ＩＳＳＮ　０３８６－５８７８

土木研究所資料　第４３００号

# 土 木 研 究 所 資 料

# 浸透に起因する河川堤防の
# のり尻からの進行性破壊現象に関する実験

平成２７年　２月

独立行政法人土木研究所

地質・地盤研究グループ土質・振動チーム

Copyright © (2013) by P.W.R.I.
All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.
この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料

第4300号 2015年2月

# 浸透に起因する河川堤防の のり尻からの進行性破壊現象に関する実験

地質・地盤研究グループ　土質・振動チーム　上席研究員　佐々木　哲也
主任研究員　石原　雅規
主任研究員　齋藤由紀子※1
研　究　員　吉田　直人
交流研究員　秋場　俊一
交流研究員　川井　正彦※2

**要　旨**

河川堤防の安全性は、円弧すべり計算や局所動水勾配によって評価を行うが、過去の被災事例ではこれら円弧すべりやパイピングといった被災だけではなく、のり尻付近の比較的浅い部分の小規模な崩壊が生じた後、徐々にのり面上部に進行する変状事例もみられる。しかしながら、このような進行性の破壊は、その発生条件や発生メカニズムについて必ずしも明らかになっておらず、評価手法も現時点では確立されていない状況にある。

本研究では浸透現象によって発生するのり尻からの進行性破壊について、堤防形状や土質を変化させた模型実験を行った結果、発生時の挙動や発生条件が明らかとなった。

**キーワード：河川堤防、模型実験、浸透破壊、進行性破壊、内部侵食**

※1：現　国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所
※2：現　応用地質株式会社

# 目　次


1 章　はじめに---------- 1
1.1　研究の背景と目的---------- 1
1.2　実験概要---------- 2

2 章　中規模浸透模型実験---------- 3
2.1　実験目的---------- 3
2.2　実験概要---------- 3
2.3　実験装置---------- 3
2.4　実験模型と実験ケース---------- 4
2.5　計測方法---------- 6
2.6　実験材料---------- 8
2.7　実験方法---------- 10
2.8　実験結果---------- 12
2.8.1　破壊の状況のまとめ ---------- 12
2.8.2　模型 1 の破壊進行状況 ---------- 14
2.8.3　模型 2 の破壊進行状況 ---------- 23
2.8.4　模型 3 の破壊進行状況 ---------- 32
2.8.5　模型 4 の破壊進行状況 ---------- 39
2.8.6　模型 5 の破壊進行状況 ---------- 48
2.8.7　模型 6 の破壊進行状況 ---------- 57
2.8.8　模型 7 の破壊進行状況 ---------- 66
2.8.9　水頭・間隙水圧計の変化 ---------- 75
2.8.10 実験後の粒度試験 ---------- 82
2.8.11 破壊の発生の有無と堤体材料の関係 ---------- 90
2.8.12 既往文献との比較 ---------- 95
2.9　まとめ---------- 97

3 章　小規模浸透模型実験---------- 99
3.1　実験目的---------- 99
3.2　予備実験概要---------- 99
3.3　実験装置（予備実験）---------- 100
3.4　実験模型と実験ケース（予備実験）---------- 101
3.5　計測方法（予備実験）---------- 104
3.6　実験材料（予備実験）---------- 105
3.7　実験方法（予備実験）---------- 106
3.8　予備実験結果---------- 107

3.8.1　CASE1 の破壊進行状況----------107
3.8.2　CASE2 の破壊進行状況----------109
3.8.3　CASE3 の破壊進行状況----------111
3.8.4　CASE4 の破壊進行状況----------113
3.8.5　CASE5 の破壊進行状況----------115
3.8.6　CASE6 の破壊進行状況----------117
3.8.7　CASE7 の破壊進行状況----------119
3.8.8　CASE8 の破壊進行状況----------121
3.8.9　確認事項の整理----------123
3.9　本実験概要----------127
3.10　実験装置（本実験）----------127
3.11　実験模型と実験ケース（本実験）----------128
3.12　計測方法（本実験）----------129
3.13　実験材料（本実験）----------129
3.14　実験方法（本実験）----------131
3.15　本実験結果----------132
3.15.1　進行性破壊の発生過程----------132
3.15.2　破壊の状況----------133
3.15.3　CASE1 の破壊進行状況----------135
3.15.4　CASE2 の破壊進行状況----------137
3.15.5　CASE3 の破壊進行状況----------139
3.15.6　CASE4 の破壊進行状況----------141
3.15.7　CASE5 の破壊進行状況----------143
3.15.8　CASE6 の破壊進行状況----------145
3.15.9　CASE7 の破壊進行状況----------147
3.15.10　CASE8 の破壊進行状況----------149
3.15.11　CASE9 の破壊進行状況----------151
3.15.12　CASE10 の破壊進行状況----------153
3.15.13　CASE11 の破壊進行状況----------155
3.15.14　CASE12 の破壊進行状況----------157
3.15.15　CASE13 の破壊進行状況----------159
3.15.16　のり尻付近の水頭と動水勾配----------161
3.15.17　のり尻付近の細粒分含有率の変化----------162
3.15.18　のり面形状の変化----------163
3.15.19　発生の有無と堤体材料の関係----------168
3.16　まとめ----------169

4 章　まとめ----------171

参考文献 ----------173
付録 ----------175
A　マノメータ水頭の経時変化図----------177
B　間隙水圧計経時変化図----------193
C　動水勾配経時変化図----------209
D　使用材料の室内試験結果----------233

# 1. はじめに

## 1.1 研究の背景

河川堤防の浸透に対する安全性は、河川の水位変動や降雨の影響を踏まえた浸透流解析を実施し、得られた浸潤線をもとに円弧すべり計算および局所動水勾配などによって評価することとなっている。しかしながら、河川堤防の浸透に伴う変状には、これら手法で評価する円弧すべりやパイピング現象以外にものり尻部で発生した小規模な崩壊が徐々にのり面上方にまで拡大する「進行性の破壊」も存在することが指摘されている。例えば、赤井[1)]によると「初期には局部的なものであっても進行性を有して広がり、ついには重大な被害をもたらした上、復旧に莫大な費用を必要とするに到るものである。」と指摘している。さらに、このような破壊を防止するためには、

① 浸透水流（浸透流）の性状を明らかにすること。

② 浸透水流（浸透流）の作用を受けた盛土構成土の力学的挙動を究明すること。

の二つの考察が必要であるとしている。しかしながら、①については数値解析手法（浸透流解析）の発達により工学的な考察が加えられるようになったものの、②については飽和度の変化にともなう力学特性の変化や間隙水圧の作用に伴う強度特性の変化、表層付近の細粒分の移動（流失）によるの物性の変化など、明らかとすべき事象に対する知見が充分に蓄積されているとは言い難い状況にある。

長瀬[2)]によると、浸透に伴う土構造物の破壊現象に関する概念の変遷について、以下のように整理している。

- 20 世紀初頭：ダム上下流を貫通するパイプ状の空洞が地中に形成（「パイピング」）
- 20 世紀前半～中頃：Terzaghi が「広義のパイピング」という表現で、地下侵食としての「狭義のパイピング」と膨れ上がりによる「ボイリング」に区分
- Tschebotarioff は「パイピング」をクイックサンドが局部的に起こる特殊な現象として指摘
- 「狭義のパイピング」と「ボイリング」に「内部侵食（internal erosion）」を加える考え方もある
- 「広義のパイピング」の意味で地下侵食が用いられる例もある

一方、破壊条件については、1922 年に Terzaghi が限界動水勾配、1923 年に Justin が限界流速に関する提案がなされて以降、一世紀以上を経た今日においても同様の考え方にもとづいた検討がなされている状況にある。

また、D.van Zyl and M.E.Harr[3)]によると、浸透による侵食の形態として「ヒービング」、「パイピング」、「内部侵食」の３つを挙げ、それぞれの特徴を表 1.1.1 のように整理している。

表 1.1.1　浸透侵食の性質（Zyl, et. al.[3] をもとに長瀬[2] を一部修正）

| 形 態 | 機 構 | 解析方法 | 例 | 参考資料 |
|---|---|---|---|---|
| ヒービング | ● 大規模な土塊の同時的隆起<br>● 土塊のせん断抵抗はほとんどゼロである | ● 限界土塊の単位有効重量に対する単位浸透力の比較 | ● 開削内部の地下水位低下に伴うヒービング<br>● 被圧条件下での掘削部の噴出<br>● 水門の下流側止水壁や余水吐すぐそばのヒービング | - Sentko (1961)<br>- Terzaghi and Peck (1967)<br>- Van Zyl (1979) |
| パイピング | ● 土中の不連続部分で局部的に始まる（細粒分の集中、比重の小さい粒子、亀裂や割れ目などである）<br>● 土の表面で土粒子が離脱し始める<br>● 浸出部に徐々に拡大する空間ができ、不規則なパイプ状の水ミチが後退方向にできる<br>● パイプの周りの土は安定している | ● 不連続性に左右されるのでほとんど不可能であるが、平均勾配法の利用は一つの試みである | ● 堤防背後の噴砂<br>● 水門の止水壁の下をくぐるパイピング | - Bligh (1927)<br>- Terzaghi (1929)<br>- Lane (1935)<br>- Khosla,et.al. (1936) |
| ｲﾝﾀｰﾅﾙｴﾛｰｼﾞｮﾝ<br>(ﾏﾄﾘｯｸｽｴﾛｰｼﾞｮﾝ) | ● 細粒土が土のマトリックスから粗粒土へと動かされることにより、局部的に始まる<br>● 空洞が形成され、崩壊・破壊に至る | ● 粒度分布の影響と動水勾配を結び付けることが試みられているが一般に解析は難しい<br>● 特定のフィルター基準に設計されたフィルターを用いて防ぐことができる | ● アースダムやロックフィルダムのゾーン間での粒子の移動<br>● 分散性の土 | - Lubochkov (1968)<br>- Ronzhin (1969)<br>- Breth (1972)<br>- Sherard, et.al. (1972) |

すなわち、内部侵食（internal erosion）が加わってはいるものの、その機構は「土粒子の移動に伴う空洞化を始まりとした崩壊・破壊」であり、「空洞周りが安定している」パイピング現象との違いが明瞭ではないと考えられ、本研究で取り上げたのり面が徐々に崩壊するようなのり尻からの進行性破壊とは形状を異にするものと考えられる。

上記のような状況を踏まえ、本研究では浸透に伴って発生するのり尻からの進行性破壊を模型実験により再現し、その挙動や特性に関する知見を取得することにより、河川堤防の安全性向上に資することを目的としている。

## 1.2　実験概要

本研究では、浸透に伴って発生するのり尻からの進行性破壊を模型実験により再現し、その挙動や特性に関する知見を取得することにより、河川堤防の安全性向上に資することを目的に、実験を実施した。

河川堤防ののり尻からの進行性破壊の発生の有無について、中規模浸透模型実験で、模型の堤体材料、のり面勾配、締固め度の影響の確認を目的に実施した。また、多種の材料を用いて堤体材料の影響の確認することを目的に、小規模浸透模型実験を実施した。

# 2. 中規模浸透模型実験

## 2.1 実験目的

河川堤防ののり尻付近から進行する破壊の発生の有無について、堤体材料、のり面勾配、締固め度の影響を確認するため、中規模浸透模型実験を行った。

## 2.2 実験概要

浸透実験施設内の幅 4.0m×長さ 8.0m×深さ 2.5m の土槽を用い、厚さ 1.0m のロームからなる基礎地盤上に天端幅 1.0m、高さ 1.4m、のり勾配 1:4～1:1.5 の堤体模型を構築（初めに勾配の緩い模型を構築し、順次掘削することによってのり勾配を変化させた）し、堤体の圧力水頭の上昇と進行性破壊の発達について計測を行った。

## 2.3 実験装置

実験は、浸透実験施設内の幅 4.0×長さ 8.0m×深さ 2.5m の土槽を用いた。土槽はコンクリート壁となっており、コンクリートの壁面にルーフィング対策として、3cm×4cm の角材を 1m～2m 間隔で、縦方向に設置した。短辺の片側には、模型に水を浸透させるために幅約 35cm の水位調節槽を作製し，槽の内側には高さ方向に 50cm 間隔で 2cm 幅スリットを設けた。さらに，ジオグリットを束にしたマットを調節槽と模型地盤の間に設置し、水位調節槽から模型地盤へ浸透する構造とした。基礎地盤の下端には、実験後の排水を目的に砕石を敷設し、砕石内に土槽外への排水パイプを設置した。

図 2.3.1 実験土槽全景

図 2.3.2 水位調節槽

図 2.3.3　ジオグリッドの束マット

図 2.3.4　排水パイプ

## 2.4　実験模型と実験ケース

5 種類の砂質土を用い、のり面勾配と締固め度を変えた実験を全 27 ケース実施した。

実験模型の形状を**図 2.4.1～図 2.4.2** に示すとともに、実施した実験ケースの一覧を**表 2.4.1** に示した。

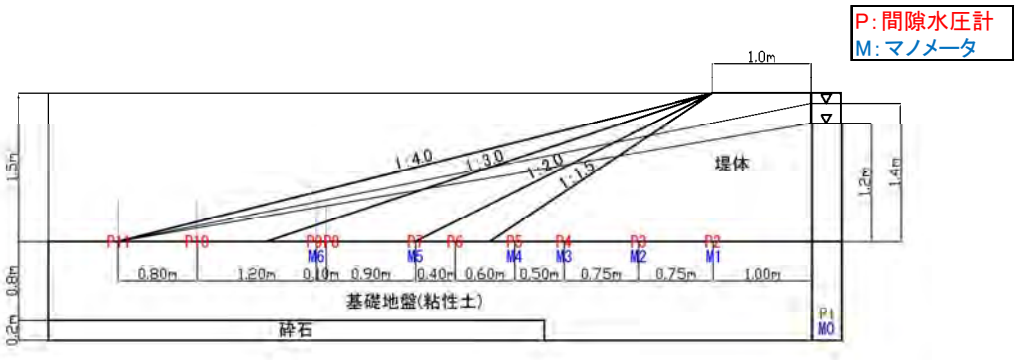



図 2.4.1　実験模型（断面図）

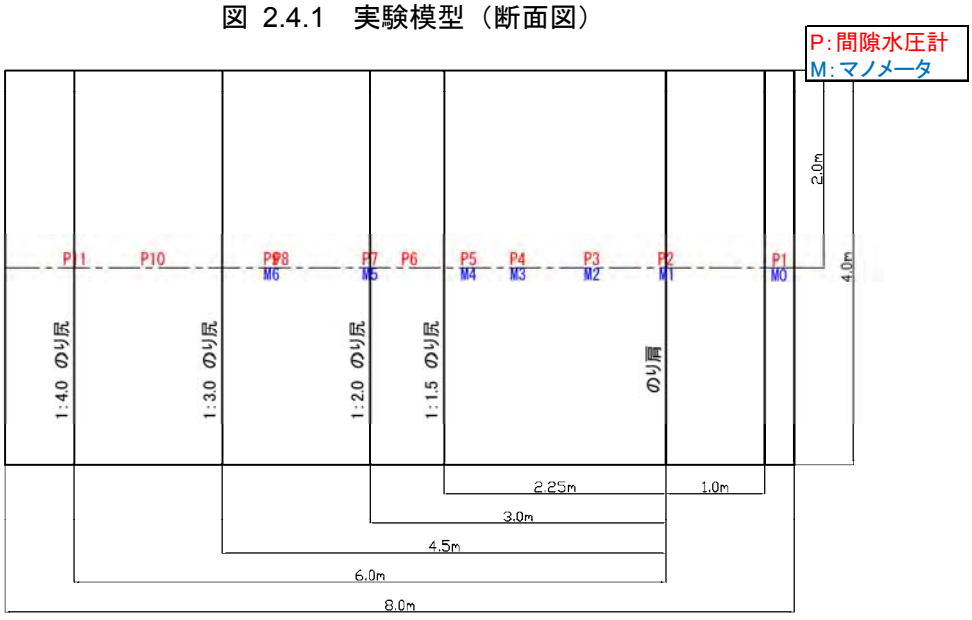



図 2.4.2　実験模型（平面図）

注）模型４は天端の無いケースとした。

表 2.4.1　浸透破壊に関する模型実験ケース(全 27 ケース)

| 実験ケース | 模型 | 使用材量 | 天端の有無 | 目標締固め度 | 細粒分含有率 | のり勾配 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CASE1 | 模型1 | 砂質土1 | 有り | 90% | 13.90% | 1：4 |
| CASE2 | | | | | | 1：3 |
| CASE3 | | | | | | 1：2 |
| CASE4 | | | | | | 1：1.5 |
| CASE5 | 模型2 | 砂質土2 | 有り | 90% | 31.50% | 1：4 |
| CASE6 | | | | | | 1：3 |
| CASE7 | | | | | | 1：2 |
| CASE8 | | | | | | 1：1.5 |
| CASE9 | 模型3 | 砂質土3 | 有り | 90% | 28.50% | 1：4 |
| CASE10 | | | | | | 1：3 |
| CASE11 | | | | | | 1：2 |
| CASE13 | 模型4 | 砂質土4 | 無し | 90% | 20.90% | 1：4 |
| CASE14 | | | | | | 1：3 |
| CASE15 | | | | | | 1：2 |
| CASE16 | | | | | | 1：1.5 |
| CASE17 | 模型5 | 砂質土5 | 有り | 90% | 25.80% | 1：4 |
| CASE18 | | | | | | 1：3 |
| CASE19 | | | | | | 1：2 |
| CASE20 | | | | | | 1：1.5 |
| CASE21 | 模型6 | | 有り | 85% | | 1：4 |
| CASE22 | | | | | | 1：3 |
| CASE23 | | | | | | 1：2 |
| CASE24 | | | | | | 1：1.5 |
| CASE25 | 模型7 | | 有り | 80% | | 1：4 |
| CASE26 | | | | | | 1：3 |
| CASE27 | | | | | | 1：2 |
| CASE28 | | | | | | 1：1.5 |

※CASE11 実施時に模型堤防が大規模に崩壊し、予定していた CASE12 が実施不能となった

## 2.5　計測方法

実験にあたっては、**図 2.4.1～図 2.5.2** に示す位置にマノメータ及び間隙水圧計を設置して計測を行うとともに、模型正面及び浸透実験施設 2 階通路より模型の状況（亀裂の発達等）を 5 分間隔で撮影した。

使用した間隙水圧計を**表 2.5.1** にまとめて示す。

**表 2.5.1　模型実験に使用した間隙水圧計**

| CH名 | 計器位置 | 計器型番 | 製造番号 | 校正係数 | 定格容量 | メーカー | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 000 | P1 | BPR-A-50KPS | 026300016 | 0.04990 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 001 | P2 | BPR-A-50KPS | 296540010 | 0.05631 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 002 | P3 | BPR-A-50KPS | 918040012 | 0.04484 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 003 | P4 | BPR-A-50KPS | 626790035 | 0.04897 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 004 | P5 | BPR-A-50KPS | 046770029 | 0.05988 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 005 | P6 | BPR-A-50KPS | 918040001 | 0.04600 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 006 | P7 | BPR-A-50KPS | 046770027 | 0.06250 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 007 | P8 | BPR-A-50KPS | 526970017 | 0.04713 | 50kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 008 | P9 | BPR-A-30KPS | 426460007 | 0.05119 | 30kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 009 | P10 | BPR-A-30KPS | 426460001 | 0.05017 | 30kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 010 | P11 | BPR-A-20KPS | 296810003 | 0.02381 | 20kPa | 共和電業 | 北側土槽 |
| 011 | P1 | BPR-A-50KPS | 026300018 | 0.05187 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 012 | P2 | BPR-A-50KPS | 526970018 | 0.04955 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 013 | P3 | BPR-A-50KPS | 8B6000009 | 0.04990 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 014 | P4 | BPR-A-50KPS | 5B7650023 | 0.05051 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 015 | P5 | BPR-A-50KPS | 977350002 | 0.04708 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 016 | P6 | BPR-A-50KPS | 918040010 | 0.04374 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 017 | P7 | BPR-A-50KPS | 46770028 | 0.06165 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 018 | P8 | BPR-A-50KPS | 46770026 | 0.05247 | 50kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 019 | P9 | BPR-A-30KPS | 426460009 | 0.04926 | 30kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 020 | P10 | BPR-A-30KPS | 426460004 | 0.04983 | 30kPa | 共和電業 | 南側土槽 |
| 021 | P11 | BPR-A-20KPS | 296810002 | 0.02384 | 20kPa | 共和電業 | 南側土槽 |

※北側土槽(模型 1，模型 4，模型 6，模型 7)，南側土槽(模型 1，模型 4，模型 6，模型 7)

また、CASE16 については、破壊の進行状況を三次元的にとらえるため、模型正面より 3D レーザースキャナによる計測も併せて実施した。

3D レーザースキャナの仕様

メーカー：パルステック工業株式会社　　型　　番：TDS-130L

計測距離：3.5m～10m　　画素数：Y1401，X4501

分解能：Y1.7～5mm，X1.2～4mm，Z0.5～5mm

図 2.5.1　マノメータ

図 2.5.2　間隙水圧計

図 2.5.3　データロガーおよび気圧計

図 2.5.4　3D スキャナ

## 2.6　実験材料

模型実験に使用した５種類の砂質土の物理特性および力学特性を**表 2.6.1** に示すとともに、粒径加積曲線をまとめて**図 2.6.1** に示した。実験材料の力学特性（圧密非排水試験 CUB）の結果を付録Ｄに示す。

**表 2.6.1　模型材料の土質特性・製作した堤体模型の締固め度とせん断強度**

| 実験模型 | | 模型１ | 模型２ | 模型３ | 模型４ | 模型５ | 模型６ | 模型７ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 模型材料 | | 砂質土1 | 砂質土2 | 砂質土3 | 砂質土4 | 砂質土５ | | |
| 材料の物理・締固め特性 | 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm$^3$) | 2.640 | 2.573 | 2.604 | 2.704 | 2.620 | | |
| | 自然含水比 $W_n$(%) | 13.5 | 21.1 | 19.0 | 15.0 | 18.5 | | |
| | 礫分 (%) | 3.0 | 14.7 | 22.2 | 1.5 | 33.1 | | |
| | 砂分 (%) | 82.9 | 53.8 | 49.3 | 77.6 | 41.1 | | |
| | シルト分 (%) | 8.4 | 17.3 | 22.3 | 16.9 | 17.8 | | |
| | 粘土分 (%) | 5.5 | 14.2 | 6.2 | 4.0 | 8.0 | | |
| | 10%粒径 $D_{10}$ (mm) | 0.018 | 0.0028 | 0.012 | 0.031 | 0.008 | | |
| | 50%粒径 $D_{50}$ (mm) | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.16 | 0.36 | | |
| | 均等係数 $U_c$ | 19 | 150 | 37 | 5 | 90 | | |
| | 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm$^3$) | 1.598 | 1.707 | 1.512 | 1.658 | 1.582 | | |
| | 最適含水比 $W_{opt}$ (%) | 20.9 | 17.1 | 27.8 | 17.8 | 24.8 | | |
| 締固度 | 模型　湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm$^3$) | 1.749 | 1.863 | 1.746 | 1.715 | 1.751 | 1.618 | 1.540 |
| | 模型　乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm$^3$) | 1.474 | 1.555 | - | - | 1.421 | 1.350 | 1.270 |
| | 模型　締固め度 $D_c$ (%) | 92.2 | 91.1 | 90.1 | 89.9 | 89.8 | 85.3 | 79.8 |
| 三軸圧縮 | 供試体　乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm$^3$) | 1.460 | 1.430 | 1.355 | 1.490 | 1.424 | 1.353 | 1.277 |
| | 供試体　締固め度 $D_c$ (%) | 91.4 | 83.8 | 89.6 | 89.8 | 90.0 | 85.5 | 80.7 |
| | 粘着力 c (kN/m$^2$) | 74.4 | 9.60 | 2.88 | 12.2 | 36.8 | 16.1 | 11.9 |
| | 内部摩擦角 $\phi$ (deg.) | 21.6 | 11.5 | 29.4 | 33.0 | 13.9 | 12.1 | 9.6 |
| | 粘着力 c' (kN/m$^2$) | 6.26 | 4.68 | 6.35 | 1.87 | 23.3 | 12.0 | 8.91 |
| | 内部摩擦角 $\phi$' (deg.) | 35.1 | 23.8 | 36.4 | 35.5 | 24.5 | 21.1 | 19.2 |
| 透水 | 試験前乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm$^3$) | 1.474 | 1.555 | 1.358 | 1.490 | 1.424 | 1.346 | 1.266 |
| | 透水係数 $k_{15}$ (m/s) | 7.63E-5 | 1.06E-6 | 3.91E-6 | 2.09E-5 | 1.15E-6 | 6.16E-6 | 4.82E-5 |

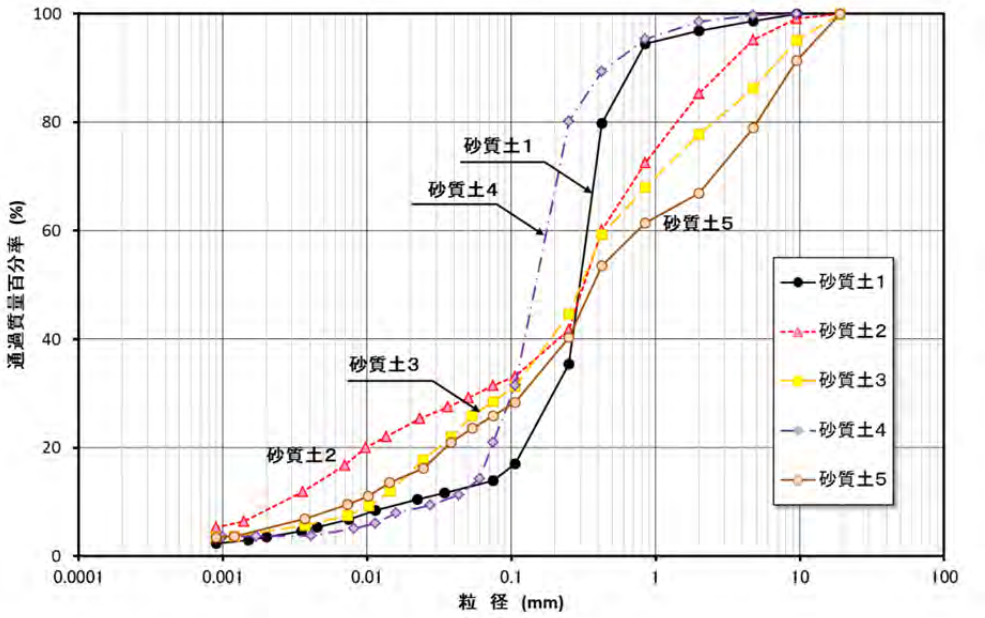



図 2.6.1　模型実験で使用した砂質土の粒径加積曲線

## 2.7　実験方法

実験模型を以下の工程で作製した。

① 土槽の最下層に砕石を厚さ 0.2m、長さ 5.0m、奥行き 4.0mの範囲に敷き詰める。(図 2.7.1)
② 粘性土を二層に分けて土槽下面から高さ 1 mの位置まで盛り立てる。(図 2.7.1)
③ 堤体は一層の仕上がり厚 0.15mとし、指定の密度になるよう締固めて作製する。各層 2 箇所（計 20 箇所／1 模型）で湿潤密度試験用の試料を採取。(図 2.7.3, 4)
④ 盛り立て作業と並行して、図 2.4.1 に示す位置に、マノメータ（6 箇所／1 模型)、間隙水圧計（10 箇所／1 模型）を設置。また、実験棟内に気圧計をあわせて設置。(図 2.7.3)
⑤ 各ケース終了後、模型地盤内の浸透水を速やかに排出するため、水抜きチューブを 12 本設置。(図 2.7.5)
⑥ のり面勾配 1:3、1:2、1:1.5 のケースについては、1:4 のケースが終了した後に順次のり面を掘削して作製。(図 2.7.5)

各模型の湿潤密度・締固め度は、各材料の締固め特性と併せて表 2.3.1 中に示した。

作成した実験模型の背面側の水位調整槽の水位を上昇させ、基礎地盤まで十分な時間(2 日以上)をおいて飽和させる。その後 30 分かけて基礎地盤から 1.2m まで上昇させて, 一定水位を維持し, 模型内に設置したマノメータ及び間隙水圧計で計測を実施した。CASE3,4,7,8,13,14,17～28 ではさらに 1.4mまで上昇させて一定水位を維持した。実験後は 1 時間かけて外水位を低下させた。

図 2.7.1　砕石層の作製

図 2.7.2　基盤（粘土層）の作製

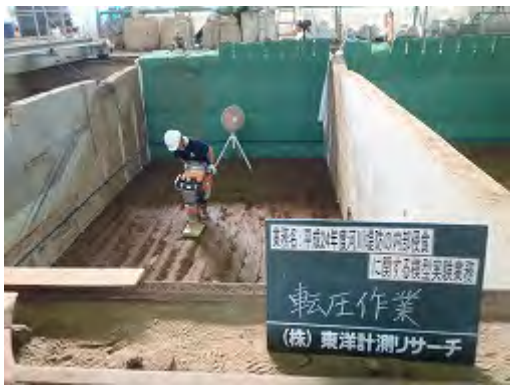


図 2.7.3　転圧作業

図 2.7.4　計測機器の設置

図 2.7.5　排水パイプの設置

図 2.7.6　のり面の整形

## 2.8　実験結果

### 2.8.1　破壊の状況のまとめ

模型実験終了時の各模型の破壊状況について、図 2.8.1 に示す。
模型材料、のり面勾配、締固め度により、破壊の発生有無が分かれる結果となった。

<table>
<tr><th colspan="4">各模型の実験終了時の状況</th></tr>
<tr><td> </td><td>【模型１】<br>CASE1～3 では変状が起きなかったが，CASE4(1:1.5)で両壁付近及びのり尻付近において小規模な破壊発生.</td><td> </td><td>【模型５】<br>破壊せず</td></tr>
<tr><td> </td><td>【模型２】<br>いずれの CASE でも破壊が発生せず。</td><td> </td><td>【模型６】<br>両壁付近において小規模な破壊発生</td></tr>
<tr><td> </td><td>【模型３】<br>のり勾配 1:2 で局部的かつ急激な崩壊が発生</td><td> </td><td>【模型７】<br>両壁付近及びのり尻付近において小規模な破壊発生</td></tr>
<tr><td> </td><td>【模型４】<br>のり勾配 1:3 より急なケースで破壊が発生。1:1.5 では崩壊が水槽にまで至る</td><td></td><td></td></tr>
</table>

**図 2.8.1　実験終了時の状況**

一方、破壊の進行状況を三次元的にとらえることを目的に実施した 3D レーザースキャナにより、**図 2.8.2　三次元レーザースキャナによる計測結果（模型４　のり勾配 1**:1.5（CASE16））に示すように破壊が時間とともに進行していく状況が計測され、崩壊はのり面下部の比較的浅い崩壊から始まり、その後、崩壊部（滑落崖）の高さを増しつつ、徐々にのり面上方へ進展していく状況が確認された。本計測により、崩壊がのり面の比較的浅い部分に留まっていることや破壊の進行により形成される滑落崖の高さがのり面上方に進行するほど高くなることが明らかとなった。

なお、多くの変状が壁沿いに発生していた。壁沿いの止水の効果が模型規模や給水槽の水位に対して不足していることにより、壁沿いに局部的な速い流れが形成された結果と考えられる。

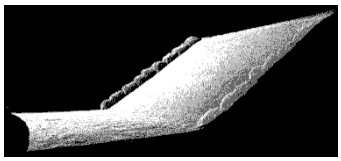
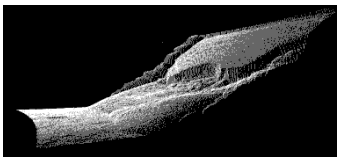
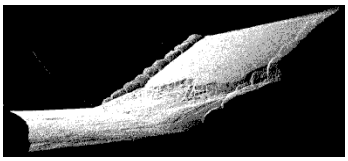
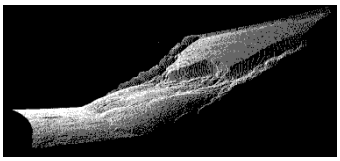
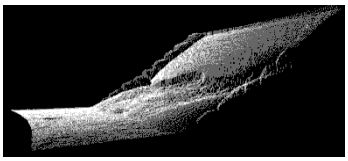
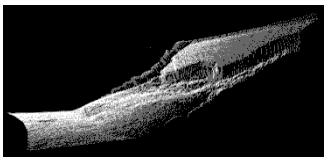
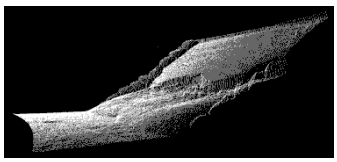
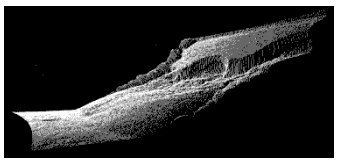
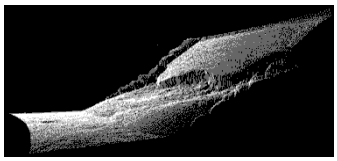
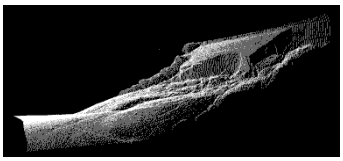
| 計測時間 | 三次元画像 | 計測時間 | 三次元画像 |
|---|---|---|---|
| **実験開始前**<br>**09:48**<br>実験開始 10:00<br>初期（変状無） |  | **14:35**<br>変状開始後 155 分 |  |
| **12:55**<br>変状開始後 55 分 |  | **14:55**<br>変状開始後 175 分 |  |
| **13:35**<br>変状開始後 95 分 |  | **15:15**<br>変状開始後 195 分 |  |
| **13:55**<br>変状開始後 115 分 |  | **15:35**<br>変状開始後 215 分 |  |
| **14:15**<br>変状開始後 135 分 |  | **15:57**<br>変状開始後 237 分<br>決壊 |  |

**図 2.8.2　三次元レーザースキャナによる計測結果（模型４　のり勾配 1:1.5（CASE16））**

実験結果の水頭値について、細かい間隔で計測した間隙水圧計の値を示す。なお、マノメータによる計測結果については、付録に示す。

### 2.8.2　模型１の破壊進行状況

のり勾配 1:4（CASE1）、1:3（CASE2）、1:2（CASE3）の 3 ケースでは変状の発生は見られなかったが、のり勾配 1:1.5（CASE4）において、破壊が発生した。ただし、発生場所がのり尻の一部と壁沿いに限定され、大規模な破壊は生じなかった。

なお、CASE3、CASE4 では、堤体内の水頭が安定した状況をみて、一定時間の経過後、給水槽の水位を 1.2m から 1.4m まで上昇させた。

図 2.8.3　終了時の状況 CASE1(1:4.0)

図 2.8.4　終了時の状況 CASE2(1:3.0)

図 2.8.5　終了時の状況 CASE3(1:2.0)

図 2.8.6　終了時の状況 CASE4(1:1.5)

(1) CASE1 (1:4)

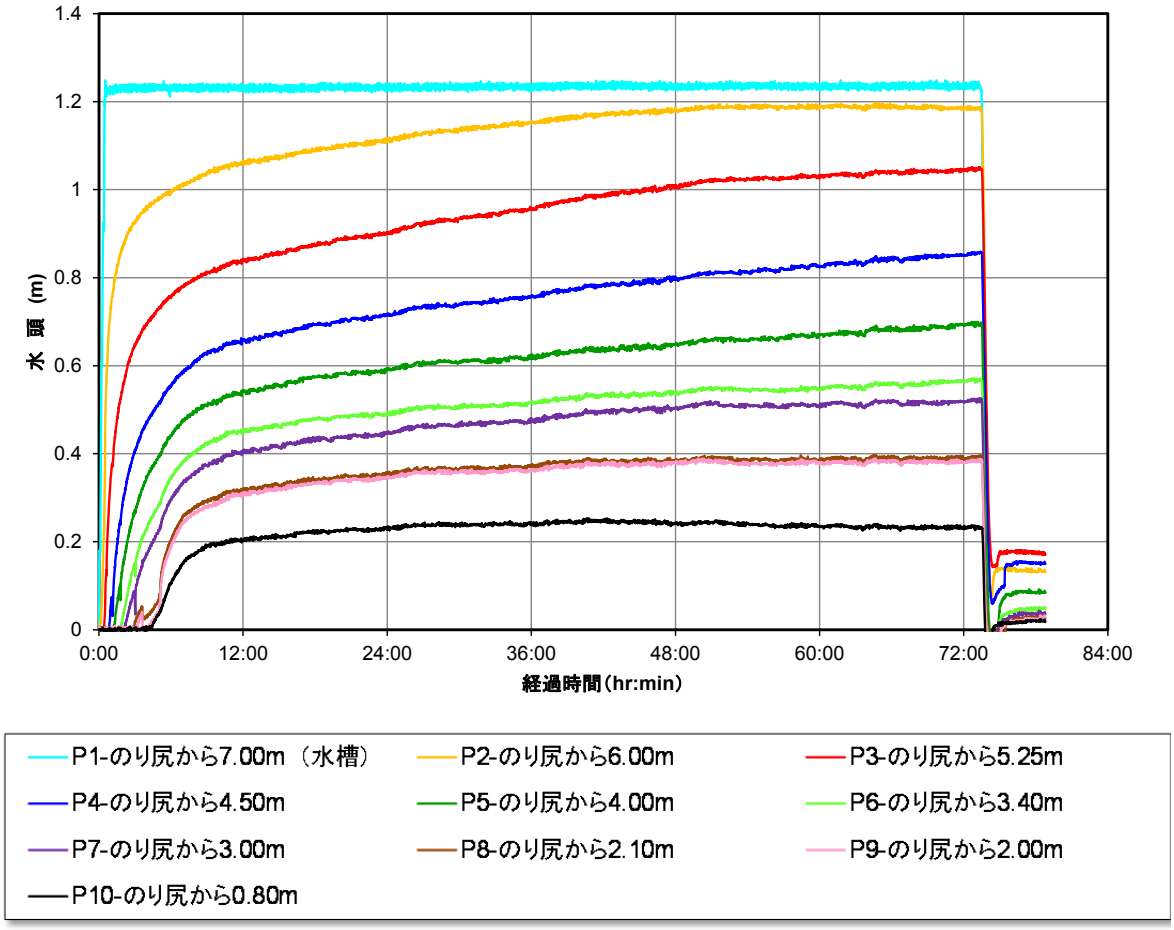



図 2.8.7　水頭の経時変化(CASE1)

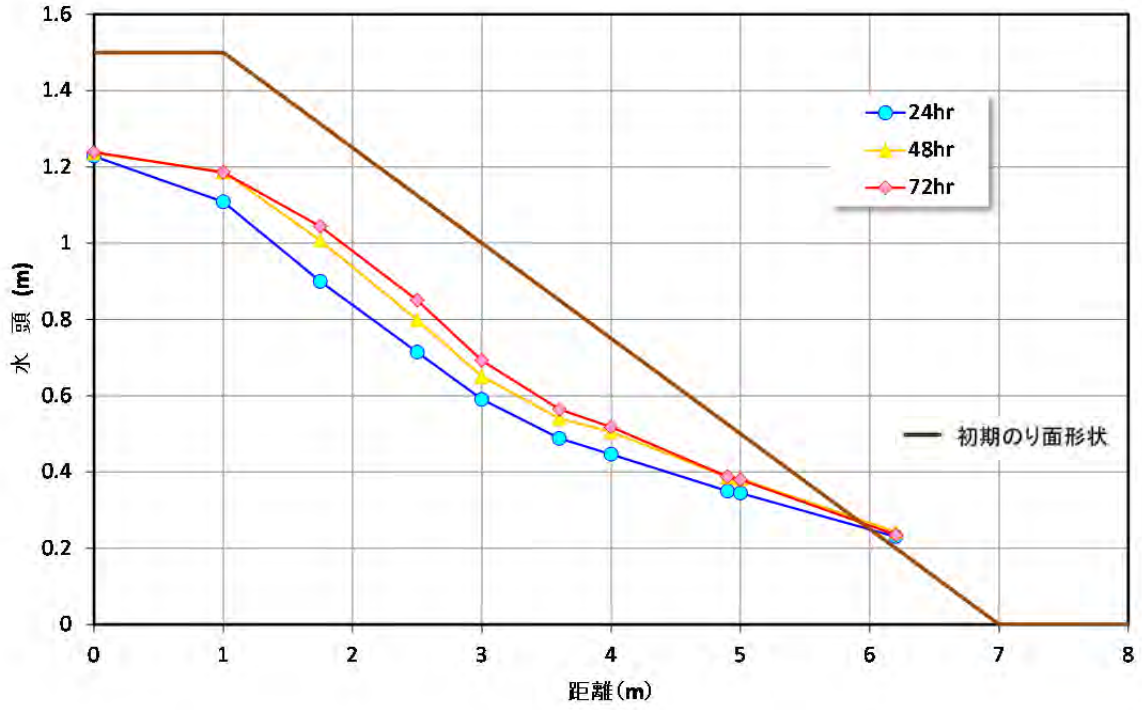



図 2.8.8　水頭分布の経時変化(CASE1)

図 2.8.9　のり尻の状況（CASE1,24hr 後）

図 2.8.10　のり尻の状況（CASE1,48hr 後）

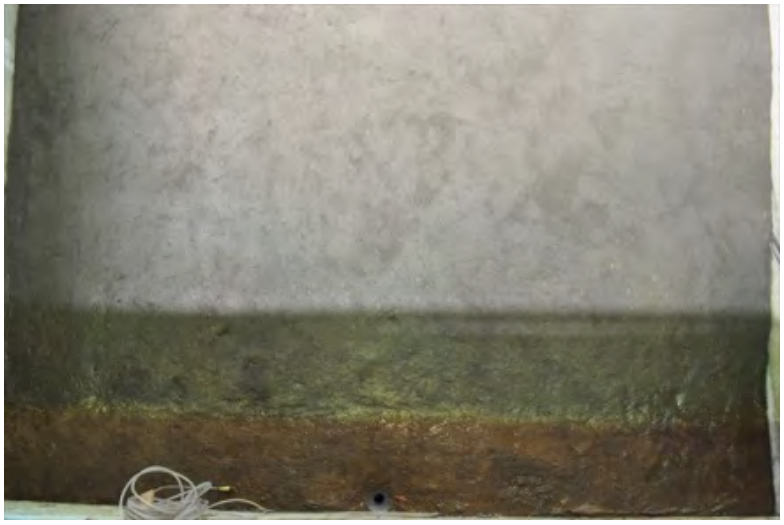


図 2.8.11　のり尻の状況（CASE1,72hr 後）

(2) CASE2(1:3)

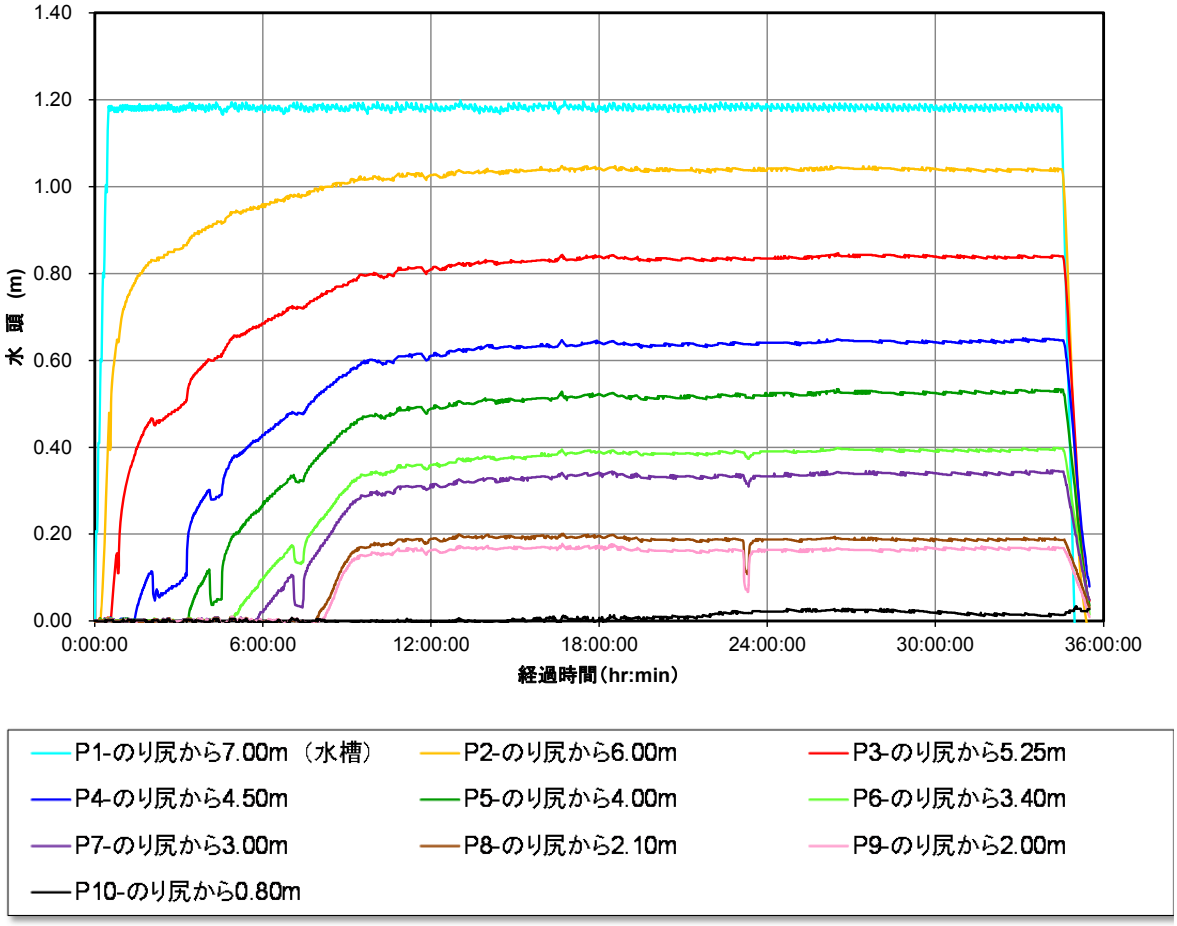



図 2.8.12　水頭の経時変化(CASE2)

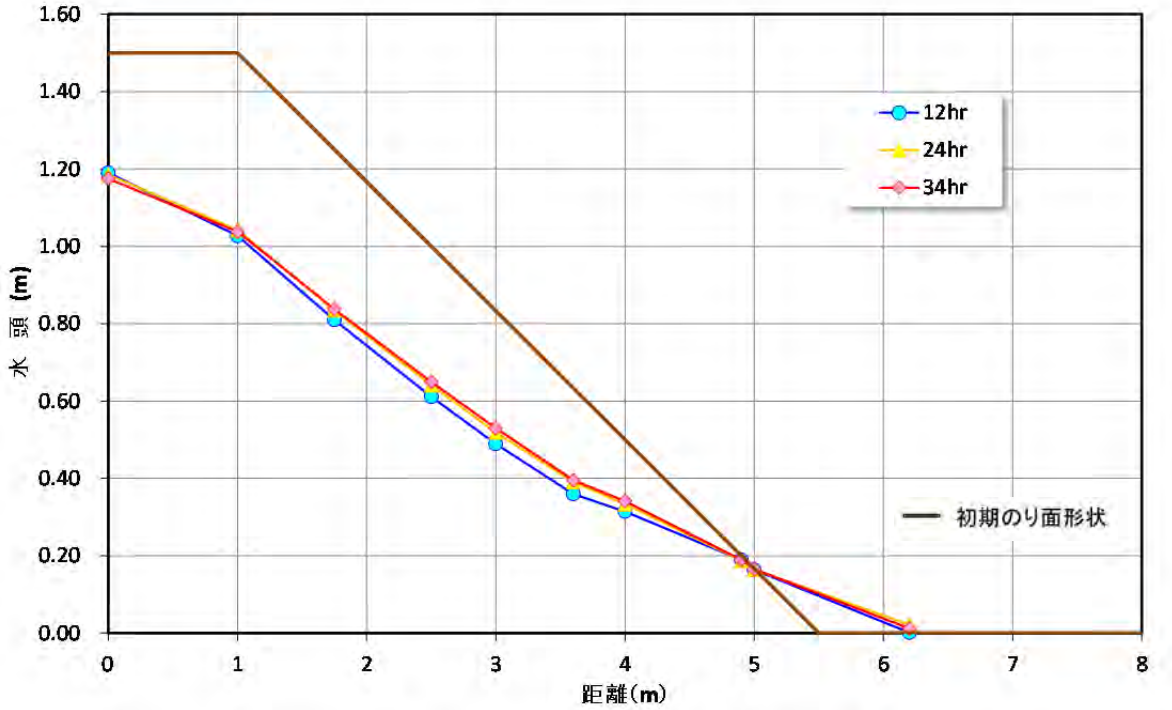



図 2.8.13　水頭分布の経時変化(CASE2)

図 2.8.14　のり尻の状況（CASE2,12hr 後）

図 2.8.15　のり尻の状況（CASE2,24hr 後）

図 2.8.16　のり尻の状況（CASE2,34hr 後）

(3) CASE3 (1:2)

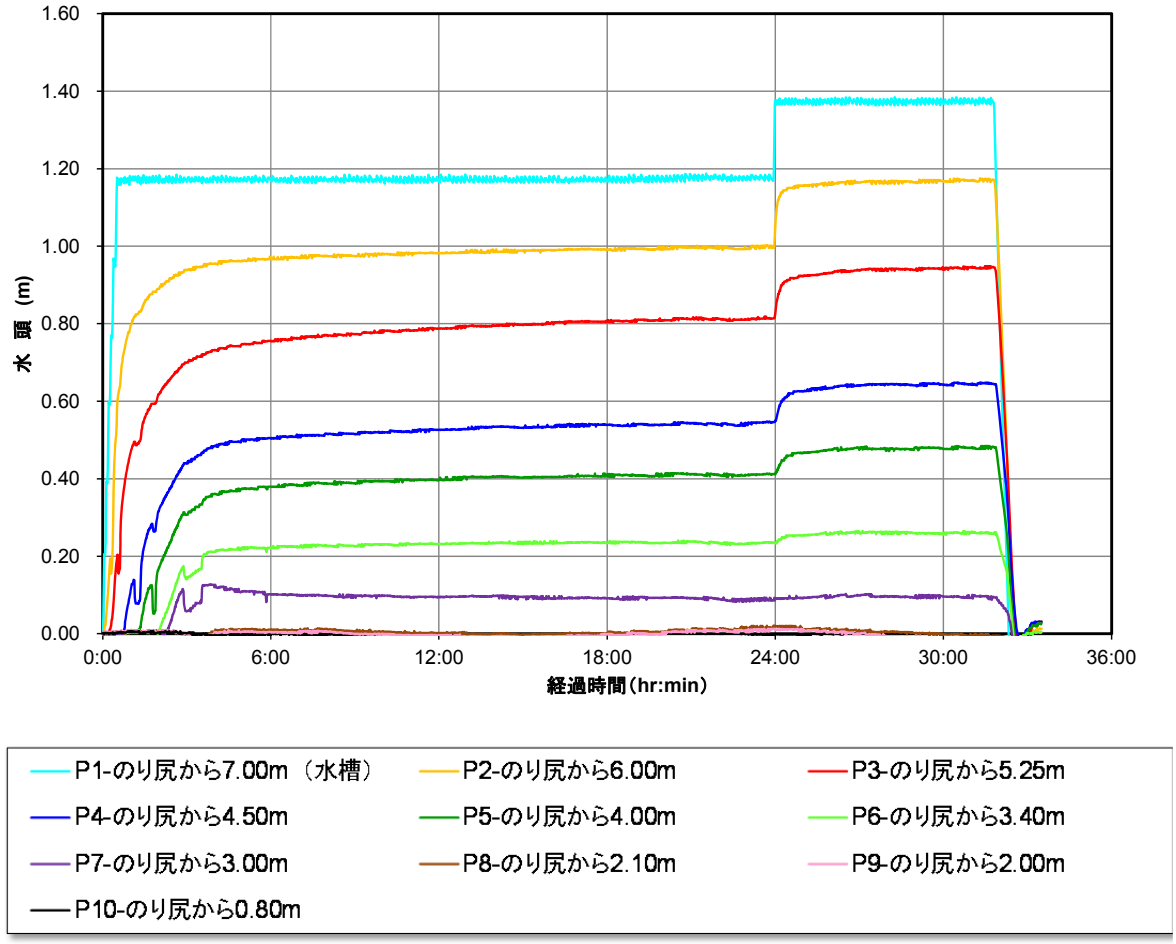



図 2.8.17　水頭の経時変化(CASE3)

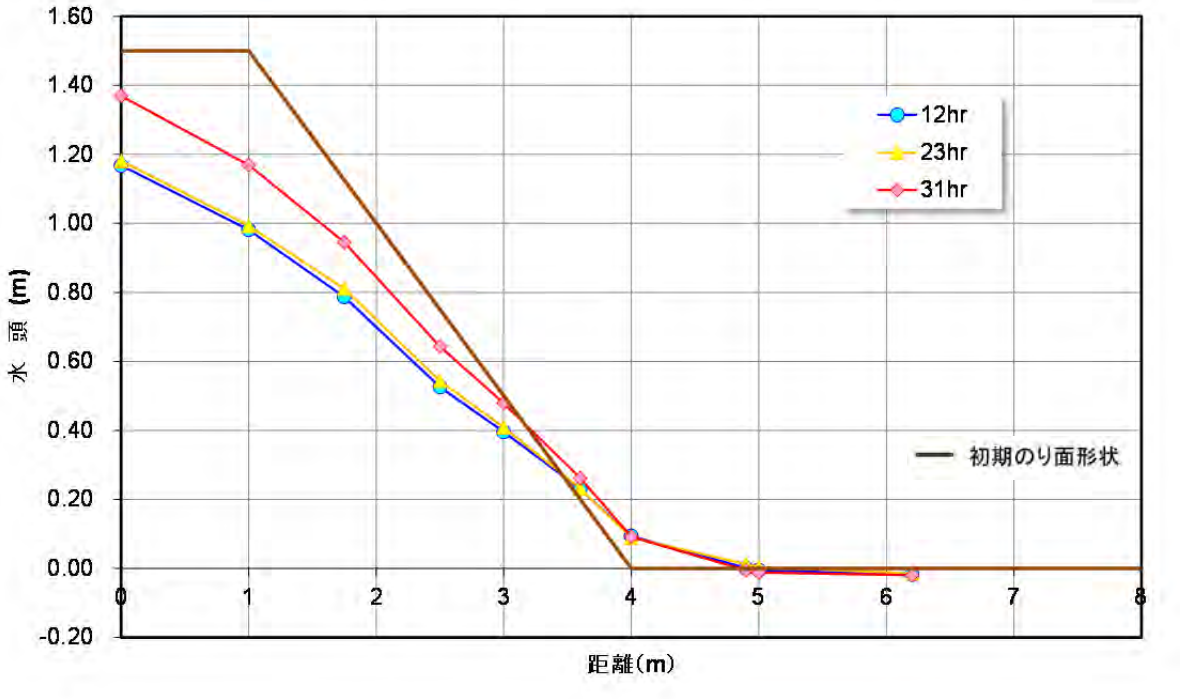



図 2.8.18　水頭分布の経時変化(CASE3)

図 2.8.19　のり尻の状況（CASE3,12hr 後）

図 2.8.20　のり尻の状況（CASE3,23hr 後）

図 2.8.21　のり尻の状況（CASE3,31hr 後）

(4) CASE4(1:1.5)

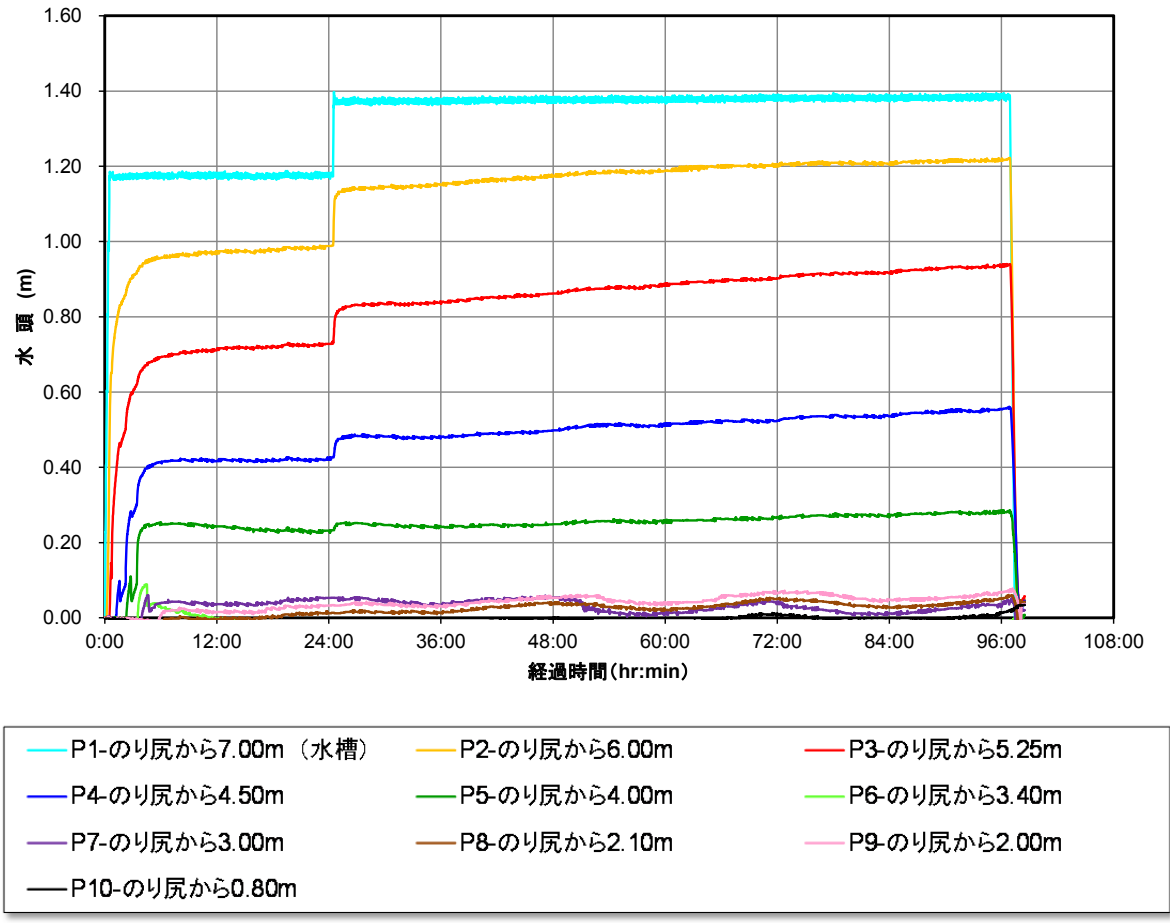



図 2.8.22　水頭の経時変化(CASE4)

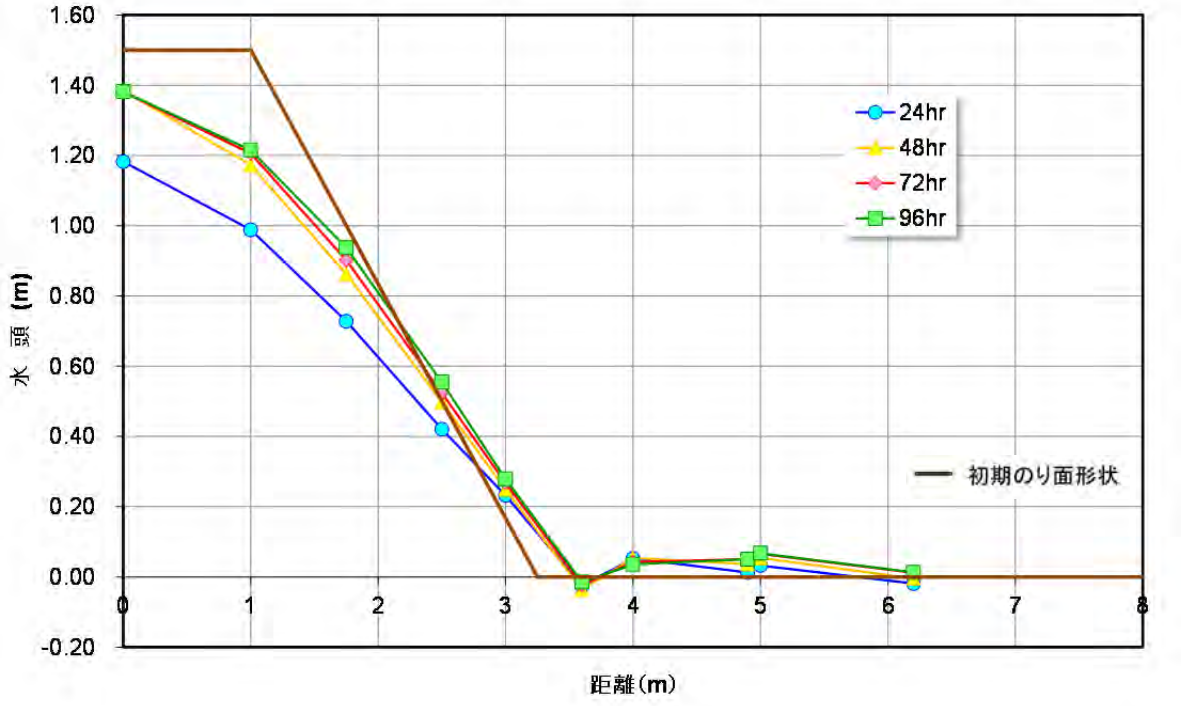



図 2.8.23　水頭の経時変化(CASE4)

図 2.8.24　のり尻の状況（CASE4,24hr 後）

図 2.8.25　のり尻の状況（CASE4,48hr 後）

図 2.8.26　のり尻の状況（CASE4,72hr 後）

図 2.8.27　のり尻の状況（CASE4,96hr 後）

### 2.8.3　模型 2 の破壊進行状況

1：4.0（CASE5）から 1:1.5（CASE8）まで、のり面勾配を急にしても浸透破壊は発生しなかった。

なお、CASE7、CASE8 では、堤体内の水頭が安定した状況をみて、一定時間の経過後、給水槽の水位を 1.2m から 1.4m まで上昇させた。

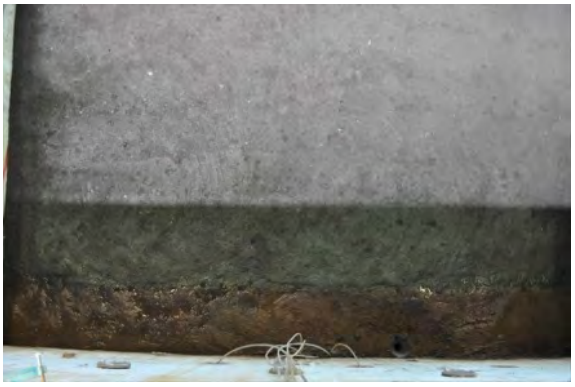


図 2.8.28　終了時の状況 CASE5(1:4.0)

図 2.8.29　終了時の状況 CASE6(1:3.0)

図 2.8.30　終了時の状況 CASE7(1:2.0)

図 2.8.31　終了時の状況 CASE8(1:1.5)

(1) CASE5(1:4)

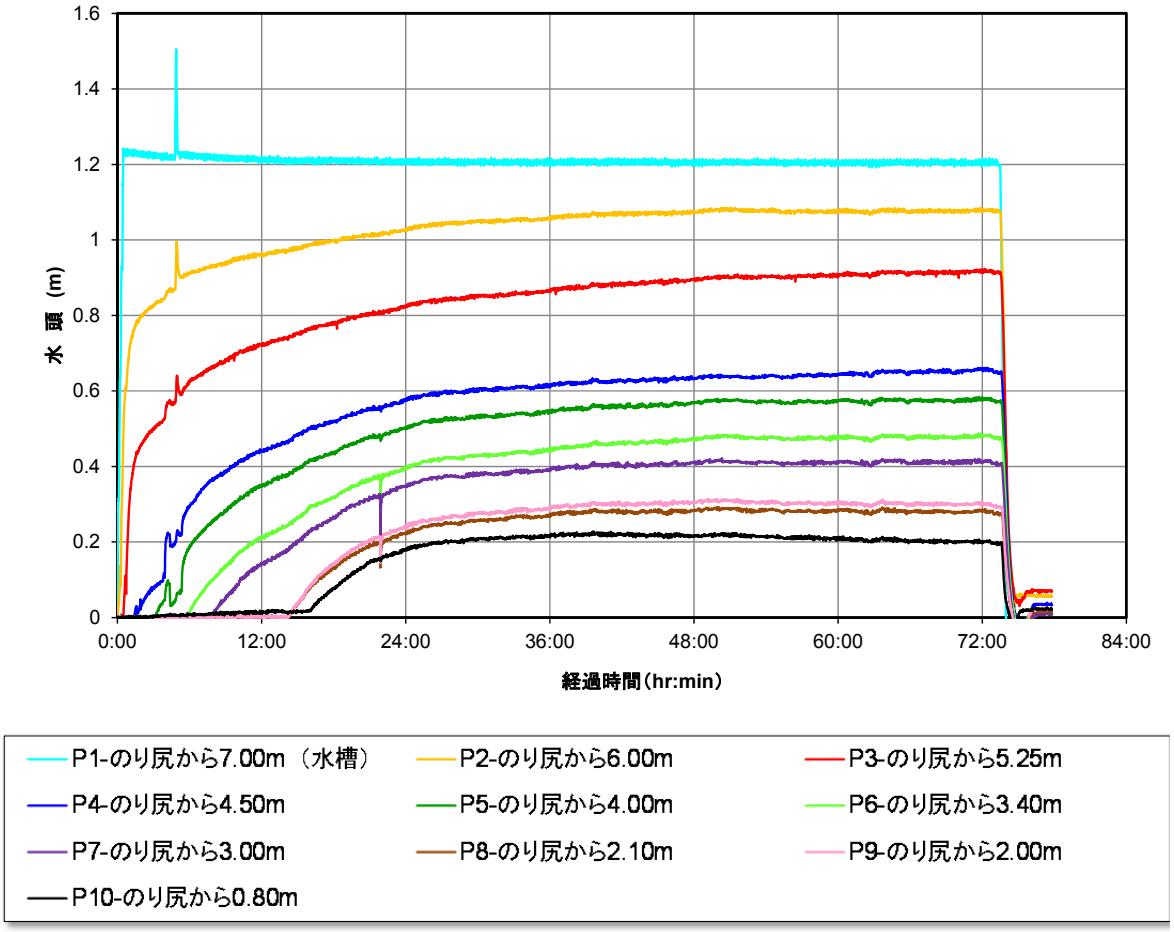



図 2.8.32　水頭の経時変化(CASE5)

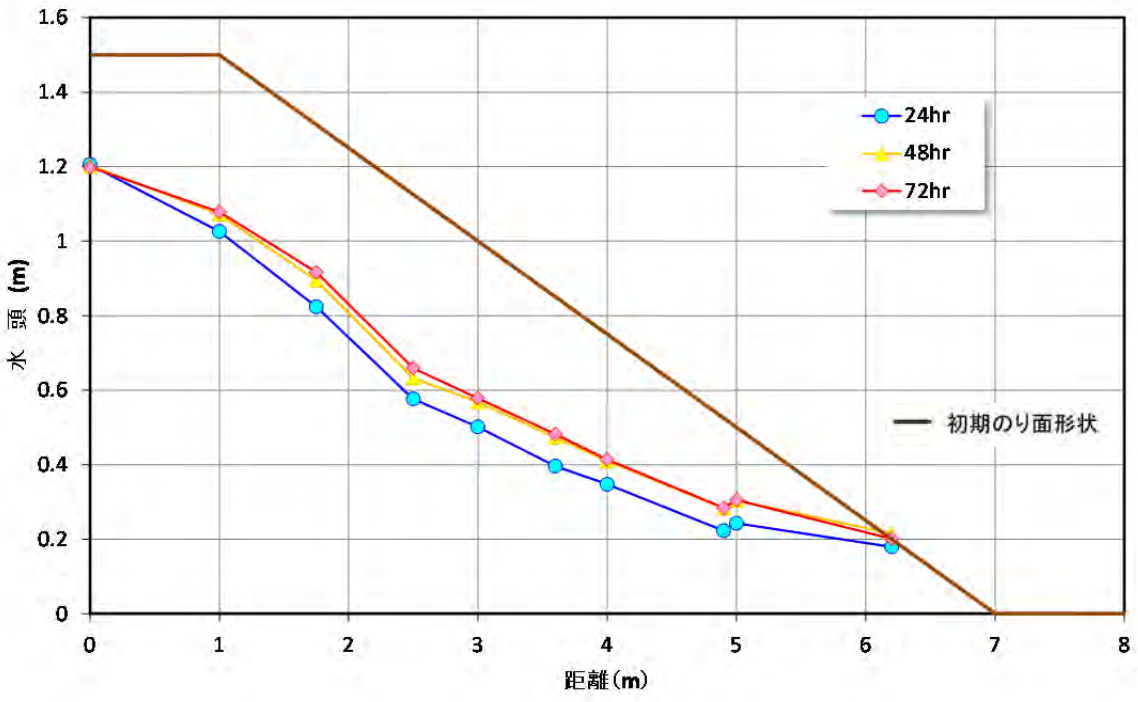
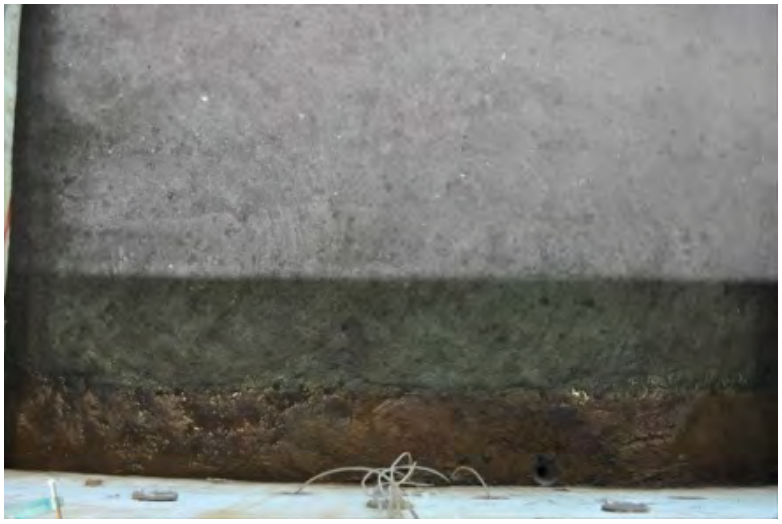



図 2.8.33　水頭分布の経時変化(CASE5)

図 2.8.34　のり尻の状況（CASE5,24hr 後）

図 2.8.35　のり尻の状況（CASE5,48hr 後）



2.8.36　のり尻の状況（CASE5,72hr 後）

(2) CASE6 (1:3)

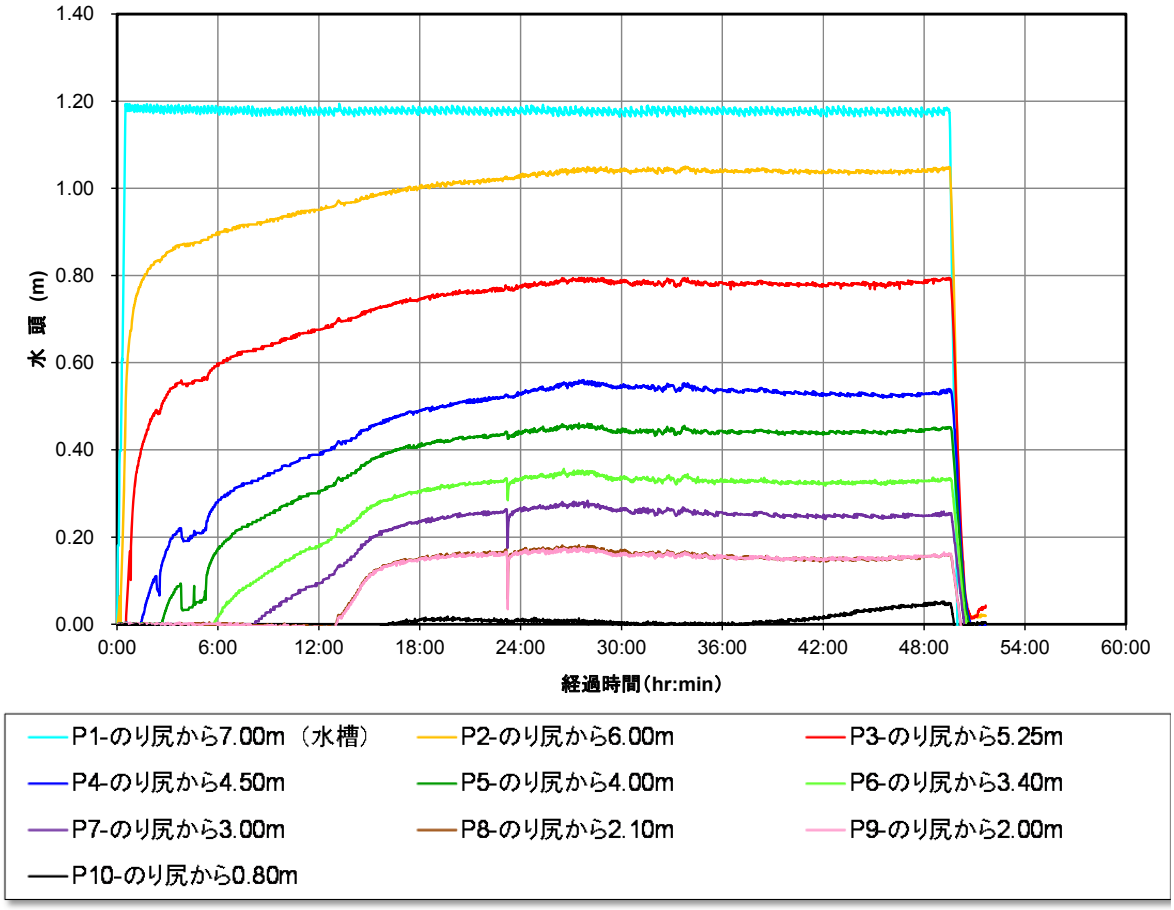



図 2.8.37　水頭の経時変化(CASE6)

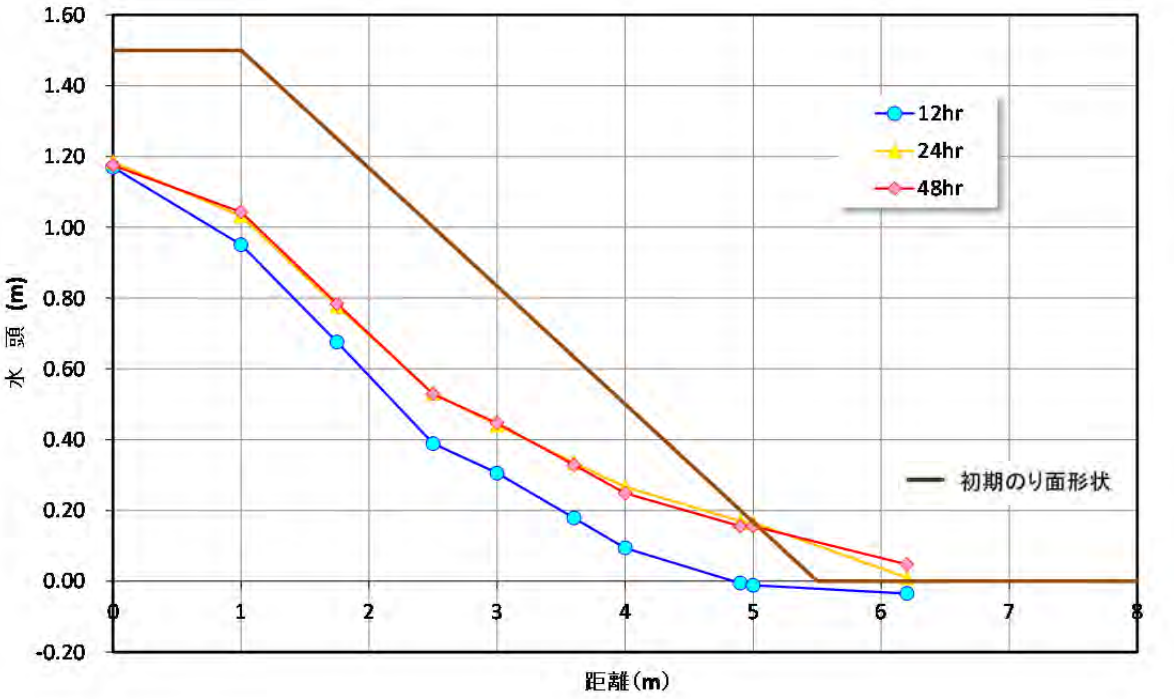



図 2.8.38　水頭分布の経時変化(CASE6)

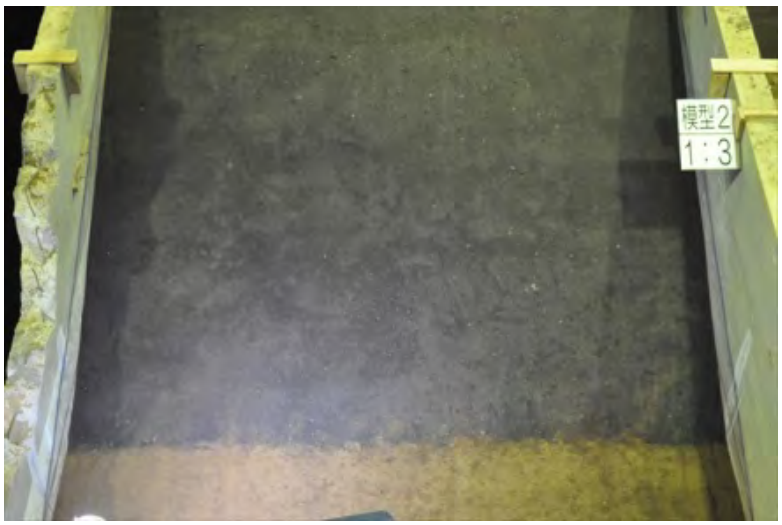



図 2.8.39　のり尻の状況（CASE6,12hr 後）

図 2.8.40　のり尻の状況（CASE6,24hr 後）

図 2.8.41　のり尻の状況（CASE6,48hr 後）

(3) CASE7 (1:2)

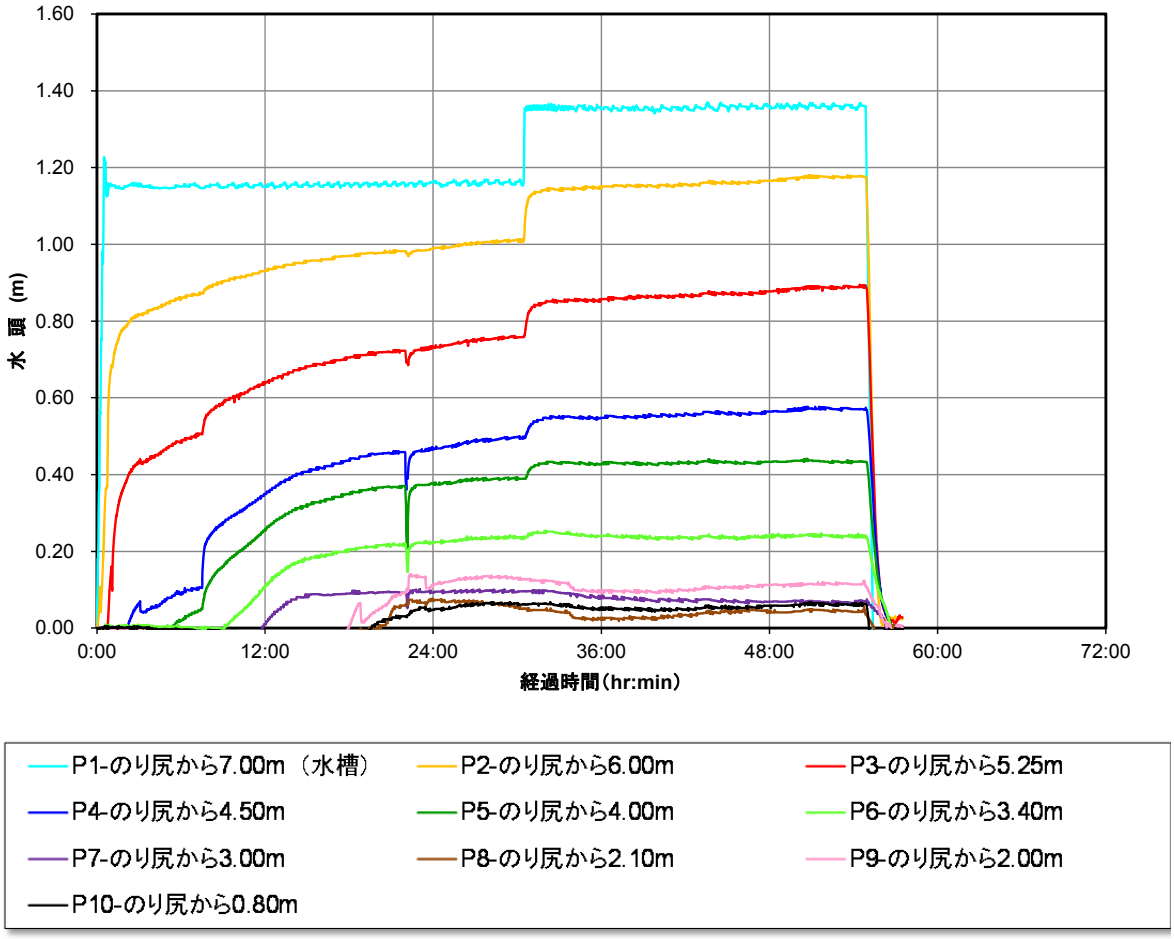



図 2.8.42　水頭の経時変化(CASE7)

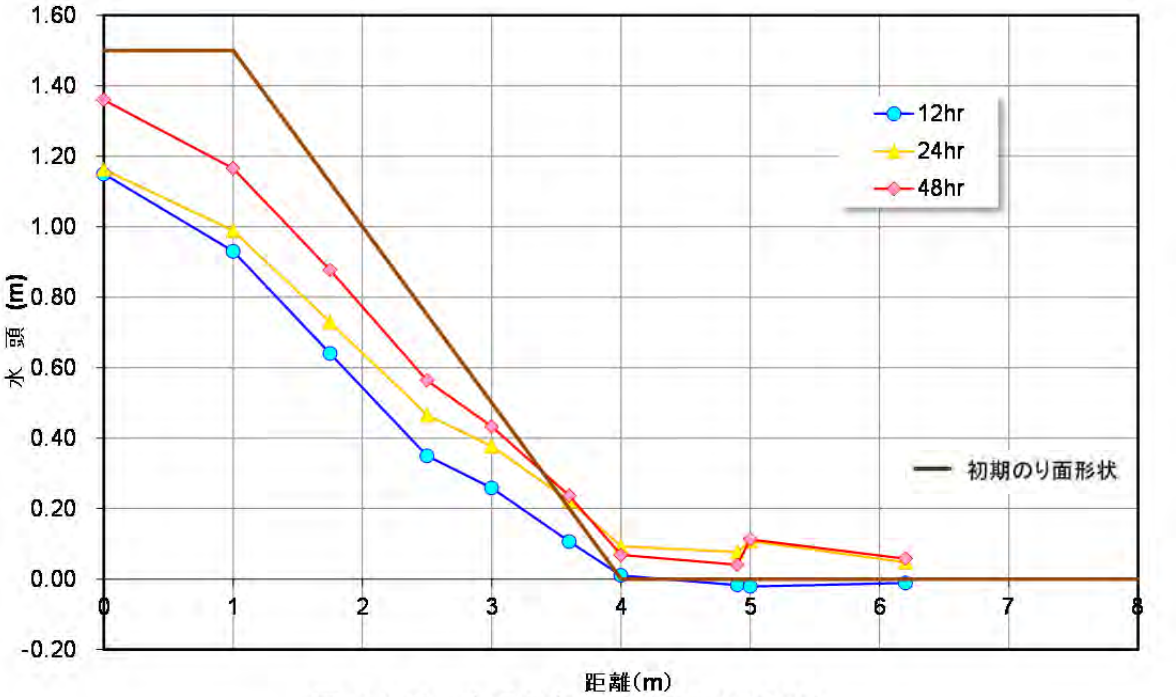



図 2.8.43　水頭分布の経時変化(CASE7)

図 2.8.44　のり尻の状況（CASE7,12hr 後）

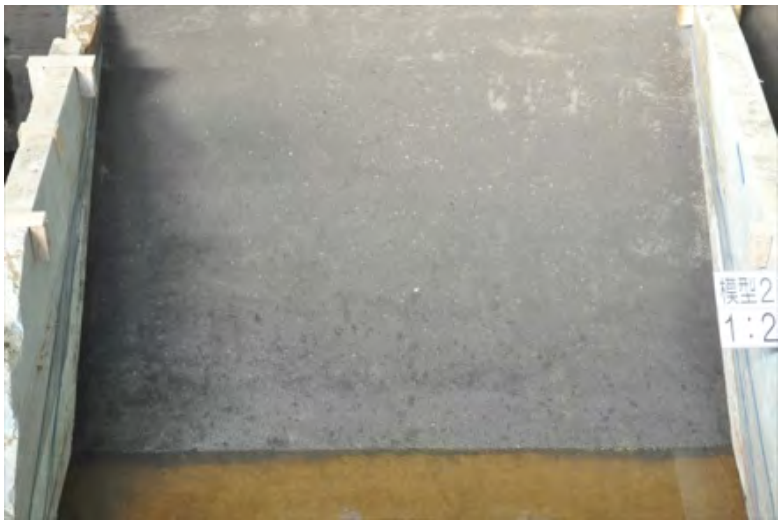



図 2.8.45　のり尻の状況（CASE7,24hr 後）

図 2.8.46　のり尻の状況（CASE7,48hr 後）

(4) CASE8 (1:1.5)

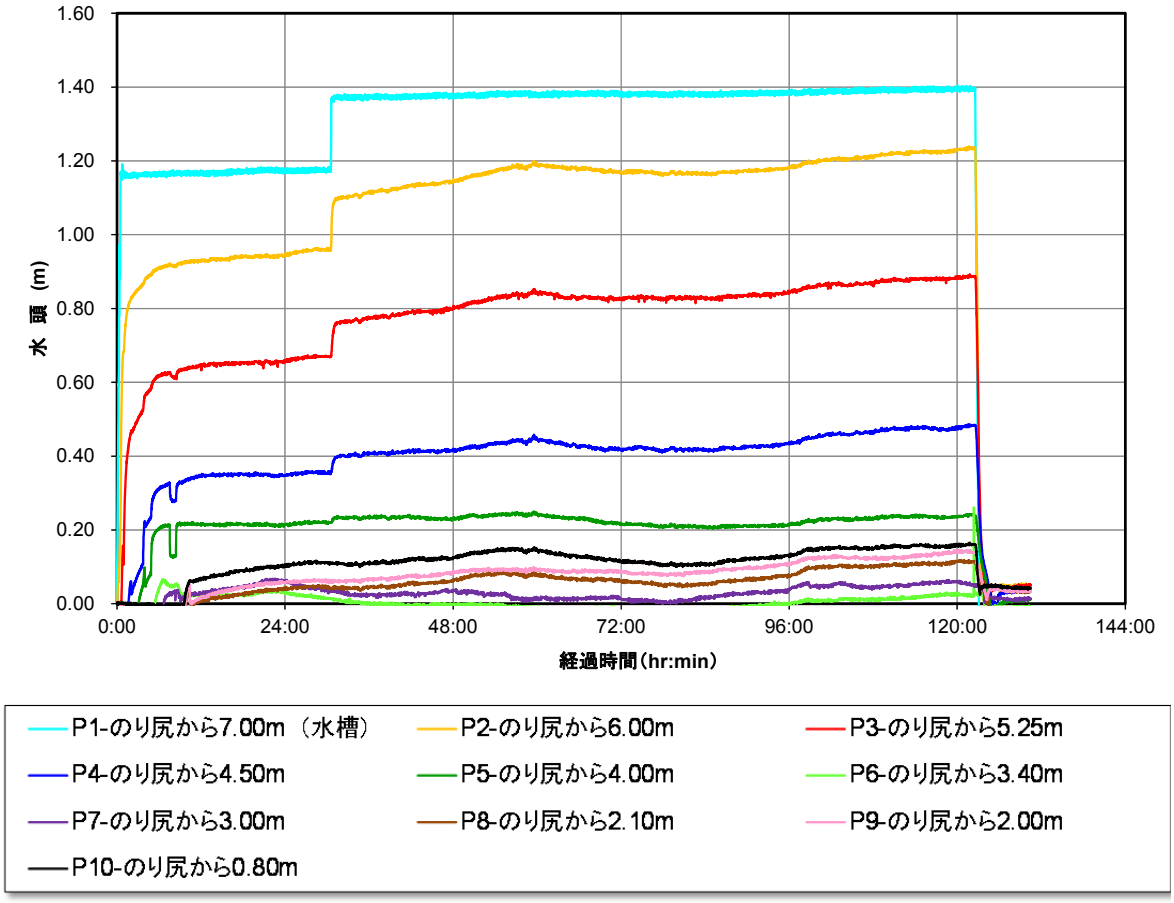



図 2.8.47　水頭の経時変化(CASE8)

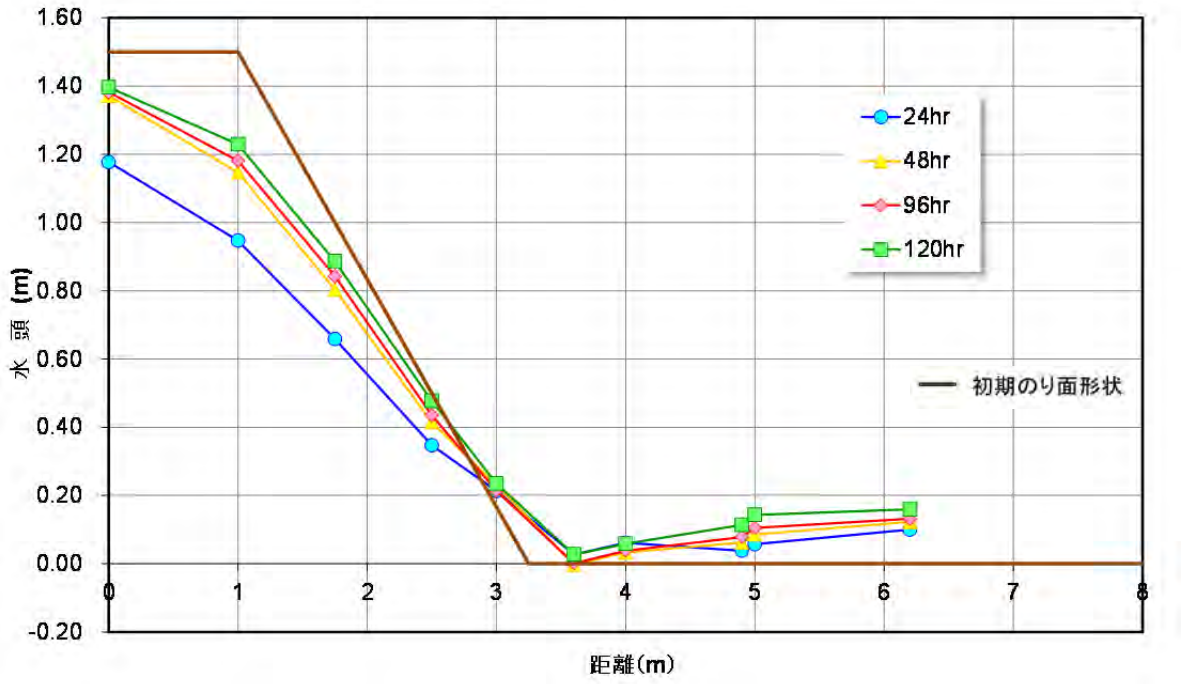



図 2.8.48　水頭分布の経時変化(CASE8)

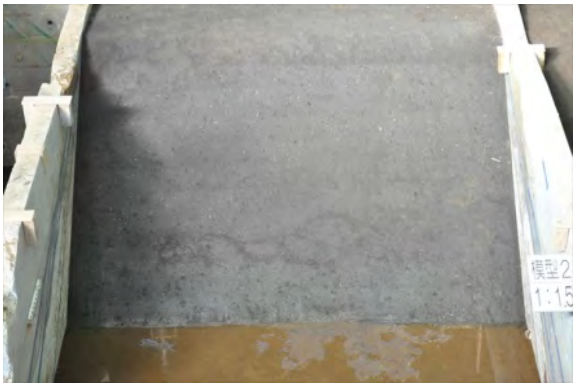


図 2.8.49　のり尻の状況（CASE8,24hr 後）

図 2.8.50　のり尻の状況（CASE8,48hr 後）

図 2.8.51　のり尻の状況（CASE8,96hr 後）

図 2.8.52　のり尻の状況（CASE8,120hr 後）

### 2.8.4　模型 3 の破壊進行状況

のり勾配 1:4（CASE9）、1:3（CASE10）では変状は発生せず。のり勾配 1:2（CASE11）とした際にのり面中央から壁際にかけて，突然陥没上の破壊が発生した（本実験で対象としている浸透破壊ではない）。

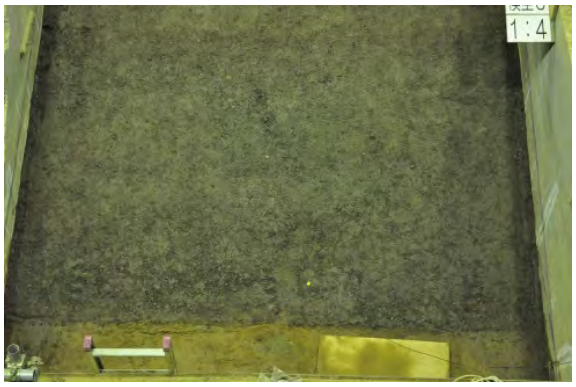



図 2.8.53　終了時の状況 CASE9(1:4.0)

図 2.8.54　終了時の状況 CASE10(1:3.0)

図 2.8.55　終了時の状況 CASE11(1:2.0)

1:1.5 は実施せず

図 2.8.56　終了時の状況 CASE12(1:1.5)

(1) CASE9(1:4)

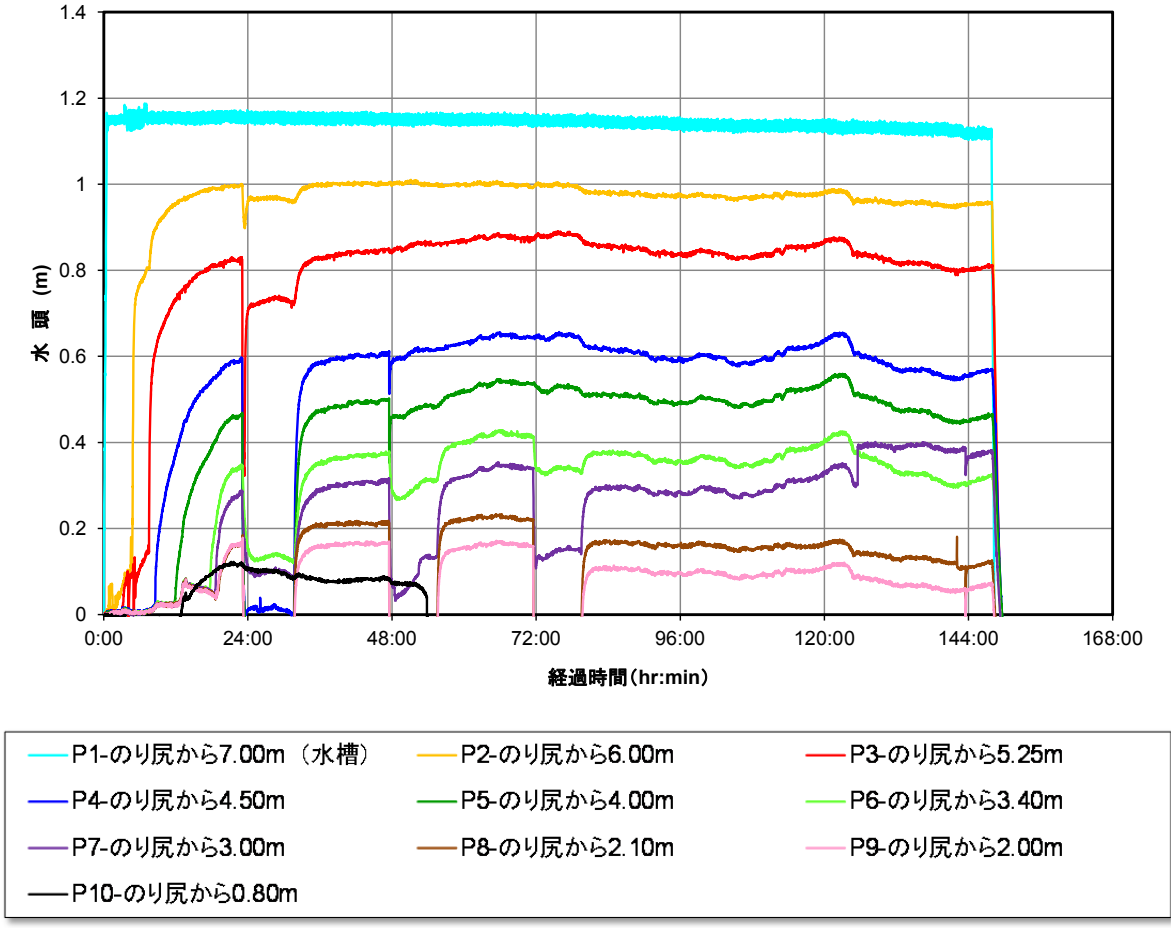



図 2.8.57　水頭の経時変化(CASE9)

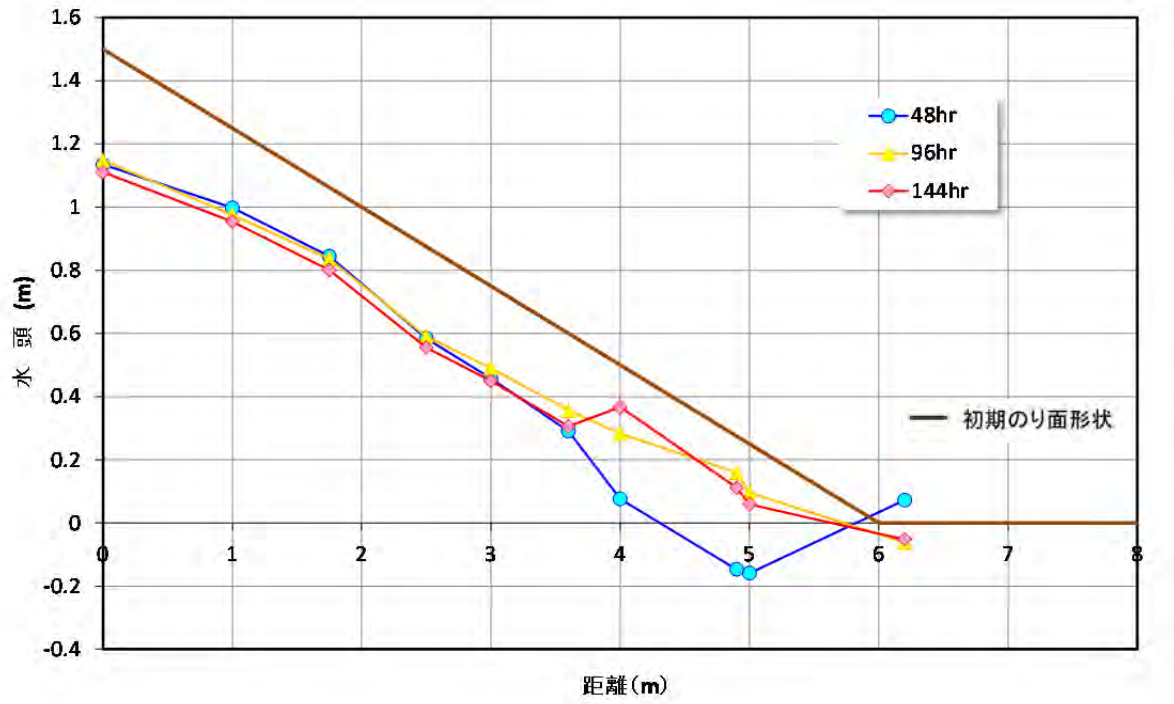



図 2.8.58　水頭分布の経時変化(CASE9)

図 2.8.59　のり尻の状況（CASE9,48hr 後）

図 2.8.60　のり尻の状況（CASE9,96hr 後）

図 2.8.61　のり尻の状況（CASE9,144hr 後）

(2) CASE10(1:3)

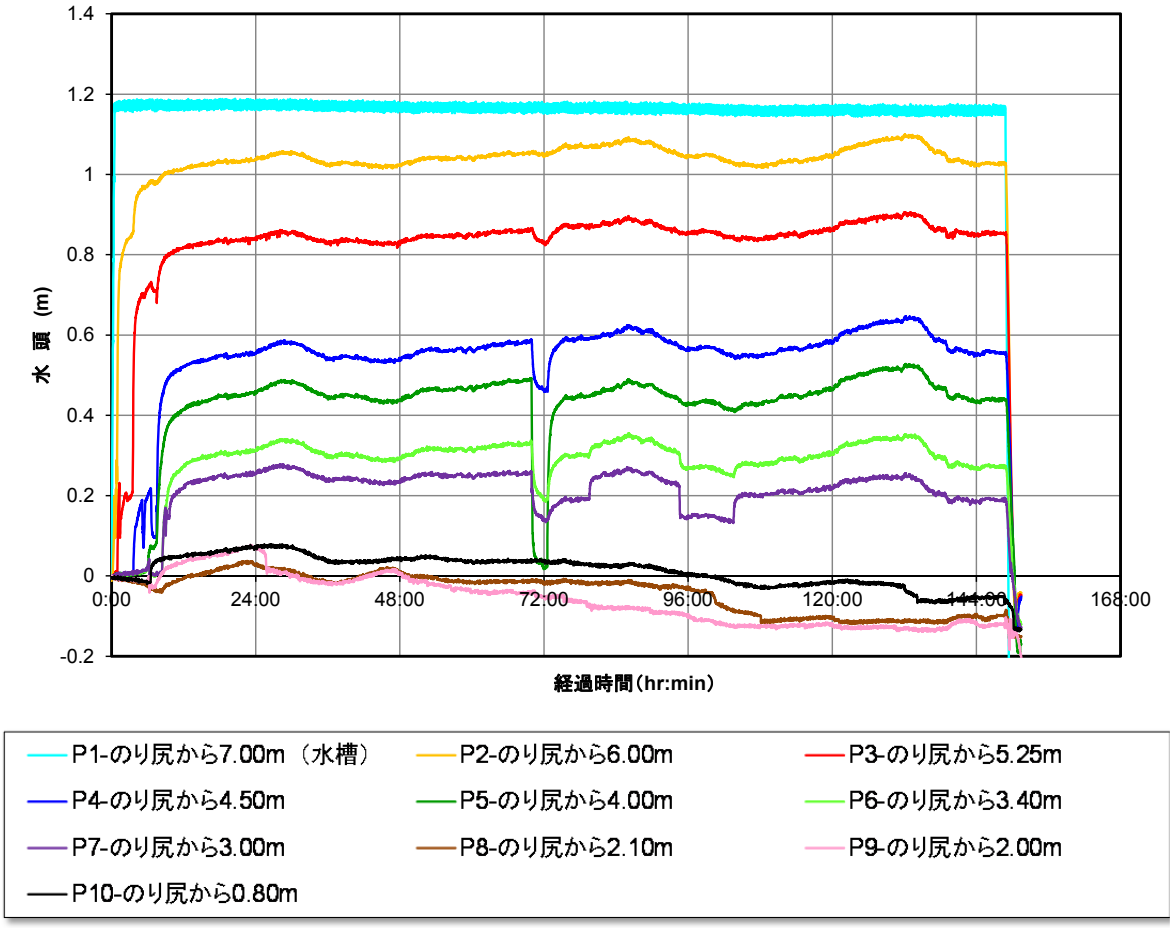



図 2.8.62　水頭の経時変化(CASE10)

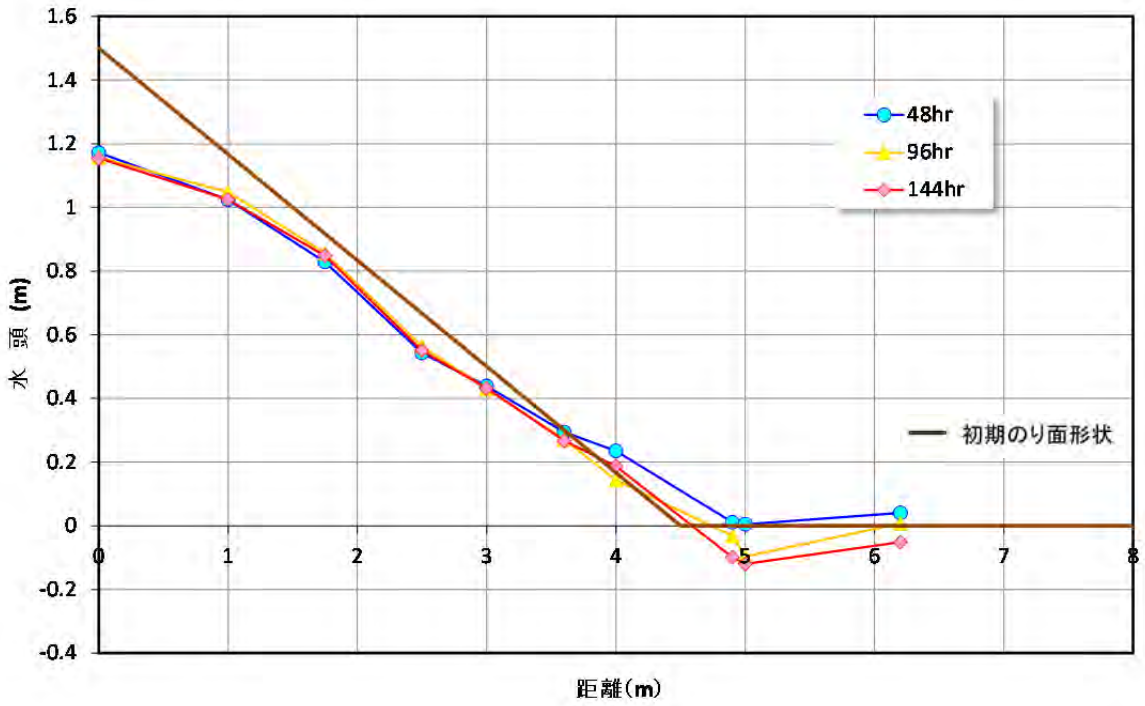



図 2.8.63　水頭分布の経時変化(CASE10)

図 2.8.64　のり尻の状況（CASE10,48hr 後）

図 2.8.65　のり尻の状況（CASE10,96hr 後）

図 2.8.66　のり尻の状況（CASE10,144hr 後）

(3) CASE11(1:2)

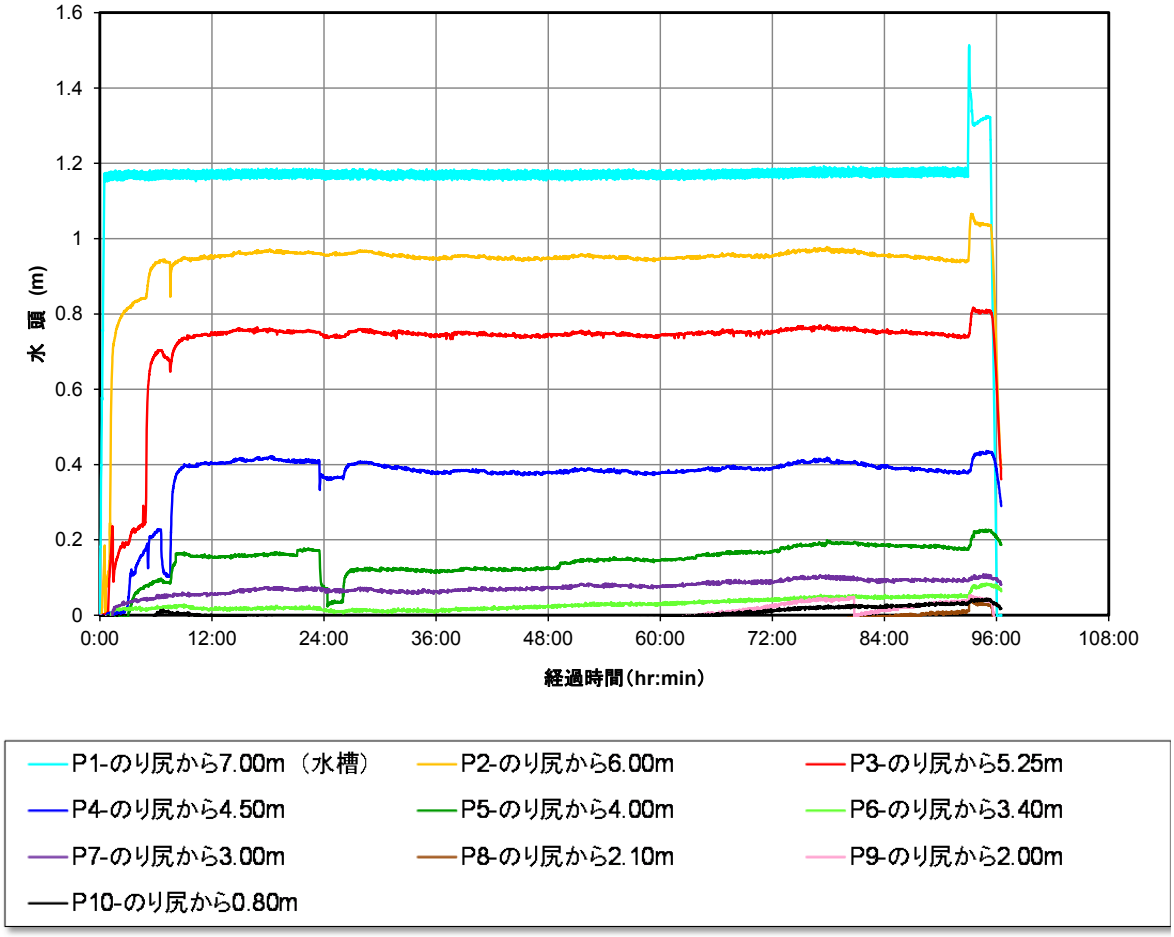



図 2.8.67　水頭の経時変化(CASE11)

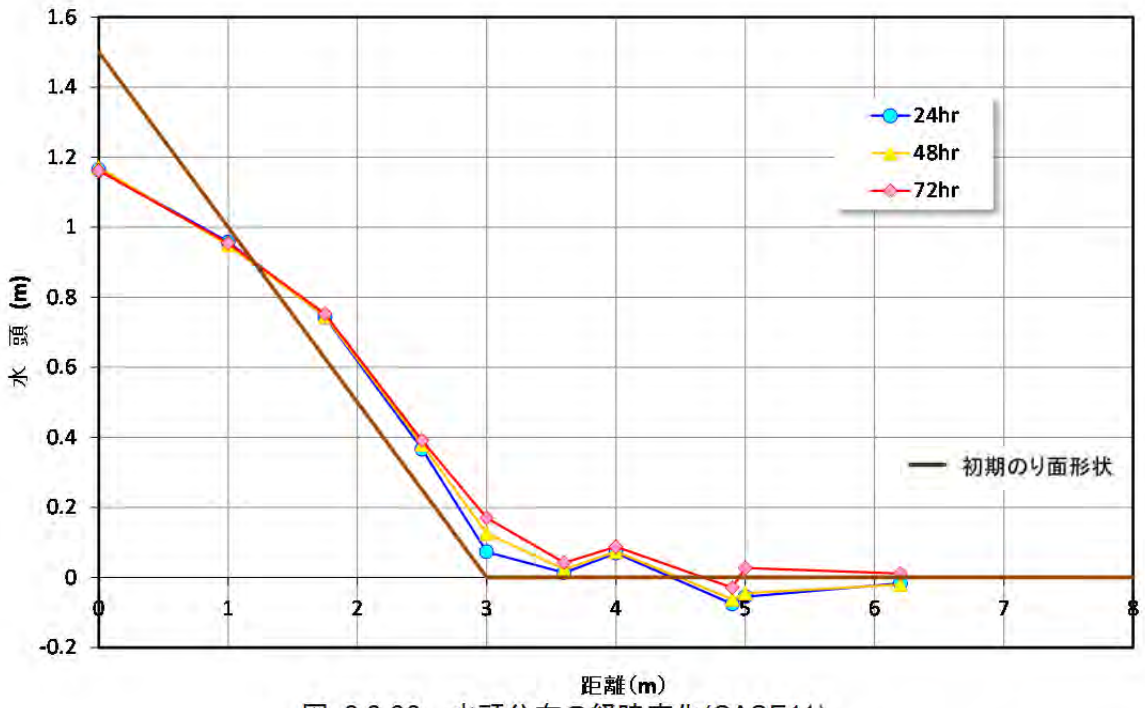



図 2.8.68　水頭分布の経時変化(CASE11)

図 2.8.69　のり尻の状況（CASE11,24hr 後）

図 2.8.70　のり尻の状況（CASE11,48hr 後）

図 2.8.71　のり尻の状況（CASE11,72hr 後）

### 2.8.5　模型 4 の破壊進行状況

のり勾配 1:4（CASE13）では変状の発生は見られなかったが、のり勾配 1:3（CASE14）、1:2（CASE15）、1:1.5（CASE16）においてのり尻から進行する浸透破壊が発生した。

CASE13、CASE14 においては、変状が生じなかったため、一定時間の経過後、給水槽の水位を 1.2m から 1.4m まで上昇させた。しかし、変状の発生は見られなかった。

図 2.8.72　終了時の状況 CASE13(1:4.0)

図 2.8.73　終了時の状況 CASE14(1:3.0)

図 2.8.74　終了時の状況 CASE15(1:2.0)

図 2.8.75　終了時の状況 CASE16(1:1.5)

(1) CASE13(1:4)

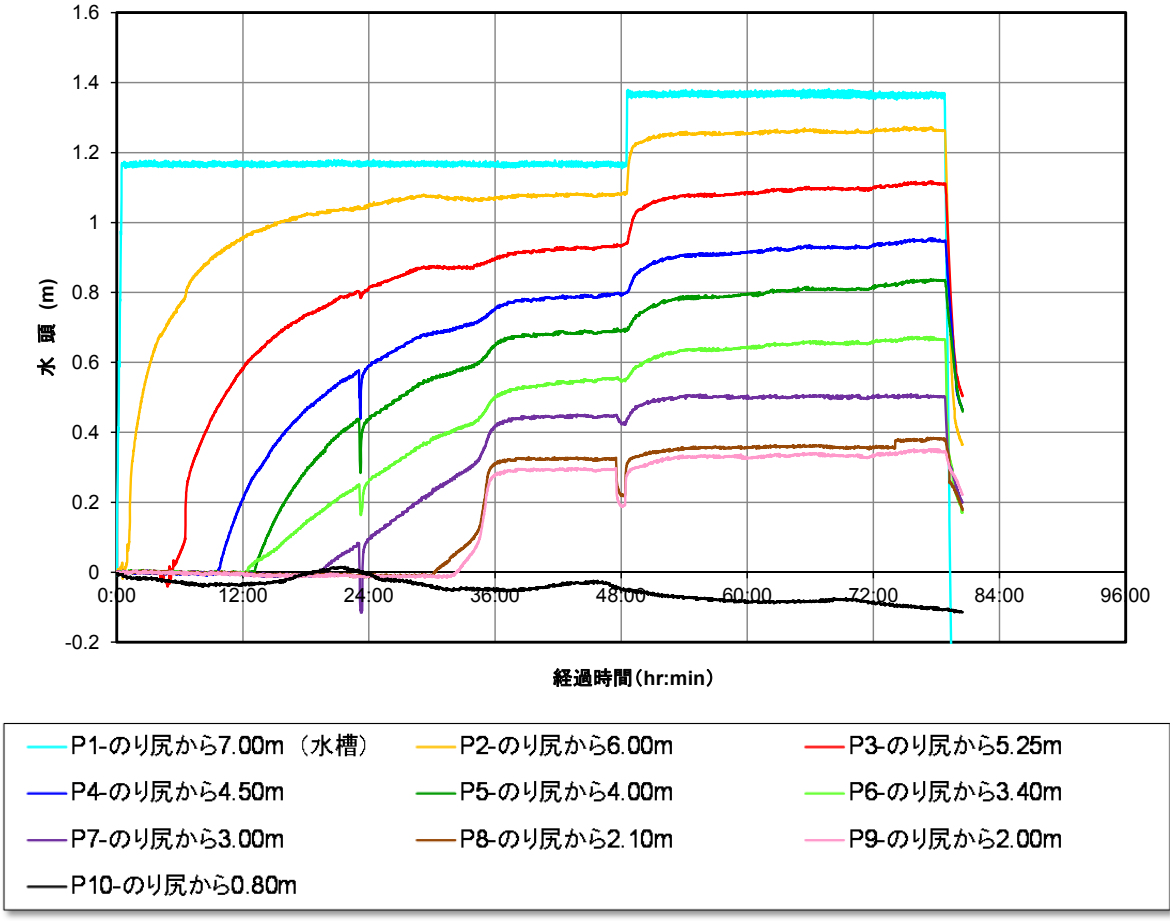



図 2.8.76　水頭の経時変化(CASE13)

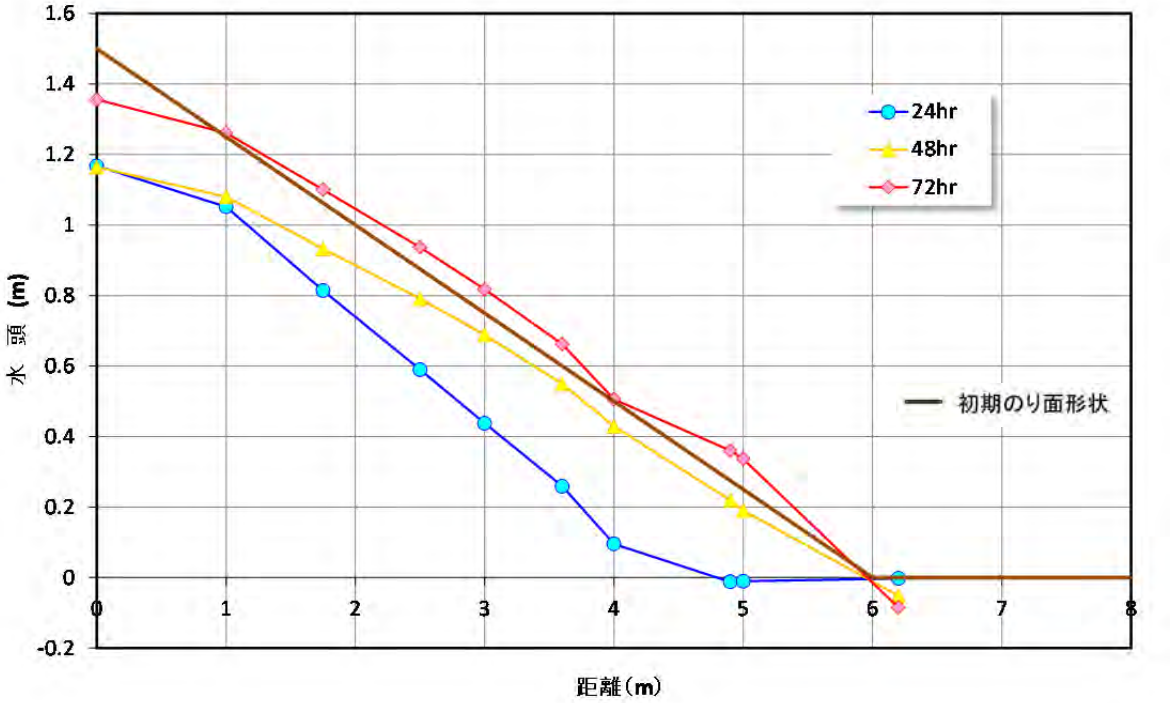



図 2.8.77　水頭分布の経時変化(CASE13)

図 2.8.78　のり尻の状況（CASE13,24hr 後）

図 2.8.79　のり尻の状況（CASE13,48hr 後）

図 2.8.80　のり尻の状況（CASE13,72hr 後）

(2) CASE14(1:3)

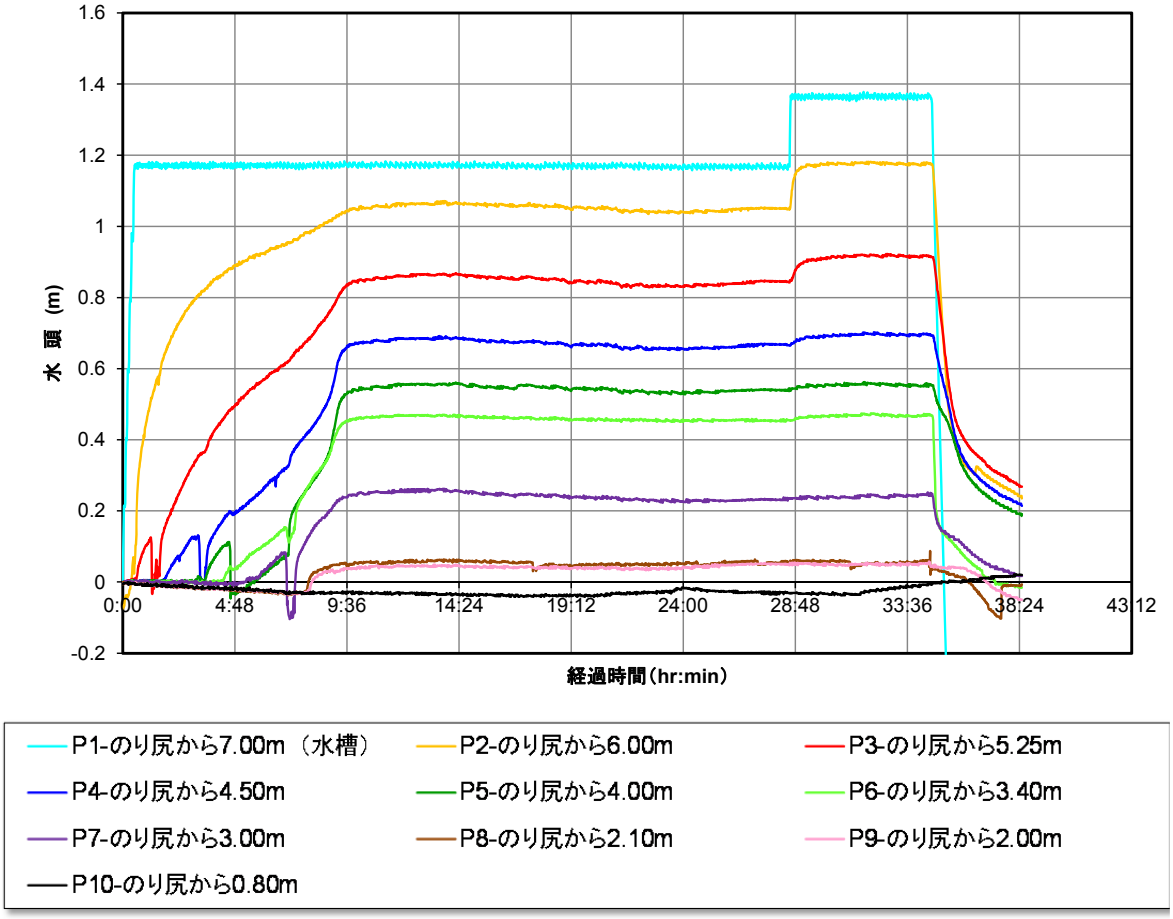



図 2.8.81　水頭の経時変化(CASE14)

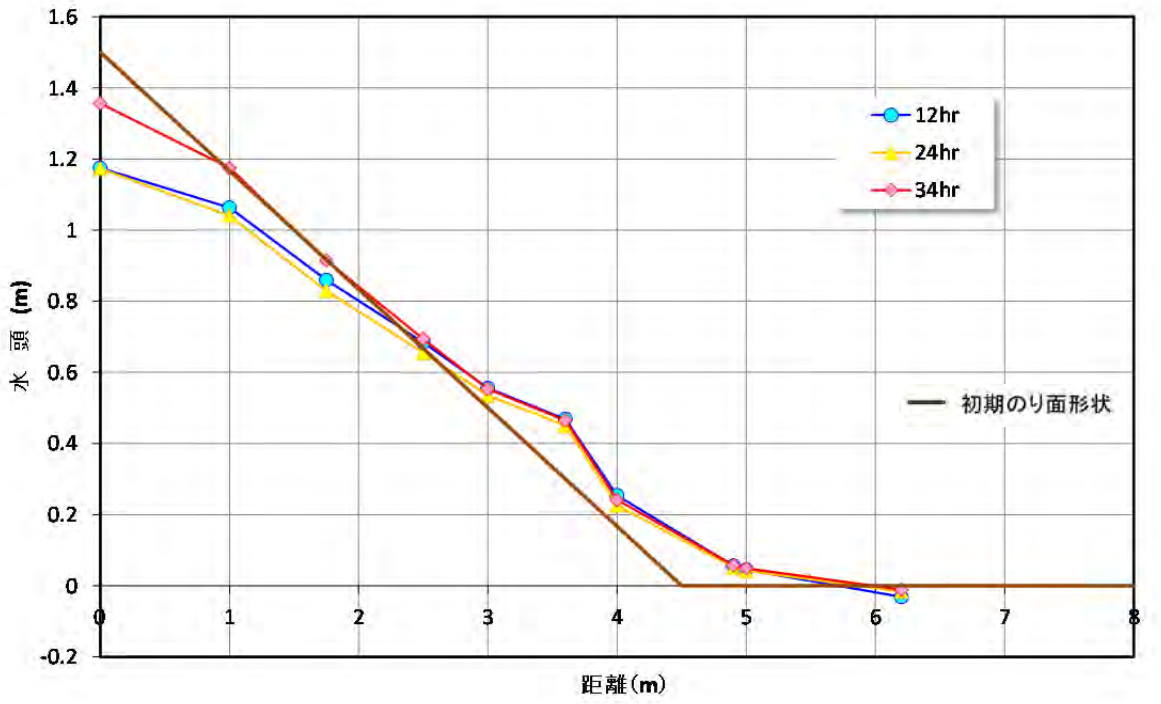



図 2.8.82　水頭分布の経時変化(CASE14)

図 2.8.83　のり尻の状況（CASE14,12hr 後）

図 2.8.84　のり尻の状況（CASE14,24hr 後）

図 2.8.85　のり尻の状況（CASE14,34hr 後）

(3) CASE15(1:2)

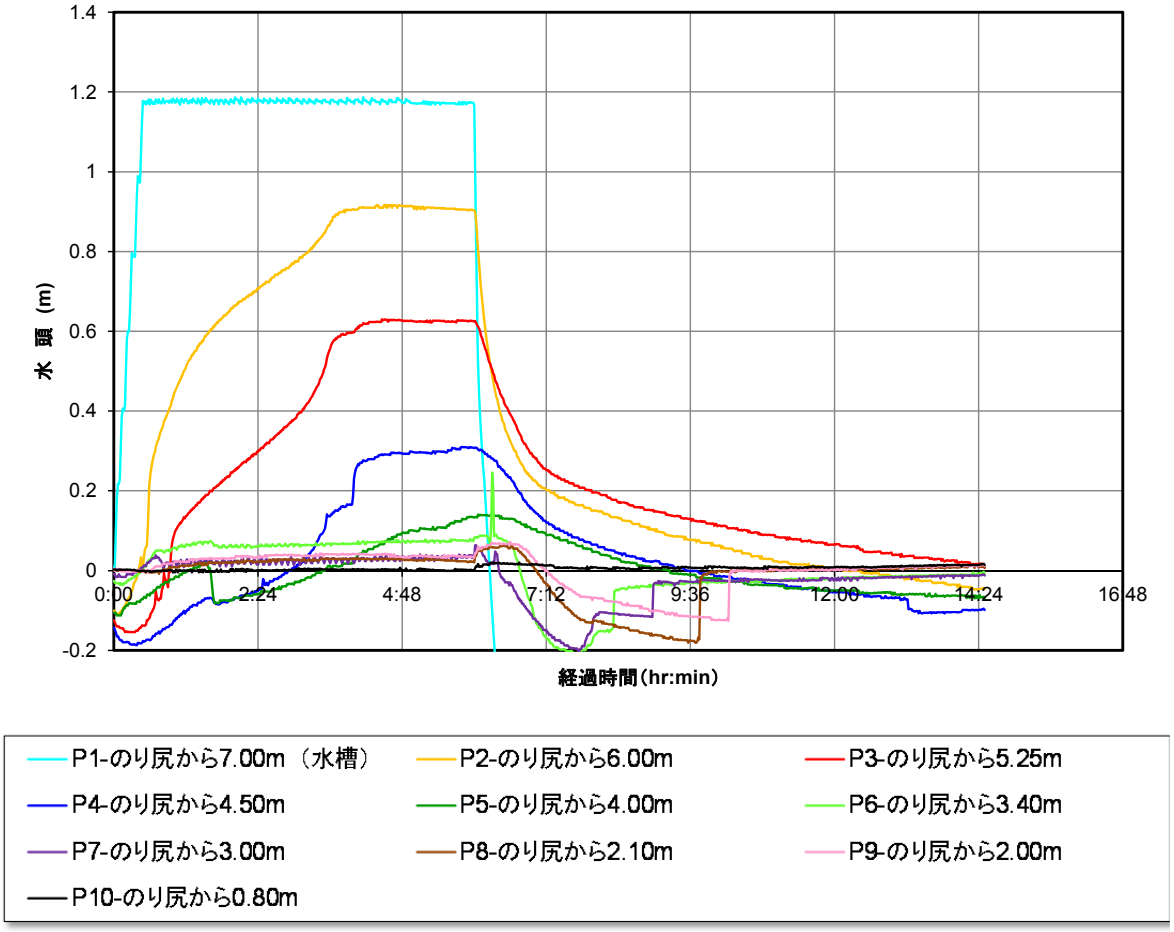



図 2.8.86　水頭の経時変化(CASE15)

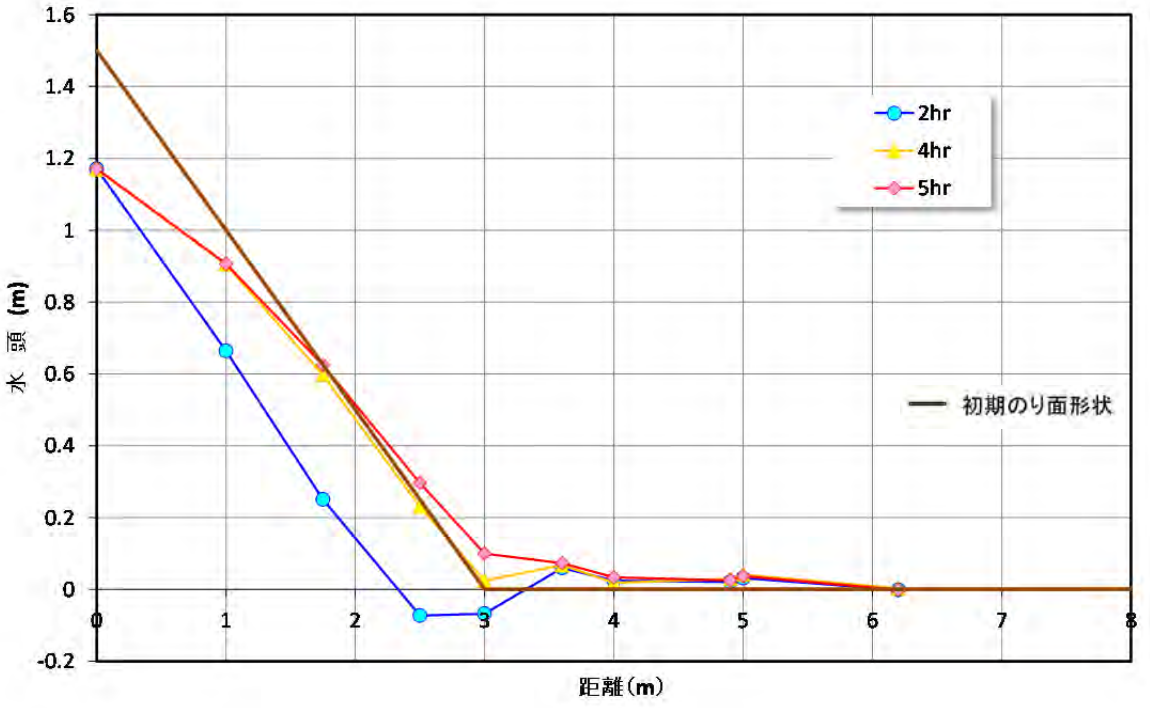



図 2.8.87　水頭分布の経時変化(CASE15)

図 2.8.88　のり尻の状況（CASE15,2hr 後）

図 2.8.89　のり尻の状況（CASE15,4hr 後）

図 2.8.90　のり尻の状況（CASE15,5hr 後）

(4) CASE16(1:1.5)

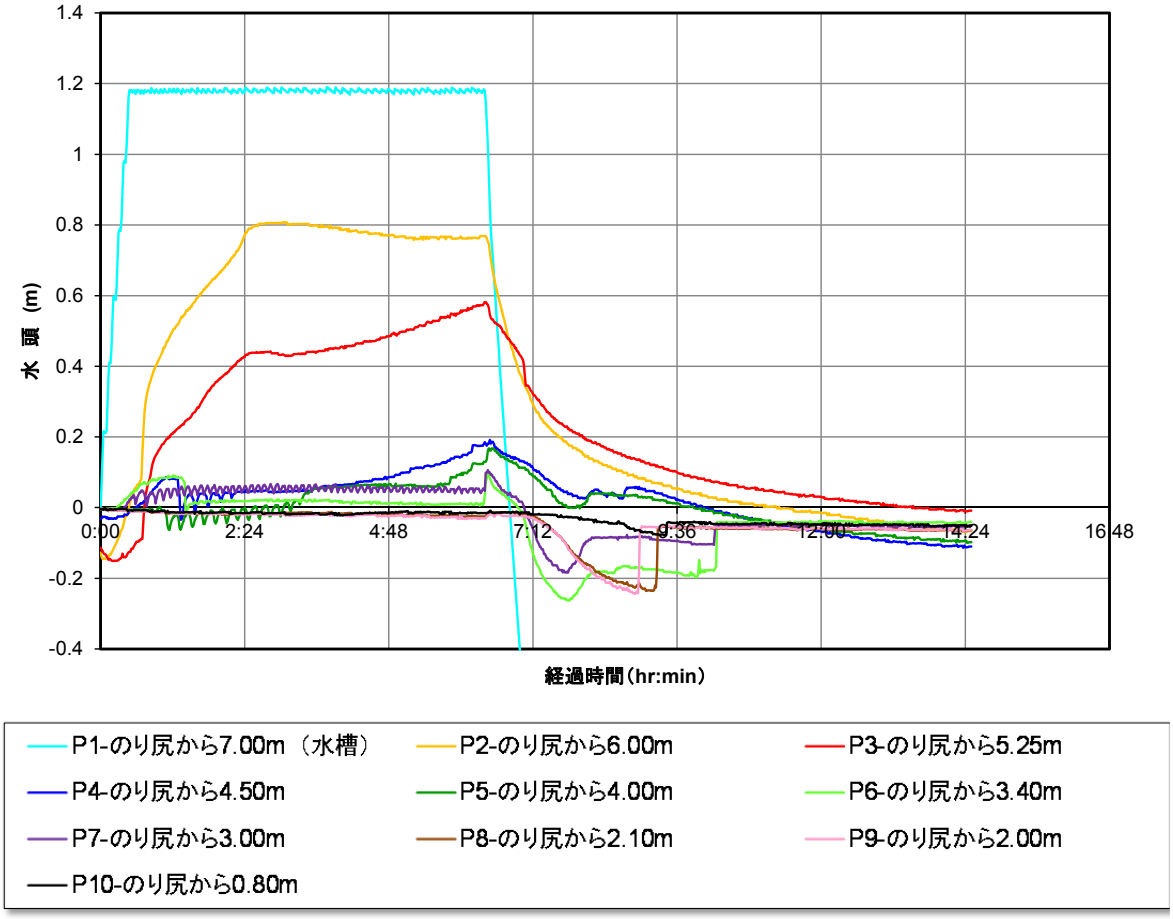



図 2.8.91　水頭の経時変化(CASE16)

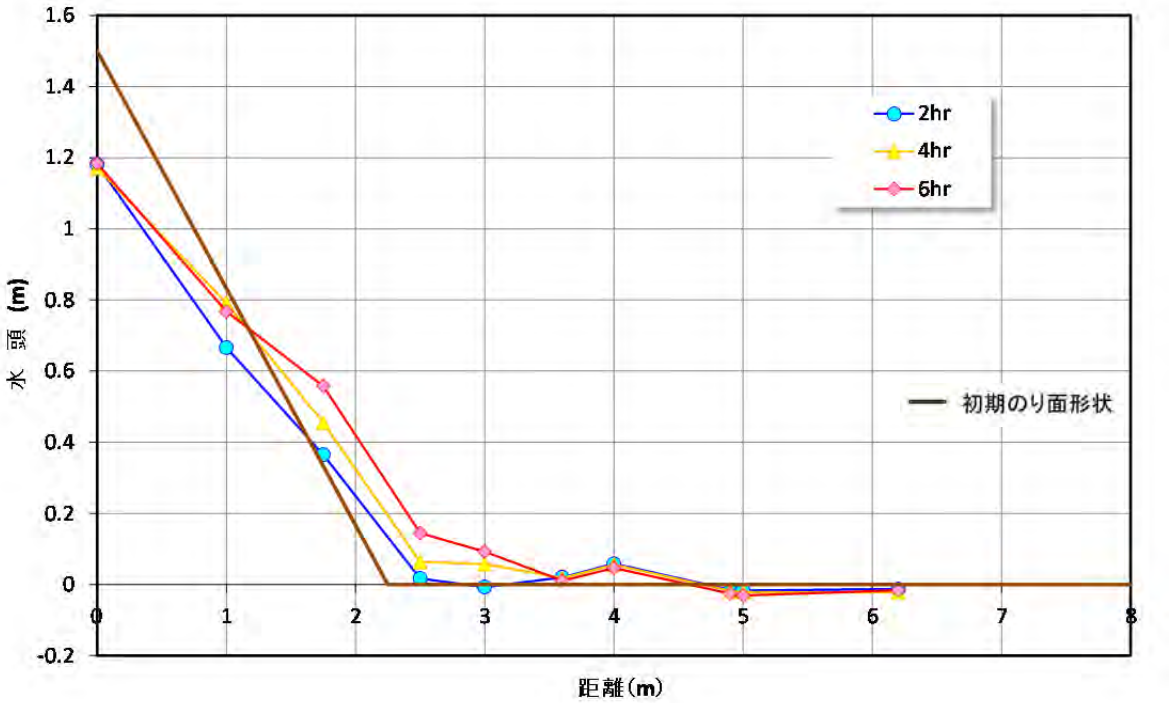



図 2.8.92　水頭分布の経時変化(CASE16)

図 2.8.93　のり尻の状況（CASE16,2hr 後）

図 2.8.94　のり尻の状況（CASE16,4hr 後）

図 2.8.95　のり尻の状況（CASE16,6hr 後）

### 2.8.6　模型 5 の破壊進行状況

のり面勾配を急にしても変状は発生しなかった。ここでは、実験開始から一定時間経過後に給水槽の水位を 1.2m から 1.4m まで上昇させた。

図 2.8.96　終了時の状況 CASE17(1:4.0)

図 2.8.97　終了時の状況 CASE18(1:3.0)

図 2.8.98　終了時の状況 CASE19(1:2.0)

図 2.8.99　終了時の状況 CASE20(1:1.5)

(1) CASE17(1:4)

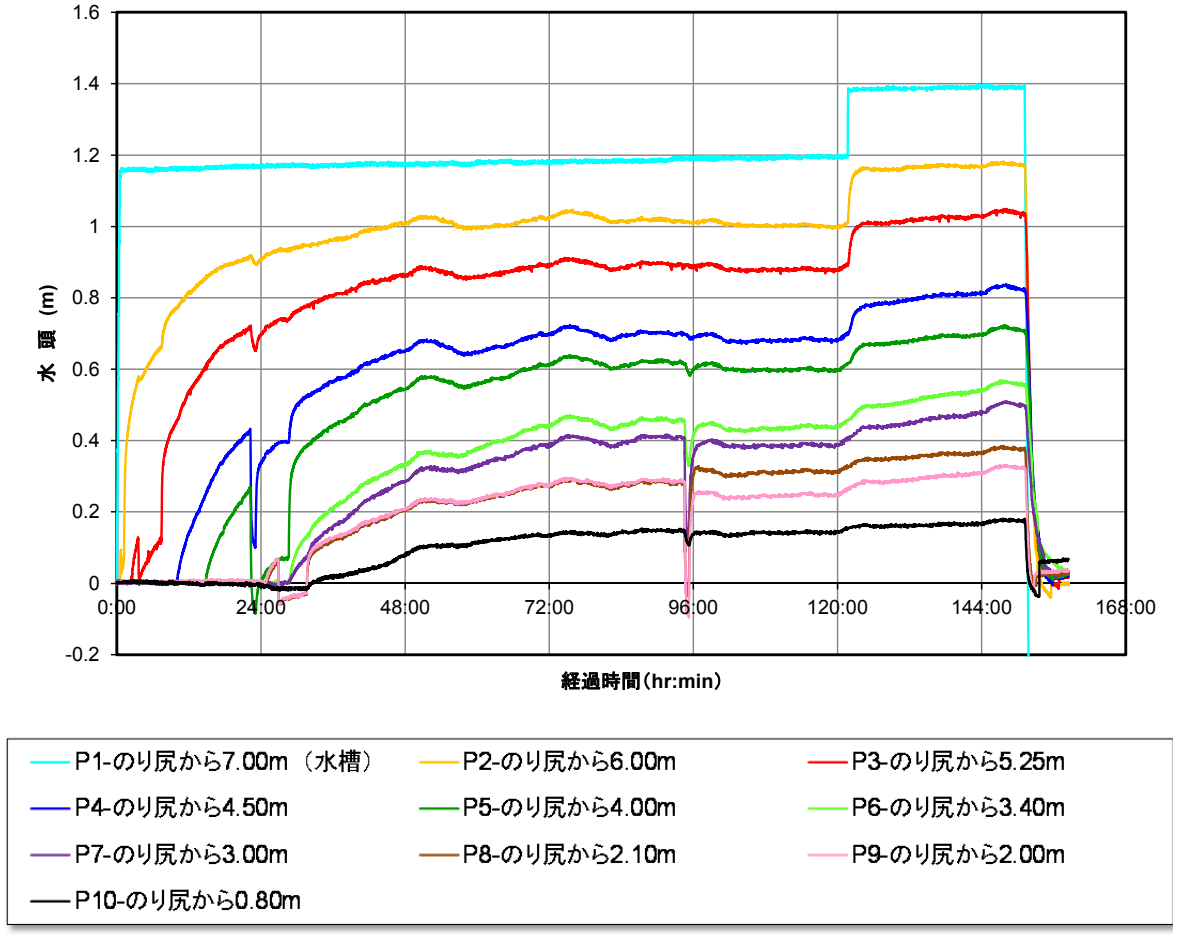



図 2.8.100　水頭の経時変化(CASE17)

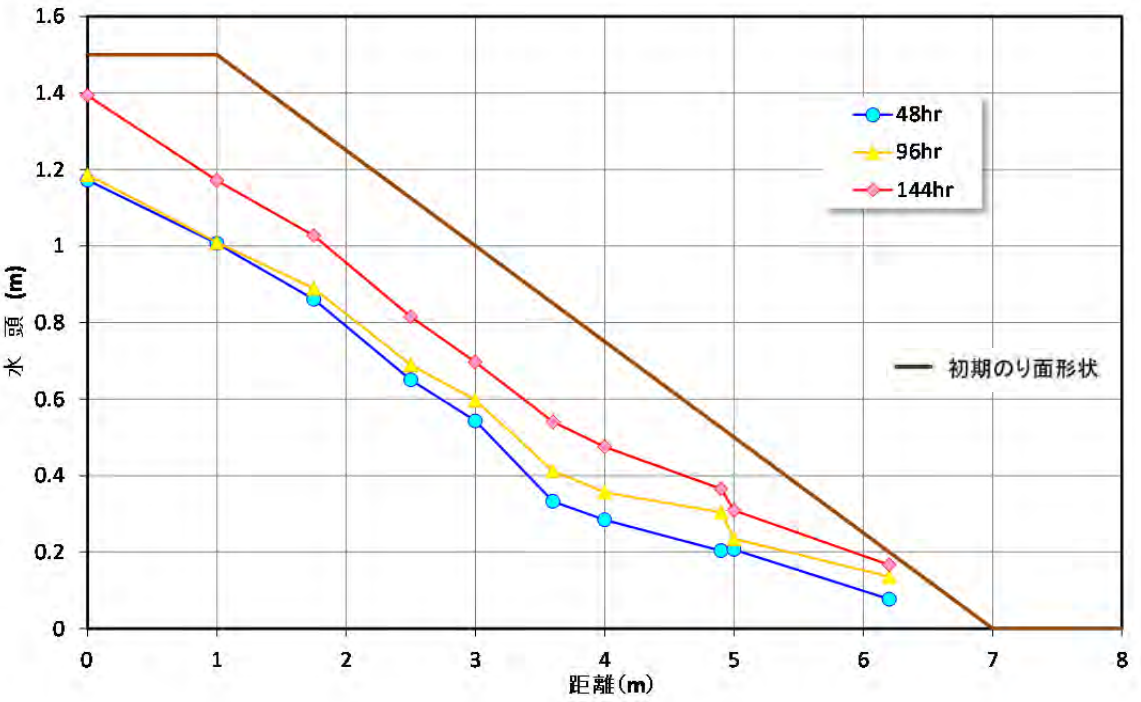



図 2.8.101　水頭分布の経時変化(CASE17)

図 2.8.102　のり尻の状況（CASE17,48hr 後）

図 2.8.103　のり尻の状況（CASE17,96hr 後）

図 2.8.104　のり尻の状況（CASE17,144hr 後）

(2) CASE18(1:3)

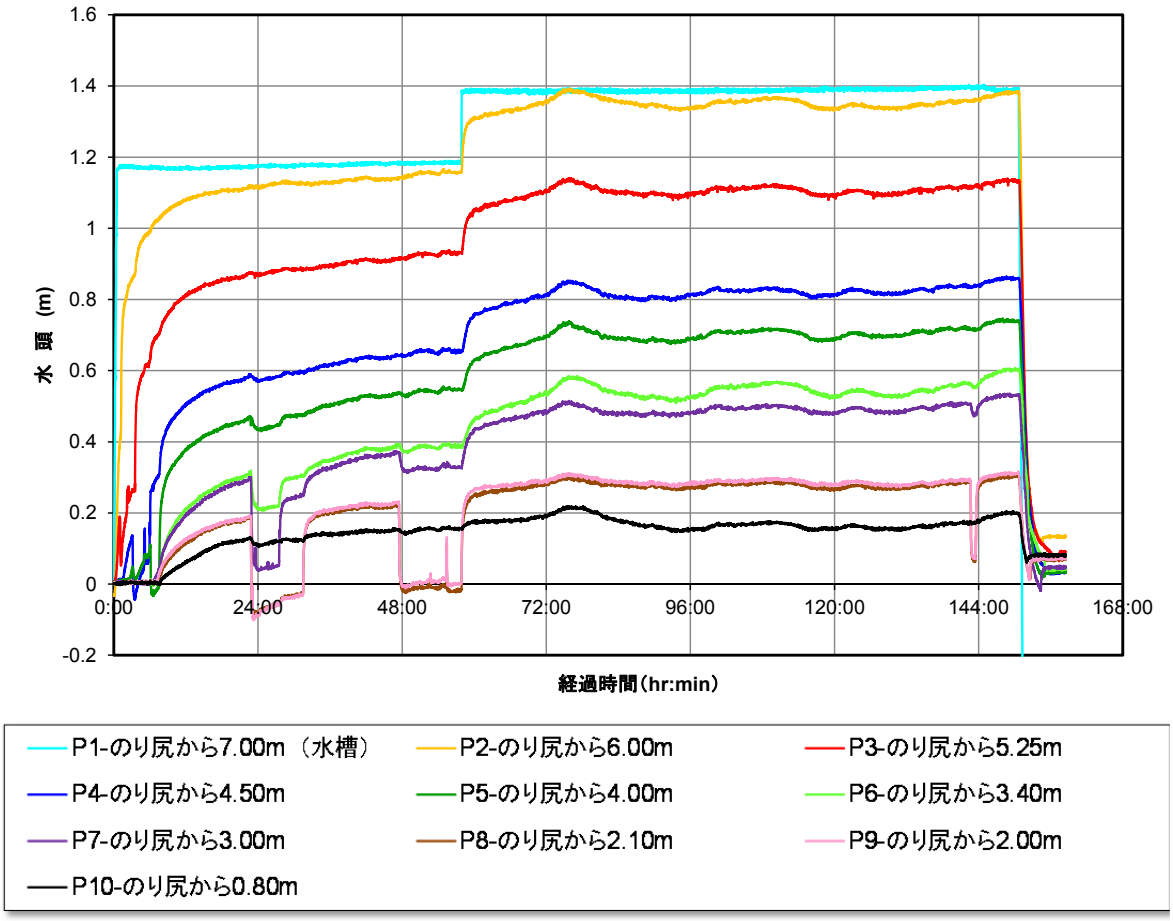



図 2.8.105　水頭の経時変化(CASE18)

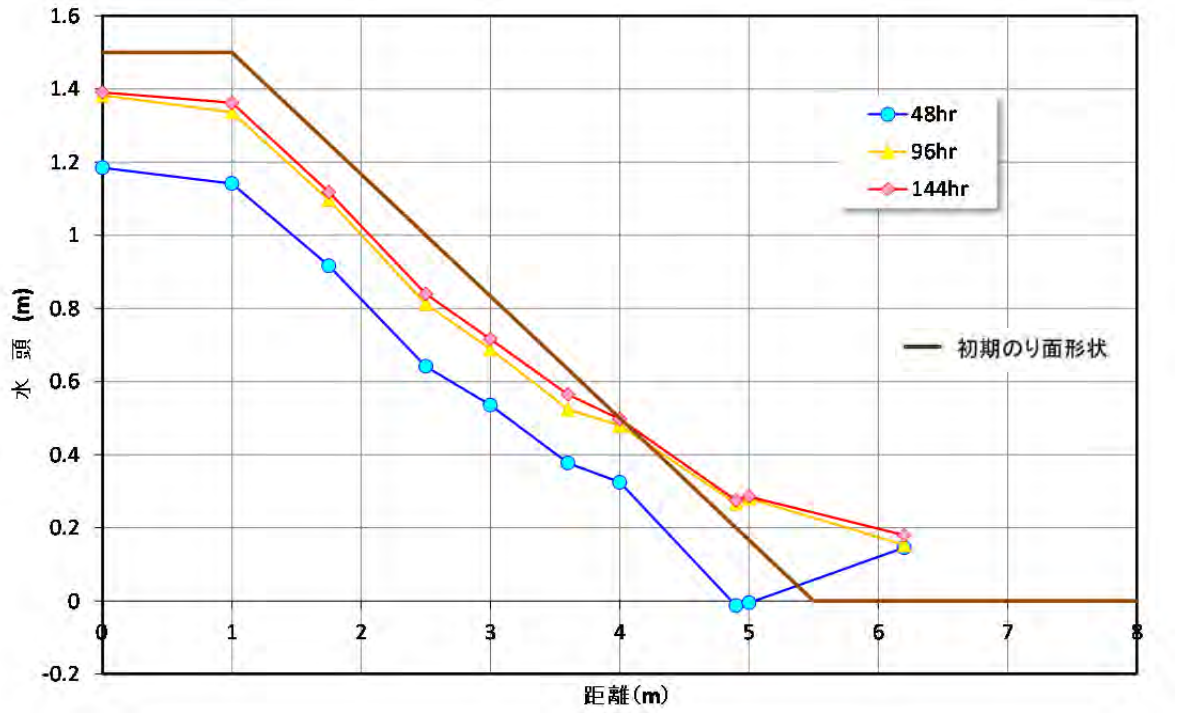



図 2.8.106　水頭分布の経時変化(CASE18)

図 2.8.107　のり尻の状況（CASE18,24hr 後）

※48hr、96hr、144hr ののり尻の状況写真なし。

(3) CASE19(1:2)

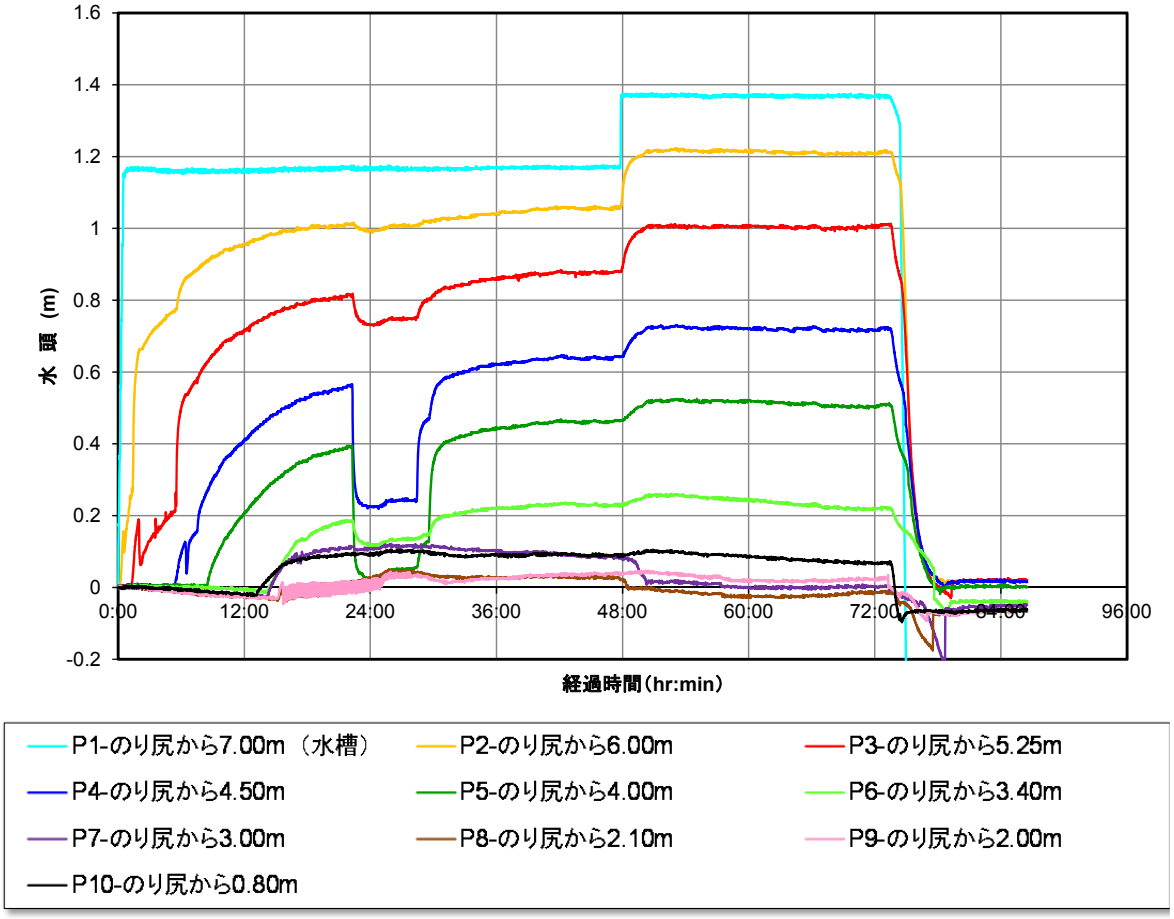



図 2.8.108　水頭の経時変化(CASE19)

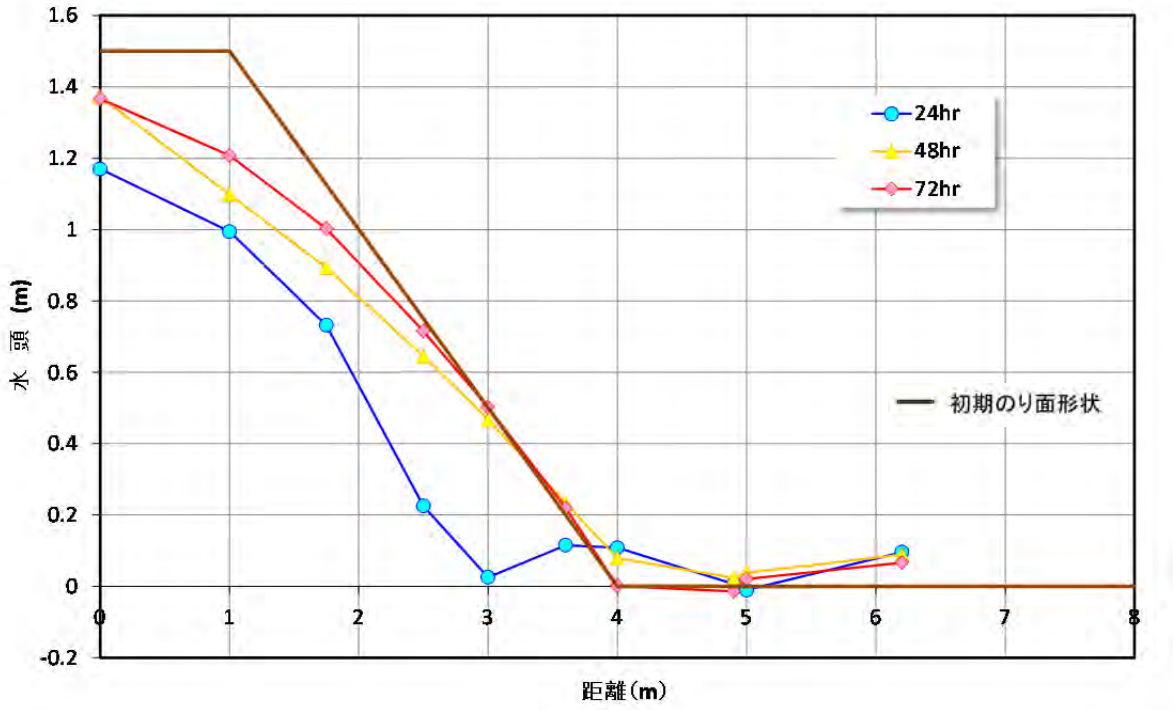



図 2.8.109　水頭分布の経時変化(CASE19)

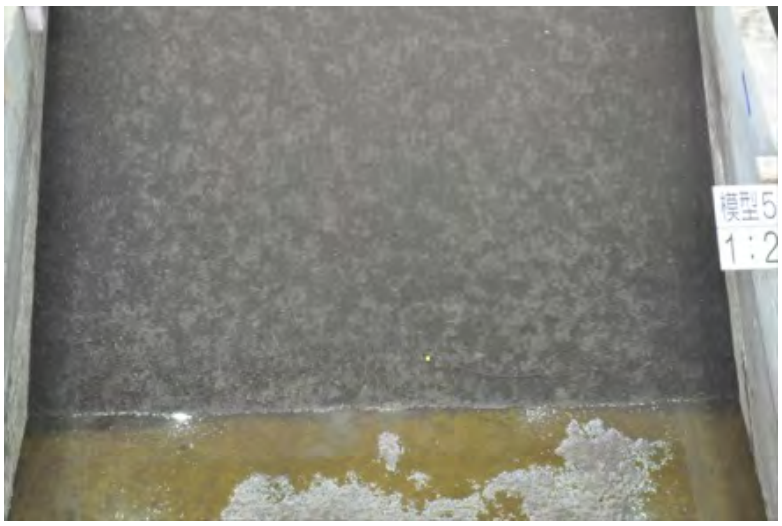


図 2.8.110　のり尻の状況（CASE19,24hr 後）

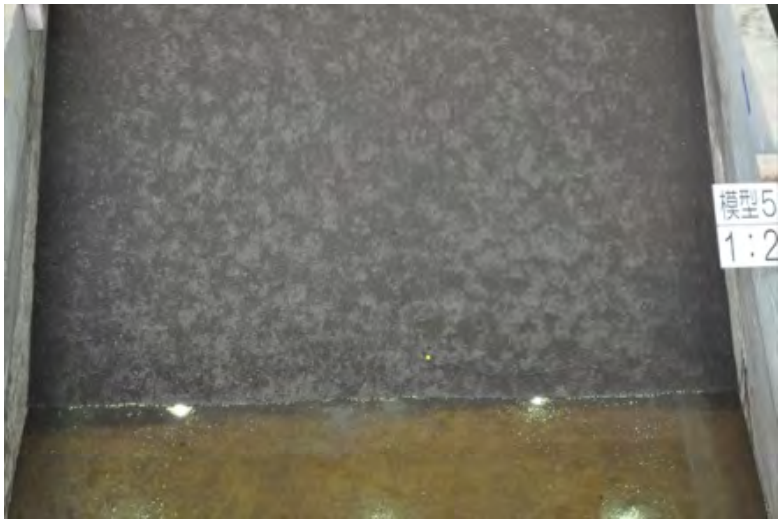


図 2.8.111　のり尻の状況（CASE19,48hr 後）

図 2.8.112　のり尻の状況（CASE19,72hr 後）

(4) CASE20(1:1.5)

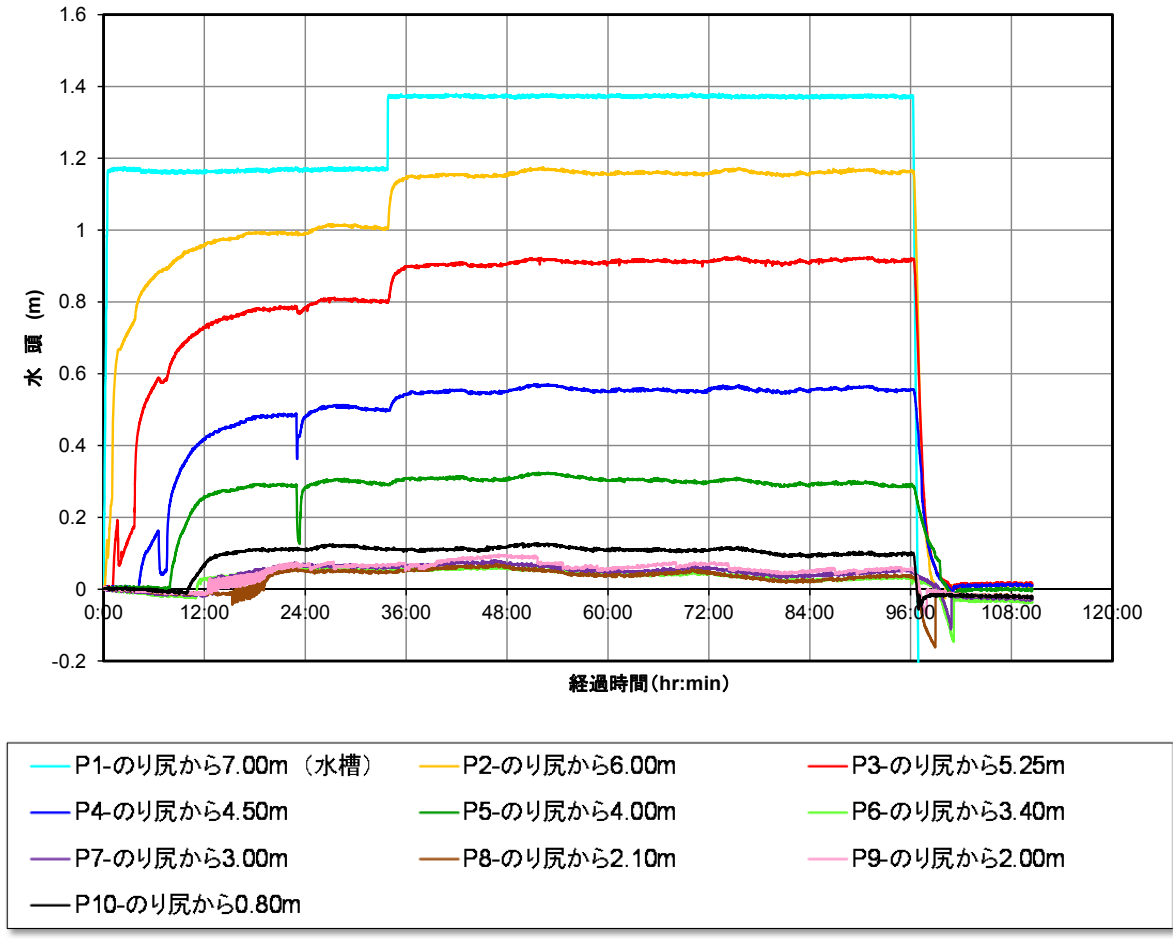



図 2.8.113　水頭の経時変化(CASE20)

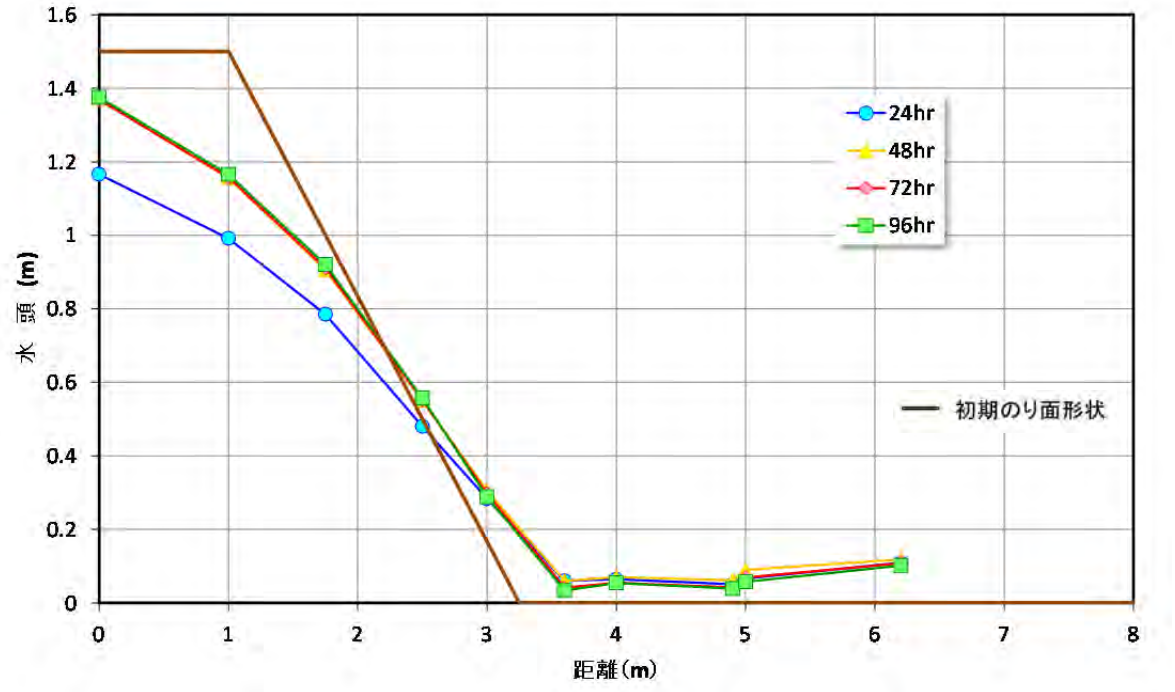



図 2.8.114　水頭分布の経時変化(CASE20)

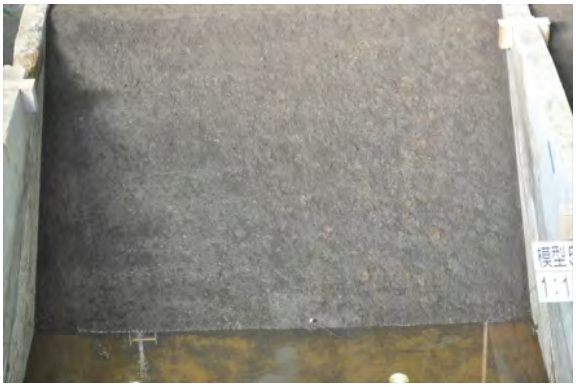


図 2.8.115　のり尻の状況（CASE20,24hr 後）

図 2.8.116　のり尻の状況（CASE20,48hr 後）

図 2.8.117　のり尻の状況（CASE20,72hr 後）

図 2.8.118　のり尻の状況（CASE20,96hr 後）

### 2.8.7　模型 6 の破壊進行状況

のり面勾配 1:4（CASE21）、1:3（CASE22）、1:2（CASE23）の 3 ケースでは変状の発生は見られなかったが、のり勾配 1:1.5（CASE24）において、壁沿いに小規模な浸透破壊が発生した。

なお、ここでは実験開始から一定時間経過後、給水槽の水位を 1.2m から 1.4m まで上昇させた。

図 2.8.119　終了時の状況 CASE21(1:4.0)

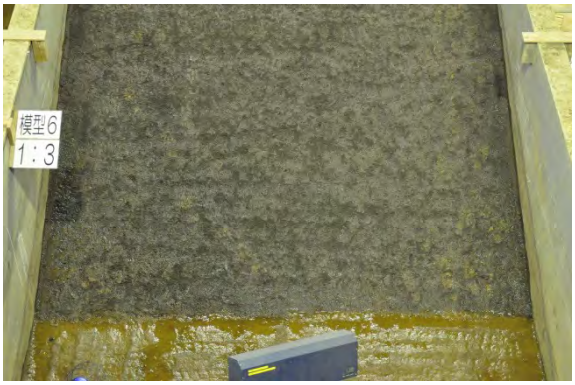



図 2.8.120　終了時の状況 CASE22(1:3.0)

図 2.8.121　終了時の状況 CASE23(1:2.0)

図 2.8.122　終了時の状況 CASE24(1:1.5)

(1) CASE21 (1:4)

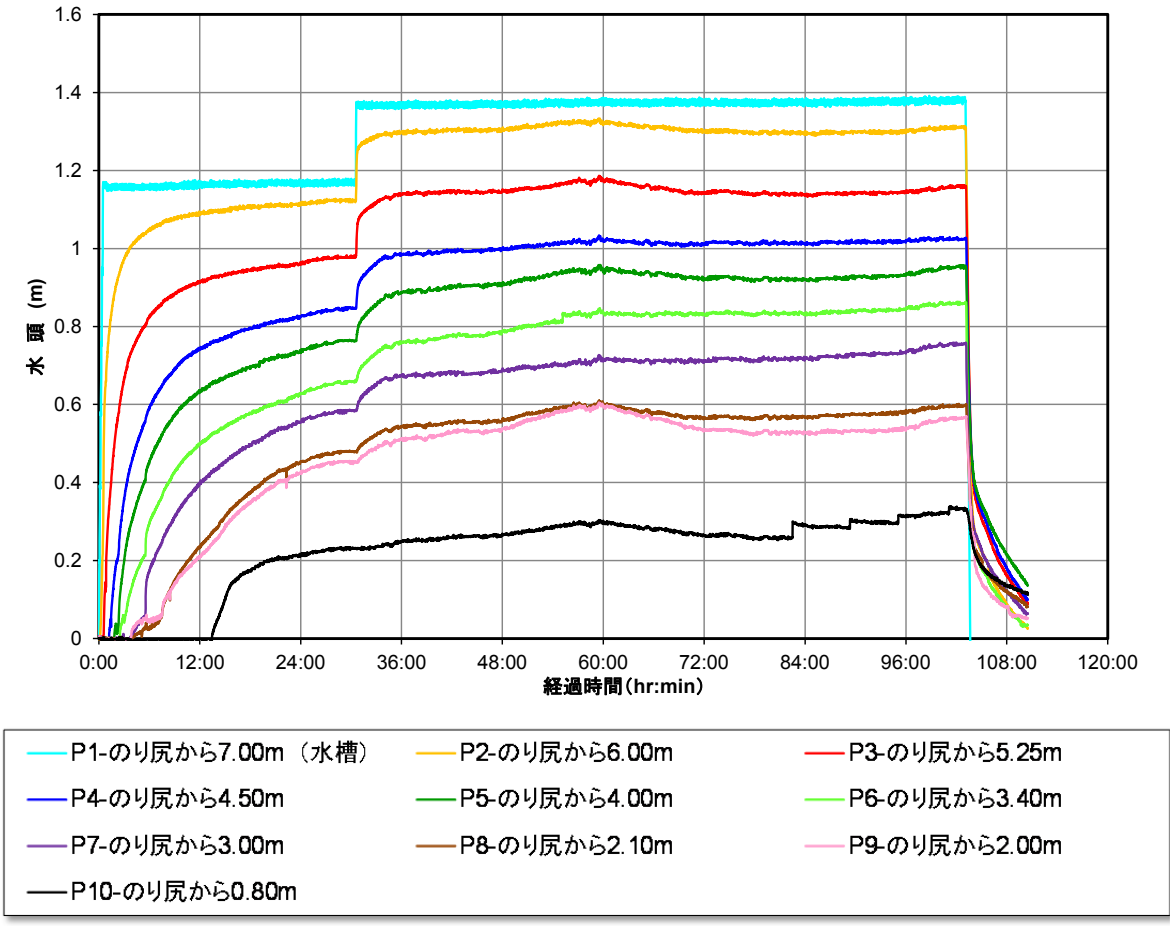



図 2.8.123　水頭の経時変化(CASE21)

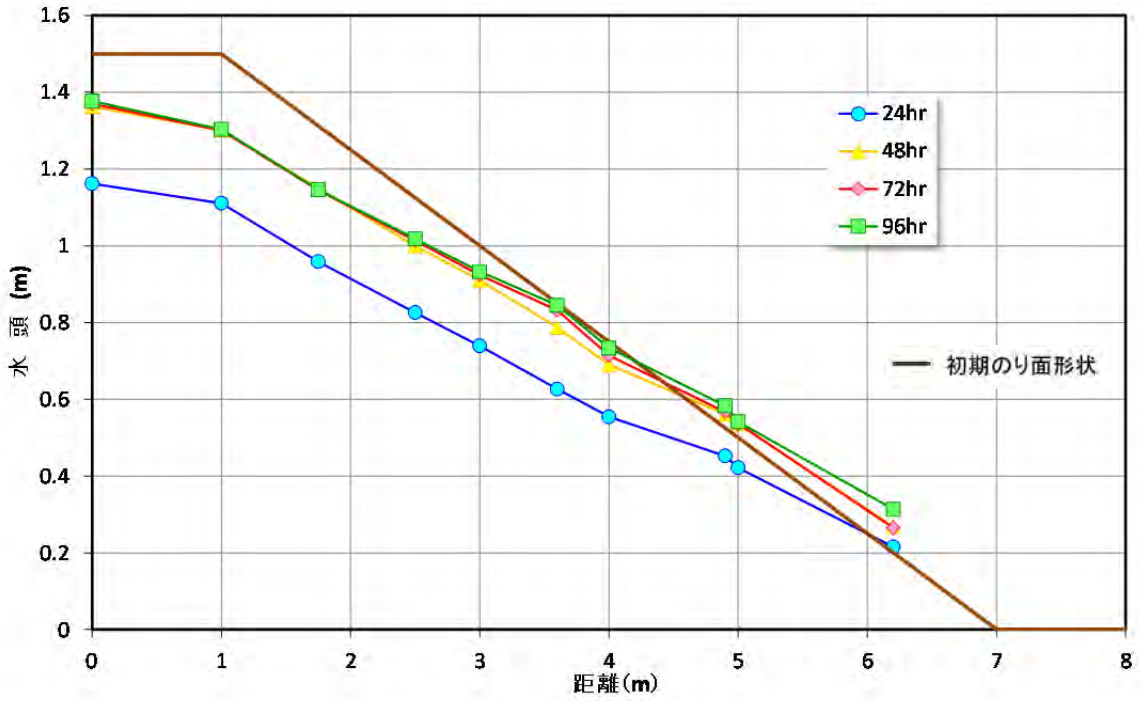



図 2.8.124　水頭分布の経時変化(CASE21)

図 2.8.125　のり尻の状況（CASE21,24hr 後）

図 2.8.126　のり尻の状況（CASE21,48hr 後）

図 2.8.127　のり尻の状況（CASE21,72hr 後）

図 2.8.128　のり尻の状況（CASE21,96hr 後）

(2) CASE22(1:3)

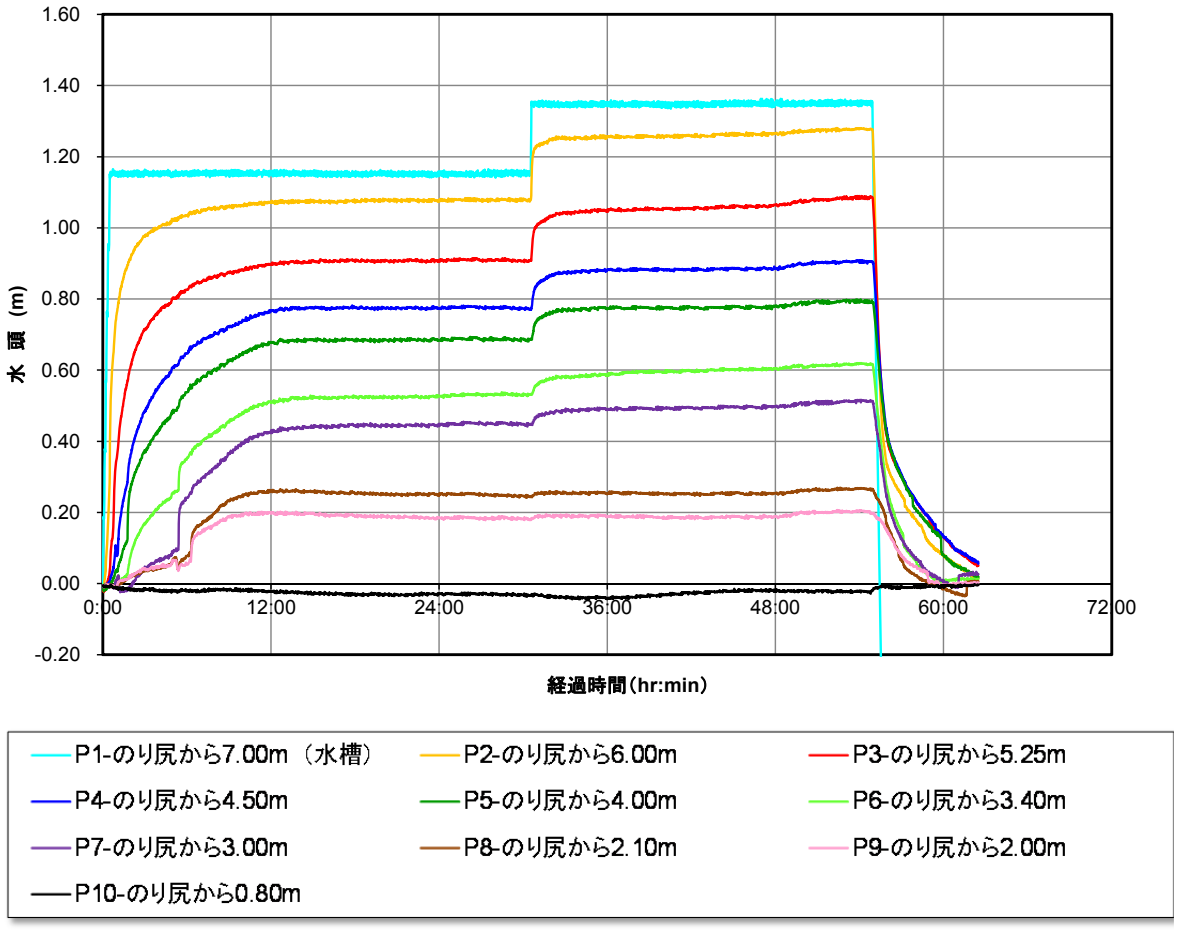



図 2.8.129　水頭の経時変化(CASE22)

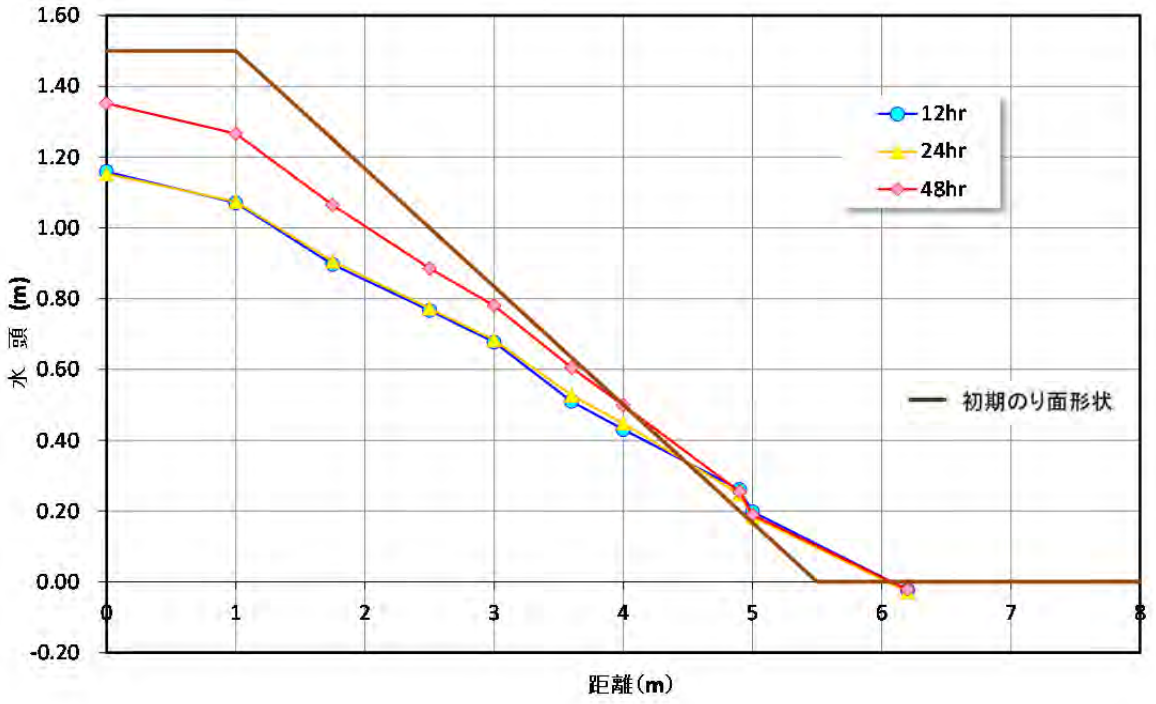



図 2.8.130　水頭分布の経時変化(CASE22)

図 2.8.131　のり尻の状況（CASE22,12hr 後）

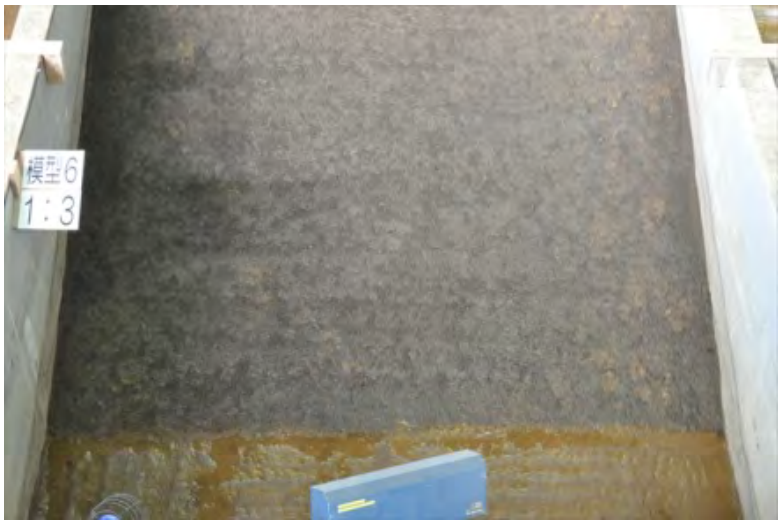



図 2.8.132　のり尻の状況（CASE22,24hr 後）

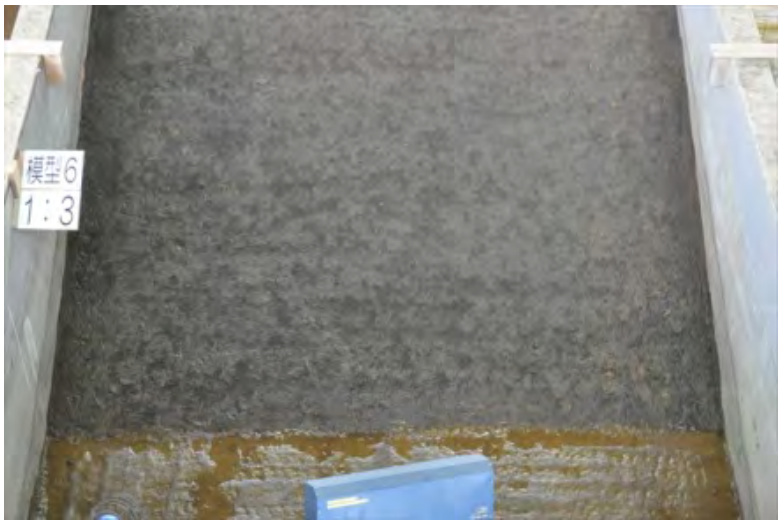



図 2.8.133　のり尻の状況（CASE22,48hr 後）

(3) CASE23(1:2)

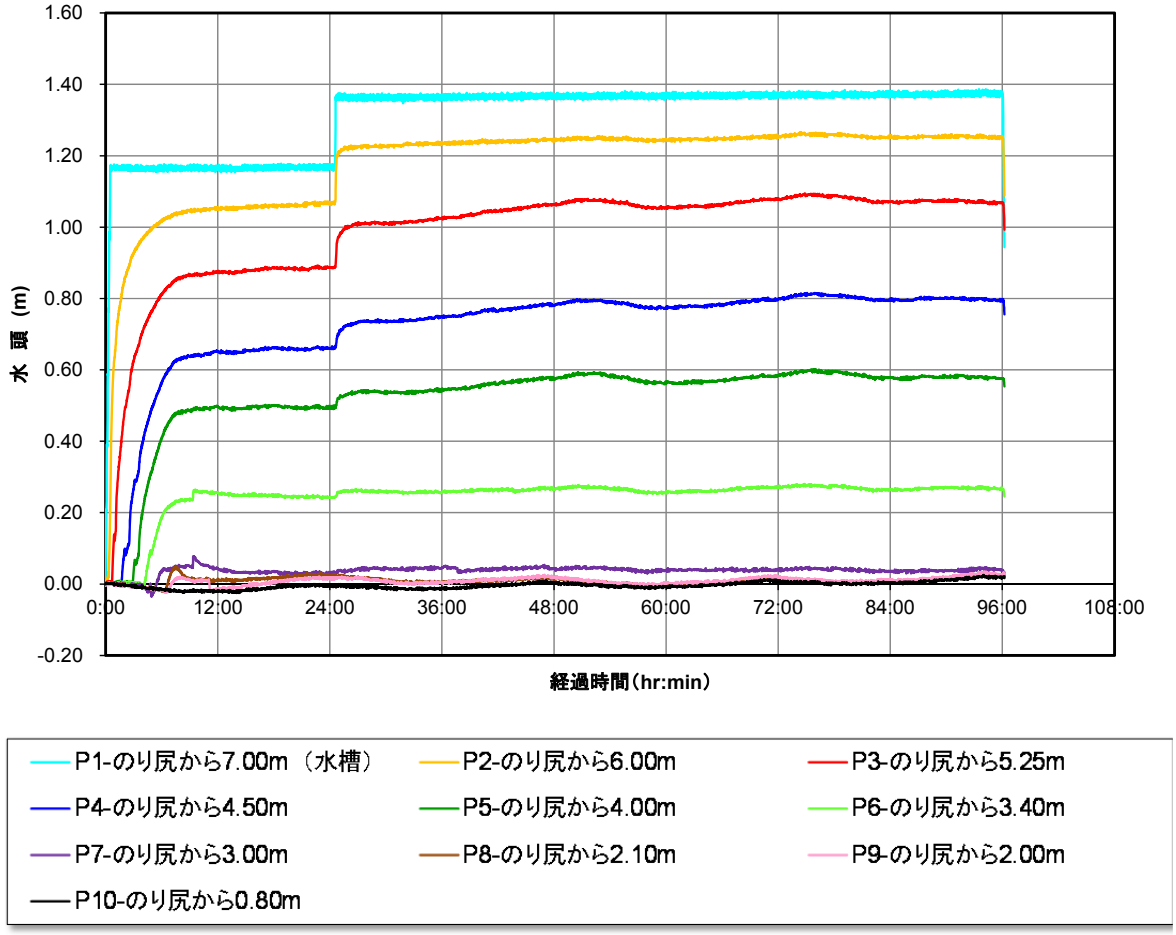



図 2.8.134　水頭の経時変化(CASE23)

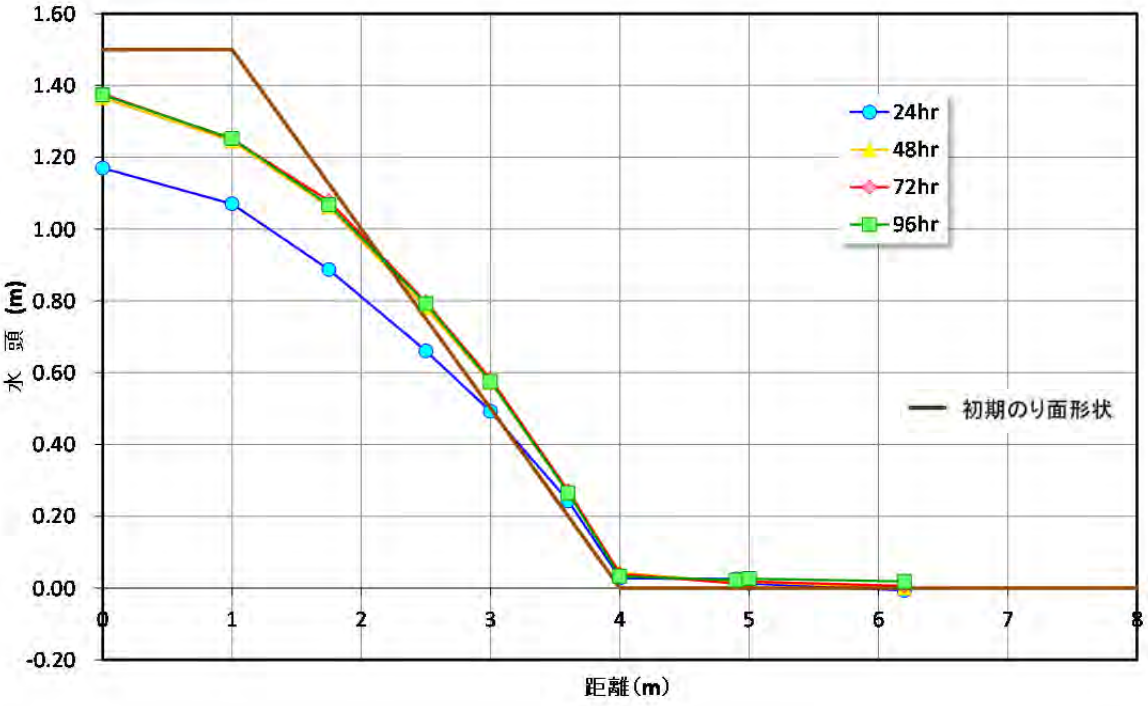



図 2.8.135　水頭分布の経時変化(CASE23)

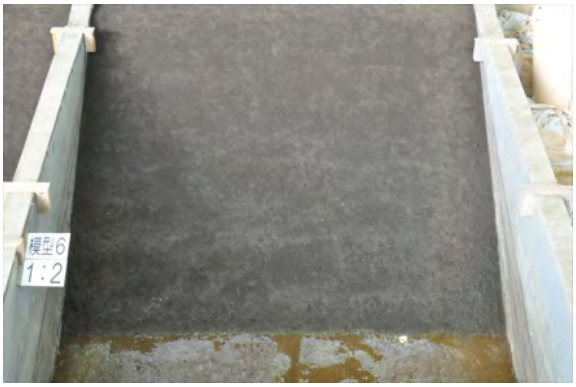



図 2.8.136　のり尻の状況（CASE23,24hr 後）

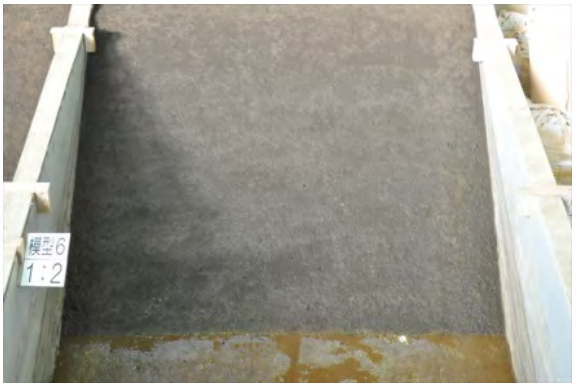



図 2.8.137　のり尻の状況（CASE23,48hr 後）

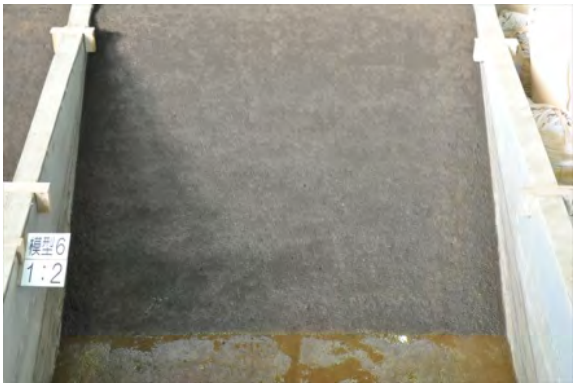



図 2.8.138　のり尻の状況（CASE23,72hr 後）

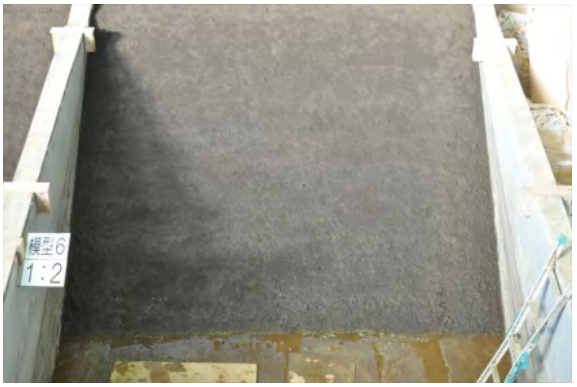



図 2.8.139　のり尻の状況（CASE23,96hr 後）

(4) CASE24 (1:1.5)

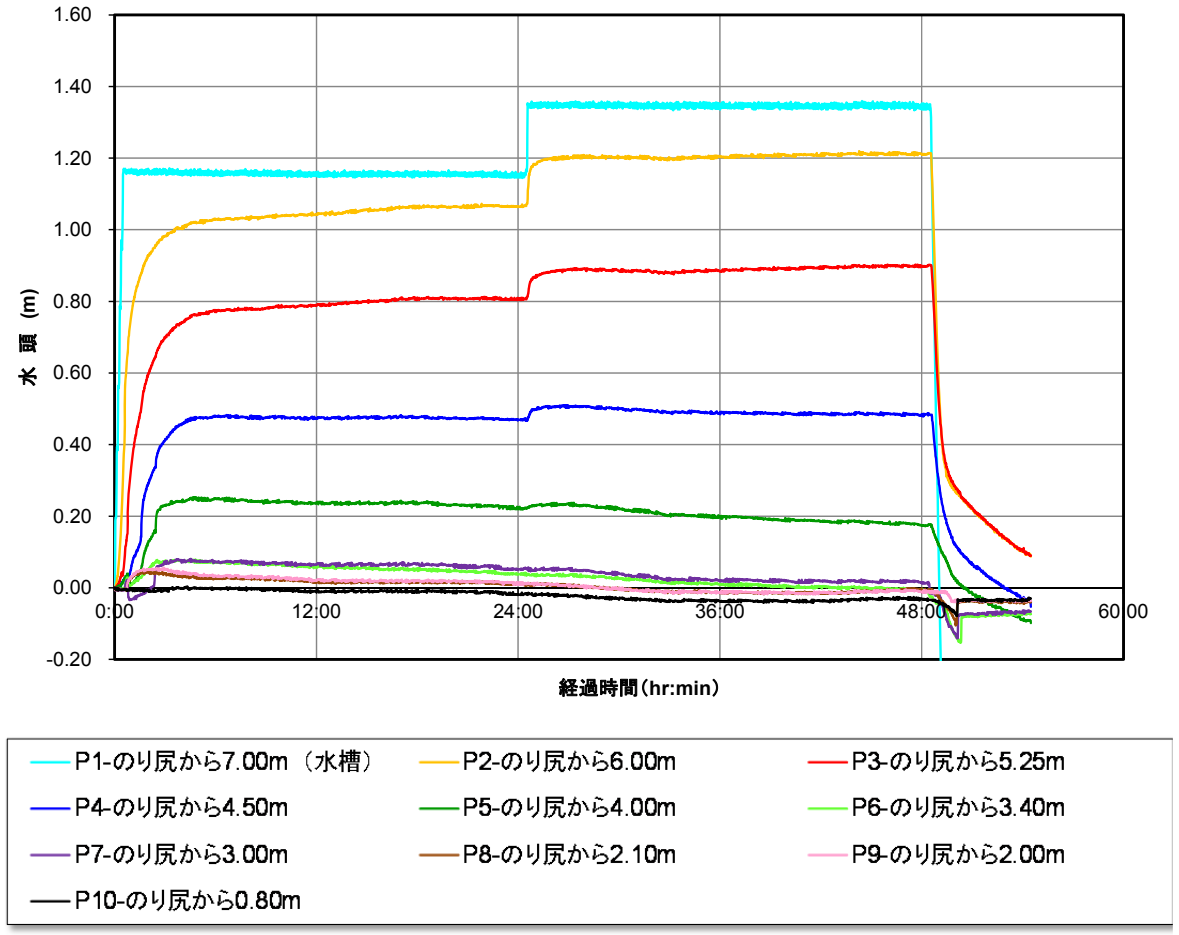



図 2.8.140　水頭の経時変化(CASE24)

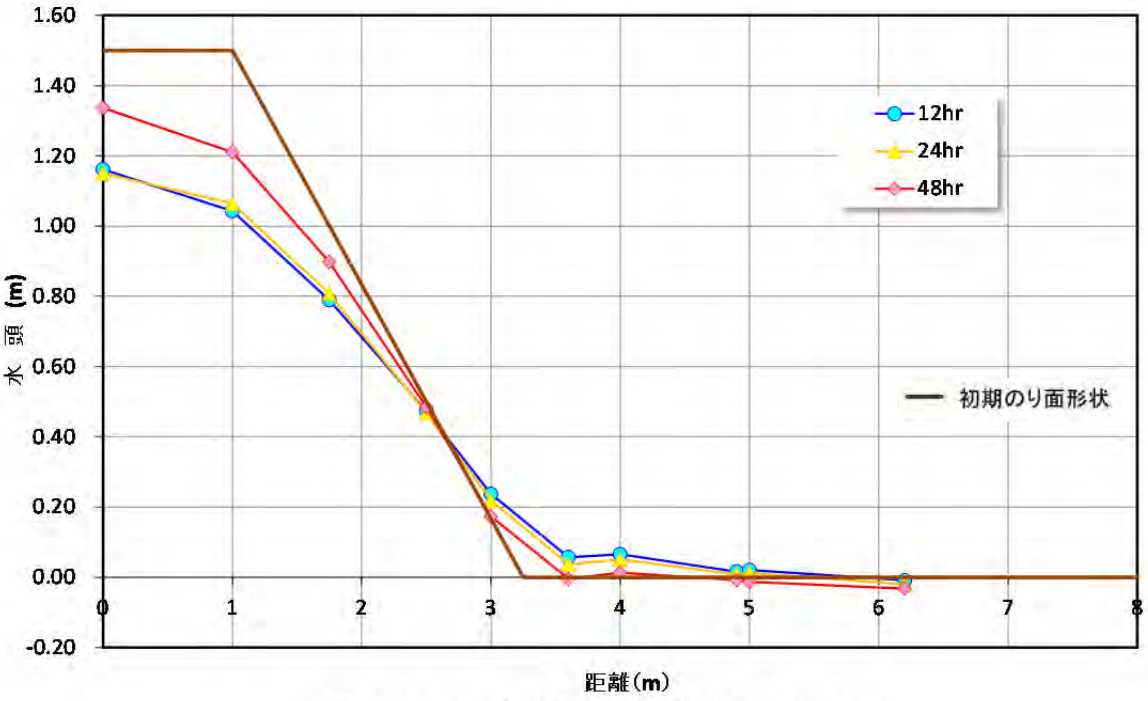



図 2.8.141　水頭分布の経時変化(CASE24)

図 2.8.142　のり尻の状況（CASE24,12hr 後）

図 2.8.143　のり尻の状況（CASE24,24hr 後）

図 2.8.144　のり尻の状況（CASE24,48hr 後）

### 2.8.8　模型 7 の破壊進行状況

のり勾配 1:4（CASE25）、1:3（CASE26）、1:2（CASE27）の 3 ケースでは変状の発生は見られなかったが、のり勾配 1:1.5（CASE28）において、壁沿い及びのり尻に小規模な浸透破壊が発生した。

なお、ここでは実験開始から一定時間経過後、給水槽の水位を 1.2m から 1.4m まで上昇させた。

図 2.8.145　終了時の状況 CASE25(1:4.0)

図 2.8.146　終了時の状況 CASE26(1:3.0)

図 2.8.147　終了時の状況 CASE27(1:2.0)

図 2.8.148　終了時の状況 CASE28(1:1.5)

(1) CASE25(1:4)

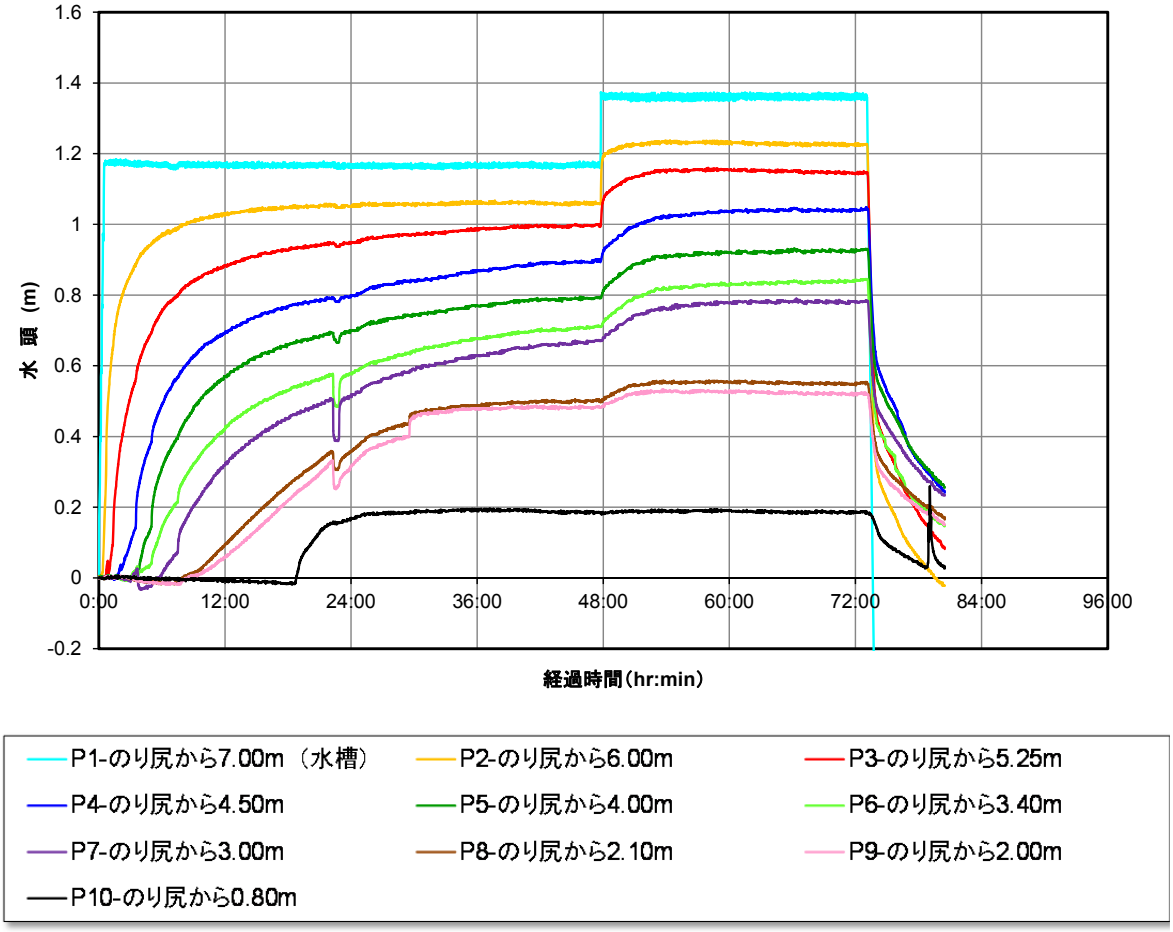



図 2.8.149　水頭の経時変化(CASE25)

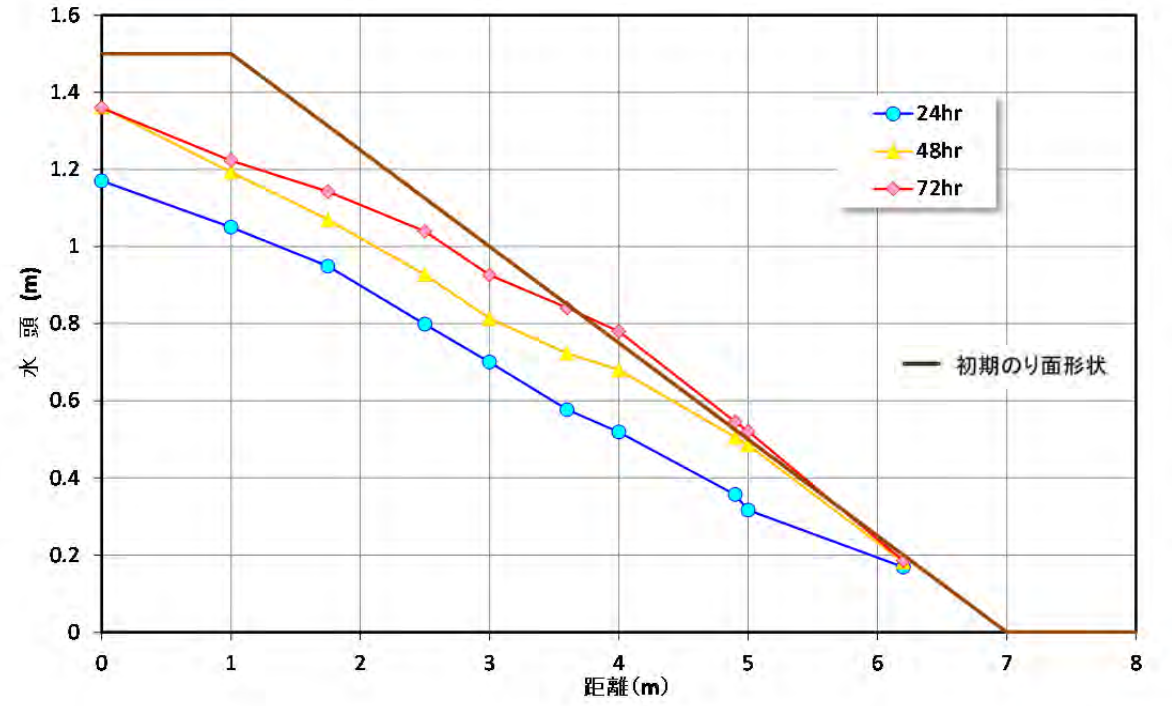



図 2.8.150　水頭分布の経時変化(CASE25)

図 2.8.151　のり尻の状況（CASE25,24hr 後）

図 2.8.152　のり尻の状況（CASE25,48hr 後）

図 2.8.153　のり尻の状況（CASE25,72hr 後）

(2) CASE26(1:3)

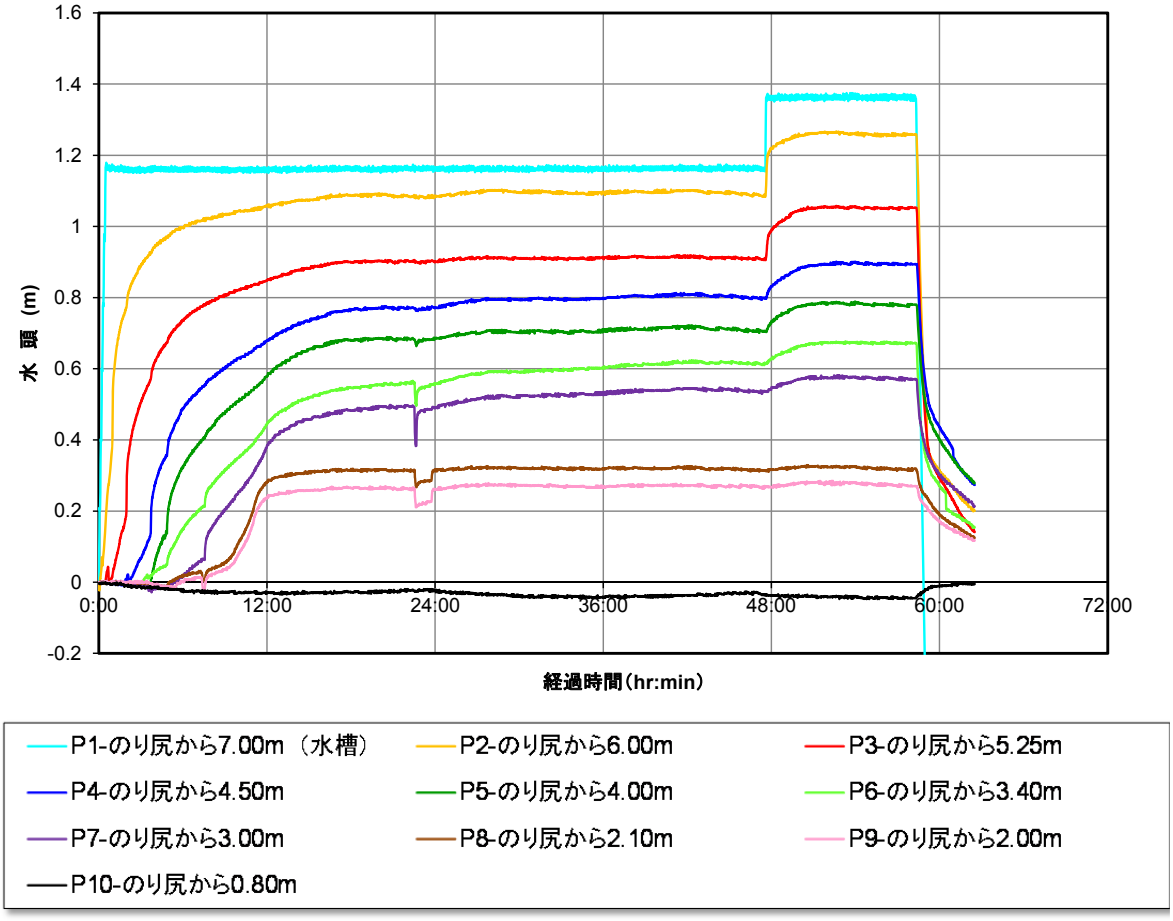



図 2.8.154　水頭の経時変化(CASE26)

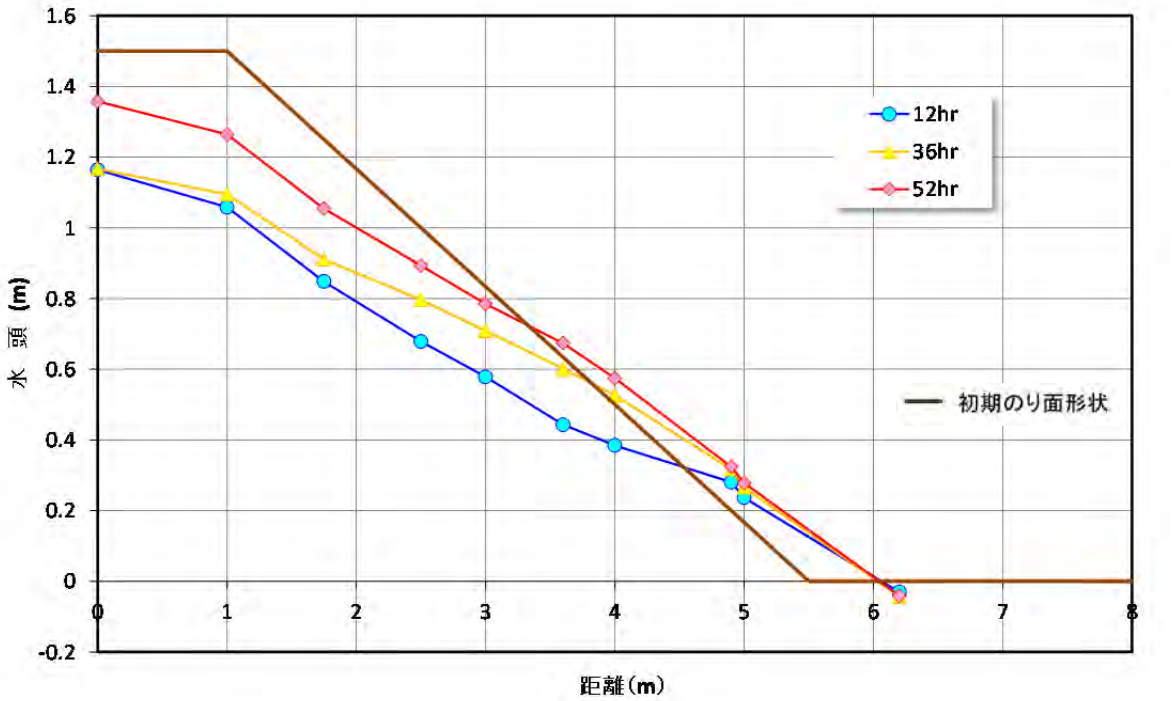



図 2.8.155　水頭分布の経時変化(CASE26)

図 2.8.156　のり尻の状況（CASE26,12hr 後）

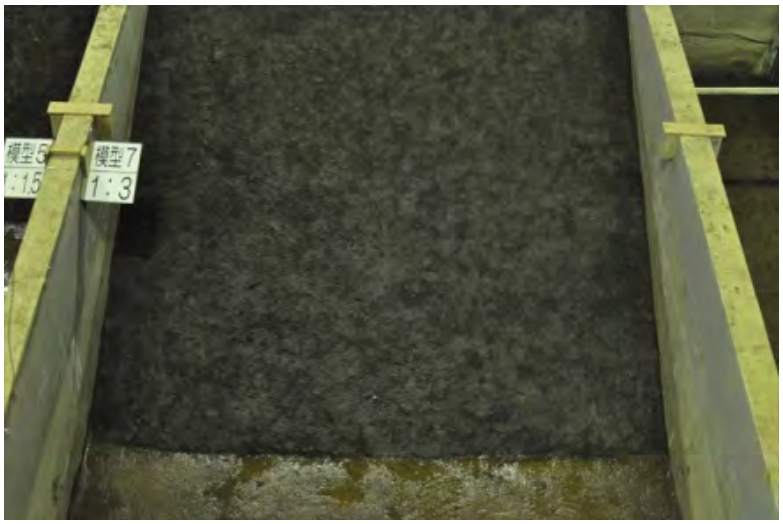



図 2.8.157　のり尻の状況（CASE26,36hr 後）

図 2.8.158　のり尻の状況（CASE26,52hr 後）

(3) CASE27(1:2)

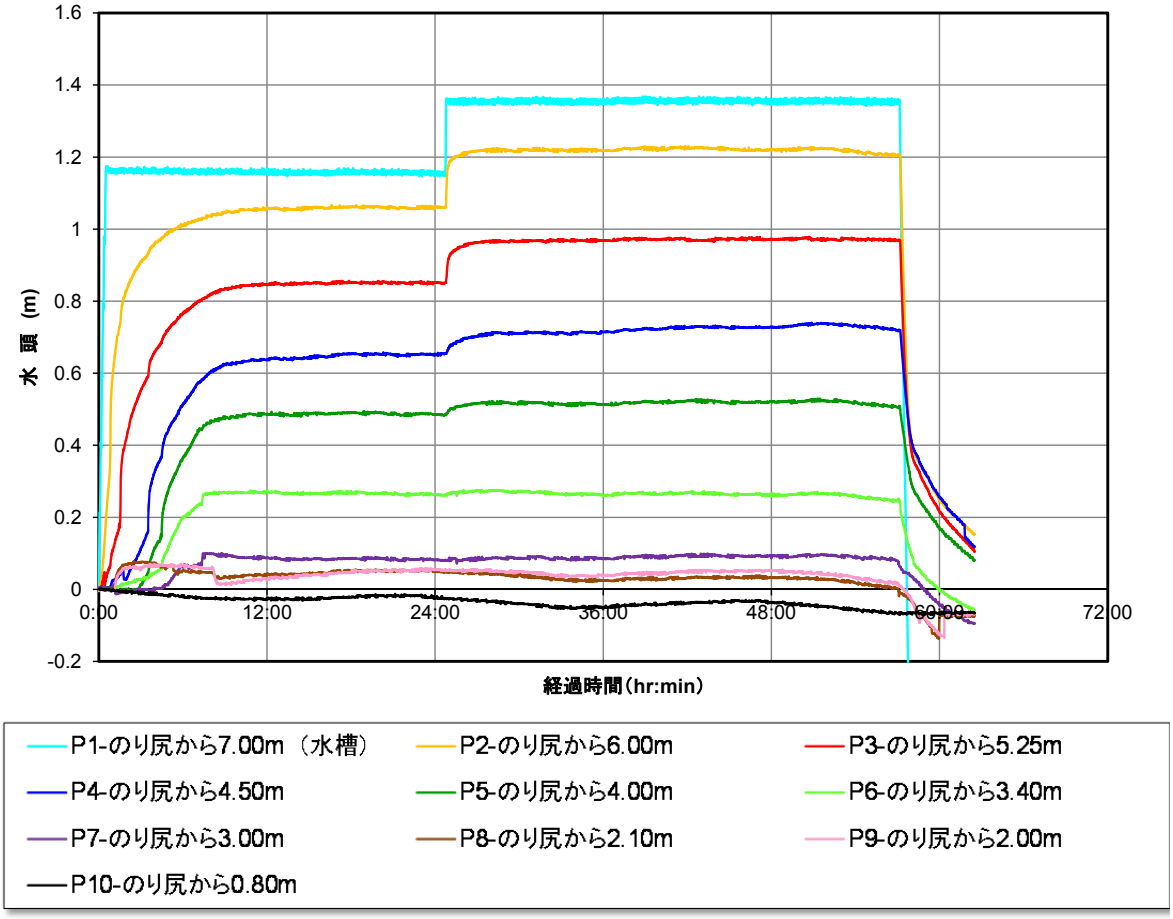



図 2.8.159　水頭の経時変化(CASE27)

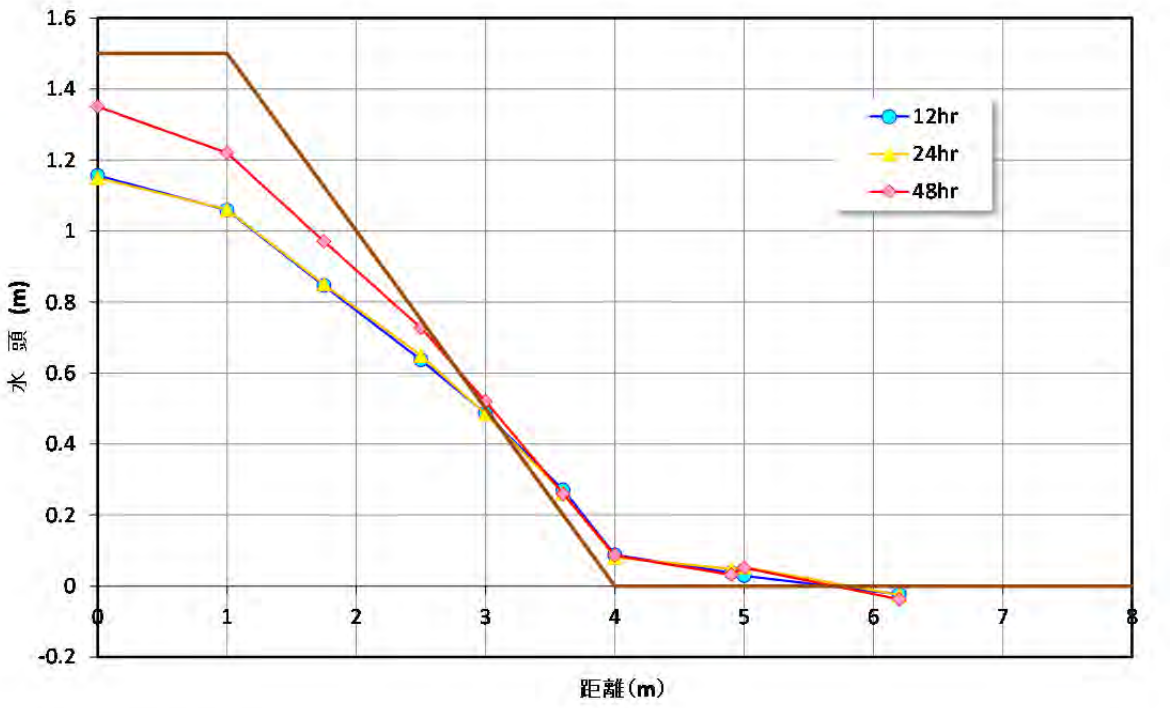



図 2.8.160　水頭分布の経時変化(CASE27)

図 2.8.161　のり尻の状況（CASE27,12hr 後）

図 2.8.162　のり尻の状況（CASE27,24hr 後）

図 2.8.163　のり尻の状況（CASE27,48hr 後）

(4) CASE28(1:1.5)

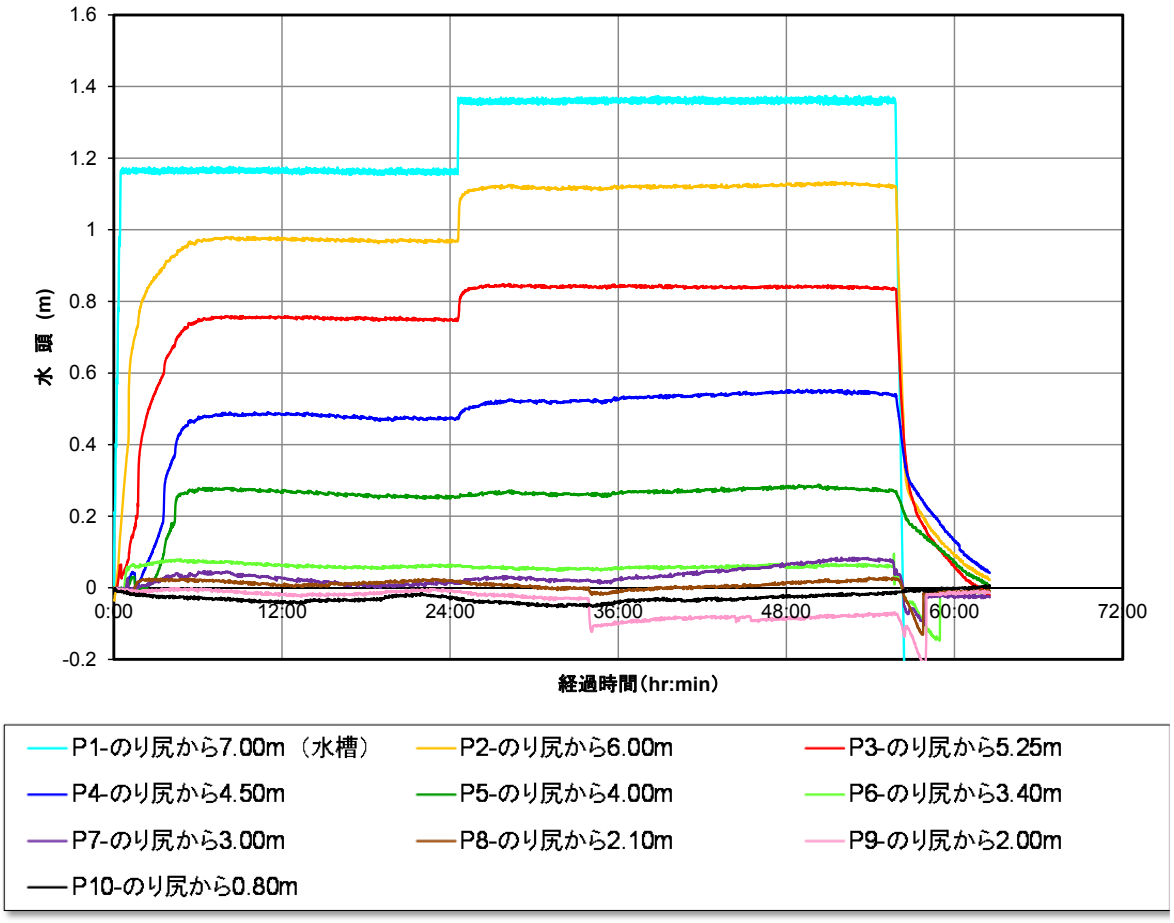



図 2.8.164　水頭の経時変化(CASE28)

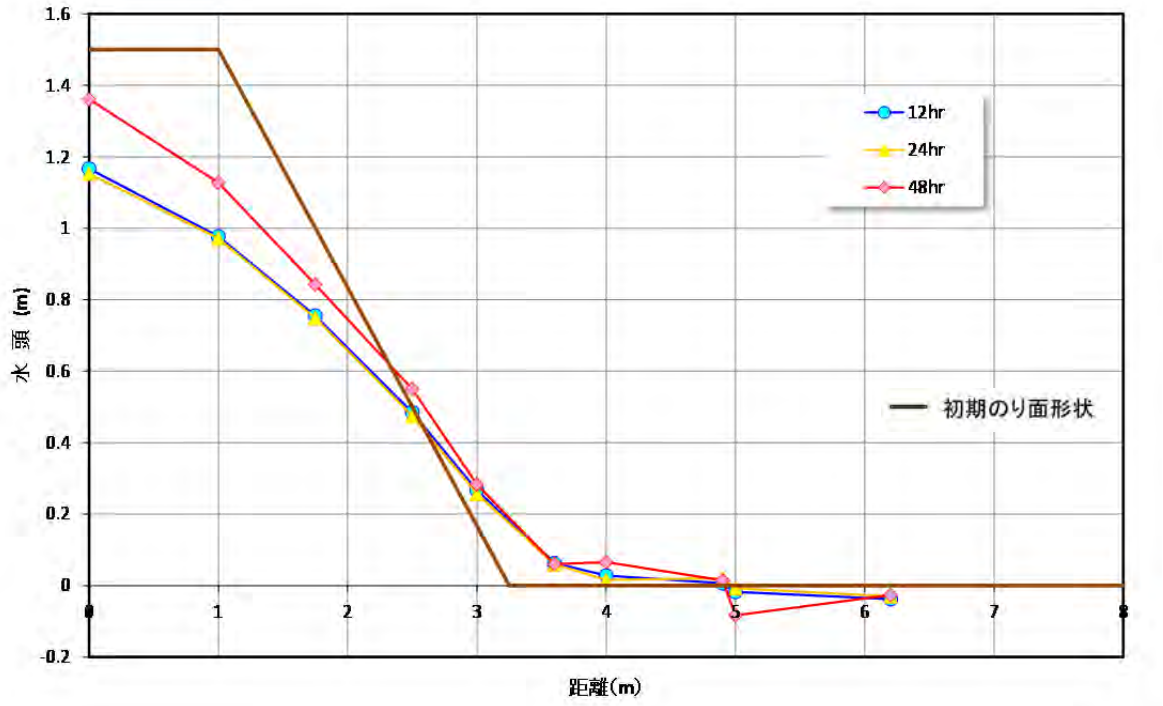



図 2.8.165　水頭分布の経時変化(CASE28)

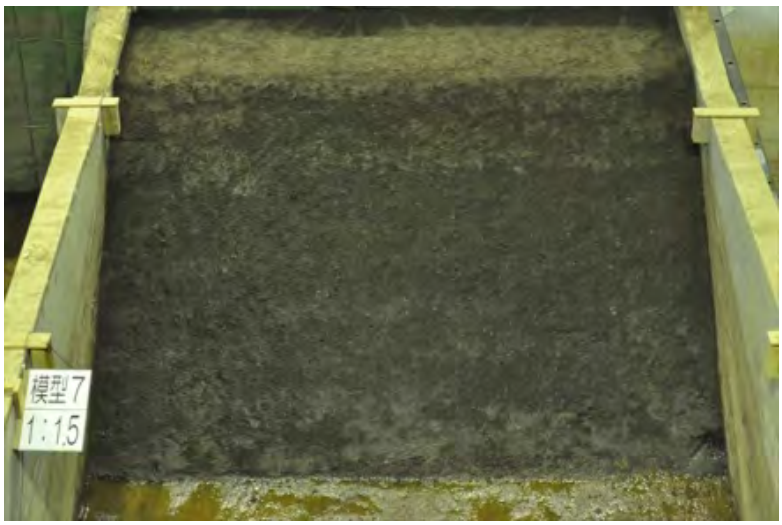



図 2.8.166　のり尻の状況（CASE28,12hr 後）

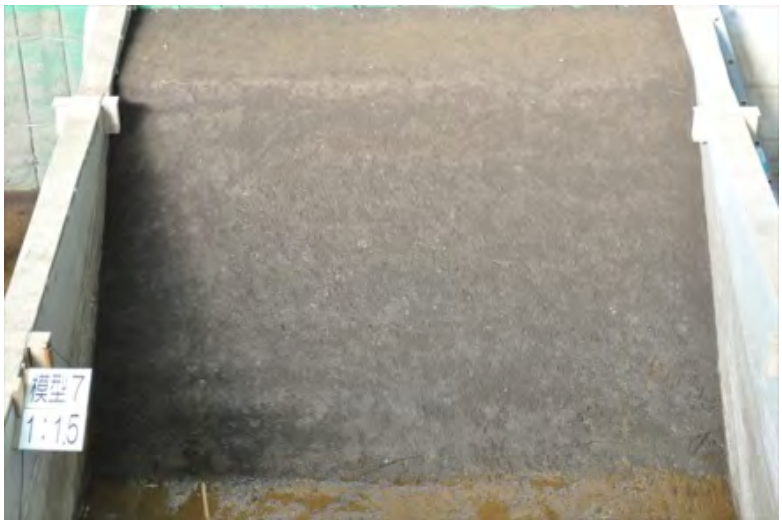



図 2.8.167　のり尻の状況（CASE28,24hr 後）

図 2.8.168　のり尻の状況（CASE28,48hr 後）

### 2.8.9　水頭・間隙水圧の変化

マノメータ及び間隙水圧計による水頭・間隙水圧の計測結果は、経時変化図に整理し付属資料に添付するとともに付属 CD に収録した。

また、浸透破壊が多く発生したのり勾配 1:1.5 とあまり発生しなかったのり勾配 1:2 における間隙水圧計の計測結果をもとに動水勾配の経時変化図を作成し、**図 2.8.169～図 2.8.181** に示した。のり尻近傍の動水勾配がほぼ同等であっても浸透破壊が発生するケースと発生しないケースがあり、動水勾配のみによって破壊の発生の有無が区分される現象ではないものと考えられる。

#### （1）模型 1

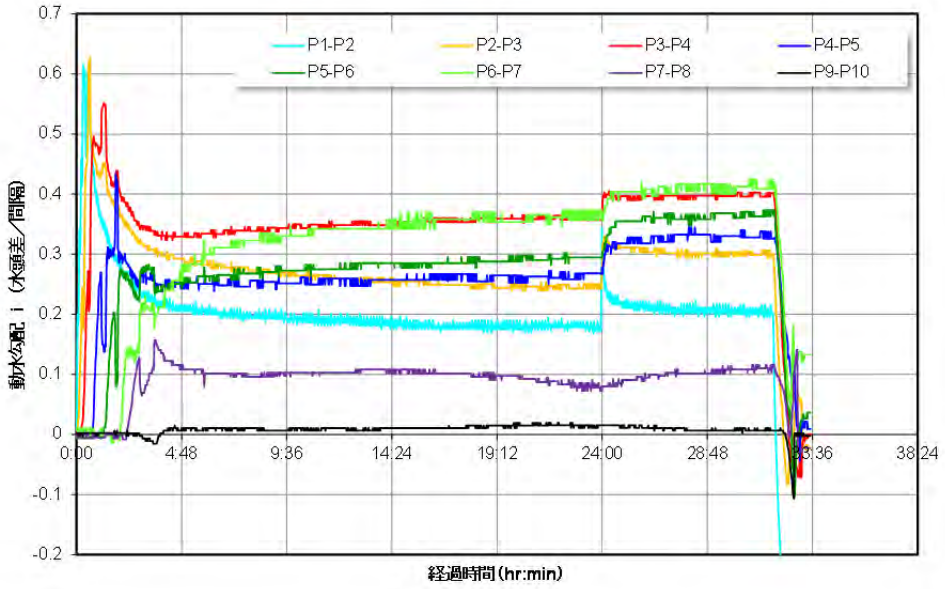



図 2.8.169　のり勾配 1:2（CASE3）における動水勾配の経時変化

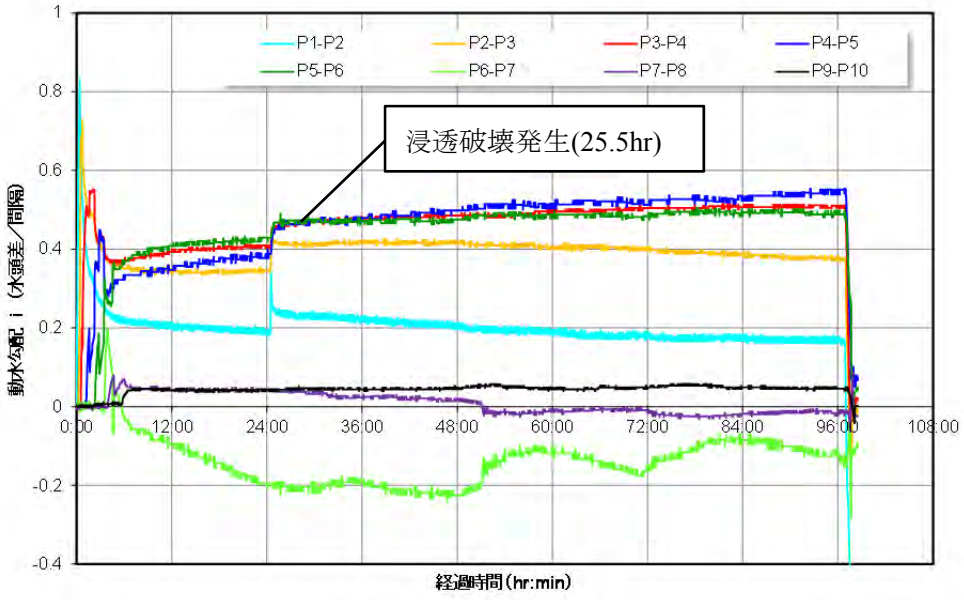



図 2.8.170　のり勾配 1:1.5（CASE4）における動水勾配の経時変化

（2）模型２

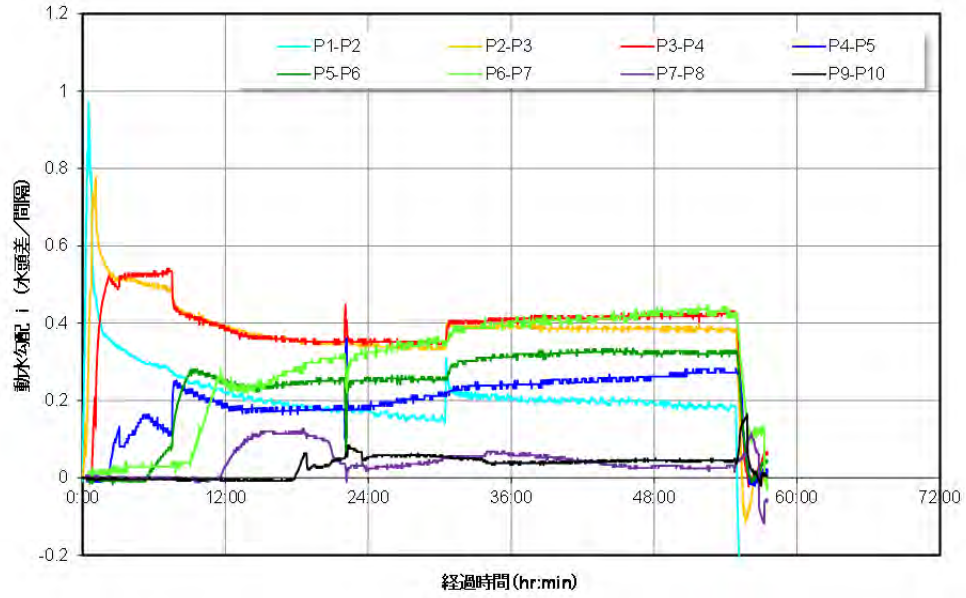



図 2.8.171　のり勾配 1:2（CASE7）における動水勾配の経時変化

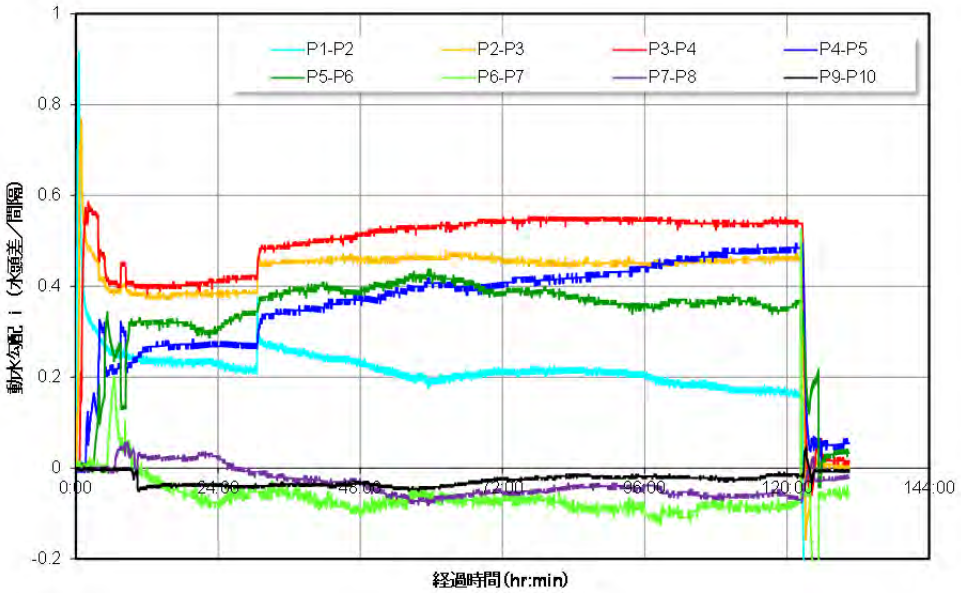



図 2.8.172　のり勾配 1:1.5（CASE8）における動水勾配の経時変化

（3）模型３

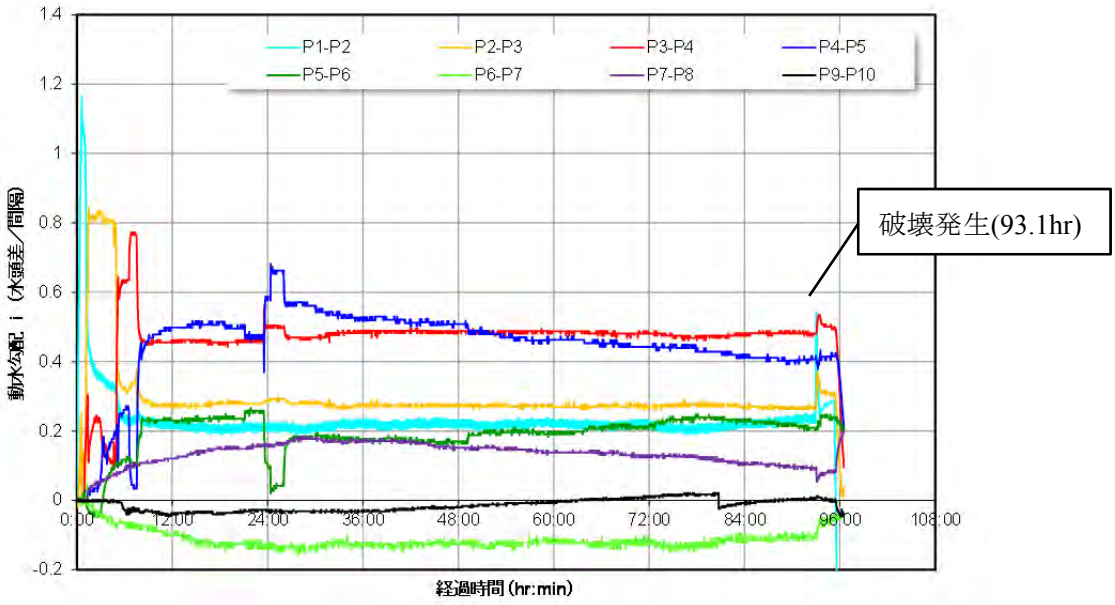



図 2.8.173　のり勾配 1:2（CASE11）における動水勾配の経時変化
（異なる破壊（パイピング）が発生）

（4）模型４

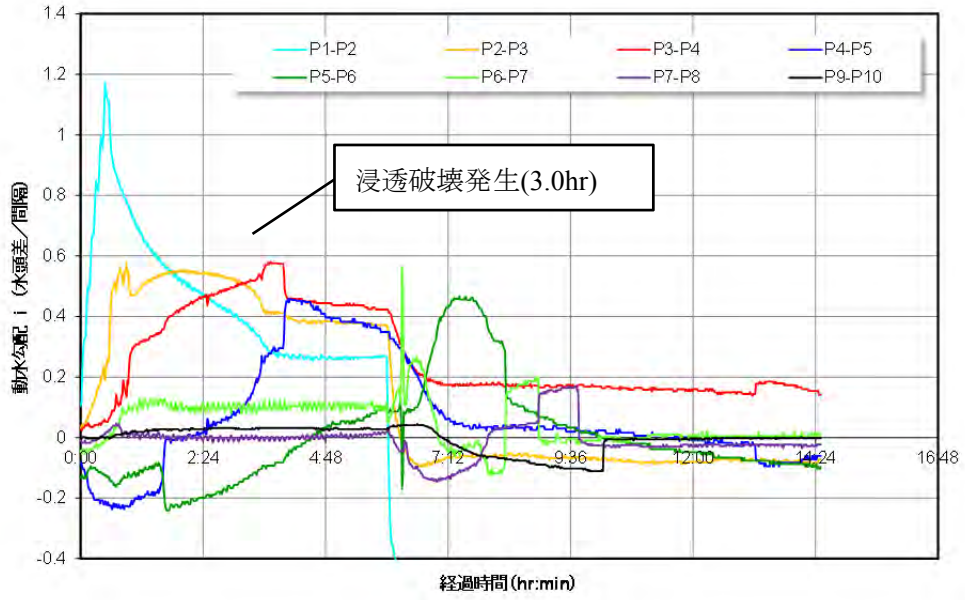



図 2.8.174　のり勾配 1:2（CASE15）における動水勾配の経時変化

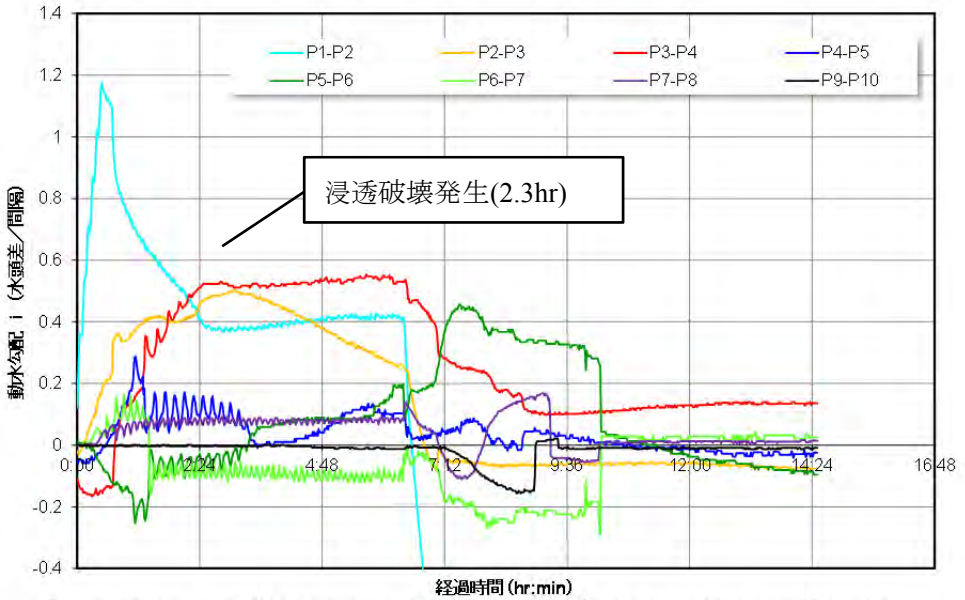



図 2.8.175　のり勾配 1:1.5（CASE16）における動水勾配の経時変化

（5）模型５

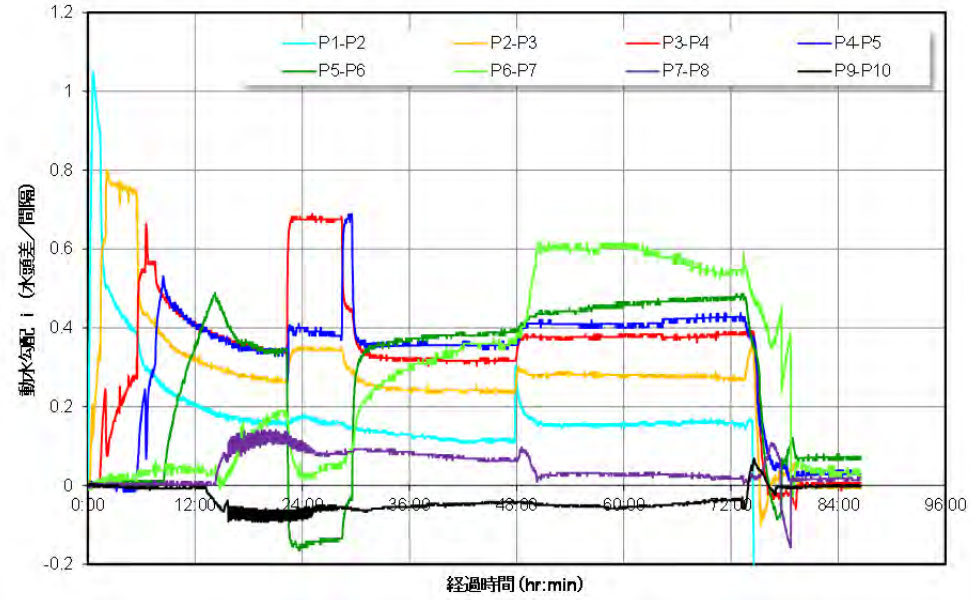



図 2.8.176　のり勾配 1:2（CASE19）における動水勾配の経時変化

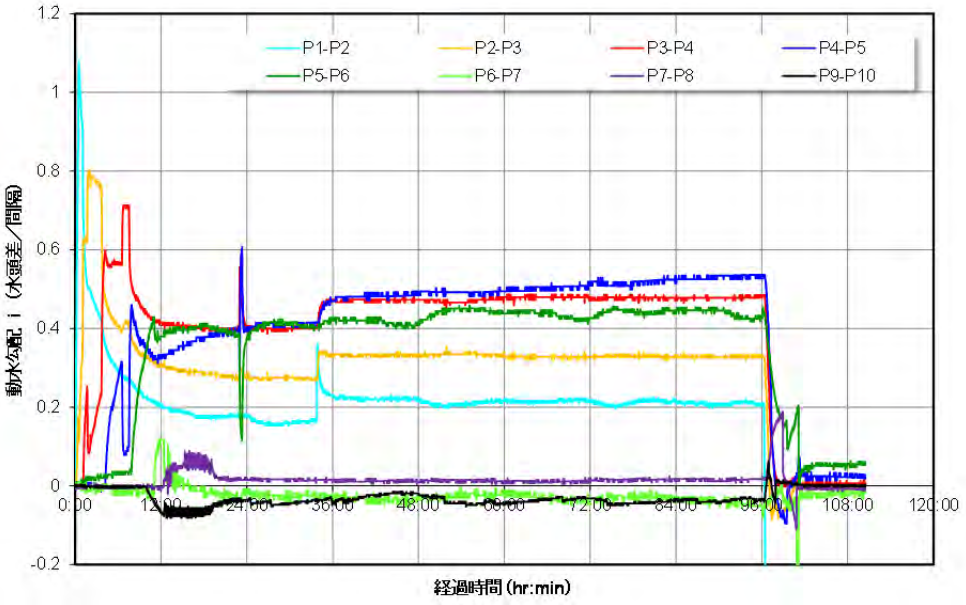



図 2.8.177　のり勾配 1:1.5（CASE20）における動水勾配の経時変化

（6）模型６

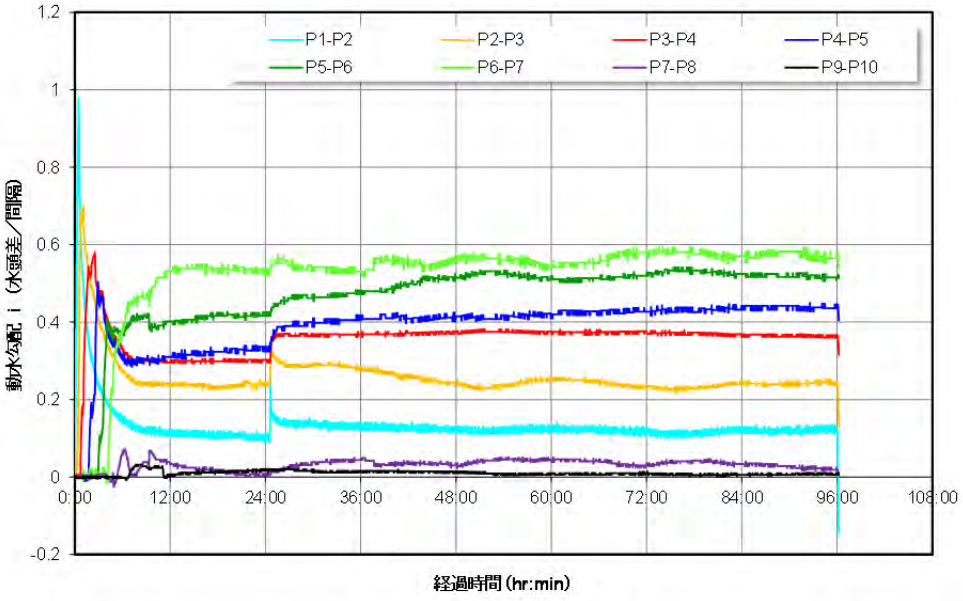



図 2.8.178　のり勾配 1:2（CASE23）における動水勾配の経時変化

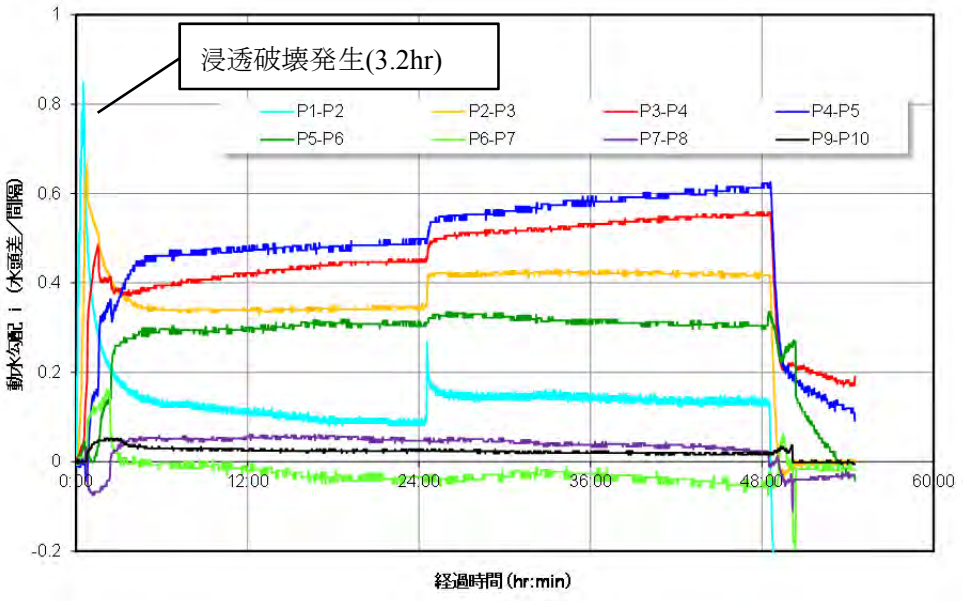
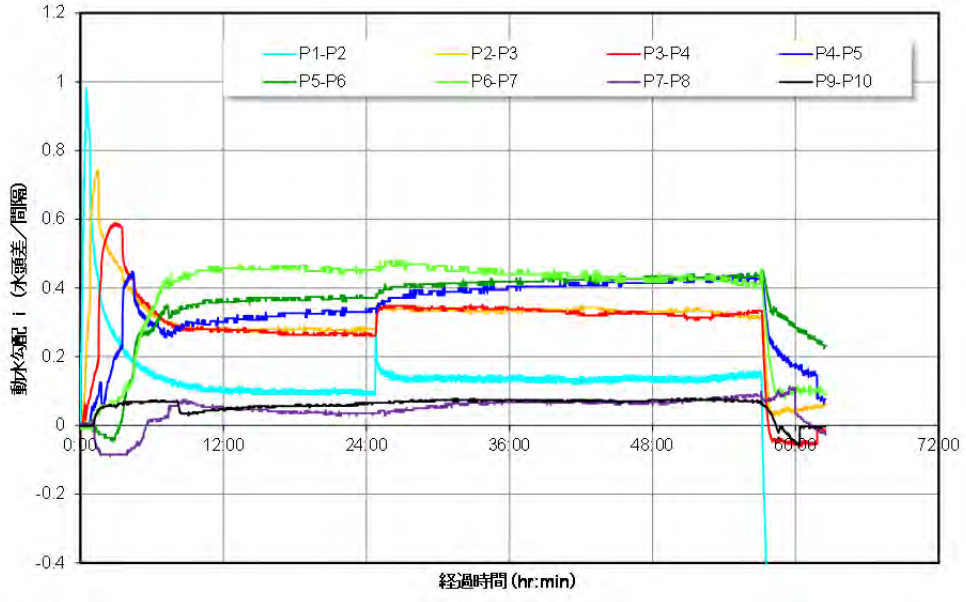



図 2.8.179　のり勾配 1:1.5（CASE24）における動水勾配の経時変化

（7）模型 7




2.8.180　のり勾配 1:2（CASE27）における動水勾配の経時変化

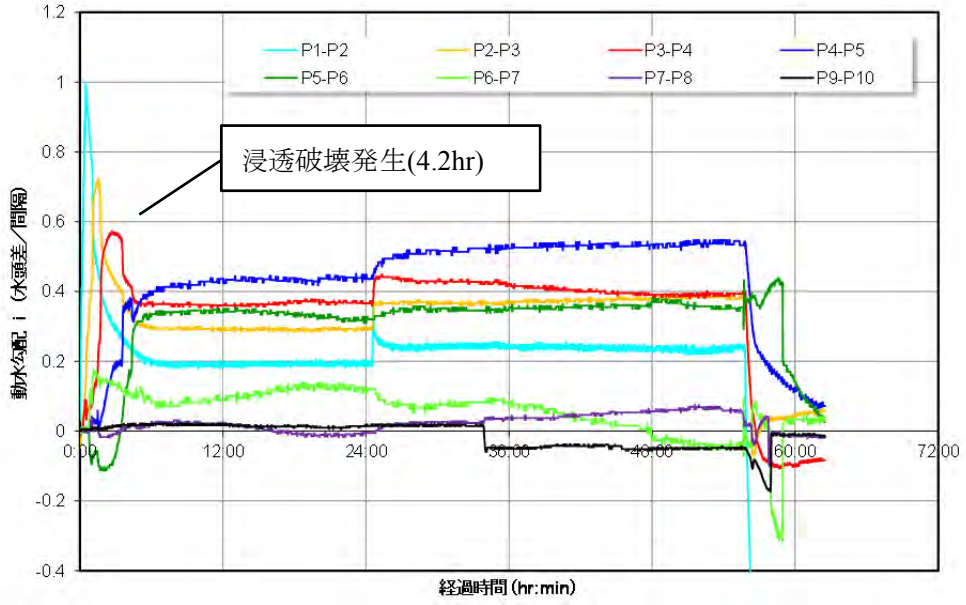



図 2.8.181　のり勾配 1:1.5（CASE28）における動水勾配の経時変化

### 2.8.10 実験後の粒度試験

実験終了後に、のり尻付近および天端付近の表層部の試料を採取し粒度分布を確認した。採取位置の詳細は、以下の**図 2.8.182** に示す。

試験結果は、実験前後で模型の変状がなく、粒度変化が無いことが想定された天端付近の試料とのり尻付近の試料の結果を比較し、整理した。また、粒度試験結果は、粘土分、シルト分およびこれらを合計した細粒分含有率に着目して整理した。粒度試験結果のデータシートは、巻末資料に記載する。

粒度分析の結果、変化があるケースについては、細粒分含有率の中で、概ねシルト分含有率が変動している結果が確認された。しかし、崩壊発生の有無や崩壊位置とのり尻付近の粒度分析の結果の関係性は模型作成時の初期値のバラツキも考えられ、不明瞭であった。

なお、崩壊の発生しなかった模型 5～7（砂質土 5）において、締固め度が高いケースほど、シルト分含有率の変化が見られた。

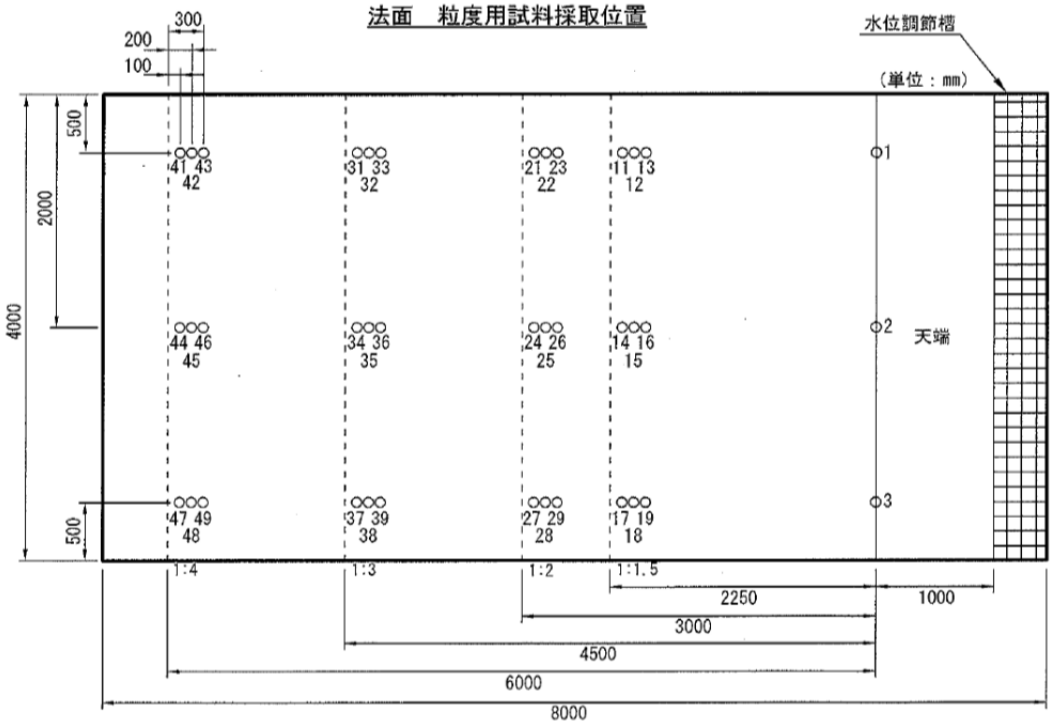
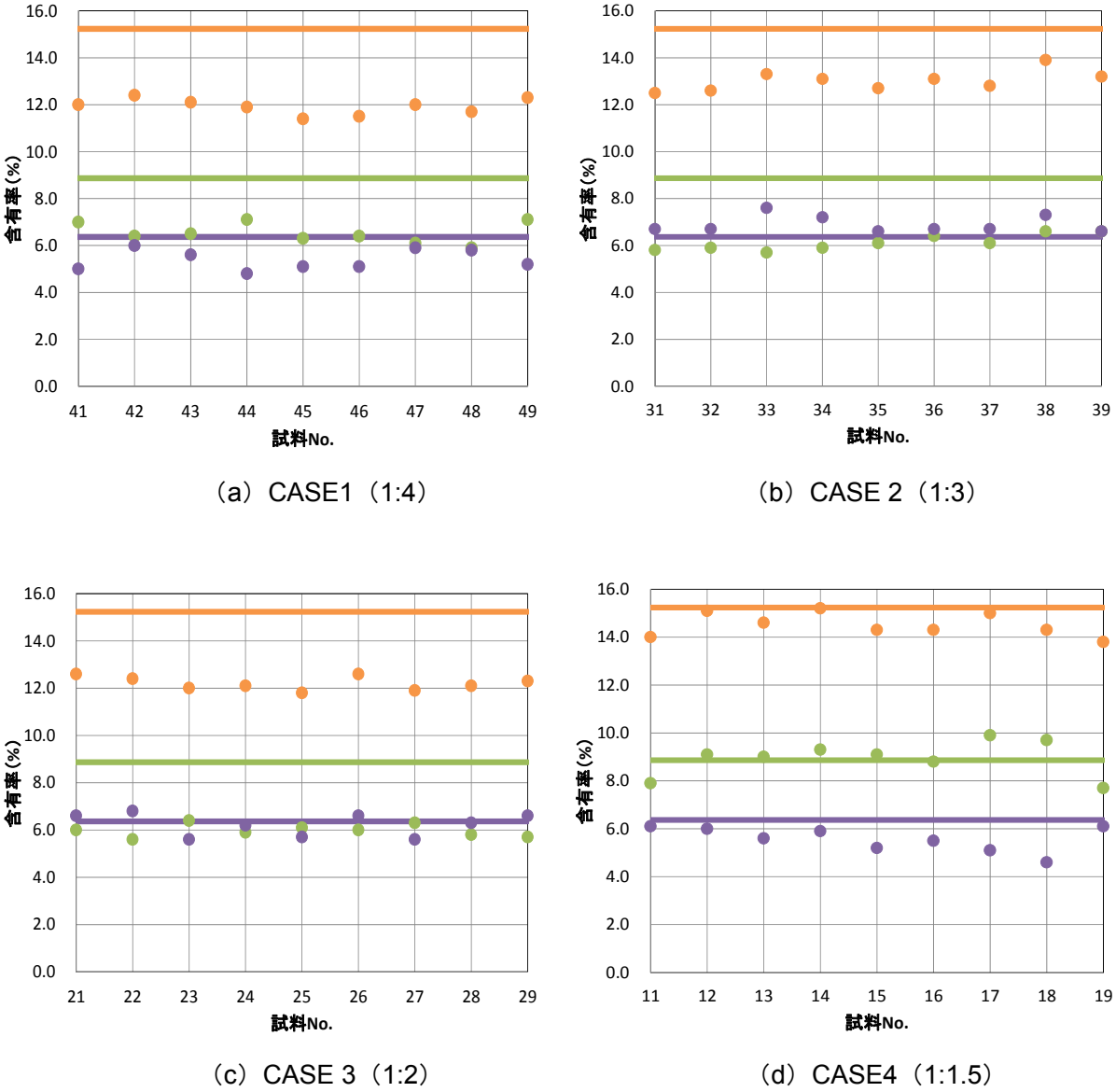



**図 2.8.182　粒度試験用試料採取位置**

(1) 模型 1（砂質土 1）

CASE1～3 について、のり尻付近の細粒分含有率が、天端と比較して 2%程度低い傾向が見られた。粘土分の大きな変化はなく、シルト分が変化している。CASE1～3 については、破壊が生じていないが、細粒分含有率の減少があり、CASE4 については、のり尻端部で破壊が生じているものの、細粒分含有率に変化が少ないことが確認された。



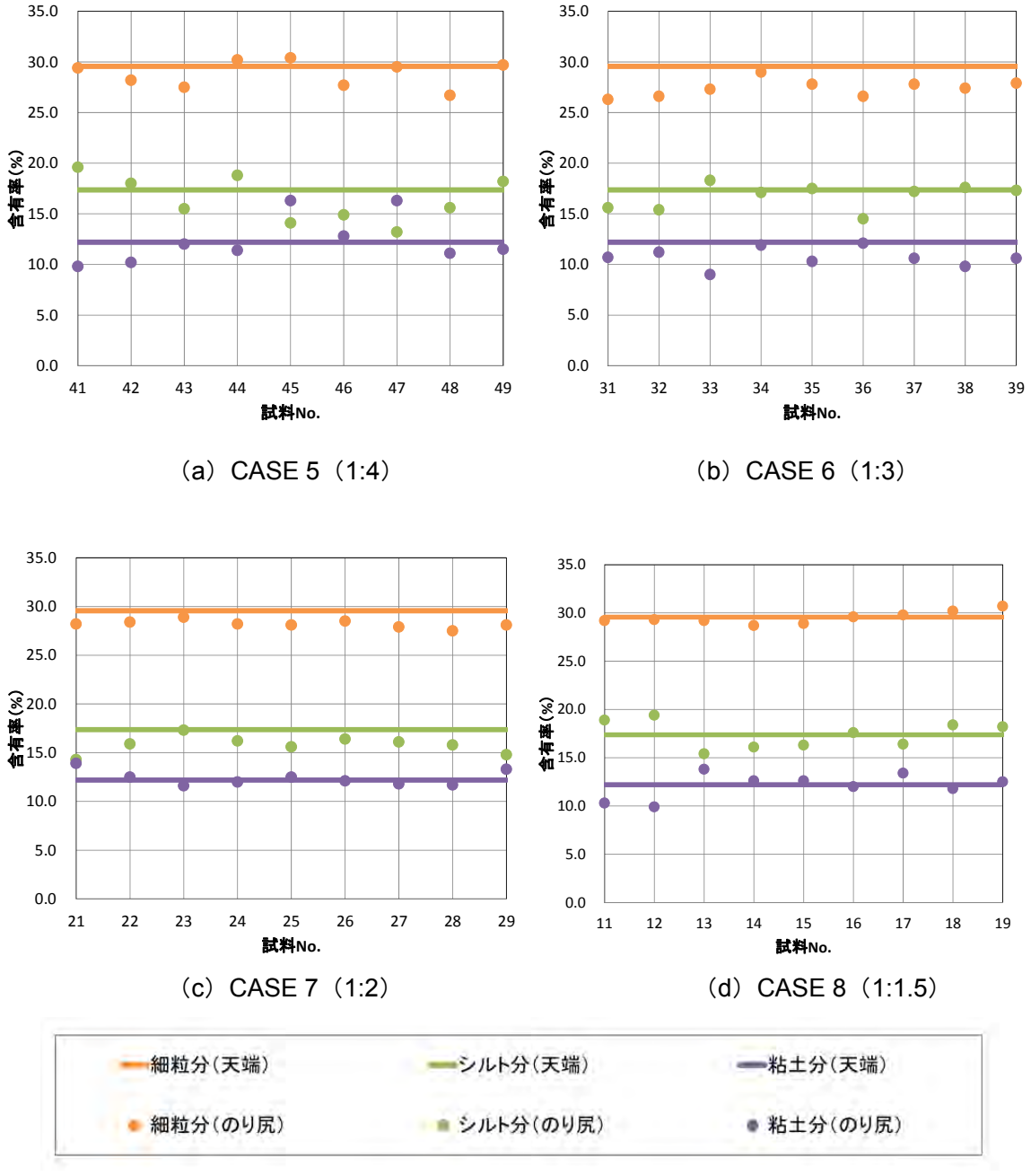

（a）CASE1（1:4）　（b）CASE 2（1:3）

（c）CASE 3（1:2）　（d）CASE4（1:1.5）

図 2.8.183　細粒分含有率の変化（模型 1　CASE1～4）

(2) 模型 2（砂質土 2）

CASE5 ～7 について、のり尻付近の細粒分含有率が、天端より 2～3%程度の減少が見られた。バラツキがあるものの、粘土分の大きな変化はなく、シルト分が変化していることが確認された。CASE8 については、バラツキがあるものの細粒分含有率の大きな変化は確認されなかった。



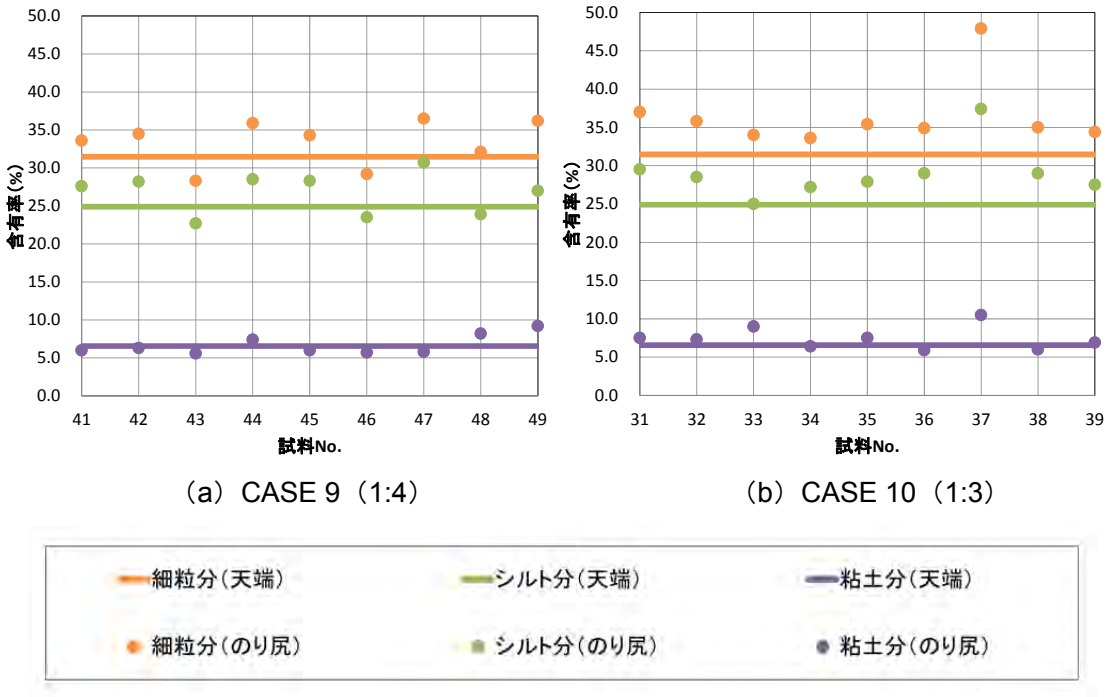

（a）CASE 5（1:4）　（b）CASE 6（1:3）

（c）CASE 7（1:2）　（d）CASE 8（1:1.5）

図 2.8.184　細粒分含有率の変化（模型 2　CASE 5～8）

### (3) 模型 3（砂質土 3）

CASE 9、10 ともにのり尻付近の細粒分含有率が、天端と比較して 3～5%程度増加していることが確認された。また、局所的に 15%程度増加している箇所が確認された。シルト分と粘土分では、粘土分に大きな変化はなく、シルト分が概ね増加していることが確認された。これは、崩壊した箇所と一致しており、崩壊箇所に細粒分が移動されたことが考えられる。



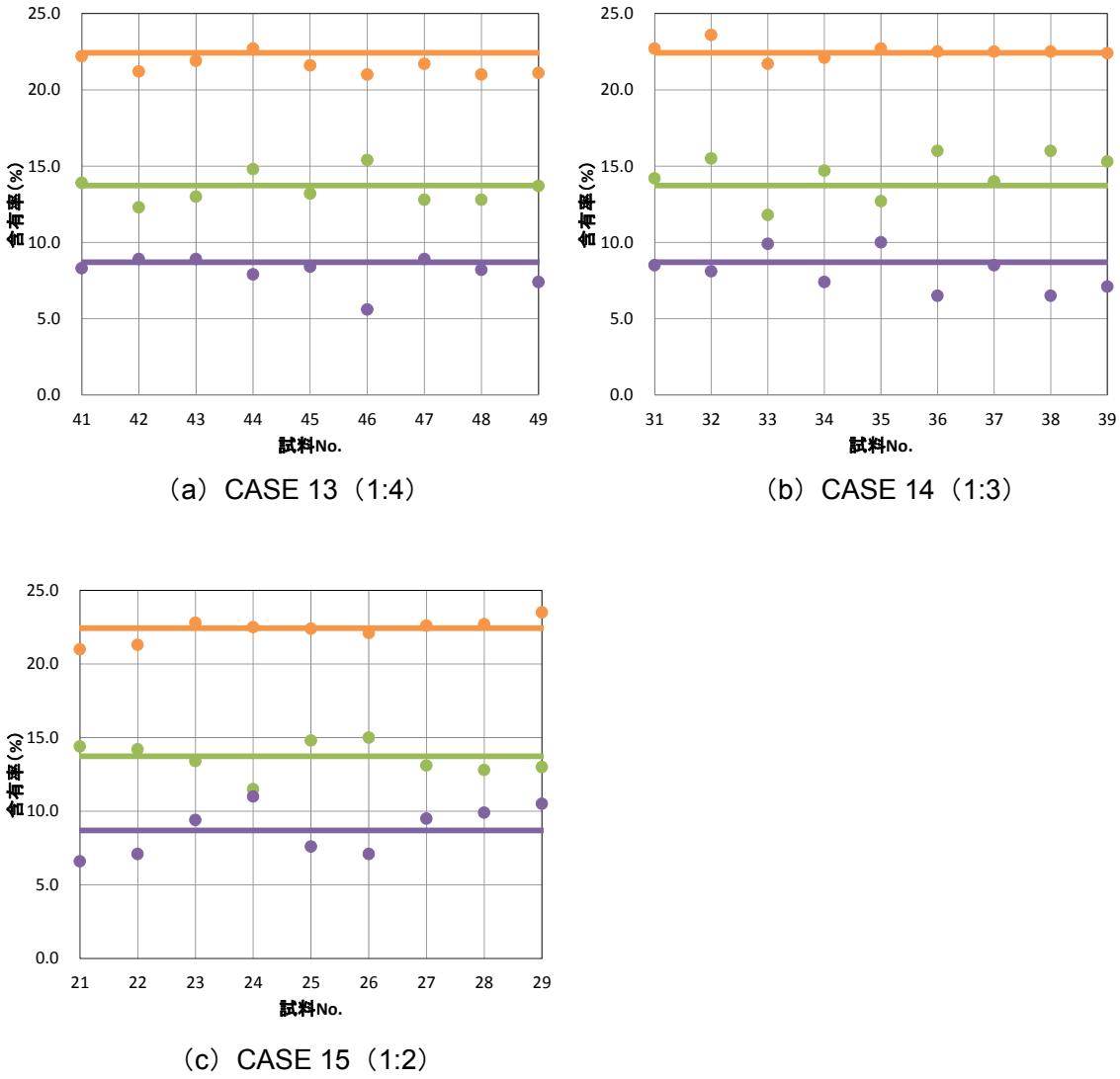

（a）CASE 9（1:4）　　（b）CASE 10（1:3）

※CASE 11 で模型が大きく崩壊したため、CASE 11、12 は、粒度分析は未実施

図 2.8.185　細粒分含有率の変化（模型 3　CASE 9～12）

### (4) 模型 4（砂質土 4）

破壊の生じていない CASE13、破壊の生じた CASE 14～15 ともに、バラツキはあるものの、のり尻付近の細粒分含有率、シルト分、粘土分について、大きな増減は確認されなかった。




（a）CASE 13（1:4）

（b）CASE 14（1:3）

（c）CASE 15（1:2）

※CASE 15 で模型が大きく崩壊したため、Case16 は、実験未実施

図 2.8.186　細粒分含有率の変化（模型 4　CASE 13～16）

(5) 模型 5（砂質土 5）

CASE 17、18、20 については、天端と比較し、のり尻付近の細粒分含有率の増加傾向が確認された。粘土分については、ほとんど変化は無いが、シルト分が増加している傾向が確認される。なお、CASE 19 については、バラツキがあるが、平均すると大きな増減は確認されなかった。

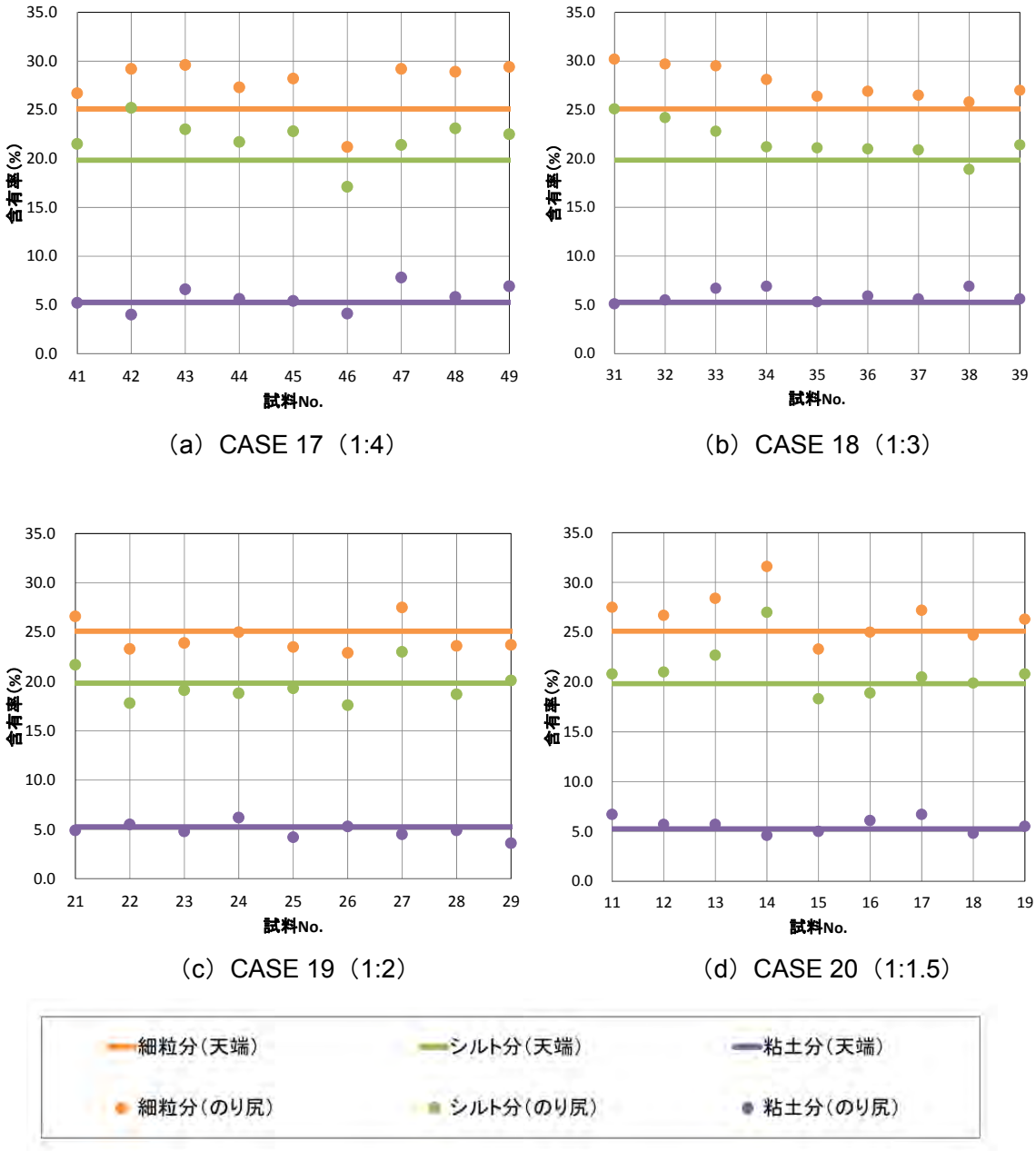
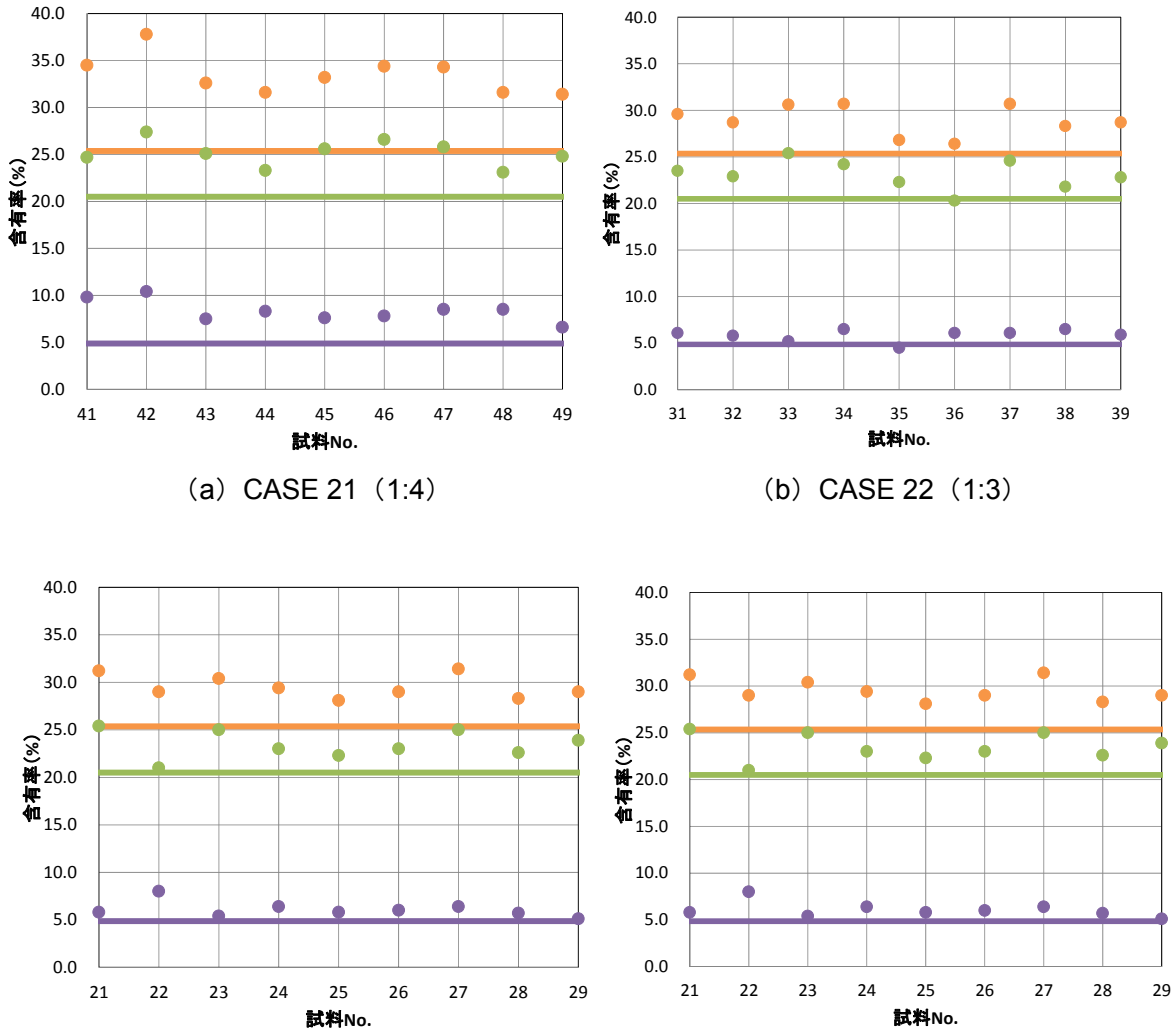



図 2.8.187　細粒分含有率の変化（模型 5　CASE 17～20）

### (6) 模型 6（砂質土 5）

模型 6 については、のり尻付近の細粒分含有率が、天端と比較して増加傾向が見られた。シルト分と粘土分では、シルト分がやや多く増加していることが確認された。破壊が生じていないものの、のり尻付近については、土粒子が内部で移動していると推定される。



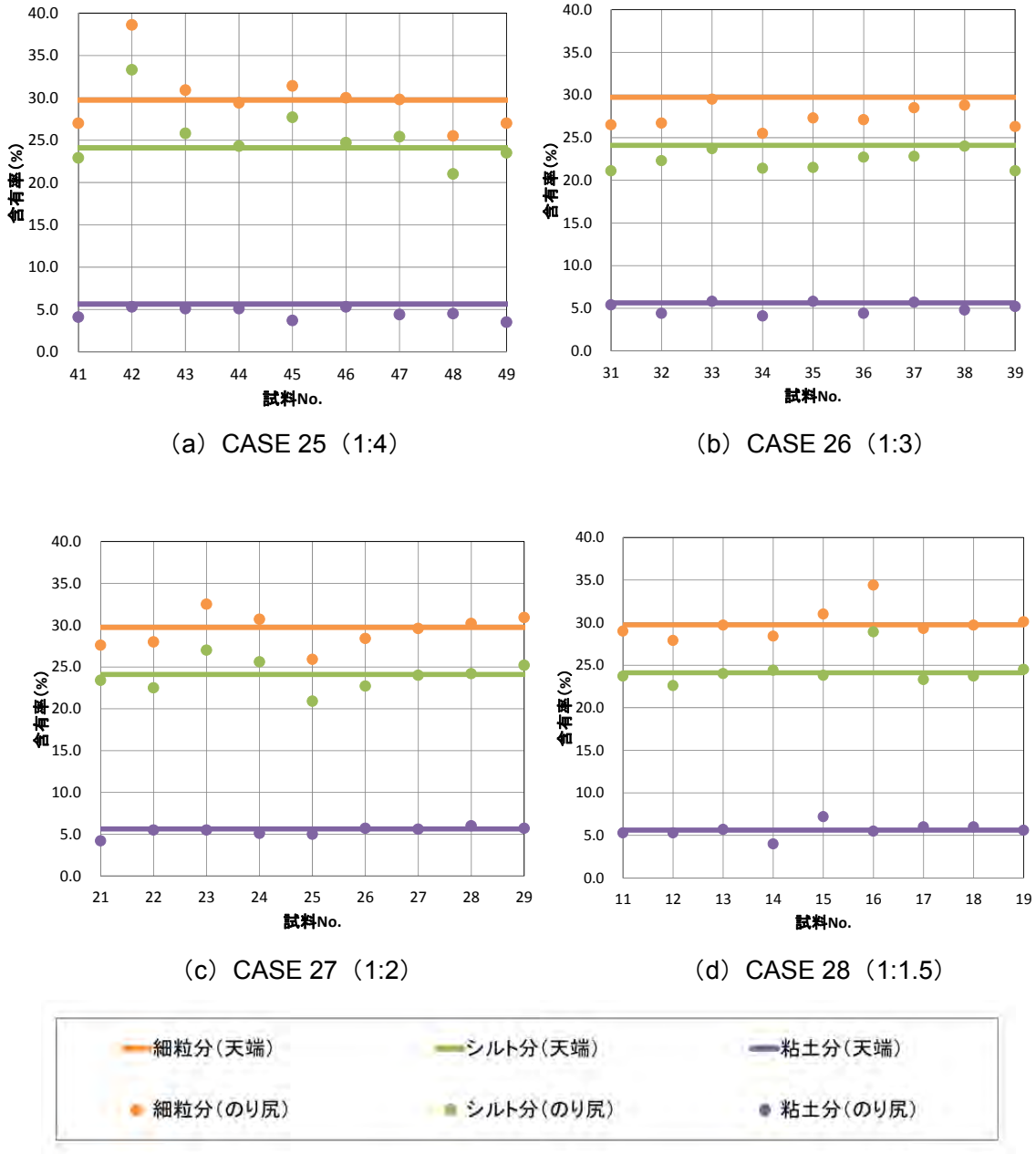

（a）CASE 21（1:4）　（b）CASE 22（1:3）

（c）CASE 23（1:2）　（d）CASE 24（1:1.5）

図 2.8.188　細粒分含有率の変化（模型 6　CASE 21～24）

### (7) 模型 7（砂質土 5）

CASE25～28 について、細粒分含有率は、全体的に大きな変化は確認されなかった。粘土分については、ほとんど変化が無く、シルト分により少しバラツキが確認された。




（a）CASE 25（1:4）　（b）CASE 26（1:3）

（c）CASE 27（1:2）　（d）CASE 28（1:1.5）

図 2.8.189　細粒分含有率の変化（模型 7　CASE 25～28）

### 2.8.11 破壊の発生の有無と堤体材料の関係

堤体材料とのり尻付近の動水勾配の関係を、進行性破壊の発生の有無別で整理した。ここでは、過去に土木研究所で実施した大型模型実験の結果[4,5,6]と合わせて整理した。のり尻付近の動水勾配は、のり尻直下とその一番近傍に位置するマノメータで計測した圧力水頭を用いて求めた。なお、のり尻付近の動水勾配は模型寸法に応じて算出位置が異なる。動水勾配の算出地点は以下に示す。

・のり面勾配 1：4 では、のり尻とのり尻から 0.8m

・のり面勾配 1：3 では、のり尻から 0.5m とのり尻から 0.6m

・のり面勾配 1：2 では、のり尻とのり尻から 0.4m

・のり面勾配 1：1.5 では、のり尻から 0.25m とのり尻から 0.5m

のり尻付近の動水勾配は、模型寸法に応じて算出位置が異なり、一概に比較できないものの、概ねの傾向として、60%粒径、50%粒径、30%粒径が小さいほど低い動水勾配で崩壊が発生することが確認された。また、材料中の礫分、細粒分、シルト分、粘土分の含有率とのり尻付近の導水勾配の関係は、不明瞭であった。

なお、同一材料の締固め度での違いを比較すると、概ね締固め度の低いほどのり尻付近の動水勾配が低い値で崩壊が発生することが確認された。

#### (1) 礫分含有率とのり尻付近の動水勾配

礫分含有率が少ない堤体材料で、崩壊が発生しているケースが多く確認された。また、礫分含有率が 33%程度でも崩壊が発生することが確認された。

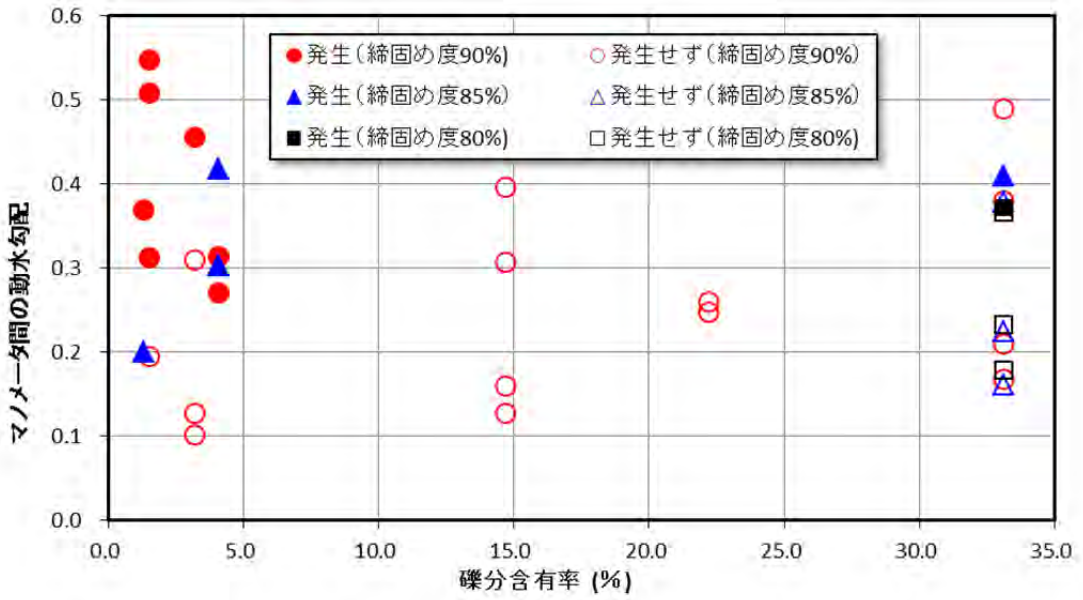



図 2.8.190　礫分含有率とのり尻付近の動水勾配

### (2) 細粒分含有率とのり尻付近の動水勾配

細粒分含有率が低く、締固め度が 85%の場合は、のり尻付近の動水勾配が 0.2 と低い状態で崩壊したことが確認された。その他、細粒分含有率とのり尻付近の動水勾配の関係は不明瞭であった。

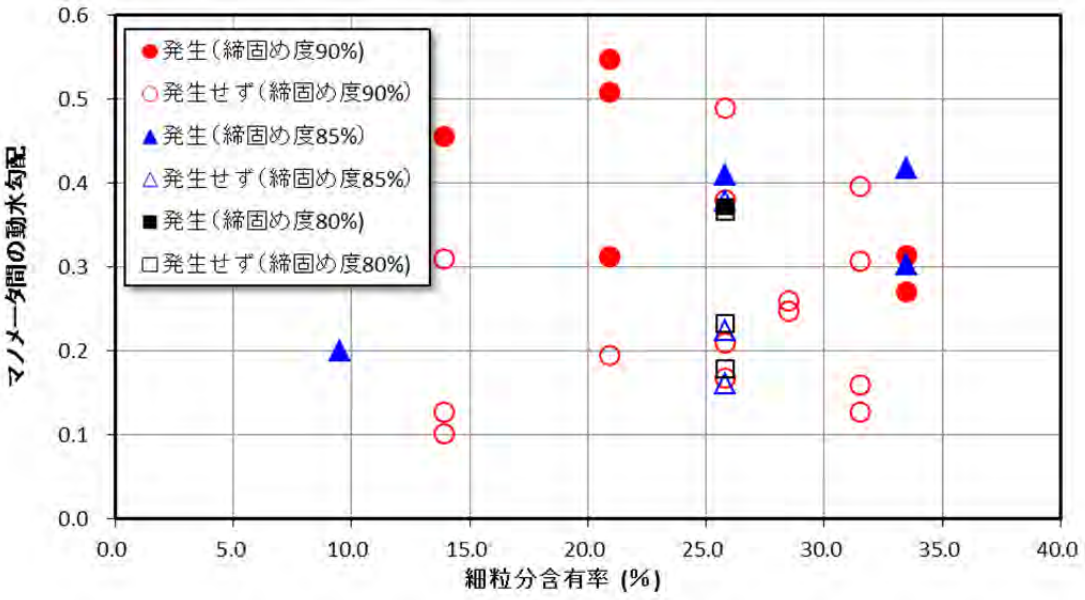



図 2.8.191　細粒分含有率とのり尻付近の動水勾配

### (3) シルト分含有率とのり尻付近の動水勾配

試験後の粒度試験の結果では、シルト分含有率の変化が見られるケースがあったが、のり尻付近の動水勾配との関係は、不明瞭であった。

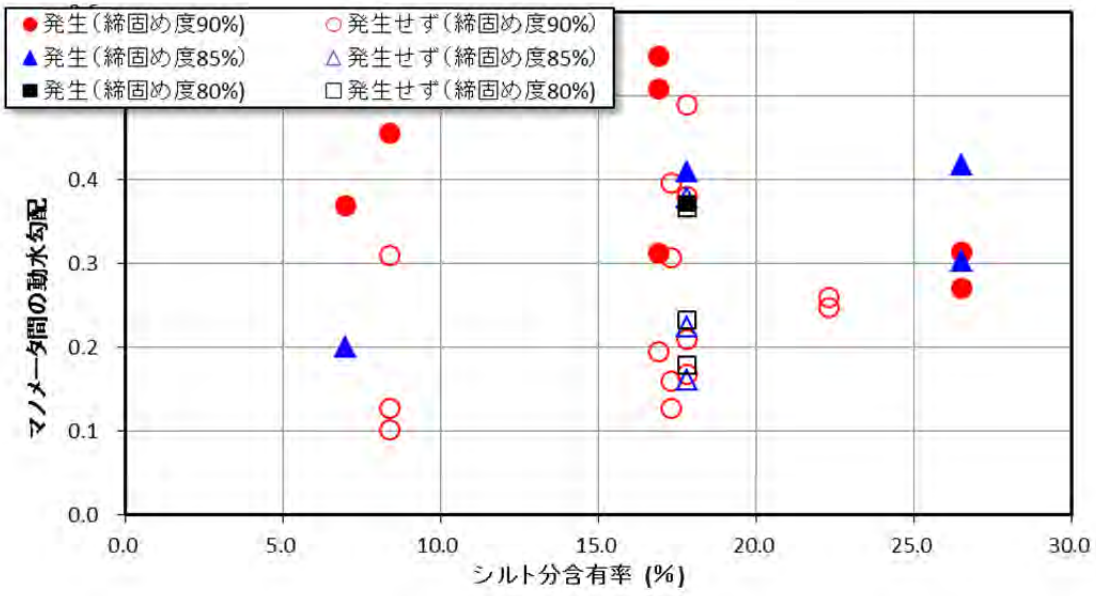



図 2.8.192　シルト分含有率とのり尻付近の動水勾配

### (4) 粘土分含有率とのり尻付近の動水勾配

粘土分含有率が 2～8%程度のケースで、崩壊の発生が確認された。なお、粘土分含有率が 14%程度の材料では、崩壊が確認されなかった。

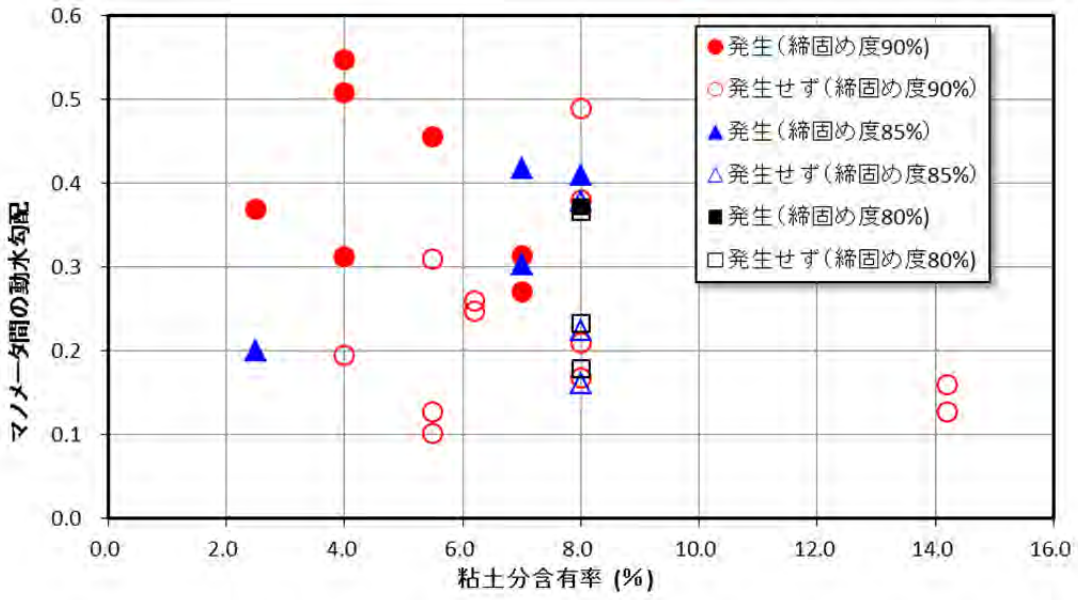



図 2.8.193　粘土分含有率とのり尻付近の動水勾配

### (5) 60%粒径とのり尻付近の動水勾配

概ね 60%粒径が大きいほど、のり尻付近の動水勾配が高い状態で、崩壊している傾向が確認された。

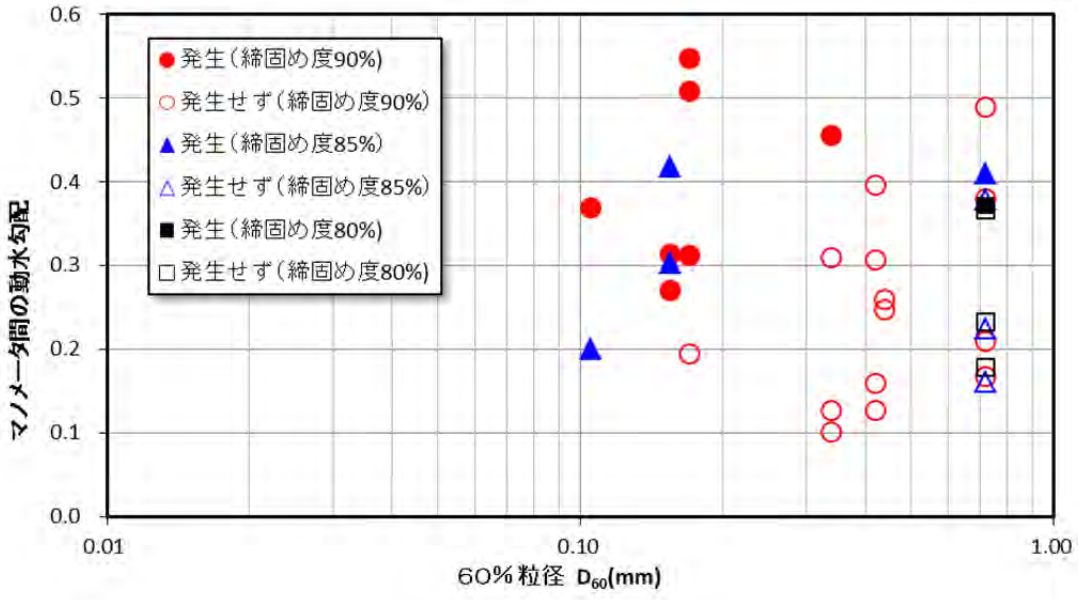



図 2.8.194　60%粒径とのり尻付近の動水勾配

（6）50%粒径とのり尻付近の動水勾配

概ね 50%粒径が大きいほど、のり尻付近の動水勾配が高い状態で、崩壊している傾向が確認された。

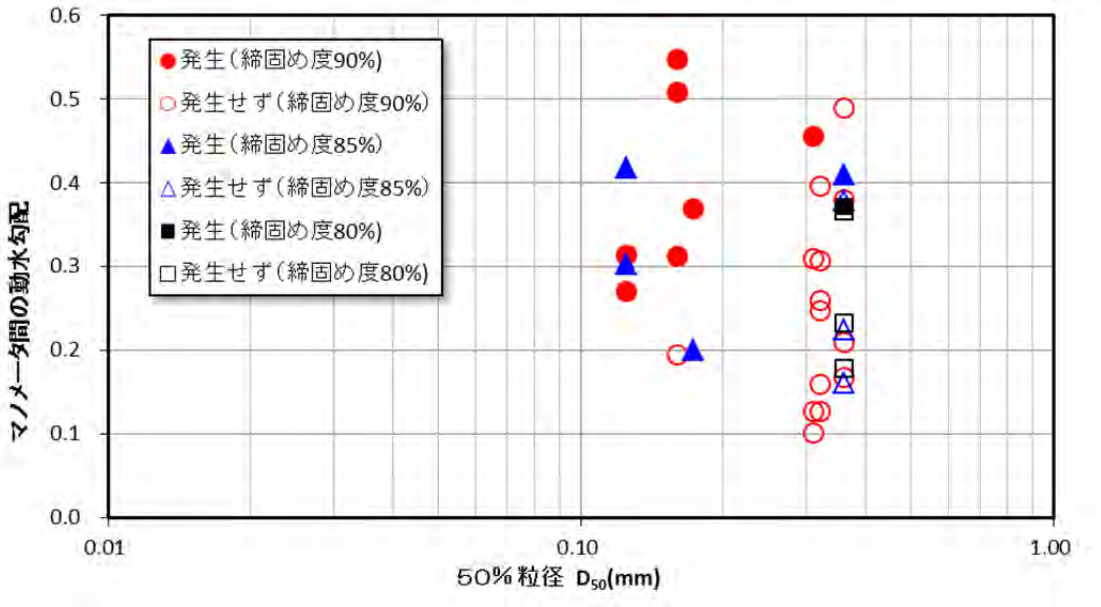



図 2.8.195　50%粒径とのり尻付近の動水勾配

（7）30%粒径とのり尻付近の動水勾配

概ね 30%粒径が大きいほど、のり尻付近の動水勾配が高い状態で、崩壊している傾向が確認された。

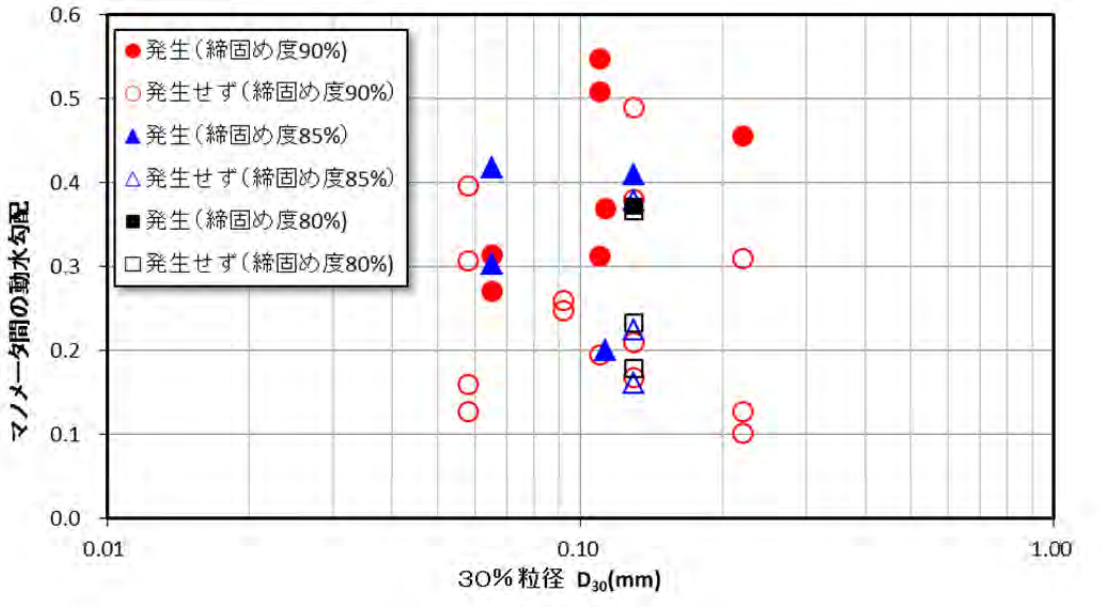



図 2.8.196　30%粒径とのり尻付近の動水勾配

（8）10%粒径とのり尻付近の動水勾配

10%粒径が、0.08 ㎜以上の材料で崩壊が確認された。10%粒径とのり尻付近の動水勾配の関係は不明瞭であった。

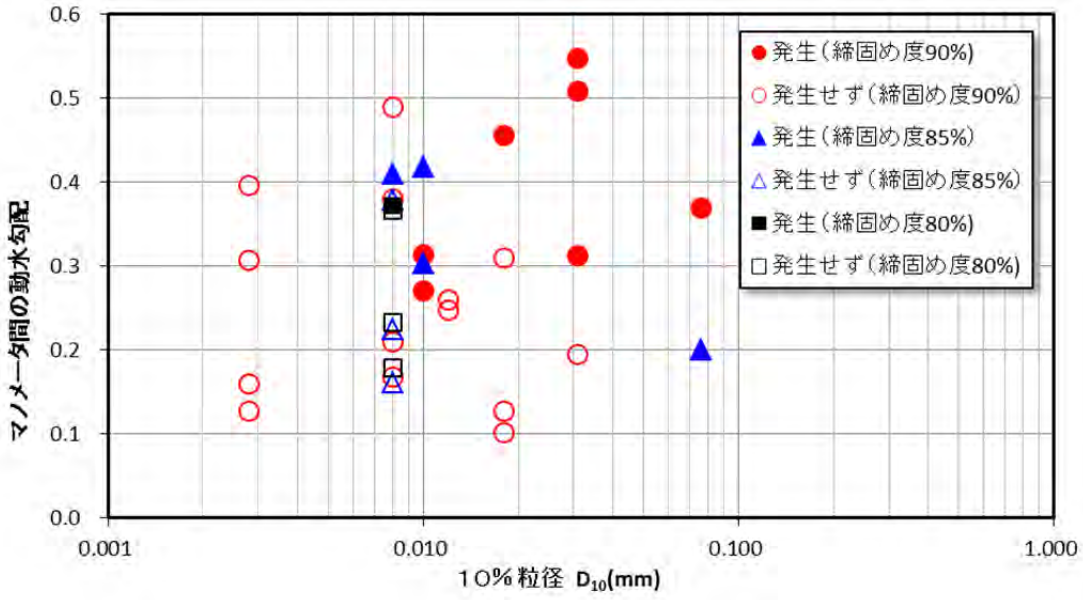
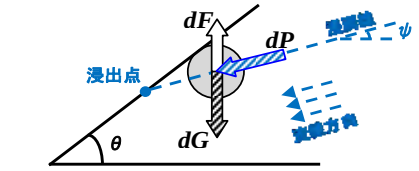



図 2.8.197　10%粒径とのり尻付近の動水勾配

### 2.8.12 既往文献との比較

既往文献において、浸透水流による盛土裏法面の局部破壊について、限界動水勾配で提案されている式[1]との比較を行った。

赤井[1]によるとのり面の浸出点における限界動水勾配 $i_c^*$は、以下で表される。




***dG:*** 自重
***dF:*** 浮力
***dP:*** 浸透水圧
***ϕ:*** 内部摩擦角

浸出点での単一粒子のつり合い　$dP+dG\cdot\sin\psi \leqq (dG-dF)\cos\psi\tan\phi$
（起動力 ／ 抵抗力）

式を展開し、起動力と抵抗力が等しくなり粒子が動き出す場合の限界動水勾配を求めると次のとおり

$$i_c^* = \frac{4}{3}c\,\frac{\gamma'}{\gamma_w}\cos\theta\,(\tan\phi-\tan\theta)$$

$i_c^*$: 限界動水勾配
$c$: 粒子の形状・間隙の大きさに関する係数
$\gamma'$: 水中単位重量
$\gamma_w$: 浸透水の単位重量

そこで、係数 c を文献と同様、c=0.6 と仮定し、のり面勾配によって内部侵食の発生の有無が分かれた CASE1～CASE4、CASE12～CASE15、CASE20～CASE23、CASE24～CASE27 について内部摩擦角（全応力および有効応力）と限界動水勾配の関係を整理した。崩壊が発生している動水勾配は、いずれも提案されている限界動水勾配を上回っており、崩壊が発生していない場合でも提案されている限界動水勾配を上回っているケースが見られることがわかる。参考文献[1]による限界導水勾配は、崩壊の発生時の動水勾配よりも低く、安全側の値を与えることがわかった。

### (1) 内部摩擦角(全応力)とのり尻付近の動水勾配

概ねのり尻付近の動水勾配は、赤井の提案式より大きく上回った値で崩壊していることが確認された。

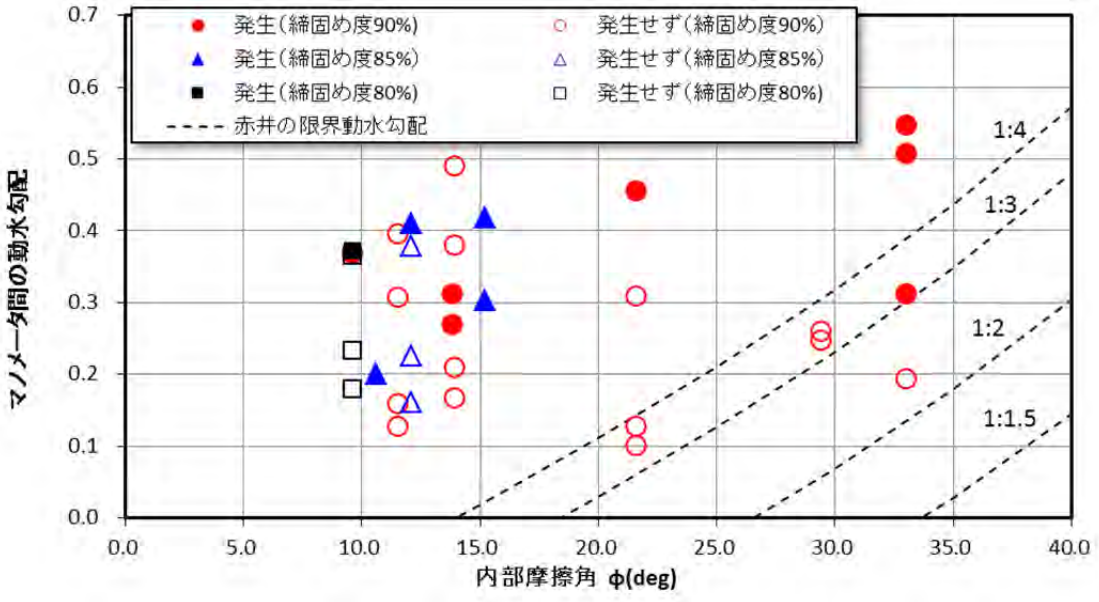



図 2.8.198　内部摩擦角(全応力)と動水勾配

### (2) 内部摩擦角(有効応力)とのり尻付近の動水勾配

内部摩擦角（有効応力）とのり尻付近の動水勾配の関係についても、内部摩擦角（全応力）と同じく赤井の提案式より上回った値で崩壊していることが確認された。

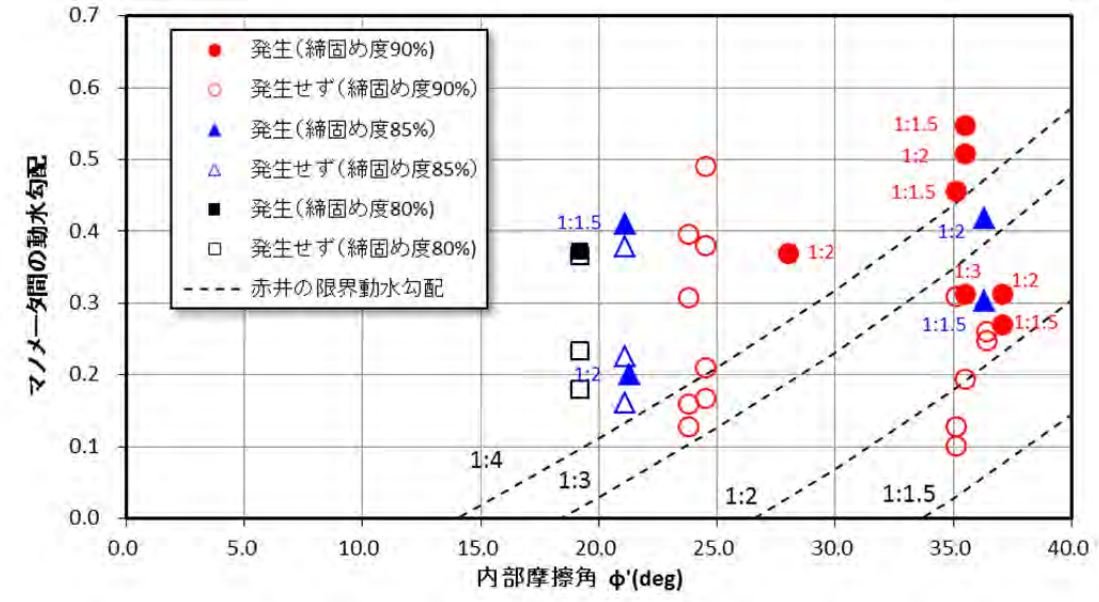



図 2.8.199　内部摩擦角(有効応力)と動水勾配

## 2.9　まとめ

中規模浸透模型実験において、堤体材料、のり面勾配、締固め度を変えた実験を行った。

実験模型の破壊状況について、三次元レーザースキャナによる計測の結果、崩壊はのり面下部の比較的浅い崩壊から始まり，その後、崩壊部（滑落崖）の高さを増しつつ、徐々にのり面上方へ進展していく挙動が確認された。

堤体材料の違いでは，概ねの傾向として 60%、50%、30%粒径が細かい材料では低い動水勾配で破壊が発生し，粒径が粗くなるにつれて、破壊が発生するにはより高い動水勾配が必要なった。

のり面勾配の違いでは、急勾配の方が、破壊が発生しやすい傾向となり、のり面勾配 4 割の模型では、崩壊が確認されなかった。

締固め度の違いでは、締固め度が低いほど、低い動水勾配で崩壊が発生しやすい傾向であった。

のり尻付近の粒度分析結果から、崩壊の発生の有無と細粒分含有率の変化の関係性は確認されず、締固め度の高いほどシルト分含有率の変化が確認された。

赤井の提案される式による限界動水勾配は、本実験の破壊発生時の動水勾配よりも低く、安全側の値を与える結果となった。

なお、本実験で崩壊が発生したケースは、壁沿いで発生することが見られ、壁面を伝う局部的な流れの影響を受けた恐れがある。このため、3 章で述べる小規模浸透模型実験では、壁面の影響を極力なくした実験を行った。

# ３.小規模浸透模型実験

## 3.1　実験目的

河川堤防ののり尻付近から進行する破壊の発生の有無について、堤体材料の影響を主に確認するため、小規模浸透模型実験を行った。

## 3.2　予備実験概要

中規模模型実験では、全 27 ケースのうち 6 ケースで浸透破壊が発生したが、その発生位置は多くが壁沿いに限定されており、大規模な崩壊に至ったケースはごく限られていた。また、基盤材料についてもロームに限定しており、基盤材料の浸透破壊への影響は不明であった。

そこで、過去に土木研究所が行った模型実験で大規模な崩壊を生じた模型材料（山砂）[4,5,6] を用いて、壁際の止水方法や基盤の土質の影響を確認することを目的に予備実験を行ったうえで、堤体材料を変化させた本実験を行った。

### 3.3　実験装置（予備実験）

実験は幅 1.5m×長さ 3.0m×高さ 1.0m の鋼製の土槽を作製し、これを用いて盛土実験施設において実施することとした。また、計測器による計測は水頭を計測するマノメータ及び排水量計測のための流量計の 2 種としたが、CASE8 では、のり尻の水平変位の進行を観測するため、上空から一定時間間隔で写真撮影を行った。

図 3.3.1　実験状況

図 3.3.2　実験土槽

## 3.4　実験模型と実験ケース（予備実験）

予備実験の実施のフローを**図 3.4.1** に示す。

予備実験では、壁際の止水方法、基盤材料の影響に加え、天端の有無、模型の高さの影響を確認することとした。

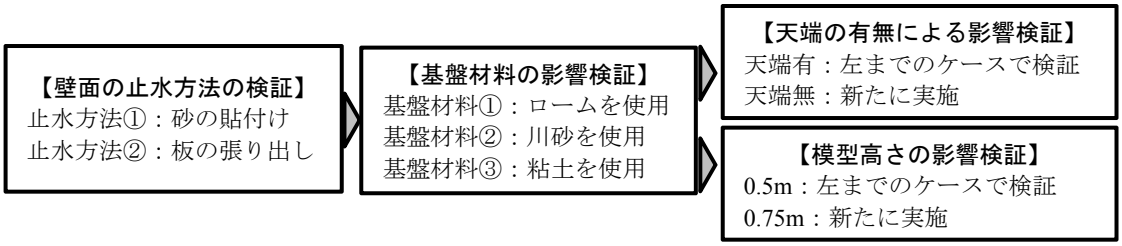



**図 3.4.1　予備実験による検証の流れ**

予備実験の緒元を**表 3.4.1** に整理するとともに、模型形状を**図 3.4.4**、**図 3.4.5** に示した。なお、いずれのケースにおいてものり勾配は 1:2 とするとともに、Dc=90%となるように締固めた。壁沿いの止水方法の写真を**図 3.4.2** に示す。壁沿いの水の流れを阻害することを目的に、２種の方法（①材料を予め壁面に貼付ける。②壁面から板を 10cm 程度張り出す。）を施した上で材料の盛り立てを行なった。

**表 3.4.1　予備実験の確認事項・模型形状などの緒元**

| | 壁沿いの止水方法 | 天端の有無 | 基盤材料 | 模型高さ | 堤体材料 |
|---|---|---|---|---|---|
| CASE1 | 砂の貼付け | 有り | ローム | 0.5m | 山砂 |
| CASE2 | 板の張り出し | 有り | ローム | 0.5m | 山砂 |
| CASE3 | 板の張り出し | 無し | 川砂 | 0.5m | 山砂 |
| CASE4 | 板の張り出し | 無し | 粘性土 | 0.5m | 山砂 |
| CASE5 | 板の張り出し | 無し | ローム | 0.5m | 山砂 |
| CASE6 | 板の張り出し | 無し | 川砂 | 0.5m | 山砂＋礫 |
| CASE7 | 板の張り出し | 無し | 川砂 | 0.75m | 山砂＋礫 |
| CASE8 | 板の張り出し | 無し | 川砂 | 0.5m | 山砂 |

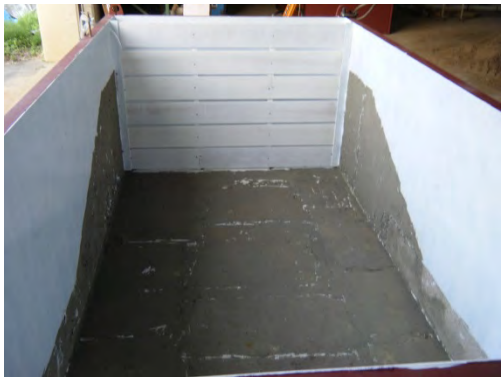


**図 3.4.2　壁沿いの止水(砂の貼付け)**

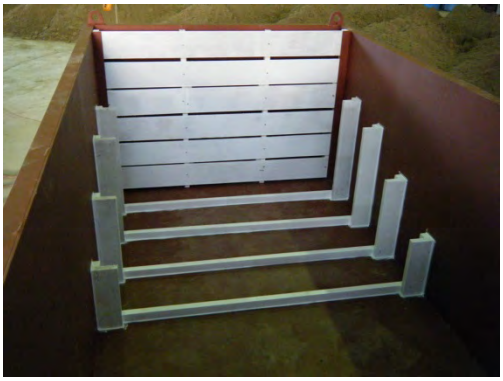
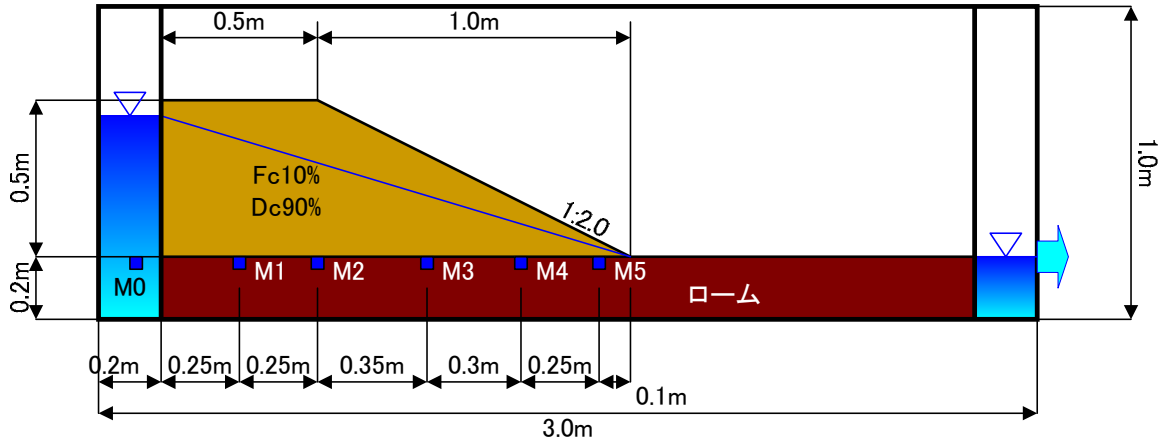
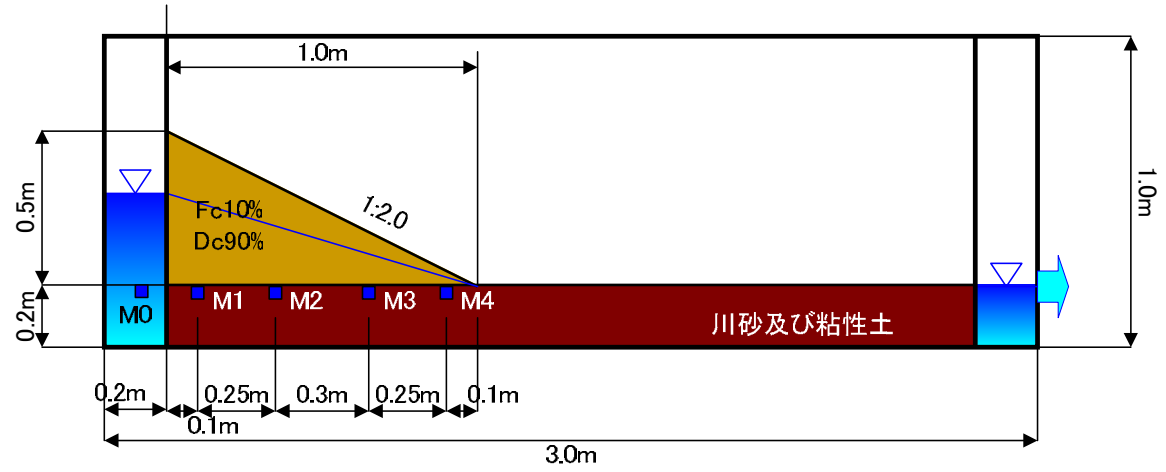


**図 3.4.3　壁沿いの止水(板の張り出し)**

(1) 予備実験　CASE1・CASE2




(2) 予備実験　CASE3・CASE4




(3) 予備実験　CASE5

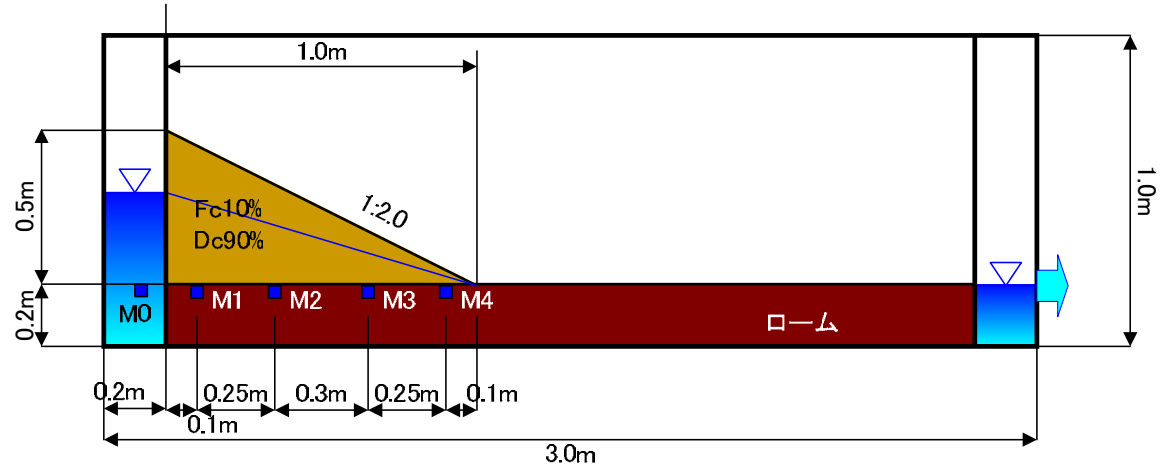
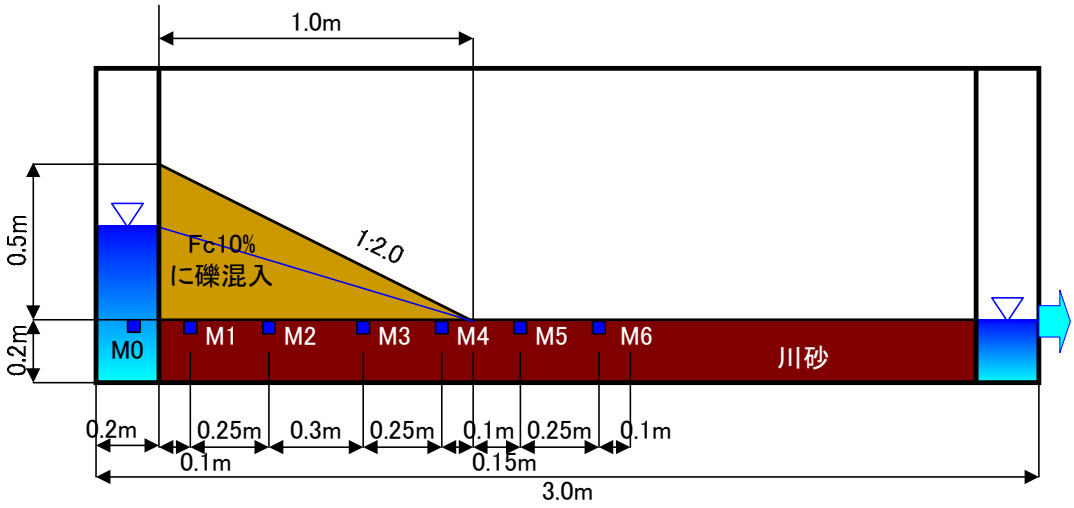
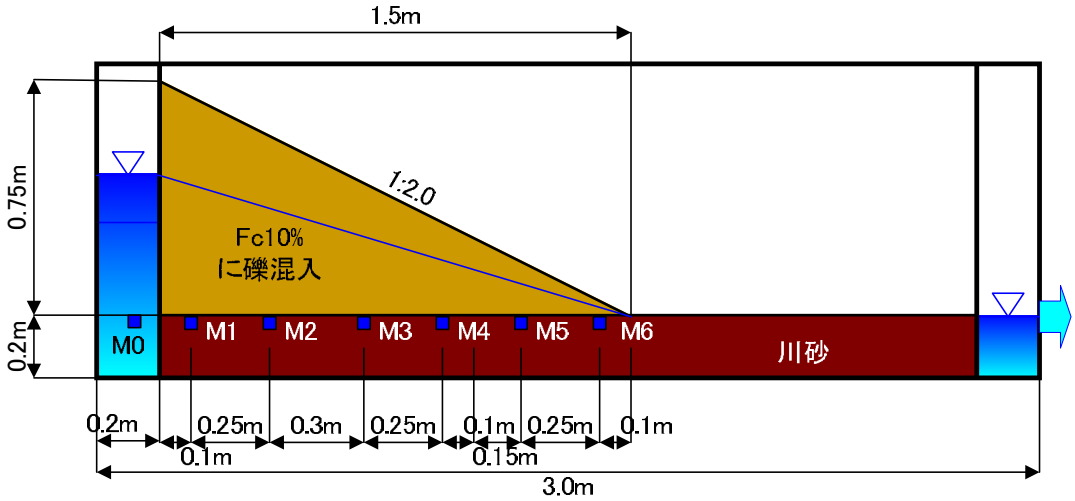



図 3.4.4　予備実験を行った模型形状(その１)

(4) 予備実験　CASE6




(5) 予備実験　CASE7




(6) 予備実験　CASE8

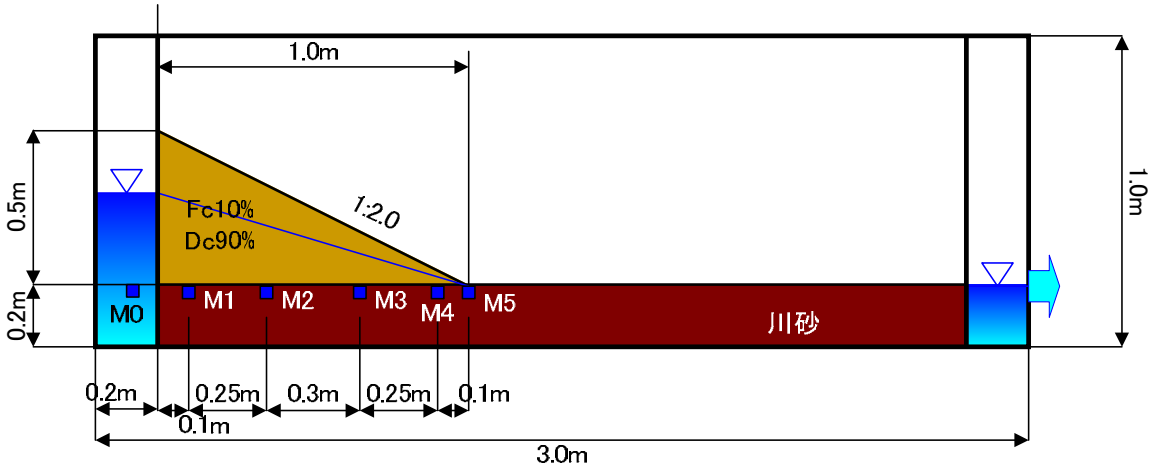



図 3.4.5　予備実験を行った模型形状(その 2)

### 3.5　計測方法（予備実験）

実験にあたっては、**図 3.4.4**、**図 3.4.5** に示す位置にマノメータ（基盤上面より-4cm）を設置して計測を行うとともに、CASE8 では模型正面より模型の状況（亀裂の発達等）を 5 分間隔で撮影した。

## 3.6　実験材料（予備実験）

予備実験で使用した模型材料の粒径加積曲線を**図 3.6.1** に示すとともに、各材料の特性を**表 3.6.1** に整理した。

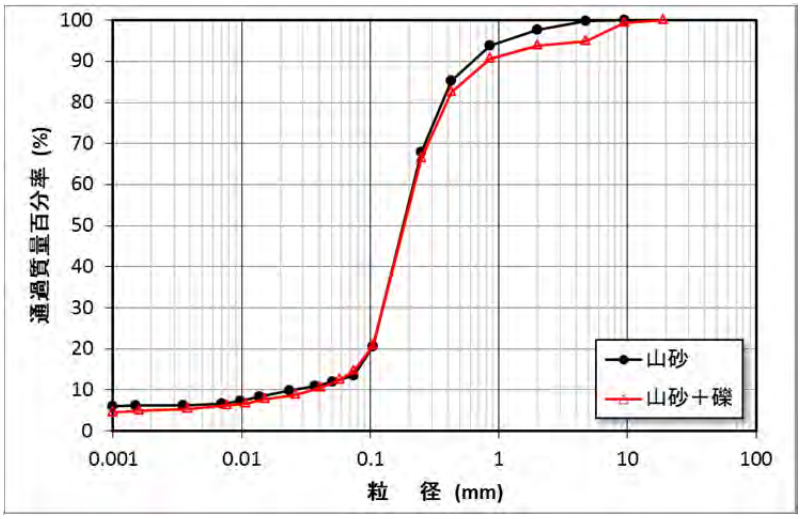



**図 3.6.1　予備実験で使用した模型材料の粒径加積曲線**

**表 3.6.1　予備実験で使用した材料の土質特性一覧**

| | | 山砂 | 山砂+礫 |
|---|---|---|---|
| 材料の物理・締固め特性 | 土粒子の密度　$\rho_s$　(g/cm$^3$) | 2.702 | 2.704 |
| | 自然含水比　$W_n$(%) | 15.5 | 9.4 |
| | 礫分　(%) | 2.3 | 6.2 |
| | 砂分　(%) | 84.2 | 79.1 |
| | シルト分　(%) | 11.2 | 10.6 |
| | 粘土分　(%) | 2.3 | 4.1 |
| | 10%粒径 $D_{10}$　(mm) | 0.0237 | 0.03050 |
| | 50%粒径 $D_{50}$　(mm) | 0.18 | 0.18 |
| | 均等係数　$U_c$ | 9.3 | 6.6 |
| | 最大乾燥密度　$\rho_{dmax}$　(g/cm$^3$) | 1.746 | 1.786 |
| | 最適含水比　$W_{opt}$　(%) | 16.7 | 14.1 |

### 3.7　実験方法（予備実験）

堤体模型は、一層の仕上り厚さを 10cm として締固め度 90%を目標に締固めて作製した。模型作製後、基礎地盤表面まで十分な時間を掛けて(2 日間以上)飽和したうえで実験を行った。

また、給水槽への水の供給は、30 分間で所定の水位（模型高さの 7 割を目安とした）となるように制御した。

実験模型は以下の工程で作製した。

① 基礎地盤は調整された材料を用い、厚さ 20cm となるよう 2 層分けて締固めて敷設した。(図 3.7.1)

② 堤体は調整された模型材料を用い、一層の仕上り厚 10cm として、模型高さまで盛り立て模型を作製した。このとき、模型の締固め度は 90%となるように締固めを行った。なお、締固め度の確認のため各層 2 箇所（計 14 箇所／1 模型）で湿潤密度を測定し、締固め度を満足することを確認した。(図 3.7.1)

③ 盛り立て作業と並行して、図 3.4.4、図 3.4.5 に示す位置に、マノメータ（6 箇所／1 模型）を設置。(図 3.7.3)

図 3.7.1　基盤地盤の作製

図 3.7.2　堤体地盤の作製

図 3.7.3　計測機器の設置

## 3.8　予備実験結果

### 3.8.1　CASE1 の破壊進行状況

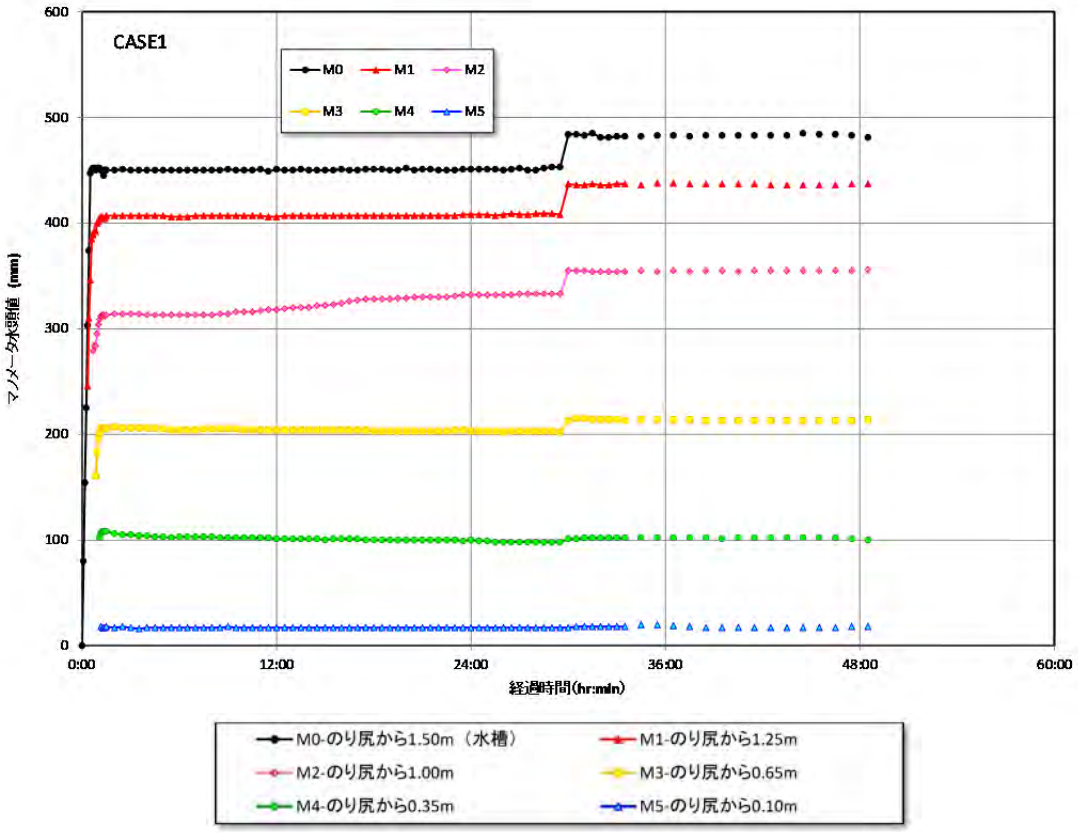



図 3.8.1　水頭の経時変化(CASE1)

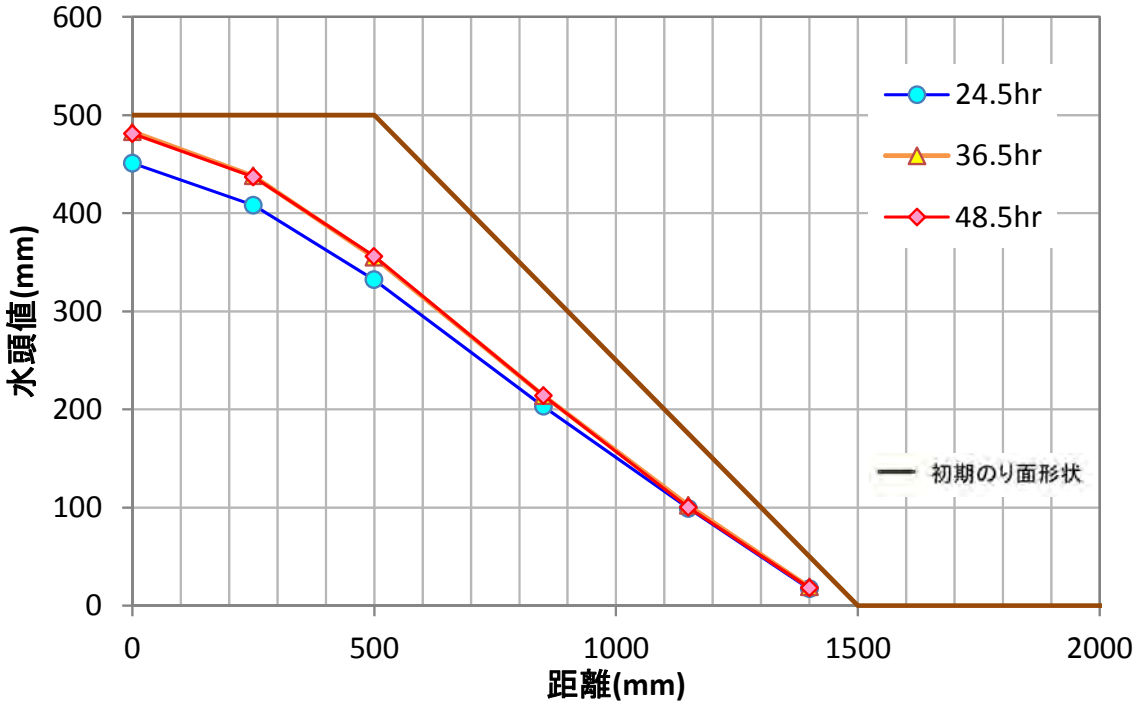



図 3.8.2　水頭分布の経時変化(CASE1)

図 3.8.3　のり尻の状況（24.5hr 後）

図 3.8.4　のり尻の状況（36.5hr 後）

図 3.8.5　のり尻の状況（48.5hr 後）

### 3.8.2　CASE2 の破壊進行状況

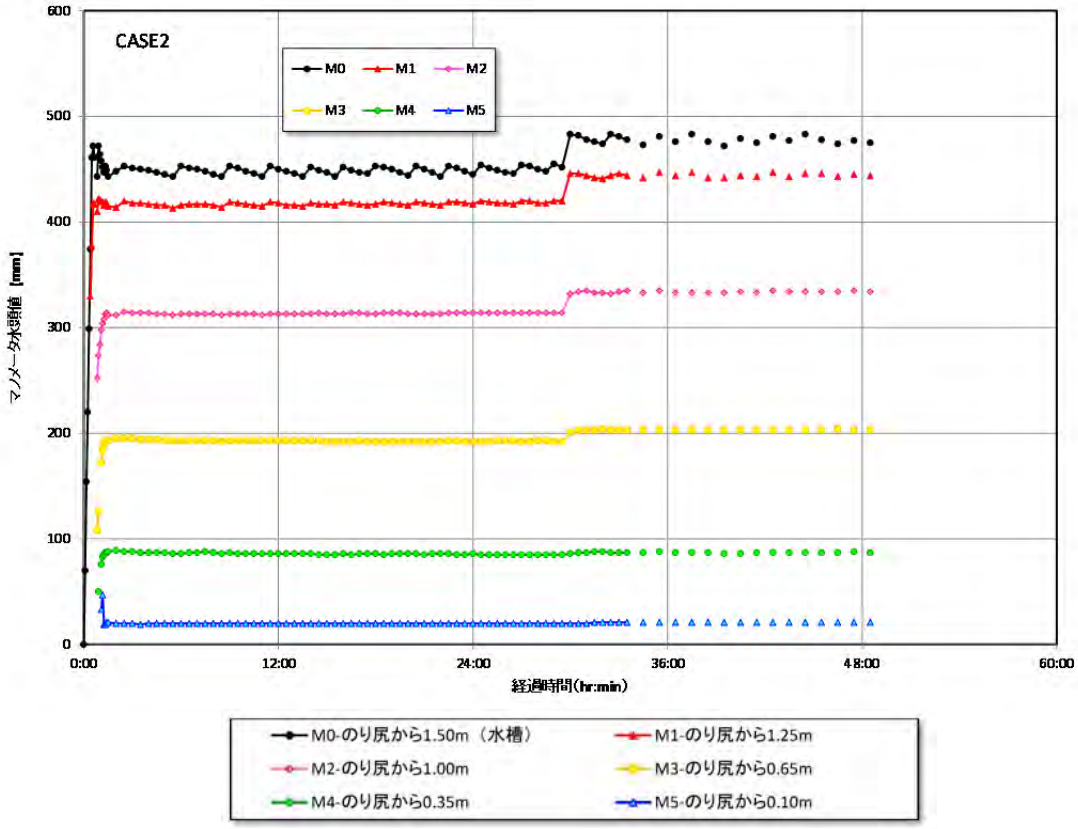



図 3.8.6　水頭の経時変化(CASE2)

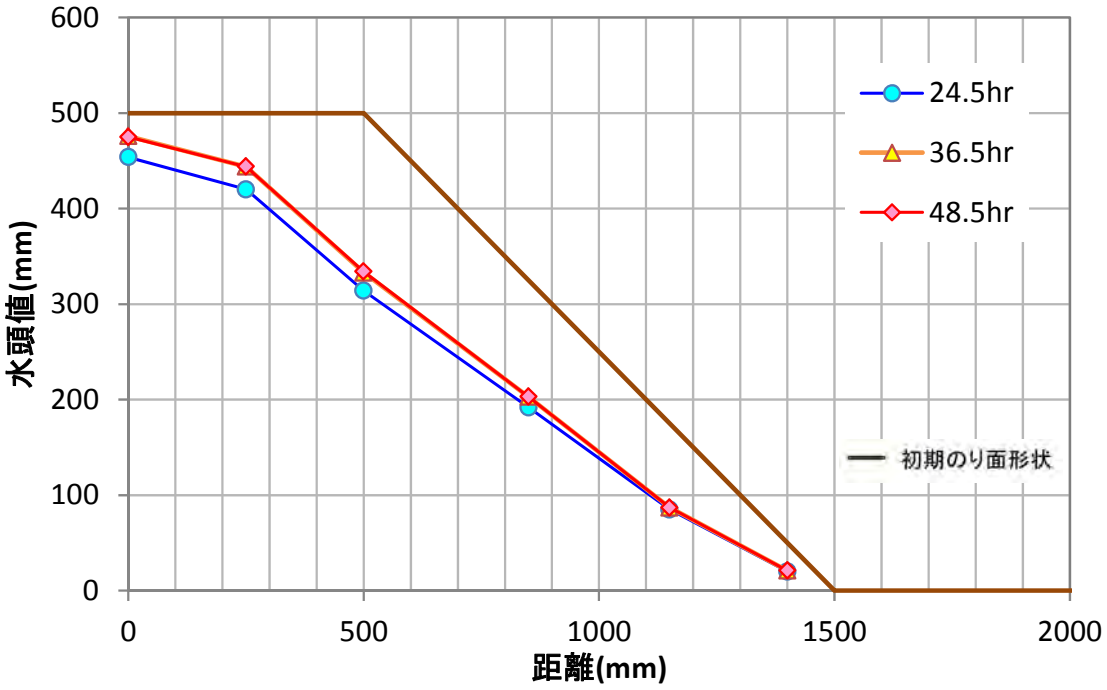



図 3.8.7　水頭分布の経時変化(CASE2)

図 3.8.8　のり尻の状況（24.5hr 後）

図 3.8.9　のり尻の状況（36.5hr 後）

図 3.8.10　のり尻の状況（48.5hr 後）

### 3.8.3　CASE3 の破壊進行状況

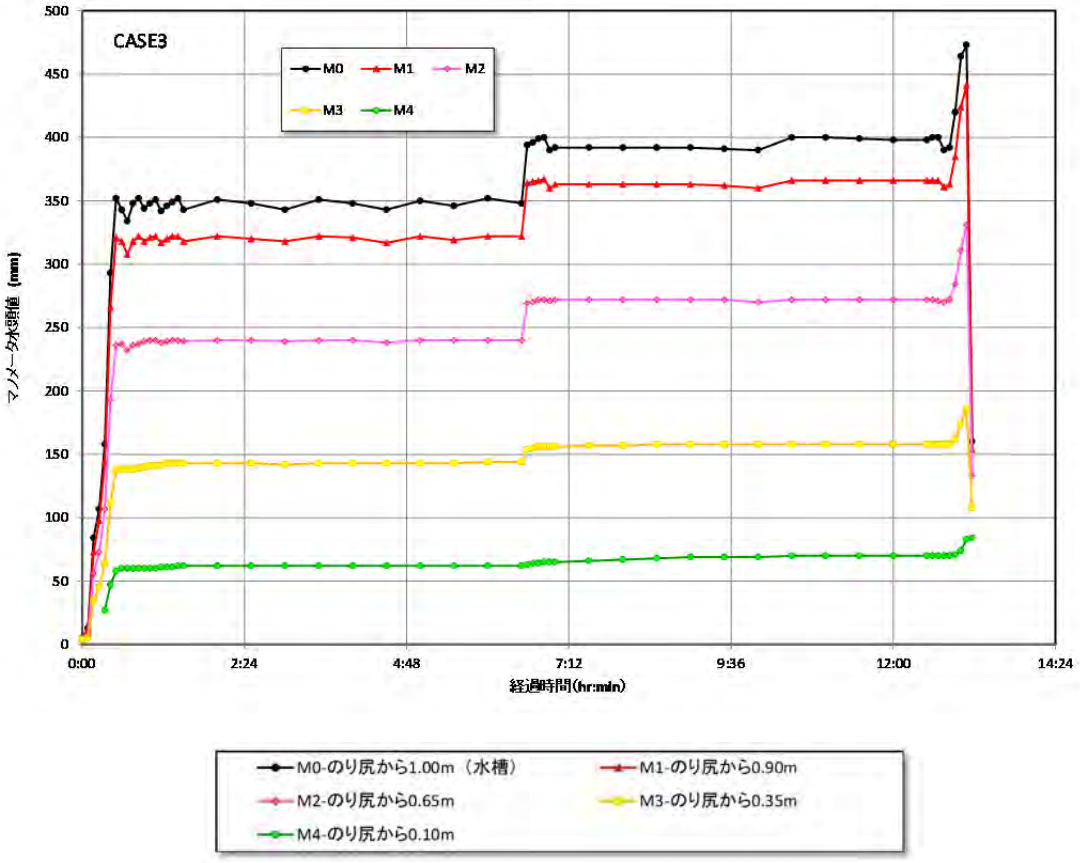



図 3.8.11　水頭の経時変化(CASE3)

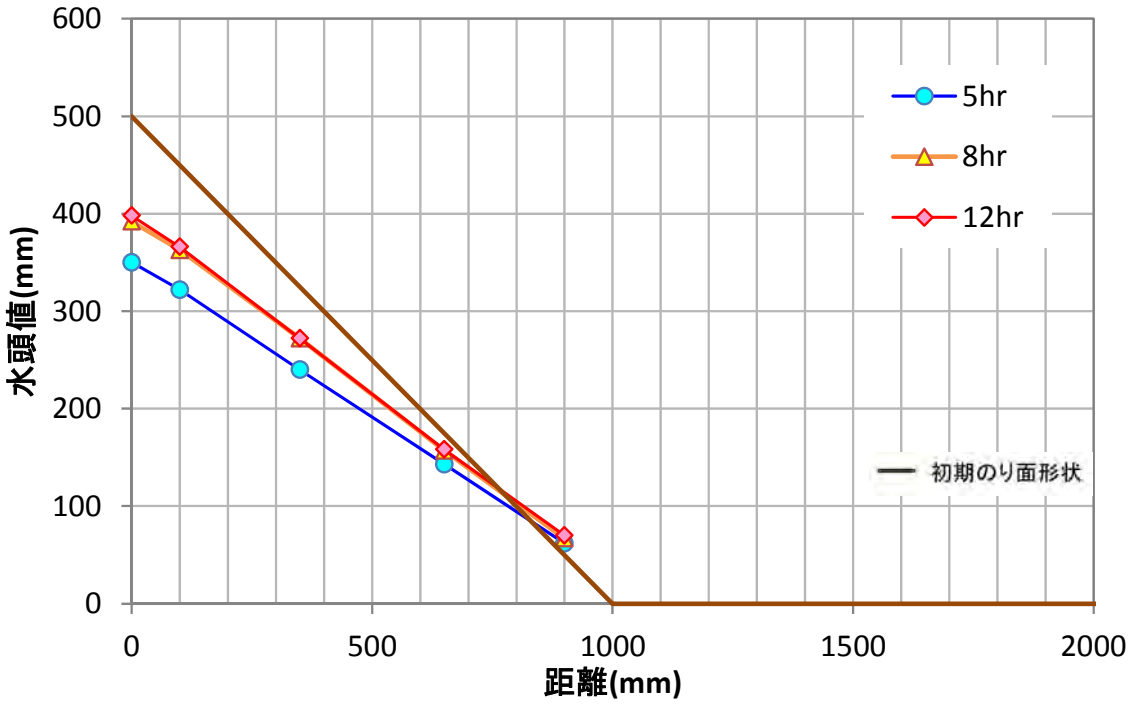



図 3.8.12　水頭分布の経時変化(CASE3)

図 3.8.13　のり尻の状況（5hr 後）

図 3.8.14　のり尻の状況（8hr 後）

図 3.8.15　のり尻の状況（12hr 後）

### 3.8.4　CASE4 の破壊進行状況

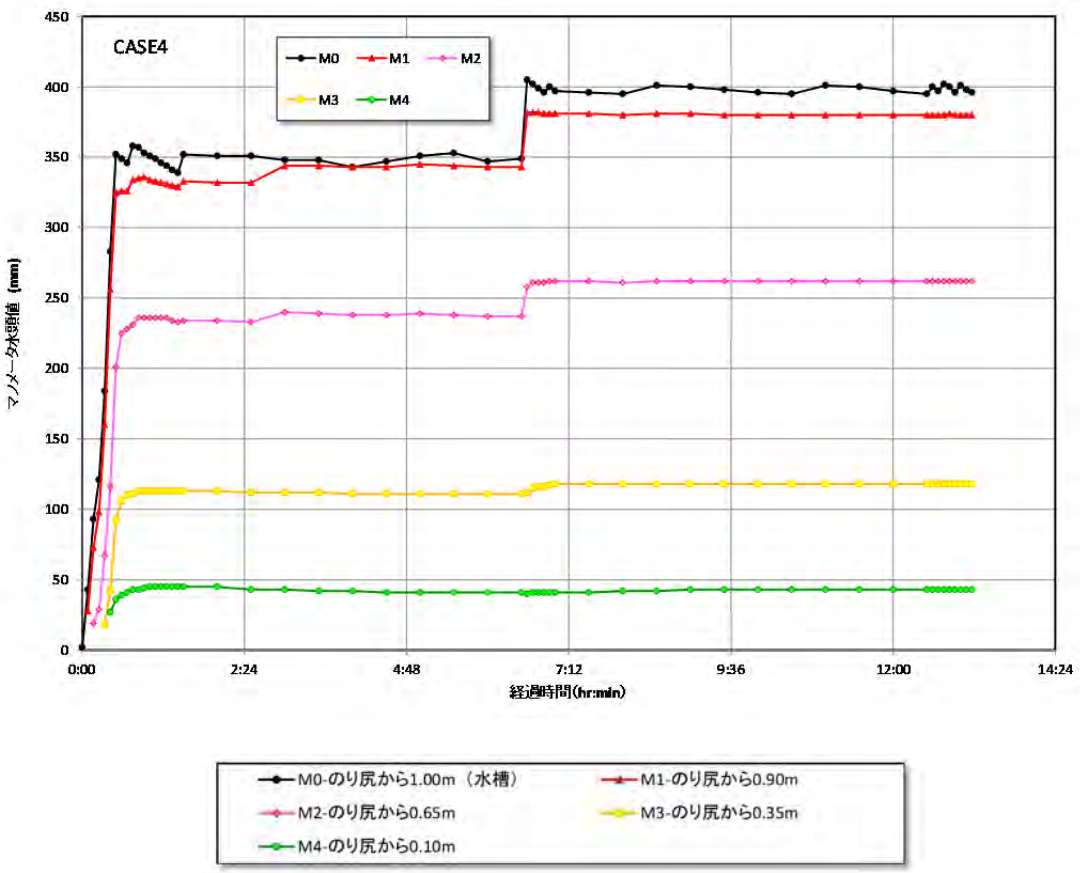



図 3.8.16　水頭の経時変化(CASE4)

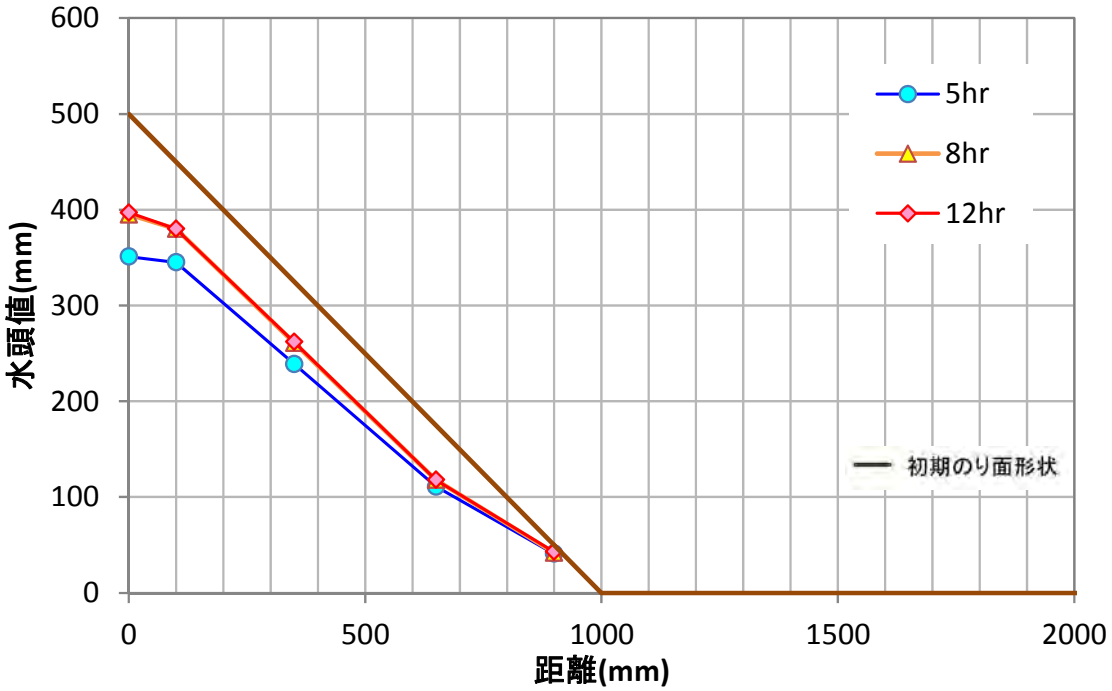



図 3.8.17　水頭分布の経時変化(CASE4)

図 3.8.18　のり尻の状況（5hr 後）

図 3.8.19　のり尻の状況（8hr 後）

図 3.8.20　のり尻の状況（12hr 後）

### 3.8.5　CASE5 の破壊進行状況

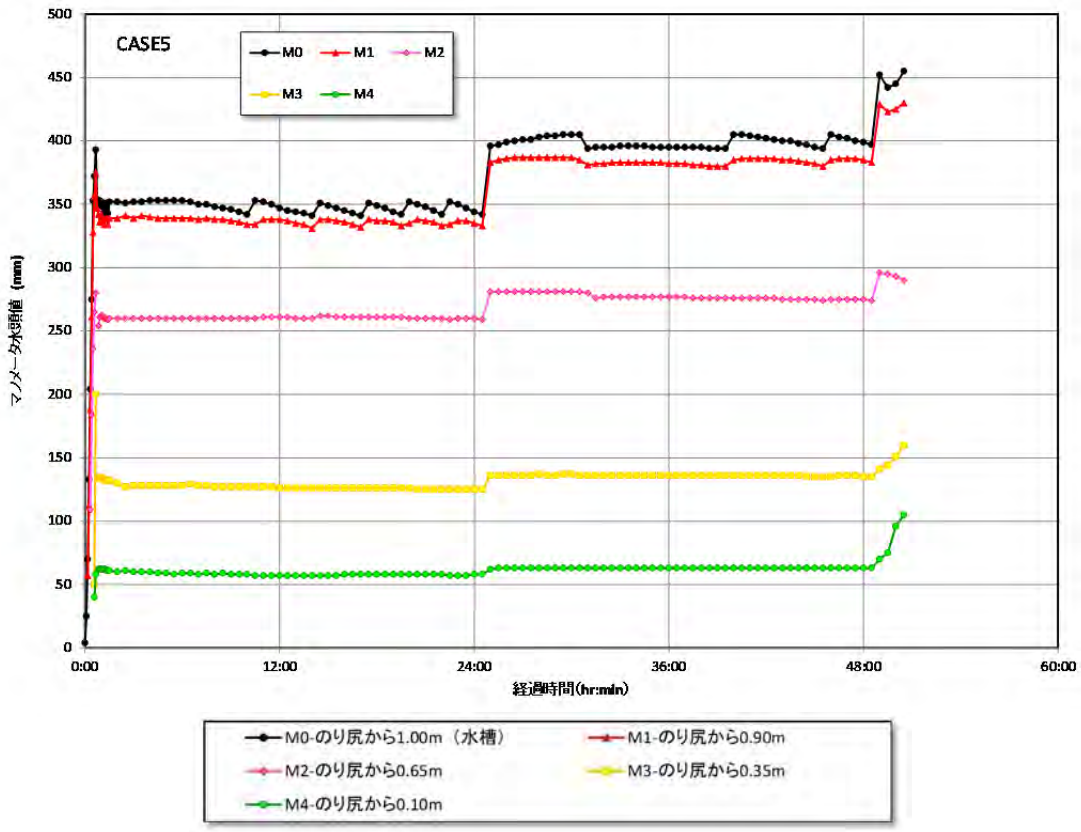



図 3.8.21　水頭の経時変化(CASE5)

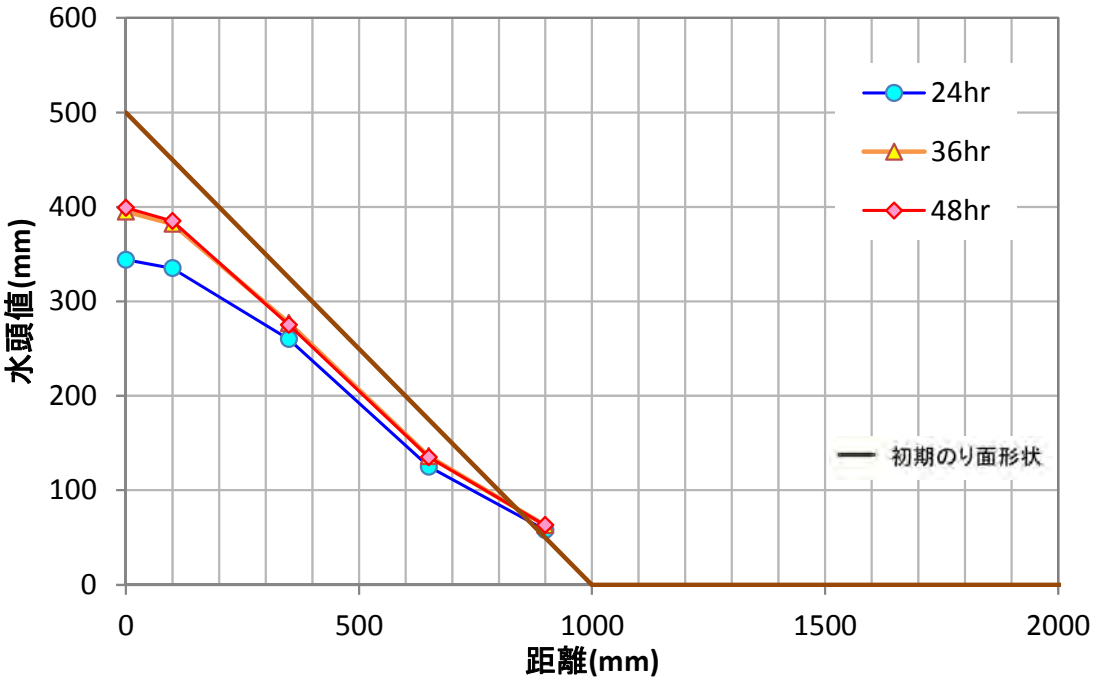



図 3.8.22　水頭分布の経時変化(CASE5)

図 3.8.23　のり尻の状況（24hr 後）

図 3.8.24　のり尻の状況（36hr 後）

図 3.8.25　のり尻の状況（48hr 後）

### 3.8.6　CASE6 の破壊進行状況

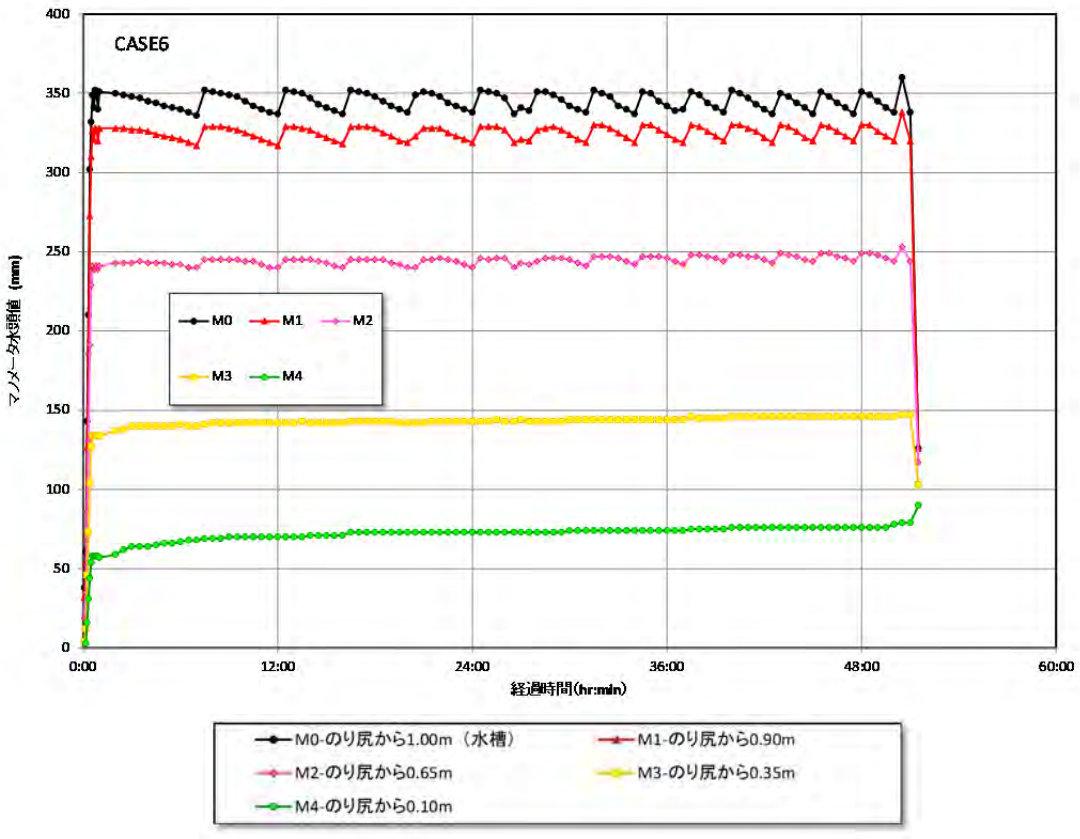



図 3.8.26　水頭の経時変化(CASE6)

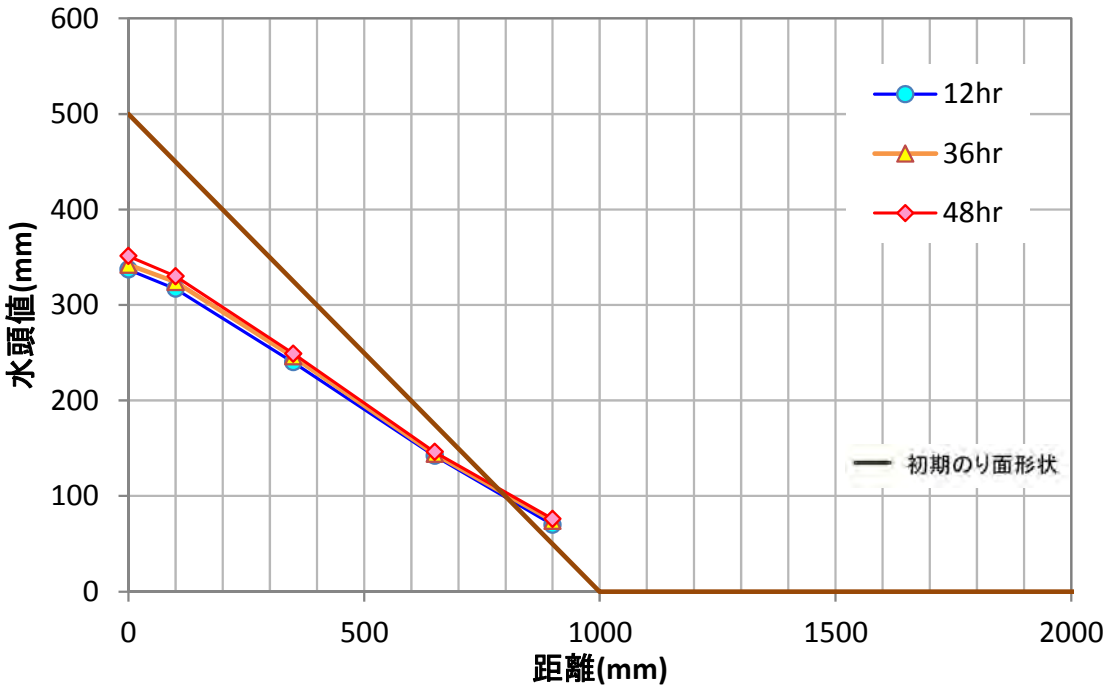



図 3.8.27　水頭分布の経時変化(CASE6)

図 3.8.28　のり尻の状況（12hr 後）

図 3.8.29　のり尻の状況（36hr 後）

図 3.8.30　のり尻の状況（48hr 後）

### 3.8.7　CASE7 の破壊進行状況

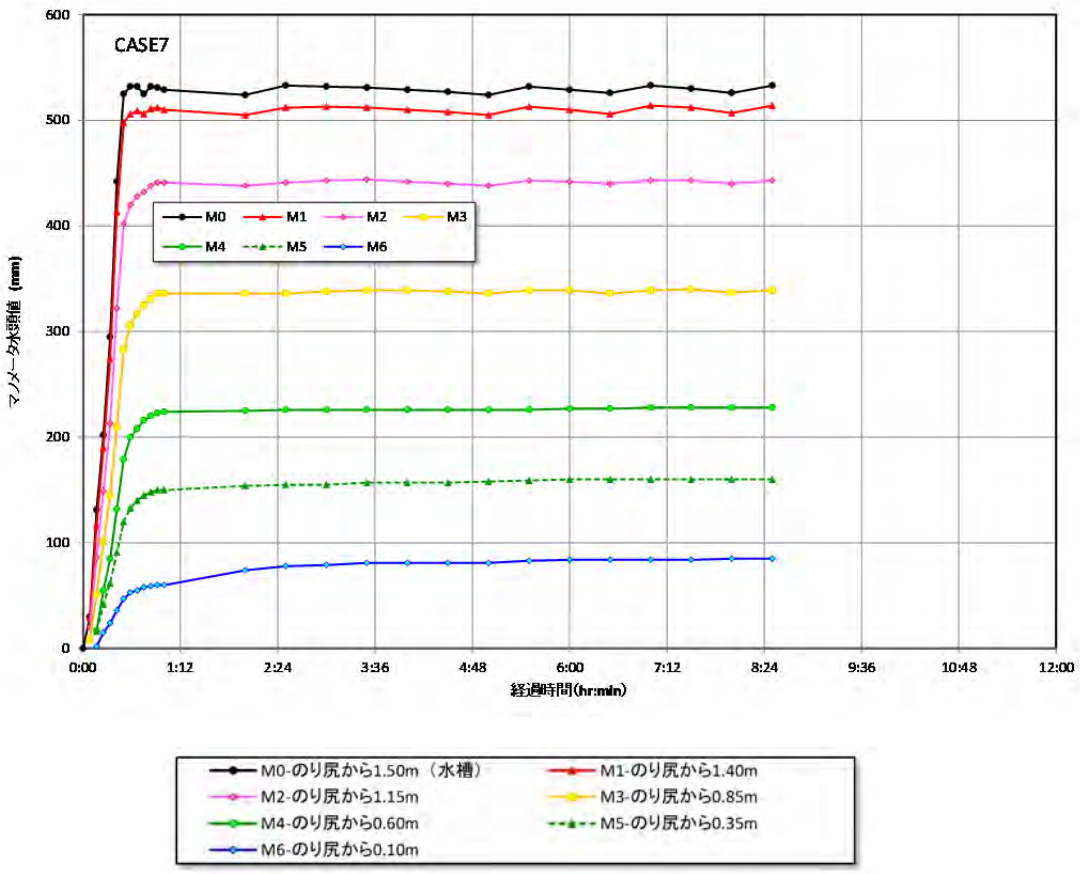



図 3.8.31　水頭の経時変化(CASE7)

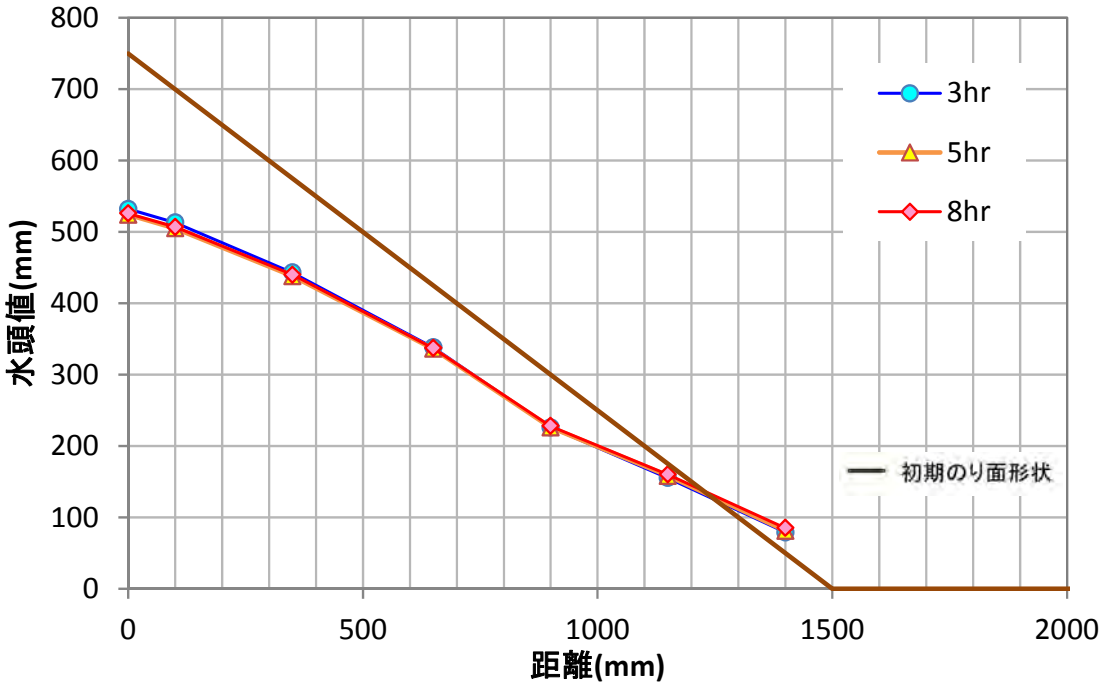



図 3.8.32　水頭分布の経時変化(CASE7)

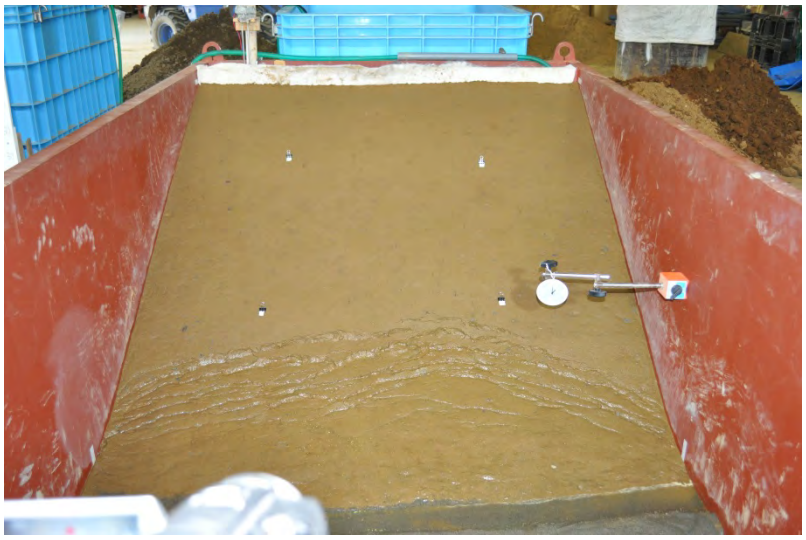


図 3.8.33　のり尻の状況（3hr 後）

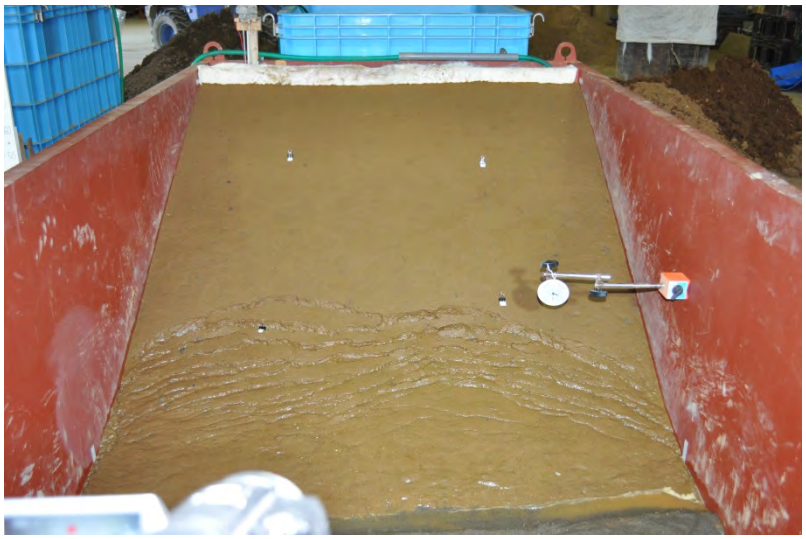


図 3.8.34　のり尻の状況（5hr 後）

図 3.8.35　のり尻の状況（8hr 後）

### 3.8.8　CASE8 の破壊進行状況

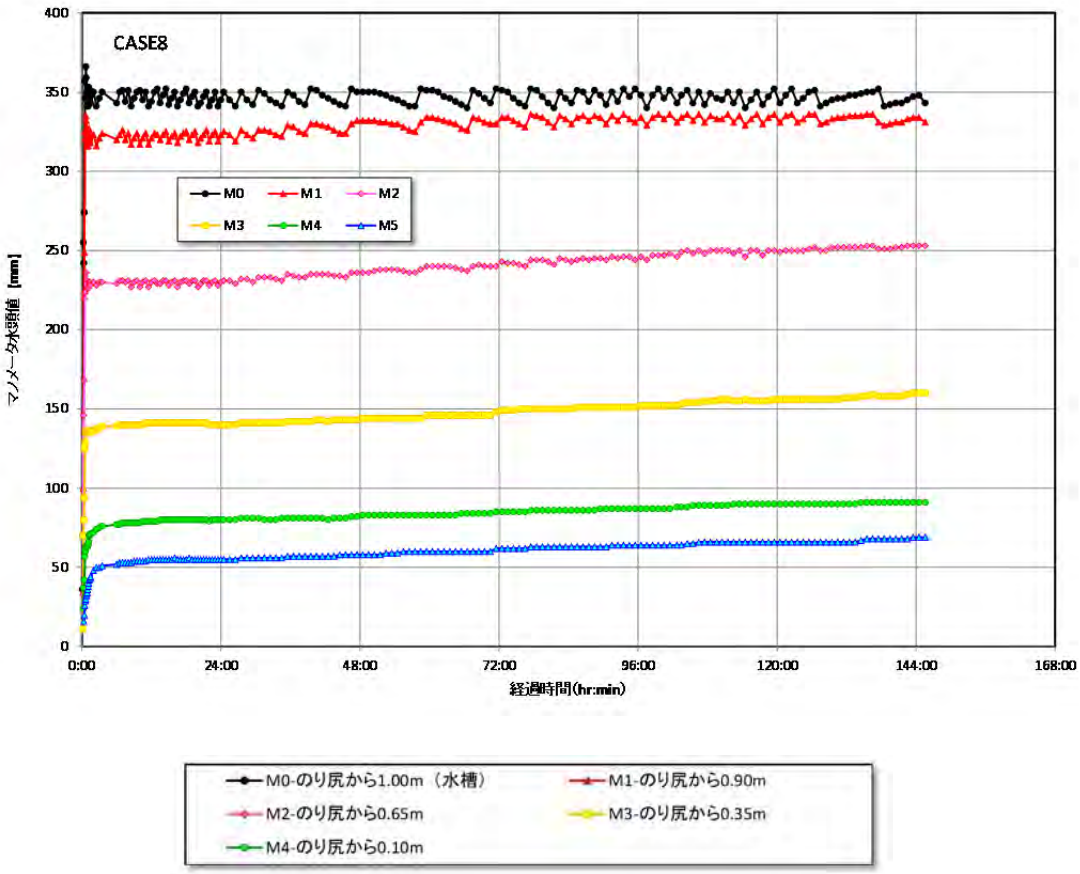



図 3.8.36　水頭の経時変化(CASE8

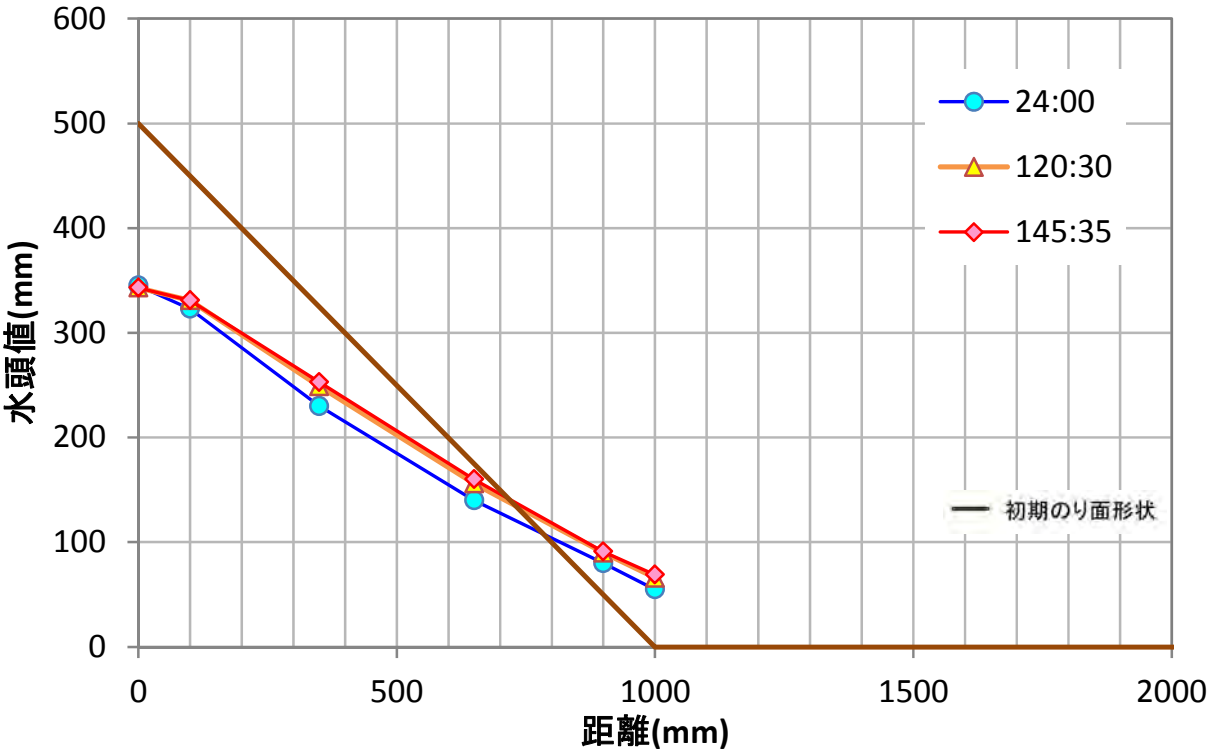



図 3.8.37　水頭分布の経時変化(CASE8)

図 3.8.38　のり尻の状況（24hr 後）

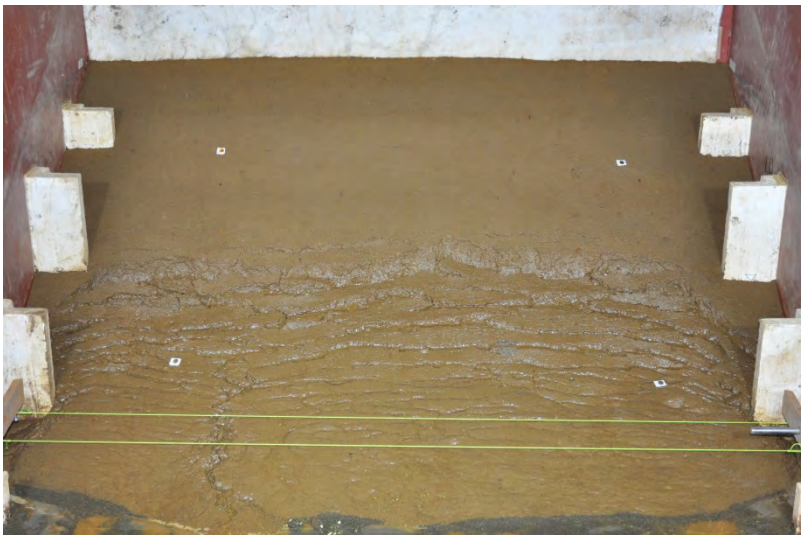


図 3.8.39　のり尻の状況（120hr 後）

図 3.8.40　のり尻の状況（145.5hr 後）

### 3.8.9　確認事項の整理

以下、前述した予備実験の確認事項について検討する。

**(1) 止水方法の違いによる水頭値への影響**

予備実験の CASE1（砂貼付けによる壁沿い止水）及び CASE2（板張り出しによる壁沿い止水）によって得られる水頭の経時変化を**図 3. 8. 41** にまとめて示した。

図によると、タンク近傍の M1 を除くマノメータにおいて CASE1 の水頭が CASE2 に比べ高くなっており、また、CASE1 の M2 地点では一旦安定した水頭を示したのち徐々に上昇するような挙動を示している。このことは、CASE1 において壁沿いの止水効果が劣るため CASE2 よりも高い水頭を示したものと推定できる。

以上のことから、CASE2 で採用した板張り出しによる止水方法を実験模型に採用することとした。

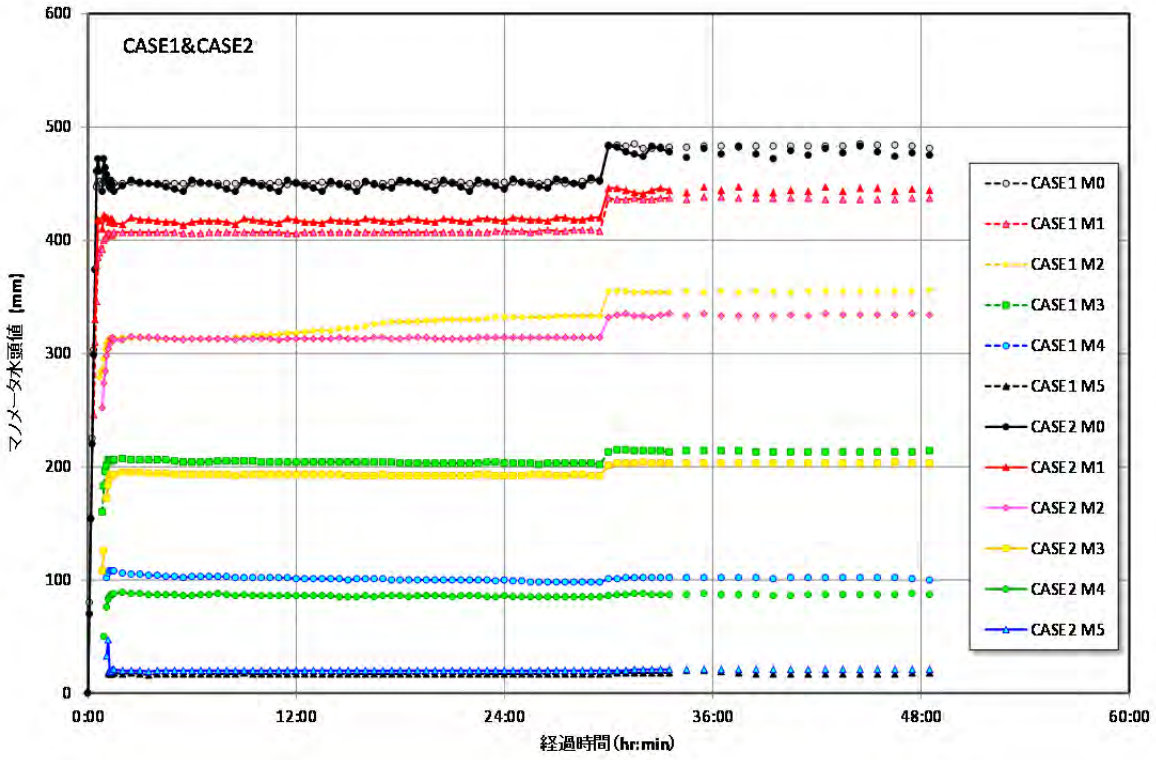



図 3.8.41　壁沿いの止水方法の違いによる水頭の差異

### (2) 基盤材料の違いによる水頭への影響

２章の中規模浸透模型実験を含め、過年度（平成 21 年度以降）に実施された模型実験では、全てのケースで基盤材料にロームが用いられていたものの、基盤材料の違いによる浸透破壊発生の差異などは確認されていなかった。そこで、基盤材料をローム、粘性土、川砂の３種類に変えた場合の水頭の違いについて検証した。

３種類の基盤材料を用いたのり尻付近（のり尻から 10cm の位置）の水頭の経時変化は図 3.8.42 に示すとおりであり、基盤が粘性土である場合の水頭値が最も低く、ロームと川砂がほぼ等しい水頭値で安定していることがわかる。これは各材料の透水性の違いによるものであると考えられる。さらに、水頭値が安定するまでの時間は、川砂が 35 分、ロームが 50 分、粘性土が 1 時間と小規模な模型ながら明瞭な差異が見られる。

以上のことから、基盤材料としては高い水頭値が短時間で発生する川砂を基盤材料として採用することとした。

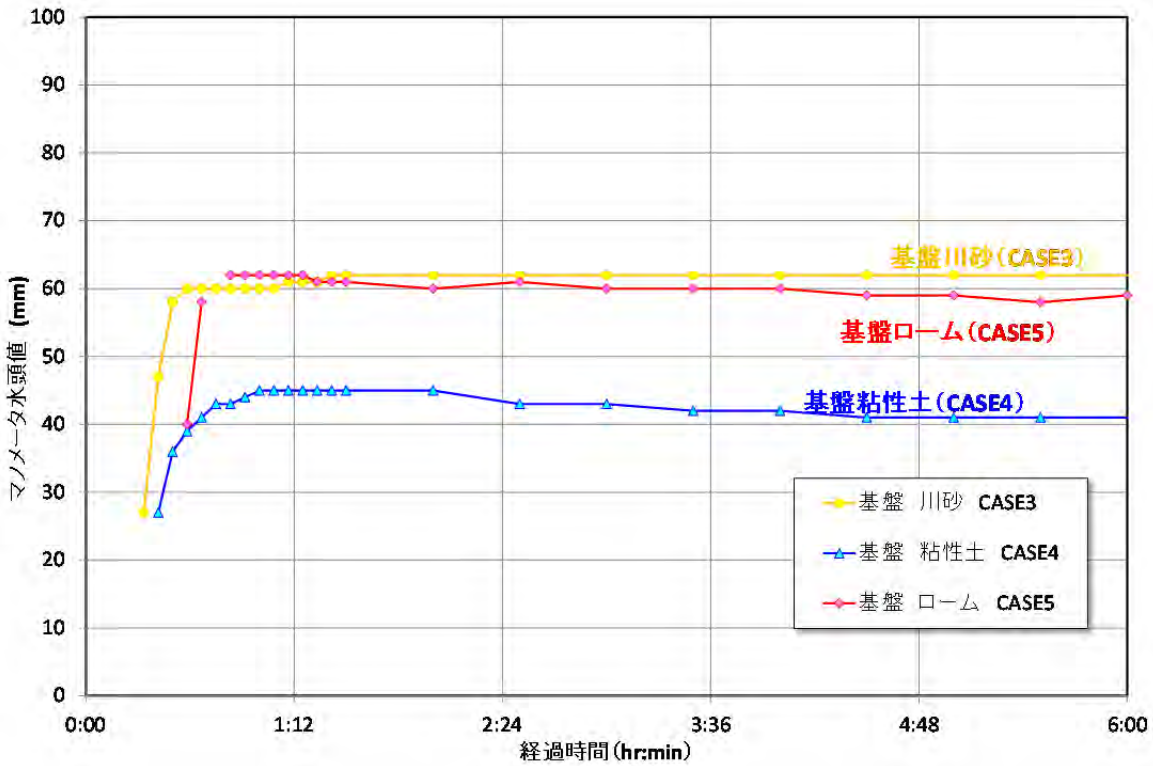



図 3.8.42　基盤材料の違いによるのり尻付近の水頭の差異

### (3) 天端の有無による水頭への影響

模型堤防に天端の有るケース（CASE2）ののり肩の水頭とのり尻の水頭の差と天端の無いケース（CASE5）のタンク水位とのり尻の水頭の差を**図 3.8.43** に示した。

図によると、天端の無い CASE5 では給水槽の水位変動の影響を受けてはいるものの、高い水位を結ぶと概ね天端がある CASE2 と同等の水頭差であることがわかる。なお、CASE5 の水頭が一定時間を経て断続的な挙動をしているのは、水位を一定に保つ機械（フロートレス装置）によって、タンク内に断続的に水が供給されることによるものである。

タンク内の水位さえのり肩に発生する水位と同等の水位を与えれば、のり尻に発生する水頭に極端な差異が生じないことを意味しており、“天端無しの模型”で実験しても“天端がある模型”と同等の結果が得られるものと考えられる。

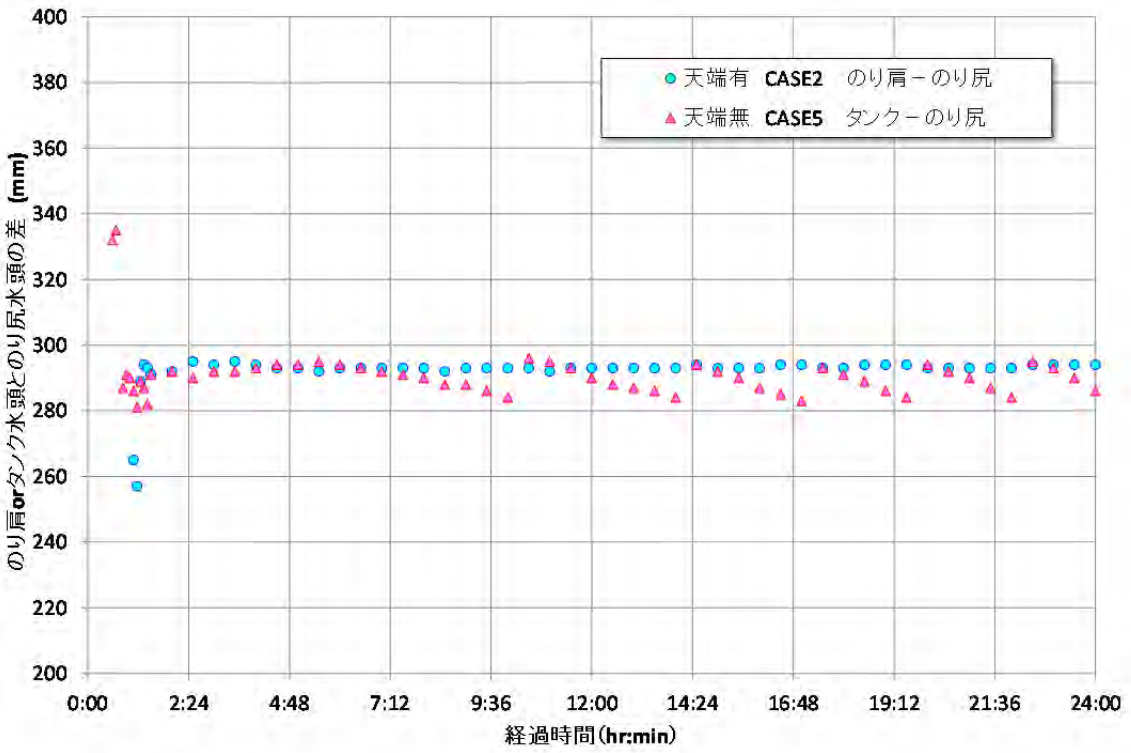



図 3.8.43　天端の有無によるのり面間の水頭差の比較

(4) 模型の高さによる水頭への影響

模型高さを 0.5m（CASE6）、0.75m（CASE7）とした場合ののり尻付近（のり尻から 10cm の位置）における水頭の経時変化を**図 3. 8. 44** に示す。

破壊まで（CASE6：1:01，CASE7：0:41）の経過や水頭値によると両 CASE はほぼ同様な挙動を示したため、本実験では 0.75m を採用した。

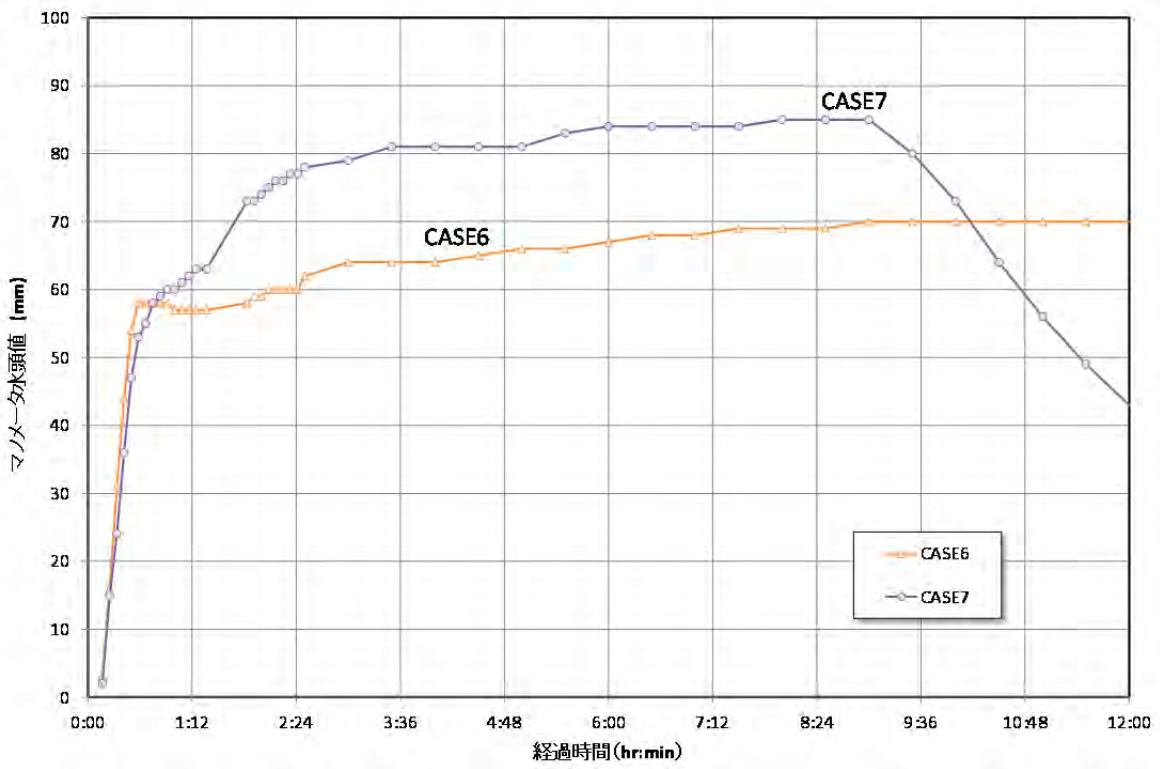



図 3.8.44　模型高さの違いによるのり尻付近の水頭の比較

### 3.9　本実験概要

堤体材料の影響を見ることを目的に屋内において、幅 1.5m×長さ 3.0m×高さ 1.0m の土槽を用い、厚さ 0.2m の川砂の基盤上に高さ 0.75m、のり勾配 1:2.0 の堤体模型を構築し、堤体の圧力水頭の上昇と進行性破壊の発達について計測を行った。

### 3.10　実験装置（本実験）

実験は予備実験で用いた幅 1.5m×長さ 3.0m×高さ 1.0m の鋼製の土槽で、屋内において実施することとした。また、計器による計測は水頭を計測するマノメータとした。また、のり尻の水平変位の進行を観測するため、上空から一定時間間隔で写真撮影を行った。

予備実験により、①壁沿いの止水方法は板の張り出しによる止水が効果的であること、②基盤材料は川砂を用いた方が早く浸透破壊が発生すること、③天端は設けなくてものり面部の水頭に差はないこと、④模型の高さは 0.75m とした方がのり尻付近の水頭値が早く高くなることが確認された。本実験ではこれらを踏まえた土槽・模型を作製（**図 3.10.1** に示す）し、堤体材料の種類を変えて実験を行った。なお、予備実験 CASE8 によりのり尻直下の水頭や浸透破壊初期にのり尻の水平変位が発生していることが確認されたため、本実験においては正面からのカメラに加え、上空にもカメラを設置し、のり面を観察するとともにのり尻の変位もとらえることとした。

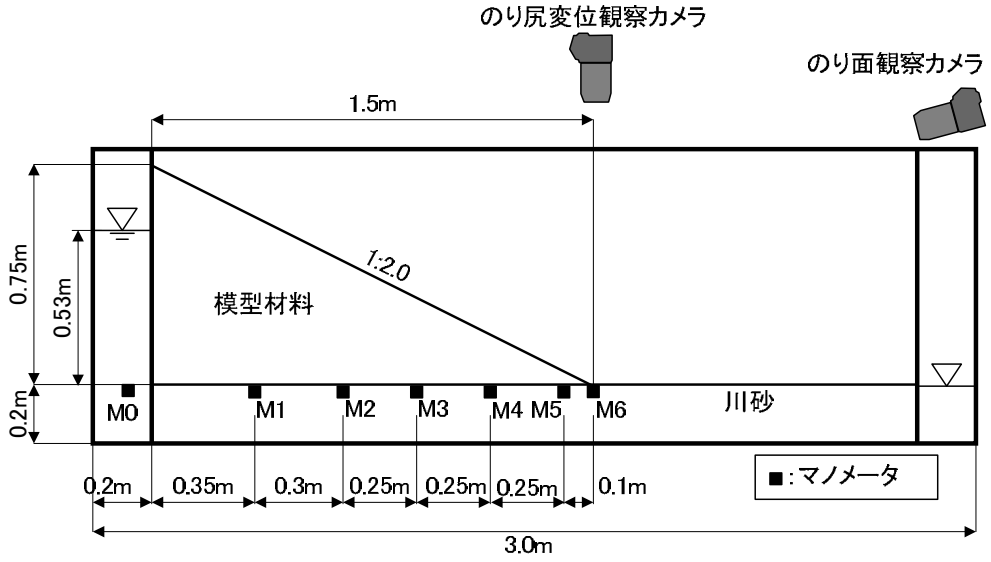



**図 3.10.1　予備実験結果を踏まえ本実験で採用した模型形状**

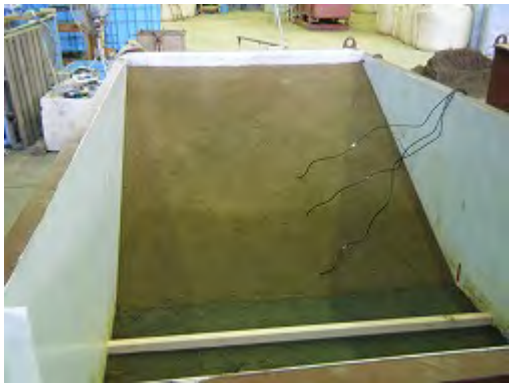


**図 3.10.2　模型写真**

**図 3.10.3　壁沿いの止水方法**

### 3.11 実験模型と実験ケース（本実験）

実験は堤体材料に 10 種類の砂質土を用いて全 13 ケース実施した。実施した実験ケースの一覧を**表 3.11.1** に示した。

**表 3.11.1　実験ケース一覧**

| 実験ケース | 模型高さ | のり勾配 | 堤体材料 | 基盤材料 |
|---|---|---|---|---|
| CASE1 | 0.75m | 1:2.0 | ① | 川砂 |
| CASE2 | 0.75m | 1:2.0 | ② | 川砂 |
| CASE3 | 0.75m | 1:2.0 | ③ | 川砂 |
| CASE4 | 0.75m | 1:2.0 | ④ | 川砂 |
| CASE5 | 0.75m | 1:2.0 | ⑤ | 川砂 |
| CASE6 | 0.75m | 1:2.0 | ⑥ | 川砂 |
| CASE7 | 0.75m | 1:2.0 | ⑦ | 川砂 |
| CASE8 | 0.75m | 1:2.0 | ⑧ | 川砂 |
| CASE9 | 0.50m | 1:2.0 | ⑨ | 川砂 |
| CASE10 | 0.75m | 1:2.0 | ⑩ | 川砂 |
| CASE11 | 0.75m | 1:2.0 | ① | 川砂 |
| CASE12 | 0.75m | 1:2.0 | ② | 川砂 |
| CASE13 | 0.75m | 1:2.0 | ⑩ | 川砂 |

### 3.12 計測方法（本実験）

実験にあたっては、**図 3.10.1** に示す位置にマノメータを設置して計測を行うとともに、模型正面及び上空より模型の状況（水平変位　等）を 5 分間隔で撮影した。

### 3.13 実験材料（本実験）

本実験で使用した模型材料の粒径加積曲線を**図 3.13.1** に示すとともに、各材料の特性を**表 3.13.1** に整理した。

**表 3.13.1　模型材料の土質特性**

| 実験ケース | CASE1 | CASE2 | CASE3 | CASE4 | CASE5 | CASE6 | CASE7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 使用材料 | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ |
| 礫分（%） | 1.80 | 2.20 | 4.09 | 4.19 | 3.56 | 5.21 | 1.81 |
| 砂分（%） | 81.29 | 62.57 | 86.33 | 87.93 | 92.72 | 75.78 | 70.24 |
| シルト分（%）<br>粘土分（%） | 16.91 | 35.23 | 9.58 | 7.88 | 3.72 | 19.01 | 27.95 |
| D60（mm） | 0.26 | 0.19 | 0.34 | 0.34 | 1.05 | 0.30 | 0.21 |
| D50（mm） | 0.21 | 0.15 | 0.29 | 0.30 | 0.85 | 0.24 | 0.17 |
| D10（mm） | － | － | 0.08 | 0.11 | 0.15 | － | － |
| 均等係数 | － | － | 0.28 | 0.37 | 0.18 | － | － |
| 土粒子の密度（g/cm3） | 2.702 | 2.690 | 2.732 | 2.720 | 2.722 | 2.723 | 2.709 |
| 乾燥密度（g/cm3） | 1.573 | 1.523 | 1.563 | 1.556 | 1.687 | 1.547 | 1.519 |
| 間隙比 | 0.718 | 0.766 | 0.748 | 0.748 | 0.614 | 0.760 | 0.783 |
| 湿潤密度（g/cm3） | 1.763 | 1.761 | 1.750 | 1.731 | 1.807 | 1.741 | 1.748 |
| c（kN/m2） | 14.5 | 18.9 | 30.8 | 60.6 | 8.2 | 66.9 | 58.8 |
| φ（°） | 11.3 | 12.0 | 34.7 | 26.6 | 22.1 | 14.4 | 13.1 |
| c’（kN/m2） | 9.5 | 15.3 | 0.0 | 2.8 | 3.4 | 9.3 | 7.8 |
| φ’（°） | 20.7 | 20.0 | 36.5 | 35.4 | 30.9 | 33.6 | 33.5 |
| 透水係数（m/s）定水位 | 3.77E-06 | 7.80E-07 | 7.58E-06 | 2.77E-05 | 2.15E-05 | 8.11E-06 | 4.53E-06 |

| 実験ケース | CASE8 | CASE9 | CASE10 | CASE11 | CASE12 | CASE13 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 使用材料 | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ① | ② | ⑩ |
| 礫分（%） | 1.68 | 2.20 | 69.10 | 1.80 | 2.20 | 69.10 |
| 砂分（%） | 64.36 | 90.10 | 26.00 | 81.29 | 62.57 | 26.00 |
| シルト分（%）<br>粘土分（%） | 33.96 | 7.70 | 4.90 | 16.91 | 35.23 | 4.90 |
| D60（mm） | 0.17 | 0.92 | 4.40 | 0.26 | 0.19 | 4.40 |
| D50（mm） | 0.14 | 0.65 | 3.50 | 0.21 | 0.15 | 3.50 |
| D10（mm） | － | 0.10 | 0.15 | － | － | 0.15 |
| 均等係数 | － | 9.20 | 29.30 | － | － | 29.30 |
| 土粒子の密度（g/cm3） | 2.709 | 2.653 | 2.657 | 2.702 | 2.690 | 2.657 |
| 乾燥密度（g/cm3） | 1.498 | 1.759 | 1.899 | 1.576 | 1.500 | 1.899 |
| 間隙比 | 0.808 | 0.508 | 0.399 | 0.714 | 0.793 | 0.399 |
| 湿潤密度（g/cm3） | 1.752 | 1.859 | 1.999 | 1.786 | 1.730 | 1.999 |
| c（kN/m2） | 16.0 | 17.1 | 19.5 | 14.5 | 18.9 | 19.5 |
| φ（°） | 16.9 | 19.5 | 18.8 | 11.3 | 12.0 | 18.8 |
| c’（kN/m2） | 1.5 | 0.6 | 0.0 | 9.5 | 15.3 | 0.0 |
| φ’（°） | 37.8 | 41.5 | 42.5 | 20.7 | 20.0 | 42.5 |
| 透水係数（m/s）定水位 | 1.72E-05 | 9.36E-06 | 1.11E-05 | 3.77E-06 | 7.80E-07 | 1.11E-05 |

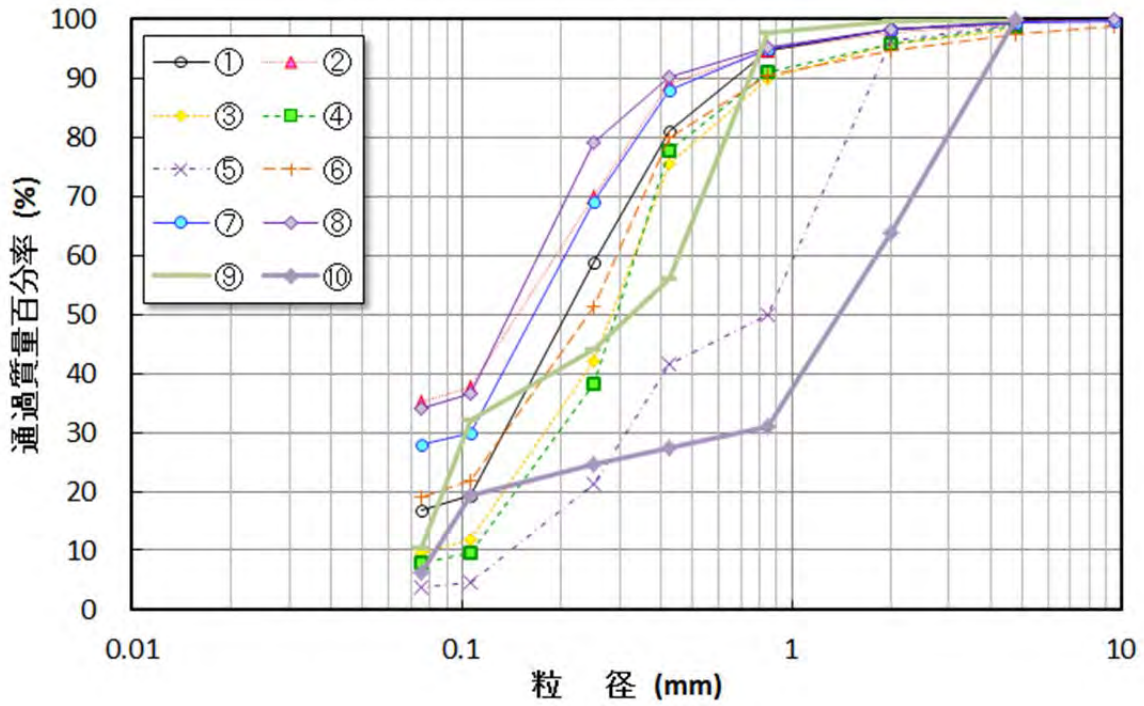



図 3.13.1　本実験で使用した堤体材料の粒径加積曲線

### 3.14 実験方法（本実験）

実験模型を以下の工程で作製した。

① 模型の基盤となる川砂を厚さ 20cm となるように締固めて敷設した。（ **図 3.14.1**）

② 堤防模型の盛り立てに先立ち、マノメータ（6 箇所／1 模型）を基盤表面及び給水槽内に設置した。（ **図 3.14.1**）

③ 調整された模型材料を用い、一層の仕上り厚 10cm として、高さ 0.75m の模型を作製した。このとき、模型の締固め度は 90%となるように締固めを行った。なお、締固め度確認のため各層 2 箇所（計 14 箇所／1 模型）で湿潤密度を測定し、締固め度を満足することを確認した。（ 図 3.14.3）

④ のり尻の水平変位量を計測するため、のり尻及びのり尻から 10cm の位置に写真判読の目安となる水糸を設置した。（ **図 3.14.3**）

作製した実験模型の背面側の水位調整槽の水位を上昇させ、基礎地盤まで十分な時間(2 日以上)をおいて飽和させる。その後 30 分かけて基礎地盤から 0.53m まで上昇させて、一定水位を維持し、模型内に設置したマノメータで計測を実施した。

**図 3.14.1　基礎地盤の作製**

**図 3.14.2　マノメータ設置**

**図 3.14.3　締固め状況**

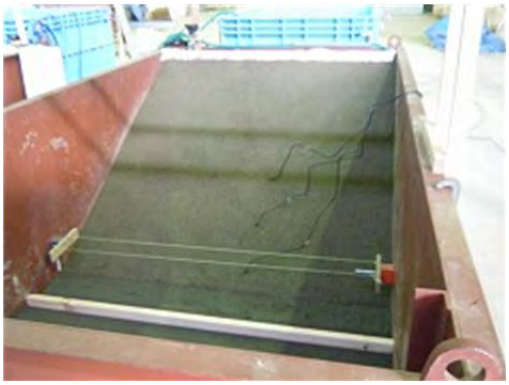


**図 3.14.4　水糸の設置**

### 3.15 本実験結果

予備実験結果をもとに、模型形状、壁沿いの止水方法などを決定し、本実験を行った。以下、実験結果について述べる。

#### 3.15.1 進行性破壊の発生過程

進行性破壊の発生過程[7]を**図 3.15.1** に示す。

① のり尻近傍の細粒分の微少な流出
② 水頭の上昇によるのり尻水平変位の発生
③ のり尻水平変位に伴うのり面亀裂の発生
④ 亀裂より下部の土砂の流出により、のり面の上段に亀裂の発生
⑤ ②～④が継続し、のり面の亀裂は徐々にのり面上方へと拡大する。

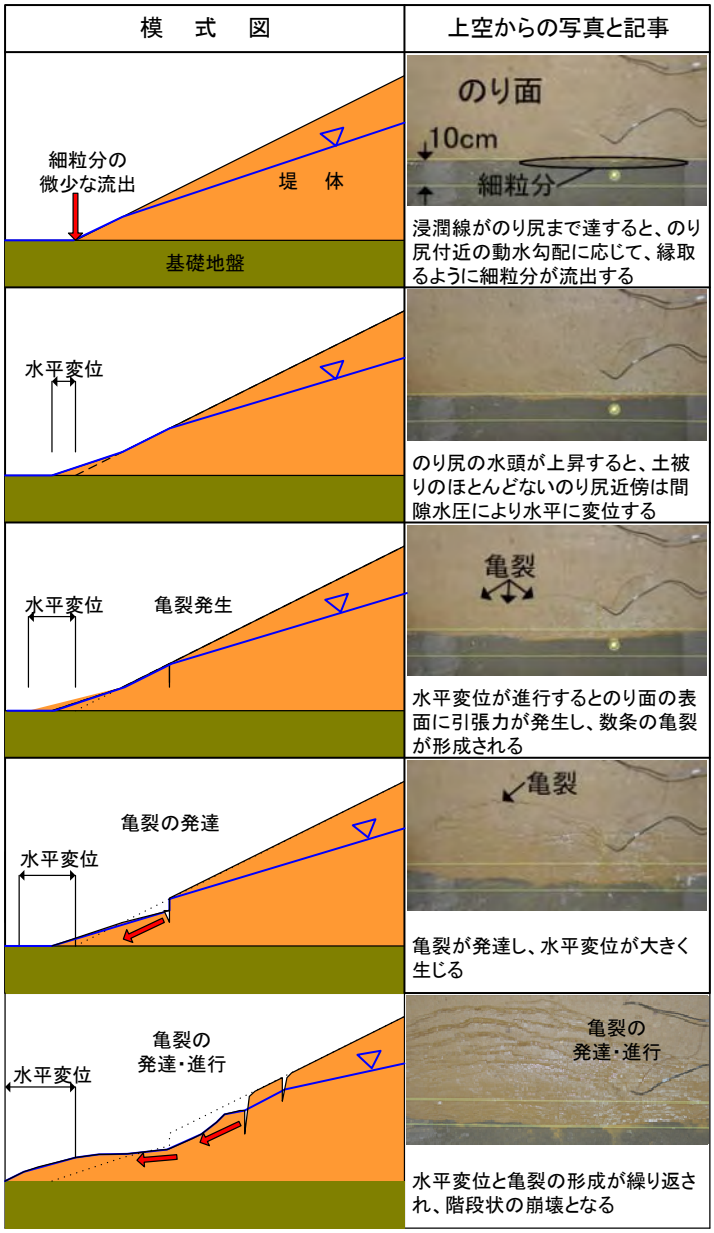



図 3.15.1　破壊の発生から発達（進行・拡大）に至る過程

### 3.15.2 破壊の状況

図 3.15.2　CASE1

図 3.15.3　CASE2

図 3.15.4　CASE3

図 3.15.5　CASE4

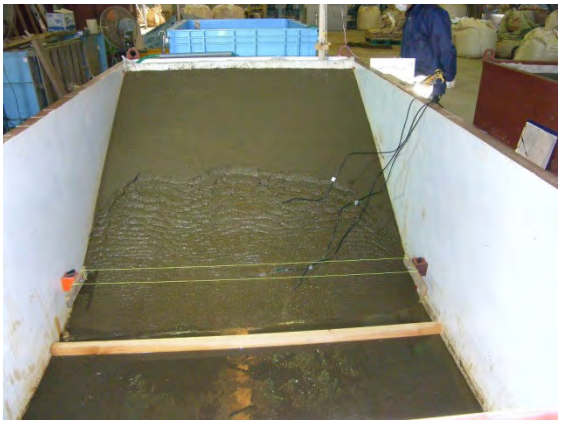


図 3.15.6　CASE5

図 3.15.7　CASE6

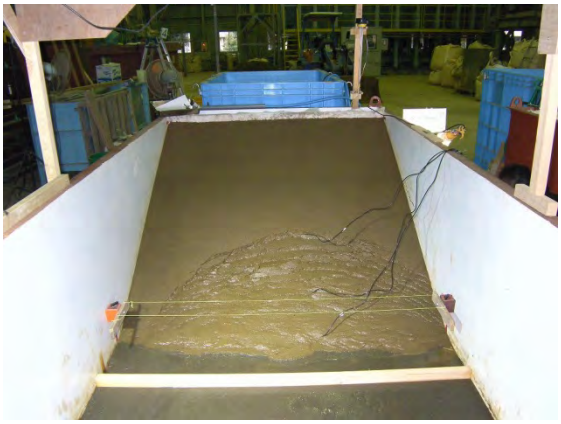


図 3.15.8　CASE7

図 3.15.9　CASE8

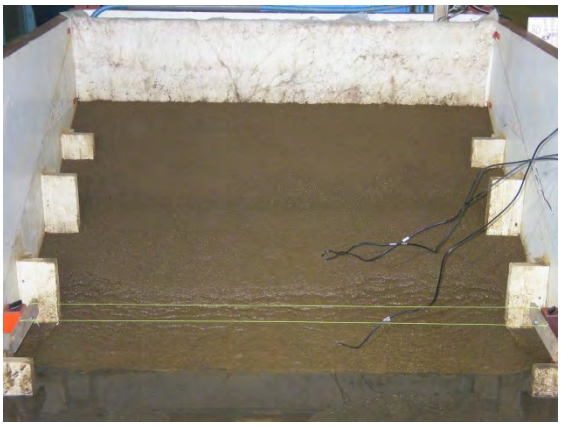


図 3.15.10　CASE9

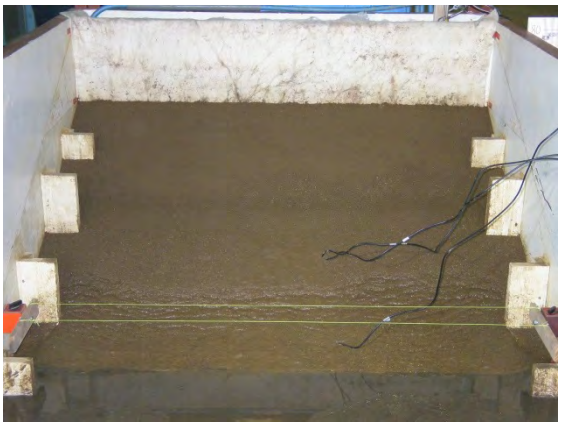


図 3.15.11　CASE10

図 3.15.12　CASE11

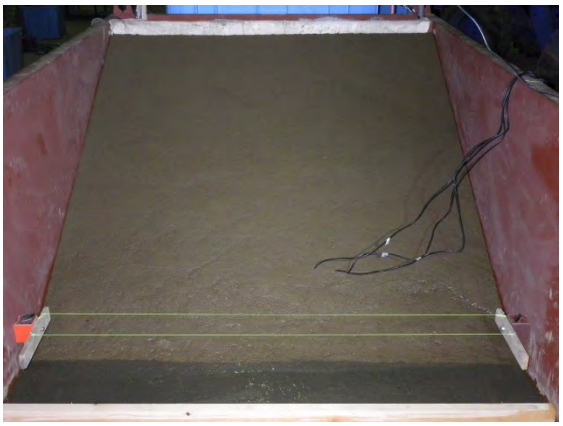


図 3.15.13　CASE13

### 3.15.3 CASE1 の破壊進行状況

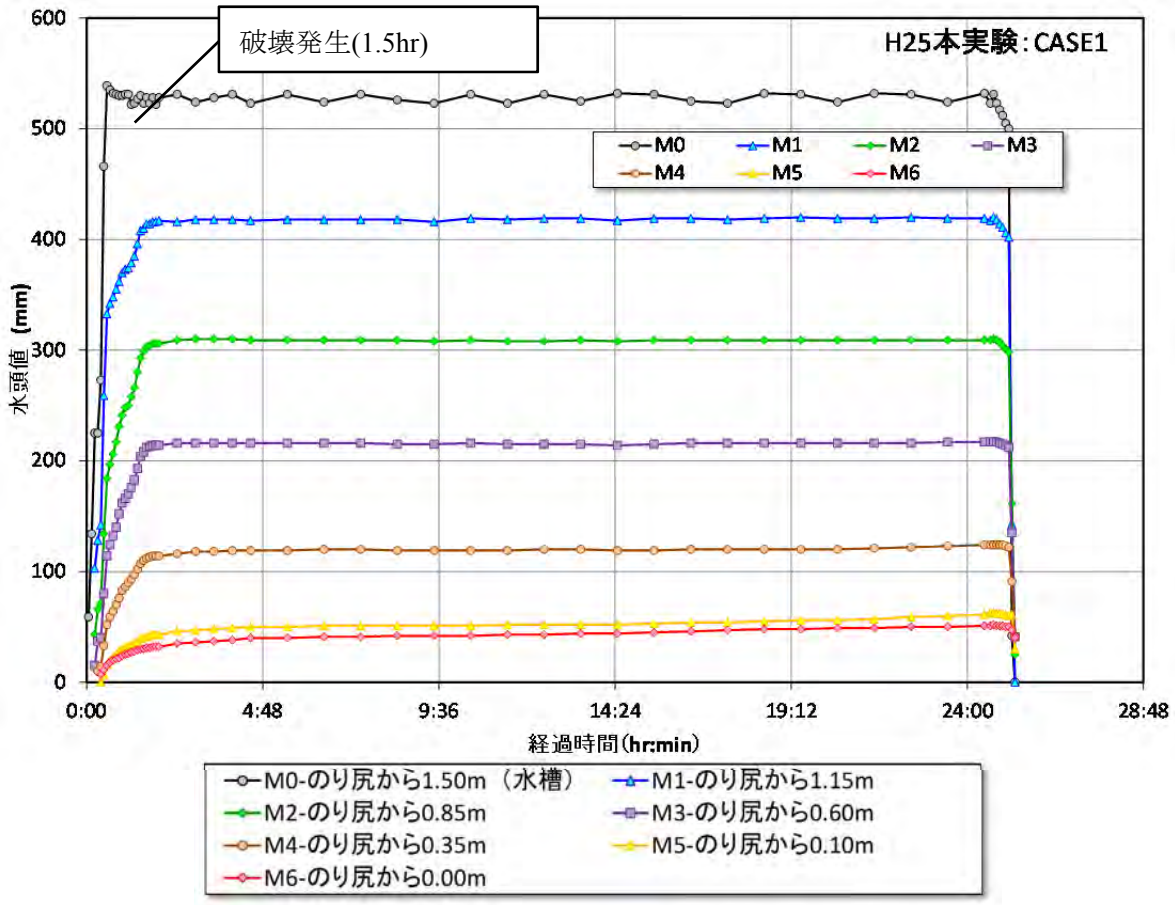



図 3.15.14　水頭の経時変化(CASE1)

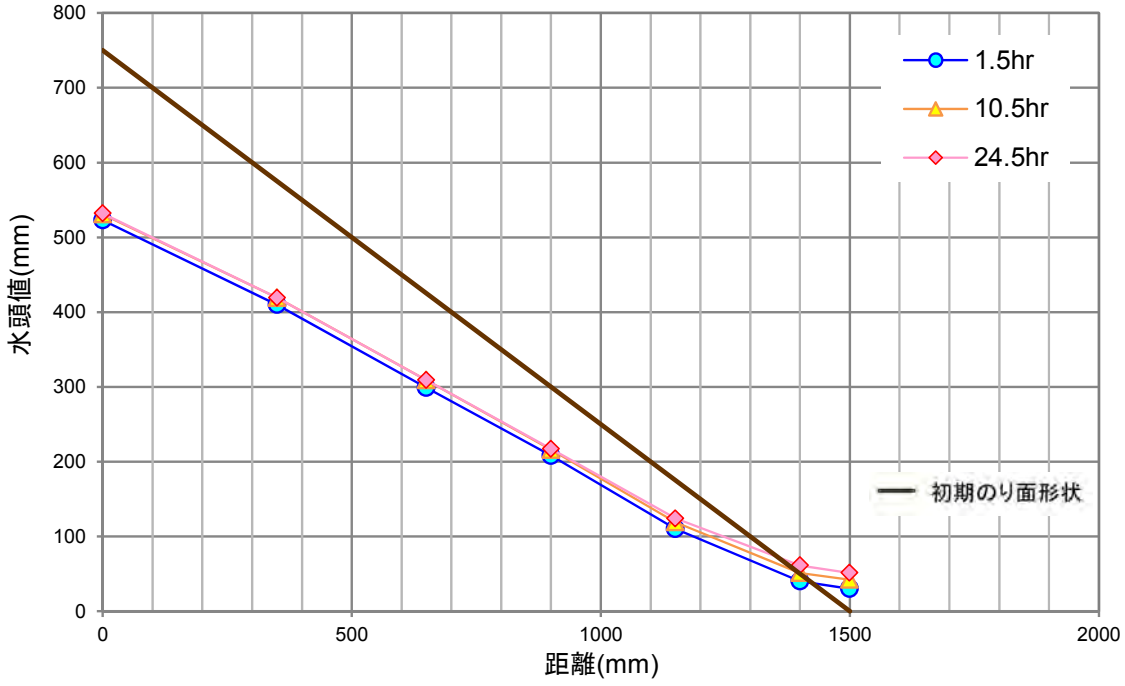
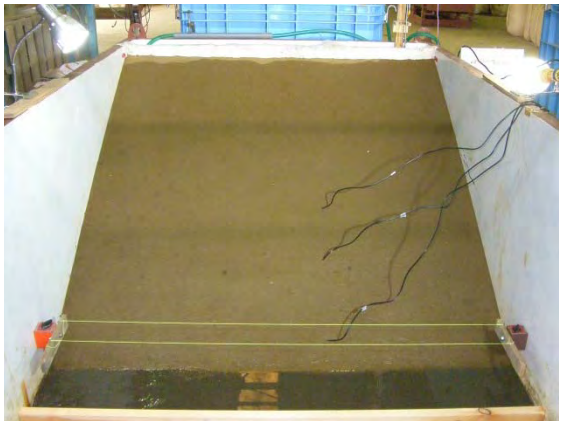
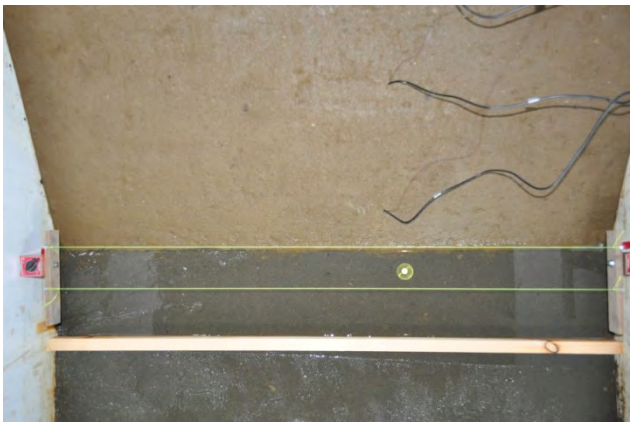



図 3.15.15　水頭分布の経時変化(CASE1)

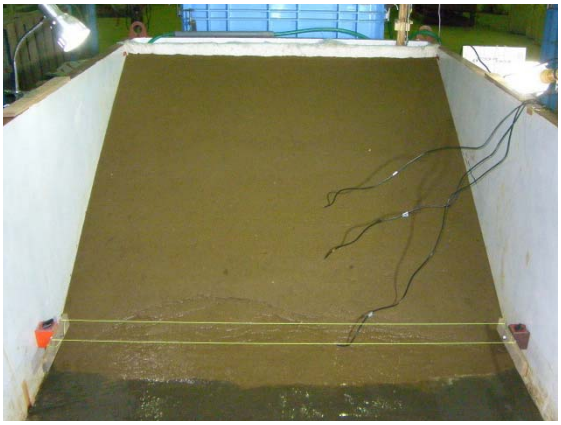


(a) 正面写真



(b) 上空写真

図 3.15.16　のり尻の状況（1.5hr 後、破壊開始）

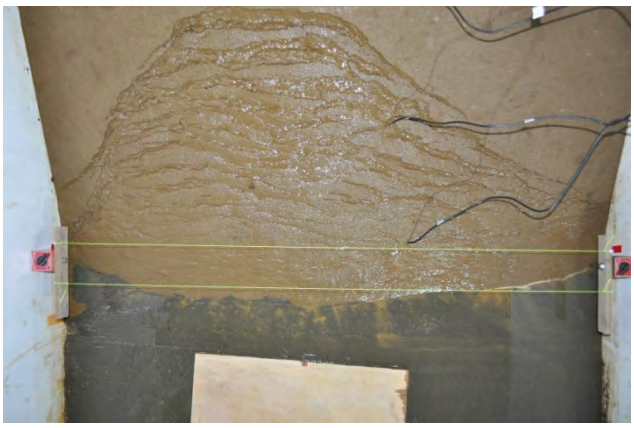


(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.17　のり尻の状況（10.5hr 後）

(a) 正面写真



(b) 上空写真

図 3.15.18　のり尻の状況（24.5hr 後、実験終了）

### 3.15.4 CASE2 の破壊進行状況

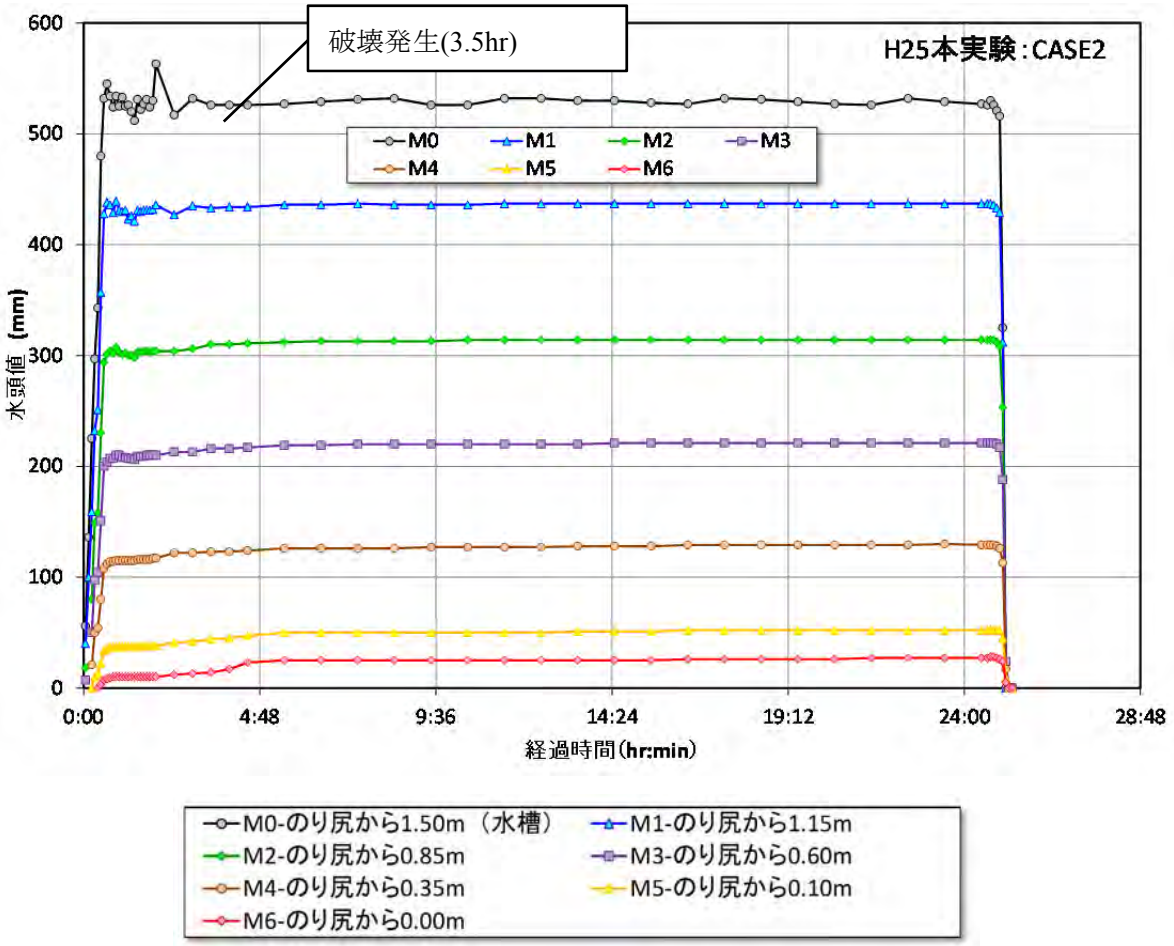



図 3.15.19　水頭の経時変化(CASE2)

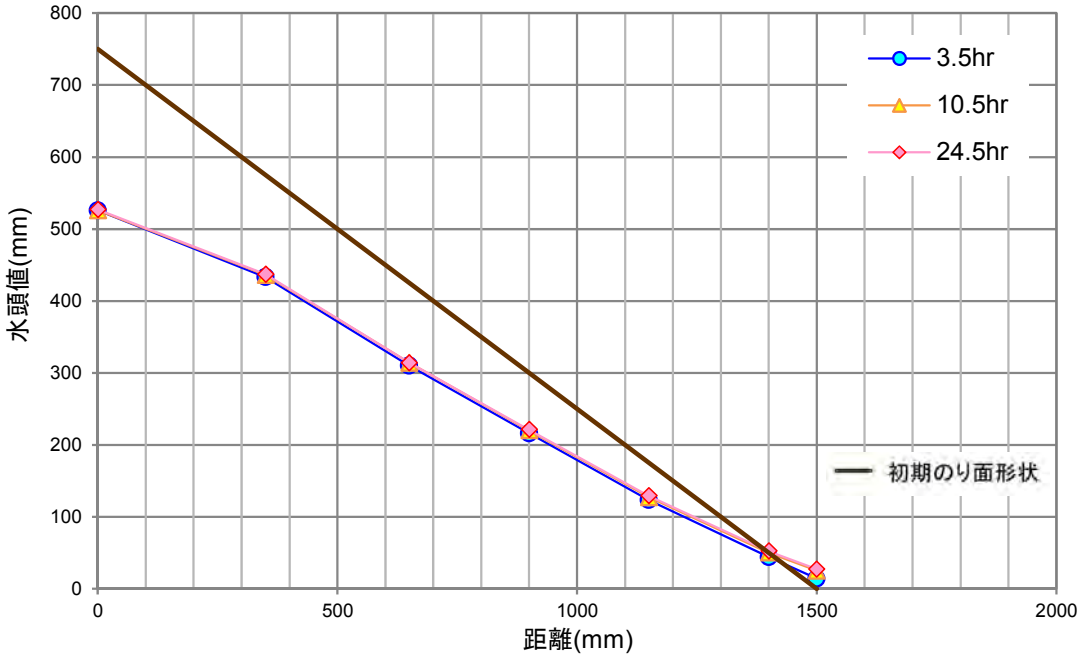
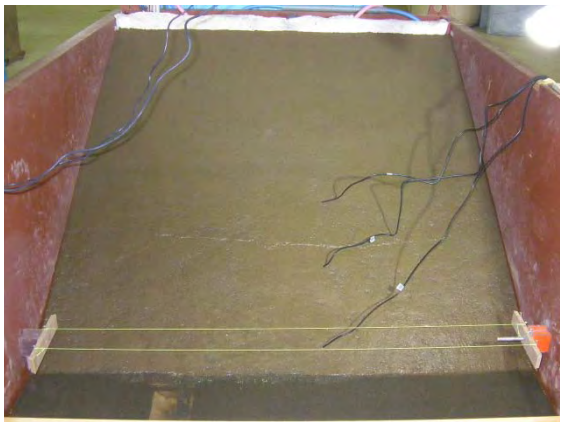



図 3.15.20　水頭分布の経時変化(CASE2)



(a) 正面写真

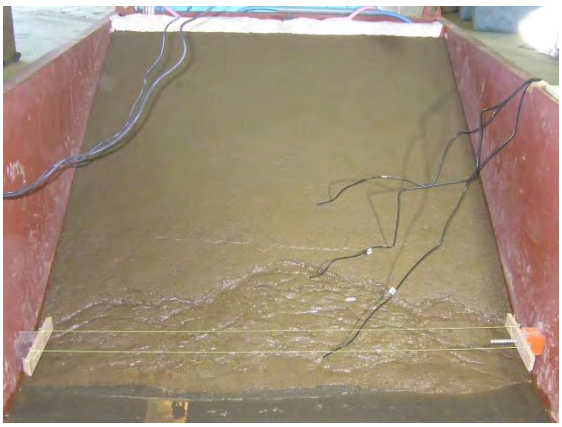
(b) 上空写真

図 3.15.21　のり尻の状況（3.5hr 後、破壊開始）

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.22　のり尻の状況（10.5hr 後）



(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.23　のり尻の状況（24.5hr 後、実験終了）

### 3.15.5 CASE3 の破壊進行状況

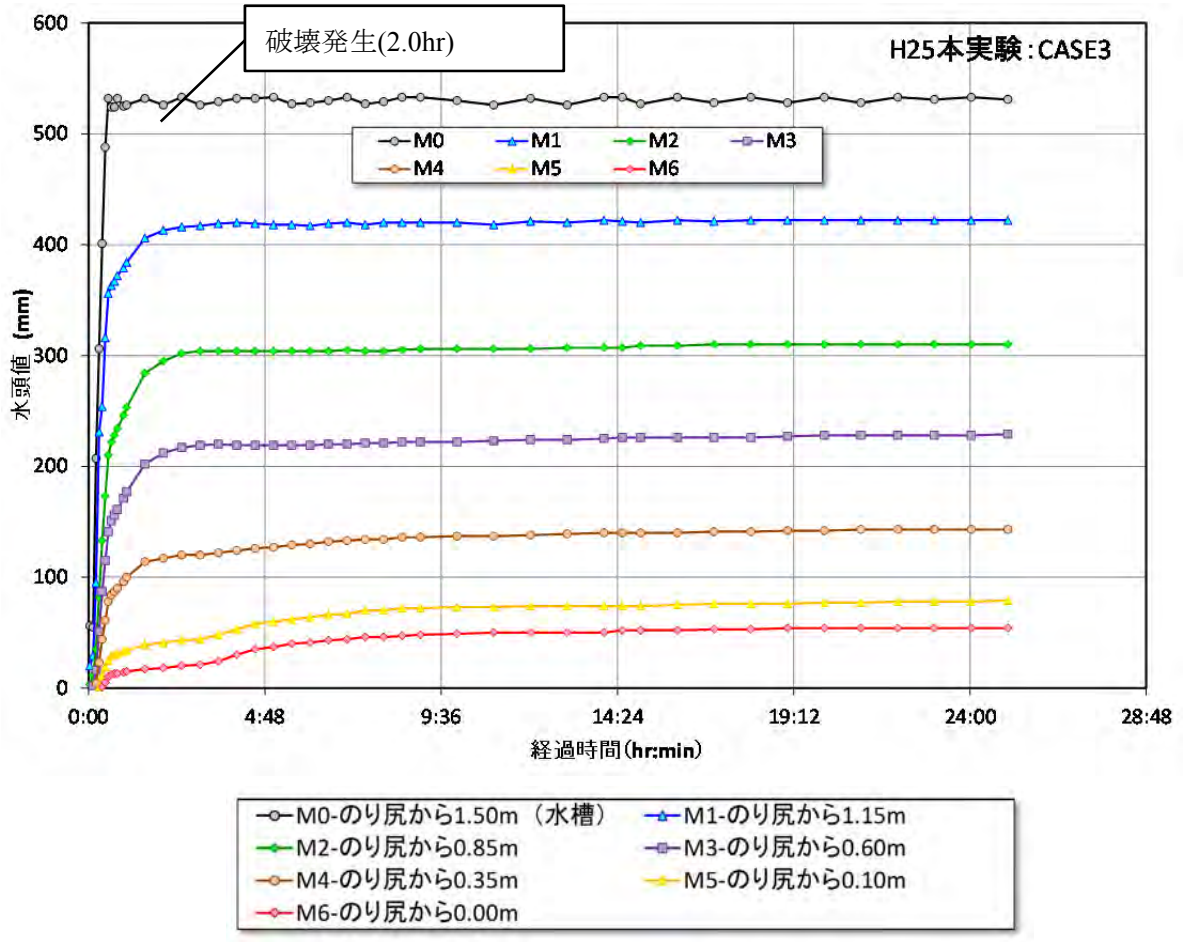



図 3.15.24　水頭の経時変化(CASE3)

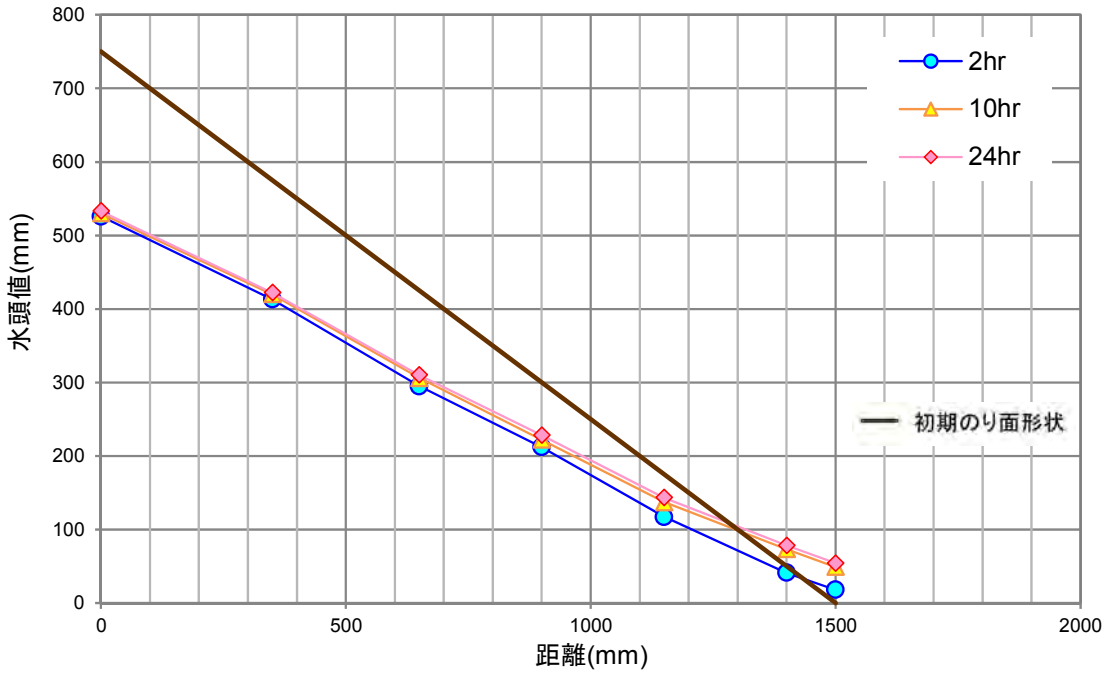
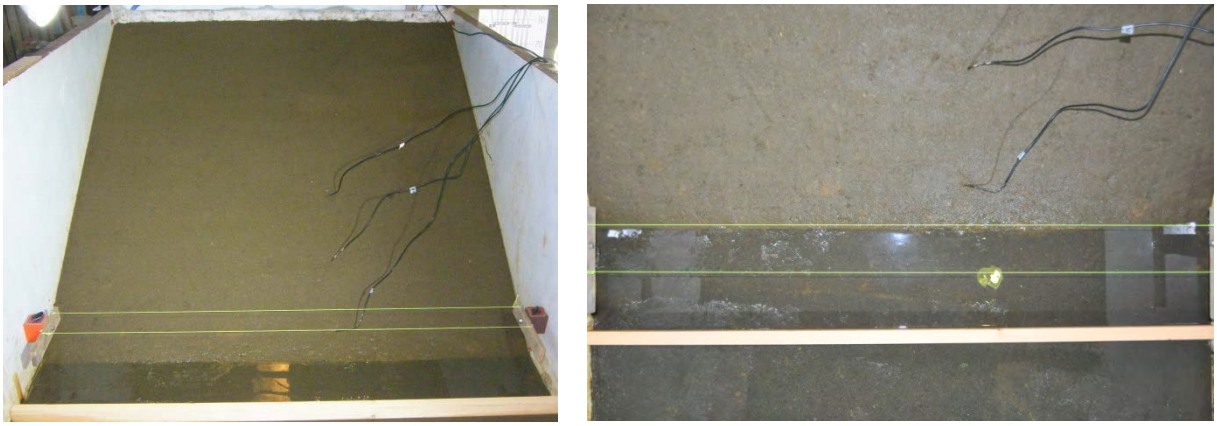
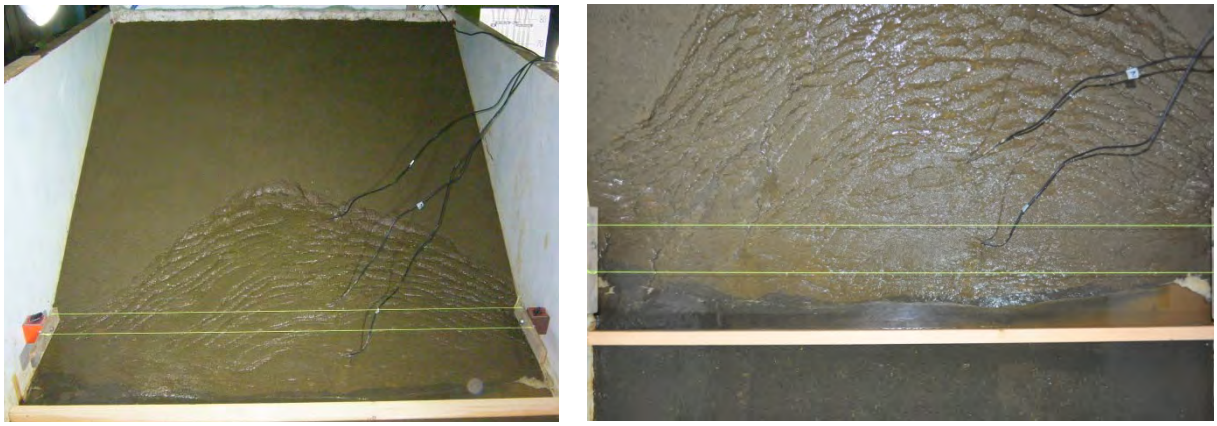



図 3.15.25　水頭分布の経時変化(CASE3)



(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.26　のり尻の状況（2.0hr 後、破壊開始）



(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.27　のり尻の状況（10.0hr 後）

(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.28　のり尻の状況（24.0hr 後、実験終了）

### 3.15.6 CASE4 の破壊進行状況

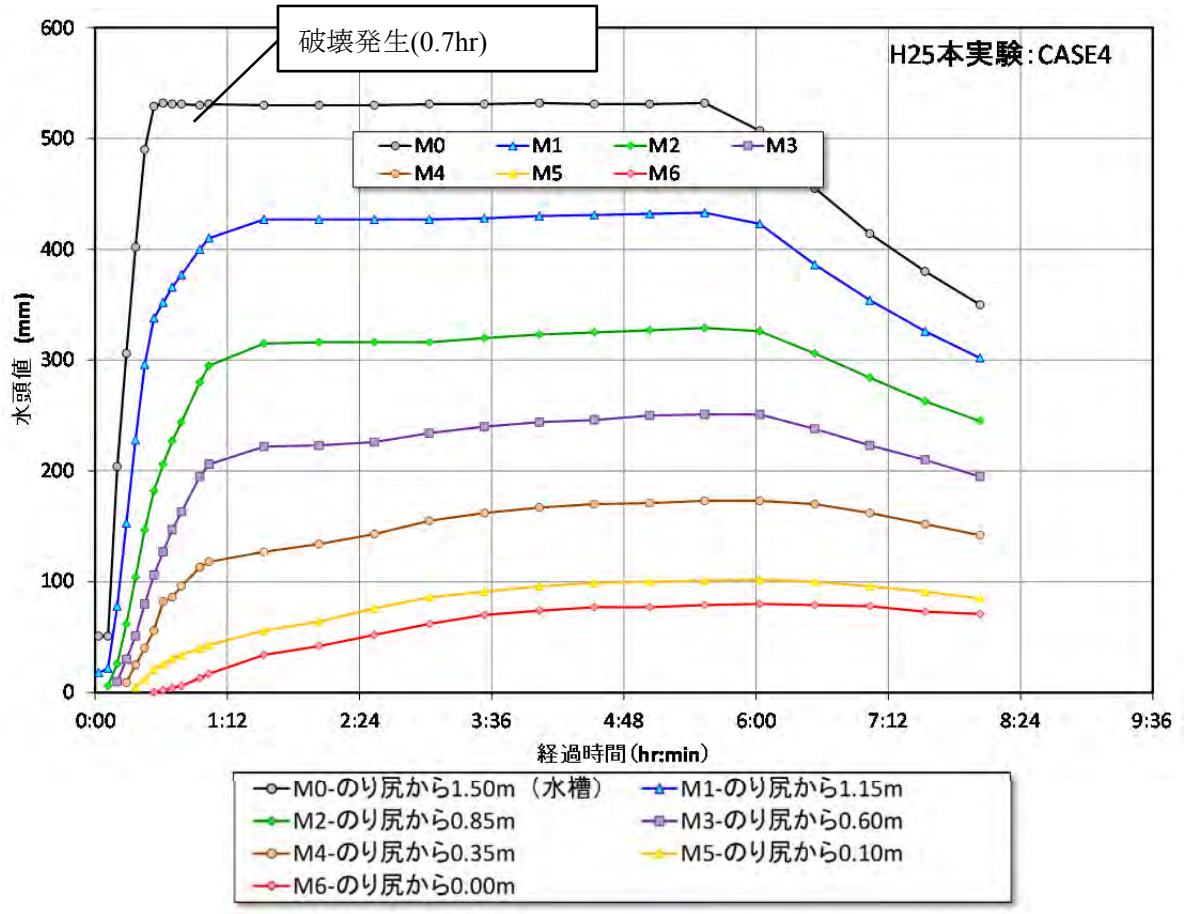



図 3.15.29　水頭の経時変化(CASE4)

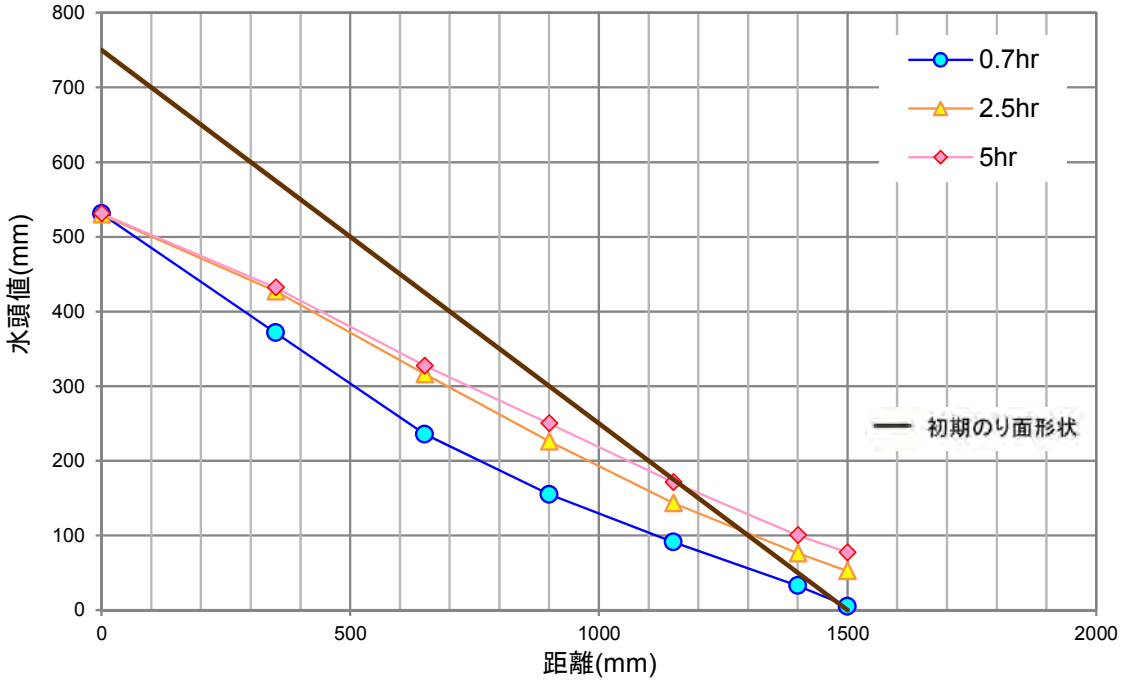
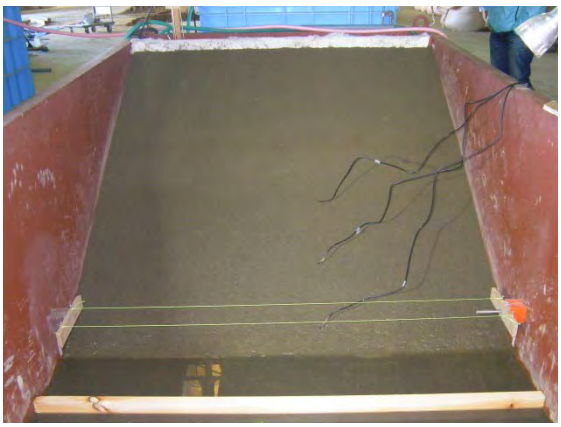
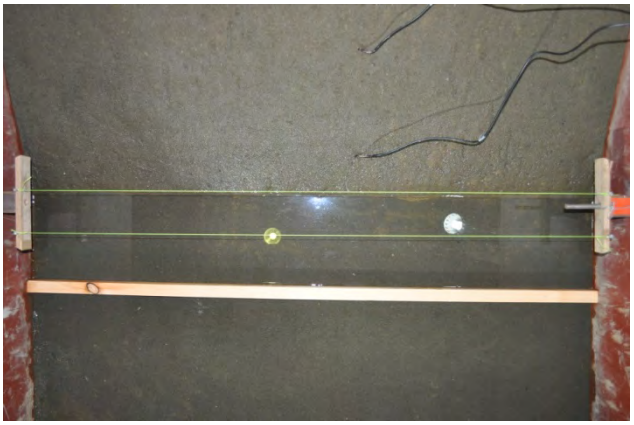



図 3.15.30　水頭分布の経時変化(CASE4)

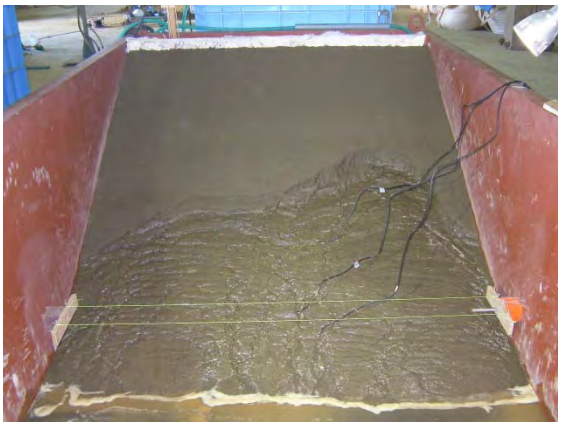


(a) 正面写真

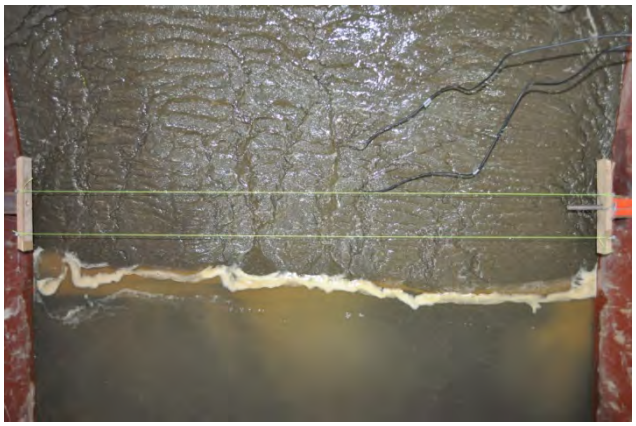


(b) 上空写真

図 3.15.31　のり尻の状況（0.7hr 後、破壊開始）



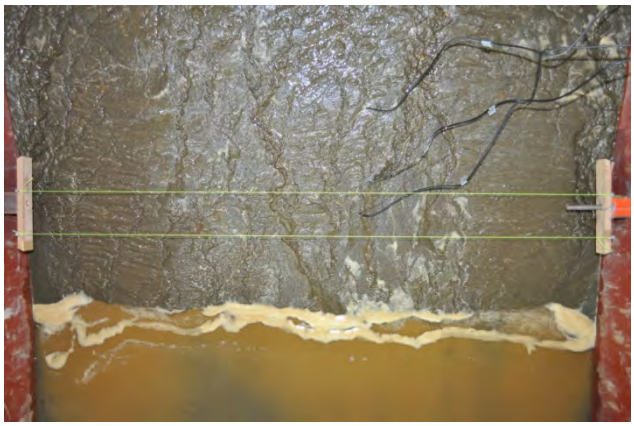
(a) 正面写真



(b) 上空写真

図 3.15.32　のり尻の状況（2.5hr 後）

(a) 正面写真



(b) 上空写真

図 3.15.33　のり尻の状況（5.0hr 後、実験終了）

### 3.15.7 CASE5 の破壊進行状況

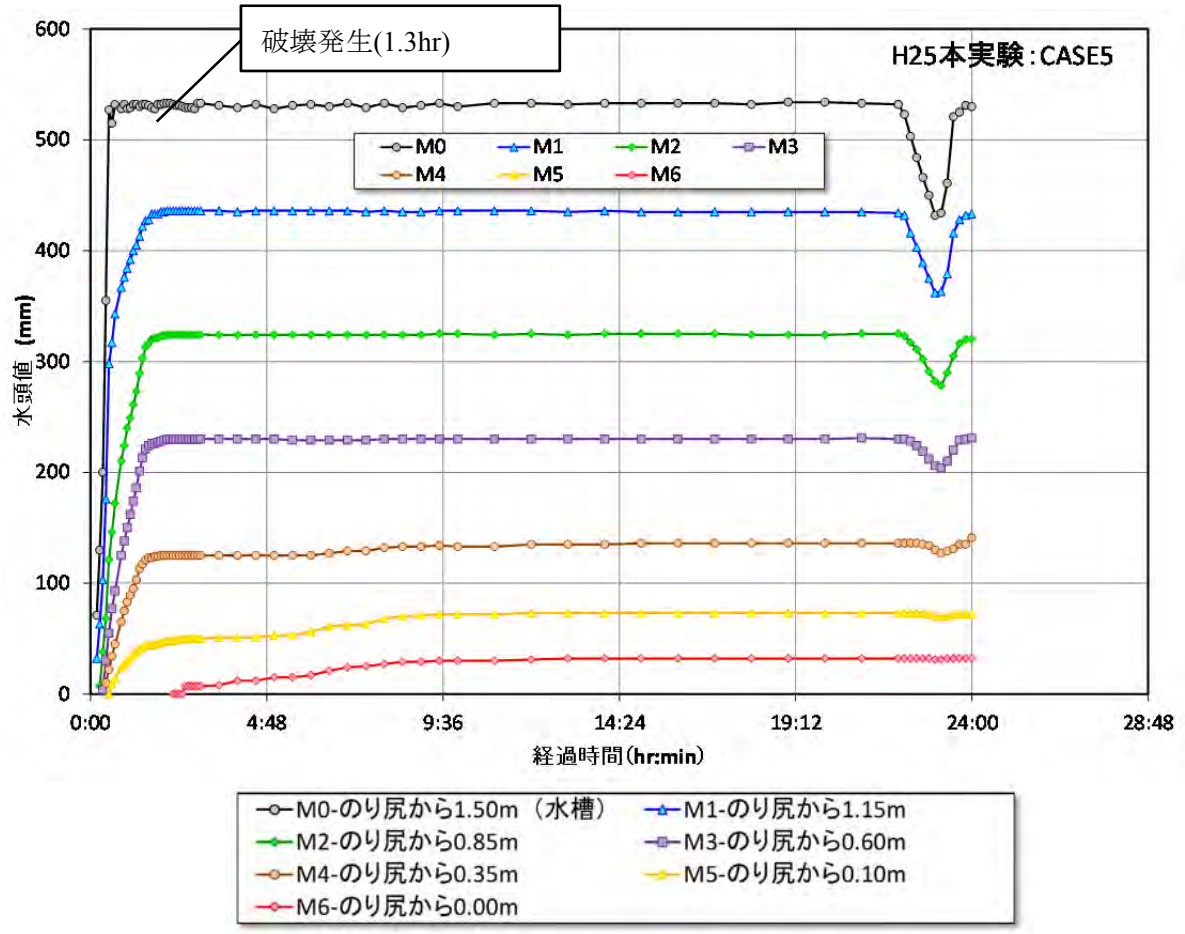



図 3.15.34　水頭の経時変化(CASE5)

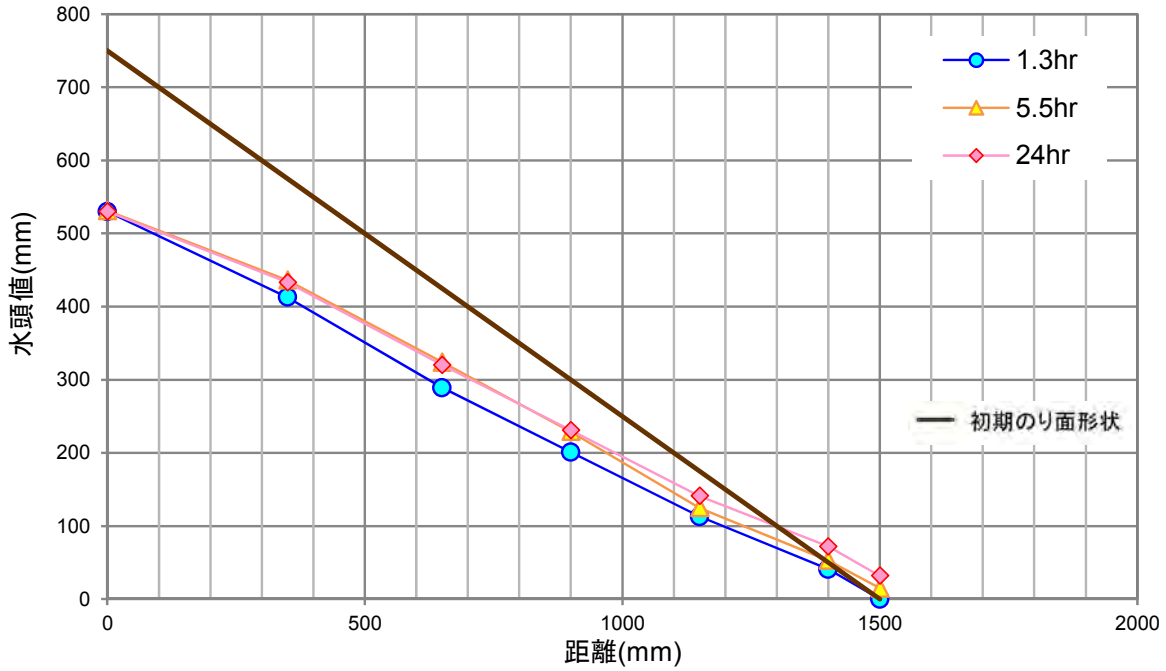
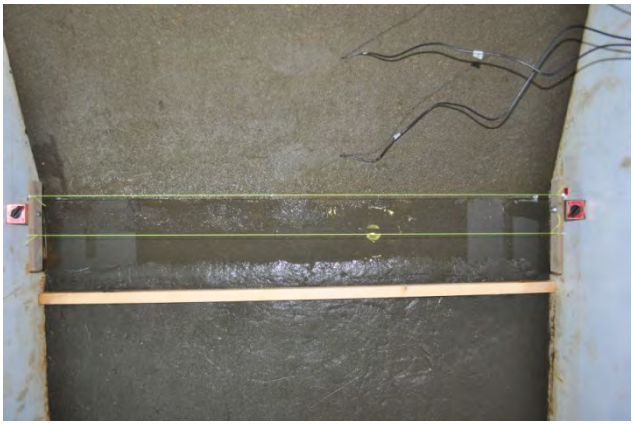



図 3.15.35　水頭分布の経時変化(CASE5)

(a) 正面写真



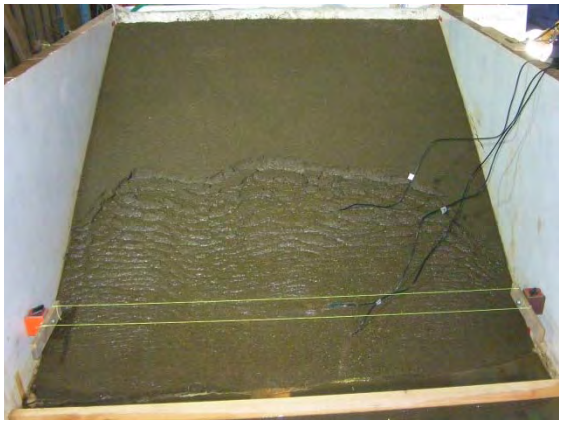
(b) 上空写真

図 3.15.36　のり尻の状況（1.3hr 後）

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.37　のり尻の状況（5.5hr 後）



(a) 正面写真

※上空写真は、機器不良により、未撮影

図 3.15.38　のり尻の状況（24.0hr 後）

### 3.15.8 CASE6 の破壊進行状況

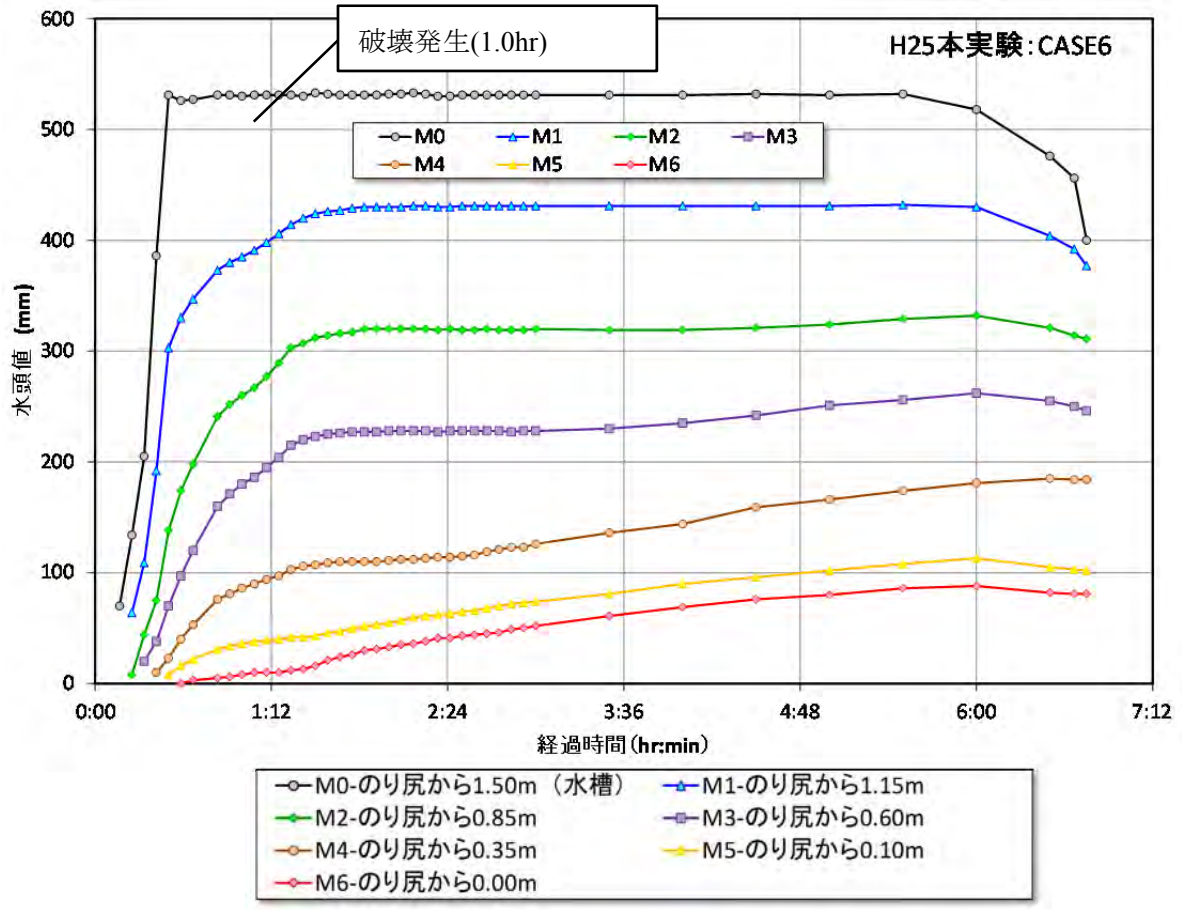



図 3.15.39　水頭の経時変化(CASE6)

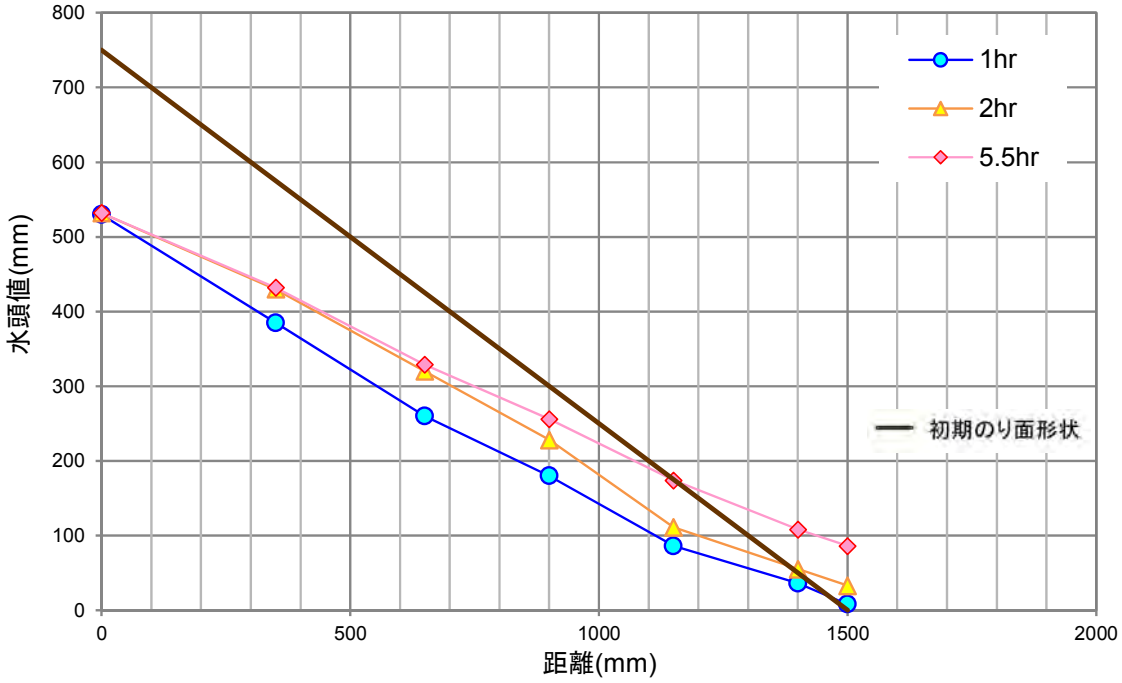
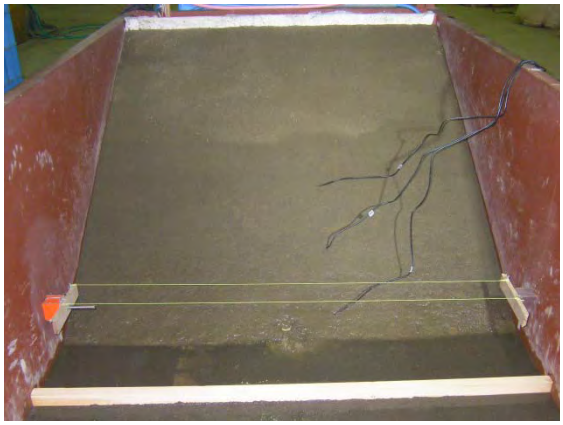
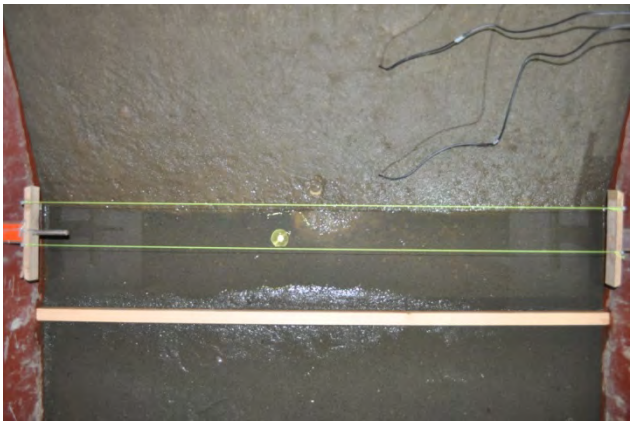



図 3.15.40　水頭分布の経時変化(CASE6)

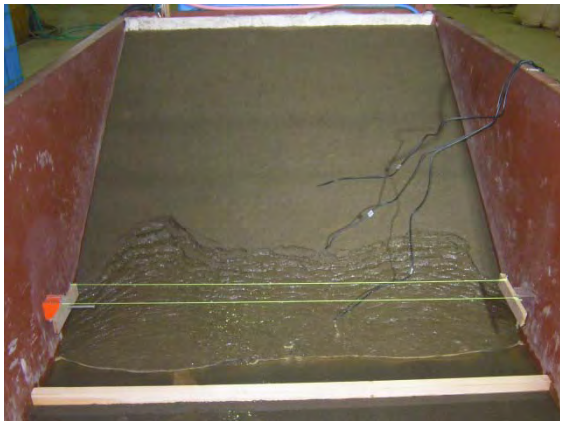


(a) 正面写真

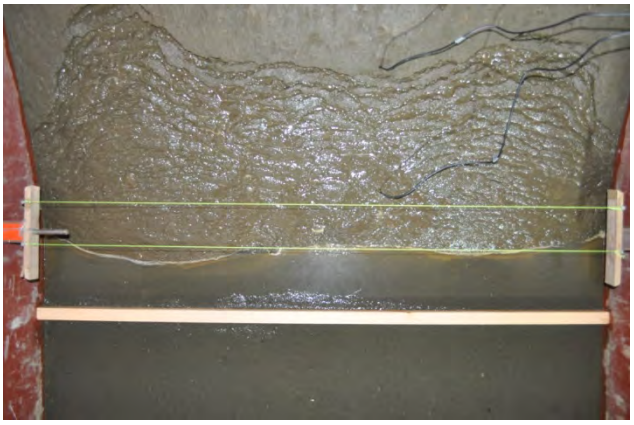


(b) 上空写真

図 3.15.41　のり尻の状況（1.0hr 後、破壊開始）



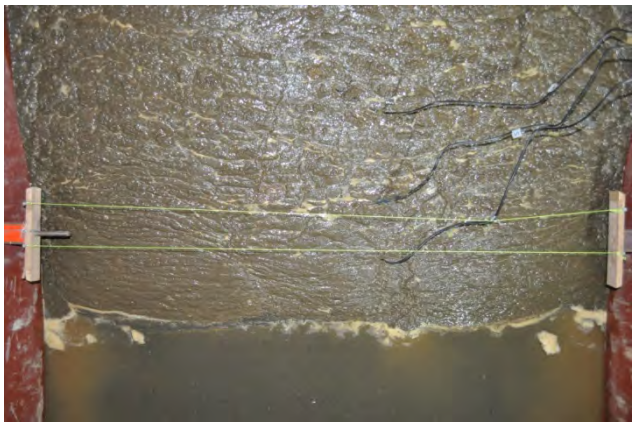
(a) 正面写真



(b) 上空写真

図 3.15.42　のり尻の状況（2.0hr 後）

(a) 正面写真



(b) 上空写真

図 3.15.43　のり尻の状況（5.5hr 後、実験終了）

### 3.15.9 CASE7 の破壊進行状況

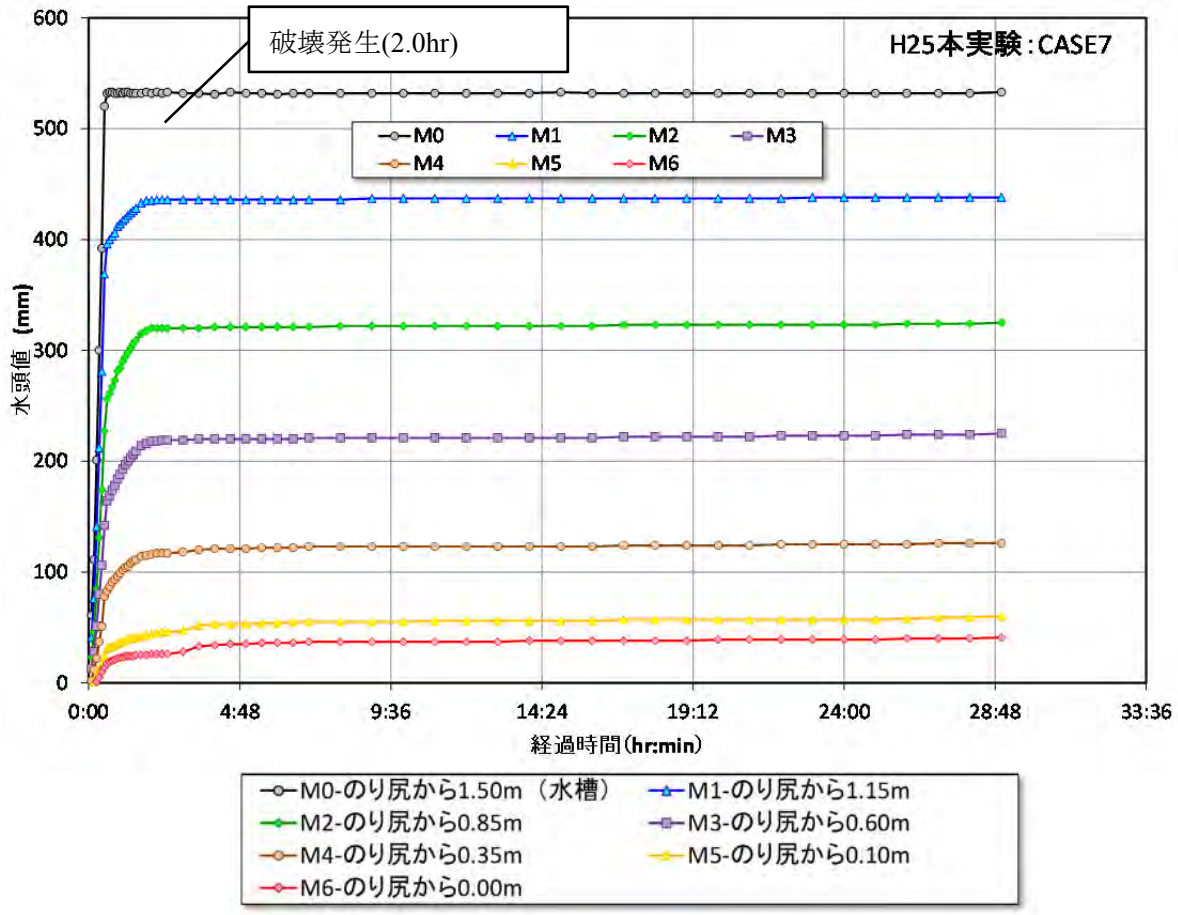



図 3.15.44　水頭の経時変化(CASE7)

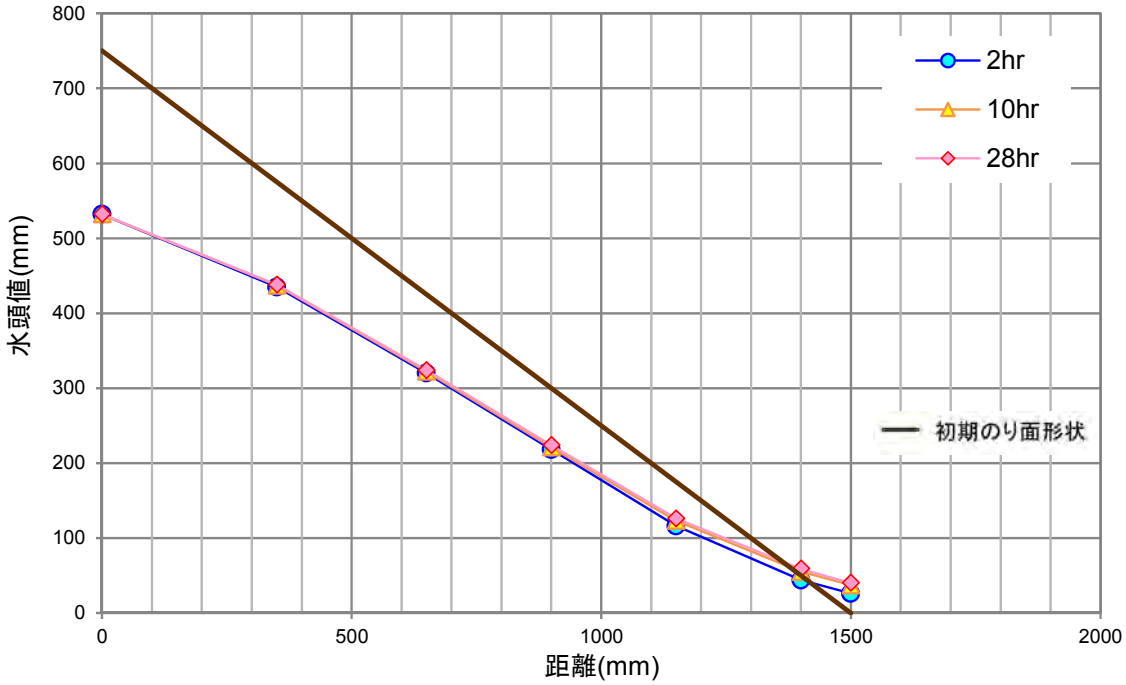



図 3.15.45　水頭分布の経時変化(CASE7)

(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.46　のり尻の状況（2.0hr 後、破壊開始）

(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.47　のり尻の状況（10.0hr 後）

(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.48　のり尻の状況（28.0hr 後、実験終了）

### 3.15.10　CASE8 の破壊進行状況

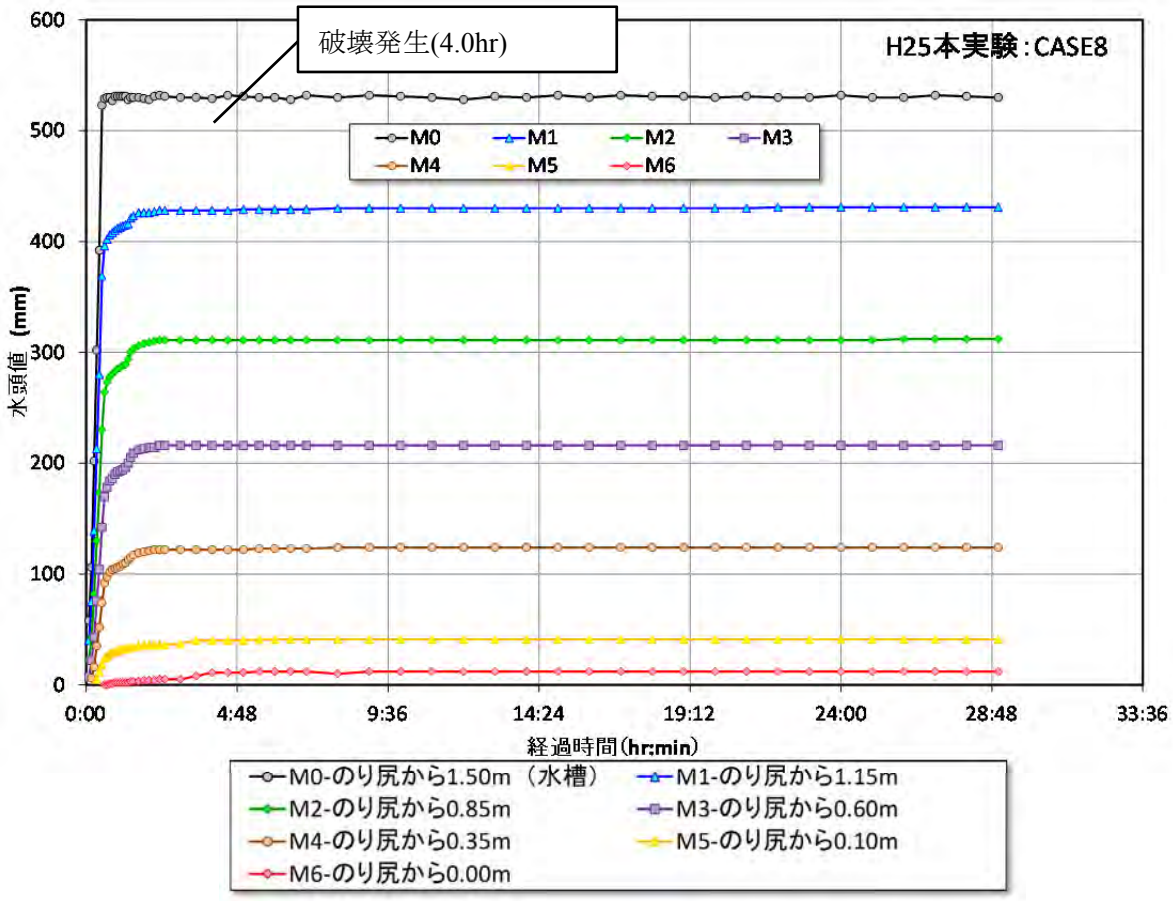



図 3.15.49　水頭の経時変化(CASE8)

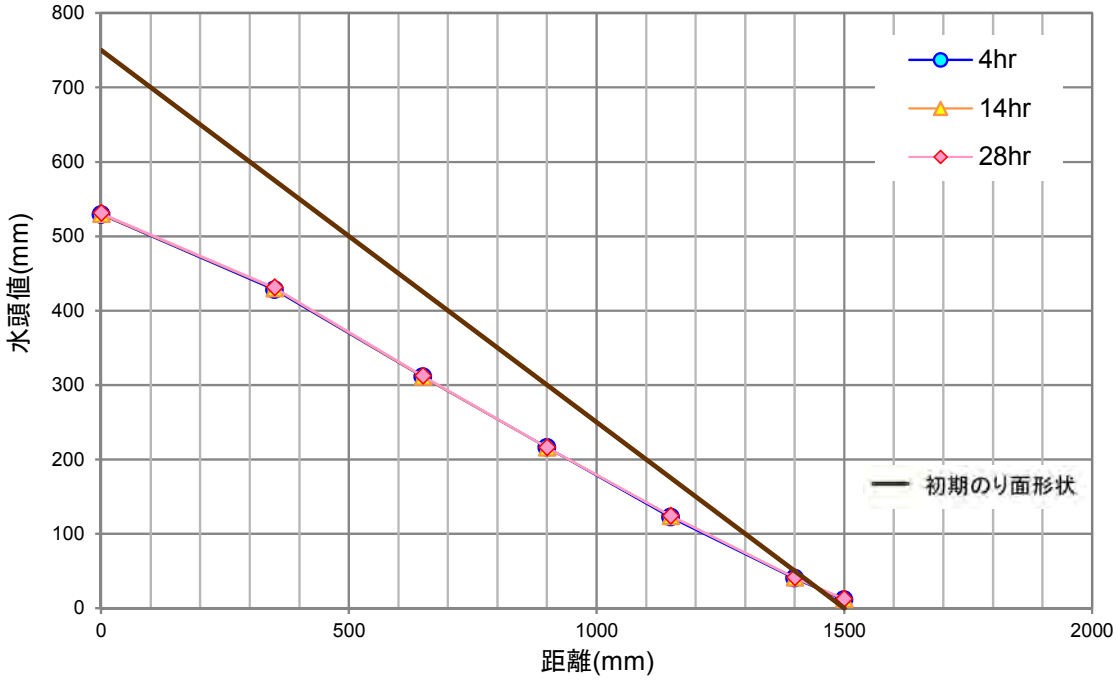



図 3.15.50　水頭分布の経時変化(CASE8)

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.51　のり尻の状況（4.0hr 後、破壊開始）

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.52　のり尻の状況（14.0hr 後）

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.53　のり尻の状況（28.0hr 後、実験終了）

### 3.15.11　CASE9 の破壊進行状況

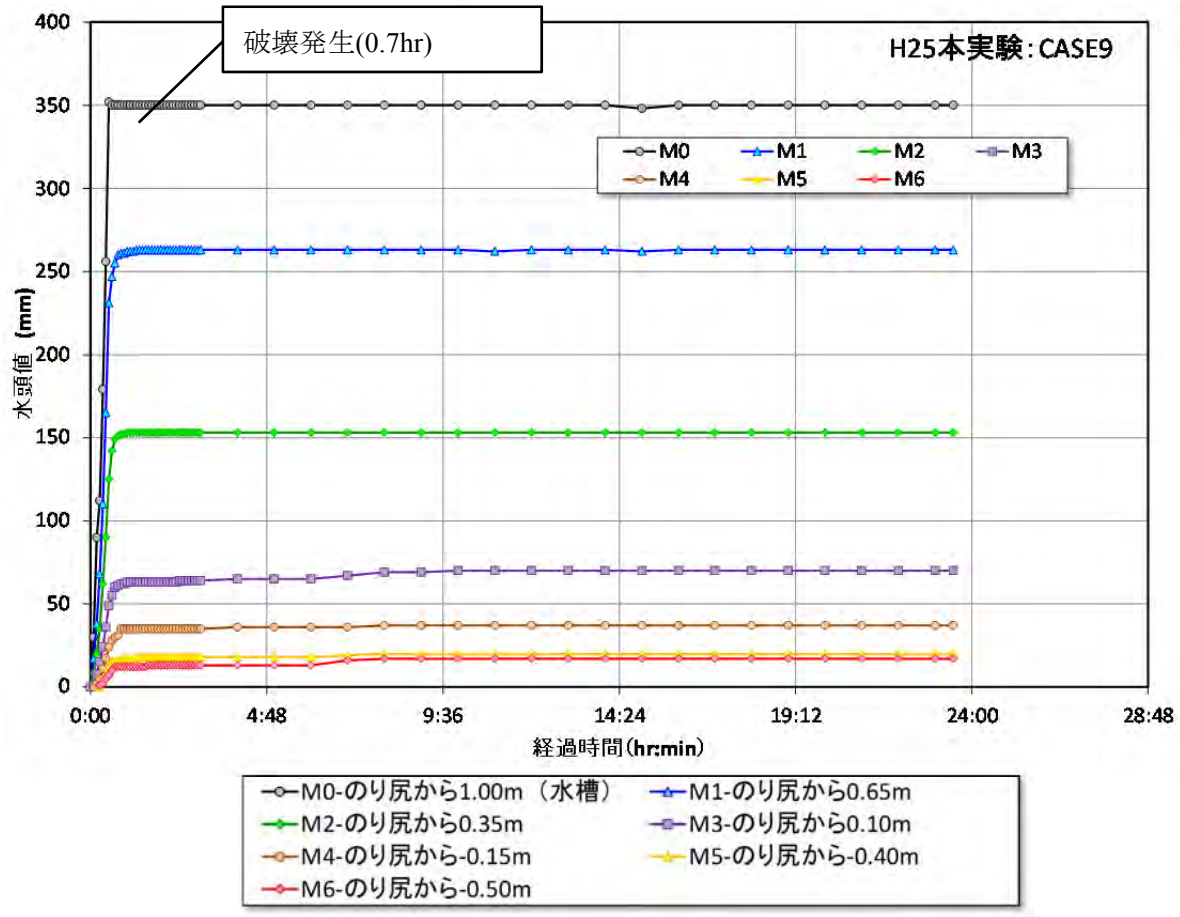



図 3.15.54　水頭の経時変化(CASE9)

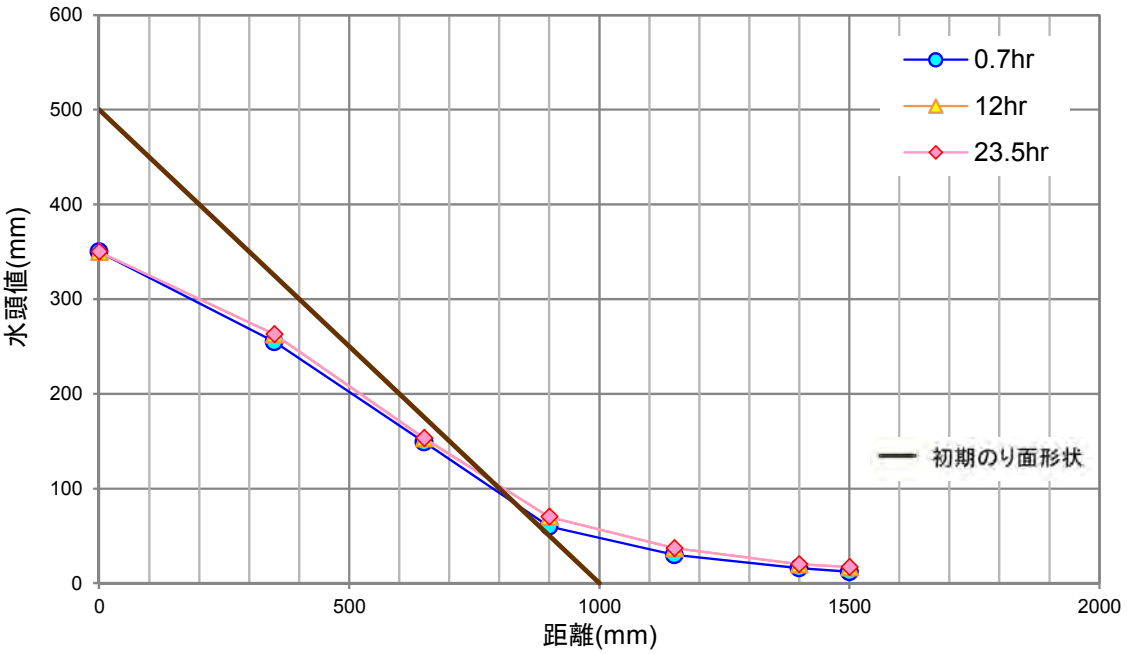
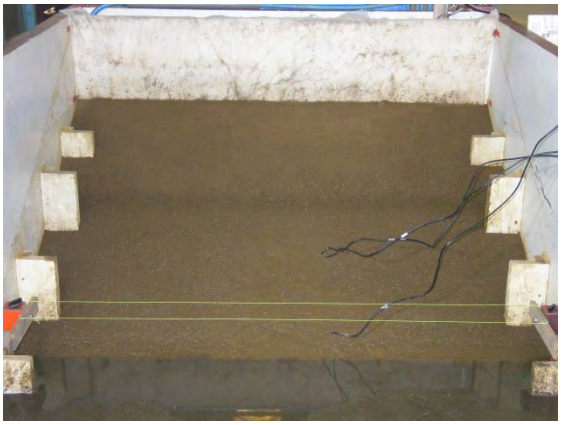
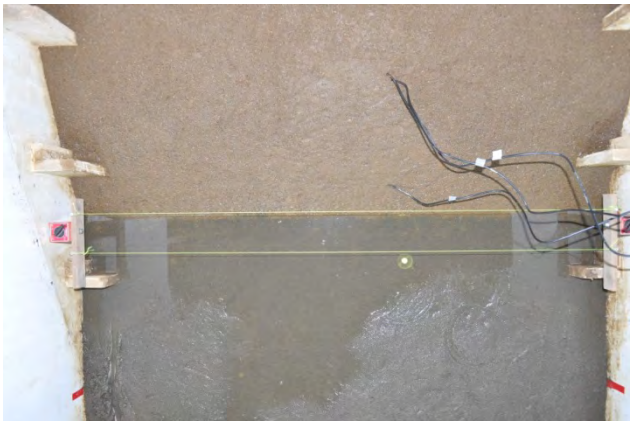



図 3.15.55　水頭分布の経時変化(CASE9)

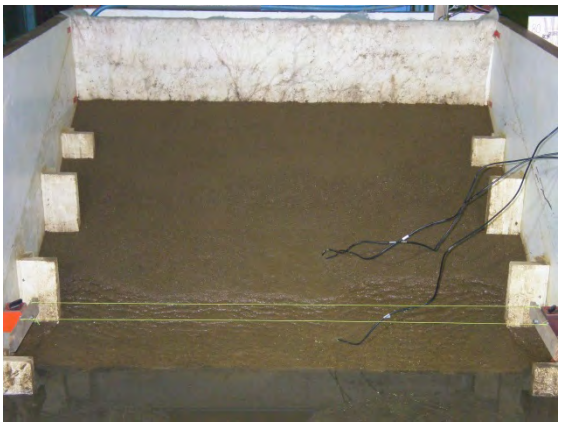


(a) 正面写真



(b) 上空写真

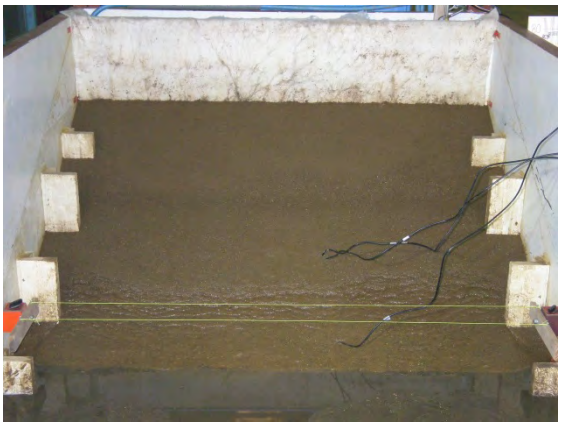
図 3.15.56　のり尻の状況（0.7hr 後、破壊開始）



(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.57　　のり尻の状況（12.0hr 後）



(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.58　のり尻の状況（23.5hr 後、実験終了）

### 3.15.12　CASE10 の破壊進行状況

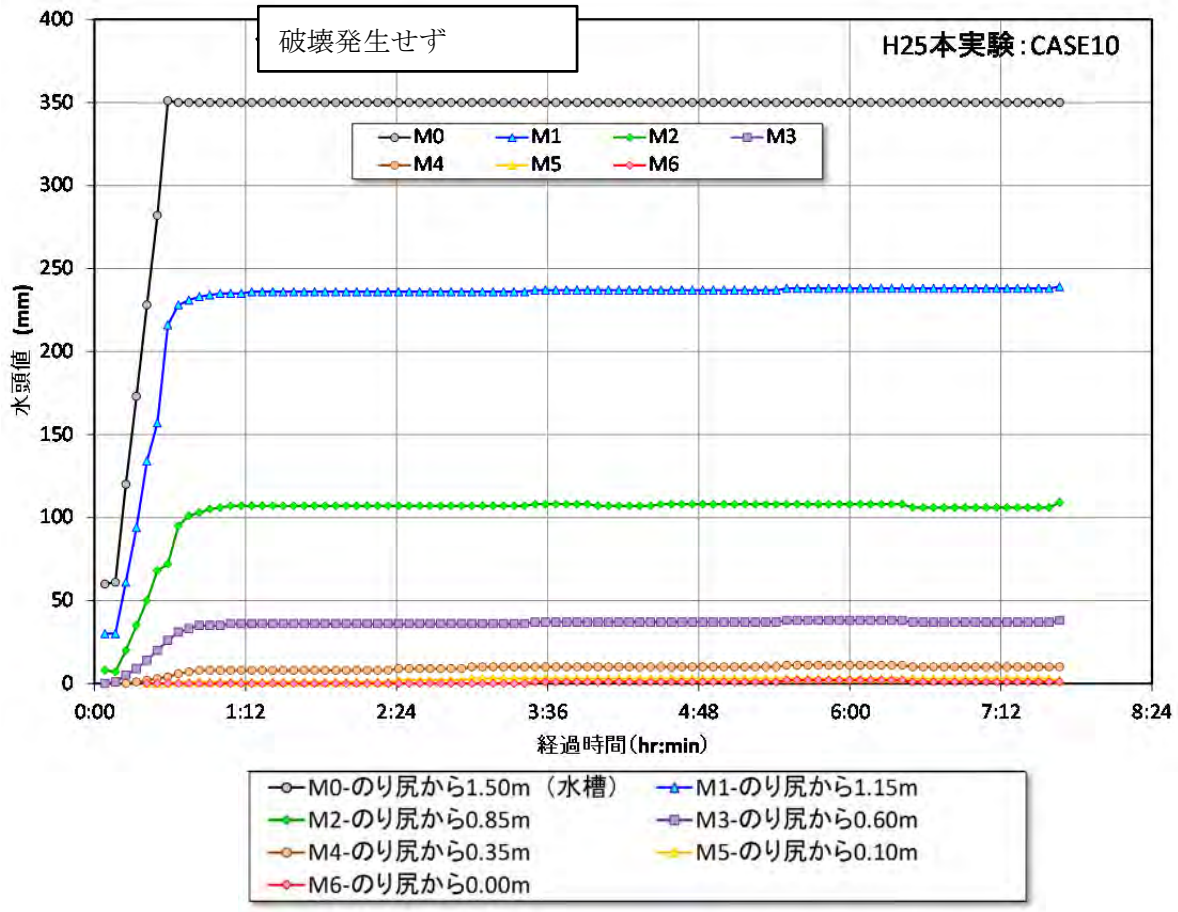



図 3.15.59　水頭の経時変化(CASE10)

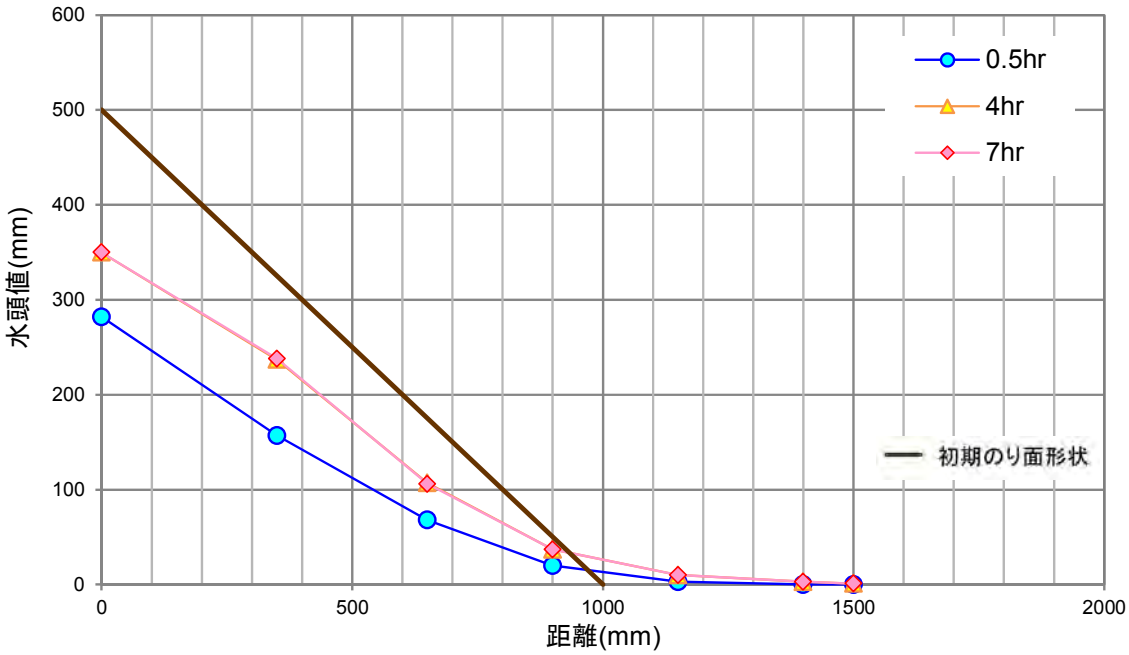



図 3.15.60　水頭分布の経時変化(CASE10)

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.61　のり尻の状況（0.5hr 後）

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.62　のり尻の状況（4.0hr 後）

(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.63　のり尻の状況（7.0hr 後、実験終了）

### 3.15.13CASE11 の破壊進行状況

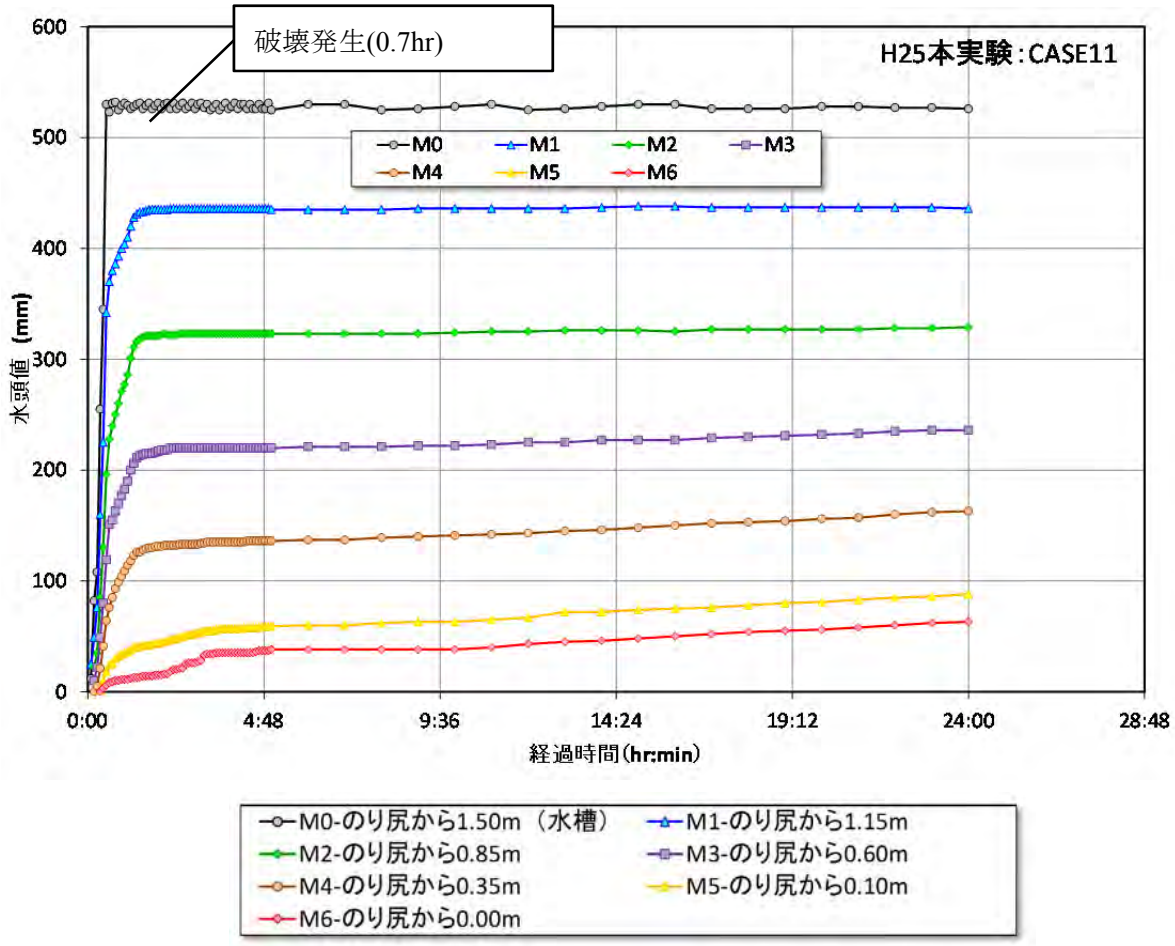



図 3.15.64　水頭の経時変化(CASE11)

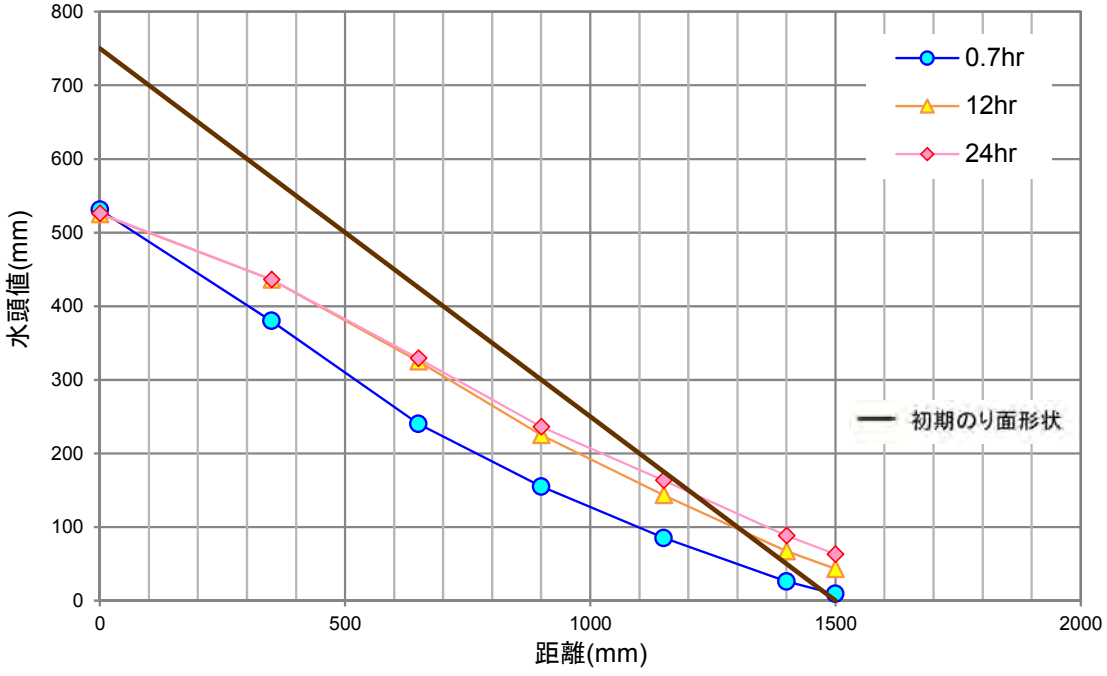
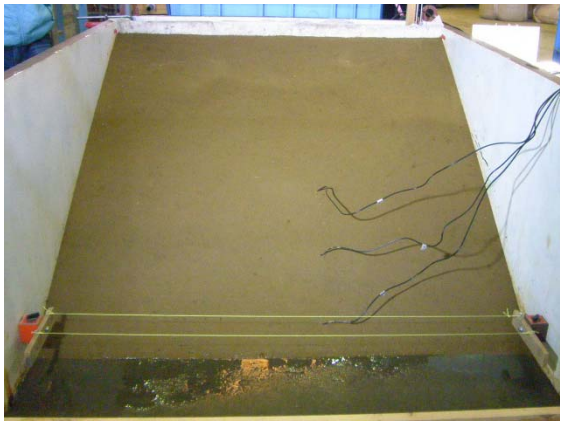


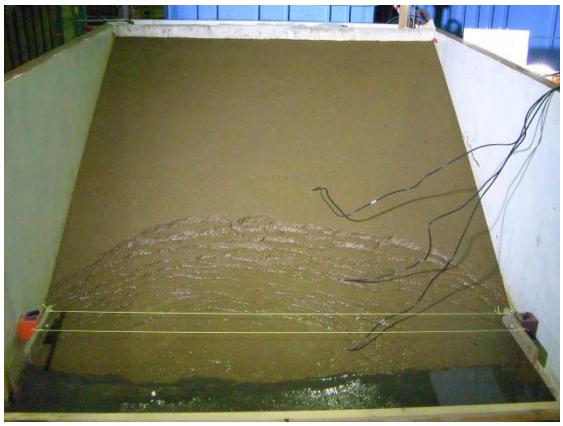

図 3.15.65　水頭分布の経時変化(CASE11)



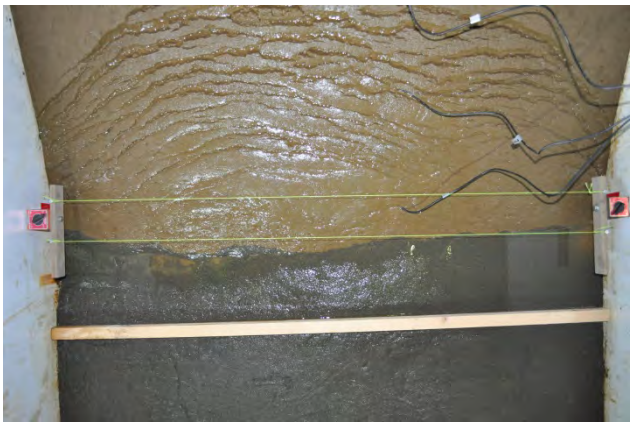
(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.66　のり尻の状況（0.7hr 後、破壊開始）

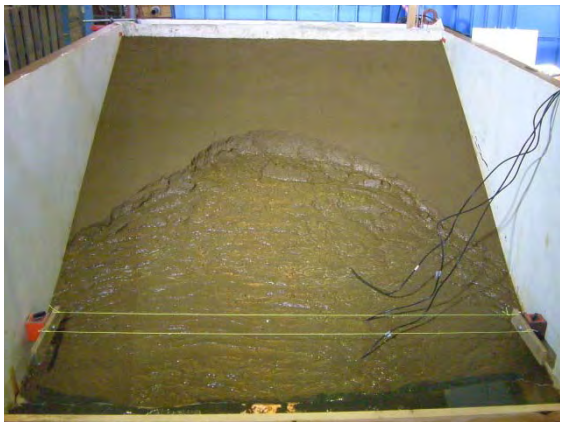


(a) 正面写真



(b) 上空写真

図 3.15.67　のり尻の状況（12.0hr 後）



(a) 正面写真

(b) 上空写真

図 3.15.68　のり尻の状況（24.0hr 後、実験終了）

### 3.15.14CASE12 の破壊進行状況

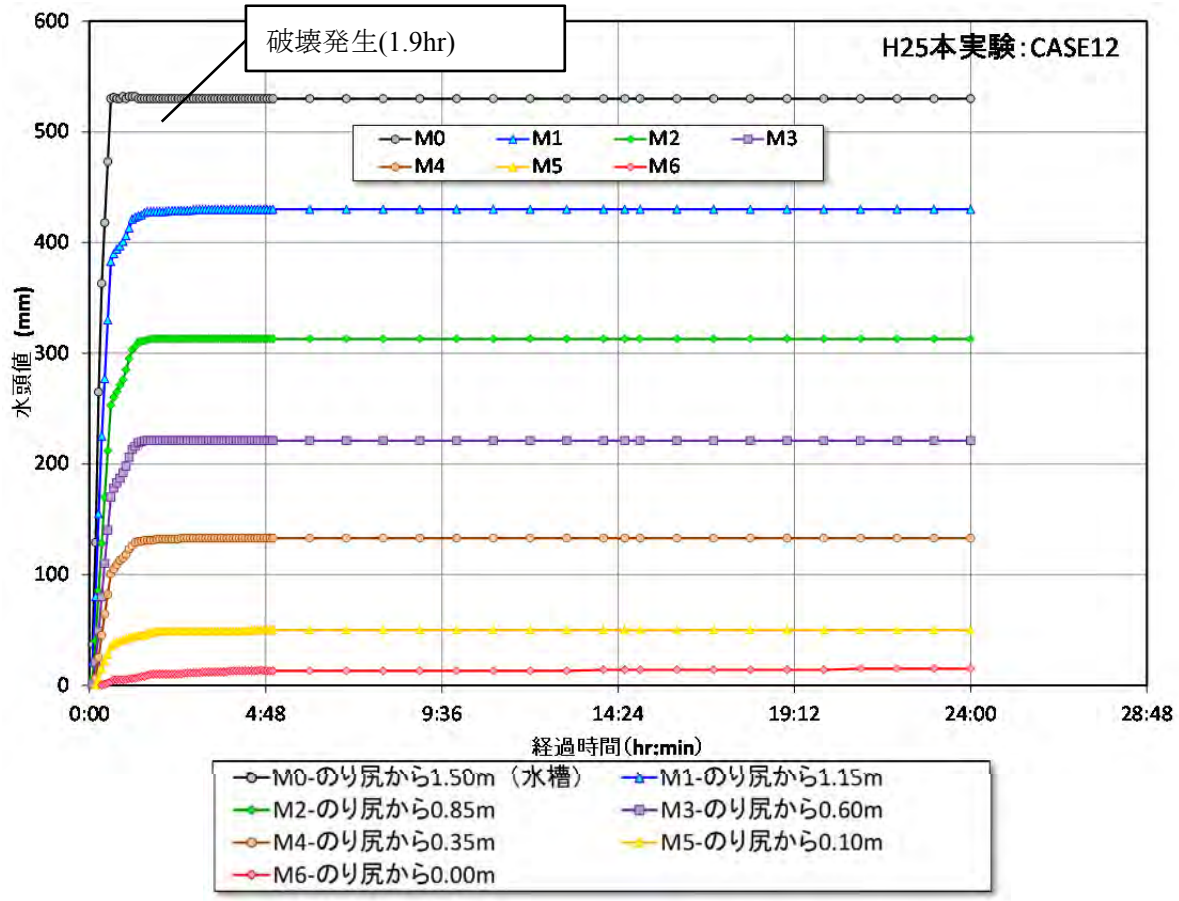



図 3.15.69　水頭の経時変化(CASE12)

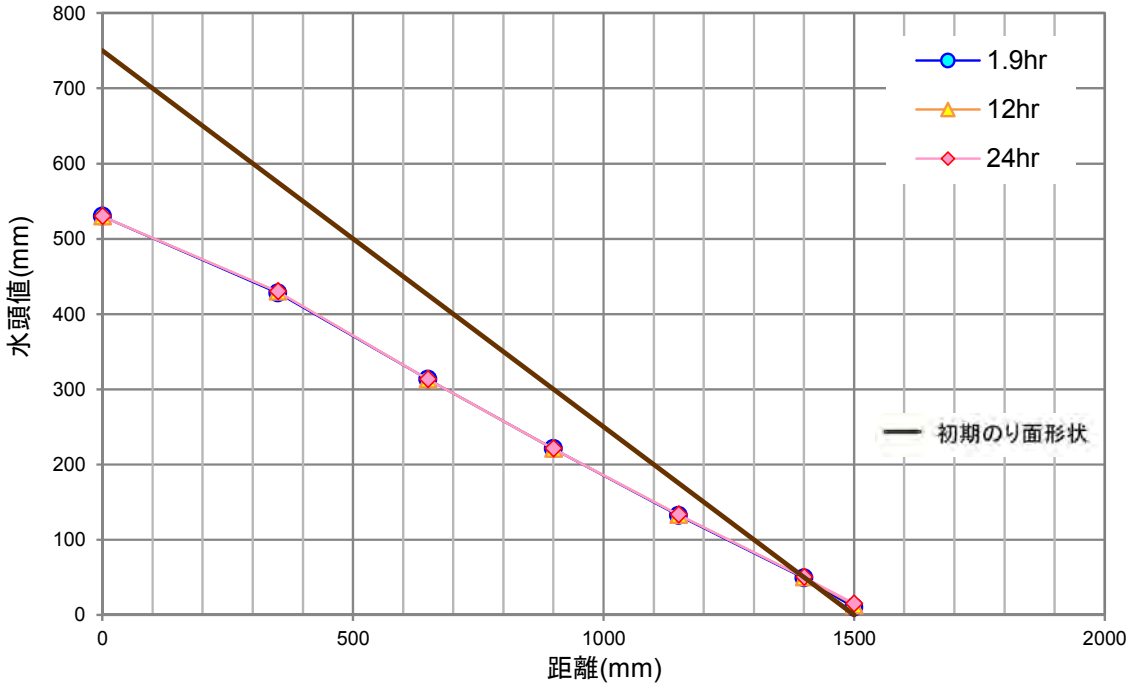



図 3.15.70　水頭分布の経時変化(CASE12)

(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.71　のり尻の状況（1.9hr 後、破壊開始）

(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.72　のり尻の状況（12hr 後）

(a) 正面写真　　(b) 上空写真

図 3.15.73　のり尻の状況（24hr 後、実験終了）

3.15.15CASE13 の破壊進行状況

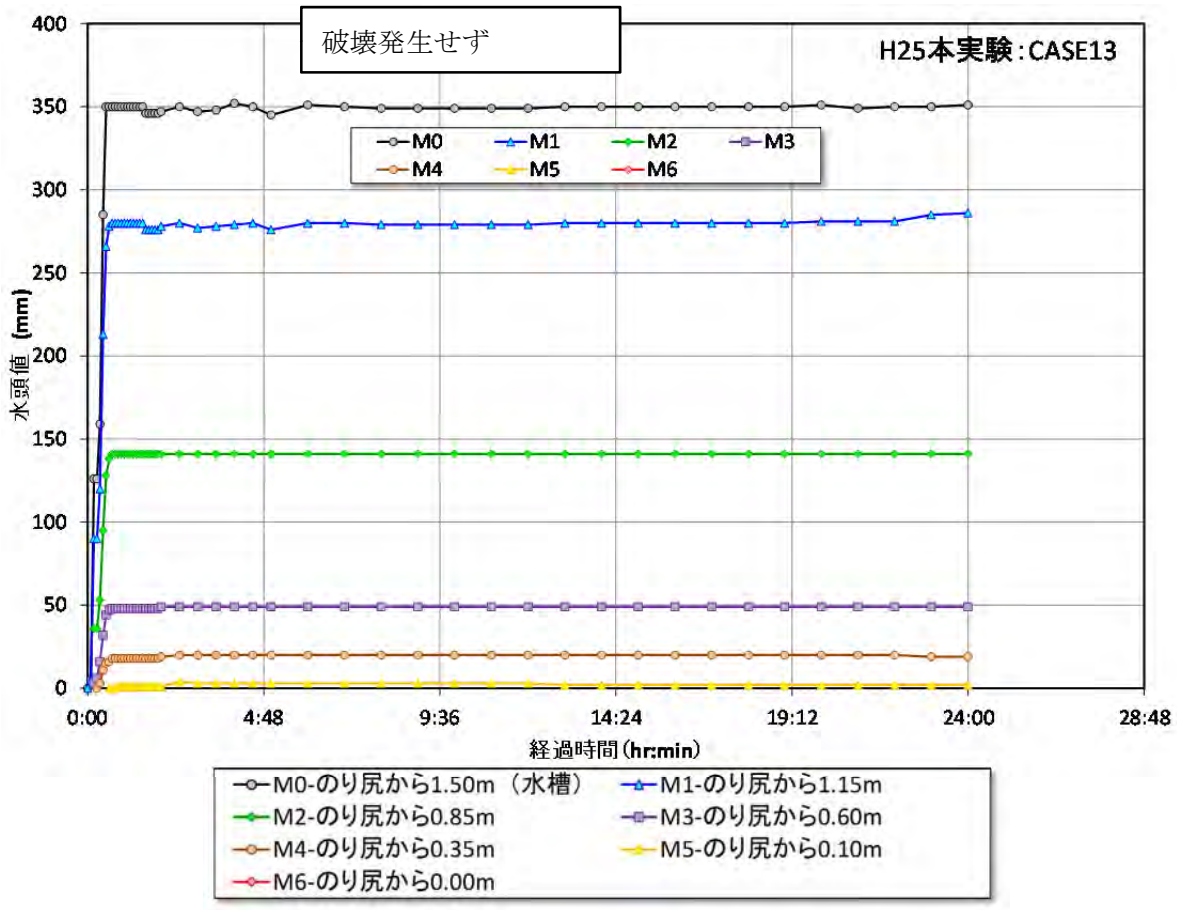



図 3.15.74　水頭の経時変化(CASE13)

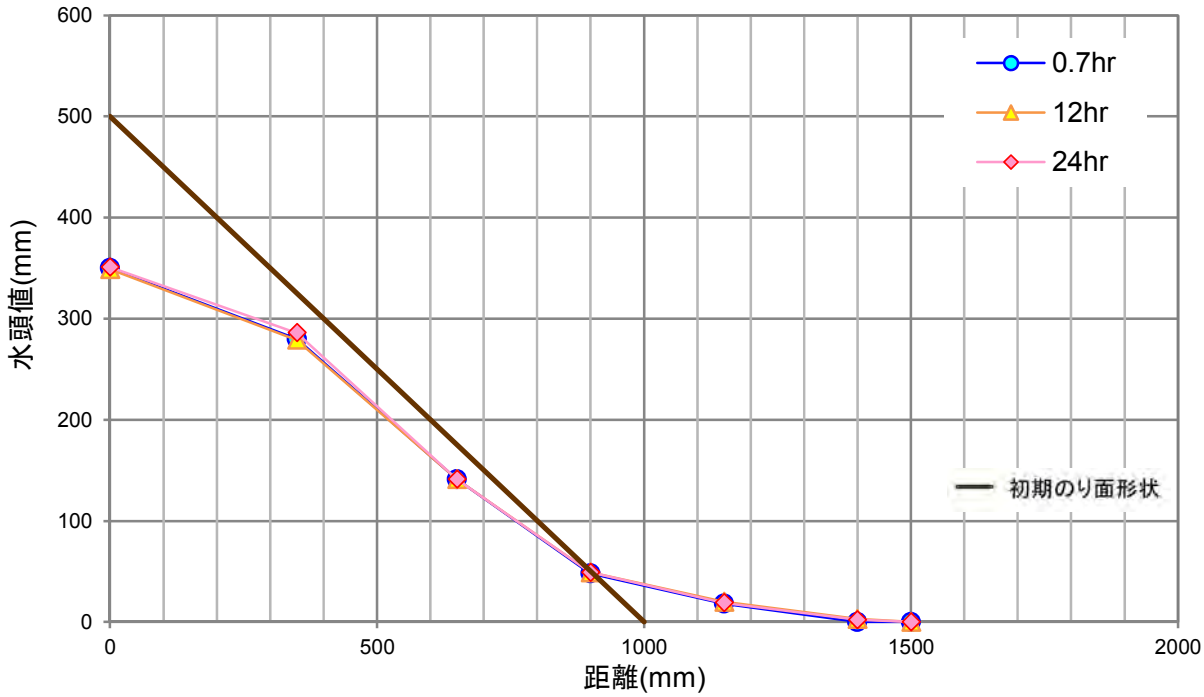



図 3.15.75　水頭分布の経時変化(CASE13)

(b)上空写真

図 3.15.76　のり尻の状況（0.7hr 後）

(b)上空写真

図 3.15.77　のり尻の状況（12.0hr 後）

(b)上空写真

図 3.15.78　のり尻の状況（24.0hr 後）

※正面写真は、機器不良により、未撮影

### 3.15.16　のり尻付近の水平変位と動水勾配

マノメータによる計測結果は、経時変化図に整理し付属資料に添付するとともに付属 CD に収録した。

ここでは本実験で実施した CASE1～CASE13 で計測されたのり尻から 10cm の位置における水頭の経時変化を作成し**図 3.15.79** に示す。いずれの CASE においても水位上昇直後には若干のばらつきはあるものの、その後ほぼ安定した圧力水頭を示すことがわかる。また、これら安定後の圧力水頭は 37mm（CASE5）～63mm（CASE9）程度とばらつくが、多くの CASE でマノメータ位置ののり面高さ 50mm 付近に収束する。

次に動水勾配と水平変位の関係[8)]を**図 3.15.80** に示す。動水勾配はのり尻とのり尻から 10cm 位置に設置されているマノメータの間の動水勾配であり、水平変位はのり尻位置での変位量である。動水勾配は、のり尻位置を 0 として算出した。なお、各 CASE の崩壊が発生した時点のマーカを大きく図示した。のり尻部の水平変位が発生する動水勾配は一定ではなく、0.26～0.60 の広い範囲で生じているが、水平変位量の増加傾向を見ると崩壊が発生する概ね 0.4～0.5 の範囲で、急激に水平変位量が累積する挙動を示し、崩壊が進むことが確認された。

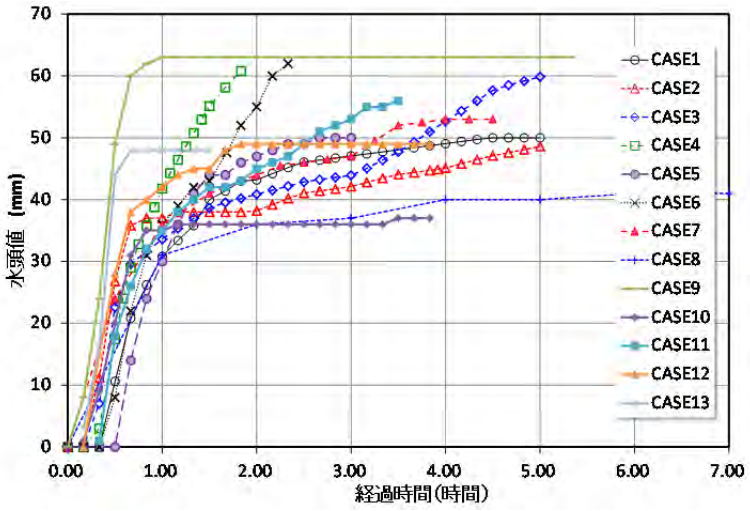



図 3.15.79　のり尻付近の圧力水頭の経時変化

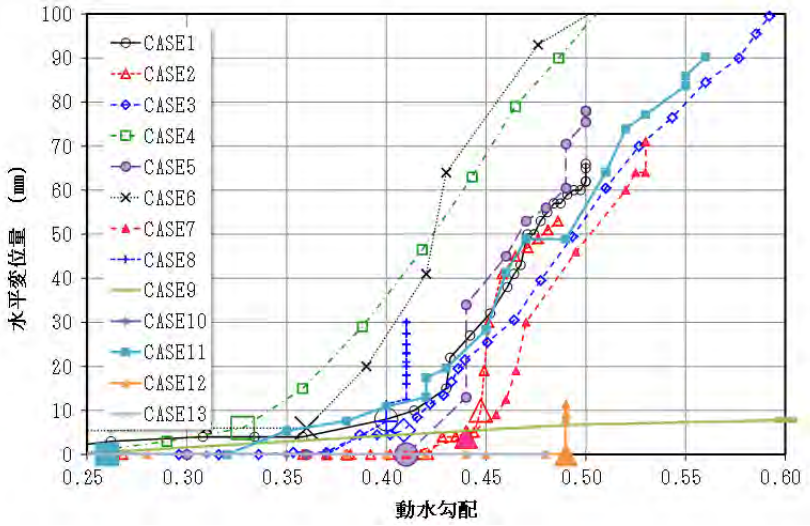



図 3.15.80　のり尻付近の水平変位と動水勾配の関係

### 3.15.17　のり尻付近の細粒分含有率の変化

浸透破壊の初期にはのり尻を縁取るように細粒分の流出が見られたが、その変化量を把握するため、実験後（浸透破壊が概ねのり面の中央付近まで発達した時点で実験終了とした）の細粒分含有率を実験前と比較して**図 3.15.81** に示した。なお、実験後の試料はのり面の表面から採取したものを使用している。

図によると、実験後の細粒分含有率は概ね実験前よりも低くなっており、細粒分の流出が生じていることをうかがわせている。

しかしながら、この細粒分の変化は実験終了まで浸透させた結果であるため、浸透破壊の発生に細粒分の移動が関与していることを直接示すものかどうかは判断できない。

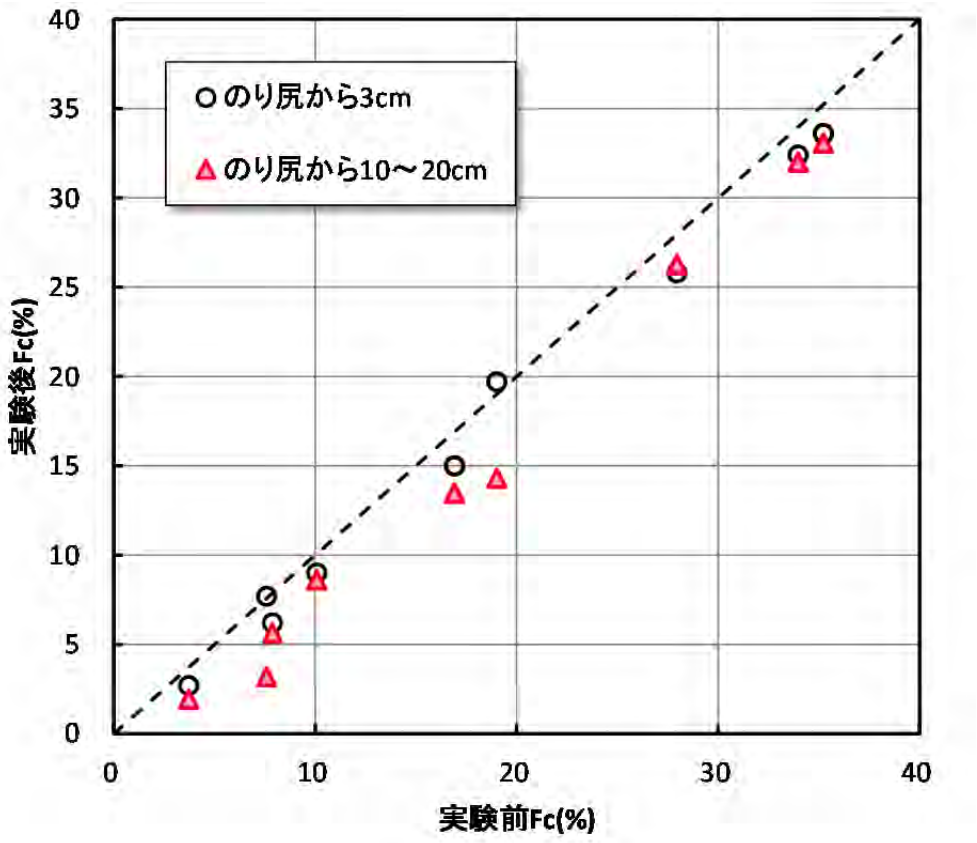



図 3.15.81　実験前後の細粒分含有率の比較

### 3.15.18　のり面形状の変化

堤防模型の崩壊後の形状と緩みの範囲を、土層強度検査棒[9]を用いて、土槽上面からの距離の計測を行った。模型の奥行き方向に端部より 300、600、900、1200 ㎜の位置に測線を設け、水平距離で概ね 200mm 毎に緩み領域底面の高さを計測した。地表面の形状が大きく変わっている場合には、変化点も計測した。また、緩みの範囲は、土層強度検査棒で貫入する際の感覚で、抵抗が極端に増加する高さまでとした。

実験後の堤防のり面形状と実験後の地表面からの緩みの範囲[10]を図 3.15.83～図 3.15.90 に示す。プロットした値は、端部の影響をあまり受けていないと考えられる、のり面の中央付近の 600、900 ㎜を平均した。なお、未計測及び崩壊が発生していない CASE1、2、10、13 を除いている。

のり尻付近からのり面側に 100mm までの範囲は、どの CASE においても崩壊土の存在と共に、緩みの範囲が分布していることが確認された。緩みの範囲が深く、上部まで進展している CASE3～7、11 は、実験材料の細粒分含有率が、30%以下のものであった。

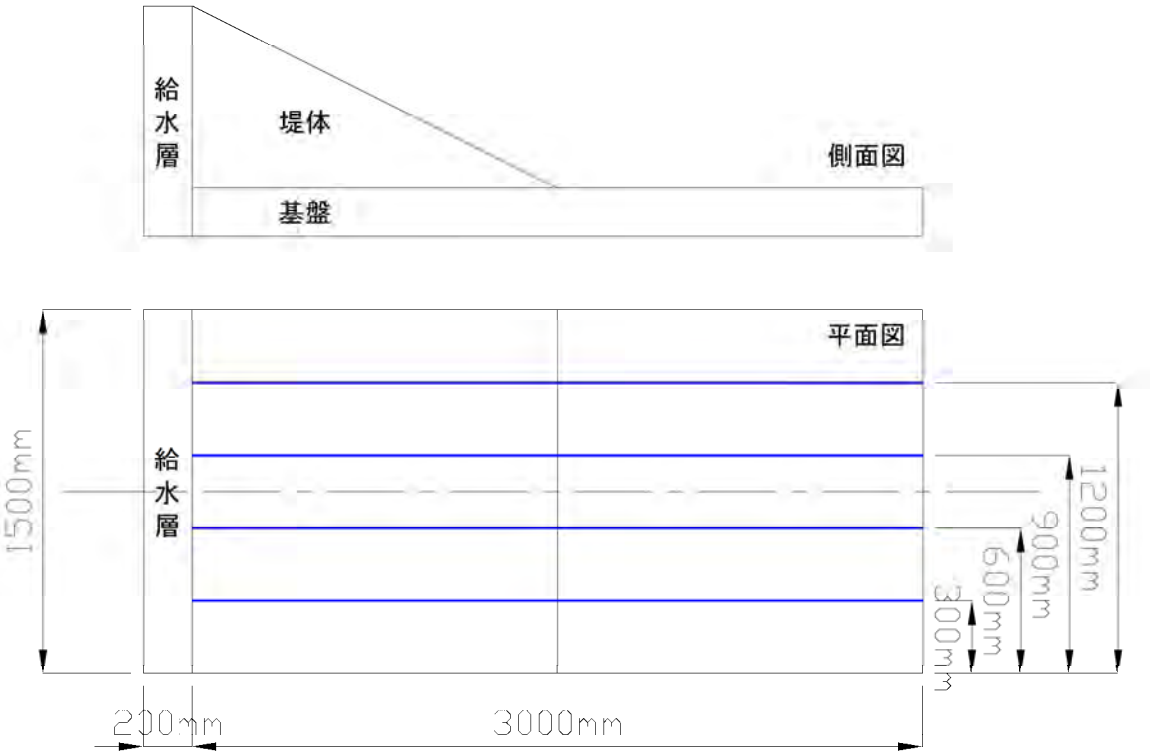



図 3.15.82　計測した測点位置

(1) CASE3

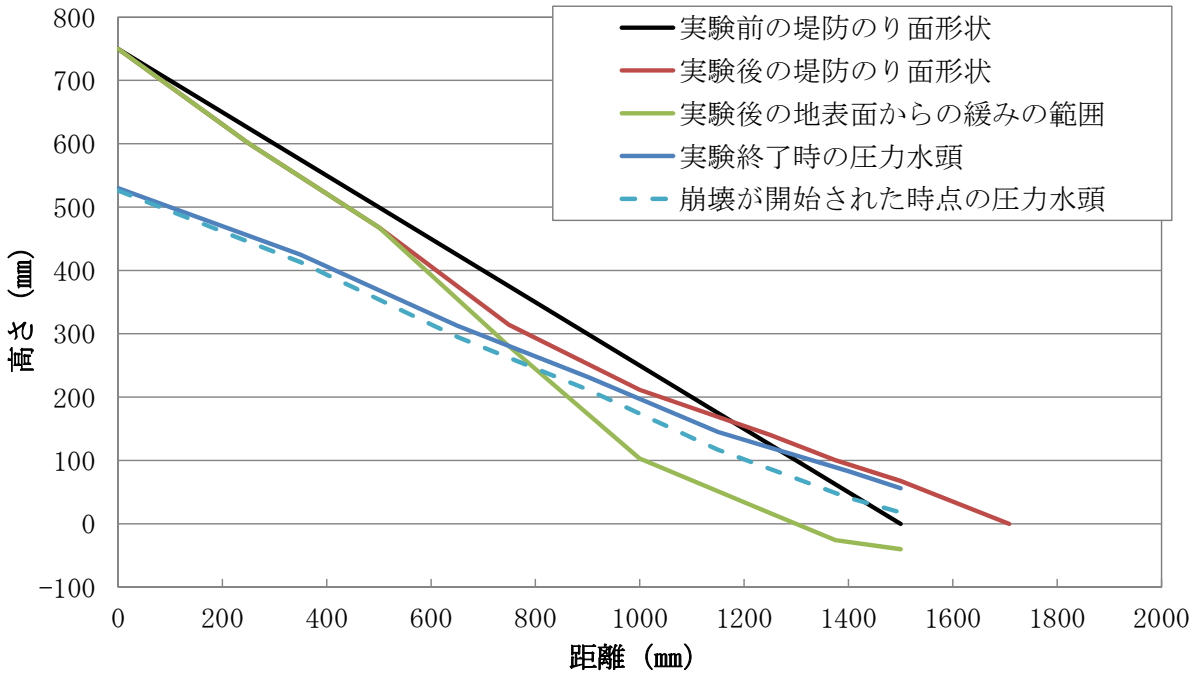



図 3.15.83　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE3)

(2) CASE4

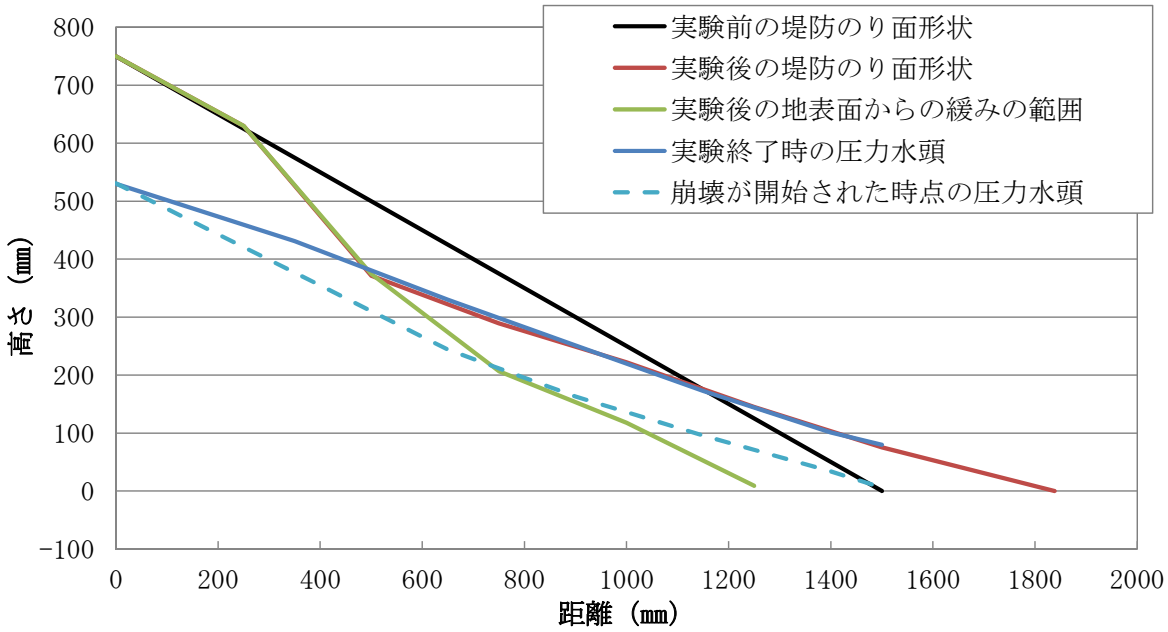



図 3.15.84　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE4)

(3) CASE5

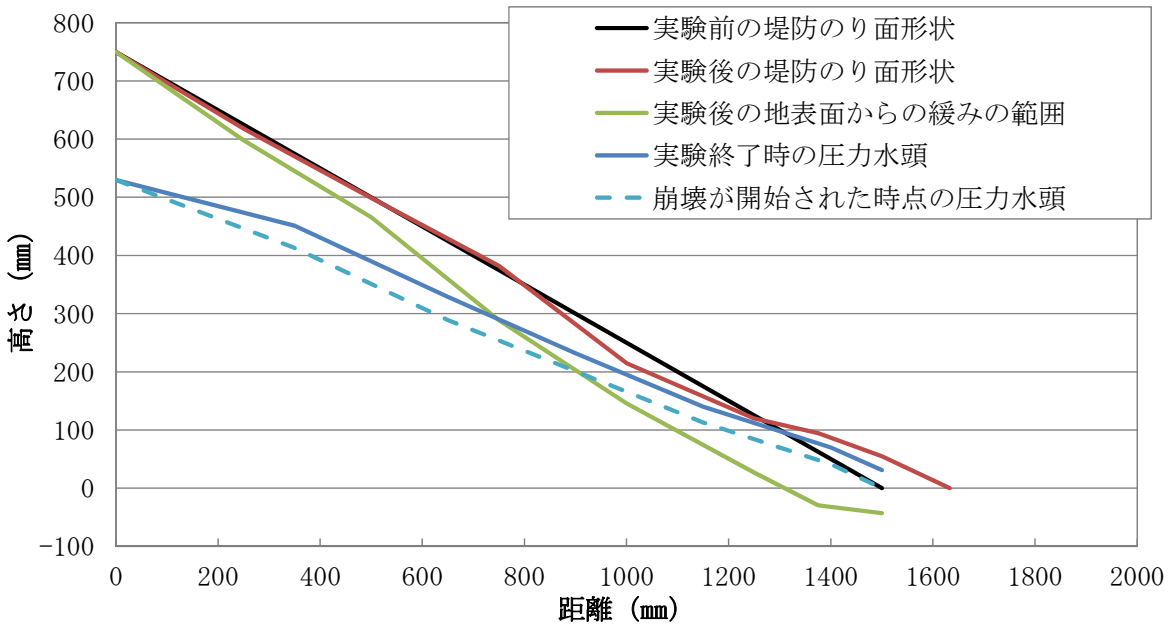



図 3.15.85　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE5)

(4) CASE6

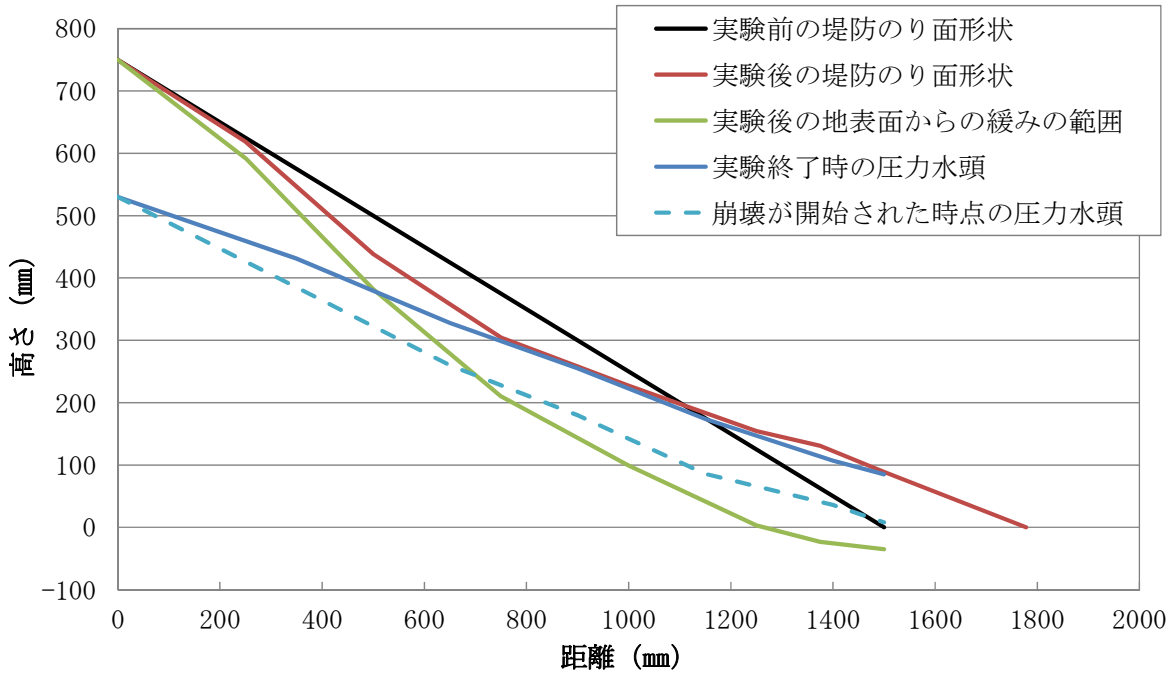



図 3.15.86　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE6)

(5) CASE7

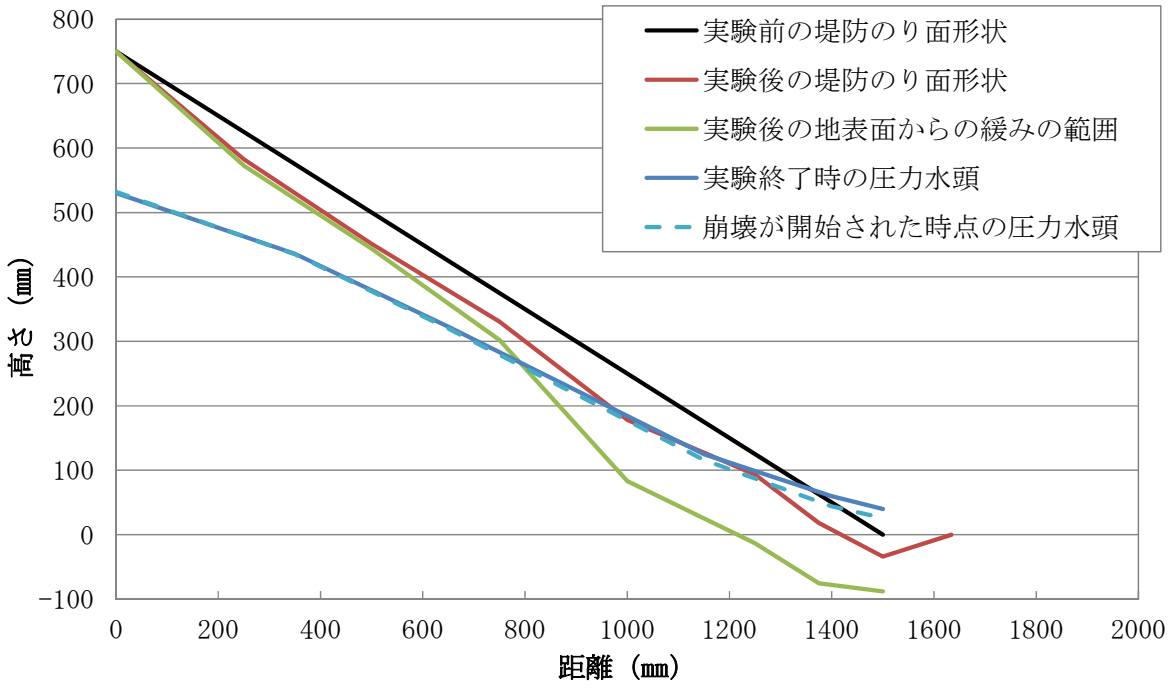



図 3.15.87　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE7)

(6) CASE8

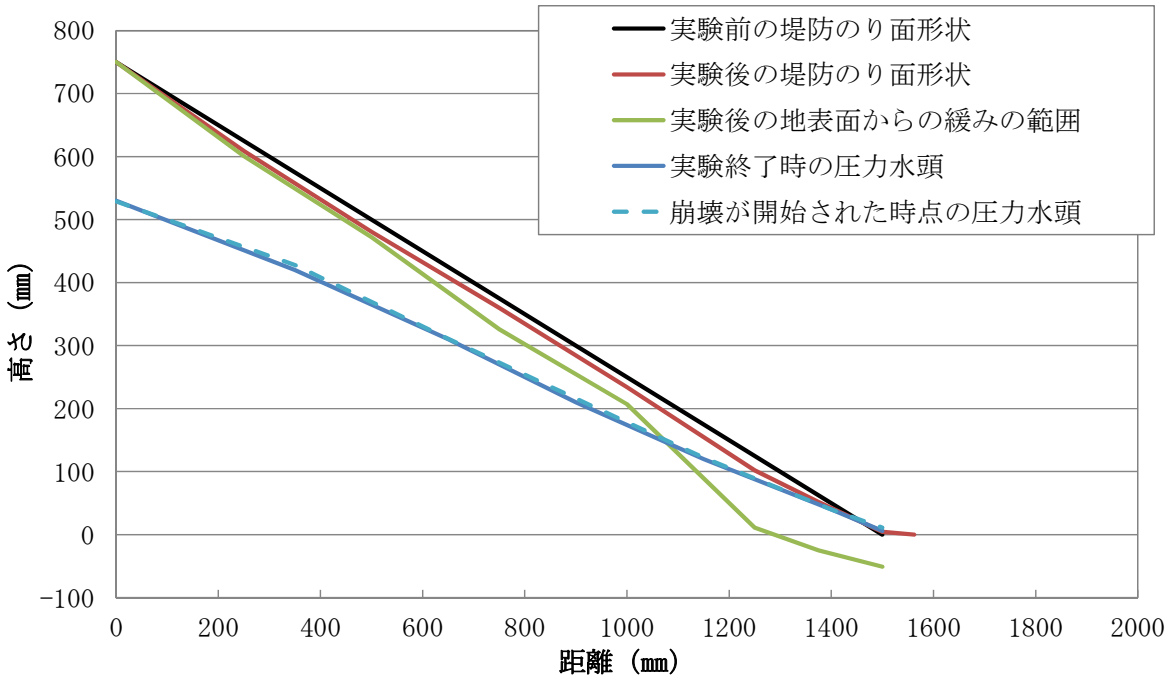



図 3.15.88　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE8)

(7) CASE9

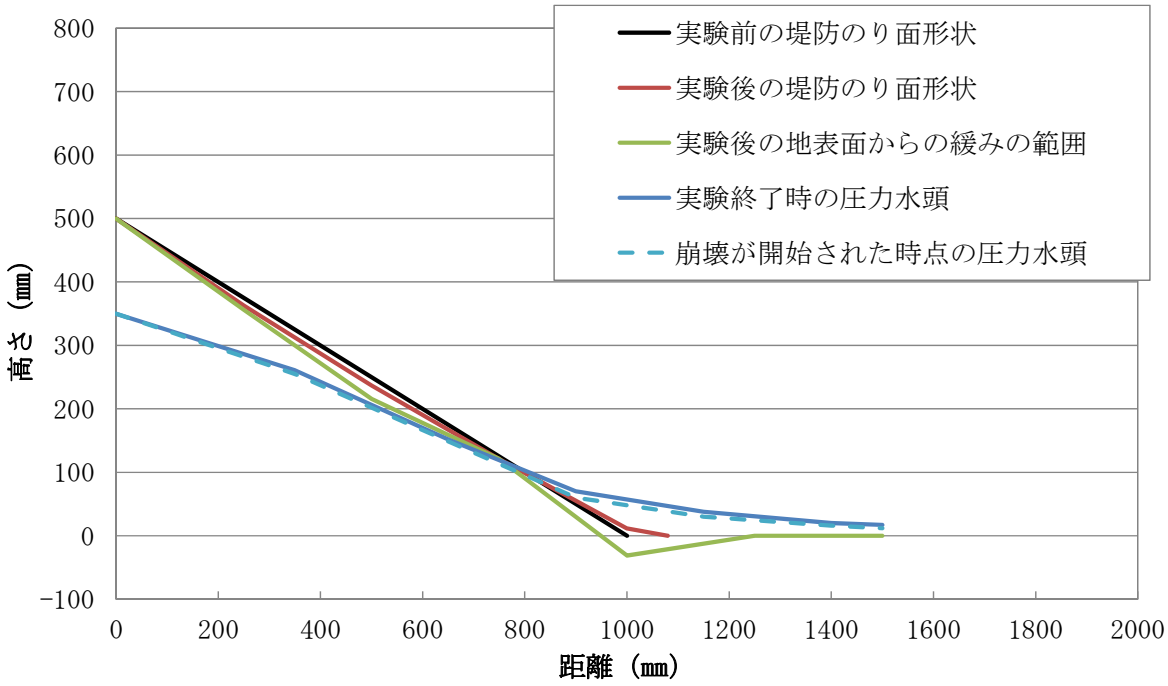



図 3.15.89　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE10)

(8) CASE11

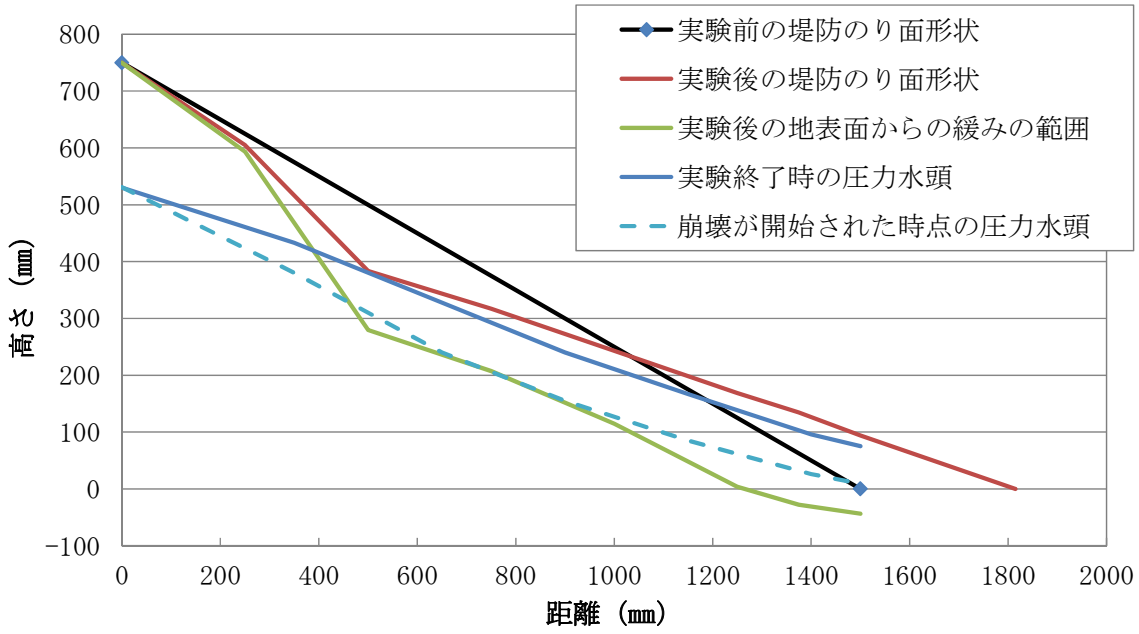



図 3.15.90　実験前後の模型形状と圧力分布(CASE11)

### 3.15.19　発生の有無と堤体材料の関係

実験結果から得られたのり尻近傍の動水勾配（のり尻とのり尻から 10 ㎝間の位置）で、進行性破壊が発生したケースでは崩壊発生時の値、発生しなかったケースでは最大値と 60%粒径との関係を**図 3.15.91** に示した。

60%粒径が細かい材料では低い動水勾配で進行性破壊が発生し、60%粒径が粗くなるにつれて、進行性破壊が発生するにはより高い動水勾配が必要となる傾向があるものと考えられる。実験 CASE の中で他の CASE と比較して 60%粒径の大きい CASE10、13 の実験材料⑩では、進行性破壊が生じなかった。

次に、細粒分含有率と動水勾配の関係を**図 3.15.92** に示す。細粒分含有率の違いによる進行性破壊の発生の有無の傾向は確認されなかった。進行性破壊が生じなかった Case10、13 は、礫分含有率が 69.1%と多くの礫を含む材料であった。

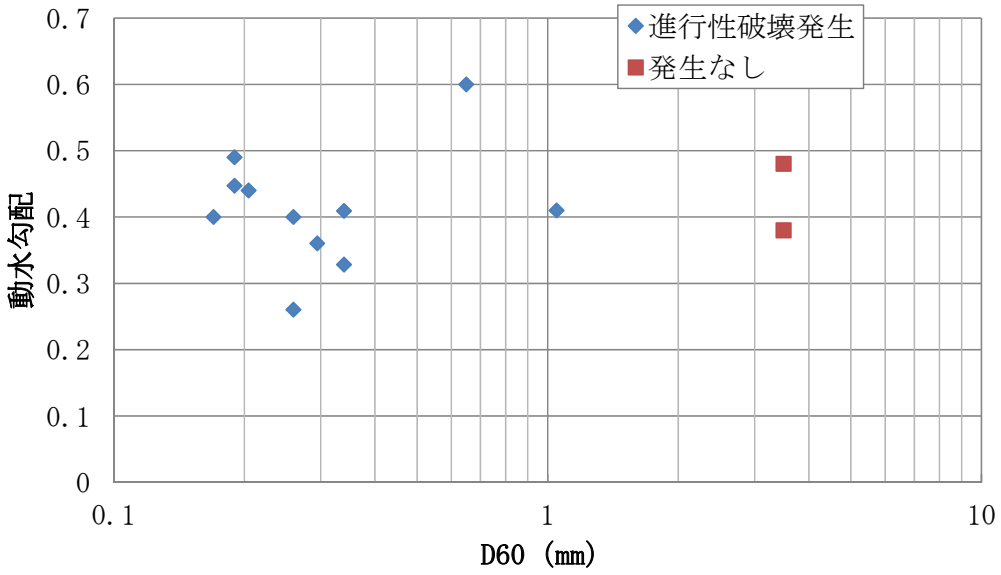



**図 3.15.91　60%粒径と動水勾配**

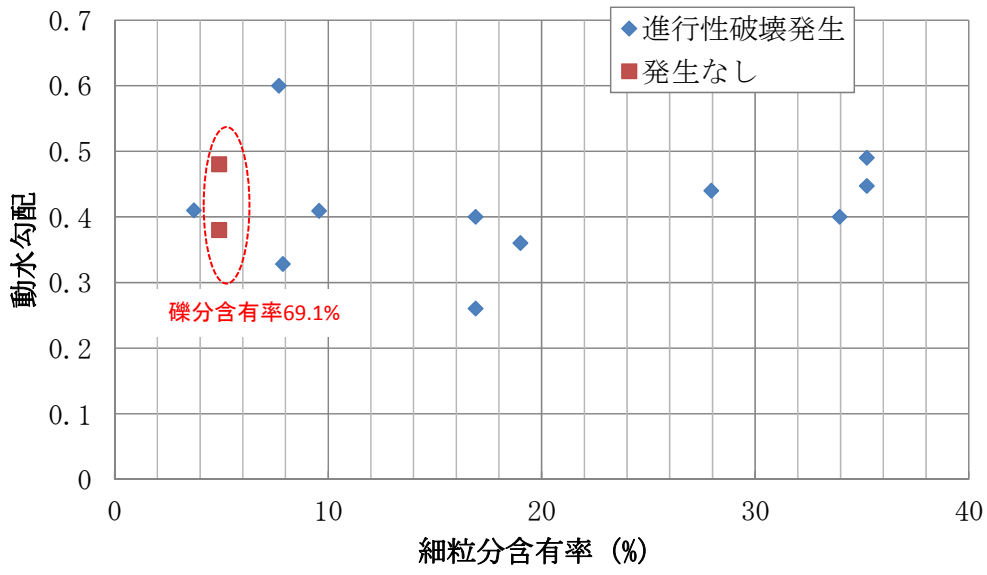



**図 3.15.92　細粒分含有率と動水勾配**

## 3.16 まとめ

小型模型実験では、まず、予備実験で壁側の影響を減ずる土槽の構造を検討、基礎地盤の土質、模型形状の違いによる実験結果の影響について確認した。その結果、土槽は、水壁沿いの影響を減らす止水板の設置し、模型の大きさの影響を受けない天端なし、堤体模型の高さ 0.75m とした。また、基礎地盤はのり尻付近の水頭値が上昇しやすい条件を設定した。

本実験では同形状の模型を使用し、堤体材料を変えたケースで実験を実施した。

破壊発生時ののり尻付近の動水勾配によると、各ケースで破壊がのり尻部の水平変位が発生する動水勾配は一定ではなく，0.26～0.60 の広い範囲で生じているものの、水平変位量の増加傾向を見ると崩壊が発生する概ね 0.4～0.5 の範囲で，急激に水平変位量が累積する挙動を示し，崩壊が進むことが確認された。

実験後の模型の状態から、破壊が発生した模型では、崩壊土の存在と共に、緩みの範囲が分布していることが確認された。緩み範囲はのり面に沿って広がっており、破壊が進行しても堤体内部には健全な部分が残ることが、確認された。また、基礎地盤の緩みがが確認されており、基礎地盤の強度低下が堤体材料の崩壊に関与した可能性が確認された。

動水勾配と堤体材料の材料特性の関係からは、中規模浸透模型実験と同じ傾向で、60%粒径が細かい材料では低い動水勾配で破壊が発生し，60%粒径が大きくなるにつれて，進行性破壊が発生するにはより高い動水勾配が必要となる傾向が確認された。また、礫分を多く含み 60%粒径の大きいケースでは、進行性破壊が生じないことを確認した。

# 4. まとめ

河川堤防の浸透によるのり尻からの進行性破壊現象に関する模型実験を行い、その挙動や発生条件に関する知見を整理した。

中規模浸透模型実験では、進行性破壊に及ぼす堤体材料、のり面勾配、締固め度の影響を、また、小規模浸透模型実験においては、堤体材料の影響について検討した。

進行性破壊が生じたケースでは、崩壊はのり面下部の比較的浅い崩壊から始まり，その後、崩壊部（滑落崖）の高さを増しつつ、徐々にのり面上方へ進展していく挙動が確認された。また、実験後の模型の貫入抵抗から求めた崩壊による緩みの範囲は、緩み範囲はのり面に沿って広がっており、破壊が進行しても堤体内部には健全な部分が残ることを確認した。

進行性破壊の発生条件について、堤体材料の違いでは，概ねの傾向として 60%粒径が小さい材料では低い動水勾配で破壊が発生し，粒径が大きくなるにつれて、破壊が発生するにはより高い動水勾配が必要なることを確認した。また、礫分を 10%以上含み 60%粒径の大きいケースでは、動水勾配の最大値が 0.5 程度の今回の実験の範囲においては進行性破壊が生じなかった。

のり面勾配の違いでは、急勾配の方が、破壊が生じやすい傾向を示し、のり面勾配 4 割の模型では崩壊が確認されなかった。

締固め度の違いでは、締固め度が低いほど、低い動水勾配で崩壊が発生しやすい傾向であった。

これらの結果より、進行性破壊の発生条件には、動水勾配だけでなく、堤体材料の土質特性、のり面勾配、締固め度が関与していることが言える。

今後、堤体地盤の材料、基礎地盤材料を変えるなど、破壊の発生しない条件や破壊の進行速度などのさらなる知見を蓄積する必要がある。

**参考文献**


1） 赤井浩一:浸透水流による盛土裏法面の局部破壊について, 土木学会論文集, 第 36 号, pp.44-49, 1956.

2） 長瀬迪夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生の条件－諸文献における記述と用例－，応用地質技術年報，No.9，1987.

3） D. van Zyl and M. E. Harr : Seepage Erosion Analysis of Structures, Proceedings 10th ICSMFE 1, pp.503-509, 1981.

4） 齋藤由紀子、森啓年、佐々木哲也：砂質土堤防の浸透による破壊形態と土質定数に関する大型模型実験，河川技術論文集第 17 巻，2011.7

5） 佐々木哲也，森啓年，齋藤由紀子：2.1 河川堤防の弱点箇所の評価技術に関する研究，平成 22 年度重点プロジェクト研究報告書，独立行政法人土木研究所

6） 佐々木哲也，石原雅規，齋藤由紀子，谷本俊輔：1.3 堤防システムの浸透安全性・耐震性評価技術に関する研究①，平成 23 年度プロジェクト研究報告書，独立行政法人土木研究所

7） 川井正彦，吉田直人，平林学，石原雅規，佐々木哲也：河川堤防の内部侵食発生の初期変状と進行性に関する小型模型実験，第 49 回地盤工学研究発表会，2014.7

8） 川井正彦，石原雅規，吉田直人：内部侵食とのり尻付近の動水勾配の関係，第 1 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，2013.11

9） 佐々木靖人，柴田光博，福田徹也，片山弘憲：斜面の土層深さとせん断強度の簡易試験法の開発，平成 14 年度応用地質学会論文講演集，pp359-362, 2002

10） 吉田直人，秋場俊一，川井正彦，石原雅規，佐々木哲也：河川堤防ののり面の進行性破壊に関する模型実験における崩壊形状の分析，GeoKanto2014，2014.9

# 付　　録

# A. マノメータ水頭の経時変化図

# 中型浸透模型実験

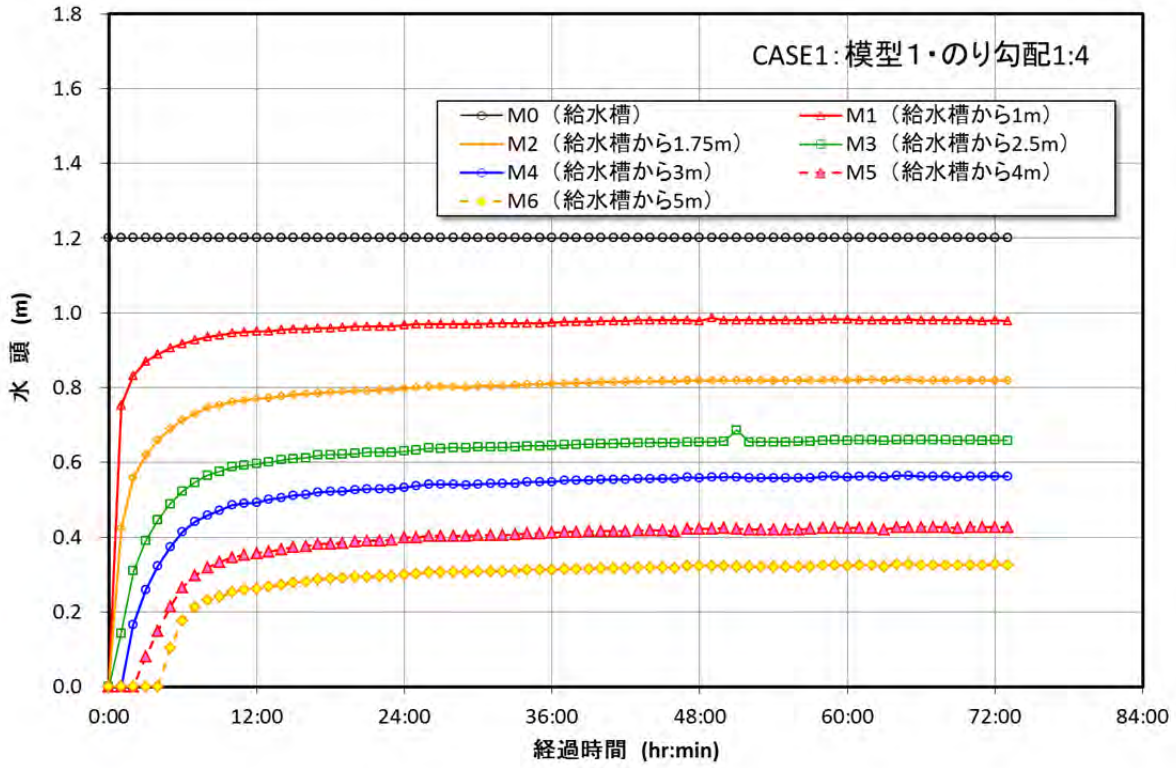



図 付 A.1　マノメータ水頭の経時変化（CASE1）

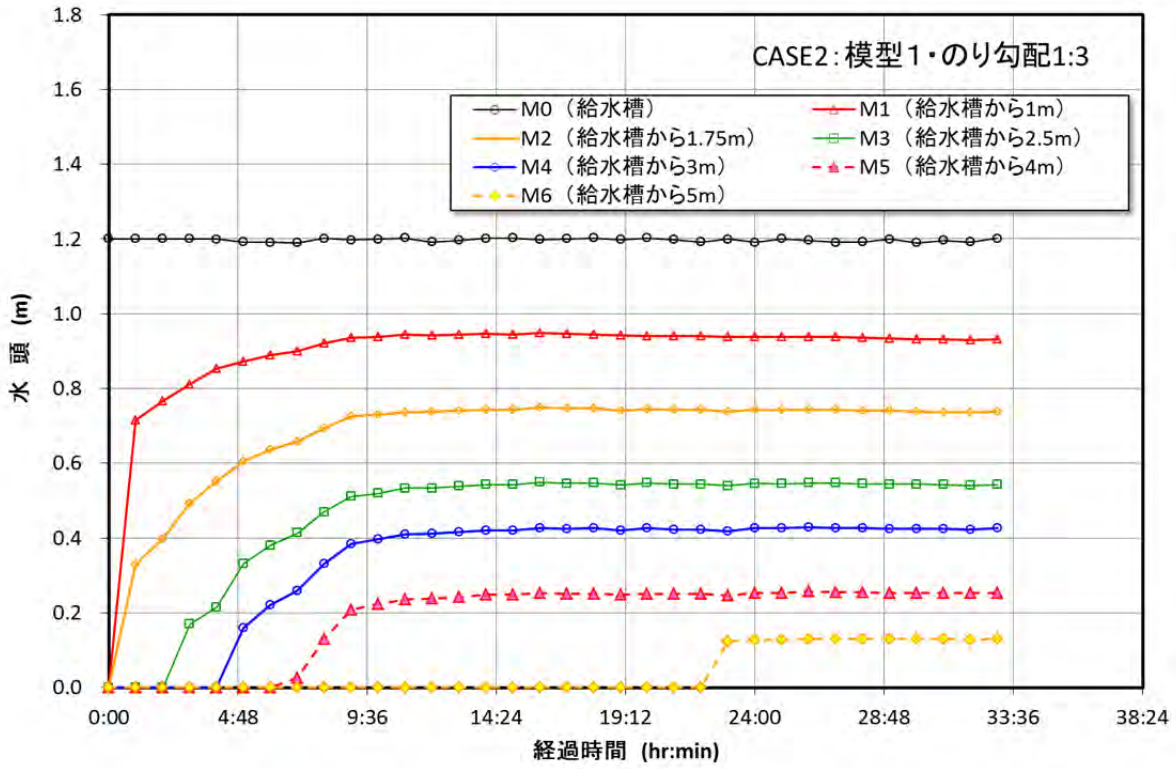



図 付 A.2　マノメータ水頭の経時変化（CASE2）

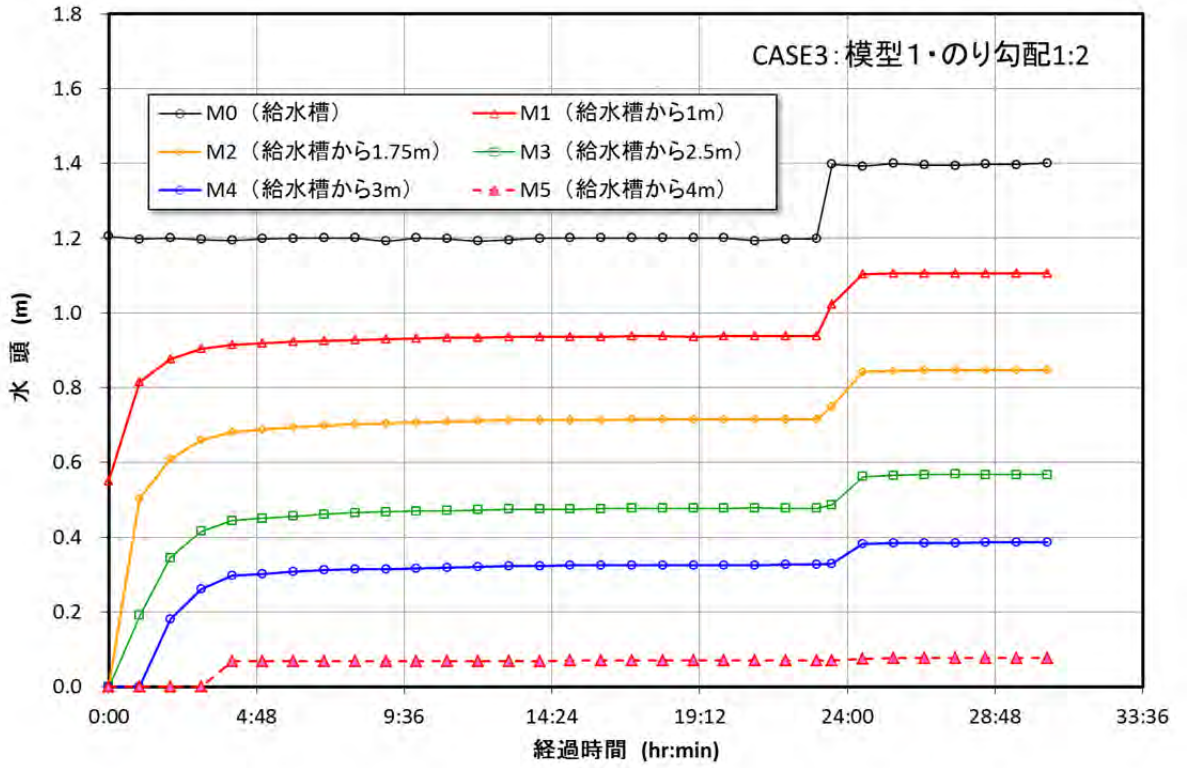



図 付 A.3　マノメータ水頭の経時変化（CASE3）

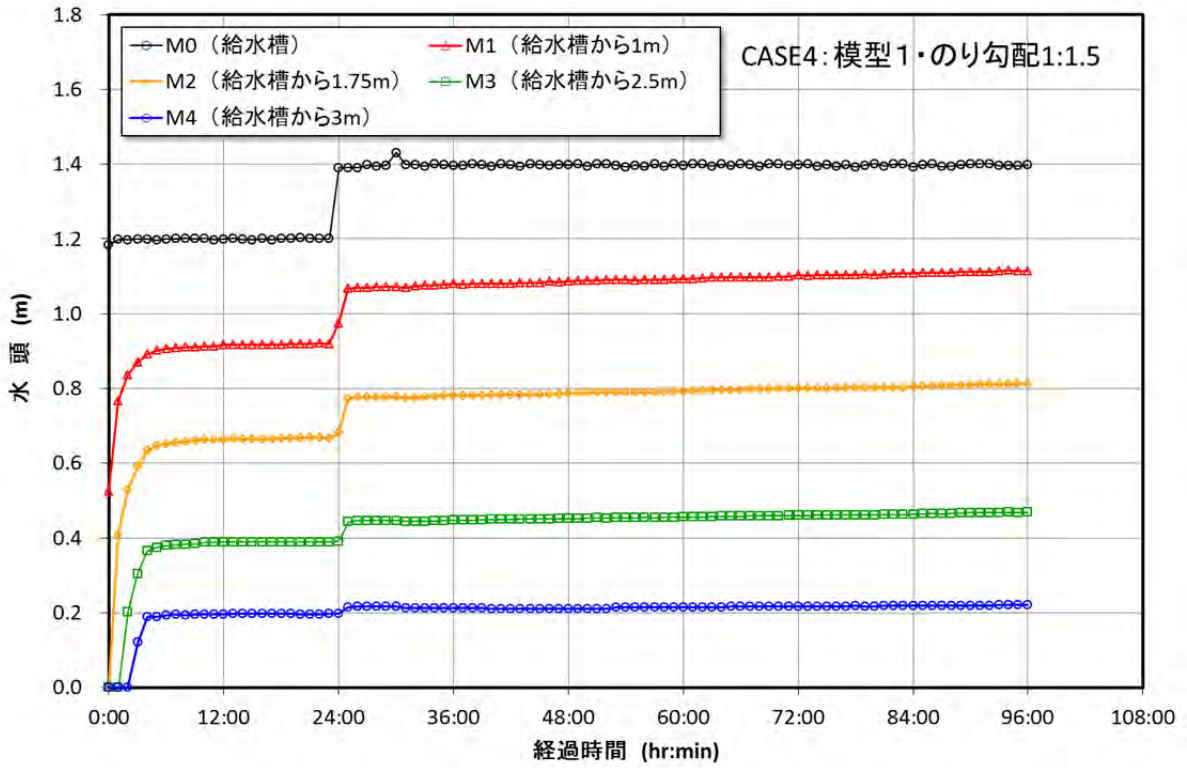



図 付 A.4　マノメータ水頭の経時変化（CASE4）

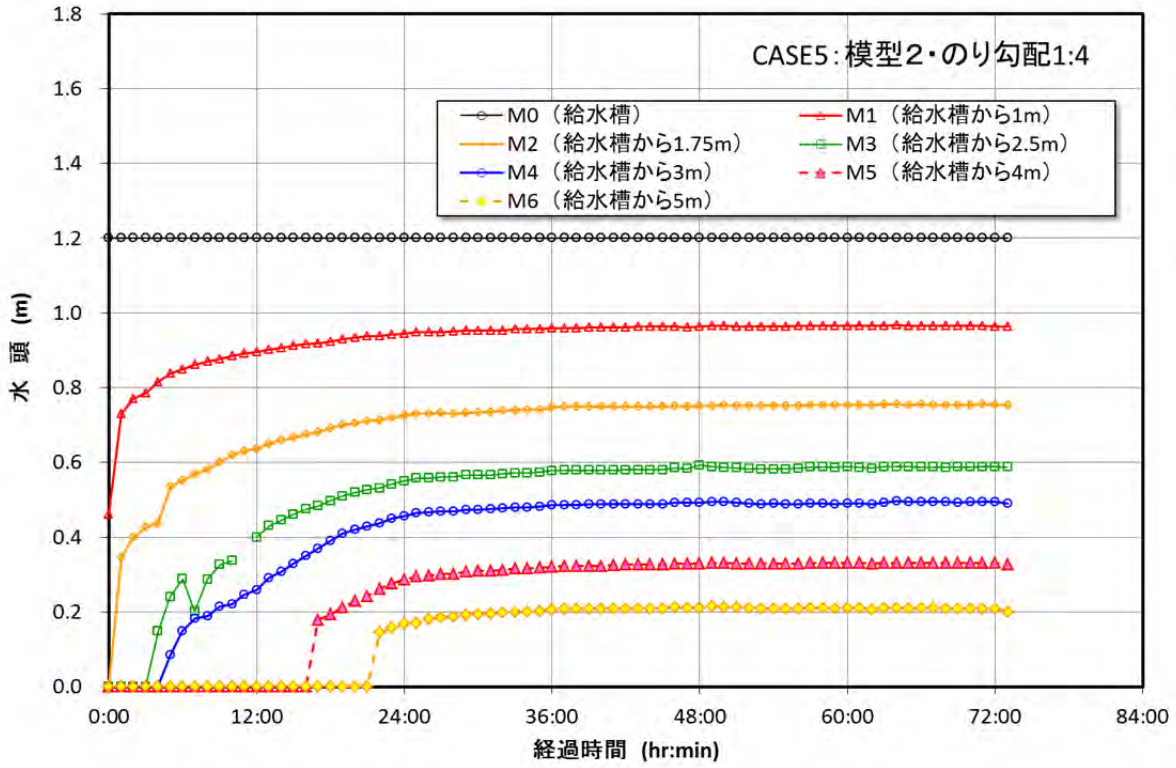



図 付 A.5　マノメータ水頭の経時変化（CASE5）

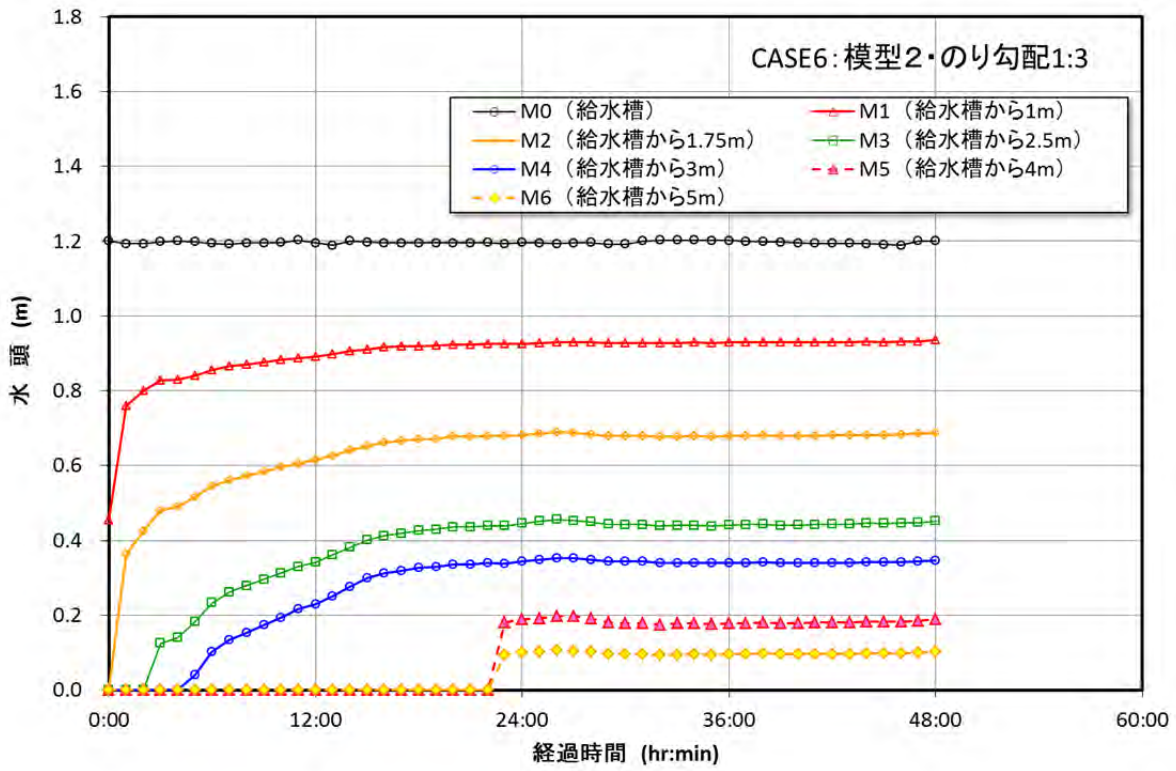



図 付 A.6　マノメータ水頭の経時変化（CASE6）

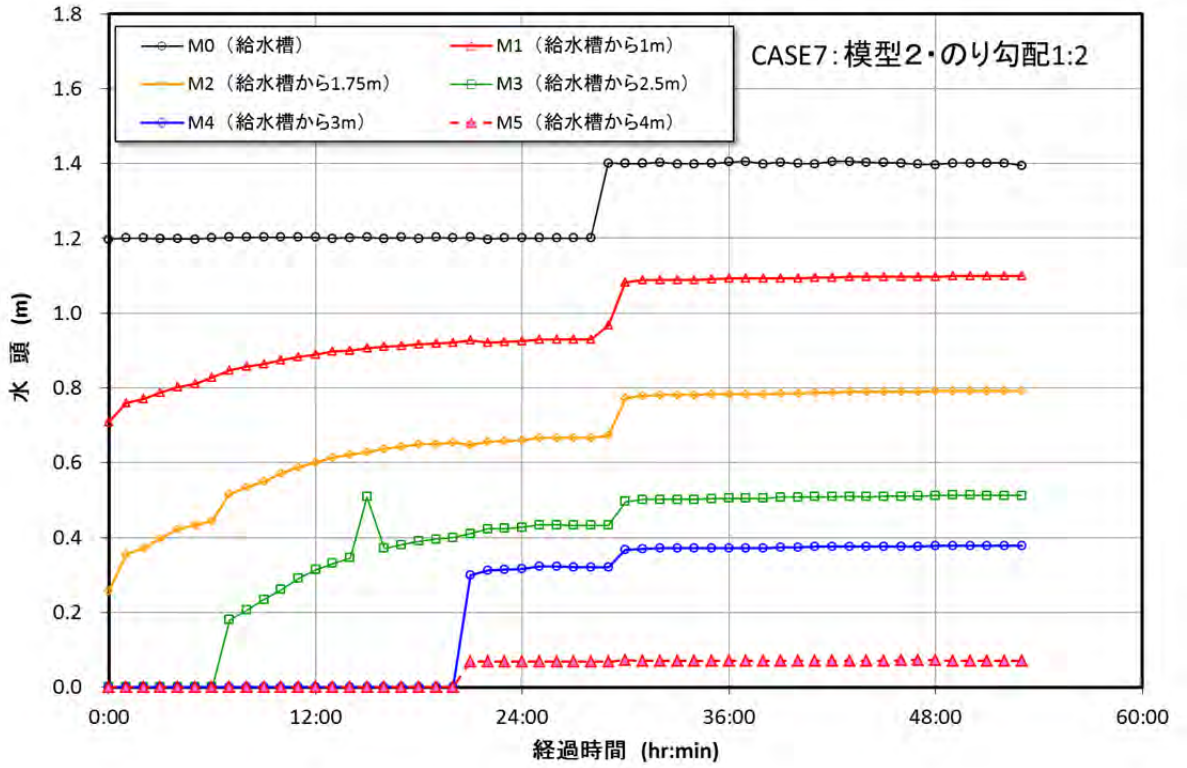



図 付 A.7　マノメータ水頭の経時変化（CASE7）

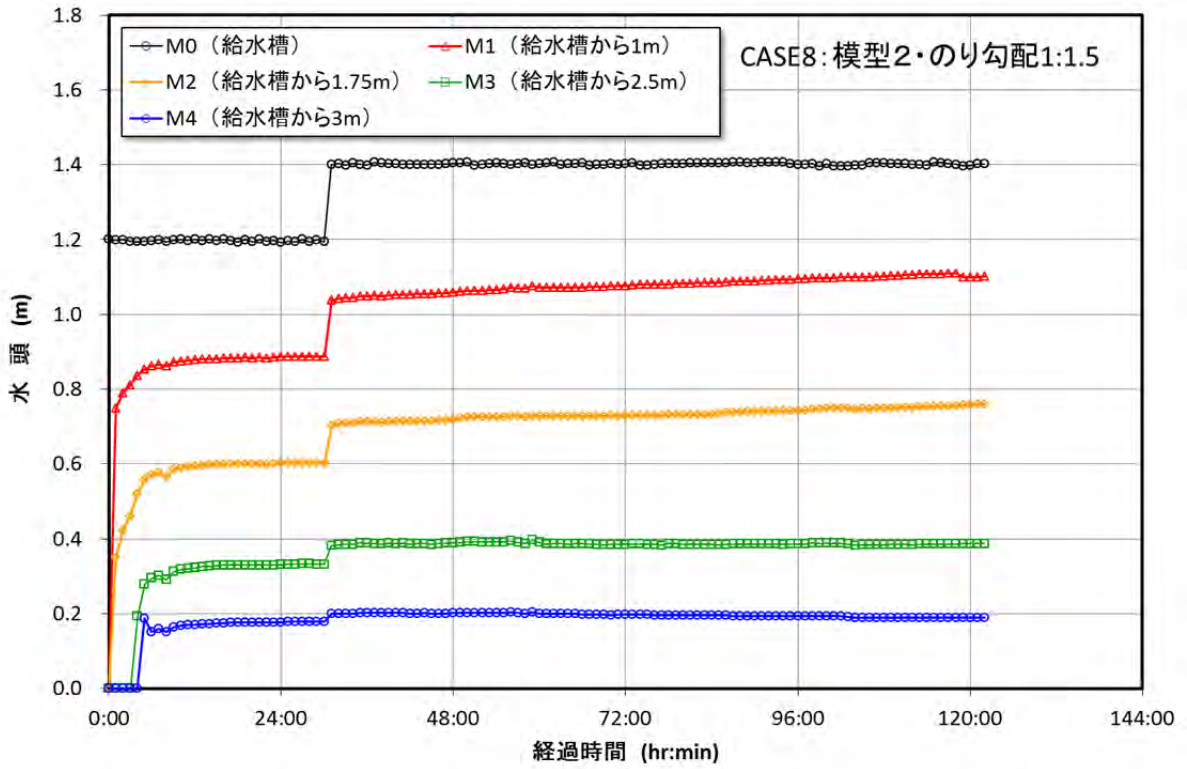



図 付 A.8　マノメータ水頭の経時変化（CASE8）

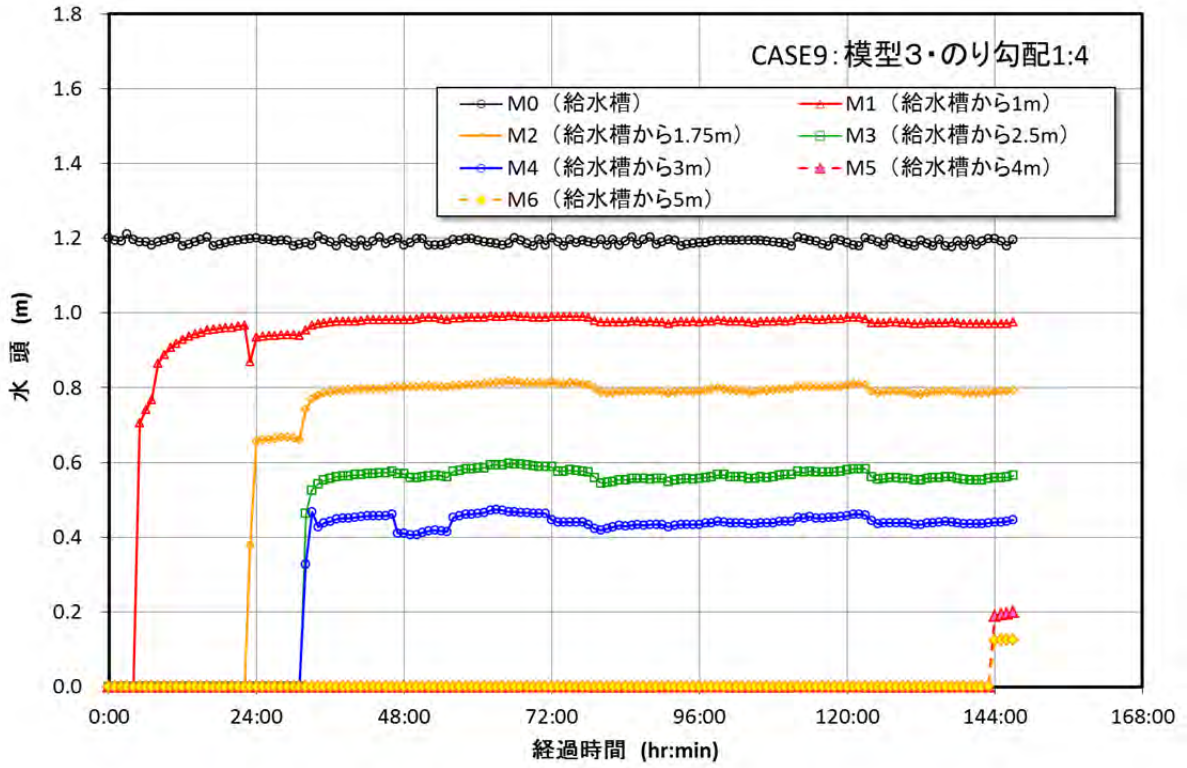



図 付 A.9　マノメータ水頭の経時変化（CASE9）

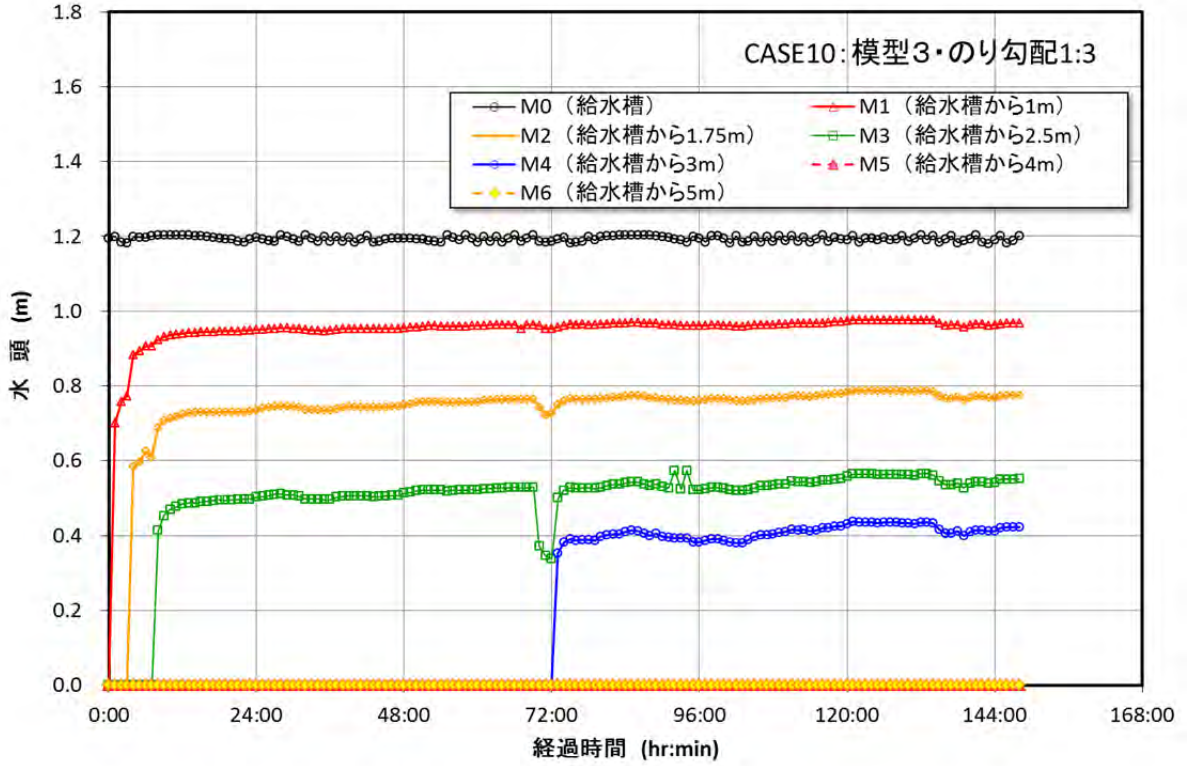



図 付 A.10　マノメータ水頭の経時変化（CASE10）

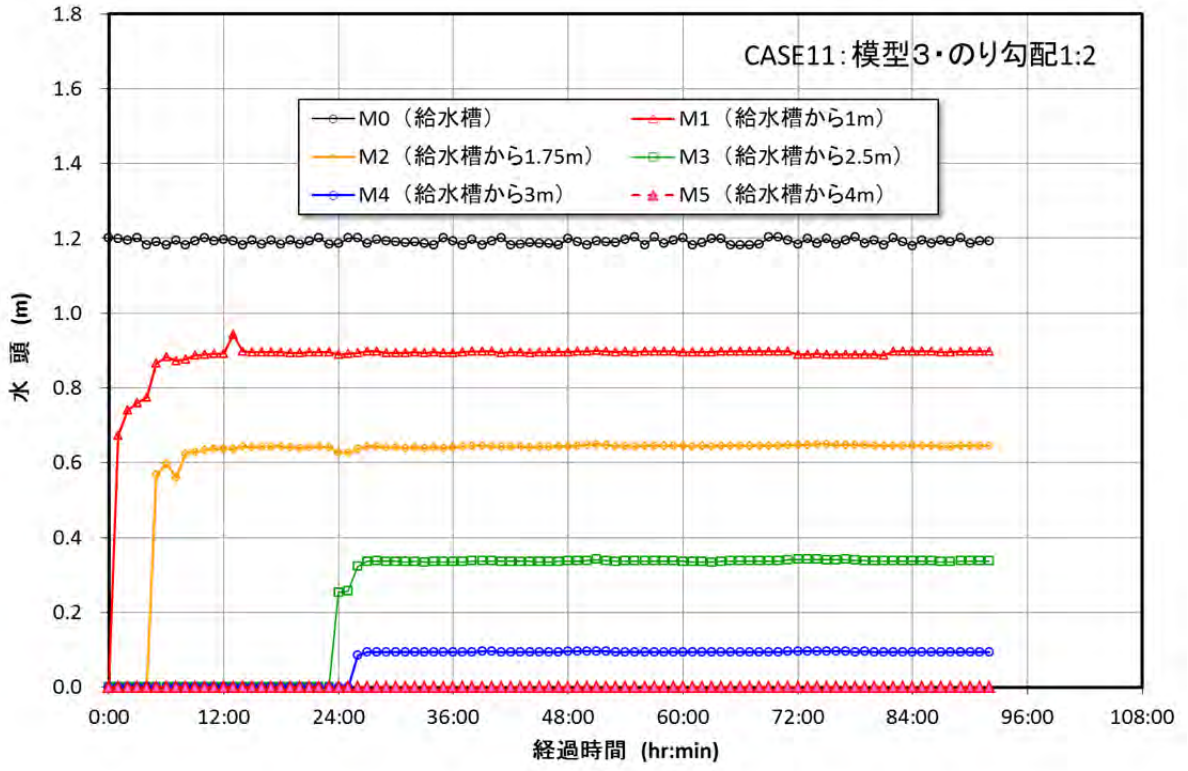



図 付 A.11　マノメータ水頭の経時変化（CASE11）

※模型３は CASE11 で決壊したため CASE12 は実施できず※

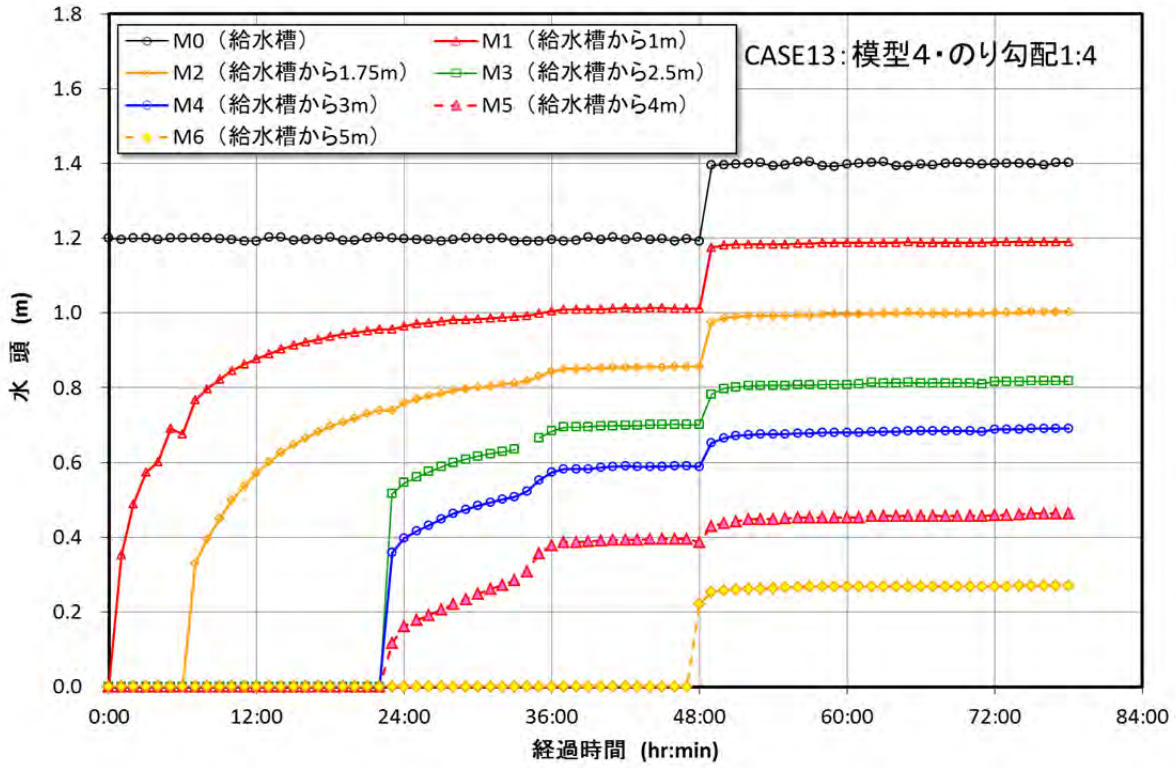



図 付 A.12　マノメータ水頭の経時変化（CASE13）

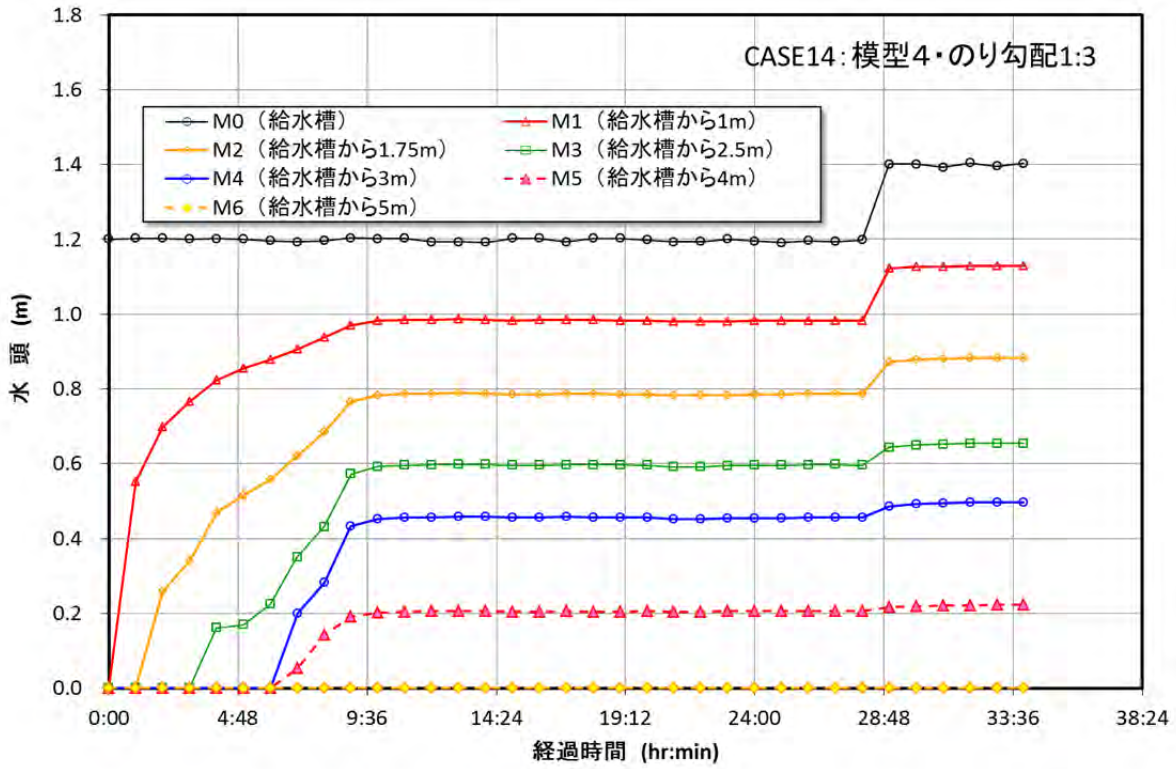



図 付 A.13　マノメータ水頭の経時変化（CASE14）

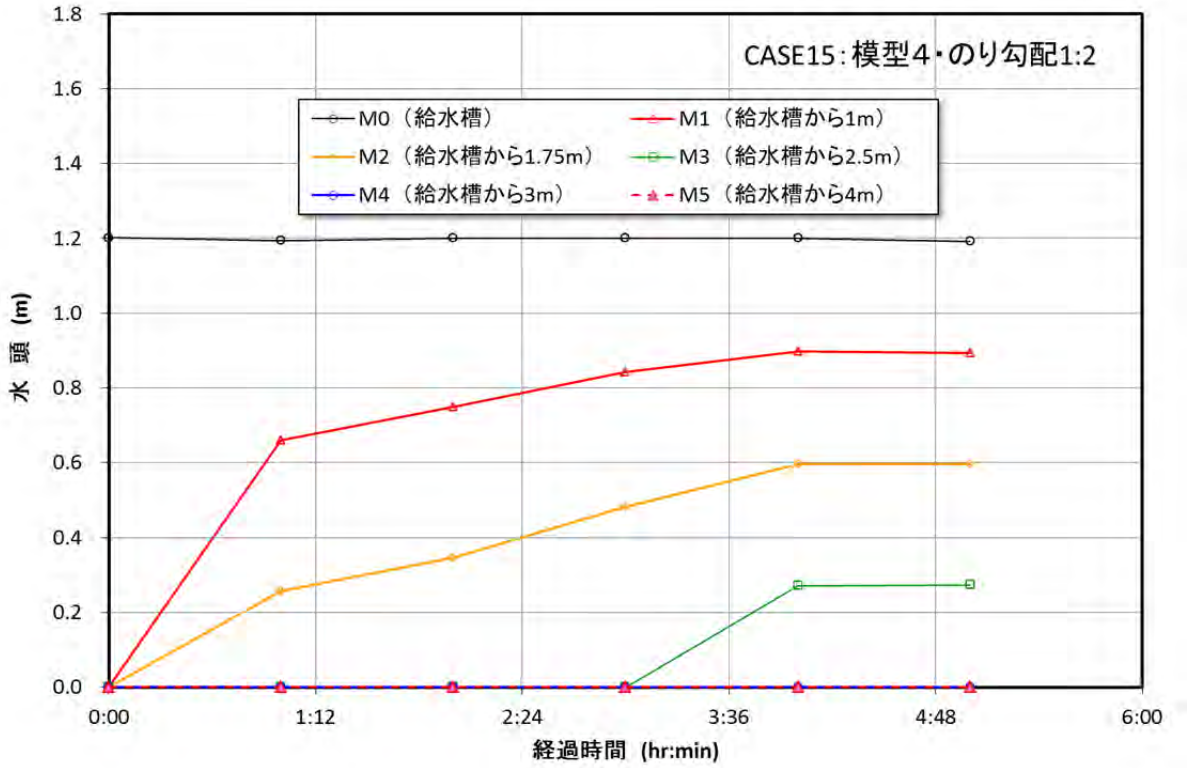



図 付 A.14　マノメータ水頭の経時変化（CASE15）

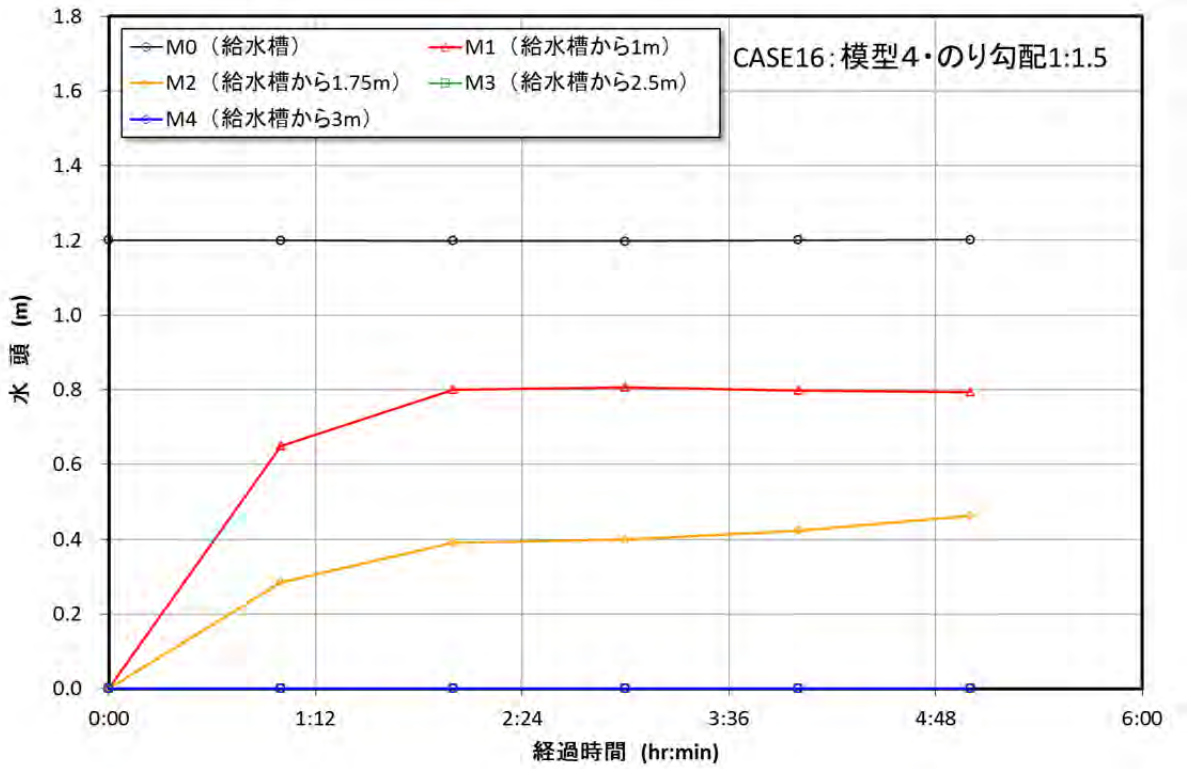



図 付 A.15　マノメータ水頭の経時変化（CASE16）

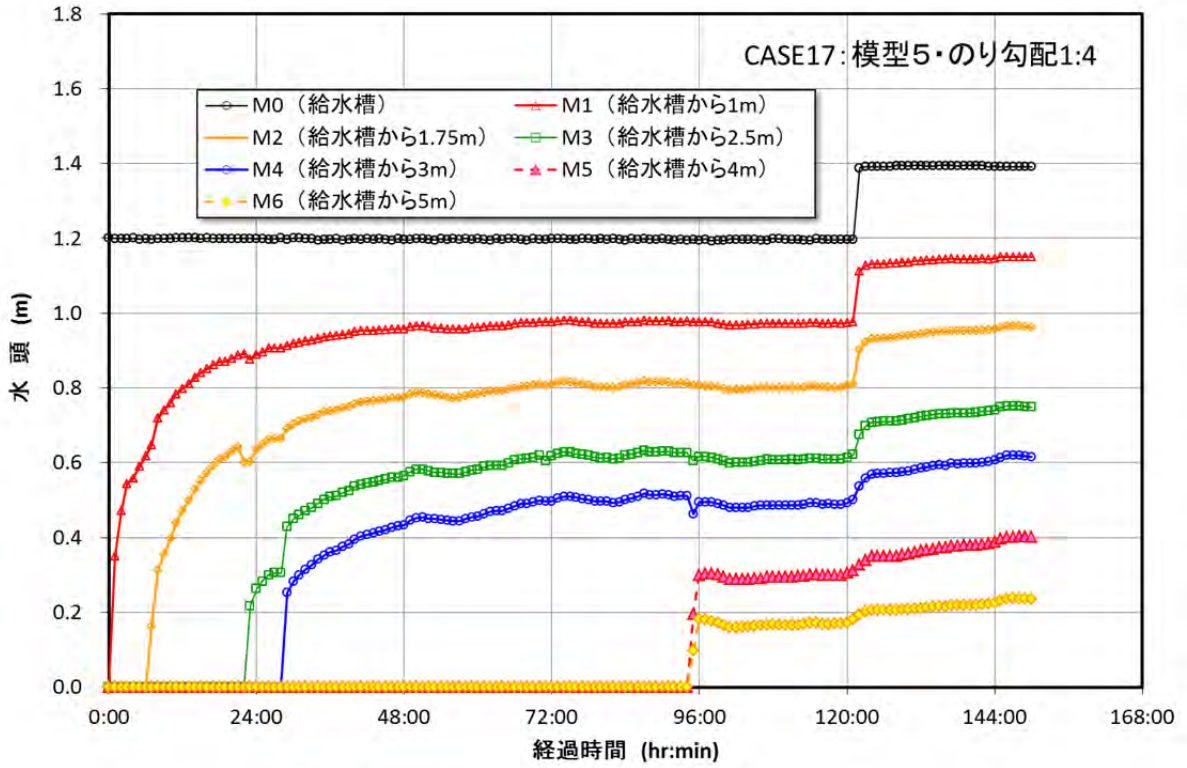



図 付 A.16　マノメータ水頭の経時変化（CASE17）

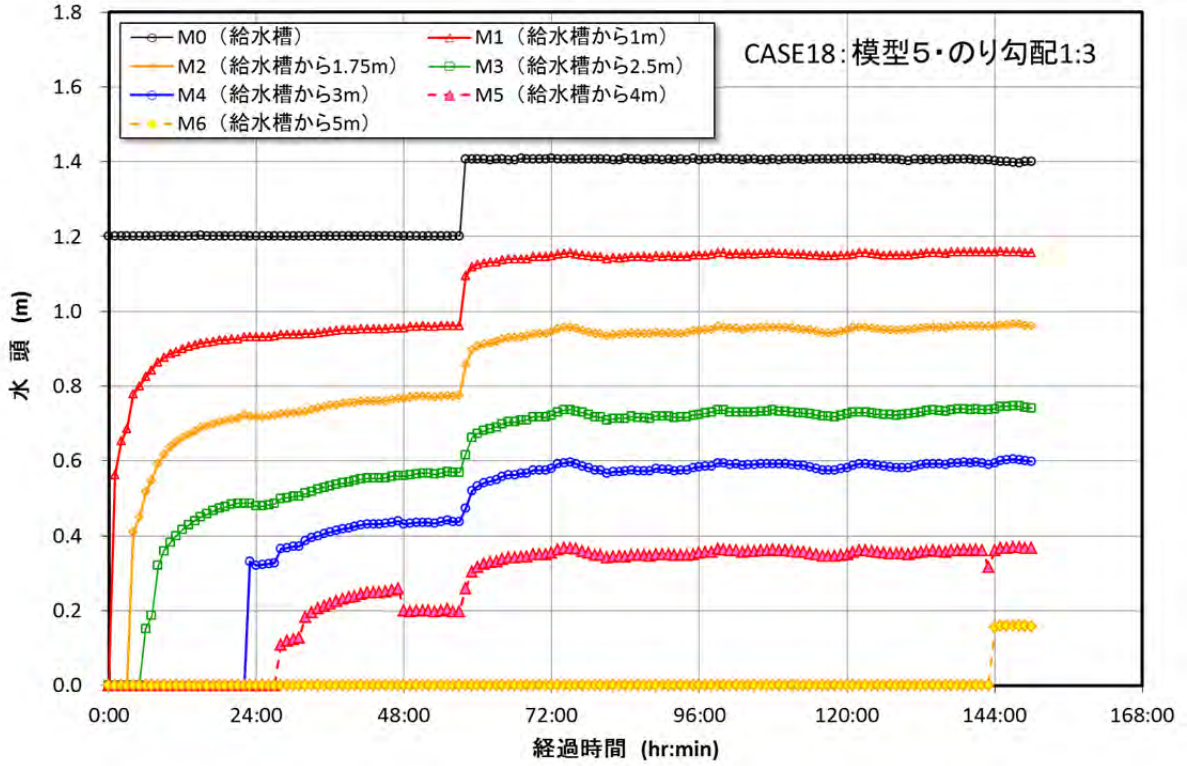



図 付 A.17　マノメータ水頭の経時変化（CASE18）

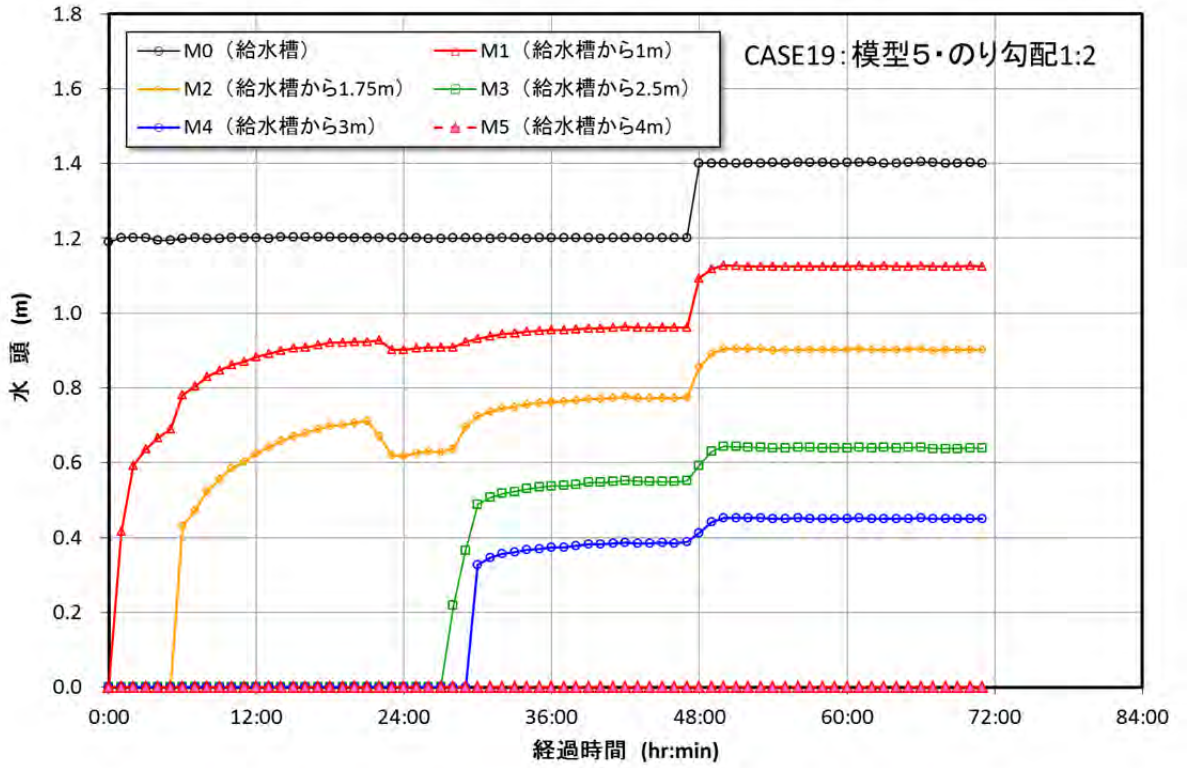



図 付 A.18　マノメータ水頭の経時変化（CASE19）

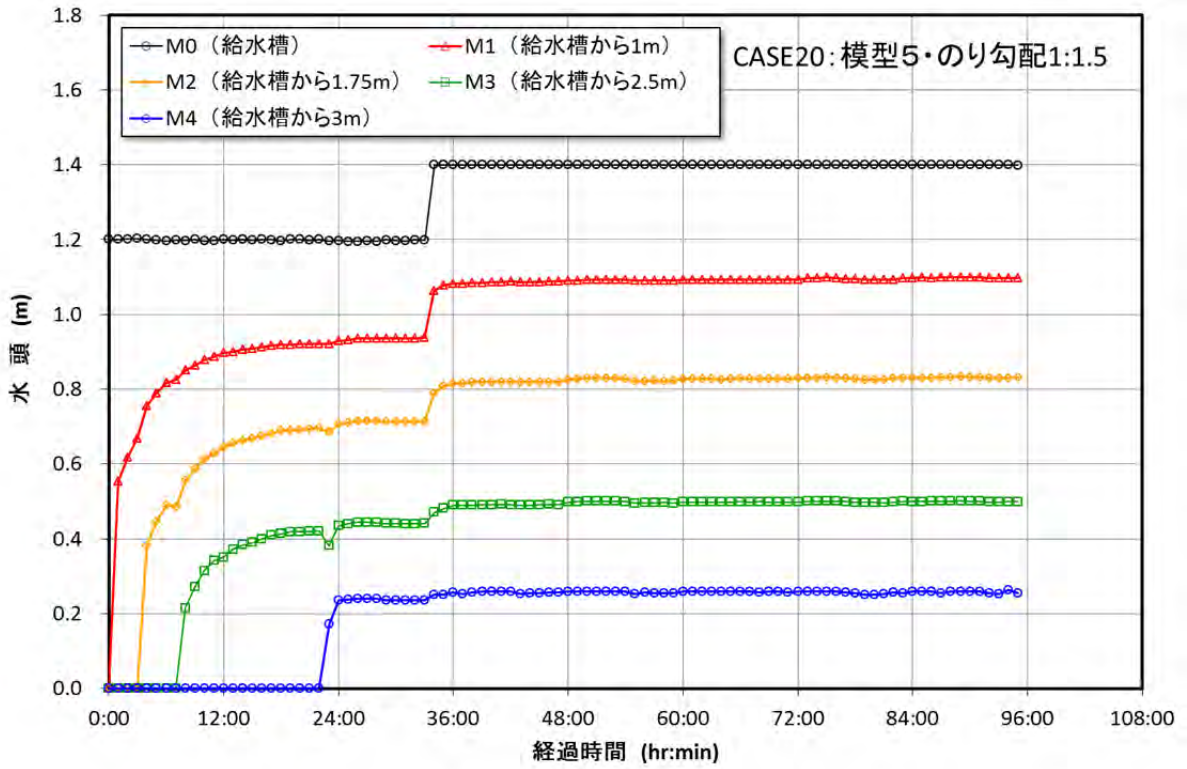



図 付 A.19　マノメータ水頭の経時変化（CASE20）

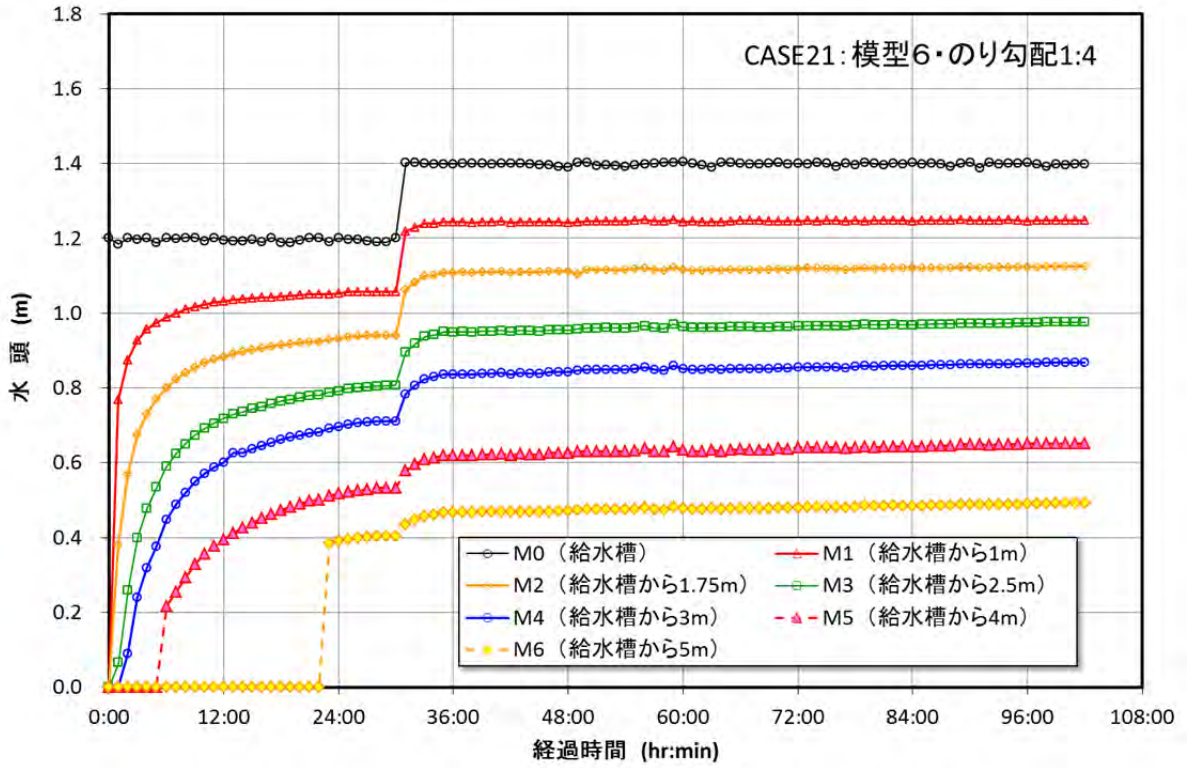



図 付 A.20　マノメータ水頭の経時変化（CASE21）

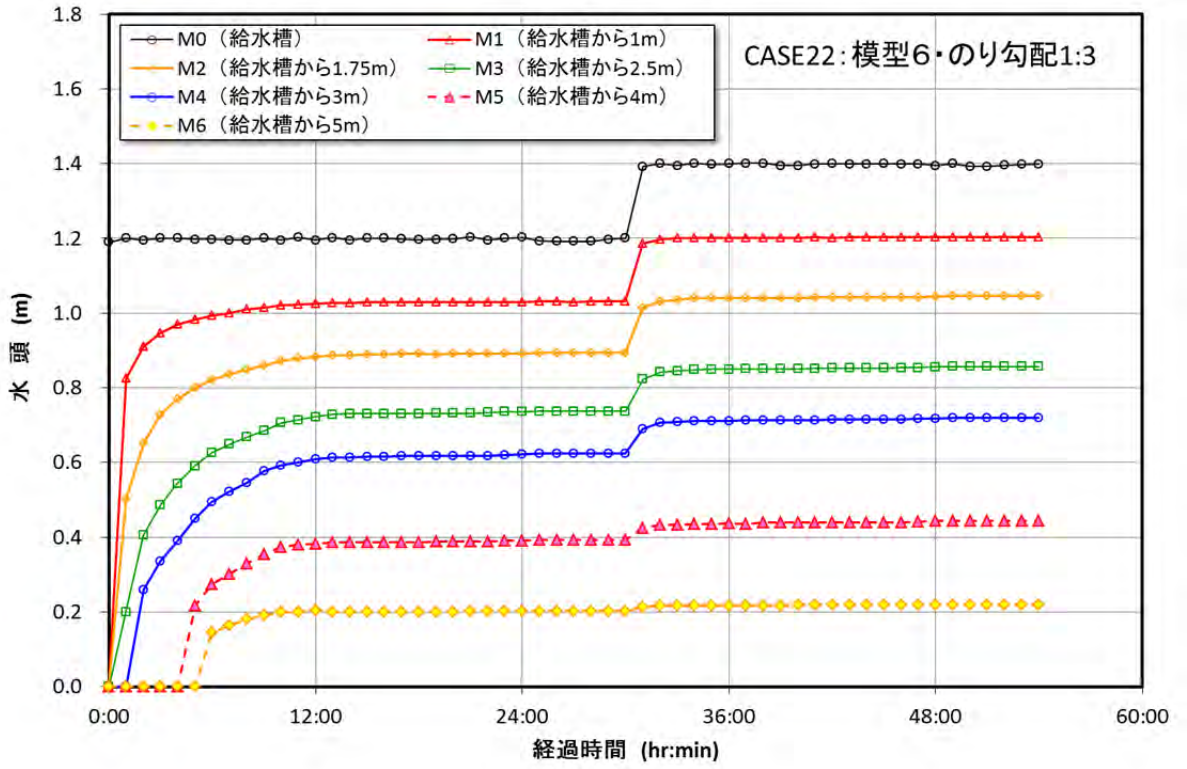



図 付 A.21　マノメータ水頭の経時変化（CASE22）

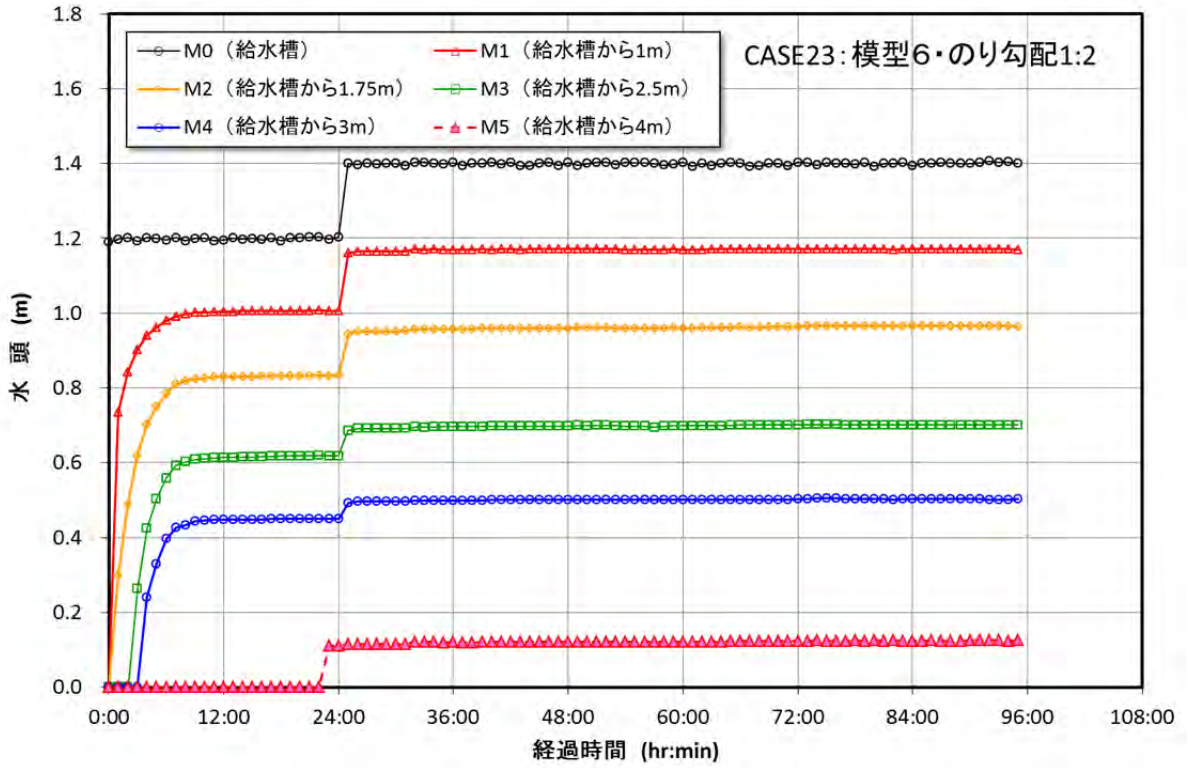



図 付 A.22　マノメータ水頭の経時変化（CASE23）

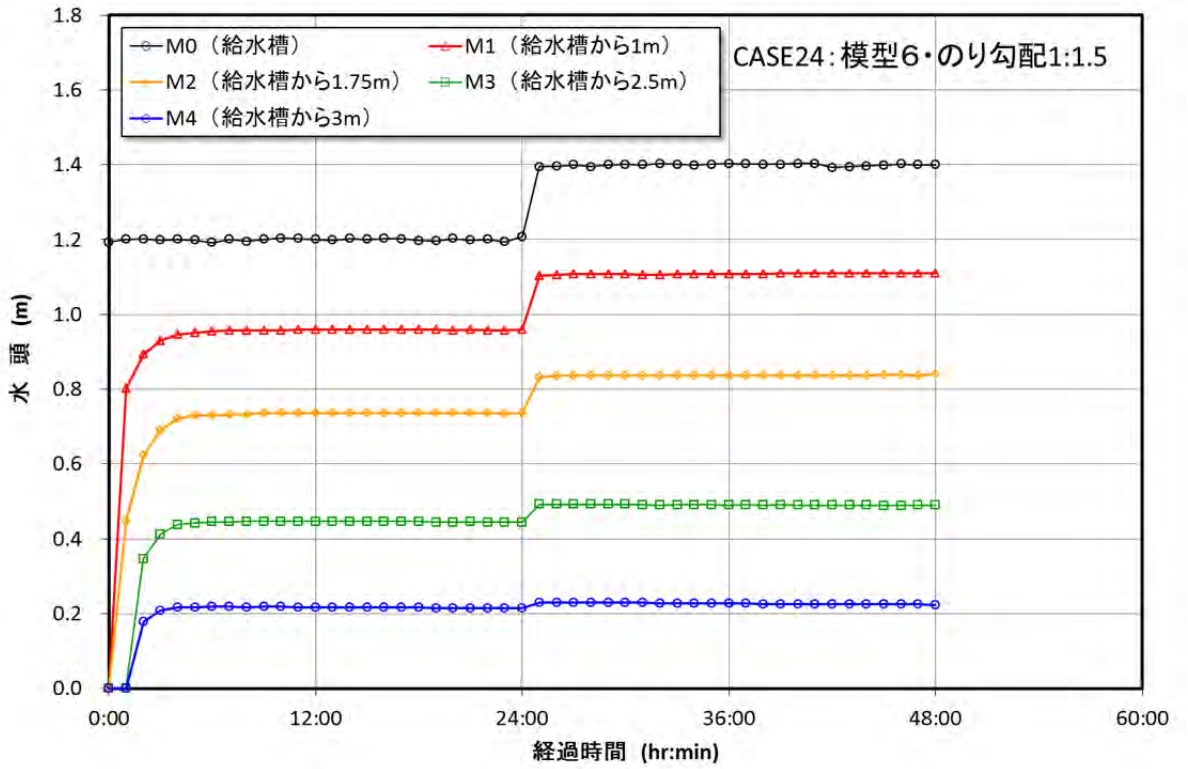



図 付 A.23　マノメータ水頭の経時変化（CASE24）

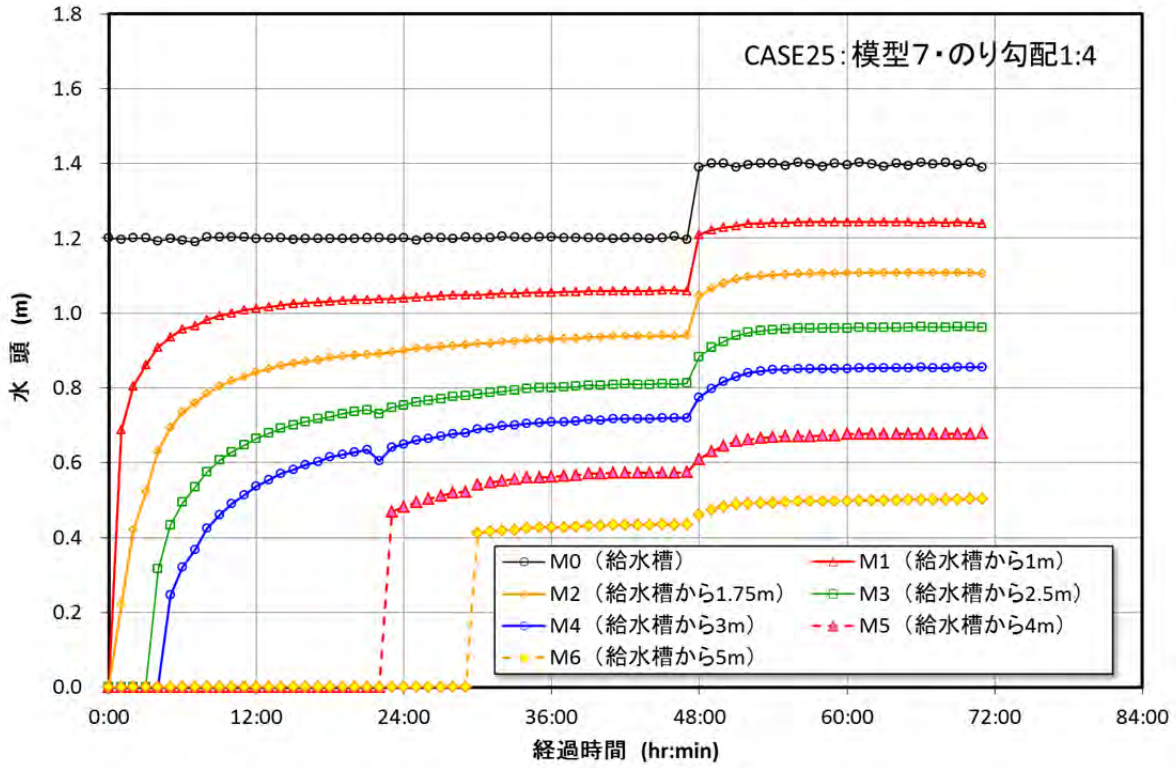



図 付 A.24　マノメータ水頭の経時変化（CASE25）

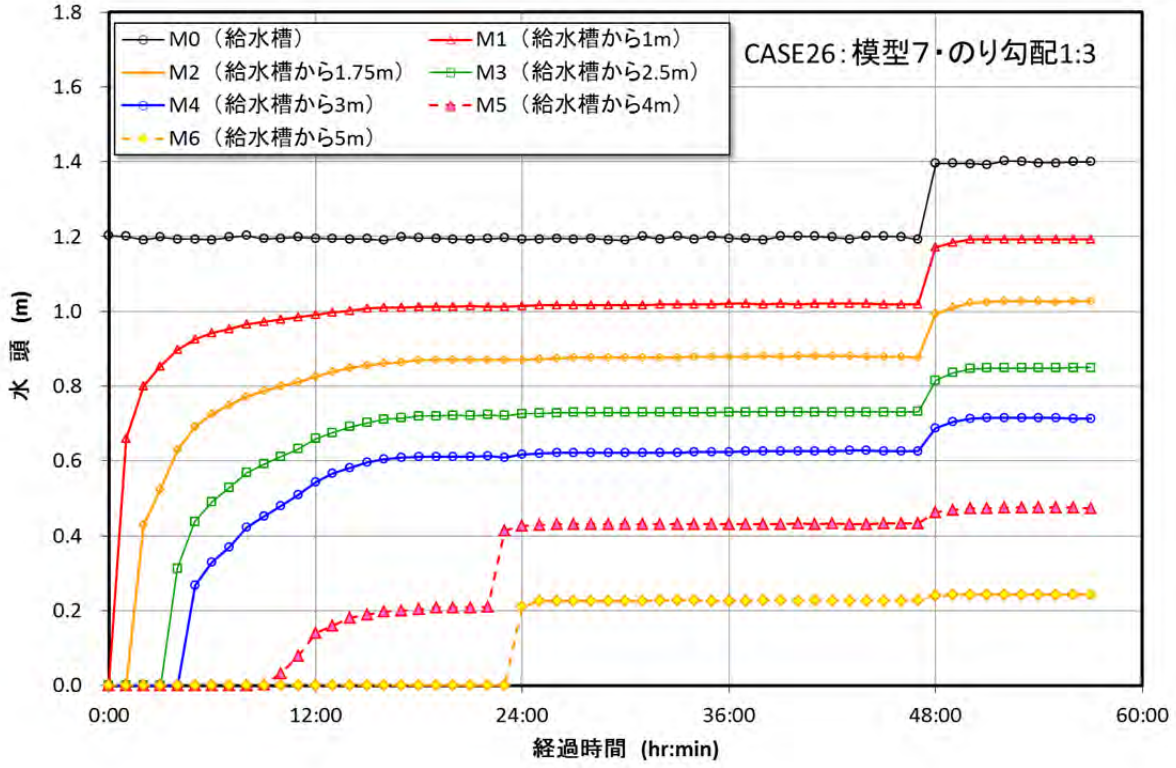



図 付 A.25　マノメータ水頭の経時変化（CASE26）

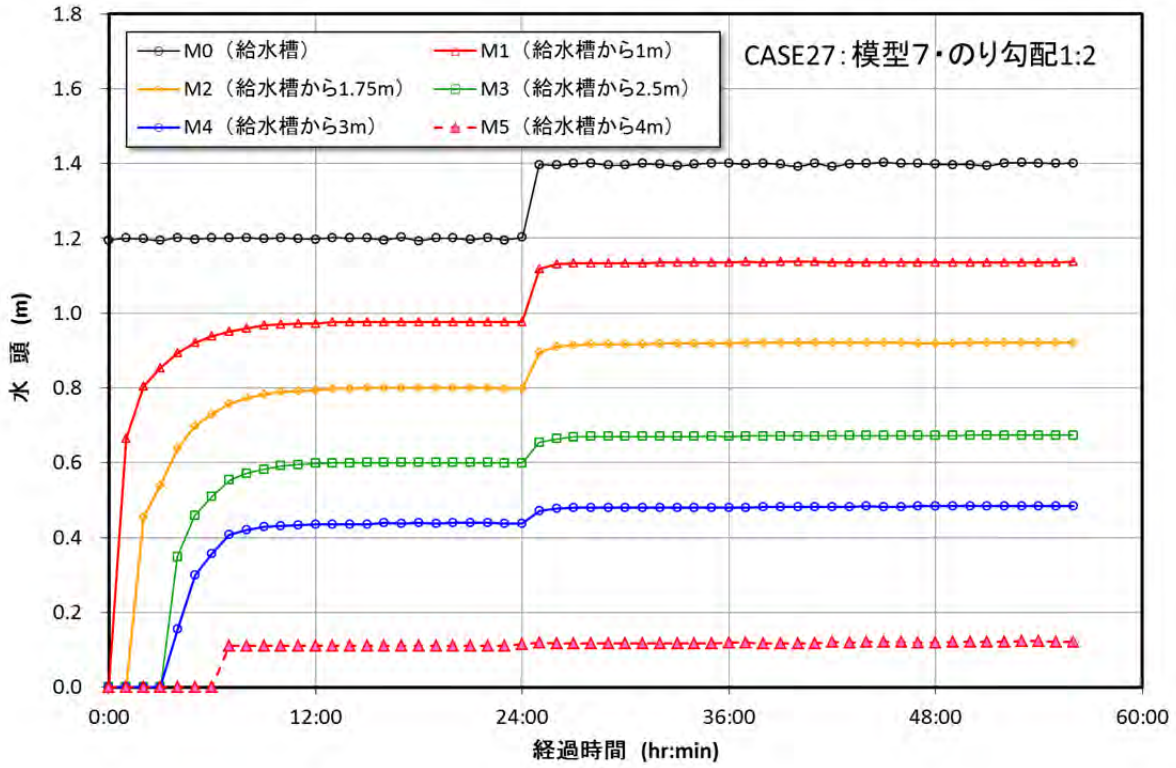



図 付 A.26　マノメータ水頭の経時変化（CASE27）

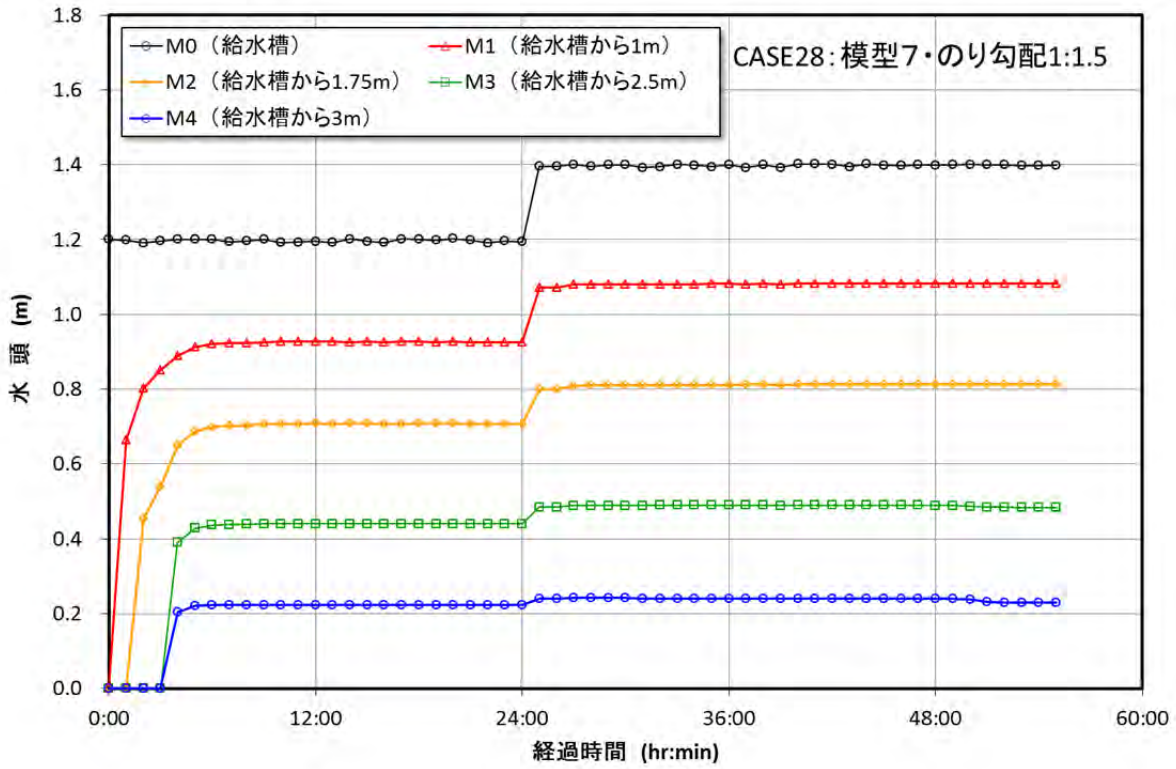



図 付 A.27　マノメータ水頭の経時変化（CASE28）

# B. 間隙水圧計経時変化図

# 中型浸透模型実験

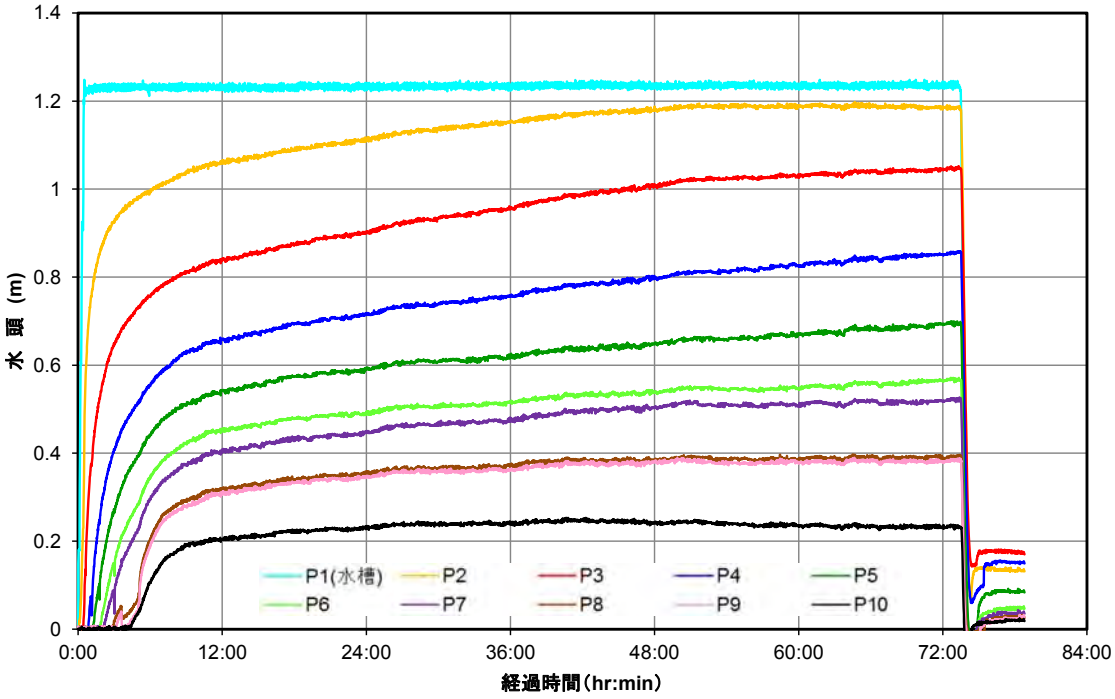



図 付 B.1　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE1,模型 1 のり勾配 1:4）

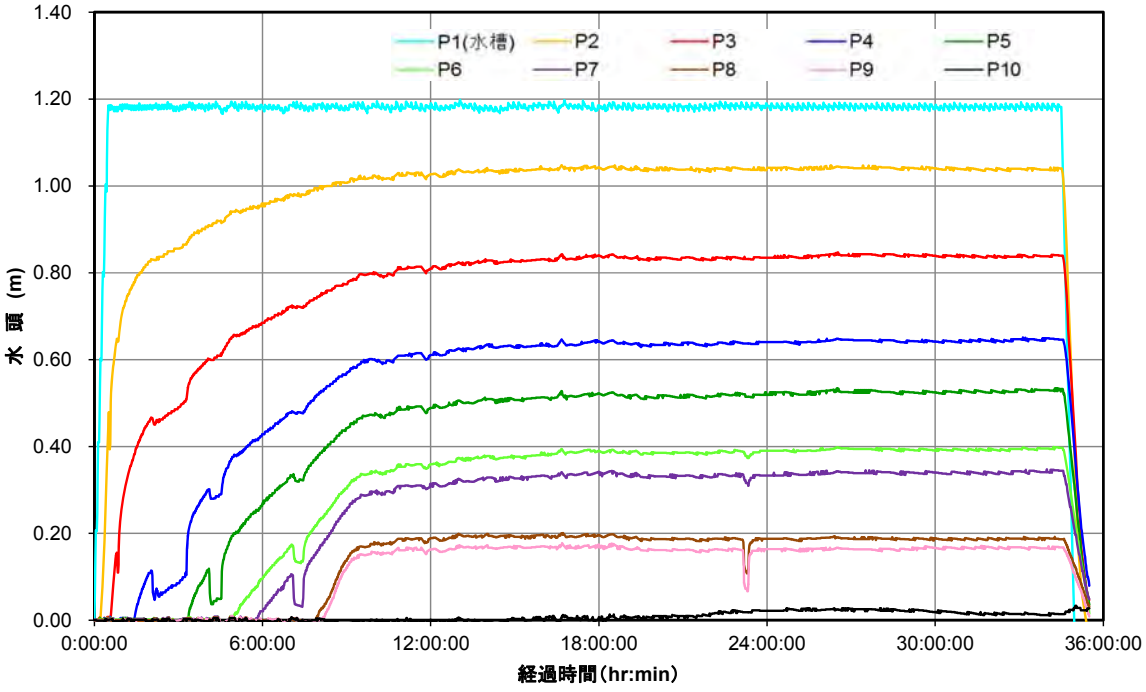



図 付 B.2　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE2,模型 1 のり勾配 1:3）

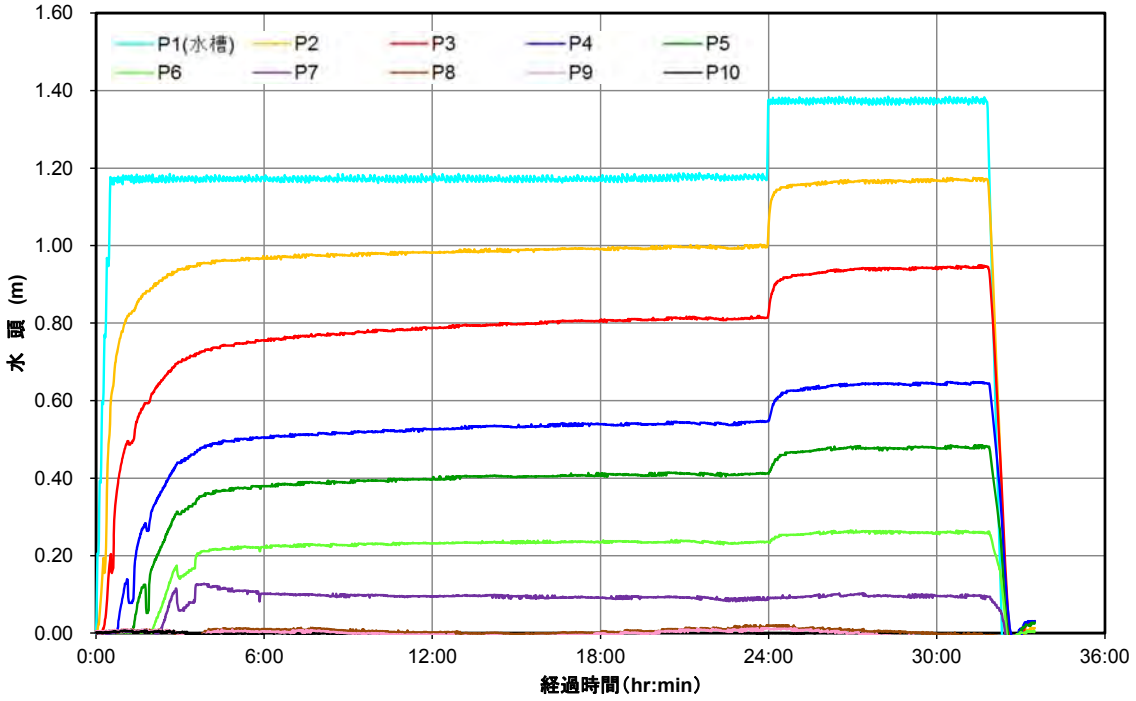



図 付 B.3　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE3,模型 1 のり勾配 1:2）

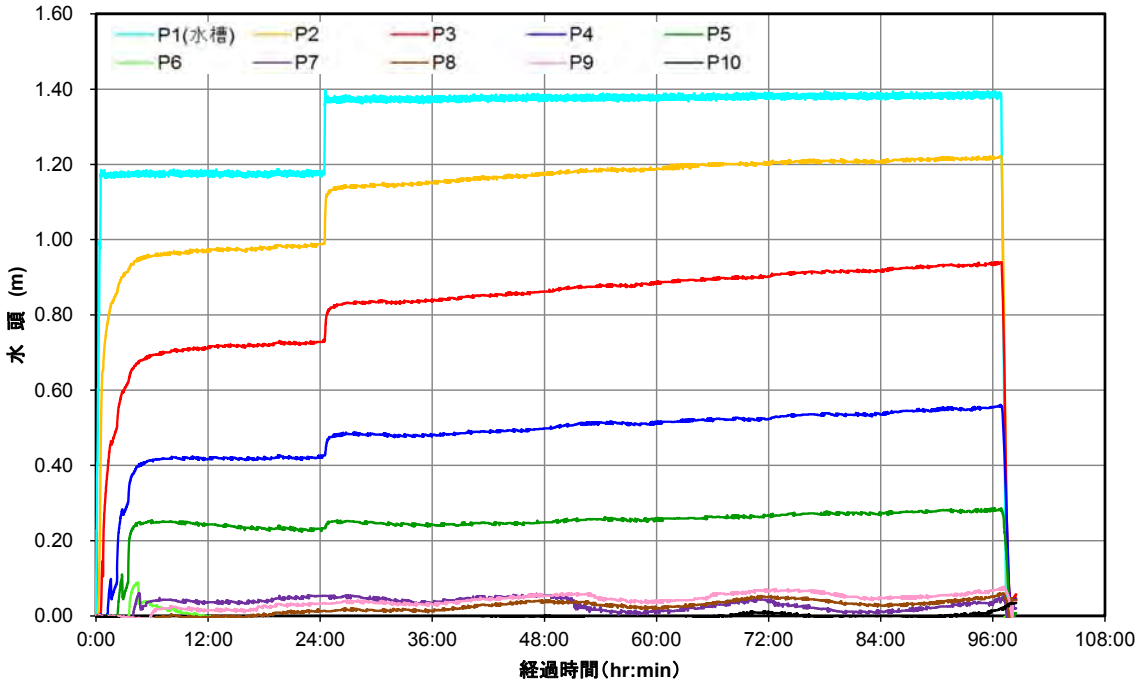



図 付 B.4　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE4,模型 1 のり勾配 1:1.1.5）

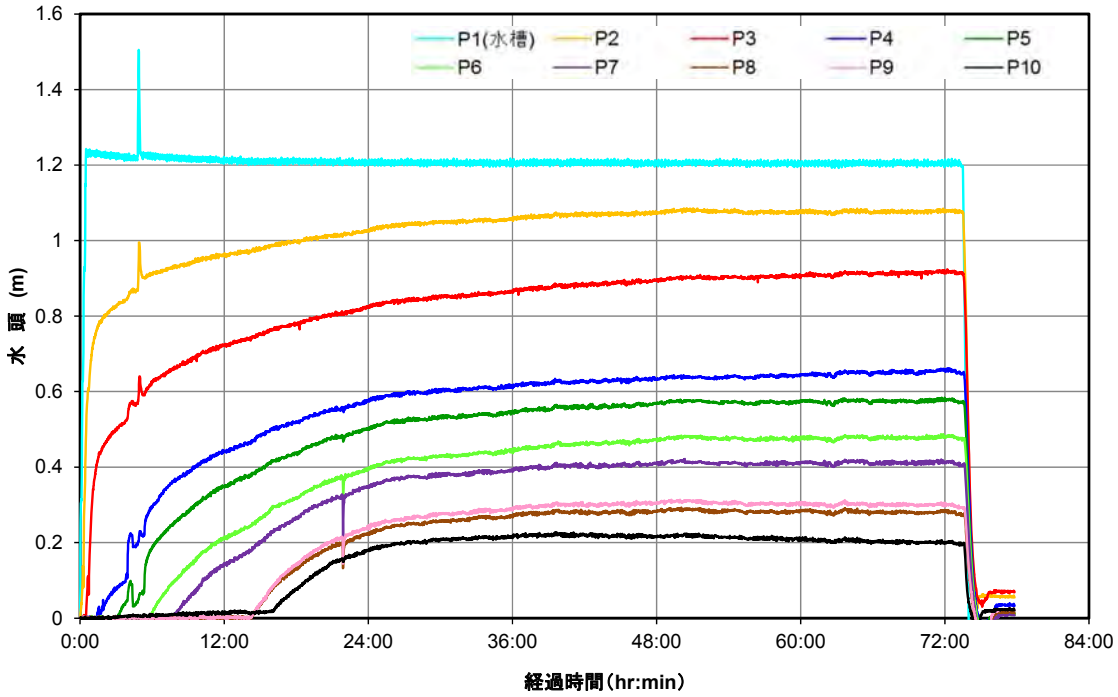



図 付 B.5　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE5,模型 2 のり勾配 1:4）

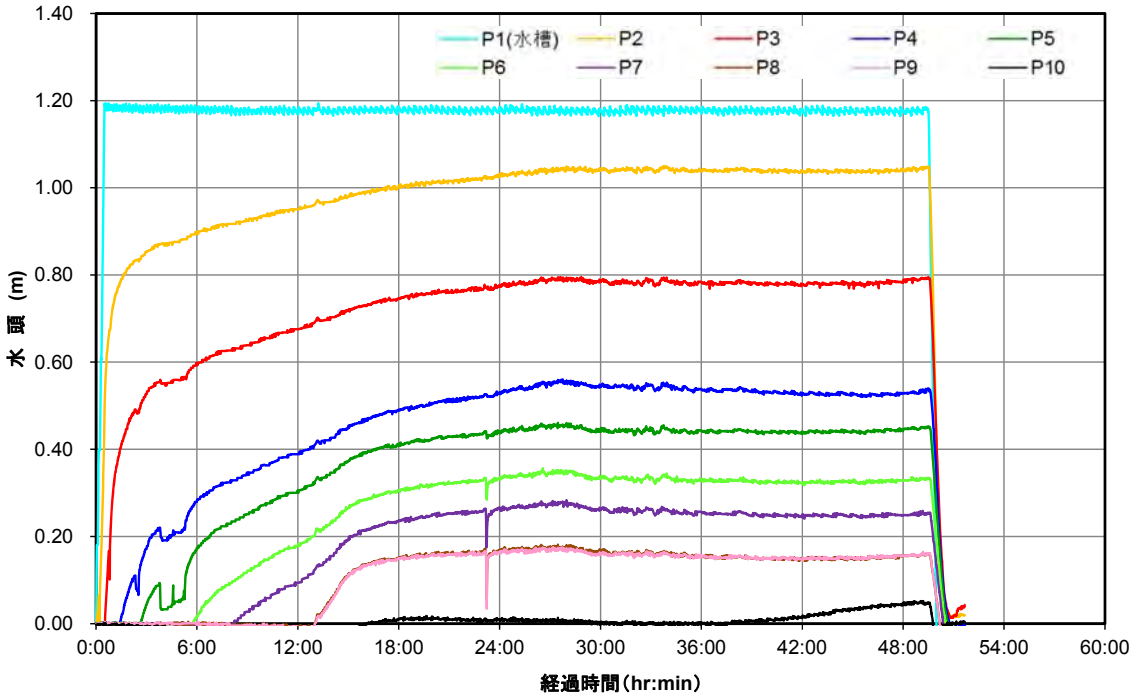



図 付 B.6　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE6,模型 2 のり勾配 1:3）

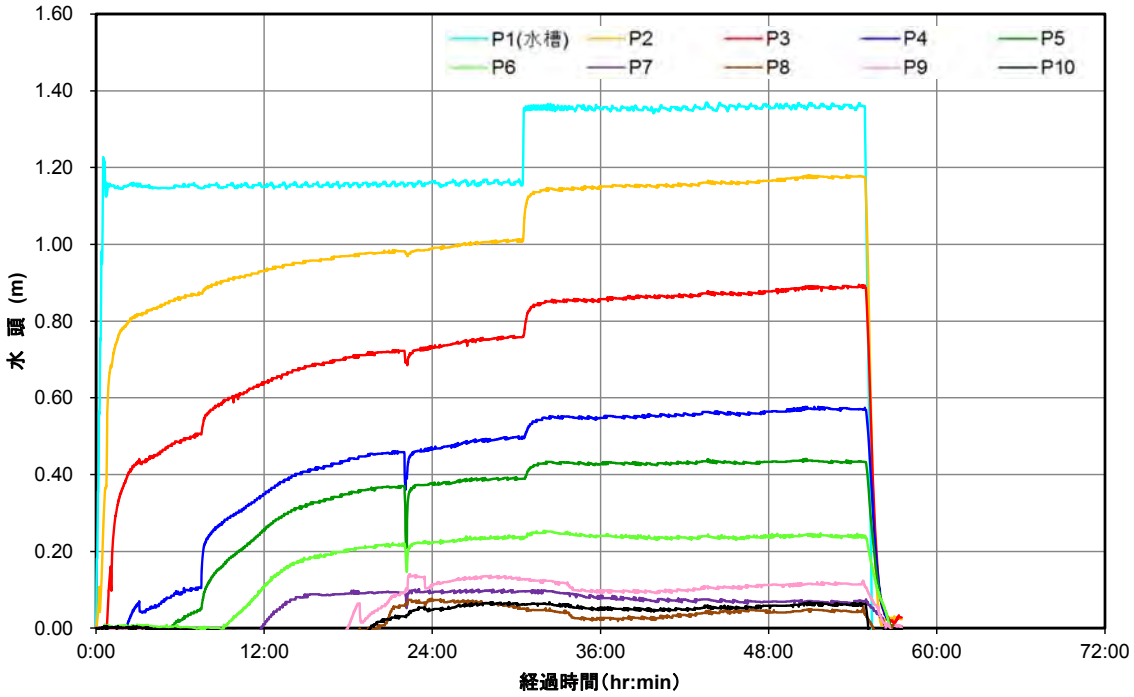



図 付 B.7　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE7,模型 2 のり勾配 1:2）

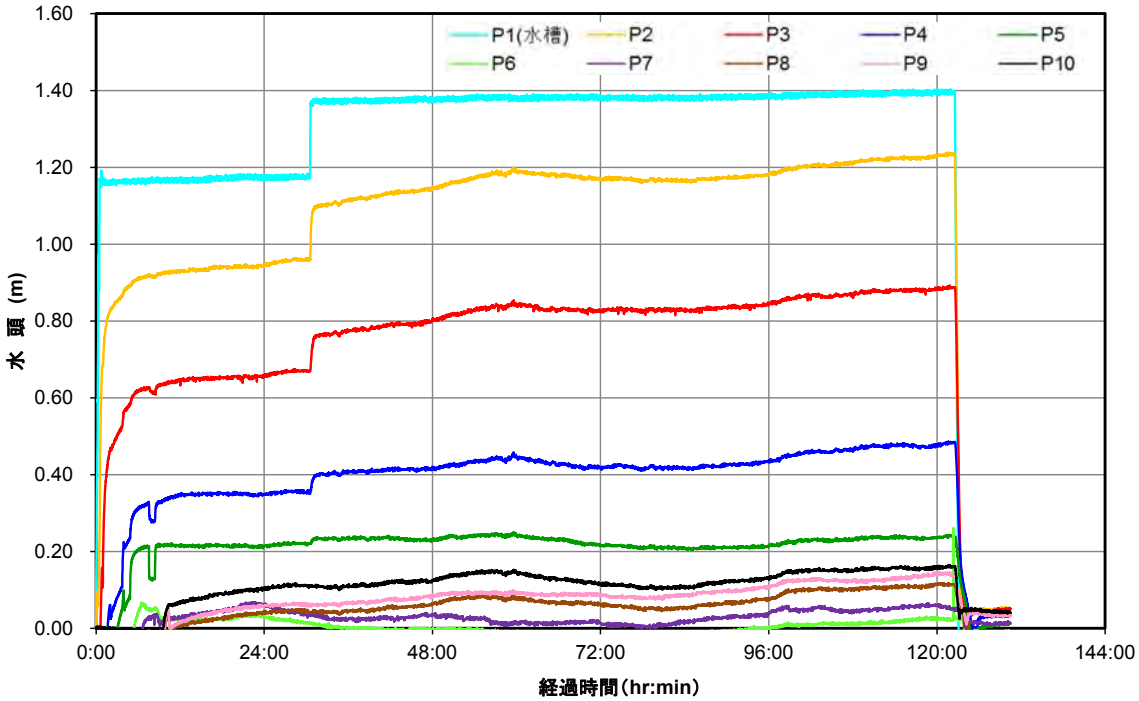



図 付 B.8　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE8,模型 2 のり勾配 1:1.5）

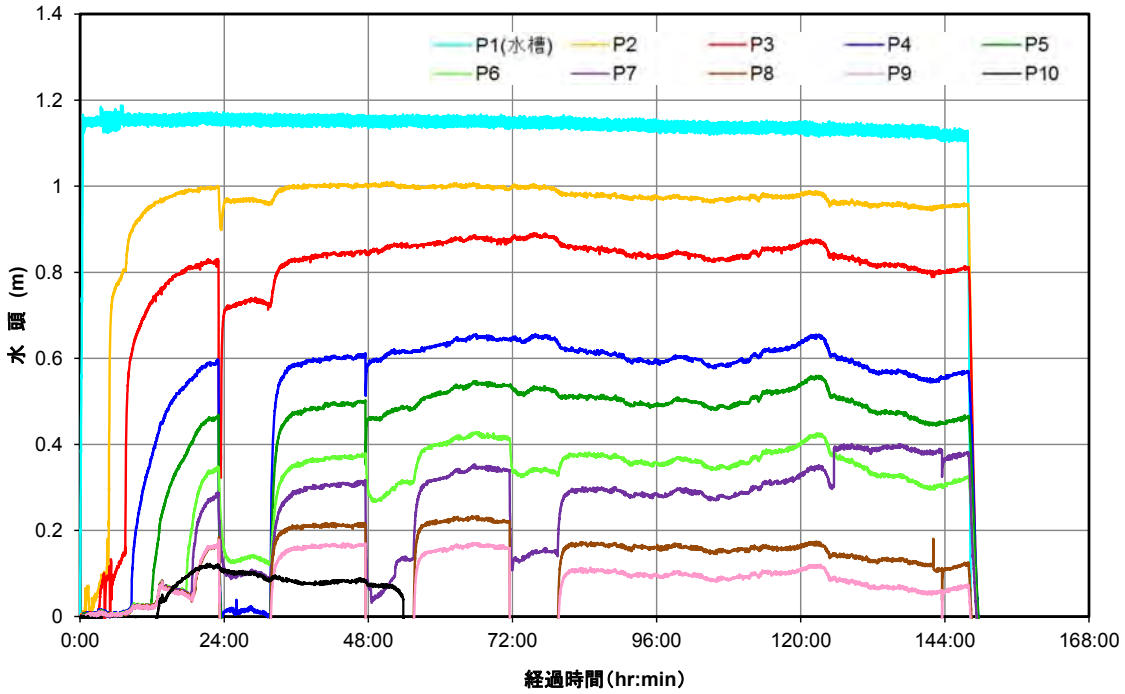



図 付 B.9　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE9,模型 3 のり勾配 1:4）

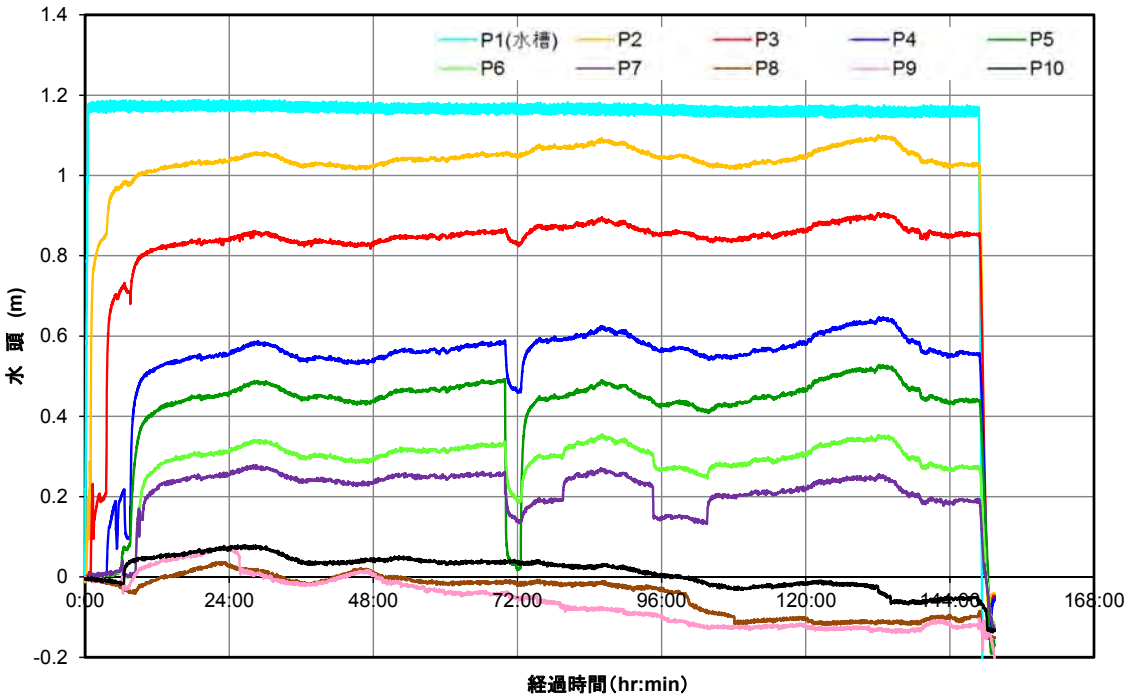



図 付 B.10　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE10,模型 3 のり勾配 1:3）

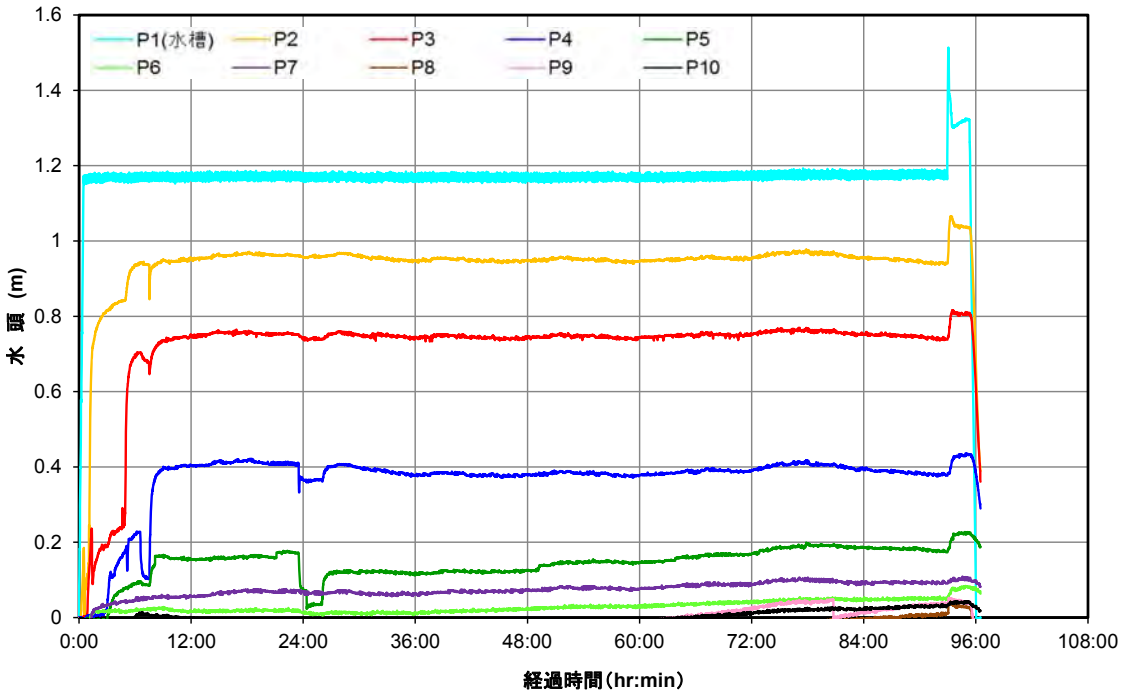



図 付 B.11　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE11,模型 3 のり勾配 1:2）

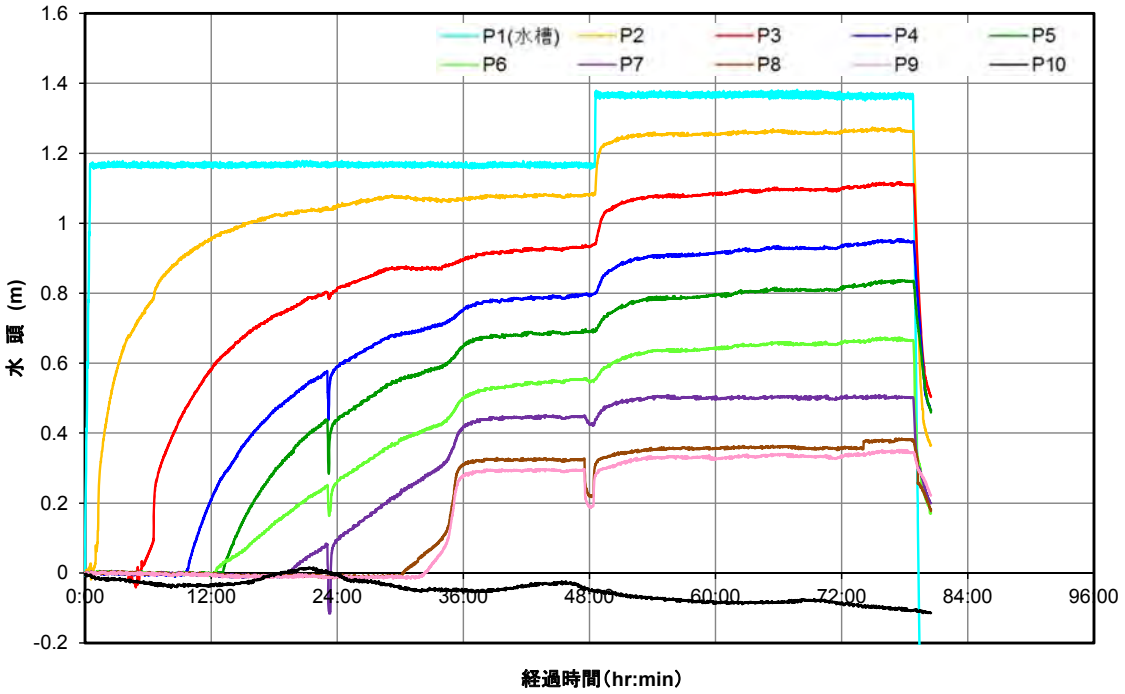



図 付 B.12　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE13,模型 4 のり勾配 1:4）

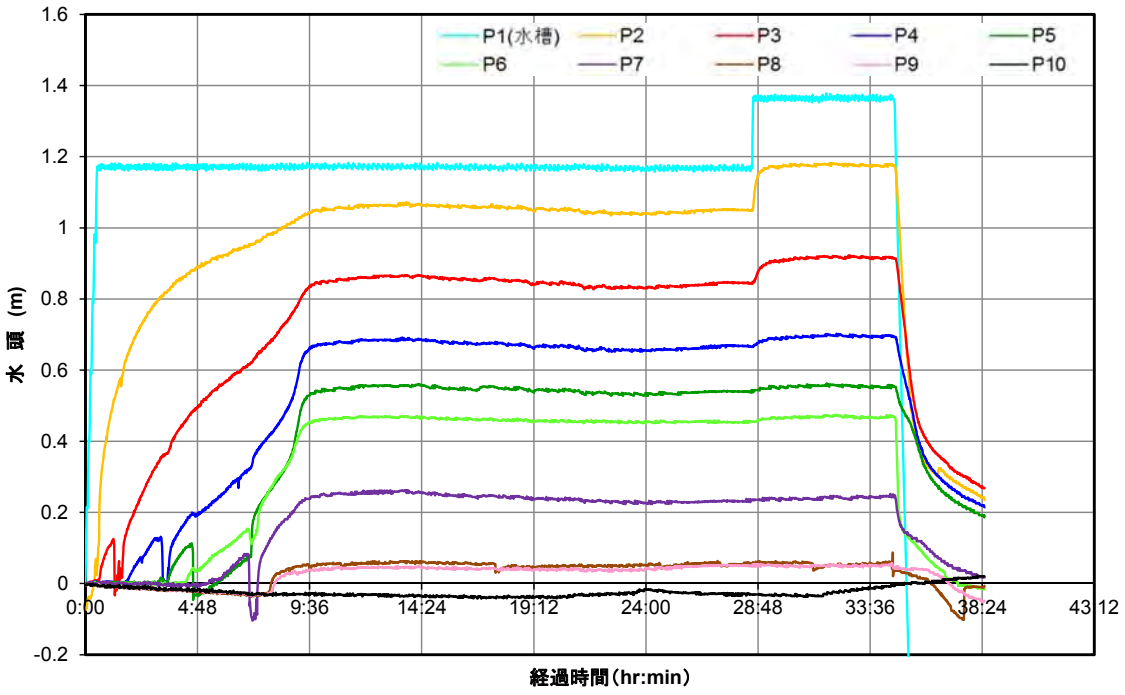



図 付 B.13　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE14,模型 4 のり勾配 1:3）

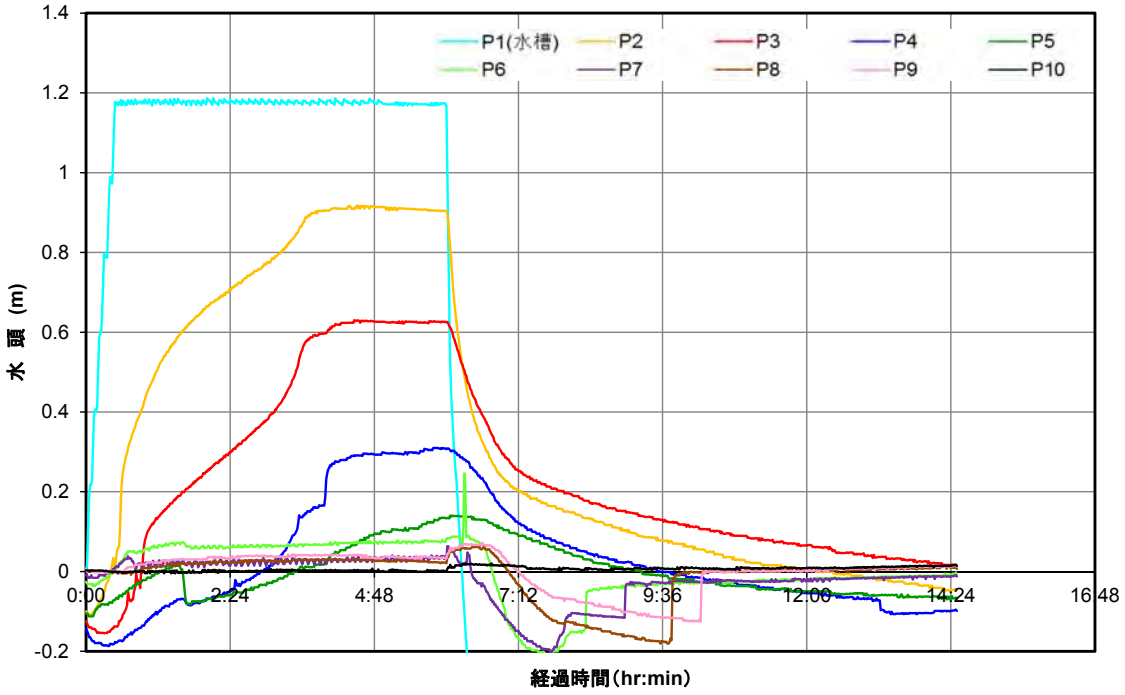



図 付 B.14　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE15,模型 4 のり勾配 1:2）

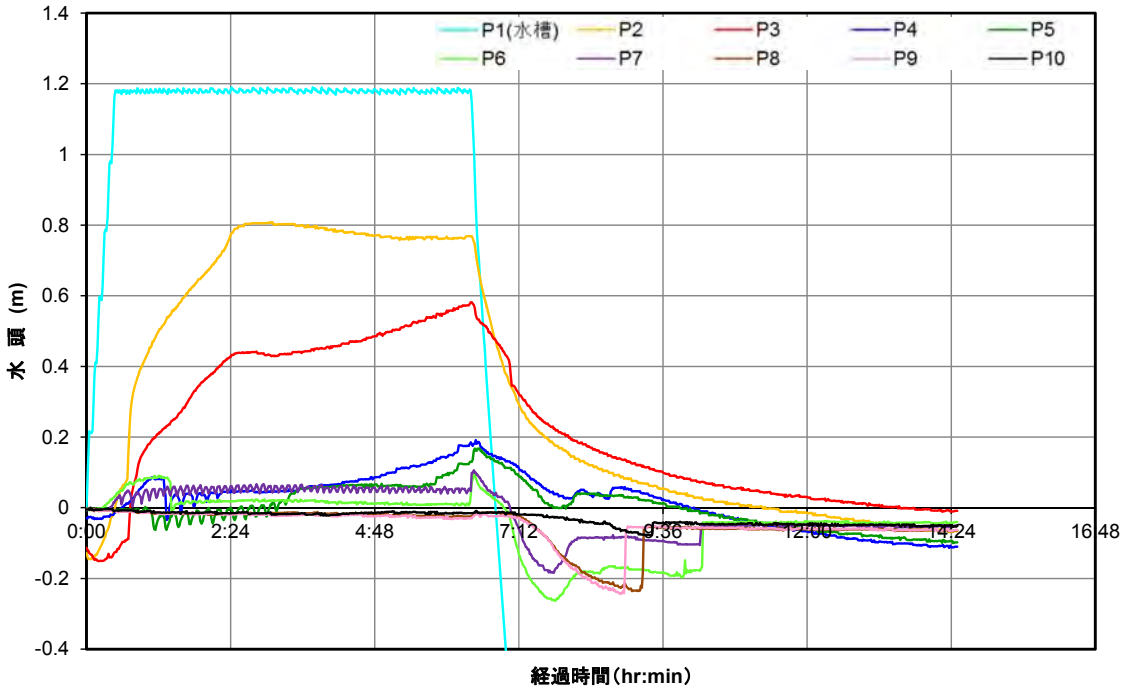



図 付 B.15　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE16,模型 4 のり勾配 1:1.5）

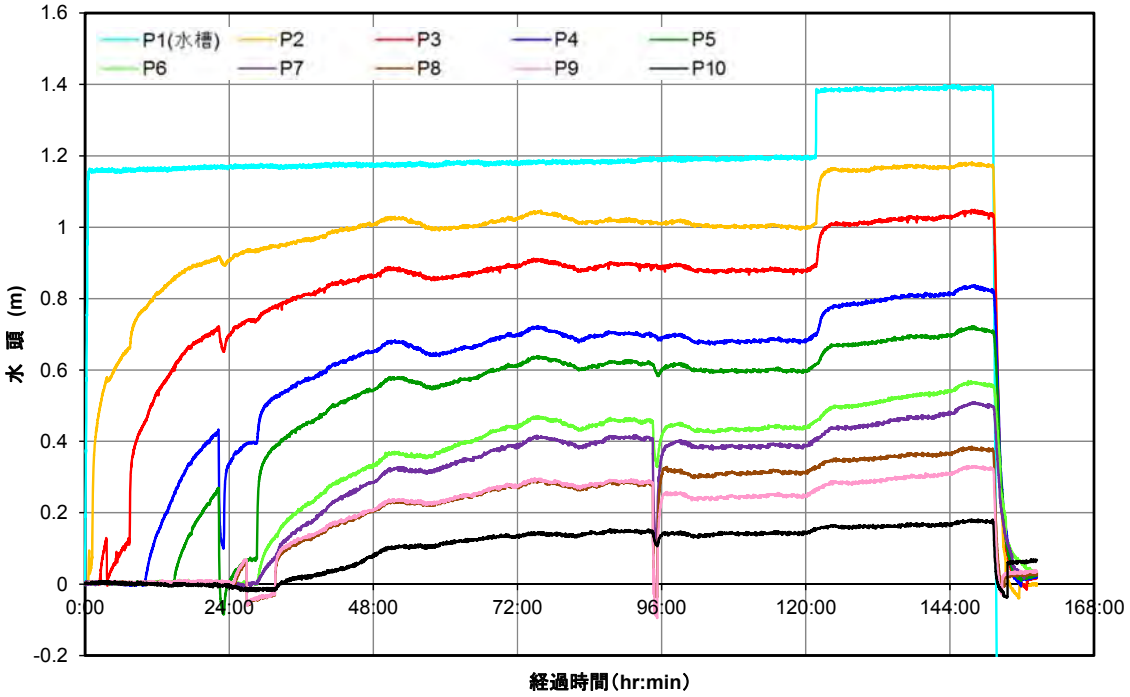



図 付 B.16　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE17,模型 5 のり勾配 1:4）

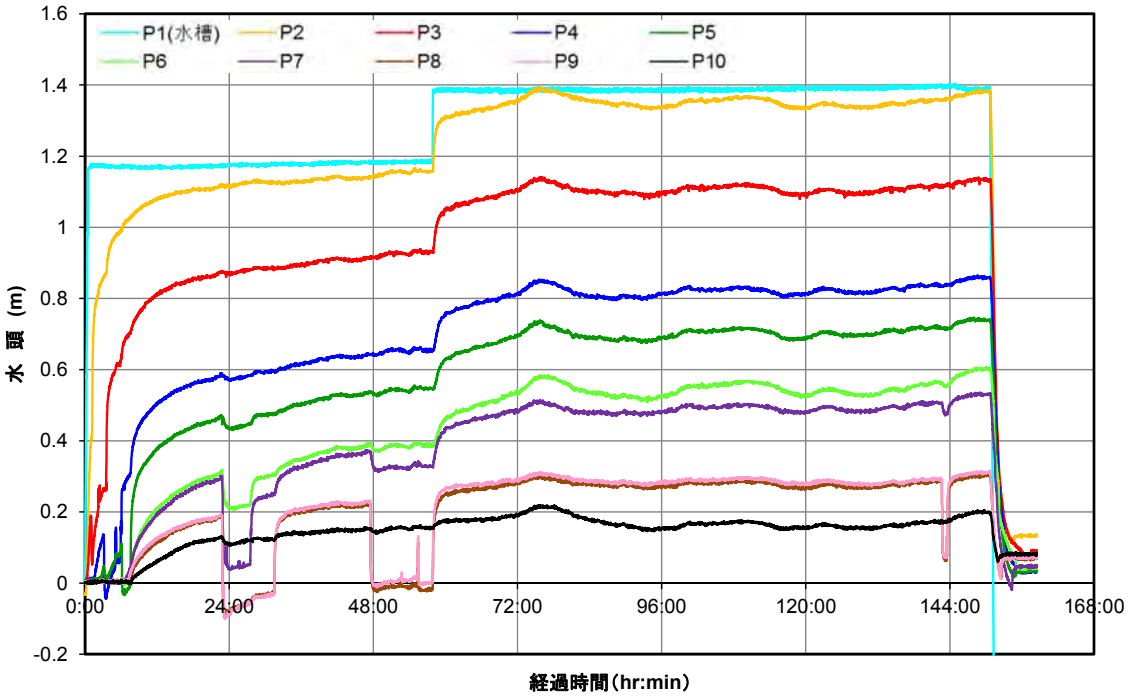



図 付 B.17　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE18,模型 5 のり勾配 1:3）

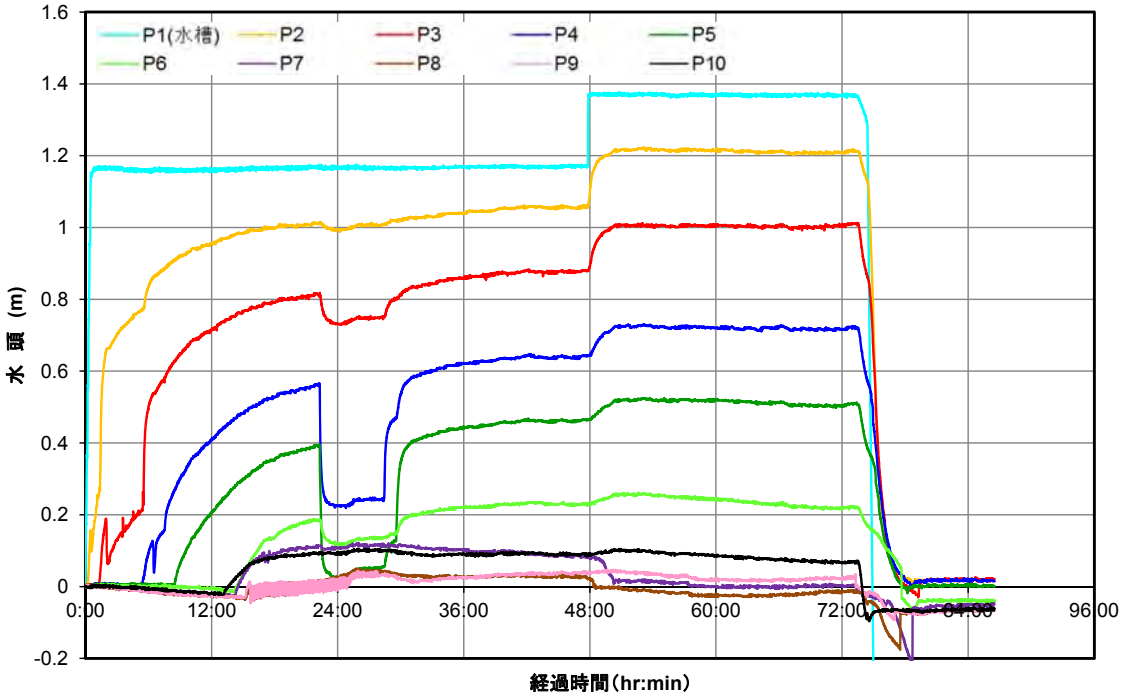



図 付 B.18　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE19,模型 5 のり勾配 1:2）

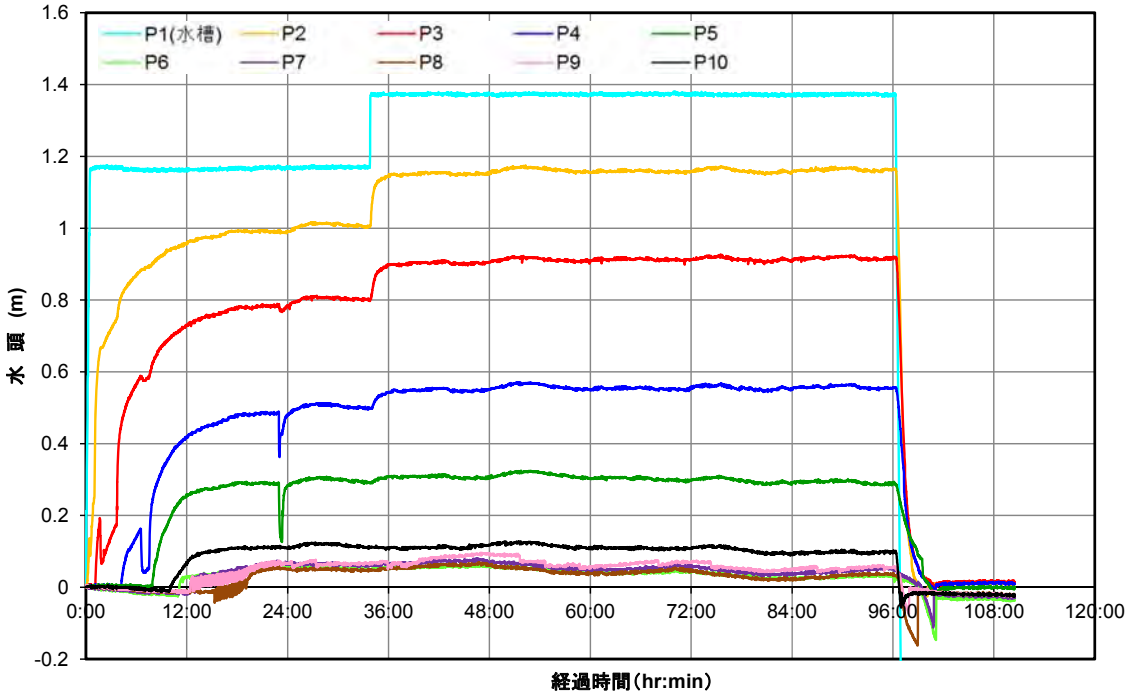



図 付 B.19　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE20,模型 5 のり勾配 1:1.5）

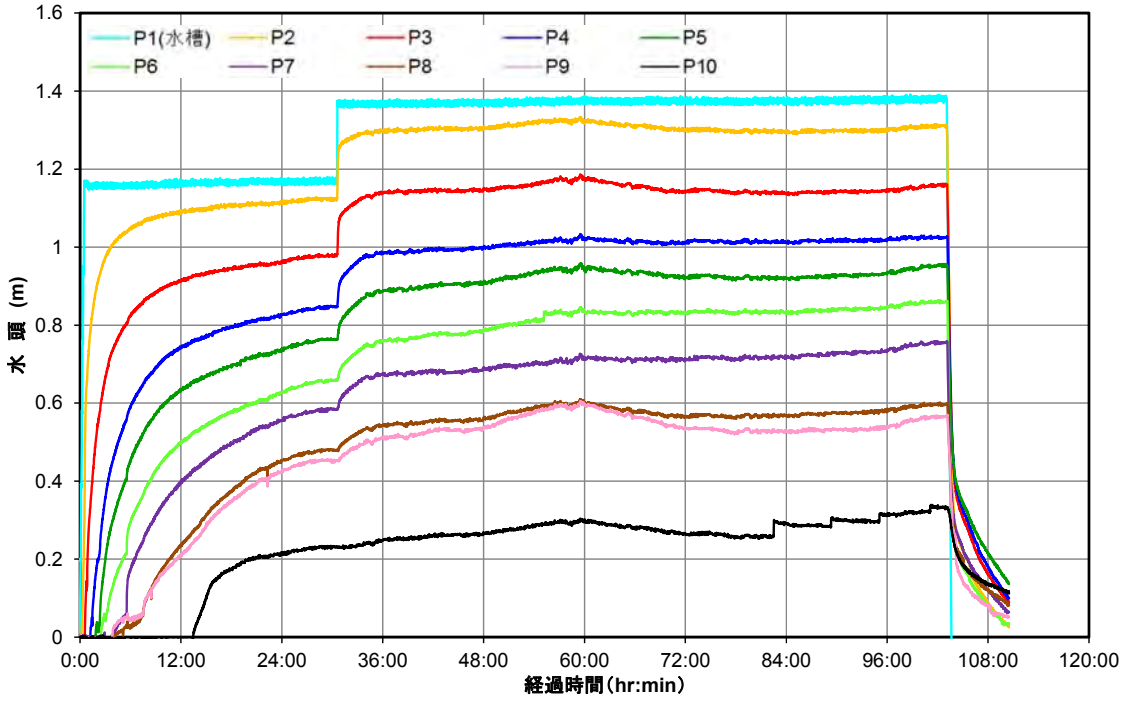



図 付 B.20　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE21,模型 6 のり勾配 1:4）

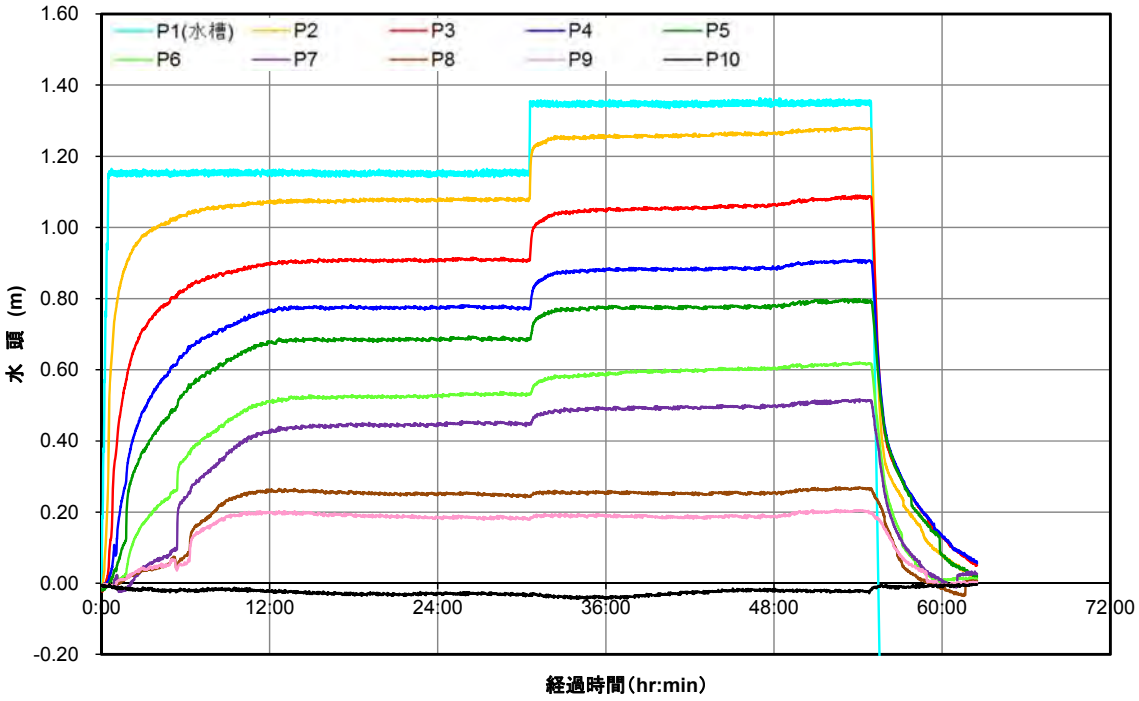



図 付 B.21　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE22,模型 6 のり勾配 1:3）

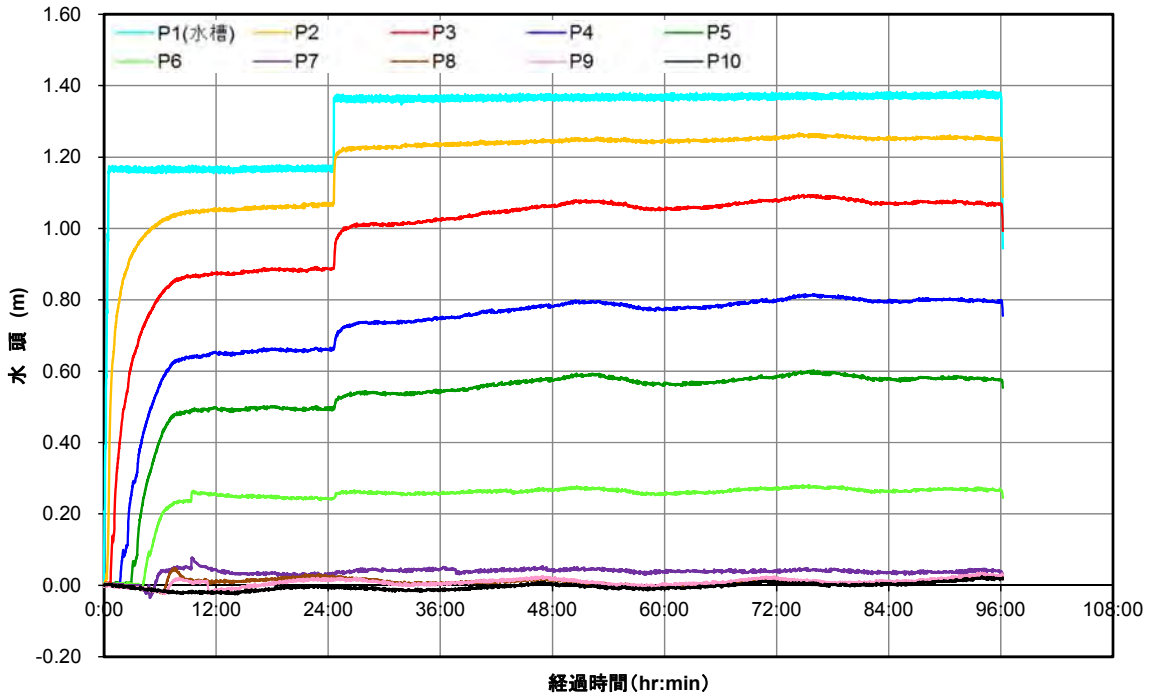



図 付 B.22　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE23,模型 6 のり勾配 1:2）

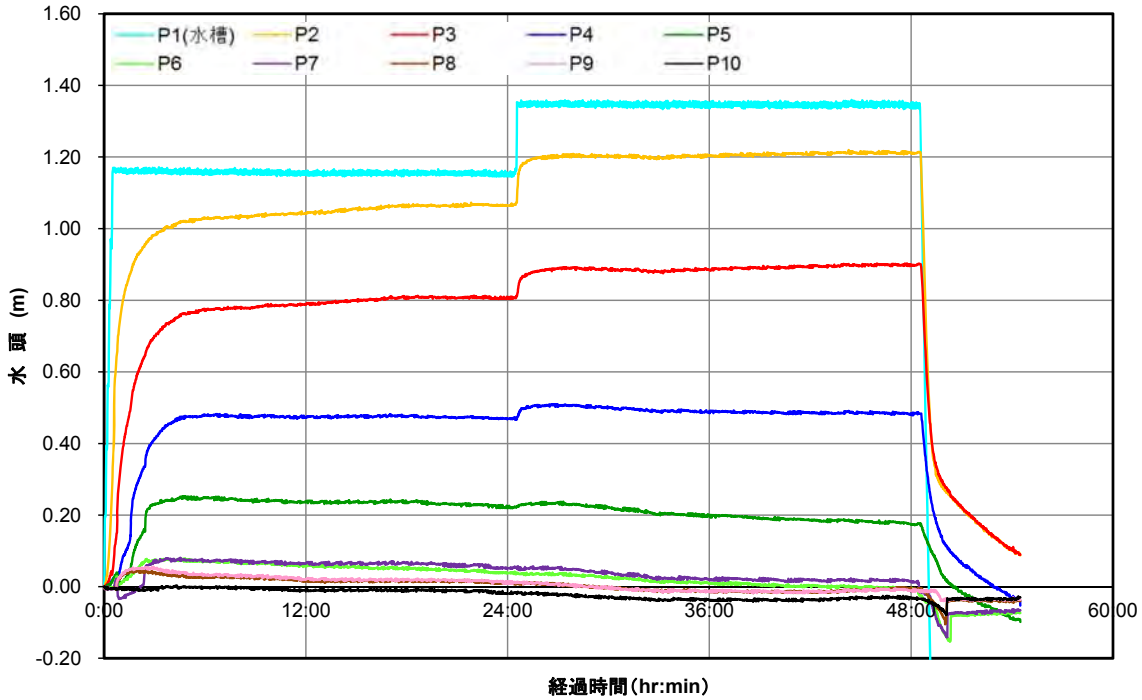



図 付 B.23　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE24,模型 6 のり勾配 1:1.5）

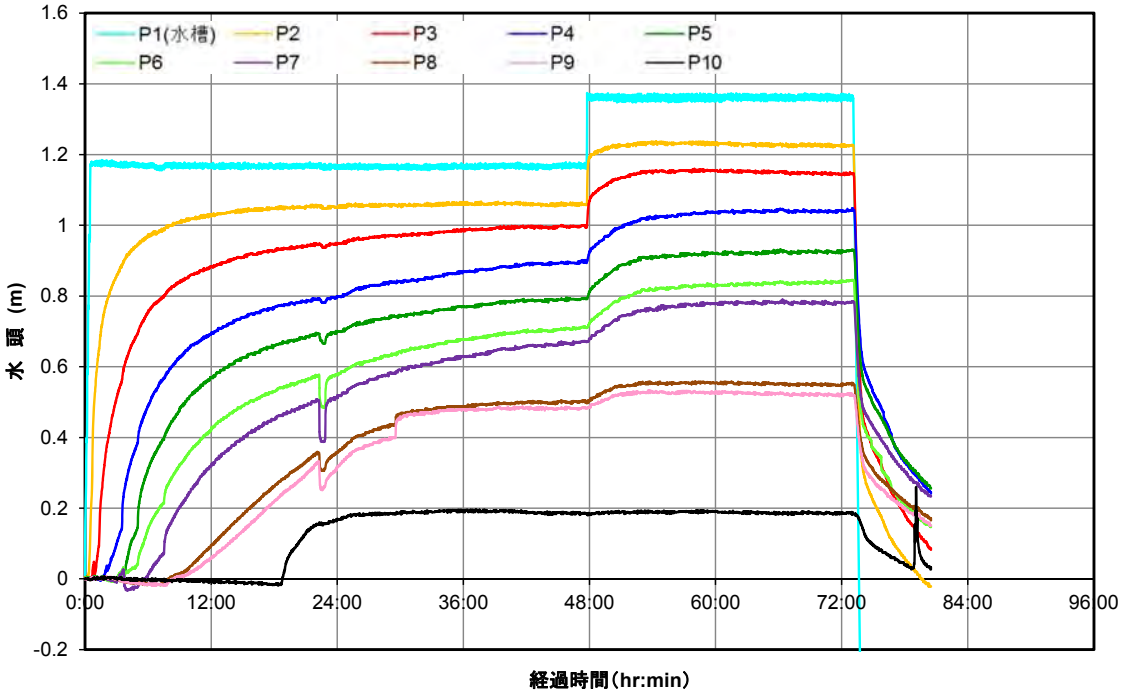



図 付 B.24　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE25,模型 7 のり勾配 1:4）

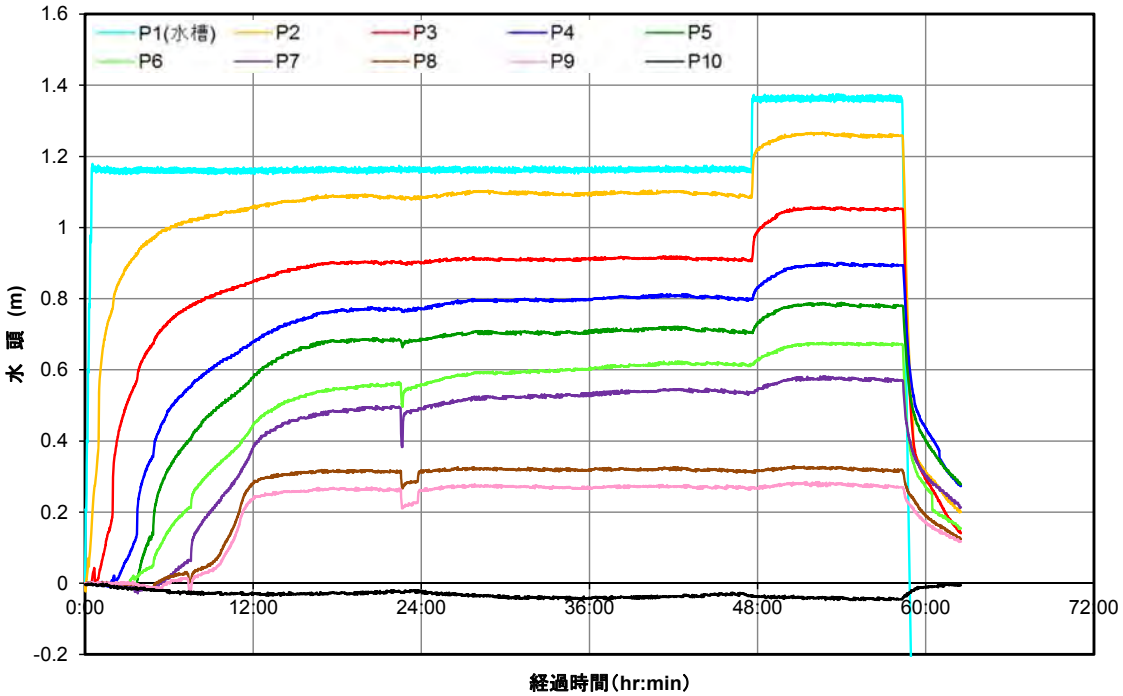



図 付 B.25　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE26,模型 7 のり勾配 1:3）

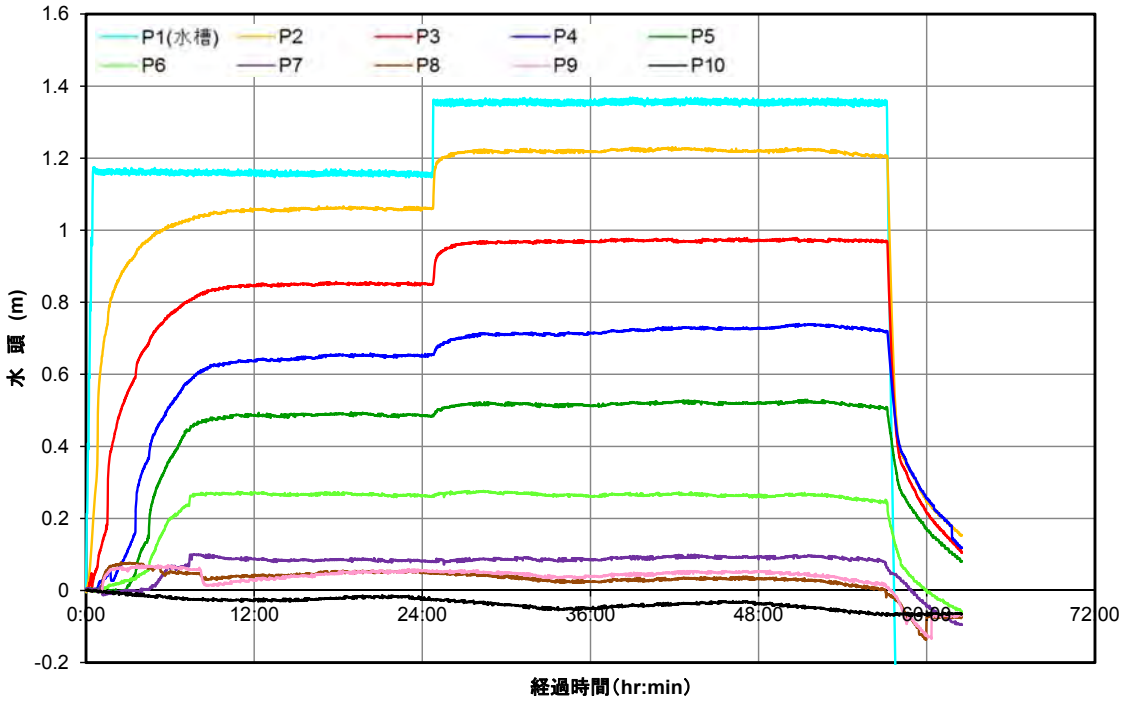



図 付 B.26　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE27,模型 7 のり勾配 1:2）

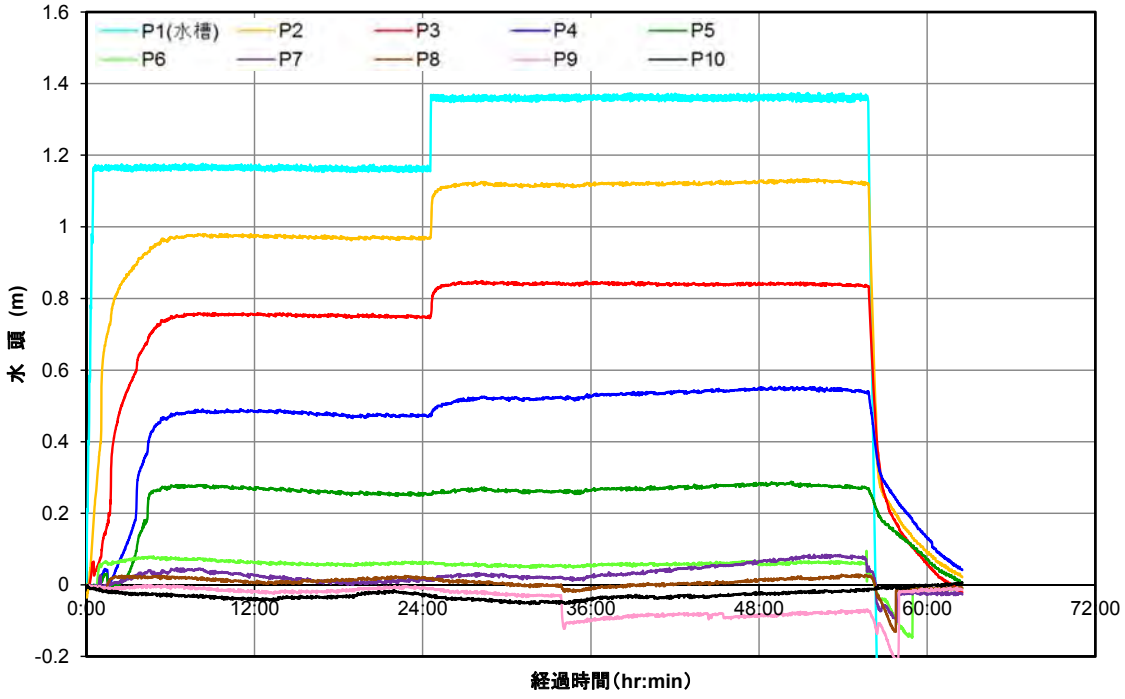



図 付 B.27　間隙水圧計による水頭の経時変化（CASE28,模型 7 のり勾配 1:1.5）

# C. 動水勾配経時変化図

# 中型浸透模型実験

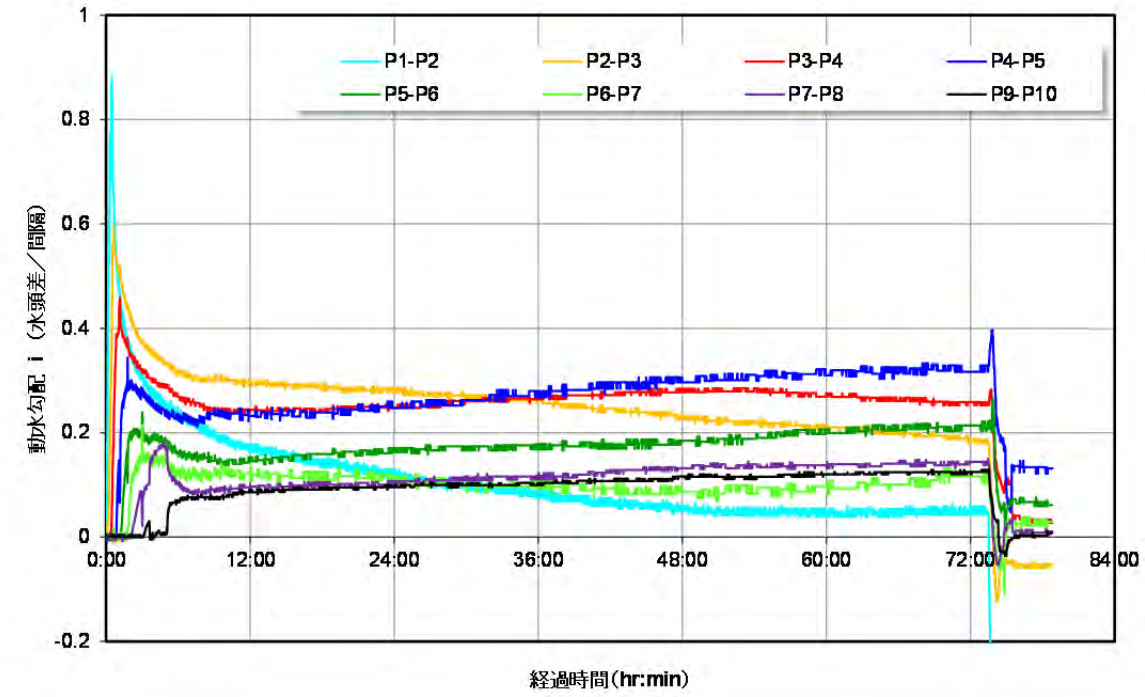



図 付 C.1　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE1,模型 1 のり勾配 1:4）

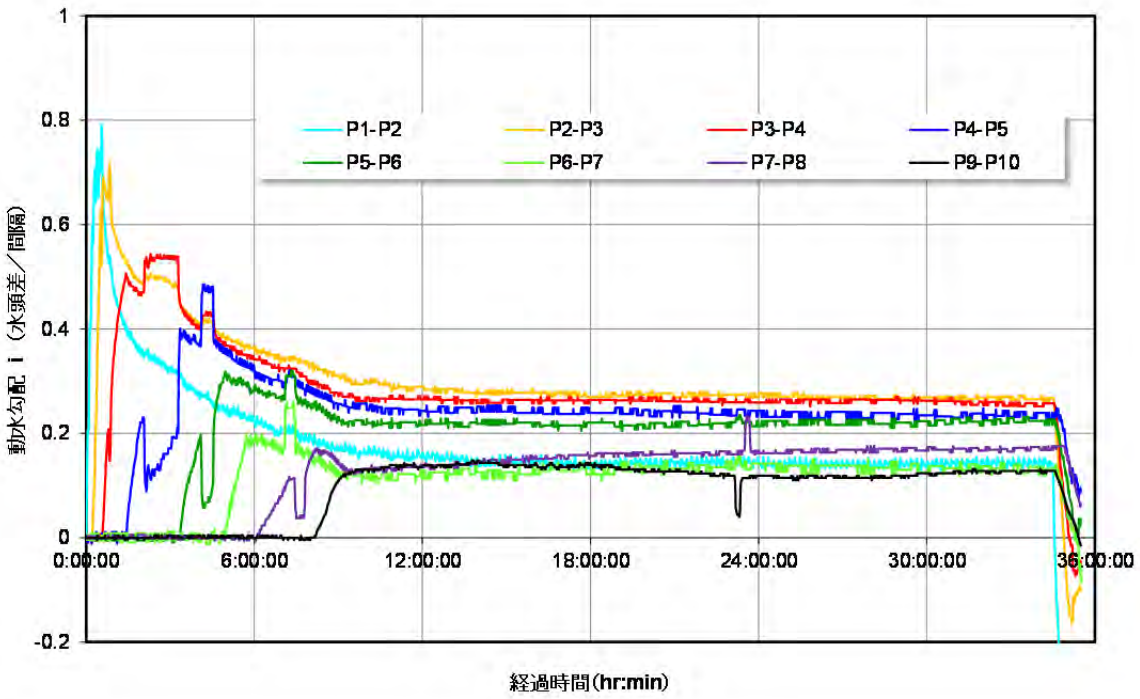



図 付 C.2　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE2,模型 1 のり勾配 1:3）

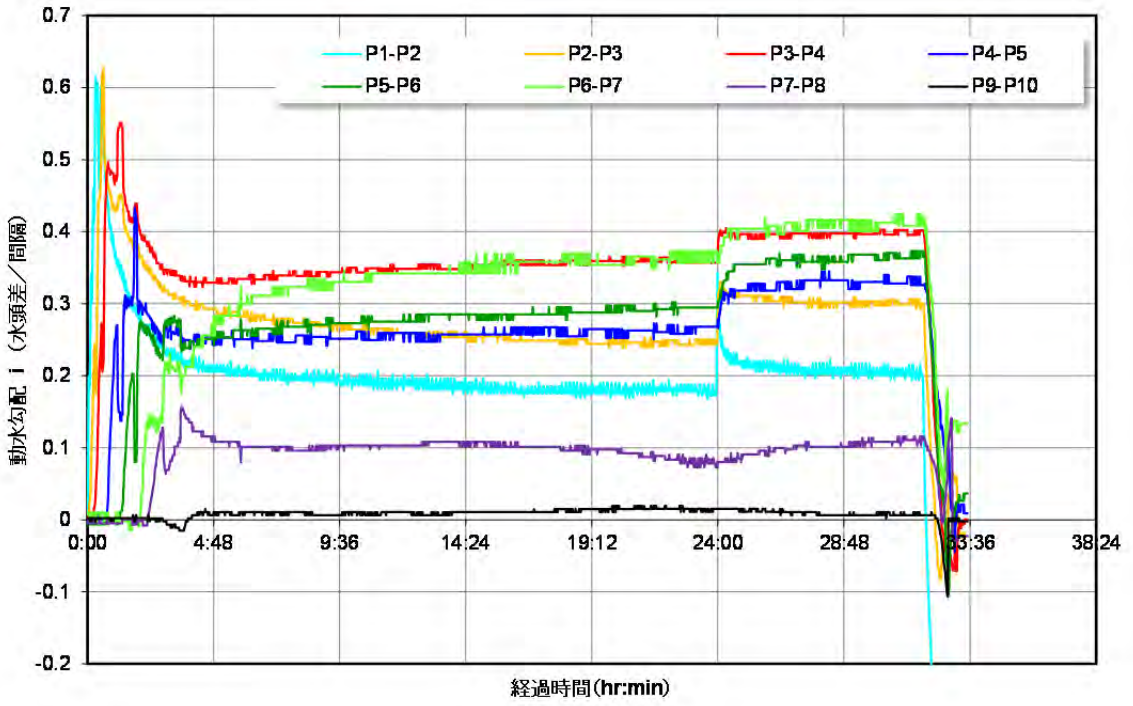



図 付 C.3　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE3,模型 1 のり勾配 1:2）

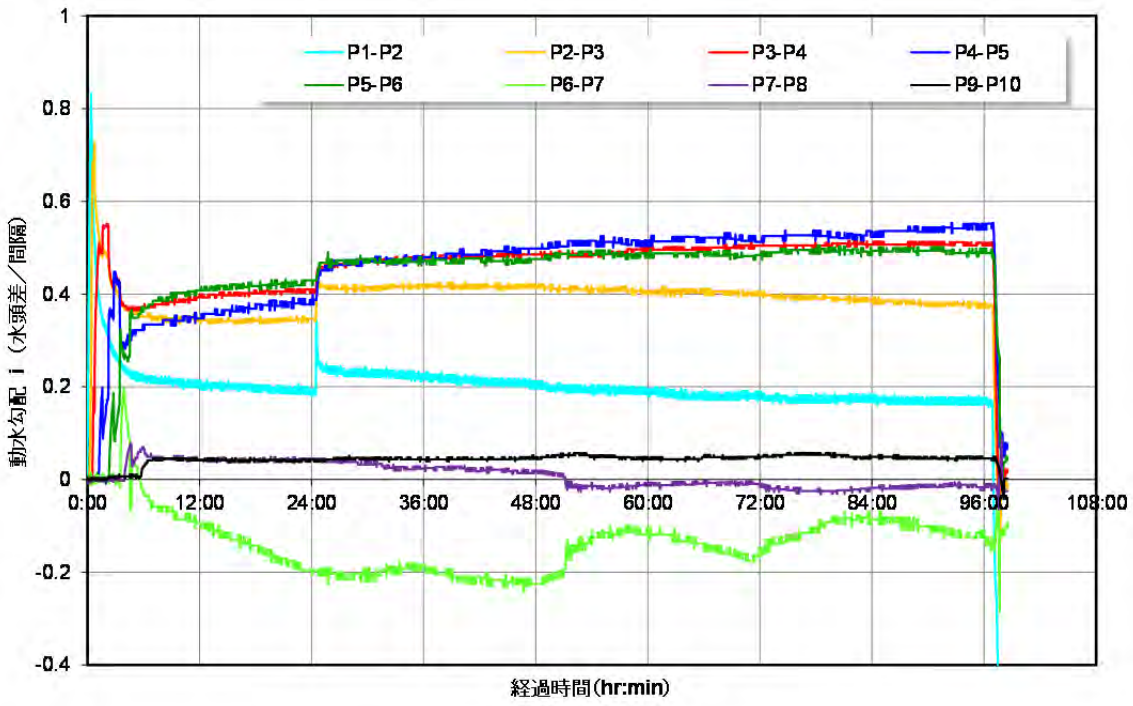



図 付 C.4　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE4,模型 1 のり勾配 1:1.5）

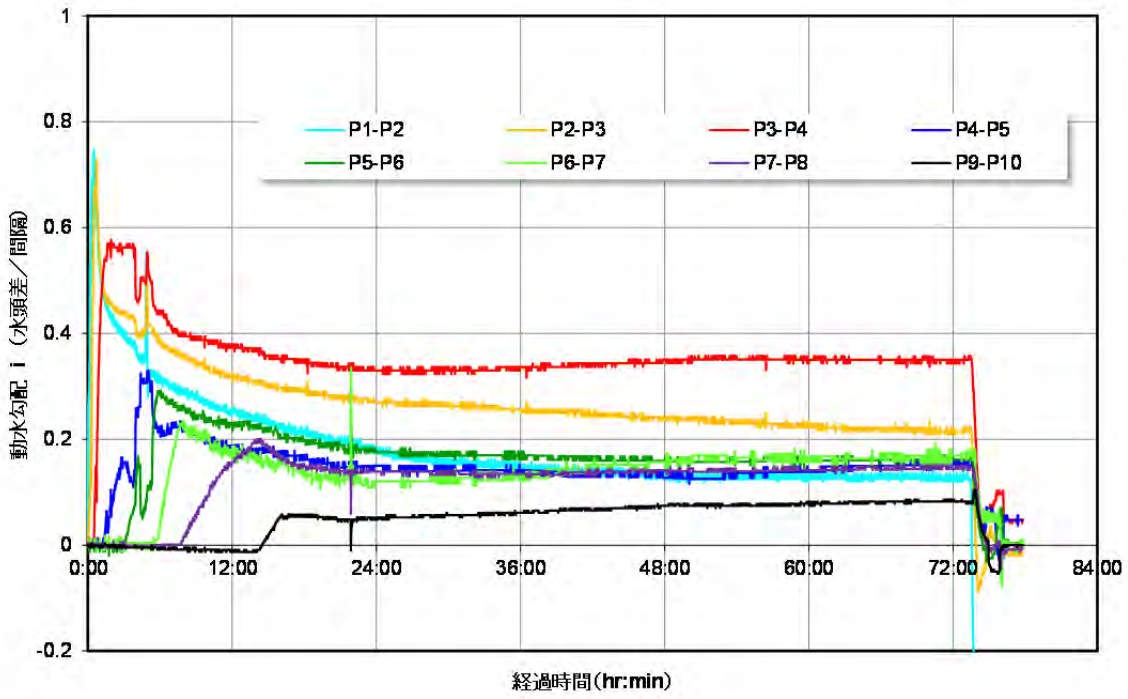



図 付 C.5　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE5,模型 2 のり勾配 1:4）

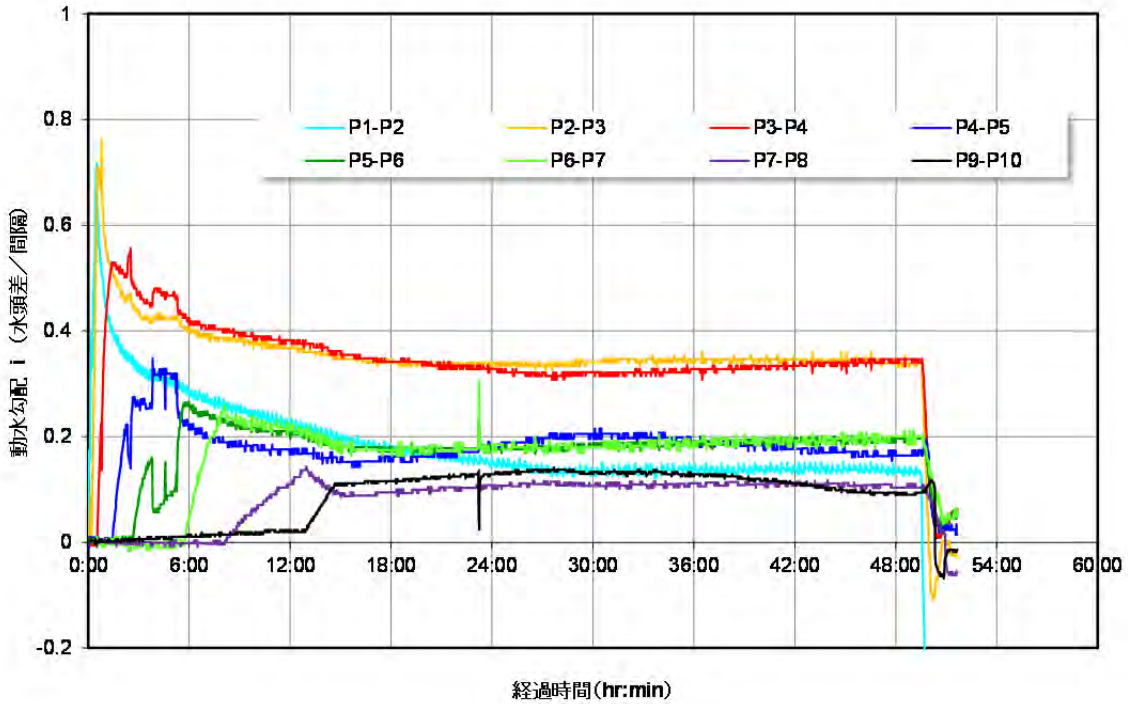



図 付 C.6　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE6,模型 2 のり勾配 1:3）

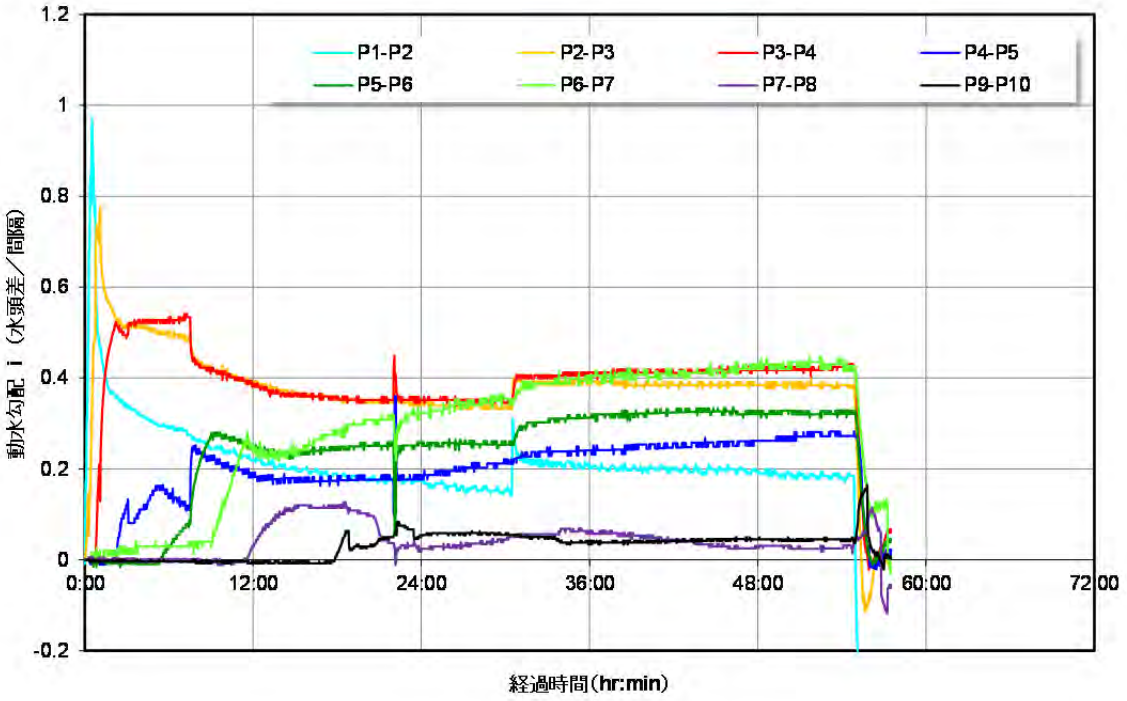



図 付 C.7　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE7,模型 2 のり勾配 1:2）

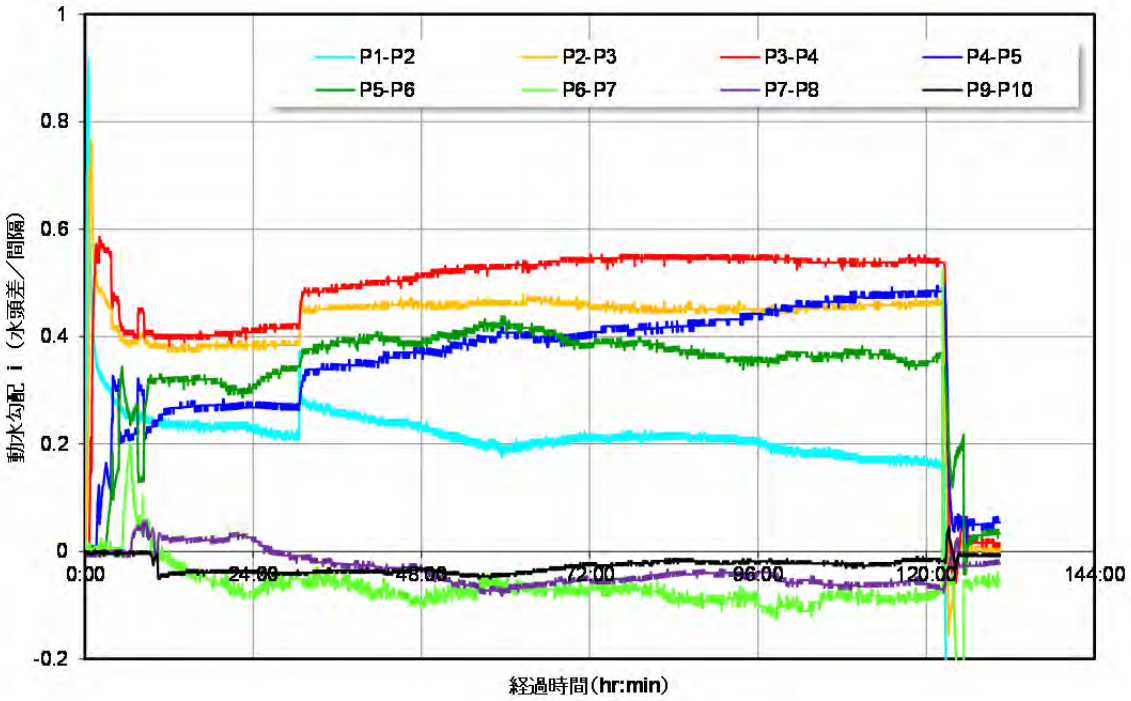



図 付 C.8　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE8,模型 2 のり勾配 1:1.5）

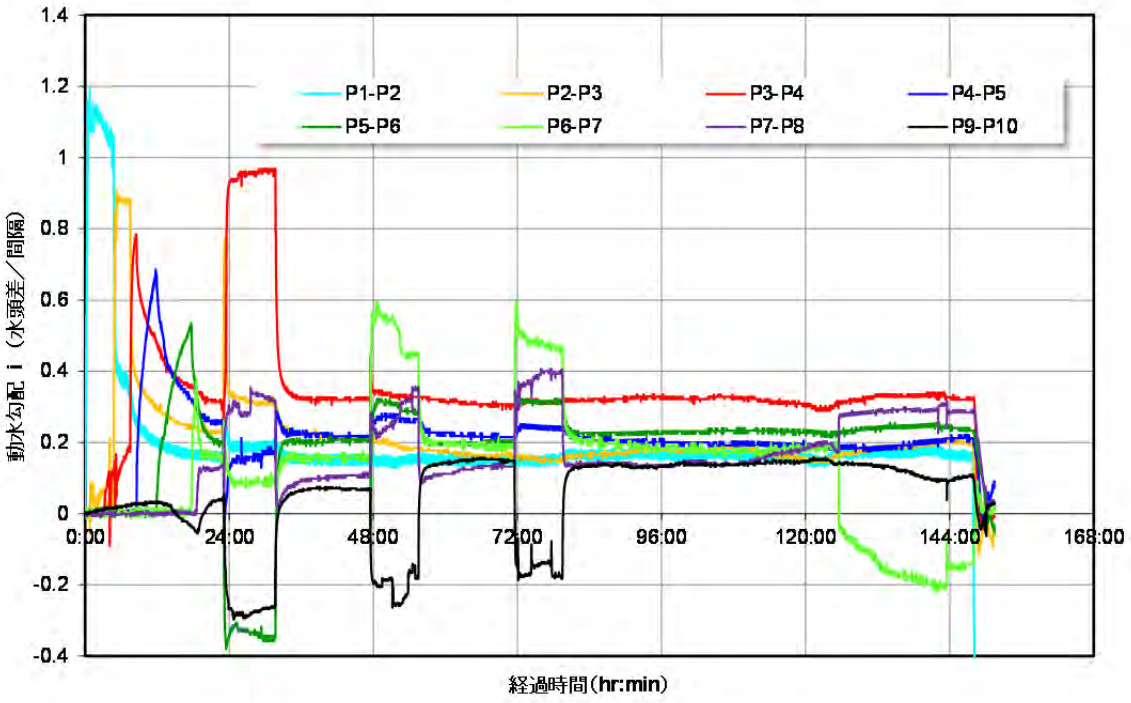



図 付 C.9　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE9,模型 3 のり勾配 1:4）

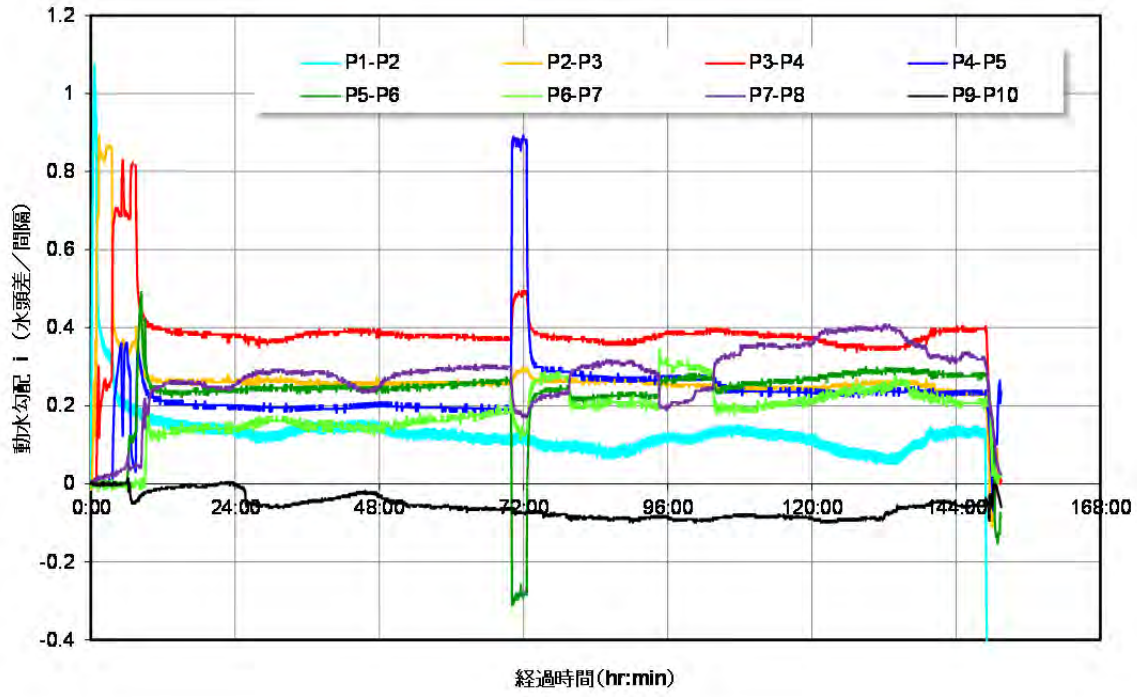



図 付 C.10　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE10,模型 3 のり勾配 1:3）

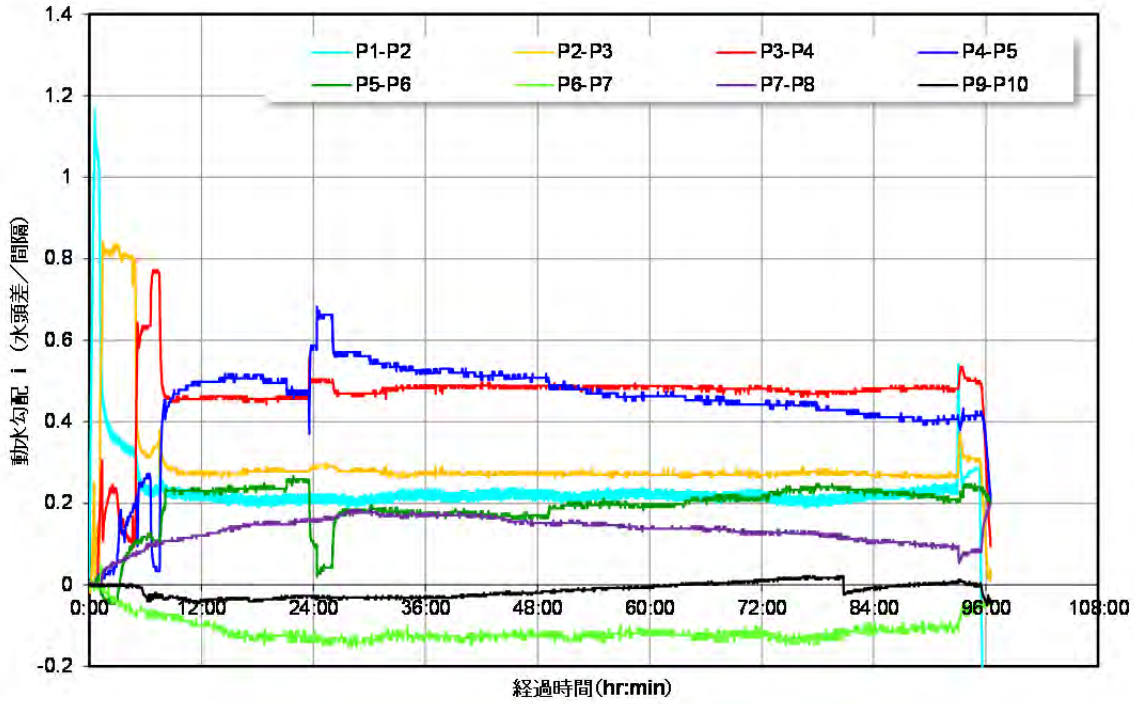



図 付 C.11　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE11,模型 3 のり勾配 1:2）

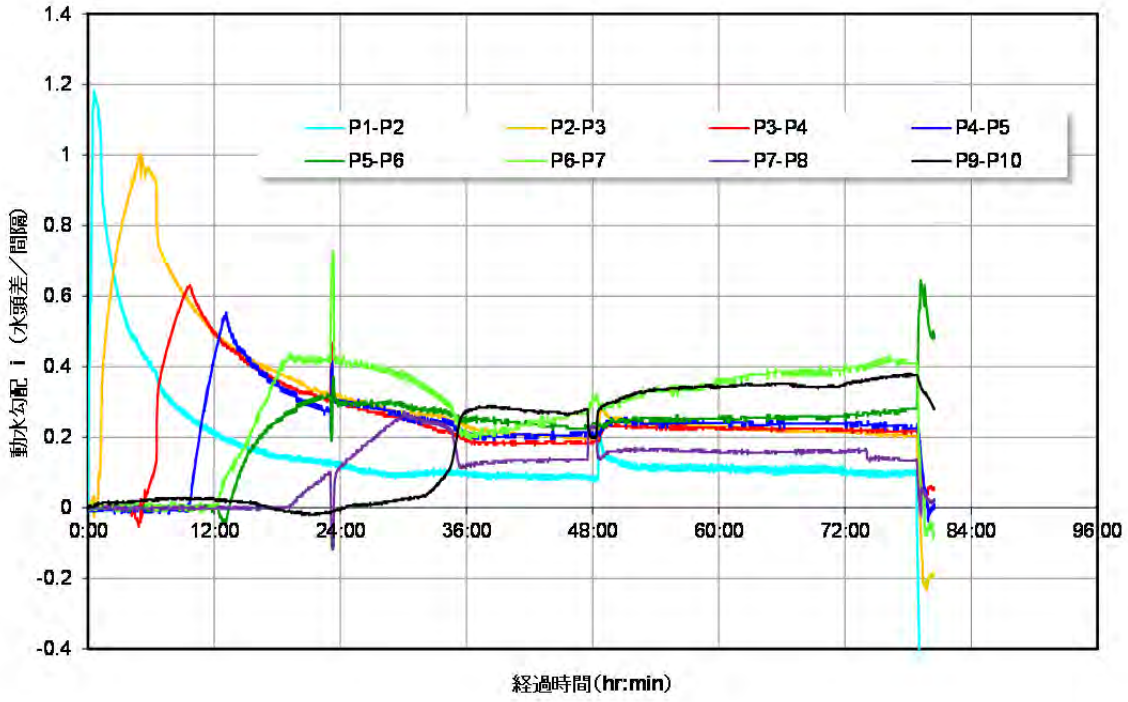



図 付 C.12　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE13,模型 4 のり勾配 1:4）

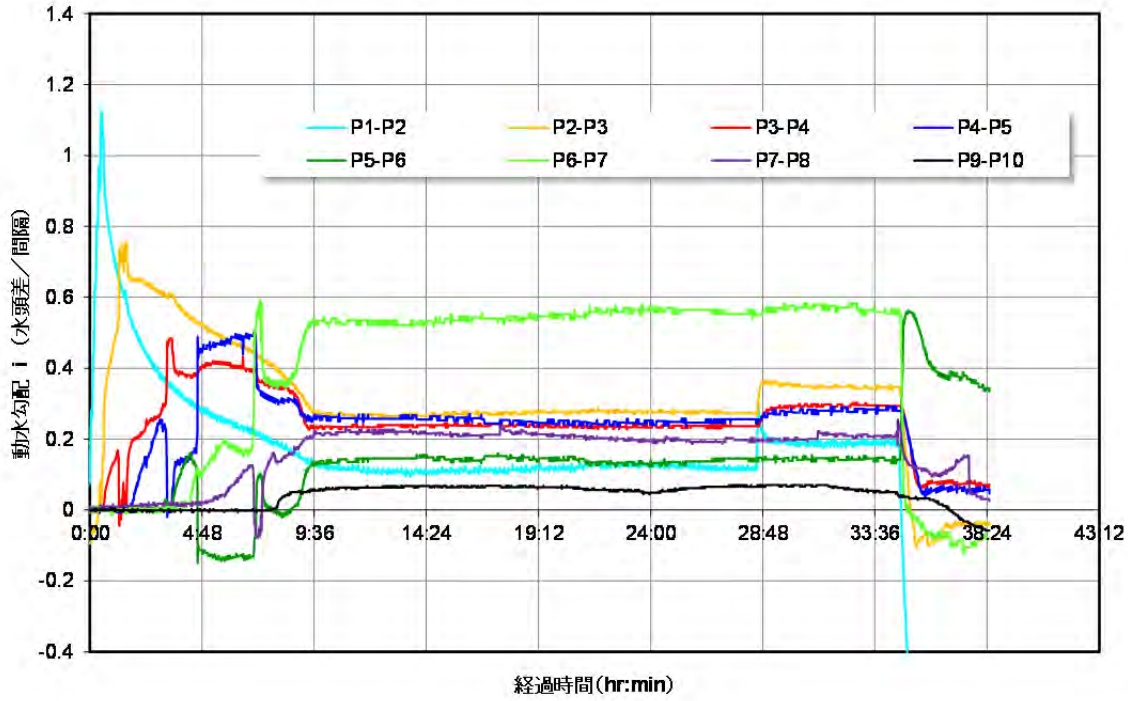



図 付 C.13　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE14,模型 4 のり勾配 1:3）

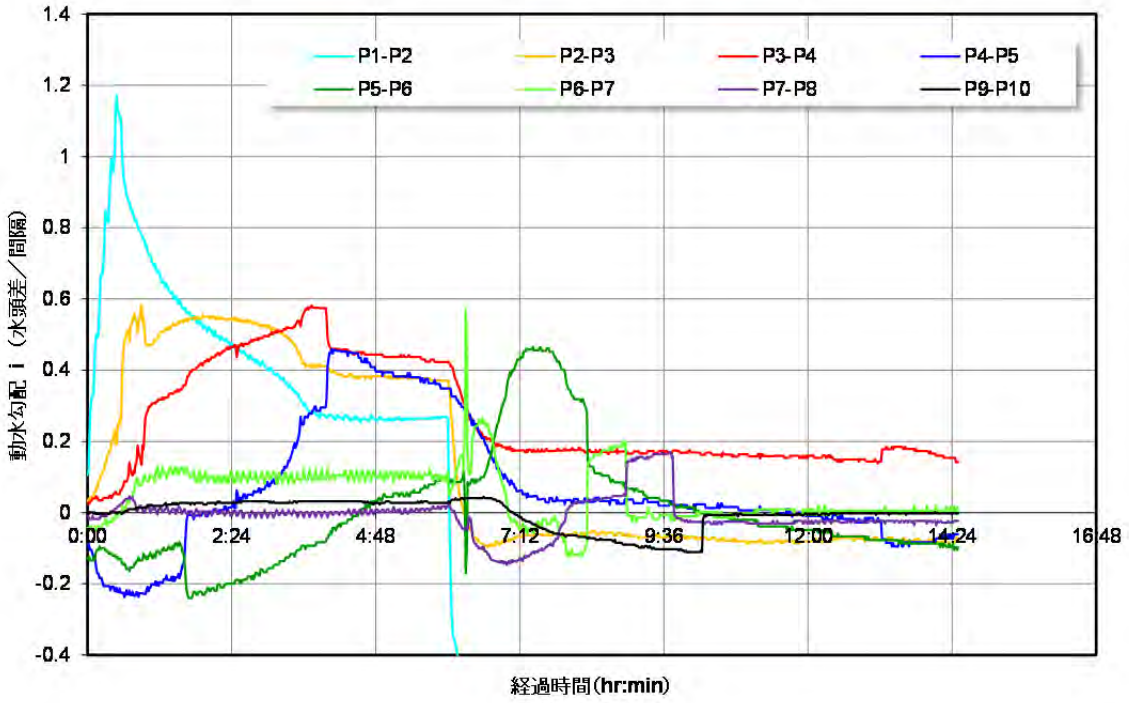



図 付 C.14　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE15,模型 4 のり勾配 1:2）

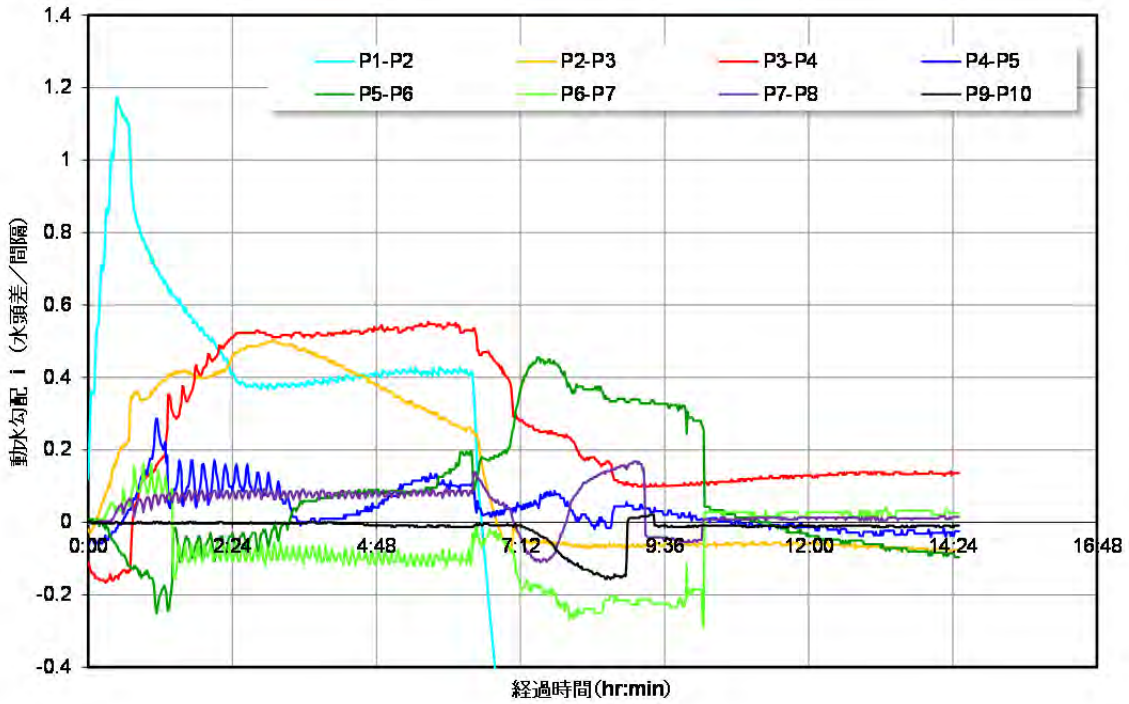



図 付 C.15　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE16,模型 4 のり勾配 1:1.5）

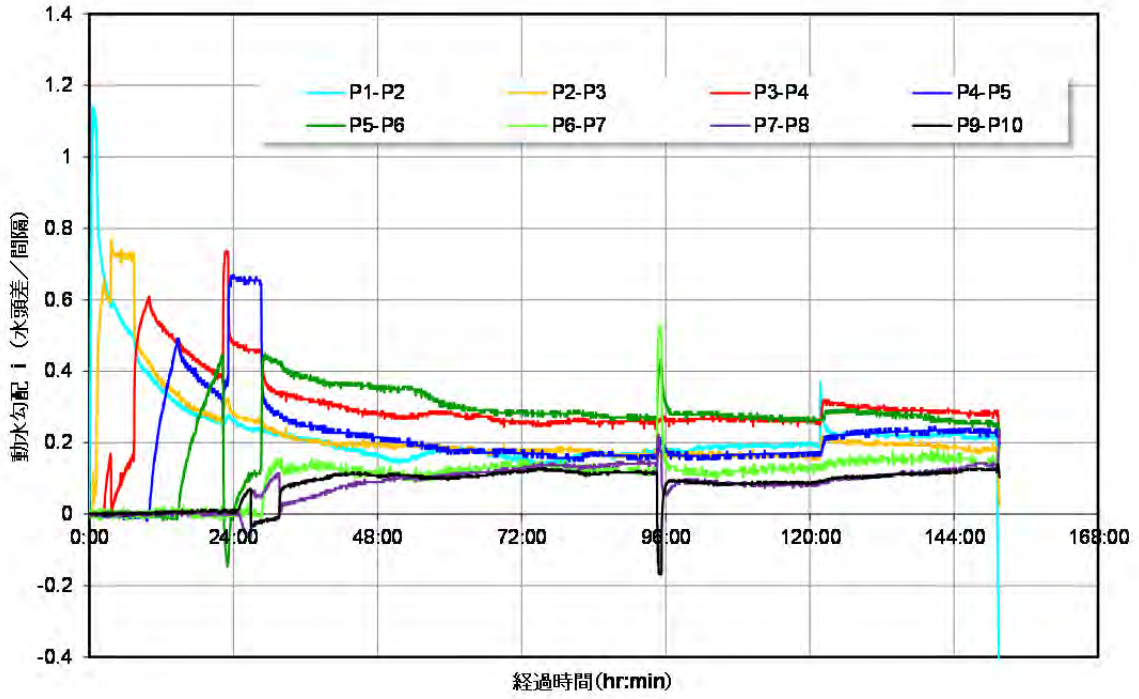



図 付 C.16　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE17,模型 5 のり勾配 1:4）

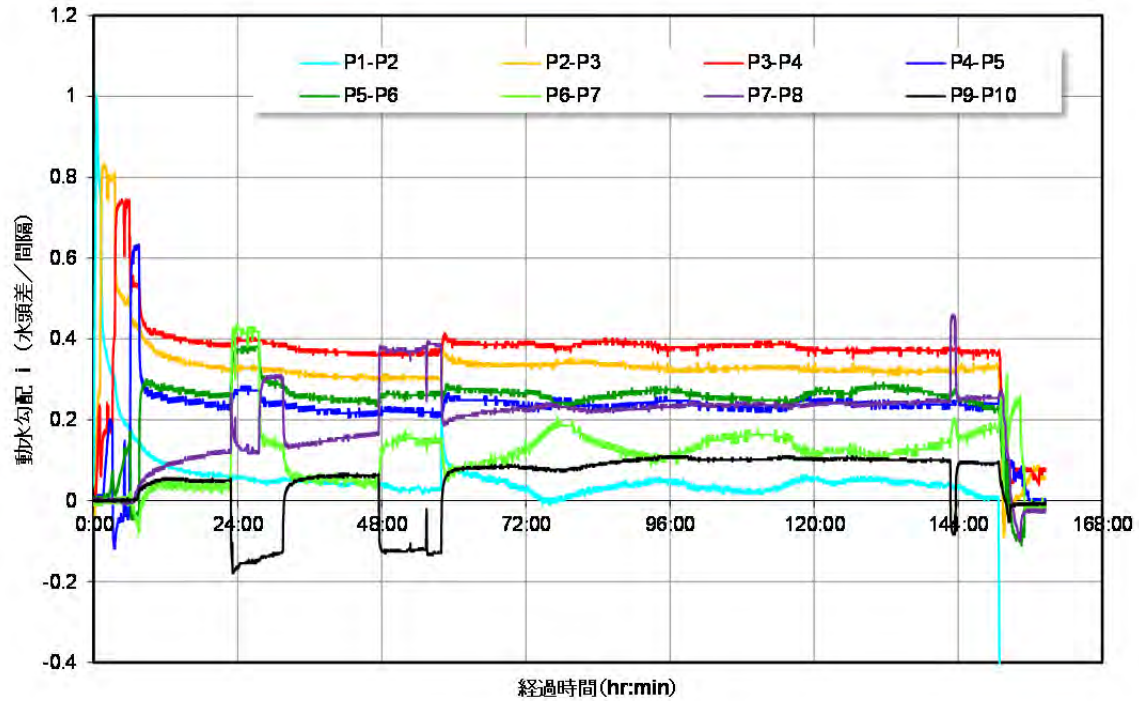



図 付 C.17　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE18,模型 5 のり勾配 1:3）

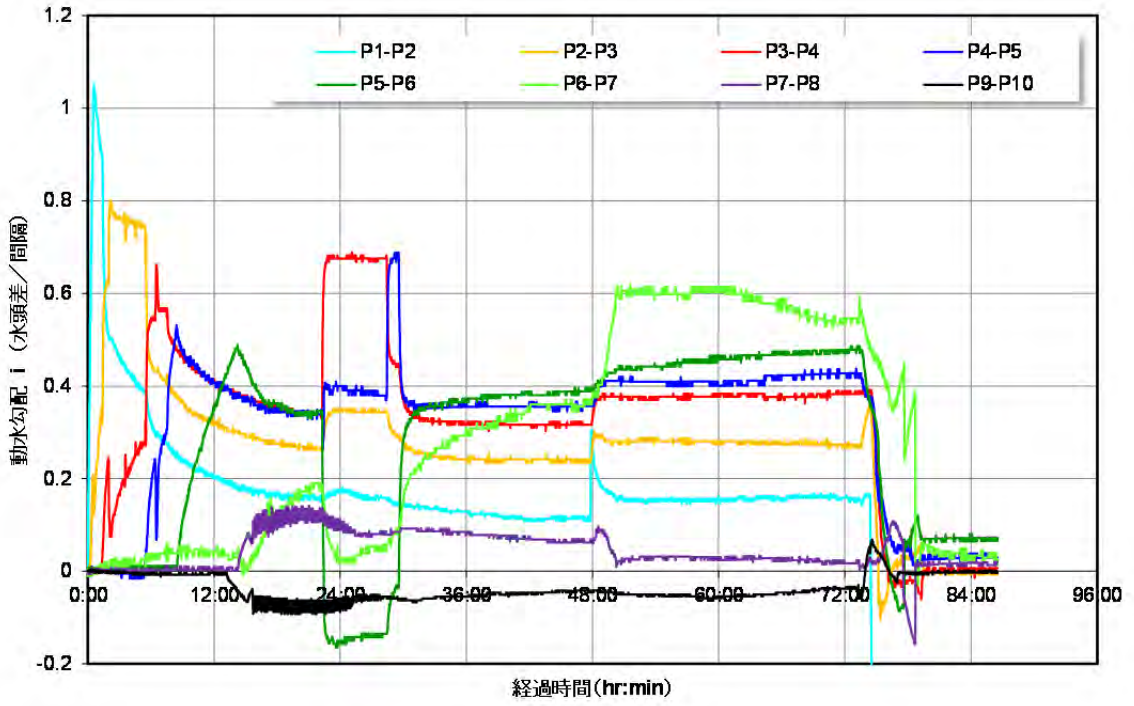



図 付 C.18　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE19,模型 5 のり勾配 1:2）

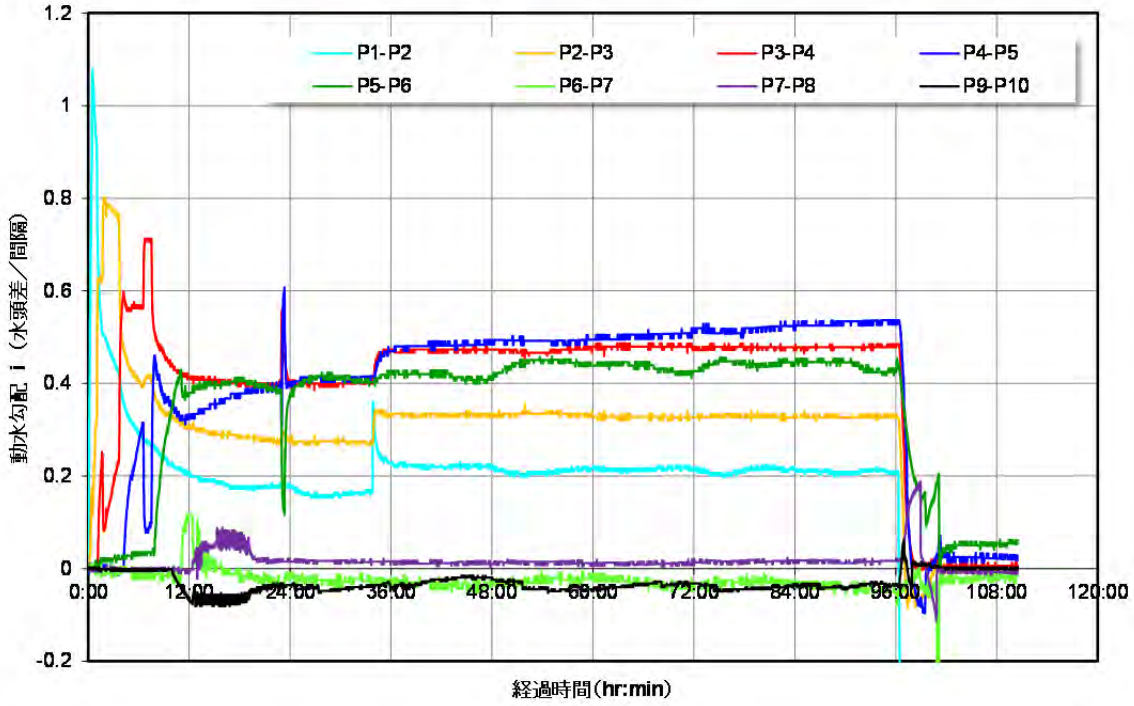



図 付 C.19　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE20,模型 5 のり勾配 1:1.5）

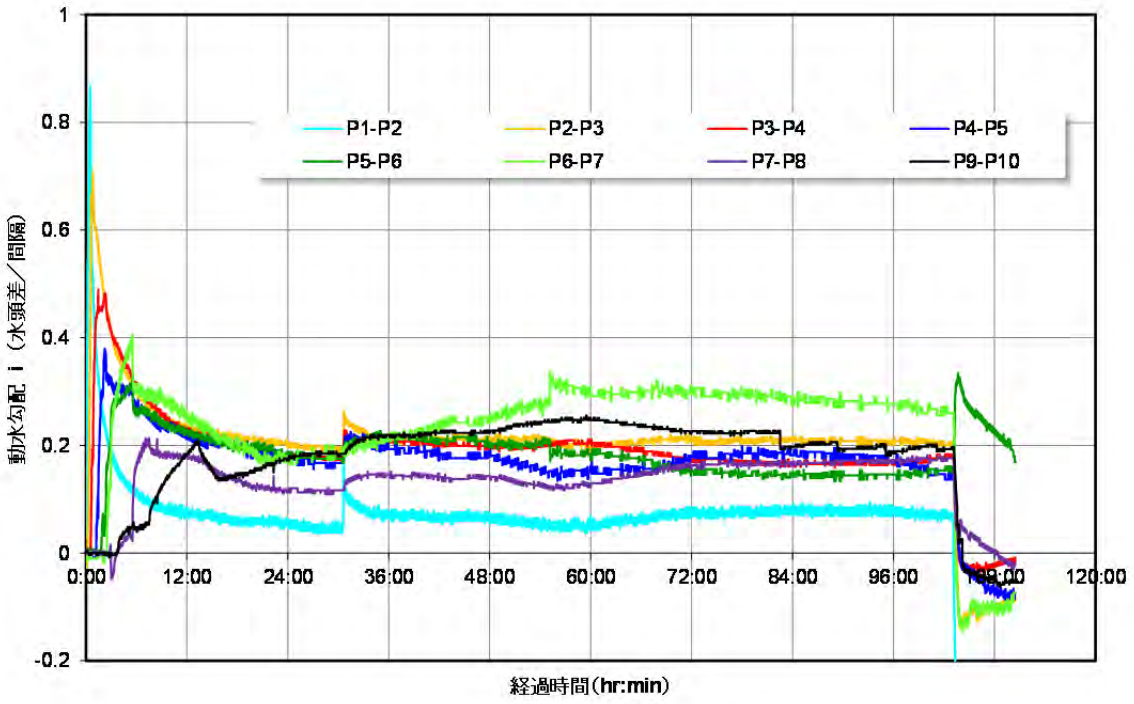



図 付 C.20　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE21,模型 6 のり勾配 1:4）

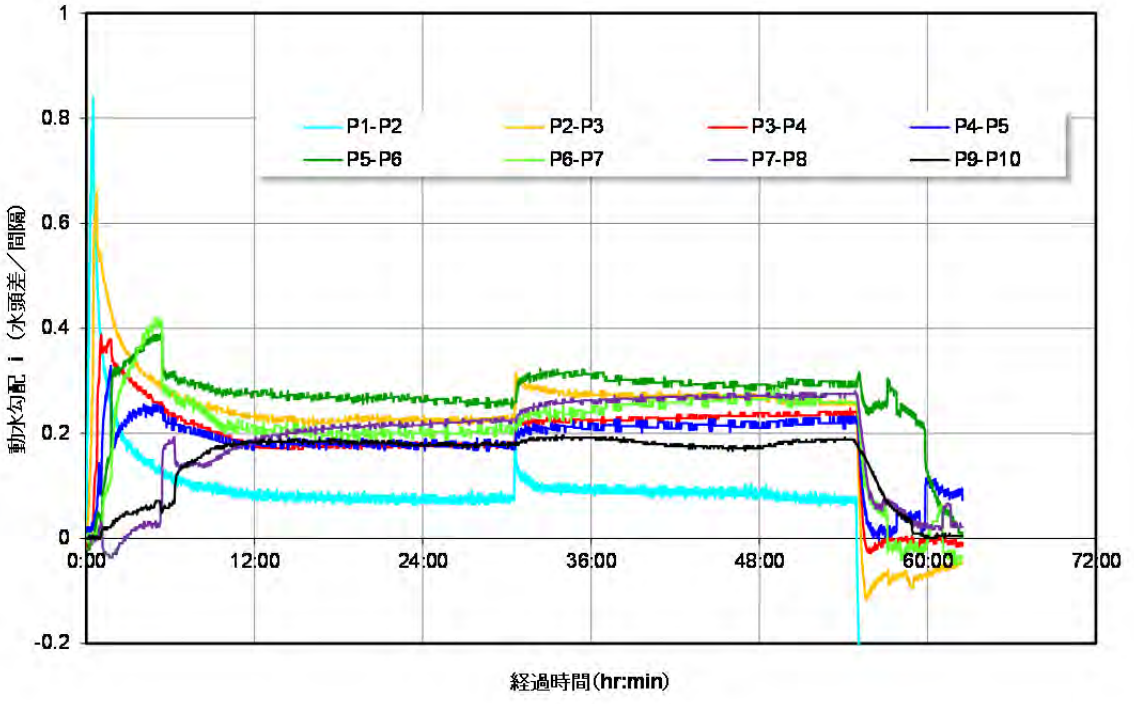



図 付 C.21　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE22,模型 6 のり勾配 1:3）

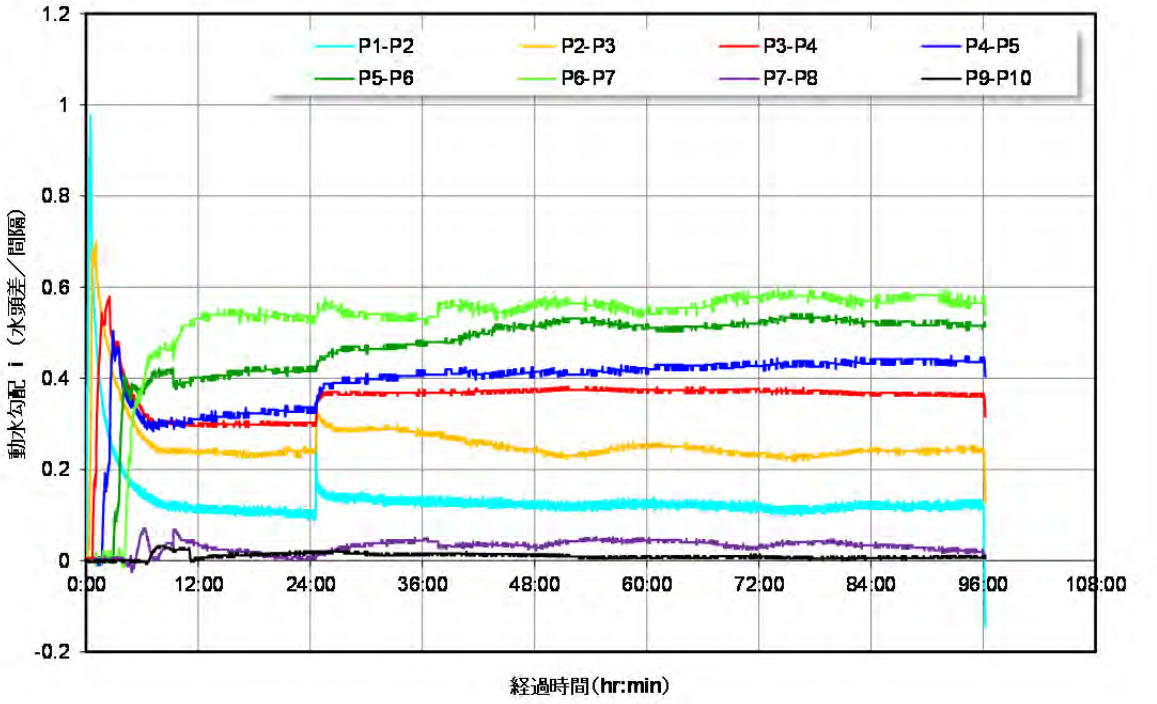



図 付 C.22　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE23,模型 6 のり勾配 1:2）

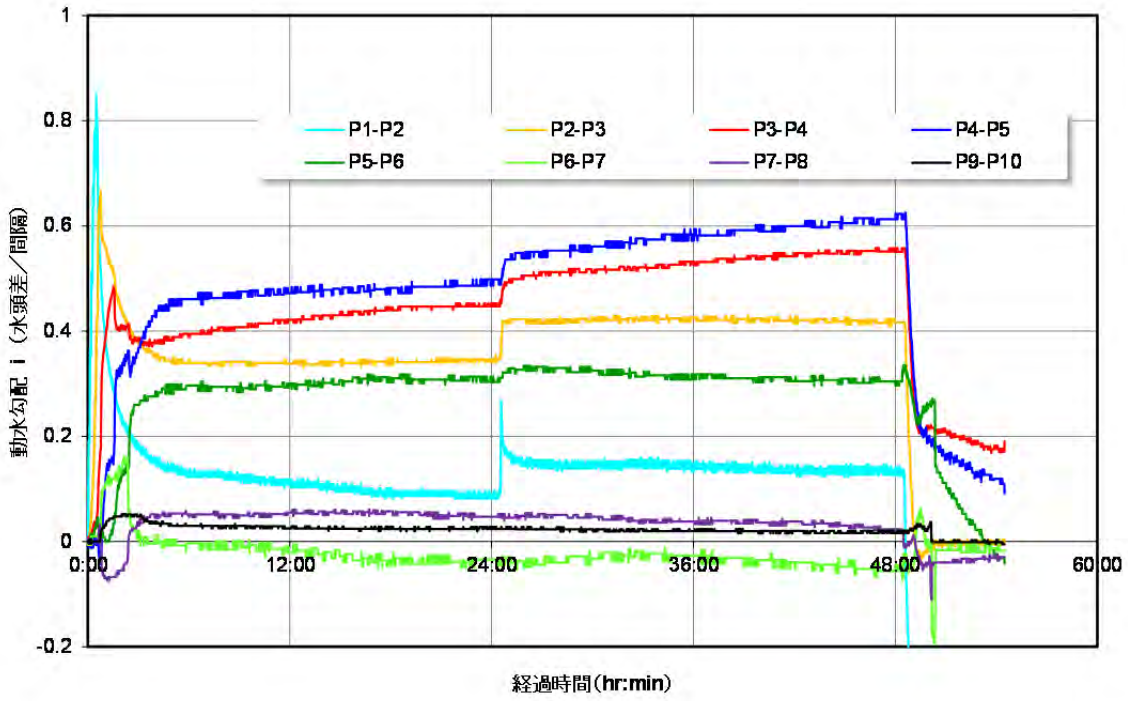



図 付 C.23　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE24,模型 6 のり勾配 1:1.5）

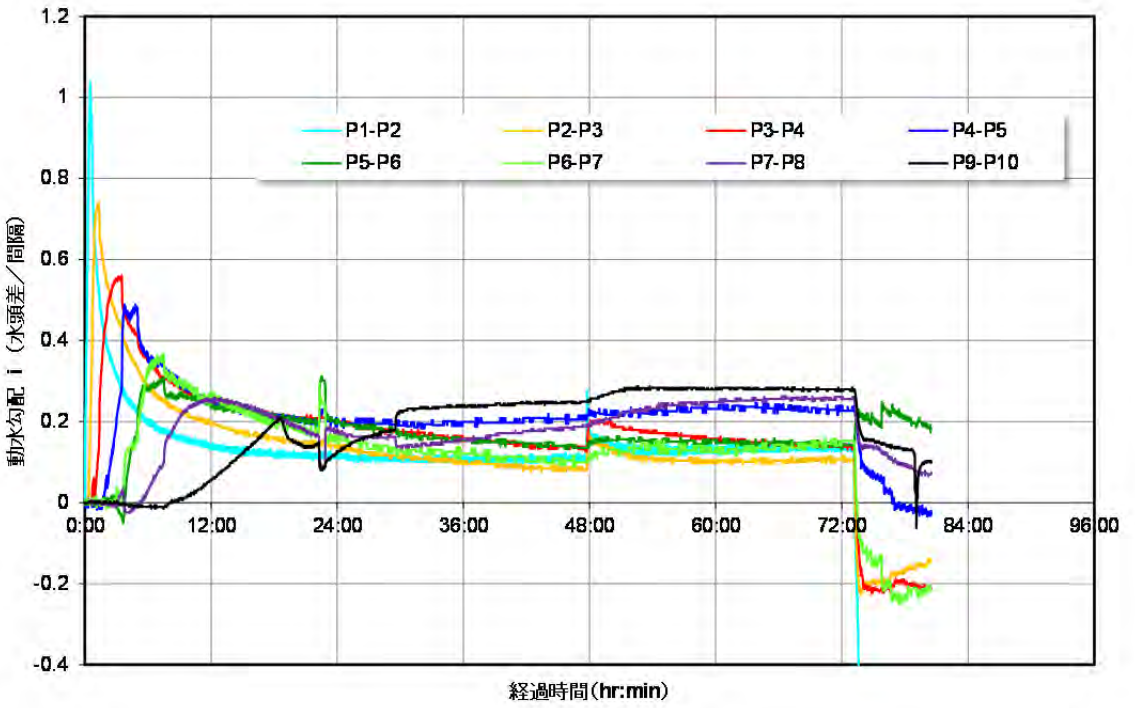



図 付 C.24　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE25,模型 7 のり勾配 1:4）

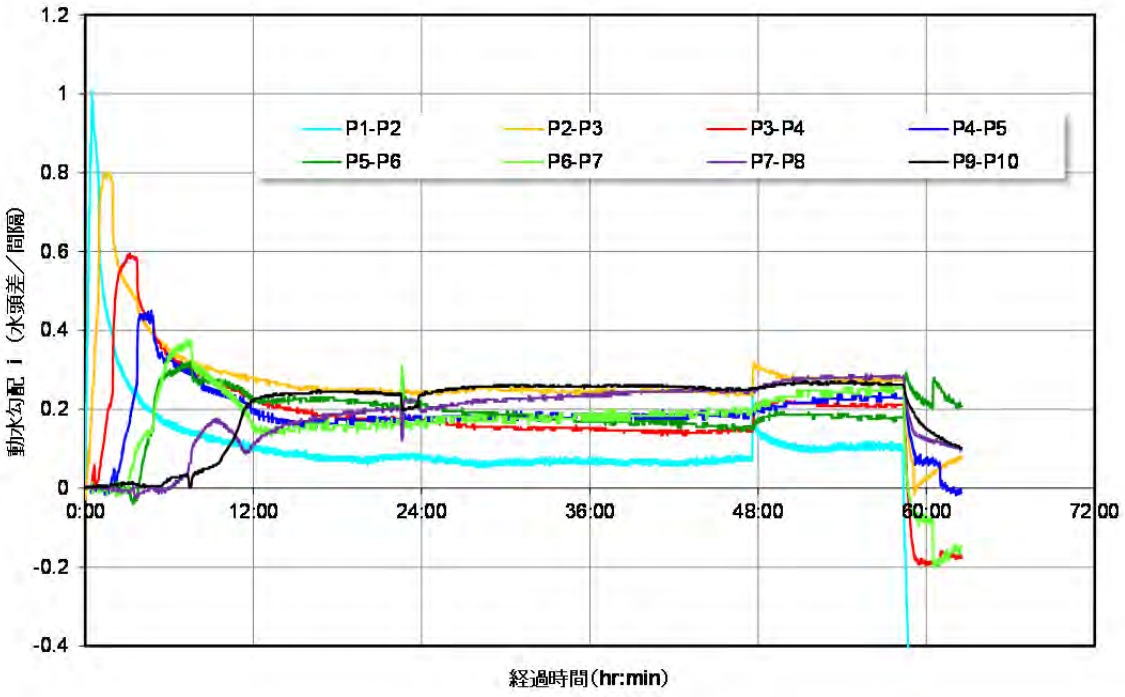



図 付 C.25　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE26,模型 7 のり勾配 1:3）

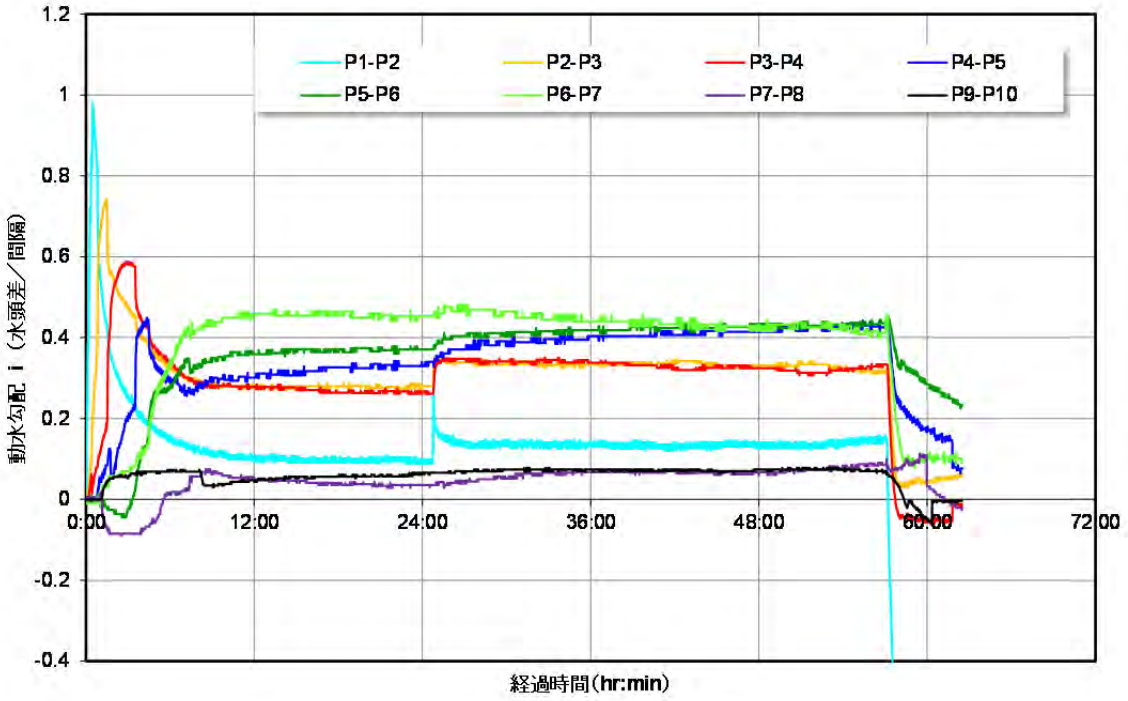



図 付 C.26　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE27,模型 7 のり勾配 1:2）

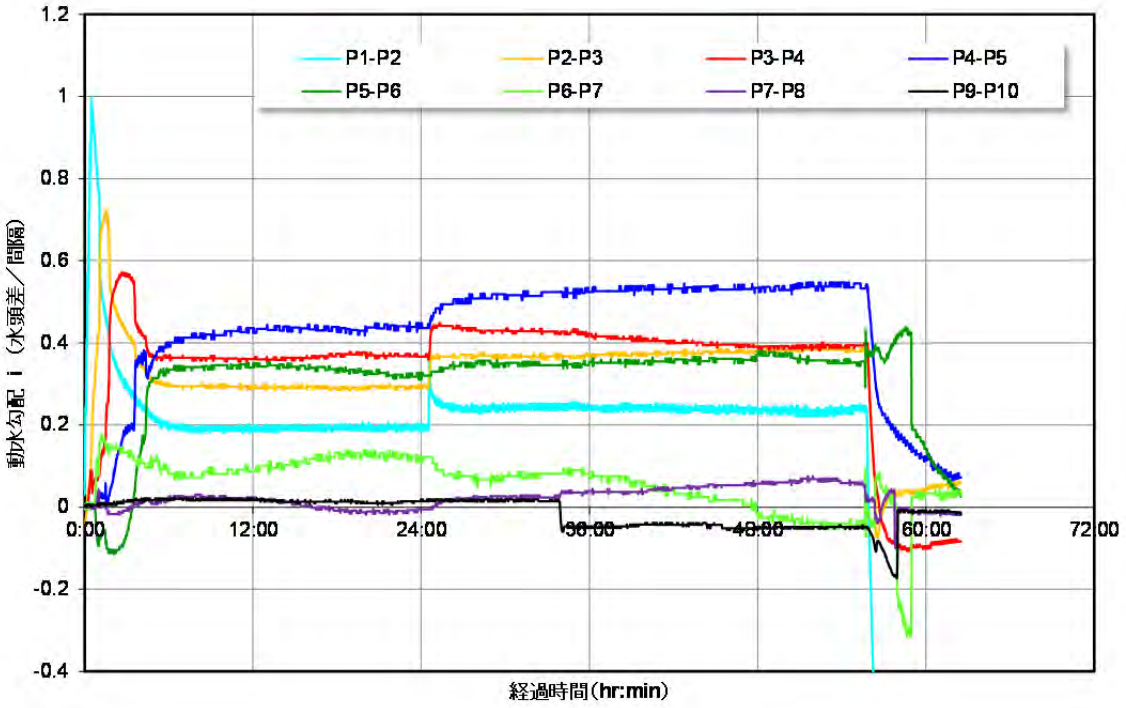



図 付 C.27　間隙水圧計による動水勾配の経時変化（CASE28,模型 7 のり勾配 1:1.5）

# 小型浸透模型実験（本実験）

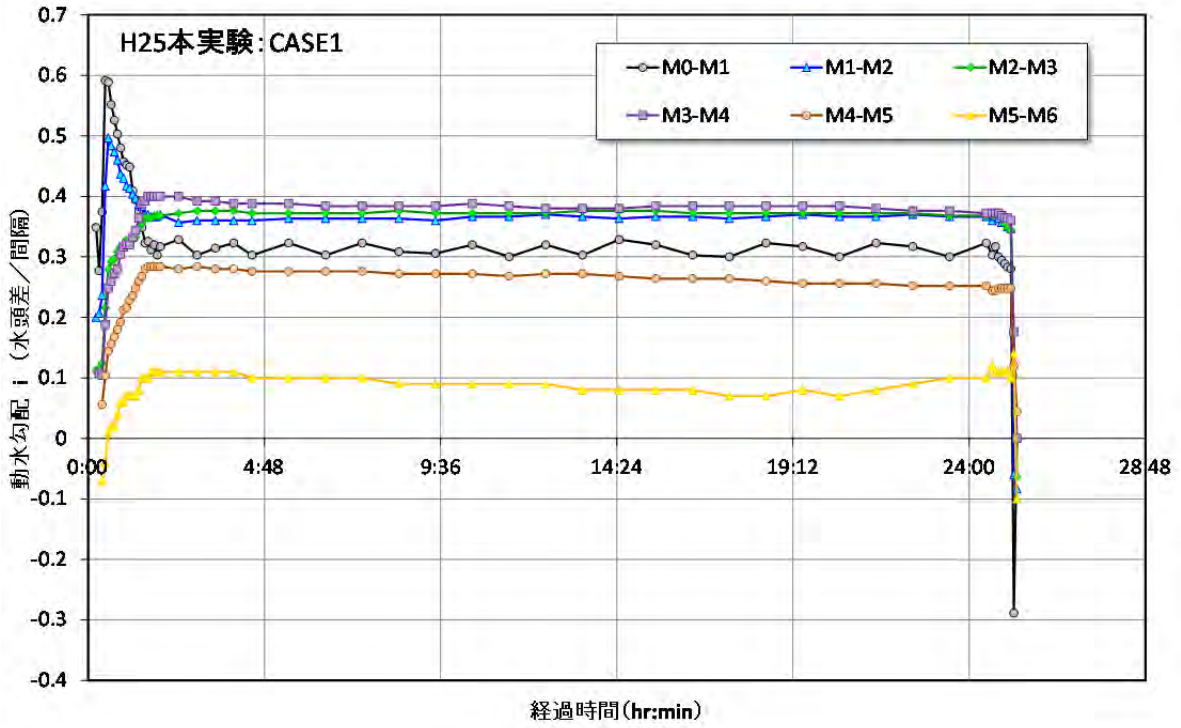



図 付 C.28　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE1）

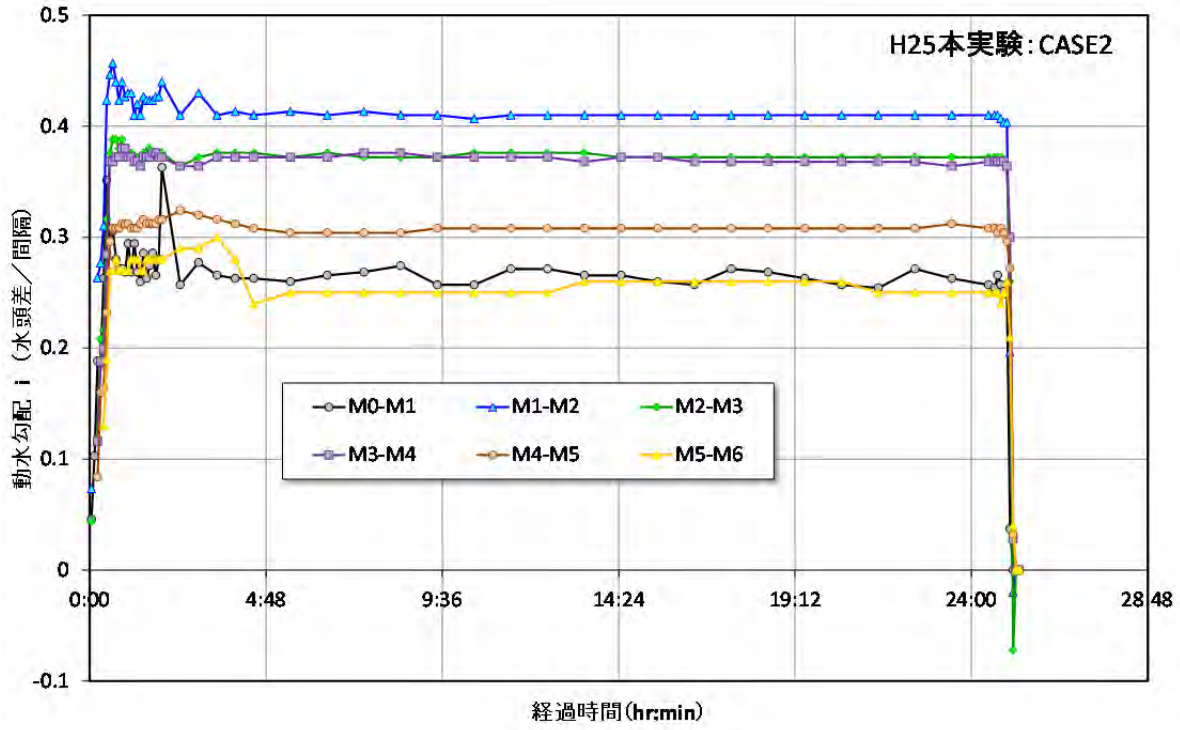



図 付 C.29　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE2）

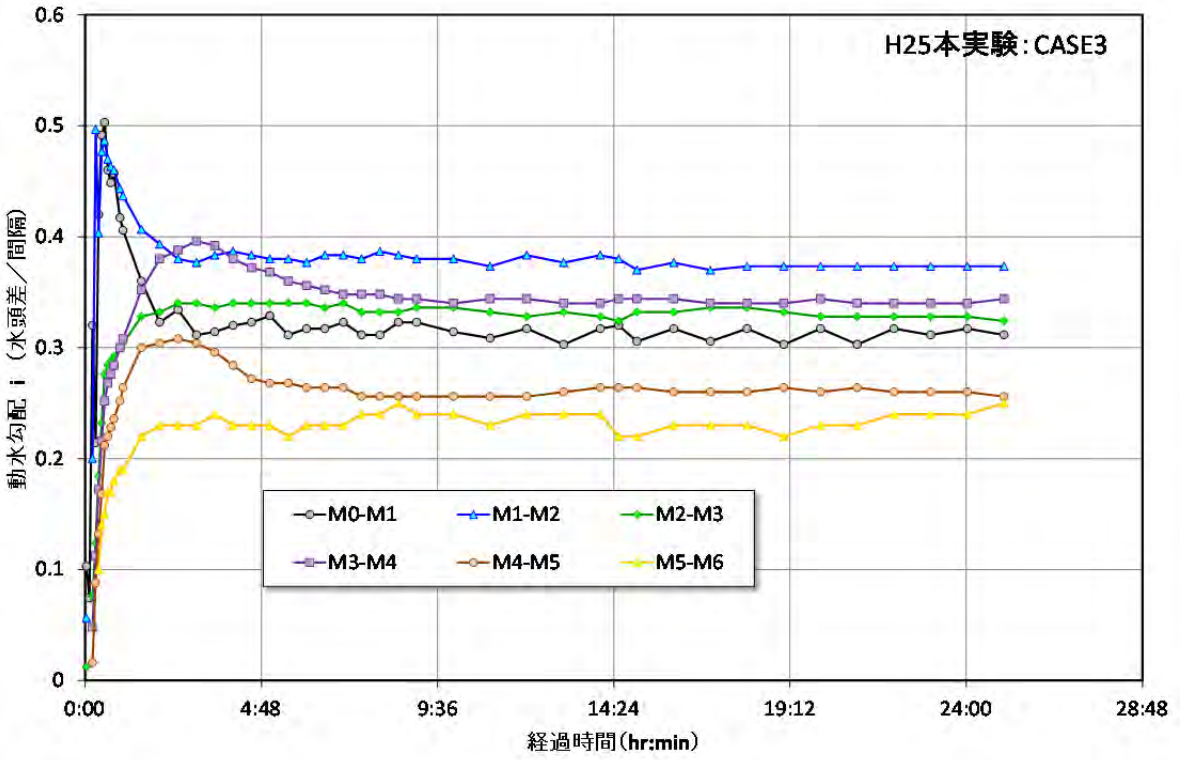



図 付 C.30　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE3）

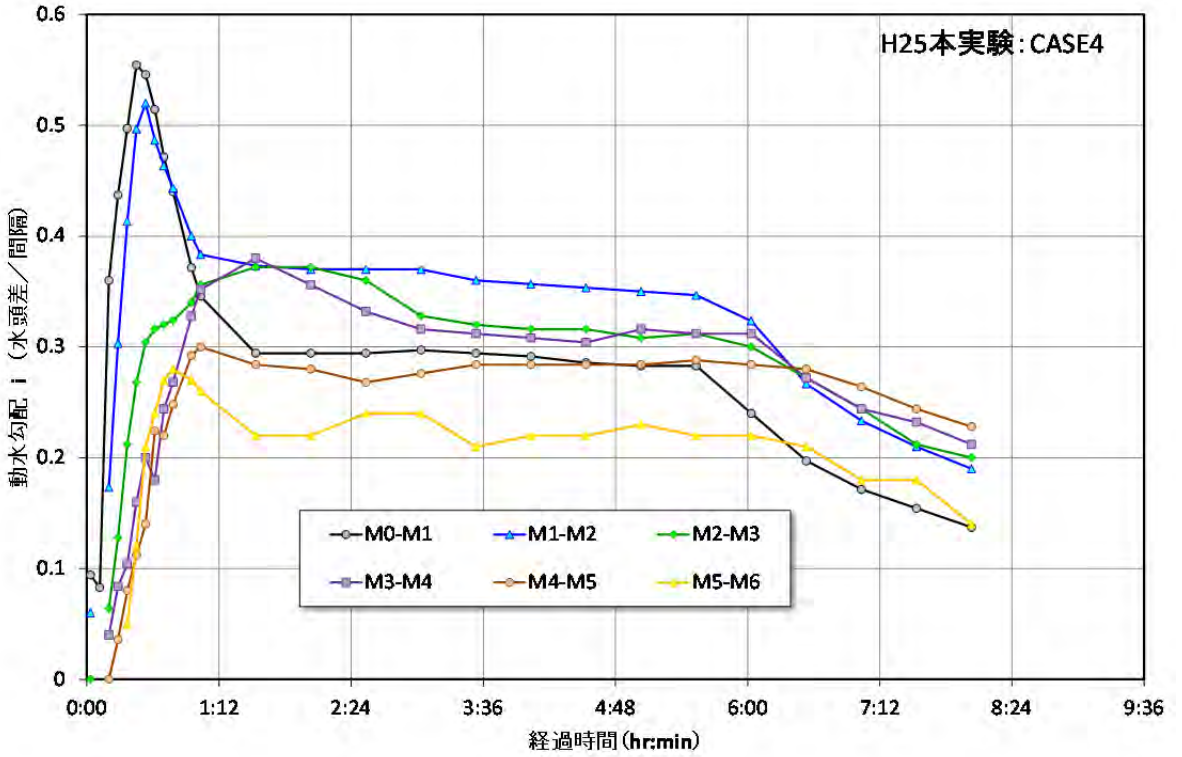



図 付 C.31　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE4）

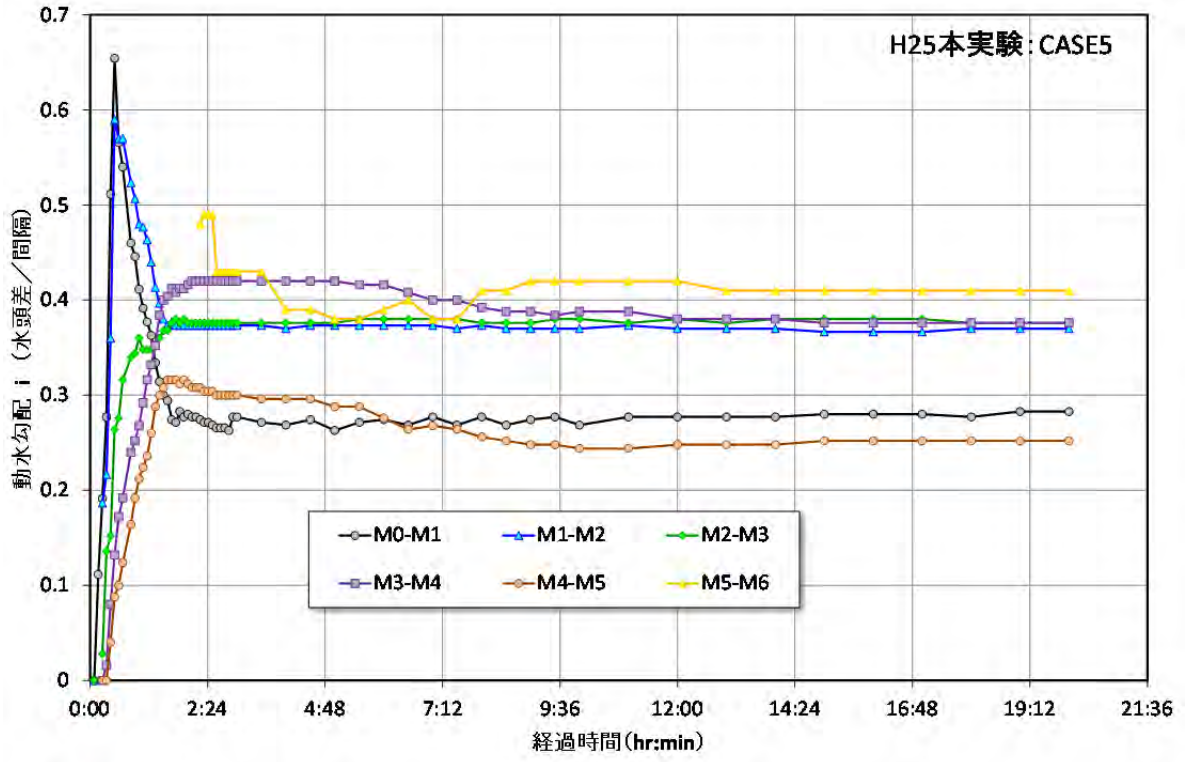



図 付 C.32　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE5）

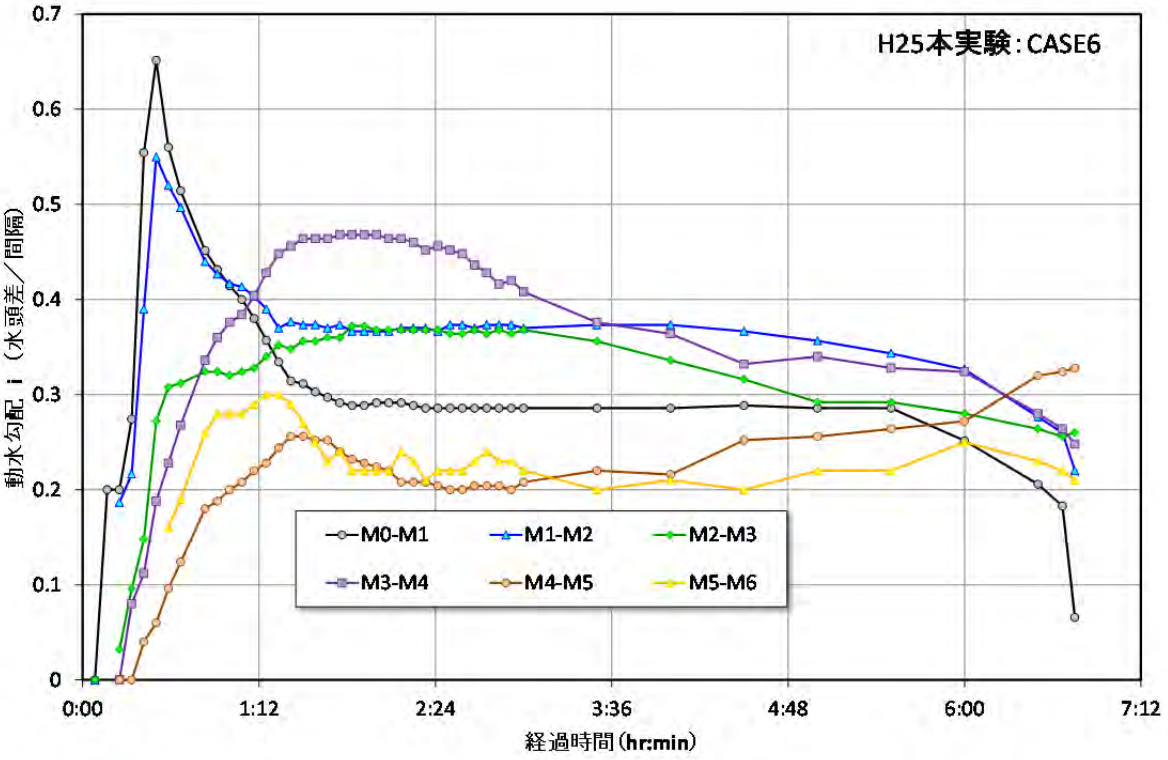



図 付 C.33　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE6）

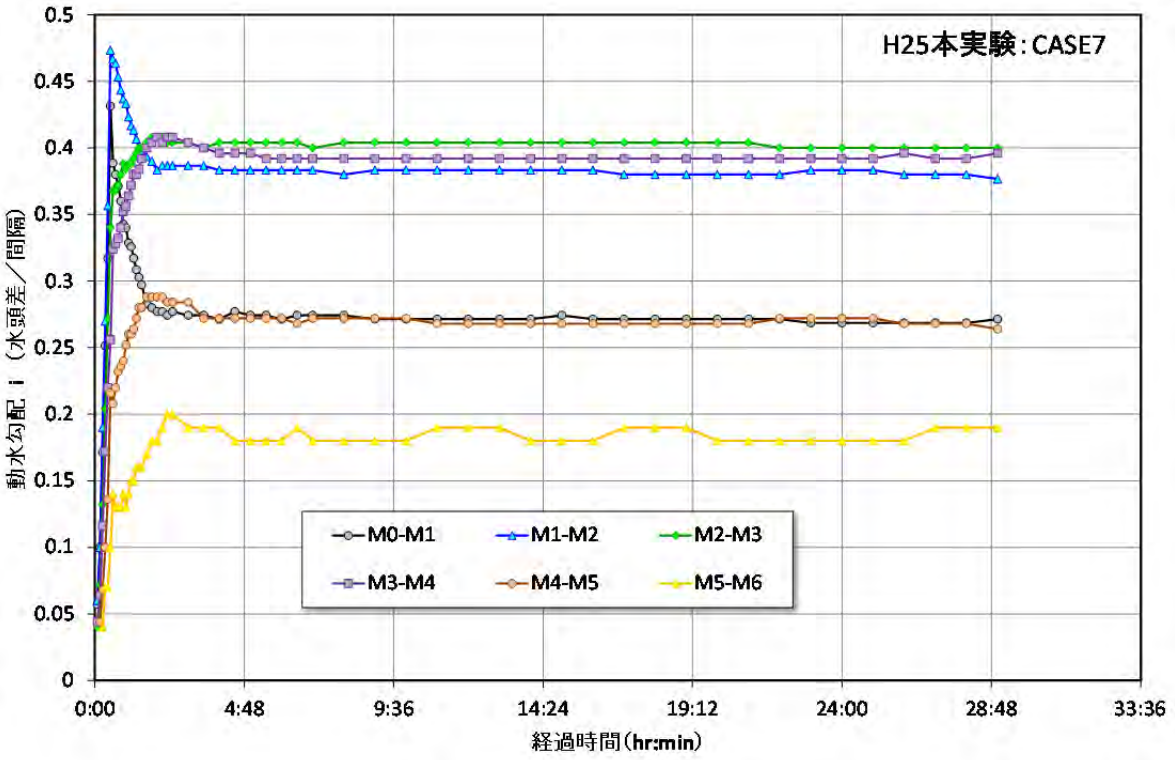



図 付 C.34　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE7）

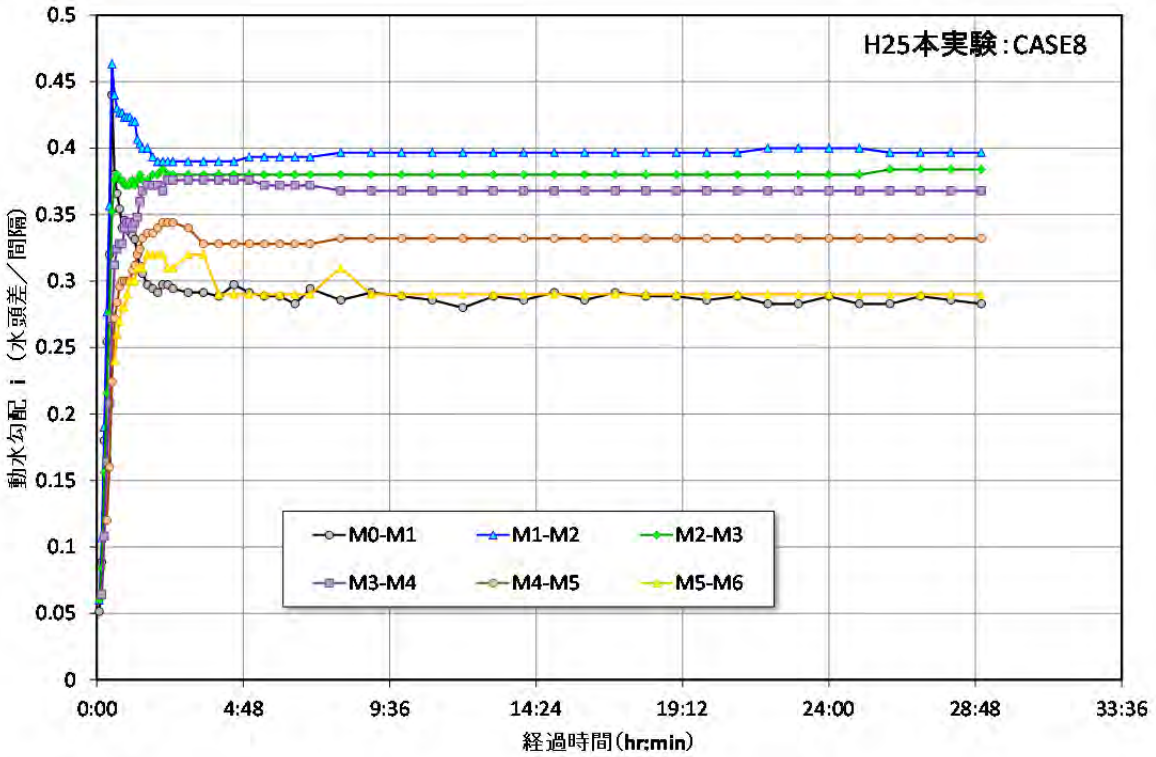



図 付 C.35　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE8）

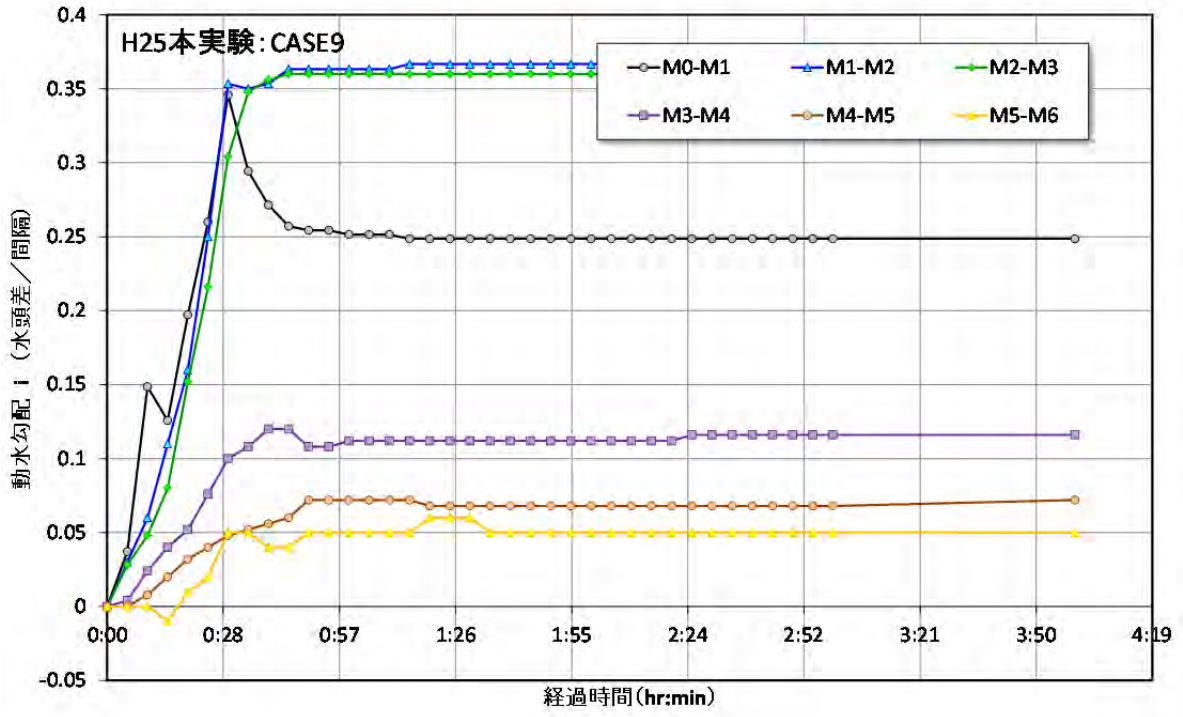



図 付 C.36　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE9）

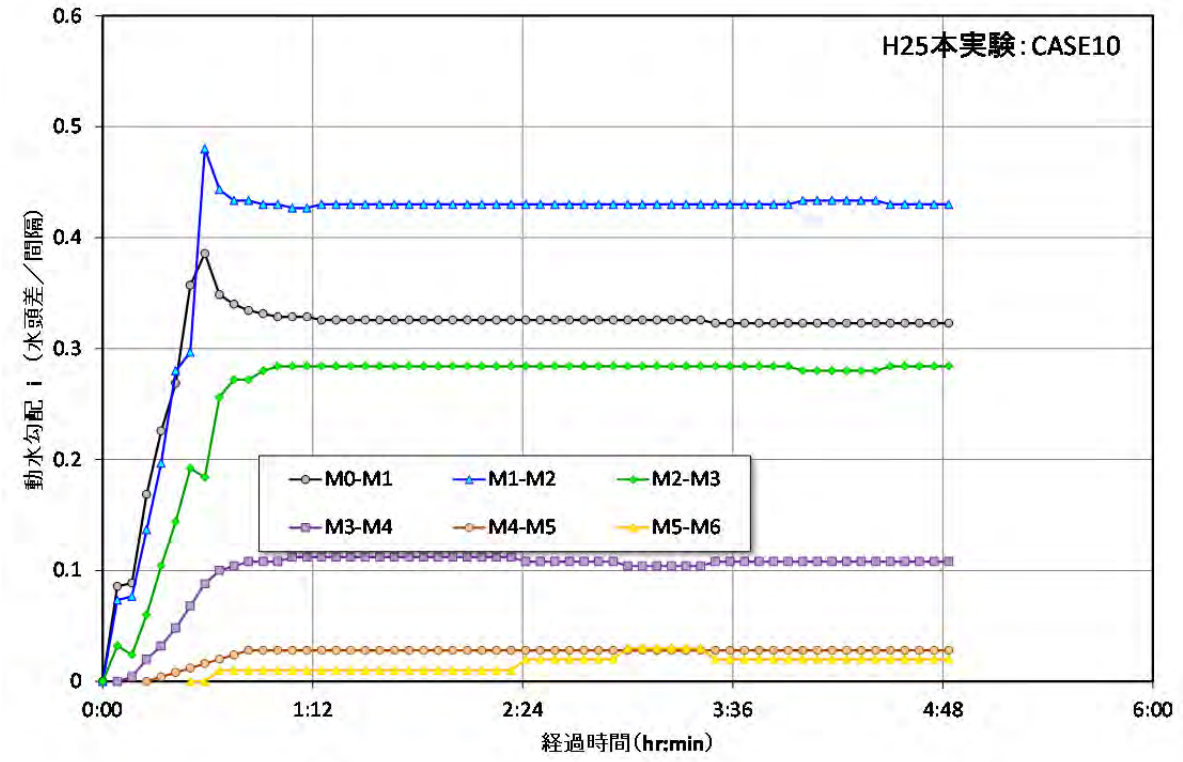



図 付 C.37　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE10）

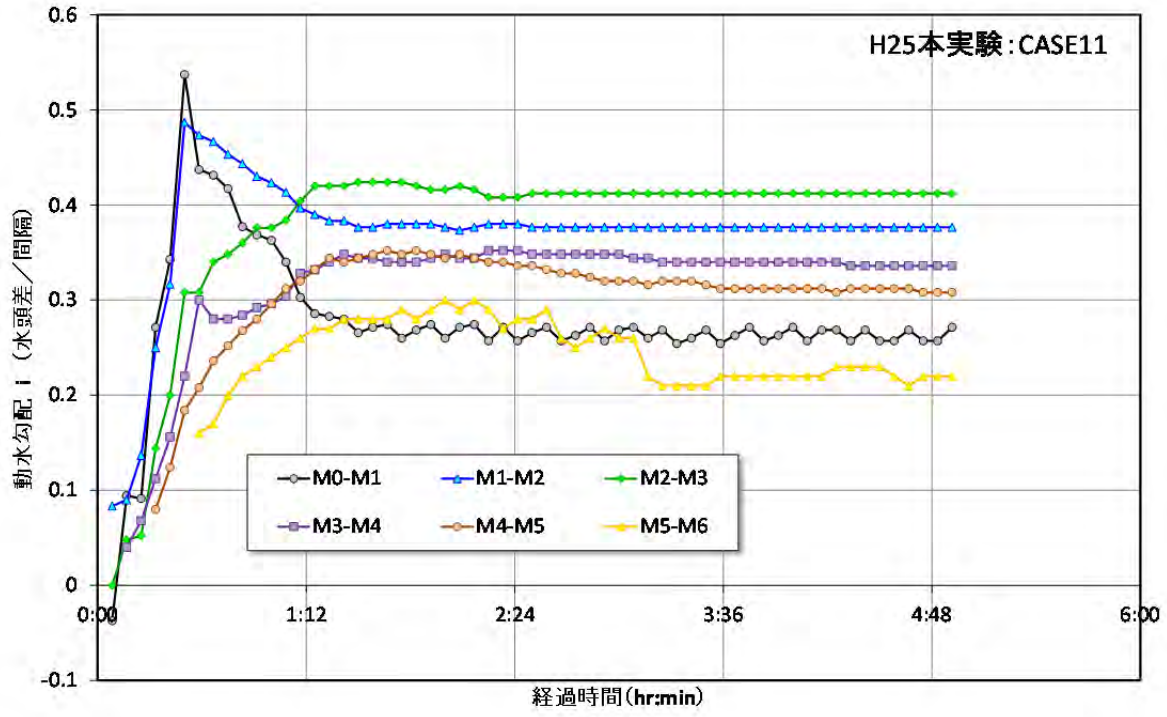



図 付 C.38　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE11）

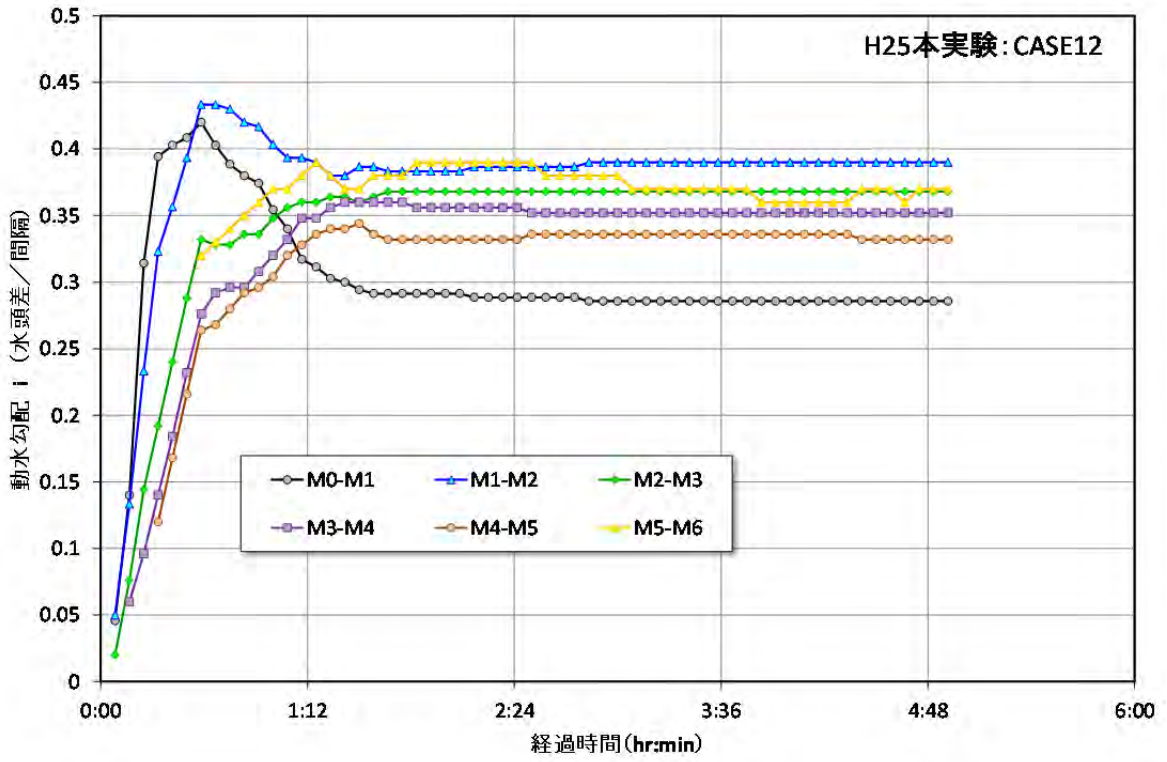



図 付 C.39　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE12）

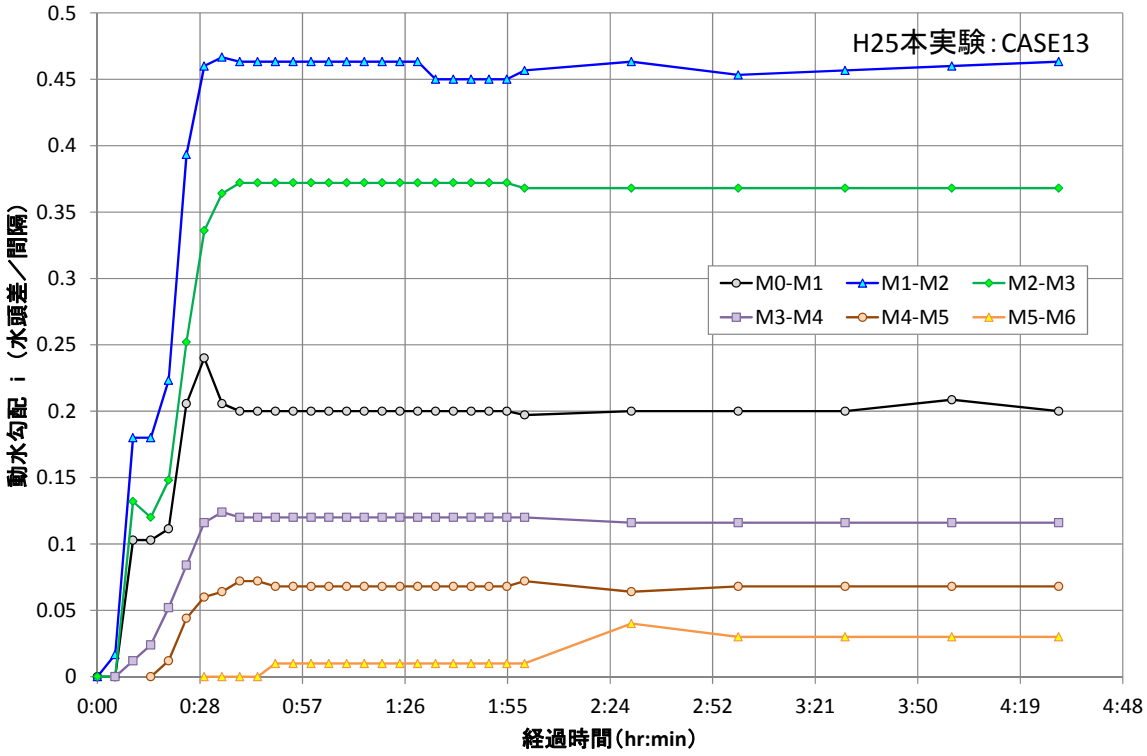



図 付 C.40　マノメータによる動水勾配の経時変化（CASE13）

# D. 使用材料の室内試験結果

# 中型浸透模型実験

JIS A 1218
~~JGS 0311~~

# 土 の 透 水 試 験（~~定水位~~，変水位）

調査件名：平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日：2012.10.26

試料番号（深さ）：模型1　　試 験 者：武 田

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 試料 | 土質名称 | 砂質土1(大形橋2) | 透水円筒 | 容器 No. | A |
| | 最大粒径 mm | 9.5 | | 内径 $D_m$ cm | 10.00 |
| | 土粒子の密度 $\rho_S$ g/cm$^3$ | 2.640 | | 長さ $L_m$ cm | 12.73 |
| スタンドパイプ[1] | 内径 cm | 2.545 | | 質量 $m_2$[2] g | 2000.1 |
| | 断面積 $a$ cm$^2$ | 5.087 | 試験用水 | | 水道水 |

供試体作成、飽和方法：密度は現場に合わせて92%とした。飽和は水浸脱気法。

| | | | 試験前 | 試験後[3] |
|---|---|---|---|---|
| 供試体寸法 | 供試体 No. | 1 | | |
| | 直径 $D$ cm | 10.00 | | |
| | 断面積 $A$ cm$^2$ | 78.54 | | |
| | 長さ $L$ cm | 12.73 | | |
| | 体積 $V$ cm$^3$ | 999.8 | | |
| 供試体の状態 | (供試体+透水円筒)質量 $m_1$ g | | 3716.2 | |
| | 供試体質量 $m=m_1-m_2$ g | | 1716.1 | |
| | 湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm$^3$ | | 1.716 | |
| | 乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm$^3$ | | 1.474 | |
| | 間隙比 $e=(\rho_S/\rho_d)-1$ | | 0.790 | |
| | 飽和度 $S_r=w\ \rho_S/(e\ \rho_w)$ % | | 54.8 | |

| | | 試験前 | | | 試験後[3] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含水比 | 容器No. | 3 | | | 55 | | |
| | $m_a$ g | 80.3 | | | 2558.3 | | |
| | $m_b$ g | 72.9 | | | 2096.7 | | |
| | $m_c$ g | 27.8 | | | 651.0 | | |
| | $w$, $w_f$ % | 16.4 | | | 31.9 | | |
| | 平均値 % | 16.4 | | | 31.9 | | |

| 測定 No. | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測定開始時刻 | | $t1$ | 10:31:00 | 10:32:32 | 10:34:00 | | |
| 測定終了時刻 | | $t2$ | 10:31:37 | 10:33:08 | 10:34:36 | | |
| 測定時間 | | $t2-t1$ s | 37 | 36 | 36 | | |
| 定水位 | 水位差 | $h$ cm | | | | | |
| | 透水量 | $Q$ cm$^3$ | | | | | |
| | T℃に対する透水係数 $k_T$[4] | m/s | | | | | |
| 変水位 | 時刻t1における水位差 | $h_1$ cm | 63 | 63 | 63 | | |
| | 時刻t2における水位差 | $h_2$ cm | 43 | 43 | 43 | | |
| | T℃に対する透水係数 $k_T$[5] | m/s | 8.51E-05 | 8.75E-05 | 8.75E-05 | | |
| 測定時の水温 | | $T$℃ | 20.1 | 20.1 | 20.1 | | |
| 温度補正係数 | | $\eta_T/\eta_{15}$ | 0.880 | 0.880 | 0.880 | | |
| T℃に対する透水係数 | | $k15$ m/s | 7.49E-05 | 7.70E-05 | 7.70E-05 | | |
| 代表値 | | $k15$ m/s | 7.63E-05 | | | | |

特記事項

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒、底板、シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T = \frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15} = k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

(社)地盤工学会 *6621*

図 付 D.1　透水試験結果 砂質土 1

JIS A 1218
~~JGS 0311~~

# 土 の 透 水 試 験（~~定水位~~，変水位）

| | | | |
|---|---|---|---|
| 調査件名 | 平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務 | 試験年月日 | 2012.10.30 |
| 試料番号（深さ） | 模型2 | 試 験 者 | 武 田 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 試料 | 土質名称 | 砂質土2(大形橋3) | 透水円筒 | 容器 No. | A |
| | 最大粒径 mm | 19 | | 内径 $D_m$ cm | 10.00 |
| | 土粒子の密度 $\rho_S$ g/cm³ | 2.573 | | 長さ $L_m$ cm | 12.73 |
| スタンドパイプ[1] | 内径 cm | 2.545 | | 質量 $m_2$[2] g | 2000.1 |
| | 断面積 $a$ cm² | 5.087 | | 試験用水 | 水道水 |
| 供試体作成、飽和方法 | 密度は現場に合わせて91%とした。飽和は水浸脱気法。 | | | | |

| | | | | | 試験前 | 試験後[3] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 供試体寸法 | 供試体 No. | 1 | 供試体の状態 | | | |
| | 直径 $D$ cm | 10.00 | | (供試体+透水円筒)質量 $m_1$ g | 3825.9 | |
| | 断面積 $A$ cm² | 78.54 | | 供試体質量 $m=m_1-m_2$ g | 1825.8 | |
| | 長さ $L$ cm | 12.73 | | 湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³ | 1.826 | |
| | 体積 $V$ cm³ | 999.8 | | 乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³ | 1.555 | |
| | | | | 間隙比 $e=(\rho_S/\rho_d)-1$ | 0.654 | |
| | | | | 飽和度 $S_r=w\rho_S/(e\rho_w)$ % | 68.5 | |

| | | 試験前 | | | 試験後[3] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含水比 | 容器No. | 285 | | | 56 | | |
| | $m_a$ g | 108.3 | | | 2621.9 | | |
| | $m_b$ g | 96.3 | | | 2215.5 | | |
| | $m_c$ g | 27.4 | | | 664.9 | | |
| | $w$, $w_f$ % | 17.4 | | | 26.2 | | |
| | 平均値 % | 17.4 | | | 26.2 | | |

| 測定 No. | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 測定開始時刻 | $t1$ | 13:01:00 | 13:29:00 | 14:00:00 | | |
| 測定終了時刻 | $t2$ | 13:27:45 | 13:56:09 | 14:27:37 | | |
| 測定時間 | $t2-t1$ s | 1605 | 1629 | 1657 | | |
| 定水位 水位差 | $h$ cm | | | | | |
| 定水位 透水量 | $Q$ cm³ | | | | | |
| 定水位 | T℃に対する透水係数 $k_T$[4] m/s | | | | | |
| 変水位 | 時刻t1における水位差 $h_1$ cm | 103 | 103 | 103 | | |
| 変水位 | 時刻t2における水位差 $h_2$ cm | 83 | 83 | 83 | | |
| 変水位 | T℃に対する透水係数 $k_T$[5] m/s | 1.11E-06 | 1.09E-06 | 1.07E-06 | | |
| 測定時の水温 | $T$℃ | 15.5 | 15.5 | 15.5 | | |
| 温度補正係数 | $\eta_T/\eta_{15}$ | 0.975 | 0.975 | 0.975 | | |
| T℃に対する透水係数 | $k15$ m/s | 1.08E-06 | 1.07E-06 | 1.05E-06 | | |
| 代表値 | $k15$ m/s | 1.06E-06 | | | | |

特記事項

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒、底板、シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T = \frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15} = k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$



図 付 D.2 透水試験結果 砂質土２

JIS A 1218
~~JGS 0311~~

# 土 の 透 水 試 験（~~定水位~~，変水位）

調査件名：平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日：2012.10.26

試料番号（深さ）：模型3　　試 験 者：武 田

| 試料 | | | | 透水円筒 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 土質名称 | | | 砂質土3(下妻SY2) | 容器 No. | | A |
| 最大粒径 | | mm | 9.5 | 内径 $D_m$ | cm | 10.00 |
| 土粒子の密度 | $\rho_S$ | g/cm$^3$ | 2.604 | 長さ $L_m$ | cm | 12.73 |
| スタンドパイプ[1] | 内径 | cm | 2.545 | 質量 $m_2$[2] | g | 2000.1 |
| | 断面積 $a$ | cm$^2$ | 5.087 | 試験用水 | | 水道水 |

供試体作成、飽和方法：密度は現場に合わせて92%とした。飽和は水浸脱気法。

| 供試体寸法 | | 供試体の状態 | | 試験前 | 試験後[3] |
|---|---|---|---|---|---|
| 供試体 No. | 1 | | | | |
| 直径 $D$ cm | 10.00 | (供試体+透水円筒)質量 | $m_1$ g | 3716.2 | |
| 断面積 $A$ cm$^2$ | 78.54 | 供試体質量 | $m=m_1-m_2$ g | 1716.1 | |
| 長さ $L$ cm | 12.73 | 湿潤密度 | $\rho_t=m/V$ g/cm$^3$ | 1.716 | |
| 体積 $V$ cm$^3$ | 999.8 | 乾燥密度 | $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm$^3$ | 1.474 | |
| | | 間隙比 | $e=(\rho_S/\rho_d)-1$ | 0.766 | |
| | | 飽和度 | $S_r=w\rho_S/(e\rho_w)$ % | 55.8 | |

| 含水比 | | 試験前 | | | 試験後[3] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 容器No. | | 3 | | | 55 | | |
| $m_a$ | g | 80.3 | | | 2558.3 | | |
| $m_b$ | g | 72.9 | | | 2096.7 | | |
| $m_c$ | g | 27.8 | | | 651.0 | | |
| $w$, $w_f$ | % | 16.4 | | | 31.9 | | |
| 平均値 | % | 16.4 | | | 31.9 | | |

| 測定 No. | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測定開始時刻 | $t1$ | | 10:31:00 | 10:32:32 | 10:34:00 | | |
| 測定終了時刻 | $t2$ | | 10:31:37 | 10:33:08 | 10:34:36 | | |
| 測定時間 | $t2-t1$ | s | 37 | 36 | 36 | | |
| 定水位 水位差 | $h$ | cm | | | | | |
| 定水位 透水量 | $Q$ | cm$^3$ | | | | | |
| 定水位 T℃に対する透水係数 $k_T$[4] | | m/s | | | | | |
| 変水位 時刻t1における水位差 | $h_1$ | cm | 63 | 63 | 63 | | |
| 変水位 時刻t2における水位差 | $h_2$ | cm | 43 | 43 | 43 | | |
| 変水位 T℃に対する透水係数 $k_T$[5] | | m/s | 8.51E-05 | 8.75E-05 | 8.75E-05 | | |
| 測定時の水温 | $T$ | ℃ | 20.1 | 20.1 | 20.1 | | |
| 温度補正係数 | $\eta_T/\eta_{15}$ | | 0.880 | 0.880 | 0.880 | | |
| T℃に対する透水係数 | $k15$ | m/s | 7.49E-05 | 7.70E-05 | 7.70E-05 | | |
| 代表値 | $k15$ | m/s | 7.63E-05 | | | | |

特記事項

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒、底板、シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T = \frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15} = k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

(社)地盤工学会 *6621*

図 付 D.3　透水試験結果 砂質土 3

JIS A 1218
~~JGS 0311~~

# 土 の 透 水 試 験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　2013.1.30

試料番号（深さ）　模型4　　試 験 者　武 田

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 試料 | 土質名称 | | 砂質土4(Fc20) | 透水円筒 | 容器 No. | A |
| | 最大粒径 | mm | 4.75 | | 内径 $D_m$ cm | 10.00 |
| | 土粒子の密度 | $\rho_S$ g/cm$^3$ | 2.704 | | 長さ $L_m$ cm | 12.73 |
| スタンドパイプ[1] | 内径 | cm | 2.545 | | 質量 $m_2$[2] g | 2000.1 |
| | 断面積 $a$ | cm$^2$ | 5.087 | | 試験用水 | 水道水 |

供試体作成、飽和方法　密度は90%位とした。飽和は水浸脱気法。

| | | | | 試験前 | 試験後[3] |
|---|---|---|---|---|---|
| 供試体寸法 | 供試体 No. | 1 | 供試体の状態 | | |
| | 直径 $D$ cm | 10.00 | (供試体+透水円筒)質量 $m_1$ g | 3766.1 | |
| | 断面積 $A$ cm$^2$ | 78.54 | 供試体質量 $m=m_1-m_2$ g | 1766.0 | |
| | 長さ $L$ cm | 12.73 | 湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm$^3$ | 1.766 | |
| | 体積 $V$ cm$^3$ | 999.8 | 乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm$^3$ | 1.490 | |
| | | | 間隙比 $e=(\rho_S/\rho_d)-1$ | 0.815 | |
| | | | 飽和度 $S_r=w\ \rho_S/(e\ \rho_w)$ % | 61.5 | |

| | | 試験前 | | | 試験後[3] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含水比 | 容器No. | 151 | 27 | 88 | 58 | | |
| | $m_a$ g | 133.5 | 124.9 | 119.7 | 2749.7 | | |
| | $m_b$ g | 117.0 | 109.8 | 105.1 | 2305.1 | | |
| | $m_c$ g | 28.0 | 27.8 | 26.8 | 827.1 | | |
| | $w$, $w_f$ % | 18.5 | 18.4 | 18.6 | 30.1 | | |
| | 平均値 % | 18.5 | | | 30.1 | | |

| 測定 No. | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測定開始時刻 | $t1$ | | | | | | |
| 測定終了時刻 | $t2$ | | | | | | |
| 測定時間 | $t2-t1$ s | | 157 | 167 | 169 | | |
| 定水位 | 水位差 | $h$ cm | | | | | |
| | 透水量 | $Q$ cm$^3$ | | | | | |
| | T℃に対する透水係数 $k_T$[4] | m/s | | | | | |
| 変水位 | 時刻t1における水位差 $h_1$ | cm | 83.5 | 83.5 | 83.5 | | |
| | 時刻t2における水位差 $h_2$ | cm | 63.5 | 63.5 | 63.5 | | |
| | T℃に対する透水係数 $k_T$[5] | m/s | 1.44E-05 | 1.35E-05 | 1.34E-05 | | |
| 測定時の水温 | $T$℃ | | 1 | 1 | 1 | | |
| 温度補正係数 | $\eta_T/\eta_{15}$ | | 1.521 | 1.521 | 1.521 | | |
| T℃に対する透水係数 | $k15$ | m/s | 2.19E-05 | 2.06E-05 | 2.03E-05 | | |
| 代表値 | $k15$ | m/s | 2.09E-05 | | | | |

特記事項
*時間測定はストップウォッチを使用した。

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒、底板、シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T = \frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15} = k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

(社)地盤工学会 *6621*

図 付 D.4　透水試験結果 砂質土 4

JIS A 1218
~~JGS 0311~~

# 土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　2013.1.8

試料番号（深さ）　模型5 (90%)　　試験者　武田

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 試料 | 土質名称 | 砂質土5(下妻SY1) | 透水円筒 | 容器 No. | A |
| | 最大粒径 mm | 19 | | 内径 $D_m$ cm | 10.00 |
| | 土粒子の密度 $\rho_S$ g/cm$^3$ | 2.620 | | 長さ $L_m$ cm | 12.73 |
| スタンドパイプ[1] | 内径 cm | 2.545 | | 質量 $m_2$[2] g | 2000.1 |
| | 断面積 $a$ cm$^2$ | 5.087 | | 試験用水 | 水道水 |

供試体作成、飽和方法　密度は90%とした。飽和は水浸脱気法。

| | | | | 試験前 | 試験後[3] |
|---|---|---|---|---|---|
| 供試体寸法 | 供試体 No. | 1 | 供試体の状態 | | |
| | 直径 $D$ cm | 10.00 | | (供試体+透水円筒)質量 $m_1$ g | 3710.1 | |
| | 断面積 $A$ cm$^2$ | 78.54 | | 供試体質量 $m=m_1-m_2$ g | 1710.0 | |
| | 長さ $L$ cm | 12.73 | | 湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm$^3$ | 1.710 | |
| | 体積 $V$ cm$^3$ | 999.8 | | 乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm$^3$ | 1.424 | |
| | | | | 間隙比 $e=(\rho_S/\rho_d)-1$ | 0.840 | |
| | | | | 飽和度 $S_r=w\ \rho_S/(e\ \rho_w)$ % | 62.7 | |

| | | 試験前 | | | 試験後[3] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含水比 | 容器No. | 151 | 27 | 88 | 55 | | |
| | $m_a$ g | 122.2 | 100.2 | 98.5 | 2809.6 | | |
| | $m_b$ g | 106.1 | 88.1 | 86.8 | 2115.7 | | |
| | $m_c$ g | 26.8 | 27.8 | 28.0 | 651.0 | | |
| | $w$, $w_f$ % | 20.3 | 20.1 | 19.9 | 47.4 | | |
| | 平均値 % | | 20.1 | | | 47.4 | |

| 測定 No. | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 測定開始時刻 | $t1$ | | | | | |
| 測定終了時刻 | $t2$ | | | | | |
| 測定時間 | $t2-t1$ s | 1090 | 1182 | 1226 | | |
| 定水位 水位差 | $h$ cm | | | | | |
| 定水位 透水量 | $Q$ cm$^3$ | | | | | |
| 定水位 T℃に対する透水係数 $k_T$[4] | m/s | | | | | |
| 変水位 時刻t1における水位差 | $h_1$ cm | 85 | 85 | 85 | | |
| 変水位 時刻t2における水位差 | $h_2$ cm | 75 | 75 | 75 | | |
| 変水位 T℃に対する透水係数 $k_T$[5] | m/s | 9.47E-07 | 8.73E-07 | 8.42E-07 | | |
| 測定時の水温 | $T$℃ | 5.9 | 5.9 | 5.9 | | |
| 温度補正係数 | $\eta_T/\eta_{15}$ | 1.295 | 1.295 | 1.295 | | |
| T℃に対する透水係数 | $k15$ m/s | 1.23E-06 | 1.13E-06 | 1.09E-06 | | |
| 代表値 | $k15$ m/s | 1.15E-06 | | | | |

特記事項
*時間測定はストップウォッチを使用した。

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒、底板、シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T = \frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15} = k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

(社)地盤工学会 *6621*

図 付 D.5　透水試験結果 砂質土 5，模型 5

JIS A 1218
~~JGS 0311~~

# 土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　2012.10.30

試料番号（深さ）　模型6 (85%)　　試験者　武田

| 試料 | | | | 透水円筒 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 土質名称 | | | 砂質土5(下妻SY1) | 容器 No. | | A |
| 最大粒径 | | mm | 19 | 内径 $D_m$ | cm | 10.00 |
| 土粒子の密度 | $\rho_S$ | g/cm$^3$ | 2.620 | 長さ $L_m$ | cm | 12.73 |
| スタンドパイプ[1] | 内径 | cm | 2.545 | 質量 $m_2$[2] | g | 2000.1 |
| | 断面積 $a$ | cm$^2$ | 5.087 | 試験用水 | | 水道水 |

供試体作成、飽和方法　密度は現場に合わせて85%位とした。飽和は水浸脱気法。

| 供試体寸法 | | 供試体の状態 | | 試験前 | 試験後[3] |
|---|---|---|---|---|---|
| 供試体 No. | 1 | | | | |
| 直径 $D$ cm | 10.00 | (供試体+透水円筒)質量 | $m_1$ g | 3610.1 | |
| 断面積 $A$ cm$^2$ | 78.54 | 供試体質量 | $m=m_1-m_2$ g | 1610.0 | |
| 長さ $L$ cm | 12.73 | 湿潤密度 | $\rho_t=m/V$ g/cm$^3$ | 1.610 | |
| 体積 $V$ cm$^3$ | 999.8 | 乾燥密度 | $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm$^3$ | 1.346 | |
| | | 間隙比 | $e=(\rho_S/\rho_d)-1$ | 0.947 | |
| | | 飽和度 | $S_r=w\,\rho_S/(e\,\rho_w)$ % | 54.4 | |

| 含水比 | | 試験前 | | | 試験後[3] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 容器No. | | 35 | | | 604 | | |
| $m_a$ | g | 406.7 | | | 2746.3 | | |
| $m_b$ | g | 386.1 | | | 2230.3 | | |
| $m_c$ | g | 281.4 | | | 817.3 | | |
| $w$, $w_f$ | % | 19.7 | | | 36.5 | | |
| 平均値 | % | 19.7 | | | 36.5 | | |

| 測定 No. | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測定開始時刻 | $t1$ | | 15:31:00 | 15:40:00 | 15:50:00 | | |
| 測定終了時刻 | $t2$ | | 15:38:07 | 15:47:29 | 15:57:55 | | |
| 測定時間 | $t2-t1$ | s | 427 | 449 | 475 | | |
| 定水位 水位差 | $h$ | cm | | | | | |
| 定水位 透水量 | $Q$ | cm$^3$ | | | | | |
| 定水位 T℃に対する透水係数 $k_T$[4] | | m/s | | | | | |
| 変水位 時刻t1における水位差 | $h_1$ | cm | 83 | 83 | 83 | | |
| 変水位 時刻t2における水位差 | $h_2$ | cm | 63 | 63 | 63 | | |
| 変水位 T℃に対する透水係数 $k_T$[5] | | m/s | 5.32E-06 | 5.06E-06 | 4.79E-06 | | |
| 測定時の水温 | $T$ | ℃ | 8.0 | 8.0 | 8.0 | | |
| 温度補正係数 | $\eta_T/\eta_{15}$ | | 1.217 | 1.217 | 1.217 | | |
| T℃に対する透水係数 | $k15$ | m/s | 6.48E-06 | 6.16E-06 | 5.83E-06 | | |
| 代表値 | $k15$ | m/s | 6.16E-06 | | | | |

特記事項

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒、底板、シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T = \frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15} = k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

(社)地盤工学会 *6621*

図 付 D.6　透水試験結果 砂質土 5，模型 6

JIS A 1218
~~JGS 0311~~

# 土 の 透 水 試 験 (~~定水位~~, 変水位)

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　2013.1.8

試料番号 (深さ)　模型7 (80%)　　試 験 者　武 田

| 試料 | | | | 透水円筒 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 土 質 名 称 | | 砂質土5(下妻SY1) | | 容 器 No. | A |
| | 最 大 粒 径 | mm | 19.0 | | 内 径 $D_m$ cm | 10.00 |
| | 土粒子の密度 | $\rho_S$ g/cm$^3$ | 2.620 | | 長 さ $L_m$ cm | 12.73 |
| スタンドパイプ[1] | 内 径 | cm | 2.545 | | 質量 $m_2$[2] g | 2000.1 |
| | 断面積 $a$ | cm$^2$ | 5.087 | | 試 験 用 水 | 水道水 |

供試体作成、飽和方法　密度は80%とした。飽和は水浸脱気法。

| 供試体寸法 | | | 供試体の状態 | | 試験前 | 試験後[3] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 供試体 No. | 1 | | | | |
| | 直径 $D$ cm | 10.00 | | (供試体+透水円筒)質量 $m_1$ g | 3555.1 | |
| | 断面積 $A$ cm$^2$ | 78.54 | | 供試体質量 $m=m_1-m_2$ g | 1555.0 | |
| | 長さ $L$ cm | 12.73 | | 湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm$^3$ | 1.555 | |
| | 体積 $V$ cm$^3$ | 999.8 | | 乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm$^3$ | 1.266 | |
| | | | | 間隙比 $e=(\rho_S/\rho_d)-1$ | 1.070 | |
| | | | | 飽和度 $S_r=w\rho_S/(e\rho_w)$ % | 56.0 | |

| 含水比 | | 試験前 | | | 試験後[3] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 容器No. | 151 | 27 | 88 | 65 | | |
| | $m_a$ g | 104.5 | 113.3 | 121.4 | 2591.1 | | |
| | $m_b$ g | 90.2 | 97.5 | 103.7 | 2069.2 | | |
| | $m_c$ g | 28.0 | 27.8 | 26.8 | 823.4 | | |
| | $w$, $w_f$ % | 23.0 | 22.7 | 23.0 | 41.9 | | |
| | 平均値 % | | 22.9 | | 41.9 | | |

| 測定 No. | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測定開始時刻 | | $t1$ | | | | | |
| 測定終了時刻 | | $t2$ | | | | | |
| 測定時間 | | $t2-t1$ s | 125 | 131 | 137 | | |
| 定水位 | 水位差 | $h$ cm | | | | | |
| | 透水量 | $Q$ cm$^3$ | | | | | |
| | T℃に対する透水係数 $k_T$[4] | m/s | | | | | |
| 変水位 | 時刻t1における水位差 | $h_1$ cm | 23.5 | 23.5 | 23.5 | | |
| | 時刻t2における水位差 | $h_2$ cm | 13.5 | 13.5 | 13.5 | | |
| | T℃に対する透水係数 $k_T$[5] | m/s | 3.66E-05 | 3.49E-05 | 3.34E-05 | | |
| 測定時の水温 | | $T$℃ | 4.3 | 4.3 | 4.3 | | |
| 温度補正係数 | | $\eta_T/\eta_{15}$ | 1.378 | 1.378 | 1.378 | | |
| T℃に対する透水係数 | | $k15$ m/s | 5.04E-05 | 4.81E-05 | 4.60E-05 | | |
| 代表値 | | $k15$ m/s | 4.82E-05 | | | | |

特記事項
*時間の測定はストップウォッチを使用した。

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒、底板、シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T = \frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15} = k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

(社)地盤工学会 *6621*

図 付 D.7 透水試験結果 砂質土 5, 模型 7

| JGS　0523 | 土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$]　(応力－ひずみ曲線) |
|---|---|

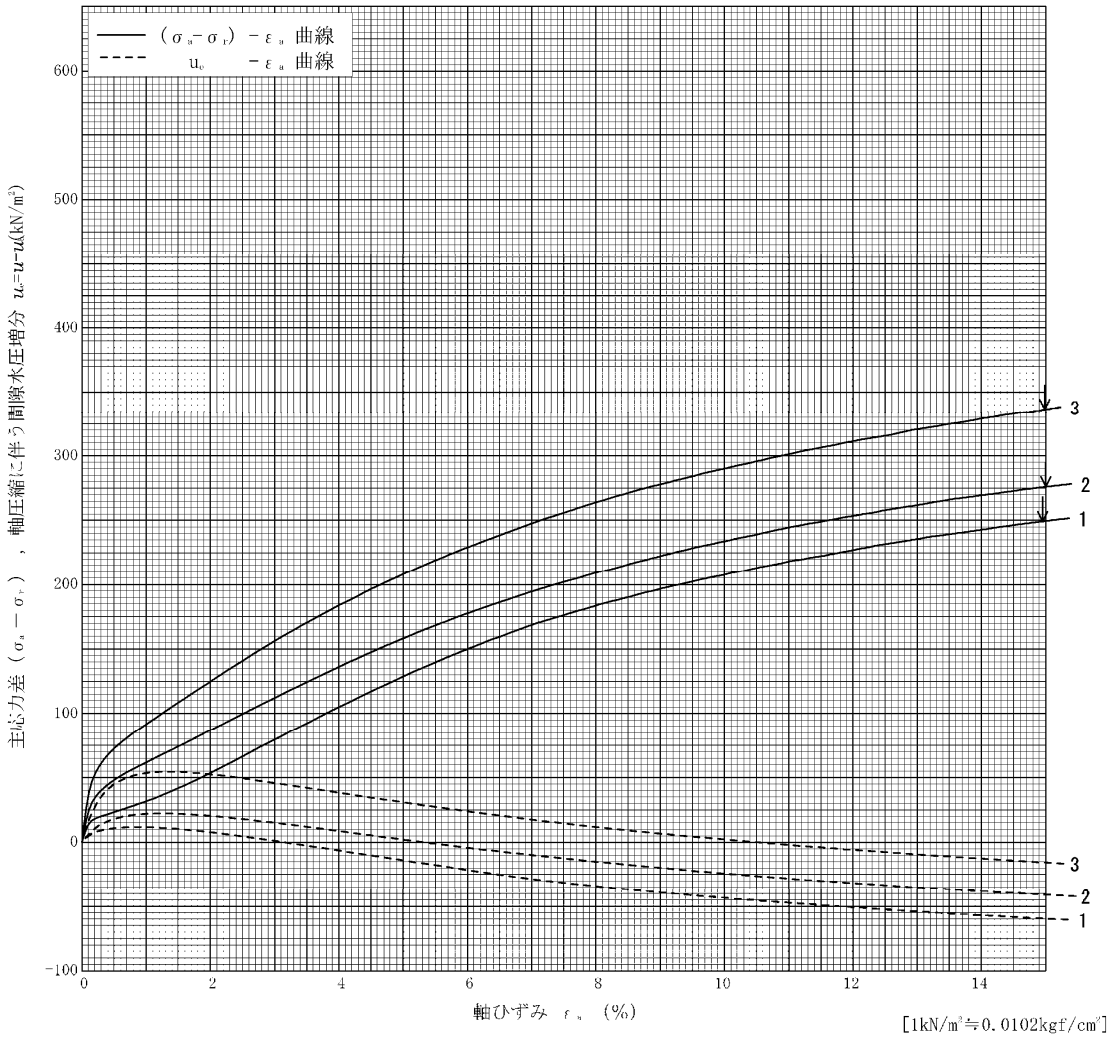
調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 10月 19日

試料番号（深さ）　模型1(砂質土1 90%)　　試 験 者　中村 敏明

| 土質名称 | 細粒分まじり砂 |
|---|---|
| 最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ g/cm³ | |
| 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ g/cm³ | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 |

特記事項　1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界，塑性限界，砂質土の場合は最小乾燥密度，最大乾燥密度等を記載する。

| | | | 供試体 No. | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ~~セル圧~~・圧密応力 kN/m² | 25 | 50 | 100 |
| | | | 背圧 $u_b$ kN/m² | 200 | 200 | 200 |
| 主応力差最大時 | | | 圧縮強さ $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ kN/m² | 249 | 276 | 336 |
| | | | 軸ひずみ $\varepsilon_{af}$ % | 14.95 | 15.00 | 14.98 |
| | $\overline{CU}$ | | 間隙水圧 $u_f$ kN/m² | 140 | 159 | 184 |
| | | | 有効軸方向応力 $\sigma'_{af}$ kN/m² | 334 | 367 | 452 |
| | | | 有効側方向応力 $\sigma'_{rf}$ kN/m² | 84.5 | 90.8 | 116 |
| | CD | | 体積ひずみ $\varepsilon_{vf}$ % | | | |
| | | | 間隙比 $e_f$ | | | |
| | | | 変形係数 $E_{50}$ MN/m² | 2.58 | 3.39 | 4.93 |
| | | | 供試体の破壊状況 | | | |




[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

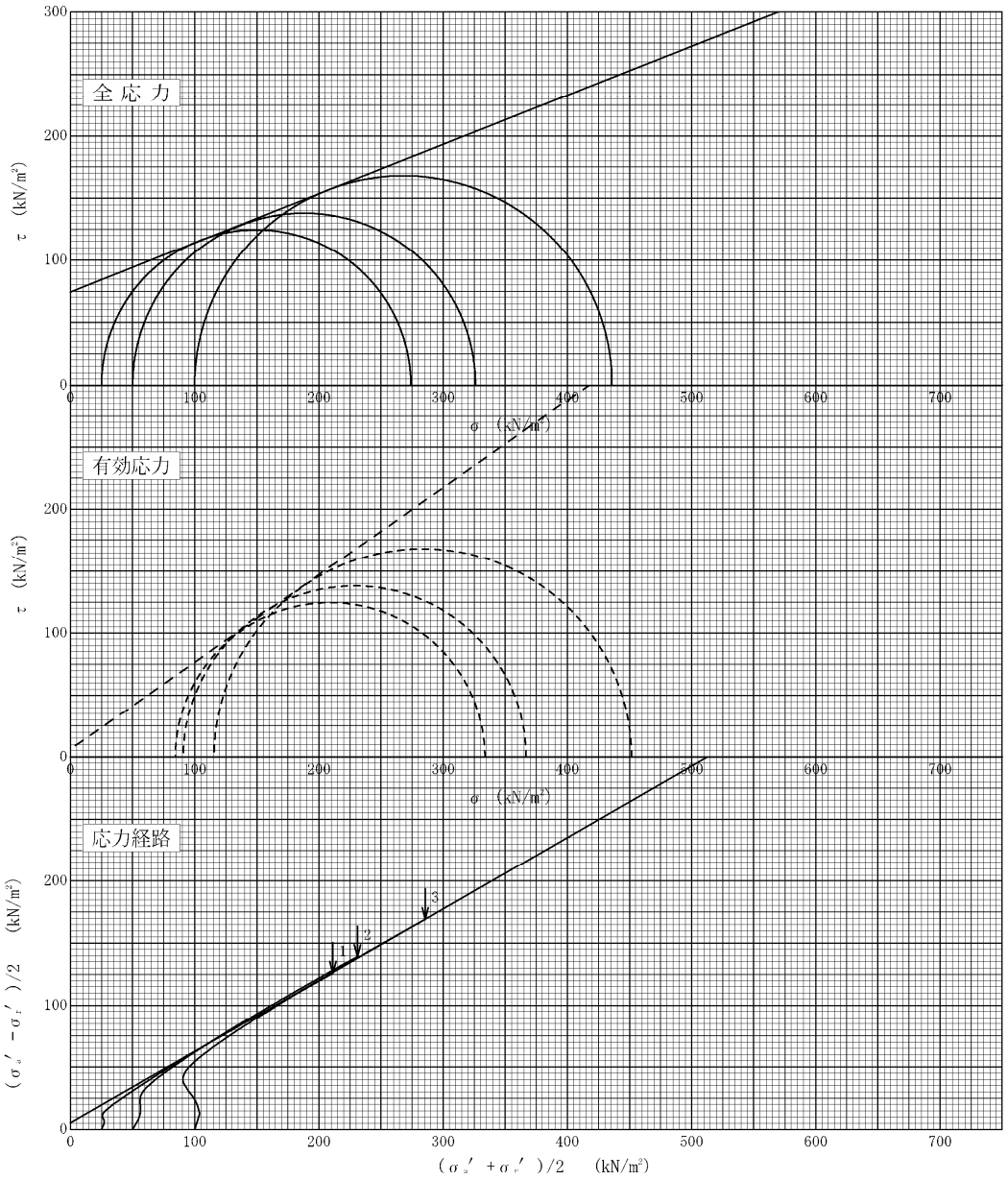
図 付 D.8　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）砂質土 1

| JGS　0523 | 土の強度特性　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$] | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 10月 19日

試料番号（深さ）模型1(砂質土1 90%)　　試　験　者　中村　敏明

| 強度定数 / 応力範囲 | 全応力 | | | 有効応力 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $c$ kN/m² | $\phi$ ° | tan $\phi$ | $c'$ kN/m² | $\phi'$ ° |
| 正規圧密領域 | 74.4 | 21.6 | 0.396 | 6.26 | 35.1 |
| 過圧密領域 | | | | | |
| | | | | | |




特記事項

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

図 付 D.9　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）砂質土 1

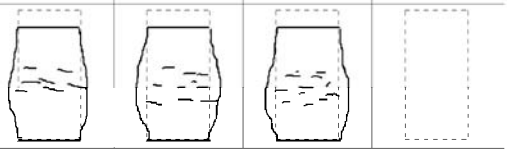
JGS　0523　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$]　(応力－ひずみ曲線)

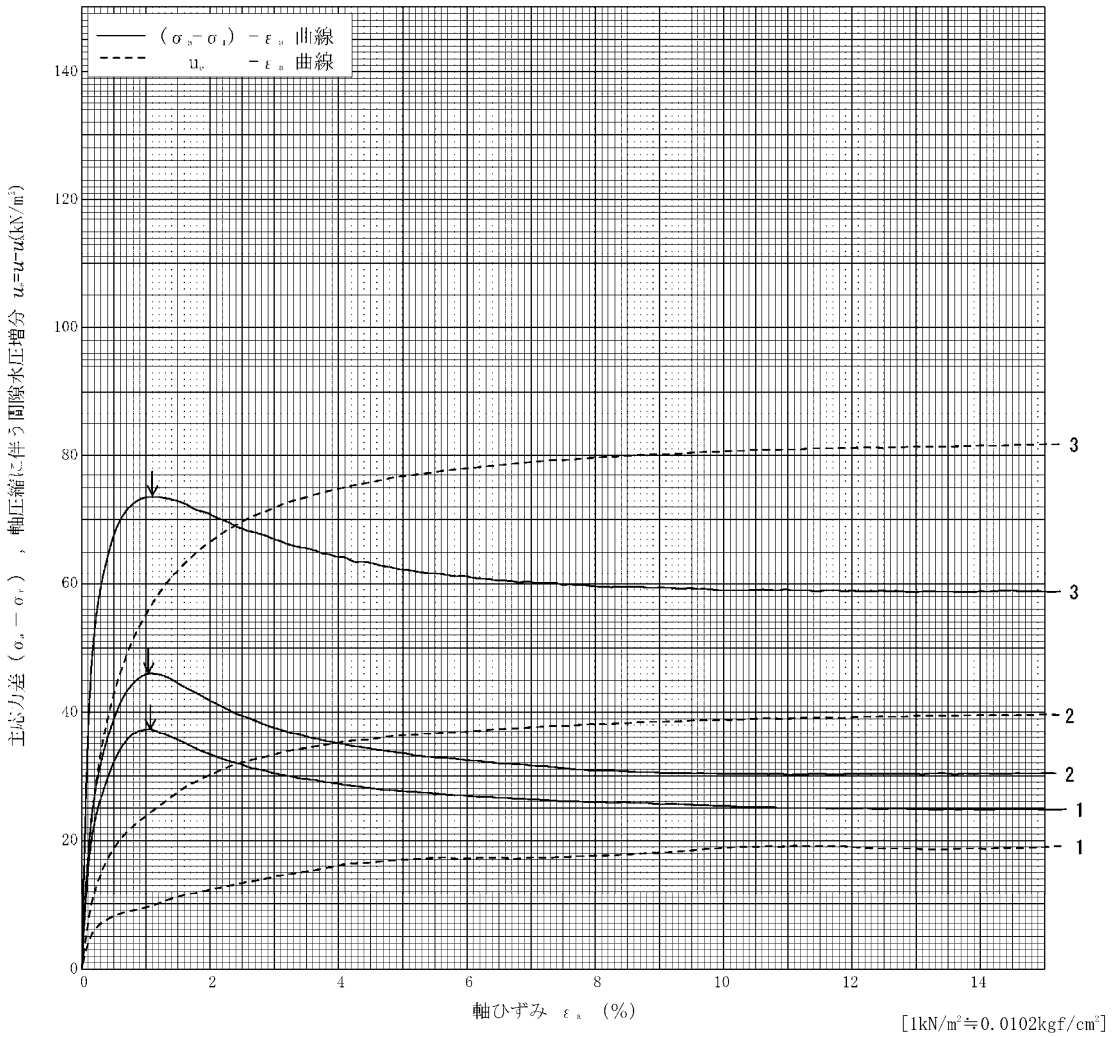
調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 10月 17日

試料番号（深さ）模型2(砂質土2 90%)　　試験者　中村　敏明

| 土質名称 | 細粒分質礫質砂 (SFG) |
|---|---|
| 最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ g/cm³ | |
| 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ g/cm³ | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 |

特記事項　1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界，塑性限界，砂質土の場合は最小乾燥密度，最大乾燥密度等を記載する。

| 供試体 No. | | | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| ~~セル圧~~・圧密応力 | | kN/m² | 25 | 50 | 100 |
| 背圧 $u_b$ | | kN/m² | 200 | 200 | 200 |
| 主応力差最大時 | 圧縮強さ $(\sigma_3-\sigma_1)_{max}$ | kN/m² | 37.4 | 46.1 | 73.8 |
| | 軸ひずみ $\varepsilon_{af}$ | % | 1.07 | 1.04 | 1.10 |
| | $\overline{CU}$ 間隙水圧 $u_f$ | kN/m² | 210 | 224 | 257 |
| | $\overline{CU}$ 有効軸方向応力 $\sigma'_{af}$ | kN/m² | 52.7 | 72.1 | 117 |
| | $\overline{CU}$ 有効側方向応力 $\sigma'_{rf}$ | kN/m² | 15.3 | 26.0 | 43.1 |
| | CD 体積ひずみ $\varepsilon_{vf}$ | % | | | |
| | CD 間隙比 $e_f$ | | | | |
| 変形係数 $E_{50}$ | | MN/m² | 13.9 | 15.4 | 40.1 |
| 供試体の破壊状況 | | |  | | |




[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

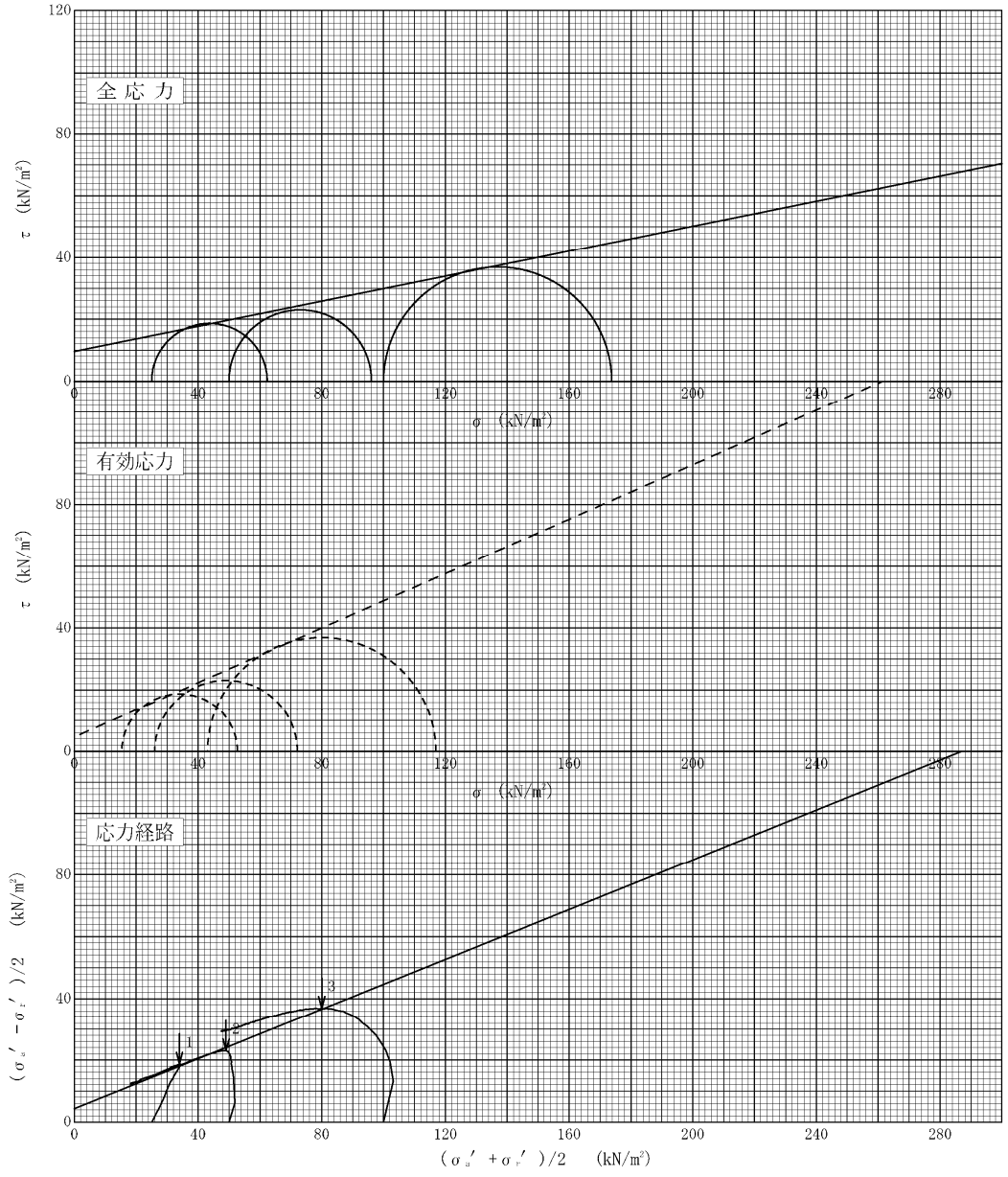
図 付 D.10　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）砂質土２

| JGS　0523 | 土の強度特性　土の三軸圧縮試験［$\overline{CU}$］ | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 10月 17日

試料番号（深さ）模型2(砂質土2 90%)　　試　験　者　中村　敏明

| 強度定数 / 応力範囲 | 全応力 $c$ kN/m² | 全応力 $\phi$ ° | 全応力 tan$\phi$ | 有効応力 $c'$ kN/m² | 有効応力 $\phi'$ ° |
|---|---|---|---|---|---|
| 正規圧密領域 | 9.60 | 11.5 | 0.203 | 4.68 | 23.8 |
| 過圧密領域 | | | | | |
| | | | | | |




特記事項

［1kN/m²≒0.0102kgf/cm²］

図 付 D.11　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）砂質土２

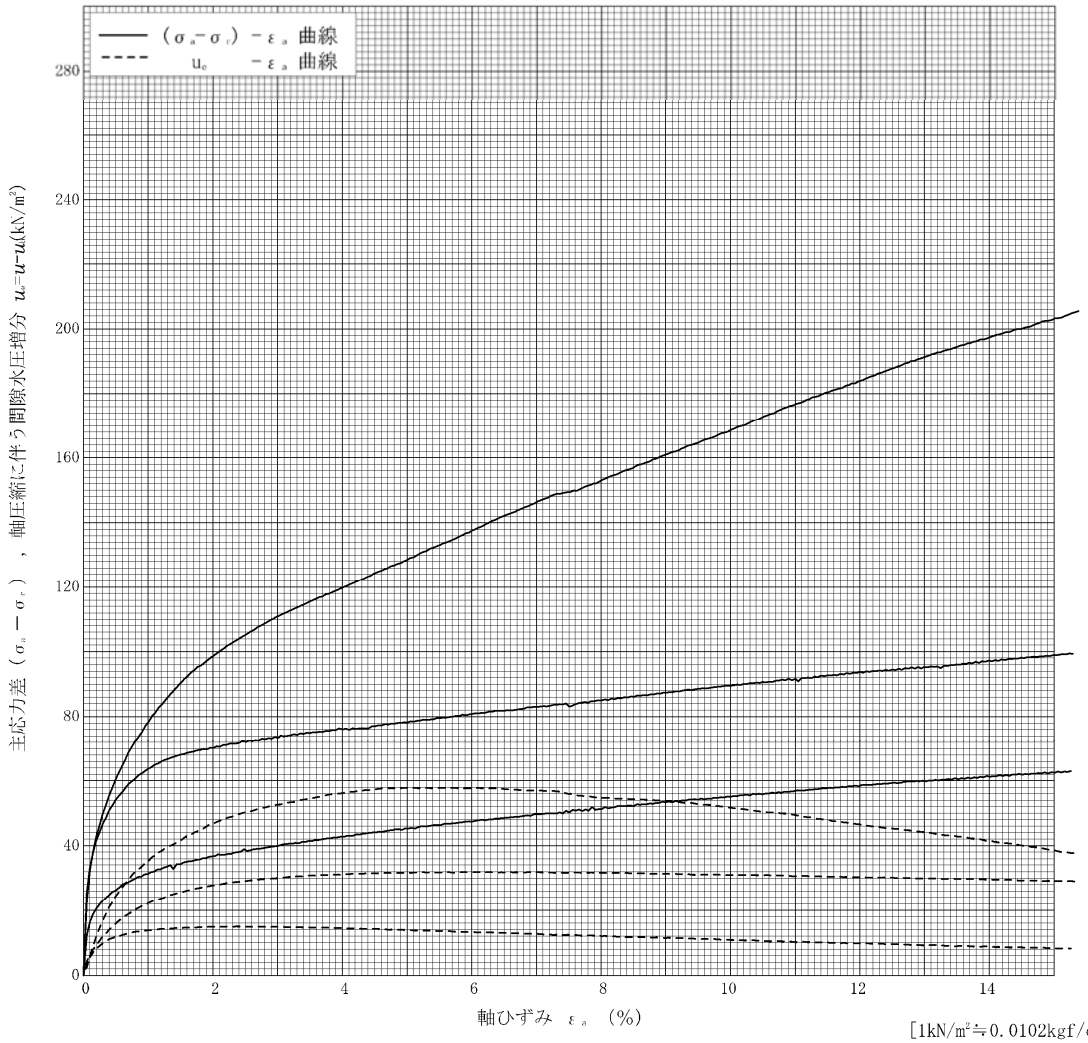
| JGS　0523 | 土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$]　(応力－ひずみ曲線) | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 25年　2月　7日

試料番号（深さ）　模型3(砂質土3 90%)　　試　験　者　中村　敏明

| 土質名称 | | | 供試体 No. | | 1 | 2 | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 液性限界 $W_L$ % | | | 飽和圧・圧密応力 | kN/m² | 25 | 50 | 100 | |
| 塑性限界 $W_P$ % | | | 背圧 $u_b$ | kN/m² | 200 | 200 | 200 | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 主応力差最大時 | 圧縮強さ $(\sigma_a-\sigma_r)_{max}$ | kN/m² | 63.0 | 99.5 | 205 | |
| | | | 軸ひずみ $\varepsilon_{af}$ | % | 15.26 | 15.24 | 15.38 | |
| | | | $\overline{CU}$ 間隙水圧 $u_f$ | kN/m² | 208 | 229 | 237 | |
| | | | $\overline{CU}$ 有効軸方向応力 $\sigma'_{af}$ | kN/m² | 79.7 | 120 | 268 | |
| | | | $\overline{CU}$ 有効側方向応力 $\sigma'_{rf}$ | kN/m² | 16.7 | 20.9 | 62.6 | |
| | | | CD 体積ひずみ $\varepsilon_{vf}$ | % | | | | |
| | | | CD 間隙比 $e$ | | | | | |
| | | | 変形係数 $E_{50}$ | MN/m² | 3.11 | 13.3 | 4.47 | |
| | | | 供試体の破壊状況 | | | | | |

特記事項　1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界，塑性限界，砂質土の場合は最小乾燥密度，最大乾燥密度等を記載する。




[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

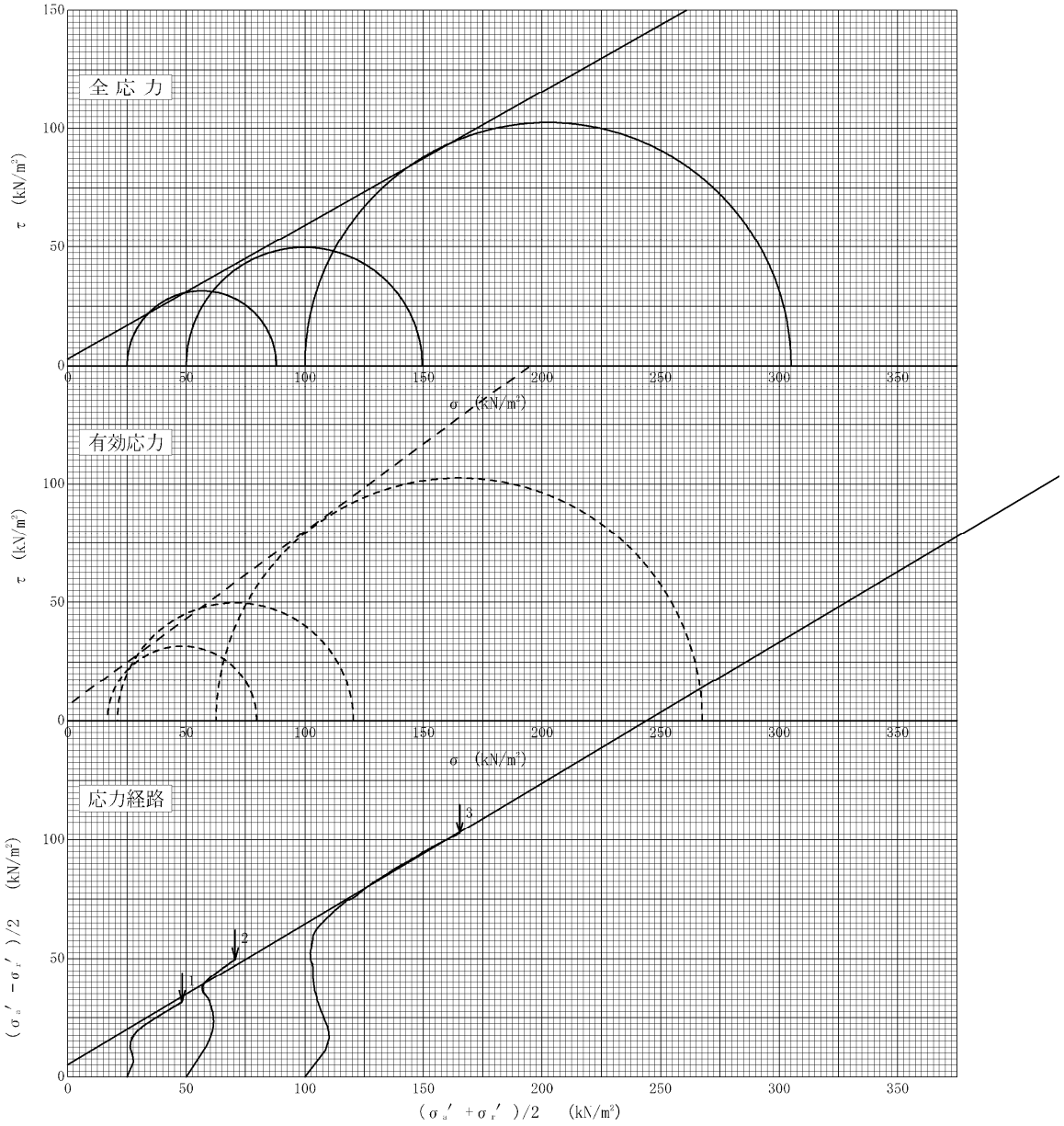
図 付 D.12　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）砂質土３

| JGS　0523 | 土の強度特性　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$] | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 25年　2月 7日

試料番号（深さ）　模型3(砂質土3 90%)　　試　験　者　中村　敏明

| 強度定数 / 応力範囲 | 全応力 | | | 有効応力 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $c$ kN/m² | $\phi$ ° | tan$\phi$ | $c'$ kN/m² | $\phi'$ ° |
| 正規圧密領域 | 2.88 | 29.4 | 0.564 | 6.35 | 36.4 |
| 過圧密領域 | | | | | |
| | | | | | |




特記事項

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

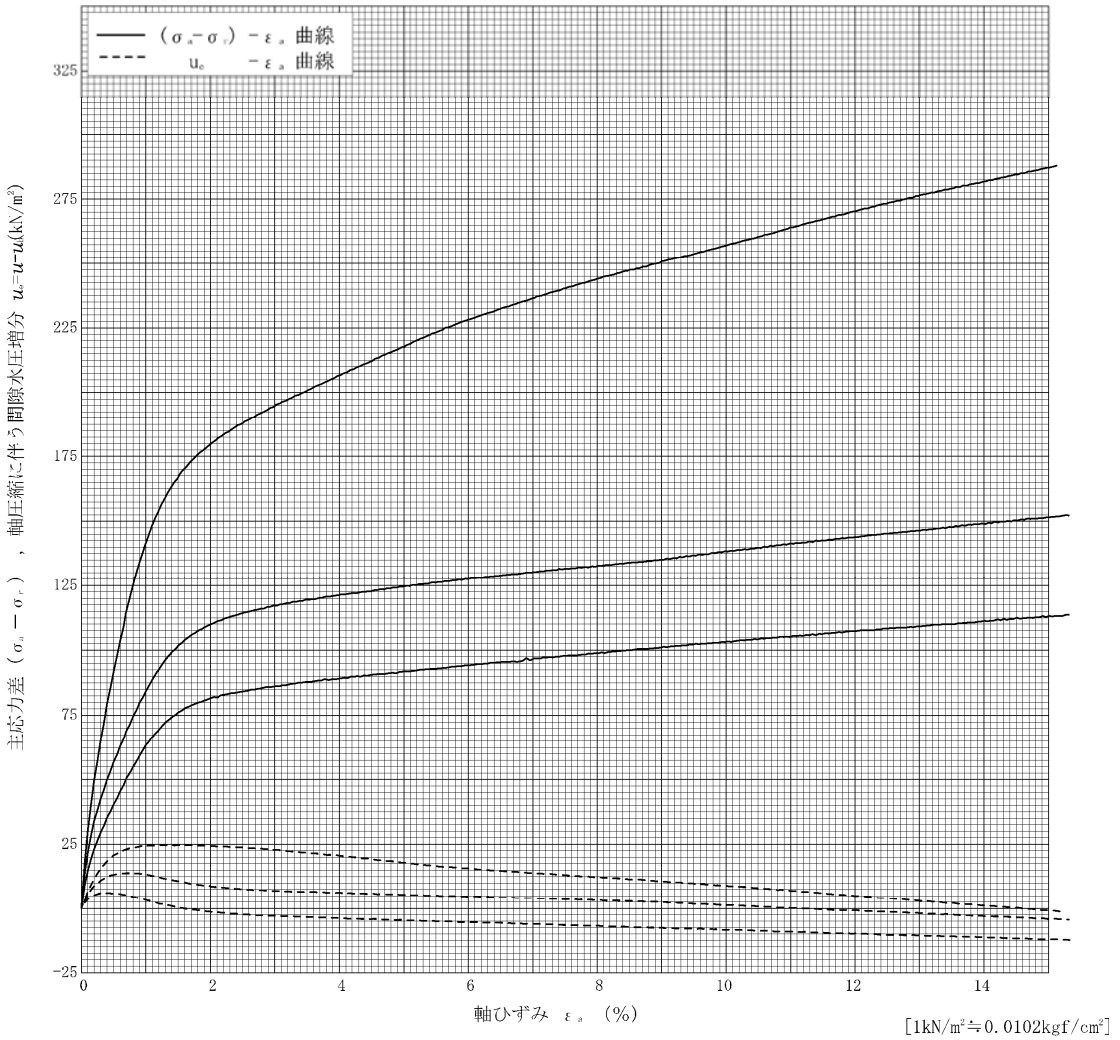
図 付 D.13　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）砂質土 3

JGS　0523　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$]　(応力－ひずみ曲線)

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 25年　2月　8日

試料番号（深さ）　模型4(砂質土4 90%)　　試　験　者　中島　雅之

| 土質名称 | | | 供試体 No. | | 1 | 2 | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 液性限界 $W_L$ % 1) | | | セル圧・圧密応力 | kN/m² | 25 | 50 | 100 | |
| 塑性限界 $W_P$ % 1) | | | 背圧 $u_b$ | kN/m² | 200 | 200 | 200 | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 主応力差最大時 | 圧縮強さ $(\sigma_a-\sigma_r)_{max}$ | kN/m² | 114 | 152 | 288 | |
| 特記事項　1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界，塑性限界，砂質土の場合は最小乾燥密度，最大乾燥密度等を記載する。 | | | 軸ひずみ $\varepsilon_{af}$ | % | 15.27 | 15.27 | 15.13 | |
| | | | $\overline{CU}$ 間隙水圧 $u_f$ | kN/m² | 188 | 196 | 199 | |
| | | | $\overline{CU}$ 有効軸方向応力 $\sigma'_{af}$ | kN/m² | 151 | 206 | 389 | |
| | | | $\overline{CU}$ 有効側方向応力 $\sigma'_{rf}$ | kN/m² | 37.2 | 54.3 | 101 | |
| | | | CD 体積ひずみ $\varepsilon_{vf}$ | % | | | | |
| | | | CD 間隙比 $e$ | | | | | |
| | | | 変形係数 $E_{50}$ | MN/m² | 6.71 | 9.15 | 14.0 | |
| | | | 供試体の破壊状況 | | | | | |




[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

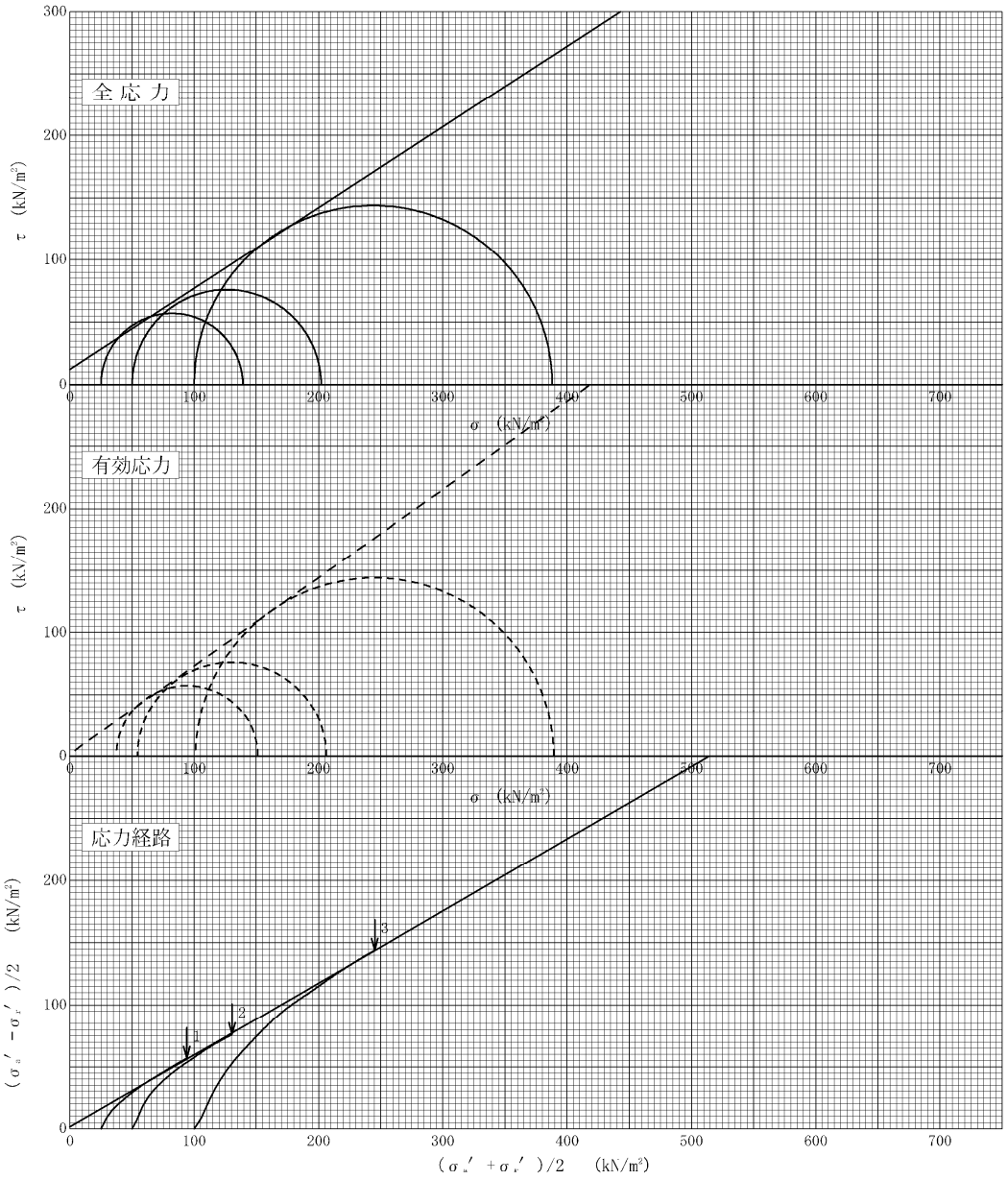
図 付 D.14　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）砂質土４

| JGS　0523 | 土の強度特性　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$] | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 25年　2月　8日

試料番号（深さ）模型4(砂質土4 90%)　　試　験　者　中島　雅之

| 強度定数 / 応力範囲 | 全応力 | | | 有効応力 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $c$ kN/m² | $\phi$ ° | tan $\phi$ | $c'$ kN/m² | $\phi'$ ° |
| 正規圧密領域 | 12.2 | 33.0 | 0.650 | 1.87 | 35.5 |
| 過圧密領域 | | | | | |
| | | | | | |




特記事項

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

図 付 D.15　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）砂質土 4

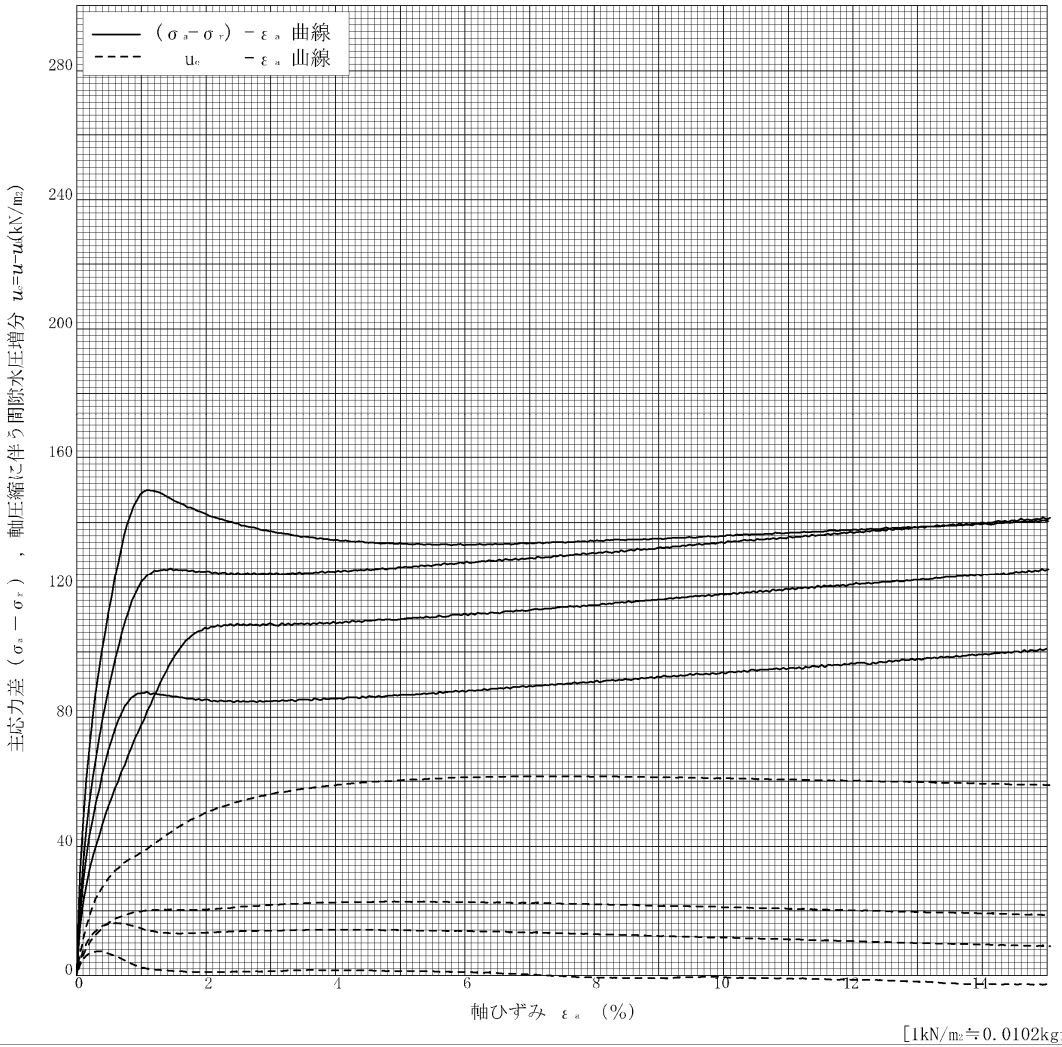
| JGS　0523 | 土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$]　(応力－ひずみ曲線) | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 12月 14日

試料番号（深さ）　模型5(砂質土5 90%)　　試験者　中村 敏明

| 土質名称 | | | 供試体 No. | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 液性限界 $W_L$ % | | | セル圧・圧密応力 | kN/m² | 25 | 50 | 100 | 50 |
| 塑性限界 $W_P$ % | | | 背圧 $u_b$ | kN/m² | 200 | 200 | 200 | 200 |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 主応力差最大時 | 圧縮強さ $(\sigma_a-\sigma_r)_{max}$ | kN/m² | 101 | 142 | 150 | 126 |
| | | | 軸ひずみ $\varepsilon_{af}$ | % | 14.99 | 14.94 | 1.08 | 15.02 |
| | | | $\overline{CU}$ 間隙水圧 $u_f$ | kN/m² | 197 | 209 | 239 | 218 |
| | | | $\overline{CU}$ 有効軸方向応力 $\sigma'_{af}$ | kN/m² | 129 | 183 | 211 | 158 |
| | | | $\overline{CU}$ 有効側方向応力 $\sigma'_{rf}$ | kN/m² | 27.7 | 41.0 | 60.9 | 31.5 |
| | | | CD 体積ひずみ $\varepsilon_{vf}$ | % | | | | |
| | | | CD 間隙比 $e$ | | | | | |
| | | | 変形係数 $E_{50}$ | MN/m² | 18.8 | 21.8 | 34.0 | 9.13 |
| | | | 供試体の破壊状況 | | | | | |

特記事項　1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界，塑性限界，砂質土の場合は最小乾燥密度，最大乾燥密度等を記載する。




[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

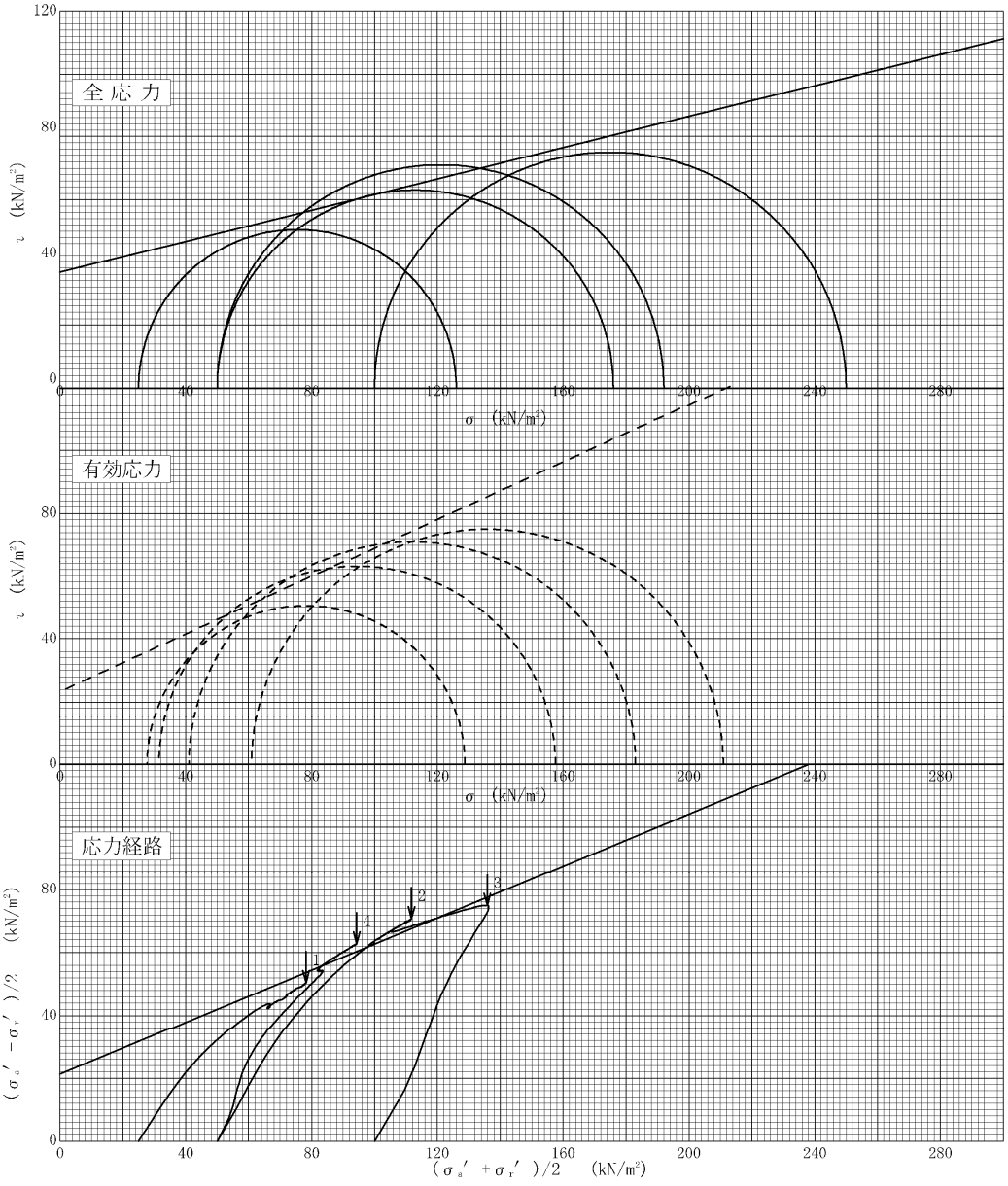
図 付 D.16　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）砂質土 5,模型 5

| JGS　0523 | 土の強度特性　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$] | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 12月 14日

試料番号（深さ）　模型5(砂質土5 90%)　　試　験　者　中村　敏明

| 強度定数 / 応力範囲 | 全応力 $c$ kN/m² | 全応力 $\phi$ ° | 全応力 tan$\phi$ | 有効応力 $c'$ kN/m² | 有効応力 $\phi'$ ° |
|---|---|---|---|---|---|
| 正規圧密領域 | 36.8 | 13.9 | 0.248 | 23.3 | 24.5 |
| 過圧密領域 | | | | | |
| | | | | | |




特記事項

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

図 付 D.17　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）砂質土 5,模型 5

JGS　0523　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$]　(応力－ひずみ曲線)

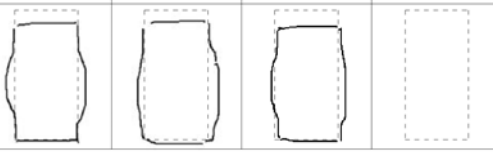
調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 12月 13日

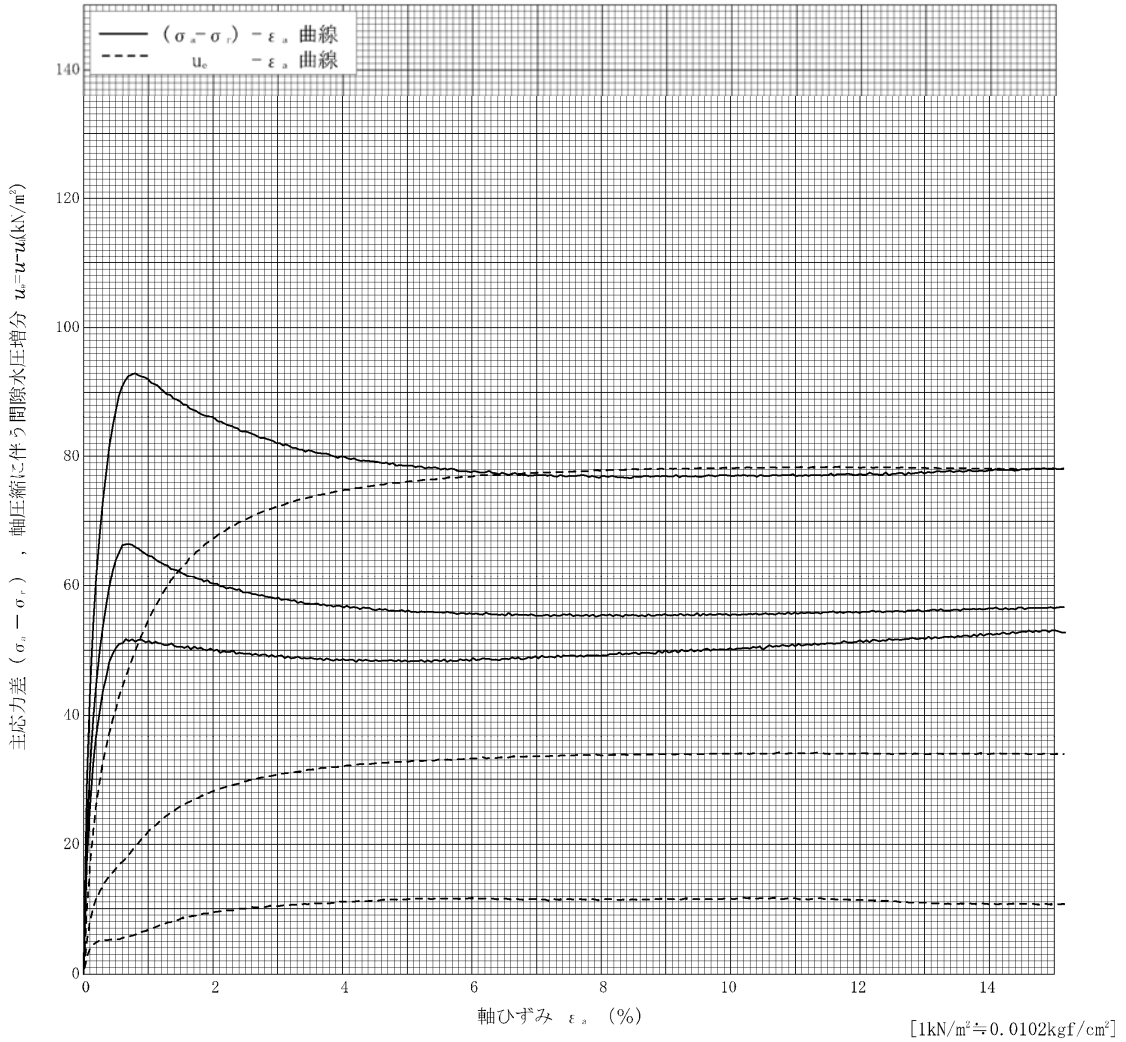
試料番号（深さ）　模型6(砂質土5 85%)　　試 験 者　中村 敏明

| 土質名称 | | | |
|---|---|---|---|
| 液性限界 $W_L$ % | | | |
| 塑性限界 $W_P$ % | | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | | |

特記事項　1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界，塑性限界，砂質土の場合は最小乾燥密度，最大乾燥密度等を記載する。

締固め度 Dc=85%

| 供試体 No. | | | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| セル圧・圧密応力 | | kN/m² | 25 | 50 | 100 |
| 背圧 $u_b$ | | kN/m² | 200 | 200 | 200 |
| 主応力差最大時 | 圧縮強さ $(\sigma_a-\sigma_r)_{max}$ | kN/m² | 53.1 | 66.5 | 93.0 |
| | 軸ひずみ $\varepsilon_{af}$ | % | 14.87 | 0.70 | 0.79 |
| | $\overline{CU}$ 間隙水圧 $u_f$ | kN/m² | 211 | 218 | 250 |
| | $\overline{CU}$ 有効軸方向応力 $\sigma'_{af}$ | kN/m² | 67.4 | 98.1 | 143 |
| | $\overline{CU}$ 有効側方向応力 $\sigma'_{rf}$ | kN/m² | 14.3 | 31.6 | 50.3 |
| | CD 体積ひずみ $\varepsilon_{vf}$ | % | | | |
| | CD 間隙比 $e_f$ | | | | |
| 変形係数 | $E_{50}$ | MN/m² | 25.4 | 30.5 | 41.5 |
| 供試体の破壊状況 | | |  | | |




[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

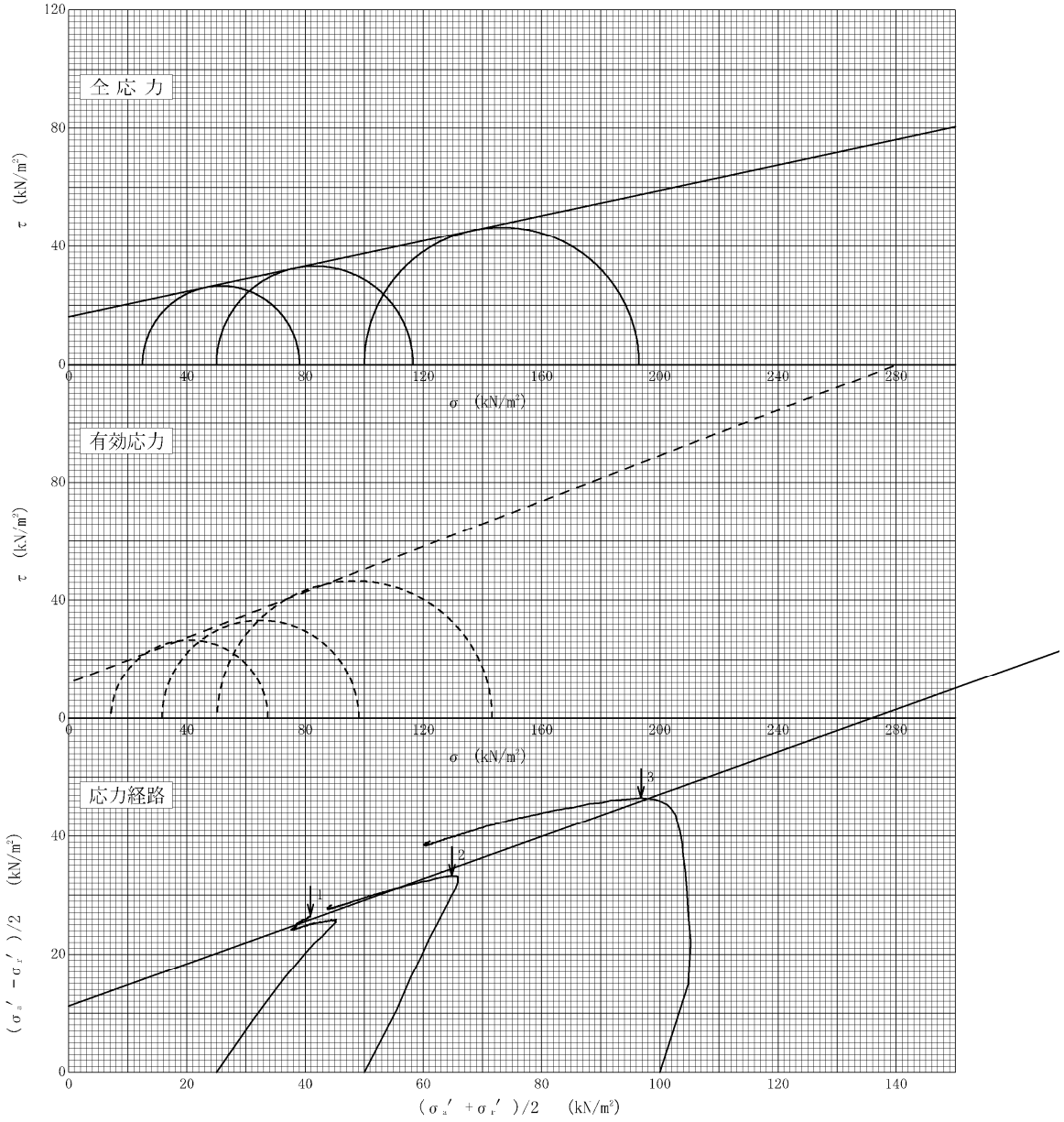
図 付 D.18　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）砂質土 5,模型 6

| JGS　0523 | 土の強度特性　土の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$] | |
|---|---|---|

調査件名　平成24年度河川堤防の内部浸食に関する模型実験業務　　試験年月日　平成 24年 12月 13日

試料番号（深さ）　模型6(砂質土5 85%)　　試　験　者　中村　敏明

| 強度定数 / 応力範囲 | 全応力 | | | 有効応力 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $c$ kN/m² | $\phi$ ° | tan $\phi$ | $c'$ kN/m² | $\phi'$ ° |
| 正規圧密領域 | 16.1 | 12.1 | 0.215 | 12.0 | 21.1 |
| 過圧密領域 | | | | | |
| | | | | | |




特記事項　締固め度 Dc=85%

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

図 付 D.19　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）砂質土 5,模型 6

図 付 D.20　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）砂質土 5,模型 7

図 付 D.21　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）砂質土 5,模型 7

# 小型浸透模型実験（予備実験）

図 付 D.22　透水試験結果（山砂）

図 付 D.23　透水試験結果（山砂+礫）

図 付 D.24　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）山砂

図 付 D.25　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）山砂

図 付 D.26　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）山砂＋礫

図 付 D.27　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）山砂＋礫

# 小型浸透模型実験(本実験)

図 付 D.28　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 2

図 付 D.29　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 2

図 付 D.30　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 3

図 付 D.31　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 3

図 付 D.32　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 4

図 付 D.33　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 4

図 付 D.34　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 5

図 付 D.35　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 5

図 付 D.36　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 6

図 付 D.37　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 6

図 付 D.38　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 7

図 付 D.39　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 7

図 付 D.40　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 8

図 付 D.41　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 8

図 付 D.42　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 9

図 付 D.43　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 9

図 付 D.44　模型材料の三軸試験結果（応力・ひずみ）材料 10

図 付 D.45　模型材料の三軸試験結果（応力円・応力経路）材料 10

図 付 D.46　透水試験結果　材料 2

図 付 D.47　透水試験結果　材料 3

図 付 D.48　透水試験結果　材料 4

図 付 D.49　透水試験結果　材料 5

図 付 D.50　透水試験結果　材料 6

図 付 D.51　透水試験結果　材料 7

図 付 D.52　透水試験結果　材料 8

図 付 D.53　透水試験結果　材料 9

図 付 D.54　透水試験結果　材料 10

土木研究所資料

TECHNICAL NOTE of PWRI

No.4300 February 2015

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課

〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754