

# 熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)における試験

## (その1)天然岩石を用いた試験結果

1997年1月

動力炉・核燃料開発事業団  
東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

## 熱-水-応力連成試験設備 (COUPLE) における試験

### (その1) 天然岩石を用いた試験結果

実施責任者：石川博久<sup>1</sup>、石黒勝彦<sup>1</sup>

報告者：千々松正和<sup>1</sup>、杉田裕<sup>2</sup>、松本一浩<sup>3</sup>、

茂呂吉司<sup>4</sup>、菅野毅<sup>1</sup>

### 要 旨

地層処分の性能評価において、ニアフィールドの熱、水理、応力等の条件を明確にする観点から、人工バリア及び周辺岩盤における熱-水-応力の連成現象を定量的に評価することが重要である。熱-水-応力連成試験設備 (COUPLE) では、試験対象を周辺岩盤を含むニアフィールドまで拡張し、地下深部の処分環境下における地圧の作用、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧力の発生、廃棄体の発熱による熱応力等が周辺岩盤のゆるみ域や亀裂中の水理特性に及ぼす影響を評価することを主目的とし試験を実施した。

試験の第一段階として、対象試験岩体への模擬処分孔掘削前後の載荷試験を実施した。試験の第二段階として、模擬処分孔内にヒーター、緩衝材（ペントナイトブロック）を設置し、浸潤、加熱試験を実施した。そして試験終了後、緩衝材のサンプリングを行ない、乾燥密度、含水比の測定を行なった。その結果、次のようなことが分かった。

- ・ AE測定と弾性波測定を総合的に評価することにより、載荷により発生する破壊の位置を定性的に予測できる。
- ・ サイクロメータを用いることにより、水がペントナイトの外側から順次内部へ浸入していく様子が観察できた。
- ・ ペントナイトに水が浸潤することにより膨潤圧が発生する。しかし、ペントナイトが飽和した時点で、膨潤圧の新たな発生はなくなる。
- ・ ヒーターによる加熱により、粘土内に熱応力が発生した。
- ・ ペントナイトブロックを用いる場合でも、ペントナイトが飽和した後は膨潤によりブロック縫目は閉鎖し、高透水性部になることはない。

\*1 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

\*2 釜石事務所

\*3 検査開発（株）

\*4 (株) 間組 技術研究所

## 目 次

1. 試験の概要 .....	1
2. 試験装置及び計測装置 .....	2
2.1 試験装置 .....	2
2.2 測定項目と計測機器の設置位置 .....	3
2.2.1 載荷荷重 .....	3
2.2.2 応力 .....	3
2.2.3 変位 .....	5
2.2.4 間隙水圧 .....	7
2.2.5 弾性波 .....	8
2.2.6 AE .....	9
2.2.7 溫度 .....	9
2.3 測定装置の仕様及び設置位置 .....	11
3. 掘削前後における載荷試験 .....	17
3.1 試験岩体の基本物性 .....	17
3.2 試験の概要 .....	18
3.2.1 機能試験 .....	18
3.2.2 模擬処分孔掘削 .....	20
3.2.3 掘削載荷試験 .....	20
3.3 試験結果 .....	20
3.3.1 機能試験 .....	20
3.3.2 掘削載荷試験 .....	21
3.4 載荷試験の解析 .....	26
3.4.1 概要 .....	26
3.4.2 カムクレイモデル .....	27
3.4.3 載荷試験の解析 .....	30
3.5 まとめ .....	37
4. 浸潤・加熱試験 .....	38
4.1 ヒーター、ペントナイトブロックの設置 .....	38
4.1.1 ヒーターの概要 .....	38

4.1.2 ベントナイトブロックへのセンサーの設置 .....	40
4.2 浸潤試験 .....	40
4.3 加熱予備試験 .....	43
4.4 ベントナイトのサンプリング .....	52
5.まとめ .....	55
参考文献 .....	57

## 1. 試験の概要

地層処分の性能評価において、ニアフィールドの熱、水理、応力等の条件を明確にする観点から、人工バリア及び周辺岩盤における熱-水-応力の連成現象を定量的に評価することが重要である。

緩衝材中の熱-水-応力連成現象については、緩衝材大型試験（Big-Ben）においてデータを得るとともに、モデルの開発・確認を実施した<sup>1) 2)</sup>。熱-水-応力連成試験設備（COUPLE）では、試験対象を周辺岩盤を含むニアフィールドまで拡張し、地下深部の処分環境下における地圧の作用、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧力の発生、廃棄体の発熱による熱応力等が周辺岩盤のゆるみ域や亀裂中の水理特性に及ぼす影響を評価することを主目的とする。

試験の第一段階として、対象試験岩体への模擬処分孔掘削前後の載荷試験を実施した。平成5年10月～平成6年2月に模擬処分孔掘削前の載荷機能試験（載荷試験）を、平成6年3月に模擬処分孔の掘削、平成6年4月～平成6年8月に掘削後の載荷試験を実施した。この試験では、模擬処分孔掘削前後の岩体中の応力変化、載荷荷重の違いによる弾性波速度の変化及びAE（Acoustic Emission）カウント数の変化等の測定を行なった。そして、掘削前後の載荷試験を応力解析した結果と比較検討を行なった。試験の第二段階として、浸潤、加熱試験を実施した。平成7年3月に緩衝材及びヒーターを模擬処分孔内に設置し、平成7年3月より浸潤試験を開始し、平成7年12月に加熱を行なった。そして、平成8年1月に緩衝材のサンプリングを行ない、乾燥密度、含水比の測定を行なった。

本報告書は、COUPLEの試験設備の概要及び計測センサーの設置概況、模擬処分孔掘削前後の載荷試験結果、浸潤・加熱試験結果について報告するものである。

## 2. 試験装置及び計測装置

### 2.1 試験装置

熱-水-応力連成試験設備（COUPLE）の試験設備の概要図を図2-1に示す。又、設備の横断面図を図2-2に示す。縦320cm、横320cm、高さ156cm、厚さ50cmの鉄枠を地中に埋設し、載荷時の反力枠として用いる。その反力枠に一方向6本ずつ、2方向、合計12本のパワージャッキを取り付け、縦100cm、横100cm、高さ147cmの試験岩体を図に示す位置に設置し、載荷板を介して載荷する。パワージャッキ1本の最大載荷荷重は375tonであるから一方向あたり最大2250tonまで載荷可能である。圧力に換算すると最大約15MPaの載荷能力を有する。

載荷板と岩体の間にはフラットジャッキを介在させ、載荷荷重が均一に岩体にかかる仕組みになっている。

載荷板の周りに水槽を設け、岩体の周囲の温度境界を一定に保つために恒温水循環装置を用いて恒温水（室温～50°C）を循環させる。

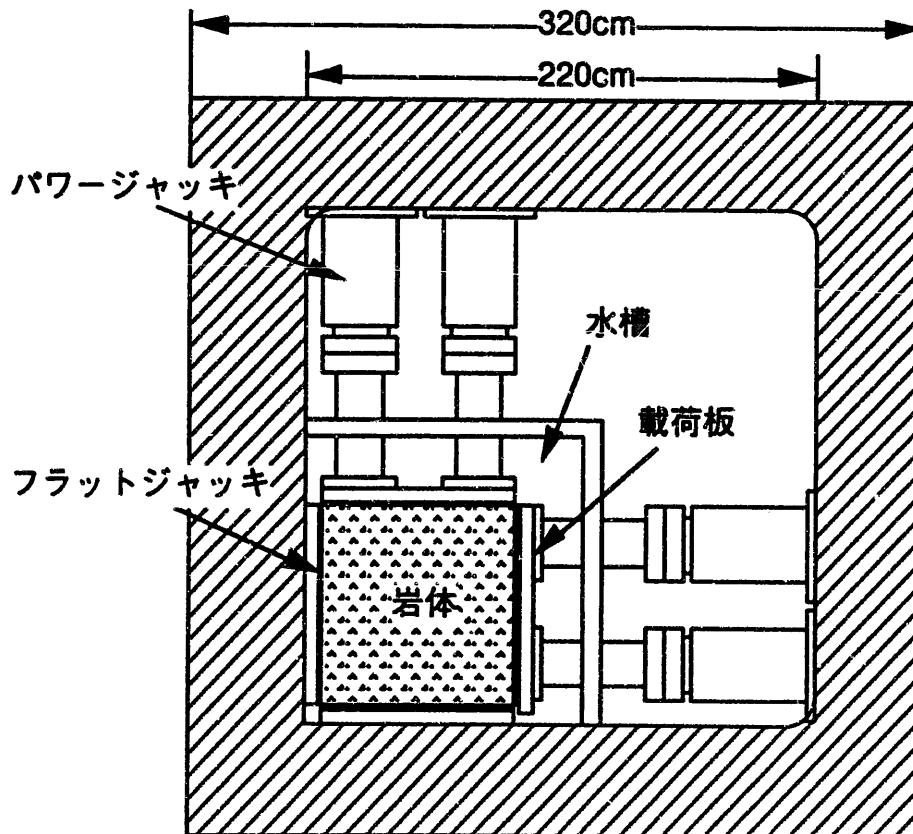


図2-1 热-水-応力連成試験設備（COUPLE）の概要図

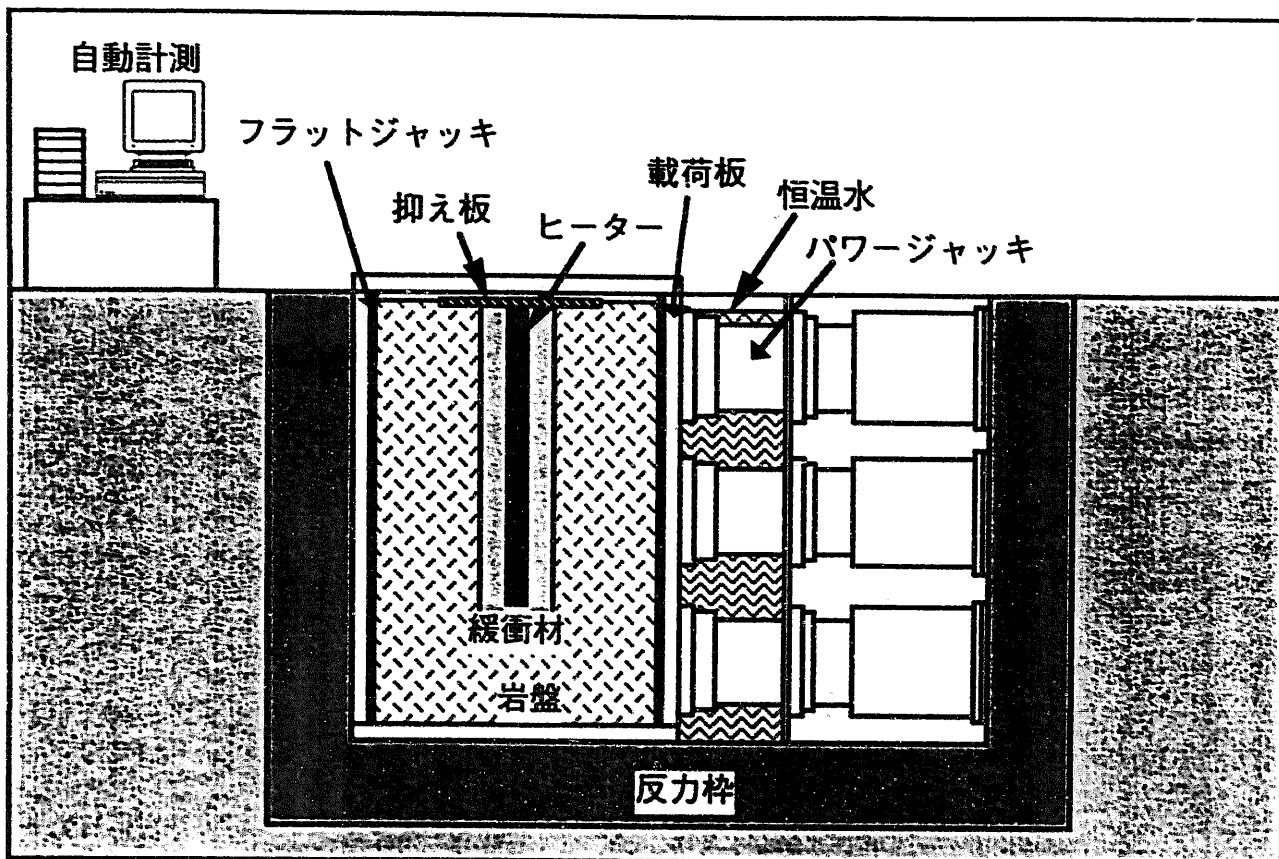


図2-2 热-水-应力连成試験設備 (COUPLE) の横断面図

## 2.2 測定項目と計測機器の設置位置

各測定項目について、使用する計測機器及び機器の埋設位置について以下に述べる。

### 2.2.1 載荷荷重

サーボコントロールシステムの圧力を測定する。

### 2.2.2 応力

試験岩体内に発生する応力を、差動トランス (LVDT) 型孔径変位計を用いて測定する。変位計は、3つのLVDTを120度ずつ方向を回転させて組み合わせた形式で、孔径の変化を応力成分に換算する資環研（資源環境研究所）方式である。図2-3に変位計の概要を示す。

模擬処分孔掘削以降に問題となるゆるみの影響を計測するため、処分孔壁から水平方向に0.2d（掘削する模擬処分孔の直径はd=25cmであるので、ここでは5cmを示

す)、 $1.0d$  (25cm) 及び $0.5d$ 、 $1.0d$ の距離に変位計を1組ずつ、4組、合計12チャンネル配置する（図2-4参照）。

変位計を設置するボーリング孔は、直径36mm、深さ50cmのもので、ボーリング孔掘削は全て試験岩体の上面から行なう。変位計は、パッカーで圧力をかけてバネを縮めて挿入し、所定の位置で圧力を抜いてバネを戻し固定する。

応力測定孔は温度測定孔と兼用する。熱電対はモルタルで試験岩体に固定する必要があるため、はじめにボーリング孔奥に熱電対を埋設し、その上の空孔（充填物のない孔）部分に上記の方法で孔径変位計を設置する（図2-5参照）。回収、再利用のため、孔径変位計部分には、モルタル注入は行なわず空孔のままとする。応力測定孔同士の間隔（12.5cmおよび20.0cm）は、ボーリング孔の直径（36mm）の2倍以上の距離があるため、空孔のままでボーリング孔相互の影響は少ないと考えられる。

また、応力測定孔の孔底に熱電対をモルタルで固定するときには、循環水の温度の影響を無くすために、5cm程度の深さで埋設した。なお、孔底の影響を避けるために、孔径変位計はモルタル表面から7~8cm程度離れた位置（ボーリング孔径の2倍程度）に設置した。

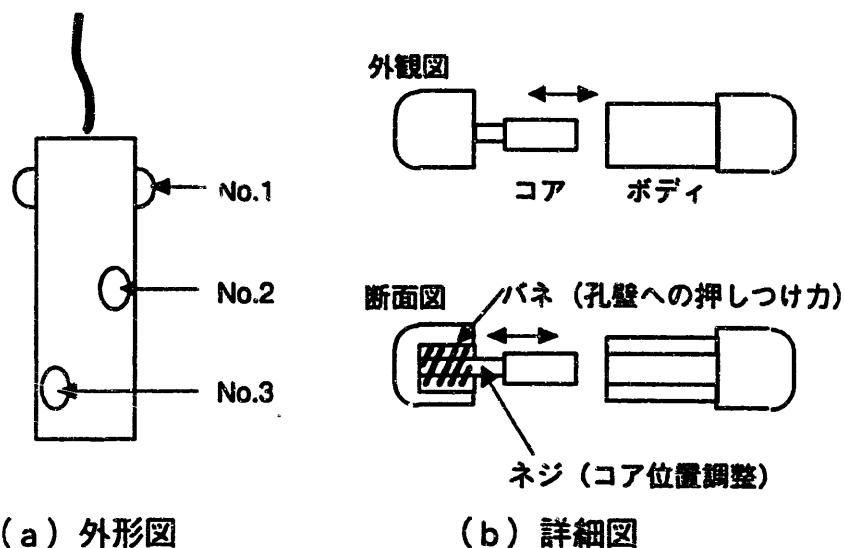


図2-3 孔径変位計 (LVDT) 概要図

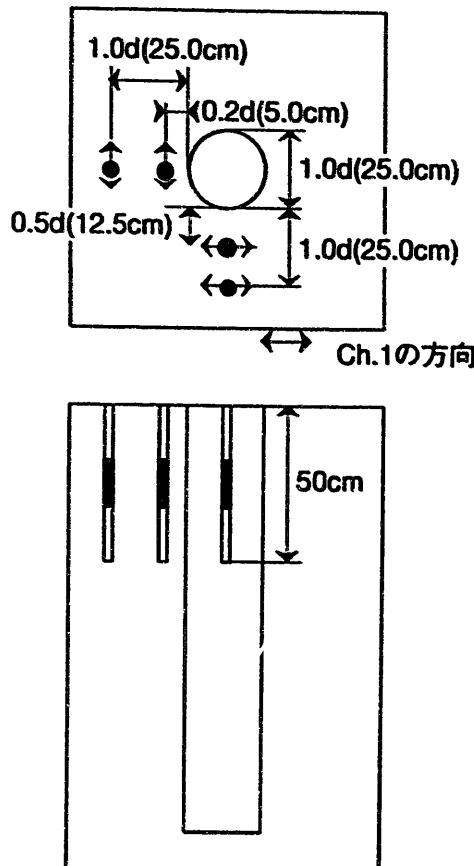


図2-4 孔径変位計設置位置

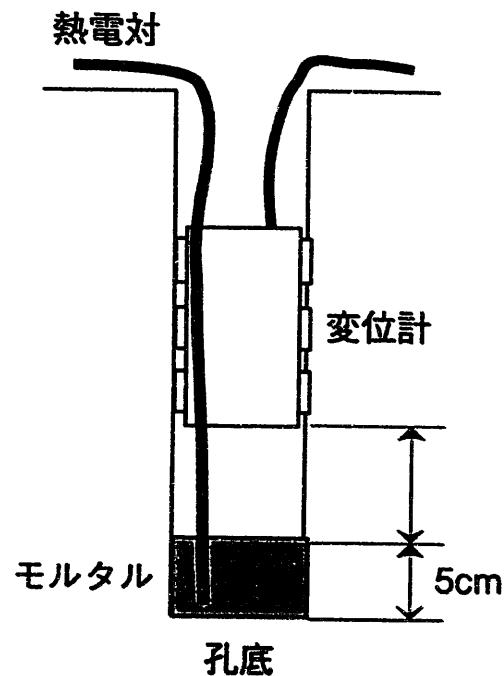


図2-5 孔径変位計設置概念図

### 2.2.3 変位

#### (1) フレーム変位

試験岩体に対する偏荷重をチェックするために、載荷板外側に変位計を設置する。また、変位計の出力値を利用し、試験岩体が破壊しないようにジャッキの変位制御を行なう。上面にはアクリル板を設置するために変位計は設置しない。変位計の仕様と概略を図2-6に示す。

変位計は載荷板の外側2側面に7個設置し、面の傾きから偏荷重をチェックする(図2-7参照)。変位計はジャッキに設置し、載荷板の移動を測定する(図2-8)。

#### (2) 地中変位(岩体中)

試験岩体の変形を直接計測するため、小型地中変位計を用いる。図2-9に示す様な差動トランス(LVDT 3ch)とパッカーを組み合わせ、パッカーの固定点間の変位を測定する。変位計の配置位置は図2-7に示す。設置方法は応力測定用の孔径変位計の

設置と同様、パッカーの圧力でバネを操作し、所定の位置で固定する。ボーリング孔は、モルタル充填を行なわず空孔のまます。

設置用のボーリング孔は直径50mm、長さ35cmとする。

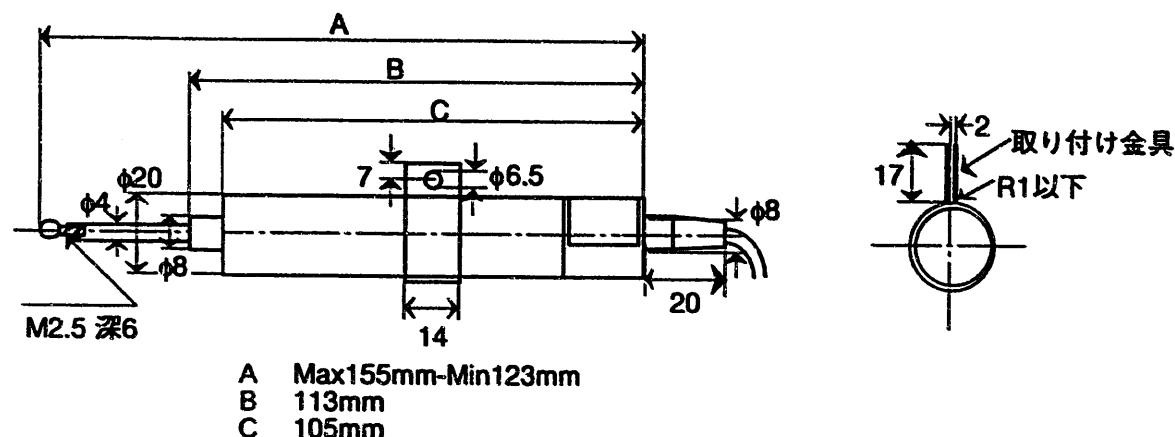


図2-6 変位計（フレーム変位用）概略図

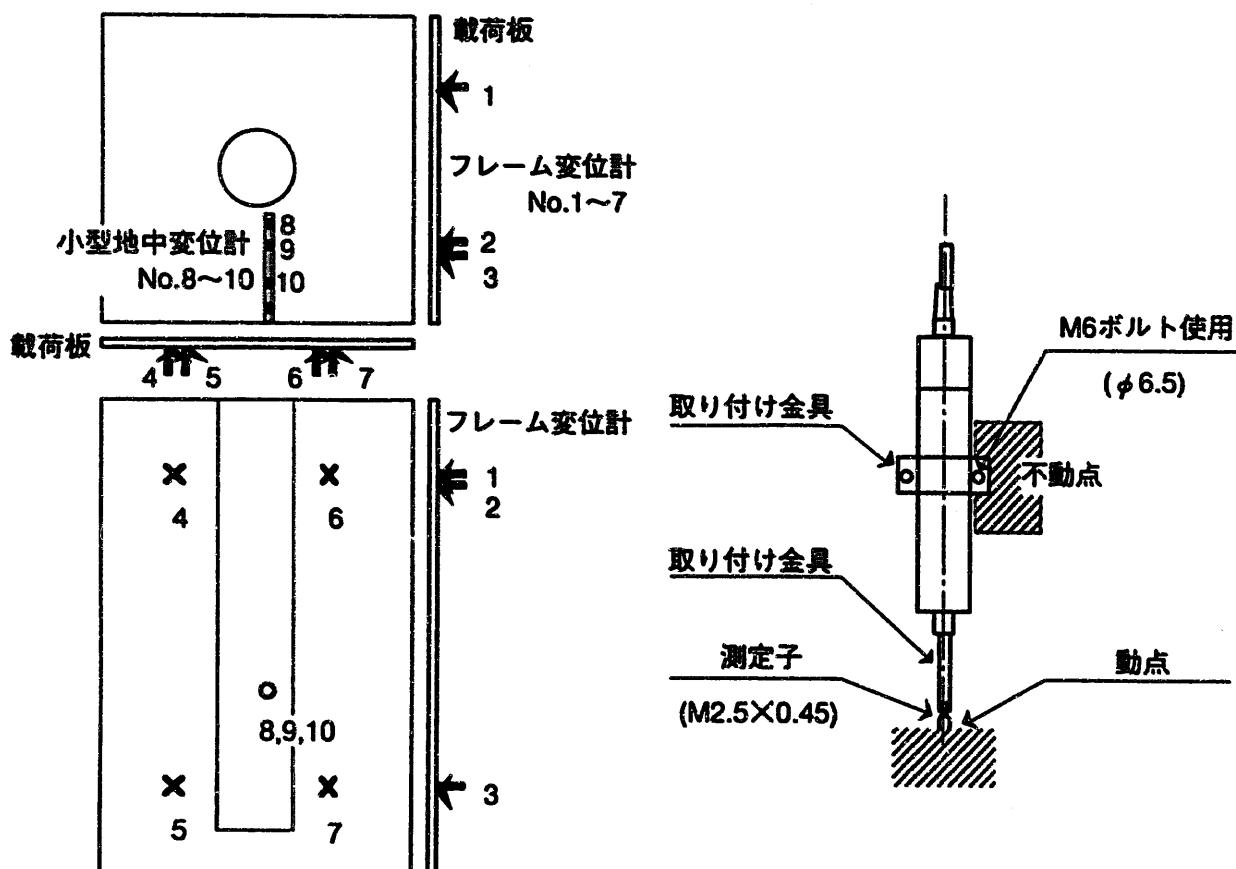


図2-7 変位計の設置位置

図2-8 フレーム変位計の固定方法

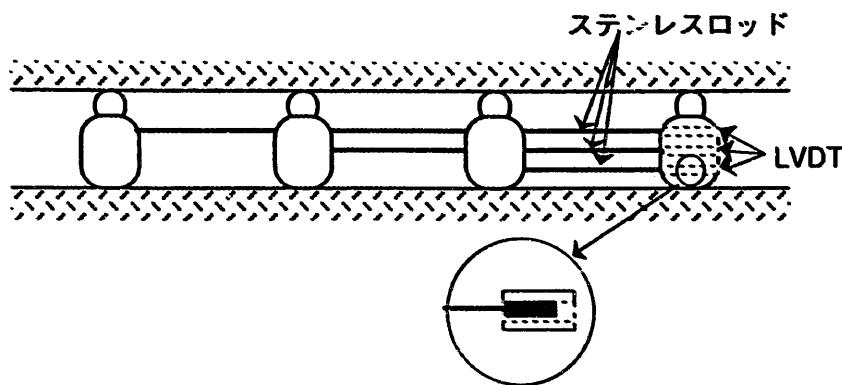


図2-9 小型地中変位計概要図

#### 2.2.4 間隙水圧

載荷時の応力変化に伴う間隙水圧の変化とその消散の過程を観測する。また、透水試験にも利用する。計測器の容量は0.2MPaである。

ゆるみの影響を観察するため、間隙水圧計は処分孔から0.5d (12.5cm) 、1.0d (25 cm) の位置に一列に配置した。この測線を2本設け、載荷方向の違いによる間隙水圧への影響を観察する。計測器は、深さ130cmのボーリング孔に熱電対と共に埋設する（図2-10）。計測器は、試験岩体上面から75cmの深さに設置した。熱電対はモルタル注入により固定し、間隙水圧計部分には豊浦標準砂を詰めた。熱電対は、1本の間隙水圧測定孔の上中下と3箇所に配置するため、次に示す埋設手順を踏んだ。

1. 下部では、まずモルタルを注入し、熱電対を埋め込み、1日程度放置し固化させた。モルタルの強度は、試験岩体と同程度になるように配合した。
2. 次にモルタルの上に注水し、豊浦標準砂を詰めて、間隙水圧計と熱電対を埋め込んだ。
3. 最後にモルタルを注入し、熱電対を埋め込んだ。

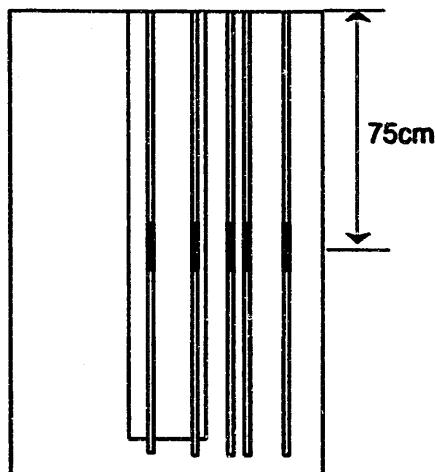
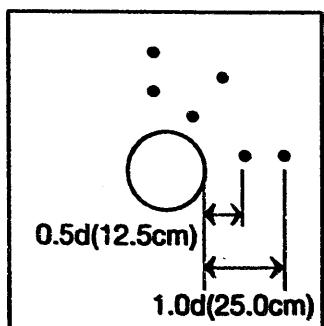


図2-10 間隙水圧計の設置位置

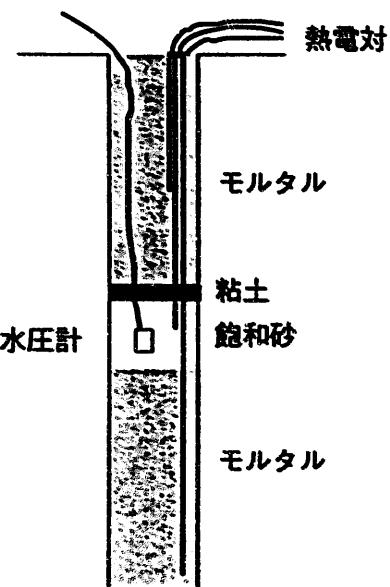


図2-11 間隙水圧計設置概念図

## 2.2.5 弹性波

ゆるみ域推定のためにP波の速度、振幅の変化をモニタリングする。弹性波測定用超音波振動子は、長短合わせて計8本のボーリング孔内に20個配置する。センサーの配置は、平行測線とトモグラフィー用の交差測線を設定できるように分散させる。実際に使用する計測装置と同じタイプの装置を用いて、本試験で使用する岩石で予備測定した結果、30cmまではP波到達点、最大振幅の読みとりが可能であった。したがって、測線の長さは、最大30cm程度となるようにセンサーを配置する（図2-12参照）。また、センサーの概要を図2-13に示す。センサーは岩盤とのカップリング（波の伝搬効率）を向上させるため、モルタル注入により固定する。1本のボーリング孔に複数のセンサーを設置する場合は、バルサー等の柔らかい木の板にあらかじめセンサーを固定し、板ごとモルタルで埋設する。木の板を利用するのは、試験岩体以外での弹性波の伝搬を防ぐためである。

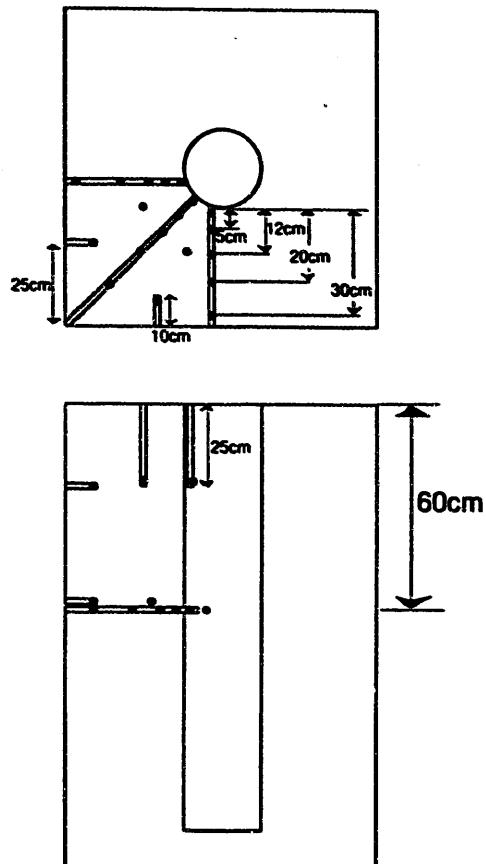


図2-12 弾性波センサー配置図

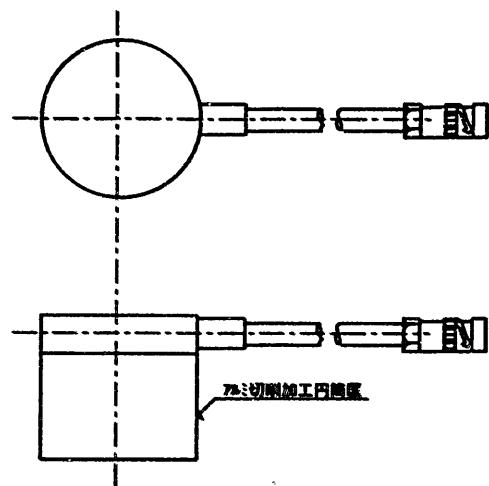


図2-13 圧電型トランスデューサ

### 2.2.6 AE

AEを複数のセンサーを用いて観測することにより微小破壊の頻度、2次元的、3次元的な発生位置が推定できる。AEセンサーは弾性波のセンサーと共に用いる。

### 2.2.7 温度

応力計、間隙水圧計、弾性波センサーのボーリング孔に熱電対を設置する。このため、熱電対の種類、設置方法は各ボーリング孔によって異なる。弾性波、応力計用のボーリング孔を利用して水平断面コンター用の熱電対を配置し、間隙水圧計の縦ボーリングを利用して垂直断面コンター用の熱電対を配置する。熱電対はシース熱電対である。各ボーリング孔における設置方法及び個数は以下の通りである。配置図は図2-14に示す。

(1) 応力測定用ボーリング孔：

個数 1個／本、計4個

設置方法 ボーリング孔の奥にモルタルを注入し、熱電対を固定。

(応力計はモルタルの上の空孔に設置する)

(2) 間隙水圧計用ボーリング孔：

個数 3個／本、計18個

設置方法 ボーリング孔の奥に1個目の熱電対をモルタルで固定。間隙水圧計の深さで、2個目の熱電対を砂に埋設。孔口付近で、3個目の熱電対をモルタルで固定。

(3) 弹性波用ボーリング孔（水平ボーリング）：

個数 計18個

設置方法 弹性波センサーと一緒に挿入し、モルタルで固定。

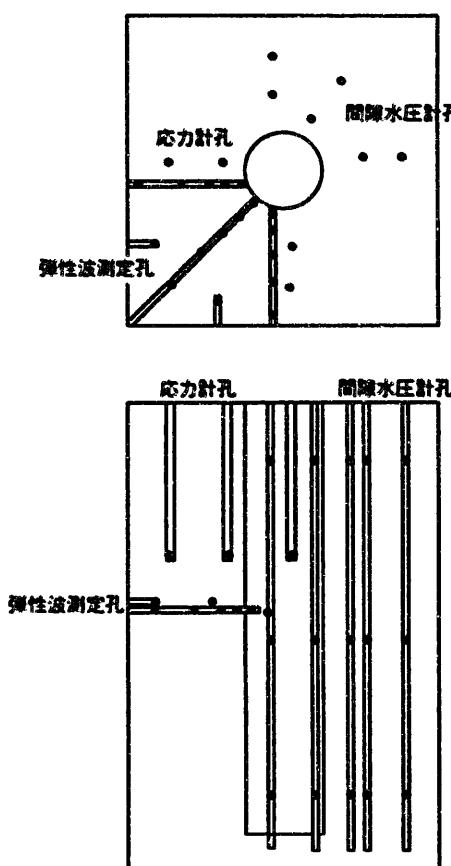


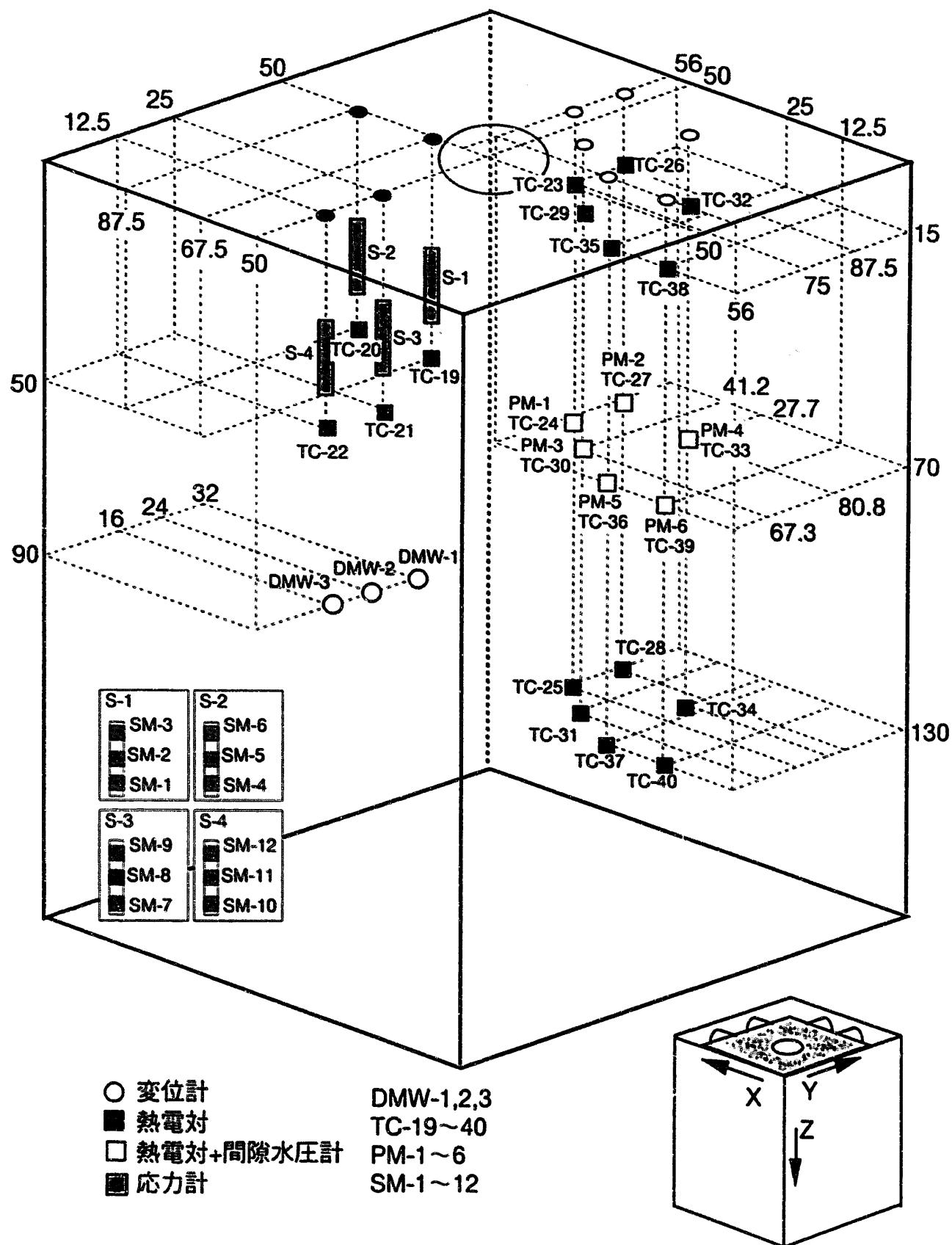
図2-14 热電対配置図

### 2.3 測定装置の仕様及び設置位置

以上の各測定装置の仕様を表2-1に示す。また、センサー配置図を図2-15に示す。

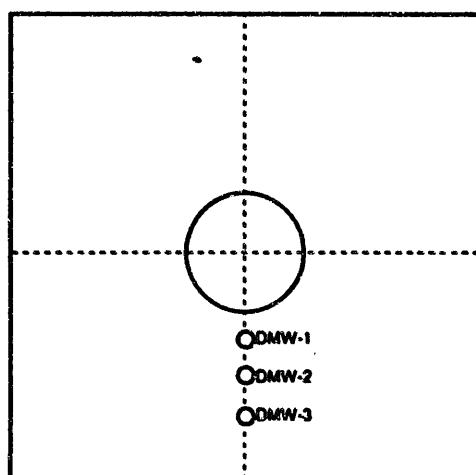
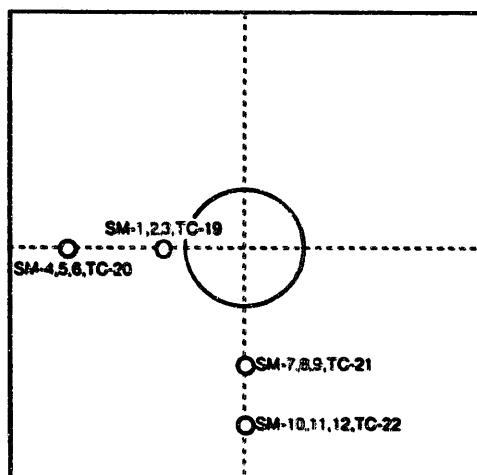
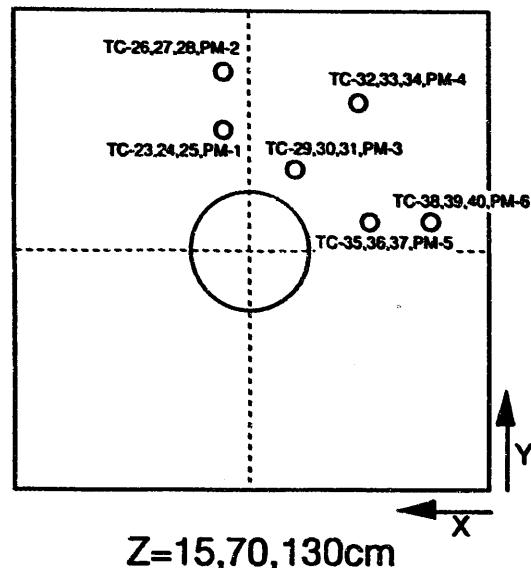
表2-1 岩盤内センサーの仕様

機器番号	機器名称	数	メーカー	型番	寸法・仕様
PT	カーボン圧力センサー	2	共和電業	PG-1TH	ひずみゲージ式圧力センサー 測定範囲 100.0MPa 温度補償範囲 0~60℃
SM	応力計	12	メック	-	差動トランス型孔径変位計 孔径変位測定範囲 ±1.25mm 温度補償範囲 0~50℃
DM	変位計（壁面）	7	共和電業	DT-30F	ひずみゲージ式変位計 測定範囲 30mm 温度補償範囲 0~50℃
DMW	変位計（岩石中）	3	メック	-	差動トランス型変位計 変位測定範囲 ±1.25mm 温度補償範囲 0~50℃
W1	透水試験圧力センサー	1	共和電業	PGM-10KC	ひずみゲージ式圧力センサー 測定範囲 1.0MPa 温度補償範囲 0~60℃
TC	熱電対	40	助川電気工業	T35	シーズT型熱電対 (T(CC), Sタイプ)
PM	間隙水圧計	6	共和電業	BP-2KRS	ひずみゲージ式圧力センサー 測定範囲 0.2MPa 温度補償範囲 0~80℃
VS	孔間弾性波測定センサー	20	開発電子測器研	UP-20AB	圧電型セラミック振動子 共振周波数 400kHz 温度補償範囲 0~60℃

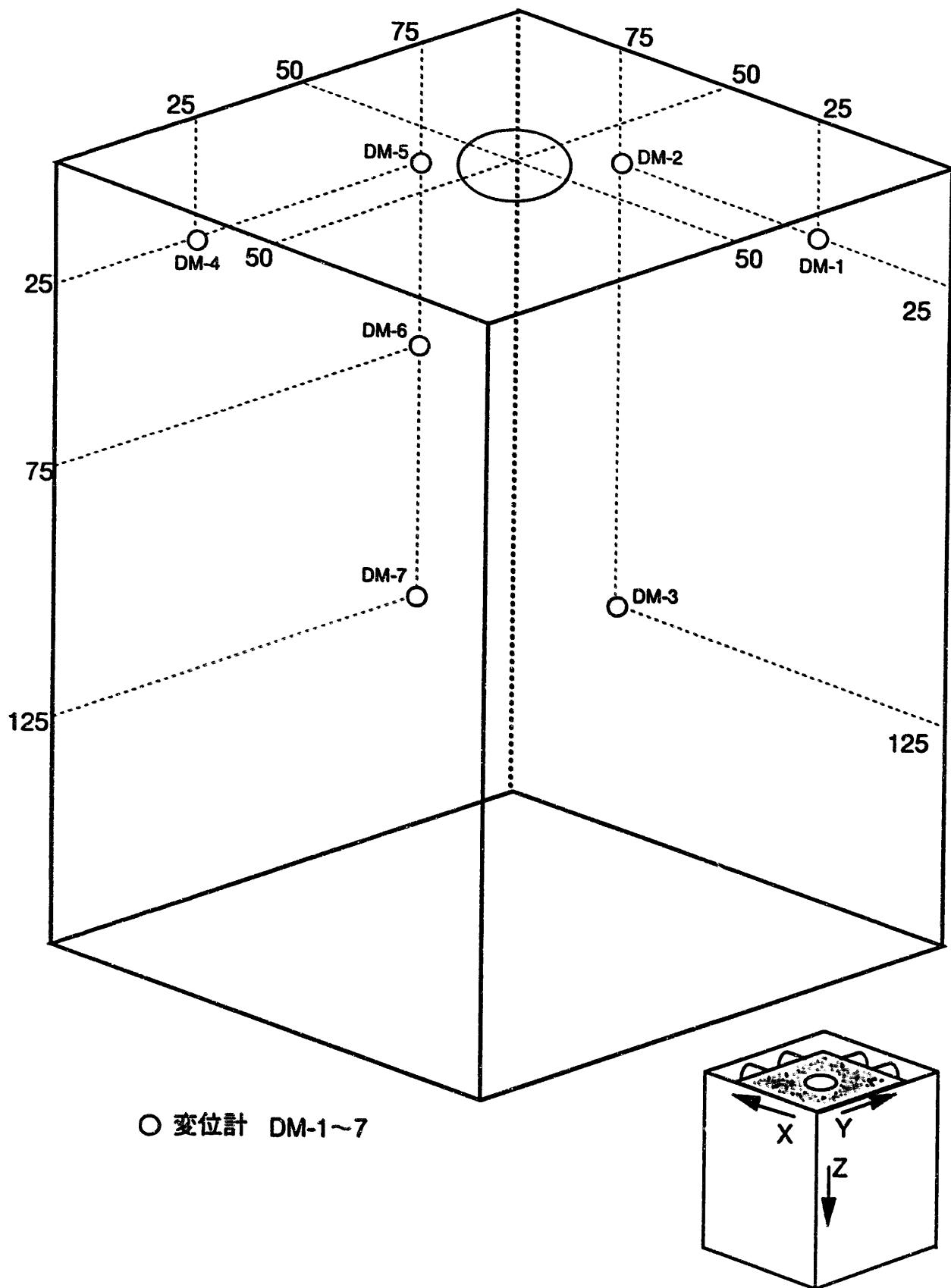


(a) 地中変位計、間隙水圧計、応力計、熱電対

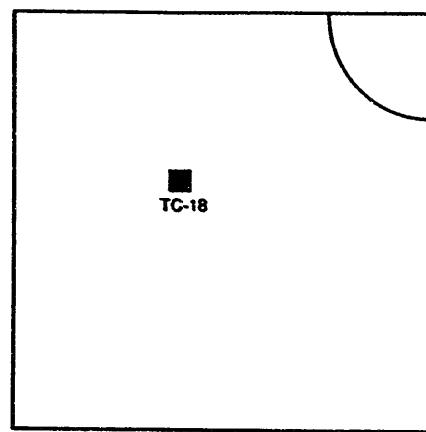
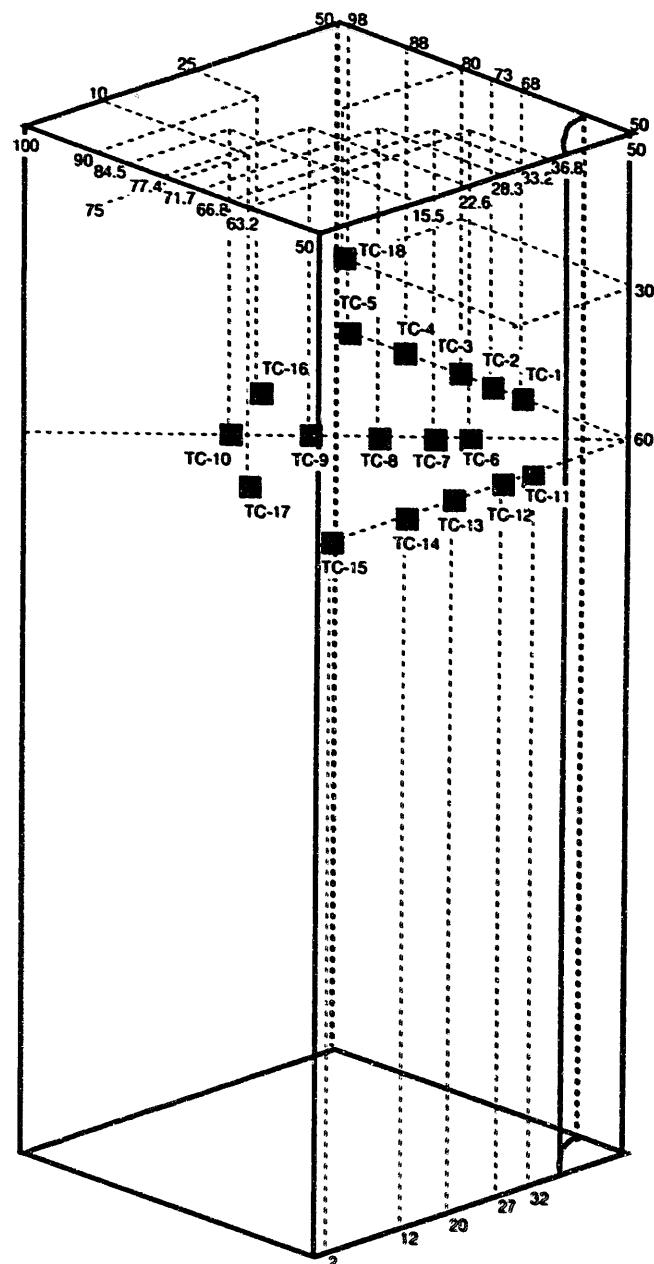
図2-15 測定装置配置図 (1/5)



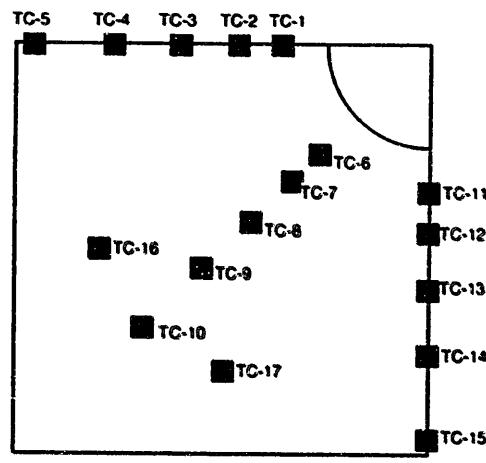
(b) 地中変位計、間隙水圧計、応力計、熱電対（平面図）  
図2-15 測定装置配置図（2／5）



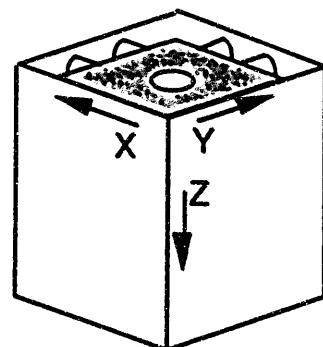
(c) フレーム変位計  
図2-15 測定装置配置図 (3/5)



$Z = 30\text{cm}$



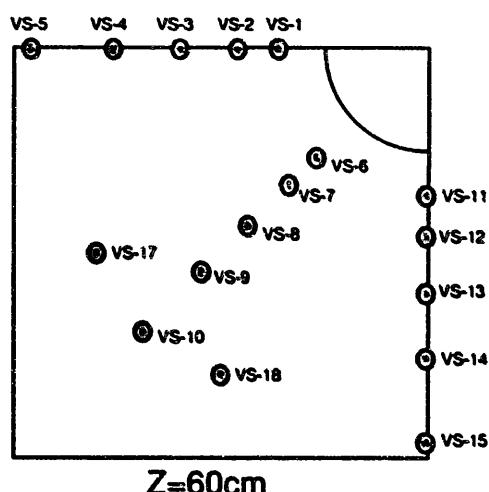
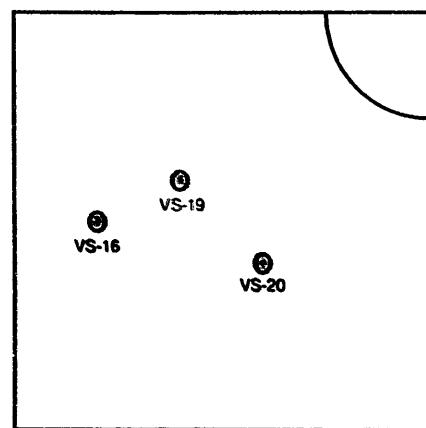
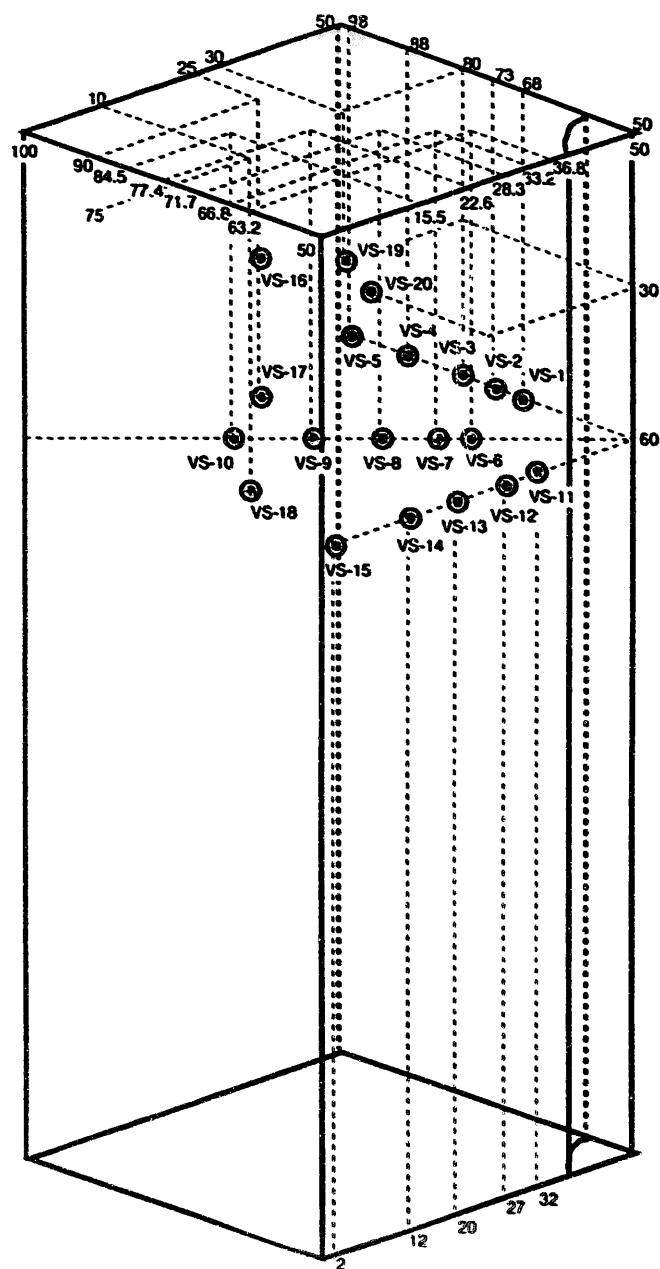
$Z = 60\text{cm}$



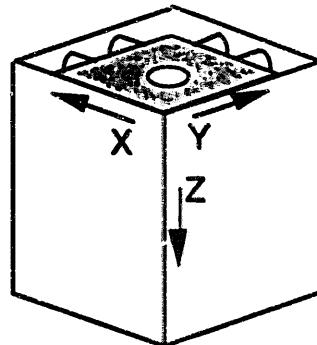
■ 热電対 TC-1~18

(d) 热電対

図2-15 測定装置配置図 (4 / 5)



◎弾性波測定センサー VS-1~20



(e) 弾性波センサー  
図2-15 測定装置配置図 (5/5)

### 3. 挖削前後における載荷試験

#### 3.1 試験岩体の基本物性

試験岩体としては国内産凝灰岩を用いた。載荷試験を実施する前に、岩石の物理特性を調査する目的で各種要素試験を実施した。実施した試験項目を以下に示す。

##### 1) 一軸圧縮試験

設定温度 : 20°C (常温)

供試体寸法 :  $\phi 50 \times 100$  (mm)

測定項目 : 一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比

##### 2) 三軸圧縮試験

設定温度 : 20°C (常温)

供試体寸法 :  $\phi 50 \times 100$  (mm)

測定項目 : 三軸圧縮強度、残留強度、体積弾性率、ヤング率、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角

##### 3) 圧裂引張試験

設定温度 : 20°C (常温)

供試体寸法 :  $\phi 50 \times 25$  (mm)

測定項目 : 圧裂引張強度

##### 4) 見掛け比重試験

供試体寸法 : 上記 1) 2) 3) の試験に用いた供試体

測定項目 : 見掛け比重、間隙比

##### 5) 熱伝導率測定

設定温度 : 20°C (常温)、90°C

供試体寸法 :  $\phi 50 \times 150$  (mm)

測定項目 : 熱伝導率

##### 6) 比熱容量測定

供試体寸法 :  $\phi 50 \times 150$  (mm) (粉状で測定)

測定項目：比熱容量

7) 热膨張率測定

供試体寸法： $\phi 50 \times 150$  (mm)

測定項目：熱膨張率

8) 透水試験

設定温度：20°C (常温)

供試体寸法： $\phi 50 \times 100$  (mm)

試験条件：軸応力、封圧および間隙水圧は任意に設定可能

測定方法：トランジェットパルス法または定水位法

測定項目：透水係数

ヤング率及びポアソン比は、破壊強度の50%応力における接線ヤング率及びポアソン比とした。内部摩擦角は、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験及び圧裂引張試験の結果をモールの応力円表示することにより求めた。各種要素試験により得られた物性値を表3-1に示す。

### 3.2 試験の概要

#### 3.2.1 機能試験

機能試験においては、健全な実岩体の内部状況を把握し、掘削前の初期状態を捉るために異なる荷重条件で載荷を実施した。

まず、試験岩体を本試験設備に設置後、水槽部分に水を張り、恒温水循環装置により、試験岩体の境界温度を25°Cに保った。次に、試験岩体に埋設した間隙水圧計を用いて試験岩体の飽和を確認し、熱電対によって岩体内部の温度分布を確認後、表3-2の載荷荷重条件（応力の境界条件）に従って試験を実施した。載荷荷重方向は図3-1、表3-2に示すようなPxとPyを組み合わせた6条件とした。

表3-1 試験より得られた各物性値

項目	記号	値	単位
一軸圧縮強度	$q_u$	7.96	MPa
ヤング率	$E$	2310	MPa
ボアソン比	$\nu$	0.2	-
体積弾性率	$K$	2.40	GPa
粘着力	$c$	2.70	MPa
内部摩擦角	$\phi$	33	-
引張強度	$q_t$	1.60	MPa
見掛け比重	$G_d$	2.041	-
初期間隙比	$e$	0.67	-
熱伝導率	$\kappa$	0.576 (20°C) 0.600 (60°C) 0.619 (90°C)	W/(m·°C)
比熱	$C$	0.217	cal/(g·°C)
熱膨張率	$\alpha$	$4.67 \times 10^{-6}$	1/°C
透水係数	$k$	$1.014 \times 10^{-7}$	cm/s

表3-2 載荷荷重条件

載荷荷重 (MPa)		Px		
		2	4	6
Py	2	Case 1	Case 2	Case 4
	4	-	Case 3	Case 5
	6	-	-	Case 6

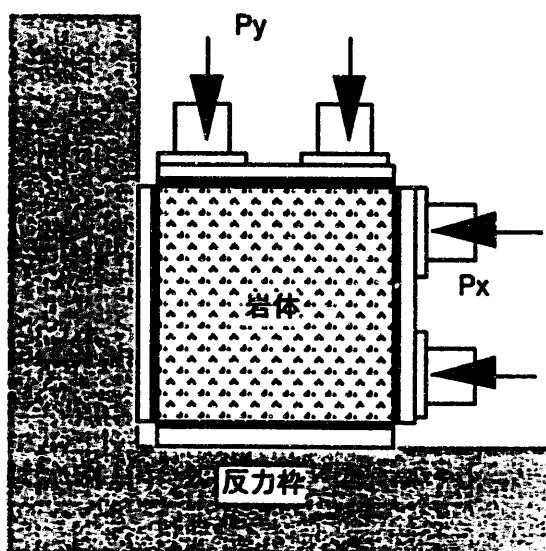


図3-1 載荷方向

### 3.2.2 模擬処分孔掘削

機能試験終了後、試験岩体中央に直径25cmの模擬処分孔を掘削した。掘削は試験岩体を試験設備に設置したまま、水槽の水を抜き、載荷荷重を $P_x = P_y = 0 \text{ MPa}$ として実施した。掘削終了後、水槽に水を入れ、恒温水循環装置によって水温を一定(25°C)に保ちながら、岩体を飽和させた。飽和させる過程においても、熱電対、間隙水圧計を用いて、温度、水圧分布を測定した。

### 3.2.3 掘削載荷試験

模擬処分孔掘削後、湛水して飽和させ温度境界を一定(25°C)に保ち、その状態下で、載荷を行ない、模擬処分孔周辺に発生しうるゆるみ域を観察し、そのゆるみ域が試験岩体の水理特性や物理特性に与える影響を観察した。測定項目は応力、変位、温度、弾性波速度、AEカウントである。

試験では塑性域の評価を簡便なものにするために塑性域が処分孔の中心軸に関して対称に発生することが望ましいので、表3-3に示すように載荷荷重は等方に設定した。

表3-3 載荷荷重条件

試験ケース	1	2	3	4	5	6	7	8
載荷荷重 (MPa)	$P_x = P_y =$							
	3	4	5	6	7	8	9	15

## 3.3 試験結果

### 3.3.1 機能試験

載荷前の初期状態における弾性波速度トモグラフィーを図3-2に示す。速度分布にはかなりばらつきがみられる。図2-15(e)のセンサーの配置と比較してみると、センサーVS-1～VS-10で囲まれた範囲は、センサーVS-6～VS-15で囲まれた範囲に比べて速度が低くなっている。特にセンサーVS-6～VS-10が埋設されたボーリング孔に沿って低速度域が観察される。この低速度域は、センサー設置後のボーリング

グ孔へのモルタル充填が均質でなく、センサーと試験岩体との間に空隙ができたためではないかと考えられる。したがって、載荷後の状態については、初期状態の弾性波速度との差をとり、変化率で評価することとした。

図3-3は載荷荷重 $P_x = P_y = 6\text{ MPa}$  (Case6) 時の弾性波速度の変化率である。荷重状態が $P_x = P_y = 6\text{ MPa}$ の状態までは、載荷荷重が等方、異方の如何にかかわらず試験岩体は弾性拳動を示したと考えられ、載荷荷重の増大に伴い、若干弾性波速度が上昇した。これは、載荷に伴って岩体の密度が高まったためと考えられる。AE測定においてもほとんどAEは発生しなかったことから載荷に伴う破壊も生じなかったと考えられる。

### 3.3.2 掘削載荷試験

掘削載荷試験のうち、弾性波速度の変化率とAE測定結果を示す。図3-4は載荷荷重 $P_x = P_y = 9\text{ MPa}$  (Case7) 時の弾性波速度の変化率で、図3-5は同じ状態でのAEの発生分布図である。図3-4より、模擬処分孔周辺で、若干弾性波速度が低下したところがみられる。また、図3-5においても、ほぼ同位置で、AEの発生が見られる。この段階では、破壊や亀裂の進展は観察されなかったが、載荷荷重を $P_x = P_y = 13\text{ MPa}$ まで上昇させた時点で、図3-4、図3-5とほぼ同位置の地点で破壊が観察された。これは、応力測定孔と模擬処分孔の間で発生した破壊で、載荷条件が等方であったにもかかわらず、応力が集中し破壊が発生したものと考えられる。AE測定、あるいは弾性波トモグラフィーそれぞれ単独のデータからは破壊の発生を評価することは難しいが、AE測定と弾性波トモグラフィーを総合的に検討すると、破壊の発生する位置を可視前の段階で、定性的に予測できたこととなる。

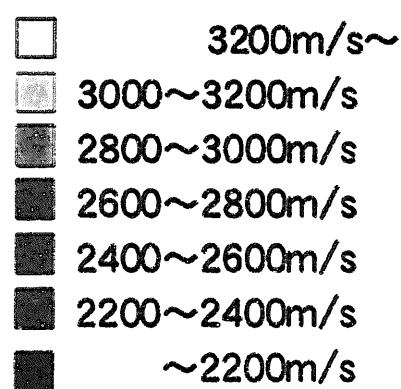
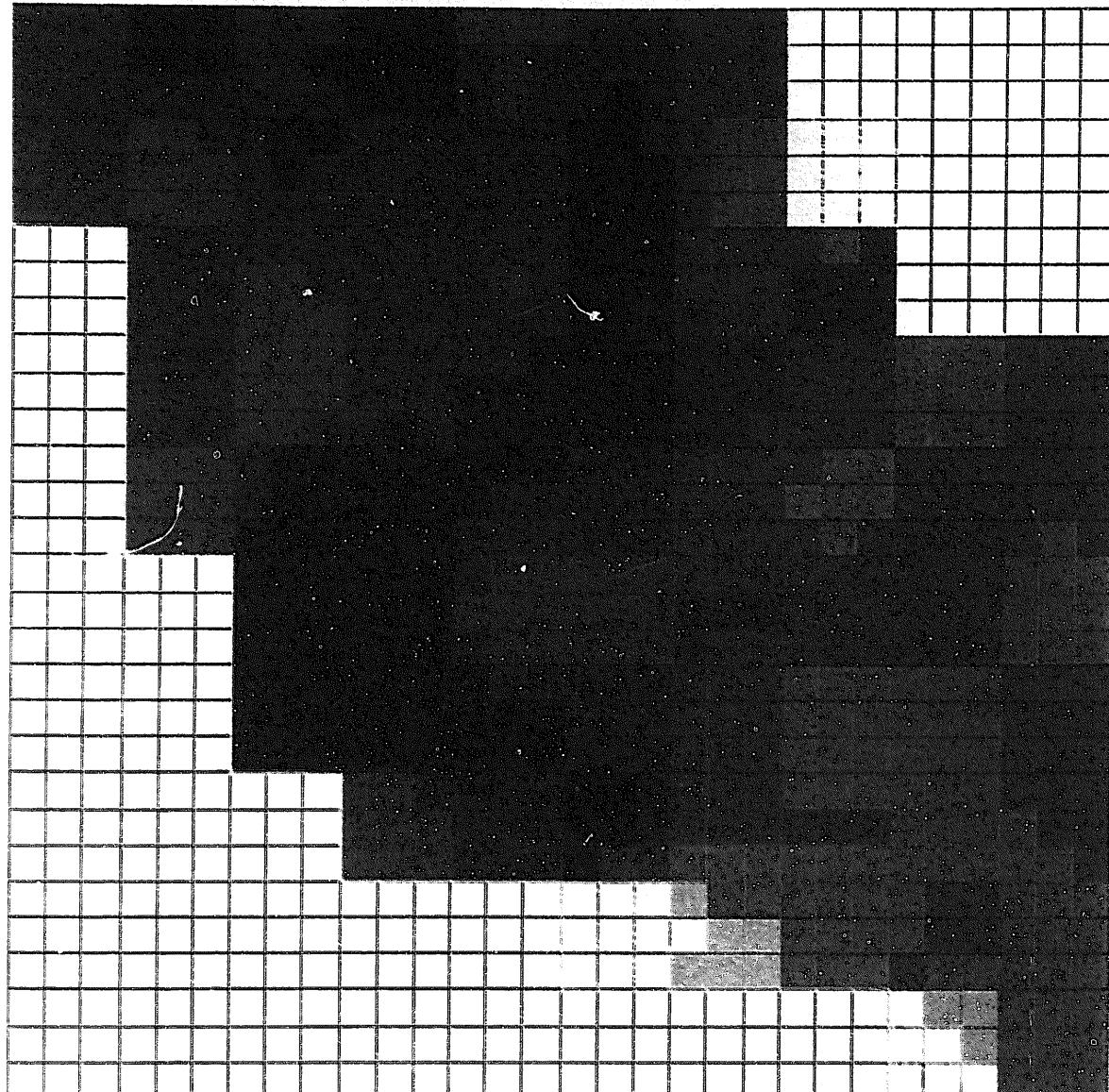


図3-2 弾性波速度トモグラフィー  
模擬処分孔掘削前  
荷重  $P_x = P_y = 0.0 \text{ MPa}$

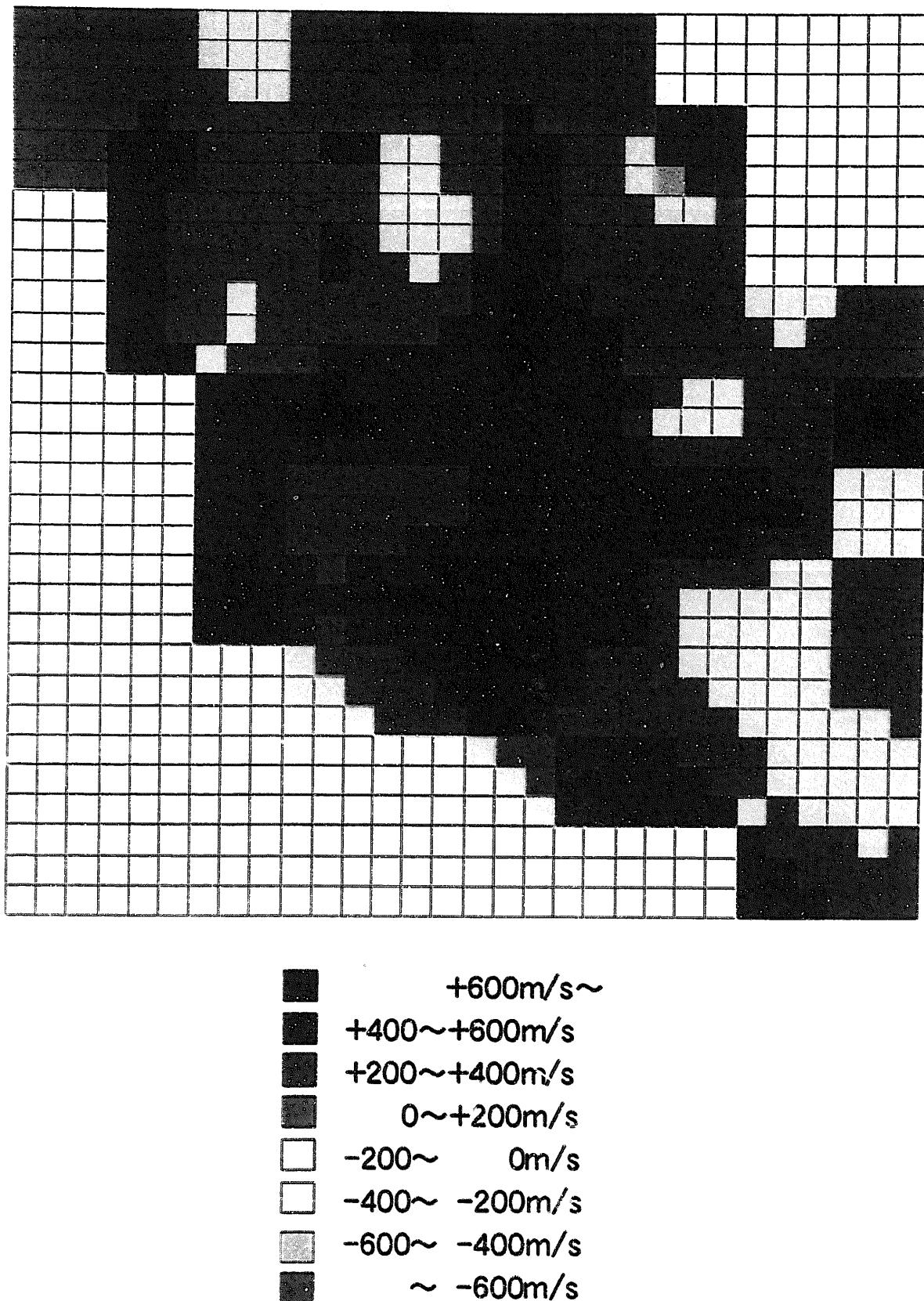


図3-3 載荷前初期状態との弾性波速度の変化率  
模擬処分孔掘削前 Case6 (機能試験)  
荷重  $P_x = P_y = 6.0 \text{ MPa}$

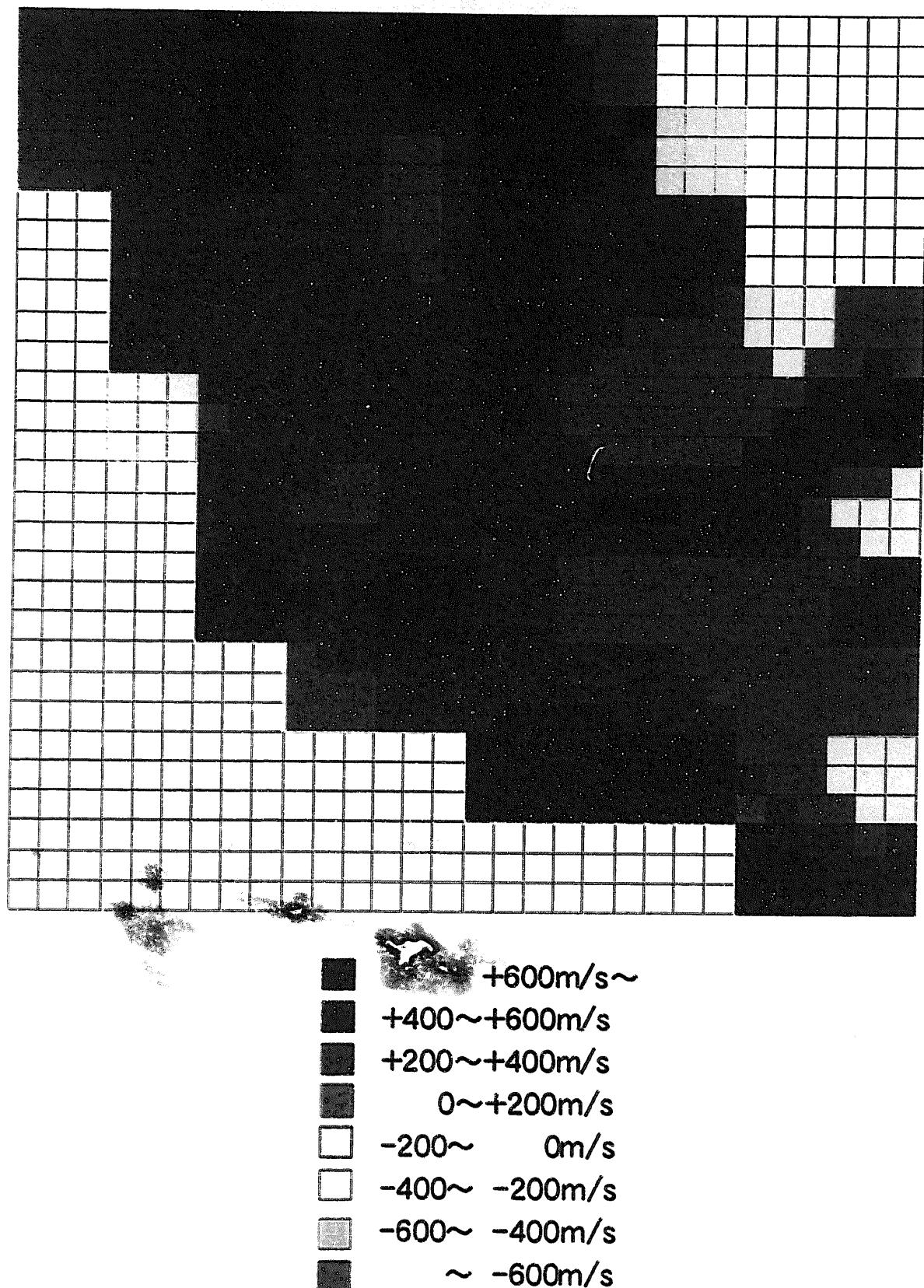
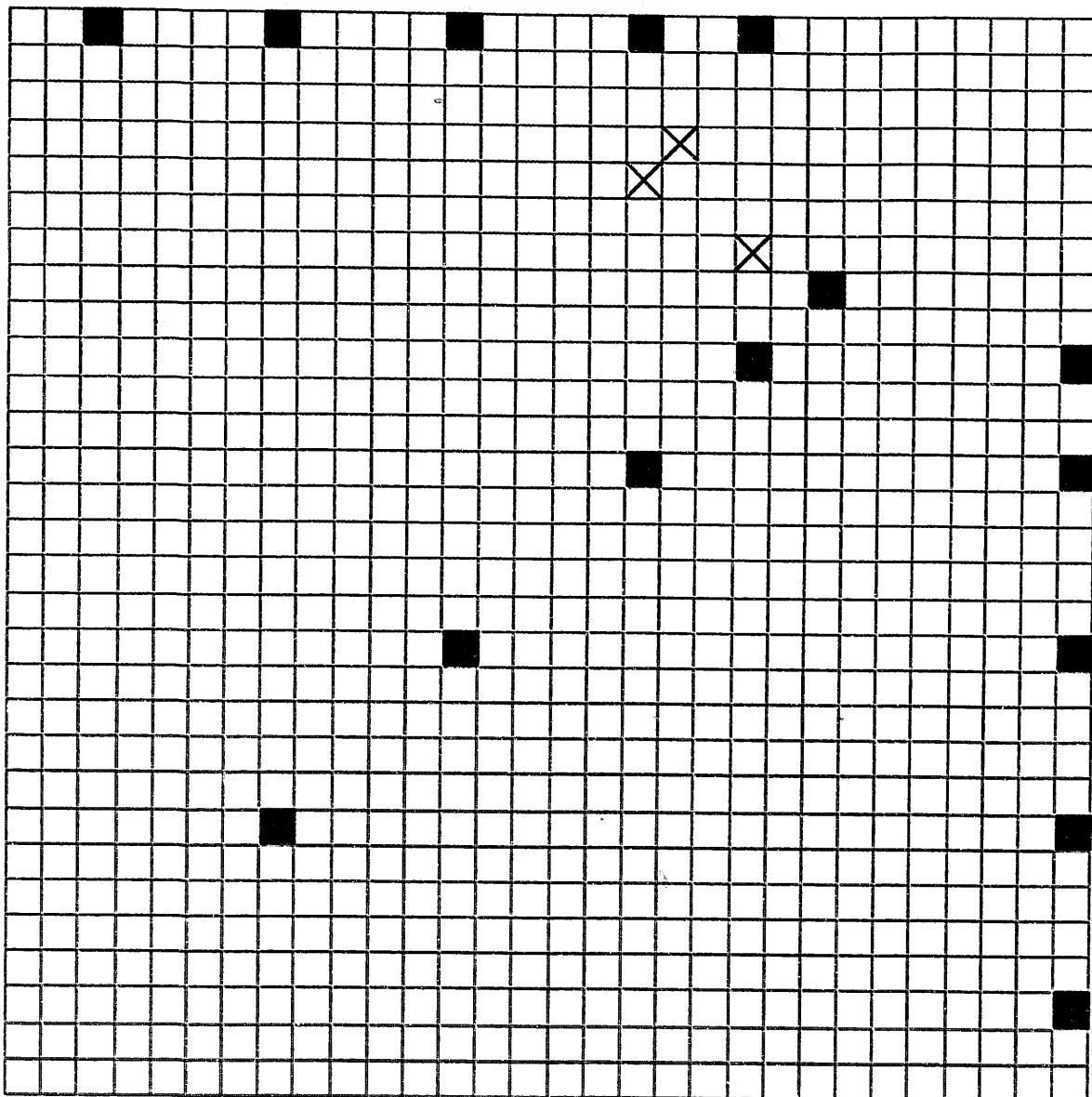


図3-4 載荷前初期状態との弾性波速度の変化率

模擬処分孔掘削後 Case7 (載荷試験)

荷重  $P_x = P_y = 9.0 \text{ MPa}$



■ AE受信センサー  
× AE発生推定位置

図3-5 AE発生分布図  
(模擬処分孔掘削後 Case7)

### 3.4 載荷試験の解析

#### 3.4.1 概要

本試験設備は処分ピット周辺の岩盤の連成挙動を検討するための試験であり、その解析は緩衝材と周辺岩盤を含んだものになる。解析の対象となるのはピット周辺部の掘削による緩みとその緩み領域の緩衝材の膨潤及び廃棄体からの発熱による変化である。したがって、挙動は掘削による除荷、膨潤・熱応力による載荷といった課程を辿る。その場合の解析としては、弾塑性的な扱いでは不十分であり、弾塑性的な扱いが必要である。温度変化場における弾塑性挙動は基礎的なデータが少ないので取り扱いは今までと同じDuhamel- Neuman形式で与えるしかできない。そこで、温度変化の影響は無視して、通常の土質材料で行われる弾塑性的な扱いをする。試験で用いる材料は凝灰岩であり、軟岩に分類される岩である。現状では三軸試験が十分に行なわれていないので、どのような挙動を示す岩であるか不明な点があるが、土質材料と同じ挙動を示すことを予想してここではキャップモデルを用いることにする。

軟岩の一般的な特徴として、次のような事項が言われている。

- 1) 低拘束圧での正のダイレイタンシー
- 2) 圧密降伏応力付近での負のダイレイタンシー
- 3) セメンテーションによる粒子構造の劣化現象
- 4) 軟化現象

これらの内、試験においてどの程度の拘束圧をかけ、どの程度のせん断力をかけるかで考慮するべき現象が選択できる。今回の試験に関しては、どのような応力レベルやひずみレベルに対するモデル化が必要であるかをまず試験の仕様と照らし合わせて考える必要がある。そして、最も注目しなければならないピット周辺の挙動を考え、その上で、用いるモデルを選択することが肝要であると思われる。しかしながら、現状ではそのような基礎的な検討もなされていない段階であるので、通常、軟岩に対しても良く用いられるカムクレイタイプのモデルを適用する。

### 3.4.2 カムクレイモデル<sup>3)</sup>

#### (1) 概要

カムクレイモデルは、イギリスのケンブリッジ大学のグループが1963年に開発した正規圧密およびやや過圧密な粘土に対する構成則である。このモデルは、せん断応力、平均主応力そして間隙比の三つの関係を用いて、粘土の挙動を表しており、特に破壊状態（Critical state）において、全エネルギーがせん断応力による仕事で消費されるという実際現象に一致した概念を用いているところに特徴がある。したがって、カムクレイモデルのことをクリティカルステイトセオリー（Critical state theory）と呼ぶことも多い。このモデルの挙動は図3-6の状態曲面と呼ばれるせん断応力 $q$ 、平均有効主応力 $p'$ 、間隙比 $e$ で作られる三次元空間で表され、その特徴を簡単にまとめると次のようになる。

- 1) 正規圧密状態およびやや過圧密状態（wetと呼ぶ）ではロスコー面（Roscoe surface）を通って破壊へと至る。
- 2) 過圧密比が大きな状態（dryと呼ぶ）からは、ボシュレフ面（Hvorslev surface）を通って破壊へと至る。
- 3) Critical State Line (CSL) はあらゆる条件下での破壊点の集合であり、ロスコー面とボシュレフ面はこの線で一致する。
- 4) 上記の様な面（state boundary surfaceと呼ばれることもある）で囲まれた中は弾性挙動を示す。

$e = 0$ の状態でこの曲面を $p' - q$ 面に投影すると図3-7の様になる。CSLの投影は同図では傾き $M_c$ の直線になっている。今、ある初期状態が既知であるとすると、それに対する降伏曲面が自動的に定義され、初期状態からせん断が始まるとその線上を移動する。図中、Originalとあるのは最初に提案されたカムクレイモデルで $q = 0$ で降伏曲面が尖っており、小さなせん断力で大きなせん断変形が起こる。そこで、そ

れを改良し $q=0$ で降伏曲面が $p'$  軸に垂直になるようにしたのがModifiedと書かれた修正カムクレイモデルである。実験値との比較によると、せん断速度が大きいときには修正カムクレイが良く一致し、小さいときには基のモデルが良く一致するようである。

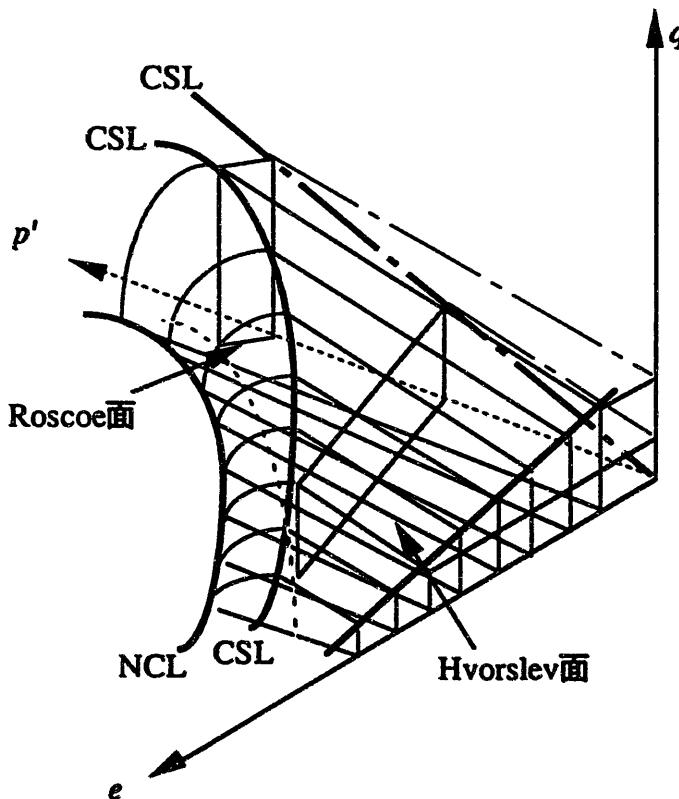


図3-6 カムクレイの状態曲面

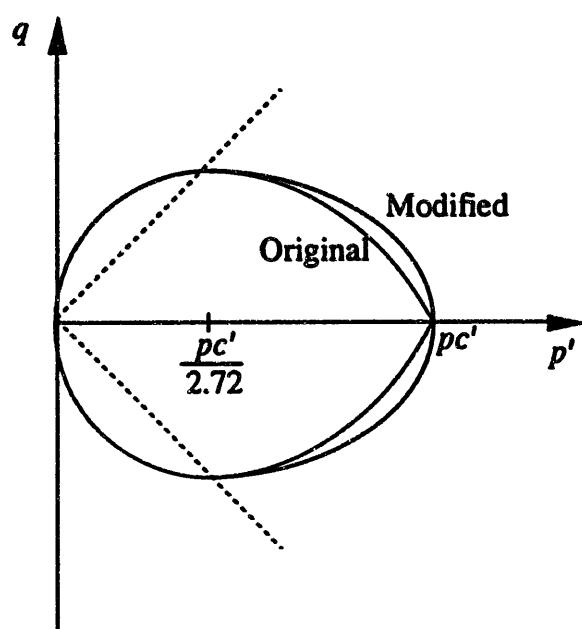


図3-7 カムクレイモデルの降伏曲面

## (2) 構成則

まず、 $p' - e$  の関係について述べる。図3-6でNormal Consolidation Line (NCL) とあるのが通常の圧密試験から得られる挙動で、一般に  $e - \log p'$  で整理すると直線になることが知られている。これを  $e - \ln p'$  で整理しても同様の直線が得られ、その傾きを  $-\lambda$  とする。また、圧密試験終了時の除荷で得られる曲線の  $e - \ln p'$  関係の傾きを  $-\kappa$  とする。圧縮時の圧密曲線は次式で与えられる。

$$V = V_\lambda - \lambda \ln(p') \quad (3-1)$$

ここで、 $V_\lambda$  は  $\ln p' = 0$  (すなわち  $p' = 1$ ) の時の体積である。また、上式では間隙比を体積  $V$  で置き換えてある。同様に、除荷曲線は次式で与えられる。

$$V = V_\kappa - \kappa \ln(p') \quad (3-2)$$

$V_\kappa$  はどの時点で除荷が開始されるかに依存している。

次に、せん断について考える。CSL は次式で表される。

$$q = M_c p \quad (3-3)$$

$$V = \Gamma - \lambda \ln(p') \quad (3-4)$$

ここで  $\Gamma$  は  $p' - V$  座標に CSL を投影したときの  $\ln p' = 0$  との交点であり、その傾きは圧密曲線式 (3-1) と平行であると仮定されている。(3-3) 式は先述の様に  $p' - q$  座標への CSL の投影図である。

次にエネルギー状態について考える。外力によって消費されるエネルギーの増分は次式のように表される。

$$p' d\epsilon_v^p + q d\epsilon^p \quad (3-5)$$

カムクレイモデルの特徴はこの外部消散エネルギー増分が内部摩擦によって全部消散すると仮定するところにある。したがって、以下のようになる。

$$p' d\epsilon_v^p + q d\epsilon^p = M_c p' |d\epsilon^p| \quad (3-6)$$

ここで  $M_c p'$  は (3-3) 式よりせん断力に等しい。上式において CSL 上では左辺第二項と右辺が等しくなるので塑性体積ひずみ増分がゼロとなり破壊状態を表現することになる。さて、ここで直交則を考える。直交則とは降伏曲面に垂直に塑性ひずみ増分  $d\epsilon^p$  が生じるというものである。これより次式が得られる。

$$dp' d\epsilon_v^p + dq d\epsilon^p = 0 \quad (3-7)$$

(3-6) 、 (3-7) 式より  $d\epsilon_v^p$  と  $d\epsilon^p$  を消去し、微分方程式を解き、 (3-1) 、 (3-2) 式を用いて積分定数を決定すると次式の降伏関数（状態曲面式）が得られる。

$$|q| = \frac{M_c p'}{\lambda - \kappa} (\Gamma + \lambda - \kappa - V - \lambda \ln(p')) \quad (3-8)$$

これで降伏関数が決まったので、これに塑性体積ひずみがひずみ硬化を規定すると仮定して硬化パラメータを求め、構成則を導くことができる。

### 3.4.3 載荷試験の解析

#### (1) 解析条件と物性値

本解析は本試験設備における掘削載荷試験の結果との比較に主眼をおく。解析に

は2次元熱-水-応力連成解析コードTHAMES<sup>4)</sup>に上述のカムクレイモデルを導入したもの用いた。

今回解析に用いた物性値は試験岩石を用いた各種要素試験結果から算出した。カムクレイモデルに必要な物性値は $\lambda$ 、 $\kappa$ 、 $M$ 、 $\Gamma-1$ である。

$\lambda$ 、 $\kappa$ は圧密終了時の排水量と拘束圧 $P$ の傾きを用いて求めた。その際、試験岩石の軸差応力～ひずみ関係で封圧10～20MPaの間で軟化特性から硬化特性に変わることから、この間に圧密降伏応力があるものと推定し、 $\lambda$ と $\kappa$ の推定に当たっては拘束圧10MPa以下のデータで $\kappa$ をそれ以上のデータで $\lambda$ を求めた。結果を図3-8に示す。また、 $\kappa$ の値の妥当性を検証するために、次の方法でも $\kappa$ を求めた。一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験の軸変位制御、周変位制御試験結果から求められた10MPa以下の異なる拘束圧下でのヤング率とポアソン比を用いて、以下の関係から $\kappa$ を求めた。

$$P = (\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (3-9)$$

$$K = E/3/(1-2\nu) \quad (3-10)$$

$$K = (1+e)P/\kappa \quad (3-11)$$

ここで、間隙比 $e$ は初期の状態から変化しないものと仮定した。以上の結果をまとめると表3-4の様になる。排水量から求めた $\lambda$ と $\kappa$ の値は通常の粘性土の値と比べてもさほど大きな差はないが、弾性定数から推定した $\kappa$ はかなり大きな値となっている。これは三軸試験や一軸試験から求めたヤング率とポアソン比は供試体の状況を考慮せずに単に軸ひずみと軸応力から求めたために、そこには塑性変形の分も含まれているためと思われる。そこで今回は、圧密試験結果から得られた $\lambda$ 、 $\kappa$ の値を用いることにした。圧密降伏応力 $p_c$ については降伏が開始する圧力の近傍で10MPaと仮定した。 $M$ 、 $\Gamma-1$ については $M = 6 \sin\phi / (3 - \sin\phi)$ 、 $\Gamma-1 = e + \lambda \ln p_c$ に $\phi = 33^\circ$ 、 $e = 0.67$ 、 $\lambda = 1.37$ 、 $p_c = 1.02 \times 10^4$  MPaを代入してそれぞれ求めた。これらの結果と解析に用いた物性値を表3-5に示す。

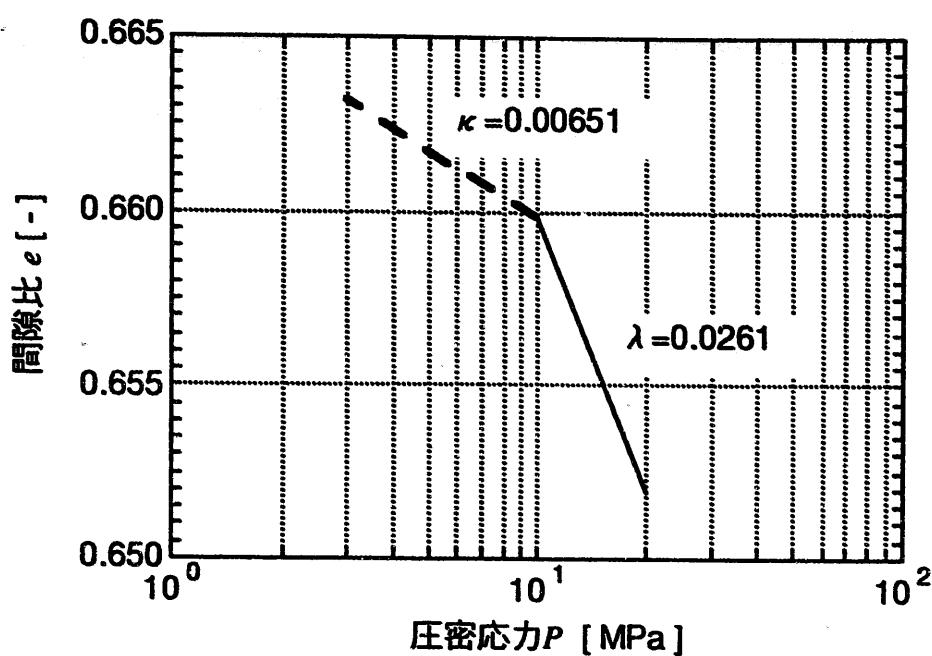


図3-8 圧密圧力と排水量の関係

表3-4 試験結果から算出した $\lambda$ 、 $\kappa$ 

算出の元にした試験方法	$\lambda$	$\kappa$
圧密試験	0.0261	0.00651
軸変位制御圧縮試験	-	0.73
周変位制御圧縮試験	-	1.20

表3-5 解析に用いた物性値

項 目	値
ポアソン比 $\nu$	0.2
ヤング率 $E$	2310 MPa
間隙比 $e$	0.67
内部摩擦角 $\phi$	33°
$M$	1.33
$\Gamma-1$	16.47
$\lambda$	1.37
$\kappa$	0.33
$p_c$	$1.02 \times 10^4$ MPa

## (2) 解析結果

解析は2次元平面ひずみモデルで試験体の水平断面の4分の1モデルを用いた。まず、掘削前に行なった機能試験で測定された変位、応力測定からパラメータのキャリブレーションを行なった。掘削前のメッシュ図を図3-9に示す。境界条件は図に示す通りで、温度固定境界では固定温度を20℃に、水位固定境界では水位を75cmとした。また、載荷荷重は2MPaの等方荷重を設定した。

機能試験の解析結果を図3-10に示す。同図はヤング率を表3-5に示した値を用いたもの、5倍にしたもの、10倍にしたものとの解析結果と実測の岩盤の変位量と比較したものである。ヤング率を5~10倍に変化させると実測結果と解析結果が良く合うことがわかる。

また、図3-11に実測値と始めに設定したヤング率で求めた計算値の応力分布を示す。実測値の応力は試験岩体中にφ36mmの孔を穿孔し、その孔径変化量を応力に換算したものである。同図によると、実測値は計算値よりもかなり小さくなっている。応力の換算式は等方に応力が作用している無限領域内に穴がある場合の理論解であり、孔径の変化を妨げる力は考慮されていない。一方、計算では計測孔は考慮せずに岩体のひずみから算出している。したがって、対象としている現象が大きく異なっており、簡単に比較することは難しい。

図3-12~14に掘削後の載荷試験の解析結果を示す。それぞれの図中の2は塑性となつことを示す指標である。図3-12は載荷荷重が7.0MPaと2.0MPaの場合である。図から分かるとおり、模擬処分孔周辺と7.0MPaを載荷した軸方向に塑性域が発生している。図3-13は載荷荷重が7.0MPaと7.0MPaの場合である。この結果では、模擬処分孔周辺部のみに塑性域が発生している。図3-14は載荷荷重が15.0MPaと2.0MPaの場合である。この結果では、ほぼ全体に塑性域が発生している。

以上から、2方向で異なる大きさの荷重をかけると、載荷荷重の大きい軸方向に塑性域が発生し、2方向で同じ大きさの荷重をかけると、模擬処分孔周辺の中心線を中心に軸対称に、かつ模擬処分孔周辺のみ塑性域が発生することが分かった。試

験では塑性域の評価を簡便なものにするために塑性域が処分孔の中心線に関して軸対称に発生することが望ましい。さらに、2方向で異なる大きさの荷重をかけた場合と、同じ大きさの荷重をかけた場合を比べて最大荷重が同じ場合、前者の方が発生する塑性域は広い。したがって図3-14の結果とあわせて考えると、試験設備の最大載荷能力でも試験岩体の破壊は生じないと考えられる。しかし、実際の試験では最大載荷荷重以下で破壊が発生している。これは、試験岩体中に存在する数々のボーリング孔による影響であると考えられる。

これらの解析結果は十分な基本物性に基づいたものではなく、塑性域の発生領域の分布や破壊の発生の有無などはあくまで定性的な推察に過ぎない。今後、カムクレイモデルを用いて塑性域の発生や破壊の発生を推察するには対象試験岩体の圧密特性を十分に把握する必要性がある。

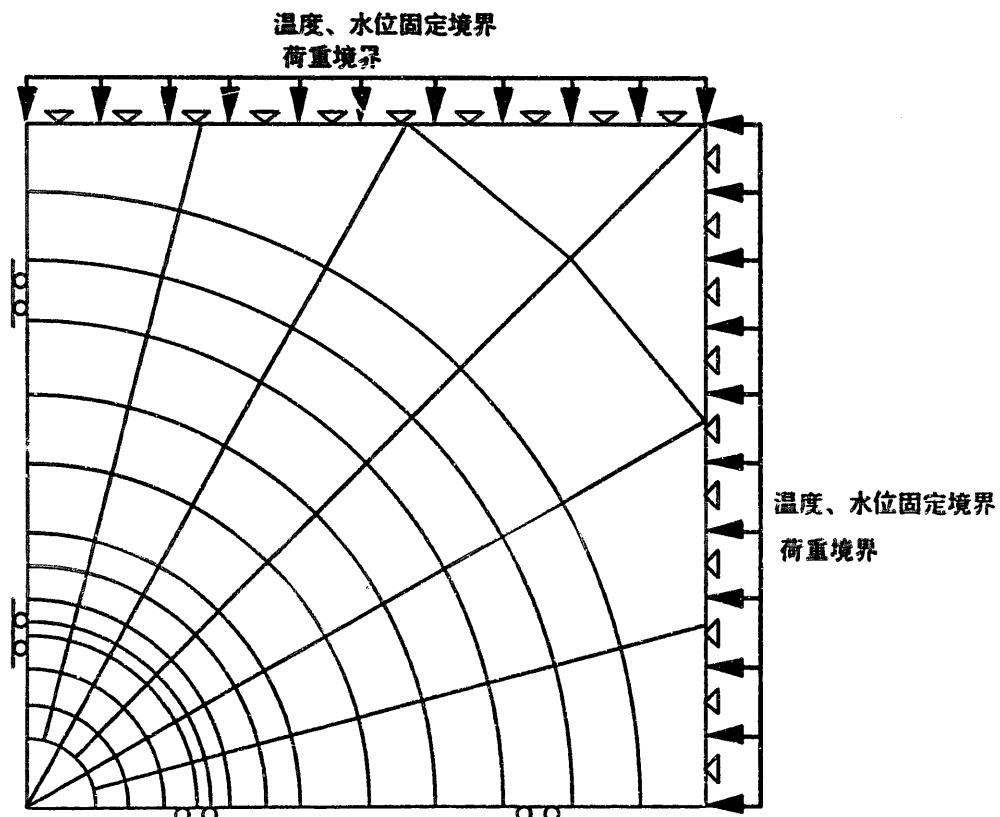


図3-9 掘削前のメッシュ図と境界条件

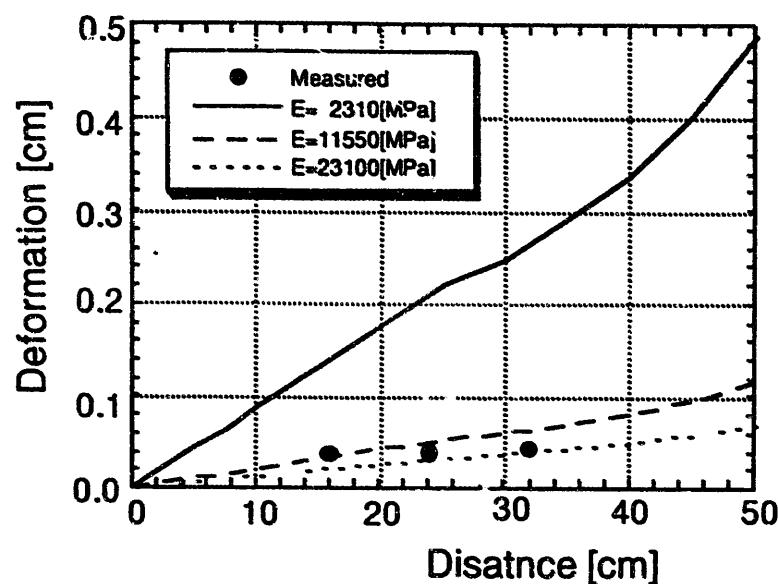


図3-10 変位の比較図

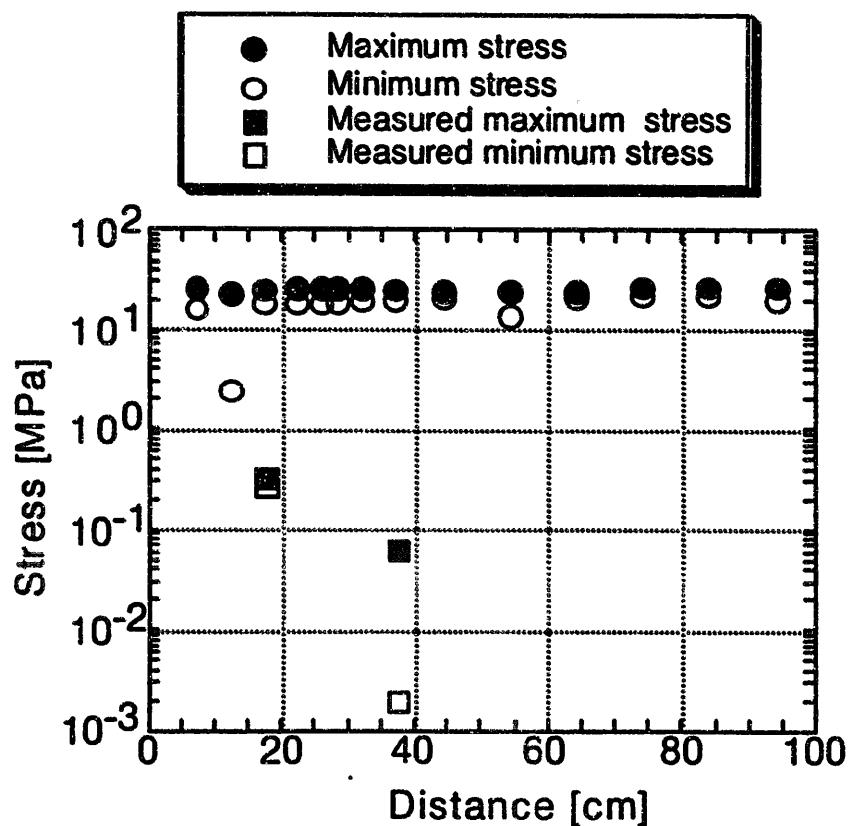


図3-11 応力分布の比較図

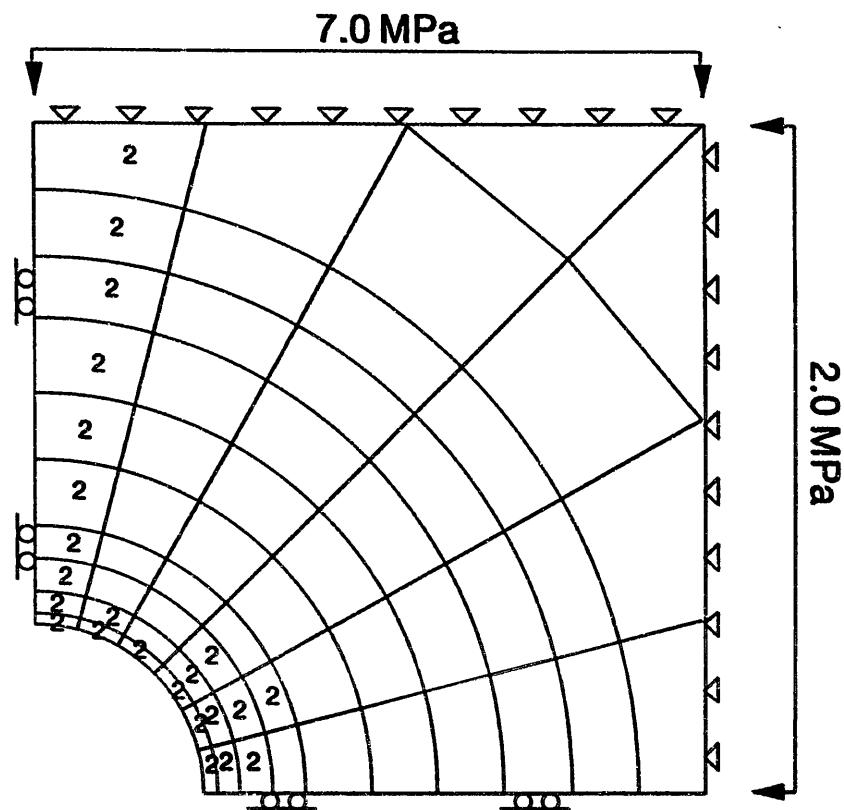


図3-12 載荷荷重が7.0MPaと2.0MPaの場合

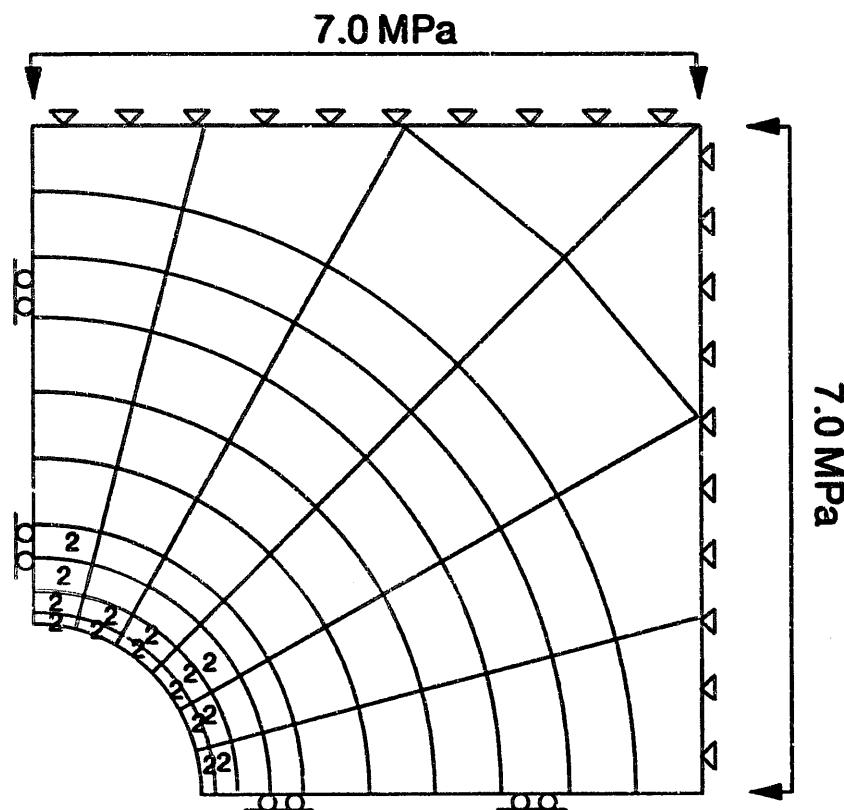


図3-13 載荷荷重が7.0MPaと7.0MPaの場合

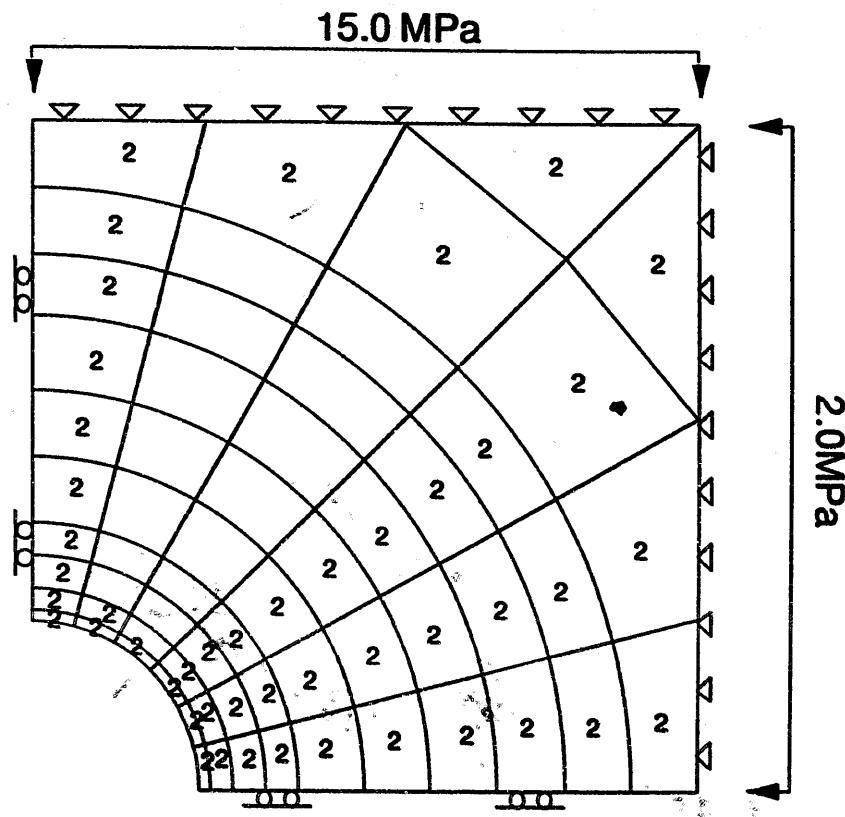


図3-14 載荷荷重が15.0MPaと2.0MPaの場合

### 3.5 まとめ

機能試験においては、本試験設備の性能を確認し、試験岩体の初期状態が確認できた。掘削載荷試験において、模擬処分孔周辺に均一なゆるみ域は発生せず、また観測できなかった。解析においては、孔径変位を応力に変換する際に弾性係数が問題となり、また、岩の圧密特性が把握されていなかったため、ゆるみ域の評価が十分に行なえなかった。これらの解析結果は十分な基本物性に基づいたものではなく、塑性域の発生領域の分布や破壊の発生の有無などはあくまで定性的な推察に過ぎない。今後、カムクレイモデルを用いて塑性域の発生や破壊の発生を推察するには対象試験岩体の基本特性を十分に把握する必要性がある。以上を鑑みて、今後は岩の弾性係数の再確認、圧密特性データの取得などを実施し充分把握したのち、試験及び解析評価を実施していく必要がある。

## 4. 浸潤・加熱試験

### 4.1 ヒーター、ベントナイトブロックの設置

#### 4.1.1 ヒーターの概要

熱-水-応力連成試験を実施するために緩衝材ブロックの中心にヒーターを設置した。ヒーターの概要を図4-1に示す。ヒーターの発熱部本体の上下には着脱可能な緩衝材ブロック抑え板を取り付けている。ヒーターは100℃まで昇温可能で、その温度を長期にわたって維持できるものとした。

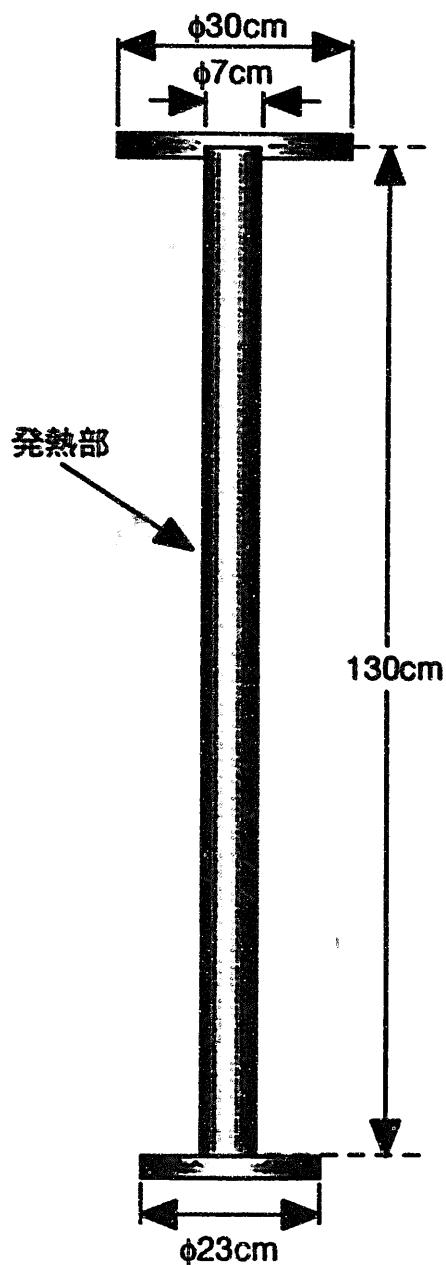


図4-1 ヒーターの外観図

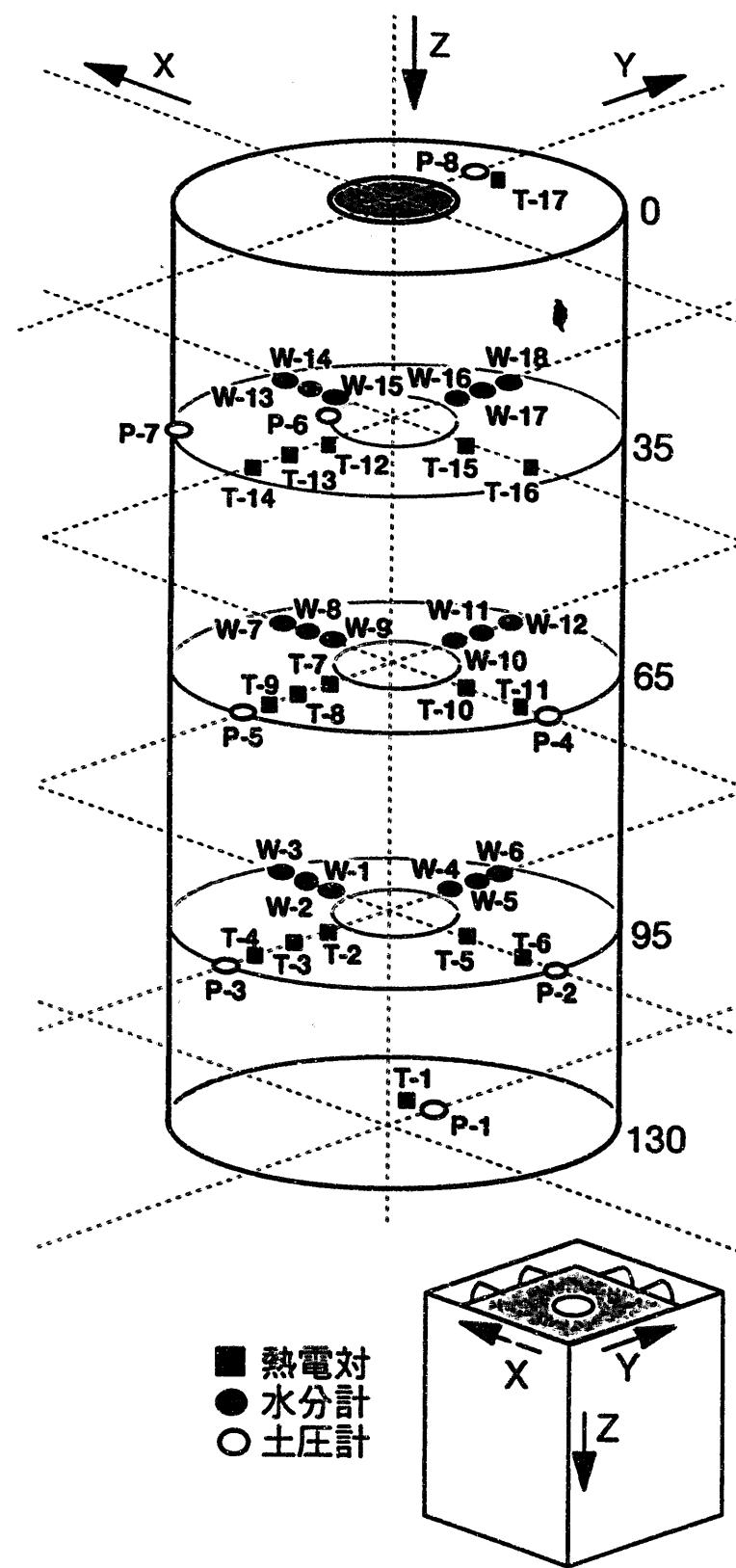


図4-2 緩衝材内のセンサーの配置

#### 4.1.2 ベントナイトブロックへのセンサーの設置

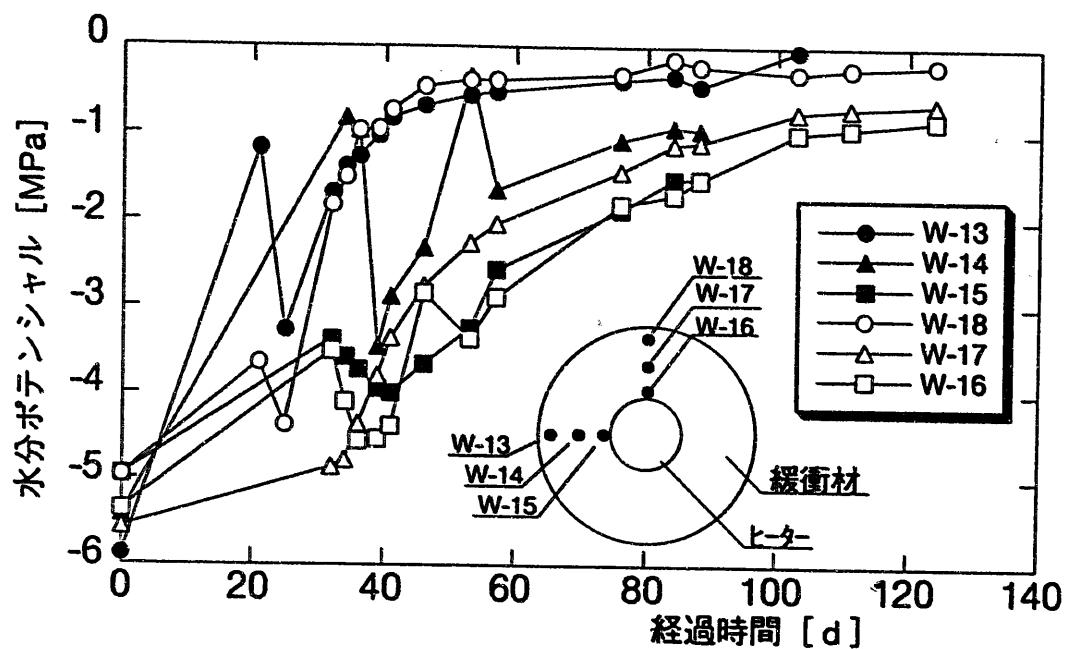
ベントナイトブロックはクニミネ工業製のクニゲルV1を使用し作製した。初期含水比は13%とし、乾燥密度 $1.8\text{g/cm}^3$ で厚さ10cm×内径7cm×外径24cmのドーナツ状に圧縮成型した。ベントナイトブロック内には表4-1に示す各センサーを設置した。設置位置は図4-2に示す通りである。熱電対、圧力計のデータはスキャナーおよびデータロガーを介在させワークステーションに取り込み、サイクロメータは手動で計測した。

表4-1 ベントナイトブロック内センサーの仕様

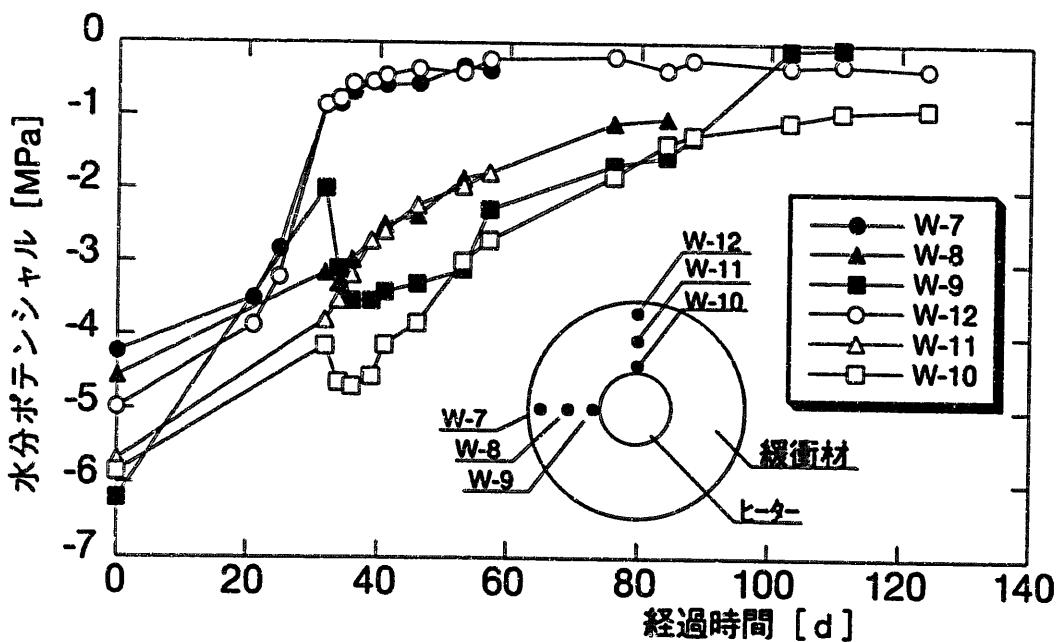
機器番号	機器名称	メーカー	数	型番	仕様
W	水分計	米国WESCOR社	18	PCT-55	原位置用熱電対サイクロメータ
T	熱電対	助川電気工業	14	T35 (T,CC),S (ヒーター表面以外)	シース型熱電対
			3	T35 (K,CA),S (ヒーター表面)	
P	圧力計	ST研究社	8	PS25-50	土圧計 定格容量 5MPa 使用温度範囲 -15~90°C

#### 4.2 浸潤試験

緩衝材設置後、浸潤試験を行ない緩衝材内の水分分布及び膨潤圧の発生状況を観測した。図4-3にサイクロメータにより観測された緩衝材内の水分ポテンシャルの経時変化を示す。同図より緩衝材の外側から内側に向かって順次浸潤している様子が分かる。約半年後に緩衝材全体がほぼ飽和となった。図4-4に膨潤圧の経時変化を示す。同図より、膨潤圧の最大値は約4 MPaとなった。この値は、室内試験における乾燥密度 $1.8\text{g/cm}^3$ の供試体の膨潤圧の値とほぼ同じである<sup>5)</sup>。また、図4-3、4-4より緩衝材全体が飽和すると新たな膨潤圧の発生がなくなっていることが分かる。すなわち、膨潤圧はベントナイト内に水が浸潤する過程のみで発生すると考えられる。



(a)  $Z=35\text{cm}$   
図4-3 緩衝材内のポテンシャルの経時変化 (1/3)



(b)  $Z=65\text{cm}$   
図4-3 緩衝材内のポテンシャルの経時変化 (2/3)

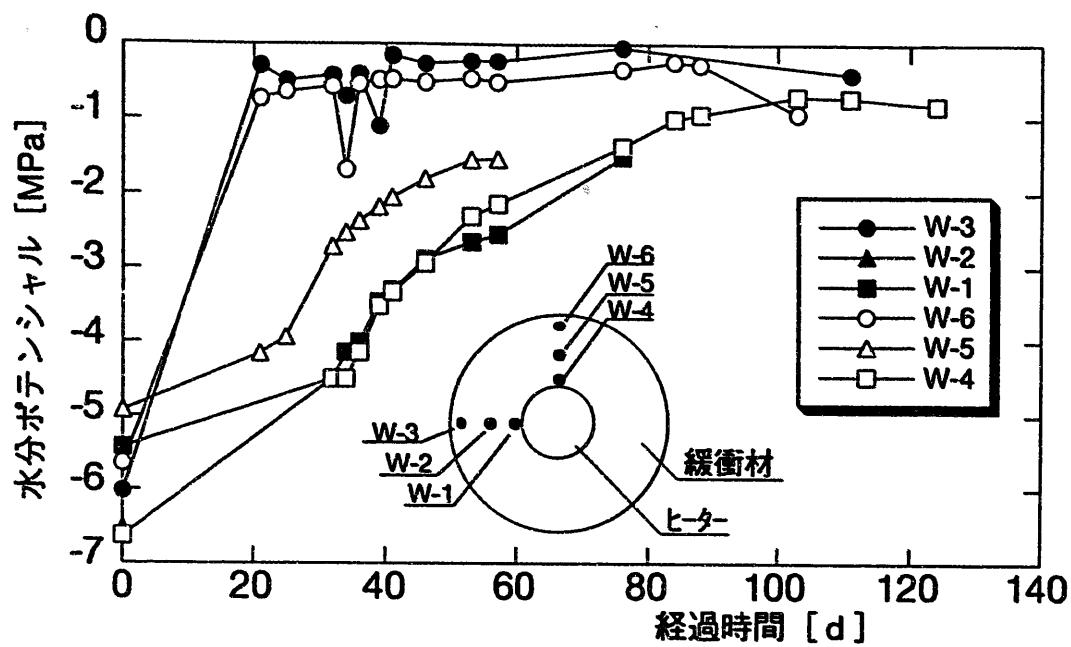
(c)  $Z=95\text{cm}$ 

図4-3 緩衝材内のポテンシャルの経時変化 (3 / 3)

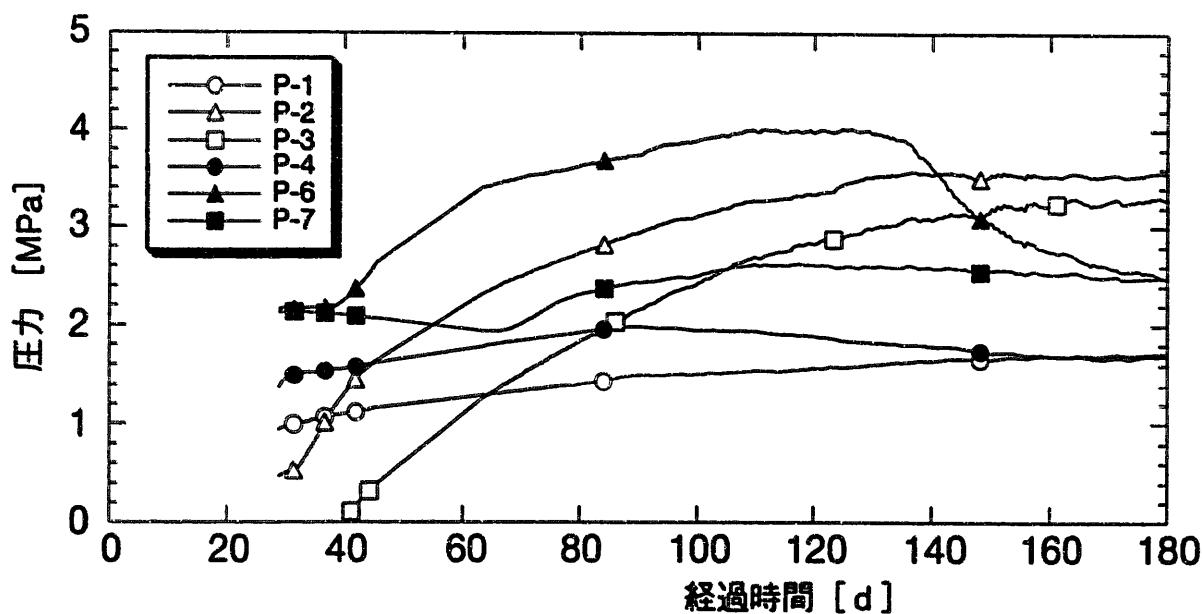


図4-4 緩衝材内の圧力の経時変化

### 4.3 加熱予備試験

当初の計画では、浸潤試験終了後、一定荷重の載荷のもと加熱試験を実施する予定であった。しかし、加熱試験前にヒーターの機能確認のために予備加熱を行なったところ試験岩体が破断してしまった。岩体の破断部を図4-5に示す。この破断部は、載荷試験の際に生じた模擬処分孔の亀裂部から岩体内の計測器設置用のボーリング孔を伝わって発生している。載荷試験の際の数度にわたる繰り返し載荷により、かなり岩体が疲労していたものと考えられる。したがって、本岩体を用いての本試験は中止することとし、載荷を行なわない状態で予備的に加熱試験を行ない岩体内およびベントナイト内に生じる現象を観察することとした。加熱は温度一定で行ない、加熱時間は約2日とした。

図4-6に岩体内の温度の経時変化を示す。(a)はTC-1～TC-5、(b)はTC-6～TC-10、(c)はTC-11～TC-15の熱電対のデータである。(b)、(c)についてはほぼ同傾向を示しており、両端のセンサーの温度差は約15℃、温度勾配は0.5℃/cmである。(a)は他に比べて温度が低くなっている。これは、熱電対TC-1～TC-5の設置してあるボーリング孔に沿って破断が生じたためであり、破断部に水が浸入したために熱が伝わりにくくなった結果であると考えられる。図4-7にはベントナイト内の温度の経時変化を示す。岩体に比べ、温度上昇勾配は急であり一定になるまでの時間も早い。また、加熱終了後の温度低下も急である。これは本試験に用いた岩体の熱伝導率がベントナイトの熱伝導率に比べ小さいためであると考えられる。鉛直断面での温度分布を図4-8に示す。温度はZ=35cmのレベル付近で最も高くなっている、下に向かって低くなっている。これは、ベントナイト上端部は抑え板を介して空気であり、下端部は抑え板を介して岩体であるという違いによるものであると推察される。図4-9には岩体内の応力計のデータを示す。加熱による影響はほとんどなく、唯一SM-3が変化している。本センサーは破断部に位置するセンサーであり、模擬処分孔に最も近く、かつ、一番高い位置にある。したがって、この部分は加熱により破断部が開口したものと思われる。図4-10には岩体壁面の変位計のデータを示す。載荷をしていな

いにも関わらず、加熱により岩体の変位は観測されなかった。図4-11には、ベントナイト内の応力計のデータを示す。岩体の破断により、緩衝材の応力は浸潤試験時に観測された値より低下している。そして、加熱を行なうことにより応力は上昇し、加熱を終了すると応力は低下した。

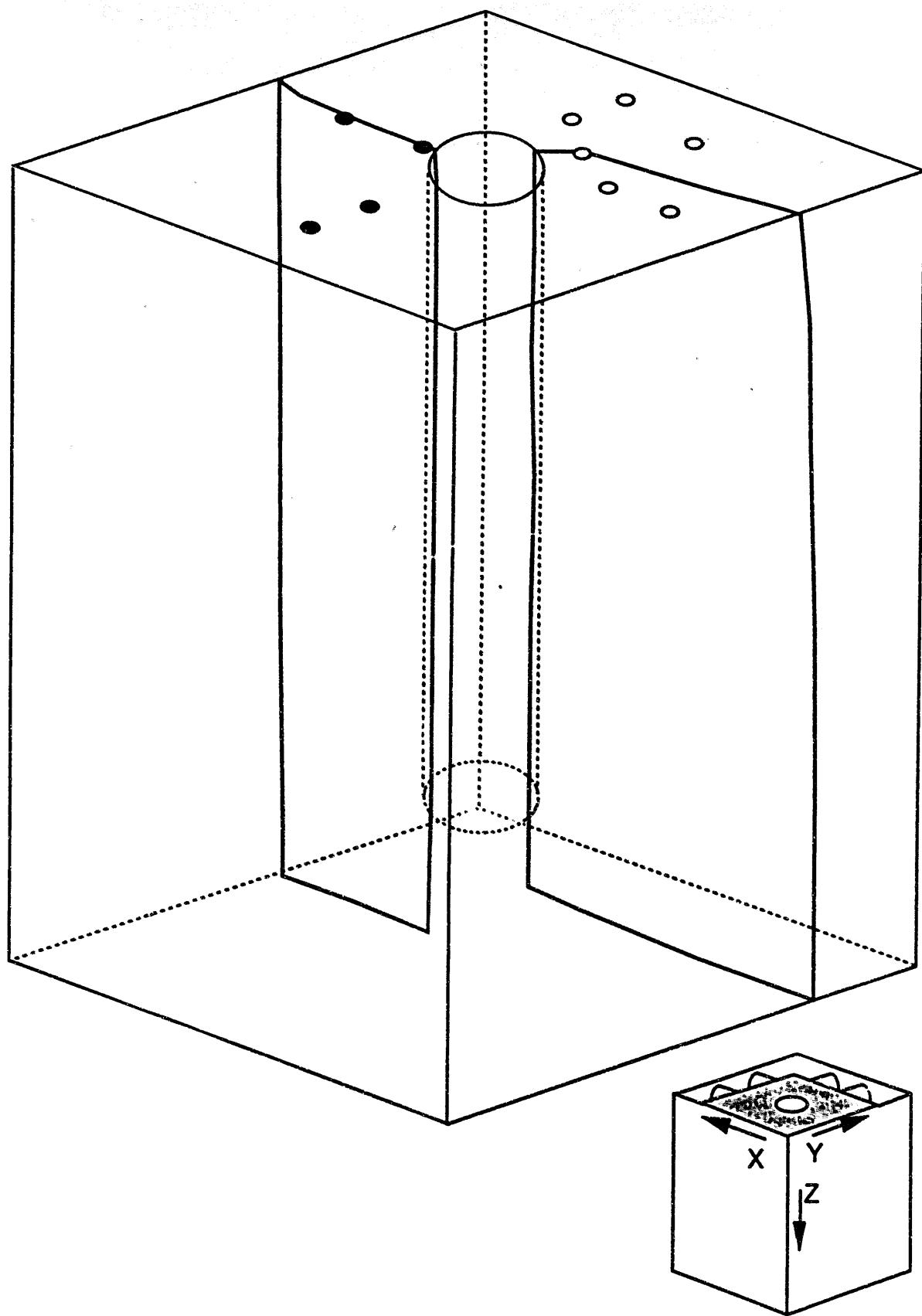
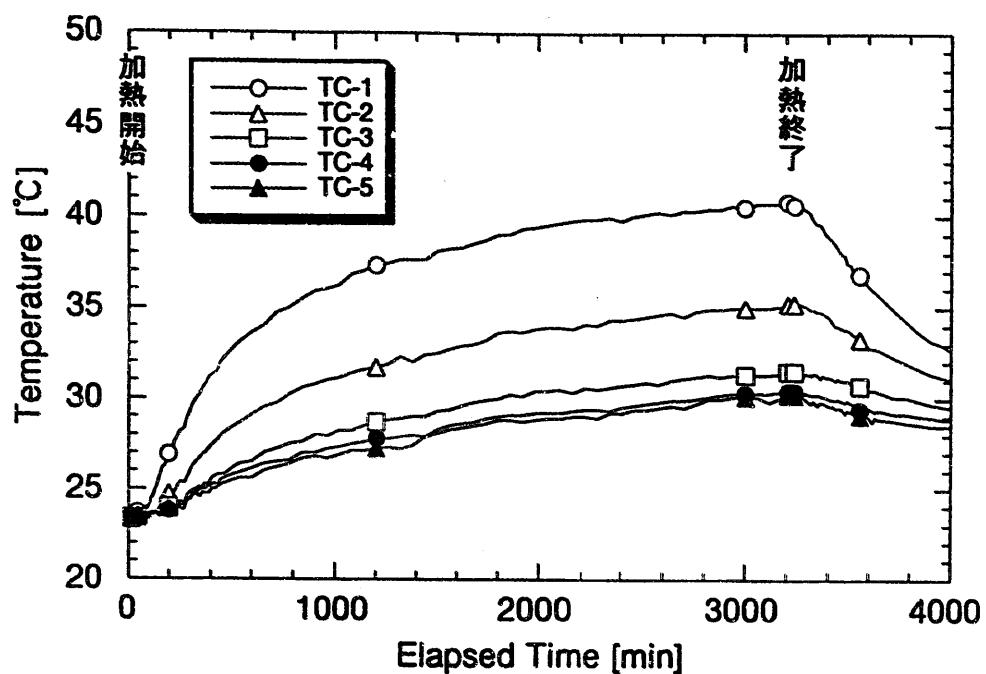
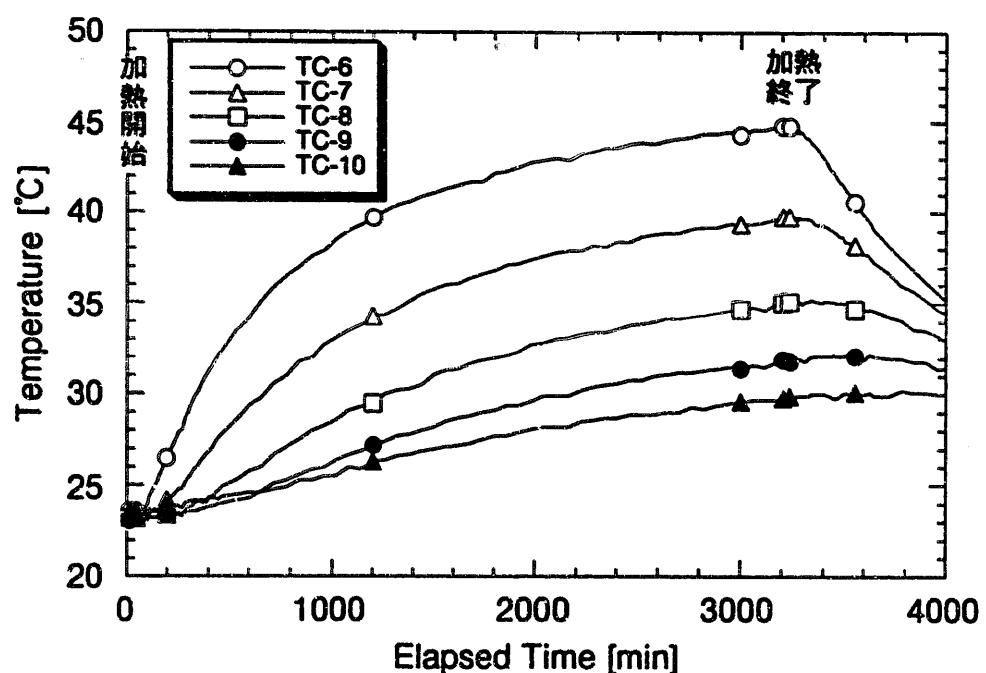


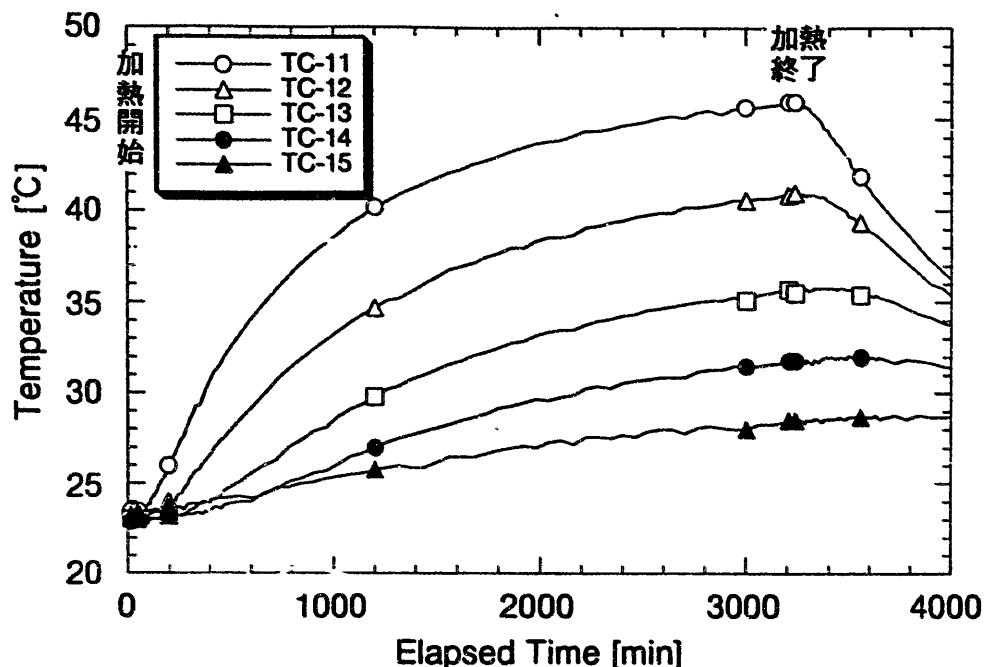
図4-5 破断部



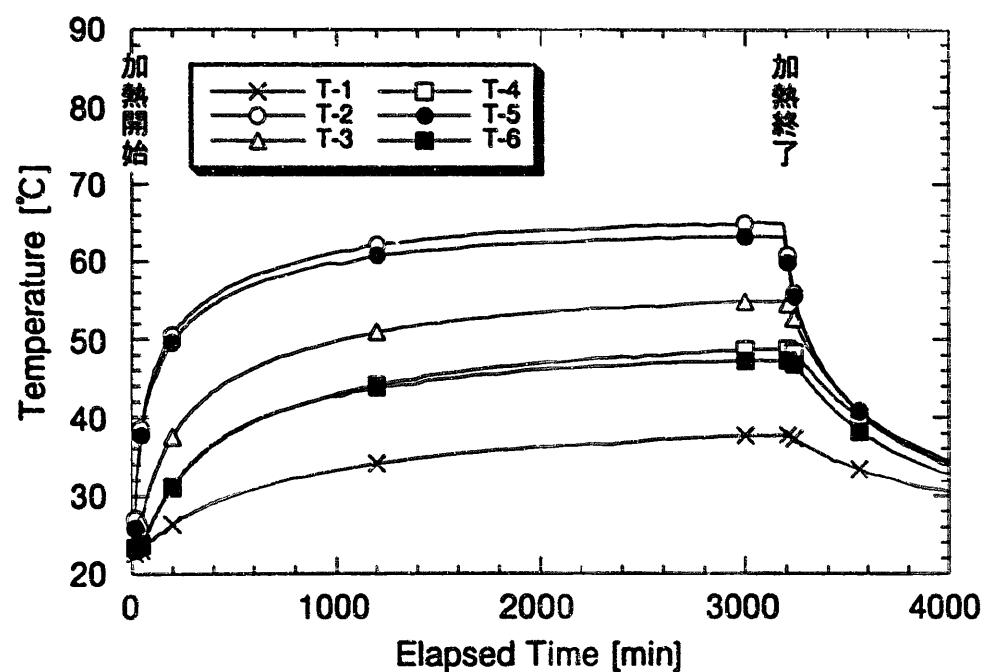
(a) TC-1~TC-5  
図4-6 岩体内の温度の経時変化 (1/3)



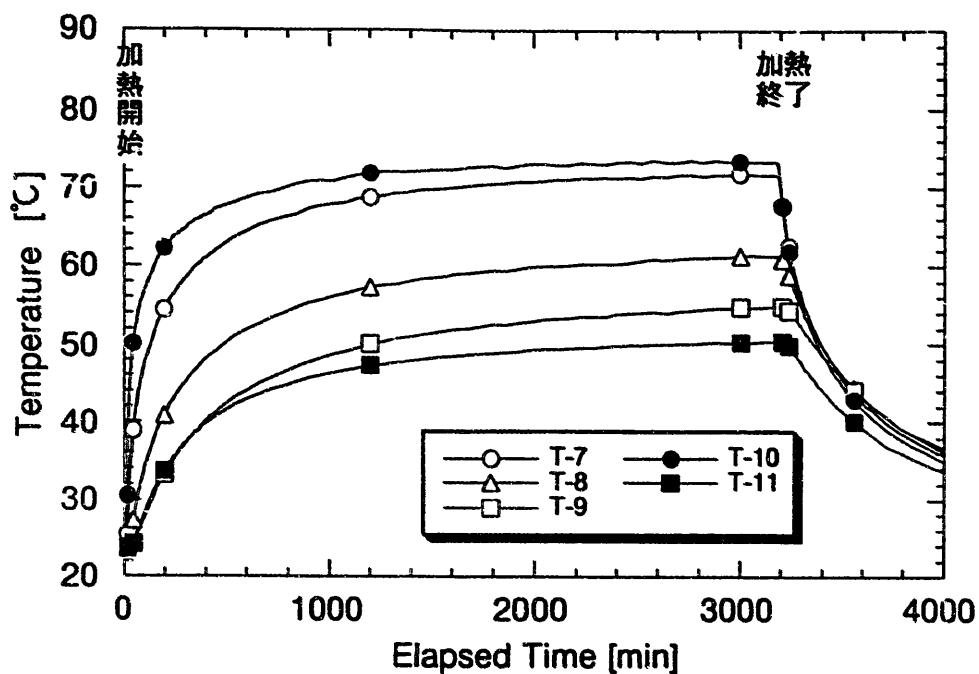
(b) TC-6~TC-10  
図4-6 岩体内の温度の経時変化 (2/3)



(c) TC-11～TC-15  
図4-6 岩体内的温度の経時変化 (3／3)

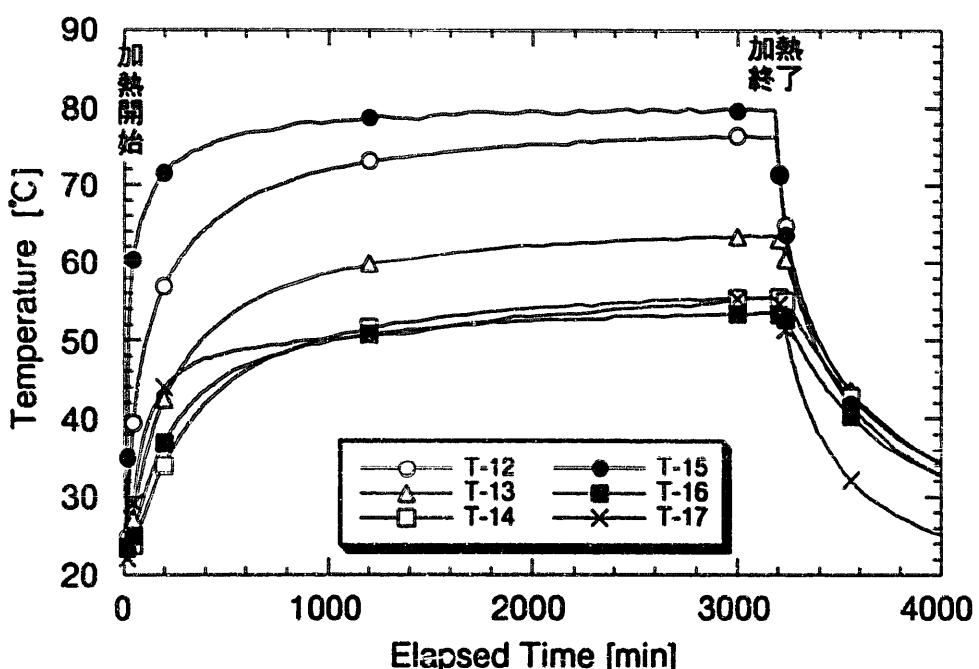


(a) T-1～T-6 (Z=95cm)  
図4-7 ベントナイト内の温度の経時変化 (1／3)



(b) T-7～T-11 (Z=65cm)

図4-7 ベントナイト内の温度の経時変化 (2/3)



(c) TC-12～TC-17 (Z=35cm)

図4-7 ベントナイト内の温度の経時変化 (3/3)

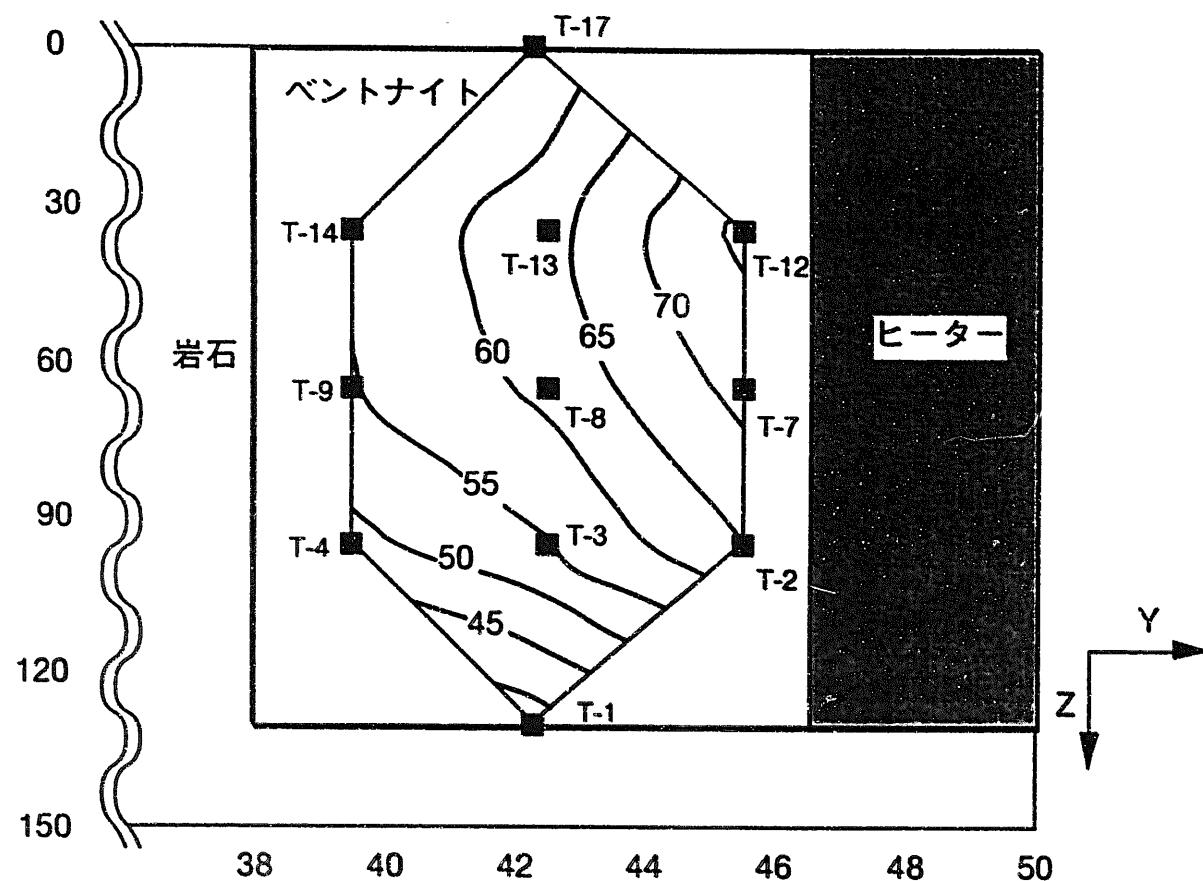
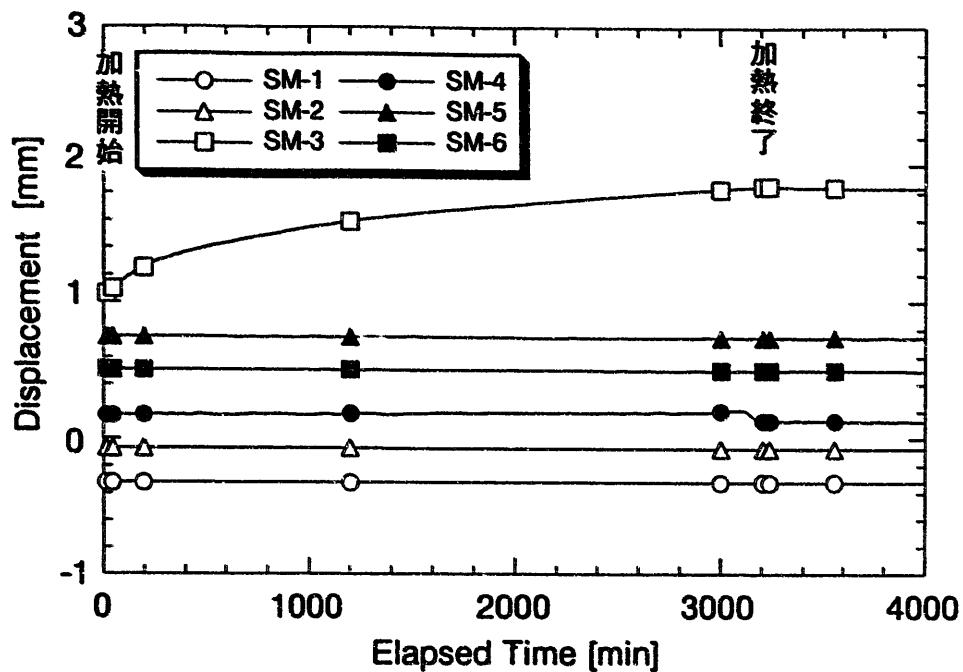
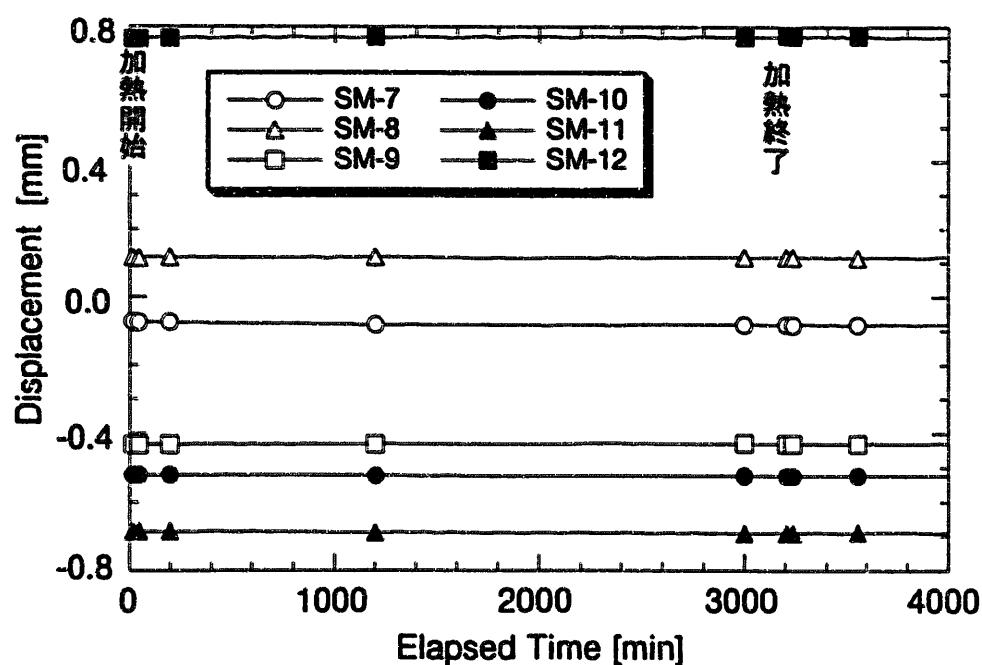


図4-8 ベントナイト内の鉛直断面の温度コンター



(a) SM-1~SM-6



(b) SM-7~SM-12

図4-9 岩体内の応力計（孔径変位計）の経時変化

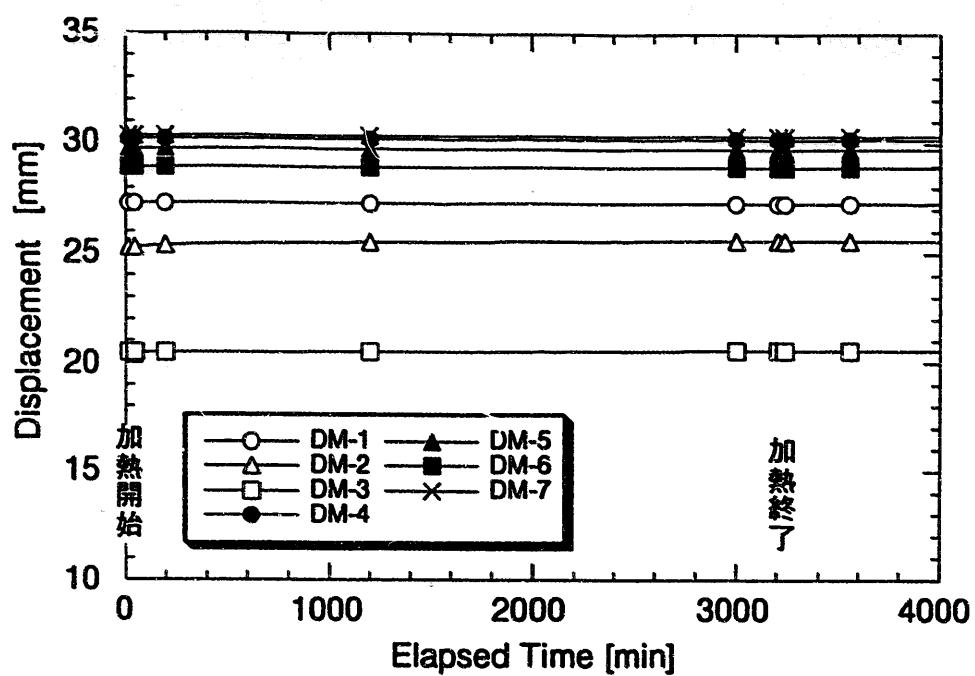


図4-10 岩体壁面変位計の経時変化

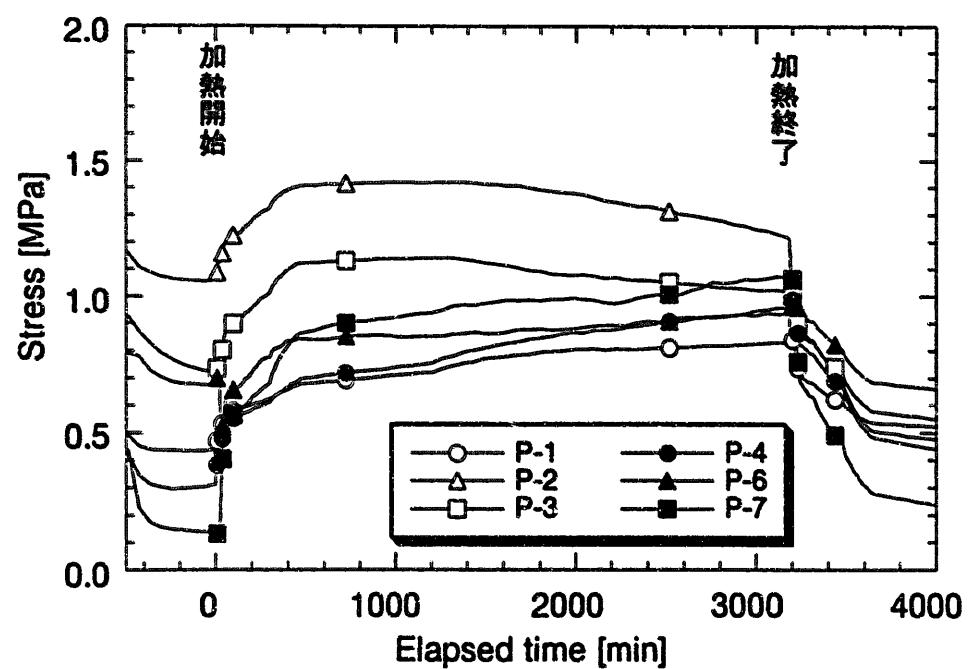


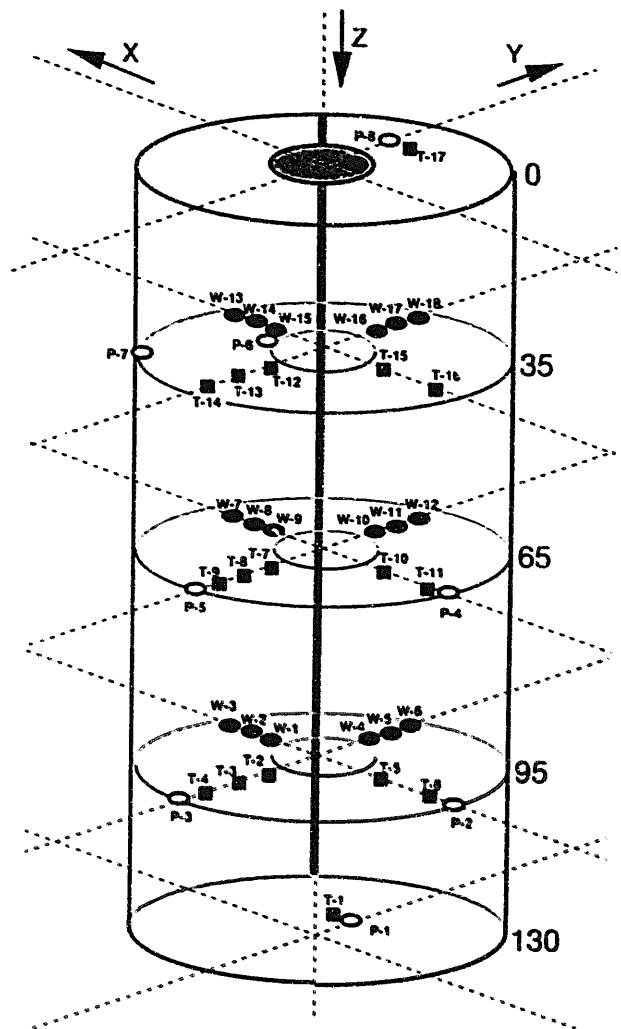
図4-11 ベントナイト内の応力計の経時変化

#### 4.4 ベントナイトのサンプリング

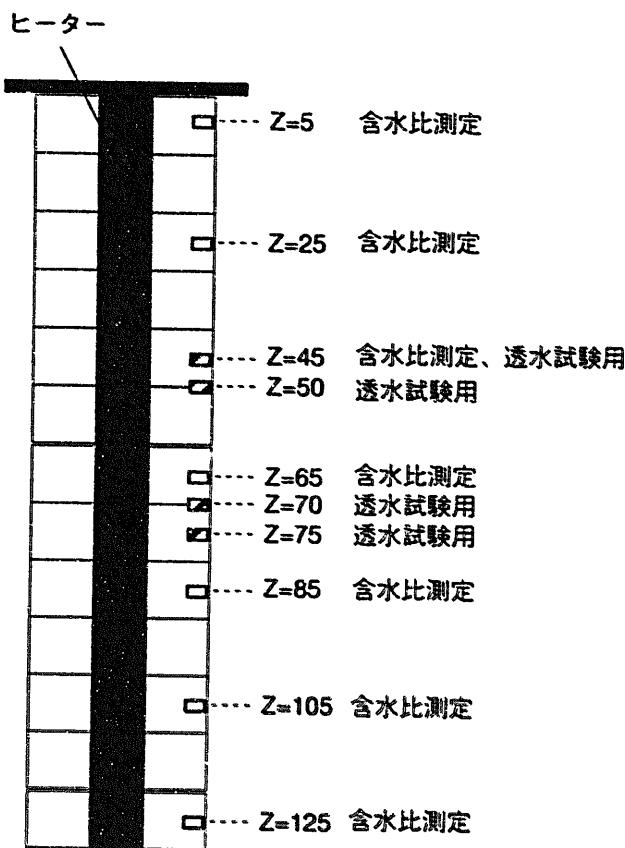
加熱予備試験終了後、ベントナイトを取りだし含水比および透水係数の測定を行なった。サンプリング位置を図4-12に示す。

透水係数は、ベントナイトブロックの継目部およびブロック内部について測定を行なった。図4-13に測定結果を示す。Sample1 ( $z=45\text{cm}$ )、2 ( $z=50\text{cm}$ )、3 ( $z=75\text{cm}$ )、4 ( $z=70\text{cm}$ ) の結果が今回サンプリングした試料の測定結果であり、それ以外は別途実施し得られたクニゲルV1の乾燥密度と透水係数の関係である。今回透水試験用にサンプリングした試料は乾燥密度の測定も行なっており、得られた乾燥密度は $1.44\sim 1.47\text{g/cm}^3$ であった。初期のベントナイトブロックの乾燥密度は $1.80\text{g/cm}^3$ であり、かなり低下している。これは、試験時に載荷をしていなかったために、岩体の破断部およびヒーター上部の抑え板と岩体の間からかなりの量のベントナイトが流出したためである。透水係数と乾燥密度の関係をみてみると、今回サンプリングした試料の透水係数は室内試験と同等な値を示している。また、継目部とブロック内部とでは明瞭な差はみられない。したがって、ベントナイトブロックを用いた場合でも、飽和した場合は継目部が高透水性部になることはないと考えられる。

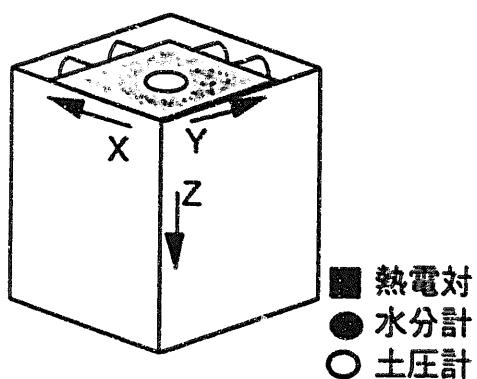
図4-14には、含水比の測定結果を示す。同図には、各乾燥密度における飽和含水比も示している。同図より、全ての試料が飽和状態であることが分かる。測定された含水比が乾燥密度 $1.4\sim 1.45\text{g/cm}^3$ の飽和含水比に比べかなり高い部分はベントナイトの流出が他に比べ多いためであると考えられる。



(a) サンプリング位置



(b) サンプリング位置 (鉛直断面)



(c) サンプリング位置 (水平断面)

図4-12 ベントナイト内のサンプリング位置図

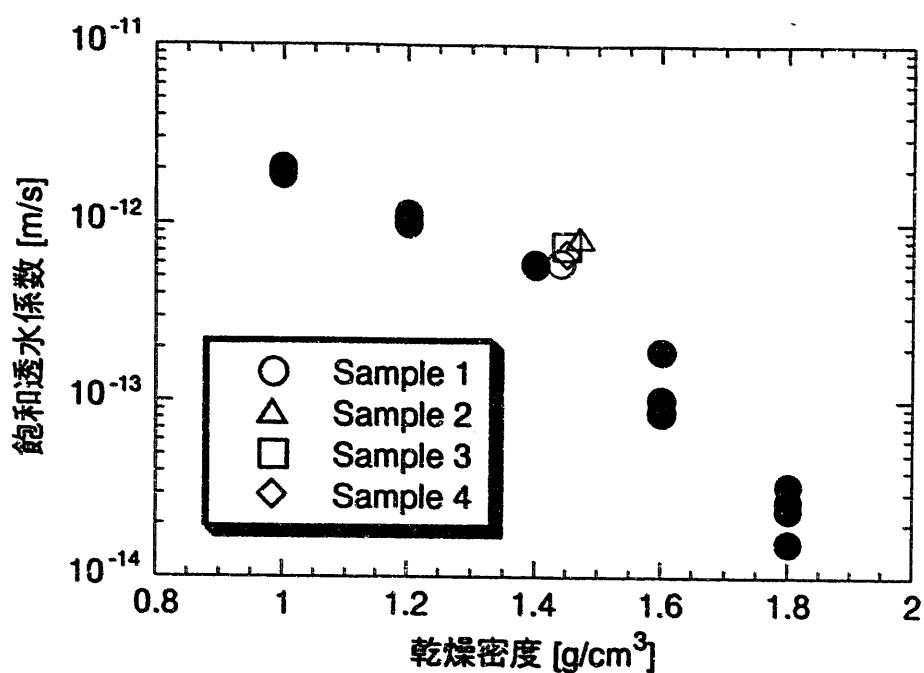


図4-13 サンプリング試料の透水係数測定結果

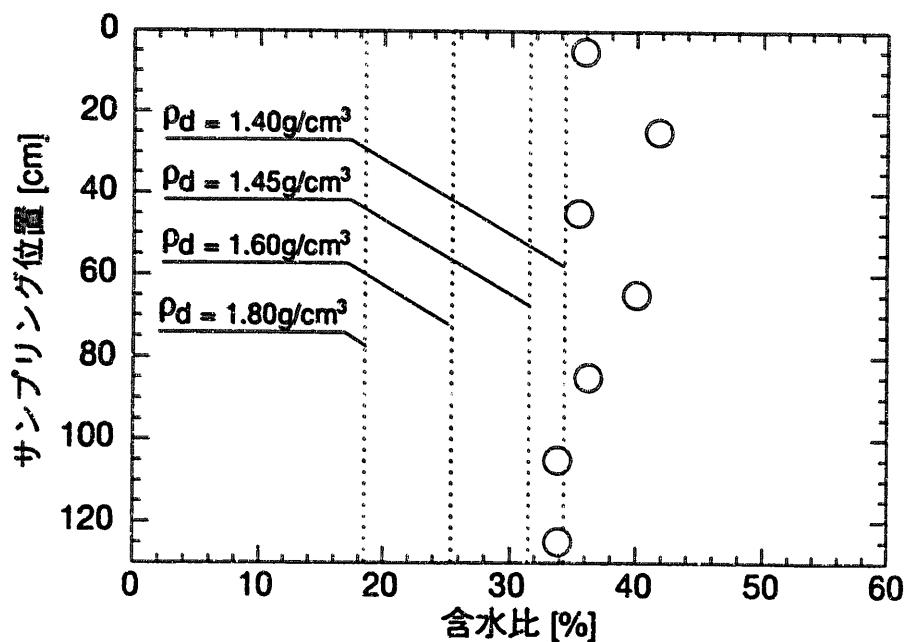


図4-14 サンプリング試料の含水比測定結果

## 5. まとめ

地層処分の性能評価において、ニアフィールドの熱、水理、応力等の条件を明確にする観点から、人工バリア及び周辺岩盤における熱-水-応力の連成現象を定量的に評価することが重要である。

熱-水-応力連成試験設備（COUPLE）では、試験対象を周辺岩盤を含むニアフィールドまで拡張し、地下深部の処分環境下における地圧の作用、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧力の発生、廃棄体の発熱による熱応力等が周辺岩盤のゆるみ域や亀裂中の水理特性に及ぼす影響を評価することを主目的とし試験を実施した。

試験の第一段階として、対象試験岩体への模擬処分孔掘削前後の載荷試験を実施した。試験の第二段階として、浸潤、加熱試験を実施した。そして試験終了後、緩衝材のサンプリングを行ない、乾燥密度、含水比の測定を行なった。その結果、次のようなことが分かった。

- ・ AE測定と弾性波測定を総合的に評価することにより、載荷により発生する破壊の位置を定性的に予測できる。
- ・ サイクロメータを用いることにより、水がペントナイトの外側から順次内部へ浸入していく様子が観察できた。
- ・ ペントナイトに水が浸潤することにより膨潤圧が発生する。しかし、ペントナイトが飽和した時点で、膨潤圧の新たな発生はなくなる。
- ・ ヒーターによる加熱により、粘土内に熱応力が発生した。
- ・ ペントナイトブロックを用いる場合でも、ペントナイトが飽和した後は膨潤によりブロック縫目は閉鎖し、高透水性部になることはない。

本試験においては、試験途中段階で岩体が破断してしまったので、充分な試験が実施できなかった。しかし、破断部が存在したことにより亀裂を含む周辺岩盤に生じる熱-水-応力連成現象の一部を観察できた。すなわち、亀裂部に水が存在するか否かによって熱の伝導の仕方が大きく異なることが分かった。

今後は、一定荷重の載荷を行なった状態で熱-水-応力連成試験を実施し、ペントナイ

ト内および周辺岩盤内に生じる現象を計測し、現在作成中の3次元熱-水-応力連成解析コードを用い、定量的に解析評価していく予定である。

## 参考文献

- 1) Fujita,T., etc. (1994) : Phase 2 Test-Case Big-Ben experiment、DECOVALEX.
- 2) 千々松正和他 (1995) : 膨潤応力を考慮した熱-水-応力連成解析、土木学会第50回年次学術講演会、講演概要集第3-A、pp.26-27.
- 3) A.M.Britto and M.J.Gunn (1987) : Critical State Soil Mechanics via Finite Elements : Ellis Horwood Limited、pp.52~81.
- 4) Ohnishi,Y., etc. (1987) : Development of finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium、coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories、pp.679-697.
- 5) 鈴木英明他 (1992) : 緩衝材の特性試験 (I) 、動力炉・核燃料開発事業団公開資料 PNC TN8410 92-057.