

釜石鉾山における粘土充填・熱負荷試験(II)
(平成8年度)

(動力炉・核燃料開発事業団 受託研究内容報告書)

概要集

1997年3月

PNC TJ1412 97-002

釜石鉾山における粘土充填・熱負荷試験(Ⅱ) (平成8年度)

(動力炉・核燃料開発事業団 受託研究内容報告書)

概要集

1997年3月

株式会社 間組

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。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

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

釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験 (II)

茂呂 吉司*

Tran Duc Phi Oanh*

雨宮 清**

要 旨

放射性廃棄物の地層処分においては緩衝材とその周辺岩盤に、廃棄体から発生する熱による力学・透水特性の変化、地下水の侵入による伝熱・力学特性の変化、緩衝材の膨潤、岩盤の変形による伝熱・透水特性の変化等が相互に複合して生じる。このため、人工バリア及びその周辺岩盤の伝熱特性、力学的挙動、水理特性等を評価するためには、これらの熱-水-応力連成現象を解析するモデル、コードの開発・確認が必要である。

釜石鉱山においては、白亜紀初期の花崗岩中で原位置試験が進められてきた。本試験はその1つとして、熱-水-応力連成概念モデルを確立し、数学モデルとコンピューターコードを確認する目的で平成6年度に開始された。試験は、試験坑道掘削、岩の特性調査、試験ピット掘削、ベントナイトの埋設と連成試験の5段階に分かれている。昨年度までに、発破工法による試験坑道掘削、14本の試錐と各種計測機器の埋設、大口径ボーリングによるピット掘削と岩盤挙動計測などが終了した。

本年度は、試験ピット内に緩衝材を原位置締固め方式で施工し、同時に、緩衝材中に発熱体と熱-水-応力連成現象を観察する各種計測器を埋設したので報告する。

本報告書は、株式会社間組が、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：080D0109

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発部地層処分開発室 石川 博久

* : 株式会社間組技術研究所

** : 株式会社間組技術本部原子力部

Coupled Thermal-Hydro-Mechanical Experiment at Kamaishi Mine

Yoshiji Moro *

Tran Duc Phi Oanh *

Kiyoshi Amemiya **

Abstract

In the case of geological disposal of high level radioactive wastes, a coupled phenomenon involving thermal (T), hydrological (H), and mechanical (M) processes occurs in the buffer materials and surrounding rocks. This coupled phenomenon implies hydromechanical (HM) processes by heat dispersion, thermomechanical (TM) processes by ground water seepage, and thermohydrological (TH) processes by swelling of buffer materials and deformation of surrounding rocks.

In order to understand the deep geological condition in fractured crystalline rock, PNC initiated the in-situ experiments in the Kamaishi Mine, where early Cretaceous granodiorite hosts the experiments.

The coupled thermo-hydro-mechanical (T-H-M) experiment in situ has been planned as a task of Kamaishi in-situ experiments in order to establish the coupled T-H-M conceptual models and to build up confidence to the mathematical models and computer codes. The program of T-H-M experiment is divided into five phases; Excavation of Drifts, Measurement of Rock Properties, Excavation of Test Pit, Setting up of Bentonite, and T-H-M test. Last year, the excavation of drifts was opened by blasting method, 14 boreholes was opened, measurements equipments was settled, the test pit excavated by large boring bit and measurements of rock mass movement was done.

This year we carried out the compaction of bentonite into the test pit and insatallation of sensors in the bentonite in order to monitor the oupled phenomenon involving therm-hydro-mechanical processes and report the results.

Work performed by HAZAMA Corporation under contact with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC).

PNC Liaison : Hirohisa Ishikawa, Waste Technology Development Division, Geological Isolation Technology Section

*: Technical Research Institute of HAZAMA Corporation

** : Nuclear Power Department of HAZAMA Corporation

目次

1	概要	1-1
2	全体工程	2-1
3	粒状ベントナイト（商品名 OT-9607）	3-1
3.1	OT-9607 の製造過程	3-1
3.2	粒径加積曲線	3-2
3.3	締固め・強度の特性	3-4
3.4	メチレンブルー吸着量	3-7
4	ベントナイトの一面せん断試験	4-1
4.1	目的	4-1
4.2	試料	4-1
4.3	試験方法	4-2
4.4	せん断試験結果	4-3
4.4.1	せん断変位とせん断応力ならびに垂直変位の関係について	4-3
4.4.2	ピーク強度と残留強度について	4-3
5	計測機器	
5.1	水分計	5-1
5.2	湿度計	5-3
5.3	熱電対	5-5
5.4	圧力計	5-6
5.5	ひずみ計	5-7
5.6	間隙水圧計	5-8
5.7	熱流束計	5-9
6	埋設計測機器適用試験	6-1
6.1	目的	6-1
6.2	湿度計	6-1
6.2.1	試験方法	6-1
6.2.2	試験結果	6-4
6.3	サイクロメーター（水分計）	6-12
6.3.1	試験方法	6-12
6.3.2	試験結果	6-15

7	発熱体	7-1
7.1	仕様	7-1
7.2	設置および検査	7-4
8	緩衝材施工試験	8-1
8.1	施工方法	8-1
8.1.1	施工断面および締固め方法	8-1
8.1.2	密度管理方法	8-2
8.1.3	施工管理項目および目標値	8-4
8.1.4	施工フロー	8-5
8.2	施工結果	8-6
8.2.1	材料試験	8-6
8.2.2	含水比	8-10
8.2.3	密度	8-12
8.2.4	各層の仕上がり厚さ（締固め後の厚さ）	8-18
8.2.5	締固め時間および締固めエネルギー	8-18
8.2.6	間隙比および飽和度について	8-20
8.2.7	まとめ	8-22
8.3	計測機器の埋設方法および手順	8-23
8.3.1	設置方法および手順	8-23
8.3.2	動作確認	8-32
8.3.3	設置位置	8-33
9	コンクリートフタ設置、固定	9-1
9.1	設置方法	9-1
9.2	固定方法	9-1
10	計測室等整備	10-1
11	連成試験	11-1
11.1	ベントナイト中の測定データ	11-1
11.1.1	温度	11-1
11.1.2	間隙水圧	11-2
11.1.3	湿度、水分分布	11-2
11.1.4	圧力	11-2
11.1.5	熱流束	11-3
11.1.6	ひずみ	11-3
11.1.7	ベントナイト中のデータに関する考察	11-3
11.2	岩盤の測定データ	11-4

11.2.1 間隙水圧	11-4
11.2.2 温度	11-5
11.2.3 ボアホール型ひずみ計	11-5
11.2.4 ひずみ計	11-5
11.2.5 ジョイント変位計	11-6
11.2.6 トリベック	11-6
11.2.7 岩盤データに関する考察	11-6
11.3 取得データに関する考察	11-6
12 達成モデル、コードの妥当性の評価	12-1
12.1 「VALUCLAY」プロジェクト	12-1
12.2 「DECOVALEX II」プロジェクト	12-6

1 概要

放射性廃棄物の地層処分においては緩衝材とその周辺岩盤に、廃棄体から発生する熱による力学・透水特性の変化、地下水の侵入による伝熱・力学特性の変化、緩衝材の膨潤、岩盤の変形による伝熱・透水特性の変化等が相互に複合して生じる。このため、人工バリア及びその周辺岩盤の伝熱特性、力学的挙動、水理特性等を評価するためには、これらの熱—水—応力連成現象を解析するモデル、コードの開発・確認が必要である。

特に、亀裂性結晶質岩における深地層処分を理解するために、白亜紀初期の花崗岩を母岩とする釜石鉾山における原位置試験が計画され、数学モデルとコンピューターコードを確認するために釜石原位置試験の1つとして、原位置熱—水—応力連成試験が計画された。連成試験計画は、試験坑道掘削、岩の特性調査、試験ピット掘削、緩衝材の施工と連成試験の5段階に分かれている。試験坑道は幅5 m、奥行10 m、高さ7 mで、掘削機と発破によって掘削され、昨年度は各種計測機器を埋設するために14本の試錐が行なわれた。

本年度は、試験ピットの中に緩衝材、発熱体、各種計測器を埋設し、コンクリートのフタを設置し、発熱体を加熱した試験を実施したのでその結果もあわせて報告する。

2 全体工程

平成8年度の全体工程を表2-1に示す。

本年度の原位置での主要な作業は、表中に示すとおり、緩衝材施工、発熱体および計測機器埋設、試験場整備および加熱計測である。

原位置締固め工法による緩衝材施工は、8月20日に開始し、約3ヶ月後の10月22日に最終の第46層眼の締固めをもって終了した。発熱体および計測機器の埋設は、締固め作業と並行して実施された。これに続き、10月29日～11月22日に、コンクリート蓋設置、鋼材による蓋の固定、断熱のための隔壁の設置などの試験場整備を行った。発熱体中の電気ヒーターは12月17日午後1時に通電を開始し、その後、加熱中のデータ取得を継続している。

表2-1 全体工程表

調査研究項目	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1. 緩衝材施工試験										
1.1 ベントナイト調整	---	---	---	---	---					
1.2 緩衝材施工試験			---	---	---					
1.3 緩衝材高さ、密度測定			---	---	---					
1.4 発熱体設置、気密試験			---	---	---					
1.5 計測機器適用試験		---								
1.6 計測器機改造		---	---	---						
1.7 計測機器埋設			---	---	---					
1.8 コンクリートフタ設置、固定		---				---				
1.9 計測室等整備	---	---								
1.10 試験場整備、坑内運搬		---	---	---	---	---				
2. 岩盤特性調査および連成試験										
2.1 堰設置、水溜め	---									
2.2 坑内温度管理							---			
2.3 連続計測	---	---	---	---	---	---	加熱	---	---	---
2.4 岩盤変位計測（トリベック）							---		---	
2.5 計測データ整理					---	---	---	---	---	---
3. 連成モデル、コードの妥当性の評価	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4. 報告書の作成						---	---	---	---	---

3 粒状ベントナイト (商品名 OT-9607)

3.1 商品名 OT-9607 の製造過程

本試験に使用したベントナイトはクニミネ工業社製の OT-9607 である。締固め特性を向上させるために、粒径をクニゲル V1 (動燃殿の標準的材料) より大きく製造した本試験のための特注ベントナイトである。

図3-1に粒状ベントナイトの製造工程を示す。粒状ベントナイトは、粒径分級段階で、目開き 1.5mm のふるいを用いて、ふるいを通過した材料である。

次頁以下に粒状ベントナイトの基本物性を述べる。

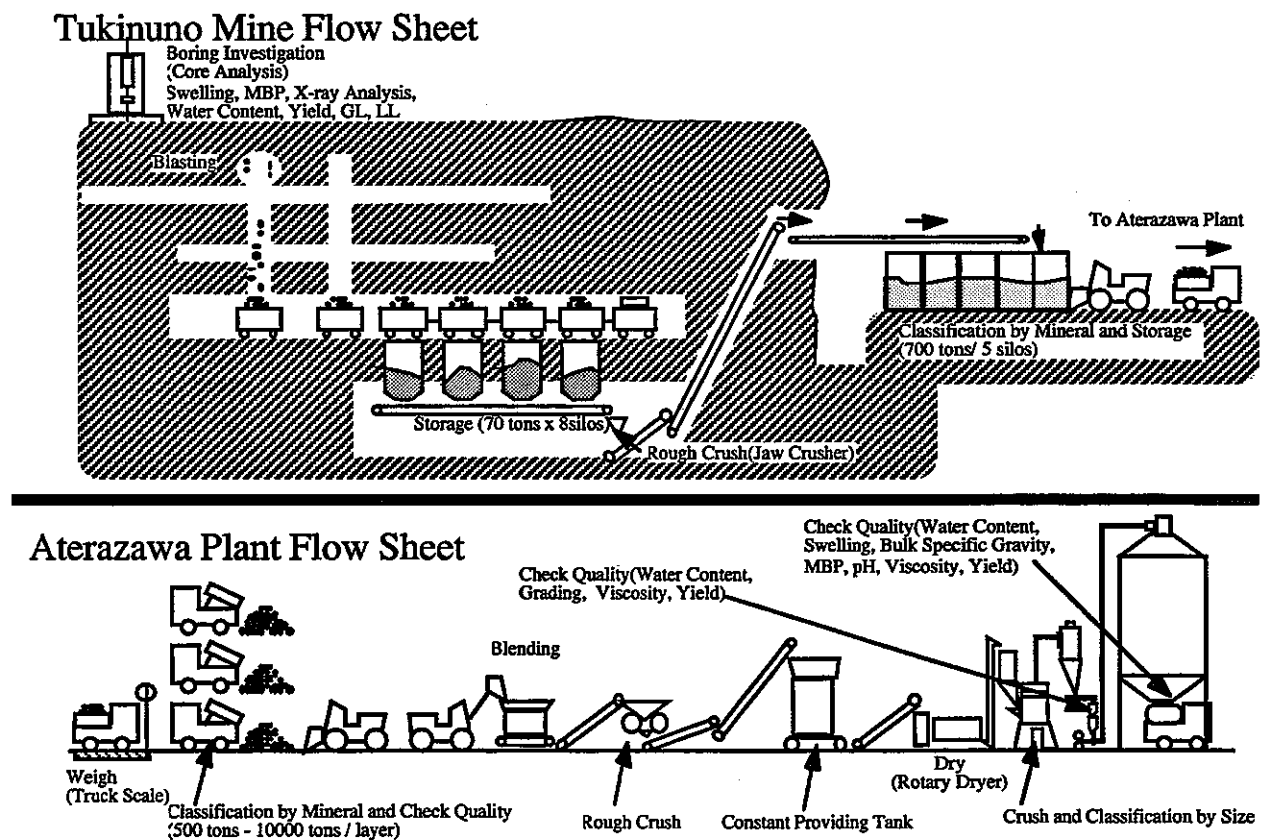


図3-1 粒状ベントナイトの製造工程

3.2 粒径加積曲線

表3-1に粒径分布、図3-2に粒径加積曲線を示す。

突き固め前では、れき分は2%、細粒分（0.075mm以下）は6%程度で、砂分は70%以上とほとんど占めており、地盤工学会の土質分類法によると砂に分類され、均等係数は $U_c=4.6$ であった。また、含水比は7%程度である。

一方、突き固めによる粒径の破碎が多少見られ、標準突き固めエネルギー E_c の15倍（ $15E_c$ ）で突き固めた後の粒度の細粒分は17%に増加し、その結果均等係数は $U_c=8.0$ となり、突き固め前より良い粒度分布を示す。

ここで、均等係数 U_c とは $U_c=D_{60}/D_{10}$ と定義されており、粒度分布を判定するために D_{60} と D_{10} の幅が大きいほど均等係数大きく、突き固めや転圧による締固め効果大きい。一般に、 $U_c<5$ ：均等な土（わるい粒度）、 $5<U_c<10$ ：普通の土（中位の粒度）、 $10<U_c$ ：不均等な土（よい粒度）とされている。粒状ベントナイトでは、突固め前が $U_c=4.6$ 、突固め後が $U_c=8.0$ であったから、前者は一般的指標では土、後者は普通の土ということになる。

表3-1 粒径分布

粒径区分	突き固め前	15 E_c で突き固め後
最大粒径 D_{max} (mm)	4.75	4.75
平均粒径 D_{50} (mm)	0.34	0.23
D10 (10%通過おける粒径) (mm)	0.095	0.04
D60 (60%通過おける粒径) (mm)	0.44	0.32
均等係数 U_c (=D60/D10)	4.6	8.0
細礫分 (2~4.74mm) (%)	2.1	1.4
粗砂分 (0.425~2mm) (%)	40.3	30.0
細砂分 (0.075~0.425mm) (%)	32.2	33.5
2mm通過率 (%)	97.9	98.6
細粒分 (0.075mm通過率) (%)	6.1	17.1

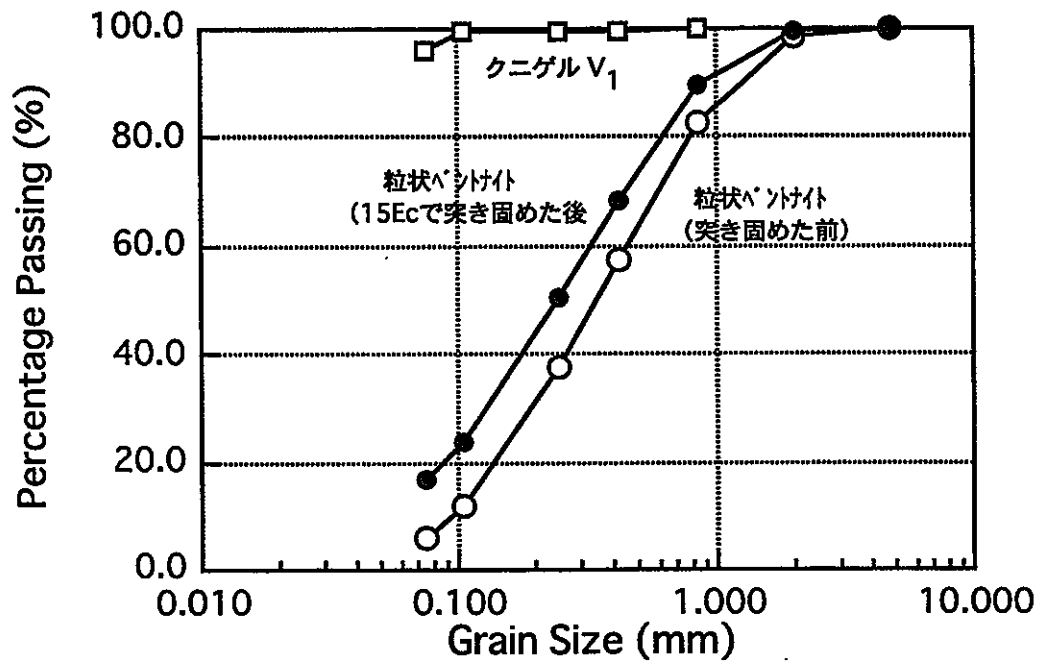


図3-2 ベントナイトの粒径加積曲線

3.3 締固め・強度の特性

図3-3、図3-4に室内締固め試験における締固め曲線、含水比と一軸圧縮強度の関係を表す曲線を示す。ただし、突き固めエネルギーは標準エネルギー E_c の15倍とした($E_c=2.5\text{kgf}\times 30\text{cm}\times 25\text{回}\times 3\text{層}/1000\text{cm}^3=5.625\text{kgf cm/cm}^3$)。

最適含水比は $w_{\text{opt}}=15\%$ 程度、最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}}=1.82\text{g/cm}^3$ である。

一方、一軸圧縮強さ q_u は $w=15\%$ 、つまり最適含水比で最大乾燥密度を得た試料において最大値 17kgf/cm^2 を示している。また、そのピークから含水比が増大するに伴い、 q_u は著しく減少している。緩衝材の一軸圧縮強さに影響を与える要因には、締固めエネルギー、乾燥密度、含水比などがある。本試験は締固めエネルギーが一定であるため、図3-4は、含水比の増大と乾燥密度が低下による強度の低下の現象をよく示している。

図3-5、図3-6にそれぞれ突き固めエネルギーにおける乾燥密度、一軸圧縮強さの変化を示す。突き固めエネルギーが $5E_c$ までに乾燥密度と一軸圧縮強さともに急激に増加したのち、緩やかになる。

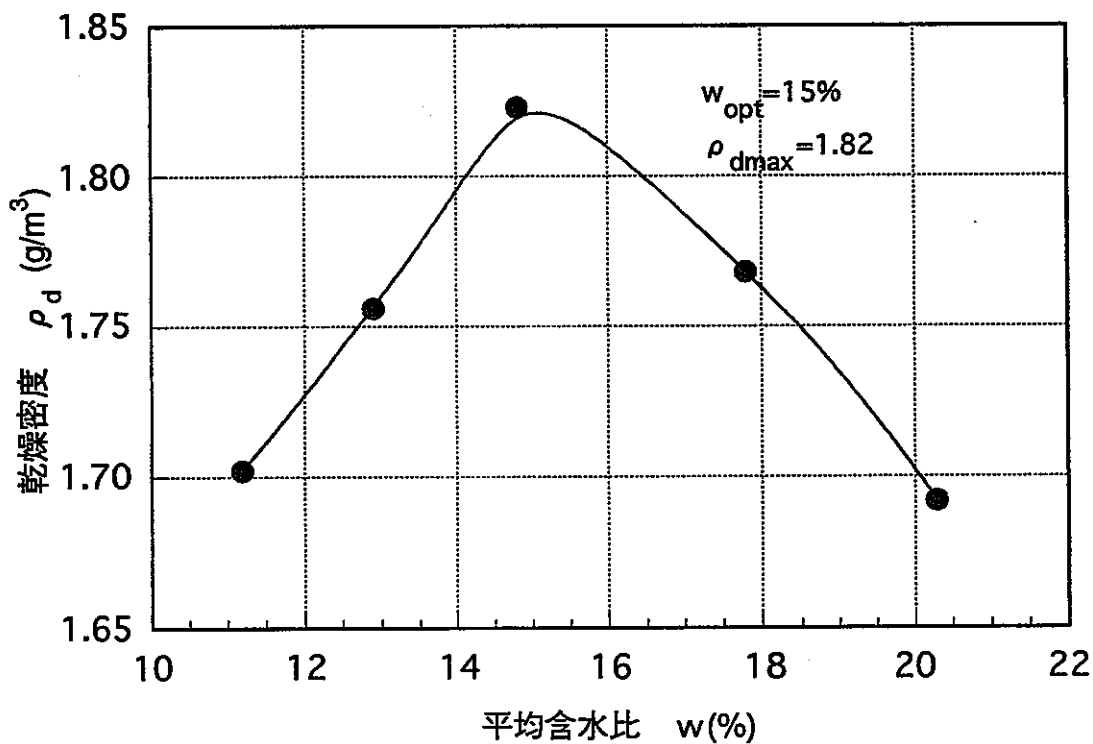


図3-3 締固め曲線

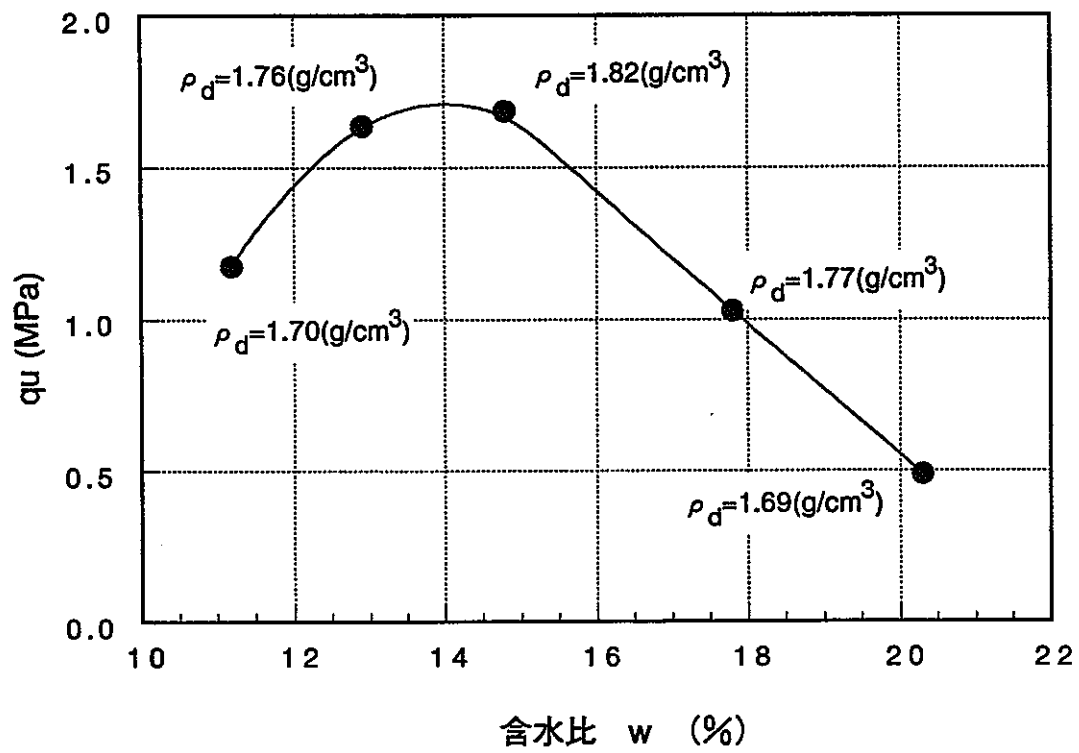


図3-4 締固め・強度の曲線

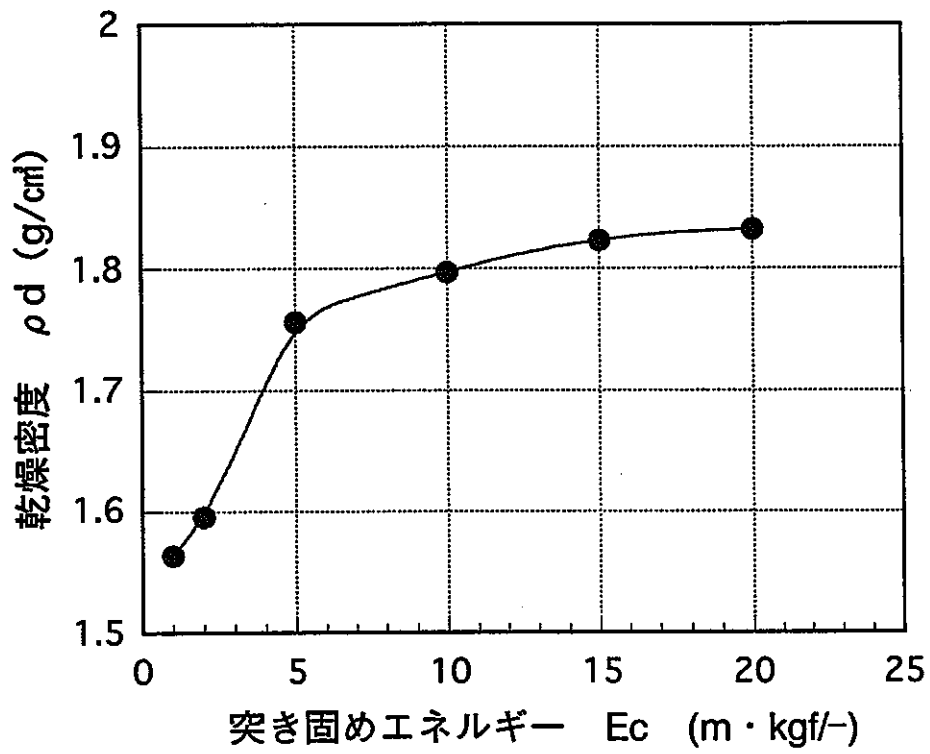


図3-5 突き固めエネルギーにおける乾燥密度の変化

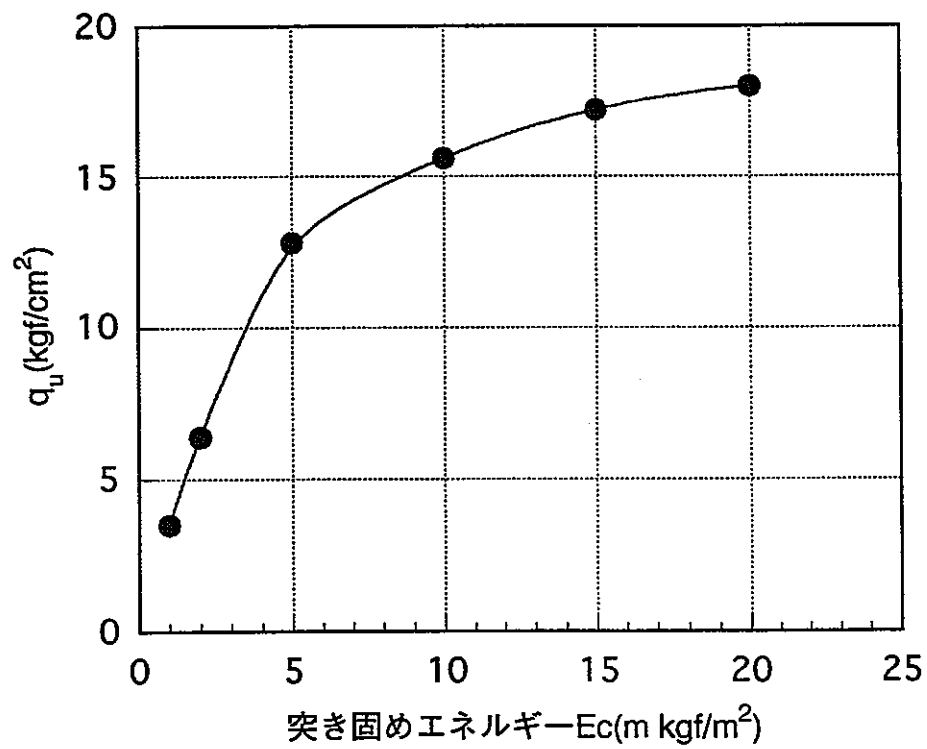


図3-6 突き固めエネルギーにおける一軸圧縮強さの変化

3.4 メチレンブルー吸着量

図 3-7は原位置実験に使用した全試料から 16 バッチのサンプルを採取し、メチレンブルーを測定した結果を示したものである。

メチレンブルー吸着量は 60～68 mmol/100g に変化し、平均値は 64mmol/100g（標準偏差 2.48mmol/100g）であり、クニゲルV 1（平均約 66mol/100g）よりやや小さくなっている。

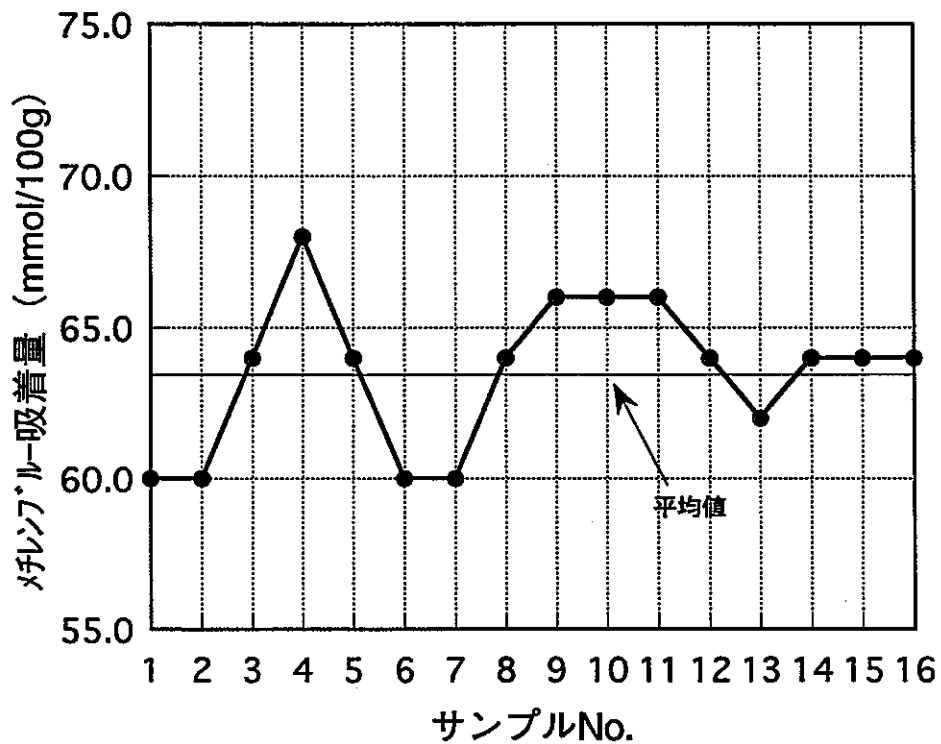


図3-7 メチレンブルー吸着量の試験結果

4 ベントナイトの一面せん断試験

4.1 目的

施工方法から緩衝材を分類すると、現場施工型と工場製作型のふたつの方式が考えられる。前者は、処分空間に含水比等を調整した材料を投入し現場でこれを所定の密度まで締固める方式であり、後者は、工場で所定の大きさと密度の緩衝材ブロックを製作し、処分空間までこれを搬入し設置するものである。いずれの場合でも緩衝材中の施工継ぎ目や不連続面は水理的、力学的な弱面となる可能性がある。例えば、施工後の緩衝材中では、オーバーバックの荷重と腐食膨張変位、および地圧と空洞の変形といった現象から、部分的にせん断応力が発生する。ここで、地下水の浸潤によってその性状を変化させると予測される継ぎ目や不連続面の、せん断応力と変形の関係を得ることは重要となる。

以上の視点から本章では、緩衝材中の不連続面のせん断試験を実施する。本年度は、その基礎試験として不飽和のベントナイトブロックの継ぎ目の一面せん断試験を実施し、継ぎ目のない試料との比較を行ったので、以下に報告する。

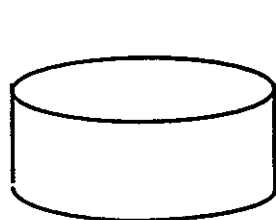
4.2 試料

ベントナイトには、粉末クニゲル V1 を使用した。ベントナイト試料の乾燥密度は、 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ である。ベントナイトの飽和度別の物性値を表 4-1 に示す。試料は、整形用セルに一定重量の粉末ベントナイトを入れ、材料試験機を用いて飽和度 50% の密度に相当する体積になるまで圧縮して固化させることにより作成した。なお、試料の整形、飽和度の調整は動力炉・核燃料開発事業団で実施した。

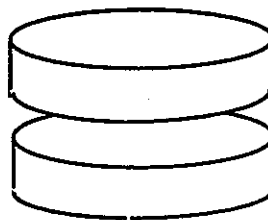
試料は、図 4-1 に示すように、ベントナイトブロック自体の力学特性を評価するために直径 5cm、厚さ 2cm の円盤状に整形した一体型試料とベントナイトブロックの継ぎ目の力学特性を評価するために直径 5cm、厚さ 1cm の試料を重ねた分離型試料の二種類準備し、一面せん断試験を行った。

表 4-1 ベントナイトの物性値

	ヤング率 E (MPa)	ポアソン比 ν	一軸圧縮強度 Sc (MPa)
飽和度 50%	808.0	0.35	5.4



一体型試料



分離型試料

図 4-1 試料模式図

4.3 試験方法

せん断試験には岩石用一面せん断試験機（丸井製作所製）を使用した。図 4-2にその概略図を示す。

このせん断試験機のせん断箱の寸法は、直径5cm、深さ5cmであるため、今回の実験では、試料の上下に厚さ1.5cmの鋼鉄製スペーサーを入れせん断面が試料の中央に来るようにセットした。

まず、垂直荷重を所定の垂直応力になるまで載荷し一定に保った、次に、せん断変位をサーボコントロールによって一定の変位速度（0.05mm/min）となるように制御し、せん断応力がピークを超えて残留強度状態に落ち着くまで変位させた。この間、10秒毎に水平方向および垂直方向の変位と荷重を計測し、フロッピーディスクに記録した。今回の実験では、垂直応力を1MPa、2MPa、3MPaの三種類に設定し、それぞれの垂直応力につき2回ずつせん断試験を行った。

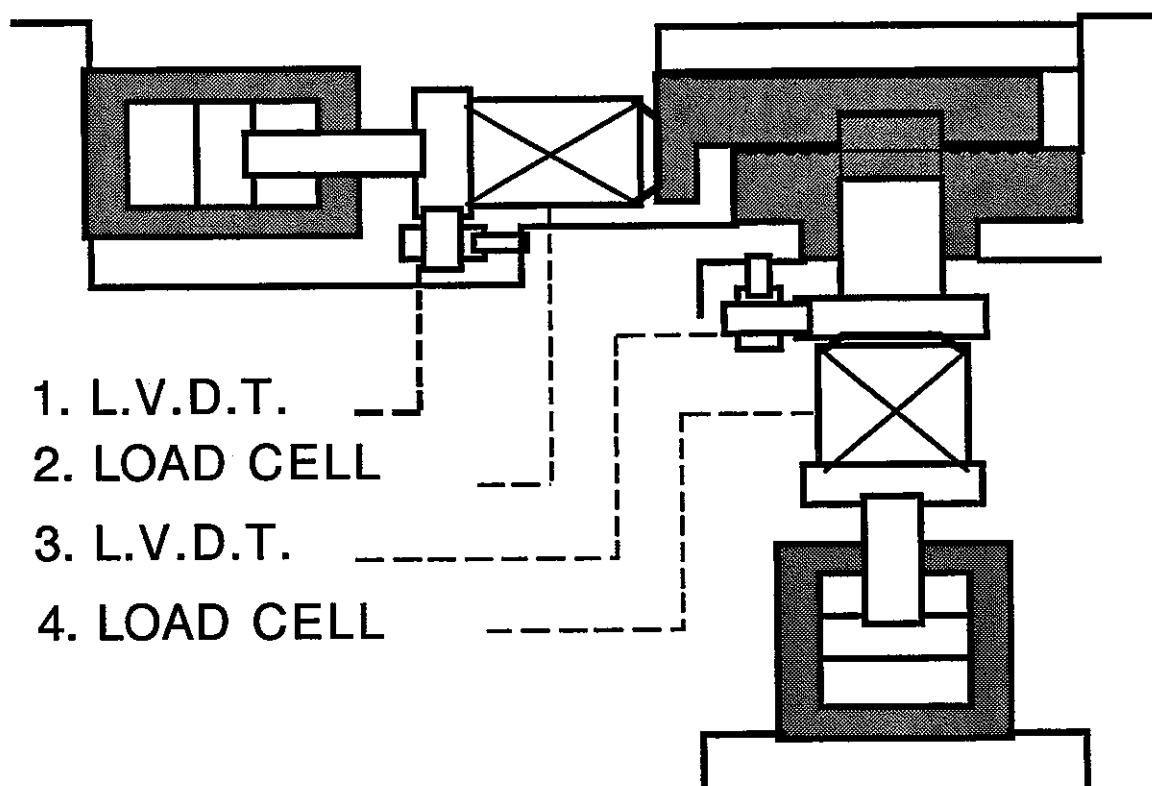


図 4-2 せん断試験機

4.4 せん断試験結果

せん断試験の結果を、図4-3～図4-8に示す。図4-3～図4-5は、一体型試料に対するせん断応力-せん断変位曲線およびダイレイタンスー曲線を示したグラフであり、図4-6～図4-8は、分離型試料に対するせん断応力-せん断変位曲線およびダイレイタンスー曲線を示したグラフである。いずれのグラフも一つの垂直応力について行なった二回のせん断試験の結果をまとめて記載している。ここで、垂直変位については、試験機特性による変位を取り除くためキャリブレーションデータに基づいて補正している。また、せん断応力については、5点の単純移動平均法を用いて電氣的なものと考えられるノイズを除去している。

4.4.1 せん断変位とせん断応力ならびに垂直変位の関係について

異なる垂直応力下でのせん断試験結果を一つのグラフにまとめたものを一体型試料、分離型試料に対してそれぞれ図4-9、図4-10に示す。これらの図からわかるように、いずれの試料においても垂直応力が大きくなるほど、ピーク強度の値、最終的な残留強度の値が大きくなる。また、一体型試料では、いずれの垂直応力でも試験開始からピーク強度に達するまでほぼ一定の傾き（せん断剛性が一定）で応力が増加するのに対し、分離型試料では、試験開始からピーク強度に達するまで垂直応力の大きさにほぼ比例した傾き（垂直応力に比例したせん断剛性）で応力が増加する。さらに、一体型試料では、せん断応力がピーク強度に到達した後、垂直変位が増加しダイレイタンスーを生じていることがわかる。また、ダイレイタンスーの量は、垂直応力が大きいものほど小さくなる。一方、分離型試料では、垂直変位が変化せず、ダイレイタンスーが生じていないことがわかる。

4.4.2 ピーク強度と残留強度について

各せん断試験により得られたピークならびに残留状態に達したときのせん断強度と、せん断変位をまとめたものを表4-2に示す。また、表4-2のデータより、ピーク強度、残留強度の値と垂直応力の値の関係をグラフにしたものを一体型、分離型にわけてそれぞれ図4-11、図4-12に示す。図4-11より一体型試料については垂直応力とピーク強度ならびに残留強度の間には、図中に示した放物線で近似できる関係が見られた。一方、図4-12より、分離型試料については、垂直応力とピーク強度ならびに残留強度のいずれの関係においても図中に示した明瞭な直線関係が見られた。

図4-11、図4-12のピーク強度に対する近似曲線（直線）が縦軸と交わる値より、一体型試料の粘着力は1.88MPaとなり、分離型試料の粘着力は0.26MPaとなる。すなわち、分離型試料の粘着力は、一体型試料の約7分の1になる。

表 4-2 せん断試験に供した試料のピークせん断強度と残留せん断強度

SAMPLE NAME	ピーク強度		残留強度	
	せん断強度(MPa)	せん断変位(mm)	せん断強度(MPa)	せん断変位(mm)
O50-1-1	2.79	1.030	1.80	1.967
O50-1-2	2.55	1.360	1.85	1.976
O50-2-1	3.25	1.069	2.84	1.799
O50-2-2	3.52	1.572	2.68	2.607
O50-3-1	3.72	1.271	3.22	2.421
O50-3-2	3.72	1.112	3.18	2.086
S50-1-1	0.95	0.563	0.72	0.902
S50-1-2	0.92	0.554	0.74	1.296
S50-2-1	1.49	0.527	1.23	1.240
S50-2-2	1.59	0.647	1.24	1.226
S50-3-1	2.37	0.658	1.73	1.433
S50-3-2	2.14	0.519	1.47	1.662

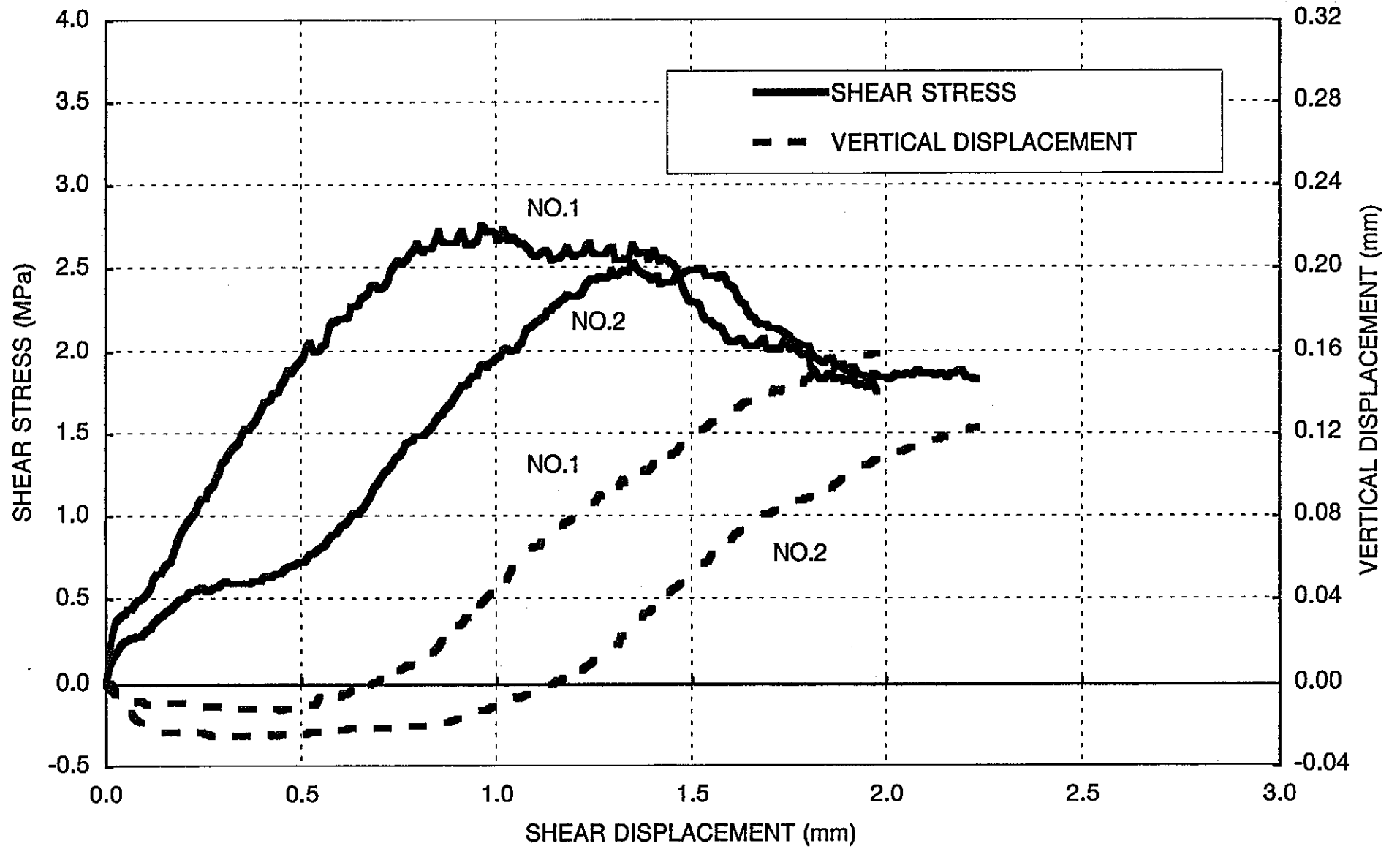


図4-3 一体型試料せん断試験結果 (垂直応力 1MPa)

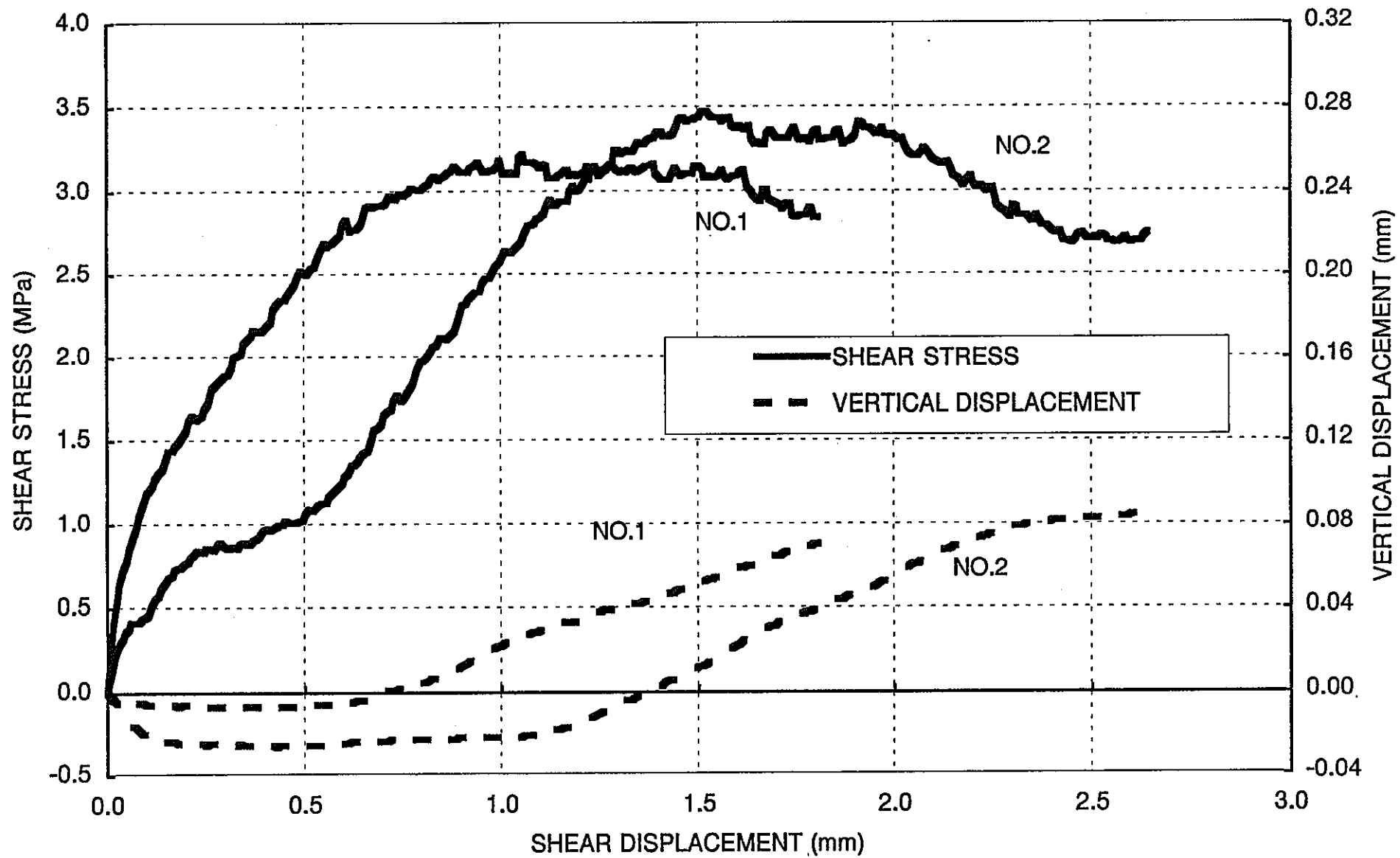


図4-4 一体型試料せん断試験結果 (垂直応力2MPa)

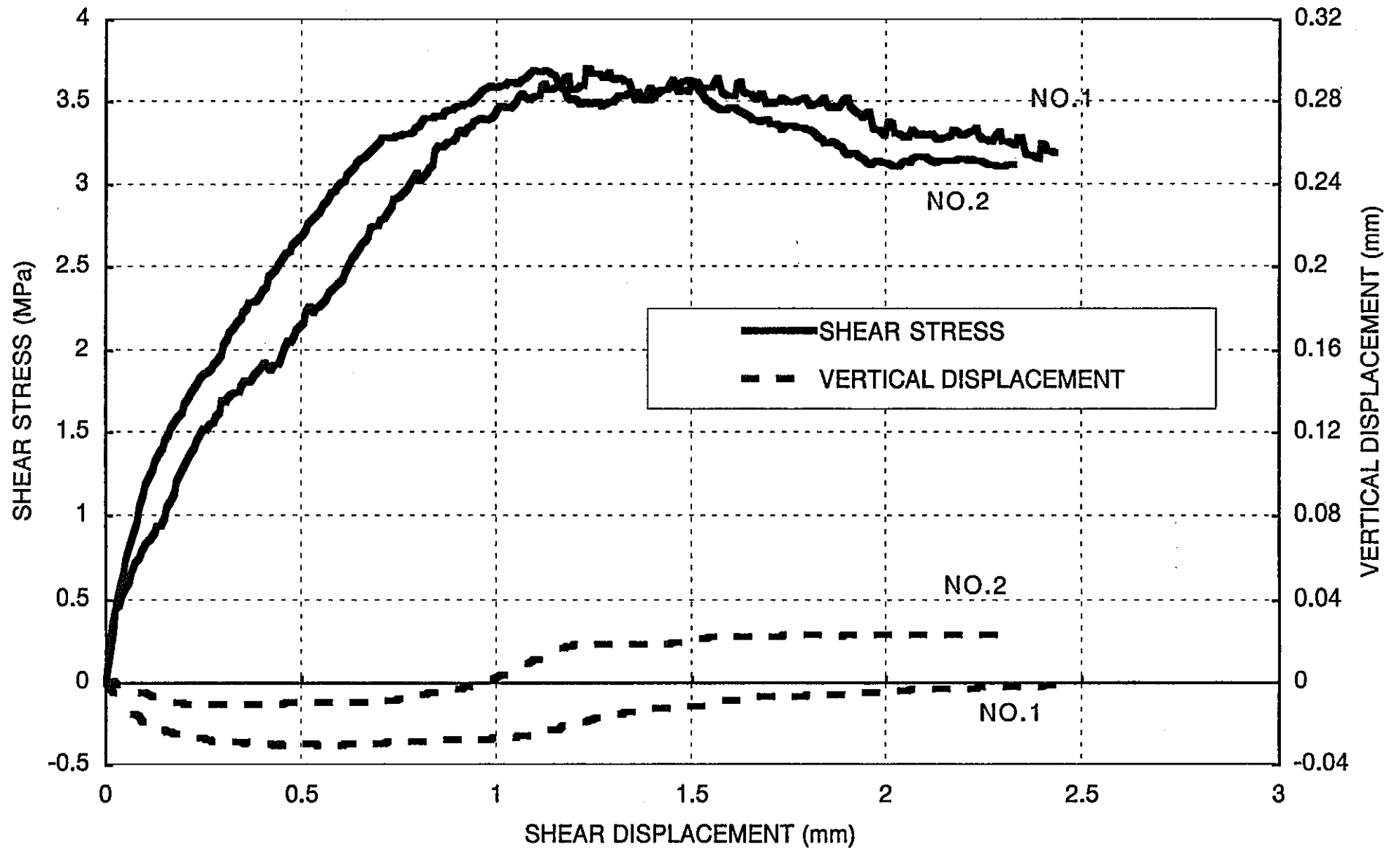


図 4-5 一体型試料せん断試験結果 (垂直応力 3MPa)

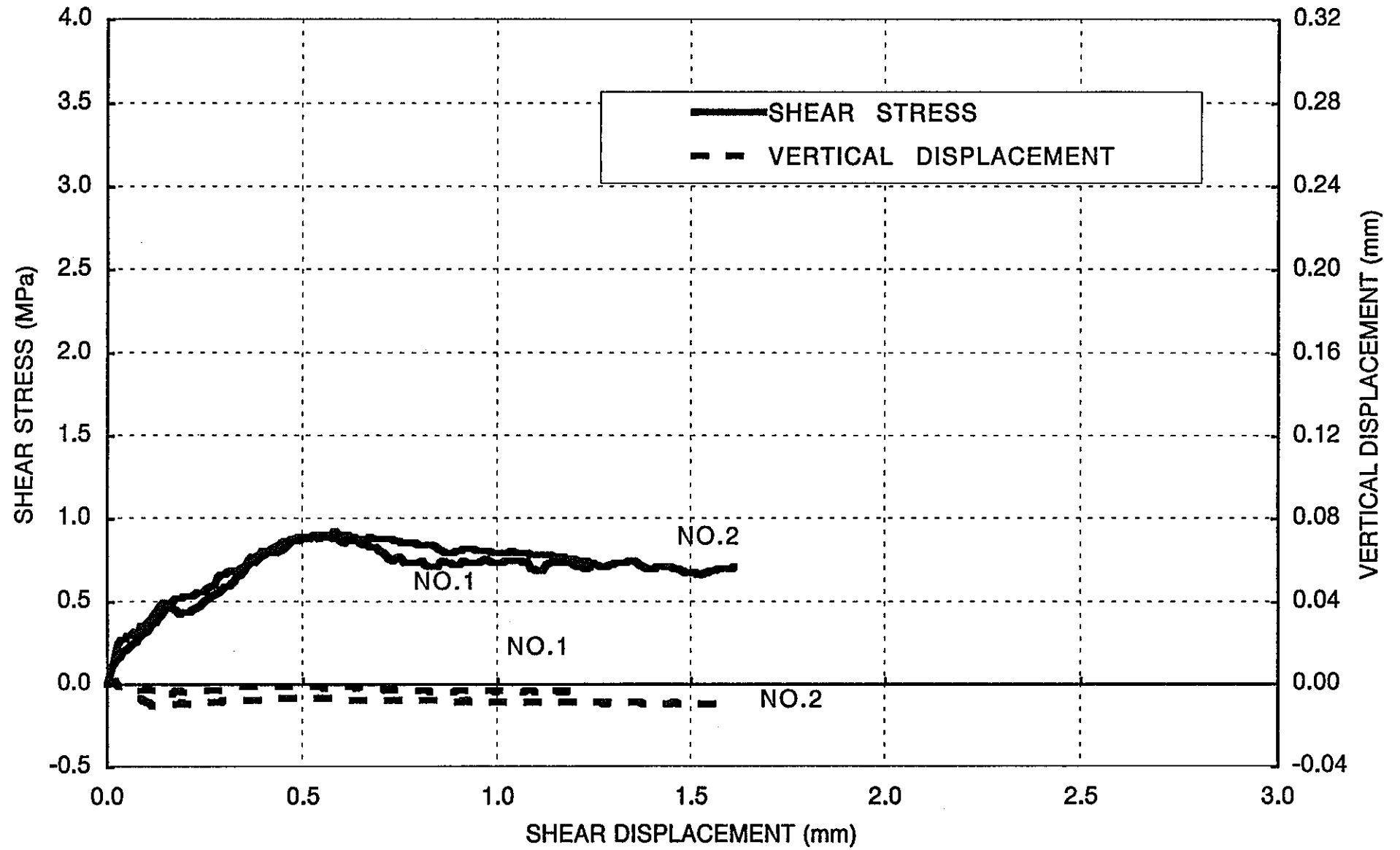


図 4-6 分離型試料せん断試験結果 (垂直応力 1MPa)

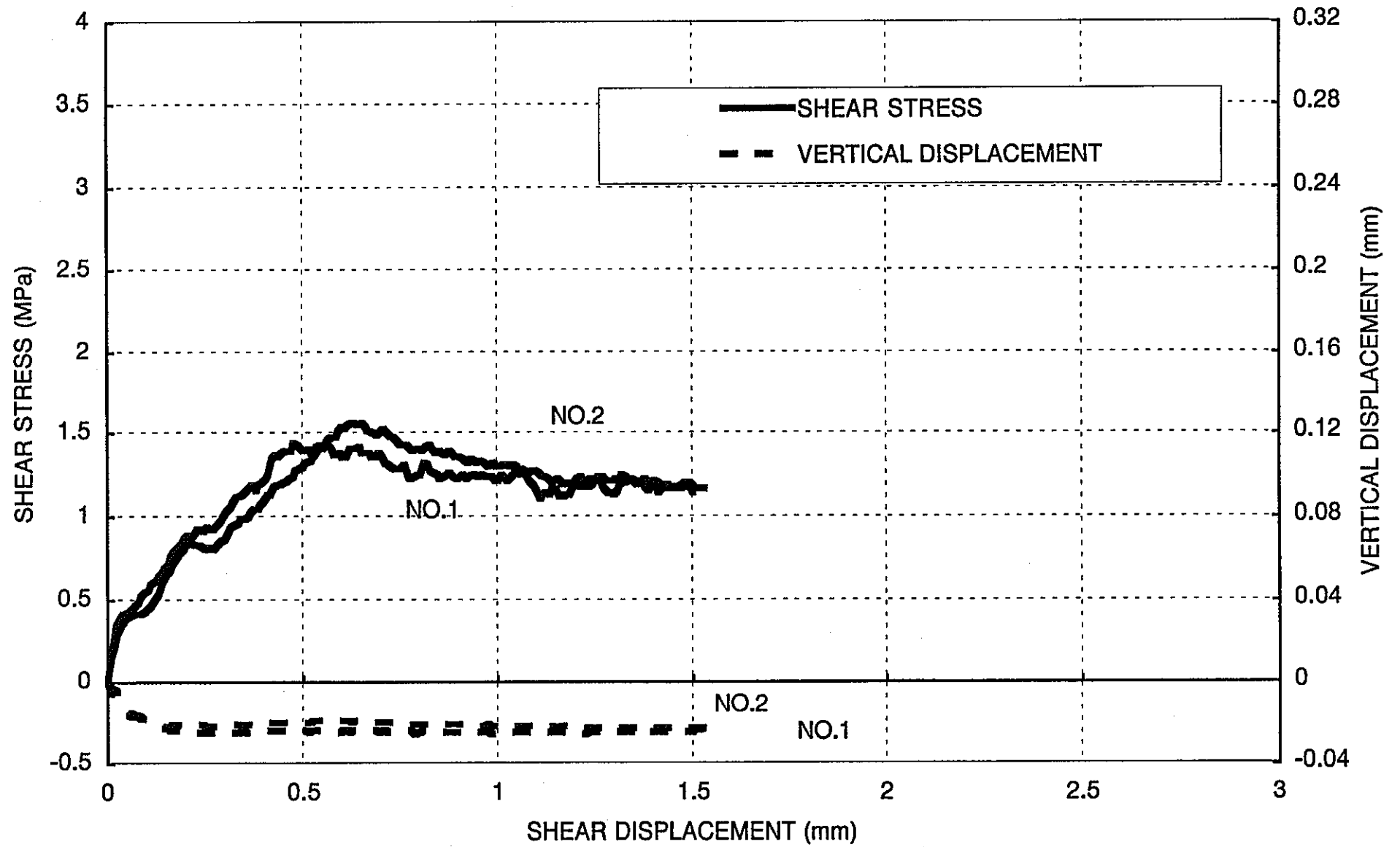


図 4-7 分離型試料せん断試験結果 (垂直応力 2MPa)

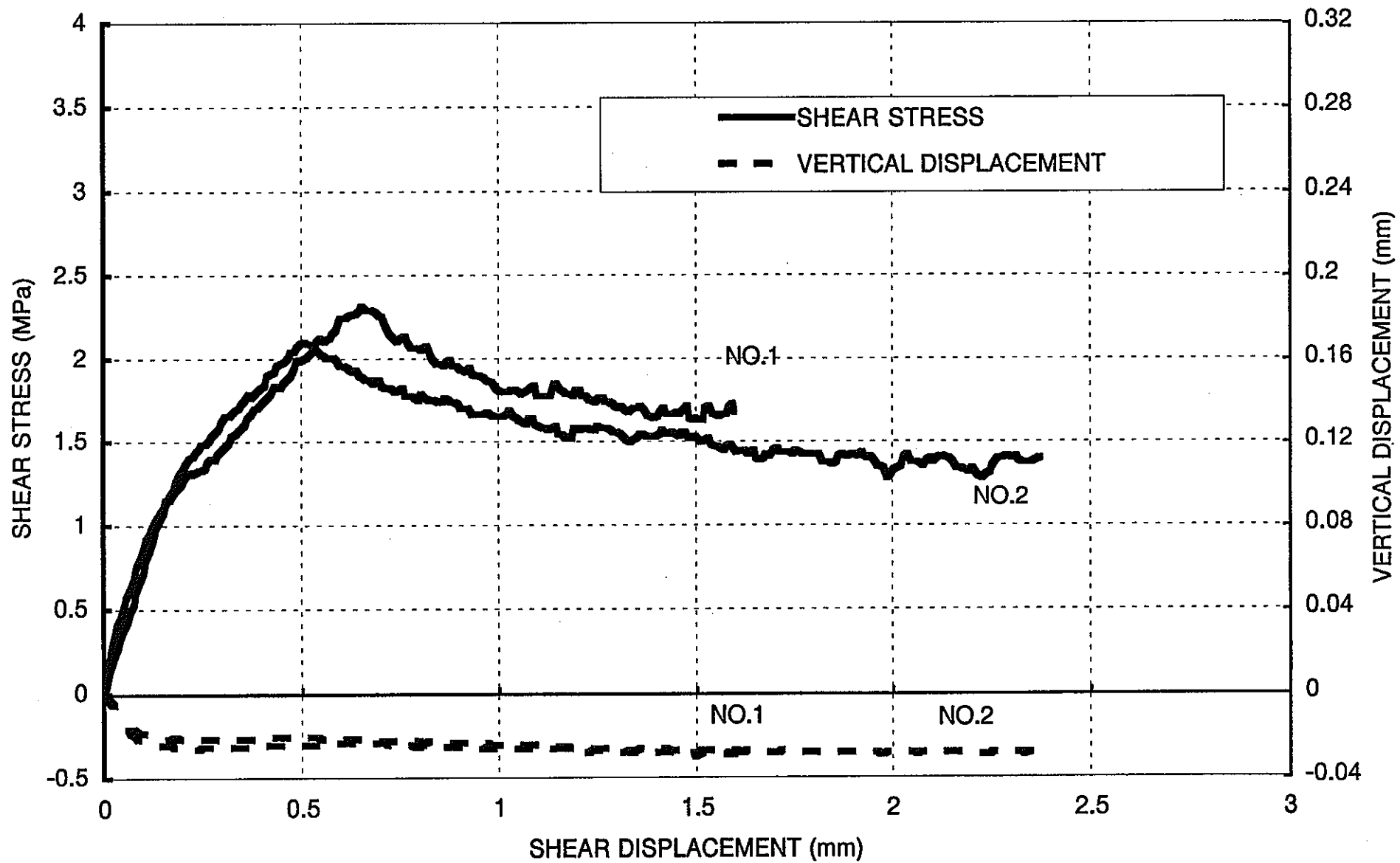


図 4-8 分離型試料せん断試験結果 (垂直応力 3MPa)

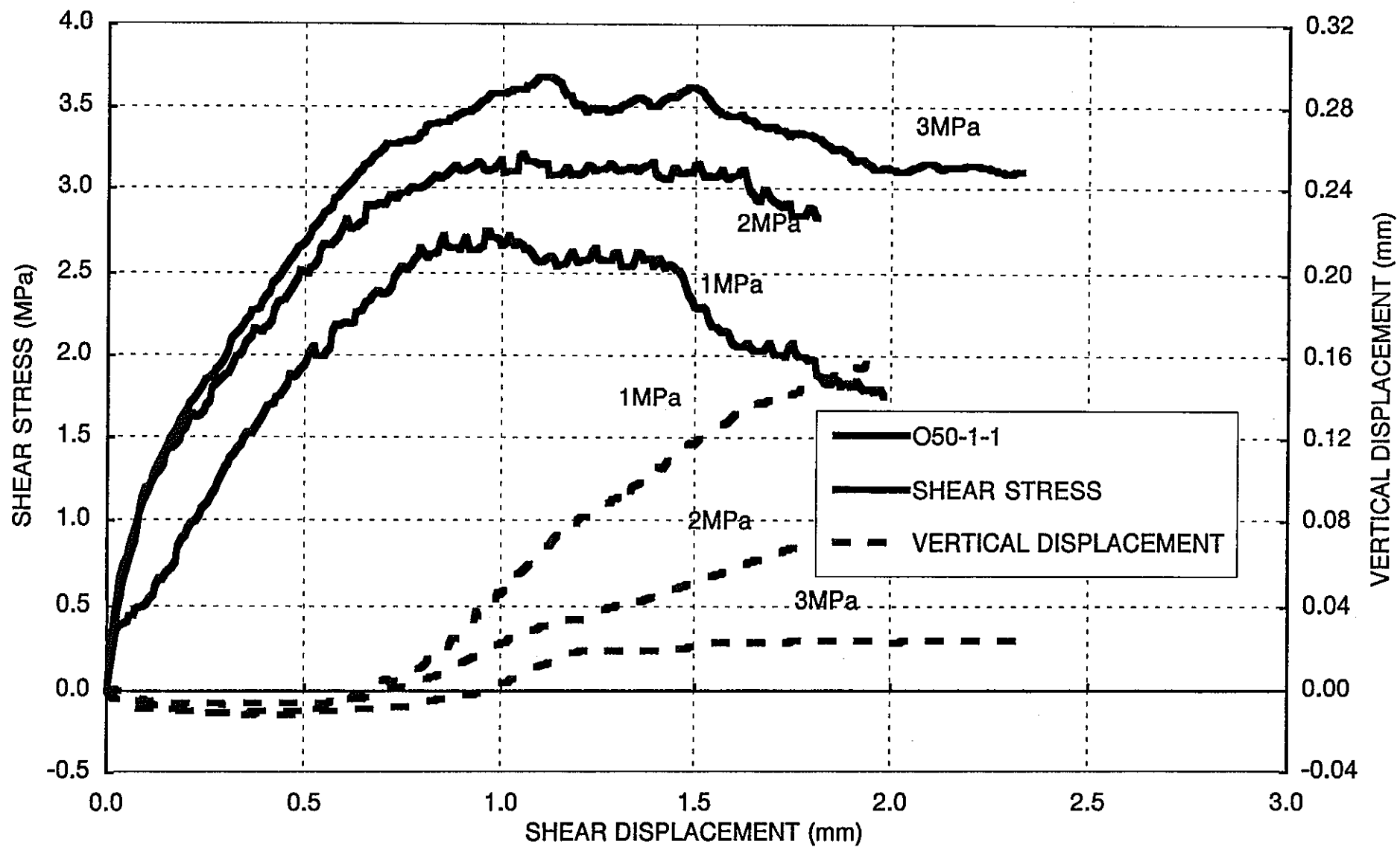


図 4-9 一体型試料せん断試験結果 (垂直応力 1MPa, 2MPa, 3MPa)

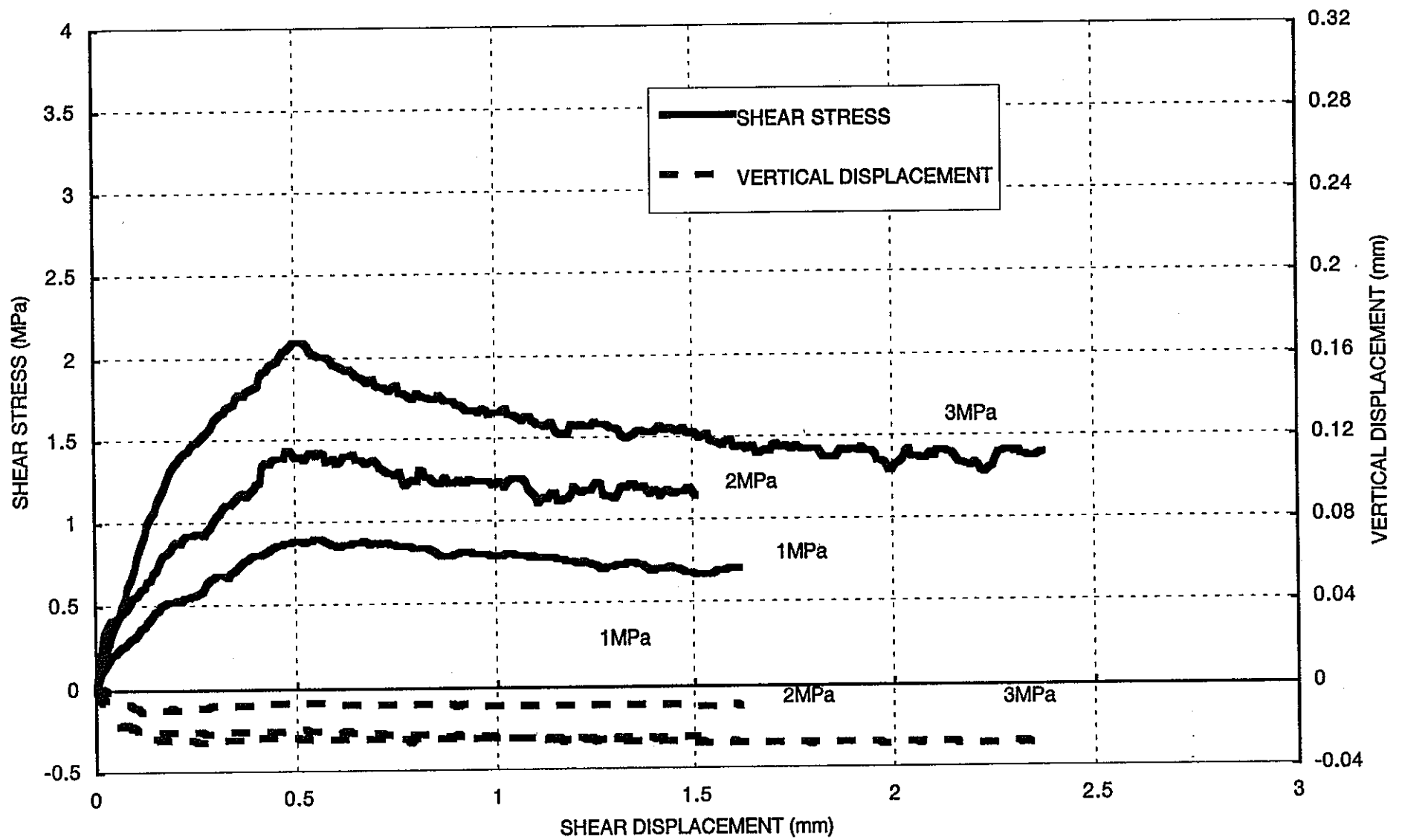


図 4-10 分離型試料せん断試験結果 (垂直応力 1MPa, 2MPa, 3MPa)

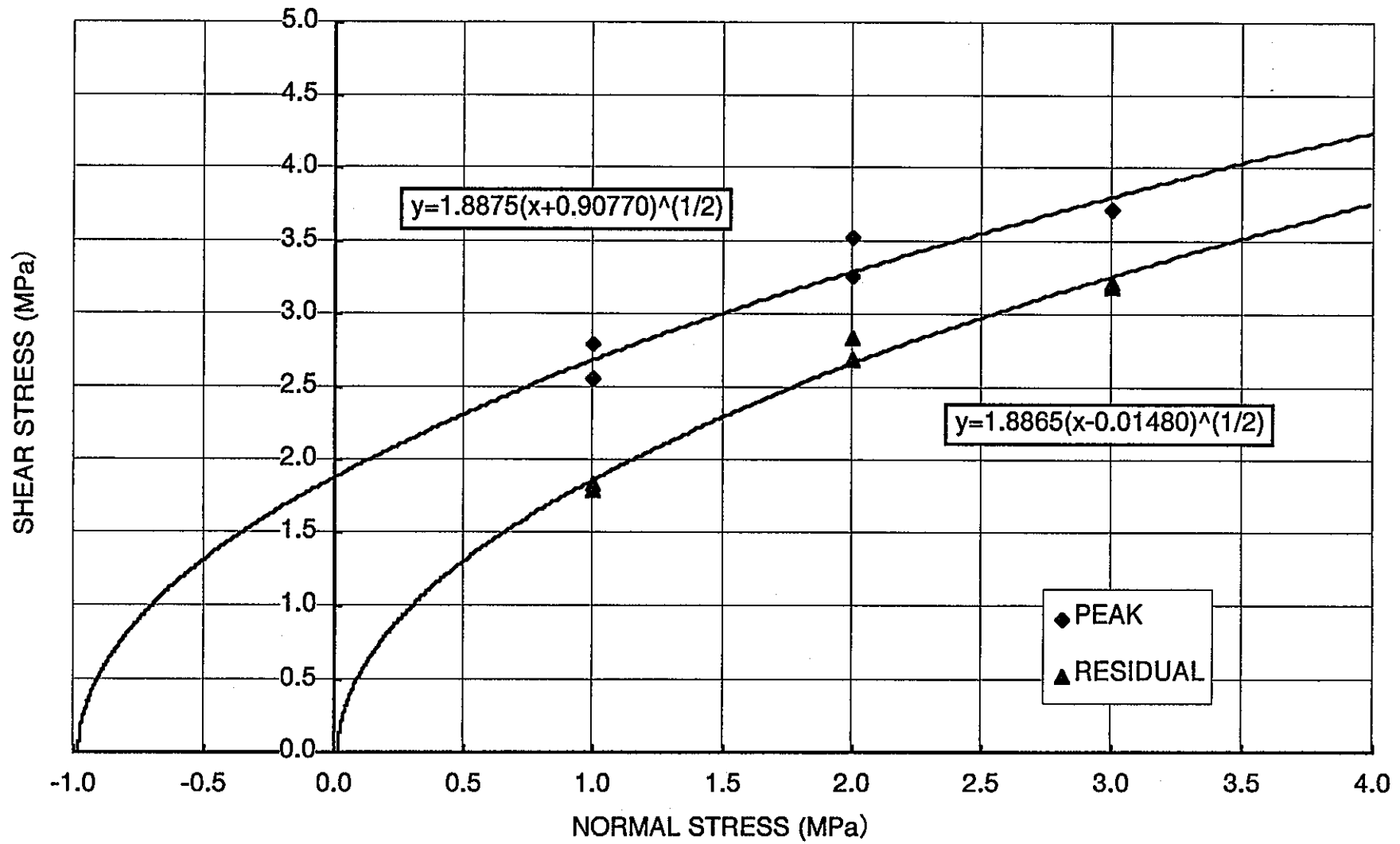


図 4-11 垂直応力-せん断応力 (一体型試料)

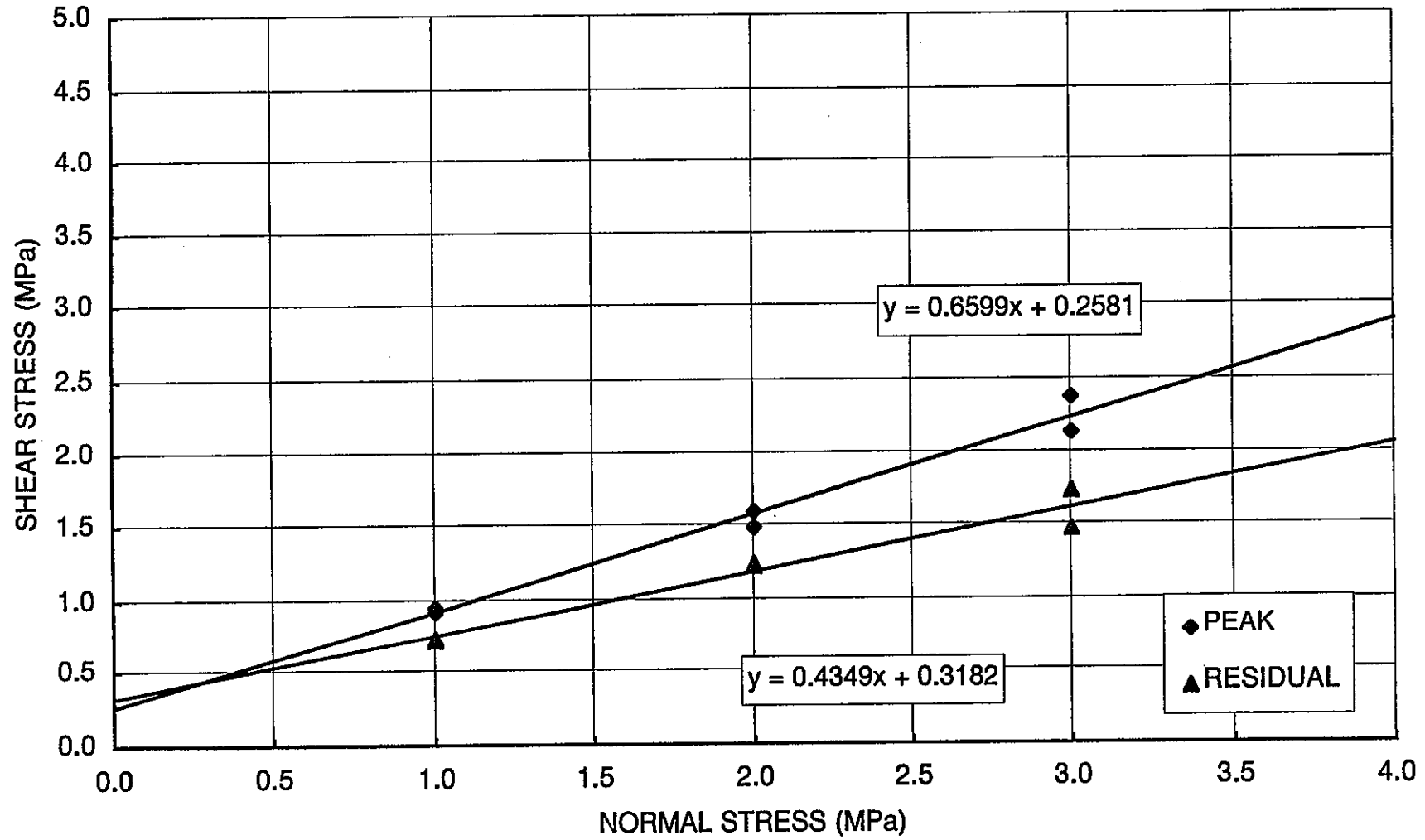


图 4-12 垂直応力-せん断応力 (分離型試料)

5 計測機器

5.1 水分計

水分計は緩衝材中の水分の移動を測定するために埋設した。この水分計は後述する予備試験から含水比15%以上の範囲での適用性が確認されており、緩衝材中はヒーターから離れた水分の多くなることが予想される個所に設置した。

検出器の仕様を表5-1、表5-2に、水分計の検出器を図5-1、水分計のセンサー部を図5-2に示す。検出器は熱電対変換器による水分ポテンシャルを測定するための測定機である。

表5-1 検出器の仕様

型式	HR-33T
製作	WESCOR
数量	1台
レンジ	10、30、100、300 μ V フルスケール±電池電圧、温度0~40°C
機能	加熱、入力短絡、読み取り、冷却、露点
精度	フルスケール記録計出力±1%、フルスケールパネルメーター2%、温度誤差±0.5°C
ゼロドリフト	24時間あたり0.5 μ V以下、1°Cあたり0.1 μ V以下
雑音	0.1 μ VP-P以下
入力インピーダンス	1M Ω
最大ソースインピーダンス	100 Ω (これ以上のインピーダンスは精度が低下する)
立上がり時間	2秒 (10~90%)
記録計出力	10V フルスケール (10mA)
接続端子	コンスタンタン、バインディングポスト
電源	100V、50/60Hz
外部サイズ	235×305×135 (mm)
重量	3.3kg

表5-2 センサー部の仕様

型式	PST-55-SF
数量	40
乾湿温度計出力	25°Cにおいて0.47 μ V/bar±5%
湿度計出力	25°Cにおいて0.75 μ V/bar
冷却係数	40 μ V最低 (8mA、25°C)
レンジ	π v ÷ 0.75bars、25°C (π v=40 μ V で-53bars)
種類	PST-55 ステンレス・シールド

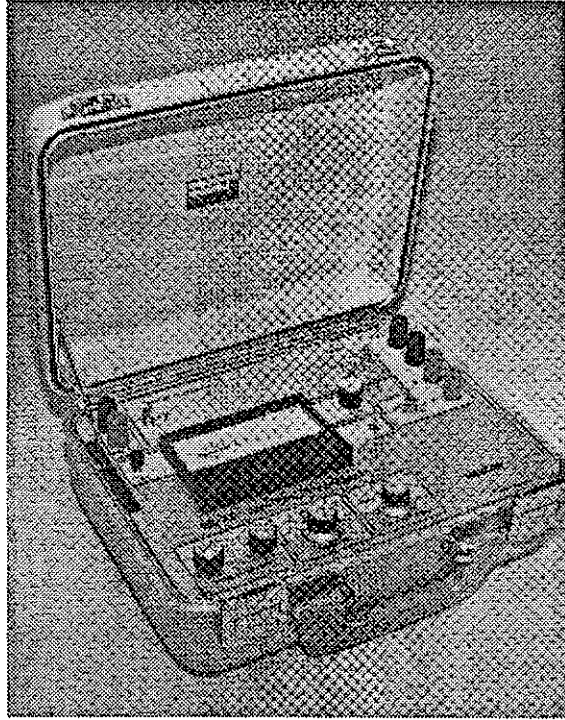


図5-1 水分計の検出器

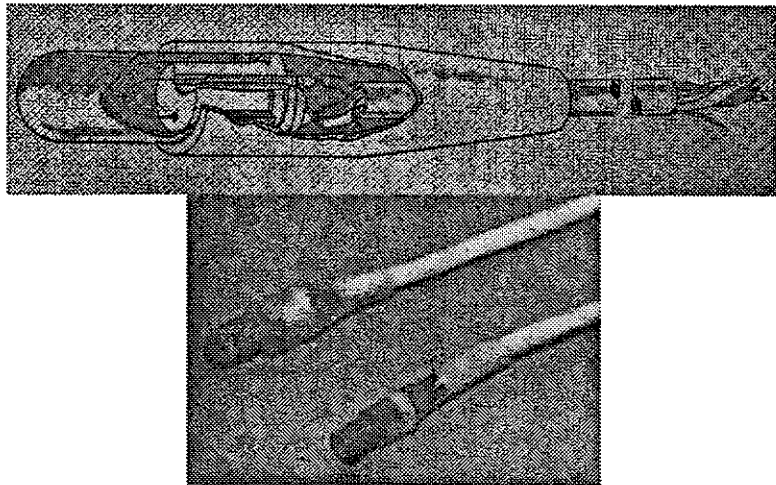


図5-2 水分計のセンサー部

5.2 湿度計

湿度計は緩衝材中の水分の移動を測定するために埋設する。この湿度計は予備試験から含水比 15% 以下の範囲での適用性が確認されており、緩衝材中においてヒーターに隣接する個所に設置する。予備試験結果については予備試験結果報告書を参照のこと。

仕様を表 5-3、表 5-4 に、湿度計の回路部を図 5-3、湿度計のセンサー部を図 5-4 に示す。

センサーと変換器はコネクタではなく、ハンダ付けになっているので、一度ハンダを除去してから設置し、その度再ハンダ付けをする。また、センサーと変換器は 1 対 1 対応になっているので、入れ換えないようにする。

表5-3 湿度計の仕様 (1)

型式		HMP233H		
製作		VAISALA		
数量		11 台		
測定項目	相対湿度	測定範囲		0~100%RH
		精度 (非直線性、ヒステリシス含む)	●高精度湿度基準で校正した場合の精度	±1%RH (0~90%RH)
			●飽和塩にて校正した場合の精度	±2%RH (90~100%RH)
				±3%RH (90~100%RH)
		●焼結金属フィルター装着時	±2%RH (0~90%RH)	
	応答速度 (90%応答、20℃、微風時)	約 15 秒		
		センサ	HUMICAP H センサ	
	温度	測定範囲		-40~+120℃
		精度 (20℃において)		±0.1℃ (電気的精度)
		温度係数 (回路部)		±0.005℃/℃
センサ		Pt100RTD1/3DIN43760B		
演算項目	露点温度	指示範囲		-60~+100℃
	混合比	指示範囲		0~500g/kg d.a.
	絶対湿度	指示範囲		0~600g/m ³
	湿球温度	指示範囲		0~100℃
出力	選択およびスケリングが可能なアナログ出力		4~20mA	
	アナログ出力の精度 (20℃において)		±0.05%フルスケール	
	アナログ出力の温度係数		±0.005%フルスケール/℃	
	シリアル出力		RS232C	

表5-4 湿度計の仕様 (2)

一般仕様	電源	24VDC (20~28V)
	消費電流	最大100mA
	外部負荷	<500 Ω
	回路部の使用温度範囲	-40~+60°C
	保管温度	-40~+70°C
	ハウジングの材質	G-AISI12(DIN1725)
	ハウジングガラス	IP65(NEMA4)
	プッシング	径7~10mmのケーブル用 (8×0.5mm シールドケーブル)
	センサーケーブル長	φ 6mm×長さ 10m
	センサ保護	ステンレス焼結フィルタ
	E.M.I.プロテクション	EN55022、classB、IEC801-3、Level3

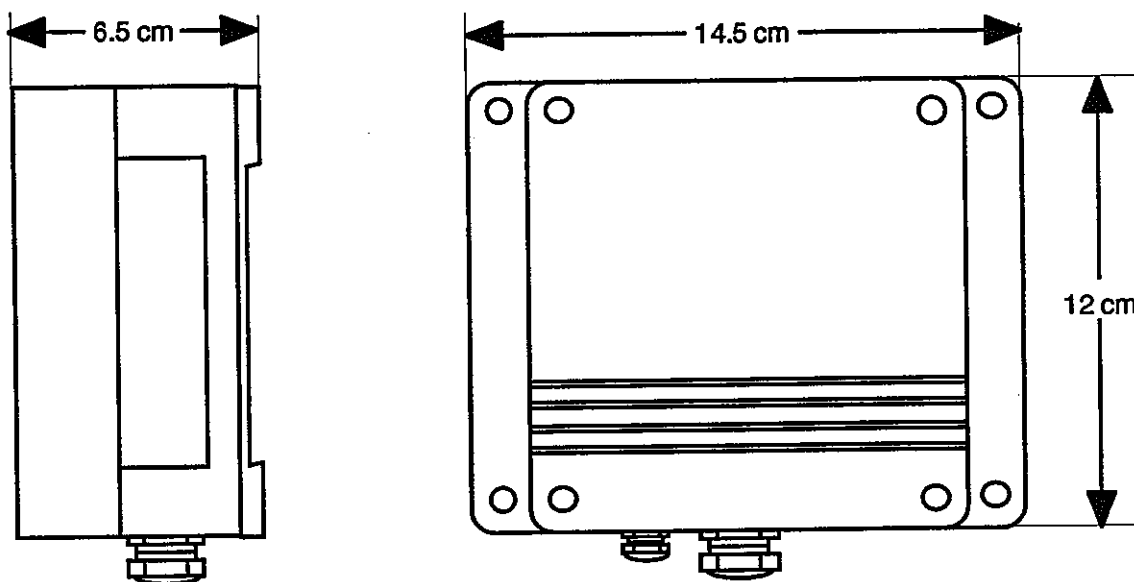


図5-3 湿度計の回路部

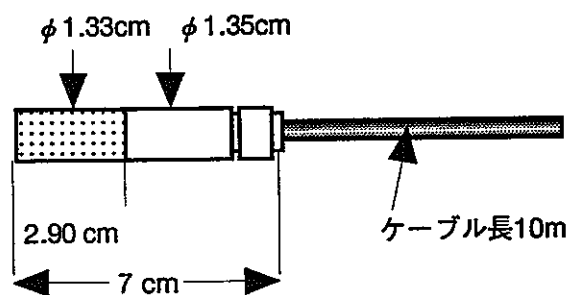


図5-4 湿度計のセンサ部

5.3 熱電対

緩衝材中の温度を測定するために熱電対を設置する。緩衝材中はすべてシースで、試験ピットの外の大気中に防湿結線部が来るように設置する。

熱電対の仕様を表5-5に、外観図を図5-5に示す。

表5-5 熱電対の仕様

型式	T35型Tタイプ	
製作	助川電気工業(株)	
数量	28	
測定範囲	-200~+350℃	
精度	-200~0℃	±0.75%
	0℃~350℃	±1.5%
分解能	0.1℃	
補償導線長さ	30m	

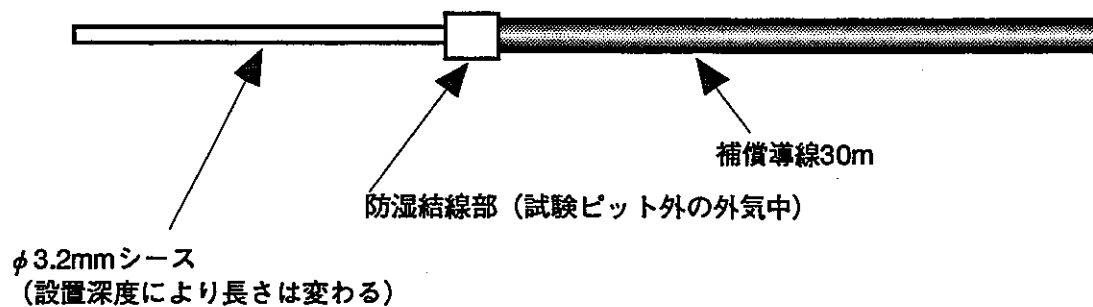


図5-5 熱電対の外観図

5.4 圧力計

緩衝材の膨潤圧力を測定するために圧力計を試験ピット内壁、ヒーター表面、コンクリート蓋の裏側に設置する。表5-6に圧力計の仕様を、図5-6に圧力計の外観図を示す。

表5-6 圧力計の仕様

型式	PS25-50S
製作	(株)エス・テ研究所
数量	30
定格出力	50kg/cm ²
分解能	1/1000
精度	1/100
出力電圧	10000 $\mu\epsilon$
過負荷	150%FS
非直線性 (&ヒステリシス)	0.5%FS
再現性	0.1%FS
温度特性	0.02%FS/°C (0~+40°C)
入出力抵抗	500 Ω
ブリッジ電圧	6VDC
使用温度範囲	-15~+100°C
中心たわみ	直径比 1/5000
コード	ϕ 4コード 30m先端むきだし
外形寸法	ϕ 25×6t

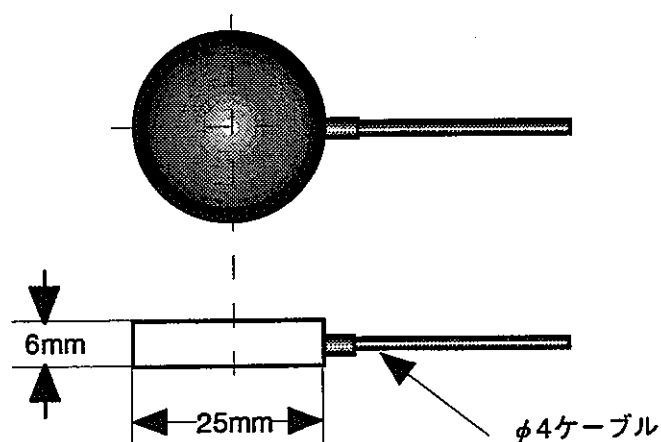


図5-6 圧力計の外観図

5.5 ひずみ計

緩衝材の局所的なひずみを測定するためにひずみ計を埋設する。

ひずみ計の仕様を表5-7に、外観図を図5-7に示す。

表5-7 ひずみ計の仕様

型式	KM-50F
製作	(株)東京測器研究所
数量	13本
分解能	1/1000
精度	1%
測定範囲	±5000×10 ⁻⁶ ひずみ
非直線性	1%RO
入出力抵抗	350 Ω 4ゲージ法
定格出力	4.0 mV/V
標点距離	50mm
見掛けの弾性係数	400kgf/cm ²
許容温度範囲	-20～+80℃
入出力ケーブル	φ 6.0.3 4心クロロブレン先端ばら線、35m

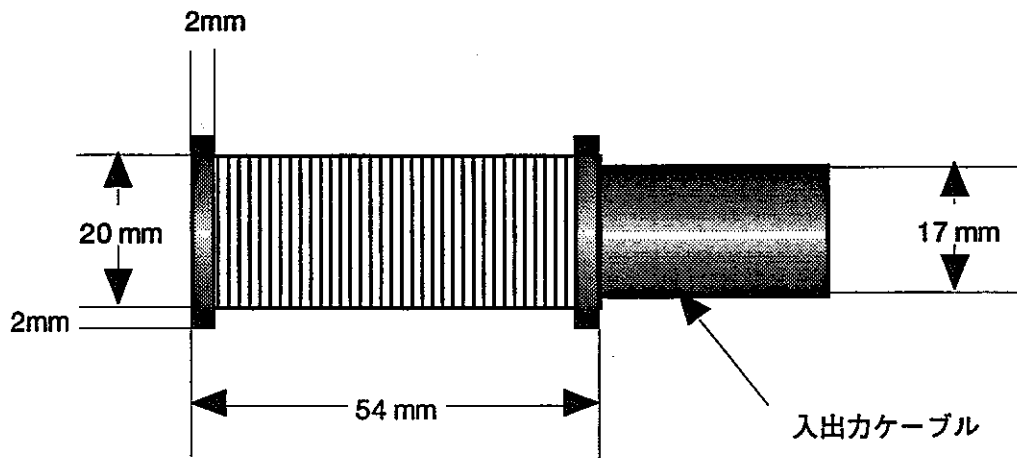


図5-7 ひずみ計の寸法図

5.6 間隙水圧計

間隙水圧計設置の目的は、ベントナイト中の水分の移動や岩盤からベントナイトへの水分の移動などを計測するためである。

間隙水圧計の外観は図 5-8 に示すような外径 30mm の圧力トランスデューサー型で温度も同時に測定できる。測定部は敏感なので、フラットフィルター (10 μ) により保護されている。

間隙水圧計の仕様を表 5-8 に示す。

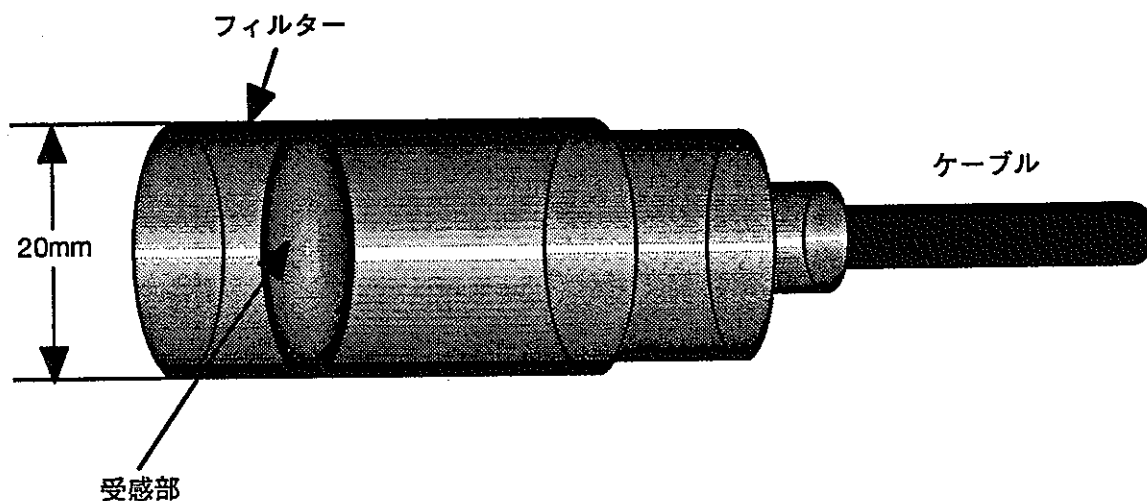


図5-8 間隙水圧計の外観図

表5-8 間隙水圧計の仕様

項目	仕様	
製造	共和電業	
型式	BP-5KBT	
定格出力	0.75mV/V 以上 (2000 \times 10 ⁻⁶ ひずみ以上)	
非直線性	2%RO	
推奨印加電圧	2~10V	
入出力抵抗	350 Ω	
許容過負荷	150%	
重量	約 320g	
測定範囲	温度	-30~+70 $^{\circ}$ C
	圧力	2kgf/cm ² (許容負荷を考慮すると 3kgf/cm ²)

5.7 熱流束計

熱流束計はヒーターからの熱流束を測定するために設置する。熱流束計の仕様は表5-9に、外観図は図5-9に示す。

表5-9 熱流束計の仕様

型式	MF-9L
製作	英弘精機株式会社
数量	6
コード長	35m
測定範囲	$1 \sim 10^3 \text{W/m}^2$
分解能	1/1000
感度定数	0.016V/Wm^2
使用温度	$-20 \sim +120^\circ\text{C}$
内部抵抗	220Ω
熱抵抗	$0.0076^\circ\text{Cmh/kcal}$
基材	ポリエステル
寸法	$L80 \times W20 \times T1.7(\text{mm})$

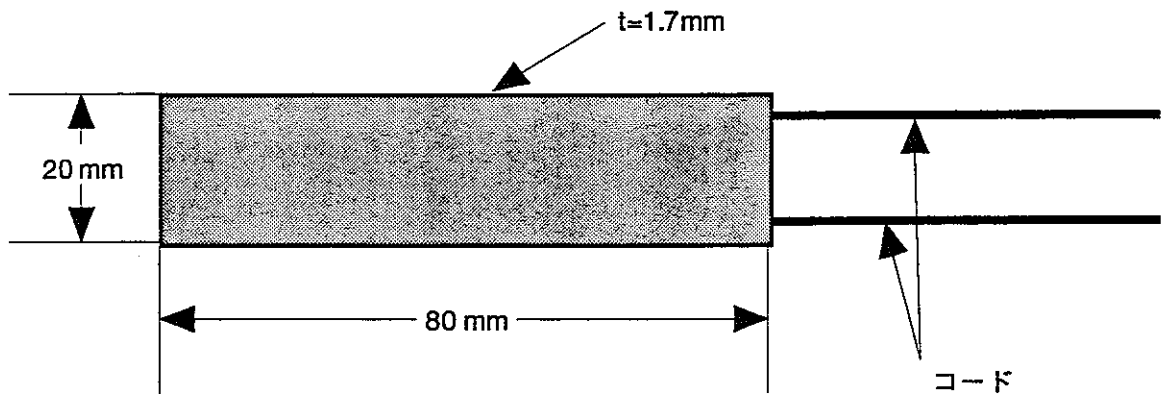


図5-9 熱流束計の外観図

6 埋設計測機器適用試験

6.1 目的

釜石での人工バリア試験の際に、緩衝材中に湿度計およびサイクロメーター（水分計）を埋設し、含水比を測定する。しかし、湿度計およびサイクロメーターは直接的に緩衝材の含水比を測定することはできない。そこで、既知の含水比を有する緩衝材の供試体にそれぞれの計測機器を埋設し、その出力値と含水比の関係を求め、原位置で得られた湿度計およびサイクロメーターの出力を含水比に変換する際にその関係を適用する。また、湿度計とサイクロメーターの含水比の適用範囲も合わせて検証する。

6.2 湿度計

6.2.1 試験方法

(1) 試料

5種類の含水比を有するベントナイトの試料を用いて埋設計の確認試験を実施する。試験予定含水比は5%、10%、12%、15%、20%とした。初期含水比約16%の粒状ベントナイト試料を用い、重量法で含水調整をした。その後、ビニール袋に詰めて、約7日間養生してから測定用供試体を作製した。

湿度計確認試験の測定用供試体は内径7cm、高さ10cmの亚克力円筒に予め含水比を調整済みの粒状ベントナイトを詰めた後、円筒に蓋をし、密閉容器とした。供試体の乾燥密度は 1.65g/cm^3 を目標とした。上蓋の中心部およびベントナイト試料にドリル等で穴を空け、湿度計センサーの感知部が供試体の上下のほぼ中心部に配置するように埋設し、センサーケーブルの口元にシリコンゴムでシールした。供試体の状況を模式的に図6-1に示す。なお、供試体の密封について、室温条件において、1週間程度その重量変化を測定して、密封性に問題がないことを確認した。すなわち、数日の計測過程において、容器内の水分量が変化しないことを確認した。

(2) 装置および試験方法

湿度計確認試験に用いた装置の一覧を表6-1、設定した試験条件を表6-2に示す。表からわかるとおり、含水比が約5%～20%となる試料を用いて、予定測定温度の環境を与えて計測を実施した。

また、試験手順は以下のとおり。

- ・ 供試体作製のための粒状ベントナイト試料の含水調整後、養生する。
- ・ 供試体を作製し、センサーを埋設する。
- ・ 供試体を恒温室内にセットする。
- ・ 恒温室の予定温度制御プログラムをスタートさせる。温度設定は図6-2に示す。
- ・ 計測プログラムをスタートさせる。計9日間の温度制御期間中は連続計測とし、データはテキストファイルで保存した。

・計測終了後の供試体を解体して、試料の含水比分布を測定した。含水測定は供試体を図6-3に示すように分割して実施した。

また、センサーは供試体の中心に設置するので、その部分の温度が恒温室内の温度に追随するかどうかを確認するために、予備試験として、同様なベントナイトダミー供試体を用いて内部の温度分布を測定した。温度測定は熱電対を用いて実施し、熱電対の配置は図6-4に示すとおりである。

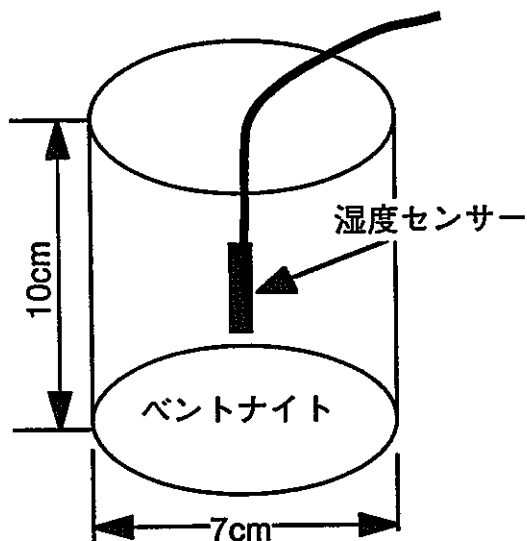


図6-1 湿度計模式図

表6-1 湿度計確認試験に用いた装置の一覧

装置名	メーカー・型式	備考
湿・温度変換機	VAISALA 社 HMP233	2 台使用
恒温室	いすゞ製作所 (株) 熱風循環式定温恒温機そよかぜ ESF-115S	
Data Aquisition Contorler	日本電気三栄 (株) 7V14	アナログデータを変換
パソコン		データ記録

表6-2 湿度計試験の設定条件

含水比	5%	10%	12%	15%	20%
温度					
加熱 25℃	○	○	○	○	○
加熱 45℃	○	○	○	○	○
加熱 65℃	○	○	○	○	○
加熱 80℃	○	○	○	○	○
冷却 65℃	○	○	○	○	○
冷却 45℃	○	○	○	○	○
冷却 25℃	○	○	○	○	○

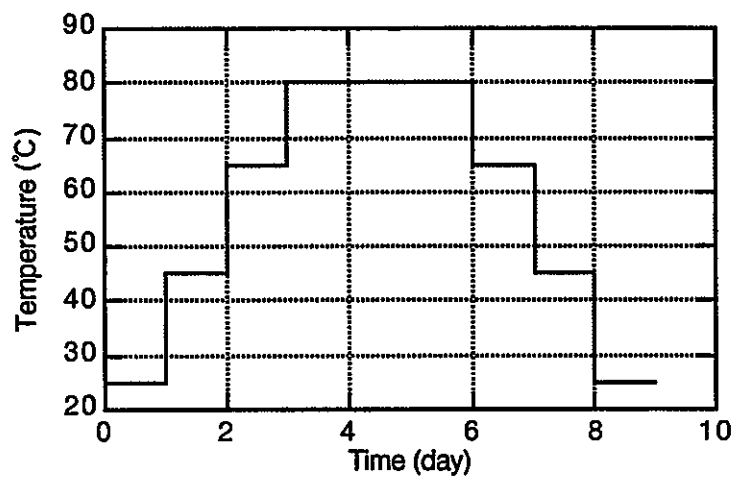


図6-2 湿度計計測時の温度設定

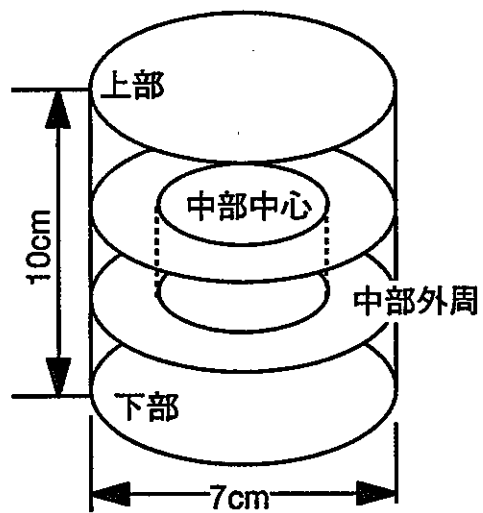


図6-3 含水分布測定試料

6.2.2 試験結果

(1) 温度分布予備試験

図6-4に供試体の内部温度の測定の様子を示す。また、その結果を図6-5に示す。恒温室内（供試体の外部周面）の温度がステップ状に20℃程上昇すると、供試体内部の内周面、中間、中心の順で外部温度に追随し、約2～3時間程度で、各箇所の温度がほぼ一定になる。したがって、アクリル円筒様式の供試体では、試料内部での温度の不均一分布はないことが分かった。

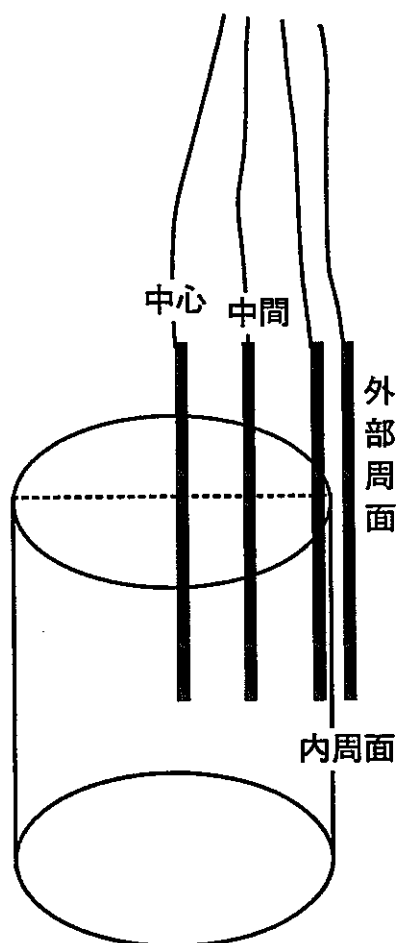
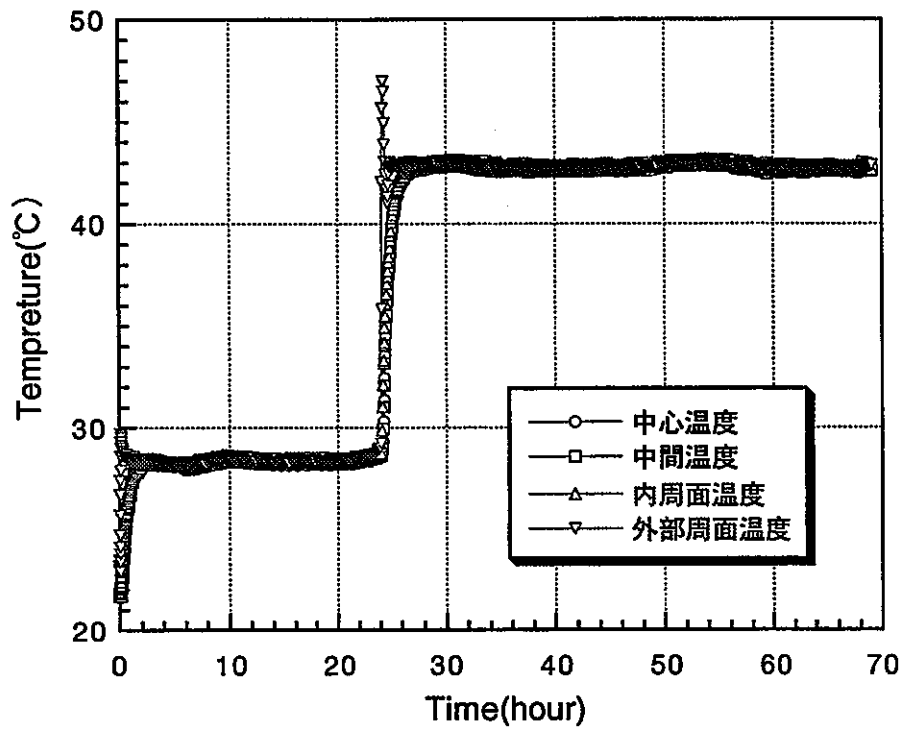
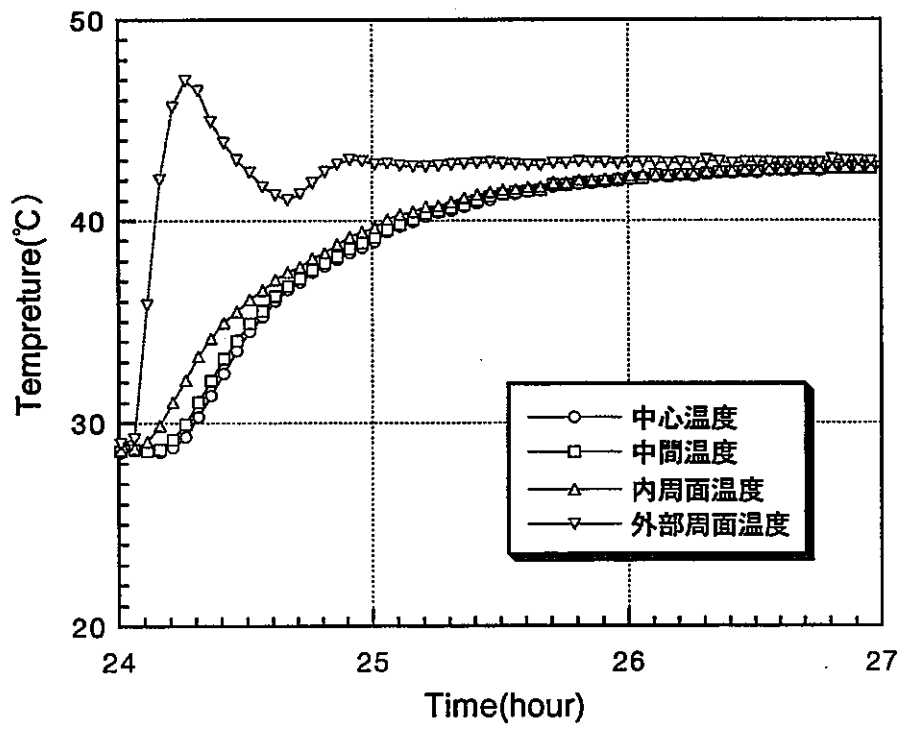


図6-4 熱電対配置図



a) 全体図



b) 拡大図

図6-5 供試体内の温度分布

(2) 含水比測定結果

湿度計測定後の供試体を解体して、内部の含水比分布を測定した結果を表6-3に示す。まず、アクリル容器内のペントナイトの含水分布はほぼ均一であることが分かった。また、目標含水比はやや異なる場合もあるが、概ね予定どおりであった。

表6-3 湿度計測定用供試体内部の含水比分布 (%)

目標含水比 (%)		5%	10%	12%	15%	20%	
実 測 値 (%)	上 部	6.40	10.6	11.1	15.9	18.9	
	中 部	中心	6.39	10.3	10.9	15.8	19.0
		外周	6.27	10.6	11.1	15.9	19.0
	下 部	6.33	11.0	11.1	15.9	19.0	
平均		6.35	10.6	11.1	15.9	19.0	

(3) 湿度・温度計による測定結果

湿度・温度計による5試料の測定結果を図6-6～図6-10に示す。含水比6.35%、10.6%および11.1%の試料は、温度が高くなるにつれ相対湿度が大きくなる。含水比15.9%および19.0%の試料においては、ほとんどすべての温度条件では、相対湿度がほぼ100%になっている。したがって、相対湿度の計測結果から含水比を求める間接的な測定法の測定可能領域の上限としてはすでに15.9%の含水比が相当していることを示唆していると考えられる。

相対湿度、温度および含水比の三者の関係を求めるためには、上述の計測過程における各ステップの温度に対応する湿度を代表値として、読み取ることとした。前述の容器内の温度分布に関する予備試験の結果から、温度が次のステップに上げてから約3時間経過すると、ほぼ一定となることから代表値として、3時間経過時点の相対湿度、温度を採用した。その値を表6-4に示す。また、これらの値による温度と相対湿度との関係を図6-11に示す。データ点数がやや少ないものの、温度が高くなるにともなって、相対湿度がほぼ直線的に大きくなる。さらに、温度をパラメーターとして、相対湿度と含水比との関係を図6-12に示す。これによると、含水比が15.9%までの範囲内で大きくなるにともない、相対湿度が直線的に大きくなる。全体の含水比～相対湿度関係は変曲点を有し、含水比15.9%が折れ点となっている。したがって、19%の含水比は湿度による含水比間接測定法の測定限界を超えていることを意味していると思われる。

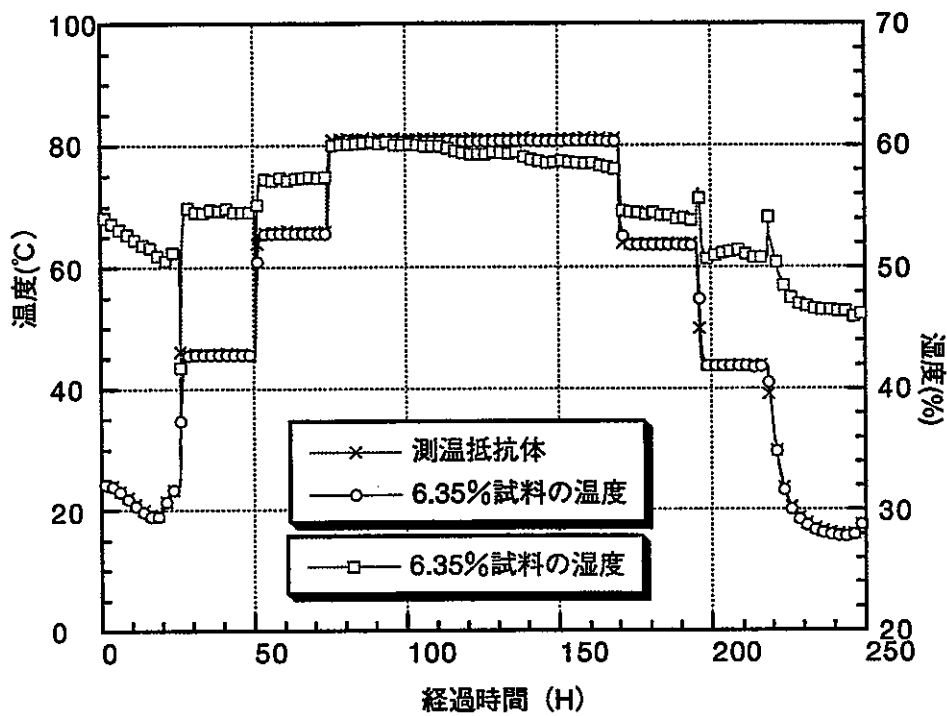


図6-6 含水比6.35%試料の湿度・温度測定結果

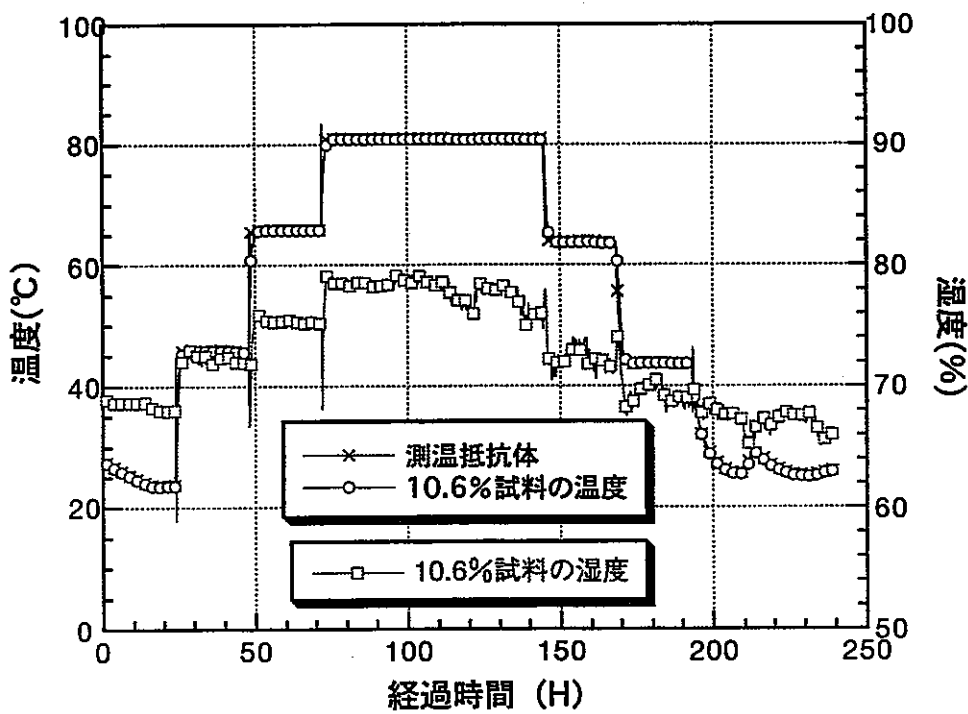


図6-7 含水比10.6%試料の湿度・温度測定結果

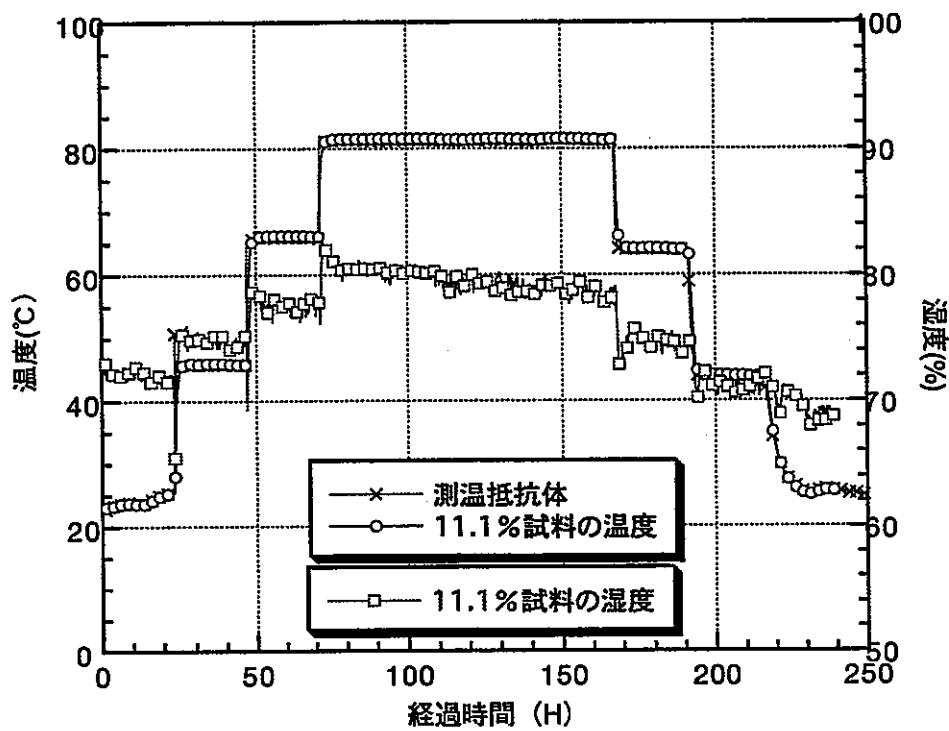


図6-8 含水比11.1%試料の湿度・温度測定結果

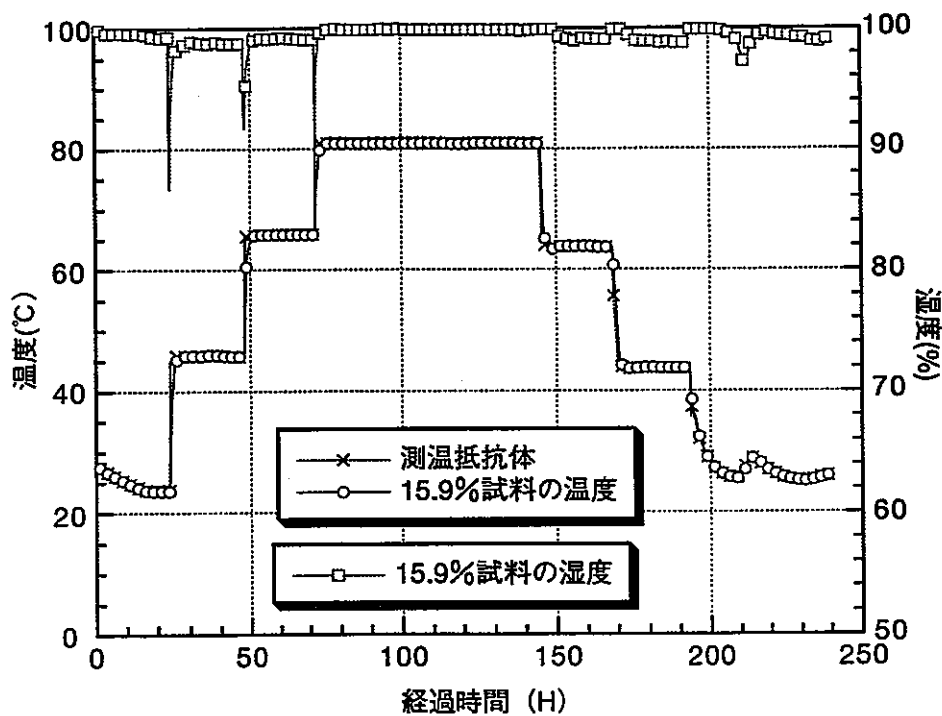


図6-9 含水比15.9%試料の湿度・温度測定結果

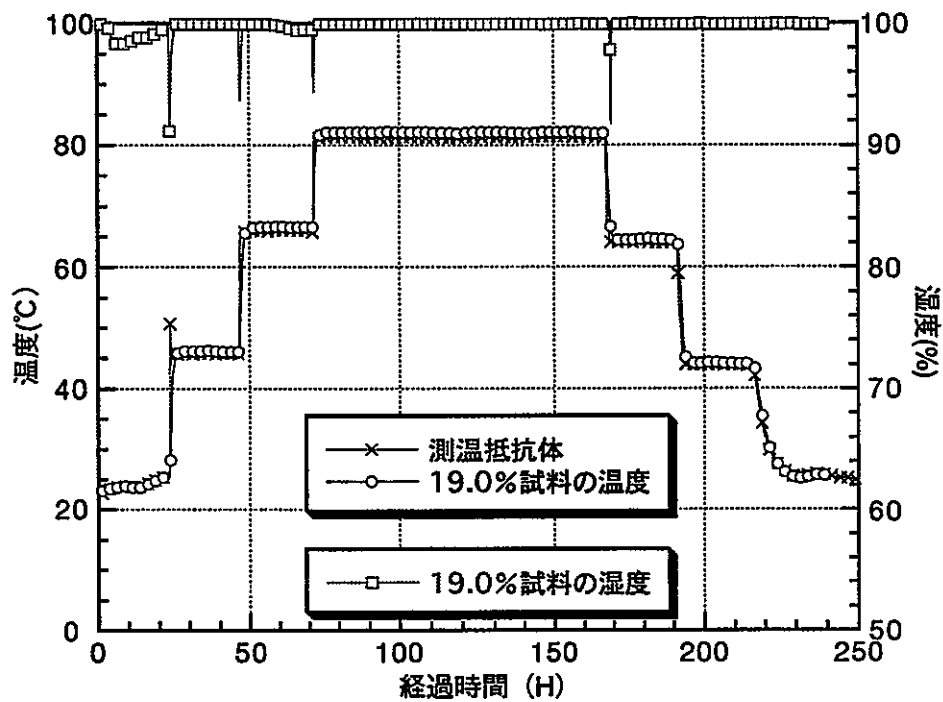


図6-10 含水比19%試料の湿度・温度測定結果

表6-4 各温度ステップにおける相対湿度

含水比 6.35%		含水比 10.6%		含水比 11.1%		含水比 15.9%		含水比 19.0%	
温度	相対湿度	温度	相対湿度	温度	相対湿度	温度	相対湿度	温度	相対湿度
℃	%	℃	%	℃	%	℃	%	℃	%
24.1	53.7	25.6	68.6	23.6	72.2	25.8	99.6	23.7	98.6
45.6	54.7	45.8	73.3	45.8	75.7	45.8	98.7	46.0	99.9
65.5	57.3	65.6	75.7	65.9	78.5	65.7	98.9	66.3	99.9
80.6	60.1	80.7	79.0	81.1	81.9	80.7	99.9	81.7	99.9

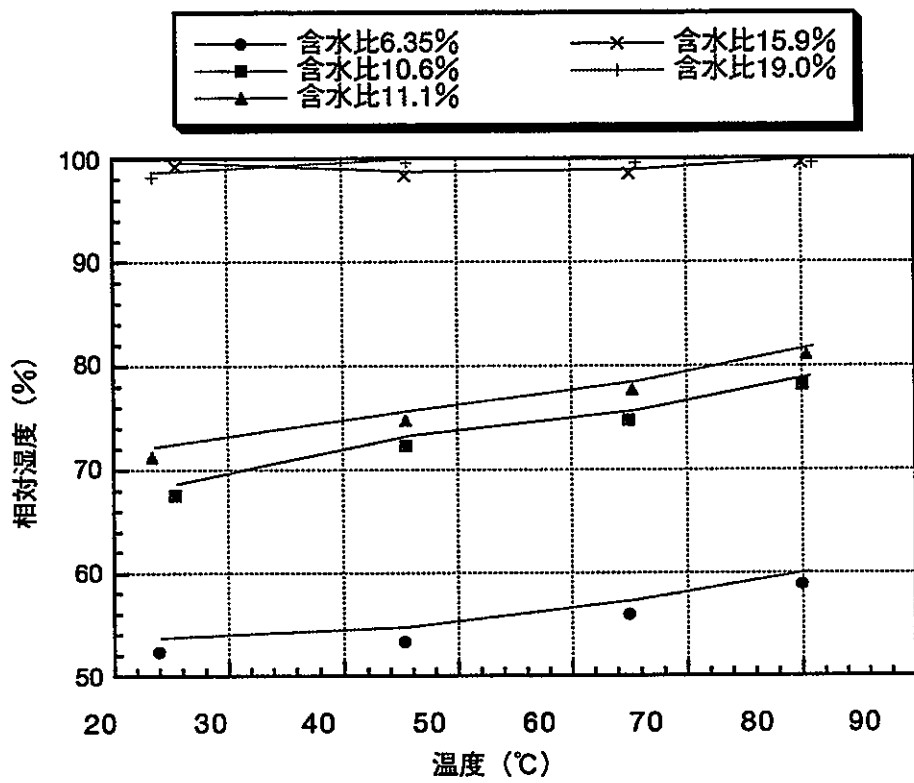


図6-11 含水比をパラメーターとしての温度と相対湿度の関係

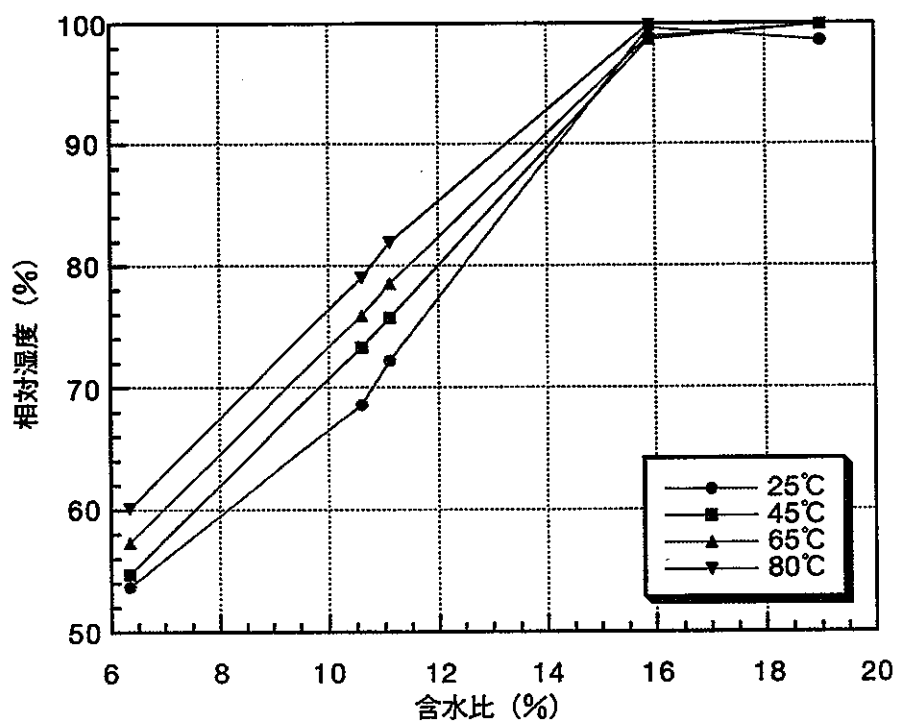


図6-12 温度をパラメーターとしての含水比と相対湿度の関係

(4) 温度、相対湿度による含水比の多重回帰式

含水比が6.35%、10.6%、11.1%、15.9%の4試料の相対湿度および温度を独立変数として、含水比を従属変数として、「 $z=ax+by+c$ 」で表わされる多重線形回帰解析を行い、その結果が次式になる。

$$W=0.220H-0.0257T-4.52 \quad (6-1)$$

ここでは、 W は含水比（%）、 H は相対湿度（%）、 T は温度（℃）である。ただし、多重回帰式の適用上限は含水比16%までとする。

相対湿度、温度の実測値を用いて(6-1)式に代入して求めた含水比と試料の実際の含水比との対比を図6-13に示す。両者は非常に良く一致していると考えられる。

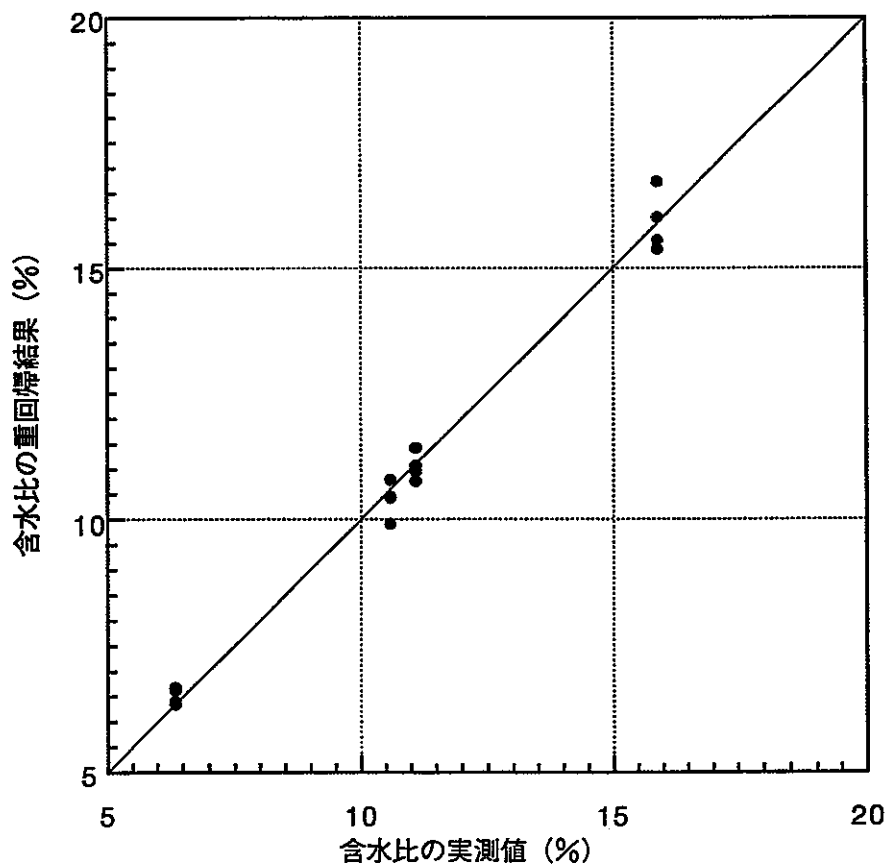


図6-13 含水比の重回帰結果と実測値の比較

6.3 サイクロメーター（水分計）

6.3.1 試験方法

(1) 試験内容

以下の内容の試験を実施した。

- ・サイクロメーターの測定可能範囲を調べるために、室温で各種含水比を有する粒状ベントナイトを用いて予備試験を実施した（以下、予備試験と称する）。測定はC-52 チャンバーおよび PST-55 チャンバーを用いて行った。
- ・室温～80℃の範囲でステップ状に温度変化させた4段階において、約15%、20%、25%の含水比を有するベントナイト試料のケミカルポテンシャルを測定した（以下、チャンバー加熱試験と称する）。
- ・サイクロメーターによる温度測定結果の検定。

(2) 試料

湿度計確認試験と同様に、初期含水比約16%の粒状ベントナイト試料（クニゲル）を用いて、重量法で含水調整を行い、ビニール袋詰め状態で約7日間養生してから測定用供試体を作製した。

予備試験は含水比約10%、15%、20%、25%、30%、35%の6試料を用いた。

チャンバー加熱試験は含水比約15%、20%、25%の3試料について実施した。

埋設センサー加熱試験は含水比約15%、20%、25%、30%、35%の5試料について実施した。

これらの実施条件は一覧表にまとめると、表6-5になる。

表6-5 サイクロメーター確認試験の実施条件

含水比	10%	15%	20%	25%	30%	35%	測定温度
予備試験	○	○	○	○	○	○	室温のみ
チャンバー加熱試験	×	○	○	○	×	×	25、45、65、80℃

(3) 装置および試験方法

サイクロメーターに関する確認試験に用いた装置の一覧を表6-5に示す。

予備試験は次の手順で行なった。

- ・ベントナイト粒状試料の含水調整後、養生する。
- ・試料をそれぞれC-52 チャンバーと PST-55 チャンバーに適量を詰める。
- ・露点法でケミカルポテンシャルを測定する。

- ・サイクロメトリック法でケミカルポテンシャルを測定する。
- ・計測終了後に、PST-55 チャンバー内の試料の含水比を測定する。

チャンバー加熱試験は次の手順で行った。

- ・ベントナイト粒状試料の含水調整後、養生する。
- ・試料をそれぞれ C-52 チャンバーと PST-55 チャンバーに適量を詰める。
- ・C-52 チャンバーと PST-55 チャンバーを恒温室内にセットする。
- ・露点法とサイクロメトリック法で室温におけるケミカルポテンシャルを測定する。
- ・恒温室の予定温度制御プログラムをスタートさせる。温度設定は湿度計確認試験と同様に図 6-1.2 に示すとおりである。
- ・温度を次のステップに上げる直前に、露点法とサイクロメトリック法で室温におけるケミカルポテンシャルを測定する。すなわち、所定温度に上げてから約 24 時間程経過した後、測定を実施した。サイクロメーターの計測時の温度設定を模式的に図 6-14 に示す。
- ・計測終了後に、PST-55 チャンバー内の試料の含水比を測定する。

また、サイクロメーターの取り扱い説明書によれば、センサー内の熱電対の非線形による誤差があるが、説明書に掲載している温度補正カーブは最大 60℃までしかないので、サイクロメーターによる温度測定の検定テストを実施した。検定テストは PST-55 チャンバーのセンサーとその近傍に設置した測温抵抗体を用い、恒温室で最高 80℃まで行った。

表6-6 湿度計確認試験に用いた装置の一覧

装置名	メーカー・型式	備考
サイクロメーター	米国 WESCOR 社 HR-33T	
サンプルチャンバー	米国 WESCOR 社 C-52-SF	
サンプルチャンバー	自製 PST-55	
恒温室	いすゞ製作所 (株) 熱風循環式定温恒温機そよかぜ ESF-115S	
Data Aquisition Contorler	日本電気三栄 (株) 7V14	アナログデータを変換
パソコン		データ記録

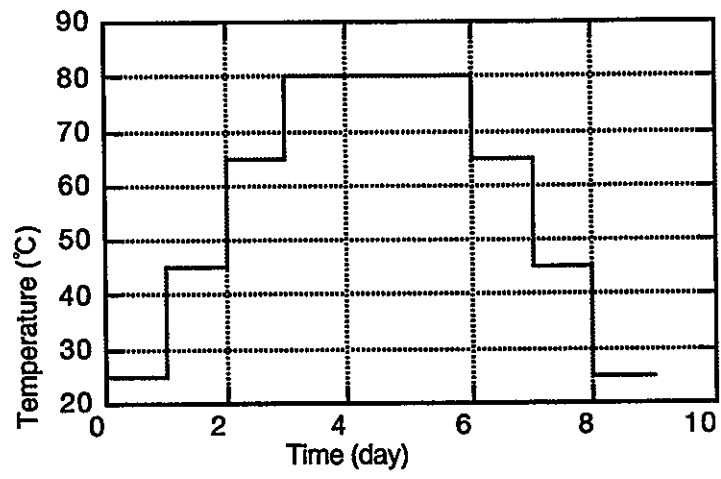


図 6-14サイクロメーター計測の温度設定模式図

6.3.2 試験結果

(1) 予備試験

サイクロメーターの測定範囲に関する予備試験結果の一覧を表 6-7に示す。

また、C-52 チャンバーと PST-55 チャンバーによる試験結果をそれぞれ

図 6-15と図 6-16に示す。まず、22℃の常温条件で、含水比が約 10%の試料について、サイクロメーター

は測定不能であることを確認した。含水比とケミカルポテンシャルとの関係については、含水比が高くなるにともない、ケミカルポテンシャルの絶対値が小さくなる。

また、露点法とサイクロメトリック法とは概ね同様な傾向を示している。

表 6-7 サイクロメーターの測定範囲に関する予備試験結果一覧

		C-52サンプルチャンバー				PST-55サンプルチャンバー				
含水比 (%)		温度	露点法		サイクロメトリック法		露点法		サイクロメトリック法	
各供試体	平均値	(°C)	D1(μV)	P1(bar)	D1(μV)	P1(bar)	D1(μV)	P1(bar)	D1(μV)	P1(bar)
10.4	10.6	22.0	不能		不能		不能		不能	
10.6										
10.8										
16.4	16.6	22.0	40.8	-54.4	19.0	-40.4	32.3	-43.1	17.8	-37.9
16.6										
16.7										
21.1	20.9	22.0	21.0	-28.0	9.5	-20.2	19.8	-26.4	11.0	-23.4
20.9										
20.8										
26.6	26.4	22.0	14.5	-19.3	7.6	-16.2	17.5	-23.3	9.8	-20.9
26.2										
26.4										
27.2	28.2	22.0	14.2	-18.9	7.4	-15.7	11.8	-15.7	3.8	-8.1
29.2										
28.1										
36.1	36.3	22.0	8.4	-11.2	4.6	-9.8	8.8	-11.7	4.5	-9.6
35.9										
37.0										

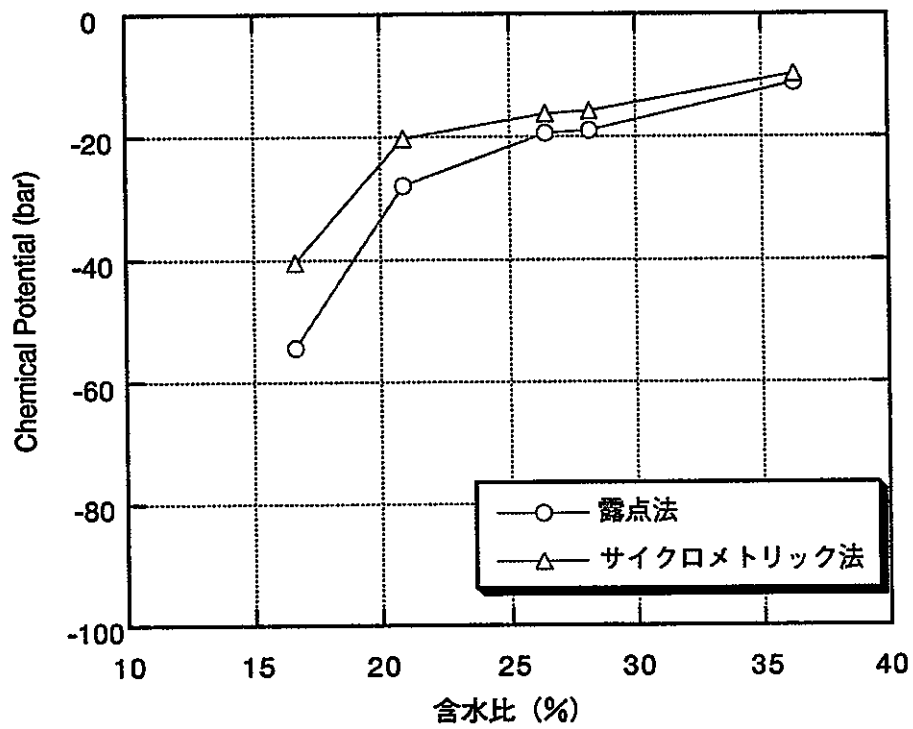


図6-15 PST-55チャンバーによる含水比とケミカルポテンシャルとの関係

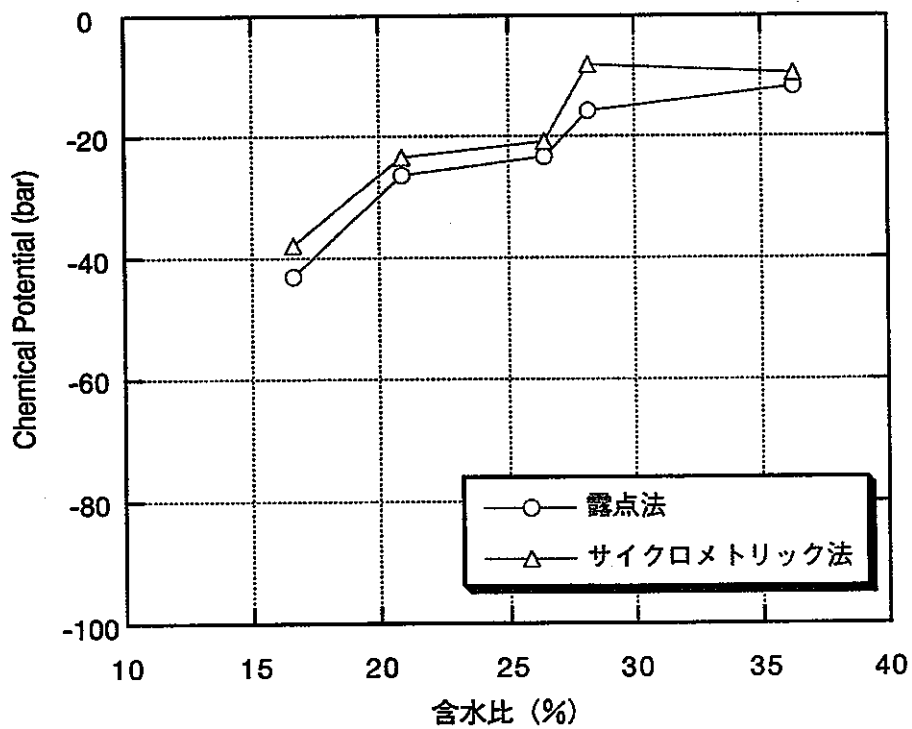


図 6-16 PST-55チャンバーによる含水比とケミカルポテンシャルとの関係

(2) チャンバー加熱試験

含水比が14.5%、19.5%および23.2%の試料によるサイクロメーター確認試験の結果一覧をそれぞれ、表6-8、表6-9、

表6-10に示す。

以下にその特徴を述べる。

- ・2種類のチャンバーを用い露点法とサイクロメトリック法で測定した4種類のケミカルポテンシャルと温度との関係について、いずれのケースでも、温度が高くなるとポテンシャルの絶対値が大きくなる。一部のデータを除いて、両者の関係は概ね直線関係を示している。
- ・ケミカルポテンシャルと含水比との関係について、含水比が大きくなると、いずれのケースとも、ケミカルポテンシャルの絶対値が小さくなる、その関係が上に凸のカーブである。
- ・両測定法について、常温領域ではサイクロメトリックによるポテンシャル絶対値は露点法の値と概ね同程度であるが、温度が高くなると、サイクロメトリック法による値は大きくなる。
- ・2種類のチャンバーで比較すると、常温領域では、両者はほぼ同程度の値を示しているが、温度が高くなると、C-52チャンバーは大きくなっている。加熱前後のベントナイト試料を含むチャンバーの重量を測定すると、C-52チャンバーの場合、試料が約0.3gと少ない上、密閉性が良くないので、試料中の含水が一部発散したとの結果を確認した（表6-8～表6-10を参照）。高温におけるC-52の結果はこの影響を受けている恐れがあると考えられる。

表6-8 含水比14.5%の試料によるチャンバー加熱試験結果一覧

C-52 チャンバー、加熱過程					C-52 チャンバー、冷却過程				
温度	露点法		マイクロメトリック法		温度	露点法		マイクロメトリック法	
(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)	(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)
23.0	43.0	-57.3	21.5	-45.7	84.5	不能		不能	
47.0	45.5	-60.7	33.5	-71.3	64.5	不能		不能	
68.0	52.5	-70.0	44.5	-94.7	43.0	不能		不能	
85.0	63.5	-84.7	57.5	-122.3	27.0	不能		不能	

(注意)

チャンバーの重量：434.43g

試料重量：0.27g

試験前のチャンバー+試料の重量：434.70g

試験後のチャンバー+試料の重量：434.64g

試験前後重量差：0.06g (含水比が14.5%からほぼ絶乾になった)

PST-55 チャンバー、加熱過程					PST-55 チャンバー、冷却過程				
温度	露点法		マイクロメトリック法		温度	露点法		マイクロメトリック法	
(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)	(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)
23.5	39.5	-52.7	21.0	-44.7	83.5	45.0	-60.0	41.0	-87.2
47.0	41.0	-54.7	30.0	-63.8	66.5	43.0	-57.3	38.0	-80.9
68.0	43.5	-58.0	37.0	-78.7	43.0	43.0	-57.3	29.0	-61.7
85.5	44.5	-59.3	40.5	-86.2	28.0	38.5	-51.3	21.5	-45.7

(注意)

チャンバーの重量：946.03g

試料重量：38.48g

試験前のチャンバー+試料の重量：984.51g

試験後のチャンバー+試料の重量：984.47g

試験前後重量差：0.04g (含水比が14.5%から14.4%に低下)

試料含水比：14.5% (試験後試料で測定)

表6-9 含水比19.5%の試料によるチャンバー加熱試験結果一覧

C-52 チャンバー、加熱過程					C-52 チャンバー、冷却過程				
温度	露点法		マイクロメトリック法		温度	露点法		マイクロメトリック法	
(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)	(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)
25.0	17.5	-23.3	9.5	-20.2	84.5	43.5	-58.0	39.5	-84.0
46.0	21.0	-28.0	15.5	-33.0	65.0	43.0	-57.3	37.0	-78.7
68.0	25.5	-34.0	22.0	-46.8	44.0	39.0	-52.0	30.5	-64.9
85.5	31.0	-41.3	28.0	-59.6	25.5	35.0	-46.7	22.0	-46.8

(注意)

チャンバーの重量：434.40g

試料重量：0.18g

試験前のチャンバー+試料の重量：434.58g

試験後のチャンバー+試料の重量：434.56g

試験前後重量差：0.02g (含水比が19.5%から6.7%に低下)

PST-55 チャンバー、加熱過程					PST-55 チャンバー、冷却過程				
温度	露点法		マイクロメトリック法		温度	露点法		マイクロメトリック法	
(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)	(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)
25.5	19.0	-25.3	11.0	-23.4	85.0	27.0	-36.0	24.5	-52.1
46.0	20.5	-27.3	15.5	-33.0	65.0	25.0	-33.3	22.0	-46.8
68.0	24.0	-32.0	20.5	-43.6	42.0	22.0	-29.3	18.0	-38.3
84.5	25.0	-33.3	23.0	-48.9	25.5	19.5	-26.0	14.0	-29.8

(注意)

チャンバーの重量：945.96g

試料重量：38.25g

試験前のチャンバー+試料の重量：984.21g

試験後のチャンバー+試料の重量：984.12g

試験前後重量差：0.09g (含水比が19.5%から19.3%に低下)

試料含水比：19.5% (試験後試料で測定)

表 6-10 含水比 14.5%の試料によるチャンバー加熱試験結果一覧

C-52 チャンバー、加熱過程					C-52 チャンバー、冷却過程				
温度	露点法		マイクロメトリック法		温度	露点法		マイクロメトリック法	
(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)	(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)
23.5	12.5	-16.7	6.4	-13.6	83.0	24.5	-32.7	22.0	-46.8
46.0	16.0	-21.3	12.0	-25.5	65.0	22.5	-30.0	19.5	-41.5
67.0	19.0	-25.3	16.0	-34.0	44.0	19.0	-25.3	15.0	-31.9
83.0	22.5	-30.0	20.0	-42.6	24.0	15.5	-20.7	9.5	-20.2

(注意)

チャンバーの重量：433.58g

試料重量：0.33g

試験前のチャンバー+試料の重量：433.91g

試験後のチャンバー+試料の重量：433.89g

試験前後重量差：0.02g (含水比が 23.2% から約 14.8% に低下)

PST-55 チャンバー、加熱過程					PST-55 チャンバー、冷却過程				
温度	露点法		マイクロメトリック法		温度	露点法		マイクロメトリック法	
(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)	(℃)	D1(μ V)	P1(bar)	A1(μ V)	P1(bar)
24.0	9.5	-12.7	5.5	-11.7	84.0	17.5	-23.3	16.0	-34.0
46.0	15.0	-20.0	11.5	-24.5	66.0	17.5	-23.3	15.0	-31.9
67.0	17.0	-22.7	14.0	-29.8	45.0	17.5	-23.3	14.5	-30.9
83.0	17.0	-22.7	15.0	-31.9	24.0	15.0	-20.0	10.0	-21.3

(注意)

チャンバーの重量：945.92g

試料重量：42.93g

試験前のチャンバー+試料の重量：988.85g

試験後のチャンバー+試料の重量：988.82g

試験前後重量差：0.03g (含水比が 23.2% から 23.1% に低下)

試料含水比：23.2% (試験後試料で測定)

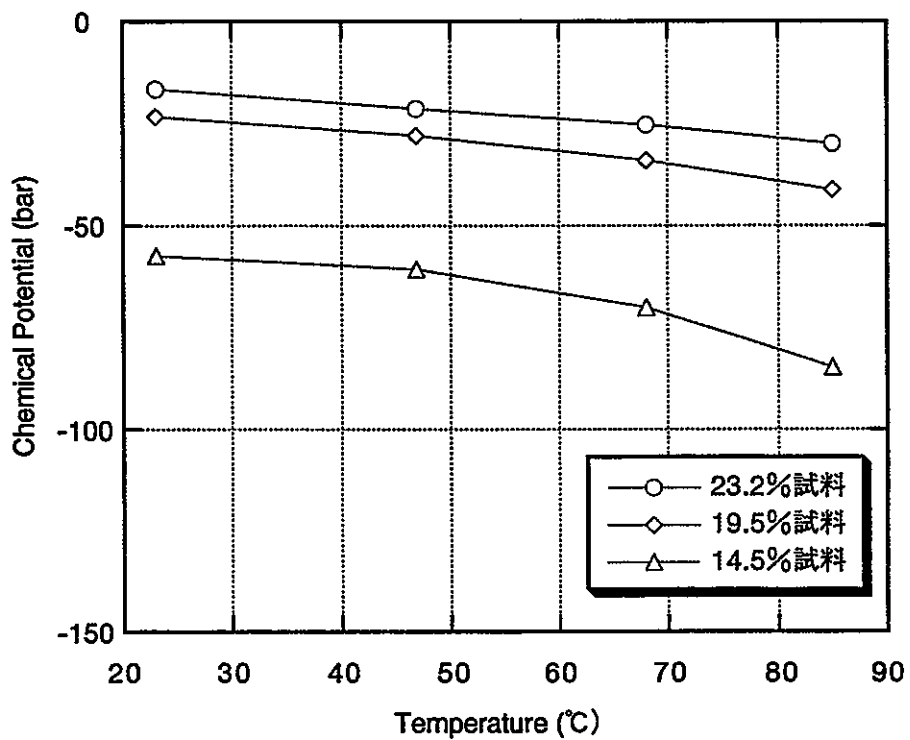


図6-17 温度とケミカルポテンシャルとの関係 (C-52、露点法)

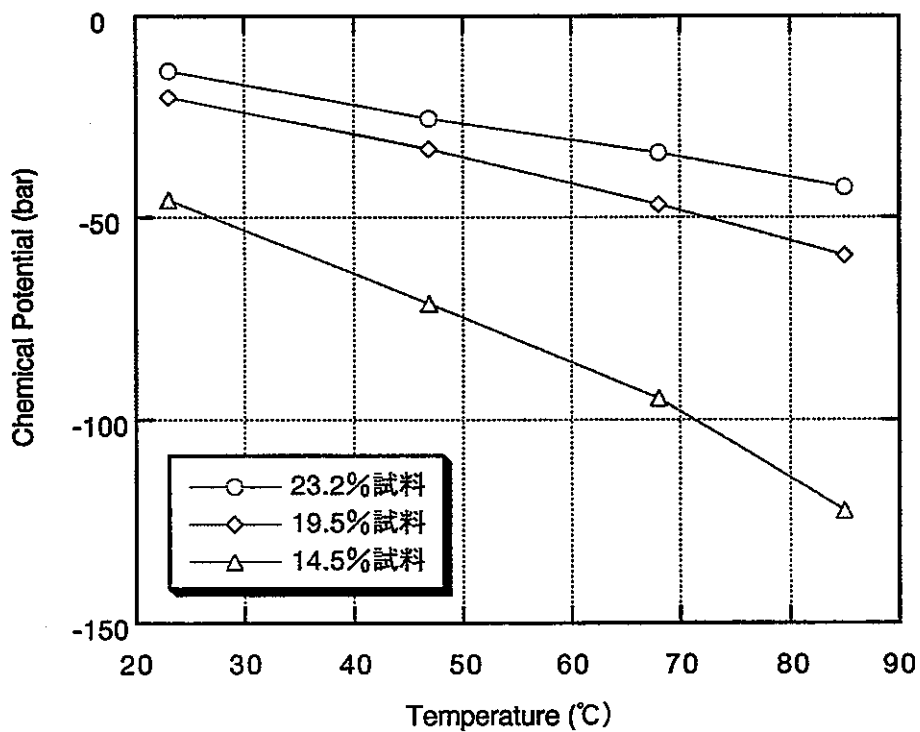


図6-18 温度とケミカルポテンシャルとの関係 (C-52、サイクロメトリック法)

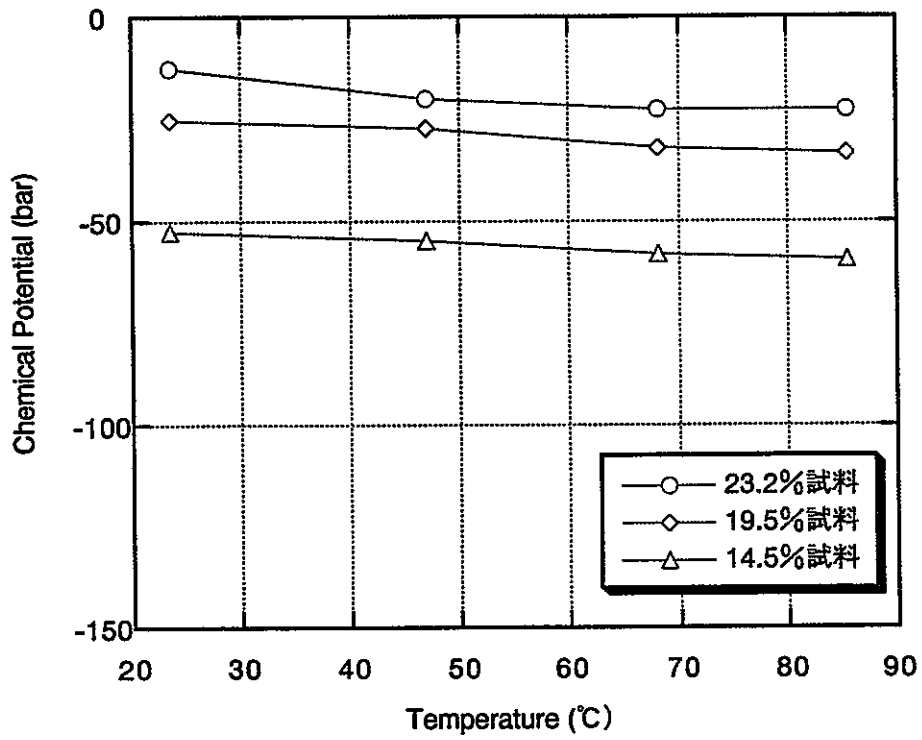


図6-19 温度とケミカルポテンシャルとの関係 (PST-55、露点法)

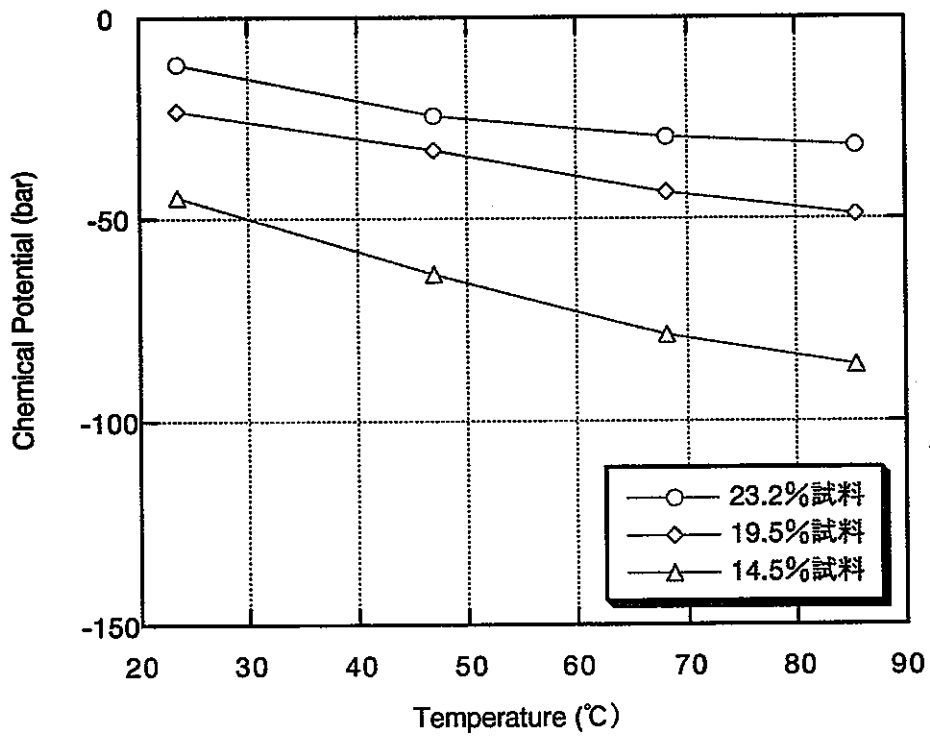


図6-20 温度とケミカルポテンシャルとの関係 (PST-55、サイクロメトリック法)

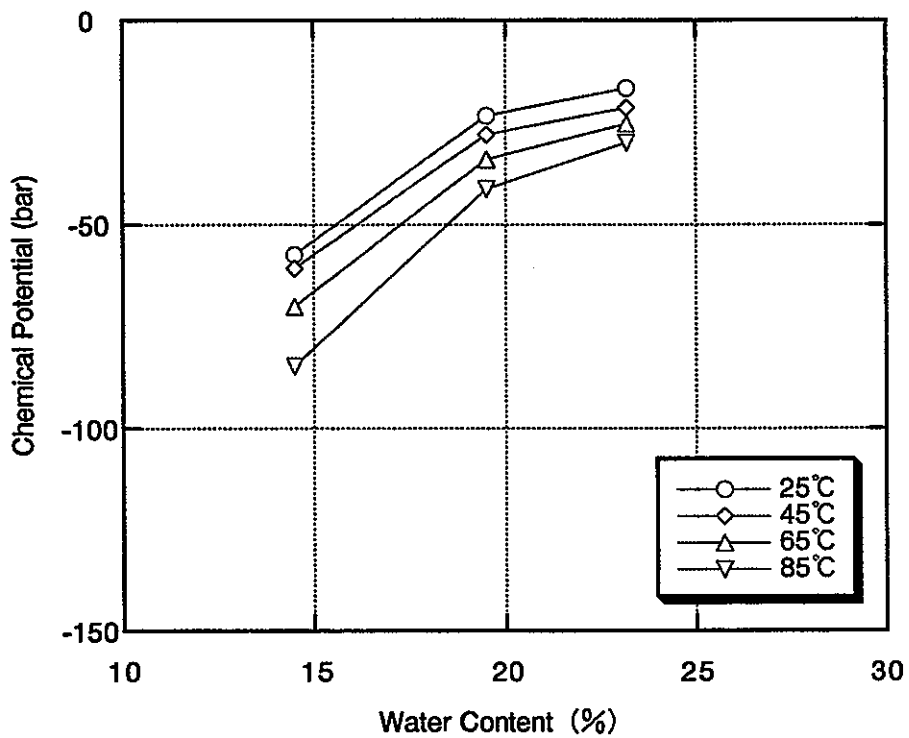


図6-21 含水比とケミカルポテンシャルとの関係 (C-52、露点法)

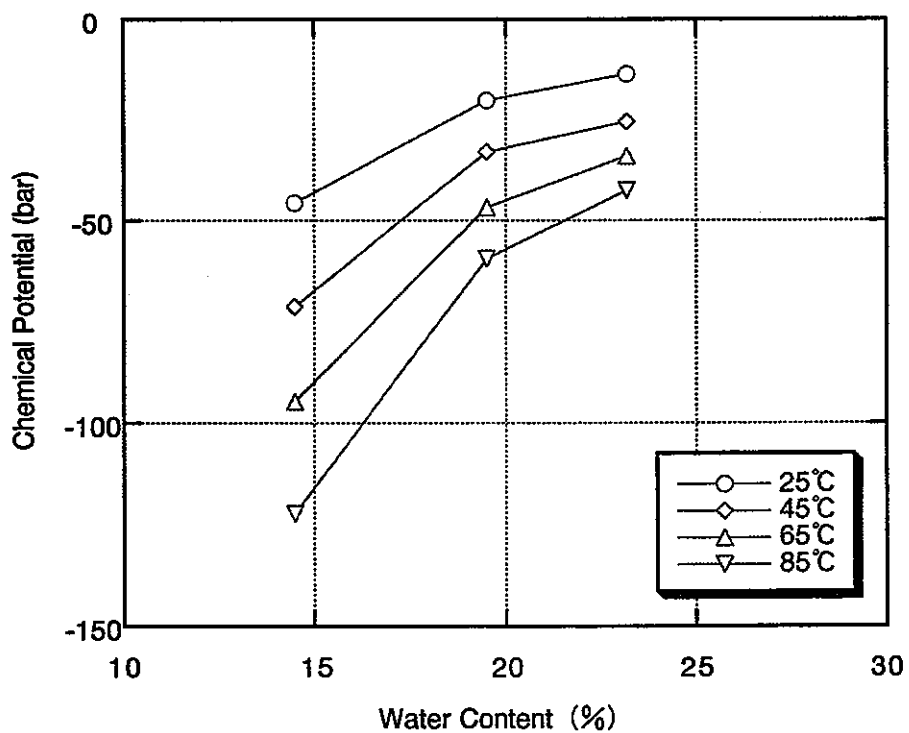


図6-22 含水比とケミカルポテンシャルとの関係 (C-52、サイクロメトリック法)

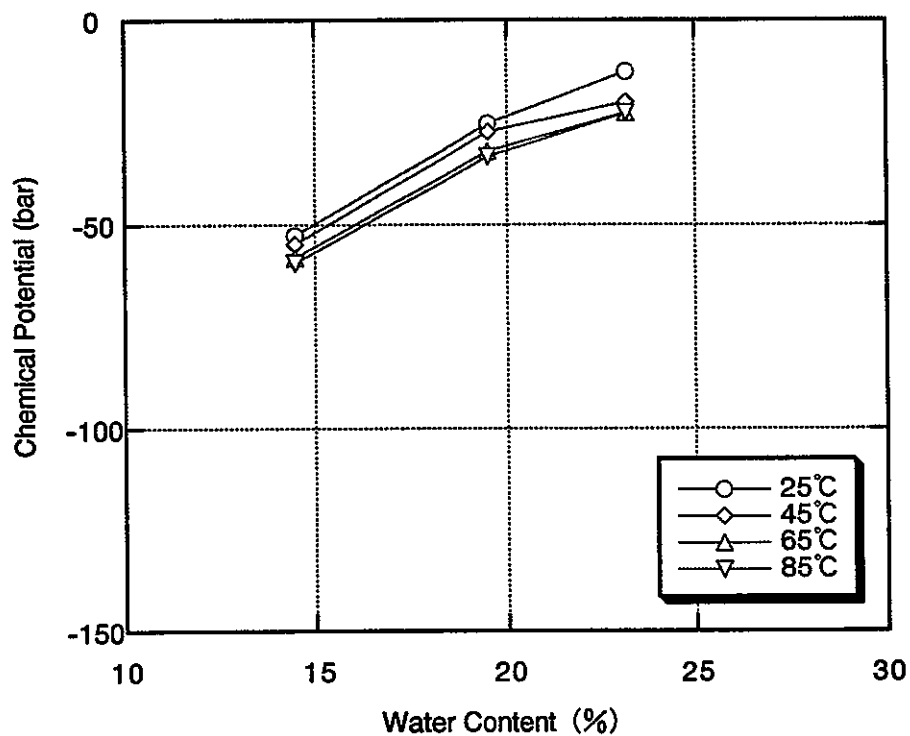


図6-23 含水比とケミカルポテンシャルとの関係 (PST-55、露点法)

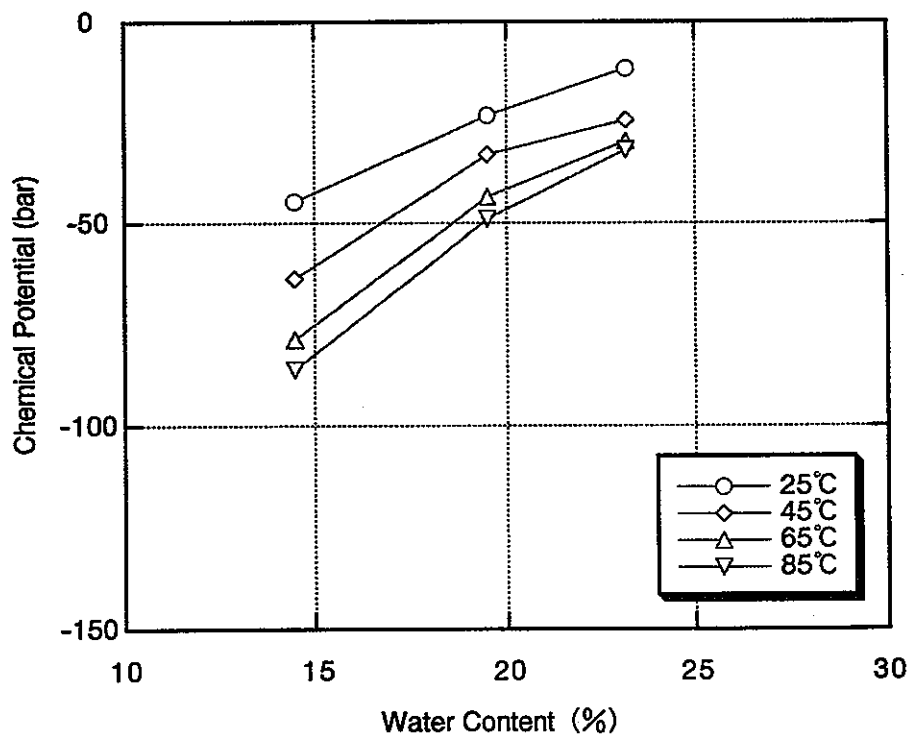


図6-24 含水比とケミカルポテンシャルとの関係 (PST-55、サイクロメトリック法)

(3) チャンバー加熱試験結果による多重回帰式

含水比が14.5%、19.5%、23.2%の3試料についてケミカルポテンシャルおよび温度を独立変数、含水比を従属変数として、「 $z=ax+by+c$ 」で表わされる多重線形回帰解析を行った。多重回帰は C-52 と PST-55 の2種類サンプルチャンバーで露点法とサイクロメトリック法の2方法で測定した4種類のケミカルポテンシャルを用い、別々に行った。その結果が6-2～6-5式に示すとおりである。

C-52、露点法：

$$W=0.0606P+0.219T+7.52 \quad (6-2)$$

ここで、Wは含水比(%)、PはC-52チャンバーを用い、露点法で測定したケミカルポテンシャル(bar)、Tは温度(℃)である。

C-52、サイクロメトリック法：

$$W=0.114P+0.284T+7.28 \quad (6-3)$$

ここで、Wは含水比(%)、PはC-52チャンバーを用い、サイクロメトリック法で測定したケミカルポテンシャル(bar)、Tは温度(℃)である。

PST-55、露点法：

$$W=0.0265P+0.198T+7.19 \quad (6-4)$$

ここで、Wは含水比(%)、PはPST-55チャンバーを用い、露点法で測定したケミカルポテンシャル(bar)、Tは温度(℃)である。

PST-55、サイクロメトリック法：

$$W=0.102P+0.254T+7.50 \quad (6-5)$$

ここで、Wは含水比(%)、PはPST-55チャンバーを用い、露点法で測定したケミカルポテンシャル(bar)、Tは温度(℃)である。

ただし、6-2～6-5式の含水比適用下限は含水比15%とする。また、温度Tはサイクロメーターのセンサーの値を用いることとする。当センサーの熱電対の非線形性による誤差はあるが、キャリブレーションを目的とした室内試験と原位置の測定とは、同一タイプのセンサーを用いるので、温度の値としては誤差を含むものの、これにより求めた含水比には温度の誤差が相殺される。

ケミカルポテンシャル、温度の実測値を用いて6-2～6-5式に代入して求めた含水比と試料の実際の含水比との対比を図6-25～図6-28に示す。多重線形回帰解析による含水比の式は、含水比とポテンシャルとの関係が比線形性であるため、最大40%程度の誤差が生じることが分かった。

したがって、ケミカルポテンシャルと含水比との関係が上に凸のカーブとなっていることから、ポテンシャルの対数および温度を独立変数、含水比を従属変数で、「 $W=a\ln(-P)+bT+c$ 」で表わされ

る非線形多重回帰解析を行った。その結果を以下に示す。

C-52、露点法：

$$W = -7.66 \ln(-P) + 0.0636T + 43.03 \quad (6-6)$$

ここで、Wは含水比（%）、PはC-52チャンバーを用い、露点法で測定したケミカルポテンシャル（bar）、Tは温度（℃）である。なお、lnは自然対数である。

C-52、サイクロメトリック法：

$$W = -7.71 \ln(-P) + 0.133T + 40.59 \quad (6-7)$$

ここで、Wは含水比（%）、PはC-52チャンバーを用い、サイクロメトリック法で測定したケミカルポテンシャル（bar）、Tは温度（℃）である。

PST-55、露点法：

$$W = -7.70 \ln(-P) + 0.0419T + 43.29 \quad (6-8)$$

ここで、Wは含水比（%）、PはPST-55チャンバーを用い、露点法で測定したケミカルポテンシャル（bar）、Tは温度（℃）である。

PST-55、サイクロメトリック法：

$$W = -7.74 \ln(-P) + 0.102T + 41.52 \quad (6-9)$$

ここで、Wは含水比（%）、PはPST-55チャンバーを用い、露点法で測定したケミカルポテンシャル（bar）、Tは温度（℃）である。

ケミカルポテンシャル、温度の実測値を用いて6-6～6-9式に代入して求めた含水比と試料の実際の含水比との対比を図6-29～図6-32に示す。6-6式～6-9式で室内のキャリブレーションデータを良く表現できたことが分かった。

現在、含水比とケミカルポテンシャルとの関係については3個のデータしかなく、非線形多重回帰式を求めるためにはやや不足するとも思われ、新たなデータの取得は今後の課題と考えられる。

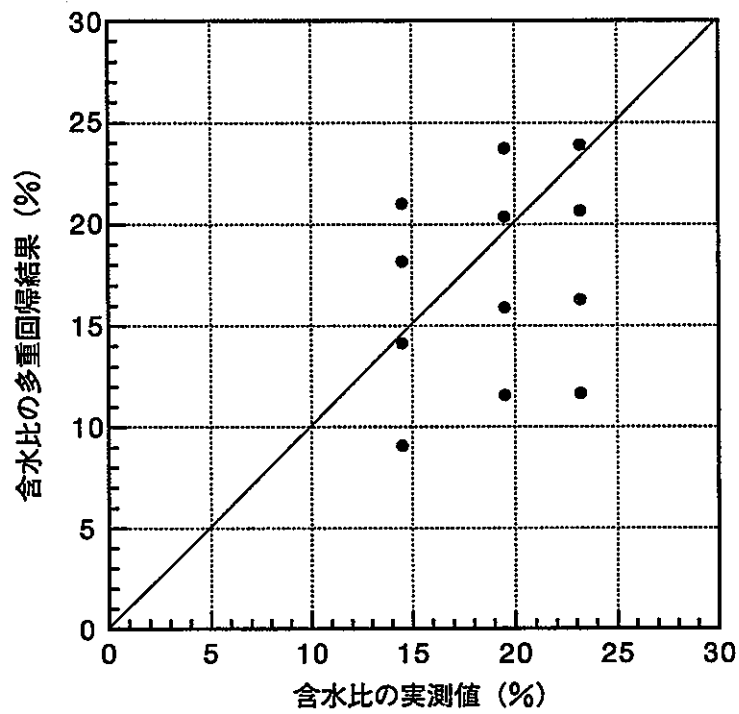


図6-25 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (C-52、露点法)

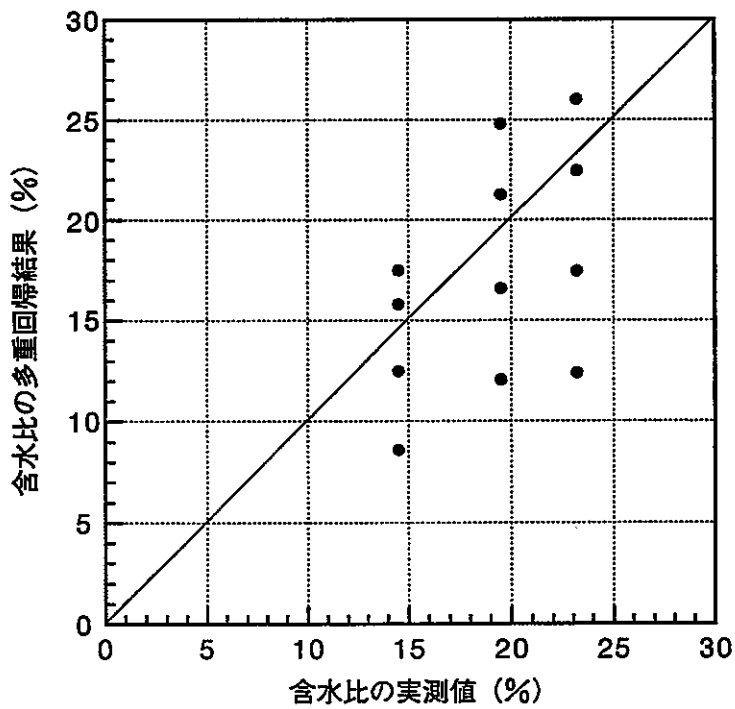


図6-26 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (C-52、サイクロメトリック法)

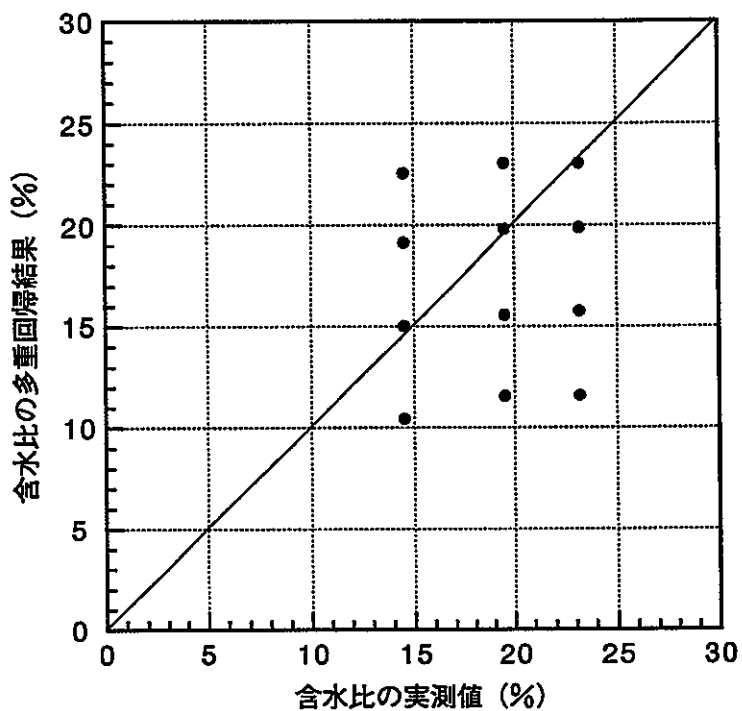


図6-27 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (PST-55、露点法)

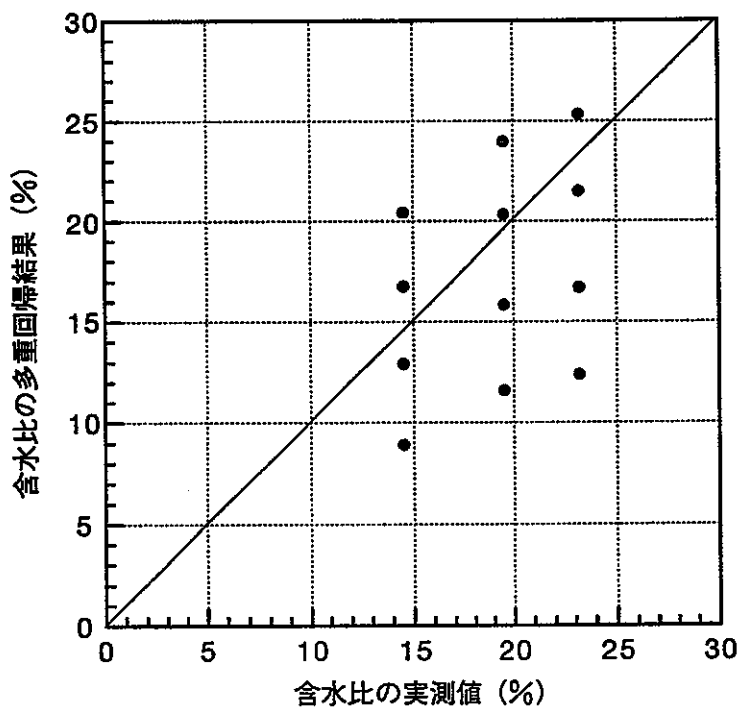


図6-28 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (PST-55、サイクロメトリック法)

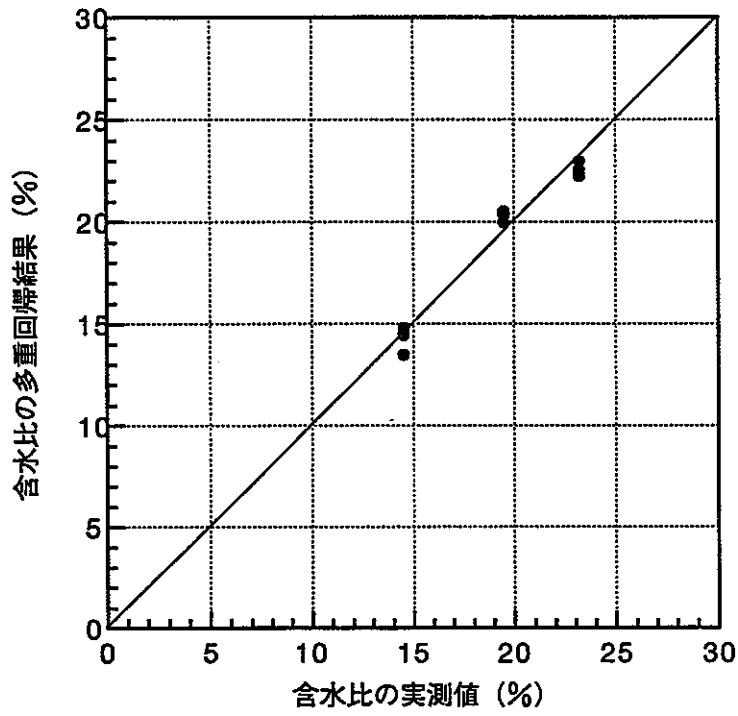


図6-29 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (C-52、露点法)

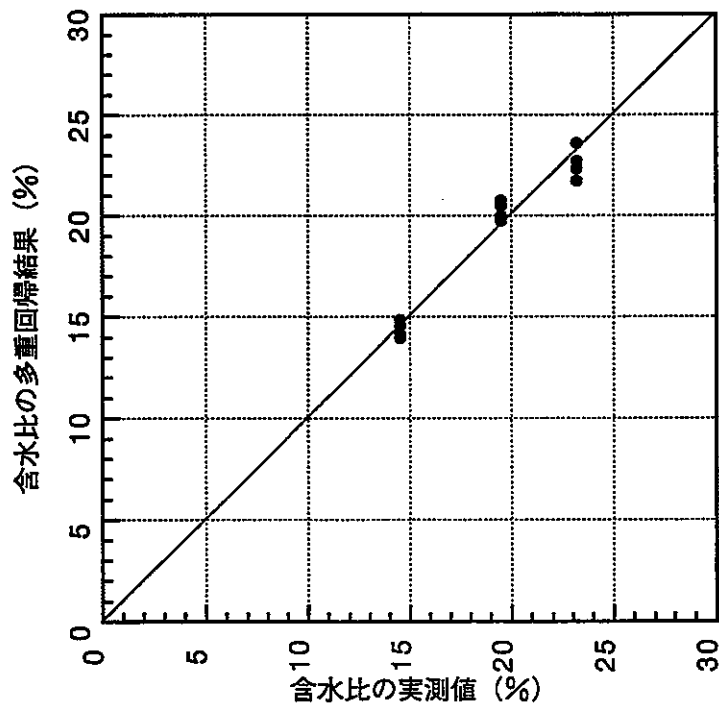


図6-30 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (C-52、サイクロメトリック法)

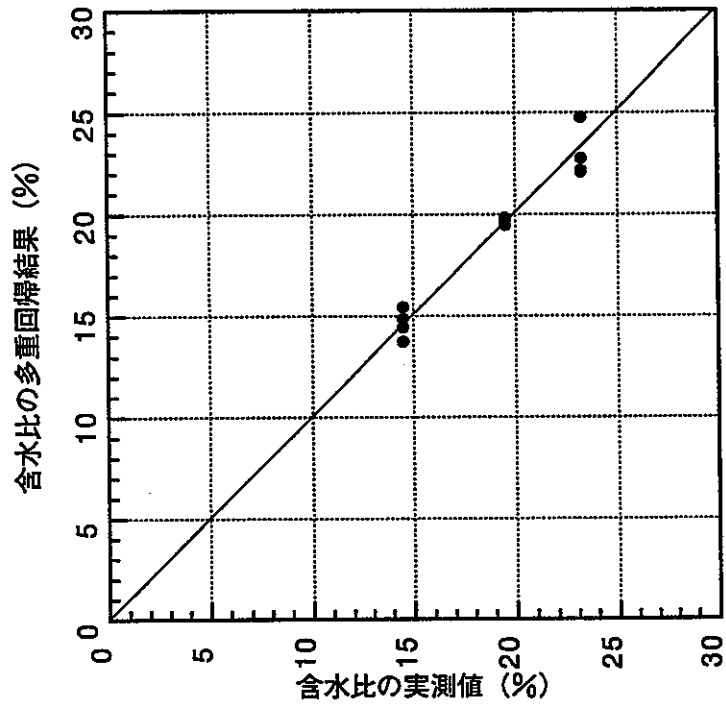


図6-31 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (PST-55、露点法)

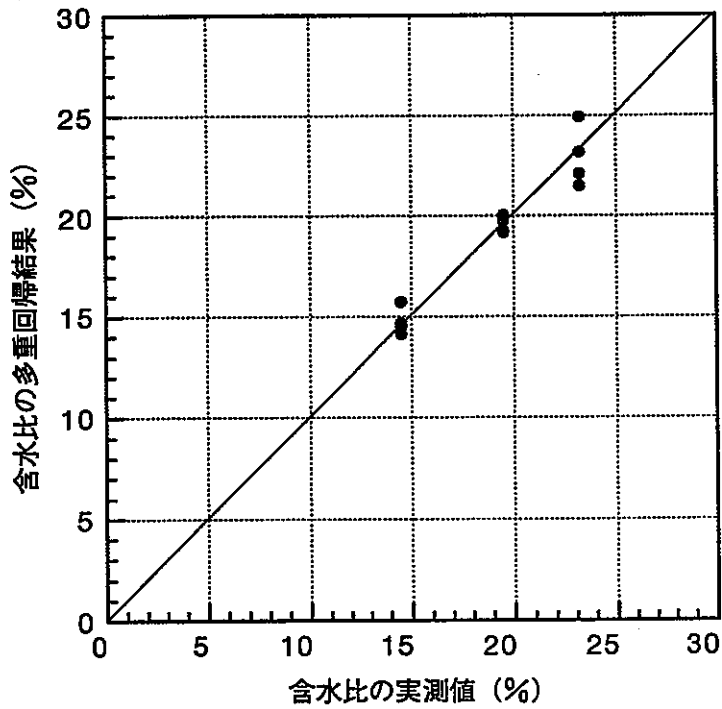


図6-32 含水比の多重回帰結果と実測値の比較 (PST-55、サイクロメトリック法)

(4) センサーの温度測定検定試験

サイクロメーターによる温度測定はセンサー内の熱電対の非線形性により、常温以外の領域では測定値に誤差が含まれている。したがって、その誤差を確認する目的で PST-55 サンプルチャンバーを用いて、センサーの温度測定値の検定試験を実施した。恒温室内に、PST-55 チャンバーのセンサーの近傍に測温抵抗体 2 本（チノー、シース測温抵抗体 model NRZ JIS A 級）と熱電対 1 本（チノー、シース熱電対、JIS0.4 級）を設置して、検定を実施した。

サイクロメーター、測温抵抗体および熱電対による温度測定値と経過時間との関係を図 6-33、サイクロメーターと測温抵抗体（2 本の平均値）との関係を図 6-34 に示す。また、測温抵抗体を基準とする場合、サイクロメーターによる温度測定値のエラーと経過時間との関係、また、測定値エラーと温度との関係を図 6-35 と図 6-36 に示し、加熱する段階と冷却段階でのヒステリシスが認められた。加熱速度は 0.25°C と比較的遅く設定しているため、ヒステリシスが熱伝導に起因しているとは考えにくい。

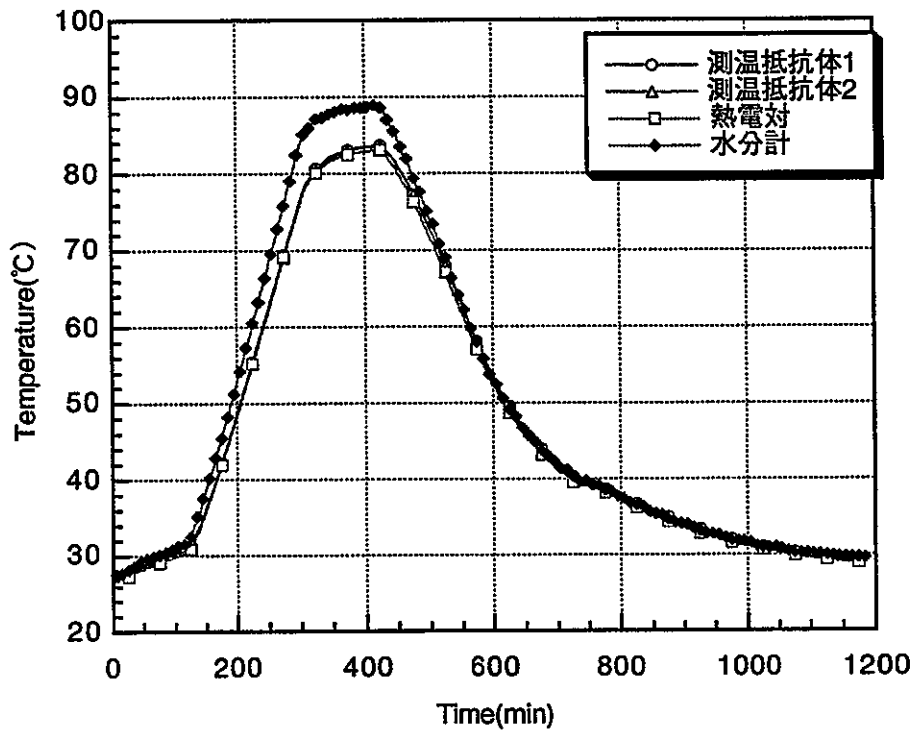


図6-33 サイクロメーター、測温抵抗体による温度測定値

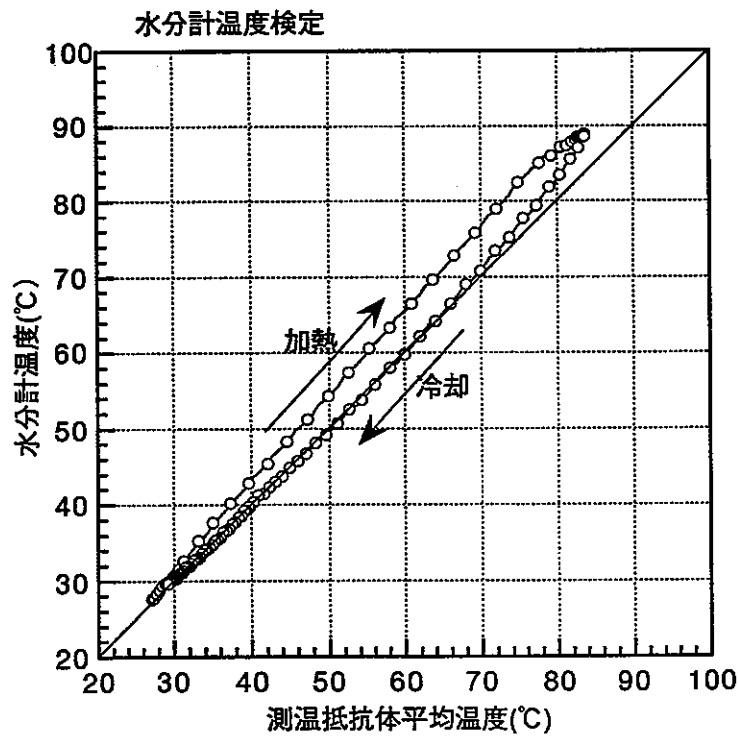


図6-34 サイクロメーターと測温抵抗体との温度測定関係

7. 発熱体

7.1 仕様

発熱体は、①鋼製ヒーター枠と内部オイル循環装置、②電気ヒーター、③内部オイルよりなる。このうち①、②は、動燃殿からの支給物品である。以下に、各装置の仕様を示す。

①鋼製ヒーター枠と内部オイル循環装置

全体図を図 7-1 に示す。鋼製ヒーター枠材質は、SM400B JIS G3106 である。寸法は、直径 1040 mm、高さ 1950 mm であり、厚さは、本体 40 mm、蓋 55 mm である。ヒーター枠は、設置の便宜性を考え、図 7-1 のように 4 分割された本体と蓋から構成されており、分割された本体は内側からのボルト締めによって一体化される。

内部のオイルを強制循環させるために、ヒーター枠にはスクリー式攪拌機 1 台と 2 本のエア-攪拌供給パイプが備わっている。

②電気ヒーター

全体図を図 7-2 に示す。3 Φ AC200V、1667W、発熱部の長さ 1600 mm のシース型カートリッジヒーターを 6 本束ねて構成されている。最大出力は 10KW、最高使用温度は 300℃ である。

③内部オイル

ヒーター枠の内部には、電気ヒーターからの発熱をヒーター枠に伝える媒質として油が溜められる。油は、ハイテクサーム 32 (日本石油製)、比重 0.909、流動点 -25℃、引火点 230℃ である。また、油量の観察のためにフロート式の油面計と給油装置がヒーター枠内と地表に設置されている。

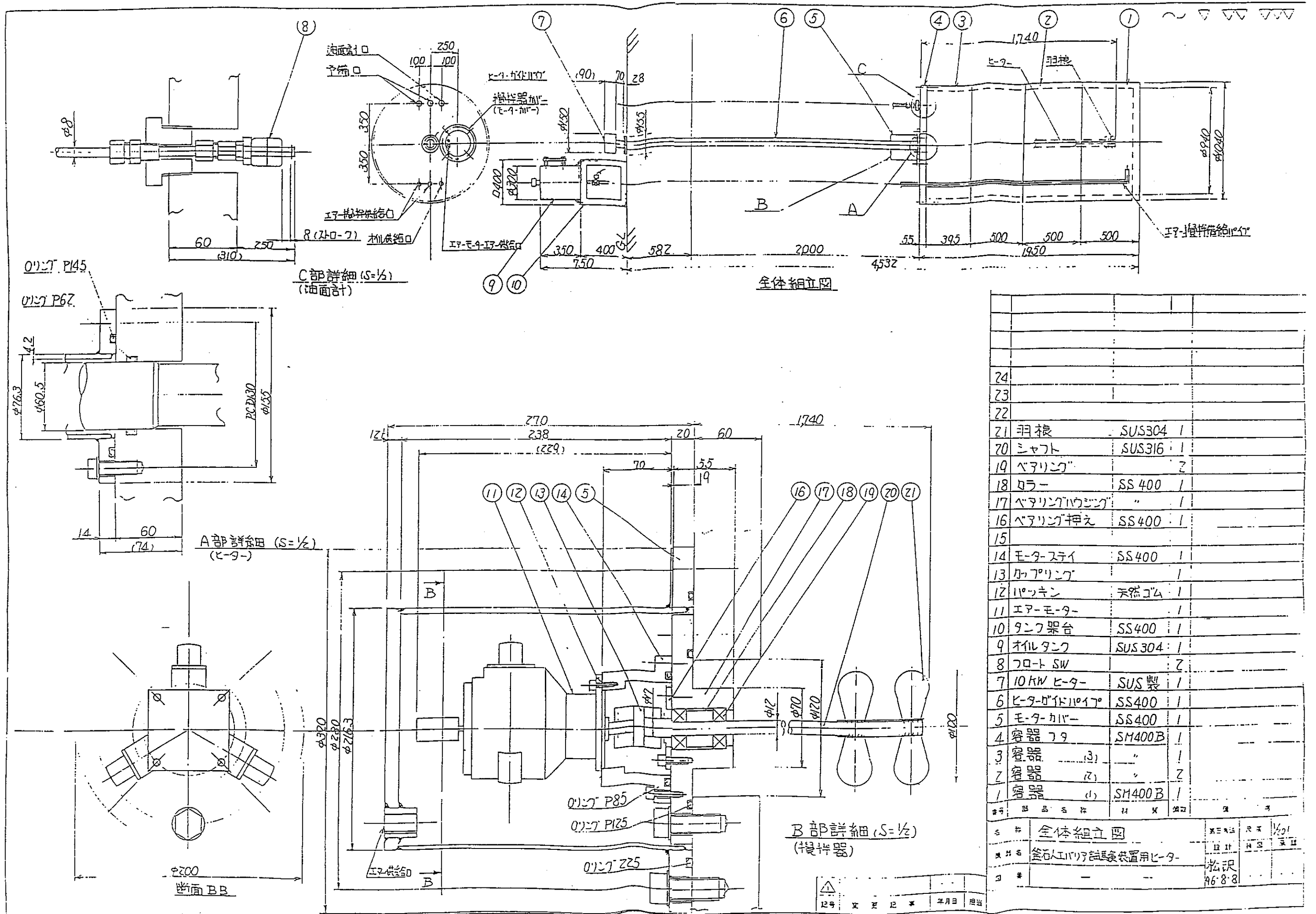
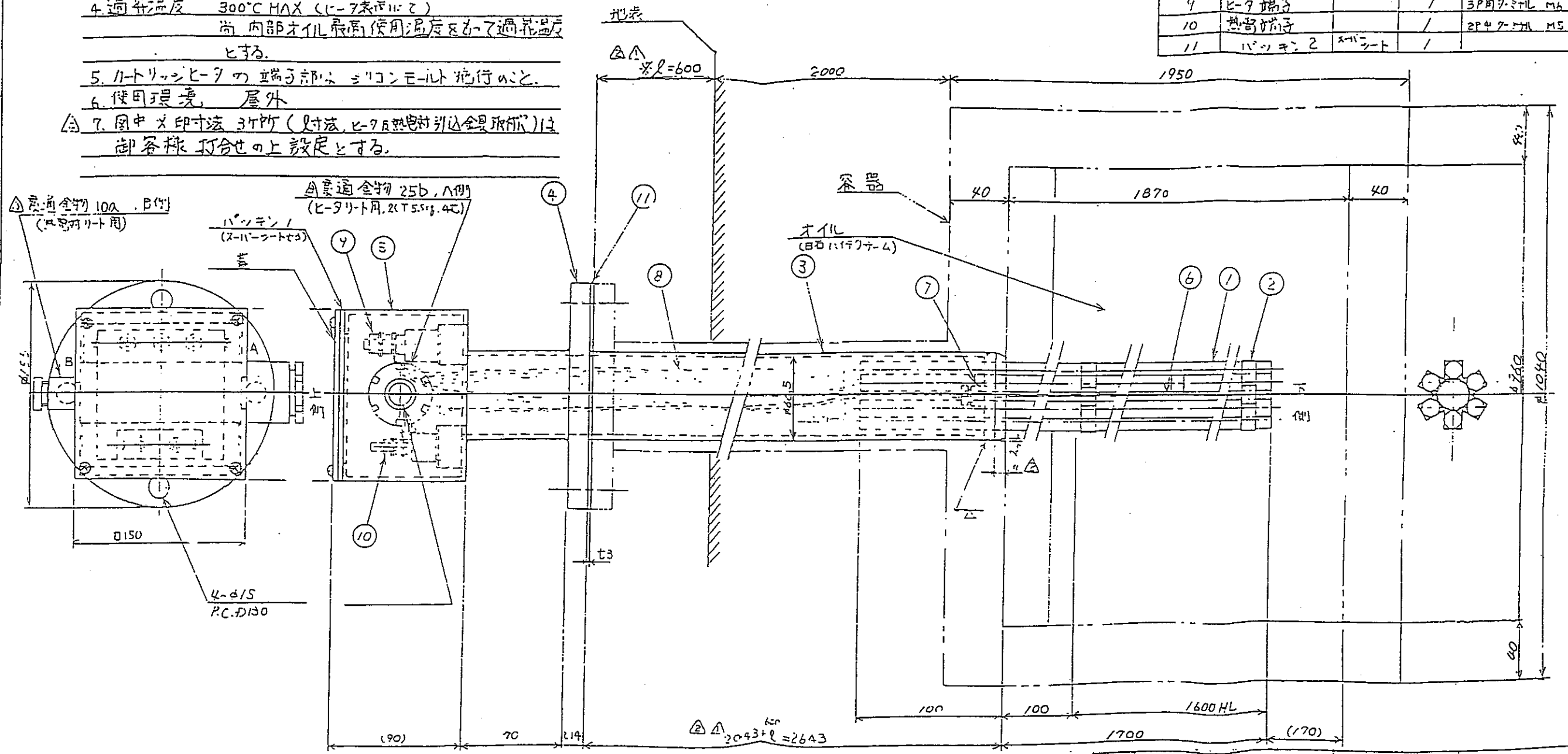


図7-1 ヒーター棒およびオイル循環装置

仕様

1. ヒーター容量 3φ AC200V 10KW
(200V 1667W x 6本、表面積約 2.8㎡/1台)
2. 加熱物 粉砕
3. 加熱温度 100°C (容器表面温度を指す)
御客様指定にて容器表面に温度センサーを取り付ける
4. 過昇温度 300°C MAX (ヒーター表面にて)
尚 内部オイル 最高使用温度を越えて過昇温度とする。
5. ヒーターヒータの端子部は 3/4コンエルト施行のこと。
6. 使用環境 屋外
7. 図中×印寸法 3ヶ所 (寸法、ヒーター熱電対引込金具取付)は 御客様 打合せの上 設定とする。

品番	品名	材質	数量	備考
1	ヒーターヒータ	SUS304	6	
2	振込止め	-	3	
3	パイプ	SUS	1	SUS-TP50A JIS A20
4	フランジ	SUS304	1	JIS SK-65A
5	端子箱	SUS304	1	
6	スチールボルト	SUS316	1	SK022 20x100
7	ボルト	SUS304	1	4ヶ所
8	耐熱電線			6G 耐熱電線
9	ヒータ端子		1	3P 耐熱電線用
10	熱電対端子		1	2P 47-77A MS
11	パイプ	スチール	1	



品番	品名	材質	数量	備考
2				
1				
名称	ヒーター本体図			
機器名	釜石人工ハリア製粉機用ヒーター	尺数	単位	
図番				

図7-2 電気ヒーター

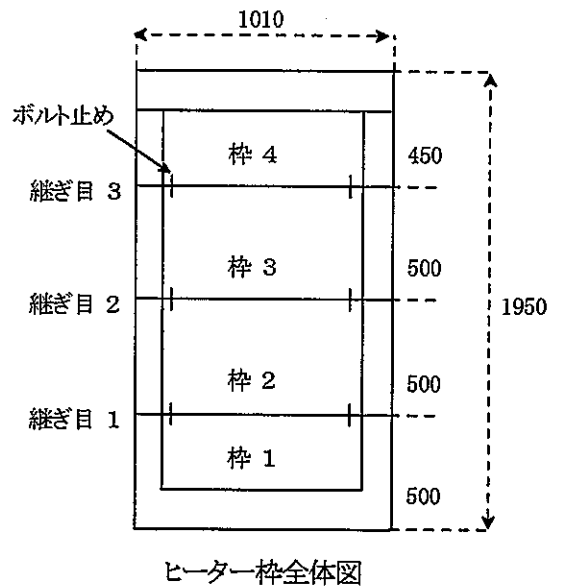
7.2 設置および検査

鋼製ヒーター枠は、右図に示すように、4つの枠と蓋から構成されている。

ピット内への設置は、10層目の締固めが終了後に枠1を緩衝材の上に置く。そして、11層から14層の締固めを行った後に、枠2を重ねボルト締めをする。つまり、枠の継ぎ目の10 cm下まで緩衝材が施行されることに、上の枠を重ねて設置していく。

また、ヒーター枠の設置に伴って、次の要領で、現地での継ぎ目の気密試験を実施し、継ぎ目からの漏れのないことを確認した。

検査は、枠内に水を溜め、ここに 2kgf/cm^2 の水圧を加えて30分放置し、継ぎ目からの漏水のないことと、圧力の低下がないことを認識するものである。検査は、枠2、3、4、それぞれを設置した直後に蓋をつけて行った。



ヒーター枠全体図

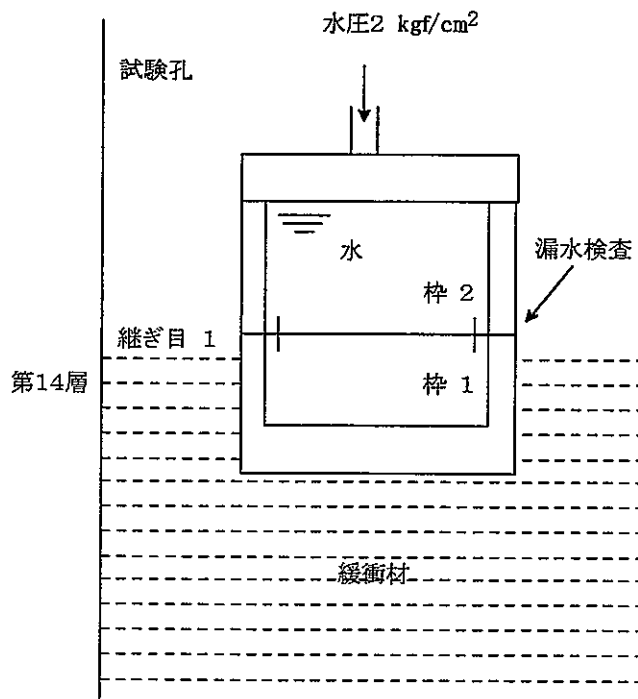


図 7-3 ヒーター枠継ぎ目の気密試験(継ぎ目1の場合)

8 緩衝材施工試験

8.1 施工方法

8.1.1 施工断面および締固め方法

図8-1に緩衝材施工および計測機器設置断面を示す。

1層当り仕上がり厚さ10cmは44層、厚さ5cmは2層で、合計46層である。

締固め機械は電動タンピングランマー（三笠社製 MT-M50V、以下ランマーと呼ぶ）およびエアースンドタンパー（東洋空機製作所社製 T-6、以下タンパーと呼ぶ）を使用した。

ランマーは主に中心部、タンパーは中心部と岩盤壁付近および発熱体を設置した後の発熱体と岩盤壁の間に使用した。所定の密度を得た時間を締固め時間としたところ、発熱体下部と上部では60分/層、発熱体周辺部では40分/層であった。

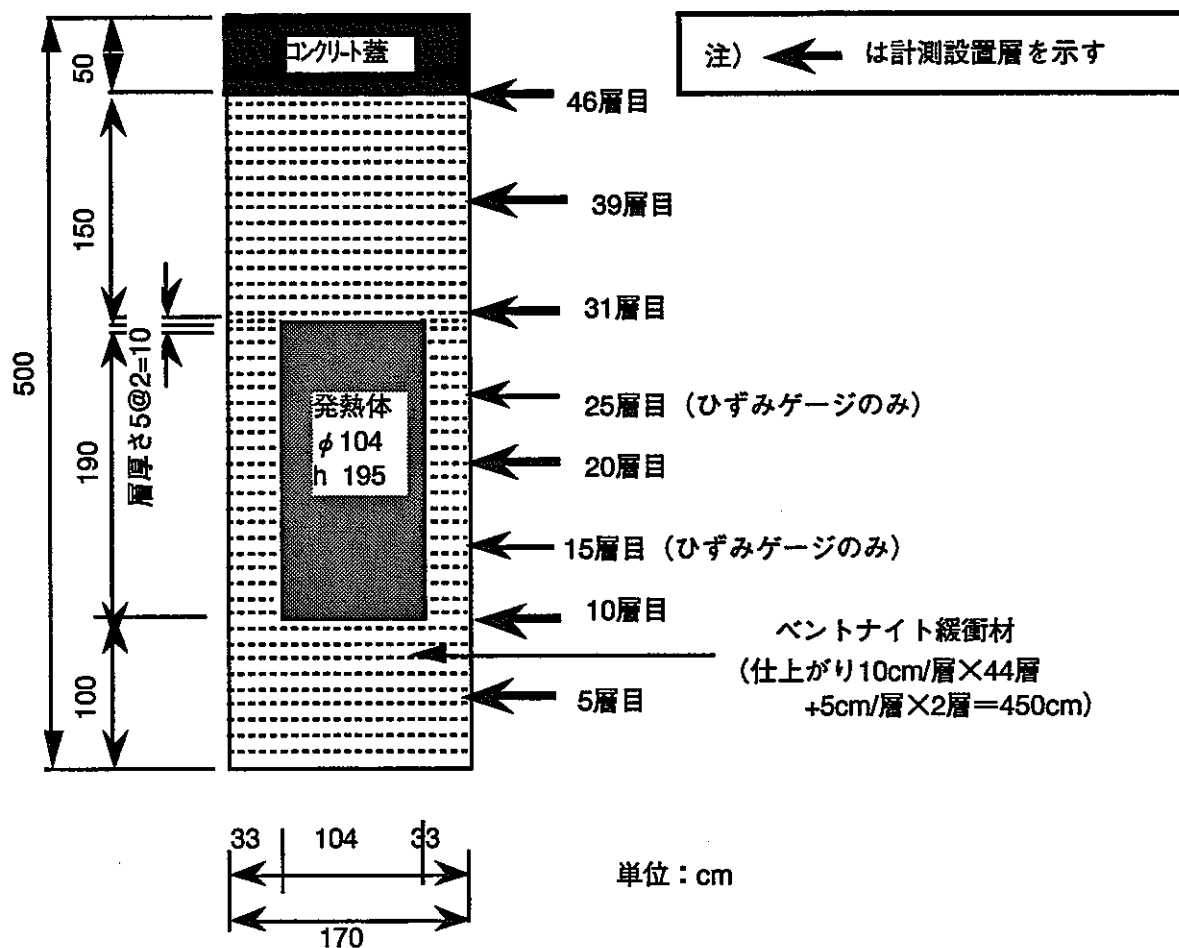


図8-1 緩衝材施工および計測機器設置断面

8.1.2 密度管理方法

出来型測量と舗装用密度計による測定を実施した。

(1) 出来型測量

出来型測量は全層について実施した。各層の締固め後の高さを測定した。

図8-2に出来型測量の測定箇所を示す。

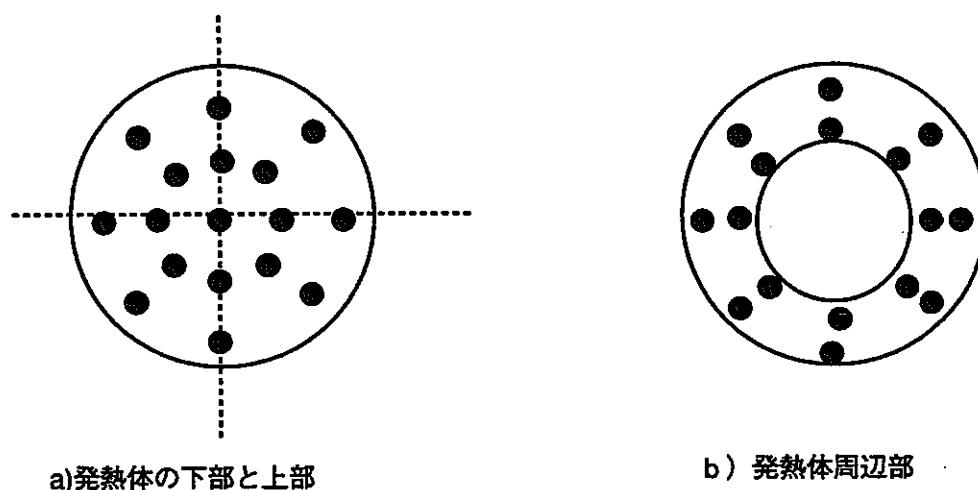


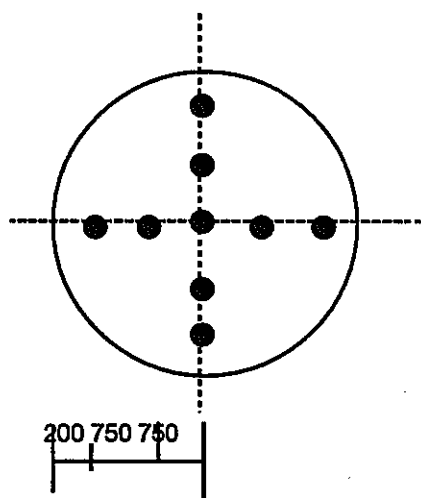
図8-2 出来型測量の測定箇所

(2) 舗装用密度計による測定

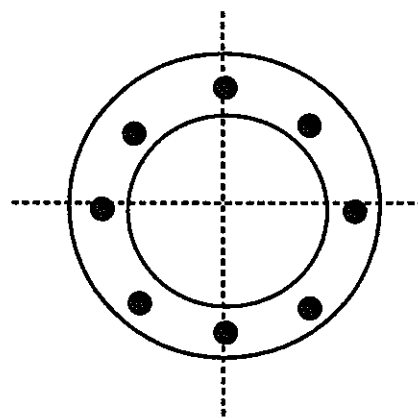
締め固めた後の乾燥密度の平面的な変化（ばらつき）を把握する目的で、第37層目（ピット底面から高さ約360cm、図8-1参照）において実施した。

測定位置を図8-3に示す。測定は、1測点あたり5回行ない、異常値と思われるデータを除去した後、残りのデータの平均をその箇所の密度とした。

また、含水比は密度測定後、測定位置で試料を採取し、炉乾燥法にて測定した。



a) 発熱体上下部



b) 発熱体周囲部

図8-3 舗装用密度計による測定箇所

8.1.3 施工管理項目および目標値

施工管理項目と目標値を表8-1に示す。

含水比測定は施工する前にあらかじめ、乾燥炉にて測定した。管理値を満足しないものは管理値を満足できるように含水比を再調整し使用した。

また、緩衝材の一日の投入量は仕上がり厚さが10cmで、乾燥密度が目標値を達成する量、仕上がり厚さが5cmの場合は仕上がり厚さが10cmの量の半分と考え、現場で第1層～第3層の締固めの実績により一日の投入量を設定した。なお、施工速度は1日当り1層を基本とした。

1層施工終了後、あらかじめ作製した直径1.7mのビニールシートを用いて上部を覆い、シートと岩盤周辺壁面の隙間にベントナイト粘土によりシールし、上部からの水の浸入を防止した(図8-4)。

また、浸出水量が比較的少ない場合は、ベントナイト粘土のシールの代わりに高分子吸水シート(成人用おむつ)を漏水箇所を設置し、水を吸収させた。

次の層を施工する前にビニールシートの上部に溜まった水分をスポンジなどにより取り除く。また、層表面にリップング(幅数mm、深さ数mm程度の溝を網状に切り取る)を実施し、次の層との付着の向上を図った。

表8-1 施工管理項目と目標値、管理値

項目	目標値	管理値
締固め前の材料の含水比 w	15%	15±2%
締固め後の乾燥密度 ρ_d	1.65g/cm ³	1.6~1.7g/cm ³
1層当りの投入量	10cm	特になし

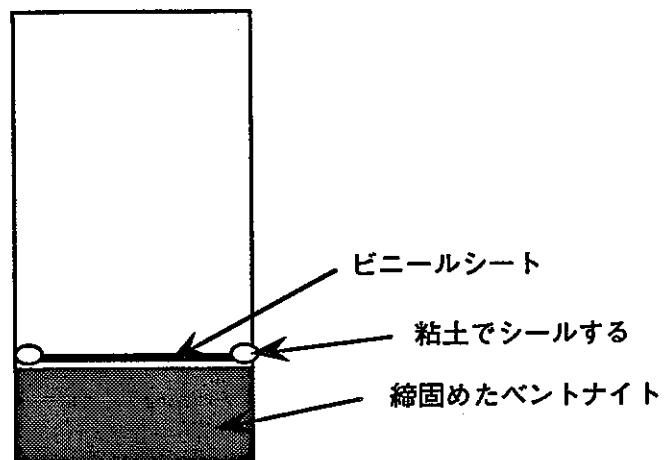


図8-4 締固めた後の供試体上部の養生

8.1.4 施工フロー

図8-5に施工フローを示す。

なお、計測機器を設置した後の転圧による機器の破損を防ぐ目的で、計測機器を設置する所定位置より1層上を施工したのち、孔などを開けて計測機器を挿入して設置するものとした。

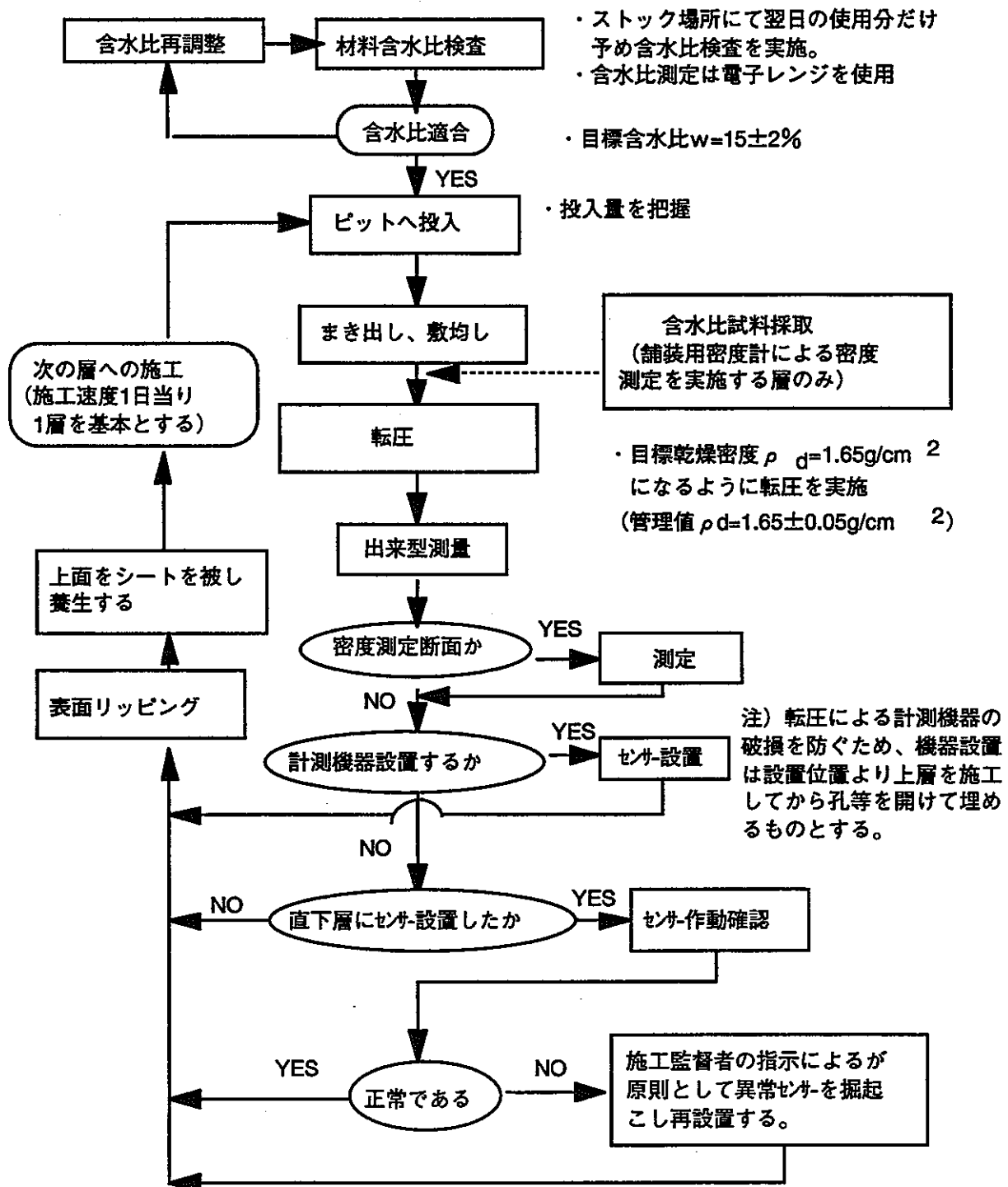


図8-5 施工フロー

8.2 施工結果

8.2.1 材料試験

(1) 粒度特性

搬入した全試料（湿潤重量 17t）において、約 1t ごとに 1 試料を採取し、計 15 ケースの粒度試験を実施した。図 8-6 に試料の粒径加積曲線群、表 8-2 に粒度特性を示す。

最大粒径は 4.75mm で、礫分は 4～11% で、砂分は 89～95% とほとんどを占めている。細粒分は 1.4% 以下になっている。均等係数 U_c は 4～5 程度である。

表8-2 ベントナイトの粒度特性

最大粒径 D_{max} (mm)	4.75
平均粒径 D_{50} (mm)	0.52～0.80
平均粒径 D_{10} (mm)	0.14～0.28
平均粒径 D_{10} (mm)	0.70～1.00
均等係数 U_c	3.6～5.0
細礫分 (2～4.75mm) (%)	4～11
粗砂分 (0.425～2mm) (%)	56～67
細砂分 (0.075～0.425mm) (%)	38.6～21.9
細粒分 (0.075mm 通過率) (%)	1.4～0.1
細粒分 (2mm 通過率) (%)	88.9～96.2

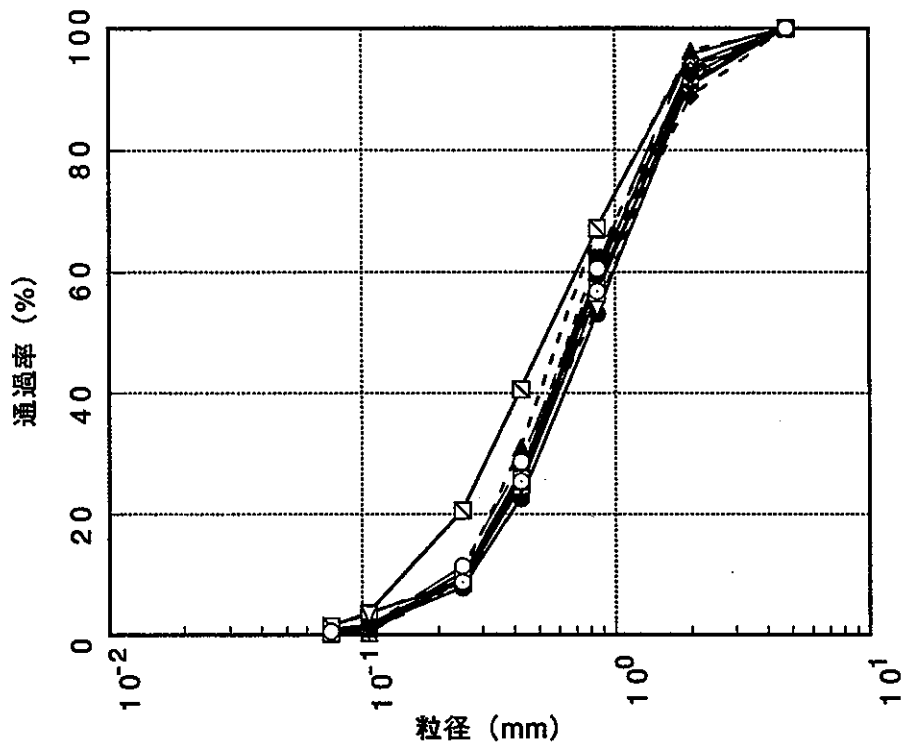


図8-6 ベントナイトの粒径加積曲線

(2) 施工試験

施工試験結果を表8-3、各測定データの全層の平均値を表8-4に示す。
 なお、表中の各特性値はつぎのように求めた。

①含水比 w

炉乾燥法にて測定する。

$$w = Mw/Ms \times 100 \quad (\%)$$

Mw : 含水量 (g)、 Ms : 土粒子重量 (乾燥重量) (g)

②湿潤密度 ρ_t (単位容積当たりの土の湿潤状態の重量)

1層当たりの試料投入量と層の仕上がり厚さから算定する。

$$\rho_t = Mt/V \quad (t/m^3) \quad \text{or} \quad (g/cm^3)$$

Mt : 投入量 (t)、 V = (ピット断面積 × 層の仕上がり厚さ) (m³)

③乾燥密度 ρ_d (単位容積当たりの土の乾燥状態の重量)

湿潤密度 ρ_t と含水比 w から算定する。

$$\rho_d = \rho_t / (1 + w/100) \quad (t/m^3) \quad \text{または} \quad (g/cm^3)$$

④間隙比 e (単位容積当たりの間隙の占める比率)

$$e = G_s / \rho_d - 1$$

ただし、 G_s ：土粒子の密度（比重）=2.65とする。

⑤飽和度 S_r （間隙の単位容積に対する水の占める比率）

$$S_r = G_s \times w / e \quad (\%)$$

表8-3 締固め試験結果（その1）

層 No.	含水比 w (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	厚さ (cm)	厚さ累計 (cm)
1	15.6	2.01	1.74	0.523	79.0	12.35	12.35
2	15.6	1.82	1.57	0.688	60.1	11.71	24.06
3	15.7	1.95	1.68	0.577	72.1	9.55	33.61
4	15.6	1.88	1.63	0.626	66.1	10.40	44.01
5	15.7	1.93	1.67	0.587	70.9	10.10	54.11
6	15.4	1.84	1.60	0.656	62.2	10.10	64.21
7	14.7	1.92	1.68	0.577	67.5	9.70	73.91
8	14.6	1.93	1.68	0.577	67.0	9.70	83.61
9	14.7	1.88	1.64	0.616	63.3	10.00	93.61
10	14.4	1.85	1.61	0.646	59.1	9.50	103.11
11	14.7	1.85	1.61	0.646	60.3	10.60	113.71
12	14.4	1.92	1.68	0.577	66.1	9.80	123.51
13	14.3	1.90	1.66	0.596	63.5	10.10	133.61
14	14.5	1.89	1.65	0.606	63.4	10.10	143.71
15	14.5	1.90	1.66	0.596	64.4	10.10	153.81
16	14.8	1.89	1.64	0.616	63.7	10.10	163.91
17	15.3	1.91	1.66	0.596	68.0	9.90	173.81
18	15.6	1.91	1.66	0.596	69.3	9.80	183.61
19	15.6	1.90	1.64	0.616	67.1	9.90	193.51
20	15.8	1.89	1.63	0.626	66.9	9.90	203.41
21	15.8	1.87	1.62	0.636	65.9	10.20	213.61
22	16.1	1.96	1.69	0.568	75.1	9.70	223.31
23	15.8	1.85	1.60	0.656	63.8	10.30	233.61
24	15.9	1.90	1.64	0.616	68.4	9.90	243.51
25	15.8	1.88	1.62	0.636	65.9	10.00	253.51
26	16.0	1.89	1.63	0.626	67.8	10.00	263.51
27	15.1	1.91	1.66	0.596	67.1	9.90	273.41

表 8-3 締固め試験結果 (その2)

層 No.	含水比 w (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	飽和度 Sr (%)	厚さ (cm)	厚さ累計 (cm)
28	14.1	1.94	1.70	0.559	63.1	7.70	281.11
29	14.1	1.90	1.67	0.587	60.1	8.00	289.11
30	13.9	1.97	1.73	0.532	69.3	7.70	296.81
31	14.1	1.97	1.73	0.532	70.3	6.20	303.01
32	14.1	1.85	1.62	0.636	58.8	10.10	313.11
33	14.6	1.82	1.59	0.667	58.0	10.20	323.31
34	15.0	1.92	1.67	0.587	67.7	9.70	333.01
35	15.7	1.86	1.61	0.646	64.4	10.00	343.01
36	15.8	1.88	1.62	0.636	65.9	9.90	352.91
37	15.9	1.88	1.62	0.636	66.3	10.10	363.01
38	15.1	1.93	1.68	0.577	69.3	10.10	373.11
39	14.7	1.91	1.67	0.587	66.4	10.20	383.31
40	13.8	1.82	1.60	0.656	55.7	9.80	393.11
41	13.7	1.83	1.61	0.646	56.2	9.60	402.71
42	14.1	1.97	1.72	0.541	69.1	9.90	412.61
43	15.8	1.96	1.69	0.568	73.7	10.00	422.61
44	16.4	1.97	1.69	0.568	76.5	10.00	432.61
45	15.1	1.97	1.71	0.550	72.8	10.00	442.61
46	11.3	1.85	1.66	0.596	50.2	0.596	453.31

表8-4 測定データの平均値

項目	平均値	変化幅	標準偏差
含水比 (%)	15.03	13.30~16.40	0.80
湿潤密度 (g/cm ³)	1.900	1.815~2.011	0.046
乾燥密度 (g/cm ³)	1.645	1.570~1.740	0.041
間隙比	0.604	0.523~0.688	0.039
飽和度 (%)	66.16	55.73~79.05	5.09

8.2.2 含水比

図 8-7 にピット底面からの高さ方向における含水比の変化を示す。各層の材料の含水比は 11.3～16.4% (平均 14.95%、標準偏差 0.96%) である。管理目標値 ($w=15\pm 2\%$) に対して、層 No.46 ($w=11.3\%$) を除いて満足している。

また、図 8-8、図 8-9 に含水比の配分比率、含水比の範囲とデータ多数の変化を示す。これらの図より、含水比は 14.5%～15.0% と 15.5%～16.0% の範囲に集中している。

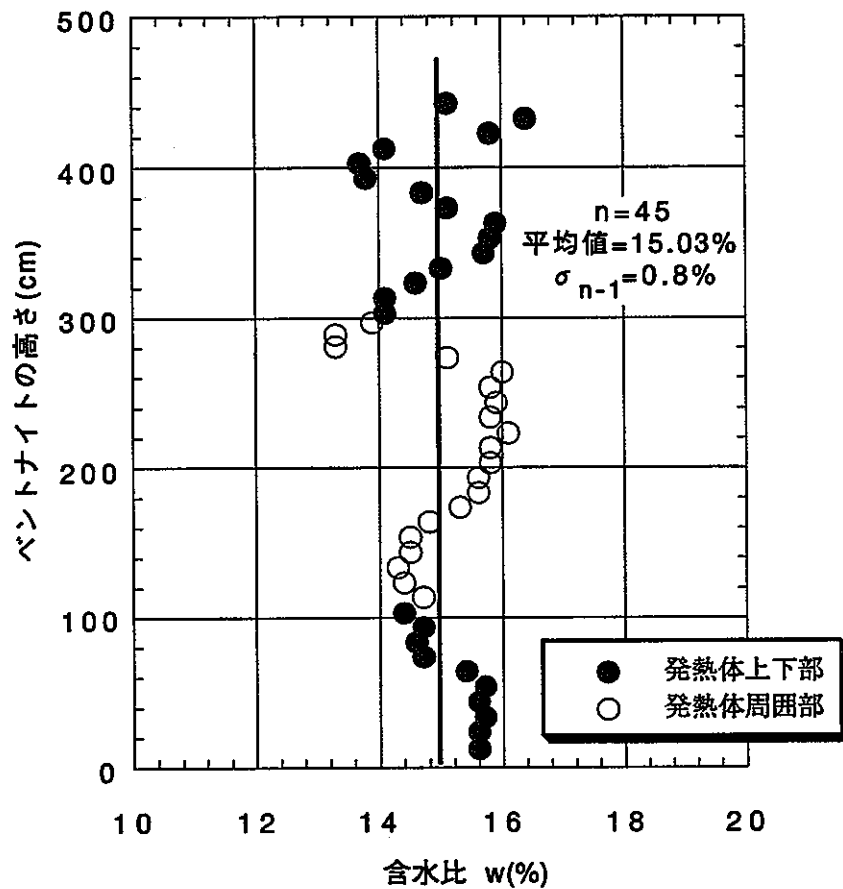


図8-7 含水比の変化

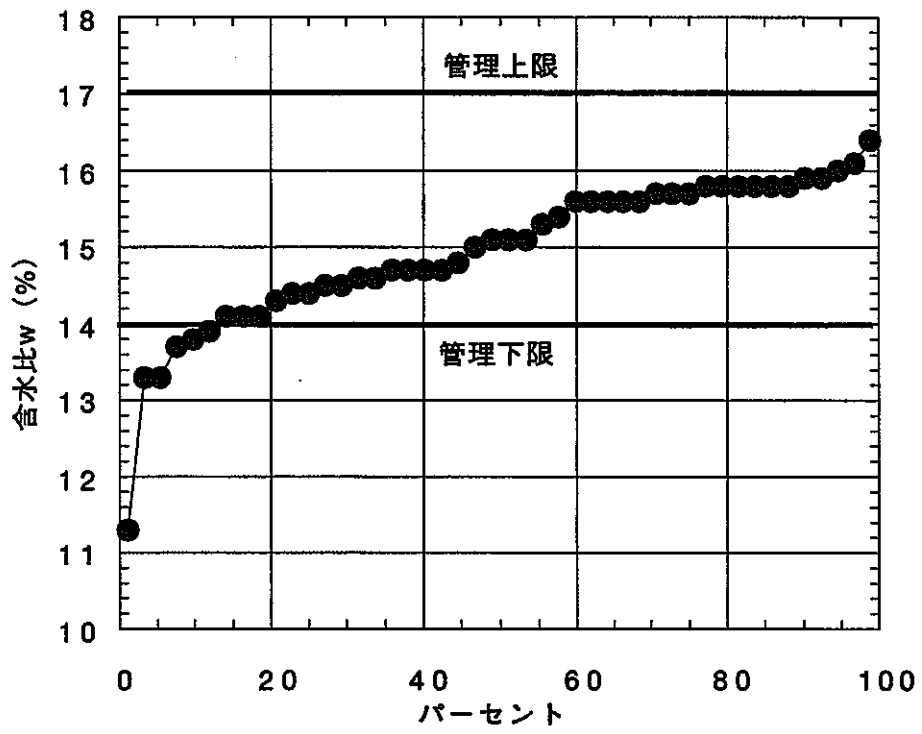


図8-8 含水比の配分比率

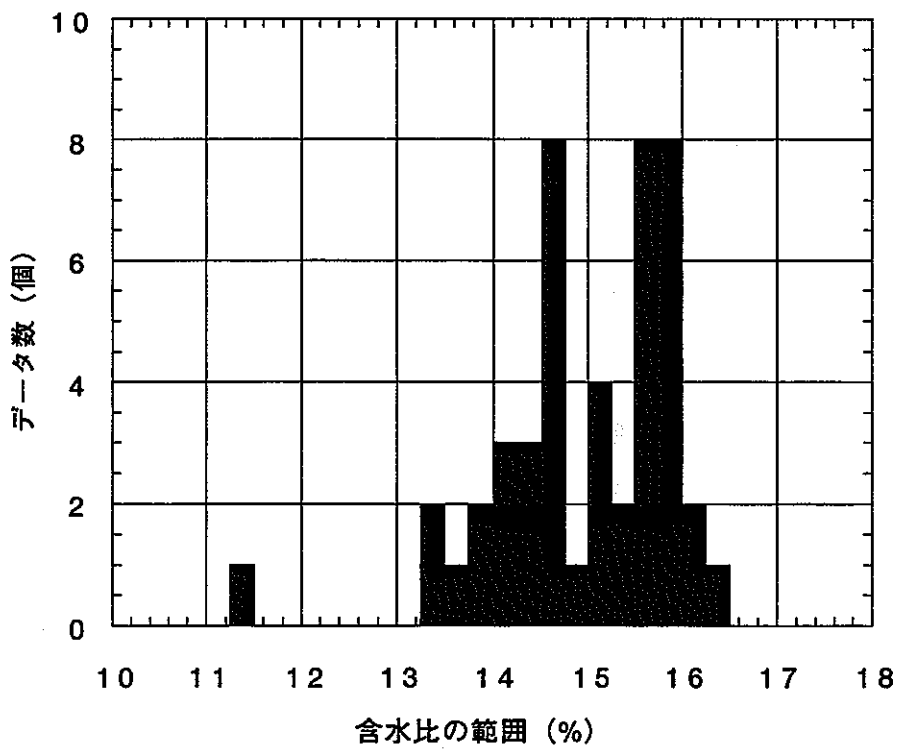


図8-9 含水比の範囲

8.2.3 密度

図8-10、図8-11にピット底面よりの高さにおける湿潤密度、乾燥密度の変化を示す。湿潤密度では $\rho_w=1.81\sim 2.01\text{g/cm}^3$ の範囲に変化し、平均値は 1.90g/cm^3 、標準偏差は 0.046g/cm^3 である。

また、乾燥密度では $\rho_d=1.57\sim 1.74\text{g/cm}^3$ の範囲に変化する。平均値は 1.65g/cm^3 、標準偏差は 0.041g/cm^3 になっている。管理値 $\rho_d=1.6\sim 1.7\text{g/cm}^3$ に対して、若干満足していない層($\rho_d<1.6\text{g/cm}^3$ は層No.2とNo.33で、 $\rho_d>1.7\text{g/cm}^3$ は層No.1、No.30、No.31、No.42、No.45)があるものの、大部分が $\rho_d=1.6\sim 1.7\text{g/cm}^3$ の範囲内にある。また、平均値は $\rho_d=1.65\text{g/cm}^3$ となり、目標値とほぼ同じである。

発熱体の下部層(層1~10の間)および上部層(層31~層45の間)では発熱体周辺部に比較して乾燥密度の変化幅が大きい。これは、1層当たりの締固め面積が大きく、締固めによる密度の均一性の確保が比較的難しくなっていると考えられる。

図8-12、図8-13に乾燥密度の配分比率、含水比の範囲とデータ数の変化を示す。乾燥密度は管理範囲 $1.6\sim 1.7\text{g/cm}^3$ にほぼ均等に分布しているが満足しないデータもある。下限 1.6g/cm^3 以下では2データで全体の約4%、上限 1.7g/cm^3 では6データで全体の約10%を占めている。

下限 1.6g/cm^3 未満の2データにおいて、層No.2のデータ($\rho_d=1.57\text{g/cm}^3$)では施工初期の段階でピット底面の凹凸による出来型測量誤差が主な原因と考えられる。層No.1と層No.2の測定ではそれぞれ $\rho_d=1.74\text{g/cm}^3$ 、 1.57g/cm^3 で各々の測定誤差による過大評価と過小評価の可能性があると考えられる。両者を平均すると $\rho_d=1.66\text{g/cm}^3$ になる。

次に、層No.33の乾燥密度($\rho_d=1.59\text{g/cm}^3$)はわずかながら管理下限値を下回っている。これは、管理含水比と施工後測定含水比の違いによるものである。すなわち、現場施工に先立ち測定した含水比を用いて、所定の乾燥密度を得るための投入量と仕上がり厚さを管理したが、施工後測定した含水比は管理含水比よりやや大きく、その結果、算定された乾燥密度は小さくなったためと考えられる。

本試験における乾燥密度の管理範囲の設定は品質の均等性を確保する目的で下限値とともに上限値も設定している。一方、緩衝材の諸性能(遮水性、核種遮蔽性、膨潤性、強度等)を向上させる観点から乾燥密度をなるべく大きくした方が望ましい。

このように、緩衝材の管理範囲の下限値は緩衝材の品質を確保するのに重要であるが上限値を越えた緩衝材では均等性からは望ましくないものの、材料の諸性能の確保・向上の観点からみると問題はなく、下限値ほど重要でないと考えられる。

図8-14、図8-15に同じ層における乾燥密度の平面的な変化の1例を示す。測定は層No.37において舗装用密度計を用い、測定位置は図8-16にしたがった。

AC断面では、乾燥密度が $\rho_d=1.61\sim 1.64\text{g/cm}^3$ と変化幅が比較的小さいが、BD断面では $\rho_d=1.59\sim 1.67\text{g/cm}^3$ に変化し、ピット壁面近傍の密度は中央部より小さくなっている。

これは壁面付近は中央部より締固めしにくいことに加えて、ピット壁面の岩盤(花崗岩)の持つ放射能特性の影響で舗装用密度計の測定値が小さくなるものと考えられる。

全データの平均値は 1.62g/cm^3 で、同層のレベル測量による平均乾燥密度とほぼ同じである。

層の仕上がり厚さと乾燥密度の関係では、図8-17に示すように、ばらつきが大きく両者の相関があきらかでないが、層厚さが6~8cm程度の場合では、10cmに比較してより大きい乾燥密度が得易いものと推測される。

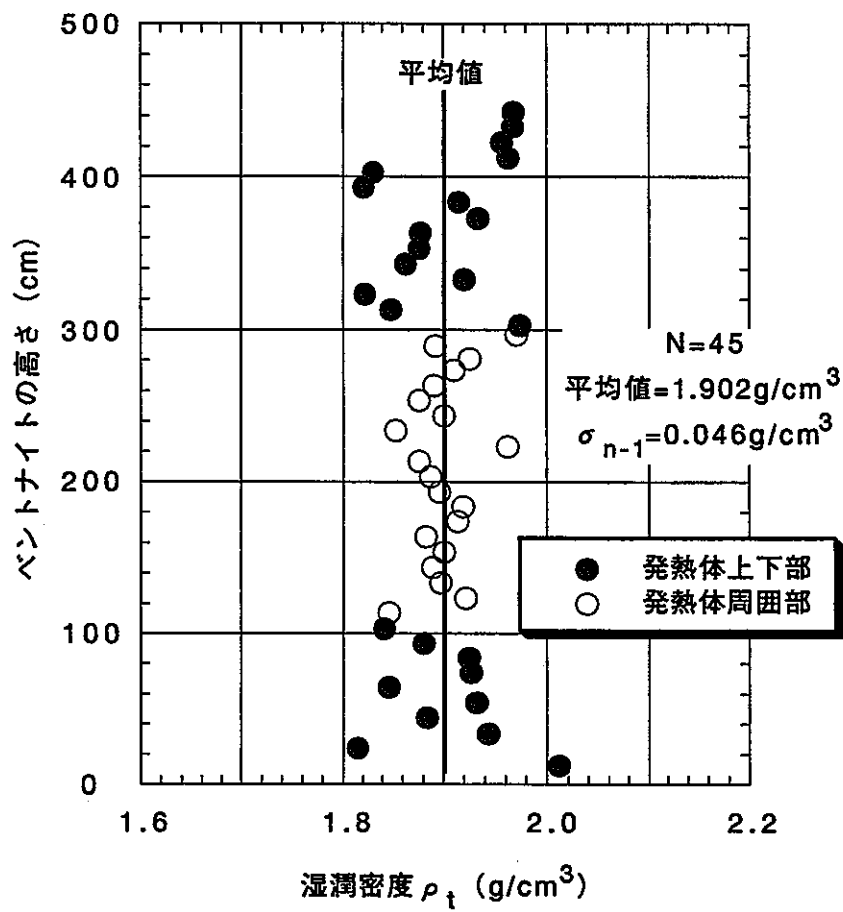


図8-10 湿潤密度の変化

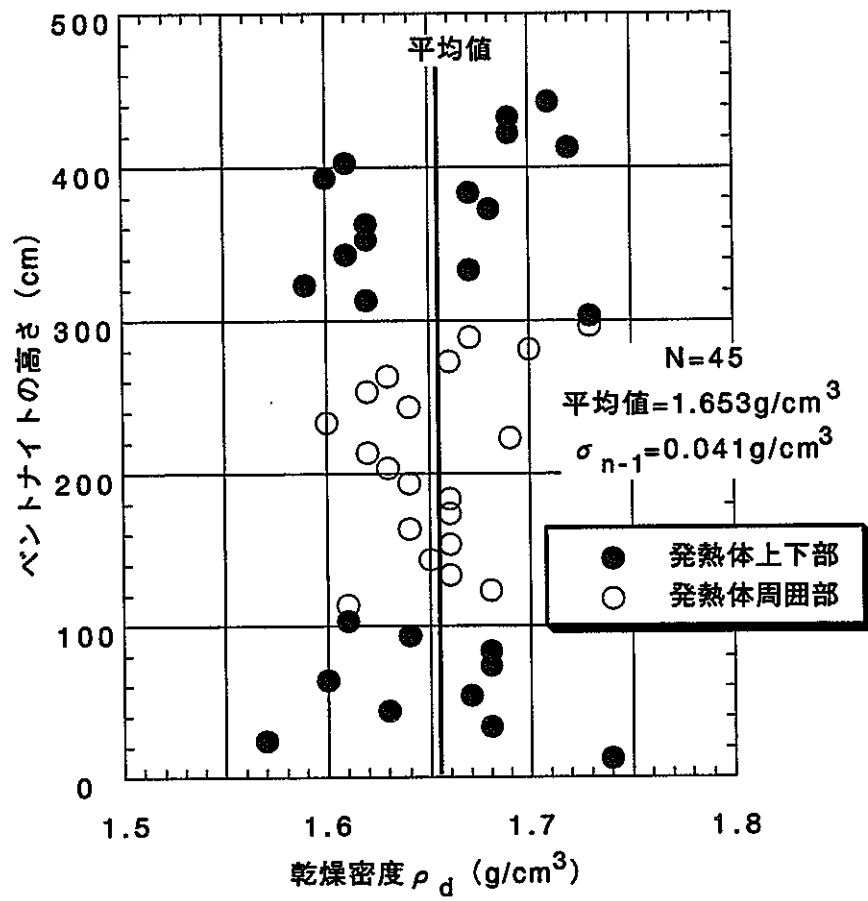


図8-11 乾燥密度の変化

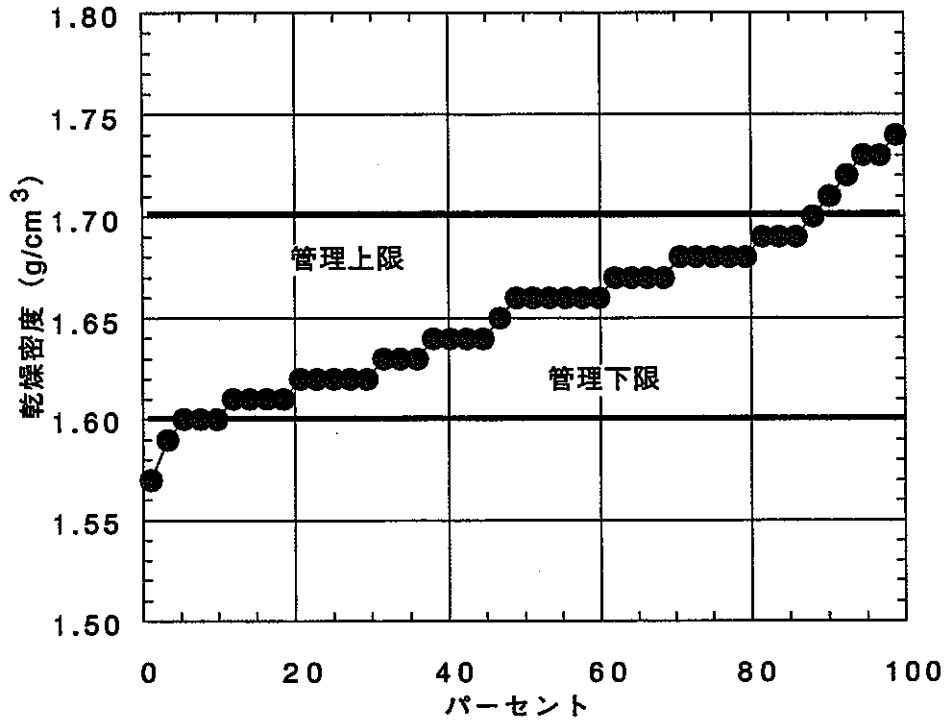


図8-12 乾燥密度の配分比率

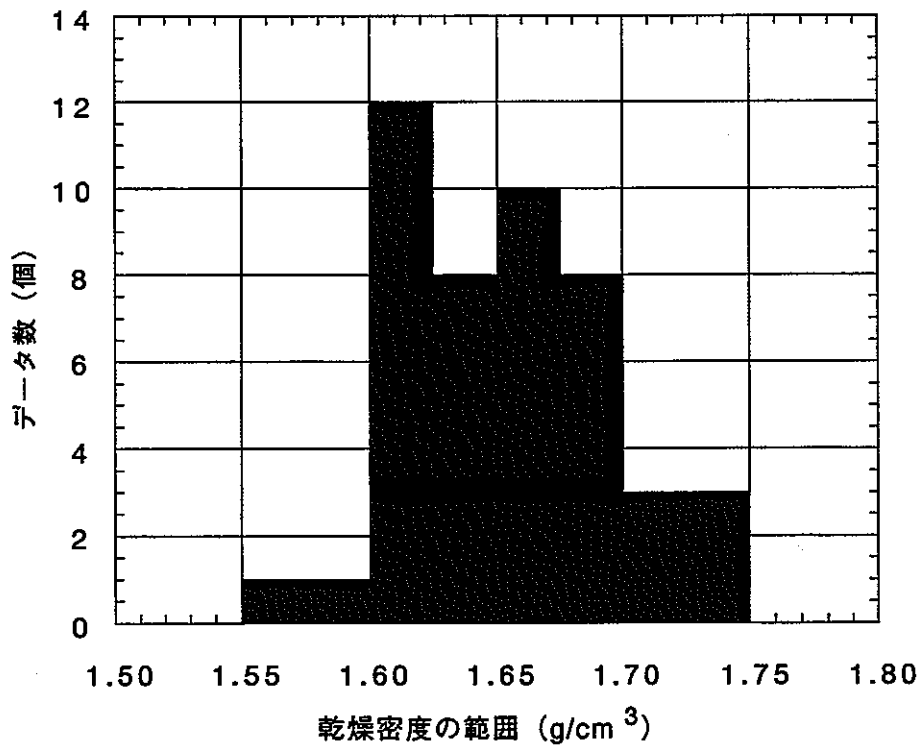


図8-13 乾燥密度の範囲とデータ数の変化

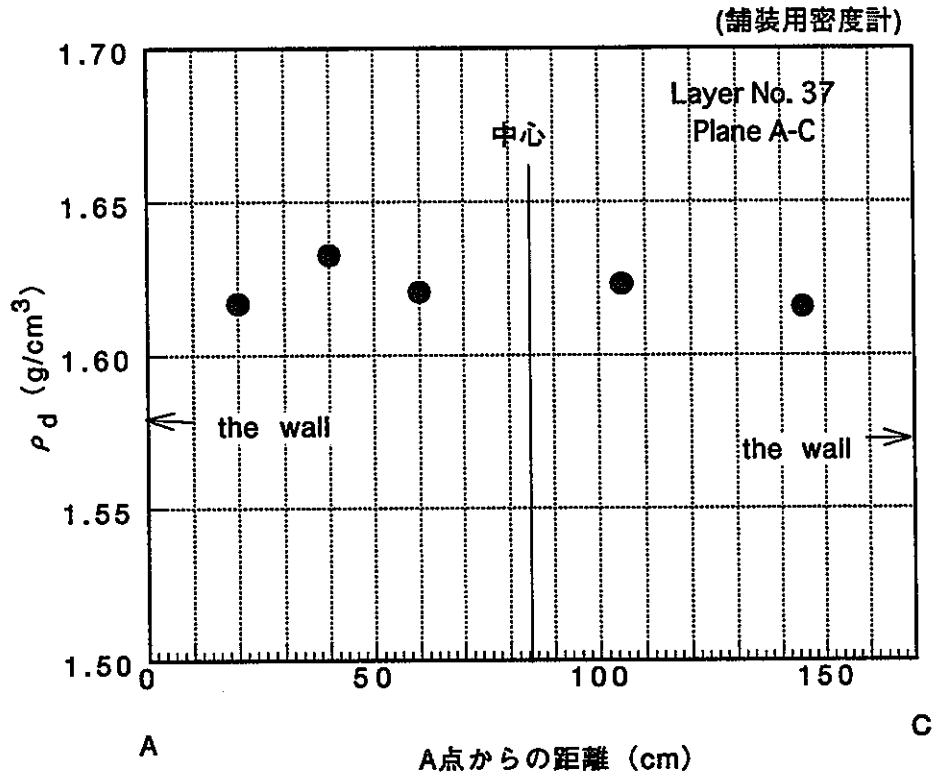


図8-14 乾燥密度の平面的な変化 (AC断面)

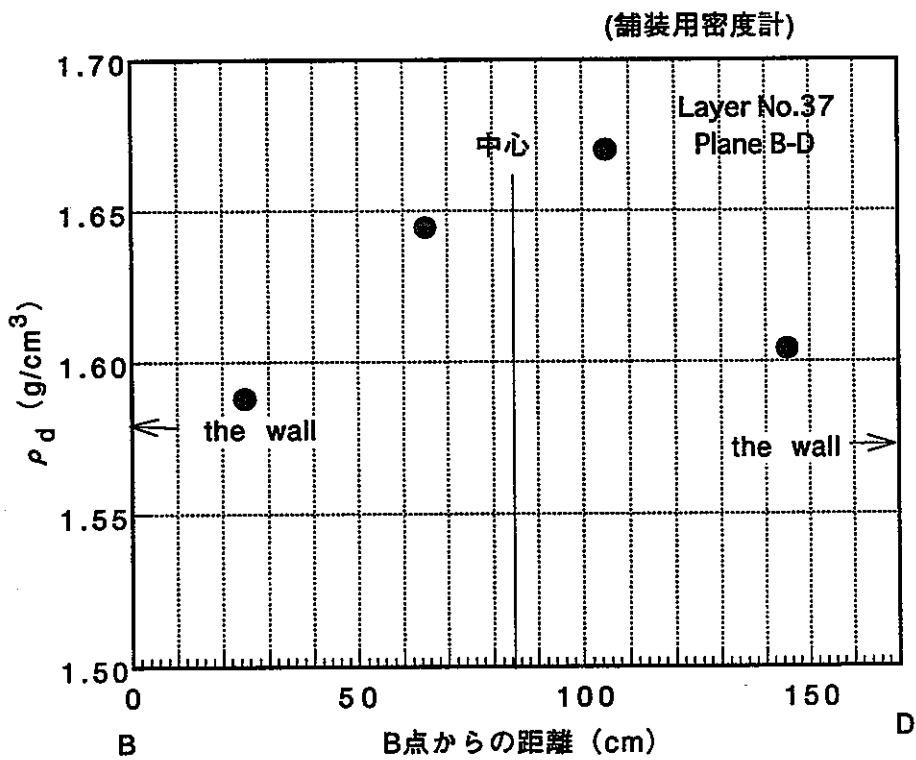


図8-15 乾燥密度の平面的な変化

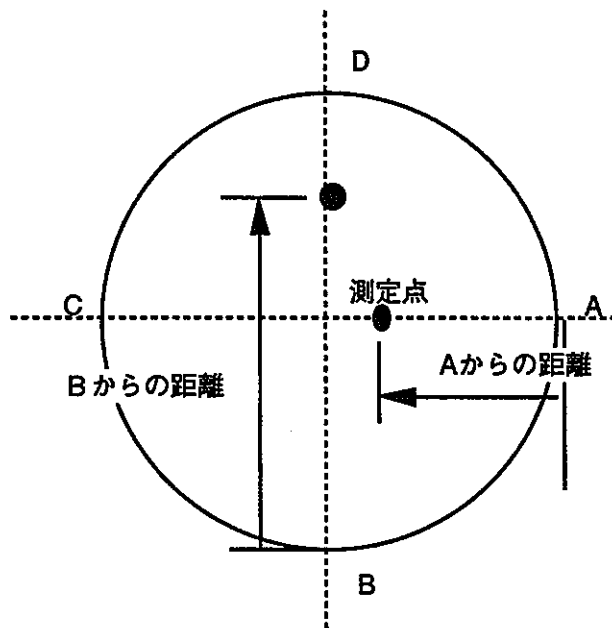


図8-16 測定位置の説明

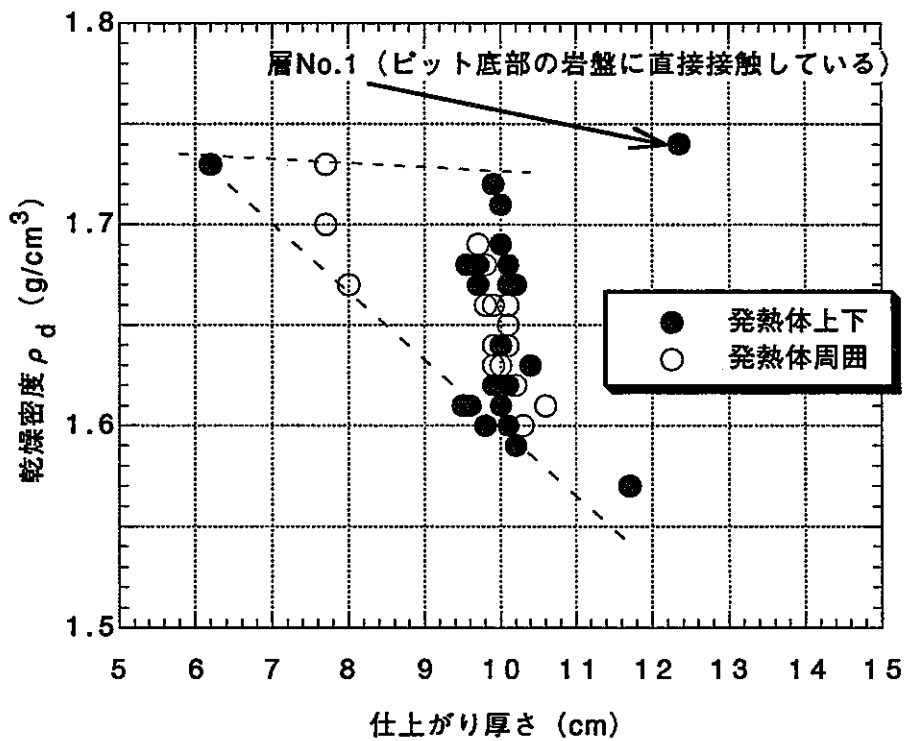


図8-17 仕上がり層厚さと乾燥密度の関係

8.2.4 各層の仕上がり厚さ（締固め後の厚さ）

図 8-18に各層における仕上がり厚さの変化を示す。ほとんどの層では、目標厚さの 10cm 付近を示すが、最初の 2層ではピット底面の凹凸の影響で12cm程度と大きくなった。また28～31層目において、あらかじめ設置した発熱体上部のレベルを合わせるために6～8cmとした。

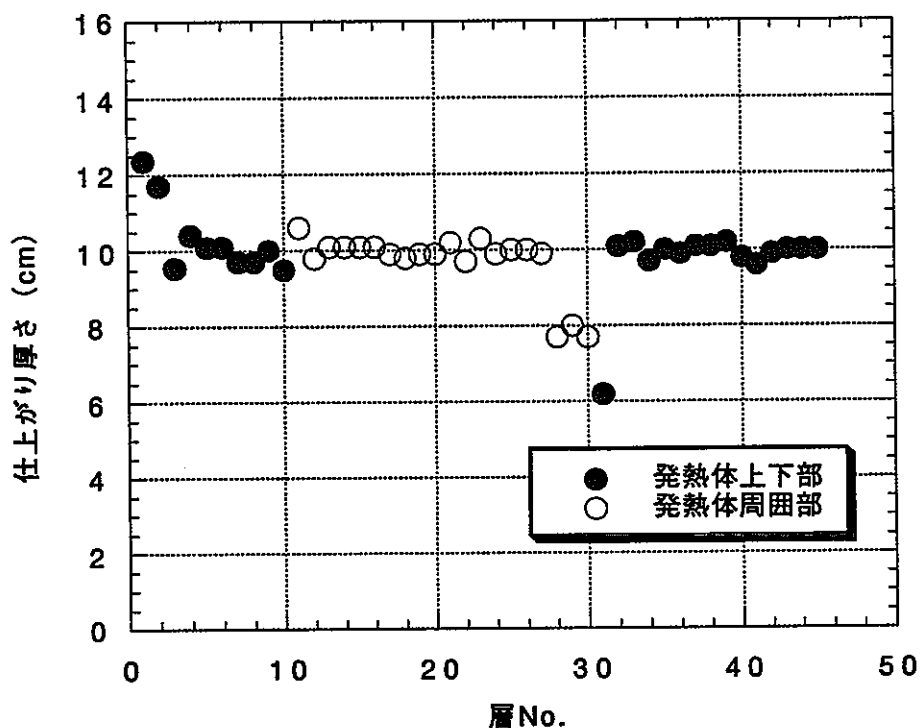


図8-18 各層の仕上がり厚さの変化

8.2.5 締固め時間および締固めエネルギー

図 8-19に1層当たり締固め時間と乾燥密度の関係、図 8-20に締固め時間から換算した締固めエネルギーと乾燥密度の関係を示す。ただし、実際の締固めでは、前述した電動タンピングランマー (MT-M50V) およびエアースンドタンパー (T-6) の両方を使用した。前者の使用時間が後者に比較して非常に多いことから時間からエネルギーへの換算ではエアースンドタンパー (T-6) を無視した。

締固め時間または締固めエネルギーと乾燥密度の相関が見られない。1層当たりの締固め時間はおよそ13～40分 (平均28分)、またエネルギーでは(18～55) Ec になり、室内試験結果により想定した必要な締固めエネルギー $\geq 15\text{Ec}$ になっている。

ここで Ec とは (社) 地工学会規定の土の突固め試験方法における標準の突固め仕事量 (Standard Proctor) で $\text{Ec}=5.625\text{cm} \cdot \text{kgf}/\text{cm}^3$ である。

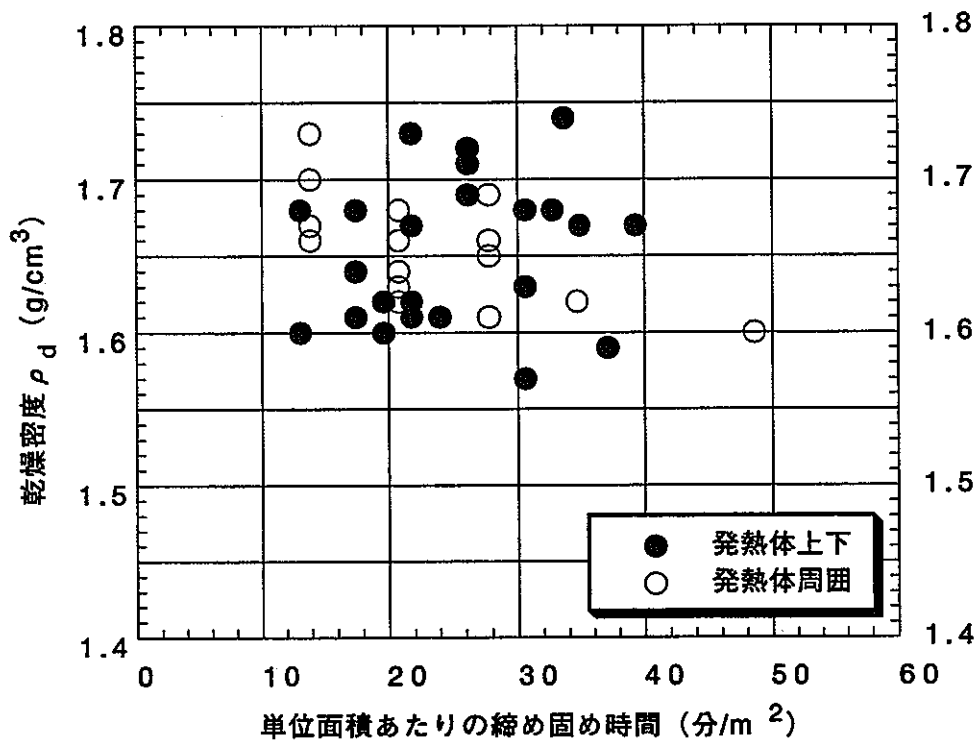


図8-19 締め固め時間の変化

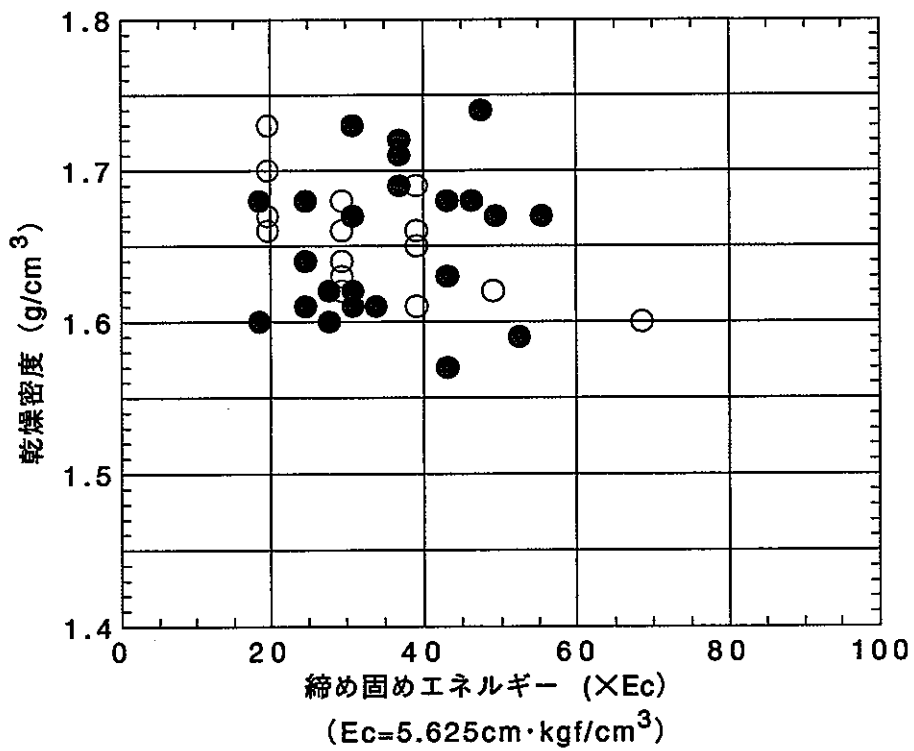


図8-20 換算した締め固めエネルギーの変化

8.2.6 間隙比および飽和度について

図 8-21、図 8-22にそれぞれ間隙比と飽和度の変化を示す。間隙比は、 $e=0.52\sim 0.69$ に変化している。平均値は 0.60、標準偏差 0.04 になっている。また飽和度では $S_r=56\sim 58\%$ 、平均 66.2% (標準偏差 5.1%) になっており、締固め後の緩衝材は不飽和状態を示す。

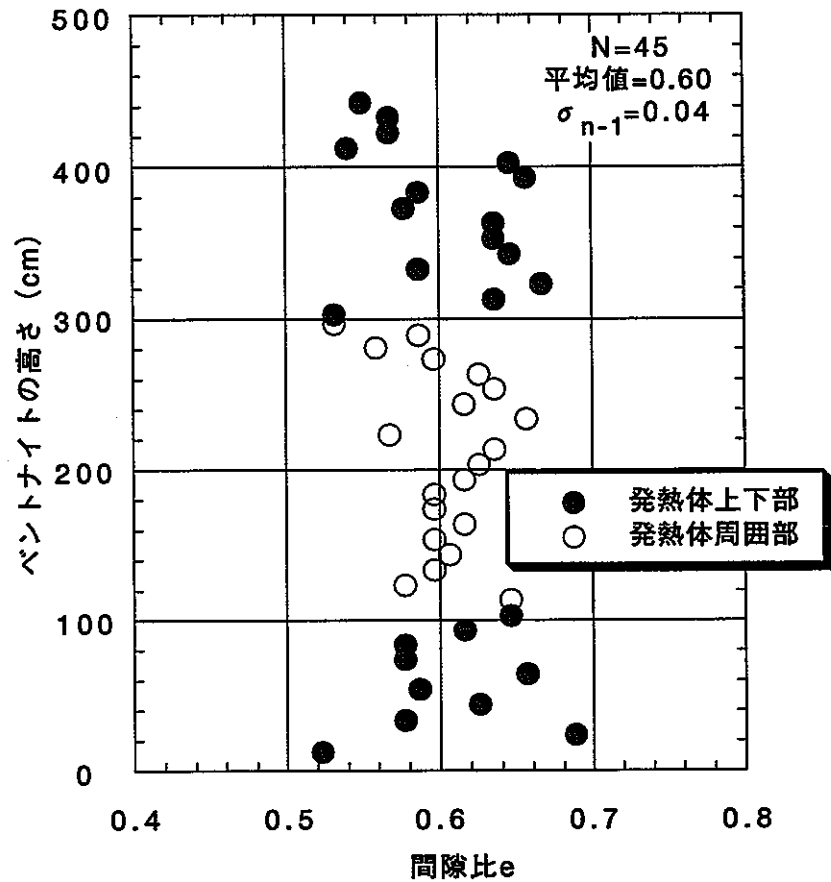


図8-21 間隙比の変化

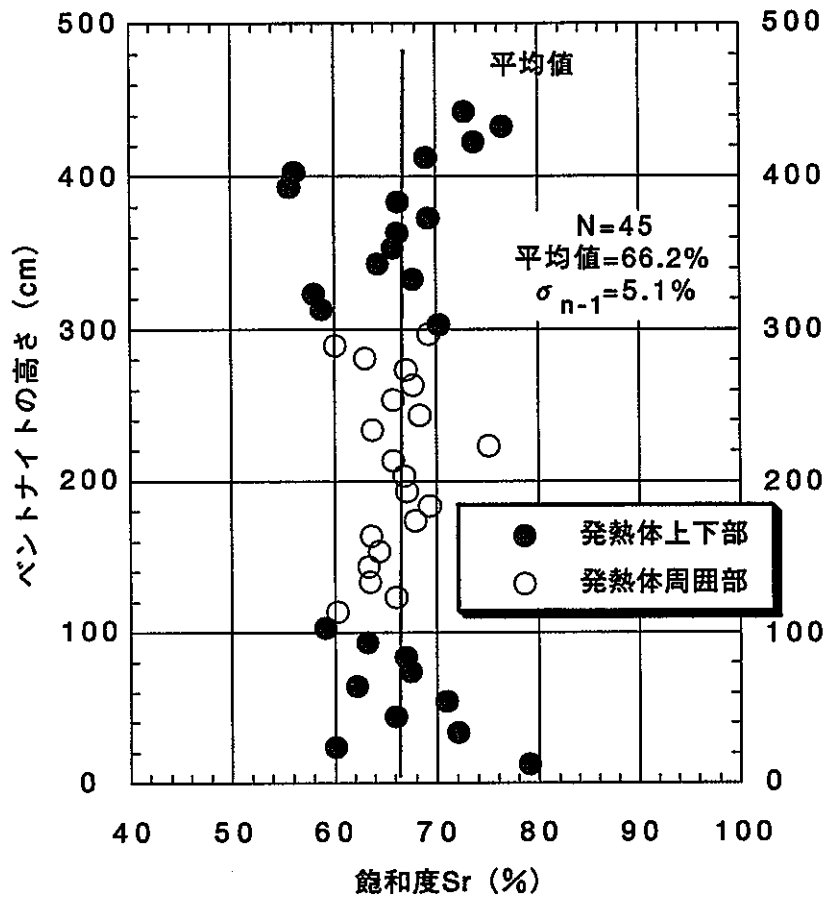


図8-22 飽和度の変化

8.2.7 まとめ

締固め試験から次のことが判明した。

- (1) 含水比は13.3～16.4%（平均15.03%、標準偏差0.80%）に変化し、層 No.36 のデータを除いて、管理値の $w=15\pm 2\%$ を満足している。
- (2) 締固め時間は各層においてかなり変化しており、単位面積当たりの締固め時間はおよそ15～40分/m²になっている。締固め時間を締固めエネルギーに変換すると約(20～55) Ecになる。
- (3) 乾燥密度は管理範囲の $\rho_d=1.6\sim 1.7\text{g/cm}^3$ に対して、大部分が満足しており、また、平均値は $\rho_d=1.65\text{g/cm}^3$ となり、目標値とほぼ同じである。しかしながら、一部のデータでは上記の管理範囲を満足していない。下限値を下回ったデータは、施工初期における測定誤差や含水比の変化によるものと考えられ、今後ピット底面の処理方法や含水比の管理方法を検討する必要がある。一方、上限値を越えたデータでは、均等性からは望ましくないものの、緩衝材の遮水性、膨潤性や力学的安定性等、諸性能の確保・向上の観点からみると問題はなく、上限値は下限値ほど重要でないと考えられる。舗装用密度計による乾燥密度の平面的な変化の一例をみると、ピット壁面近傍では中央部より小さくなる傾向を示し、中央部では $\rho_d\geq 1.62\text{g/cm}^3$ に対して壁面近傍では $\rho_d\leq 1.62\text{g/cm}^3$ と小さくなっている。また出来型測量による全データの平均は1.62程度で、同じ層のヘルメット測量による平均乾燥密度とほぼ同じである。中央部と壁面の密度の違いは締固め方法に加え、岩壁の放射性による舗装用密度計への影響等も考えられる。したがって、今後、特に壁面近傍における締固め方法や密度の測定方法を検討する必要があると考えられる。
- (4) 間隙比および飽和度はそれぞれ0.52～0.68（平均0.60）、56～78%（平均66.2%）であり、締固め後の緩衝材が不飽和状態を示す。

8.3 計測機器の埋設方法および手順

8.3.1 設置方法および手順

計測機器を壊すことなく緩衝材中に設置する方法と手順を示す。基本的には、所定深度までのペントナイトの突固め終了後に、更にもう一層（10cm）ペントナイトを突固め、センサー設置用の孔を削孔し、そこにセンサーを埋設した。各センサー毎の詳細な設置方法を以下に記す。

(1) 湿度計

湿度計の設置は基本的に縦置きとする。ヒーターの上下面の設置に関しては横置きとする。まず、ヒーター上下部以外での設置方法を以下に示す。

- ① 湿度計センサー設置深度の次の層までペントナイトの突固めが終了した後、深さ 115mm、直径 25mm の孔をハンドドリルで削孔する。センサー本体の先端より 15mm 手前に受感部分があるため、その部分がちょうど設置深度になるように考慮する。また、ケーブルを這わせるための溝を図のように彫刻刀などで彫る。このとき、溝が1カ所に密集しないようにする。
- ② 次に、その孔にセンサーを設置する。このとき、溝にペントナイトを撒いてから、ケーブルを這わせることとする。また、孔とケーブルを這わせる溝は適宜削り、センサーやケーブルに負担がかからないようにする。
- ③ 図 8-23 の様に孔とセンサーの間にペントナイトを入れ、治具を用いて、センサーが動かないようにペントナイトを突固める。また、ケーブルを埋めた溝にもケーブルの上からペントナイトを撒いて木ゴテなどで軽く押さえる。

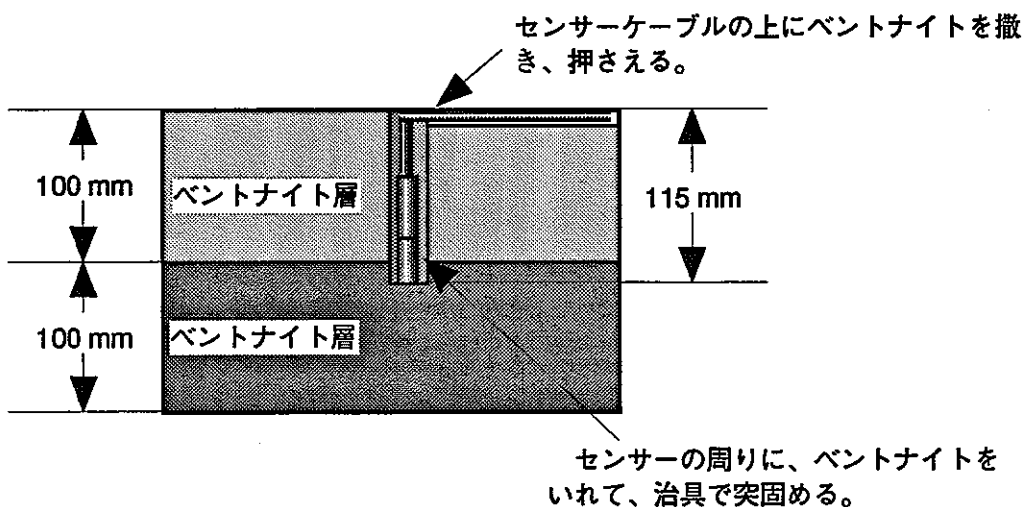


図8-23 センサーの埋め込み

次にヒーターの上下にセンサーを埋設する方法について述べる。

ヒーターの上下にセンサーを埋設する場合、2つの設置深度が考えられる。ヒーターの下に埋設する場合は、Aの面にヒーターがのることになり、ヒーターの上に埋設する場合はBから下がヒーターとなる。設置手順を以下に示す。

- ① 所定の層までベントナイトを突固めた後は、彫刻刀などで、センサーとケーブル用の溝を作成した。
- ② センサーおよびケーブルを溝に設置する前に少量のベントナイトを溝に撒き、その上にケーブルおよびベントナイトを埋設した。
- ③ 図 8-24の様にセンサーおよびケーブルを設置した後は、その上にベントナイトを再び撒き、板などを用いて押さえた。特にセンサーの上は治具などを用いて十分突固める。

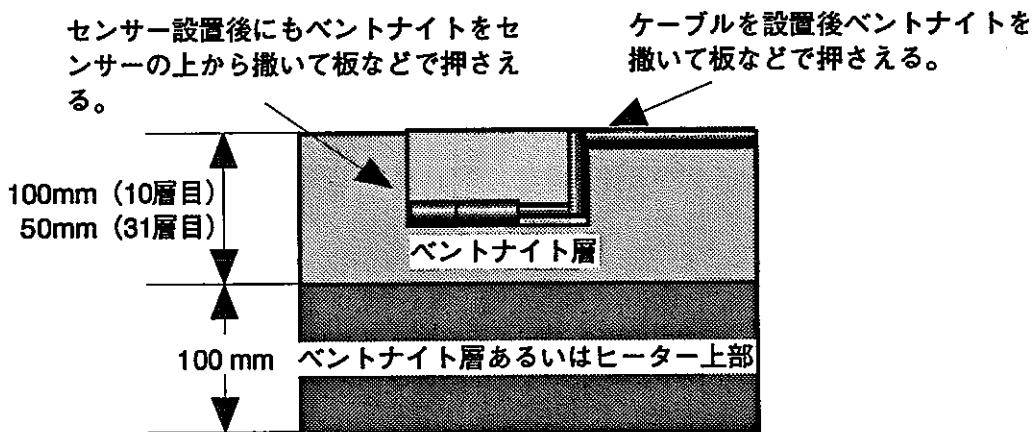


図8-24 センサーおよびケーブルの設置後のベントナイトの撒きだし

(2) 水分計

水分計の埋設はすべて以下の手順で実施した。

- ① センサー設置深度の次の層までベントナイトの突固めが終了したら、深さ100mm、直径20mmの孔をハンドドリルで削孔した。
また、ケーブルを這わせるための溝を彫刻刀などで彫った。
- ② 次に、その孔にセンサーを設置した。このとき、ケーブルは溝に埋めるが、溝とケーブルの間に隙間があるならば、溝にベントナイトを撒いてから、ケーブルを這わせた。また、孔とケーブルを這わせる溝は適宜削って、センサーやケーブルに負担がかからないようにした。
- ③ 図 8-25の様に孔とセンサーの間にベントナイトを入れ、治具を用いて、センサーが動かないようにベントナイトを突固める。また、ケーブルを埋めた溝にもケーブルの上からベントナイトを撒いて木ゴテなどで軽く押さえる。

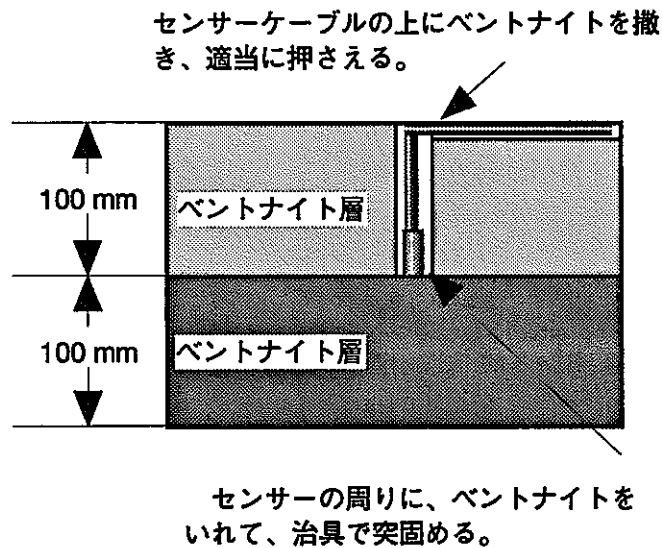


図8-25 センサーの埋め込み

(3) 圧力計

圧力計は3つの設置方法がある。2つは試験ピットの底やコンクリート蓋の裏に設置して、鉛直方向の圧力を測定する設置方法と、ヒーターの壁面や試験ピットの壁面に設置して水平方向の圧力を測定する方法である。まず、試験ピットの底に設置する方法について示す。

- ① 試験ピットの底の所定の位置に耐熱性（120℃）があるエポキシ樹脂を厚めに塗った。
- ② 次に圧力計の受感部分（溝の無い方）を上にしてエポキシ樹脂の上に水平に設置した。
- ③ エポキシ樹脂が乾いて、圧力計が固定されたらベントナイトを撒きだして突固めた（図8-26）。

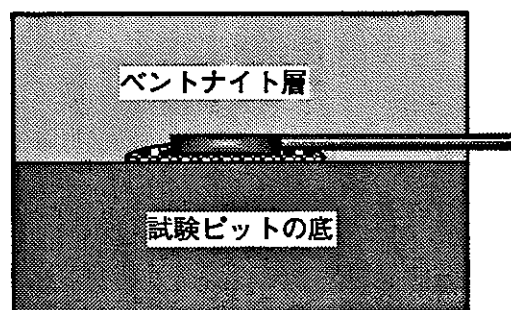


図8-26 ベントナイトのまきだし

次に、コンクリートの蓋の下に設置する方法について説明する。

- ① ベントナイトの最後の層の突固めが終了する前に厚さ6mm、直径25mmの木型を圧力計設置位置に置き、突固めた後その木型を除去して深さ6mm、直径25mmの孔を得る。もし、この方法が困難ならば、彫刻刀で同じ寸法の孔を削る。また、ケーブルを這わせるための溝を図のように彫刻刀などで彫る。

- ② 次に、その孔に圧力計を図のように設置する。このとき、センサーの受感部分は鉛直下方に向けて設置する。ケーブルは溝に埋めるが、溝とケーブルの間に隙間があるならば、溝にベントナイトを撒いてから、ケーブルを這わせることとする。また、孔とケーブルを這わせる溝は適宜削り、センサーやケーブルに負担がかからないようにする。
- ③ ケーブルを埋めた溝にもケーブルの上からベントナイトを撒いて木ゴテなどで軽く押さえる。図8-27参照。

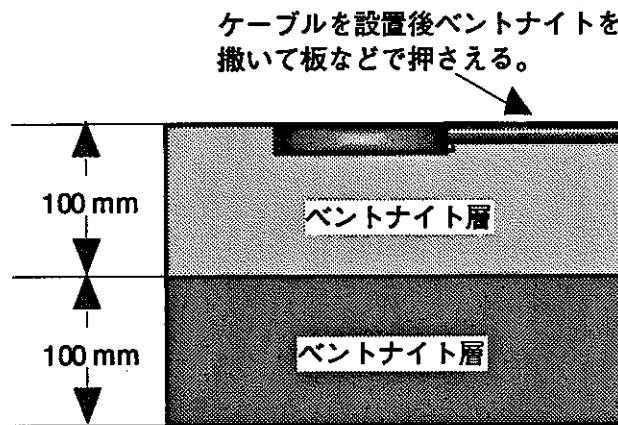


図8-27 ベントナイトの撒きだし

最後に、圧力計をヒーターあるいは試験ピットの孔壁に埋設する方法について述べる。

- ① 横幅25mm、厚さ10mm、高さ112.5mmの木型を圧力計が設置される深度の前の層から試験ピットあるいはヒーター壁面に木工用ボンドなどで仮止めしておき、2つの層を順次、突固める。
- ② 設置深度の上の層の突固めが終わり次第、木型を除去し、圧力計を設置する孔を削孔する。彫刻刀を用いてケーブルの溝（幅4mm、深さ5mm）を彫る。
- ③ 圧力計に十分な量のエポキシ樹脂を塗布し、試験ピットあるいはヒーターの壁面に接着させる。ケーブルは溝に入れる前にベントナイトを撒いてから入れる。
- ④ 図8-28のように、隙間にベントナイトをいれて突固める。ケーブルについてもベントナイトを撒いて、木の板などで押さえる。

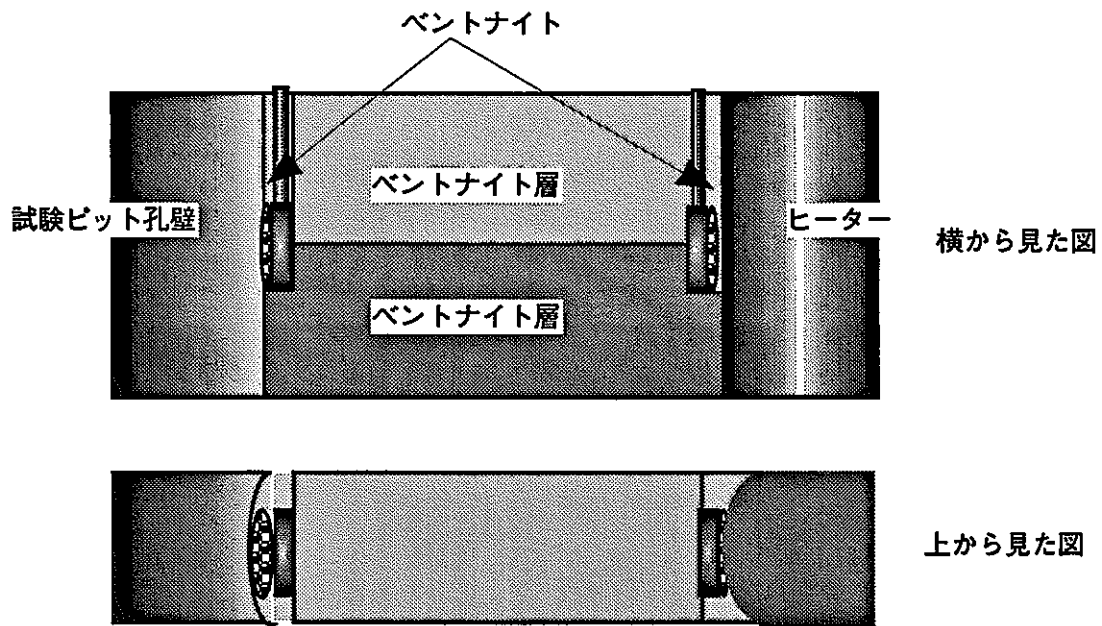


図8-28 ベントナイトの充填

(4) 間隙水圧計

間隙水圧計の設置はすべて同じ方法で実施する。基本的に間隙水圧計は試験ピット内壁の岩盤部からの湧水の水圧を測定するために設置するので、受感部分を孔壁に向けて設置する。

図 8-29 の様に、設置前に間隙水圧計の受感部分に界面活性剤を塗り、そして受感部分保護の金属キャップの端にエアー抜きの切り込みを入れる。

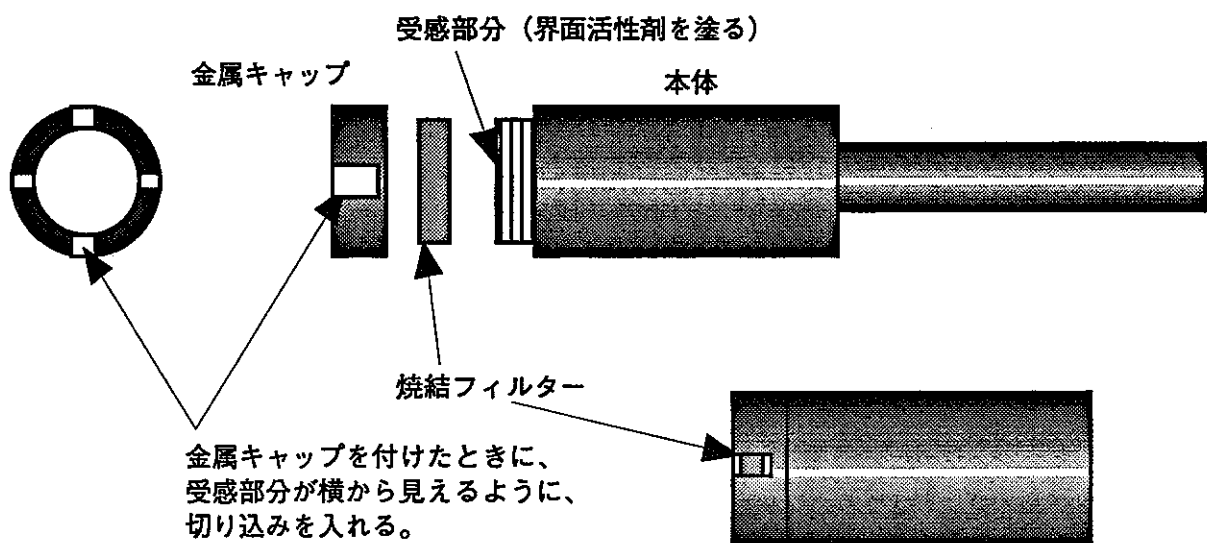


図8-29 間隙水圧計の加工

- ① 間隙水圧計の設置深度の次のベントナイト層を撒きだすときに、幅40mm、高さ100mm、長さ150mmの木型を設置し、ベントナイトを撒きだし、突固める。突固め終了後に、ケーブル埋設用の溝（幅10mm、深さ10mm）を彫刻刀などで彫る。
- ② 突固め終了後、木型を除去し、間隙水圧計設置用の空間を確保した。
- ③ 間隙水圧計を横向きに置き、受感部分の前に砂を、ケーブルの下にはベントナイトを撒いた。
- ④ 図8-30のように、間隙水圧計やケーブルの上にベントナイトを撒き、木製のハンマー等でたたいた。

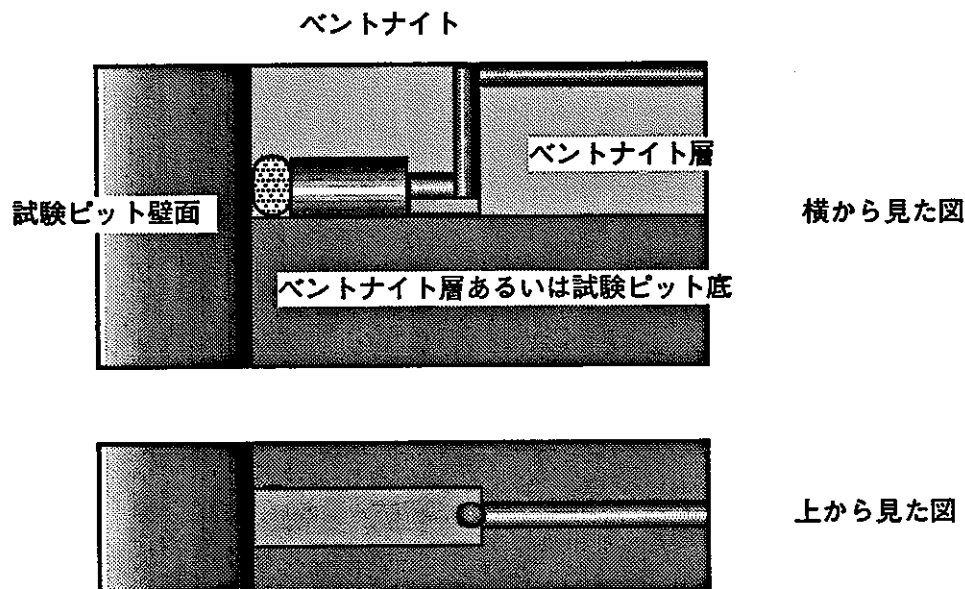


図8-30 間隙水圧計の設置

(5) 熱流束計

熱流束計の設置はすべて同じ方法で実施する。熱流束計はヒーターから放出する熱流束、あるいはベントナイトから孔壁へ流出する熱流束を測定するために設置する。熱流束計の正の方向を外向きに設置する。

- ① 横幅40mm、厚さ10mm、高さ140mmの木型を熱流束が設置される深度の前の層から試験ピットあるいはヒーター壁面に木工用ボンドなどで仮止めしておき、2つの層を順次、突固める。
- ② 設置深度の上の層の突固めが終わり次第、木型を除去し、熱流束計を設置する孔を開ける。また、ケーブルの溝（幅4mm、深さ5mm）もつくる。
- ③ 熱流束計に十分な量のエポキシ樹脂を塗布し、試験ピットあるいはヒーターの壁面に接着させる。ケーブルは溝に入れる前にベントナイトを撒いてから入れる。
- ④ 図8-31に示すように、すき間にベントナイトをいれて治具で突固める。ケーブルについてもベントナイトをまいて、木の板などで押さえる。

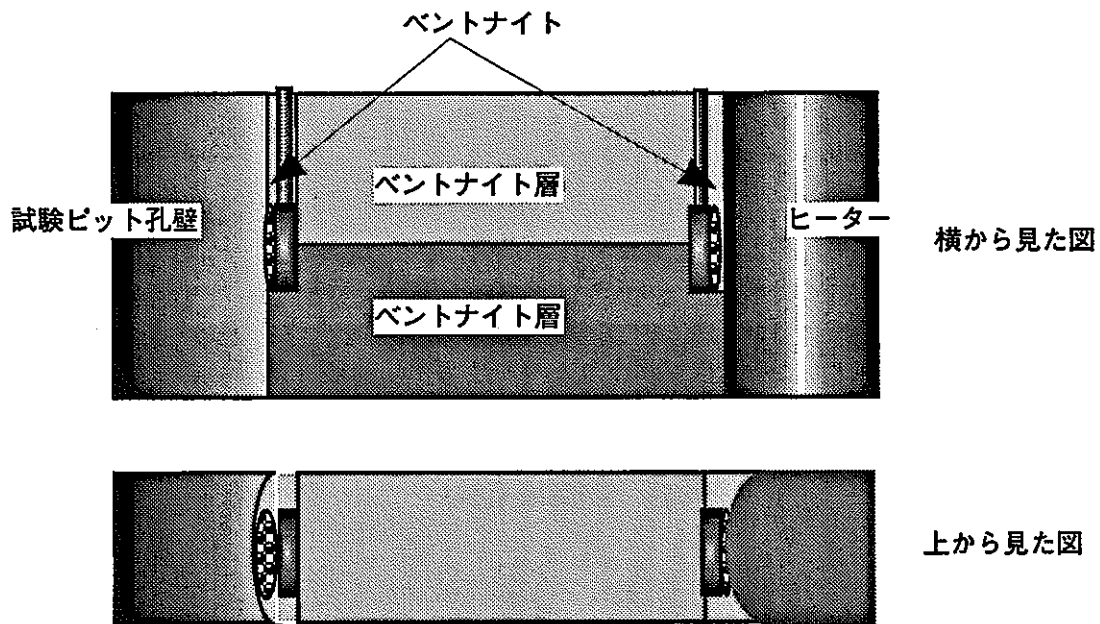


図8-31 熱流束計の設置

(6) 熱電対

熱電対の設置は基本的に縦置きとする。ヒーターの壁面に関してはヒーターの壁面に付けた治具に差し込んで設置した。

ヒーター表面以外の熱電対の設置は、以下の手順で実施した。

- ① センサー設置深度の次の層までベントナイトの突固めが終了したら、深さ 100mm、直径 4mm の孔をハンドドリルで削孔する。
また、シースを這わせるための溝を図のように彫刻刀などで彫る。
- ② 次に、L字型に曲げた熱電対を設置した。このとき、シースは溝に埋めるが、溝とシースの間にすき間があるならば、溝にベントナイトを撒いてから、シースを這わせる。
また、孔とシースを這わせる溝は適宜削り、シースに負担がかからないようにした。
- ③ 孔とセンサーの間にベントナイトを入れ、治具を用いて、センサーが動かないようにベントナイトを突固めた。また、シースを埋めた溝にもケーブルの上からベントナイトを捲いて木ゴテなどで軽く押さえた。

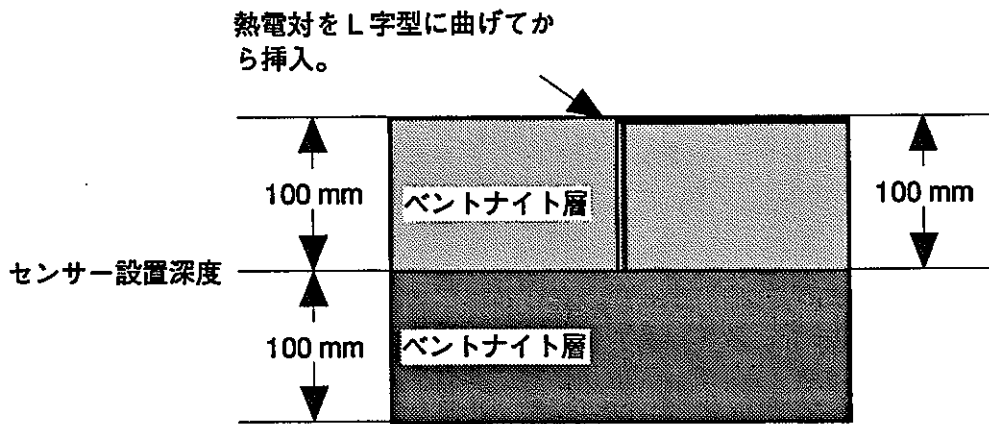


図8-32 熱電対の設置

次にヒーター表面の熱電対の取り付け方法について説明する。

- ① 図8-33に示す様な金物をヒーター表面に予め溶接して取り付ける。
- ② の設置深度のベントナイト層の突固めが終了したら、熱電対を金物に差し込み、M6のボルトで固定した。
- ③ 図8-34の様に、ベントナイトを撒きだして突固めた。突固め終了後、熱電対のシースを曲げて配線した。配線する際は、突固めたベントナイト層に適宜溝を作ってベントナイトを撒いた。

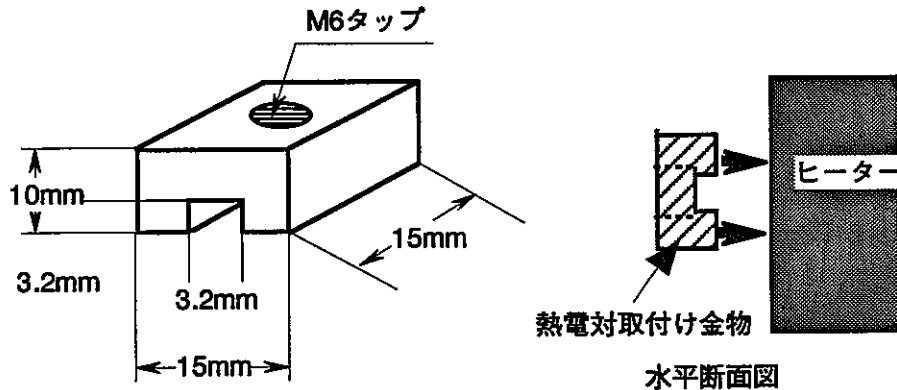


図8-33 熱電対の取付け金具

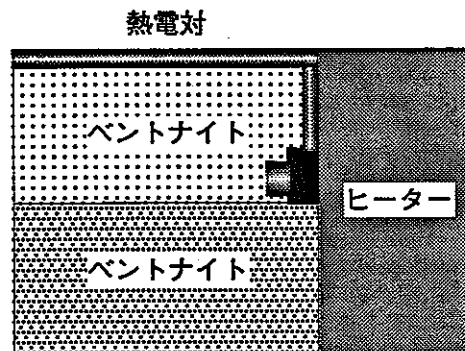


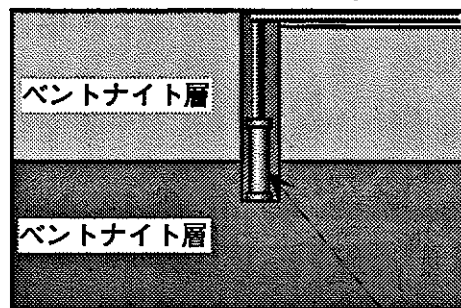
図8-34 熱電対の取付け金具

(7) ひずみ計

ひずみ計の設置方法は2つある。1つは水平方向のひずみを測定するための横置きと、鉛直方向のひずみを測定するための縦置きである。先に縦置きの方法について述べる。

- ① センサー設置深度の次の層までベントナイトの突固め後、深さ127mm、直径30mmの孔をハンドドリルで削孔した。センサー本体の計測部の長さが54mmあり、測定の中心部分がちょうど設置深度になるよう設置した。
また、ケーブルを這わせるための溝を彫刻刀などで彫った。
- ② 次に、その孔にセンサーを設置した。このとき、ケーブルは溝に埋めるが、溝とケーブルの間にすき間があるならば、溝にベントナイトを撒いてから、ケーブルを這わせる。
また、孔とケーブルを這わせる溝は適宜削り、センサーやケーブルに負担がかからないようにする。
- ③ 図8-35のように、孔とセンサーの間にベントナイトを入れ、治具を用いて、センサーが動かないように突固める。また、ケーブルを埋めた溝にもケーブルの上からベントナイトを撒いて木ゴテなどで軽く押さえる。

センサーケーブルの上にベントナイトを撒き、適当に押さえる。



センサーの周りに、ベントナイトをいれて、治具で締固める。

図8-35 センサーの埋め込み

次に横置きについて述べる。

- ① ひずみ計の設置深度の次のベントナイト層を撒きだすときに、幅40mm、高さ100mm、長さ150mmの木型を図のように設置し、ベントナイトを撒きだし、突固める。突固め終了後に、ケーブル埋設用の溝（幅10mm、深さ10mm）を彫刻刀などで彫る。
- ② 突固め終了後、木型を除去し、ひずみ計設置用の空間を確保する。
- ③ ひずみ計を横向きに置く。ケーブルの下にはベントナイトを撒く。
- ④ 図8-36の様に、ひずみ計やケーブルの上にベントナイトを撒き、木ゴテで押さえる。

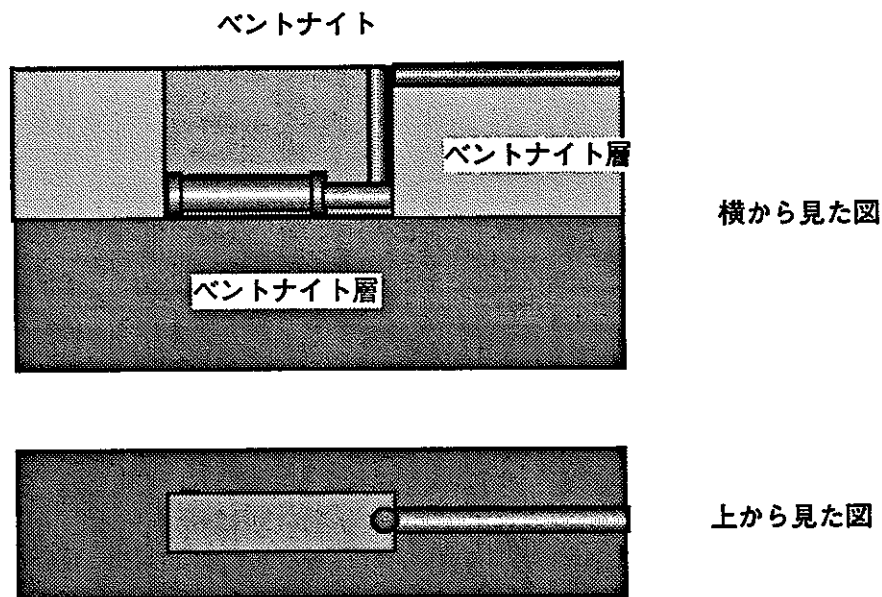


図8-36 ひずみ計設置

8.3.2 動作確認

計測機器埋設前後の動作確認表 8-5に示す方法で実施した。

表8-5 計測機器埋設前後の動作確認方法

センサー名	坑外	埋設前	埋設後
湿度計	湿度校正器を用いて湿度チェック	湿度校正器を用いて再度湿度チェック	データロガーによる計測値が正常であることを確認
水分計	湿度・水分測定	埋設する水分計の温度測定	検出器による計測値が正常であることを確認
土圧計	テスターで導通チェック	データロガーに接続し、受感部を手の平で軽く押して、計測値が+側になるのを確認	データロガーによる計測値が正常であることを確認
間隙水圧計	テスターで導通チェック	データロガーに接続し、水の入った容器に入れ、徐々に加熱し、温度・間隙水圧を計測	データロガーによる計測値が正常であることを確認
熱流束計	テスターで導通チェック	データロガーに接続し、片側を加熱した鉄板上に熱流束計を置いて計測	データロガーによる計測値が正常であることを確認
熱電対	テスターで導通チェック	データロガーに接続し、水の入った容器に入れ、徐々に加熱し、温度計で温度確認	データロガーによる計測値が正常であることを確認
ひずみ計	テスターで導通チェック	データロガーに接続し、零バランスを測定し、測定値が試験成績書の値と大きく異なることを確認	データロガーによる計測値が正常であることを確認

8.3.3 設置位置

緩衝材内に設置したセンサーの配置図を図8-38～図8-39に示す。また、試験坑道に設置したセンサーの配置図について図8-40に示す。本年度に設置したセンサーの数量を表8-6に示す。に示す。座標は座標系（ r 、 θ ）で表示した（図8-37）。

表8-6 本年度設置したセンサーの数

センサー名	緩衝材中	坑道	合計
間隙水圧計	15		15
湿度計	11	2	13
水分計	40		40
ひずみ計	13		13
圧力計	30		30
熱電対	28	10	38
熱流束計	6	3	9
軸力計		4	4
水位計		2	2
ダイヤルゲージ		4	4

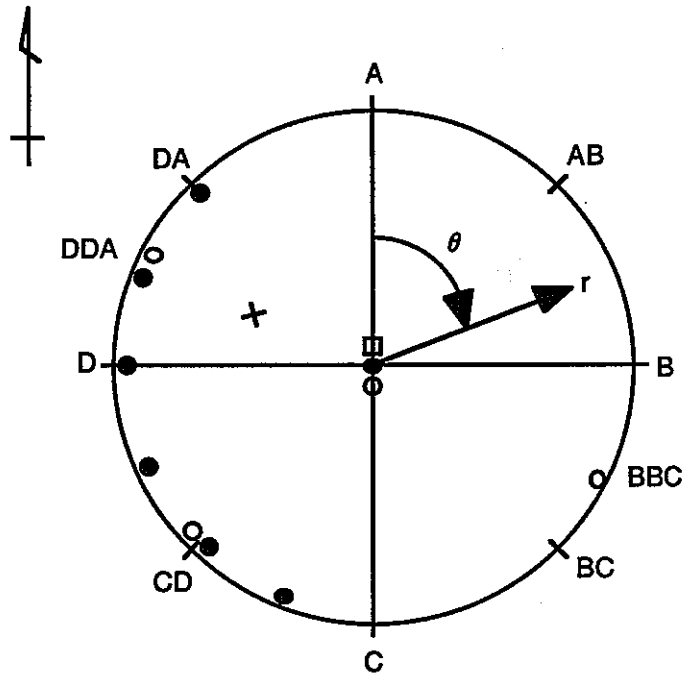


図8-37 座標系（ r 、 θ ）

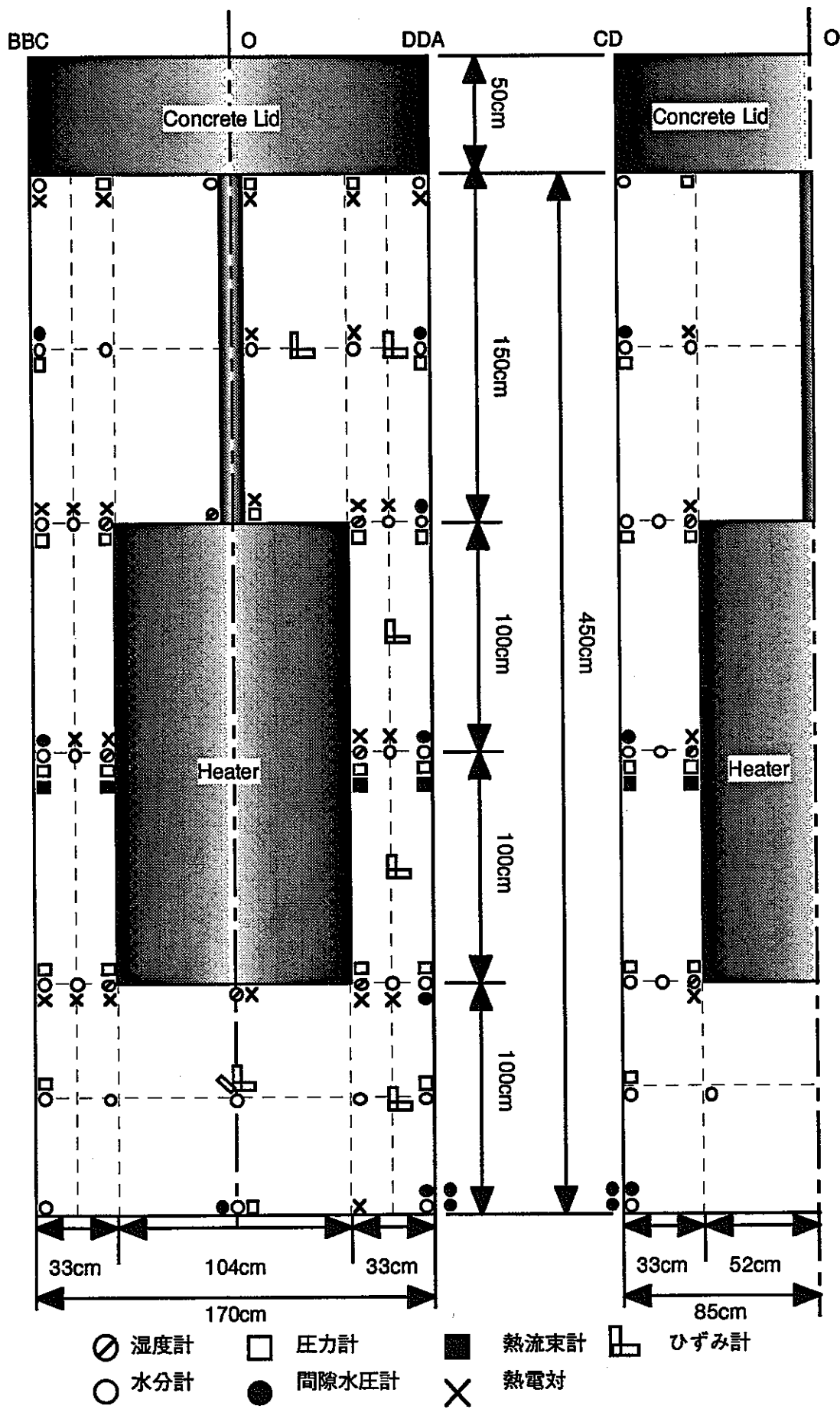


図8-38 緩衝材内のセンサー配置図 (緩衝材内：全ての断面)

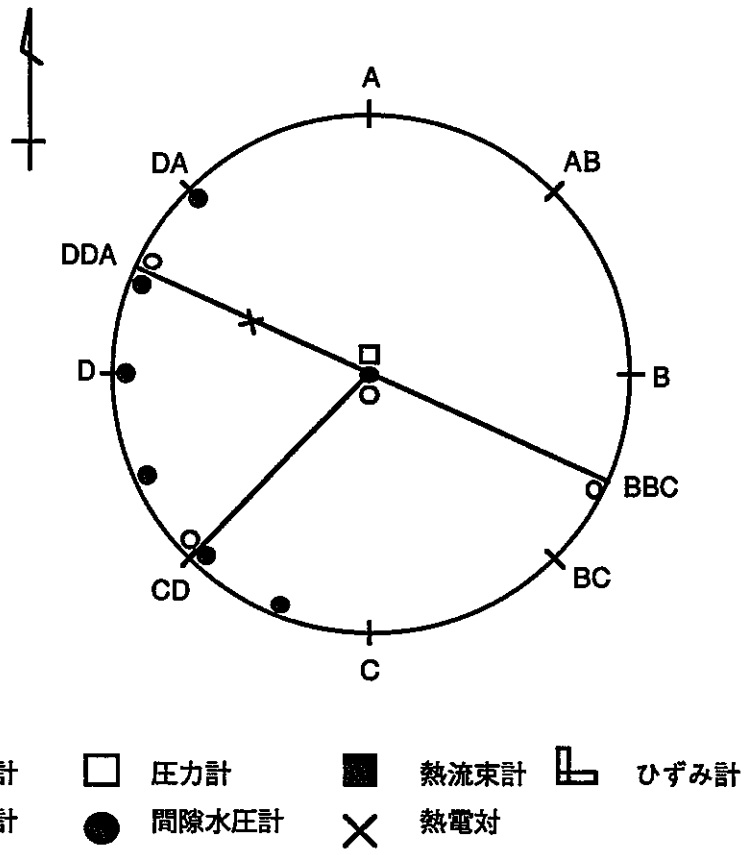


図8-39 緩衝材内のセンサー配置図 (緩衝材内:ピット底面)

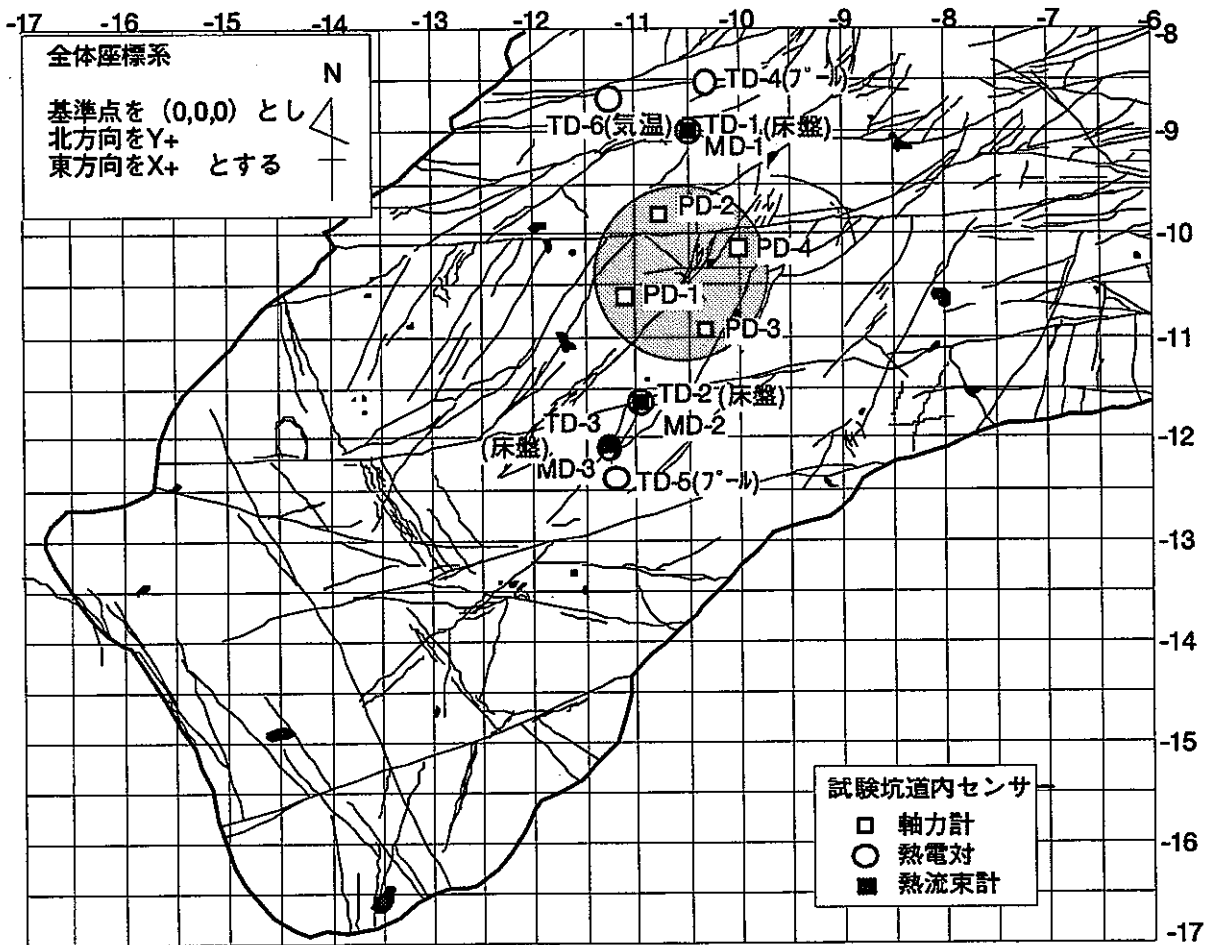


図8-40 センサー配置図 (坑道)

9 コンクリートフタ設置、固定

9.1 設置方法

コンクリート蓋の設置方法を図9-1に示す。また、蓋の平面図を図9-2に示す。

コンクリート蓋は、ベントナイト原位置締固め後に、ピット掘削に用いたビットを逆さまに挿入し、その中にモルタルを充填することにより施工した。ベントナイト中に埋設したセンサーのケーブル類はフレキシブルチューブの中を通して、直接モルタルに触れないようにした。また、図9-2 からわかるように、次年度に実施するベントナイトのサンプリングのために、コア採取用のボーリング孔を鉄製のパイプを埋設することにより設けた。

9.2 固定方法

コンクリート蓋の設置方法を図9-3に示す。ベントナイトサンプリング用の鉄製パイプの口やセンサーケーブル挟まないように、4本のH鋼をコンクリート蓋を押さえるために設置した。4本のH鋼のしたには、鉛直方向に力を加えるためにオイルジャッキを設置し、加圧した。また、それらのH鋼の座屈防止のために、梁となるH鋼を2本設置した。

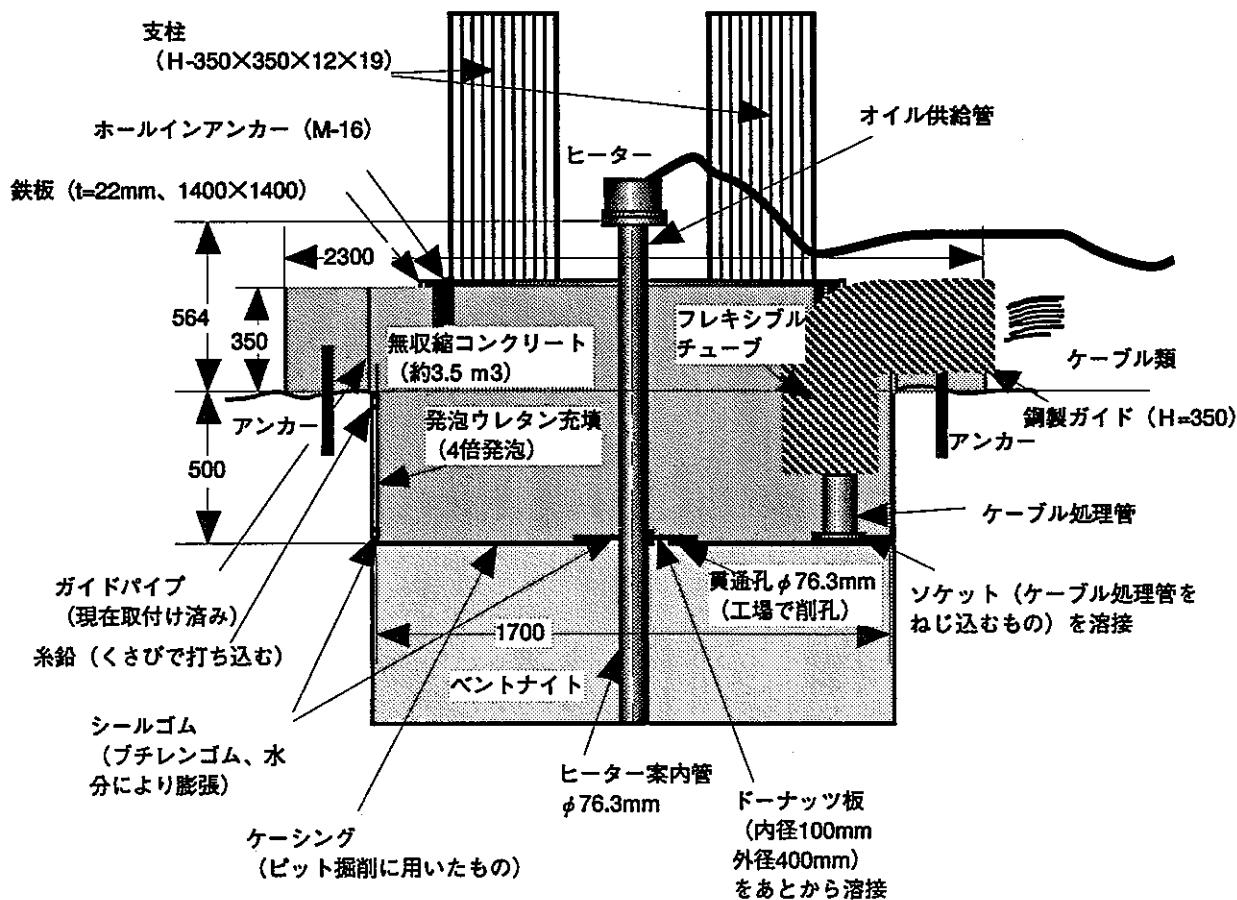


図9-1 コンクリート蓋の設置方法

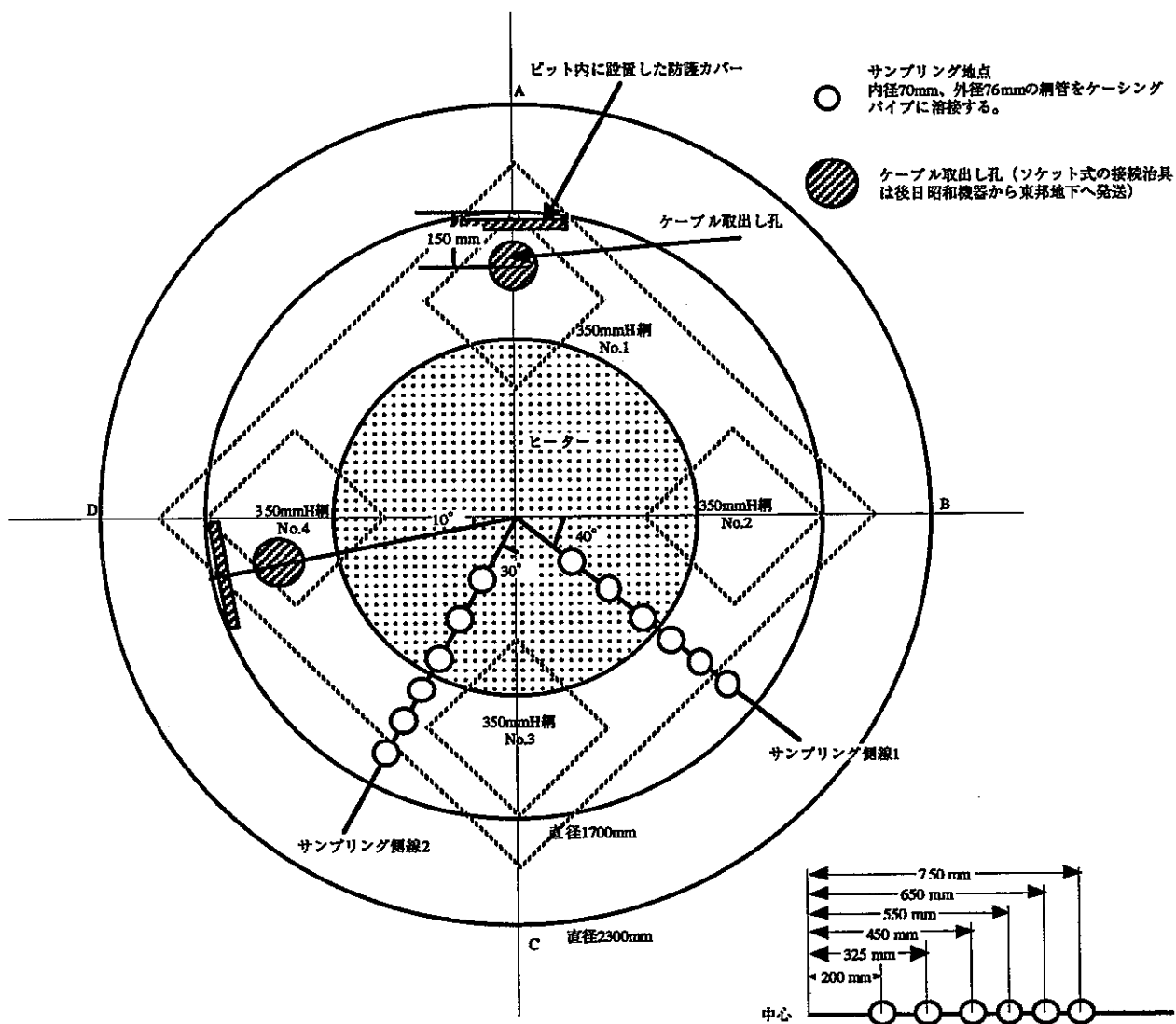


図9-2 コンクリート蓋を上から見た図

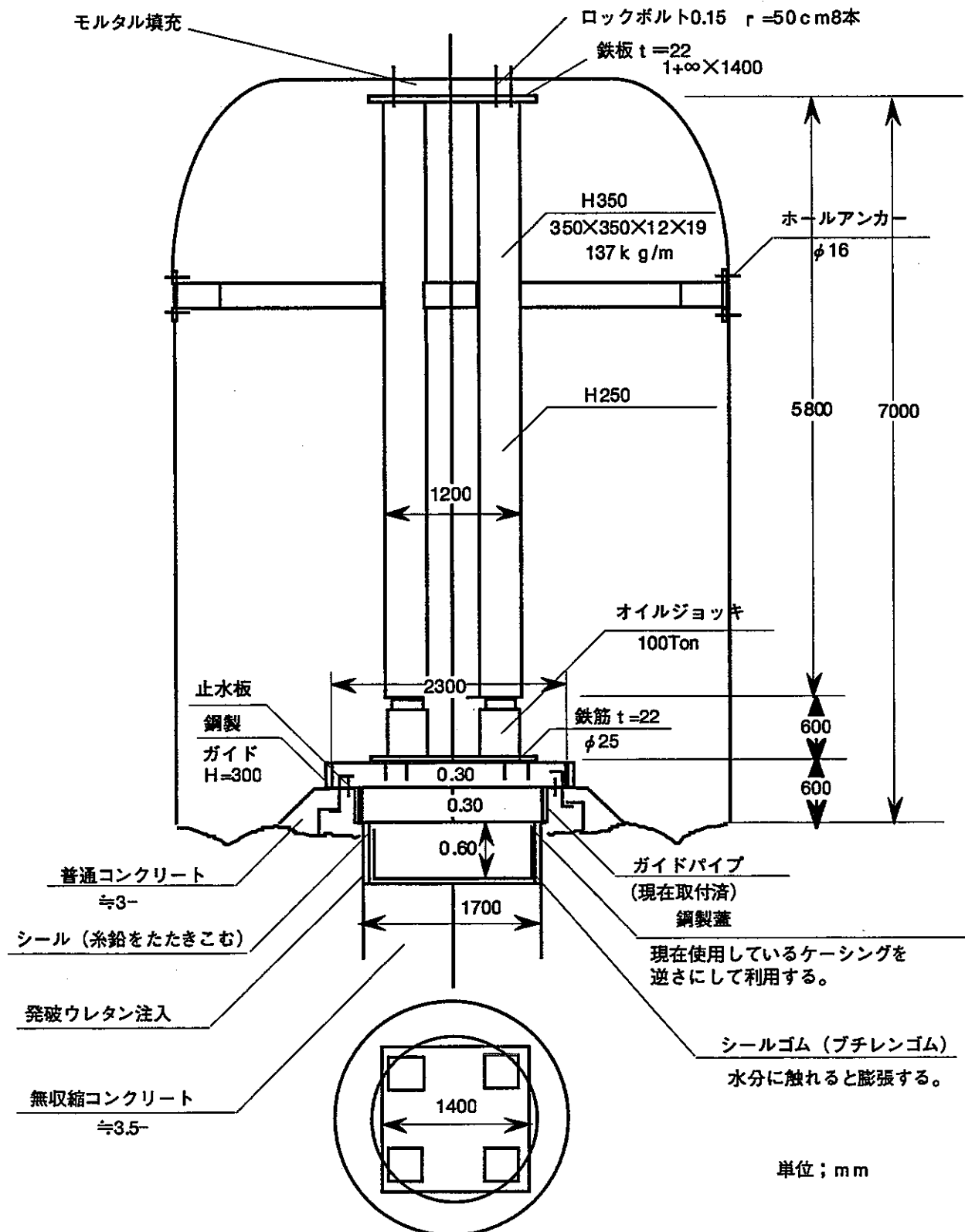


図9-3 コンクリート蓋の固定方法

10 計測室等整備

昨年度仮設した計測小屋に替えて、市販の物置に手を加えて計測室とし、図 10-1 に示す位置に常設した。計測室内には、データロガー、スキャナー、サイクルメーターの測定器、グラスファイバー式温度計の計測システムなどを設置した。

また、試験場の温度および湿度を一定に保つために、エアコンと隔壁を設置した。隔壁の概要を図 10-2 に示す。エアコンによって温度、湿度を調節し、隔壁によってその温度、湿度を維持することが目的である。

堰は、図中の黒い太い線の位置に設け、連成試験中は試験場に水をはった。水位はピット中心部で約 40cm とした (図 10-3)。

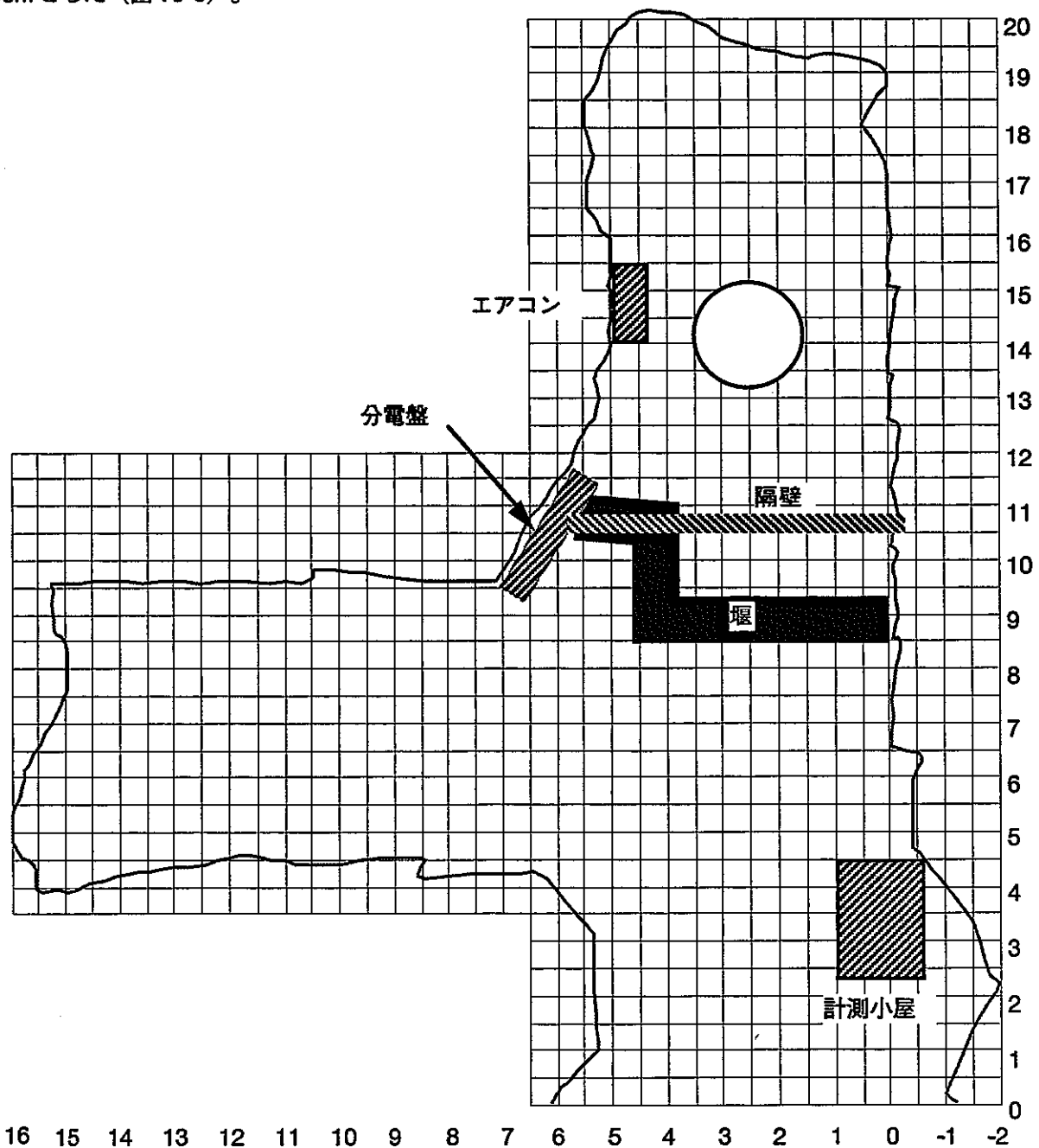
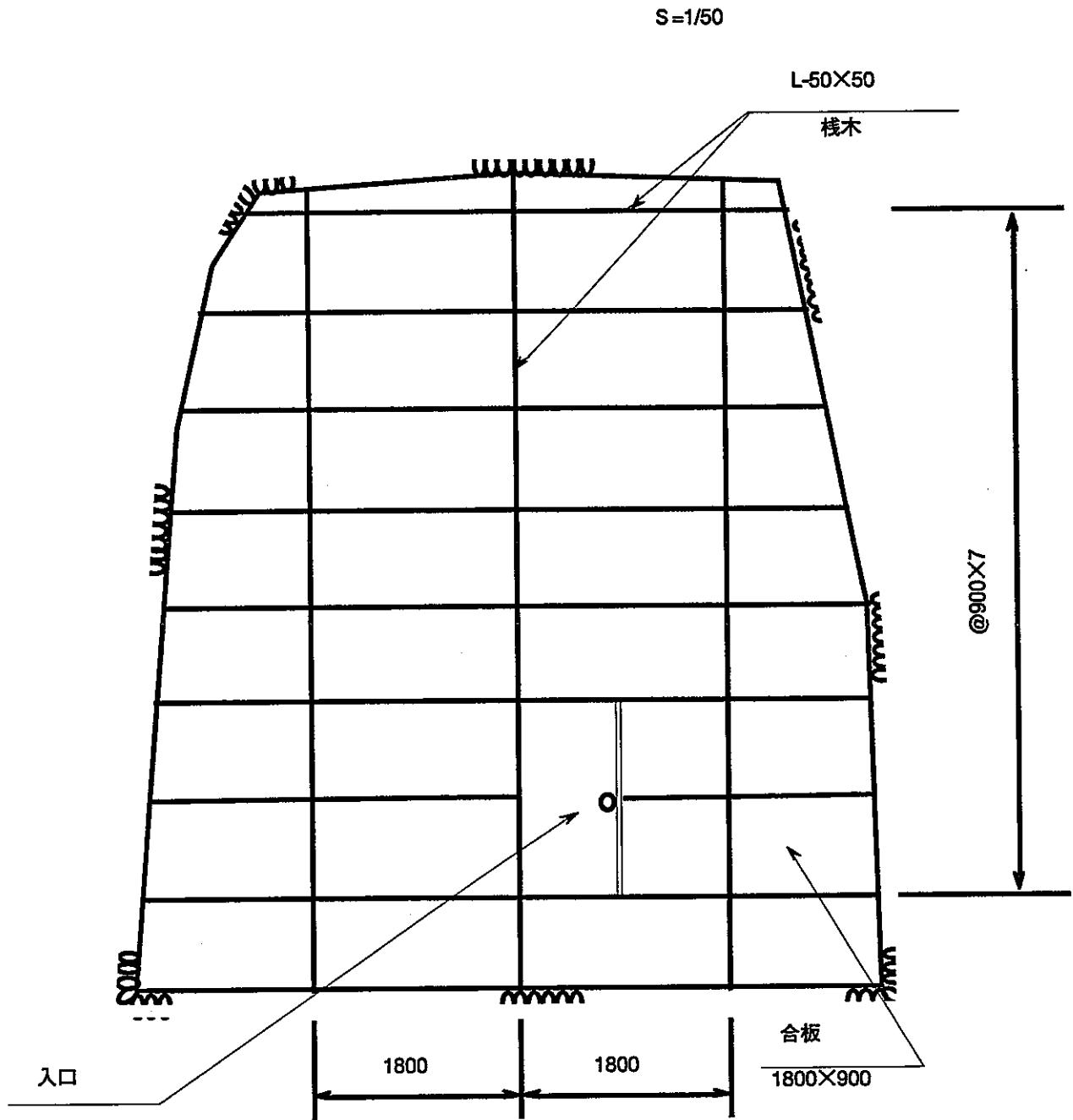


図10-1 計測小屋、隔壁、堰の設置位置



- 合板 40枚
- アングル 5.5m/本 20本
- 栈木 40m/本 30本

図 10-3 隔壁の概要

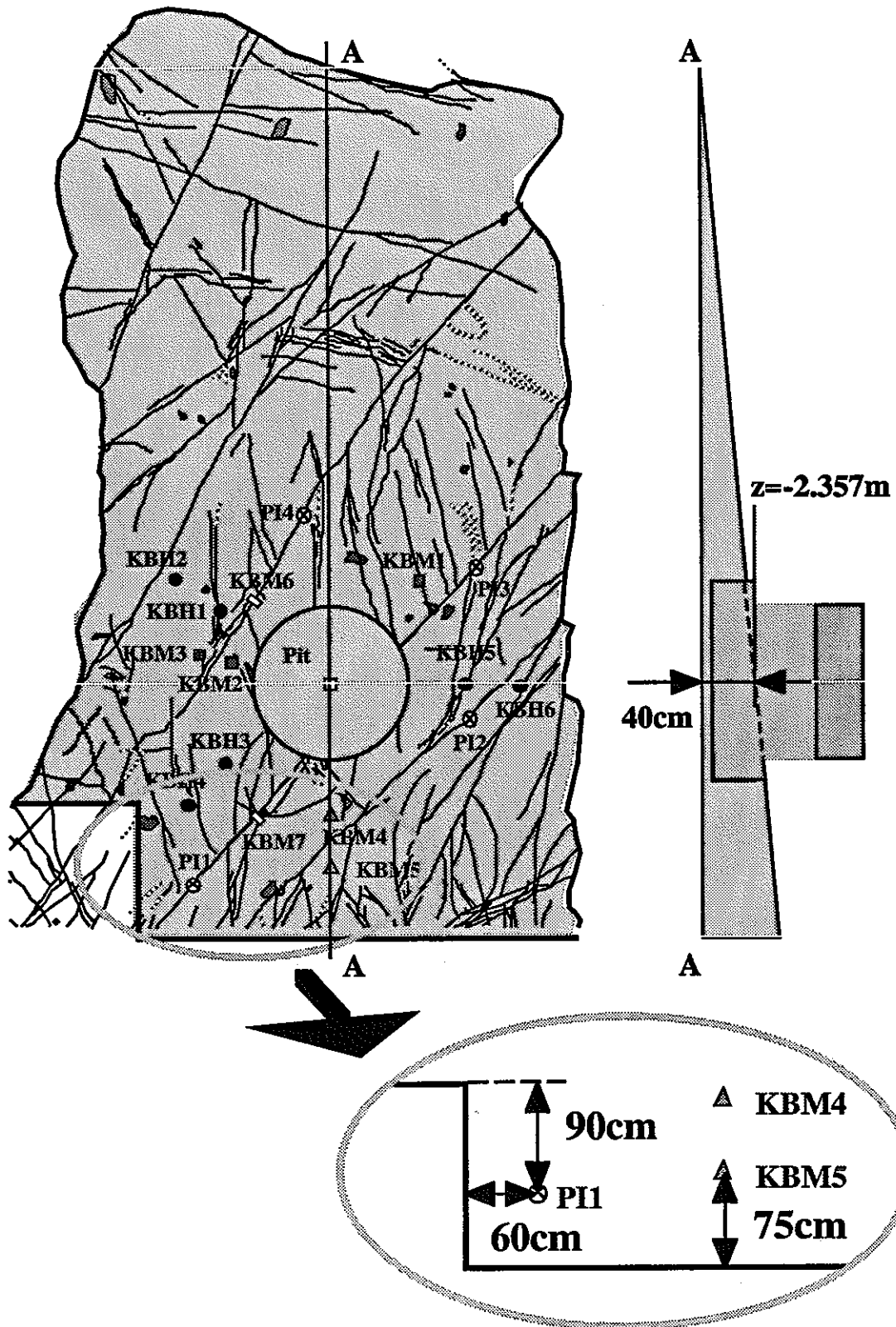


図 10-3 プールの概要

11 連成試験

平成8年度12月17日13:00より、ヒーター表面温度を100度に設定し、熱-水-応力連成試験を開始した。ここでは、連成期間中のベントナイト中と岩盤中の計測データについて考察を加える。

11.1 ベントナイト中の測定データ

前述の通り、本年度実施した緩衝材の施工の際に各種センサーを埋設した。そのうち、水分計以外はすべてデータロガーで連続計測（計測間隔は3時間を基本とし、必要に応じて間隔を調整した）した。ベントナイト中のセンサーの埋設位置は前述した通り、垂直3断面に大別され、データの状況から、3つの断面はほぼ同様の挙動を示しているため、ここでは代表的なDDA断面およびピット床面について考察を加える。ほかのデータについては、添付資料に経時変化をすべて掲載する。

11.1.1 温度

ベントナイト中の温度は湿度計、測温機能付き間隙水圧計、熱電対の3種類のセンサーを用いて測定した。図11-1はDDA断面の熱電対による温度の経時変化、図11-2はピット床面の間隙水圧計による温度の経時変化、図11-3は間隙水圧計によるDDA断面の温度の経時変化、図11-4は湿度計によるDDA断面の温度の経時変化を示す。図11-5は試験場に制作したプール内の水温、岩盤の温度、直上の試験場の気温の経時変化を示す。図11-6～図11-8には、それらのデータを用いて、DDA断面の開始直後、1カ月後、3カ月後のコンター図を描いた。

図11-1からは、試験開始後、ヒーターの表面温度を100℃に設定するためにヒーター出力が上昇し、一時的に100℃を越える値を呈した。その後は、TT-11のようにほぼ100℃を示している。この温度がヒーターの制御の指標で、ヒーター表面のほかのセンサー、TT-2、TT-8、TT-20、TT-19が同じ100℃にならないのは、センサーの設置状況や、ヒーター内の油の循環状況によるものと思われる。また、ヒーターから一番離れたTT-26、TT-27、TT-28は3カ月後でも20℃に達しないではほぼ定常状態に達した。

図11-2からはヒーター直下のPC-1Tはほかのピット内壁に沿うように設置されたPC-2T～PC-7Tより高い値を示し、約3カ月後では3℃ほど差が生じたことがわかる。

図11-3からは岩盤とベントナイトの境界ではヒーターの中心となる深度に設置されたPC-10Tが一番温度が高く、次に、ヒーターの上端、下端部分と同じ深度に設置したPC-8T、PC-12が次に高い値を示している。一番低い値を示したのはTPC-14Tで、これはヒーターから一番離れている。3カ月後の3つの値はそれぞれ約55℃、45℃、25℃を示している。すなわち上下方向にも温度勾配が生じていることがわかる。

図11-4では、HM-1、THM7、THM-8Tがほぼ同じ値を示している。3カ月後の値は約90℃となった。また、HM-10Tはヒーターの肩部であるので若干温度が低く、HM-3Tに関してはこのような挙動を示すのは不明である。こうした、挙動が故障によるものかどうか、試験設備解体時に調査する必要がある。

図11-5からは、試験場の水温はほぼ12℃（TD-4、TD-5）、岩盤表面温度（TD-1、TD-2）、気温（TD-3、TD-6）はほぼ13℃で一定であることがわかる。

図11-6からは試験開始直後はベントナイト中の温度はほぼ15～16℃であることがわかり、ほぼ一定

温度であることがわかる。

図 11-7 からはヒーターの中心深度ではベントナイト中の温度勾配は $54^{\circ}\text{C}/35\text{cm}=\text{約 } 1.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ であることがわかり、図 11-8 と比較すると、1 カ月後にベントナイト中の温度分布はほぼ定常状態に達していることがわかる。

11.1.2 間隙水圧

ベントナイト中の間隙水圧は間隙水圧計によって測定した。図 11-9 はピット底面、図 11-10 は DDA 断面にそれぞれ設置した間隙水圧計の経時変化である。

図 11-9、図 11-10 の両方のグラフからもわかる通り、間隙水圧の上昇は観察されない。特に図 11-9 はピット底面の亀裂付近に設置したのだが、間隙水圧の上昇は観察できなかった。間隙水圧計の周りには豊浦標準砂をまいて水の浸潤状況をよくしたが、その周りがベントナイトであるため、高いサクションにより水の浸潤が妨げられたのではないかと考えられる。

結局、このような不飽和状態で岩盤との境界という特殊な状況において、ベントナイト中の間隙水圧を測定することは難しいと思われる。

11.1.3 湿度、水分分布

ベントナイト中の湿度は湿度計によって測定した。図 11-11 は DDA 断面に設置した湿度の経時変化である。図 11-12 は水分計によって測定したポテンシャルの経時変化である。また、前述したようにベントナイト中の湿度、ポテンシャルを含水比に変換する変換式を実験的に求めたので、含水比に変換した。それらをもとに試験開始後、1 カ月後、3 カ月後の含水比コンター分布を描いたのが図 11-13、図 11-14、図 11-15 である。

図 11-11 からは時間とともにヒーター近傍では湿度が低くなり、ベントナイト中の水分が減少していることがわかる。図 11-12 からも時間とともにヒーター側では水分量が低くなり、ベントナイト中の水分がヒーターの熱の影響により減少していることがわかる。また、岩盤との境界では浸潤が進み、センサーの測定限界を越えたセンサーも現れた。

図 11-13 から初期状態の含水比分布がわかり、平均して 15% 前後であり、ベントナイトの締固め実施の際の初期設定とほぼ同じであった。しかし、岩盤側では一部で浸潤が観察できる。図 11-14 からは時間とともにヒーター側が乾燥し、岩盤側から水が浸潤していることがわかる。図 11-15 では 1 カ月後の結果と同様であるが岩盤側のセンサーが測定範囲を超えてしまっている。

結論として、ヒーター側の乾燥はよく測定できたが、岩盤側の浸潤状況は測定範囲を超えてしまったので測定できなかった。しかし、経時変化を観察することにより浸潤状況はよく観察できるものと思われる。

11.1.4 圧力

ベントナイト中の膨潤応力を測定するために圧力計を設置した。その連続計測した結果を図 11-16 に示す。最大でヒーター直上のセンサー PS-23 が 3 カ月後に 4000kPa (4MPa) を示した。また、ヒーター中心深さの PS-11 が約 2000kPa (2MPa) を示した。ほかの場所では数十 kPa 程度の圧力を示したが、

PS-14、PS-10の様に増加の傾向から現象の傾向に転じた、室内試験レベルでは予想もつかない挙動を示したのもあった。この挙動は、ベントナイトの挙動そのものであるのか、それとも温度による影響なのか、あるいはセンサー自身の問題なのかは判断が難しい。今後、試験設備を解体するにあたり、センサーの機能検査を実施する必要がある。

11.1.5 熱流束

ヒーターの熱の出力の変化を測定するために、ベントナイト中に熱流束計を埋設した。図 11-17 は DDA 断面に設置した熱流束計の連続測定結果である。

試験開始直後は、ヒーター温度を 100℃ に急激に上昇させる必要があったため、ヒーター近傍に設置した MF-3 の熱流束は 400W/m² にまで達した。その後、3 週間程で、ヒーターの出力がほぼ安定したので、近傍での測定値は 140W/m² ほどで安定した。岩盤との境界近傍に設置した MF-4 では試験開始直後若干の熱流束の上昇は見られたもの、ヒーター近傍程ではなく、2 週間程で 90W/m² で安定した。ヒーター側の MF-3 で観察される多少の変動は、ヒーターの表面温度の制御の際にヒーターの出力が若干変動するものに起因するものと思われる。

11.1.6 ひずみ

ベントナイト中のひずみを測定した結果を図 11-18 に示す。ひずみは DDA 断面のみで測定した。

図からわかる通り、ひずみも圧力同様、多様な変化を示しており、ベントナイトの熱、水などに起因する膨潤、収縮などの複雑な現象があらわれている。しかし KM-5 などのヒーターの真下の鉛直方向のひずみを測定している個所での伸び方向への挙動は、妥当な挙動であるものと思われる。また、KM-3、KM-4 などは KM-5 と同じ個所の水平 2 方向の測定値であるが、鉛直方向のベントナイトの体積の圧縮分が水平方向の伸びに変化したものと思われる。

KM-7、KM-8 は深度が異なるがヒーターの横にある半径方向のひずみを測定するために設置したものである。これをみると両者とも始めは水の浸潤の影響を受け膨潤すなわち伸びを示していたが、温度分布が定常になった 1 カ月後位から、転じてヒーターの熱による収縮の影響を強く受け、圧縮する傾向に転じている。同じ深度で、岩盤近傍とヒーター側にさらにセンサーを設置して測定していればさらに深い解釈を得られたと考えられる。

11.1.7 ベントナイト中のデータに関する考察

ベントナイト中のデータは、温度、間隙水圧、水分、圧力、熱流束、ひずみなどを測定した。このうち、温度、水分、熱流束に関しては十分な計測結果が得られた。間隙水圧に関しては対象が不飽和のベントナイトであることと、岩盤とベントナイトの境界という特殊な環境であるため、反応が無かった。また、ひずみと圧力に関しては、水の浸潤、ヒーターの熱による乾燥などがベントナイトの膨潤、収縮などに複雑に影響して、測定結果が複雑になって現れた。この 2 つの測定項目は 1 つの現象を異なる値で表現しているため、関連づけた解釈をする必要がある。

11.2 岩盤の測定データ

昨年度実施したピットの掘削の際に岩盤中や試験坑道の表面に各種センサーを設置した。すべてデータロガーで連続計測（計測間隔は3時間を基本とし、必要に応じて間隔を調整した）した。また、加熱前、加熱直後、加熱3カ月後にトリバック計測を実施したのであわせて報告する。

11.2.1 間隙水圧

岩盤中の間隙水圧は6本のボアホール（KBH1、KBH2、KBH3、KBH4、KBH5、KBH6）に埋設した間隙水圧計を用いて測定した。その計測結果を図11-19、図11-20、図11-21、図11-22、図11-23、図11-24に示す。

図11-19によると試験開始3カ月後に、KBH1孔ではPT-2Hが約30kPa（=3.0m水頭）、PT-3Hが約25kPa（=2.5m水頭）に達した。これは水面までの水頭とほぼ一致し、この2つの区間が飽和状態であることを示している。しかし、ヒーターの加熱による影響で水の動きは観察できなかった。それ以外は、約10kPa（=1.0m水頭）前後の値を示している。

図11-20によると試験開始3カ月後に、KBH2孔ではPT-6Hが約10kPa（=1.0m水頭）、PT-7Hが約20kPa（=2.0m水頭）に達した。これは水面までの水頭とほぼ一致し、この2つの区間が飽和状態であることを示している。しかし、ヒーターの加熱による影響で水の動きは観察できなかった。それ以外は、約0kPa（=1.0m水頭）前後の値を示している。

図11-21によると試験開始3カ月後に、KBH3孔ではPT-10Hが約60kPa（=6.0m水頭）、PT-11Hが約20kPa（=2.0m水頭）、PT-12Hが約15kPa（=1.5m水頭）、PT-13Hが約30kPa（=3.0m水頭）、PT-14Hが約5kPa（=0.5m水頭）に達した。特にPT-10Hでは試験開始後から2週間で、著しく値が増加し、その後、何らかの影響で間隙水圧が減少し始めた。これはヒーターの加熱により、PT-10Hを含む区間内の亀裂が何らかの影響を受けたものと思われる。

図11-22によると試験開始3カ月後に、KBH4孔ではPT-15Hが約150kPa（=15.0m水頭）、PT-16Hが約20kPa（=2.0m水頭）、PT-17Hが約20kPa（=2.0m水頭）、PT-18Hが約5kPa（=0.5m水頭）、PT-19Hが約10kPa（=1.0m水頭）に達した。特に、PT-15Hは試験開始後6週間ほどで間隙水圧が上昇し、PT-17H、PT-18H、PT-19Hでは試験開始後1週間も経たずに急激に間隙水圧が減少している。その値はそれぞれ20kPa（=2.0m水頭）、30kPa（=3.0m水頭）、60kPa（=6.0m水頭）である。試験開始前は各区間が飽和していたが、ヒーターの加熱により各区間に属する亀裂が開口してしまったのではないかと考えられる。

図11-23によると試験開始3カ月後に、KBH5孔ではPT-20Hが約20kPa（=2.0m水頭）、PT-21Hが約25kPa（=2.5m水頭）、PT-22Hが約20kPa（=2.0m水頭）、PT-23Hが約5kPa（=0.5m水頭）、約0kPa（=0.0m水頭）に達した。ヒーターの影響を受けているのはPT-20H、PT-21H、PT-22H。そのうちPT-22Hは複雑な挙動を示し、ほかの2つは時間の経過とともに増加している。

図11-24によると試験開始3カ月後に、KBH6孔ではPT-25Hが約10kPa（=1.0m水頭）、PT-26Hが約0kPa（=0.0m水頭）、PT-27Hが約30kPa（=3.0m水頭）、PT-28Hが約15kPa（=1.5m水頭）、PT-29Hが約10kPa（=1.0m水頭）に達した。特に、PT-26Hは試験開始後1週間ほどで間隙水圧が急激に上昇し、その後、減少している。PT-27H、PT-28H、PT-29Hでは試験開始後1週間も経たずに急

激に間隙水圧が減少している。その値はそれぞれ 20 kPa (=2.0m 水頭)、50 kPa (=5.0m 水頭)、60 kPa (=6.0m 水頭) である。試験開始前は各区間が飽和していたが、ヒーターの加熱により各区間に属する亀裂が開口してしまったのではないかと考えられる。

11.2.2 温度

岩盤中の温度は測温機能付き間隙水圧計、熱電対の 2 種類のセンサーを用いて測定した。そのうち間隙水圧計は 6 本のボアホール (KBH1、KBH2、KBH3、KBH4、KBH5、KBH6) に埋設した間隙水圧計を用いて測定した。その計測結果を図 11-25、図 11-26、図 11-27、図 11-28、図 11-29、図 11-30 に示す。

図 11-25 によると試験開始 3 カ月後に、KBH1 孔では PT-1T が約 22℃、PT-2T が約 33℃、PT-3T が約 28℃、PT-4T が約 20℃、PT-5T が約 16℃ に達した。PT-2T がヒーターの中心深度とほぼ同じであるので一番高い値を示している。

図 11-26 によると試験開始 3 カ月後に、KBH2 孔では PT-6T が約 20℃、PT-7T が約 26℃、PT-8T が約 21℃、PT-9T が約 16℃、PT-10T が約 25℃ に達した。PT-7T がヒーターの中心深度とほぼ同じであるので一番高い値を示している。

図 11-27 によると試験開始 3 カ月後に、KBH3 孔では PT-11T が約 31℃、PT-12T が約 31℃、PT-13T が約 20℃、PT-14T が約 15℃、PT-15T が約 19℃ に達した。PT-11T、PT-12T がヒーターの中心深度とほぼ同じであるので一番高い値を示している。

図 11-28 によると試験開始 3 カ月後に、KBH4 孔では PT-16T が約 25℃、PT-17T が約 23℃、PT-18T が約 17℃、PT-19T が約 14℃、PT-20T が約 22℃ に達した。PT-16T がヒーターの中心深度とほぼ同じであるので一番高い値を示している。

図 11-29 によると試験開始 3 カ月後に、KBH5 孔では PT-21T が約 35℃、PT-22T が約 32℃、PT-20T が約 28℃、PT-24T が約 15℃、PT-25T が約 19℃ に達した。PT-21T がヒーターの中心深度とほぼ同じであるので一番高い値を示している。

図 11-30 によると試験開始 3 カ月後に、KBH6 孔では PT-26T が約 26℃、PT-27T が約 23℃、PT-28T が約 18℃、PT-29T が約 14℃ に達した。PT-26T がヒーターの中心深度とほぼ同じであるので一番高い値を示している。

11.2.3 ボアホール型ひずみ計

岩盤中のひずみをボアホール型ひずみ計によって測定した。その結果を図 11-31 に示す。ヒーターの加熱による影響はほとんど無いと思われる。

11.2.4 ひずみ計

岩盤中のひずみをひずみ計によって測定した。その結果を図 11-32 に示す。ヒーターの加熱による影響により、SD-2 は 400 $\mu\epsilon$ 、SD-3 は 1500 $\mu\epsilon$ 、SD-5 は 2000 $\mu\epsilon$ まで上昇した。SD-2、SD-3 は単純な増加ではない。特に、SD-2 では一時圧縮方向に動いていたものが、途中から引張りに方向に動いた。

11.2.5 ジョイント変位計

岩盤中の亀裂の挙動をジョイント変位計によって測定した。その結果を図 11-33 に示す。ヒーターの加熱により、JM-1 が 0.05mm、JM-3 が 0.12mm、JM-5 が 0.05mm、JM-6 が 0.05mm 変化した。JM-2、JM-4 は測定不能となったが、それを除外して考え、JM-1、JM-3 は KBM6 孔、JM-5、JM-6 は KBM7 孔に設置されているので、2つのボアホールに交わる亀裂はそれぞれ約 0.1mm 程動いたものと思われる。これは、ヒーターの加熱による影響と思われる。

11.2.6 トリベック

本年度はトリベック計測を 3 回実施した。平成 8 年 4 月 23 日のピット掘削終了後、平成 8 年 12 月 3 日のベントナイト施工終了後、平成 9 年 2 月 18 日のヒーター加熱 2 カ月後の 3 回である。平成 8 年 4 月 23 日を初期値とし、その後 2 回の計測値との累積変位の差を表したのが図 11-34、図 11-35 である。前者は KBM4、後者は KBM5 のそれである。2つの孔で、緩衝材の施工による影響とヒーターの加熱による影響を比較すると、緩衝材の施工による影響の方が若干大きいものと思われる。緩衝材の施工という力学的に岩盤に直接影響を与える要因と、ヒーターの加熱という間接的な影響を与える要因の差によるものと思われる。

11.2.7 岩盤データに関する考察

岩盤中の温度、水圧、ひずみ、変位などを測定した。そのうち温度に関しては理解しやすい挙動を示した。水圧の変化、ひずみ、変位に関しては対象領域が多数の亀裂で分割され、岩盤ブロックが複雑な挙動を示したため、単純には説明することはできない。こうした現象を理解把握するために解析を用いた検証をする必要があると思われる。

11.3 取得データに関する考察

本年度取得したデータは連成試験開始後 3 カ月間のデータである。前述した通り、温度分布に関してはベントナイト中、岩盤中とも約 1 カ月程度で定常状態に達している。また、ベントナイト中の水分の移動もほぼ 3 カ月間で終了している。しかし、ベントナイトの力学的挙動、岩盤中の力学的挙動に関しては単純な解釈では説明がつかず、連成を考慮した検証をする必要があるものと思われる。次年度はヒーターを停止し、その後の温度の低下、水の移動、ベントナイトおよび岩盤の力学的挙動データを取得し、それらを検証し、連成現象を把握、理解する予定である。

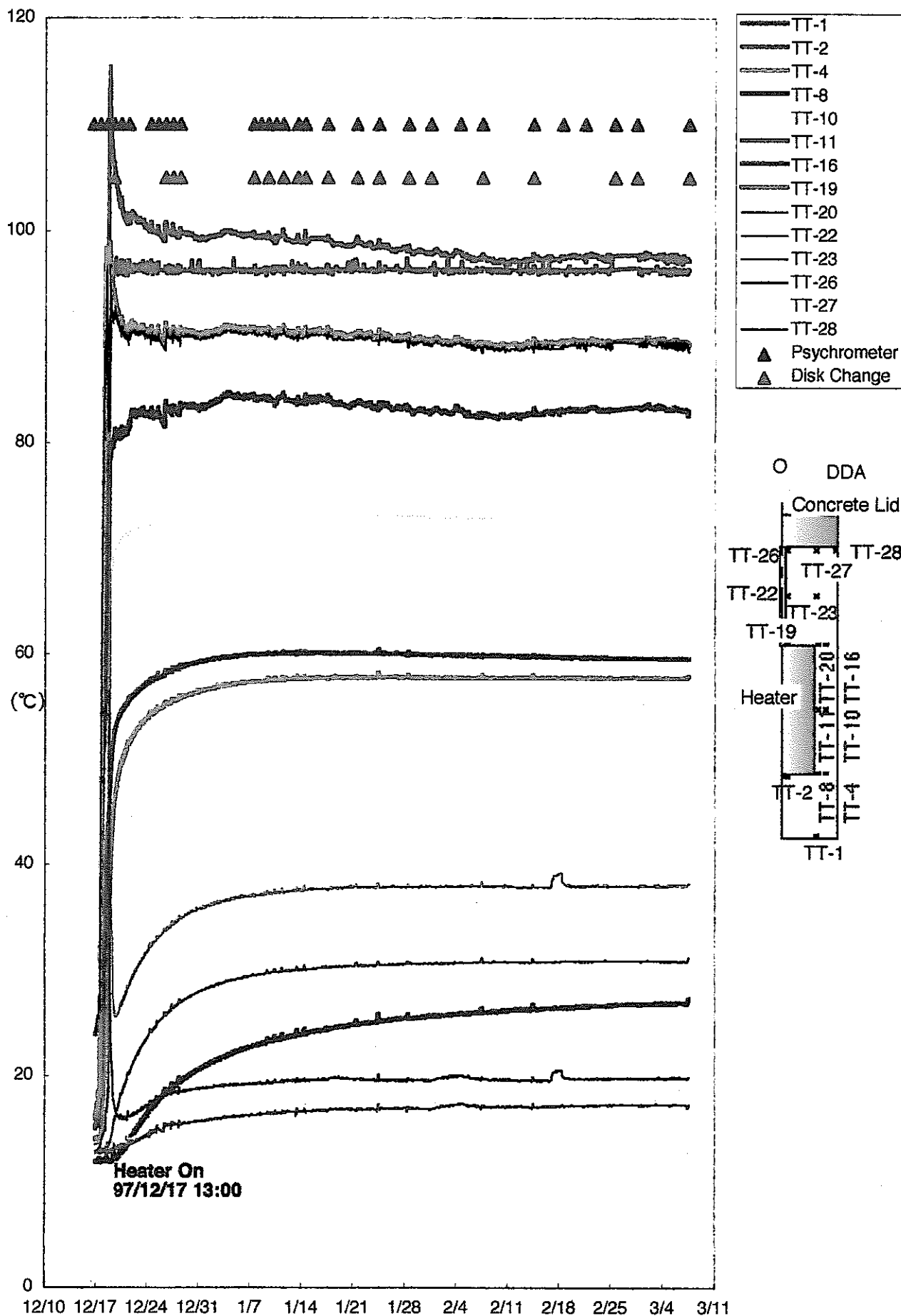


図11-1 緩衝材中の温度の経時変化 (DDA断面)

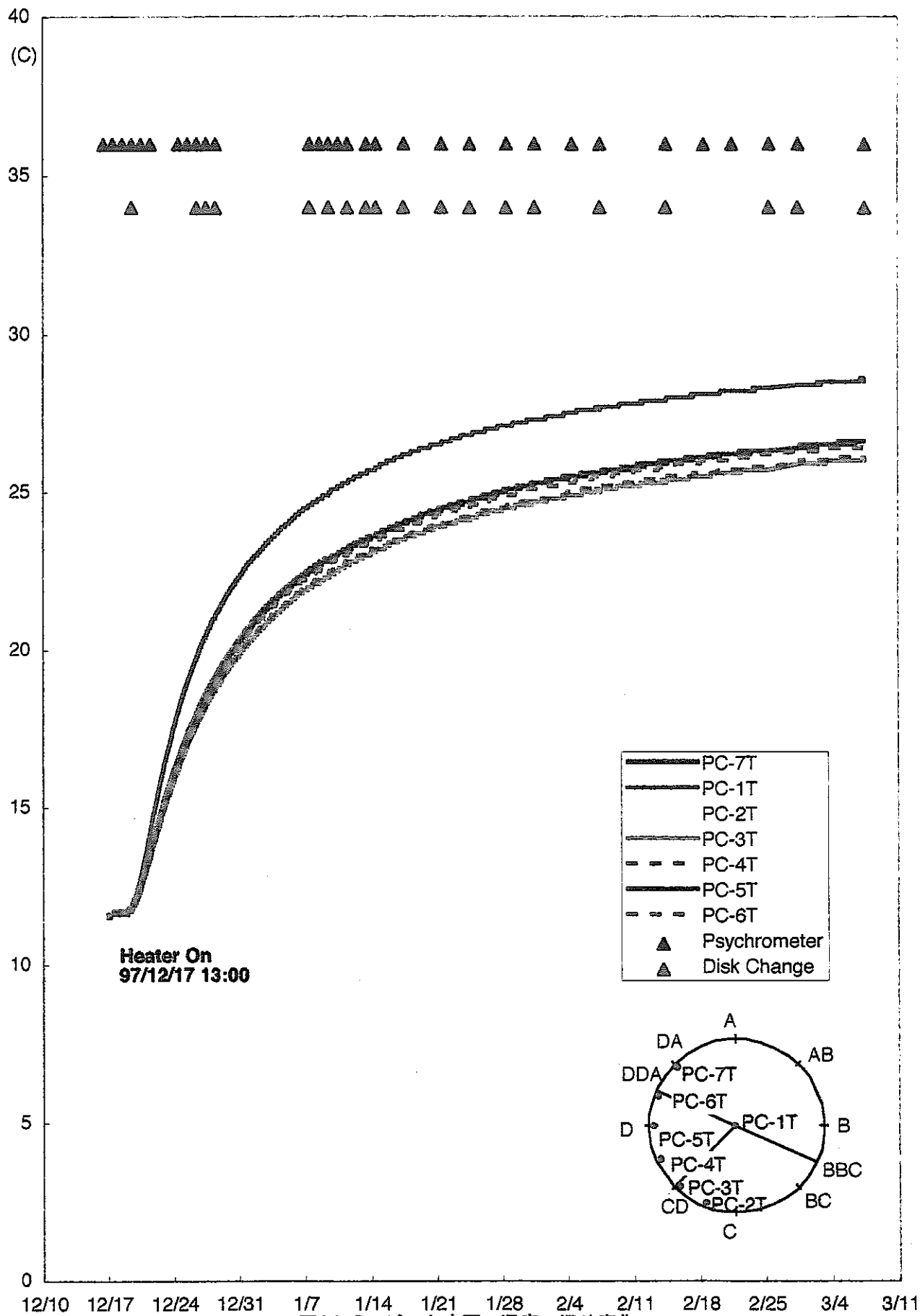


図11-2 ピット床面の温度の経時変化

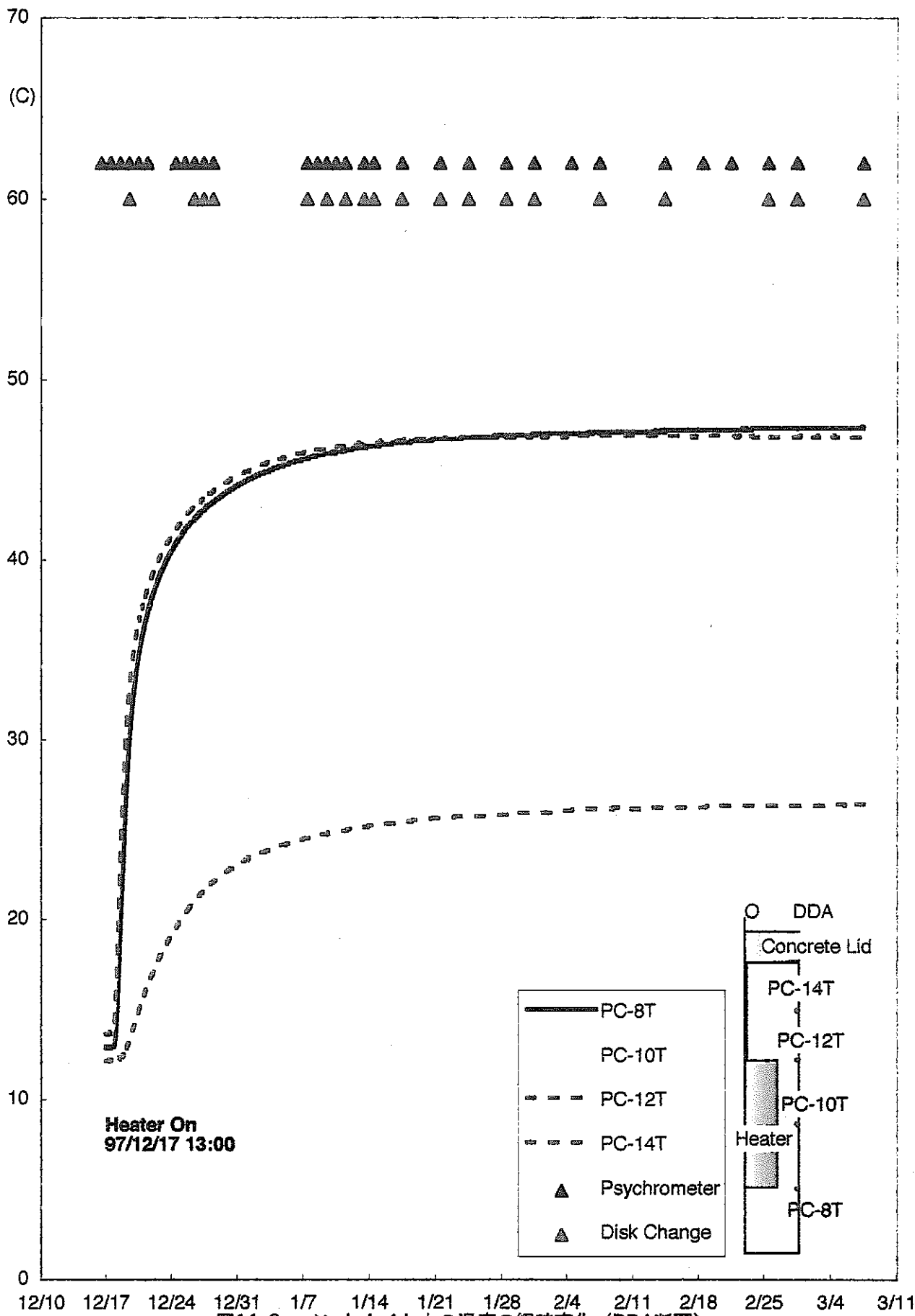


図11-3 ベントナイト中の温度の経時変化 (DDA断面)

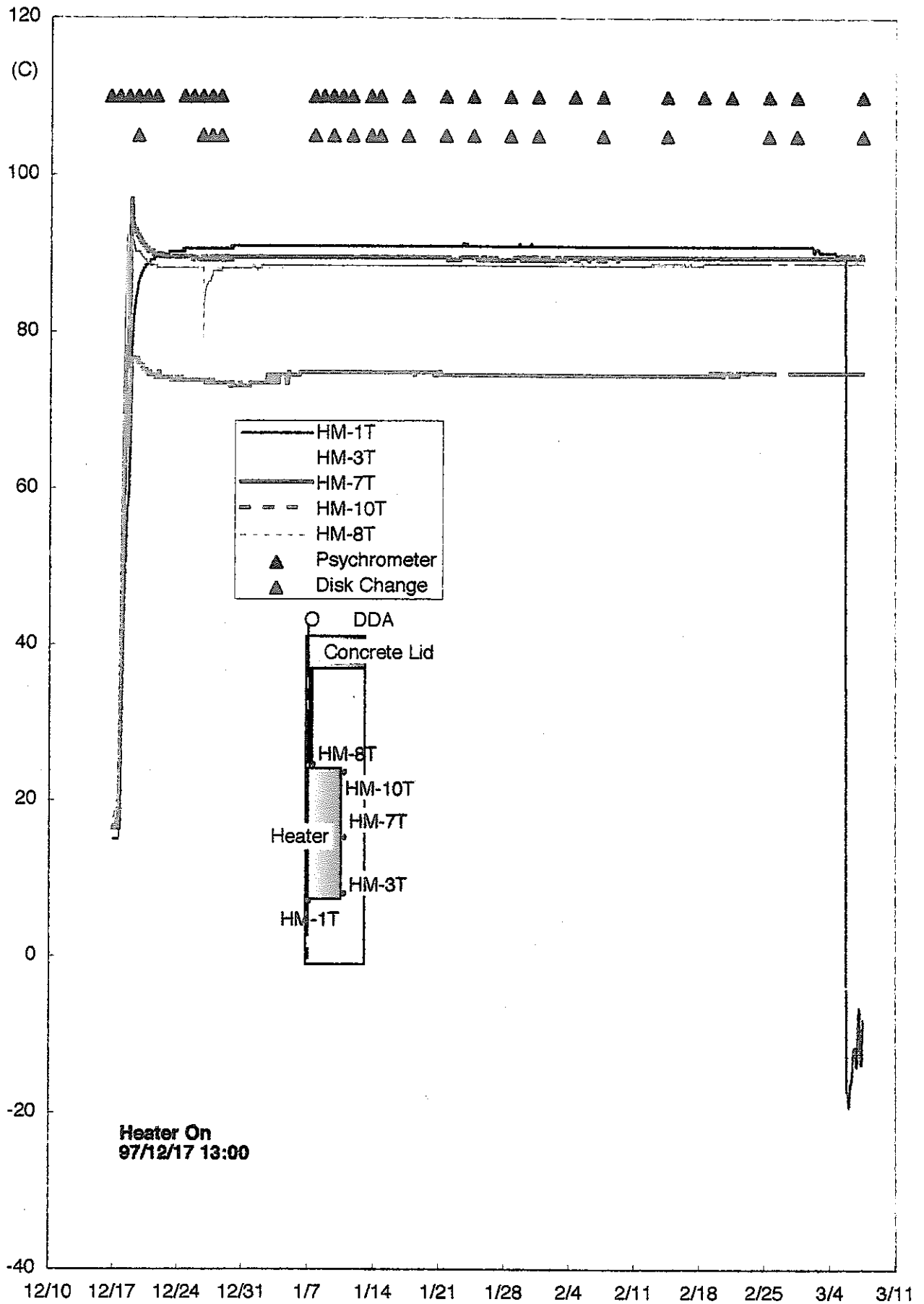


図11-4 温度の経時変化 (DDA断面、湿度計)

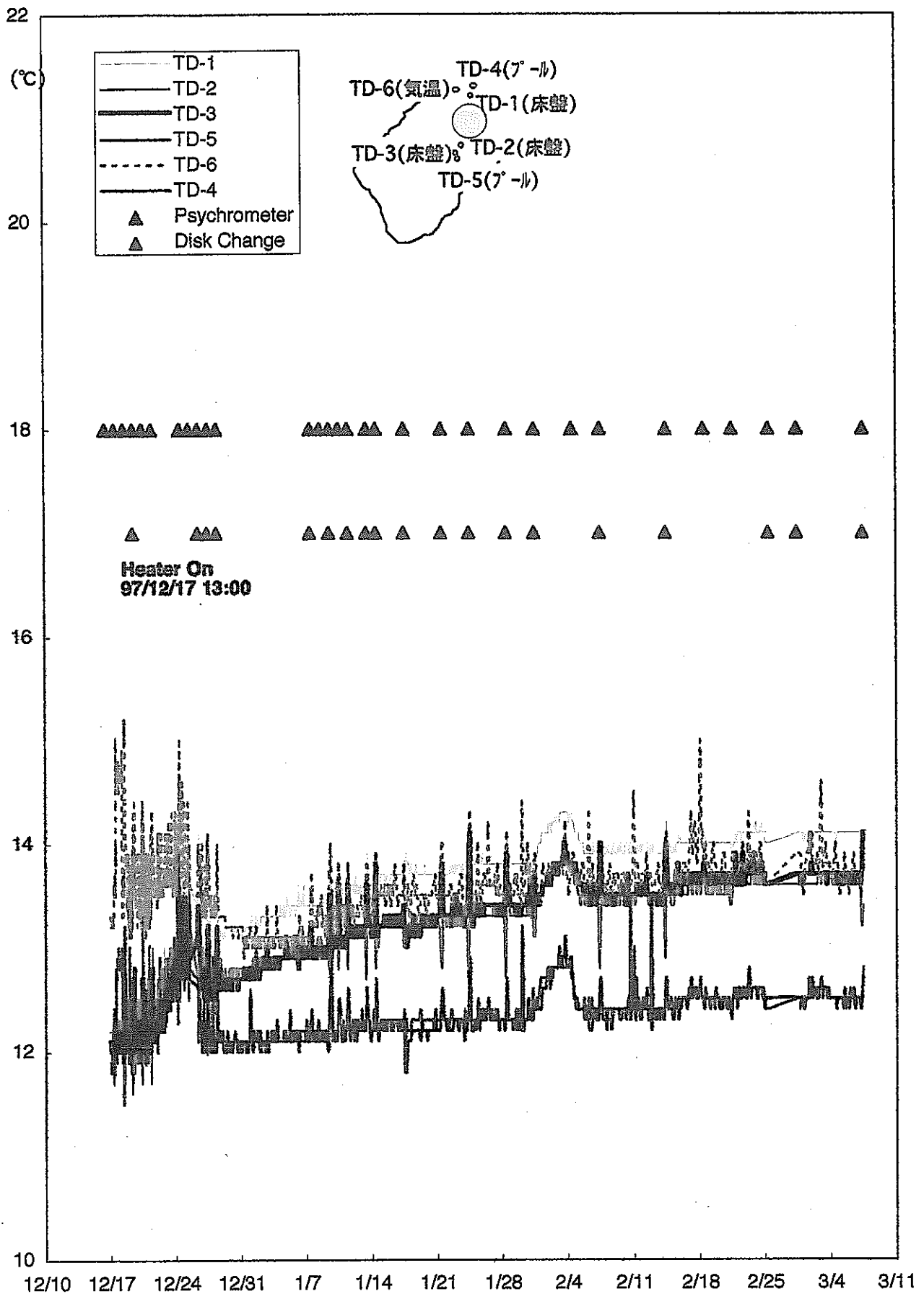


図11-5 水温、気温、岩盤表面の温度の経時変化

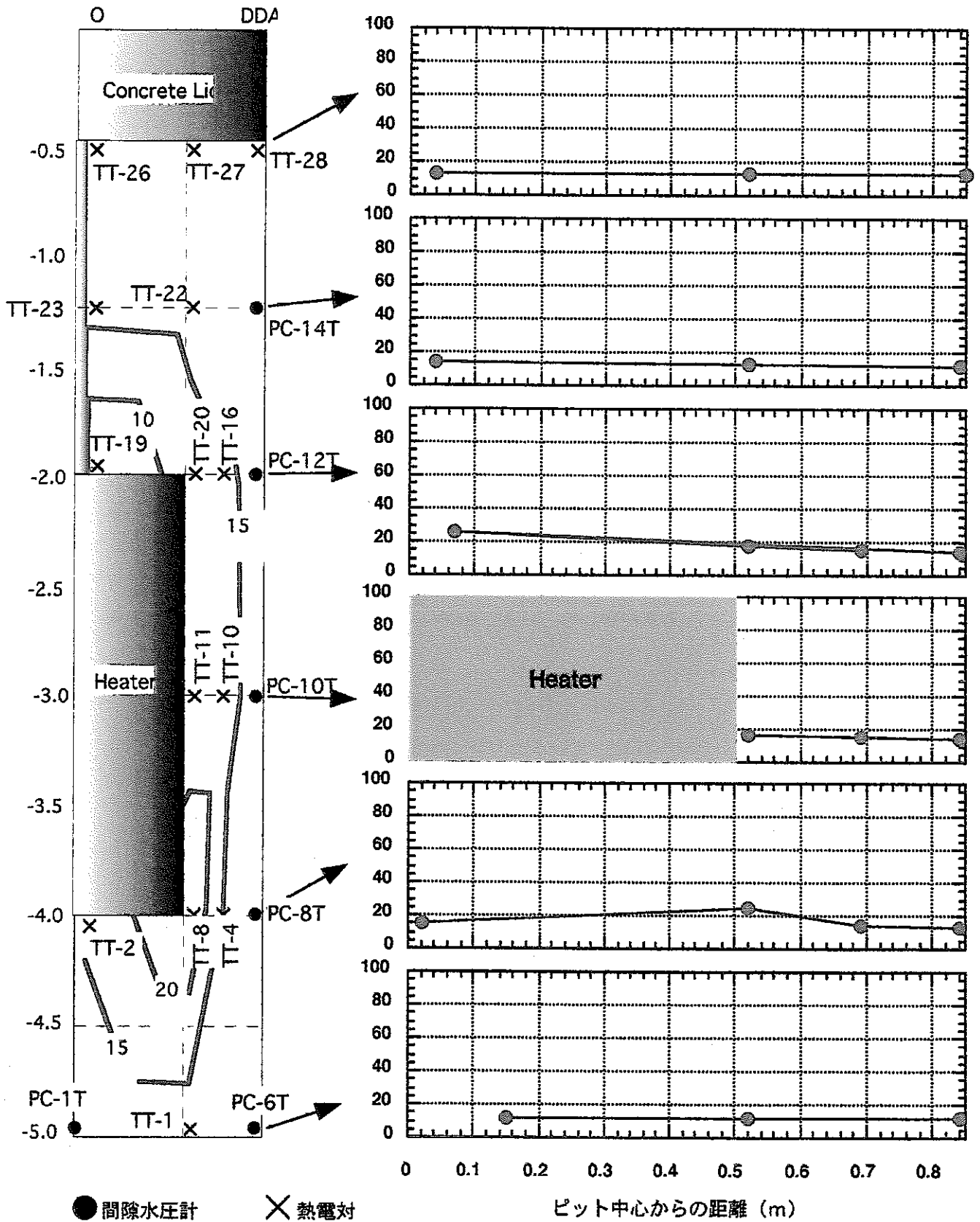


図11-6 試験開始直後のDDA断面の温度分布 (単位 ; °C)

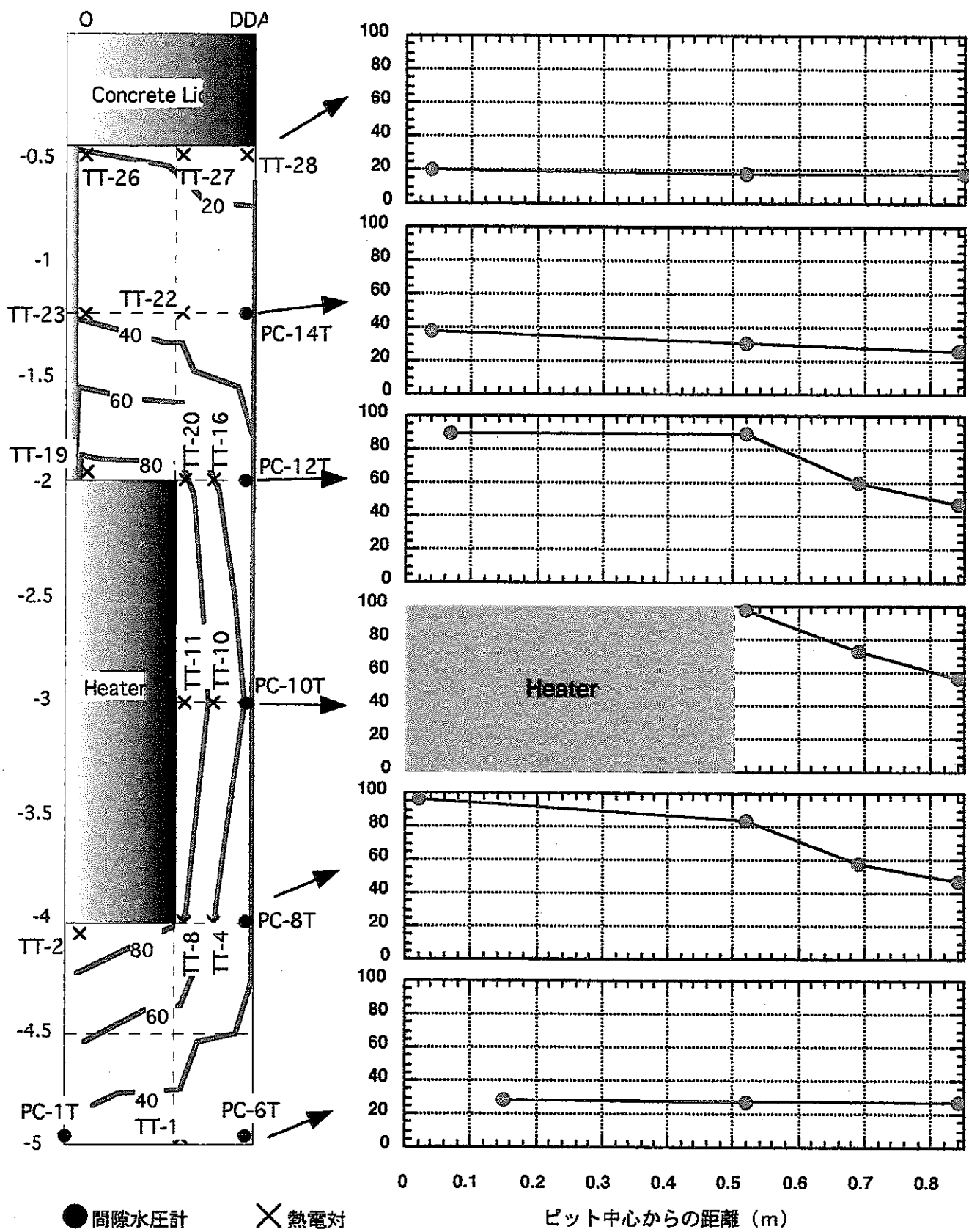


図11-7 試験開始1カ月後のDDA断面の温度分布 (単位 ; °C)

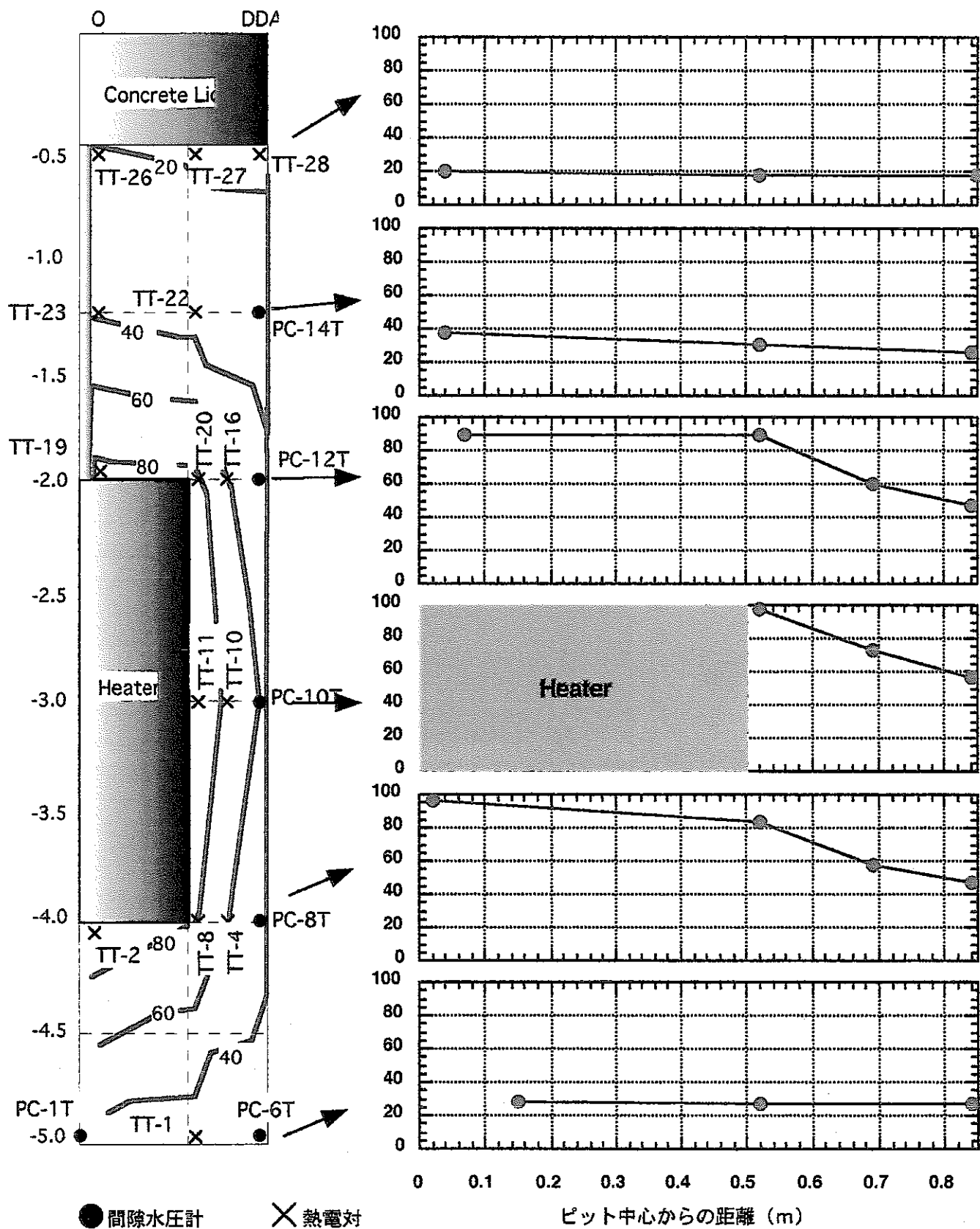


図11-8 試験開始3カ月後のDDA断面の温度分布 (単位 ; °C)

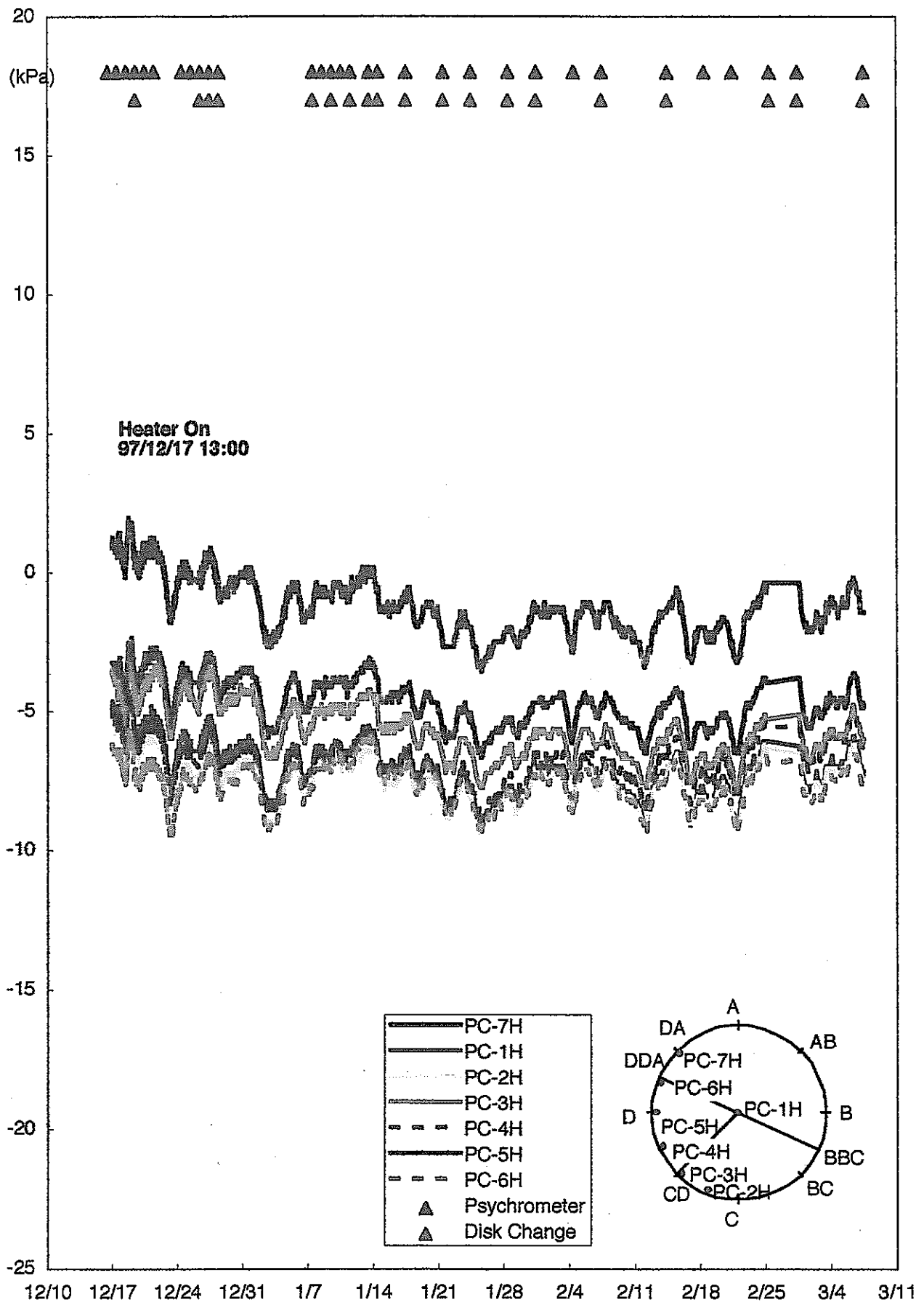


図11-9 ピット床面の間隙水圧の経時変化

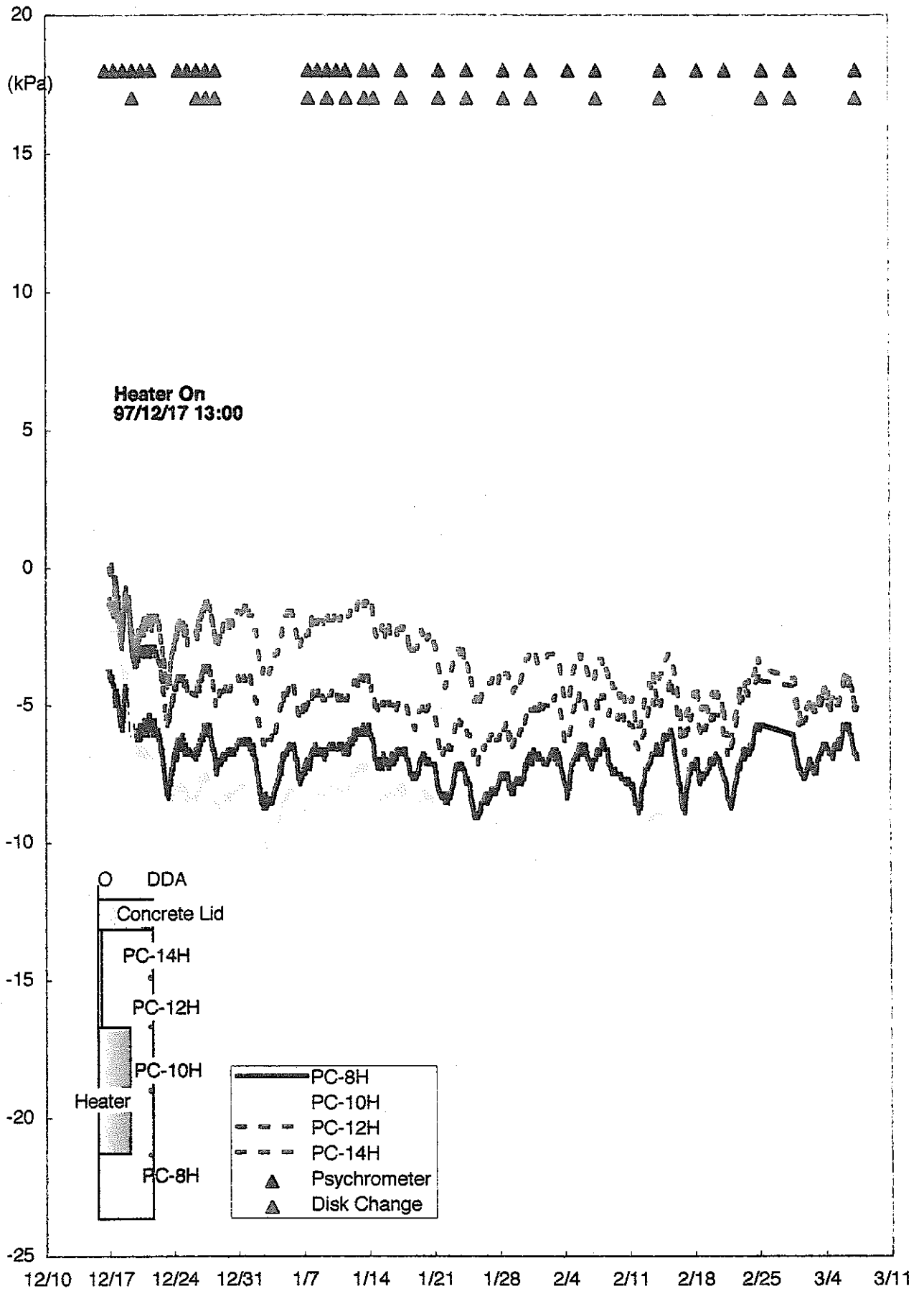


図11-10 間隙水圧の経時変化 (DDA断面)

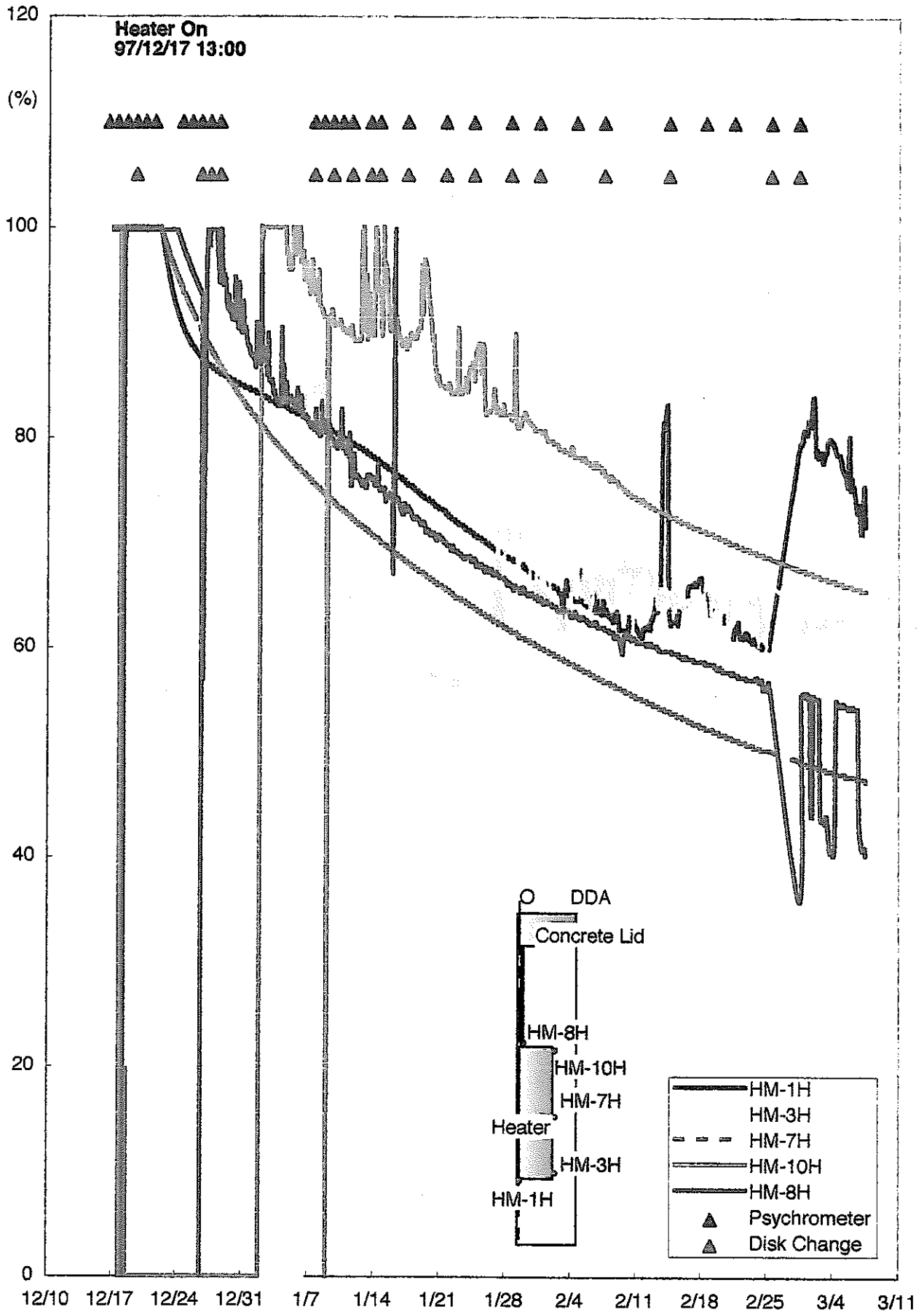


図11-11 湿度の経時変化 (DDA断面)

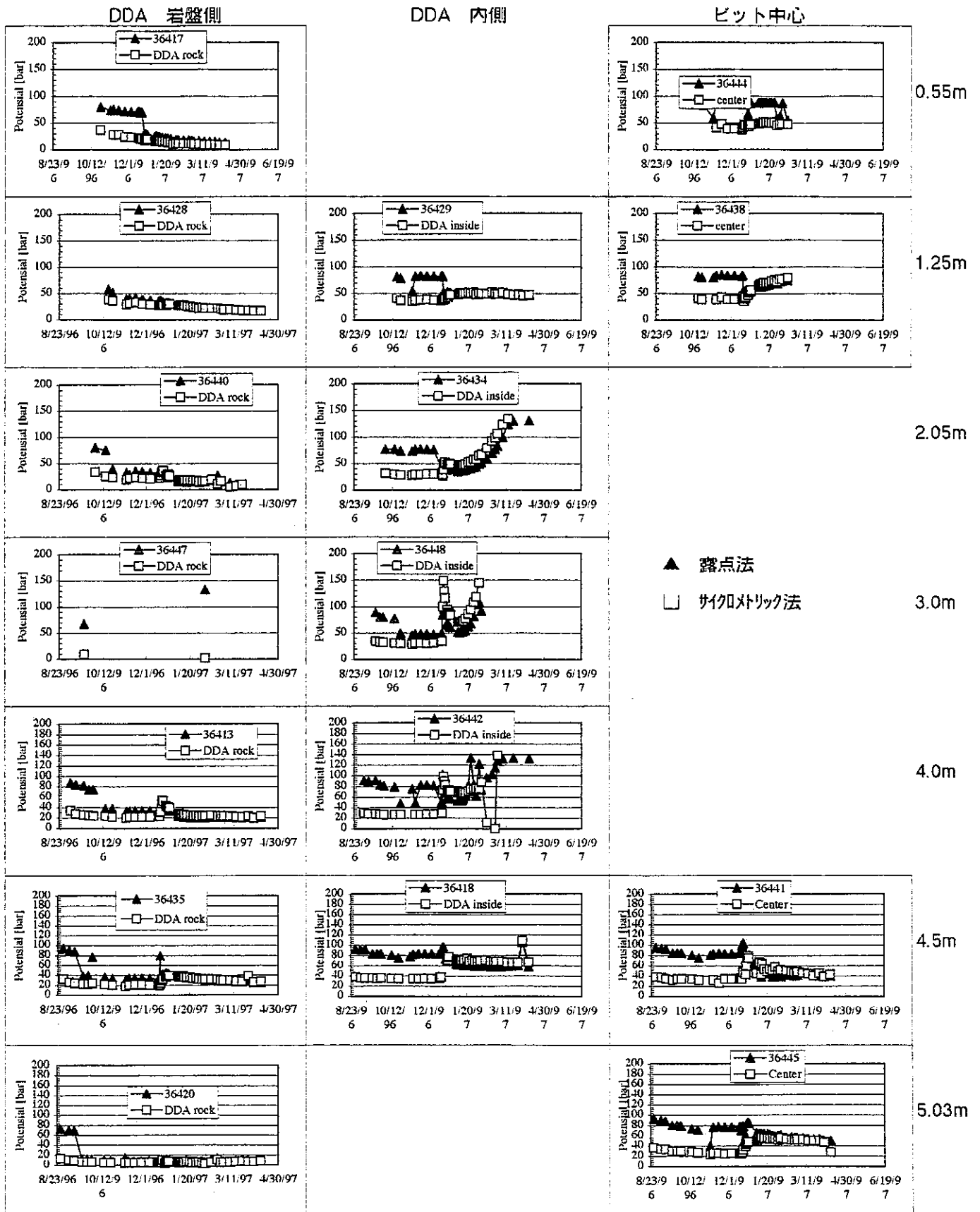


図11-12 ベントナイト中の水分の経時変化 (DDA断面)

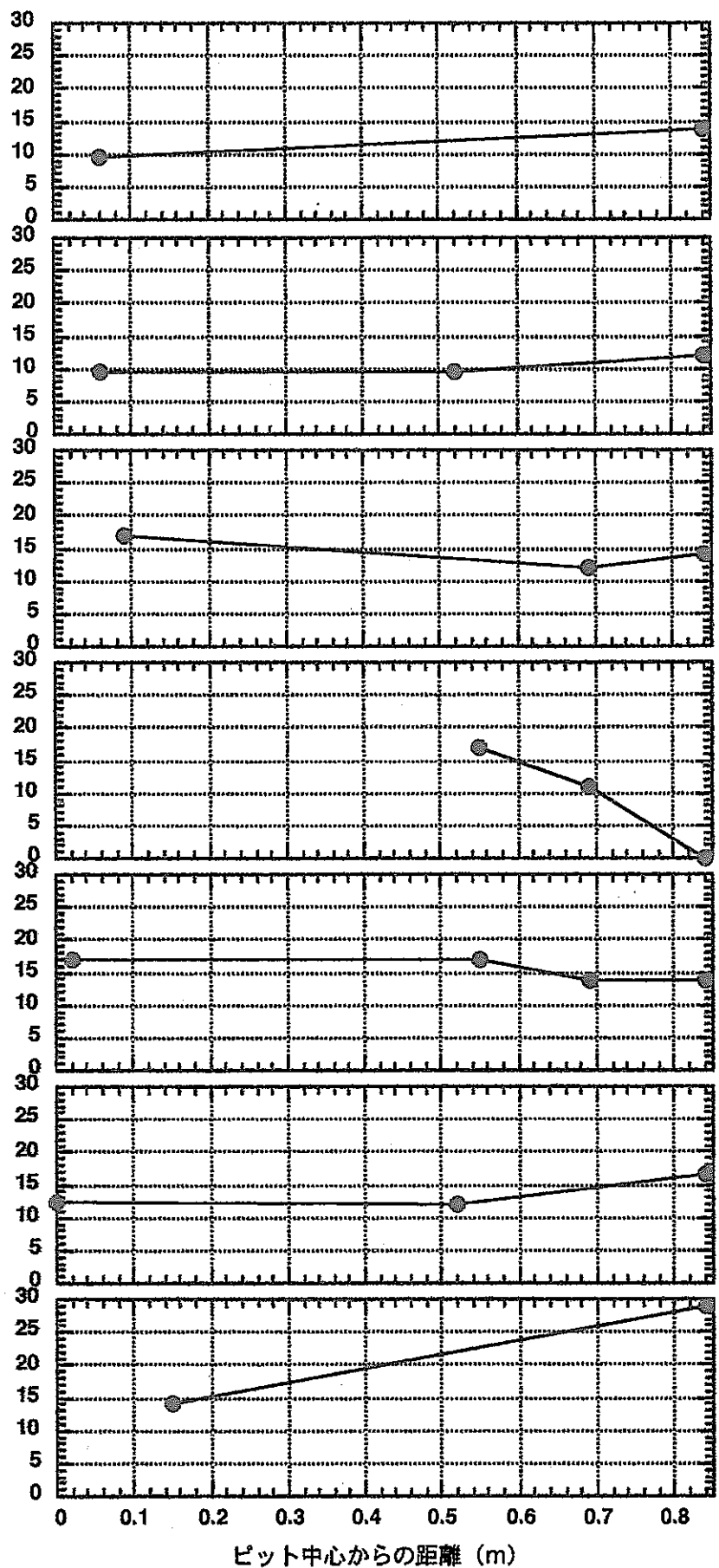
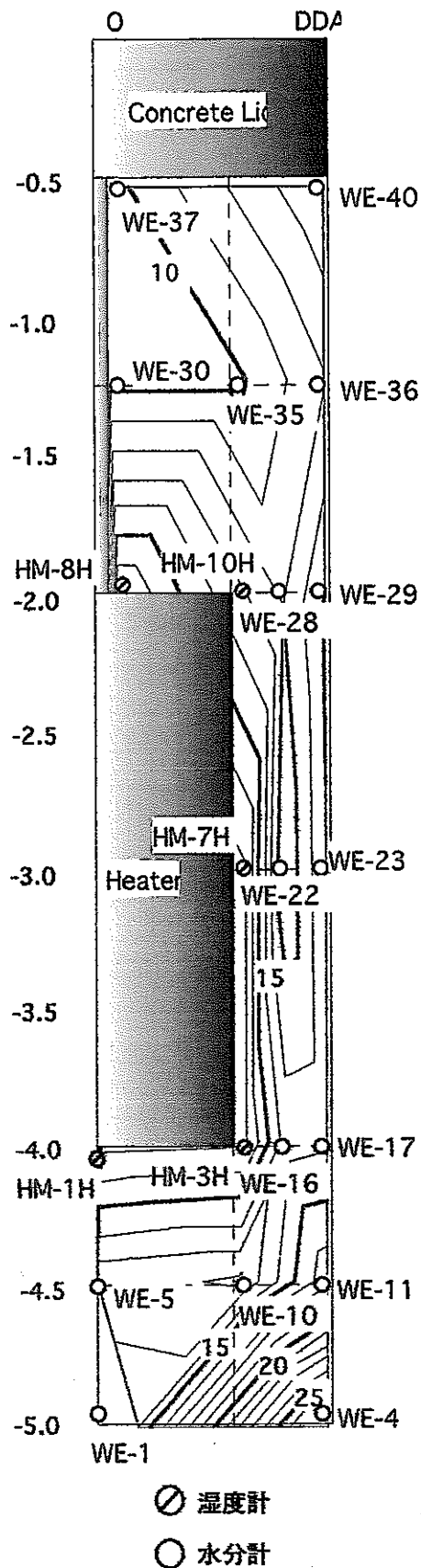


図11-13 試験開始直後のDDA断面の含水比分布 (単位 ; %)

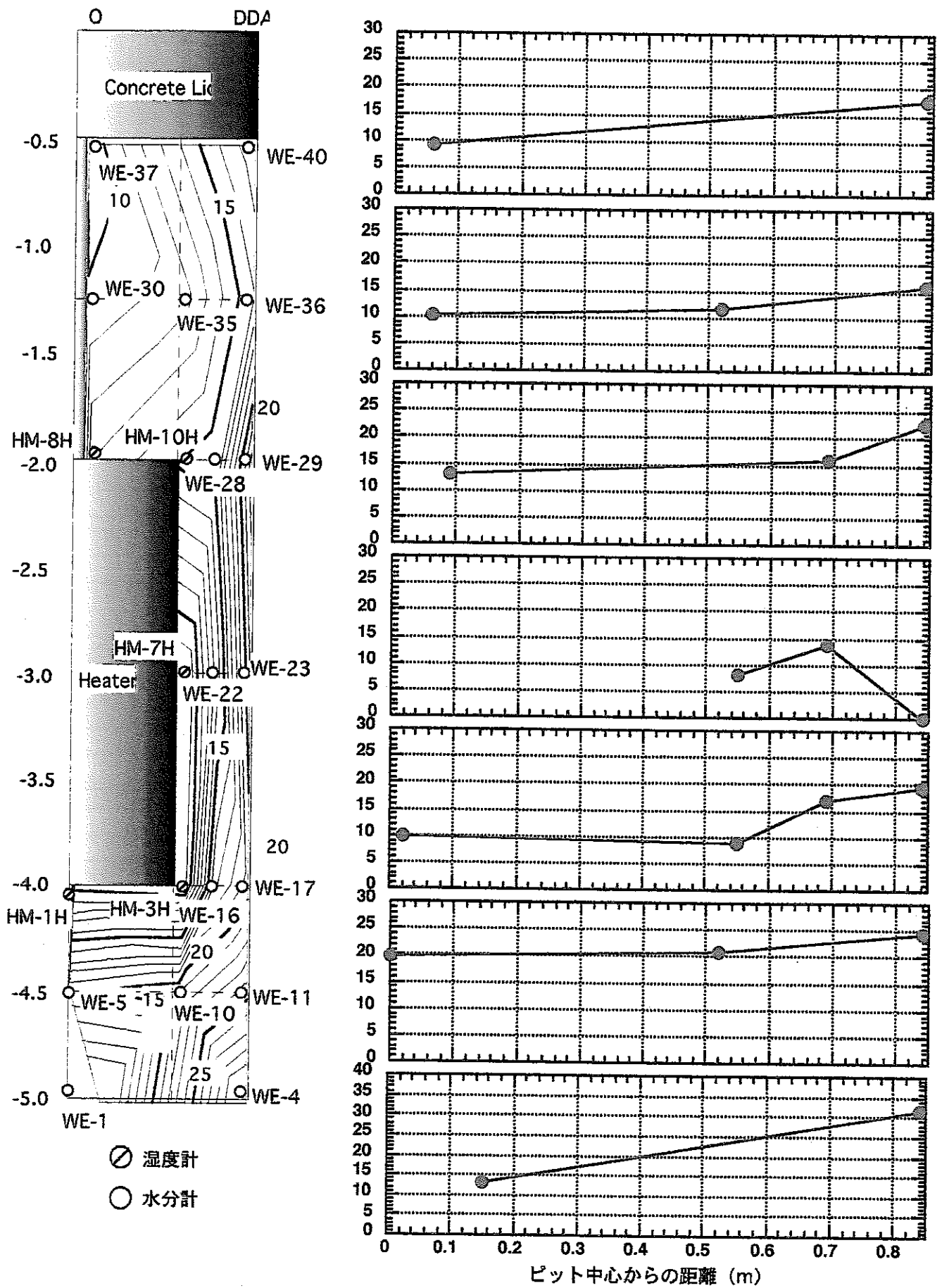


図11-14 試験開始3カ月後のDDA断面の含水比分布 (単位; %)

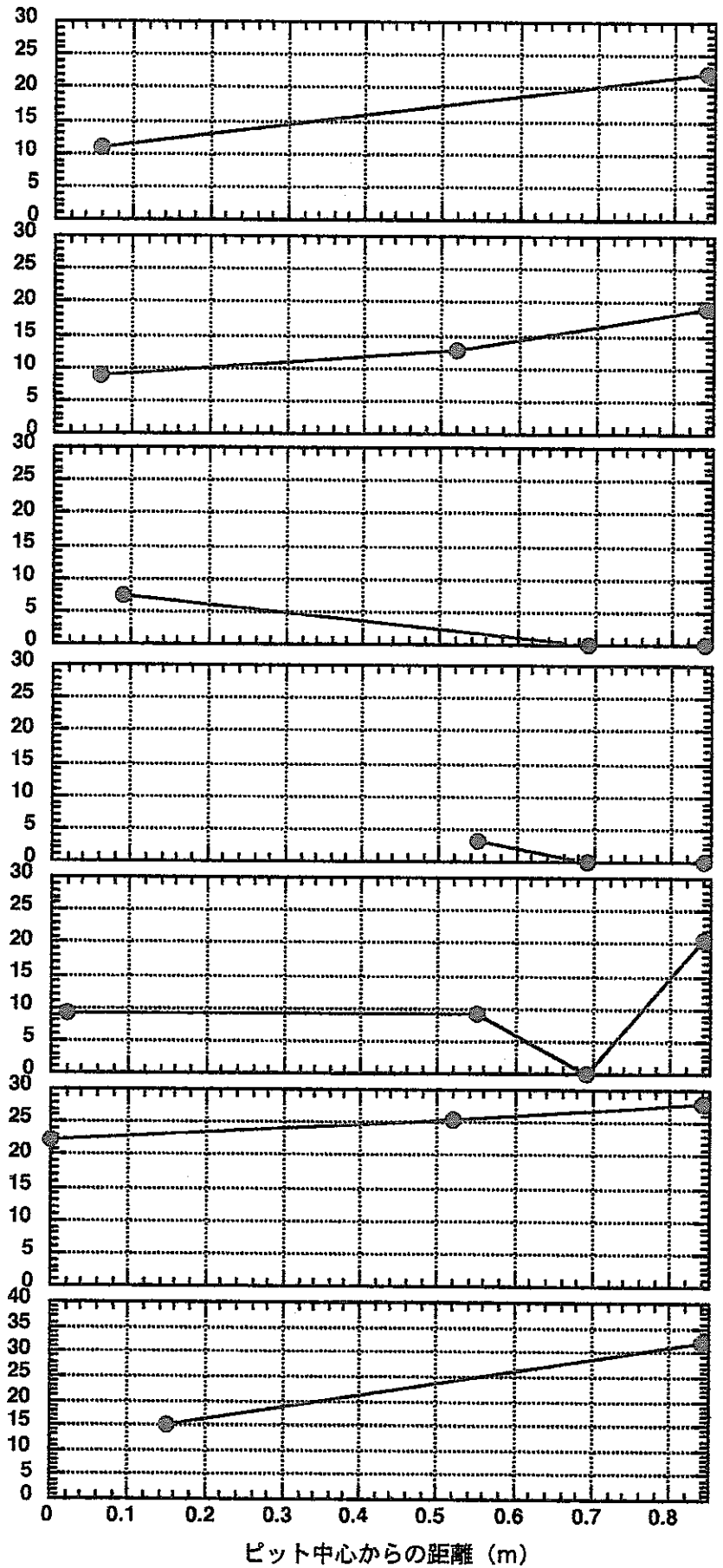
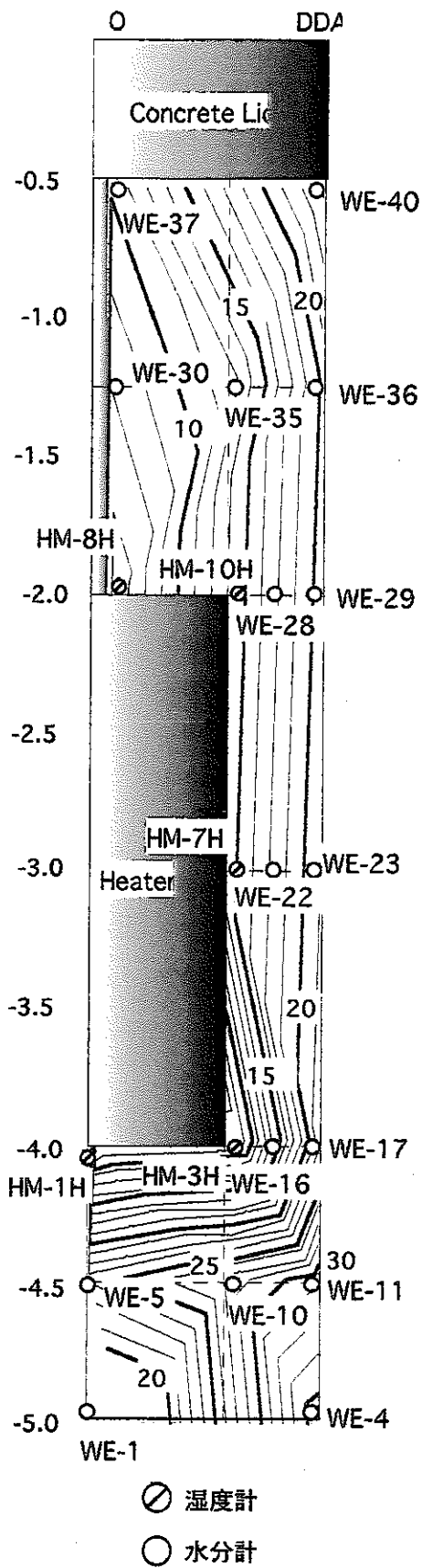


図11-15 試験開始3カ月後のDDA断面の含水比分布 (単位; %)

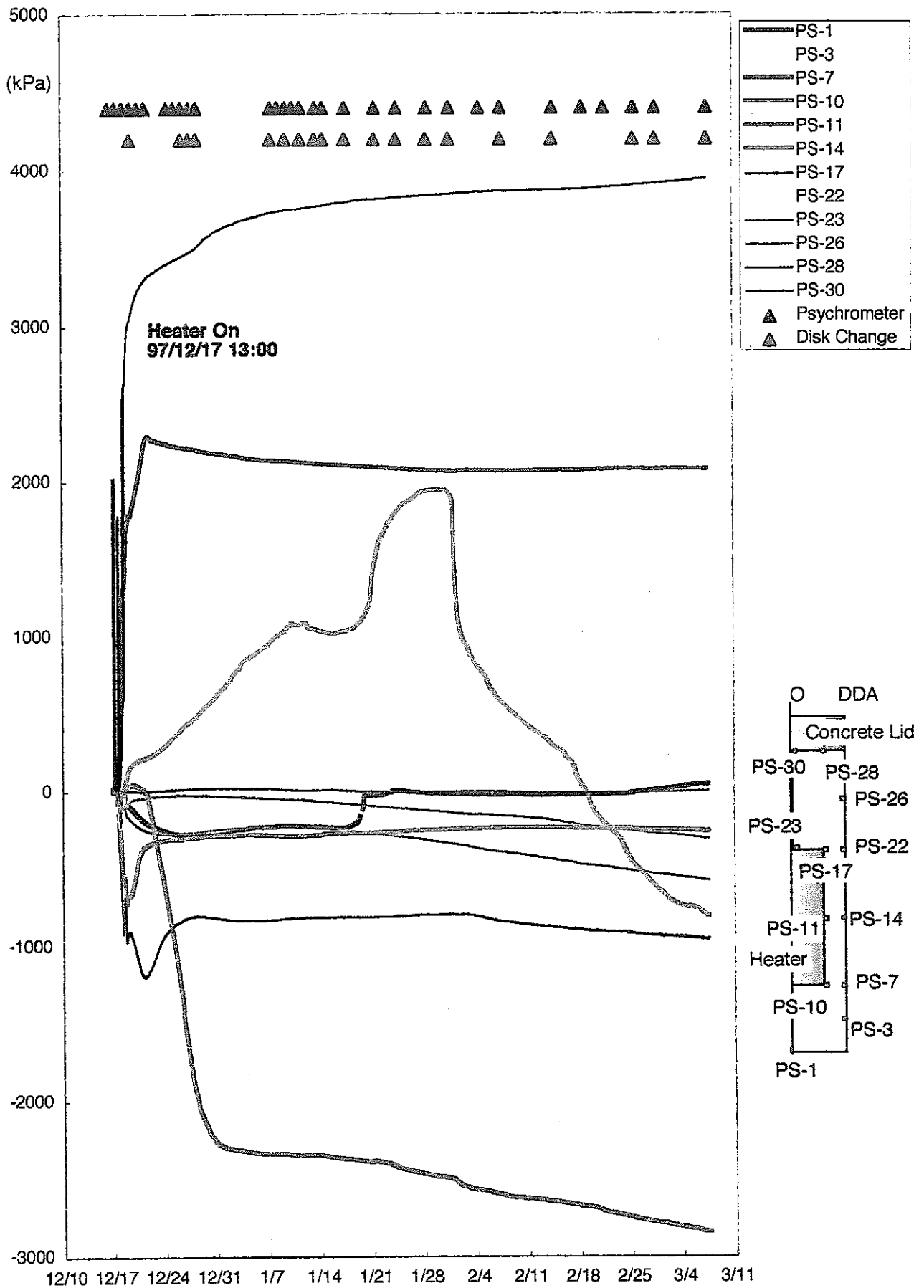


図11-16 ベントナイト中の圧力の経時変化 (DDA断面)

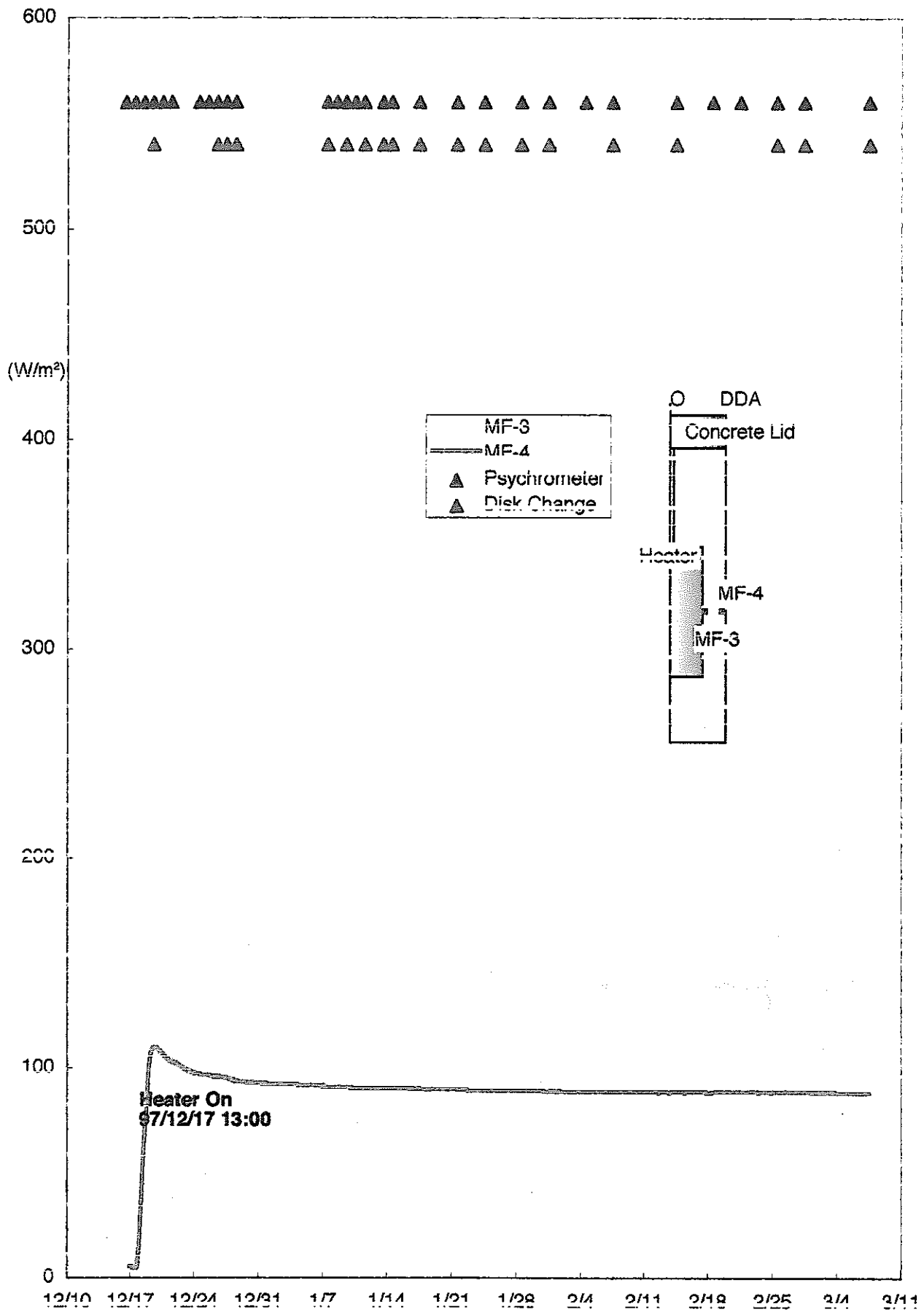


図11-17 熱流束の経時変化 (DDA断面)

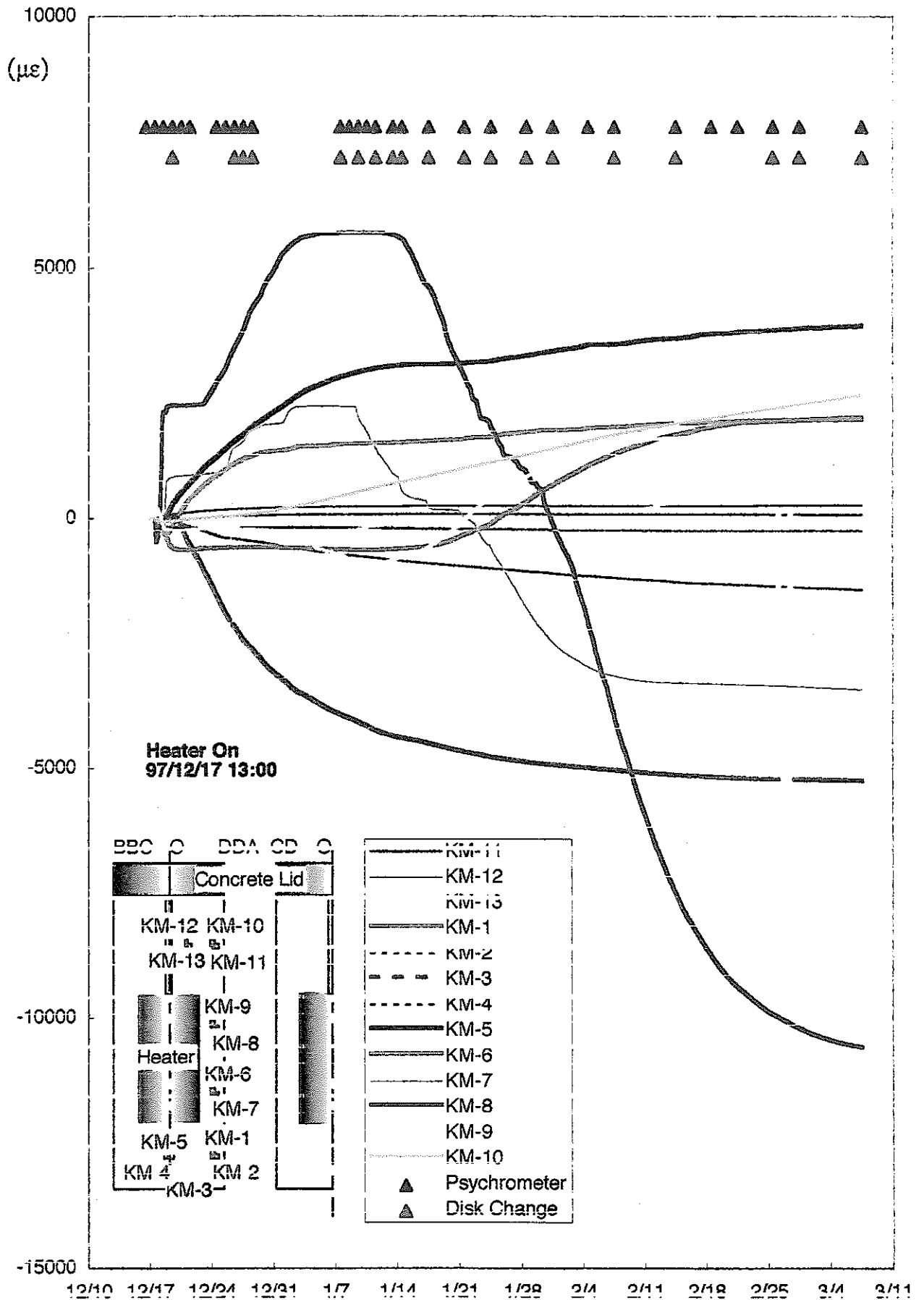


図11-18 ひずみの経時変化

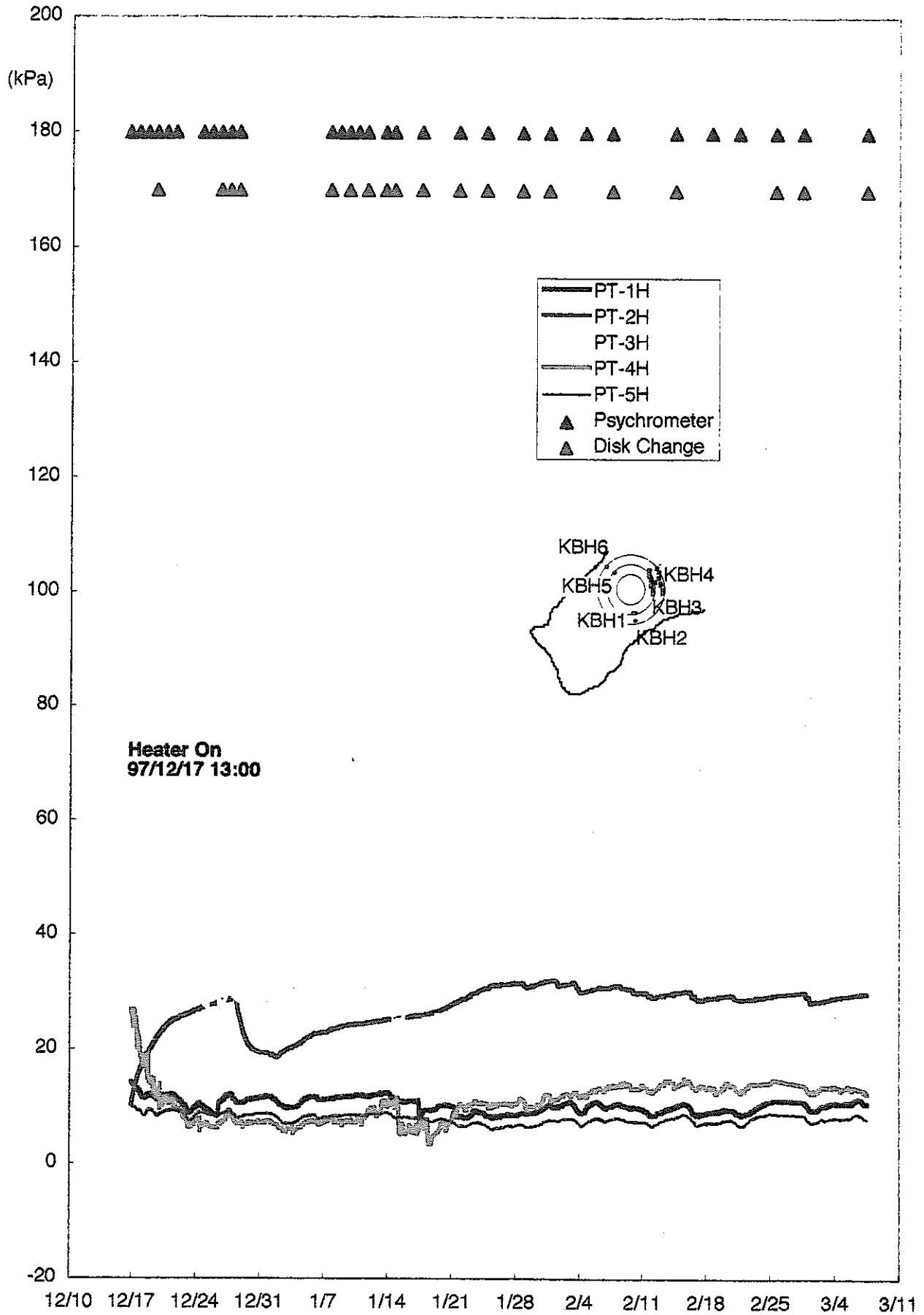


図11-19 岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH1)

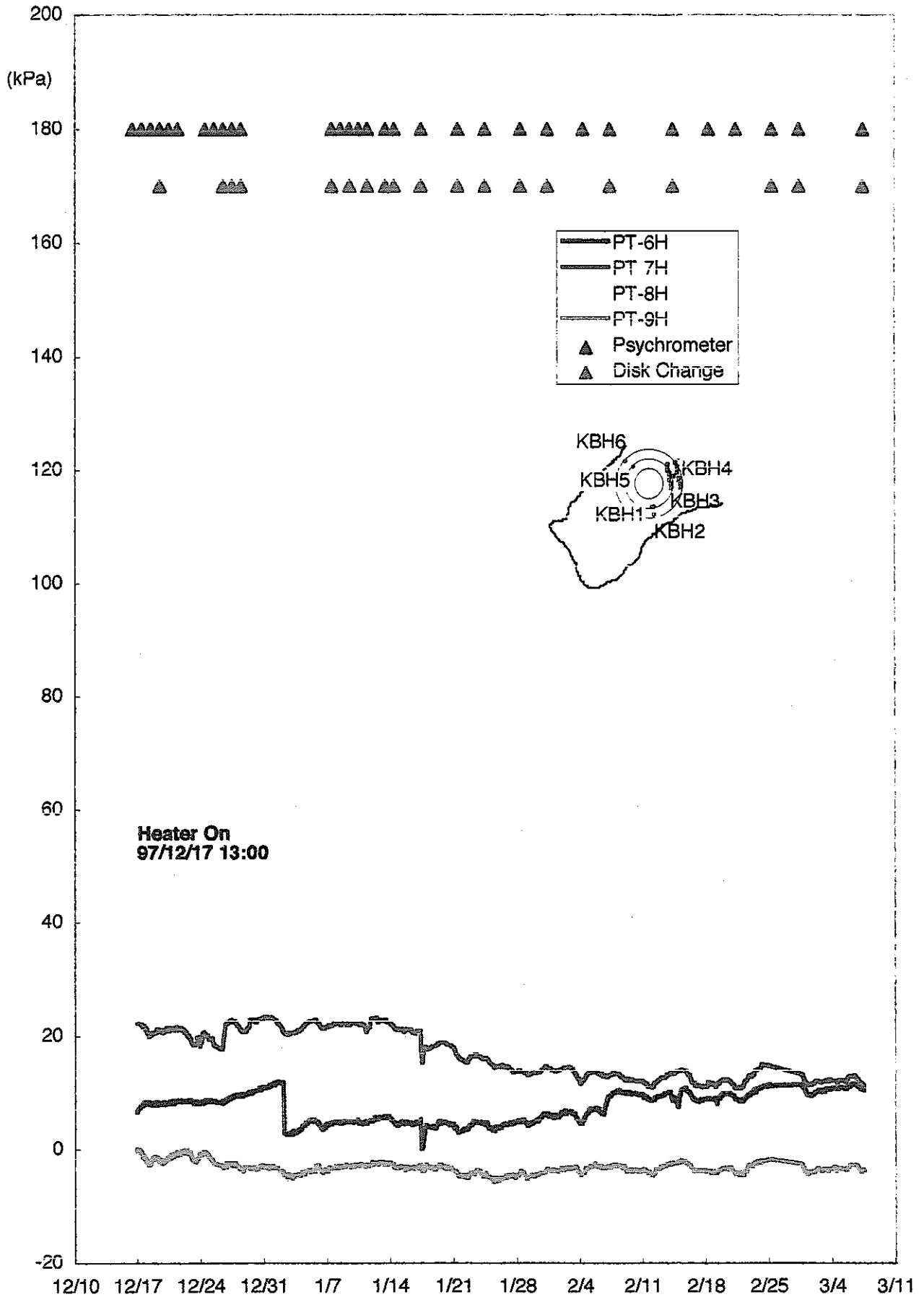


図11-20 岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH2)

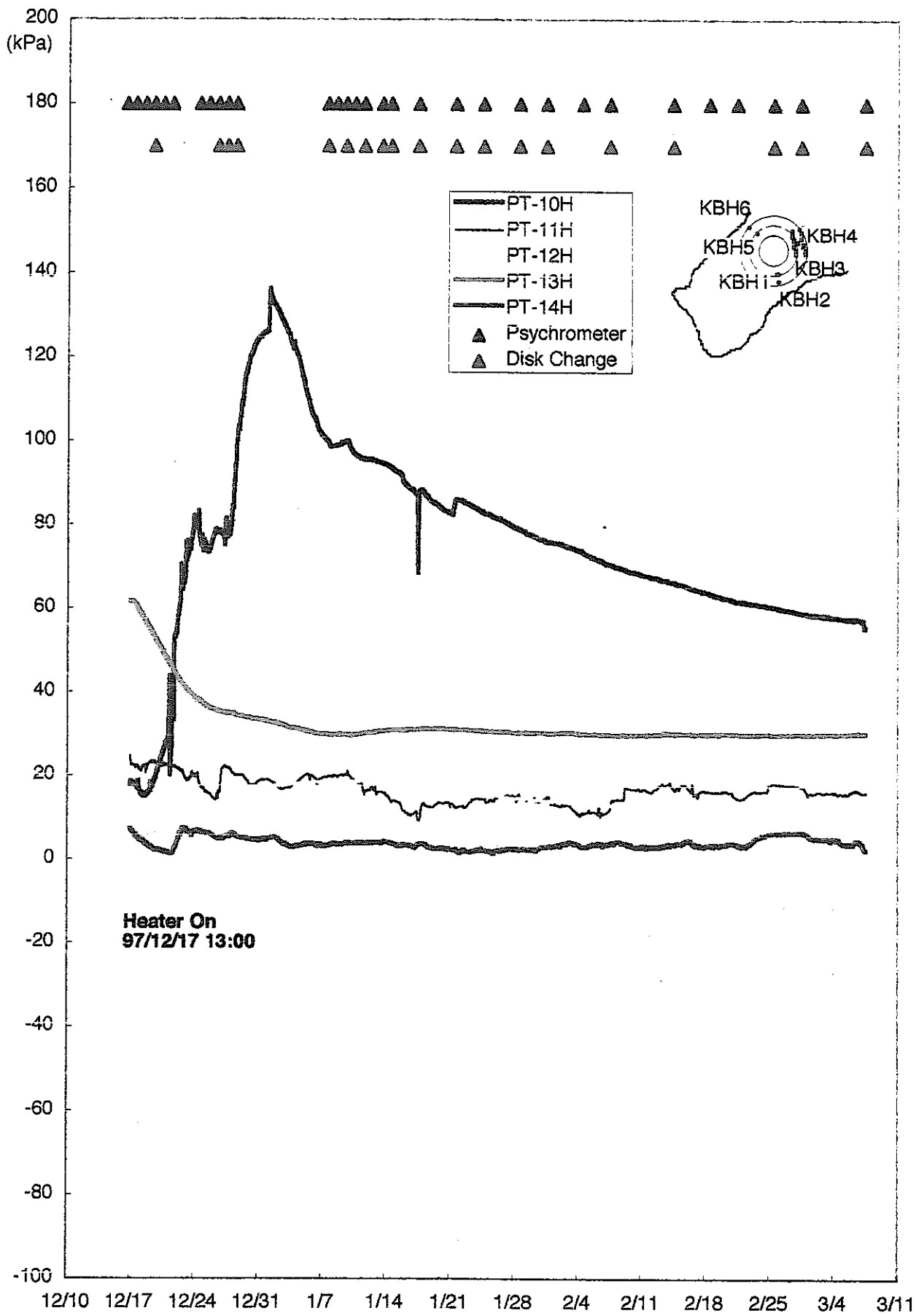


図11-21 岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH3)

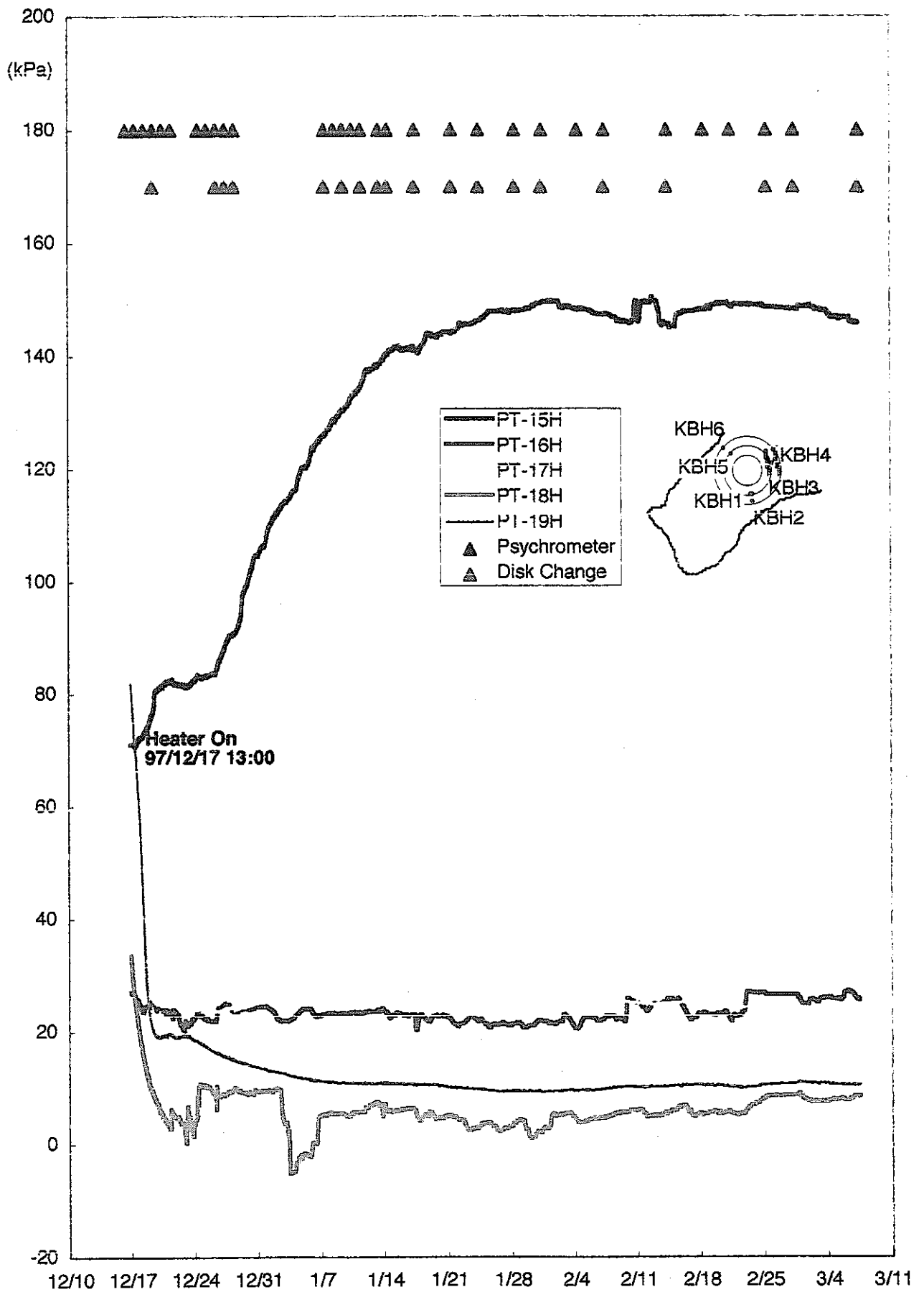


図11-22 岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH4)

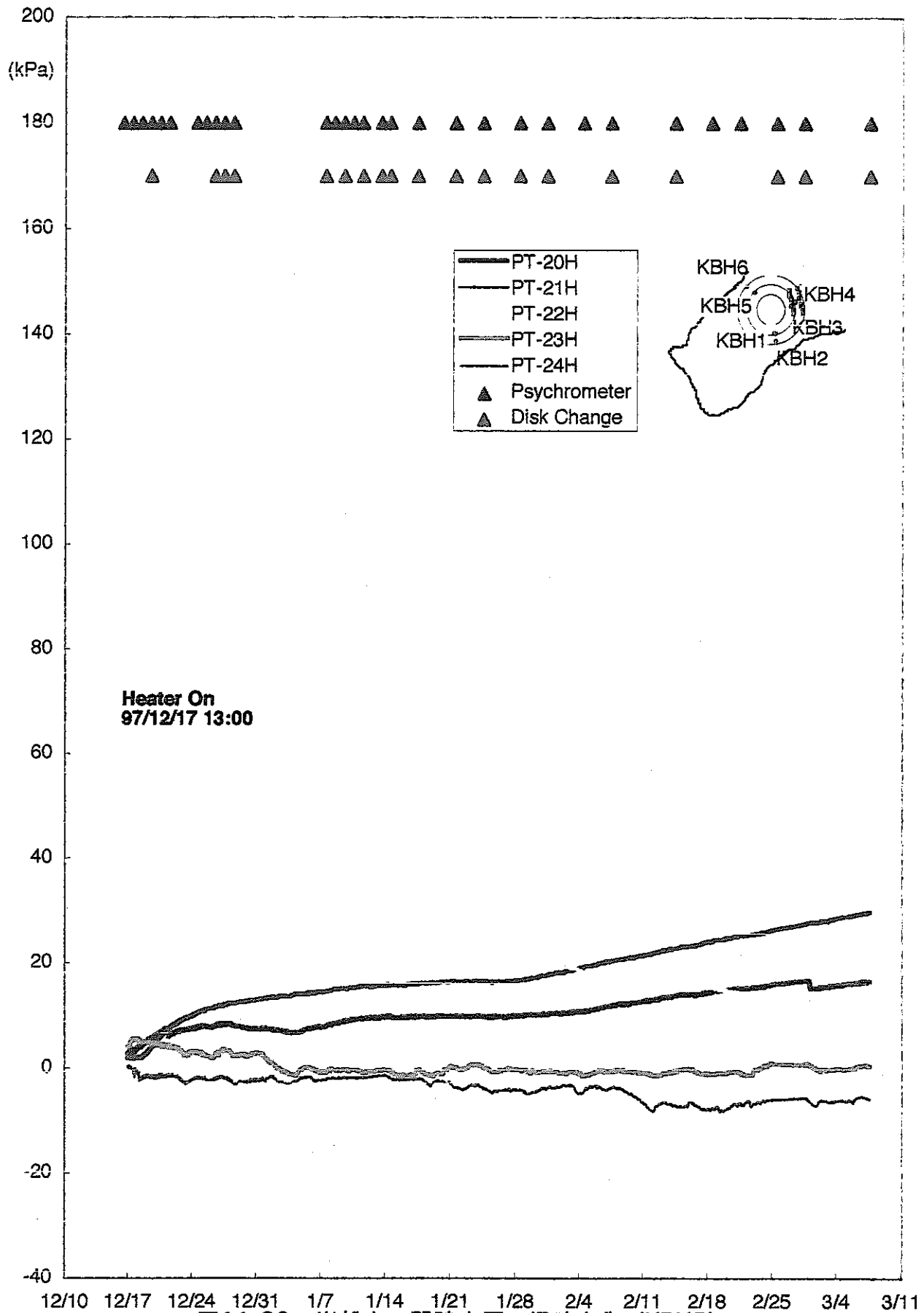


図11-23 岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH5)

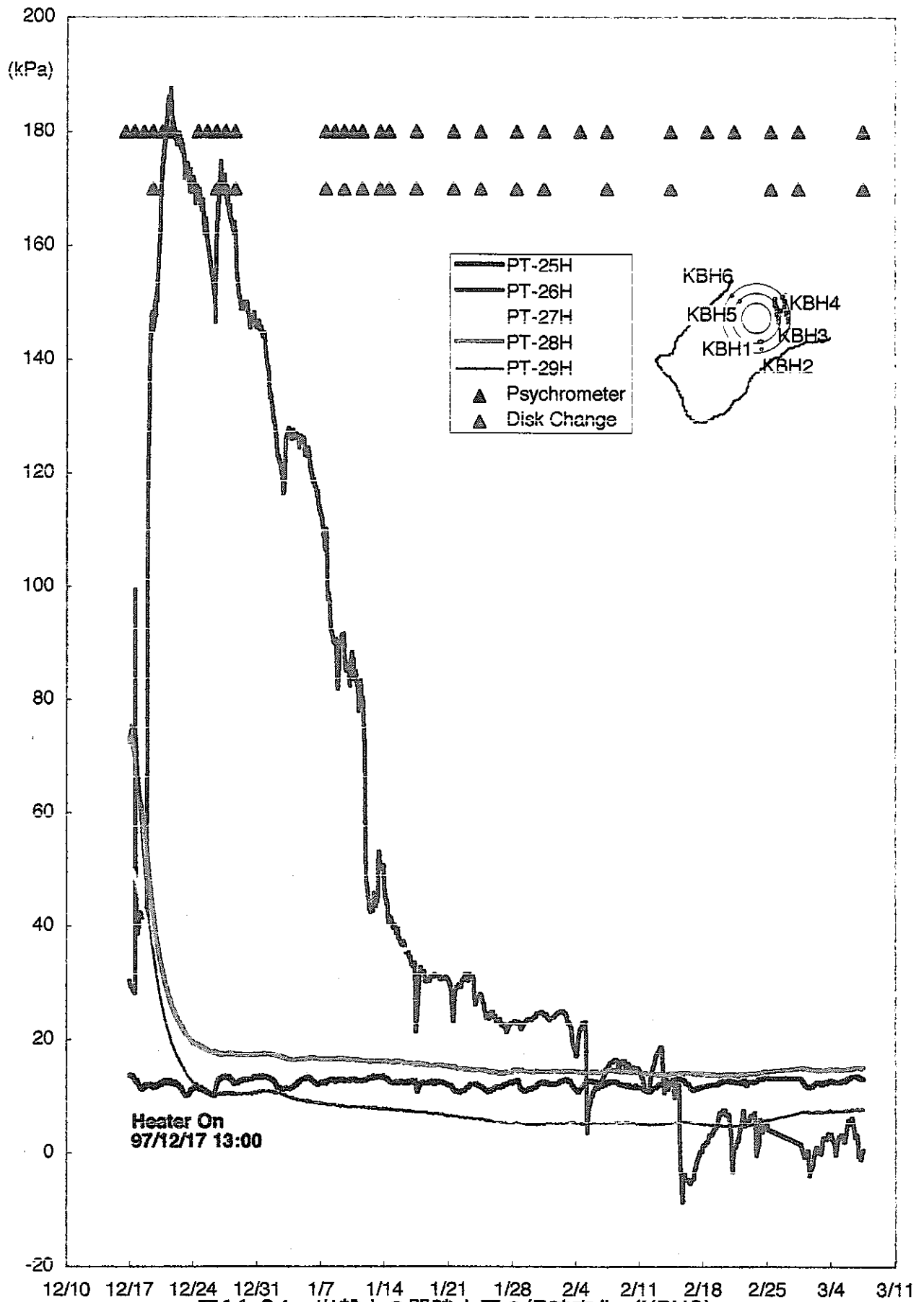


図11-24 岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH6)

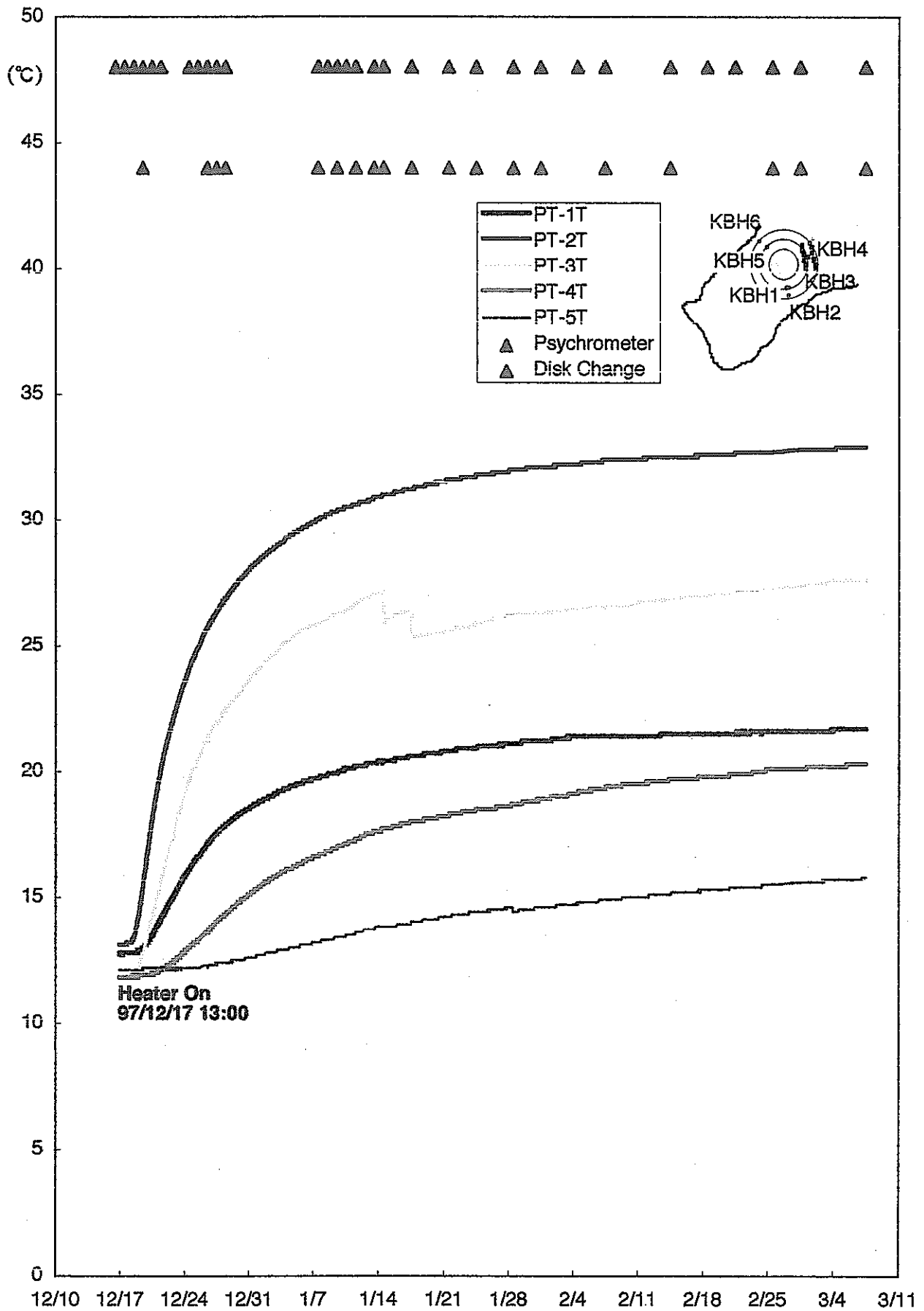


図11-25 岩盤中の温度の経時変化 (KBH1)

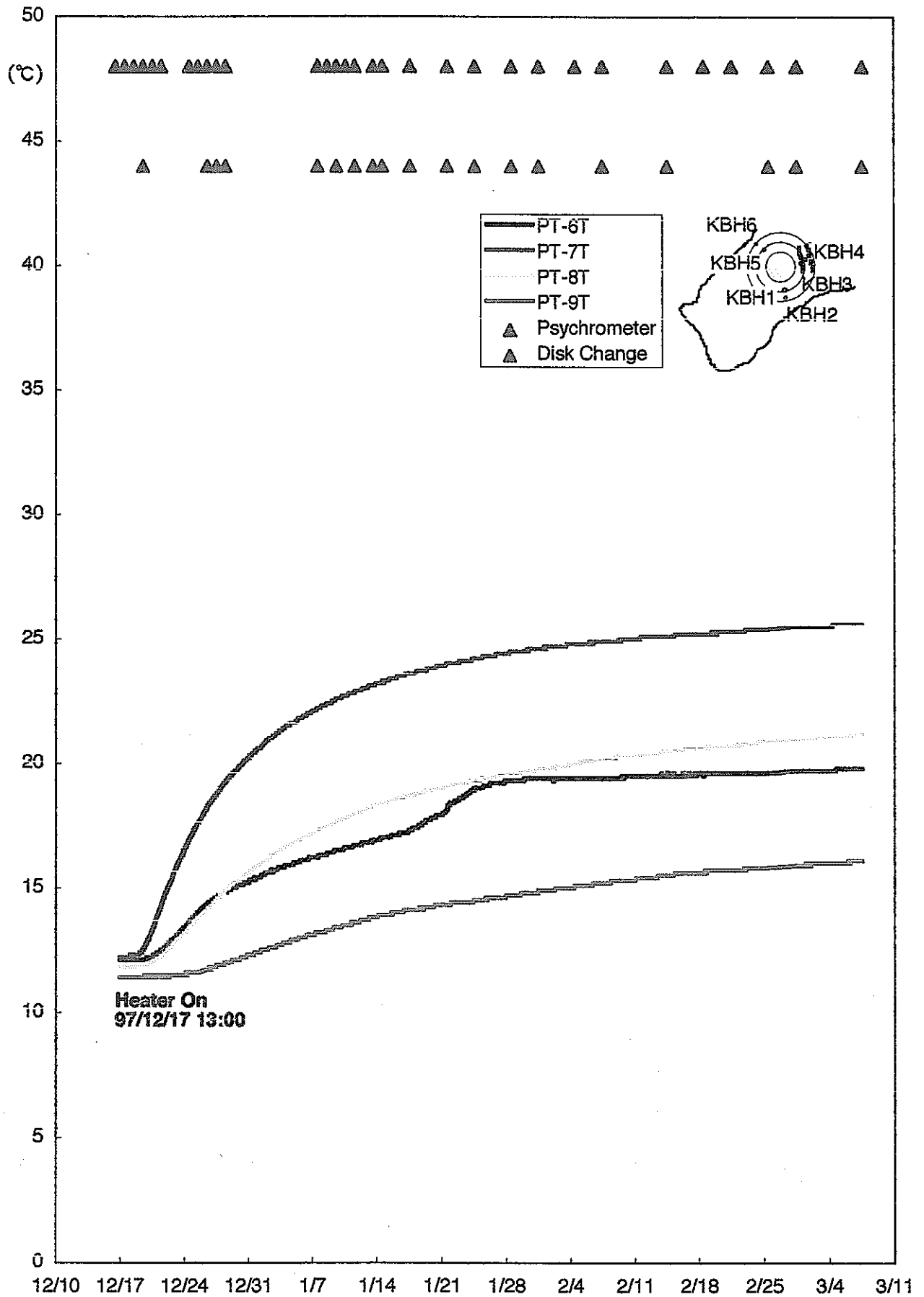


図11-26 岩盤中の温度の経時変化 (KBH2)

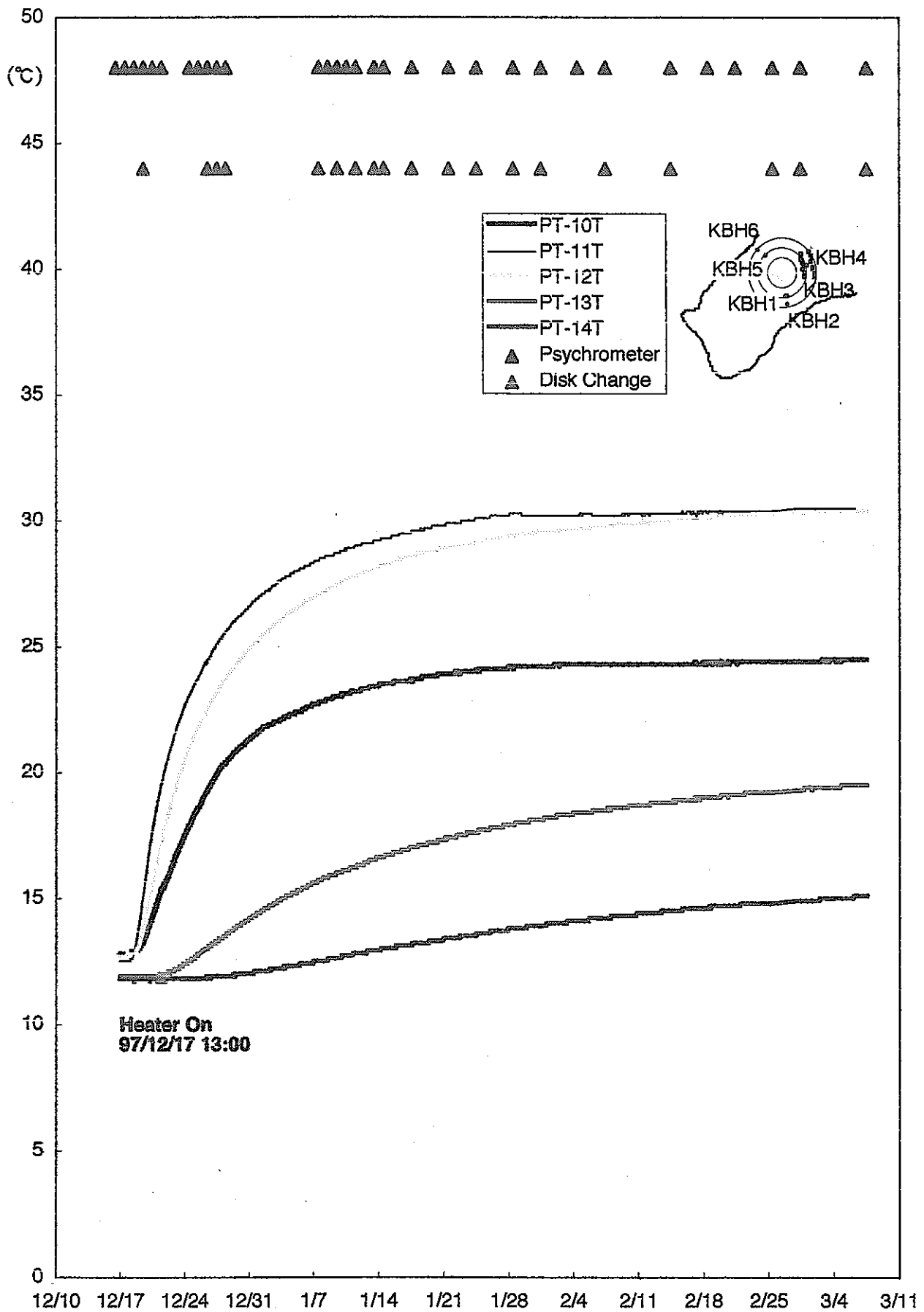


図11-27 岩盤中の温度の経時変化 (KBH3)

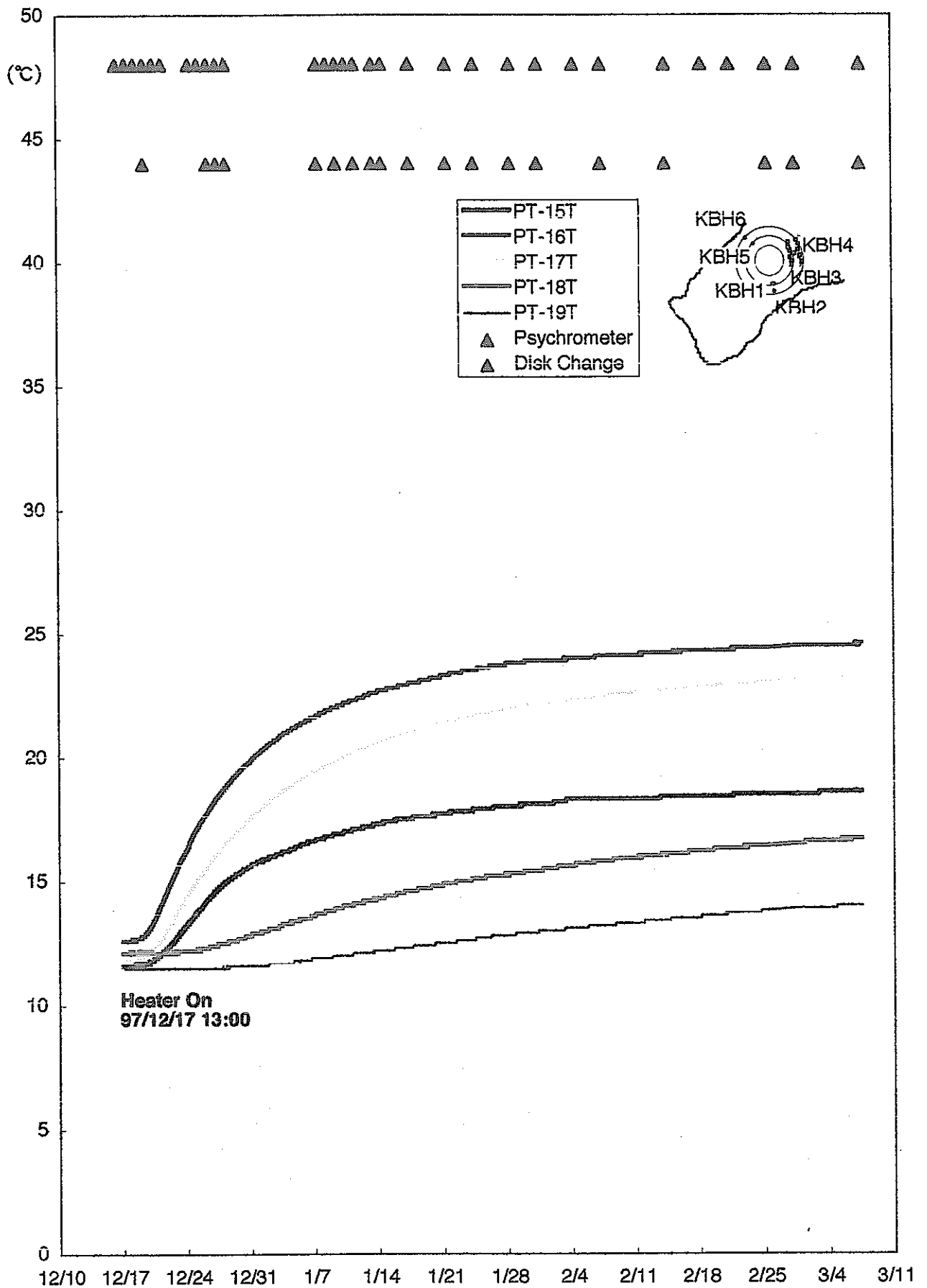


図11-28 岩盤中の温度の経時変化 (KBH4)

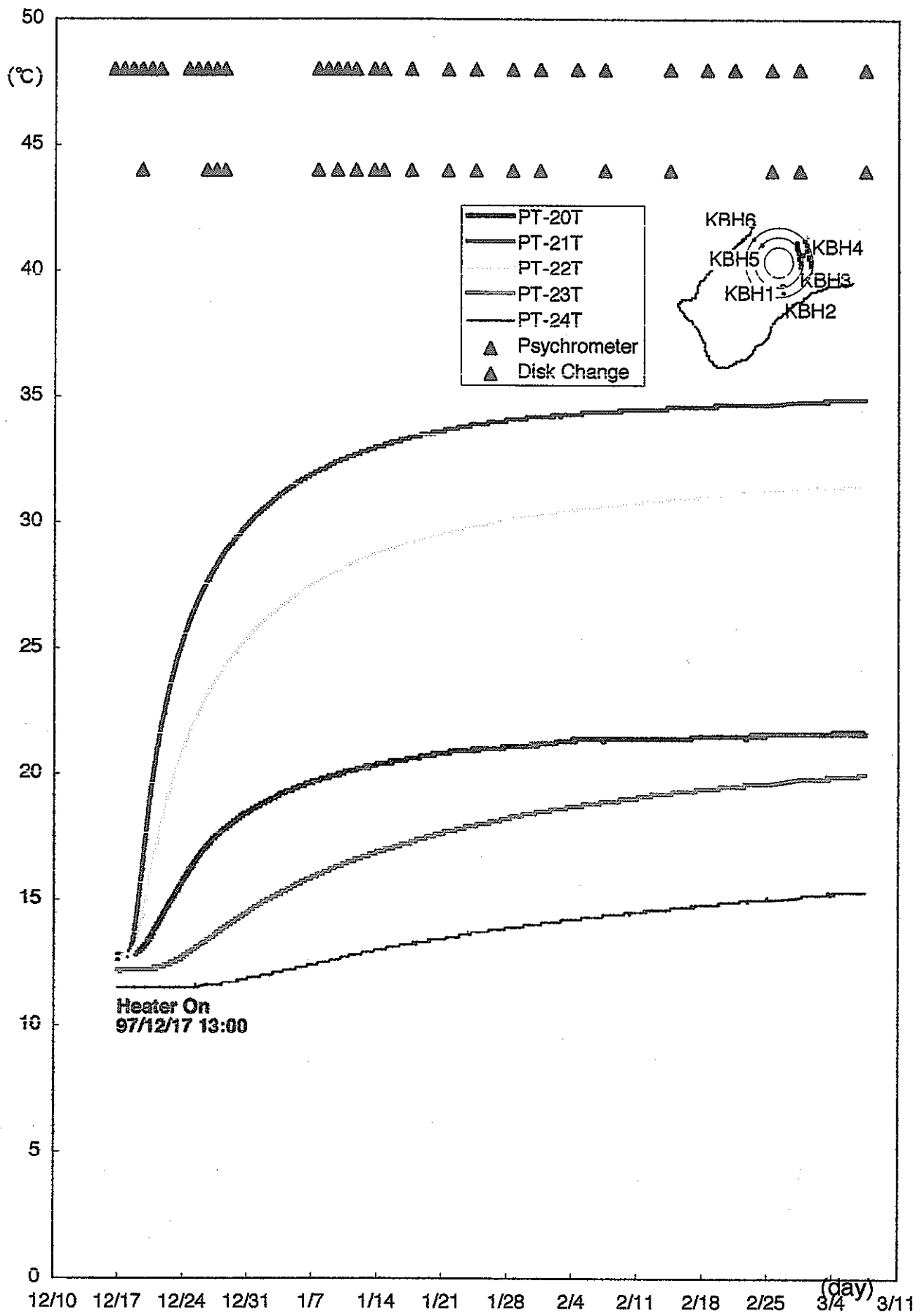


図11-29 岩盤中の温度の経時変化 (KBH5)

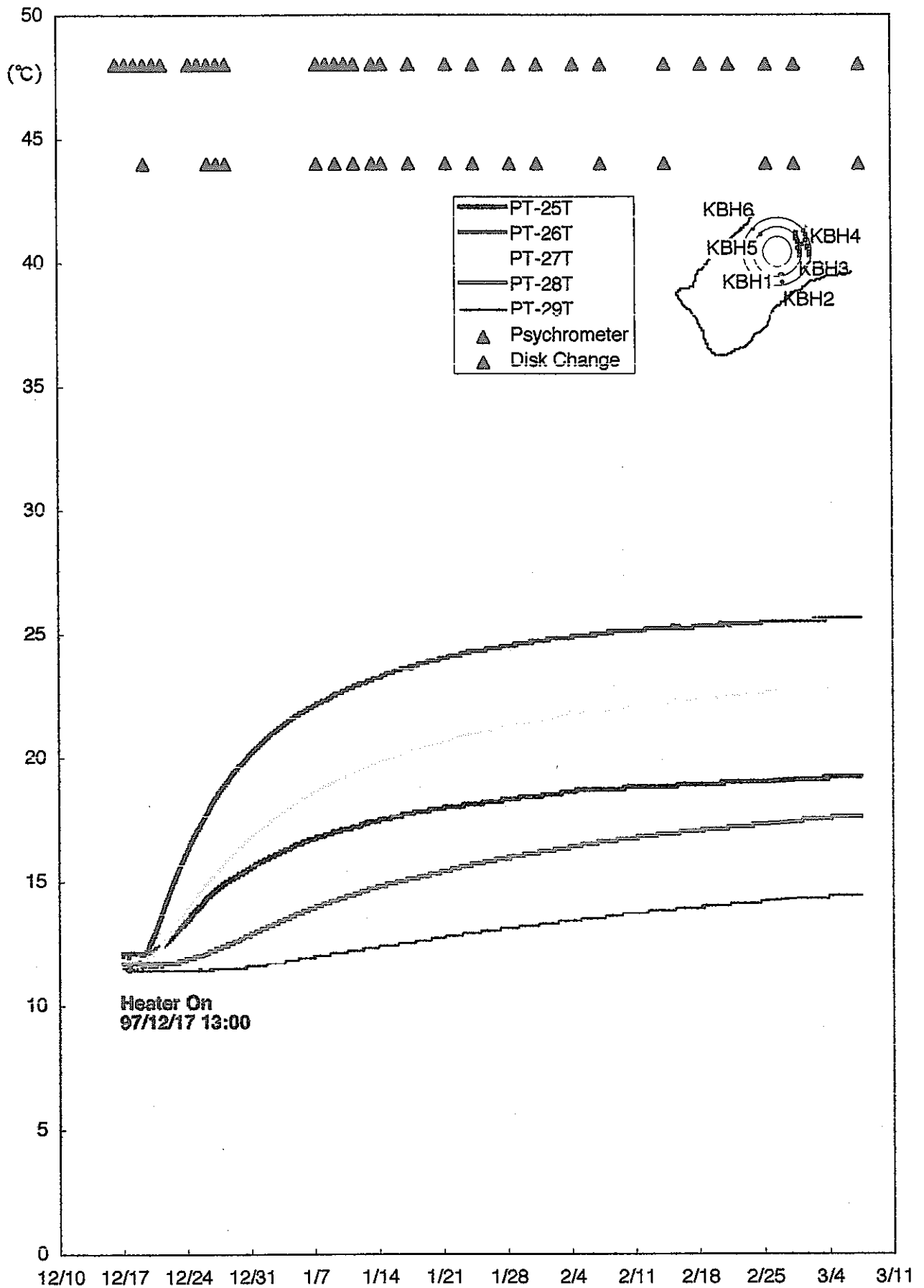


図11-30 岩盤中の温度の経時変化 (KBH6)

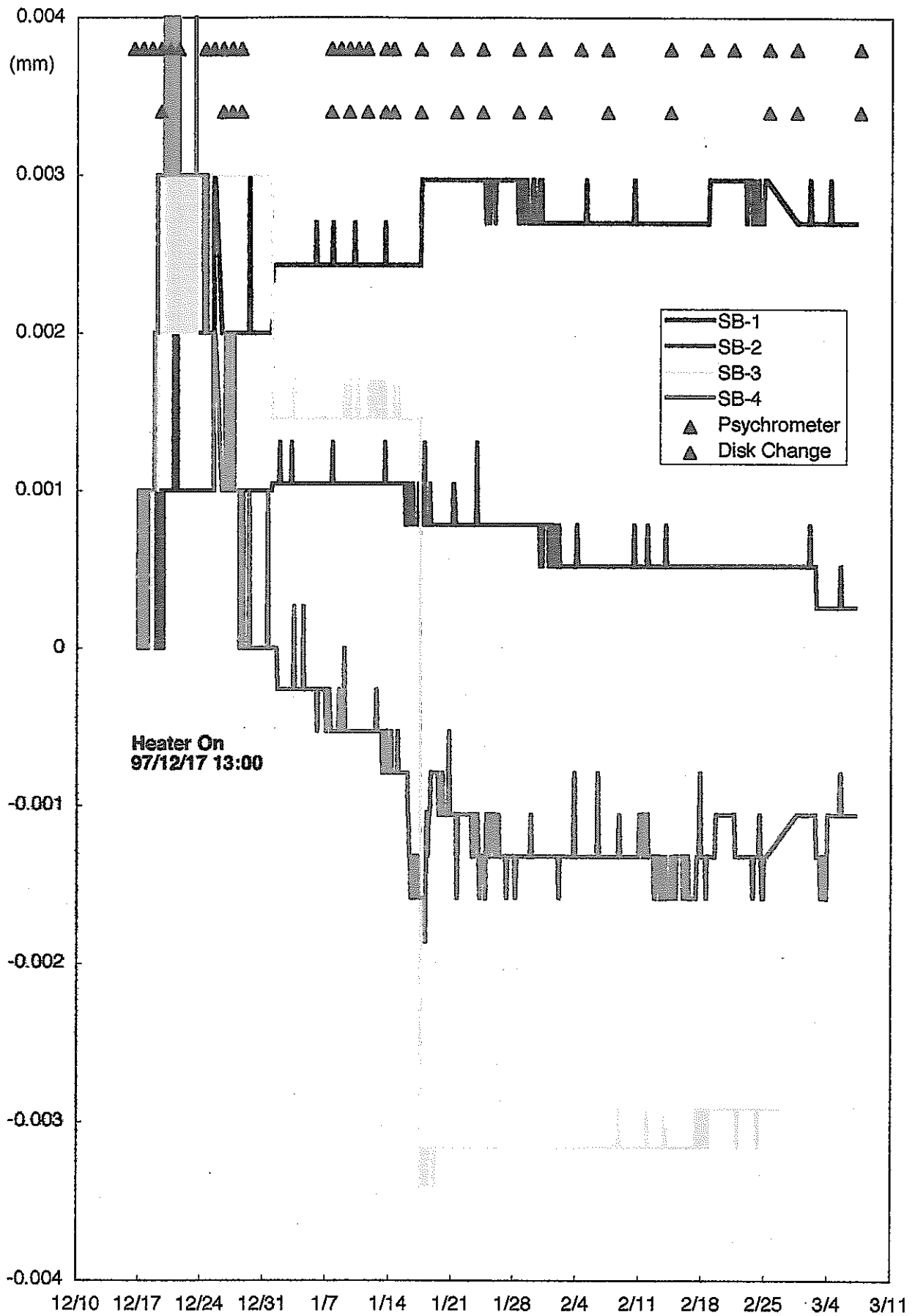


図11-31 ひずみの経時変化 (ボアホールひずみ計)

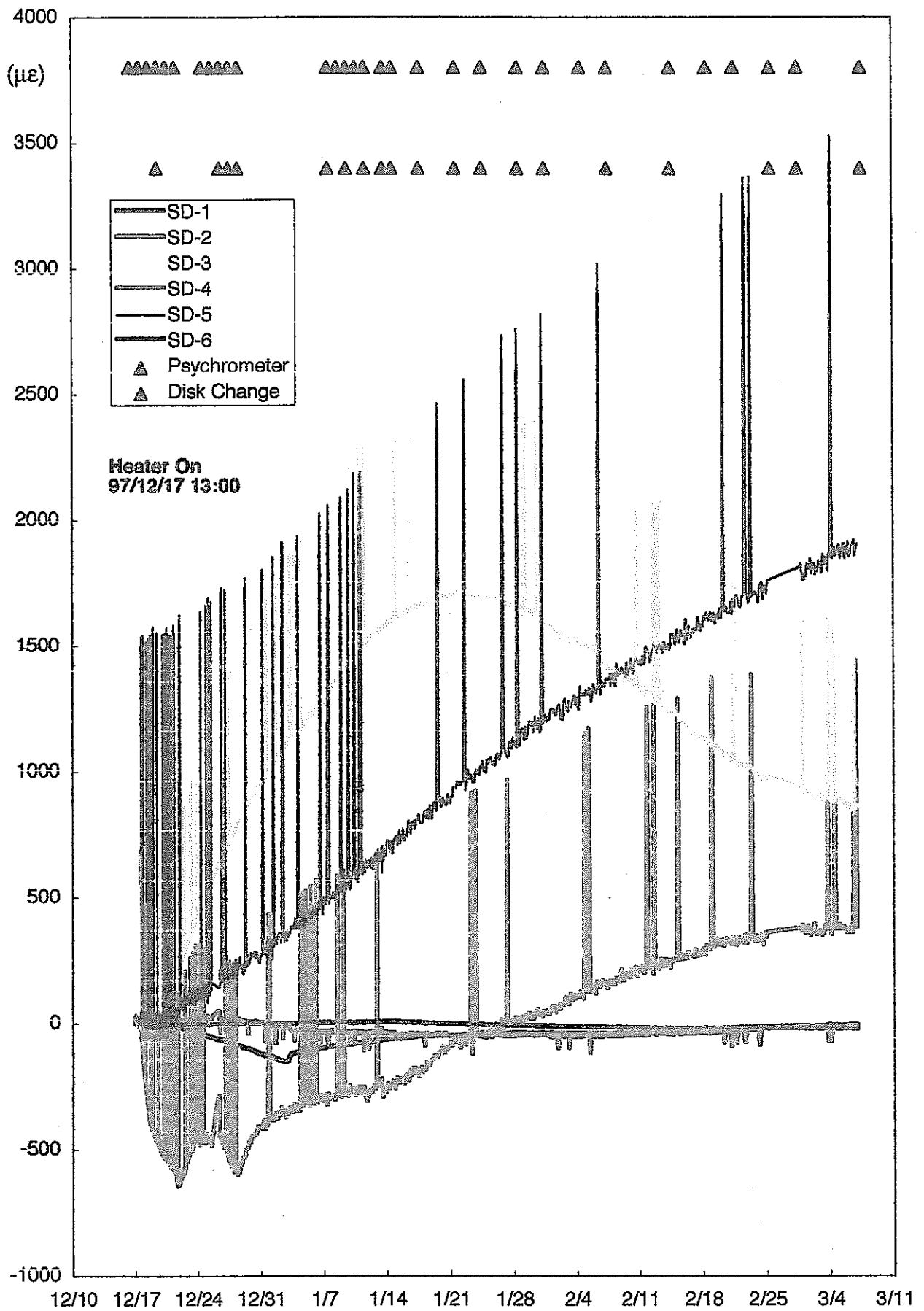


図11-32 ひずみの経時変化

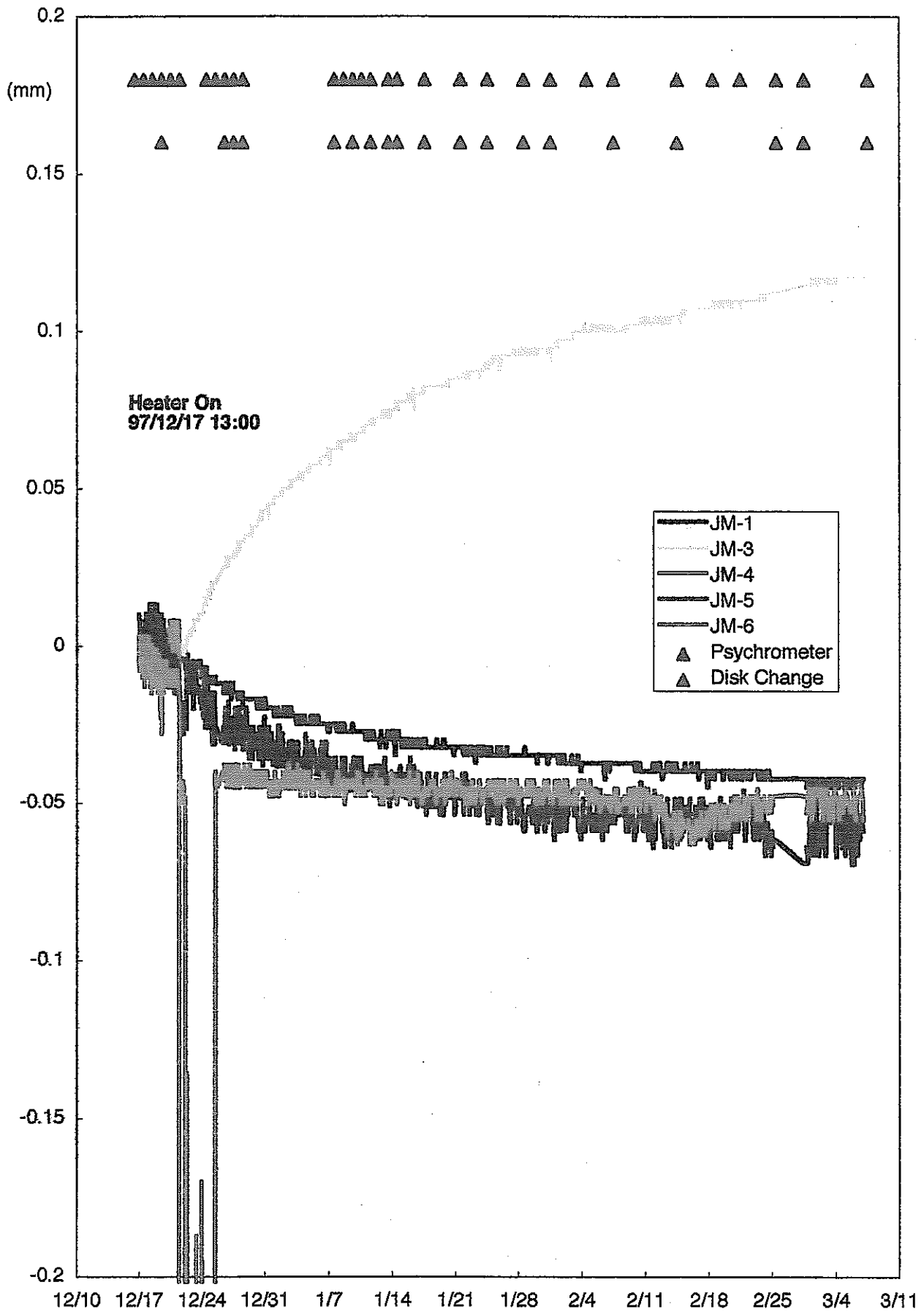
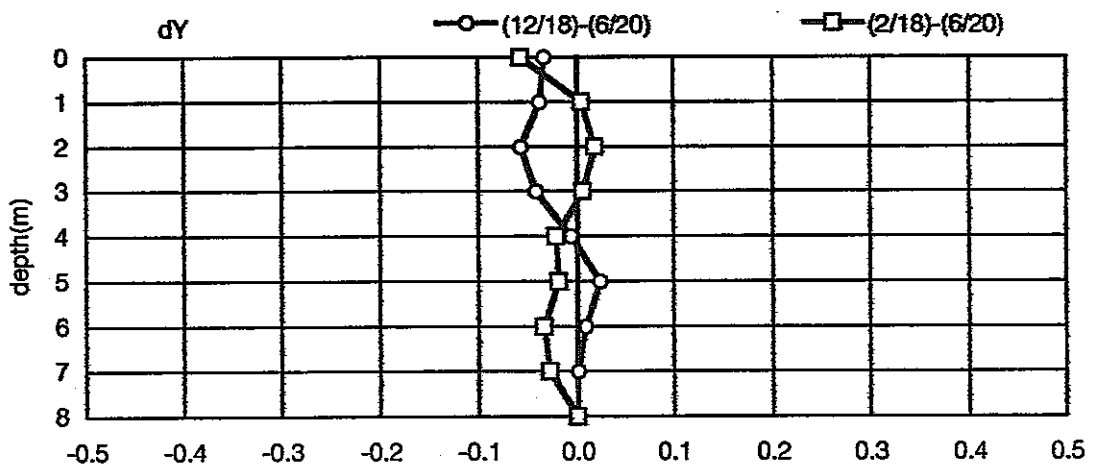
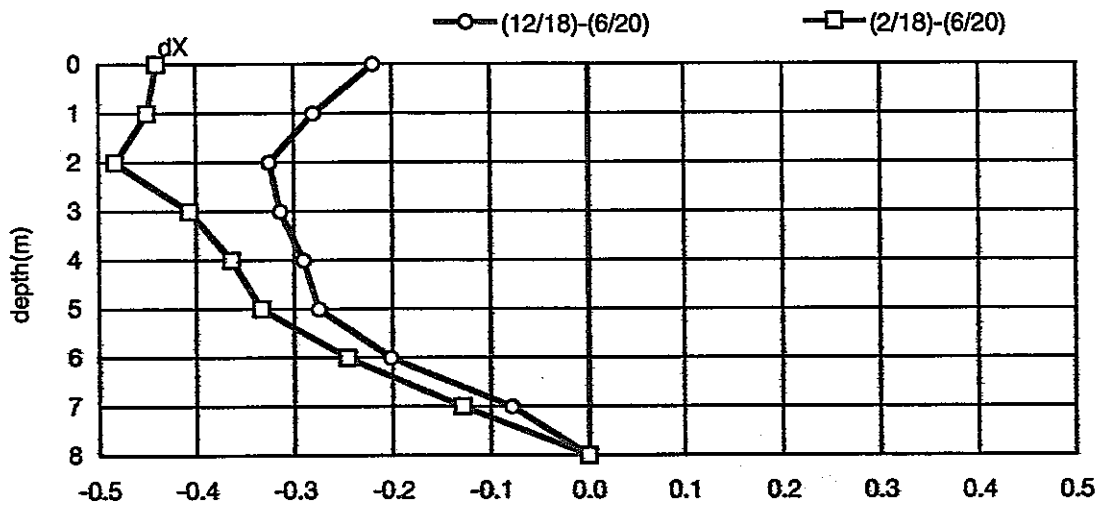
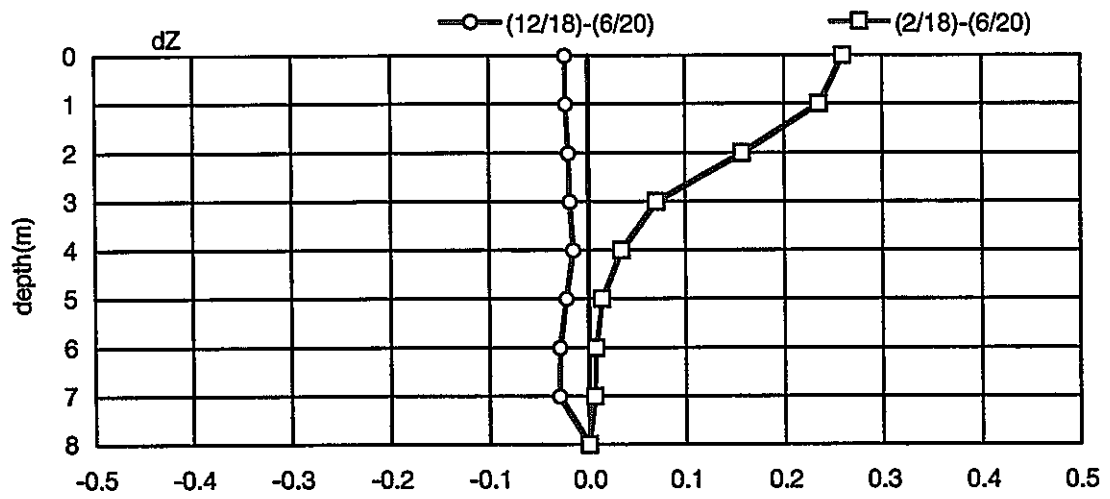
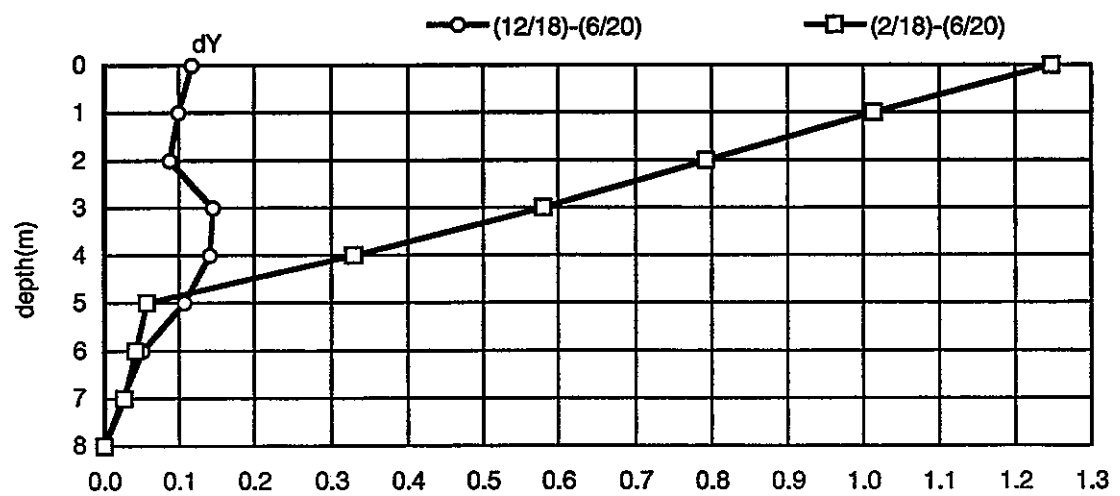
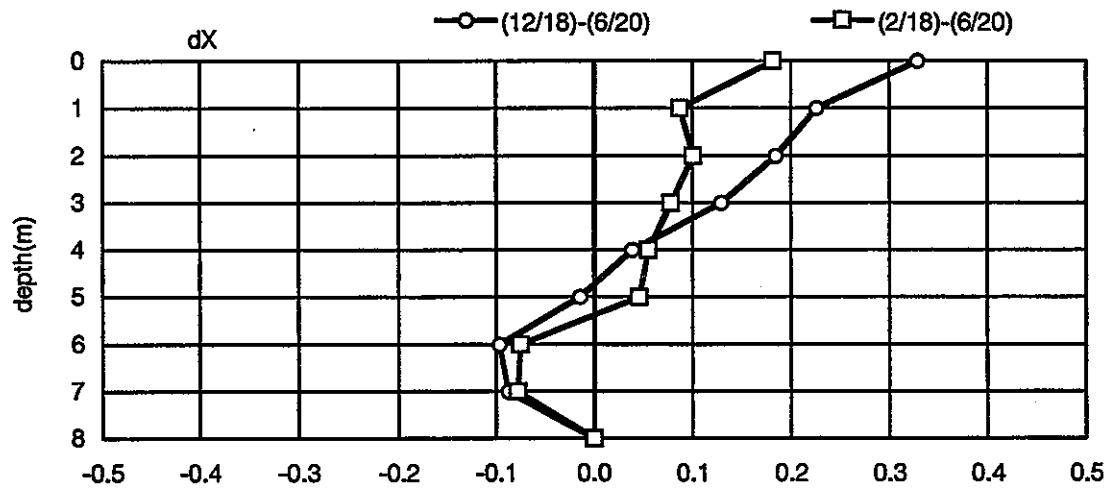
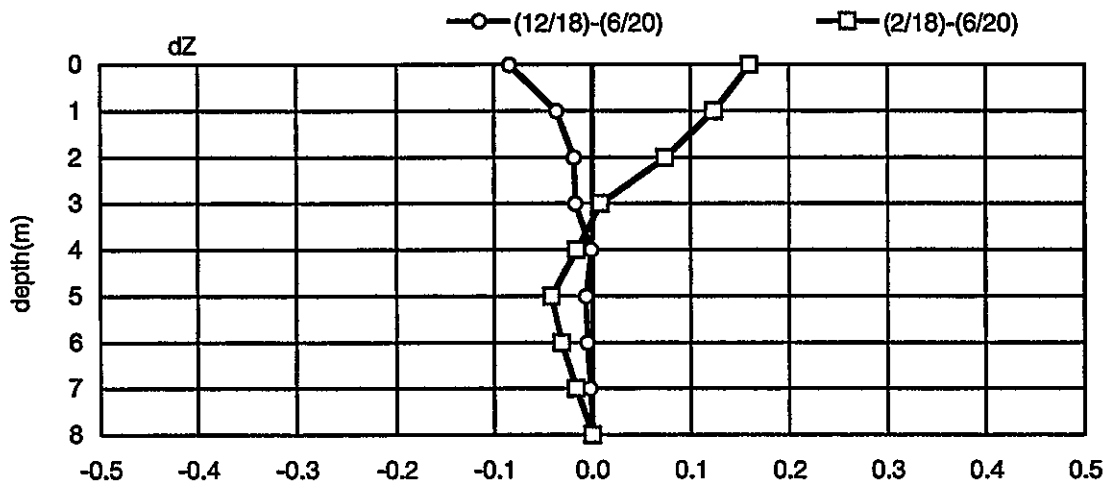


図11-33 岩盤亀裂の変位の経時変化



単位 (mm)

図11-34 トリベック累積変位図 (KBM4)



単位 (mm)

図11-35 トリベック累積変位 (KBM5)

12. 連成モデル、コードの妥当性の評価

本研究の一環として、緩衝材と岩盤における熱-水-応力連成挙動を解析する手法の妥当性を検討する。本年度は、「釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験」における、緩衝材中の連成挙動の評価と解析に必要な緩衝材の基本物性の整理を行った。つまり、本試験に供した粒状ベントナイトの諸物性値を収集し、これを「VALUCLAY」プロジェクトのデータベースとして整理した。

また、岩盤における連成解析手法の評価に資するために、試験ピットへの湧水量調査を実施し（PNC TN8410 97-070）、「DECOVALEX II」プロジェクトのTask 2Aのデータベースとして整理した。以下に、両国際共同研究における発表を中心に、成果の概要を報告する。

12.1 「VALUCLAY」プロジェクト

VALUCLAY (VALidation of codes/models that describe the Unsaturated behavior of engineered clay barriers) プロジェクトは、不飽和粘土緩衝材中の熱-水-応力連成モデルの開発、検証に関する国際共同研究であり、緩衝材に関する研究開発の内容等が類似しているカナダ AECL、スウェーデン SKB、および動燃事業団の協賛により、平成7年度から開始されたものである。日本からは、動燃、ハザマ、IHI 研究チームとして加わっている。

研究の目的は、ニアフィールドの性能評価において重要な環境条件となる不飽和緩衝材中の熱-水-応力連成現象に関し、各機関から提供される連成モデル、データのレビュー、データベース化およびモデルの検証解析等を通じて、データの信頼性の確保及び連成モデル、コードの妥当性を確認し、性能評価の信頼性の向上を図るところにある。

平成7年度は、緩衝材と埋戻し材に関するデータの整理とデータベース化を実施した。VALUCLAY では、データは大きく次の種類に分類された。

- ・ Mineralogical properties (鉱物組成)
- ・ Chemical properties (化学組成)
- ・ Geochemical properties (CEC、pH などの地化学特性)
- ・ Geotechnical properties (粒度分布等、コンシステンシー限界などの物理特性)
- ・ Consolidation indices (圧密、収縮、膨潤に関わる特性)
- ・ Mechanical moduli (力学係数)
- ・ Thermal properties (熱特性)
- ・ Flow properties (流動に関わる特性)
- ・ Transport coefficients (物質移動に関わる係数)

表 12-1 は、VALUCLAY の第 2 回 workshop (於東京、1996.10.30-11.1) で、事務局である AECL が整理した各国のデータベースの作成状況である。

粒状ベントナイト (OT-9607) に関するデータである。このうち、「釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験」に用いた粒状ベントナイト (OT9607) については、粒径分布、最適含水比と最大乾燥密度、膨潤圧力、熱伝導率、比熱、固有透水係数、透水係数、水分特性曲線、水分拡散係数について整理しデータベース化を行った。

VALUCLAY の第 2 回 workshop で発表した粒状ベントナイトに関するデータの一例を、“資料編 15” に添付する。

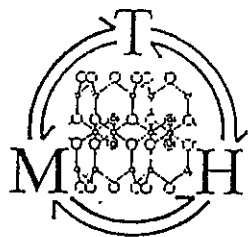


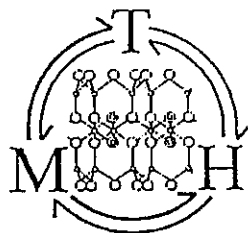
表 12-1 VALUCLAY データベース

VALUCLAY
Secretariat

Table 1. VALUCLAY Database - Number of records (pg. 3/3).

Property Group	Property (Table)	Buffer			Backfill			Sand			EDZ			Fluid			Other Mat.	Total	
		CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD			
Mineralo	Mineralogical Composition	31	8	13	14													66	
Thermal	Latent Heat of Vaporization			5														5	
	Specific Heat Capacity		19	1			1											21	
	Thermal Conductivity		54															54	
	Thermal Expansion Coef.		1	3												1		5	
Transpor	Apparent Diffusion	15			7													22	
	Diffusion	8			3													11	
	Moisture Diffusivity (Iso)	25	888	15			4											932	
	Moisture Diffusivity (T-c)	4			1													5	
	Moisture Diffusivity (T-u)																	0	
	Thermal Conductivity (Iso)																	0	
	Thermal Conductivity (T-c)																	0	
	Thermal Conductivity (T-u)	9		22	26		2										68	127	
	Thermal Diffusivity (Iso)																	0	
	Thermal Diffusivity (T-c)	4	1		1													6	
	Thermal Diffusivity (T-u)				1													1	
	Thermal Moist. Diff. (Iso)																	0	
	Thermal Moist. Diff. (T-c)	17			1													18	
	Thermal Moist. Diff. (T-u)			28														28	
Total		1241	2124	796	157	0	53	0	0	0	0	0	0	9	98	0	1	186	4665

12-3



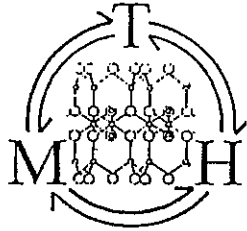
VALUCLAY

Secretariat

Table 1. VALUCLAY Database - Number of records (pg. 1/3).

Property Group	Property (Table)	Buffer			Backfill			Sand			EDZ			Fluid			Other Mat.	Total
		CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD		
Chemical	Chemical Composition	215			8									8			231	
	Organic Matter	1			2												3	
	Pore Water Composition			44													44	
	Pore Water Chemistry	22			11									74			107	
Consolid	Compressibility			33			13										46	
	Coefficient of consolidation		6	24													30	
	Compression Index		1														1	
	Drying Shrinkage	24															24	
	Rebound Index		1														1	
	Shrinkage Index	3															11	
	Shrinkage Limit	10	1	27													38	
	Swelling Pressure	97	32	34			9										172	
	Flow_pro	Air Conductivity																0
Air Entry Pressure Head																	0	
Intrinsic Permeability			283														283	
Hydraulic Conductivity		104	282	25	18								9				453	
Local Swelling Pressure		2															2	
Moisture Characteristic C.		2	389	52			24										467	
Relative Permeability																	0	
Tortuosity Factor		3															3	
Geochemi	Cation Exchange Capacity	20	19	7	2												48	
	pH	25		12	2									2			41	
	Surface Area	4		2	2												8	

12-4

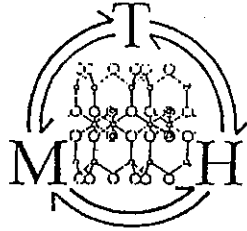


VALUCLAY

Secretariat

Table 1. VALUCLAY Database - Number of records (pg. 2/3).

Property Group	Property (Table)	Buffer			Backfill			Sand			EDZ			Fluid			Other Mat.	Total	
		CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD			
Geotechn	Degree of Saturation	1		65	1													67	
	Dry Density	13		65	16													47	141
	Fluid Dynamic Viscosity			11											14				25
	Free Swell	148																	148
	Grain Size	278	53	8	22													9	370
	Liquid Limit	23	1	3	1													2	30
	Maximum Dry Density	13	12		9													31	65
	Moisture Content	1			1														2
	Optimum Moisture Content	8	12		1														21
	Plastic Limit	15	1	1	1														18
	Plasticity Index	3	1	1	1													3	9
	Porosity	1			1														2
	Specific Gravity	23	19	2	1														45
	Void Ratio	1		65	1														67
	Volumetric Moisture C.	1		65	1														67
	Wet Density	1		65	1														67
	Mechanic	Bulk Modulus			82														82
Cohesion		25		6														31	
Critical State Slope of F.			1	3														4	
Friction Angle			1	6														7	
Modulus of Elasticity		16	38															54	
Poissons Ratio		25		1														26	
Shear Modulus																		0	



VALUCLAY

Secretariat

Table 1. VALUCLAY Database - Number of records (pg. 2/3).

Property Group	Property (Table)	Buffer			Backfill			Sand			EDZ			Fluid			Other Mat.	Total	
		CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD	CAN	JPN	SWD			
Geotechn	Degree of Saturation	1		65	1													67	
	Dry Density	13		65	16													47	141
	Fluid Dynamic Viscosity			11											14				25
	Free Swell	148																	148
	Grain Size	278	53	8	22													9	370
	Liquid Limit	23	1	3	1													2	30
	Maximum Dry Density	13	12		9													31	65
	Moisture Content	1			1														2
	Optimum Moisture Content	8	12		1														21
	Plastic Limit	15	1	1	1														18
	Plasticity Index	3	1	1	1													3	9
	Porosity	1			1														2
	Specific Gravity	23	19	2	1														45
	Void Ratio	1		65	1														67
	Volumetric Moisture C.	1		65	1														67
Wet Density	1		65	1														67	
Mechanic	Bulk Modulus			82														82	
	Cohesion	25		6														31	
	Critical State Slope of F.		1	3														4	
	Friction Angle		1	6														7	
	Modulus of Elasticity	16	38															54	
	Poissons Ratio	25		1														26	
	Shear Modulus																	0	

Constantin Onofrei