

# 土木研究所資料

## 円柱縦型ドレーンを使用した 堤内基盤排水対策に関する研究

令和3年3月

国立研究開発法人土木研究所  
地質・地盤研究グループ土質・振動チーム

Copyright © (2021) 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、国立研究開発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、国立研究開発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。

# 円柱縦型ドレーンを使用した 堤内基盤排水対策に関する研究

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

元研究員

吉田直人<sup>※1</sup>

元研究員

佐々木亨<sup>※2</sup>

元交流研究員

平林 学<sup>※3</sup>

## 要旨

降雨などによって河川水位が上昇すると、堤内地側の法尻付近では、基礎地盤の透水層内の水圧が高くなり堤内地側の被覆土層に揚圧力が作用し、地表面が膨れ上がる現象が発生する。このような現象は盤膨れと呼ばれ、堤内地側で噴砂を伴った漏水やパイピング、最悪の場合には決壊を引き起こす可能性がある。

このような盤膨れに対して、川裏法尻付近から透水層内の水圧を穏やかに抜くことにより、透水層内の水圧を低減させる堤内基盤排水対策がある。堤内基盤排水対策に関しては、従前から模型実験や解析などによりその効果や設計法の検討を実施してきたところである。本報告では、円柱縦型ドレーンの形状や設置位置を変化させた模型実験を実施し、2次元及び3次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析による再現性を確認した。また、実験の中には、ドレーンの隙間から噴砂が生じ、結果的に対策効果が十分に発揮されなかったケースがあったため、隙間の影響や隙間に発生する流速を把握するための部分模型実験を実施した。これらの成果を集約したマニュアルを巻末に示す。

キーワード：浸透対策，盤膨れ，模型実験，浸透流解析

※1: 現 国土交通省関東地方整備局

※2: 現 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム

※3: 現 ライト工業株式会社



# 目次

1. はじめに	1
2. 円柱縦型ドレーンに関する大型模型浸透実験	3
2.1 実験概要	3
2.2 模型作製	4
2.3 実験方法	20
2.4 実験結果	21
2.5 浸透実験まとめ	54
3. 飽和・不飽和非定常浸透流解析	59
3.1 2次元飽和・不飽和非定常浸透流解析	59
3.2 3次元飽和・不飽和非定常浸透流解析	72
4. 対策工と地盤の隙間からの漏水・噴砂に係る模型実験	93
4.1 実験目的	93
4.2 実験概要	94
4.3 模型作製	95
4.4 実験方法	96
4.5 実験結果	97
4.6 排水流速に係る分析	103
5. まとめ	106
参考文献	108
付録 A 使用間隙水圧計・変位計	111
付録 B 土質試験結果	115
付録 C 透水層及び被覆土層の締固め度測定結果	123
付録 D 3次元解析結果と計測値比較	129

堤内基盤排水対策マニュアル(試行版)



## 第1章 はじめに

降雨などによって河川水位が上昇すると、堤内地側の法尻付近では、基礎地盤の透水層内の水圧が高くなり堤内地側の被覆土層に揚圧力が作用し、地表面が膨れ上がる現象が発生する。このような現象は盤膨れと呼ばれ、堤内地側で噴砂を伴った漏水やパイピング、最悪の場合には決壊を引き起こす可能性がある。

平成 24 年 7 月九州北部豪雨では、直轄管理区間において堤防が決壊しただけでなく、派川沖端川の堤防決壊や内水氾濫も重なり、浸水面積約 2,579ha、浸水戸数 1,870 戸の甚大な被害となった<sup>1)</sup>。このうち、直轄管理区間における決壊(右岸 7.3k 付近)は、パイピングが原因であると結論付けられている。

「河川堤防の構造検討の手引き」<sup>2)</sup>においては、パイピング破壊に対する安全性の照査方法が、被覆土がない場合と被覆土がある場合とに分けて示されている。盤膨れに対する安全性照査は、被覆土がある場合に相当し、 $G/W$ ( $G$ :被覆土層の重量、 $W$ :被覆土層底面に作用する揚圧力)という荷重バランスにより照査が行われ、 $G/W$  が 1.0 以下の場合に対策が必要と評価される。盤膨れを含む基盤漏水対策としては、川表側で鋼矢板等を基礎地盤まで打設して浸透水を遮水する工法が多く採用されている。鋼矢板等を遮水目的に打設する工法は、透水層が厚い場合や砂礫地盤の場合など費用や施工性の面や、平常時の地下水利用の面から適応が困難となる場合がある。このような条件において、安価で効率的な対策の開発が望まれている。

そこで、筆者らは、**図 1-1** に示すような川裏側法尻付近で透水層内の水圧を穏やかに抜くことにより、透水層内の水圧を低下させる堤内基盤排水対策の効果検証及び設計法の確立を目指し、模型実験等を行ってきた<sup>3),4),5)</sup>。主に、裏法尻に被覆土層を貫通するような縦断的に断面形状の変化のない逆台形のトレンチを作り、この中を透水性の高い碎石で埋め戻す形式の堤内基盤排水対策を対象としたものであった。この形式では、被覆土層が厚い場合に、施工量が増え、現実的でないことがある。施工量を抑える方法として、円柱縦型ドレーンを離散的に配置する方法がある。本資料では、この円柱縦型ドレーンに関する模型実験や解析結果を報告する。

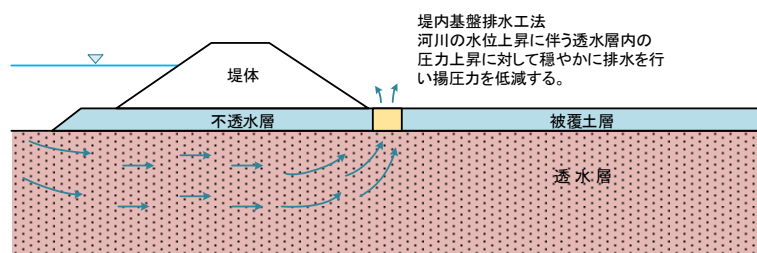


図 1-1 堤内基盤排水工法概念図

巻末には、過去の検討結果<sup>例えば 5)</sup>と本資料の検討結果をマニュアルとしてとりまとめた「堤内基盤排水対策マニュアル(試行版)」を示す。平成 29 年に公開したものから、公開後に実施した第 4 章の実験結果を踏まえ、一部改訂を行ったものである。なお、本マニュアルでは、本編で対象とした円柱縦型ドレーンを含む離散配置だけでなく、連続配置の両者を対象としている。



## 第2章 円柱縦型ドレーンに関する大型模型浸透実験

### 2.1 実験概要

大型土槽を使用し河川堤防の法尻部分を切り出した模型の浸透実験を行った。土槽内に基盤層(透水層)、被覆土層、堤防を模した盛土を作製し、法尻部および堤内地側に円柱縦型ドレーンを設置した。この模型の透水層に水圧を与えることで、円柱縦型ドレーンの効果を検証するものである。

図 2-1 に代表的な模型の平面図および横断形状を示す。使用した土槽は、高さ  $H=2.5\text{m}$  × 幅  $W=8.0\text{m}$  × 奥行き  $B=4.0\text{m}$  の実験土槽である。この実験土槽内最下部に、川砂(厚さ  $t=0.75\text{m}$ )の透水層、その上にローム(厚さ  $t=0.50\text{m}$ )の被覆土層を作製し基礎地盤とした。基礎地盤作製後、被覆土層と同じロームを用いて堤防の法尻部分を切り出した堤体(高さ  $1.25\text{m}$ 、法面勾配  $1:2.0$ )を作製した。

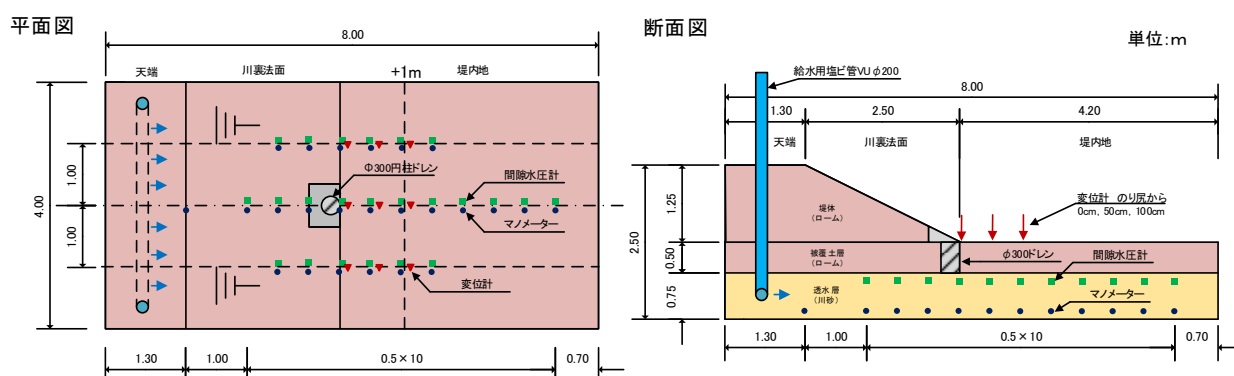


図 2-1 模型実験の平面図・断面図 (Case1)

表 2-1 に各ケースの条件を示す。Case1 を基本ケースとし、 $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻部中央に設置した。Case2 では、ドレーンの大きさを  $\phi 1000$  に変え、Case3 ではドレーンの位置を法尻から  $2\text{m}$  離れた位置に変えた。Case4 では、法尻部に  $\phi 300$  の円柱ドレーンを 2 箇所配置し、Case5 では、法尻部に  $\phi 140$  の円柱ドレーンを 3 箇所設置した。Case6 では、法尻部に  $\phi 100$  の円柱ドレーンを 1 箇所設置した。Case6 は、ドレーンからの噴砂が発生しやすい条件として他のケースよりも細い径で、ドレーンと地盤の間に意図的に空隙を設けている。

給水設備は図 2-1 に示すように堤防模型天端直下に  $\phi 200\text{mm}$  のスリット加工した硬質塩化ビニル管(以下、塩ビ管)を堤防縦断方向に埋設し、埋設する水平な塩ビ管の両端から塩ビ管を立ち上げた構造とした。外力は塩ビ管の管内水位を上昇させることにより、透水層へ直接水圧をかけ河川水位の上昇によって発生

する透水層内の水圧上昇を再現した。透水層の水圧（塩ビ管内の水頭）と法面から堤内地の透水層内の水圧の関係を整理することにより、対策工（円柱縦型ドレーン）の効果を検証することとした。

表 2-1 実験ケース一覧

ケース名	円柱ドレーン径 (mm) × 箇所	設置位置
Case1	φ 300 × 1	法尻部中央
Case2	φ 1000 × 1	法尻部中央
Case3	φ 300 × 1	法尻部中央から 2m 堤内地側
Case4	φ 300 × 2	法尻部
Case5	φ 140 × 3	法尻部
Case6	φ 100 × 1	法尻部中央

## 2.2 模型作製

### 2.2.1 実験土槽

本実験では、土木研究所内の浸透実験施設にある 4 つの土槽のうち、図 2-2 に示す南から 2 番目の土槽（ピット B）を使用した。ピットの大きさは高さ H=2.5m × 幅 W=8.0m × 奥行き B=4.0m である。土槽の側壁に漏水が確認されたため、図 2-3 左に示すように止水補修を行った。実験の状況を図 2-3 右に示す。

以降、図 2-4 の表記にしたがって模型の位置を表すものとする。



図 2-2 実験土層（ピット B）



図 2-3 土槽の補修状況（左）と模型・実験の状況（右）

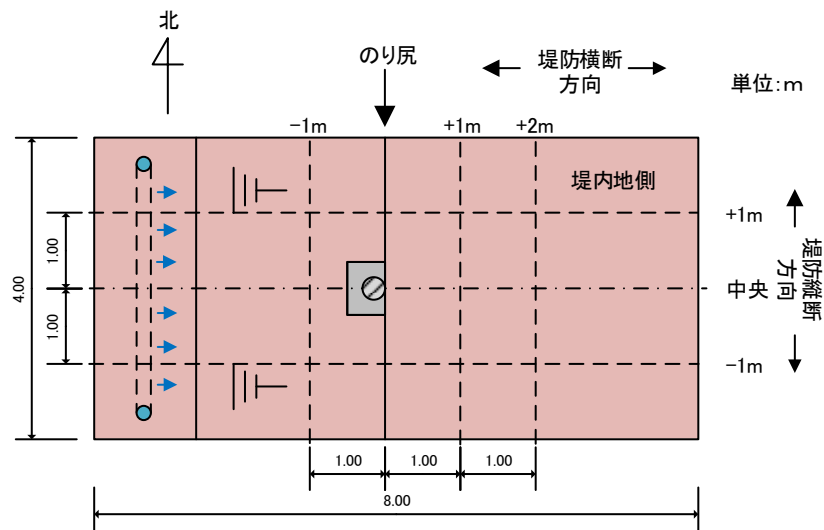


図 2-4 模型の位置に係る表記

## 2.2.2 給水設備

給水設備として、スリット(W=200mm, B=20mm)加工し、吸出し防止材を巻き付けた VU  $\phi 200$  の塩ビ管を透水層内中央に埋設した。埋設した塩ビ管の両端から直上へ塩ビ管を立ち上げて全体を U 字型に組み立て給水管とした。埋設した塩ビ管のスリット加工部と吸出し防止材を巻き付けた状態の塩ビ管を図 2-5 に示す。また、給水設備全体を図 2-6 に示す。



(a) 給水塩ビ管スリット加工部



(b) 吸出し防止材を巻き付けた給水塩ビ管

図 2-5 給水管（塩ビ管）

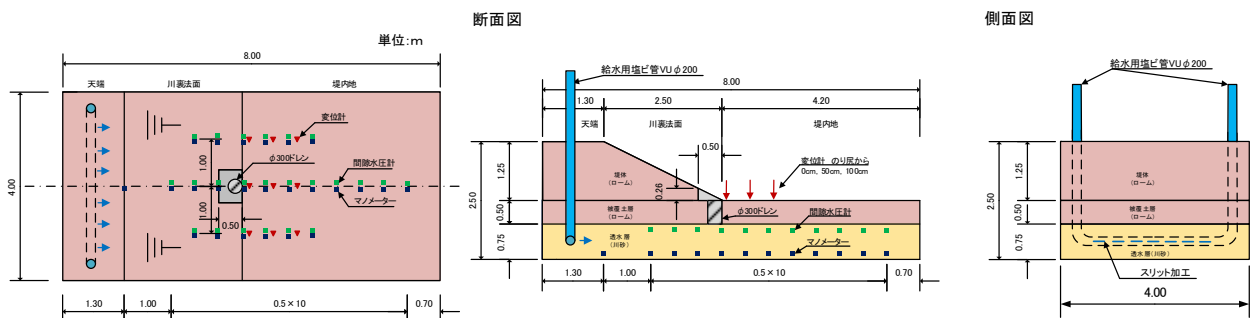


図 2-6 給水設備全体図

### 2.2.3 土槽壁面等の漏水防止対策

実験中、透水層内に高い水圧がかかると、一般に、土槽壁面沿いに漏水が発生しやすい。本実験では、土層壁面沿いだけでなく、給水設備の塩ビ管も同様に漏水が発生しやすいことが想定される。そのため、被覆土層の中間深さにルーフィング対策として厚さ  $t=1\text{mm}$ 、幅  $W=300\text{mm}$ 、長さ  $L=10\text{m}$  のポリエチレンシートを被覆土層と壁面の間の全周及び給水設備周りに設置した。シートは、透水層からの上向き漏水に対して被覆土層中間部で浸透路長が長くなるようにシート幅の半分程度を壁面に接着させ、残りを被覆土で挟むように設置した。図 2-7 に設置状況を示す。

### 2.2.4 給水管内の水位の調整

実験中、給水管内の水位を調整することにより、透水層に対して水圧を作用させた。給水管内の水位は、時間に対して階段状に徐々に上昇させることとした。階段状の平らな部分は、給水管内に設置したフロートレス水位制御装置により給水管内への給水ポンプを起動・停止することで、自動制御とした。給水管内の水位を上昇させるときには、手でフロートレス水位制御装置の高さを所定の高さまで引き上げ固定した。なお、本実験で使用したフロートレス水位制御装置は、目標水位に対して  $2\text{cm}$  水位が下回るとポンプが起動し、目標水位に達するとポンプが停止するよう設定した。フロートレス水位制御装置の設置状況を図 2-8 に示す。





(a) シート片側接着状況



(b) シート壁面貼り付け状況



(c) 給水用塩ビ管



(d) 塩ビ管へのシート貼り付け状況

図 2-7 漏水防止対策



(a) フロートレス水位制御装置設置状況



(b) 装置と電源接続状況

図 2-8 フロートレス装置の設置状況

### 2.2.5 計測方法

実験中、給水管内の水位、給水量、被覆土層下面の間隙水圧、地表面の鉛直変位、土槽からの排水量を計測した。また、模型の状況を定点カメラで静止画を 10 分間隔で撮影し、ビデオカメラでも動画を撮影した。実験前後に模型地表面の高さを測量した。実験で使用した間隙水圧計、変位計の一覧を付録 A にまとめた。図 2-9 に実験時計測状況を示す。



図 2-9 実験時計測状況

### (1) 給水量の計測

給水は、盛土天端に立ち上がった給水管内へポンプにより送水した。送水ポンプは貯水タンク(容量1,200L, 1基もしくは2基)に設置し、この貯水タンクから給水を行った。給水量の計測は、貯水タンクの水位低下量を1時間毎に計測し、給水管への時間当たりの給水量を算出した。図 2-10 に使用した貯水タンクを示す。



図 2-10 貯水タンク

### (2) 排水量の計測

対策工及び堤内地側地盤から排出される排水量を計測した。土槽からの排水は、実験土槽東側壁面に開けられた孔から排出され、重量計上に据え付けられたポリタンクへ水中ポンプで汲み上げた。ポリタンクの重量を一定時間毎に計量して、時間当たりの排水量を求めた。図 2-11 に排水量の計測状況を示す。

### (3) 間隙水圧計による被覆土層下面に働く水圧の計測

間隙水圧計を被覆土層下面に Case1~2 は 23 箇所, Case3 は 27 箇所, Case4~6 は 35 箇所設置した。図 2-12 に設置状況を示す。間隙水圧計は、データロガー(東京測器研究所 TDS-530)に接続し、1 分間隔で計測を行った。なお、間隙水圧計の計測値は、気象庁のつくば・館野観測所における大気圧観測値により補正した。また、計測値は実験開始時の値を”0”とし、開始からの増分(変化分)として整理した。





図 2-11 排水量計測状況



(a) 間隙水圧計設置作業



(b) 設置後の状況

図 2-12 間隙水圧計設置

#### (4) マノメータによる被覆土層下面に働く水圧の計測

マノメータは間隙水圧計の補完用として、透水層の下層部に16箇所設置した。マノメータの設置状況を図 2-13 (a)、先端部を図 2-13 (b)に示す。マノメータはピット B 南側側壁下部に開けられた孔を経由し、ピット A 内にマノメータの水柱表示板を設置した。マノメータの水位の計測は30分間隔で目視により行った。マノメータの表示板を図 2-13 (c)に示す。



(a) 設置状況



(b) マノメータ先端部



(c) マノメータ表示板

図 2-13 マノメータ設置

#### (5) 被覆土層地表面の計測

堤内地側の被覆土層表面の鉛直変位を計測するために、変位計を設置した。変位計は、土槽壁面上部に渡した梯子の上に固定し、変位計の軸と地表面の重りとを鉛直にワイヤーで繋いで設置した。変位計の設置状況を図 2-14 に示す。変位計の設置位置は、法尻部、法尻から 0.5m 堤内地側、法尻から 1m 堤内地側にそれぞれ 3 箇所変位計を設置し、合計で 9 箇所の変位を計測した。変位計の堤防縦断方向の間隔は 1m とした。また、変位計の計測値は、実験開始時の値を”0”とし、開始からの増分(変化分)として整理した。計測値は、隆起をプラス方向とし、陥没(地表面の降下)をマイナス側とし設定を行った。

また、実験前後の堤体と被覆土層表面の形状変化を把握するために、横断方向に 3 測線、縦断方向 6 測線の 18 交点において、模型表面の高さをスタッフとレベルにより測量した。





(a) 設置状況



(b) 変位計固定方法



(c) 地表面に設置した錘

図 2-14 変位計設置

#### (6) 静止画及び動画撮影

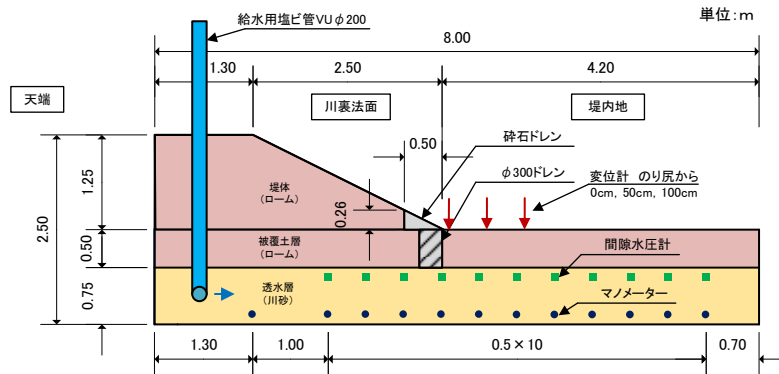
実験中の模型の状況を側から堤防方向に向けて、定点に設置したデジタルカメラで静止画(10 分間隔: 4,288×2,848 ピクセル)を撮影し、ビデオカメラにより定点からの動画を撮影した。

## 2.2.6 模型の仕様

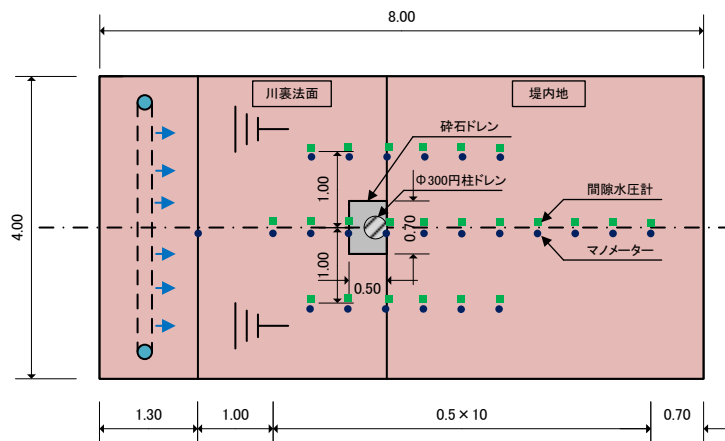
各ケースの模型の仕様を示す。

### (1) Case1 ( $\phi 300 \times 1$ 箇所)

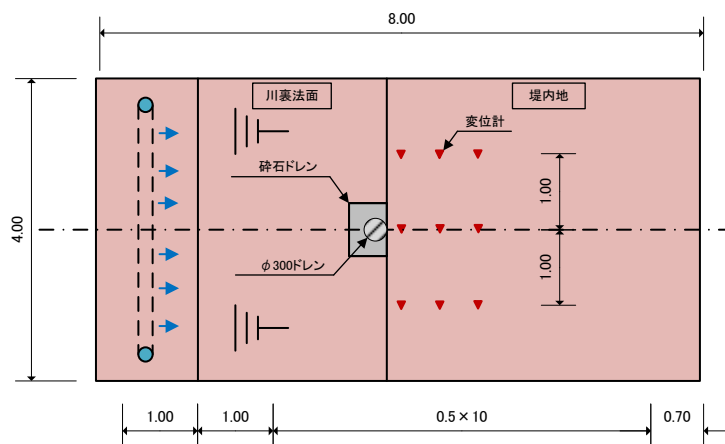
Case1 は、 $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻中央部に 1 箇所設置したケースである。図 2-15 に模型横断面、模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置), 模型平面(変位計位置)を示す。



(a) 模型横断面



(b) 模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置)

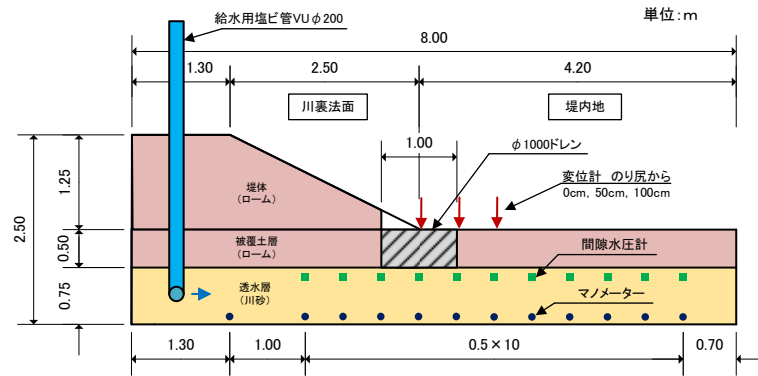


(c) 模型平面(変位計位置)

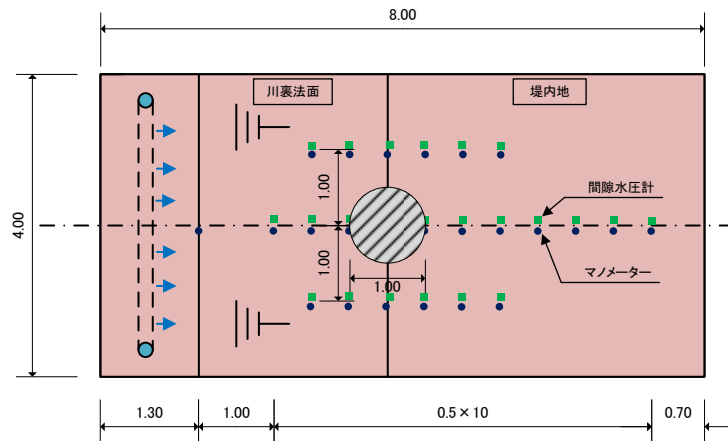
図 2-15 模型の仕様 (Case1)

(2) Case2 ( $\phi 1000 \times 1$  箇所)

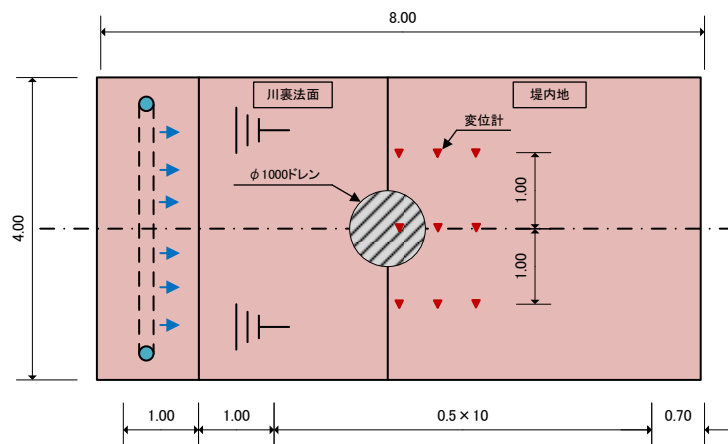
Case2 は、 $\phi 1000$  の円柱縦型ドレーンを法尻中央部に 1 箇所設置したケースである。図 2-16 に模型横断面、模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置), 模型平面(変位計位置)を示す。



(a) 模型横断面



(b) 模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置)

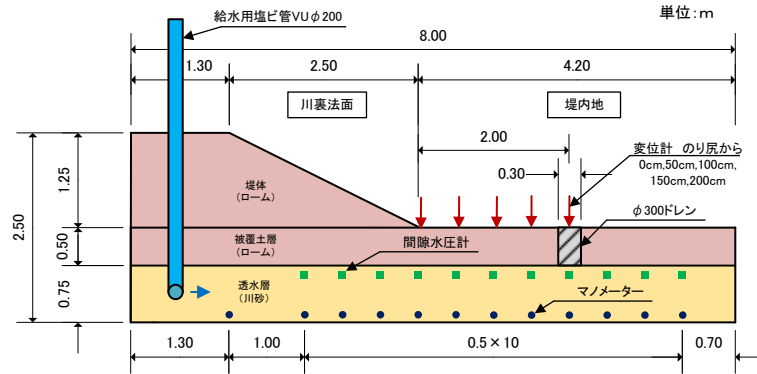


(c) 模型平面(変位計位置)

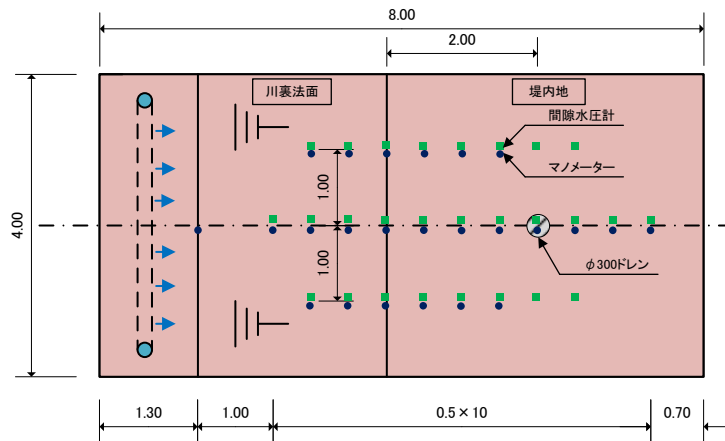
図 2-16 模型の仕様 (Case2)

(3) Case3 (φ 300×1 箇所, 堤内地側)

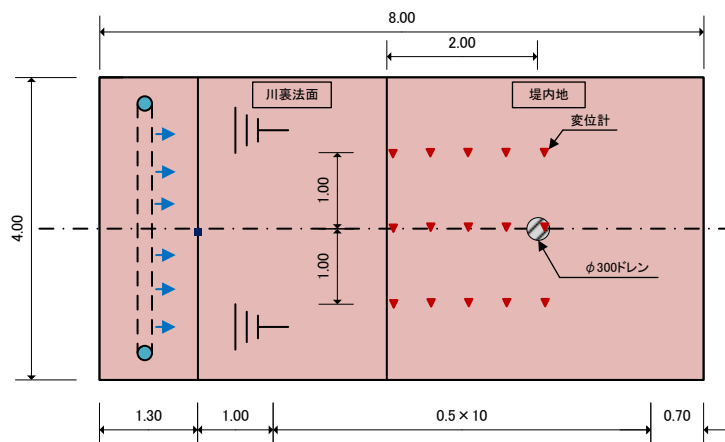
Case3 は, φ 300 の円柱縦型ドレーンを法尻から堤内地側に 2m 離れた位置に 1 箇所設置したケースである。図 2-17 に模型横断面, 模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置), 模型平面(変位計位置)を示す。



(a) 模型横断面



(b) 模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置)

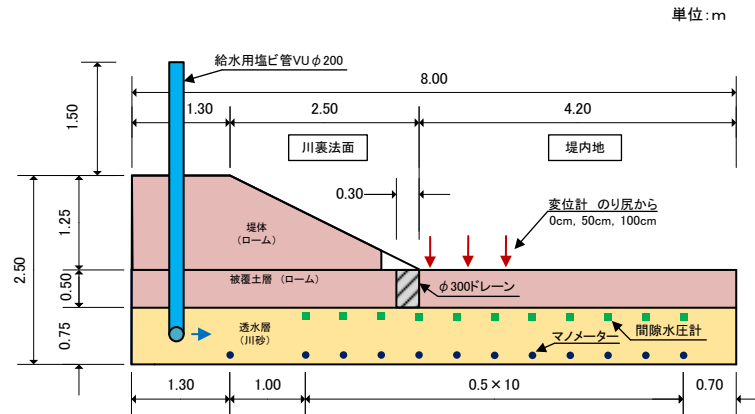


(c) 模型平面(変位計位置)

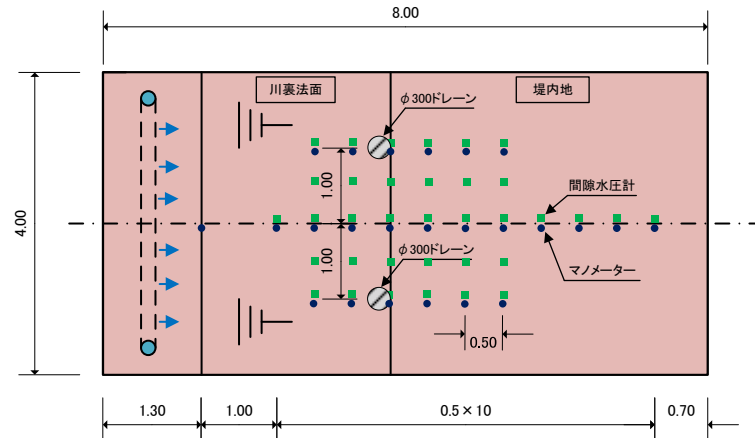
図 2-17 模型の仕様 (Case3)

(4) Case4 ( $\phi 300 \times 2$  箇所)

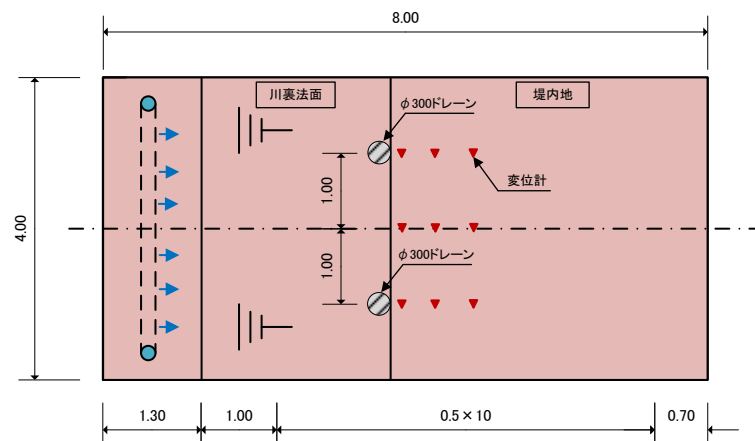
Case4 は、 $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻に 2 箇所設置したケースである。図 2-18 に模型横断面、模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置), 模型平面(変位計位置)を示す。



(a) 模型横断面



(b) 模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置)

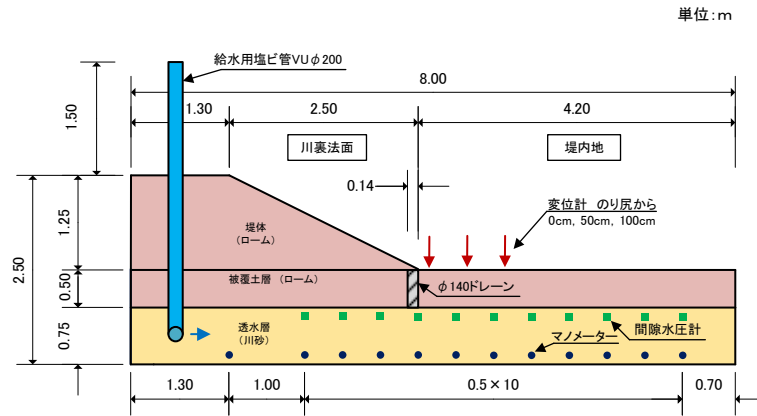


(c) 模型平面(変位計位置)

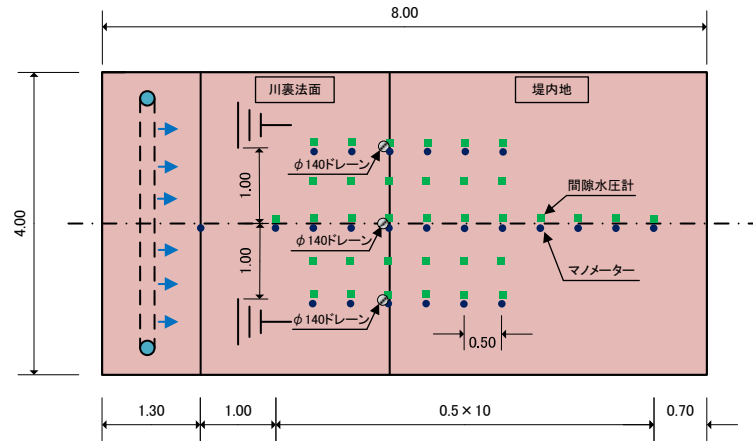
図 2-18 模型の仕様 (Case4)

(5) Case5 ( $\phi 140 \times 3$  箇所)

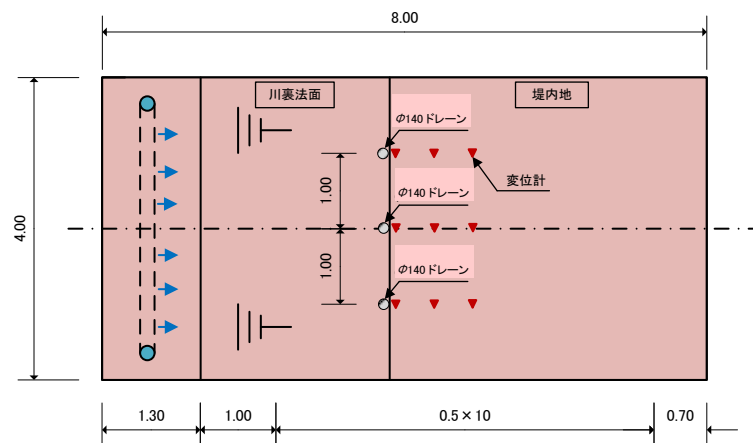
Case5 は、 $\phi 140$  の円柱縦型ドレーンを法尻に 3 箇所設置したケースである。図 2-19 に模型横断面、模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置), 模型平面(変位計位置)を示す。



(a) 模型横断面



(b) 模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置)

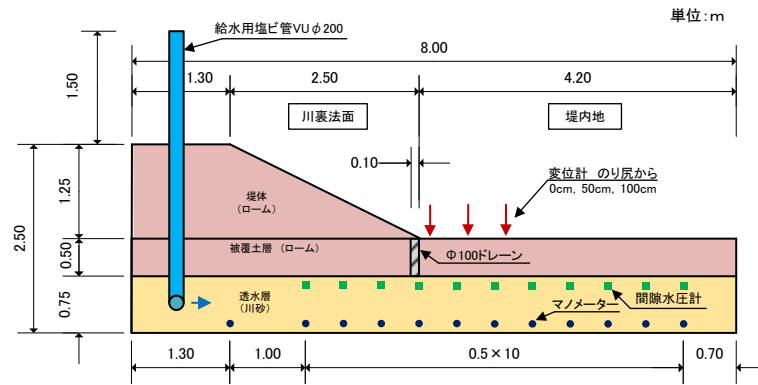


(c) 模型平面(変位計位置)

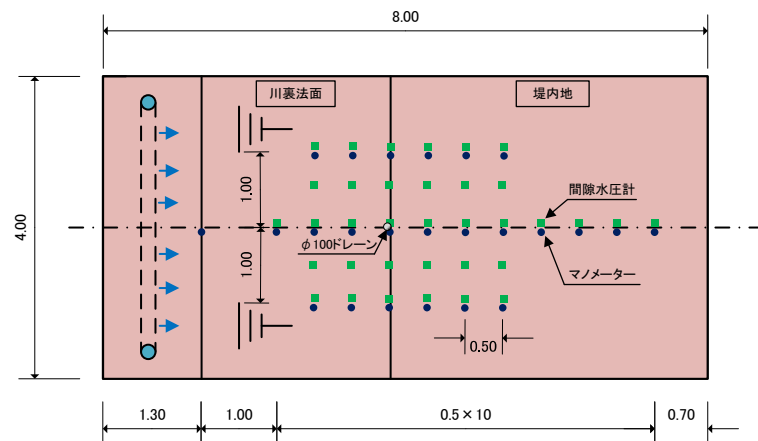
図 2-19 模型の仕様 (Case5)

(6) Case6 ( $\phi 100 \times 1$  箇所)

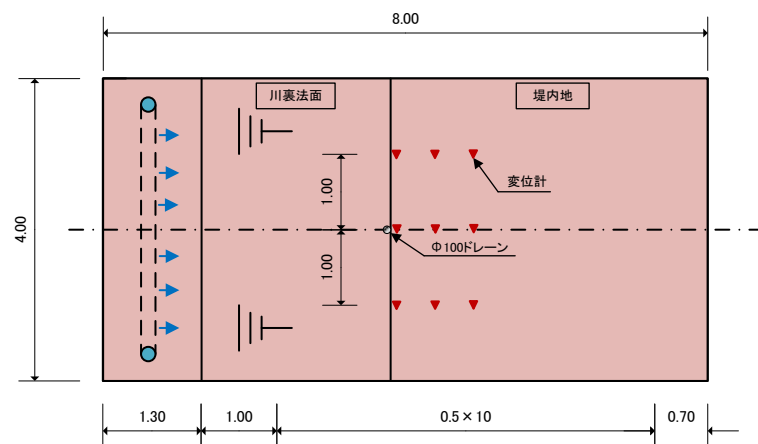
Case6 は、 $\phi 100$  の円柱縦型ドレーンを法尻に 1 箇所設置したケースである。また、ドレーンと地山の上に透水層から地表面まで人為的に空間を作ることで、ドレーン内に高い流速が発生しやすい構造とした。図 2-20 に模型横断面、模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置), 模型平面(変位計位置)を示す。



(a) 模型横断面



(b) 模型平面(間隙水圧計, マノメータ位置)



(c) 模型平面(変位計位置)

図 2-20 模型の仕様 (Case6)

## 2.2.7 模型作製

### (1) 土質材料

盤膨れし易い構造とするために、透水層に川砂、被覆土層及び堤体土にロームを使用した。土質材料の土粒子の密度試験結果及び突固めによる土の締固め試験結果を表 2-2、土の粒度試験結果の粒径加積曲線を図 2-21 に示す。また、透水試験の結果を表 2-3 に示す。土質試験結果の詳細については付録 B にまとめた。

### (2) 密度管理

透水層、被覆土層とも目標締固め度を 90% として作製した。締固め機械は、タンピングランマー (60kg 級) を使用した。透水層及び被覆土層の造成時の締固め度の測定結果を表 2-4 に示す。また、各測定値の詳細は付録 C にまとめた。

表 2-2 密度及び締固め試験結果

土質材料		ローム	川砂
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )		2.739	2.711
粒度構成	礫分 (%)	0.7	5.2
	砂分 (%)	17.8	90.7
	シルト・粘土分 (%)	81.5	4.1
締固め特性	最大乾燥密度 $\rho_{s\text{dmax}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.989	1.611
	最適含水比 $w_{\text{opt}}$ (%)	54.0	17.6

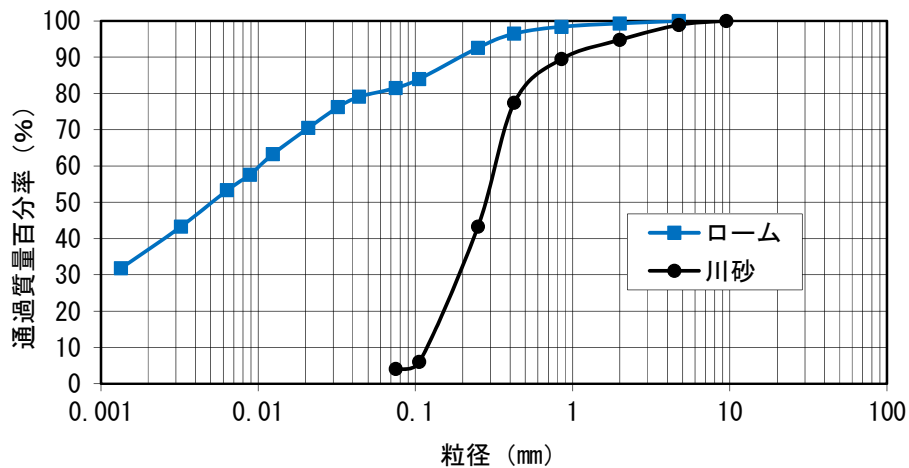


図 2-21 粒形加積曲線



表 2-3 透水試験結果

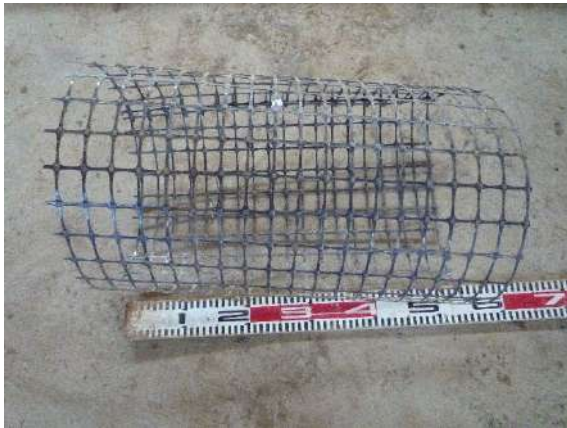
土質材料	ローム	川砂
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.702	2.706
湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.431	1.795
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.767	1.438
間隙比(試験後)	2.521	0.881
飽和度(%) (試験後)	92.7	76.1
透水係数(m/s)	1.93E-06	3.35E-04

表 2-4 透水層及び被覆土層の締固め度測定結果

ケース名	層別	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
Case1	透水層	10.7	1.615	1.459	90.5
	被覆土層	80.1	1.606	0.892	90.2
Case2	透水層	10.5	1.621	1.466	91.0
	被覆土層	67.7	1.506	0.898	90.5
Case3	透水層	10.8	1.618	1.461	90.7
	被覆土層	78.0	1.603	0.901	91.1
Case4	透水層	12.1	1.623	1.448	89.9
	被覆土層	60.9	1.506	0.936	94.6
Case5	透水層	12.4	1.642	1.460	90.6
	被覆土層	58.3	1.493	0.430	95.4
Case6	透水層	12.4	1.642	1.460	90.6
	被覆土層	59.1	1.496	0.940	95.1

### (3) 円柱縦型ドレーンの作製

被覆土層造成時に予めドレーンの径に合わせた型枠を設置し、被覆土層を造成した。被覆土層造成完了後、型枠を撤去し内部にドレーンを設置した。図 2-22 に円柱縦型ドレーンを示す。ドレーンの構造は、ジオグリッド(目合 28mm×38mm)を円筒形に固定し型枠とした。内側には目の細かい網を巻き、その内部には、充填材として単粒砕石(C40)を投入した。Case6 では、円柱縦ドレーンからの噴砂を再現するために、径を小さくするとともに、ジオグリッドと周辺被覆土層の間に意図的に隙間を設けた。



(a) ジオグリッド



(b) ジオグリッドの目の大きさ



(c) ジオグリッドに碎石を詰めた状態 (Case1)



(d) ドレーン (Case6)

図 2-22 円柱縦型ドレーン

## 2.3 実験方法

### 2.3.1 基礎地盤の飽和

実験に先立って、基盤層(透水層と被覆土層)を飽和状態とするため、事前に給水管内の水位を上げ 48 時間以上かけて被覆土層地表面の高さまで飽和を行った。被覆土層は透水性の低いロームを使用しているため、急激に水位を上昇させることで、透水層内の密閉された空気によって被覆土層が膨れ上がる可能性がある。そのため、水位上昇の初期段階では、給水管内の水位を底版から 0.75m 程度まで上げ透水層の飽和を行った。透水層の飽和を確認した後、給水管内の水位を底版から 1.25m の高さまで上げ、被覆土層表面まで飽和を行う 2 段階の水位上昇とした。透水層および被覆土層の飽和状態の確認は、透水層に設置したマンメータにより行った。

### 2.3.2 外力条件

透水層内に設置した給水管内の水位を上昇させて外力とした。給水管内の水位は、洪水時の河川水位の上昇を模擬し、図 2-23 に示すように経過時間とともに徐々に上げていった。実験開始時には被覆土層上面とし、最初の 2 時間までは 1 時間当たり 0.2m 上昇させ、その後 1 時間を経過する毎に 0.1m 上昇させた。

具体には、給水管内に設置したフロートレス水位制御装置の接触部分を1時間毎に手動で引き上げるこ  
とによって、水位を調整した。

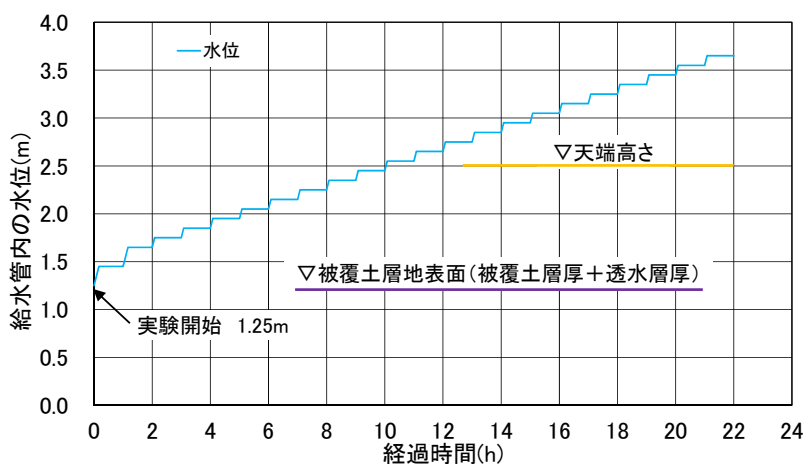


図 2-23 給水管内水位と経過時間

### 2.3.3 実験手順

堤内地側の地表面まで水位がある状態を実験開始の状態とし、外力条件に記述したとおり、給水管の水位を1時間毎に上げ、透水層への水圧を段階的に増加させた。

実験中、被覆土層下面に働く水圧(揚圧力)の変化を間隙水圧計により、地表面の鉛直変位を変位計により1分間隔で計測・記録した。また、1時間毎の給水管への給水量と土層から排出される排水量の変化を計測した。

実験の終了は、水位の上昇に伴い土層からの排水量が多くなり給水が追い付かなくなった場合、または模型が崩壊して給水または計測が不可能となった場合、Case5,6では盛土高さ(水位1.25m)に達した時点で実験終了とした。

## 2.4 実験結果

### 2.4.1 Case1 (φ300)の実験結果

#### (1) 実験結果の概要

Case1は、φ300の円柱縦型ドレーンを法尻部の中央に配置したケースである。図2-24(a)に6時間後の模型の状況を示す。水位上昇に伴い圧力水頭および堤内地側の鉛直変位量が増加し、18時間(水位2.1m)を過ぎた段階で、壁面付近で堤体が盛り上がるようにして模型が崩壊した(図2-24(b))。

水位を上げていく段階では、堤内地側に噴砂を伴う明らかな漏水は確認されなかったが、堤内地側地表面の所々で細かな漏水が確認された。

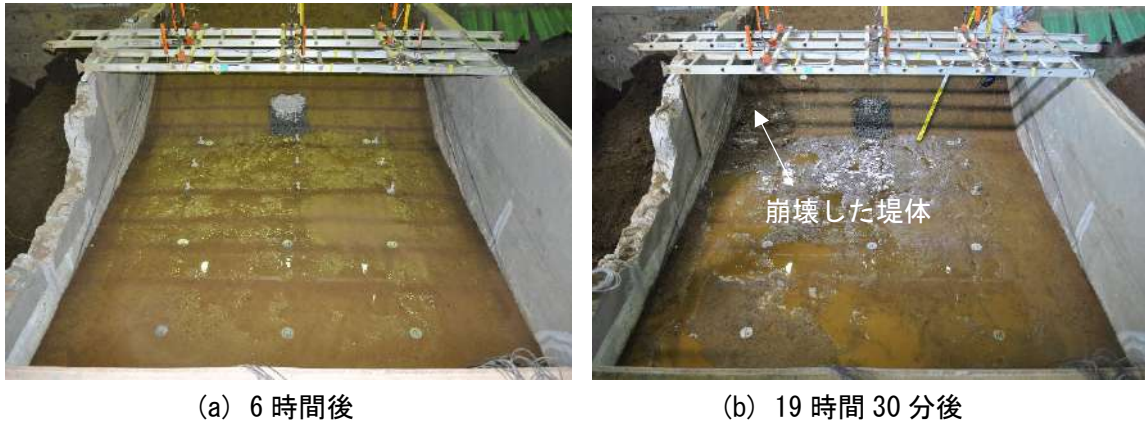


図 2-24 模型の状況 (Case1)

## (2) 被覆土層下面に働く水圧

図 2-25 に間隙水圧計の設置位置と計測器番号を示す。図 2-26 に計測された圧力水頭の時刻歴を示す。間隙水圧計の値は、実験開始より水位上昇に伴って階段状に右肩上がりに推移している。堤内地側では、緩やかに上昇しており、14 時間(水位 1.5m)を過ぎた辺りからほぼ一定の値となった。

図 2-27 に中央横断面の圧力水頭分布を示す。また、図 2-28 に中央+1m 横断面の圧力水頭分布を示す。ドレーンが設置されている中央横断面では、ドレーンの効果により圧力水頭が下がっていることが分かる。ドレーン中心より 1m 離れた中央+1m 横断面では、法尻部での圧力水頭の局所的な低下が見られず、ドレーンの効果が形からは分からない。

次に、堤防縦断方向の圧力水頭分布を図 2-29 に示す。断面は、法尻部を基準に-1m(川側)から堤内地側へ+1.5m まで 0.5m ピッチの 6 断面となっている。ドレーンが設置されている法尻部(同図(c))では、ドレーン設置箇所で局所的に圧力水頭が下がっていることが分かる。法尻部±0.5m の同図(b), (d)では、圧力水頭が中央部で若干低くなっているものの、法尻-1m, 法尻+1m, +1.5m では、ドレーンの効果が形からは分からない。

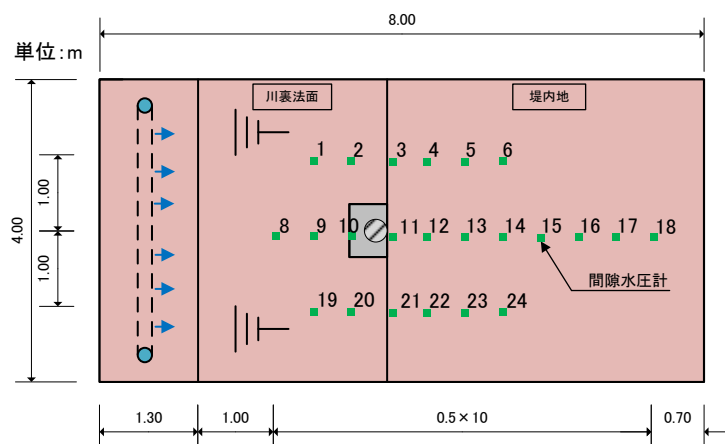


図 2-25 間隙水圧計配置位置図 (Case1)

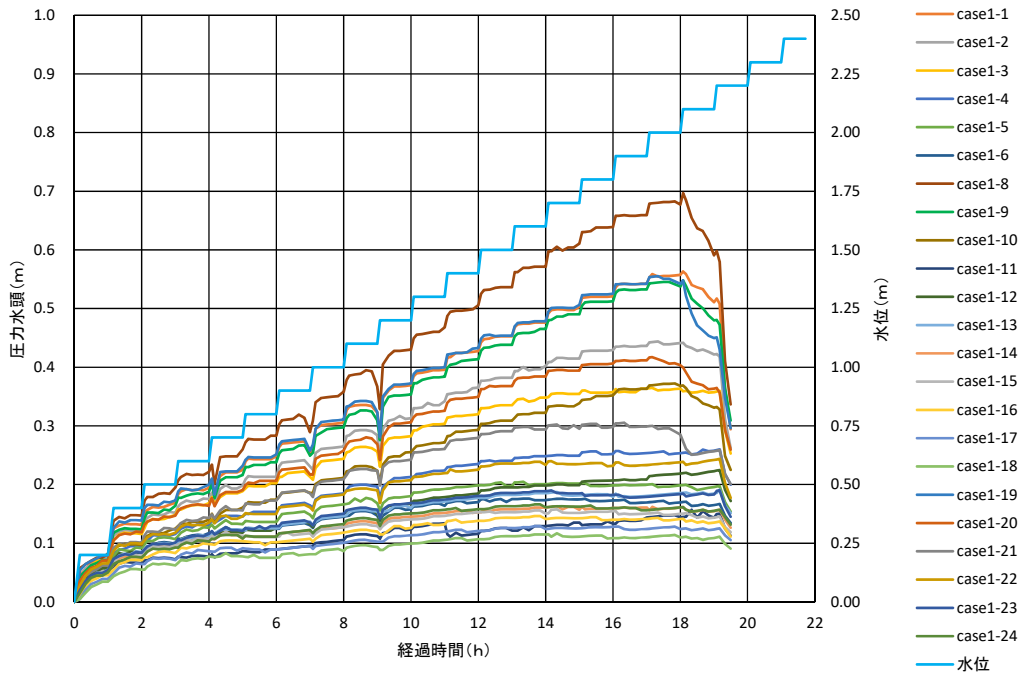


図 2-26 圧力水頭の時刻歴 (Case1)

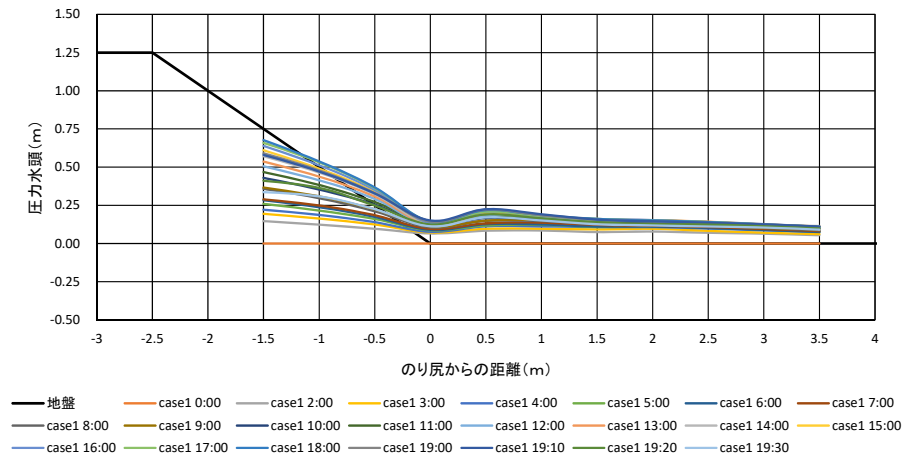


図 2-27 中央横断面の圧力水頭分布 (Case1)

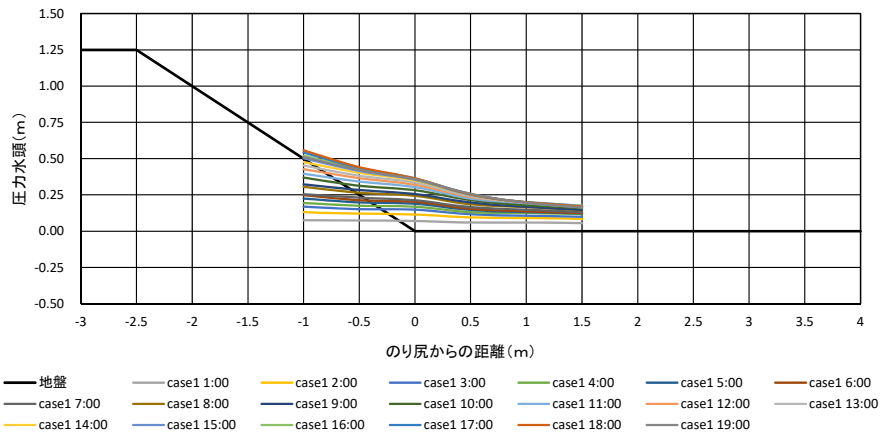


図 2-28 中央+1m 横断面の圧力水頭分布 (Case1)



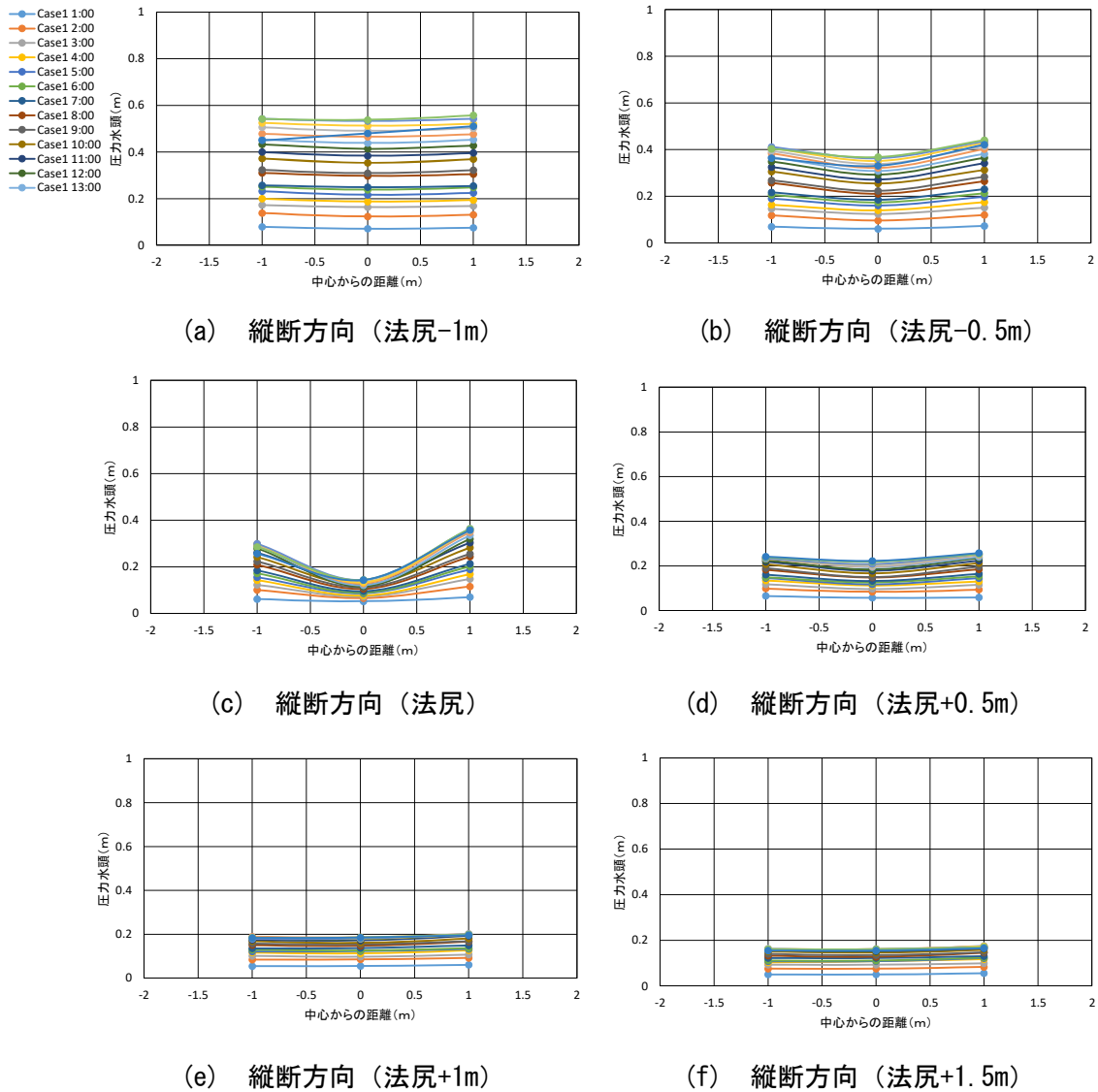


図 2-29 縦断方向の圧力水頭分布 (Case1)

### (3) 被覆土層表面の鉛直変位

図 2-30 に変位計の位置と計測器番号を示す。図 2-31 に計測された鉛直変位を示す。

4 時間(水位 0.7m)を過ぎた辺りで急に増加した場所があり、図 2-26 の 4 時間過ぎの一時的な水圧低下と対応している。その後、鉛直変位は、水位の上昇に従い、全体的に増加した。

### (4) 給水量と排水量

計測を行った給水量と排水量の時刻歴を図 2-32 に示す。水位上昇に伴い、給水量、排水量とも増加傾向である。給水量と排水量は、同じように増加しているが直線的な増加ではなく、曲線的に増加し 16 時間(水位 1.7m)を過ぎた辺りから増加の割合が大きくなっている。

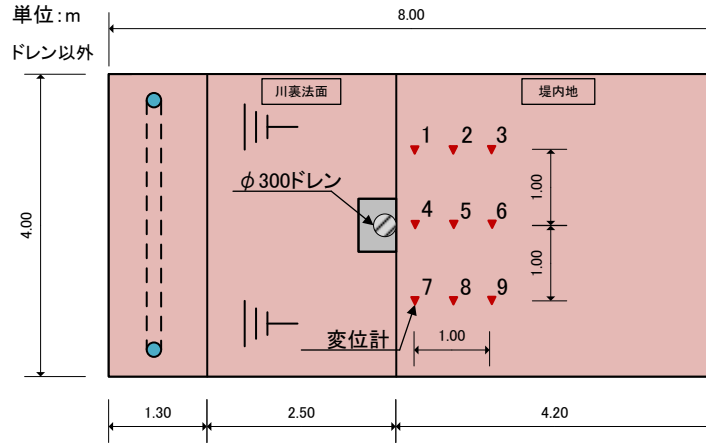


図 2-30 変位計配置位置図 (Case1)

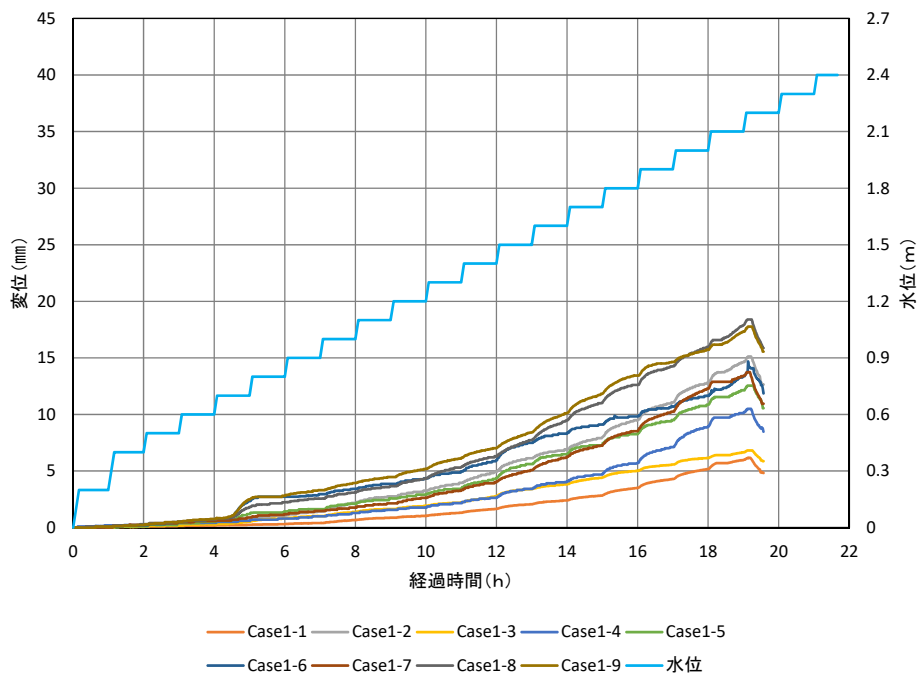


図 2-31 鉛直変位の時刻歴 (Case1)

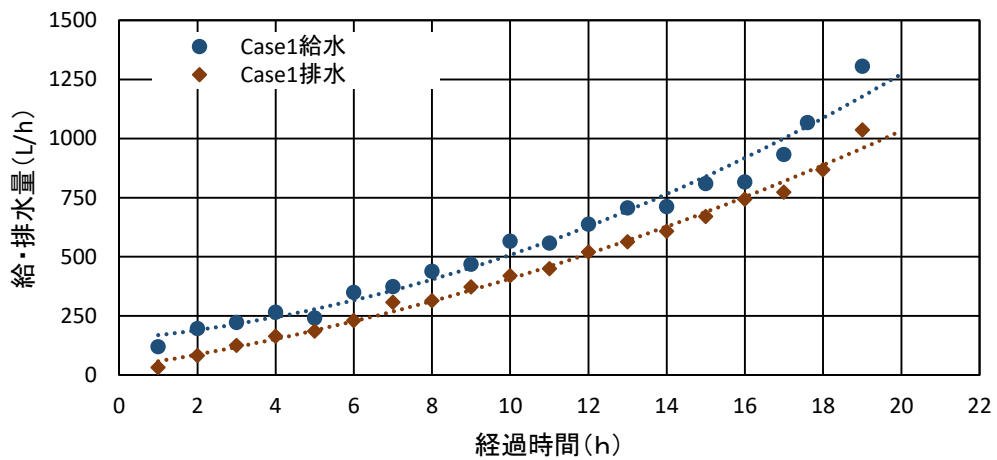


図 2-32 給水量と排水量の時刻歴 (Case1)

## 2.4.2 Case2 ( $\phi 1000$ ) の実験結果

### (1) 実験結果の概要

Case2 は、 $\phi 1000$  の円柱縦型ドレーンを法尻部の中央に配置したケースである。

図 2-33 (a) に 6 時間後の模型の状況を示す。12 時間(水位 1.5m)を過ぎた頃から、徐々に堤内地盤の鉛直変位が増加し始め、19 時間(水位 2.2m)を過ぎて変位が急激に増加した。21 時間(水位 2.3m)で堤体部が盛り上がるようにして模型が崩壊した(図 2-33 (b))。

水位を上げていく段階では、堤内地側に噴砂を伴う明らかな漏水は確認されなかったが、堤内地側地表面の所々で細かな漏水が確認された。

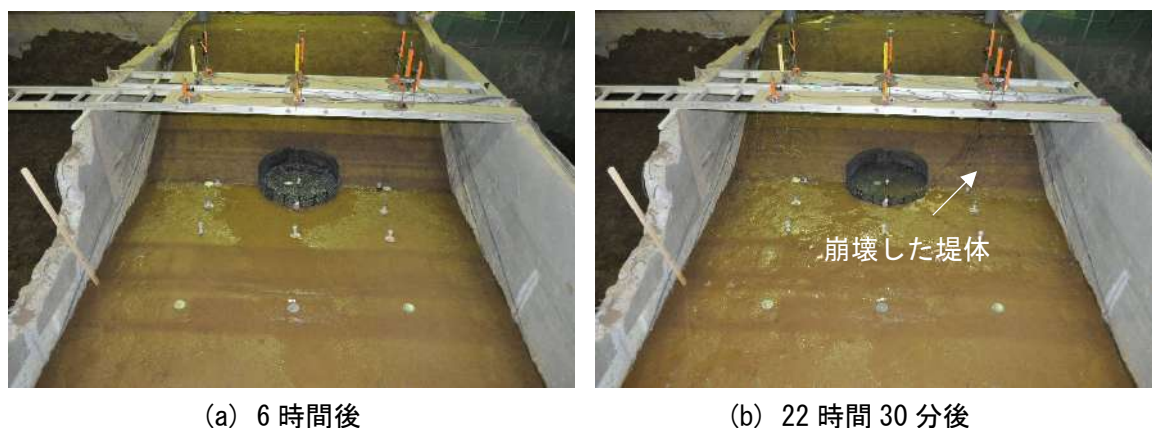


図 2-33 模型の状況 (Case2)

### (2) 被覆土層下面に働く水圧

図 2-34 に間隙水圧計の設置位置と計測器番号を示す。図 2-35 に計測された圧力水頭の時刻歴を示す。間隙水圧計の値は、実験開始より水位上昇に伴って階段状に右肩上がりに推移しているが、ドレーン直下の計測値は、実験開始からほとんど変わっていない。法面下に比べ堤内地側では、緩やかに上昇し、17 時間(水位 2.2m)を過ぎた辺りからほぼ一定となった。

図 2-36 に中央横断面の圧力水頭分布を示す。図 2-37 に中央+1m 横断面の圧力水頭分布を示す。ドレーンが設置されている中央横断面では、ドレーンの効果により法尻部の圧力水頭が下がっていることが分かる。ドレーン中心より 1m 離れた中央+1m 横断面では、法尻部での圧力水頭の局所的な低下が見られず、ドレーンの効果が形からは分からない。

次に、堤防縦断方向の圧力水頭分布を図 2-38 に示す。断面は、法尻部を基準に-1m(川側)から堤内地側へ 1.5m まで 0.5m ピッチの 6 断面となっている。ドレーンが設置されている法尻部同図 (c) 及び法尻部 $\pm 0.5m$  断面の同図 (b) 及び同図 (d) では、中心部(ドレーン設置箇所)で急激に圧力水頭が下がっているのが分かる。それ以外の法尻-1m、法尻+1m、+1.5m では、ドレーンの効果による圧力低下が若干見られる。



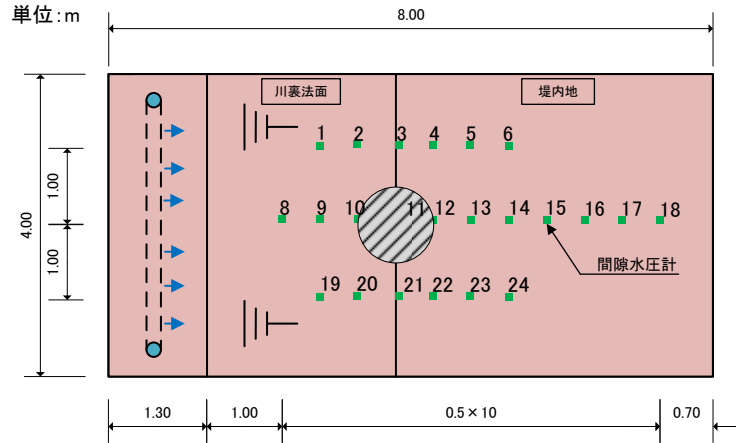


図 2-34 間隙水圧計配置位置図 (Case2)

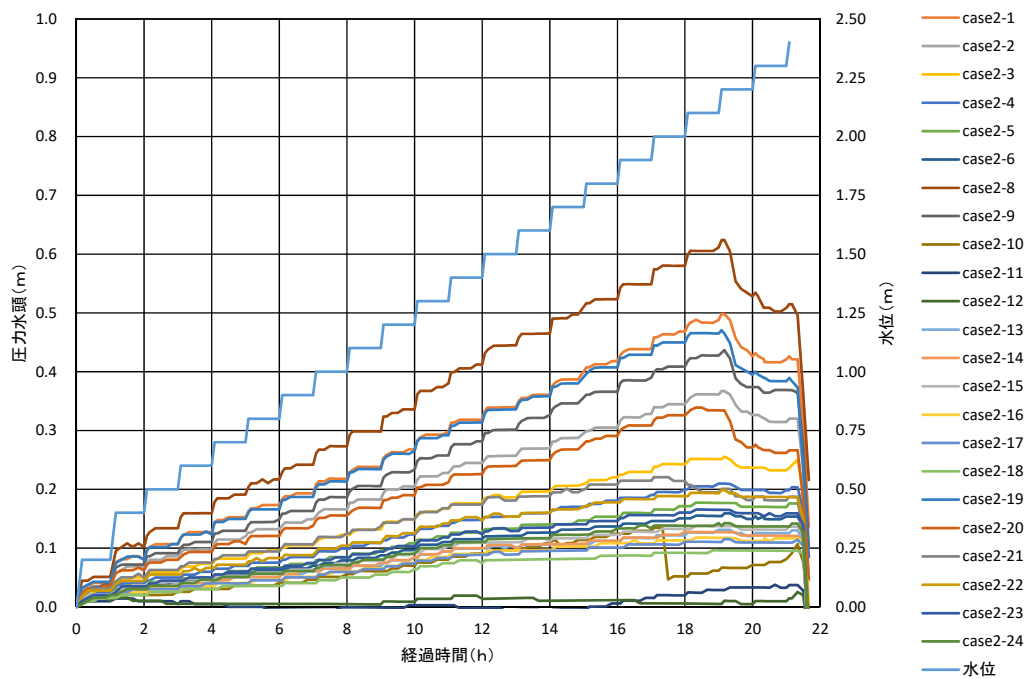


図 2-35 圧力水頭の時刻歴 (Case2)

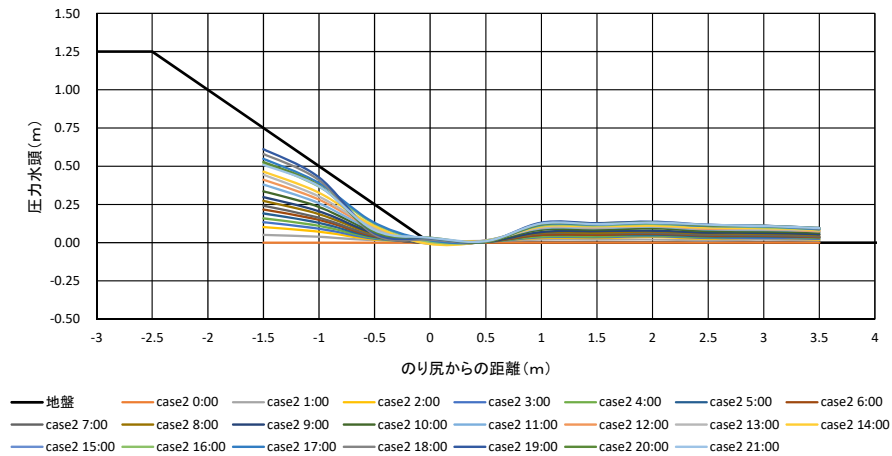


図 2-36 中央横断面の圧力水頭分布 (Case2)

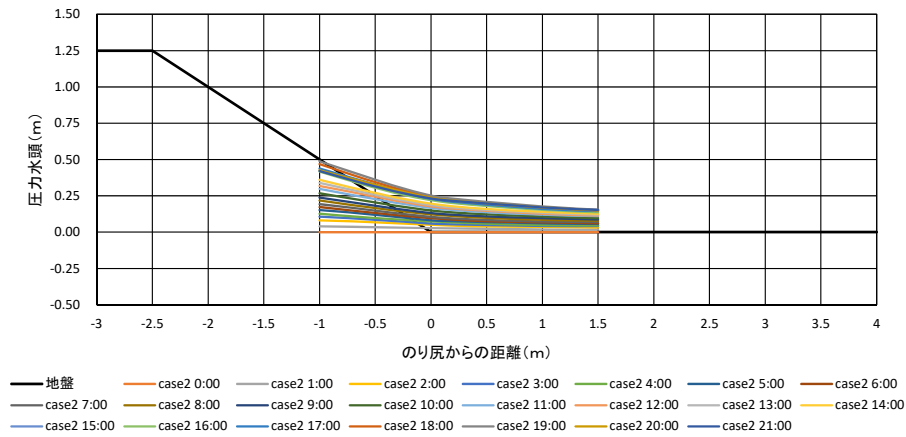


図 2-37 中央+1m 横断面の圧力水頭分布 (Case2)

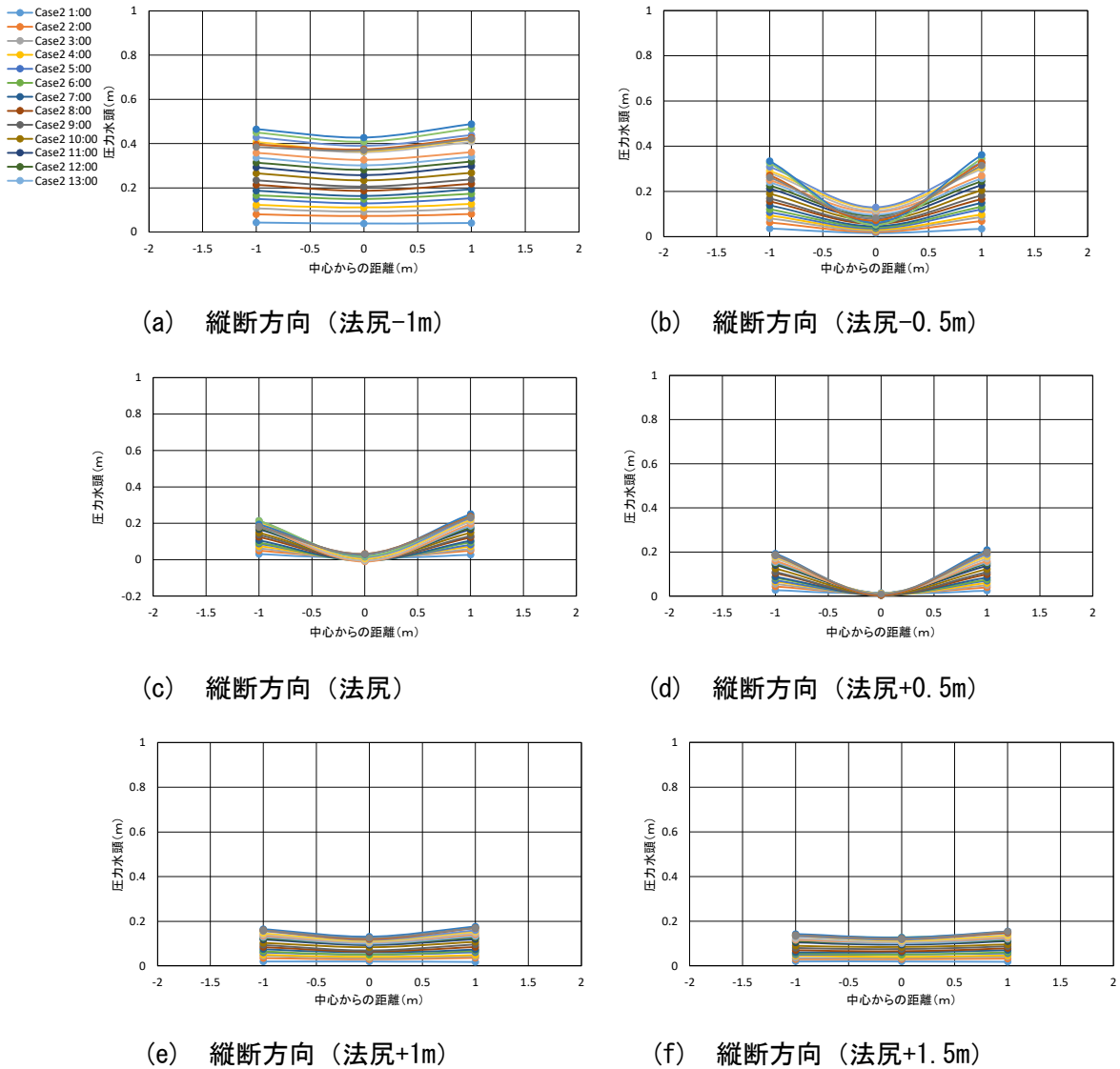


図 2-38 縦断方向の圧力水頭分布 (Case2)

### (3) 被覆土層表面の鉛直変位

図 2-39 に変位計の位置と計測器番号を示す。図 2-40 に計測された鉛直変位を示す。

12 時間まで鉛直変位はほぼ 0 であったが、12 時間以降徐々に増加し始め、16 時間～18 時間から急激に増加した。

### (4) 給水量と排水量

計測を行った給水量と排水量の時刻歴を図 2-41 に示す。水位上昇に伴い、給水量、排水量とも増加傾向である。時間に対して(≒水位に対して)、ほぼ直線的に増加している。

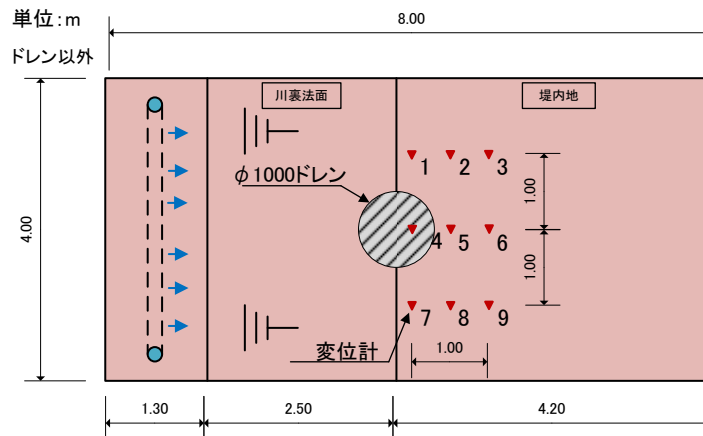


図 2-39 変位計配置位置図 (Case2, 再掲)

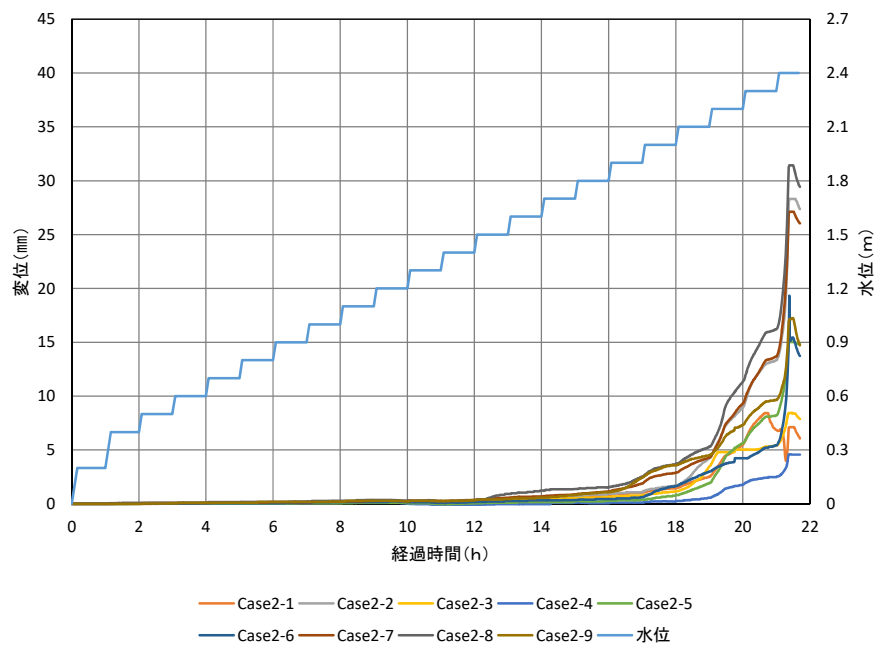


図 2-40 鉛直変位の時刻歴 (Case2)

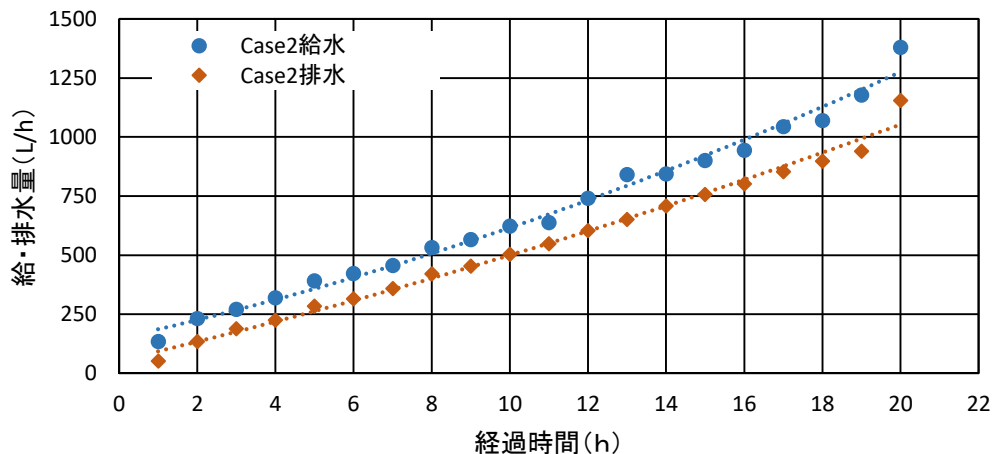


図 2-41 給水量と排水量の時刻歴 (Case2)

### 2.4.3 Case3 (φ 300 堤内地側) の実験結果

#### (1) 実験結果の概要

Case3 は、φ 300 の円柱縦型ドレーンを法尻から堤内地側に 2m 離して配置したケースである。

図 2-42 (a) に 6 時間後の模型の状況を示す。水位を 2.0m に上げた 18 時間後に、堤体部 (給水設備周辺) が盛り上がり、模型が崩壊して終了した (図 2-42 (b))。

水位を上げていく段階では、堤内地側に噴砂を伴う明らかな漏水は確認されなかったが、法尻部および堤内地側地表面の所々で細かな漏水が確認された。



(a) 6 時間後

(b) 18 時間後

図 2-42 模型の状況 (Case3)

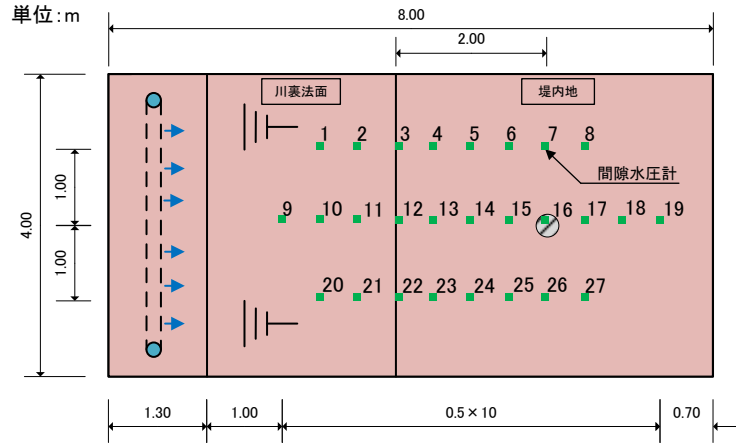


図 2-43 間隙水圧計配置位置図 (Case3)

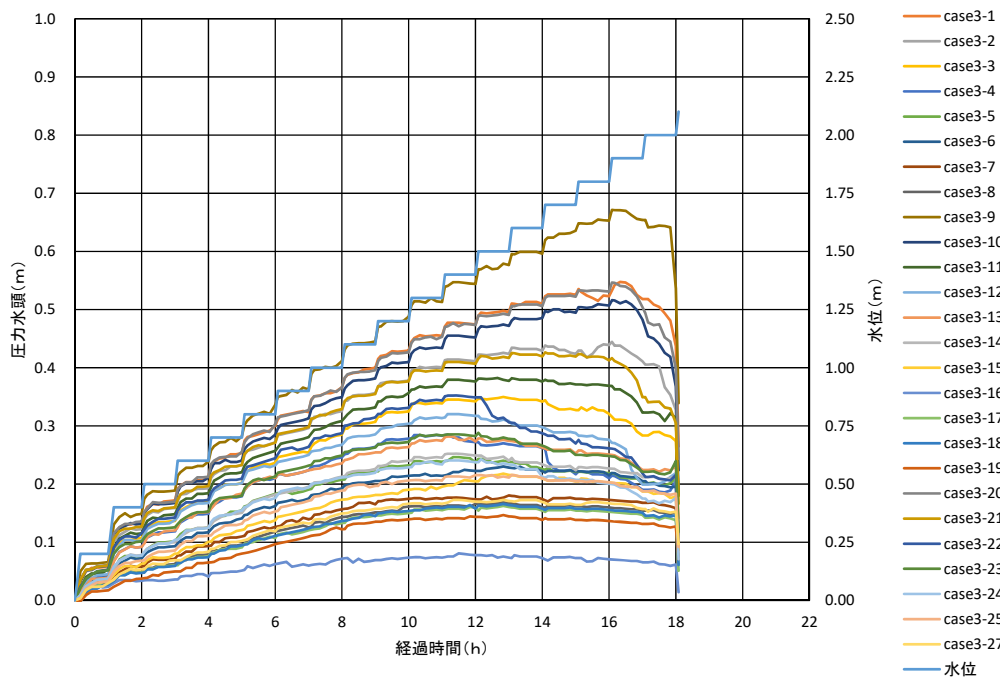


図 2-44 圧力水頭の時刻歴 (Case3)

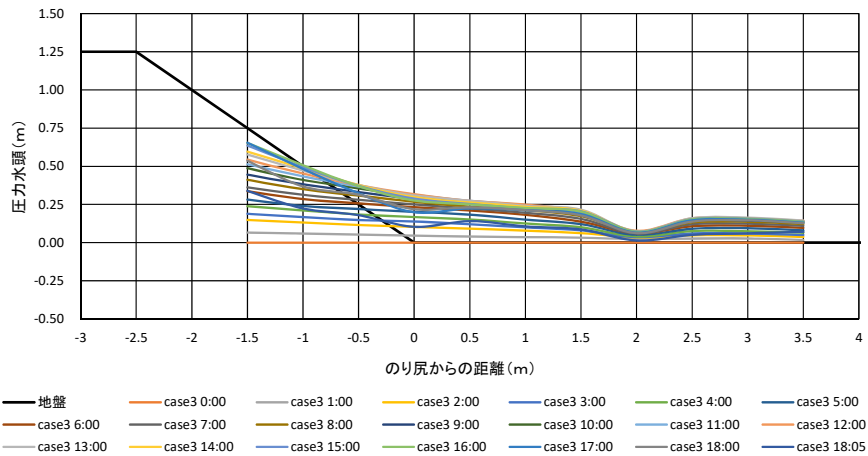


図 2-45 中央横断面の圧力水頭分布 (Case3)

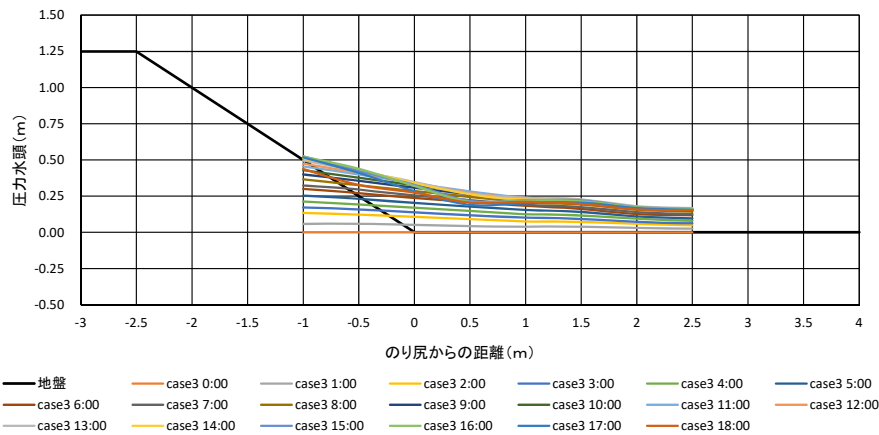


図 2-46 中央+1m 横断面の圧力水頭分布 (Case3)

## (2) 被覆土層下面に働く水圧

図 2-43 に間隙水圧計の設置位置と計測器番号を示す。図 2-44 に計測された圧力水頭の時刻歴を示す。堤内地側では比較的緩やかに上昇しているものが多いが、経過時間 12 時間(水位 1.4m)を過ぎた辺りからほぼ一定となった。その後、法尻から堤内地側へ 1m までの範囲で減少傾向となっている。中にはかなり勢いで低下しているものもあるため、間隙水圧計近傍での漏水の発生・拡大が推測される。

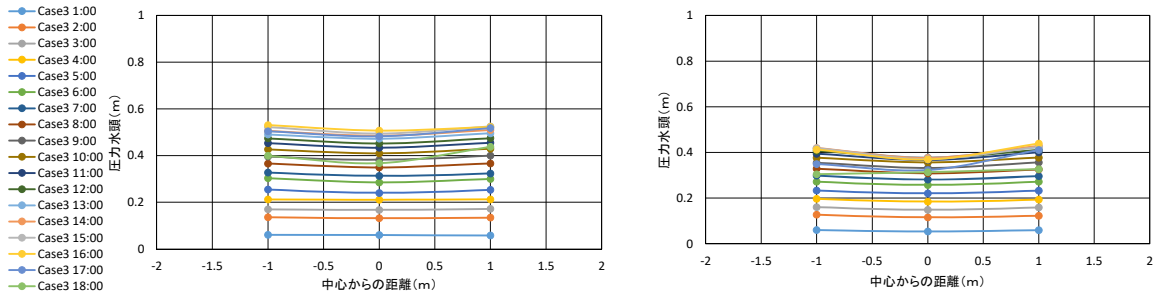
中央横断面の圧力水頭分布を図 2-45 に示す。図 2-46 に中央+1m 横断面の圧力水頭分布を示す。ドレーンを設置した法尻から 2m 離れた位置でドレーンの効果により圧力水頭が下がっていることが分かる。また、ドレーン中心より 1m 離れた中央+1m 断面でも、ドレーン設置位置で圧力水頭の若干の低下が見られる。

次に、堤防縦断方向の圧力水頭分布を図 2-47 に示す。断面は、法尻部を基準に-1m(川側)から堤内地側へ+2.5m まで 0.5m ピッチの 8 断面となっている。ドレーンが設置されている箇所は、法尻から 2m 堤内地側へ離れた同図 (g) であり、中心部(ドレーン設置箇所)で圧力水頭が下がっているのが分かる。それ以外の箇所では、縦断方向に圧力水頭の変化は見られない。

## (3) 被覆土層表面の鉛直変位

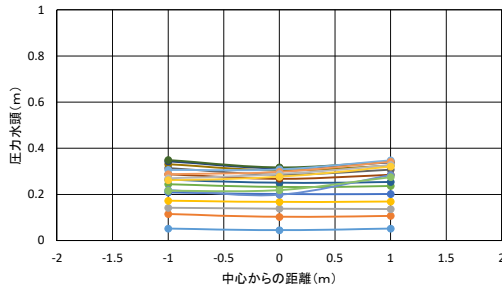
図 2-48 に変位計の位置と計測器番号を示す。図 2-49 に計測された鉛直変位の変化を示す。

6 時間(水位 0.8m)後から、全体的に鉛直変位量が増加し始めている。変位量が大きい箇所は、法尻から 0.5m~1.0m の範囲であり、ドレーン付近の変位計 No.5, 10 は比較的緩やかに変位が増加している。

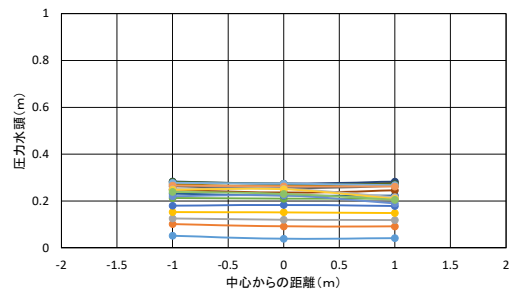


(a) 縦断方向 (法尻-1m)

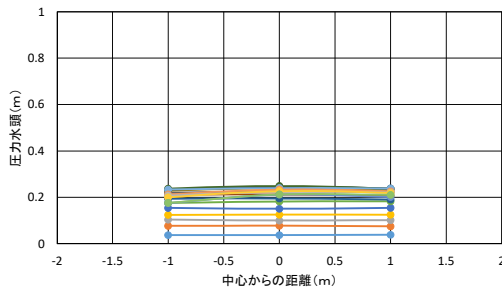
(b) 縦断方向 (法尻-0.5m)



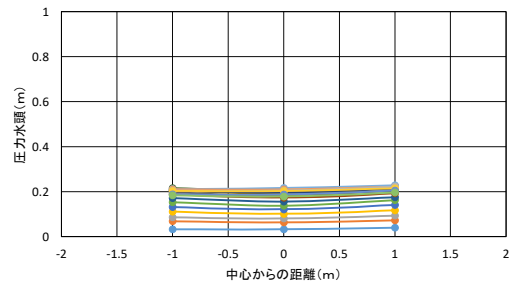
(c) 縦断方向 (法尻)



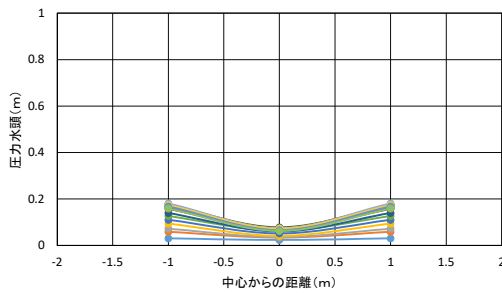
(d) 縦断方向 (法尻+0.5m)



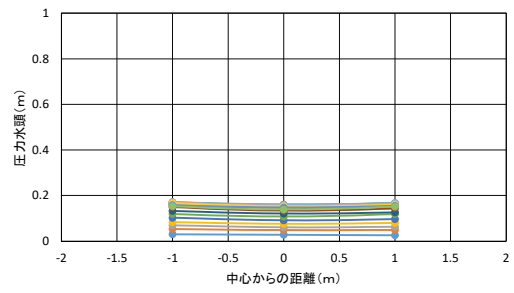
(e) 縦断方向 (法尻+1m)



(f) 縦断方向 (法尻+1.5m)



(g) 縦断方向 (法尻+2.0m)



(h) 縦断方向 (法尻+2.5m)

図 2-47 縦断方向の圧力水頭分布 (Case3)

#### (4) 給水量と排水量

計測を行った給水量と排水量の時刻歴を図 2-50 に示す。水位上昇に伴い、給水量、排水量とも増加傾向である。14 時間(水位 1.7m)から、排水量が増大する傾向にある。

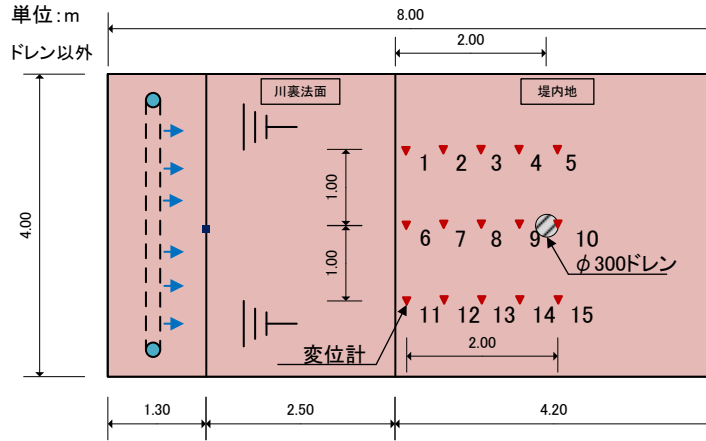


図 2-48 変位計配置位置図 (Case3)

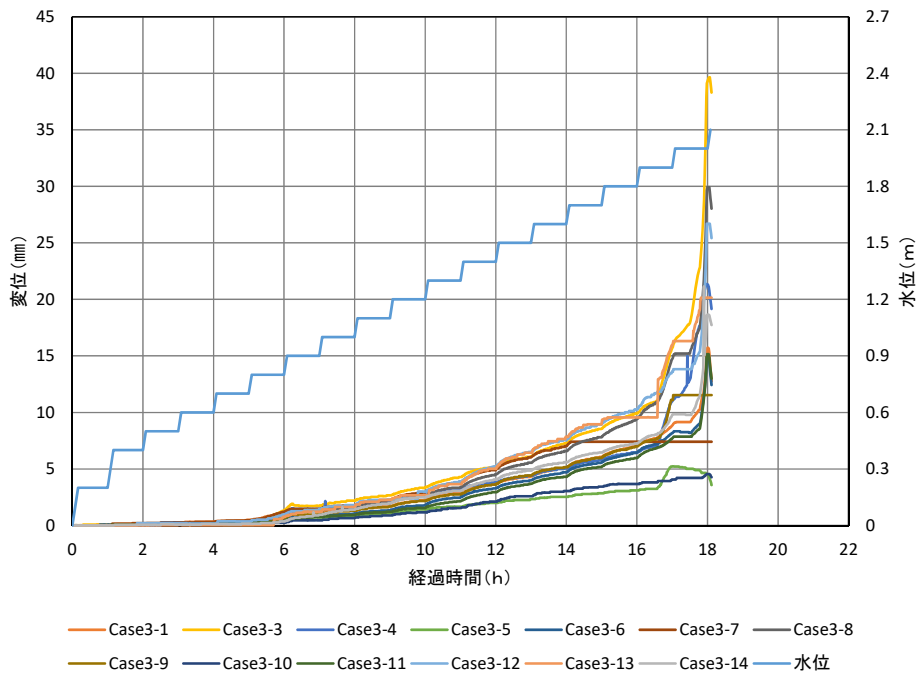


図 2-49 鉛直変位の時刻歴 (Case3)

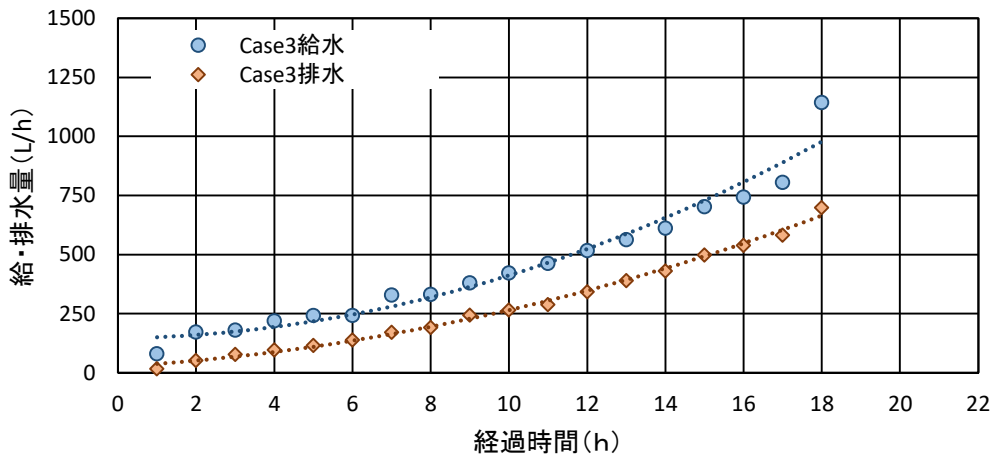


図 2-50 給水量と排水量の時刻歴 (Case3)



## 2.4.4 Case4 (φ 300×2 箇所) の実験結果

### (1) 実験結果の概要

Case4 は、φ 300 の円柱縦型ドレーンを法尻部に 2 箇所配置したケースである。図 2-51 に 6 時間後の模型の状況を示す。水位上昇に伴い圧力水頭も増加したが、7 時間 40 分後(水位 1.0m)に北側ドレーンからの排水が濁り始めた。その後、8 時間 47 分後(水位 1.1m)からドレーンの排水に砂が混じり始め、ドレーン地表面に砂が堆積し始めた。砂の噴出後も水位を上げ続けた結果、ドレーンからの排水量が極端に減少し、法尻から 1.5m 離れた堤内地側地盤が膨れはじめた。9 時間 41 分(水位 1.2m)後に、膨れ上がった箇所中央部から噴砂を伴った漏水が発生した。



図 2-51 6 時間後の模型の状況 (Case4)

### (2) 被覆土層下面に働く水圧

図 2-52 に間隙水圧計の設置位置と計測器番号を示す。図 2-53 に計測された圧力水頭の時刻歴を示す。間隙水圧計の値は、実験開始より水位上昇に伴って階段状に右肩上がりに推移しているが、ドレーン設置位置(法尻)より堤内地側は比較的緩やかに上昇している。7 時間(水位 1.0m)を過ぎた辺りで、圧力水頭が低下している。この時点は、ドレーンからの排水が濁り始めた時刻と一致する。圧力水頭の急激な低下は、中央+1m 断面の堤体直下の間隙水圧計 No. 1(濁り水が出た北側のドレーンに比較的近い)で最も大きい。8 時間(水位 1.1m)を過ぎた辺りから、今度は増加に転じている。この圧力の増加は、ドレーン内を透水層の砂を含む水が通過し目詰まりを起こし、透水層内部の圧力が高まったためであると推察される。その後、堤内地側の法尻から 1.5m 離れた中央部で地表面が膨れ上がり、その中央部から噴砂を伴った漏水が発生した。盤膨れが発生した 9 時間 30 分後(水位 1.2m)に圧力水頭が一気に低下している。

図 2-54 に中央横断面の圧力水頭分布(中央断面)を示す。図 2-55 には中央+0.5m 横断面、図 2-56 に中央+1.0m 横断面の結果を示す。ドレーンがない中央断面では、9 時間後に一気に圧力水頭が増加していることが分かる。ドレーンが設置されている中央+1.0m 断面では、法尻部で圧力水頭の低減が若干みられる。中央+0.5m の断面も他の断面同様に 9 時間後に圧力水頭が一気に増加している。

次に、堤防縦断方向の圧力水頭分布を図 2-57 に示す。断面の位置は、法尻部を基準に-1m(川側)から堤内地側へ+1.5m まで 0.5m ピッチとなっている。同図(a)の法尻-1m 断面では、水位上昇に伴い徐々に圧力水頭も増加しているが、8 時間(水位 1.1m)後に中心からの距離+1m の箇所で極端に圧力水頭が低下している。同図(b)の法尻+0.5m 断面では、水位の上昇に伴い中心から+0.5m の箇所で圧力水頭の低下が見

られる。法尻部の断面では、水位上昇に伴い圧力水頭も増加するが、ドレーン設置箇所である中心からの距離が+1.0m, -1.0mの地点で圧力水頭が低下しているが左右対称ではない。一方、堤内地側断面の同図(d)～(f)は、盤膨れ発生後の10時間後に中心からの距離-0.5m, -1mの箇所で圧力水頭が一気に低下している。この箇所は、盤膨れ発生箇所とも一致する。

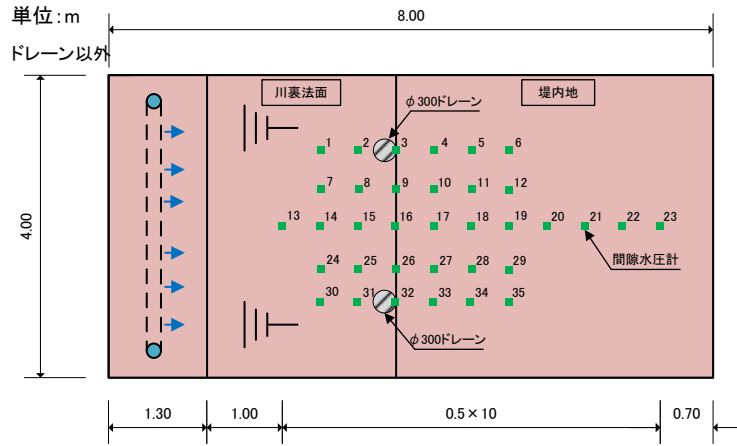


図 2-52 間隙水圧計配置位置図 (Case4)

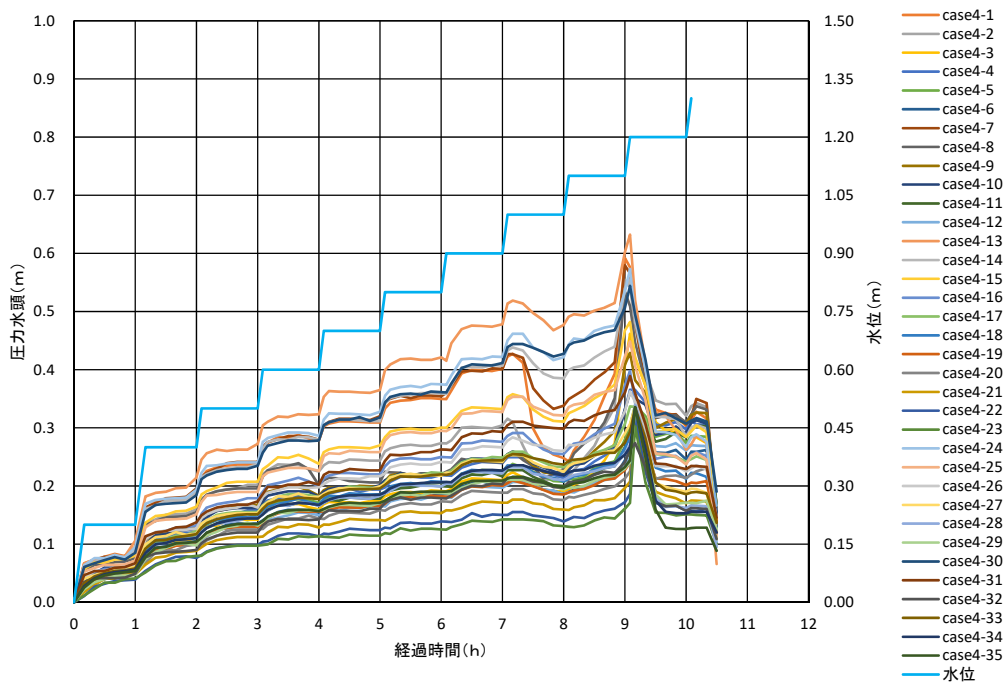


図 2-53 圧力水頭の時刻歴 (Case4)

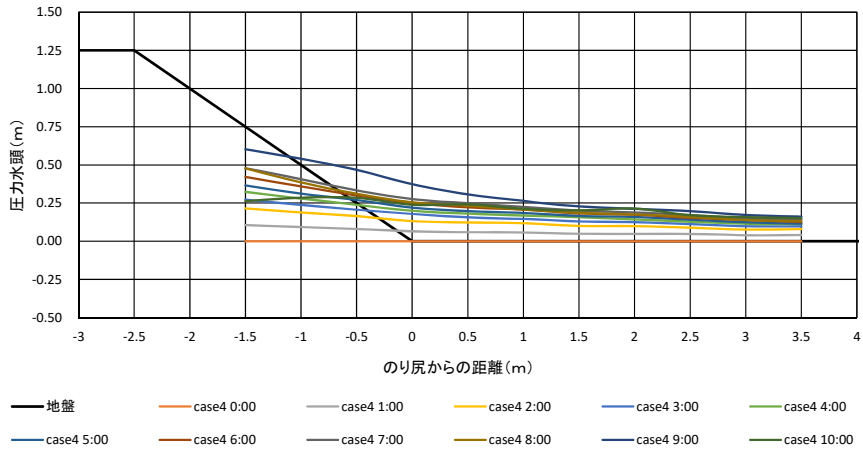


図 2-54 中央横断面の圧力水頭分布 (Case4)

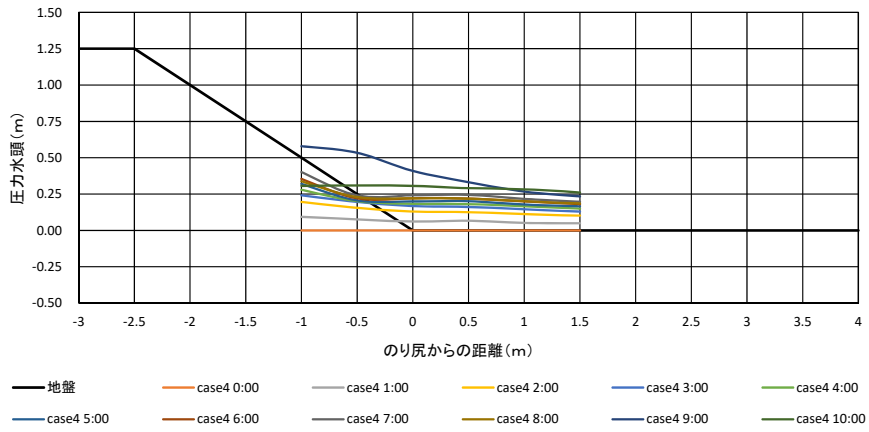


図 2-55 中央+0.5m 横断面の圧力水頭分布 (Case4)

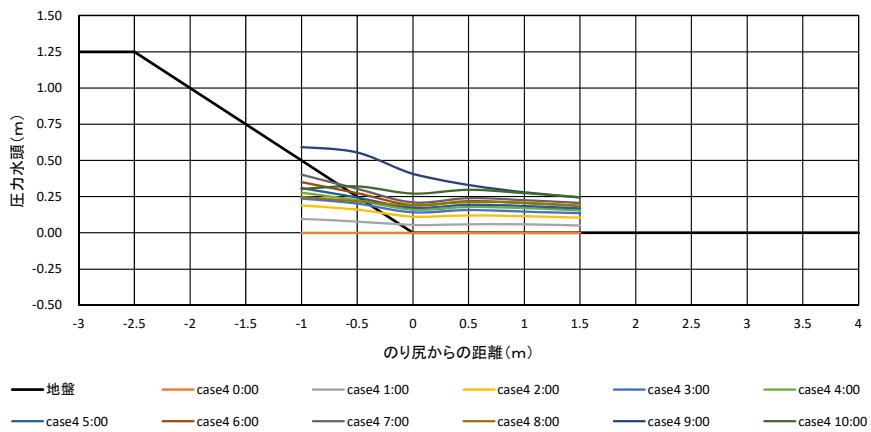
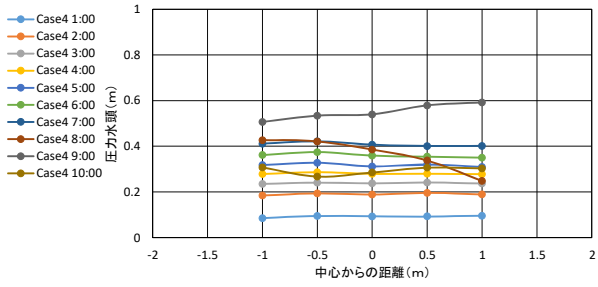
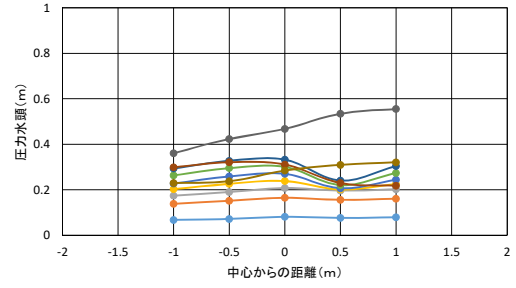


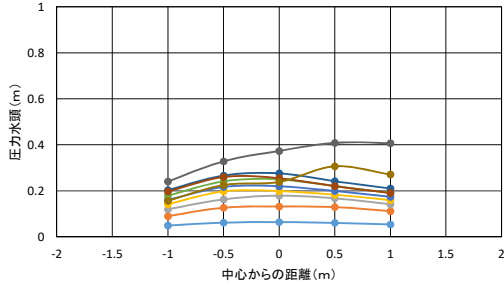
図 2-56 中央+1.0m 横断面の圧力水頭分布 (Case4)



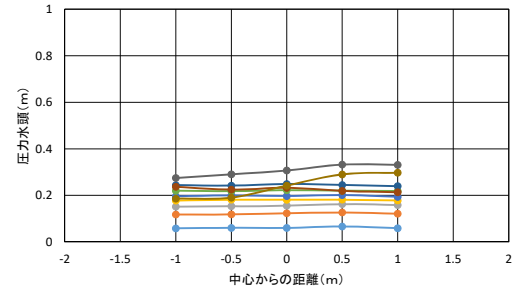
(a) 縦断方向 (法尻-1m)



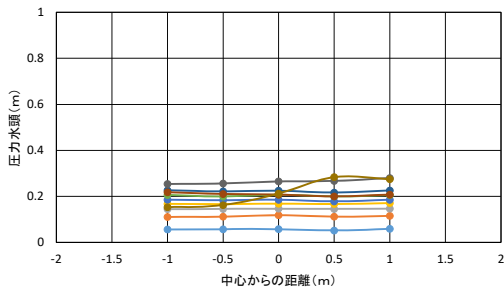
(b) 縦断方向 (法尻-0.5m)



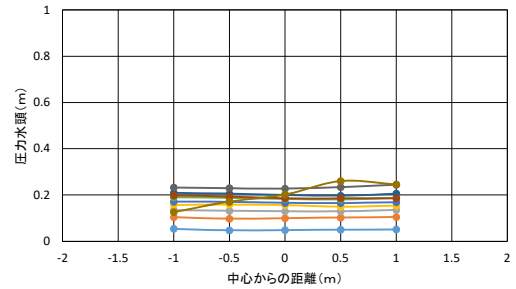
(c) 縦断方向 (法尻)



(d) 縦断方向 (法尻+0.5m)



(e) 縦断方向 (法尻+1m)



(f) 縦断方向 (法尻+1.5m)

図 2-57 縦断方向の圧力水頭分布 (Case4)

### (3) 被覆土層表面の鉛直変位

図 2-58 に変位計の位置と計測器番号を示す。図 2-59 に計測された鉛直変位の変化を示す。7 時間(水位 1.0m)後から、部分的に鉛直変位が増加し始め、9 時間後には全体的に急増した。

### (4) 給水量と排水量

計測を行った給水量と排水量の時刻歴を図 2-60 に示す。水位上昇に伴い、給水量、排水量とも増加傾向である。給水量には、目詰まりの状況に対応し、若干の増減が見られる。

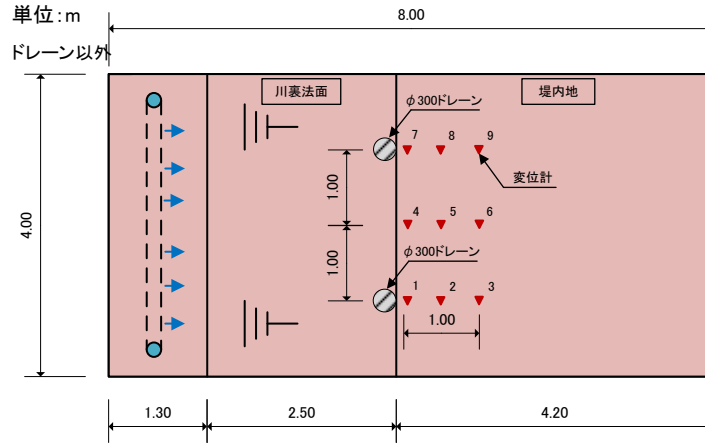


図 2-58 変位計配置位置図 (Case4)

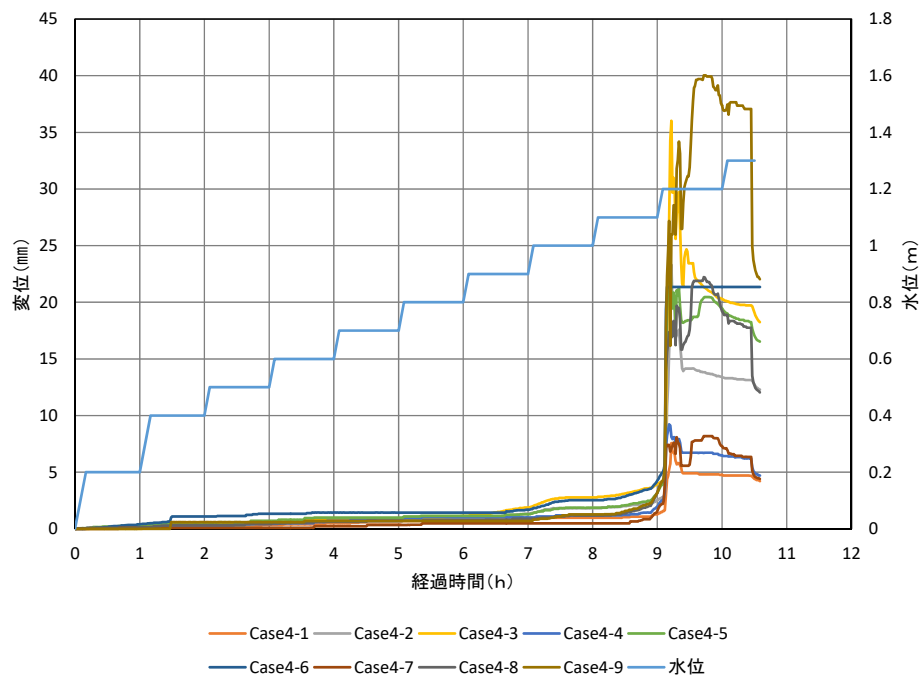


図 2-59 鉛直変位の時刻歴 (Case4)

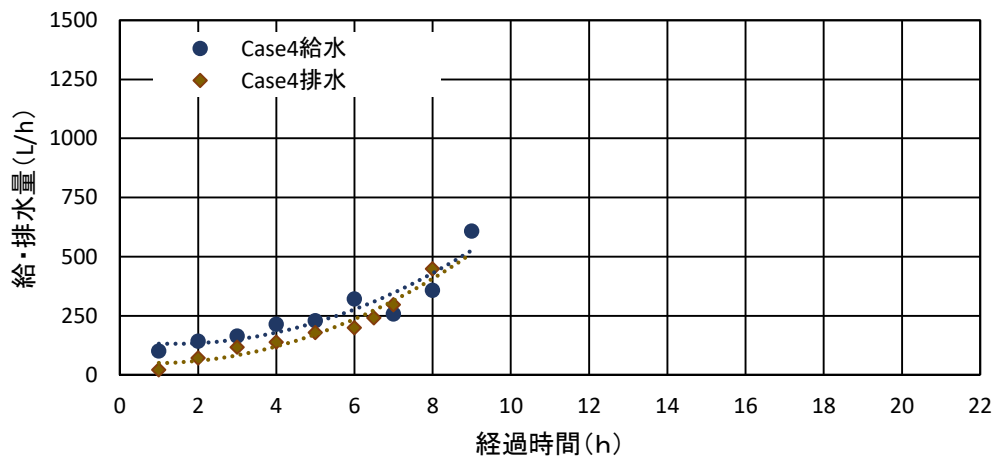


図 2-60 給水量と排水量の時刻歴 (Case4)

### (5) 盤膨れの発生状況

図 2-61 に盤膨れの発生経過の写真を示す。7 時間 40 分後(水位 1.0m)にドレーンからの排水が濁りはじめ(同図(a), (b)), 8 時間 47 分後(水位 1.1m)にドレーンからの排水に砂が混じりドレーン表面に砂が堆積する状態となった(同図(c))。その後, ドレーン内部が噴出した砂で目詰まりを起こした。ドレーンが閉塞状態となったため, 透水層内の圧力が高まり堤内地側の被覆土層表面が膨れ上がった(同図(d))。9 時間 41 分(水位 1.2m)に, 膨れ上がった箇所の中央部から噴砂を伴った漏水が発生した(同図(e))。



(a) 排水濁り(7 時間 50 分)



(b) 排水濁り(7 時間 54 分)



(c) 砂噴出(9 時間 00 分)



(d) 膨れ上がり(9 時間 40 分)



(e) 噴砂漏水(9 時間 50 分)

図 2-61 盤膨れ発生経過 (Case4)



### (6) 発生箇所

盤膨れが発生した箇所は、法尻から 1.5m 堤内地側で中央断面より 0.5m 南側で発生した。図 2-62 に盤膨れに伴う主要な漏水発生箇所を示す。

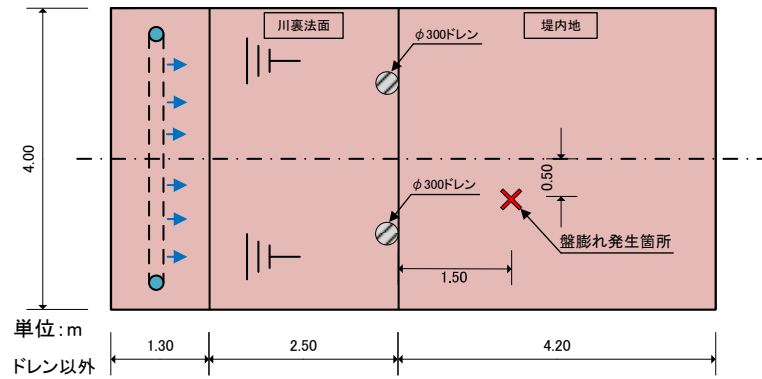


図 2-62 盤膨れ発生箇所 (Case4)



(a) 実験後の盤膨れの状況



(b) 噴出孔付近掘削状況



(c) 開削断面

図 2-63 盤膨れの状況と開削状況 (Case4)

### (7) 実験後調査

水位を十分に低下させた状態で、盤膨れが発生した箇所を開削し、被覆土層内部の状況を調査した。図



2-63(a)に開削前の状況を示す。盤膨れの最も高い位置(漏水・噴砂が発生した噴出孔)から砂脈を透水層まで追跡しながら掘削した。掘削を行った噴出孔付近の写真を図 2-63(b)に、砂脈の追跡掘削を行った断面の写真を図 2-63(c)に示す。

噴出孔周辺では、被覆土層のロームが侵食され、噴出孔から運搬された球形のロームの塊が点在していた。掘削調査の結果、砂脈は噴出孔より透水層に向かって直線的に分布しておらず、被覆土層内を不規則に脈状に分布していることが確認された。

#### (8) ドレーン内部

実験後、目詰まりを起こしたドレーンの内部を確認した。砂を排出した北側のドレーン内部は、透水層の川砂で充填されていた。このドレーン内部の砂は、上層部に比較的細かい粒径のものが詰まり、下層部になるに従って粒径の大きい砂が詰まっていた。砂を排出しなかった南側ドレーンの内部には、砂はほとんど確認されなかった。図 2-64 に実験後のドレーンの状況と周辺の被覆土層を掘削した状況を示す。また、南北2箇所のドレーン内部の砕石(砕石+砂)を上部、中間、下部の3箇所から採取し粒度試験を行った。図 2-65 に粒度試験結果の粒径加積曲線を示す。



(a) 実験後のドレーン

(b) ドレーン掘削状況

図 2-64 ドレーンの状況と掘削調査 (Case4)

#### (9) 噴出砂の粒度

ドレーンから排出された砂(噴砂①, ③)と盤膨れが発生した噴出箇所から採取した噴砂(噴砂②)の粒度試験を行った。噴出された砂は、透水層に使用した川砂より粒度曲線が立っており粒径 0.1mm~0.4mm の細砂中心となっている。図 2-66 に噴出砂の粒径加積曲線を示す。

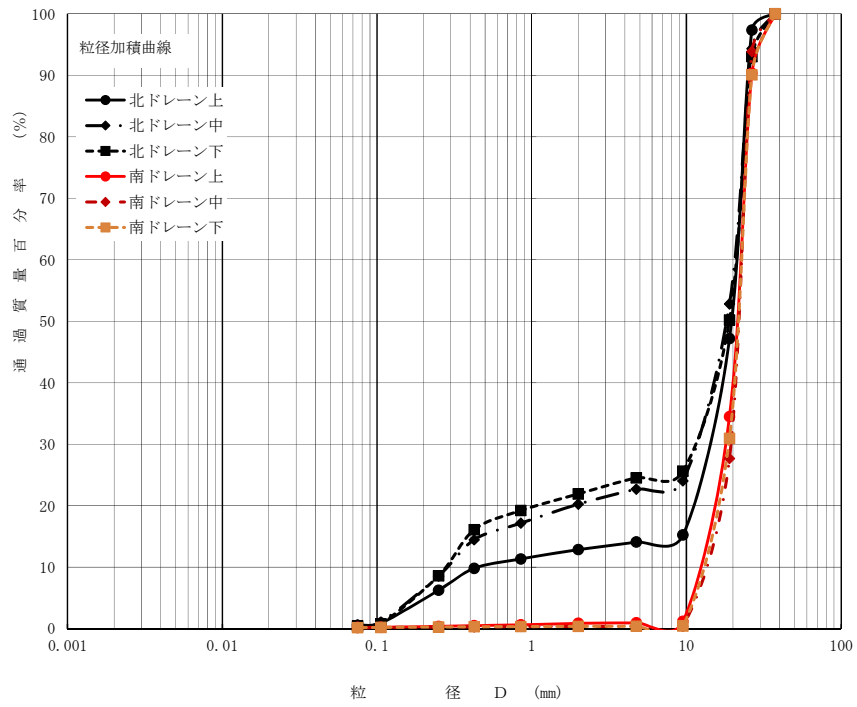


図 2-65 ドレイン内部の粒径加積曲線 (Case4)

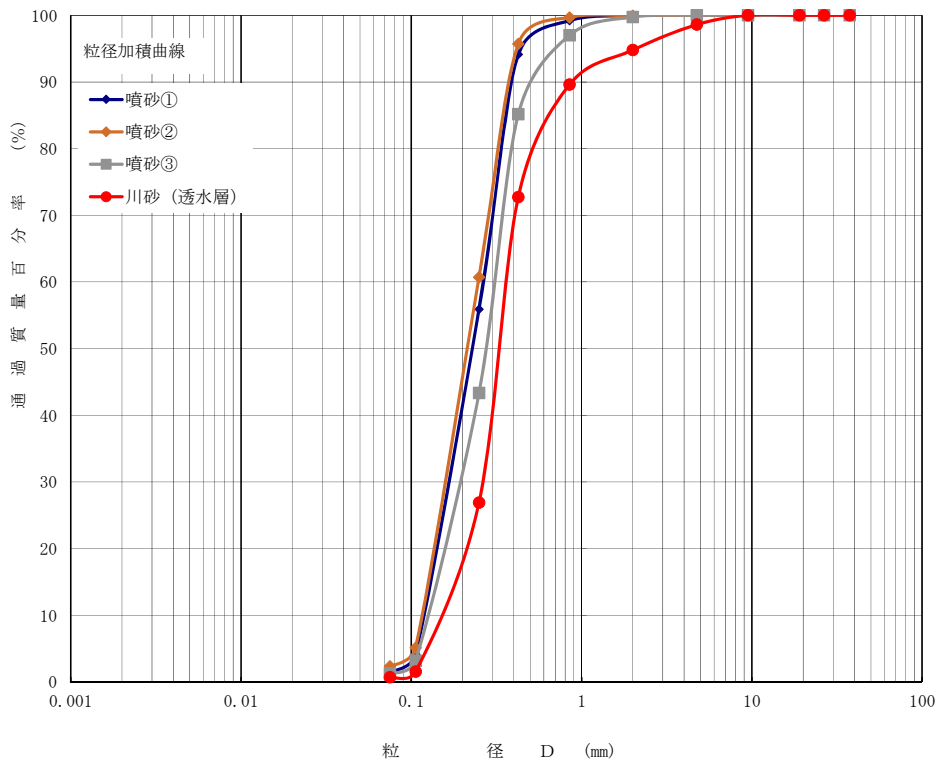


図 2-66 噴出砂の粒径加積曲線 (Case4)

## 2.4.5 Case5 ( $\phi 140 \times 3$ 箇所) の実験結果

### (1) 実験結果の概要

Case5 は、 $\phi 140$  の円柱縦型ドレーンを法尻部に 3 箇所配置したケースである。図 2-67 (a) に 6 時間後の実験状況を示す。経過時間 10 時間(水位 1.2m)まで水位を上昇させて終了とした。この後、本模型では、対策工の中に砂を投入し強制的に目詰まりを起こした上で、浸透実験も行った。しかし、Case4 のような堤内地の盤膨れ・噴砂を伴う漏水は発生せず、かなりの水圧をかけたところで、堤体模型全体が持ち上がるようにして、亀裂が入り(図 2-67 (b))実験を終了した。

水位を上げていく段階では、堤内地側に噴砂を伴う明らかな漏水は確認されなかったが、法尻部および堤内地側地表面の所々で細かな漏水が比較的多く確認された。



(a) 6 時間後

(b) 崩壊状況

図 2-67 模型の状況 (Case5)

### (2) 被覆土層下面に働く水圧

図 2-68 に間隙水圧計の設置位置と計測器番号を示す。図 2-69 に計測された圧力水頭の時刻歴を示す。間隙水圧計の値は、実験開始より水位上昇に伴って階段状に右肩上がりに推移している。給水箇所に最も近い間隙水圧計 No.13 の圧力水頭が一番高く、堤内地側に向かって順に低くなっている。堤内地側に設置された間隙水圧計の圧力水頭は、比較的緩やかに上昇している。

図 2-70 に中央横断面の圧力水頭分布を示す。図 2-71 に中央+0.5m 横断面の、図 2-72 に中央+1.0m 横断面の圧力水頭分布を示す。ドレーンが設置されている中央断面では、法尻部で圧力水頭の値が低下している。中央+0.5m 横断面はドレーンが設置されていないため圧力水頭の低下は見られない。中央+1.0m 横断面は、ドレーンが設置されている箇所であり、法尻部で圧力水頭の低下が見られる。

次に、堤防縦断方向の圧力水頭分布を図 2-73 に示す。断面の位置は、法尻部を基準に-1m(川側)から堤内地側へ+1.5m まで 0.5m ピッチとなっている。ドレーンが設置されている断面は、同図 (c) でドレーン位置は中心から-1.0m, 0m, +1.0m である。ドレーン設置箇所で圧力水頭が下がっていることが分かる。それ以外の箇所では、縦断方向の圧力水頭の局所的な変化は見られない。

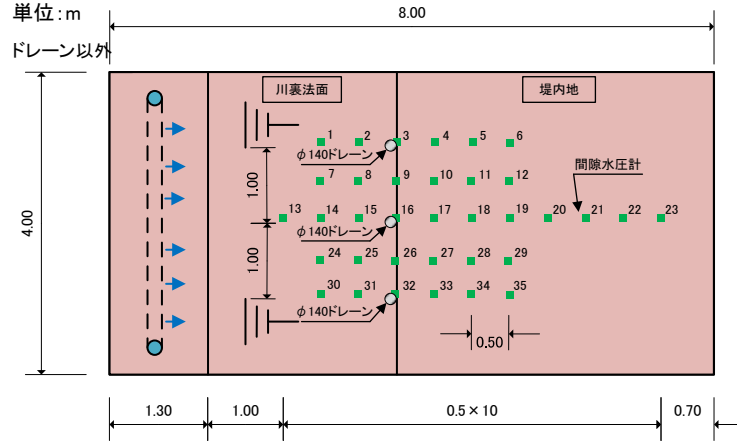


図 2-68 間隙水圧計配置位置図 (Case5)

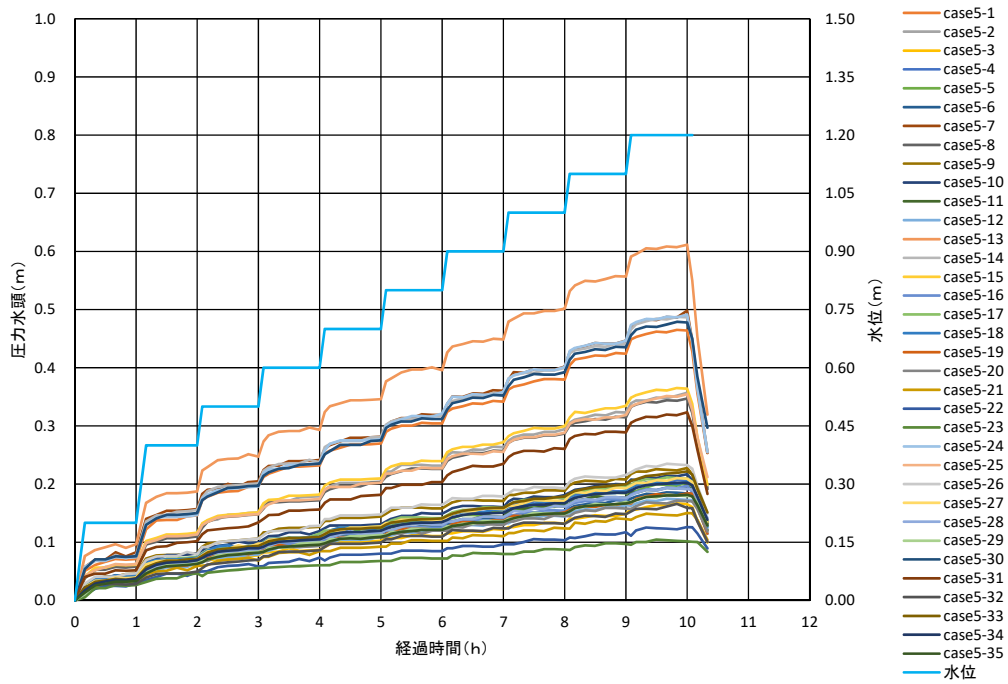


図 2-69 圧力水頭の時刻歴 (Case5)

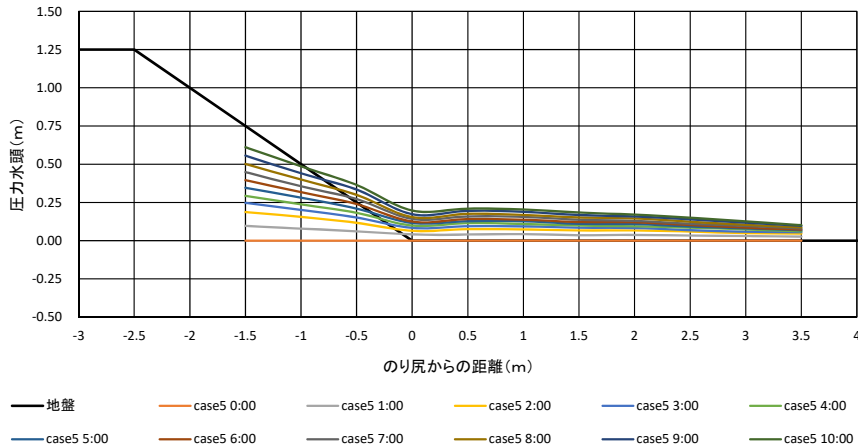


図 2-70 中央横断面の圧力水頭分布 (Case5)

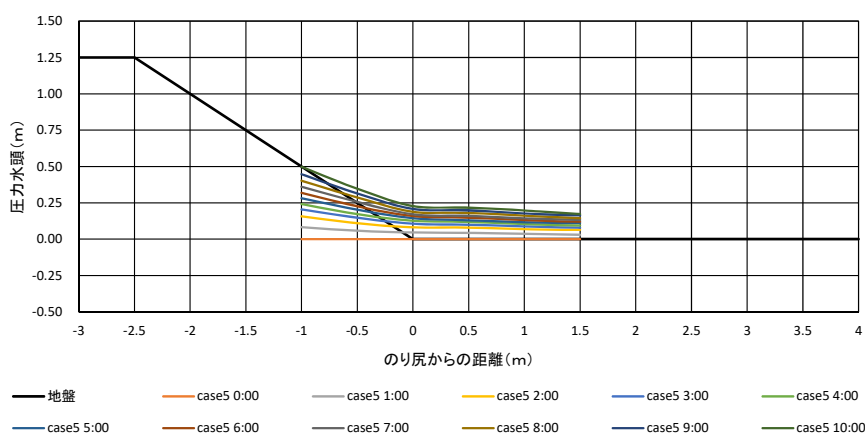


図 2-71 中央+0.5m 横断面の圧力水頭分布 (Case5)

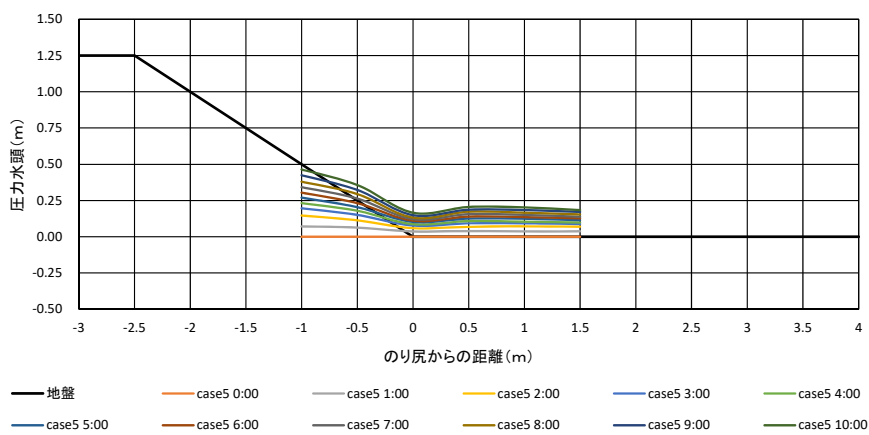
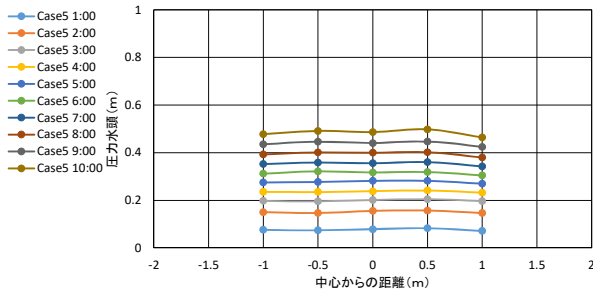


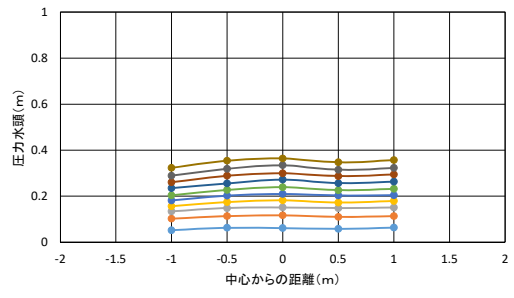
図 2-72 中央+1m 横断面の圧力水頭分布 (Case5)

### (3) 被覆土層表面の鉛直変位

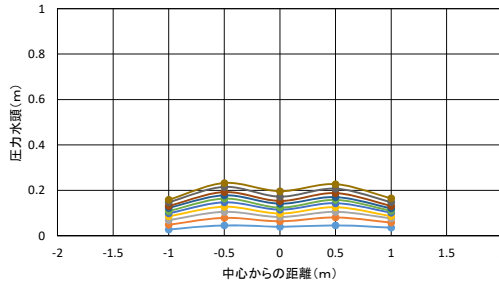
図 2-74 に変位計の位置と計測器番号を示す。図 2-75 に計測された鉛直変位を示す。全体的に極めて小さな鉛直変位しか発生しなかった。



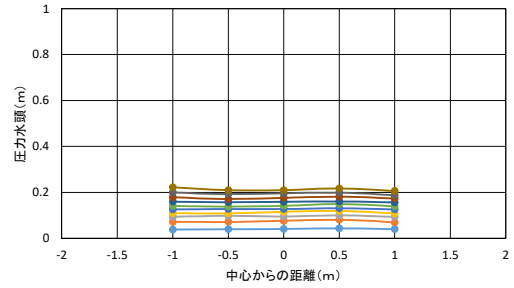
(a) 縦断方向 (法尻-1m)



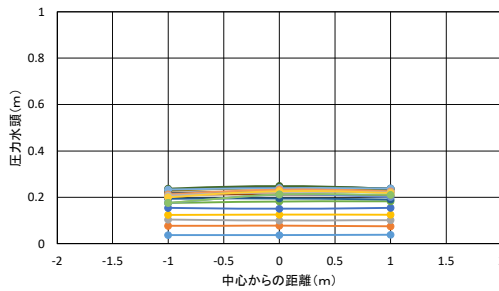
(b) 縦断方向 (法尻-0.5m)



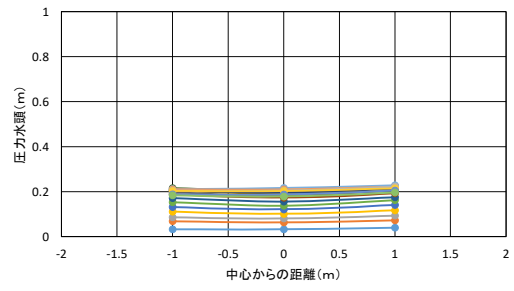
(c) 縦断方向 (法尻)



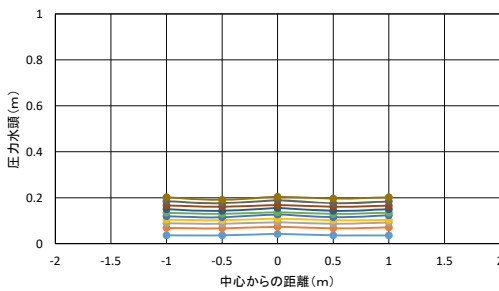
(d) 縦断方向 (法尻+0.5m)



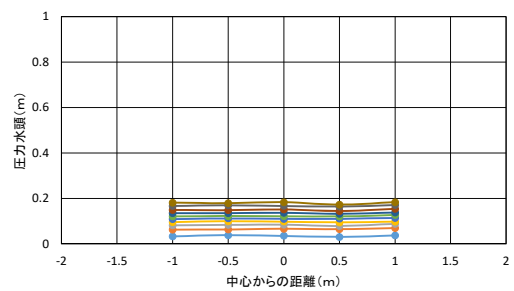
(e) 縦断方向 (法尻+1m)



(f) 縦断方向 (法尻+1.5m)



(g) 縦断方向 (法尻+2.0m)



(h) 縦断方向 (法尻+2.5m)

図 2-73 縦断方向の圧力水頭分布 (Case5)

#### (4) 給水量と排水量

計測を行った給水量と排水量の時刻歴を図 2-76 に示す。水位上昇に伴い、給水量、排水量とも増加傾向である。

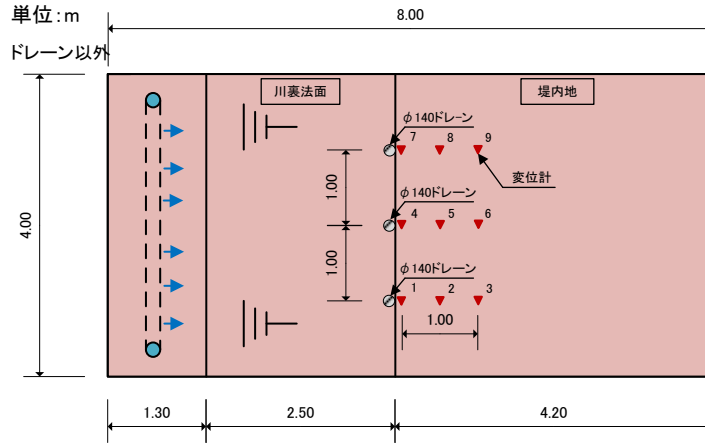


図 2-74 変位計配置位置図 (Case5)

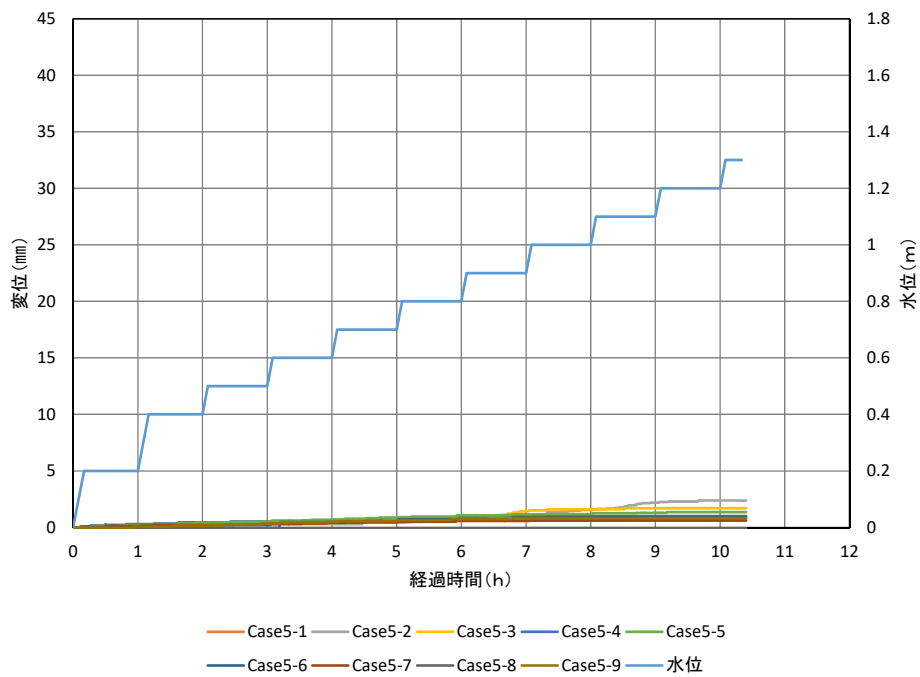


図 2-75 鉛直変位の時刻歴 (Case5)

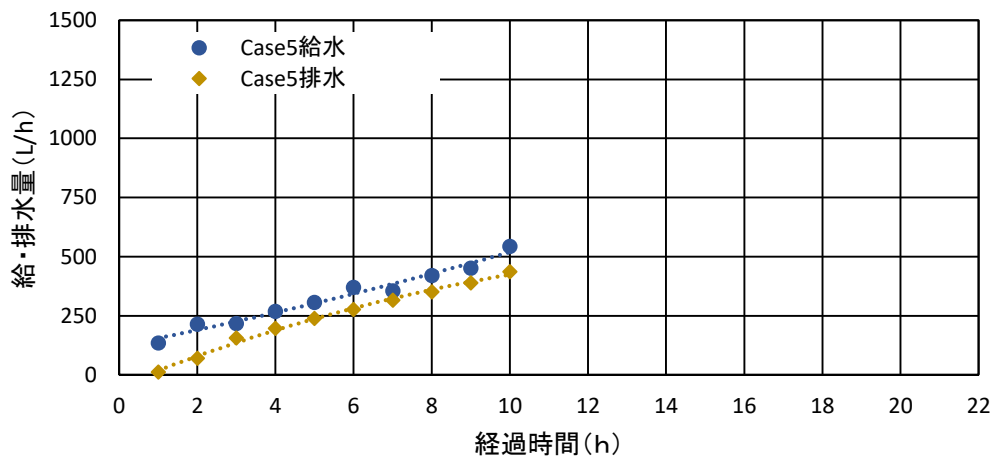


図 2-76 給水量と排水量の時刻歴 (Case5)



## 2.4.6 Case6 ( $\phi 100 \times 1$ 箇所) の実験結果

### (1) 実験結果の概要

Case6 は、 $\phi 100$  の円柱縦型ドレーンを法尻部の中央に 1 箇所配置したケースである。本ケースは、Case4 で発生したようなドレーンからの噴砂と目詰まりを意図的に発生させることを目的としている。このため、ドレーン内に高い流速が発生するように、ドレーンの径を他のケースよりも小さく設定した。また、ドレーンを設置するための掘削孔よりジオグリッドの型枠を小さくすることで、ドレーンと被覆土層の間に意図的に隙間を設けた。

図 2-77 (a) に 6 時間後の実験状況を示す。

水位が 1.8m を超えた辺りからドレーンからの排水が濁りはじめ、最終的には砂混じりの排水となった(図 2-77 (b)) が、ドレーンに目詰まりが生じた様子はなかった。水位を上げていく段階から、土槽境界部、法尻部および堤内地側地表面の所々で細かな漏水が比較的多く確認された。



図 2-77 模型の状況 (Case6)

### (2) 被覆土層下面に働く水圧

図 2-78 に間隙水圧計の設置位置と計測器番号を示す。図 2-79 に計測された圧力水頭の時刻歴を示す。間隙水圧計の値は、実験開始より水位上昇に伴って階段状に右肩上がりに推移している。給水管所に最も近い間隙水圧計 No.13 の圧力水頭が一番高く、堤内地側に向かって順に低くなっている。堤内地側に設置された間隙水圧計の圧力水頭は、実験開始 5 時間後(水位 0.8m)からほぼ横ばいとなった。11 時間 30 分(水位 1.4m)後には、ドレーン直下に設置した間隙水圧計 No.16 の圧力水頭が急激に低下し、周辺の間隙水圧計でも減少傾向となっている。この時点で目視ではドレーンから濁った排水などは確認されていない。

図 2-80 に中央横断面の圧力水頭分布を示す。図 2-81 に中央+0.5m 横断面、図 2-82 に中央+1.0m 横断面の圧力水頭の分布を示す。ドレーンが設置されている中央断面では、法尻部で圧力水頭の値が低下している。圧力水頭の時間変化同様に中央断面においても、12 時間後に急激に圧力水頭が低下していることが分かる。

中央+0.5m 断面はドレーンが設置されていないため圧力水頭の局所的な低下はほとんど見られない。中央+1.0m 断面は、中央+0.5m 断面同様にドレーンが設置されていない箇所であり、法尻部で圧力水頭の局所的な低下がほとんど見られない。

次に、堤防縦断方向の圧力水頭分布を図 2-83 に示す。断面の位置は、法尻部を基準に-1m(川側)から

堤内地側へ+1.5m まで 0.5m ピッチとなっている。ドレーンが設置されている断面は、同図(c)でドレーン設置箇所を中心部で圧力水頭が下がっているのが分かる。法尻より川側の断面である同図(a)の断面において、中心から-0.5m の位置で若干圧力水頭が高めに推移し、その後、低下している。圧力水頭の時間変化が左右対称となっていない。同様に同図(b)も-1.0m の地点で同様に圧力の低下がみられる。堤内地側断面の同図(d)～(e)では、初期段階で圧力水頭の上昇があるものの、その後は圧力水頭の増加がほとんど見られない。

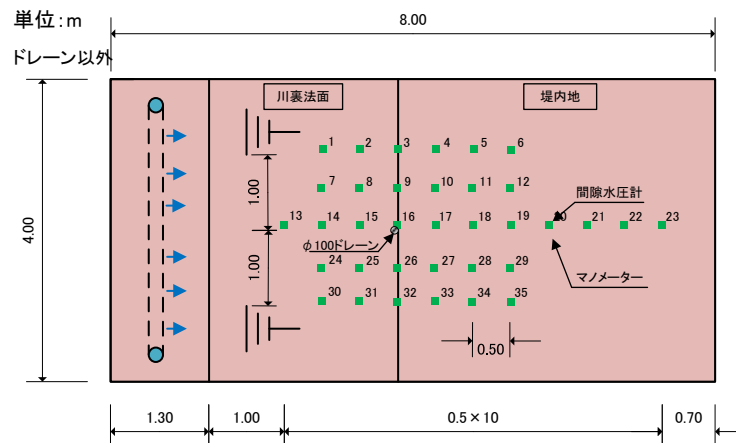


図 2-78 間隙水圧計配置位置図 (Case6)

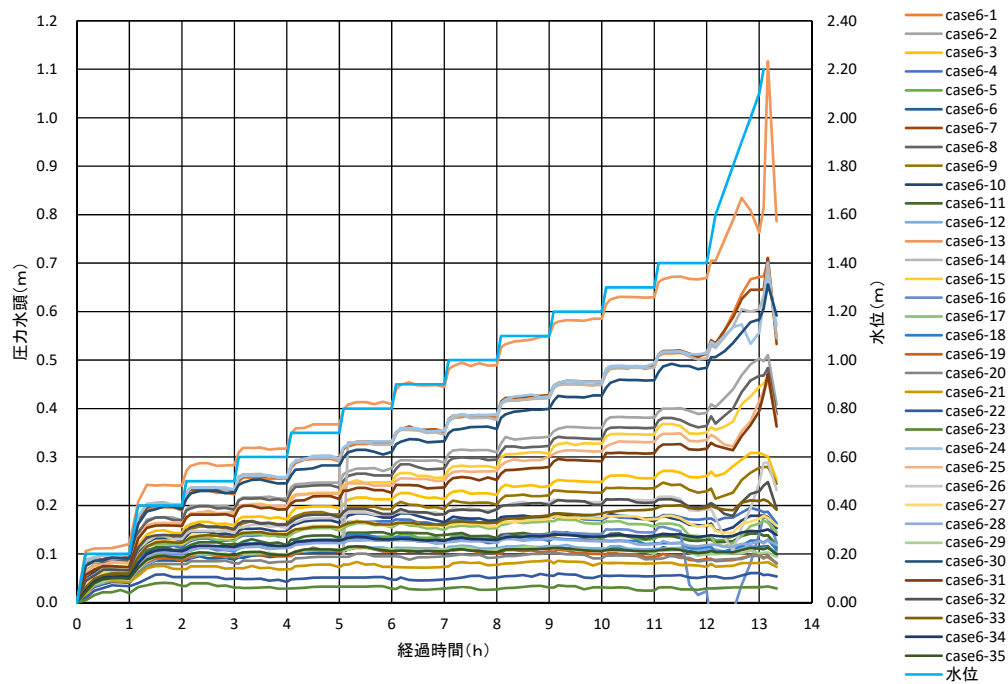


図 2-79 圧力水頭の時刻歴 (Case6)

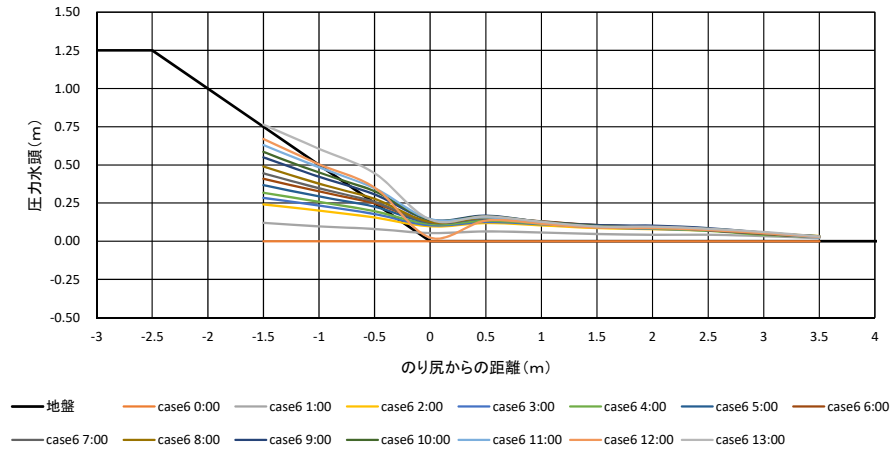


図 2-80 中央横断面の圧力水頭分布 (Case6)

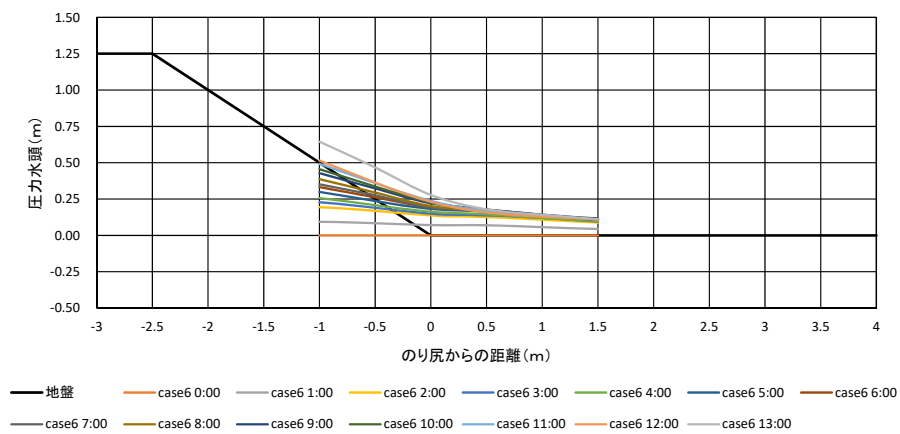


図 2-81 中央+0.5m 横断面の圧力水頭分布 (Case6)

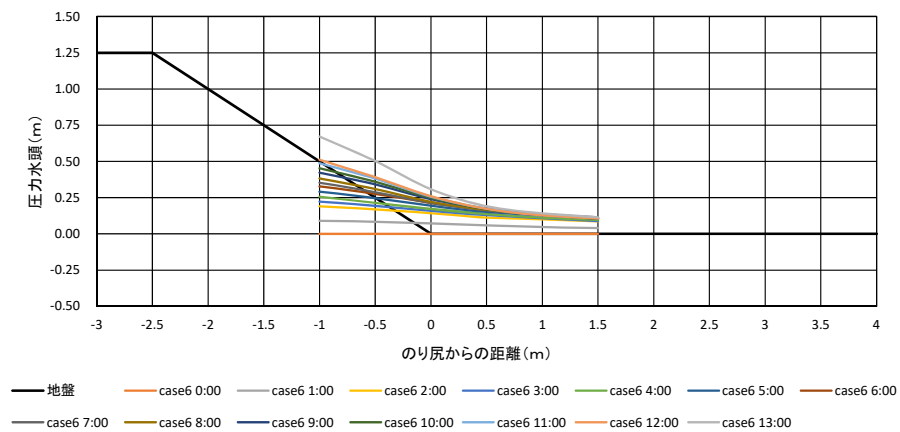


図 2-82 中央+1m 横断面の圧力水頭分布 (Case6)

### (3) 被覆土層表面の鉛直変位

図 2-84 に変位計の位置と計測器番号を示す。図 2-85 に計測された鉛直変位の変化を示す。

堤内地側の鉛直変位量は、実験開始 2 時間 (水位 0.5m) 経過後、変位計 No.2,3 で鉛直変位量が徐々に増加し始め、3mm 程度まで増加したが、それ以降は、横ばいとなった。6 時間後 (水位 0.9m) には再び変位

が増加し、全体的に変位量が 5mm 程度となった。その後、緩やかに増加した。このように変位が上昇し始め、その後、変位量の増加が横ばいとなるのは、被覆土層表面が水圧によって一時的に膨れ上がるが、被覆土層表面に形成された細かな亀裂から漏水が発生し、水圧が低下し、盤膨れが進展しにくいことが推測される。

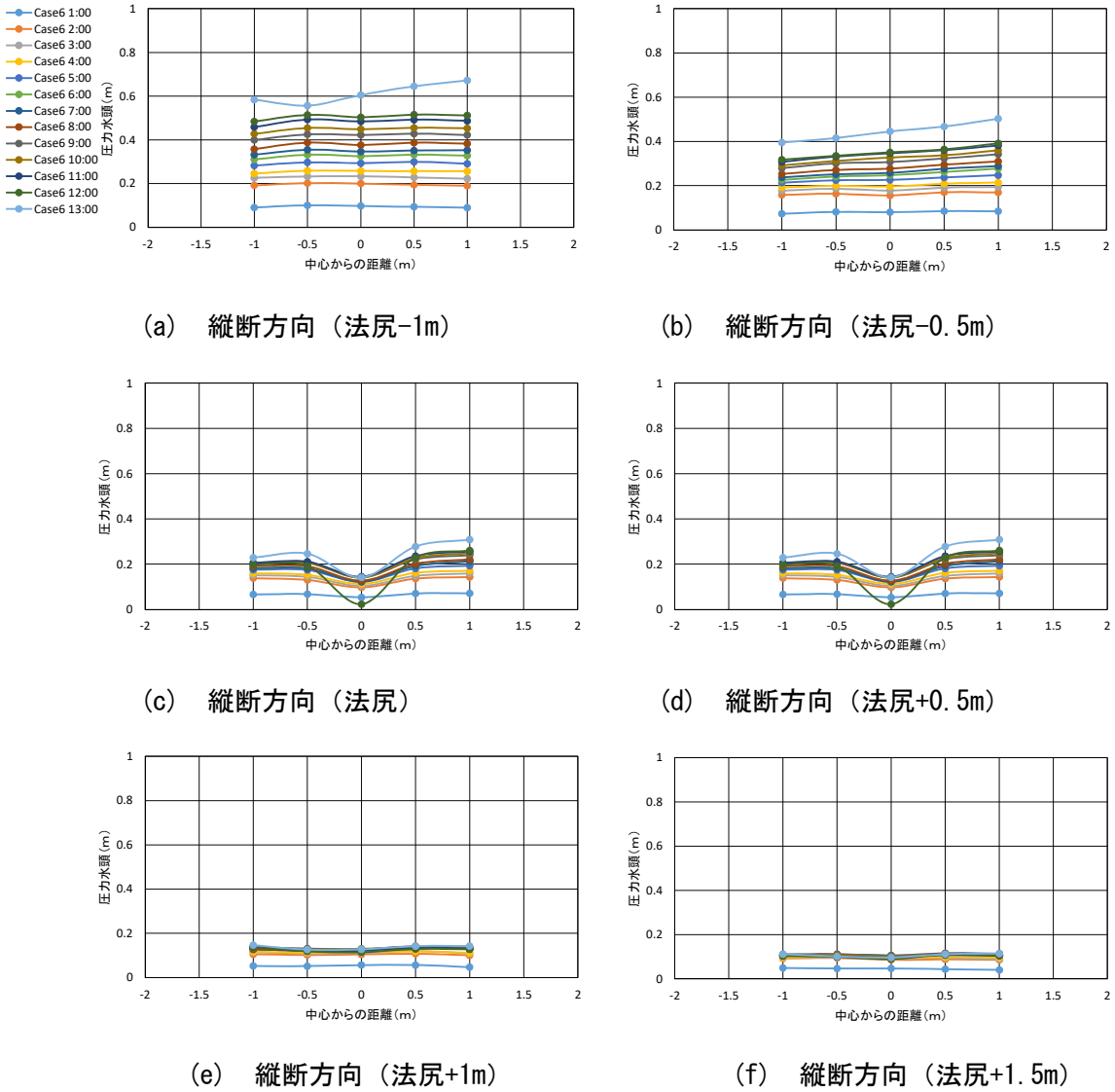


図 2-83 縦断方向の圧力水頭分布 (Case6)

#### (4) 給水量と排水量

給水量と排水量を図 2-86 に示す。水位上昇に伴い、給水量、排水量ともに増加している。

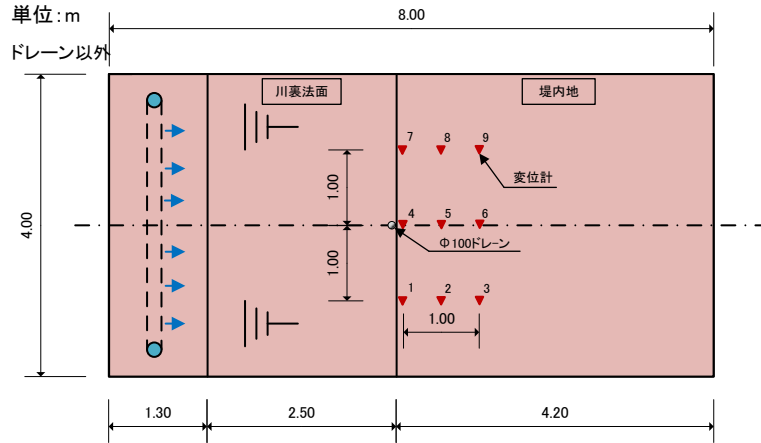


図 2-84 変位計配置位置図 (Case6)

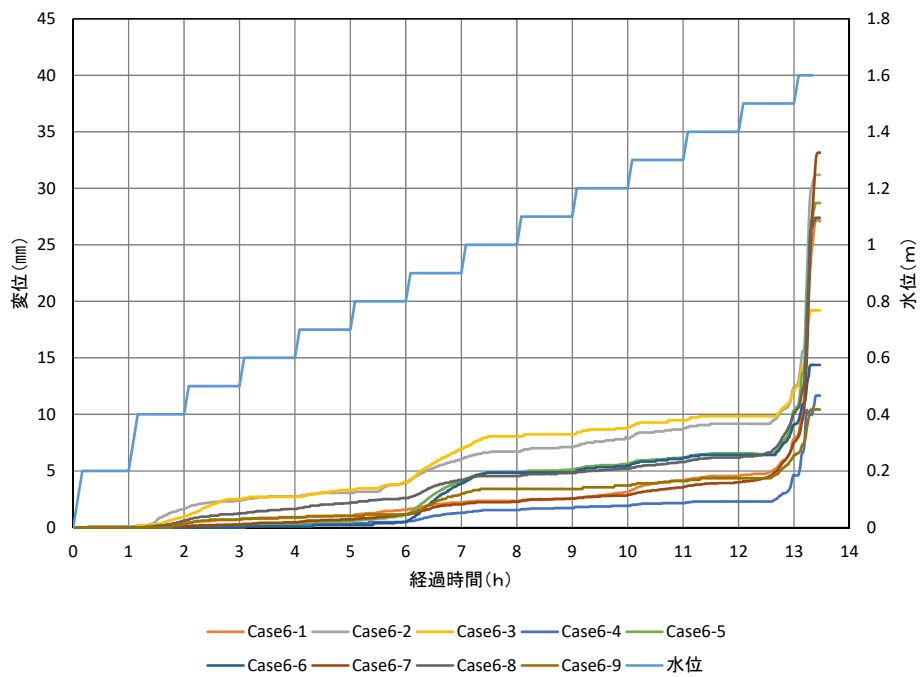


図 2-85 鉛直変位の時刻歴 (Case6)

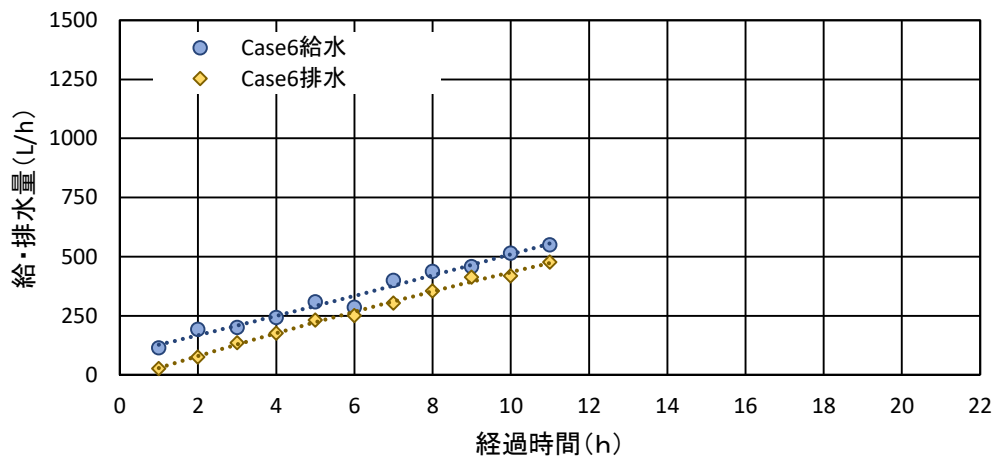


図 2-86 給水量と排水量の時刻歴 (Case6)

## 2.5 浸透実験まとめ

### 2.5.1 ドレーンの面積と水位の関係

円柱縦型ドレーンの円の面積と水位上昇に伴う状態の変化の関係を図 2-87 に示す。縦に同一ケースの様々な状態が並んでおり、下側が実験初期の状態、上側ほど実験終了に近い状態となっている。

状態として、水位の上昇により地表面の変位が出始めた時点、盤膨れの進行によって間隙水圧計の値がほぼ一定となった時点、地表面の変位が 5mm 以上となった時点、ドレーン工からの排水が濁り始める時点、盤膨れや砂が噴出した時点を挙げた。

ドレーン面積が大きいほど、変位が出始める水位、変位が 5mm 以上となる水位、水圧一定となる水位が大きくなる傾向が見られる。堤防延長当たりのドレーンの面積が大きいほど、高い対策効果が得られることを表しているものであり、離散的に配置する円柱縦型ドレーンよりも連続配置のトレンチの方が高い効果を発揮することが期待される。

排水の濁りと砂の噴出が生じたのは、Case4 と Case6 の 2 ケースであるが、これらが生じた時点の水位にドレーンの面積との関係性は見られない。この理由ははっきりとしないものの、関係しうる状況として、Case6 では、変位が出始めてから排水の濁りや砂が噴出するまでの間に、被覆土層表面の細かな亀裂や土層壁面から噴砂を伴わない漏水が確認されているのに対し、Case4 ではこれらの漏水はあまり確認されていないことが挙げられる。どのケースでも同じように模型を作っていたものの、微妙な違いで被覆土層の遮水性に違いが生じていたことは十分考えられる。実際に、被覆土層下面に作用する水圧を Case4 と Case6 を比較すると、法尻から堤内地側に離れた場所では、Case6 の方が明らかに小さかった。

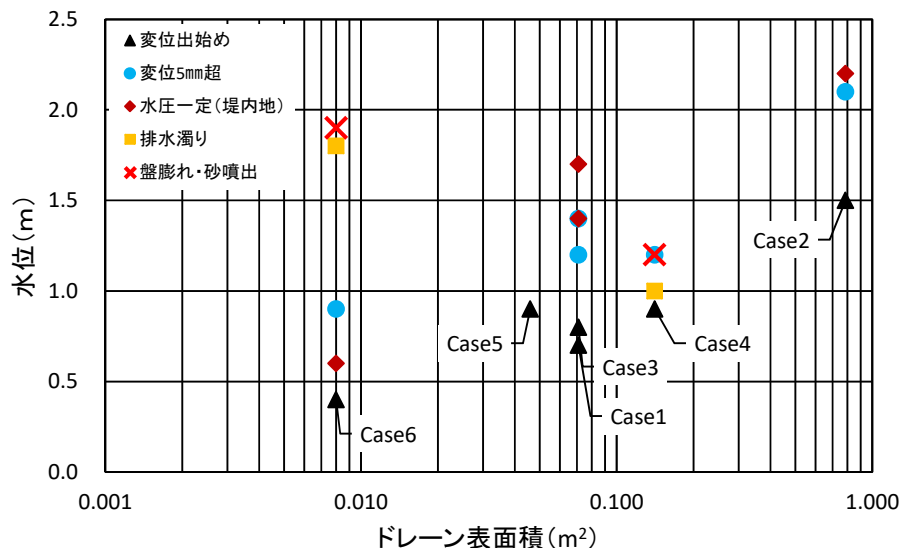


図 2-87 ドレーン面積と水位上昇に伴う状態の変化

### 2.5.2 水位上昇に伴う圧力水頭と変位の関係

Case1～Case6 の給水管の水位と土槽中心線上の法尻から 1m 堤内地側に離れた地点の透水層の圧力水頭の関係を図 2-88 に示す。ドレーン面積の大きな Case2 の勾配は緩く、面積の小さな Case6 は比較的急勾配となっている。この勾配は、ドレーン面積だけでなく、被覆土層の遮水性によっても変化するものと考え

えられる。

また、図 2-89 には、給水管の水位と土槽中心線上の法尻から 1m 堤内地側に離れた地点の被覆土層表面の鉛直変位の関係を示す。圧力水頭が 0.1m 前後で鉛直変位が生じ始めているケースが多い。

透水層の圧力水頭も地表面の変位も、水位の上昇に伴い増加しているが、圧力水頭は途中で頭打ちとなるものも多く、変位には急増するものが見られる。圧力水頭が頭打ちとなる理由としては、地盤の変位に伴って生じた被覆土層の細かな亀裂からの漏水が増加することや変位に伴って生じる空間に水が移動することが考えられる。

Case4 以外の実験では、噴砂や漏水を伴った盤膨れは確認されなかった。Case4 の実験で計測された圧力水頭の値は、全体的に増加傾向であるが、濁り水が出始めた時点と噴砂が出始めた時点で圧力水頭が急激に低下している。この Case4 で生じた急激な水圧変化によって、ドレーン内の流速が急激に低下し、ドレーン内を流れ出ようとしていた砂が碎石間に堆積し、目詰まりが生じたことが推測される。同じく濁り水や噴砂が生じた Case6 では、圧力水頭の急激な変化は生じておらず、目詰まりも生じていない。

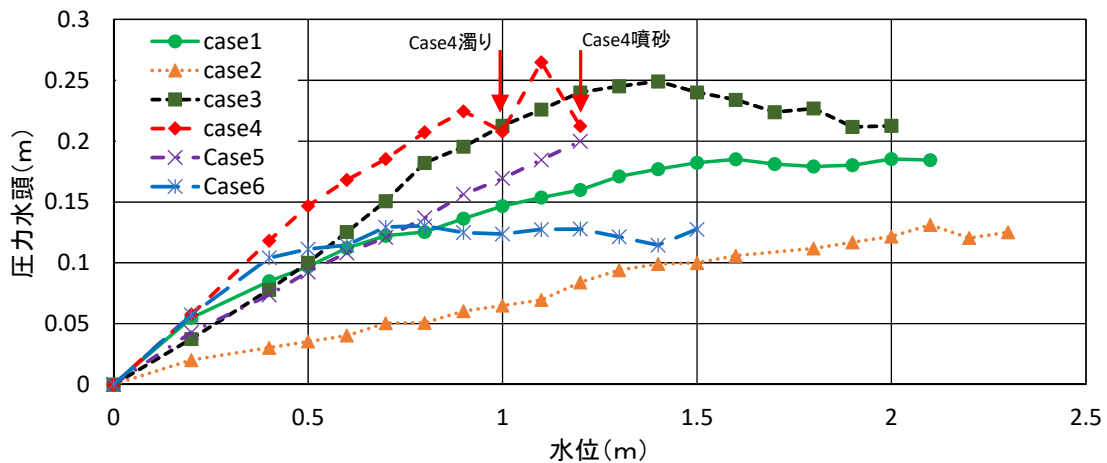


図 2-88 給水管の水位と透水層の圧力（法尻+1m 堤内地側）の関係

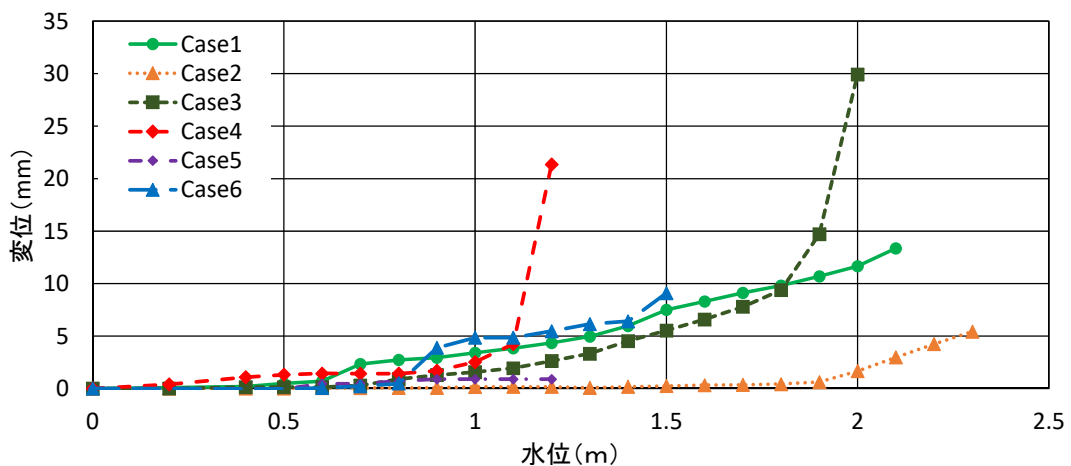


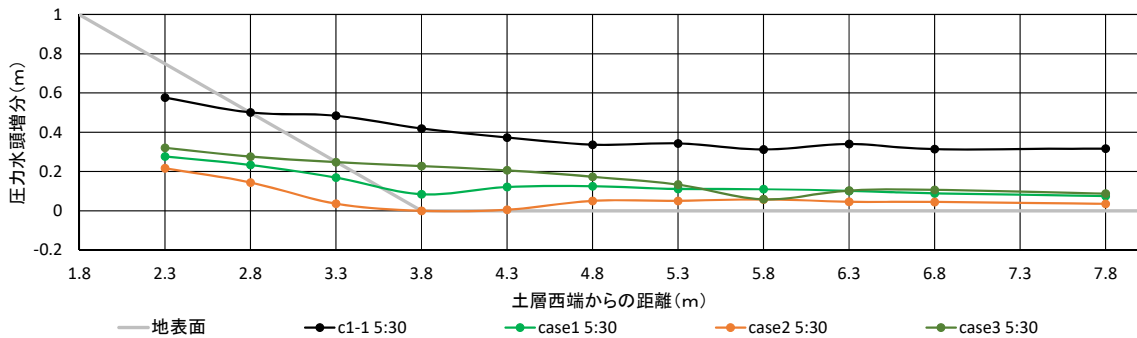
図 2-89 給水管の水位と地表面の鉛直変位（法尻+1m 堤内地側）の関係



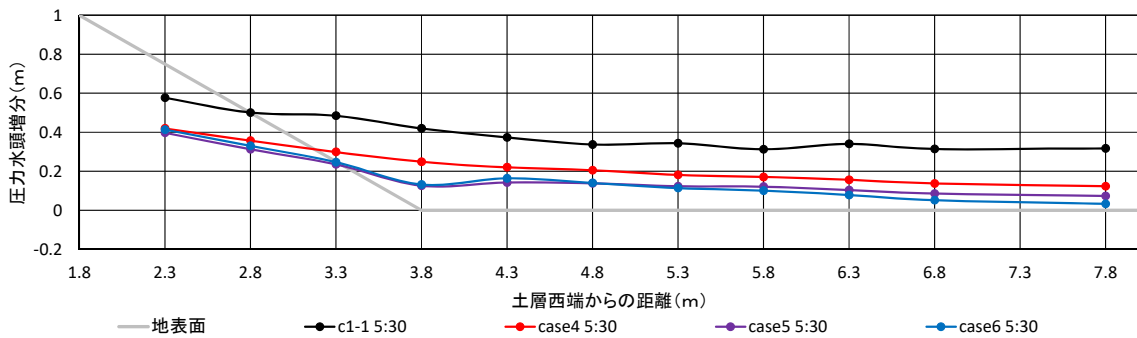
### 2.5.3 横断方向の圧力水頭の比較

図 2-90 に実験開始から 5 時間 30 分後(水位 0.8m)の中央断面における堤防横断方向の圧力水頭を示す。同図には、参考に無対策(c1-1)の同じ水位における圧力水頭の値を合わせて示している。

各ケースとも無対策と比較して、圧力水頭が横断方向に渡り全体的に低下している。ドレーンを設置した箇所でも最も低下し、その少し堤内地側で若干圧力水頭が回復する傾向が見られる。透水層のドレーン設置箇所前後及び深いところでは、高い圧力を保持しているものと考えられ、このような圧力の回復を考慮して対策の設計を行う必要がある。また、法尻から堤内地川に 2m 離れた位置にドレーンを設けた Case3 が法尻位置で高い圧力となっている。さらに水位が上昇した場合には法尻位置で盤膨れが生じる可能性がある。このため、最も効果を発揮させるためには、圧力が高くなりやすい法尻にドレーンを設けることが合理的である。



(a) Case1~3



(b) Case4~6

図 2-90 横断方向の圧力水頭の比較 (実験開始から 5 時間 30 分後, 水位 0.8m)

### 2.5.4 縦断方向の圧力水頭の比較

図 2-91 に実験開始から 5 時間 30 分後(水位 0.8m)の法尻の堤防縦断方向の圧力水頭を示す。同図には、参考に無対策(c1-1)の同じ水位における圧力水頭の値を合わせて示した。無対策と比較すると、0~60%の間にある。縦断的に対策から離れると、圧力が増加する傾向が見られることから、縦型ドレーンの場合には、対策の中間にあたる縦断位置で対策の効果を評価する必要があると考えられる。

図 2-92 には、同時刻における法尻+1.0m の位置の堤防縦断方向の圧力水頭を示す。こちらも同様に、無対策と比較すると、0~60%の間にある。ただし、法尻から 1m 離れると、縦断的な変化はほとんど見られない。

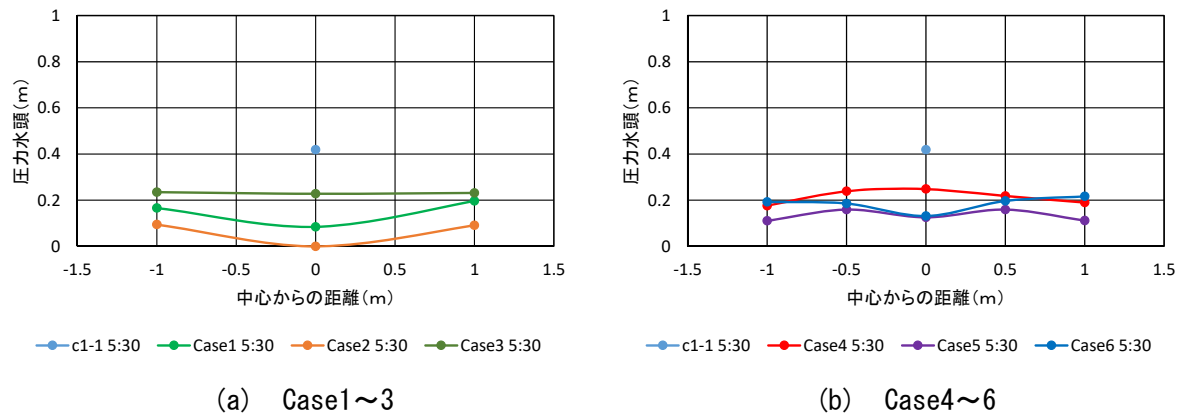


図 2-91 縦断方向の圧力水頭の比較 (実験開始から 5 時間 30 分後, 水位 0.8m, 法尻)

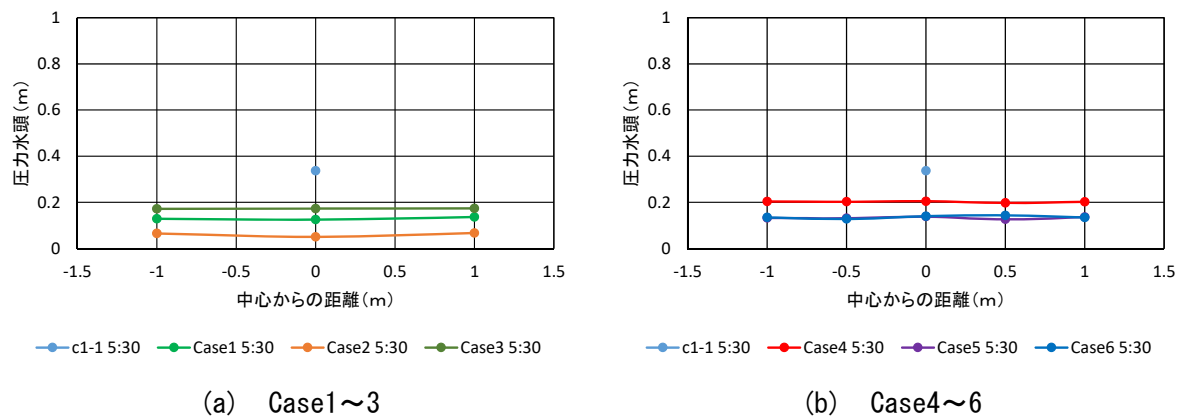


図 2-92 縦断方向の圧力水頭の比較 (実験開始から 5 時間 30 分後, 水位 0.8m, 法尻+1.0m)

### 2.5.5 給水量と排水量

給水量と排水量の時刻歴を図 2-93 と図 2-94 に示す。給水量, 排水量は時間が経過するとともに増加しているが, 直線的な範囲と下に凸の範囲とが存在する。盤膨れが生じた Case4 は早い時点で急増しているが, 盤膨れからの漏水によるものである。一方で,  $\phi 1000$  の円柱縦型ドレーン 1 箇所設置した Case2 は比較的直線的に推移した。

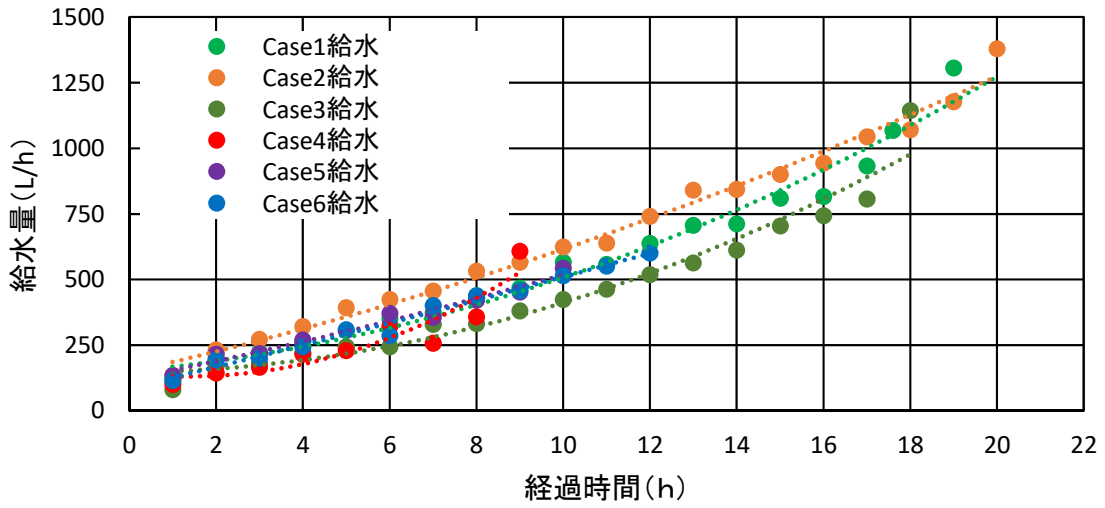


図 2-93 給水量の時刻歴

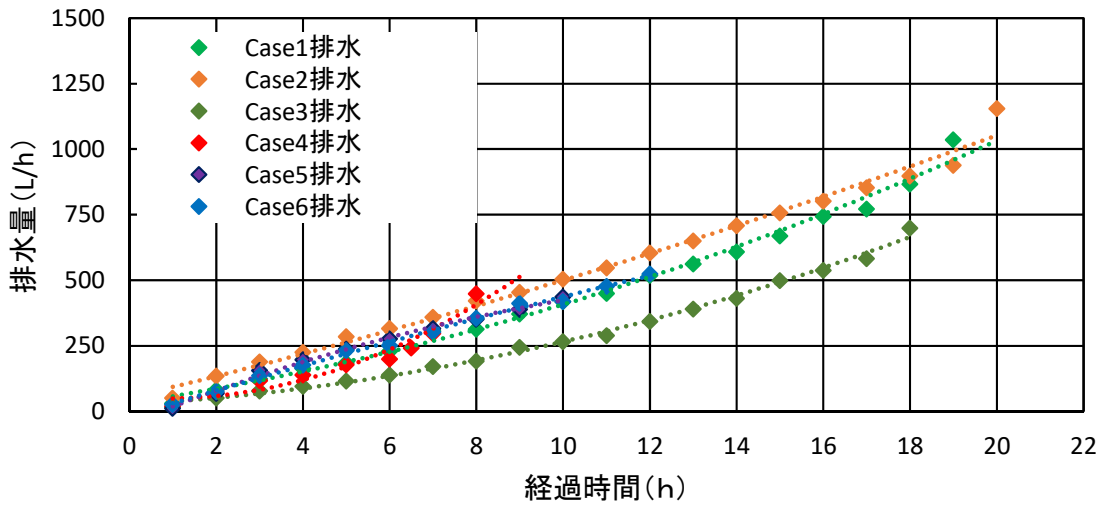


図 2-94 排水量の時刻歴

## 第3章 飽和・不飽和非定常浸透流解析

第2章では、円柱縦型ドレーンの径と配置を変化させた浸透実験を行った。これらの実験条件を対象として、2次元及び3次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析により被覆土層下面に作用する圧力の再現解析を行った。

### 3.1 2次元飽和・不飽和非定常浸透流解析

#### 3.1.1 解析目的

2次元浸透流解析は一般的に設計で用いられており、簡易にモデル化できる。堤防縦断方向に連続したトレンチ状の堤内基盤排水対策を2次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析によって、ある程度、実験で計測された被覆土層下面に作用する圧力を再現することが可能である<sup>4)</sup>。本章では、堤縦断方向に離散配置された円柱縦型ドレーンに対する2次元飽和・不飽和非定常浸透流解析の再現性を確認することを目的とする。対象とした実験ケースは、 $\phi 300$ 円柱縦型ドレーンを法尻中央部に設置したCase1、 $\phi 1000$ のドレーンを法尻中央部に設置したCase2、及び $\phi 300$ 円柱ドレーンを法尻から2m堤内地側へ配置したCase3である。

#### 3.1.2 解析方法

浸透流解析は、境界条件、土質条件など各パラメータを設定し基本式を解くことにより、各節点のタイムステップ毎の圧力水頭、流速などを導く。実験では、被覆土層下面に間隙水圧計を設置しており、各水位段階(経過時間)での圧力水頭が計測されているため、この計測値と解析値とを比較した。計測値と解析値に乖離がある場合は、ドレーン(碎石)の透水係数を変化させ、ある程度一致するまでパラメトリックスタディーを行った。実験を行ったモデルに対して、図3-1に示すようなモデル化を行った。

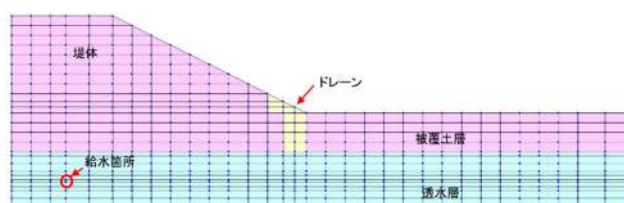


図 3-1 解析モデル (Case1)

また、円柱縦型ドレーンは、縦断方向に連続してしないため、ドレーンのない断面についても仮想のドレーン

ンを配置し解析を行うことで、ドレーンの効果を確認できるか検証した。仮想ドレーンを配置した断面の抽出イメージを図 3-2 に示す。

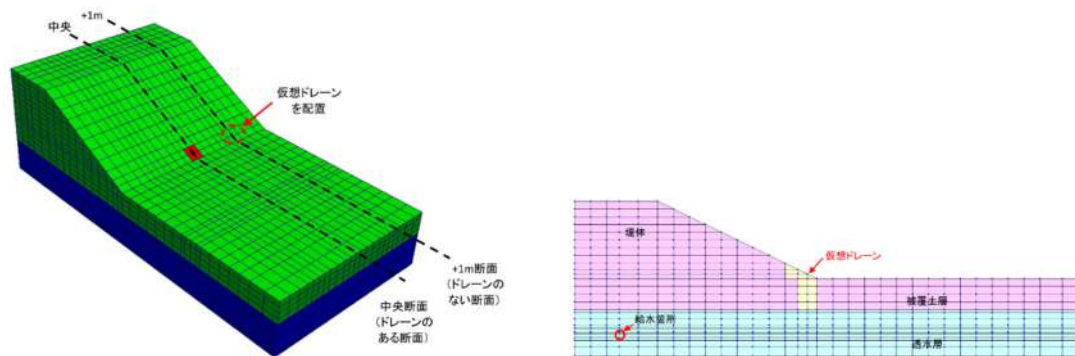


図 3-2 ドレーンがない横断における 2 次元モデル

検討に用いた浸透流解析プログラムは、Dtransu-2D・EL<sup>6)</sup>である。Dtransu-2D は、ソースコードが公開されており、比較的簡単に浸透流解析ができる。2 次元飽和・不飽和浸透流解析の支配方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial z} + k \right) = (C + \alpha \cdot S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

- ここに、
- $x$  : 堤防横断面の水平方向の軸
  - $z$  : 堤防横断面の鉛直方向の軸
  - $k$  : 透水係数 (m/hr)
  - $\Psi$  : 圧力水頭 (m)
  - $C$  : 比水分容量 (1/m)
  - $\alpha$  : 1 の場合飽和領域, 0 の場合不飽和領域
  - $S_s$  : 比貯留係数 (1/m)
  - $t$  : 時間 (hr)

ここで、比水分容量  $C$  は水分特性曲線の接線勾配として与え、比貯留係数  $S_s$  は、川砂を  $1 \times 10^{-4}$  (1/m)、ロームを  $1 \times 10^{-3}$  (1/m) と設定した。

### 3.1.3 解析条件

解析条件の設定のうち透水層(川砂)および被覆土層(ローム)の透水係数は、室内試験の結果を当方として採用し、不飽和特性値は、「河川堤防の構造検討の手引き」<sup>2)</sup>(以下、「手引き」)から粘性土(ローム)と砂質土(川砂)を採用した。初期条件として、被覆土層表面まで飽和状態とし、実験で行った水位を時系列で与えた。また、実験の土槽は、側面と底面の 5 面がコンクリート張りとなっているため、鉛直面と底面を不透水境界とし、地表面全てを浸出境界とした。

上記パラメータを設定した後、実験で得られた間隙水圧計の計測値と解析結果が整合するドレーン(碎石)

の透水係数を推定した。

解析で設定したパラメーター一覧を表 3-1 に示す。手引きに記載されている不飽和特性を図 3-3、図 3-4 に示す。

表 3-1 解析パラメーター一覧

	飽和透水係数 (m/sec) 試験値	有効間隙率 手引き参照	比貯留係数 (1/m) 手引き参照	不飽和特性
堤体・被覆土層 (ローム)	$1.9 \times E-6$	0.1	$1.0 \times E-3$	手引き 図 3-3, 図 3-4
透水層 (川砂)	$3.4 \times E-4$	0.2	$1.0 \times E-4$	
ドレーン (碎石)	変数	0.2	$1.0 \times E-4$	

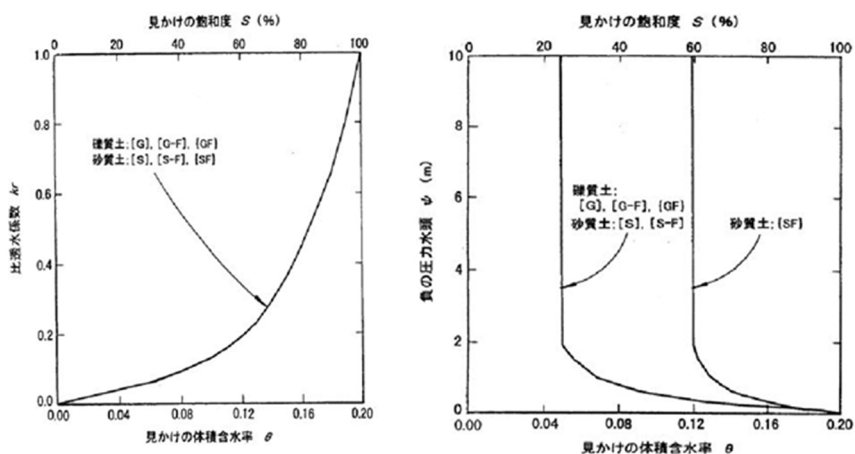


図 3-3 透水層（川砂）の不飽和特性

(左：飽和土—比透水係数，右：飽和土—負の圧力水頭)

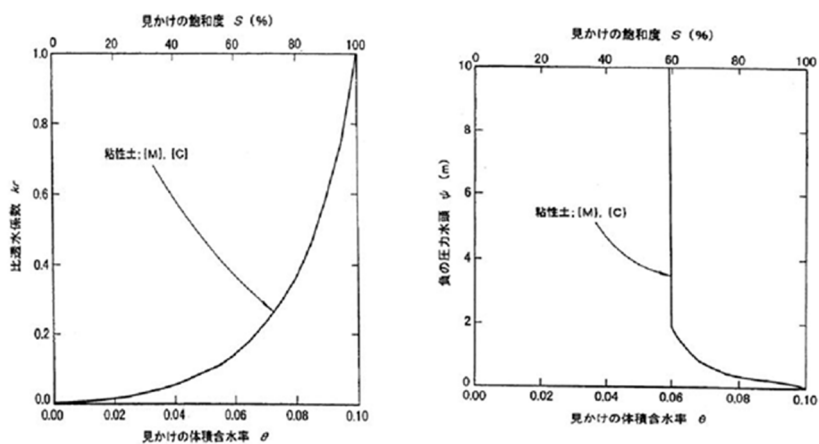


図 3-4 被覆土層・堤体（ローム）の不飽和特性

(左：飽和土—比透水係数，右：飽和土—負の圧力水頭)

### 3.1.4 Case1 の解析結果

#### (1) モデル

Case1 は、 $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻中央部に 1 箇所配置したケースである。図 3-5 に Case1 の解析モデルを示す。

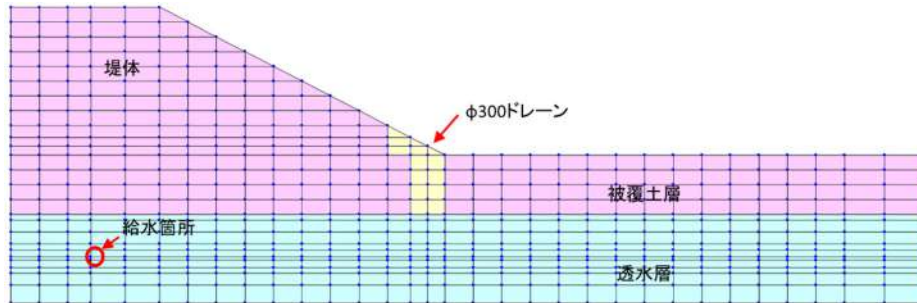


図 3-5 モデル図 (Case1)

#### (2) 間隙水圧計の番号とメッシュ節点番号

実験で計測を行った間隙水圧計の位置を図 3-6 に、対応する節点番号の位置図を図 3-7 に示す。また、計測器番号と対応する節点の番号一覧表を表 3-2 に示す。解析値と計測値の比較は、中央横断面 (ドレーンあり) では 5 箇所、中央+1m 横断面 (ドレーンなし) では 3 箇所において行った。

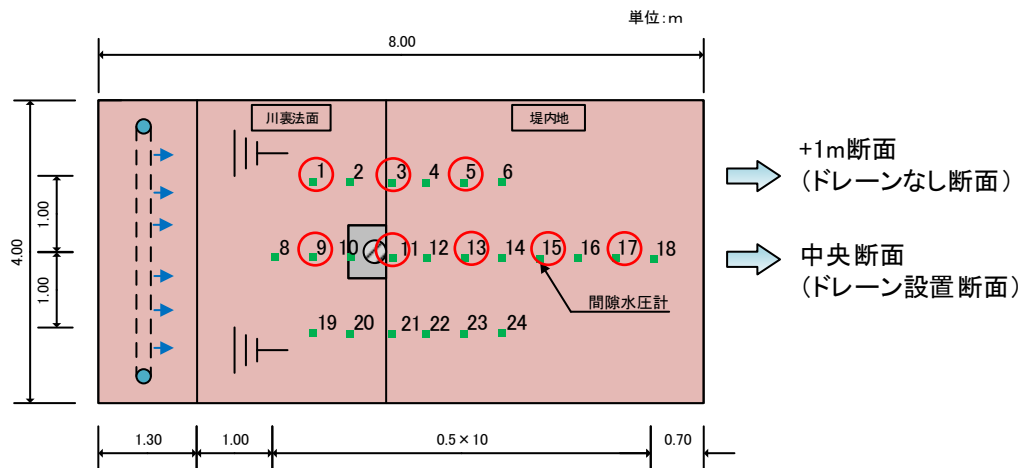


図 3-6 比較した間隙水圧計の位置 (Case1)

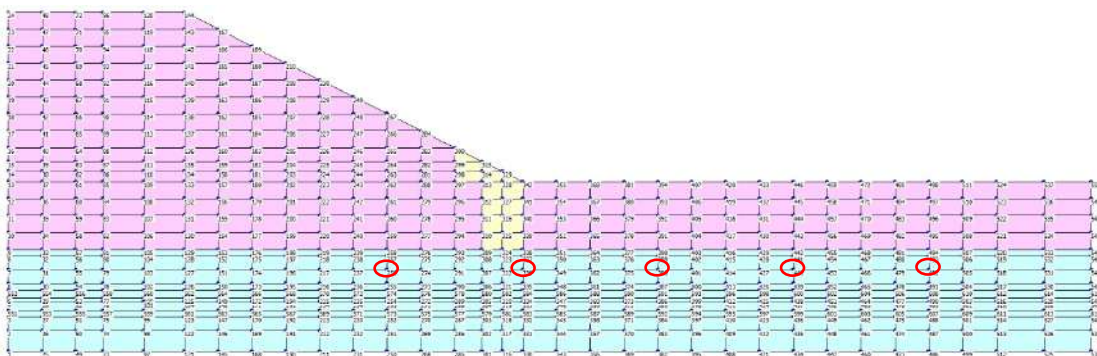
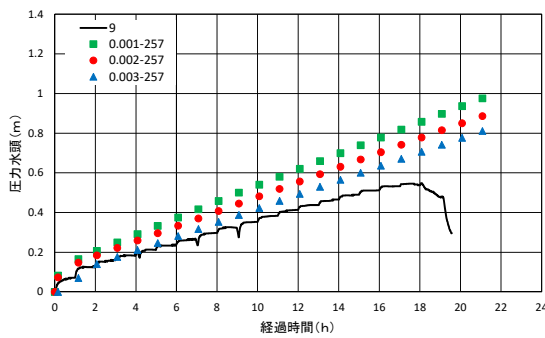


図 3-7 比較した節点番号位置 (Case1)

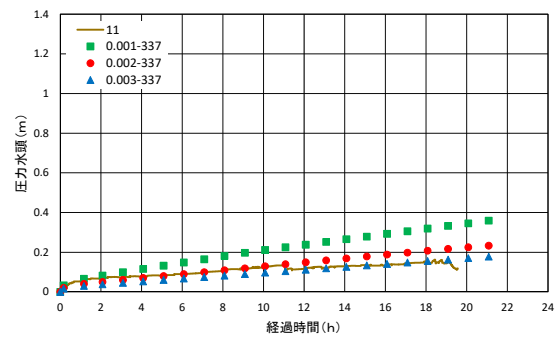


表 3-2 対応する計測器番号と節点番号 (Case1)

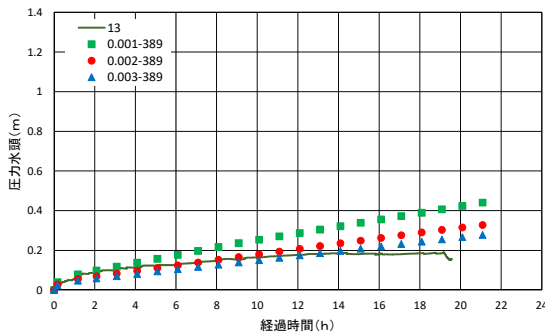
	間隙水圧計 No.	節点番号	法尻からの距離	中央からの距離
中央+1m 横断面 (ドレーンなし)	1	257	-1m	+1m
	3	337	0m(法尻)	
	5	389	+1m	
中央横断面 (ドレーンあり)	9	257	-1m	0m
	11	337	0m(法尻)	
	13	389	+1m	
	15	441	+2m	
	17	493	+3m	



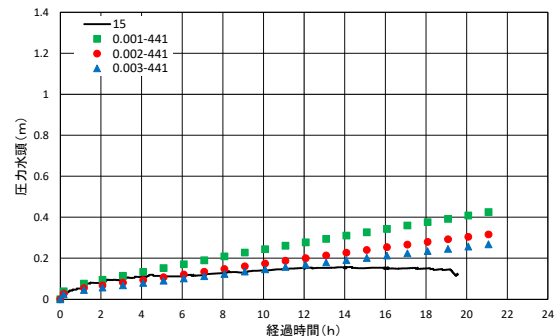
(a) 計測値と解析値の比較 (法尻-1m)



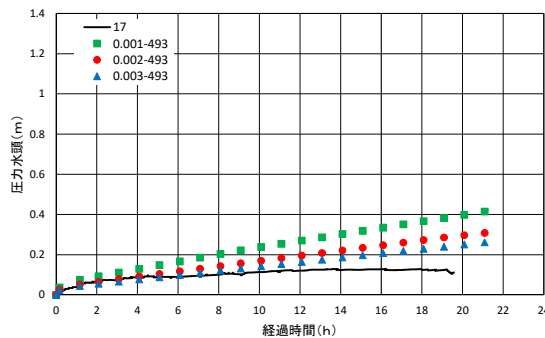
(b) 計測値と解析値の比較 (法尻)



(c) 計測値と解析値の比較 (法尻+1m)



(d) 計測値と解析値の比較 (法尻+2m)



(e) 計測値と解析値の比較 (法尻+3m)

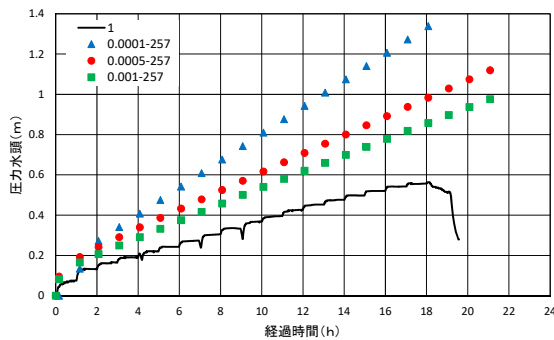
図 3-8 中央横断面の計測値と解析値の比較 (Case1)

### (3) 中央横断面の解析値と計測値

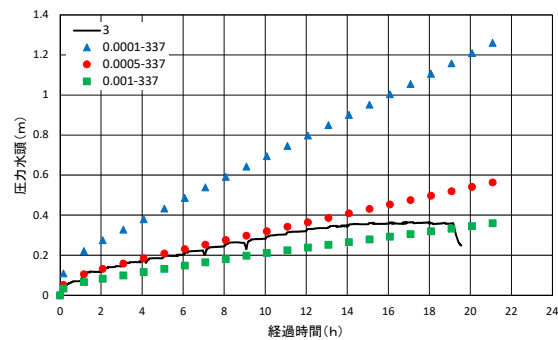
図 3-8 に中央横断面の計測値と解析値の圧力水頭の時刻歴を合わせて示す。解析値は、ドレーン(碎石)の透水係数を  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ,  $2.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ,  $2.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$  にした場合の 3 種類である。法尻部で計測値と解析値がほぼ整合したのは、ドレーンの透水係数を  $2.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$  にした場合である。

### (4) 中央+1m 横断面の解析値と計測値

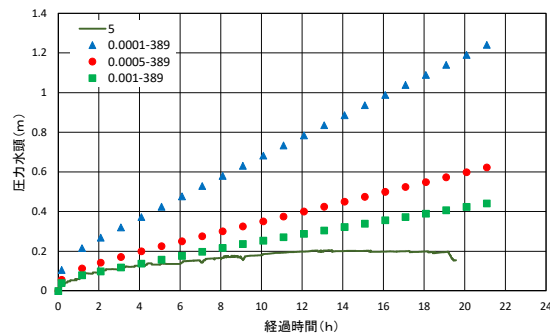
図 3-9 に中央+1m 横断面の計測値と解析値の圧力水頭の時刻歴を合わせて示す。解析値は、ドレーン(碎石)の透水係数を  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ,  $5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ,  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$  にした場合の 3 種類である。法尻部で計測値と解析値がほぼ整合したのは、ドレーンの透水係数を  $5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  にした場合である。



(a) 計測値と解析値の比較 (法尻-1m)



(b) 計測値と解析値の比較 (法尻)



(c) 計測値と解析値の比較 (法尻+1m)

図 3-9 中央+1m 横断面の計測値と解析値の比較 (Case1)

### 3.1.5 Case2 の解析結果

#### (1) モデル

Case2 は、 $\phi 1000$  の円柱縦型ドレーンを法尻中央部に 1 箇所配置したケースである。図 3-10 に Case2 の解析モデルを示す。

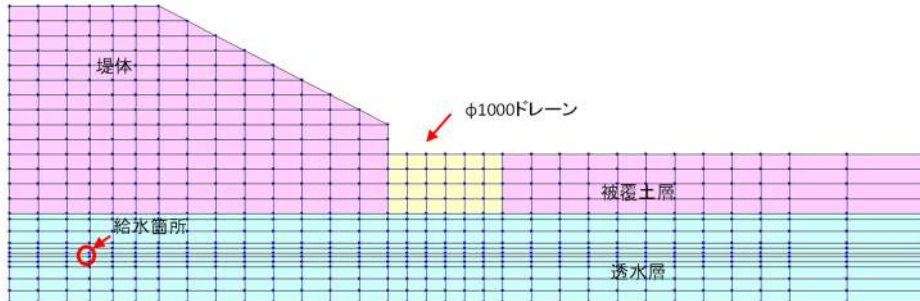


図 3-10 モデル図 (Case2)

#### (2) 間隙水圧計の番号とメッシュ節点番号

実験で計測を行った間隙水圧計の位置を図 3-11 に、対応する節点番号の位置図を図 3-12 に示す。また、計測器番号と対応する節点の番号一覧表を表 3-3 に示す。解析値と計測値の比較は、中央横断面(ドレーンあり)では 5 箇所、中央+1m 横断面(ドレーンなし)では 3 箇所において行った。

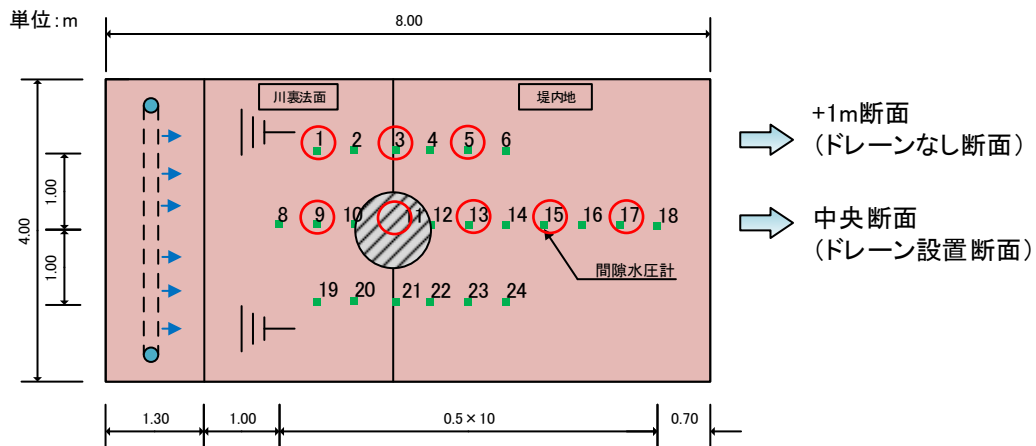


図 3-11 比較した間隙水圧計の位置 (Case2)

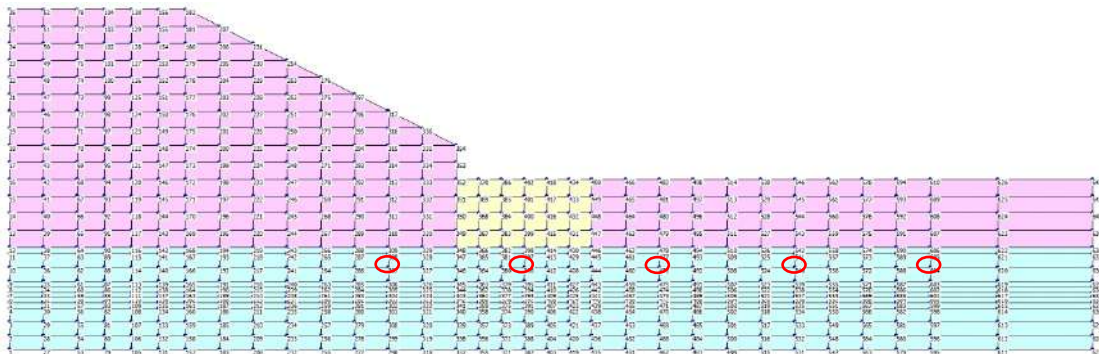
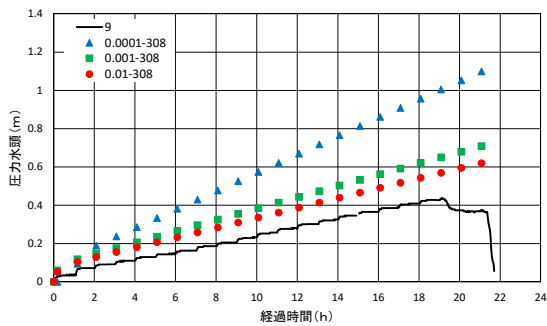


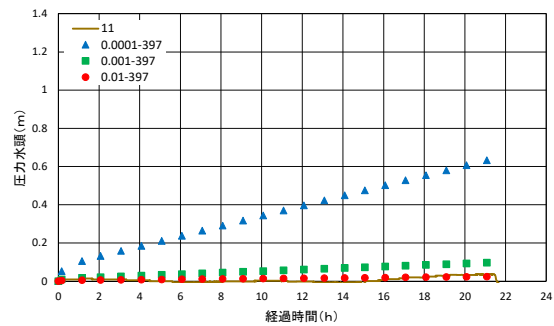
図 3-12 比較した節点番号位置 (Case2)

表 3-3 対応する計測器番号と節点番号 (Case2)

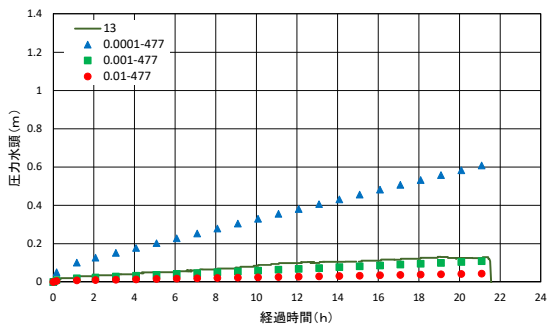
	間隙水圧計 No.	節点番号	法尻からの距離	中央からの距離
中央+1m 横断面 (ドレーンなし)	1	308	-1m	+1m
	3	397	0m(法尻)	
	5	477	+1m	
中央横断面 (ドレーンあり)	9	308	-1m	0m
	11	397	0m(法尻)	
	13	477	+1m	
	15	541	+2m	
	17	605	+3m	



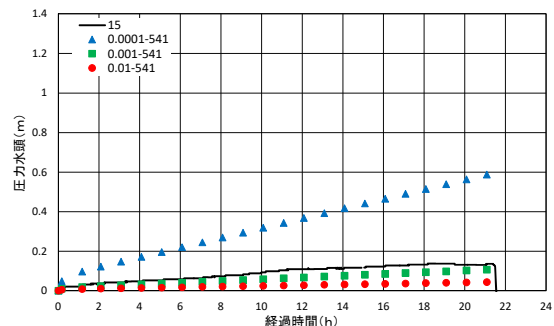
(a) 計測値と解析値の比較 (法尻-1m)



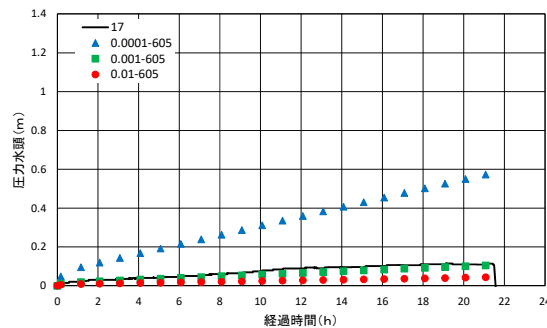
(b) 計測値と解析値の比較 (法尻)



(c) 計測値と解析値の比較 (法尻+1m)



(d) 計測値と解析値の比較 (法尻+2m)



(e) 計測値と解析値の比較 (法尻+3m)

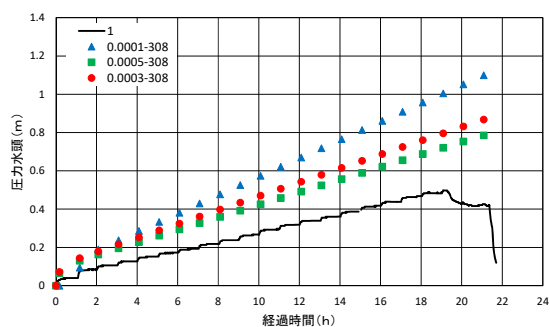
図 3-13 中央横断面の計測値と解析値の比較 (Case2)

### (3) 中央横断面の解析値と計測値

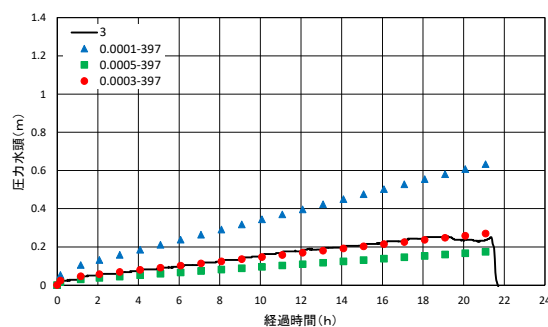
図 3-13 に中央横断面の計測値と解析値の圧力水頭の時刻歴を合わせて示す。解析値は、ドレーン(碎石)の透水係数を  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ,  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ,  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$  にした場合の 3 種類である。法尻部で計測値と解析値がほぼ整合したのは、ドレーンの透水係数を  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$  にした場合である。

### (4) 中央+1m 横断面の解析値と計測値

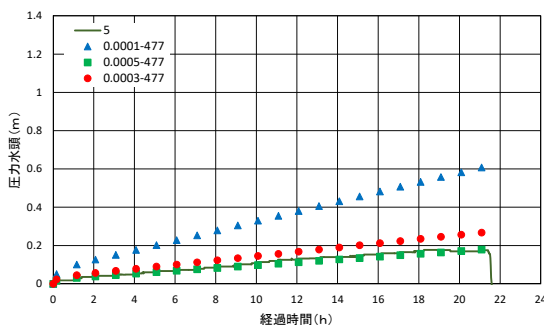
図 3-14 に中央+1m 横断面の計測値と解析値の圧力水頭の時刻歴を合わせて示す。解析値は、ドレーン(碎石)の透水係数を  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ,  $5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ,  $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  にした場合の 3 種類である。法尻部で計測値と解析値がほぼ整合したのは、ドレーンの透水係数を  $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  にした場合である。



(a) 計測値と解析値の比較 (法尻-1m)



(b) 計測値と解析値の比較 (法尻)



(c) 計測値と解析値の比較 (法尻+1m)

図 3-14 中央+1m 横断面の計測値と解析値の比較 (Case2)

### 3.1.6 Case3 の解析結果

#### (1) モデル

Case3 は、 $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻中央部から 2m 堤内地側に 1 箇所配置したケースである。図 3-15 に Case3 の解析モデルを示す。

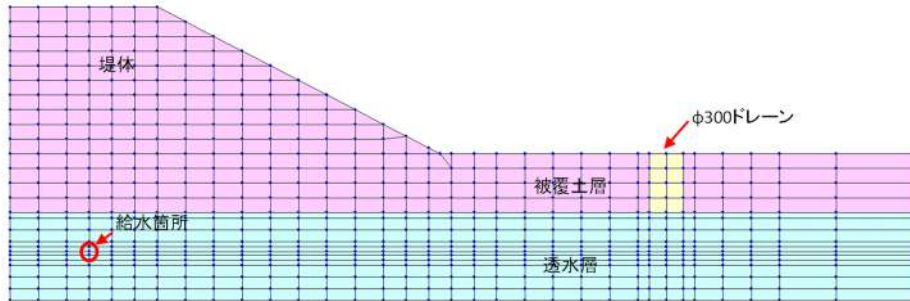


図 3-15 モデル図 (Case3)

#### (2) 間隙水圧計の番号とメッシュ節点番号

模型に設置した間隙水圧計の位置を図 3-16, 対応する節点番号の位置図を図 3-17 に示す。また, 計測器番号と対応する節点の番号一覧を表 3-4 に示す。解析値と計測値の比較は, 中央横断面(ドレーンあり)では 5 箇所, 中央+1m 横断面(ドレーンなし)では 4 箇所において行った。

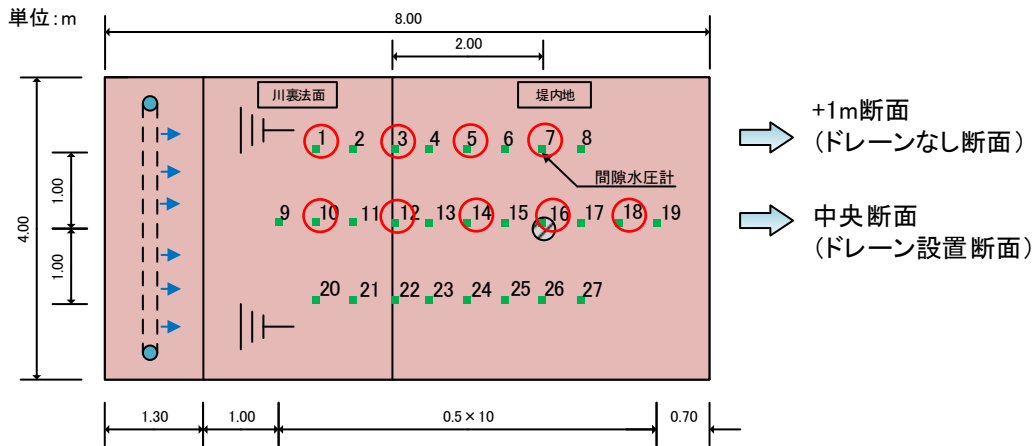


図 3-16 比較した間隙水圧計の位置 (Case3)

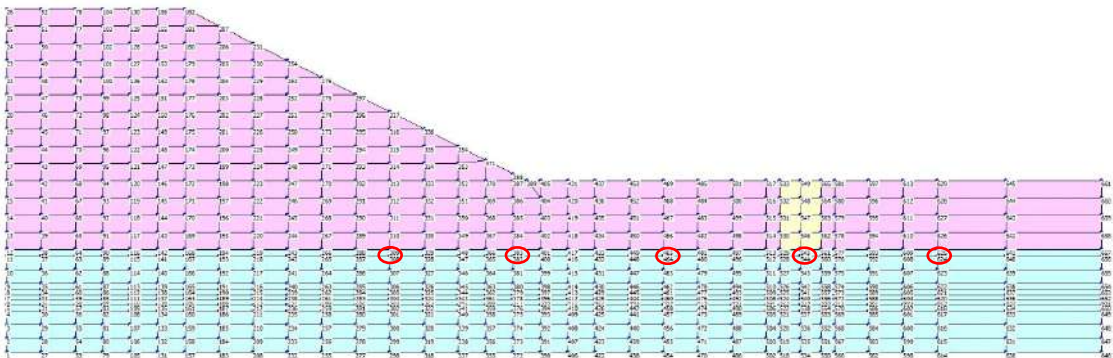
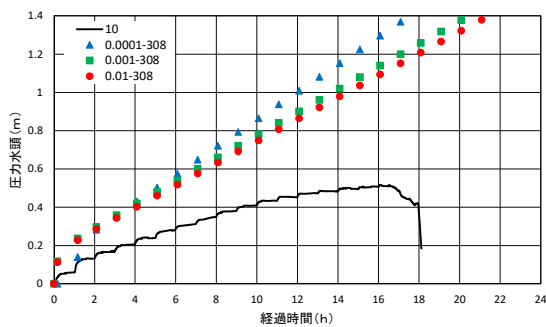


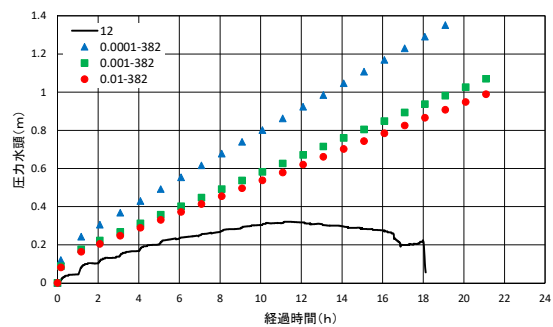
図 3-17 比較した節点番号位置 (Case3)

表 3-4 対応する計測器番号と節点番号 (Case3)

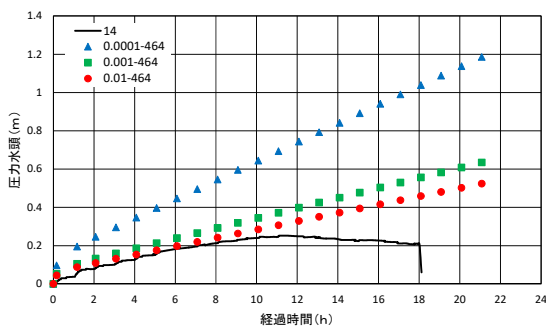
	間隙水圧計 No.	節点番号	法尻からの距離	中央からの距離
中央+1m 横断面 (ドレーンなし)	1	308	-1m	+1m
	3	382	0m(法尻)	
	5	464	+1m	
	7	544	+2m	
中央横断面 (ドレーンあり)	9	308	-1m	0m
	11	382	0m(法尻)	
	13	464	+1m	
	15	544	+2m	
	17	624	+3m	



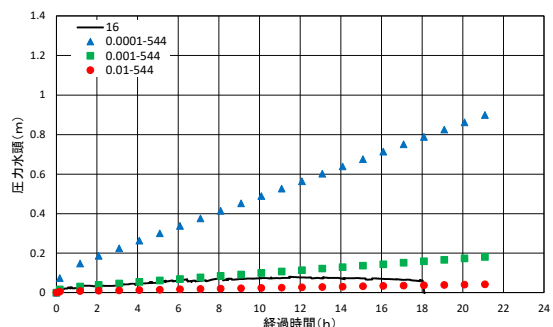
(a) 計測値と解析値の比較 (法尻-1m)



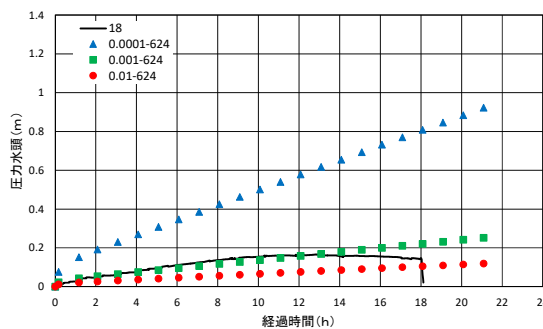
(b) 計測値と解析値の比較 (法尻)



(c) 計測値と解析値の比較 (法尻+1m)



(d) 計測値と解析値の比較 (法尻+2m)



(e) 計測値と解析値の比較 (法尻+3m)

図 3-18 中央横断面の計測値と解析値の比較 (Case3)



### (3) 中央横断面の解析値と計測値

図 3-18 に中央横断面の計測値と解析値の圧力水頭の時刻歴を合わせて示す。解析値は、ドレーン(碎石)の透水係数を  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ,  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ,  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$  にした場合の 3 種類である。法尻部で計測値と解析値がほぼ整合したのは、ドレーンの透水係数を  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$  にした場合である。

### (4) 中央+1m 横断面の解析値と計測値

図 3-19 に中央+1m 断面の計測値と解析値の圧力水頭の時刻歴を合わせて示す。解析値は、ドレーン(碎石)の透水係数を  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ,  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ,  $5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  にした場合の 3 種類である。ドレーンが設置されている法尻+2m で計測値と解析値がほぼ整合したのは、ドレーンの透水係数を  $5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  にした場合である。

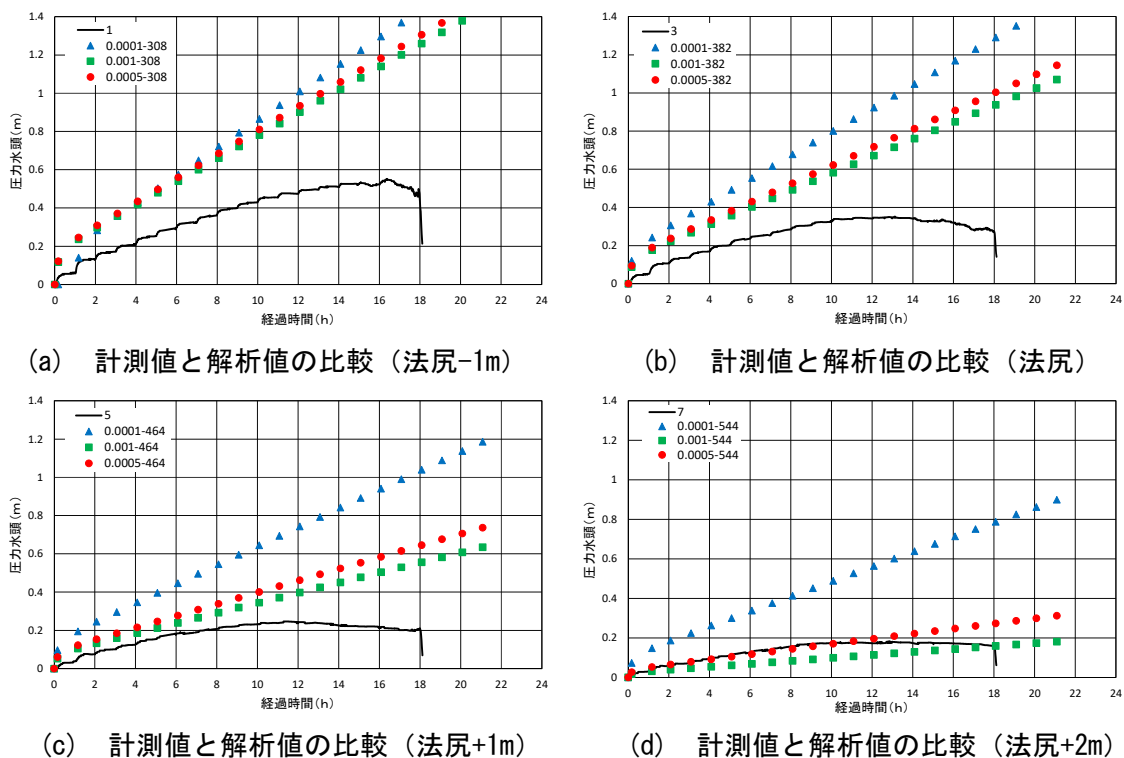


図 3-19 中央+1m 横断面の計測値と解析値の比較 (Case3)

### 3.1.7 2次元浸透流解析まとめ

堤防縦断方向に法尻に円柱縦型ドレーンを離散配置した浸透実験を対象とし、2次元飽和・不飽和非定常浸透流解析により再現解析を行い、被覆土層下面の水圧を計測値と解析値とで比較した。解析ではドレーンの透水係数を変化させたが、法尻部(ドレーン設置箇所)の計測値と解析値で整合する場合には、他の位置では乖離する結果というように、全体的に整合させることはできなかった。この結果は、中央横断面だけでなく、中央+1m 横断面でも同様であった。

法尻部(ドレーン設置部)の圧力水頭が整合した透水係数を表 3-5 に示す。中央横断面では、 $1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$  程度、中央+1m 横断面では、 $3.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  となっており、中央+1m 横断面の方が小さい。中央+1m 横断面では実際にはドレーンが存在するわけではなく、ドレーンまでの距離に応じて、

中央横断面よりも小さな透水係数を設定しないと圧力水頭が整合しないものと考えられる。

表 3-5 ドレーンの透水係数と整合箇所

ケース	ドレーン透水係数:ks(m/s)		整合箇所
	中央断面	+1m断面	
Case1	0.002	0.0005	のり尻(ドレーン設置個所)
Case2	0.01	0.0003	のり尻(ドレーン設置個所)
Case3	0.001	0.0005	のり尻+2m(ドレーン設置個所)

分散配置された円柱縦ドレーンの場合には、ドレーンの効果が及び難いドレーン間の圧力水頭で効果を確認する必要があり、これを2次元浸透流解析で確認するには、中央+1m横断面で整合した透水係数のような低減した透水係数を設定する必要がある。この透水係数は、ドレーンの透水係数、ドレーンの形状、ドレーンの間隔等に応じて変化することが考えられるが、これを簡易的に設定するのは困難である。また、前述のとおり、被覆土層下面に作用する圧力を全体的に実験と整合する解析条件を、2次元の解析では見出すことができなかつたことから、分散配置の円柱ドレーンの効果を2次元浸透流解析を用いて評価することは困難であると現時点では判断せざるを得ない。

## 3.2 3次元飽和・不飽和非定常浸透流解析

### 3.2.1 解析目的

第1節では、2次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析を行い、ドレーンの透水係数を変化させることで実験を再現できるかを検証した。ドレーンの透水係数を変化させるだけでは、堤防縦断方向に離散配置された円柱縦型ドレーンの効果を2次元解析では再現することはできなかった。そのため、3次元浸透流解析を行った。本検討では、ドレーンの透水係数に加えて、被覆土層(ローム)の透水係数についても変化させることとした。

### 3.2.2 解析方法

実験において被覆土層下面で計測した間隙水圧と解析の結果を比較した。計測値と解析値に乖離がある場合は、ドレーン(碎石)の透水係数と被覆土層(ローム)の透水係数を変化させ、ある程度一致するまでパラメトリックスタディーを行った。モデルの例として、Case1を対象とした解析モデルを図3-20に示す。

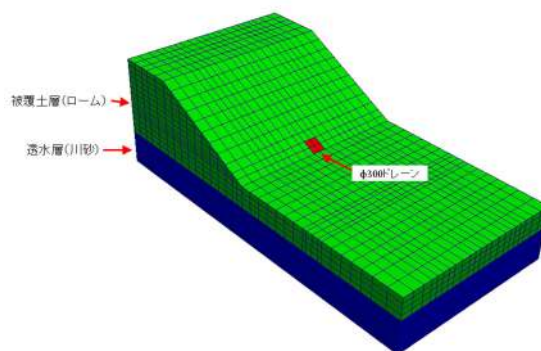


図 3-20 モデル図 (Case1)

検討に用いた浸透流解析プログラムは、Dtransu-3D・EL<sup>6)</sup>である。Dtransu-3Dは、ソースコードが公開されている。3次元飽和・不飽和浸透流解析の支配方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( k \frac{d\psi}{dz} + k \right) \right] - q = (\beta S_s + C) \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

- ここに、
- $x$  : 堤防横断面の水平方向の軸
  - $z$  : 堤防横断面の鉛直方向の軸
  - $y$  : 堤防縦断方向の軸
  - $k$  : 透水係数 (m/hr)
  - $\psi$  : 圧力水頭(m)
  - $q$  : 流出流入項
  - $S_s$  : 比貯留係数 (1/m)
  - $C$  : 比水分容量 (1/m)

$\beta$  : 1 の場合, 飽和領域。0 の場合, 不飽和領域

$t$  : 時間 (hr)

ここで, 比水分容量  $C$  は水分特性曲線の接線勾配として与え, 比貯留係数  $S_s$  は, 川砂を  $1 \times 10^{-4}$  (1/m), ロームを  $1 \times 10^{-3}$  (1/m) と設定した。

### 3.2.3 解析条件

解析条件の設定のうち透水層(川砂)の透水係数は, 室内試験の結果を採用し, 不飽和特性は, 「河川堤防の構造検討の手引き」<sup>2)</sup>(以下, 「手引き」)から粘性土(ローム)と砂質土(川砂)を採用した。初期条件として, 被覆土層表面までを飽和状態とし, 実験で与えた水位を時系列的に解析でも与えた。また, 実験の土槽は, 側面と底面の5面がコンクリート張りとなっているため, 鉛直面と底面を不透水境界とし, 地表面全てを浸出境界とした。

上記パラメータを設定した後, 実験で得られた間隙水圧計の計測値と解析結果が整合するドレーン(碎石)と被覆土層(ローム)の透水係数を推定した。

解析で設定したパラメータ一覧を表 3-6 に示す。手引きに記載されている不飽和特性は前述の図 3-3, 図 3-4 を使用した。

表 3-6 解析パラメータ一覧

	飽和透水係数 (m/sec) 試験値	有効間隙率 手引き参照	比貯留係数 (1/m) 手引き参照	不飽和特性
堤体・被覆土層 (ローム)	変数	0.1	$1.0 \times E-3$	手引き 図 3-3, 図 3-4
透水層 (川砂)	$3.4 \times E-4$	0.2	$1.0 \times E-4$	
ドレーン (碎石)	変数	0.2	$1.0 \times E-4$	

### 3.2.4 Case1 の解析結果

#### (1) モデル

Case1 は $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻部中央に配置したケースである。図 3-21 に Case1 の解析モデルを示す。同図左側は全体図であり、図右側はドレーンがある断面(中央断面)で切断した半断面である。

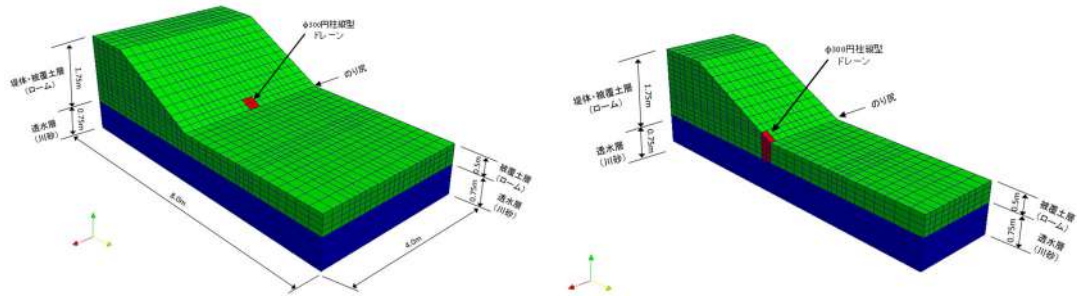


図 3-21 モデル図 (Case1)

#### (2) 流速ベクトル

図 3-22 に実験開始後約 8 時間、水位 1m の時点の流速のベクトル図を示す。図の半分は、解析結果の流速ベクトルを示し、半分はモデルの形状を示している。

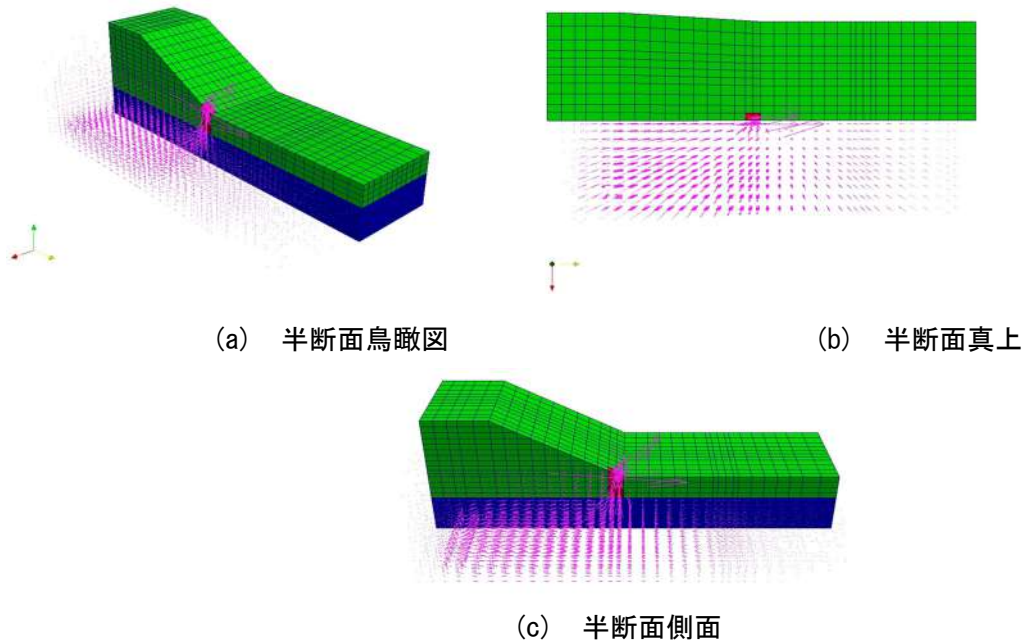


図 3-22 実験開始約 8 時間後 (水位 1m) の流速ベクトル (Case1)

### (3) 透水係数の推定

表 3-7 に Case1 に関する解析のドレーン及び被覆土層の透水係数の組み合わせを示す。

計測値と解析値の比較は、間隙水圧計を設置した 23 箇所において行った。表中の○印は、計測値と解析値がほぼ整合した解析のケース、△印は、ある部分では整合がみられるが、整合していない箇所もある場合、×印は整合していない場合である。整合した組み合わせとともに表中の乖離①、②の圧力水頭の時刻歴を示す。

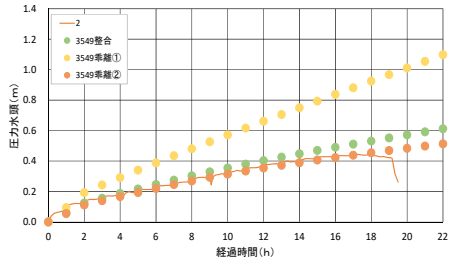
表 3-7 解析ケース一覧 (Case1, 表中の数字は透水係数 (m/s) を表す)

ローム	× e-4		× e-5									× e-6	
	1.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.9	1.0	1.9	
砕石													
1.	×										×	×	
0.5													
0.1	乖離②												
0.09													
0.07								△					
0.05						△							
0.04													
0.03					○		△						
0.02													
0.01	×			△									
0.009								△					
0.008													
0.007													
0.006													
0.005	×												
0.004	○		△										
0.003	×			×		×						乖離①	
0.002	×												
0.001	×												

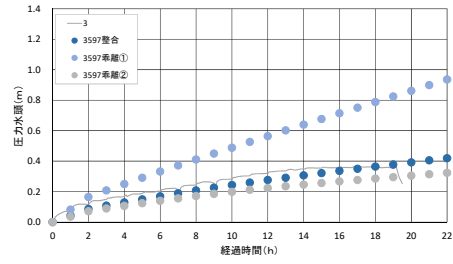
### (4) 計測値と解析値

図 3-23 に解析で得られた圧力水頭が実験とある程度整合した組み合わせと乖離した組み合わせの間隙水圧の時刻歴を示す。ドレーンのない中央+1.0mの横断面から 2 箇所、ドレーンが設置されている中央横断面から 2 箇所を代表として比較しており、その位置を図 3-24 に示す。また、図 3-24 以外の箇所については、付録 D.1 にまとめた。

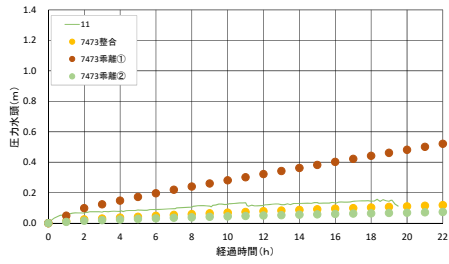
図 3-23 に示す整合したケースの透水係数は、ドレーン(砕石)が  $3.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $6.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  であった。乖離がみられた透水係数は、乖離①ではドレーン(砕石)が  $3.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  である。乖離②ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-1} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  である。



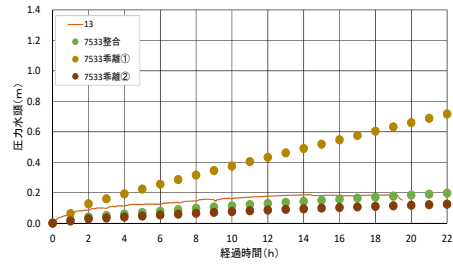
(a) 法尻-0.5m (中央+1.0m 横断面)



(b) 法尻 (中央+1.0m 横断面)



(c) 法尻 (中央横断面)



(d) 法尻+1m (中央横断面)

図 3-23 計測値と解析値 (Case1)

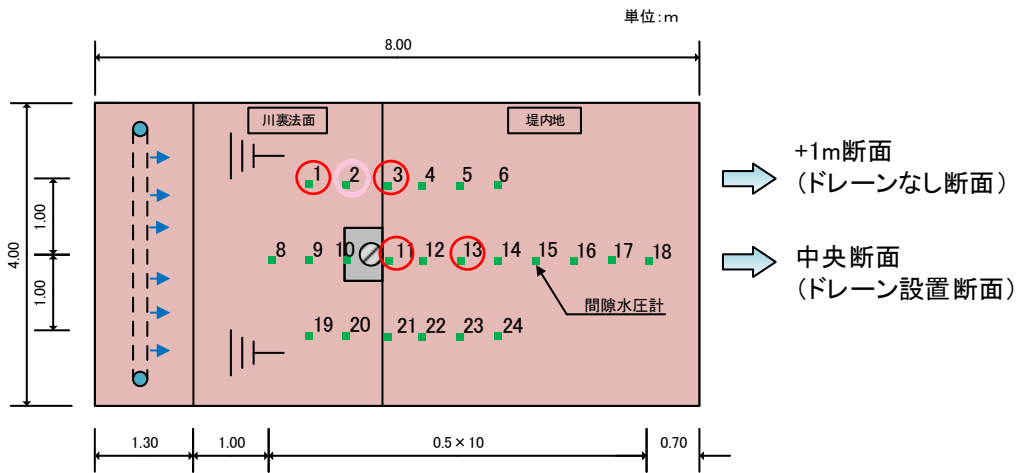


図 3-24 計測値と解析値を比較した位置 (Case1)



### 3.2.5 Case2 の解析結果

#### (1) モデル

Case2 は $\phi 1000$  の円柱縦型ドレーンを法尻部中央に設置したケースである。図 3-25 に Case2 の解析モデルを示す。同図左側は全体図であり、図右側はドレーンがある断面(中央断面)で切断した半断面である。

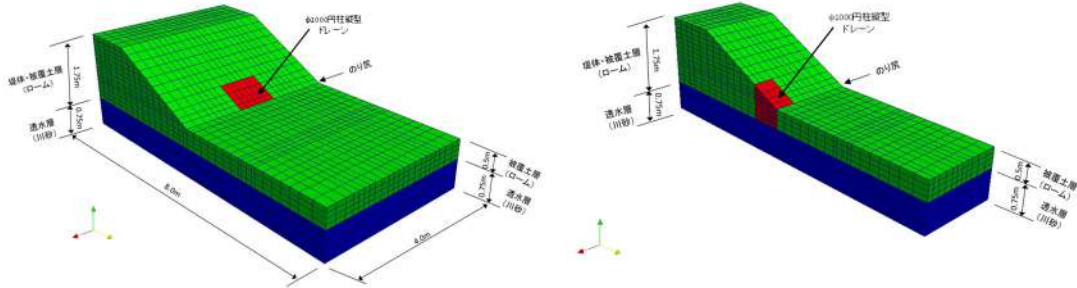


図 3-25 モデル図 (Case2)

#### (2) 流速ベクトル

図 3-26 に実験開始後約 8 時間、水位 1m の時点の流速のベクトル図を示す。図の半分は、解析結果の流速ベクトルを示し、半分はモデルの形状を示している。

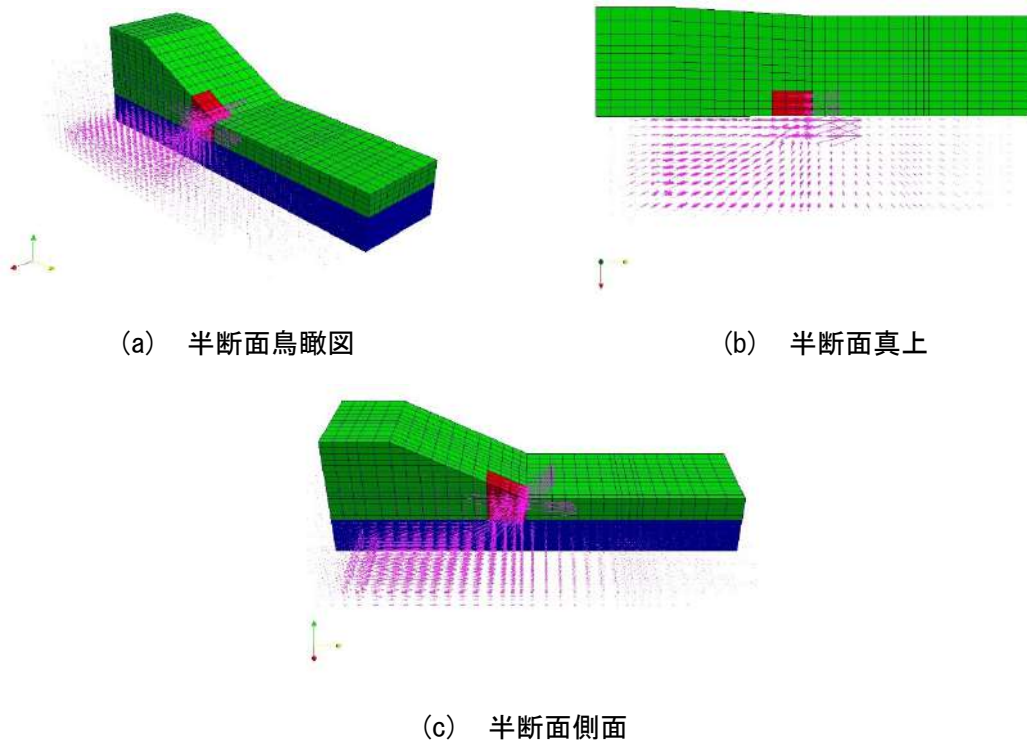


図 3-26 実験開始約 8 時間後 (水位 1m) の流速ベクトル (Case2)

### (3) 透水係数の推定

表 3-8 に Case2 に関する解析のドレーン及び被覆土層の透水係数の組み合わせを示す。

計測値と解析値の比較は、間隙水圧計を設置した 23 箇所において行った。表中の○印は、計測値と解析値がほぼ整合した解析のケース、△印は、ある部分では整合がみられるが、整合していない箇所もある場合、×印は整合していない場合である。整合した組み合わせとともに、表中の乖離①、②の圧力水頭の時刻歴を示す。

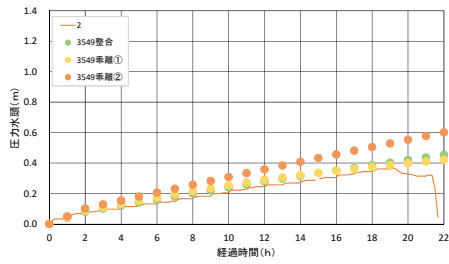
表 3-8 解析ケース一覧 (Case2, 表中の数字は透水係数 (m/s) を表す)

ローム	× e-4			× e-5								× e-6	
	1.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.9	1.0	1.9	
砕石													
1.								○					
0.5								○					
0.1													
0.09								△					
0.07								△					
0.05								△					
0.04													
0.03													
0.02													
0.01												乖離②	
0.009								△					
0.008													
0.007													
0.006													
0.005													
0.004		乖離①											
0.003													
0.002													
0.001													

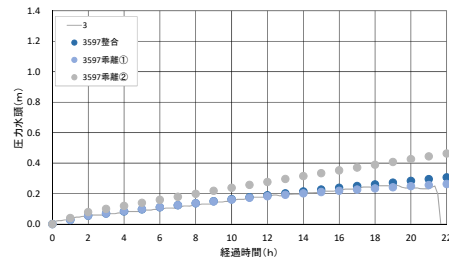
### (4) 計測値と解析値

図 3-27 に解析で得られた圧力水頭が実験とある程度整合した組み合わせと乖離した組み合わせの間隙水圧の時刻歴を示す。ドレーンのない中央+1.0mの横断面から 2 箇所, ドレーンが設置されている中央横断面から 2 箇所を代表として比較しており, その位置を図 3-28 に示す。また, 図 3-27 以外の箇所については, 付録 D.2 にまとめた。

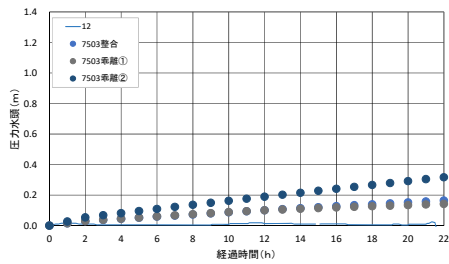
図 3-27 に示す整合したケースの透水係数は, ドレーン(砕石)が  $5.0 \times 10^{-1} \text{m/s}$ , 被覆土層(ローム)が  $3.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  であった。乖離がみられた透水係数は, 乖離①ではドレーン(砕石)が  $4.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ , 被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  である。乖離②ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ , 被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  である。



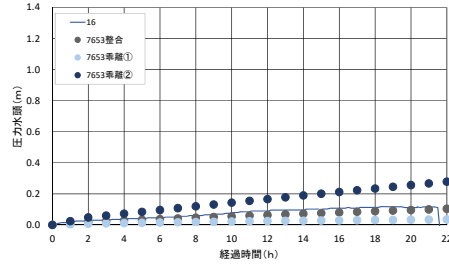
(a) 法尻-0.5m (中央+1.0m 横断面)



(b) 法尻 (中央+1.0m 横断面)



(c) 法尻 (中央横断面)



(d) 法尻+1m (中央横断面)

図 3-27 計測値と解析値 (Case2)

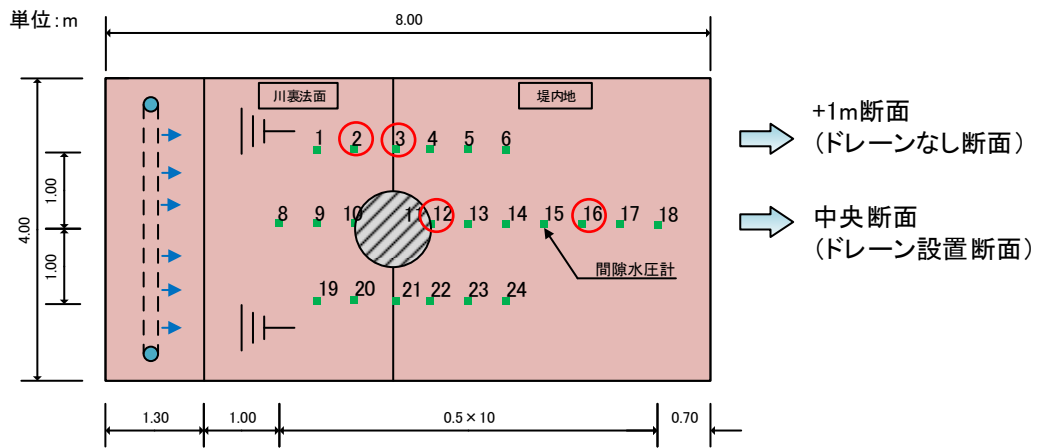


図 3-28 計測値と解析値を比較した位置 (Case2)

### 3.2.6 Case3 の解析結果

#### (1) モデル

Case3 は $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻中央部から 2m 堤内地側に 1 箇所配置したケースである。図 3-29 に Case3 の解析モデルを示す。同図左側は全体図であり、図右側はドレーンがある断面(中央断面)で切断した半断面である。

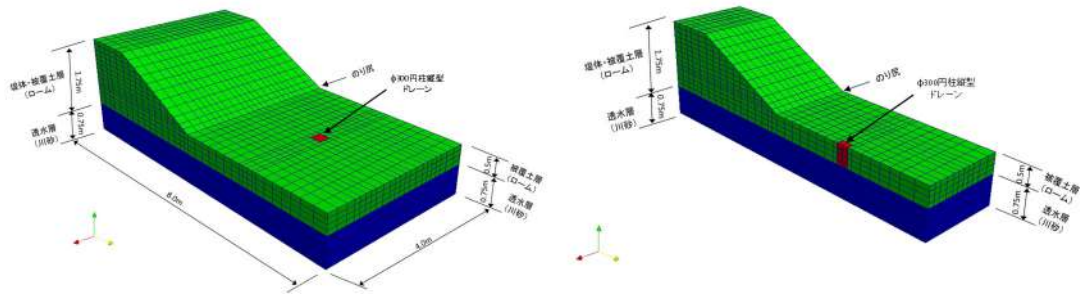


図 3-29 モデル図 (Case3)

#### (2) 流速ベクトル

図 3-30 に実験開始後約 8 時間、水位 1m の時点の流速のベクトル図を示す。図の半分は、解析結果の流速ベクトルを示し、半分はモデルの形状を示している。

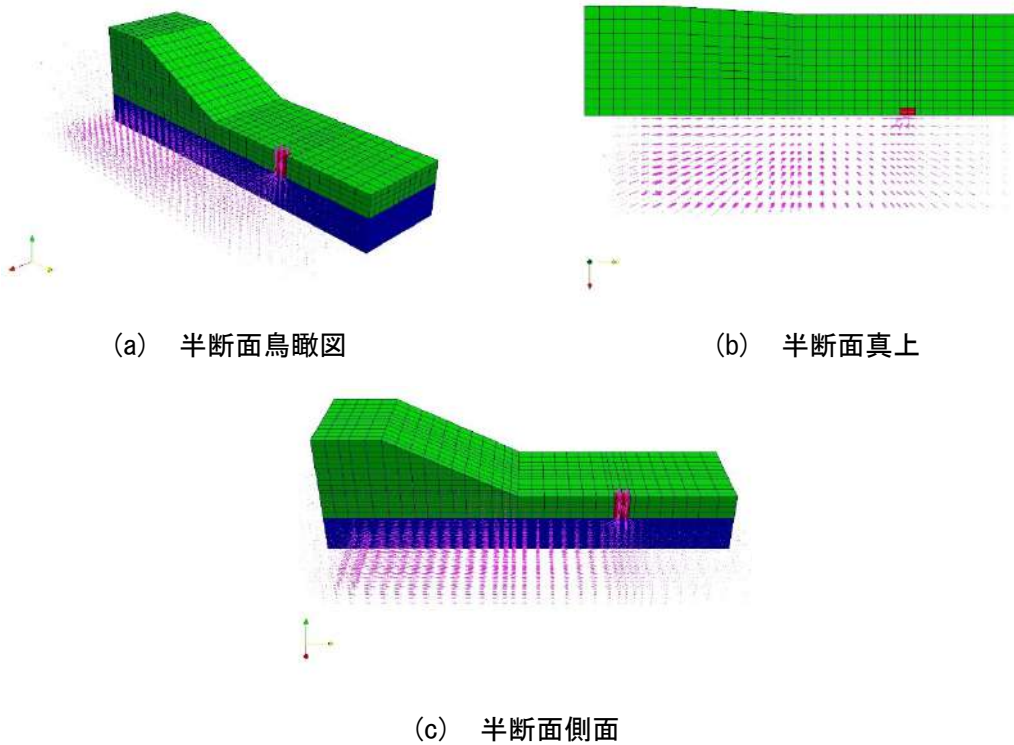


図 3-30 実験開始約 8 時間後 (水位 1m) の流速ベクトル (Case3)

### (3) 透水係数の推定

表 3-9 に Case3 に関する解析のドレーン及び被覆土層の透水係数の組み合わせを示す。

計測値と解析値の比較は、間隙水圧計を設置した 27 箇所において行った。表中の○印は、計測値と解析値がほぼ整合した解析のケース、△印は、ある部分では整合がみられるが、整合していない箇所もある場合、×印は整合していない場合である。整合した組み合わせとともに、表中の乖離①、②の圧力水頭の時刻歴を示す。

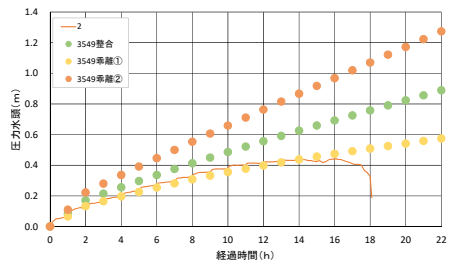
表 3-9 解析ケース一覧 (Case3, 表中の数字は透水係数 (m/s) を表す)

ローム	× e-4			× e-5								× e-6	
	1.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.9	1.0	1.9	
砕石													
1.													
0.5													
0.1													
0.09									△				
0.07								○	△				
0.05									△				
0.04													
0.03													
0.02													
0.01													
0.009													
0.008													
0.007									△				
0.006													
0.005								△					
0.004													
0.003	乖離①			×		×							
0.002													
0.001											乖離②		

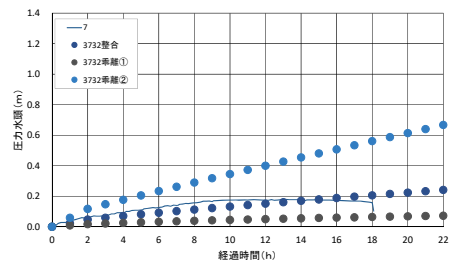
### (4) 計測値と解析値

図 3-31 に解析で得られた圧力水頭が実験とある程度整合した組み合わせと乖離した組み合わせの間隙水圧の時刻歴を示す。ドレーンのない中央+1.0mの横断面から 2 箇所、ドレーンが設置されている中央横断面から 2 箇所を代表として比較しており、その位置を図 3-32 に示す。また、図 3-31 以外の箇所については、付録 D.3 にまとめた。

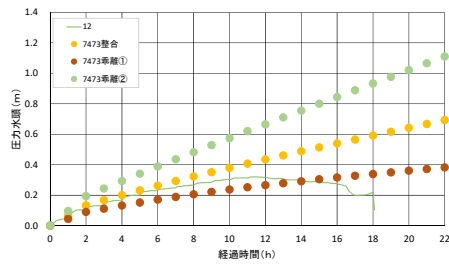
図 3-31 に示す整合したケースの透水係数は、ドレーン(砕石)が  $7.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $3.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  であった。乖離がみられた透水係数は、乖離①ではドレーン(砕石)が  $3.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  である。乖離②ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  である。



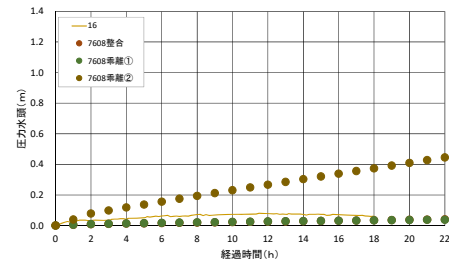
(a) 法尻-0.5m (中央+1.0m 横断面)



(b) 法尻 (中央+1.0m 横断面)



(c) 法尻 (中央横断面)



(d) 法尻+2.0m (中央横断面)

図 3-31 計測値と解析値 (Case3)

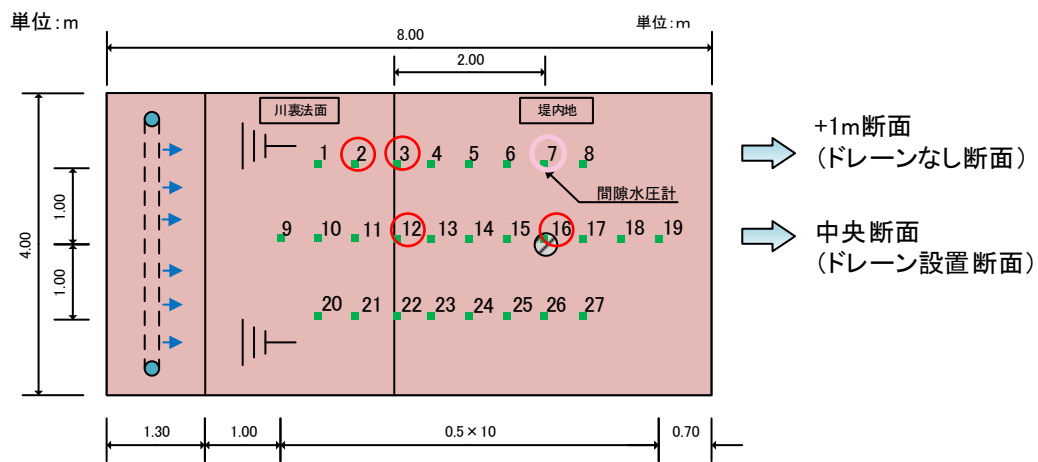


図 3-32 計測値と解析値を比較した位置 (Case3)

### 3.2.7 Case4 の解析結果

#### (1) モデル

Case4 は $\phi 300$  の円柱縦型ドレーンを法尻部に1mの間隔をあけて2箇所設置したケースである。図 3-33 に Case4 の解析モデルを示す。同図左側は全体図であり、図右側はドレーンがある断面(中央-1.0m 断面)で切断した半断面である。

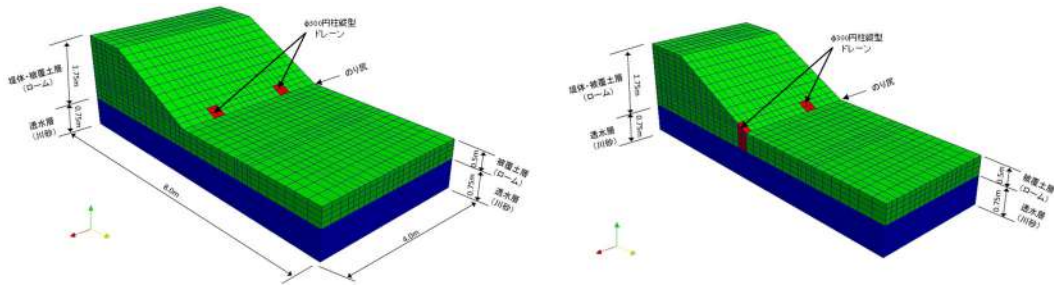


図 3-33 モデル図 (Case4)

#### (2) 流速ベクトル

図 3-34 に実験開始後約 8 時間、水位 1m の時点の流速のベクトル図を示す。図の半分は、解析結果の流速ベクトルを示し、半分はモデルの形状を示している。

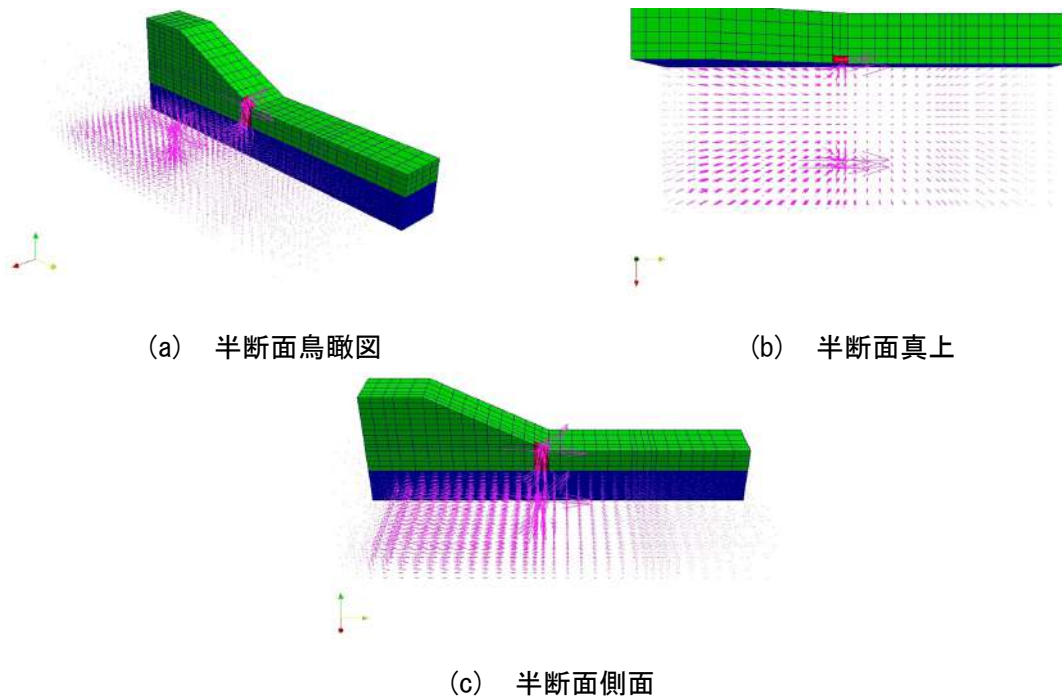


図 3-34 実験開始約 8 時間後 (水位 1m) の流速ベクトル (Case4)



### (3) 透水係数の推定

表 3-10 に Case4 に関する解析のドレーン及び被覆土層の透水係数の組み合わせを示す。

計測値と解析値の比較は、間隙水圧計を設置した 35 箇所において行った。表中の○印は、計測値と解析値がほぼ整合した解析のケース、△印は、ある部分では整合がみられるが、整合していない箇所もある場合、×印は整合していない場合である。整合した組み合わせとともに、表中の乖離①、②の圧力水頭の時刻歴を示す。

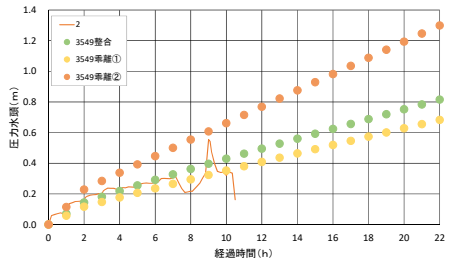
表 3-10 解析ケース一覧 (Case4, 表中の数字は透水係数 (m/s) を表す)

ローム	× e-4		× e-5								× e-6	
	1.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.9	1.0	1.9
砕石												
1.											×	
0.5												
0.1												
0.09												
0.07												
0.05												
0.04												
0.03												
0.02												
0.01											乖離①	
0.009												
0.008												
0.007											×	
0.006												
0.005											×	
0.004												
0.003						×					○	
0.002												
0.001	×										×	乖離②

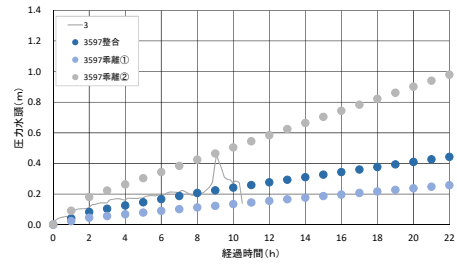
### (4) 計測値と解析値

図 3-35 に解析で得られた圧力水頭が実験とある程度整合した組み合わせと乖離した組み合わせの間隙水圧の時刻歴を示す。ドレーンのない中央横断面から 2 箇所、ドレーンが設置されている中央+1.0m 横断面から 2 箇所を代表として比較しており、その位置を図 3-36 に示す。また、図 3-35 以外の箇所については、付録 D.4 にまとめた。

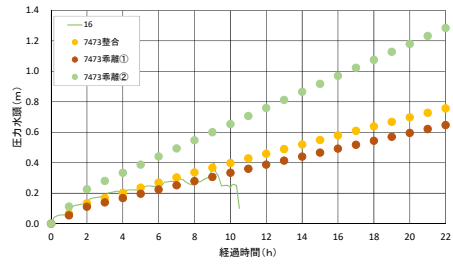
図 3-35 に示す整合したケースの透水係数は、ドレーン(砕石)が  $3.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  であった。乖離がみられた透水係数は、乖離①ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  である。乖離②ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$  である。



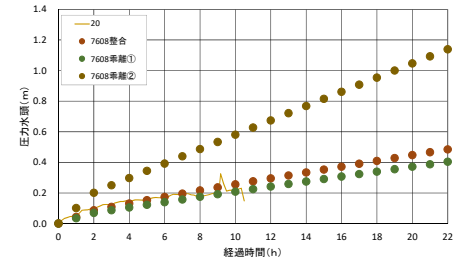
(a) 法尻-0.5m (中央+1.0m 横断面)



(b) 法尻 (中央+1.0m 横断面)



(c) 法尻 (中央横断面)



(d) 法尻+2.0m (中央横断面)

図 3-35 計測値と解析値 (Case4)

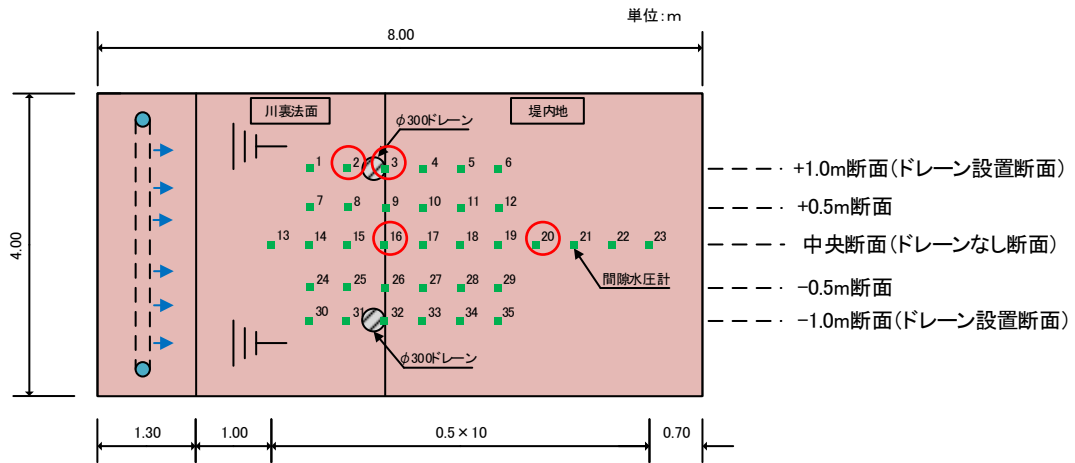


図 3-36 計測値と解析値を比較した位置 (Case4)

### 3.2.8 Case5 の解析結果

#### (1) モデル

Case5 は $\phi 140$  の円柱縦型ドレーンを法尻部に1mの間隔をあけて3箇所設置したケースである。図 3-37 に Case5 の解析モデルを示す。同図左側は全体図であり、図右側はドレーンがある断面(中央断面)で切断した半断面である。

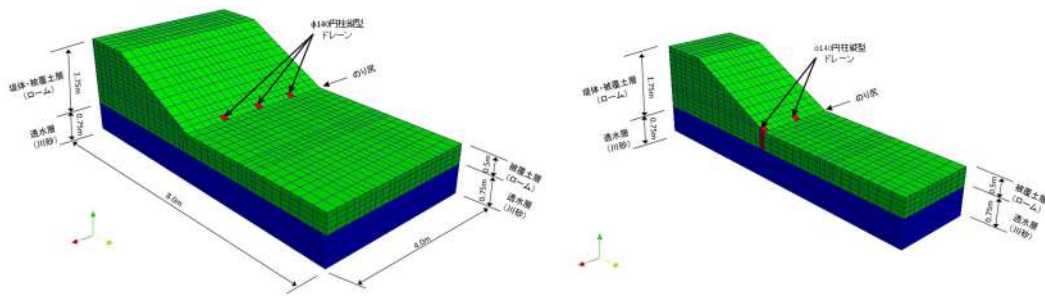


図 3-37 モデル図 (Case5)

#### (2) 流速ベクトル

図 3-38 に実験開始後約 8 時間、水位 1m の時点の流速のベクトル図を示す。図の半分は、解析結果の流速ベクトルを示し、半分はモデルの形状を示している。

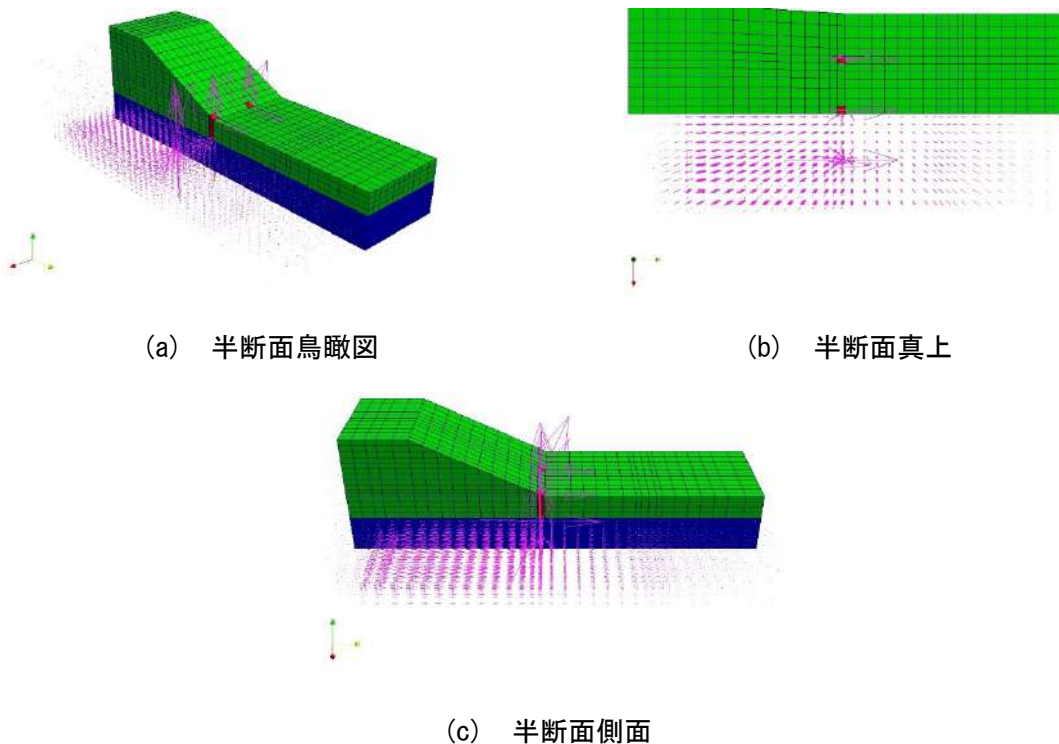


図 3-38 実験開始約 8 時間後 (水位 1m) の流速ベクトル (Case5)

### (3) 透水係数の推定

表 3-11 に Case5 に関する解析のドレーン及び被覆土層の透水係数の組み合わせを示す。

計測値と解析値の比較は、間隙水圧計を設置した 35 箇所において行った。表中の○印は、計測値と解析値がほぼ整合した解析のケース、△印は、ある部分では整合がみられるが、整合していない箇所もある場合、×印は整合していない場合である。整合した組み合わせとともに、表中の乖離①、②の圧力水頭の時刻歴を示す。

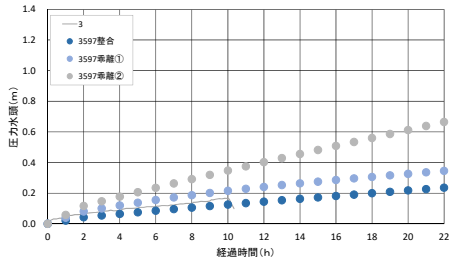
表 3-11 解析ケース一覧 (Case5, 表中の数字は透水係数 (m/s) を表す)

ローム	× e-4		× e-5									× e-6	
	1.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.9	1.0	1.9	
砕石													
1.													
0.5													
0.1													
0.09													
0.07													
0.05										△			
0.04										○			
0.03										○			
0.02													
0.01										△		×	
0.009									△	△			
0.008									△				
0.007									△	△		×	
0.006													
0.005									△				
0.004													
0.003	△			×		△						乖離②	
0.002													
0.001	乖離①												

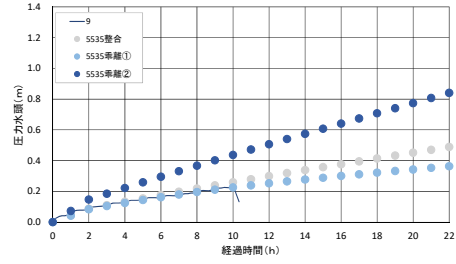
### (4) 計測値と解析値

図 3-39 に解析で得られた圧力水頭が実験とある程度整合した組み合わせと乖離した組み合わせの間隙水圧の時刻歴を示す。ドレーンのない中央横断面から 2 箇所, ドレーンが設置されている中央+1.0m 横断面から 2 箇所を代表として比較しており, その位置を図 3-40 に示す。また, 図 3-39 以外の箇所については, 付録 D. 4 にまとめた。

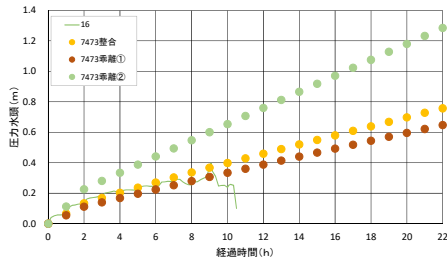
図 3-39 に示す整合したケースの透水係数は, ドレーン(砕石)が  $3.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ , 被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  であった。乖離がみられた透水係数は, 乖離①ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ , 被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  である。乖離②ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ , 被覆土層(ローム)が  $1.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$  である。



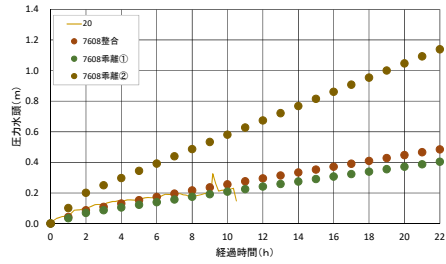
(a) 法尻 (中央+1.0m 横断面)



(b) 法尻 (中央+0.5m 横断面)



(c) 法尻 (中央横断面)



(d) 法尻+2.5m (中央横断面)

図 3-39 計測値と解析値 (Case5)

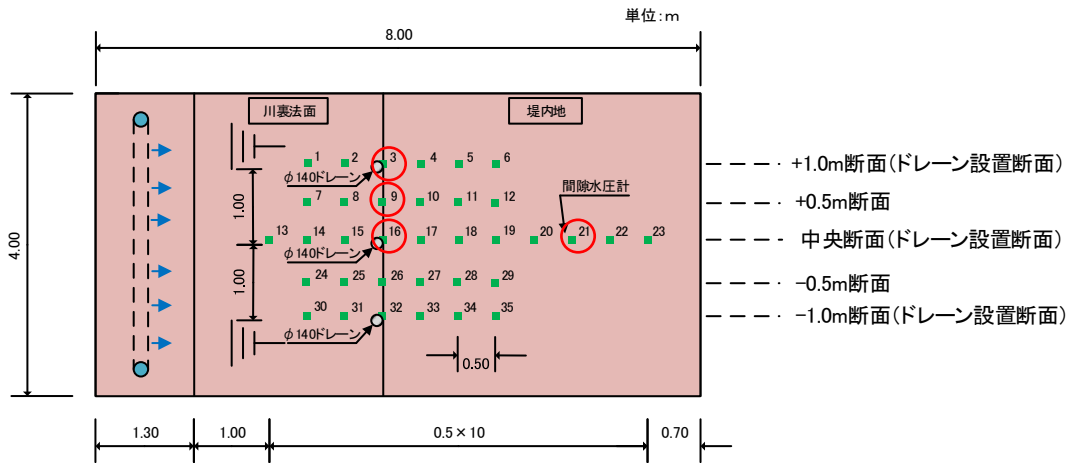


図 3-40 計測値と解析値を比較した位置 (Case5)

### 3.2.9 Case6 の解析結果

#### (1) モデル

Case6 は $\phi 100$  の円柱縦型ドレーンを法尻部に 1 箇所設置したケースである。図 3-41 に Case6 の解析モデルを示す。同図左側は全体図であり、図右側はドレーンがある断面(中央断面)で切断した半断面である。

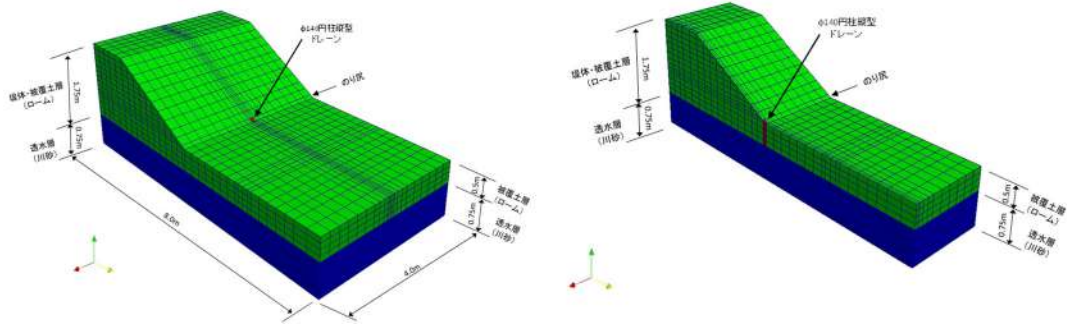
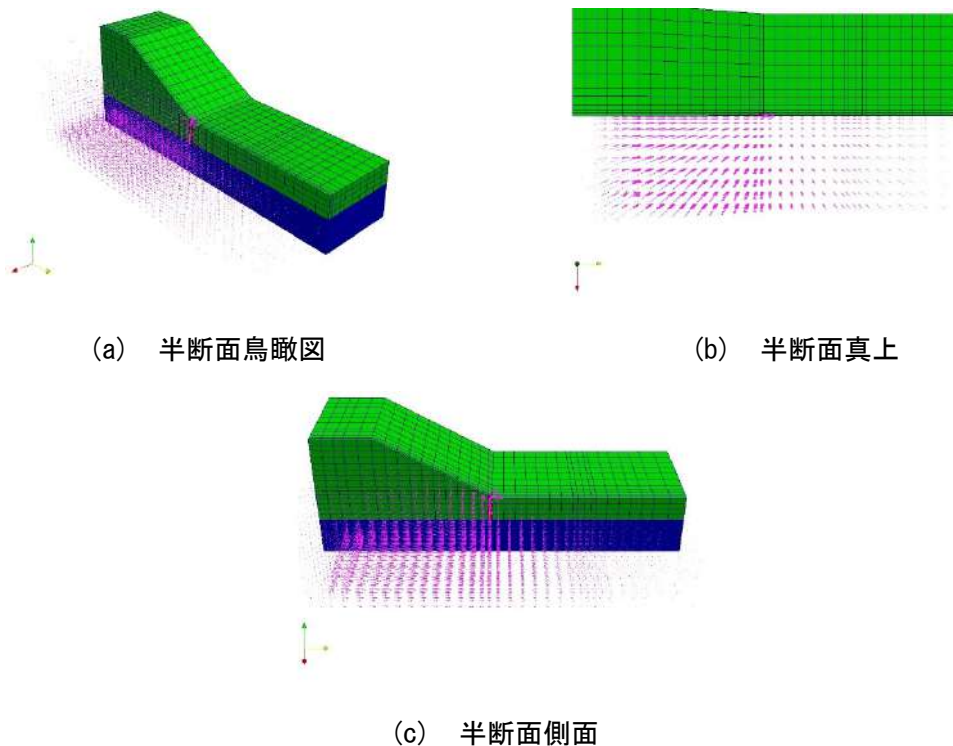


図 3-41 モデル図 (Case6)

#### (2) 流速ベクトル

図 3-42 に実験開始後約 8 時間、水位 1m の時点の流速のベクトル図を示す。図の半分は、解析結果の流速ベクトルを示し、半分はモデルの形状を示している。



(a) 半断面鳥瞰図

(b) 半断面真上

(c) 半断面側面

図 3-42 実験開始約 8 時間後 (水位 1m) の流速ベクトル (Case6)

### (3) 透水係数の推定

表 3-12 に Case6 に関する解析のドレーン及び被覆土層の透水係数の組み合わせを示す。

計測値と解析値の比較は、間隙水圧計を設置した 35 箇所において行った。表中の○印は、計測値と解析値がほぼ整合した解析のケース、△印は、ある部分では整合がみられるが、整合していない箇所もある場合、×印は整合していない場合である。整合した組み合わせとともに、表中の乖離①、②の圧力水頭の時刻歴を示す。

表 3-12 解析ケース一覧 (Case6, 表中の数字は透水係数 (m/s) を表す)

ローム	× e-4		× e-5								× e-6	
	1.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.9	1.0	1.9
砕石												
1.												
0.5												
0.1												
0.09									乖離①			
0.07												
0.05			△					△				×
0.04												
0.03												
0.02												
0.01												
0.009												
0.008												
0.007			△									
0.006												
0.005												
0.004												
0.003												
0.002												
0.001	○		○				△					乖離②

### (4) 計測値と解析値

図 3-43 に解析で得られた圧力水頭が実験とある程度整合した組み合わせと乖離した組み合わせの間隙水圧の時刻歴を示す。ドレーンが設置されていない中央+1.0mの横断面から 1 箇所、中央+0.5m 横断面から 1 箇所、ドレーンが設置されている中央横断面から 2 箇所を代表として比較しており、その位置を図 3-44 に示す。また、図 3-43 以外の箇所については、付録 D. 6 にまとめた。

図 3-43 に示す整合したケースの透水係数は、ドレーン(砕石)が  $9.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $2.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  であった。乖離がみられた透水係数は、乖離①ではドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  である。乖離②はドレーン(砕石)が  $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、被覆土層(ローム)が  $1.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$  である。



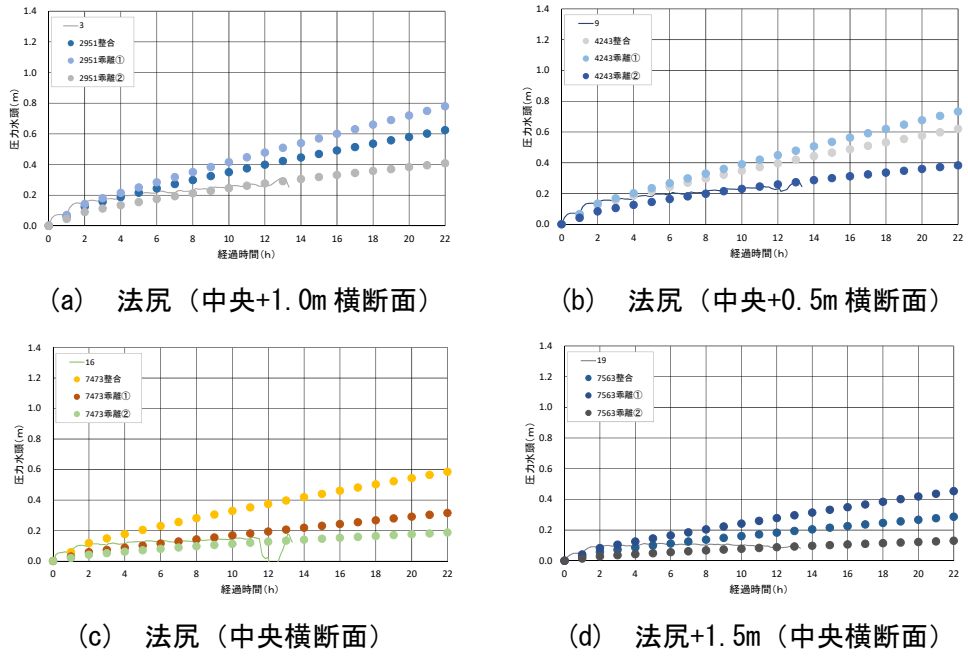


図 3-43 計測値と解析値 (Case6)

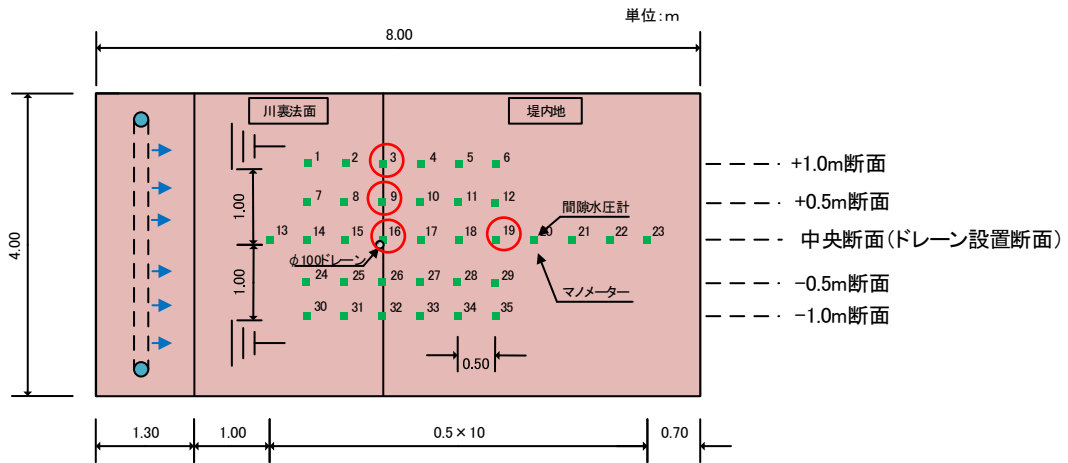


図 3-44 計測値と解析値を比較した位置 (Case6)

### 3.2.10 3次元浸透流解析まとめ

実験を行った全ケースについて3次元のモデル化を行い、飽和・不飽和非定常浸透流解析を行った。ドレーン(碎石)と被覆土層(ローム)の透水係数を変化させることで、実験で計測された圧力水頭を再現できる各透水係数を推定した。解析を行った碎石と被覆土層の透水係数の組み合わせを図3-45に示す。また、解析値と計測値が比較的近い値となった組み合わせを○印で示した。

組み合わせによっては、実験で得られた被覆土層下面に作用する水圧を再現することが可能であり、離散配置のドレーンを検討する際には、3次元の浸透流解析を用いることが有効であると考えられる。

被覆土層(ローム)の室内試験による透水係数は、 $1.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$  であるのに対し、整合した透水係数は全体的に5~50倍の範囲に分布した。比較的低い水位でドレーンからの噴砂があり、盤膨れを起こしたCase4の被覆土層の透水係数は、一番小さい値となっている。また、水位上昇の早い段階から被覆土層表面から漏水が所々で確認されたCase6の被覆土層の透水係数は、一番大きな値となっている。実験状況と対比して考えれば、第2章で述べたとおり、模型作製の微妙な違いや土槽壁面と被覆土層の境界面からの漏水等の影響を含んだ透水係数で整合したものと考えられる。

碎石(ドレーン)の透水係数は、 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$  から  $1.0 \times 10^{-0} \text{m/s}$  まで幅広く分布した。傾向としては、ドレーン面積が大きいものほど大きな透水係数、目詰まりを起こしたCase4や水圧低減効果の小さかったCase6が小さな透水係数となった。同じ材料でも、動水勾配が小さいほど、大きな透水係数となることが知られている。ドレーン面積が十分に大きければ、動水勾配が小さくなるため、透水係数も大きくなり、余裕をもって排水することができる。逆にドレーン面積が不十分だと、動水勾配が大きくなり、透水係数が小さくなってしまい、増々排水ができなくなる。このような正のフィードバックや負のフィードバックがかかる対策であるため、十分に余裕を持った設計(動水勾配を十分に下げる)を行うことが必要となる。

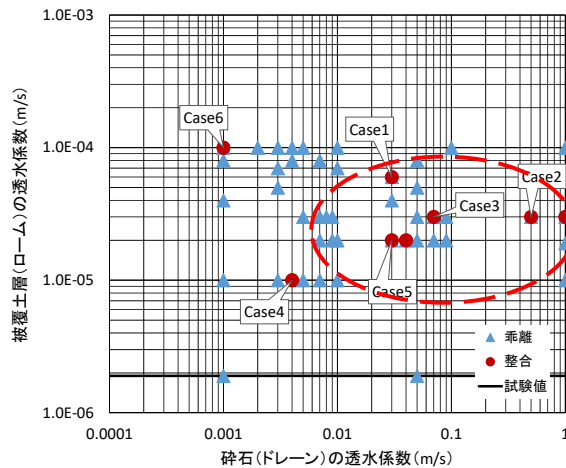


図 3-45 ドレーンの透水係数とロームの透水係数

## 第4章 対策工と地盤の隙間からの漏水・噴砂に係る模型実験

### 4.1 実験目的

第2章で示した模型実験 Case4 は、ドレーンの隙間から噴砂が生じ、結果的に対策効果が十分に発揮されなかった。最終的に堤内地盤で盤膨れ・漏水・噴砂に至った。このため、堤内基盤排水対策を設計する際に、隙間に対する配慮が必要と考えられる。

隙間として、ドレーン内部の隙間と、ドレーンと被覆土層の境界部分に形成される隙間の2種類が考えられる。ドレーン内部の隙間は、ドレーン材を不織布等のフィルターで隙間なく巻くことによって、防ぐことができる。また、ドレーンと被覆土層の境界部分に形成される隙間は、ドレーンを連続的に配置する場合には、図4-1に示すように被覆土層を平滑に仕上げ、その上に敷いた不織布等のフィルターをドレーン材で押さえることで、ある程度抑制することが可能と考えられる。一方で、離散的に配置する円柱縦型ドレーンの場合には、フィルターで隙間なく巻くことと、フィルターを被覆土層に密着させることは、施工上の難易度が比較的高いと考えられる。また、トレンチの方が、多くの場合に堤防延長当たりのドレーン面積を確保し易いという点でも有利である。このため、被覆土層が厚く、図4-1のようなトレンチ形状のドレーンとした場合にドレーンが極めて大きくなってしまいう場合に限って、離散配置の円柱縦ドレーンを採用すべきと考えられる。

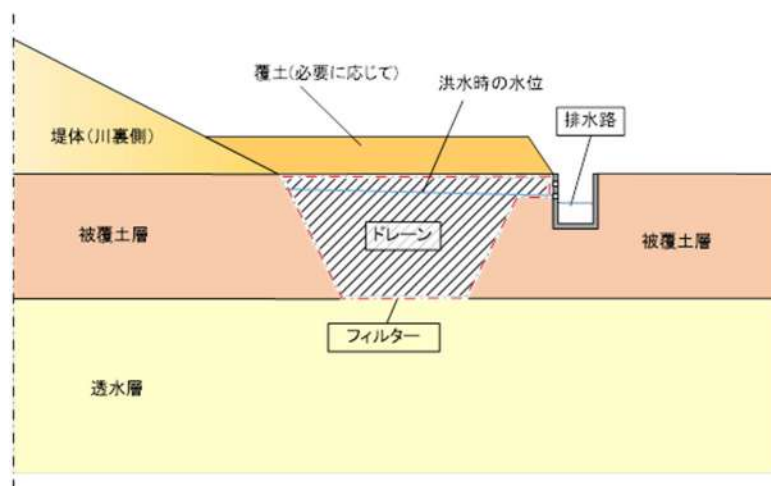


図 4-1 トレンチ形状のドレーンの構造

このように、円柱縦型ドレーンの場合に隙間ができることが避けられない場合があることと、トレンチ形状のドレーンの場合でも隙間をゼロにできるとは限らないため、できる限り隙間を小さくするための配慮の他に、隙間があった場合でも、ドレーンに影響が及ばないような検討が必要である。

そこで、隙間の影響や隙間に発生する流速を把握するための部分模型実験を実施した。

## 4.2 実験概要

実験装置を図 4-2 に示す。給水槽の高さを変えられるようになっており、模型に対して自由に水圧を作用させることが可能である。

模型を図 4-3 に示す。平面的に均質に透水層に対して水圧が作用するよう、模型の最下部に砕石層を設けた。砕石層の上に 250mm の厚さの透水層を設けた。透水層の内部には、間隙水圧計を設置した。対策工(ドレーン)以外の部分には、粘性土を敷き詰め、アクリル板で蓋をし、さらに実験中の水圧で持ち上げられないよう錘を載せた。対策工は $\phi 100\text{mm}$  の塩ビ管の内側に砕石を詰めたもので、隙間として金属製のパイプを設置した。パイプに透明なチューブを接続し、模型の外まで引き出し、隙間から出てくる水の流量とそれ以外のドレーンからの排水量を分離して求められるようにした。

実験条件は、隙間を設けない Case1、隙間として設けたパイプの内径を 5mm、10mm、15mm と変えた Case2～Case4 の 4 ケースとした。

間隙水圧計以外に、対策工及び隙間からの排水量をロードセルにより測定した。

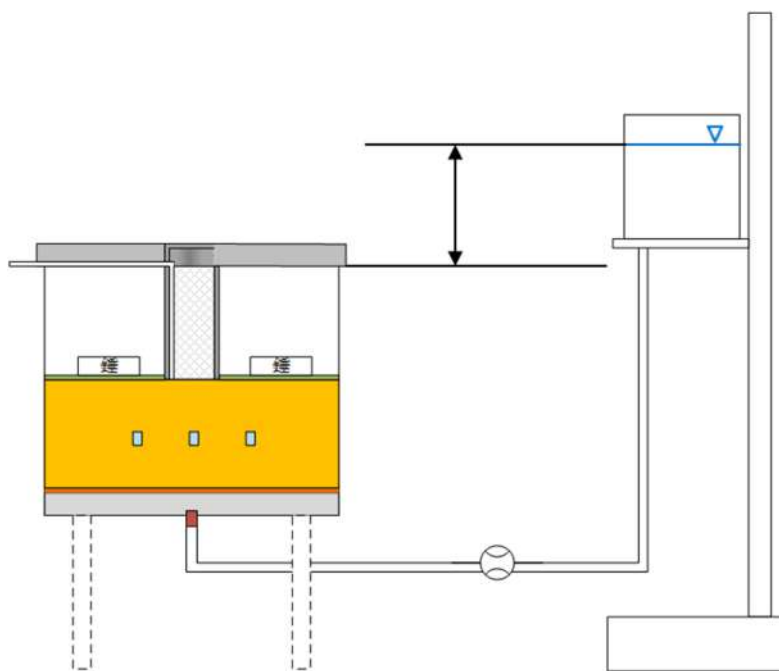


図 4-2 実験装置

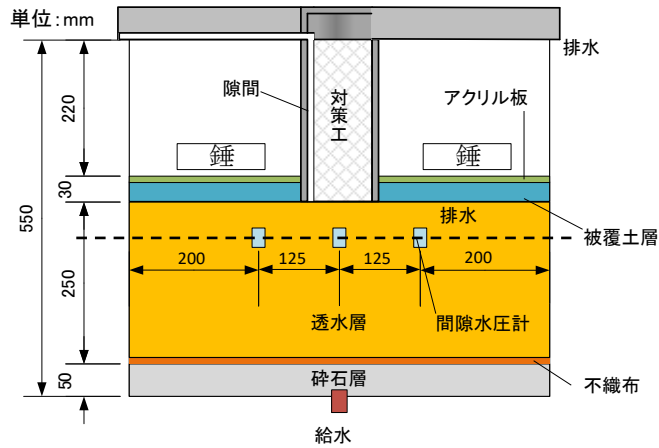


図 4-3 模型横断面図

### 4.3 模型作製

透水層として、図 4-4 に示す粒形加積曲線の材料を用いた。この材料は、重量比で宇部珪砂 3 号を 5%、宇部珪砂新特 5 号 A を 5%、宇部珪砂 6 号を 80%、宇部珪砂 7 号を 10% 配合したものである。

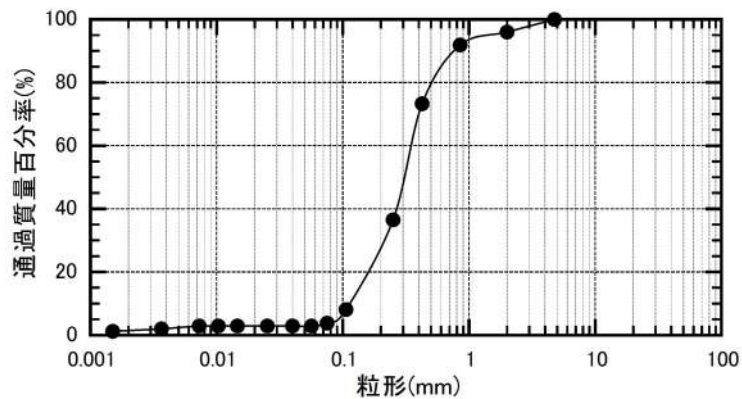


図 4-4 透水層の粒形加積曲線

模型は以下の順序で作製した。

- ① 碎石を厚さ 50mm で敷き均し、碎石層を突き固めて作製(図 4-5(a))。
- ② 碎石層の上に不織布を設置し、25mm 毎に、相対密度 90%となるように投入量による密度管理を行いながら透水層を作製(同図(b))。途中には間隙水圧計を設置(同図(c))。
- ③ 隙間を模したパイプと、パイプと同じ内径の孔をあけた不織布を接着(パイプの真下には不織布がない状態)(同図(d))。
- ④ 透水層の上にパイプを接着した不織布を敷き(Case1 では、パイプが接着されていない不織布)、さらにその上に 500×700mm のアクリル板を設置。アクリル板の中央には直径 100mm の孔がくりぬいてあり、内径 100mm の塩ビ管を設置。アクリル板が被覆土層、塩ビ管が対策工(ドレーン)を模擬(同図(e))。
- ⑤ アクリル板と土槽を念入りに止水し 40kg の錘をのせ、対策工の中に大きめの碎石を投入(同図(f))。





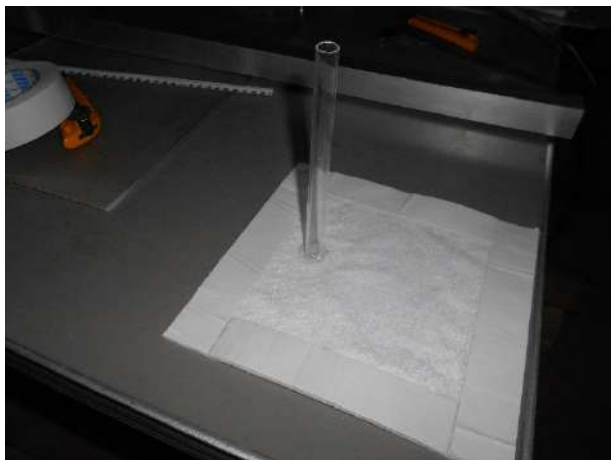
(a) 碎石層の突き固め



(b) 透水層の突き固め



(c) 間隙水圧計の設置



(d) 隙間を模したパイプと不織布の接着



(e) アクリル板と塩ビ管, パイプ設置



(f) 碎石の投入

図 4-5 模型作製状況

#### 4.4 実験方法

給水層内の水位が透水層上面の高さとなるまで、給水槽の高さをゆっくりと上げ、その高さを暫く維持し、

透水層の飽和を行った。その後、給水槽内の水位がドレーン上面となるまで給水槽を上げ、ドレーンを飽和した。

給水槽の高さを 0.1m または 0.05m ずつ階段状に上げ、模型の状況を確認しつつ、隙間からの排水量、隙間以外の対策からの排水量、間隙水圧の計測を実施した。

## 4.5 実験結果

### 4.5.1 Case1

ドレーン内に隙間を模擬したパイプを設けないケースである。

0.1m 毎に階段状に水位を上昇させ、最終的に 0.7m の水頭差を付けたところで、止水材が水圧で剥がれ、異常漏水を起こし、実験終了となった。ただし、実験後の解体調査で、対策工の内側や透水層に変状は確認されなかった。

計測値の時刻歴を図 4-6 に示す。排水量は、排水された水を貯めた水槽の重さから  $1\text{kg}=1\text{L}$  として求めたものである。排水流量は、各段階の平均的な排水量の勾配を代表値とした。間隙水圧増分の時刻歴によると、水位を上げてから安定するまでにしばらく時間を要する。

各段階における排水流量を図 4-7 に示す。流量は、水位に概ね比例しているが、水位の高い所で、若干流量が低下する傾向も見られる。

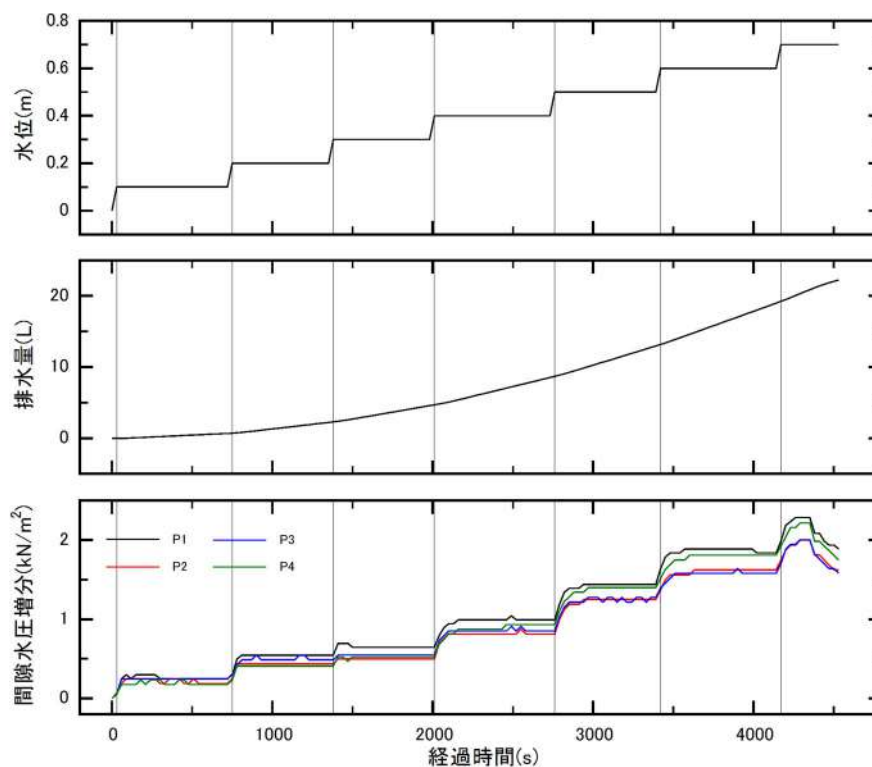


図 4-6 時刻歴 (Case1)



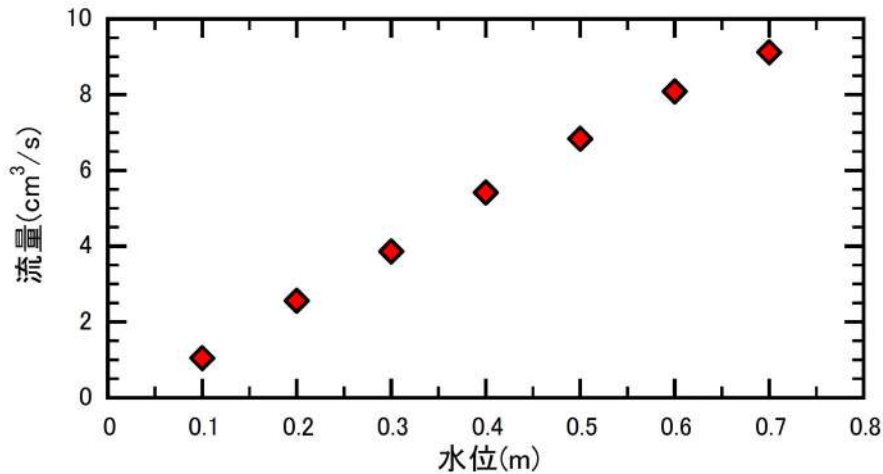


図 4-7 各段階における排水流量 (Case1)

#### 4.5.2 Case2

ドレーン内に隙間を模擬した内径 5mm のパイプを設けたケースである。

0.05m 毎に階段状に水位を上昇させ、最終的に 0.95m の水頭差を付けたところで、隙間から排水されなくなったため、実験終了となった。隙間から濁り水や砂が出てくることはなかった。実験後の解体調査で、隙間の目詰まりは透水層の上面からすぐ上の高さで生じており、隙間の上部は空洞のままであった。このように移動した砂の量が僅かであるため、透水層の表面にも明瞭な変状は確認されなかった。

計測値の時刻歴を図 4-8 に示す。排水量は、隙間以外の対策(ドレーン)から排水される量と隙間から排水される量を分けて計測しており、隙間からの排水量は隙間以外の対策から排水される量の 1/20 から 1/10 程度である。面積比は 1:400 であるから、ドレーンの 20 倍以上の流速が隙間内では発生していたことになる。なお、隙間以外の対策からの排水量が 9500 秒付近で急減しているのは、タンクが一杯になったために、タンクの水を捨てたためのものである。

各段階における排水流量を図 4-9 に示す。水位 0.5m 以降は、隙間が目詰まりし、隙間の流量は徐々に減少しているが、対策からの流量は単調に増加している。

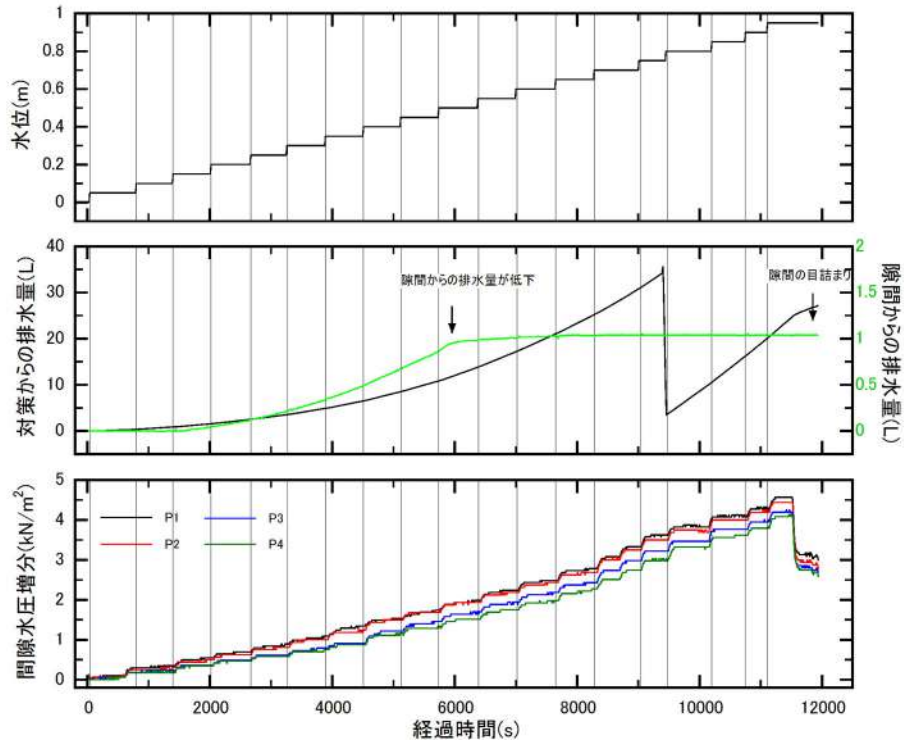


図 4-8 時刻歴 (Case2)

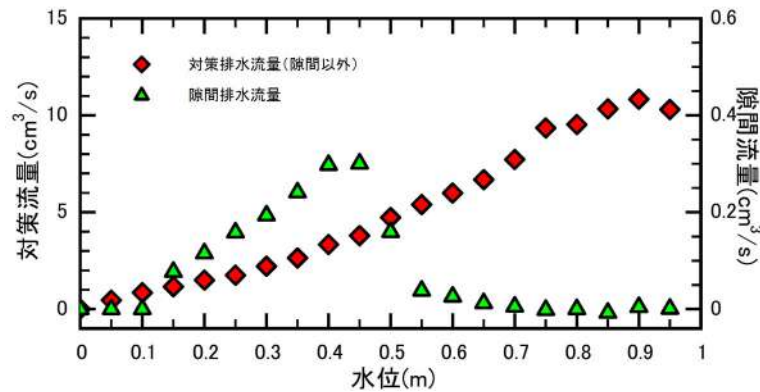


図 4-9 各段階における排水流量 (Case2)

#### 4.5.3 Case3

ドレーン内に隙間を模擬した内径 10mm のパイプを設けたケースである。

0.3m までは 0.1m 毎に、それ以降は 0.05m 毎に階段状に水位を上昇させた。最終的に 0.95m の水頭差を付けたところで、隙間から排水されなくなったため、実験終了となった。途中、水位 0.55m と 0.75m の時に、濁り水が出た。実験後の解体調査で、図 4-10 に示すように隙間を模したパイプのほとんどが砂で充填された状態となり、透水層の表面に小さな窪みができていた。

計測値の時刻歴を図 4-11 に示す。濁り水が発生した段階を黄色、目詰まりが発生した段階を薄い赤に着色した。2 回目の濁り水の発生以降、隙間からの排水量の勾配が急減している。



(a) パイプに詰まった砂

(b) 透水層表面の窪み

図 4-10 解体時の調査状況 (Case3)

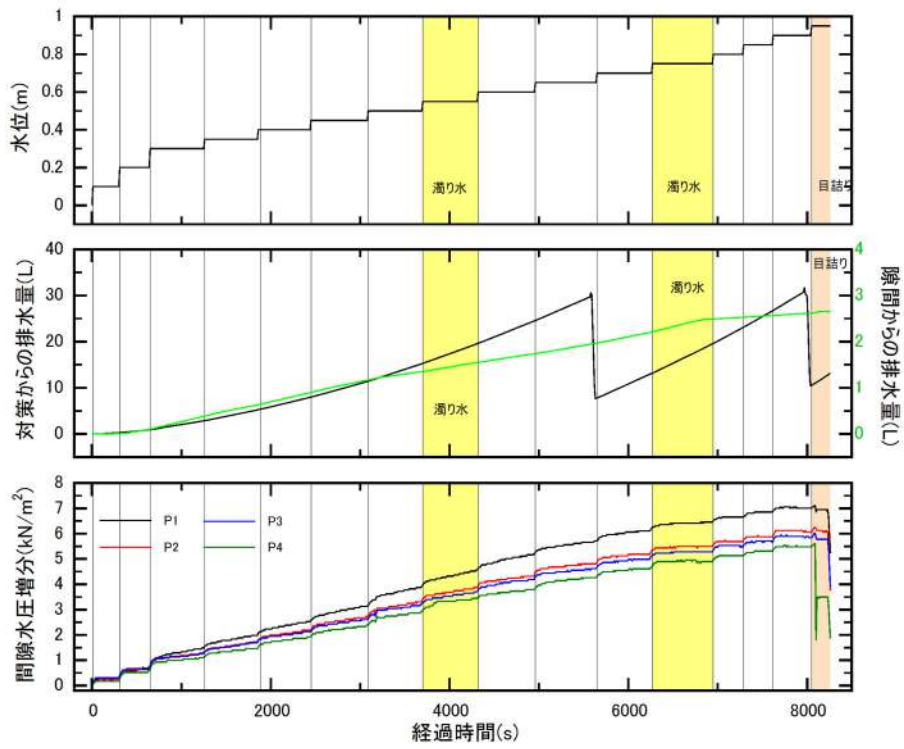


図 4-11 時刻歴 (Case3)

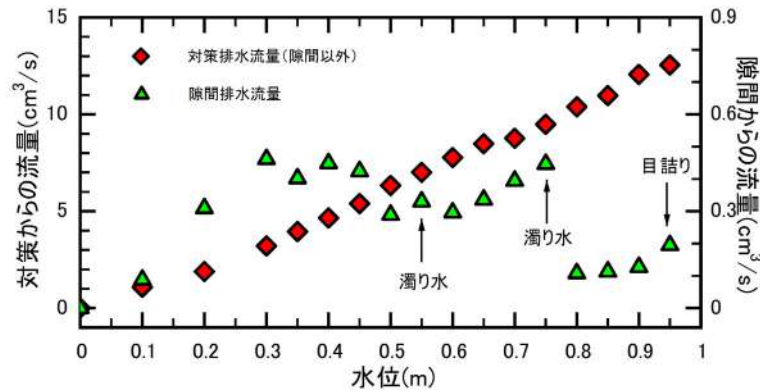


図 4-12 各段階における排水流量 (Case3)

#### 4.5.4 Case4

ドレーン内に隙間を模擬した内径 15mm のパイプを設けたケースである。

0.3mまでは0.1m毎に、それ以降は概ね0.05m毎に階段状に水位を上昇させた。最後に1.35mから0.1m高い1.45mに水位を上昇させた。水位が0.6mと1.1mの時点で濁り水が、水位が0.8mの時点で噴気が確認された。水位1.2mと1.45mで噴砂が確認され、目詰まりを起こしわけではないものの、パイプ内が噴砂によって充填されるような状況となったことから、実験終了とした。

実験後のパイプの状態は、図 4-13 (a)に示すように、ドレーンの外にまで砂が出てきていた。パイプを取り出した全体が同図 (b)、下部を拡大したものが同図 (c)である。下部は粗砂で、上部は細砂で埋まっており、分級が確認された。解体調査では、同図 (d)に示すような窪みが、透水層表面に形成されていた。表面の下側にも、緩み領域が確認され、細かい粒子のみが選択的に吸出された痕跡ではないかと考えられる。

計測値の時刻歴を図 4-14に示す。水位0.8mの間隙水圧計の1つの値が飛んでいる。これは、隙間から空気が噴出したことに関連していると推測されるが、これより詳細な理由は分からない。また、水位1mの時に、隙間からの排水量、間隙水圧に乱れがある。これらの乱れは模型に変状があったわけではなく、給水装置の段取り替えに伴うものである。

図 4-15の各段階の流量によると、対策から排水流量は概ね単調に増加している。一方で、水位0.6m以降は、隙間が目詰まりし、隙間の流量は徐々に減少しているが、対策からの流量は単調に増加している。濁り水や噴気によって、一概に流量が増加したり、減少したりという関係は見つけられないが、Case4の噴砂は目詰まりを生じるようなものではなく、むしろ流量の増加に寄与しているようにも見られる。



(a) 対策工の外まで詰まった砂



(b) パイプに詰まった砂 (全体)



(c) パイプに詰まった砂 (下部拡大)



(d) 透水層表面の窪み

図 4-13 解体時の調査状況 (Case4)



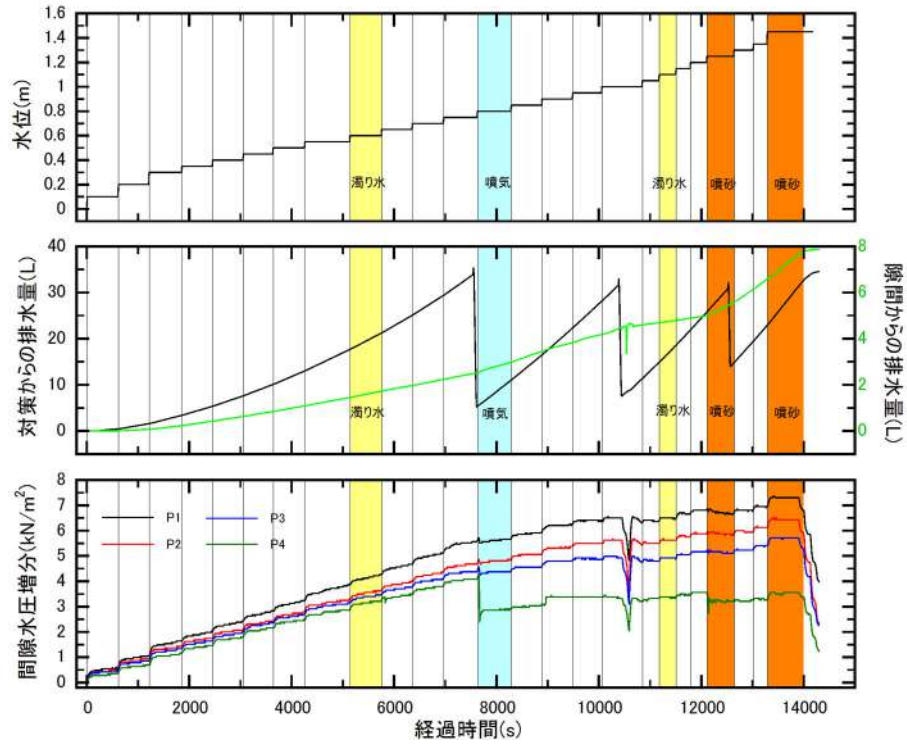


図 4-14 時刻歴 (Case4)

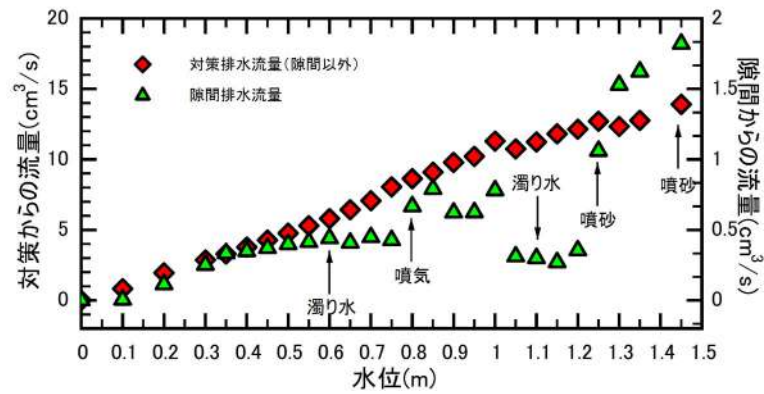


図 4-15 各段階における排水流量 (Case4)

#### 4.6 排水流速に係る分析

図 4-16 に Case1 から 4 で得られた対策及び隙間からの排水流量から流速を算出した結果をまとめて示す。

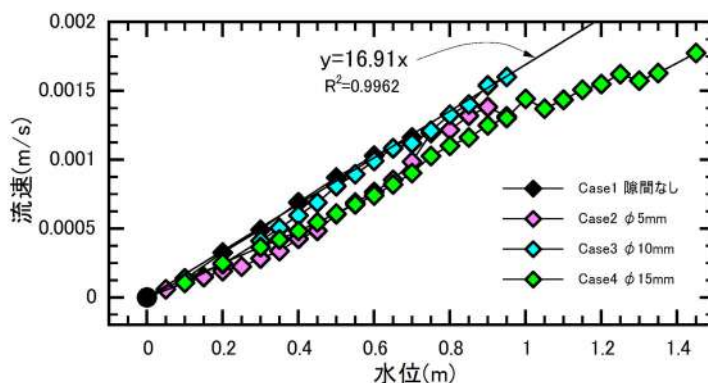


図 4-16 対策からの排水流速

①いずれのケースでも水位に対して単調に増加していること、②濁り水などの変状が発生し始める水位よりも大きな水位の範囲ではケース毎の違いは2～3割以内に収まっていること、③隙間の有無や大きさによって流速に明瞭な大小関係がないことから、Case1の水位と流速の関係に対してフィッティングを行った直線を対策からの排水流速の代表値の1つと考えることができる。

次に、隙間の排水流速をCase1の対策からの流速と合わせて図4-17に示す。隙間が小さいほど、高流速が発生し、隙間が大きいほど低流速となる傾向が見られる。流速が最も大きくなったφ5mmの隙間を設けたCase2では、結果的に早い段階で目詰りが生じ、透水層にも変状が確認されなかった。このため、このような大きな流速の発生に対する配慮を設計で行う必要はないと考えられる。Case3でも同様の傾向があり、水位が0.3～0.4mで流速が大きくなっているが、この時点では特段の変状は発生しておらず、これも設計で配慮する必要はないと考えられる。一方で、水位が0.5mよりも大きい範囲では、濁り水や噴気、噴砂などの様々な変状が発生しており、これらに対して設計上配慮すべきであると考えられる。

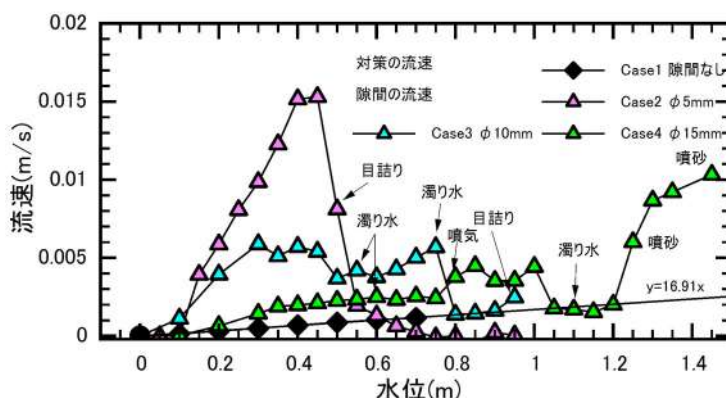


図 4-17 隙間からの排水流速

さらに、隙間の流速を各ケース・水位で得られた対策の流速に対する比として表した結果を図4-18に、隙間の流速をCase1の水位と流速の関係に対してフィッティングを行った直線関係に対する比とした表した結果を図4-19に示す。

図4-18によると、濁り水や噴気、噴砂などの様々な変状が発生している流速比は、最も大きくても



5.8 (Case4 の水位 1.45m, 噴砂) である。同じく, 図 4-19 によると, 最も大きくても 4.5 (Case3 の水位 0.55m, 濁り水) となる。

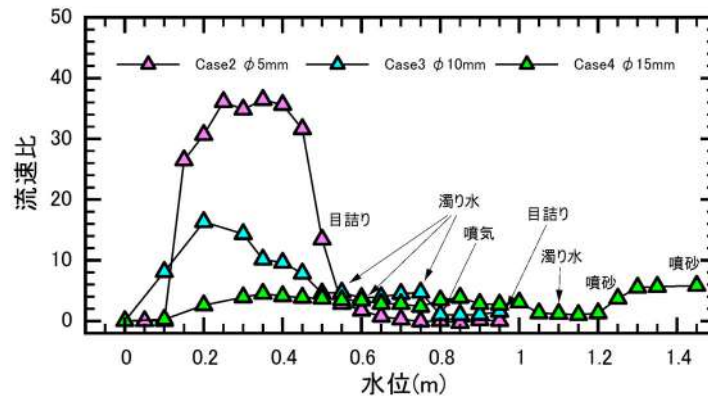


図 4-18 流速比 (隙間の流速/Case1 の対策の流速)

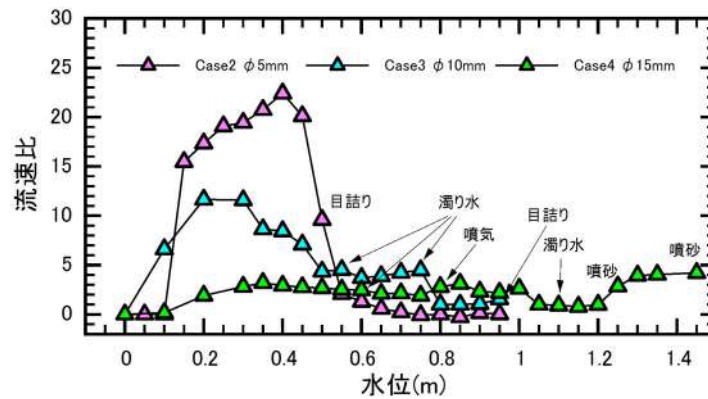


図 4-19 流速比 (隙間の流速/各ケースの対策の流速)

設計において, 濁り水や噴気, 噴砂などのドレーン周辺の隙間に関連して発生する変状が生じないよう考慮する方法としては, ドレーンに影響を及ぼしかねない隙間に発生する有害な流速に対して, 透水層の土粒子が安定であることを確認すれば良いと考えられる。これまで示した実験結果のとおり, 隙間で発生する有害な流速は, 大きくてもドレーンの流速に対して 4.5 倍, もしくは, 5.8 倍であった。設計で実施される浸透流解析は, 隙間がないことを仮定したものであるから, 同じく隙間のない Case1 の流速に対する比の最大値の 4.5 を用いれば十分との考えもある。しかし, 今回の実験に限られた実験条件であることや実験精度の問題(ケースによってドレーンの流速が 2,3 割異なる)もあることから, 安全側の配慮として 5.8 を切り上げた 10 を設計において隙間で発生する有害な流速を求める際の倍率として用いるのが良いと考えられる。

## 第5章 まとめ

第2章では、堤防高さ1.25mの大型模型を用いて、円柱縦型ドレーンの形状及び設置位置を変化させ、浸透実験を実施した結果を示した。河川水位の上昇を模擬した水圧を透水層に作用させ、被覆土層下面に働く水圧の計測を行った。その結果、堤内地側の法尻部に離散的に配置した円柱型ドレーンでは、堤防延長辺りのドレーンの面積に応じて圧力低減効果に変化すること、最もG/Wが小さくなり易い法尻への対策設置が合理的であることが確認された。

また、ドレーンの隙間から生じた噴砂によって、ドレーンが詰まり、結果的に対策効果が十分に発揮されなかったケースがあった。ドレーンに隙間があり、被覆土の遮水性が高いことが原因であると考えられる。設計上、被覆土の透水性に対して十分に注意を払うとともに、ドレーンの隙間に対する配慮が必要であることが分かった。

さらに、これらの実験では、円柱縦型ドレーンによる対策を施した堤防の限界を把握するために、実際の堤防では作用しないような極めて大きな水圧を透水層に作用させた。目詰まりを起こしたケースと法尻から離して対策を設置したケースを除けば、円柱縦型ドレーンでは対処できないような堤体が部分的に持ち上がって壊れるケースと堤防に大きな変状が発生せずに終了したケースしかなかった。このような結果から、対策を法尻直近に設置し、目詰まりが生じなければ、円柱縦型ドレーンが極めて高い効果を発揮する対策であると考えられる。

第3章では、実験で計測された被覆土層下面に働く圧力水頭と、2次元及び3次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析で得られる圧力水頭の値と比較した。その結果、堤内地側に離散的に配置された円柱縦型ドレーンの場合、比較的簡便に行える2次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析では、実験で計測された値と解析値が整合しない結果となった。3次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析では、対策工(砕石)の透水係数に加え堤内地側の被覆土層(ローム)の透水係数を調整することで、計測値と解析値をある程度整合させることができた。これより、離散的に配置された円柱縦型ドレーンの効果を評価するに当たっては、3次元の浸透流解析を実施する必要があることが確認された。

第4章では、隙間に係る部分模型実験結果を示した。この実験は、第2章の実験の中に、ドレーンの隙間から噴砂が生じ、結果的に対策効果が十分に発揮されなかったケースがあったために行ったものである。部分模型実験により隙間の影響や隙間に発生する流速を把握することで、隙間に対する配慮を具体的に検討した。隙間が小さいと隙間に大きい流速が生じるが、すぐに目詰まりが起り、移動する砂の量は限定的であった。このため、ドレーンに与える影響は小さいものと推測される。一方で、隙間が大きいと相対的に小さい流速が隙間に生じるが、噴砂が継続的に発生し、大量の砂が移動する。このため、ドレーンに与える影響は大きいものと推測される。このようなドレーンに影響を及ぼしかねない隙間に発生する流速によって、透水層

の砂が移動しないよう検討することが、隙間に対する配慮の 1 つと考えられる。

## 参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会:報告書, pp4-124, 2013.
- 2) (財)国土技術研究センター:河川堤防の構造検討の手引き(改訂版), JICE 資料, 第 111002 号, pp.47-56, pp.71-72, 2012.
- 3) 増山博之・齋藤由紀子・石原雅規・佐々木哲也:河川堤防の盤膨れ・揚圧力対策工の水圧低減効果と耐震性能に関する遠心模型実験,第 56 回地盤工学シンポジウム, 平成 23 年度論文集, pp.29-36, 2011.
- 4) 増山博之・齋藤由紀子・森啓年・佐々木哲也:河川堤防の盤膨れ・揚圧力対策に関する模型実験, 土木技術資料, Vol.53, No.7, pp.32-37, 2011.
- 5) 佐々木哲也・増山博之・齋藤由紀子・石原雅規・森啓年・平林学・吉田直人:大型模型を使用した河川堤防の盤膨れ対策に関する研究, 土木研究所資料, 第 4267 号, 2014.
- 6) 西垣誠・三菱マテリアル株式会社・株式会社ダイヤコンサルタント:オイリアン・ラグラシアン・二次元飽和不飽和浸透流解析プログラム, 著作権登録番号 P 第 4135-1 号, P 第 7169-1 号.

# 付 録



## 付録 A 使用間隙水圧計・変位計

A.1 使用間隙水圧計一覧表 (Case1~2)

ケース	No.	製造メーカー	S/N	定格出力 ( $\mu\epsilon$ )	定格容量 (kPa)	較正係数 (kPa/ $\mu\epsilon$ )
Case1~Case2	1	共和電業	026300016	$1002 \times 10^{-6}$	50	0.0499
	2	共和電業	296540010	$888 \times 10^{-6}$	50	0.0563
	3	共和電業	918040012	$1115 \times 10^{-6}$	50	0.0448
	4	共和電業	626790035	$1021 \times 10^{-6}$	50	0.0490
	5	共和電業	046770029	$835 \times 10^{-6}$	50	0.0599
	6	共和電業	918040001	$1087 \times 10^{-6}$	50	0.0460
	7	共和電業	046770027	$800 \times 10^{-6}$	50	0.0625
	8	共和電業	526970017	$1061 \times 10^{-6}$	50	0.0471
	9	共和電業	5B7650023	$990 \times 10^{-6}$	50	0.0505
	10	共和電業	977350002	$1062 \times 10^{-6}$	50	0.0471
	11	共和電業	026300018	$964 \times 10^{-6}$	50	0.0519
	12	共和電業	526970018	$1009 \times 10^{-6}$	50	0.0496
	13	共和電業	8B6000009	$1002 \times 10^{-6}$	50	0.0499
	14	共和電業	426460007	$586 \times 10^{-6}$	30	0.0512
	15	共和電業	426460001	$598 \times 10^{-6}$	30	0.0502
	16	共和電業	426460009	$609 \times 10^{-6}$	30	0.0493
	17	共和電業	426460004	$602 \times 10^{-6}$	30	0.0498
	18	共和電業	046770026	$953 \times 10^{-6}$	50	0.0525
	19	共和電業	918040010	$1143 \times 10^{-6}$	50	0.0437
	20	共和電業	046770028	$811 \times 10^{-6}$	50	0.0617
	21	共和電業	GG3960001	$922 \times 10^{-6}$	50	0.0542
	22	共和電業	GG3960002	$1018 \times 10^{-6}$	50	0.0491
	23	共和電業	GG3960003	$1000 \times 10^{-6}$	50	0.0500



A.2 使用間隙水圧計一覧表 (Case3)

ケース	No.	製造メーカー	S/N	定格出力 ( $\mu\epsilon$ )	定格容量 (kPa)	較正係数 (kPa/ $\mu\epsilon$ )
Case3	1	共和電業	026300016	$1002 \times 10^{-6}$	50	0.0499
	2	共和電業	296540010	$888 \times 10^{-6}$	50	0.0563
	3	共和電業	918040012	$1115 \times 10^{-6}$	50	0.0448
	4	共和電業	626790035	$1021 \times 10^{-6}$	50	0.0490
	5	共和電業	046770029	$835 \times 10^{-6}$	50	0.0599
	6	共和電業	918040001	$1087 \times 10^{-6}$	50	0.0460
	7	共和電業	GG8730008	$906 \times 10^{-6}$	50	0.0552
	8	共和電業	GG8730009	$871 \times 10^{-6}$	50	0.0574
	9	共和電業	046770027	$800 \times 10^{-6}$	50	0.0625
	10	共和電業	526970017	$1061 \times 10^{-6}$	50	0.0471
	11	共和電業	5B7650023	$990 \times 10^{-6}$	50	0.0505
	12	共和電業	977350002	$1062 \times 10^{-6}$	50	0.0471
	13	共和電業	026300018	$964 \times 10^{-6}$	50	0.0519
	14	共和電業	526970018	$1009 \times 10^{-6}$	50	0.0496
	15	共和電業	8B6000009	$1002 \times 10^{-6}$	50	0.0499
	16	共和電業	426460007	$586 \times 10^{-6}$	30	0.0512
	17	共和電業	426460001	$598 \times 10^{-6}$	30	0.0502
	18	共和電業	426460009	$609 \times 10^{-6}$	30	0.0493
	19	共和電業	426460004	$602 \times 10^{-6}$	30	0.0498
	20	共和電業	046770026	$953 \times 10^{-6}$	50	0.0525
	21	共和電業	918040010	$1143 \times 10^{-6}$	50	0.0437
	22	共和電業	046770028	$811 \times 10^{-6}$	50	0.0617
	23	共和電業	GG3960001	$922 \times 10^{-6}$	50	0.0542
	24	共和電業	GG3960002	$1018 \times 10^{-6}$	50	0.0491
	25	共和電業	GG3960003	$1000 \times 10^{-6}$	50	0.0500
	26	共和電業	GG8730010	$1061 \times 10^{-6}$	50	0.0471
	27	共和電業	GG8730011	$1099 \times 10^{-6}$	50	0.0455

A.3 使用間隙水圧計一覧表 (Case4~6) 1/2

ケース	No.	製造メーカー	S/N	定格出力 ( $\mu\epsilon$ )	定格容量 (kPa)	較正係数 (kPa/ $\mu\epsilon$ )
Case4~Case6	1	共和電業	026300016	$1002 \times 10^{-6}$	50	0.0499
	2	共和電業	296540010	$888 \times 10^{-6}$	50	0.0563
	3	共和電業	918040012	$1115 \times 10^{-6}$	50	0.0448
	4	共和電業	626790035	$1021 \times 10^{-6}$	50	0.0490
	5	共和電業	046770029	$835 \times 10^{-6}$	50	0.0599
	6	共和電業	918040001	$1087 \times 10^{-6}$	50	0.0460
	7	共和電業	046770027	$800 \times 10^{-6}$	50	0.0625
	8	共和電業	526970017	$1061 \times 10^{-6}$	50	0.0471
	9	共和電業	5B7650023	$990 \times 10^{-6}$	50	0.0505
	10	共和電業	977350002	$1062 \times 10^{-6}$	50	0.0471
	11	共和電業	026300018	$964 \times 10^{-6}$	50	0.0519
	12	共和電業	526970018	$1009 \times 10^{-6}$	50	0.0496
	13	共和電業	8B6000009	$1002 \times 10^{-6}$	50	0.0499
	14	共和電業	426460007	$586 \times 10^{-6}$	30	0.0512
	15	共和電業	426460001	$598 \times 10^{-6}$	30	0.0502
	16	共和電業	426460009	$609 \times 10^{-6}$	30	0.0493
	17	共和電業	426460004	$602 \times 10^{-6}$	30	0.0498
	18	共和電業	046770026	$953 \times 10^{-6}$	50	0.0525
	19	共和電業	918040010	$1143 \times 10^{-6}$	50	0.0437
	20	共和電業	046770028	$811 \times 10^{-6}$	50	0.0617
	21	共和電業	GG3960001	$922 \times 10^{-6}$	50	0.0542
	22	共和電業	GG3960002	$1018 \times 10^{-6}$	50	0.0491
	23	共和電業	GG8730006	$965 \times 10^{-6}$	50	0.0500
	24	共和電業	GG8730007	$894 \times 10^{-6}$	50	0.0559
	25	共和電業	GG3960007	$981 \times 10^{-6}$	50	0.0510
	26	共和電業	GG3960008	$880 \times 10^{-6}$	50	0.0568
	27	共和電業	GG8730008	$906 \times 10^{-6}$	50	0.0552
	28	共和電業	GG3960009	$965 \times 10^{-6}$	50	0.0518
	29	共和電業	026300017	$943 \times 10^{-6}$	50	0.0530
	30	共和電業	026300019	$941 \times 10^{-6}$	50	0.0531

A.4 使用間隙水圧計一覧表 (Case4~6) 2/2

ケース	No.	製造メーカー	S/N	定格出力 ( $\mu\epsilon$ )	定格容量 (kPa)	校正係数 (kPa/ $\mu\epsilon$ )
Case4~Case6	31	共和電業	GL7950004	$886 \times 10^{-6}$	50	0.0564
	32	共和電業	GL7950005	$903 \times 10^{-6}$	50	0.0554
	33	共和電業	296810011	$1728 \times 10^{-6}$	20	0.0116
	34	共和電業	296810012	$1764 \times 10^{-6}$	20	0.0113
	35	共和電業	296810013	$1841 \times 10^{-6}$	20	0.0109

A.5 使用変位計

ケース	No.	製造メーカー	型名	S/N	定格出力 ( $\mu\epsilon$ )	定格容量 (mm)
Case1~ Case6	1	東京測器研究所	SDP-200R	054501	$1000 \times 10^{-6}$	200
	2	東京測器研究所	SDP-200R	053218	$1000 \times 10^{-6}$	200
	3	東京測器研究所	SDP-200R	050489	$1000 \times 10^{-6}$	200
	4	東京測器研究所	SDP-200R	050487	$1000 \times 10^{-6}$	200
	5	東京測器研究所	SDP-200R	054503	$1000 \times 10^{-6}$	200
	6	東京測器研究所	SDP-200R	050488	$1000 \times 10^{-6}$	200
	7	東京測器研究所	SDP-200R	050349	$1000 \times 10^{-6}$	200
	8	東京測器研究所	SDP-200R	050484	$1000 \times 10^{-6}$	200
	9	東京測器研究所	SDP-200R	050482	$1000 \times 10^{-6}$	200

# 付録B 土質試験結果

## B.1 土粒子の密度試験結果（測定）

JIS A 1202 JGS 0111		土粒子の密度試験（測定）					
調査件名	平成25年度河川堤防の揚圧力対策工に関する模型実験業務			試験年月日	平成26年1月16日		
試験者							
試料番号（深さ）	関東ローム			川砂			
ピクノメーター No.	25	26	27	28	29	30	
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 $m_b$ g	172.400	179.686	186.362	176.758	191.525	170.855	
$m_b$ をはかったときの内容物の温度 $T$ °C	19	19	19	19	19	19	
$T$ °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm <sup>3</sup>	0.9984	0.9984	0.9984	0.9984	0.9984	0.9984	
温度 $T$ °Cの蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 $m_a^{(1)}$ g	162.544	170.167	178.215	167.129	179.223	159.887	
試料の 乾燥質量	容器 No.	25	26	27	28	29	30
	(伊乾燥試料+容器)質量 g	62.193	65.111	81.353	75.467	87.603	65.050
	容器質量 g	46.704	50.139	68.508	60.236	68.124	47.678
	$m_s$ g	15.489	14.972	12.845	15.231	19.479	17.372
土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	2.745	2.741	2.730	2.714	2.710	2.709	
平均値 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	2.739			2.711			
試料番号（深さ）							
ピクノメーター No.							
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 $m_b$ g							
$m_b$ をはかったときの内容物の温度 $T$ °C							
$T$ °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm <sup>3</sup>							
温度 $T$ °Cの蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 $m_a^{(1)}$ g							
試料の 乾燥質量	容器 No.						
	(伊乾燥試料+容器)質量 g						
	容器質量 g						
	$m_s$ g						
土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>							
平均値 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>							
試料番号（深さ）							
ピクノメーター No.							
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 $m_b$ g							
$m_b$ をはかったときの内容物の温度 $T$ °C							
$T$ °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm <sup>3</sup>							
温度 $T$ °Cの蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 $m_a^{(1)}$ g							
試料の 乾燥質量	容器 No.						
	(伊乾燥試料+容器)質量 g						
	容器質量 g						
	$m_s$ g						
土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>							
平均値 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>							
特記事項	1) ピクノメーターの検定結果から求める。 $\rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \rho_w(T)$						

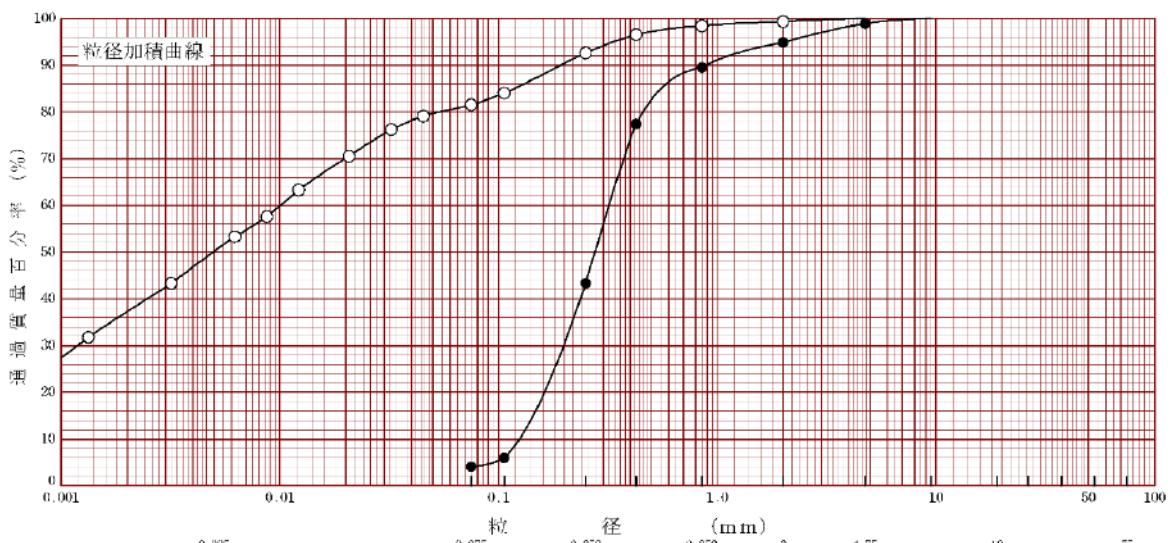
B.2 土の粒度試験結果（粒径加積曲線）

JIS A 1204 JGS 0131	土の粒度試験（粒径加積曲線）	
------------------------	----------------	--

調査件名 平成25年度河川堤防の揚圧力対策工に関する模型実験業務 試験年月日 平成26年1月16日

試験者

試料番号 (深さ)	関東ローム		川砂		試料番号 (深さ)		関東ローム	川砂
	粒径 mm	通過質量百分率%	粒径 mm	通過質量百分率%	粗 礫 分 %			
ふる る い 分 析	75		75		中 礫 分 %		0.0	1.1
	53		53		細 礫 分 %		0.7	4.1
	37.5		37.5		粗 砂 分 %		0.9	5.3
	26.5		26.5		中 砂 分 %		5.8	46.2
	19		19		細 砂 分 %		11.1	39.2
	9.5		9.5	100.0	シルト分 %		31.4	4.1
	4.75	100.0	4.75	98.9	粘土分 %		50.1	
	2	99.3	2	94.8	2mmふるい通過質量百分率 %		99.3	94.8
	0.850	98.4	0.850	89.5	425 $\mu$ mふるい通過質量百分率 %		96.5	77.4
	0.425	96.5	0.425	77.4	75 $\mu$ mふるい通過質量百分率 %		81.5	4.1
	0.250	92.6	0.250	43.3	最大粒径 mm		4.75	9.50
	0.106	84.0	0.106	6.0	60% 粒径 $D_{60}$ mm		0.0101	0.320
	0.075	81.5	0.075	4.1	50% 粒径 $D_{50}$ mm		0.00495	0.276
沈 降 分 析	0.0453	79.1			30% 粒径 $D_{30}$ mm		0.00118	0.198
	0.0323	76.2			10% 粒径 $D_{10}$ mm		----	0.125
	0.0207	70.5			均等係数 $U_c$		----	2.57
	0.0122	63.3			曲率係数 $U_c'$		----	0.988
	0.0087	57.6			土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>		2.739	2.711
	0.0062	53.3			使用した分散剤		ヘキサメタリン 酸ナトリウム 10ml	
	0.0032	43.3			溶液濃度、溶液添加量			
0.0013	31.8			20% 粒径 $D_{20}$ mm		----	0.162	
				記号		-○-	-●-	



粘 土	シ ル ト	細 砂	中 砂	粗 砂	細 礫	中 礫	粗 礫
-----	-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

特記事項

B.3 突固めによる土の締固め試験（測定：ローム）

JIS A 1210 JGS 0711		突固めによる土の締固め試験（測定）				
調査件名		平成25年度河川堤防の揚圧力対策に関する模型実験業務		試験年月日	平成26年1月17日	
試料番号(深さ)		関東ローム		試験者		
試験方法	A-c	土質名称	砂質火山灰質粘性土			
試料の準備方法	<del>乾燥法</del> 、湿潤法	ランマー質量 kg	2.5	モ   ル ド	内径 cm	10.00
試料の使用方法	<del>繰返し法</del> 、非繰返し法	落下高さ cm	30		高さ <sup>1)</sup> cm	12.73
含水比	試料分取後 $w_0$ %	65.5	突固め回数 回/層	25	容量 $V$ cm <sup>3</sup>	1000
	乾燥処理後 $w_1$ %		突固め層数 層	3	質量 $m_1$ <sup>2)</sup> g	1626
測定 No.	1	2	3	4		
(試料+モルト)質量 $m_2$ <sup>2)</sup> g	2849	2957	3091	3182		
湿潤密度 $\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>	1.223	1.331	1.465	1.556		
平均含水比 $w$ %	32.1	40.9	49.2	58.8		
乾燥密度 $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	0.926	0.945	0.982	0.980		
含水比	容器 No.	809	819	837	801	
	$m_a$ g	304.1	345.4	343.1	338.3	
	$m_b$ g	261.5	281.8	273.0	260.3	
	$m_c$ g	128.6	128.2	131.2	127.4	
	$w$ %	32.1	41.4	49.4	58.7	
含水比	容器 No.	855	847	853	829	
	$m_a$ g	301.2	340.9	359.8	369.4	
	$m_b$ g	258.6	280.7	284.1	280.5	
	$m_c$ g	126.2	131.3	129.5	129.8	
	$w$ %	32.2	40.3	49.0	59.0	
測定 No.	5	6	7	8		
(試料+モルト)質量 $m_2$ <sup>2)</sup> g	3175	3132				
湿潤密度 $\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>	1.549	1.506				
平均含水比 $w$ %	64.2	74.7				
乾燥密度 $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	0.943	0.862				
含水比	容器 No.	841	817			
	$m_a$ g	379.2	461.8			
	$m_b$ g	282.6	319.2			
	$m_c$ g	132.5	128.8			
	$w$ %	64.4	74.9			
含水比	容器 No.	863	857			
	$m_a$ g	385.0	431.1			
	$m_b$ g	285.8	300.9			
	$m_c$ g	131.0	126.0			
	$w$ %	64.1	74.4			

特記事項

- 1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
- 2) モールドの質量は底板を含む。

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

B.4 突固めによる土の締固め試験（締固め特性：ローム）

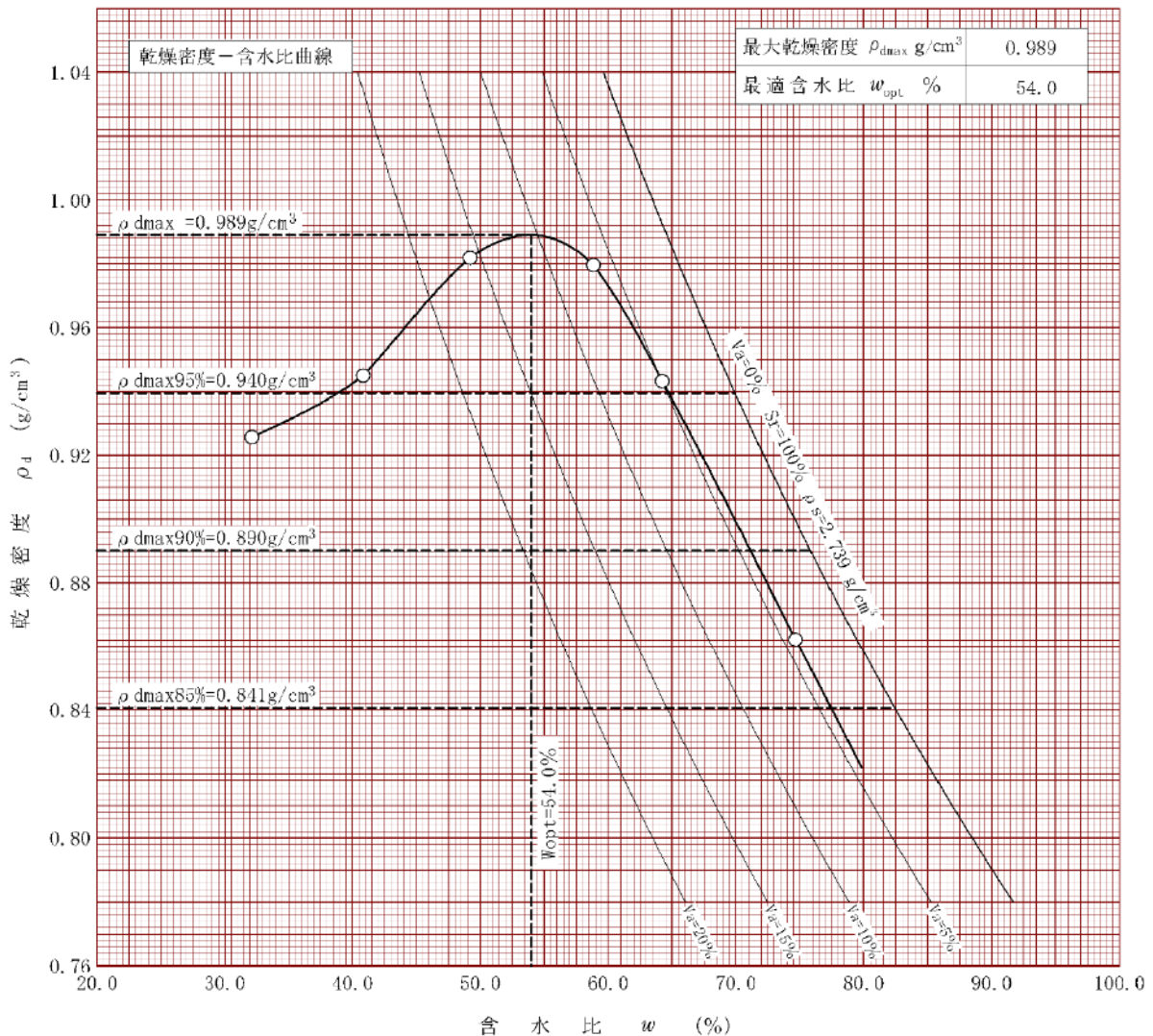
JIS A 1210 JGS 0711	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）
------------------------	----------------------

調査件名 平成25年度河川堤防の揚圧力対策工に関する模型実験業務 試験年月日 平成26年1月17日

試料番号(深さ) 関東ローム

試験者

試験方法	A-c		土質名称		砂質火山灰質粘性土			
試料の準備方法	乾燥法, 湿潤法		ランマー質量 kg	2.5	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	2.739		
試料の使用方法	繰返し法, 非繰返し法		落下高さ cm	30	試料調整前の最大粒径 mm	4.75		
含水比	試料分取後 $w_0$ %	65.5		突固め回数 回/層	25	モールド 内径 cm 高さ <sup>1)</sup> cm	10.00	
	乾燥処理後 $w_1$ %			突固め層数 層	3		12.73	
測定 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 $w$ %	32.1	40.9	49.2	58.8	64.2	74.7		
乾燥密度 $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	0.926	0.945	0.982	0.980	0.943	0.862		



特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスパーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{d\text{sat}} = \frac{\rho_w}{\rho_u/\rho_s + w/100}$$



### B.5 突固めによる土の締固め試験（測定：川砂）

JIS A 1210 JGS 0711		突固めによる土の締固め試験（測定）					
調査件名		平成25年度河川堤防の揚圧力対策工に関する模型実験業務			試験年月日		平成26年1月17日
試料番号(深さ) 川砂		試験者					
試験方法		A-a	土質名称		分級された礫まじり砂		
試料の準備方法		乾燥法, <del>湿潤法</del>	ランマー質量 kg	2.5	モ   ル ド	内径 cm	10.00
試料の使用方法		<del>繰返し法, 非繰返し法</del>	落下高さ cm	30		高さ <sup>1)</sup> cm	12.73
含水比	試料分取後 $w_0$ %	8.5	突固め回数/層	25	容量 $V$ cm <sup>3</sup>	1000	
	乾燥処理後 $w_1$ %		突固め層数 層	3		質量 $m_1$ <sup>2)</sup> g	1626
測定 No.		1	2	3	4		
(試料+モールド)質量 $m_2$ <sup>2)</sup> g		3213	3273	3329	3445		
湿潤密度 $\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>		1.587	1.647	1.703	1.819		
平均含水比 $w$ %		2.3	6.1	8.9	14.4		
乾燥密度 $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>		1.551	1.553	1.563	1.590		
含 水 比	容器 No.	805	823	811	821		
	$m_a$ g	204.3	231.9	271.6	362.4		
	$m_b$ g	202.6	226.0	259.9	332.5		
	$m_c$ g	129.3	131.0	130.7	128.3		
	$w$ %	2.3	6.2	9.1	14.6		
容 器 No.	容器 No.	849	859	827	835		
	$m_a$ g	222.4	243.1	261.5	354.8		
	$m_b$ g	220.3	236.6	251.0	326.5		
	$m_c$ g	129.9	126.4	131.8	127.0		
	$w$ %	2.3	5.9	8.8	14.2		
測定 No.		5	6	7	8		
(試料+モールド)質量 $m_2$ <sup>2)</sup> g		3531	3547				
湿潤密度 $\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>		1.905	1.921				
平均含水比 $w$ %		18.3	22.9				
乾燥密度 $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>		1.610	1.563				
含 水 比	容器 No.	839	815				
	$m_a$ g	400.6	475.9				
	$m_b$ g	358.2	410.8				
	$m_c$ g	129.6	128.8				
	$w$ %	18.5	23.1				
容 器 No.	容器 No.	861	833				
	$m_a$ g	390.2	455.2				
	$m_b$ g	350.4	395.1				
	$m_c$ g	130.6	130.3				
	$w$ %	18.1	22.7				

特記事項

- 1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
- 2) モールドの質量は底板を含む。

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w / 100}$$

B.6 突固めによる土の締固め試験（締固め特性：川砂）

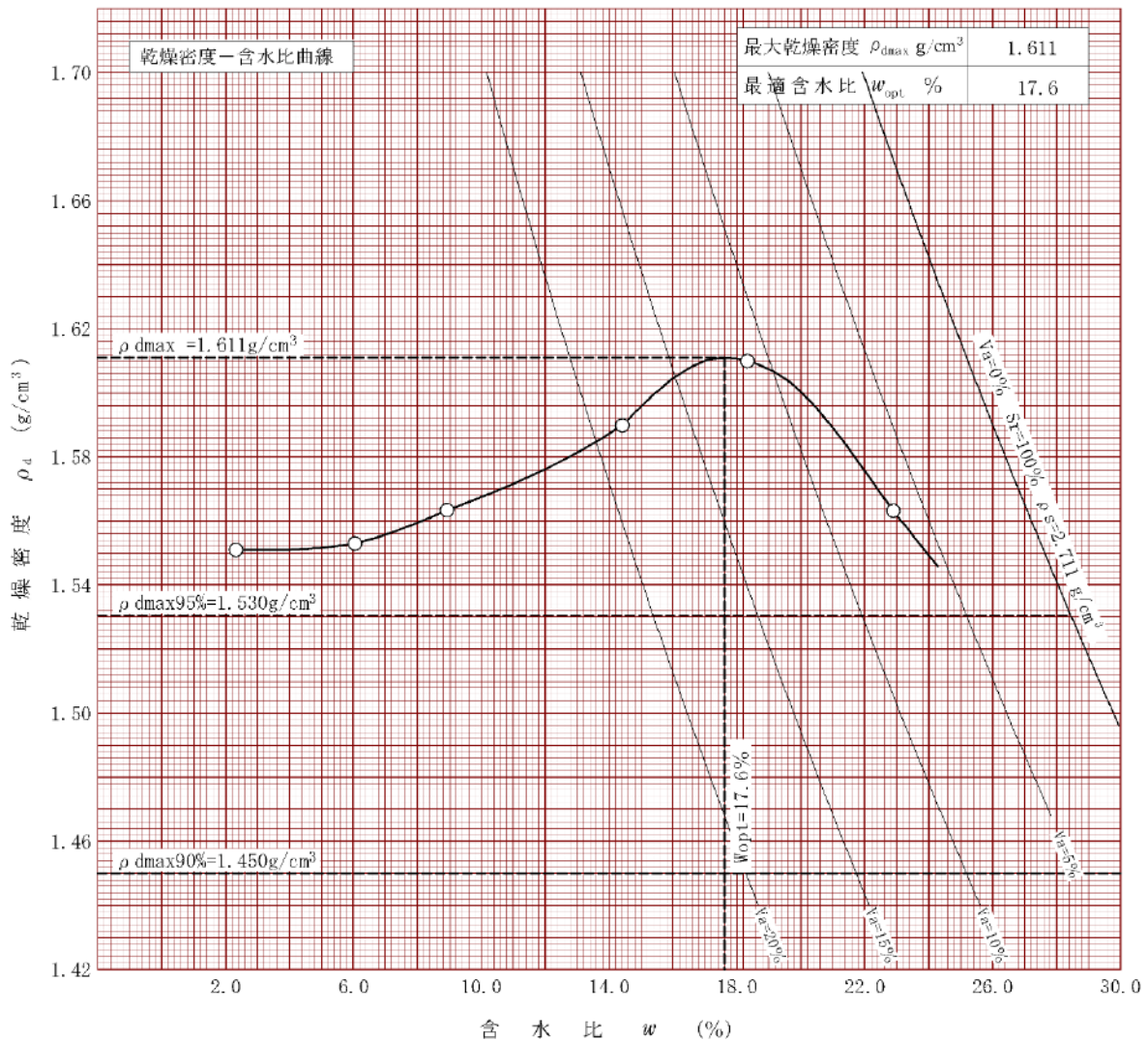
JIS A 1210 JGS 0711	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）
------------------------	----------------------

調査件名 平成25年度河川堤防の盤膨れ対策に関する模型実験業務 試験年月日 平成26年1月17日

試料番号(深さ) 川砂

試験者

試験方法	A-a		土質名称		分級された眺まじり砂				
試料の準備方法	乾燥法, 湿潤法		ランマー質量	kg	2.5	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>		2.711	
試料の使用方法	繰返し法, 非繰返し法		落下高さ	cm	30	試料調整前の最大粒径 mm		4.75	
含水比	試料分取後 $w_0$ %	8.5		突固め回数	回/層	モールド	内径	cm	10.00
	乾燥処理後 $w_1$ %			突固め層数	層		高さ <sup>1)</sup>	cm	12.73
測定 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	
平均含水比 $w$ %	2.3	6.1	8.9	14.4	18.3	22.9			
乾燥密度 $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	1.551	1.553	1.563	1.590	1.610	1.563			



特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{d,sat} = \frac{\rho_w}{\rho_u/\rho_s + w/100}$$

## B.7 土の透水試験（川砂）

JIS A 1218 JSF T 311		土の透水試験（定水位、変水位）									
調査件名					試験年月日						
試料番号(深さ)		川砂			試験者 片野 定男						
試料	土質名称				透容器 No.	—					
	最大粒径 mm				水内径 Dm cm	—					
	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	2.706			円長さ Lm cm	—					
スタンド パイプ <sup>1)</sup>	内径 cm				筒質量 m <sup>2)</sup> g						
	断面積 a cm <sup>2</sup>				試験用水	水道水					
供試体作製、 飽和方法		水浸脱気法により、24時間以上水浸させた。									
供試体寸法	供試体 No.				試験前	試験後					
	直径 D cm	10.00				(供試体+透水円筒)質量 ml					
	断面積 A cm <sup>2</sup>	78.54				供試体質量 m=m1-m2 g	1658.3 1795.0				
	長さ L cm	12.74				湿潤密度 $\rho_t = m/V$ g/cm <sup>3</sup>	1.658 1.795				
	体積 V cm <sup>3</sup>	1000.0				乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1+w/100)$ g/cm <sup>3</sup>	1.493 1.438				
						間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$	0.812 0.881				
						飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$ %	36.8 76.1				
含水比	試験前			試験後							
	容器 No.										
	ma g	256.8				2290.0					
	mb g	238.6				1933.4					
	mc g	73.7				495.8					
w, wf %	11.0				24.8						
平均値 %	11.0			24.8							
測定 No.	1		2		3		4		5		
測定開始時刻	t <sub>1</sub>										
測定終了時刻	t <sub>2</sub>										
測定時間	t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> s		180		300		150				
定水位差	h cm		4.9		4.9		4.9				
透水水量	Q cm <sup>3</sup>		199.5		316.1		154.9				
変位	T°Cに対する透水係数 k <sub>T</sub> <sup>4)</sup> cm/s		3.67E-02		3.49E-02		3.42E-02				
変水	時刻 t <sub>1</sub> における水位差 cm										
変水	時刻 t <sub>2</sub> における水位差 cm										
変位	T°Cに対する透水係数 cm/s										
測定時の水温	°C		17.0		17.0		17.0				
温度補正係数	$\eta_T / \eta_{15}$		0.950		0.950		0.950				
15°Cに対する透水係数	cm/s		3.49E-02		3.32E-02		3.25E-02				
代表値	cm/s				3.35E-02						
特記事項		試験後の密度測定は、供試体脱型の際に脱水及び試料の損失が生じる為に、値はかなりの誤差を含む。									

B.8 土の透水試験（ローム）

JIS A 1218 JSF T 311		土の透水試験（定水位、変水位）				
調査件名				試験年月日		
試料番号(深さ)		ローム		試験者 片野 定男		
試料	土質名称			透	容器 No.	—
	最大粒径	mm		水	内径 Dm cm	10.00
料	土粒子の密度 $\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2.702	円	長さ Lm cm	12.74
	スタンド	内径	cm	筒	質量 m2 <sup>2)</sup> g	—
パイプ <sup>1)</sup>	断面積 a	cm <sup>2</sup>	11.045	試験用水	水道水	
供試体作製、		水浸脱気法により、24時間以上水浸させた。				
飽和方法						
供試体寸法	供試体No.	1	供試体の状態	試験前		試験後 <sup>3)</sup>
	直径D cm	10.00		(供試体+透水円筒)質量 ml		g
	断面積A cm <sup>2</sup>	78.54		供試体質量 m=m1-m2		g
	長さL cm	12.74		湿潤密度 $\rho_t = m/V$		g/cm <sup>3</sup>
	体積V cm <sup>3</sup>	1000.0		乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1+w/100)$		g/cm <sup>3</sup>
				間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$		
		飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$		%		
含水比	試験前			試験後 <sup>3)</sup>		
	容器No.					
	ma g	332.2		2166.1		
	mb g	223.2		1502.3		
	mc g	69.2		734.9		
	w, wf %	70.8		86.5		
平均値 %	70.8			86.5		
測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻	t <sub>1</sub>					
測定終了時刻	t <sub>2</sub>					
測定時間	t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub> s	420	1200	1260		
定水位差	h cm					
透水	透水量 Q cm <sup>3</sup>					
位	T°Cに対する透水係数k <sub>T</sub> <sup>4)</sup> cm/s					
変水	時刻t <sub>1</sub> における水頭	cm	81.5	76.1	63.3	
	時刻t <sub>2</sub> における水頭	cm	76.1	63.3	57.4	
位	T°Cに対する透水係数	cm/s	2.92E-04	2.75E-04	1.39E-04	
測定時の水温	°C	23	23	23		
温度補正係数	$\eta_T / \eta_{15}$	0.819	0.819	0.819		
15°Cに対する透水係数	cm/s	2.39E-04	2.25E-04	1.14E-04		
代表値	cm/s	1.93E-04				
特記事項						
試験後の試料の撤去時に脱水が生じる為に、値に誤差を含む。						

## 付録 C 透水層及び被覆土層の締固め度測定結果

透水層（川砂）：最大乾燥密度 1.611g/cm<sup>3</sup>，最適含水比 17.6%

堤体（ローム）：最大乾燥密度 0.989g/cm<sup>3</sup>，最適含水比 54.0%

### C1. Case1

地盤	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
透水層 (川砂)	1274.0	93.7	87.5	28.3	10.5	1.623	1.469	91.2
	1249.3	105.7	98.6	30.2	10.4	1.591	1.442	89.5
	1269.8	107.3	99.8	27.2	10.3	1.618	1.466	91.0
	1264.2	93.5	87.5	28.7	10.2	1.610	1.461	90.7
	1259.6	90.2	84.2	27.7	10.6	1.605	1.451	90.0
	1281.8	101.0	94.2	28.1	10.3	1.633	1.481	91.9
	1277.2	111.6	102.8	27.8	11.7	1.627	1.456	90.4
	1252.1	95.4	88.4	27.2	11.4	1.595	1.431	88.8
	1268.9	88.3	82.2	26.8	11.0	1.616	1.456	90.4
	1279.5	85.7	80.2	28.2	10.6	1.630	1.474	91.5
平均値					10.7	1.615	1.459	90.5

地盤	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
堤体 (ローム)	1259.6	80.2	56.3	27.1	81.8	1.605	0.882	89.2
	1293.3	78.3	55.3	26.8	80.7	1.648	0.912	92.2
	1227.8	90.4	63.2	28.3	77.9	1.564	0.879	88.9
	1242.6	88.1	61.9	27.2	75.5	1.583	0.902	91.2
	1268.3	79.3	55.6	27.7	84.9	1.616	0.874	88.3
	1282.6	77.4	56.0	30.2	82.9	1.634	0.893	90.3
	1260.4	81.6	57.4	27.4	80.7	1.606	0.889	89.9
	1240.7	79.6	56.5	27.1	78.6	1.581	0.885	89.5
	1256.4	76.4	55.1	27.3	76.6	1.601	0.906	91.6
	1272.5	75.3	54.2	27.7	79.6	1.621	0.902	91.2
	1266.7	89.1	61.7	28.3	82.0	1.614	0.886	89.6
	1254.5	79.9	55.9	27.7	85.1	1.598	0.863	87.3
	1268.1	76.3	55.3	28.6	78.7	1.615	0.904	91.4
	1256.0	82.5	58.8	27.7	76.2	1.600	0.908	91.8
平均値					80.1	1.606	0.892	90.2

C2. Case2

地盤	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
透水層 (川砂)	1272.0	86.5	80.9	27.1	10.4	1.620	1.468	91.1
	1251.3	100.3	93.3	26.8	10.5	1.594	1.442	89.5
	1288.2	96.2	89.8	28.3	10.4	1.641	1.486	92.3
	1261.6	88.1	82.5	27.3	10.1	1.607	1.459	90.6
	1264.6	79.6	74.5	27.6	10.9	1.611	1.453	90.2
	1276.8	84.3	79.1	27.7	10.1	1.626	1.477	91.7
	1281.2	91.4	85.3	27.2	10.5	1.632	1.477	91.7
	1264.0	83.3	77.7	28.4	11.4	1.610	1.446	89.8
	1278.8	95.8	89.4	26.9	10.2	1.629	1.478	91.7
	1284.2	101.3	94.1	27.1	10.7	1.636	1.477	91.7
平均値					10.5	1.621	1.466	91.0

地盤	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
堤体 (ローム)	1195.4	83.6	60.6	25.9	66.3	1.523	0.916	92.6
	1177.1	83.5	60.9	28.0	68.7	1.499	0.889	89.9
	1197.0	69.9	50.7	22.6	68.3	1.525	0.906	91.6
	1184.3	72.8	52.2	21.7	67.5	1.509	0.900	91.0
	1200.4	92.4	65.9	27.7	69.4	1.529	0.903	91.3
	1175.3	86.5	62.5	28.3	70.2	1.497	0.880	89.0
	1186.5	93.1	67.0	27.5	66.1	1.511	0.910	92.0
	1169.5	88.4	65.0	28.6	64.3	1.490	0.907	91.7
	1159.8	79.8	59.1	27.7	65.9	1.477	0.890	90.0
	1162.8	93.6	67.8	30.2	68.6	1.481	0.878	88.8
	1220.6	89.2	63.6	27.4	70.7	1.555	0.911	92.1
	1189.4	78.6	58.2	28.7	69.2	1.515	0.896	90.6
	1152.2	86.1	62.3	27.2	67.8	1.468	0.875	88.4
	1178.8	83.6	61.8	28.1	64.7	1.502	0.912	92.2
平均値					67.7	1.506	0.898	90.5

C3. Case3

地盤	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
透水層 (川砂)	1264.2	92.2	86.1	28.3	10.6	1.610	1.457	90.4
	1286.7	85.4	79.6	27.1	11.0	1.639	1.476	91.6
	1251.3	81.6	76.1	27.4	11.3	1.594	1.432	88.9
	1268.9	93.8	87.6	28.4	10.5	1.616	1.463	90.8
	1279.1	90.4	84.4	28.1	10.7	1.629	1.472	91.4
	1261.8	88.9	82.7	26.8	11.1	1.607	1.447	89.8
	1272.7	84.3	79.0	26.9	10.2	1.621	1.472	91.3
	1258.4	79.8	74.9	27.2	10.3	1.603	1.454	90.2
	1272.6	97.3	90.3	28.4	11.3	1.621	1.456	90.4
	1287.9	86.7	80.9	27.1	10.8	1.641	1.481	91.9
平均値					10.8	1.618	1.461	90.7

地盤	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
堤体 (ローム)	1253.5	84.7	58.9	27.1	81.1	1.597	0.882	89.1
	1267.0	76.1	53.8	27.3	84.2	1.614	0.876	88.6
	1287.5	72.4	52.6	27.7	79.5	1.640	0.914	92.4
	1263.3	76.6	55.5	28.3	77.6	1.609	0.906	91.6
	1268.3	79.8	57.3	27.5	75.5	1.616	0.921	93.1
	1242.5	82.6	59.8	28.6	73.1	1.583	0.915	92.5
	1256.9	90.1	63.0	27.7	76.8	1.601	0.906	91.6
	1260.8	88.2	63.5	30.2	74.2	1.606	0.922	93.2
	1241.3	76.2	53.9	27.4	84.2	1.581	0.859	86.8
	1264.6	74.8	53.2	27.1	82.8	1.611	0.881	89.1
	1276.3	76.2	54.6	27.3	79.1	1.626	0.908	91.8
	1246.4	82.6	58.8	27.7	76.5	1.588	0.899	90.9
	1248.7	84.9	61.1	28.3	72.6	1.591	0.922	93.2
	1243.2	87.7	61.9	27.5	75.0	1.584	0.905	91.5
平均値					78.0	1.603	0.901	91.1



C4. Case4

地盤	採取高さ (m)	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	
川砂	0.15	1239.9	109.7	102.3	30.2	10.3	1.579	1.432	88.9	
		1242.0	115.3	106.8	25.9	10.5	1.582	1.432	88.9	
	0.30	1245.9	126.3	117.0	28.0	10.4	1.587	1.437	89.2	
		1260.0	116.4	107.8	25.7	10.5	1.605	1.453	90.2	
	0.45	1327.3	123.0	109.4	27.4	16.6	1.691	1.450	90.0	
		1351.5	122.1	108.4	27.8	17.0	1.722	1.472	91.3	
	0.60	1271.4	120.3	110.7	28.4	11.7	1.620	1.450	90.0	
		1277.4	134.3	122.9	27.7	12.0	1.627	1.453	90.2	
	0.75	1258.7	128.9	119.2	28.2	10.7	1.603	1.449	89.9	
		1264.0	117.7	108.5	26.5	11.2	1.610	1.448	89.9	
	平均						12.1	1.623	1.448	89.9

地盤	採取高さ (m)	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	
ローム	0.25	1134.3	97.7	72.1	27.1	56.9	1.445	0.921	93.1	
		1143.3	97.3	71.6	29.5	61.0	1.456	0.904	91.4	
	0.50	1119.7	127.3	90.0	29.3	61.4	1.426	0.883	89.3	
		1167.3	131.9	91.2	27.8	64.2	1.487	0.906	91.6	
	0.75	1208.3	122.1	87.3	30.1	60.8	1.539	0.957	96.8	
		1204.2	113.6	82.1	29.8	60.2	1.534	0.957	96.8	
	1.00	1211.4	137.3	95.9	29.3	62.2	1.543	0.952	96.2	
		1203.3	119.3	84.3	27.7	61.8	1.533	0.947	95.8	
	1.25	1197.0	134.6	95.0	28.2	59.3	1.525	0.957	96.8	
		1190.0	130.1	90.9	26.5	60.9	1.516	0.942	95.3	
	1.50	1210.6	118.9	83.2	27.9	64.6	1.542	0.937	94.8	
		1207.3	141.7	97.8	27.5	62.4	1.538	0.947	95.7	
	1.75	1167.1	122.7	88.0	27.8	57.6	1.487	0.943	95.4	
		1182.3	143.5	100.2	26.5	58.8	1.506	0.949	95.9	
	平均						60.9	1.506	0.936	94.6

C5. Case5

地盤	採取高さ (m)	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	
川砂	0.15	1344.2	143.4	128.7	28.2	14.6	1.712	1.494	92.7	
		1286.7	130.2	121.4	28.5	9.5	1.639	1.497	92.9	
	0.30	1245.9	126.3	117.0	28.0	10.4	1.587	1.437	89.2	
		1260.0	116.4	107.8	25.7	10.5	1.605	1.453	90.2	
	0.45	1327.3	123.0	109.4	27.4	16.6	1.691	1.450	90.0	
		1351.5	122.1	108.4	27.8	17.0	1.722	1.472	91.3	
	0.60	1271.4	120.3	110.7	28.4	11.7	1.620	1.450	90.0	
		1277.4	134.3	122.9	27.7	12.0	1.627	1.453	90.2	
	0.75	1258.7	128.9	119.2	28.2	10.7	1.603	1.449	89.9	
		1264.0	117.7	108.5	26.5	11.2	1.610	1.448	89.9	
	平均						12.4	1.642	1.460	90.6

地盤	採取高さ (m)	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	
ローム	0.25	1163.1	95.6	71.3	27.5	55.5	1.482	0.953	96.4	
		1168.7	98.9	72.4	26.8	58.1	1.489	0.942	95.2	
	0.50	1188.8	109.7	78.9	25.9	58.1	1.514	0.958	96.8	
		1166.0	112.0	80.6	27.0	58.6	1.485	0.937	94.7	
	0.75	1179.9	113.3	81.8	26.5	57.0	1.503	0.958	96.8	
		1178.3	147.7	103.8	27.9	57.8	1.501	0.951	96.2	
	1.00	1176.3	137.1	97.0	27.2	57.4	1.498	0.952	96.2	
		1181.6	104.8	76.0	27.0	58.8	1.505	0.948	95.9	
	1.25	1167.6	116.6	83.1	25.9	58.6	1.487	0.938	94.8	
		1172.1	129.8	91.5	26.5	58.9	1.493	0.940	95.0	
	1.50	1172.3	106.8	77.1	27.5	59.9	1.493	0.934	94.4	
		1156.3	133.5	94.5	27.0	57.8	1.473	0.934	94.4	
	1.75	1169.6	124.1	88.0	27.9	60.1	1.490	0.931	94.1	
		1164.2	118.6	84.3	26.5	59.3	1.483	0.931	94.1	
	平均						58.3	1.493	0.943	95.4

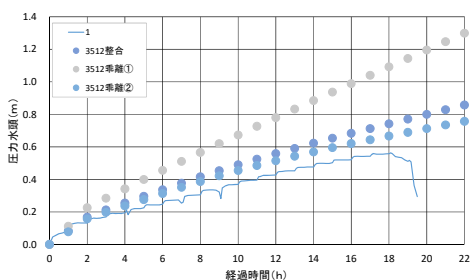
C6. Case6

地盤	採取高さ (m)	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	
川砂	0.15	1344.2	143.4	128.7	28.2	14.6	1.712	1.494	92.7	
		1286.7	130.2	121.4	28.5	9.5	1.639	1.497	92.9	
	0.30	1245.9	126.3	117.0	28.0	10.4	1.587	1.437	89.2	
		1260.0	116.4	107.8	25.7	10.5	1.605	1.453	90.2	
	0.45	1327.3	123.0	109.4	27.4	16.6	1.691	1.450	90.0	
		1351.5	122.1	108.4	27.8	17.0	1.722	1.472	91.3	
	0.60	1271.4	120.3	110.7	28.4	11.7	1.620	1.450	90.0	
		1277.4	134.3	122.9	27.7	12.0	1.627	1.453	90.2	
	0.75	1258.7	128.9	119.2	28.2	10.7	1.603	1.449	89.9	
		1264.0	117.7	108.5	26.5	11.2	1.610	1.448	89.9	
	平均						12.4	1.642	1.460	90.6

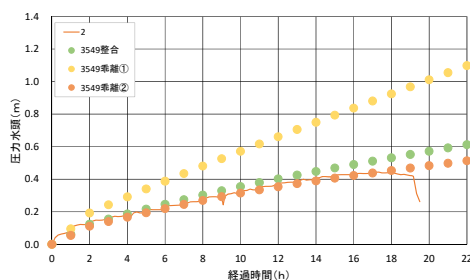
地盤	採取高さ (m)	湿潤重量 (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>b</sub> (g)	m <sub>c</sub> (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	
ローム	0.25	1191.1	103.3	74.5	27.7	61.5	1.517	0.939	95.0	
		1184.2	98.3	72.1	28.1	59.5	1.509	0.946	95.6	
	0.50	1176.2	107.3	77.4	28.2	60.8	1.498	0.932	94.2	
		1177.0	91.0	67.7	28.3	59.1	1.499	0.942	95.3	
	0.75	1187.3	107.0	77.4	27.2	59.0	1.512	0.951	96.2	
		1188.8	102.0	74.7	27.5	57.8	1.514	0.959	97.0	
	1.00	1164.9	141.2	99.8	27.7	57.4	1.484	0.943	95.3	
		1170.5	126.6	90.0	28.1	59.1	1.491	0.937	94.7	
	1.25	1181.3	130.4	92.2	28.3	59.8	1.505	0.942	95.2	
		1172.2	128.7	91.5	27.0	57.7	1.493	0.947	95.8	
	1.50	1176.6	106.9	77.1	28.2	60.9	1.499	0.931	94.2	
		1160.7	108.8	79.0	28.0	58.4	1.479	0.933	94.4	
	1.75	1157.2	114.4	82.3	27.5	58.6	1.474	0.930	94.0	
		1151.5	128.0	91.2	27.7	58.0	1.467	0.929	93.9	
	平均						59.1	1.496	0.940	95.1

## 付録 D 3次元解析結果と計測値比較

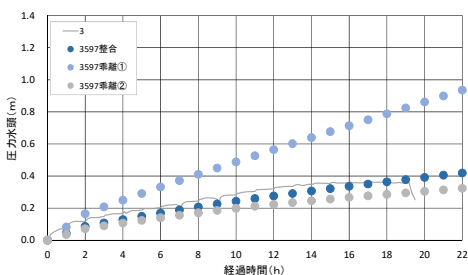
### D.1 Case1 3次元解析結果と計測値比較



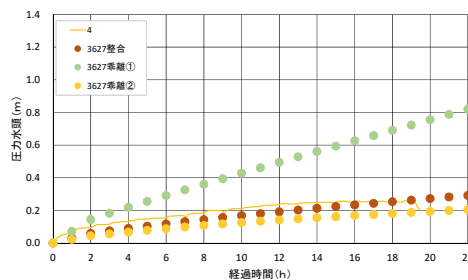
D-1.1 法尻から-1.0m (+1m 断面)



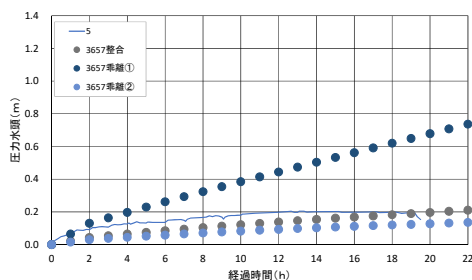
D-1.2 法尻から-0.5m (+1m 断面)



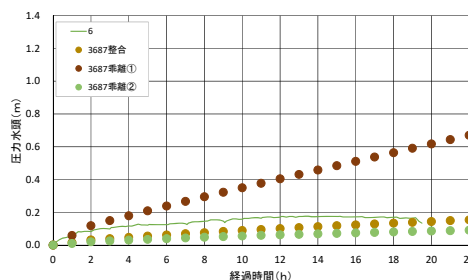
D-1.3 法尻 (+1m 断面)



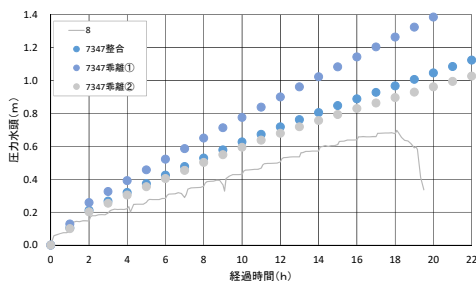
D-1.4 法尻から+0.5m (+1m 断面)



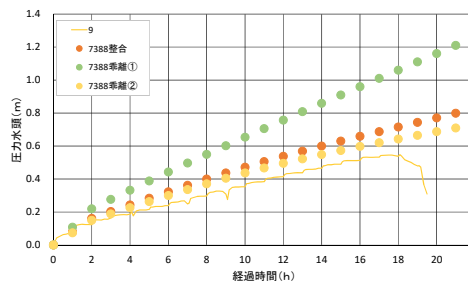
D-1.5 法尻から+1.0m (+1m 断面)



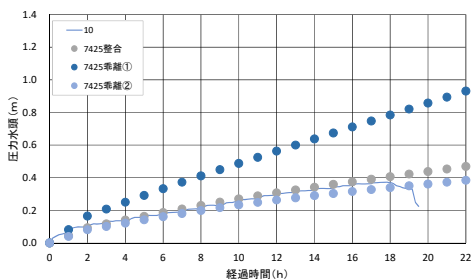
D-1.6 法尻から+1.5m (+1m 断面)



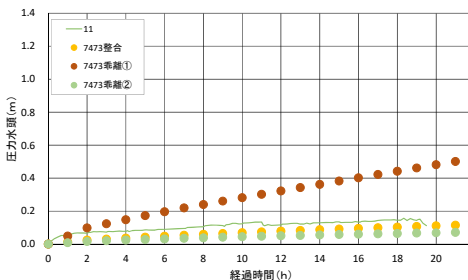
D-1.7 法尻から-1.5m (中央断面)



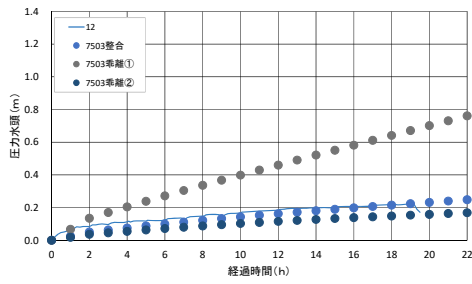
D-1.8 法尻から-1.0m (中央断面)



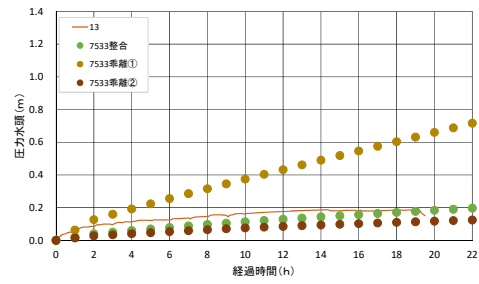
D-1.9 法尻から-0.5m (中央断面)



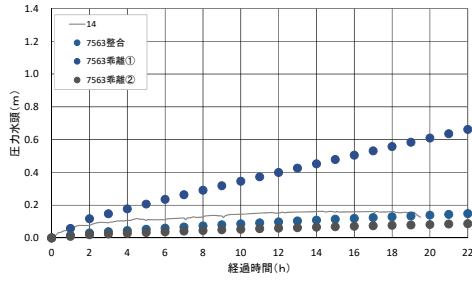
D-1.10 法尻 (中央断面)



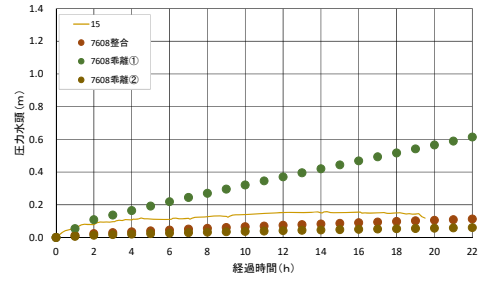
D-1.11 法尻から+0.5m (中央断面)



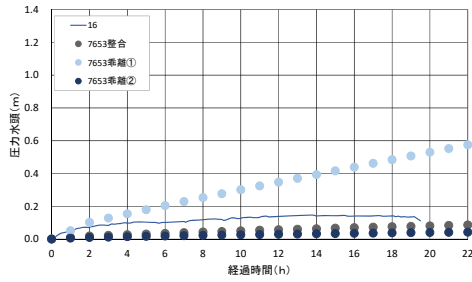
D-1.12 法尻から+1.0m (中央断面)



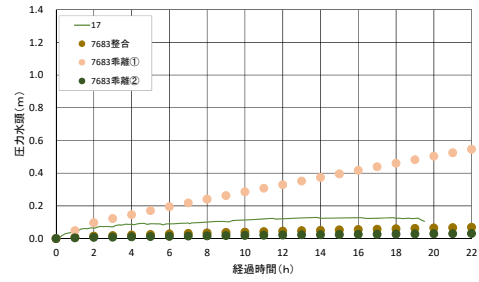
D-1.13 法尻から+1.5m (中央断面)



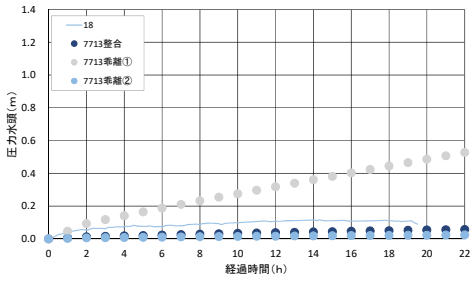
D-1.14 法尻から+2.0m (中央断面)



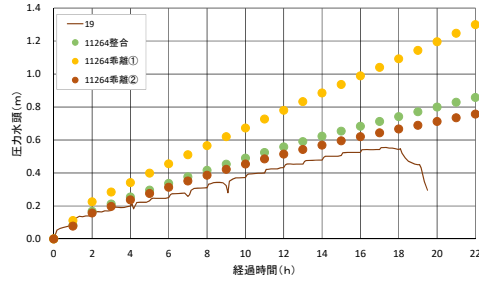
D-1.15 法尻から+2.5m (中央断面)



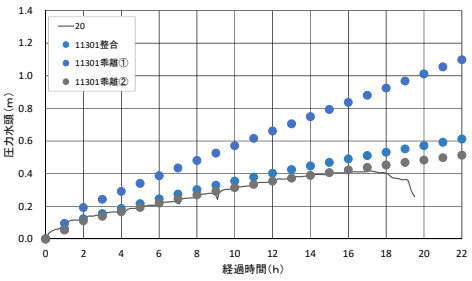
D-1.16 法尻から+3.0m (中央断面)



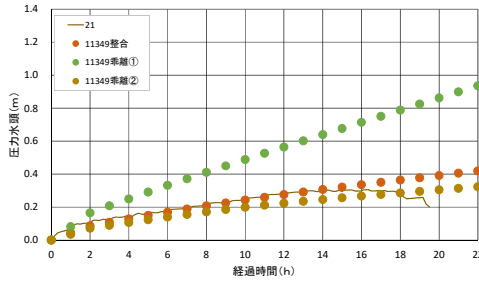
D-1.17 法尻から+3.5m (中央断面)



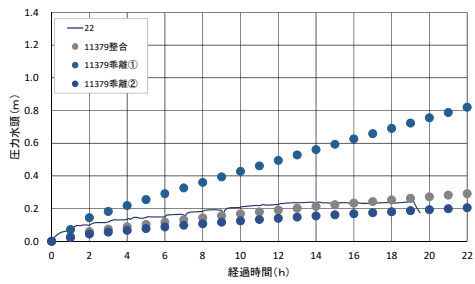
D-1.18 法尻から-1.0m (-1m断面)



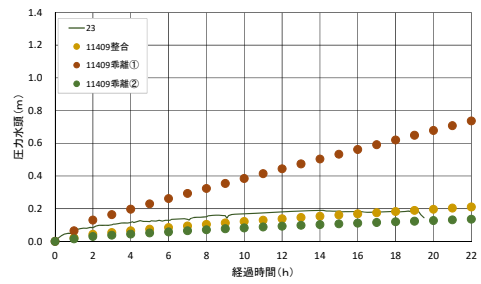
D-1.19 法尻から-0.5m (-1m断面)



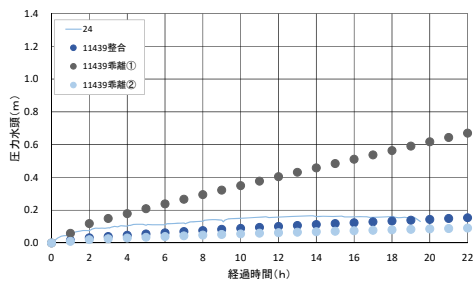
D-1.20 法尻 (-1m断面)



D-1.21 法尻から+0.5m (-1m 断面)

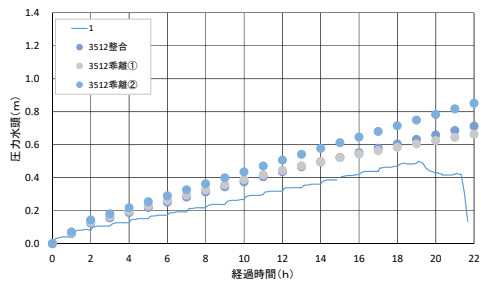


D-1.22 法尻から+1.0m (-1m 断面)

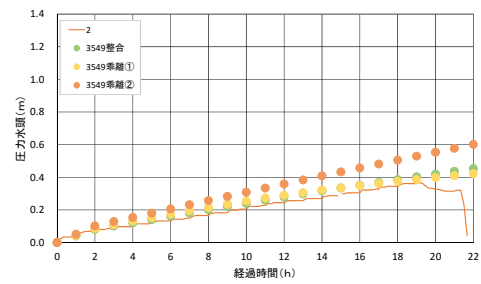


D-1.23 法尻から+1.5m (-1m 断面)

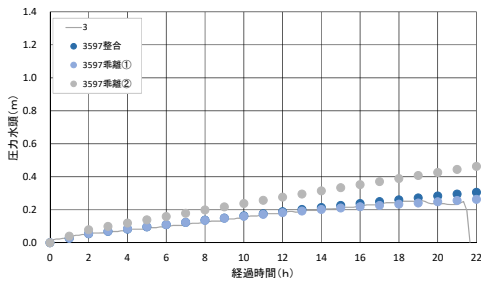
## Case2 3次元解析結果と計測値比較



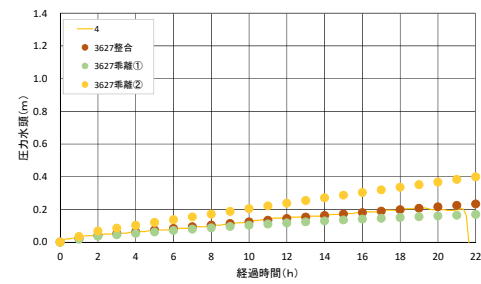
D-2.1 法尻から-1.0m (+1m 断面)



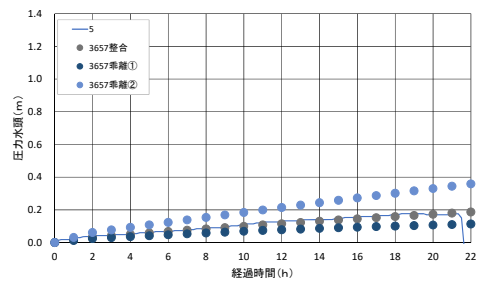
D-2.2 法尻から-0.5m (+1m 断面)



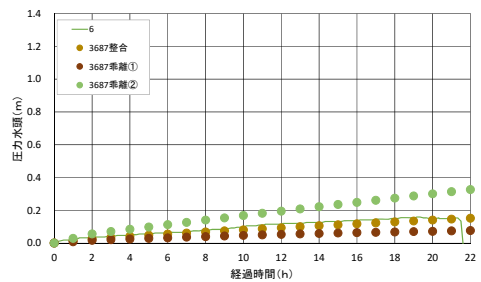
D-2.3 法尻 (+1m 断面)



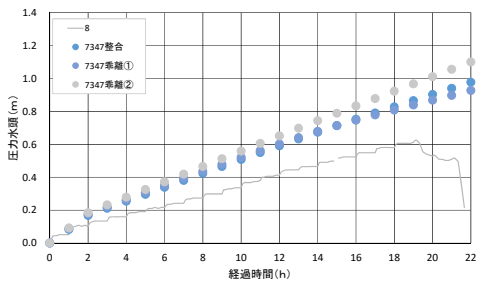
D-2.4 法尻から+0.5m (+1m 断面)



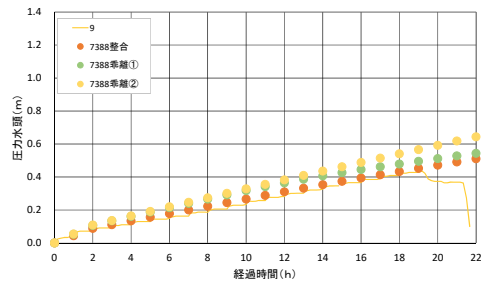
D-2.5 法尻から+1.0m (+1m 断面)



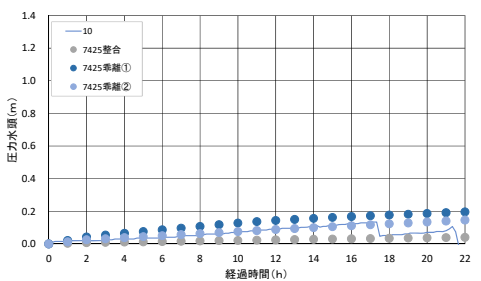
D-2.6 法尻から+1.5m (+1m 断面)



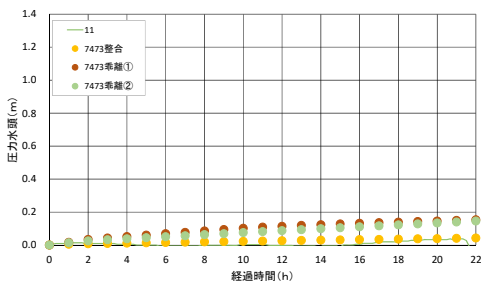
D-2.7 法尻から-1.5m (中央断面)



D-2.8 法尻から-1.0m (中央断面)

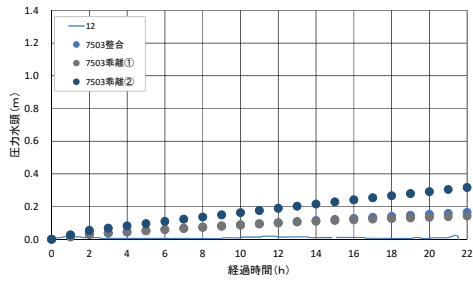


D-2.9 法尻から-0.5m (中央断面)

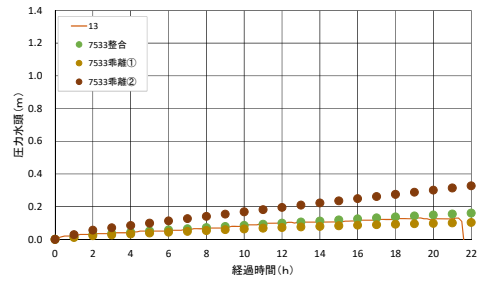


D-2.10 法尻 (中央断面)

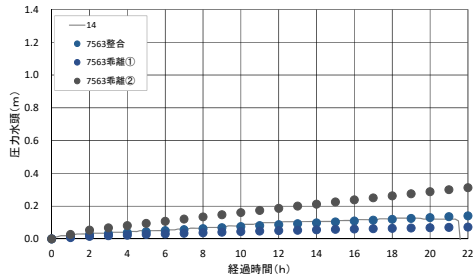




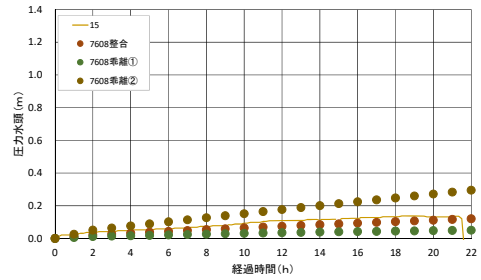
D-2.11 法尻から+0.5m (中央断面)



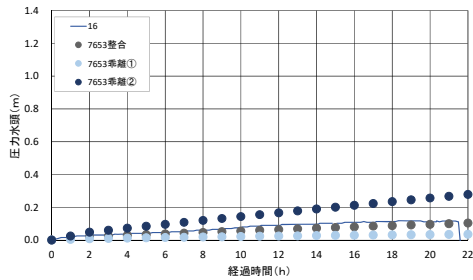
D-2.12 法尻から+1.0m (中央断面)



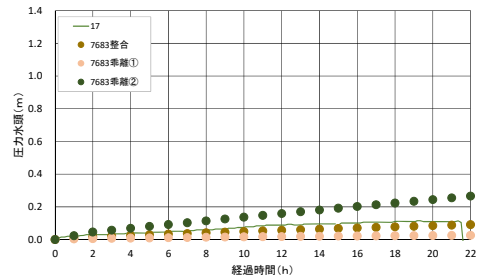
D-2.13 法尻から+1.5m (中央断面)



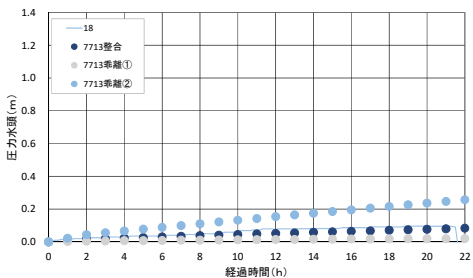
D-2.14 法尻から+2.0m (中央断面)



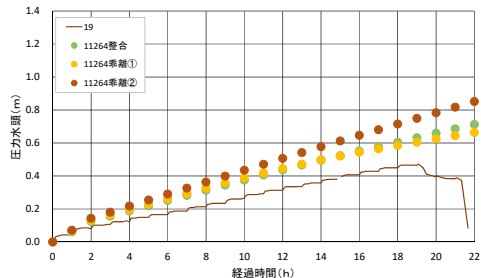
D-2.15 法尻から+2.5m (中央断面)



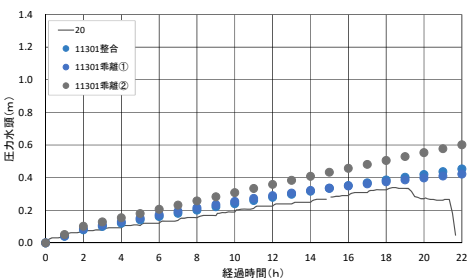
D-2.16 法尻から+3.0m (中央断面)



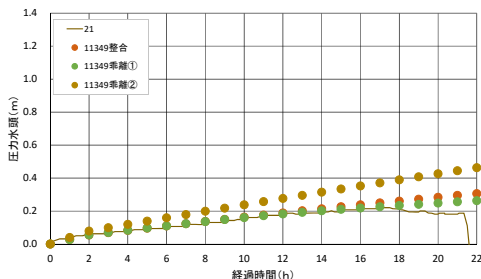
D-2.17 法尻から+3.5m (中央断面)



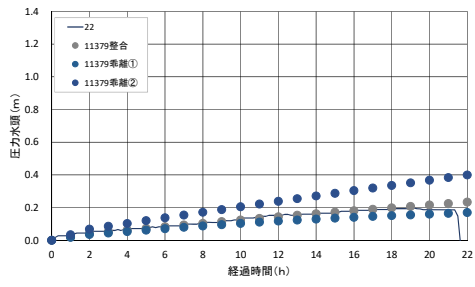
D-2.18 法尻から-1.0m (-1m 断面)



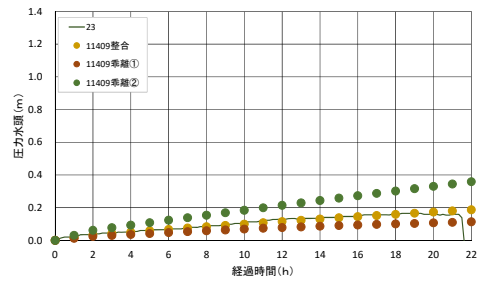
D-2.19 法尻から-0.5m (-1m 断面)



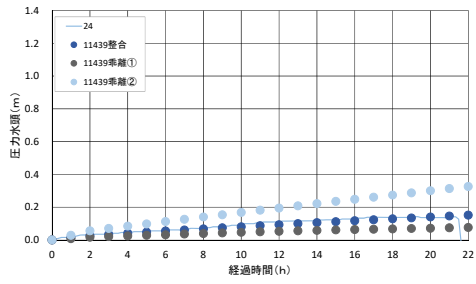
D-2.20 法尻 (-1m 断面)



D-2.21 法尻から+0.5m (-1m 断面)

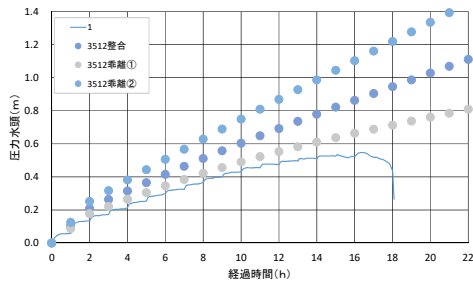


D-2.22 法尻から+1.0m (-1m 断面)

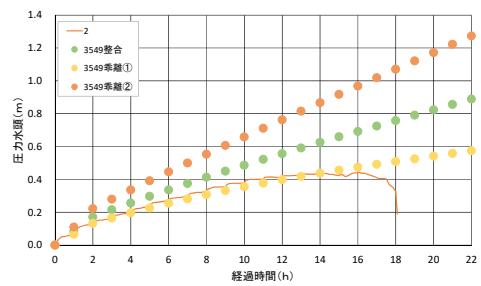


D-2.23 法尻から+1.5m (-1m 断面)

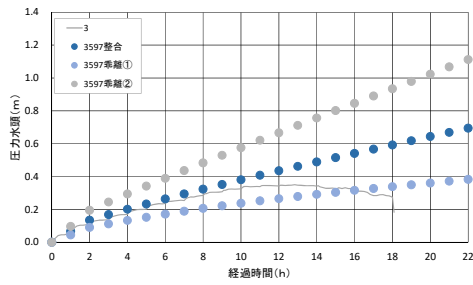
### D.3 Case3 3次元解析結果と計測値比較



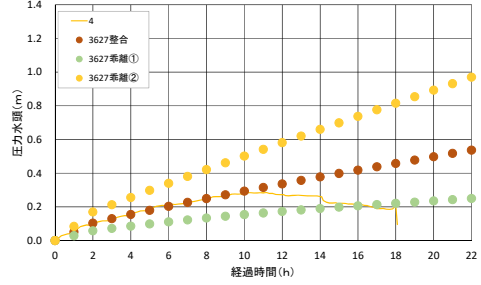
D-3.1 法尻から-1.0m (+1m 断面)



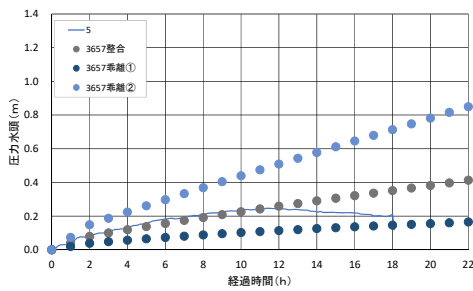
D-3.2 法尻から-0.5m (+1m 断面)



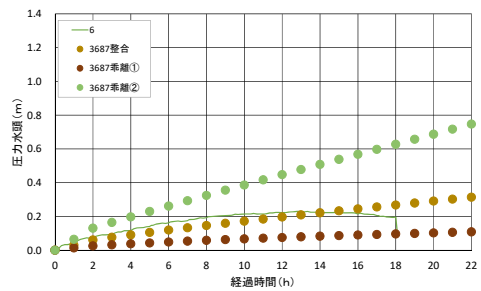
D-3.3 法尻 (+1m 断面)



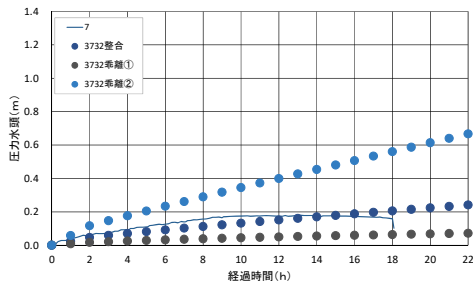
D-3.4 法尻から+0.5m (+1m 断面)



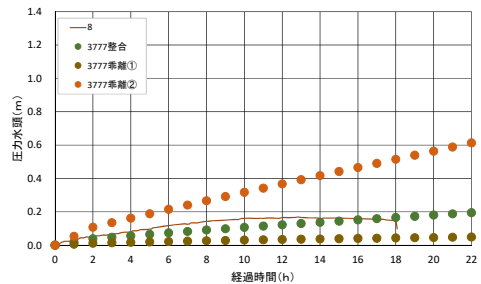
D-3.5 法尻から+1.0m (+1m 断面)



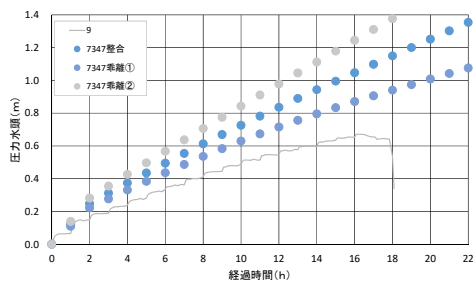
D-3.6 法尻から+1.5m (+1m 断面)



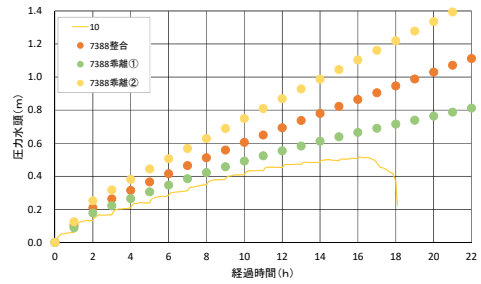
D-3.7 法尻から+2.0m (+1m 断面)



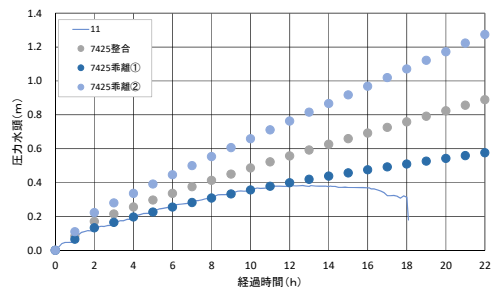
D-3.8 法尻から+2.5m (+1m 断面)



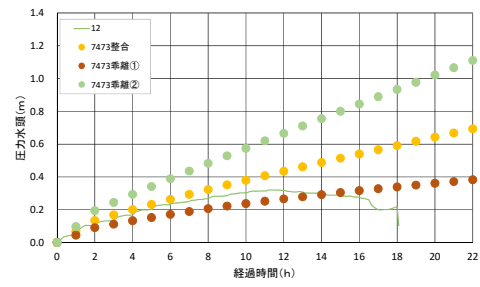
D-3.9 法尻から-1.5m (中央断面)



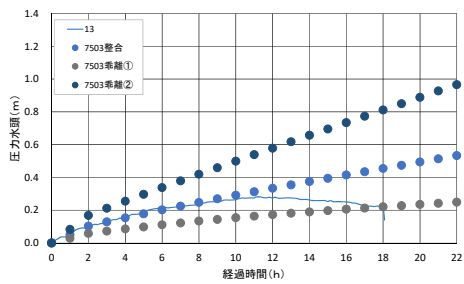
D-3.10 法尻から-1.0m (中央断面)



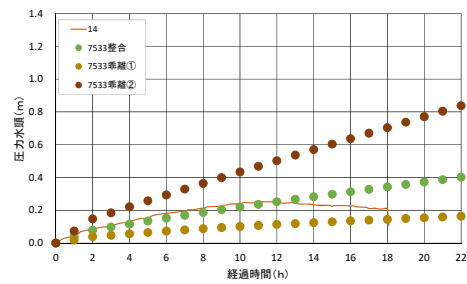
D-3.11 法尻から-0.5m (中央断面)



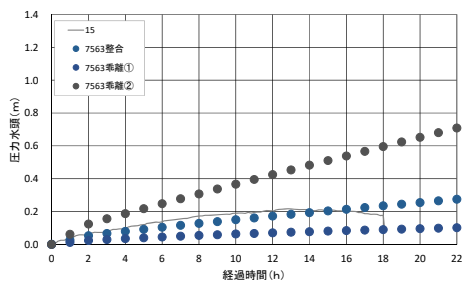
D-3.12 法尻から (中央断面)



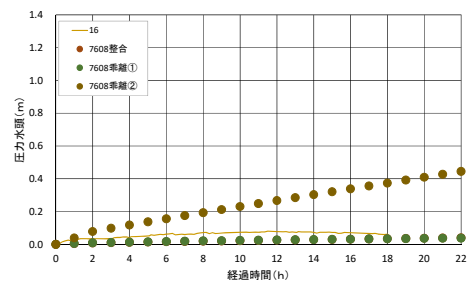
D-3.13 法尻から+0.5m (中央断面)



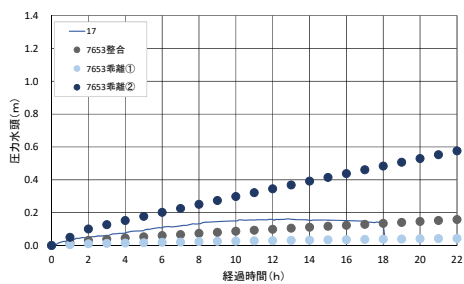
D-3.14 法尻から+1.0m (中央断面)



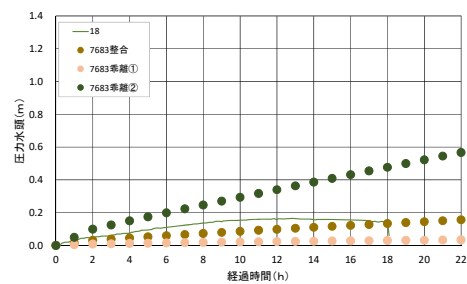
D-3.15 法尻から+1.5m (中央断面)



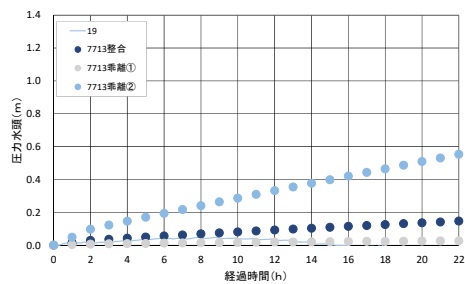
D-3.16 法尻から+2.0m (中央断面)



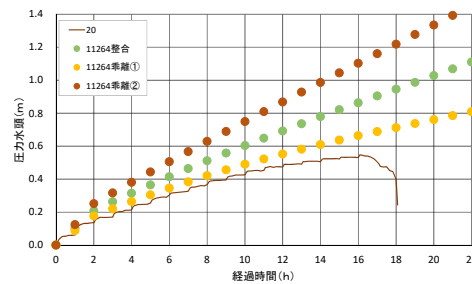
D-3.17 法尻から+2.5m (中央断面)



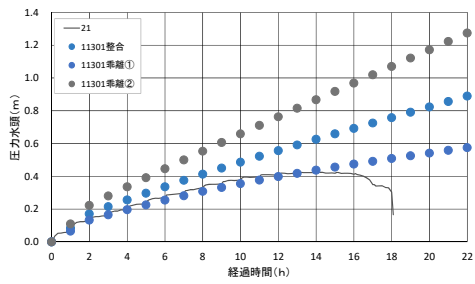
D-3.18 法尻から+3.0m (中央断面)



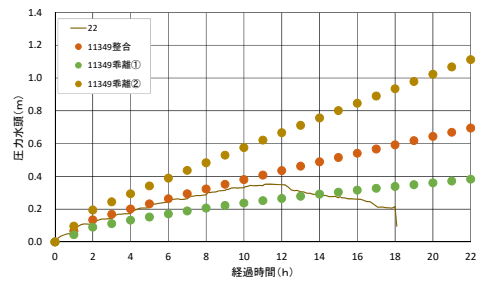
D-3.19 法尻から+3.5m (中央断面)



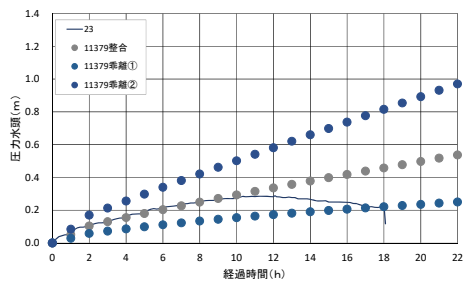
D-3.20 法尻-1.0m (-1m 断面)



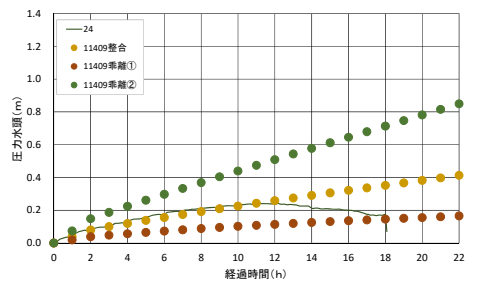
D-3.21 法尻から-0.5m (-1m 断面)



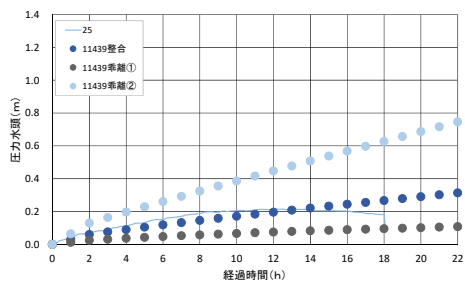
D-3.22 法尻 (-1m 断面)



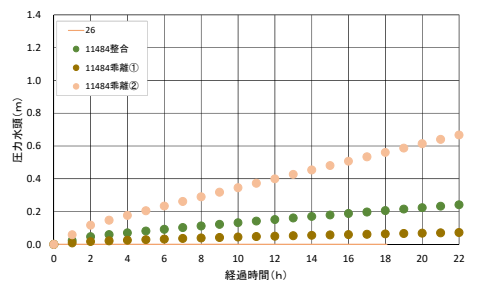
D-3.23 法尻から+0.5m (-1m 断面)



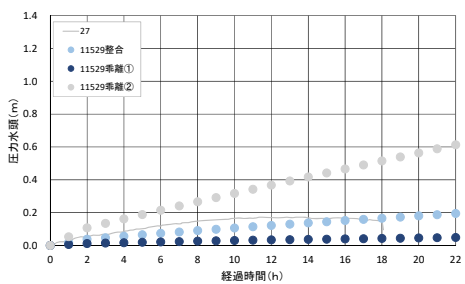
D-3.24 法尻から+1.0m (-1m 断面)



D-3.25 法尻から+1.5m (-1m 断面)

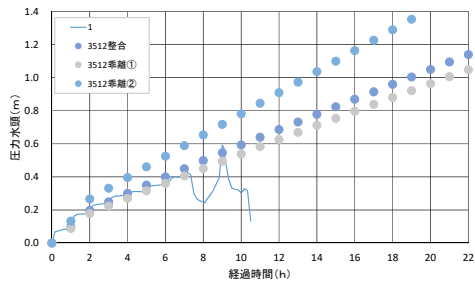


D-3.25 法尻から+2.0m (-1m 断面)

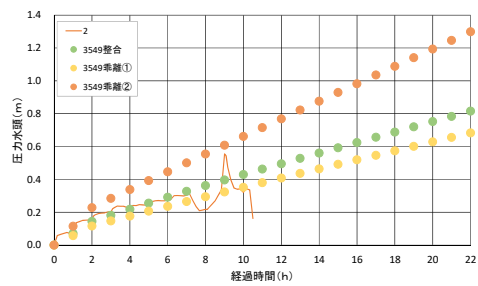


D-3.27 法尻から+2.5m (-1m 断面)

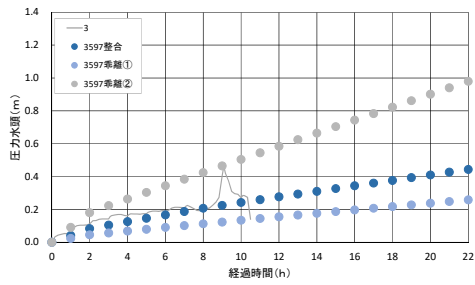
## D.4 Case4 3次元解析結果と計測値比較



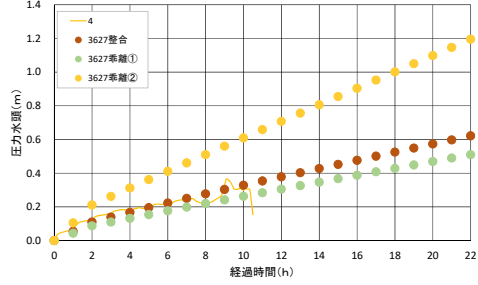
D-4.1 法尻から-1.0m (+1m 断面)



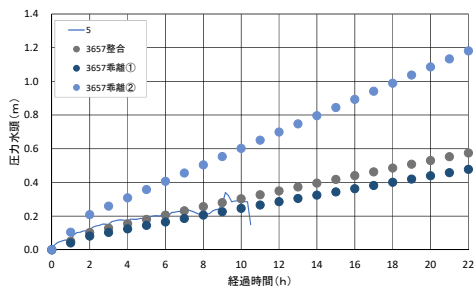
D-4.2 法尻から-0.5m (+1m 断面)



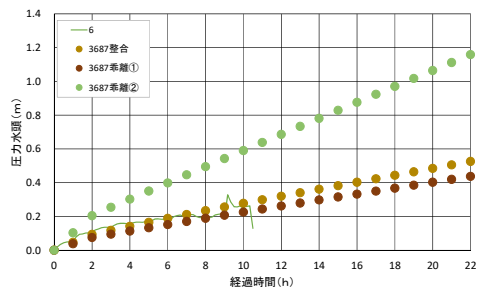
D-4.3 法尻 (+1m 断面)



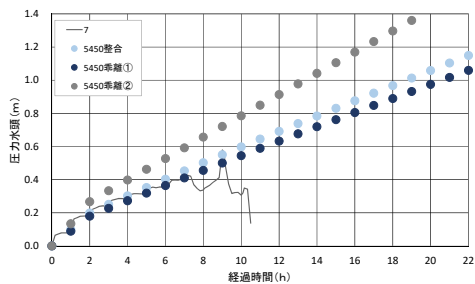
D-4.4 法尻から+0.5m (+1m 断面)



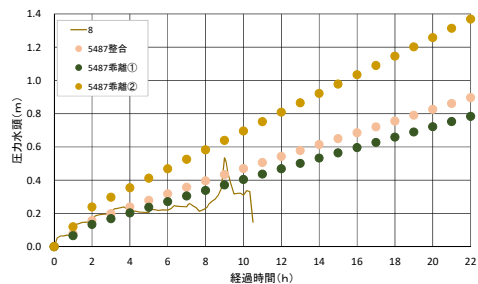
D-4.5 法尻から+1.0m (+1m 断面)



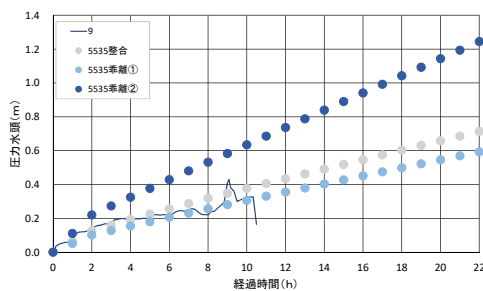
D-4.6 法尻から+1.5m (+1m 断面)



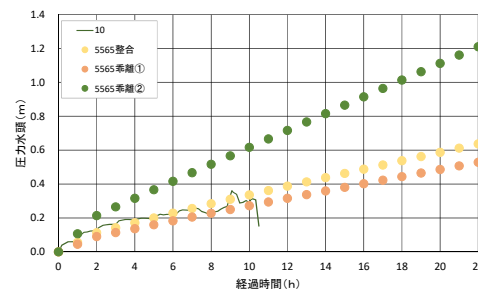
D-4.7 法尻から-1.0m (+0.5m 断面)



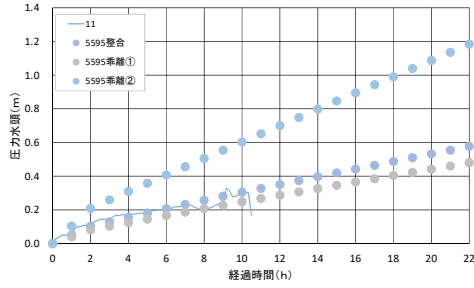
D-4.8 法尻から-0.5m (+0.5m 断面)



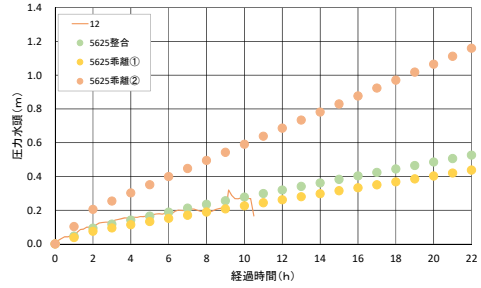
D-4.9 法尻 (+0.5m 断面)



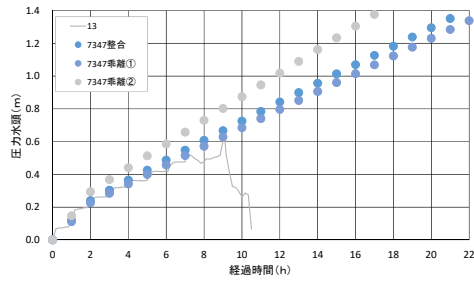
D-4.10 法尻+0.5m (+0.5m 断面)



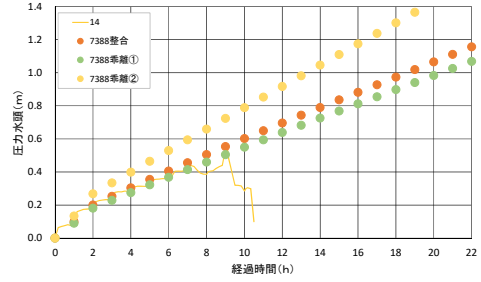
D-4.11 法尻から+1.0m (+0.5m 断面)



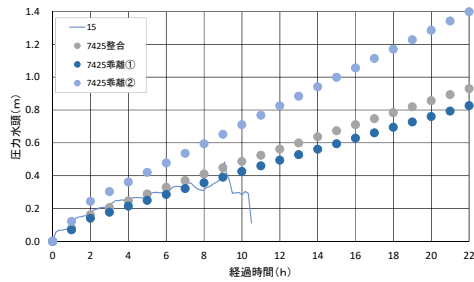
D-4.12 法尻から+1.5m (+0.5m 断面)



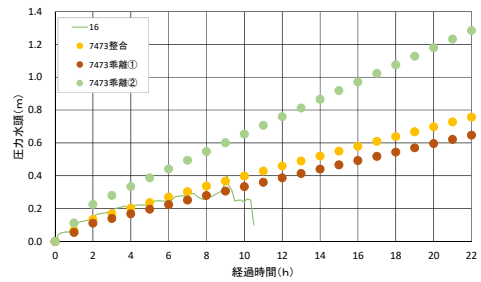
D-4.13 法尻から-1.5m (中央断面)



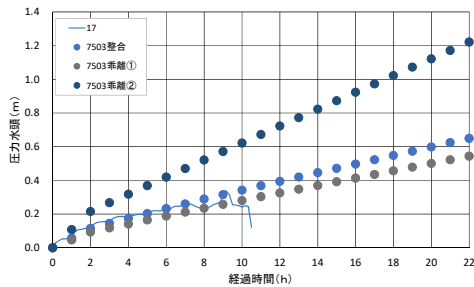
D-4.14 法尻から-1.0m (中央断面)



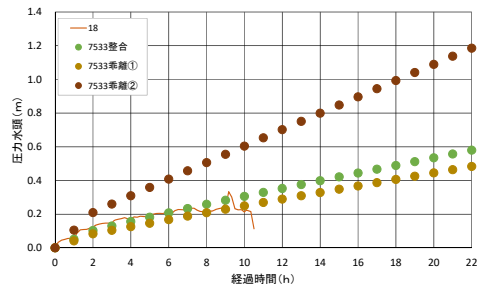
D-4.15 法尻から-0.5m (中央断面)



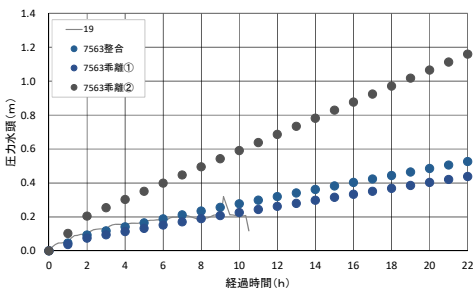
D-4.16 法尻 (中央断面)



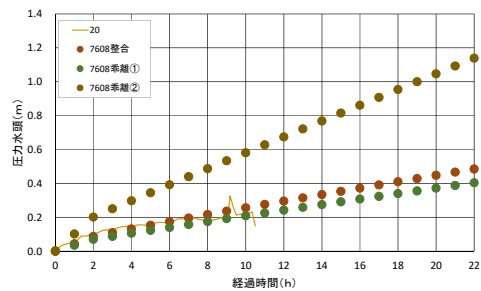
D-4.17 法尻から+0.5m (中央断面)



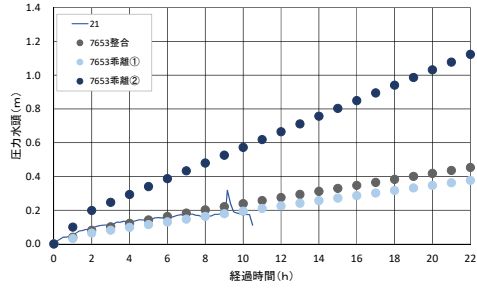
D-4.18 法尻から+1.0m (中央断面)



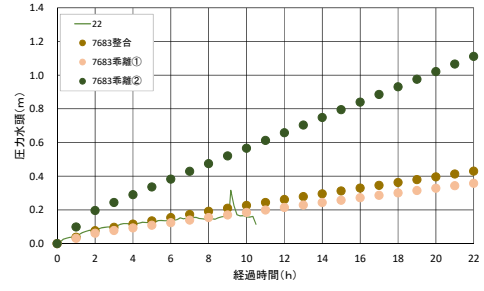
D-4.19 法尻から+1.5m (中央断面)



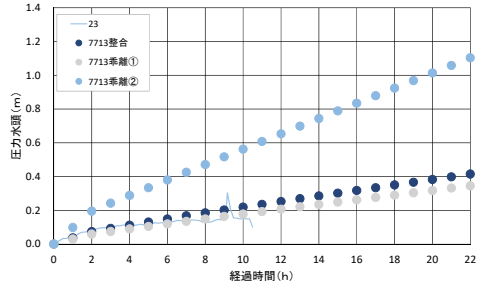
D-4.20 法尻から+2.0m (中央断面)



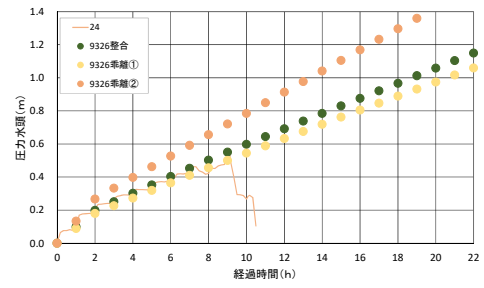
D-4.21 法尻から+2.5m (中央断面)



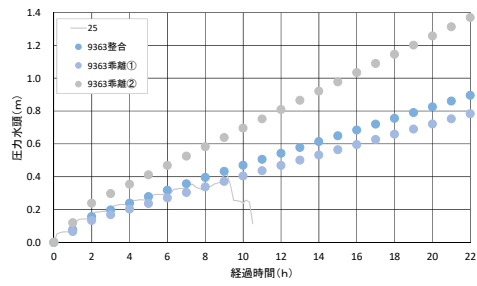
D-4.22 法尻から+3.0m (中央断面)



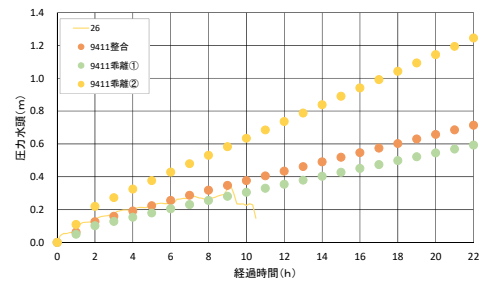
D-4.23 法尻から+3.5m (中央断面)



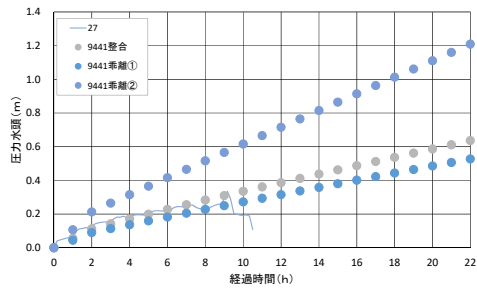
D-4.24 法尻から-1.0m (-0.5m 断面)



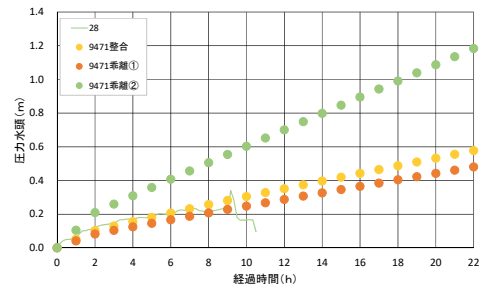
D-4.25 法尻から-0.5m (-0.5m 断面)



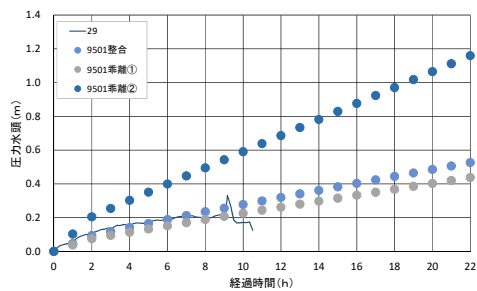
D-4.26 法尻 (-0.5m 断面)



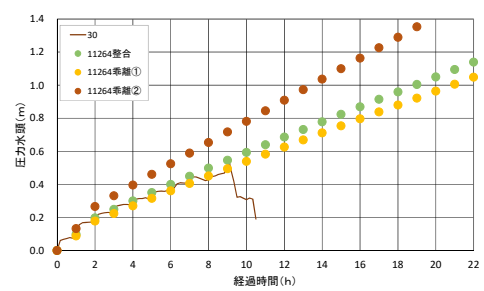
D-4.27 法尻から+0.5m (-0.5m 断面)



D-4.28 法尻から+1.0m (-0.5m 断面)

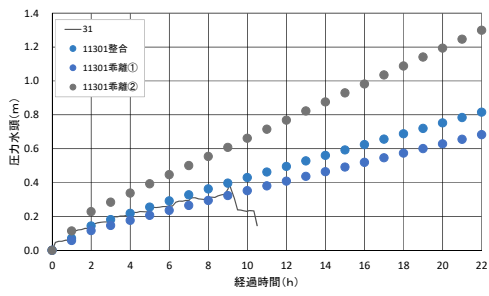


D-4.29 法尻から+1.5m (-0.5m 断面)

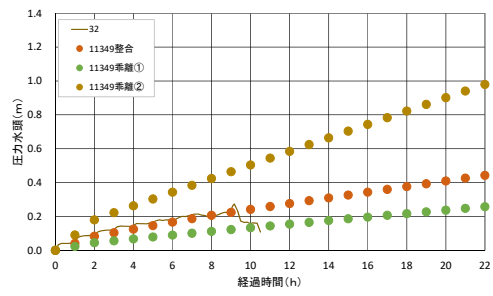


D-4.30 法尻-1.0m (-1.0m 断面)

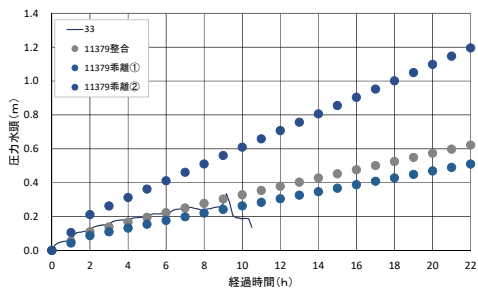




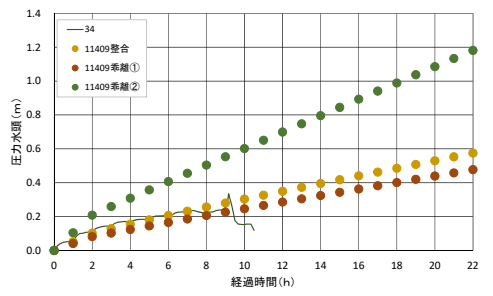
D-4.31 法尻から-0.5m (-1.0m 断面)



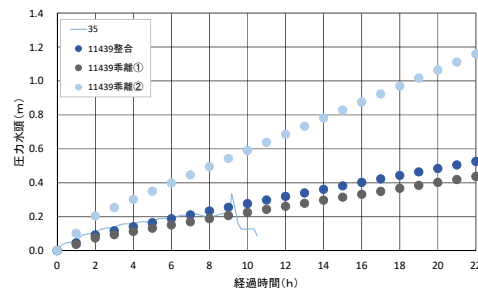
D-4.32 法尻 (-1.0m 断面)



D-4.33 法尻から+0.5m (-1.0m 断面)

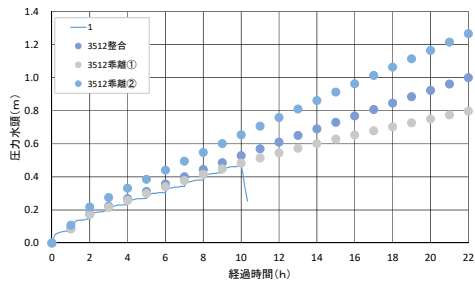


D-4.34 法尻から+1.0m (-1.0m 断面)

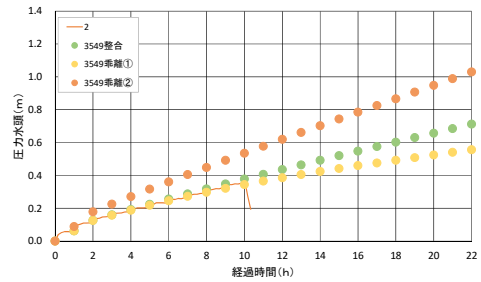


D-4.35 法尻から+1.5m (-1.0m 断面)

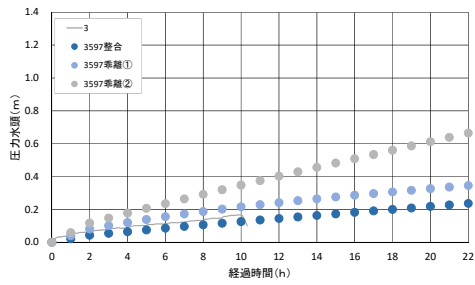
## D.5 Case5 3次元解析結果と計測値比較



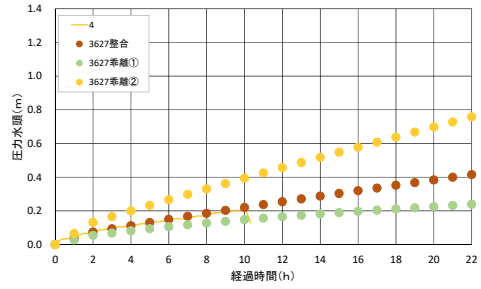
D-5.1 法尻から-1.0m (+1m 断面)



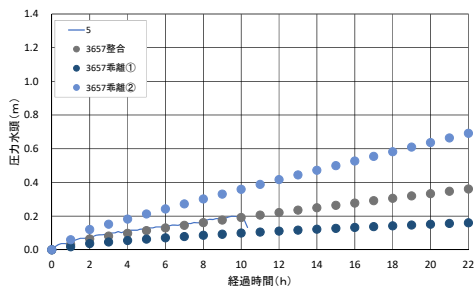
D-5.2 法尻から-0.5m (+1m 断面)



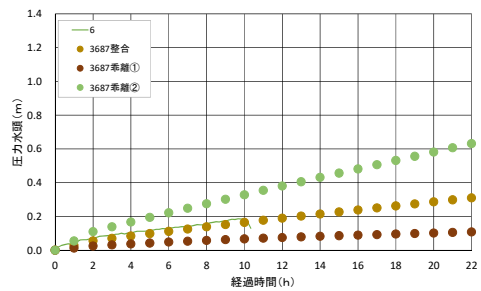
D-5.3 法尻 (+1m 断面)



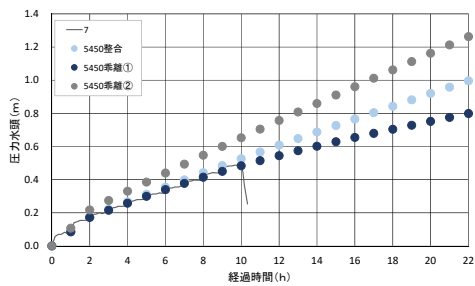
D-5.4 法尻から+0.5m (+1m 断面)



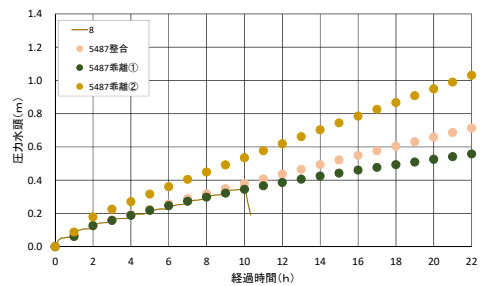
D-5.5 法尻から+1.0m (+1m 断面)



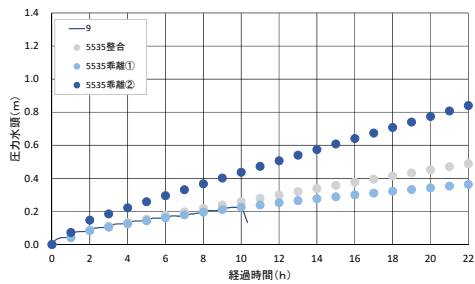
D-5.6 法尻から+1.5m (+1m 断面)



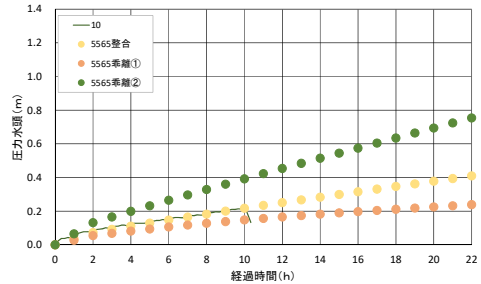
D-5.7 法尻から-1.0m (+0.5m 断面)



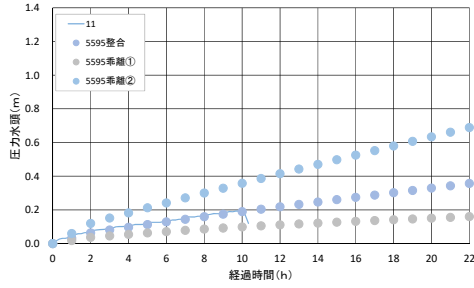
D-5.8 法尻から-0.5m (+0.5m 断面)



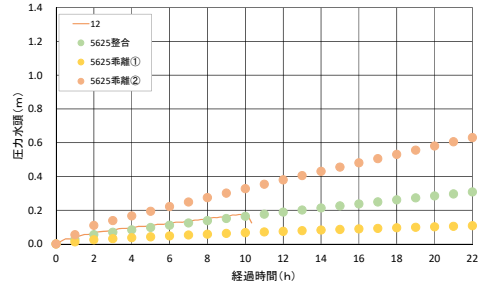
D-5.9 法尻 (+0.5m 断面)



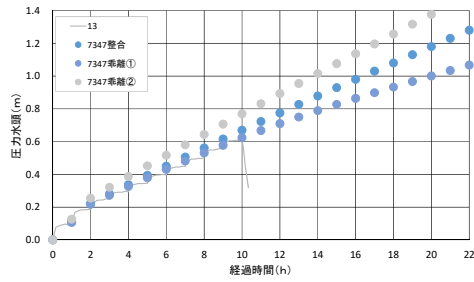
D-5.10 法尻+0.5m (+0.5m 断面)



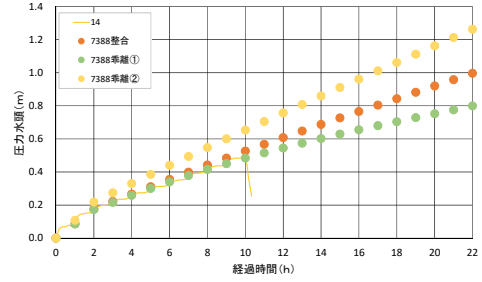
D-5.11 法尻から+1.0m (+0.5m 断面)



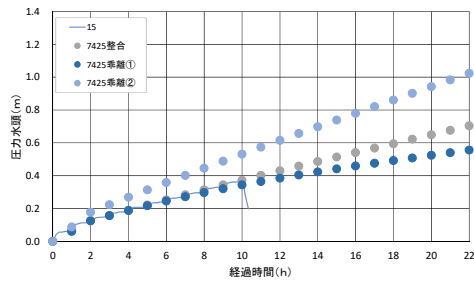
D-5.12 法尻から+1.5m (+0.5m 断面)



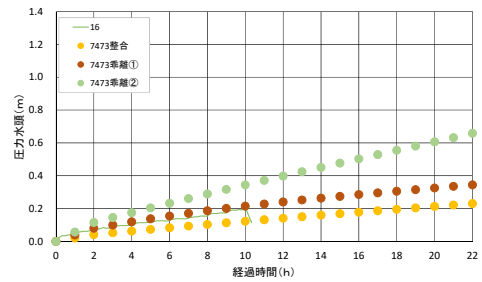
D-5.13 法尻から-1.5m (中央断面)



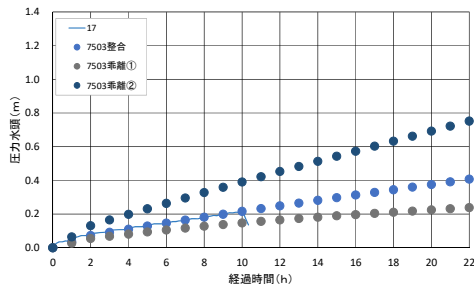
D-5.14 法尻から-1.0m (中央断面)



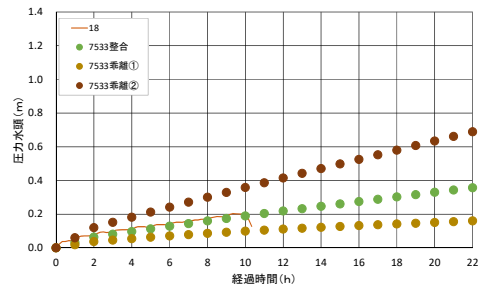
D-5.15 法尻から-0.5m (中央断面)



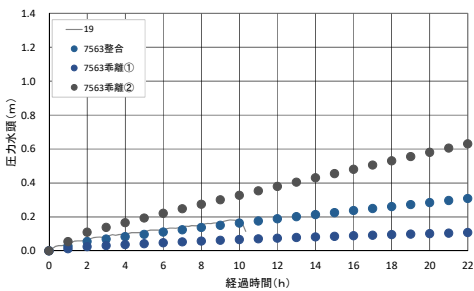
D-5.16 法尻 (中央断面)



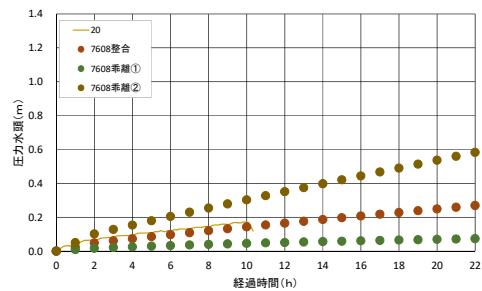
D-5.17 法尻から+0.5m (中央断面)



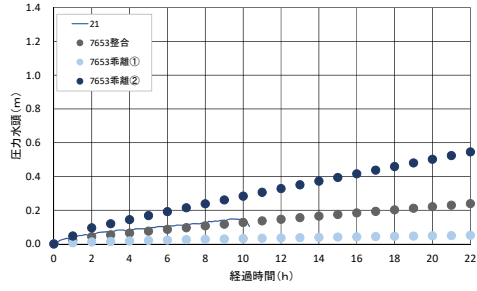
D-5.18 法尻から+1.0m (中央断面)



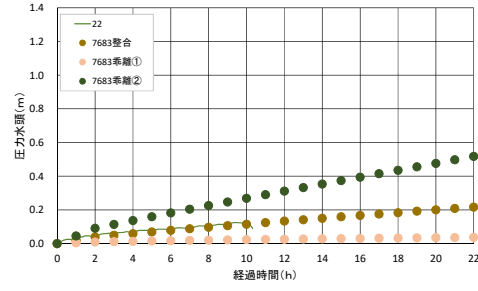
D-5.19 法尻から+1.5m (中央断面)



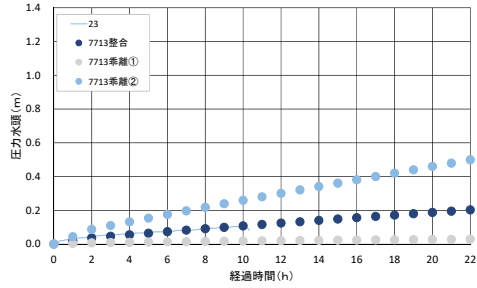
D-5.20 法尻から+2.0m (中央断面)



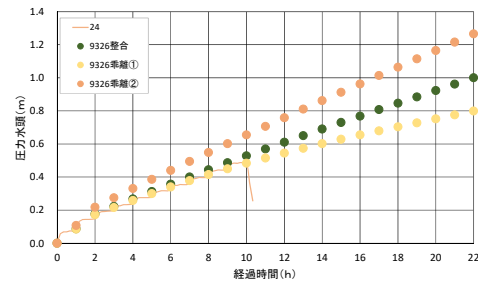
D-5.21 法尻から+2.5m (中央断面)



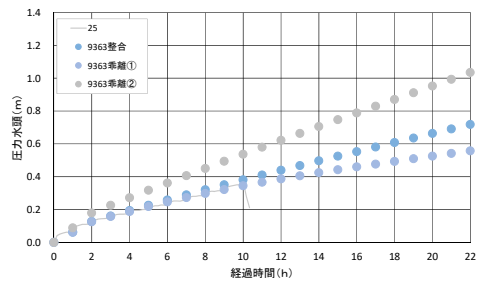
D-5.22 法尻から+3.0m (中央断面)



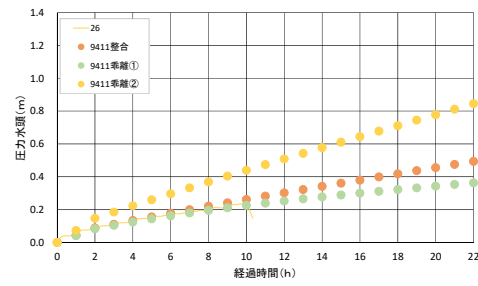
D-5.23 法尻から+3.5m (中央断面)



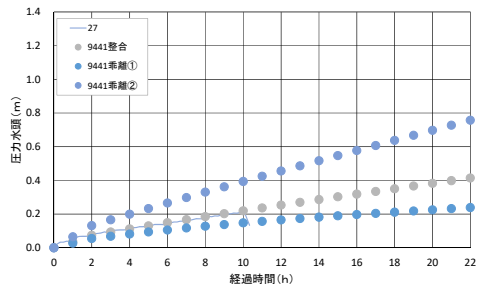
D-5.24 法尻から-1.0m (-0.5m 断面)



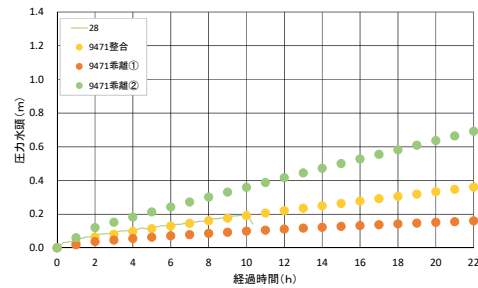
D-5.25 法尻から-0.5m (-0.5m 断面)



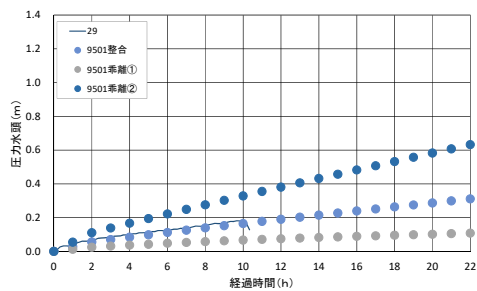
D-5.26 法尻 (-0.5m 断面)



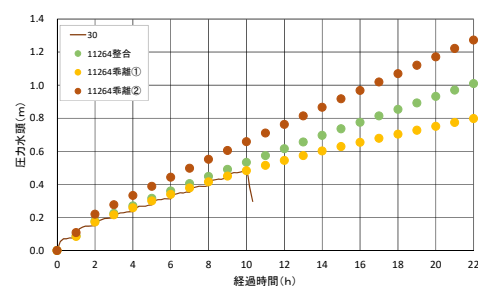
D-5.27 法尻から+0.5m (-0.5m 断面)



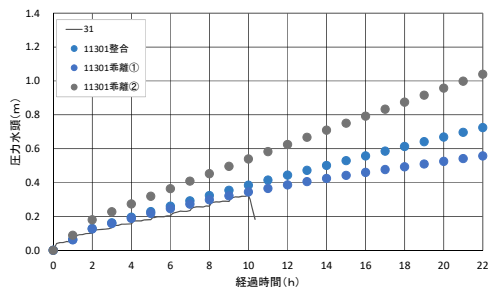
D-5.28 法尻から+1.0m (-0.5m 断面)



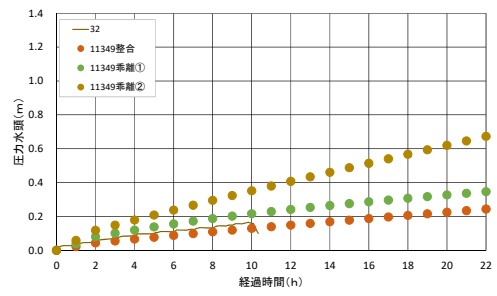
D-5.29 法尻から+1.5m (-0.5m 断面)



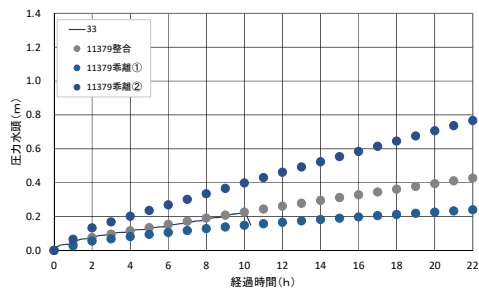
D-5.30 法尻-1.0m (-1.0m 断面)



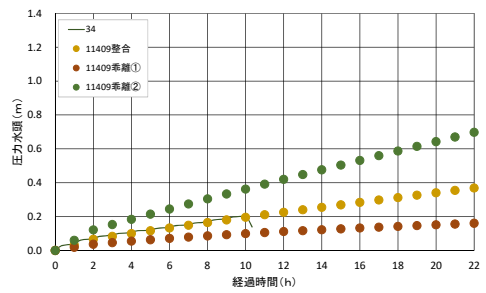
D-5.31 法尻から-0.5m (-1.0m 断面)



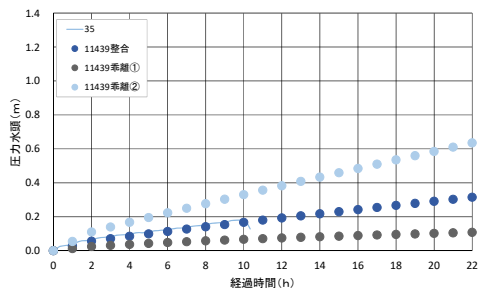
D-5.32 法尻 (-1.0m 断面)



D-5.33 法尻から+0.5m (-1.0m 断面)

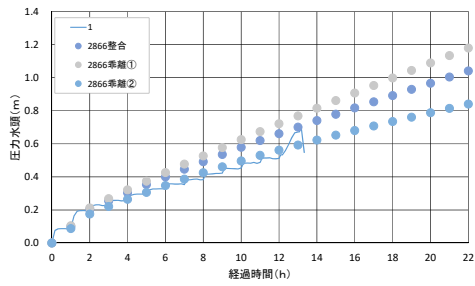


D-5.34 法尻から+1.0m (-1.0m 断面)

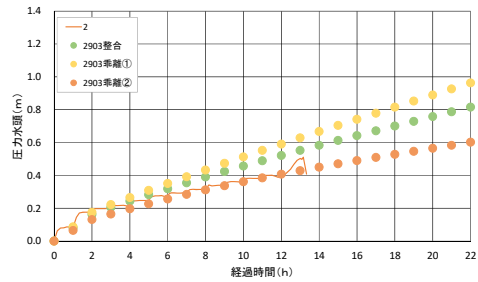


D-5.35 法尻から+1.5m (-1.0m 断面)

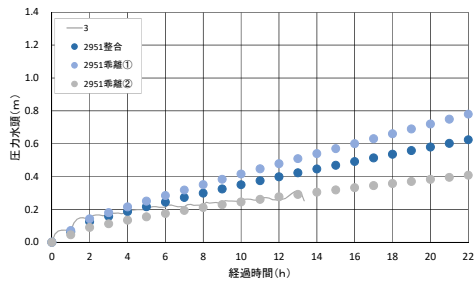
Case6 3次元解析結果と計測値比較



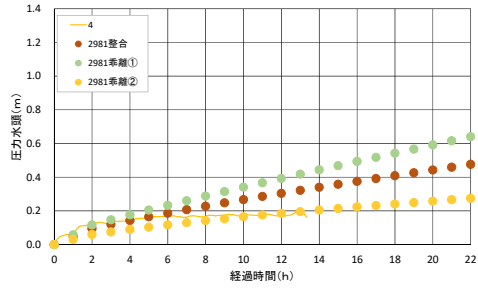
D-6.1 法尻から-1.0m (+1m 断面)



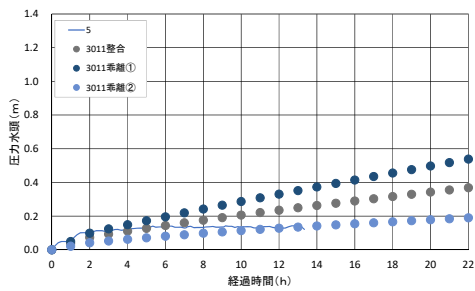
D-6.2 法尻から-0.5m (+1m 断面)



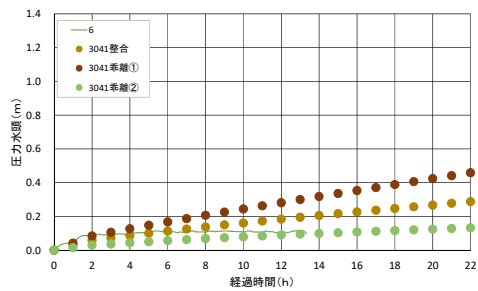
D-6.3 法尻 (+1m 断面)



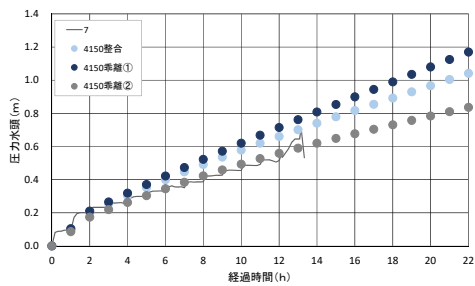
D-6.4 法尻から+0.5m (+1m 断面)



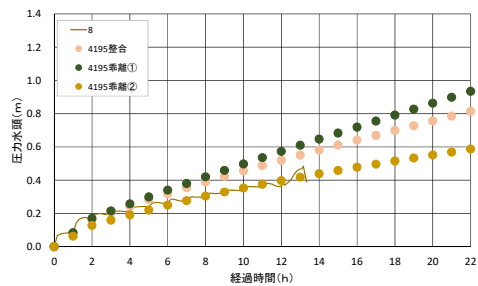
D-6.5 法尻から+1.0m (+1m 断面)



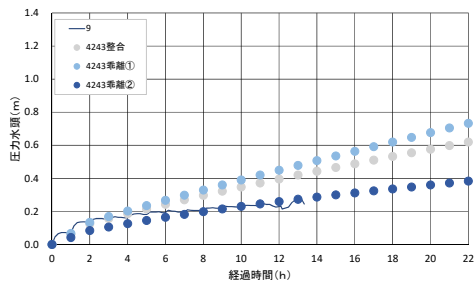
D-6.6 法尻から+1.5m (+1m 断面)



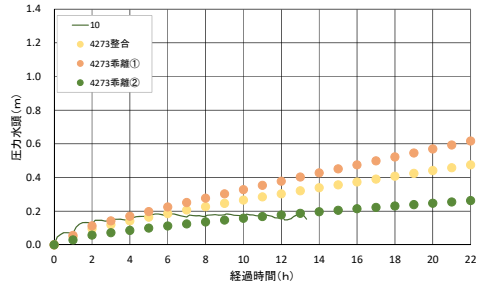
D-6.7 法尻から-1.0m (+0.5m 断面)



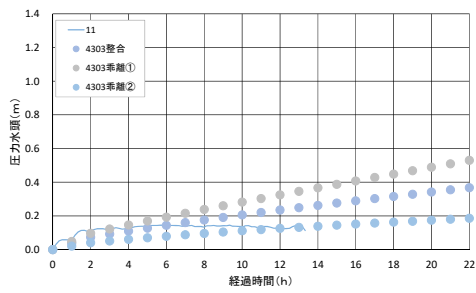
D-6.8 法尻から-0.5m (+0.5m 断面)



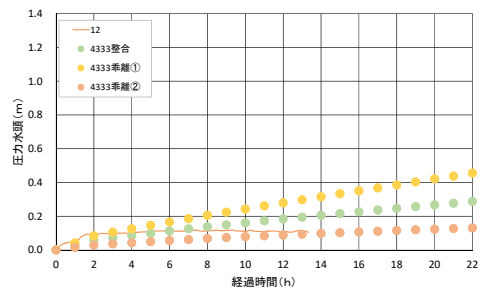
D-6.9 法尻 (+0.5m 断面)



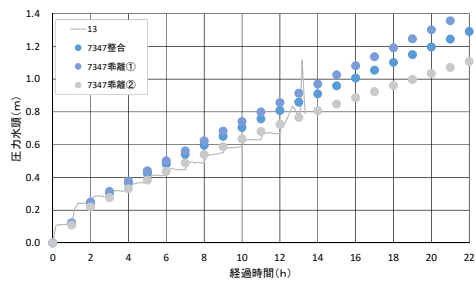
D-6.10 法尻+0.5m (+0.5m 断面)



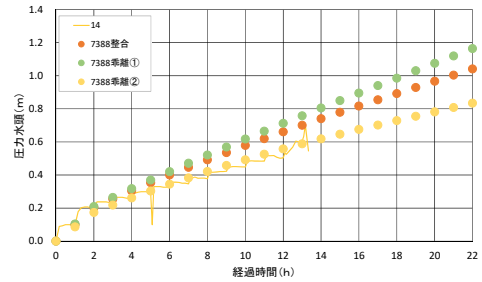
D-6.11 法尻から+1.0m (+0.5m 断面)



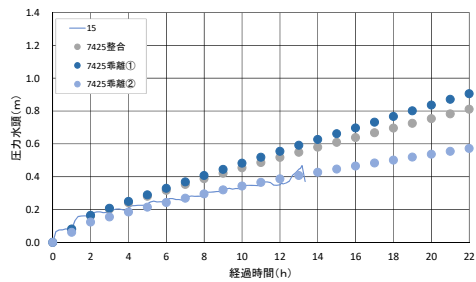
D-6.12 法尻から+1.5m (+0.5m 断面)



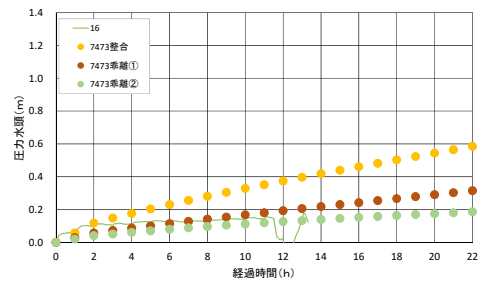
D-6.13 法尻から-1.5m (中央断面)



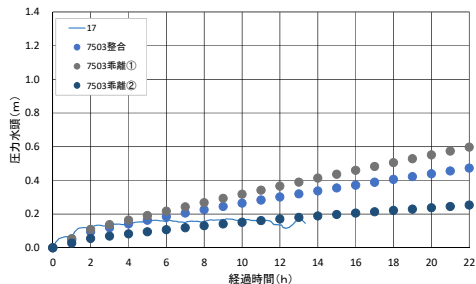
D-6.14 法尻から-1.0m (中央断面)



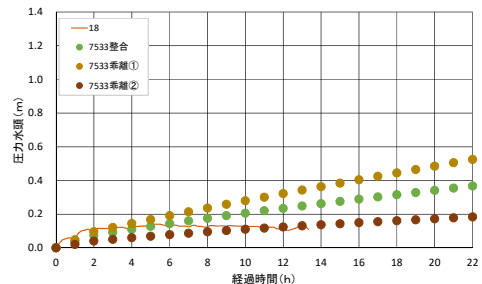
D-6.15 法尻から-0.5m (中央断面)



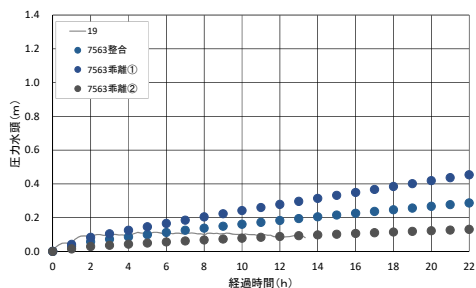
D-6.16 法尻 (中央断面)



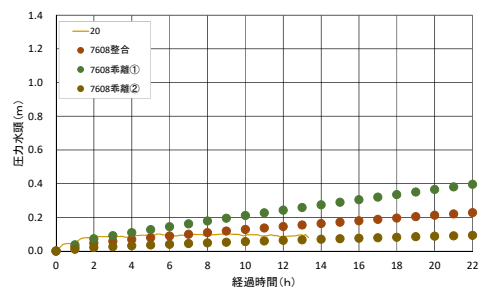
D-6.17 法尻から+0.5m (中央断面)



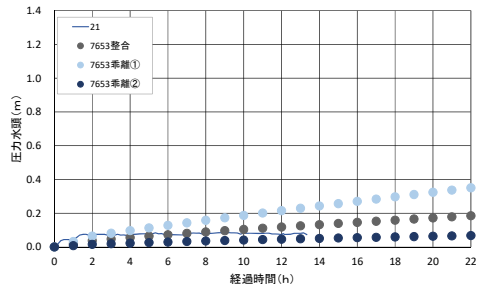
D-6.18 法尻から+1.0m (中央断面)



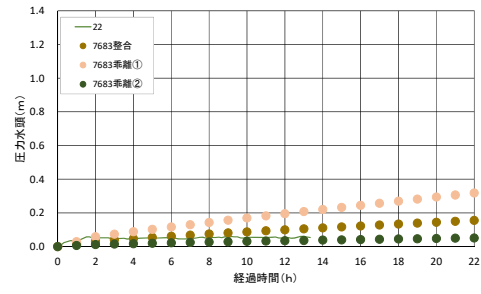
D-6.19 法尻から+1.5m (中央断面)



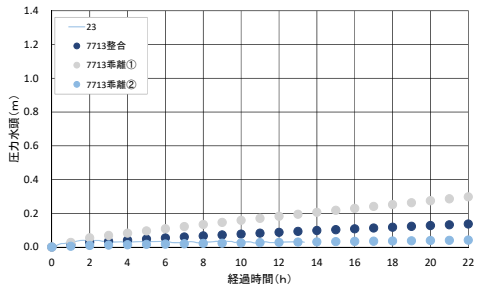
D-6.20 法尻から+2.0m (中央断面)



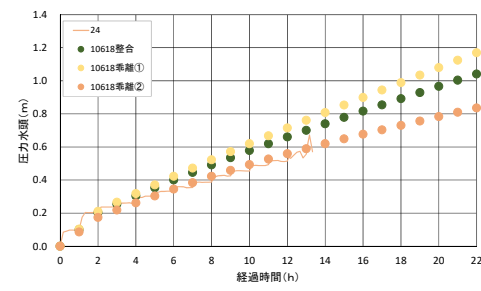
D-6.21 法尻から+2.5m (中央断面)



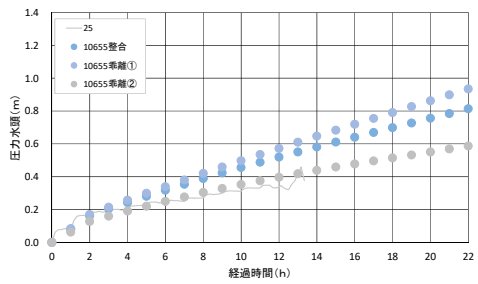
D-6.22 法尻から+3.0m (中央断面)



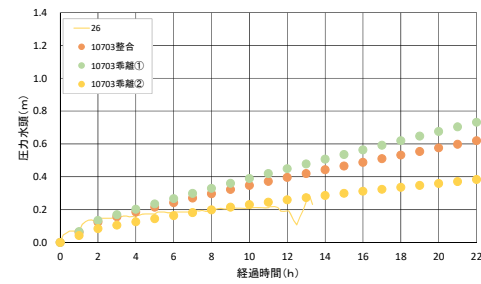
D-6.23 法尻から+3.5m (中央断面)



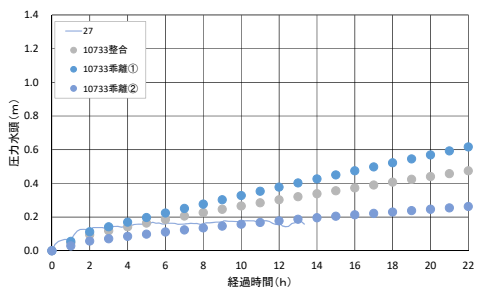
D-6.24 法尻から-1.0m (-0.5m 断面)



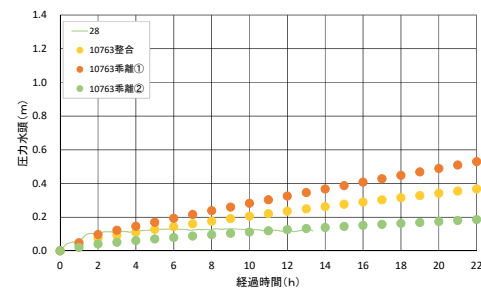
D-6.25 法尻から-0.5m (-0.5m 断面)



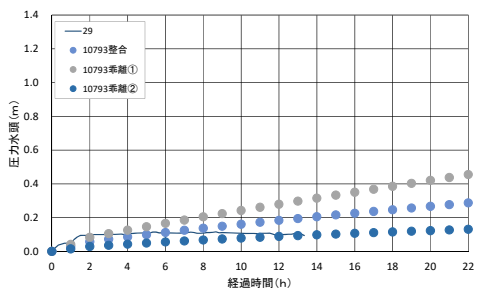
D-6.26 法尻 (-0.5m 断面)



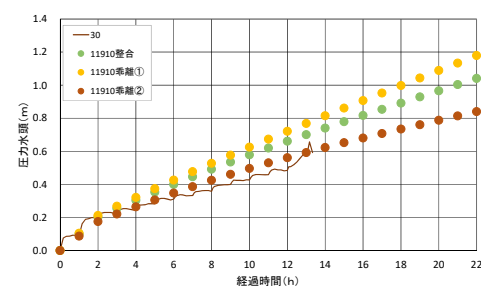
D-6.27 法尻から+0.5m (-0.5m 断面)



D-6.28 法尻から+1.0m (-0.5m 断面)

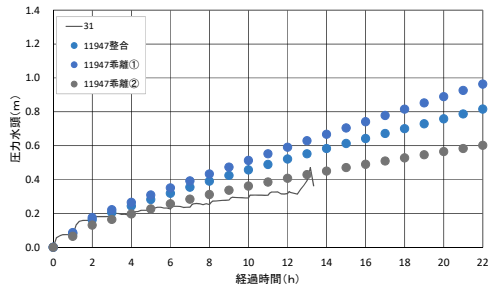


D-6.29 法尻から+1.5m (-0.5m 断面)

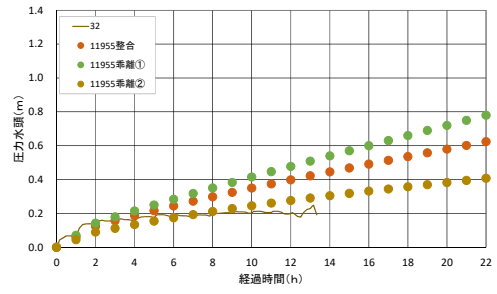


D-6.30 法尻-1.0m (-1.0m 断面)

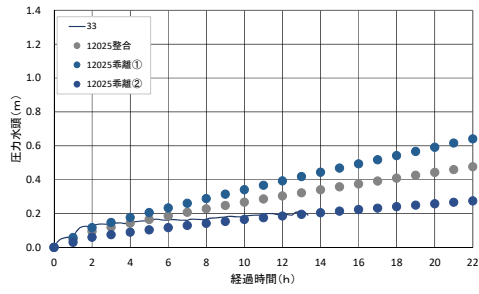




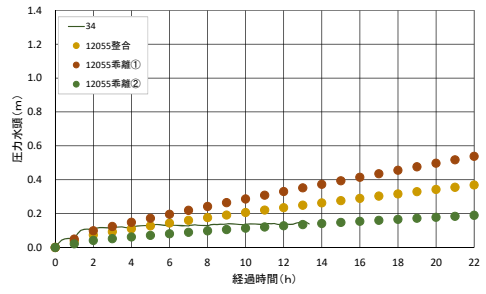
D-6.31 法尻から-0.5m (-1.0m 断面)



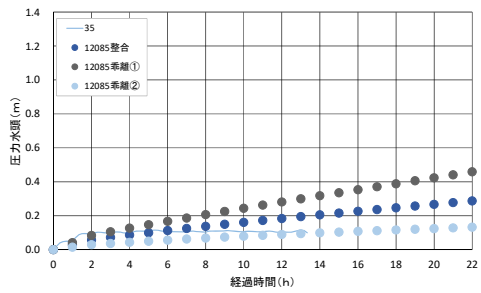
D-6.32 法尻 (-1.0m 断面)



D-6.33 法尻から+0.5m (-1.0m 断面)



D-6.34 法尻から+1.0m (-1.0m 断面)



D-6.35 法尻から+1.5m (-1.0m 断面)





---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No.4413 March 2021

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754