

# 花崗岩における岩盤工学に関する調査試験研究 (その3)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1994年3月

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
ⓧ	J1559 94-001	1994, 5, 12

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。注)

〒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3）

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、岩盤物性と地殻応用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の岩盤工学の基礎的研究、すなわち岩盤応力、岩盤の長期安定性および岩盤割れ目の透水性の変化に関する、原位置（釜石原位置試験場）や室内での試験に基づく基礎的・理論的研究を行うものである。

「岩盤内割れ目の透水性及び止水に関する研究」では、従来の試験で、割れ目に地下水が充満している場合、あるいは流動している場合、注入材が注入されて水と遭遇すると設計比（水セメント比）が大きく変化し設計通りの固化が行われず、信頼性に欠ける点が指摘された。そこで、平成5年度は充填材（グラウト材）の選定・改質をはかる実験を行ない、新しい固化材の効果を確認した。

「岩盤の疲労特性に関する実験的研究」では、繰り返し載荷試験、すなわち疲労試験における岩石の力学的特性の変動を把握するとともに、岩石が繰り返し載荷により受けるダメージを弾性波の伝播速度により定量化することを試みた。

「坑道周辺岩盤の力学的状況の精密調査」では、坑道周辺の岩盤内の地圧の分布や緩みの状態等を精密に把握する方法の確立を目的として、かぶりが600mある250mレベル坑道の日峰分岐付近において、坑道周辺の地圧分布とき裂深さに関する測定を実施した。

「単一不連続面のShear-Flow Coupling 特性試験」では、人工的不連続面にある一定の条件の下で履歴を与えたサンプルを試験体とみなし、Shear-Flow Coupling 実験を行った。そして、その諸特性を調べることによって現場の岩盤不連続面の応力-変形の履歴、及び各要素の影響について基礎的に検討した。

「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」では、実験室におけるガラスモデルを用いた基礎的研究ならびに釜石鉾山250mレベルの石灰岩コアについて変位測定装置を用いた非弾性変位回復に基づく地圧計測を行い、高信頼性三次元地圧計測法の開発の研究を進めた。

---

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 : 050D0245

事業団担当部課および担当者 : 環境技術開発推進本部 地層科学研究グループ  
主幹 鶴巻 宏一

## 花崗岩における岩盤工学に関する調査試験研究 (その3)

まえがき	1
1. 岩盤内割れ目の透水性および止水に関する研究	2
1. 1 研究の経過	
1. 2 注入材	
1. 3 注入試験	
1. 3. 1 注入試験孔	
1. 3. 2 ルジオンテスト	
1. 3. 3 注入試験結果	
1. 4 まとめ	
1. 5 今後の課題	
2. 岩石の疲労特性に関する研究	27
2. 1 はじめに	
2. 2 岩石試料ならびに試験片	
2. 3 試験方法	
2. 4 試験結果	
2. 5 まとめ	
2. 6 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 地下空洞周辺の地圧分布の測定	
3. 2. 1 測定の概要	
3. 2. 2 測定結果	
3. 2. 3 地圧の測定結果に関する若干の解釈	
3. 3 き裂深さの測定	
3. 3. 1 初動極性の変化を利用した方法の計測手順	
3. 3. 2 伝播時間を利用した方法の計測手順	
3. 3. 4 石灰岩中の坑道壁面における計測結果	
3. 3. 5 き裂の測定に関する考察	
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	77
4. 1 Shear-Flow Coupling 特性に及ぼすせん断履歴の影響に についての実験概要	
4. 1. 1 実験の目的	
4. 1. 2 実験の内容	
4. 2 Shear-Flow Coupling 実験方法の概要	
4. 2. 1 Shear-Flow Coupling 実験装置	

- 4. 2. 2 試験体の作成
  - 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. 3 Case 1の実験結果および考察
  - 4. 4 Case 2の実験結果および考察
  - 4. 5 Case 3の実験結果および考察
  - 4. 6 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…………… 127
- 5. 1 はじめに
  - 5. 2 閉鎖き裂の力学的挙動に関する基礎的研究
    - 5. 2. 1 ガラス板試験片
    - 5. 2. 2 試験装置及び測定方法
    - 5. 2. 3 実験結果および考察
  - 5. 3 非弾性変位回復に基づいた250mレベル石灰石の地圧評価
    - 5. 3. 1 測定位置
    - 5. 3. 2 測定装置および測定方法
    - 5. 3. 3 測定結果
  - 5. 4 まとめ
  - 5. 5 今後の課題

## まえがき

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の岩盤工学の基礎的研究、すなわち岩盤応力、岩盤の長期安定性および岩盤割れ目の透水性の変化に関する、原位置（釜石原位置試験場）や室内での試験に基づく、基礎的・理論的研究を行うものである。

本研究は委員会形式により実施された。委員会の構成は以下の通りである。

委員長	岩手大学	工学部資源開発工学科	教授	関本 義則
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

## 1. 岩盤内割れ目の透水性および止水に関する研究

### 1-1. 研究の経過

昨年度までに、釜石鉱山現地試験場において、地下に空間を構築した場合に岩盤内に発達する割れ目を流動する地下水に対して、一定範囲内を止水するとともに、その範囲外の岩盤内は従来通りの地下水の流動にまかせて、自然状態の変化を最小に止める目的で、グラウトに関連した実験を行ってきた。

その結果、われわれの行ってきた無機系の微粒子セメントを主材とする瞬結タイプの注入材を使用することで、ほぼその目的を達成することができた。しかし、その間の試験で割れ目に地下水が充満している場合、あるいは流動している場合には、注入材が注入されて水と遭遇すると設計比（水セメント比）が大きく変化し、設計通りの固化が行われず、材料が未固結のままとなったり、固結しても低い圧縮強度しか発揮しない場合があって、信頼性に欠ける点があった。

そこで、この障害を避けるために、試験孔内に基材と固化材をツーショットで注入するのではなく、予め混合槽で注入材を混和・熟成し、それをワンショットで試験孔に注入する方式に変えることとした。そのためには、これまでのような秒オーダーの固化時間では、注入ポンプのシリンダー内あるいは注入ロッドの中で固化してしまう恐れがあるので、30分程度の長い固化時間の注入材を選択する必要が生じた。

### 1-2. 注入材

注入材の基材としては、従来通り微粒子セメント（以下MC）を用い、固化材として比較的固化時間の長いものを選択する方法を取った。その結果、それ自体の固結時間の調節が可能で、しかも1～2時間材令の強度が $10.20 \text{ kg/cm}^2$ に達する超速硬性セメントのジェットセメント（以下JetC）が最適であるということになった。このJetCには、表-1に示すように、速硬性を生み出す成分鉱物組成アルミン酸カルシウムが含まれており、普通セメントでは $C_3A$ の形で存在するが、このセメント中では活性アルミン酸カルシウム（ $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ ）として存在し、水和においてこの成分が関与するのが、これまでのセメントと異なる点である。

そこで、基材の微粒子セメントにこの Jet C を固化材として用いたとき、固化時間の調整が可能かどうか、室内実験を行った。表-2 は、その結果を表したもので、固化時間を 20~150 min の範囲で調整できることが確認できた。また、固化した注入材の一軸圧縮強度は、表-3 に示すように、基材 + Jet C の水セメント比（以下 W/C）167 % では、従来より高い強度が得られ、W/C が 300% でもほぼ同じ強度が得られた。さらに、水中に吐出した場合にも十分固化することが確認されたので、現場の作業時間等を考慮し、固化時間を 30 min に設計、この注入材を用いて現地で注入試験を実施することとした。

### 1-3. 注入試験

#### 1-3-1. 注入試験孔

釜石鉾山現地試験場 550 mL NW の従前からの試験位置に、図-1 に示すように、K 孔を穿孔した。この孔は、孔径 76mm $\phi$ 、孔長 10 m で、坑道方向に 45度の角度で、これまでの注入孔および観測孔と平行に穿孔され、われわれの推定した湧水亀裂 I-1、I-2 および亀裂 I-3 を貫通している。

次に、試験孔の孔内状況をボアホールカメラによって観察した結果を図-2 に示す。カメラで確認できた湧水箇所は 4 箇所、図-3 の A は上部から、C、E は下部から湧水しているのがわかる。なお、この亀裂は、コアの観察結果と合わせて判断すると、I-1 の亀裂ではないかと推定される。

ボーリングコアの観察からは、図-4 のように、これまで実施した注入試験の際のグラウト材料が付着しているのが確認された。このことから、試験区域に発達する割れ目は相互に連絡していることが確実となった。そこで、従前の試験孔 D、E、I、J および今回の K 孔のボーリングコアの観察結果を一枚の図にまとめたものが図-5 である。この図の湧水箇所、注入材料の付着箇所から地下水の流路（みずみち）の推定を試みたが、合理的な結果を得ることはできず、結局割れ目の確認に止まった。

また、各孔の R Q D を求めた結果をまとめたものが図-6 であるが、坑道掘削時の影響により坑道近くの数値が落ちているのがわかる

#### 1-3-2. ルジオンテスト



注入試験孔K孔についてルジオンテストを行った結果が表-4である。結果をみると、一般にいわれる割れ目のない花崗岩の透水係数 $10^{-7}$ cm/secに対し、 $10^{-4}$ のオーダーを示し、試験対象の岩盤はかなり透水性が高い。また、図-2からもわかるとおり、湧水箇所ではルジオン値が低いことが認められる。

### 1-3-3. 注入試験結果

試験に際しては、止水効果を判断する目安として、湧水量とルジオン値を測定した。また、試験には一つの目的に一本の試験孔を使用するのが理想的であるが、経費的な問題もあり、10 mの孔を三分割してそれぞれの目的の試験を行った。

#### (1) 1st Stage

孔尻より 2.13 m の区間を使用し、止水を目的に最初に W/C 167% の注入材を 65.5ℓ 注入した。次に、開口幅の小さな割れ目を対象に W/C を 300% と流動性を大きくした注入材を追いかけて 165.1ℓ 注入した。

表-5 は、その間の実績を示したものであるが、結果的にこの区間の割れ目の湧水に対する止水の目的は達成され、孔の肉眼観察でもその状況は確認できた。このことは、ルジオン値が 19.8(Lu) から 9.2(Lu) に変わり、透水性が低下したことも証明された。なお、一回目の注入で全体の湧水量が約 5% 増加したが、この現象は、注入によって岩盤内の割れ目が閉塞されたために、この区域を流れていた地下水の流路（みずみち）が変わり、奥部の地下水がグラウトゾーンを迂回して流れ込んだものと解釈される。二回目の注入の結果、全体の湧水量は 4.98 ℓ/min となった。このことから、1st Stage 区間が止水されたことが認められる。

#### (2) 2nd Stage

続いて 2nd Stage の注入を行った。この区間は 1st Stage 端から 3.65 m の間でかなり割れ目の発達が見られる区間である。ここでは、基材と固化材を予め混合・熟成する方法に代えて、始めに基材だけを注入し、ついで固化材だけを注入し割れ目内で固化させる方法の効果を見ることを目的とした。

実際には、表-6 に示すように、一回目と二回目に流動性の高い注入材を送る

ことで小さな割れ目を充填を期待し、続く三回目の第一次でMCを注入、第二次に Jet C を注入した。しかし、その結果は区間での止水率は15%とあまり良好ではなかった。この原因としては、W/C 300%という薄いものを使用したために割れ目を充填する注入材の絶対量が不足したのではないかと思われる。

### (3) 3rd Stage

3rd Stage も 2nd Stageと同様に先にMCを注入する方法を取った。結果は表-7の通りで、Stage 区間の止水率は38%となった。したがって、本試験全体の止水率は65%となり、ルジオン値も4.8(Lu) から2.9(Lu) に低下した。

試験終了後に、ホースから水を流して孔内を洗い、まだ完全に固結しない充填材を流出させて湧水箇所を肉眼で観察したところ、手前の2箇所から湧水がみられた。このことから、2nd および 3rd Stageの注入が不完全であったことがわかった。また、3rd Stage の注入中グラウト材の漏出がJおよびE孔で観察された。そこで、この漏出箇所と予想した亀裂図と照合した結果、図-7の通り、よく一致した。そして、注入量が少ない時点で、先にE孔から漏出していることから、この箇所の亀裂幅はJ孔のそれよりも大きいと推定できる。もし、この推定が正しいならば、注入材は亀裂幅の大きい方から先に充填していることになる。

### (4) 確認孔

注入試験終了後1か月経ってから、試験孔に平行に2m離して確認孔を穿孔した。コアに注入材の付着の有無を調べた結果、7mから手前のほとんどの割れ目から付着が確認できたのに対し、7m以上奥の割れ目では2箇所であった(図-8参照)。この理由は、1st Stage で100%の止水が行われた結果、割れ目内の流路(みずみち)が坑道壁側になり、その後2ndから3rd StageでW/Cの高い流動性の良い注入材を使用したためと、優勢な割れ目に対し注入材が先に流入したためと考えられる。

## 1-4. まとめ

(1) 従前の弱アルカリ性シリカゾルの固化材(硬化剤)に代わって、新しい固化材のジェットセメントの効果を確認できた。

- (2) 1st Stage における試験で止水率 100%が達成できた。その理由として、水セメント比の低いものを（濃いもの）使用したこと、先に大きい割れ目を充填してから、小さな割れ目を充填する方法を取ったこと、が挙げられる。
- (3) ルジオン値の測定結果から、割れ目のグラウトによって岩盤の透水性が評価できることがわかった。

## 1-5. 今後の課題

### (1) 流動性を固化寸前まで維持できる注入材の開発

岩盤内の割れ目を伝って奥部に流入していく注入材には、濃度が高くしかも流動性が大きい性質が要求される。そして、目的とする範囲に広がったとき直ちに固化し、固化した注入材は周囲の岩盤と同程度またはそれ以上の強度を発揮できることが望ましい。

この要求を満たす材料として、われわれは、微粒子セメントを基材に選んだ。そして、固化を急速に進めるために、ジェットセメントを加え、また、流動性を増すために、水セメント比を大きく設定した上で、さらに分散剤を投入して早期の凝固、沈降を防いでいる。しかしながら、注入材料の濃度と流動性をはじめ相反する性質があって、必ずしも満足する状態ではない。

今後は次の点に留意した実験を進め、目的とする一定範囲以内での高強度の固結が期待できる注入法の確立を目指したい。

- ① 注入材の高濃度（水セメント比）化と流動性を保持のための添加剤の開発
- ② ワンショット注入のための事前混和による熟成と適正固結時間の決定
- ③ 固結後の注入材強度の向上

### (2) 岩盤性状の正確な把握方法の確立

岩盤内の割れ目の分布を性格に知ることは、グラウトにとっても重要であるが、現在までの研究では、全くといって良いほど掌握することができない。とくに、流水経路（みずみち）は見当もつかない状況である。しかし、その経路を通り注入材は優先して流動しているので、実技上少しでも追及する必要がある。

### (3) 注入用ポンプの開発

われわれは、本実験では吐出量 0.2~5 l /min、吐出圧力 0.2~5 kg/ cm<sup>2</sup> で二連装の自動記録・自動制御ポンプを使用している。注入は、固結時間の正確さを期するため、一定圧力、一定流量で行うことが必要である。現使用機はその点では問題はないが、ユニット数が多くスペースを取るのでコンパクト化が要求される。

表-1 ジェットセメント, アロフィクスMC, 普通セメントの化学成分

成分 セメント の種類	化学成分 (%)										鉱物組成 (%)				
	ig.loss	insol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	Total	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>11</sub> A <sub>7</sub> CaF <sub>2</sub>	C <sub>4</sub> AF
ジェットセメント	0.6	0.1	13.8	11.4	1.5	59.1	0.9	10.2	0.7	98.3	50.7	1.7	-	20.6	4.7
アロフィクスMC	0.3	0.1	29.0	13.2	1.2	49.2	5.6	1.2	---	99.8	49.8	20.1	10.5	----	10.1
普通セメント	0.6	0.1	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	1.6	0.7	100.0	52.7	23.9	8.2	----	9.7

\*) 注意 C=CaO A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> S=SiO<sub>2</sub> F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> R<sub>2</sub>O=Na<sub>2</sub>O+0.658K<sub>2</sub>O

表-2 新しい調整剤(硬化剤)におけるゲル化及び硬化タイム

養成方法	AMC (g)	JET (g)	水 (g)	pH	水セメント比 (%)	ゲルタイム (h,m,s)	硬化時間 (h,m,s)
カップ	90	10	100	7.3	100	1° 24' 04"	1° 36' 08"
カップ	90	10	100	7.3	100	1° 18' 25"	1° 23' 50"
攪拌	90	10	200	7.3	200	2° 21' 45"	2° 38' 46"
攪拌	90	10	300	7.3	300	-----	3時間で硬化せず
カップ	80	20	100	7.3	100	56' 26"	1° 09' 59"
カップ	70	30	100	7.3	100	35' 26"	42' 07"
カップ	70	30	100	7.3	100	37' 43"	41' 19"
カップ	60	40	100	7.3	100	25' 01"	30' 22"
カップ	100	50	150	7.3	100	19' 10"	22' 51"
攪拌	100	50	300	7.3	200	17' 16"	59' 42"
攪拌	100	50	450	7.3	300	45' 38"	*1° 09' 59"

\* ) 注意 この値は、完全な硬化ではなく水状の状態がなくなった値である。

表-3 注入材の一軸圧縮強度結果

NO.		1	2	3
養成方法		静 止	静 止	静 止
グラウト名		MC+J 167%	MC+J 300%	MC+ SS
配 合 比	AMC (g)	200	200	/
	JET (g)	100	100	
	水 (g)	500	900	
水セメント比		167%	300%	139%
ゲル化タイム		30分	46分	15秒
圧縮強さ  (kg/cm <sup>2</sup> )	1日目	1.6	0.8	6.4
	4日目	34.3	12.0	14.2
	7日目	40.6	15.9	17.4
	14日目	47.6	20.5	20.0
	28日目	55.2	27.4	30.2

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{AMC} + \text{JET (固結材)}} \times 100 (\%)$$

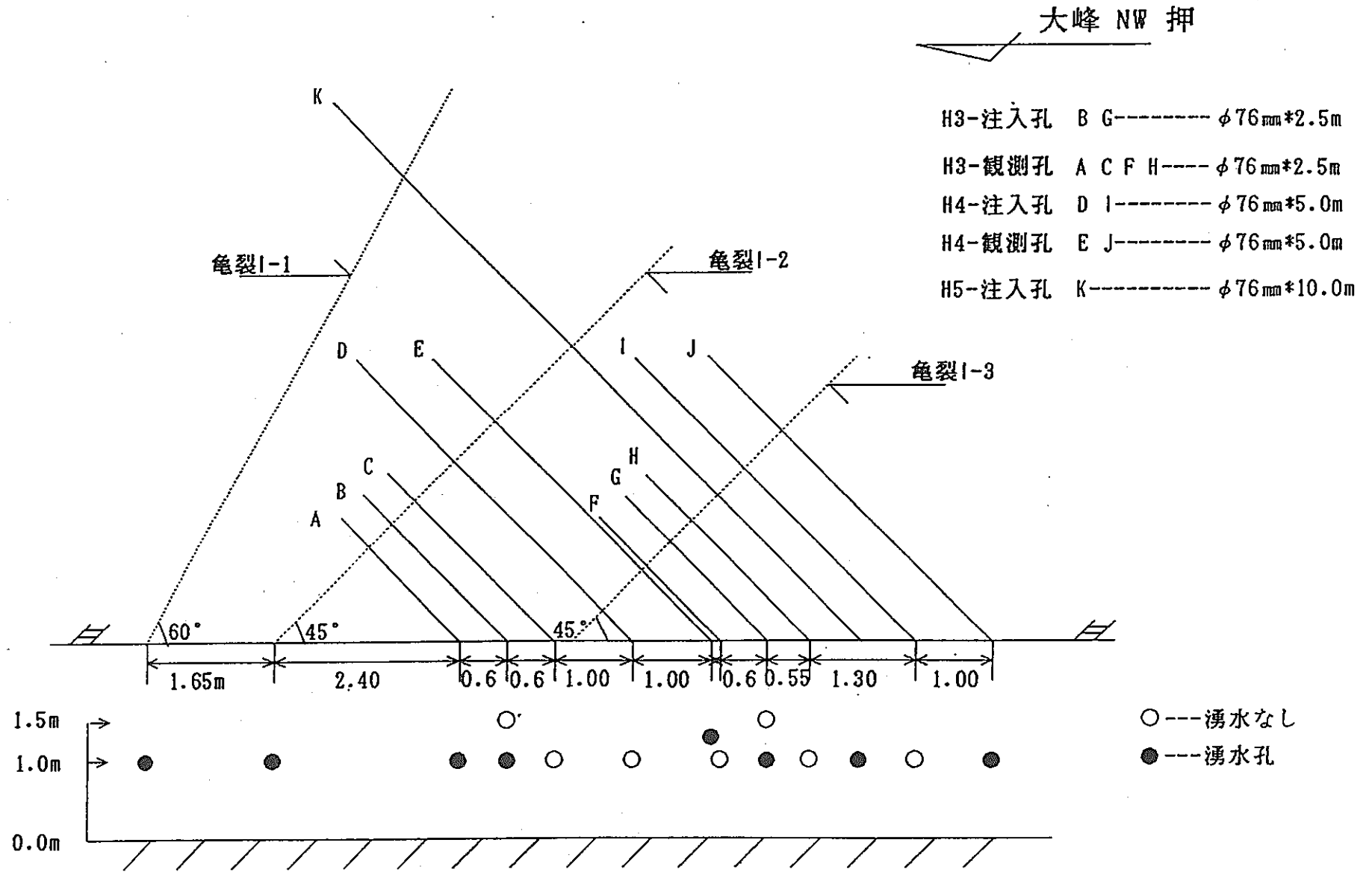
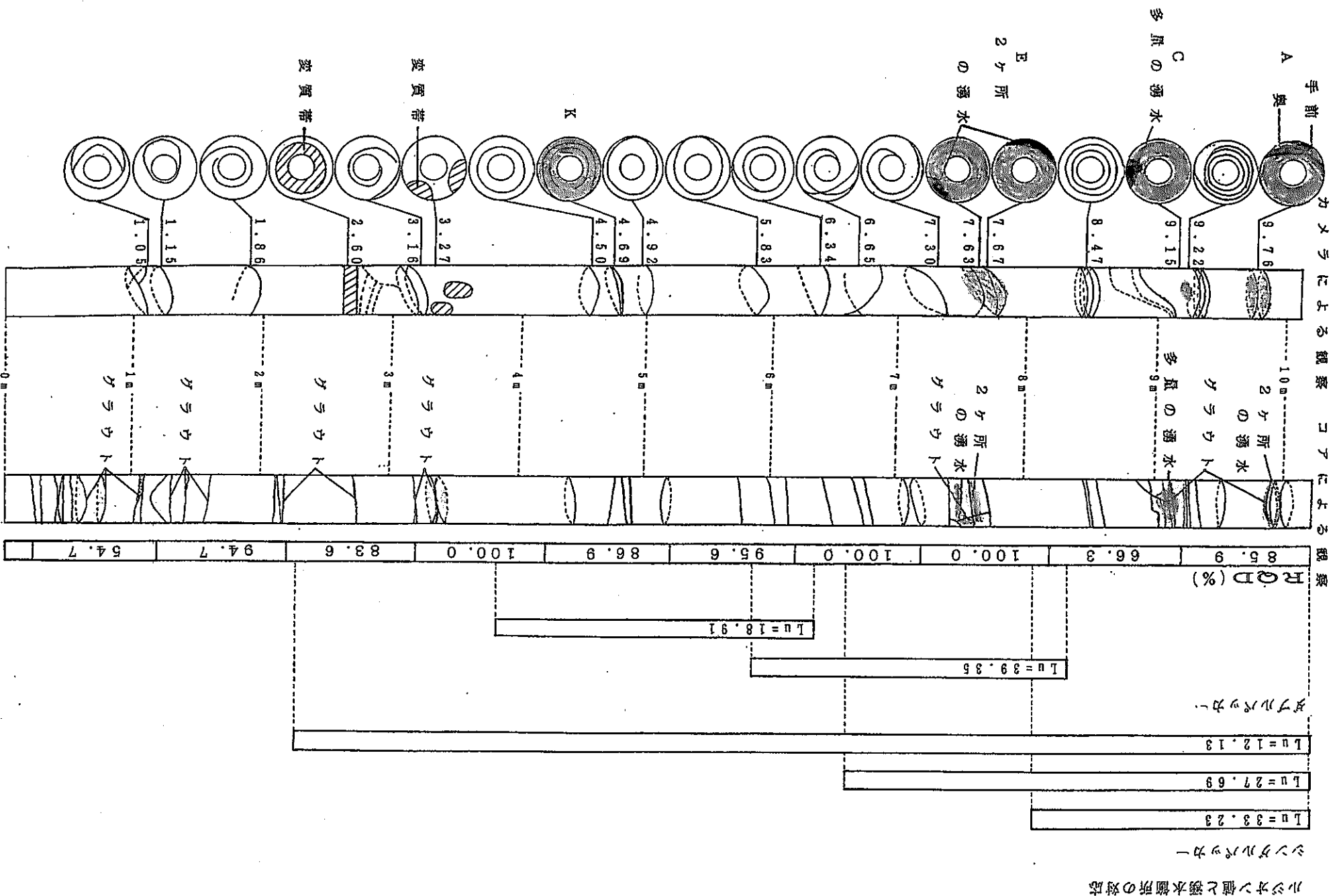


図-1 注入試験孔のレイアウト図



図-2 ポアホールカメラによる孔内観察結果



ルシオノ値と湧水箇所の対応

シンダリバツカ-

Lu=33.23

Lu=27.69

Lu=12.13

シンダリバツカ-

Lu=39.35

Lu=18.91

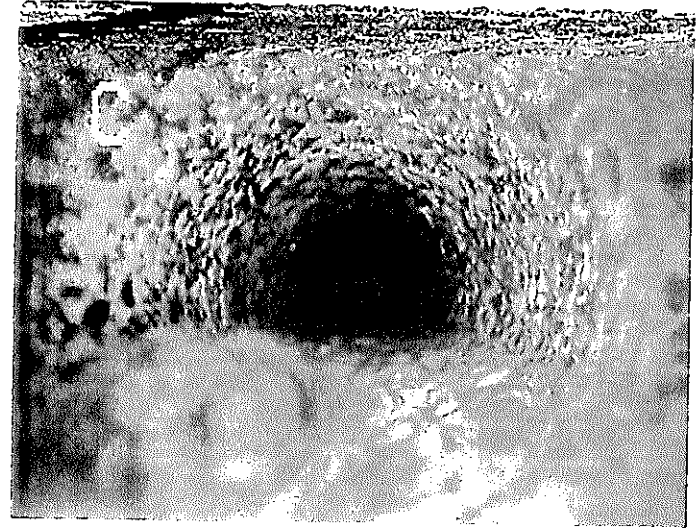
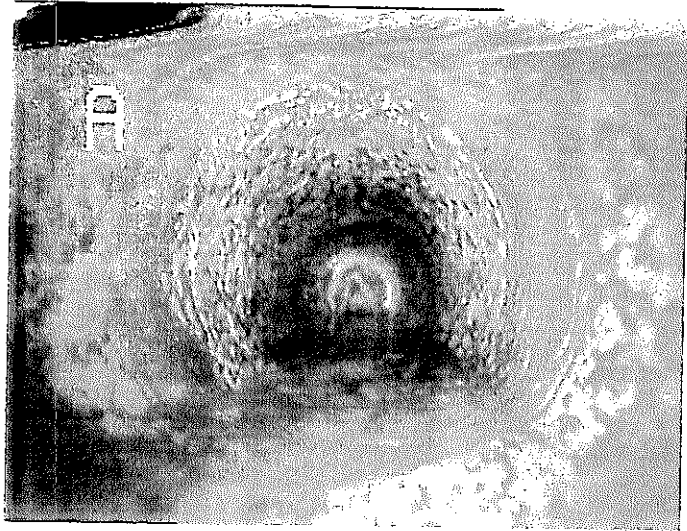
RQD (%)

観察

コアによる観察

カメラによる観察

図-3 孔内湧水箇所を観察結果



P A G E I = E

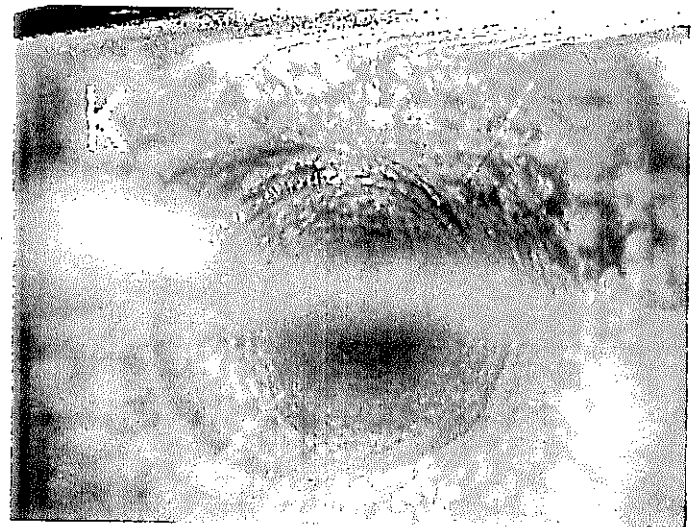


図-4 ボーリングコアに付着した注入材料

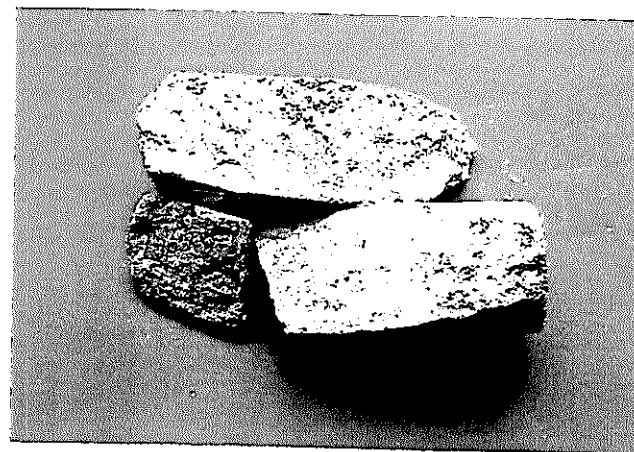
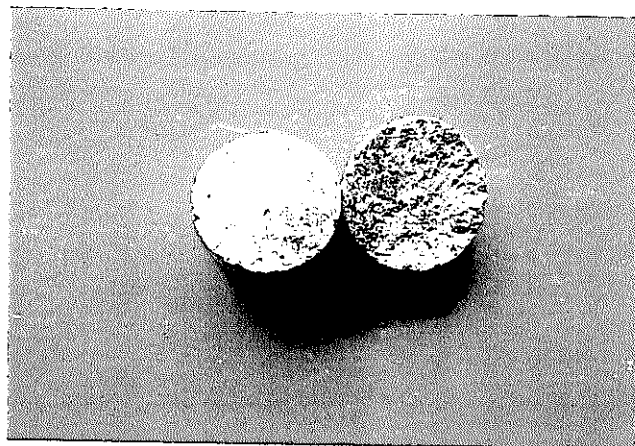
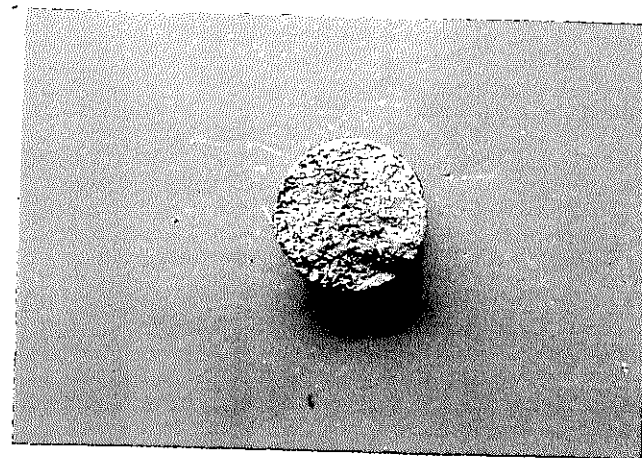


図-5 孔内湧水箇所および注入材料の付着箇所

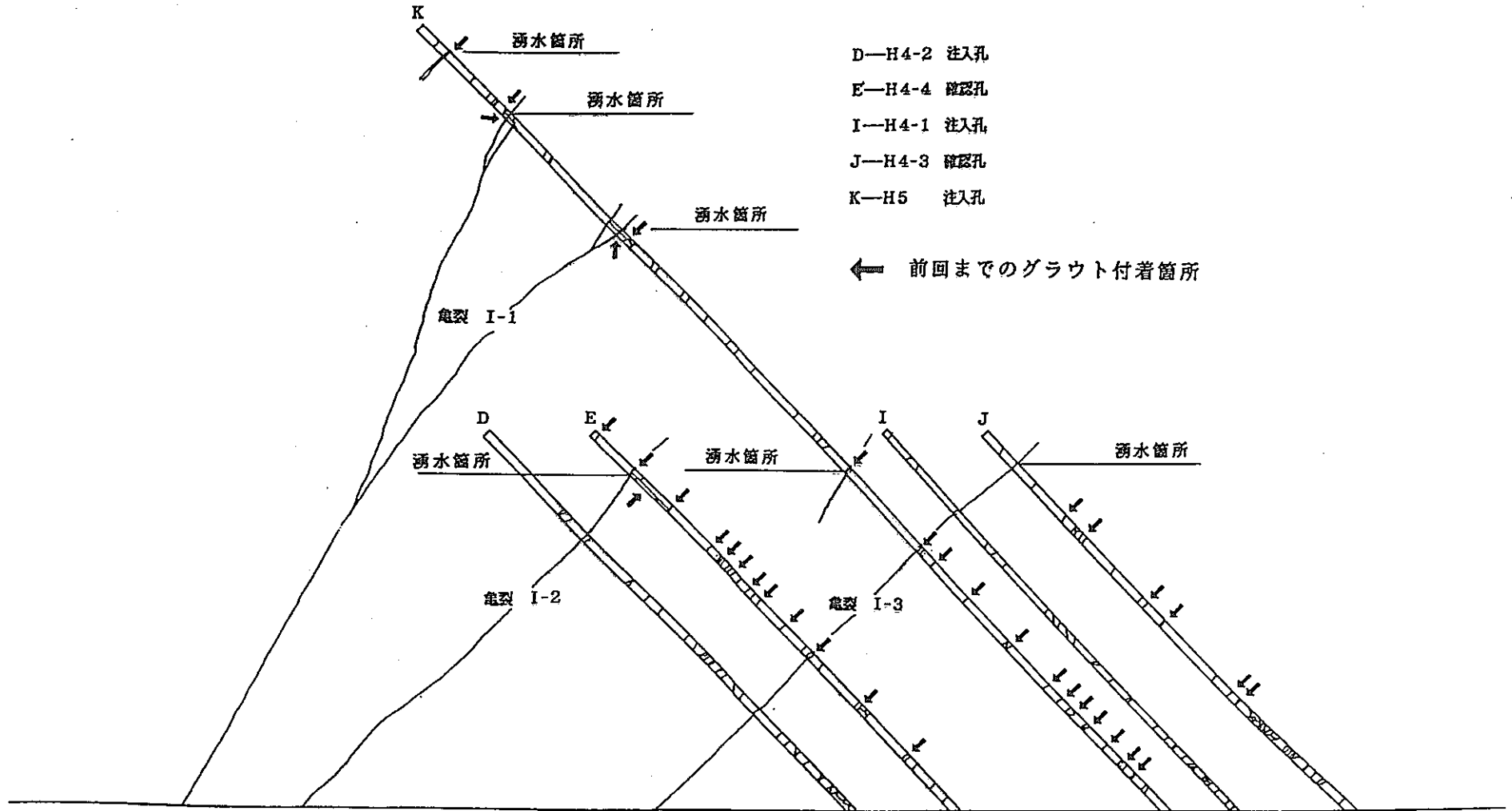


図-6 各ボーリング孔におけるRQD

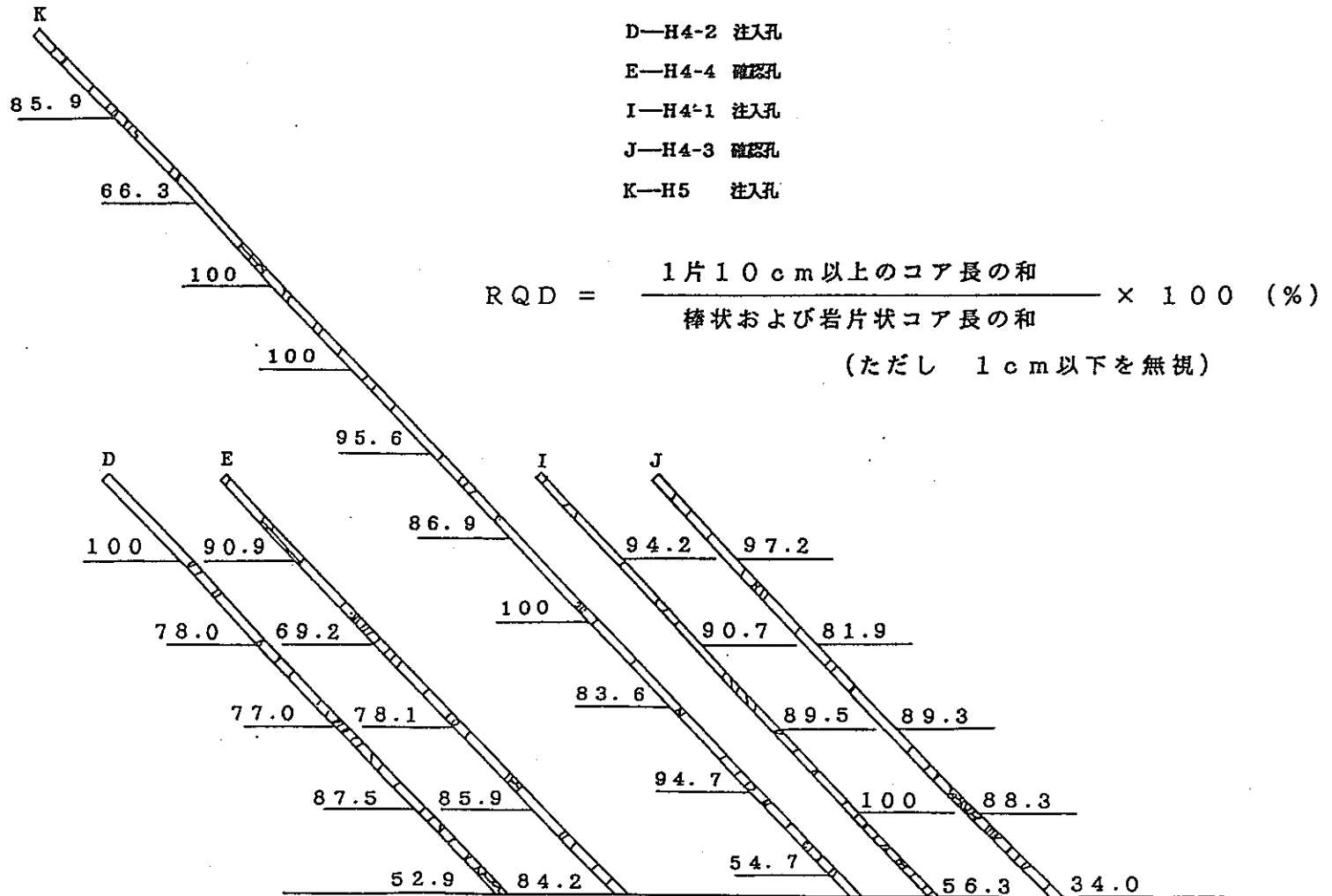


表-4 透水係数およびルジオン値

$$K = \frac{Q}{\Delta h} \cdot \frac{\ln \left[ \frac{2L}{\phi} \right]}{2\pi L} \quad (\text{cm/sec}) \quad \text{---- (1)}$$

- K : 透水係数 (cm/sec)  
 Q : 注入量 (cm<sup>3</sup>/sec)  
 Δh : 水頭 (cm)  
 L : 試験区間長 (cm)  
 φ : ボーリング孔の直径 (cm)

$$Lu = \frac{10Q}{PL} \quad (Lu) \quad \text{----- (2)}$$

- Lu : ルジオン値 (Lu)  
 Q : 注入量 (ℓ/min)  
 P : 注入圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 L : 試験区間長 (m)

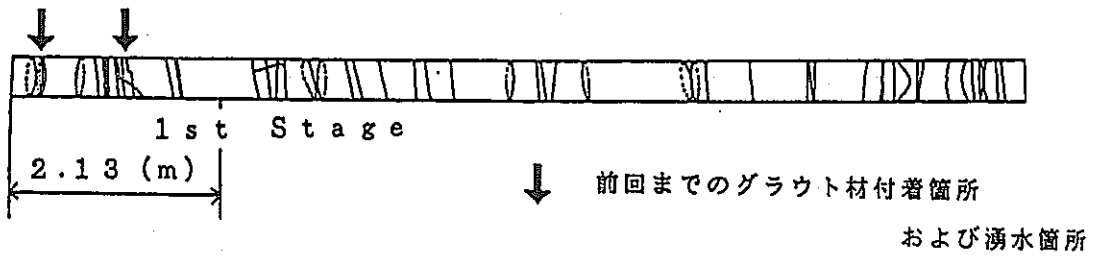
$$1 (Lu) \approx 1 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$$

本試験におけるルジオン値および透水係数

	試験区間長 (m)	注入量 (ℓ/min)	間隙水圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	ルジオン値 (Lu)	透水係数 (cm/sec)
1	2.20	2.05	0.28	33.2	3.58 × 10 <sup>-4</sup>
2	3.70	2.15	0.21	27.7	3.36 × 10 <sup>-4</sup>
3	8.00	2.04	0.21	12.1	1.67 × 10 <sup>-4</sup>
4	2.50	2.07	0.21	39.3	4.37 × 10 <sup>-4</sup>
5	2.50	1.91	0.41	18.9	2.01 × 10 <sup>-4</sup>

- \* ) 1、2、3 - シングルパッカー方式による  
 4、5 - ダブルパッカー方式による

表-5 1st Stage の注入経過



注入予定表

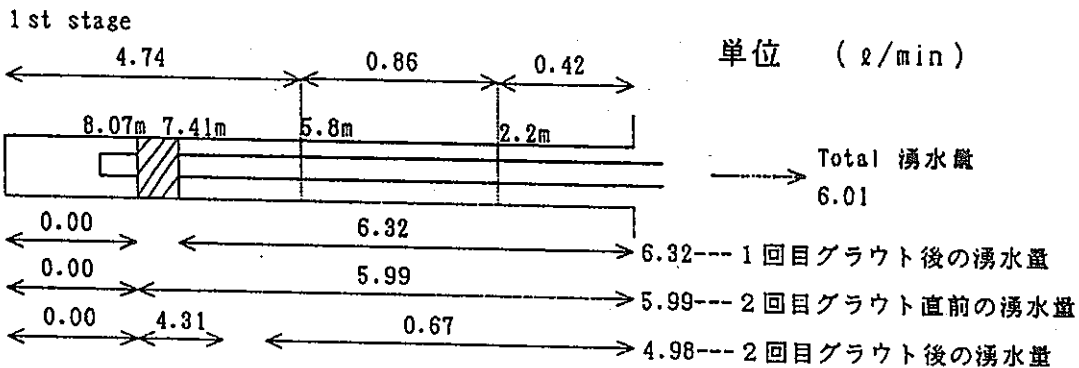
	注入予定範囲 (m)	注入予定量 (ℓ)	間隙率 (%)
1回目	半径 2	43.5	0.1
2回目	半径 2	135.5	0.3

配合割合と注入量

	AMC	JET	水	水セメント比 (%)	注入量 (ℓ)
1回目	2	1	5	167	65.5
2回目	2	1	9	300	165.1

AMC, JET, 水は重量比

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{AMC} + \text{JET}} \times 100 (\%)$$



グラウト材注入における止水率

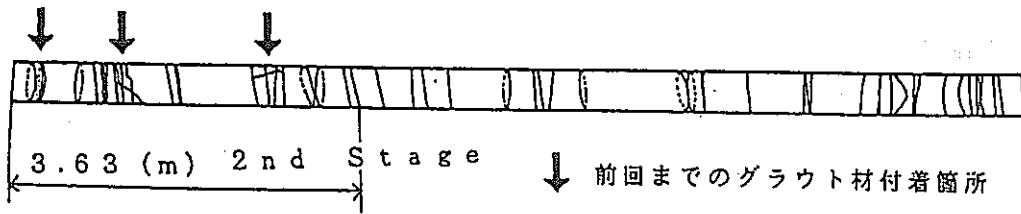
ステージ	ステージ区間での止水率	前グラウト後の湧水量からみた止水率	ステージ区間外からみた止水率	全体湧水量からみた止水率
1st	1	---	''	-5%
	2	---	17%	16%

\* ) 注意 (-) は、湧水量が増えたことを示す。

ルジオン値変化

19.8 (Lu) → 9.20 (Lu)

表-6 2nd Stage の注入経過



注入予定表

および湧水箇所

	注入予定範囲 (m)	注入予定量 (ℓ)	間隙率 (%)
1回目	半径 2	43.5	0.1
2回目	半径 2	135.5	0.3
3回目	-----	間隙圧上昇確認まで	

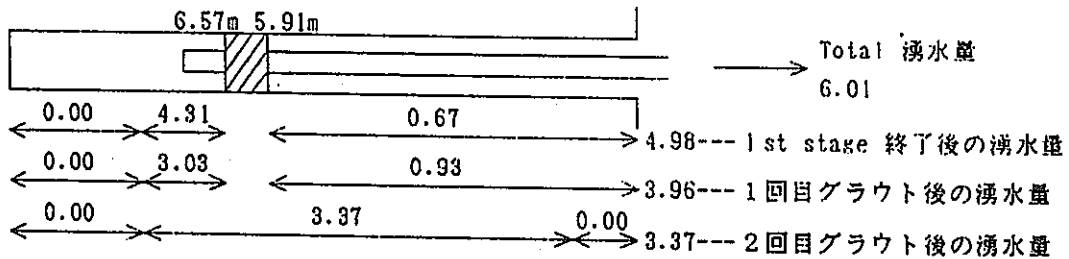
配合割合と注入量

	AMC	JET	水	水セメント比 (%)	注入量 (ℓ)
1回目	2	1	9	300	37.6
2回目	2	1	9	300	137.6
3回目	1	0	2	200	41.0
	2	1	9	300	126.9

AMC, JET, 水は重量比

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{AMC} + \text{JET}} \times 100 (\%)$$

2nd stage



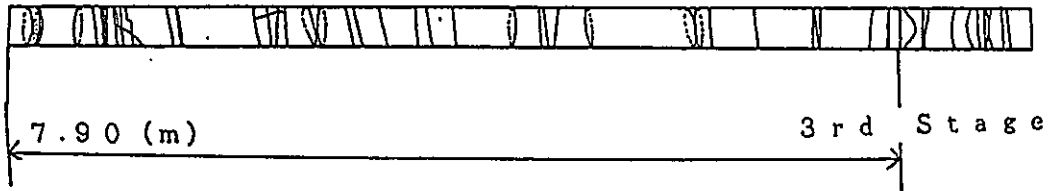
グラウト材注入における止水率

ステージ		ステージ区間での止水率	前グラウト後の湧水量からみた止水率	ステージ区間外からみた止水率	全体湧水量からみた止水率
2nd	1	---	---	---	---
	2	30%	20%	*) -39%	34%
	3	---	15%	---	44%

\*) 注意 (-) は、湧水量が増えたことを示す。



表-7 3rd Stage の注入経過



注入予定表

	注入予定範囲 (m)	注入予定量 (ℓ)	間隙率 (%)
1回目	-----	間隙圧上昇確認まで	

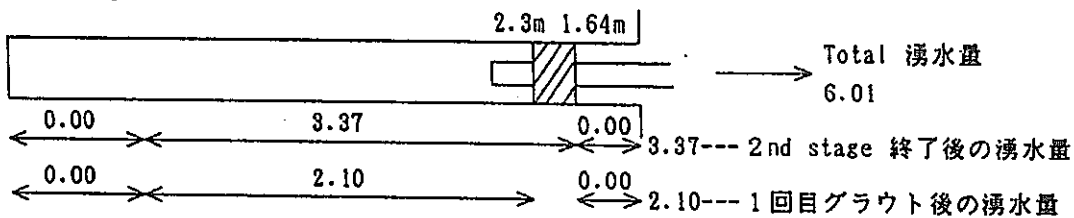
配合割合と注入量

	AMC	JET	水	水セメント比 (%)	注入量 (ℓ)
3回目	1	0	2	200	42.5
	2	1	9	300	234.5

AMC, JET, 水は重量比

$$\text{水セメント比} = \frac{\text{水}}{\text{AMC} + \text{JET}} \times 100 (\%)$$

3rd stage



グラウト材注入における止水率

ステージ	ステージ区間での止水率	前グラウト後の湧水量からみた止水率	ステージ区間外からみた止水率	全体湧水量からみた止水率
3rd	1	38%	---	65%

\* ) 注意 ( - ) は、湧水量が増えたことを示す。

ルジオン値変化

4.80 (Lu) → 2.90 (Lu)

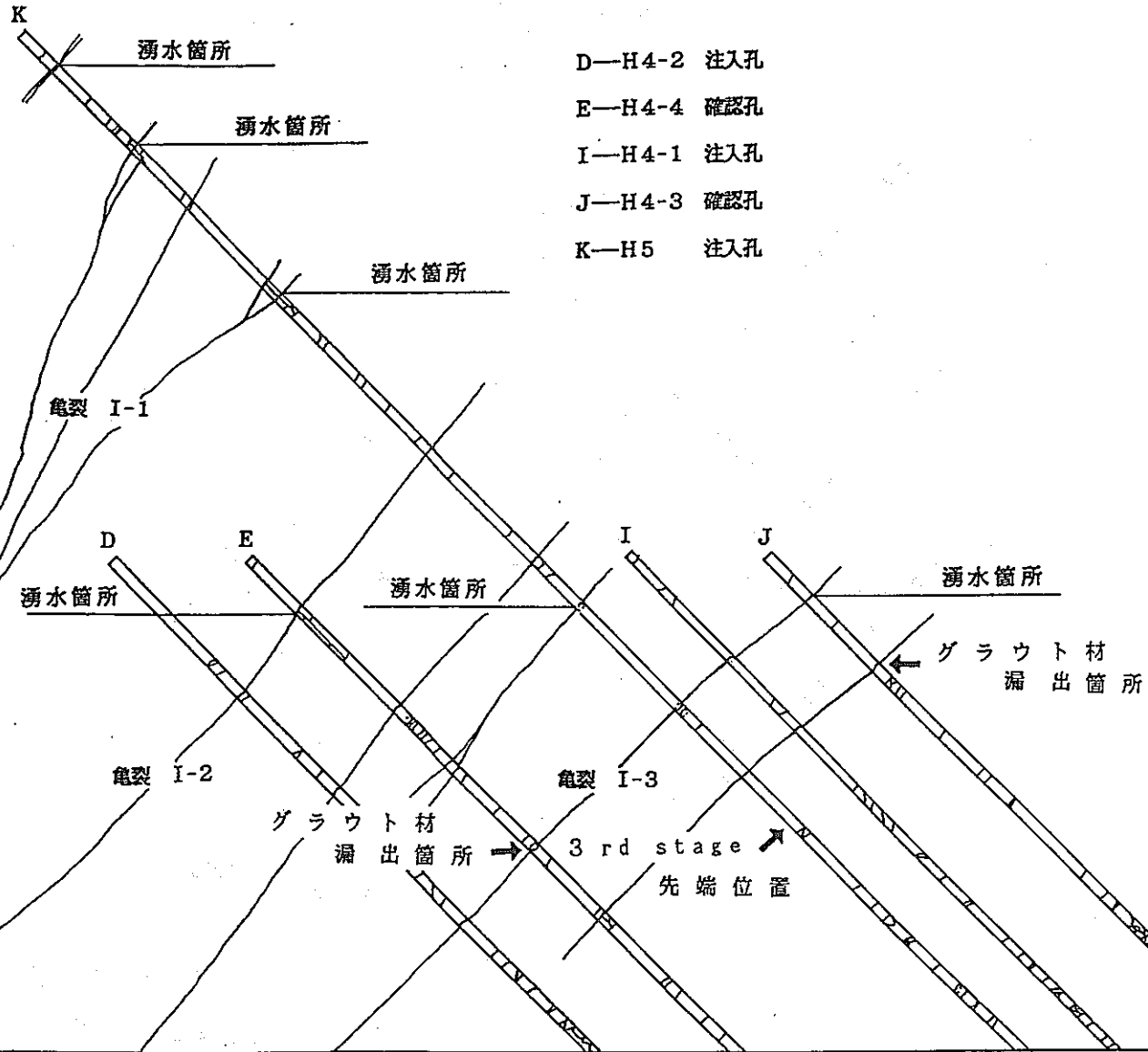


図-7 予想亀裂と漏出箇所

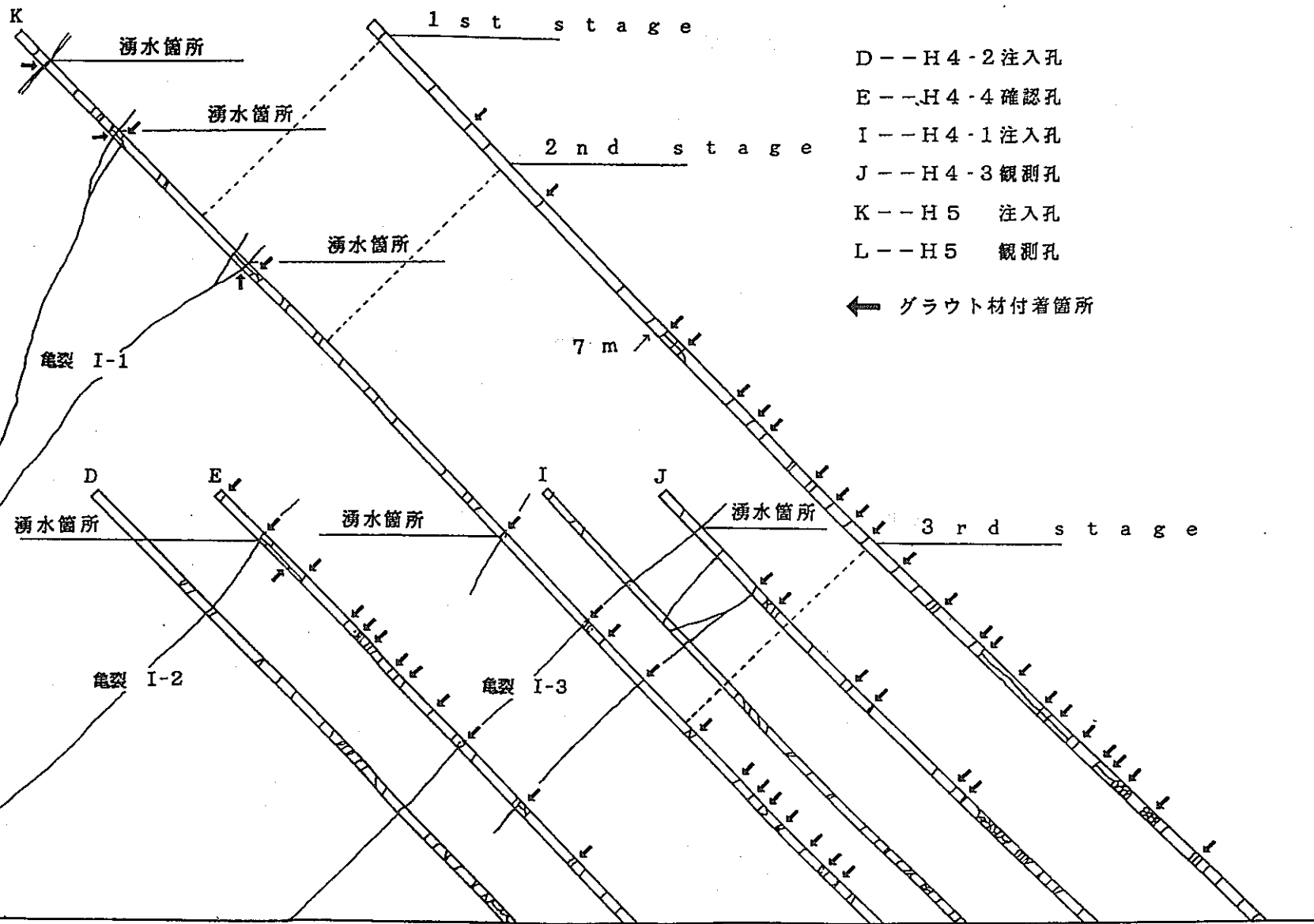


図-8 グラウト材付着箇所

## 2. 岩石の疲労特性に関する実験的研究

### 2. 1 はじめに

周期的な繰返し荷重を受ける岩盤構造物は時間の経過とともにその強度などが低下することが予測されるため、岩盤構造物を安全に維持・管理する上で岩盤の疲労特性を把握しておくことが必要である。

繰返し載荷による岩盤の強度低下などは、岩盤が受けるダメージの蓄積の結果と考えられる。しかし、岩盤が繰返し載荷により受けるダメージの蓄積過程に関する実験的な研究例は少ない。

本研究では、繰返し載荷試験、すなわち疲労試験における岩石の力学的特性の変動を把握するとともに、岩石が繰返し載荷により受けるダメージを弾性波の伝播速度により定量化することを試みた。

### 2. 2 岩石試料ならびに試験片

岩石試料としては、島根県宍道町産来待砂岩を用い、試験片を作製し、試験に供した。

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35mmのコアを採取し、採取後、岩石用カッターにより長さ約73mmにコアを切断した。切断したコアの両端面を平面研削盤により研削し、長さ約70mmの円柱状の試験片を作製した。

作製した試験片を3日間水中養生し、自然状態で7日間乾燥させた。自然乾燥後、乾燥剤を入れないデシケータ中に保存し、試験に供した。なお、岩石試料の比重、含水率、吸水率、空隙率の平均値を表2-1に示す。

また、圧裂引張試験により求めた来待砂岩の引張強度の平均値は $20.0\text{kg/cm}^2$ である。さらに、ひずみ速度を $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}/\text{sec}$ として行った一軸圧縮試験において得られた一軸圧縮強度を図2-1に示す。同図において、ひずみ速度が速くなると一軸圧縮強度が大きくなる傾向がみられる。本研究の疲労試験における一軸圧縮強度の基準としては、ひずみ速度 $10^{-3}/\text{sec}$ における強度の平均値 $292.2\text{kg/cm}^2$ を用いた。

### 2. 3 試験方法

疲労試験では、岩石試験片に上限応力として一軸圧縮強度の90%(263.0kg/cm<sup>2</sup>)、87.5%(255.7kg/cm<sup>2</sup>)、85%(248.4kg/cm<sup>2</sup>)、82.5%(241.0kg/cm<sup>2</sup>)、80%(233.7kg/cm<sup>2</sup>)に相当する応力、また下限応力として約10kg/cm<sup>2</sup>を周波数1Hzのランプ波により、繰り返して加えた。なお、一定の繰り返し数を岩石試験片に作用させたところで、試験を中断し、岩石試料の弾性波速度を測定し、さらに、弾性波測定後、再び疲労試験を継続した。このような手順を試験片が破断するまで繰り返した。なお、試験時間の都合上、繰り返し数10<sup>5</sup>回で破断しなかった場合には試験を打ち切った。

本研究では載荷装置としては、MTS製の高速サーボ・コントロール試験機、弾性波伝播速度の計測には応用地質(株)製のソニック・ビューワを用いた。

### 2. 4 試験結果

疲労試験における上限応力と破壊までの繰り返し回数との関係を図2-2に示す。同図において、上限応力が小さくなるにしたがい、破壊までの繰り返し回数が増加する傾向を示すが、個々の試験片の固体差が大きく、破壊までの繰り返し回数に大きなバラツキが見られる。

図2-3に上限ひずみと繰り返し回数との関係を示す。上限ひずみはクリープ曲線と同様な曲線の形状となる。同図では、繰り返し回数を対数でとってあるため、明確ではないが、1次、2次、3次のクリープに相当する区間が存在する。なお、試験片が破断に至らなかった場合にはクリープ試験と同様に2次クリープの状態に相当する区間にあるものと考えられる。(図中の例えば△△85-1の85は上限応力の一軸圧縮強度の対する割合を示している。)

上限ひずみの繰り返し数あたりの増加割合と繰り返し回数との関係を図2-4に示す。上限ひずみの増加割合は両対数グラフ上で最初は直線的に減少し、最小ひずみ増加割合に至り、つぎに反転し、ひずみの増加割合が大きくなり、破断にいたる。また、破断に至らなかった多くの場合には、ひずみ増加割合が減少し続ける、あるいは最小のひずみ増加割合に近い状態にある。なお、ここでの繰り返し数あたりのひずみの増加(増加割合)は1Hzで疲労試験を行っているため、ひずみ速度に相当するものと考えられる。

上限ひずみ増加割合と軸ひずみとの関係を図2-5に示す。上限ひずみ増加割合が最小となる上限ひずみは $6000 \times 10^{-6} \sim 8000 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、それぞれの試験片でかなりのばらつきがみられる。なお、一軸圧縮試験で得られた破壊強度点における軸ひずみは約 $6800 \times 10^{-6}$ 前後の値である。

岩石の疲労過程として、一軸圧縮試験における破壊強度点の軸ひずみに相当する上限ひずみが発生するまでは上限ひずみ増加割合は、次第に小さくなってゆき、破壊強度点の軸ひずみで最小値となり、その後上限ひずみ増加割合が次第に大きくなり、破断に至るといふ考え方がある。しかし、今回の結果ではばらつきが大きく、このような概念が適用できるどうかの判断はできない。

疲労試験において得られたヒステリシス・ループの例を図2-6に示す。一般に、試験片が破断に至る場合には、ループの中が繰り返し回数とともに、次第に狭くなり、つぎに広くなり、破断に至る。また、試験時間内に破断に至らない場合にはループの中が狭くなったままの状態である。

このようなループの変遷は、試験片内のき裂の発生・進展と関連しているものと考えられる。繰り返しの初期では、試験片内に存在する空隙やき裂が閉塞とともに、特定方向のき裂が安定化するまで進展するため、ひずみが増加する。つぎの段階では、き裂が進展する、あるいは新たなき裂が発生するが、安定なき裂伝播のために載荷の際にはき裂は進展するが、除荷の際にはき裂の進展は見られない。この段階は疲労過程において多くの繰り返し回数(時間)を占め、き裂の進展はかなり遅いものと考えられる。さらに、繰り返し回数が増加すると、き裂が不安定な伝播する段階まで成長する。すなわち、除荷の際にもき裂が進展するような状態となる。このような過程をたどり試験片が破断に至るものと考えられる。しかし、上限応力によっては安定なき裂が伝播する段階を飛び越し、不安定なき裂伝播の段階に入ることがあり、空隙やき裂の閉塞もこの段階で生ずると考えられる。

試験時間内に破断した試験片では上記のような過程が考えられるが、より長期の疲労破壊では、き裂の発生・進展が応力腐食など生じることが推測される。

図2-7にヤング率と繰り返し回数との関係を示す。(a)は破断した試験片であり、繰り返し回数を破断した回数で基準化してある。また、(b)は破断に至らなかった試験片についての結果である。これらにおけるヤング率は上限応力

とそれの50%の応力との割線ヤング率である。(a)では、ヤング率は、はじめ繰り返し回数とともに大きくなり、つぎに低下する傾向が見られる。これは、最初既存の空隙やき裂の閉塞および不安なき裂が安定化するための進展による影響が次第に小さくなるため、ヤング率が大きくなる。つぎには、き裂が進展する、あるいは新たなき裂が発生するために、ヤング率が低下するものと考えられる。

(b)では、ヤング率は増加後、ほぼ一定の値となっている。すなわち、き裂の進展速度がかなり遅いことを示している。

P波伝播速度と繰り返し回数との関係を図2-8に示す。(a)は破断した試験片であり、繰り返し回数を破断回数で基準化し、(b)は破断に至らなかった試験片についての結果である。(a)においては、P波伝播速度は繰り返し回数の増加とともに減少する傾向を示し、(b)ではP波伝播速度は低下した後、一定の値となっている。なお、前述のヤング率は繰り返し回数とともに増加し、つぎに減少する傾向とは一致しないが、これはP波速度の測定の際には、試験片が無負荷の状態にあり、いったん閉じたき裂が再び開いたため、P波の伝播速度が繰り返し回数の増加とともに、減少するものと考えられる。したがって、P波伝播速度の低下は、それまでに試験片がうけたき裂の進展などによるダメージを示唆している。

図2-9は、これまで述べてきたそれぞれの物性値と繰り返し回数との関係を代表的な試験片について整理したものである。(a)は上限応力が一軸圧縮強度の90%、(b)は同じく90%、(c)は85%でそれぞれ試験中に破断したものである。また、(d)は上限応力が85%で10,000回で、(e)と(f)は80%で100,000回で試験を打ち切ったものである。

これらの図において、ヤング率およびP波伝播速度と上限ひずみの増加割合との関係は明確とは言えない。この原因は、ヤング率の算出およびP波伝播速度の計測を人為的に設定した繰り返し回数で行ったためである。しかしながら、ヤング率が大きくなる繰り返し回数の範囲は上限ひずみの増加割合が急激な減少を示す範囲に重なることが推測され、ひずみの増加割合と関連性が大きいと考えられる。また、P波伝播速度はひずみ増加割合よりひずみの増加、すなわち、試験片中のき裂の進展・発生に関連し、試験片の受けたダメージの蓄積の結果を示すものと考えられる。

図2-10に、 $1 - R_v^2$ （ただし、 $R_v$ はP波の伝播速度の試験前のP波速度に対する割合）とに繰返し回数との関係を示す。なお、(a)は破断した試験片であり、繰返し回数を破断した回数で基準化したものであり、(b)は破断に至らなかった試験片についての結果である。一般に、P波速度はき裂の程度に関連するといわれ、 $1 - R_v^2$ をき裂係数として用いていることがある。破断した試験片では、き裂係数は破断までの繰返し回数の約10%までは急激に大きくなり、その後繰返しの割合に比例して大きくなる傾向を示す。一方、破断に至らなかった試験片では、上限応力が小さい場合にはき裂係数が徐々に大きくなり、一定値となる傾向がみられる。き裂係数がき裂の実態を反映するものであるならば、き裂の進展過程は、上限応力の大きさに依存することが予測される。すなわち、試験片が破断した場合には、微視的なき裂成長の時間が短い、あるいは全くなく、すぐに巨視的なき裂が生ずる。また、破壊までの繰返し回数が増加するに連れ、微視的なき裂成長の段階が長くなると考えられる。

## 2. 5 まとめ

本研究では、周期的な荷重をうける岩盤の力学的特性の変化を把握するために、基礎研究として、来待砂岩試料を用い、1Hzのランプ波による疲労試験を行った。

岩石の疲労特性に関する一般的な力学的特性を把握することができたが、これらの特性は従来、多くの研究により述べられてきたことと同様なことである。すなわち、1) 上限応力が大きいと破壊までの繰返し数が少なく、上限応力が低下するにつれて、繰返し数が増加して行く。2) ヒステリシス・ループの巾は次第に狭くなり、つぎに広がり、破壊に至る。3) ヒステリシス・ループから求めたヤング率は、繰返しとともに大きくなった後、減少して行く。4) 繰返し数当りの上限ひずみの増加割合（上限ひずみ速度）は、繰返し数とともに減少し、最小となる速度にいたり、反転し増加に転ずる。

P波の伝播速度は繰返し数の増加につれ、減少していく傾向がみられる。この傾向は、P波の測定は連続的に行うことができず、かつ人為的に回数を設定したため、必ずしも、その特性を完全に表しているとは限らない。しかし、繰返し数とともにダメージが蓄積する傾向は確認できる。



## 2. 6 今後の課題

本年度は来待砂岩の疲労特性について検討したが、これらの特性は岩石試験片表面に現れてくる現象を計測しているにすぎず、試験片内部におけるき裂の分布や、き裂の進展過程を把握するまでには至っていない。したがって、この点が今後の課題として残されている。

従来 of 種々の岩石試験において、試験片内部におけるき裂の発生・進展過程と試験片表面で計測された結果とを比較検討した例は少ない。また、各試験においてき裂の発生・進展が同様であるとは考えにくい。したがって、種々の岩石試験の各段階で除荷した岩石試験片から薄片を作製し、顕微鏡によりき裂の状態を観察するとともに、顕微鏡写真からき裂の分布、長さ、方向などについて解析を行い、さらに、それらと試験片表面において計測されるひずみやAEなどの結果を合わせて検討し、試験片内部のき裂の状況と試験片表面における計測結果との関連性を究明することが必要である。

表 2 - 1 来待砂岩試料の比重、吸水率、吸水率、空隙率

強制乾燥比重	飽和含水比重	自然含水比重	吸水率 (%)	含水率 (%)	空隙率 (%)
1.92	2.15	2.02	10.58	9.17	22.76

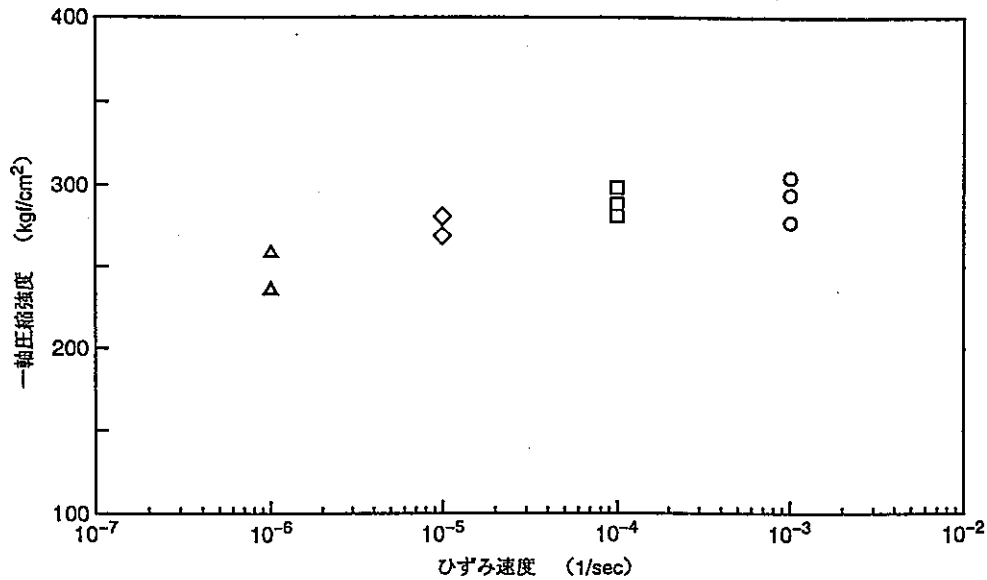


図 2 - 1 一軸圧縮強度とひずみ速度との関係

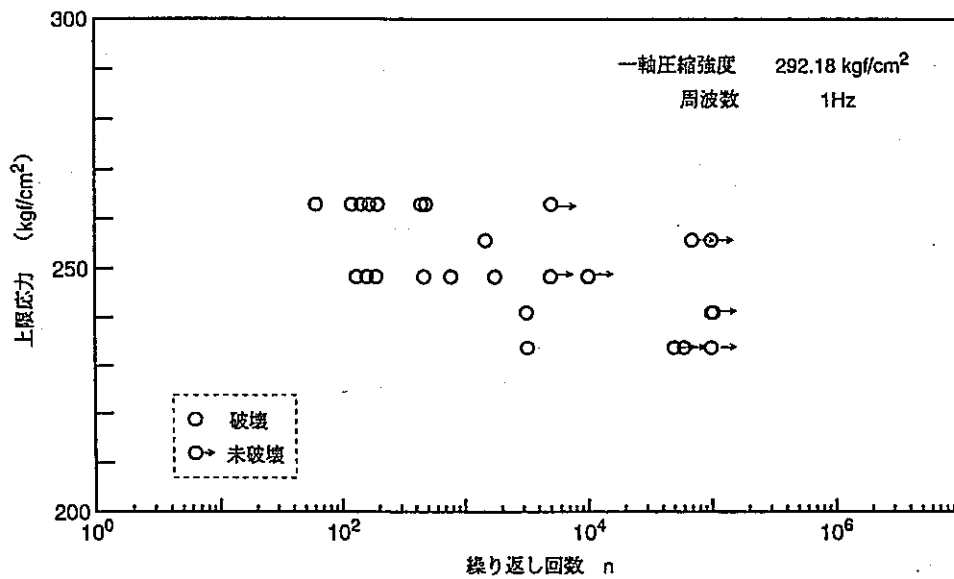


図 2 - 2 上限応力と破壊までの繰り返し回数との関係

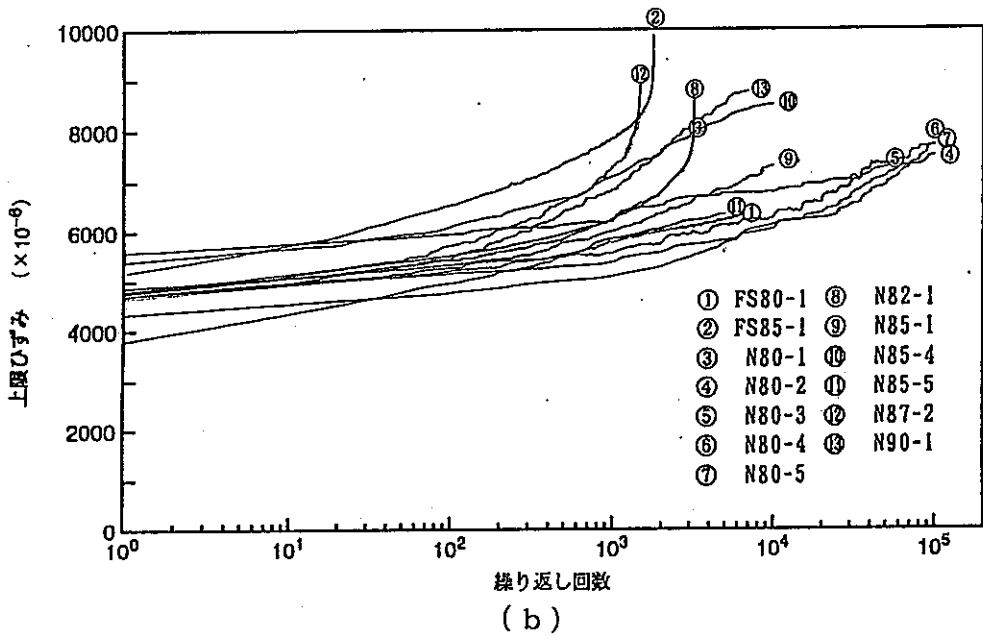
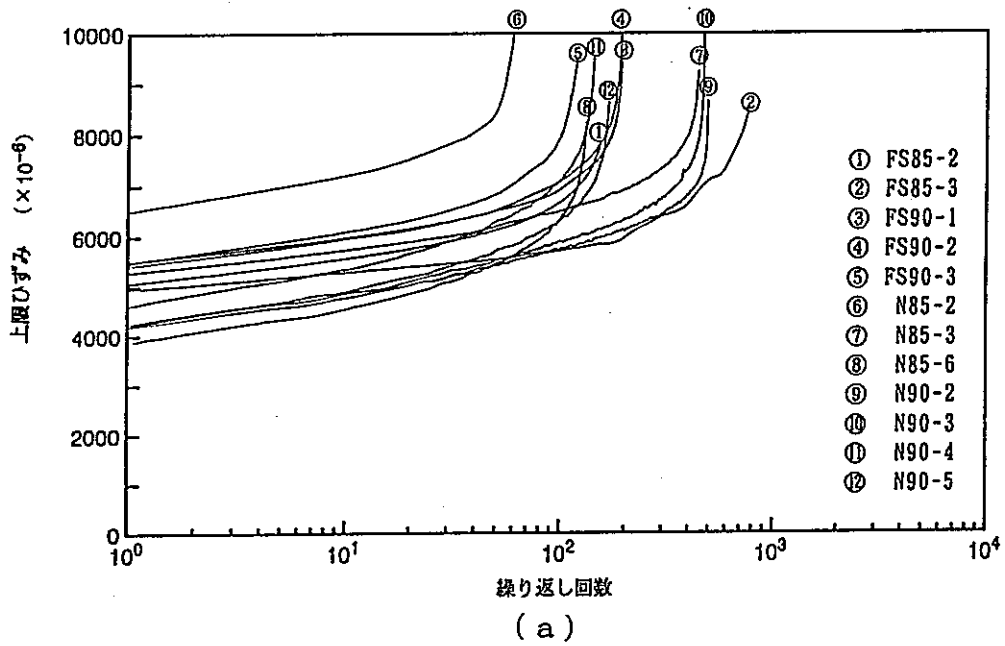


図 2 - 3 上限ひずみと繰り返し回数との関係

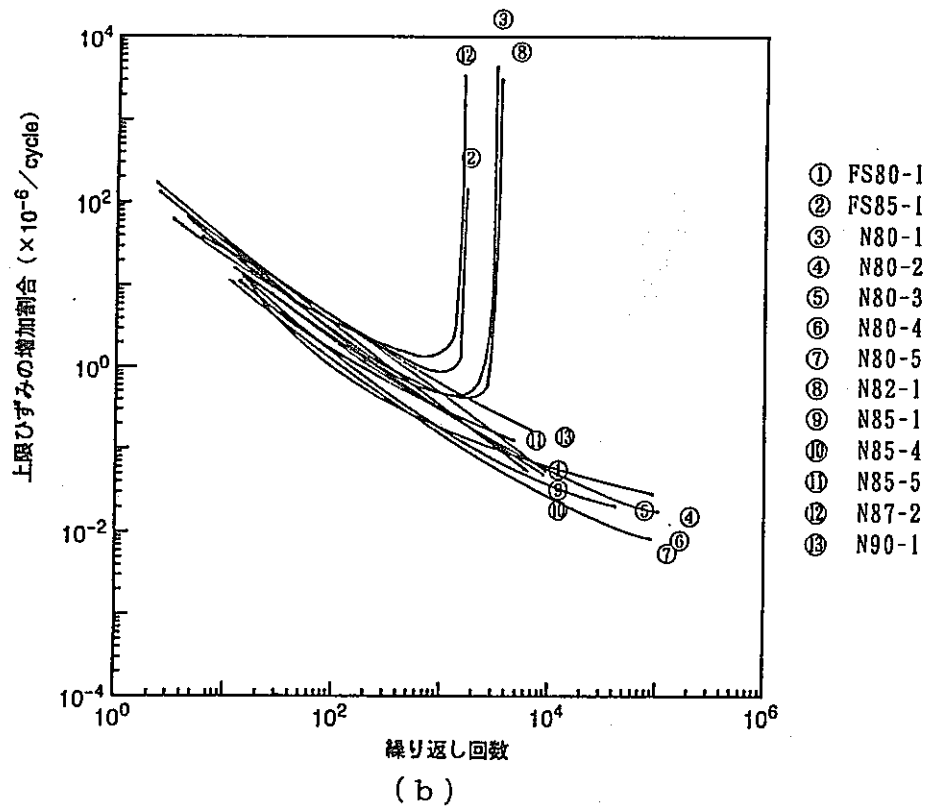
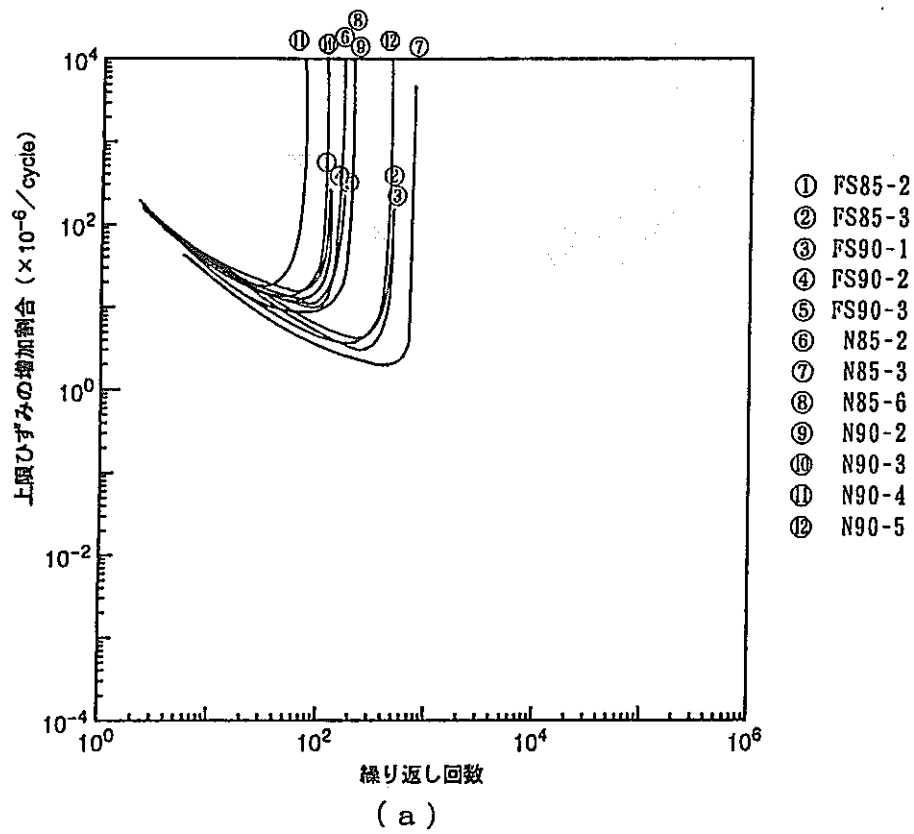


図 2 - 4 上限ひずみ増加割合と繰り返し回数との関係

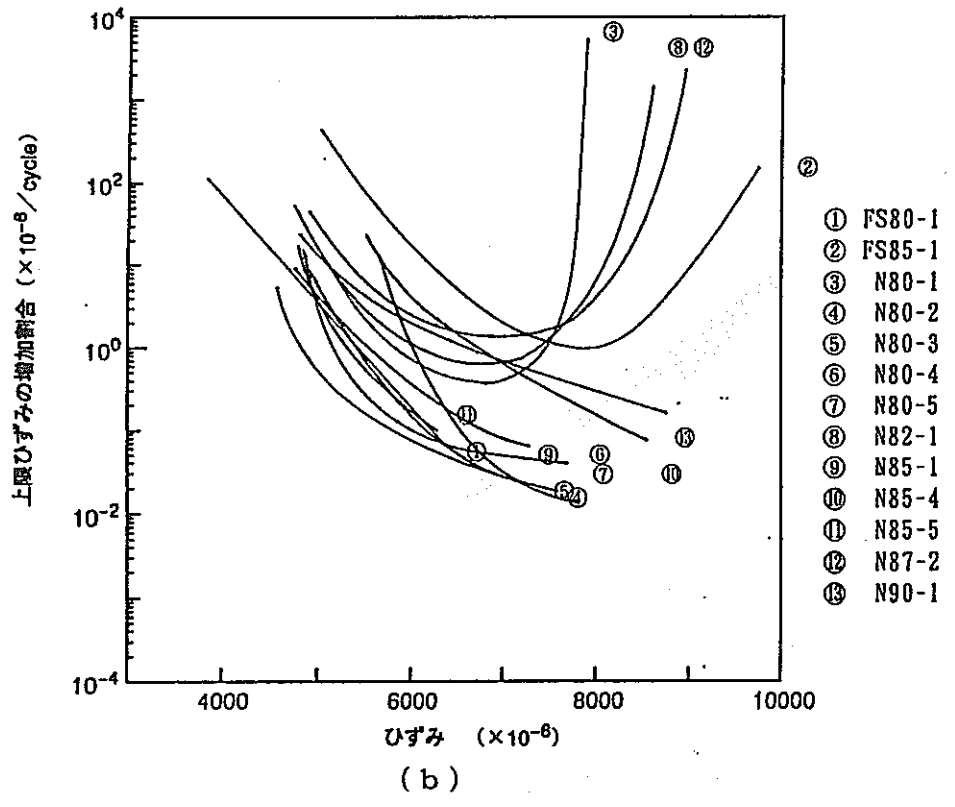
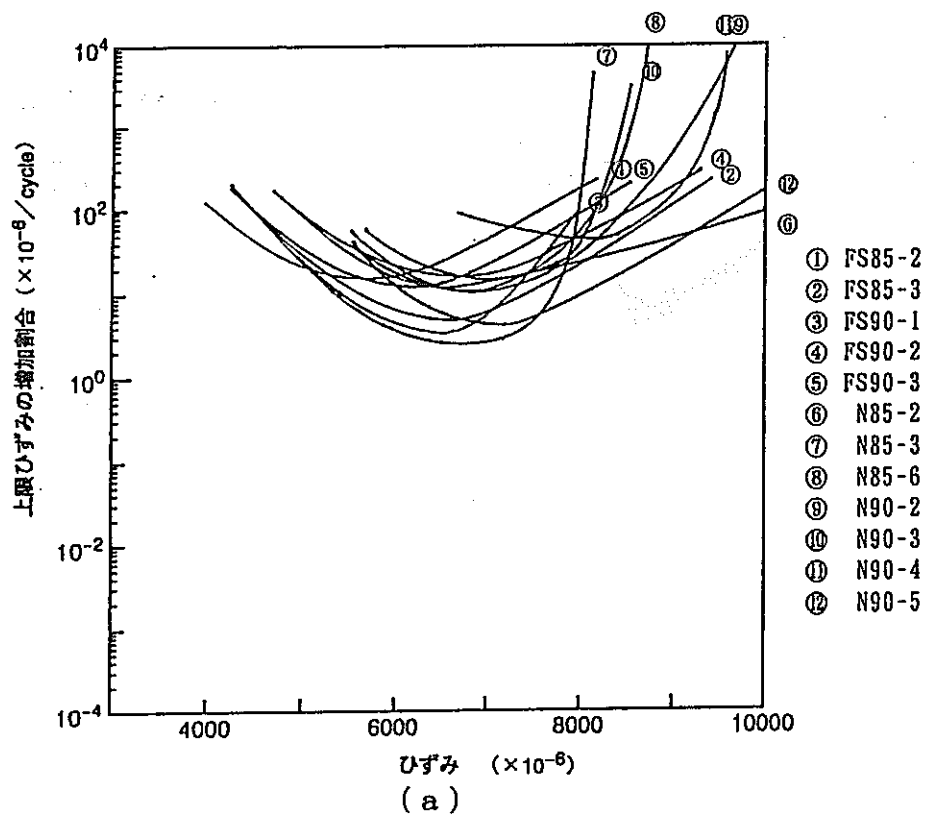


図2-5 上限ひずみ増加割合と上限ひずみとの関係

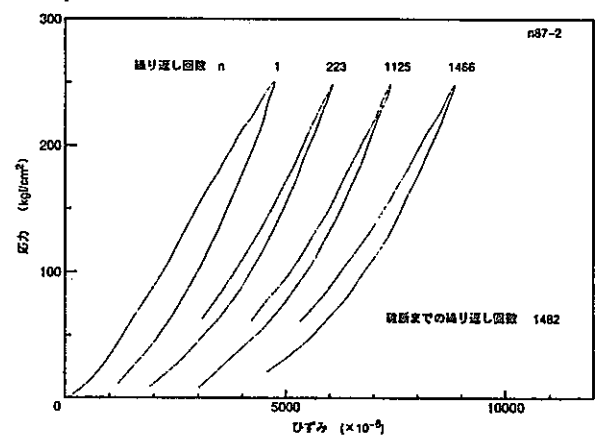
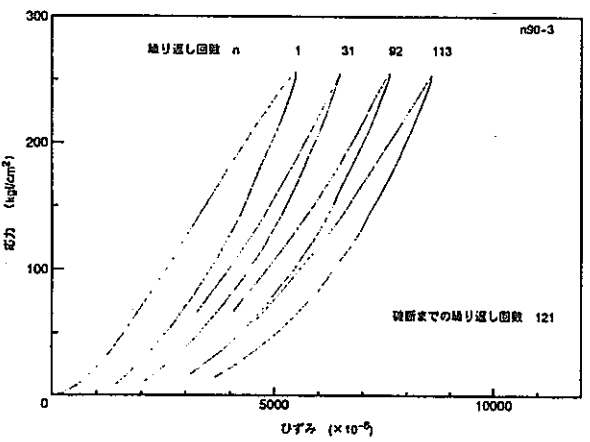
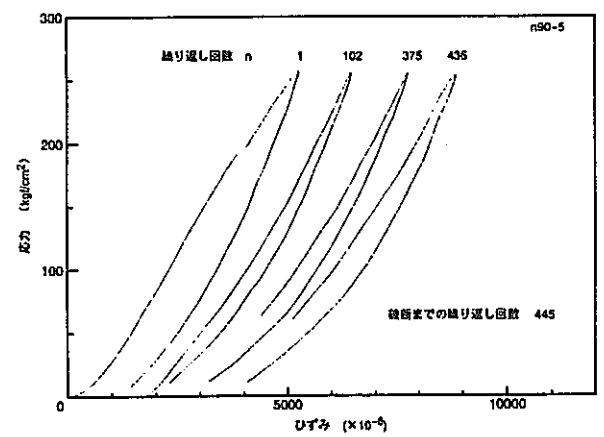
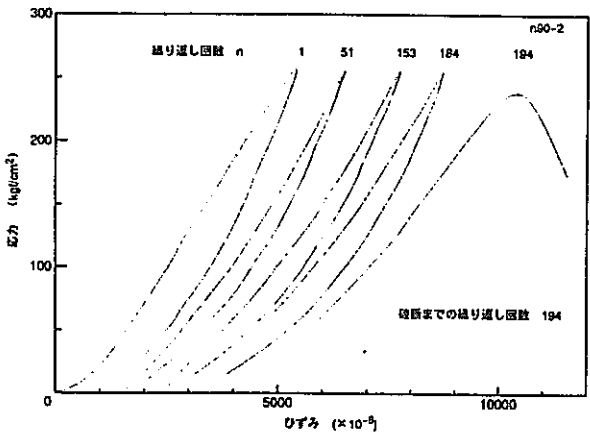
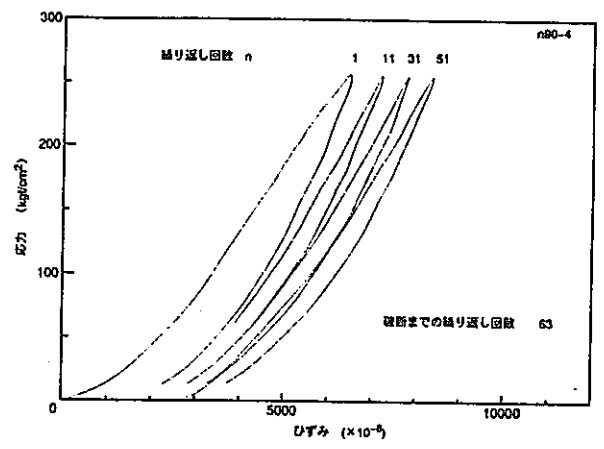
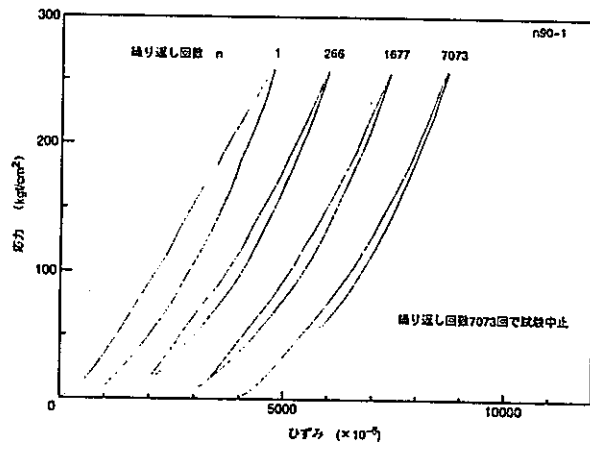


図 2-6 ヒステリシス・ループ (その1)

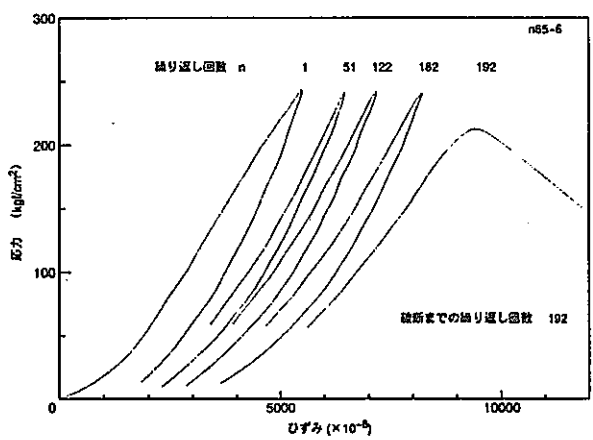
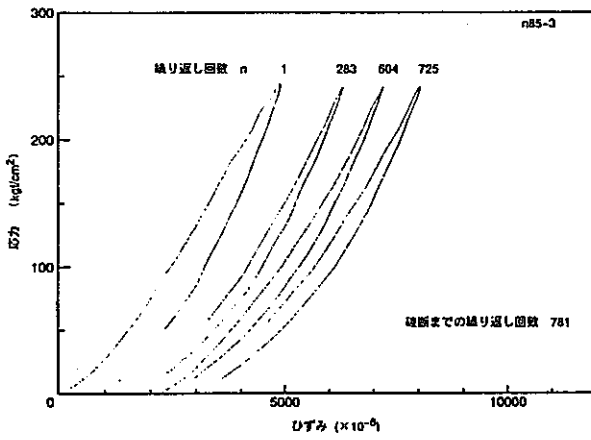
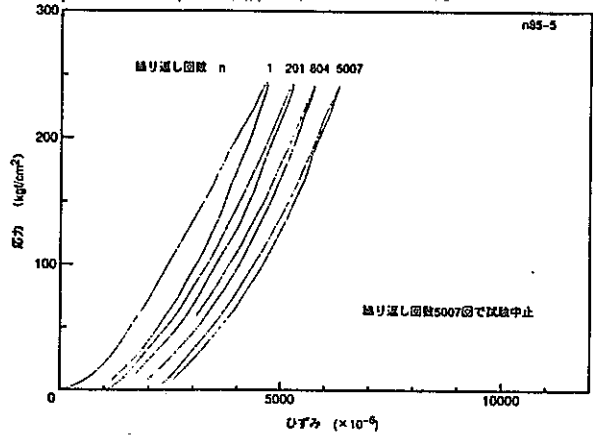
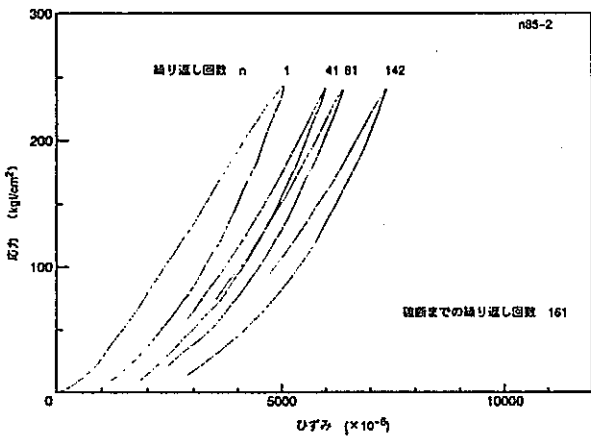
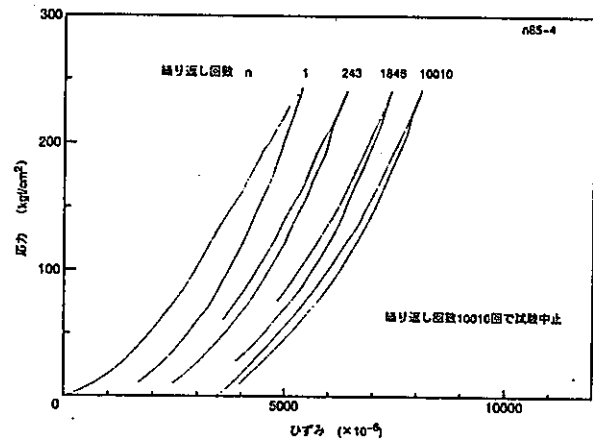
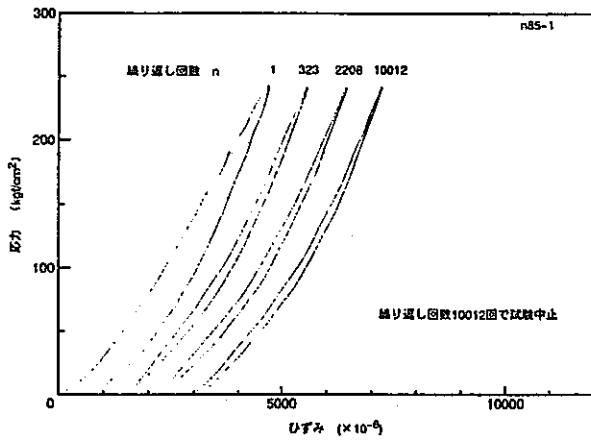


図 2-6 ヒステリシス・ループ (その 2)

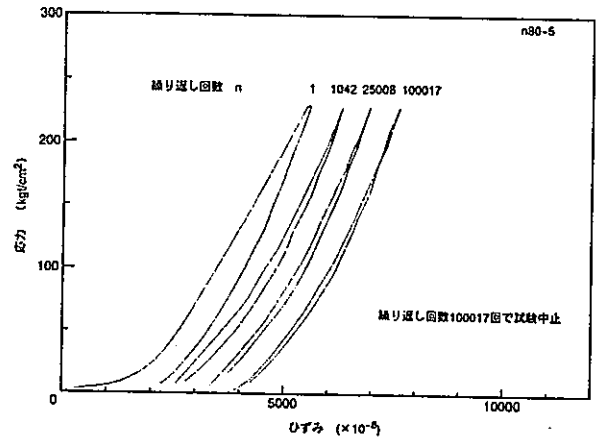
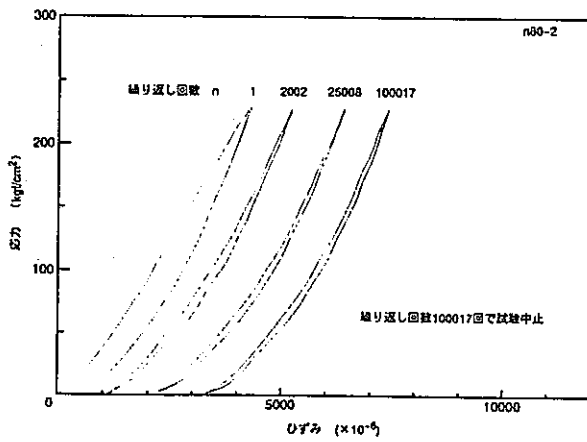
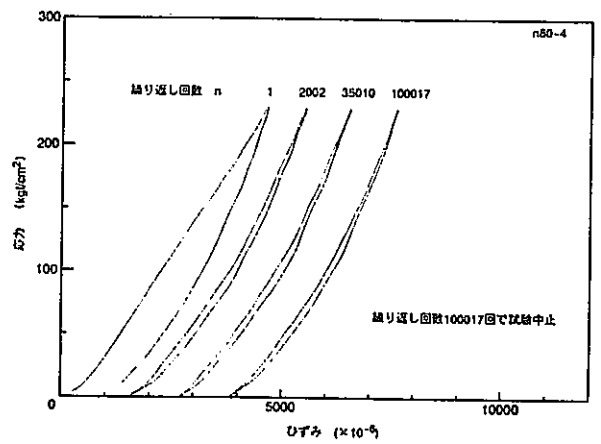
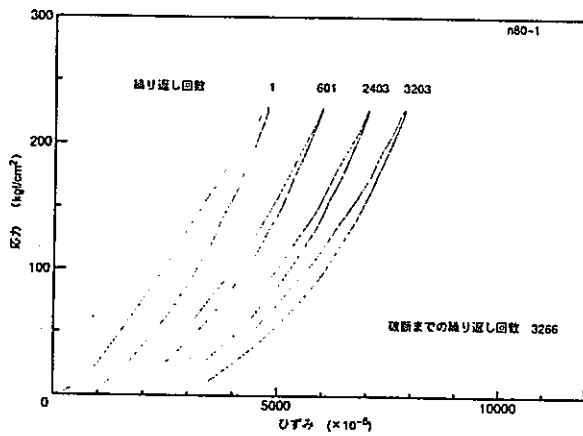
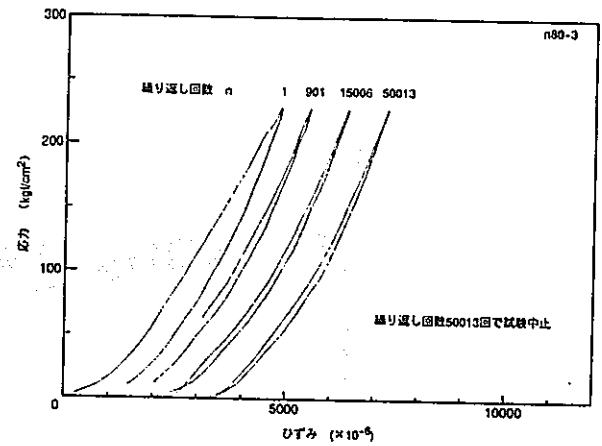
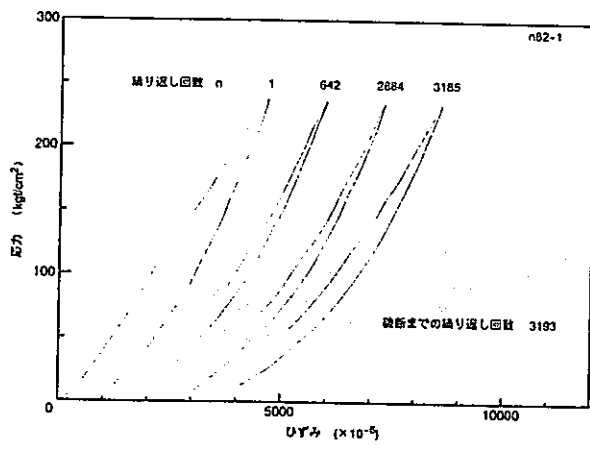


図2-6 ヒステリシス・ループ (その3)



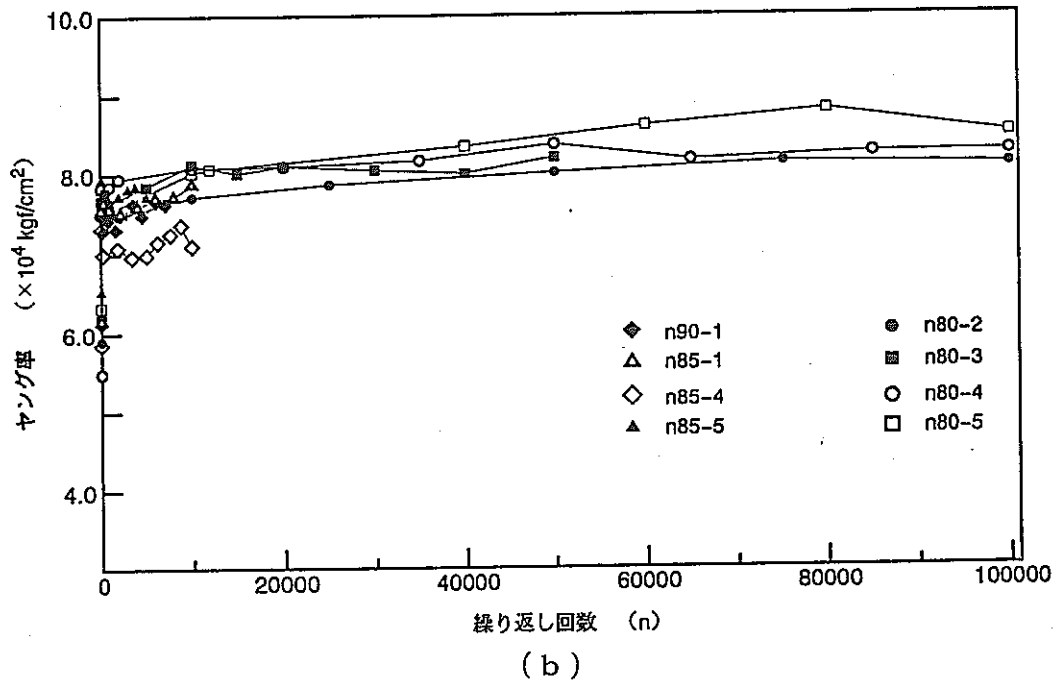
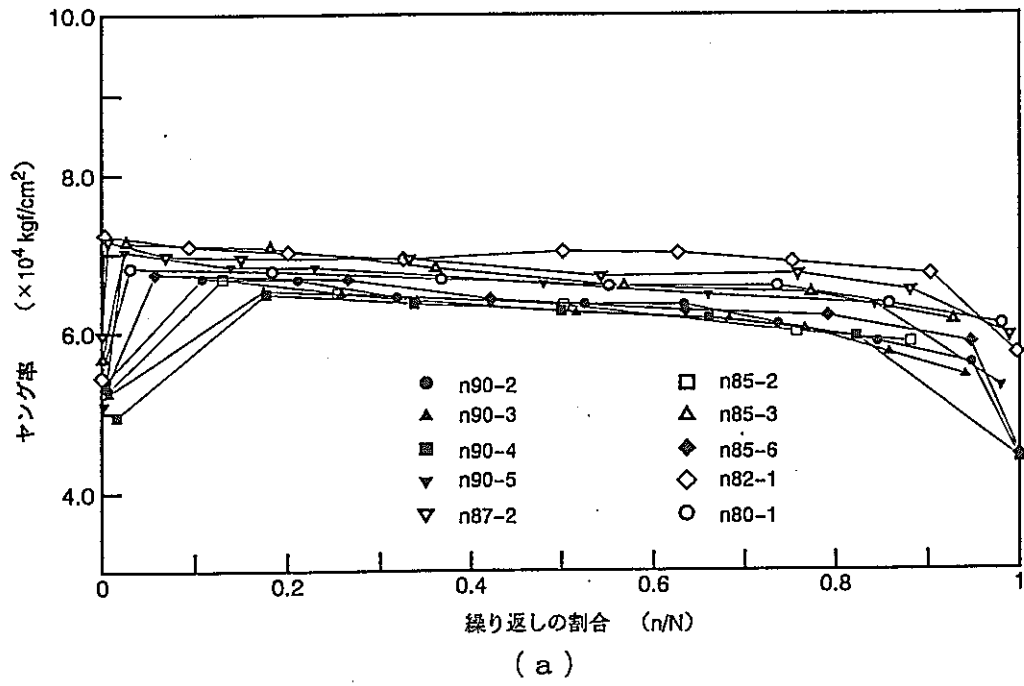


図 2-7 ヤング率と繰返し回数との関係

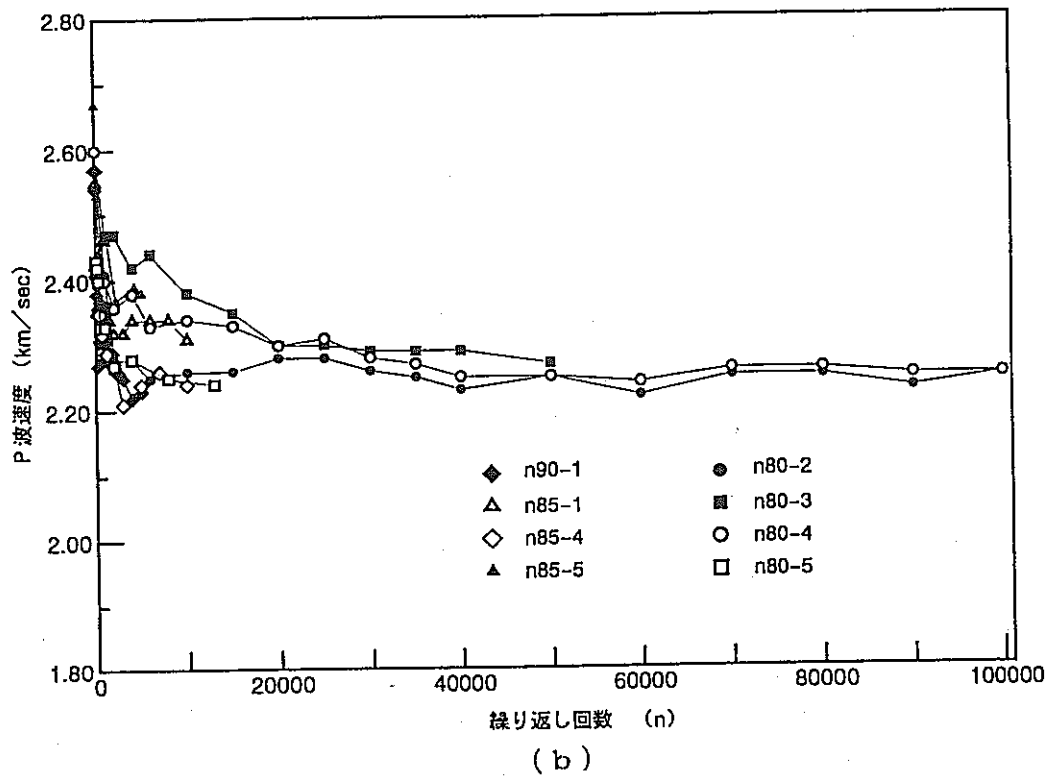
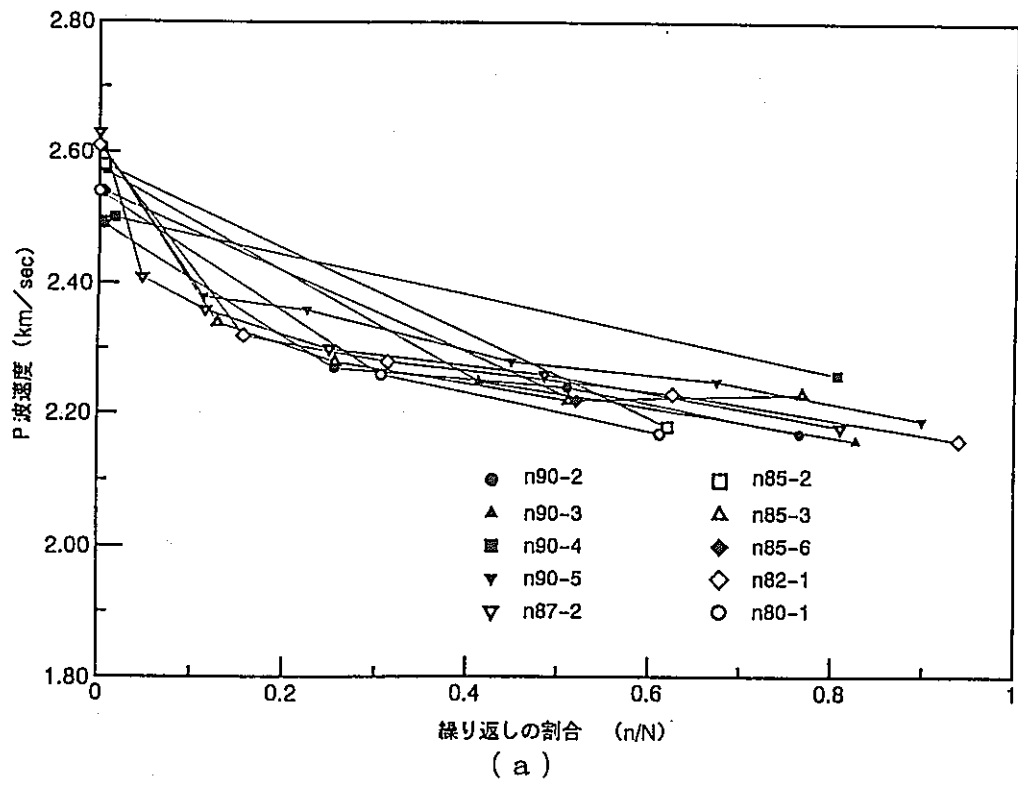
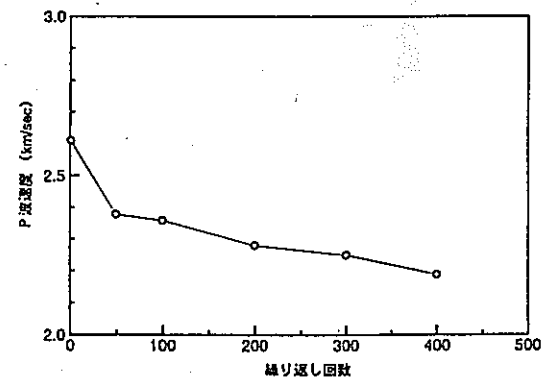
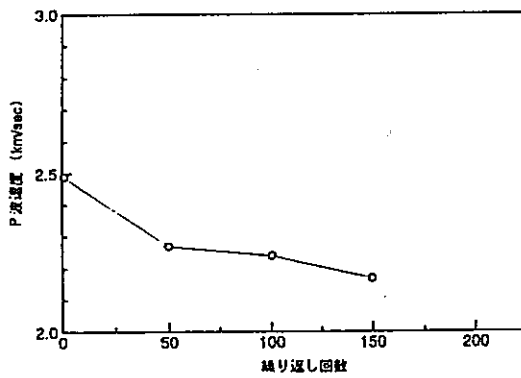
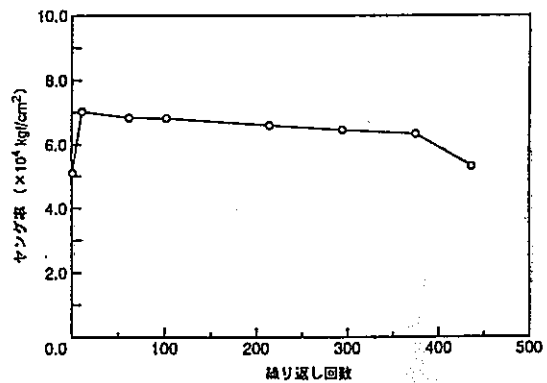
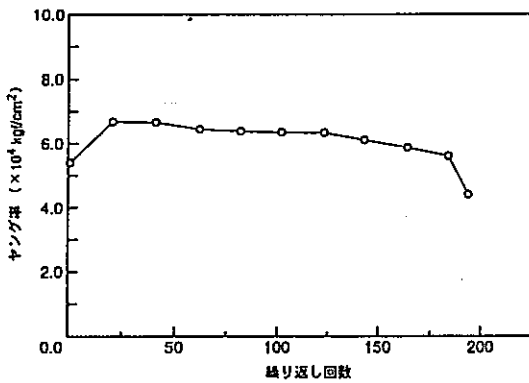
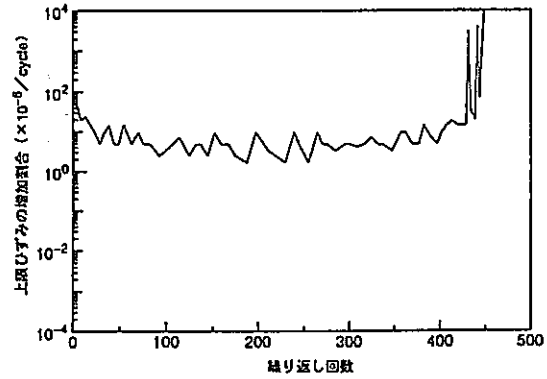
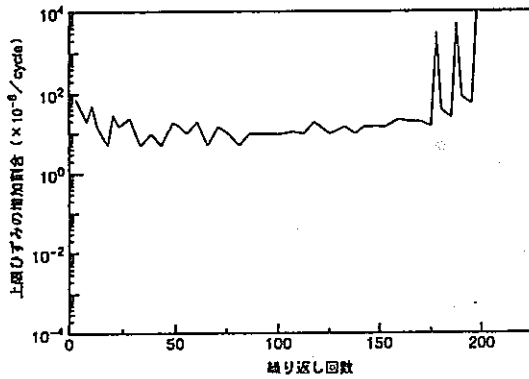
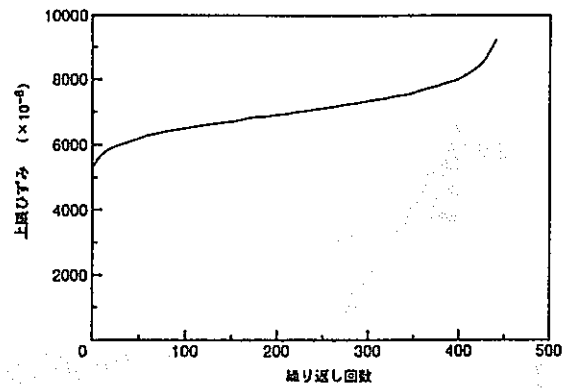
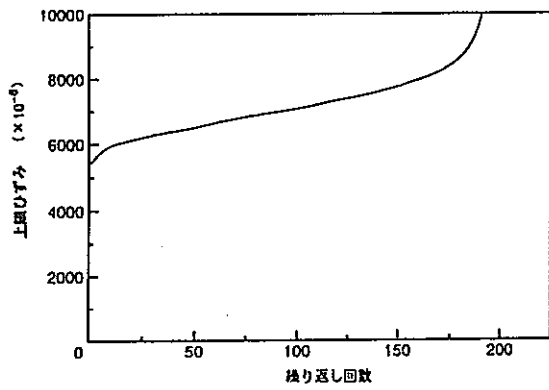


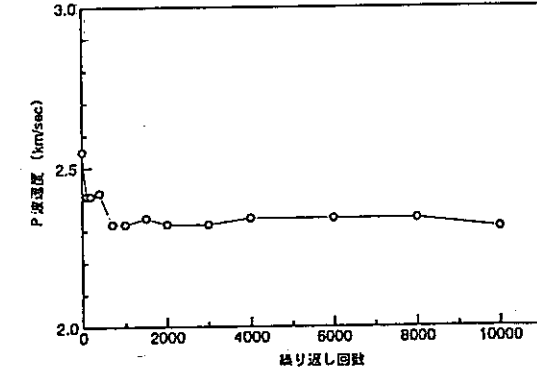
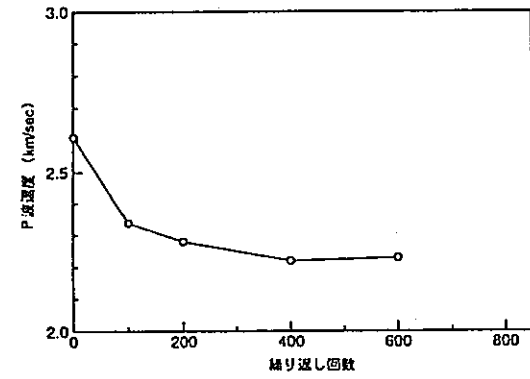
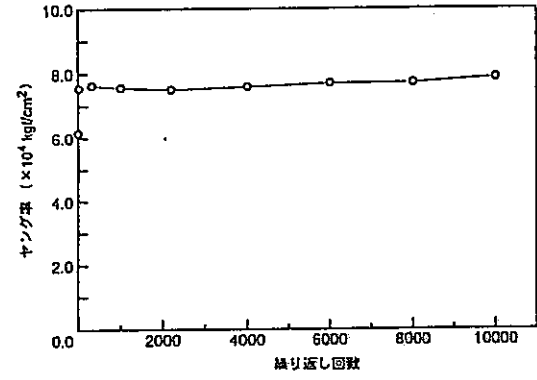
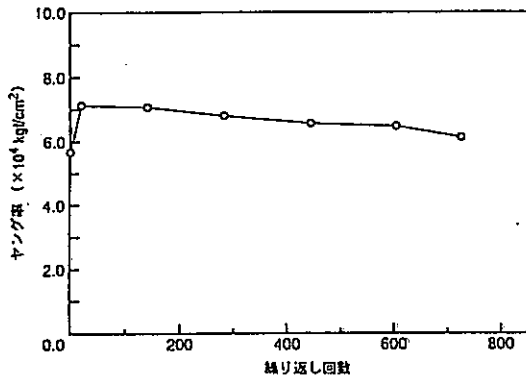
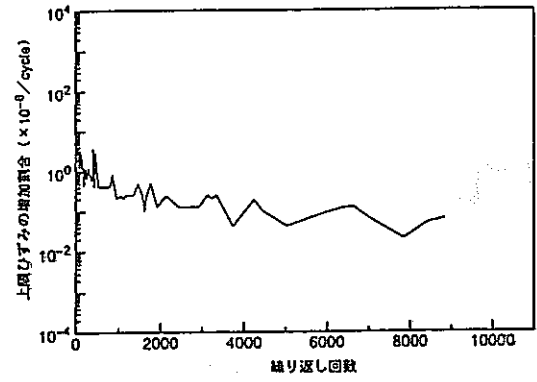
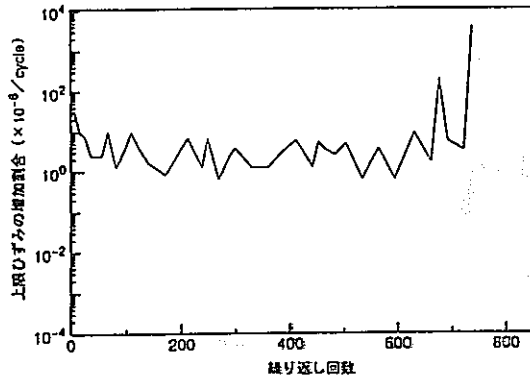
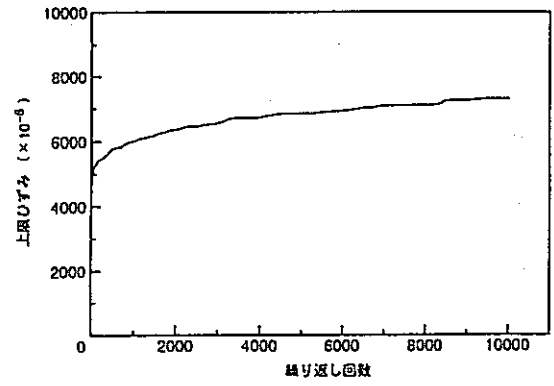
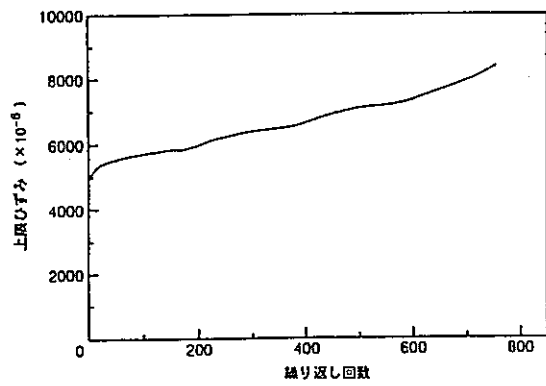
図 2 - 8 P 波伝播速度と繰返し回数との関係



(a) N90-2

(b) N90-5

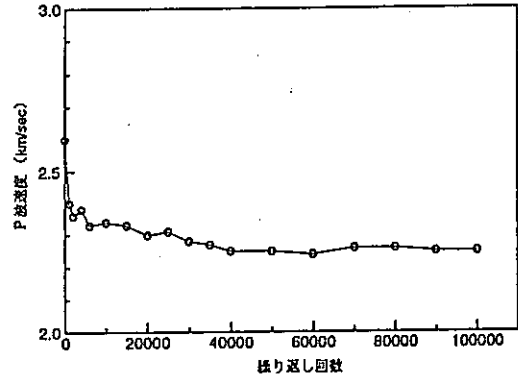
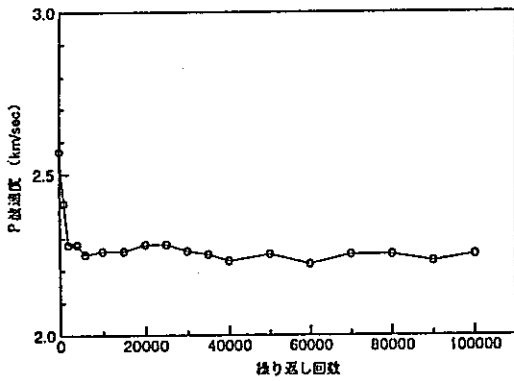
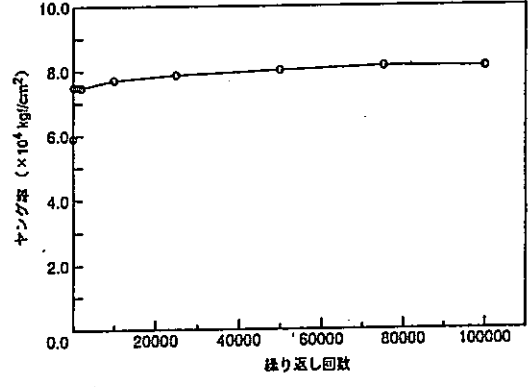
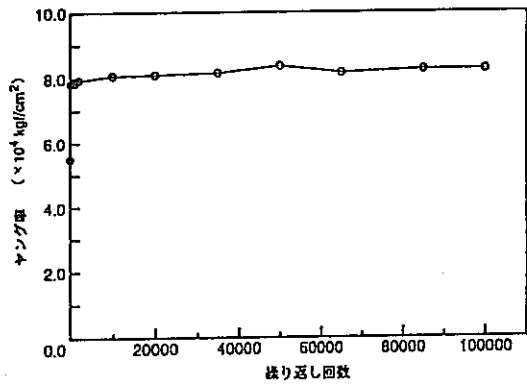
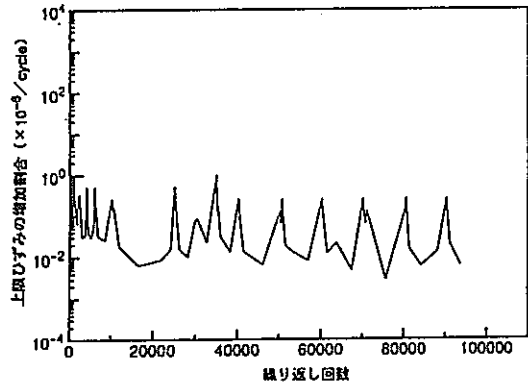
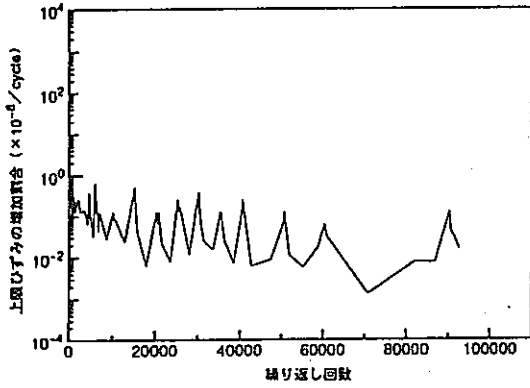
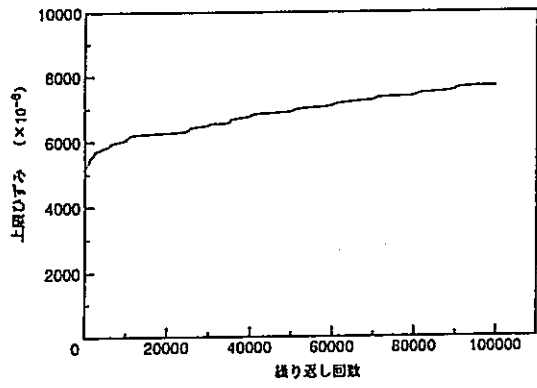
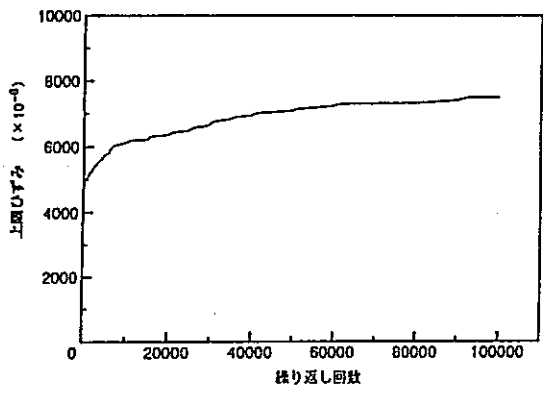
図 2-9 各物性値と繰り返し回数との関係 (その 1)



(c) N85-3

(d) N85-1

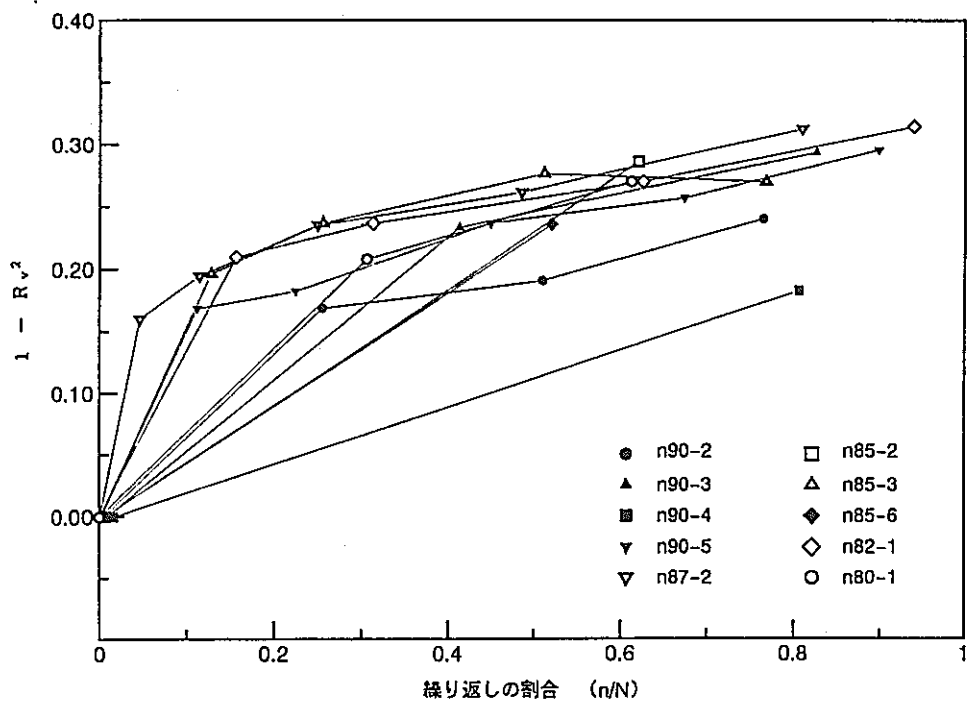
図 2-9 各物性値と繰り返し回数との関係 (その 2)



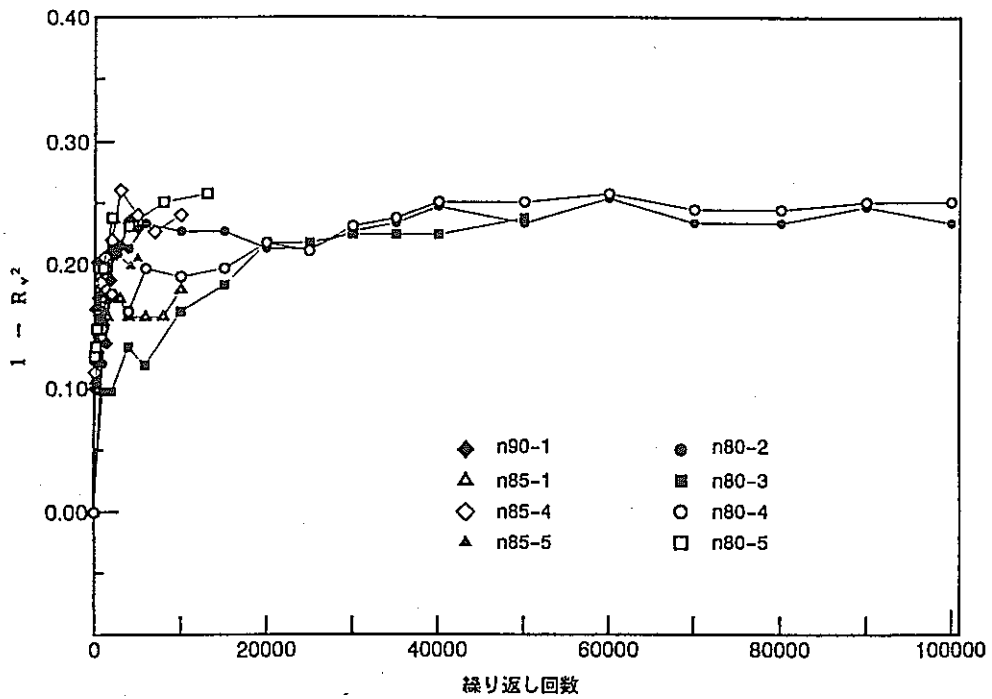
(e) N80-2

(f) N80-4

図2-9 各物性値と繰返し回数との関係(その3)



( a )



( b )

図 2 - 1 0 き裂係数  $(1 - R_v^2)$  と繰返し回数との関係

### 3. 坑道周辺岩盤の力学的状況の精密調査

#### 3. 1 はじめに

坑道周辺の岩盤がおかれている力学的状態、すなわち、地圧の分布や緩みの状態などを精密に把握する方法の確立を目的として、かぶりが約 590m ある 250m レベル坑道 (N13°W) の日峰分岐付近において、坑道周辺の地圧分布とき裂深さに関する測定を実施した (図-3-1 参照)。周囲の岩盤は花崗閃緑岩であり、坑道は無支保で敷幅約 2.3 m、高さ約 2.4m の馬蹄形である。表面には浮き石が見られる箇所や一部のジョイントからの湧水もあった。

地圧測定は一昨年、昨年で坑道壁面から 3m 奥まで行っているが、本年度は昨年と同一孔を利用して、さらにその奥 6m までの測定を目指した。

き裂深さに関する測定はコンクリートのき裂深さ測定法を岩盤に応用したものであり、昨年度にモルタル供試体を用いた基礎試験、および、花崗閃緑岩中の坑道壁面における測定を行い測定精度を確認している。今年度は、坑道壁面に 1.2 m x 1.2 m の測定領域を設定し、この領域内に存在する全ての開口き裂に関して表面における長さ、角度、開口幅、および、き裂深さ、き裂と壁面の角度を計測した。また、石灰岩中のき裂に対して本方法の応用を試みた。

#### 3. 2 地下空洞周辺の地圧分布の測定

応力解放法による地圧測定では、作業に作孔機を必要とするが、この機械は、通常、大型で重く、その運搬と備え付けに労力と時間がかかり人件費もかさむ。そこで、本研究では、安価で迅速な地圧測定をめざし、携帯型の作孔機を用いた地圧測定を試みている (1, 2)。一昨年、昨年は、当鉱山の花崗閃緑岩中の坑道において、坑道壁面から 3m 奥までの地圧測定に成功している。昨年は、作孔機の回転部の摩耗に起因した振動のために、測定作業を途中で打ち切らざるをえない状況に追い込まれた。

本年度は前述のトラブルがないよう新規に購入した作孔機を用い、深さ 6m までの測定を目標として計測を行った。

### 3. 2. 1 測定の概要

地圧の測定には、従来と同様に、39 mm 径の測定孔を用いた孔壁ひずみ法を採用した。計測の手順を以下に示す。

1) 携帯用電動作孔機（シブヤダイモドリル TS-250N ベース特注、100V、20 A）で穿孔した 100mm 径の孔底の中心から、39 mm 径のビットで約 20 cm の長さの測定孔を作孔する。

作孔機は 4) の作業のために駆動力をギヤを介して伝達するようになっている。用いたビットはノートン社製のインプリ型硬岩用ダイヤモンドビットである。ロッドはアルミ製であり、穿孔長が大きい場合には振動を低減するためにセンタライザーを 2 個使用した。

2) 測定孔内をロッドで誘導した家庭用ドライヤーの温風で 1 時間程度乾燥させた後、アセトンを含ませたウェスで孔壁を拭う。

3) 石島・宋 3) の開発したプローブ（図 - 3 - 2）には、防水型抵抗線ロゼットひずみゲージ（共和 KFW-5-120-D17-11）が 3 枚セットされている（図 - 3 - 5 参照）。ひずみゲージベースにゼリー状のシアノアクリレート系瞬間接着剤を塗布し、プローブを所定の位置まで挿入する。ポンベから誘導した圧縮窒素ガス（2, 500 hPa）によりゲージを孔壁に押し出し接着する。

4) ゲージからのリード線をスイベルを貫通してスイッチボックスに接続する。スイッチボックスの出力は静ひずみ測定器に入力され、ひずみ値は同測定器の液晶表示部に 1 マイクロストレイン単位でデジタル表示される。

5) ひずみの初期値を測定後、100 mm 径のコアビットでオーバーコアリングを行い、ひずみの変化を記録する。

6) 作業が終了したら、コアを折り取り回収する。

7) 奥部の測点に対し 1) ~ 6) の作業を繰り返す。

### 3. 2. 2 測定結果

図 - 3 - 3 に回収されたコアの様子を示す。き裂が多く、穿孔深さ 4.5m 付近



では中空コアのディスクングが観察された。また、その近傍ではき裂からの湧水も観察された。6.2mの深度に現れたき裂からは相当量の湧水がみられ、この時点で接着剤を使用する地圧測定は断念せざるを得なくなった。以上の事情から、本年度は深さ 5 mにおける地圧計測結果しか得ることができなかった。

強制的なコアの折り取りやディスクングに起因するき裂を省いて算出した RQD、すなわち、長さ10cm以上のコアの回収率の深さに沿った分布を、図-3-4に示す。RQD値は坑道壁面から 5 m奥までは徐々に増加しているものの大きな変動は見られない。一方、深度が 5 ~ 6 mの範囲では、小さい値が示されている。一般に、ゆるみは坑道壁面から生じると考えられているので、深度 5 ~ 6 mで見られる小さい RQD値は、坑道掘削に伴う緩みではなく、本来、岩盤に存在していた地質的弱部であると判断される。

深度 5 m で実施した計測において観測されたオーバーコアリング時のひずみ変化を図-3-5に示す。ひずみの変化は滑らかで、作孔ビットの深度がひずみゲージ貼付位置よりも 8 cm 以上奥に進むと、ひずみは一定値を示し変化がなくなっている。この挙動は弾性モデルに基づく予想と一致しており、ひずみゲージの張り付けは完全であったことを示している。

ボーリングコアから直径 30 mm、長さ 60mm の供試体を作製し、単軸圧縮試験によって求めた花崗閃緑岩の物性値を表-3-1に示す。同表の除荷時のヤング率、ポアソン比を用いて、測定されたひずみから地圧応力を評価した。その結果を図-3-8および表-3-2に示す（座標系については、図-3-6、3-7参照）。なお、図-3-8には、本年度と同一孔を用いて得られた昨年度の結果も示されている。

深度 2 m、3m における主応力の方向は互いに一致している。深度 1 m における主応力の方向も前 2 者と大きな差異はない。ところが、深度 5 m においては主応力の方向が他の計測位置の結果と異なっており、最小主応力は引張となっている。この差異は、深度 5 m より奥ではき裂が多いために、地圧が多少擾乱されていることを意味するのかも知れない。現時点では、図-3-8から、坑道周辺の地圧分布について明確な傾向を見いだすことはできない。しかしながら、鉛直方向の地圧や、水平面内の地圧に限っては、以下に示すような傾向を見いだすことができる。

まず、鉛直方向の地圧は、図-3-9(a)のように、坑道壁面から遠ざかるにつれて減少している。また、水平面内の地圧の分布は、図-3-9(b)に示すように、水平面内の最大主応力はほぼ南北方向を向き、深さ2mで大きい値になっている以外は、大体、30MPa前後の一定大きさになっている。これに対して、ほぼ東西方向を向いた水平面内の最小主応力は、深さ1mの値が大きく、坑道壁面から遠ざかるにつれて減少している。

### 3. 2. 3 地圧の測定結果に関する若干の解釈

#### ① 坑道壁面に垂直な直ひずみの分布

藤井他は岩石の新しいせい性破壊規準として引張ひずみ規準を提案している(4-6)。この破壊規準は岩石に生じる引張ひずみがある値に達すると破壊が起こるといふものである。はたして、岩盤内には引張ひずみが発生するものであろうか？実は、本計測結果は以下に説明するように、これに関する情報も与えている。

本計測におけるロゼットひずみゲージは、図-3-5に示すように、孔壁上の3つの異なった位置に貼られている。この内、ゲージ1A、2A、3Aは孔軸方向に貼付されている。弾性理論によれば、オーバーコアリングに伴って計測されるこの方向のひずみは、元来、岩盤中に存在している大きさに等しい(符号は逆になる)。

この坑道壁面に垂直な直ひずみに注目し、測定されたひずみ値に負号をつけた値の分布状況を示したのが、図-3-10である。坑道側壁の中で、北東側の結果(同図(a))をみると、坑壁から1m奥のひずみは圧縮であり、坑道壁面近くでは引張になっている。一方、南西側の側壁(同図(b))では、岩盤奥部ではほぼ0、2m奥では引張、1m奥では3つの内で2つが圧縮になっている。

引張ひずみ破壊基準に基づくならば、北東側岩盤は健全であり、南西側岩盤では、坑道壁面近くで引張ひずみが限界値に達し破壊が発生したものと解釈できる。実際、南西側岩盤ではコアにき裂が多かった。また、南西側岩盤に比べて北東側岩盤は穿孔能率が低く、ビットに対して硬く反応したことは、北東側岩盤が健全であったことを裏付ける一つの証左を与えているといえる。

上記の解釈の正否はともかく、少なくとも、岩盤内に引張ひずみが存在することが明らかになった。これは引張ひずみ基準を岩盤内空洞の安定性評価に対して

応用し得る可能性を示唆している。

## ② ディスキングに関する考察

既述したように、坑壁から4.5m前後の2箇所で、中空コアディスクングが発生した。中空コアディスクングの発生条件に関して実験的・理論的検討を行った菅原他の研究によれば7)、中空コアディスクングの条件は、

$$\sigma_x + \sigma_y - 2\sigma_z = kT. \quad (3.1)$$

と表される。ここで、 $T$ は引張強度、 $k$ は定数で、通常は8、中空コアで内径と外径の比が0.63の場合には5の値を取る。今回の現場では引張強度が10 MPa程度、 $\sigma_x + \sigma_y - 2\sigma_z$ は24 ~ 58 MPa程度なので、中空コアのディスクングの発生する条件を満たしていたといえる。

## 3. 3 き裂深さの測定

昨年度は、坑道側壁に現れている開口き裂のき裂深さを、±15 mm以内の誤差で非破壊的に測定できることを確認した2)。測定法は、コンクリートに対して実用化されている回折波の初動極性の変化を応用したものである。

本年度は花崗閃緑岩中の坑道壁面に1.2 m x 1.2 mの測定領域を設定し、この領域内の全ての開口き裂について、表面における長さ、角度、開口幅、および、き裂深さ、き裂と測定面のなす角を計測した。また、石灰岩中の坑道壁面について初動極性の変化を利用した方法の適用性を確認し、伝播時間を利用した方法の応用も試みた。

### 3. 3. 1 初動極性の変化を利用した方法の計測手順

計測システムを図-3-11に示す。室内試験、原位置試験とも同じシステムを用いた。以下に計測装置の説明を加えながら計測の手順について述べる(図-3-12参照)。なお、詳しい理論については文献8を参照されたい。

1) 岩盤表面に、目盛り付きの測線を記す。通常、測線はき裂と垂直になるようにとる。

2) 測線上に発振子 S と受振子 R をき裂を挟んで配置し、S から弾性波を発振し、R での受振波形を観察する。発振子、受振子がき裂から近い場合には受振波の初動極性は負であるが、き裂から発振子、受振子を遠ざけていくと、ある距離を境に初動極性が正に変化する(図-3-13)。このときの、発振子 S からき裂までの距離 a、受振子 R からき裂までの距離 b をそれぞれ  $a_c$ 、 $b_c$  とし、これを記録する。き裂の角度  $\gamma$  (図-3-12 参照) がクリノメーター等で測定できない場合にはもう一度異なった  $a_c$ 、 $b_c$  の組を測定、記録する。

発振には、インパルスハンマー(リオン社製、PH-51、エキステンダー L とスチールチップを装着、2~10,000 Hz) を岩盤上に押し付け、頭部を木作業用の市販のハンマーで打撃した。この方法は、発振周波数を高くすること、再現性を向上すること、岩盤の損傷を防ぐことの3つを目的をほぼ満たしている。受振には、原位置岩盤の表面に多少の凹凸があっても計測可能なように、圧電式加速度ピックアップ(リオン社製 PV-85、1~7,000Hz) に棒状アタッチメントを装着して用いた。

受振波形はチャージアンプ(リオン社製、VM-27、周波数帯域 1~30,000 Hz) を介して、デジタルストレージシンクロスコープ(岩崎通信社製 DS8606C、サンプリング周波数最大 60MHz、3ch) 上で観察した。受振波の初動極性が変化する前後では、確認後、受振波形をメモリーカードに記録した。メモリーカード上の波形は GP-IB インターフェースを介してパソコン(NEC 社製 PC9801TF51) のハードディスク上に転送し、必要があれば解析(FFT 等) に供した。

3) 採取したサンプルを持ち帰り整形後、超音波式弾性波速度測定装置(OYO CORPORATION 製、ソニックビューワー) を用いて計測した P 波速度、S 波速度を基に、動的ポアソン比を計算する。前述の  $a_c$ 、 $b_c$  と動的ポアソン比を基に、文献 8 に示されている方法を用いて、き裂の長さや角度を評価する。

### 3. 3. 2 伝播時間を利用した方法の計測手順

本研究では、T-法と呼ばれる方法<sup>9)</sup>を採用した。この方法もコンクリートに関して既に実用化されているが、精度に関しては初動極性を利用した方法に比較し

てやや劣る。計測システムは初動極性の変化を利用した方法と同じである。計測の手順について以下に述べる（図-3-14参照）

- 1) 岩盤表面にき裂と垂直に目盛り付きの測線を記す。
- 2) 測線上に発振子 S、受信子 R を配置し、S から弾性波を発振し、R で受振し、S - R 間の伝播時間をシンクロスコープのモニター上のカーソルを用いて計測する。受信子の位置は一定とし、発振子の位置を図 3 - 1 4 に示すように移動しながら計測を繰り返す。理論的には発振子、受信子のいずれを移動させても同じ結果が得られるが、多数回の打撃による岩盤表面の損傷を防ぐために発振子を移動する方法が採用された。
- 3) 得られた伝播時間と測線上の発振子 - 受信子間の距離との関係は、図 - 3 - 1 4 のようになり、以下の式によってき裂の深さを算出することができる。

$$d = \Delta t \cot D (\Delta t \cot D + 2 L) / \{2(\Delta t \cot D + L)\} \quad (3.2)$$

ここで、 $\cot D$  は P 波速度である。

### 3. 3. 3 花崗閃緑岩中の坑道壁面における計測結果

1.2 m x 1.2 m の計測領域は地圧計測現場近傍の北東側壁面に設定した。まず、領域内の個々の開口き裂にフェルトペンで印をつけて存在を明確にさせた後、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。

計測領域内の総数 25 本のき裂について、表面上に現れたき裂長さをスケール、角度をクリノメーター、開口幅を拡大ビデオ撮影装置（100 倍）によって計測した。なお、岩盤の動ポアソン比は 0.21 と評価された。

表面に現れたき裂の角度  $\eta$  の分布を図 - 3 - 1 5 に示す。 $\eta$  は向って右側を  $0^\circ$  として反時計回りに計った。角度  $\eta$  は  $0^\circ$  前後のものと  $90^\circ$  前後のものが多い。

表面上のき裂の長さ  $L$  は、図 - 3 - 1.6 に示すように、ほとんどが 80 cm 以下になっており、短いものほど多く分布している。

表面で測定したき裂の開口量  $t$  は、図 - 3 - 1 7 に示すように、ほとんどが 2

mm 以下になっており、小さいものほど多く分布している。

き裂深さ  $d$  はほとんどが 10 cm 以内である (図-3-18)。

き裂の角度  $\gamma$  は  $90^\circ$  前後のものが多く、 $0^\circ$  のものはそれに次いで多い。後者は、浮き石の一部を形成している (図-3-19)。

計測した各き裂について、角度  $\eta$ 、 $\gamma$  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-3-20)。図から、き裂は走向、傾斜が類似した3つのグループに分かれていることがわかる。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 石灰岩中の坑道壁面における計測結果

計測現場として、8D 休憩所付近の石灰岩中に掘削された坑道壁面を選定した。幅 6.1 m、高さ 3.0 m の矩形状の断面を持つ坑道は、天盤のみロックボルトによって支保されている。現場には坑道を貫くき裂が 10 m に 1 本程度の頻度で存在し、これらの一部からは湧水が観察された。

坑道壁面に現れていた小さなき裂 3 本を選び、これらのき裂の深さを測定するために、初動極性の変化を利用する方法を適用した。評価の際に、ポアソン比として、0.15 を用いた。測定後、インパクトドリルで取り明けを行い実際のき裂深さを調べた。両方の結果を表-3-3 に示す。推定されたき裂深さは実際の値と良く一致していることがわかる。これに対して、角度に関する精度はやや劣るが、初動極性の変化を利用する方法は、石灰岩に対しても適用できることが確認されたといえる。

坑道を貫くき裂帯に対しても、初動極性の変化を利用する方法の適用を試みた。当該き裂帯は、走向、傾斜が大体等しい 10 本程度のき裂から成っており、天盤付近からは湧水が観察された。また、表面付近は岩盤が崩れていたため、開口幅は不明である。

試験は側壁に対して行ったが、得られた波形は反射波が卓越しており、また、初動極性の変化が明瞭に識別できなかった。このため、初動極性を利用する方法は、本事例に対しては適用不能と判断された。上記の現象が起こった原因として、

当該方法は小さなき裂に対して敏感であるために、波形が、計測対象のき裂だけではなく、坑道壁面に密に存在する小さなき裂にも影響されたことが挙げられる。

伝播時間を利用する方法は、波形に関わらず、伝播時間さえ読み取ることができればき裂深さを推定できる。そこで、当該き裂に対して、T-法の適用を試みた。発振子-受信子間の距離と伝播時間の関係から、 $\Delta t$  は 0.32 milisec. と評価され、これを基に、このき裂帯は表面から 1.8m の深さまで開口しているものと推定された。

### 3. 3. 5 き裂の測定に関する考察

ここではき裂の深さを推定するために2つの方法を用いたが、それぞれの特長を活かして使い分ける必要があると考えられる。

まず、初動極性の変化を利用する方法であるが、この方法は小さなき裂に敏感で、測定精度が良い。このため、風化や発破によって形成された比較的浅い（数10cm以下）き裂の深さを正確に評価するのに適していると考えられる。一方、伝播時間を用いる方法は、精度は劣るものの、測定結果に及ぼす伝播経路上の小さなき裂の影響は小さい。したがって、節理など比較的深くまで開口しているき裂の測定に適しているものと考えられる。

### 3. 4 まとめ

硬岩に対し、簡便な作孔機の使用と孔壁ひずみ法による応力解放法の組み合わせにより、壁面から5m奥までの地圧を測定できることが確認された。コアレスキング現象やひび割れ状況などとも符合した妥当な測定結果が得られたものと判断される。また、孔壁ひずみ法による測定から、岩盤中に元来存在していたひずみに関する情報が得られること、坑壁近くでは、このひずみが引張になっていることが確認された。

開口き裂の深さの測定に関しては、初動極性の変化を利用する方法が、花崗閃緑岩の他に石灰岩中のき裂に対しても適用できることが確認された。花崗閃緑岩における測定からは、評価されたき裂の向きが、元来存在している直交した3系

統の石目に対応すること、浮き石を形成するき裂の識別が容易に行えることなどが明らかになった。

初動極性の変化を利用する方法については、適用限界の一つも見いだされた。すなわち、深さがmオーダーの大きなき裂には不向きであり、その場合には、伝播時間を用いる方法が適していることがわかった。

### 3. 5 今後の課題

今年度、地圧測定作業は、測定孔に現れたき裂からの湧水によって、途中で中止せざるを得なかった。硬岩の場合、湧水は避けて通るのが難しいので、水中でも測定可能な方法の開発が望まれる。このため、来年度は、孔壁の変形を機械式の測定器を用いて測定する方法の開発に着手したいと考えている。本方法を用いれば、下向き孔を用いた地圧測定が可能であり、水平面内の応力状態についての信頼のおける情報が得られるものと期待される。

坑道周囲のひずみ分布の測定は、空洞周辺の緩みの評価と関連して興味深いテーマであり、今後も測定結果の集積を計る所存である。

き裂深さを測定するために、今年度は、弾性波の測定に立脚した2つの方法を用いた。両方法とも、坑道壁面で開口しており奥で閉じている（接触している）き裂について、最初の閉じた場所の評価を与えていることがわかった。き裂の中には、いくつかの場所で閉じているものもあろう。来年度は、こういった状態にあるき裂に対して、反射法を応用した測定を試みる。

開口幅を含めたき裂の開口状態は、岩盤内の浸透流とも密接に関係しており、その評価法の開発が望まれる。今後は、測定の最終目標をこれに据えて研究を進めていく所存である。

### 参考文献

- 1) 石島洋二：坑道周辺岩盤の力学的状況の精密調査、システム総合研究所、花崗



- 岩における岩盤工学に関する調査試験研究、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書、pp.39-54、1992
- 2)石島洋二：坑道周辺岩盤の力学的状況の精密調査、システム総合研究所、花崗岩における岩盤工学に関する調査試験研究、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書、pp.？、1993
- 3)石島洋二・宋文洲：2点法によるトンネルライニングに作用する地圧の測定、資源・素材学会、Vol.107, No.7, pp.476-480, 1991
- 4)藤井義明・木山保・石島洋二：岩石の新しい破壊規準、資源と素材、Vol.109、pp.549-550(1993)
- 5)藤井義明・木山保・石島洋二：岩石の新しい破壊規準とその応用、平成5年度資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料、[E]岩盤力学と情報化採鉱、pp.5-8(1993)
- 6)藤井義明・木山保・石島洋二：引張ひずみ規準に関する研究、資源と素材（採択済）
- 7)菅原勝彦・亀岡美友・斎藤敏明・丘行俊・平松良雄、コアディスクキング現象に関する研究、日本鉱業会誌、Vol.1089、No.11、pp.797-803、1978
- 8)藤井義明・福島猛・石島洋二：岩盤表面に現れているき裂の深さを測定する方法、資源と素材（採択済）
- 9)魚本健人・加藤潔・広野進：コンクリート構造物の非破壊検査、森北出版株式会社、1990

表 - 3 - 1 花崗岩の物性値

---

単軸圧縮強度	163 MPa
ヤング率	61 GPa
除荷時のヤング率	63 GPa
ポアソン比	0.22
P 波速度	5.0
S 波速度	3.0
動ポアソン比	0.22

---

表 - 3 - 2 地圧測定結果 ( $\theta$  は鉛直上向きの軸となす角)

坑壁から 1 m 奥

---

局所座標系	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
(MPa)	34.9	43.9	25.2	-13.3	3.7	3.2

---

全体座標系	$\sigma_N$	$\sigma_W$	$\sigma_V$	$\tau_{NW}$	$\tau_{WV}$	$\tau_{VN}$
(MPa)	35.8	24.3	43.9	-0.8	-6.6	-12.2

---

最大主応力 53.5 MPa (N163E、 $\theta = 35^\circ$ )

中間主応力 30.0 MPa (N 37E、 $\theta = 67^\circ$ )

最小主応力 20.4 MPa (N 65W、 $\theta = 65^\circ$ )

---

水平面内の最大主応力 35.9 MPa (N 4E)

” 最小主応力 24.2 MPa (N86W)

---

坑壁から2 m 奥

---

局所座標系	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
(MPa)	56.0	22.1	10.0	-3.8	0.6	4.9

---

全体座標系	$\sigma_N$	$\sigma_W$	$\sigma_V$	$\tau_{NW}$	$\tau_{WV}$	$\tau_{VN}$
(MPa)	55.8	10.2	22.1	5.7	-1.4	-3.6

---

最大主応力 56.9 MPa (N173E、 $\theta = 84^\circ$ )  
 中間主応力 21.8 MPa (N 29E、 $\theta = 8^\circ$ )  
 最小主応力 9.4 MPa (N 97W、 $\theta = 86^\circ$ )

---

水平面内の最大主応力 56.5 MPa (N 7W)  
 " 最小主応力 9.5 MPa (N83E)

---

坑壁から3 m 奥

---

局所座標系	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
(MPa)	28.1	12.3	7.6	-7.1	-0.3	4.5

---

全体座標系	$\sigma_N$	$\sigma_W$	$\sigma_V$	$\tau_{NW}$	$\tau_{WV}$	$\tau_{VN}$
(MPa)	29.0	6.7	12.3	0.5	-1.3	-7.0

---

最大主応力 31.5 MPa (N178E、 $\theta = 70^\circ$ )  
 中間主応力 10.1 MPa (N 42E、 $\theta = 27^\circ$ )  
 最小主応力 6.3 MPa (N 86W、 $\theta = 73^\circ$ )

---

水平面内の最大主応力 29.0 MPa (N 1W)  
 " 最小主応力 6.6 MPa (N89E)

坑壁から5 m 奥

---

局所座標系	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
(MPa)	36.4	6.0	9.2	-9.2	-14.9	7.7

---

全体座標系	$\sigma_N$	$\sigma_W$	$\sigma_V$	$\tau_{NW}$	$\tau_{WV}$	$\tau_{VN}$
(MPa)	38.4	7.2	6.0	-1.0	12.5	-12.3

---

最大主応力 43.2 MPa (N171W、 $\theta = 69^\circ$ )  
 中間主応力 15.8 MPa (N 66W、 $\theta = 56^\circ$ )  
 最小主応力 -7.5 MPa (N 73E、 $\theta = 41^\circ$ )

---

水平面内の最大主応力 38.4 MPa (N 2E)  
 “ 最小主応力 7.1 MPa (N88W)

---

表-3-3 初動極性の変化を利用する方法で推定された石灰岩中のき裂の深さと角度（き裂3は壁面に平行な浮き石を形成するき裂）

---

き裂	推定深さ (mm)	推定角度 ( $^\circ$ )	実際の深さ (mm)	実際の角度 ( $^\circ$ )
1	16	73	23	60
2	16	86	19	68
3	66	--	60	--

---

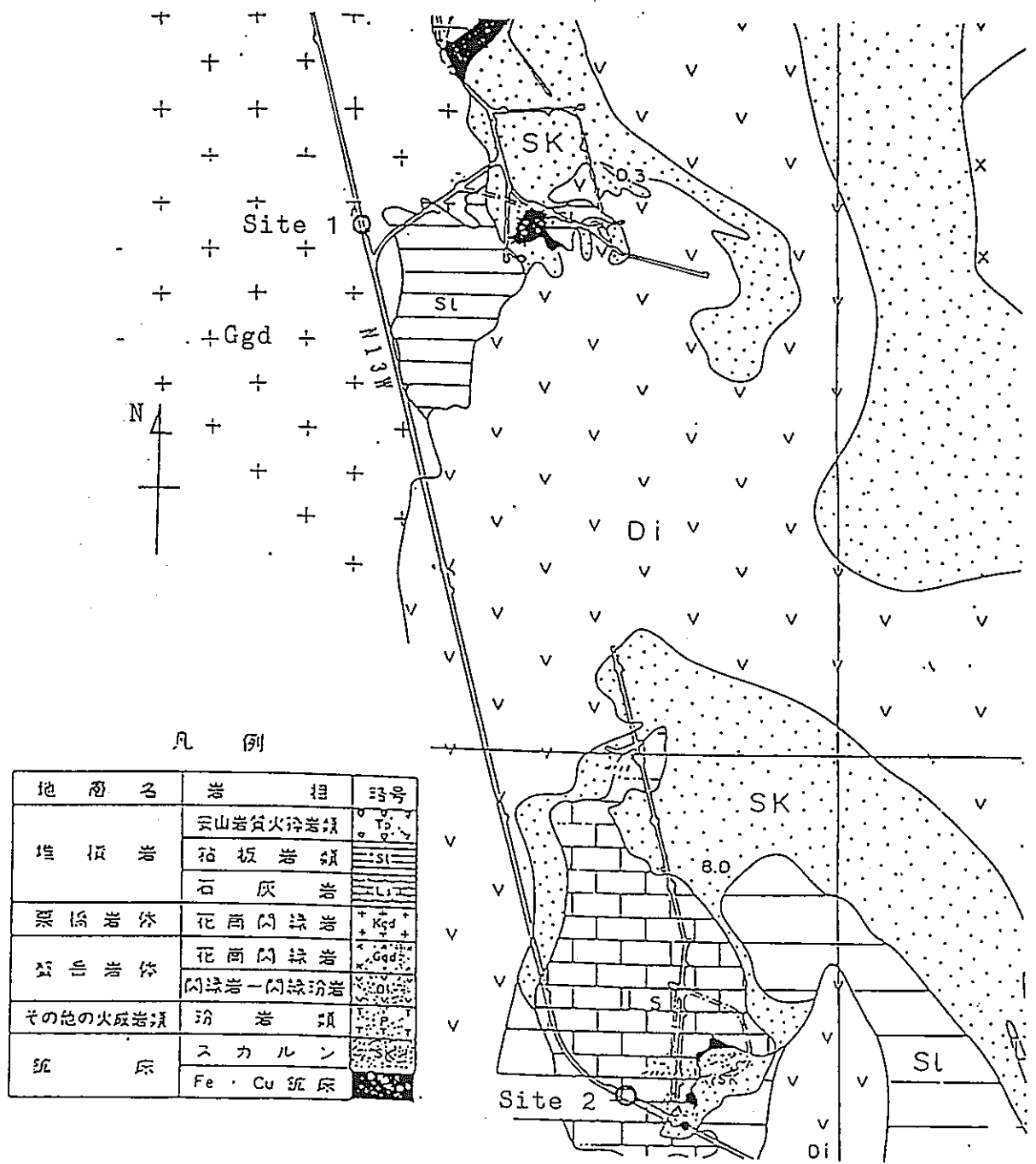


図 - 3 - 1 計測現場周辺の地質図。現場 1 : 地圧とき裂深さの測定現場 (花崗閃緑岩中)、現場 2 : き裂深さ測定現場 (石灰岩中)

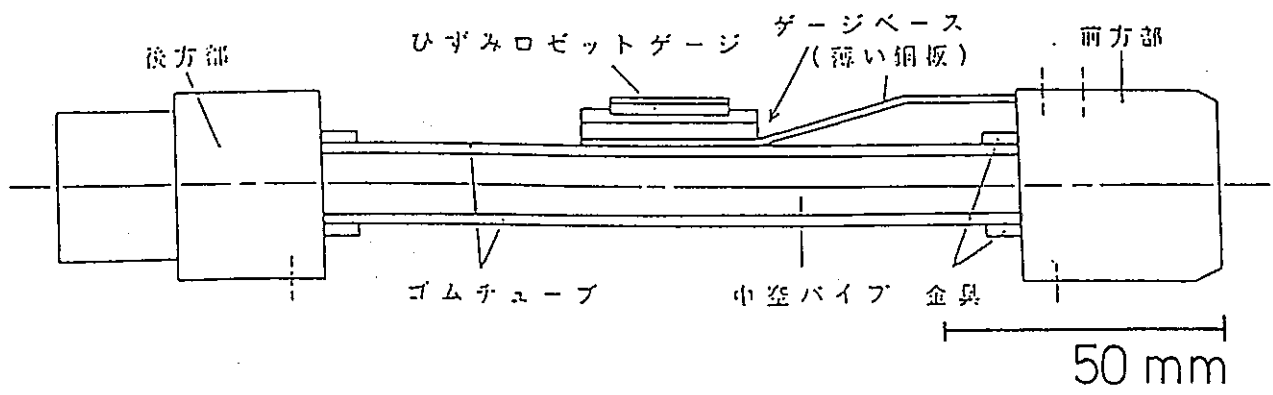


図 - 3 - 2 孔壁ひずみ法の測定で使したプローブ

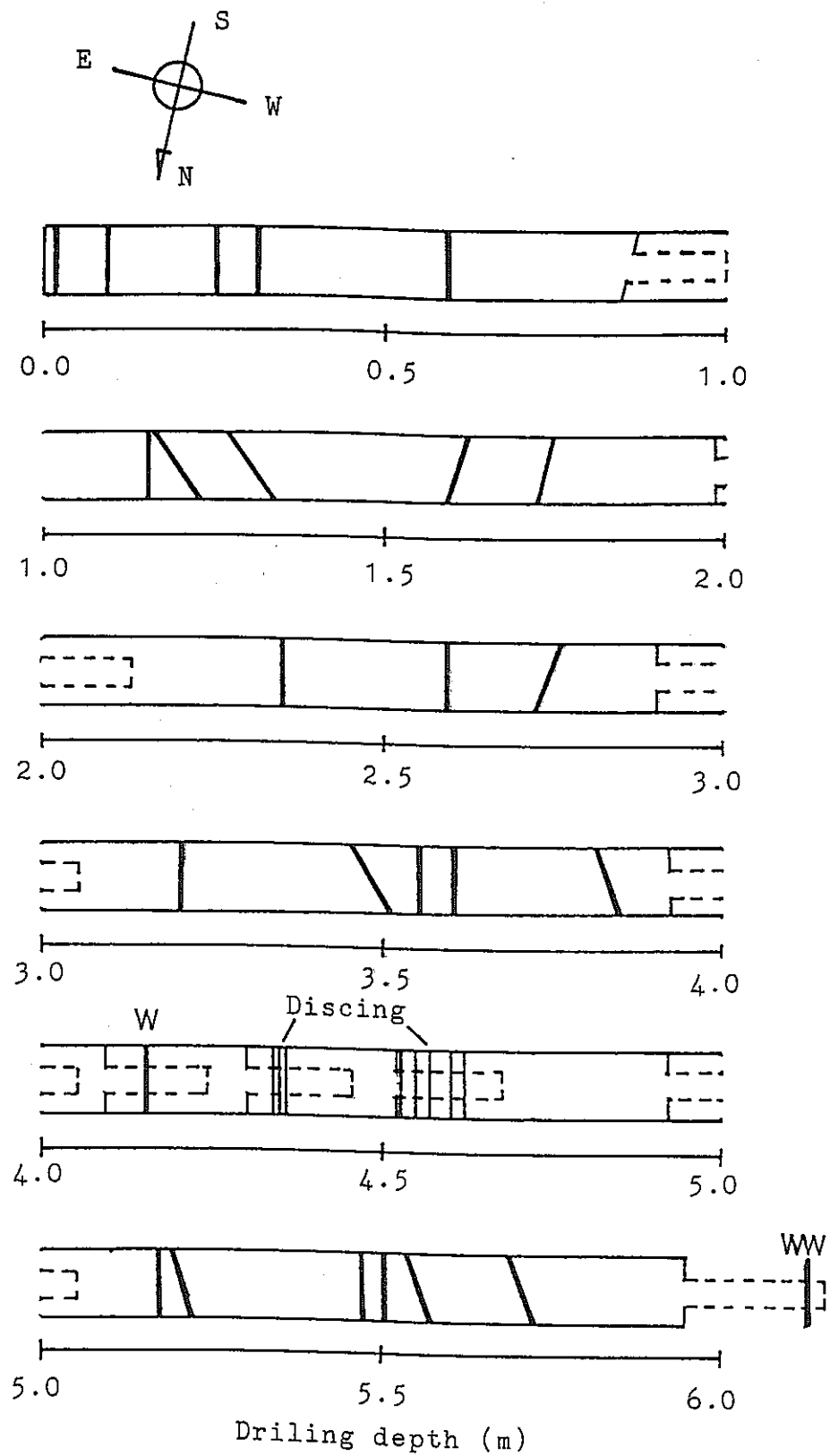


図 - 3 - 3 回収されたコアの様子。点線は計測孔を示す。また、き裂に付けた記号Wは少量の湧水、WWは大量の湧水があったことを示す。

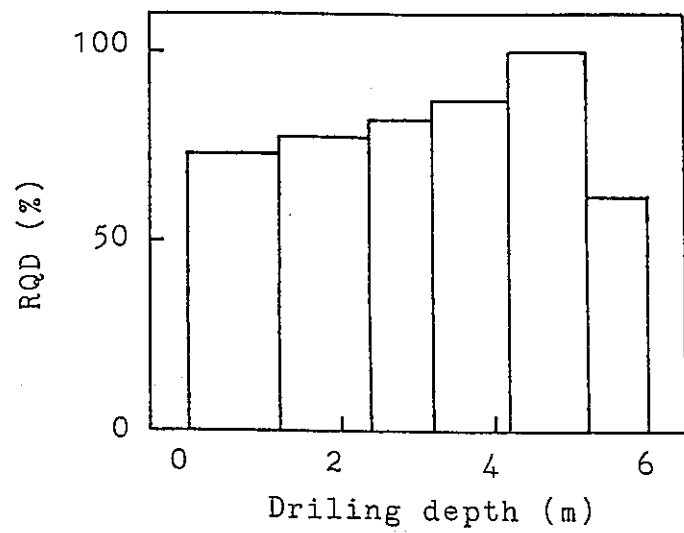


図 - 3 - 4 回収されたコアの RQD の分布



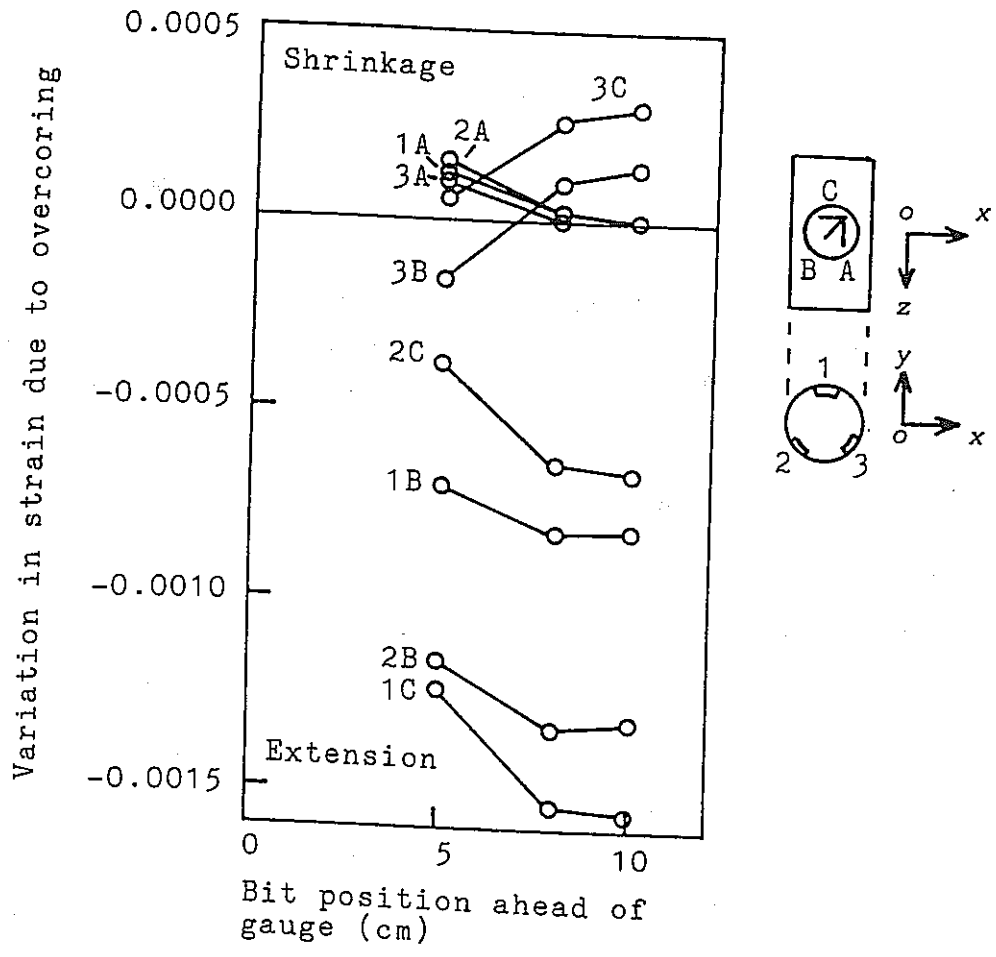


図 - 3 - 5 オーバーコアリング時のひずみ変化。1A 等の記号はひずみゲージの貼付位置と方向を示す。

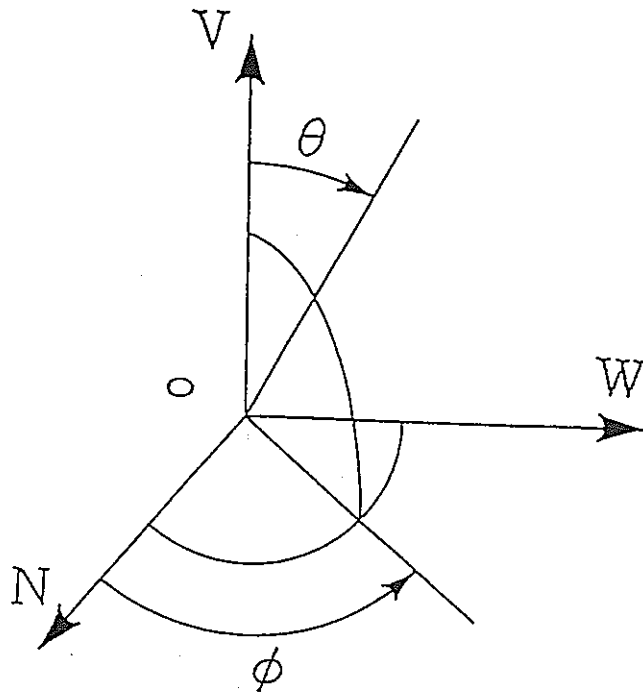


図 - 3 - 6 用いた局所座標系

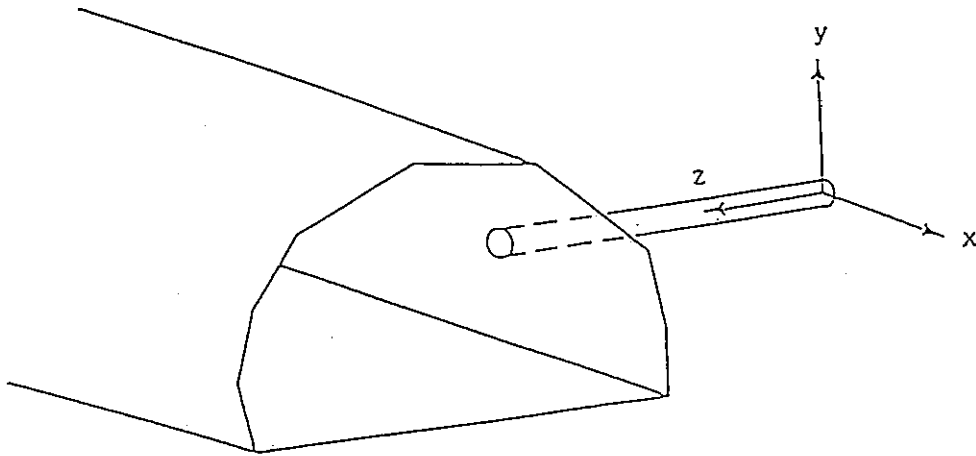


図 - 3 - 7 用いた全体座標系

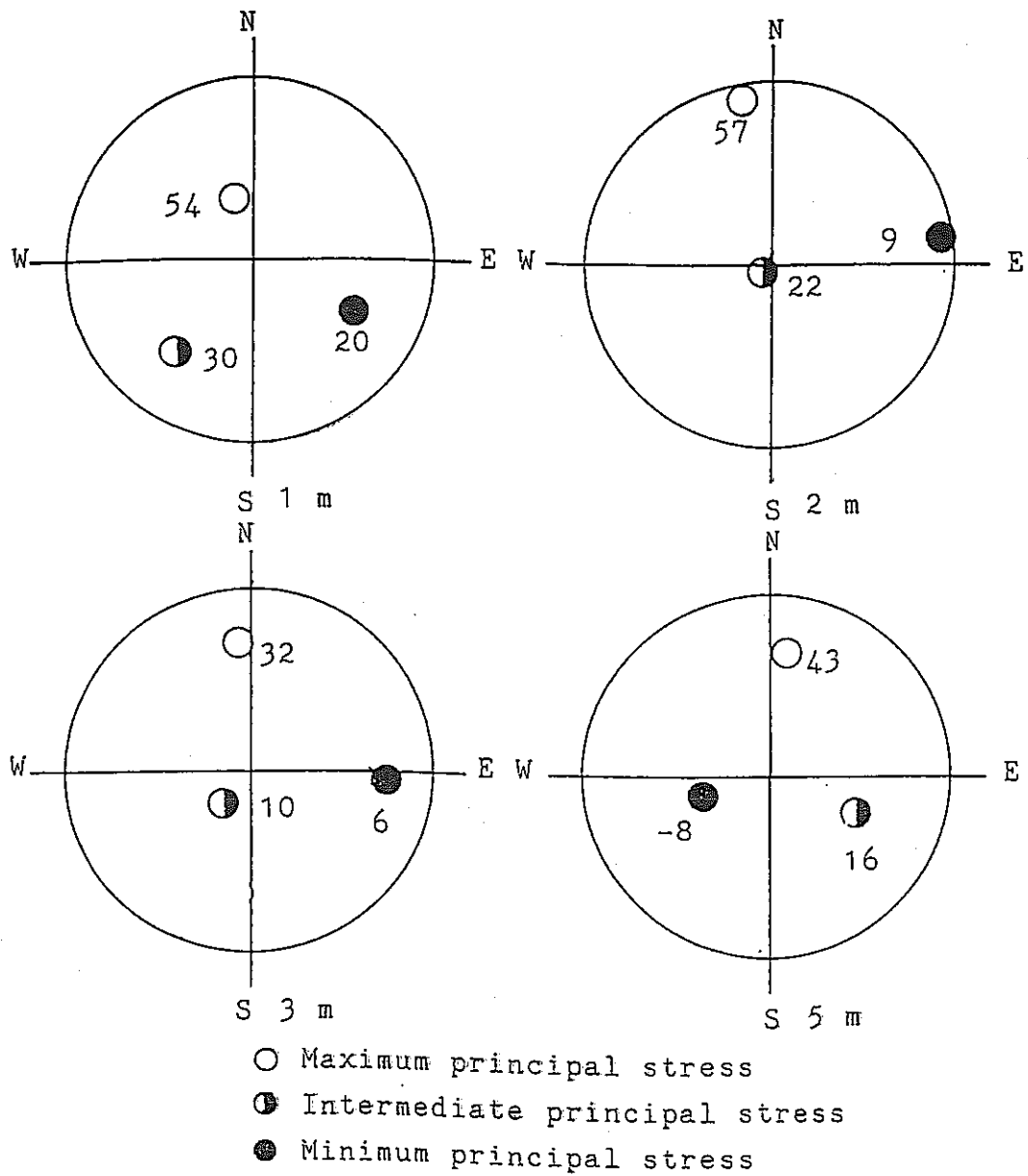


図 - 3 - 8 孔壁ひずみ法による地圧測定結果。下半球ステレオ投影法で表した坑壁からの深さ 1、2、3、5 m における主応力の方向と大きさが示されている。主応力の方向を表すシンボルの近傍に記入された数字は主応力の大きさ (MPa) を表す。

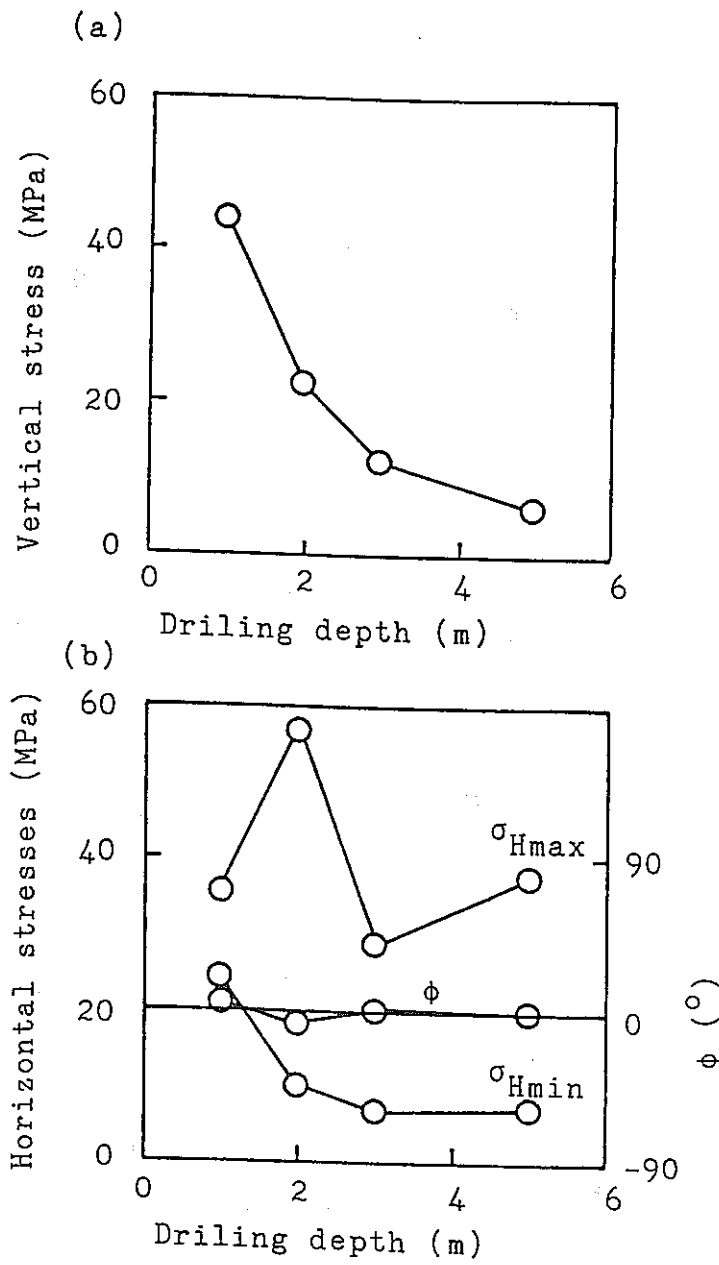


図 - 3 - 9 坑道周辺の地圧分布。(a)鉛直地圧の分布、(b)水平地圧の分布

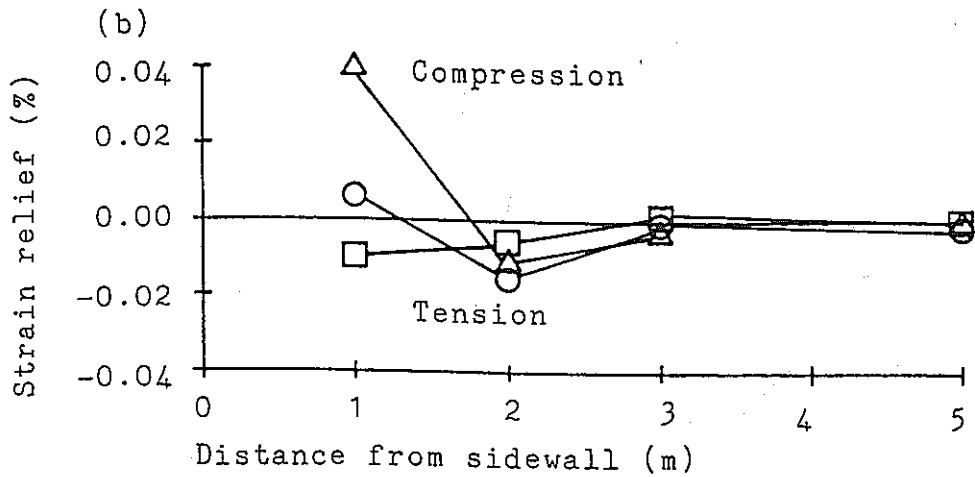
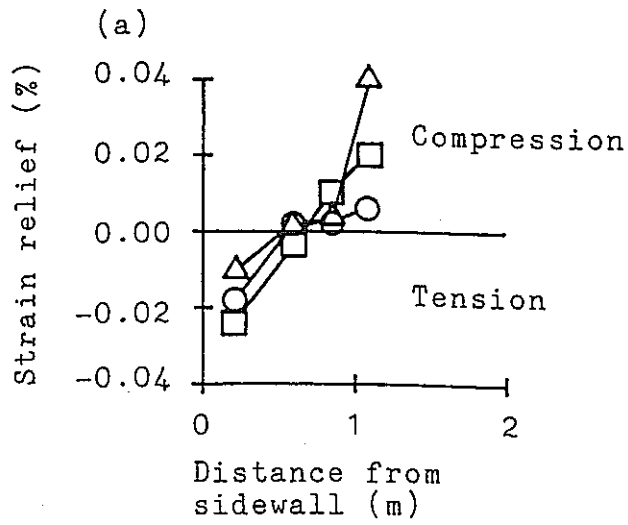


図 - 3 - 1 0 ボーリング軸方向のひずみの分布、○ : 1A、△ : 2A、□ : 3A、  
 (a)北東側岩盤、(b)南西側岩盤

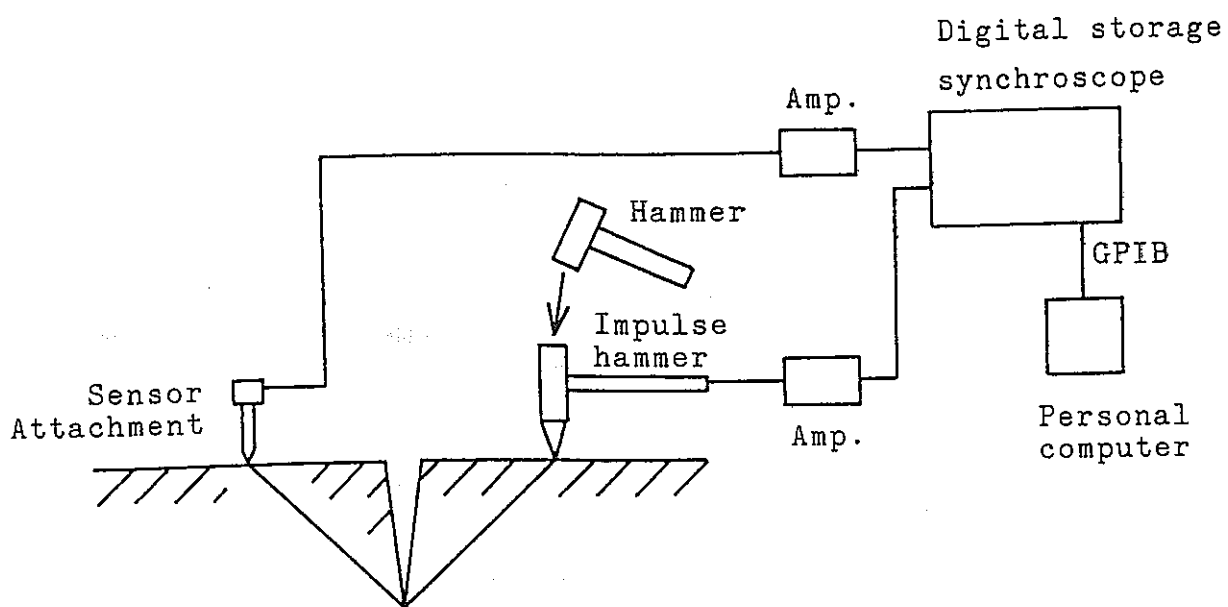


図 - 3 - 1 1 弾性波を用いたき裂深さの計測システム

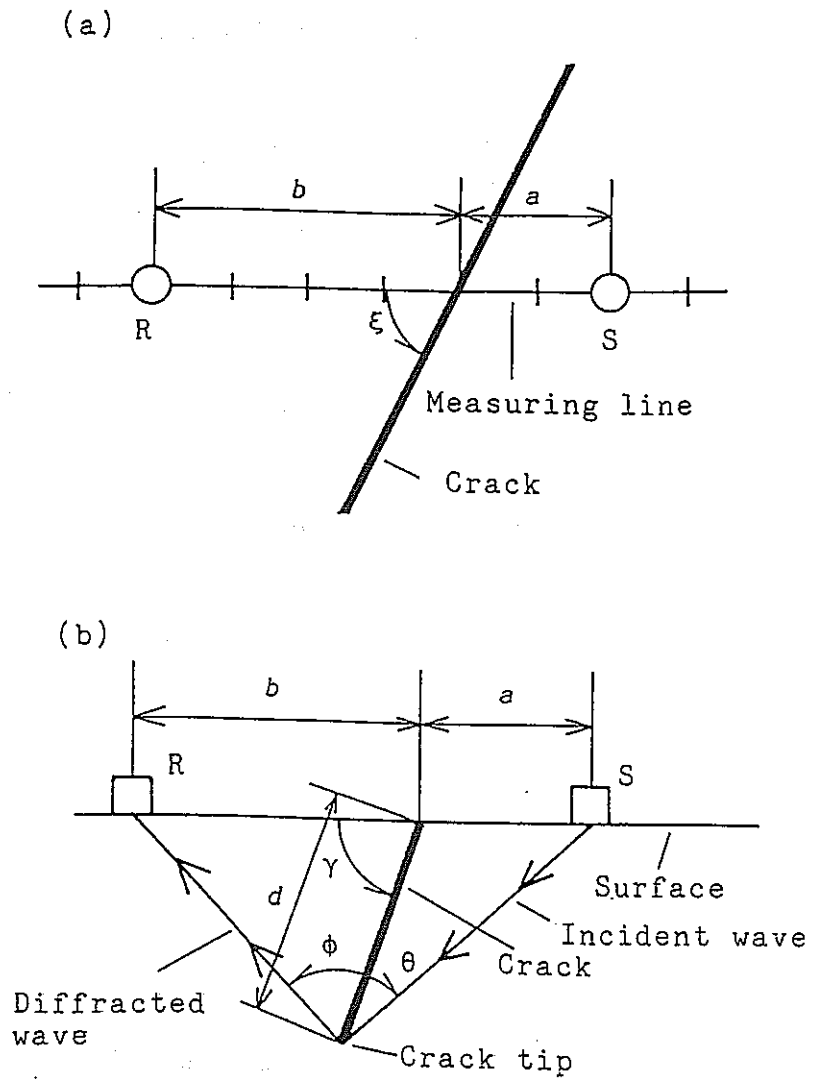


図 - 3 - 1 2 初動極性の変化を利用した方法で用いる各種変数の説明。  
 (a)平面図、(b)断面図

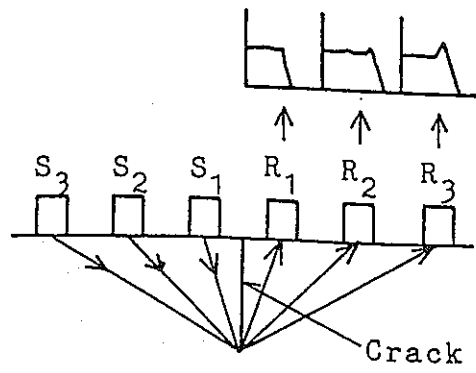


図 - 3 - 1 3 初動極性変化の模式図

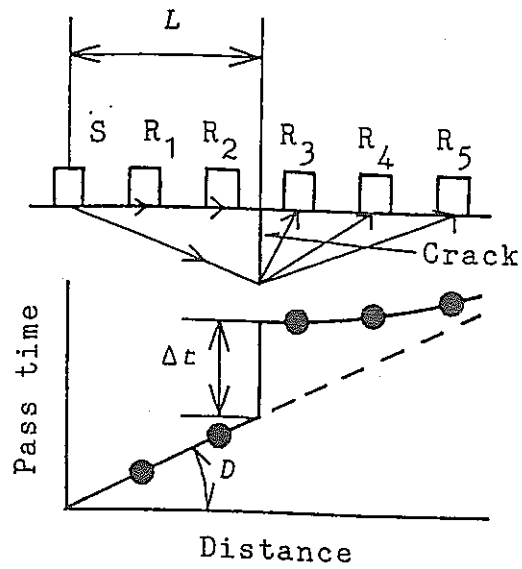


図 - 3 - 1 4 T-法の模式図



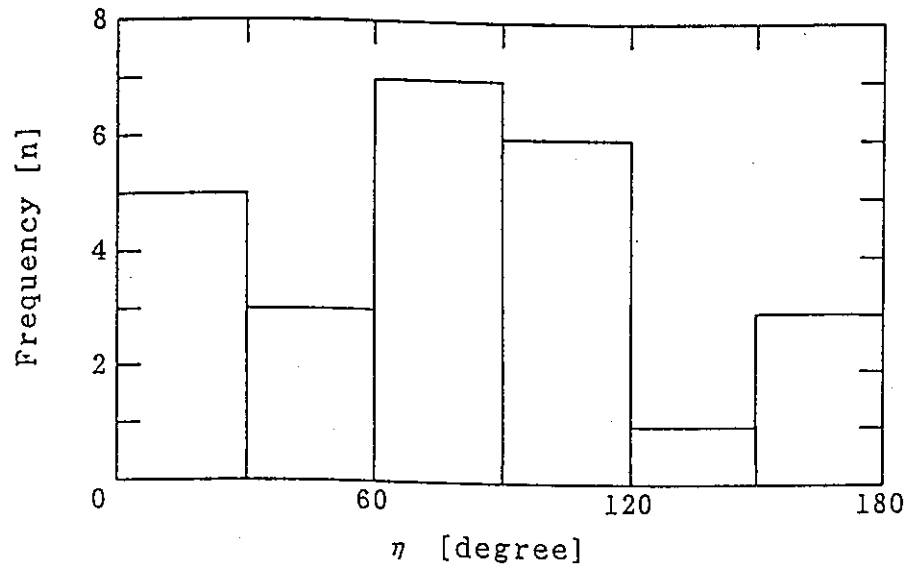


図 - 3 - 1 5 表面上の角度  $\eta$  の分布

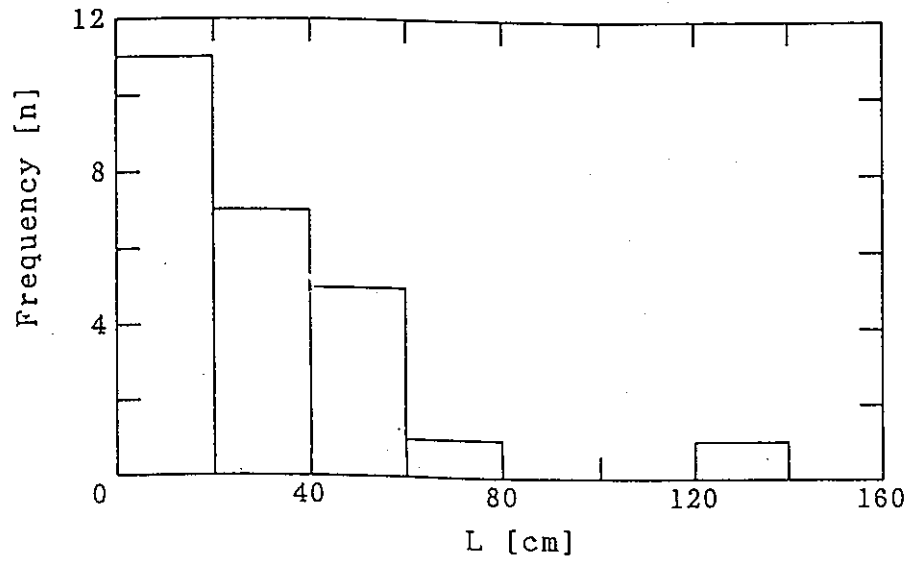


図 - 3 - 1 6 表面上の長さ L の分布

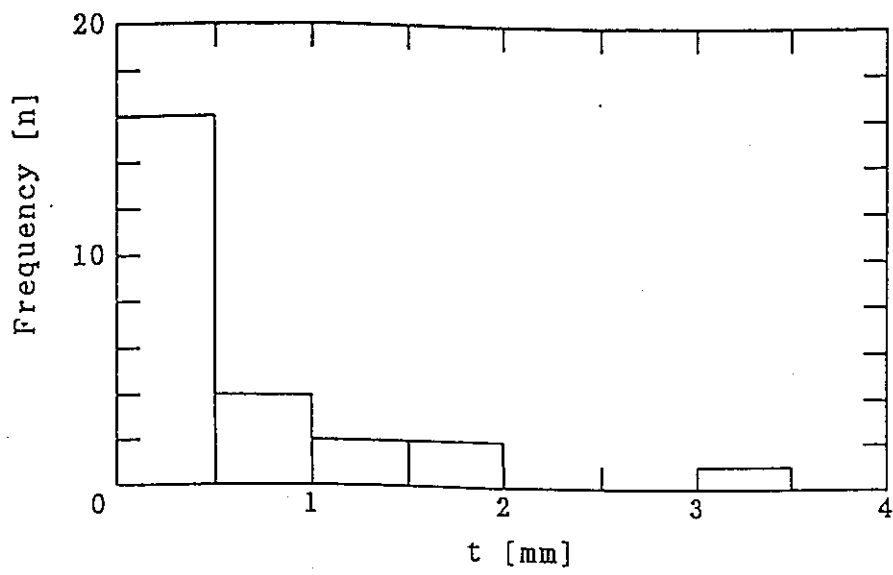


図 - 3 - 1 7 表面における開口量  $t$  の分布

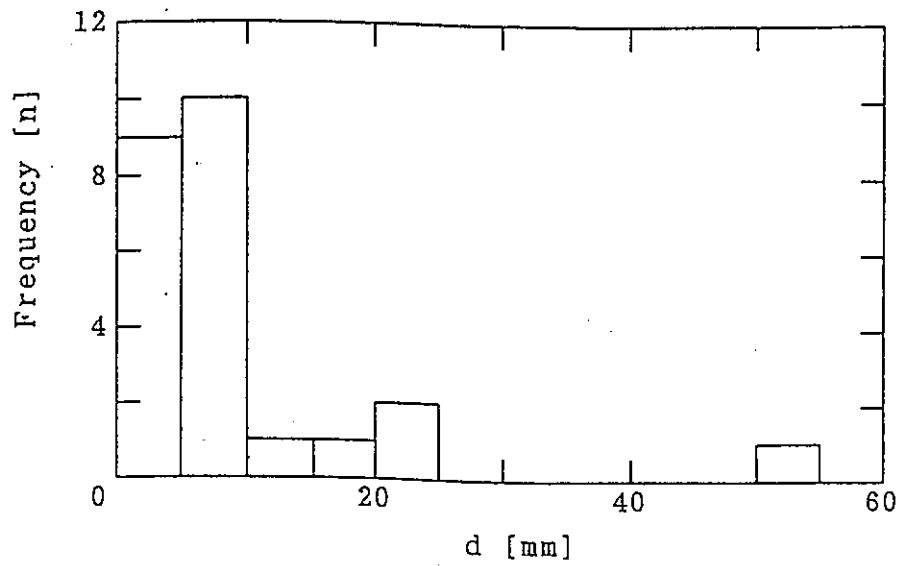


図 - 3 - 1 8 き裂深さ  $d$  の分布

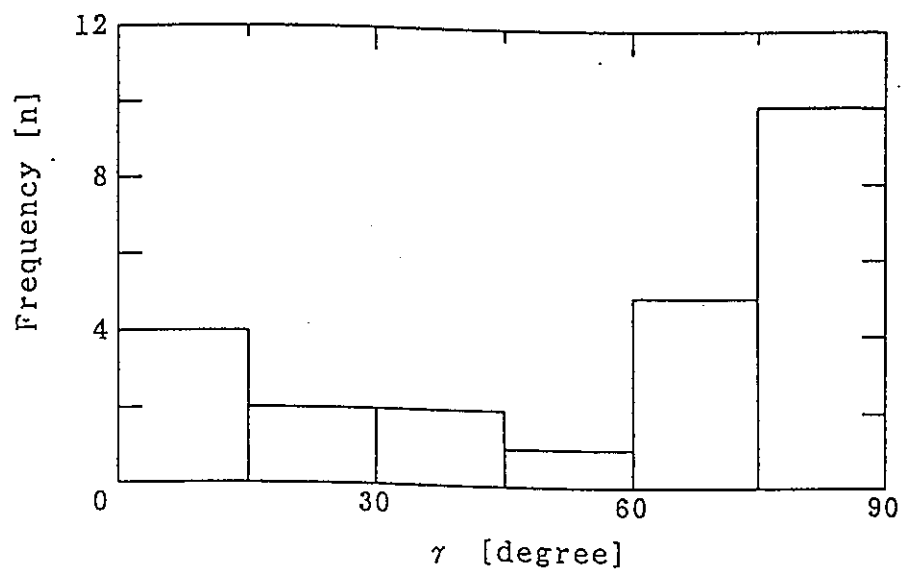


図 - 3 - 1 9 き裂の角度  $\gamma$  の分布

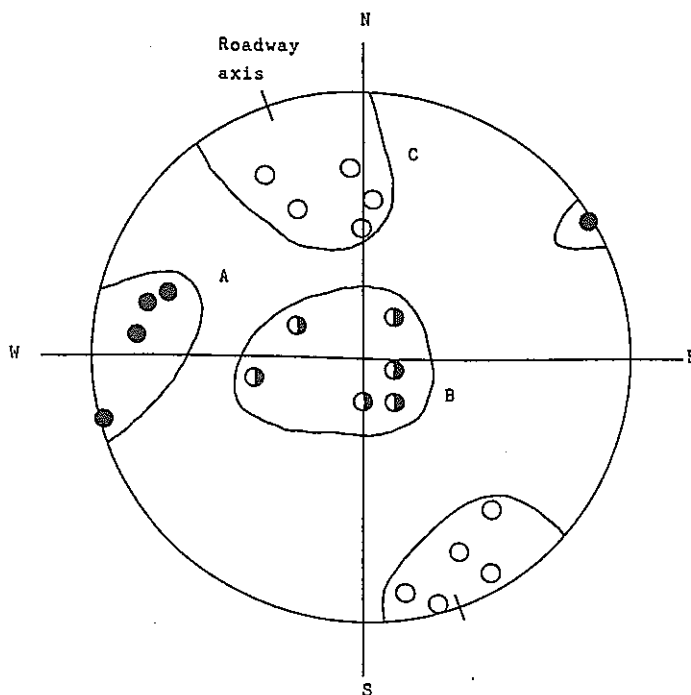


図 - 3 - 2 0 き裂の法線方向の分布 (下半球ステレオ投影)

## 4. 単一不連続面のShear-Flow Coupling特性試験

### 4. 1 Shear-Flow Coupling 特性に及ぼすせん断履歴の影響についての 実験概要

#### 4. 1. 1 実験の目的

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、これらの履歴の状況を室内実験により推測することが、自然の不連続面を評価するために是非必要である。過去の実験から、まだ履歴を受けていない人工的不連続面、及び履歴を受けた現場採取の自然の不連続面のせん断特性、ダイラタンション特性、透水特性に関する実験データの蓄積がある。

そこで本研究では、人工的不連続面にある一定の条件の下で履歴を与えたサンプルを新たな試験体とみなし、Shear-Flow Coupling実験を行った。そして、その諸特性を調べることによって現場の岩盤不連続面の応力-変形の履歴、及び各要素の影響について基礎的に検討する。

#### 4. 1. 2 実験の内容

今回は、表4-1に示すような3つのケースについて実験を行った。まず、Case 1について研究の内容を述べる。先行履歴として垂直応力5MPaのもとせん断変位12mmを与え、それを新たな試験体とみなした人工的不連続面のShear-Flow Coupling実験を行い、履歴を受けていない人工的不連続面の実験データとの比較を行う。ここで、先行履歴を垂直応力5MPa、せん断変位12mmと決定した理由を次に述べる。まず、せん断変位12mmに関しては、以前自然のサンプルを用いた実験において、このサンプルが現場で12mmのせん断履歴を受けていることがわかっており、この実験データとの比較を行える意味で、せん断変位を12mmに決定した。そして、せん断試験はせん断変位を20mmとしており、履歴で与えたせん断変位の影響を十分に考察できる。次に垂直応力5MPaとしたのは、凹凸表面がある程度破壊された状態として適当であると考えたからである。即ち、それより低い垂直応力では、凹凸の破壊が微少であるため、履歴を与えたサンプルと履歴を与えないサンプルとの間に顕著な変化が現れない。逆に垂直応力が高すぎると凹凸の大部分が破壊さ

Case		First shear	Shear flow test
1	Normal stress	5MPa	1,5,10,20MPa
	Shear displacement	12mm	20mm
2	Normal stress	1,5,10,20MPa	5MPa
	Shear displacement	12mm	20mm
3	Normal stress	5MPa	1,5,10,20MPa
	Shear displacement	12mm	20mm

Note : Case3 is repetitive test with the same sample.

表 4-1 Experiment pattern

Shear displacement	Constant A
0	1652151.1
1	1619620.1
2	1401185.9
3	1215891.2
4	1107524.8
5	1034606.8
6	996208.7
7	967390.8
8	888500.7
9	899007.1
10	829629.3
11	860163.2
12	850127.7
13	827613.4
14	822201
15	852984.8
16	833937.2
17	883602.5
18	836857.4
19	854516.6
20	853077

表 4-2 Proportional constant A for calculating hydraulic conductivity

れてしまい、低い垂直応力での履歴の影響が現れ難くなるので評価が困難になる。そして、過去のデータは、垂直応力1.2.5.10.20MPaのもとで実験を行っており、比較する際に高低の垂直応力にも柔軟に対応できるからである。

次に、Case 2について述べる。逆に先行履歴1.5,10,20MPaでせん断変位12mmを与えたものを新しい試験体とみなし、再履歴として全て垂直応力5MPaに統一してせん断変位20mmを与える。その挙動は、履歴を受けていない垂直応力5MPaの時の挙動と類似したものと考えられるが、初履歴の違いによってどの程度の変化が見られるかを検討する。

最後に、Case 3について述べる。以前、現場で履歴を受けた自然の不連続面を用いて、垂直応力を1.5,10,20MPaと段階的に増加させた繰返しせん断を行った実験データがある。この実験データとの比較を行うために、履歴を与えた人工的不連続面を用いて、同様の繰返しせん断試験を行い、現場の応力-変形を推測するための指標となる可能性について検討する。

#### 4. 2 Shear-Flow Coupling実験方法の概説

##### 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。

##### (a)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。载荷はせん断方向、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。最大载荷能力は、せん断载荷は前進方向40ton、後退方向35tonであり、垂直载荷は200tonである。

#### (b) 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。

#### (c) 不連続面作成装置

従来、不連続面の作成は圧裂で行っていたが、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かった。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（最大载荷能力10ton）が载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。

この Shear-Flow Coupling 実験は、図-4-3のフローチャートに示すように、3つ

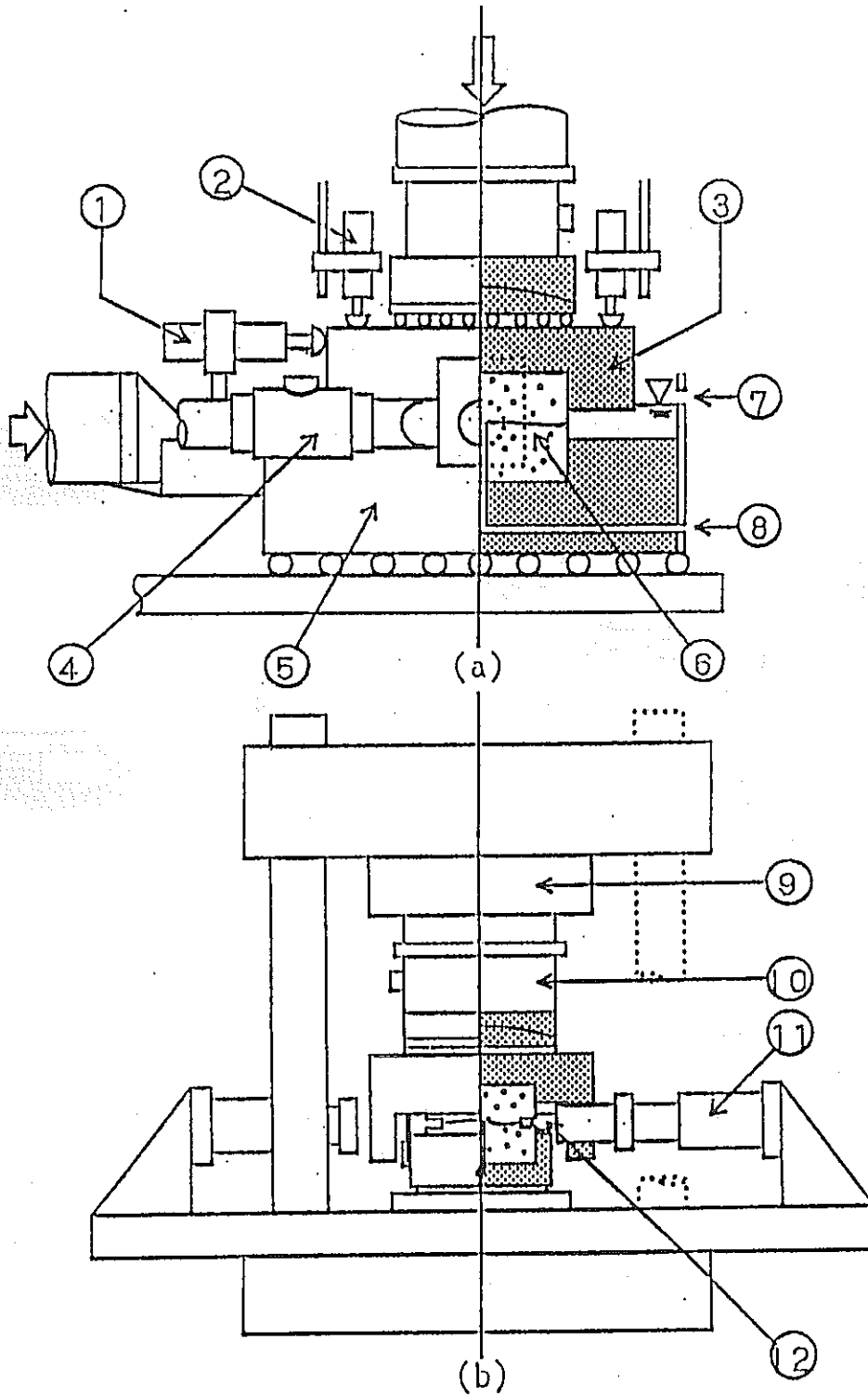


图-4-1 Shear-flow coupling test apparatus (a) side view,  
 (b) front view: not a scale: 1.shear displacement meter,  
 2.normal displacement meter, 3.upper box, 4.load cell,  
 5.lower box, 6.specimen, 7.outlet, 8.inlet, 9.vertical jack,  
 10.load cell, 11.horizontal jack, 12.wedge.



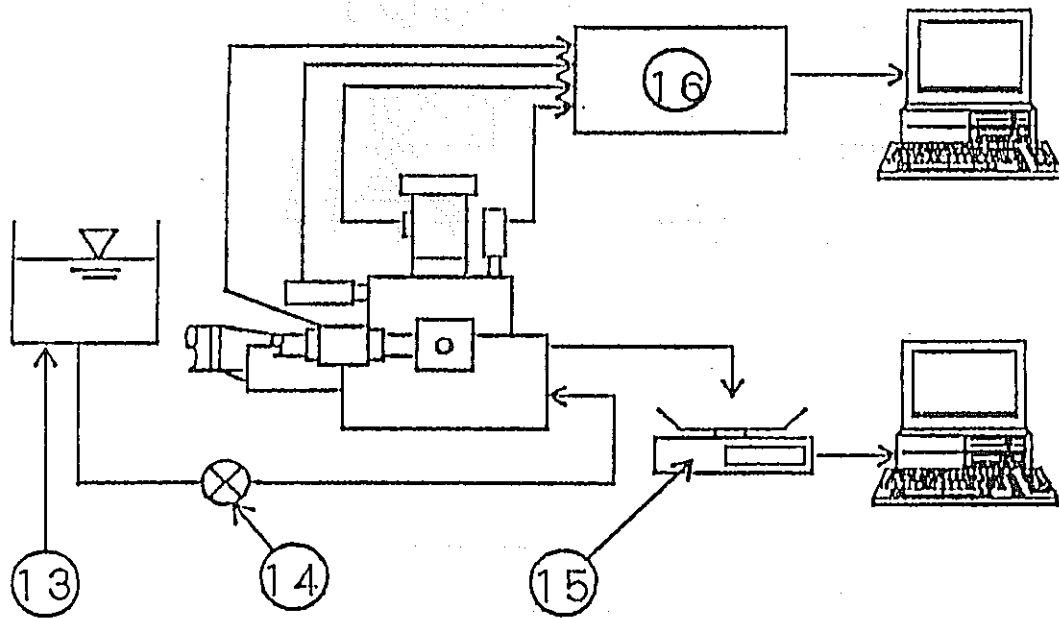


图-4-2 剪切流耦合实验系统: 13.水箱, 14.阀门, 15.电天平, 16.控制和记录单元。

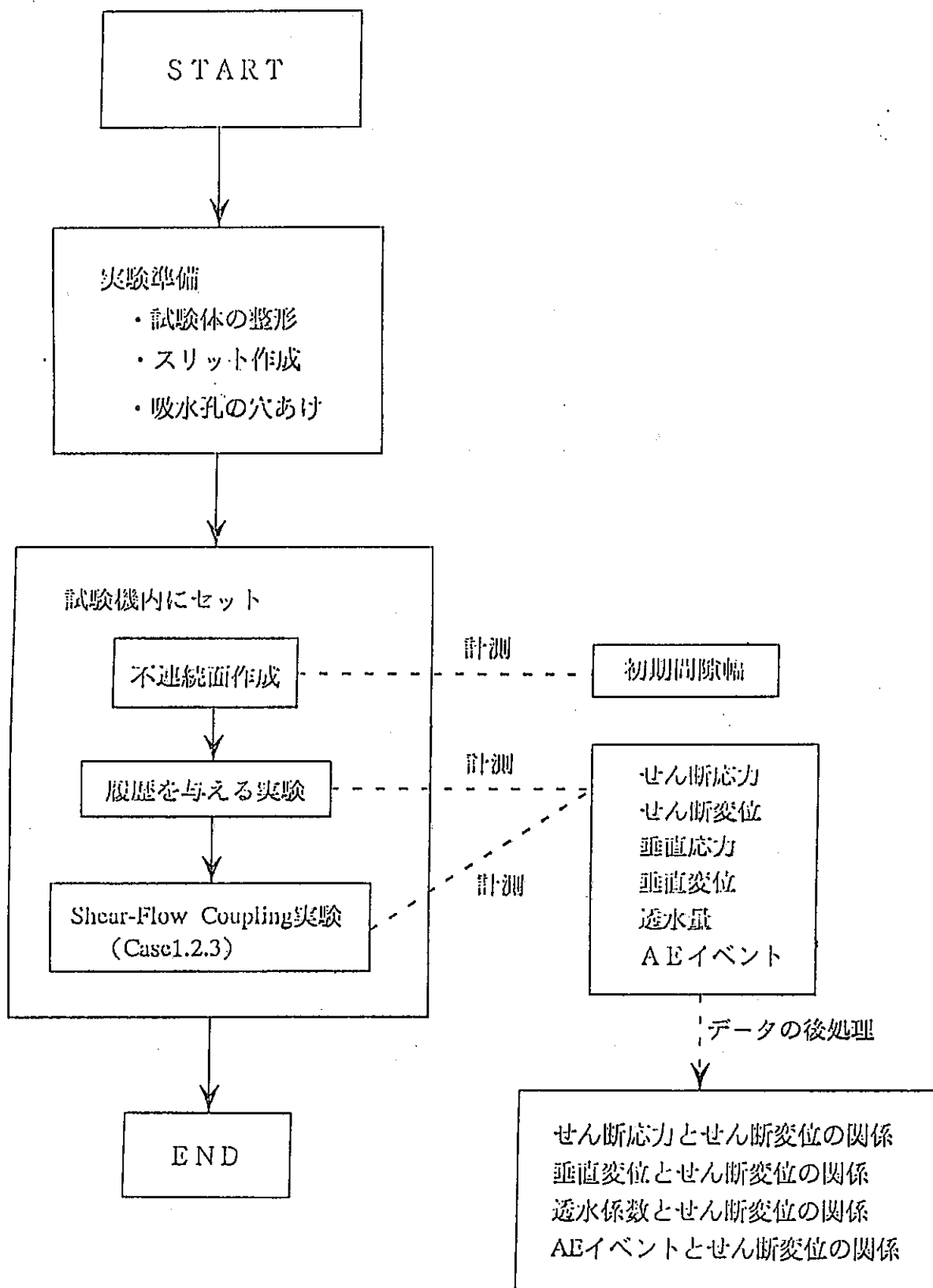


図-4-3 Shear-flow coupling test method.

の段階（1:実験準備，2:不連続面作成，3:本実験）から構成されている。さらに実験で得られたデータをもとに解析作業を行う。以下に，各段階についてくわしく述べる。

#### 4. 2. 2 試験体の作成

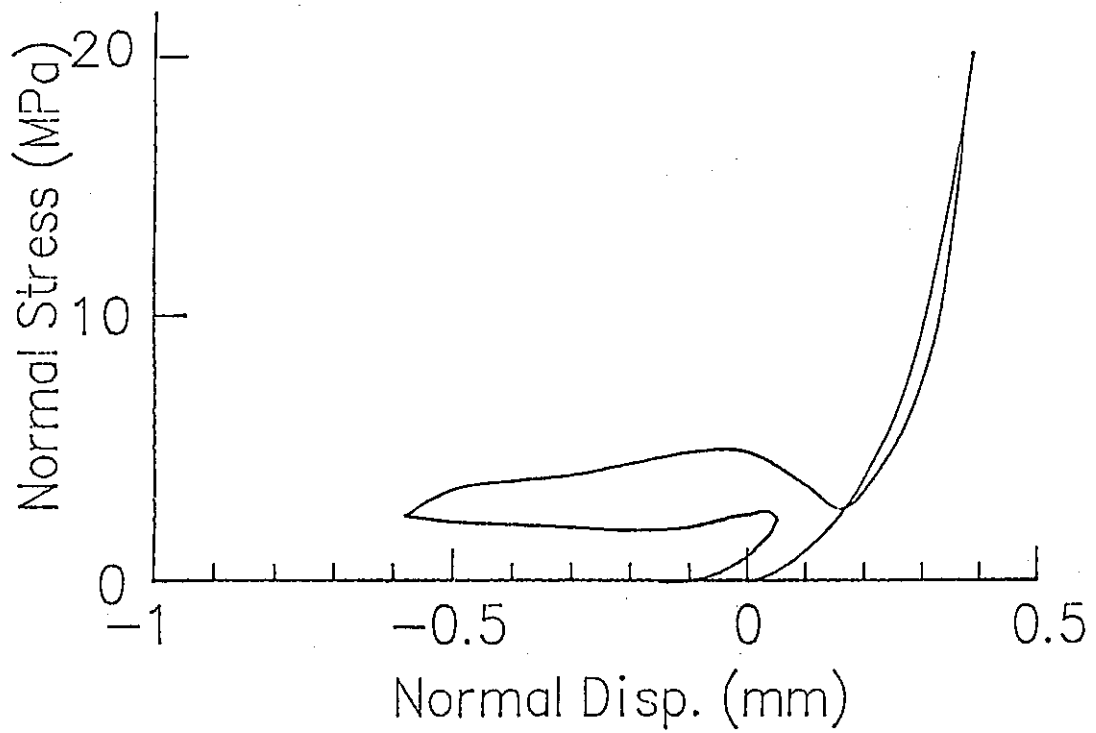
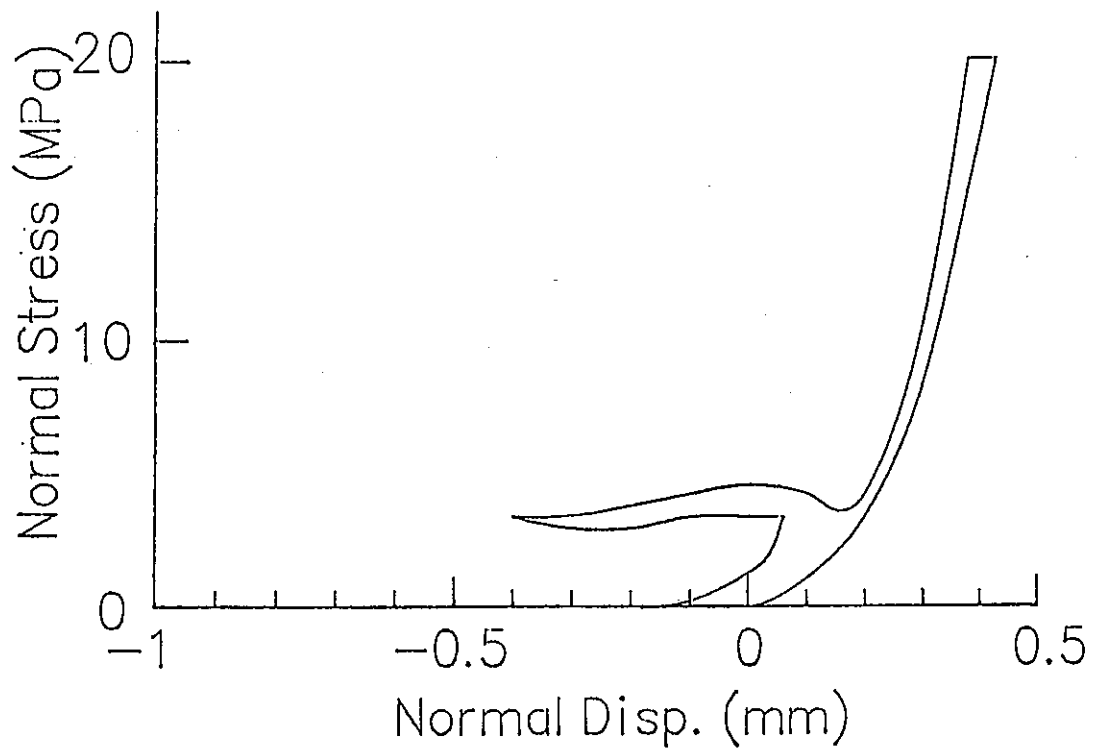
使用した岩石は，韓国南原産花崗岩（比重2.61，吸水率0.37%，飽和状態での一軸圧縮強度162MPa）で，縦120mm，横100mm，高さ80mmの直方体である。試験体高さの中央位置には不連続面の作成を容易にするために，深さ10mm，幅1mmのスリットが試験体の4側面に入れられている。したがって，せん断面の大きさは，100×80mmである。また，試験体下部の中央には，透水実験のための給水孔（直径6mm）が不連続面まで貫通している。

#### 4. 2. 3 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，その後の垂直荷重载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）の载荷を行う。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）まで载荷し，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. 4 実験方法

Case 1の実験は，履歴のあるものとないものについて，4種類の垂直応力を一定に保った状態で行う。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。（以降，これらの試験体を垂直応力の変化に伴って，



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

5MPa-1MPa, 5MPa-5MPa, 5MPa-10MPa, 5MPa-20MPaと表現する。)

次にCase 2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。(以降、これらの試験体を1MPa-5MPa, 5MPa-5MPa, 10MPa-5MPa, 20MPa-5MPaと表現する。)

さらにCase 3の実験は、先行履歴(垂直応力5MPa, せん断変位12mm)を与えた試験体を用いて、垂直応力を1, 5, 10, 20MPaと段階的に载荷した各状態で最大変位20mmのせん断変位を与える繰り返し試験も行った。透水試験は垂直応力一定の条件下で行われる。まず、垂直応力を载荷しない状態で不連続面に所定の水頭値(50-150cm)を与えて透水量を計測する。次に、所定の垂直応力(1, 5, 10, および20MPa)まで载荷し、各垂直応力レベルで透水量を測定する。そして、垂直応力が所定の値に達した後、その応力を一定に保ちながらせん断を開始する。せん断速度は約0.1mm/secで、最大変位20mmに達した後逆方向にせん断し、変位0mmの状態まで戻す。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. 5 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。

(a)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 $S_{i,j}$ とそれと隣り合うメッシュ、 $S_{i-1,j}$ ,  $S_{i+1,j}$ ,  $S_{i,j-1}$ ,  $S_{i,j+1}$ 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。

$$\Delta Q_x = \Delta Y \cdot C \cdot \{ (h_{i-1,j} - h_{i,j}) / \Delta X - (h_{i,j} - h_{i+1,j}) / \Delta X \}$$

$$\Delta Q_y = \Delta X \cdot C \cdot \{ (h_{i,j-1} - h_{i,j}) / \Delta Y - (h_{i,j} - h_{i,j+1}) / \Delta Y \} \quad (4.1)$$

$$C = gd^3 / 12\nu$$

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  
 $\nu$  : 水の動粘性係数

定常状態では,

$$\Delta Q_x + \Delta Q_y = 0 \quad (4.2)$$

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

$$h_{i,j} = (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) / 4 \quad (4.3)$$

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  $\Delta h$  は測定された流量  $Q$  を次式に代入することで得られる.

$$\Delta h = 0.383 \cdot Q + 0.0199 \cdot Q^2 \quad (4.4)$$

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.

(b) 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、

$$Q_{s, (i, j)} = d \cdot C \cdot (h_{s, (i, j)} - h_D) / \Delta \quad (4.5)$$

で表される。したがって全流量 $Q_c$ は、

$$Q_c = \sum Q_{s, (i, j)} \quad (4.6)$$

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)。

$$Q = A \cdot d^3 \quad (4.7)$$

従って、式(4.7)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。ここに、せん断変位に伴う $A$ の値を表4-2に示す。

(c) 比例定数の定まった式(4.7)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 $k = g \cdot e^2 / 12\nu$ に代入することで不連続面の透水係数は決定される。ここに、解析全体の流れを図-4-7のフローチャートに示す。

#### 4. 2. 6 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-4-8)。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

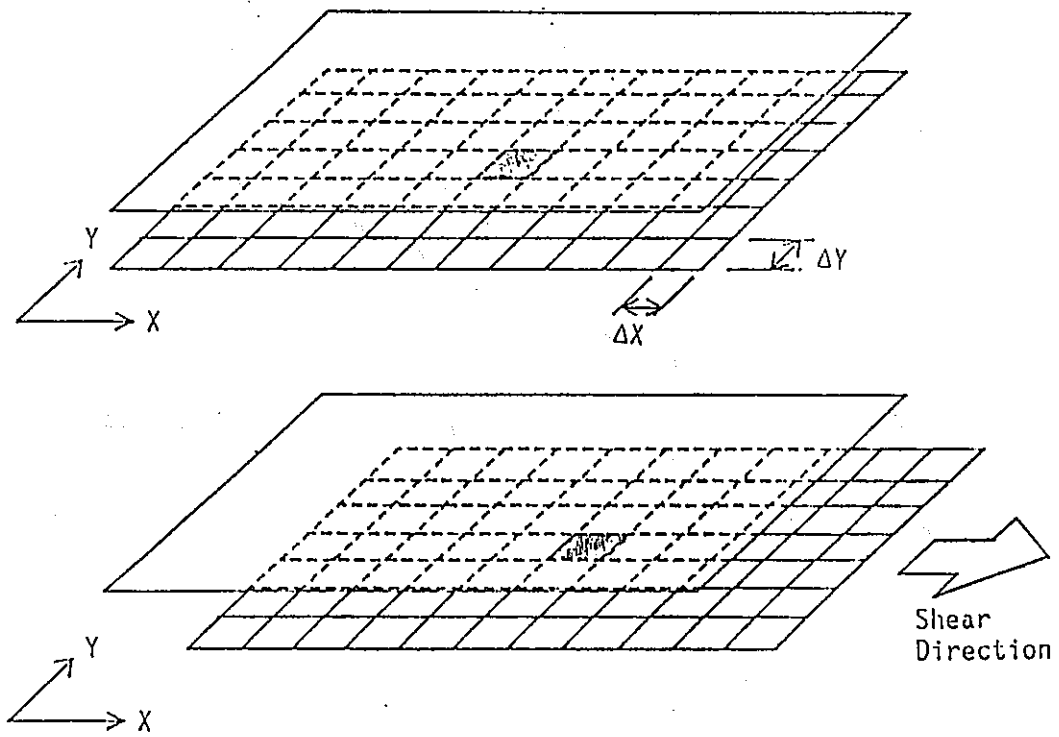


图-4-5 裂隙模型划分为正方形网格用于计算水力传导率。



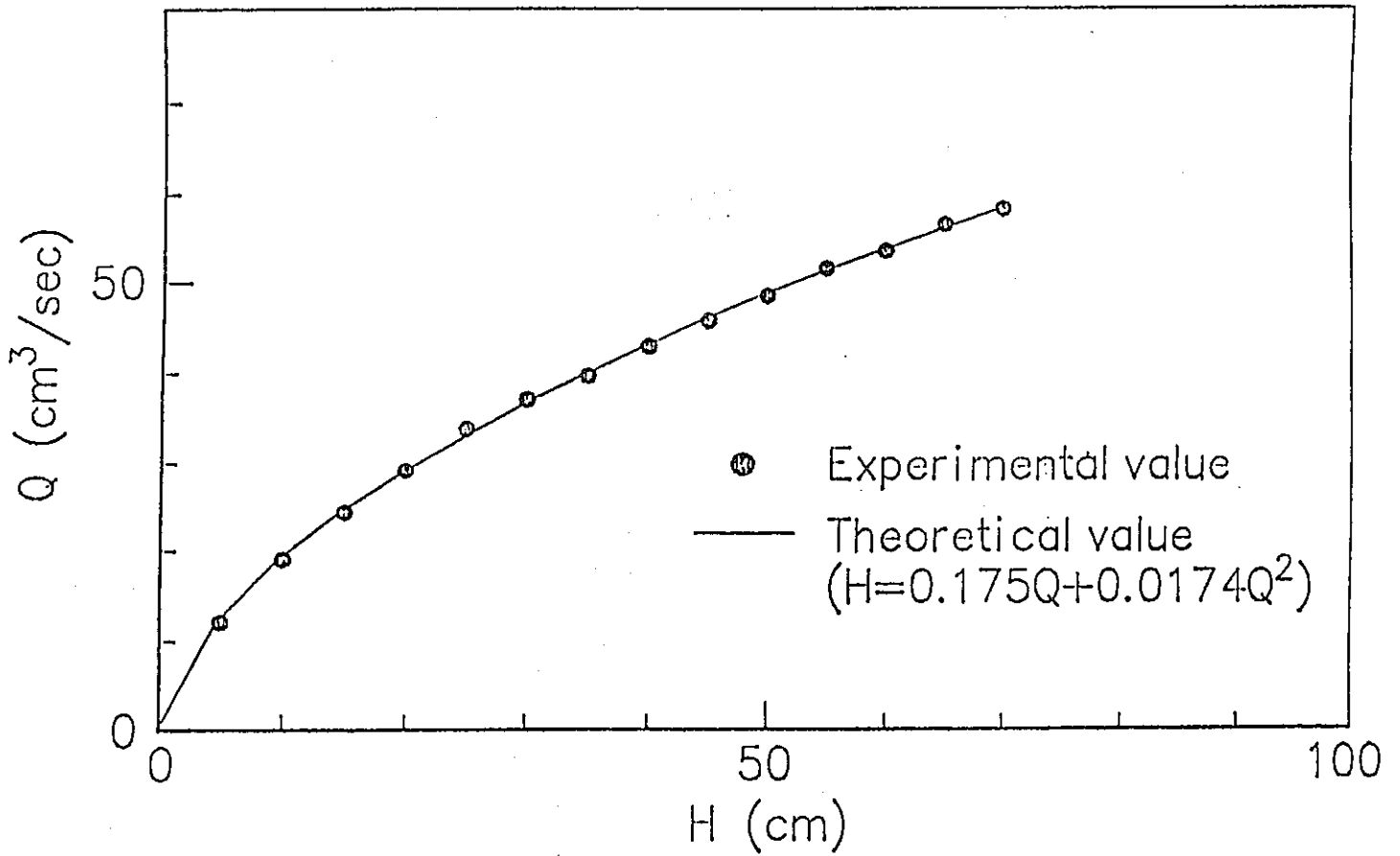


图-4-6 Relationship between flow rate and water head  
obtained from flow test when normal stress is not applied.

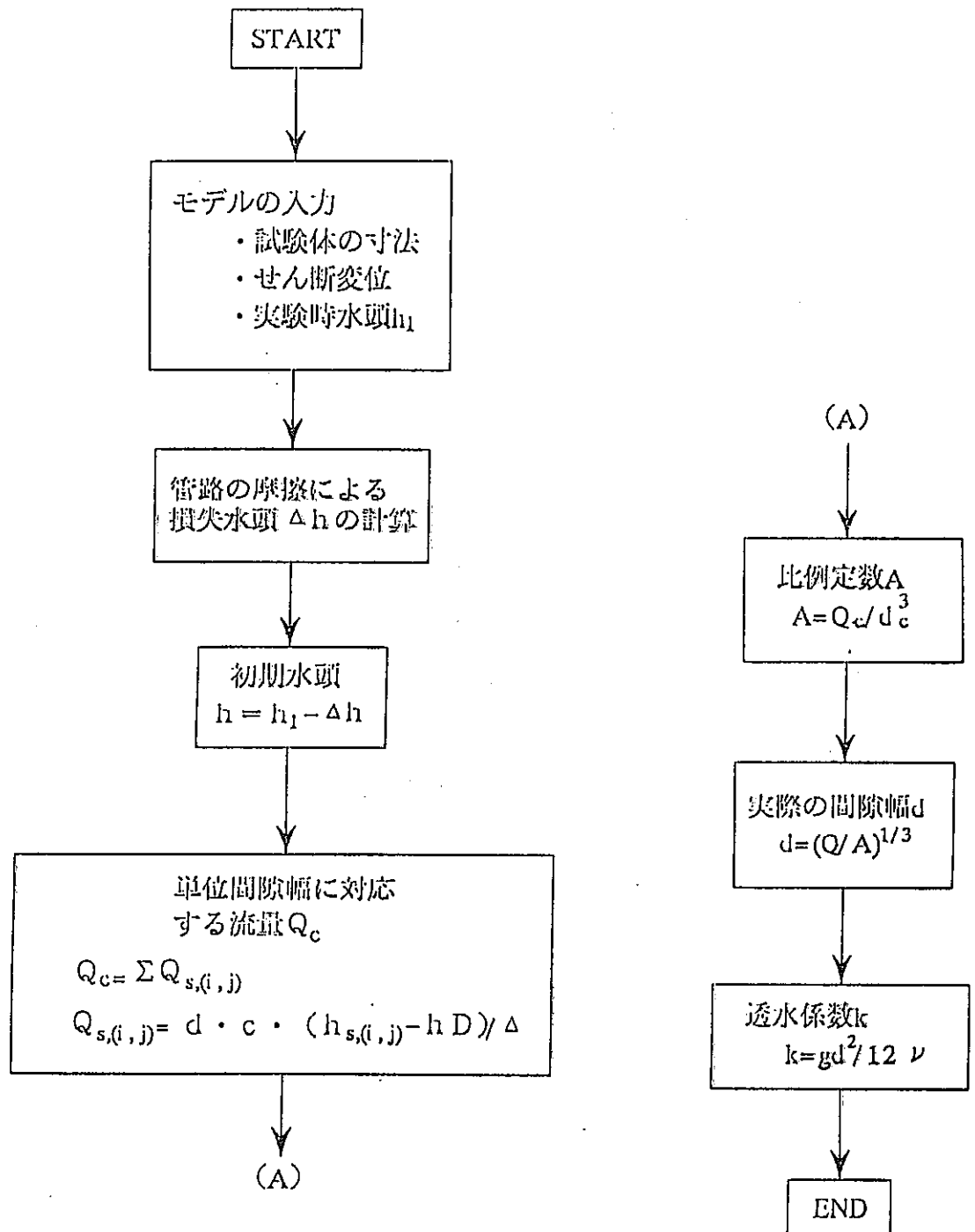


図-4-7 A flow chart for analyzing hydraulic conductivity.

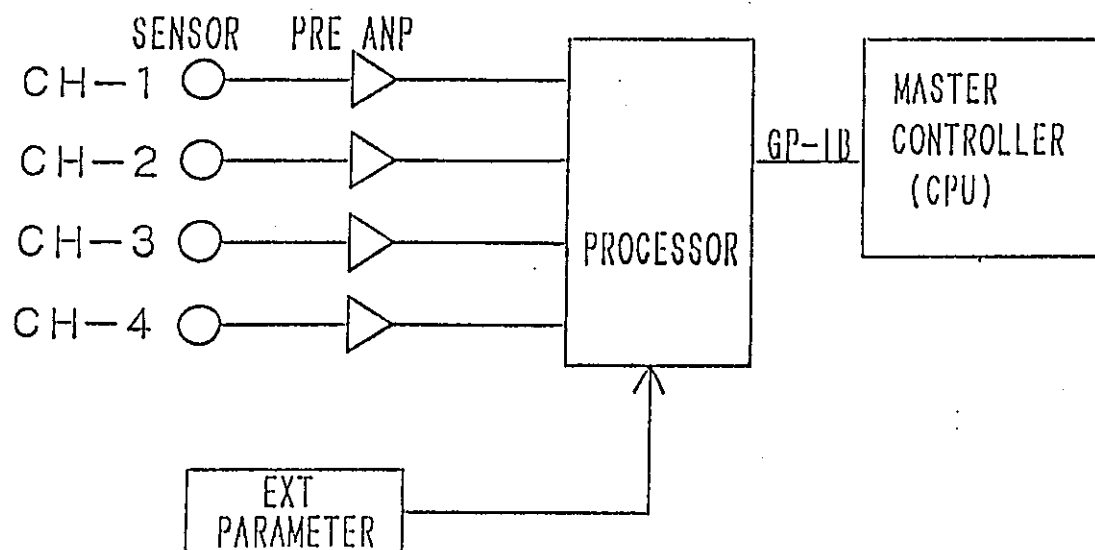


图-4-8 Schematic view of AE measurement system.

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GP1B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. 3 Case 1の実験結果および考察

##### (a)せん断応力－せん断変位の関係

図-4-9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ほぼ一致した。

##### (b)垂直変位－せん断変位の関係

図-4-10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。

##### (c)垂直応力－ダイレーションの減少量の関係

図-4-11に、垂直変位－垂直応力の関係を示す。また、図-4-12に、垂直応力－

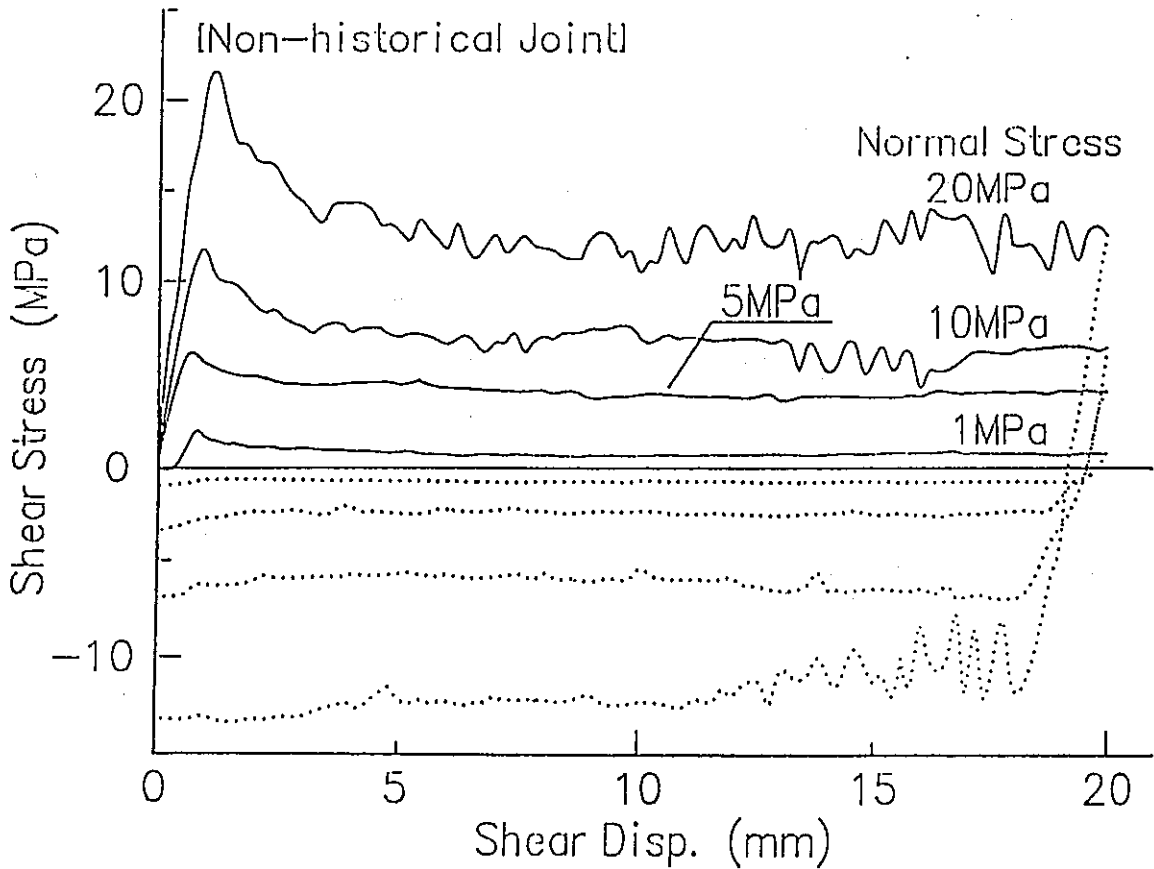
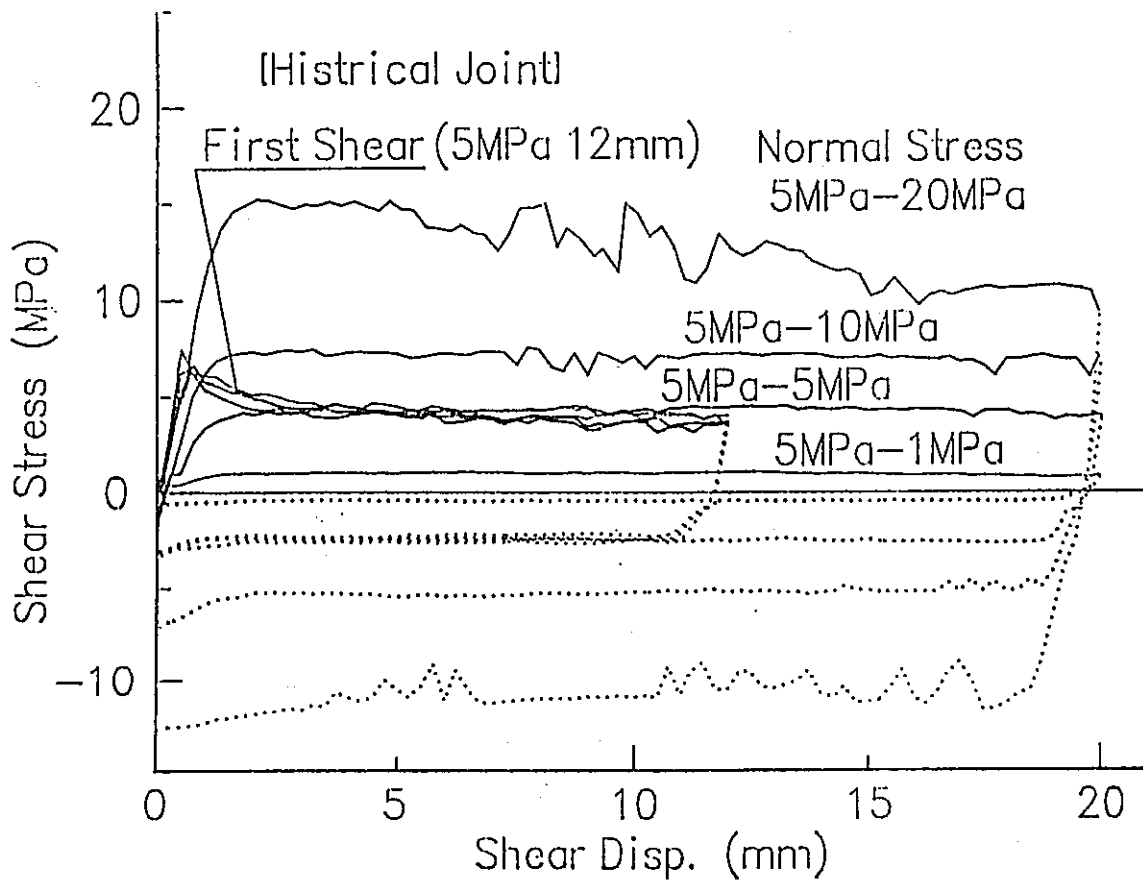


图-4-9 Shear stress vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.

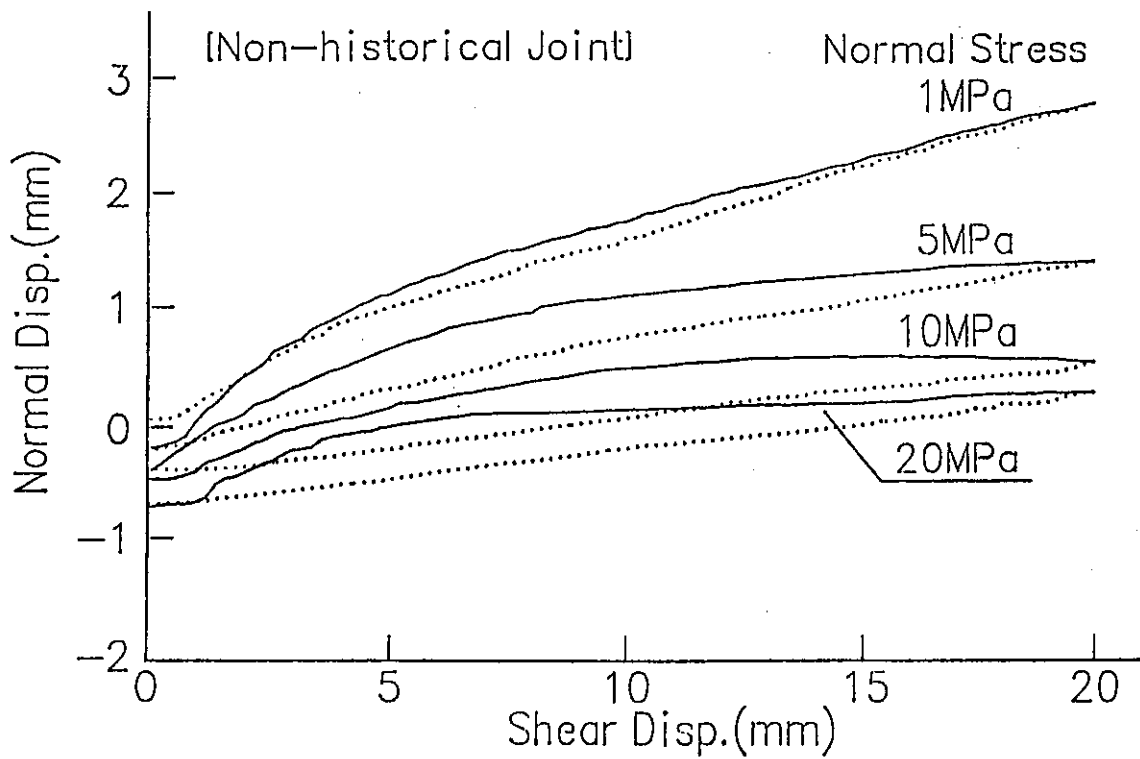
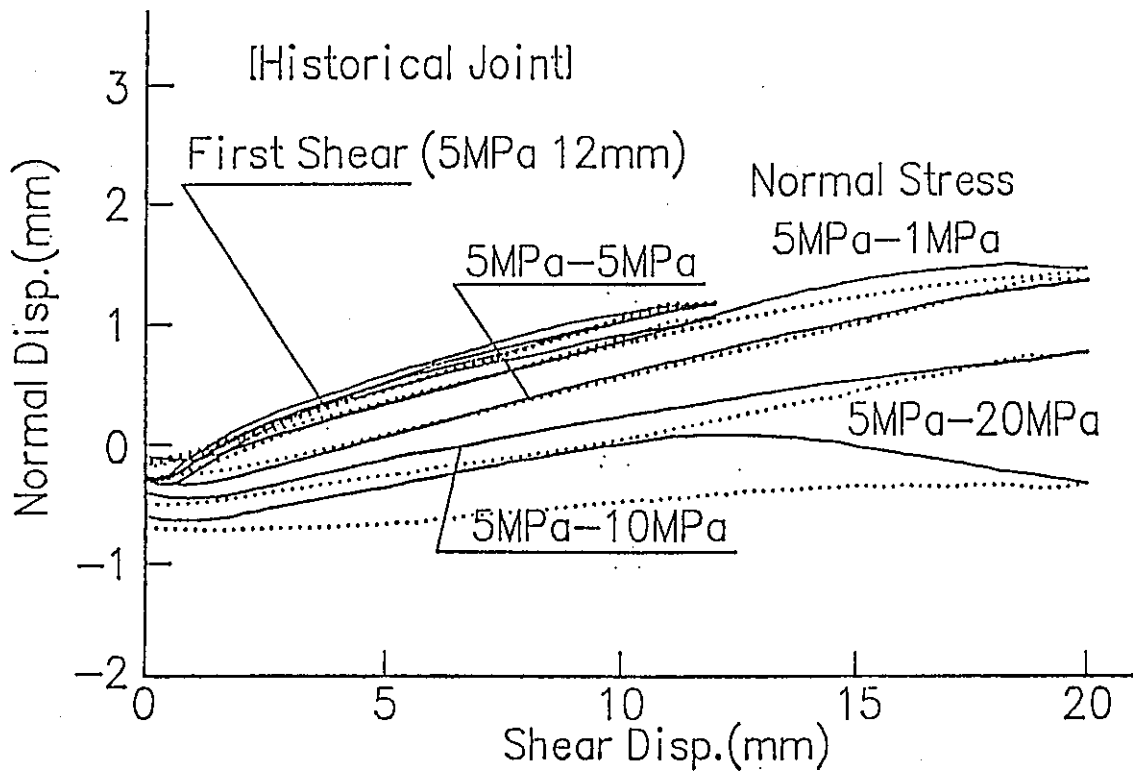


图-4-10 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.

ダイレクションの減少量の関係を示す。図-4-11において、Line1, Line3は、図-4-10における履歴のない不連続面の各ラインでのせん断変位0mm, 12mmにおける垂直変位をプロットしたものである。またLine2, Line4は図-4-10における履歴を与えた不連続面の各ラインでのせん断変位0mm, 12mmにおける垂直変位をプロットしたものである。また図-4-12はLine3とLine4の変位差をプロットした図である。5MPa-1MPaと1MPaの変位差が一番大きく、最も先行履歴の影響を受けていることがわかる。

#### (d) 透水係数 - せん断変位の関係

図-4-13に、透水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オーダー透水係数が大きい。そして、せん断初期において透水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と、凹凸の噛み合いが悪くなっていることなどが考えられる。また5MPa-20MPaが20MPaに比べて透水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に初期間隙幅にややばらつきが見られ、この試験体はやや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ク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からダイレク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。

#### (e) AEイベントとせん断変位の関係

図-4-14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

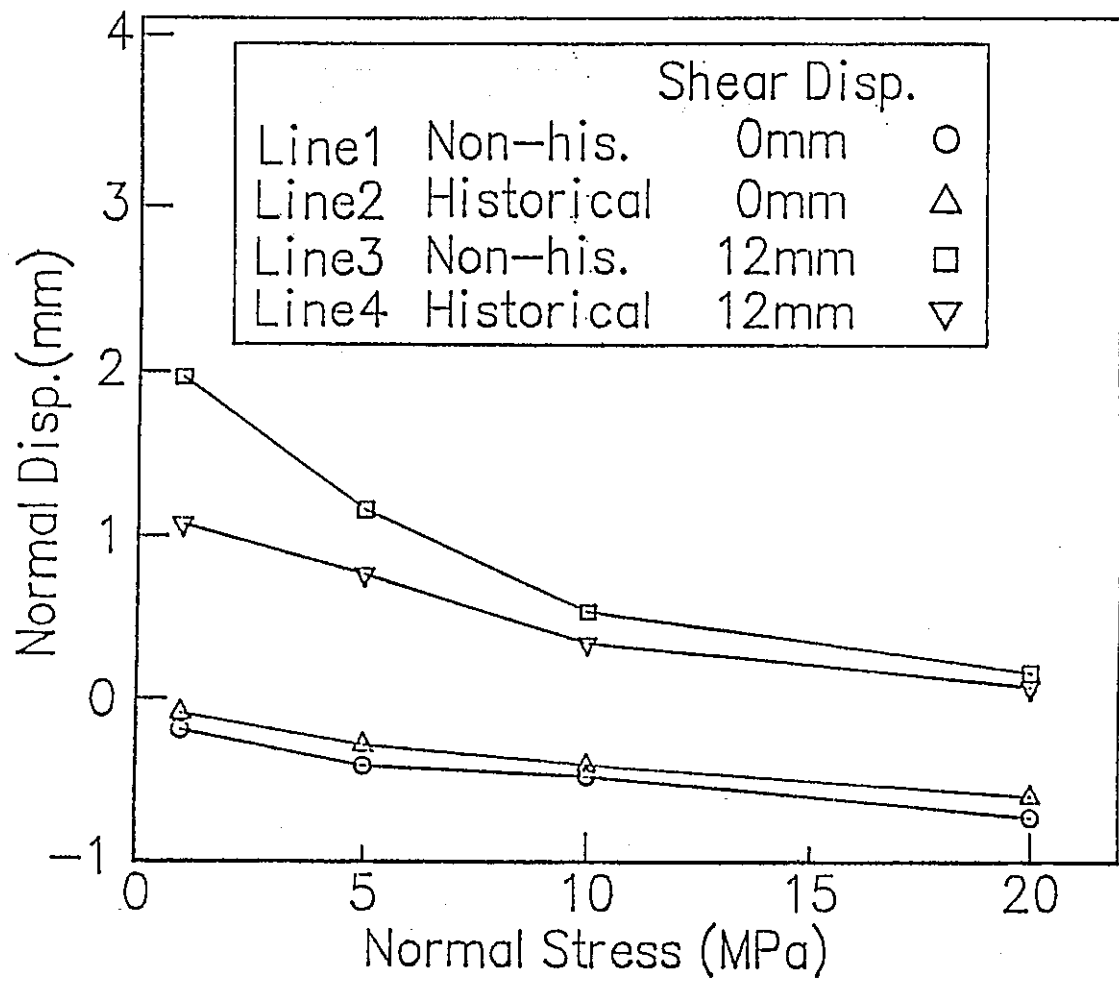
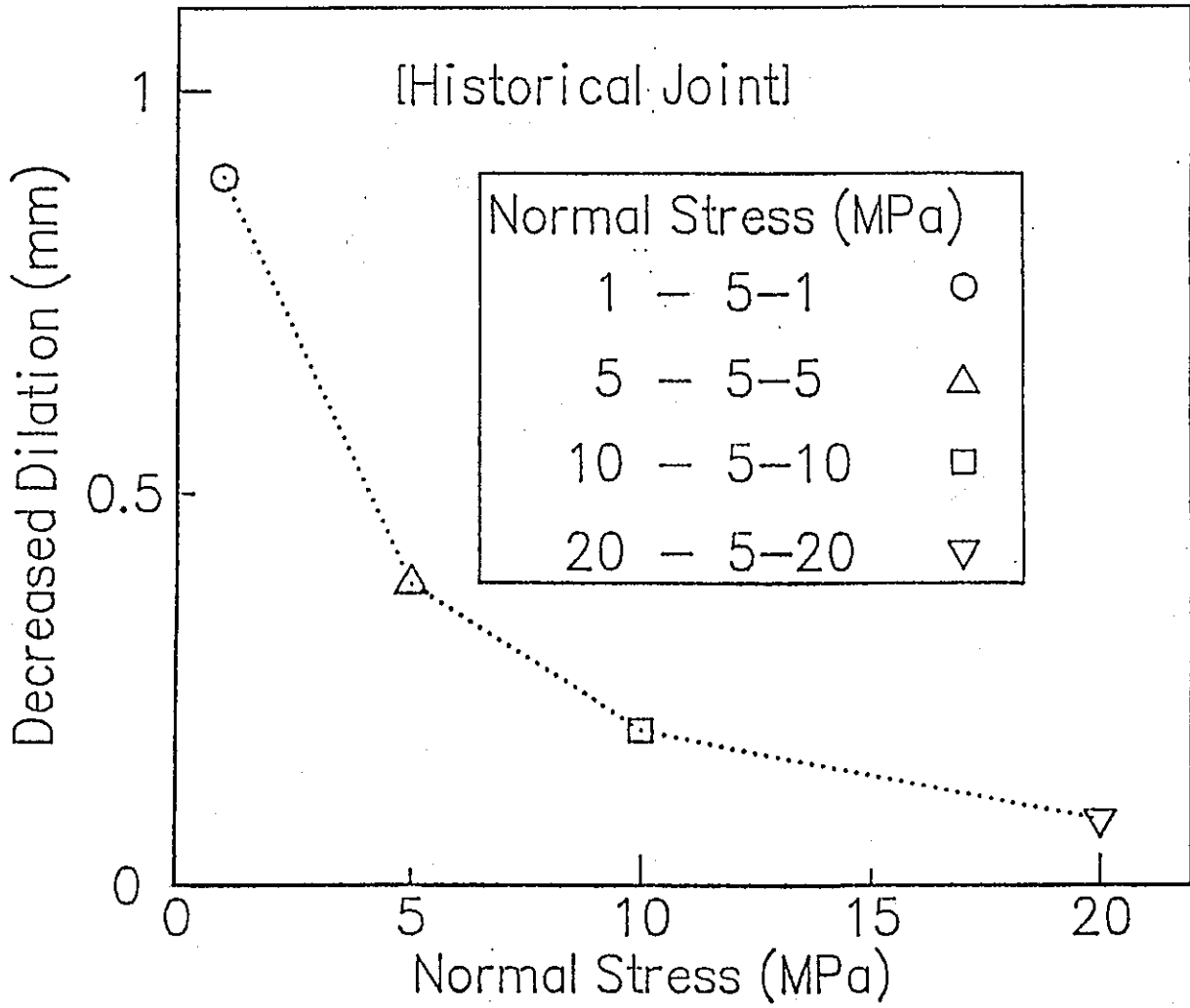
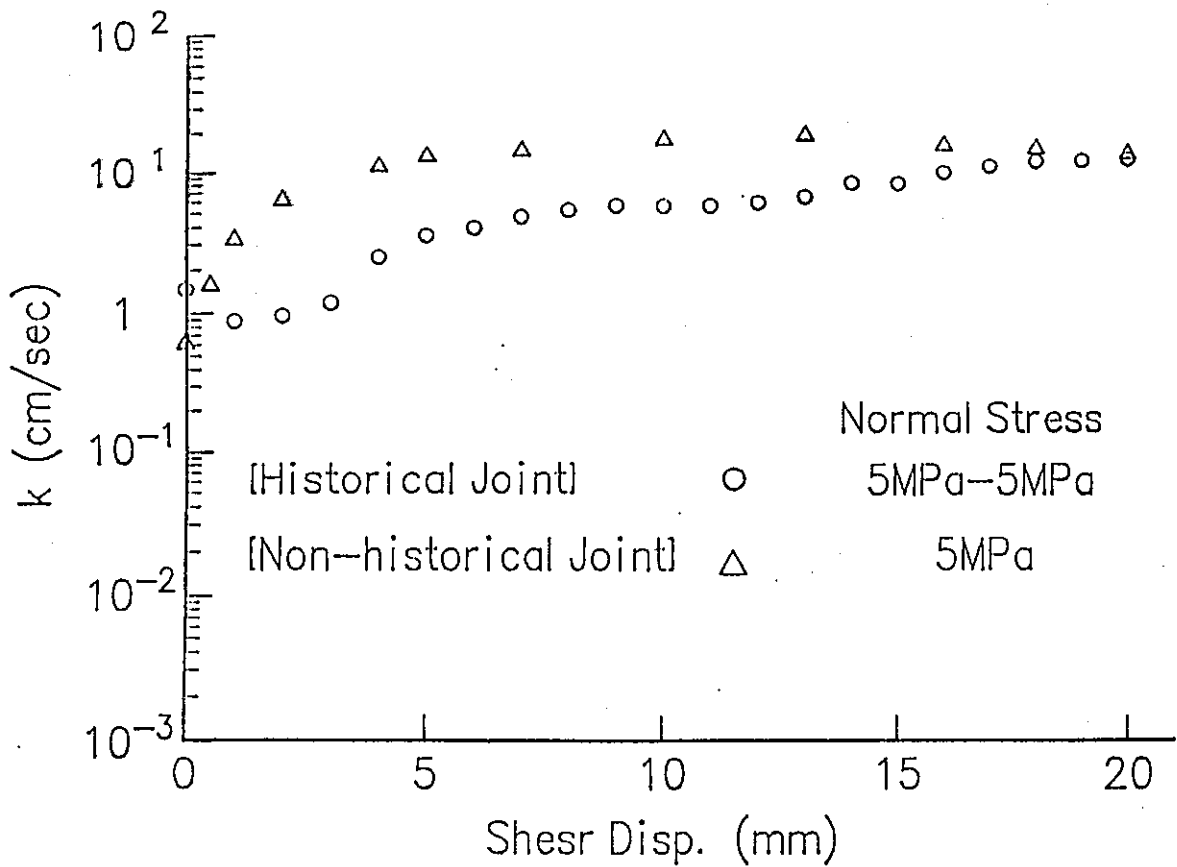
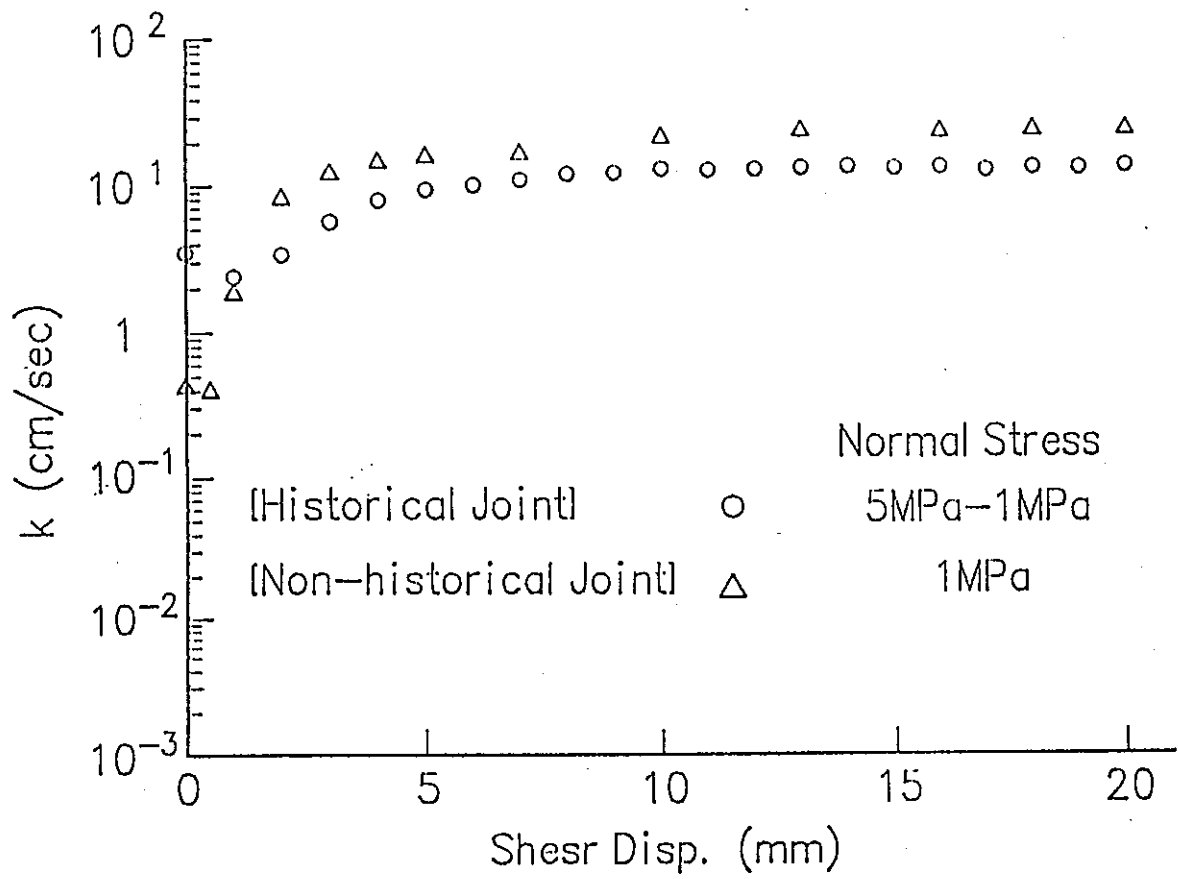


图-4-11 Relationships between normal displacement and normal stress, under initial state and after shearing of 12mm.

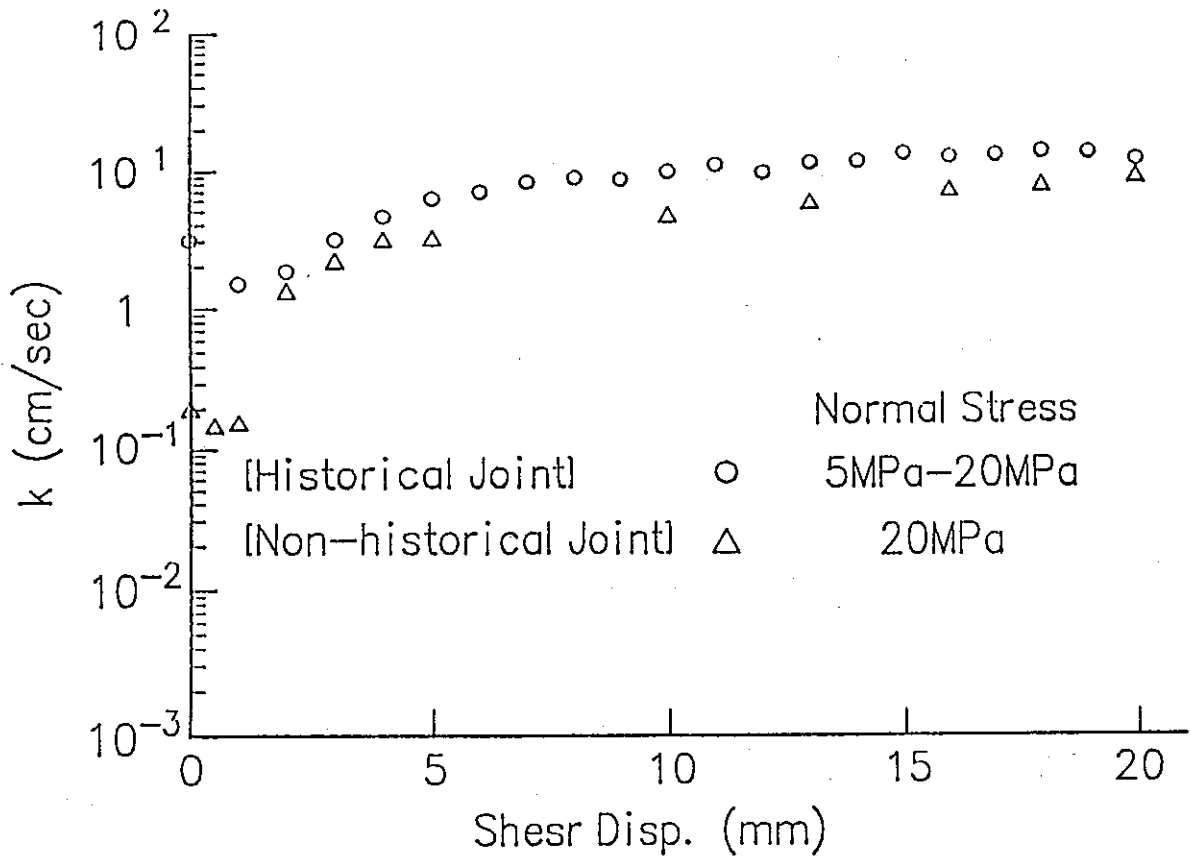
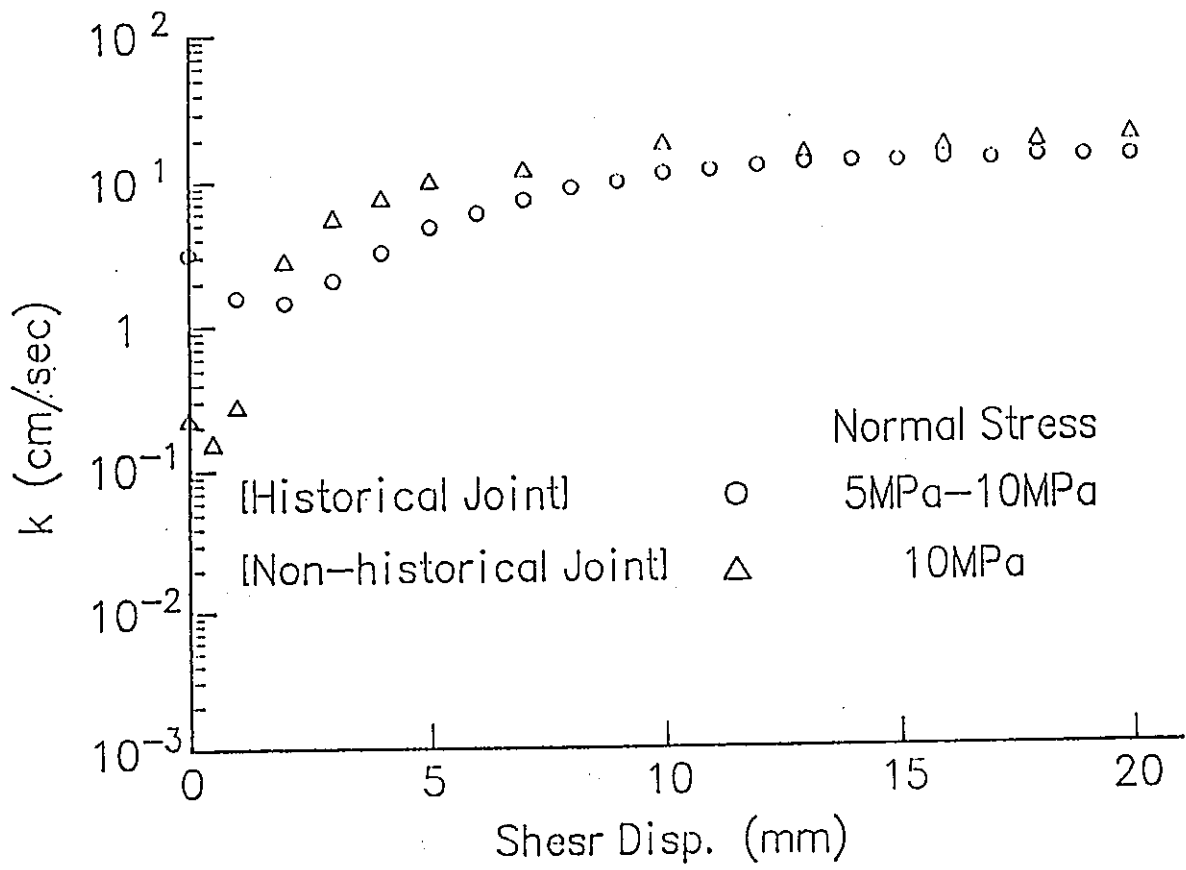




☒-4-12 Relationship between decreased dilation and normal stress, obtained from Line3 and Line4 in Fig.4-3-3.



☒-4-13 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.



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, 5MPa-20MPaと再履歴の応力が大きくなるに従って総イベント数は増加している。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。

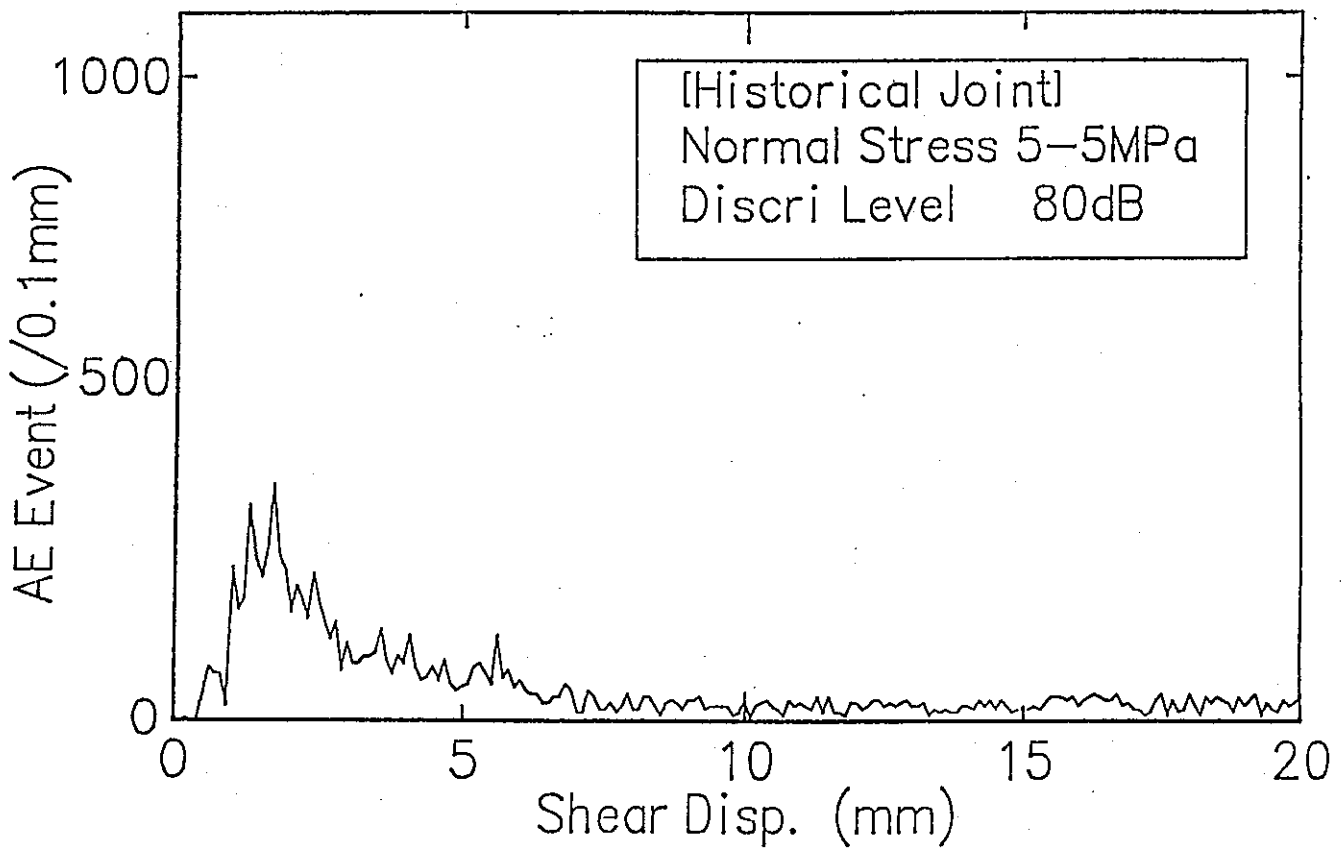
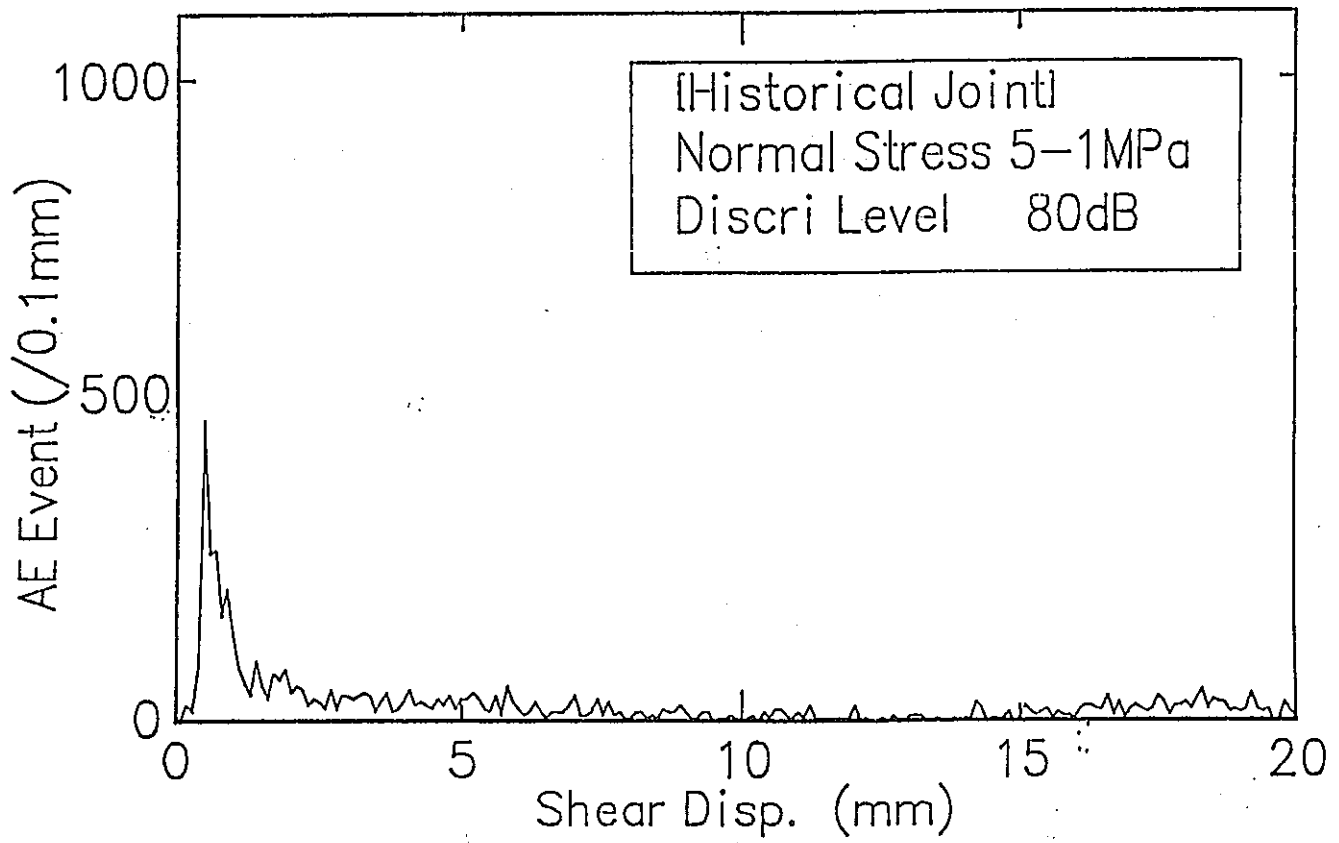
#### 4. 4 Case 2の実験結果および考察

##### (a)せん断応力-せん断変位の関係

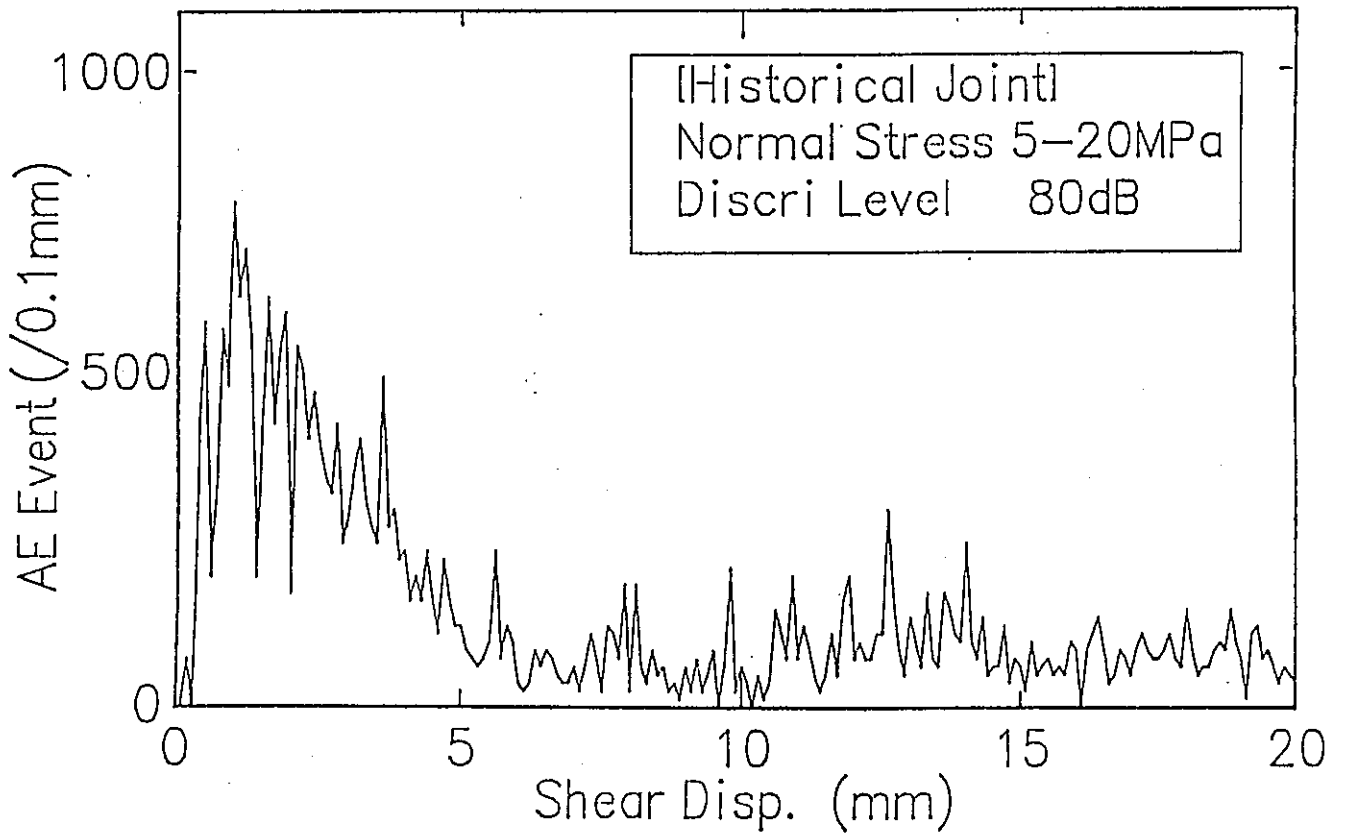
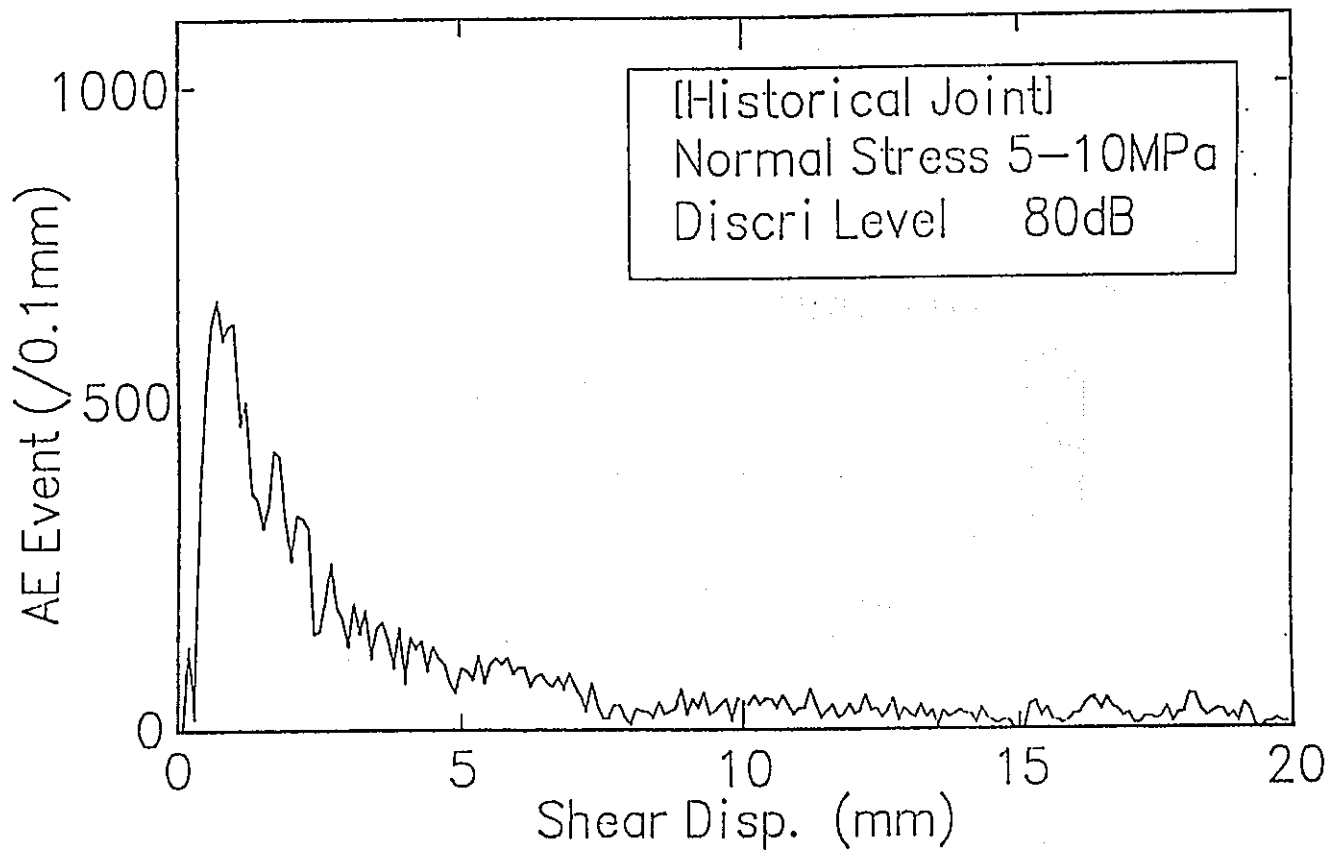
図-4-15に, せん断応力-せん断変位曲線を示す。また, 図-4-16に, 先行履歴(垂直応力1, 5, 10, 20MPa, せん断変位12mm)におけるせん断応力-せん断変位曲線を示す。図-4-15において, 履歴を受けていない5MPaはピークを示すのに対し, 履歴を与えたものは全てにおいてピークを示さず, あるせん断変位以降になるとせん断応力はほぼ一定になることが分かる。せん断変位に伴い, せん断応力が一定になるまでの段階におけるせん断応力の増分と, せん断変位の増分の比をせん断剛性 $k_s$ と定義すると, 履歴を与えた試験体に関してそれは, 先行履歴の垂直応力の増加に伴って小さくなる。これは, 先行履歴の垂直応力が増加するに従い, 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。

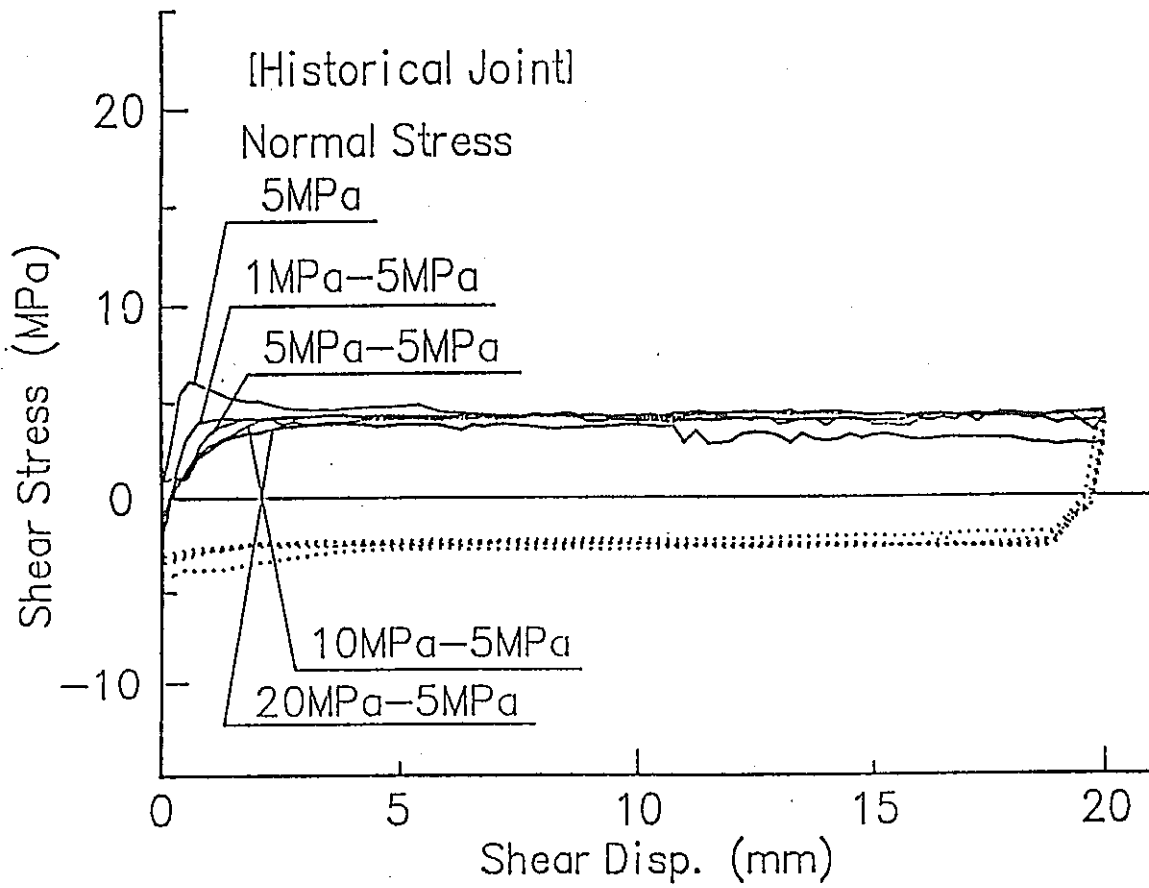
##### (b)垂直変位-せん断変位の関係

図-4-17に, 垂直変位-せん断変位曲線を示す。また, 図-4-18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-4-17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

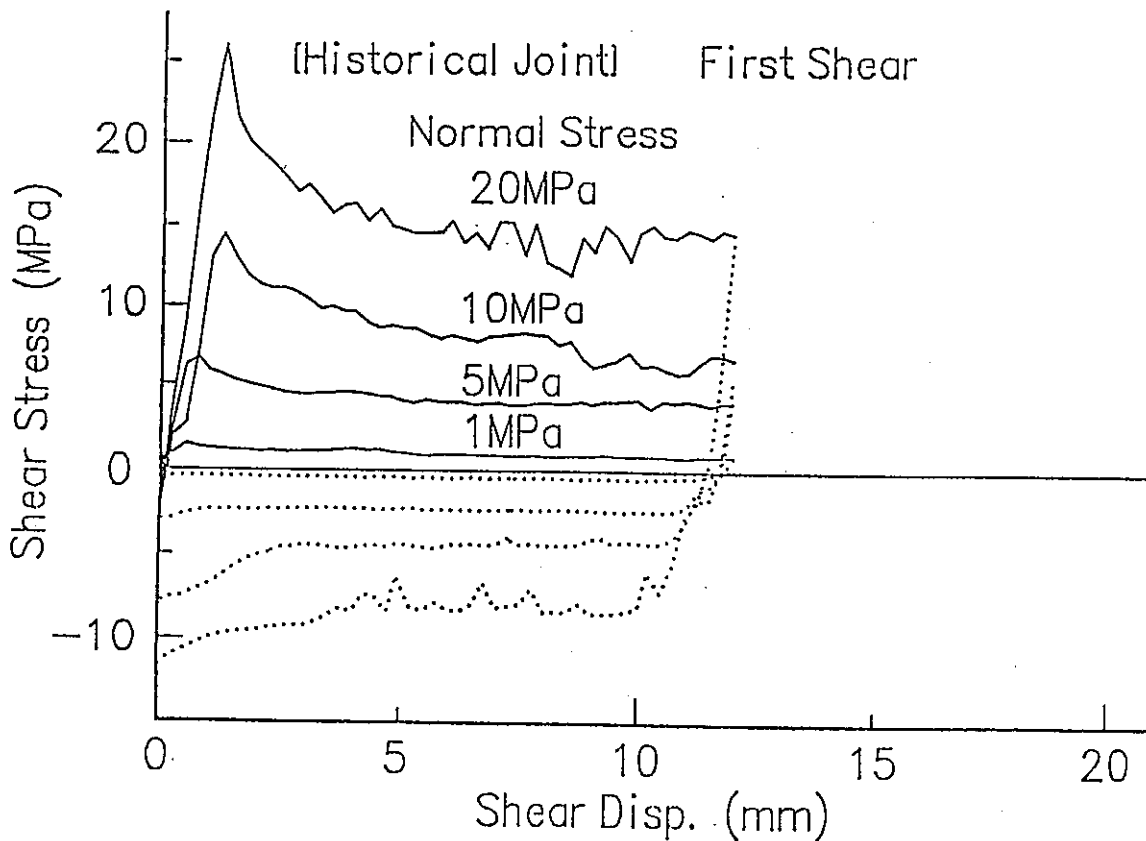


☒-4-14 Relationship between AE event count and shear displacement, obtained from the AE measurement during shear-flow coupling test.

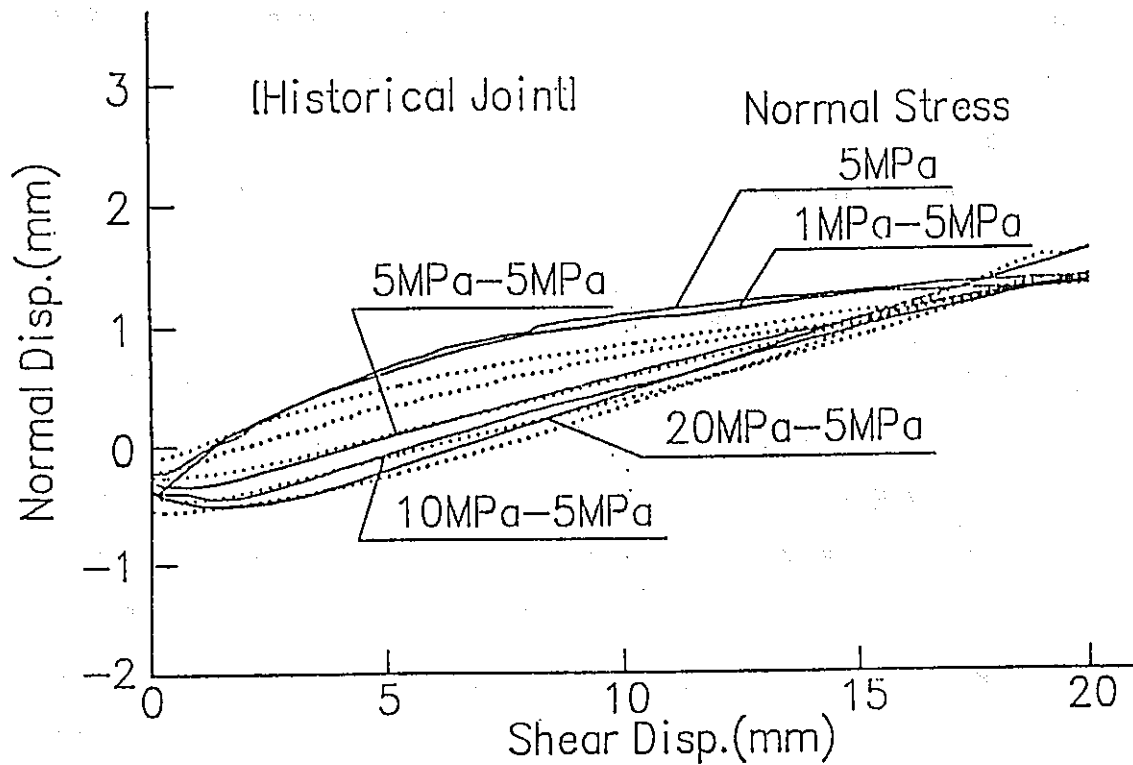




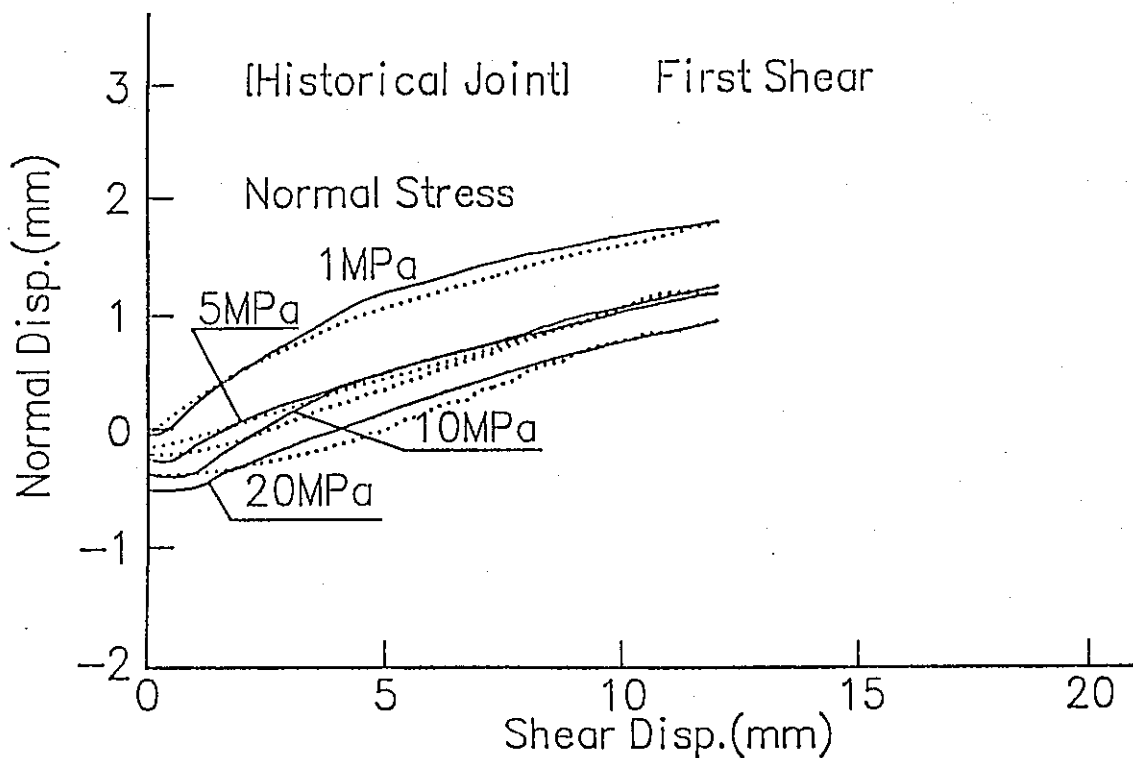
☒-4-15 Shear stress vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.



☒-4-16 Shear stress vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.



☒-4-17 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.



☒-4-18 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.



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。そして、10MPa-5MPaと20MPa-5MPaの二つを比べると、せん断変位12mm付近で、ダイレク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。

#### (c)垂直応力-ダイレクションの減少量の関係

図-4-19に、垂直変位-垂直応力の関係を示す。また、図-4-20に、垂直応力-ダイレクションの減少量の関係を示す。図-4-19において、Line1は図-4-17における各ラインでのせん断変位0mmにおける垂直変位をプロットしたものである。Line2, 3, 4, 5, 6も同様にせん断変位4, 8, 12, 16, 20mmにおける垂直変位をプロットしたものである。また、図-4-20はLine4における隣り合う点の垂直変位の差(ダイレクションの減少量)をプロットした図である。この図から、1MPa-5MPaと5MPa-5MPaの変位差が一番大きく、先行履歴の垂直応力が5MPa付近の時、最もその影響を受けていることがわかる。

#### (d)透水係数-せん断変位の関係

図-4-21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わず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クションの傾向と類似している。

#### (e)AEイベントとせん断変位の関係

図-4-22に、AEイベントとせん断変位の関係を示す。先行履歴の垂直応力が大きくなる程、総イベント数は減少している。これは垂直応力の増加に伴い凹凸の表面が滑らかになっていったことを示している。

### 4. 5 Case 3の実験結果および考察

履歴を受けた自然の不連続面は、そのほとんどが現場において、浸食作用、化学的反應等によって壁面強度が低下しているため、今回、人工的不連続面を用い

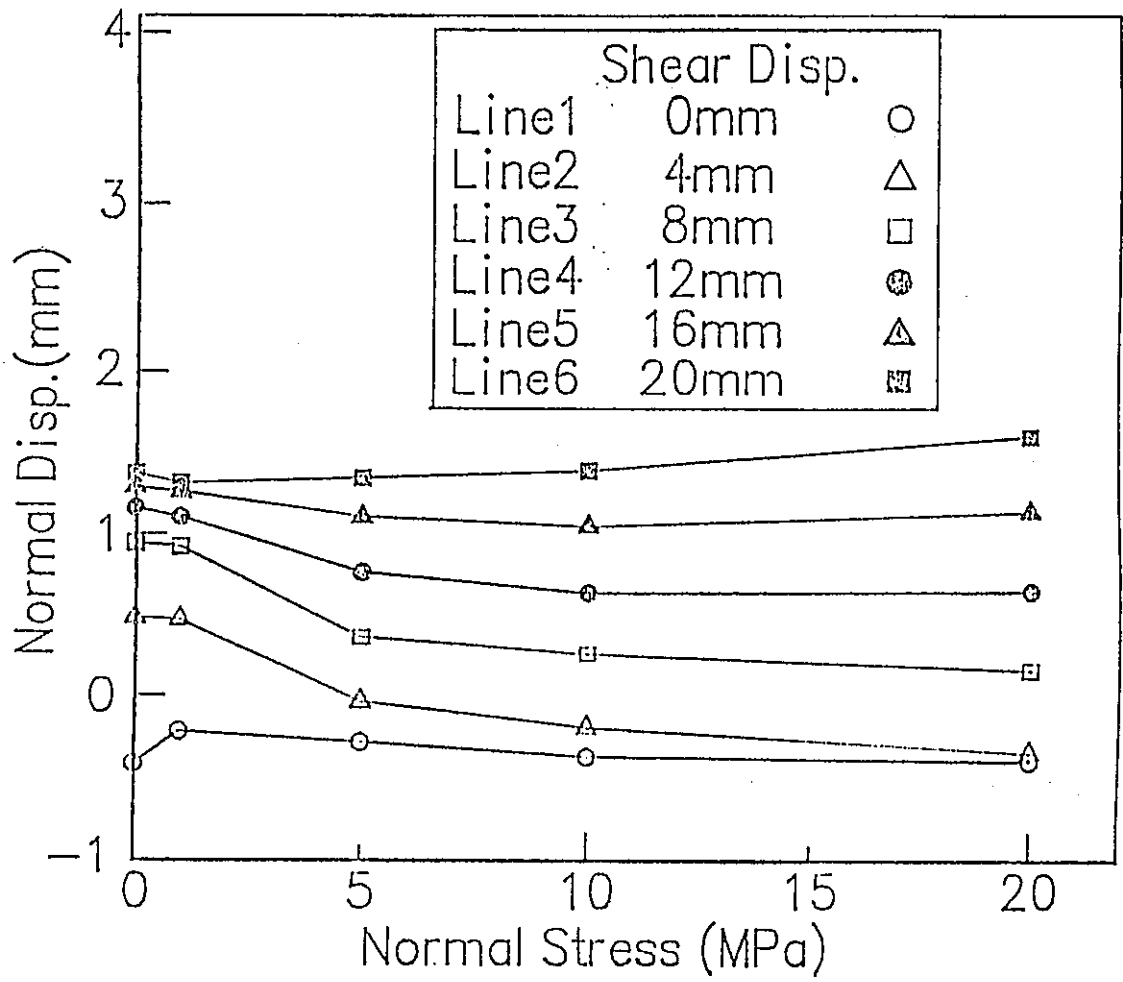


图-4-19 Relationships between normal displacement and normal stress according to different shear displacement.

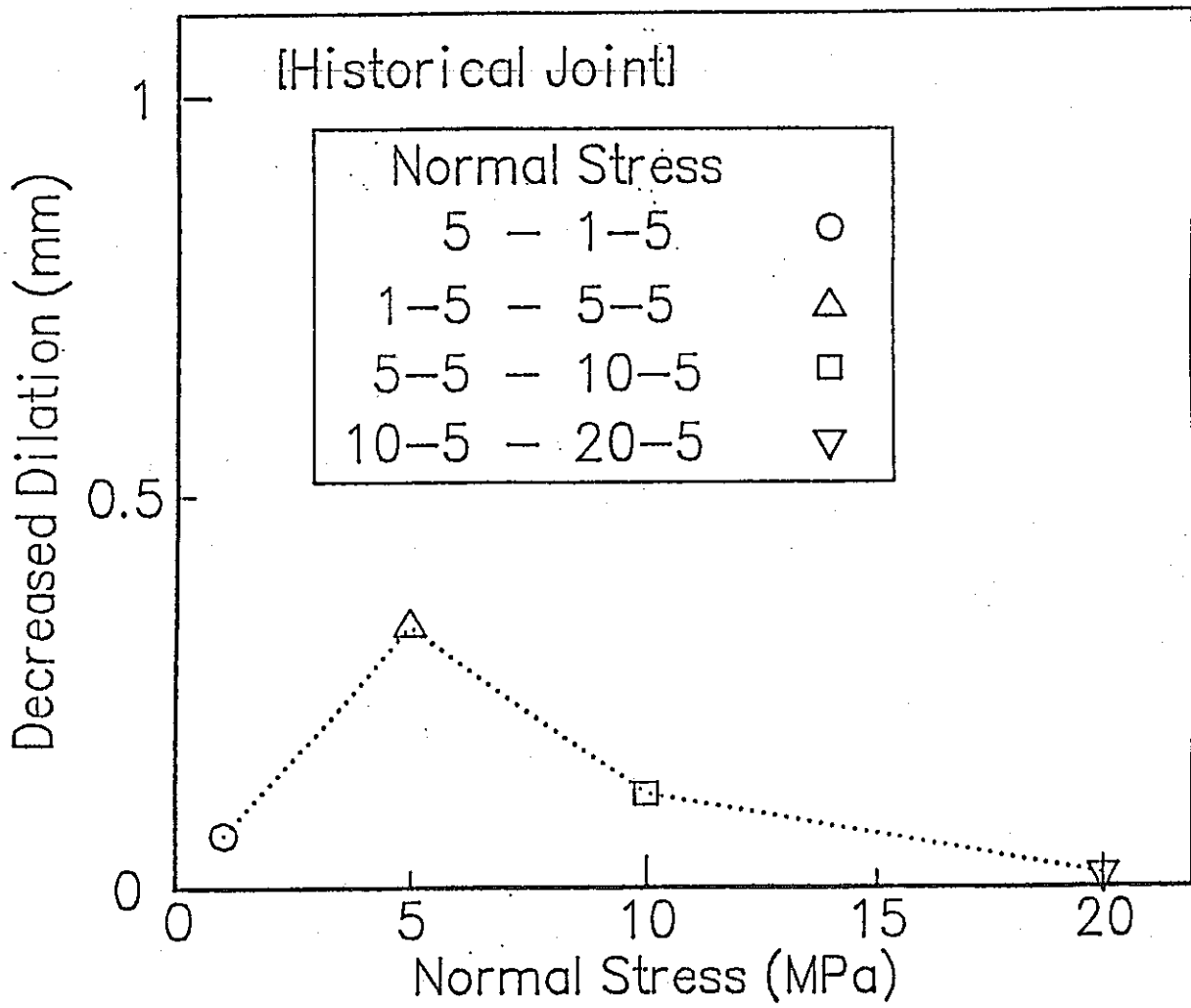


图4-20 Relationship between decreased dilation and normal stress, obtained from Line4 in Fig.4-4-5.

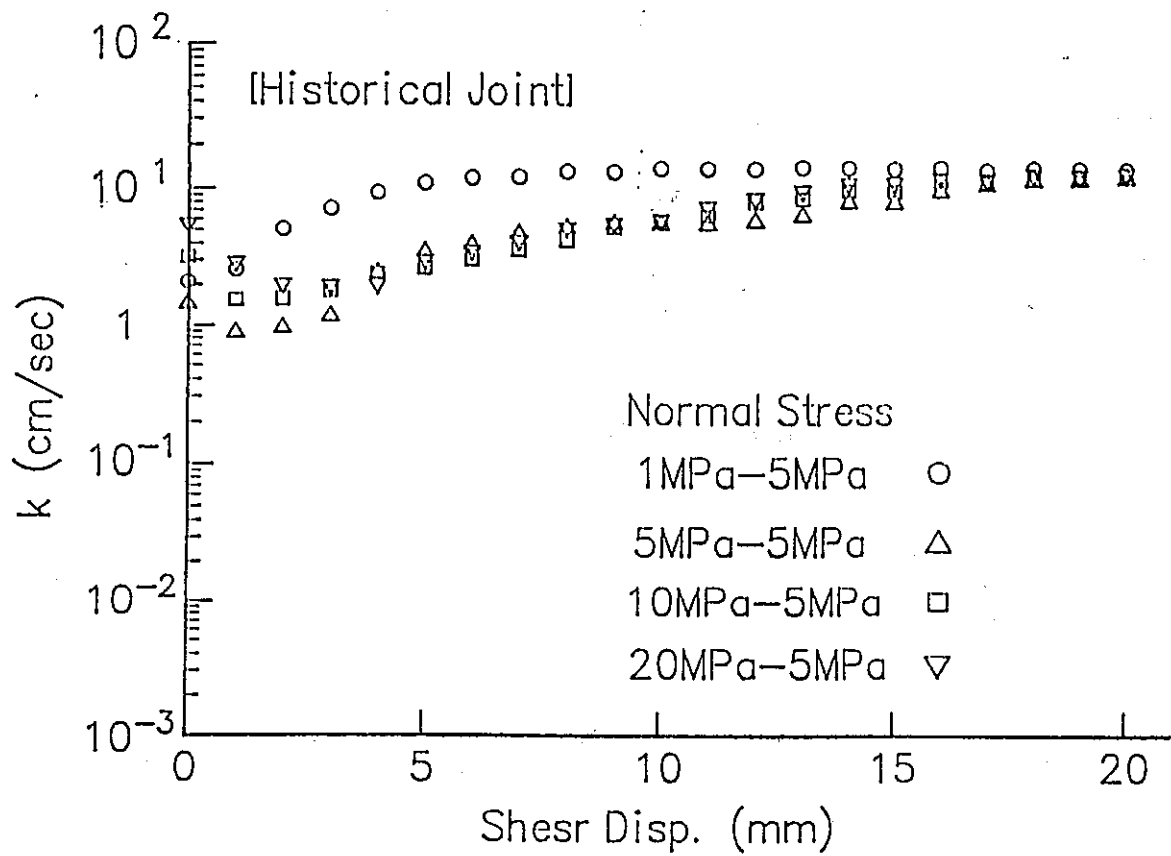


图-4-21 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.

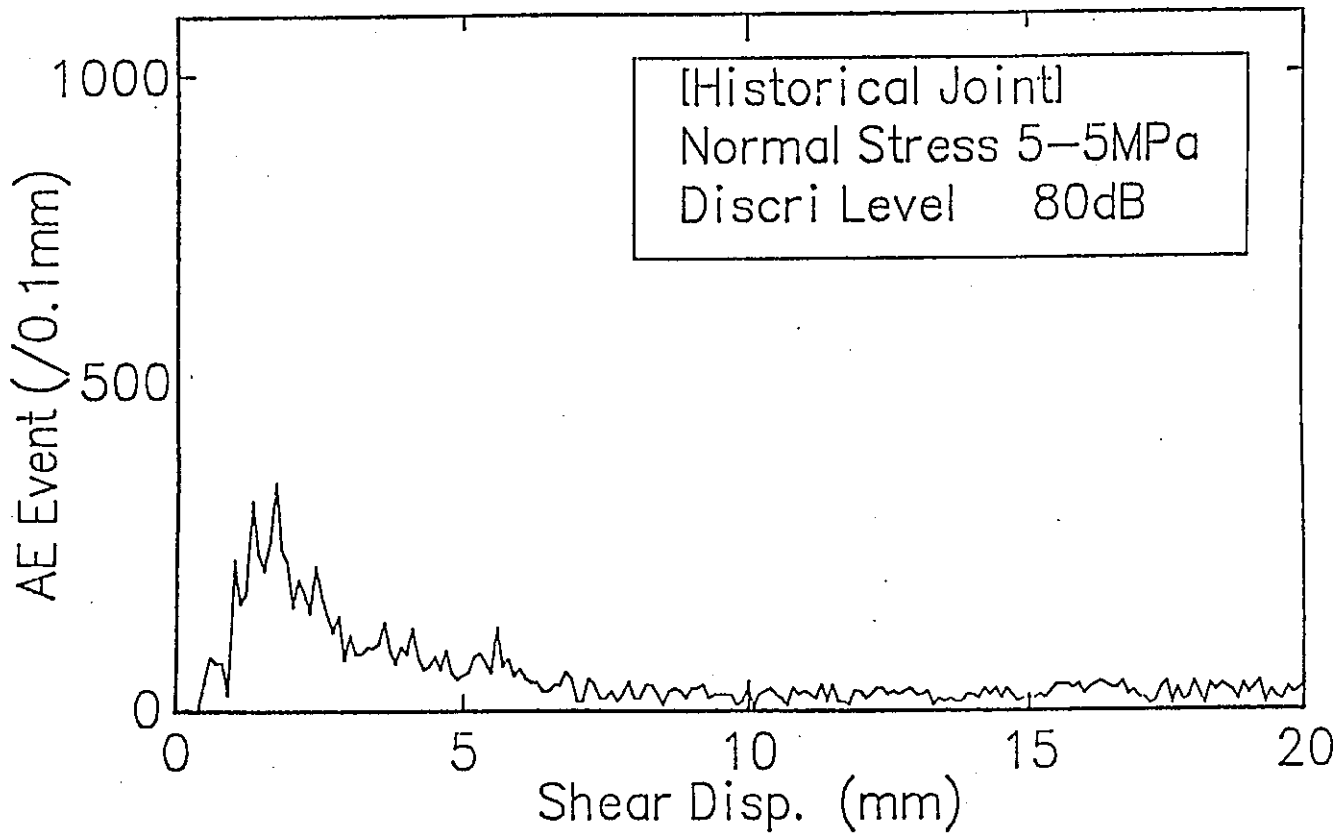
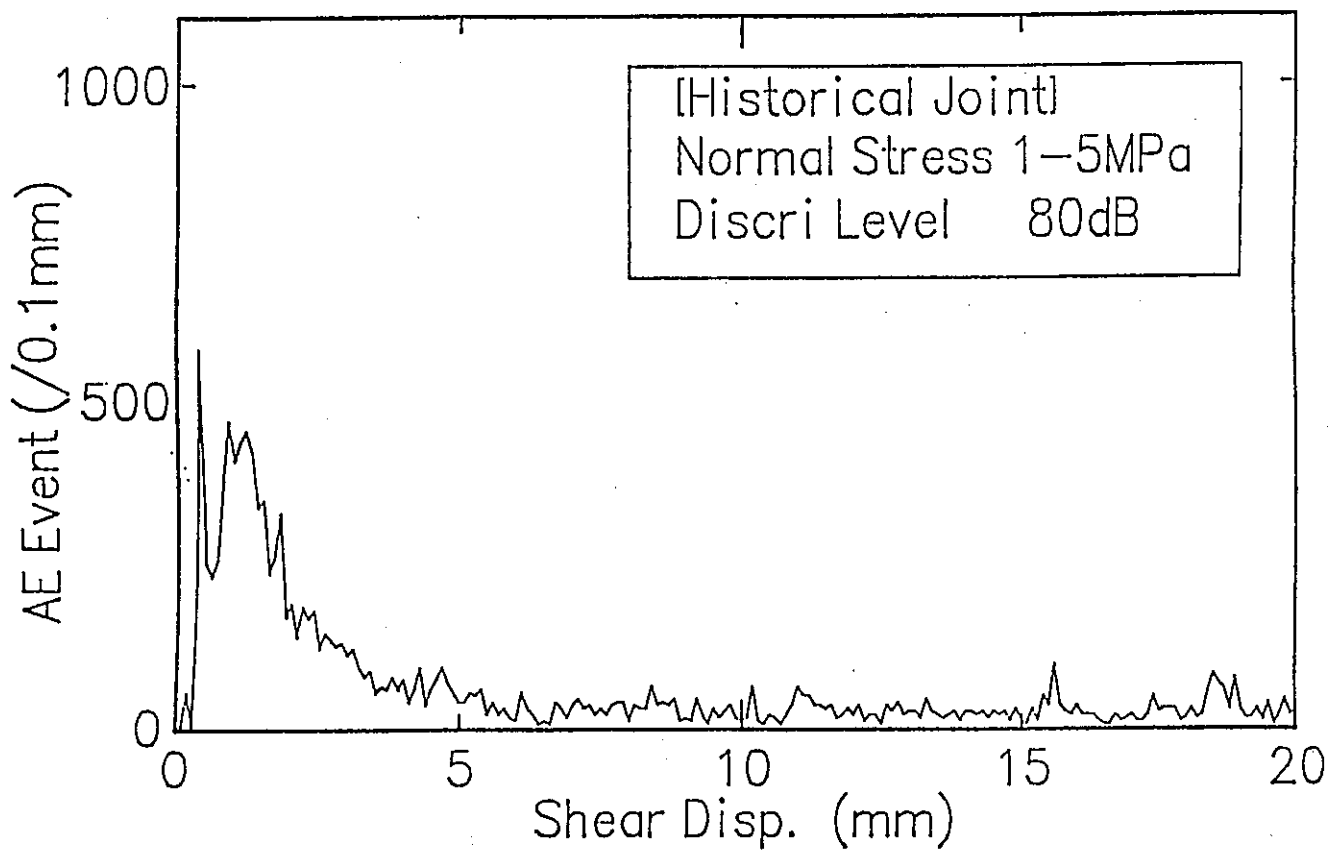
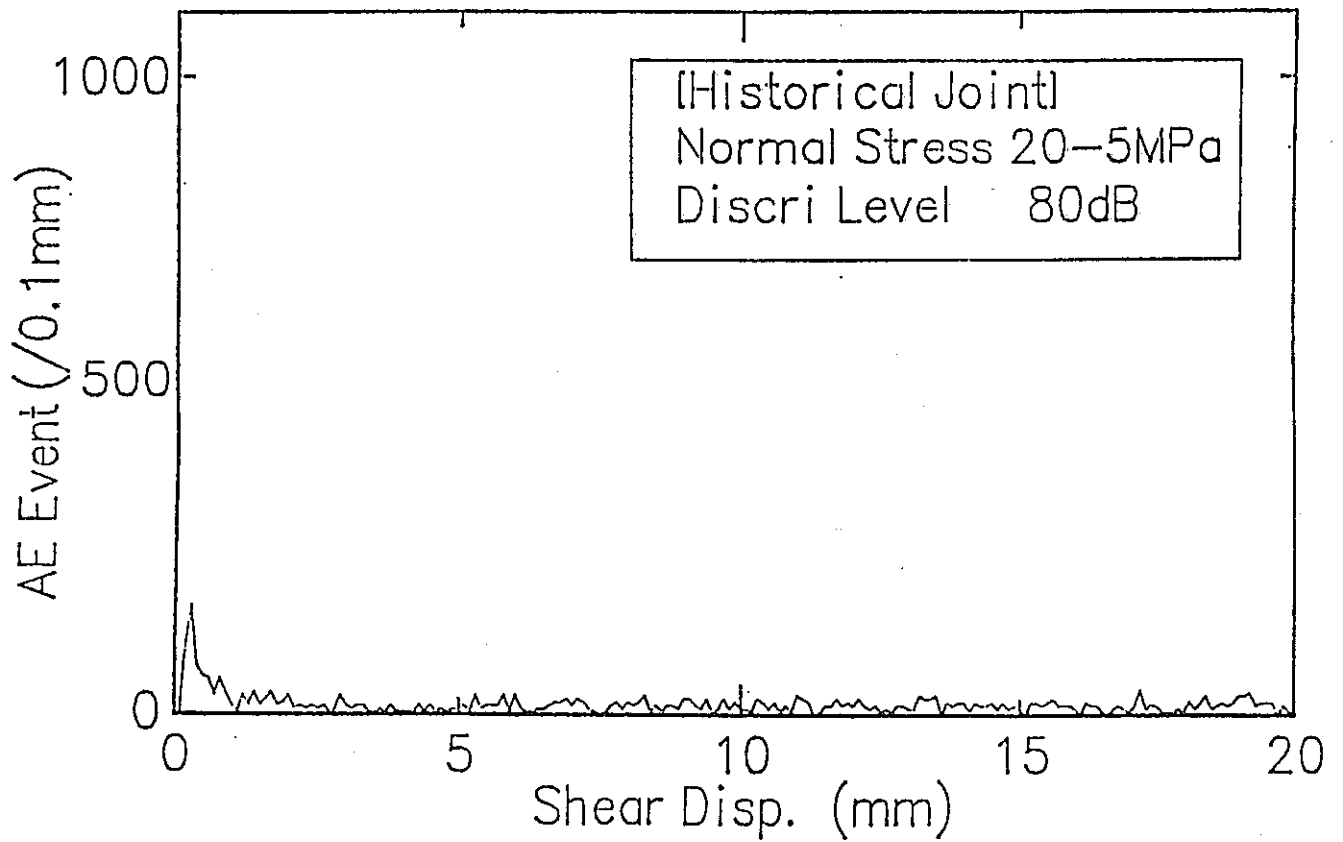
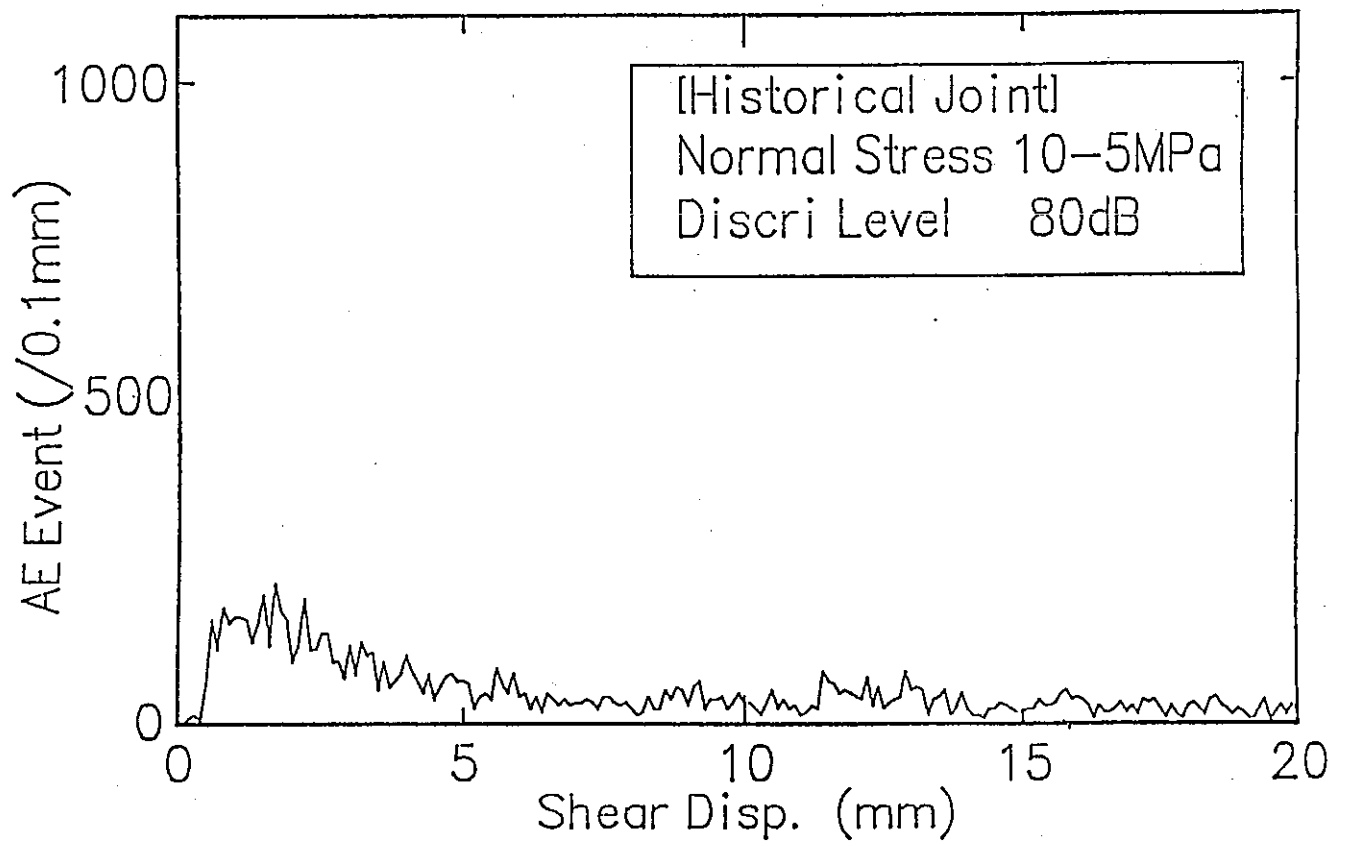


图-4-22 Relationship between AE event count and shear displacement, obtained from the AE measurement during shear-flow coupling test.



て行った実験から得られた結果と直接比較することは難しい。そこで、ここでは両者の傾向の比較、およびその評価を中心に考察を行う。

#### (a)せん断応力－せん断変位の関係

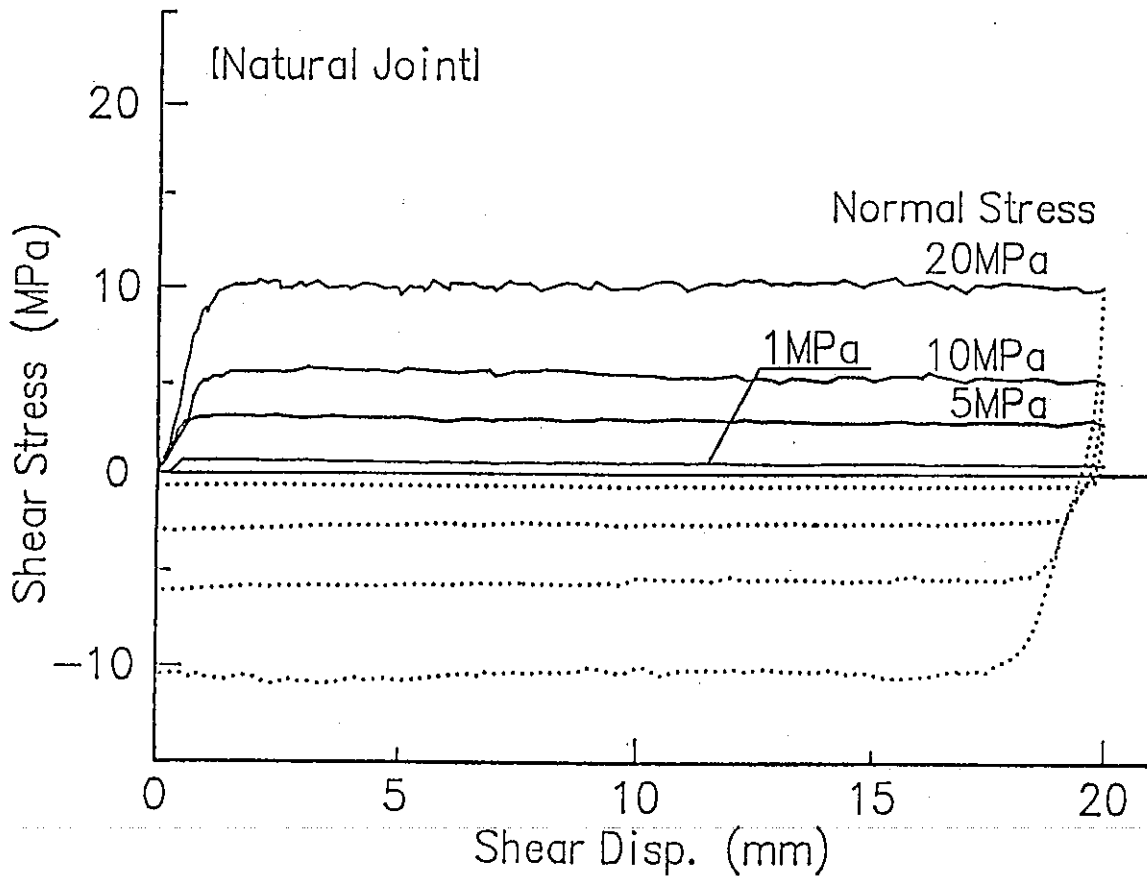
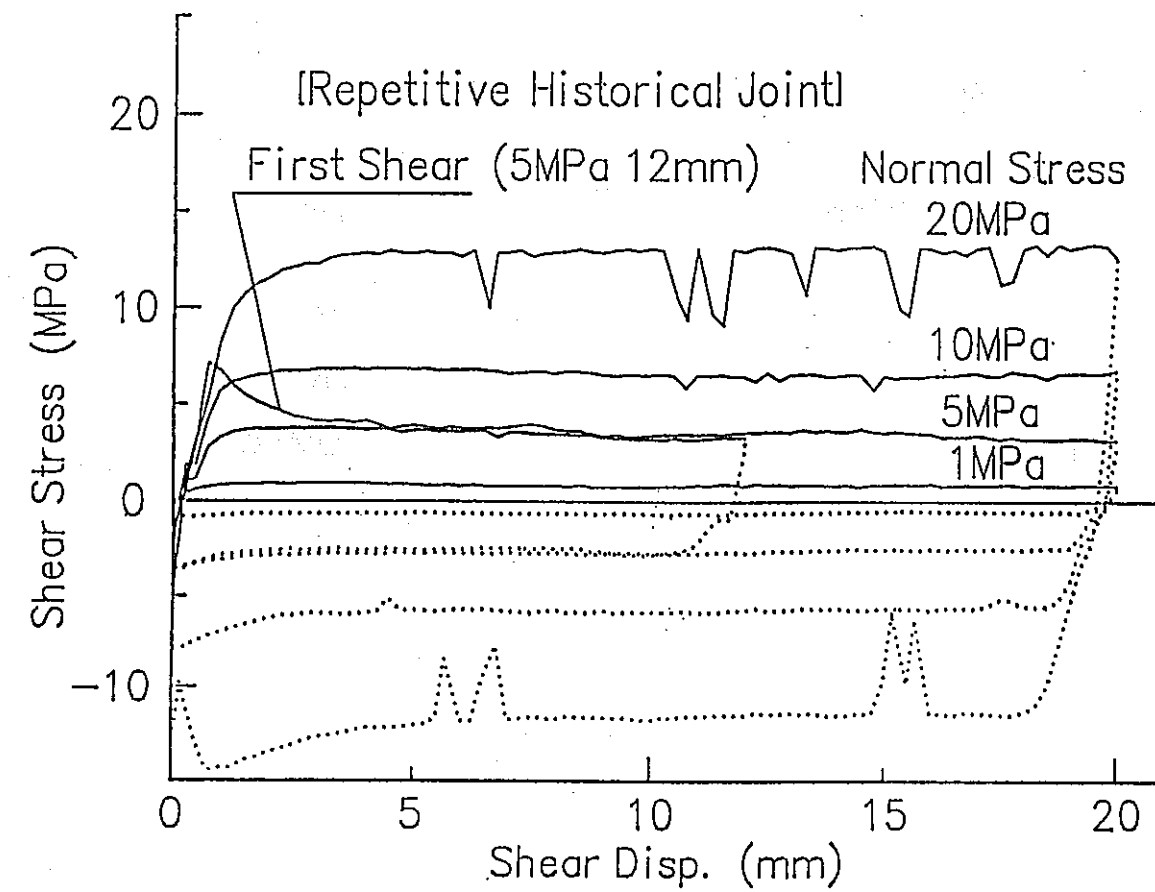
図-4-23に、せん断応力－せん断変位曲線を示す。履歴を与えた人工的不連続面は4回の繰り返しせん断全てにおいて、せん断応力はピークを示さずに残留応力に達する。またその残留応力は、自然の不連続面の残留応力に比べて少し大きくなっている。これは、自然の不連続面が現場において浸食され、凹凸の壁面強度が低下していることが原因と考えられる。

#### (b)垂直変位－せん断変位の関係

図-4-24に、垂直応力－せん断変位曲線を示す。履歴を与えた人工的不連続面は4回の繰り返しせん断全てにおいてダイレーションの傾向を示している。これに対して自然の不連続面は比較的低い垂直応力ではダイレーションの傾向を示すが、垂直応力10MPaではほとんどダイレーションはなくなり、20MPaでは逆に負のダイレーションを示している。これは自然の不連続面が現場の風化作用によって、不連続面表面がもろくなっていることが原因と考えられる。また、履歴を与えた人工的不連続面の1MPaにおいてせん断変位12mm付近までは先行履歴のダイレーションよりも小さく、その後でダイレーションの増加率が上昇している。このことから、先行履歴よりも小さな垂直応力で履歴を与えた場合、先行履歴の影響を大きく受けることが分かる。

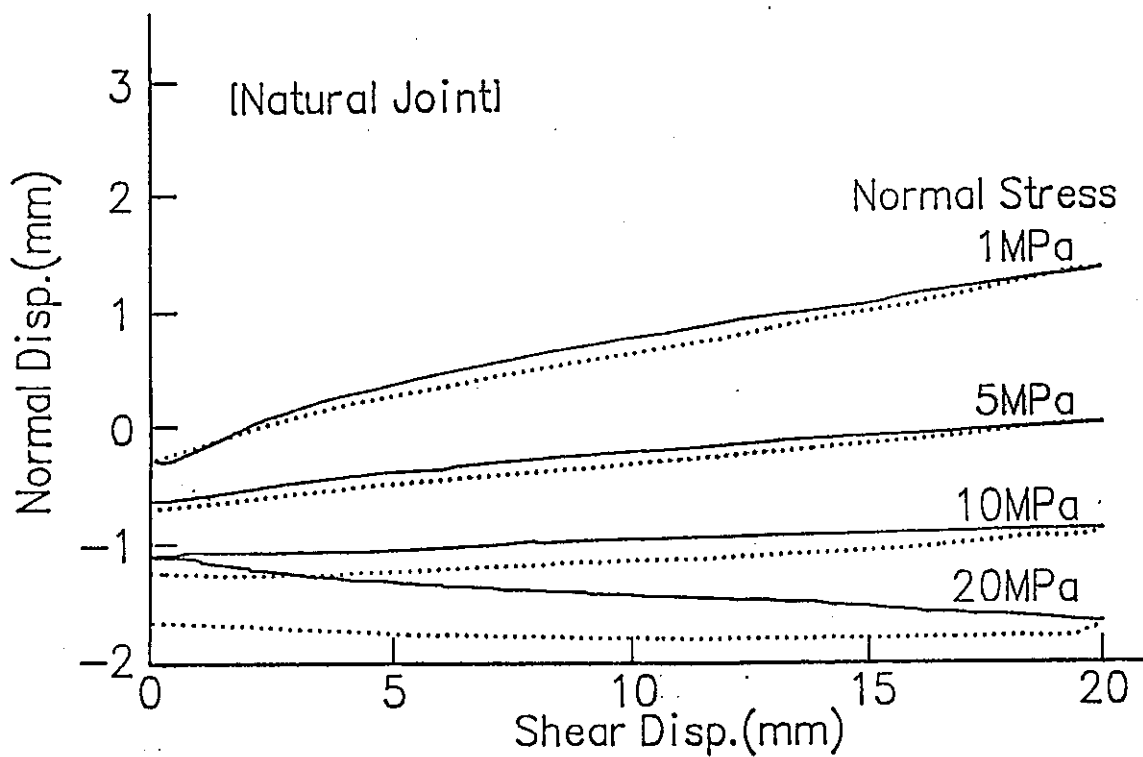
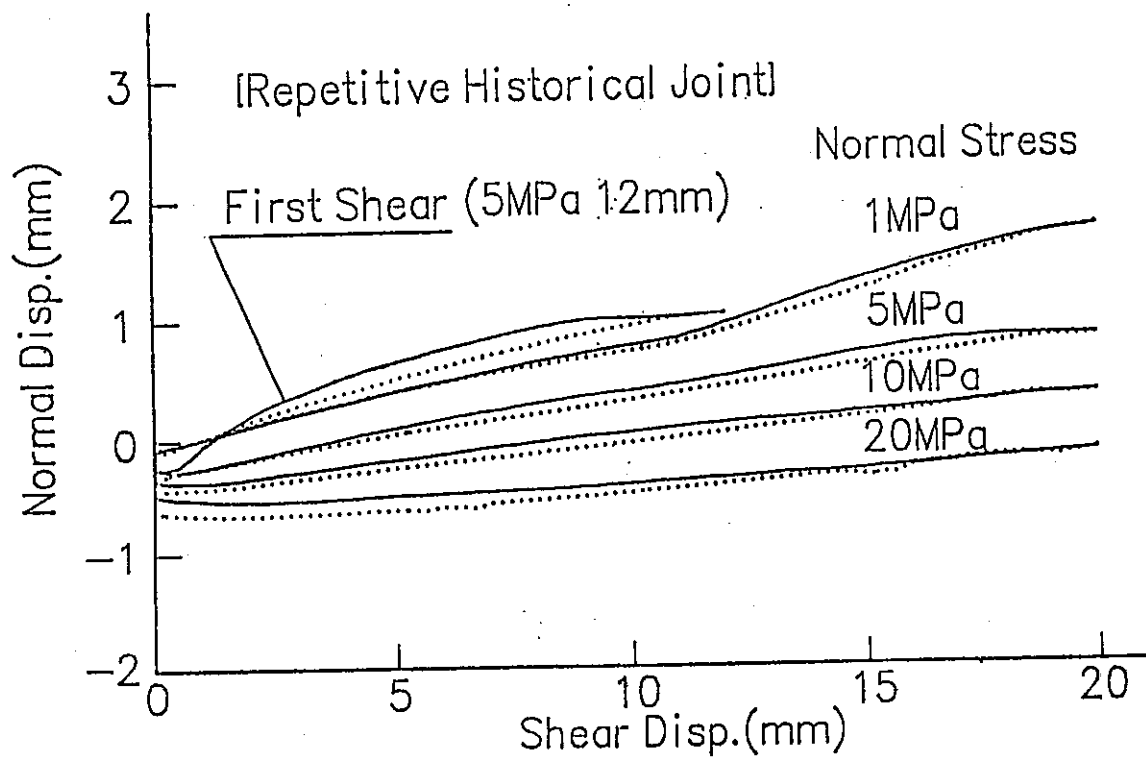
#### (c)透水係数－せん断変位の関係

図-4-25、及び図-4-26に透水係数－せん断変位の関係を示す。図-4-25において、履歴を与えた人工的不連続面、現場で履歴を受けた自然の不連続面ともに、垂直応力5MPa、10MPaにおいて、微小ではあるがせん断変位12mm付近で増加率が上昇している。ここにおいても先行履歴の影響を受けているものと考えられる。また、自然の不連続面の20MPaでは不規則な変化を示すのに対して、人工的不連続面の20MPaでは規則的な変化を示している。これは自然の不連続面が現場において、かなり大きな履歴を受けてこのサンプルの表面が滑らかになっている、および現場

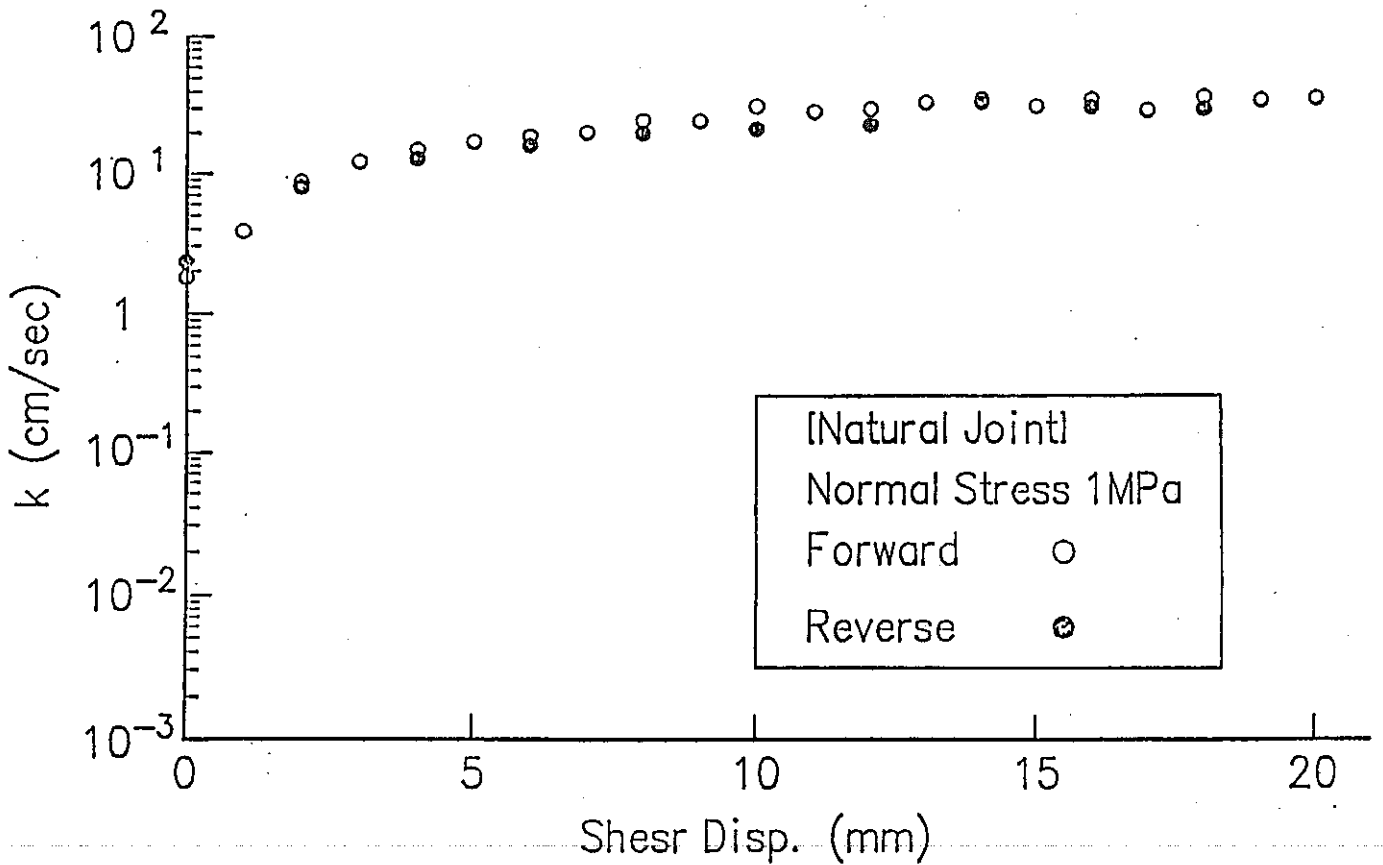
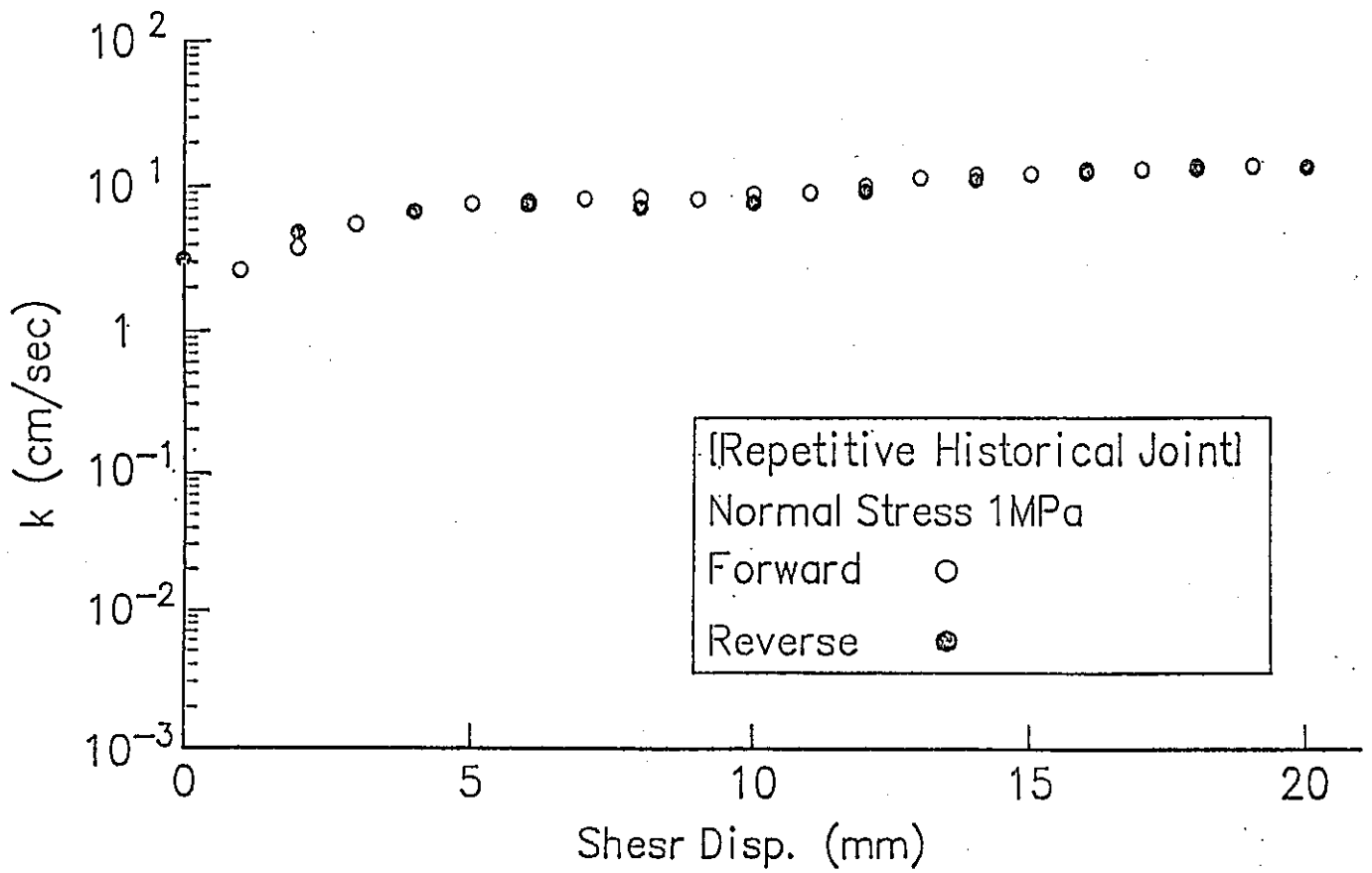


☒ -4-23 Shear stress vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the repetitive shear-flow coupling test.

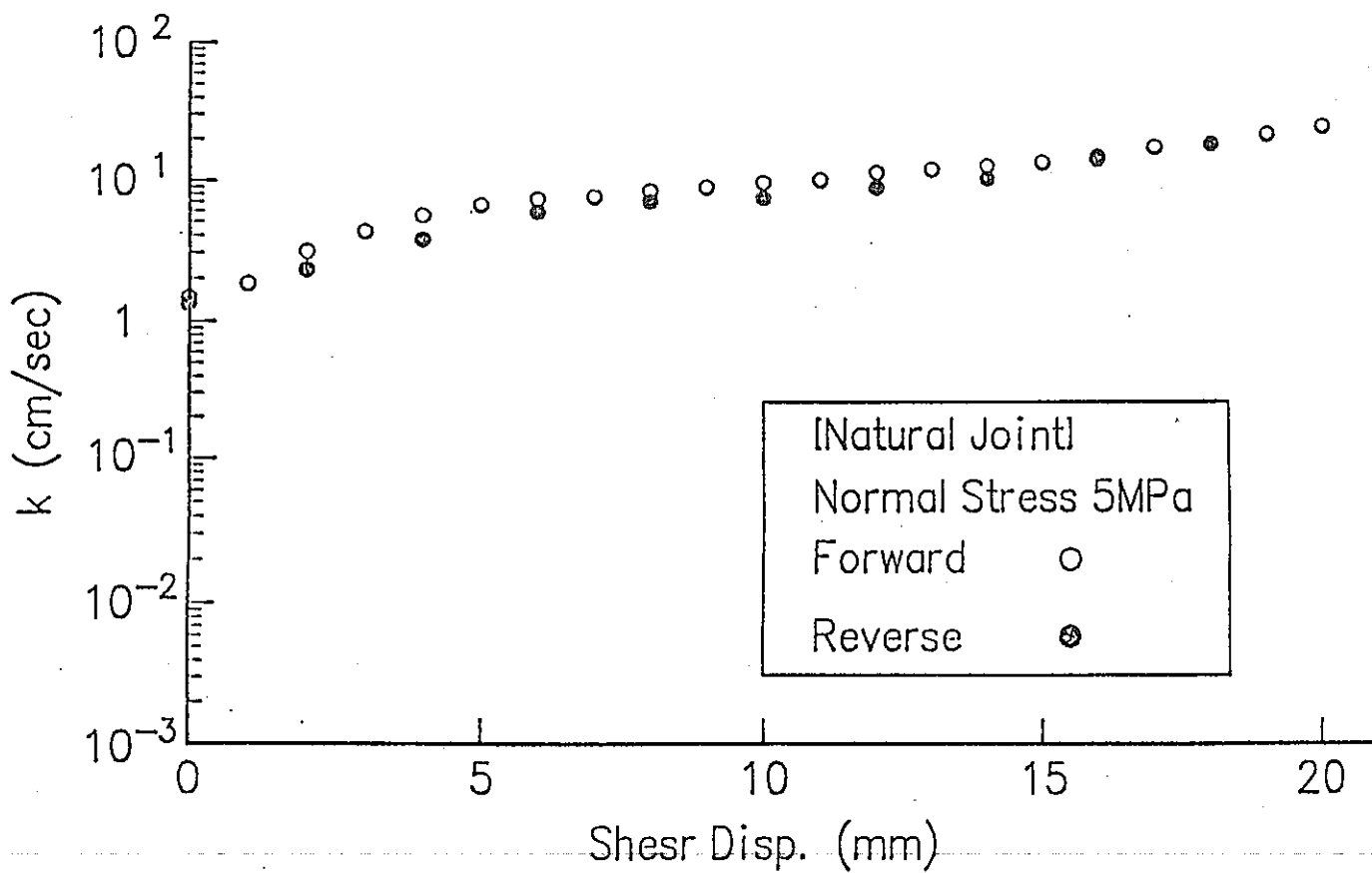
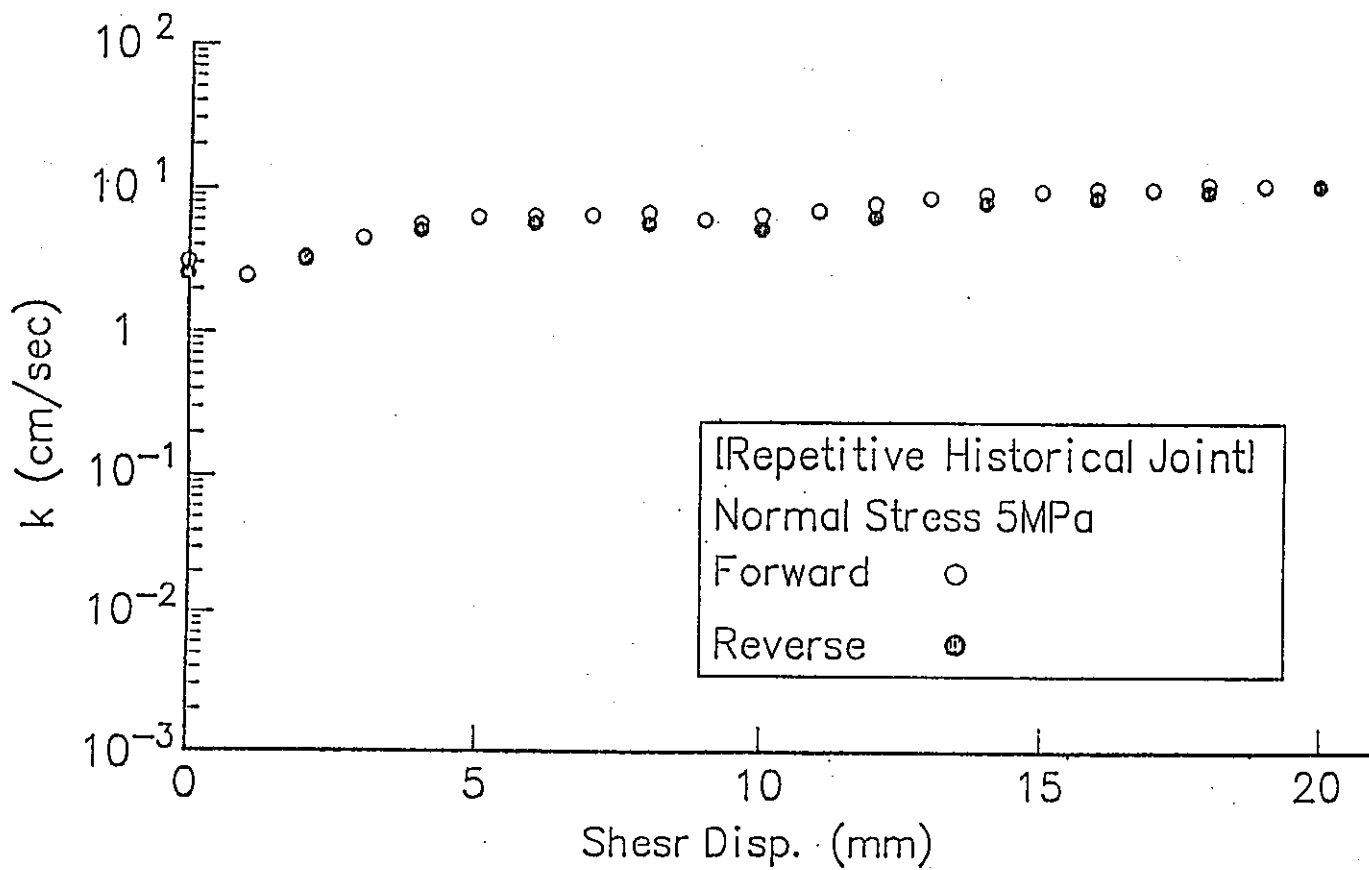


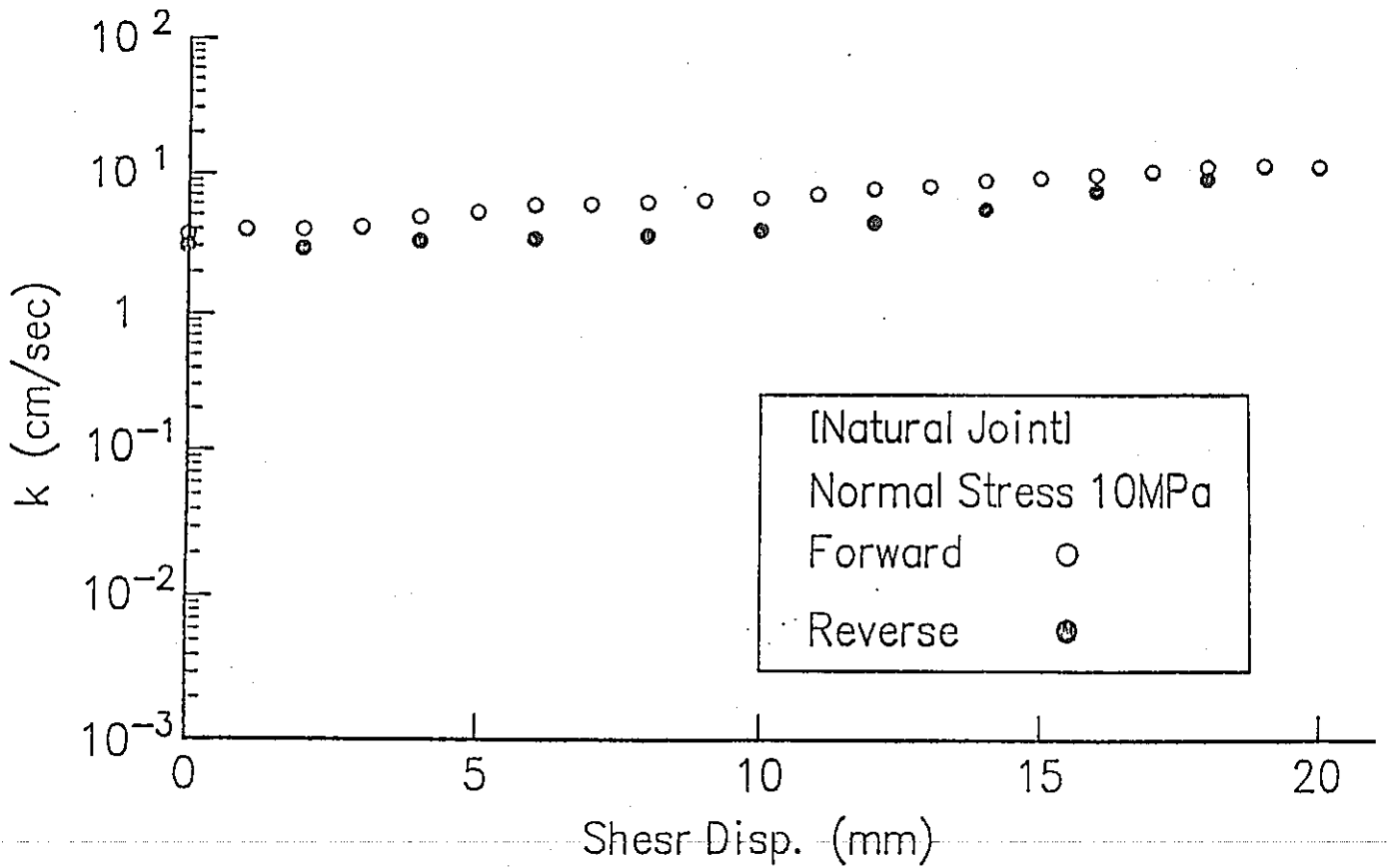
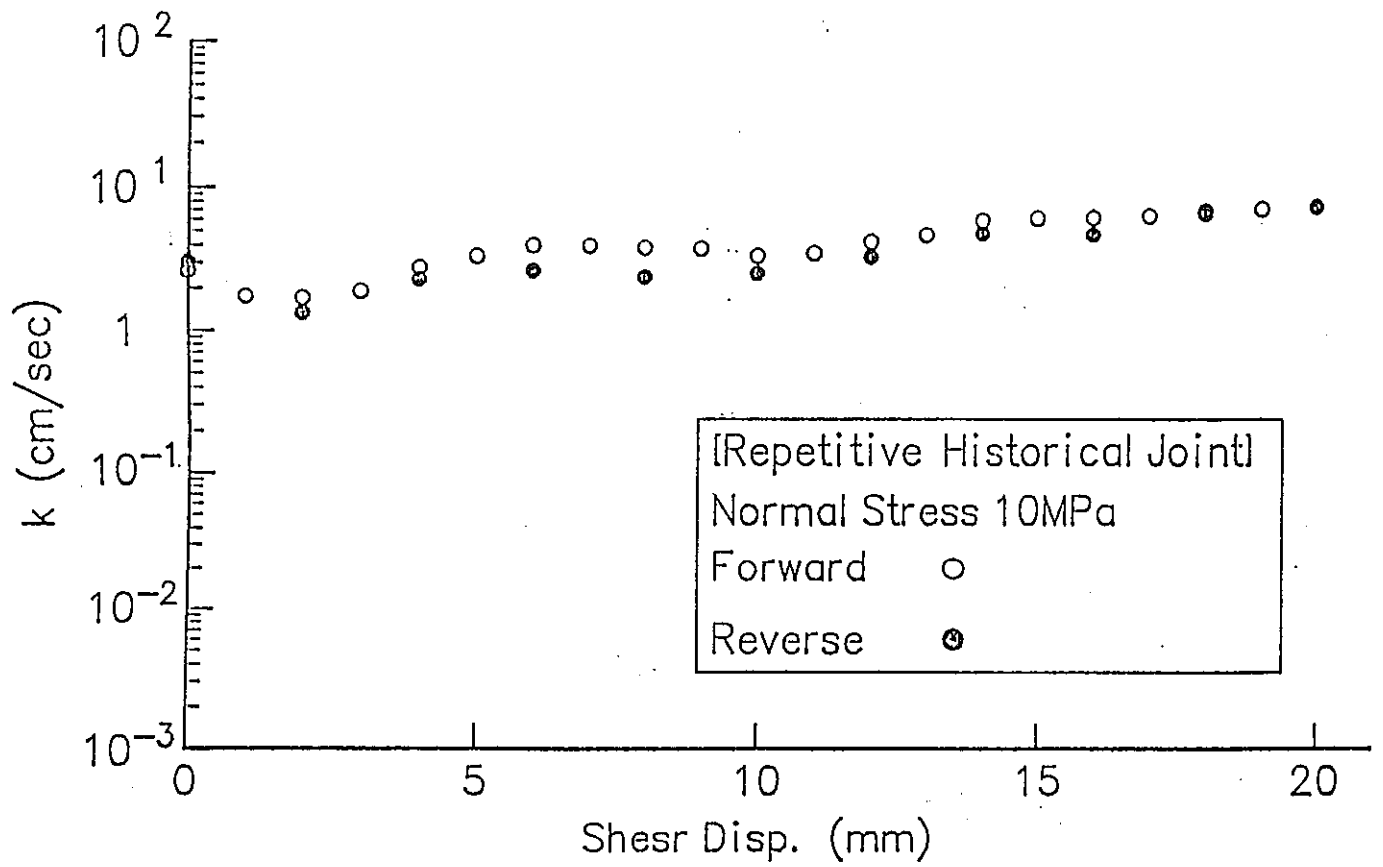


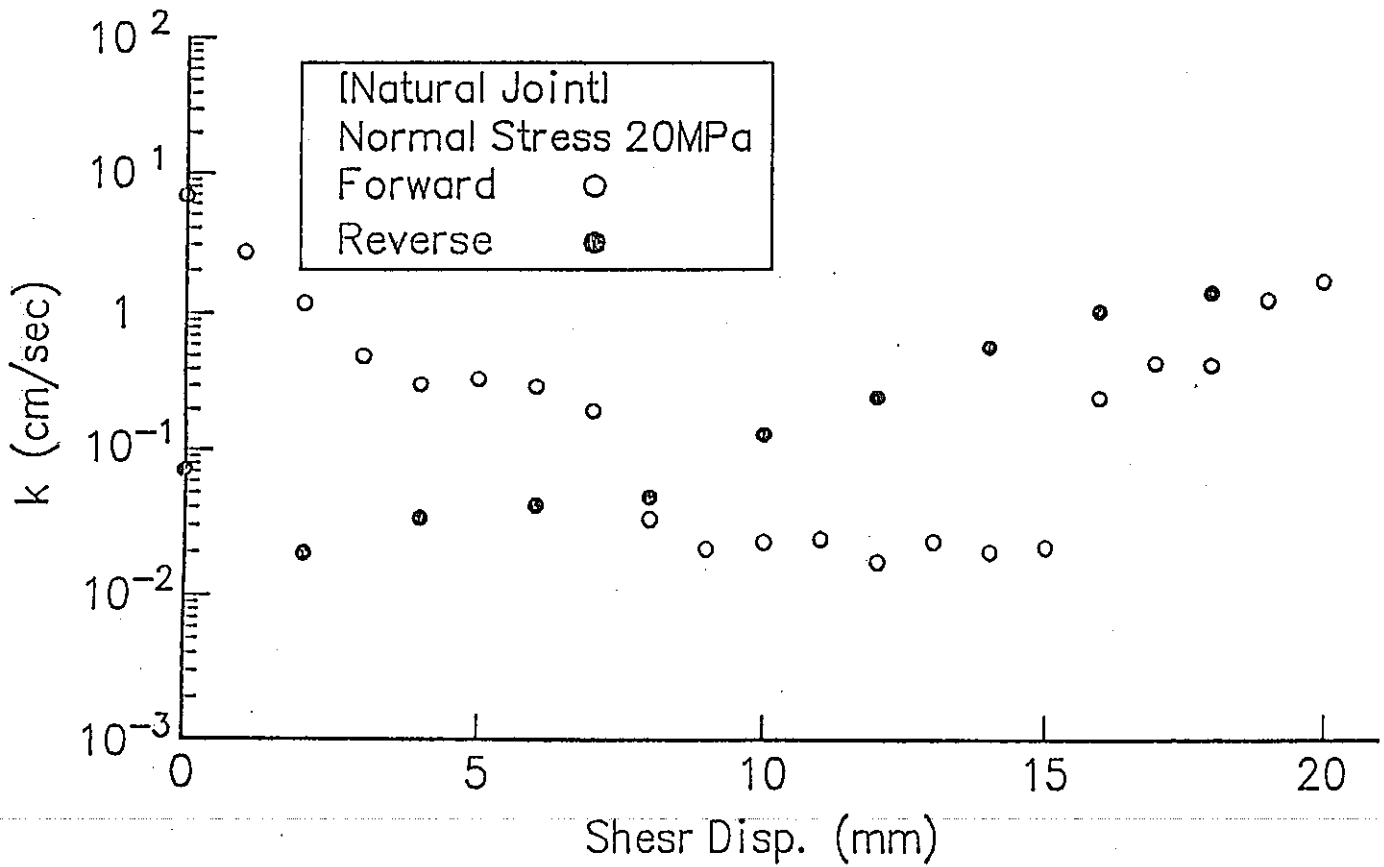
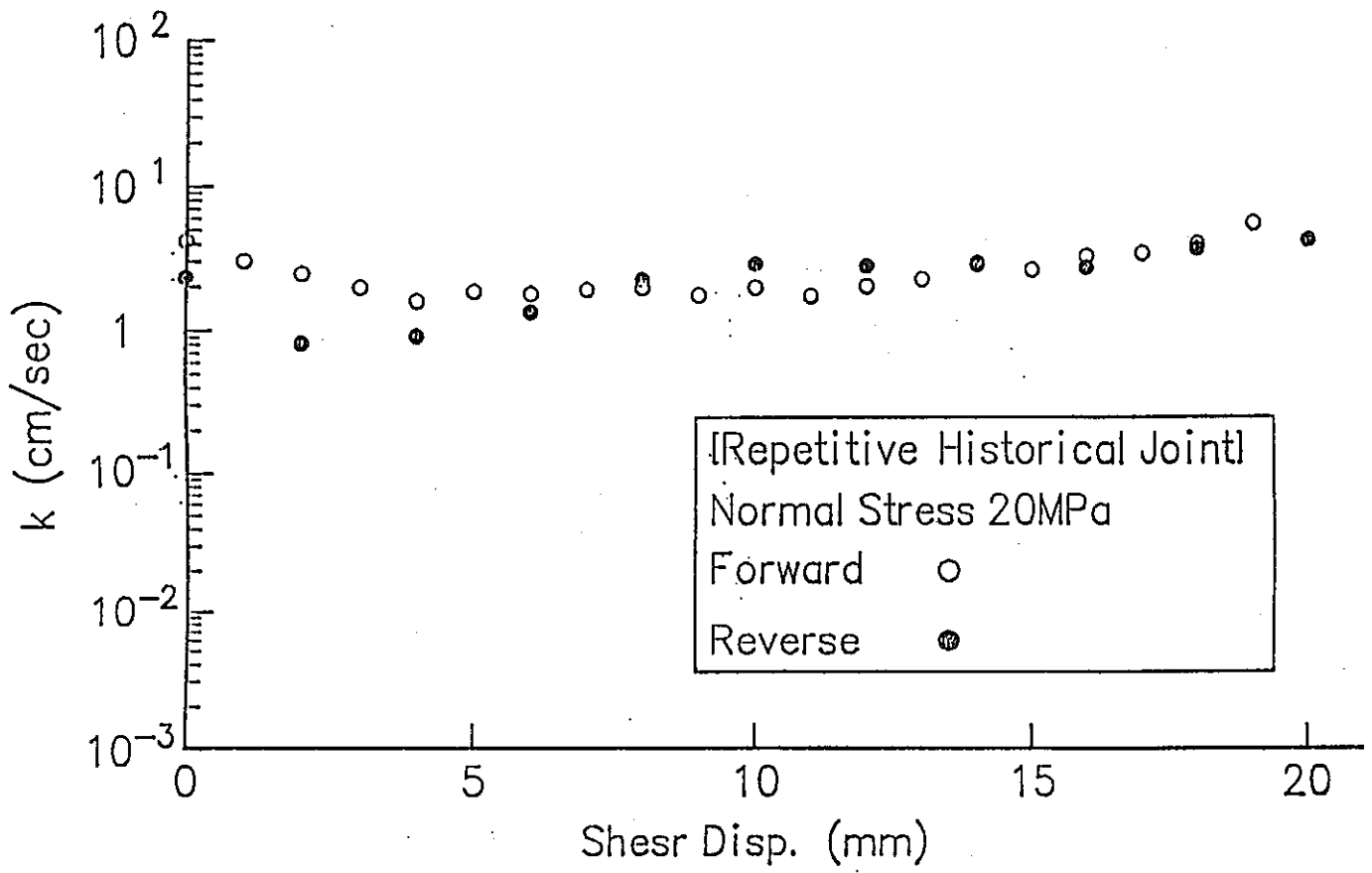
☒-4-24 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the repetitive shear-flow coupling test.



☒ -4-25 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different constant normal stresses, obtained from the repetitive shear-flow coupling test.







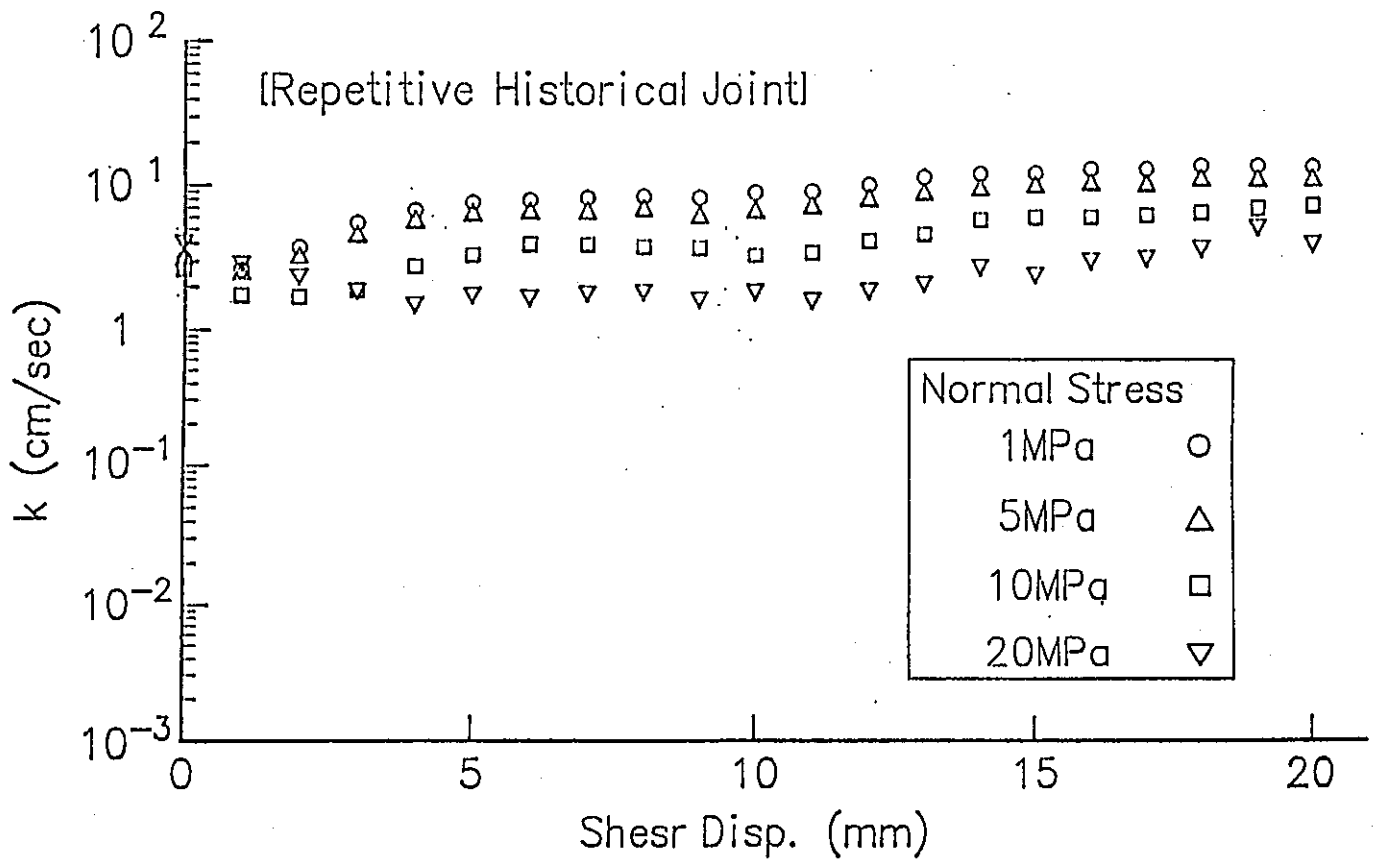
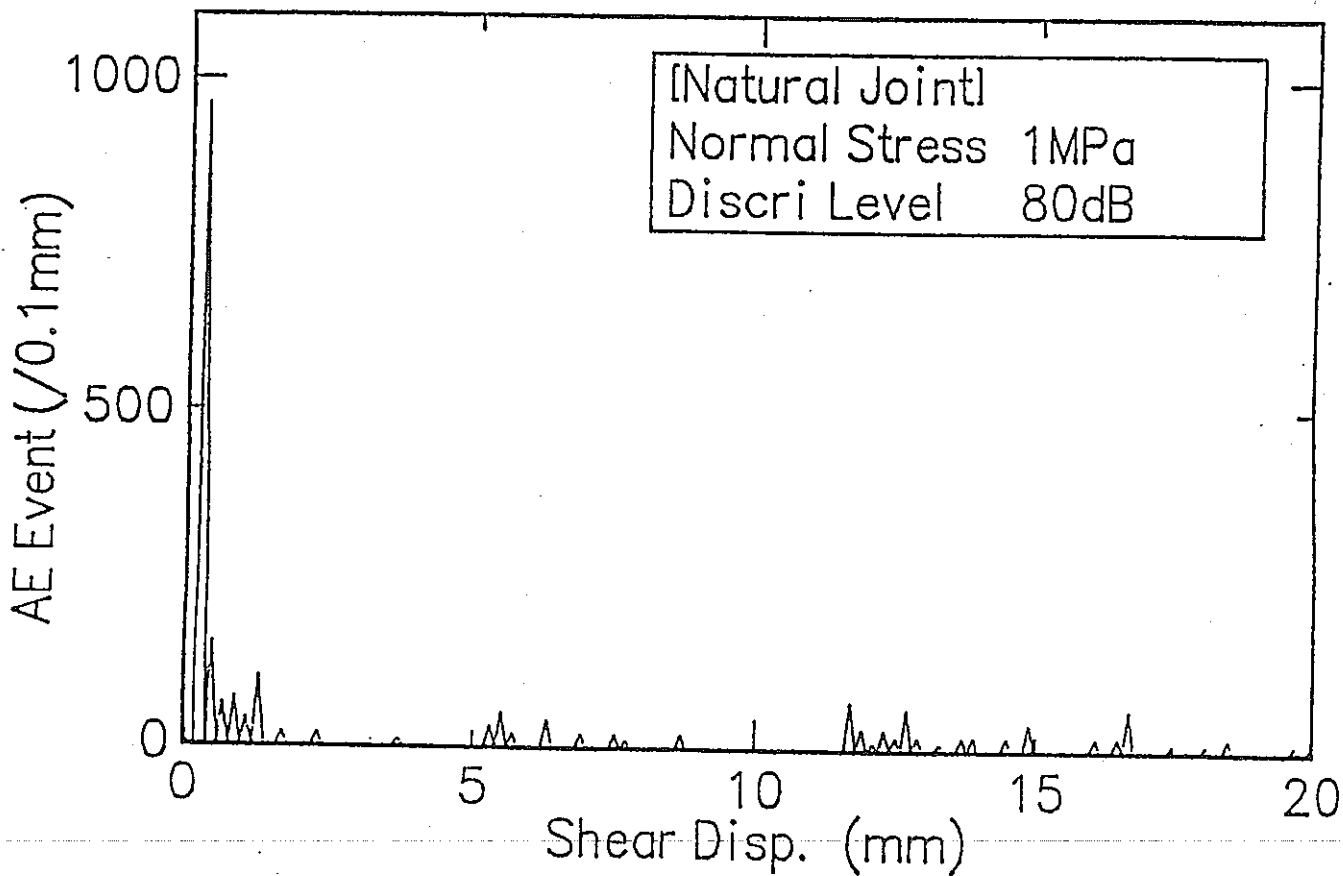
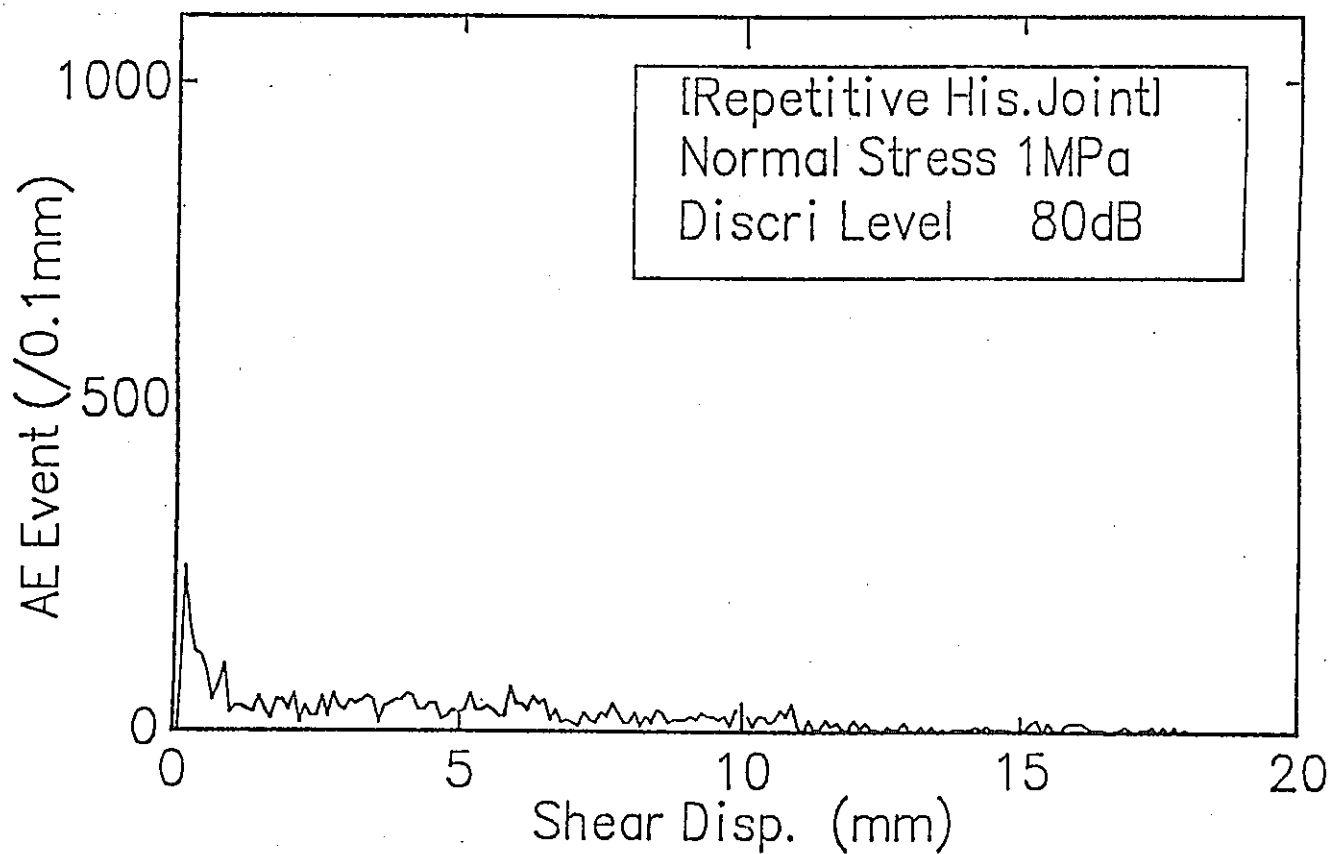
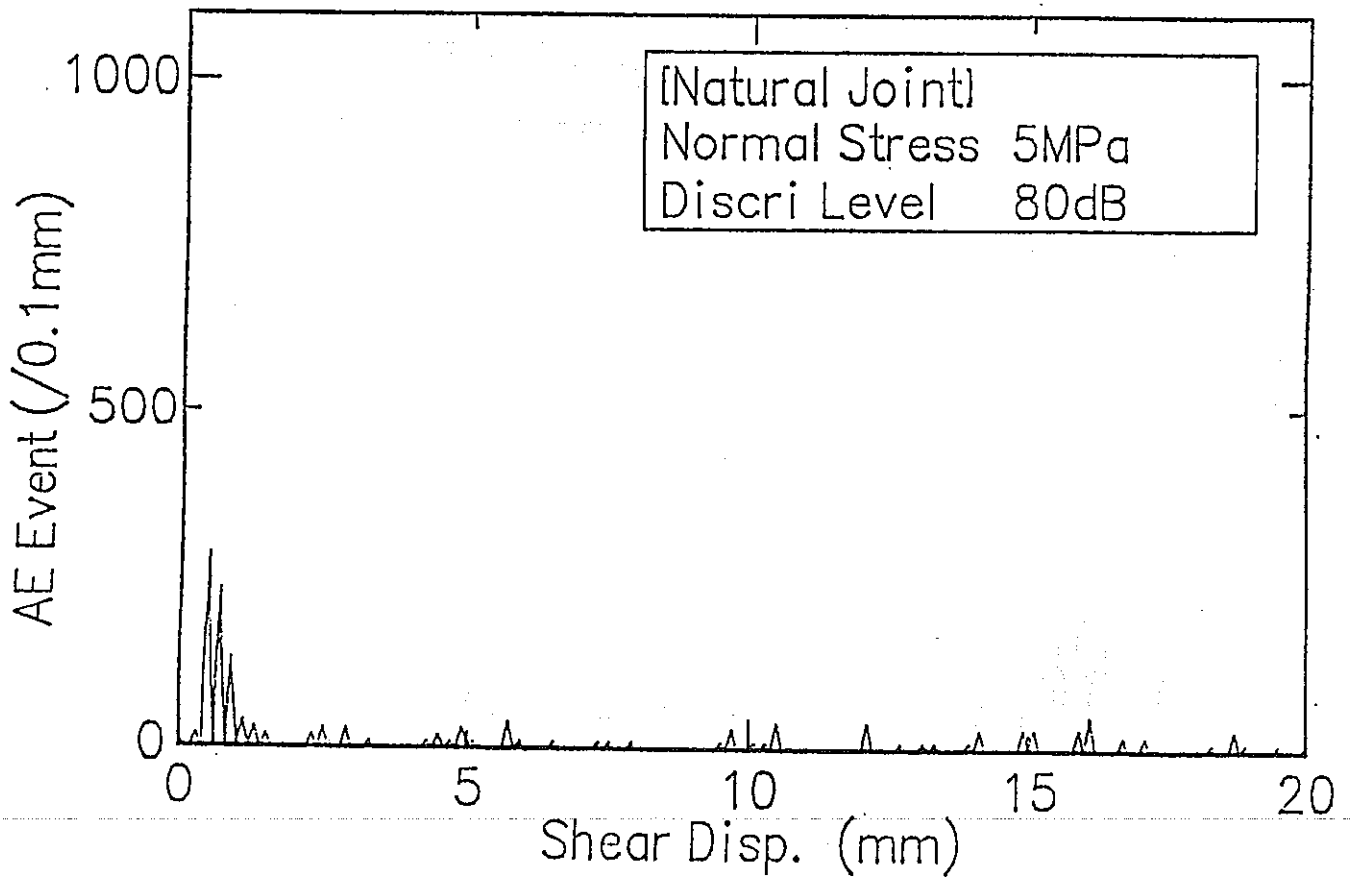
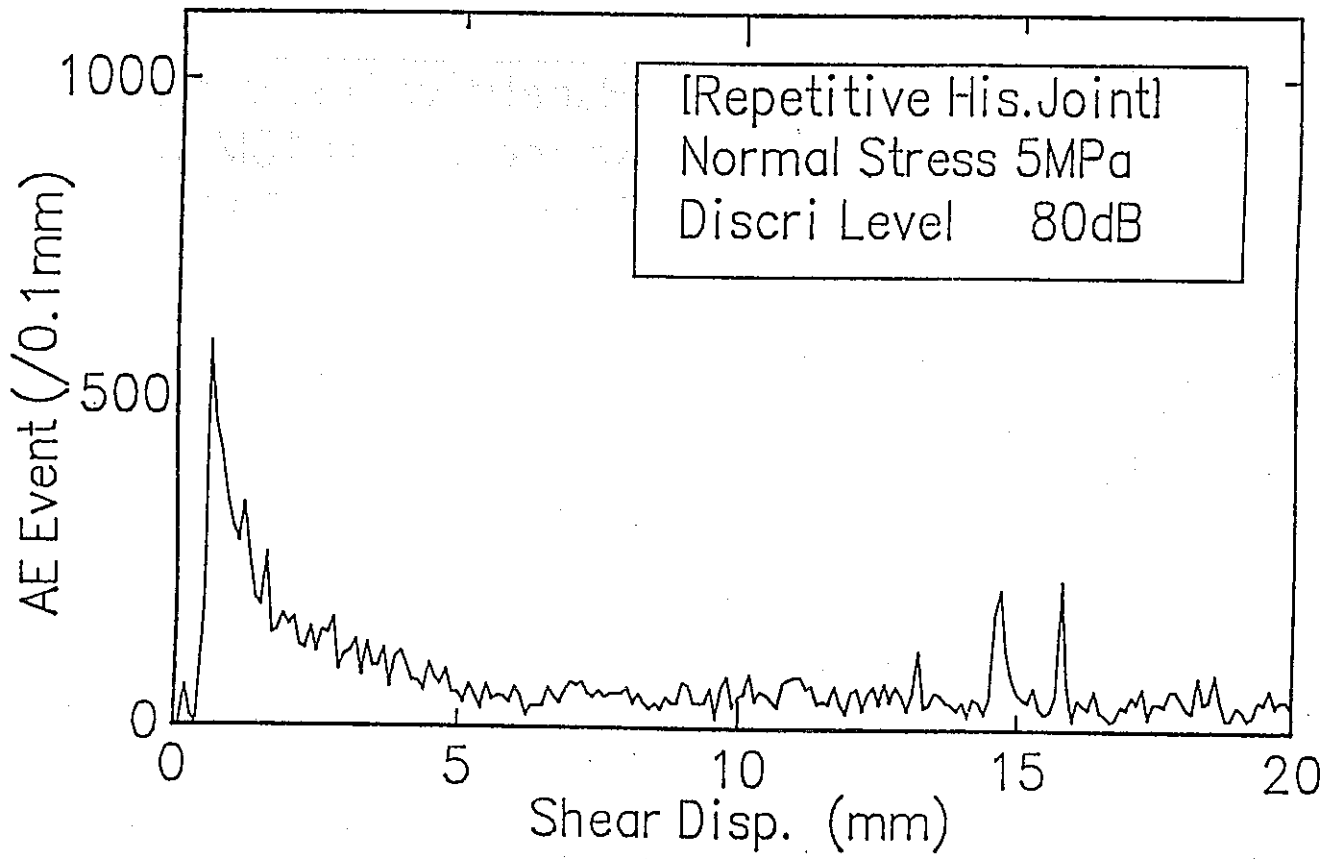


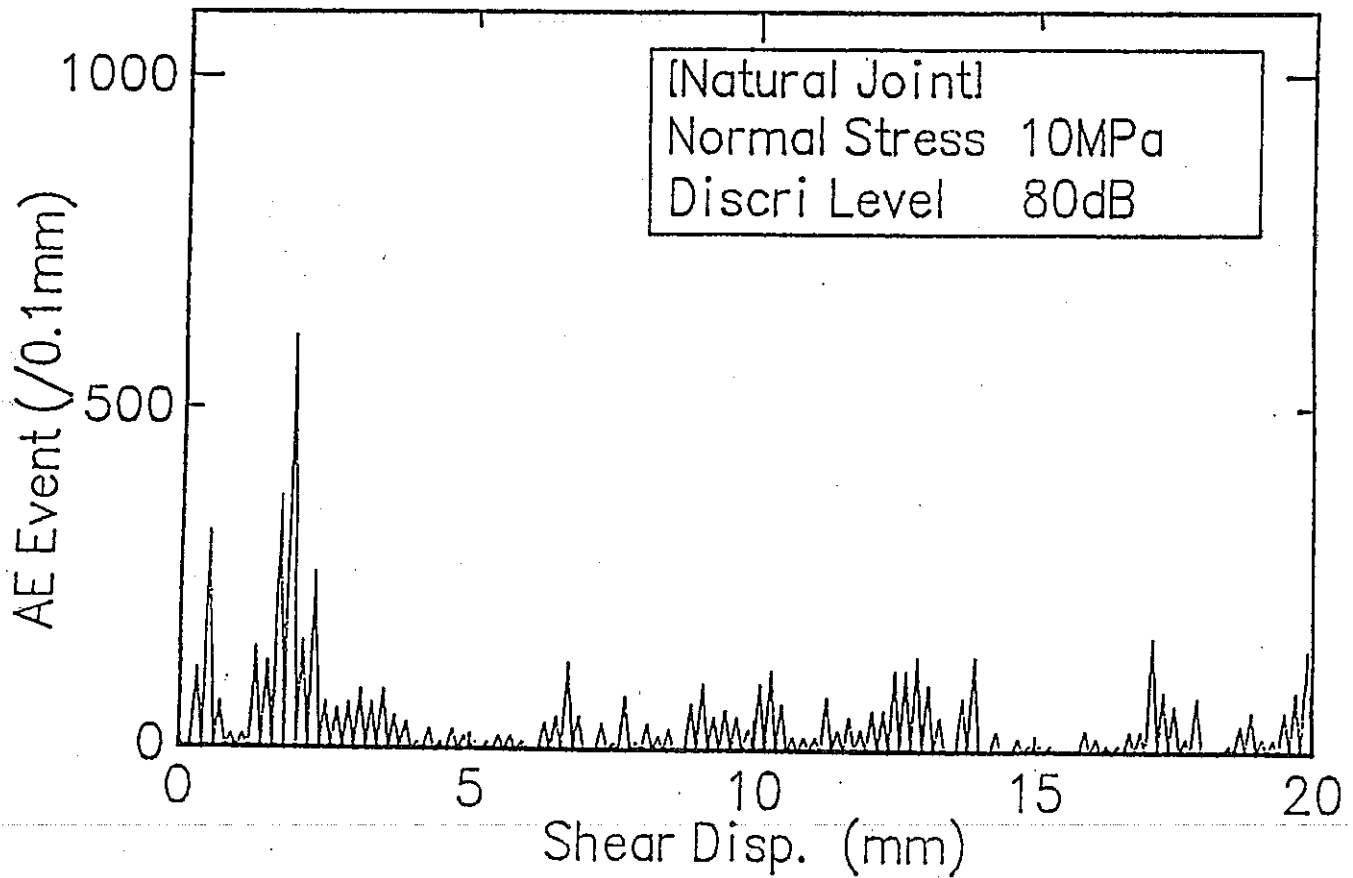
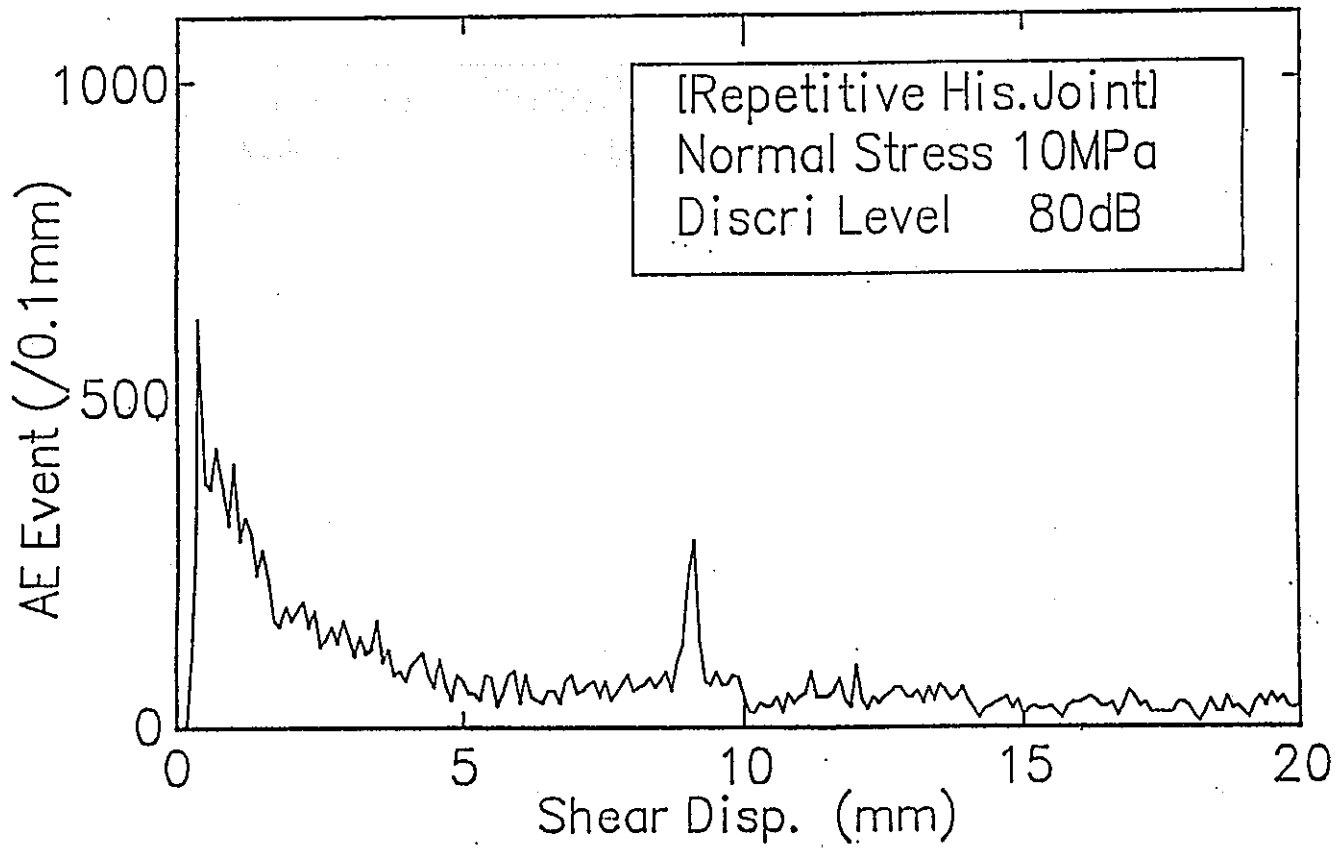
图-4-26 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different constant normal stresses, obtained from the shear-flow coupling test.

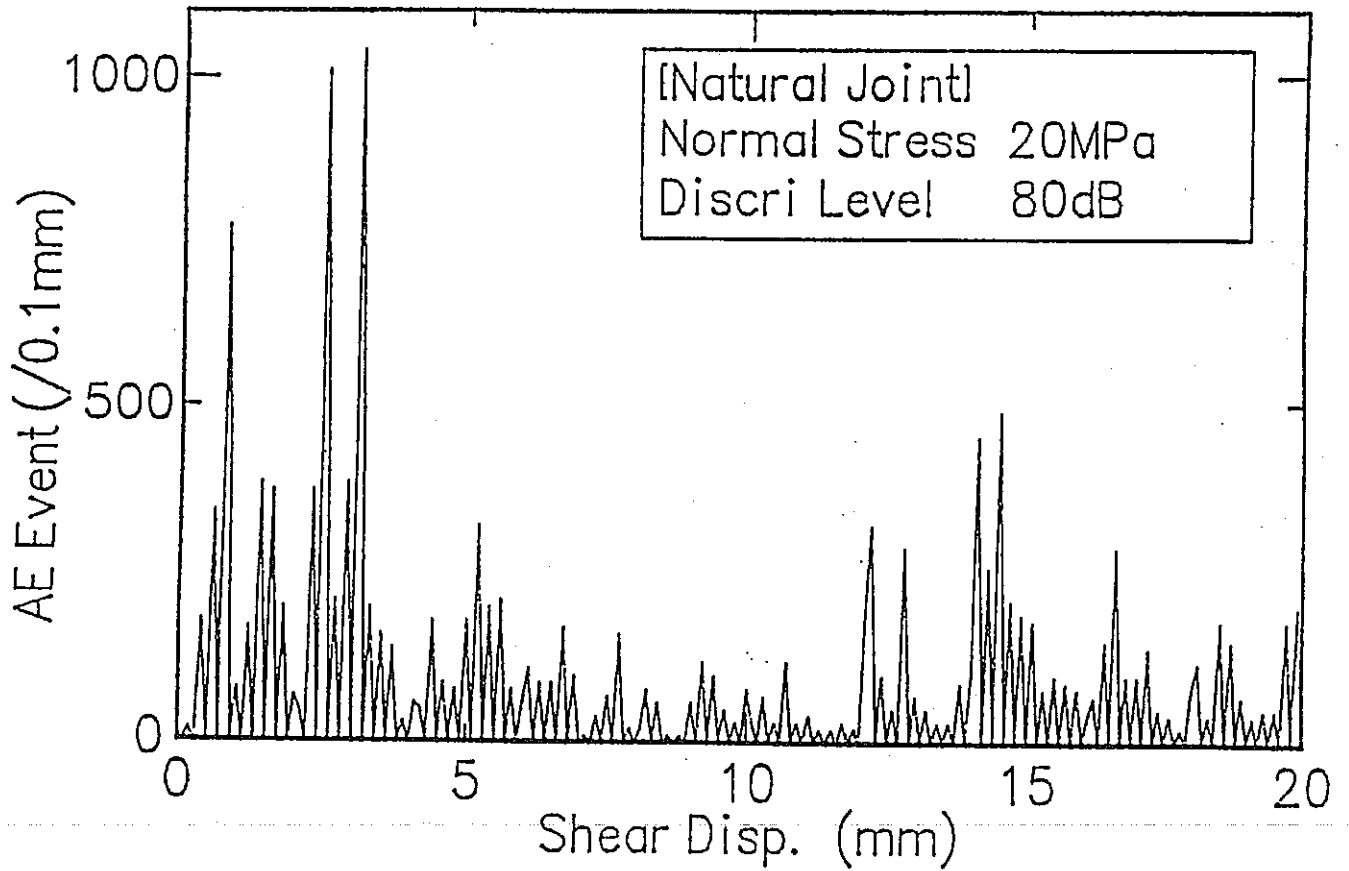
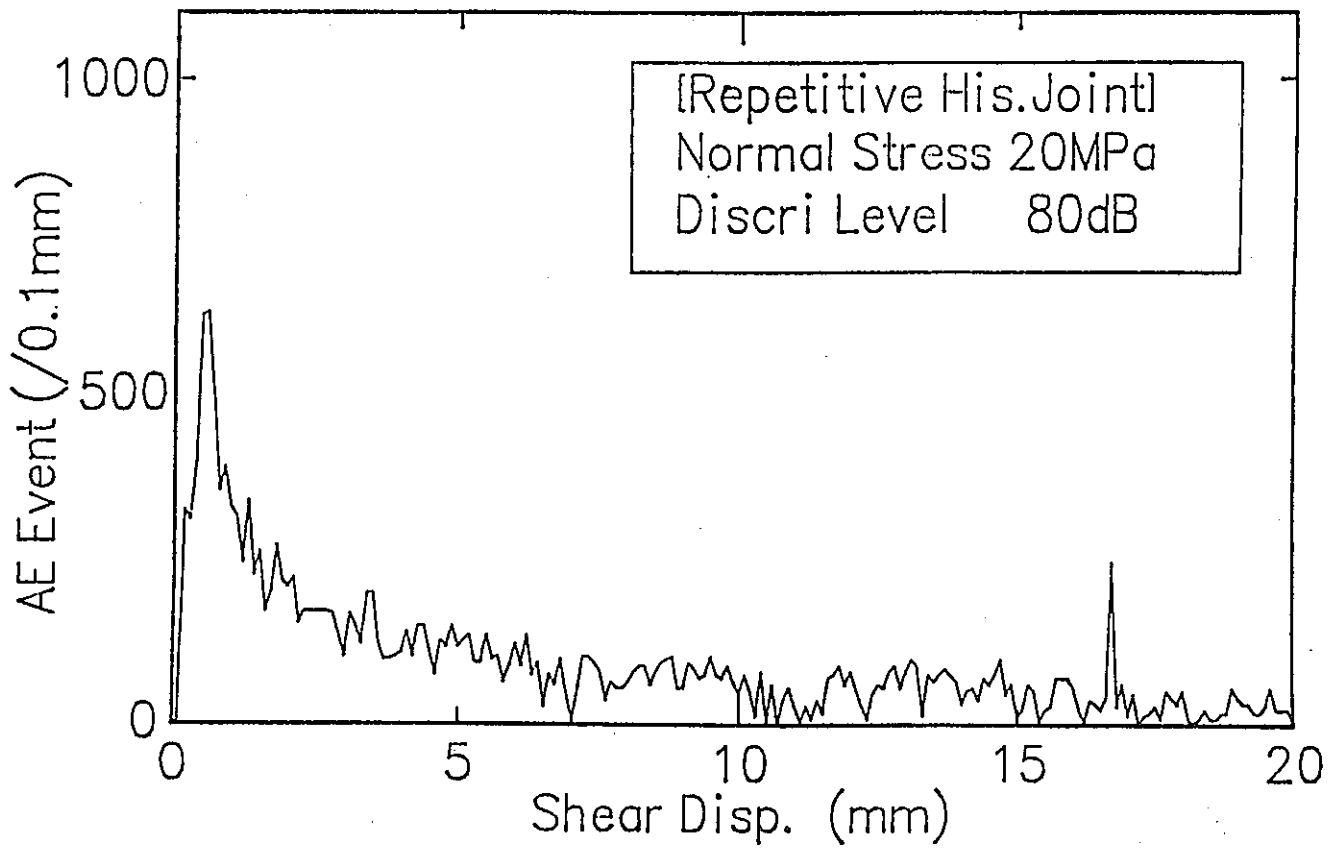


☒-4-27 Relationship between AE event count and shear displacement, obtained from the AE measurement during repetitive shear-flow coupling test.









の浸食作用による壁面強度の低下が影響しているものと考えられる。

#### (d) AEイベント－せん断変位の関係

図-4-27に、AEイベント－せん断変位の関係を示す。自然の不連続面と人工的不連続面の両方ともにすべ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。人工的不連続面において、先行履歴5MPaよりも大きな垂直応力を与えた場合、イベント数は多くなっている。

### 4. 6 まとめ

本研究では、所定の履歴を与えた岩盤不連続面のせん断特性、および透水特性を調べることによって、過去のせん断履歴の影響がせん断特性、透水特性にどのような影響を与えるかを評価し、将来的には現場の岩盤不連続面の応力－変形の履歴、及び各要素の影響を評価できる可能性を得ることを目的とした。

これらの結果を要約すると以下の通りである。

#### ・ Case 1の結果

(1) 先行履歴を与えることによって、せん断応力はすべての垂直応力下においてピークは現れない。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ほぼ一致する。

(2) せん断変位12mm付近までは先行履歴の影響により、すべての場合でダイレーションは小さくなっている。

(3) 透水係数について、履歴を与えた不連続面ではせん断前より1～1.5オーダー透水係数が大きい。そして、せん断初期において透水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。

#### ・ Case 2の結果

(1) 先行履歴を与えることによって、せん断応力は全ての垂直応力下においてピークを示さない。履歴を与えた不連続面に関してせん断剛性 $k_s$ は先行履歴の垂直応力の増加に伴って小さくなる。

(2) ダイレーションに関して、1MPa-5MPaは先行履歴の影響が小さく、履歴を受け

ていない5MPaの挙動と類似している。5MPa-5MPa, 10MPa-5MPa, 20MPa-5MPaは5MPaとはかなり違った挙動を示しているがこれら3種類の挙動は類似している。

(3)垂直応力とダイレーションの減少量の関係から1MPa-5MPaと5MPa-5MPaの変位差が一番大きく、5MPa前後の履歴の影響を最も受けている。

(4)せん断に伴う透水係数の変化はそれぞれのダイレーションの挙動とよく類似している。

(5)先行履歴の垂直応力が大きくなる程、AEの総イベント数は減少する。

#### ・ Case 3の結果

(1)履歴を与えた人工的不連続面は4回の繰り返しせん断全てにおいて、せん断応力はピークを示さずに残留応力に達する。

(2)履歴を与えた人工的不連続面は4回の繰り返しせん断全てにおいてダイレーションの傾向を示している。繰り返し試験の1MPaにおいてせん断変位12mmを過ぎた辺りからダイレーションの増加率が上昇している。このことから先行履歴よりも小さな垂直応力で履歴を与えた場合、先行履歴の影響を大きく受けることが分かる。

# 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

本研究では、ボーリングコアを用いた高信頼性三次元地圧計測法を開発するため、実験室におけるガラスモデルを用いた基礎的研究ならびに釜石鉱山250mレベルの石灰岩コアについて変位測定装置を用いた非弾性変位回復に基づく地圧計測を行った。現在、コアを用いた地圧計測法の信頼性が必ずしも高くない主な原因として、それらの方法の背後にあるメカニズムに関する科学的理解が不十分であることが挙げられるが、前者は、閉鎖き裂の力学的挙動を調べることによって、コアを用いた地圧計測法の背後にあるメカニズムを明らかにしようとする試みである。また、後者は、ひずみゲージ法に比べて扱いが簡単で安定性も高いと考えられる差動トランス型変位計により、比較的堅い岩石コアの非弾性ひずみの回復挙動を測定し、より信頼性の高いASR法を開発することを目指した研究である。

## 5. 2 閉鎖き裂の力学的挙動に関する基礎的研究

ボーリングコアを用いた地下深部の地圧計測方法が注目されているが、これらの地圧計測法は、いずれもその利用原理に対する理論的説明が不十分である。それぞれの原理のメカニズムを明らかにすることは、コアを用いた地圧計測の信頼性を高めることのみならず、各方法の適用条件と適用限界を明らかにし、包括的なコアを用いた地圧計測法を確立するためにも必要不可欠である。

AEのカイザー効果(AE法)や変形率の変化(DRA法)といった現象の説明を、先行応力を越えた時点での新たなマイクロクラックの発生によるものとする考え方があがるが、これらを出現させる応力が岩石にダイレイタンスを起こす応力より低いことと矛盾するし、また、これらの現象が経過時間依存性を有すること

を説明できない。本研究室では、岩石中の既存の微小閉鎖き裂を模擬したき裂をガラス板に導入し、一軸圧縮载荷時のき裂の挙動とAEの関係を調べることによって、岩石中の閉鎖き裂の滑り挙動が、AEのカイザー効果のメカニズムとなりうることを示唆しており、これは、カイザー効果の経過時間依存的挙動も説明しうるものであった。この結果より、DRA法における先行応力を超えた時点での非弾性ひずみの急増のメカニズムも、これと同様に微小閉鎖き裂の滑り挙動に関係していることが考えられる。

ASR法に関しては、その原理となる非弾性ひずみ回復特性がどのようなメカニズムのもとで生じているか明らかにされていないが、非弾性ひずみ回復過程においてAEが発生し、その累積数の時間変化は体積膨張の時間変化と類似しているという測定報告があり、このことから、岩石中の既存の微小閉鎖き裂の開口、滑りなどがこの過程で生じていることなどが考えられる。

そこで、本研究では、岩石コア中に既存する微小閉鎖き裂の滑り挙動がAE法、DRA法、ASR法の基本原理に関係しているものと考え、これを模擬するためにガラス板内に閉鎖き裂を導入し、一軸圧縮応力下における滑り挙動に注目した実験を行った。測定したものは、き裂の滑りによる変形とAEである。また、この実験においては、閉鎖き裂面の表面形状の滑り挙動に及ぼす影響も調べた。

## 5. 2. 1 ガラス板試験片

### (1) ガラス板試験片の製作方法

本実験で用いたガラス板のサイズは縦120mm、横100mm、厚さ8mmであり、これは一般的な窓ガラス用のものをカットしたものである。

ガラス板への閉鎖き裂の導入は以下のような方法で行った。ガラス板の片面にダイヤモンドカッターで所定の長さの傷をつけ、これを治具を用いて反対の面から軽く叩き、反射波により傷を起点としたき裂をガラス板の厚さ方向に伝播させた。こうして導入したき裂を本研究では主き裂(Main crack)と称する。主き裂を圧縮载荷したときの破壊過程は3段階に大別できる。第1段階は、主き裂面に沿って数対の引張き裂が軸方向に初生する。第2段階は、これらの引張き裂が安定に成長するが、特に主き裂の両端にある引張き裂の成長が早く、第3段階になって、これが限界長さに達して不安定破壊する。主き裂は第2段階になって滑り易くなる

ので、本研究ではこの第2段階に達したき裂を試験片として用いた。尚、本研究では特に断りのない限り、引張き裂 (Wing crack) は、主き裂の両端にあるものを指すこととする。

## (2) ガラス板試験片のき裂タイプについて

本研究では、き裂表面の形状が閉鎖き裂の滑り挙動に影響を与えると考え図-5-1に示すような2種のき裂表面粗さの試験片を用意した。一つは、30MPaまで载荷して引張き裂を成長させたもので、主き裂面は滑らかではなく、凹凸のために多数の2次き裂が見られた。この試験片をType I の試験片と呼ぶ。他方は、50MPaまで载荷して引張き裂を成長させたもので、主き裂面は滑らかで凹凸はあまり見られなかった。また、主き裂両端の引張き裂は、試験片製作過程では見えていたものの、その後数時間で見えなくなった。この試験片をType II の試験片と呼ぶ。

## 5. 2. 2 試験装置及び測定方法

### (1) 試験装置

図-5-2は本研究で用いた試験装置を模式的に図示したものである。

ガラス試験片に周期载荷を加える一軸圧縮試験装置としては、デジタル計測制御式精密万能試験機 (島津オートグラフDCS-R型) を用いた。また、ロードセルはこの装置に組み込まれているものを使用した。AEの検出には、2個の共振周波数500kHzのAEトランスデューサを使用し、これらをガラス板試験片表面にレーキサイトセメントを用いて貼り付けた。検出された信号は40dBのプリアンプで増幅されたあと、AE計測装置 (Local-Processor NF-9602) に取り込まれる。装置内部でバンドパスフィルタ (500kHz以下に設定) を通過した信号は、再び40dBのメインアンプで増幅される。その後、ディスクリミネータにより設定されたしきい値 (本研究では、200mv前後に設定) を超え、さらに、コインシデンス処理による取り込み位置の範囲内のものがAEとして接続されたコンピュータに出力される。P波速度と2個のトランスデューサへのAEの到達時間差から、AEの発生位置が一次元で評定できるが、これを利用して取り込み範囲の限定を行うのがコインシデンス処理である。ひずみゲージ用の動ひずみ計として、KYOWA製のDPM-611Aを使用した。ひずみゲージはKYOWA製のKFG-5-120-C1-11 (ゲージ長5mm) を使用し、その配線法は、温度変化による誤差を少なくするために、ダミーゲージを用

いた4ゲージ法とした。

## (2) 測定方法

図-5-3のに示す位置に2枚のひずみゲージと2個のAEトランスデューサを貼付した。ひずみゲージは、1枚を引張き裂をまたぐように貼付し、主き裂の滑り挙動に伴う変形を測定した。もう1枚は主き裂に直交する方向に貼付し、主き裂の開閉挙動に伴う変形を測定した。なお、いずれの位置でも、ひずみゲージを貼付した表面まではき裂は貫通していない。主き裂に平行に貼り付けられた2個のAEトランスデューサでは、き裂の滑り挙動に伴うAEの検出とその一次元の発生位置の評定を行った。この際、ガラスのP波速度を5440m/sとした。

## (3) 載荷パターン

滑らかでないき裂Type I と、滑らかなき裂Type II の試験片のそれぞれに対して、次の様な3つの載荷パターンにおけるき裂の滑り挙動を計測した。

1) 繰り返し載荷：先行応力を加え除荷した直後に、先行応力を上回る応力値までの再載荷を少なくとも、2周期以上行い、その際のき裂の滑り挙動を計測する。再載荷を2周期以上行うのは、DRA法におけるひずみ差関数を求めるためである。

2) 除荷した後の経過時間の影響：先行応力を加えて除荷した後、一定時間放置し、パターン1と同様に再載荷してその際の滑り挙動の計測を行う。

3) 除荷後の時間的变化：除荷終了後の長時間にわたって、き裂の滑り挙動の計測を行う。

なお、先行応力は、繰り返し載荷か一定時間の静荷重載荷によった。

載荷パターン1、2の模式図を図-5-4に示す。載荷パターン1、2はAE法、DRA法の基本原理と閉鎖き裂の滑り挙動との関連性を調べるためのものである。また、パターン3はASR法の基本原理と閉鎖き裂の滑り挙動との関連性を調べるためのものである。

## 5. 2. 3 実験結果および考察

### (1) 繰り返し載荷

#### (A) 滑らかでないき裂 (Type I)

滑らかでないき裂 (Type I) の試験片に対しては、図-5-5に示す載荷パターンで



実験を行った。先行応力8MPaを3周期の繰り返し載荷で与えた後、直ちに先行応力を超える13MPaの3周期の繰り返し載荷を行った。図-5-6に、1周期目と4周期目の応力に対するAEの累積数および応力に伴う一次元のAEの発生位置を示す。なお、AEトランスデューサ間の距離は5cmであるが、この実験においてのみコインシデンス処理により取り込む範囲を中心から1.2cm程度とし、主き裂の両端を除く部分のAEを対象とした。先行応力を与えた後の4周期目の載荷過程のAEが先行応力を超えた8MPa付近で活性化しており、カイザー効果が現れている。また、AEの発生位置は、1周期目と4周期目で似た傾向があり、先行応力を超えると再びほぼ同じ場所からAEが発生している。

図-5-7は、周期載荷の4回目、5回目、6回目におけるWing Crackのひずみに関する応力-ひずみ線図である。4周期目では、先行応力(8MPa)付近で折れ曲がっていることならびに大きな残留ひずみが生じていることが特徴である。5周期目の応力-ひずみ線図の載荷過程は、4周期目と比較するとより直線的であり、ヒステリシスループの面積も小さくなっている。5周期目と6周期目の差は僅かであった。

図-5-8は、周期間の変化の違いを明瞭にするためにDRA法におけるひずみ差関数を求めたものである。4周期目と5周期目間のひずみ差関数とAEの累積数を重ねたものを示した。ひずみ差関数の非線形性開始点からDRA法における先行応力を求めたところ、この載荷パターンにおける先行応力の8MPaと一致した。

#### (B) 滑らかなき裂 (Type II)

滑らかなき裂 (Type II) の試験片に対しは、図-5-9に示すような載荷パターンの実験を行った。静荷重を12時間載荷することで先行応力30MPaを与えた後、直ちに先行応力を超える34MPaの3周期の繰り返し載荷を行った。図-5-10に1回目と2回目の、また図-5-11にはそれ以後の応力に対するAEの累積数及び応力に伴う一次元のAEの発生位置を示す。AEトランスデューサ間の距離は5cmであり、この間の全てのAEを計測の対象とした。中心より約1.5cmが主き裂からのAEである(以後のType I, Type IIの試験片に対しても同様である)。先行応力を与えた後の2周期目の載荷過程のAEが先行応力を超えた30MPa付近でやや活性化しており、カイザー効果が不明瞭ではあるが現れている。AEの発生位置に関する特徴的なことは見いだせない。図-5-11からは、繰り返しに伴ってAEが減少してゆく傾向があることがわかる。また、除荷時のAEはいずれの周期においても応力がかな

り低い値（約4MPa）になってから活性化している。これは、閉鎖き裂の逆すべりに伴うAEであると考えられる。このような現象は滑らかなでないき裂では観察されなかった。図-5-12に、2周期目の応力-Wing crackのひずみ線図を示す。除荷中、AEの急増点でひずみが急激に戻り、残留ひずみもほとんど無いことがわかる。また、図-5-13に、2~4周期目の応力-ひずみ線図を示すが、各周期間の差は小さい。このように、大きな逆すべりが生じて残留ひずみが小さくなることが滑らかなき裂の特徴である。

図-5-14は、2周期目のAEの累積数と2周期目と3周期目間のひずみ差関数を重ねたものであり、ここでMain Crackと表されているものは開閉挙動のひずみ差関数である。二つのひずみから先行応力をほぼ推定できることが分かるがかなり不明瞭である。

以上のことをまとめると次のようである。

滑らかなでないき裂（Type I）の実験において、AEのカイザー効果とDRA法の基本原理である先行応力点での非弾性ひずみの急増が明瞭に確認された。このことから閉鎖き裂の滑り挙動のなかにAE法、DRA法の基本原理のメカニズムが存在することが明らかとなった。また、滑らかなき裂（Type II）においては、これらの現象が不明瞭であったことから、AE法、DRA法のメカニズムは、閉鎖き裂表面の凹凸と大きく関係していると考えられる。また、これらのことは、滑らかなき裂において、除荷の後半でAEが多く発生し大きな逆すべりが生じたことと関係していると考えられる。

## （2）除荷した後の経過時間の影響

### （A）滑らかなでないき裂（Type I）

滑らかなでないき裂（Type I）の試験片に対しては、図-5-15に示すような載荷パターンでの実験を行った。一定荷重を12時間載荷することで先行応力8MPaを与えた試験片を除荷してから11日間放置した後、先行応力を超える10MPa付近の2周期の繰り返し載荷を行った。図-5-16は、2周期目の載荷過程での応力に対するAEの累積数と2周期目と3周期目間のひずみ差関数を示したものである。ここでは、AEのカイザー効果は認められないものの、ひずみ差関数が先行応力付近で変曲していることが見てとれる。また、この2周期目の載荷過程で発生しているAEは、主き裂面の全体にわたっていた。ひずみ差関数に接線をひくことによって先行応

力を求めるとおおよそ6.5~7.5MPaとなった。これは負荷した先行応力よりも小さい。

### (B) 滑らかなき裂 (Type II)

滑らかなき裂 (Type II) の試験片に対しは、図-5-17に示す様な載荷パターンで実験を行った。一定荷重を24時間載荷することで先行応力13MPaを与えた試験片を除荷してから28時間放置した後、先行応力を超える18MPaの3周期の繰り返し載荷を行った。図-5-18は2周期目の載荷過程での応力に対するAEの累積数と、2周期目と3周期目間のDRA法におけるひずみ差関数である。ここではAEのカイザー効果は見られず、ひずみ差関数の先行応力付近での変化も認められない。

以上のことをまとめると、次のようになる。

滑らかでないき裂の経過時間が11日間の実験では、DRA法によって過小評価ではあるものの先行応力を評価できた。これに対し、滑らかなき裂では経過時間が28時間のみの実験でも先行応力の評価は不可能であった。このことから、き裂表面の凹凸がDRA法のメカニズムに大きく関与していると考えられる。さらに、滑らかでないき裂の実験では、先行応力を過小評価した事とAEのカイザー効果が見られなかった事から、DRA法、AE法における時間依存的な挙動が、閉鎖き裂の滑り挙動と関係していることがわかる。

### (3) 除荷後の時間的变化

滑らかでないき裂 (Type I) 試験片に先行応力として10MPaの応力を加え、これを除荷した後の、主き裂の滑り (図中にWing Crackと表されているもの) と主き裂の開閉 (Main Crack) の時間的变化を図-5-19に示した。また、滑らかなき裂 (Type II) に1周期目に先行応力として13MPaの一定荷重を24時間加えてから除荷した直後からの主き裂の滑りと開閉の変化ならびにAEの単位時間あたりの発生率を重ねたものを図-5-20に示した。

これらの図から、滑らかなき裂では除荷後大きな非弾性ひずみの回復がみられないのに対し、滑らかでないき裂では、長時間にわたって非弾性ひずみの回復が起こり、閉鎖き裂がもとに戻ってゆくことがわかる。この現象は、滑らかでないき裂では除荷直後に大きな残留ひずみが観察されていることと関係している。なお、非弾性ひずみの回復過程におけるAEは僅かであった。

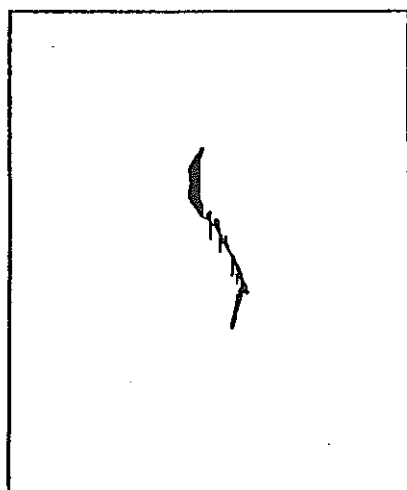
#### 5. 2. 4 閉鎖き裂の力学的挙動に基づくコアを用いた地圧計測法の基本原理

A Eのカイザー効果のメカニズムについては、すでに閉鎖き裂のすべり挙動に基礎をおいた説明がなされているが、本研究結果は、D R A法、A S R法さらにはD S C A法についても、その一軸圧縮応力下における基本原理が閉鎖き裂のすべり挙動と直接関係していることを示している。

図-5-21は、逆すべりの残留変位に基づく説明図である。き裂表面に凹凸があると応力が解放されても逆方向へのすべりが完全には起こらず、すでに見たように、応力解放後にも時間依存的なすべりが起こる。これは、凹凸の著しい箇所(すべり変位を拘束している箇所)に生じている局所的な残留圧縮垂直応力と残留せん断応力によって引き起こされ、このため、巨視的に非弾性ひずみの回復が生ずる。これと応力との関係から地圧を推定するのがA S R法である。この非弾性ひずみの回復は、き裂表面の凹凸が著しいほど長時間掛かり、場合によっては十分な時間経過の後にもすべり変位が残留したままとなる。このとき、本研究で対象としたBraceモデルでは、Wing crackが開口したままとなり、この開口量は作用していた応力が大きいほど大きいであろう。従って、この開口量を測定して地圧を求めるのがD S C A法となる。一方、D R A法やA E法では、試験片に一軸圧縮応力を加える。その際、残留変位があればその変位を生じるまではA Eは発生しにくく、その変位を越えたところから新たなすべりが生ずるためにA Eの活性化が起こる。これがA Eのカイザー効果である。D R A法では変形をはかるが、除荷による逆すべりが十分起こらない場合には、図に示したように、再載荷の過程ではすべりが生じにくいため見かけ上変形しにくくなる。しかし、先行応力を越えると新たなすべりが生じ変形性が大きくなる。従って、このとき応力-ひずみ線図が折れ曲がる。再載荷後除荷すると、やはり逆すべりが起こりにくいため応力解放時と同様な挙動となる。再び載荷すると、今度は1回目の載荷で新たなき裂面状態になっているために変形性が小さくなる。ここで、2回目と1回目のひずみの差をとってひずみ差関数を求めると、図に示したように、応力解放後の非弾性挙動に応じていくつかの型が現れるが、いずれも先行応力(先行ひずみ)で勾配が急激に変化する。これがD R A法の原理であると考えられる。

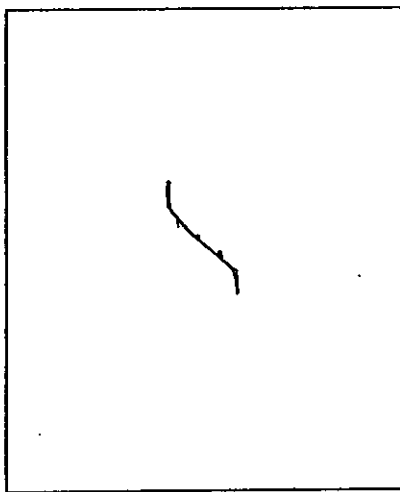
今後より定量的な議論をする必要があるが、このように、岩石中に含まれる閉鎖き裂の挙動により全てのコアを用いる地圧計測法の原理を説明することができ

ると考えられる。



Type I

滑らかでないき裂



Type II

滑らかなき裂

図-5-1 用いた二つの型のガラス試験片

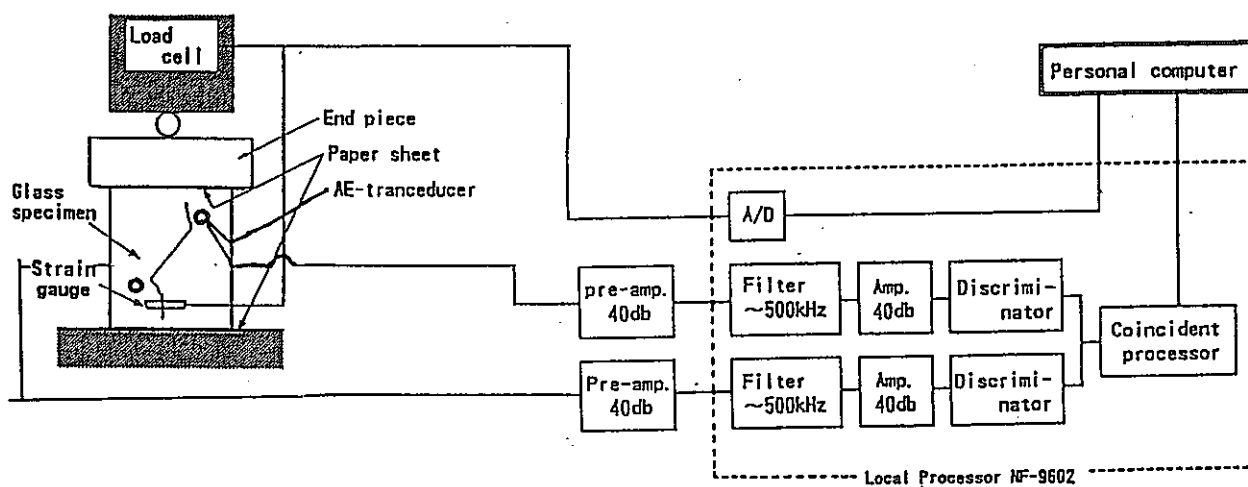


図-5-2 試験装置

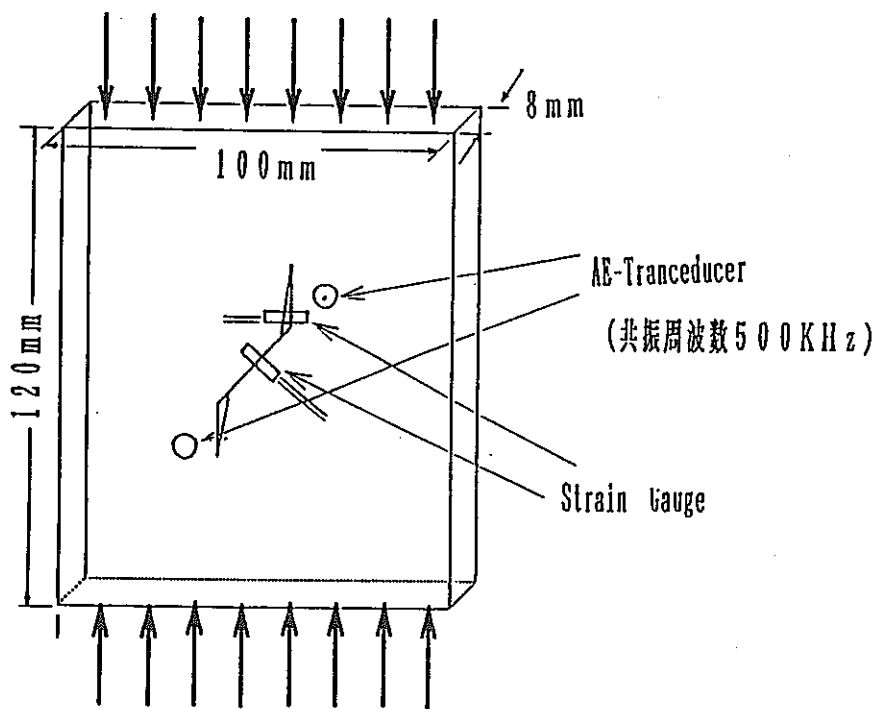
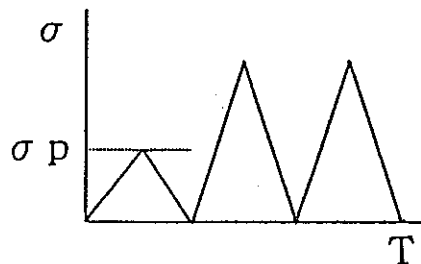


図-5-3 ひずみゲージならびにAEトランスデューサの接着位置

1 繰り返し载荷



2 除荷した後の放置時間の影響

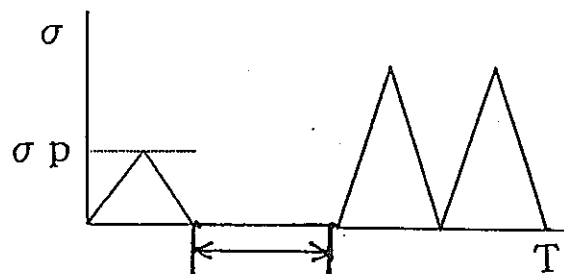


図-5-4 载荷パターン

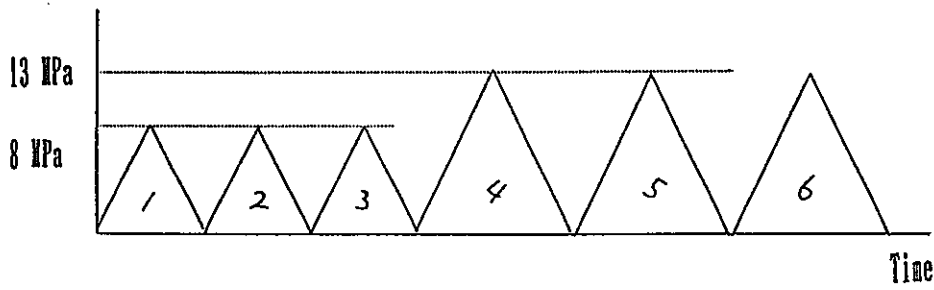


図-5-5 滑らかではないき裂の繰り返し载荷パターン

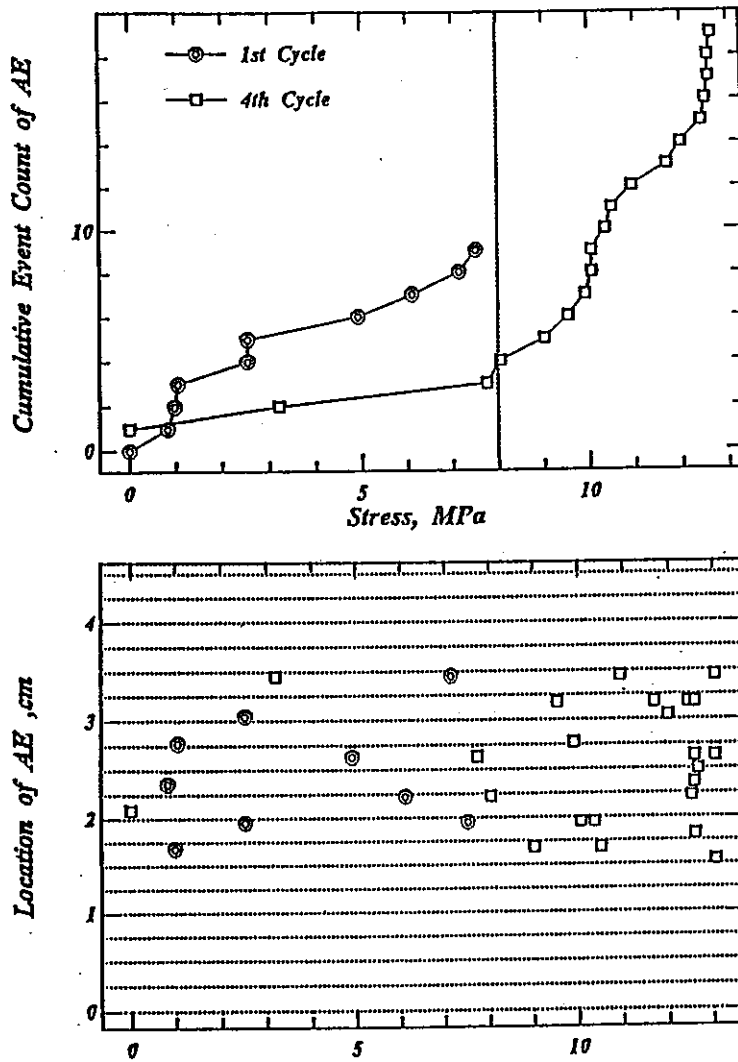


図-5-6 AE累積数と応力の関係（1周期，4周期）およびAE発生位置



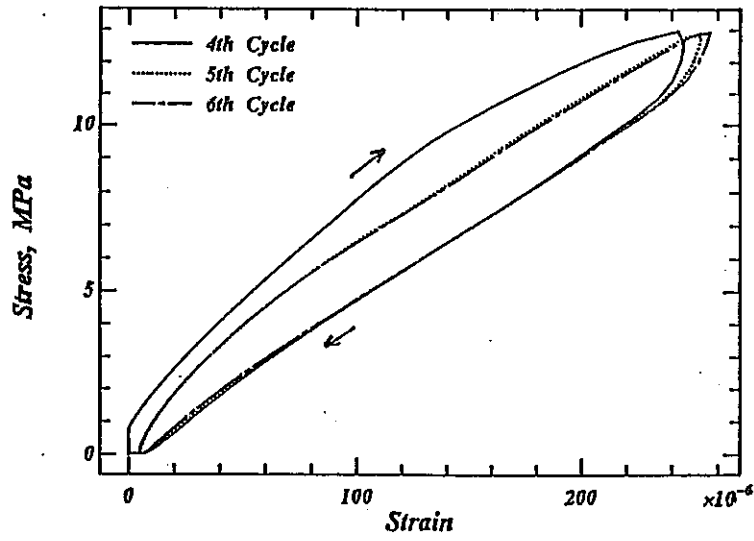


図-5-7 応力-ひずみ線図 (4, 5, 6 周期)

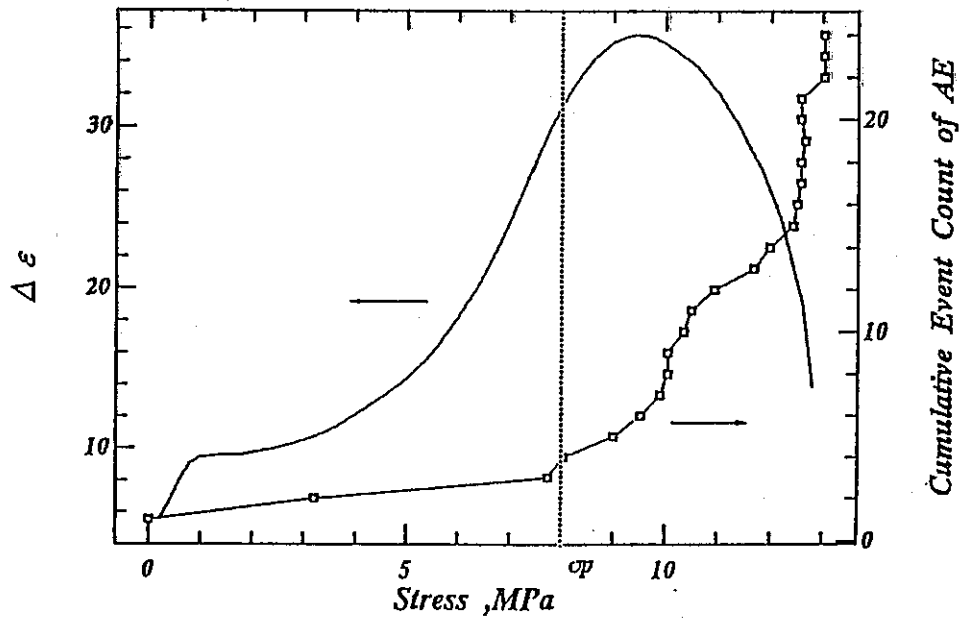


図-5-8 DRAによる先行応力評価

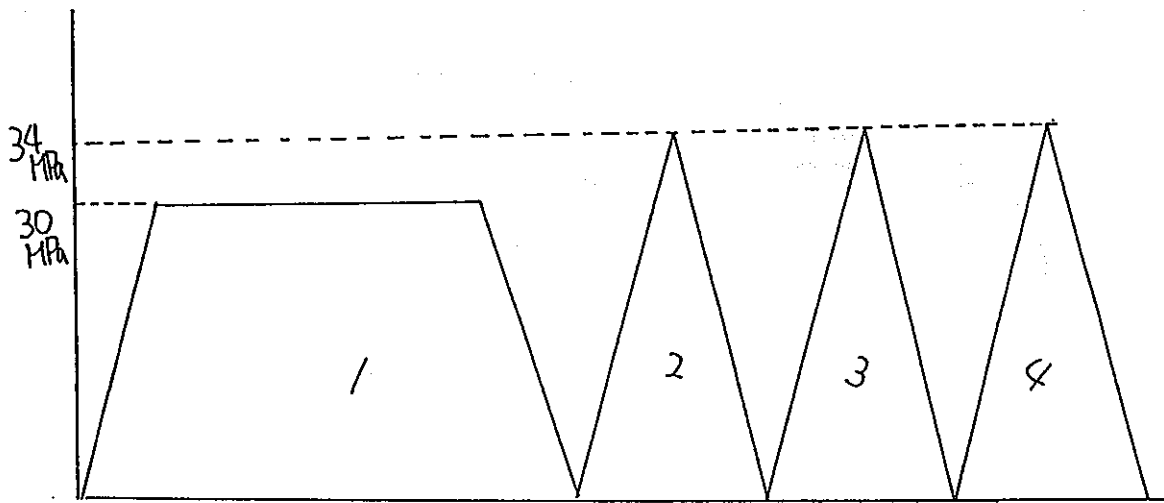


図-5-9 滑らかなき裂の繰り返し载荷パターン

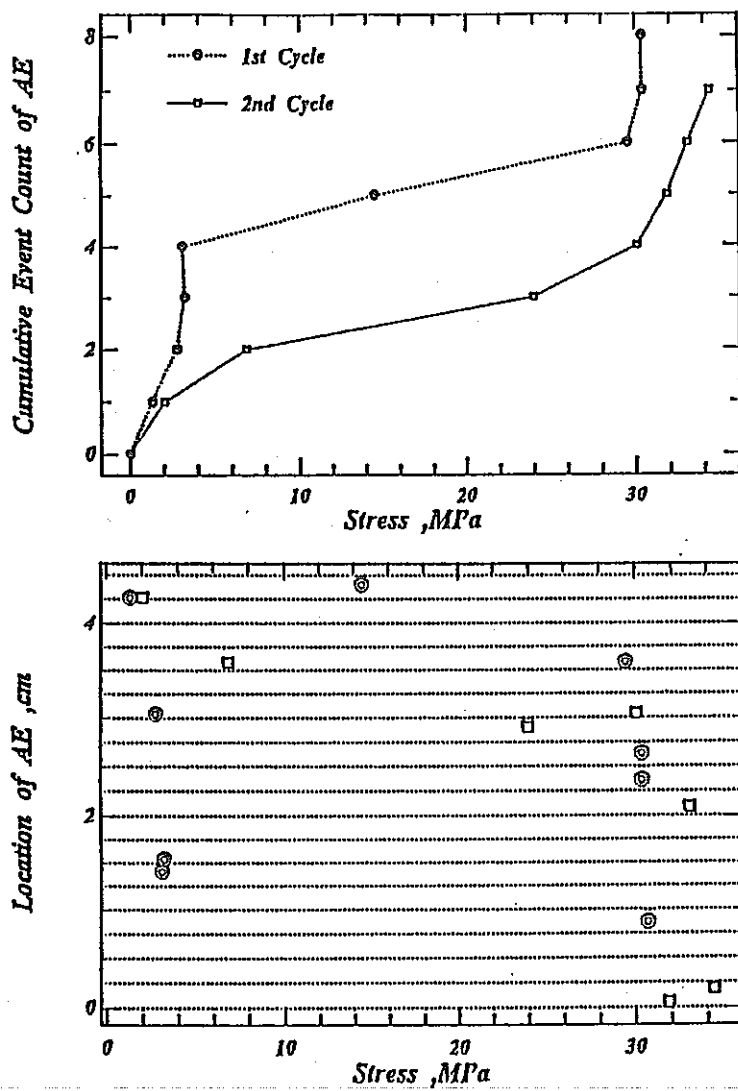


図-5-10 AE累積数と応力の関係（1周期，2周期）およびAE発生位置

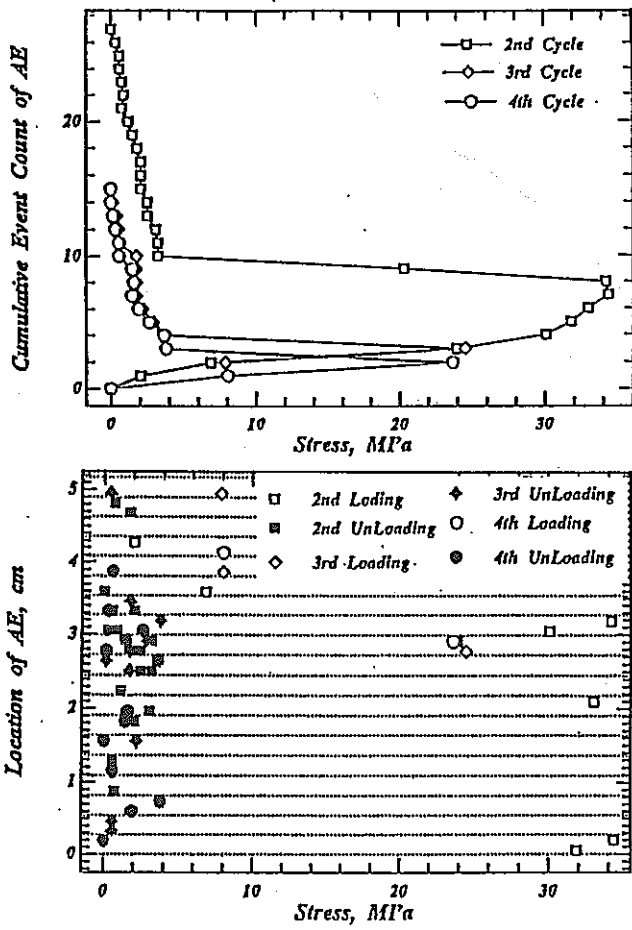


図-5-11 AE累積数と応力の関係（2～4周期）およびAE発生位置

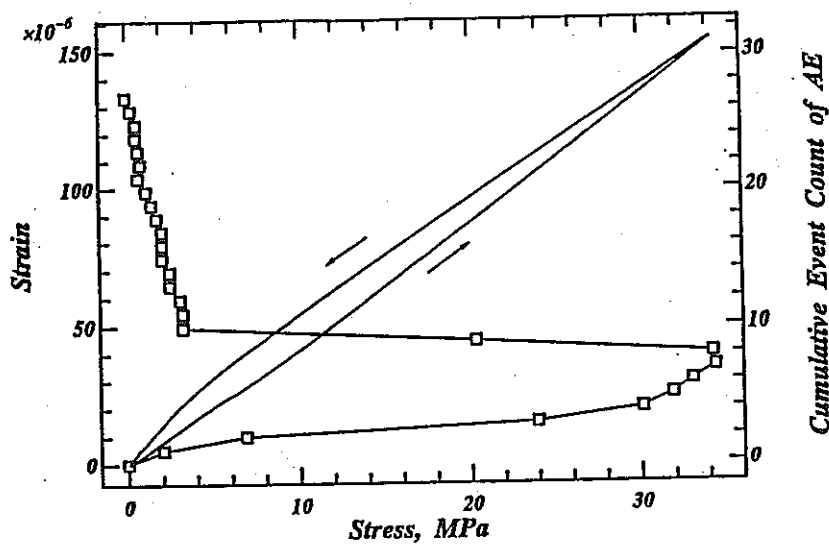


図-5-12 2周期目の応力-ひずみ線図とAE累積数

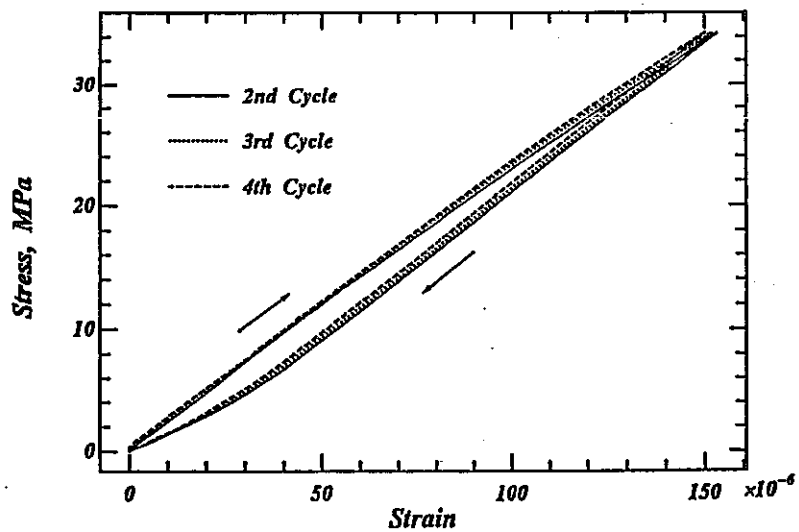


図-5-13 2周期目～4周期目の応力-ひずみ線図

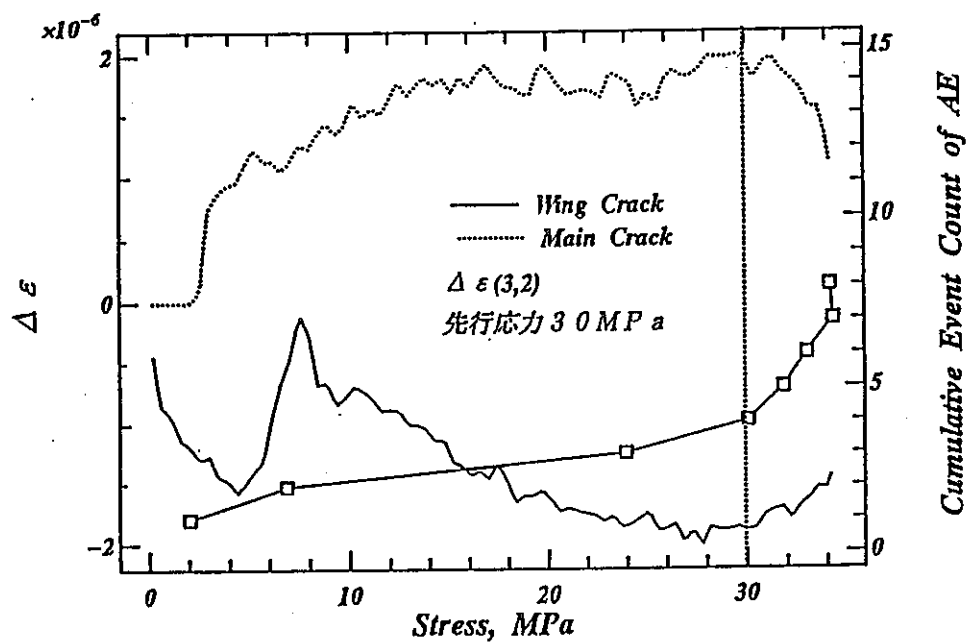


図-5-14 ひずみ差関数 (2, 3周期目) とAE累積数 (2周期目)

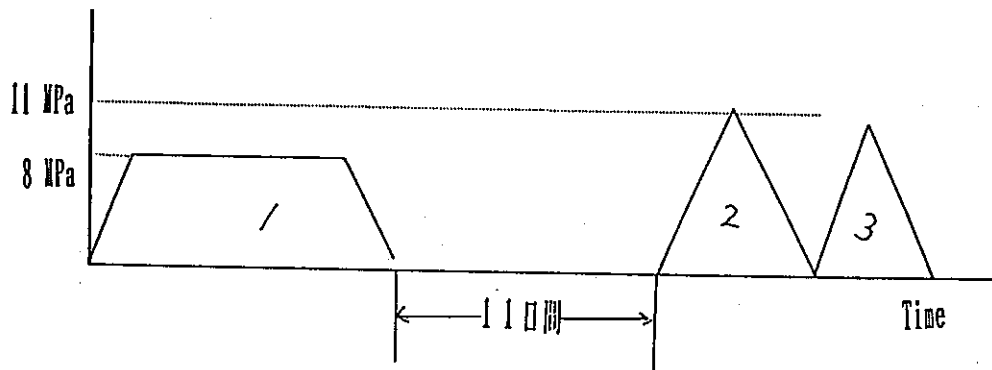


図-5-15 滑らかでないき裂の経過時間の影響評価のための繰り返し载荷パターン

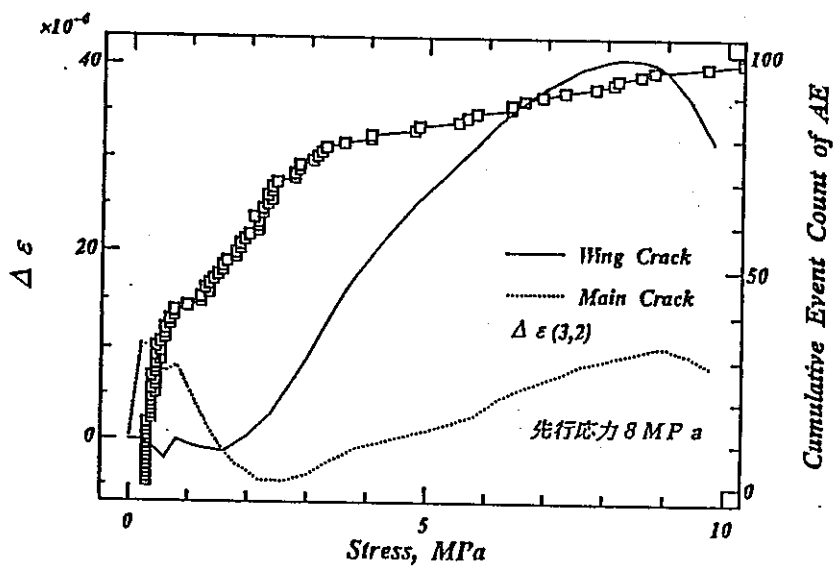


図-5-16 AE累積数およびひずみ差関数(2, 3周期)と応力の関係

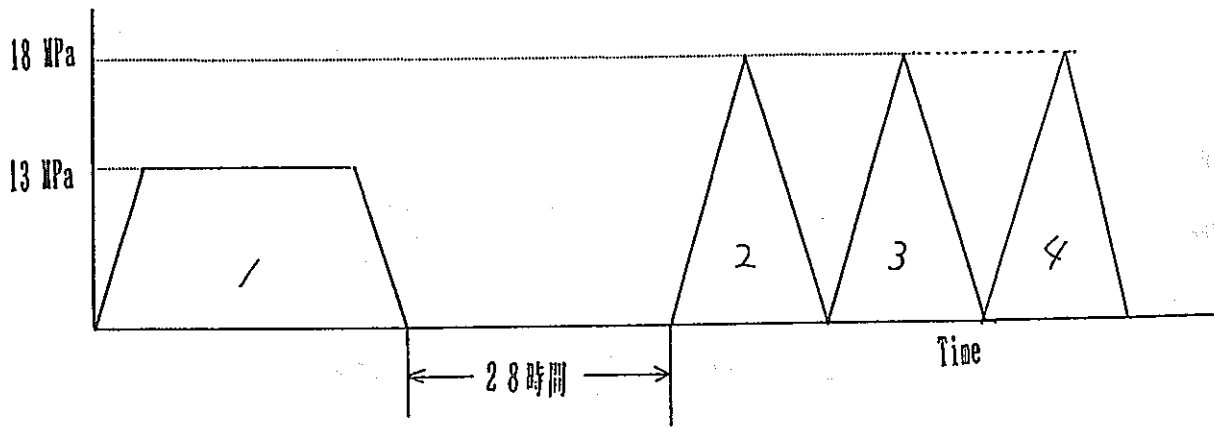


図-5-17 滑らかなき裂の経過時間の影響評価のための繰り返し荷重パターン

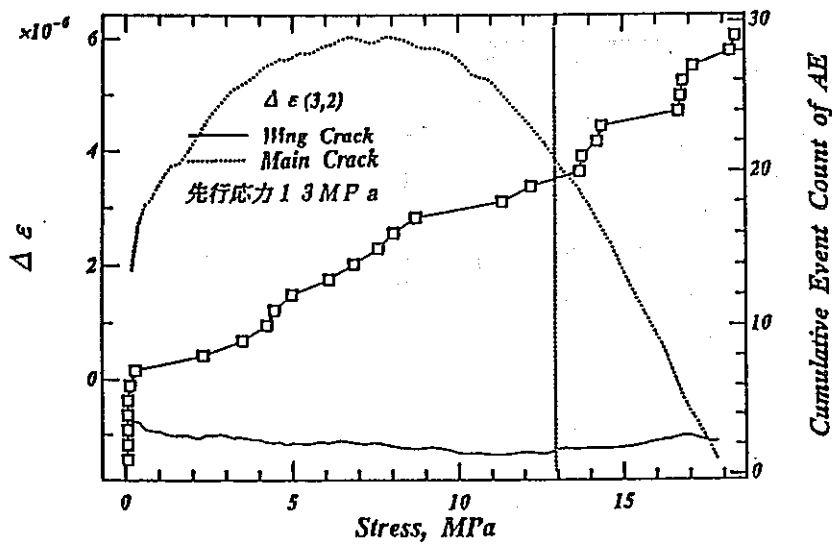


図-5-18 AE累積数およびひずみ差関数(2, 3周期)と応力の関係

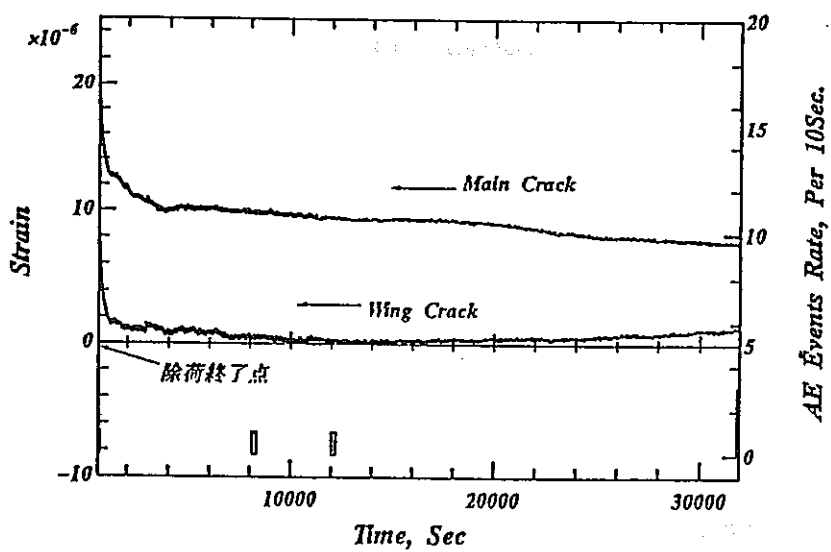


図-5-19 滑らかなでないき裂の除荷後の非弾性ひずみの時間変化

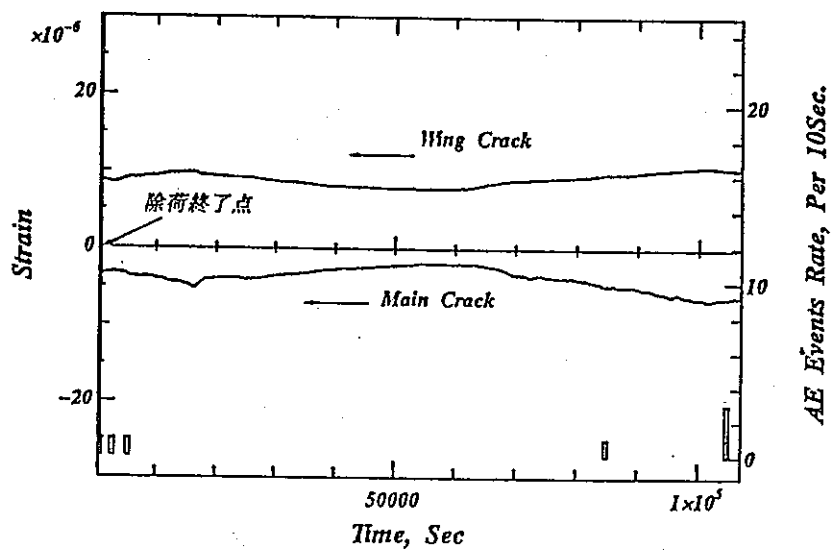


図-5-20 滑らかなき裂の除荷後の非弾性ひずみの時間変化

地圧下のき裂

応力解放後のき裂

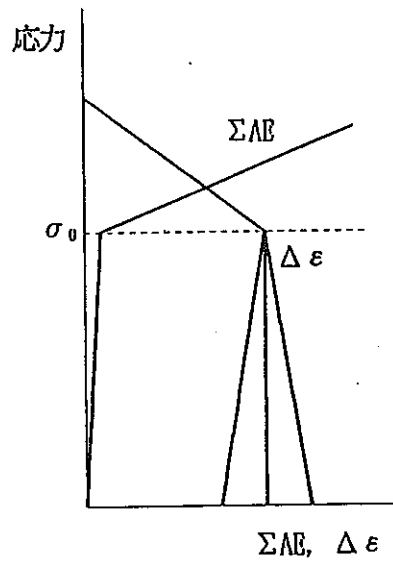
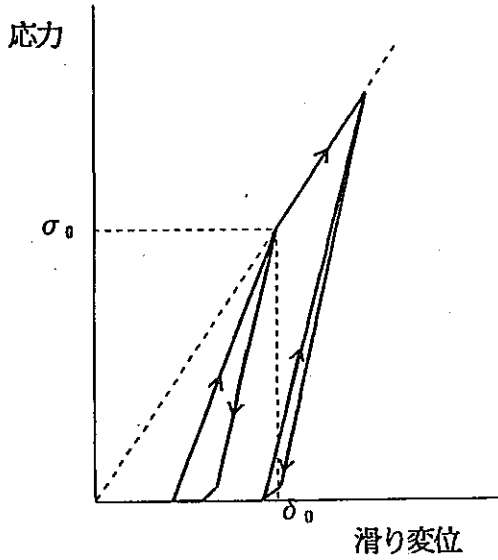
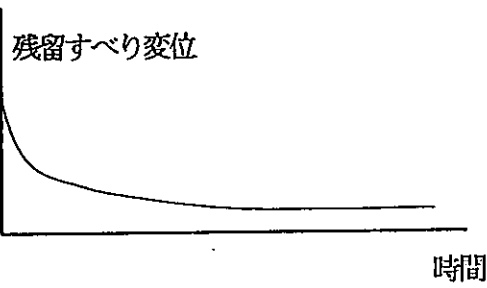
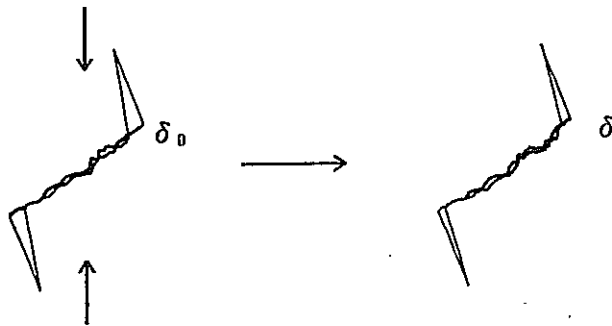


図-5-21 閉鎖き裂の力学的挙動に基づくコアを用いた地圧計測法の原理



### 5. 3 非弾性変位回復に基づいた250mレベル石灰岩の地圧評価

#### 5. 3. 1 測定位置

図5-22に、変位計型のASR法を適用した釜石鉱山250mレベルの測定位置を示す。岩盤は石灰岩であり、コア径は90~98mm、掘進方向はN256.32E, 0.92°上向き、ボーリング長21mであり、被りは約690mである。なお、掘進長が、7.6m付近、11m~12m、15m付近および20.5m付近で破砕帯的な箇所遭遇している。

測定は、9.9m、14.5m、16.62mおよび18.7mの4箇所について行い、それぞれをNo.1~No.4と呼ぶ。

#### 5. 3. 2 測定装置および測定方法

図-5-23は本研究で用いた非弾性変位の測定装置である。図-5-24に示すような6方向の非弾性変位を11個の差動トランス(測定長±500μm)で測定する。ボーリングコアの採取後、カッターを用いて直径と同じ長さのコアを切断し、端面を研磨した後、黄銅製の金具を所定の位置に接着し、含水状態を一定に保つためにシリコンで被覆して装置にセットする。測定システムを図-5-25に示すが、試料および測定装置の温度を一定に保つための恒温槽、変位増幅器、データを取り込むためのデータアキュイジションコントローラならびにCRTに表示しながらデータを記録するためのマイクロコンピュータから成っている。ただし、釜石鉱山における現場計測では、坑内の温度が約11℃とほぼ一定であったため恒温槽は用いなかった。なお、測定系のドリフト量を測定して補正するため、測定装置には一定の距離を測定するダミー変位計が取り付けられており、また非弾性変位測定装置内の温度変化も測定した。

#### 5. 3. 3 測定結果

図-5-26は測定結果の一例(No.2)である。変位量は極めて小さく、この例では20時間の測定で得られた変位は2μmに満たないが、温度がほぼ一定になった後のダミー変位計の出力がほとんど一定であることから、かなり精度よく測定されたと考えられる。これは他の測点でも同様であった。このことから、以後、温度がほぼ一定となった時刻以後のデータを解析の対象とした。

図-5-27は、No.2とNo.3における非弾性主ひずみ、非弾性体積ひずみおよび非弾性偏差主ひずみの時間変化である。これらから求められた非弾性偏差主ひずみ比の時間変化ならびに非弾性主ひずみの方向の変化を図-5-28に示す。ただし、主ひずみ方向の軸は、 $z$ がコア軸方向、 $x$ 、 $y$ はそれと直交する方向である。当該岩石が等方粘弾性体と見なせる場合、これらの値は一定でなければならず、その場合には、これらの値は、それぞれ、偏差主応力比と主応力の方向を与える。図からわかるように、測定値の変動の影響を受ける初期を除けば、これらの値はほぼ一定であることから、本研究では、図中に矢印で示した区間の平均値を用いて偏差主応力比と主応力の方向を求めた。なお、その区間における主応力方向を図中に示したが、変動は僅かであることがわかる。

図-5-29は、4箇所の測点における主応力方向（上半球投影）を示したものである。深度ごとにかなりばらついているが、これはすでに述べた破碎帯の影響によるものと思われる。しかし、その間に破碎帯を含まないNo.3（16.62m）とNo.4（18.70m）の2箇所の値はほぼ一致している。なお、偏差主応力の比は、 $S_2/S_1$ で0.04～0.53であった。

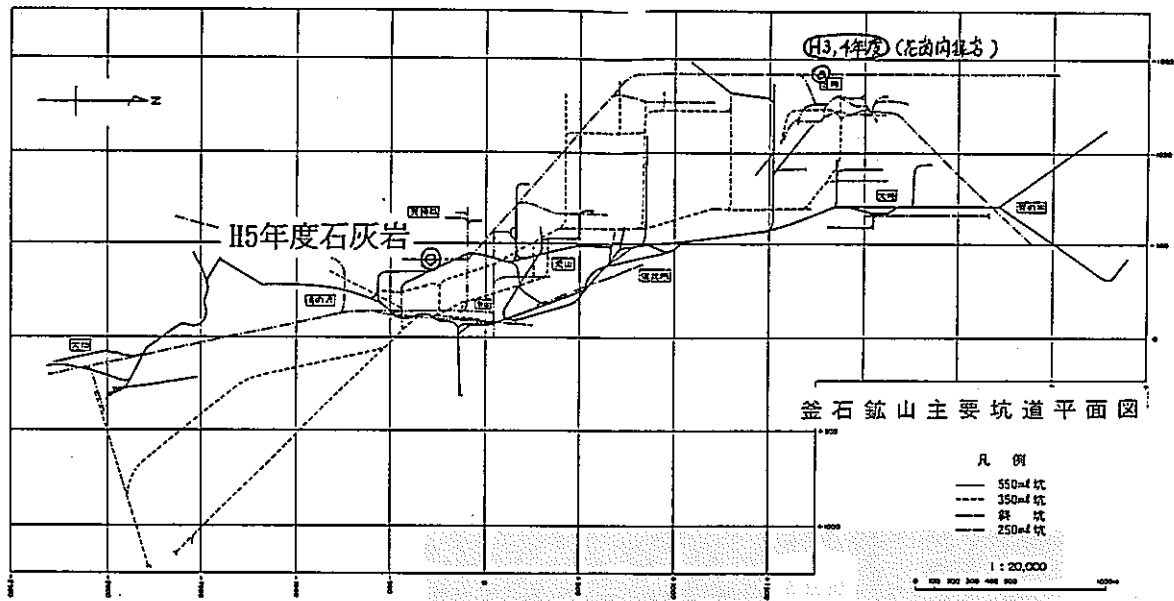


図-5-22 釜石鉱山250mレベルにおけるボーリング位置（石灰岩）

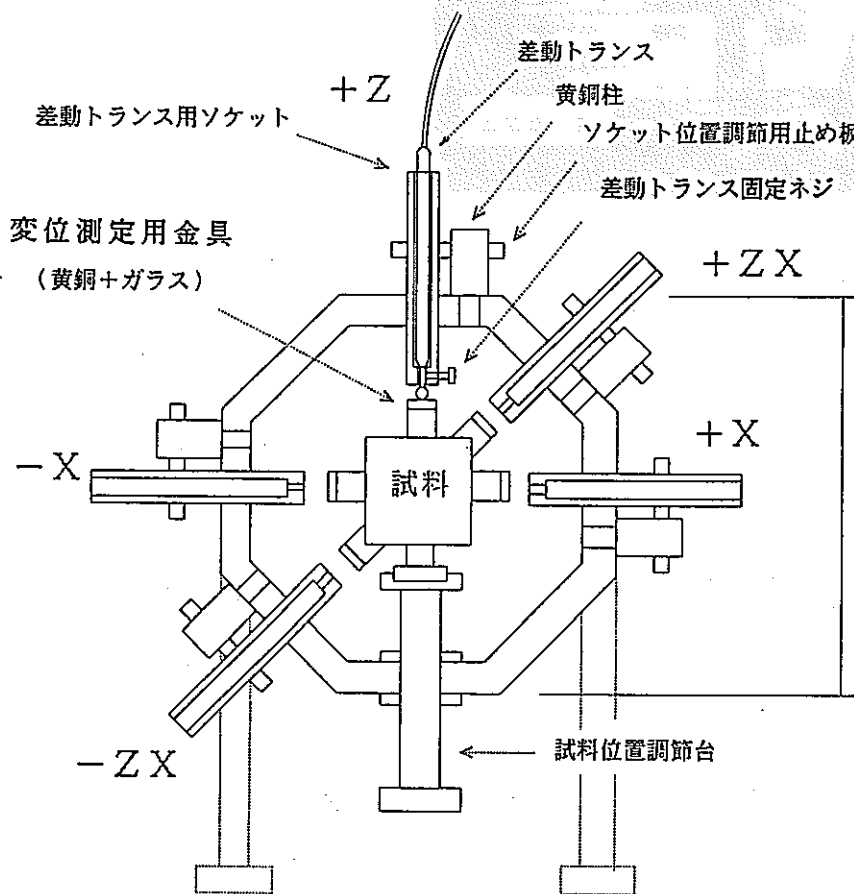


図-5-23 ASR法のための非弾性変位測定装置

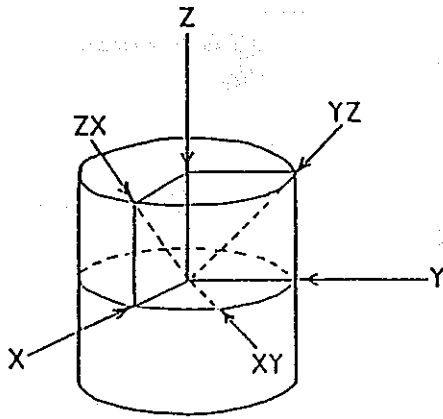


図-5-24 三次元地圧を求めるための変位の測定方向

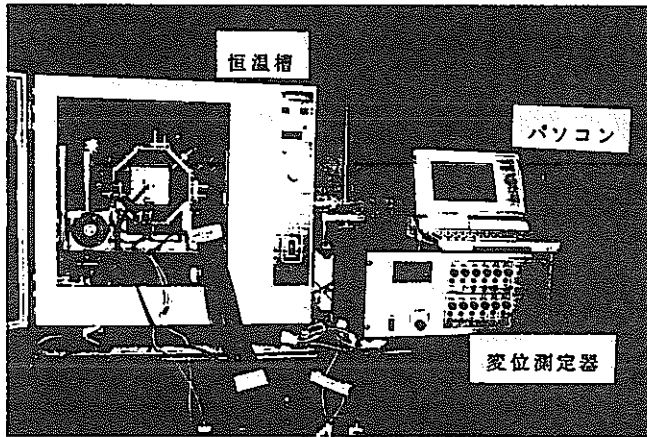


図-5-25 非弾性変位の測定システム

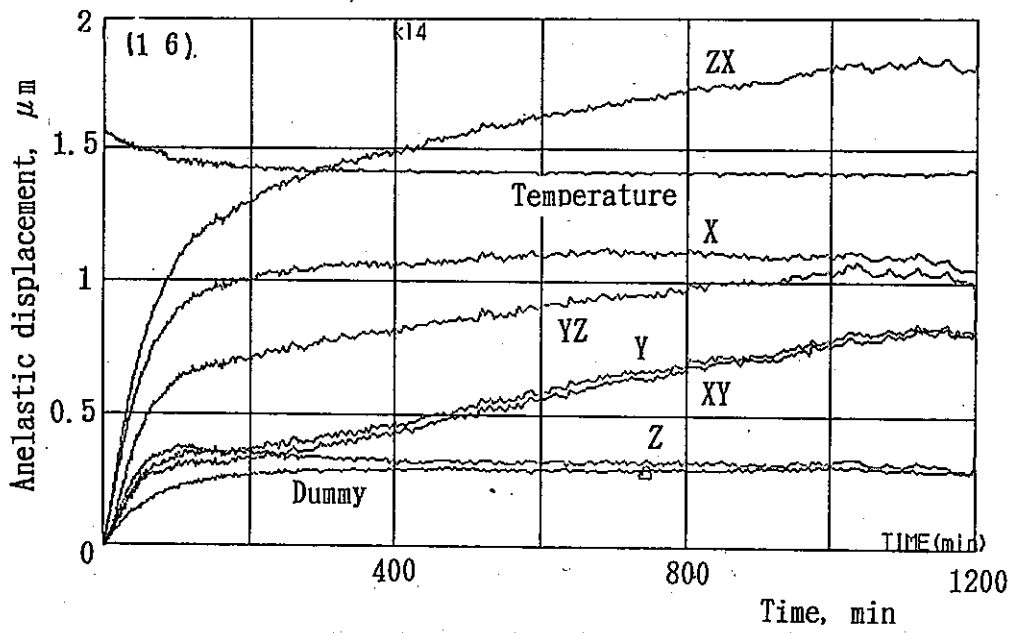


図-5-26 非弾性変位の測定結果の一例 (No.2)

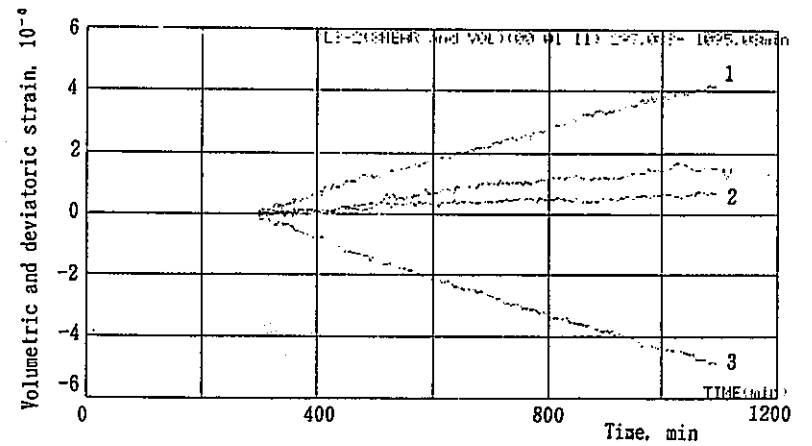
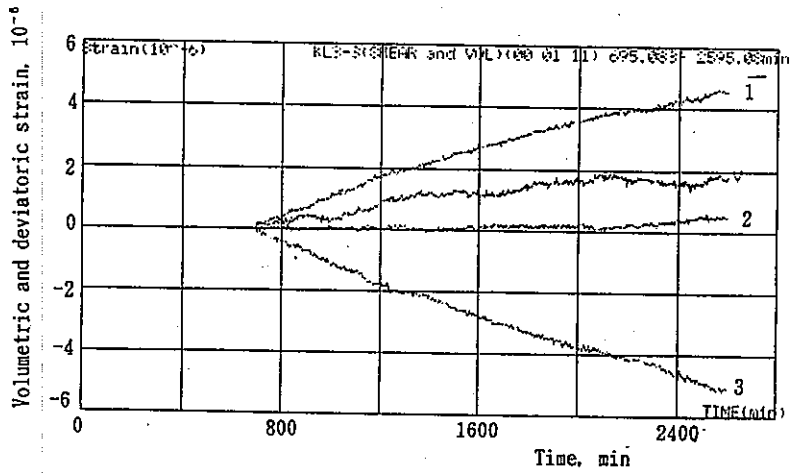
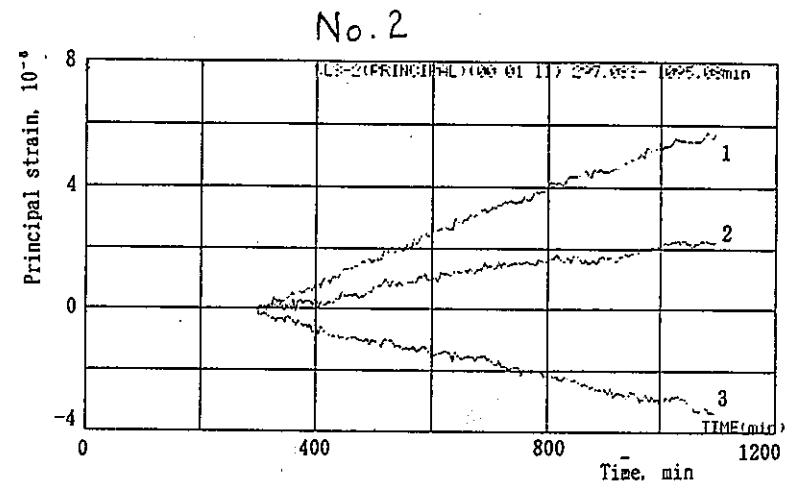
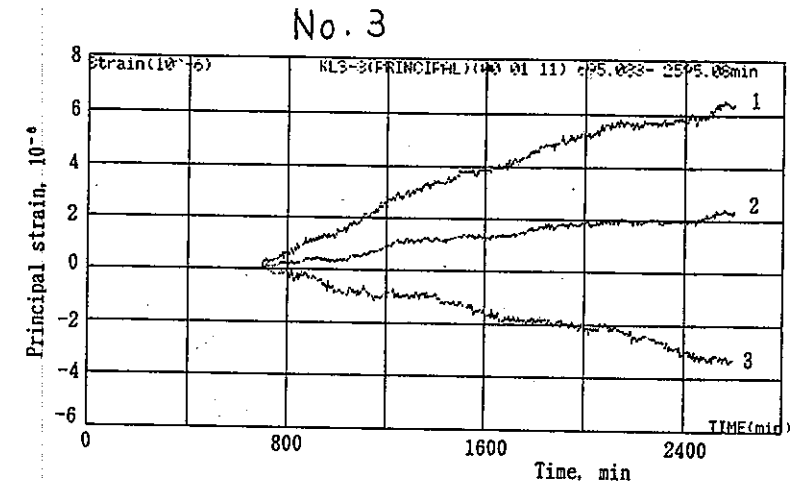
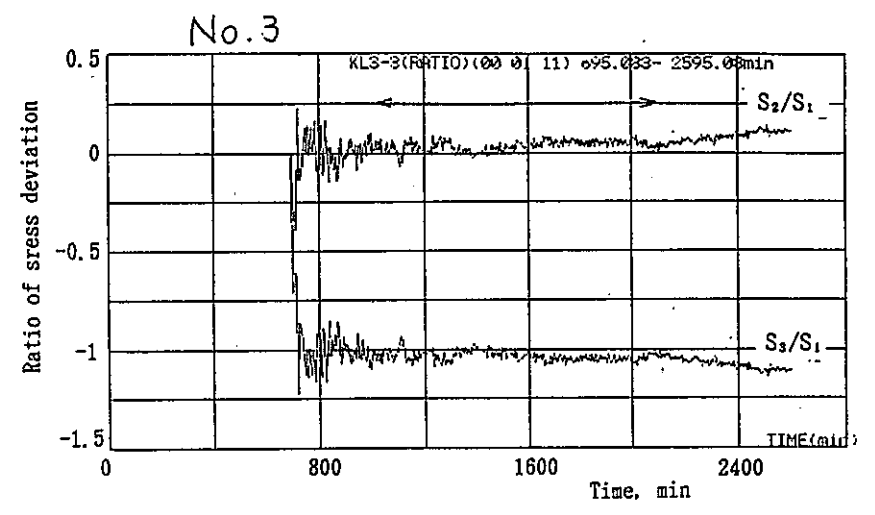
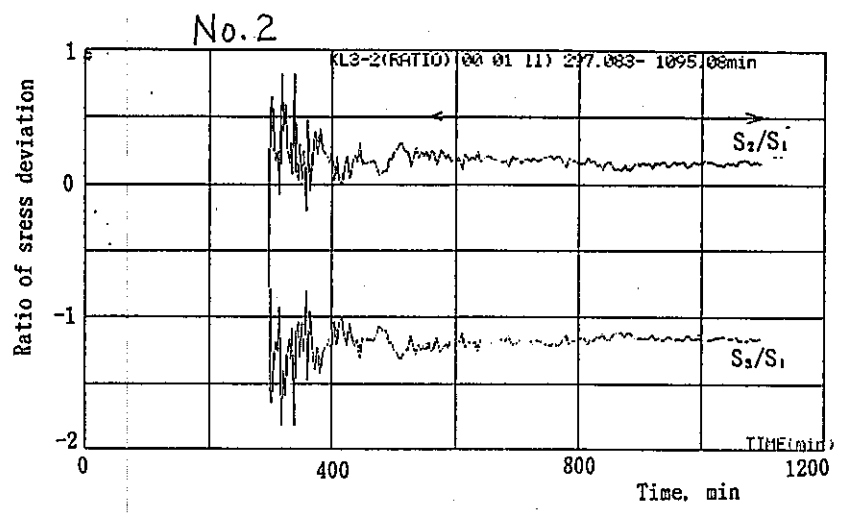
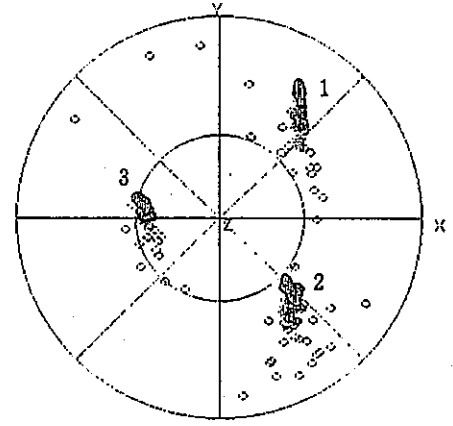


図-5-27 非弾性主ひずみ, 非弾性体積ひずみおよび非弾性偏差主ひずみの時間変化の例(No.2, No.3)



Orientation of anelastic principal strain(KL3-2) 297.083- 1095.08min



Orientation of anelastic principal strain(KL3-3) 695.083- 2595.08min

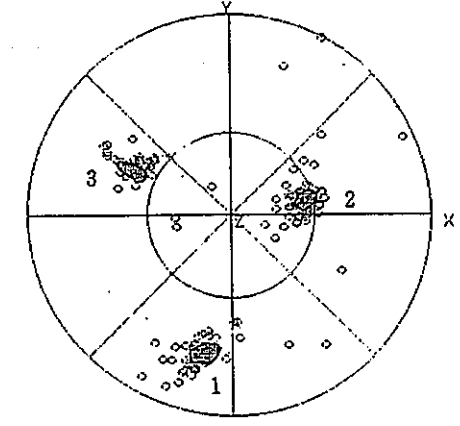
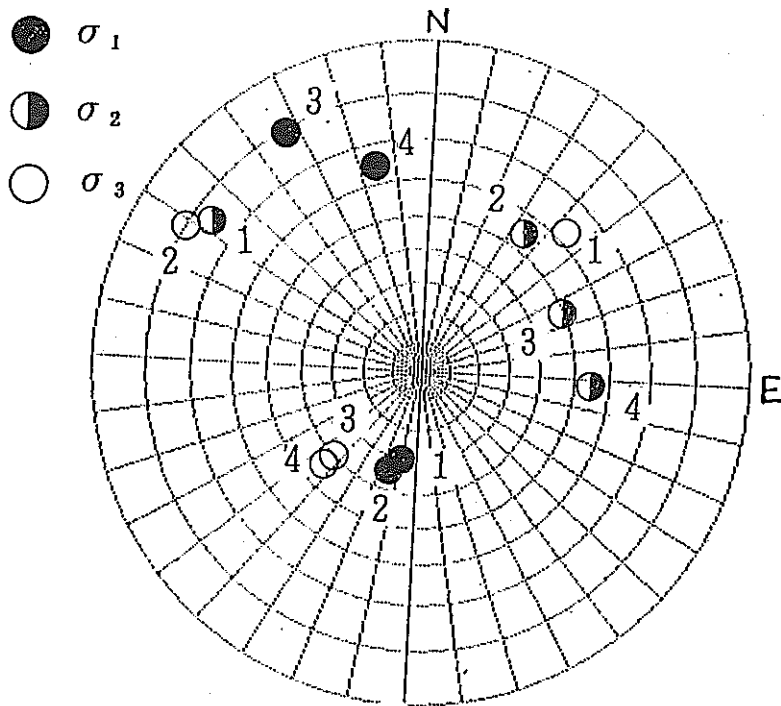


図-5-28. 偏差主ひずみ比ならびに主ひずみの方向の時間変化の例 (No.2, No.3)



1:9.90m 2:14.50m 3:16.62m 4:18.70m

図-5-29 A S R法による釜石鉱山250mレベル石灰岩の主応力方向（上半球投影）

#### 5. 4 まとめ

本報告では、ボーリングコアを用いた高信頼性地圧計測法を開発するため、①ガラスモデルを用いた閉鎖き裂の力学的挙動に関する研究ならびに②変位計型ASR測定装置による釜石鉱山250mレベルの石灰岩の地圧計測を行った。その結果をそれぞれについてまとめると以下のようである。

##### (1) 閉鎖き裂の力学的挙動に関する基礎的研究

ボーリングコアを用いた地圧計測法であるAE法、DRA法、ASR法は未だその基本原理に対する理論的説明が不十分であり多くの問題点を有している。これらの基本原理のメカニズムを明らかにすることは、その信頼性を高めるためのみならず、各方法の適用条件と適用限界を明らかにし、包括的なコアを用いた地圧計測を確立するためにも必要不可欠である。本研究は、これらAE法、DRA法、ASR法の基本原理のメカニズムを明らかにすることを目的として、岩石中の微小閉鎖き裂を模擬したき裂をガラス板に導入し、その力学的挙動、特に滑り挙動に注目した実験を行った。

本研究の結果得られた主な知見は以下の通りである。

①き裂表面の粗さの異なる2種のき裂を繰り返し載荷することにより、滑らかなき裂において、AEのカイザー効果とDRA法の基本原理である先行応力点での非弾性ひずみの急増が確認された。このことから、閉鎖き裂の滑り挙動のなかにAE法、DRA法の基本原理のメカニズムが存在することが明らかとなった。また、滑らかなき裂においては、これらの現象がやや不明瞭となったことから、AE法、DRA法のメカニズムは、閉鎖き裂表面の凹凸と大きく関係していることも明らかになった。

②除荷した後の経過時間の影響において、経過時間が11日間の滑らかなき裂を用いた実験では、DRA法によって過小評価ではあるものの先行応力を評価できた。これに対し、経過時間28時間の滑らかなき裂を用いた実験では先行応力の評価は不可能であった。このことから、閉鎖き裂表面の凹凸がDRA法のメカニズムに大きく関与していると考えられた。さらに、滑らかなき裂での実験において、先行応力を過小評価した事とAEのカイザー効果が見られなかった事から、DRA法、AE法における時間依存的な挙動が、閉鎖き裂の滑り挙動と関係していると考えられた。



③除荷後の時間的変化から、閉鎖き裂がもとに戻る過程における非弾性的な挙動が認められた。

④これらの結果を基礎として、全てのボーリングコアを用いた地圧計測法の背景にある基本メカニズムの提案を行った。

#### (2) 非弾性変位回復に基づいた250mレベル石灰岩の地圧評価

変位計型ASR測定装置を用いて、釜石鉱山250mレベルの石灰岩コアの非弾性変位を測定したところ、非弾性変位の量は極めて小さかったものの、偏差主応力比や主応力方向について安定した値が得られた。このことは、強度が大きく堅い岩石といえども、それが深部にある場合には、精度のよい測定を行いさえすれば三次元地圧を計測できることを示している。

#### 5.5 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を目的として、基礎的研究ならびに釜石鉱山の地圧評価という応用的研究を行っている。

基礎的研究としては、本研究で提案した閉鎖き裂の力学的挙動に基づくコアを用いた地圧計測法の基本原理について、封圧成分の影響を含めたより定量的なモデル化とその検証が必要である。

釜石鉱山の地圧評価については、1) 現在行っている250mレベルの石灰岩のDSCA法、DRA法およびAE法による評価を遂行するとともに非弾性ひずみ回復コンプライアンスのキャリブレーションによるASR法による地圧の大きさの評価を行う必要があり、2) 250mレベルの花崗閃緑岩について行った測定結果を含めて、それらの地点の地圧の総合評価ならびに各種のコアを用いた地圧計測法の総合評価を行う必要がある。

なお、これらの二つの研究は互いに関連しており、基礎的研究の成果を釜石鉱山の地圧評価に反映する必要がある。