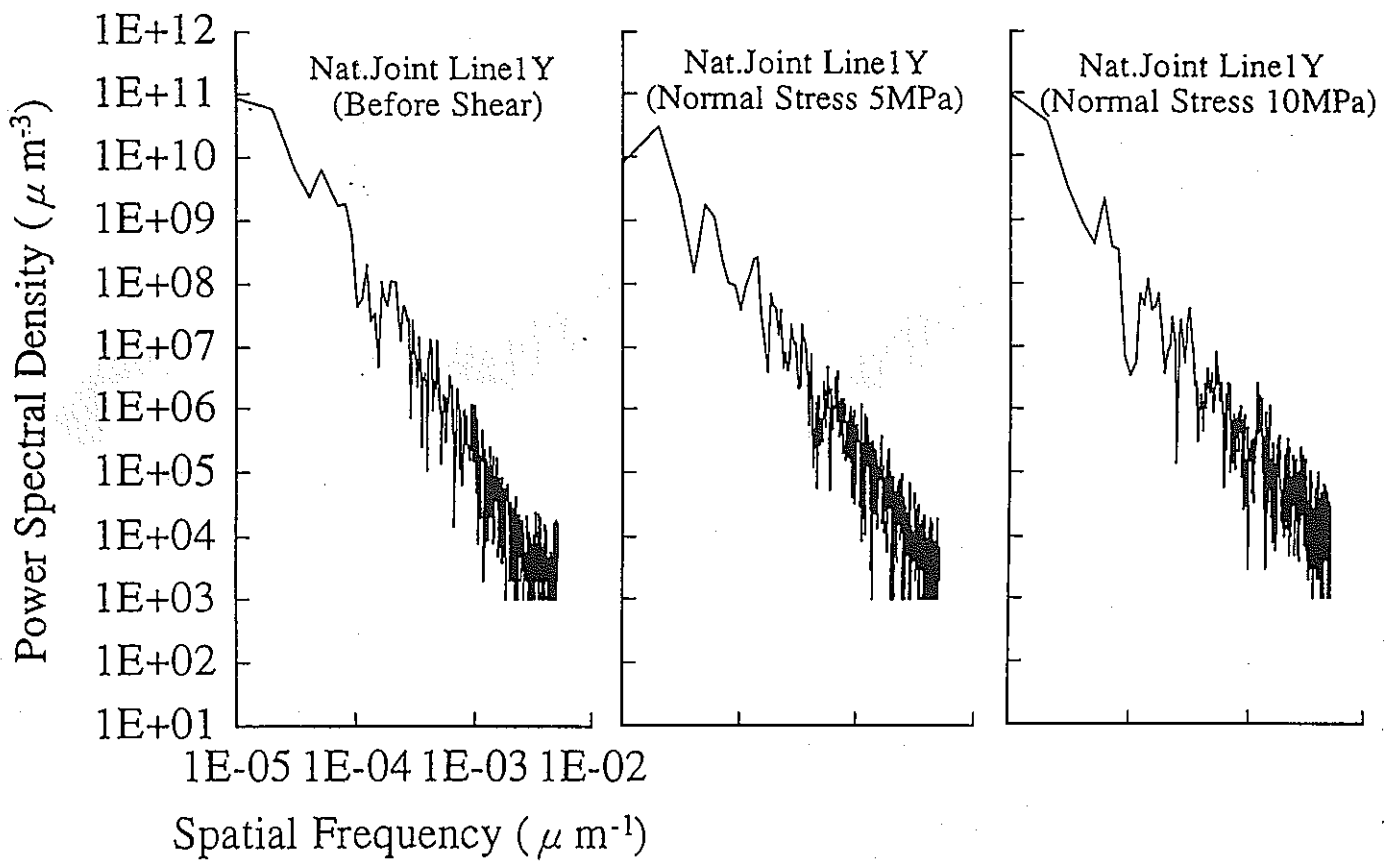


(b)

图4-67 Power spectral density vs. spatial frequency diagrams, for different preceding history.



(c)



(d)

5. ボーリングコアを用いた高信頼性三次元地圧計測法の開発

東北大学工学部 松木浩二

5.1 はじめに

コアを用いた地圧計測法は、簡便、かつ低コストで地圧計測を可能にする方法であり、代表的なものに、ASR法、DSCA法、DRA法およびAE法がある。しかし、現時点でコアを用いた方法による計測結果が十分な信頼性を有しているとは言い難い。これは、その背後にある基本原理が必ずしも明らかでないこと、適用性の判断基準がないことおよび先行地圧を評価する客観的手法が確立されていないことによる。これらの問題の解決のためには、背後にあるメカニズムを理解することと同時に、同一地点に原理の異なる方法を適用し、それとの比較を行う必要がある。

そこで、本報は、昨年度コア法による地圧計測を実施した釜石鉱山250mレベル石灰岩において、16素子円錐孔底ひずみ法による地圧計測を実施するとともに、上記4つのコアを用いる方法に関しても様々な手法で地圧の評価を行い、コア法と円錐孔底ひずみ法の結果についてを比較検討を行った。

5.2 16素子円錐孔底ひずみ法による地圧測定

5.2.1 応力測定理論

円錐孔底ひずみ法では弾性理論に基づき、孔底ひずみと初期地圧の線形関係を利用して、初期地圧の6成分を決定する。ただし、図5.1のように直角座標系 (x, y, z) 、円柱座標系 (r, θ, z) 、および球座標系 (ρ, θ, ϕ) を定め、初期地圧は直角座標系 (x, y, z) の応力成分によって、 $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\}$ と定義する。

孔底ひずみ $(\varepsilon_\theta, \varepsilon_\rho)$ と初期地圧 $\{\sigma\}$ の関係は、表5.1に示す8種類のひずみ感度係

数を用いてつぎのように表せる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\theta} \\ \varepsilon_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{11}+A_{12}\cos 2\theta, & A_{11}-A_{12}\cos 2\theta, & C_1, \\ A_{21}+A_{22}\cos 2\theta, & A_{21}-A_{22}\cos 2\theta, & C_2, \\ D_1\sin\theta, & D_1\cos\theta, & 2A_{12}\sin 2\theta \\ D_2\sin\theta, & D_2\cos\theta, & 2A_{22}\sin 2\theta \end{Bmatrix} \cdot \frac{\{\sigma\}}{E} \quad (5.1)$$

ここに、 E はヤング率であり、 θ は x 軸からひずみ測点までの回転角である。1つの孔底面における16個のひずみ測定値を $\{\beta\} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{16}\}$ とすると、 $\{\beta\}$ と $\{\sigma\}$ の関係はつぎのようにマトリックス表示できる。

$$[A] \cdot \{\sigma\} = E \cdot \{\beta\} \quad (5.2)$$

ここに、 $[A]$ は 16×6 の係数マトリックスであり、成分は式(5.1)を使って計算される。初期地圧の最確値 $\{\bar{\sigma}\}$ は最小自乗法によって計算される。すなわち、式(5.2)から得られる正規観測方程式：

$$[B] \cdot \{\bar{\sigma}\} = E \cdot \{\bar{\beta}\} \quad (5.3)$$

を解いて与えられる。したがって、 $[B]$ の逆マトリックスを $[C]$ とすると、

$$\{\bar{\sigma}\} = E \cdot [C] \cdot \{\bar{\beta}\} \quad (5.4)$$

である。

5.2.2 測定方法

原位置測定システムと測定手順を図5.2に示す。測定手順はつぎのようである。すなわち、1：口径76mmのパイロットボーリングを行う。2：特殊ダイヤモンドビットにより、孔底を所定の円錐状に加工・研磨する。そして、洗浄して乾燥させる。3：ボアホールボトムスコープにより孔底を観察し、亀裂が存在しないことを確認する。4：押付け力をスプリングで制御する貼付装置を用いて、16素子ストレインセルを市販の接着剤で孔底に所定の方向に貼付する。5：ひずみの零点調整、安定性チェック、コンパクトオーバーコアリングとなる。コンパクトオーバーコアリングの進行はボーリングマシンにセットされた変位計によりモニターされ、穿孔中のひずみ変化は有線システムにより連続計測・記録される。以上のひずみ変化に基づき、孔底ひずみ（オーバーコアリングを始める前に存在していたひずみ）が求められる。すなわち、応力解放法の原理に立脚して、オーバーコアリング完了時の測定ひずみと等値異符号のひずみとして孔底ひずみが求められる。

円錐孔底の加工・研磨用の特殊ダイヤモンドビットは荒削り用のボルツクラウンビットと仕上げ用のインプリグネイテッドビットからなる。ボアホールボトムスコープは8個の小型ライト、先端カメラ、コントロールユニット、ディスプレイ、およびケーブルから構成されている。また、貼付装置には傾斜計が内蔵されており、ストレインセルを所定の方向に貼付することが可能である。

5.2.3 測定位置

16素子円錐孔底ひずみ法による地圧測定を実施した釜石鉱山250mレベルの測定位置を図5.3に示す。岩盤は石灰岩であり、幅約4m、高さ約2.5mの坑道を幅約7m、高さ約7mのドーム状に掘ったボーリング座から実施した。被りは約700mである。測定ボーリングの孔径は76mm、掘進方向N257.4E、2.9°上向きで、ボーリング長20mである。測定は坑壁から1m～20mの区間について約1m間隔に19回実施した。その内良好な結果が得られたのは18回であり、歩留まりは95%である。図中の測点は良好な結果が得られた測定位置を示している。図5.4に回収コアで観察された主な亀裂の位置と方向を示す。亀裂は全部で56個存在し、特に13.8m付近には幅約10cmの破碎帯が観察された。この破碎帯は、コア法のために約1m離れて作孔されているボーリング孔において、坑壁から13m付近で観察された破碎帯に連続していると思われる。亀裂は坑壁から8m付近まではほとんど観察されず、10m～17mの区間に多くみられた。図5.5に主な亀裂の極の上半球投影を示す。亀裂の卓越方向は、概ね南-北および北西方向である。図5.6に回収コアのRQDを示す。

5.2.4 回収コアの一軸圧縮試験

地圧の評価に必要なヤング率とポアソン比は回収コアの一軸圧縮繰り返し試験から求めた。すなわち、回収したコアに対して、各測定点近傍に鉛直上向きとそれに直行する方向との2方向について小口径ボーリングを行い、供試体を作成して試験を実施した。供試体の数は全部で23個であり、寸法は直径約25mm、高さ約53mmである。各供試体には、2枚のクロスゲージを貼付し、除荷時の応力・ひずみ関係からヤング率とポアソン比を求めた。各供試体の寸法等をまとめて表5.2に示す。各測定点における平均ヤング率および平均ポアソン比の結果を図5.7に示す。ヤング率およびポアソン比の全平均値はヤング率61GPa、ポアソン比0.26であった。地圧の評価には各測定点における値を用いた。なお、一軸圧縮試験のための供試体を得られなかった測定点に関しては、その前後および近傍の平均ヤング率、平均ポアソン比を用いて地圧を計算した。

5.2.5 測定結果

ひずみ測定結果を例示すると図5.8のようである。横軸のLはオーバーコアリングの進行（距離）を示している。オーバーコアリングがひずみ測点円の断面(L=0)を通過した後、10cm程度進むとひずみはそれぞれ一定値に収束している。収束値から求めた孔底ひずみ（圧縮：正）は図5.9のプロットのようである。横軸の θ はゲージの位置を示す回転角であり、図中の曲線は測定された応力状態から弾性理論解析された孔底ひずみ分布である。孔底ひずみの測定値と解析値の一致は良好である。なお、他の測定結果についても同様であった。

地圧測定結果を表5.3、図5.10、図5.11におよび図5.12に示す。図5.10は図5.3で定義した直角座標系(X, Y, Z) = (E, N, V)における各応力成分の分布を示している。 σ_x は坑壁から10mあたりまではあまり変動していないが、破碎帯を含む10m~16mの区間で減少し、その後急激に増加している。 σ_y も亀裂を多く含む区間でその値が減少している。 σ_z についても同様の傾向が見られる。

σ_z の平均は25.0MPaであり、推定被り重量圧18.9MPa（単位体積重量2.7g/cm³として計算：表5.2参照）より大きい。せん断応力成分については変動はあまりみられない。図5.11は主応力の分布を示したものである。主応力の分布も破碎帯を挟んでその値が変動しており、亀裂を多く含む区間で値が小さくなっている。図5.12は主軸を上半球投影したものである。各地点による結果がほぼ同じ傾向を示していることから、信頼性の高い結果だと考えられる。、最大主応力 σ_1 はその傾斜にはバラツキみられるものの、方向は概ね南北に集中している。この結果は、釜石地域の巨視的な応力場を反映していると考えられる。

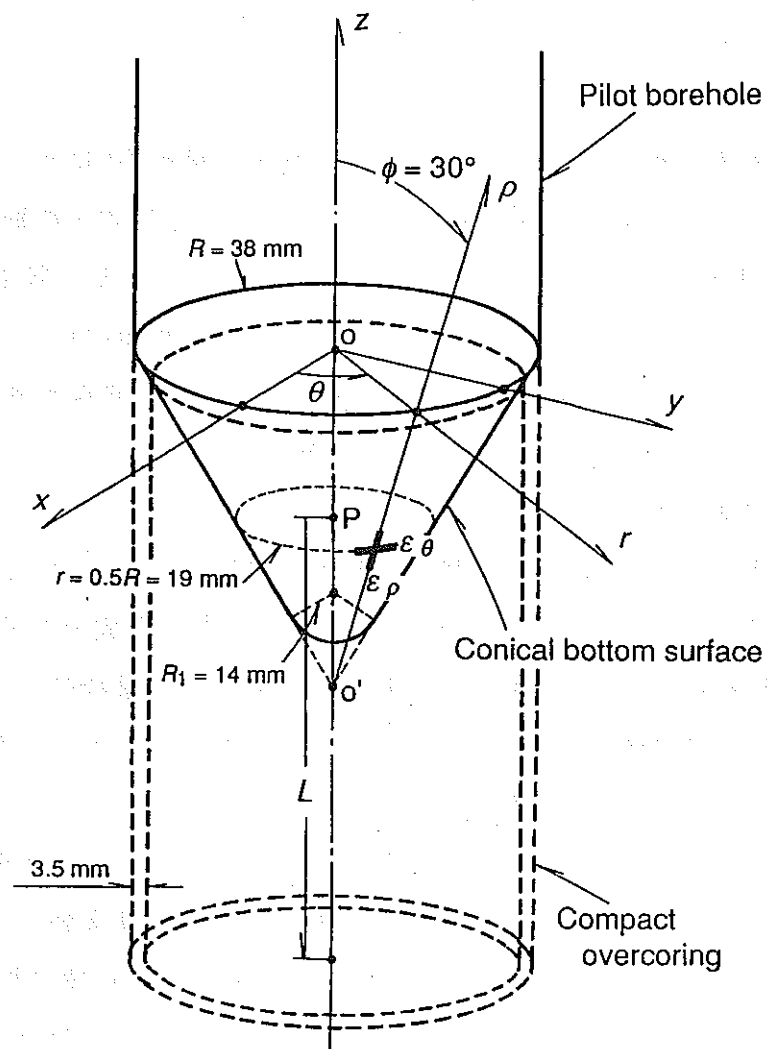


図 5.1 円錐孔底と座標系

表 5.1 ひずみ感度係数

Poisson's ratio : ν	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}	C_1	C_2	D_1	D_2
0.10	1.002	-1.762	0.109	0.343	-0.155	0.655	0.082	1.542
0.20	1.000	-1.752	0.022	0.365	-0.263	0.641	0.095	1.627
0.25	0.999	-1.733	-0.021	0.373	-0.317	0.636	0.101	1.673
0.30	0.997	-1.704	-0.065	0.380	-0.371	0.632	0.108	1.716
0.40	0.989	-1.611	-0.154	0.386	-0.481	0.630	0.123	1.787

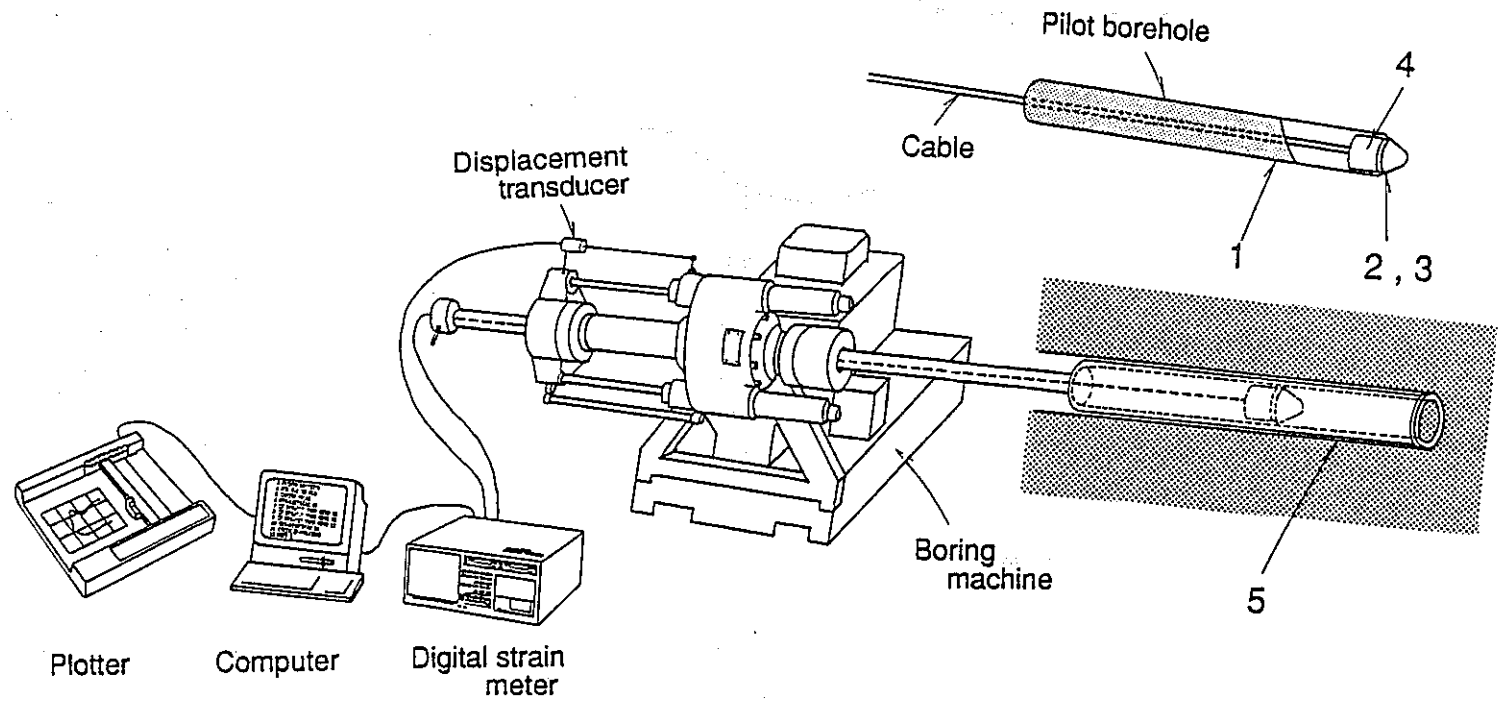


図5.2 原位置測定システム

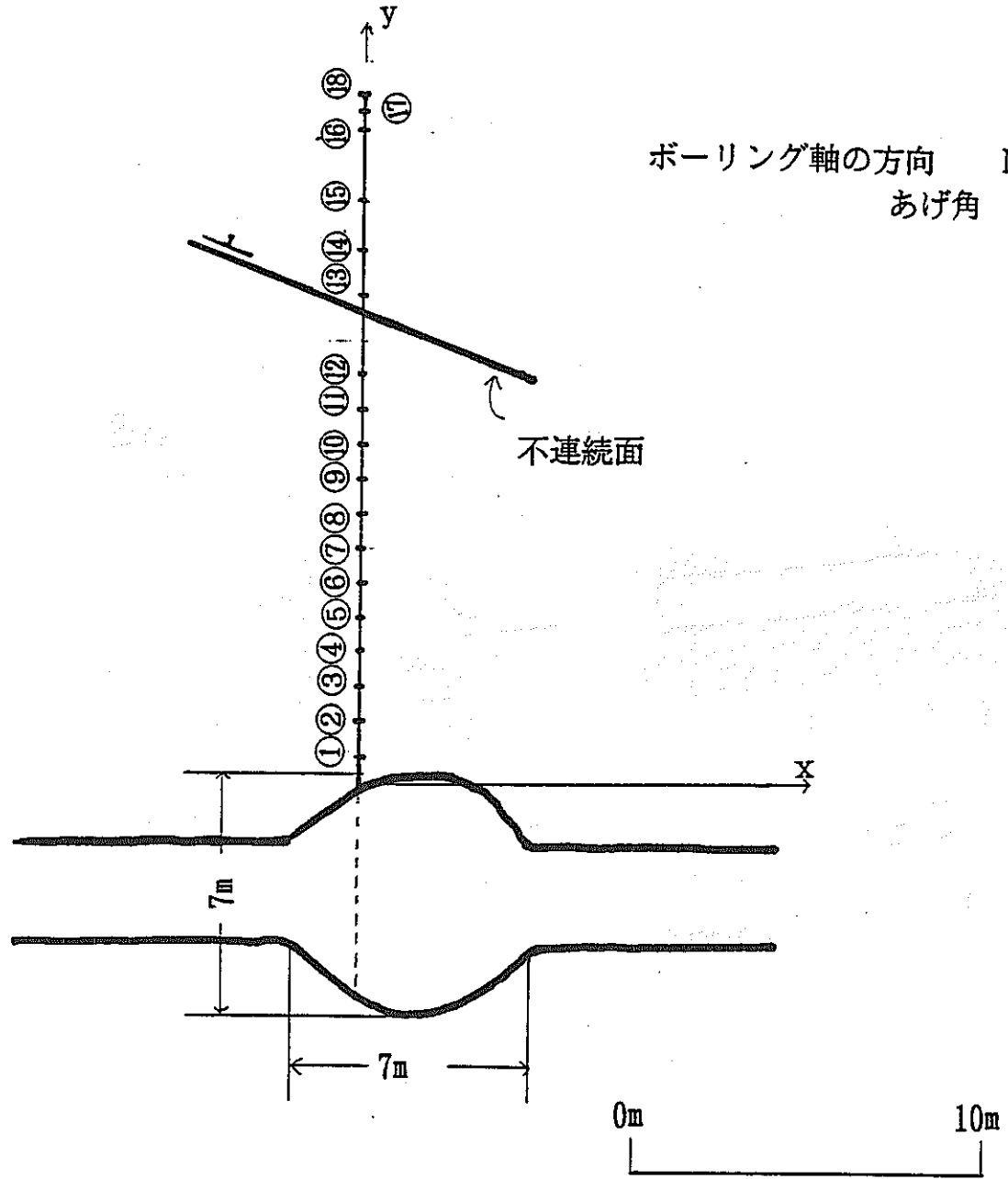
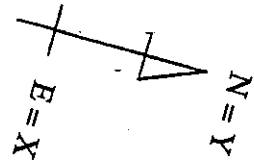
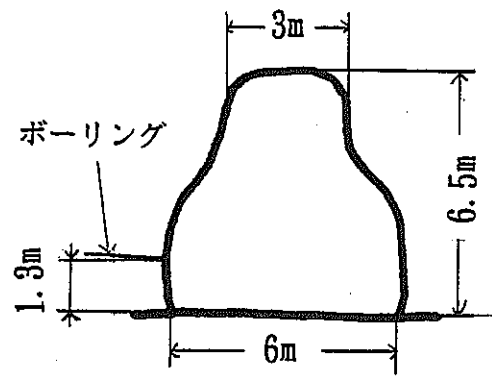


図5.3 測定位置

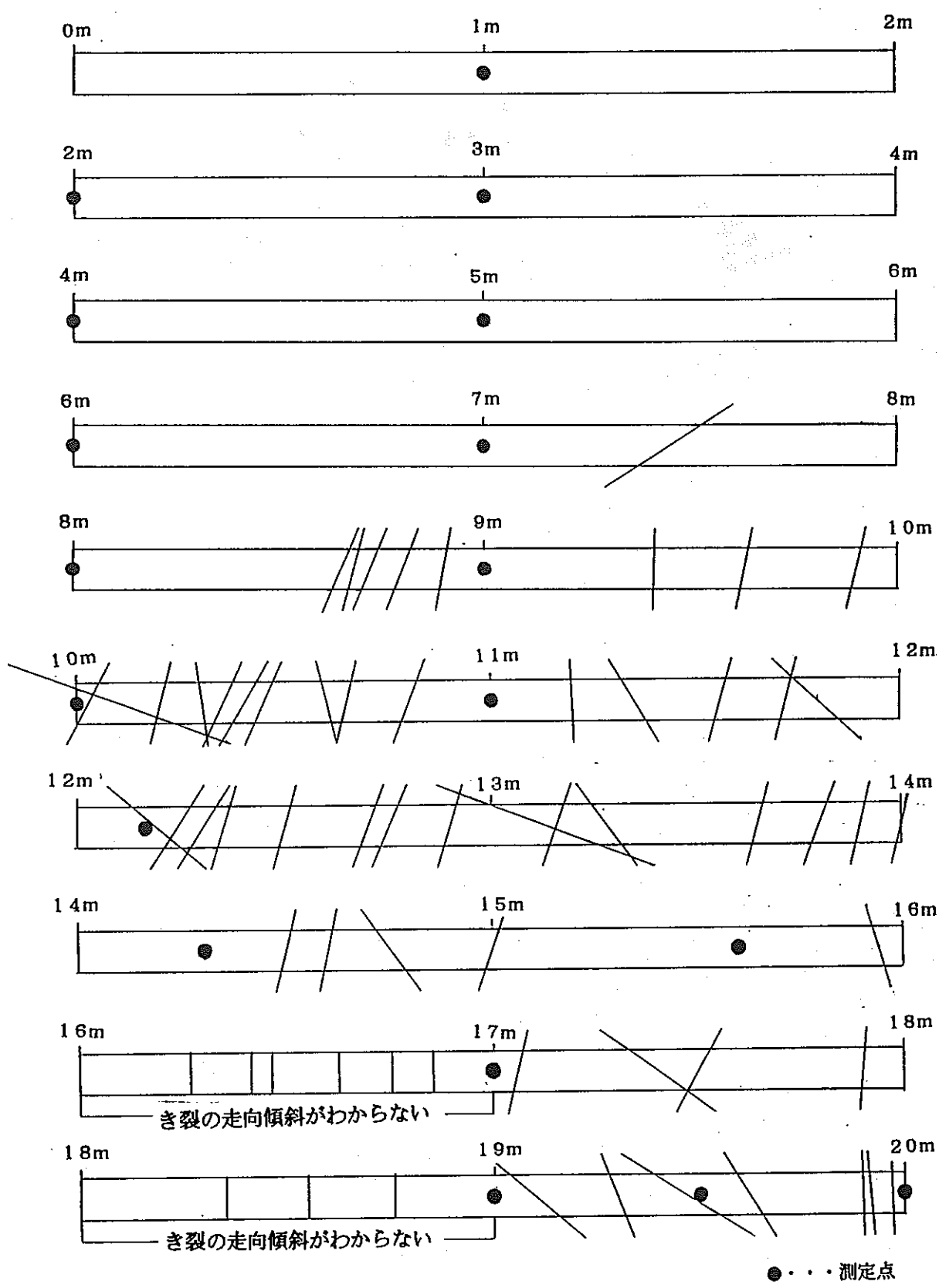
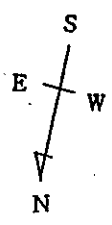


図5.4 回収コアで観察された主な亀裂とその方向

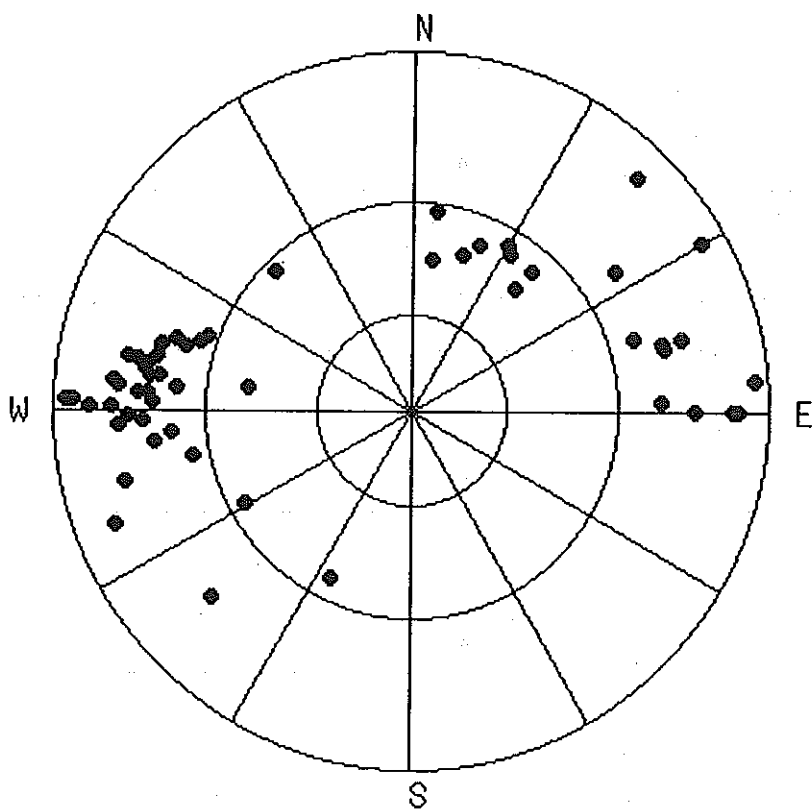


図5.5 主な亀裂の極の上半球投影

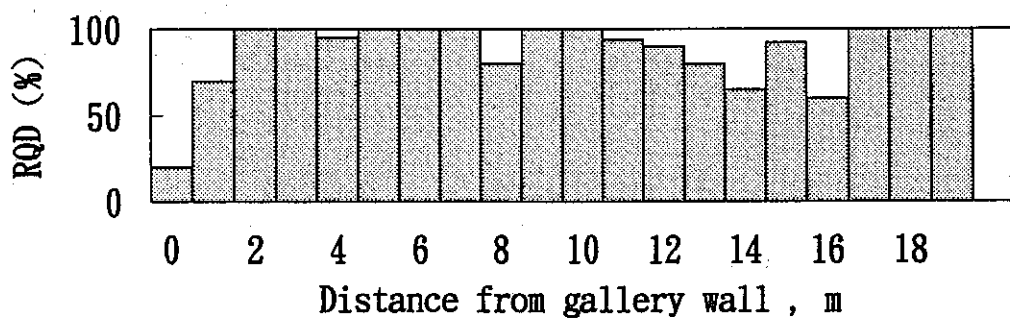


図5.6 回収コアのRQD

表5.2 一軸試験用供試体

供試体番号	採取深度(m)	高さ(cm)	直径(cm)	単位体積重量(g/cm ³)	P波速度(km/s)	ヤング率(GPa)	ポアソン比
XY-1	1.0	5.10	2.46	2.67	2.79	40.0	0.27
XY-2	2.0	4.93	2.46	2.67	3.09	56.1	0.15
XY-3	3.0	5.26	2.46	2.70	3.37	62.1	0.22
Z-3	3.0	5.32	2.46	2.70	3.55	54.3	0.29
XY-4	4.0	5.44	2.46	2.69	3.22	50.8	0.30
Z-4	4.0	5.44	2.47	2.68	2.82	45.7	0.26
XY-6	6.0	5.20	2.48	2.66	3.17	57.5	0.28
Z-6	6.0	5.22	2.48	2.64	3.13	50.4	0.26
XY-7	7.0	5.01	2.48	2.66	3.19	62.7	0.27
Z-7	7.0	5.25	2.47	2.68	2.93	49.0	0.24
XY-8	8.0	5.14	2.47	2.68	3.57	71.4	0.34
Z-8	8.0	4.73	2.47	2.68	3.01	58.8	0.24
XY-9	9.0	5.30	2.47	2.68	3.38	67.8	0.22
Z-9	9.0	5.30	2.47	2.68	3.31	56.9	0.24
XY-11	11.0	5.50	2.47	2.68	3.46	64.9	0.25
Z-11	11.0	5.38	2.47	2.67	3.36	66.1	0.26
XY-13	14.3	5.23	2.47	2.74	3.58	82.9	0.29
Z-13	14.3	5.50	2.46	2.73	3.57	72.2	0.29
XY-14	15.6	5.36	2.47	2.69	3.48	65.8	0.21
Z-14	15.6	5.35	2.47	2.68	3.17	61.5	0.26
Z-16	19.0	5.39	2.47	2.68	3.69	70.9	0.25
XY-17	19.5	5.37	2.47	2.69	3.42	71.7	0.30
Z-17	19.5	5.32	2.48	2.68	3.39	63.4	0.26

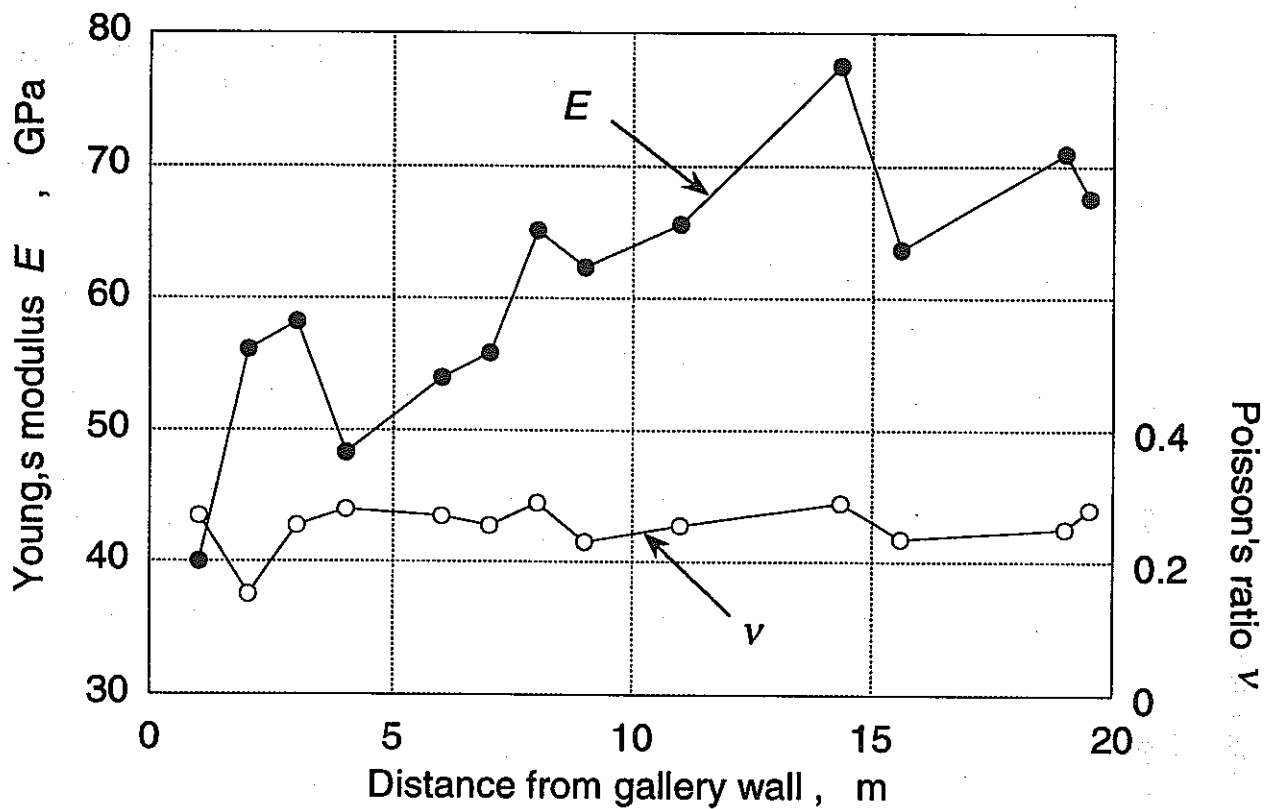


図5.7 ヤング率およびポアソン比の分布

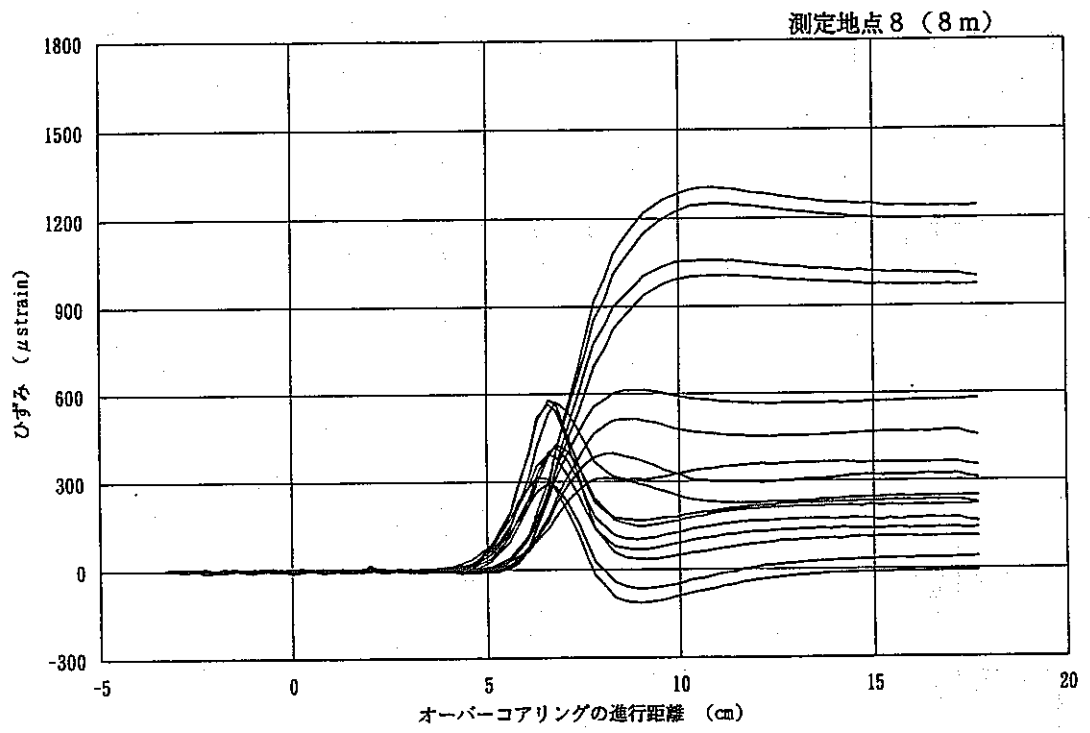


図5.8 応力解放過程の測定ひずみの例

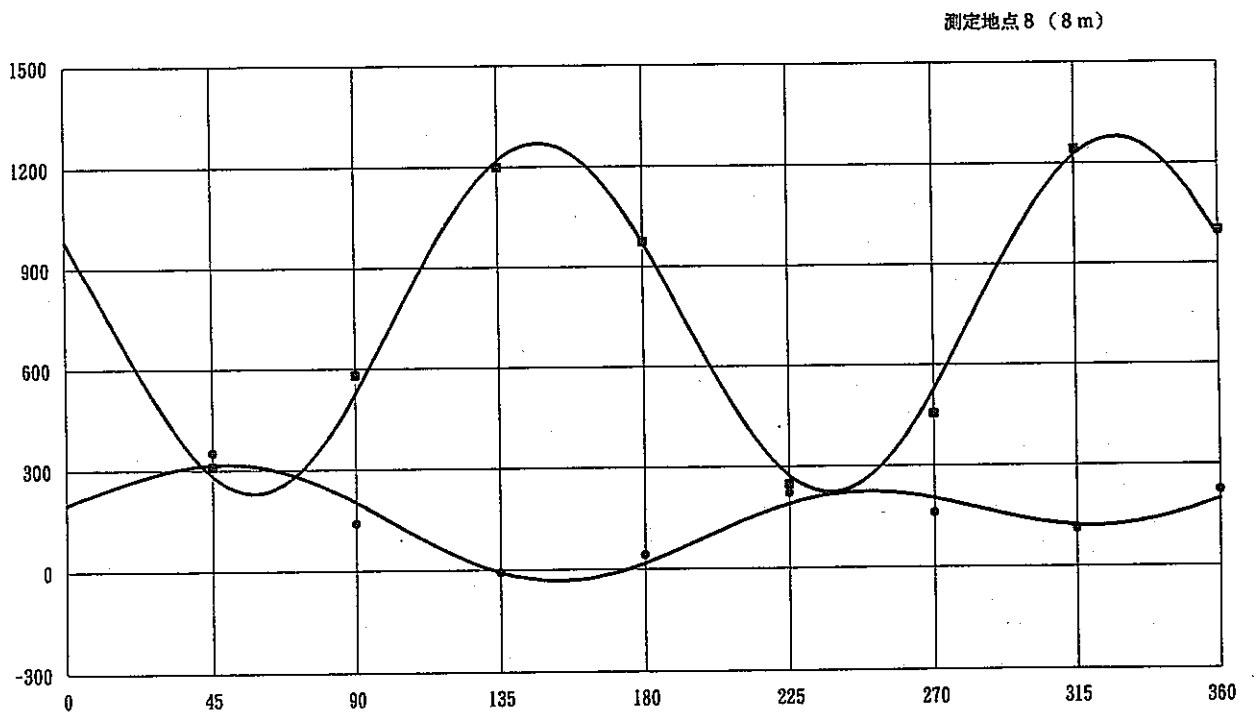


図5.9 理論孔底ひずみと測定ひずみの比較の例

表5.3 地圧の評価結果

	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5	L-6	L-7	L-8	L-9	L-10	L-11	L-12	L-13	L-14	L-15	L-16	L-17	L-18
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12.16m	14.3m	15.6m	17m	19m	19.5m	20m
回転角	261°	263°	261°	323°	265°	268°	270°	270°	270°	270°	270°	270°	270°	270°	270°	275°	272°	266°
ヤング率 (GPa)	40.00	56.10	58.20	48.30	51.15	54.00	55.90	65.10	62.40	63.95	65.50	65.50	77.60	63.70	63.70	70.90	67.60	69.25
ポアソン比	0.27	0.15	0.26	0.28	0.28	0.27	0.25	0.29	0.23	0.24	0.25	0.25	0.29	0.23	0.23	0.25	0.28	0.27
σ_x	20.21	21.51	33.48	17.22	16.86	22.52	26.36	19.42	22.57	8.03	14.56	7.04	14.56	14.41	3.12	18.75	18.65	7.75
σ_y	20.17	30.10	28.83	16.89	24.87	24.26	24.75	25.46	35.31	30.31	25.09	14.91	22.81	14.67	32.52	42.71	24.05	29.31
σ_z	23.12	24.80	36.50	15.13	20.71	22.68	30.52	32.48	34.12	19.28	31.85	22.45	20.36	38.28	24.66	18.74	21.57	13.75
τ_{yz}	3.07	5.38	-0.47	2.31	1.98	3.31	4.59	8.72	8.52	6.36	8.03	3.74	11.17	6.84	10.89	8.04	7.51	5.52
τ_{zx}	-3.48	-4.56	7.16	1.17	-3.50	-2.60	-3.82	-1.39	0.95	2.45	-3.85	-1.35	2.10	13.69	-0.39	-7.61	-1.66	-1.70
τ_{xy}	-0.97	5.60	8.07	5.49	3.59	6.10	4.81	2.89	11.18	2.06	0.23	-1.97	7.77	6.41	0.33	3.30	0.65	7.85
σ_1 (MPa)	26.89	34.07	44.07	23.28	26.33	29.67	33.34	38.38	48.61	33.54	37.61	24.22	35.37	46.97	40.16	45.20	30.45	33.04
AZIMUTH/DIP	132/51	196/23	243/39	225/17	198/8	218/8	142/65	183/56	206/32	187/25	166/57	163/66	204/36	237/60	180/35	182/16	176/41	196/14
σ_2 (MPa)	19.23	27.84	33.57	14.61	22.77	24.80	30.43	22.66	29.84	16.59	20.58	13.61	14.72	13.73	17.03	25.83	19.31	13.80
AZIMUTH/DIP	40/2	78/47	28/45	88/68	94/60	114/60	50/1	50/25	51/55	341/63	22/28	348/24	75/41	20/25	4/55	78/39	73/15	74/65
σ_3 (MPa)	17.39	14.51	21.16	11.34	13.33	14.99	17.86	16.32	15.34	7.49	13.32	6.56	7.65	6.66	3.10	9.17	14.51	3.97
AZIMUTH/DIP	308/39	302/33	137/19	319/15	292/28	313/28	320/25	309/22	304/12	92/11	283/17	257/2	318/28	118/16	271/2	290/46	327/46	292/20

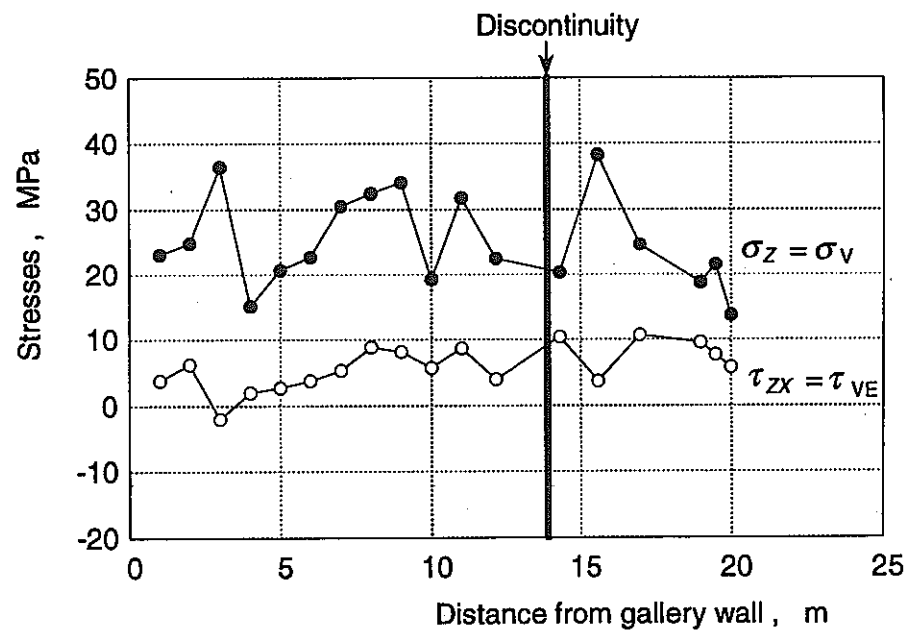
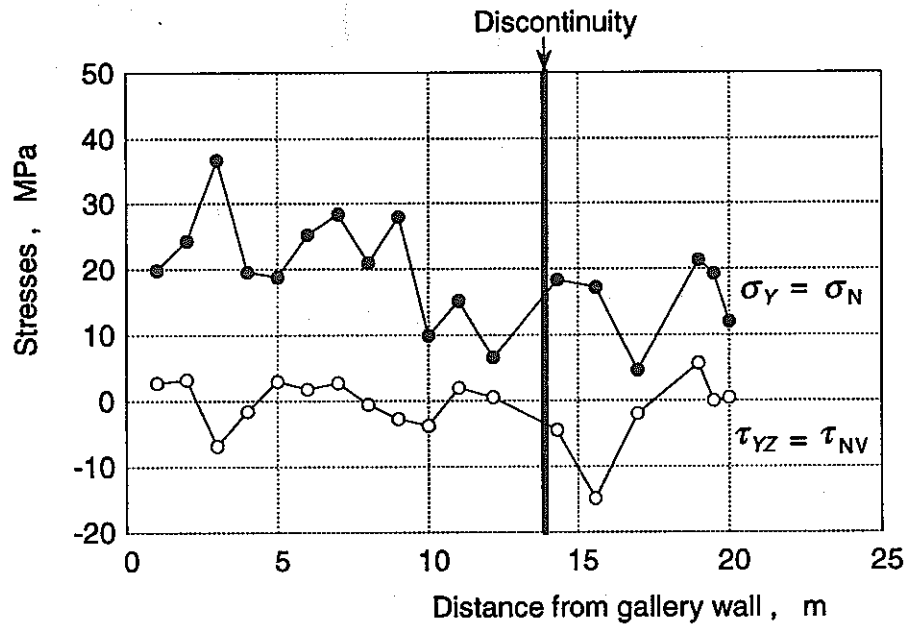
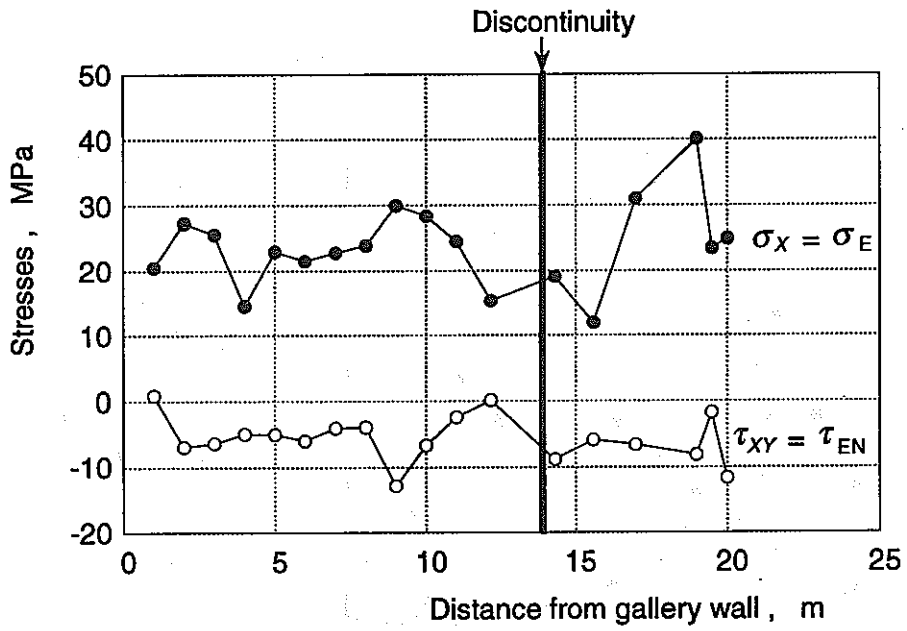


図5.10 応力成分の評価結果

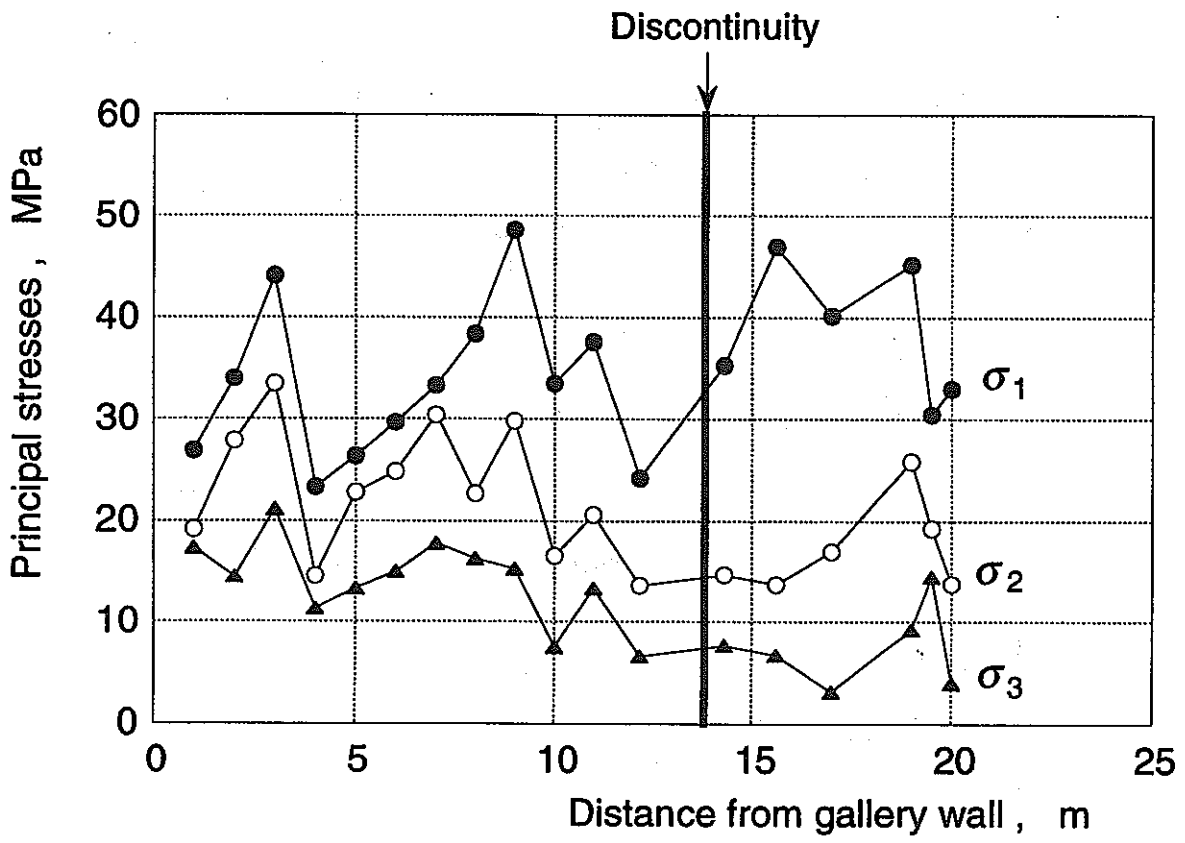


図5.11 主応力の評価結果

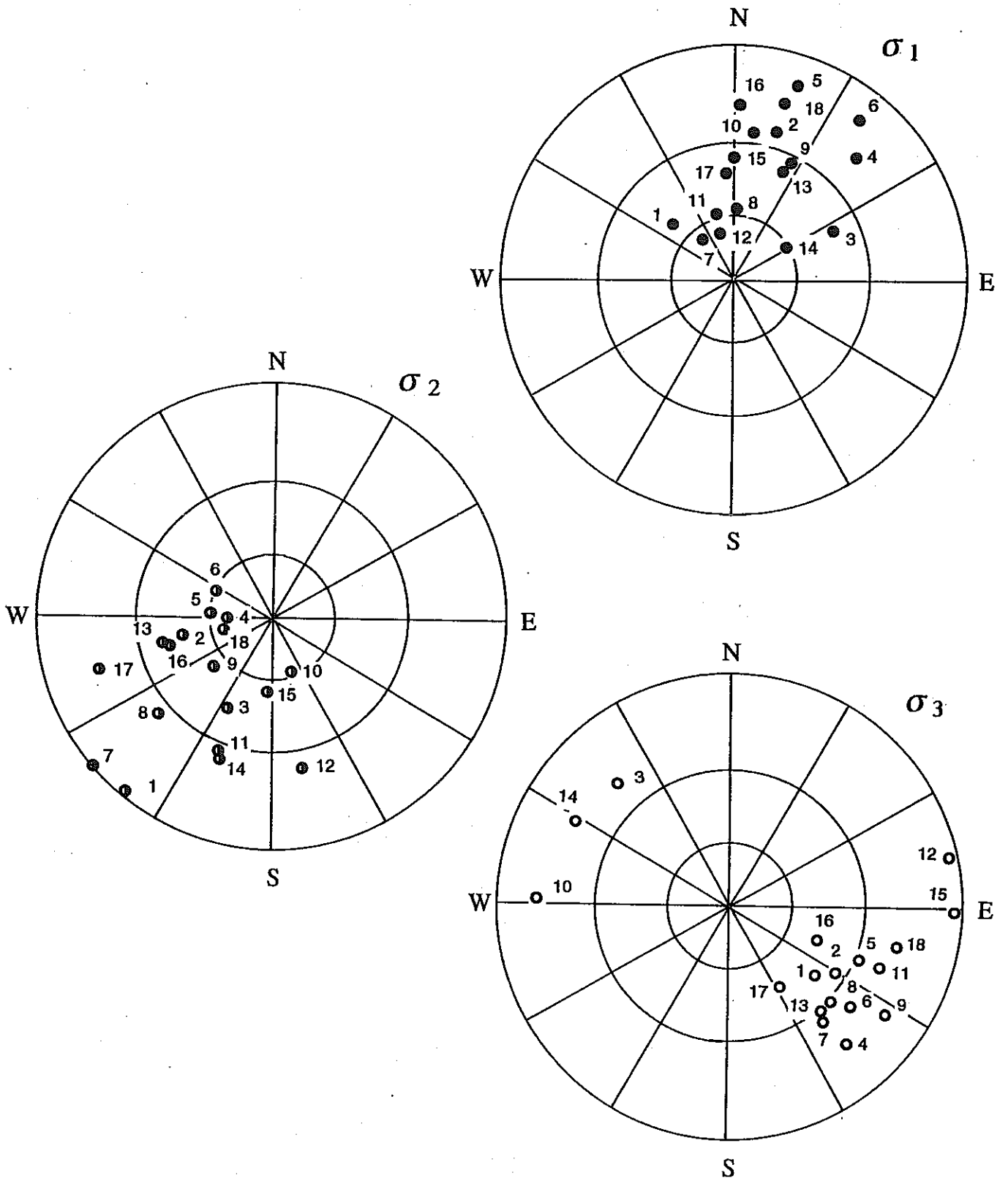


図5.12 主方向の評価結果 (上半球投影)

5.3 コアを用いた地圧計測

5.3.1 概要

図5.13に測定位置を示す。コア法に使用したコア径は90~98mm、ボーリングの掘進方向はN256.32E、0.9上向き、ボーリング長は21mである。測定は表5.4に示すように9.25~9.9m、13.6~14.9m、16.3~18.0mおよび18.7~20.5mの4箇所について行った。なお、この報告には他の研究機関によるラウンドロピンの結果も含めて示す。特徴的な地質構造として掘進長7.6m付近、11m付近、13m付近、15m付近および20.5m付近で破碎帯が観察された。

各コア法による地圧の評価に際しては、表5.5に示すような種々の方法を用いた。以下にその概要を述べる。

ASR法では、1)非弾性変位の計測から地圧を評価する方法(変位計法)を採用した。

DSCA法では、1)主値を評価するパラメータとして有効線圧縮率と固有線圧縮率の差 $\Delta\beta$ を固有線圧縮率 β で除した $\Delta\beta/\beta$ を用いる方法(従来法)、2)ある応力範囲の間で閉じるクラックによるひずみテンソル v_{ij} に着目する方法(v法)、3)DSCA法試験片対して静水圧繰り返し载荷を行い、各载荷サイクルの差ひずみ($\Delta\varepsilon$)の最大値を解析して地圧を決定する方法(PSHA法(その1))、4)3)の試験から得られる差ひずみ曲線の勾配($d\varepsilon/d\sigma$)の最大値を解析する方法(PSHA法(その2))を採用した。

DRA法では、一軸圧縮繰り返し载荷試験を行い、1)各载荷サイクルの差ひずみ関数($\Delta\varepsilon(j, i)$)の屈曲点における応力から地圧を評価する方法(従来法)、2)差ひずみ関数の屈曲点におけるひずみから地圧を評価する方法(ひずみ法)、3)差ひずみ関数の最大値における応力から地圧を評価する方法($\Delta\varepsilon_{max}$ 法)、4)差ひずみ関数の最大値におけるひずみから地圧を評価する方法($\Delta\varepsilon_{max}$ ひずみ法)、5)差ひずみ関数の勾配の最大値における応力から地圧を評価する方法($(d\varepsilon/d\sigma)_{max}$ 法)、6)差ひずみ関数の勾配の最大値におけるひずみから地圧を評価する方法($(d\varepsilon/d\sigma)_{max}$ ひずみ法)、7)差ひずみ関数の勾配が急

激に減少する点における応力から地圧を評価する方法（急減点法）、8) 差ひずみ関数の勾配が急激に減少する点におけるひずみから地圧を評価する方法（急減点ひずみ法）を採用した。

AE法では、AEイベント累積数およびAE累積エネルギーの急増点における1) 応力から地圧を評価する方法（従来法）、2) ひずみから地圧を評価する方法（ひずみ法）を採用した。なお、ここで種々の評価方法に対して付けた呼称は便宜上のものである。また、呼称に“ひずみ法”がつくものについては、応力値を直接求めることができないので、ヤング率を61GPa、ポアソン比を0.26として主応力を計算した。

5.3.2 ASR法による計測結果

250m石灰岩については、4地点で変位計を用いたASR計測を行った。計測開始は、ボーリング後1~2時間の間である。図5.14に非弾性回復ひずみの一例を示す。変化量はいずれの試料とも極めて少なく、 $3\mu\text{m}$ 前後であるが、温度が一定になった後のダミー変位計の値がほぼ一定であることからかなり精度良く計測されたと考えられる。このことから、データの解析は温度がほぼ一定の区間を対象に行った。このデータにダミー変位計分の補正を行った後、非弾性ひずみテンソルを求め、非弾性体積ひずみならびに偏差主ひずみの経時変化を求めたのが図5.15である。

図5.16は、ASR法で計測された主応力の方向を示したものである。地点1と地点2では、最大主応力の方向が一致したが、中間、最小主応力の方向が入れ替わっている。地点3と地点4では、各主応力の方向がほぼ一致したが、この値は地点1や地点2と比べると全く異なった方向である。この要因として先に述べたように地点1と地点2の間、地点2と地点3の間に破碎帯が見られたのでその影響を受けていると考えられる。また地点1の試料にはコア軸方向にき裂が入っており、地点2の試料は平行なき裂群の中にあつたので、これらの影響を受けていることが考えられる。

5.3.3 DSCA法による計測結果

DSCA法は、最大150MPaの静水圧を、最初の7MPaまでは0.2MPaごと、その後は1MPaごとのステップ状に載荷を3回繰り返して行った。応力-ひずみ線図の一例を図5.17に示す。図中のひずみは各方向 100×10^{-6} ずつずらしてある。

DSCA法（従来法）で求められた主応力の方向を図5.18に示す。最大主応力の方向はほぼ鉛直方向である。大きさについては、奥に行くほど中間、最小主応力の割合が高まっており静水圧に近づいていく傾向にある。研究機関Bの結果は地点3のものであるが、当方の地点3の結果との整合性は良い。なお、従来法では直接応力値を求めることができないので、推定被り重量圧を18.9MPaと見積もって主応力は計算した。

PSHA法（その1）で求められた主応力の方向ならびに大きさを図5.19に示す。地点4を除いて最大主応力の方向はほぼN-Sの方向で一致している。大きさについては、被りから推定した鉛直地圧18.9MPaと比べて、計測結果の鉛直成分はかなり大きな値を示している。

PSHA法（その2）で得られた主応力の方向ならびに大きさを図5.20に示す。PSHA法（その1）に比べて方向に統一性が感じられない。

本法により評価した地圧の方向ならびに大きさを図5.21に示す。最大主応力の方向はE-W方向～NW-SE方向にまとまっているが、傾斜が地点3で異なっている。鉛直応力の大きさについてはバラツキがみられ、推定値よりも大きな値になっている。

5.3.4 DRA法による計測結果

載荷応力は最大30MPaの1軸圧縮応力を5MPa/minで5回繰り返したものである。この時の応力、軸ひずみ、Reduced Strainをコンピューターに記録させ、解析を行った。データの収集は2秒ごとに行った。応力では約0.15MPaごとになる。得られた応力-差ひずみ線図の一例を図5.22に示す。i回目（ $i = 2 \sim 5$ ）と1回目のひずみ差関数 $\Delta \varepsilon_{i,1}$ では明瞭な屈曲点が得られなかったため、5回目

と2回目のひずみ差関数 $\Delta \varepsilon_{s, 2}$ を用いて解析を行った。さらに変曲点をはっきりさせるために三角フィルターで重みつき移動平均処理を行った。また、 $\Delta \varepsilon$ の最大値を用いて地圧の評価を行う際には、6本の曲線 $\Delta \varepsilon_{i, j}$, ($i > j$, $j \geq 2$)それぞれについて最大値を取る応力を求め、その中の最大と最小を除いた平均値を用いた。単調減少の曲線を含んでいて最大値が4つ以上求められなかった試料については単純に平均した。

従来法による結果を図5.23に示す。主応力の方向は地点1, 4が似ており最大主応力はNW-SE方向、地点2は同方位であるが傾きが 90° 近くずれている。大きさについては鉛直応力について地点1, 3で推定値と比較して少なめであり、地点2, 4はほぼ推定値と同じであった。また主応力の大きさは奥へ行くほど大きくなっている。研究機関Aによる結果は地点1に関しては当方の結果との整合性は良くない。一方、地点3については最大主応力の方向はほぼ一致している。

ひずみ法による結果を図5.24に示す。ここでは、従来法で求めた応力値に対応する5周期目の軸ひずみの大きさからひずみテンソルを求め地圧を評価した。従来法とひずみ法を比較すると、方向について若干異なっているが方向、大きさの比共にほぼ一致している。

$\Delta \varepsilon_{\max}$ 法による結果を図5.25に示す。方向については各地点でまちまちであるが、地点1, 4は比較的近い値となり、最大主応力がN-S方向を向いている。大きさについては地点3で鉛直成分と最小主応力がかなり小さかったが地点1, 2, 4では推定値に近い値となった。

$\Delta \varepsilon_{\max}$ ひずみ法による結果を図5.26に示す。この場合も $\Delta \varepsilon_{\max}$ 法と大きな差は見られなかった。

$(d\varepsilon/d\sigma)_{\max}$ 法による結果を図5.27に示す。応力の大きさを鉛直成分で評価するとすべての地点で推定値を大きく下回っており、この解析法で地圧を求めることは困難であるといえる。この解析法は従来法において、差ひずみ線図に直線を引きそこからはずれた点を肉眼で判定し先行応力とする方法を、客観的に行なうために試みたが、実際の差ひずみ曲線の勾配は図5.28に示すように最大値の周りに平坦な部分が見られるものがあり、この部分では差ひずみ曲線は直線である。よって従来の方法で求めていた先行応力を客観性を増して評価するには、図中に矢印で示した差ひずみ曲線の勾配が急激に減少する点を求めることが

適当だと思われる。

$(d\varepsilon / d\sigma)_{max}$ ひずみ法による結果を図5.29に示す。3つの主応力の方向は地点1、2、3でまとまっている。また、地点4についても最大主応力の方向はほぼ一致している。

急減点法による結果を図5.30に示す。これによると地点2、4の最大主応力が似た方向を示しており、NW-SE方向、地点1の最大主応力はNE-SW方向を示している。地点3は最小主応力がマイナスになっているので、正しい地圧の推定は行われていないと考えられる。大きさは地点2の最小主応力が極端に小さく、鉛直成分もすべて小さめであるが、奥に行くほど地圧が大きくなっている。

急減点ひずみ法で求めた結果を図5.31に示す。地点1では応力法に比べて最大主応力と中間主応力の位置が入れ替わっている。地点2、4ではどちらも同じような方向を示している。

DRA法の結果としてまとめて示すには各方法の結果にばらつきが有るが、主応力の大きさについては、奥に行くほど大きくなる、推定値に比べて過小評価ぎみである、という2つのことが言えるようである。後者については、DRA計測を行ったのがコア採取後半年経ってからのので応力記憶が薄れてしまった可能性がある。またデータの採取間隔が少し長かったかもしれない。

5.3.5 AE法による計測結果

AE法はDRA法と同時に計測を行ったので、試料や一軸圧縮応力の载荷パターンは同じである。载荷装置のバックグラウンドノイズが120mVであったのでディスプレイミネーターのしきい値を200mVとし、試料のP波速度が3500~4000m/sec、試料の長さが約55mmであったのでコインシデンス処理の為の時間差を8 μ sとした。図5.32にAE法の計測結果の一例を示す。上の図がAE累積数と応力の関係、下の図がAEエネルギー累積数と応力の関係である。評価地圧は、基本的にAE累積数の急増点の応力から求めたが、急増点が明瞭に現れていないものについては、AEエネルギー累積の急増点を参考にすることで、できるだけ客観的な先行応力を決定するように努めた。解析は、従来法とひずみ法の2通りで行った。

従来法で求めた主応力の方向ならびに大きさを図5.33に示す。であり、図5.34はひずみ法で求めた主応力の方向である。どちらについても最大主応力の方向は、地点3および地点4でほぼ同じであるが、中間、最小主応力が入れ替わっている。その他の点では地点1の最大主応力がN-S方向、地点2の最大主応力がNW-SE方向である。同時計測を行ったDRA法と比較をしてもあまり良い相関にあるようは思えない結果である。

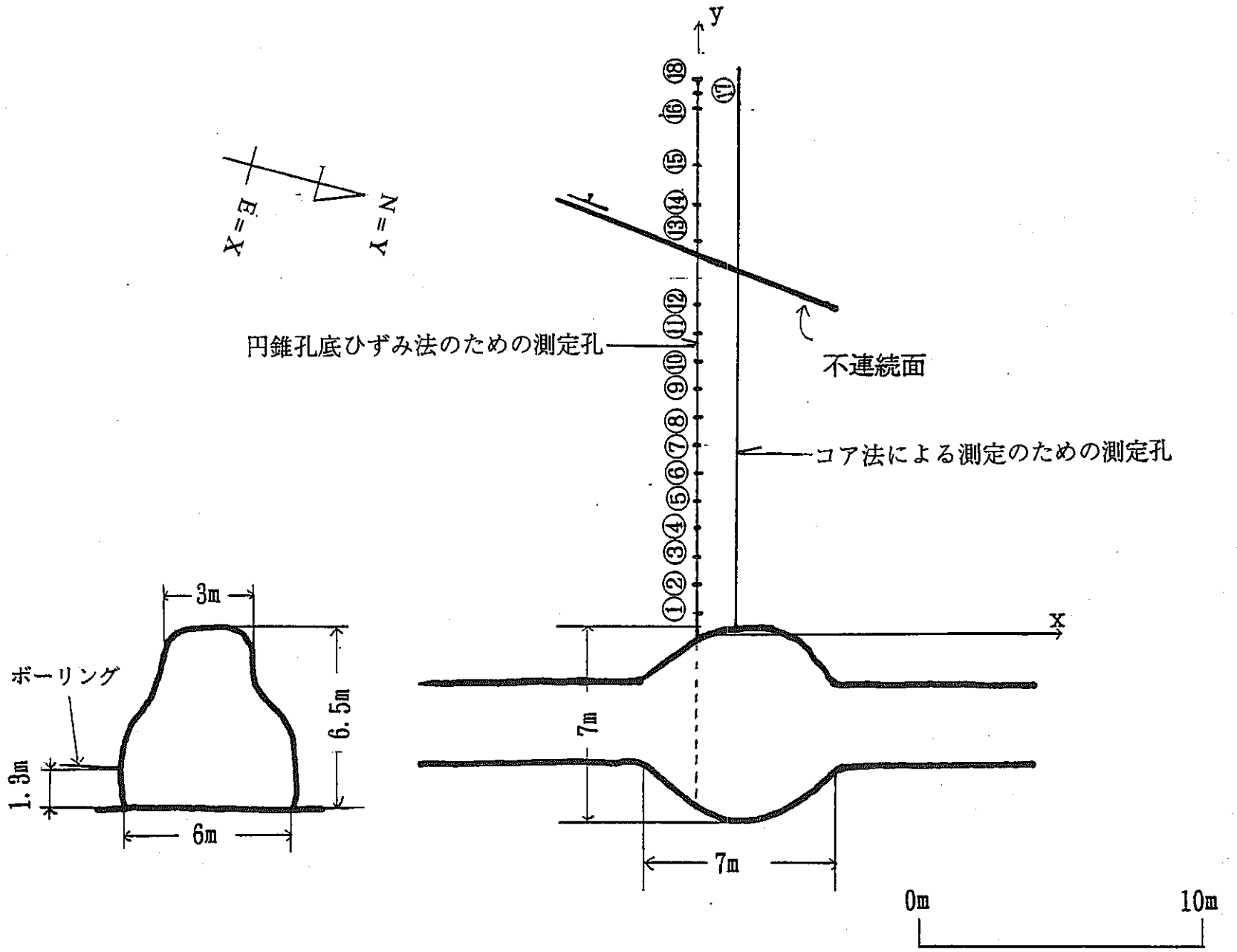


図5.13 測定位置

表 5.4 石灰岩コアに対する地圧計測

測定地点	測定深度	研究機関	計測方法
地点 1	9.25 m 9.81 m 9.90 m	東北大学 東北大学 東北大学	DRA 法 + AE 法 DSCA 法 ASR 法
地点 2	13.0 m 13.9 m 14.5 m 14.9 m	研究機関 A 東北大学 東北大学 東北大学	DRA 法 DRA 法 + AE 法 ASR 法 DSCA 法
地点 3	16.3 m 16.6 m 16.8 m 17.1 m 17.6 m 18.0 m	東北大学 東北大学 東北大学 研究機関 B 研究機関 B 研究機関 A	DSCA 法 ASR 法 DRA 法 + AE 法 AE 法 DSCA 法 DRA 法
地点 4	18.7 m 18.9 m 19.1 m	東北大学 東北大学 東北大学	ASR 法 DSCA 法 DRA 法 + AE 法

表 5.5 地圧の計測および評価法

計測方法	地圧の計測および評価法
ASR 法	変位計法
DSCA 法	1) 従来法 2) v 法 3) PSHA 法 (その1) 4) PSHA 法 (その2)
DRA 法	1) 従来法 2) ひずみ法 3) $\Delta \epsilon_{\max}$ 法 4) $\Delta \epsilon_{\max}$ ひずみ法 5) $(d\epsilon/d\sigma)_{\max}$ 法 6) $(d\epsilon/d\sigma)_{\max}$ ひずみ法 7) 急減点法 8) 急減点ひずみ法
AE 法	1) 従来法 2) ひずみ法

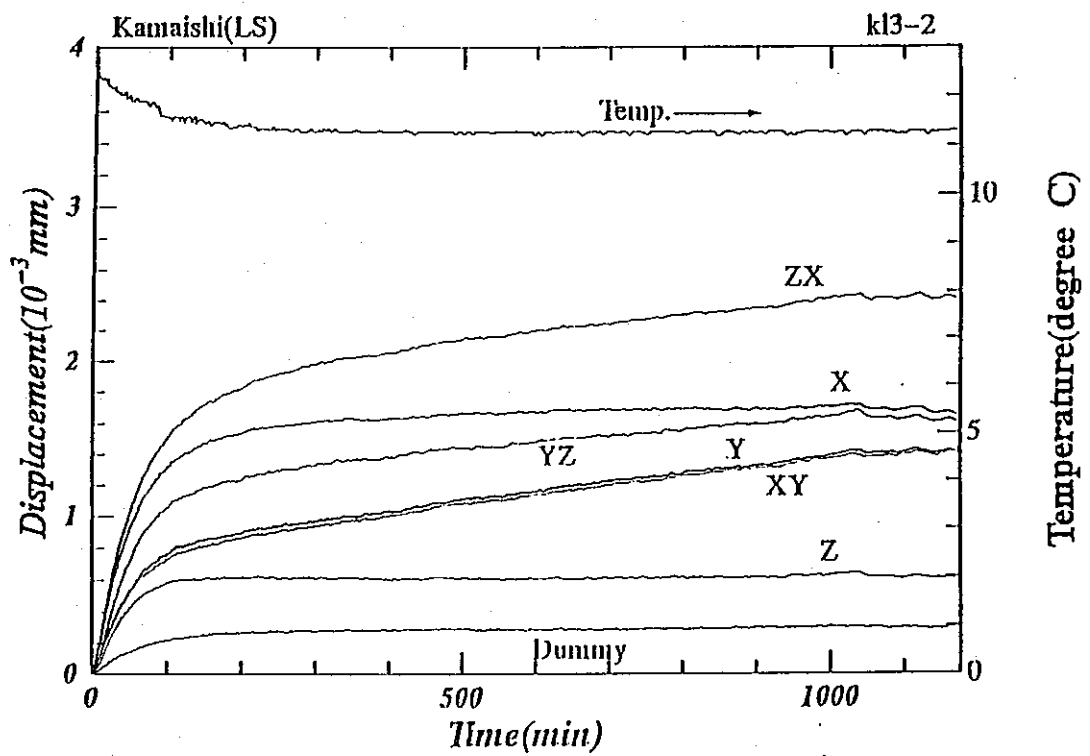


図5.14 現場計測結果の一例 (14.5m地点)

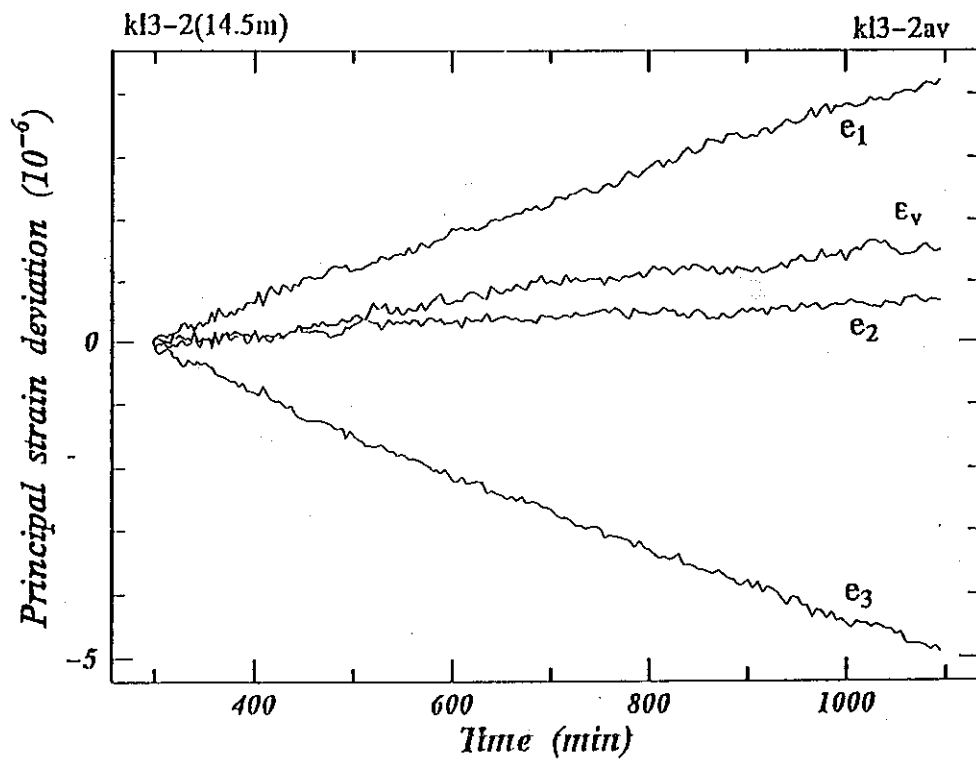


図5.15 偏差主ひずみおよび体積ひずみの経時変化の一例 (14.5m地点)

	9.9 m	14.5 m	16.6 m	18.7 m
σE	****	****	****	****
σN	****	****	****	****
σV	****	****	****	****
τEN	****	****	****	****
τNV	****	****	****	****
τVE	****	****	****	****
$\sigma 1$	****	****	****	****
Dip/Azi	58.5/191.0	54.5/195.6	9.8/327.0	24.0/343.2
cos E	-0.100	-0.156	-0.537	-0.264
cos N	-0.513	-0.559	0.826	0.875
cos V	0.853	0.814	0.170	0.407
$\sigma 2$	****	****	****	****
Dip/Azi	13.5/303.9	34.0/35.0	40.5/65.4	35.3/91.6
cos E	-0.807	0.476	0.691	0.816
cos N	0.542	0.679	0.317	-0.023
cos V	0.233	0.559	0.649	0.578
$\sigma 3$	****	****	****	****
Dip/Azi	28.0/41.3	9.1/298.8	47.9/226.0	45.0/266.6
cos E	0.583	-0.865	-0.482	-0.514
cos N	0.663	0.476	-0.466	-0.486
cos V	0.469	0.158	0.742	0.707

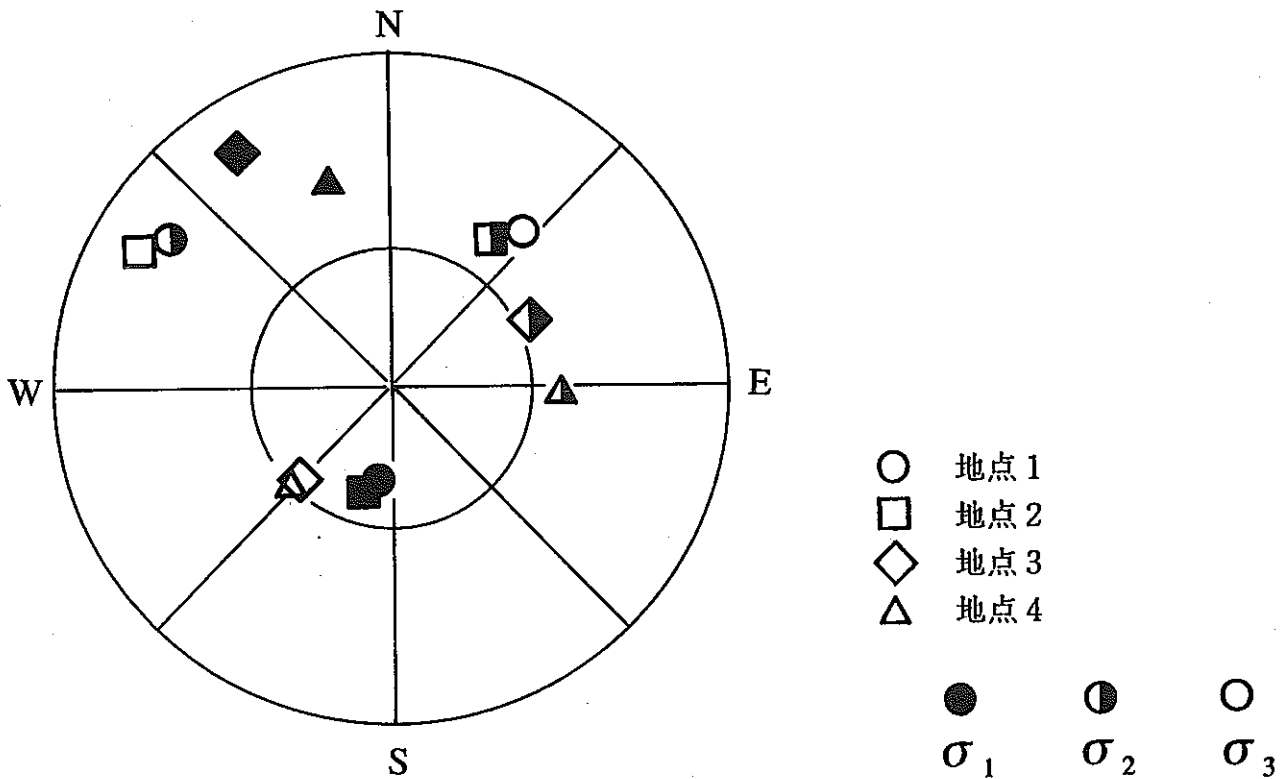


図 5.16 ASR 法による結果 (上半球投影)

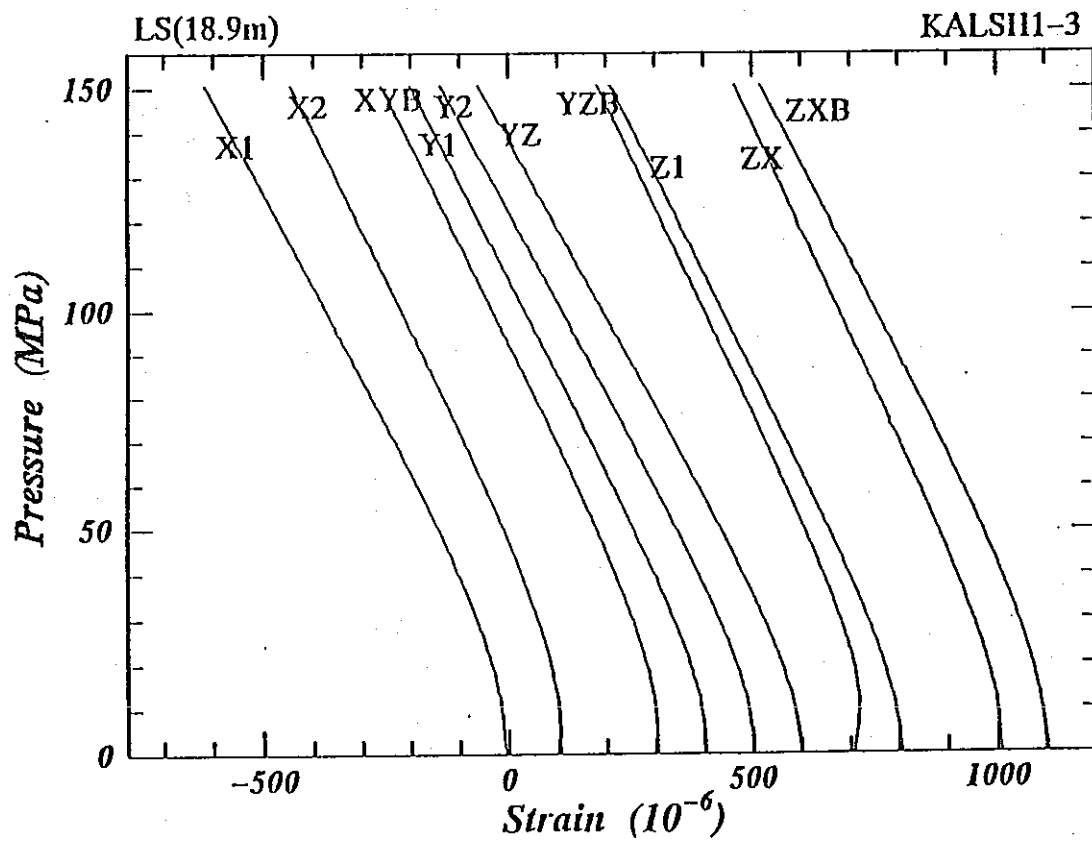


図5.17 静水圧-ひずみ曲線の一例

	9.81 m	14.9 m	16.3 m	18.9 m
ϵE^*	0.216	0.237	0.540	0.582
ϵN^*	0.388	0.276	0.460	0.934
ϵV^*	0.405	0.468	0.894	0.740
γEN^*	0.214	0.002	-0.179	0.019
γNV^*	0.098	0.039	-0.108	0.108
γVE^*	0.356	0.069	-0.317	-0.007
$\sigma 1^{**}$	26.78	18.9	22.900	23.54
Dip/Azi	46.48/54.09	80.1/60.15	59.68/269.49	16.16/16.15
cos E	0.558	0.149	-0.505	0.267
cos N	0.404	0.086	-0.004	0.923
cos V	0.725	0.985	0.863	0.278
$\sigma 2^{**}$	13.61	10.8	13.18	18.58
Dip/Azi	30.96/183.28	13.13/156.87	17.88/146.01	71.33/222.89
cos E	-0.049	0.383	-0.532	-0.218
cos N	-0.856	-0.896	0.789	-0.235
cos V	0.514	0.227	-0.307	0.947
$\sigma 3^{**}$	5.62	9.07	4.04	15.23
Dip/Azi	27.23/291.26	9.83/247.27	23.63/47.89	9.1/108.81
cos E	-0.829	-0.909	0.680	0.935
cos N	0.322	-0.381	0.614	-0.318
cos V	0.458	0.171	0.401	0.158

* $\Delta \beta / \beta$ (固有線圧縮率 - 有効線圧縮率) / 固有線圧縮率)

** 推定被り重量圧を18.9MPaと見積もって計算

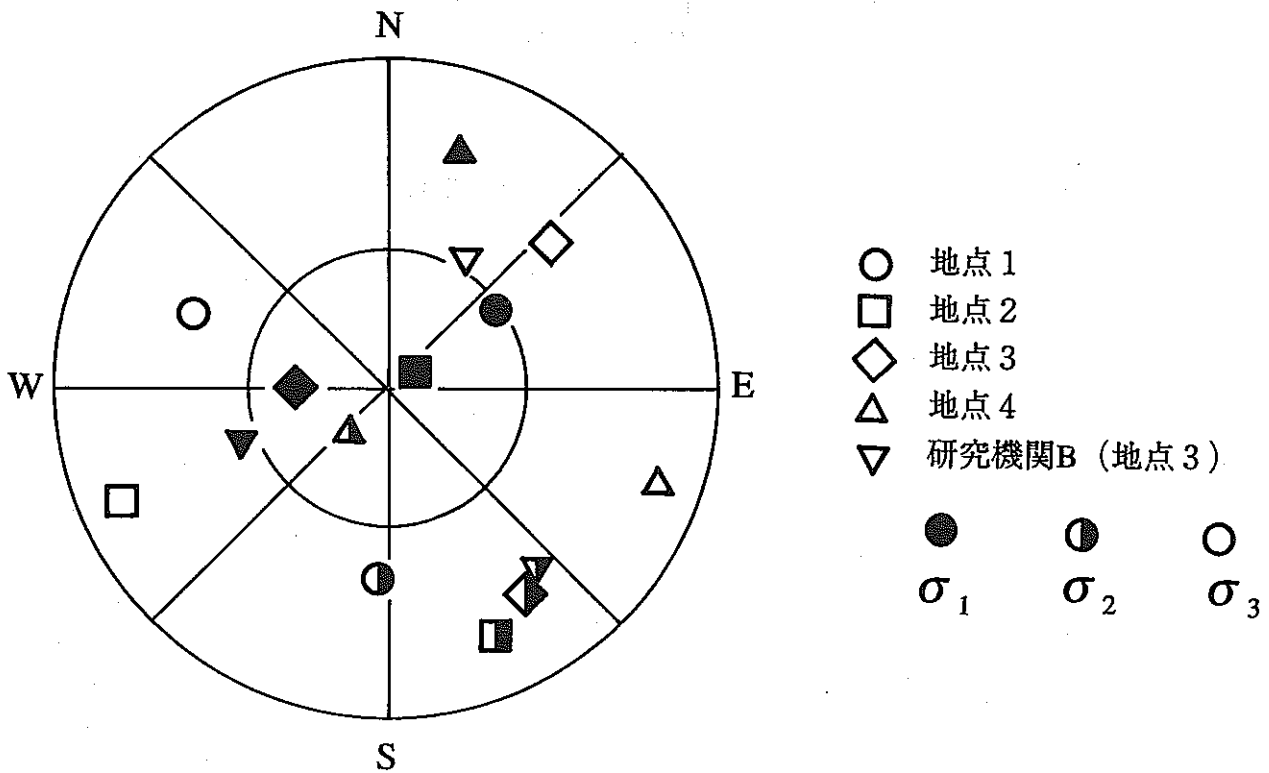


図 5.18 DSCA 法 (従来法) による結果 (上半球投影)

	9.81 m	14.9 m	16.3 m	18.9 m
σE	13.55	22.64	23.38	27.86
σN	19.83	25.6	28.07	21.58
σV	23.73	30.19	24.01	25.25
τEN	-1.50	2.7	-0.858	-1.16
τNV	7.01	5.78	0.922	3.03
τVE	-0.50	2.81	-0.418	5.93
$\sigma 1$	29.16	35.28	28.44	32.72
Dip/Azi	52.23/-7.85	51.57/27.97	12.52/-10.66	39.96/82.86
cos E	-0.083	0.292	-0.181	0.761
cos N	0.607	0.549	0.959	0.095
cos V	0.790	0.783	0.217	0.642
$\sigma 2$	15.01	22.2	23.88	24.1
Dip/Azi	34.23/143.57	36.34/229.99	66.08/229.32	26.7/-32.06
cos E	-0.491	0.617	0.308	-0.474
cos N	0.665	0.518	0.264	0.757
cos V	-0.563	-0.593	-0.914	0.449
$\sigma 3$	12.94	20.94	23.13	17.87
Dip/Azi	14.02/243.35	10.82/131.91	20.25/83.99	38.38/214.46
cos E	0.867	0.731	0.934	0.433
cos N	0.435	-0.656	0.098	0.646
cos V	-0.242	0.188	0.343	-0.621

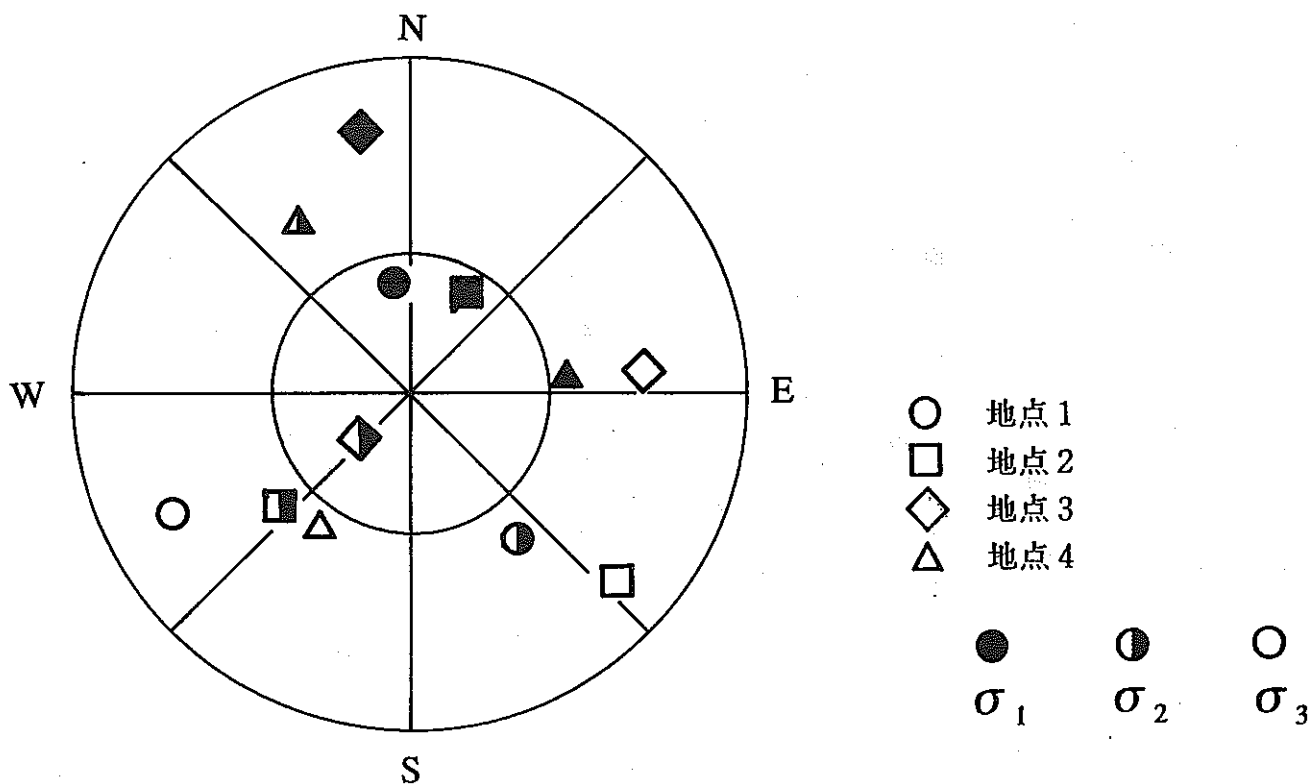


図 5.19 PSHA 法 (その 1) による結果 (上半球投影)

	9.81 m	14.9 m	16.3 m	18.9 m
σE	16.89	24.59	28.15	12.04
σN	21.96	23.18	18.05	12.31
σV	22.01	23.73	21.1	15.11
τEN	-2.70	0.35	-8.66	-2.21
τNV	16.49	-1.21	-1.53	7.30
τVE	-3.91	-0.75	-2.76	4.47
$\sigma 1$	39.45	25.45	33.35	21.64
Dip/Azi	44.15/-16.44	36.52/238.37	7.78/-61.16	52.35/23.05
cos E	-0.203	-0.684	-0.868	0.239
cos N	0.688	-0.421	0.480	0.562
cos V	0.697	0.595	0.135	0.792
$\sigma 2$	15.98	23.85	21.71	14.10
Dip/Azi	5.0/78.43	28.75/124.4	71.02/185.43	7.1/122.34
cos E	0.976	-0.723	0.031	-0.838
cos N	0.200	0.495	0.324	0.531
cos V	0.087	-0.481	-0.946	-0.124
$\sigma 3$	5.43	22.20	12.24	3.72
Dip/Azi	45.41/173.52	40.07/6.91	17.2/31.27	36.74/217.67
cos E	0.079	0.092	0.496	0.490
cos N	-0.698	0.76	0.817	0.634
cos V	0.712	0.644	0.296	-0.598

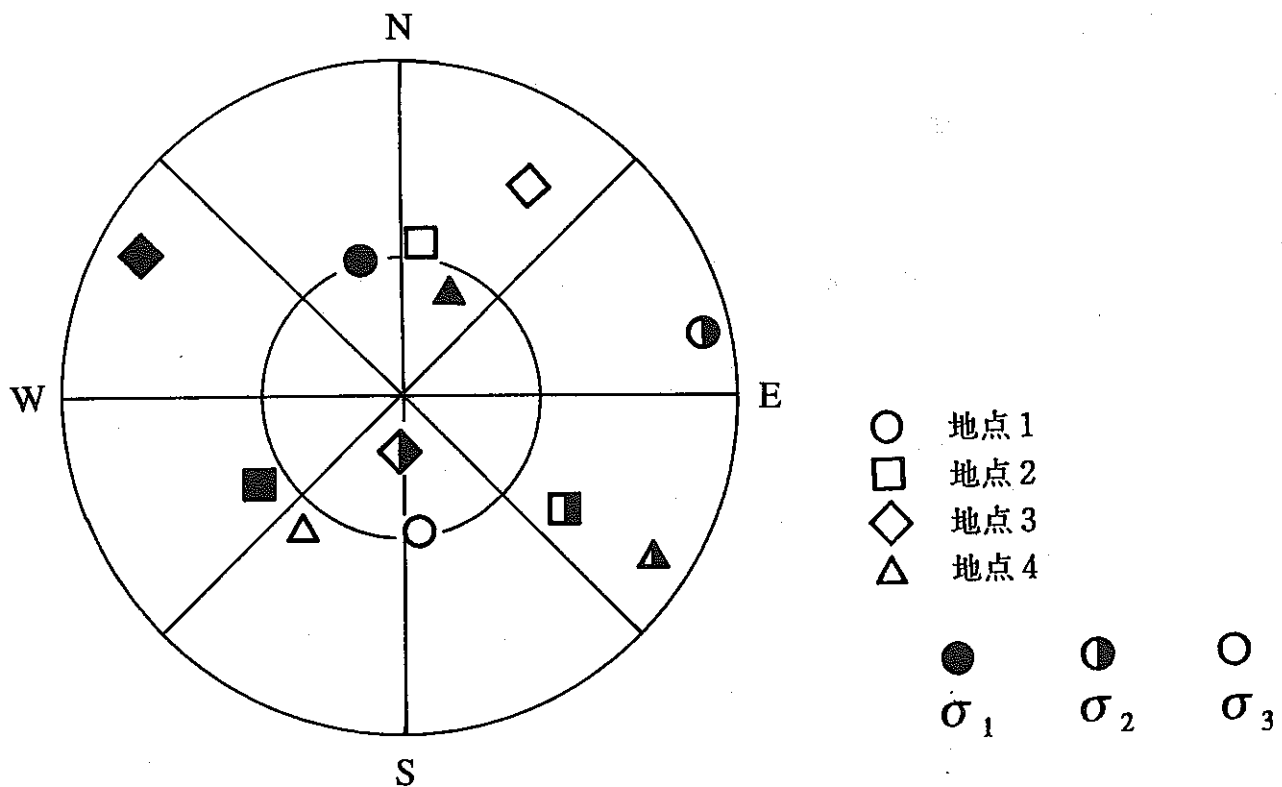


図 5.20 PSHA 法 (その 2) による結果 (上半球投影)

	9.81 m	14.9 m	16.3 m	18.9 m
σE	17.28	33.80	33.83	26.33
σN	16.38	33.42	27.39	17.25
σV	16.41	33.28	32.38	24.42
τEN	-0.90	0.09	-6.19	0.57
τNV	-0.44	-0.37	1.54	-4.25
τVE	1.13	0.60	0.37	3.58
$\sigma 1$	18.52	34.21	37.64	29.51
Dip/Azi	29.68/119.06	35.54/102.95	5.41/-58.14	42/105.51
cos E	0.759	0.793	-0.846	0.716
cos N	-0.422	-0.182	0.525	-0.199
cos V	0.495	0.581	0.094	0.669
$\sigma 2$	15.97	33.58	32.59	23.59
Dip/Azi	32.03/8.18	16.1/204.85	78.99/60.95	35.83/236.05
cos E	0.121	0.404	-0.167	0.673
cos N	0.839	0.872	-0.093	0.453
cos V	0.530	-0.277	-0.982	-0.585
$\sigma 3$	15.58	32.71	23.38	14.89
Dip/Azi	43.49/241.78	49.9/-45.11	9.57/210.95	27.25/-12.12
cos E	0.639	0.456	0.507	0.187
cos N	0.343	-0.455	0.846	-0.869
cos V	-0.688	-0.765	-0.166	-0.458

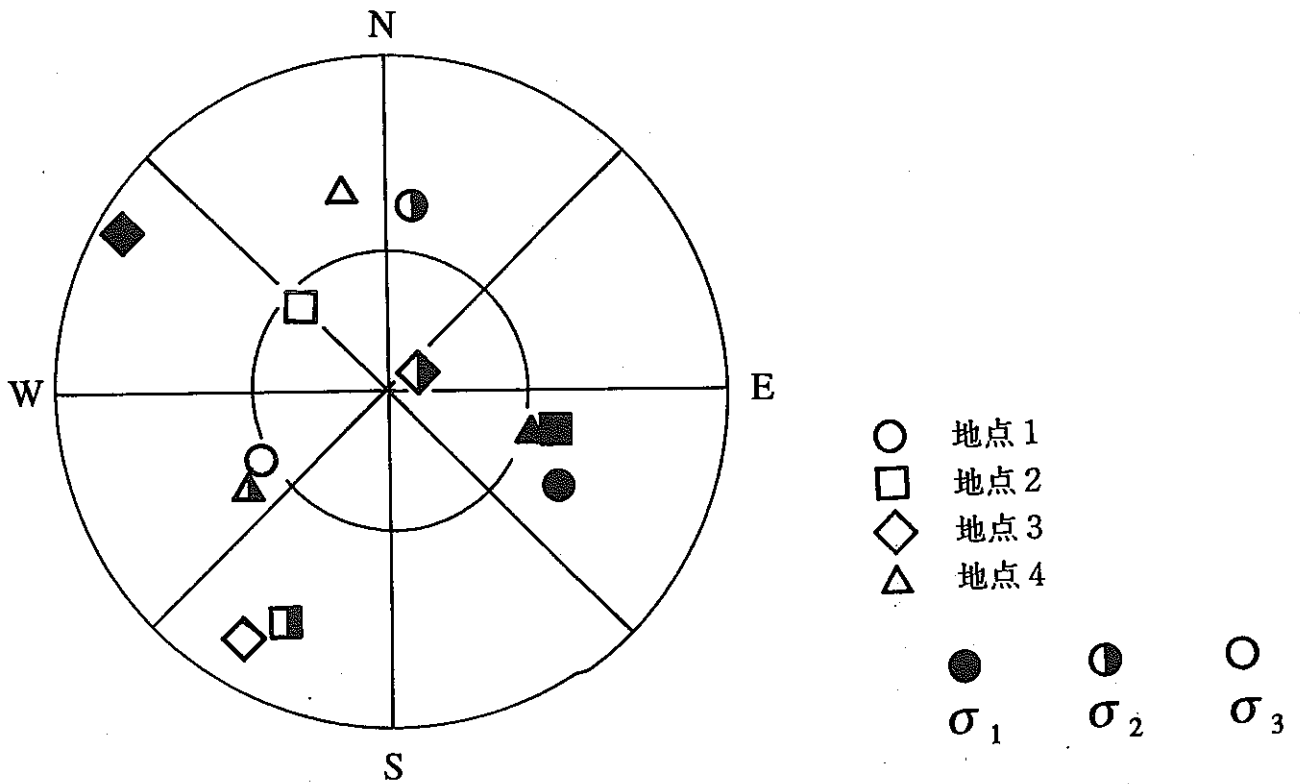


図 5.21 v法による結果 (上半球投影)

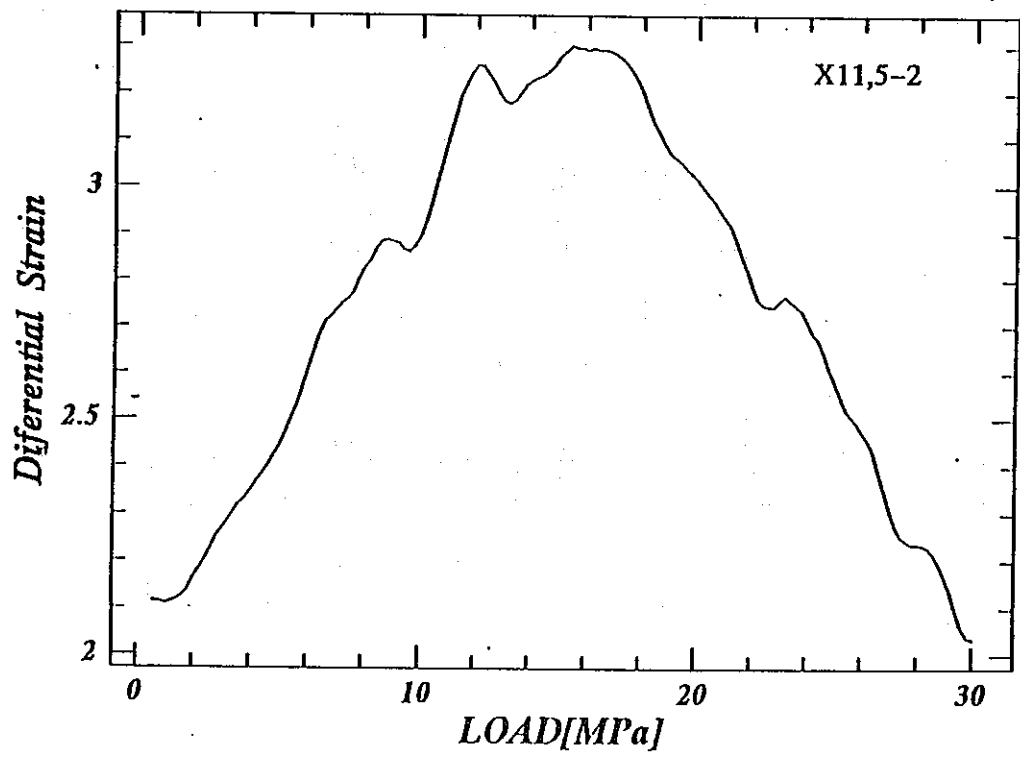


図5.22 差ひずみ曲線の一例

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
σE	12.36	13.06	16.42	20.33
σN	10.12	5.15	13.20	10.49
σV	11.37	18.03	12.70	18.97
τEN	-1.86	-1.21	0.94	-3.47
τNV	-1.30	2.95	-1.37	-5.46
τVE	2.06	-2.31	-5.26	1.96
$\sigma 1$	15.02	19.64	20.48	24.46
Dip/Azi	33.59/120.25	65.28/-59.08	34.96/255.08	39.79/122.35
cos E	0.720	-0.359	-0.792	0.649
cos N	-0.420	0.214	-0.211	-0.411
cos V	0.553	0.908	0.573	0.640
$\sigma 2$	9.77	12.15	12.95	17.93
Dip/Azi	55.54/-74.33	21.63/90.37	0.37/-14.66	41.27/259.31
cos E	-0.545	-0.930	-0.253	-0.739
cos N	0.153	0.006	0.967	-0.139
cos V	0.825	-0.369	0.006	0.660
$\sigma 3$	9.05	4.45	8.91	7.41
Dip/Azi	6.81/25.70	11.4/184.95	55.04/75.86	23.21/11.43
cos E	0.431	0.085	0.556	0.182
cos N	0.895	0.977	0.140	0.901
cos V	0.119	-0.198	0.820	0.394

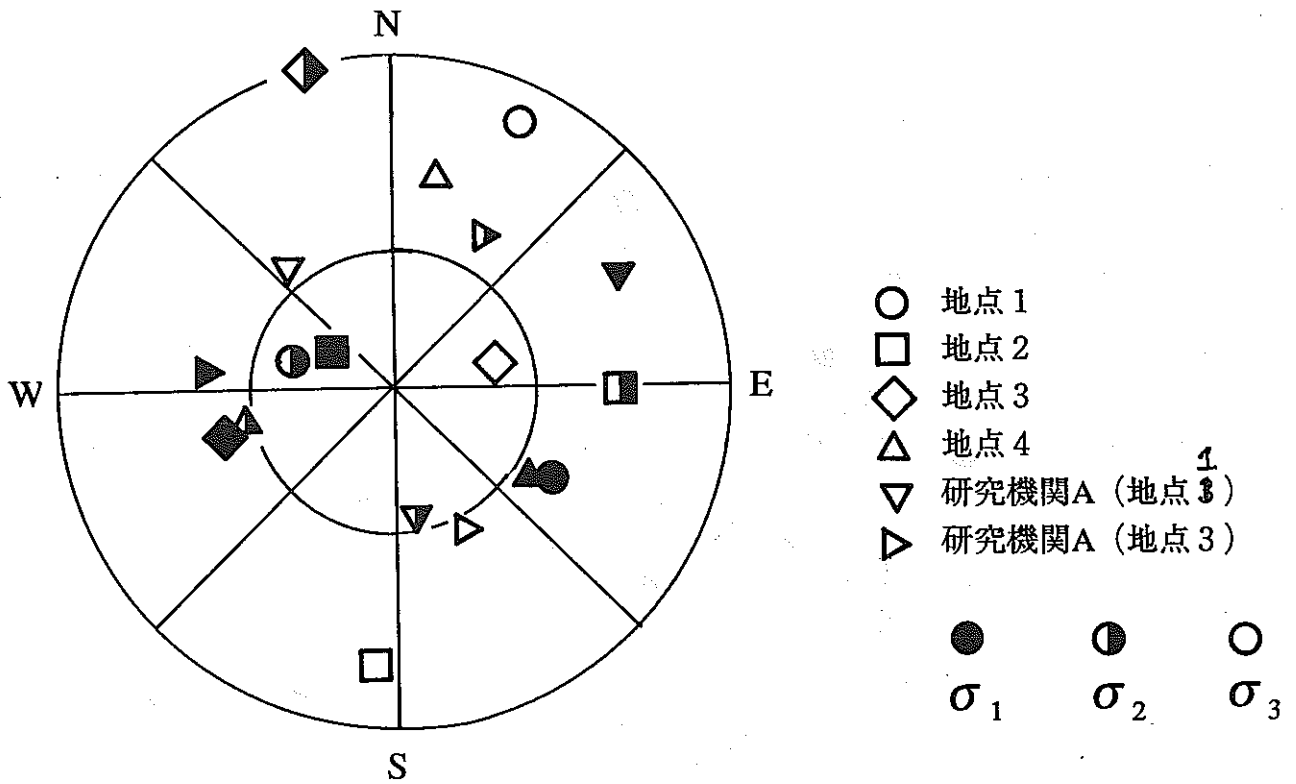


図 5.23 DRA 法 (従来法) による結果 (上半球投影)

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
ϵE	190.5	176.1	226.9	274.9
ϵN	183.6	144.8	240.5	222.6
ϵV	158.4	242.1	217.6	277.5
γEN	-31.6	-31.4	-11.4	34.9
γNV	-19.8	62.6	-19.1	-89.3
γVE	23.6	13.9	-78.8	37.3
$\sigma 1^*$	25.18	27.97	32.56	37.0
Dip/Azi	22.75/131.56	63.72/-1.90	43.78/263.48	54.92/163.75
cos E	0.690	-0.015	-0.717	0.161
cos N	-0.612	0.442	-0.082	-0.551
cos V	0.387	0.897	0.692	0.819
$\sigma 2^*$	21.48	24.03	29.81	34.46
Dip/Azi	4.95/39.48	11.06/111.43	5.45/168.23	4.06/67.95
cos E	0.633	-0.914	-0.203	0.925
cos N	0.769	0.359	0.975	0.374
cos V	0.086	-0.192	-0.095	0.071
$\sigma 3^*$	21.00	19.55	24.67	27.02
Dip/Azi	66.66/-62.11	23.51/206.31	45.71/72.62	34.75/-24.87
cos E	0.350	0.406	0.666	0.346
cos N	-0.185	0.822	0.209	-0.745
cos V	-0.918	-0.399	0.716	-0.570

*ヤング率を61.0GPa、ポアソン比を0.26として計算

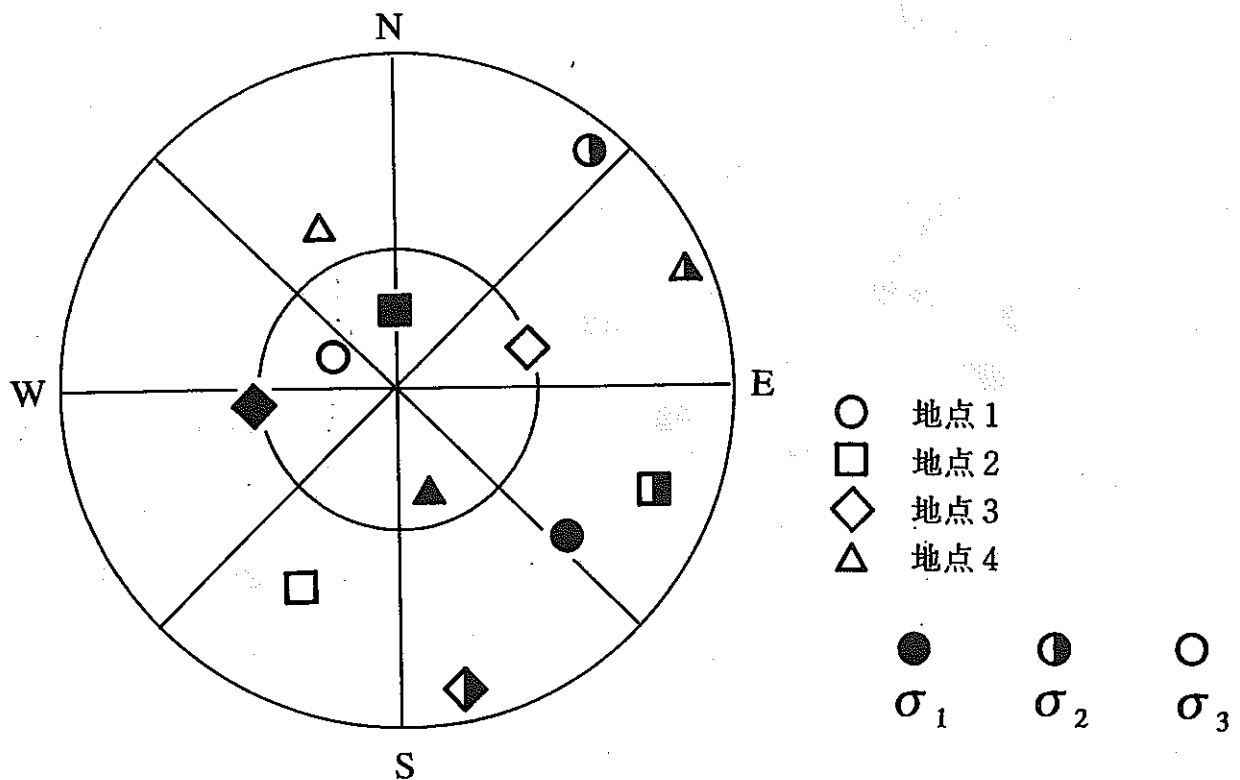


図 5.24 DRA 法 (ひずみ法) による結果 (上半球投影)

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
σE	7.79	7.22	9.72	12.91
σN	7.77	3.29	13.08	11.04
σV	17.09	10.19	6.20	18.80
τEN	-4.03	-2.60	3.03	-6.00
τNV	4.08	0.07	-1.49	12.11
τVE	3.30	3.45	3.42	-1.18
$\sigma 1$	18.93	12.68	14.89	28.94
Dip/Azi	70.61/32.33	54.14/104.91	3.83/32.52	48.52/-24.99
cos E	0.178	0.580	0.536	-0.280
cos N	0.280	-0.154	0.841	0.600
cos V	0.943	0.800	0.067	0.749
$\sigma 2$	11.78	6.38	10.85	13.11
Dip/Azi	3.59/132.61	34.02/-49.32	38.13/125.54	25.19/97.14
cos E	-0.735	-0.629	-0.640	-0.898
cos N	0.676	0.540	0.457	0.112
cos V	-0.063	0.560	-0.617	-0.426
$\sigma 3$	1.94	1.64	3.26	0.70
Dip/Azi	19.03/223.85	12.48/212.09	51.6/-62.33	30.51/203.23
cos E	0.655	0.519	0.550	0.340
cos N	0.682	0.827	-0.288	0.792
cos V	-0.326	-0.216	-0.784	-0.508

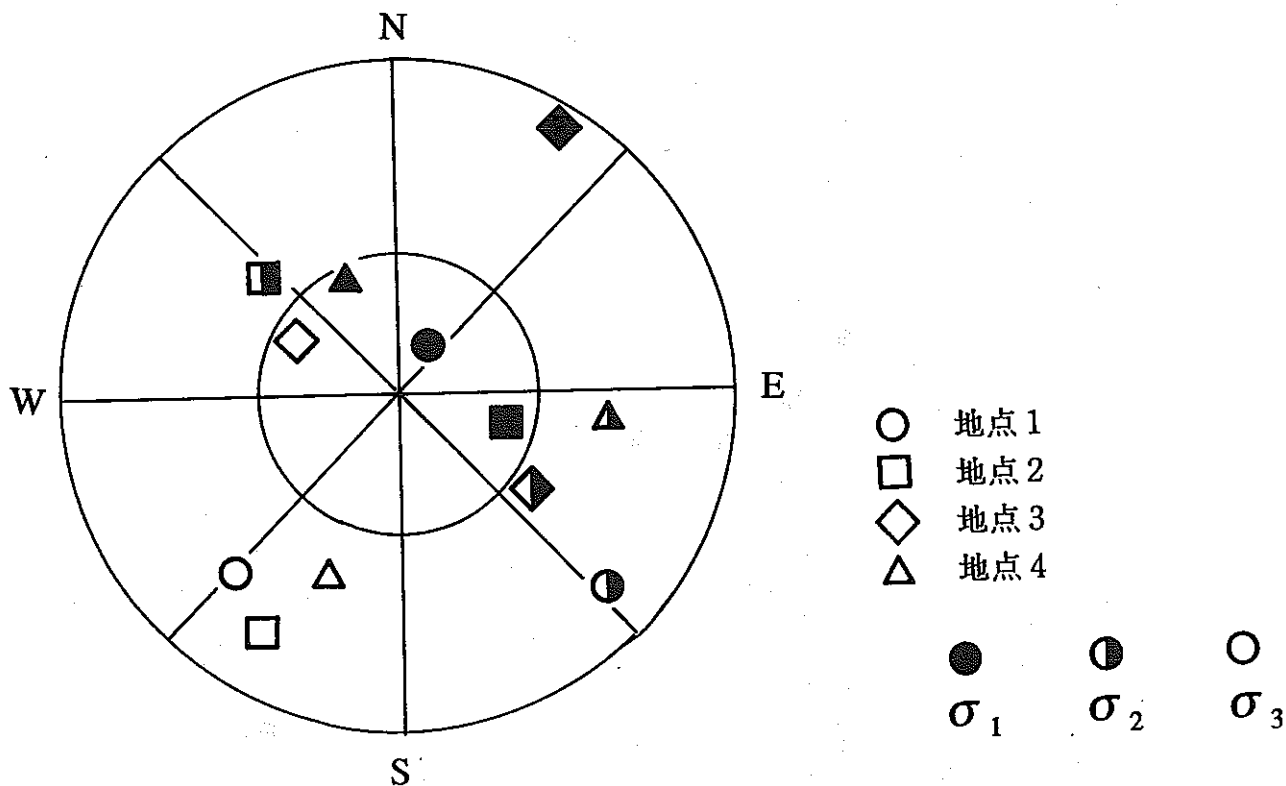


図 5.25 $\Delta \epsilon_{\max}$ 法による結果 (上半球投影)

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
ϵE	128.7	98.9	142.3	195.4
ϵN	144.1	118.1	233.8	202.2
ϵV	233.2	177.0	118.9	274.9
γEN	-71.3	-41.4	14.6	-58.0
γNV	54.6	25.3	-23.6	179.9
γVE	44.6	57.2	40.7	-7.5
$\sigma 1^*$	25.87	20.37	29.6	38.5
Dip/Azi	67.61/17.85	62.9/84.73	9.6/184.54	48.47/-15.9
cos E	0.117	0.453	-0.078	-0.182
cos N	0.363	0.042	-0.983	0.638
cos V	0.925	0.890	0.167	0.749
$\sigma 2^*$	23.25	17.48	21.35	27.25
Dip/Azi	9.97/133.12	11.86/-29.51	36.28/87.41	17.89/95.47
cos E	-0.719	-0.482	0.805	-0.947
cos N	0.673	0.852	0.036	0.091
cos V	-0.173	0.206	0.592	-0.307
$\sigma 3^*$	15.18	12.22	17.01	19.77
Dip/Azi	19.83/226.75	23.98/235.13	52.07/-72.93	35.98/199.03
cos E	0.685	0.750	0.588	0.264
cos N	0.645	0.522	-0.180	0.765
cos V	-0.339	-0.406	-0.789	-0.588

*ヤング率を61.0GPa、ポアソン比を0.26として計算

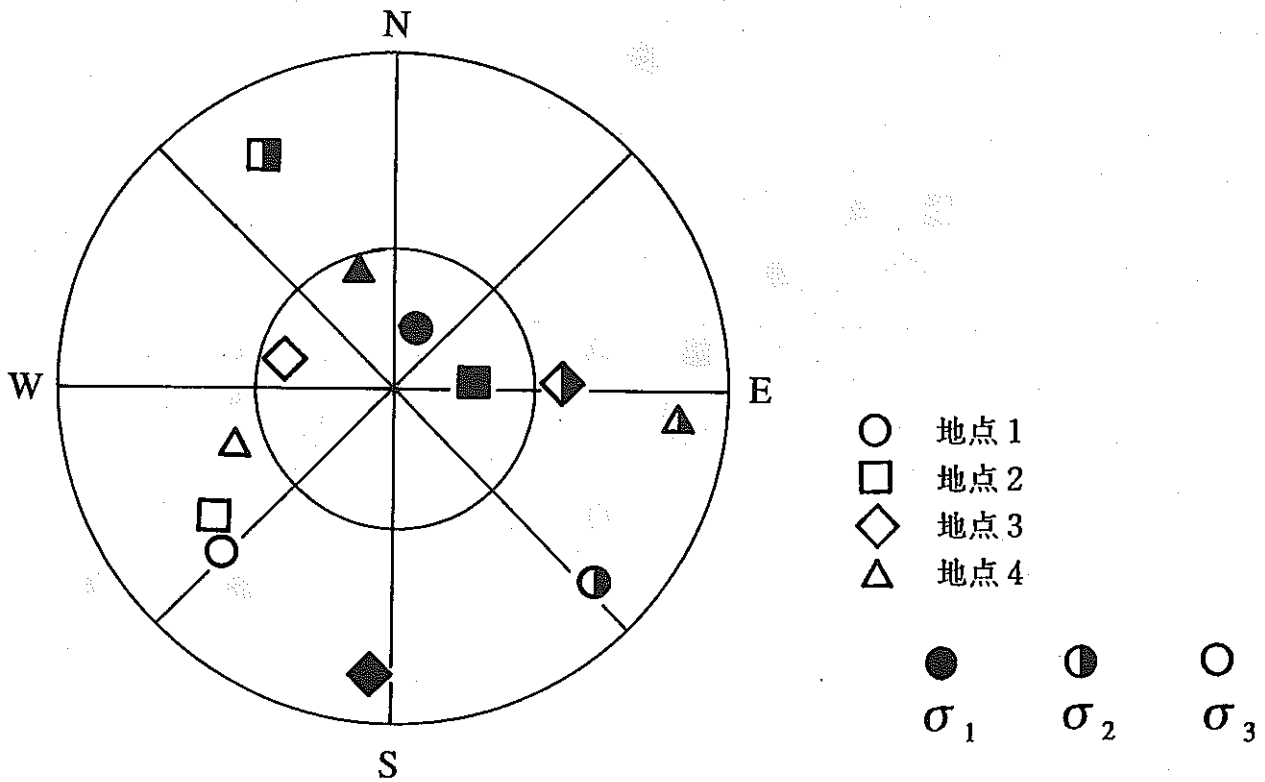


図 5.26 $\Delta \epsilon_{\max}$ ひずみ法による結果 (上半球投影)

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
σE	3.03	7.17	8.74	10.82
σN	4.61	1.14	5.32	4.67
σV	6.20	6.48	4.03	7.21
τEN	-0.06	-2.42	-0.19	-3.46
τNV	0.05	0.98	0.97	-2.18
τVE	3.08	0.39	5.20	0.40
$\sigma 1$	8.08	8.03	12.12	12.55
Dip/Azi	58.63/89.58	1.84/109.17	32.99/82.26	10.69/116.44
cos E	0.520	0.329	0.837	0.880
cos N	0.004	0.930	0.055	-0.437
cos V	0.854	-0.163	0.544	0.816
$\sigma 2$	4.61	6.65	5.48	7.85
Dip/Azi	0.44/-1.14	80.42/8.17	7.38/-8.56	65.07/230.40
cos E	-0.020	0.024	-0.148	-0.325
cos N	1.000	0.165	0.981	-0.269
cos V	0.008	0.986	0.128	0.907
$\sigma 3$	1.16	0.12	0.50	2.31
Dip/Azi	31.34/268.59	9.4/199.48	55.99/250.38	22.24/22.01
cos E	0.854	0.329	0.527	0.347
cos N	0.021	0.930	0.188	0.858
cos V	0.520	-0.163	-0.829	0.378

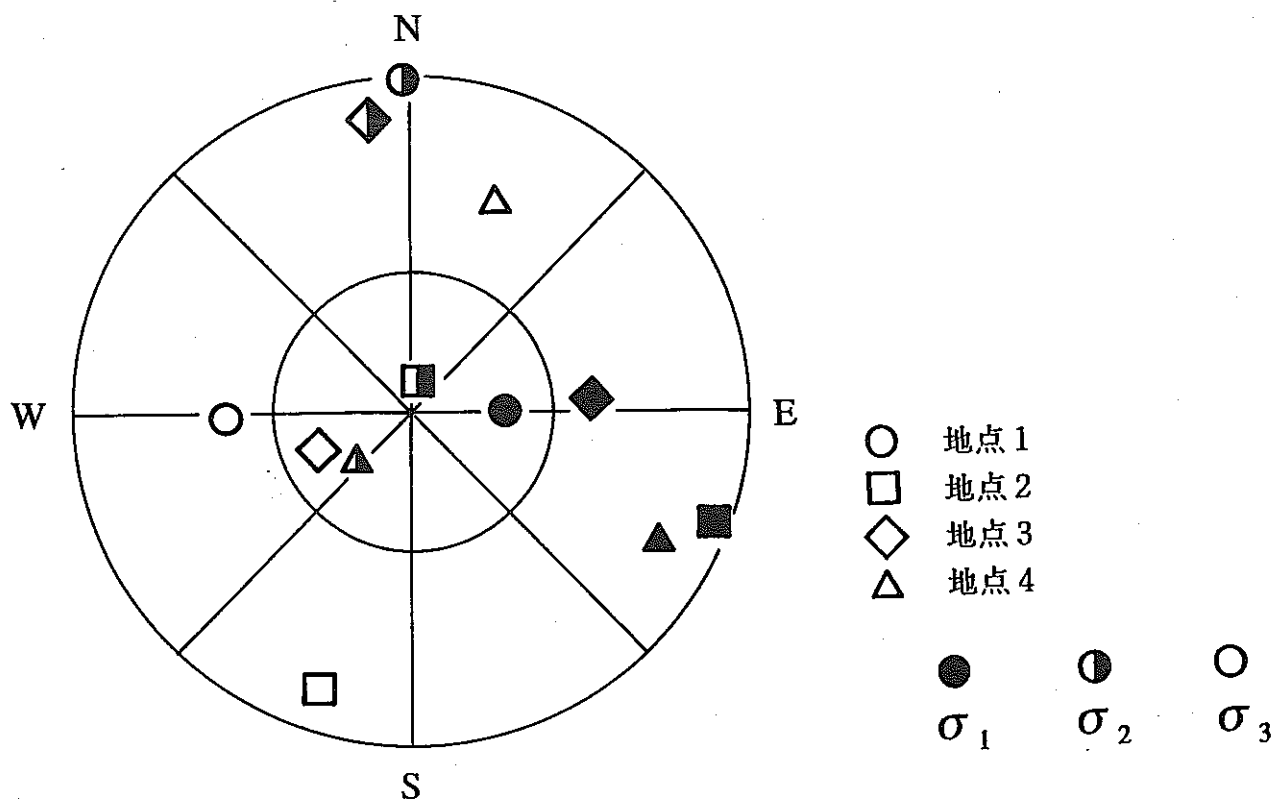


図 5.27 $(d\varepsilon/d\sigma)_{\max}$ 法による結果 (上半球投影)

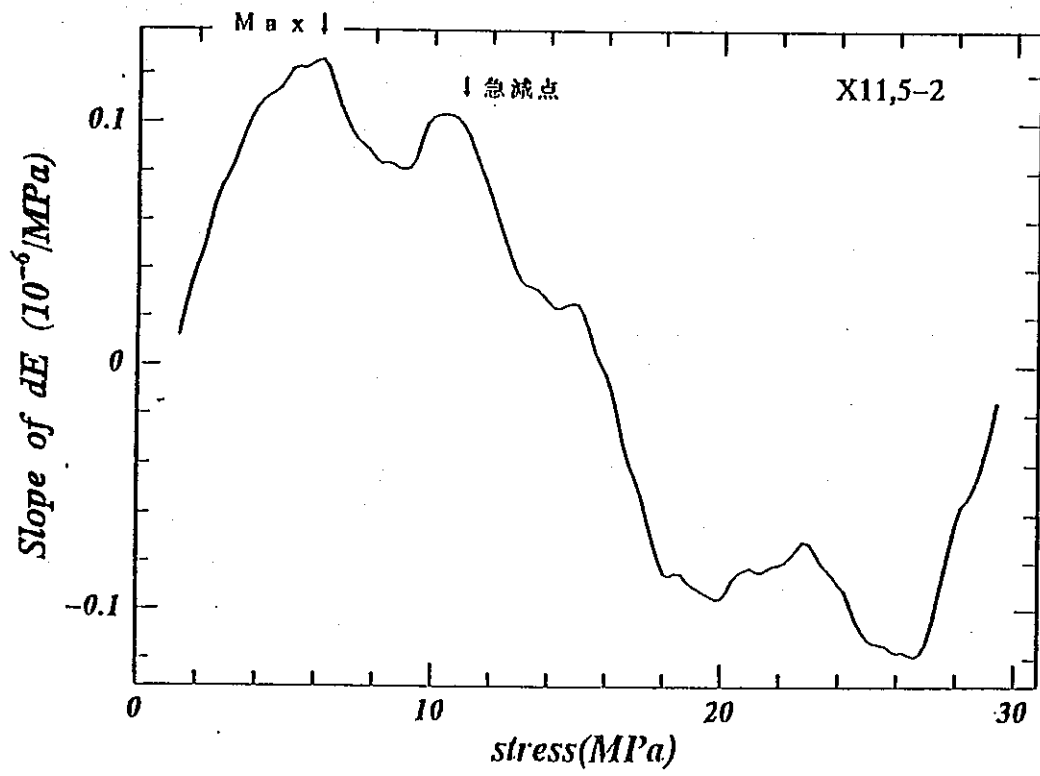


図5.28 差はずみ曲線の勾配の一例

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
ϵE	55.1	66.3	128.0	173.7
ϵN	93.2	75.8	118.6	102.8
ϵV	94.8	109.4	86.9	111.4
γEN	-3.1	-47.3	-18.2	-28.6
γNV	0.3	29.2	13.8	-27.1
γVE	37.9	61.1	63.0	9.5
$\sigma 1^*$	12.09	14.00	17.19	19.30
Dip/Azi	58.59/95.90	52.95/96.20	34.5/98.69	14.04/112.84
cos E	0.518	0.599	0.814	0.894
cos N	-0.054	-0.065	-0.124	-0.377
cos V	0.853	0.798	0.566	0.243
$\sigma 2^*$	10.89	11.95	14.73	16.12
Dip/Azi	4.0/-0.67	21.42/-25.11	16.24/-2.86	51.3/221.02
cos E	-0.012	-0.395	-0.048	-0.410
cos N	0.997	0.843	0.959	-0.472
cos V	0.070	0.365	0.280	0.780
$\sigma 3^*$	7.9	6.0	10.46	13.89
Dip/Azi	31.1/266.91	28.64/232.52	50.83/246.19	35.19/12.68
cos E	0.855	0.697	0.578	0.179
cos N	0.046	-0.534	0.255	0.797
cos V	-0.516	-0.479	-0.775	0.576

*ヤング率を61.0GPa、ポアソン比を0.26として計算

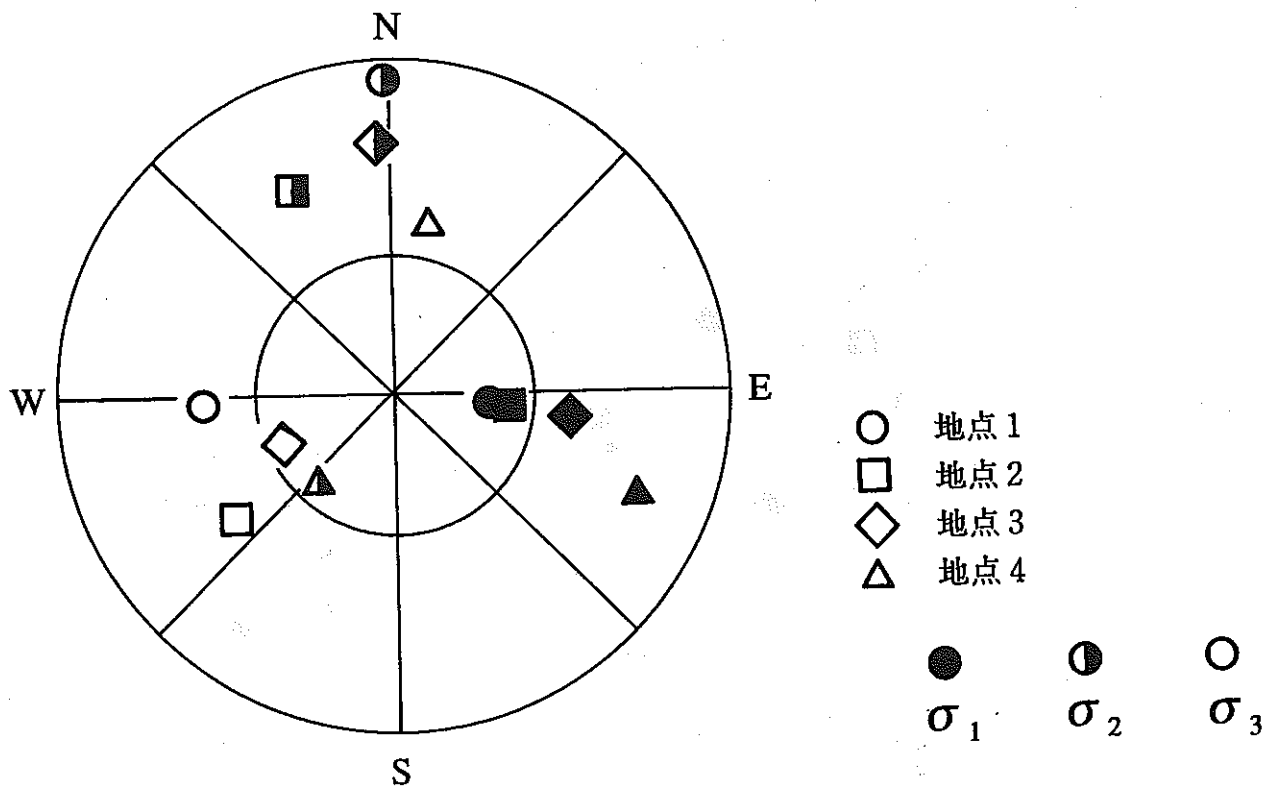


図5.29 $(d\epsilon/d\sigma)_{max}$ ひずみ法による結果 (上半球投影)

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
σE	5.86	13.76	6.34	16.10
σN	8.34	1.58	9.61	7.05
σV	9.80	13.16	9.29	12.94
τEN	-1.53	-3.78	4.30	-3.03
τNV	1.54	-0.78	-5.77	-3.73
τVE	2.89	1.41	4.82	2.66
$\sigma 1$	11.49	15.64	15.24	19.31
Dip/Azi	62.96/57.85	29.55/105.45	45.82/175.69	31.95/114.48
cos E	0.390	0.838	0.052	0.772
cos N	0.245	-0.232	-0.695	-0.352
cos V	0.888	0.493	0.717	0.529
$\sigma 2$	9.06	12.37	11.59	11.80
Dip/Azi	2.4/152.50	60.43/-72.20	24.26/58.06	49.58/251.56
cos E	-0.461	-0.470	0.773	-0.615
cos N	0.886	0.151	0.482	-0.205
cos V	-0.042	0.870	0.411	0.761
$\sigma 3$	3.45	0.50	-1.58	5.00
Dip/Azi	27.26/243.74	1.01/196.02	34.26/-49.82	22.01/9.89
cos E	0.797	0.276	0.631	0.159
cos N	0.393	0.961	-0.533	0.913
cos V	-0.458	-0.018	-0.563	0.375

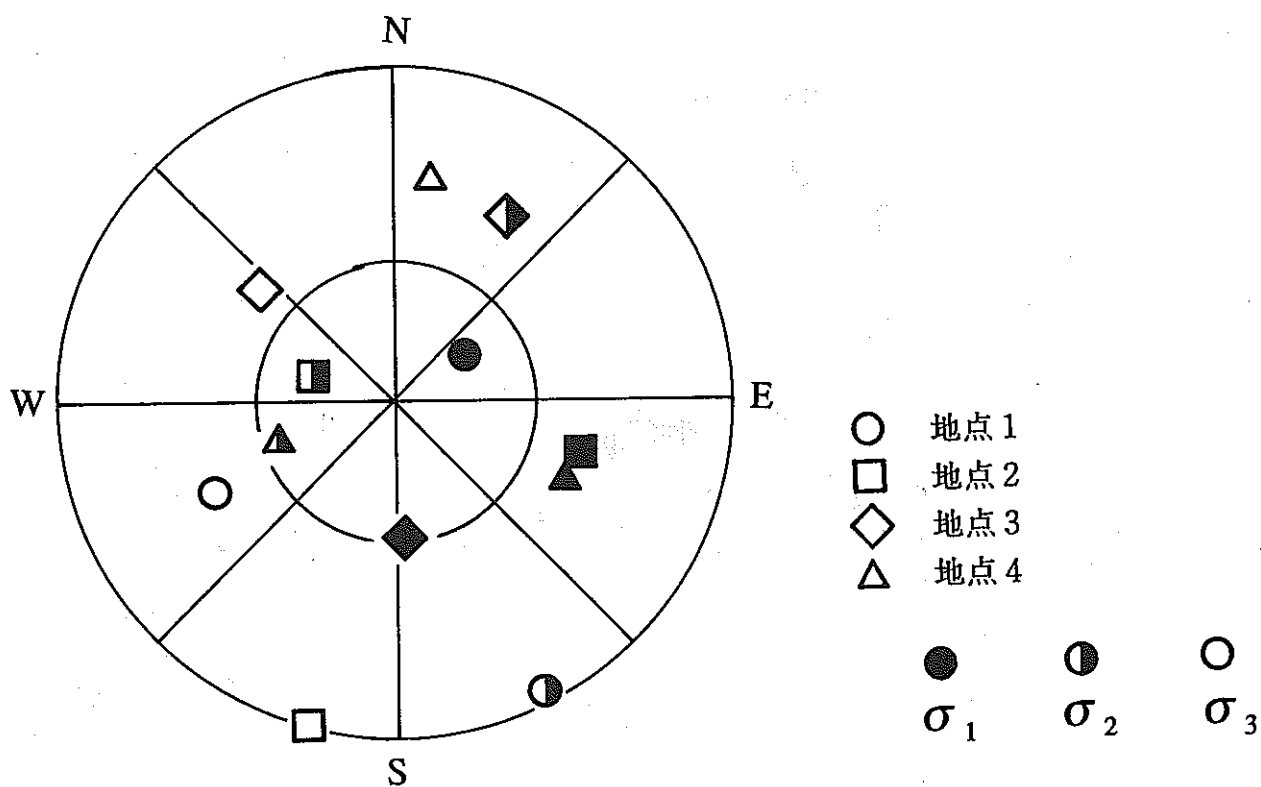


図5.30 急減点法による結果 (上半球投影)

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
ϵE	111.0	189.3	95.1	175.5
ϵN	139.1	85.1	181	131.7
ϵV	137.9	201.7	166.9	193.9
γEN	-55.2	-69.9	41.8	-35.6
γNV	20.7	17.2	-91.5	-26.8
γVE	31.3	71.3	57.1	10.7
$\sigma 1^*$	19.05	25.77	24.50	23.72
Dip/Azi	5.33/140.15	41.27/105.96	43.94/175.54	45.57/129.19
cos E	0.638	0.723	0.056	0.543
cos N	-0.764	-0.207	-0.718	-0.442
cos V	0.093	0.660	0.694	0.714
$\sigma 2^*$	17.66	20.55	19.30	21.59
Dip/Azi	65.7/38.22	43.56/-40.63	27.2/55.85	41.67/-75.64
cos E	0.255	-0.472	0.736	-0.724
cos N	0.323	0.550	0.499	0.185
cos V	0.911	0.689	0.457	0.665
$\sigma 3^*$	12.73	14.18	12.48	18.34
Dip/Azi	23.63/232.50	17.45/211.98	33.81/-54.27	12.69/25.92
cos E	0.727	0.505	0.675	0.426
cos N	0.558	0.809	-0.485	0.877
cos V	-0.401	-0.300	-0.556	0.220

*ヤング率を61.0GPa、ポアソン比を0.26として計算

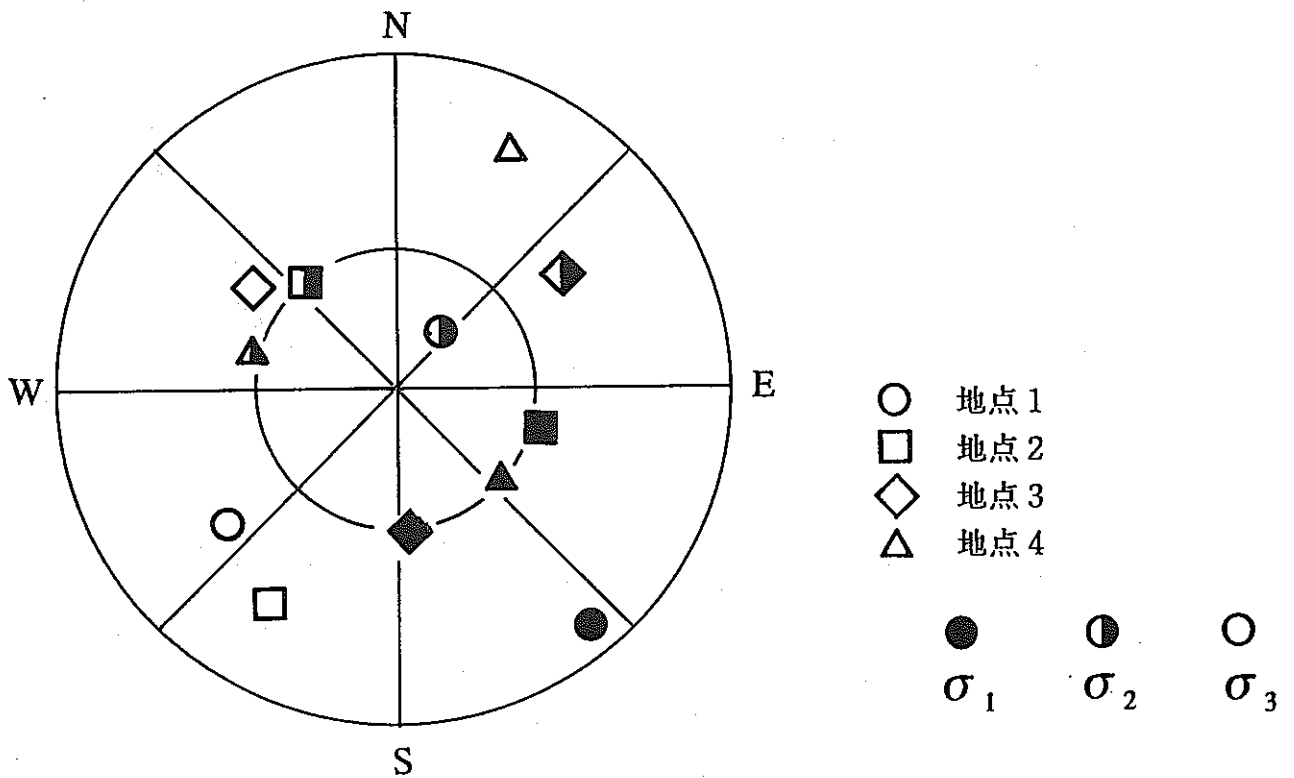


図5.31 急減点ひずみ法による結果 (上半球投影)

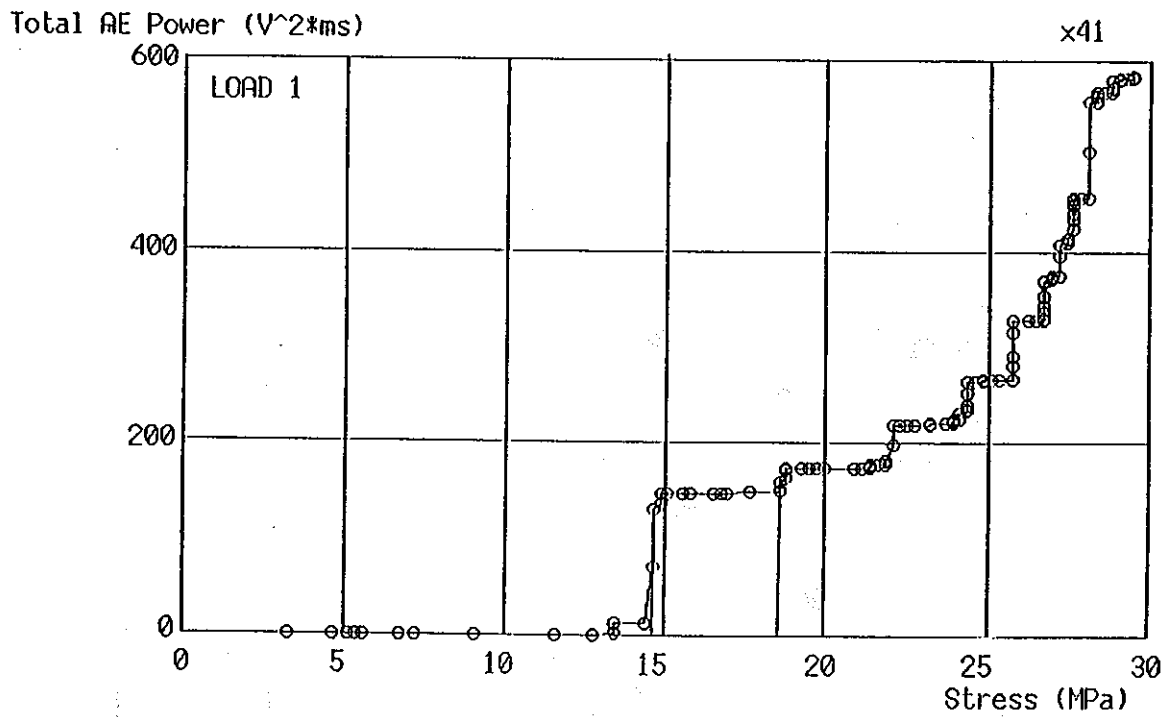
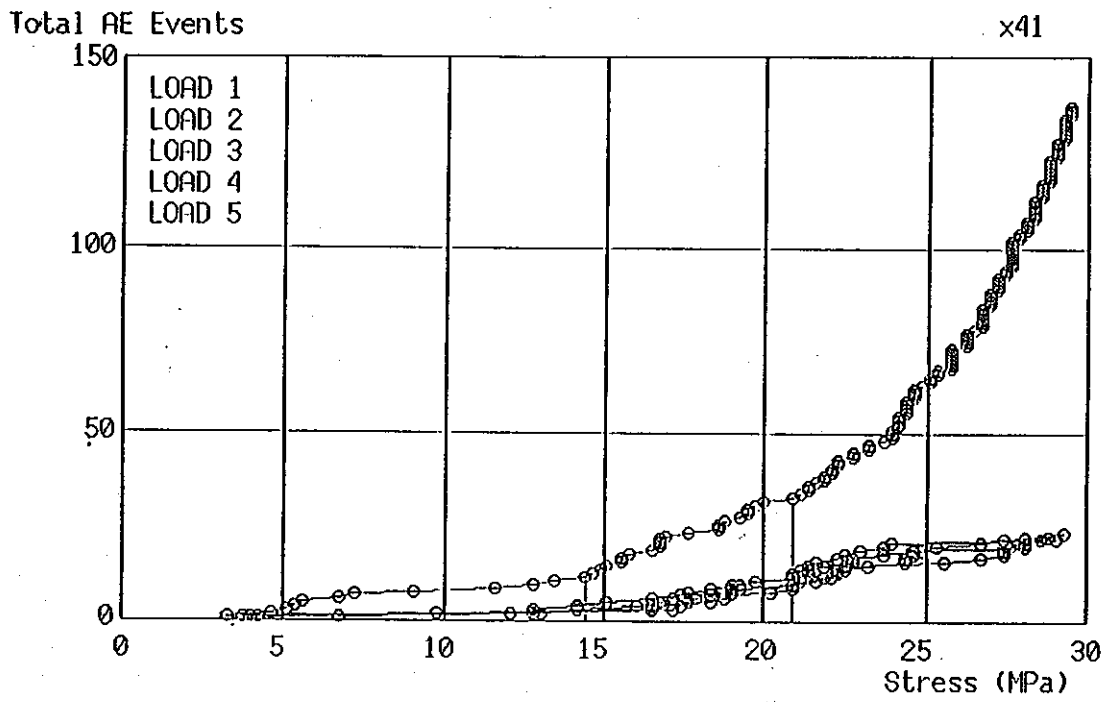


図5.32 AE法計測結果の一例（上：イベント累積数、下：AEエネルギー累積）

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
σE	10.27	9.99	13.70	16.8
σN	13.11	8.89	11.80	14.14
σV	16.53	10.41	19.33	14.63
τEN	-1.51	1.29	3.82	-1.96
τNV	-5.11	-3.26	0.02	-4.26
τVE	0.74	5.27	-5.62	-3.81
$\sigma 1$	20.43	15.82	23.17	19.98
Dip/Azi	52.83/166.11	48.31/110.71	54.18/251.62	44.18/246.26
cos E	0.145	0.622	-0.555	-0.656
cos N	-0.587	-0.235	0.185	-0.288
cos V	0.797	0.747	0.811	0.697
$\sigma 2$	10.58	10.35	14.09	17.40
Dip/Azi	25.44/-65.05	9.76/211.84	28.67/30.86	16.16/139.90
cos E	-0.819	0.520	0.450	-0.618
cos N	0.381	0.837	0.753	0.734
cos V	0.43	-0.170	0.480	-0.278
$\sigma 3$	8.89	3.11	7.56	8.18
Dip/Azi	25.15/37.86	40.02/-49.85	19.59/132.08	41.37/35.12
cos E	0.555	0.585	0.699	0.432
cos N	0.715	-0.494	0.631	0.614
cos V	0.425	-0.643	0.335	0.661

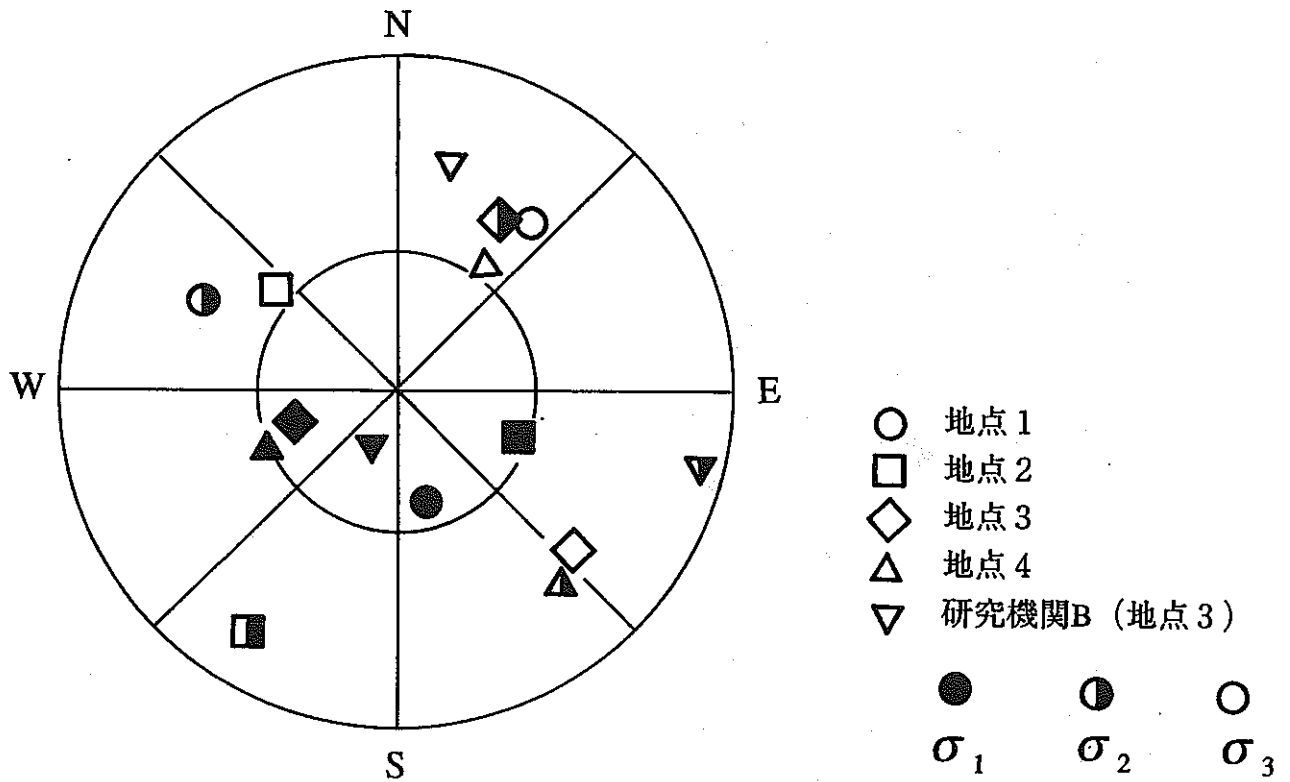


図5.33 AE法（従来法）による結果（上半球投影）

	9.25 m	13.9 m	16.8 m	19.1 m
ϵE	176.4	138.5	191.8	247.7
ϵN	220.1	172.3	224.4	263.1
ϵV	216.5	168.3	314.8	222.1
γEN	-22.4	5.2	25.2	12.6
γNV	-86.4	-42.6	3.7	-63.4
γVE	7.0	130.2	-90.7	-53.3
$\sigma 1^*$	31.0	26.67	21.81	28.22
Dip/Azi	43.16/167.55	48.02/110.91	61.47/262.46	36.98/216.61
cos E	0.517	0.625	-0.743	-0.477
cos N	-0.712	-0.239	-0.063	-0.641
cos V	0.684	0.743	0.879	0.601
$\sigma 2^*$	24.57	20.89	30.33	30.42
Dip/Azi	15.99/-86.86	2.45/18.18	10.34/12.08	3.49/-50.76
cos E	-0.960	0.312	0.206	-0.773
cos N	0.053	0.949	0.962	0.631
cos V	0.276	0.043	0.180	0.061
$\sigma 3^*$	22.32	13.3	25.8	26.94
Dip/Azi	42.49/18.36	41.88/-74.01	26.27/107.24	52.8/43.85
cos E	0.232	0.716	0.856	0.419
cos N	0.700	-0.205	-0.266	0.436
cos V	0.675	-0.668	0.443	0.797

*ヤング率を61.0GPa、ポアソン比を0.26として計算

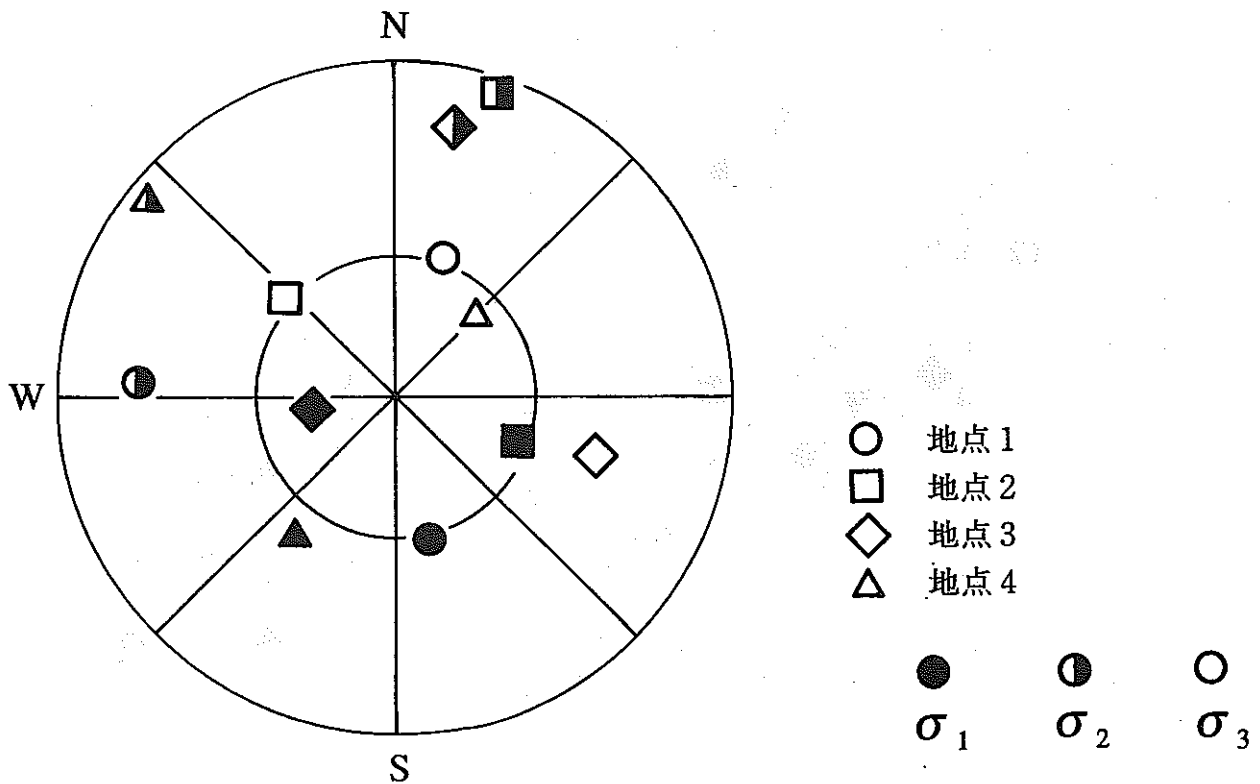


図5.34 AE法（ひずみ法）による結果（上半球投影）

5.4 円錐孔底ひずみ法とコア法との比較

円錐孔底ひずみ法による計測は坑壁から1 m～20 mの範囲で18ヶ所で行われたが、コア法による地圧計測結果との比較のために9～20 mにおける10測点についてを対象とする。なお、比較は最大主応力の方位と傾斜角についてのみ行った。

ASRの結果との比較を図5.35に示す。地点1, 2では方位、傾斜角の評価結果に隔たりがあるが、奥に行くにつれて近い値となり、地点3, 4ではかなり良く一致している。

DSCA法の結果との比較を図5.36に示す。、地点1, 2でPSHA法が円錐孔底ひずみ法の結果と良い相関を示しており、地点4では従来法による解析結果が円錐孔底ひずみ法と一致している。地点1, 2では方位については調和的である。

DRA法の結果との比較を図5.37に示す。方位に関しては、かなりの差が認められるが、その中で差ひずみ曲線の最大値から地圧を推定する方法($\Delta \varepsilon_{max}$ 法)が円錐孔底ひずみ法と調和的である。

AE法の結果との比較を図5.38に示す。AE法の計測結果は円錐孔底ひずみ法の結果との整合性は良くなかった。

全体的に、コアを用いた方法と円錐孔底ひずみ法との結果はかなり異なっている。しかし、その中でもASR法とPSHA法は比較的良く一致しているようである。DSCA法(従来法)でもある程度一致した結果が得られた。DRA法、AE法では円錐孔底ひずみ法との間に大きな差がみられる。また、他の研究機関による結果も、同じ方法でありながら研究機関が異なると大きな相違が生じていた。このような結果が得られたのは、様々な地質的な条件による影響、計測を開始するまでの時間の影響なども考えられるが、総じて、コア法の抱える現状、すなわち、それらの方法がまだ成熟していないこと、まだ多くの基礎的研究、特にその基本原理の科学的理解に関する研究が欠けているからではないかと考えられる。

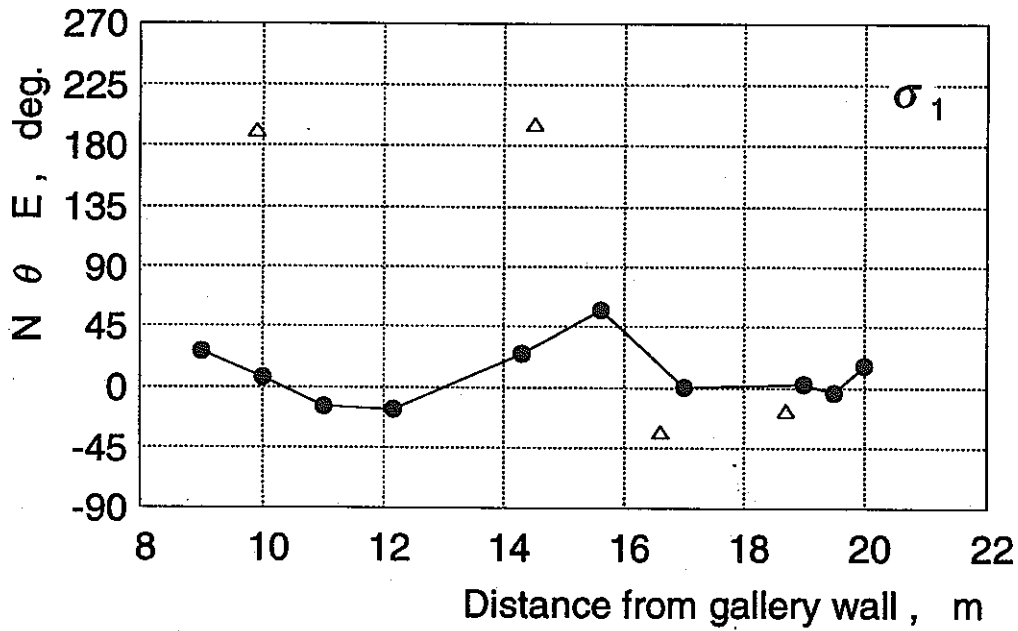
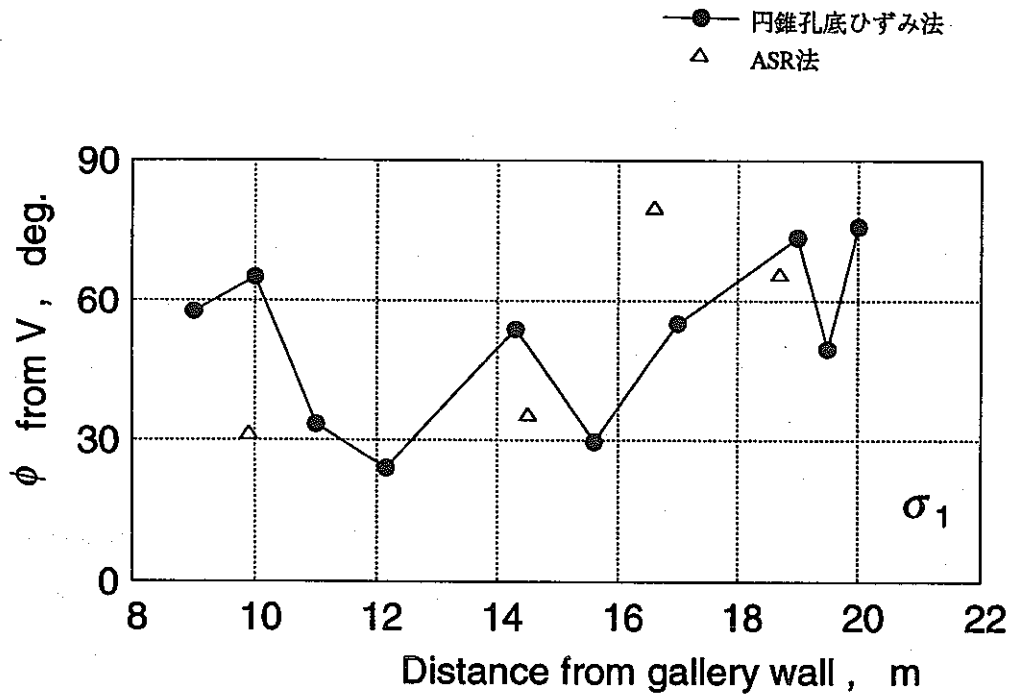


図5.35 ASR法と円錐孔底ひずみ法による結果の比較 (最大主応力)

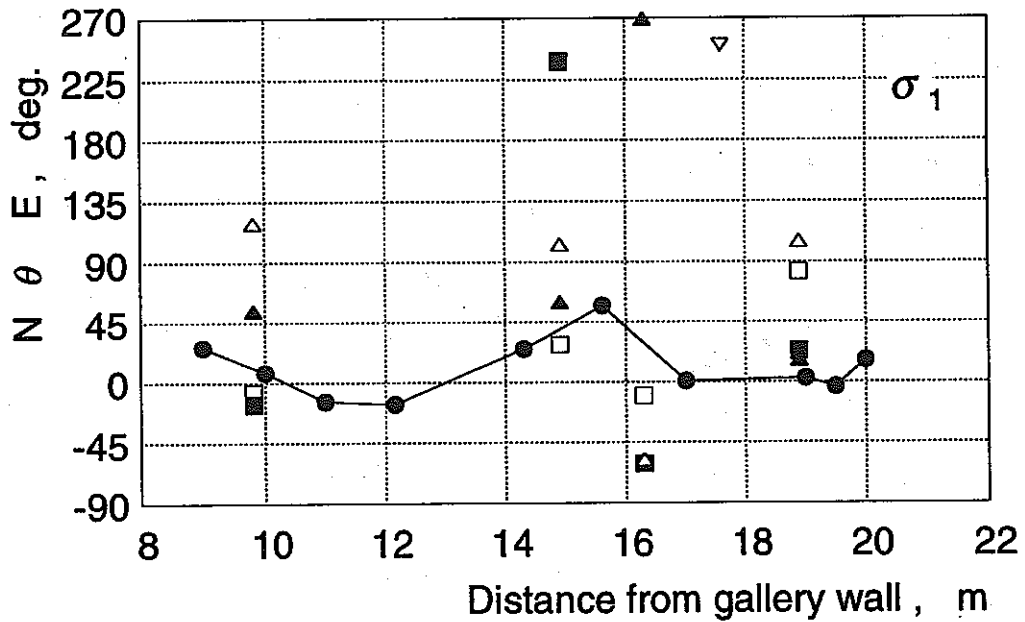
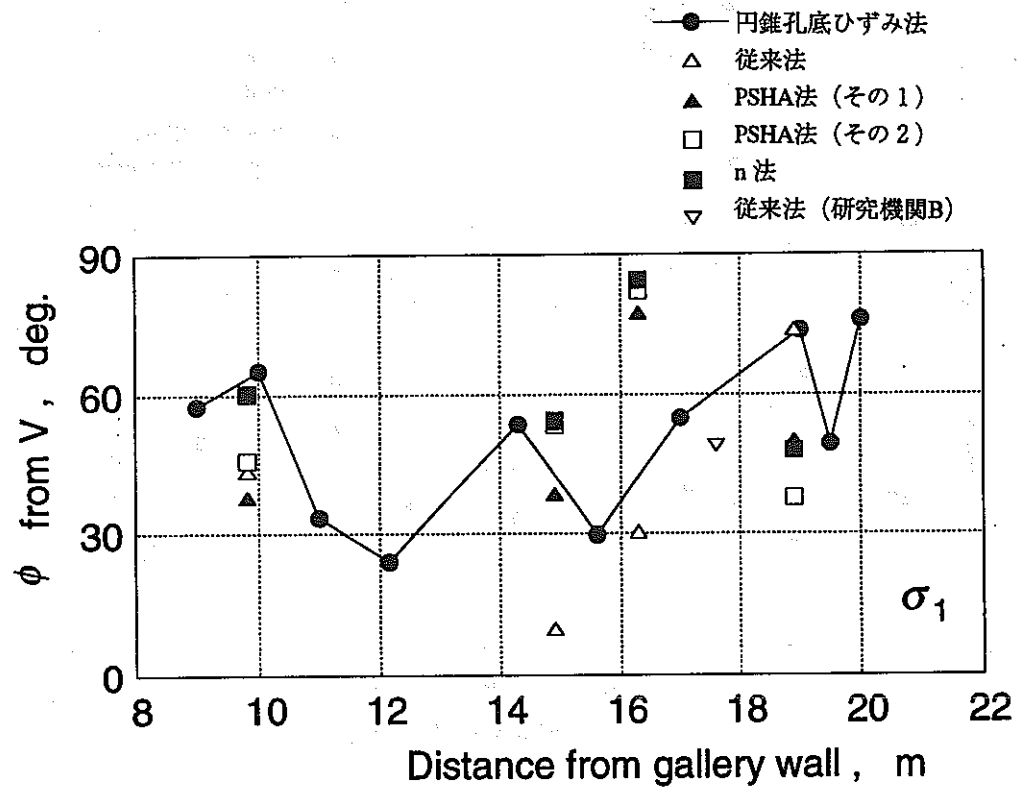


図5.36 DSCA法と円錐孔底ひずみ法による結果の比較 (最大主応力)

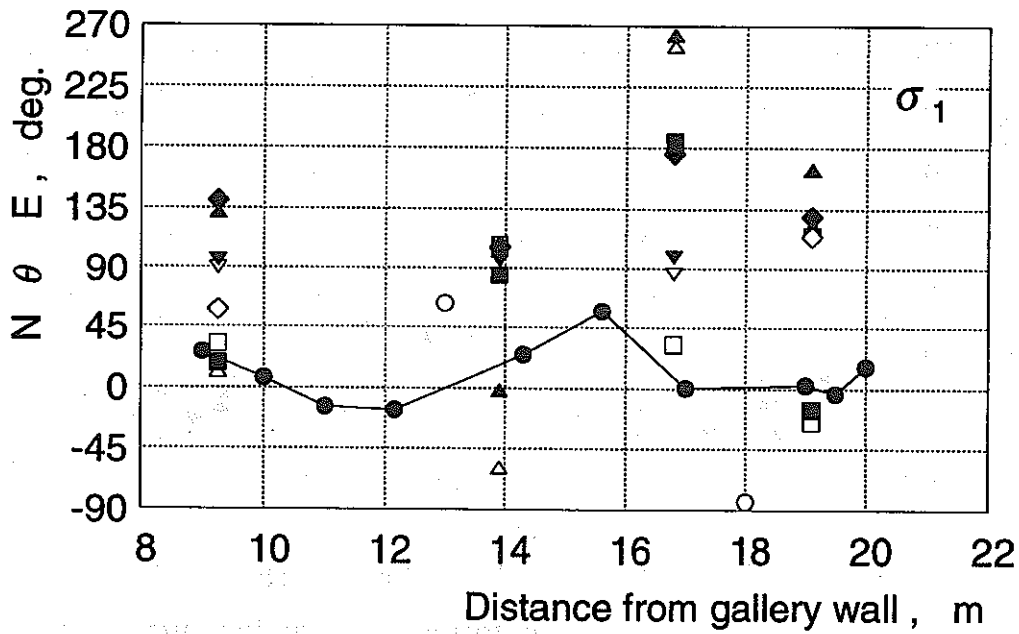
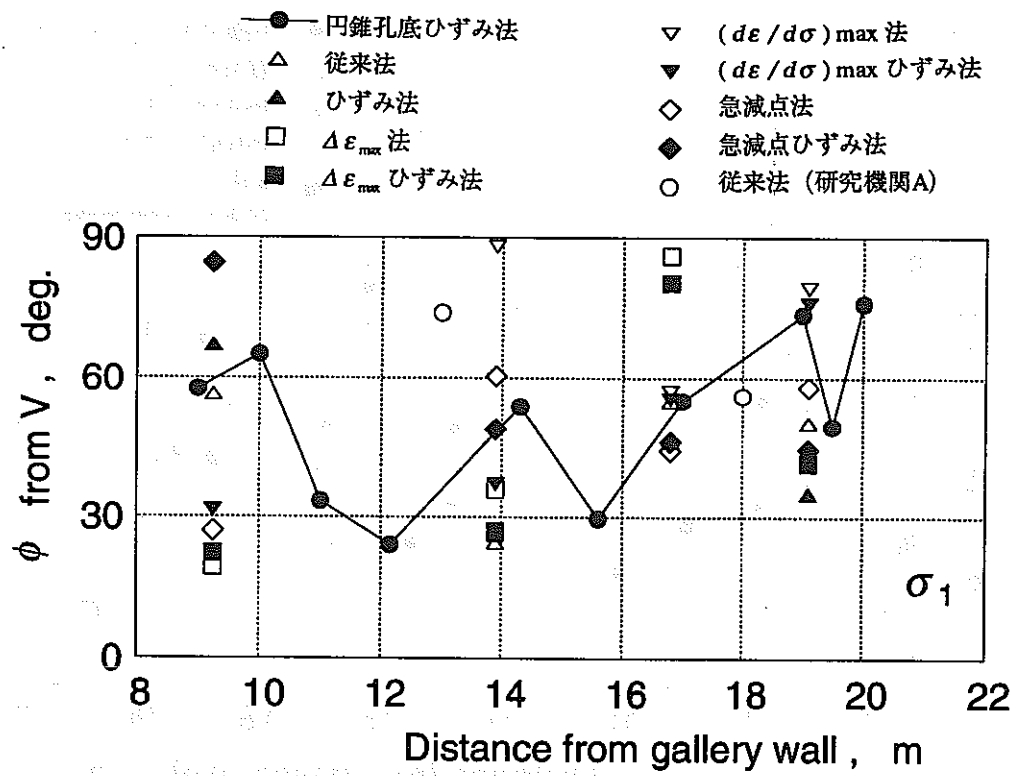


図5.37 DRA法と円錐孔底ひずみ法による結果の比較 (最大主応力)

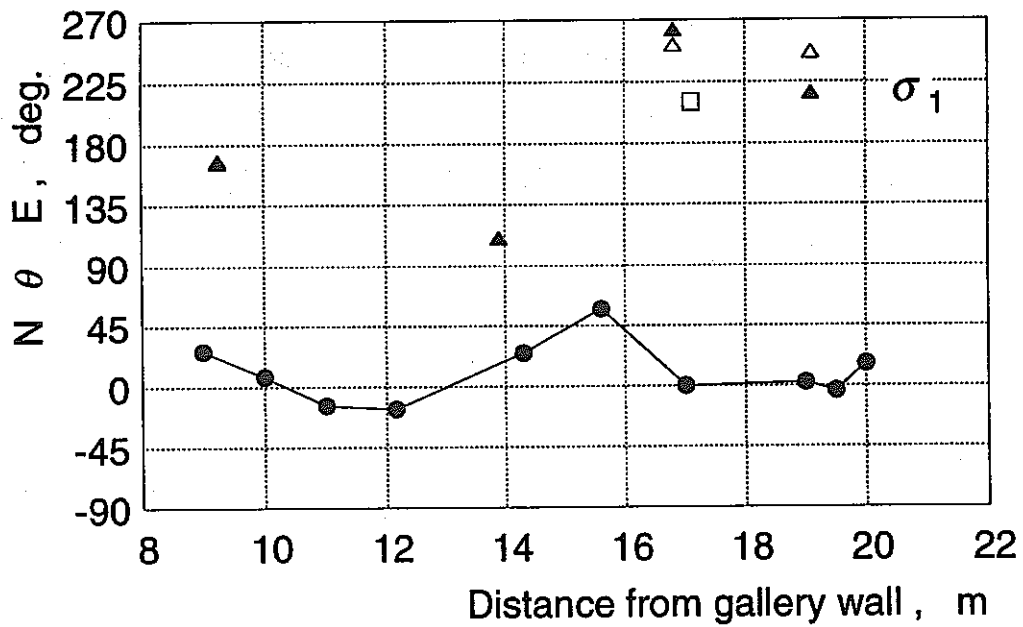
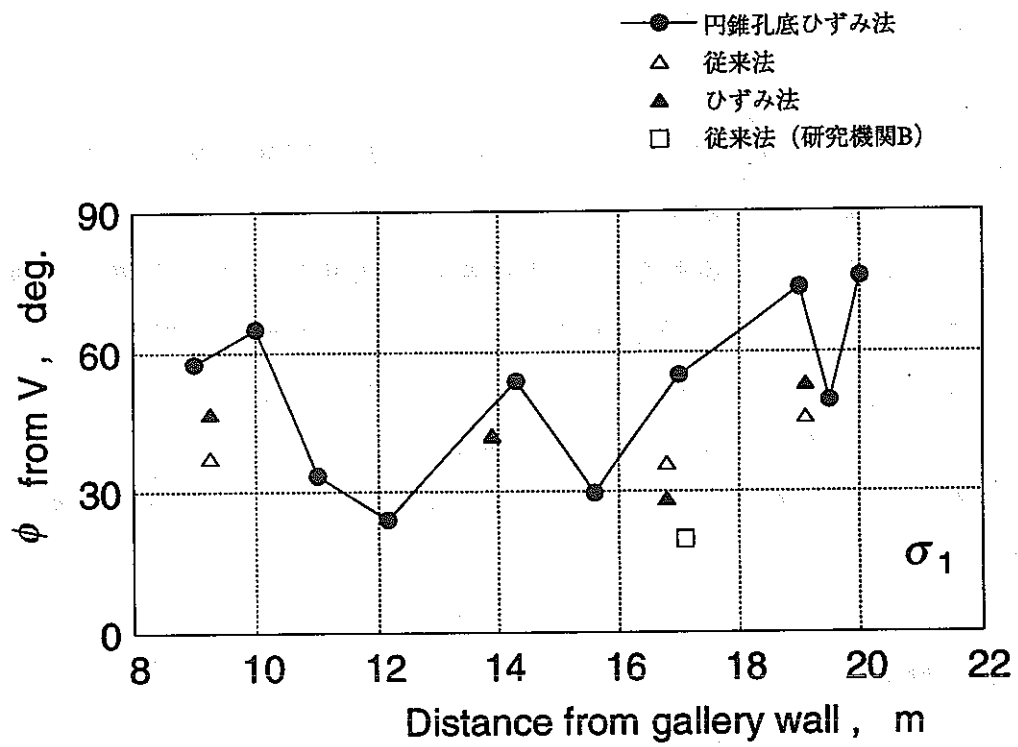


図5.38 AB法と円錐孔底ひずみ法による結果の比較 (最大主応力)

5.5 まとめ

釜石鉱山250mレベル石灰岩に対して行った16素子円錐孔底ひずみ法とコアを用いた方法による地圧計測結果から以下のことが示された。

円錐孔底ひずみ法による系統的な計測結果はその再現性から信頼性の高いものと考えられた。また、今回の測定結果は、釜石鉱山地域の巨視的な応力場を反映した結果であると考えられた。コア法による結果は、方法によってかなりの相違が認められた。円錐孔底ひずみ法と4種類のコア法による測定結果を比較した結果、全体的にその整合性は良くないが、ASR法およびPSHA法に関しては比較的の良い一致を示した。

5.6 今後の課題

本研究では、ボーリングコアを用いた地圧計測法の高信頼性化を目的として、釜石鉱山における地圧評価という応用的研究を行って来ている。

今後は、今回の石灰岩に対する結果と動燃により昨年度行われた花崗閃緑岩に対する研究について総合的に評価する。また、コア法に関する研究としては、原位置計測は行わず、むしろその基本原理に関する基礎的研究を行う。さらに、新たな研究テーマとして、「深部地圧下の閉鎖き裂の透水性評価に関する基礎的研究」を考えている。