

本資料は 17 年 7 月 25 日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験(III) (平成9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

1998年3月

技 術 資 料		
開示区分	レポート No.	受 領 日
秘T	J1412 98-002	1998.9.30
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

株式会社 間 組

釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験（Ⅲ） （平成9年度）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究内容報告書）

概要集

1998年3月

株式会社 間 組

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107-8445 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

限 定 資 料

PNC ZJ 1412 98-002

1998 年 3 月

釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験

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・検証が必要である。

特に、亀裂性結晶質岩における深地層を理解するために、白亜紀初期の花崗岩を母岩とする釜石鉱山における原位置試験が計画され、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コードを検証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、試験ビット掘削、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。昨年度は、試験ビット内に緩衝材を原位置締固め方式で施工し、その後、連成試験が実施された。

本年度は、連成試験が継続され、1年2ヶ月分の連成試験データが取得できたのでその結果を報告する。

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：070D0131

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長 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 experimental drift was opened, 5m×10m in square and 7m in height, by drill and blast method and then fourteen boreholes were drilled in order to install several sensors.

This year we carried out the compaction of bentonite into the test pit and installation of sensors in the bentonite 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.粒状ベントナイトの三軸試験	3-1
3.1 試験方法	3-1
3.1.1 試験条件	3-1
3.1.2 供試体および荷重条件	3-1
3.2 試験結果	3-5
3.3 まとめ	3-11
4.ベントナイトの一面せん断試験	4-1
4.1 試料	4-2
4.2 せん断試験	4-3
4.3 実験結果および考察	4-4
4.3.1 試料形状とせん断力学特性	4-4
4.3.2 水飽和度とせん断力学特性	4-9
4.3.3 砂混じり試料のせん断力学特性	4-11
4.4 まとめ	4-14
5.粒状ベントナイトの水分ポテンシャル測定	5-1
5.1 目的及び概要	5-1
5.2 試料の概要	5-1
5.2.1 試料	5-1
5.2.2 試験方法	5-2
5.3 試験結果	5-7
5.3.1 キャリブレーション	5-7
5.3.2 マトリックポテンシャル測定	5-10
5.4 まとめ	5-24
6.ベントナイトのサンプリング	6-1
6.1 目的及び概要	6-1
6.2 サンプリング位置	6-1
6.3 サンプリング方法	6-1
6.4 サンプリング結果および考察	6-4

6.4.1 含水比測定	6-4
6.4.2 緩衝材の硬度	6-6
7.連成試験	7-1
7.1 ベントナイト中の測定データ	7-1
7.1.1 温度	7-1
7.1.2 間隙水圧	7-2
7.1.3 湿度、水分分布	7-2
7.1.4 圧力	7-3
7.1.5 熱流束	7-3
7.1.6 ひずみ	7-3
7.1.7 ベントナイト中のデータに関する考察	7-4
7.2 岩盤の測定データ	7-4
7.2.1 間隙水圧	7-4
7.2.2 温度	7-4
7.2.3 ボアホール型ひずみ計	7-5
7.2.4 ひずみ計	7-5
7.2.5 ジョイント変位計	7-5
7.2.6 トリベック	7-5
7.2.7 岩盤データに関する考察	7-5
7.3 取得データに関する考察	7-6
8.連成モデル、コードの妥当性の評価	8-1
8.1 概要	8-1
8.2 ピット内湧水量の解析・評価	8-2
8.2.1 解析手法の検討	8-2
8.2.2 対象岩盤のモデル化	8-5
8.2.3 解析条件および解析結果	8-7
8.3 ピット内空変位の解析	8-10
8.3.1 解析モデル	8-10
8.3.2 解析ケース	8-13
8.3.3 解析結果	8-14
8.4 ベントナイト中連成解析モデルの検証に関する検討	8-19
8.5 まとめ	8-23
9.まとめ	9-1

図 目 次

3. 粒状ベントナイトの三軸試験

図 3-1	試験フロー	3-1
図 3-2	三軸試験装置および計測器のシステム図	3-4
図 3-3	せん断応力円（最大軸差応力時）	3-7
図 3-4	せん断応力円（最大軸応力比時）	3-8
図 3-5	軸差応力と平均有効応力の関係	3-9
図 3-6	正規化有功拘束圧 (σ_3'/σ_{30}') と (q/p') の関係	3-10
図 3-7	正規化有功拘束圧 (σ_3'/σ_{30}') と (σ_1'/σ_3') の関係	3-10

4. ベントナイトの一面せん断試験

図 4-1	試料模式図	4-2
図 4-2	せん断試験機	4-3
図 4-3	一体型試料のせん断試験結果（飽和度 50%、垂直応力 0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）	4-4
図 4-4	分離型試料のせん断試験結果（飽和度 50%、垂直応力 0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）	4-5
図 4-5	飽和度 50%試料のせん断強度特性（ピーク強度、残留強度）	4-5
図 4-6	一体型試料のせん断試験結果（飽和度 100%、垂直応力 0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）	4-7
図 4-7	分離型試料のせん断試験結果（飽和度 100%、垂直応力 0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）	4-7
図 4-8	圧着型試料のせん断試験結果（飽和度 100%、垂直応力 0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）	4-8
図 4-9	飽和度 100%のせん断強度特性（ピーク強度、残留強度）	4-8
図 4-10	一体型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較（垂直応力 1.0MPa）	4-10
図 4-11	分離型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較（垂直応力 1.0MPa）	4-10
図 4-12	砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度 50%、一体型、垂直応力 0.2MPa）	4-11
図 4-13	砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度 50%、分離型、垂直応力 0.2MPa）	4-12
図 4-14	砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度 100%、一体型、垂直応力 0.2MPa）	4-12

図 4-15 砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度 100%、 分離型、垂直応力 0.2MPa）	4-13
図 4-16 砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度 100%、 圧着型、垂直応力 0.2MPa）	4-13

5. 粒状ベントナイトの水分ポテンシャル測定

図 5-1 Burland 型テンシオメータ	5-3
図 5-2 従来型テンシオメータ	5-3
図 5-3 マトリックポテンシャル測定用容器	5-4
図 5-4 供試体整形用容器	5-5
図 5-5 キャリブレーション時の出力電圧変化（Burland 型）	5-8
図 5-6 Burland 型間隙水圧計のサクシオン応答特性	5-8
図 5-7 キャリブレーション時の出力電圧変化（従来型）	5-9
図 5-8 従来型間隙水圧計のサクシオン応答特性	5-9
図 5-9 マトリックサクシオンの出力値変動（Burland 型） 供試体： $\omega=142\%$ 、 $\theta=79.2\%$ 、 $\rho_d=0.560\text{gcm}^{-3}$	5-12
図 5-10 マトリックサクシオンの出力値変動（Burland 型） 供試体： $\omega=106\%$ 、 $\theta=71.8\%$ 、 $\rho_d=0.676\text{gcm}^{-3}$	5-13
図 5-11 マトリックサクシオンの出力値変動（Burland 型） 供試体： $\omega=86.4\%$ 、 $\theta=66.7\%$ 、 $\rho_d=0.772\text{gcm}^{-3}$	5-14
図 5-12 マトリックサクシオンの出力値変動（Burland 型） 供試体： $\omega=78.3\%$ 、 $\theta=66.0\%$ 、 $\rho_d=0.843\text{gcm}^{-3}$	5-15
図 5-13 マトリックサクシオンの出力値変動（Burland 型） 供試体： $\omega=74.1\%$ 、 $\theta=65.3\%$ 、 $\rho_d=0.881\text{gcm}^{-3}$	5-16
図 5-14 マトリックサクシオンの出力値変動（Burland 型） 供試体： $\omega=66.6\%$ 、 $\theta=63.9\%$ 、 $\rho_d=0.959\text{gcm}^{-3}$	5-17
図 5-15 マトリックサクシオンの出力値変動（Burland 型） 供試体： $\omega=54.1\%$ 、 $\theta=57.9\%$ 、 $\rho_d=1.07\text{gcm}^{-3}$	5-18
図 5-16 マトリックサクシオンの出力値変動（従来型） 供試体： $\omega=142\%$ 、 $\theta=78.6\%$ 、 $\rho_d=0.556\text{gcm}^{-3}$	5-20
図 5-17 マトリックサクシオンの出力値変動（従来型） 供試体： $\omega=101\%$ 、 $\theta=70.9\%$ 、 $\rho_d=0.701\text{gcm}^{-3}$	5-21
図 5-18 マトリックサクシオンの出力値変動（従来型） 供試体： $\omega=86.7\%$ 、 $\theta=68.6\%$ 、 $\rho_d=0.791\text{gcm}^{-3}$	5-22
図 5-19 マトリックサクシオンの出力値変動（従来型） 供試体： $\omega=75.8\%$ 、 $\theta=65.9\%$ 、 $\rho_d=0.870\text{gcm}^{-3}$	5-23

6. ベントナイトのサンプリング

図 6-1	サンプリング実施位置	6-2
図 6-2	標準貫入サンプラー	6-3
図 6-3	サンプリング区間	6-3
図 6-4	含水比分布の比較	6-5
図 6-5	N 値の深度分布 (8 ヶ月間加熱を経過した時点)	6-6
図 6-6	N 値の深度分布 (ヒーターを停止後約 6 ヶ月経過時点)	6-6
図 6-7	施工時乾燥密度と N 値の関係 (1 回目)	6-7
図 6-8	施工時乾燥密度と N 値の関係 (2 回目)	6-7
図 6-9	含水比と N 値の関係 (1 回目)	6-8
図 6-10	含水比と N 値の関係 (2 回目)	6-8

7. 連成試験

図 7-1	緩衝材中の温度の経時変化 (DDA 断面)	7-7
図 7-2	ピット床面の温度の経時変化	7-8
図 7-3	ベントナイト中の温度の経時変化 (DDA 断面)	7-9
図 7-4	試験開始直後の DDA 断面の温度分布 (単位 ; °C)	7-10
図 7-5	試験開始 1 ヶ月後の DDA 断面の温度分布 (単位 ; °C)	7-11
図 7-6	試験開始 3 ヶ月後の DDA 断面の温度分布 (単位 ; °C)	7-12
図 7-7	ピット床面の間隙水圧の経時変化	7-13
図 7-8	間隙水圧の経時変化 (DDA 断面)	7-14
図 7-9	温度の経時変化 (DDA 断面)	7-15
図 7-10	DDA 断面の水分分布 (減熱試験)	7-16
図 7-11	試験開始直後の DDA 断面の含水比分布 (単位 ; %)	7-17
図 7-12	試験開始 180 日後の DDA 断面での含水比分布 (単位 ; %)	7-18
図 7-13	試験開始 250 日後の DDA 断面での含水比分布 (単位 ; %)	7-19
図 7-14	ベントナイト中の圧力の経時変化 (DDA 断面)	7-20
図 7-15	熱流束の経時変化 (DDA 断面)	7-21
図 7-16	ひずみの経時変化	7-22
図 7-17	岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH3)	7-23
図 7-18	岩盤中の温度の経時変化 (KBH2)	7-24
図 7-19	岩盤中の温度の経時変化 (KBH3)	7-25
図 7-20	岩盤中の温度の経時変化 (KBH4)	7-26
図 7-21	ひずみの経時変化 (ボアホールひずみ計)	7-27
図 7-22	ひずみの経時変化	7-28
図 7-23	岩盤亀裂の変位の経時変化	7-29
図 7-24	区間変位図 KBM4 初期値 95/11/10	7-30

8. 連成モデル、コードの妥当性の評価

図 8-1	湧水解析のフロー	8-4
図 8-2	ボアホール内の亀裂の分布状況	8-6
図 8-3	FEM メッシュ	8-7
図 8-4	解析に用いた境界条件	8-7
図 8-5	解析結果として得られた圧力水頭分布	8-8
図 8-6	ピットへの浸出量のコンター	8-8
図 8-7	有限要素解析モデルと境界条件（第 1 段階）	8-10
図 8-8	第 2 段階での解析領域	8-11
図 8-9	有限要素解析モデルと境界条件（第 2 段階）	8-12
図 8-10	初期応力のシュミットネット表示	8-16
図 8-11	解析による坑道床面におけるテストピットの変形状況	8-17
図 8-12	解析によるテストピット壁の変形状況	8-18
図 8-13	相互作用の概念	8-19
図 8-14	1 次元圧密解と THAMES による解析結果の比較	8-20
図 8-15	理論解と THAMES による解析結果の比較	8-20
図 8-16	熱～応力連成問題における周方向の応力の比較	8-21
図 8-17	軸対象熱伝導問題における解析解と THAMES による結果との比較	8-21
図 8-18	熱～水連成現象についての実験データと解析との比較	8-22
図 8-19	不飽和領域を考慮した地下水解析結果と実験データとの比較	8-22

9. まとめ

図 9-1	試験計画に対するコメント図	9-6
図 9-2	研究課題と成果	9-7

表 目 次

2. 全体工程	
表 2-1 全体工程表	2-1
3. 粒状ベントナイトの三軸試験	
表 3-1 圧密試験の条件	3-3
表 3-2 せん断試験の条件	3-3
表 3-3 試験結果一覧	3-5
表 3-4 間隙水圧と B 値の変化	3-6
4. ベントナイトの一面せん断試験	
表 4-1 試料の一覧	4-2
表 4-2 ベントナイト供試体の物性値	4-3
表 4-3 ケイ砂の粒径分布	4-3
表 4-4 飽和度別にみた各試料のせん断強度特性	4-9
5. 粒状ベントナイトの水分ポテンシャル測定	
表 5-1 供試体の含水比 (ω)、体積含水率 (θ)、乾燥密度 (ρ_d)	5-10
8. 連成モデル、コードの妥当性の評価	
表 8-1 実測された透水係数値	8-5
表 8-2 解析ケース	8-13
表 8-3 主応力値と方向	8-15
9. まとめ	
表 9-1 処分ピット周辺に発生する事象	9-5

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・検証が必要である。

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鉱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検証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、試験ビット掘削、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。試験坑道は幅5 m、奥行10 m、高さ7 mで、発破によって掘削された。試験坑道の底盤に、直径1.7 m、深さ5 mの試験ビットと各種計測機器を埋設するための14本のボーリングが掘削された。そして昨年度は、試験ビットの中に緩衝材、ヒーター、各種計測器を埋設し、コンクリートのフタを設置し、加熱試験を開始した。

本年度はヒーターによる加熱試験、ヒーターの停止後の計測（これを減熱試験と呼ぶ）を実施した。さらにヒーター停止直前と試験終了直前に緩衝材を直接サンプリングすることによってその含水比を求めた。また、原位置での試験結果の解釈に資するために、室内試験としてベントナイトの一面せん断試験と粒状ベントナイトの水分ポテンシャル測定を実施した。さらに、昨年度に継続して、DECOVALEX、VALUCLAYプロジェクトに参加し、連成モデルとコードの妥当性に関する検討を進めた。以上の研究内容をここに報告する。

2. 全体工程

平成9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、表中に示す通り連成試験、ベントナイトサンプリング、トリベックの計測等である。

連成試験は、平成8年12月17日のヒーターの運転開始から、平成9年9月1日午後1時のヒーターの運転の停止までを加熱試験とし、ヒーターの停止から平成10年3月中旬までを減熱試験とした。

連成試験中は、緩衝材中及び岩盤中のデータを連続で自動計測した。

ベントナイトのサンプリングは2回実施した。1回目は加熱試験終了直前、平成9年8月19日から8月30日まで、2回目は減熱試験終了前の平成10年2月23日から3月6日までの期間でそれぞれ実施した。

トリベックは平成9年5月27日、11月21日、平成10年2月23日の3回実施した。

原位置での試験は平成10年3月中旬をもって終了し、データ計測も合わせて終了した。

表2-1 全体工程表

調査研究項目	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1. 連成試験												
1.1 連続計測	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1.2 ベントナイトサンプリング					--							--
1.3 ベントナイト三軸試験					--	--	--	--	--	--	--	
1.4 トリベック		-						-			-	
1.5 ベントナイトのせん断試験			--	--	--	--	--	--	--	--	--	
1.6 計測データ整理	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2. 連成モデル、コードの妥当性の評価	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3. 報告書の作成								--	--	--	--	--

3. 粒状ベントナイトの三軸試験

高レベル放射性廃棄物処分場における多重バリアシステムを構成する要素の一つであるベントナイト緩衝材には、処分場閉鎖後にオーバーパックと上部埋戻し部の荷重および自重が常時荷重として作用する。さらに長期間においては、オーバーパックの腐食膨張や周辺岩盤のクリープ変形等によって発生する作用荷重も予想される。

本試験は、これらの荷重による緩衝材の力学・変形特性を調査する目的で、三軸試験を実施する。

3.1 試験方法

3.1.1 試験条件

圧密非排水試験 ($\overline{CU}$) とし、地盤工学会基準 (T523) に準拠する。直径 5cm、高さ 10cm の供試体を所定の圧密応力で圧密したのち、非排水状態で間隙水圧を測定しながらせん断する方法である。

この試験方法の特徴の一つとして、せん断試験中に間隙水圧を測定することによって有効応力の変化を把握するとともに、有効応力解析に必要な強度定数を得ることができる。

3.1.2 供試体および荷重条件

図 3-1 に試験のフローを示す。

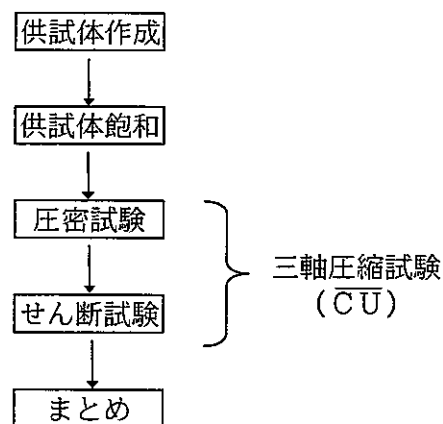


図 3-1 試験フロー

(1) 供試体の作製及び飽和

クニミネ工業社製の粒状ベントナイト (OT-9607) を用いて、含水比を 15%程度に調整したのち、内径 5cm、高さ 10cm のモールドに入れ、所定の乾燥密度 $\rho_d = 1.65 \text{g/cm}^3$ 付近になるように突き固めた。

つぎに、モールドから供試体を取り出して、飽和用のセルに入れ、水圧を加えることによって飽和させた。

供試体の飽和およびせん断試験の手順は、次のように行った。

- (1) 飽和セルから供試体を取り出し、直径、高さ、重量を測定する。
- (2) 供試体を三軸セルにセットする。供試体上下端面には、ろ紙を敷き側面には短冊状のろ紙を巻き、ゴムスリーブを被せ上下端をシールする。
- (3) 三軸セルを組立、セル内を満水にする。
- (4) 二重負圧により供試体を飽和させる。
- (5) 供試体内に背圧 (0.636MPa) を負荷し、これに合わせて側圧も増圧する。
- (6) 所定の圧密圧力で、数週間圧密を行い圧密終了を 3t 法により確認する。
- (7) 排水バルブを閉じ、非排水状態で拘側圧を下げ間隙水圧を測定する。
- (8) B 値を測定する
- (9) 拘側圧を圧密時の圧力まで戻した後、0.01 (%/min) の速度でせん断を開始する。
- (10) 軸ひずみが、15 (%) を超えた時点でせん断を終了する。
- (11) 供試体を取り出し、写真撮影後、供試体を乾燥させ乾燥重量を測定する。

注) 二重負圧法は真空圧を利用し、供試体間隙及び排水経路をいったん真空状態にし、真空を解除すると同時に、空隙を水で置き返る方法である

試験手順は、

- ① 供試体上下部の排水経路から水タンクを介し、 $-0.4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ の負圧を与える。
- ② $0.4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ の差圧を保ちながら、供試体内を $-1.0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ セル圧を $-0.6 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 徐々に下げ 24 時間放置する。
- ③ 水タンク下部より泡が出なくなるのを確認し、負圧を徐々に解除し、供試体内を $-0.4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ セル圧を $0.0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ に戻す。
- ④ セル内の水を非排水にし、供試体内圧を $0.0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ にし、24 時間放置する。

(2) 三軸試験

飽和された供試体をセルから取り出し、三軸試験圧力室内にセットし、圧密試験を実施した。

圧密応力は試験前の緩衝材の膨潤圧 $P_s=0.9\text{MPa}$ 、オーバーバックと上部埋戻しおよび緩衝材自重 ($\Sigma P_z \approx 0.3\text{MPa}$)、さらに岩盤のクリープによる荷重等を勘案して、表 3-1 に示すように設定した。

表 3-1 圧密試験の条件

項 目	条件			
圧密応力（セル圧力） （MPa）	(ケ-71) 0.9	(ケ-72) 1.4	(ケ-73) 1.9	(ケ-74) 2.9
測定項目	経過時間における排水量と軸変位量			
試験の終了	一時圧密が終了するまでとする			
間隙圧係数 B	せん断試験前の値を採用し、 $B \geq 95\%$			

圧密試験終了後、圧密試験と同じセル圧の一定な条件でせん断試験を実施する。
せん断試験の条件は表 3-2 に示す。

表 3-2 せん断試験の条件

項 目	条 件	備 考
制御方式	ひずみ制御	
ひずみ速度	0.01%/min	ひずみ速度は一定になるように連続的に行う
測定項目	軸圧縮力、軸変位量および間隙水圧	
試験終了	次のいずれの項目を該当するものとする。 ① 荷重計の読みが最大となってから引き続き軸ひずみが3%以上生じたとき。 ② 荷重計の読みが最大値の 2/3 程度に達したとき。 ③ 軸ひずみが 15%に達したとき。	

図 3-2 に三軸試験装置および計測器のシステム図を示す。

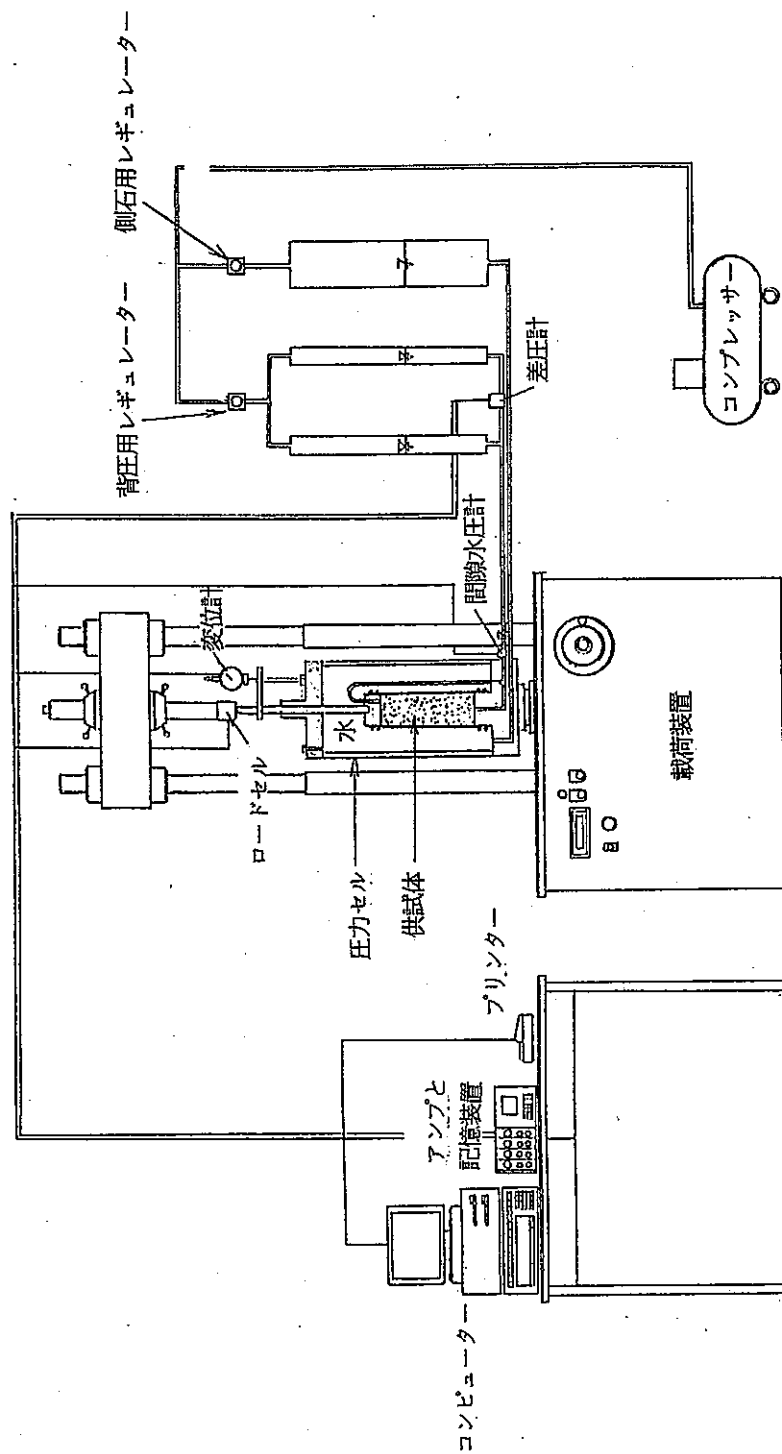


図 3-2 三軸試験装置および計測器のシステム図

3.2 試験結果

表 3-3 に試験結果一覧を示す。

供試体の湿潤密度は $\rho_t = 2.03 \sim 2.05 \text{ g/cm}^3$ 、乾燥密度は $\rho_d = 1.63 \sim 1.66 \text{ g/cm}^3$ で、目標の $\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 付近になっている。

含水比は $w = 23 \sim 25\%$ 、飽和度は計算上 100% 以上になっており、ほとんど飽和された状態を示す。

表 3-3 試験結果一覧

供試体番号	CU-1	CU-2	CU-3	CU-4
圧密応力 (MPa)	0.90	1.40	1.90	2.90
供試体高さ (cm)	10.02	10.15	10.04	10.03
供試体直径 (cm)	5.00	5.00	5.00	5.00
湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	2.041	2.027	2.045	2.041
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.629	1.626	1.659	1.648
含水比 (%)	25.3	24.6	23.3	24.2
間隙比	0.657	0.661	0.627	0.638
飽和度 (%)	103.9	100.5	100.3	102.4
最大軸差応力 (MPa)	0.786	0.962	1.223	1.668
軸ひずみ (%)	10.181	15.082	14.237	14.980
間隙水圧 (MPa)	-0.047	0.274	0.402	0.602

間隙比、飽和度は土粒子の密度 $\rho_s = 2.70 (\text{g/cm}^3)$ として算出した。

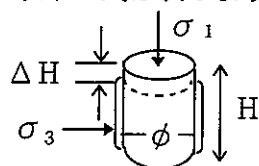
表 3-4 に間隙水圧と B 値の変化を示す。

いずれの供試体においてもせん断試験前に比排水状態で B を測定し、1 日後に B=95% に達した。

表 3-4 間隙水圧と B 値の変化

時間 t (分)	増分拘束圧 (MPa)	間隙水圧変化量 (MPa)				B 値			
		CU-1	CU-2	CU-3	CU-4	CU-1	CU-2	CU-3	CU-4
0.1	-0.29	-0.21	-0.22	-0.20	-0.19	0.72	0.75	0.69	0.65
0.15	-0.29	-0.25	-0.23	-0.23	-0.23	0.83	0.79	0.79	0.78
0.25	-0.29	-0.26	-0.25	-0.24	-0.24	0.88	0.83	0.82	0.82
0.5	-0.29	-0.27	-0.26	-0.25	-0.25	0.92	0.87	0.85	0.85
1	-0.29	-0.28	-0.26	-0.26	-0.25	0.94	0.88	0.88	0.85
2	-0.29	-0.28	-0.27	-0.27	-0.26	0.94	0.90	0.91	0.88
4	-0.29	-0.28	-0.27	-0.27	-0.27	0.95	0.92	0.92	0.92
8	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.94	0.94	0.95
15	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.95	0.95	0.95
30	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.95	0.95	0.95
60	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.96	0.95	0.95
120	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.96	0.95	0.95
240	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95
480	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95
900	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95
1440	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95

図 3-3、3-4 にせん断応力円を示す。
なお、以下の式は次のように定義されている。



軸ひずみ : $\varepsilon_1 = \Delta H / H \times 100$

軸差応力 : $q = \sigma_1 - \sigma_3$

有効拘束圧 : $\sigma_3' = \sigma_3 - u$

平均主応力 : $p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3') / 3$

せん断応力 : $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$

間隙比 : $e = \rho_s / \rho_d - 1$

ρ_s : 土粒子の密度

ρ_d : 乾燥密度

飽和度 : $S_r = \rho_w / e$

最大軸差応力時と最大応力比時に対する応力円から推定した摩擦角はほぼ同等で、全応力に対する摩擦角 $\phi=14.1\sim14.5^\circ$ 、有効応力時に対する有効摩擦角 $\phi'=16.9^\circ$ になっている。

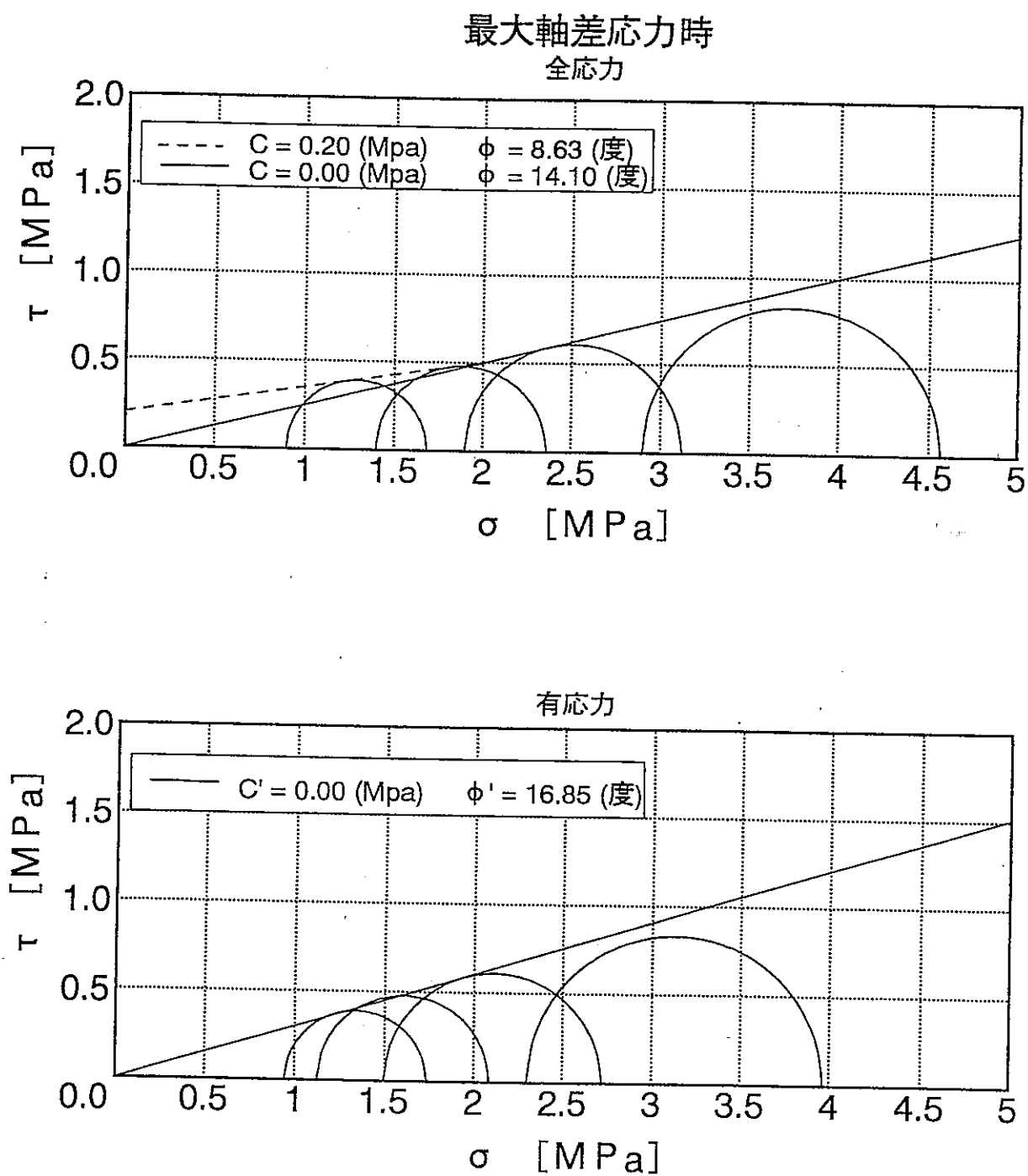


図 3-3 せん断応力円（最大軸差応力時）

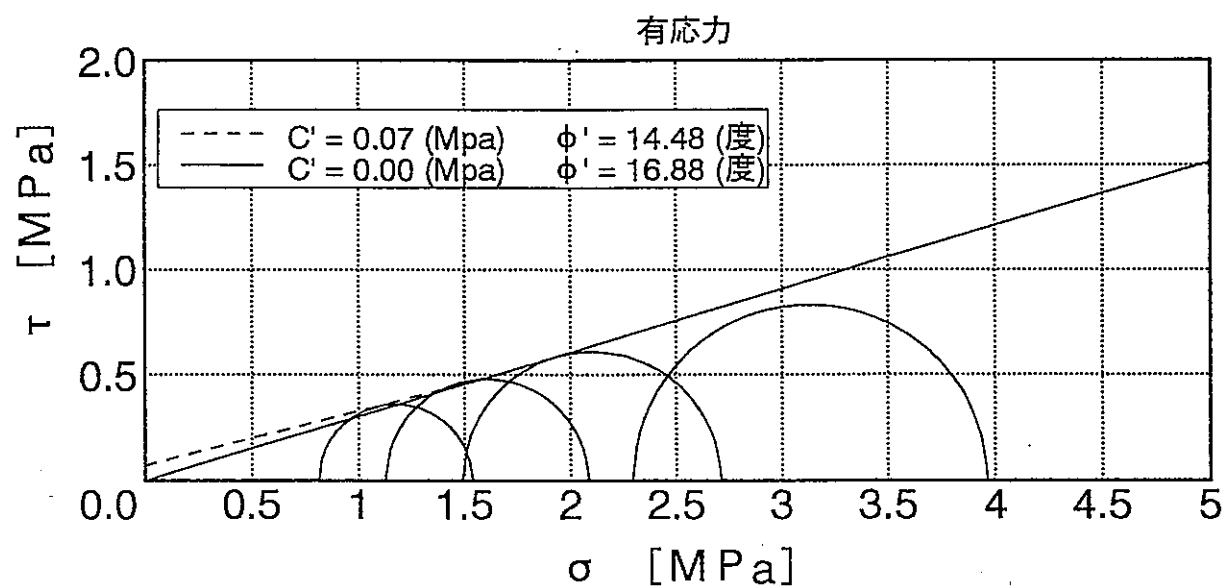
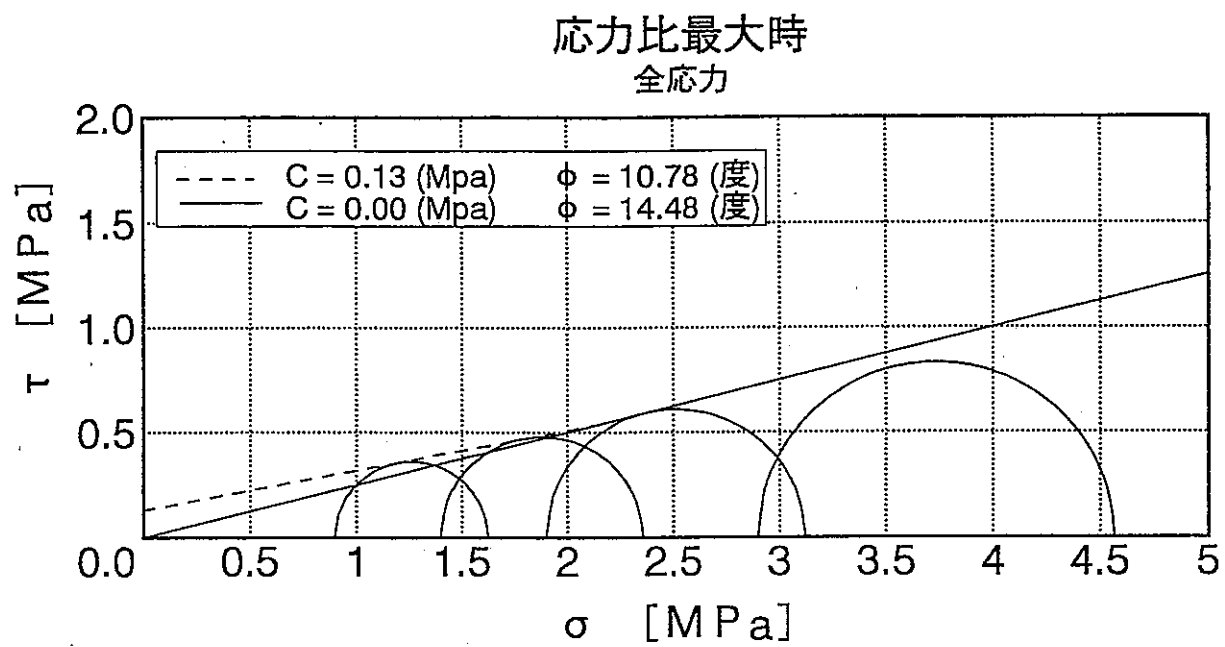


図 3-4 せん断応力円 (最大軸応力比時)

図 3-5 に軸差応力と平均有効応力の関係を示す。

軸差応力と平均有効応力を直線で結んで、M 値を求めると $M=0.64$ になる。

また、各供試体の応力経路から推測すると、CU-1 は過圧密状態、CU-2,3 は正規圧密状態、また CU-4 はやや未圧密状態を示す。

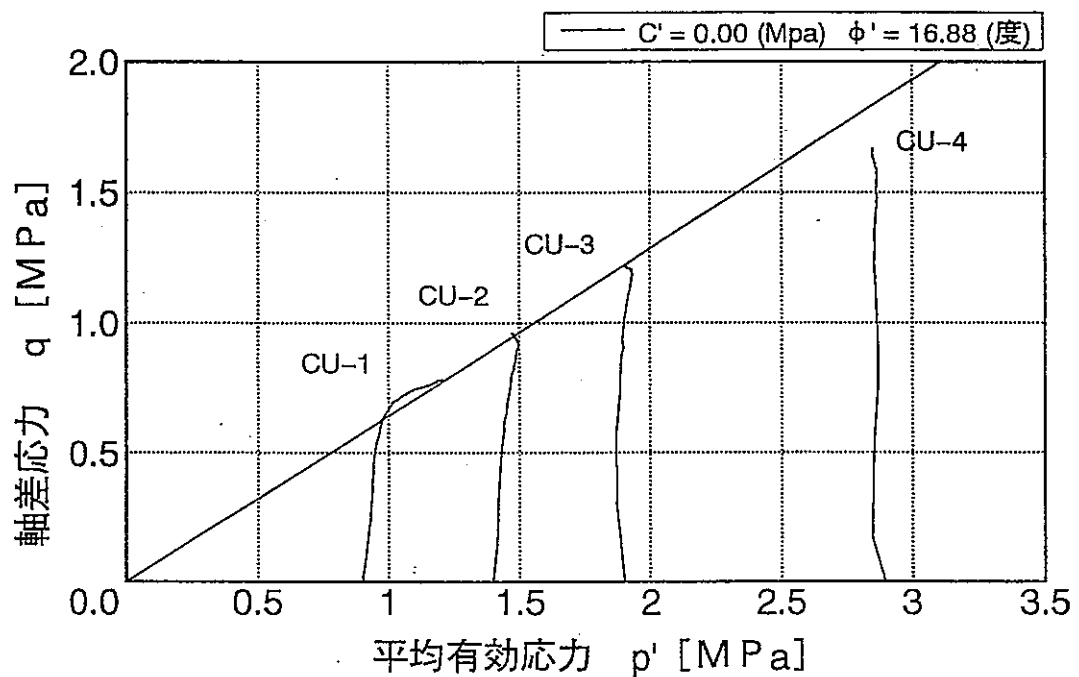


図 3-5 軸差応力と平均有効応力の関係

図 3-6～7 に正規化有功拘束圧 (σ_3'/σ_{30}') と (q/p') 、 (σ_1'/σ_3') の関係を示す。拘束圧条件と関係なく、いずれの供試体もほぼ同じ傾きを示す。

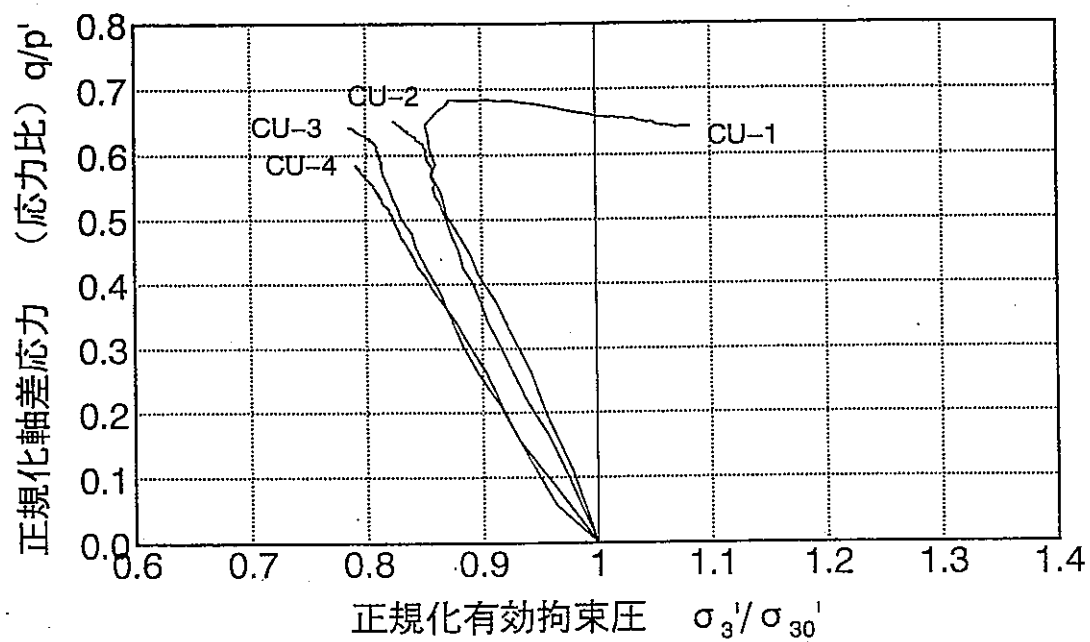


図 3-6 正規化有効拘束圧 (σ_3'/σ_{30}') と (q/p') の関係

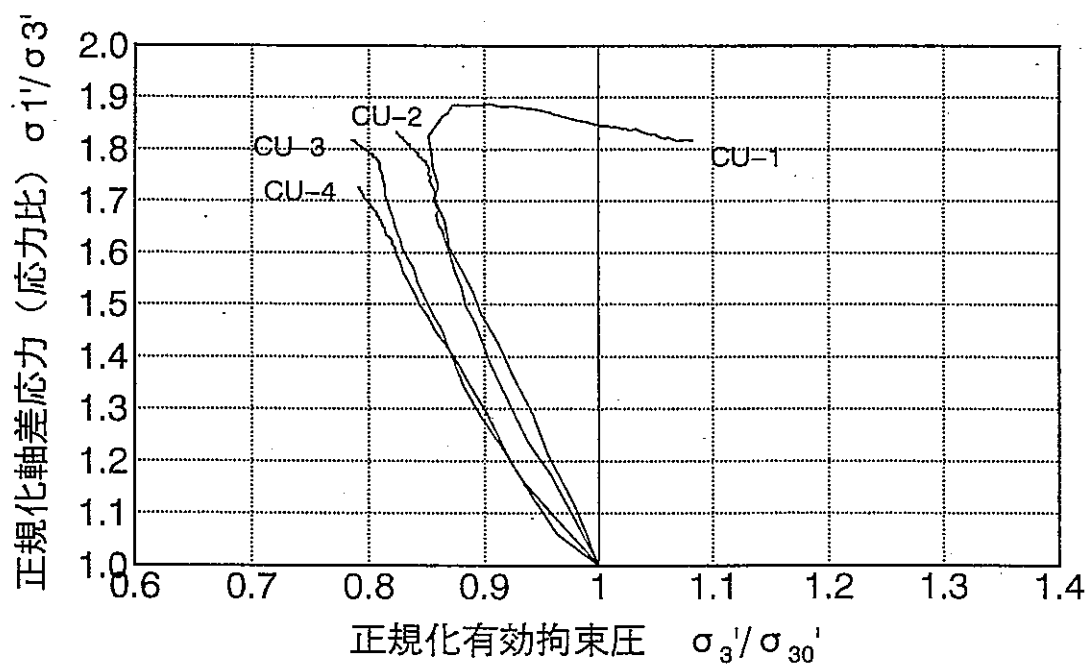


図 3-7 正規化有効拘束圧 (σ_3'/σ_{30}') と (σ_1'/σ_3') の関係

3.3 まとめ

緩衝材の三軸試験結果から以下のようにまとめられる。

- ① クニゲル V1 単体の緩衝材（初期含水比 $w=15\%$ 程度、乾燥密度 $\rho_d=1.63\sim 1.66\text{g/cm}^3$ ）の圧密非排水せん断試験 CU において、せん断前のB値は95%となり、供試体はほとんど飽和している状態を示す。
- ② せん断強度常数は全応力における摩擦角は $\phi=14.1\sim 14.4^\circ$ （平均 14.3° ）、また有効応力では $\phi'=16.9^\circ$ になっている。

せん断強度を算定すると次のようになる。

- ・ 全応力 : $\tau = \sigma \times \tan(\phi) = 0.25 \times \sigma$ 、 ($\phi=14.3^\circ$)
- ・ 有効応力 : $\tau' = \sigma' \times \tan(\phi') = 0.30 \times \sigma'$ 、 ($\phi'=16.9^\circ$)

ここに、 σ 、 σ' はそれぞれ全鉛直荷重、有効鉛直荷重である。

- ③ 各供試体の応力経路から、圧密応力 0.9MPa の場合は過圧密状態、圧密応力 1.4MPa 、 1.9MPa の場合は正規圧密、また圧密応力 2.9MPa ではやや未圧密状態が推測される。

4. ベントナイトの一面せん断試験

緩衝材の施工において、原位置締め固め方式とブロック積み重ね方式の2方式が考えられている。原位置締め固め方式の場合、隙間も生じず、緩衝材は一体となるため耐久強度も期待できるが、施工の機械化が困難であったり、施工期間が長期化することが予想される。一方、ブロック積み重ね方式は、あらかじめ作成したブロックを積み重ねていくため、施工能率が大幅に向上することが期待できる。この場合、ブロックのうち継ぎ目が弱面となったり、隙間が生じたりする危険性があるが、ベントナイトブロックの入り口を密封しておけば、浸透水によりベントナイトが膨潤し膨潤圧が発生してブロック間が圧着し、隙間がなくなると同時にうち継ぎ目の強度も上昇することが予想される。

したがって、ここでは、ブロック積み重ね方式を対象にブロックおよびブロックのうち継ぎ目のせん断力学特性について一面せん断試験により調べるとともに、ベントナイトの膨潤によるブロック圧着の効果について調べた。また、経済性、熱伝導性を高めるため、ベントナイトにケイ砂を混合したものについて、そのせん断力学特性をベントナイトのみの場合と比較検討した。

4.1 試料

試料の形状は、図4-1に示すように、直径5cm、厚さ2cmの一体型試料、直径5cm、厚さ1cmの試料を重ねた分離型試料、分離型試料を飽和セル内で膨潤圧により圧着させて一体化した圧着型試料の三種類である。これらの試料はそれぞれ、ブロックのせん断力学特性、ブロックうち継ぎ目のせん断力学特性、ベントナイトの膨潤による圧着効果を調べるために準備したものである。圧着型試料に作用した膨潤圧は約4MPaであった。また、それぞれの種類の試料に対して、飽和度50%および100%の試料、ケイ砂を含む試料および含まない試料を準備し、表4-1に示す合計10種類の試料に対してせん断試験を行った。以下、ケイ砂を含まない試料をベントナイト試料、含む試料を砂混じり試料と呼び区別することとする。なお、圧着型試料については、膨潤により圧着されるため飽和度100%の試料のみである。

飽和度50%のベントナイト試料は、粉末クニゲルV1を密度 1.8g/cm^3 になるよう材料試験機を用いて整形セル内で加圧固化させて作成した。一方、飽和度100%のベントナイト試料は、飽和度50%の試料を飽和セルに入れ、水を約1ヶ月間一定圧で注入し飽和させて作成した。ベントナイト試料の飽和度別の物性値を表4-2に示す。また、砂混じり試料は、ベントナイトとケイ砂を重量比で、7:3の割合で混合したもので、試料の作成方法はベントナイト試料と同様である。使用したケイ砂は、5号ケイ砂と3号ケイ砂を重量比で、1:1の割合で混合したものである。そのケイ砂の粒径分布を、表4-3に示す。

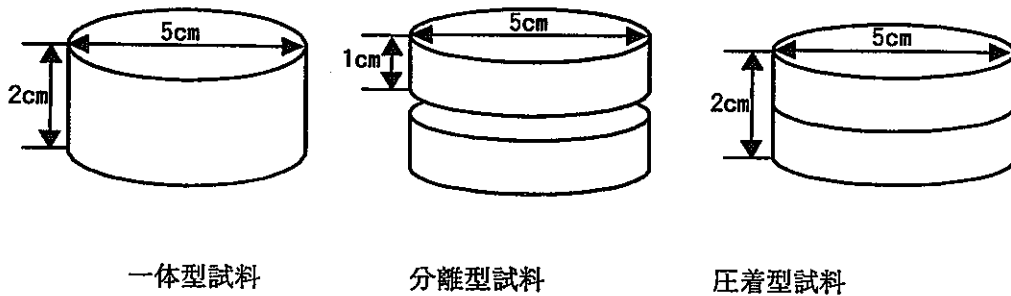


図 4-1 試料模式図

表 4-1 試料の一覧

飽和度	材 料	一体型	分離型	圧着型
50%	ベントナイト	○	○	—
	砂混じり	○	○	—
100%	ベントナイト	○	○	○
	砂混じり	○	○	○

表4-2ペントナイト供試体の物性値

飽和度	ヤング率 (MPa)	ポアッソン比	一軸圧縮強度 (MPa)
50%	808.0	0.35	5.4
100%	147.4	0.36	2.2

表4-3 ケイ砂の粒径分布

粒径(mm)	3号(%)	5号(%)	3号と5号の混合
0.075	0.0	0.0	0.0
0.250	0.0	5.0	2.5
0.425	0.0	38.0	19.0
0.850	0.0	99.0	48.5
2.000	90.0	100.0	95.0
4.750	100.0	100.0	100.0

4.2 セン断試験

せん断試験は、図4-2に示すような一面せん断試験機（圓井製作所製）を用いて、垂直荷重を一定に保ちながら、一定のせん断変位速度0.05mm/minでせん断変位2mmまでせん断した。設定した垂直応力は0.2MPa、1MPa、2MPa、3MPaの4種類である。また、せん断試験中、垂直変位、垂直荷重、せん断変位、せん断荷重を5秒毎にコンピュータに取り込み記録した。なお、せん断面は、一体型試料については試料の中央断面に、分離型、圧着型試料についてはそれぞれ分離面、圧着面に一致させている。

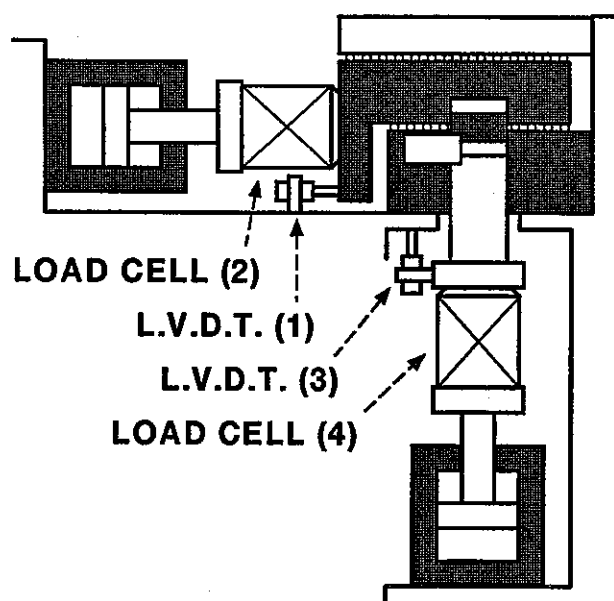


図4-2 セン断試験機

4.3 実験結果および考察

4.3.1 試料形状とせん断力学特性

(1) 水飽和度50%の場合

飽和度50%の一体型試料および分離型試料の各垂直応力に対するせん断試験結果をまとめたものをそれぞれ図4-3および図4-4に示す。せん断強度に着目すると、一体型試料のピークせん断強度、残留せん断強度ともに分離型試料のものより大きいことがわかる。すなわち、ベントナイトブロックのせん断強度はブロックのうち継ぎ目に比べて十分に大きな強度を持っていることがわかる。次に、垂直変位に着目すると、一体型試料ではダイラタンシーが発生しているのに対し、分離型試料ではダイラタンシーが見られない。また、一体型試料で見られたダイラタンシー量は、垂直応力が大きくなるにしたがって小さくなる傾向がみられる。

以上のことから、ベントナイトの水飽和度が50%程度であれば、ベントナイト緩衝材の変形は、ブロックのうち継ぎ目で発生する可能性が大きいと考えられる。また、その変形が純粹に滑り変形であれば、うち継ぎ目が開口する可能性は小さいものと考えられるが、万一、ベントナイトブロックが破壊するような場合には開口亀裂が発生する可能性が考えられる。

また、一体型、分離型それぞれの試料のせん断強度特性を図4-5に示す。図4-5より、それぞれの試料に対して粘着力、摩擦角を求めた結果、ピーク強度に対して一体型試料の粘着力は2.61MPa、摩擦角は18.1°、分離型試料の粘着力は1.46MPa、摩擦角は30.3°となった。また、残留強度に対して一体型試料の粘着力は0.15MPa、摩擦角は33.8°、分離型試料の粘着力は0.21MPa、摩擦角は23.4°となった。

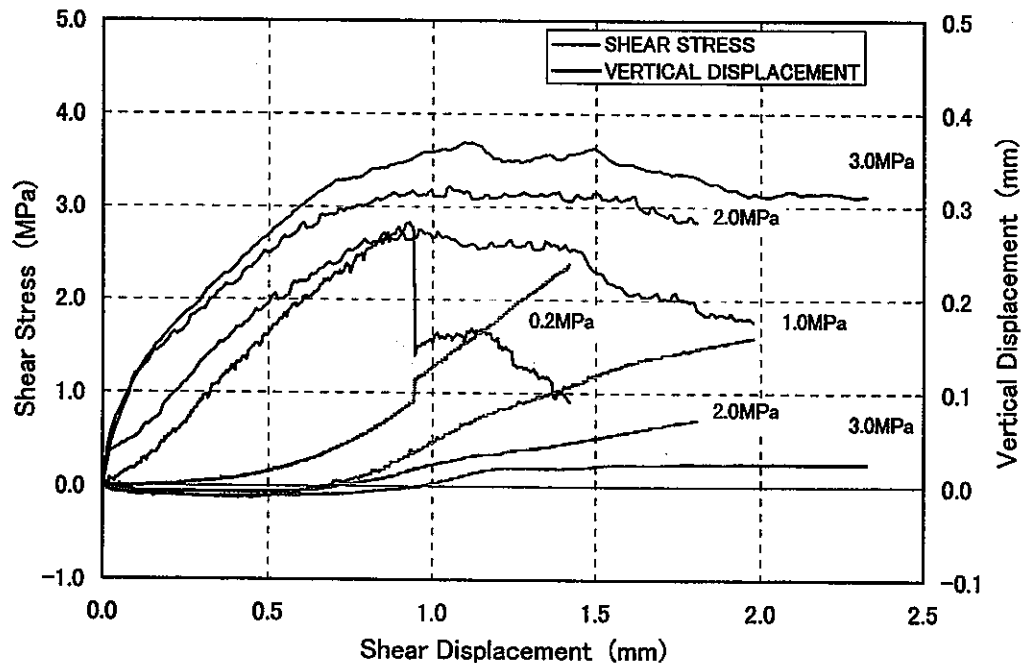


図4-3 一体型試料のせん断試験結果（飽和度50%、垂直応力0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）

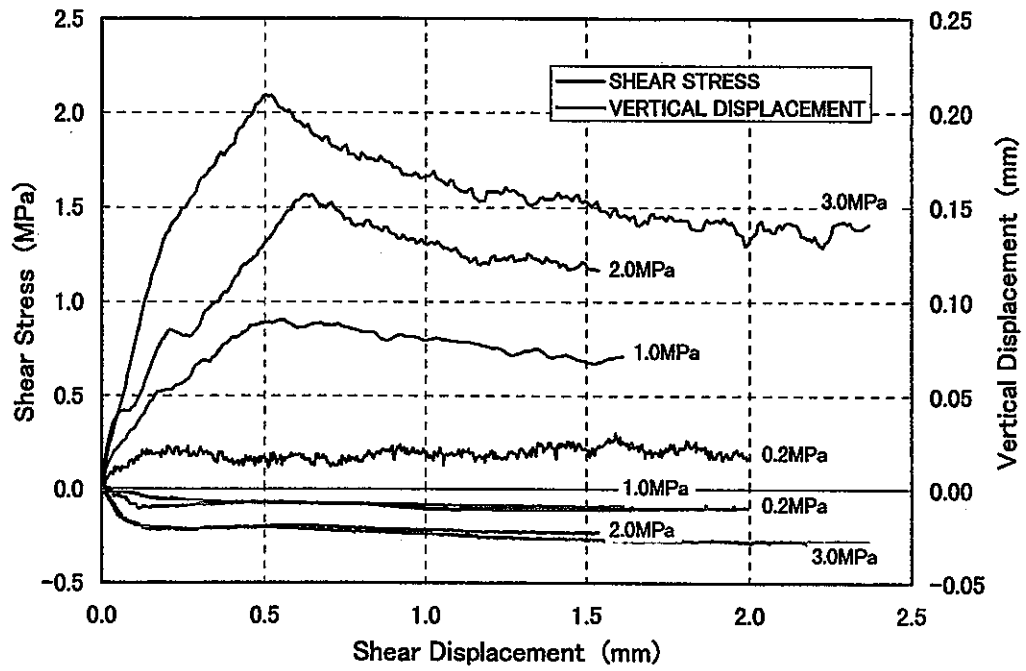


図4-4 分離型試料のせん断試験結果（飽和度50%、垂直応力0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）

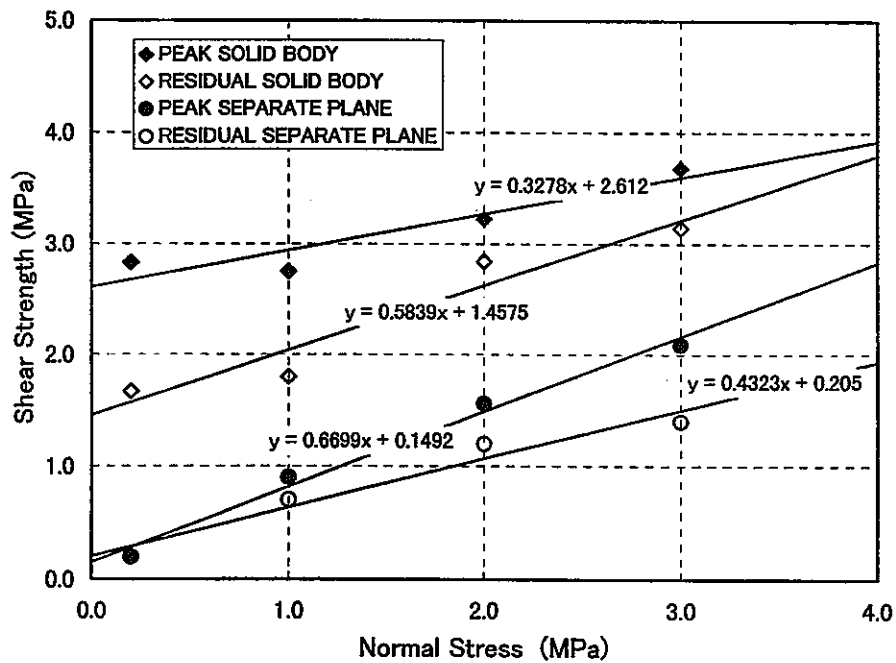


図4-5 飽和度50%試料のせん断強度特性（ピーク強度、残留強度）

(2) 水飽和度100%の場合

飽和度100%の一体型試料、分離型試料および圧着型試料の各垂直応力に対するせん断試験結果をまとめたものをそれぞれ図4-6、図4-7、図4-8に示す。まず、せん断強度に着目すると、一体型試料のピークせん断強度、残留せん断強度は、いずれも分離型試料および圧着型試料のものより大きいことがわかる。すなわち、飽和度が上昇してもベントナイトブロックのせん断強度はブロックのうち継ぎ目に比べて十分に大きな強度を持っていることがわかる。また、垂直応力0.2MPaの場合、圧着型試料のピークせん断強度は一体型のものとほとんど同じで分離型試料の約4倍、残留せん断強度も分離型試料の約2倍となり、圧着の効果が顕著にみられた。これに対し、垂直応力が1MPa以上の場合、分離型試料と圧着型試料のせん断試験結果がほとんど同じとなった。また、垂直応力0.2MPaの場合にみられた高いピークせん断強度も垂直応力1MPaの場合のピークせん断強度とほとんど同じである。したがって、施工後、浸透水によりベントナイト緩衝材の飽和度が上昇し、それに伴ってベントナイトの膨潤圧が発生してうち継ぎ目は圧着されることが想定されているが、ベントナイト緩衝材のうち継ぎ目に作用する垂直応力が1MPa以下でないと顕著な圧着の効果が見られないことが予想される。

次に、垂直変位に着目すると、一体型試料では垂直応力が2MPa以下でダイラタンシーが発生し、垂直応力が3MPaになるとダイラタンシーが発生しなくなった。また、分離型試料ではダイラタンシーが見られなかった。これに対し、圧着型試料では、圧着の効果が顕著にみられた垂直応力が0.2MPaの場合にダイラタンシーがみられたが、この場合、残留強度状態に入るとダイラタンシーの増加が止まるのが確認できた。また、垂直応力が1MPa以上の場合にはダイラタンシーは見られなかった。

以上のことから、ベントナイトの水飽和度が100%の場合においても、ベントナイト緩衝材の変形はブロックのうち継ぎ目で発生する可能性が大きく、ベントナイトブロックが破壊するような場合には開口亀裂が発生する可能性が考えられる。しかし、亀裂面に作用する垂直応力が3MPaを超えるような場合には、亀裂が開口する可能性は少ないものと考えられる。

一体型、分離型、圧着型それぞれの試料のせん断強度特性を図4-9に示す。水飽和度100%の場合、ベントナイトの一軸圧縮強度が2.2MPaであることを考えると、垂直応力が2MPaおよび3MPaのせん断試験結果は、垂直応力による試料内部破壊の影響を受け、純粋なせん断強度を反映していると考えにくいことから、垂直応力0.2MPaおよび1MPaのせん断試験結果からそれぞれの試料の粘着力および摩擦角を求めた。その結果、ピーク強度に対して一体型試料の粘着力は0.81MPa、摩擦角は35.9°、分離型試料の粘着力は0.06MPa、摩擦角は24.8°、圧着型試料の粘着力は0.57MPa、摩擦角は9.9°となった。また、残留強度に対して一体型試料の粘着力は0.89MPa、摩擦角は17.4°、分離型試料の粘着力は0.06MPa、摩擦角は23.6°、圧着型試料の粘着力は0.36MPa、摩擦角は12.0°となった。この結果を、水飽和度50%の場合と併せて、表4-4に示す。

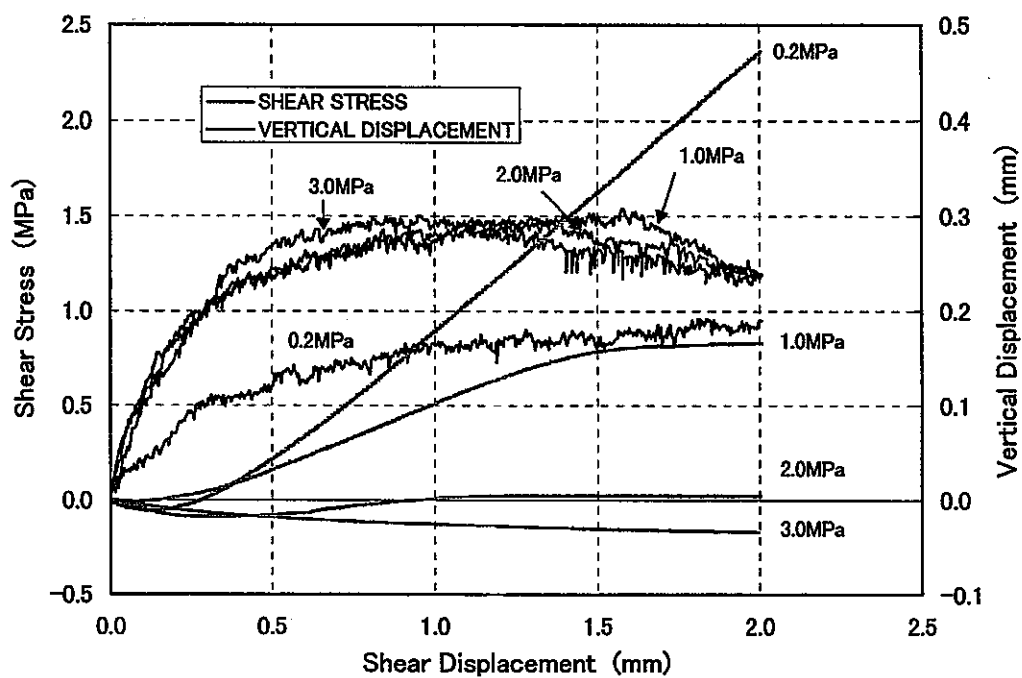


図4-6 一体型試料のせん断試験結果（飽和度100%、垂直応力0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）

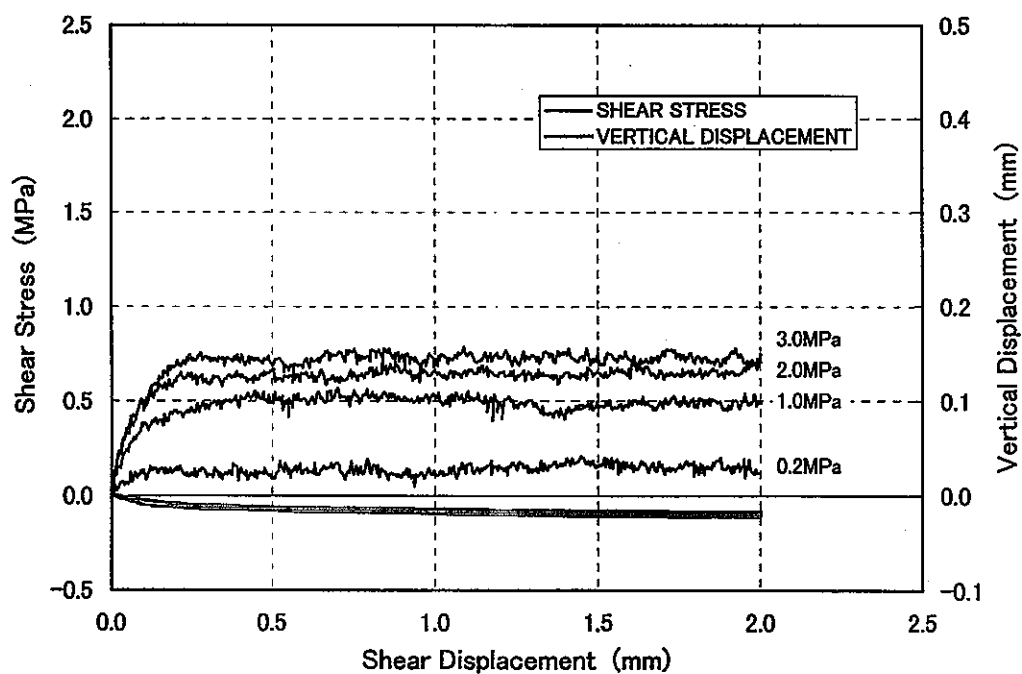


図4-7 分離型試料のせん断試験結果（飽和度100%、垂直応力0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）

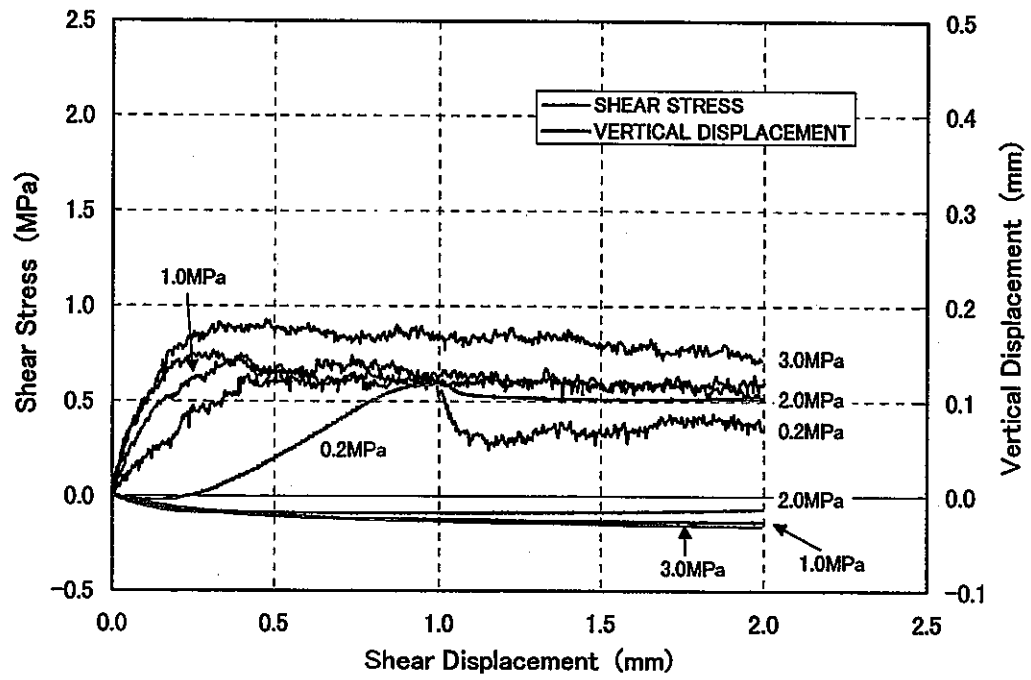


図4-8 圧着型試料のせん断試験結果（飽和度100%、垂直応力0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa）

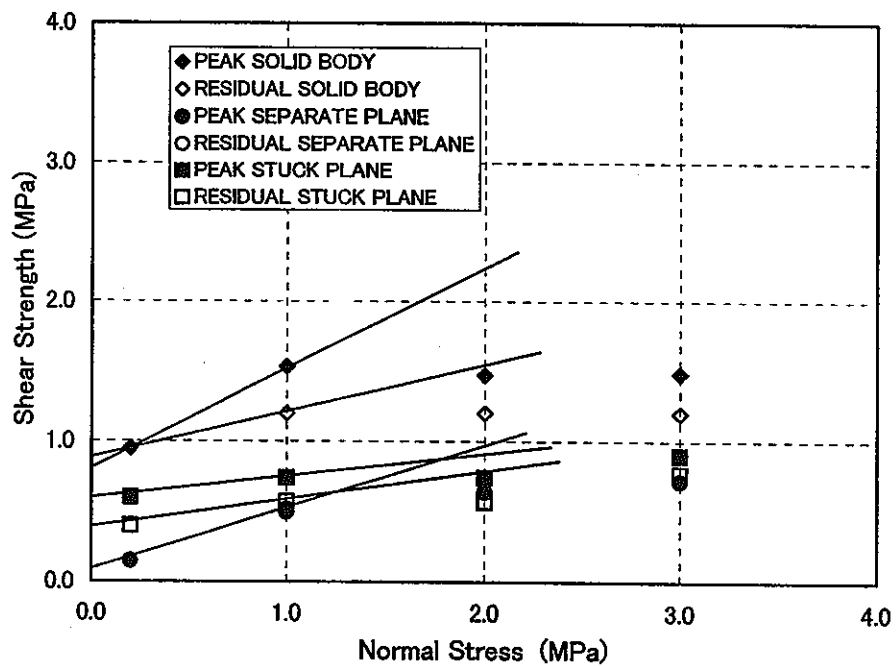


図4-9 飽和度100%試料のせん断強度特性（ピーク強度、残留強度）

表4-4 飽和度別にみた各試料のせん断強度特性

飽和度	試料	ピーク強度		残留強度	
		粘着力 (MPa)	摩擦角 (Degree)	粘着力 (MPa)	摩擦角 (Degree)
50%	一体型	2.61	18.1	1.46	30.3
	分離型	0.15	33.8	0.21	23.4
100%	一体型	0.81	35.9	0.89	17.4
	分離型	0.06	24.8	0.06	23.6
	圧着型	0.57	9.9	0.36	12.0

4.3.2 水飽和度とせん断力学特性

一体型試料および分離型試料について、飽和度の違いによるせん断力学特性の違いを検討した。試験は、垂直応力が 0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPa の場合についての4つの場合について実施した。一体型試料について、垂直応力が 1.0MPa の場合の飽和度によるせん断試験結果の比較を図4-10に示す。実験結果では、どの垂直応力の場合も、飽和度50%の場合のピークせん断強度、残留せん断強度はいずれも飽和度100%のものの約2倍であることがわかった。また、ダイラタンシー量についてみると、垂直応力が0.2MPaおよび1MPaと小さい場合、飽和度50%と飽和度100%とではダイラタンシー量がほぼ同じであるか、むしろ飽和度100%の方が大きいダイラタンシー量を示すことがわかった。これに対して、垂直応力が2MPa、3MPaと大きくなると飽和度50%の方が大きいダイラタンシー量を示した。

分離型試料についても、垂直応力が0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPaの各場合について飽和度を変化させたせん断試験を実施した。垂直応力が1.0MPaの場合の結果を図4-11に示す。実験結果よりせん断強度はいずれの垂直応力の場合についてもピークせん断強度、残留せん断強度とも飽和度50%のものの方が飽和度100%のものより大きい、垂直応力が大きくなるほど、その差が大きくなることがわかった。また、飽和度50%の試料では、垂直応力が大きくなるほど顕著なピーク強度が観察されるのに対し、飽和度100%の試料では、いずれの垂直応力においても明瞭なピークせん断強度が観察されなかった。さらに、分離型試料ではいずれの場合についてもダイラタンシーは発生しなかった。

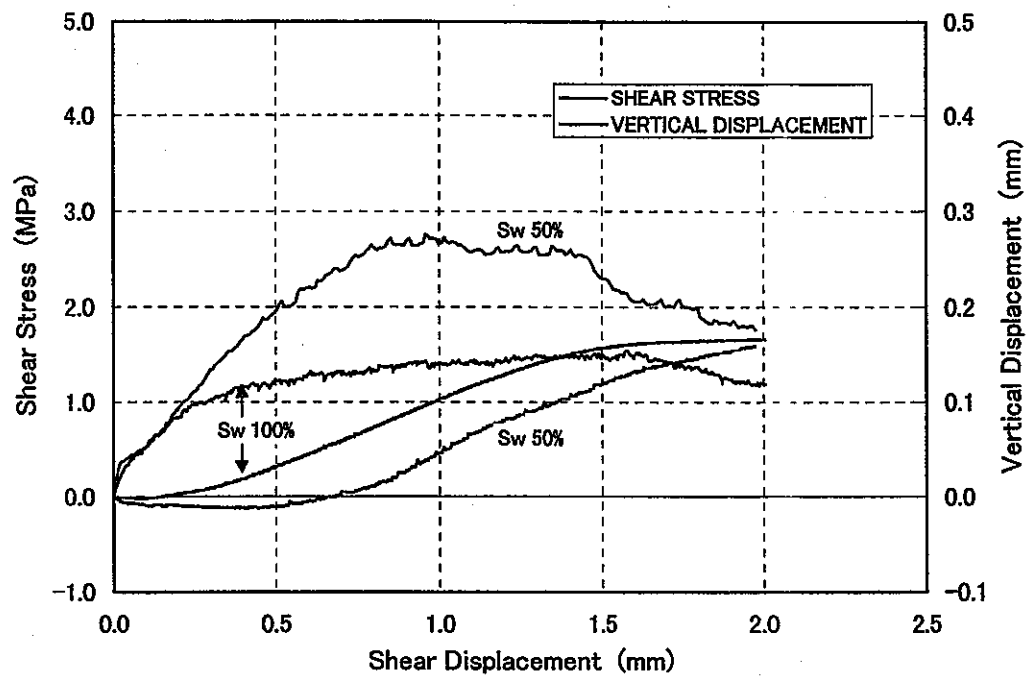


図4-10 一体型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較（垂直応力1.0MPa）

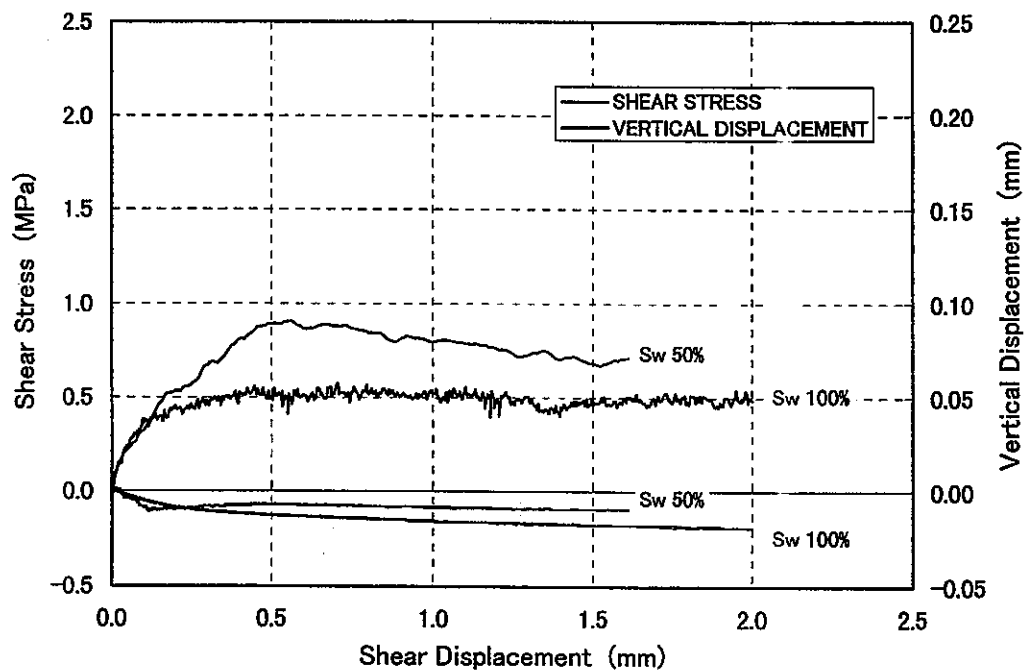


図4-11 分離型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較（垂直応力1.0MPa）

4.3.3 砂混じり試料のせん断力学特性

飽和度50%の一体型試料と分離型試料についてベントナイト試料と砂混じり試料のせん断試験結果を比較したものを図4-12および図4-13に示す。また、飽和度100%の一体型、分離型、圧着型についてベントナイト試料と砂混じり試料のせん断試験結果を比較したものを、図4-14、図4-15、図4-16に示す。なお、いずれの場合においても、垂直応力は0.2MPaである。

まず、せん断強度についてみると、飽和度に係わらず、一体型試料では砂混じり試料のピークせん断強度、残留せん断強度はともにベントナイト試料の約2分の1であることがわかる。また、分離型試料では、砂混じり試料のピークせん断強度、残留せん断強度はともにベントナイト試料のものとほぼ同じ大きさであることがわかる。圧着型試料については、砂混じり試料でも若干の圧着効果が見られるものの、ベントナイト試料ほど顕著ではない。また、圧着効果が見られるせん断変位はベントナイト試料の約2分の1となっている。このように、砂混じり試料のせん断強度特性の劣化の原因の一つとして、砂粒子とベントナイトとの変形係数の差が大きいため砂粒子のエッジ部で大きな応力集中が発生するためであると考えられる。

次に、ダイラタンシー挙動についてみると、飽和度50%では一体型試料についてダイラタンシーが見られるがその大きさは、ベントナイト試料と砂混じり試料とでは大差が無い。一方、飽和度100%試料では、一体型試料および圧着型試料にダイラタンシーが見られるが、砂混じり試料のダイラタンシー量は、ベントナイト試料のダイラタンシー量の約2分の1となっていることがわかる。

以上のことから、砂混じり試料は、コスト面や熱伝導性の面で有利であるとされているが、強度的にはベントナイト試料に比べて不利であることがわかる。

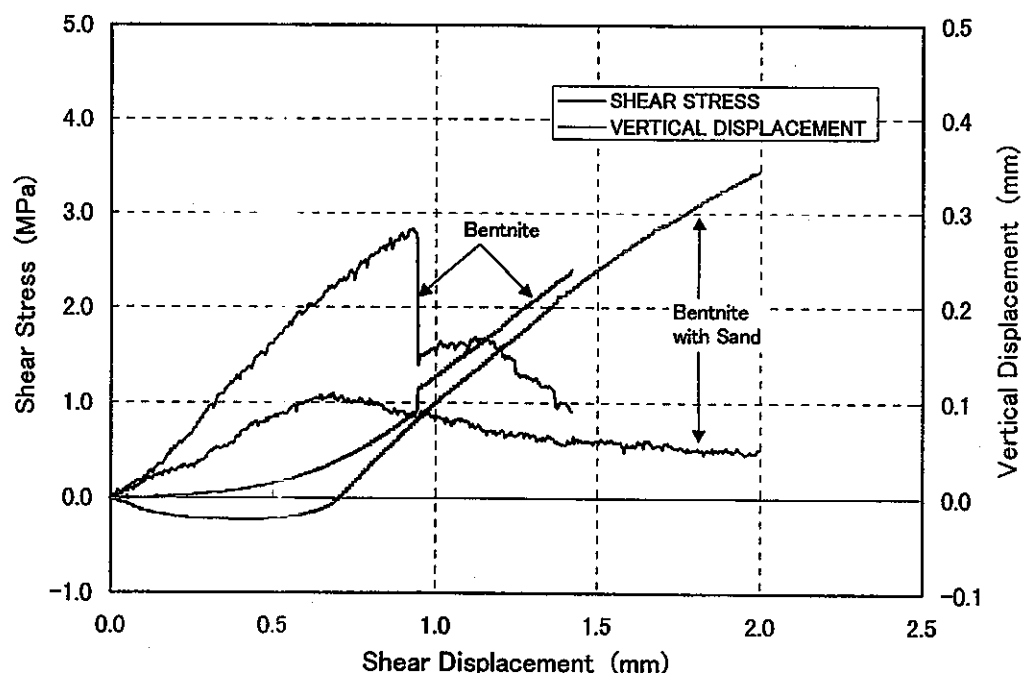


図4-12 砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度50%、一体型、垂直応力0.2MPa）

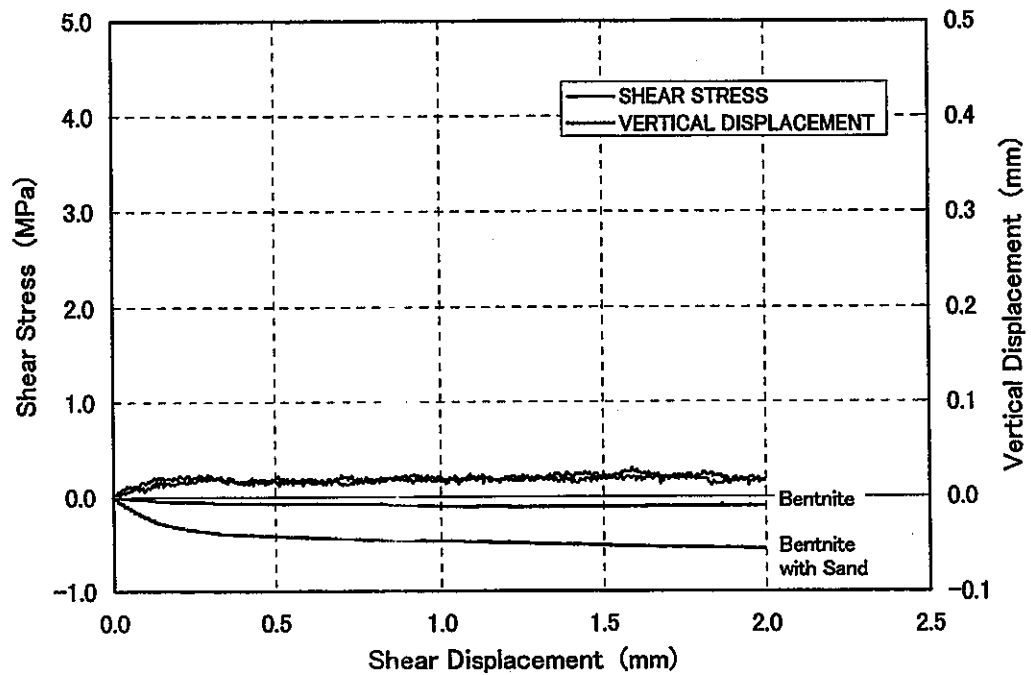


図4-13 砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度50%、分離型、垂直応力0.2MPa）

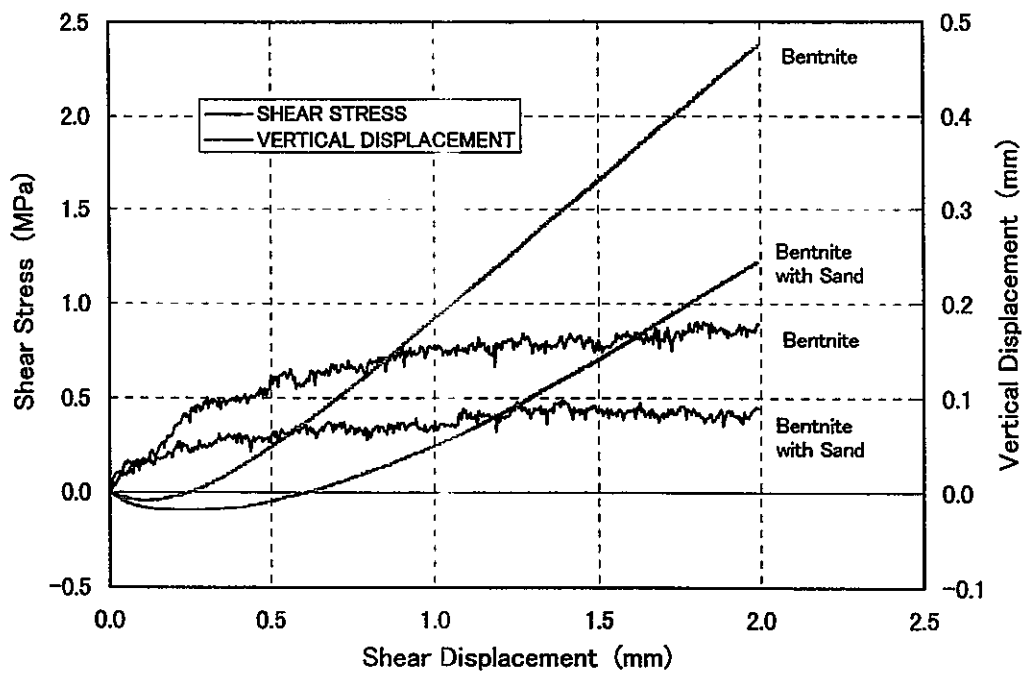


図4-14 砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度100%、一体型、垂直応力0.2MPa）

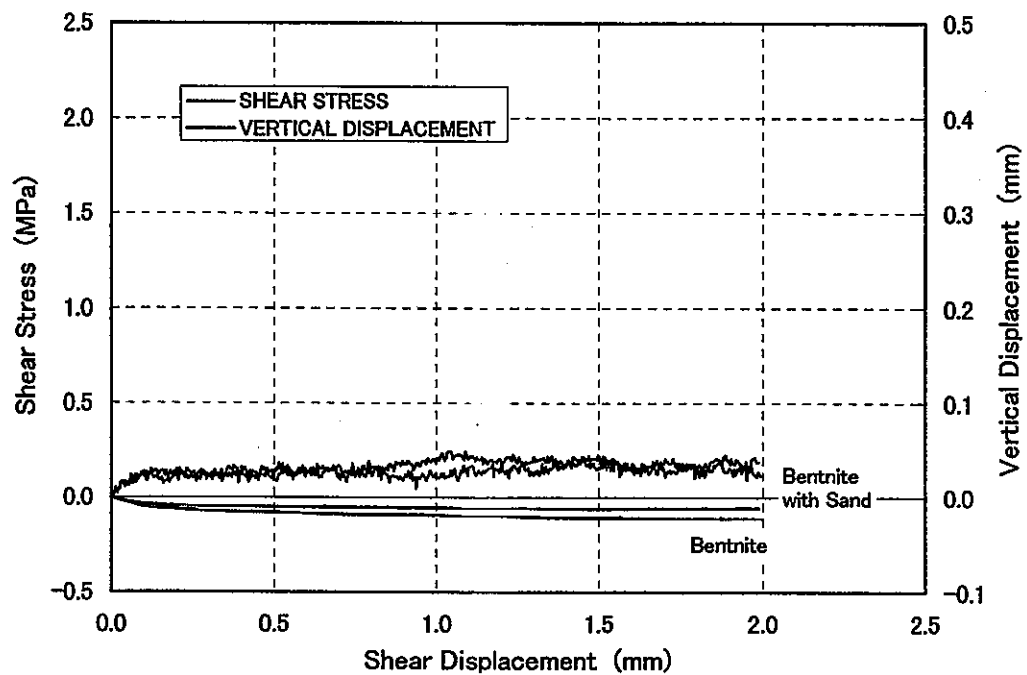


図4-15 砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度100%、分離型、垂直応力0.2MPa）

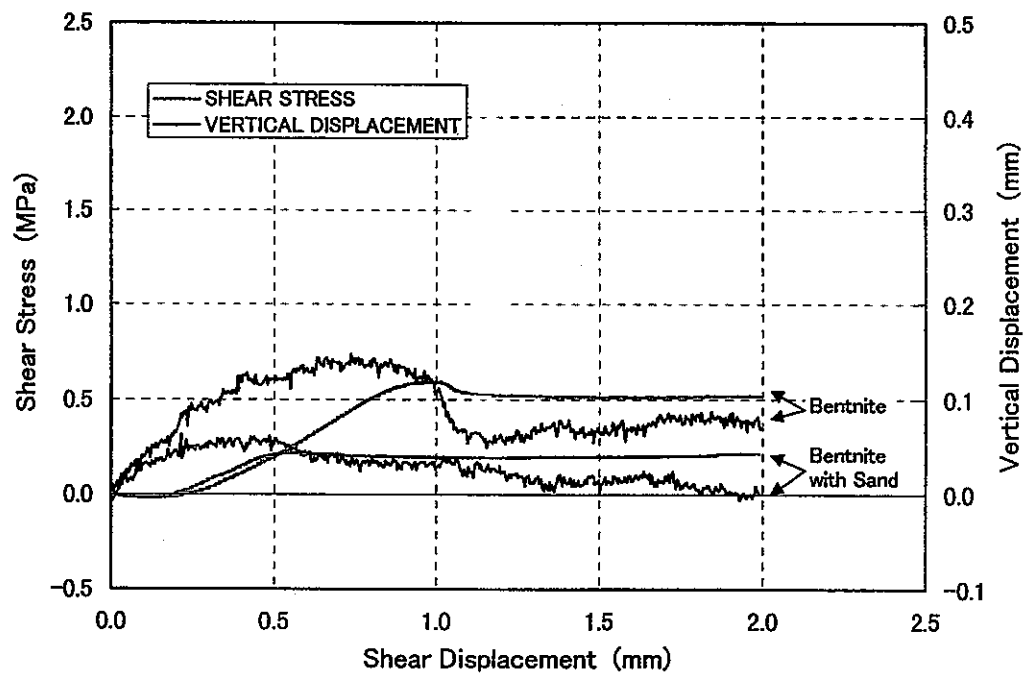


図4-16 砂混じり試料とベントナイト試料のせん断試験結果の比較（飽和度100%、圧着型、垂直応力0.2MPa）

4.4 まとめ

ブロック積み重ね方式を対象にブロックおよびブロックのうち継ぎ目のせん断力学特性について調べるとともに、ベントナイトの膨潤によるブロック圧着の効果について調べた。また、砂混じり試料のせん断力学特性とベントナイト試料のせん断力学特性の比較検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ①一体型試料のせん断強度は分離型試料や圧着型試料に比べて大きく、ベントナイト緩衝材の変形は、ブロックのうち継ぎ目で発生する可能性が大きいと考えられる。
- ②打ち継ぎ目での変形が純粋に滑り変形であれば、うち継ぎ目が開口する可能性は小さいものと考えられるが、万一、ベントナイトブロックが破壊するような場合には開口亀裂が発生する可能性が考えられる。
- ③飽和度が100%であれば、ベントナイトブロックが破壊しても垂直応力が3MPaを超えるような場合には、開口亀裂の発生の危険性は少ない。
- ④ベントナイト緩衝材のうち継ぎ目に作用する垂直応力が1MPa以下でないと顕著な圧着の効果が見られないことが予想される。
- ⑤飽和度50%の場合のせん断強度はいずれも飽和度100%のものよりも大きい。
- ⑥砂混じり試料は、コスト面や熱伝導性の面で有利であるとされているが、強度的にはベントナイト試料に比べて不利である。

5. 粒状ベントナイトの水分ポテンシャル測定

5.1 目的および概要

土壌のマトリックポテンシャルを原位置で直接的に測定するには、テンシオメータが用いられる。テンシオメータの測定可能範囲は、マトリックポテンシャルが -100kPa (-1bar)よりも高い（すなわち、マトリックサクションが 100kPa よりも低い）領域に限られており、実際の測定では、 -80kPa 程度が限界であると言われている。これは、テンシオメータの中に封入されている水の中に微量の空気が溶存しており、それが高いサクションの下では気泡となって成長するため、水の非圧縮性の圧力伝達媒体としての機能が失われるためである。

Ridley and Burland (1993)は、 -1.5MPa 程度のマトリックポテンシャルまで測定できるテンシオメータ（以下、Burland型テンシオメータ、もしくは単にBurland型と呼ぶ）を考案した。Burland型は、小型の圧力センサーと、空気侵入圧の高い(15 bar)ポーラスセラミックを用い、セラミックと圧力センサーのダイヤフラムとの間の距離を小さくすることにより、装置内での気泡の発生を押さえることに成功している。

そこで、このBurland型テンシオメータの性能を検証することを目的として、様々な水分状態のベントナイト粘土のマトリックポテンシャルを測定し、これを従来用いられているテンシオメータによる測定と比較した。本章ではこの結果について報告する。

5.2 試料の概要

5.2.1 試料

試料として、クニミネ工業（株）製の粉状ベントナイト、クニゲルV1を水分調整したものを用いた。試料は同一ロット中の特定の1袋から取り出して用いた。初期水分は7.8%、メチレンブルー吸着量は $72\text{mmol}/100\text{g-soil}$ であった。

水分調整は、初期水分状態の試料約 0.5kg をプラスチック製のパッドの上に均し、これに噴霧器を用いて徐々に純水（日本薬局方蒸留水）を加え、混合することにより行った。水分調整後の試料は、チャック付きビニール袋に入れて養生させた。なお、試料には、水分調整時と充てん時以外の物理的、化学的処理は行わなかった。

5.2.2 試験方法

(1) 装置

図5-1に、本試験で用いた Burland 型テンシオメータの構造を示す。このテンシオメータは、Ridley and Burland が使用した部品と同一のものを用いて、独自に作成したものである。

Burland 型は、小型の圧力センサーと、ポーラスセラミックの付いたキャップからなる。圧力センサーは、Entran 社の EPX-N0 で、本来は正圧測定用のものである。ねじ山の付いた突起部の先端がダイヤフラムとなっており、耐圧はゲージ圧 3.5MPa (35bar) である。EPX-N0 は、アンプを内蔵していないため、測定にあたっては、ストレンアンプ (NEC 三栄 (株) 製 AS2302) を用いて出力を 50 または 100 倍に増幅した。

ポーラスセラミックは Soilmoisture 社製で、空気侵入圧力が 1.5 MPa (15 bar) のものを整形して用いた。ダイヤフラムとポーラスセラミックとの距離は、500~750 μ m と非常に小さくなっている。圧力センサーとキャップの間隙は、脱気水で満たされている。

図5-2に、本試験で用いた従来型テンシオメータの構造を示す。Burland 型と同様に、圧力センサーと、ポーラスセラミックの付いたキャップからなる。圧力センサーは、コバル電子 (株) の負圧測定用 PA-500-102V-10 で、測定可能範囲は 0~100 kPa (-1 bar) である。ポーラスセラミックは Soilmoisture 社製で、空気侵入圧力は 100 kPa (1.0 bar) である。従来型は、Burland 型と比較して、ポーラスセラミックから圧力センサーのダイヤフラムとの間に存在する脱気水の量が多い。

図5-3に、試料のマトリックポテンシャル測定に用いた容器の構造を示す。容器は、アクリル製の底部、円筒部、および蓋からなり、これらを金属棒とねじで挟み込んだ構造である。

底部の中央には、供試体を載せる直径 20mm の台座があり、その中央にはテンシオメータが下方からねじ込まれている。テンシオメータの受圧面 (ポーラスセラミック) は、供試体との良好な接触を得るために、台座と同一の高さに揃えられている。測定時には、供試体を試料押さえ板と共に台座に載せ、供試体からの水の蒸発を防ぐために、ゴムスリーブ (厚さ 0.5mm) で覆う。供試体の大きさは、直径 20mm、高さ 10mm である。容器の蓋には、空気圧付加と圧力解放のための活栓が設けられており、容器内の圧力を調節することが可能である。

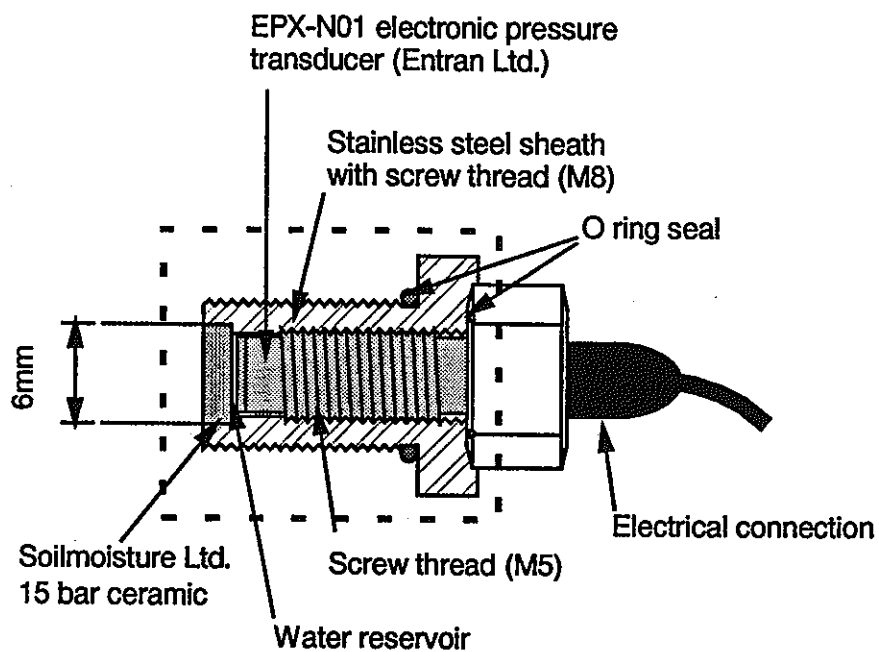


図 5-1 Burland 型テンシオメータ

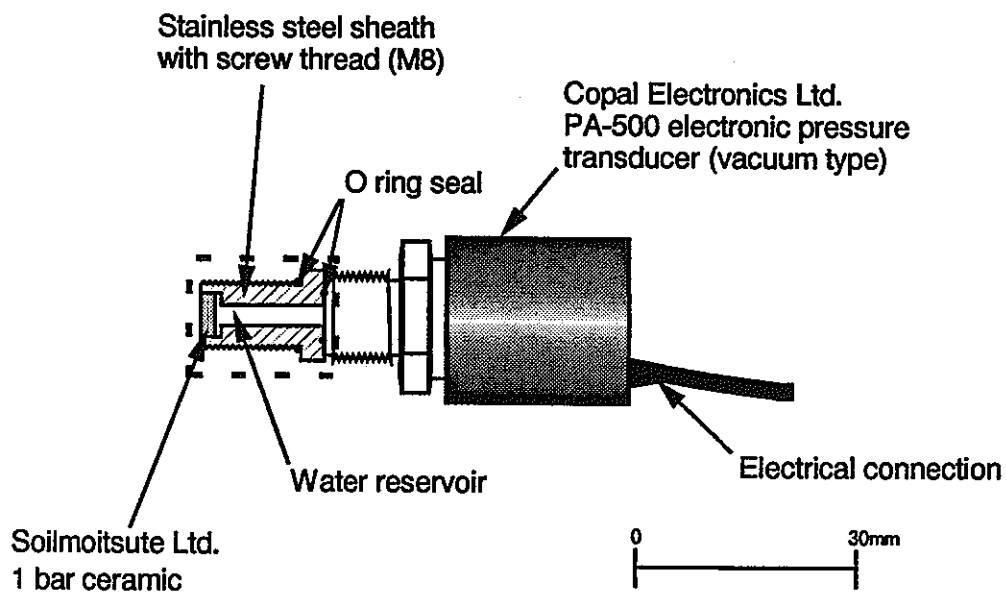


図 5-2 従来型テンシオメータ

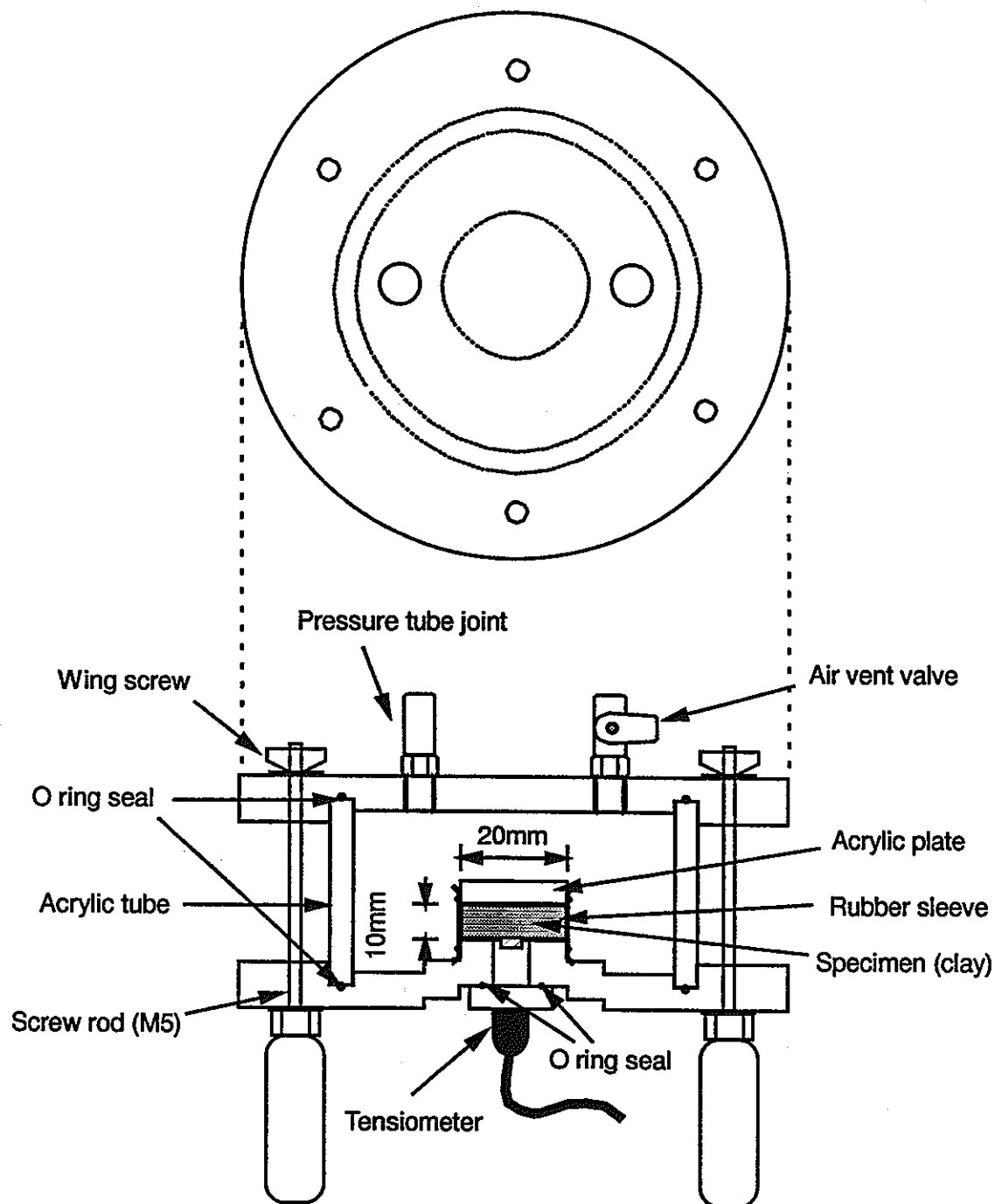


図 5-3 マトリックポテンシャル測定用容器

(2) 手順

図5-4のようなアクリル製の容器を用いて、試料の充てんと整形を行った。まず、5mm 高の台座に、内径 50mm、厚さ 0.5mm、高さ 35mm のゴムスリーブをはめ、この外側に高さ 35mm のアクリルリングを被せた。次に、ゴムスリーブ内にリングの高さ（内法 30mm）まで試料を充てんした後、リングを外してゴムスリーブをカッターで切り裂いた。その後、高さの異なるリング（30mm, 25 mm, 20 mm）を順次台座上の試料の外側に被せ、ワイヤーソーを用いて試料をリングの高さに切りそろえ、最終的に高さを 10 mm に整形した。さらに、この状態の試料の上下を直径 20 mm のアクリル円盤（試料押さえ板）で挟み込み、ワイヤーソーを用いて直径 20mm にしたものを供試体とした。

供試体を整形する過程で残った試料の含水比を炉乾法により測定し、その平均値を供試体の初期含水比 ω_0 と見なした。

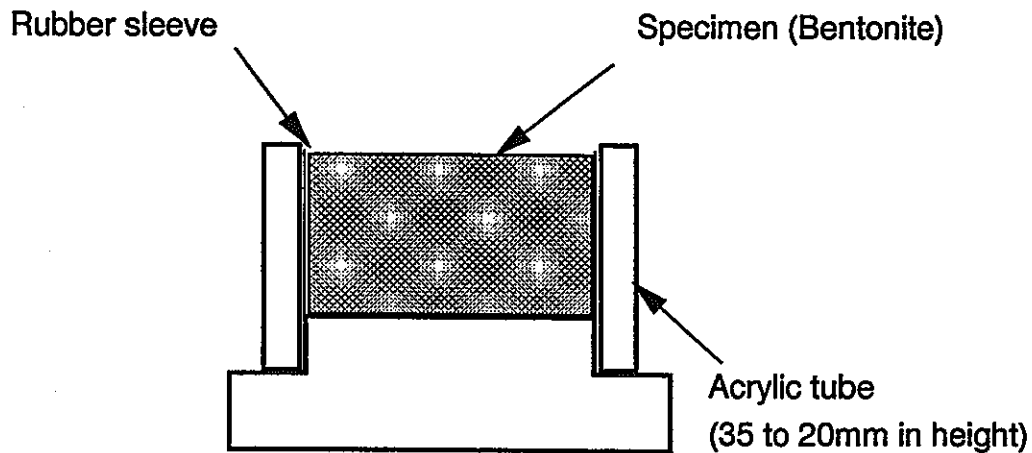


図 5-4 供試体整形用容器

テンシオメータのキャップを純水に浸して真空デシケータ内で脱気し、ポーラスセラミックを飽和させた。その後、圧力センサーとキャップとの間に気泡が入らないように注意しながら両者を結合させ、測定用容器の底部に取り付けた。その後、セラミックの乾燥を防ぐために、容器内に脱気水を入れて受圧面が水に浸かった状態にし、センサーの出力値が安定するまで放置した。

測定前に供試体の直径、厚さをノギスで測定し、体積 V を求めた。その際、供試体の変形が起こらないようにするため、供試体の厚さは、試料押さえ板で供試体をはさんだ状態で測定し、これから押さえ板の

厚みを差し引くことにより求めた。供試体の直径は、試料押さえ板の直径に等しいと見なした。湿潤質量 W_w を天秤で測定して湿潤密度 ρ_t を求め、これと初期含水比 ω_0 から乾燥密度 ρ_d を計算した。

押さえ板の付いた供試体を、乱さないようにして静かに台座に載せ、ゴムスリーブで供試体を覆った。蓋をして容器内部を密閉した後に、マトリックポテンシャルが -100kPa 未満と見られる供試体の測定においては、供試体と間隙水圧計との良好な接触を得るため、容器内に 5kPa 程度の空気圧をかけて、供試体を容器底面に押さえつけた。マトリックポテンシャルが -100 kPa 以上と見られる供試体の測定では、空気圧は付加しなかった。

供試体を設置したのち、間隙水圧計の出力値の経時変化をデータロガー、パソコンで自動測定した。測定は、約 24~48hr 継続し、その後、測定容器から供試体を取り出して、湿潤重量と乾燥質量を測定し、測定前の含水比との比較を行った。

(3) 結果の整理

計測されたマトリックポテンシャルの時間的变化から、Burland 型、および従来型の性能を検討した。炉乾後の供試体の質量 W_s と、各測定段階 ($i = 1, 2, \dots, n$) における湿潤質量 W_i および体積 V_i から、次式により各測定段階における体積含水率 θ_i 、乾燥密度 ρ_d を求めた。

$$\theta = \frac{W_i - W_s}{\rho_s V_i} \quad (5-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \omega} \quad (5-2)$$

また、計測されたマトリックポテンシャルについて、Burland 型と従来型による結果の比較を行った。

5.3 試験結果

5.3.1 キャリブレーション

粘土試料の測定を行う前に、Burland 型および従来型テンシオメータのキャリブレーションを行った。キャリブレーションは、テンシオメータのセラミックが水に浸かった状態で、真空ポンプにより容器内の圧力を 10 kPa 刻みで 0 から 90 kPa まで変化させたときの出力値を測定することにより行った。

図5-5に、Burland 型テンシオメータの出力電圧変化を示す。サクシオン上昇段階において、0.1bar から 0.6bar までは、サクシオンを設定してから 30min 以内に出力電圧が一定値に達した。一定値に達するまでの時間は、サクシオンが大きくなるほど長くなる傾向を示した。0.7bar では、60min を経過しても出力値は減少傾向にあり、一定値に到達しなかった。0.8bar 以上では、サクシオンを増加させても出力電圧の変化は小さかった。一方、サクシオン下降段階において、0.9 から 0.8bar までは、サクシオンを変化させても出力電圧はほとんど変化しなかった。0.7bar から出力値が上昇し始め、0.5～0 bar では、出力電圧が一定値に達するようになった。しかし、それらの値は、サクシオンの増加時の値とは異なっていた。

図5-6に、Burland 型のそれぞれのサクシオン値に対する出力電圧変化を示す。サクシオン上昇時の 0.1～0.7 bar における出力電圧は直線性を有しているが、それ以上のサクシオンでは直線性に乏しい。またサクシオン上昇時と下降時とでヒステリシスが認められる。

図5-7に、従来型テンシオメータの出力電圧変化を示す。出力電圧は、サクシオンの上昇時、下降時ともに、サクシオンを変化させると即時に変化し、一定値に達した。また、上昇時と下降時で、出力電圧の違いは認められなかった。

図5-8に、従来型間隙水圧計のそれぞれのサクシオン値に対する出力電圧変化を示す。キャリブレーション領域 (0～0.9 bar) では、出力電圧は十分な直線性を持っており、圧力センサーの公称特性がそのまま顕れていることが確かめられた。

以上の結果から、Burland 型については、ヒステリシスが見られるものの、ベントナイトを用いた測定自体がサクシオン上昇過程を経ることに相当することから、サクシオン上昇時の 0.1～0.7 bar における電圧変化率を校正係数として用いることとし、従来型については、圧力センサー自体の公称校正係数を用いることとした。なお、Burland 型の校正係数は、結果的に圧力センサーの公称校正係数に等しくなった。

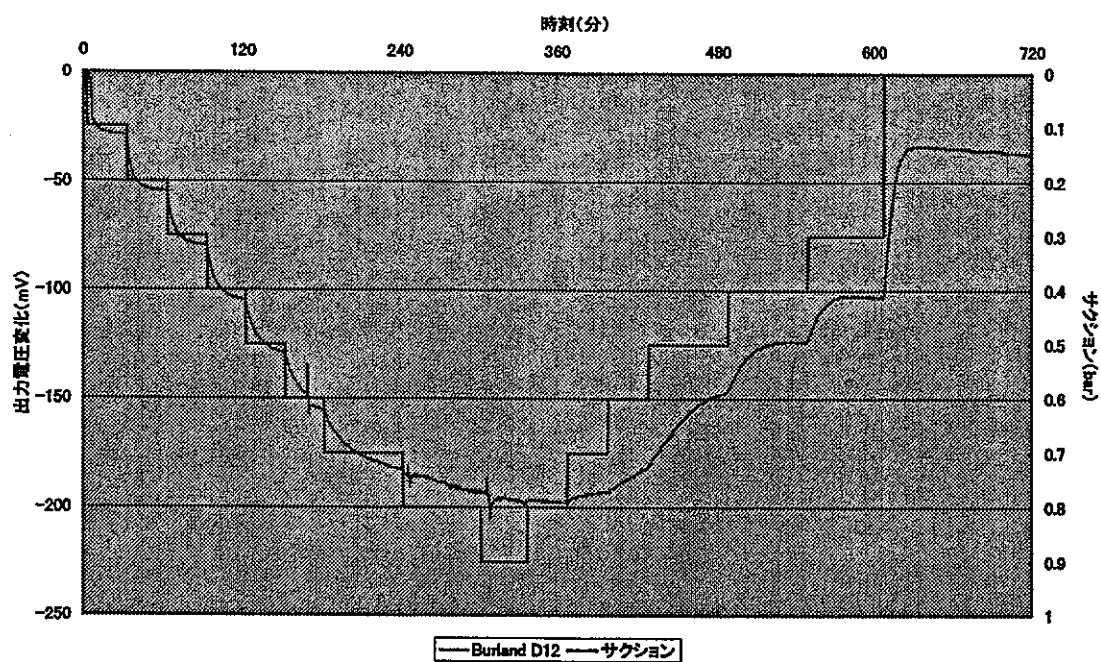


図 5-5 キャリブレーション時の出力電圧変化 (Burland 型)

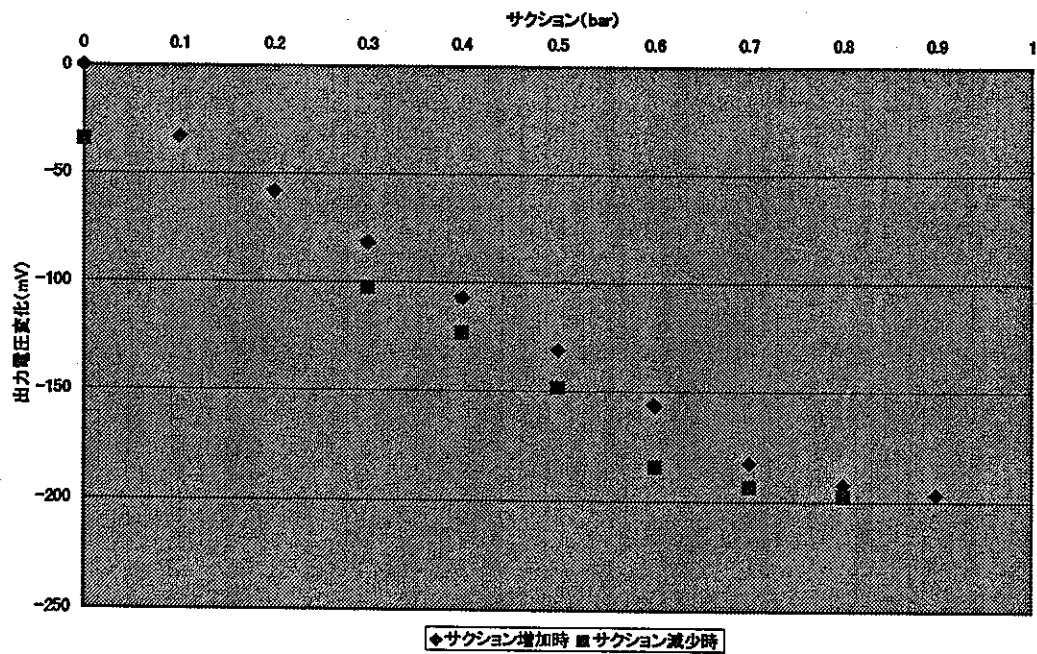


図 5-6 Burland 型間隙水圧計のサクション応答特性

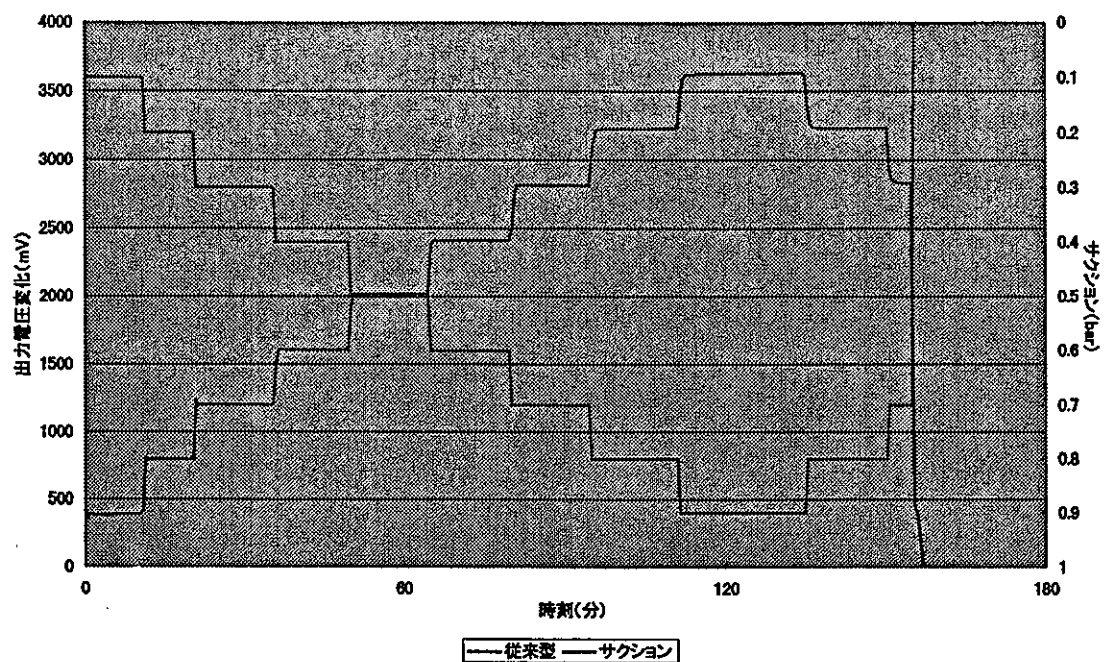


図 5-7 キャリブレーション時の出力電圧変化 (従来型)

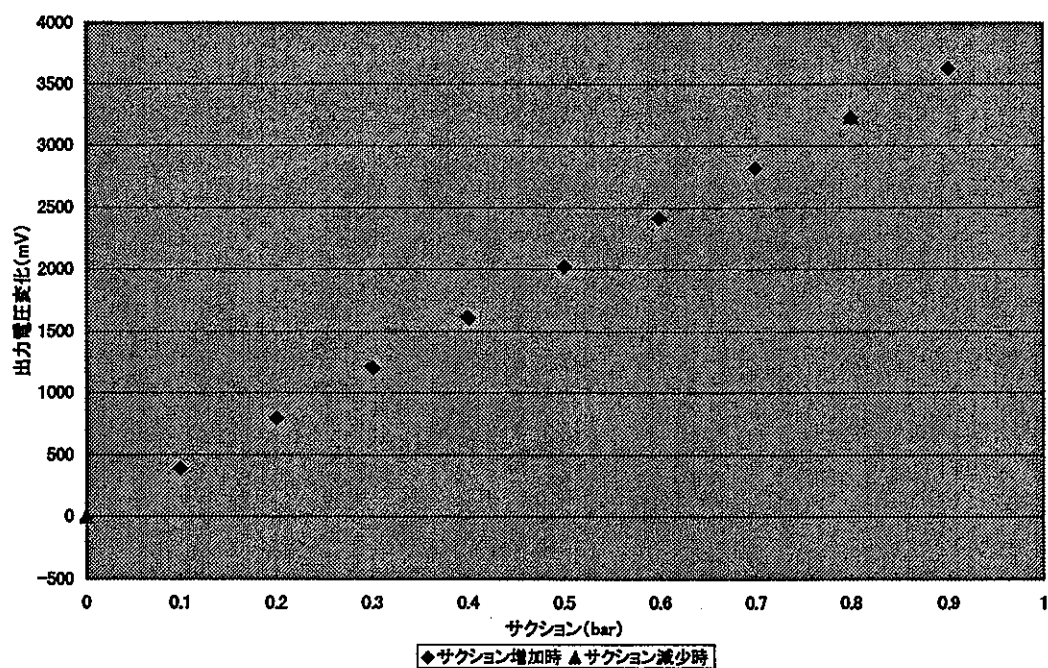


図 5-8 従来型間隙水圧計のサクション応答特性

5.3.2 マトリックポテンシャル測定

含水比を 140～55%に調整した試料を用いて供試体を作成し、そのマトリックポテンシャルを測定した。表5-1に、それぞれの測定で供試体とした試料の含水比、体積含水率、乾燥密度を示す。同一の試料から作成した供試体でも、含水比等の値が異なっているのは、調整した試料内にわずかながら水分のばらつきがあったことと、試料を同一の乾燥密度に充てんすることが困難であったためである。

表 5-1 供試体の含水比 (ω)、体積含水率 (θ)、乾燥密度 (ρ_d)

調整時の 含水比	Burland 型による測定			従来型による測定			備考
	$\omega/\%$	$\theta/\%$	$\rho_d/\text{g cm}^3$	$\omega/\%$	$\theta/\%$	$\rho_d/\text{g cm}^3$	
140	142	79.2	0.560	142	78.6	0.556	
100	106	71.8	0.676	101	70.9	0.701	
90	86.4	66.7	0.772	86.7	68.6	0.791	
80	78.3	66.0	0.843	75.8	65.9	0.870	
75	74.1	65.3	0.881				
65	66.6	63.9	0.959				
55	54.1	57.9	1.07				

それぞれの測定におけるマトリックサクシジョンの出力値変動を、図5-9～5-19に示す。

Burland 型による測定においては、ほとんどの場合で供試体を載せた直後からサクシジョン値が急速に上昇し、測定開始から 5～10min で、極値あるいは変化のほとんどない値に達した。(図5-9～図5-11、図5-13～図5-15) その後は、測定ごとに異なる変化が観測された。大別すると、 $\omega=86.4\%$ (図5-11)、 $\omega=66.6\%$ (図5-14) のように、出力サクシジョン値がほぼ一定で推移するものと、 $\omega=142\%$ (図5-9)、 $\omega=106\%$ (図5-10)、 $\omega=74.1\%$ (図5-13)、 $\omega=54.1\%$ (図5-15) のように、出力値が上昇していくものの 2 通りであった。なお、 $\omega=78.3\%$ の試料 (図5-12) では、出力値が緩やかに上昇を続け、3.5hr に 100kPa を越えたと一旦減少し、その後、10.2hr に 105kPa に達すると 22kPa まで緩やかに減少していった。

供試体を除去した後の出力変化に着目すると、サクシジョン値が上昇していく傾向を示す場合は、サクシジョン値は急速に減少するものの、測定前の値までは復帰しなかった。また、サクシジョン値がほぼ一定となる傾向を示す場合には、ほぼ測定前の値まで復帰した。サクシジョン値が測定前の値に復帰しない原因としては、圧力センサーのドリフトが考えられる。

以上のような出力変化の傾向と、試料の含水比や乾燥密度などの物性値との間には、明確な関係は認められなかった。

また、温度変化の影響と見られる出力値の変動は、全ての場合について確認された。特に $\omega=106\%$ (図 5-10) の場合は、2K 程度の温度上昇に対し、35kPa の出力値変動が起こった。この原因の一つとして、圧力センサーに温度補償回路が組み込まれていないことが挙げられる。

計測された最大のサクション値は、瞬間的な値で 240kPa (図 5-15)、長時間 (2hr 以上) 維持される値で 92kPa (図 5-14) であった。ただし、前者は供試体を除去した後の急激な温度変化の間に記録された値であり、供試体のサクションを計測したものではない。また、多くの場合で、供試体を除去した後の出力値が計測前の値に復帰しないことから、長時間測定を行った後の出力値を試料のサクションとするのは疑問が残る。

以上のことから、Burland 型で測定可能な最大サクションは、供試体を載せた直後に記録された最大値に相当する 80~90kPa 程度と予想される。これは、一般的なテンシオメータの測定限界と考えられている値とほぼ同じである。

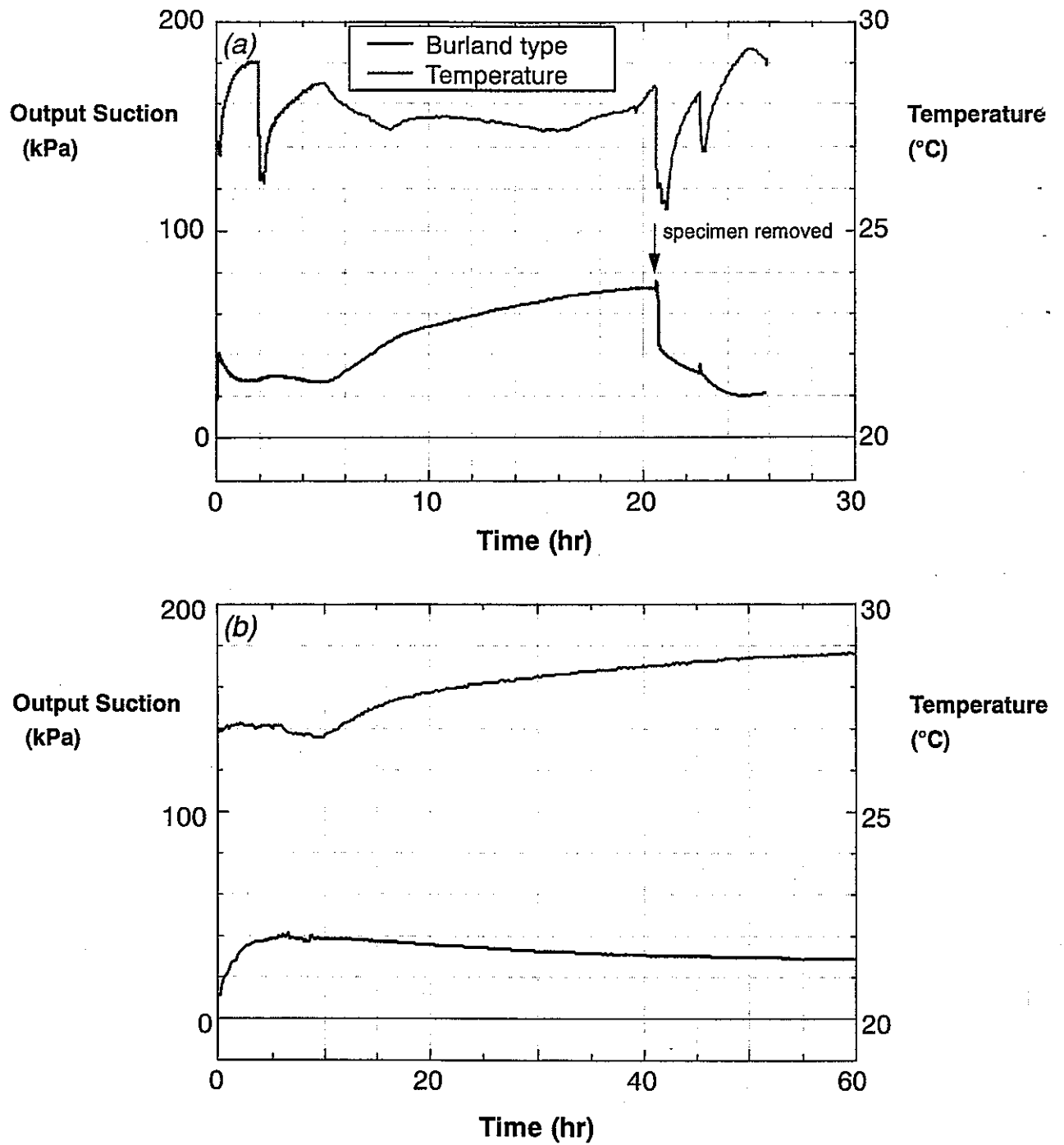


図 5-9 マトリックサクシヨンの出力値変動 (Burland 型)

供試体 : $\omega = 142\%$, $\theta = 79.2\%$, $\rho_d = 0.560 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

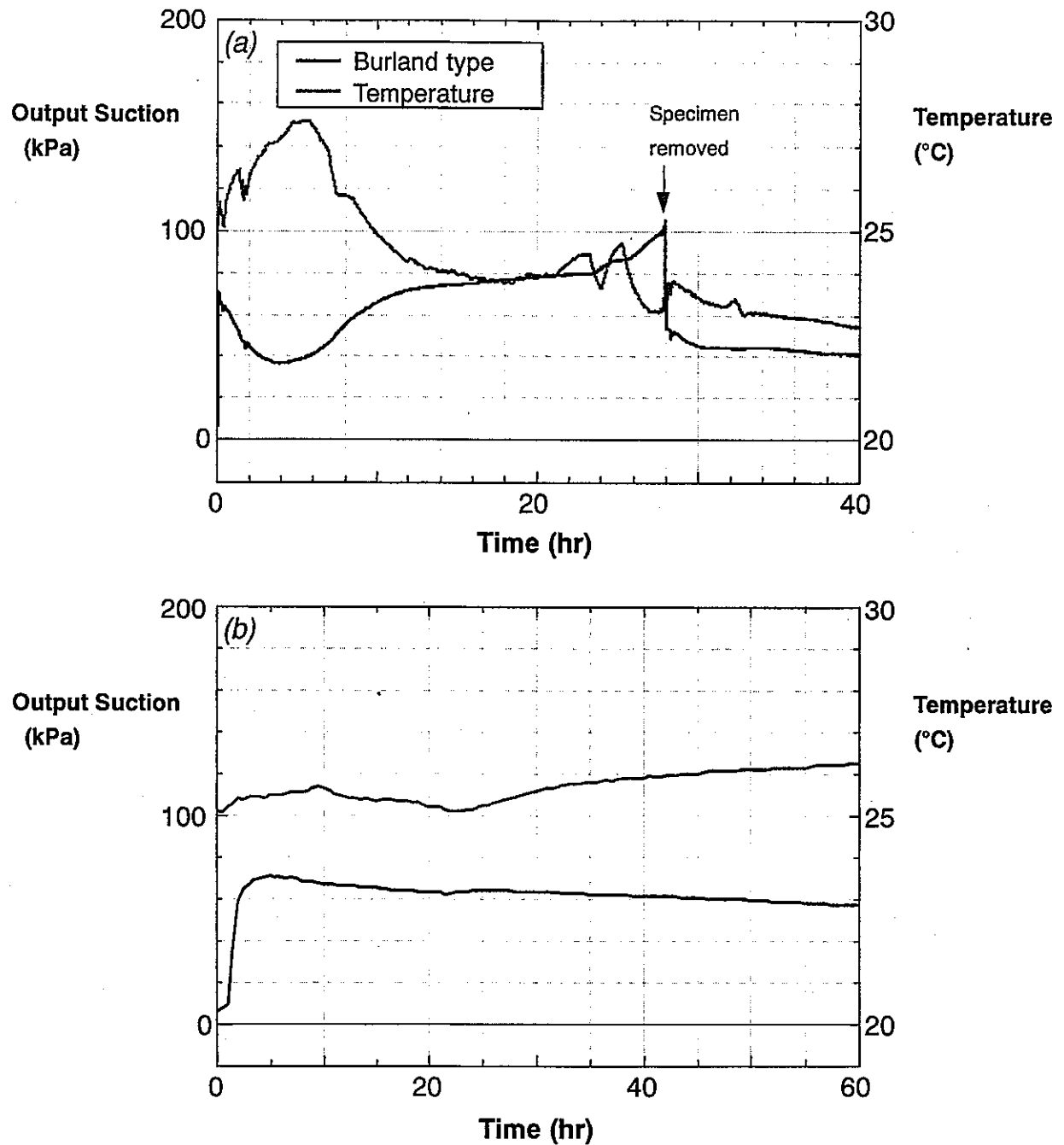


図 5-10 マトリックサクシンの出力値変動 (Burland 型)

供試体 : $\omega = 106\%$, $\theta = 71.8\%$, $\rho_d = 0.676 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

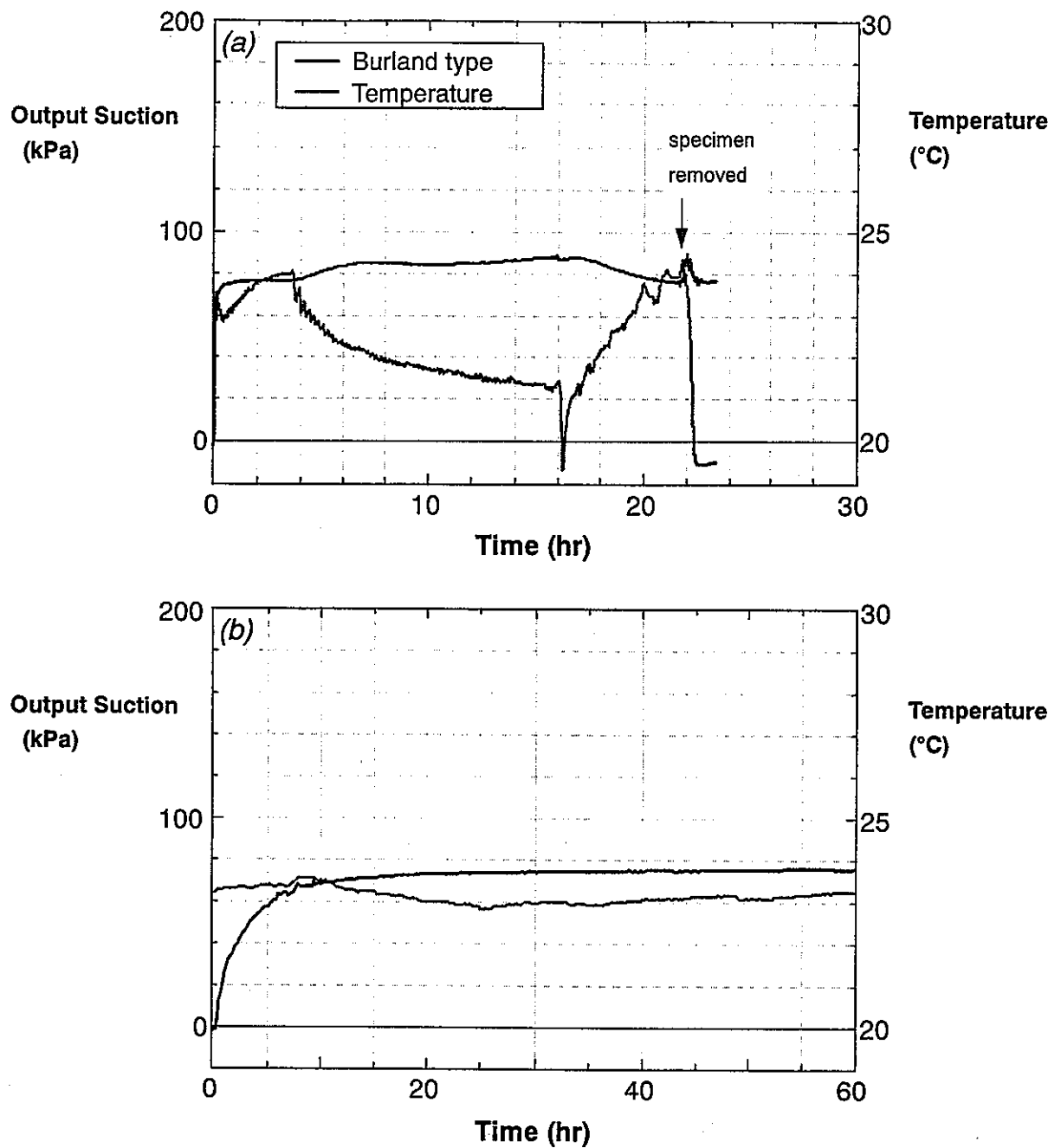


図 5-11 マトリックスサクシジョンの出力値変動 (Burland 型)

供試体 : $\omega = 86.4\%$, $\theta = 66.7\%$, $\rho_s = 0.772 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の 1 時間

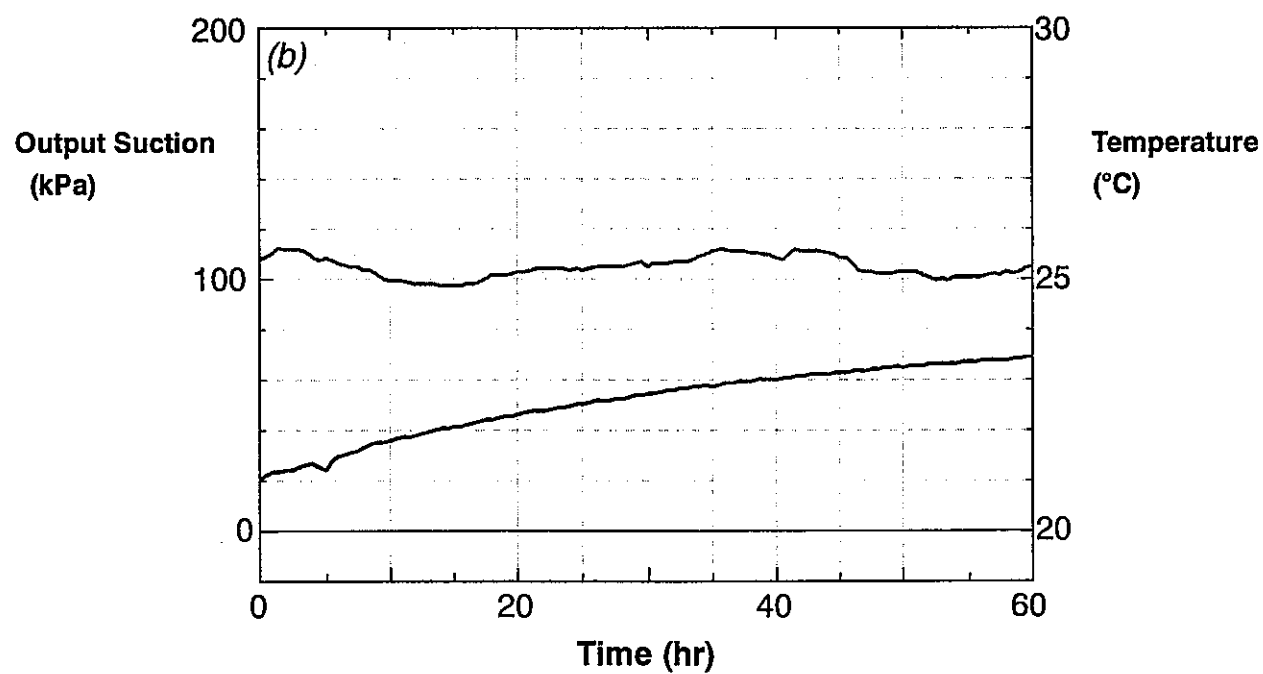
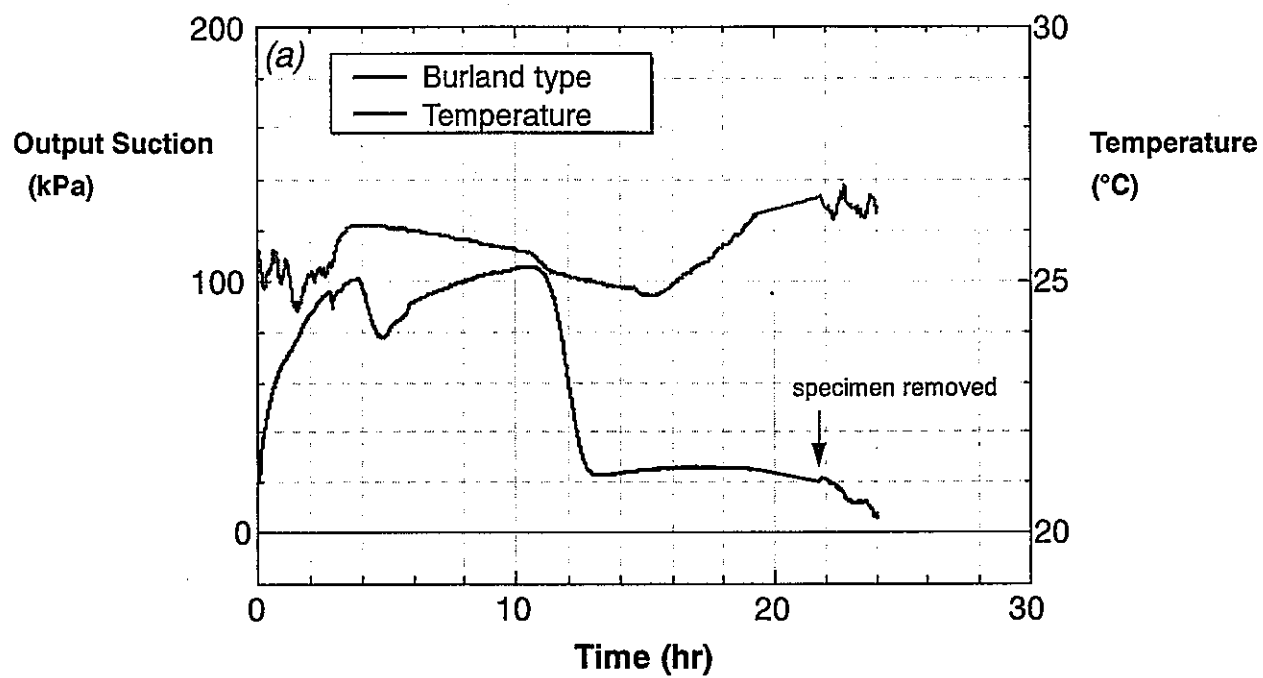


図 5-12 マトリックサクシンの出力値変動 (Burland 型)

供試体 : $\omega = 78.3\%$, $\theta = 66.0\%$, $\rho_s = 0.843 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

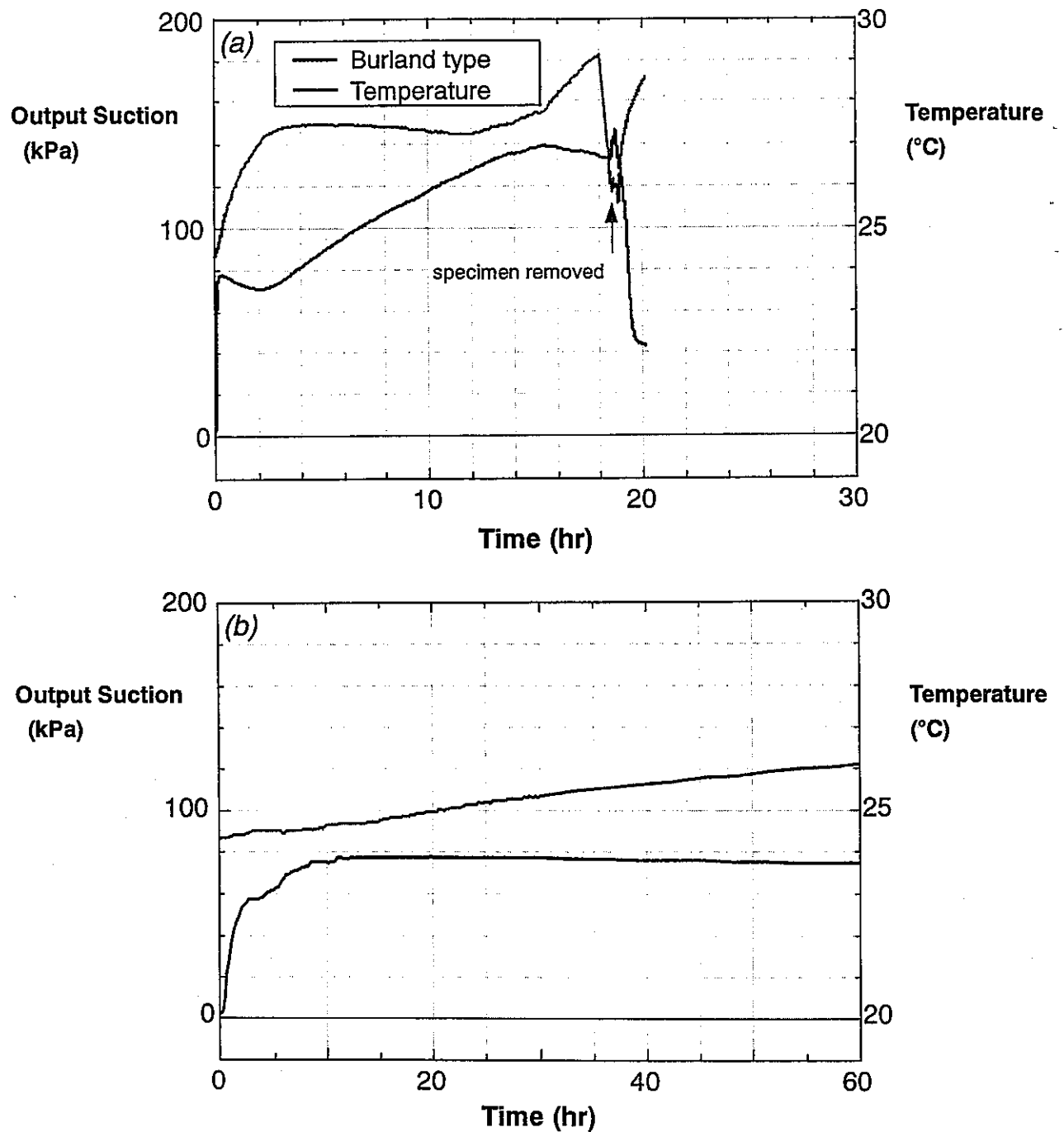


図 5-13 マトリックサクシジョンの出力値変動 (Burland 型)

供試体 : $\omega = 74.1\%$, $\theta = 65.3\%$, $\rho_d = 0.881 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の 1 時間

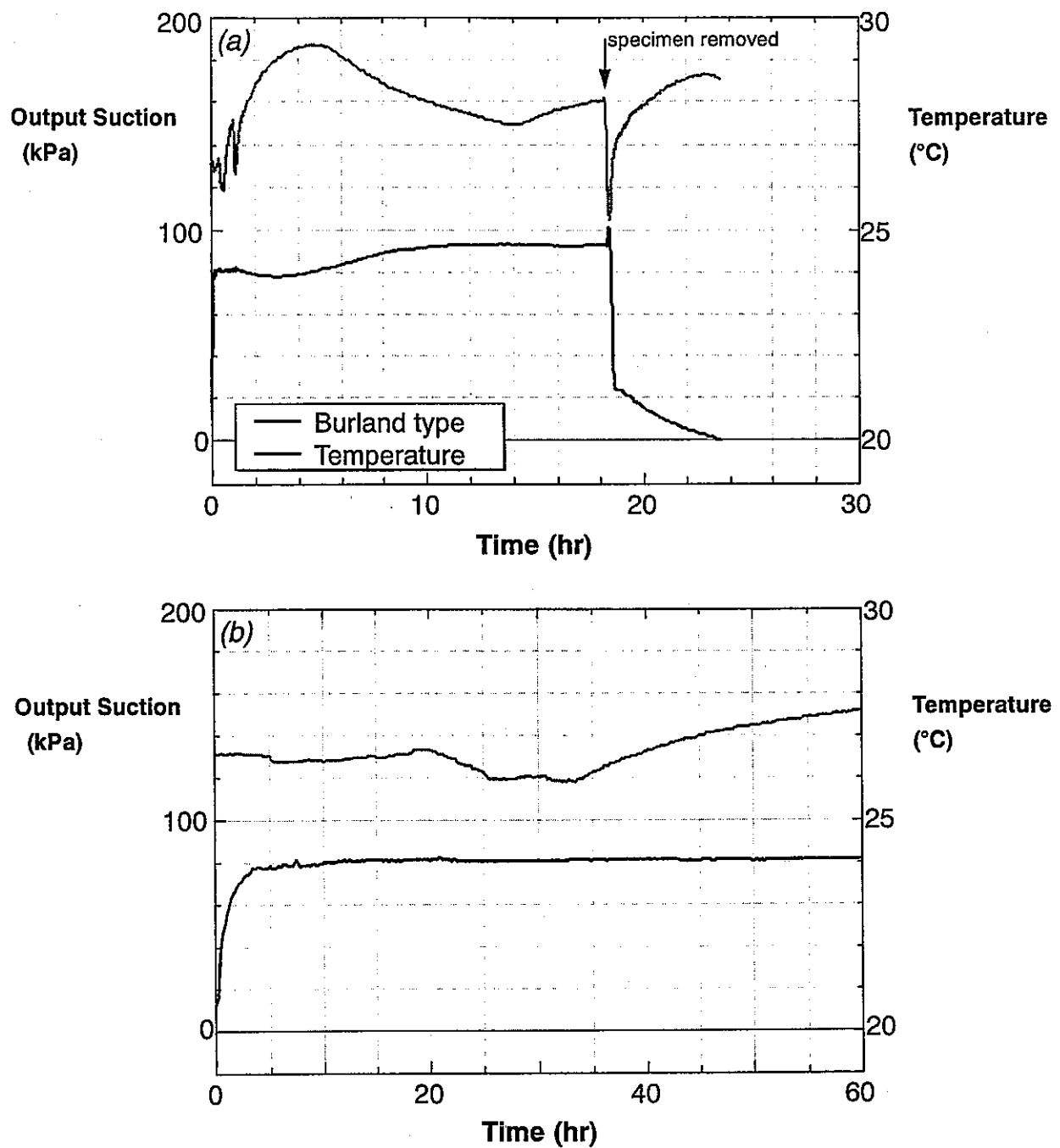


図 5-14 マトリックサクシジョンの出力値変動 (Burland 型)

供試体 : $\omega = 66.6\%$, $\theta = 63.9\%$, $\rho_d = 0.959 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

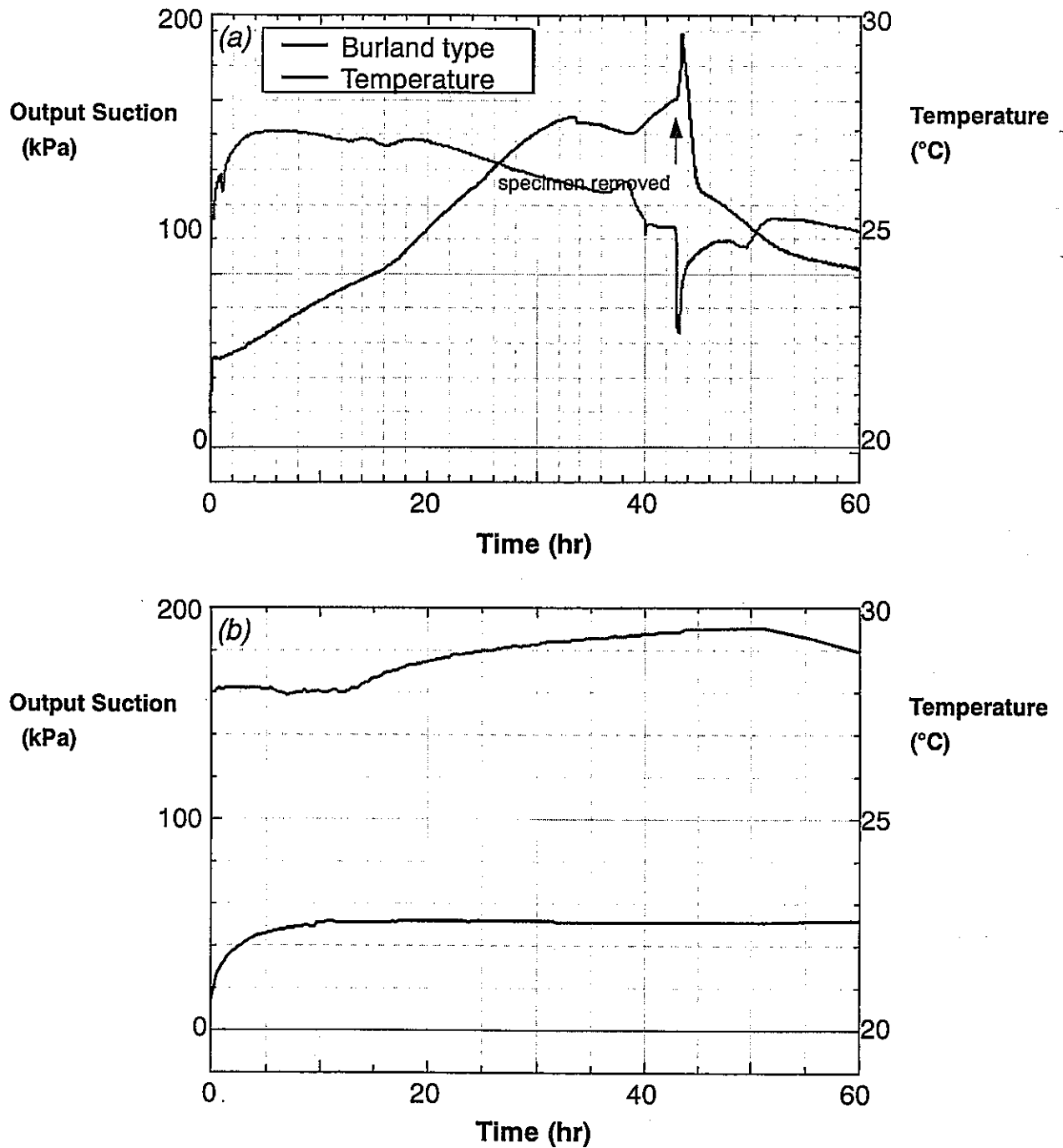


図 5-15 マトリックサクシヨンの出力値変動 (Burland 型)

供試体 : $\omega = 54.1\%$, $\theta = 57.9\%$, $\rho_d = 1.07 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

従来型による測定では、 $\omega=142\%$ (図5-16) , $\omega=75.8\%$ (図5-19) のように、測定開始から緩やかにサクシオン値が上昇し続けるものと、 $\omega=101\%$ (図5-17) , $\omega=86.7\%$ (図5-18) のように、測定開始後にサクシオン値が急速に上昇するものの2通りの時間的变化が見られた。後者の場合には、出力値が約 60kPa であるときに急激に値が 20~40kPa 低下し、その後は、緩やかな上昇と急減を繰り返した。

前者のような緩やかなサクシオン値の上昇は、供試体内の水分の再分布によるものと考えられる。すなわち、供試体を載せるステージ上か、あるいはテンシオメータを設置したねじ孔に残っていた少量の水が、供試体に吸収され、この水が再分布を経た可能性がある。また、後者のようにサクシオン値が急減な減少を経た後に上昇する現象は、テンシオメータ内で気泡が発生して、圧力センサーと供試体間の水の連続性が瞬間的に途絶え、その後テンシオメータに封入された水が供試体へ移動してサクシオンが下がることにより、水の連続性が回復するようなメカニズムが考えられる。

計測された最大のサクシオン値は、瞬間値で 83kPa (図 5-17)、長時間維持される値で約 71kPa (図 5-19) であった。供試体を除去した後は、いずれの測定でも速やかに測定前の値に復帰した。このことから、従来型で測定可能な最大サクシオンは、80kPa 程度と予想される。これは、一般にテンシオメータの測定限界と考えられている値と同じである。

また、温度変化の影響は、 $\omega=101\%$ (図5-17) の 0.5~9.0hr、 $\omega=86.7\%$ (図5-18) の 4.5~14.0hr にわずかに見られたのみで、いずれの測定でもほとんど見られなかった。これは、圧力センサー自体に温度補償回路が組み込まれているためであると考えられる。

Burland 型と従来型の測定結果を比較すると、 $\omega=142\%$ の場合に 40kPa 程度の出力値がいずれの場合でも得られた。その他の場合では、いずれの測定からも比較できる結果が得られなかった。

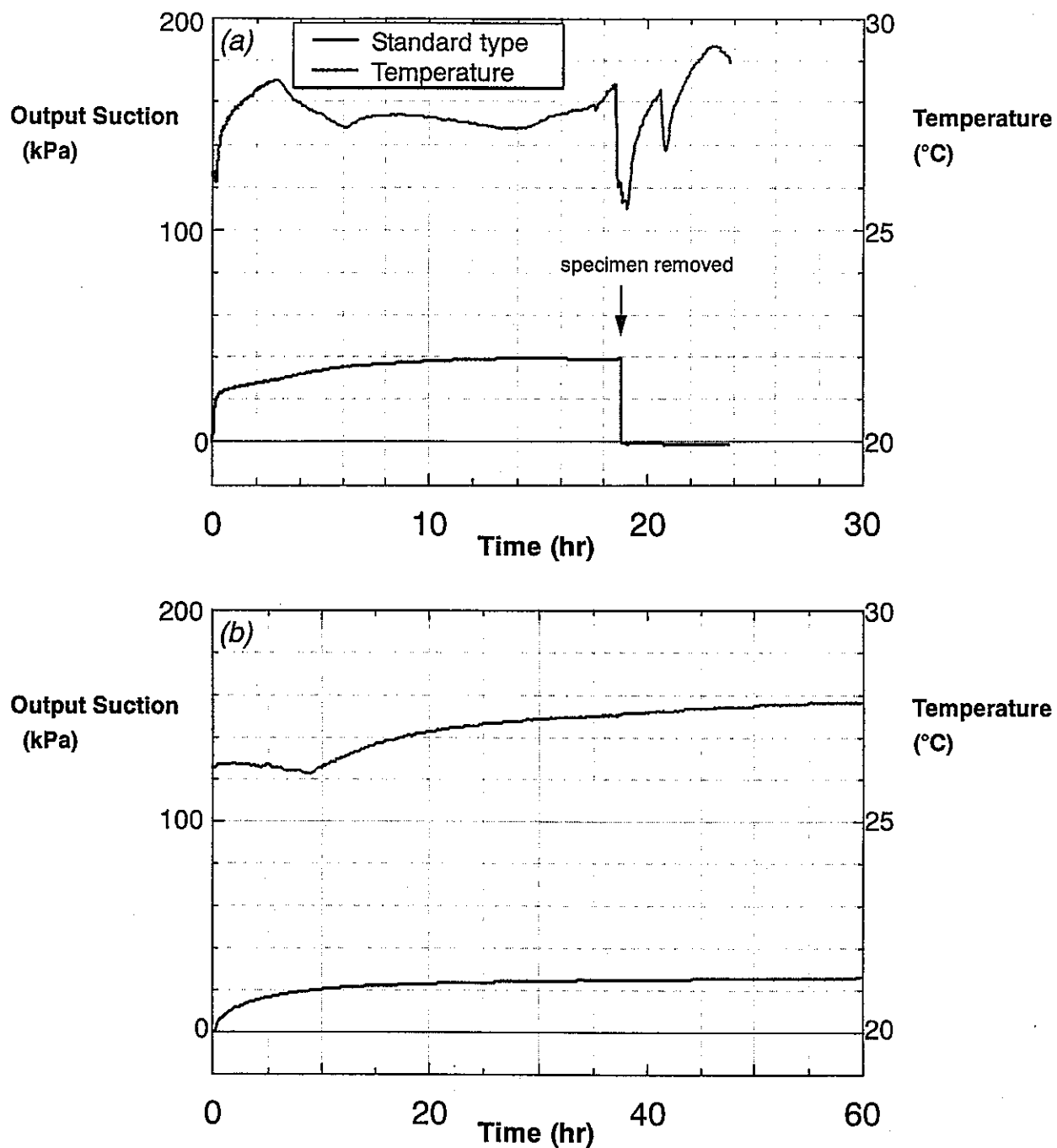


図 5-16 マトリックサクシヨンの出力値変動 (従来型)

供試体 : $\omega = 142\%$, $\theta = 78.6\%$, $\rho_d = 0.556 \text{ gcm}^3$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

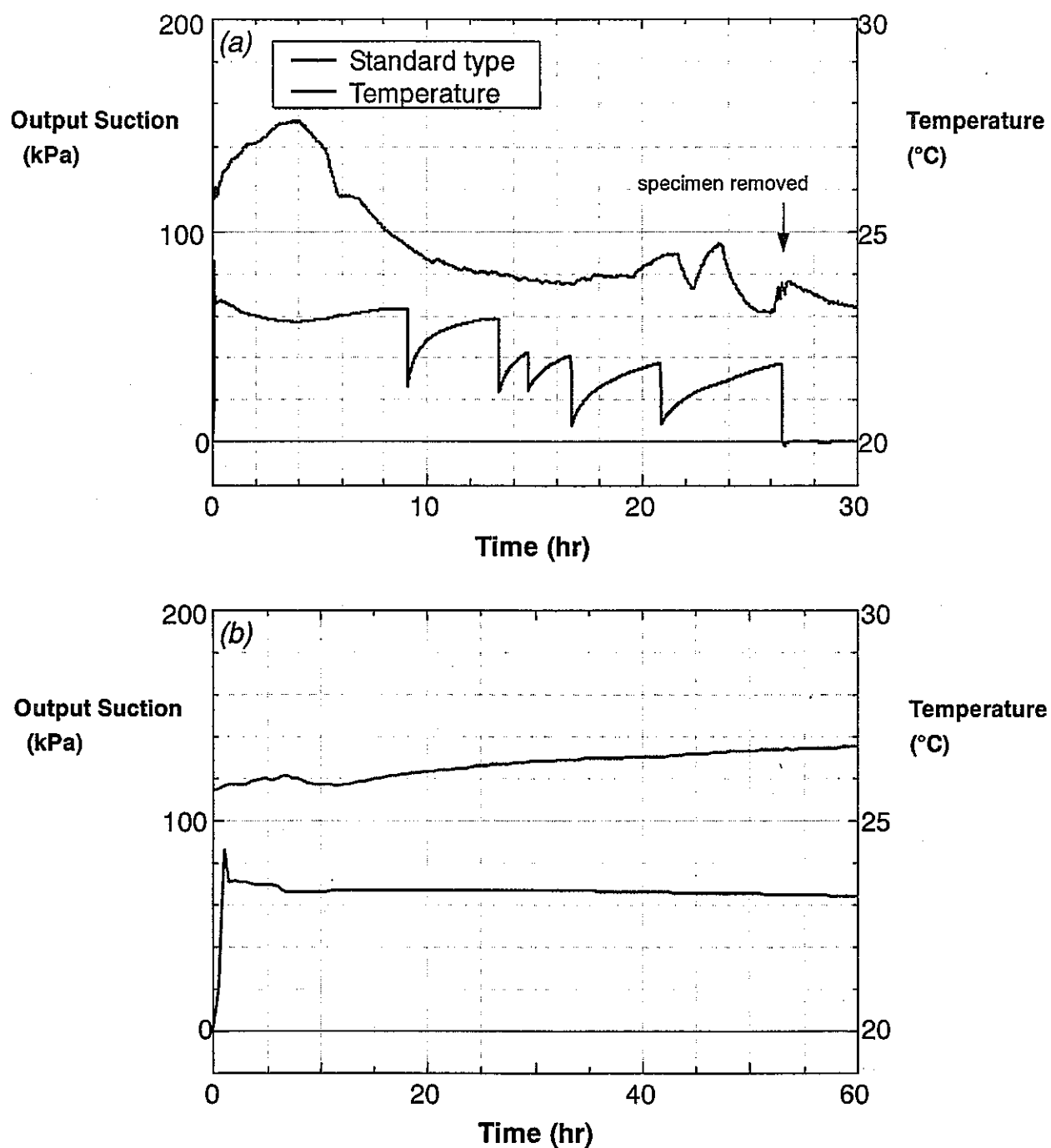


図 5-17 マトリックサクシヨンの出力値変動 (従来型)

供試体: $\omega = 101\%$, $\theta = 70.9\%$, $\rho_s = 0.701 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

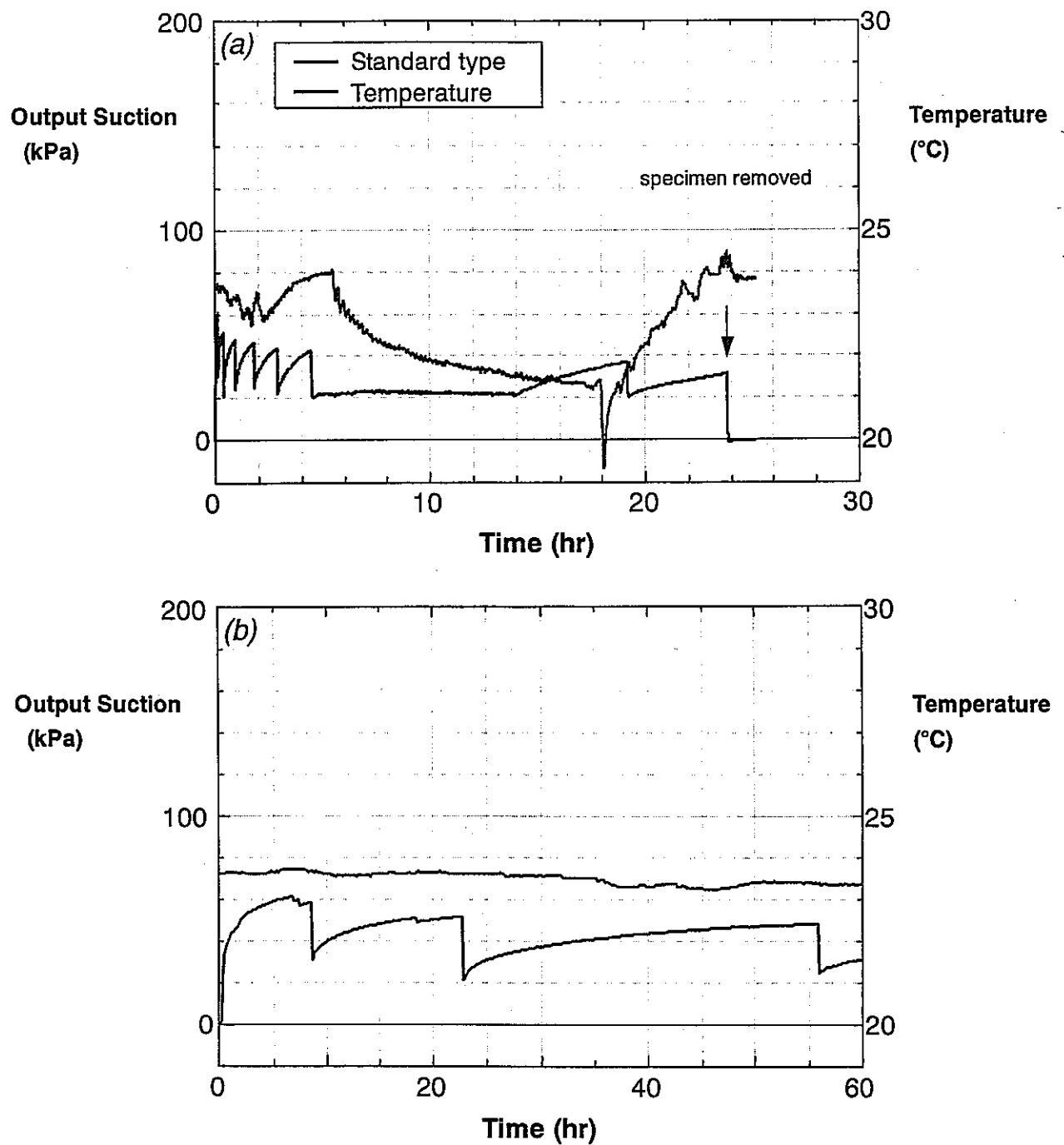


図 5-18 マトリックサクシジョンの出力値変動 (従来型)

供試体 : $\omega = 86.7\%$, $\theta = 68.6\%$, $\rho_d = 0.791 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

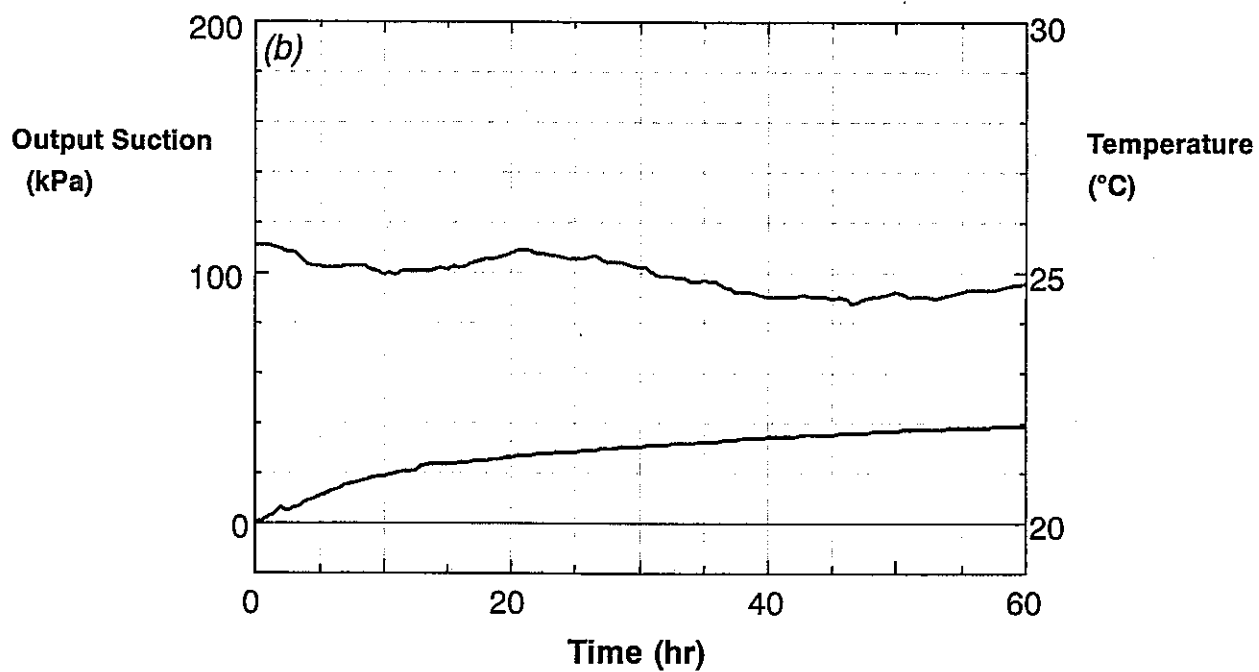
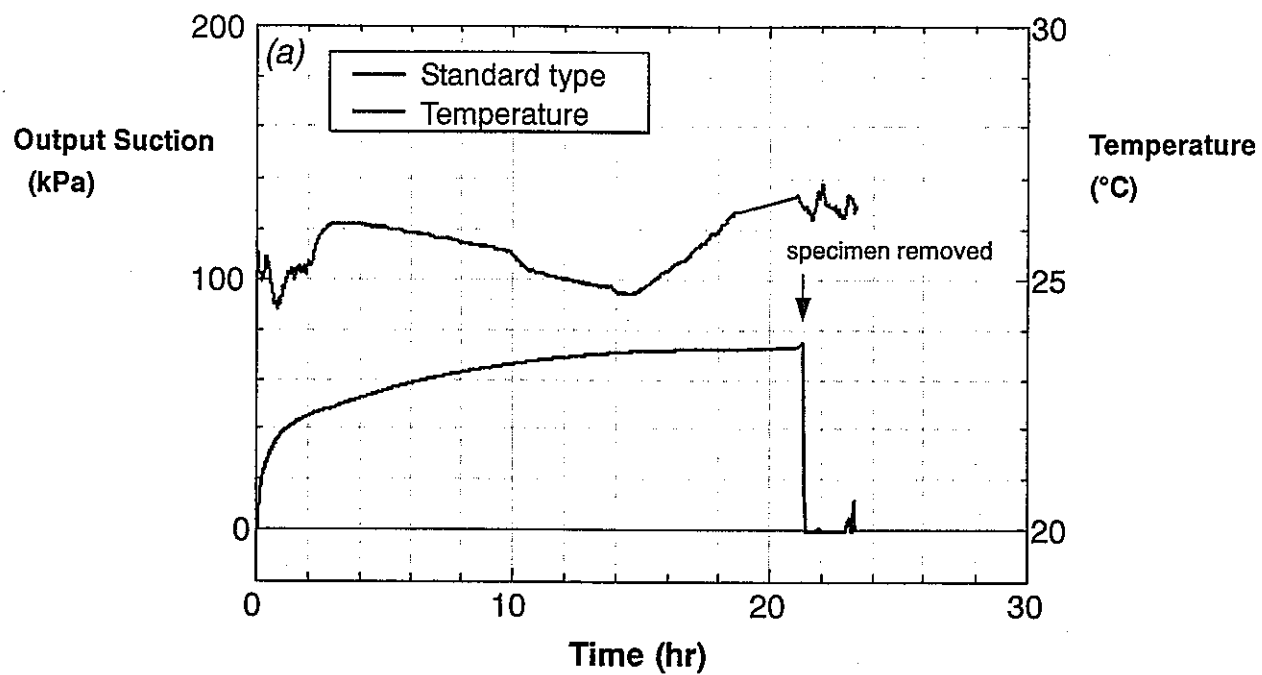


図 5-19 マトリックサクシヨンの出力値変動 (従来型)

供試体 : $\omega = 75.8\%$, $\theta = 65.9\%$, $\rho_d = 0.870 \text{ gcm}^{-3}$

(a) 全測定結果, (b) 最初の1時間

5.4 まとめ

Burland 型テンシオメータの測定可能範囲は、正圧～80kPa 程度までであり、従来型のテンシオメータと同程度であった。これは、Ridley and Burland が得た結果よりも著しく狭い範囲であった。また、精度と温度変化に対する安定性の面では、従来型に著しく劣っていた。

ただし、今回使用した Burland 型テンシオメータは、オリジナルを模倣して作成したものであり、オリジナルと次の 2 点で異なることを考慮しなくてはならない。一つは、ポーラスセラミックとダイヤフラムとの間隔であり、今回作成したものが、500～750 μ m であったのに対し、オリジナルでは250 μ m 未満となっている。もう一つは、ポーラスセラミックの飽和方法であり、今回は減圧法によったが、オリジナルでは加圧によったとの記述が見られる。また、Ridley and Burland が行った測定手順には不明な点がいくつかあり、特に、ステンレスカップとセンサーとの間にある水が、どのような処理を経たものなのか（脱気したのか、加圧したのか）は非常に重要な点であるが、これに関する明確な記述はない。

以上のことから、Burland 型の性能を従来型に劣るものであると結論付けるのは難しい。Burland 型の性能評価のためには、その測定手順が詳細に明らかにされることが必要であろう。

参考文献

Ridley, A. M., and J. B. Burland (1993) : A new instrument for the measurement of soil moisture suction, *Géotechnique* 43, No.2, pp.321-324.

なお、本試験で用いた機器のうち、以下のものについては、製造会社の www サイトから詳細な情報を得ることができる。

Entran Co., Ltd. EPX-N0: <http://www.entran.com/epx.htm>

Soilmoisture Co., Ltd. Ceramic plates: <http://www.soilmoisture.com/ceramics.htm>

6. ベントナイトのサンプリング

6.1 目的及び概要

粘土充填・熱負荷試験においては、平成8年12月17日より平成9年9月1日までヒーターによる加熱試験を実施し、通電停止後は、平成10年3月中旬まで減熱試験を実施した。ヒーター停止前のベントナイト中の水分分布を把握するために、平成9年8月19日から30日までに第1回目のベントナイトのサンプリングを実施し、ヒーター停止後試験終了直前のベントナイト中の水分分布を把握するために平成10年2月23日から3月6日までに第2回目のベントナイトのサンプリングを実施した。

ベントナイトのサンプリングは動燃東海事業所の緩衝材大型試験設備（以下 Big-Ben と呼ぶ）で既に実施している。しかし、今回釜石で用いた粒状ベントナイトに対するサンプリングは初めての試みであり、予備試験として Big-Ben で試験サンプリングを実施した。その結果、乾燥したベントナイトに対しても、標準貫入サンプラーを貫入させることは可能であり、確実にサンプリングが行えることがわかった。しかし、サンプリング後、ボーリング孔が開いている状態では隣接した個所でサンプリングする際に、孔曲がりあるいはベントナイトの流動等の問題が生じ、確実なサンプリングが行えない可能性があることが判明した。その対策として、本試験では塩化ビニール製のパイプを挿入し、パイプの中はモルタルで充填することとした。

6.2 サンプリング位置

図 6-1 に示すように、コンクリート製蓋にはあらかじめ鋼管 12 本がサンプリングのガイドパイプとして埋設されている。第 1 回サンプリングは側線 1 の 6 カ所で、第 2 回サンプリングは側線 2 の 6 カ所で実施した。

6.3 サンプリング方法

Big-Ben での予備試験では標準貫入試験サンプラーを打ち込む方法とロータリー式ボーリング方法の 2 つの方法を試験し、2 つの方法とも適用可能と判断された。本試験では含水比測定に供する区間のサンプリングは標準貫入試験サンプラー（図 6-2）の打ち込みを行い、それ以外の区間では無水ロータリー式ボーリング方法を採用した。

側線 1、2 ともボーリング孔の名称は中心から、a、b、c、d、e、f とし、サンプリングは標準貫入サンプラー（外径 51mm）による試料の採取と 66mm 径のコアビットによる掘進を交互に行った。含水比測定区間は標準貫入試験サンプラーを貫入させベントナイトを採取し、その他の区間ではコアビットで掘進した。貫入サンプラーを用いるときはモンケンによる打撃回数を記録した。貫入サンプラー引き抜きの際にはサンプラーにヒーター側が確認できるように印をつけ引き抜いた。

標準貫入試験サンプラーを、ヒーター側の印に留意しながら、刃先と本体、上端のエンドキャップに分解した。本体は縦に2つに割れ、ヒーター付近の乾燥部以外ではベントナイトは取り外しても崩れることがなく採取できた。

次に、サンプルを上端、下端の不必要部分（サンプリングの際に他から入った水が付着している部分等）を除いて、(上)、(中)、(下)の3つに分け、(上)と(下)の2つを含水比測定用のサンプルとした。サンプルはそのままビンには入らないので、金具を用いて縦に4分割した。分割した際に内部の状況も観察した。それ以外の部分はビニール袋に入れて廃棄処分とした。

(中)のサンプルについては、細菌数測定用として動燃殿に提出した（d孔、f孔）。ただし、ヒーターの付近はベントナイトが乾燥して非常に堅くなり貫入サンプラーが一度に30cm貫入できないときがあり、その時は適宜2区間に分ける等して対応した。記録シートに、各区分ごとに、区分深度、貫入長さ、採取されたコア長さ、サンプルビン番号、観察、写真の有無を記載した。

1日の採取分のサンプルビンは1つずつエアークラップで梱包し、段ボール箱でハザマの研究所に発送した。研究所では、まず試料の重量を測定し、炉乾燥法（乾燥時間は24時間、乾燥温度は約100℃）で試料の水分を除去し、乾燥した試料の重量を測定し、含水比を求めた。

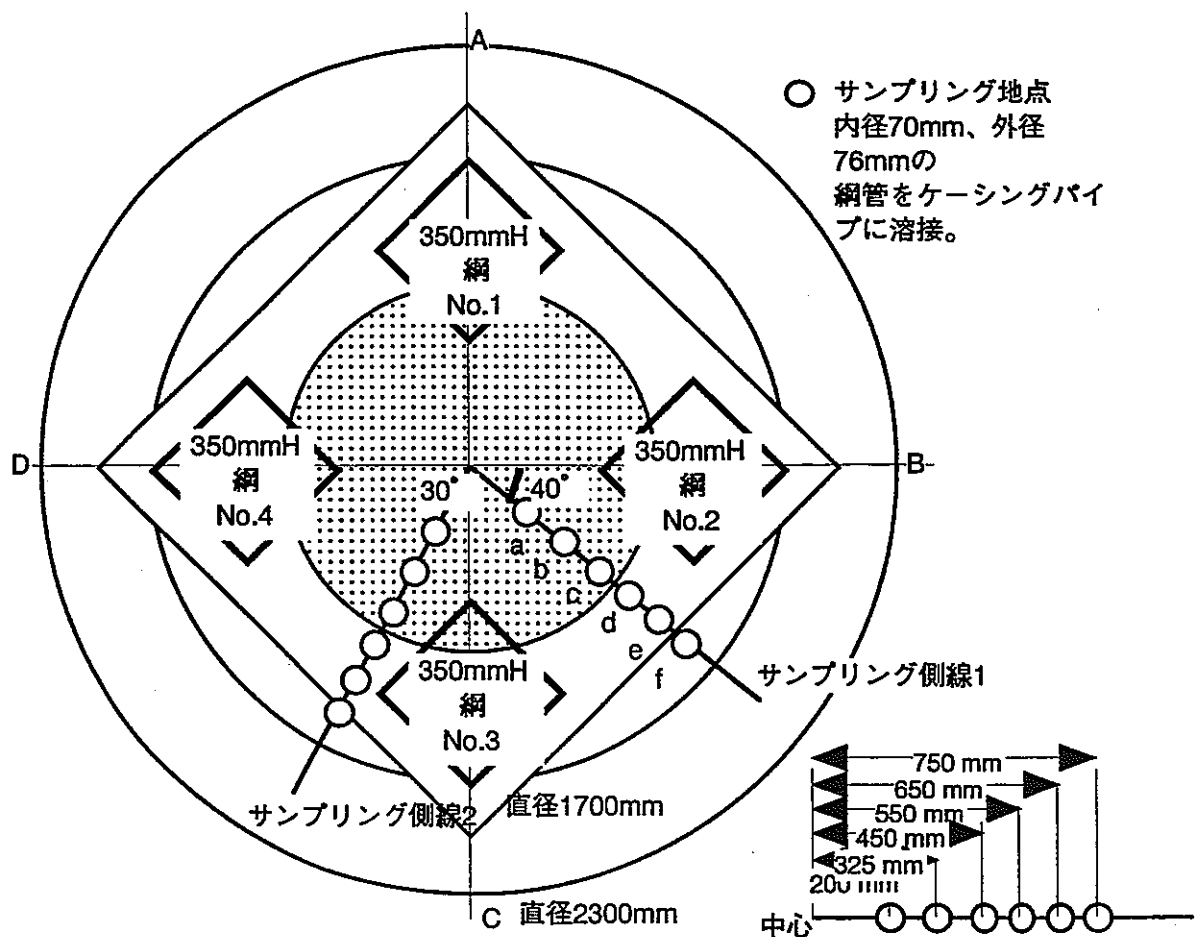


図 6-1 サンプリング実施位置

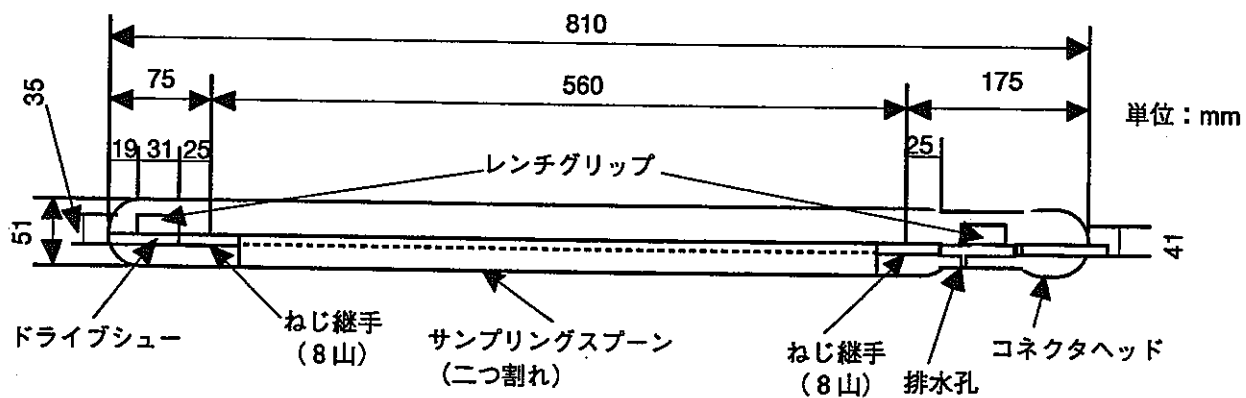


図 6-2 標準貫入サンプラー

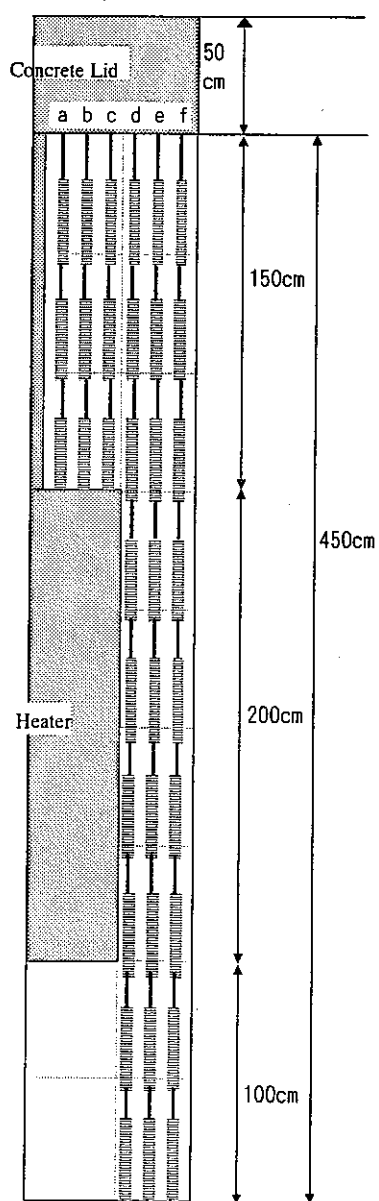


図 6-3 サンプリング区間

6.4 サンプルング結果および考察

6.4.1 含水比測定

サンプルングによる含水比測定は、第1回目、第2回目ともに30箇所実施した。その結果得られる含水比の分布のコンター図を図6-4に示す。

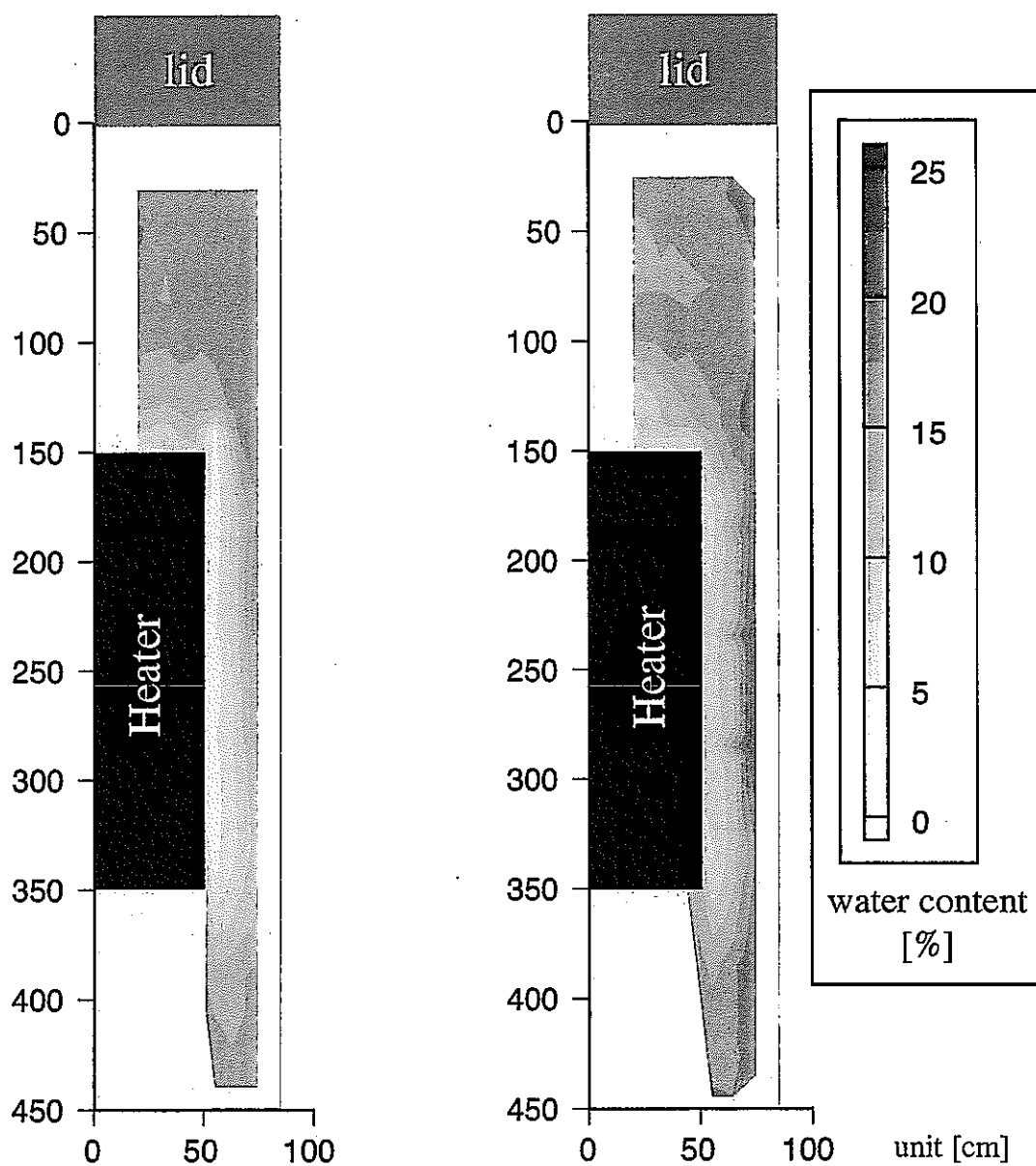
含水比分布からわかるとおり、ヒーターを中心に岩盤側に向かってきれいなコンターを描くことができた。これはサンプル数がかなり多かったことと、サンプル後の養生、すなわち塩ビパイプの挿入によって隣接する領域のサンプルングに影響を与えなかったことが要因と考えられる。

1回目のサンプルングでは、含水比15%のラインがかなり岩盤側に近寄っており、全体的にかなり乾燥していることが観察できる。実際、サンプルング試料を観察しても全体に乾燥した様子で、f孔のサンプルで若干の湿潤傾向が見られた。さらに、加熱中であるためヒーター周りにはかなり乾燥しており、含水比測定では約3%とかなり低い値であった。

また、コンターでは表現しきれていないが、ヒーター近傍になると乾燥収縮に起因するひび割れ等が観察された。この境界前後でサンプルを採取し、含水比を測定したが特異な値は見えなかった。

2回目のサンプルングはヒーターを停止後であり、岩盤との境界から水が若干浸潤しているように思われる。

以前に動燃東海で実施したBig-Benでの加熱試験中のサンプルングでは水の供給により、岩盤とベントナイトの境界で泥水のようなベントナイトが採取されたが、今回は岩盤との境界で、そのような状況は観察されなかった。



Distribution of water content during heating test
[250days after heater on] Distribution of water content during infiltration test
[180days after heater off]

図 6-4 含水比分布の比較

6.4.2 緩衝材の硬度

ヒーターの加熱による緩衝材の硬度の変化を、緩衝材のサンプリングに採用した標準貫入試験による N 値（重量 63.5kgf のハンマーを 75cm 自由落下させ、標準貫入試験用サンプラーを 30cm 打ち込むのに要する打撃数）を用いて評価する。

図 6-5、6-6 にそれぞれ約 8 ヶ月間加熱を経過した時点（以下 1 回目という）、ヒーターを停止してから約 6 ヶ月経過後の時点（以下 2 回目という）における N 値の深度方向の分布を示す。

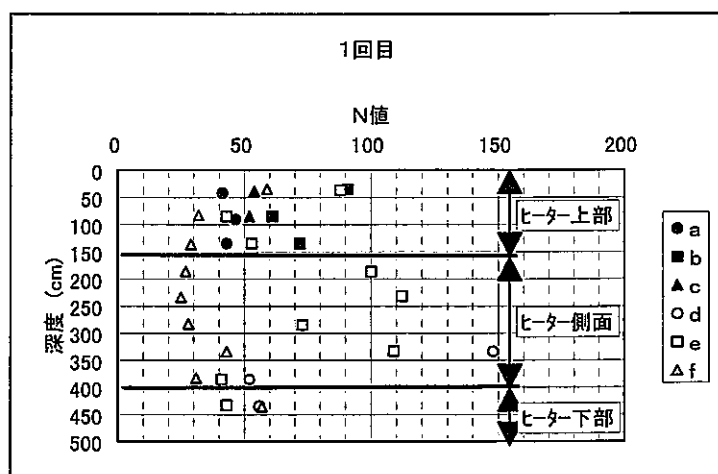


図 6-5 N 値の深度分布（8 ヶ月間加熱を経過した時点）

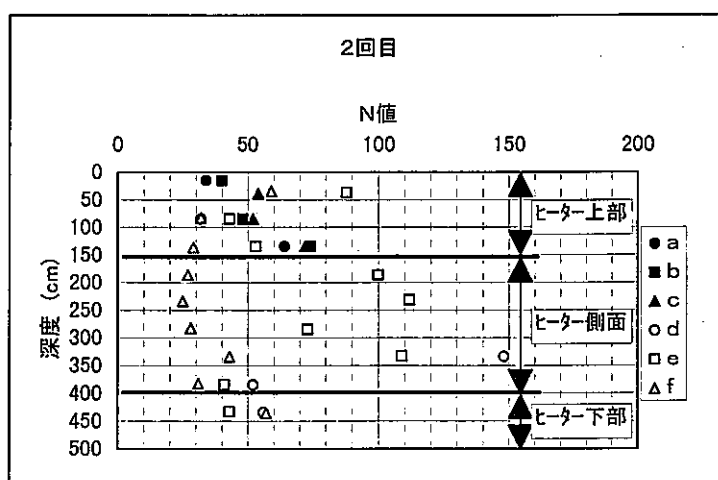
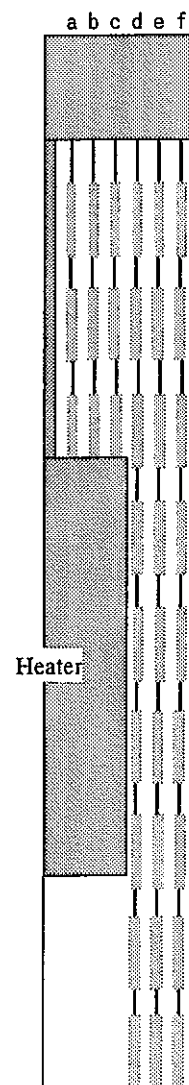


図 6-6 N 値の深度分布（ヒーターを停止後約 6 ヶ月経過時点）

N 値の深度方向の分布はばらつきが大きく、その変化に規則性は見られない。一方、ヒーター側面のデータだけをみると側線 (d,e,f) の順に N 値は小さくなる傾向を示す。これはヒーターに近接するものほど含水比が低下し、その結果として硬度、つまり N 値は大きく



なると考えられる。

図 6-7、6-8 に 1 回目、2 回目における初期乾燥密度（施工時乾燥密度）と N 値の関係を
示す。

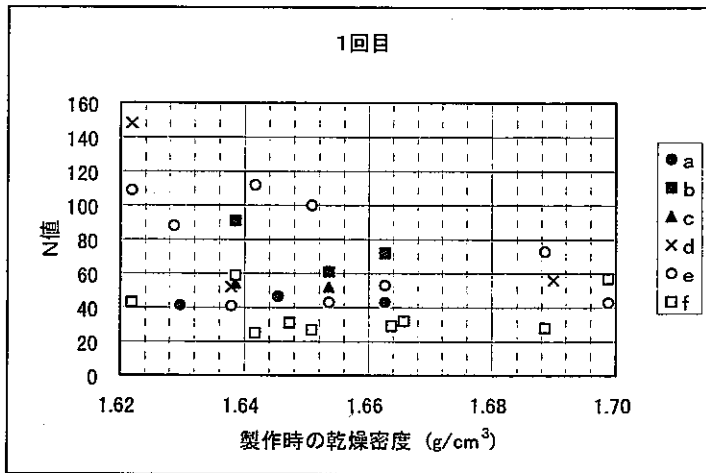


図 6-7 施工時乾燥密度と N 値の関係（1 回目）

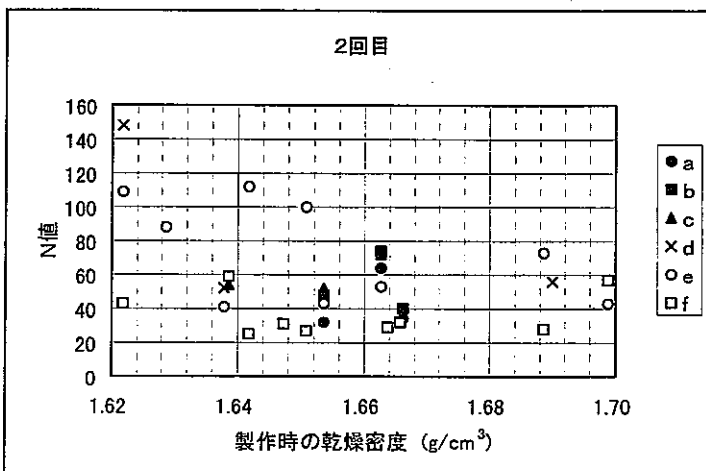
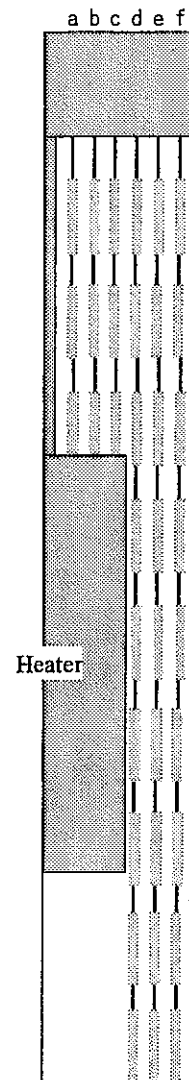


図 6-8 施工時乾燥密度と N 値の関係（2 回目）



初期乾燥密度による N 値の変化傾向は見なく、 $\rho d=1.62\sim 1.70\text{g/cm}^3$ の間において N 値は
25～148 の値を示している。

一方、加熱後の含水比と N 値との関係は図 6-9、6-10 に示すように、若干のばらつきがあ
るものの、含水比が小さいほど N 値は大きくなる傾向を示している。

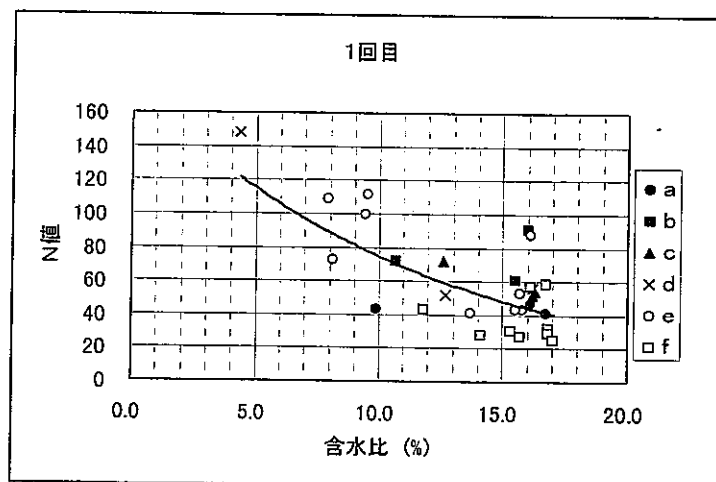


図 6-9 含水比と N 値の関係 (1 回目)

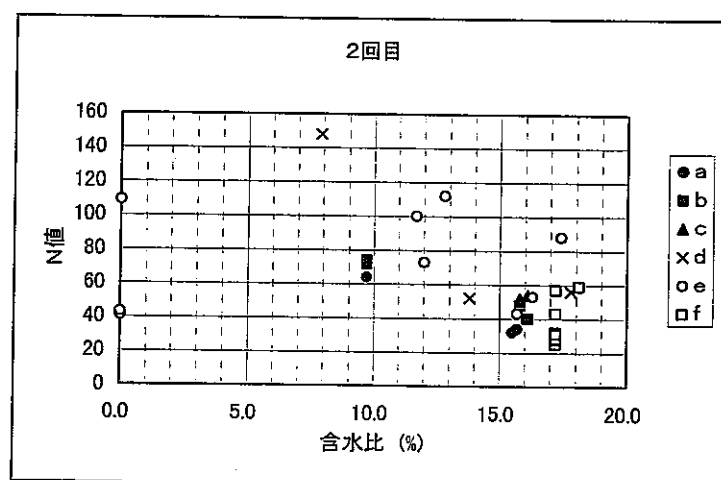
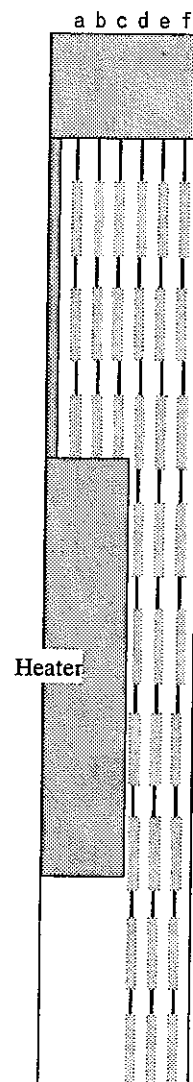


図 6-10 含水比と N 値の関係 (2 回目)



1 回目のサンプリングにおける、含水比と N 値の関係は、回帰分析により次式のように表わされる。

$$N \text{ 値} = 176.92 \times e^{-0.0864w} \quad (1 \text{ 回目}) \quad (3.1)$$

式 (3.1) によると初期含水比 (施工時含水比) $w=15\%$ 付近では $N \text{ 値}=48$ 程度、ヒータ近傍で含水比 $=10 \sim 5\%$ まで乾燥されると $N \text{ 値}=75 \sim 115$ 以上と増大する。また岩盤壁面付近においては岩盤から水が供給され、含水比が大きくなり、その結果 $N \text{ 値}$ は小さくなることが予想される。式 (3.1) から飽和含水比付近 ($w=23.6\%$ 程度) の $N \text{ 値}$ を計算すると $N \text{ 値}=23$ となる。

N 値から一軸圧縮強度を次式により概略的に換算してみる。ただし、式は N 値 35 以下の粘土地盤～シルト質粘土地盤に対して適用されるもので、今回は材料はベントナイトであることに加え、N 値はほとんど 35 を超えているため、この式から求まる一軸圧縮強度は参考程度と考えられる。

$$q_u = N/8 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (3.2)$$

(出典：土質工学会編；土質調査法、p.210、(社)土質工学会、昭和 57.12)

式 (3.1)、(3.2) から緩衝材強度 (q_u) を推定すると、次のようになる。

施工時；	平均含水比 $w=15\%$ ，	N 値=48，	$q_u=0.6\text{MPa}$
ヒータ付近；	含水比 $w=5\sim10\%$ ，	N 値=75～115，	$q_u=1\sim1.5\text{MPa}$
飽和部分；	飽和含水比 $w=23.6\%$ ，	N 値=23，	$q_u=0.3\text{MPa}$

以上の結果から、緩衝材の強度の指標となる N 値に対しては初期乾燥密度よりも含水比の変化がより重要な影響要因であり、緩衝材が乾燥するほど硬くなり、強度が増大していることがわかる。

7. 連成試験

熱-水-応力連成試験は、平成8年度12月17日14:00にヒーターを稼働させて開始した。加熱中は、ヒーター表面温度を100度に設定し、平成9年9月1日14:00にヒーターを停止するまでこの状態を維持した。ヒーター運転中を「加熱試験」と呼び、ヒーター停止後を「減熱試験」と呼ぶこととする。

本章では、連成試験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整理し、考察を加える。

7.1 ベントナイト中の測定データ

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した。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。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。

7.1.1 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7-1はDDA断面の熱電対により測定した温度の経時変化、図7-2はピット床面の間隙水圧計により測定した温度の経時変化、図7-3は間隙水圧計により測定したDDA断面の温度の経時変化を示す。図7-4～図7-6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ものである。

図7-1によると、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℃を越える値を示した。その後は、TT-11のようにほぼ100℃に落ち着いている。この温度がヒーターの制御の指標であるが、ヒーター表面の他のセンサー、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。ヒーター停止後は、約3カ月程ですべての点でほぼ加熱前の温度に戻っている。

図7-2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より約3℃ほど高い値を示しているが、これは、PC-1Tがヒーター直上に近いことによると解釈できる。ヒーター停止後は、約3カ月程ですべての点でほぼ加熱前の温度に戻っている。

図7-3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。ヒーター停止後は、約3カ月ですべての点でほぼ加熱前の温度に戻っている。

図 7-4 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 7-5 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 $46^{\circ}\text{C}/35\text{cm}=\text{約 } 1.3^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ となっている。

図 7-6 は加熱後 3 ヶ月経った時点での温度分布であるが、図 7-5 と比較してほとんど差がなく、1 カ月後の時点で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。

7.1.2 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 7-7 はピット底面、図 7-8 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 7-7、図 7-8 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ていない。全体的に加熱後間隙水圧は低下し、ヒーター停止後に上昇する傾向があるように見えるが、変動はわずかであると言える。図 7-7 のピット底面のセンサーは亀裂付近に設置しているが、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投入し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。

7.1.3 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 7-9 は DDA 断面に設置した湿度の経時変化である。センサーが不安定であるため、信頼性の高いデータとは言えないが、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。また、ヒーターの停止とともに各計測点の水分量が上昇を開始した。

図 7-10 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後、含水比に変換した。それらをもとに試験開始後、180 日後、250 日後の含水比コンター分布を描いたのが図 7-11、図 7-12、図 7-13 である。

図 7-10 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。なお、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 7-11 は初期状態の含水比分布を示すものであるが、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、岩盤側では一部では浸潤によると思われる高い含水比を示している(WE-4)。図 7-12 を図 7-11 と比較すると、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 7-13 でも 180 日後の結果と同様の結果を示している。

7.1.4 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 7-14 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減少の傾向に転じた。また、ヒーターの停止により、いったん上昇して減少するもの、減少するものなどに分かれ、それぞれの点におけるベントナイトの挙動がかなり複雑であると思われる。

7.1.5 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 7-15 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、ヒーターの出力と温度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、ヒーター近傍ほどではなく、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。また、ヒーター停止後は 1 週間ほどでそれぞれの計測点でほぼ 0 を示した。

ヒーターから緩衝材を経て、熱は放射状に伝導してゆくと考えられる。軸対称的に熱が拡がる場合、熱源中心からの距離（半径）に熱流束を乗じたものは理論的には一定値をとることになる。厳密には 3 次元的に熱は拡散するため、軸対称とは言えないが、MF-3 と MF-4 について計算すると、それぞれ 70(W/m) と 76.5(W/m) となり、概ね近い値となっていることが確かめられた。

7.1.6 ひずみ

ベントナイトのひずみを測定した結果を図 7-16 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。また、ヒーター停止後は伸びを示すもの、収縮を示すものなど、圧力測定と同じく、ベントナイトの挙動は非常に複雑であることがわかる。

7.1.7 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、反応がほとんど見られなかった。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。

7.2 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。すべてのセンサーをデータロガーに接続し、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）を行った。また、トリバック計測を加熱中、ヒーター停止後、試験終了直前の3回実施した。

7.2.1 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。その内KBH3での計測結果を図7-17に示す。

図7-17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、著しく間隙水圧が増加し、その後、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可能性を示唆するものと思われる。

7.2.2 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。間隙水圧計は6本のボアホール（KBH1、KBH2、KBH3、KBH4、KBH5、KBH6）に埋設している。その計測結果を図7-18、図7-19、図7-20に示す。

図7-18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。ヒーターの中心とほぼ同じ深度であるPT-7Tが一番高い値を示している。ヒーター停止後は約3カ月で試験開始時の温度に戻っている。

図7-19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。ヒーターの中心とほぼ同じ深度であるPT-11T、PT-12Tが一番高い値を示している。ヒーター停止後は約3カ月で試験開始時の温度に戻っている。

図7-20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。ヒーターの中心とほぼ同じ深度である PT-16T が一番高い値を示している。ヒーター停止後は約 3 カ月で試験開始時の温度に戻っている。

7.2.3 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 7-21 に示す。試験期間中の変化は微小であり、ヒーターの加熱による影響はほとんど無いと思われていたが、ヒーターの停止により若干の影響を受けた。

7.2.4 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 7-22 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。また、ヒーターの停止とともに SD-4、SD-6 以外の点で反応があった。

7.2.5 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 7-23 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ると、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。

また、ヒーター停止後も各計測点で顕著な挙動があり、これらはほかの岩盤計測データと合わせて評価する必要がある。

7.2.6 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 9 年 5 月 27 日のヒーター運転中、平成 9 年 11 月 21 日のヒーター停止の約 3 カ月後、平成 10 年 2 月 23 日の連成試験の終了 1 カ月前の 3 回である。平成 7 年 11 月 10 日を初期値とし、3 回の計測値との累積変位の差について整理した。KBM4 についての結果を図 7-24 に示す。これらトリベックのデータは特に周辺岩盤の挙動を顕著に示すものであると思われる。

7.2.7 岩盤データに関する考察

加熱中～加熱後岩盤中の温度、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て、比較・評価する作業が必要となる。

7.3 取得データに関する考察

本年度取得したデータは、連成試験開始から終了までのデータである。得られたデータをグラフ化して経時変化等として整理すると、センサーによってはかなり不安定な挙動を示すものも存在する。データの信頼性を確かめるためには、試験終了後にセンサー類を取り出して、センサー毎の確認試験をしておくことが必要と思われる。場合によっては、校正係数等を見直して生データを再整理することも必要となろう。

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と推定される。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。特に、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が取得できたので、それらを検証し、連成現象を把握、理解する必要がある。

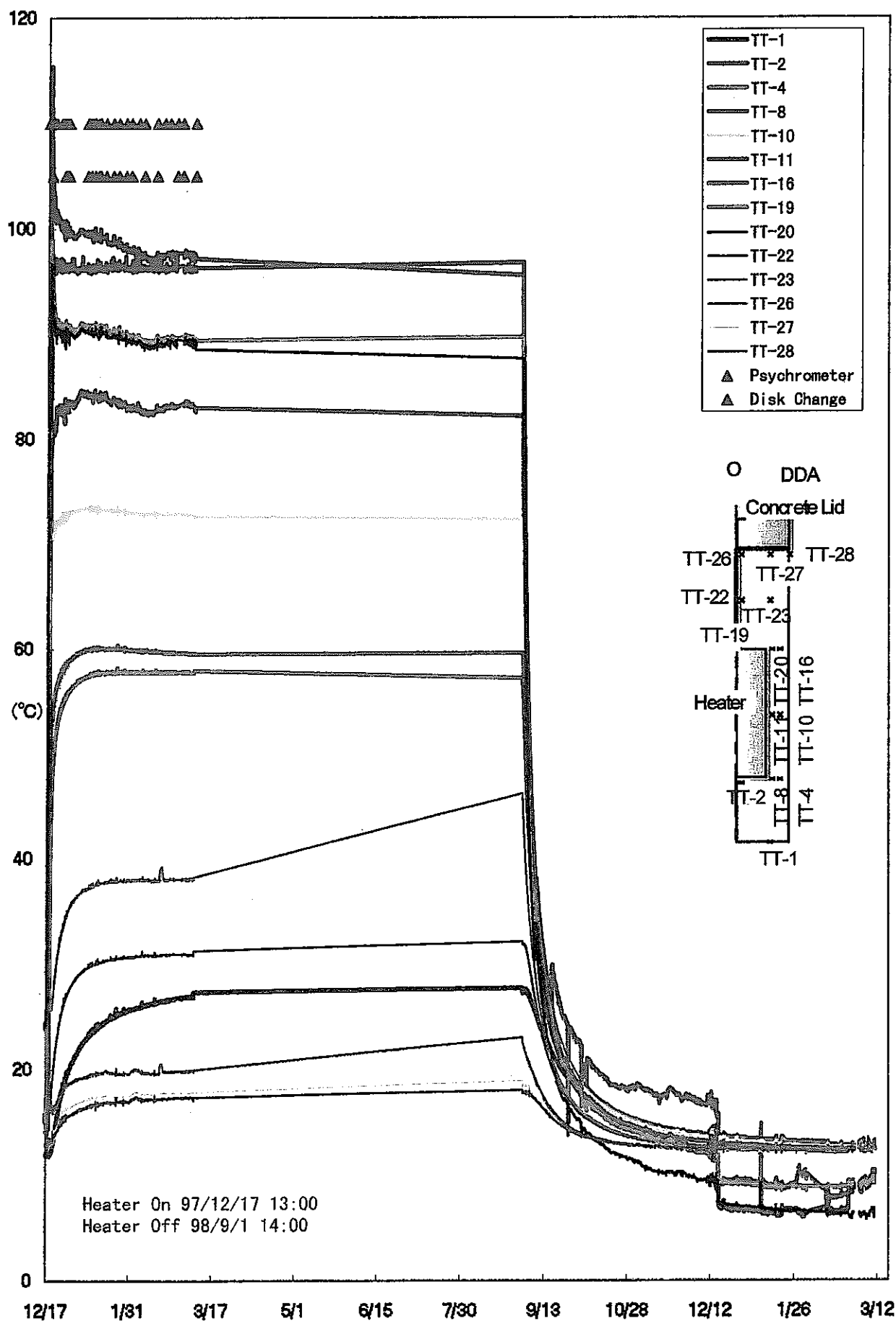


図7-1 緩衝材中の温度の経時変化 (DDA断面)

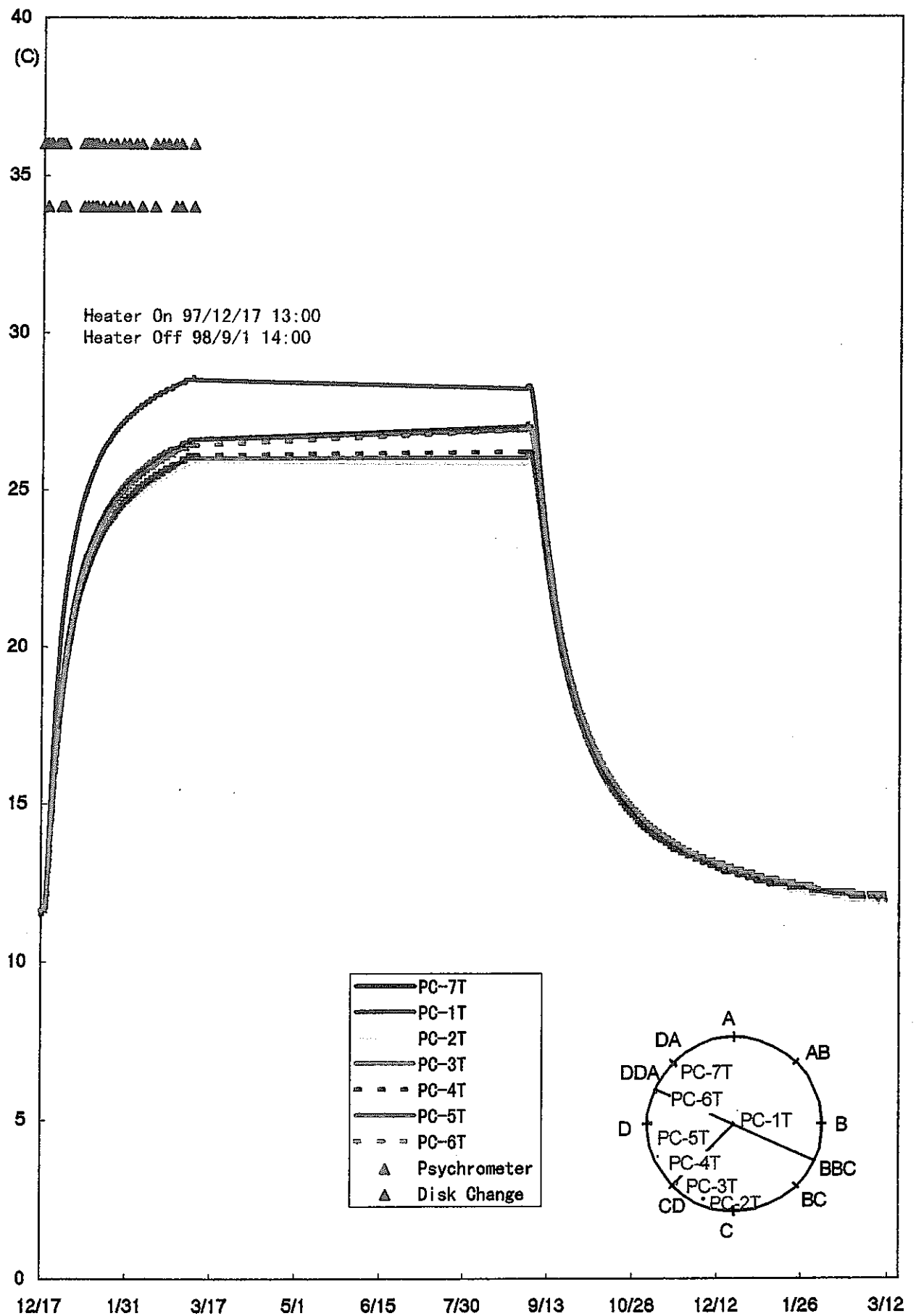


図7-2 ピット床面の温度の経時変化

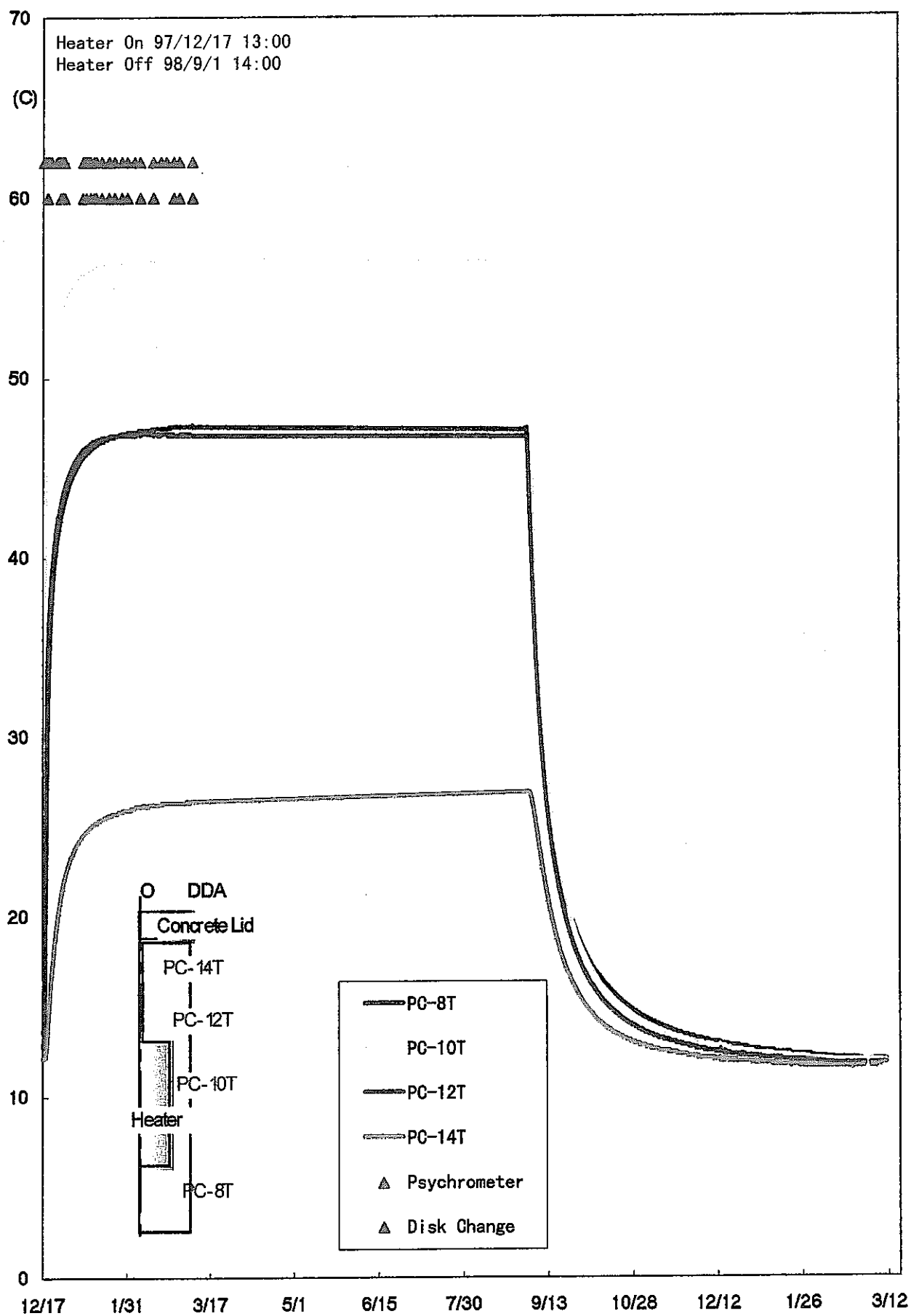


図7-3 ペントナイト中の温度の経時変化 (DDA断面)

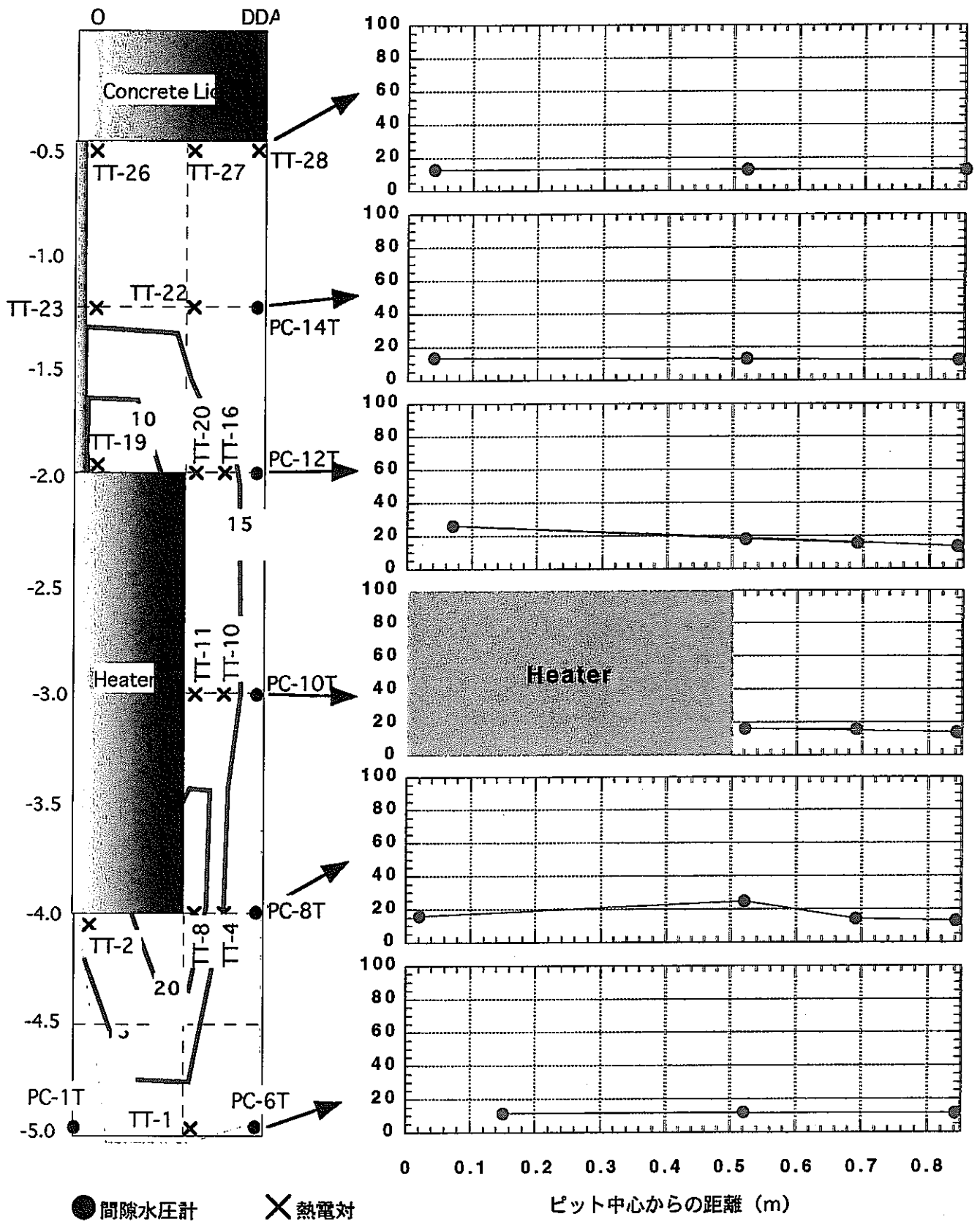


図7-4 試験開始直後のDDA断面の温度分布（単位；℃）

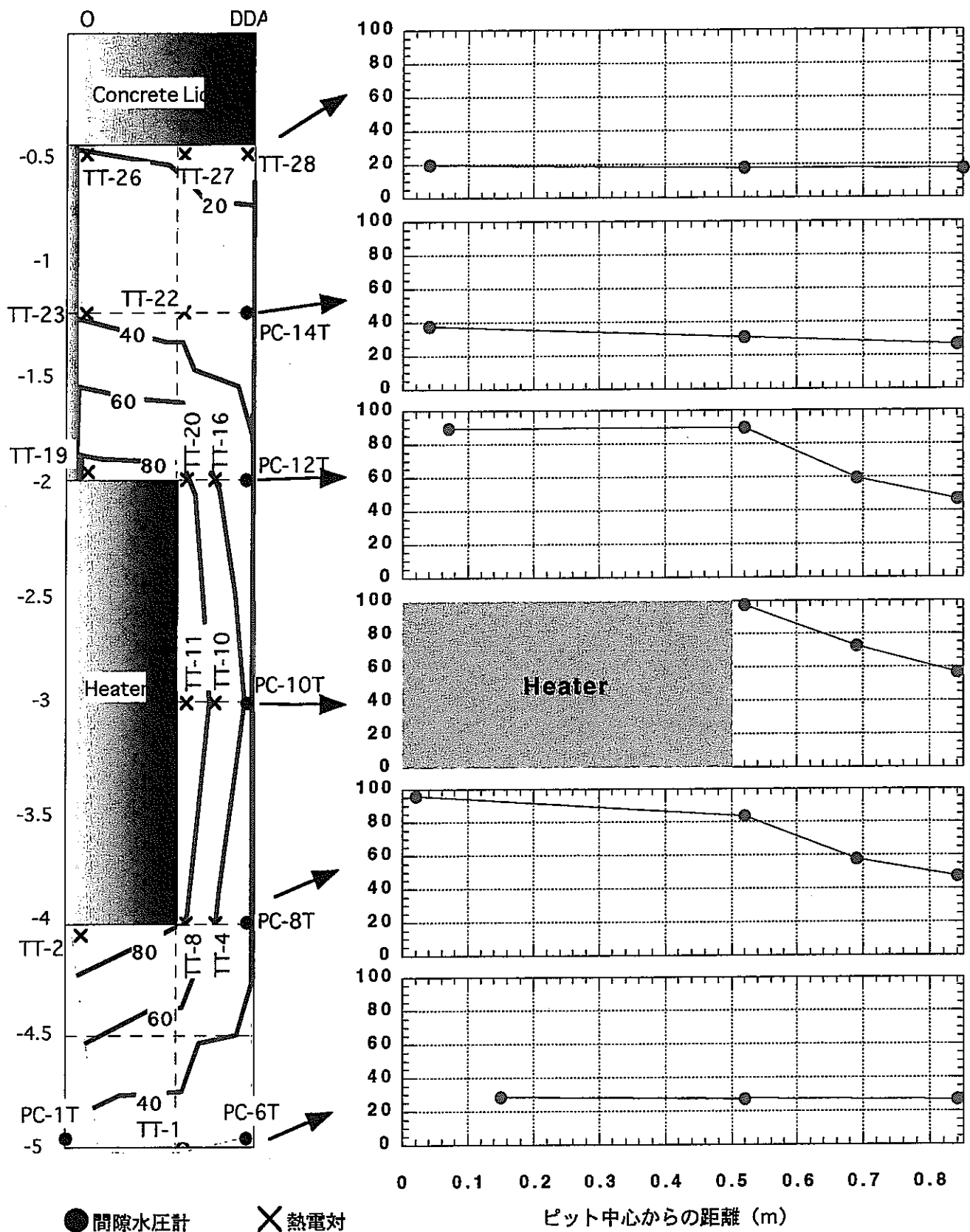


図7-5 試験開始1カ月後のDDA断面の温度分布 (単位 ; °C)

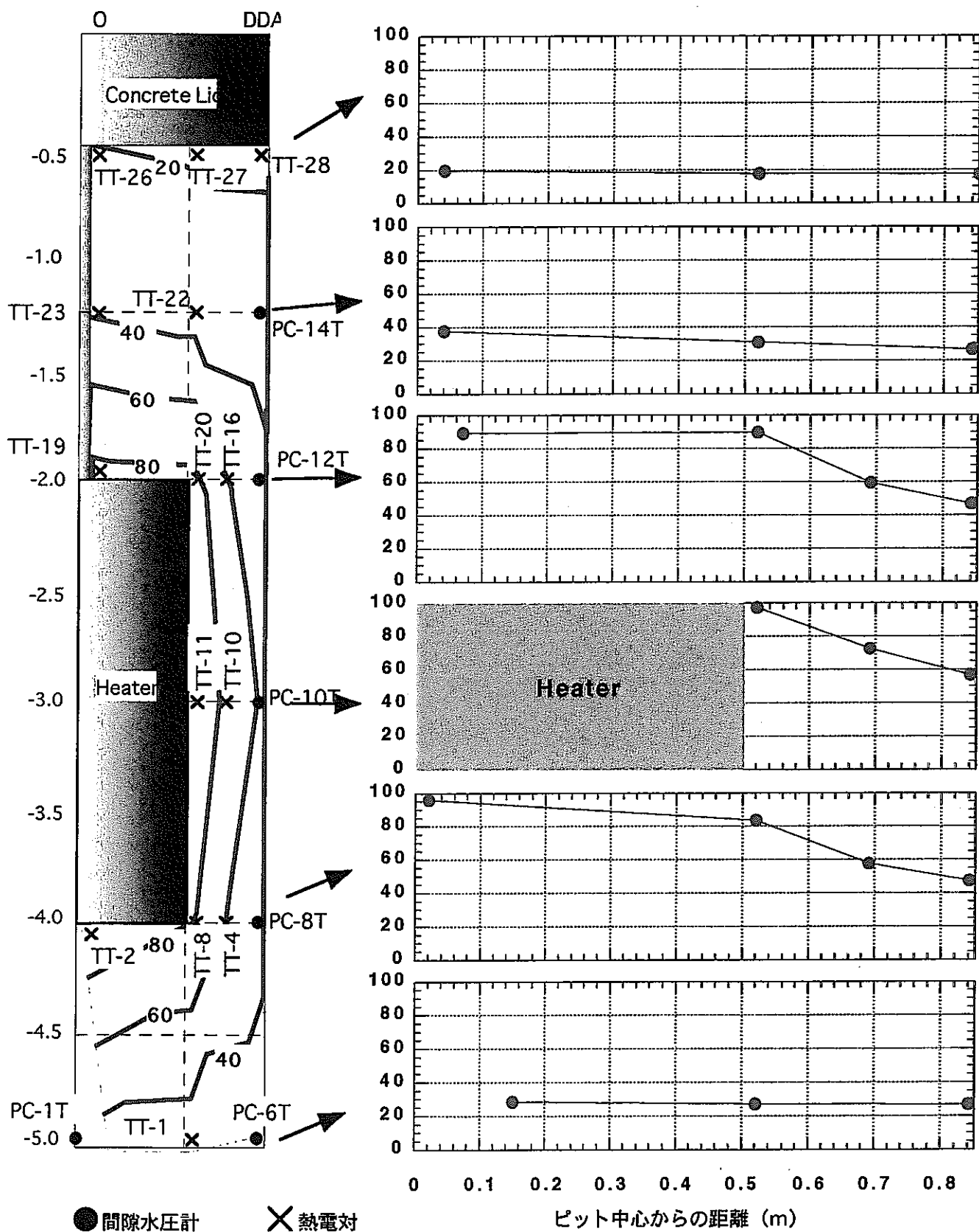


図7-6 試験開始3カ月後のDDA断面の温度分布（単位；℃）

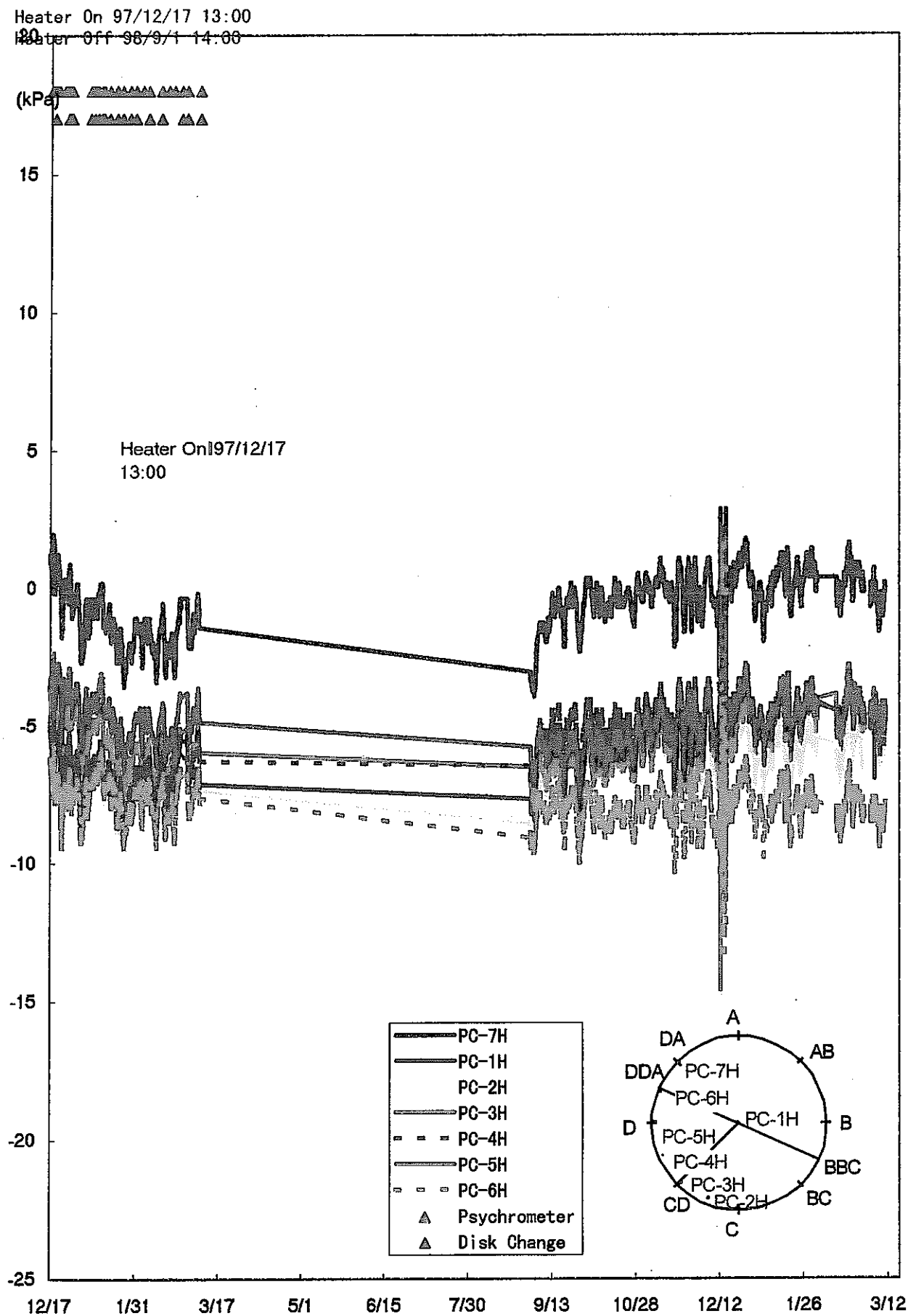


図7-7 ピット床面の間隙水圧の経時変化

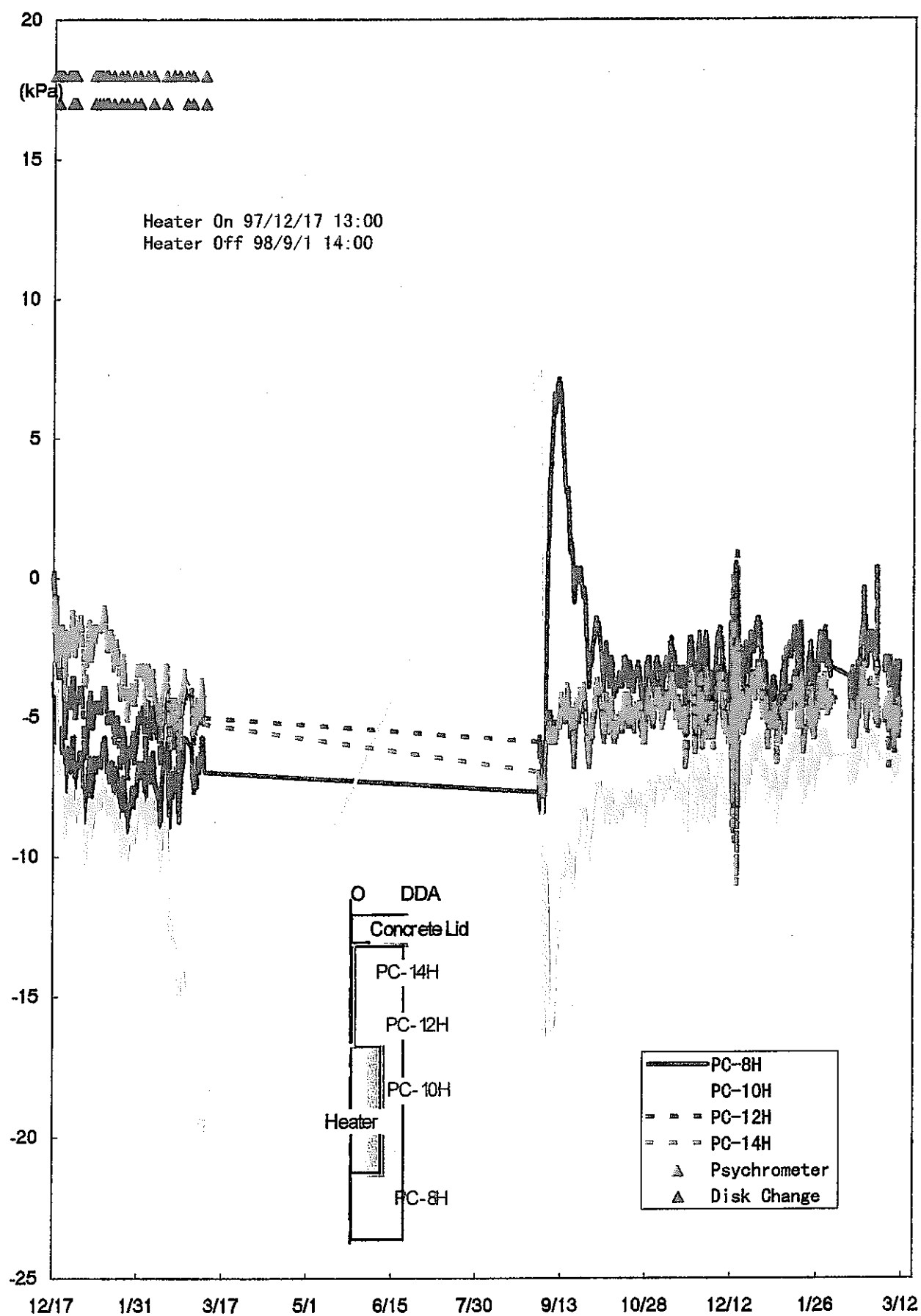


図7-8 間隙水圧の経時変化 (DDA断面)

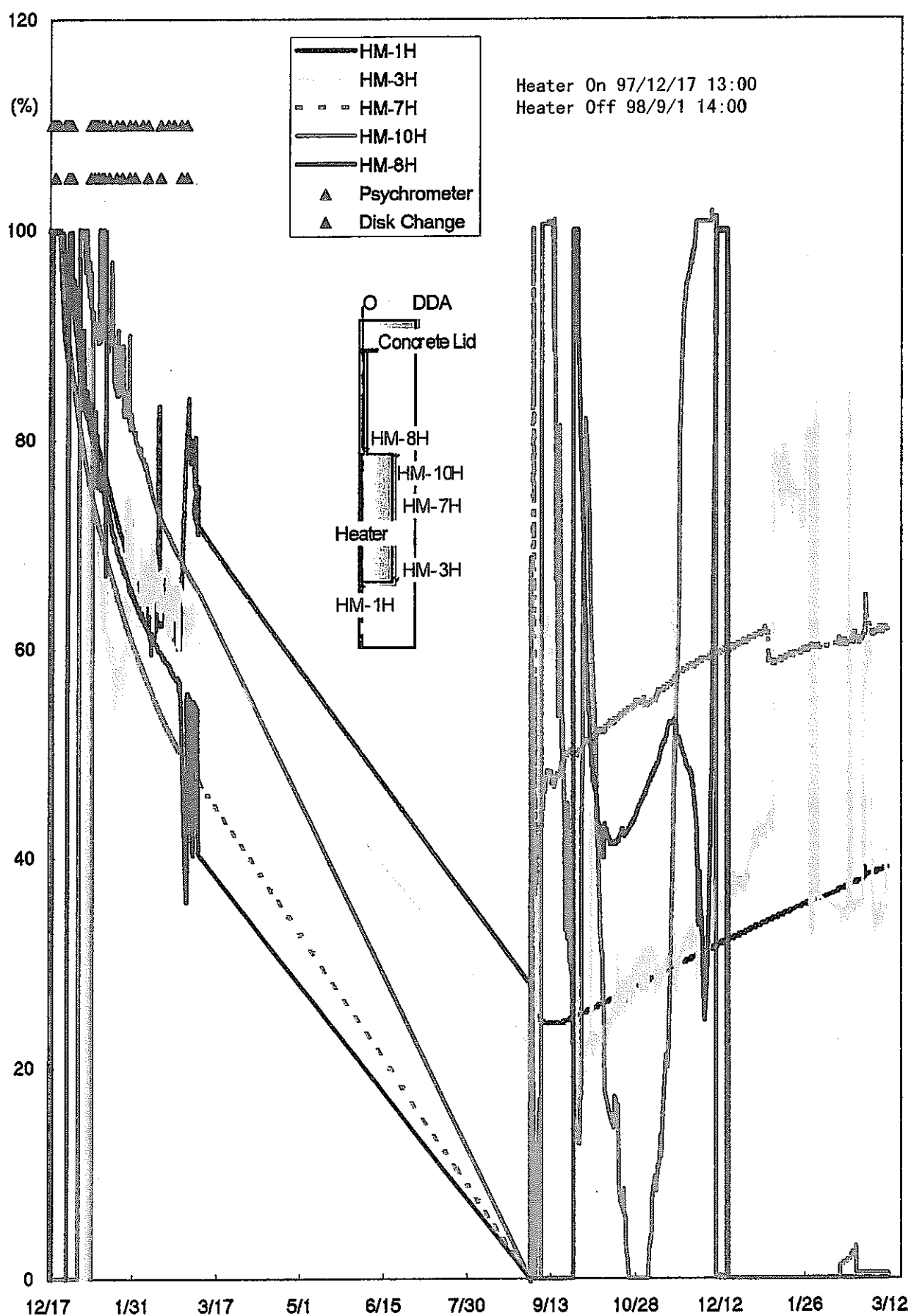


図7-9 湿度の経時変化 (DDA断面)

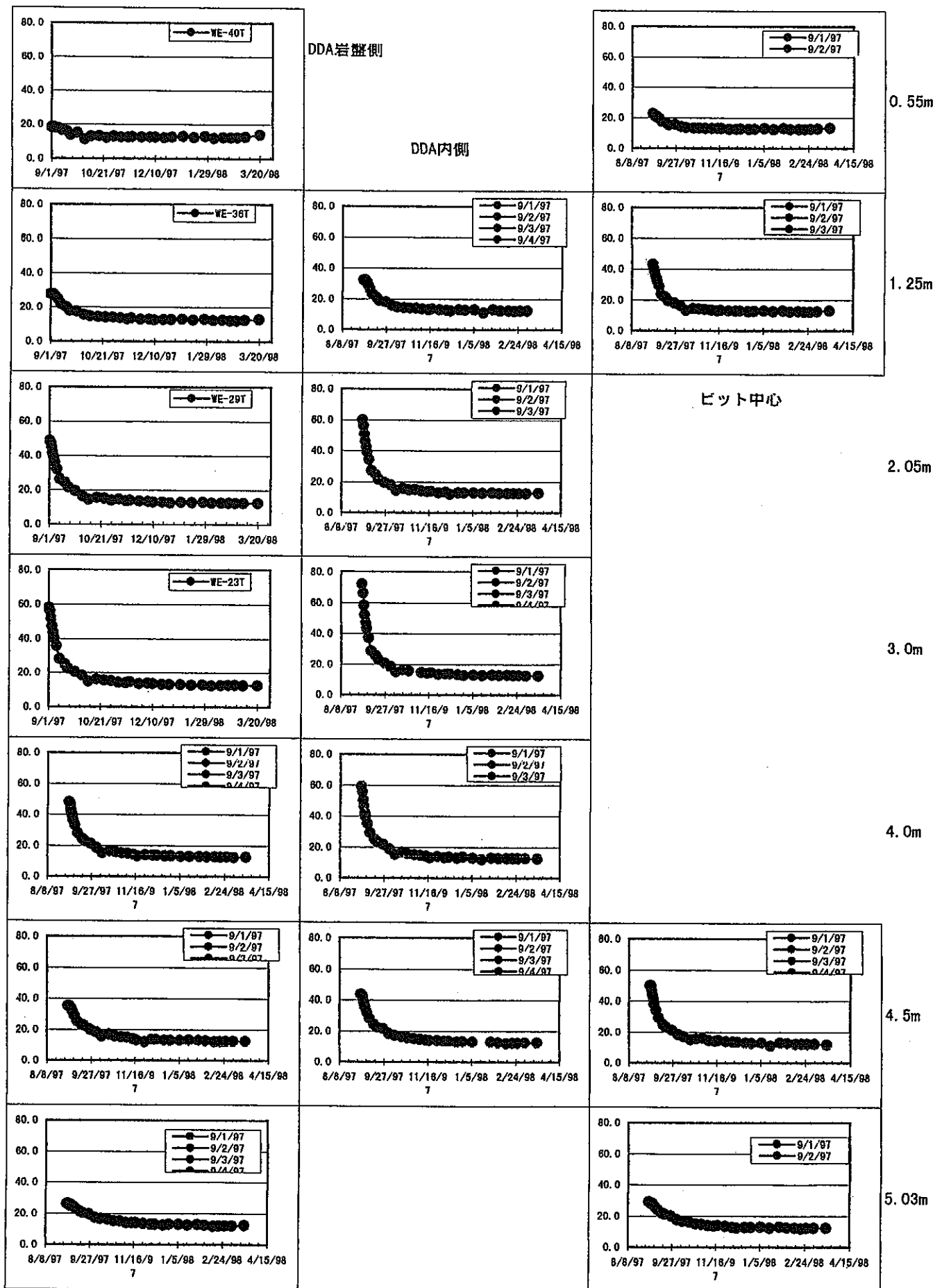


図7-10 DDA断面の水分分布（減熱試験）

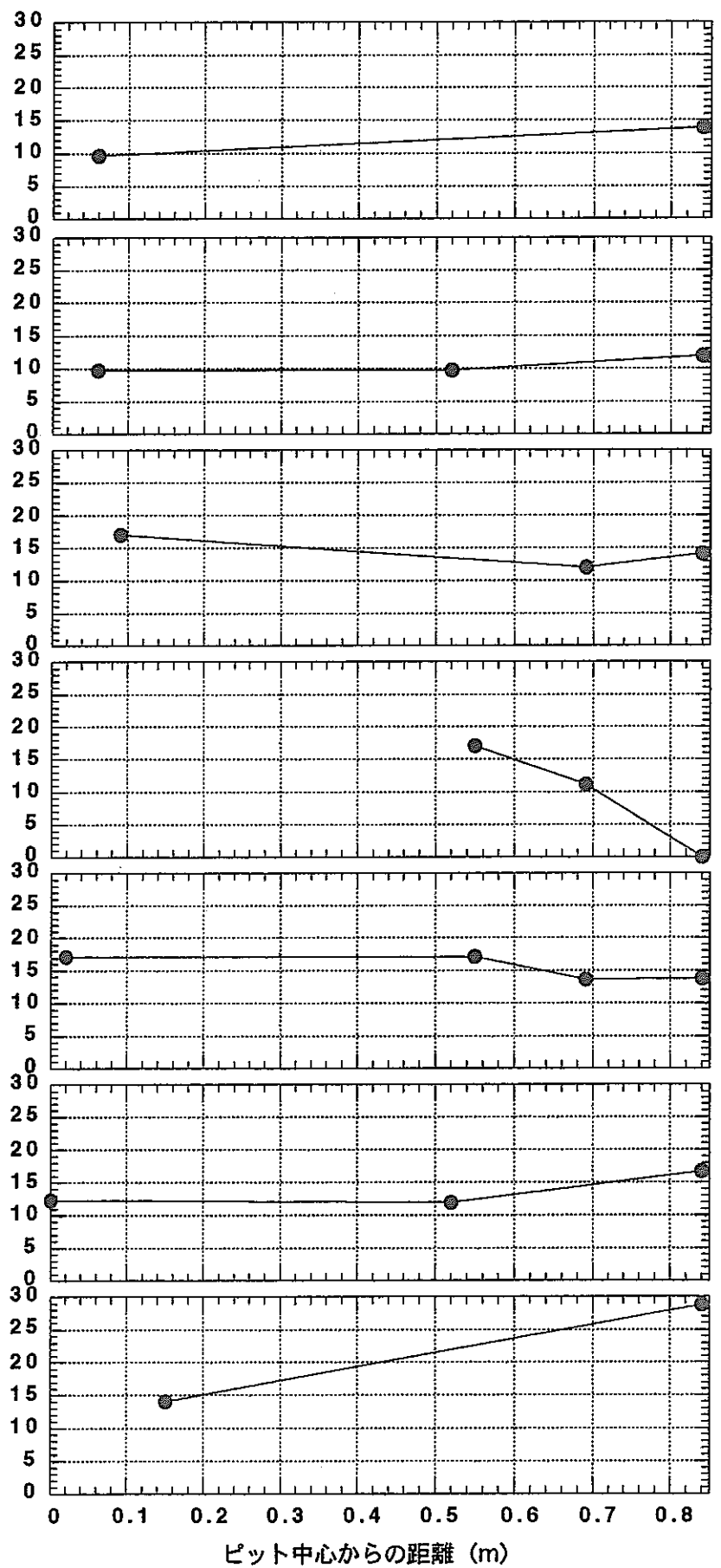
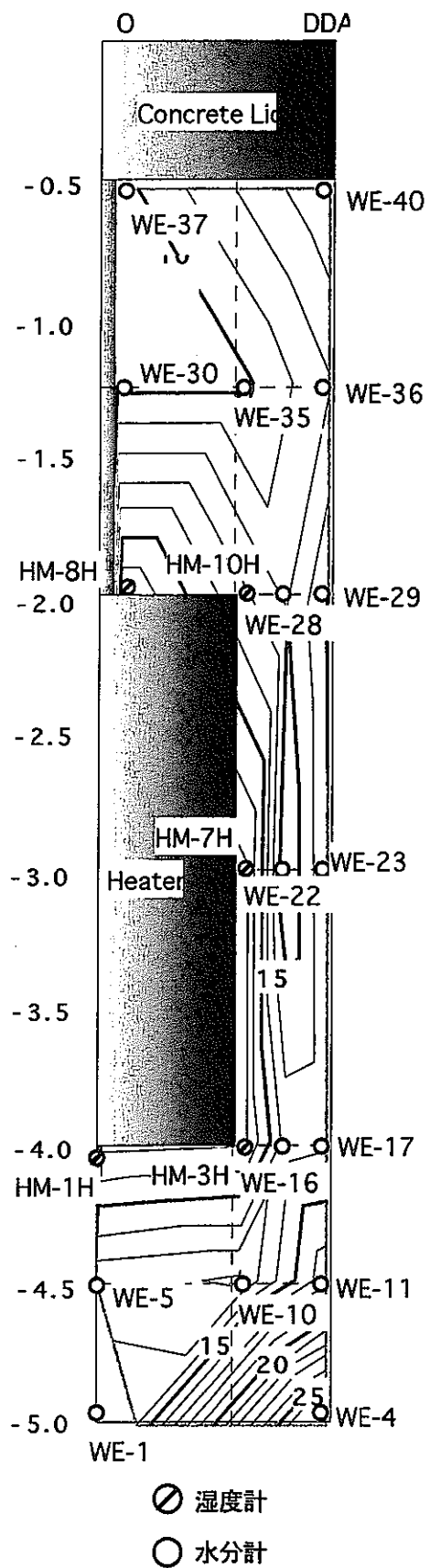


図7-11 試験開始直後のDDA断面の含水比分布 (単位 ; %)

Distribution of Water content - during infiltration test -

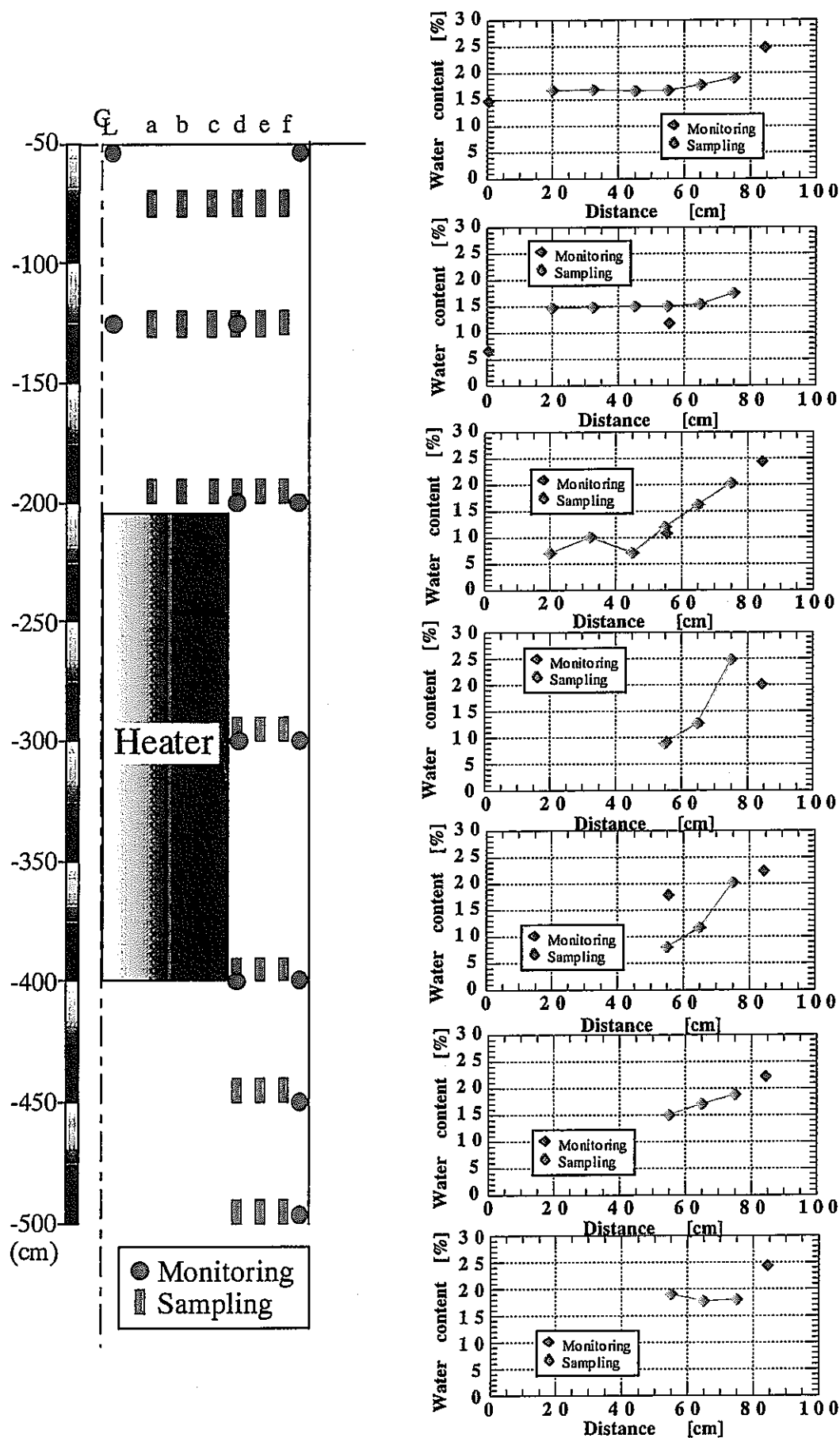


図7-12 試験開始 180 日後の DDA 断面での含水比分布(単位: %)

Distribution of Water content - during heating test -

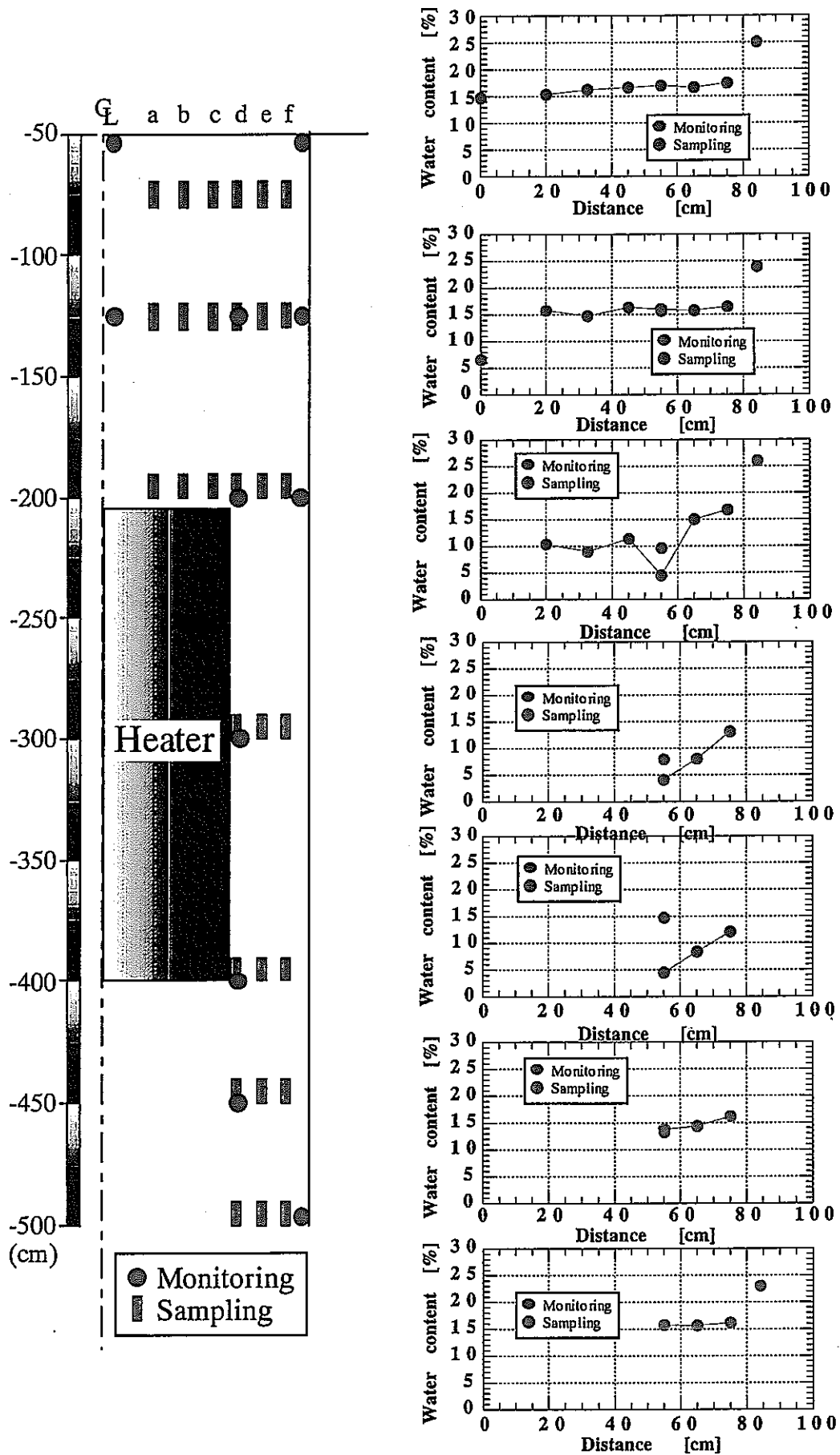


図7-13 試験開始 250 日後の DDA 断面での含水比分布(単位: %)

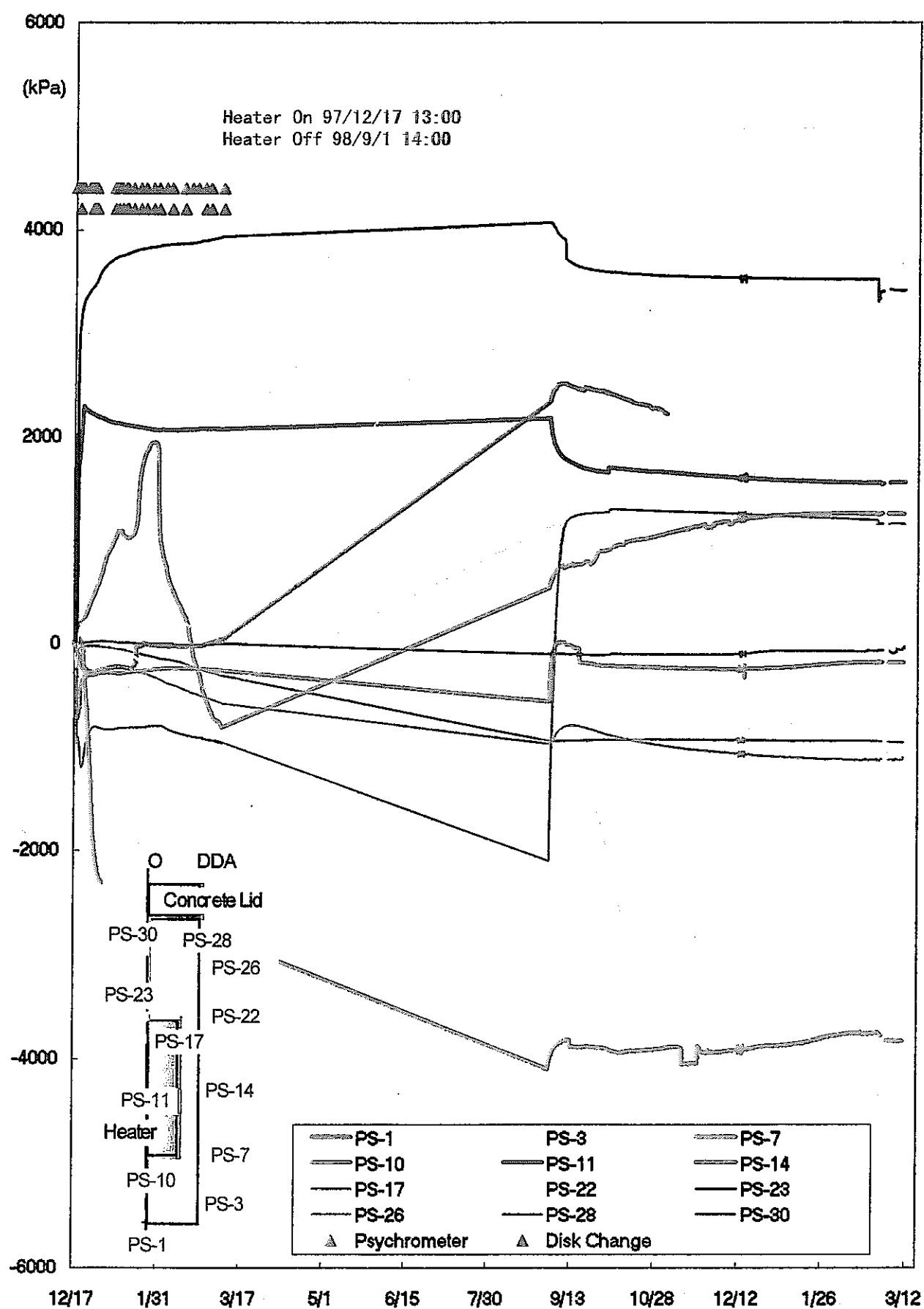


図7-14 ベントナイト中の圧力の経時変化 (DDA断面)

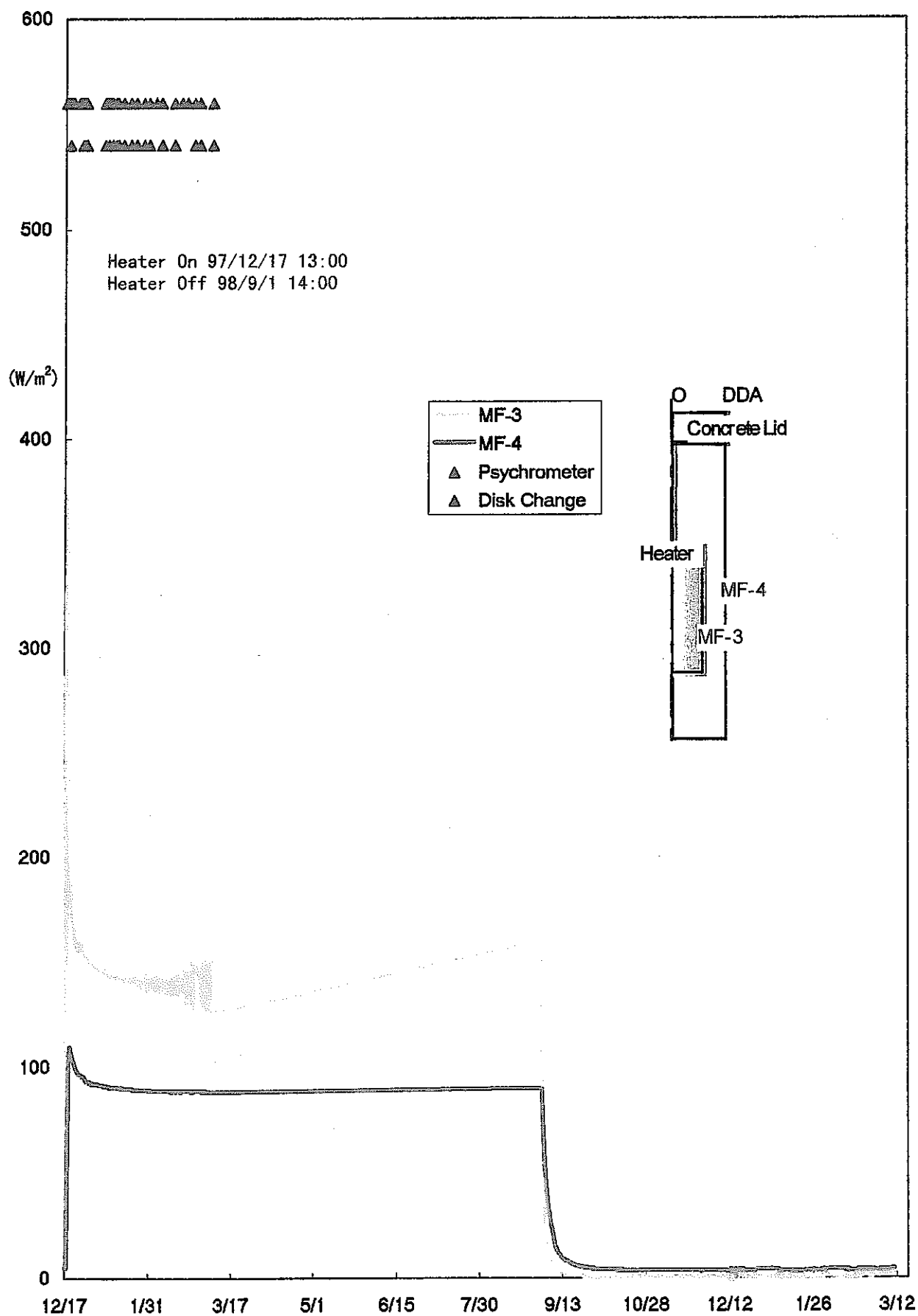


図7-15 熱流束の経時変化 (DDA断面)

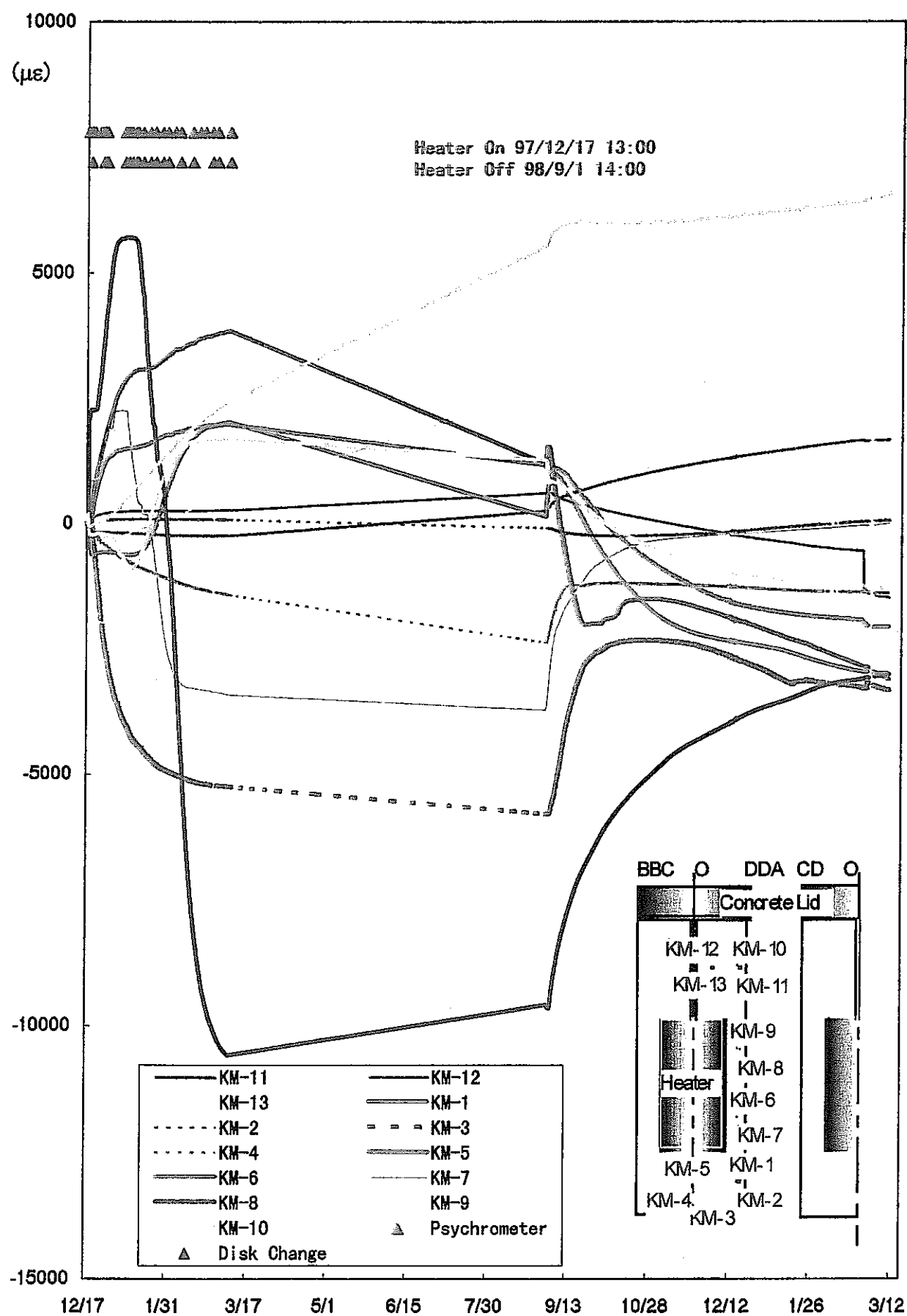


図7-16 ひずみの経時変化

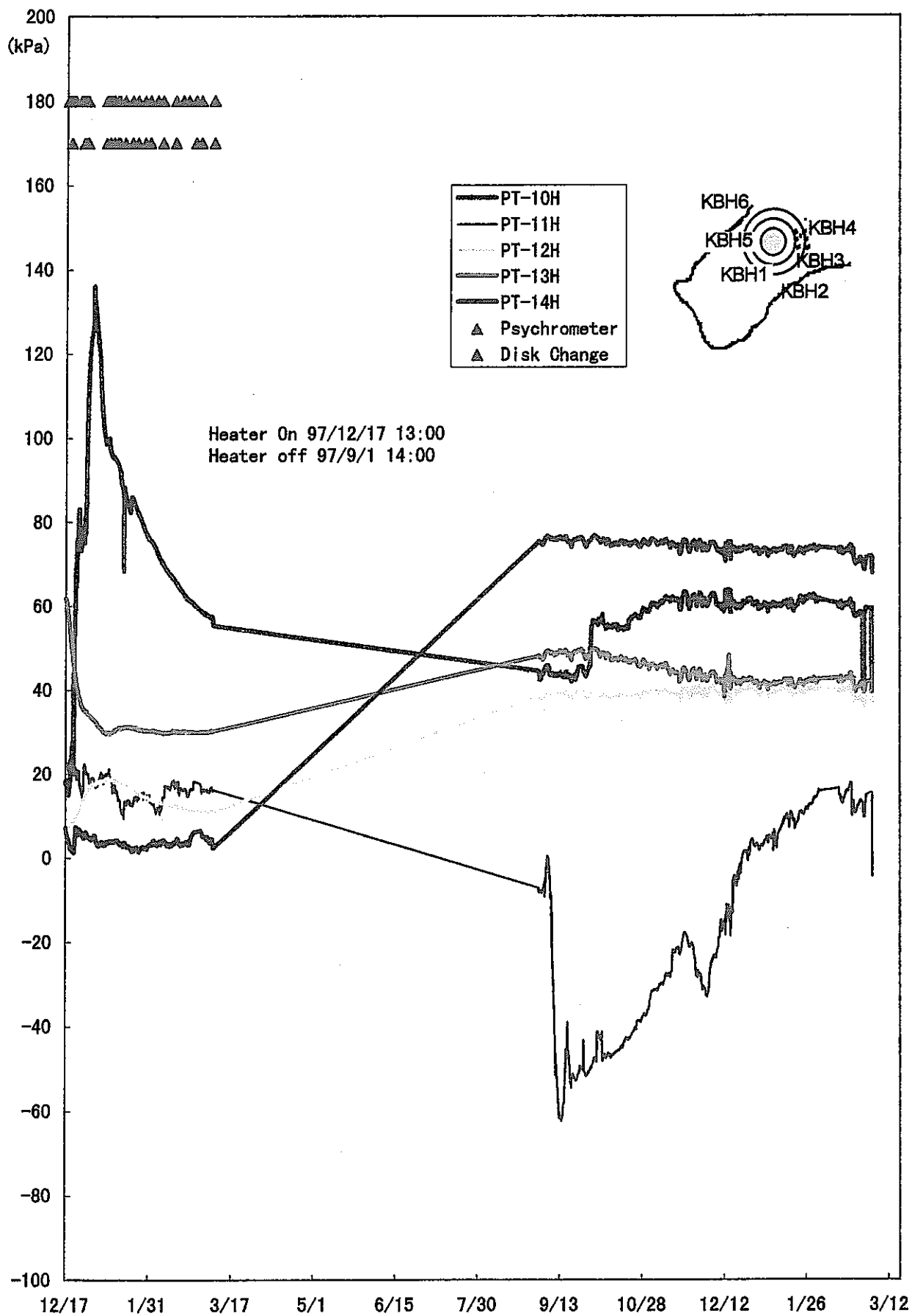


図7-17 岩盤中の間隙水圧の経時変化 (KBH3)

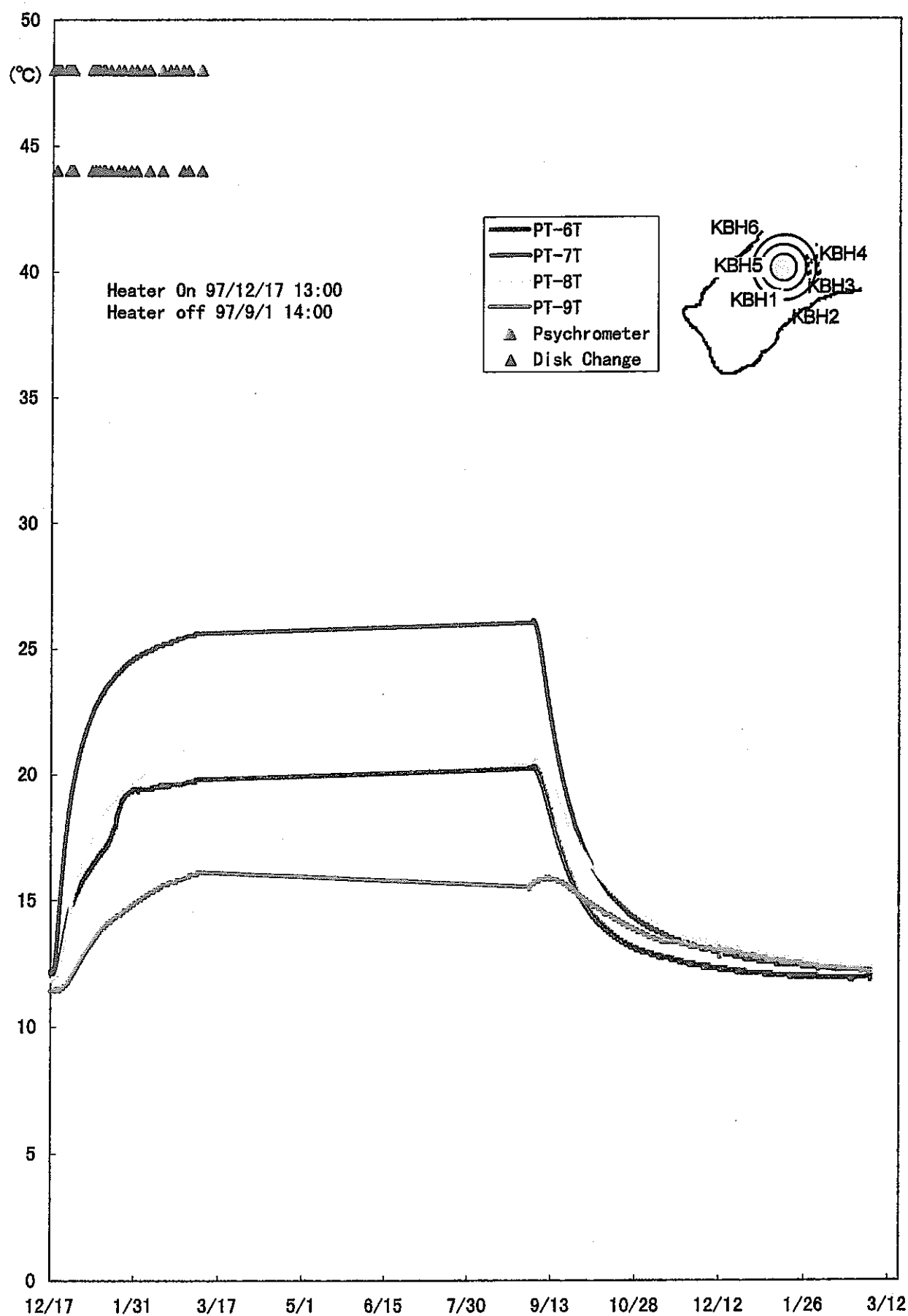


図7-18 岩盤中の温度の経時変化 (KBH2)

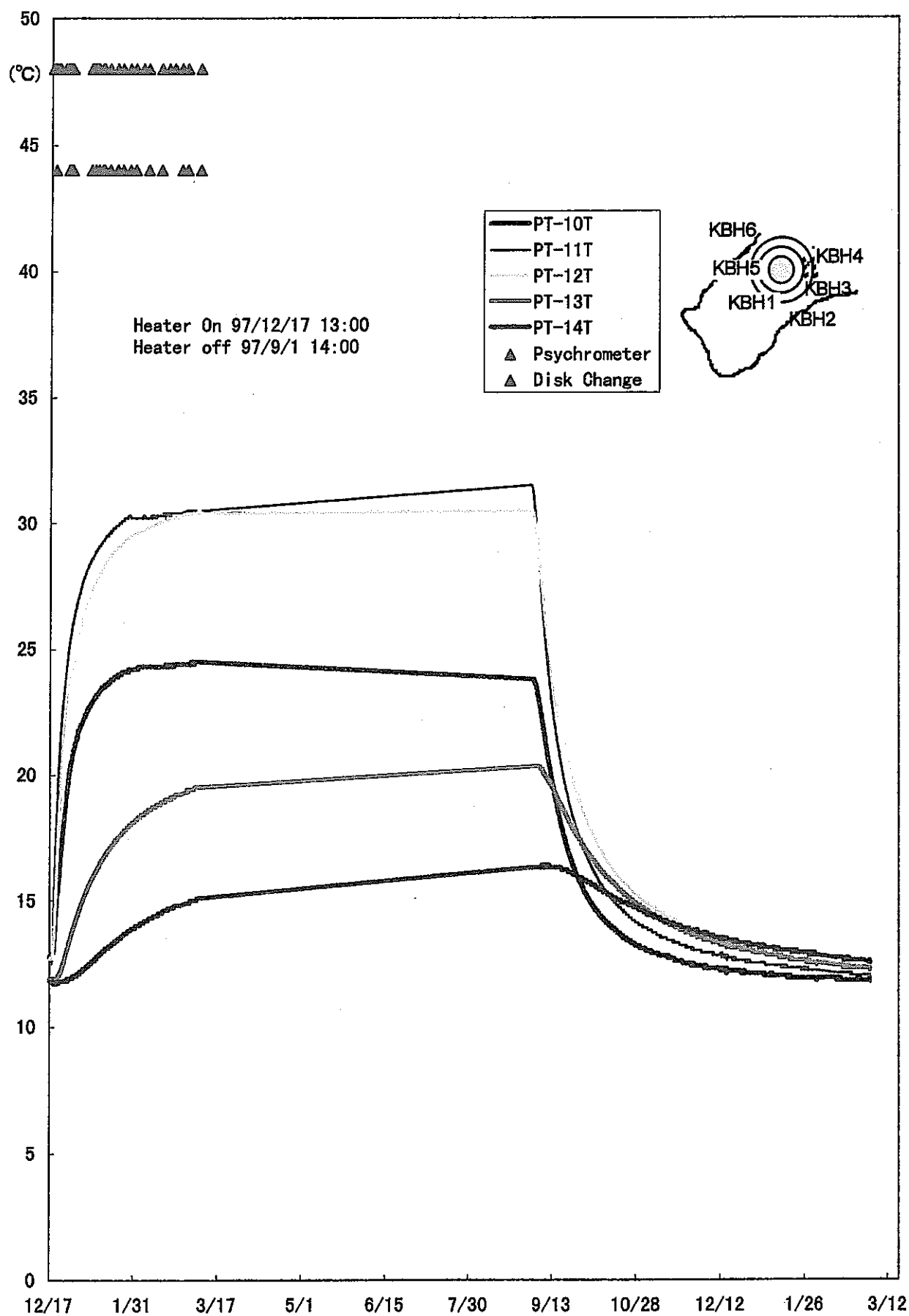


図7-19 岩盤中の温度の経時変化 (KBH3)

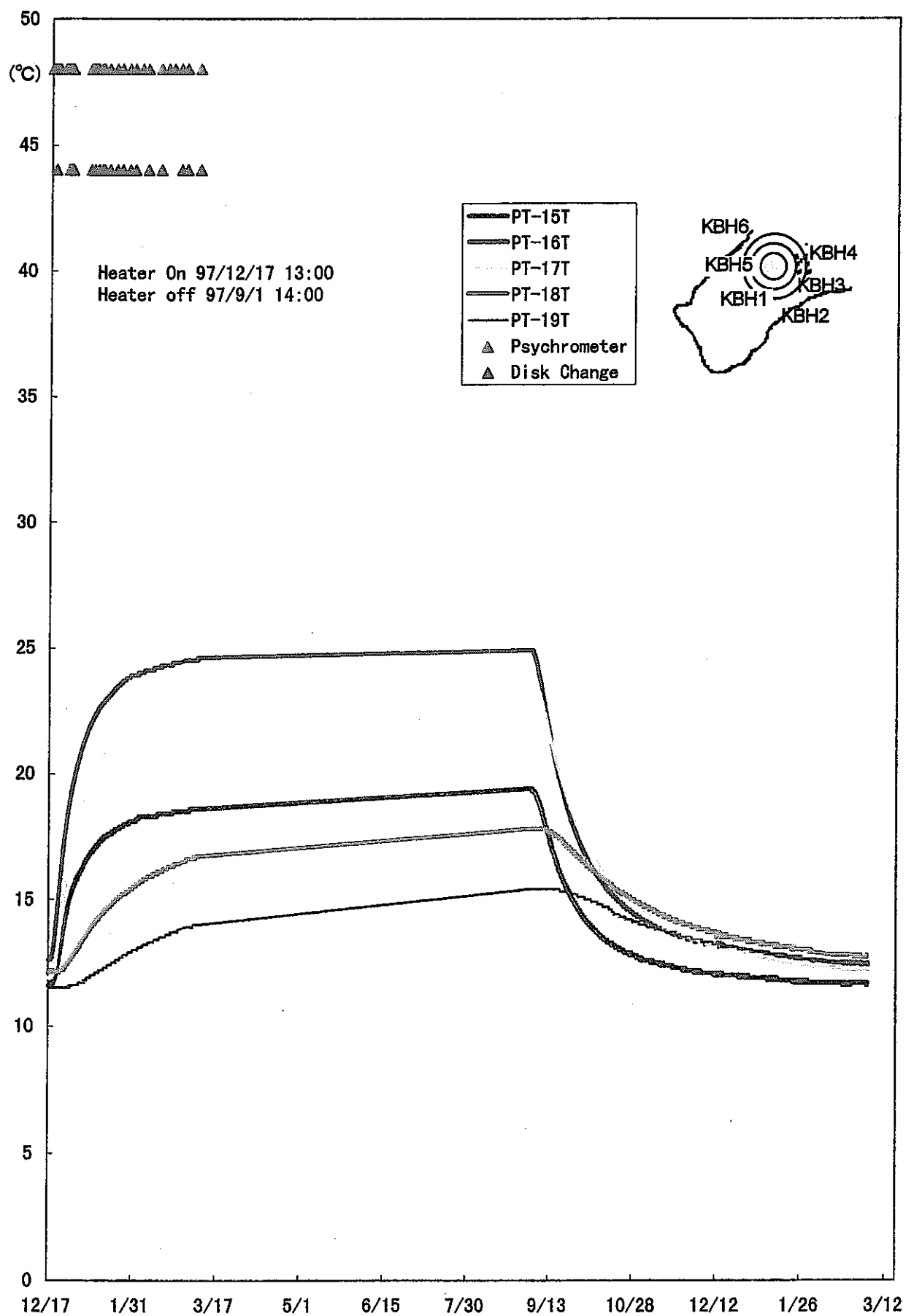


図7-20 岩盤中の温度の経時変化 (KBH4)

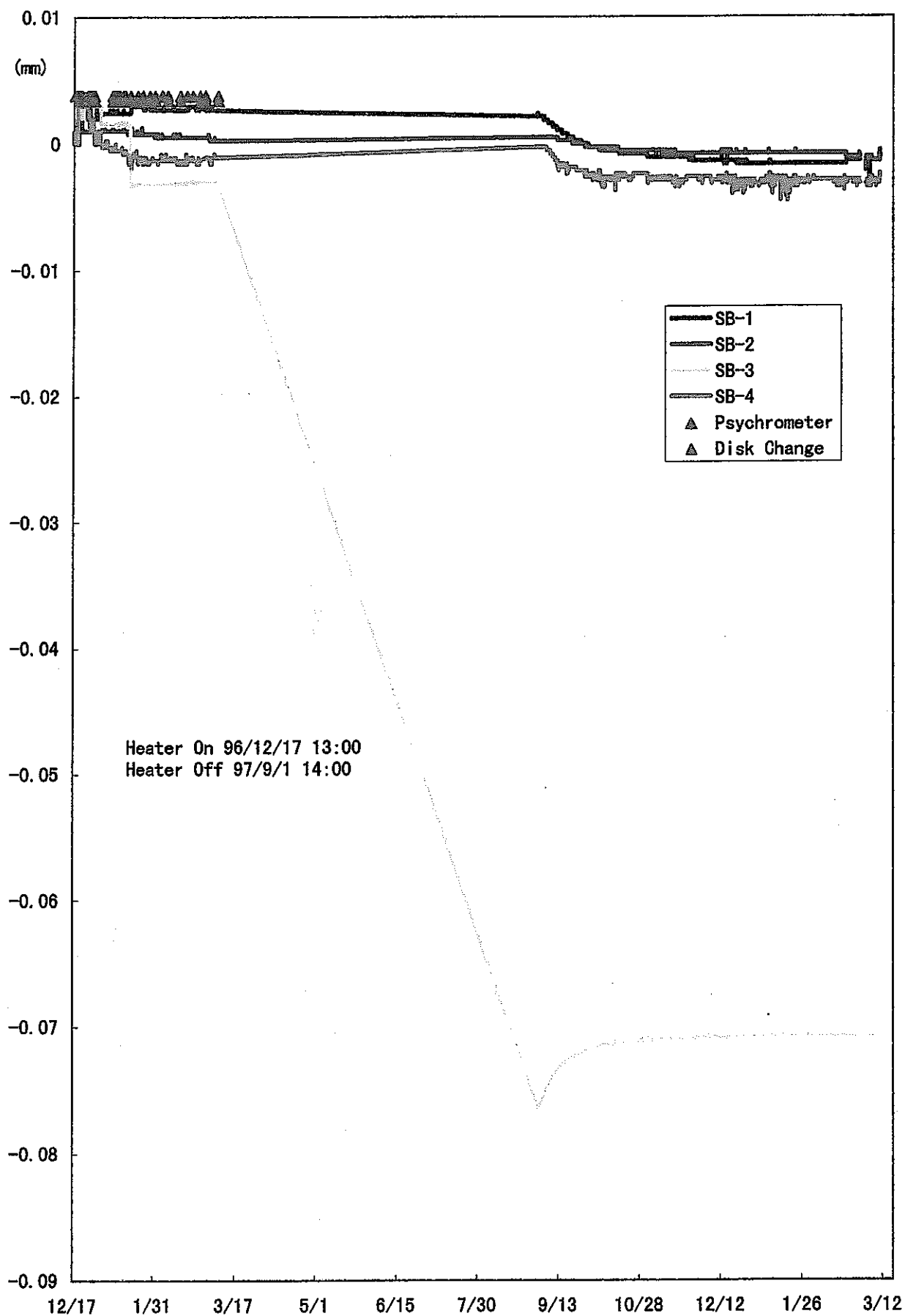


図7-21 ひずみの経時変化 (ボアホールひずみ計)

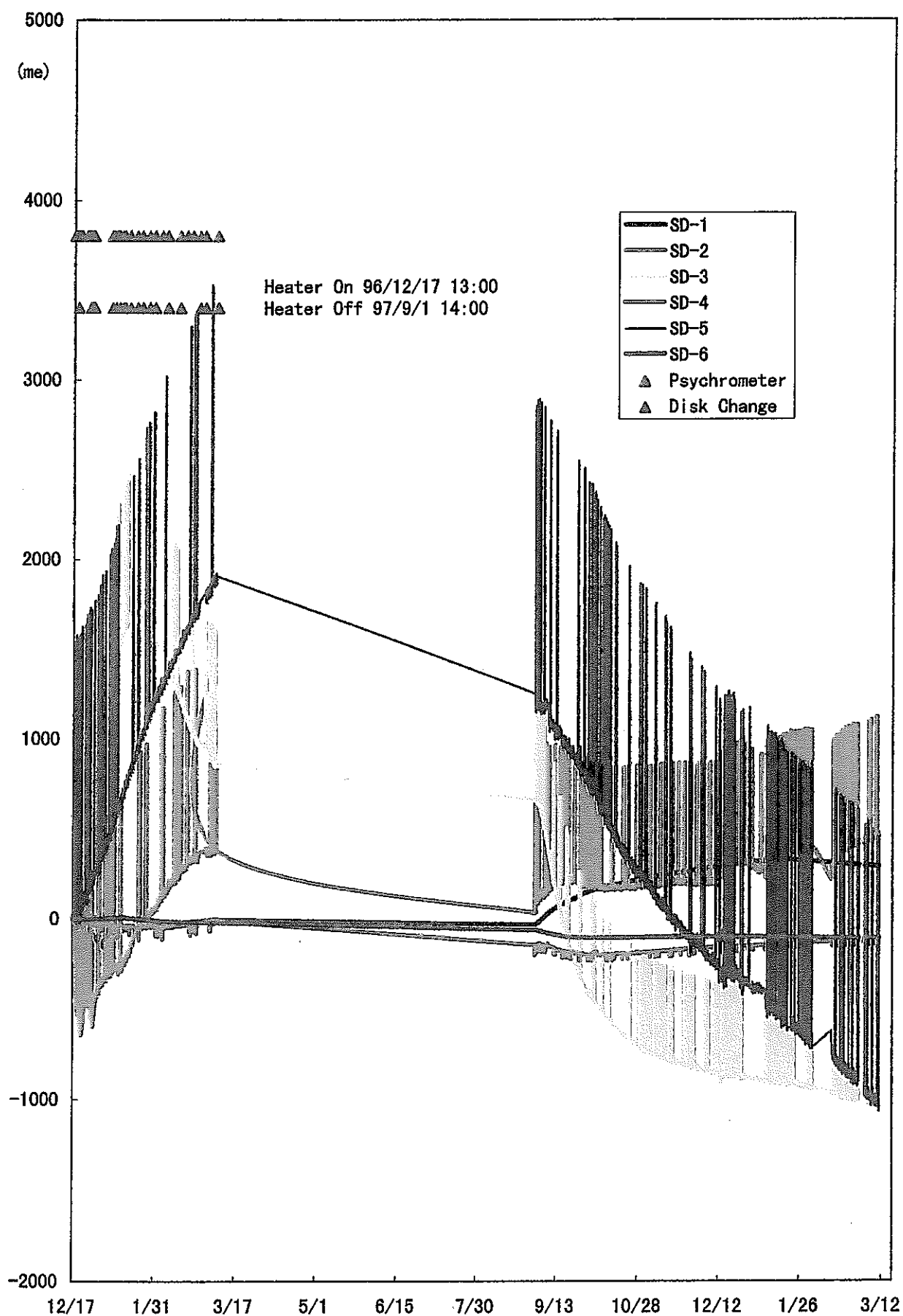


図7-22 ひずみの経時変化

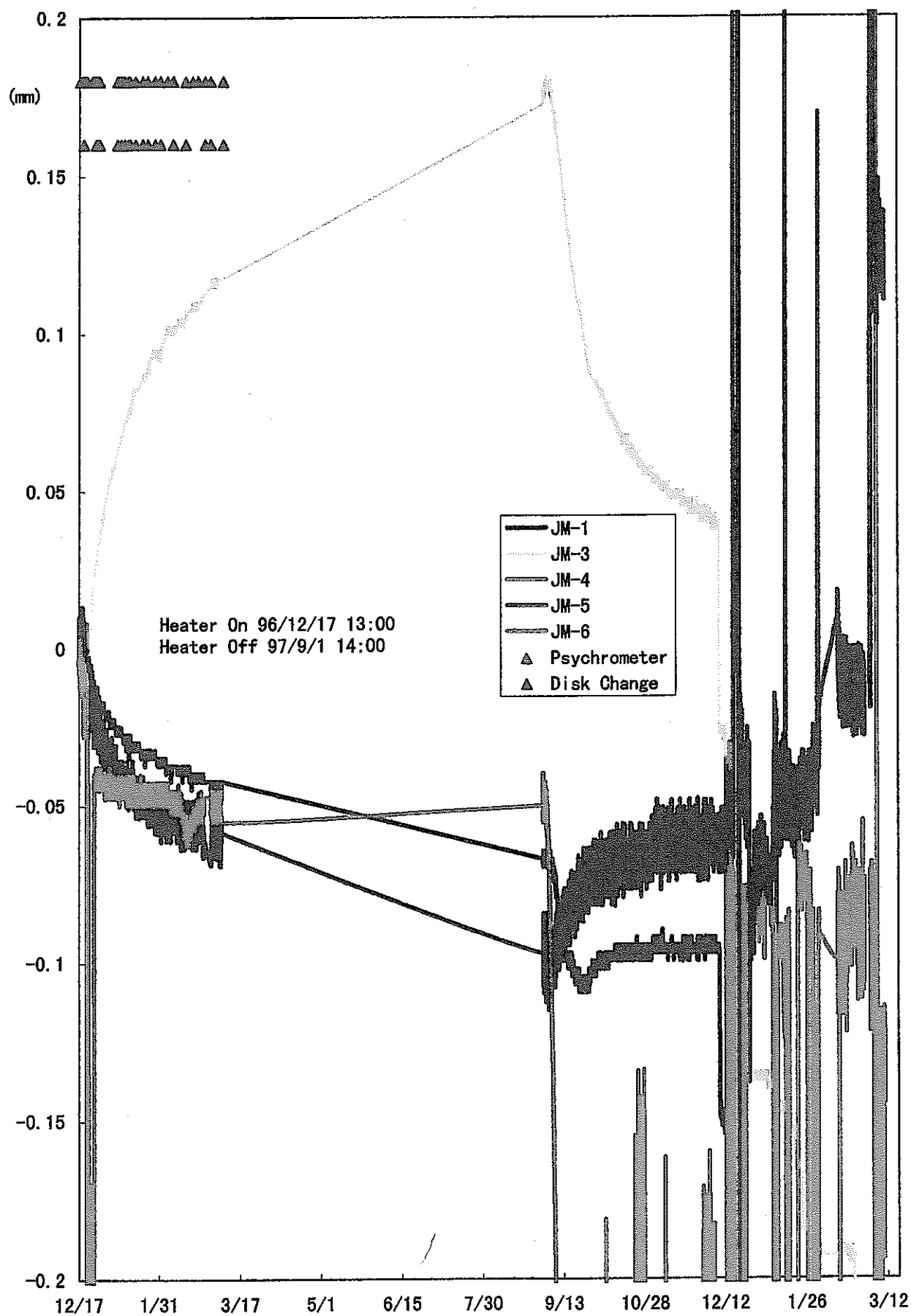


図7-23 岩盤亀裂の変位の経時変化

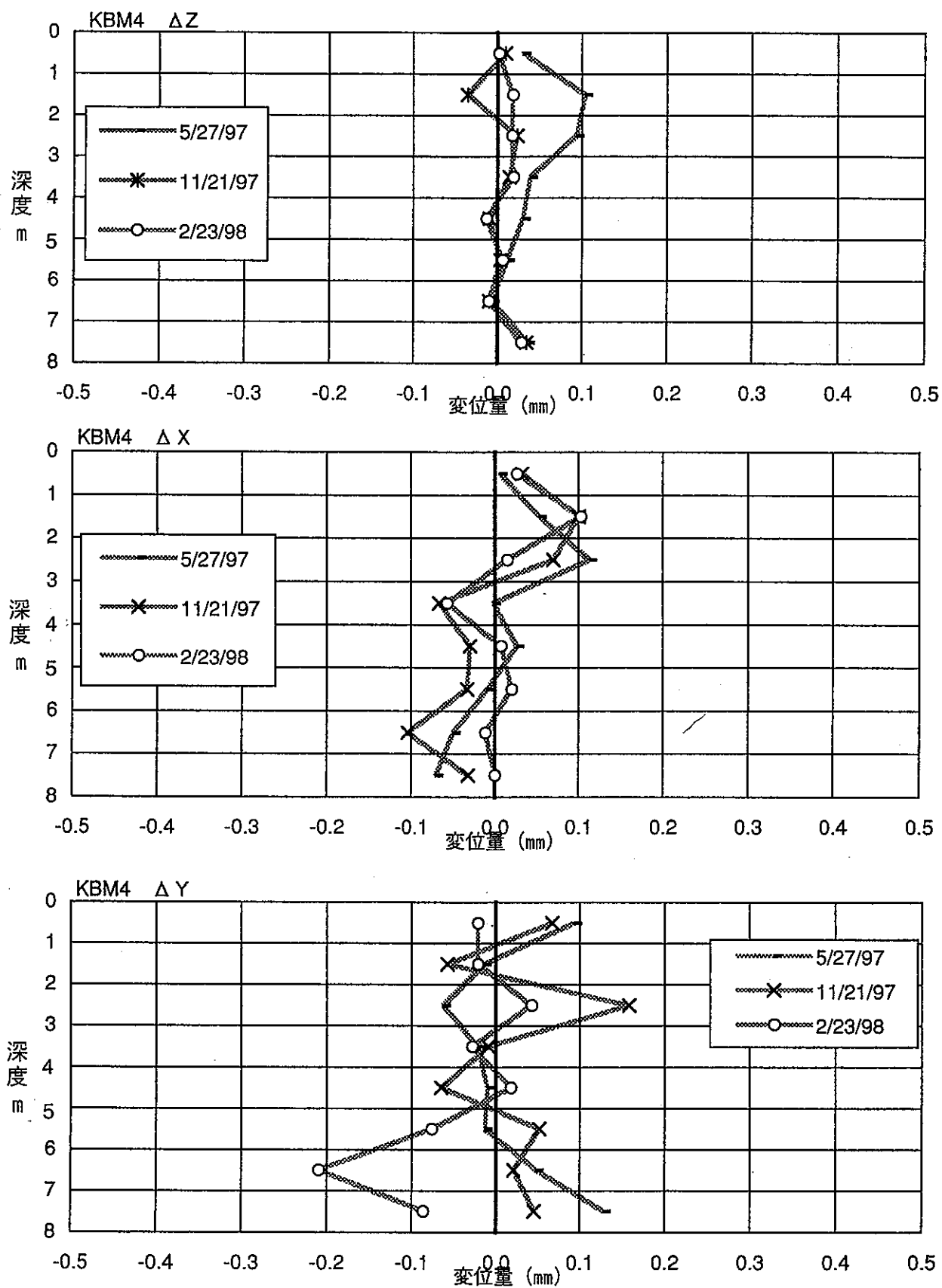


図7-24 区間変位図 KBM4 初期値 95/11/10

8. 連成モデル、コードの妥当性の評価

8.1 概要

「釜石鉾山における粘土充填・熱負荷試験」では、平成7年度から3年わたり、ニアフィールド岩盤および緩衝材中の熱-水-応力連成現象にかかわる試験を実施し、データを収集した。また、これと並行して、熱-水-応力連成解析コードの適応と、その妥当性の評価を実施している。その成果は、前年度までの本研究の報告書に記したように、適宜、DECOVALEX および VALUCLAY とよばれる連成解析プログラムの開発と確証に関わる国際プロジェクトで発表されている。

本章では、今年度の研究成果として、以下の解析およびコードの確証研究を報告する。

①試験ピット湧水量に関する解析評価

②ピットの変形に関する解析評価

③ベントナイト中の連成解析モデルの確証研究

このうち、「③ベントナイト中の連成解析モデルの確証研究」については、本章で示すように、水分拡散の考え方を取り込んだ解析手法を評価し成果を得た。しかし、解析手法の評価と同時に、ここでは、不飽和ベントナイトの水分ポテンシャル値の測定手法の検討が重要な課題として存在する。水分ポテンシャルは、主に、毛管現象として見られる水の幾何学的形状に起因する吸引圧と、ベントナイトおよびそこに含有される水の化学的性質に起因する浸透圧からなる。これらは、ベントナイト中の水分拡散や膨潤圧力の発生を検討する場合の基本的で重要なデータであり、この測定手法の高精度化は、人工バリア中での水分や熱の移動、さらに応力状態を評価する上で不可欠である。このような認識は、VALUCLAY プロジェクトでも指摘されたものである。よって、本研究では、モデルの妥当性の評価と並行して、ベントナイトの水分ポテンシャル測定手法の開発と高精度化に関する室内試験を実施した。その内容は、すでに第5章で述べたとおりである。

以下に、DECOVALEX、VALUCLAY に関連した、解析およびその手法の検討に関わる研究成果を示す。

8.2 ピット内湧水量の解析・評価

8.2.1 解析手法の検討

釜石で行われた浸透流に関する実験を、解析により表現するために浸透流解析を行った。実験は岩盤にテストピットを掘り、どれだけの量がテストピット内に浸出してくるのかを測るものであった。テストピットへの流量、テストピット内壁の浸出状況、ボアホールにおける圧力水頭など、実際に地下水の挙動は数箇所計測されており、ここで実施した解析手法で実際の事象に近い解析結果を得る事が出来るのであれば、この解析手法によって実際の事象を表現する事が出来るということになる。したがって、現段階で現象が観測されていない、また、現象がおこっていない事例の予測をする際に本手法を用いて予測することが可能となる。

ここでは、解析結果により現象をよりよく表現するために、地盤モデルをより現実に近い形で推定する事を考えた。特に、浸透流解析において重要な入力物性値である透水係数場を計測値から判断される透水係数場の性質に基づき、それが場全体の性質を示すとして推定値を現実の地盤が持つと考えられる値に近づけようと試みた。

その手法としてはクリギングを用い、既知の箇所は条件として推定せずに決定し、その既知点からの空間的相関を用いて、推定誤差が最小となるように未知点の推定を行った。だが、いくら推定誤差を小さくした所で、推定した箇所には誤差があり、それにより不確実性が含まれてしまう事は否めない。そこで、乱数を考慮し、計測値の持つ相関、分布を再現できるように既に推定された点の値をも使った。また、既に推定された値を用いる点についてであるが、推定順序がどのシミュレーションでも同じであれば本来不確定であるところが確定的になることが考えられる。これは問題があるため推定順序を乱数を用いて各シミュレーションで違えることで透水係数場に関するモンテカルロシミュレーションを行った。

また、岩盤では一般的に亀裂が透水性に大きな影響をもつため、亀裂に関する情報をクリギングの条件として用いる事を考えた。透水試験には費用がかかるため、得られている透水係数は少ない事も多い。一方で岩盤の場合、力学的挙動を知る目的もあつてか亀裂情報が得られていることは多い。そのため、亀裂に関する情報を補助的に用いて透水係数の推定、補完をすることで、クリギングに用いる条件を増し、場をより確定的に推定する事を考えた。

しかし、この岩盤では、計測限界を越える透水係数をもつ箇所が発見されており、その箇所の透水係数は計測限界で仮定している。このため、計測された透水係数値を値としてそのまま用いると透水係数を過大評価してしまうことも考えられる。そこで、インディケータークリギングを用い、値そのものではなく、条件の値がどの値域にあるのかでクリギングを行った。この岩盤では計測限界のため

に、ある値以下の透水係数をもつ箇所では、値そのものはわかっていない。しかし、その箇所では計測限界以下の値を取るという事がわかっているために、その箇所での透水係数の値域はわかっている（計測下限値以下であるという事はわかっているため）。そこで、得られた透水係数がそれぞれの値域に属するのかわかるという情報を用い、インディケータクリギングを行う事で、未知の地点の透水係数が各値域にどの確率で存在するのかを算出し、その存在確率を用いて、透水係数場を複数個発生する事でモンテカルロシミュレーションを行った。この場合は、明瞭に値がわかっている箇所の透水係数は決定論的に固定し、各値域に存在する確率を統計値としてもつ、統計的に均質な場を作っている事になる。解析のフローを図 8-1 に示す。

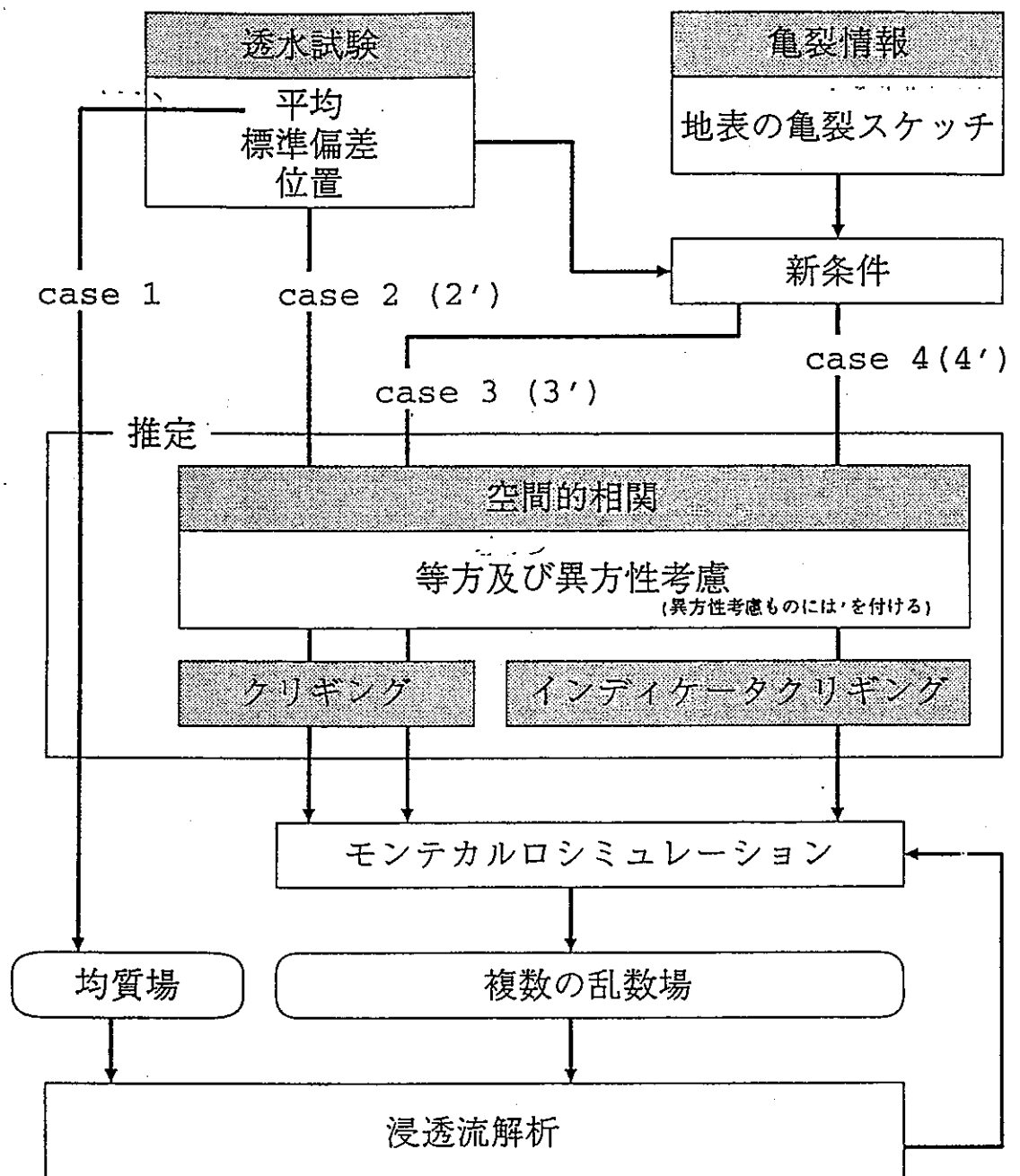


図 8-1 湧水解析のフロー

8.2.2 対象岩盤のモデル化

解析を行う対象である岩盤について詳細を示す。対象とするのは、釜石鉱山の坑道の中に掘られたテストピットのまわりの岩盤である。釜石鉱山の坑道の一つのトンネル床面にテストピットが掘られている。このテストピットを上から見た場合の亀裂のスケッチも得られている。

このうち、水平方向に 15m×15m、鉛直方向に 10m の領域が解析対象である。このエリアの何箇所かでボアホール内でパッカーによる透水試験が行われ、透水係数値が得られている。得られている透水係数の位置、そして透水係数の値について表 8-1 に示す。また、各ボアホールはテストピットのまわりに掘られている。

しかしこの表中の透水係数値の中には明確に値がわかっている訳でないものも存在する。計測に限界があり、計測下限値が存在しているため実際には計測下限値以下の透水係数値が存在していたとしても計測下限値として仮定してしまっているからである。

また、一般的に透水性と相関が強いとされる亀裂に関する情報も得られている。透水係数の計測されたボアホール内の亀裂の走行状況を図 8-2 に示す。この図に示したとおり、トンネル床面で亀裂のスケッチが得られているため、これらを利用する事が可能である。

現地ではテストピット掘削後のピットへの浸出量およびテストピットの周辺岩盤の地下水の状況、また、トンネル床面に水を張り、岩盤を飽和状態にした上でテストピットへの浸出量を計測する試験がなされている。本研究ではこれらの結果のわかっている実験をモデル化し、岩盤を連続体とみなして浸透流に関する有限要素法を用いて解析を行った。そして、モデルでの解析結果を算出し、実際と照らし合わせる事で、解析手法及びモデル化手法の妥当性を検証する。

表 8-1 実測された透水係数値

深さ (m)	透水係数 (cm/sec)			
	KBH2	KBH4	KBH6	KBH7
1-2	2.70E-7	3.00E-8 *	7.40E-8	-
2-3	3.00E-8 *	2.30E-5	8.60E-8	2.90E-6
3-4	1.20E-4	3.00E-8 *	8.50E-5	4.20E-5
4-5	3.00E-8 *	1.80E-7	3.00E-8 *	1.40E-7
5-6	3.00E-8 *	1.00E-7	3.00E-8 *	2.10E-7
6-7	3.00E-8 *	3.00E-8 *	3.00E-8 *	1.20E-6
7-8	2.00E-7	3.00E-8 *	3.00E-8 *	2.90E-8 *
幾何平均				1.98E-7

但し*は計測不可能の為計測下限値で代用

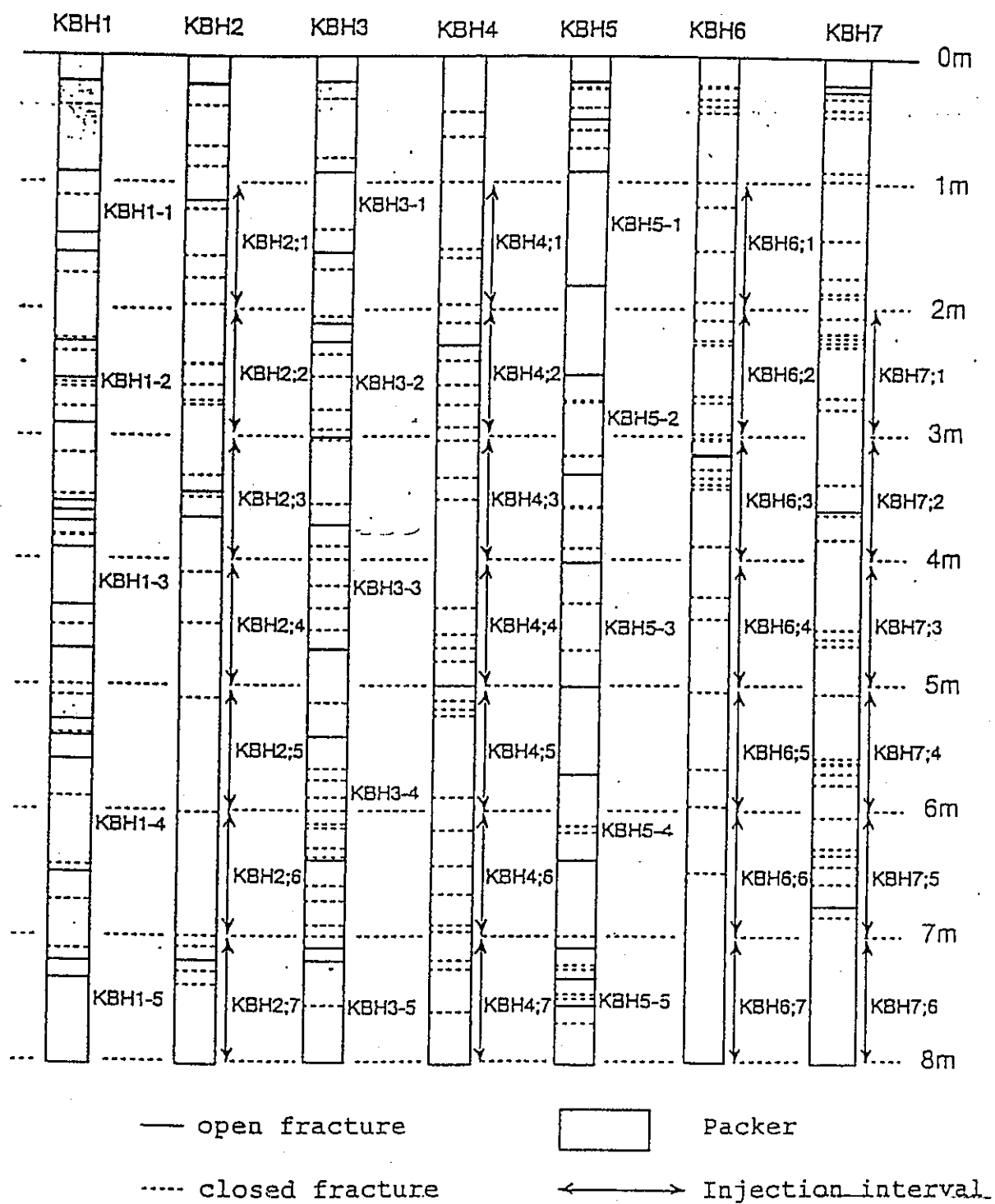


図 8-2 ポアホール内の亀裂の分布状況

8.2.3 解析条件および解析結果

有限要素法解析に用いたFEMメッシュならびに境界条件をそれぞれ図 8-3、図 8-4 に示す。

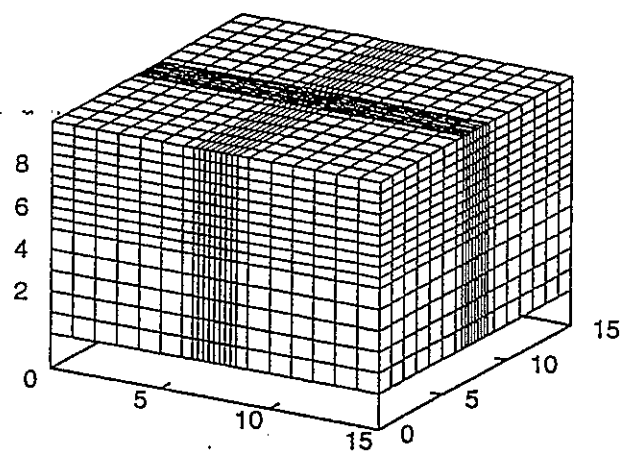


図 8-3 FEMメッシュ

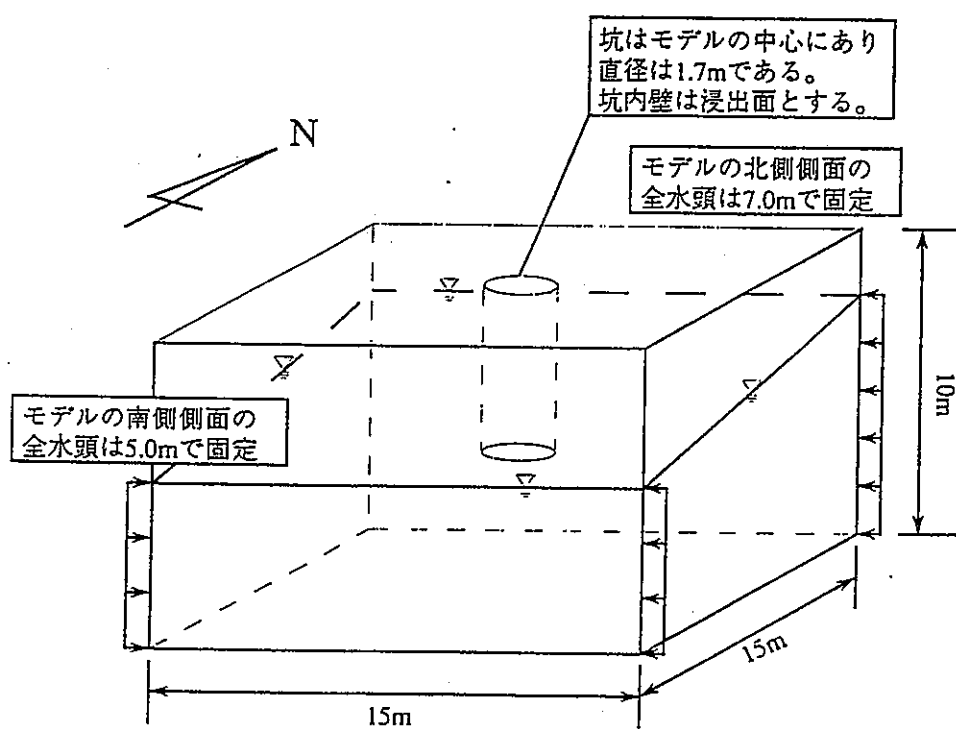


図 8-4 解析に用いた境界条件

上記の解析によって得られた圧力水頭分布を鳥瞰図として図 8-5 に示す。また、解析によって得られたピット内面への浸出状況をピット展開図の濃淡コンターとして図 8-6 に示す。

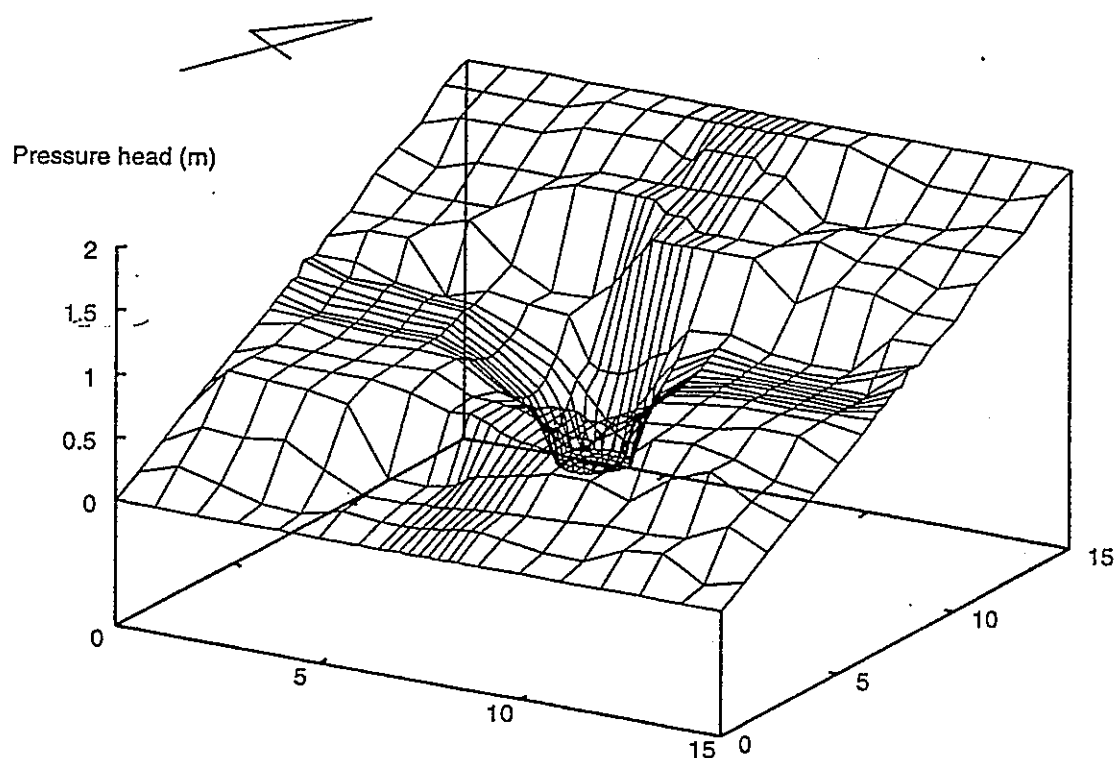


図 8-5 解析結果として得られた圧力水頭分布

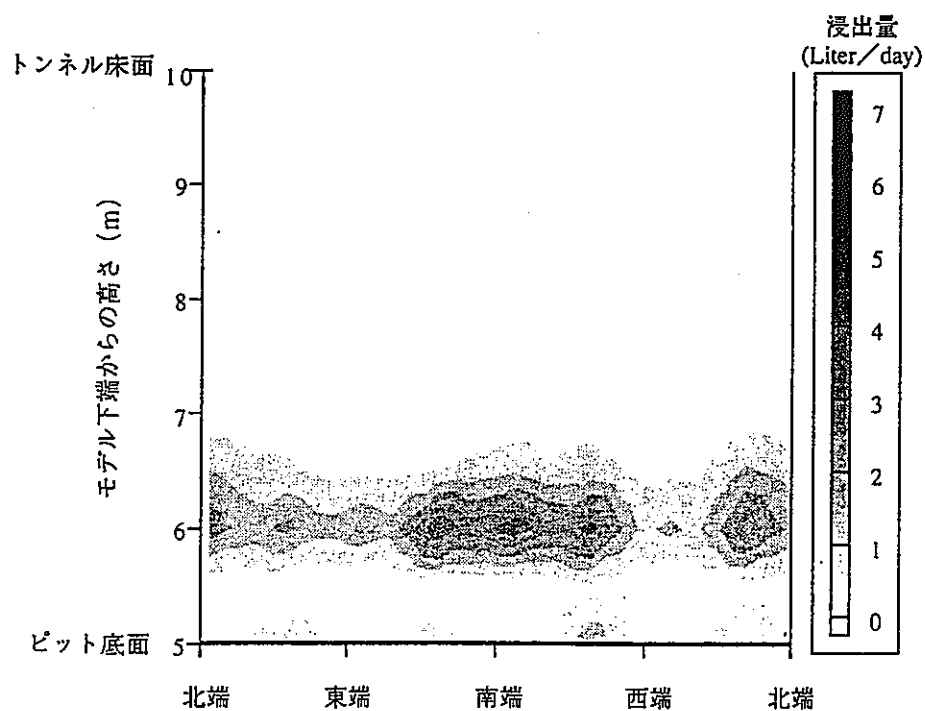


図 8-6 ピットへの浸出量のコンター

地盤の浸透問題の予測の際に重要なパラメーターである透水係数を取り上げ、未知の箇所については推定による補完を行い、また、推定による誤差による物性値場の不確定性を考慮するためにモンテカルロシミュレーションを行って場を複数乱数発生し、それぞれの場について浸透解析を行った。これにより複数の解析結果が得られるわけだが、これを統計処理することで、モデルとした地盤がいかなる浸透挙動を示しうるのかを予測することができると考える。

本研究では解析手法の検証のために、釜石鉱山での浸透実験をモデル化して浸透流解析についてのモンテカルロシミュレーションを行った。この地盤では実験結果が得られているため、解析手法が予測手法として妥当なものであれば、実験の状況をモデル化し、このモデルを解析することで実際に近い解析結果が得られるはずである。

その結果若干精度に問題があるものの本研究で掲げた手法を用いることで現実を、また、現実に近い値を予測し得ることが明らかとなった。

しかし、いくつかこの解析手法を取り扱い、予測をなす際に重要な点も見受けられたので、それに対する考察をなす。

実際に純粋な予測をなす場合について考えよう。浸透問題については次にあげるものが一般的に既知であると思われる。

- ・何箇所かで計測された透水係数
- ・何箇所かで観測された地下水位など
- ・これから起こる、あるいは起こすことで生じる地盤への影響
- ・透水係数以外の物性値（岩盤であれば亀裂など）

これらが与えられたとき、本解析手法ではまず、透水係数のみで推定の条件となりうるかの検討を行う。釜石の例では全体のモデルに対し、透水係数が計測されているエリアがかなり狭い部分であったため亀裂に関する情報をも透水係数推定の条件に用いている。また、透水係数の計測の際計測下限値以下の透水係数が得られていたため、透水計数値を推定に用いるのではなく、透水計数の値域を推定に用いるインディケータクリギングと呼ばれる手法を用いた。実際にこれから予測を行う場合には、計測されている透水係数の計測状況を見て、推定手法の選択をしなくてはならない。釜石の例のように透水係数以外の物性をも用いることが

有効であると考えられる場合、透水係数以外の物性値と透水係数の相関を分析して、透水係数以外の物性条件をも透水係数を推定する条件に組み入れ、全体の透水係数場を推定、補完することが有力であると考えられる。一方、透水係数で条件は充分であると考えられる場合には労力の問題、また、相関の決定の際に生じるエラーを推定場に入れないためにも透水係数のみから推定を行うことが推奨さ

8.3 ピット内空変位の解析

8.3.1 解析モデル

有限要素解析コード THAMES を用いて、テストピット掘削時の変形挙動をシミュレートを試みた。解析は2つのステップについて実施された。

まず、実験坑道の掘削時の解析を行った。この第1段階の掘削解析に用いた有限要素モデルならびに境界条件を図 8-7 に示す。解析領域のスケールは、 $100 \times 75 \times 35\text{m}$ とした。モデルの節点数と要素数は、それぞれ 8232 と 7020 である。

次に、この第1段階の解析で得られたテストピット周辺の応力状態を用いて第2段階の解析、すなわちテストピット掘削時の応力変形解析を実施した。解析領域を図 8-8 に示す。第2段階の掘削解析に用いた有限要素モデルならびに境界条件を図 8-9 に示す。解析領域のスケールは、 $8 \times 8 \times 10\text{m}$ である。要素数と節点数は、それぞれ 7200 と 8379 である。

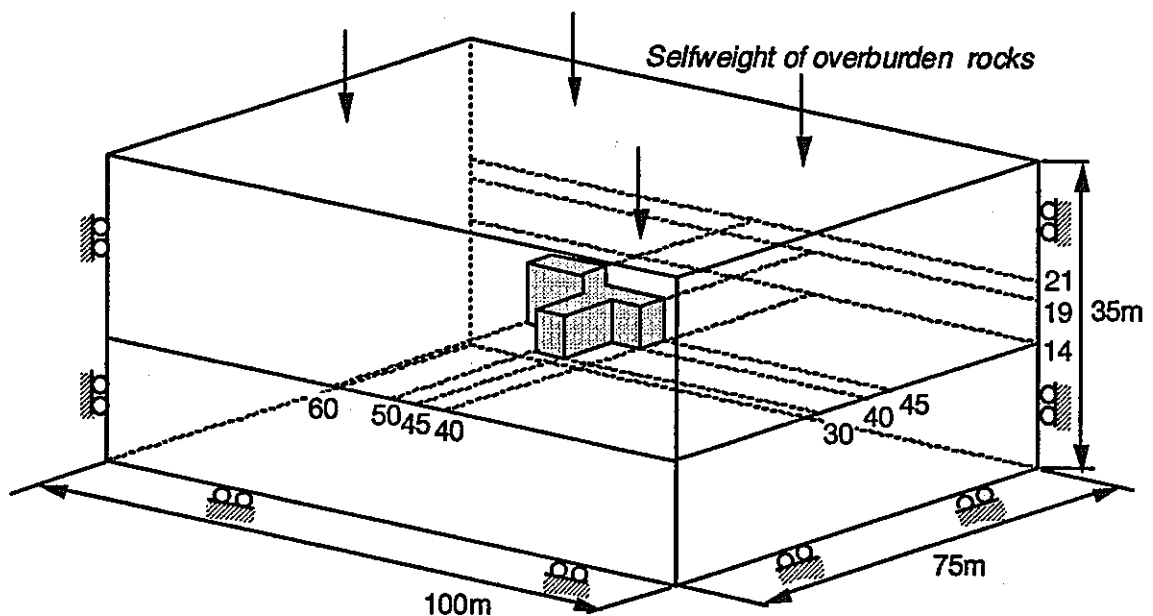


図 8-7 有限要素解析モデルと境界条件 (第1段階)

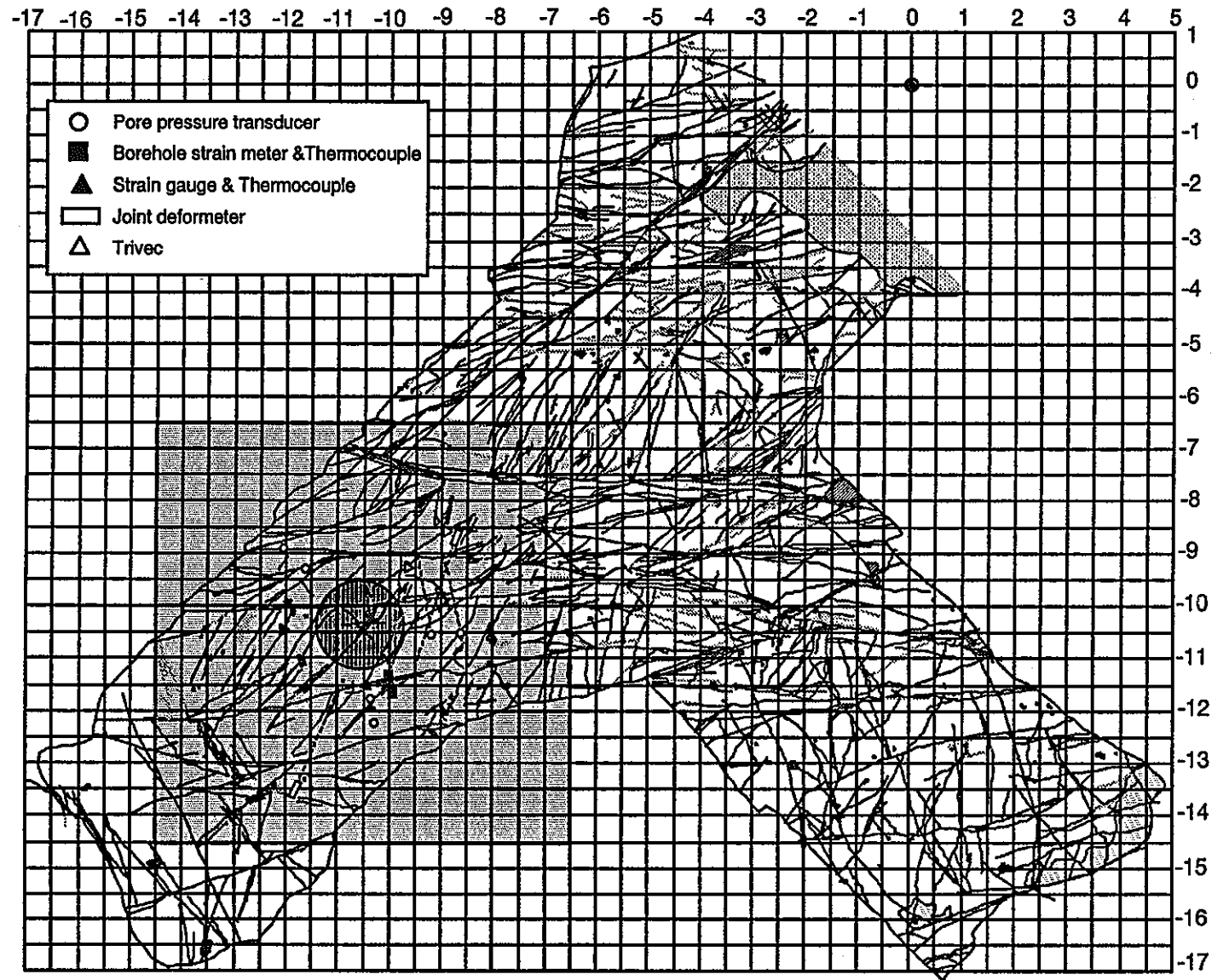


Figure 4.3 Model region

図 8-8 第2段階での解析領域

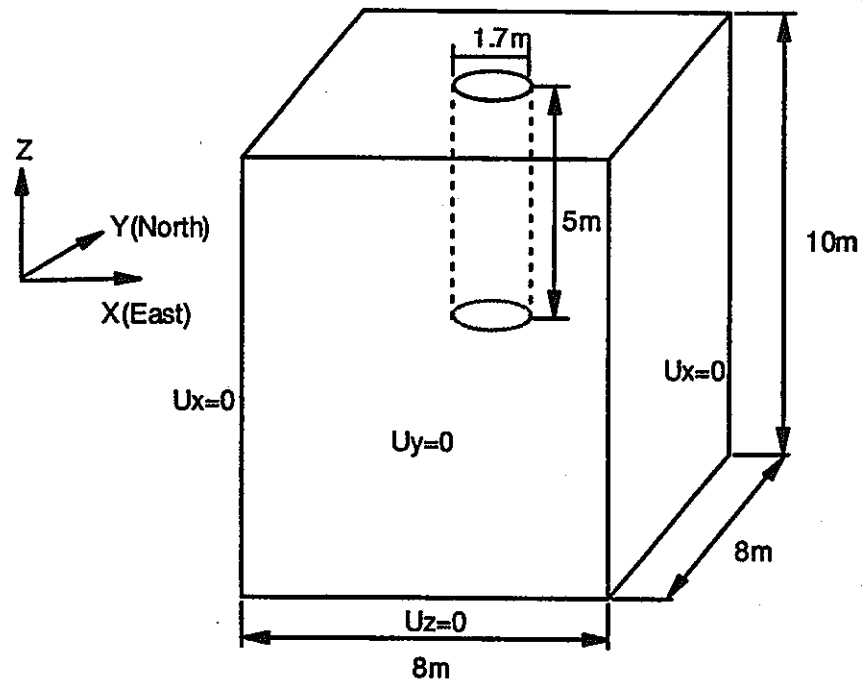


図 8-9 有限要素解析モデルと境界条件 (第2段階)

8.3.2 解析ケース

解析ケースとして4つを設定した。これを表 8-2に示す。

Case1とCase2は等方性で均質材料とした。初期応力は、上載加重より計算された。Case1においては鉛直応力と水平応力は等しいとした。Case2においては水平応力は鉛直応力の2倍であるとした。

Case3とCase4では、初期応力測定結果が用いられた。Case3は等方性、均質モデル、Case4は異方性、均質モデルである。

表 8-2 解析ケース

Case	Type	Initial stress (MPa)	Dip direction (degree)	Dip (degree)
Case 1	isotropic homogeneous	σ_x	7.0	-
		σ_y	7.0	-
		σ_z	7.0	-
Case 2	isotropic homogeneous	σ_x	14.0	-
		σ_y	14.0	-
		σ_z	7.0	-
Case 3	isotropic homogeneous	σ_1	29.3	342.0
		σ_2	7.6	248.0
		σ_3	2.9	107.0
Case 4	anisotropic homogeneous	σ_1	29.3	342.0
		σ_2	7.6	248.0
		σ_3	2.9	107.0

8.3.3 解析結果

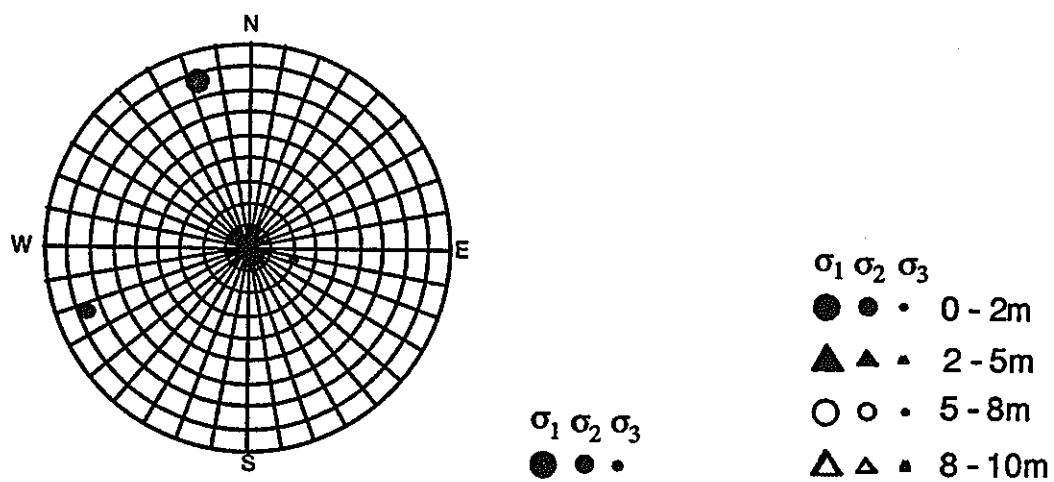
解析結果として、ピット周辺での主応力値と方向を表 8-3に示す。この表においてレベル 0 を実験坑道の床としている。せん断応力は、レベルの高い領域で大きくなっている。図 8-10は初期応力をシュミットネット上に表現したものである。原位置応力測定により得られた主応力の方向と第 1 段階の有限要素解析によって得られた主応力の方向は似通った結果となっている。

次に、図 8-11に解析による坑道床面におけるテストピットの変形状況を示す。図では変形を 50 倍に拡大して表示している。北側と南側で変形が大きい。この方向は、最大主応力の方向とほぼ同じである。

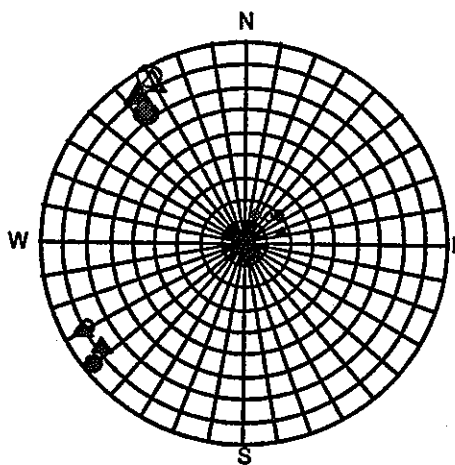
図 8-12はピット側壁に沿った変形状況を示している。これらの図から、変形の向は似通っており、最大変位量は 4mm であることがわかる。

表 8-3 主応力値と方向

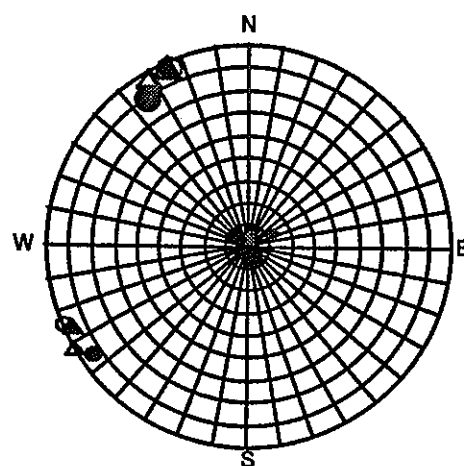
case	Depth	Principal stress (MPa)	Dip direction (deg)	Dip (deg)
Case 1	0 - 2m	σ_1 11.05	321.8	17.0
		σ_2 6.13	230.0	6.1
		σ_3 3.23	59.0	71.9
	2 - 5m	σ_1 8.45	324.7	8.1
		σ_2 7.04	232.5	15.1
		σ_3 5.20	81.8	72.8
	5 - 8m	σ_1 7.75	329.7	2.6
		σ_2 7.26	240.4	14.1
		σ_3 6.10	49.6	75.7
	8 - 10m	σ_1 7.52	329.5	6.0
		σ_2 7.29	240.6	11.0
		σ_3 6.56	31.3	77.5
Case 2	0 - 2m	σ_1 21.39	325.1	9.8
		σ_2 15.17	233.8	7.4
		σ_3 3.70	72.6	77.6
	2 - 5m	σ_1 16.47	334.6	0.7
		σ_2 15.03	244.5	5.2
		σ_3 5.91	72.0	84.7
	5 - 8m	σ_1 15.28	335.7	1.5
		σ_2 14.86	245.7	2.0
		σ_3 6.69	30.0	87.5
	8 - 10m	σ_1 14.96	328.8	1.0
		σ_2 14.78	238.8	0.9
		σ_3 7.06	12.3	88.6
Case 3	0 - 2m	σ_1 49.10	339.3	12.5
		σ_2 20.61	240.8	33.8
		σ_3 1.68	86.7	53.3
	2 - 5m	σ_1 34.70	341.0	11.8
		σ_2 12.20	241.2	39.2
		σ_3 2.74	84.6	48.4
	5 - 8m	σ_1 31.77	340.8	11.1
		σ_2 11.00	242.3	37.0
		σ_3 2.45	84.7	50.8
	8 - 10m	σ_1 31.26	340.8	10.8
		σ_2 10.80	243.0	35.2
		σ_3 2.19	85.3	52.7
Case 4	0 - 2m	σ_1 50.34	337.2	12.5
		σ_2 19.24	238.3	34.9
		σ_3 1.06	83.9	52.3
	2 - 5m	σ_1 34.89	340.4	10.5
		σ_2 12.50	242.4	36.8
		σ_3 2.43	83.7	51.2
	5 - 8m	σ_1 31.70	340.7	10.1
		σ_2 11.24	243.4	35.5
		σ_3 2.29	84.2	52.7
	8 - 10m	σ_1 31.35	340.7	10.4
		σ_2 11.00	243.5	34.1
		σ_3 2.15	85.3	53.9



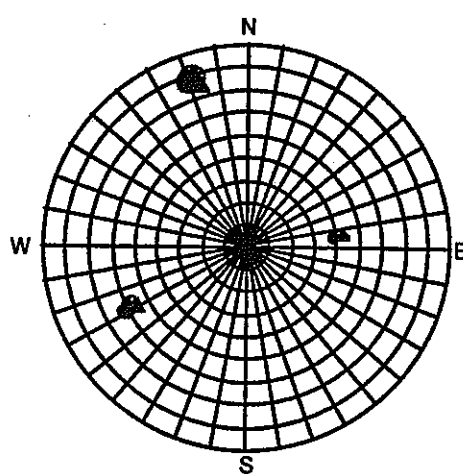
(a) Initial principal stress (Case 3, 4)



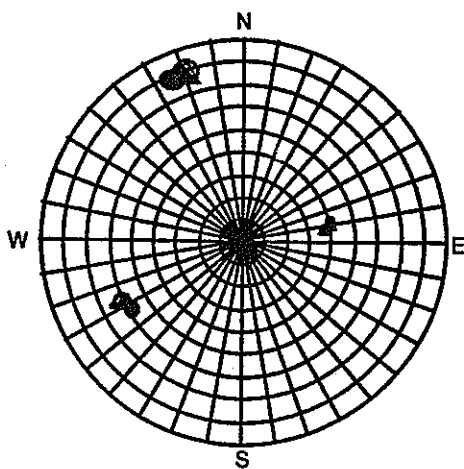
(b) case 1



(c) case 2



(d) case 3



(e) case 4

図 8-10 初期応力のシュミットネット表示

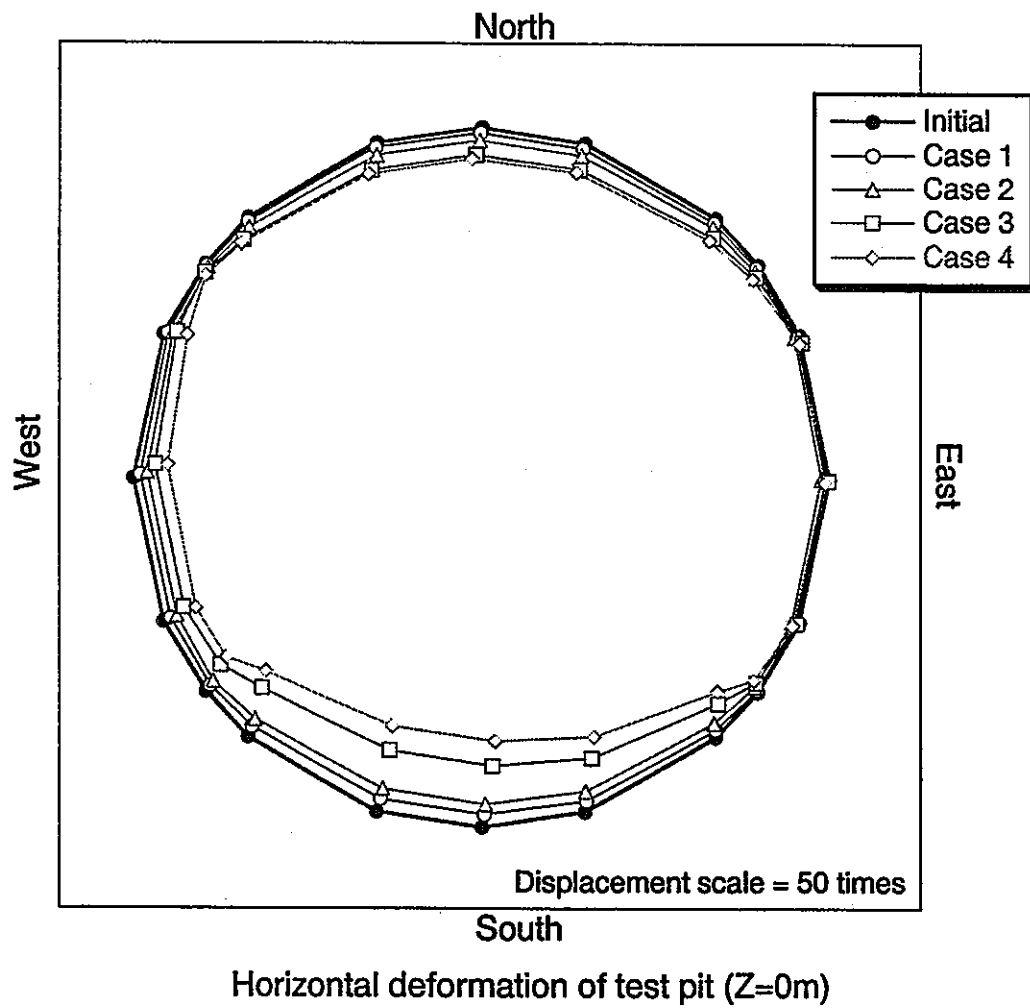
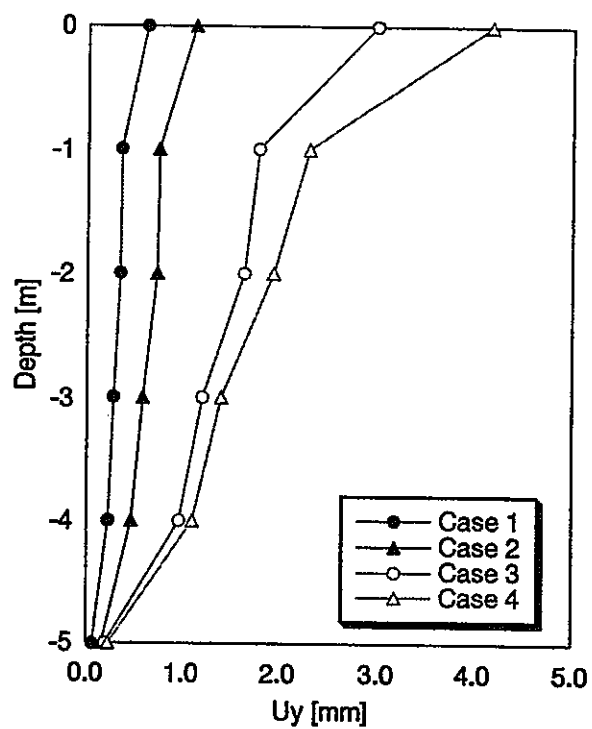
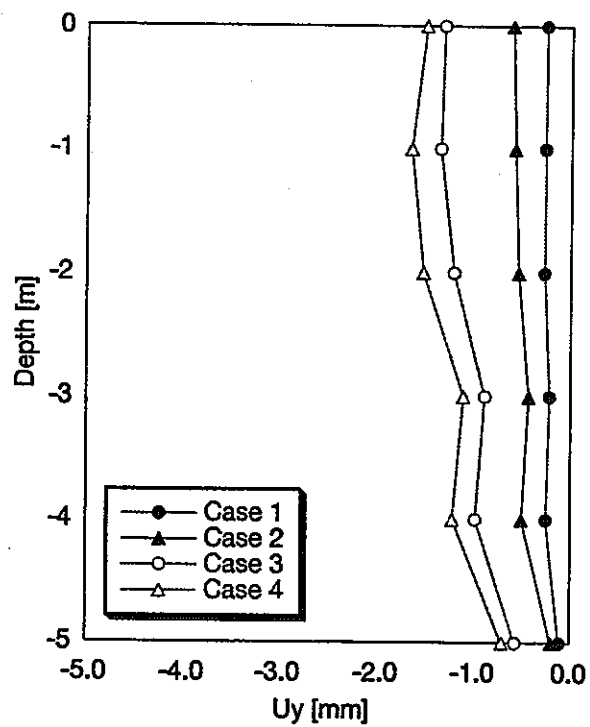


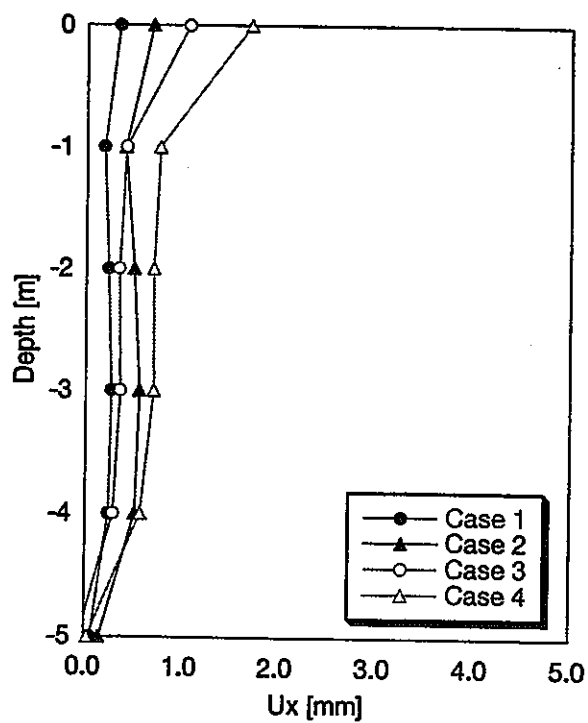
図 8-11 解析による坑道床面におけるテストピットの変形状況



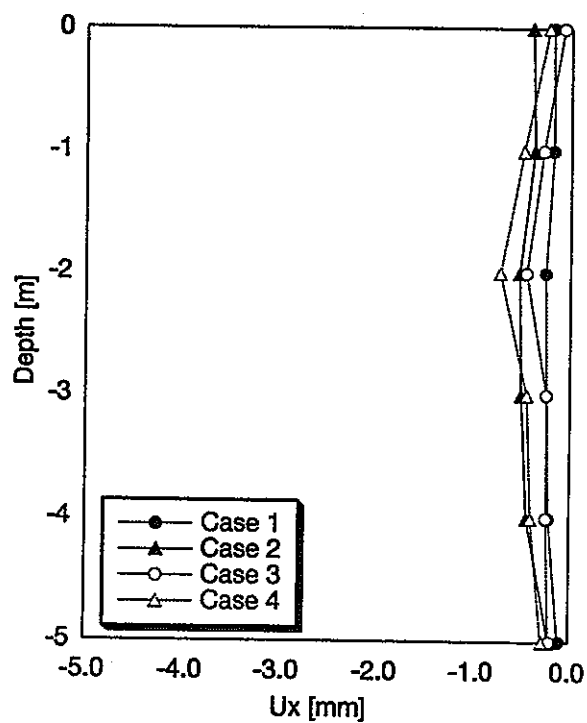
(a) 南側



(b) 北側



(c) 西側



(d) 東側

図 8-12 解析によるテストピット壁の変形状況

8.4 ベントナイト中連成解析モデルの確証に関する検討

緩衝材として最も有力な候補材料であるベントナイトについて、施工時以降の熱～水～応力連成現象を解析するためのモデルについて検討を行った。連成解析コード THAMES(Thermal, Hydraulic And MEchanical System analysis) を用いた解析によって、原位置試験のデータを解析することが最終的な目標であるが、この第1段階として理論解による検証を実施した。

THAMES が用いている数学モデルは、ビオの圧密方程式にフックの法則のデュアメル・ノイマン形式を用いたものとエネルギー平衡式である。その支配方程式は、図 1-1 に示したような水の流れ、力学的挙動、熱的挙動の3つが完全に連成したものである。そして、この3連成方程式は同時に解かれている。

地盤の固相の非線形パラメータとして、熱伝導率、比熱、熱膨張率が計算に使用でき、水の非線形パラメータとしては、熱伝導率、比熱、粘性係数が計算上考慮できる。また、亀裂性岩盤の解析のために、岩井の提案した透水性の応力依存性を取り入れている。そして、土壌地盤の解析のためには、間隙比の関数として透水性を考慮するものとなっている。

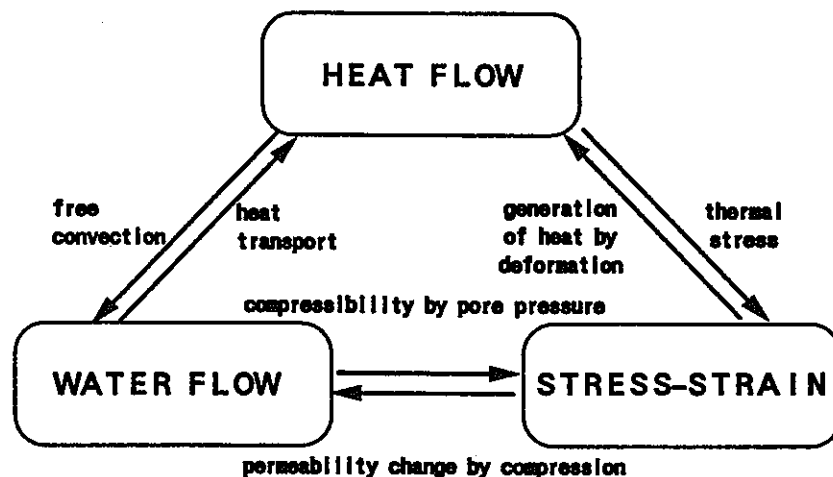


図 8-13 相互作用の概念

熱～水～応力連成問題の解析解（理論解）は、現象が極めて複雑であるためにほとんど得られていない。したがって、3連成の例題によって解析コードを検証することは、現時点では不可能である。このため、3連成問題の部分を取り出して検証を行うことが行われた。この検証は解析コードの信頼の必要条件を検討するものであるが、必ずしも十分条件を調べることにはならないことに注意しておく必要がある。

ここで、検討した問題は、①応力～水連成問題、②応力～ひずみ問題、③熱～応力問題、④熱伝導問題、⑤熱～水連成問題、⑥飽和～不飽和解析、である。以下に、その結果概要を示す。

(1) 応力～水連成問題

応力と地下水の連成現象は、これまで圧密問題として研究が進められてきた。その中で1次元圧密問題については解析解が得られている。THAMES による解析結果の比較を図 8-14に示す。

kのように、十分に良い精度で一致しており、この問題についての解析コードの信頼性が確かめられた。

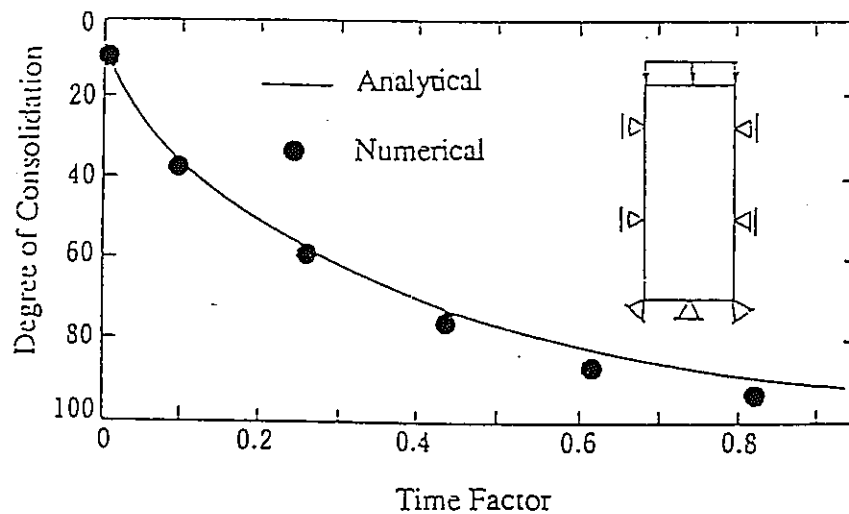


図 8-14 1次元圧密解と THAMES による解析結果の比較

(2) 応力～ひずみ問題

円孔を有する平板に内側から荷重を作用させた場合の理論解との比較を行った。半径方向応力の分布について理論解と THAMES の結果を比較した結果を次に示す。理論解とは非常に良く一致していると言える。

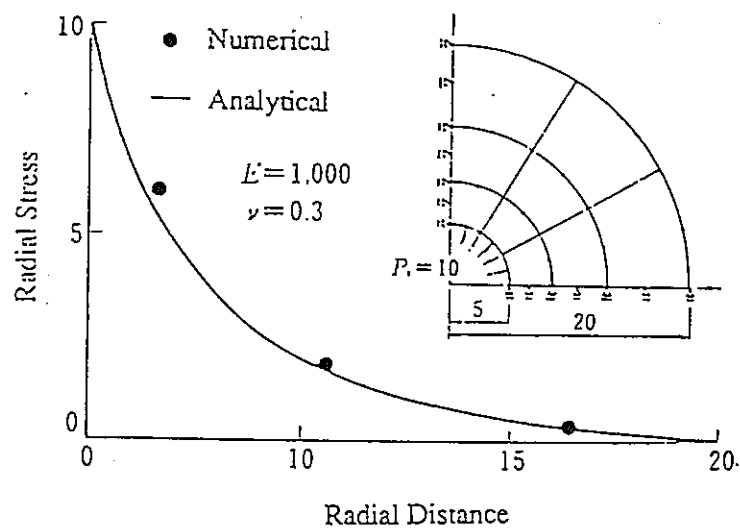


図 8-15 理論解と THAMES による解析結果の比較

(3)熱～応力問題

円孔を有する平板に熱を作用させた場合の熱応力の発生について、解析解との比較を実施した結果を次に示す。図は、周方向の応力について比較を行ったものであるが、ほぼ完全に一致していると言える。

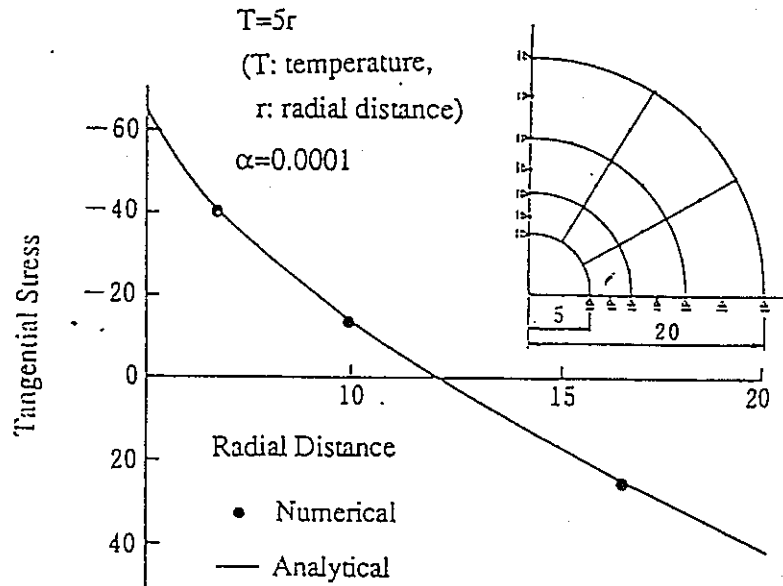


図 8-16 熱～応力連成問題における周方向の応力の比較

(4)熱伝導問題

軸対象の非定常の熱伝導問題については、解析解が Smith(1965)により得られており、これとの比較を実施した。結果を次に示す。良好な結果であり、解析コードの信頼性が確認された。

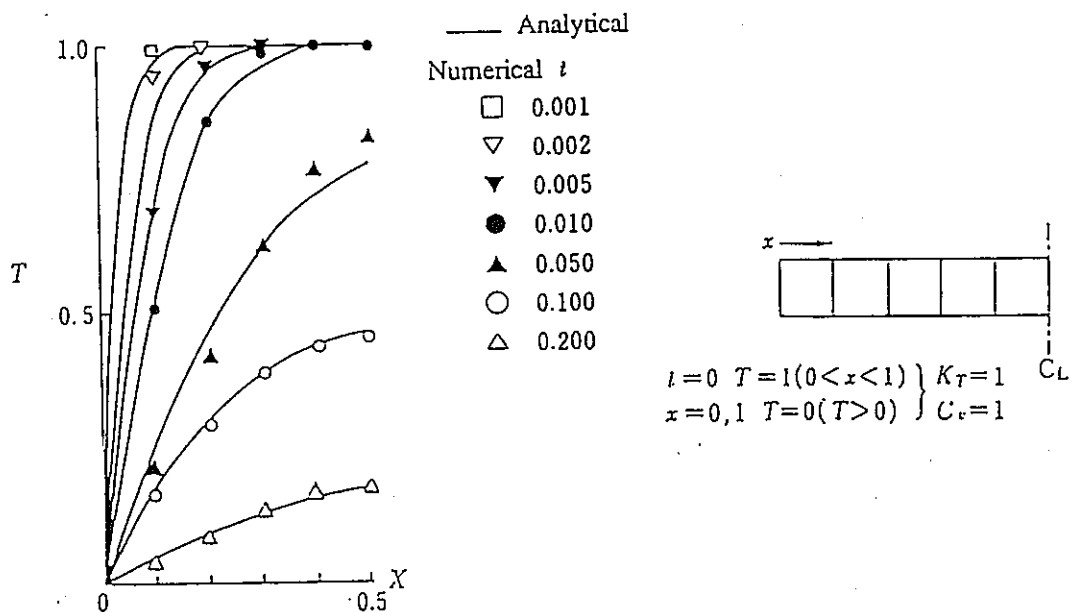


図 8-17 軸対象熱伝導問題における解析解と THAMES による結果との比較

(5) 熱～水連成問題

熱と水の連成問題に関しては、解析解は知られていない。そのため、熱～水の連成現象を取り扱った実験データにより検討を行った。その結果を次に示す。完全とは言えないが、熱の非定常な変化が、おおむね再現されている。

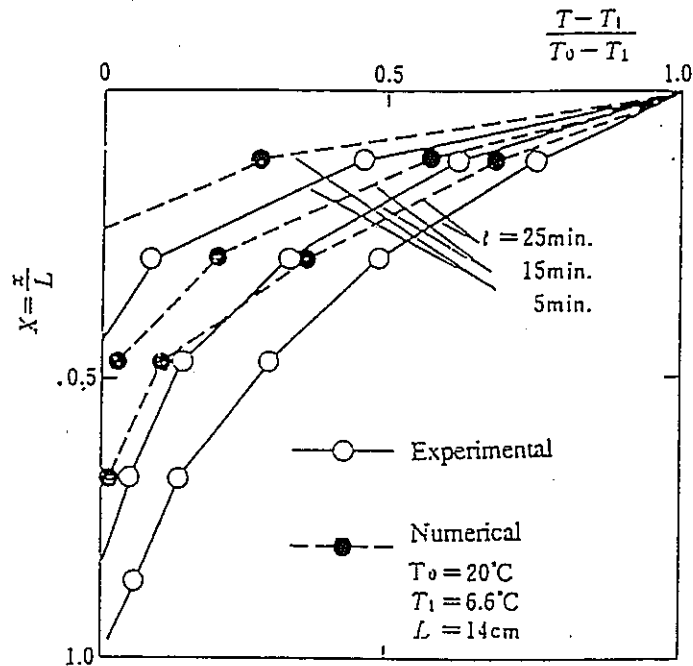


図 8-18 熱～水連成現象についての実験データと解析との比較

(6) 飽和～不飽和解析

不飽和領域での現象は、基本的に非線形性が強く、解析解は知られていない。この問題についても実験データによる検討を行った。その結果を次に示す。

地下水位の時間変化をほぼ解析で再現できていることがわかる。

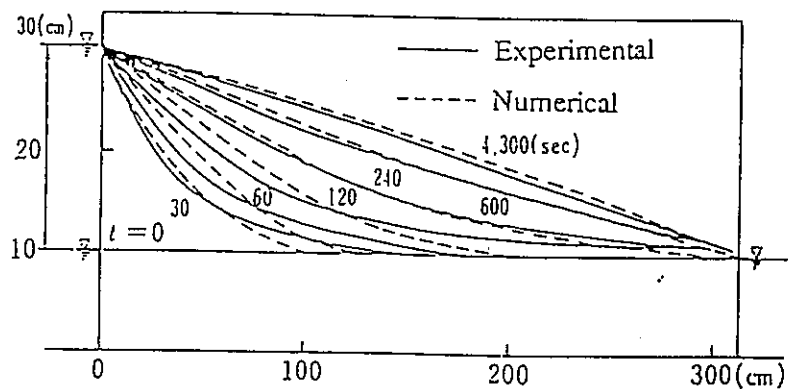


図 8-19 不飽和領域を考慮した地下水解析結果と実験データとの比較

8.5 まとめ

本章では、今年度の研究成果として、以下の解析およびコードの検証研究について述べた。

- ①試験ピット湧水量に関する解析評価
- ②ピットの変形に関する解析評価
- ③ベントナイト中の連成解析モデルの検証研究

まず、湧水量の予測解析としては、地盤の浸透問題の予測の際に重要なパラメーターである透水係数を取り上げ、未知の箇所については推定による補間を行うとともに、推定による誤差による物性値場の不確定性を考慮するためにモンテカルロシミュレーションを行って場を複数発生させ、それぞれの場について浸透解析を行った。つまり、現場試験でのデータ数に限りがあることなどから岩盤内部の水理場を確定場として捉えることは容易ではないため、確率的なアプローチを試みたものである。モンテカルロシミュレーションにより複数の解析結果が得られるが、これを統計処理することで、モデルとした地盤がいかなる浸透挙動を示しうのかを予測することができると考えられる。結果として、若干精度に問題があるものの本研究で掲げた手法を用いることで現実を、また、現実に近い値を予測し得ることが明らかとなった。また、単純な補間だけでなく、亀裂情報を補助情報として活用することにより、より精度の良い推定が可能であるとの展望を得ることができた。

ピット掘削時の変形の解析評価では、有限要素解析コード THAMES を用いた解析を実施した。解析は2つのステップにわけて実施された。これらは、実験坑道の掘削時の解析とその結果を初期条件として用いたピット掘削解析である。つまり、第2ステップのピット掘削解析では、第1ステップの解析で得られたテストピット周辺の応力状態を用いた掘削解析を実施した。第1ステップの解析では、別途得られている岩盤内応力測定の結果を基本として4ケースの初期応力状態を想定した。解析結果の傾向は、いづれのケースにおいても似通ったものであり、初期応力で最大圧縮の方向（南北方向）に縮む変形モードとなった。一方、実測によるピット内空の測定結果では、ピット直径が伸びる傾向が計測されており、解析と実測で変形モードが合致しない結果となった。この原因の1つは、解析が連続体として岩盤をモデル化しているのに対して、実際にはかなりの大小の亀裂が存在し、特にピット軸に平行な、すなわち鉛直に近い亀裂がピットを横切ったり、ピット近傍に存在することによる影響が大きいものと思われる。亀裂部分ではせん断変形やそれに伴うダイラタンシーが発生している可能性もあり、こうした現象を究明してゆくことは今後の課題の1つであると言える。

ベントナイト中の連成解析モデルについては、施工時以降の熱～水～応力連成現象を解析するためのモデル化について検討を行った。連成解析コード THAMES (Thermal, Hydraulic And MEchanical System analysis) を用いた解析によって、原位置試験のデータを解析することが最終的な目標であるが、本研究では、第1段階として理論解による検証を実施した。検証

は、応力～水連成問題、応力～ひずみ問題、熱～応力問題、熱伝導問題、熱～水連成問題、飽和～不飽和解析のそれぞれについて実施し、理論解や過去の実験結果と比較し、THAMESにより、妥当な解析結果が得られていることを確認した。

9. まとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、ある期間地上で貯蔵された廃棄物を地中深く処分することが検討されている。処分される廃棄物は、その時点ではまだ発熱しており、処分後数百年は自然状態よりも高い温度場が形成されることが予想されている。このような温度変化は、地下水の動きや地盤の変形挙動に影響を与えと考えられる。また、廃棄物を取り囲む緩衝材自体も、温度場の変化の影響を受け、不飽和状態の発生、再冠水、膨潤応力の発生、温度上昇と冷却等の複雑な環境にさらされることが予想される。

したがって、放射性廃棄物の安全性評価にあたっては、地盤および人工バリア中の熱学的・水学的・力学的挙動を連成した(T-H-M連成)挙動の評価を行う必要がある。表9-1は、佐藤他(1990)¹⁾が緩衝材大型試験設備の製作に先立って、処分ピット周辺の人工バリアと岩盤に発生する現象と研究課題をまとめたものである。これらの研究課題は、室内小型試験、室内大型試験(例えば緩衝材大型試験設備)、および原位置試験と地下研究施設での試験等を通じて解明されることが期待される。

「釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験」は、原位置での実規模の試験として位置づけられる。よって表9-1に示されるように、その中心的な研究課題には、“ピット掘削による岩盤への影響”、“緩衝材の施工と品質管理”、“蓋の施工”、“緩衝材と周辺岩盤の温度場、応力・ひずみ場、間隙水圧分布の計測”等がある。

本試験は、このような目的にしたがって平成8年度から開始された。ここで特徴的な点は、試験開始に先立ち、内外の多数の研究者、技術者から試験の方針に関する有益なコメントを得、これを試験計画に反映したことにある。これは、本試験がDECOVALEX、VALUCLAYという国際共同研究のテストケースあるいはデータベースとして取り上げられ、有識者の意見を収集する場が与えられたことに因る。

図9-1は本試験の計画に対するコメントとそこから得られた研究課題をまとめたものである。上記の研究課題に加え、釜石原位置試験場の水理と岩盤の特性を考慮して、“境界条件の設定”、“透水係数測定と測定結果の解釈”、“緩衝材継ぎ目の力学特性”等が重要なテーマとしてここに抽出された。

「釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験」は、平成7年度の岩盤中計器埋設、試験孔掘削に始まり、平成8年度には緩衝材施工、蓋の設置後に、ヒーター加熱を開始した。そして、本年度は原位置試験の最終年度として、加熱試験、ヒーター通電終了後の減熱試験と緩衝材の直接サンプリングを実施した。図9-2は、この3年度にわたる試験において、図9-1に示される研究課題への対応と残された課題をまとめたものである。

表9-1、図9-2に示されるように、原位置試験における研究課題の中心には、ここで生じる連成現象の計測と解析プログラムを用いた現象の理解、および解析手法の評価等がある。以下に、計測手法と解析手法の評価の重要性について本試験で得た知見をまとめる。

①計測手法の適応性評価について

安全評価に資するため、処分後の長期にわたりニアフィールドで生じる現象を観察することは重要である。しかし、本試験では加熱試験の期間は約8ヶ月にとどまり、処分後のごく短い期間にあたるデータが取得されたこととなる。取得されたデータは、変化の激しい過渡期の現象を反映しているという意味で貴重であるが、一方で重要な点は、計測手法の適応性評価に関する情報が含まれているというところにある。つまり、実際の処分で与えられる環境は、高温、大きな応力、高い水圧環境であり、この条件下での高精度の計測が要求される。本研究で作出した試験環境は、これに類似したものであり、採用した計測機器やセンサーの適応性を取得されたデータから評価することは重要である。

②解析手法の整備について

処分環境は上に述べたような複雑な環境である。ここでは、机上で予測できない現象が発生する可能性もある。実際、本研究では既に述べてきたように、試験ピット掘削時の口径変化、試験ピットへの湧水量、緩衝材中への地下水の浸潤、膨潤圧力の発生、等の挙動において、興味深いデータが取得された。このような実際に生じた現象を、解析で再現し、さらに長期の予測へとつなげることが重要となる。ここではまず、既存の計算コードと得られた情報（岩盤の物性値、境界条件、初期条件）で、この現象を説明することを試みる。その結果、説明が困難であるときは、その不確実性が「モデル、計算コード、入力データ」のいずれに起因するのかを明らかにすることが重要となる。これらの検討が解析手法の整備へとつながるといえる。

このような視点から、熱-水-応力連成現象に対する計測と解析手法の評価に関する本試験の成果をまとめ、今後の課題を述べる。

①熱学的挙動について

本研究では、熱に関して以下のデータを取得した。

- ・ヒーター表面温度
- ・緩衝材温度
- ・岩盤温度
- ・緩衝材熱流量
- ・岩盤熱流量

ヒーター温度は、緩衝材の内側の境界条件として重要である。本研究では、ヒーター表面の1個所を温度コントロール点として、ヒーター出力を制御した。そのため、ヒーターは定常後に均一な温度状態となった。しかし、この状態でヒーターの表面の位置のちがいによって、温度分布には最大10度以上の差が生じている。この原因が、ヒーター構造（形状、オイル循環のしくみ、材質等）、温度センサーに起因する計測誤差、緩衝材中の連成現象等のいずれに起因するかは、今後明らかにすべき検討課題である。

緩衝材、岩盤温度については、原理の異なる複数の計測機器によって測定した。測定結果はほぼ定常状態を示し、良好な温度分布が得られた。

一方、熱流束に関するデータは、ヒーター加熱開始直後に変化が生じている。これは、緩衝材や岩盤の温度上昇に先立つ熱の流れを正確にモニタリングしていることを意味し、熱流センサーの鋭敏性が確認できた。

②水学的挙動について

本研究では、水理に関して以下のデータを取得した。

- ・ 緩衝材水分
- ・ 緩衝材－岩盤境界の間隙水圧
- ・ 岩盤中間隙水圧

岩盤中の水圧分布は、ニアフィールドの水理条件の評価上、その透水係数分布と並んで重要なデータである。本研究は、試験場床にプールを設置し、ここを水位一定境界条件とした。本章で検討したピットへの湧水量の予測については、この境界条件のもとに、地盤統計学的手法の採用によって、現象をよく説明する解析結果が得られた。しかし、間隙水圧の測定結果は、経時的、空間的变化が大きい。特に、緩衝材－岩盤境界の間隙水圧データには、特異なものがある。今後、センサーの回収にあたって、ゼロ点チェックとセンサー性能検査を行い、計測誤差や計器自体の適応性を検討することが重要である。

一方、緩衝材中の含水比の変化は、サイクロメーターと埋設湿度計を用いて取得した。計測結果は、ヒーター加熱による緩衝材中の水分の岩盤方向への移動をよく表現している。また、一方で、ヒーター通電終了後のヒーター方向への地下水の浸潤速度の小ささ等が精度よく観察された。これは、不飽和緩衝材中の水の動きが、温度勾配と水分ポテンシャル勾配の双方に支配されるという仮説を検証するものであり、本章で VALUCLAY プロジェクトの一環として開発検討した連成解析コードの妥当性を確認することができた。

また、緩衝材中の水分計には、埋設後1年程度で計測限界以上あるいは計測不能となったものがあつた。この原因を調査し、機器の耐久性や計測範囲の向上を図ることは重要な課題である。試験設備の撤去とセンサー回収時に、センサーの腐食や劣化の観察と測定精度の再確認を実施することが必要である。

③力学的挙動について

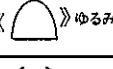
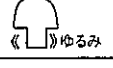
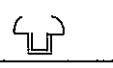
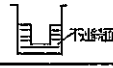
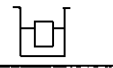
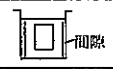
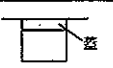
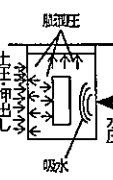
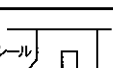
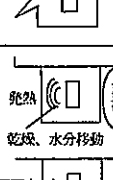
本研究では、応力分布やひずみといった力学に関して以下のデータを取得した。

- ・ 緩衝材中ひずみ
- ・ 緩衝材－岩盤境界の膨潤圧力
- ・ 岩盤中ひずみ、変位

緩衝材中のおよび岩盤のひずみや変位には大きな変化は見られなかった。加熱による熱エネルギーの負荷は、岩盤の膨張、既に存在するき裂のずれ、新たなき裂の発生等をもたらすと考えられる。しかし、本研究で与えた熱エネルギーは廃棄体 1 本相当であり、加熱期間も 8 ヶ月と実際の処分条件に比較して小さかった。そのために、岩盤やき裂、緩衝材には顕著なひずみや変位が生じなかったと推測できる。一方で、試験ピット掘削に伴う口径の変化は、第 8 章の検討で示したように大きなものである。この原因は、地圧とその異方性、トンネル掘削による応力集中、き裂の影響とブロック的な移動等が考えられる。地下深部ニアフィールドでの岩盤挙動とくにピット掘削の影響に関する解析は今後の重要な課題である。

緩衝材－岩盤境界での膨潤圧力測定は小型土圧計を用いて実施した。ここで記録される圧力の原因には、緩衝材中への地下水の浸潤により発生する膨潤圧力、緩衝材、ヒーターの熱膨張、間隙水圧の変化等がある。計測データは、すでに示したように経時的、空間的に大きなばらつきがある。これは、「土圧計設置」、「緩衝材締固め」、「プール設置による地下水浸潤と膨潤圧発生」、「ヒーター加熱による水分移動」、「ヒーター近傍緩衝材の乾燥収縮」、「緩衝材とヒーターの熱膨張」等、本試験において発生した複雑で、経時的な応力環境に起因するものである。水分計と同様に、土圧計についても回収時に十分な観察と検査を行い、データの正確を確認し、本試験で生じた現象をあらためて検討することが重要である。

表 9-1 処分ピット周辺に発生する事象

項 目	フェーズ	事 象	説明すべき現象	取 得 デ ー タ		
				廃棄体*	緩 衝 材	岩 盤
1 処分坑掘削	建設	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ ・水理状況が変わる	C ゆるみ域 C 透水性低下率			応力、ひずみ 透水係数
2 処分坑掘削		 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	C 掘削方法との関係			
3 処分坑の止水		 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	C 止水方法 C 止水期間			施工性 止水効果
4 緩衝材設置 (下部)	作業	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	BC 設置方法 BC 不連続面の状態		実大緩衝材の製作条件 施工性、不連続面形状	
5 廃棄体設置		 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	BC 設置方法 BC 緩衝材の破損	施工性 設置精度	損傷度	
6 緩衝材設置 (上部)		 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	BC 設置方法 BC 隙間充填方法		施工性 隙間の状態 不連続面形状	
7 処分坑蓋		 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	BC 蓋の設計 BC 施工法 C 耐久性			蓋の施工性 効果
8 固化体発熱	閉鎖後	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	発熱量の設定	模擬固化 体出力		
9 熱伝達 ①廃棄体 ②緩衝材 ③岩盤		 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	BC 熱伝達機構 BC 伝導 (キャスター、オーバーパッカー、緩衝材岩盤) BC 輻射 (空隙) BC 対流 (空隙、緩衝材、岩盤)	熱伝導率、比熱、密度 (温度依存性)		
				温度 熱流束	温度、熱流束 水分	温度、熱流束 水分
10 熱応力 ①廃棄体 ②緩衝材 ③岩盤	閉鎖後	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	AB 金属の熱応力、疲労 ABC 乾燥収縮 BC ひび割れ BC 熱伝導率の変化 BC 熱応力 BC 亀裂変化	熱膨張率		
				熱応力	収縮クラック状況	熱応力 亀裂変化
11 圧力 ①岩盤の押し出し ②地下水圧 ③緩衝材膨潤圧	閉鎖後	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	BC 緩衝材、廃棄体への圧力 C 地下水圧の変動 BC 水分、温度～膨潤圧力 BC 膨潤圧力の不均一性	応力	膨潤圧～水分～密度	変位、ひずみ、土圧 間隙水圧 応力、ひずみ
12 緩衝材によるシール	閉鎖後	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	ABC 亀裂幅～シール深さ		シール深さ、幅	
13 地下水、蒸気の移動 ①緩衝材 ②岩盤	閉鎖後	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	ABC 緩衝材中の水分移動 BC 熱対流 BC 蒸気移動 ABC 地下水の緩衝材への浸潤 ABC 緩衝材の流出		水分分布 間隙水圧 蒸気圧 流出量	間隙水圧 流速 蒸気圧
14 変形 ①廃棄体の沈下 ②廃棄体の偏心 ③坑蓋浮上り	閉鎖後	 掘削により岩盤がゆるむ ・掘削により岩盤がゆるむ	A 緩衝材の強度変形係数～水分 AB 緩衝材の圧密、クレー特性 A 地震時の変位 BC 緩衝材の吸水と膨潤発生 BC 坑蓋の健全性	沈下量 変位	強度～水分、クレー、動的変形 膨潤圧～水分 蓋の変位 膨潤圧	

A:室内小型試験でデータ取得

B:室内大型試験でデータ取得

C:原位試験でデータ取得

*廃棄体: ガラス固化体+オーバーパッカー

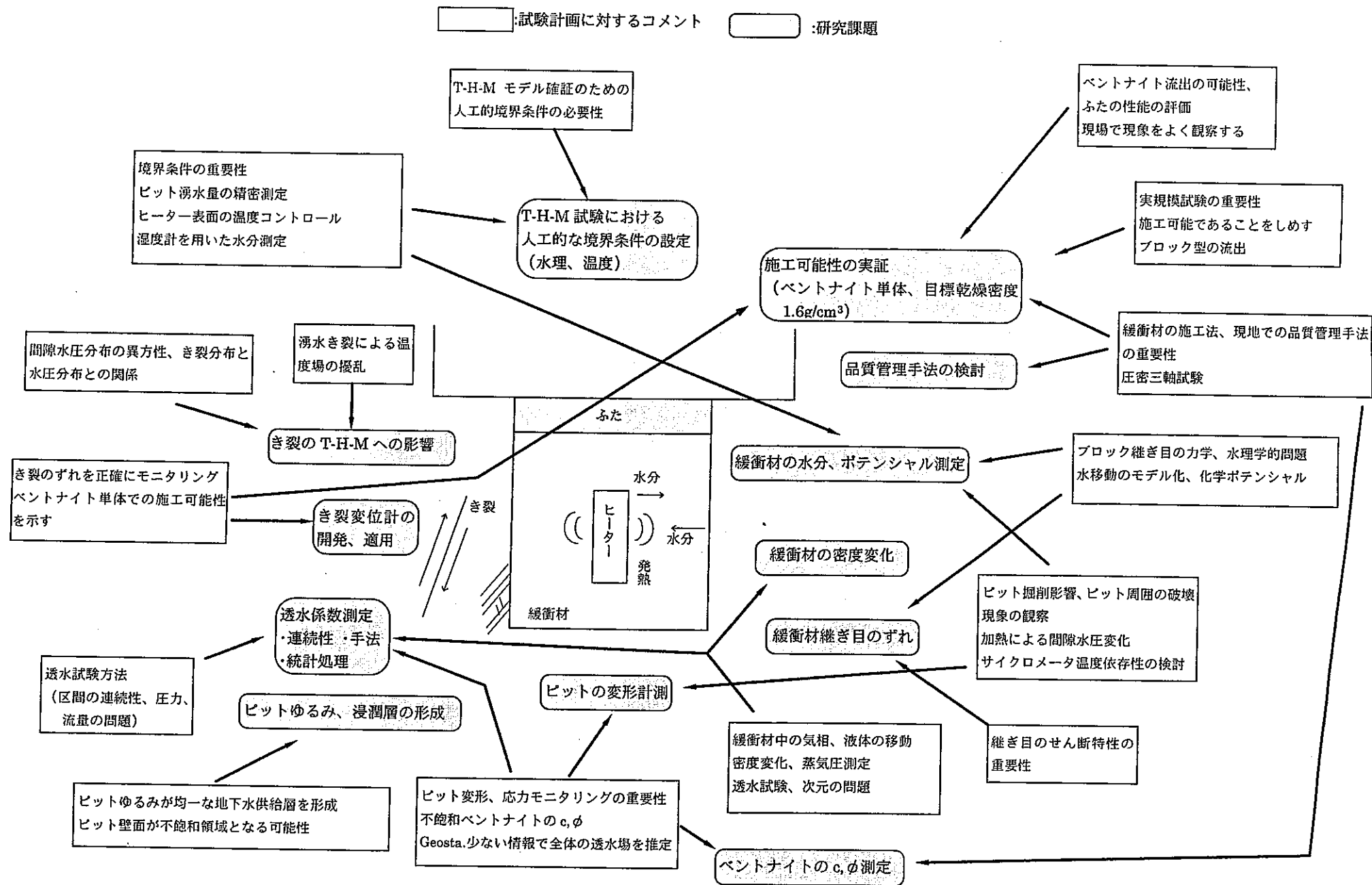


図 9-1 試験計画に対するコメント図

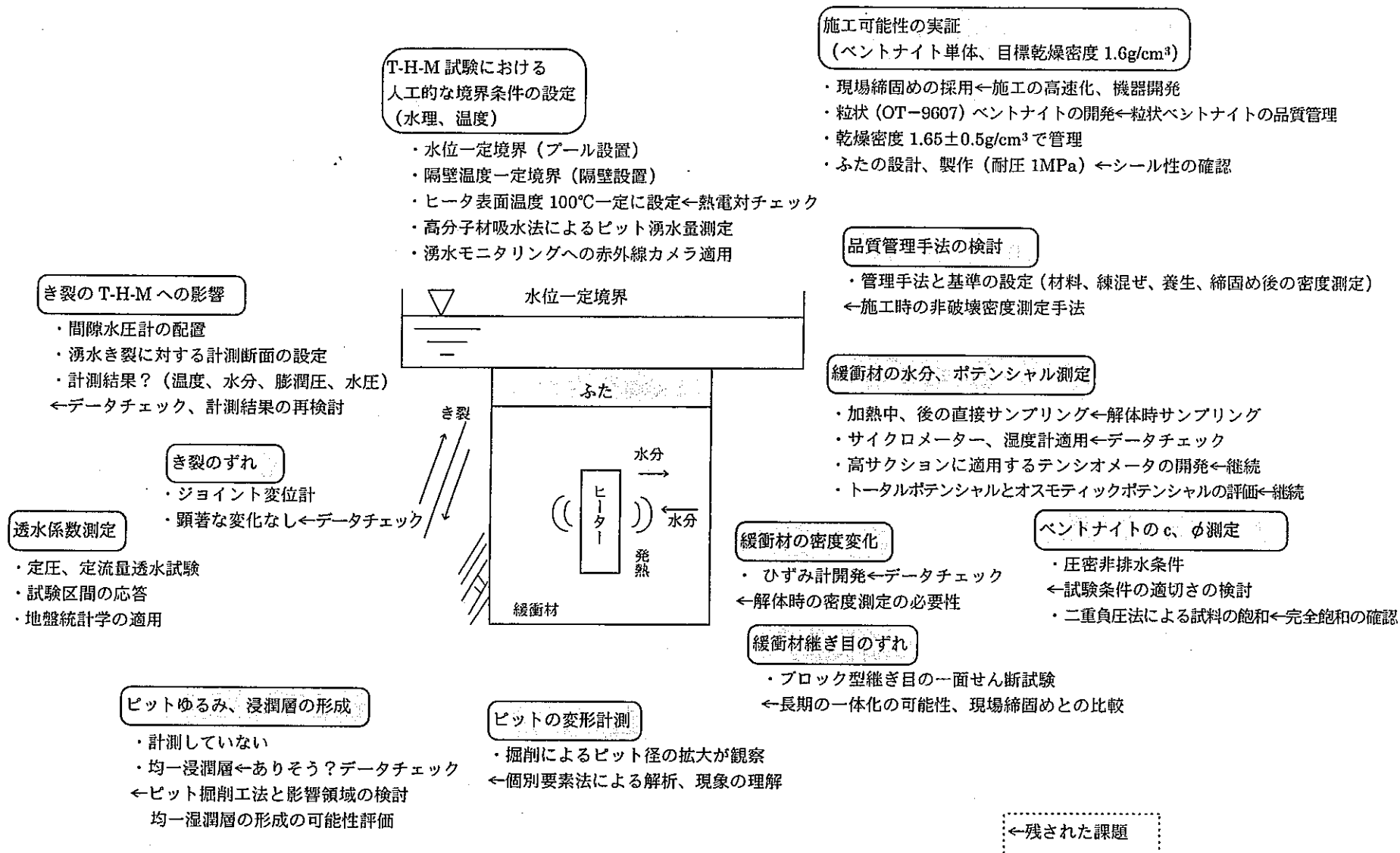


図 9-2 研究課題と成果

参考文献

- 1) 佐藤信二他: 緩衝材の熱-水-応力連成試験、PNC N8410 90-060、1990 年 6 月