

土木研究所資料

大規模地震動に対する河川堤防の 液状化対策としての ドレーン工法の効果に関する 動的遠心模型実験

令和4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 © (2022) 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。

大規模地震動に対する河川堤防の 液状化対策としての ドレーン工法の効果に関する 動的遠心模型実験

地質・地盤研究グループ	土質・振動チーム	上席研究員	佐々木 哲也
地質・地盤研究グループ		上席研究員	石原 雅規
地質・地盤研究グループ	土質・振動チーム	元主任研究員	梶取 真一 ^{※1}
	//	元研究員	佐々木 亨 ^{※2}
	//	研究員	青柳 悠大
	//	元交流研究員	富澤 彰仁 ^{※3}
	//	元交流研究員	田川 央 ^{※3}
	//	交流研究員	丸田 亮

要 旨

グラベルドレーン工法は、かつては河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアルに基づき使用されたが、レベル 2 地震動に対する効果が不明であり、効果の評価法や設計法が確立されていないことから、レベル 2 地震動に対応した現行の河川堤防の液状化対策の手引きでは適用対象外となっている。一方で、東日本大震災ではグラベルドレーン工法による対策が一定の効果を発揮した事例も確認されている。このため、動的遠心模型実験により、グラベルドレーン工法のレベル 2 地震動に対する効果を明らかにしたものである。

キーワード: 液状化、グラベルドレーン、遠心模型実験

※1: 現 土木研究所企画部研究企画課

※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 株式会社建設技術研究所

1. 実験概要	1-1
1.1 研究の背景と目的.....	1-1
1.2 実験ケース	1-1
1.3 実験方法の概要.....	1-4
1.3.1 実験模型の概要.....	1-6
1.3.2 測定方法.....	1-10
2. 実験シリーズ1	2-1
2.1 実験の目的	2-1
2.2 実験条件	2-1
2.2.1 実験模型.....	2-1
2.2.2 実験ケース.....	2-2
2.2.3 地盤材料とドレーン材.....	2-3
2.2.4 地盤の飽和方法.....	2-5
2.2.5 測定項目.....	2-5
2.2.6 外力条件.....	2-6
2.3 実験結果	2-7
2.3.1 ケース 1-1	2-7
2.3.2 ケース 1-2	2-16
2.3.3 ケース 1-3	2-25
2.3.4 ケース 1-4	2-35
2.4 結果のまとめ.....	2-44
3. 実験シリーズ2	3-1
3.1 実験の目的	3-1
3.2 実験条件	3-1
3.2.1 実験模型.....	3-1
3.2.2 実験ケース.....	3-3
3.2.3 地盤材料とドレーン材.....	3-3
3.2.4 地盤の飽和方法.....	3-5
3.2.5 測定項目.....	3-5
3.2.6 外力条件.....	3-6
3.3 実験結果	3-7
3.3.1 ケース 2-1	3-7
3.3.2 ケース 2-2	3-14
3.3.3 ケース 2-3	3-20
3.3.4 ケース 2-4	3-27

3.4	結果のまとめ.....	3-35
4.	実験シリーズ 3.....	4-1
4.1	実験の目的.....	4-1
4.2	実験条件.....	4-1
4.2.1	実験模型.....	4-1
4.2.2	実験ケース.....	4-2
4.2.3	地盤材料とドレーン材.....	4-3
4.2.4	地盤の飽和方法.....	4-5
4.2.5	測定項目.....	4-6
4.2.6	外力条件.....	4-6
4.3	実験結果.....	4-8
4.3.1	ケース 3-1.....	4-8
4.3.2	ケース 3-2.....	4-19
4.3.3	ケース 3-3.....	4-31
4.3.4	ケース 3-4.....	4-44
4.4	結果のまとめ.....	4-56
5.	実験シリーズ 4.....	5-1
5.1	実験の目的.....	5-1
5.2	実験条件.....	5-1
5.2.1	実験模型.....	5-1
5.2.2	実験ケース.....	5-6
5.2.3	地盤材料とドレーン材.....	5-7
5.2.4	地盤の飽和方法.....	5-9
5.2.5	測定項目.....	5-9
5.2.6	外力条件.....	5-10
5.3	実験結果.....	5-12
5.3.1	ケース 4-1.....	5-12
5.3.2	ケース 4-2.....	5-22
5.3.3	ケース 4-3.....	5-32
5.3.4	ケース 4-4.....	5-42
5.4	結果のまとめ.....	5-52
6.	実験結果のまとめ.....	6-1
	参考文献	

1. 実験概要

1.1 研究の背景と目的

河川堤防等の耐震（液状化）対策を推進するために現場条件に適した工法を選択できることが重要である。グラベルドレーン工法は、かつては「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）」¹⁾に基づき使用されたが、レベル2地震動に対する効果が不明であり、効果の評価法や設計法が確立されていないことから、レベル2地震動に対応した現行の「河川堤防の液状化対策の手引き」²⁾（以下、手引き）では適用対象外となっている。排水機能付き鋼矢板も排水部材の効果に関して同様の状況にあり、レベル2地震動に対しては使用しづらい状況にある。一方で、東日本大震災ではグラベルドレーン工法による対策が一定の効果を発揮した事例³⁾も確認されている。また、グラベルドレーン工法には手引きの対象である締固め工法や固結工法、鋼材を用いた工法にはない、周辺への影響が小さい、硬さが現地盤に近くなじみの問題が少ない等の特徴がある。このため、グラベルドレーン工法のレベル2地震動に対する効果を明らかにし、その評価法・設計法を開発することで、液状化対策として利用できる選択肢が増え、コスト縮減に寄与することが期待される。

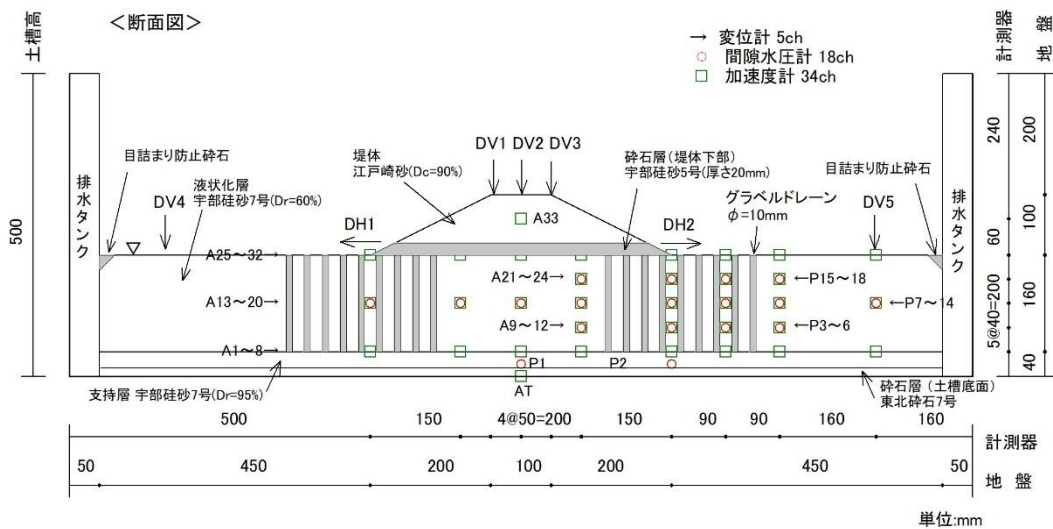
本研究では、中規模～大規模の地震動に対するグラベルドレーン工法の対策効果およびその発現メカニズムを検証することを目的とした遠心模型実験を実施した。

1.2 実験ケース

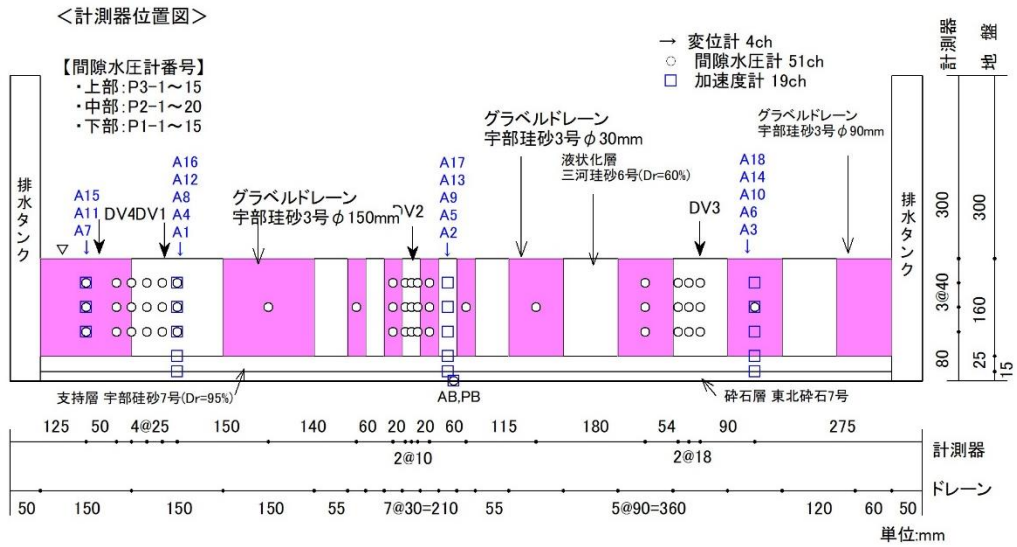
遠心模型実験の条件の概略を表 1.2.1 に示す。遠心加速度や堤体の有無、使用材料等の違いから大きく4つのシリーズに分け、各シリーズで4ケースごと実施した。なお、各シリーズの詳細な条件等は2章以降にシリーズごと記載した。また、各シリーズの実験模型例を図 1.2.1 に示す。

表 1.2.1 実験条件の概略

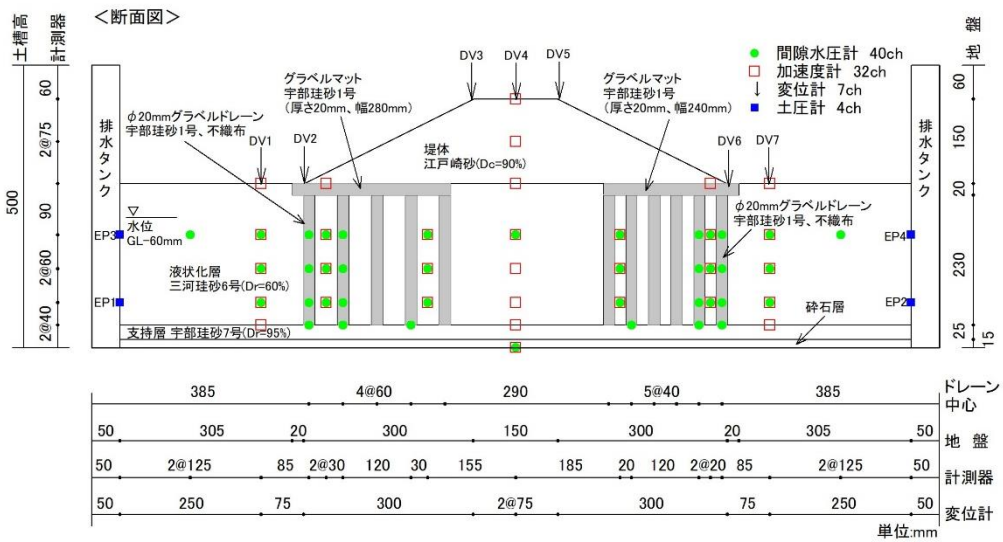
シリーズ	ケース	遠心加速度	地下水位	液状化対策工	使用材料			備考			
					堤体	ドレーン材 (φ:ドレーン径)	液状化層				
1	1-1	50G	水平地盤面 (GL 0m)	なし	江戸崎砂 (D _c =95%)	なし	宇部珪砂 7号 (D _r =60%)	地表面に被覆土層あり			
	1-2										
	1-3								グラベルドレーン 左右1種類 (同種類)	宇部珪砂 新特5号 (φ=0.5m)	地表面に被覆土層あり
	1-4										
2	2-1	50G	水平地盤面 (GL 0m)	グラベルドレーン 左右各2種類	なし	左: 宇部珪砂5号 (φ=0.5m, 1.5m) 右: 宇部珪砂3号 (φ=0.5m, 1.5m)	三河珪砂 6号 (D _r =60%)				
	2-2		GL-1m								
	2-3		水平地盤面 (GL 0m)	グラベルドレーン 左右中央各1種類					左: 宇部珪砂5号 (置換) 中央: 宇部珪砂3号 (置換) 右: 砕石7号 (置換)		
	2-4			宇部珪砂3号 (φ=7.5m, 1.5m, 4.5m)							
3	3-1	30G	GL-1.8m	なし	江戸崎砂 (D _c =90%)	なし	三河珪砂 6号 (D _r =60%)				
	3-2								ドレーン左右 各1種類	左: パイプドレーン (φ=0.6m) + 宇部珪砂1号 (φ=1.5m) 右: 宇部珪砂1号 (φ=1.5m)	パイプドレーンの外側に宇部珪砂1号
	3-3								ドレーン左右 各1種類	左: パイプドレーン (φ=0.6m) 右: 宇部珪砂1号 (φ=0.6m)	パイプドレーンの外周に不織布あり
	3-4								グラベルドレーン 左右各1種類	宇部珪砂1号 (φ=0.6m, 0.6m)	グラベルドレーンの外周に不織布あり
4	4-1	50G	GL-2m	なし	江戸崎砂 (D _c =85%)	なし	三河珪砂 6号 (D _r =60%)				
	4-2								グラベルドレーン 左右1種類 (同種類)	宇部珪砂1号 (φ=1.0m)	グラベルドレーンの外周に不織布あり
	4-3		GL-1m	なし					なし	なし	
	4-4										グラベルドレーン 左右1種類 (同種類)



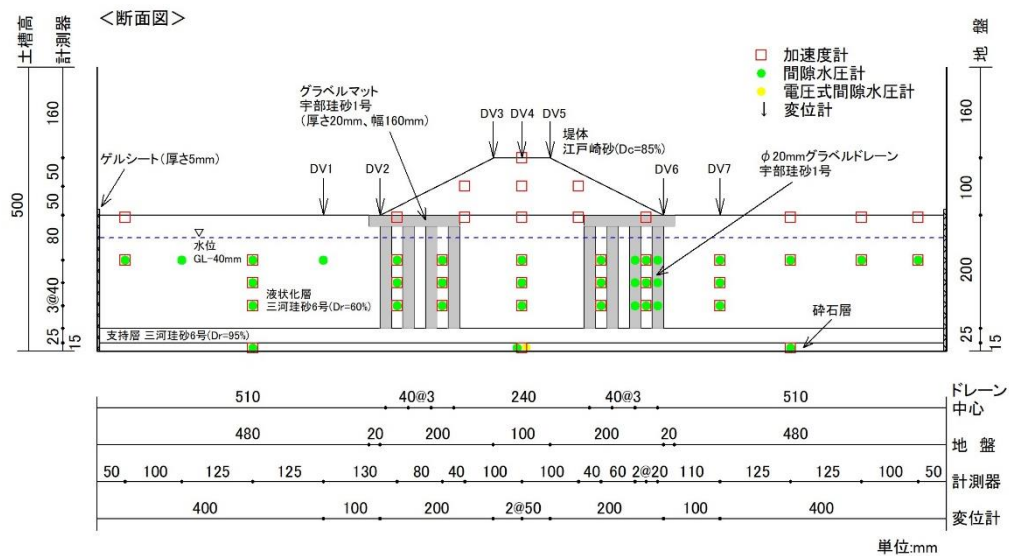
(a) シリーズ1 (ケース1-3)
図 1.2.1 各シリーズの実験模型例 (1)



(b) シリーズ 2 (ケース 2-4)



(c) シリーズ 3 (ケース 3-4)



(d) シリーズ 4 (ケース 4-2)

図 1.2.1 各シリーズの実験模型例 (2)

1.3 実験方法の概要

本研究の実験は、図 1.3.1 の大型遠心力载荷実験装置を使用して行った。大型遠心力载荷実験装置の仕様を表 1.3.1 に示す。シリーズ 1 とシリーズ 2 の間に実験装置の改修が行われたため、シリーズ 1 とシリーズ 2 以降で一部装置の仕様が変わっている。表 1.3.2 に実現象と遠心模型実験において成り立つ相似則を示す。

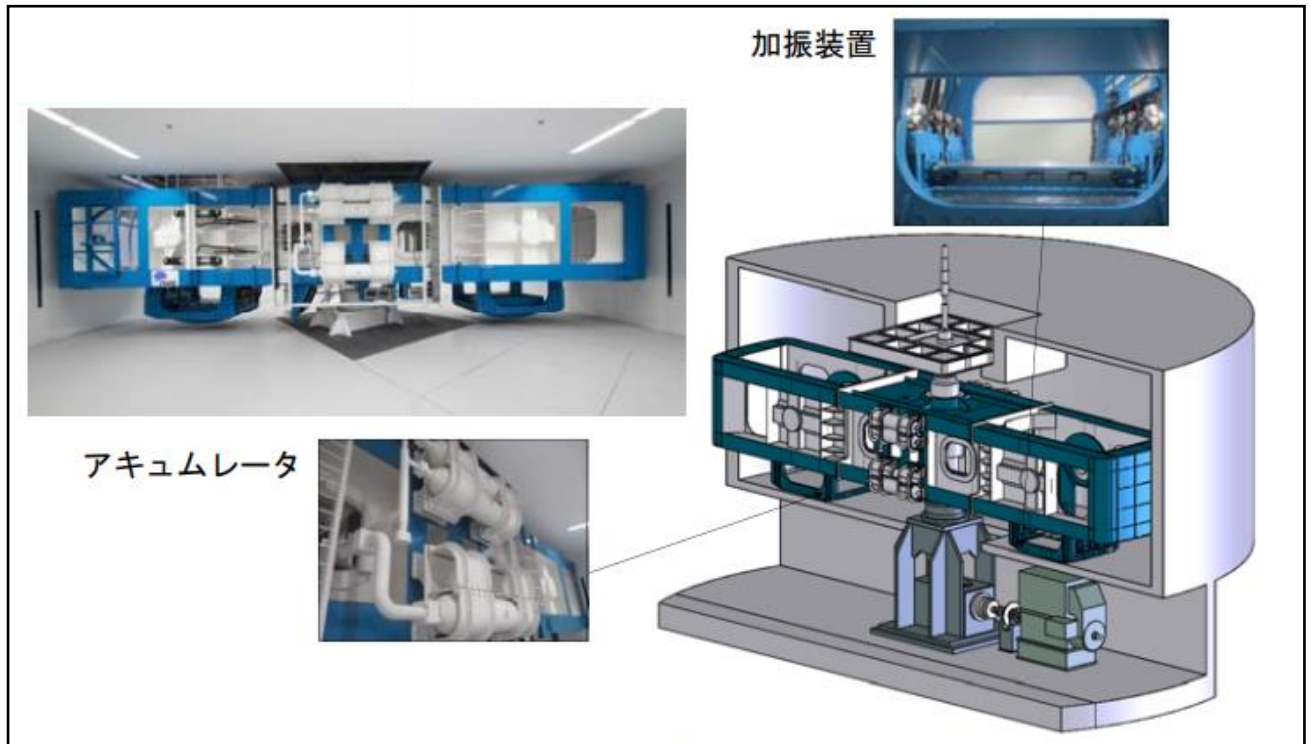


図 1.3.1 大型遠心力载荷実験装置

表 1.3.1 大型遠心力載荷実験装置の仕様

遠心力載荷装置	有効回転半径	6,600mm
	最大遠心加速度	静的試験：100G (150G) 動的試験：100G
	最大積載容量	400ton・G
	振動架台	2台
	容器の載荷スペース	幅：2,400mm 奥行：1,300mm 高さ：1,000mm
加振装置	台の大きさ	幅：1,700mm 奥行：1,000mm
	最大加振容量	50ton・G (40ton・G)
	最大加振加速度	50G (40G)
	最大速度	150cm/s (90cm/s)
	最大変位	±10.0mm (±5.0mm)
	加振周波数	10～300Hz (10～400Hz)
計測機能	伝送方式	光
	測定点数	静的試験：100ch 動的試験：80ch

※ () を記載している項目は、() 内の値がシリーズ1で、
() 外の値がシリーズ2以降で使用した装置の仕様

表 1.3.2 遠心力載荷実験における相似則（遠心加速度が NG のとき）

項目	相似則	
密度	1	
寸法	1/N	
変位	1/N	
速度	1	
加速度	N	
質量	1/N ³	
力	1/N ²	
応力	1	
ひずみ	1	
時間	動的現象	1/N
	浸透現象	1/N ²

1.3.1 実験模型の概要

実験模型は、内寸が幅 1,500mm、高さ 500mm、奥行 300mm の実験土槽（写真 1.3.1）内に作製した。模型底面から順に、碎石層（一部のケースはなし）、支持層、液状化層（対策工ありのケースではグラベルドレーンを含む）、被覆土層（一部のケースのみ）、碎石またはグラベルマット（堤体下部、一部のケースはなし）、堤体（一部のケースはなし）で構成されている。間隙水には、動的現象と浸透現象の相似則をあわせるために遠心加速度に応じて粘性を調整したメトローズ水溶液（信越化学工業株式会社製）を使用した。

下記に各層の作製方法の概略を示す。各ケースの詳細は 2 章以降に記載した。また、図 1.3.2 に模型作製状況の一例を示す。

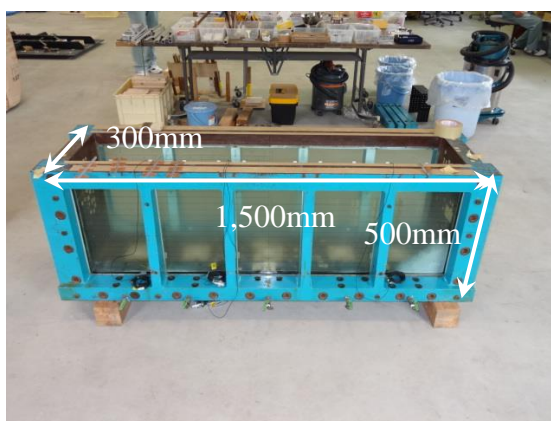


写真 1.3.1 実験土槽

(a) 碎石層

液状化層下部から間隙水をゆっくりと浸透させ飽和するケースにおいて土槽底面に厚さ 15mm の碎石層を設置した。締固めには木製の締固め棒を使用し、可能な限り密に作製した。碎石層の表面には不織布を敷き、上位となる支持層の地盤材料が混入しないよう配慮した。土層端部には碎石層に間隙水を直接滴下できるようにスタンドパイプ（中空角棒）を併せて設置した。

(b) 支持層

碎石層と同様に、締固めには木製の締固め棒を使用し、相対密度が 95% となるように碎石層を設置しないケースでは 1 層 20mm ピッチで 40mm の支持層、碎石層を設置したケースでは 25mm の支持層を作製した。

(c) 液状化層

気乾状態の地盤材料を空中落下法により、1 層 10 または 20mm ピッチで作製した。途中には、加振前後の地盤の変形状況を把握するため、鉛直方向と水平方向に厚さ 2mm の色砂をはさみメッシュを作製するとともに、直径 8mm 程度の赤色の標点を実験土槽ガラス面沿いの所定の位置に設置した。液状化層の飽和方法は 2 章に記載した。

(d) 被覆土層

一部のケースにおいて、地表面からの排水を抑制する目的で設置した。液状化層上面に粉ふるいでスミクレーを撒き出した後、水平に整形した。

(e) グラベルドレーン

作製した液状化層のドレーン設置位置にアルミパイプを丁寧に押し込み、パイプ内の地盤材料を吸引後、所定量のドレーン材を投入した。ドレーン材の投入後、アルミパイプをゆっくりと引き抜き、隙間が生じた場合には地盤材料で間詰めを行った。ドレーンと液状化層の境界には不織布を敷き、砂がドレーン内に混入しないよう配慮したケースもある。各アルミパイプの肉厚を表 1.3.3 に示す。

表 1.3.3 各アルミパイプの肉厚

使用 シリーズ	1,2	3,4	2	3	2	2
外径 (mm)	10	20	30	50	100	150
肉厚 (mm)	0.5	1.0	1.0	1.0	5.0	5.0

(f) パイプドレーン

シリーズ3の一部のケースにおいて使用した。ケースによって設置状況（パイプドレーンのみ、または内側がパイプドレーンで外側がグラベルドレーン）が異なっている。なお、パイプドレーンの詳細については4章に記載した。

パイプドレーンだけのケース（図 1.3.2 (f-1)、(f-2)）では、基本的に（e）のグラベルドレーン作製方法と同様であり、（e）の「ドレーン材の投入」（図 1.3.2 (e-3)）に代わり「パイプドレーンの挿入」（図 1.3.2 (f-1)）を行った。パイプドレーンの上端にはプラスチックメッシュ（3cm 四方）を置き、上位の地盤材料がパイプドレーン内に落ちないように配慮した。

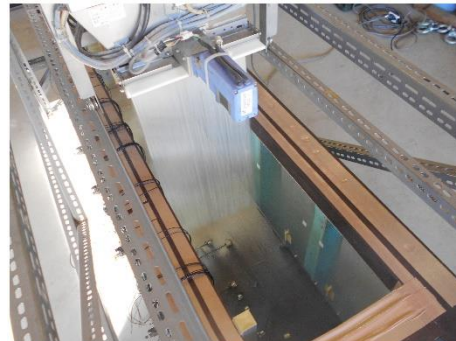
内側がパイプドレーン、外側がグラベルドレーンのケース（図 1.3.2 (f-3) ～ (f-7)）では（e）のグラベルドレーンの作製方法と同様にアルミパイプ（外側のグラベルドレーン用）内の地盤材料を吸引した後、パイプドレーン用のアルミパイプを設置（図 1.3.2 (f-3)）し、そのアルミパイプ内にパイプドレーンを設置した。アルミパイプ（パイプドレーン用）をゆっくりと引き抜いた後、パイプドレーンの上端にプラスチックメッシュを置き、外側へドレーン材を投入した。

(g) 堤体

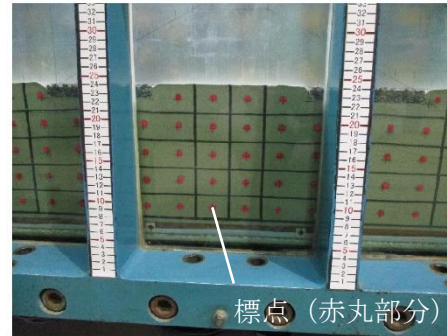
締固めには、碎石層、支持層と同様に木製の締固め棒を使用し、所定の相対密度となるように1層20mmピッチで作製した。緩い液状化層上で堤体の締固めを行うと、液状化層の密度が上がり、逆に堤体は締固まらず所定の密度にならないため、別途型枠内で作製した。作製した堤体は冷凍庫に入れ凍結させた後、飽和後の液状化層上へ設置した。設置した堤体は温度計で堤体内部の温度を計測し、実験前に十分解凍されていることを確認している。また、設置された堤体と実験土槽側面の隙間には堤体の地盤材料で間詰めを行った。



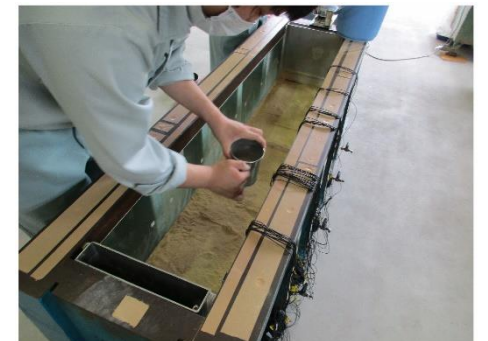
(a) 碎石層の締め状態



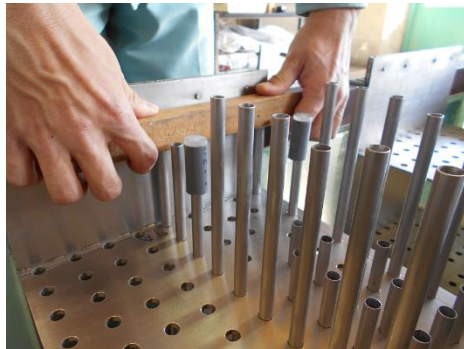
(c-1) 空中落下法による液状化層作製状況



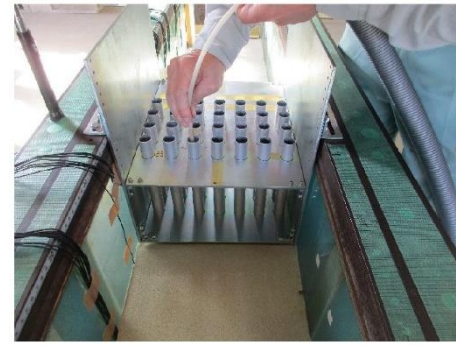
(c-2) 液状化層の側面状況
標点 (赤丸部分)



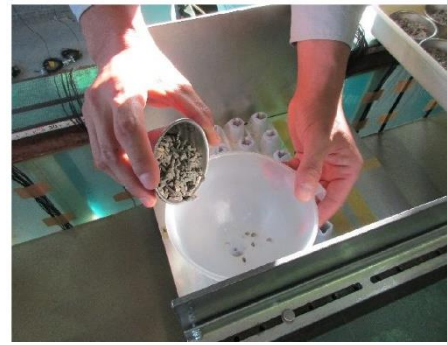
(d) 被覆土層の作製状況



(e-1) アルミパイプ押し込み状況



(e-2) 地盤材料の吸い出し状況



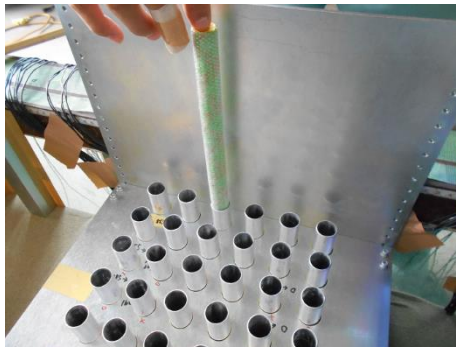
(e-3) ドレーン材投入状況



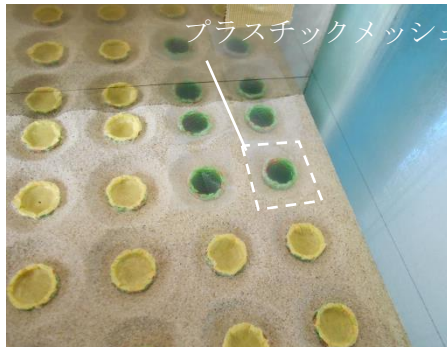
(e-4) ドレーンの締め状態



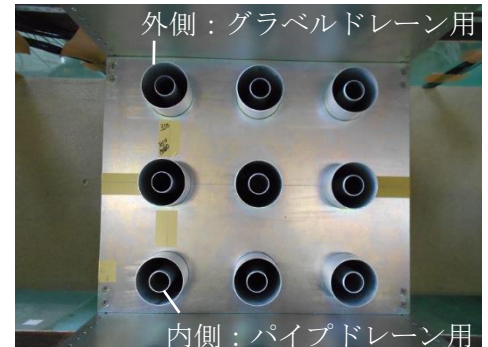
(e-5) ドレーン完成状況



(f-1) パイプドレーン挿入状況



(f-2) プラスチックメッシュ設置状況
プラスチックメッシュ



(f-3) アルミパイプ設置状況
外側：グラベルドレーン用
内側：パイプドレーン用

1-8

図 1.3.2 模型作製状況の一例 (1)



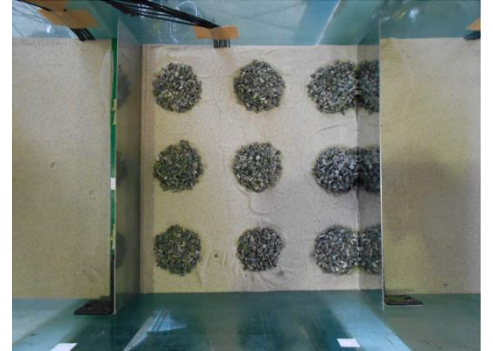
(f-4) パイプドレーン挿入状況



(f-5) ドレーン材投入後



(f-6) アルミパイプ引き抜き状況

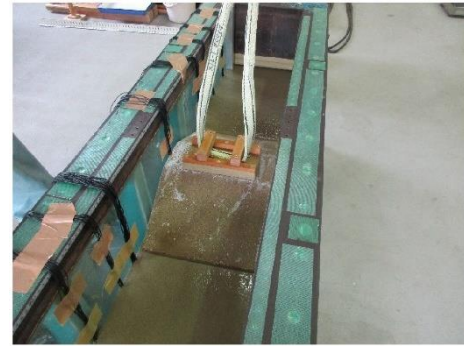


(f-7) ドレーン完成状況

1-9



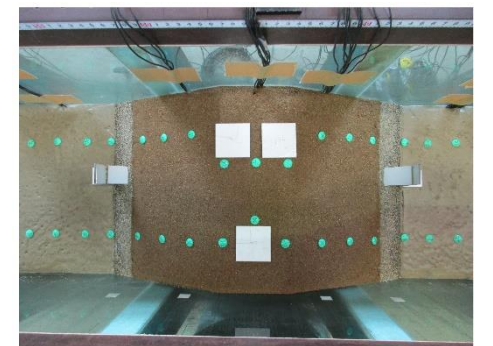
(g-1) 堤体の締固め状況



(g-2) 凍結させた堤体の設置状況



(g-3) 堤体側面の間詰め状況



(g-4) 模型完成状況

図 1.3.2 模型作製状況の一例 (2)

1.3.2 測定方法

加振中は地盤内に設置した加速度計で地盤内の加速度、水圧計で間隙水圧の変化を測定した。また、変位計で加振中の堤体の沈下量や加振後の地表面形状等を測定した。画像解析では地盤側面に設置した標点を用いて加振中の変状を測定した。表 1.3.4 に測定項目を示す。

表 1.3.4 測定項目

測定項目	測定方法	測定箇所	測定場
加速度	加速度計	地盤内 土槽底面	遠心場
間隙水圧	水圧計		
変位	接触型変位計 レーザー変位計	地表面	遠心場
	メジャー		重力場
変状	画像解析	地盤側面	遠心場
地表面形状	レーザー変位計	地表面	重力場

2. 実験シリーズ 1

2.1 実験の目的

シリーズ 1 では、堤体の左右に同一のドレーン径のグラベルドレーンを設置し、グラベルドレーンの有無による過剰間隙水圧等への影響について検討した。

2.2 実験条件

2.2.1 実験模型

実験模型として堤体盛土高 5m、法勾配 2 割、天端幅 5m、液状化層厚 8m（実スケール、以下注釈がない場合を除き、実スケールでの表記を基本とする）を想定し、50G の遠心重力場において図 2.2.1 のような模型を用いて実験を行った。

本シリーズでは、加振時にグラベルドレーンから出てくる水を水平に流すため、厚さ 1m の碎石層を堤体下部に設置した。グラベルドレーンの有無以外の実験条件をできるだけ揃えるため、グラベルドレーンを設置しないケースでも同じ碎石層を堤体下部に設置した。この碎石層には、液状化層の間隙流体が堤体材料の毛細管現象によって吸い上げられることを防止し、遠心加速度の上昇過程で発生する法面の変状を防止する効果も期待できる。

また、排水タンクの設定した地下水位の高さ（本シリーズでは、水平地盤面）に排水穴を設けた。この排水穴から流出することで、設定した地下水位を保つことができる。砂で穴に目詰まりを起こさぬよう、排水穴周辺部にのみ液状化層を碎石で置換し、液状化層と碎石の間には材料の混入を防止するための不織布を設置した。

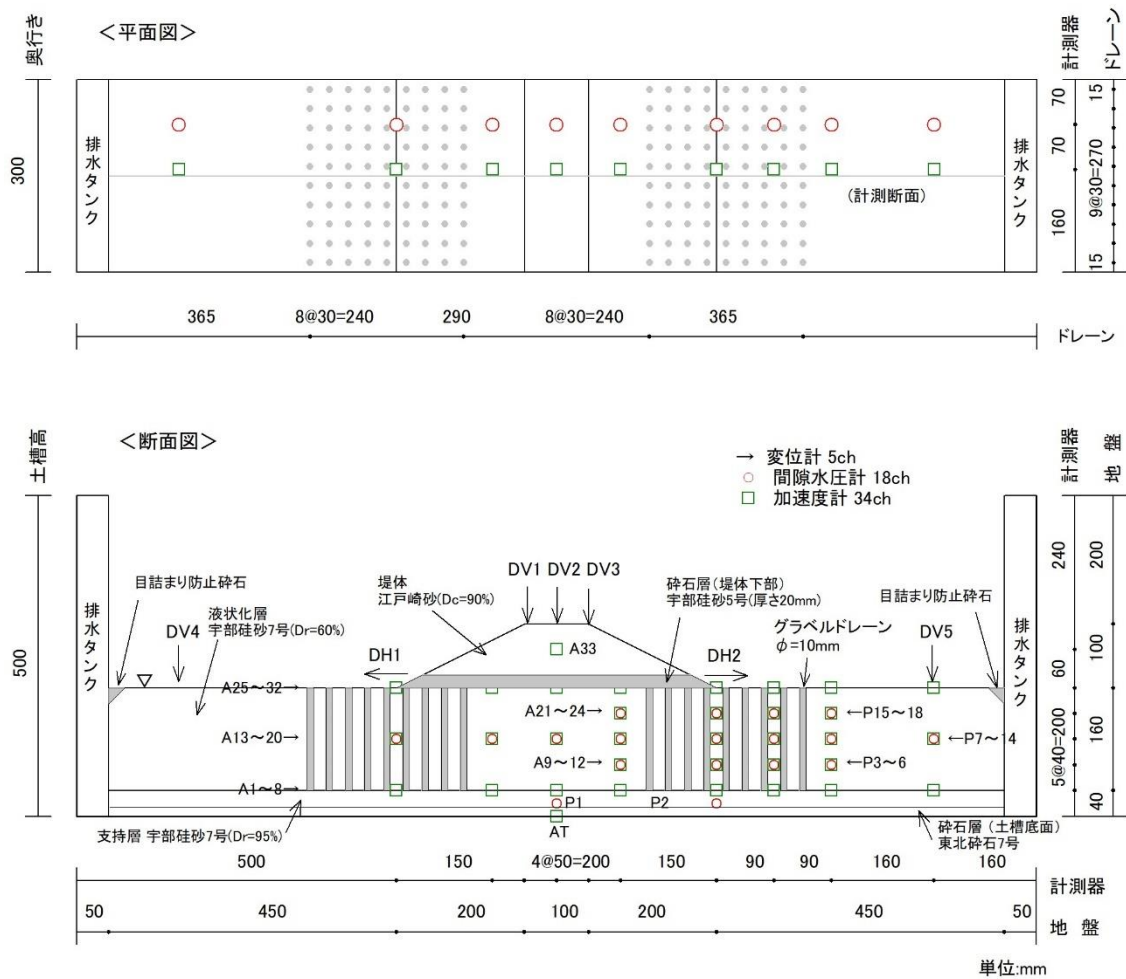


図 2.2.1 シリーズ1の実験模型例（ケース1-3、寸法は模型スケール）

2.2.2 実験ケース

実験ケースを表 2.2.1 に示す。シリーズ1では、液状化対策工（グラベルドレーン）と液状化層上位の被覆土層の有無の組み合わせにより4ケース実施した。グラベルドレーンのドレーン長は液状化層厚と同じ8mとし、杭芯間隔1.5mでドレーン径0.5mのグラベルドレーンを打設した。また、水位は水平地盤面とし、間隙流体には、遠心加速度（50G）に対応し、粘性を50倍に調整したメトローズ水溶液（信越化学工業株式会社製）を使用した。

表 2.2.1 シリーズ1の実験ケース（寸法は実スケール）

ケース	遠心加速度	地下水位	間隙流体	液状化対策工	被覆土層
1-1	50G	水平地盤面 (GL 0m)	メトローズ 水溶液 (※)	なし	なし
1-2					厚さ0.5m
1-3				グラベルドレーン左右各90本 杭芯間隔 : 1.5m ドレーン長 : 8m ドレーン径 : 0.5m	なし
1-4					厚さ0.5m

※粘性は水の50倍

2.2.3 地盤材料とドレーン材

各ケースにおける模型の地盤材料を表 2.2.2 に、その物性値を表 2.2.3 に示す。

図 2.2.2 に堤体を使用した江戸崎砂と液状化層に使用した宇部珪砂 7号およびドレーン材に使用した宇部珪砂新特 5 号の粒径加積曲線を示す。液状化層およびドレーン材に使用する材料はグラベルドレーンが目詰まりを起こさないよう「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル (案)」⁴⁾の概略条件 (以下、フィルター基準) である「 $D_{G15}/D_{85} < 9$ 」をもとに選定した (図 2.2.3、表 2.2.4)。

ここで、 D_{85} : 液状化層材料の通過質量百分率 85%のときの粒径

D_{G15} : ドレーン材の通過質量百分率 15%のときの粒径

ケース 1-2~1-4 では液状化層下部から間隙水をゆっくりと浸透させ飽和させるために土槽底面に碎石層を設けた (2.2.4 参照)。また、ケース 1-2、1-4 では、地表面からの排水を抑制するために液状化層上面にスミクレー (住友大阪セメント株式会社製) を用いて被覆土層を設けた。

表 2.2.2 シリーズ 1 の各ケースにおける模型の地盤材料

ケース	堤体	碎石層 (堤体下部)	ドレーン材	液状化層	支持層	被覆土層	碎石層 (土槽底面)
1-1	江戸崎砂 ($D_c = 95\%$)	宇部珪砂 5号	—	宇部珪砂 7号 ($D_r = 60\%$)	宇部珪砂 7号 ($D_r = 95\%$)	—	東北碎石 7号
1-2						スミクレー	
1-3			—				
1-4			スミクレー				

表 2.2.3 シリーズ 1 の各地盤材料の物性値

物性値		地盤材料	江戸崎砂	宇部珪砂 7号	宇部珪砂 5号	宇部珪砂 新特5号	スミクレー
		地盤種別	堤体	液状化層 支持層	碎石 (堤体下部)	ドレーン材	被覆土層
一般	土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)		2.709	2.630	2.634	2.635	2.746
粒度	礫分含有率 (%)		0.5	0	5.9	0	0
	砂分含有率 (%)		90.3	78.0	94.0	99.8	7.8
	シルト分含有率 (%)		5.0	19.5	0.1	0.2	55.2
	粘土分含有率 (%)		4.2	2.5			37.0
		均等係数 U_c		3.64	2.09	1.52	1.93
	平均粒径 D_{50} (mm)		0.243	0.110	1.23	0.664	0.015
テコン ンシ リス	液性限界 ω_L (%)		—	—	—	—	33.9
	塑性限界 ω_P (%)		—	—	—	—	18.1
	塑性指数 I_P		—	—	—	—	15.8
密度最大 試験最小	最大乾燥密度 ρ_{\max} (g/cm^3)		—	1.587	—	—	—
	最小乾燥密度 ρ_{\min} (g/cm^3)		—	1.214	—	—	—
試験 縮固 め	最大乾燥密度 ρ_{\max} (g/cm^3)		1.637	—	—	—	—
	最適含水比 ω_{opt} (%)		16.9	—	—	—	—
15°Cに対する透水係数 k_{15} (m/s)			—	6.04×10^{-6} (※)	—	2.30×10^{-4}	—

※液状化層の条件での透水係数

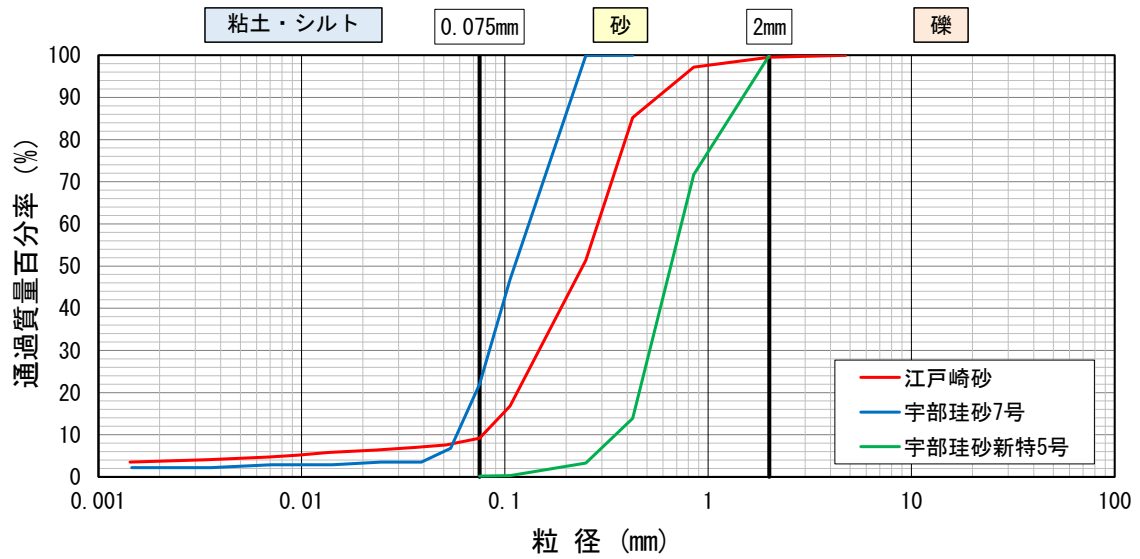


図 2.2.2 堤体、液状化層およびドレーン材の粒径加積曲線

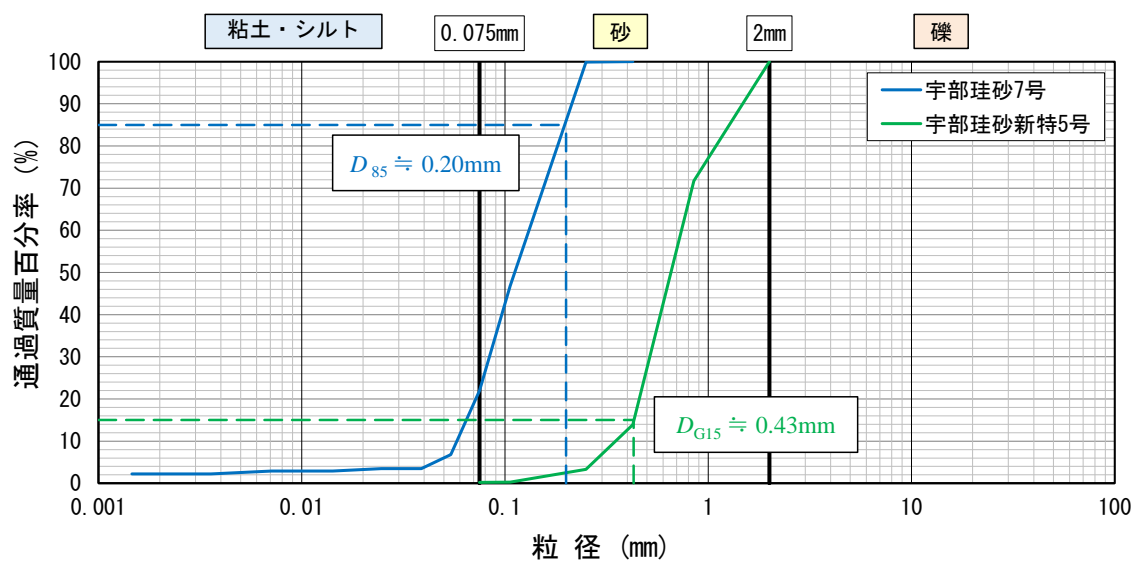


図 2.2.3 液状化層の D_{85} およびドレーン材の D_{G15}

表 2.2.4 シリーズ1における D_{G15}/D_{85} の値

地盤種別	ドレーン材	液状化層
地盤材料	宇部珪砂新特5号	宇部珪砂7号
粒径	15% 粒径 D_{G15} (mm)	85% 粒径 D_{85} (mm)
	0.43	0.20
D_{G15}/D_{85}	2.2	

2.2.4 地盤の飽和方法

ケース 1-1 においては、真空槽内で模型を脱気した後、土槽長手方向の片側から間隙流体をゆっくと水平地盤面上に滴下し、地盤材料内の空気を片側から押し出すことで飽和を試みた。ただし、加振時に地盤中から気泡の発生が確認されたことから、ケース 1-2 以降では新たに東北砕石 7 号による厚さ 75cm の砕石層を土槽底面に設け、スタンドパイプを介して底面砕石層に間隙流体を滴下し、模型下端から間隙流体を浸透させることで飽和を行った。ケース 1-3、ケース 1-4 では CO₂ ガスを使用するなど飽和方法を変更したが、ケース 1-4 でも気泡が確認された。以上より、飽和方法を改善しケースを経るごとに加振時の気泡発生量は徐々に減少していったが、ケース 1-4 においても完全には飽和状態に至っていないと推察される。表 2.2.5 に各ケースにおける飽和方法を示す。

表 2.2.5 シリーズ 1 における地盤の飽和方法

ケース	浸透箇所	飽和手順
1-1	地表面（片側）	1. 脱気 2. 通水
1-2	砕石層 （土槽底面）	1. 脱気 2. CO ₂ ガス注入 3. 脱気 4. 通水
1-3		1. CO ₂ ガス注入 2. 脱気 3. 通水
1-4		

2.2.5 測定項目

実験での測定項目を表 2.2.6 に示す。地盤側面には、液状化層は模型スケールで縦 40mm×横 50mm（排水タンク付近は一部 100mm 間隔）四方のメッシュ中央、堤体下部の砕石は模型スケールで 50mm 間隔の横 1 列、堤体は 50mm 間隔の横 3 列で標点をそれぞれ設置した。

地表面の標点は堤体の横断方向に 2 列で設置した。ただし、ケース 1-3, 1-4 ではグラベルドレーンの範囲（堤体部は除く）は標点を設置していない。

表 2.2.6 シリーズ 1 の測定項目

計測器・計測物	計測位置	数量	備考
加速度計	地盤内	33	A1～A33
	加振テーブル	1	A1
	土槽底面	1	AT
水圧計	地盤内	18	P1～P18（ケース 1-1, 1-3）
		21	P1～P21（ケース 1-2, 1-4）
変位計	堤体天端	3	DV1～DV3（鉛直）
	水平地盤	2	DV4, DV5（鉛直）
	法尻	2	DH1, DH2（水平）
地表面形状	地表面	一式	重力場で横断方向にレーザー測定
標点	地表面	一式	重力場でメジャー・レーザー測定
	地盤側面		遠心力場で撮影した画像を解析

2.2.6 外力条件

道路橋示方書⁵⁾のレベル2タイプI地震動（I種地盤）である新晩翠橋の地表面加速度波形を、水平地盤面以下の逸散減衰を考慮し、元の振幅の0.8倍したもの（波形3）を基準として、1/2倍（波形2）・1/3倍（波形1）となる地震動波形を採用（表2.2.7）した。これらの波形を各ケースにおいてステップ1：波形1、ステップ2：波形2、ステップ3：波形3の順に入力し、加振した。なお、堤体断面形状の測定や地盤の観察は各ステップの終了ごとに行った。

表 2.2.7 シリーズ1の加振実験で使用した入力地震動波形

名称	入力波形	備考
波形1	地震波	振幅が波形3の1/3倍
波形2		振幅が波形3の1/2倍
波形3		※

※道路橋示方書におけるレベル2地震動（タイプI）の動的解析用波形I-I-3（I種地盤、新晩翠橋周辺地盤上NS成分）を80%に調整

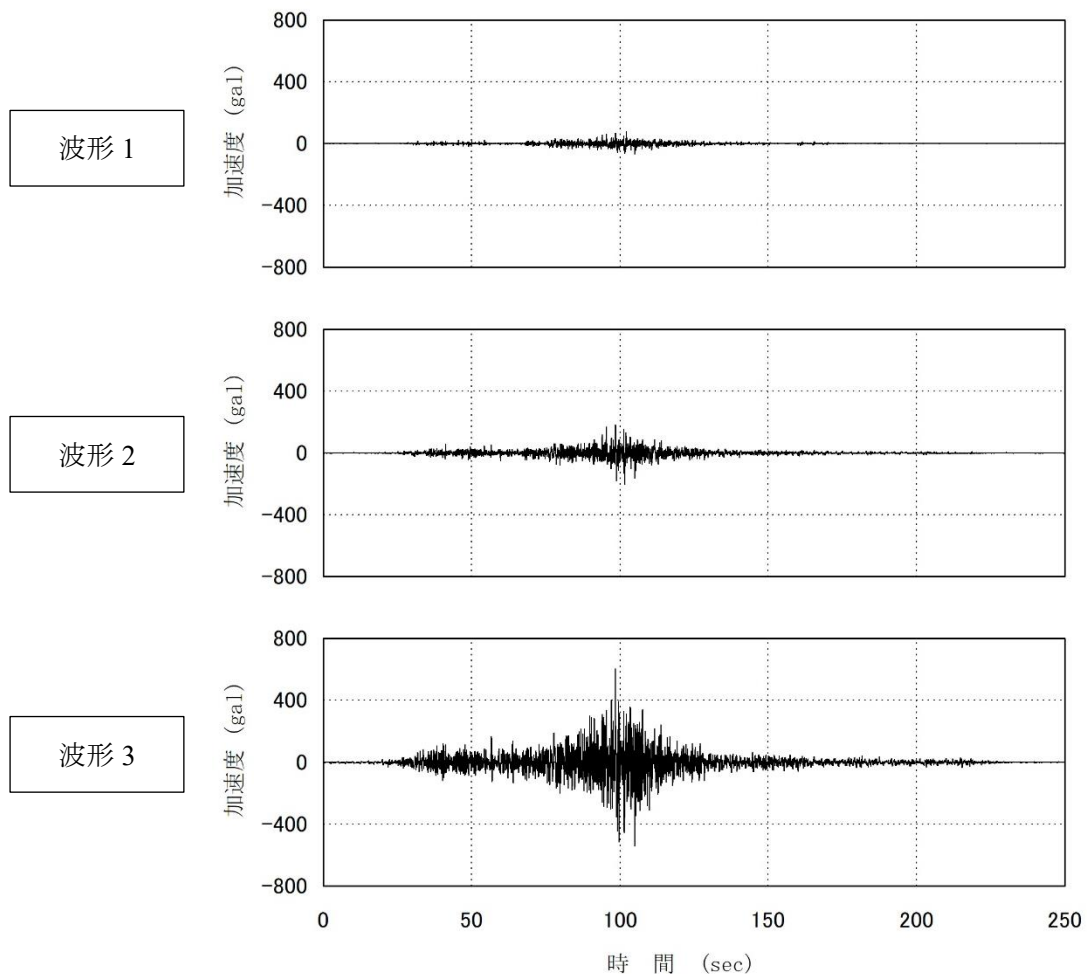


図 2.2.4 シリーズ1の加振実験で使用した入力地震動波形

2.3 実験結果

2.3.1 ケース 1-1

図 2.3.1 (本項において本図のみ模型スケールで表記) にケース 1-1 の実験模型を示す。また、図 2.3.2～図 2.3.4 にステップ 1～3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。液状化層に設置した水圧計に関して、ステップ 1 では液状化層最深部 (GL-6m) に設置した P4, 5, 6 を除くすべての水平地盤直下の水圧計、ステップ 2 では P11 を除くすべての水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。ステップ 3 ではすべての水平地盤直下の水圧計と一部の堤体直下の水圧計において、過剰間隙水圧比が 1 以上となり液状化状態に至った。なお、加振によって土槽ガラス面に多数の気泡が付着する状況が確認されたことから、飽和が不十分であることが考えられ、特にステップ 1 では過剰間隙水圧が上昇しにくくなっていたことが考えられる。

図 2.3.5 に堤体天端 (DV1～3) および水平地盤上 (DV4, 5) における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 2.3.1 にステップごとの残留沈下量および残留水平変位量を示す。

堤体天端では、ステップ 1 で残留沈下量が 0.1m 弱 (0.092～0.097m)、ステップ 2 で 0.3m 弱 (0.265～0.297m) となっており、計測位置による大きな差はみられない。一方、ステップ 3 では DV1 付近において多数の亀裂が発生したため、DV2, 3 の 0.5m 強 (0.537～0.538m) に対して DV1 の 0.8m 弱と沈下量が大きくなっている。水平地盤上の残留沈下量ではステップ 1 からステップ 3 にかけて左側の DV4 が 0.01～0.03m だったのに対し、DV5 が 0.15m 弱で右側の方が大きかった。

法尻における各ステップの累積水平変位量を図 2.3.6 に示す。なお、変位量は図左方向を正としている。水平変位量は堤体右側の DH2 が堤体左側の DH1 に比べ、約 1.2 倍程度大きかった。

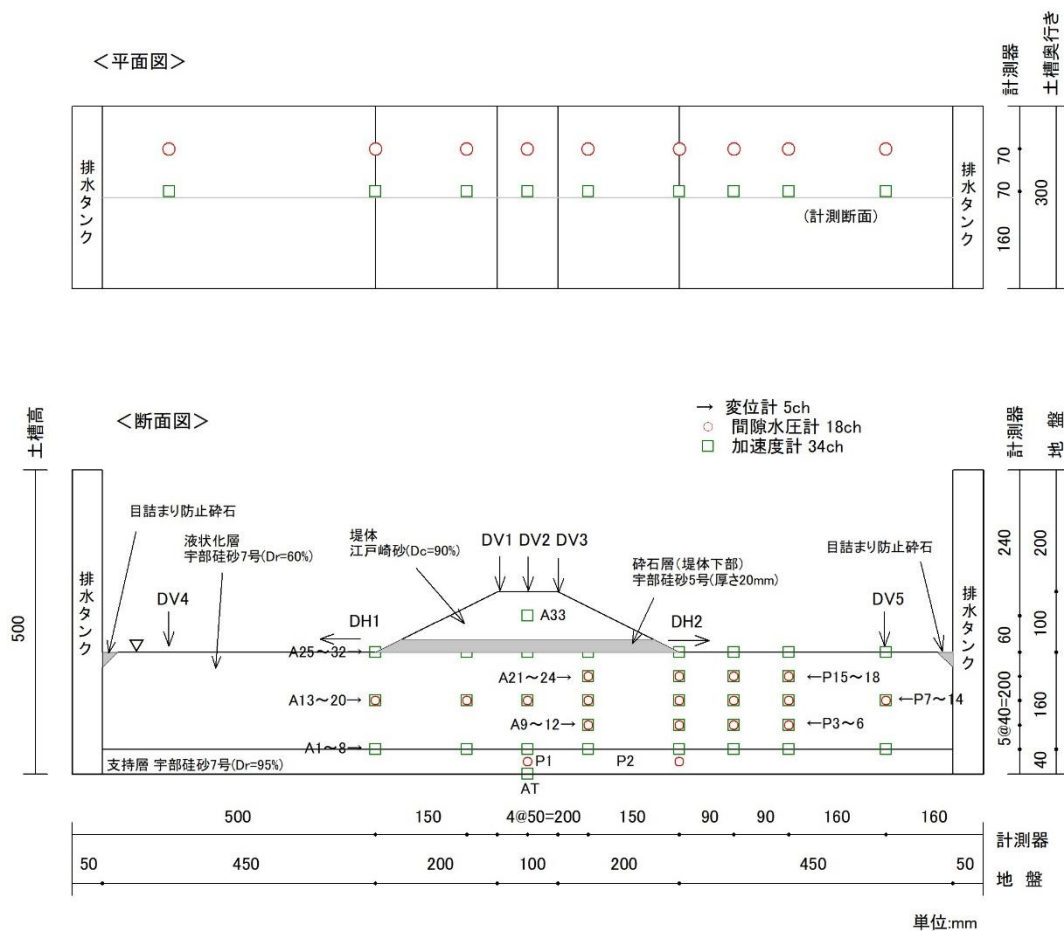


図 2.3.1 ケース 1-1 の実験模型 (寸法は模型スケール)

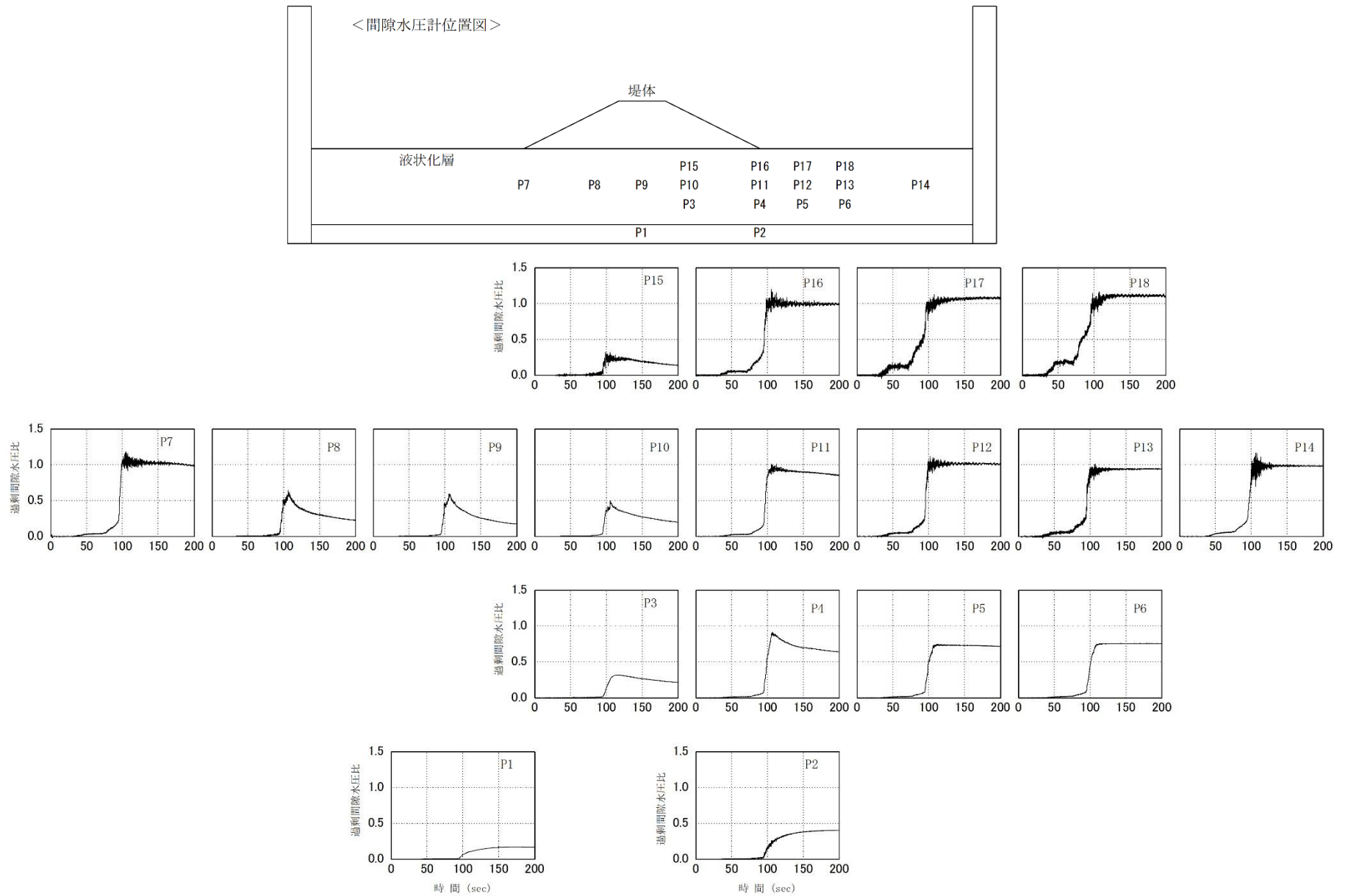


図 2.3.2 ケース 1-1 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

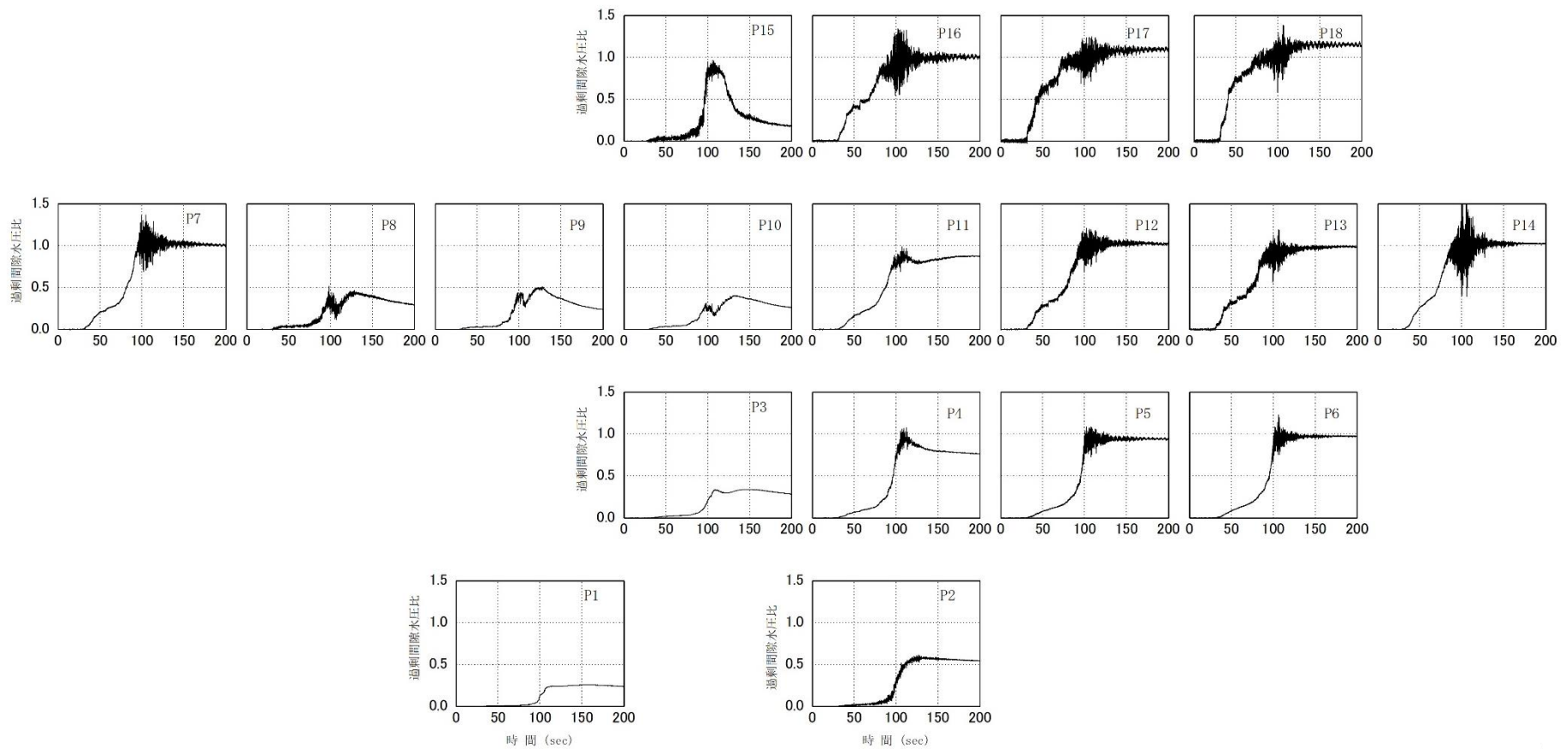
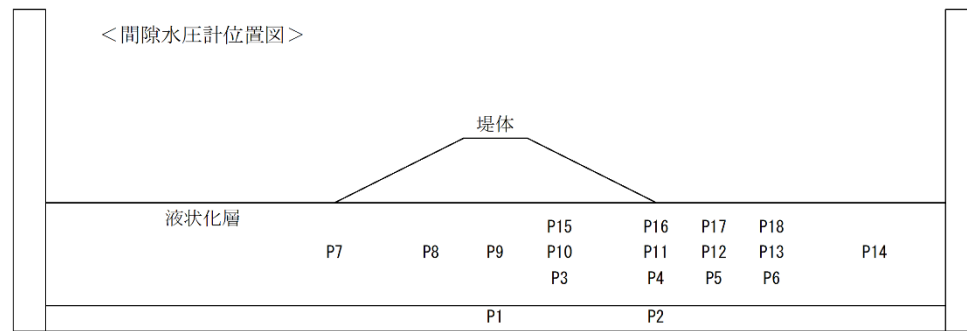


図 2.3.3 ケース 1-1 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

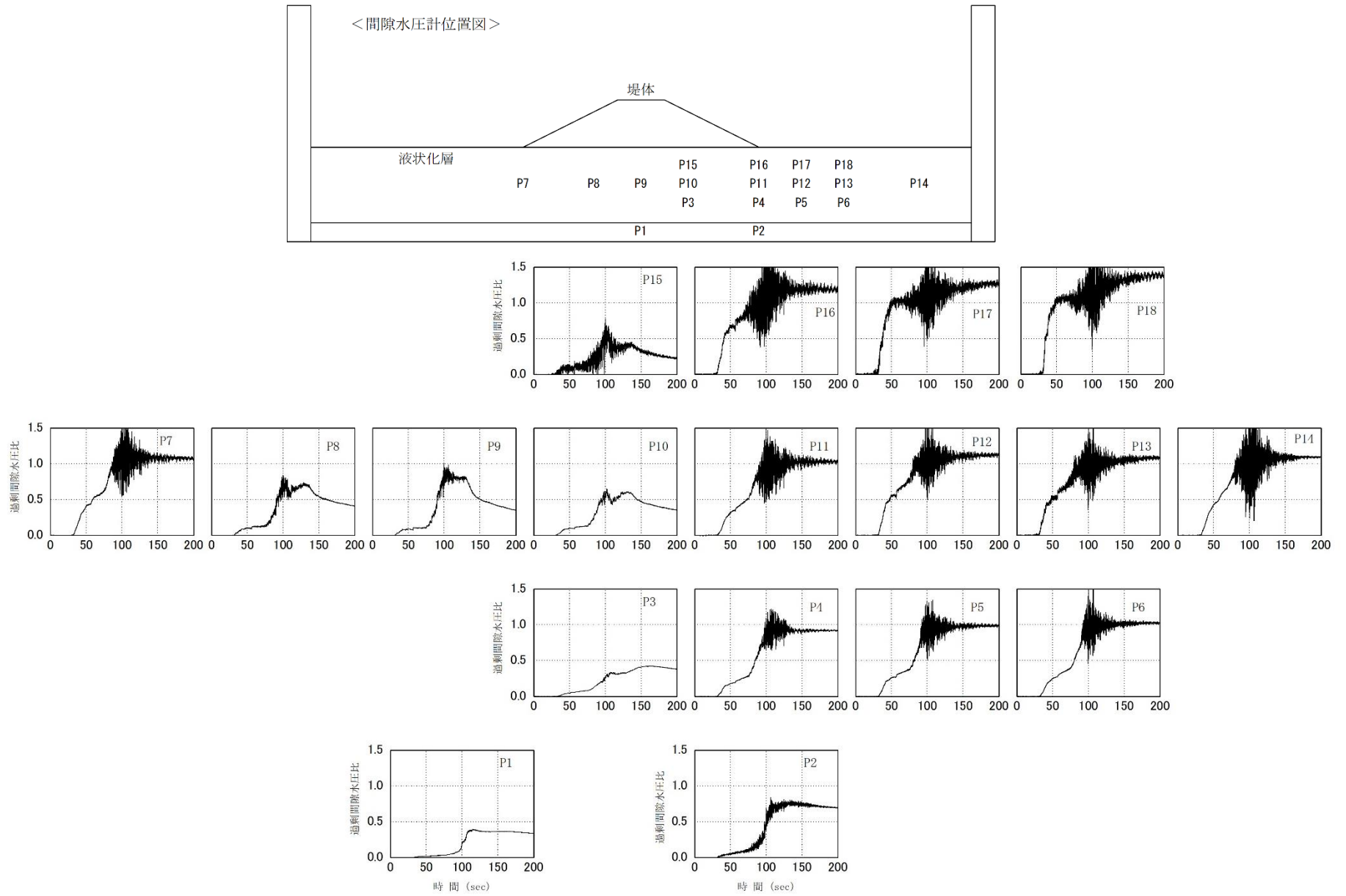


図 2.3.4 ケース 1-1 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

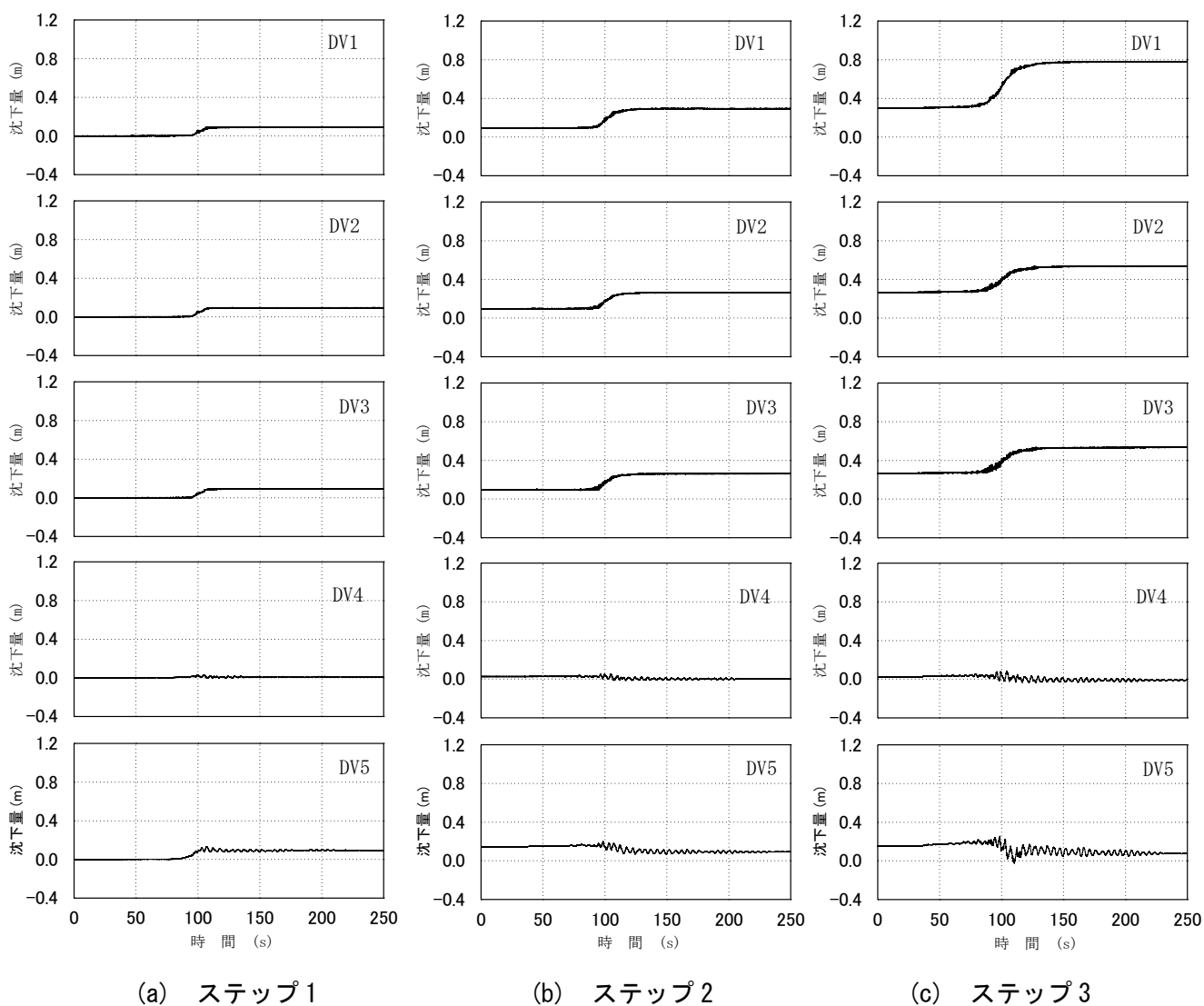
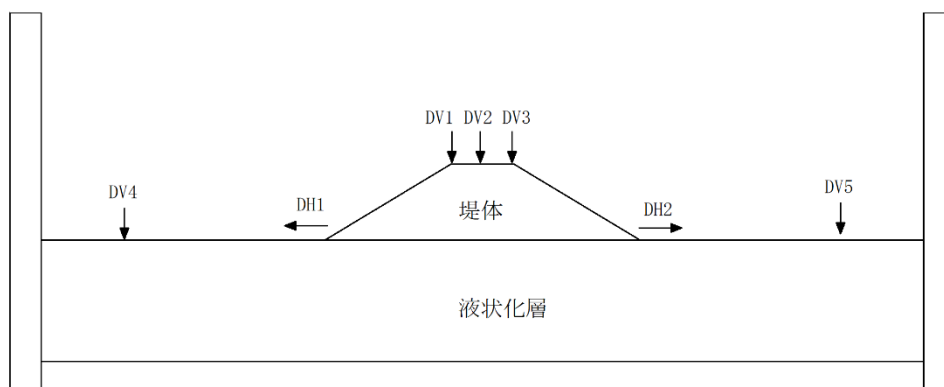
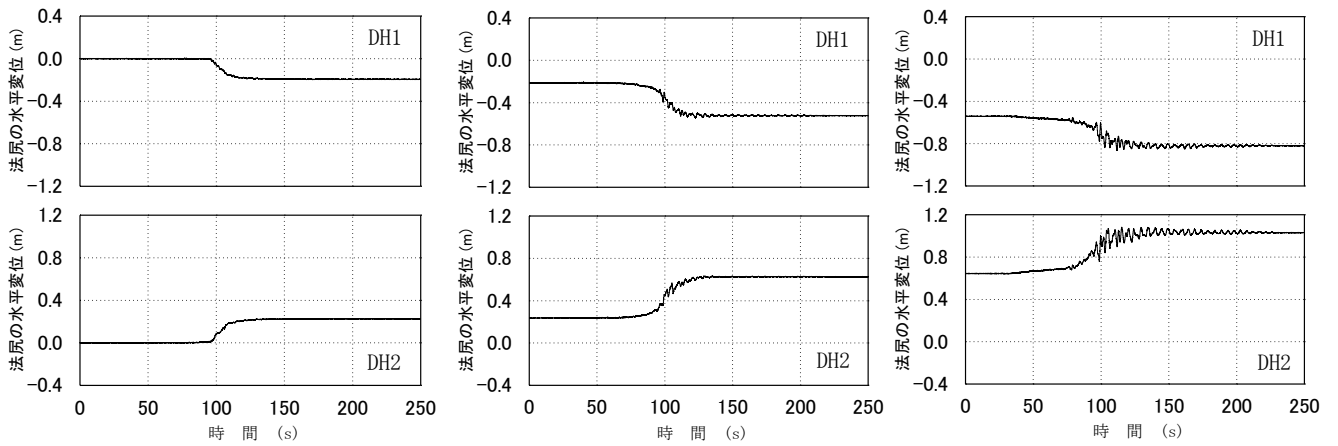
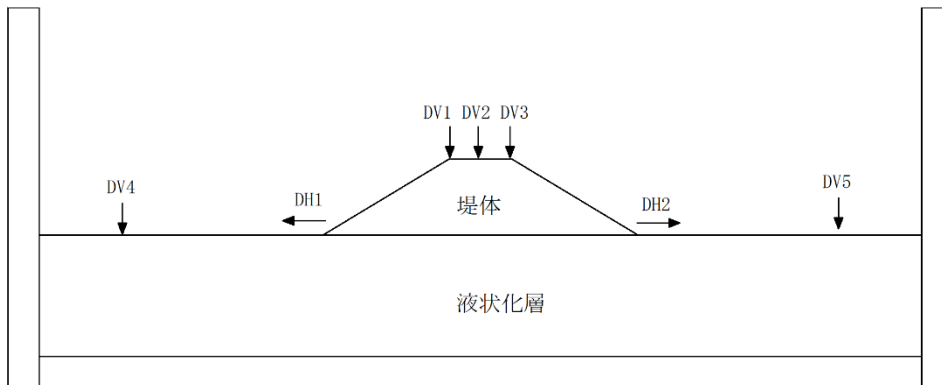


図 2.3.5 ケース 1-1 における各ステップの累積沈下量

表 2.3.1 ケース 1-1 における残留沈下量および残留水位平変位置

ステップ	残留沈下量 (m)					残留水位平変位置 (m)	
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DH1	DH2
1	0.092	0.097	0.095	0.026	0.144	-0.212	0.236
2	0.297	0.265	0.265	0.024	0.149	-0.541	0.643
3	0.783	0.538	0.537	0.011	0.139	-0.832	1.059



(a) ステップ 1

(b) ステップ 2

(c) ステップ 3

図 2.3.6 ケース 1-1 における各ステップの累積水平変位置量 (図左方向が正)

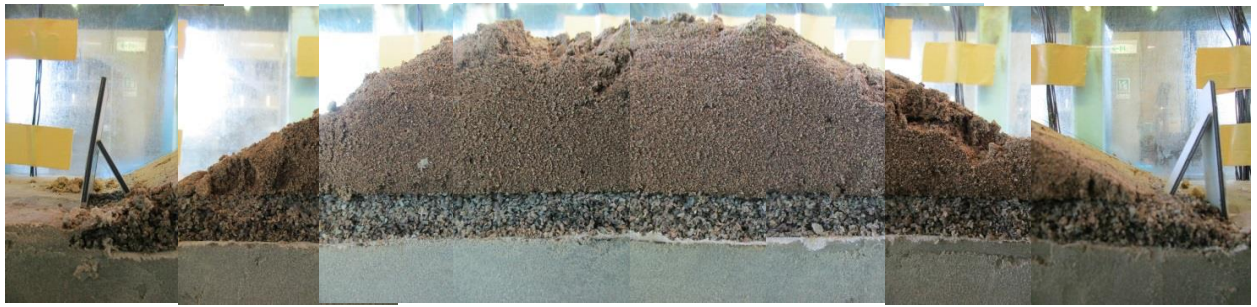


写真 2.3.1 ケース 1-1 における実験後の模型の開削断面

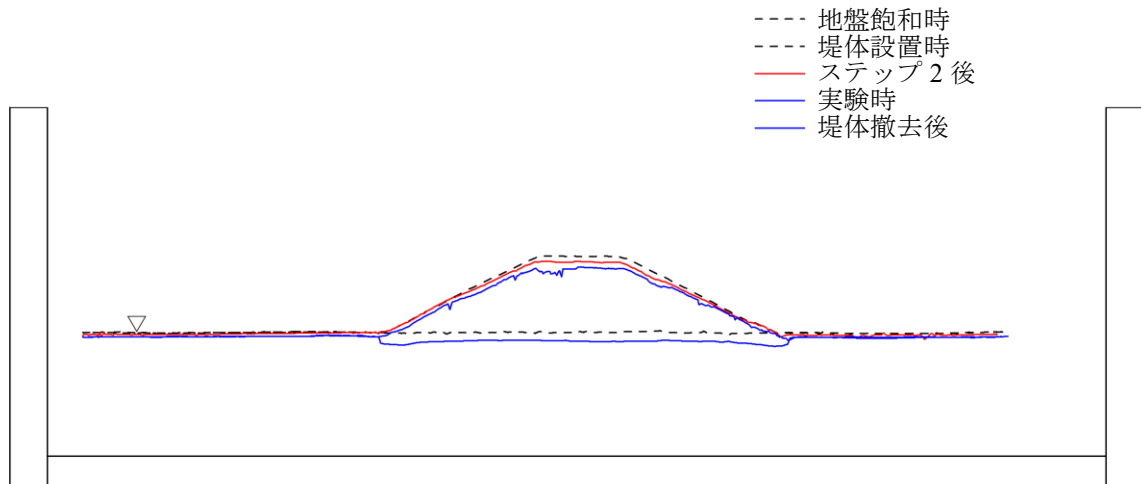


図 2.3.7 ケース 1-1 における模型の地表面形状

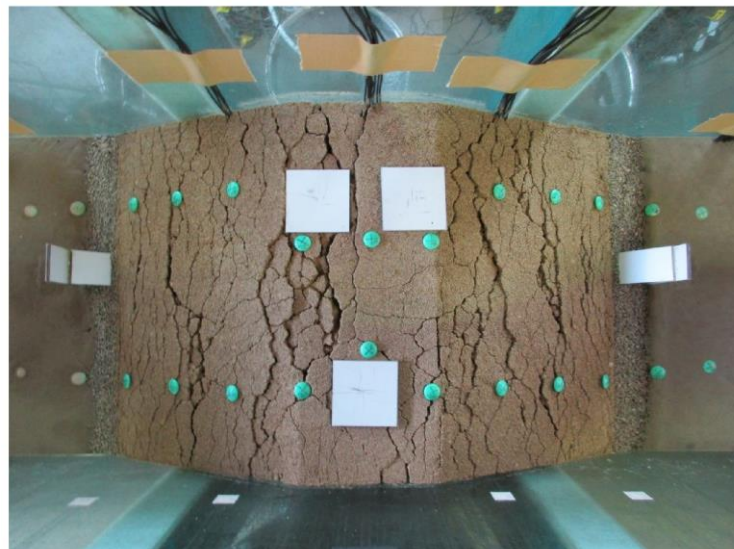
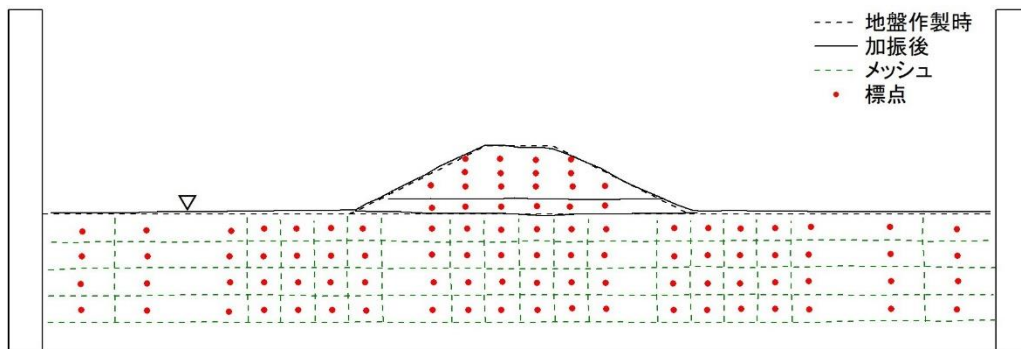
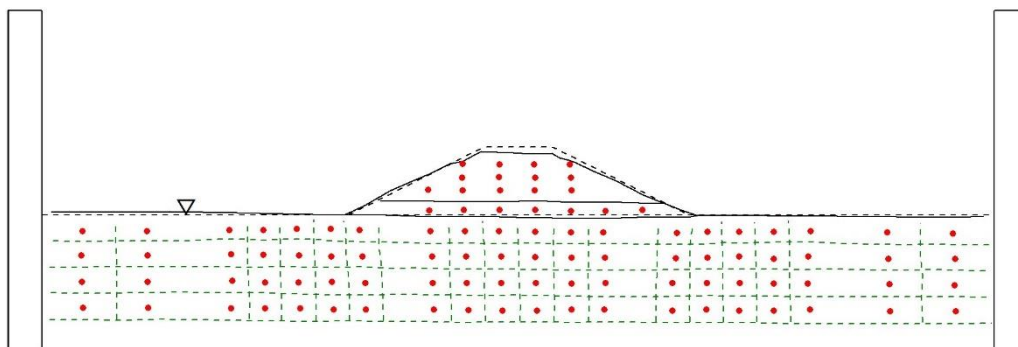


写真 2.3.2 ケース 1-1 における実験後の模型の状態（堤体真上から撮影）

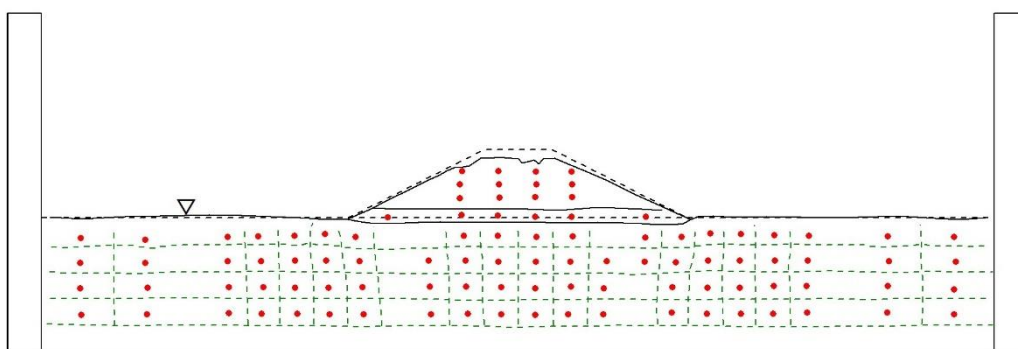
写真 2.3.1 に実験後の模型の開削断面状況を、図 2.3.7 に模型の地表面形状を、写真 2.3.2 に堤体真上から見た実験後の模型の状態を示す。写真 2.3.2 より堤体の縦断方向に複数の亀裂が発生していることがわかる。



(a) ステップ 1



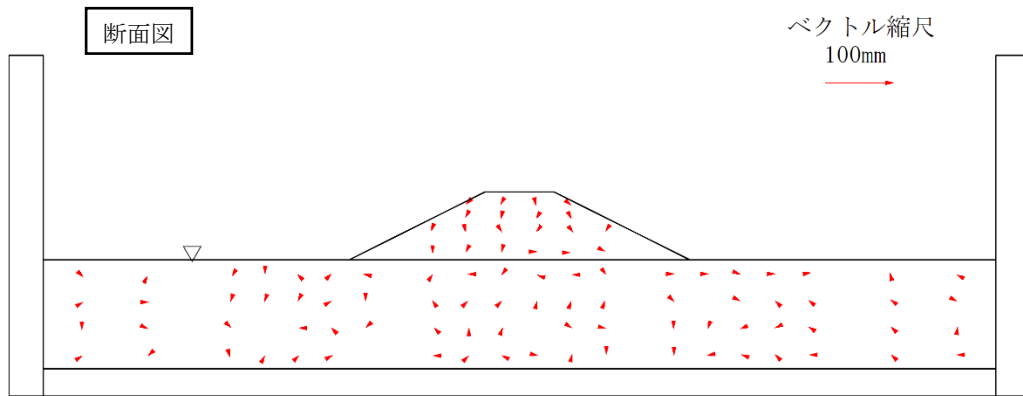
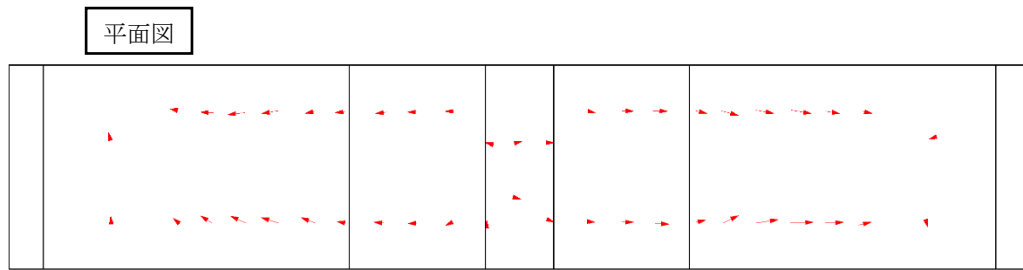
(b) ステップ 2



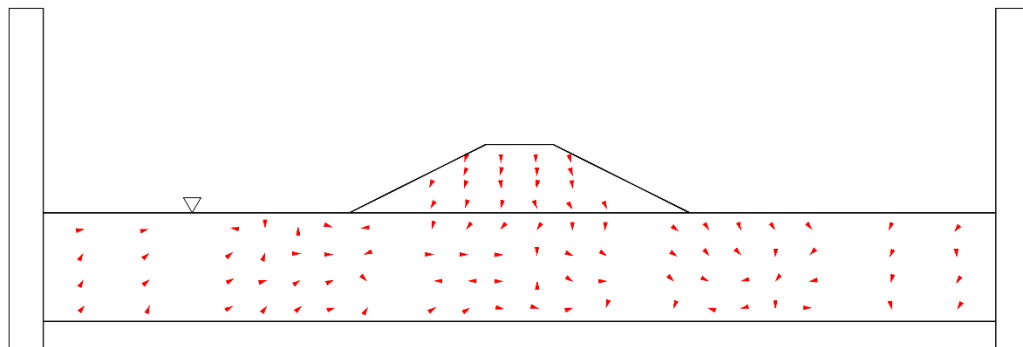
(c) ステップ 3

図 2.3.8 ケース 1-1 における各ステップ後の模型の変形

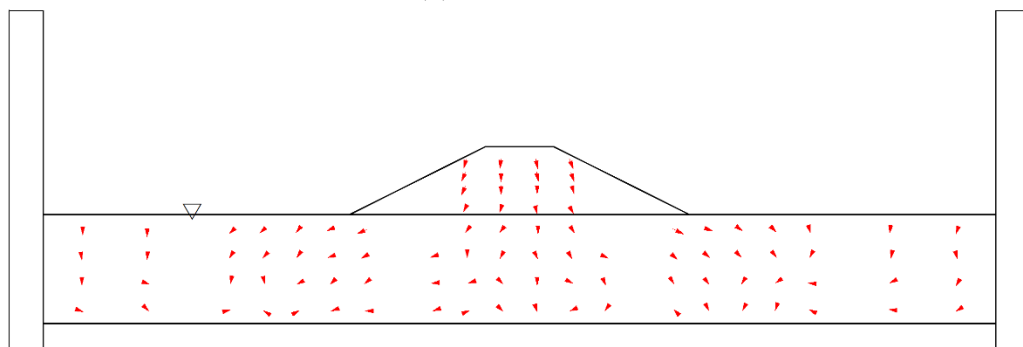
図 2.3.8 に各ステップ後の模型の変形を、図 2.3.9 に標点変位ベクトル図を示す。



(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



(c) ステップ 3

図 2.3.9 ケース 1-1 における標点変位ベクトル図

2.3.2 ケース 1-2

図 2.3.10（本項において本図のみ模型スケールで表記）に実験模型を示す。また、図 2.3.11～図 2.3.13 にステップ 1～3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。液状化層に設置した水圧計に関して、ステップ 1,2 ではほぼすべての水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。ステップ 3 でもすべての水平地盤直下の水圧計において、過剰間隙水圧比が 1 以上となり、堤体直下の P15 においては 1 に近い過剰間隙水圧比となった。

図 2.3.14 に堤体天端（DV1～3）および水平地盤上（DV4,5）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 2.3.2 にステップごとの残留沈下量および残留水平変位量を示す。

堤体天端では、ステップ 1 では左側の DV1、ステップ 2,3 では中央の DV2 が最も沈下量が大きくなった。水平地盤上の残留沈下量ではステップ 1 からステップ 3 にかけて左側の DV4 が 0.02～0.03m だったのに対し、DV5 が 0.03～0.05m で若干右側の方が大きかった。

法尻における各ステップの累積水平変位量を図 2.3.15 に示す。なお、変位量は図左方向を正としている。水平変位量は堤体右側の DH2 が堤体左側の DH1 に比べ、各ステップで約 1.3～1.4 倍程度大きかった。

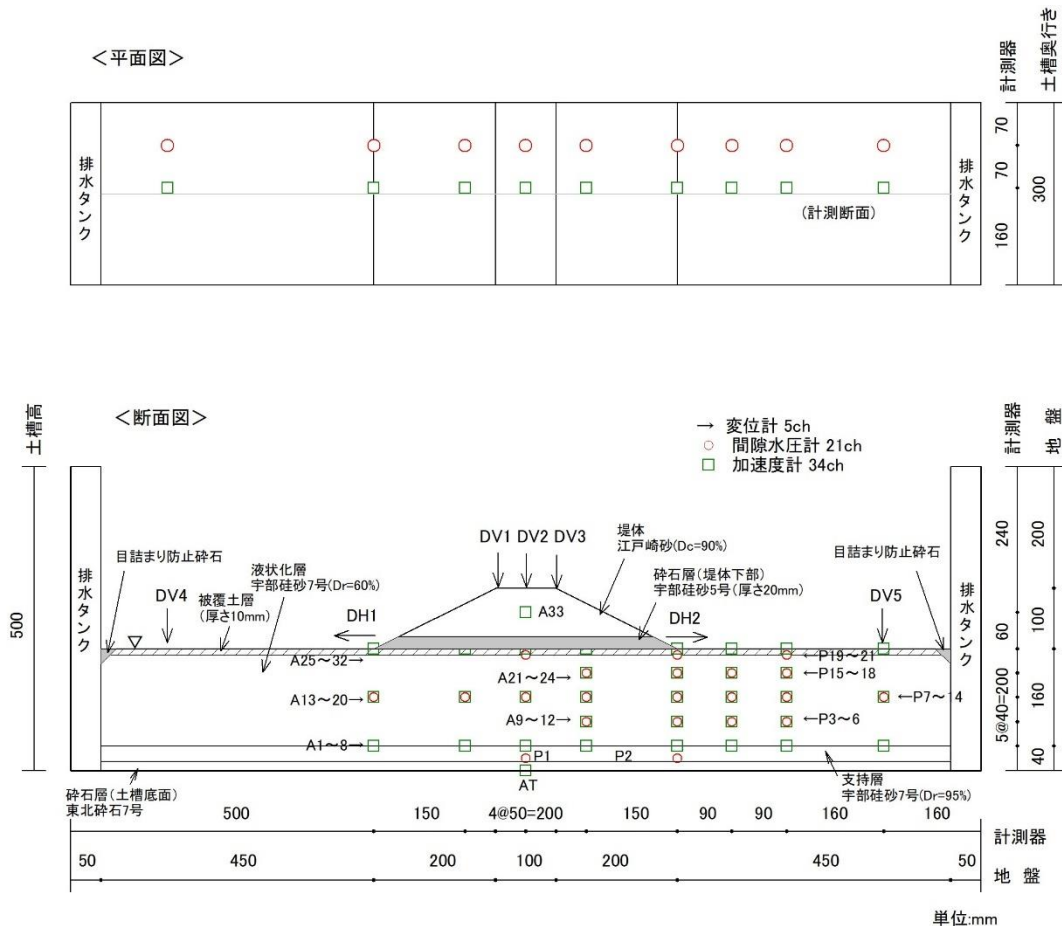


図 2.3.10 ケース 1-2 の実験模型（寸法は模型スケール）

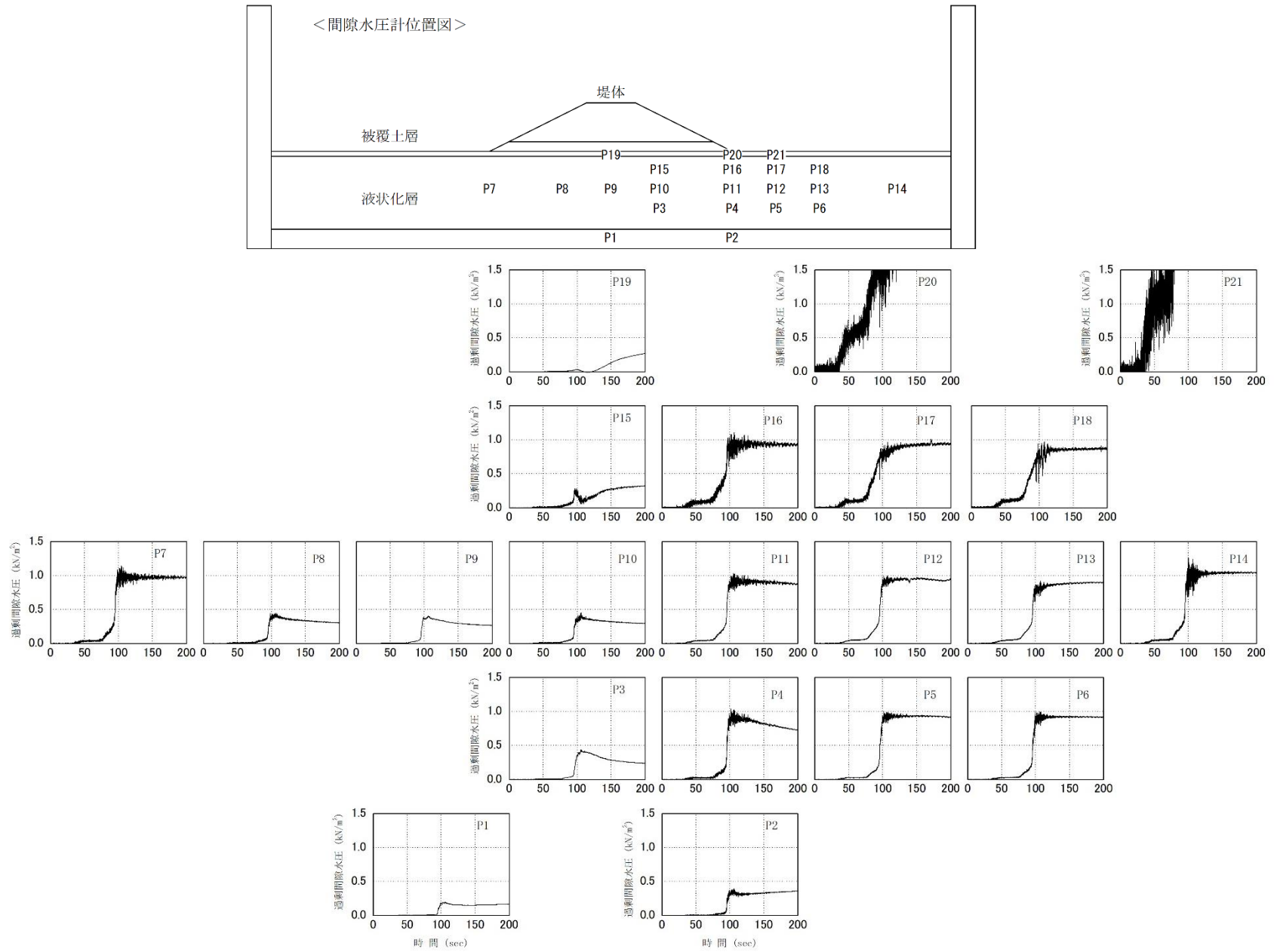


図 2.3.11 ケース 1-2 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

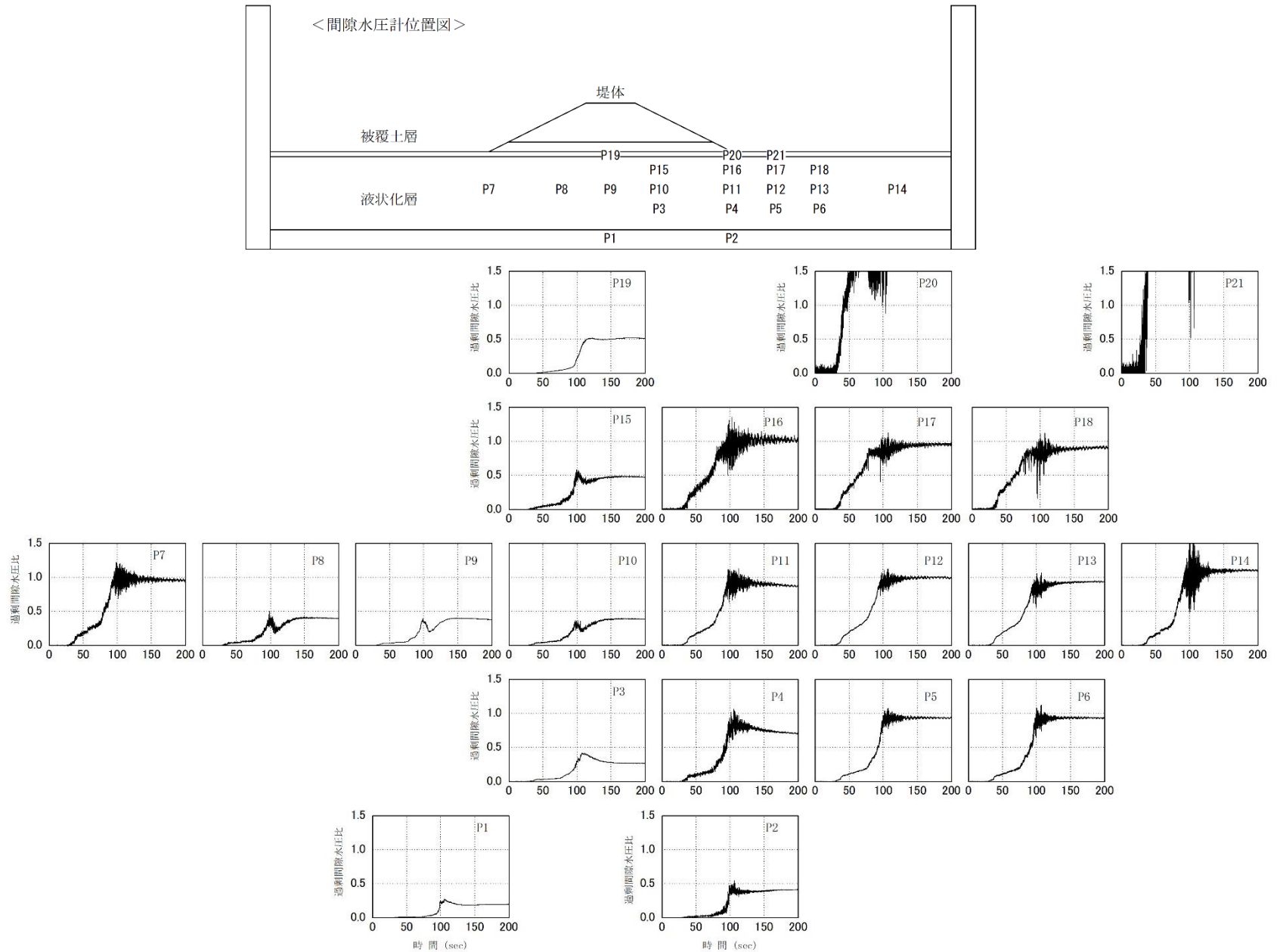


図 2.3.12 ケース 1-2 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

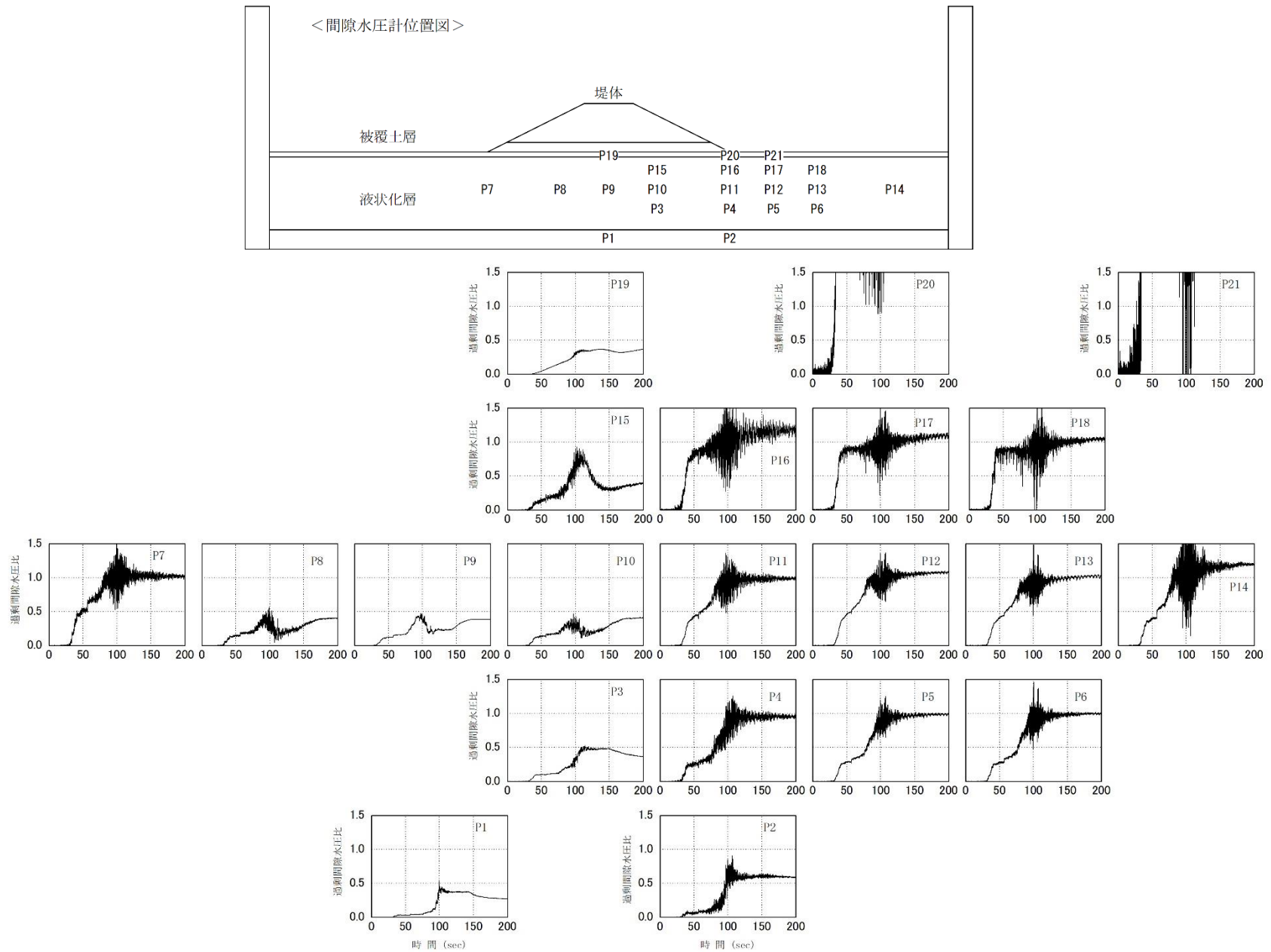


図 2.3.13 ケース 1-2 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

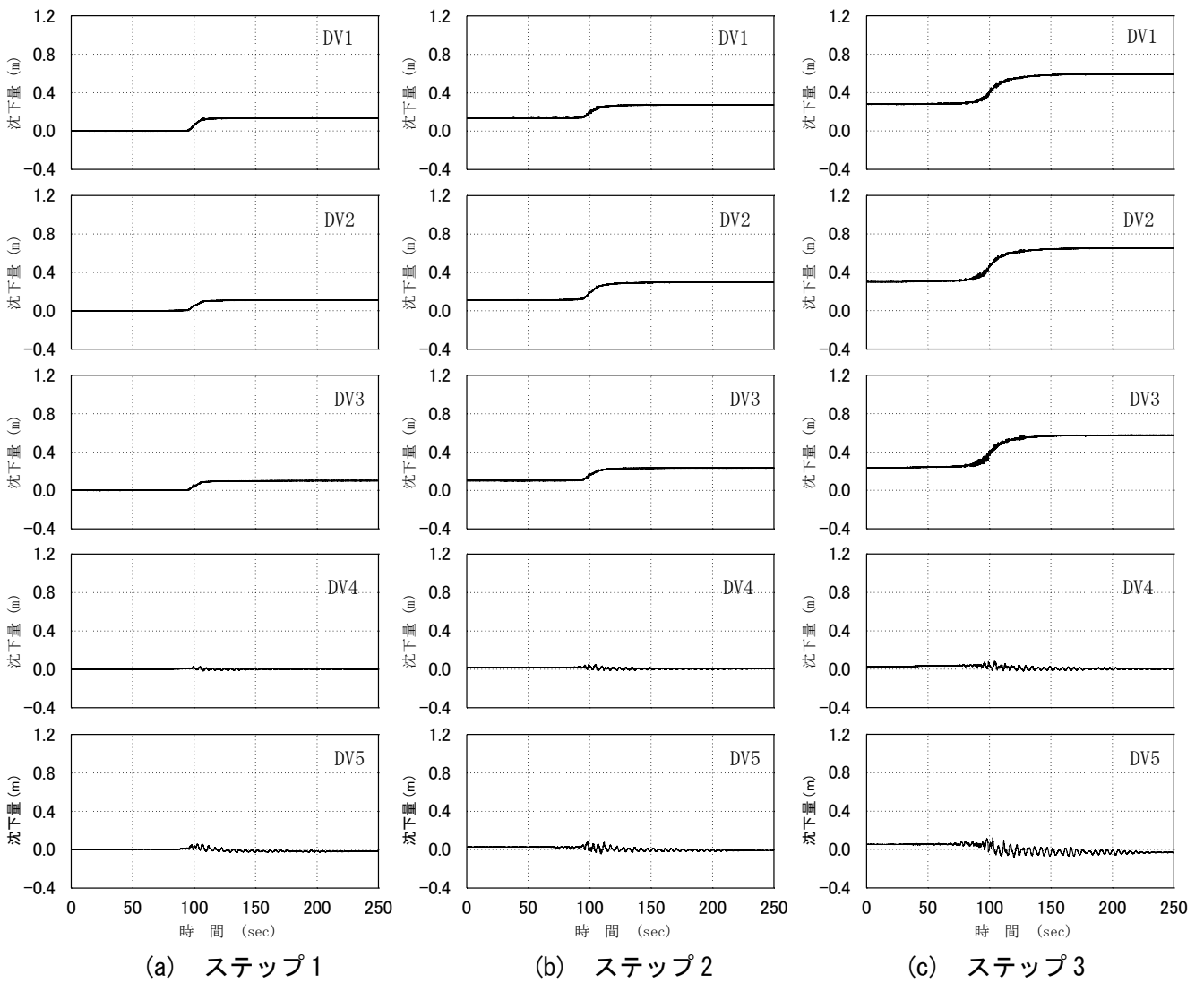
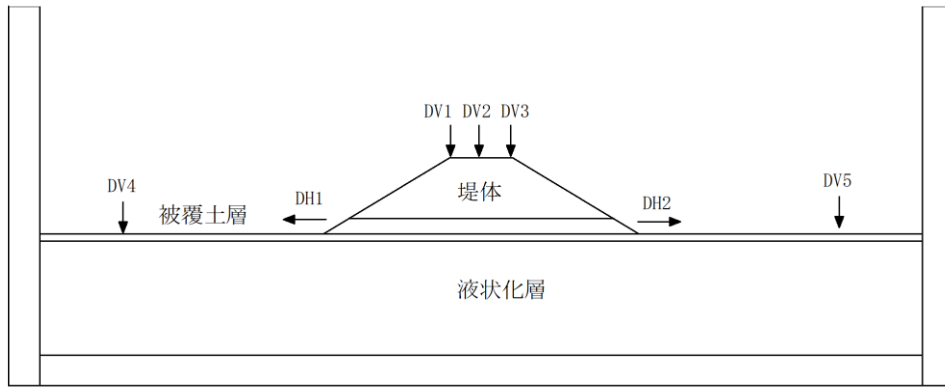
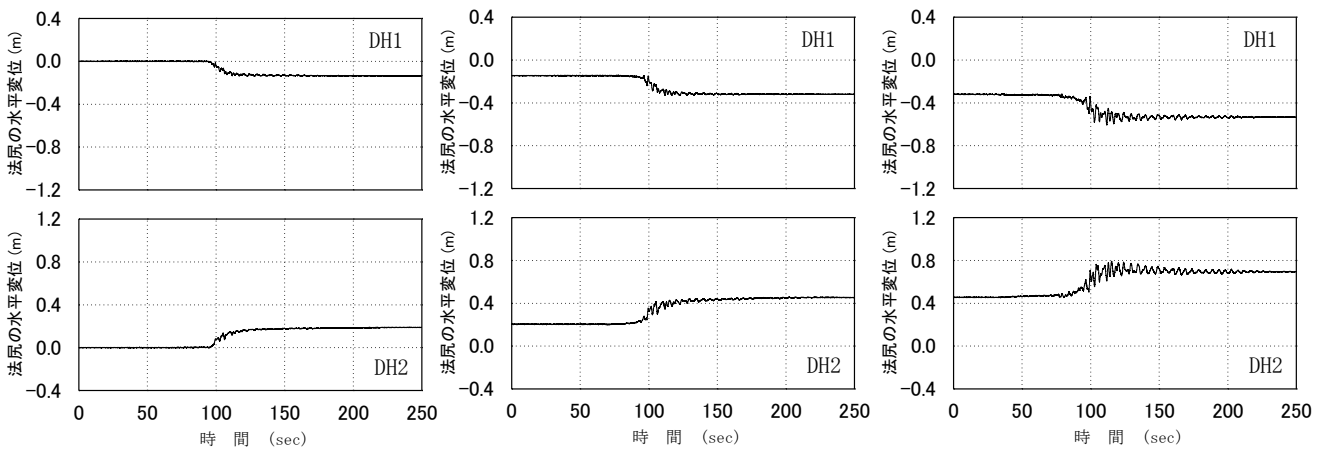
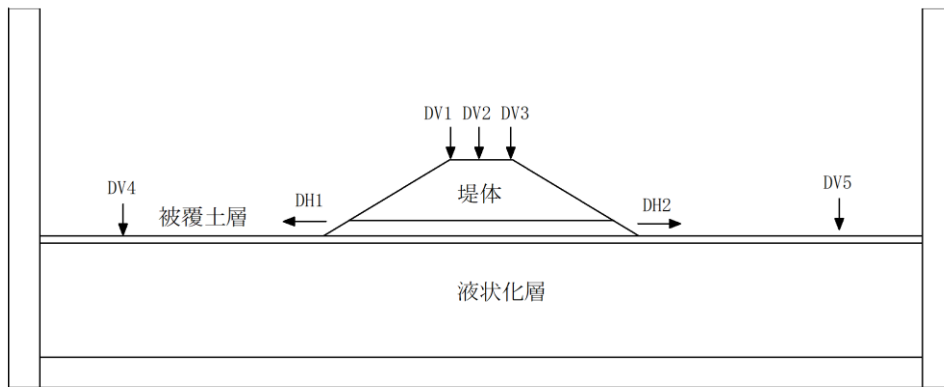


図 2.3.14 ケース 1-2 における各ステップの累積沈下量

表 2.3.2 ケース 1-2 における残留沈下量および残留水位平変位置

ステップ	残留沈下量 (m)					残留水位平変位置 (m)	
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DH1	DH2
1	0.137	0.113	0.103	0.019	0.027	-0.145	0.202
2	0.278	0.302	0.238	0.026	0.052	-0.322	0.455
3	0.598	0.656	0.580	0.022	0.033	-0.538	0.708



(a) ステップ 1

(b) ステップ 2

(c) ステップ 3

図 2.3.15 ケース 1-2 における各ステップの累積水平変位置 (図左方向が正)



写真 2.3.3 ケース 1-2 における実験後の模型の開削断面

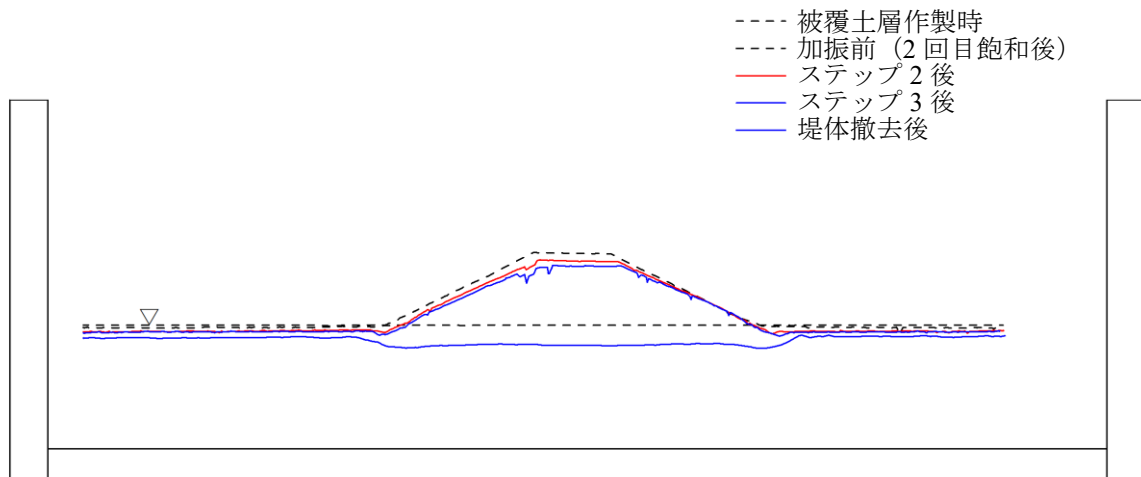
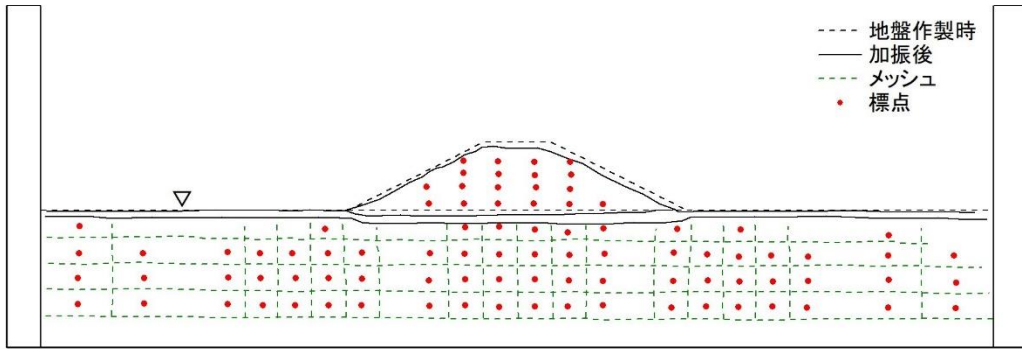


図 2.3.16 ケース 1-2 における模型の地表面形状

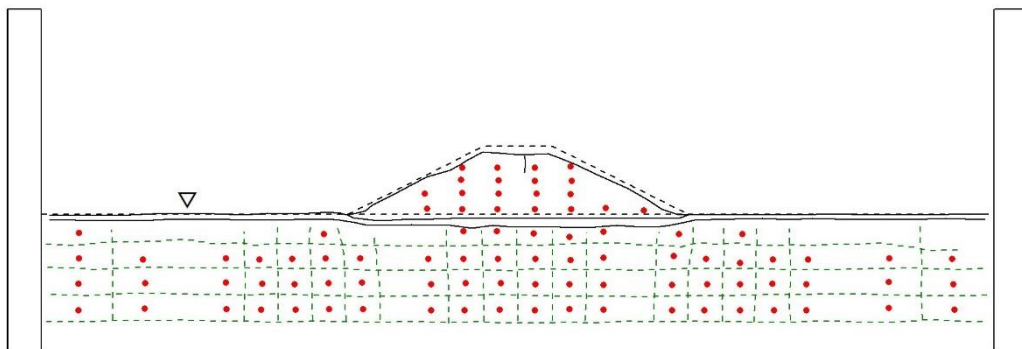


写真 2.3.4 ケース 1-2 における実験後の模型の状態 (堤体真上から撮影)

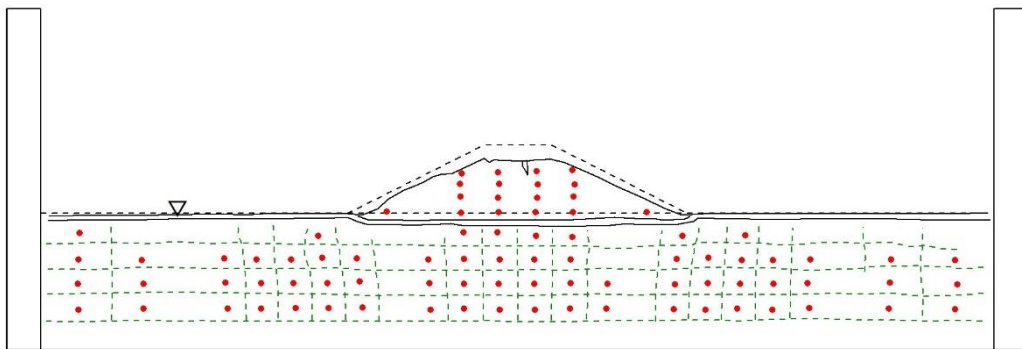
写真 2.3.3 に実験後の模型の開削断面状況を、図 2.3.16 に模型の地表面形状を、写真 2.3.4 に堤体真上から見た実験後の模型の状態を示す。



(a) ステップ 1



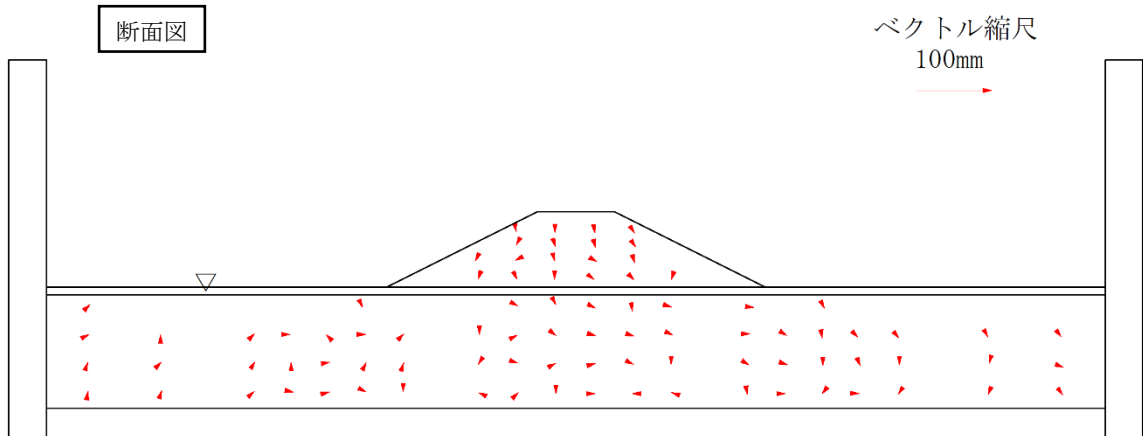
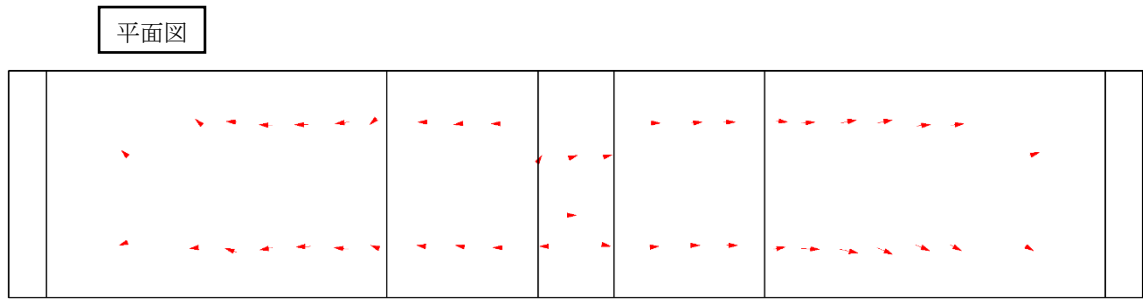
(b) ステップ 2



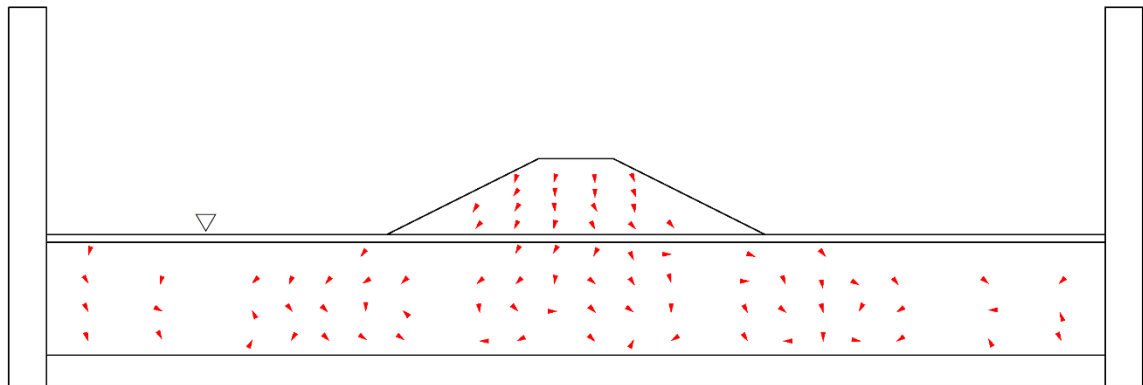
(c) ステップ 3

図 2.3.17 ケース 1-2 における各ステップ後の模型の変形

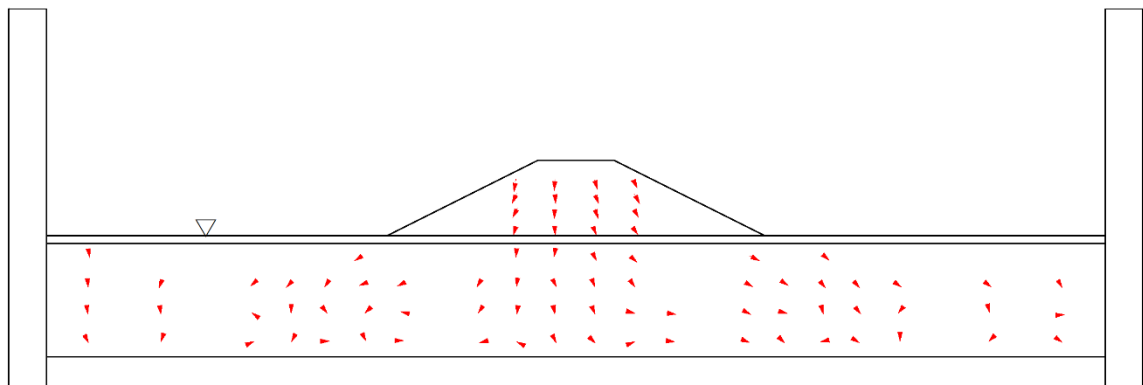
図 2.3.17 に各ステップ後の模型の変形を、図 2.3.18 に標点変位ベクトル図を示す。



(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



(c) ステップ 3

図 2.3.18 ケース 1-2 における標点変位ベクトル図

2.3.3 ケース 1-3

図 2.2.1（本項において本図のみ模型スケールで表記）にケース 1-3 の実験模型を再掲する。液状化対策工は堤体の左右に配置し、ドレーン長 8m、径 0.5m、杭芯間隔 1.5m で左右各 90 本打設した。図 2.3.19～図 2.3.21 にステップ 1～3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。各ステップともにすべての水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 2.3.22 に堤体天端（DV1～3）および水平地盤上（DV4,5）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 2.3.3 にステップごとの残留沈下量および残留水平変位量を示す。

堤体天端では、すべてのステップで左側の DV1 の沈下量が最も大きく、他の変位計との差がステップを経るごとに大きくなった。これは、堤体左側に発生した亀裂がステップを経るごとに大きくなっていったためである。水平地盤上の残留沈下量ではステップ 1 からステップ 3 にかけて左側の DV4 が 0.02～0.03m だったのに対し、DV5 が 0.01～0.09m で右側の方が大きかった。

法尻における各ステップの累積水平変位量を図 2.3.23 に示す。なお、変位量は図左方向を正としている。水平変位量は堤体右側の DH2 が堤体左側の DH1 に比べ、各ステップで約 1.3～1.5 倍程度大きかった。

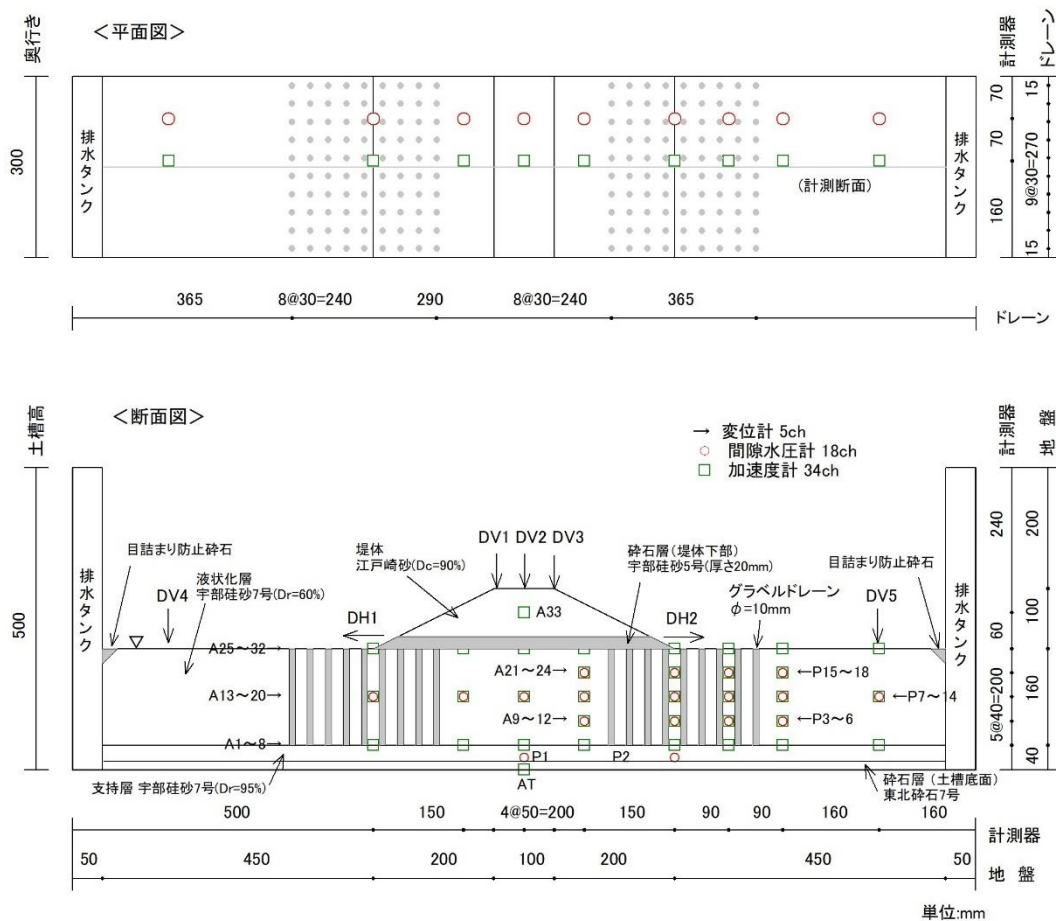


図 2.2.1 シリーズ 1 の実験模型例（ケース 1-3、寸法は模型スケール）（再掲）

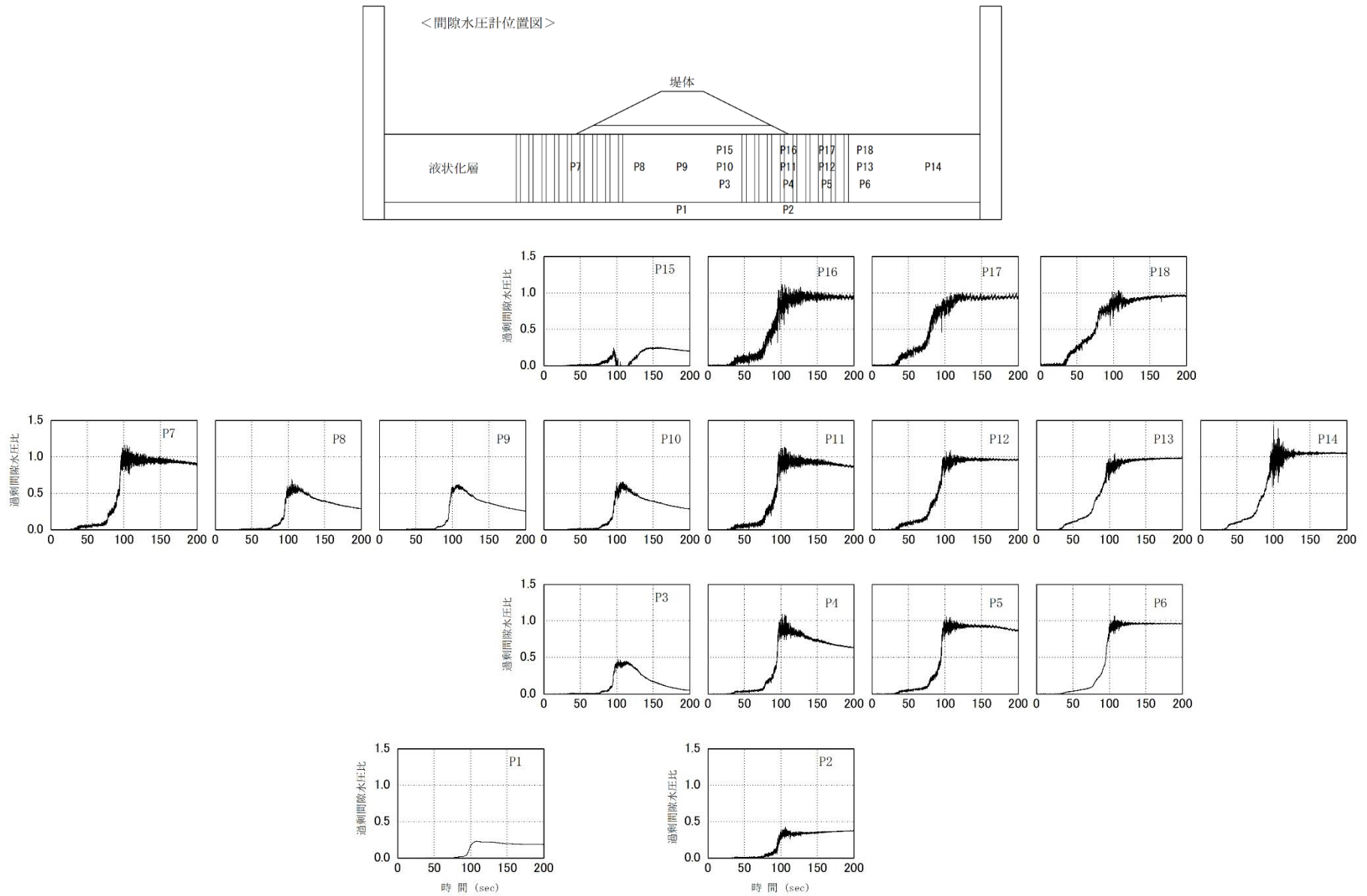


図 2.3.19 ケース 1-3 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

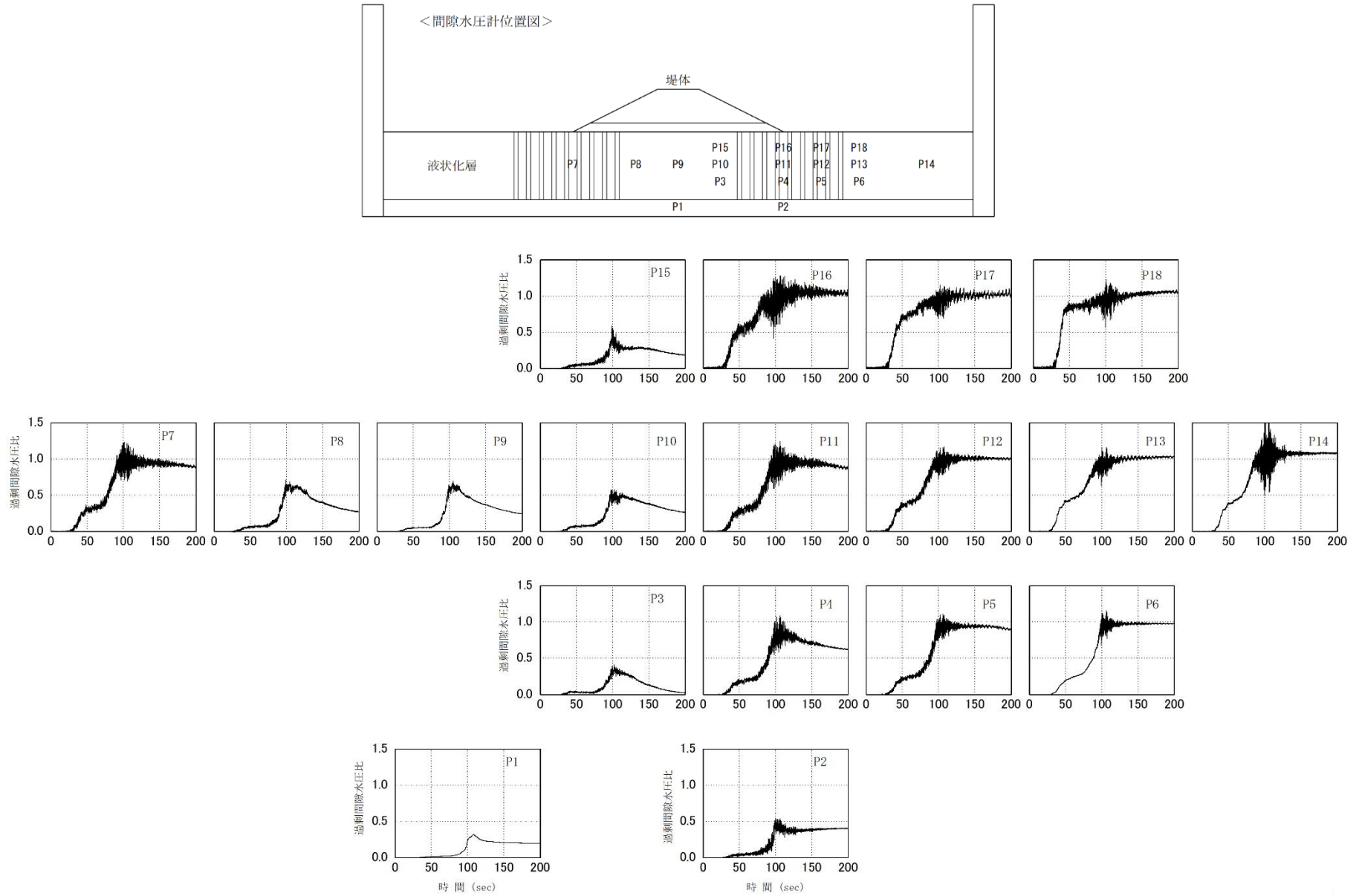


図 2.3.20 ケース 1-3 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

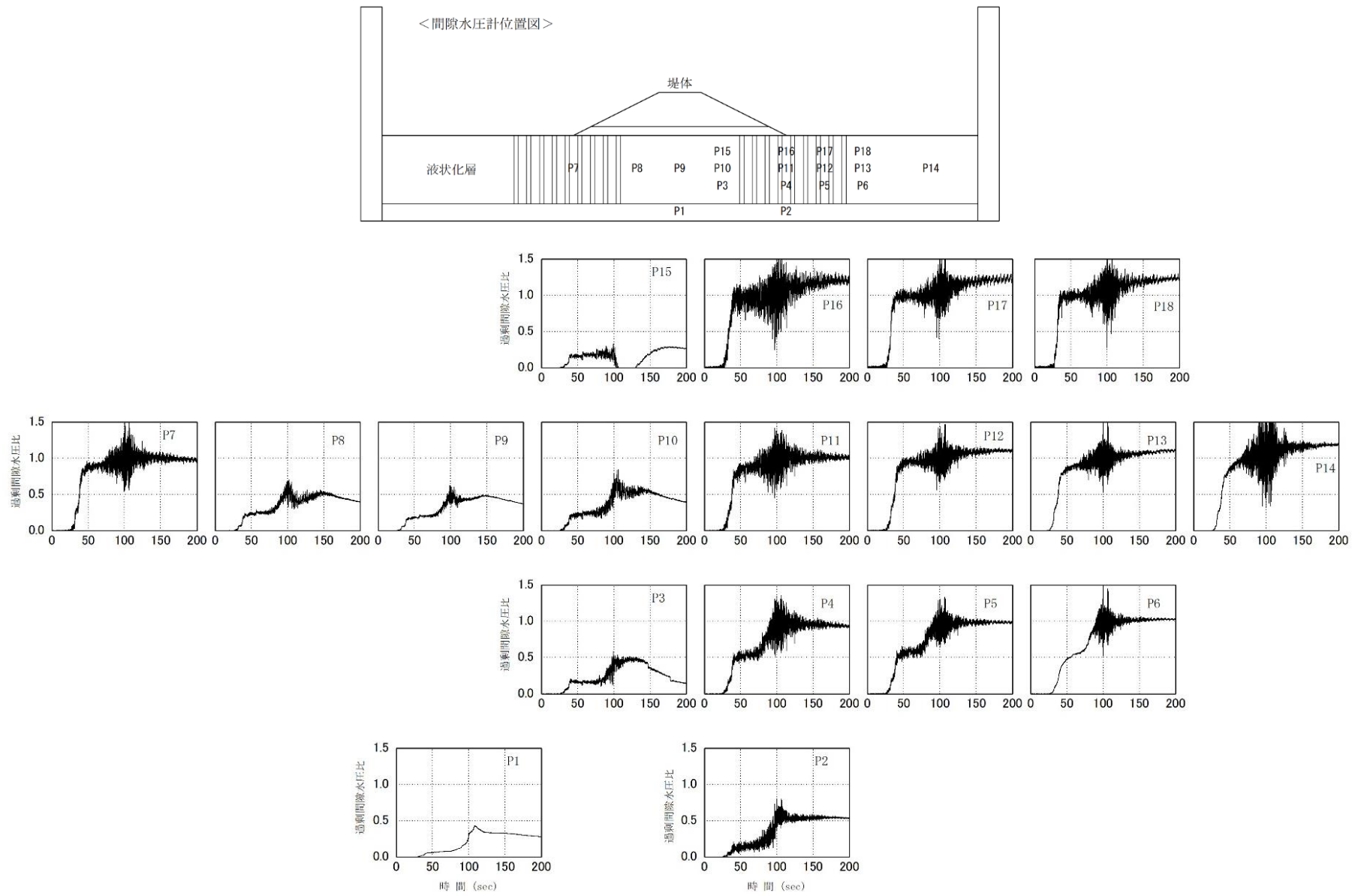
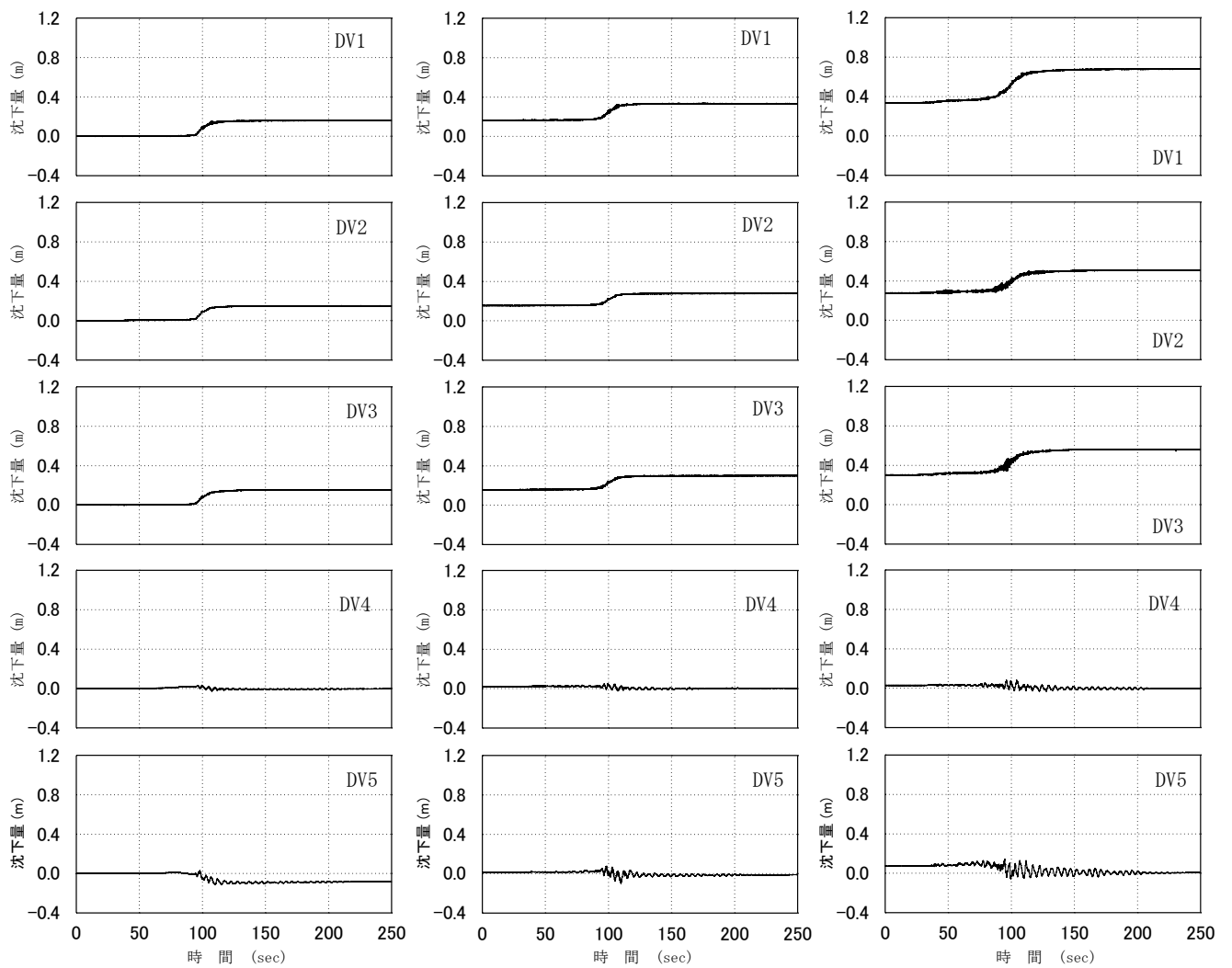
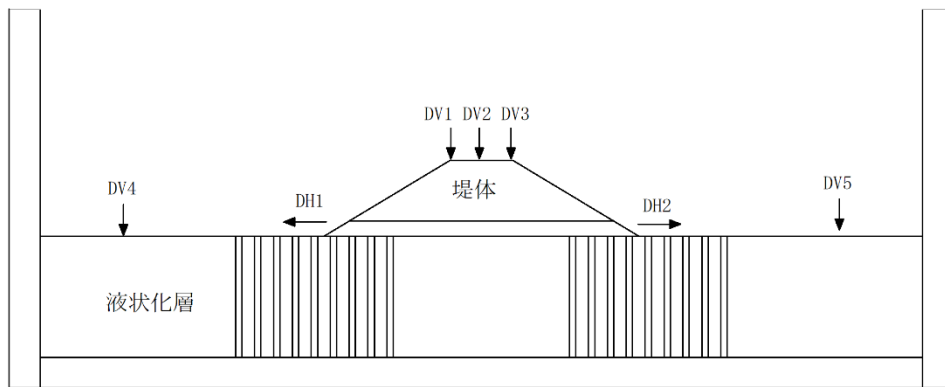


図 2.3.21 ケース 1-3 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴



(a) ステップ 1

(b) ステップ 2

(c) ステップ 3

図 2.3.22 ケース 1-3 における各ステップの累積沈下量

表 2.3.3 ケース 1-3 における残留沈下量および残留水平変位量

ステップ	残留沈下量 (m)					残留水平変位量 (m)	
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DH1	DH2
1	0.164	0.154	0.155	0.022	0.014	-0.216	0.284
2	0.337	0.279	0.302	0.028	0.073	-0.467	0.673
3	0.684	0.514	0.567	0.033	0.091	-0.686	1.064

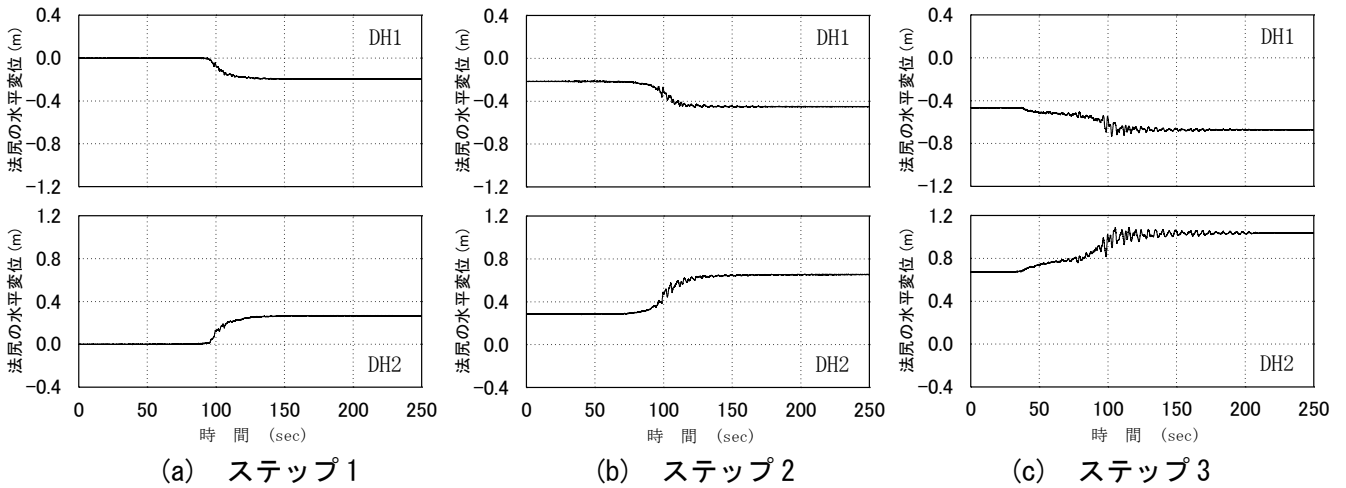
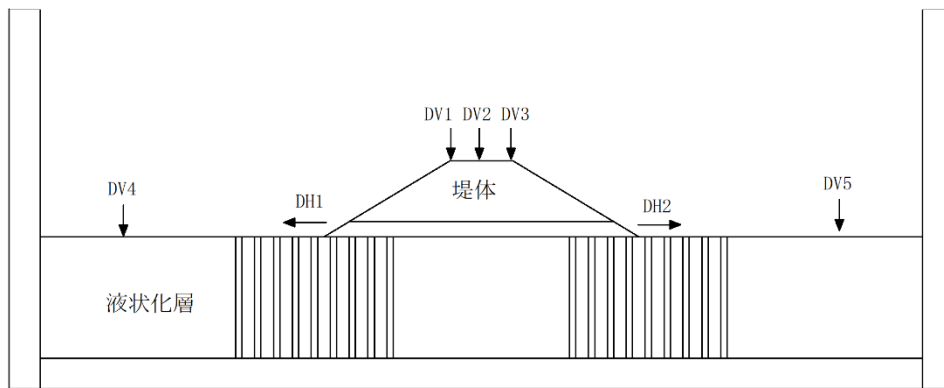
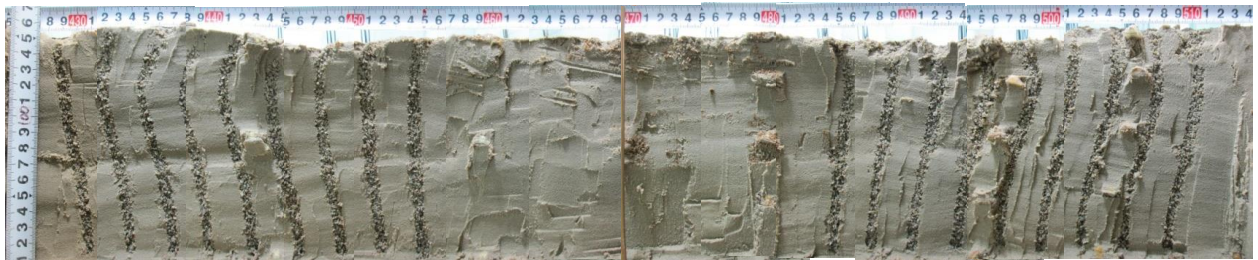


図 2.3.23 ケース 1-3 における各ステップの累積水平変位量 (図左方向が正)



(a) 堤体



(b) 液状化層（グラベルドレーン）

写真 2.3.5 ケース 1-3 における実験後の模型の開削断面

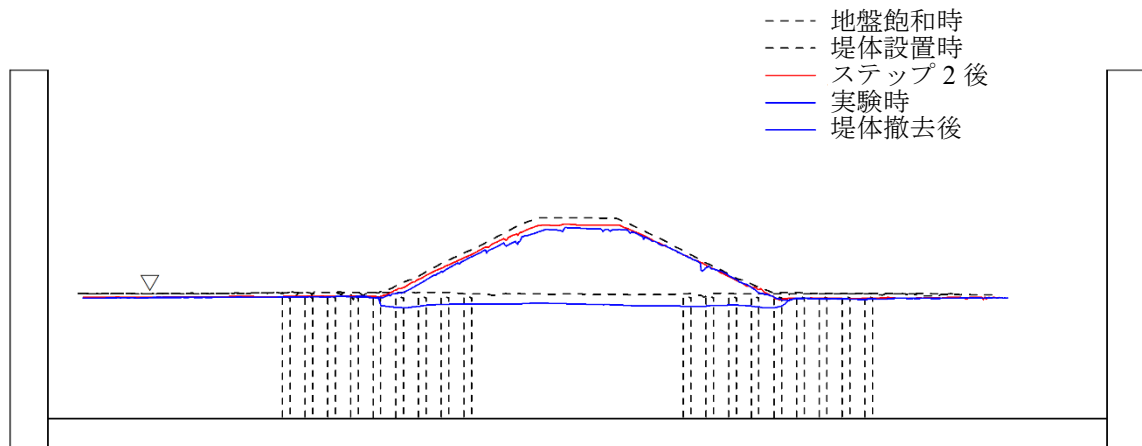


図 2.3.24 ケース 1-3 における模型の地表面形状

写真 2.3.5 に実験後の模型の開削断面を、図 2.3.24 に模型の地表面形状を、写真 2.3.6 に実験後の模型の状態を、写真 2.3.7 に実験後の水平地盤面（ドレーン箇所）の状況を示す。ドレーン箇所の水平地盤面（写真 2.3.7）からは加振時に砂まじり間隙流体の排水が確認された。

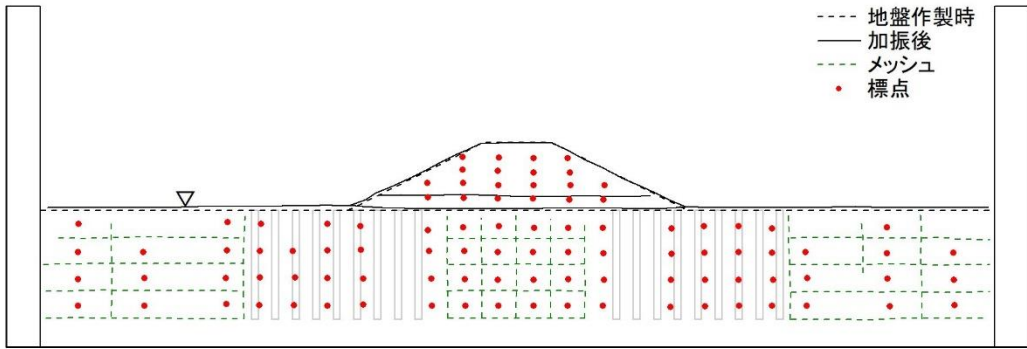
図 2.3.25 に各ステップ後の模型の変形を、図 2.3.26 に標点変位ベクトル図を示す。



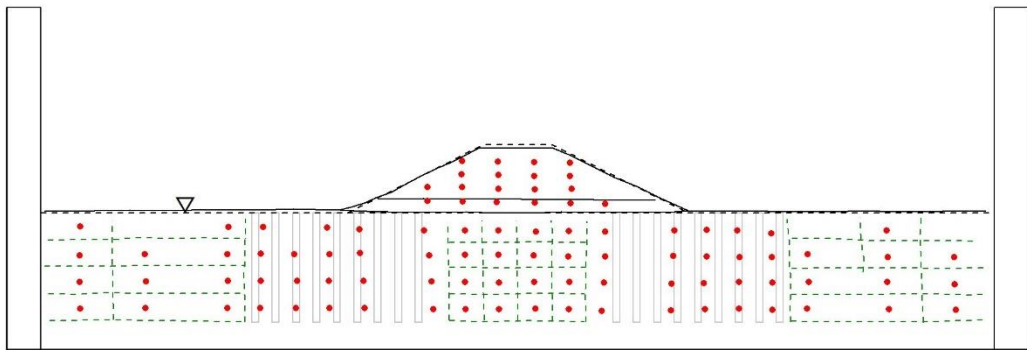
写真 2.3.6 ケース 1-3 における実験後の模型の状態（堤体真上から撮影）



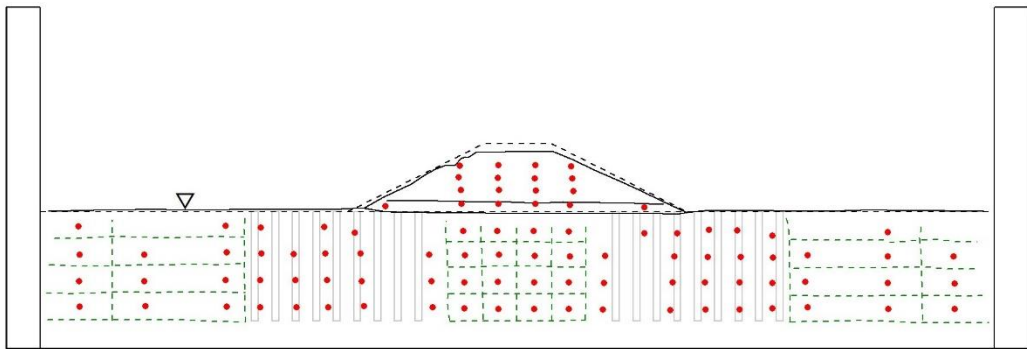
写真 2.3.7 実験後の水平地盤面（ドレーン箇所）の状況



(a) ステップ 1

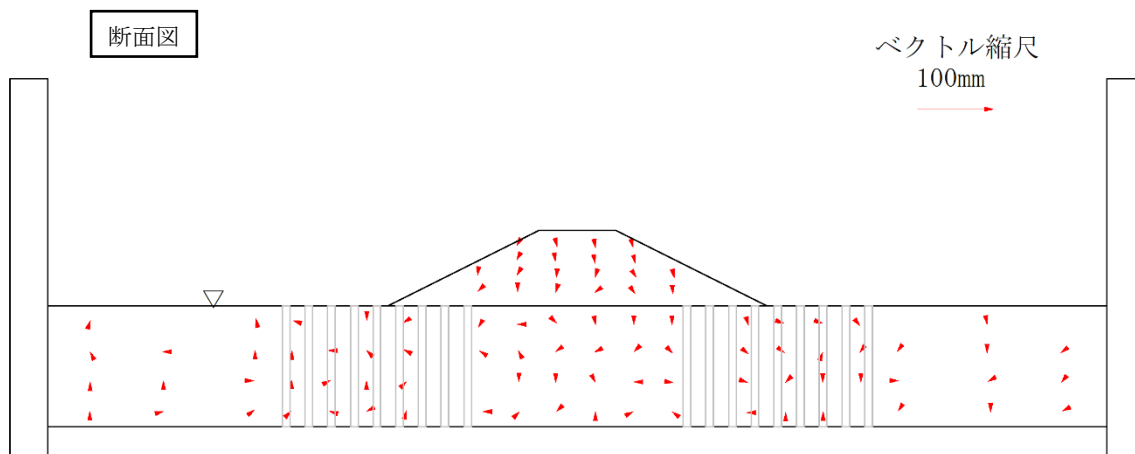
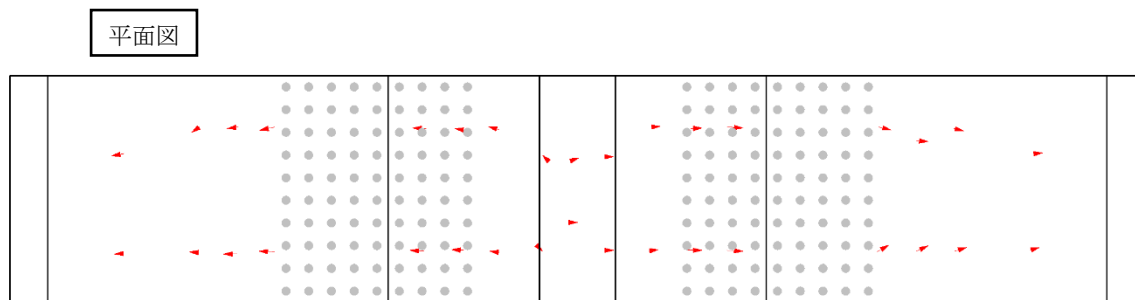


(b) ステップ 2

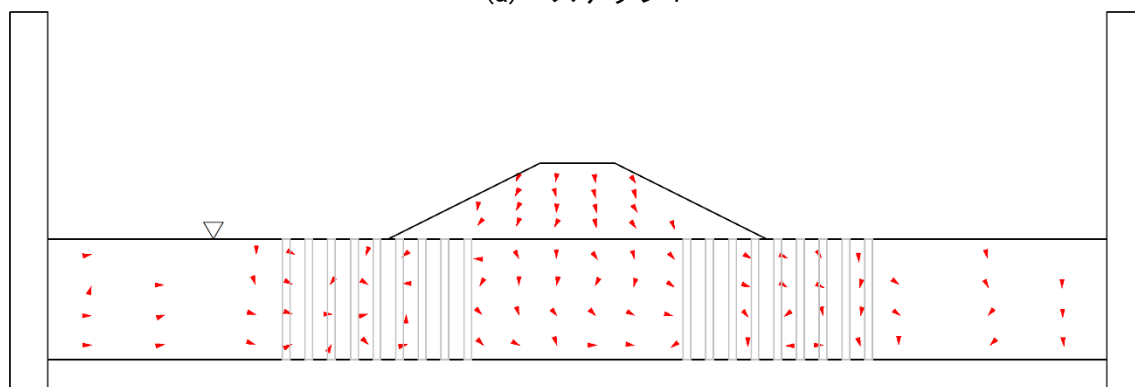


(c) ステップ 3

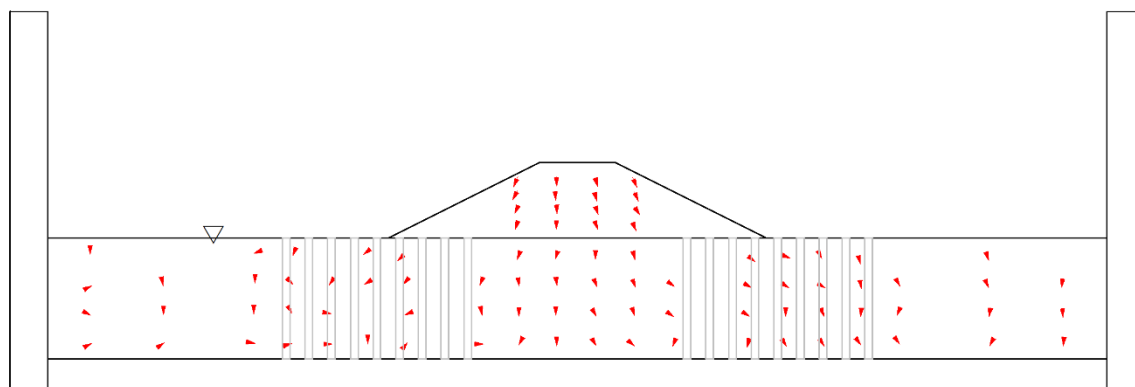
図 2.3.25 ケース 1-3 における各ステップ後の模型の変形



(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



(c) ステップ 3

図 2.3.26 ケース 1-3 における標点変位ベクトル図

2.3.4 ケース 1-4

ケース 1-4 の液状化対策工はケース 1-3 と同様に堤体の左右に配置し、ドレーン長 8m、径 0.5m、杭芯間隔 1.5m で左右各 90 本打設した（図 2.3.27、本項において本図のみ模型スケールで表記）。図 2.3.28～図 2.3.30 にステップ 1～3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。なお、P8 の水圧計はセンサーに不具合が生じたため結果から省いた。各ステップにおいて、ステップ 1 の P16～P18 を除く（ただし、ほぼ 1 に近い値）すべての水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 2.3.31 に堤体天端（DV1～3）および水平地盤上（DV4,5）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 2.3.4 にステップごとの残留沈下量および残留水平変位量を示す。

堤体天端では、ステップ 1, 2 とともに変位計間の差が 0.02m 未満となっており、計測位置による大きな差はみられない。一方、ステップ 3 では DV3 付近において多数の亀裂が発生したため、DV1, 2 より沈下量が若干（0.06～0.07m）大きかった。水平地盤上の残留沈下量ではステップ 1 からステップ 3 にかけて左側の DV4 が 0.01～0.02m だったのに対し、DV5 が 0.04～0.14m で右側の方が大きかった。

法尻における各ステップの累積水平変位量を図 2.3.32 に示す。なお、変位量は図左方向を正としている。水平変位量は堤体右側の DH2 が左側の DH1 に比べ、各ステップで約 1.1～1.2 倍程度大きかった。

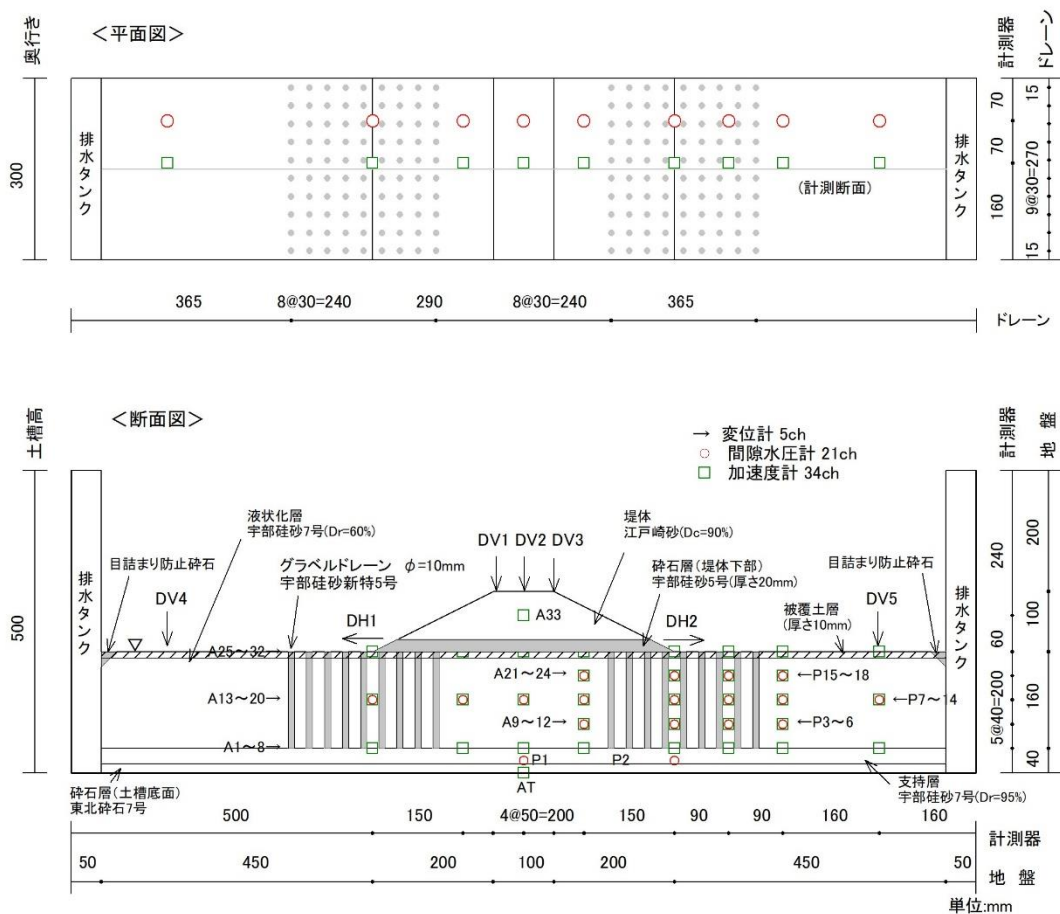


図 2.3.27 ケース 1-4 の実験模型（寸法は模型スケール）

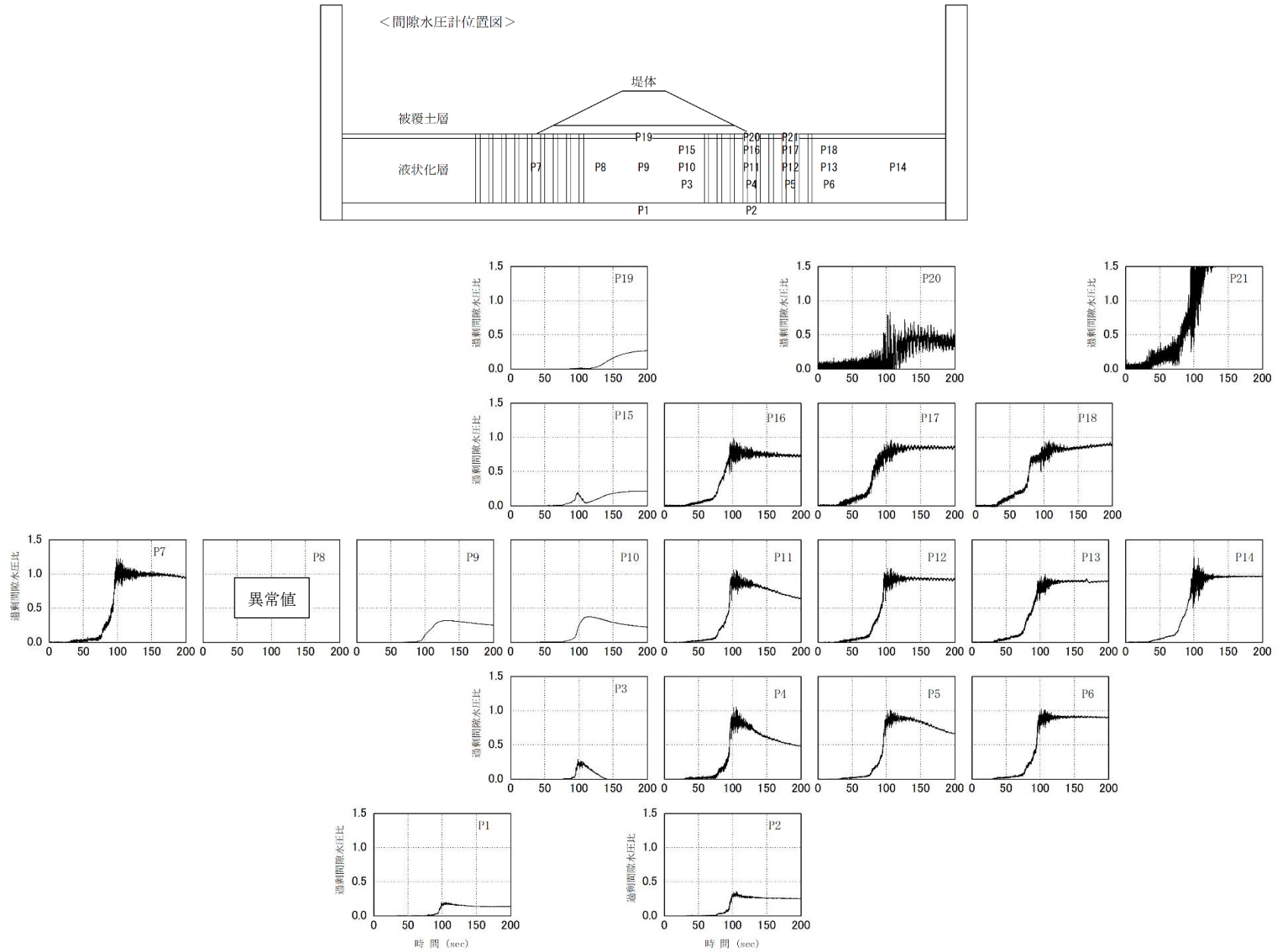


図 2.3.28 ケース 1-4 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

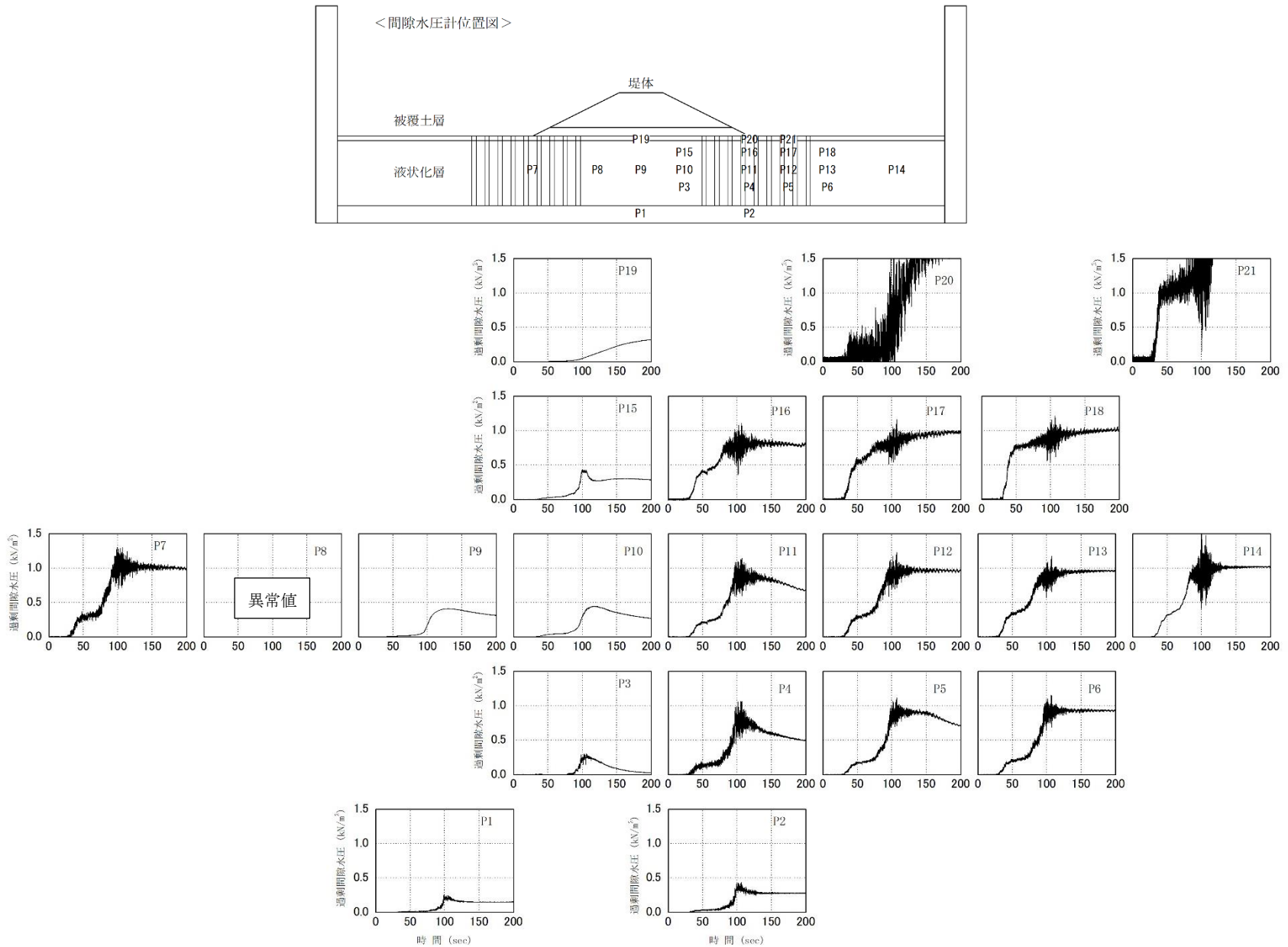


図 2.3.29 ケース 1-4 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

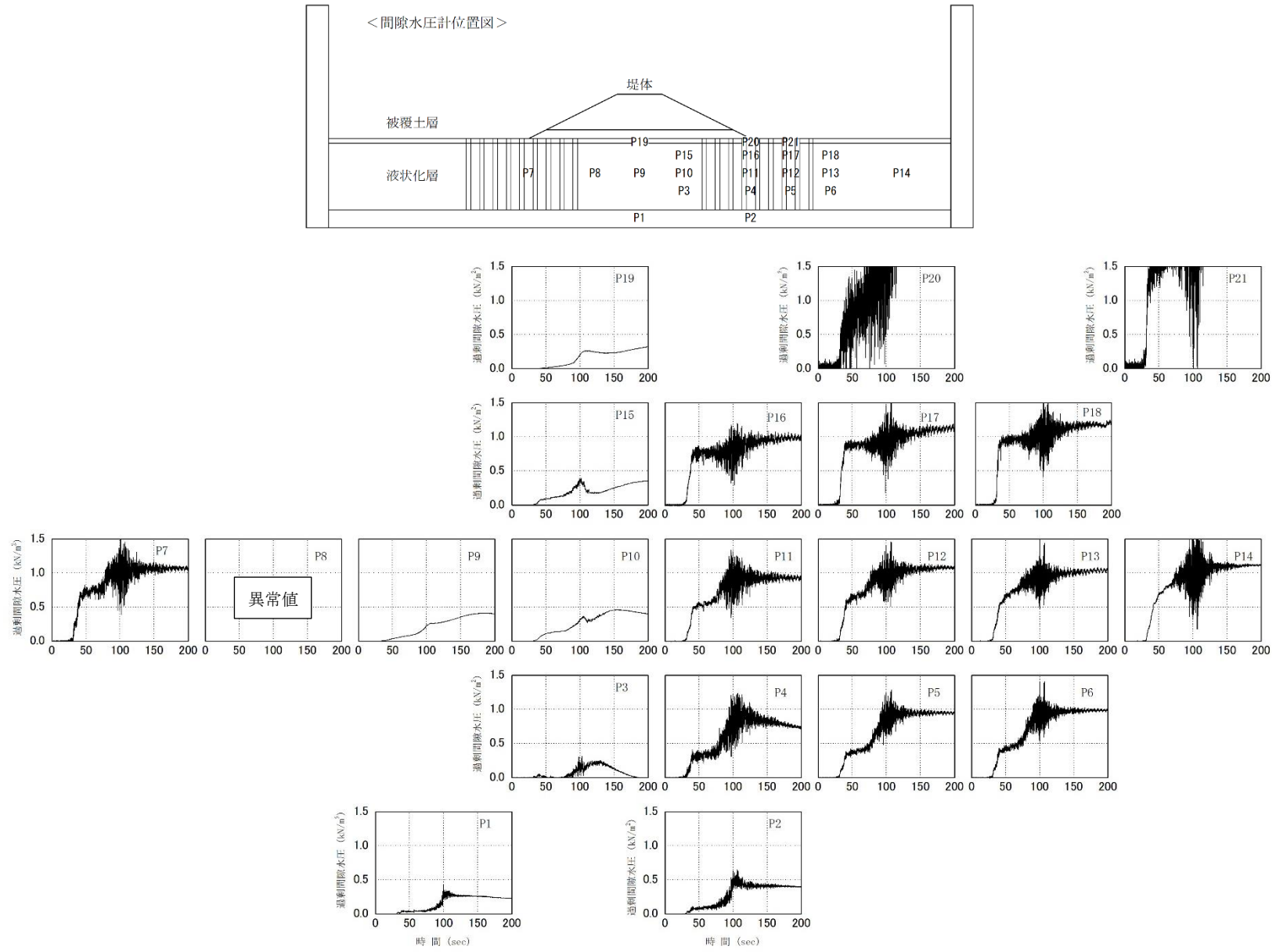


図 2.3.30 ケース 1-4 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

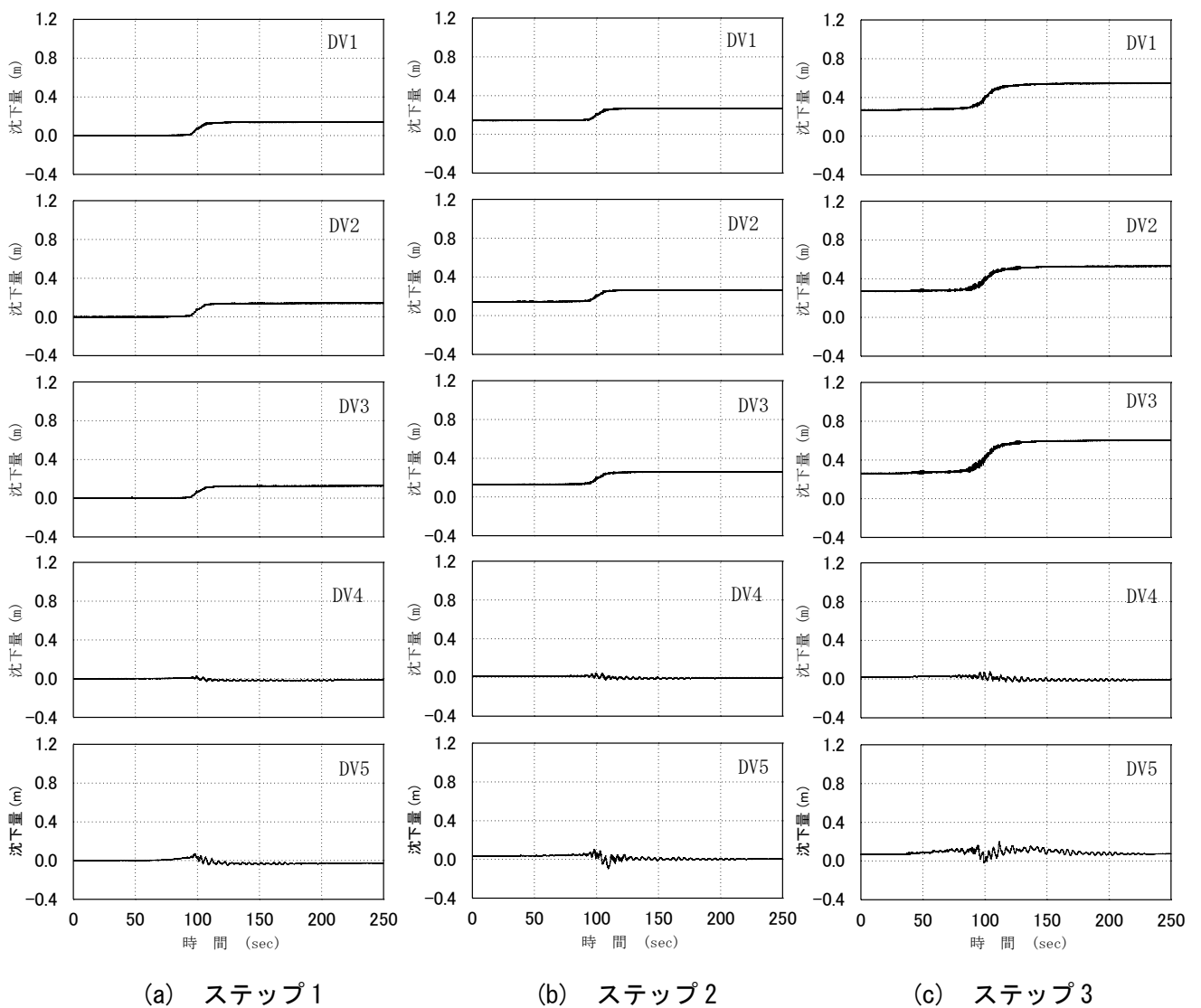
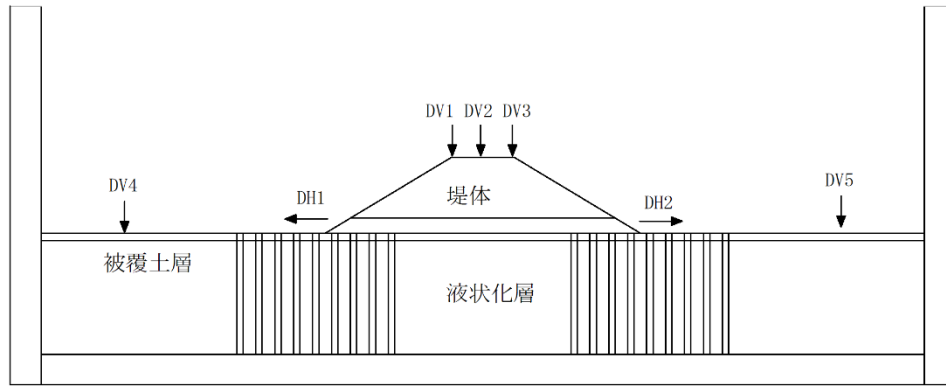


図 2.3.31 ケース 1-4 における各ステップの累積沈下量

表 2.3.4 ケース 1-4 における残留沈下量および残留水平変位量

ステップ	残留沈下量 (m)					残留水平変位量 (m)	
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DH1	DH2
1	0.142	0.144	0.130	0.013	0.035	-0.242	0.274
2	0.272	0.268	0.261	0.017	0.065	-0.439	0.546
3	0.549	0.533	0.605	0.010	0.138	-0.708	0.871

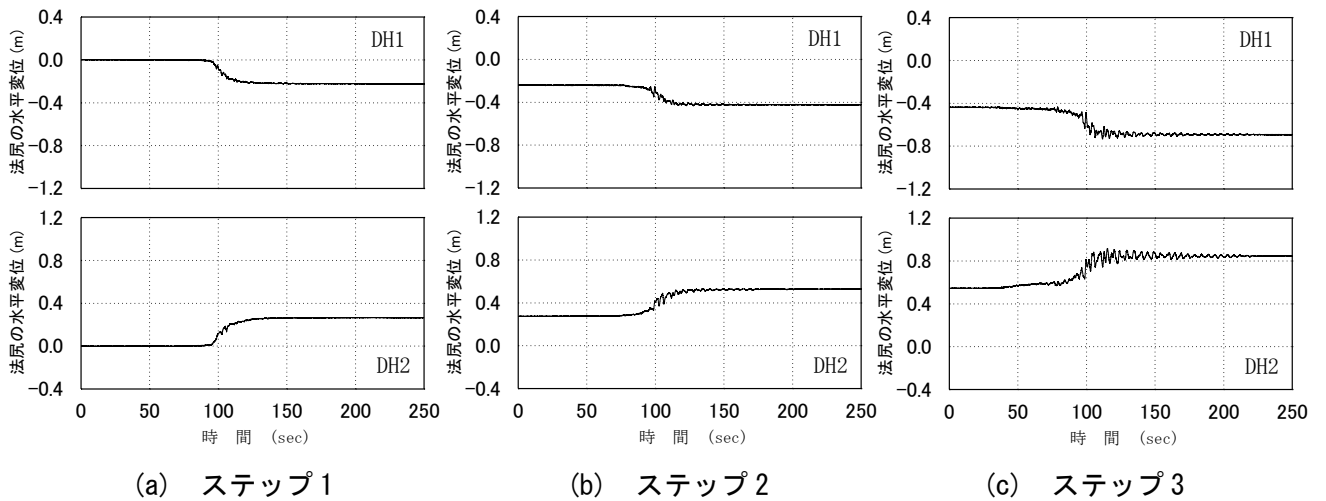
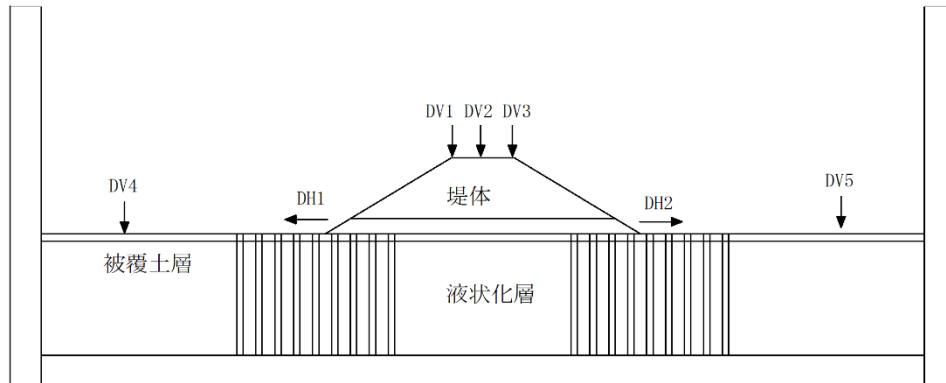


図 2.3.32 ケース 1-4 における各ステップの累積水平変位量 (図左方向为正)



(a) 堤体



(b) 液状化層 (グラベルドレーン)

写真 2.3.8 ケース 1-4 における実験後の模型の開削断面

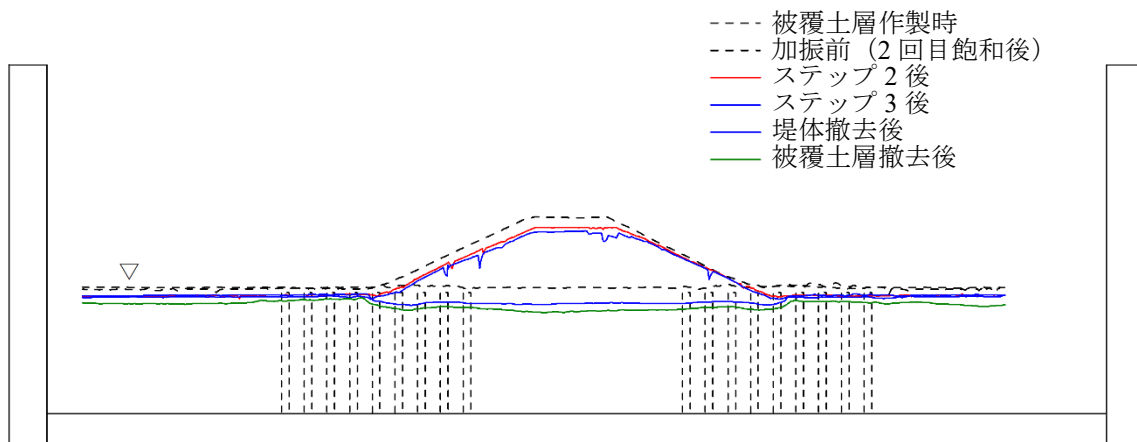


図 2.3.33 ケース 1-4 における模型の地表面形状

写真 2.3.8 に実験後の模型の開削断面を、図 2.3.33 に模型の地表面形状を、写真 2.3.9 に実験後の模型の状態を示す。

図 2.3.34 に各ステップ後の模型の変形を、図 2.3.35 に標点変位ベクトル図を示す。

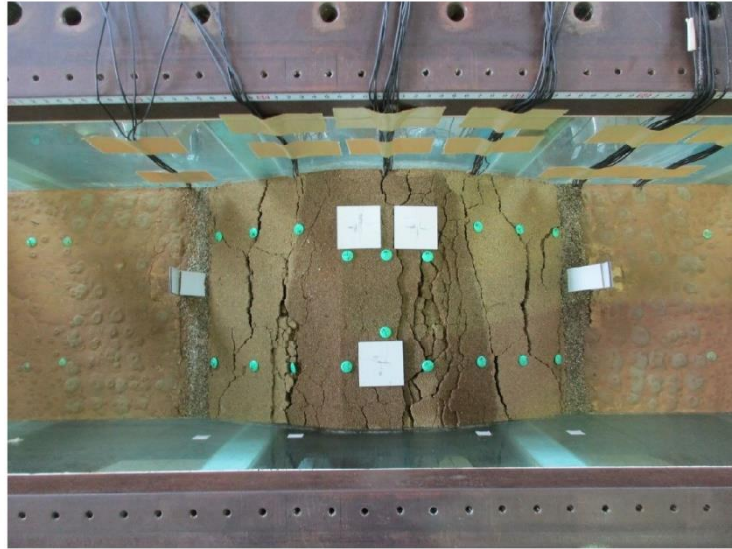
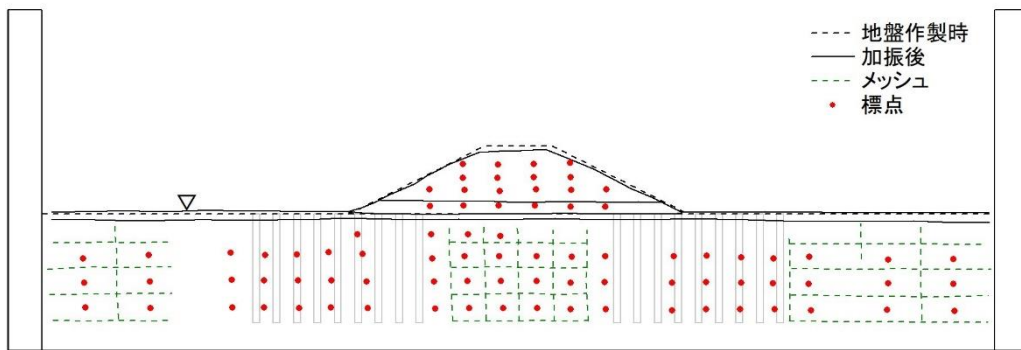
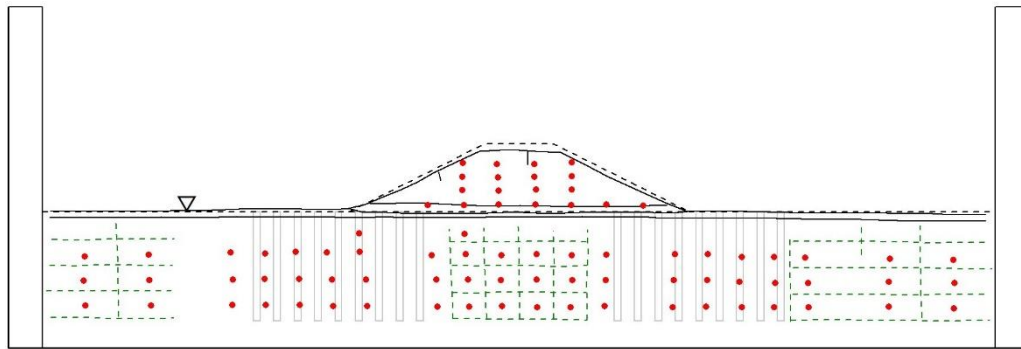


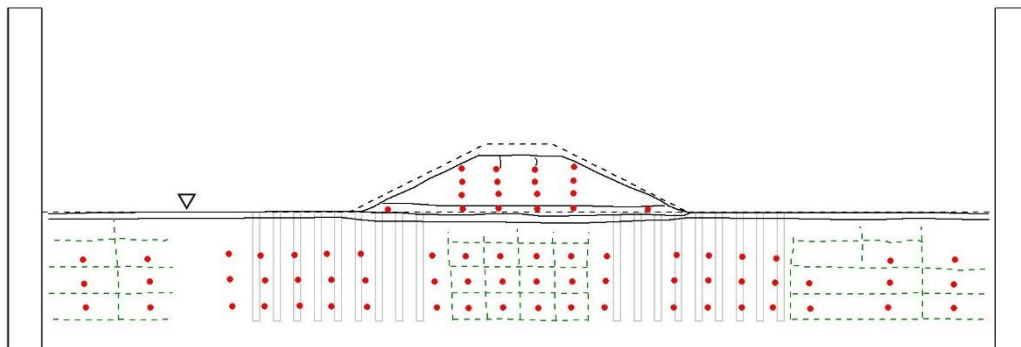
写真 2.3.9 ケース 1-4 における実験後の模型の状態（堤体真上から撮影）



(a) ステップ 1

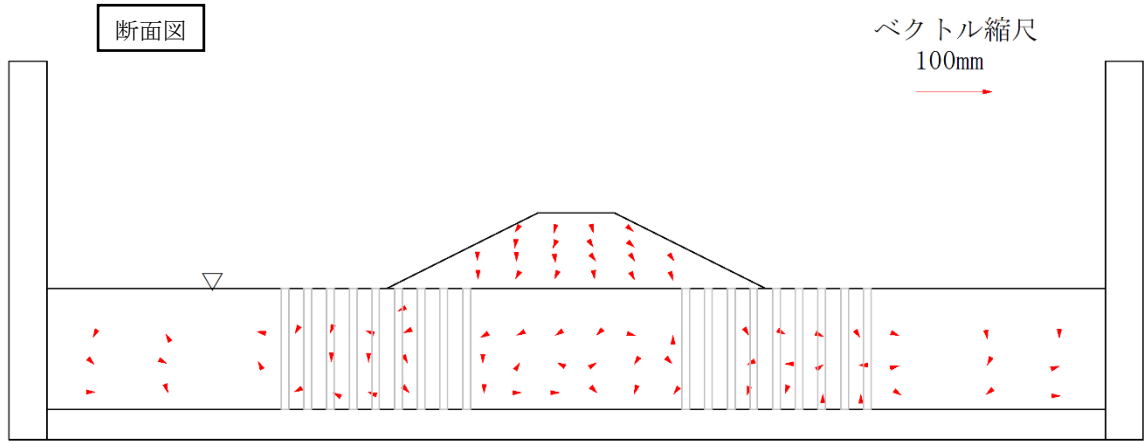
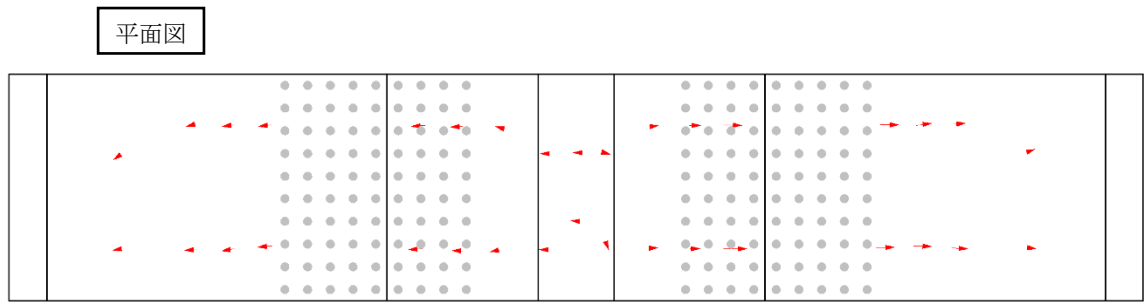


(b) ステップ 2

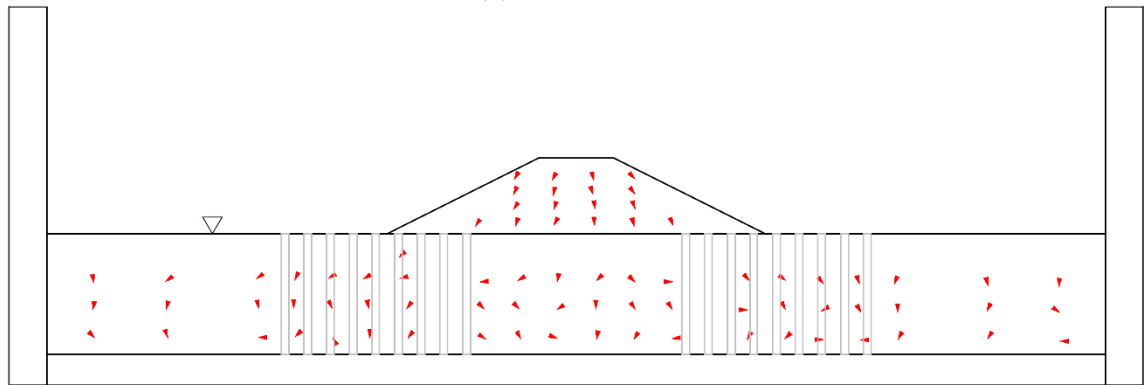


(c) ステップ 3

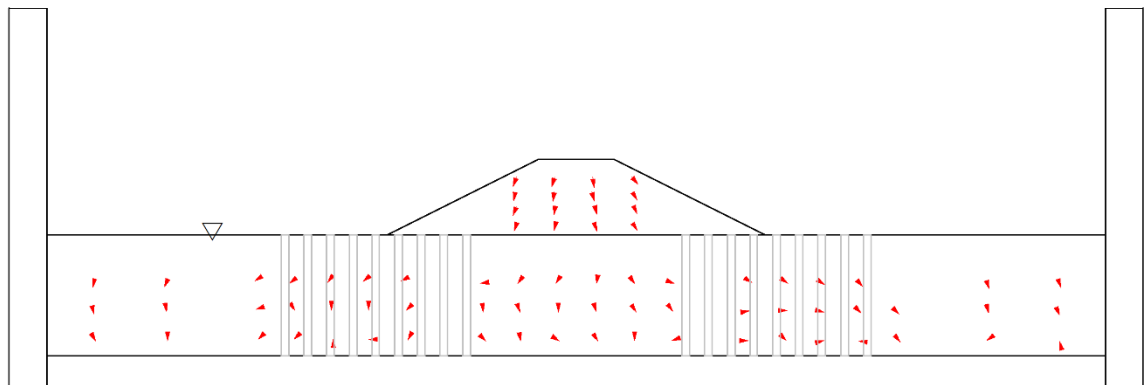
図 2.3.34 ケース 1-4 における各ステップ後の模型の変形



(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



(c) ステップ 3

図 2.3.35 ケース 1-4 における標点変位ベクトル図

2.4 結果のまとめ

図 2.4.1、図 2.4.2 にケース 1-1 とケース 1-3 の過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。図 2.4.1 より、グラベルドレーンを施したケース 1-3 は全体的に過剰間隙水圧比の最大値がケース 1-1 と同程度またはそれ以上となっている。また、過剰間隙水圧比の最大値に達するまでの時間は全体的にケース 1-1 とケース 1-3 で同程度となっているが、過剰間隙水圧比が上昇し始める時間は P5, P6 のようにケース 1-3 の方が早くなっている。これらは、ケース 1-1 はケース 1-3 よりも地盤の飽和が不十分であったことが影響していると考えられる。図 2.4.2 より、ドレーンの中に設置した水圧計は P7, P12 のようにケース 1-1 よりも早い時間に過剰間隙水圧比が減少し始める箇所も確認された。

液状化層の飽和方法をケースごとに改善し、徐々に加振時に見られる気泡が減少したものの、気泡自体はなくならなかった。これよりいずれのケースでも飽和が不十分であったと考えられる。試行錯誤を行ったもののこれ以上の飽和方法の改善は難しく、液状化層の材料選定に課題があったと考えられる。



2-45

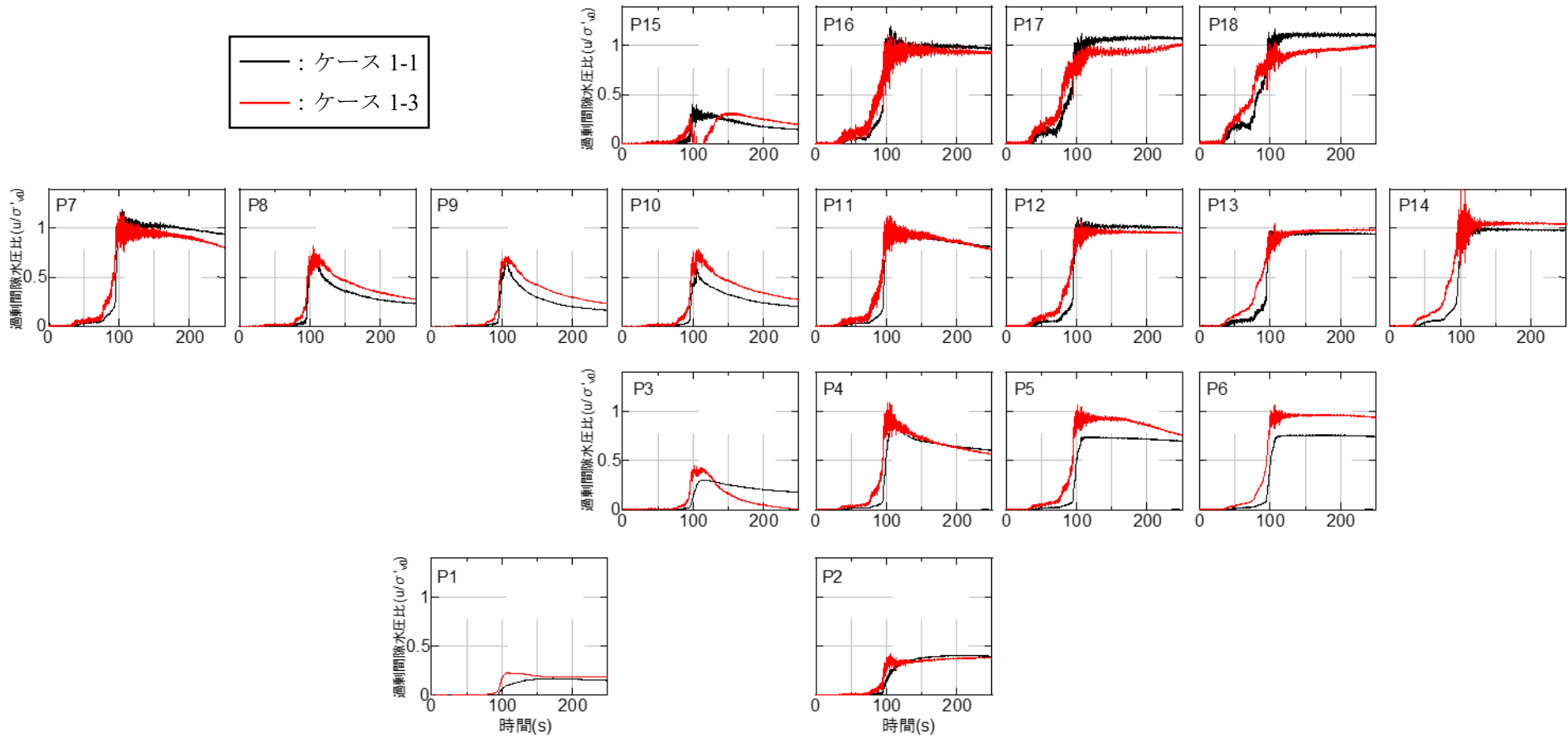


図 2.4.1 ケース 1-1 およびケース 1-3 のステップ 1 における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較



2-46

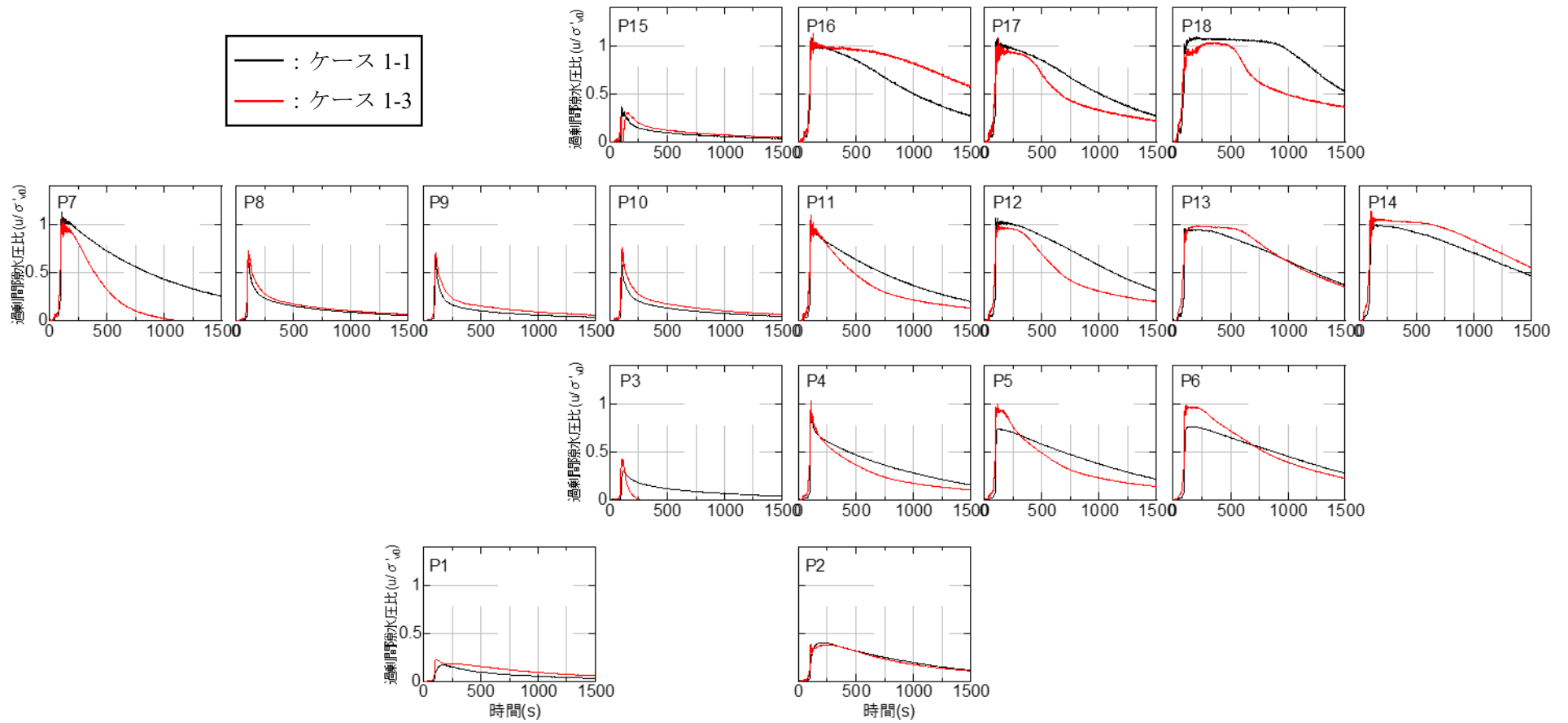


図 2.4.2 ケース 1-1 およびケース 1-3 のステップ 1 における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較（過剰間隙水圧消散過程まで）

ケース 1-1 とケース 1-3 における実験後の模型の地表面形状比較を図 2.4.3 に、各ステップの累積沈下量の比較を図 2.4.4 に示す。図 2.4.3、図 2.4.4 より、堤体の地表面形状および沈下量に着目するとケース 1-1、ケース 1-3 で大きな差はなく、ドレーンによる効果が十分にはみられなかった。

グラベルドレーンが十分な効果を発揮しなかった原因として、排水が十分にできていないことが考えられる。排水が十分にできていない原因としては3つ考えられる。1つ目はドレーン内部に液状化層の砂が入り込み目詰まりを起こしたことである。2つ目はドレーンの液状化層との境界の凹凸に液状化層の砂が入り込むことで、ドレーンの有効径が細くなることである。遠心模型では、ドレーン径に対するドレーン材の粒径の比が極端に大きいため、実際のグラベルドレーンに比べると影響が大きい。3つ目はドレーン内部を砂まじりの間隙流体が流れたことである。砂が混じっていない間隙流体に比べ、砂まじりの間隙流体は流れにくいと考えられる。ドレーン径に対しドレーン材の粒径が極端に大きいため、ドレーン内の粒子数は少ない。粒子数が少なければ、材料としてフィルター基準を満足していたとしても、フィルターとしての機能が発揮できず、ドレーン内を砂まじりの間隙流体が流れることが考えられる。

そこで、実験後にドレーンの開削調査を行い、ドレーン内部の状態を観察し、ドレーン材の粒度試験を実施した。ドレーン内部ではドレーン材の表面に液状化層の砂が付着している程度で、ドレーン材の間隙に液状化層の砂が充填された状態は確認できなかった。実験後のドレーン材の粒形加積曲線（図 2.4.5）をみても、実験後の 0.425mm 以下の粒径における通過百分率が若干大きくなっている程度であり、目詰まりは生じていないと考えられる。

一方で、ドレーンの液状化層との境界の凹凸に液状化層の砂が入り込みドレーンの有効径が減少している状態は確認できた。

3つ目の砂まじりの間隙流体に関しては、写真 2.3.7 に示すようにドレーン直上の地表面で砂溜りが徐々に大きくなる様子を加振中に確認しており、ドレーン内を砂まじりの間隙流体が流れていたと考えられる。

以上より、本シリーズにおいては、液状化層の砂の混入によりドレーンの有効径が細くなったことと、砂まじりの間隙流体が流れたことにより、十分な排水ができず、グラベルドレーンが十分な効果を発揮しなかったこと等が考えられる。

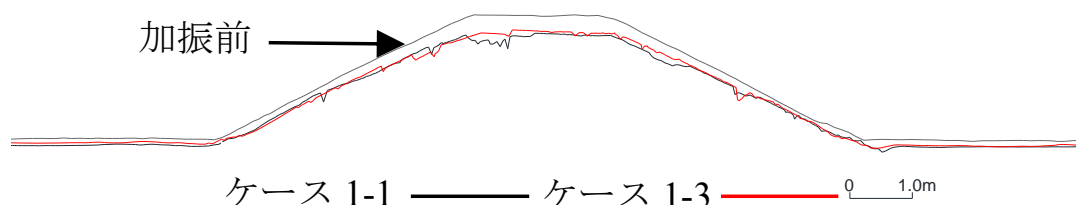


図 2.4.3 ケース 1-1 および 1-3 における実験後の模型の地表面形状比較

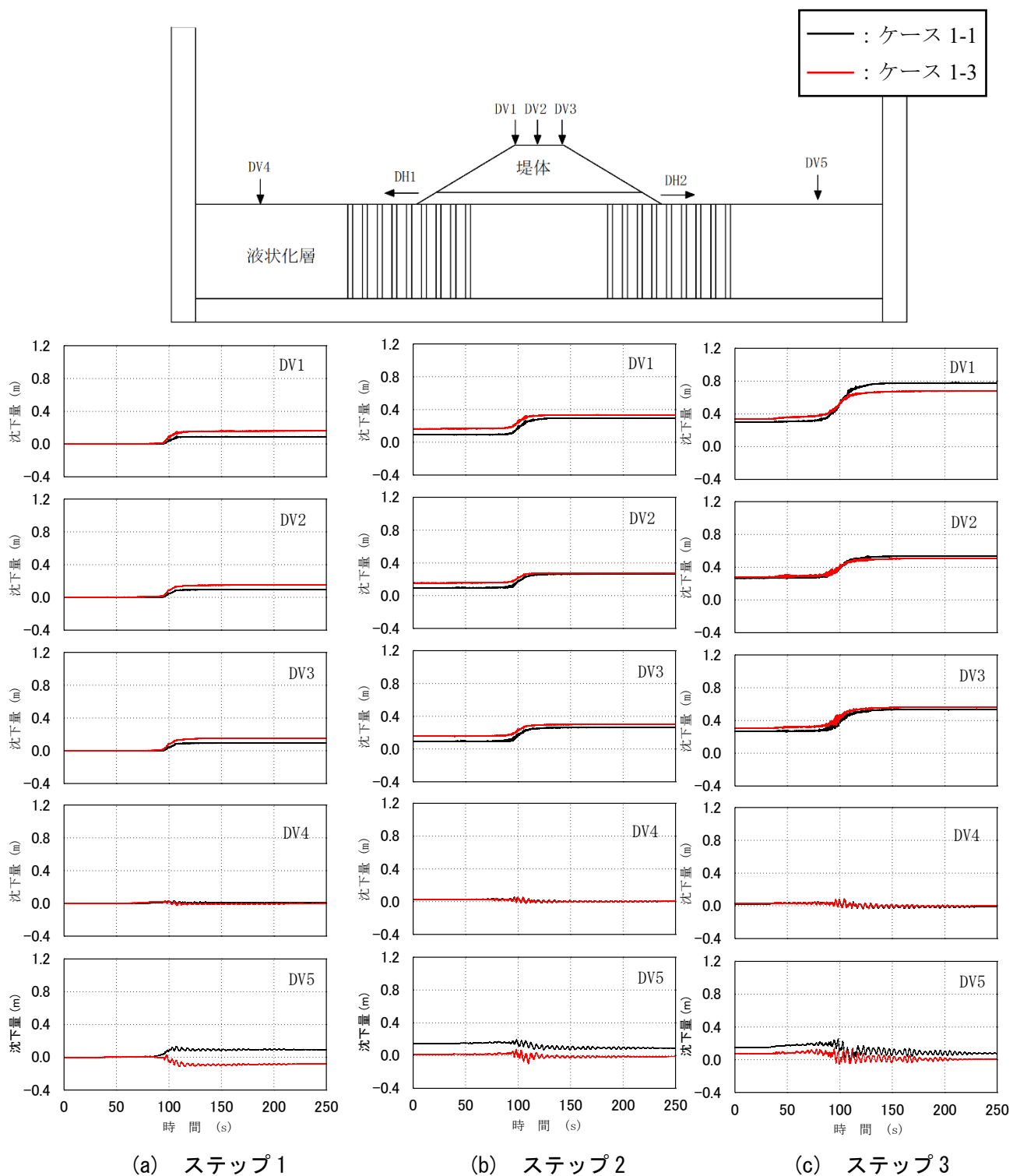


図 2.4.4 ケース 1-1 およびケース 1-3 における各ステップの累積沈下量の比較

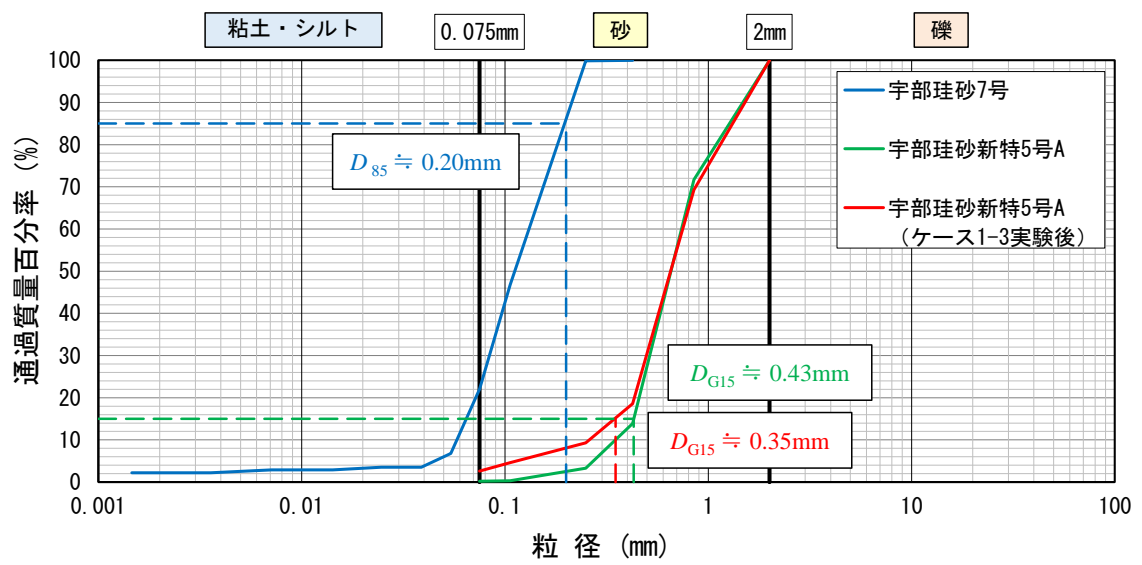


図 2.4.5 ケース 1-3 実験前後のドレーン材（宇部珪砂新特 5 号）の粒径加積曲線



写真 2.3.7 実験後の水平地盤面（ドレーン箇所）の状況（再掲）

3. 実験シリーズ 2

3.1 実験の目的

シリーズ 1 においてグラベルドレーンが十分な効果を発揮しなかった原因として、模型のドレーン中の粒子の数が実際のドレーンに比べ遥かに少ない状態であるため、砂まじりの間隙流体がドレーン内を流れることで想定よりも透水性が低下していたこと、ドレーンの有効径の減少率が大きくなる影響を受けたこと等が考えられる。

このようなシリーズ 1 の結果を踏まえると、グラベルドレーンの径を太くしてドレーン内の粒子の数を増やせば、効果が発揮されると考えられる。そこでシリーズ 2 では、グラベルドレーンの径と効果の関係を把握することを目的の 1 つとした。

2 つ目の目的は、グラベルドレーン自体が間隙水圧の上昇を起こしていないかを把握することである。グラベルドレーン内に間隙水圧計を平面的に複数設置できる大きさとして、液状化層からの排水の影響も含めて検討した。

3.2 実験条件

3.2.1 実験模型

実験模型として液状化層厚 8m を想定し、50G の遠心重力場において図 3.2.1 のような模型を用いて実験を行った。なお、排水タンクの液状化層表面の位置には排水穴があるため、目詰まり防止のため排水穴周辺部のみ碎石に置換し、液状化層と碎石の間は不織布を敷き地盤材料が混入しないよう配慮した。

本シリーズでは、堤体の変形には着目せず、水平地盤の液状化に及ぼす影響を把握するため、堤体を設置せずに実験を行った。

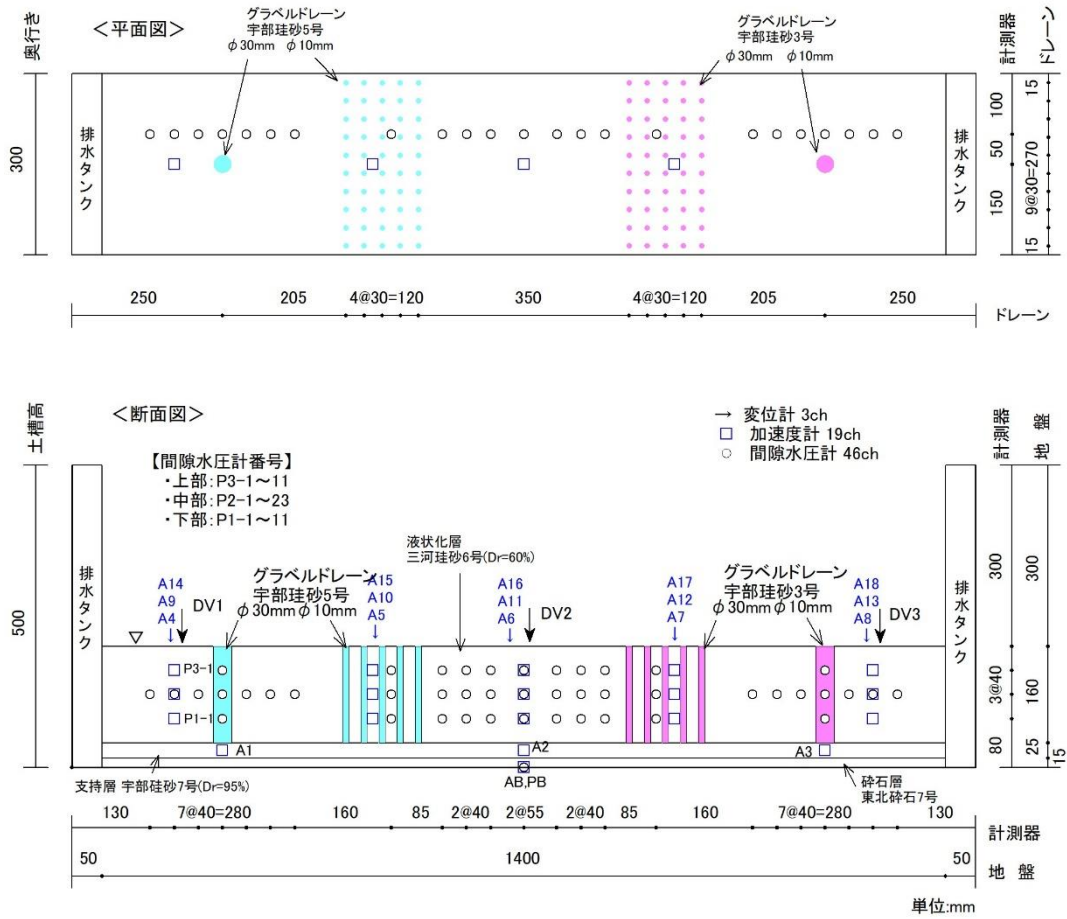


図 3.2.1 シリーズ 2 の実験模型例 (ケース 2-1、寸法は模型スケール)

3.2.2 実験ケース

実験ケースを表 3.2.1 に示す。シリーズ 2 では、液状化対策工（グラベルドレーン）の種類や水位を変化させ 4 ケース実施した。グラベルドレーンのドレーン長は液状化層厚と同じ 8m とした。また、間隙流体には、遠心加速度（50G）に対応し、粘性を 50 倍に調整したメトローズ水溶液（信越化学工業株式会社製）を使用した。

表 3.2.1 シリーズ 2 の実験ケース（寸法は実スケール）

ケース	遠心加速度	地下水位	間隙流体	液状化対策工		
				土槽左側	土槽中央	土槽右側
2-1	50G	水平地盤面 (GL 0m)	メトローズ 水溶液 (※)	グラベルドレーン左1本 ドレーン長： 8m ドレーン径： 1.5m	—	グラベルドレーン左1本 ドレーン長： 8m ドレーン径： 1.5m
2-2		GL-1m		グラベルドレーン右50本 杭芯間隔： 1.5m ドレーン長： 8m ドレーン径： 0.5m		グラベルドレーン右50本 杭芯間隔： 1.5m ドレーン長： 8m ドレーン径： 0.5m
2-3		水平地盤面 (GL 0m)		グラベルドレーン 左右中央各1箇所（置換） 縦8m×横7.5m×奥行1.5m		
2-4				グラベルドレーン 4本 杭芯間隔： 15m ドレーン長： 8m ドレーン径： 7.5m	グラベルドレーン 24本 杭芯間隔： 3m ドレーン長： 8m ドレーン径： 1.5m	グラベルドレーン 8本 杭芯間隔： 9m ドレーン長： 8m ドレーン径： 4.5m

※粘性は水の50倍

3.2.3 地盤材料とドレーン材

各ケースにおける模型の地盤材料を表 3.2.2 に、その物性値を表 3.2.3 に示す。2 章に記載したとおり、シリーズ 1 では加振時に地盤中から気泡が確認されたことからケースごとに液状化層の飽和方法を改善し、徐々に気泡は減少したものの、気泡自体はなくならなかった。このことからシリーズ 2 では液状化層の地盤材料を変更し、宇部珪砂 7 号よりも粒度の粗い三河珪砂 6 号を用いた。

図 3.2.2 に液状化層に使用した三河珪砂 6 号とドレーン材に使用した宇部珪砂 3 号、宇部珪砂 5 号、碎石 7 号の粒径加積曲線を示す。液状化層およびドレーン材に使用する材料はフィルター基準 ($D_{G15} / D_{85} < 9^4$) を満足するよう選定した（図 3.2.2、表 3.2.4）。

ここで、 D_{85} ：液状化層材料の通過質量百分率 85%のときの粒径

D_{G15} ：ドレーン材の通過質量百分率 15%のときの粒径

表 3.2.2 シリーズ 2 の各ケースにおける模型の地盤材料

ケース	ドレーン材			液状化層	支持層	碎石層
	土槽左側	土槽中央	土槽右側			
2-1	宇部珪砂 5号	—	宇部珪砂3号	三河珪砂 6号 ($D_r = 60\%$)	宇部珪砂 7号 ($D_r = 95\%$)	東北碎石 7号
2-2			宇部珪砂3号			
2-3		宇部珪砂 3号	碎石7号			
2-4	宇部珪砂3号	宇部珪砂3号				

表 3.2.3 シリーズ2の各地盤材料の物性値

物性値		地盤材料	三河珪砂 6号	宇部珪砂 5号	宇部珪砂 3号	碎石7号	宇部珪砂 7号
		地盤種別	液状化層	ドレーン材			支持層
一般	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.663	2.634	2.635	2.688	2.630
粒度	礫分含有率 (%)		0	5.9	68.1	89.7	0
	砂分含有率 (%)		95.4	94.0	31.9	9.0	78.0
	シルト分含有率 (%)		4.6	0.1	0	1.3	19.5
	粘土分含有率 (%)		0				2.5
	均等係数 U_c		2.08	1.52	2.19	1.80	2.09
	平均粒径 D_{50} (mm)		0.230	1.23	2.58	3.21	0.110
密度最大試験 最小	最大乾燥密度 ρ_{max} (g/cm ³)		1.641	1.533	1.493	—	1.587
	最小乾燥密度 ρ_{min} (g/cm ³)		1.290	1.243	1.251	—	1.214
締固め試験	参考密度 (※) ρ (g/cm ³)		—	—	—	1.717	—
15°Cに対する透水係数 k_{15} (m/s)			1.38×10^{-4}	2.52×10^{-4}	5.33×10^{-4}	2.01×10^{-4}	—

※自然含水比の地盤材料を用いて締固め試験のA法を実施し算出

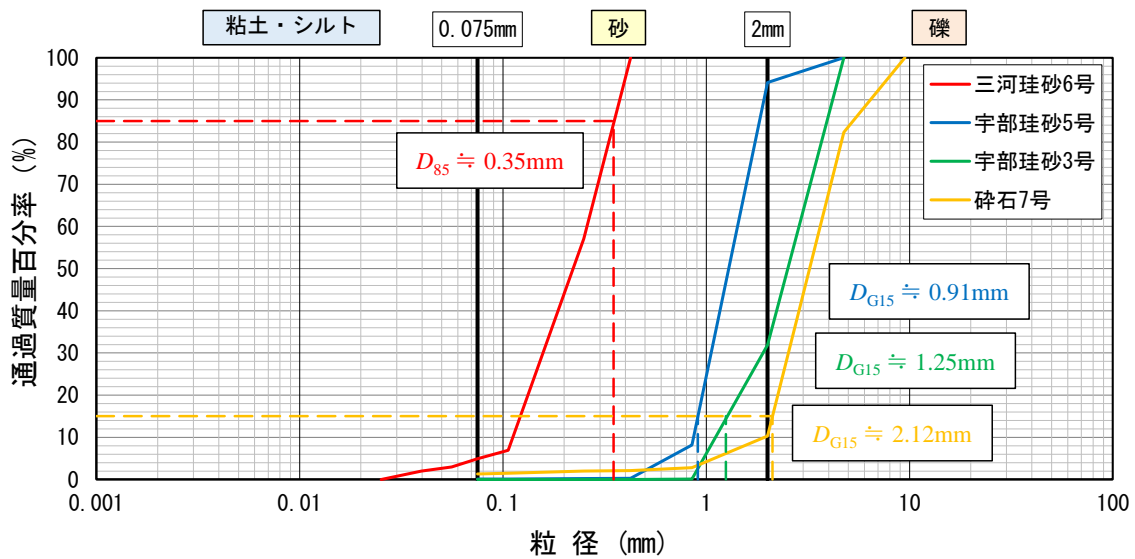


図 3.2.2 液状化層とドレーン材の粒径加積曲線および液状化層の D_{85} とドレーン材の D_{G15}

表 3.2.4 シリーズ2における D_{G15}/D_{85} の値

地盤種別	ドレーン材			液状化層
地盤材料	宇部珪砂3号	宇部珪砂5号	碎石7号	三河珪砂6号
粒径	15%粒径 D_{G15} (mm)			85%粒径 D_{85} (mm)
	1.25	0.91	2.12	0.35
D_{G15}/D_{85}	3.6	2.6	6.1	

3.2.4 地盤の飽和方法

東北砕石 7号による厚さ 75cm の砕石層を土槽底面に設け、真空槽内で模型を脱気した状態でスタンドパイプを介して底面の砕石層に間隙流体を滴下し、模型下端から間隙流体を浸透させることで飽和を行った。本シリーズでは、最も透水性の低い液状化層の材料を透水係数の高い三河珪砂 6号に変更したことにより、CO₂を使用せずとも十分に高い飽和度が確保できると判断し、シリーズ 1 から飽和方法を変更した。表 3.2.5 に各ケースにおける飽和方法を示す。

表 3.2.5 シリーズ 2 における地盤の飽和方法

ケース	浸透箇所	飽和手順
2-1	砕石層 (土槽底面)	1. 脱気 2. 通水
2-2		
2-3		
2-4		

3.2.5 測定項目

実験での測定項目を表 3.2.6 に示す。地盤側面の標点は、模型スケールで縦 40mm×横 100mm 四方のメッシュ中央を基本としてドレーンが配置されていない箇所に設置した。

表 3.2.6 シリーズ 2 の測定項目

計測器・計測物	計測位置		数量				備考
			ケース2-1	ケース2-2	ケース2-3	ケース2-4	
加速度計	地盤内		18				A1～A18
	加振テーブル		1				AT
	土槽底面		1				AB
水圧計	地盤内	下部	11	13	14	15	P1-1～P1-15
		中部	23	19	17	20	P2-1～P2-23
		上部	11	13	14	15	P3-1～P3-15
	土槽底面		1				PB
変位計	水平地盤		3		4		DV1～DV4 (鉛直)
地表面形状	地表面		一式				重力場で横断方向にレーザー測定
標点	地盤側面		一式				遠心力場で撮影した画像を解析

3.2.6 外力条件

道路橋示方書⁵⁾のレベル2タイプI地震動（I種地盤）である新晩翠橋の地表面加速度波形を、水平地盤面以下の逸散減衰を考慮し、元の振幅の0.8倍したもの（波形3）を基準として、1/2倍（波形2）・1/3倍（波形1）となる地震動波形を採用（表3.2.7）した。これらの波形を各ケースにおいてステップ1：波形1、ステップ2：波形2、ステップ3：波形3、ステップ4（ケース2-1のみ）：波形1の順に入力し、加振した。なお、堤体断面形状の測定や地盤の観察は各ステップの終了ごとに行った。

表 3.2.7 シリーズ2の加振実験で使用した入力地震動波形

名称	入力波形	備考
波形1	地震波	振幅が波形3の1/8倍
波形2		振幅が波形3の1/3倍
波形3		※

※道路橋示方書におけるレベル2地震動（タイプI）の動的解析用波形 I-I-3（I種地盤、新晩翠橋周辺地盤上NS成分）を80%に調整

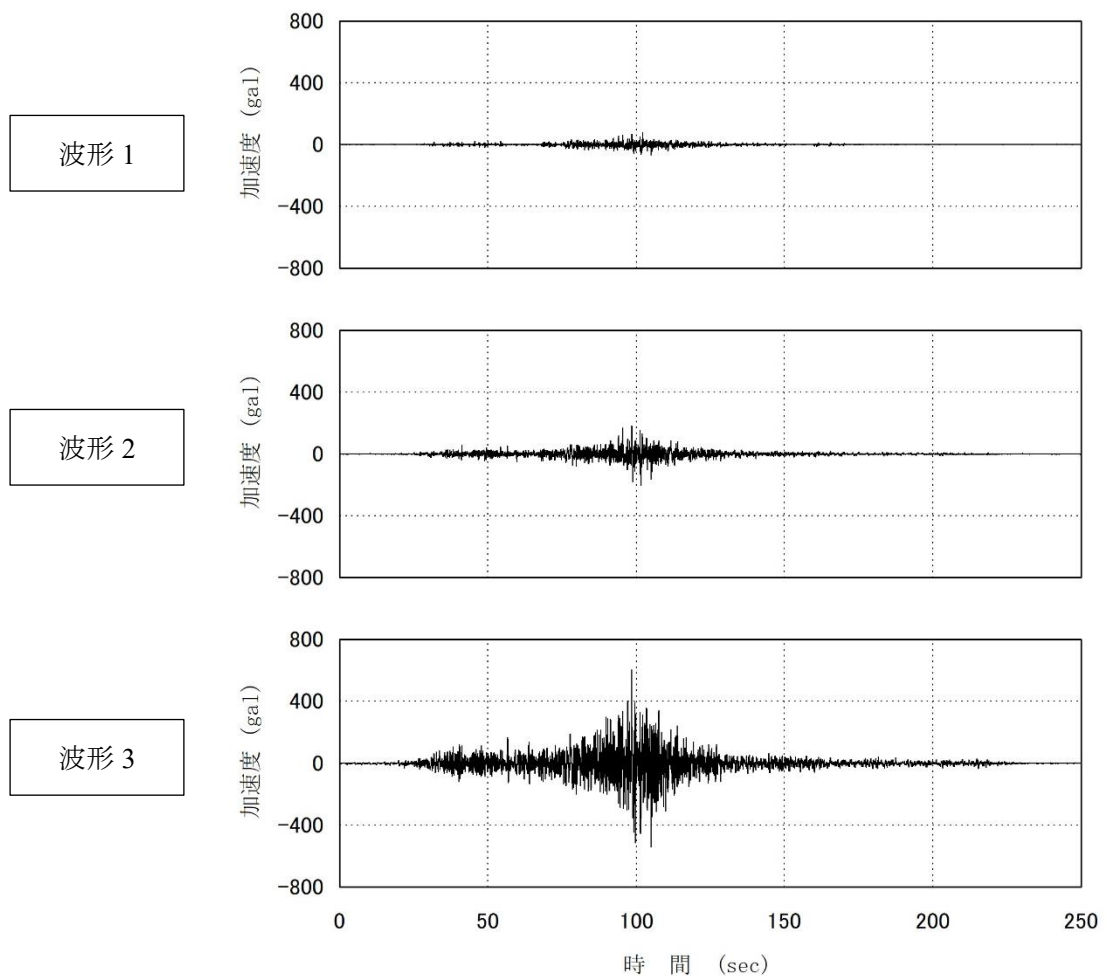


図 3.2.3 シリーズ2の加振実験で使用した入力地震動波形

3.3 実験結果

3.3.1 ケース 2-1

ケース 2-1 では、4 種類のグラベルドレーン（表 3.2.1）を液状化層へ打設し実験を行った。ケース 2-1 の実験模型（図 3.2.1、本項において本図のみ模型スケールで表記）を再掲する。土層中央寄りのドレーンは径 0.5m、杭芯間隔 1.5m で左右各 90 本打設し、排水タンク側のドレーンは径 1.5m で左右各 1 本打設した。ドレーン長はいずれも液状化層厚と同じ 8m とした。なお、左右のドレーンはドレーン材が異なっており、左側が宇部珪砂 5 号、右側が宇部珪砂 3 号を使用している。また、水位は水平地盤面とした。

図 3.3.1～図 3.3.4 にステップ 1～4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。なお、P3-2 はセンサーに不具合が生じたため結果から省いた。ステップ 1, 4 ではステップ 4 の P3-6, P3-7 を除いて過剰間隙水圧比が 1 以上となる水圧計はなかった。ステップ 2, 3 ではほとんどの水圧計で過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 3.3.5 に水平地盤上（DV1～3）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 3.3.1 にステップごとの残留沈下量を示す。水平地盤上の残留沈下量は中央の DV2 と右側の DV3 ではほぼ近い値を示し、左側の DV1 は DV2, 3 の 0.6～0.7 倍程度と小さい値となった。

写真 3.3.1 に実験後の模型の開削断面を、図 3.3.6 に模型の地表面形状を示す。なお、写真 3.3.1 においてドレーン付近の色砂（液状化層）が沈下しているのはドレーン打設の影響と考えられる。

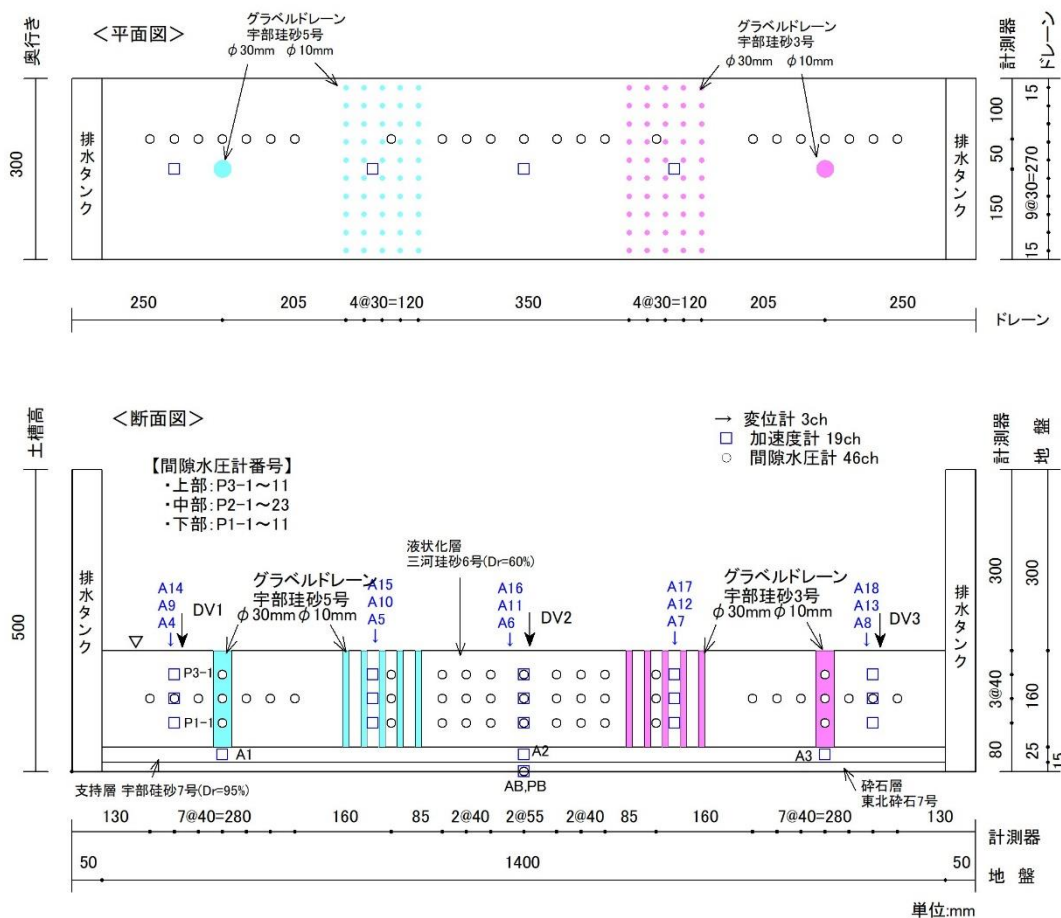


図 3.2.1 シリーズ 2 の実験模型例（ケース 2-1、寸法は模型スケール）（再掲）

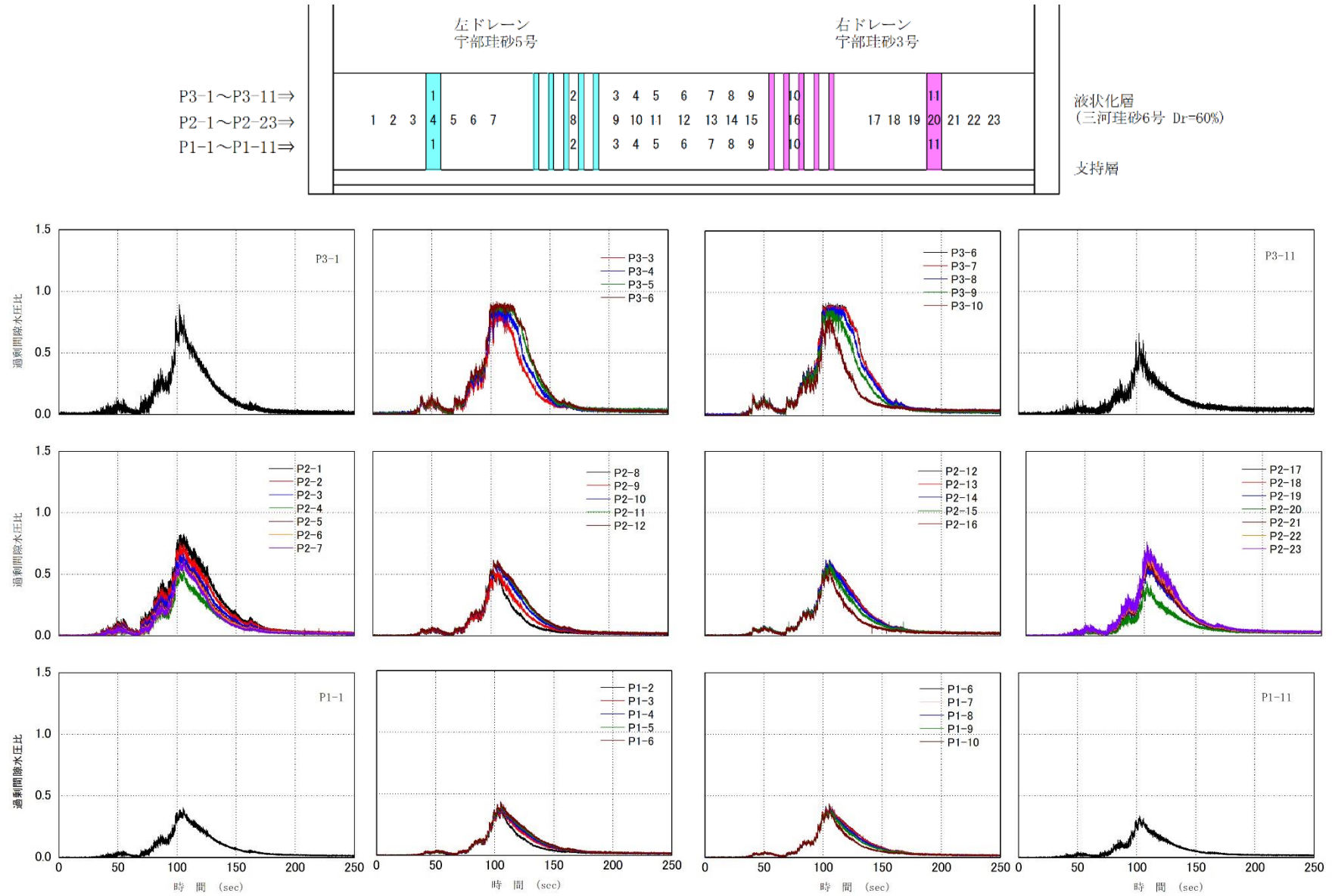


図 3.3.1 ケース 2-1 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

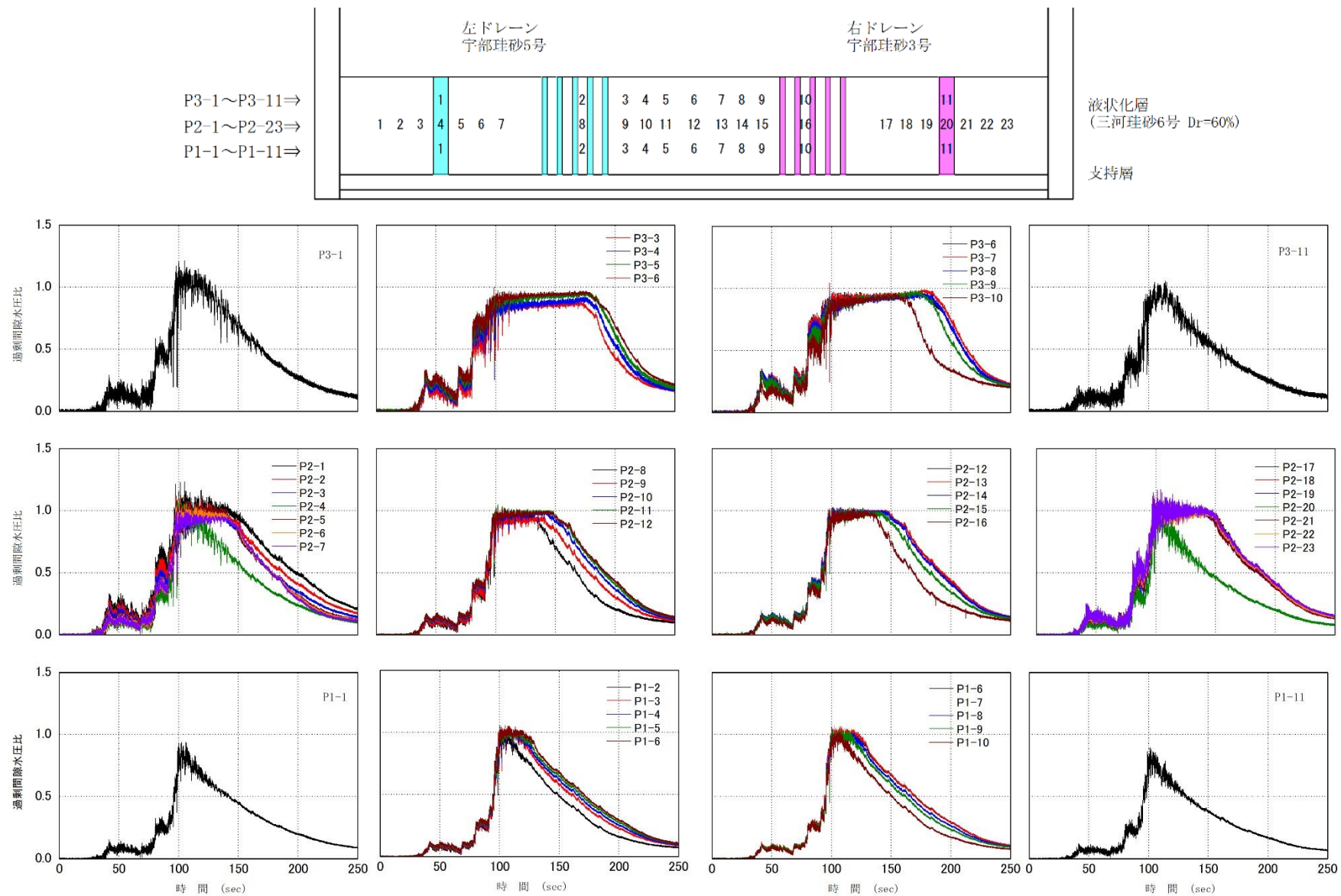


図 3.3.2 ケース 2-1 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

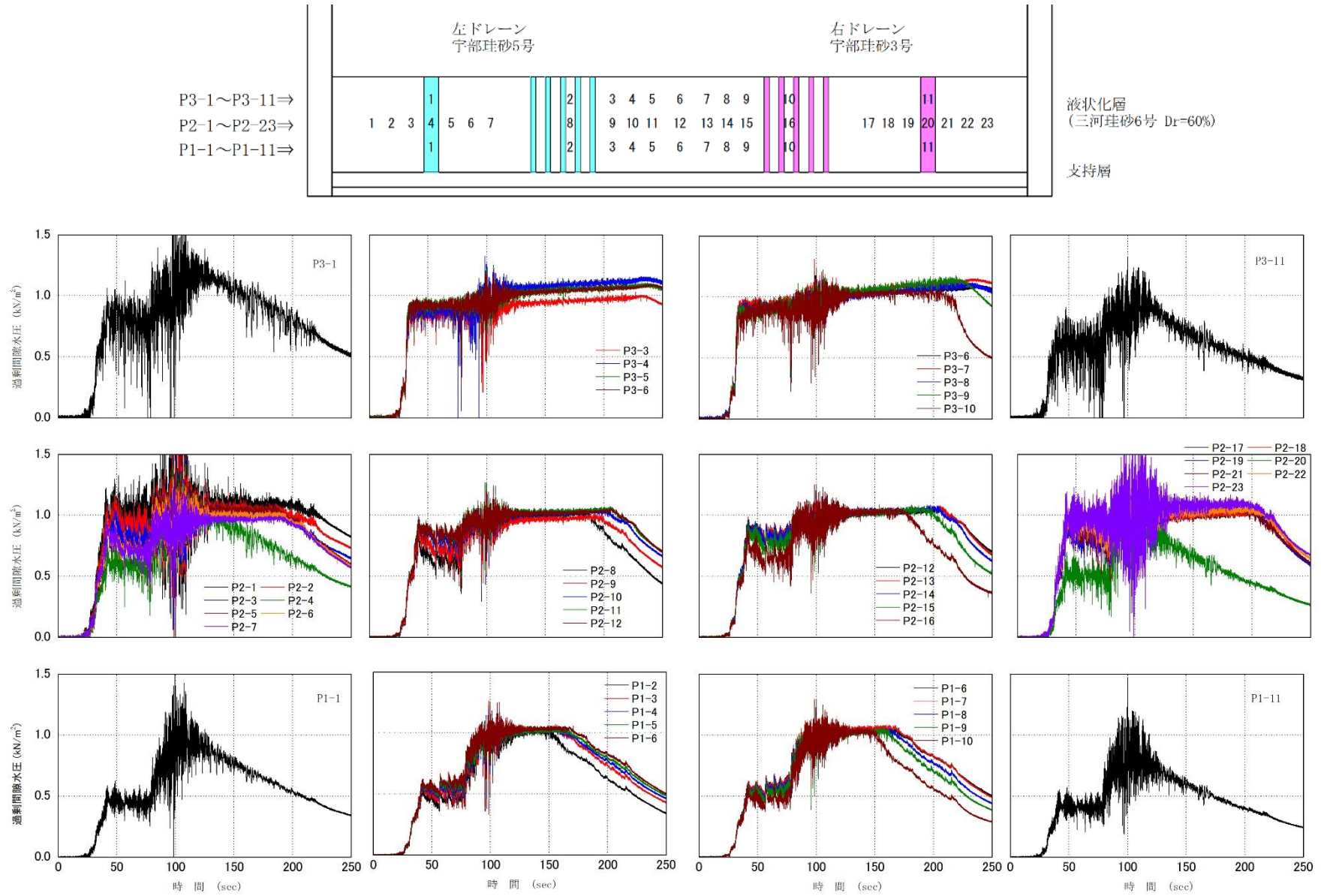


図 3.3.3 ケース 2-1 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

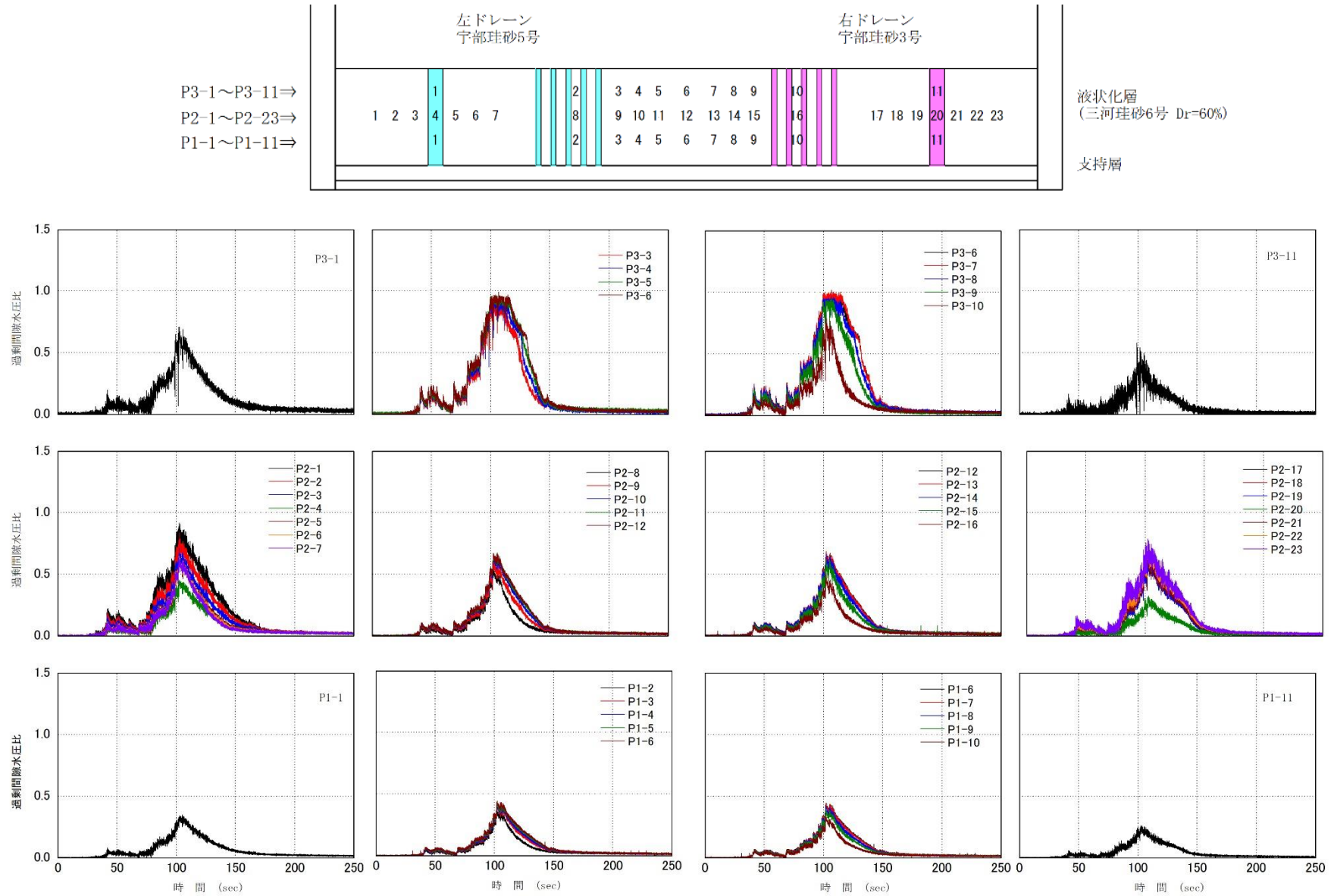


図 3.3.4 ケース 2-1 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

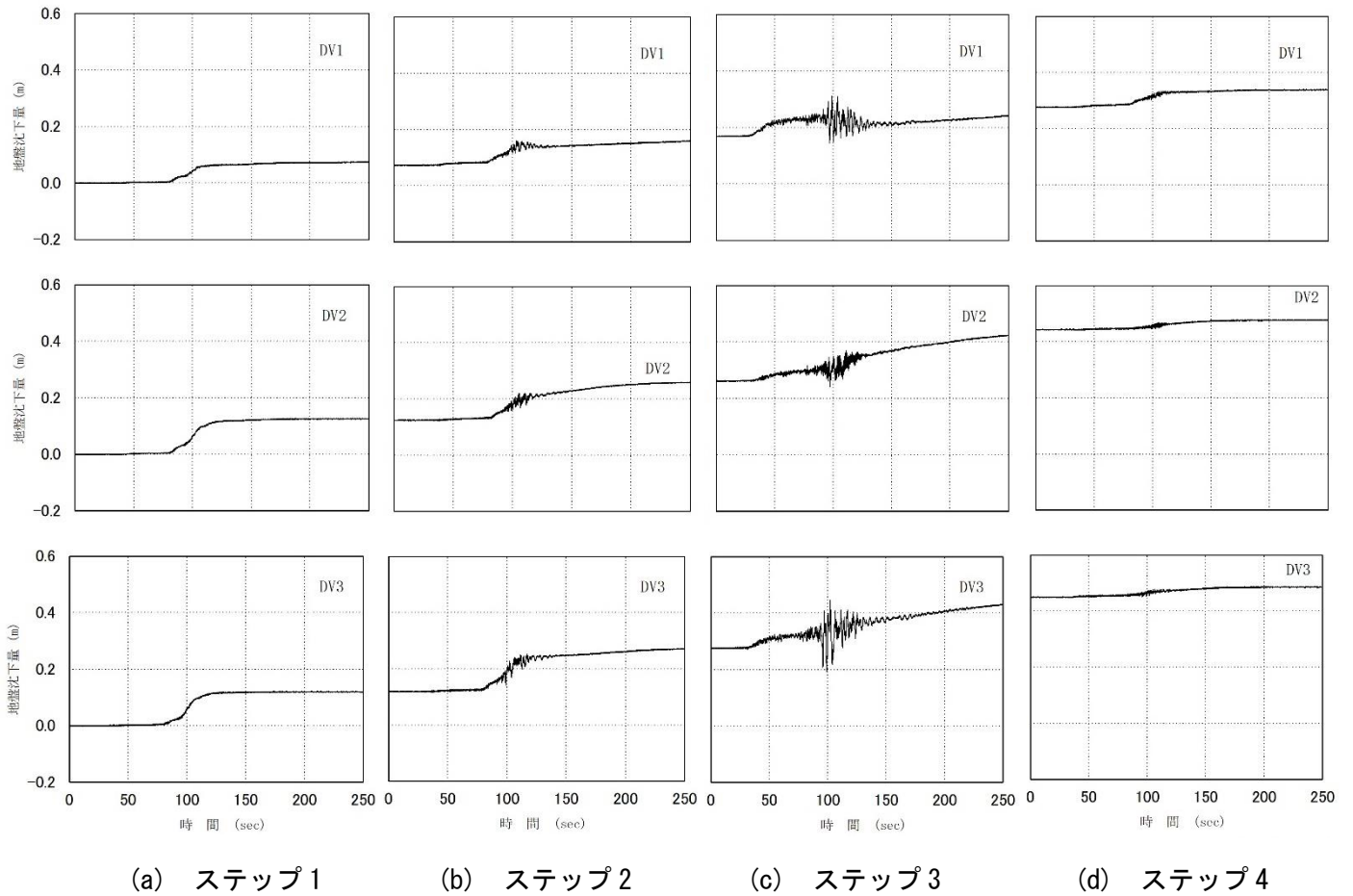
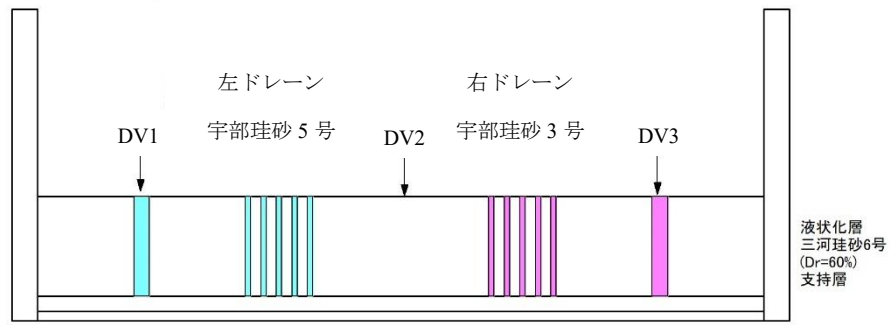


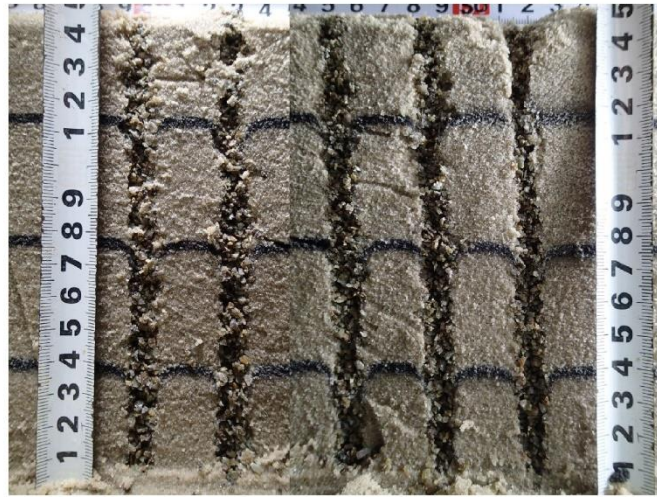
図 3.3.5 ケース 2-1 における各ステップの累積沈下量

表 3.3.1 ケース 2-1 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)		
	水平地盤		
	DV1	DV2	DV3
1	0.079	0.126	0.121
2	0.169	0.263	0.277
3	0.277	0.445	0.451
4	0.340	0.478	0.487



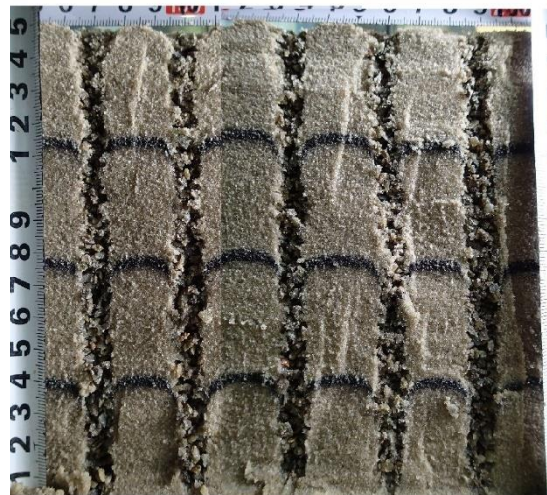
(a) 左ドレーン（ドレーン径 1.5m）



(b) 左ドレーン（ドレーン径 0.5m）



(c) 中央（ドレーンなし）



(d) 右ドレーン（ドレーン径 0.5m）



(e) 右ドレーン（ドレーン径 1.5m）

写真 3.3.1 ケース 2-1 における実験後の模型の開削断面

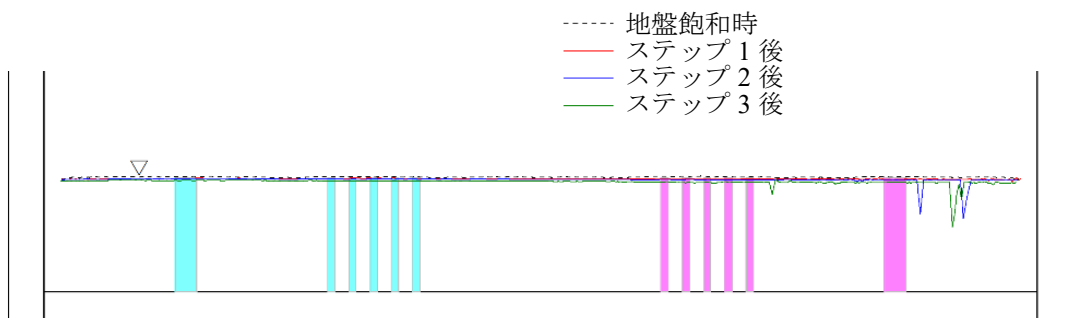


図 3.3.6 ケース 2-1 における模型の地表面形状

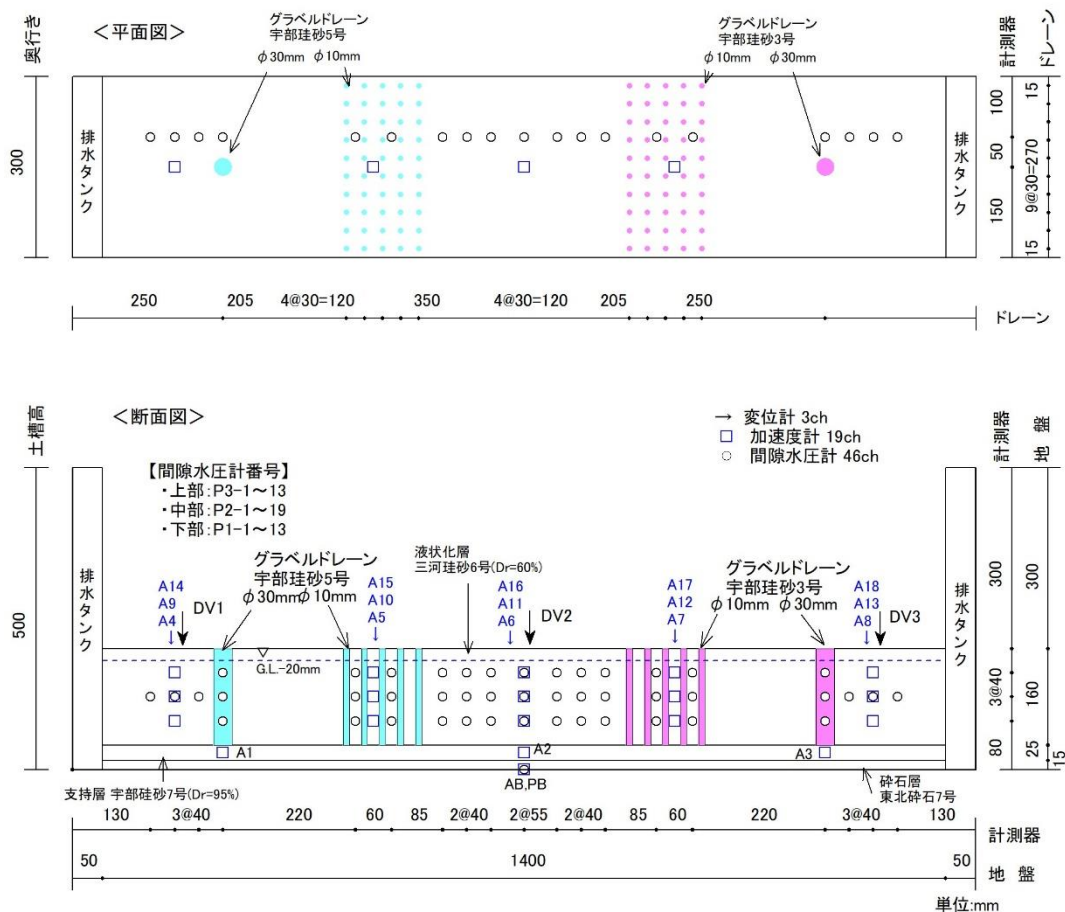
3.3.2 ケース 2-2

図 3.3.7（本項において本図のみ模型スケールで表記）にケース 2-2 の実験模型を示す。ケース 2-2 では、ケース 2-1 と同じ仕様のドレーンを同じ配置（表 3.2.1、土層中央寄りのドレーンは径 0.5m、杭芯間隔 1.5m で左右各 90 本、排水タンク側のドレーンは径 1.5m で左右各 1 本打設。ドレーン長はいずれも 8m。左右のドレーン材には、左側が宇部珪砂 5 号、右側が宇部珪砂 3 号を使用）で液状化層へ打設し実験を行った。なお、ケース 2-1 では地下水位を地表面としていたが、ケース 2-2 では GL-1m とした。

図 3.3.8～図 3.3.10 にステップ 1～3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。なお、P1-2, P1-12 はセンサーに不具合が生じたため結果から省いた。ステップ 1, 2 ではステップ 2 の P2-1, P2-4 を除いて過剰間隙水圧比が 1 以上となる水圧計はなかった。ステップ 3 では液状化層中部および下部の半数以上の水圧計で過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 3.3.11 に水平地盤上（DV1～3）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 3.3.2 にステップごとの残留沈下量を示す。水平地盤上の残留沈下量は各変位計で近い値を示したが、DV1 が最も大きい沈下量であった。

写真 3.3.2 に実験後の模型の開削断面を、図 3.3.12 に模型の地表面形状を示す。



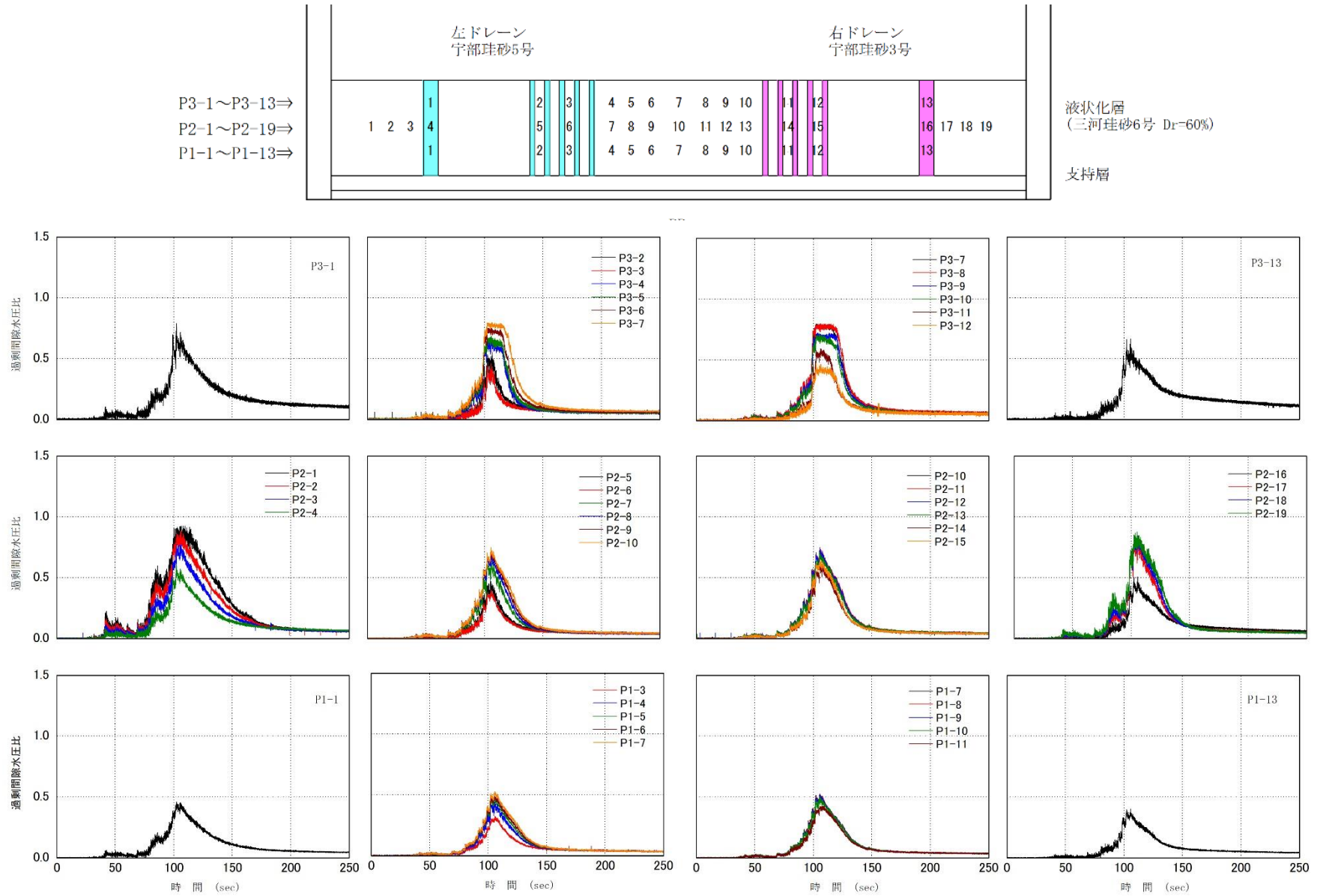


図 3.3.8 ケース 2-2 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

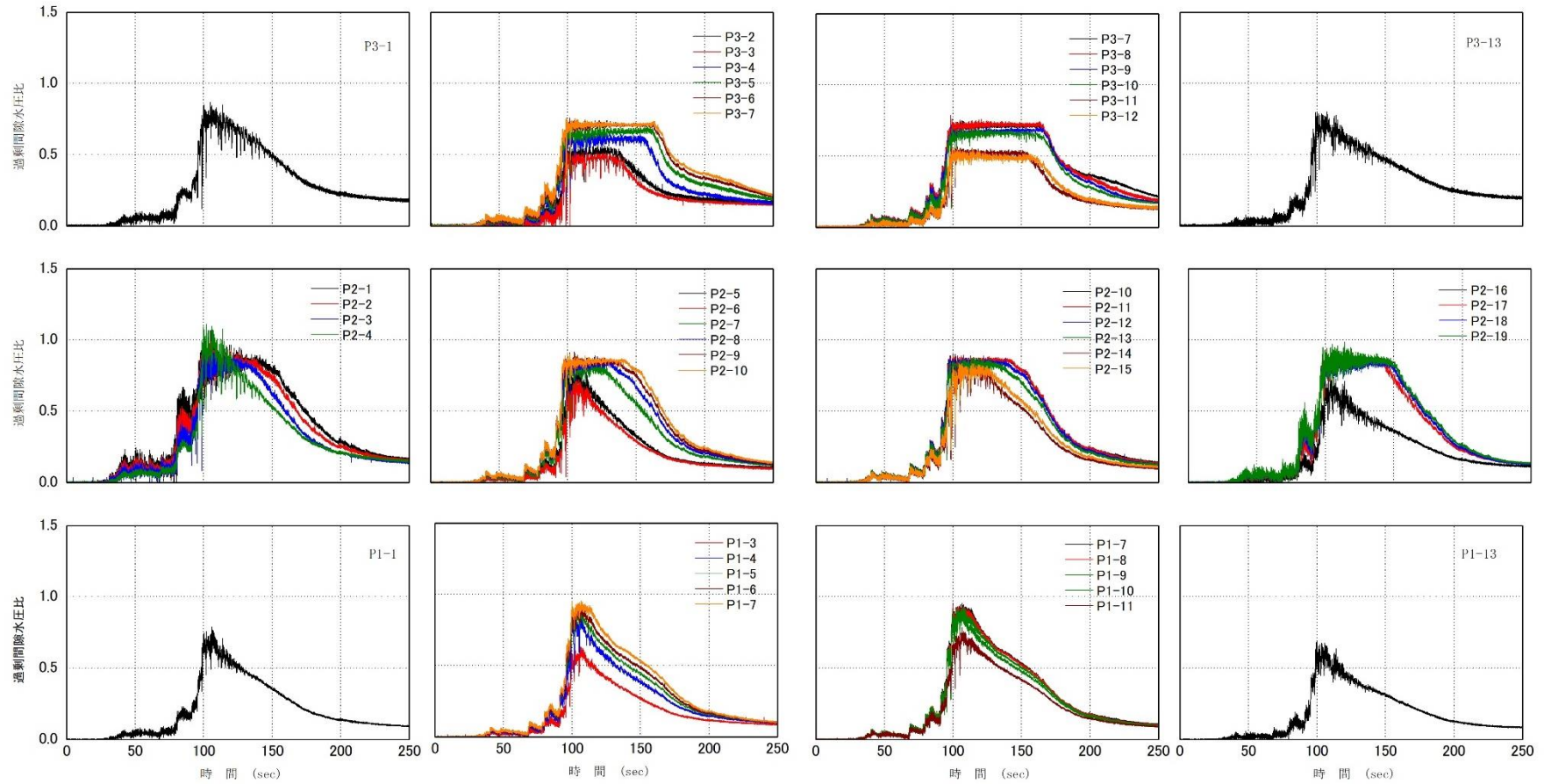
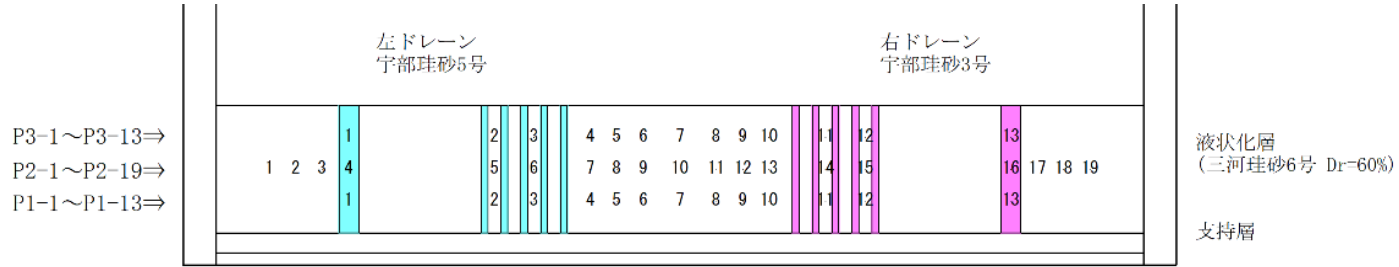
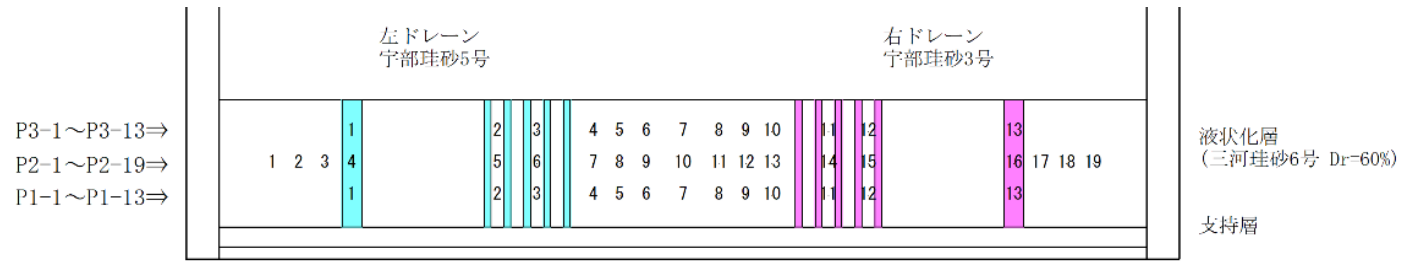


図 3.3.9 ケース 2-2 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴



PB

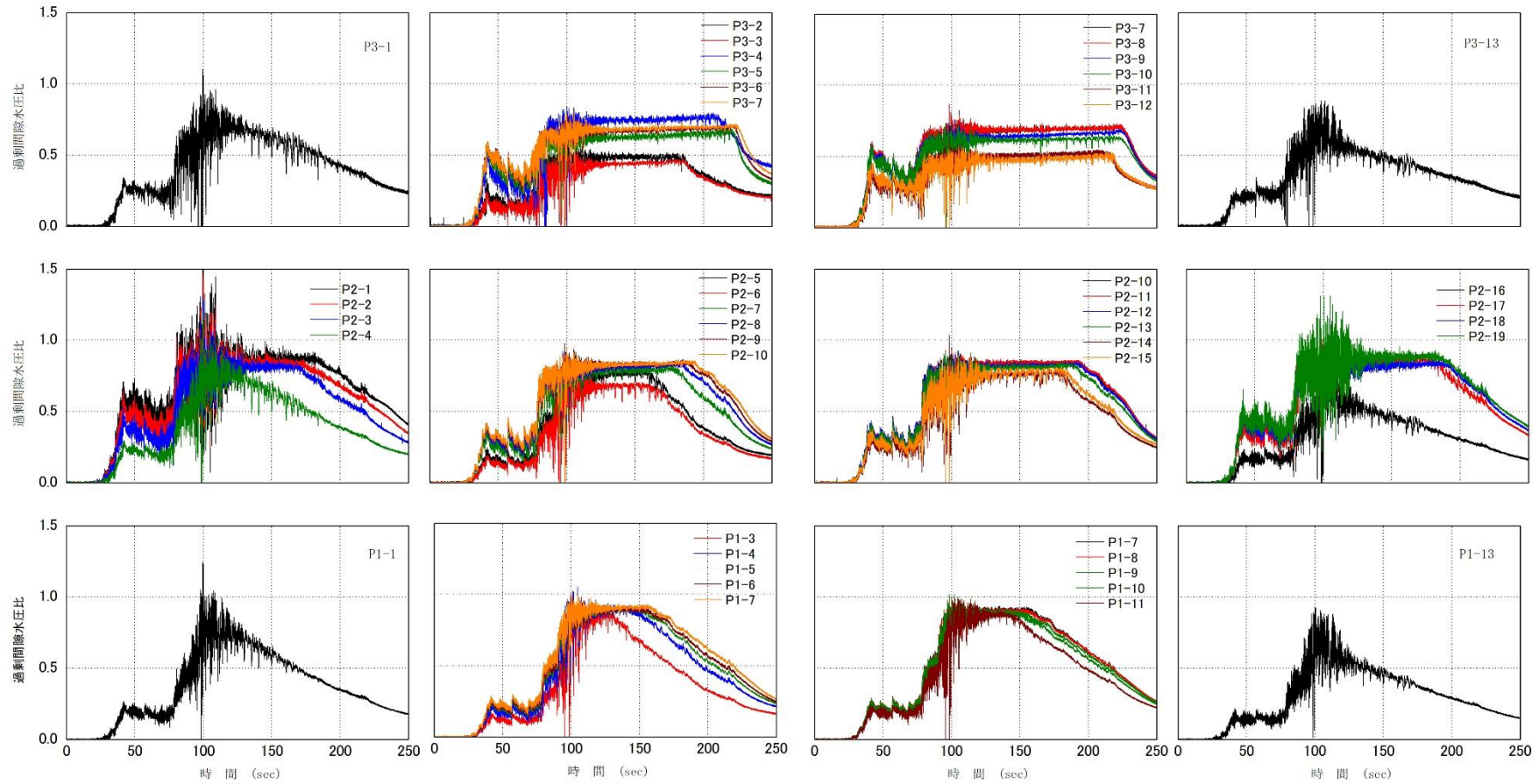


図 3.3.10 ケース 2-2 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

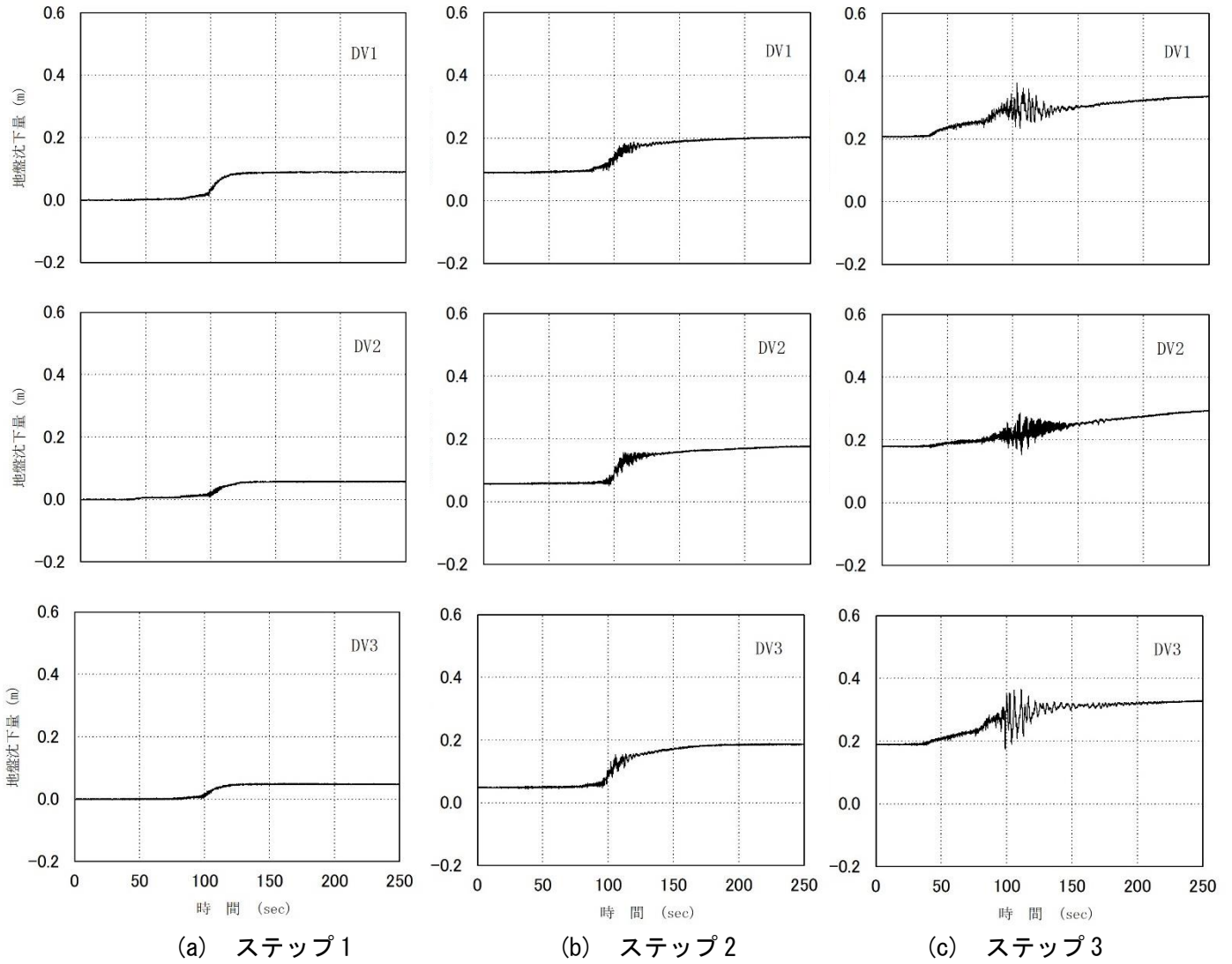
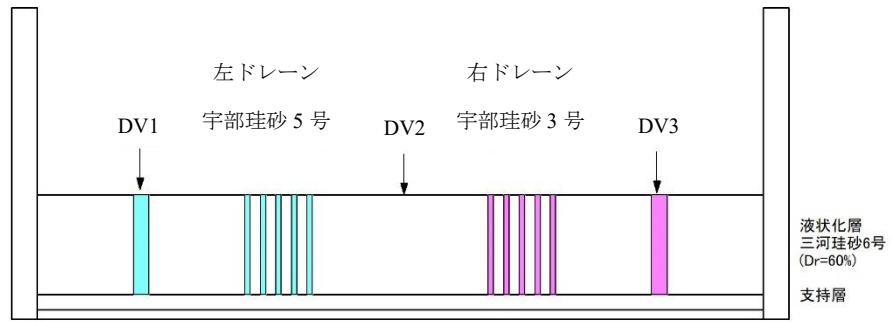
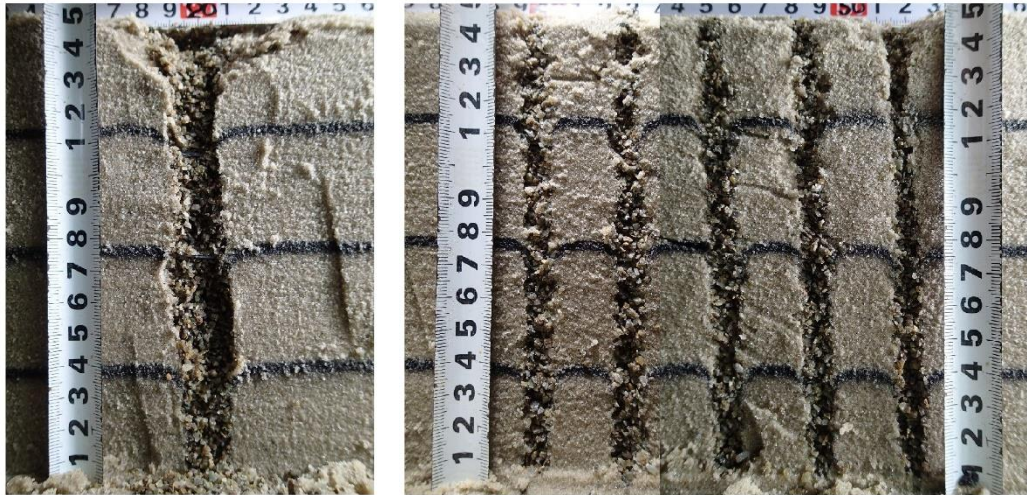


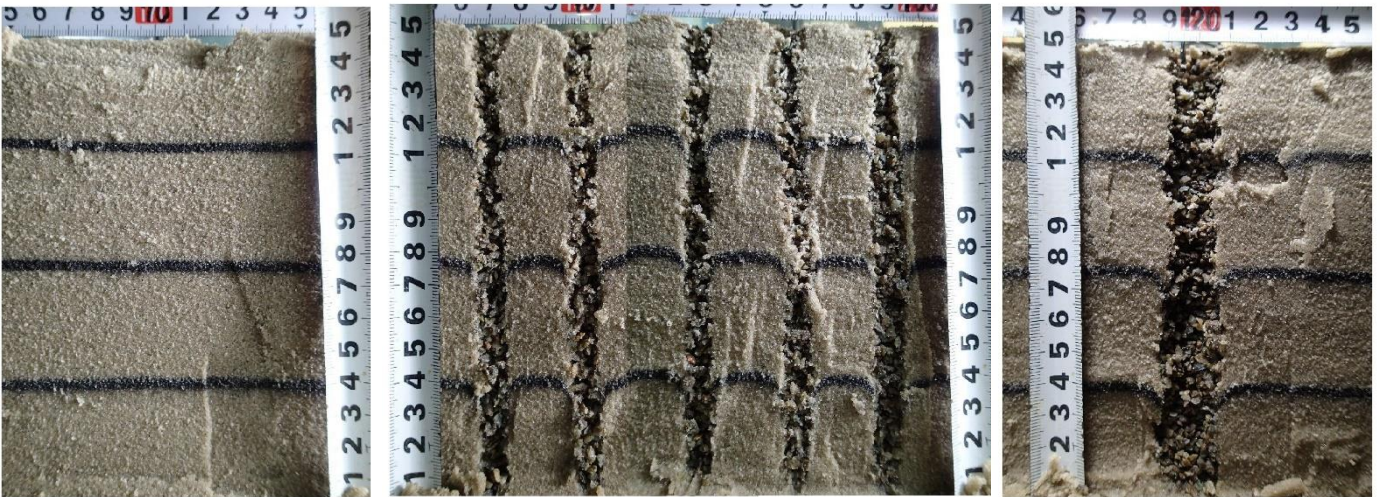
図 3.3.11 ケース 2-2 における各ステップの累積沈下量

表 3.3.2 ケース 2-2 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)		
	水平地盤		
	DV1	DV2	DV3
1	0.091	0.058	0.048
2	0.207	0.179	0.188
3	0.360	0.323	0.353



(a) 左ドレーン (ドレーン径 1.5m) (b) 左ドレーン (ドレーン径 0.5m)



(c) 中央 (ドレーンなし) (d) 右ドレーン (ドレーン径 1.5m) (e) 右ドレーン (ドレーン径 0.5m)

写真 3.3.2 ケース 2-2 における実験後の模型の開削断面

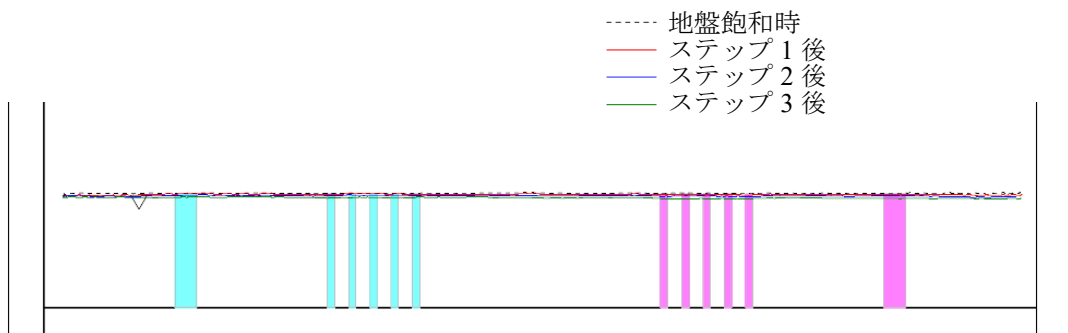


図 3.3.12 ケース 2-2 における模型の地表面形状

3.3.3 ケース 2-3

図 3.3.13 (本項において本図のみ模型スケールで表記) にケース 2-3 の実験模型を示す。ケース 2-3 では、土槽の左側、中央、右側における液状化層の一部(縦 8m×横 7.5m×奥行 1.5m) をグラベルドレーンとし、実験を行った。ドレーン材はそれぞれ、左側：宇部珪砂 5 号、中央：宇部珪砂 3 号、右側：砕石 7 号とした。また、水位は水平地盤面とした。

図 3.3.14～図 3.3.16 にステップ 1～3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。ステップ 1 ではすべての水圧計において過剰間隙水圧比が 1 未満となった。ステップ 2, 3 では半数以上の水圧計において、過剰間隙水圧比が 1 以上となった。また、グラベルドレーン内の過剰間隙水圧比は、液状化層と比べ小さく、過剰間隙水圧比の最大値が 1 以上となる一部の箇所においては比較的短い時間で 1 以下になっている。

図 3.3.17～図 3.3.19 に各ドレーン付近の最大過剰間隙水圧比を示す。ケース 2-3 のようなドレーン径の大きいドレーンでは、ドレーン外側と比較してドレーン内の過剰間隙水圧比をかなり抑えることができていることがわかる。また、ドレーン内の最大過剰間隙水圧比をみると、ケース 2-3 の中央ドレーン(宇部珪砂 3 号)ではドレーン内で差はあまりなかった。一方、左ドレーン(宇部珪砂 5 号)および右ドレーン(砕石 7 号)における最大過剰間隙水圧比は全体的にドレーン中央に近い方が若干小さい結果となった。

図 3.3.20 に水平地盤上(DV1～4)における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 3.3.3 にステップごとの残留沈下量を示す。水平地盤上の沈下量は他と比較して DV2 が大きく、ステップ 3 後には DV1, 3, 4 よりも 4～12 倍程度大きかった。

写真 3.3.3 に実験後の模型の開削断面を、図 3.3.21 に模型の地表面形状を示す。

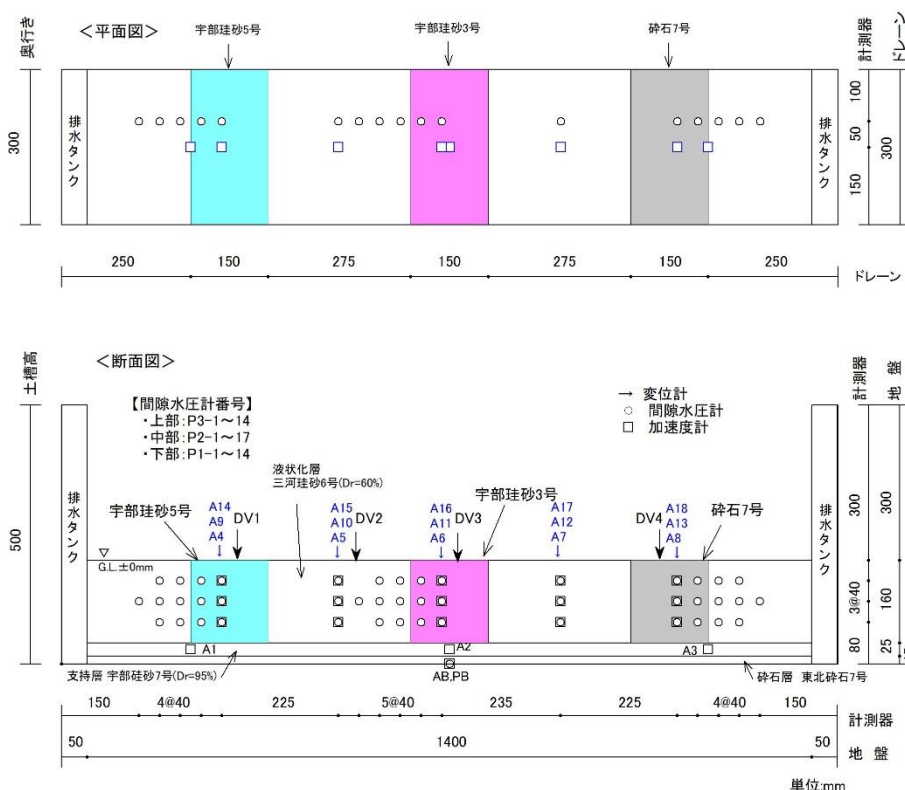


図 3.3.13 ケース 2-3 の実験模型 (寸法は模型スケール)

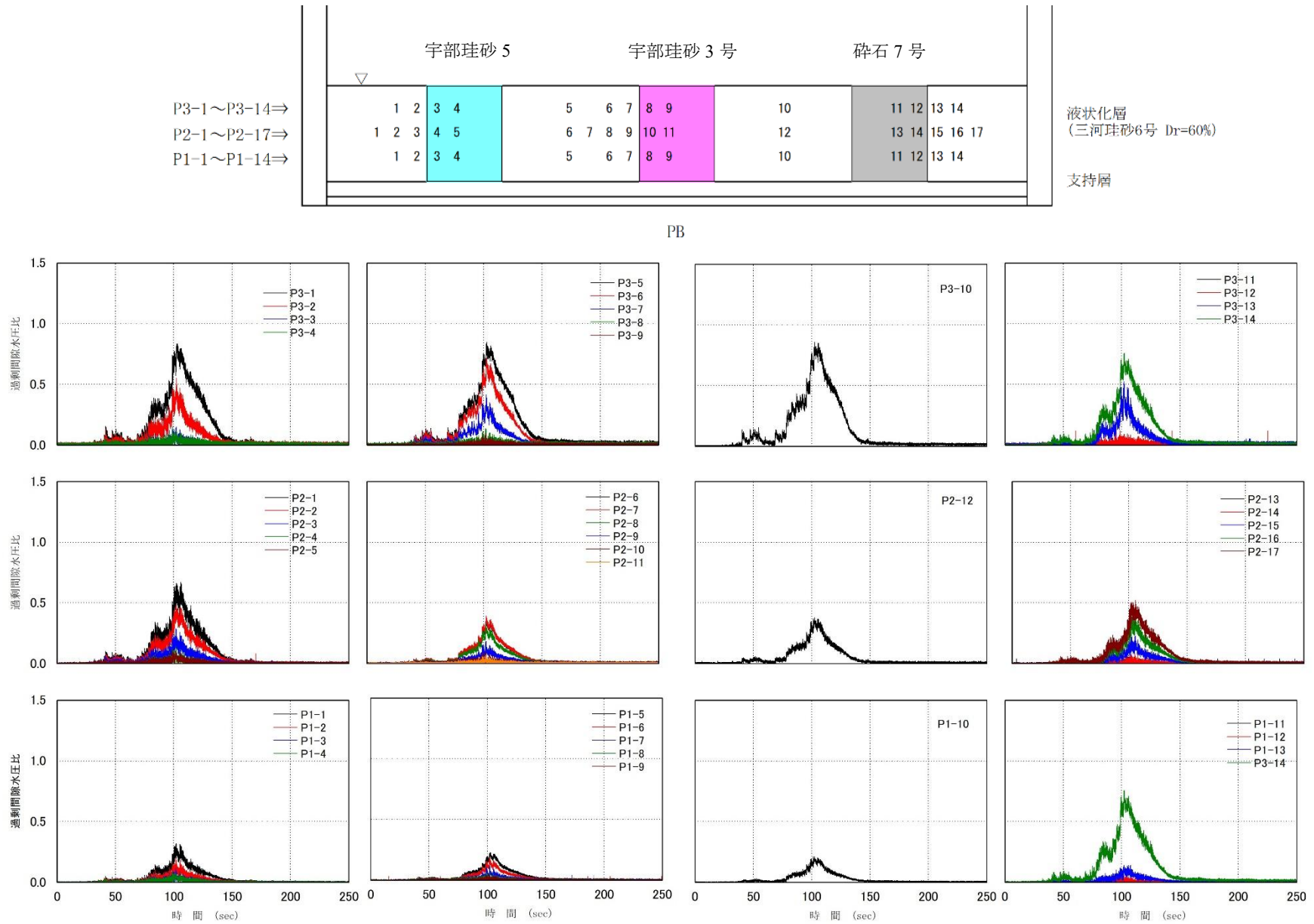


図 3.3.14 ケース 2-3 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

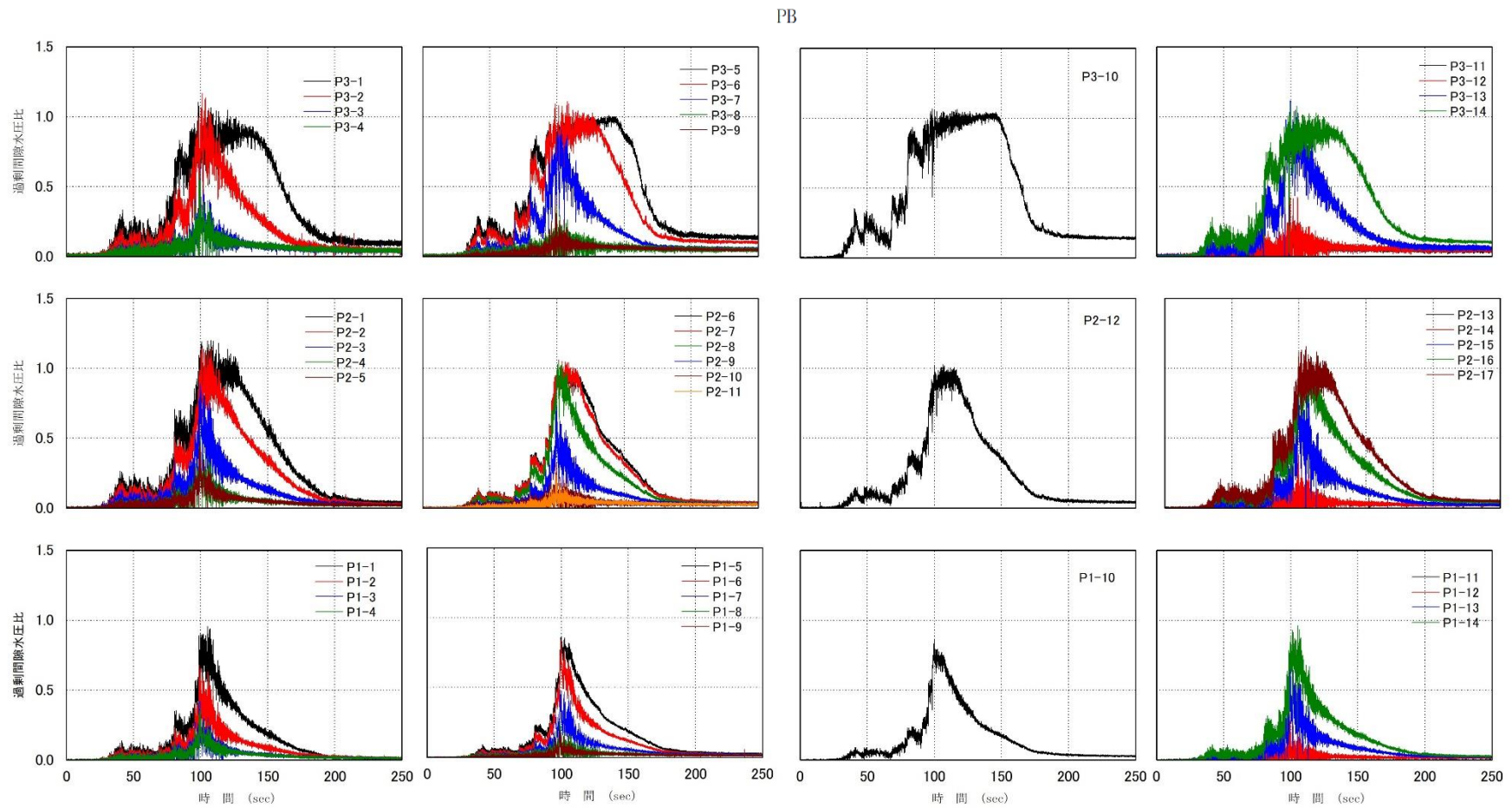
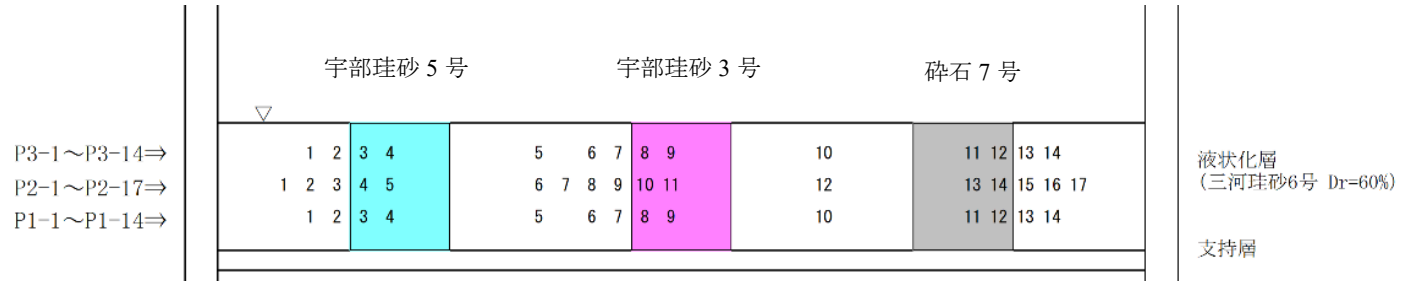


図 3.3.15 ケース 2-3 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

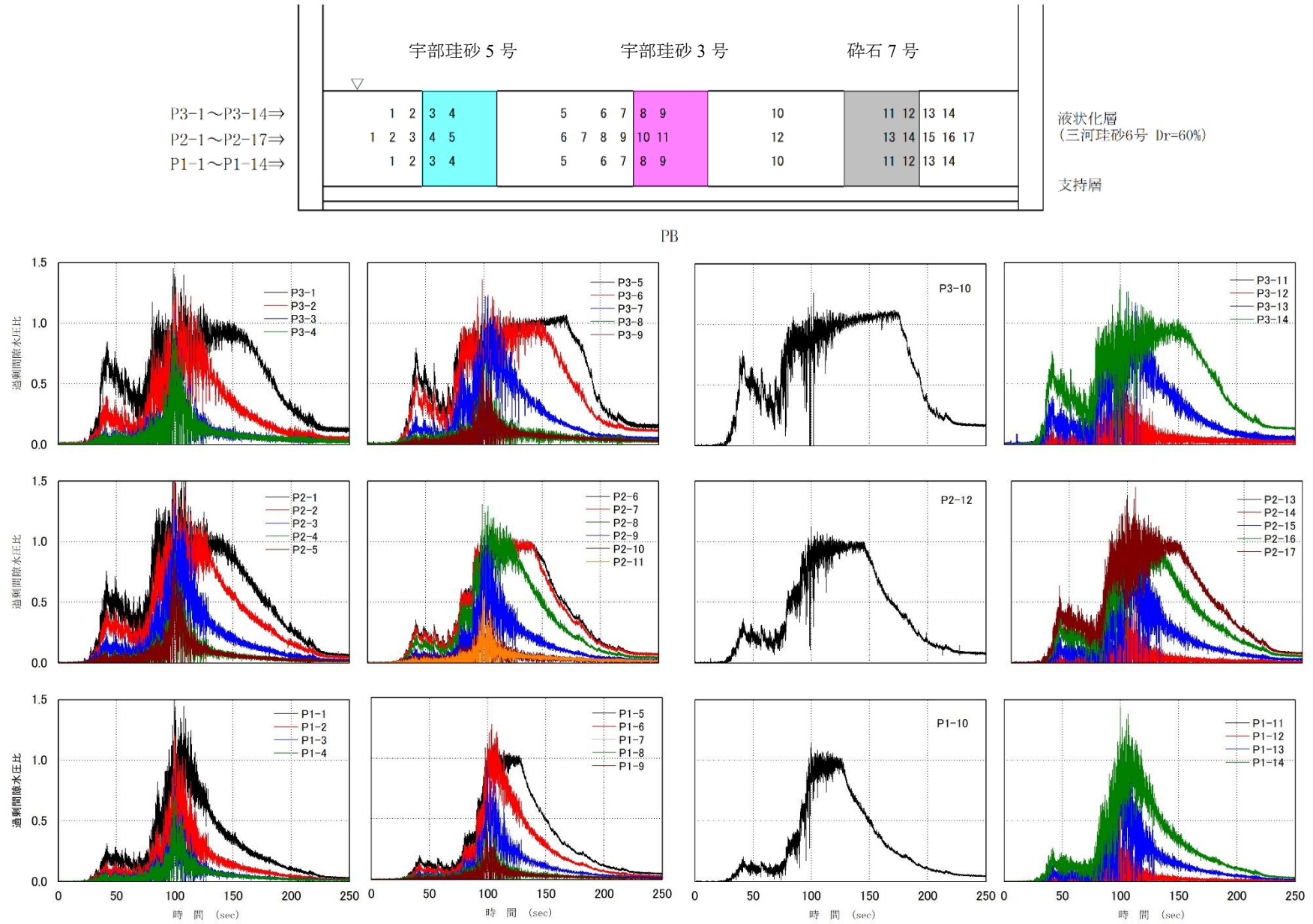


図 3.3.16 ケース 2-3 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

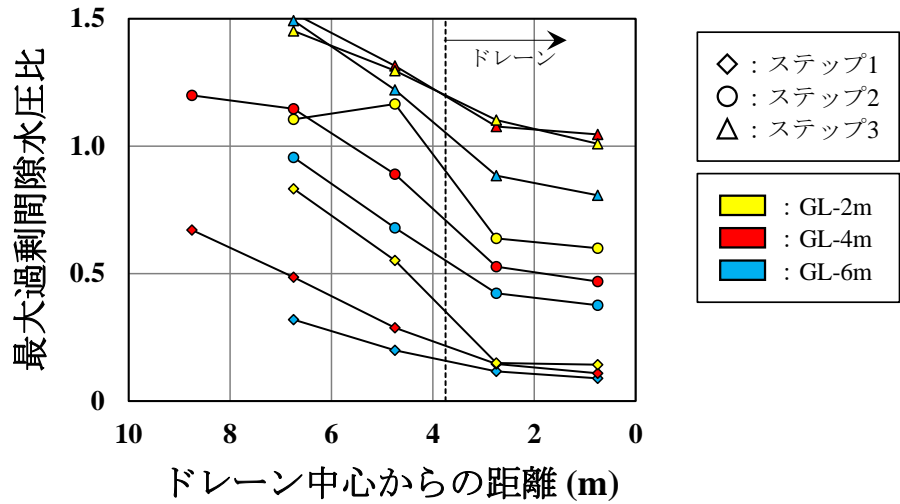
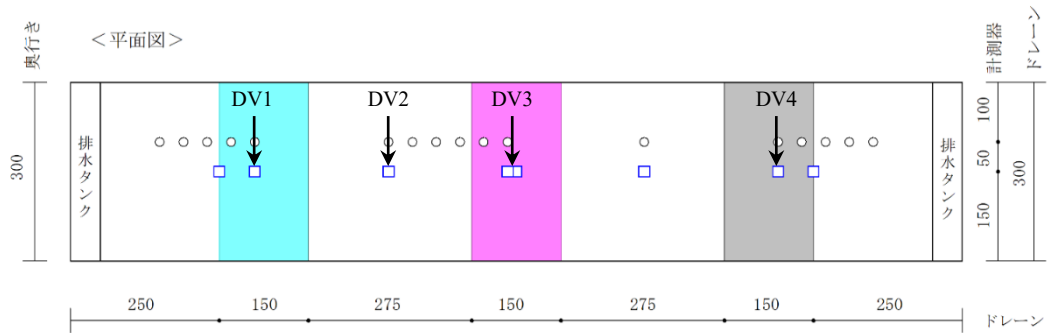


図 3.3.17 ケース 2-3 の左ドレーン（宇部珪砂 5号）付近の最大過剰間隙水圧比

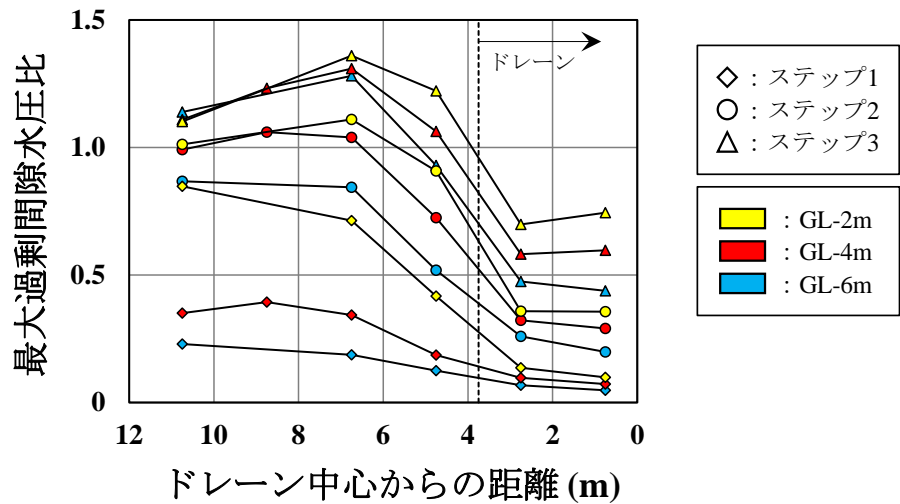


図 3.3.18 ケース 2-3 の中央ドレーン（宇部珪砂 3号）付近の最大過剰間隙水圧比

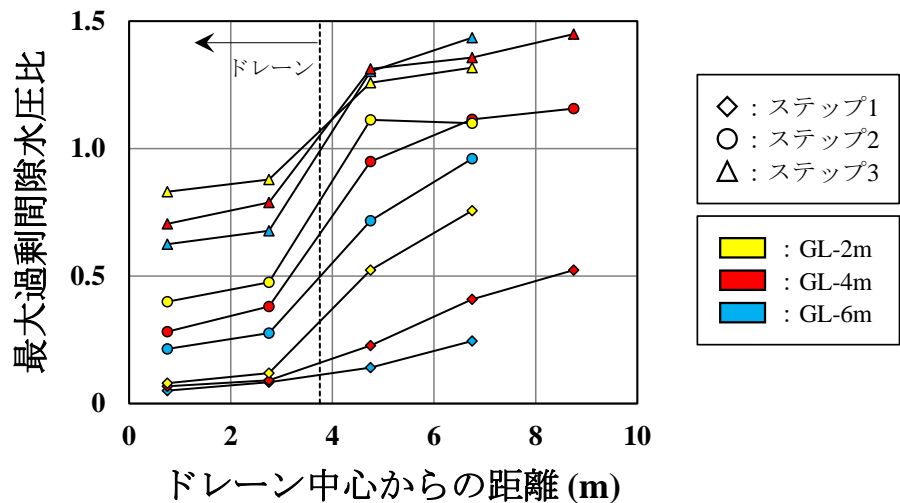


図 3.3.19 ケース 2-3 の右ドレーン（碎石 7号）付近の最大過剰間隙水圧比

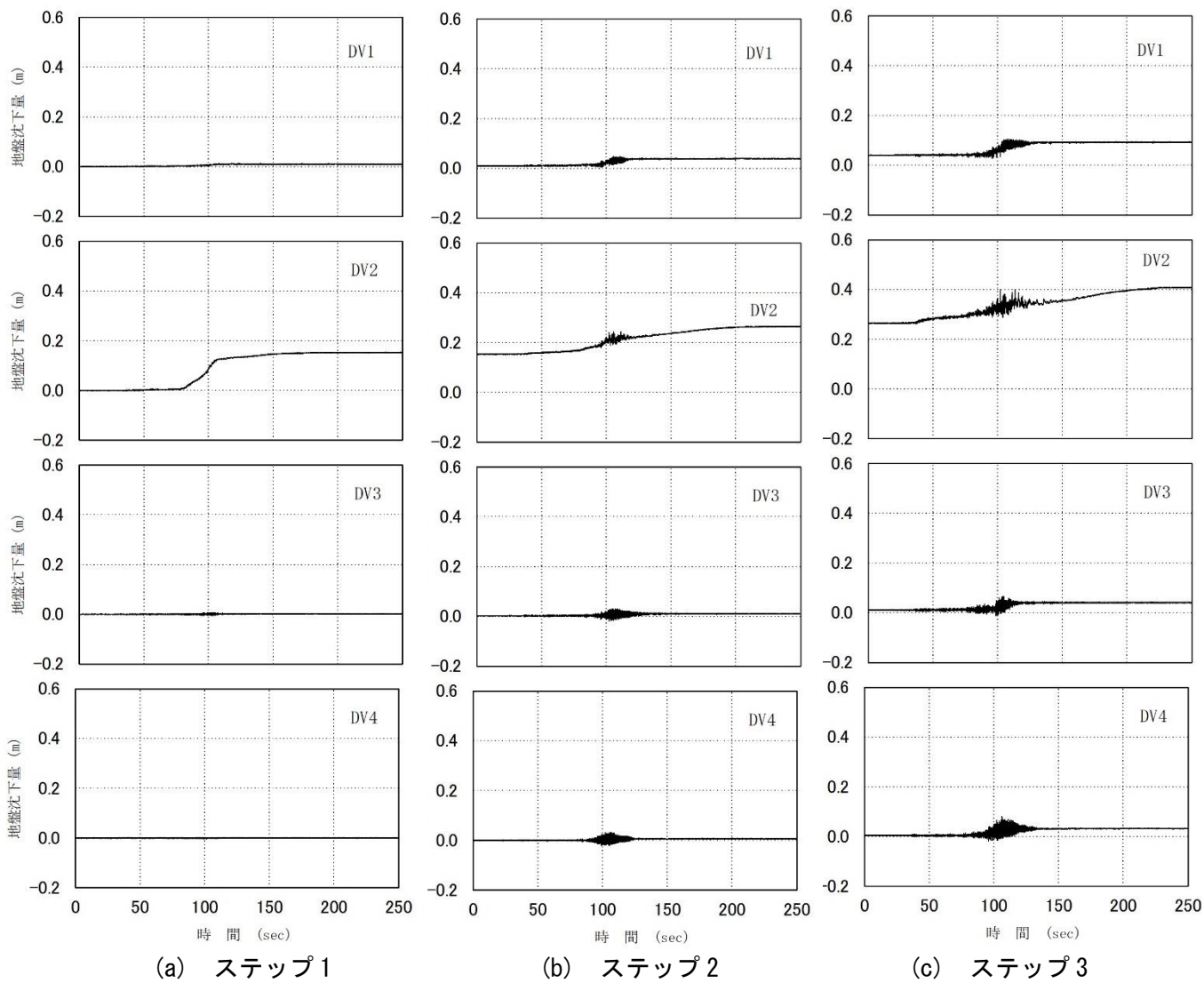
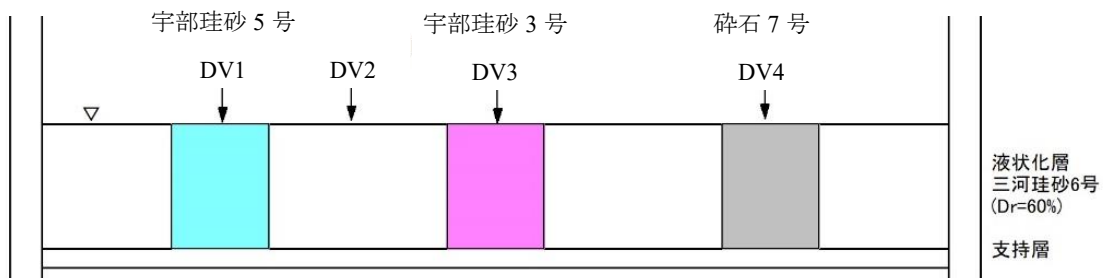
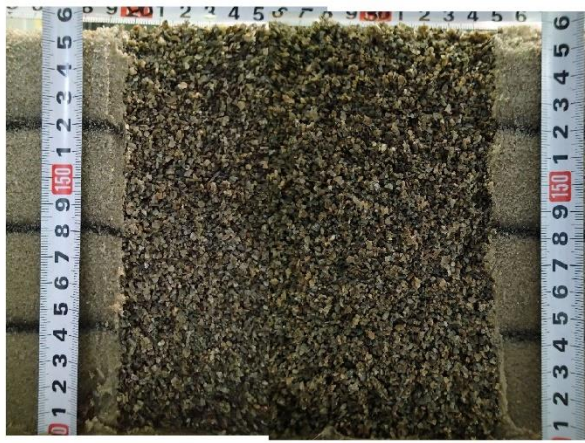


図 3.3.20 ケース 2-3 における各ステップの累積沈下量

表 3.3.3 ケース 2-3 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)			
	水平地盤			
	DV1	DV2	DV3	DV4
1	0.010	0.154	0.002	0.001
2	0.039	0.264	0.011	0.006
3	0.093	0.408	0.042	0.033



(a) 左ドレーン



(b) 左 (ドレーンなし)



(c) 中央ドレーン



(d) 右 (ドレーンなし)



(e) 右ドレーン

写真 3.3.3 ケース 2-3 における実験後の模型の開削断面

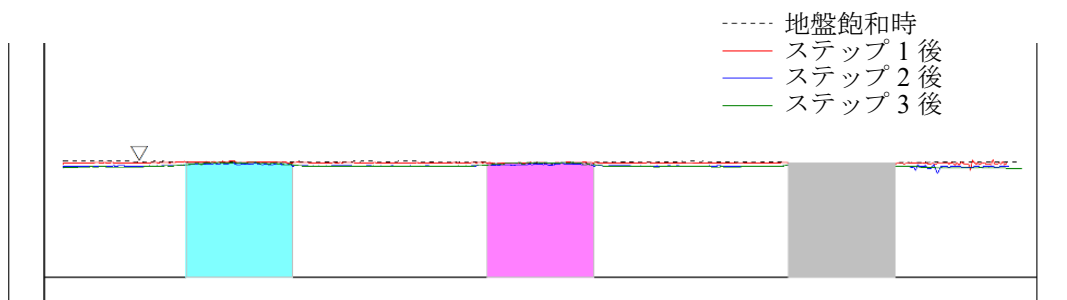


図 3.3.21 ケース 2-3 における模型の地表面形状

3.3.4 ケース 2-4

図 3.3.22 (本項において本図のみ模型スケールで表記) にケース 2-4 の実験模型を示す。ケース 2-4 では、3 種類のドレーン (表 3.2.1) を土槽の左側、中央、右側へそれぞれ打設し、実験を行った。土層左側のドレーンは杭芯間隔 15m でドレーン径 7.5m のドレーンを 4 本、中央寄りのドレーンは杭芯間隔 3m でドレーン径 1.5m のドレーンを 24 本、土層右側のドレーンは杭芯間隔 9m でドレーン径 4.5m のドレーンを 8 本打設した。いずれもドレーン材は宇部珪砂 3 号を使用し、ドレーン長は 8m とした。また、水位は水平地盤面とした。

図 3.3.23～図 3.3.25 にステップ 1～3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。ステップ 1 ではすべての水平地盤直下の水圧計で、ステップ 2 では一部を除きほぼすべての水圧計で過剰間隙水圧比が 1 未満となった。ステップ 3 では半数以上の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 3.3.26～図 3.3.28 にケース 2-4 における各ドレーン付近の最大過剰間隙水圧比を示す。左ドレーン (宇部珪砂 3 号、ドレーン径 7.5m) における最大過剰間隙水圧比はステップ 3 を除きドレーン内ではほぼ差がなかった。なお、ステップ 3 ではドレーン中心の方が大きい結果となっているが、これは各水圧計で奥行方向位置が異なり、ドレーン中心の水圧計は水平方向の壁面近傍であるため、ステップ 3 の大きな波形で壁面の影響を特に受けた可能性も考えられる。

図 3.3.29 に水平地盤上 (DV1～4) における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 3.3.4 にステップごとの残留沈下量を示す。水平地盤上の沈下量は DV1～3 ではほぼ近い値を示し、ドレーン上の DV4 ではその他の変位計と比較し、ステップ 3 後で 0.4 倍程度の大きさであった。

写真 3.3.4 に実験後の模型の開削断面を、図 3.3.30 に模型の地表面形状を示す。なお、写真 3.3.4 (a) , (c) の径の大きいドレーンにおいて、径の小さいドレーンよりもドレーン付近の色砂 (液状化層) の沈下が大きい理由については不明である。

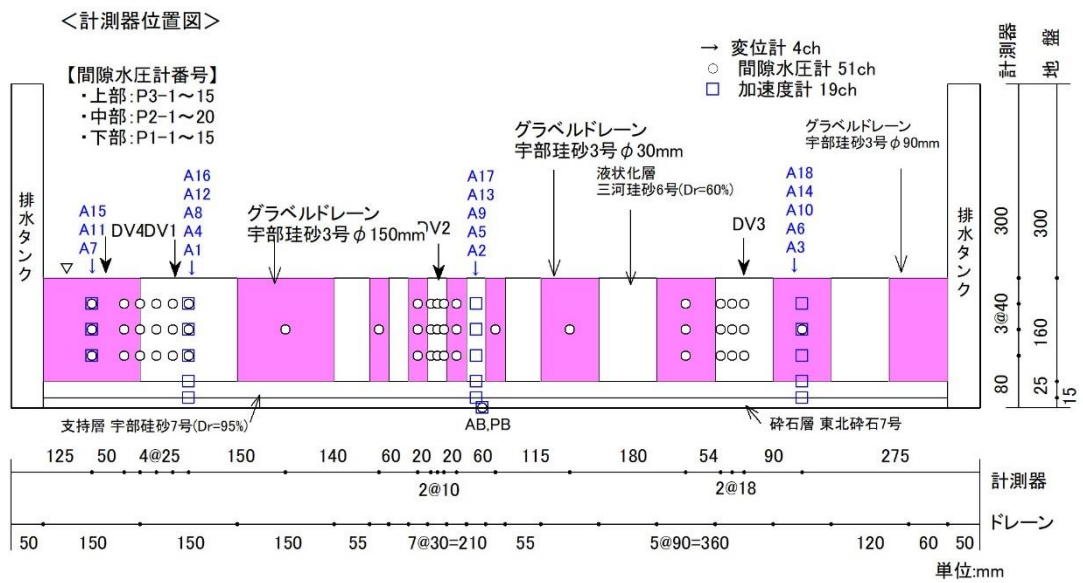
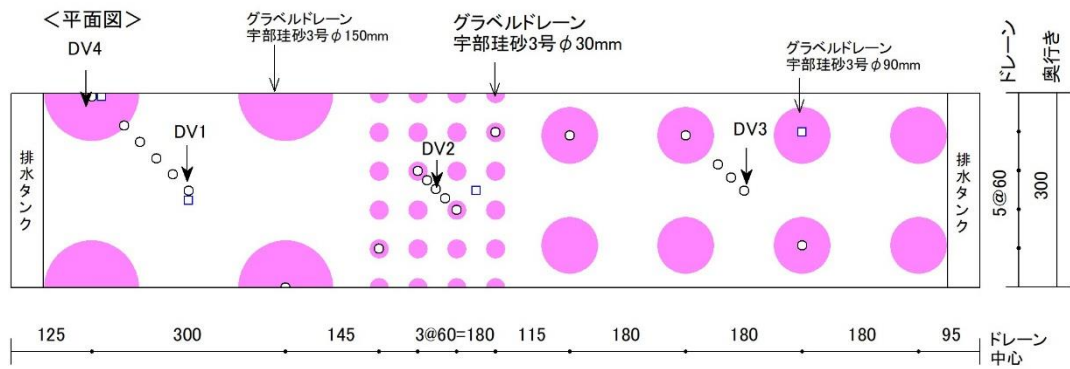
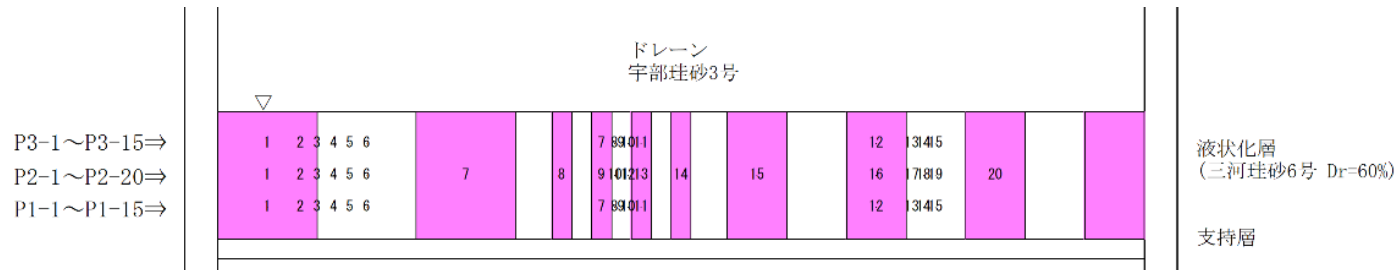


図 3.3.22 ケース 2-4 の実験模型 (寸法は模型スケール)



PB

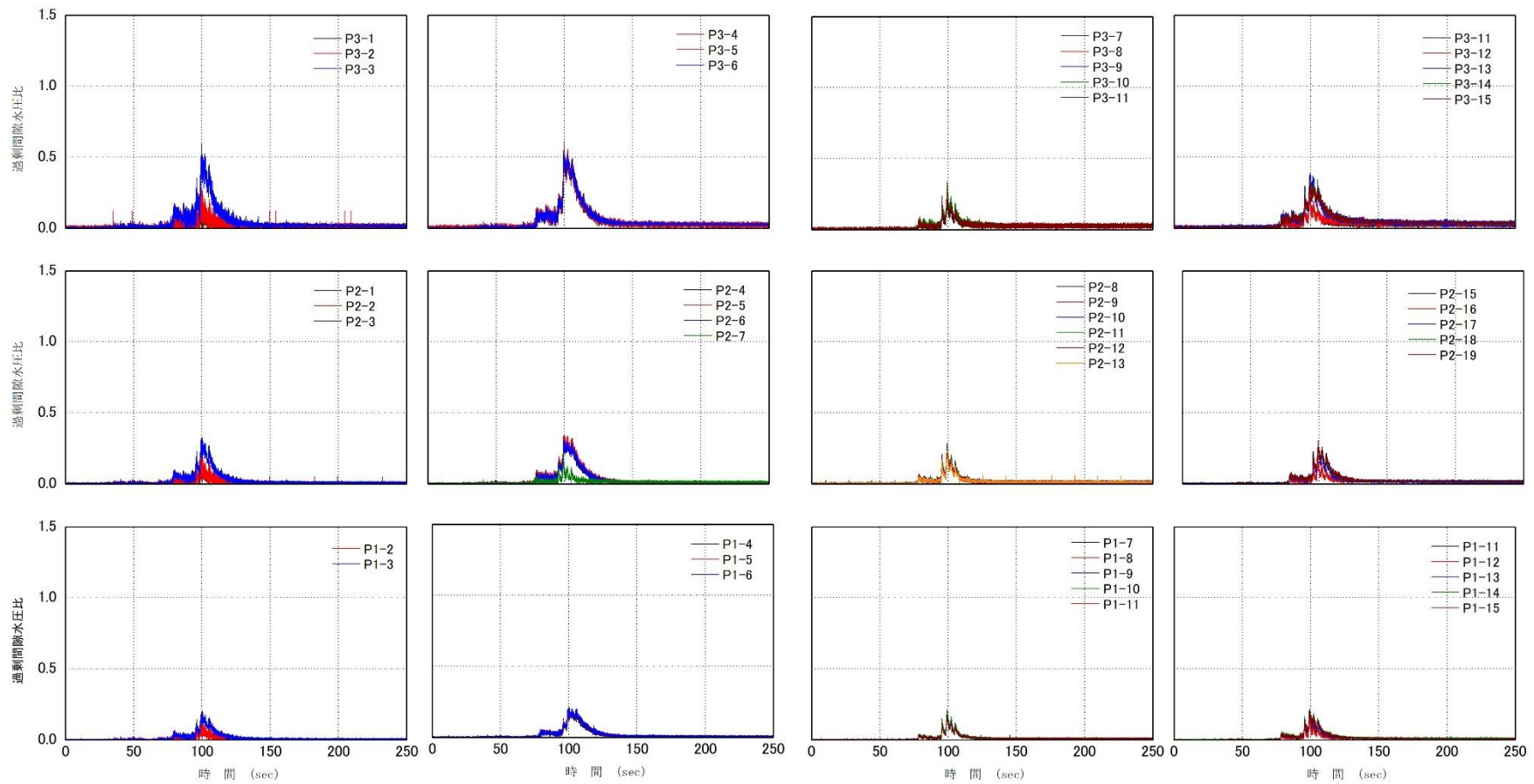


図 3.3.23 ケース 2-4 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

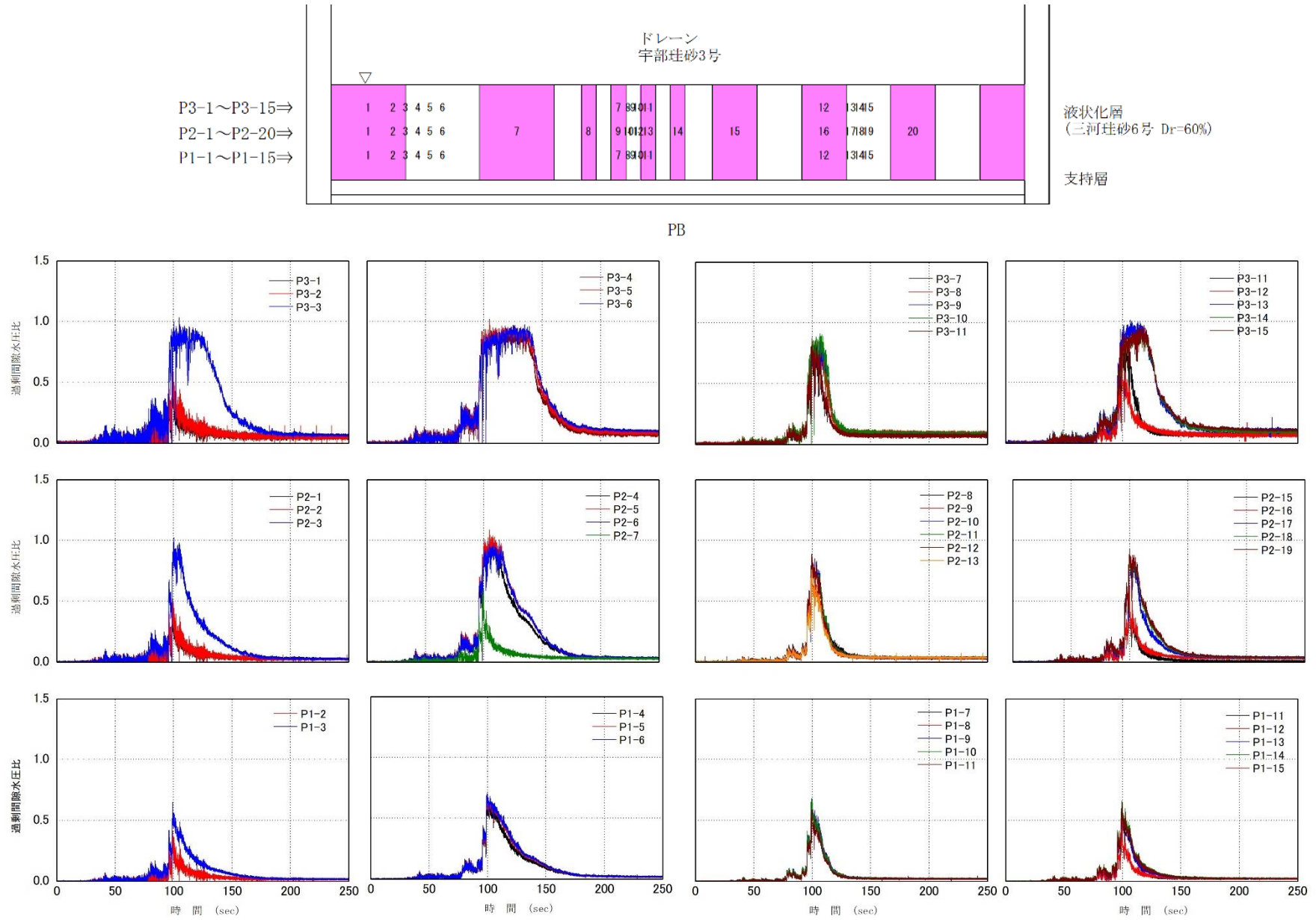


図 3.3.24 ケース 2-4 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

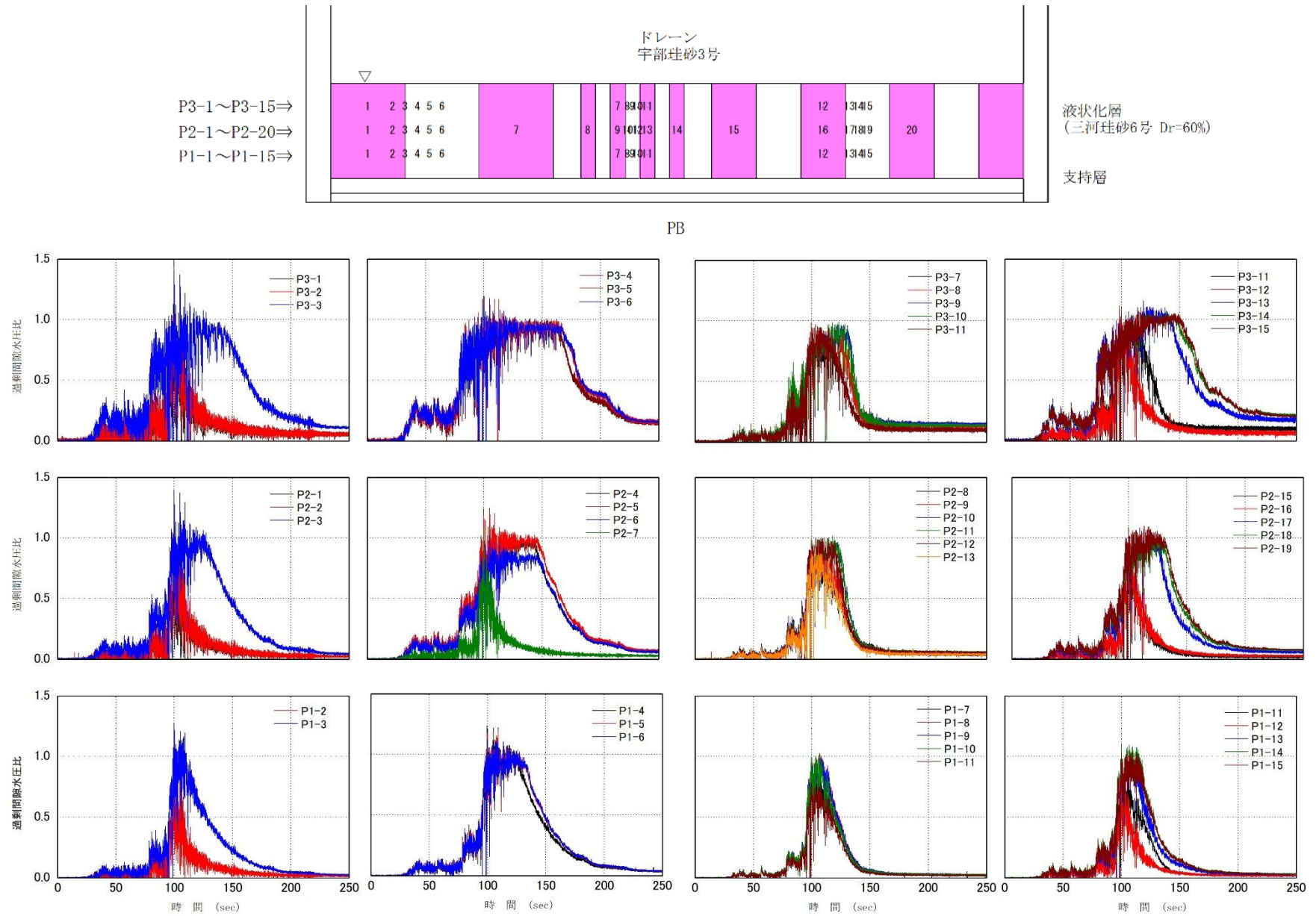


図 3.3.25 ケース 2-4 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

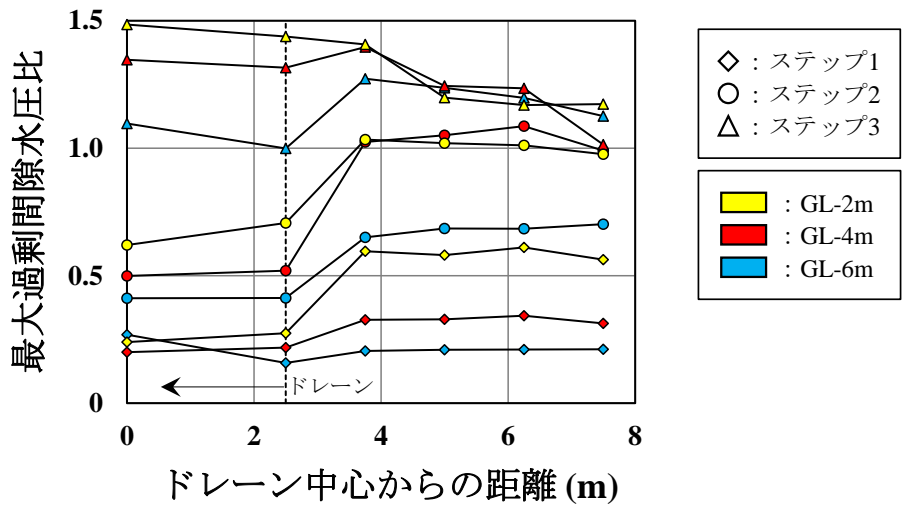
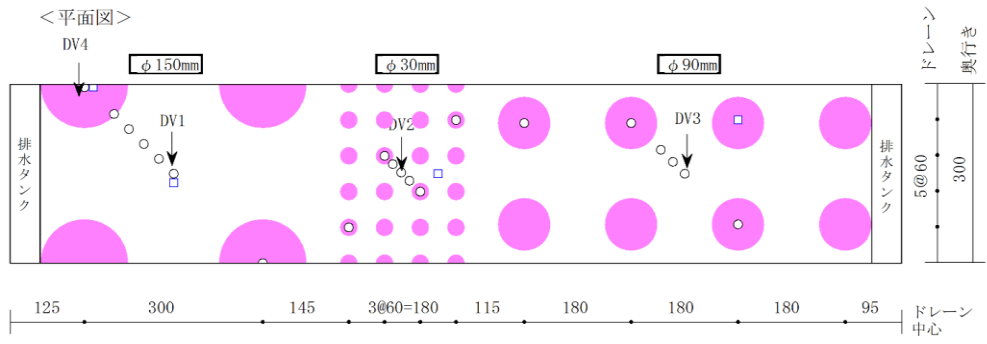


図 3.3.26 ケース 2-4 の左ドレーン(宇部珪砂 3 号、ドレーン径 7.5m) 付近の最大過剰間隙水圧比

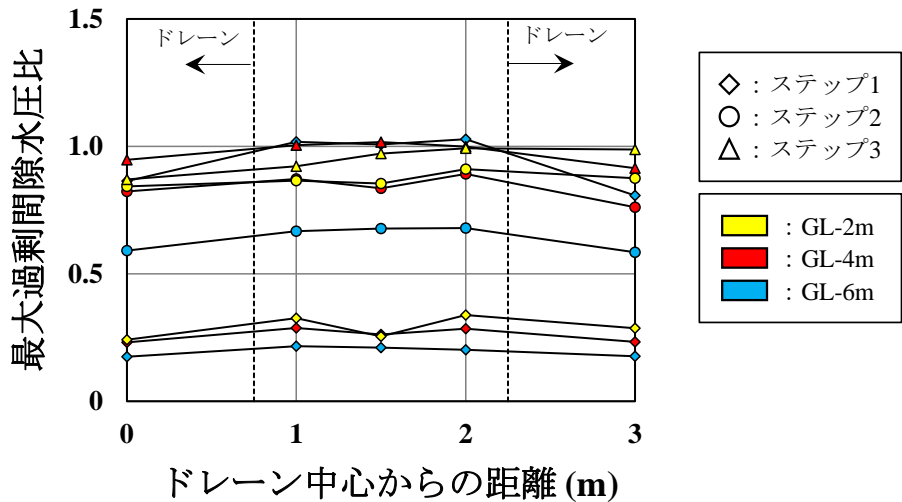


図 3.3.27 ケース 2-4 の中央ドレーン(宇部珪砂 3 号、ドレーン径 1.5m) 付近の最大過剰間隙水圧比

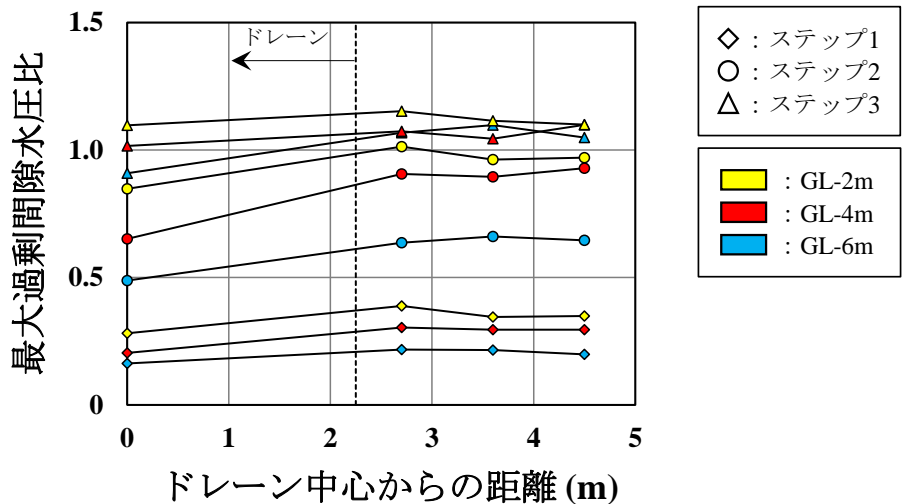


図 3.3.28 ケース 2-4 の右ドレーン(宇部珪砂 3 号、ドレーン径 4.5m) 付近の最大過剰間隙水圧比

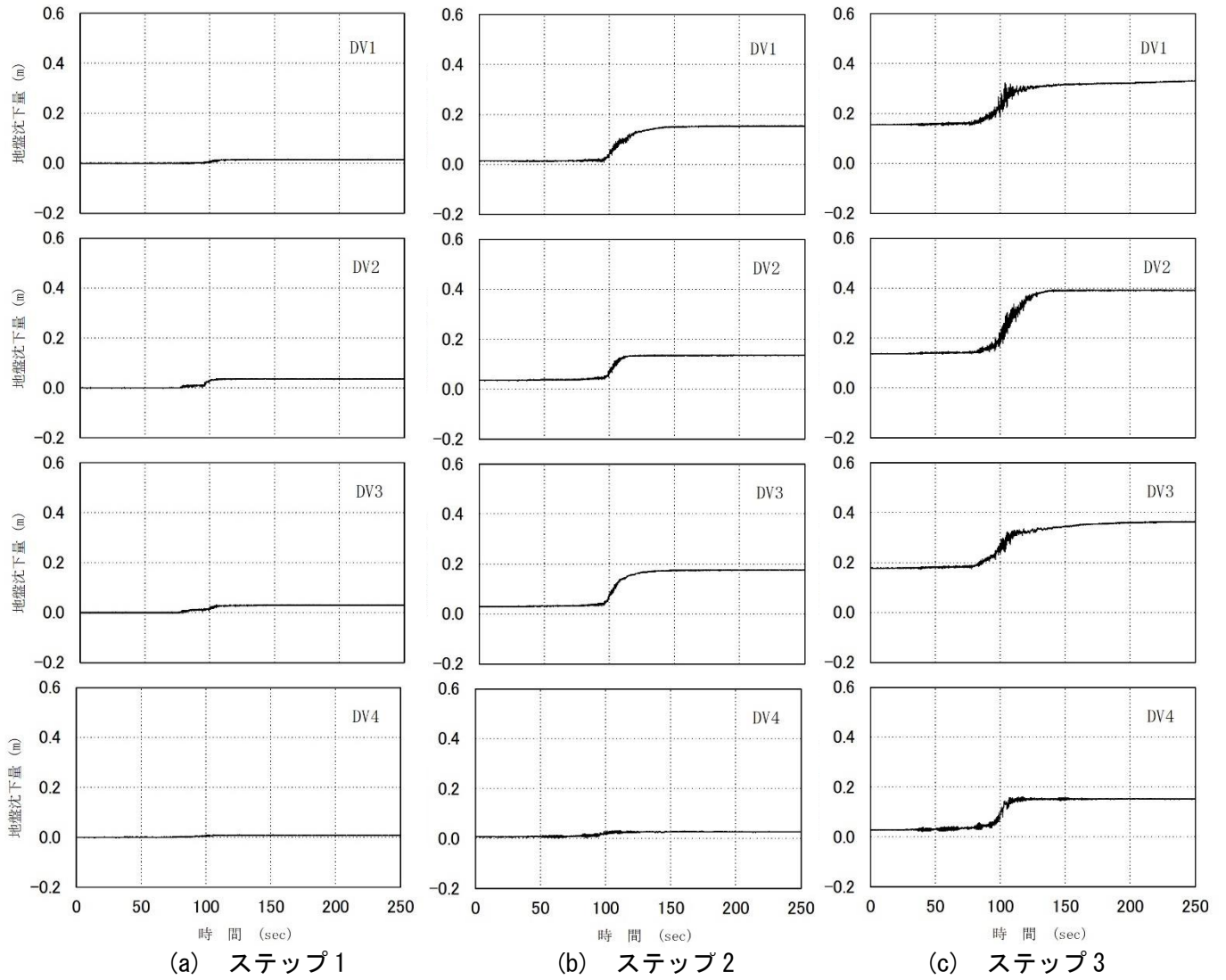
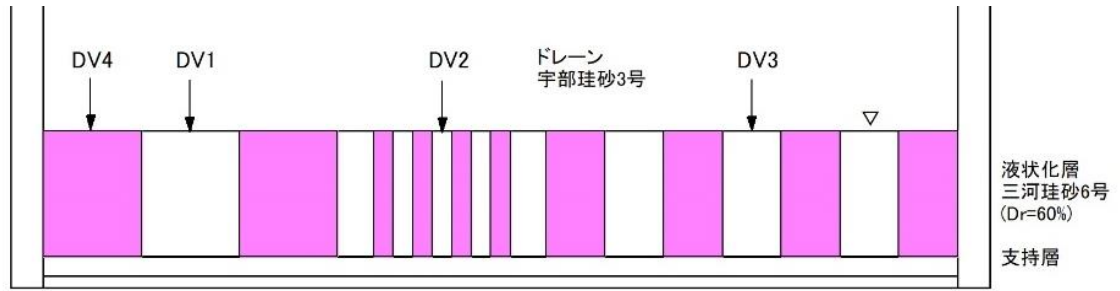


図 3.3.29 ケース 2-4 における各ステップの累積沈下量

表 3.3.4 ケース 2-4 における残留沈下量

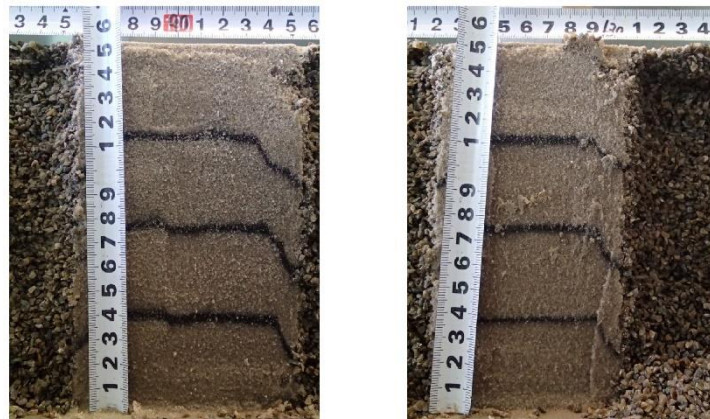
ステップ	残留沈下量 (m)			
	水平地盤			
	DV1	DV2	DV3	DV4
1	0.014	0.036	0.030	0.008
2	0.154	0.136	0.176	0.028
3	0.339	0.392	0.367	0.153



(a) 左ドレーン（ドレーン径 7.5m）間



(b) 中央ドレーン（ドレーン径 1.5m）（写真中のケーブルは加速度計等）



(c) 右ドレーン（ドレーン径 4.5m）間

写真 3.3.4 ケース 2-4 における実験後の模型の開削断面

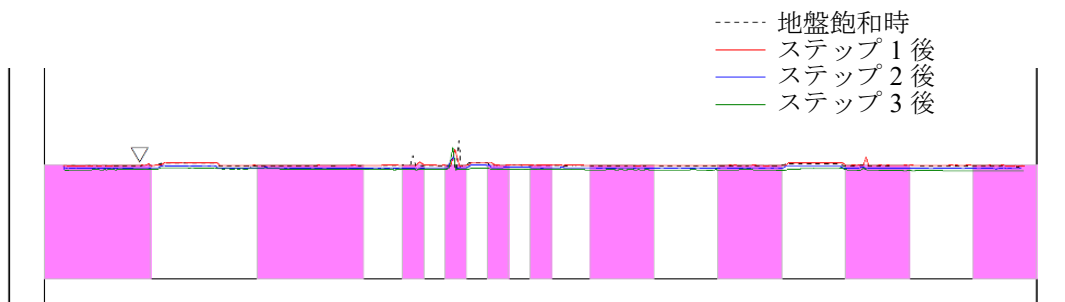


図 3.3.30 ケース 2-4 における模型の地表面形状

3.4 結果のまとめ

これまでの実験でドレーンの効果が発揮されない理由の 1 つとして、液状化層よりも先にドレーン自体が液状化してしまうことが考えられた。ケース 2-3 において、最大値を含め過剰間隙水圧比が液状化層内に比べドレーン内の方が小さいこと、また沈下量もドレーンの方が小さいことから、ドレーン自体が過剰間隙水圧比 1 以上に至りにくく、至った場合でも比較的短時間でありドレーン自体が液状化してもドレーンの効果に大きな影響を及ぼしていないことが確認できた。

GL-6m におけるドレーン中心と液状化層（4 つのドレーンごとの中心を結んでできる正方形の中心、ドレーン間中央）の過剰間隙水圧比（入力地震動波形の加速度が最大値となる時間（98.42 秒）から 50 秒間の平均値、図 3.4.1）より、ドレーン径 1.5m までは径が小さくなるほど、ドレーン中心の過剰間隙水圧比は大きくなる一方、液状化層（ドレーン間中央）は小さくなっており、同じドレーン径のドレーン中心と液状化層（ドレーン間中央）の差が小さくなっている。しかし、ドレーン径が 0.5m になると液状化層（ドレーン間中央）の過剰間隙水圧比は 1 以上となり、その他の径のドレーンによる傾向と大きく異なっている。なお、径 0.5m のドレーンは大きさの都合上、ドレーン内に水圧計は設置しておらず、過剰間隙水圧は未測定となっている。また、写真 3.4.1 にケース 2-4 のドレーン径 1.5m（模型スケールで 30mm）のグラベルドレーン部分における開削断面を示す。写真よりグラベルドレーンの鉛直方向側面から 5mm（模型スケール）程度までは特に液状化層の砂が多く混入しており、写真右側ドレーンの左側面のように場所によっては側面から 10mm（模型スケール）の位置まで混入しているが、ドレーンの中央には混入していないことがわかる。シリーズ 1（ドレーン径 0.5m）と異なり、グラベルドレーンから噴き出した砂が地表面に溜まっていることもなかった。

これより、ドレーン径 0.5m のドレーンで十分な排水機能が発揮されなかったことは、シリーズ 1 で述べたように、ドレーン径に対するドレーン材の粒径の比が極端に大きい遠心模型実験特有の問題と考えられる。すなわち、遠心実験特有の問題のため、ドレーンがフィルターとしての機能を発揮できず、砂まじりの間隙流体がドレーン内を通過し、砂が混じる分だけ見かけの透水性が低下することでドレーンが十分な排水機能を発揮できなかったこと等が考えられる。遠心実験において十分な排水機能は発揮するためには、ある程度の径が必要であるといえる。

図 3.4.2 に液状化層の鉛直方向中心に設置した水圧計（図 3.4.2 の P2-1~P2-20）のうち、各ドレーンの中心およびその近傍の水圧計の結果を示す。P2-3, P2-10, P2-17 のドレーン外周からの距離はそれぞれ異なっている（P2-10（中央） < P2-17（右） < P2-3（左））が、ドレーン径が大きいほどドレーン内と外側の過剰間隙水圧比の差が大きく、過剰間隙水圧が消散するまでの時間も早い結果となった。また、ドレーン径が大きくてもドレーン外周からの距離が離れていると過剰間隙水圧比が大きくなっていることからドレーン径の大きさに加え、杭芯間隔も過剰間隙水圧抑制に対し重要であることが改めて確認された。なお、シリーズ 1 でみられた加振時における地盤中からの気泡の発生はシリーズ 2 においては確認されなかった。

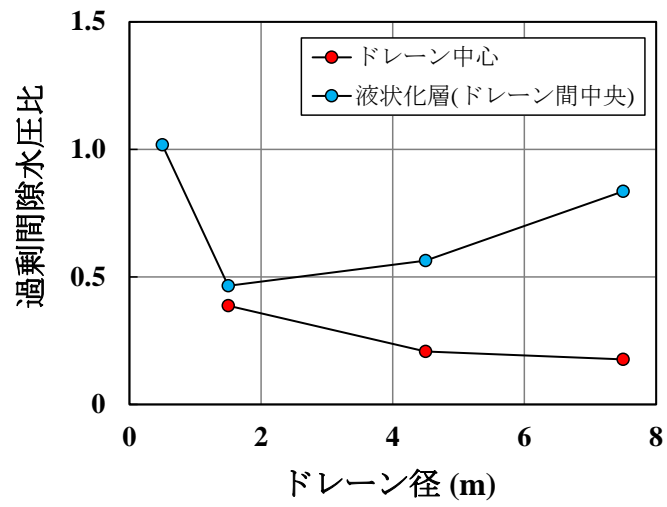
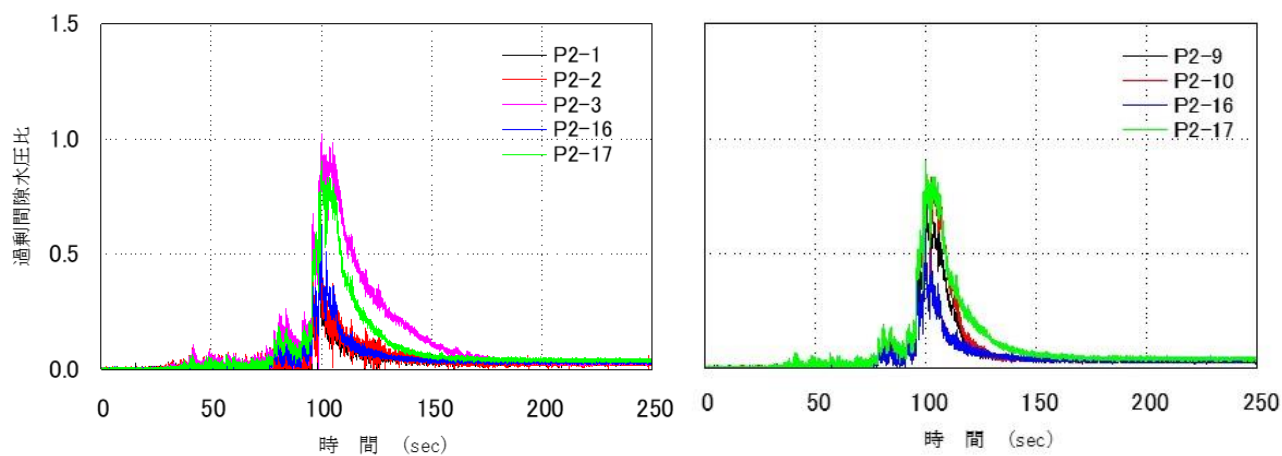
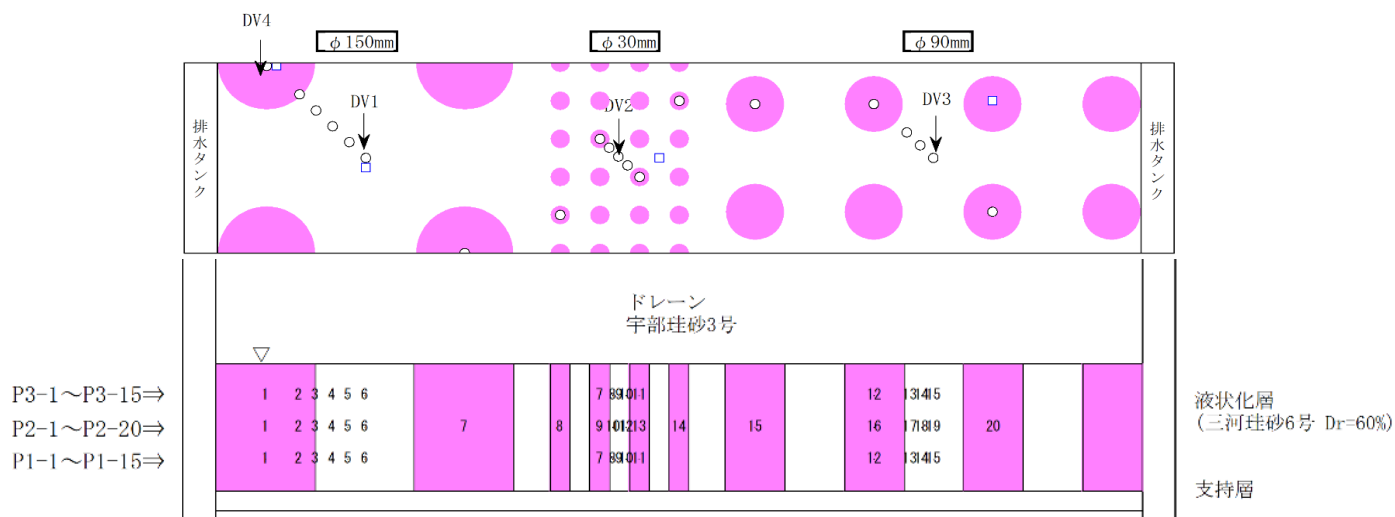


図 3.4.1 GL-6mにおけるドレーン中心と液状化層（ドレーン間中央）の過剰間隙水圧比
（入力地震動波形の加速度が最大値となる 98.42 秒から 50 秒間の平均値）



写真 3.4.1 ケース 2-4 における実験後の中央ドレーン（ドレーン径 1.5m）の開削断面



(a) ドレーン径 7.5m (左) と 4.5m (右) (b) ドレーン径 1.5m (中央) と 4.5m (右)

図 3.4.2 各ドレーン径中心およびその近傍の過剰間隙水圧比の時刻歴の比較

4.2.2 実験ケース

実験ケースを表 4.2.1 に示す。シリーズ3では、液状化対策工（グラベルドレーンおよびパイプドレーン）の有無や種類の違いにより4ケース実施した。ドレーン長は6.9mとし、ドレーンの上面には厚さ0.6mのグラベルマットを設けた。また、水位はGL-1.8mとし、間隙流体には、遠心加速度（30G）に対応し、粘性を30倍に調整したメトローズ水溶液（信越化学工業株式会社製）を使用した。

表 4.2.1 シリーズ3の実験ケース（寸法は実スケール）

ケース	遠心加速度	地下水位	間隙流体	液状化対策工	
				堤体左側	堤体右側
3-1	30G	GL-1.8m	メトローズ水溶液（※1）	なし	
3-2				ドレーン（※2） 9本 杭芯間隔： 3m ドレーン長： 6.9m グラベルドレーン径： 1.5m パイプドレーン径： 0.6m グラベルマット 横： 8.1m 厚さ： 0.6m	グラベルドレーン 9本 杭芯間隔： 3m ドレーン長： 6.9m ドレーン径： 1.5m グラベルマット 横： 8.1m 厚さ： 0.6m
3-3				パイプドレーン 42本 杭芯間隔： 1.2m ドレーン長： 6.9m ドレーン径： 0.6m グラベルマット 横： 7.2m 厚さ： 0.6m	グラベルドレーン 42本 杭芯間隔： 1.2m ドレーン長： 6.9m ドレーン径： 0.6m グラベルマット 横： 7.2m 厚さ： 0.6m
3-4				グラベルドレーン 25本 杭芯間隔： 1.8m ドレーン長： 6.9m ドレーン径： 0.6m グラベルマット 横： 8.4m 厚さ： 0.6m	グラベルドレーン 42本 杭芯間隔： 1.2m ドレーン長： 6.9m ドレーン径： 0.6m グラベルマット 横： 7.2m 厚さ： 0.6m

※1 粘性は水の30倍

※2 グラベルドレーンの内側にパイプドレーンを配置したドレーン

4.2.3 地盤材料とドレーン材

各ケースにおける模型の地盤材料を表 4.2.2 に、その物性値を表 4.2.3 に示す。

図 4.2.2 に堤体を使用した江戸崎砂と液状化層に使用した三河珪砂 6 号およびグラベルドレーン材に使用した宇部珪砂 1 号の粒径加積曲線を示す。液状化層およびグラベルドレーン材に使用する材料はフィルター基準 ($D_{G15}/D_{85} < 9^4$) を満足するよう選定した (図 4.2.3、表 4.2.4)。

ここで、 D_{85} : 液状化層材料の通過質量百分率 85% のときの粒径

D_{G15} : ドレーン材の通過質量百分率 15% のときの粒径

また、ケース 3-2 および 3-3 で使用したパイプドレーンは写真 4.2.1 に示す外径 20mm、肉厚 5mm (それぞれ模型スケール) のものを使用した。なお、ケース 3-3 のパイプドレーンは液状化層の地盤材料が流入しないようパイプの外側に不織布を巻き、設置した。ケース 3-4 のグラベルドレーンにおいてもドレーン外側に不織布を巻き、設置した。

表 4.2.2 シリーズ 3 の各ケースにおける模型の地盤材料

ケース	堤体	グラベルドレーン材 グラベルマット	パイプドレーン	液状化層	支持層	砕石層
3-1	江戸崎砂 ($D_c = 90\%$)	—	—	三河珪砂 6号 ($D_r = 60\%$)	宇部珪砂 7号 ($D_r = 95\%$)	東北砕石 7号
3-2		宇部珪砂 1号	プラスチック			
3-3						
3-4			—			

表 4.2.3 シリーズ 3 の各地盤材料の物性値

物性値		地盤材料	江戸崎砂	三河珪砂 6号	宇部珪砂 1号	宇部珪砂 7号	
		地盤種別	堤体	液状化層	グラベルドレーン材 グラベルマット	支持層	
一般	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.701	2.663	2.655	2.630	
粒度	礫分含有率 (%)		0	0	99.9	0	
	砂分含有率 (%)		86.1	95.4	0.1	78.0	
	シルト分含有率 (%)		7.5	4.6	0	19.5	
	粘土分含有率 (%)		6.4	0		2.5	
		均等係数 U_c		9.12	2.08	1.40	2.09
		平均粒径 D_{50} (mm)		0.200	0.230	3.10	0.110
密度最大試験最小	最大乾燥密度 ρ_{max} (g/cm ³)		—	1.641	—	1.587	
	最小乾燥密度 ρ_{min} (g/cm ³)		—	1.290	—	1.214	
試験締め	最大乾燥密度 ρ_{max} (g/cm ³)		1.652	—	—	—	
	最適含水比 ω_{opt} (%)		15.9	—	—	—	
15°C に対する透水係数 k_{15} (m/s)			—	1.38×10^{-4}	2.53×10^{-2}	—	

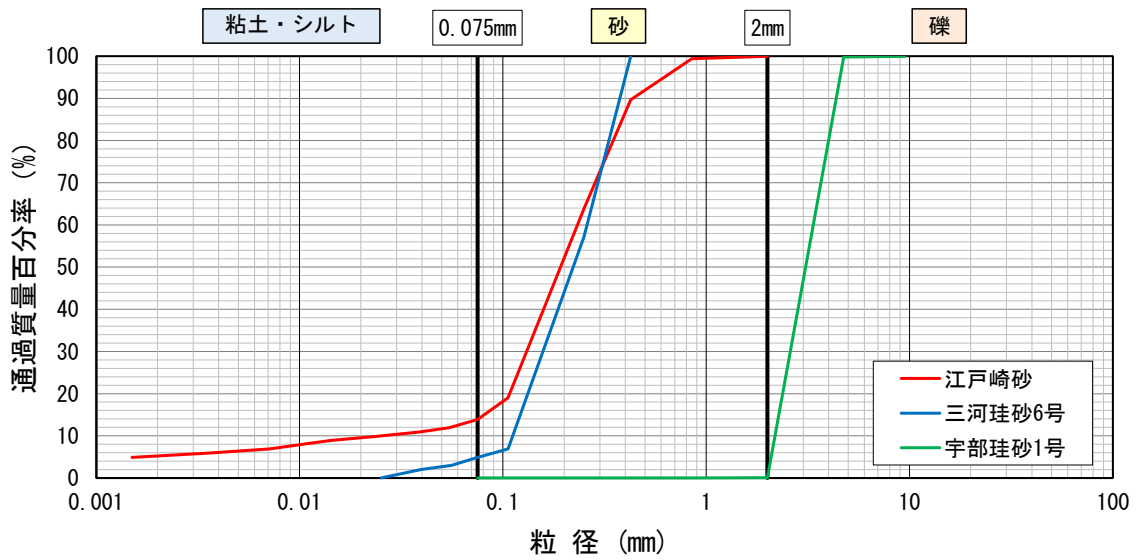


図 4.2.2 液状化層とグラベルドレーン材の粒径加積曲線

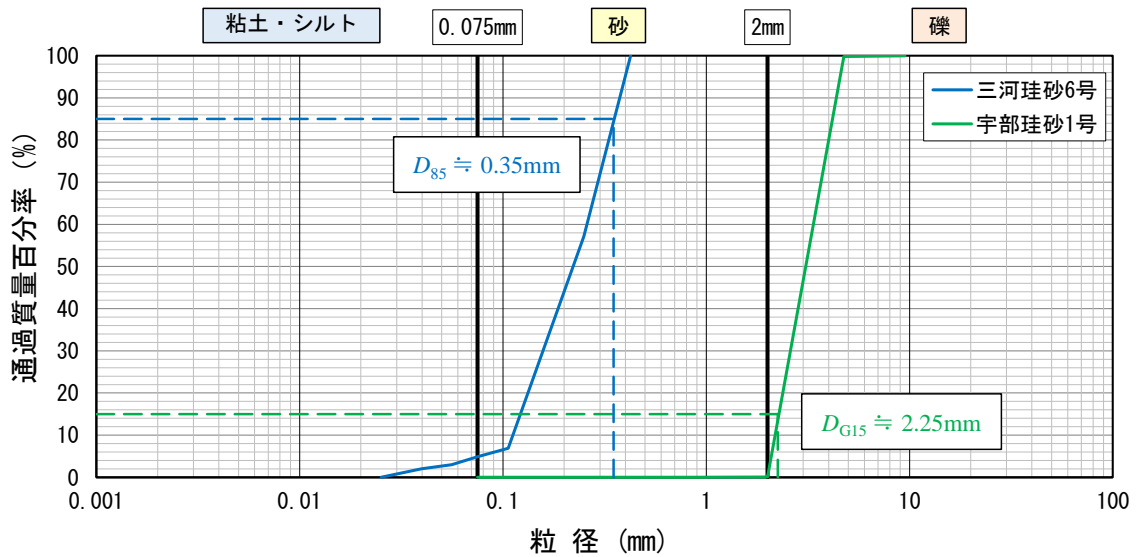
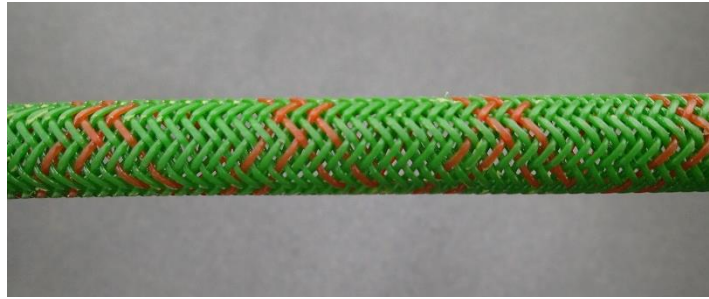


図 4.2.3 液状化層の D_{85} およびグラベルドレーン材の D_{615}

表 4.2.4 シリーズ3における D_{615}/D_{85} の値

地盤種別	グラベルドレーン材	液状化層
地盤材料	宇部珪砂1号	三河珪砂6号
粒径	15%粒径 D_{G15} (mm)	85%粒径 D_{85} (mm)
	2.25	0.35
D_{G15}/D_{85}	6.4	



(a) 不織布なし (ケース 3-2)



(b) 不織布なし (ケース 3-2)



(c) 不織布あり (ケース 3-3)

写真 4.2.1 ケース 3-2 および 3-3 で使用したパイプドレーン

4.2.4 地盤の飽和方法

地盤の飽和は、真空槽内で模型を脱気した後、CO₂ ガスを注入し再度脱気した状態で行った。浸透箇所は支持層下位の碎石層（東北碎石 7 号で厚さ 45cm）として、液状化層下部から間隙流体（メトローズ水溶液、粘性は水の 30 倍）の飽和を行った。表 4.2.5 に各ケースにおける飽和方法を示す。

表 4.2.5 シリーズ 3 における地盤の飽和方法

ケース	浸透箇所	飽和手順
3-1	碎石層 (土槽底面)	1. 脱気 2. CO ₂ ガス注入 3. 脱気 4. 通水
3-2		
3-3		
3-4		

4.2.5 測定項目

実験での測定項目を表 4.2.6 に示す。地盤側面の標点は、液状化層では模型スケールで縦 50mm×横 50mm（排水タンク付近は一部 87.5mm 間隔）四方のメッシュ中央に配置した。ただし、ケース 3-2, 3-3, 3-4 において液状化対策工を施した箇所は未配置とした。堤体では 50mm 間隔で横 3 列に計 27 箇所配置した。

地表面の標点は堤体の横断方向に 2 列で計 28 箇所設置した。

表 4.2.6 シリーズ 3 の測定項目

計測器・計測物	計測位置		数量				備考
			ケース3-1	ケース3-2	ケース3-3	ケース3-4	
加速度計	地盤内		35	25	31		A1～A35
	加振テーブル		1				AT
	土槽底面		1				AB
水圧計	地盤内	底面	4	6	8	6	P1-1～P1-8
		下部	11	9	10	10	P2-1～P2-11
		中部	13				P3-1～P3-11, P3-1V, P3-3V
		上部	11	12	13	13	P4-1～P4-14
	土槽底面		1				PB
変位計	水平地盤		7				DV1～DV7（鉛直）
地表面形状	地表面		一式				重力場で横断方向にレーザー測定
標点	地表面		一式				重力場でメジャー・レーザー測定
	地盤側面						遠心力場で撮影した画像を解析

4.2.6 外力条件

加振実験で使用した入力波形を表 4.2.7、図 4.2.4 に示す。地震波（波形 1）には道路橋示方書⁵⁾のレベル 2 タイプ I 地震動（I 種地盤）である新晚翠橋の地表面加速度波形を、水平地盤面以下の逸散減衰を考慮し、元の振幅の 0.8 倍したものを採用した。各ケースにおいてステップ 1：波形 1、ステップ 2：波形 2、ステップ 3：波形 3、ステップ 4：波形 4、ステップ 5：波形 5 の順に入力し、加振した。なお、堤体断面形状の測定や地盤の観察は各ステップの終了ごとに行った。

表 4.2.7 シリーズ 3 の加振実験で使用した入力波形

名称	入力波形	周波数 (Hz)	目標入力加速度振幅 (gal)
波形 1	地震波 (※)	—	—
波形 2	正弦波	2	150
波形 3			300
波形 4			
波形 5		1	500

※道路橋示方書におけるレベル 2 地震動（タイプ I）の動的解析用波形 I-I-3（I 種地盤、新晚翠橋周辺地盤上 NS 成分）を 80% に調整

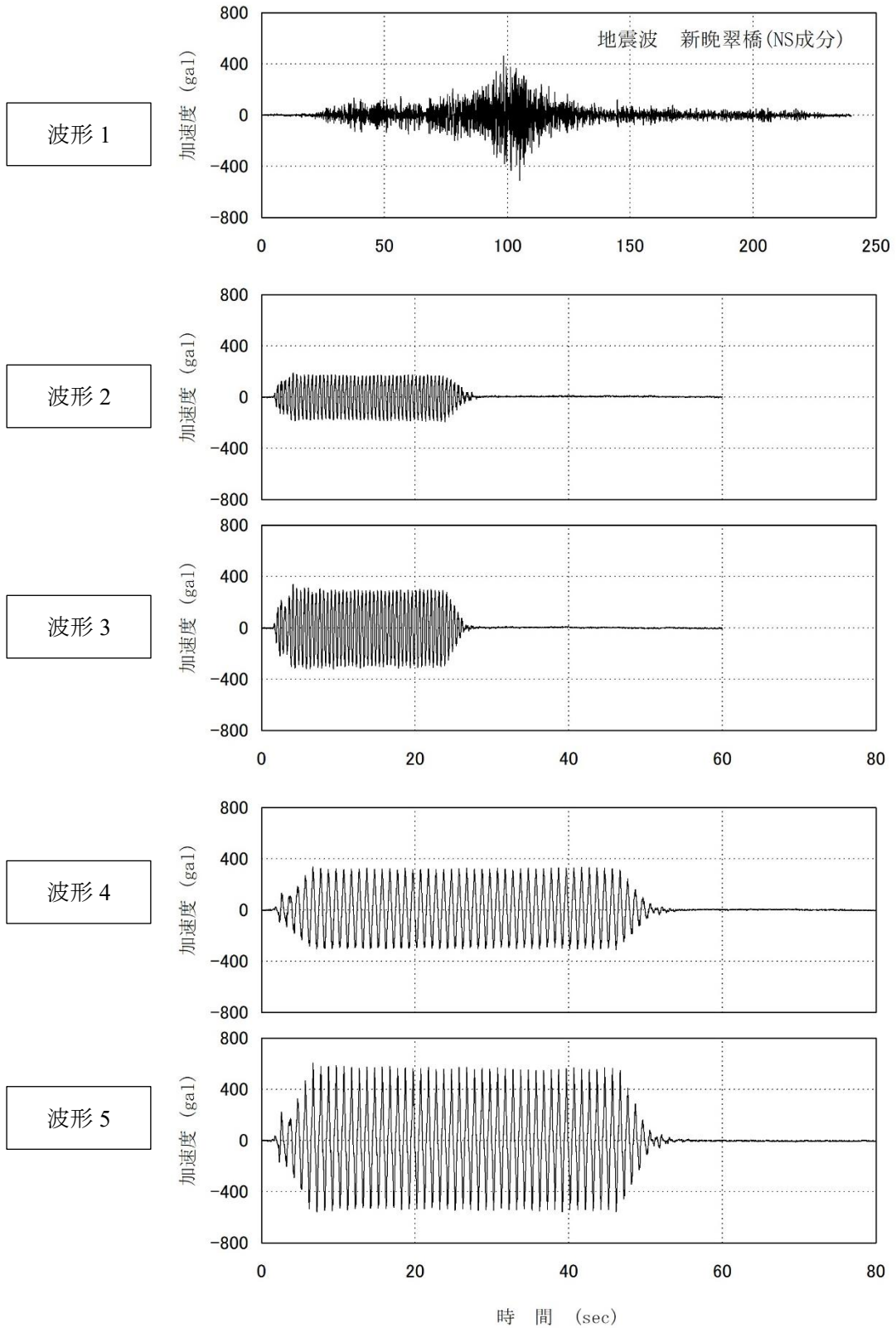


図 4.2.4 シリーズ 3 の加振実験で使用した入力波形

4.3 実験結果

4.3.1 ケース 3-1

ケース 3-1 では、液状化層に対策工を施さない条件（表 4.2.1）で実験を行った。図 4.3.1（本項において本図のみ模型スケールで表記）にケース 3-1 の実験模型を示す。

図 4.3.2～図 4.3.6 にステップ 1～5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。液状化層における過剰間隙水圧比は、各ステップにおいて水平地盤直下および法尻直下の多くで 1 以上となる結果となり、ステップ 1, 5 においては水圧計全体の 2/3 以上で過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 4.3.7、図 4.3.8 に堤体天端（DV3～5）、法尻（DV2,6）および水平地盤上（DV1,7）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 4.3.1 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、ステップ 3 までは各変位計で近い値となったがステップ 5 後の最終的な沈下量は DV3,4 が DV5 と比較して 0.2m 程度大きかった。法尻の変位は DV2 のステップ 2、DV6 のステップ 1,2 で沈下したのに対し、その他のステップでは隆起する結果となった。模型の地表面形状（図 4.3.9）から堤体（主に天端）の沈下（鉛直下向きへの堤体材料の移動）により周辺である法尻が影響を受け隆起したと考えられる。

写真 4.3.1 に堤体真上から見た実験後の模型の状態を示す。写真 4.3.1 より堤体天端から左法面にかけて亀甲状の亀裂が発生していることがわかる。

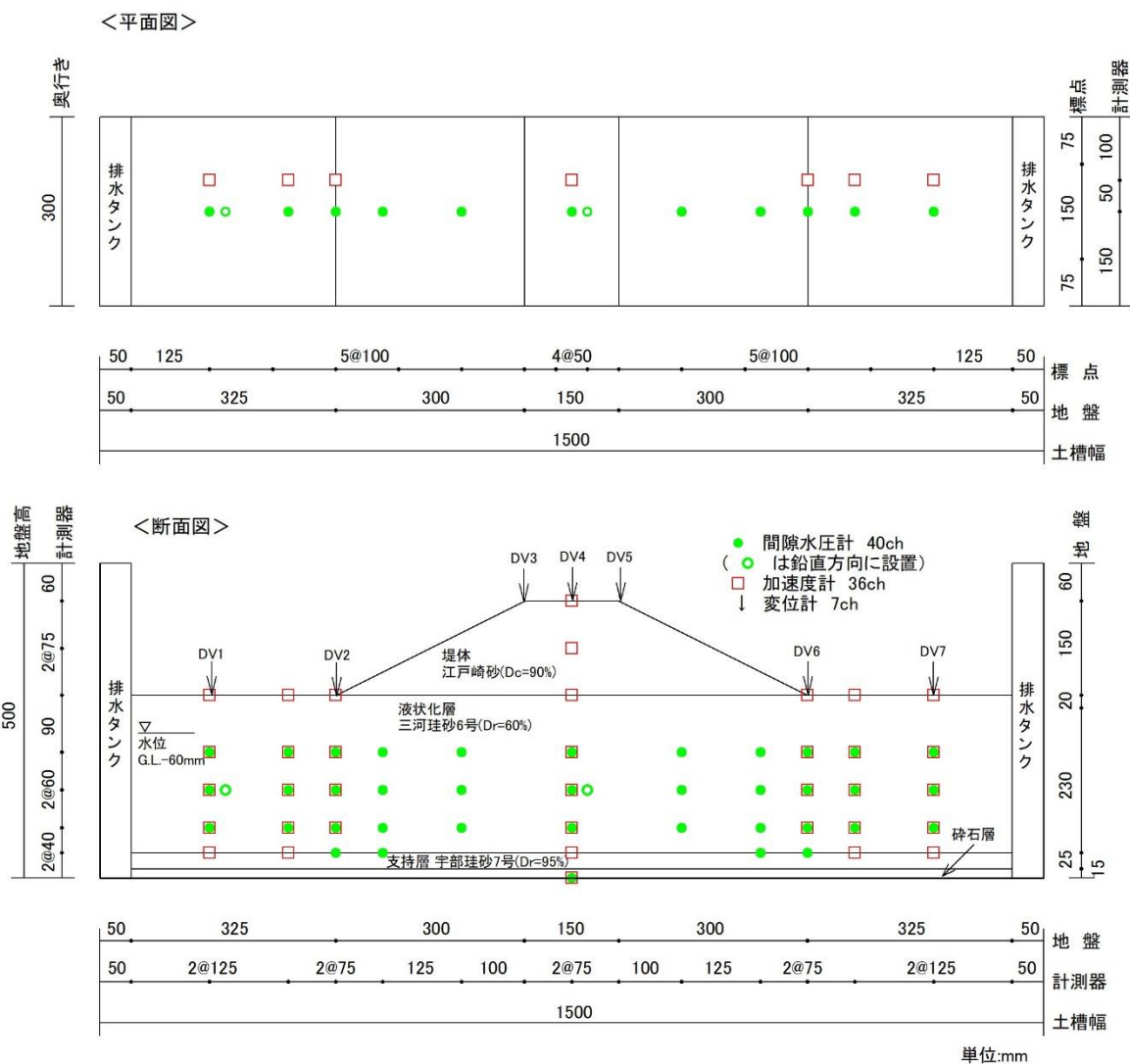


図 4.3.1 ケース 3-1 の実験模型（寸法は模型スケール）

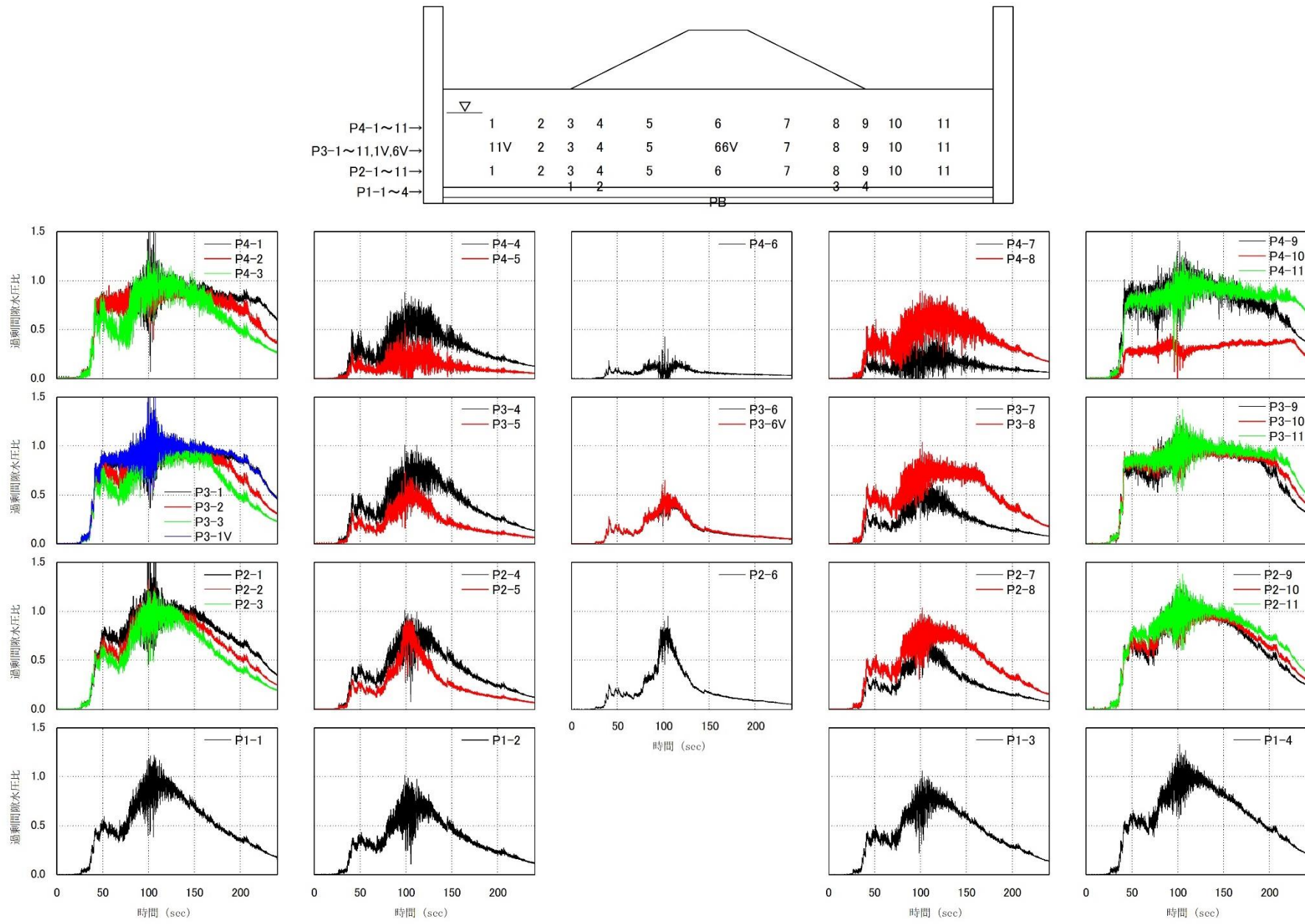


図 4.3.2 ケース 3-1 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

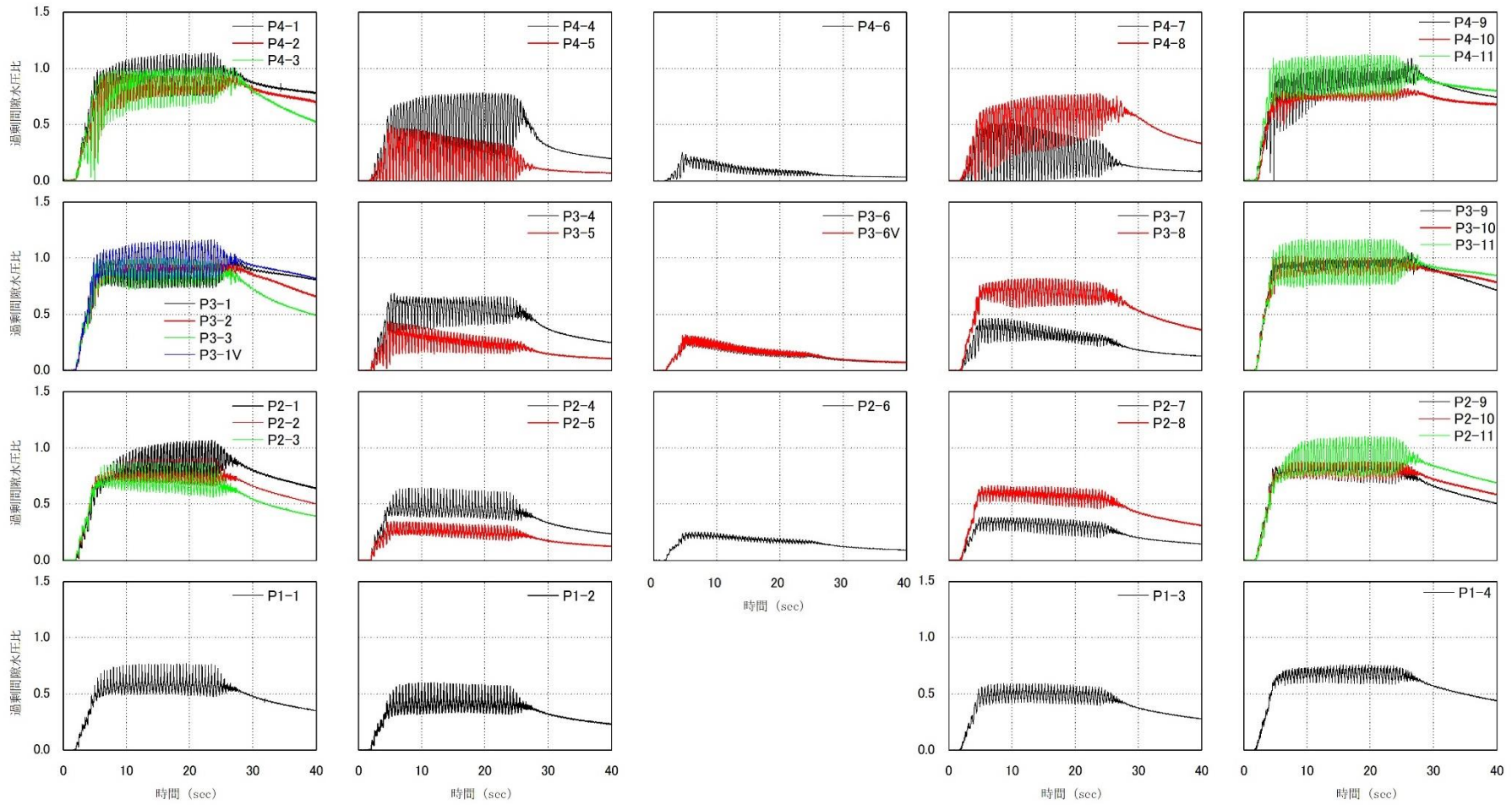
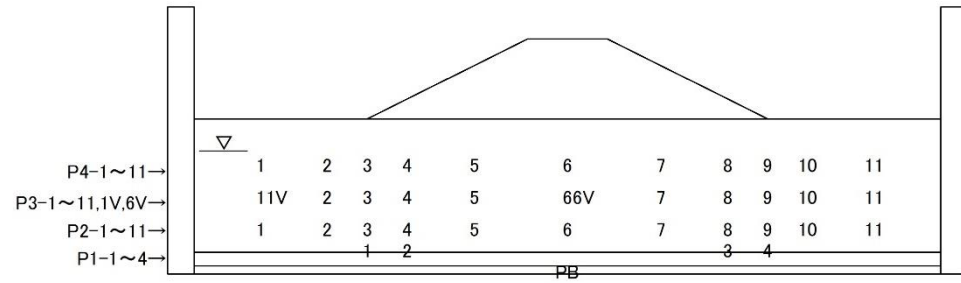


図 4.3.3 ケース 3-1 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

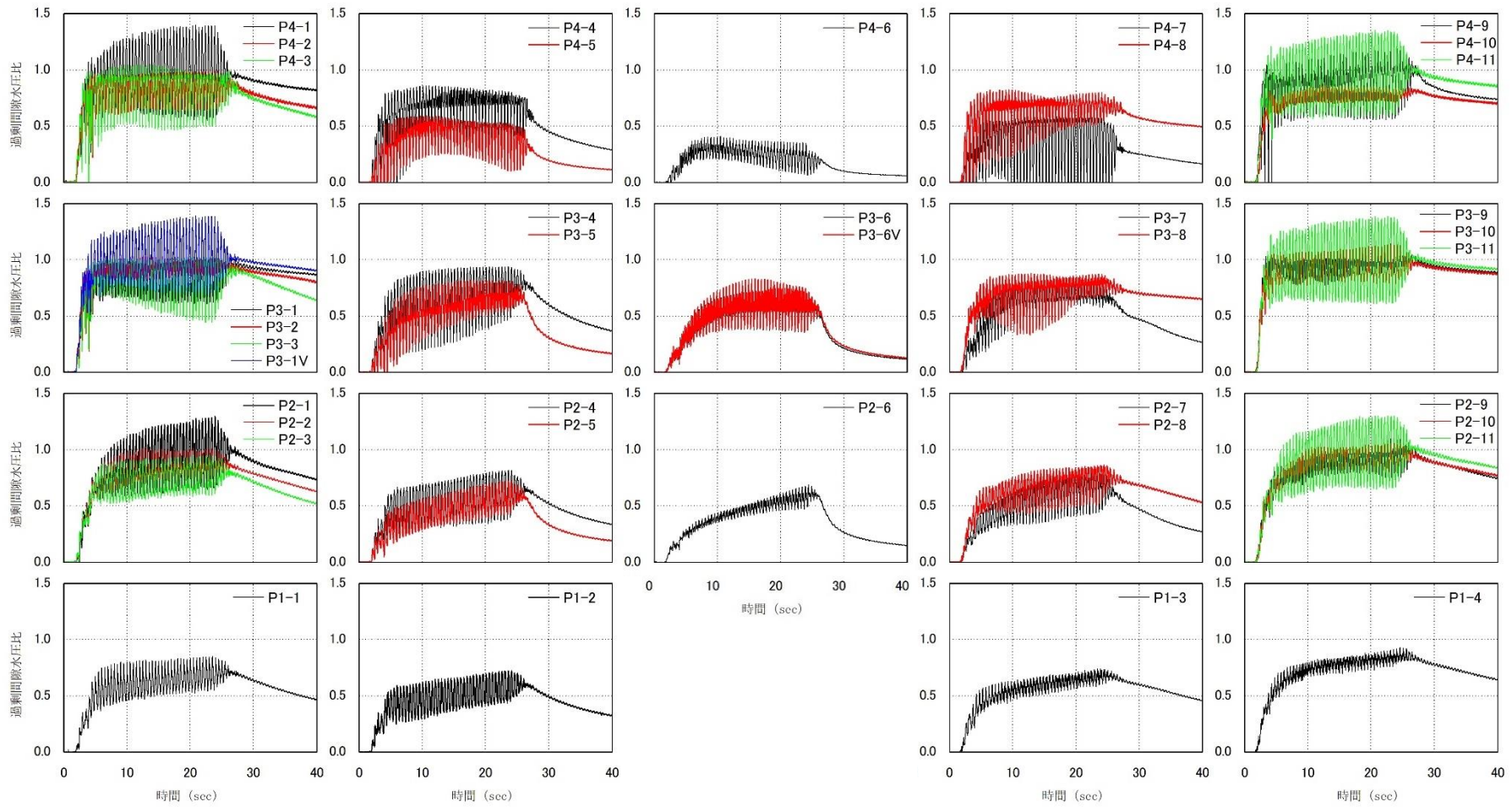
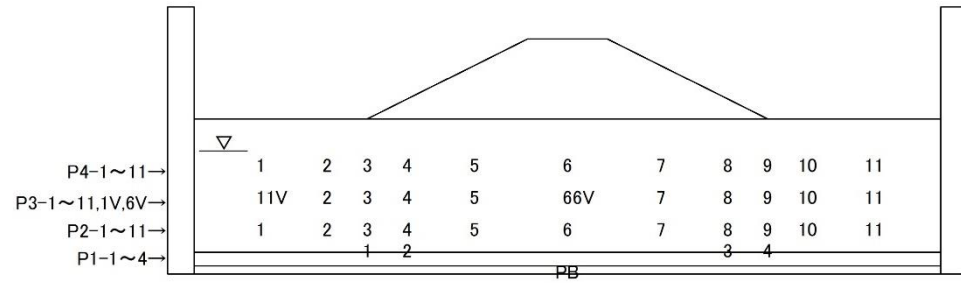


図 4.3.4 ケース 3-1 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

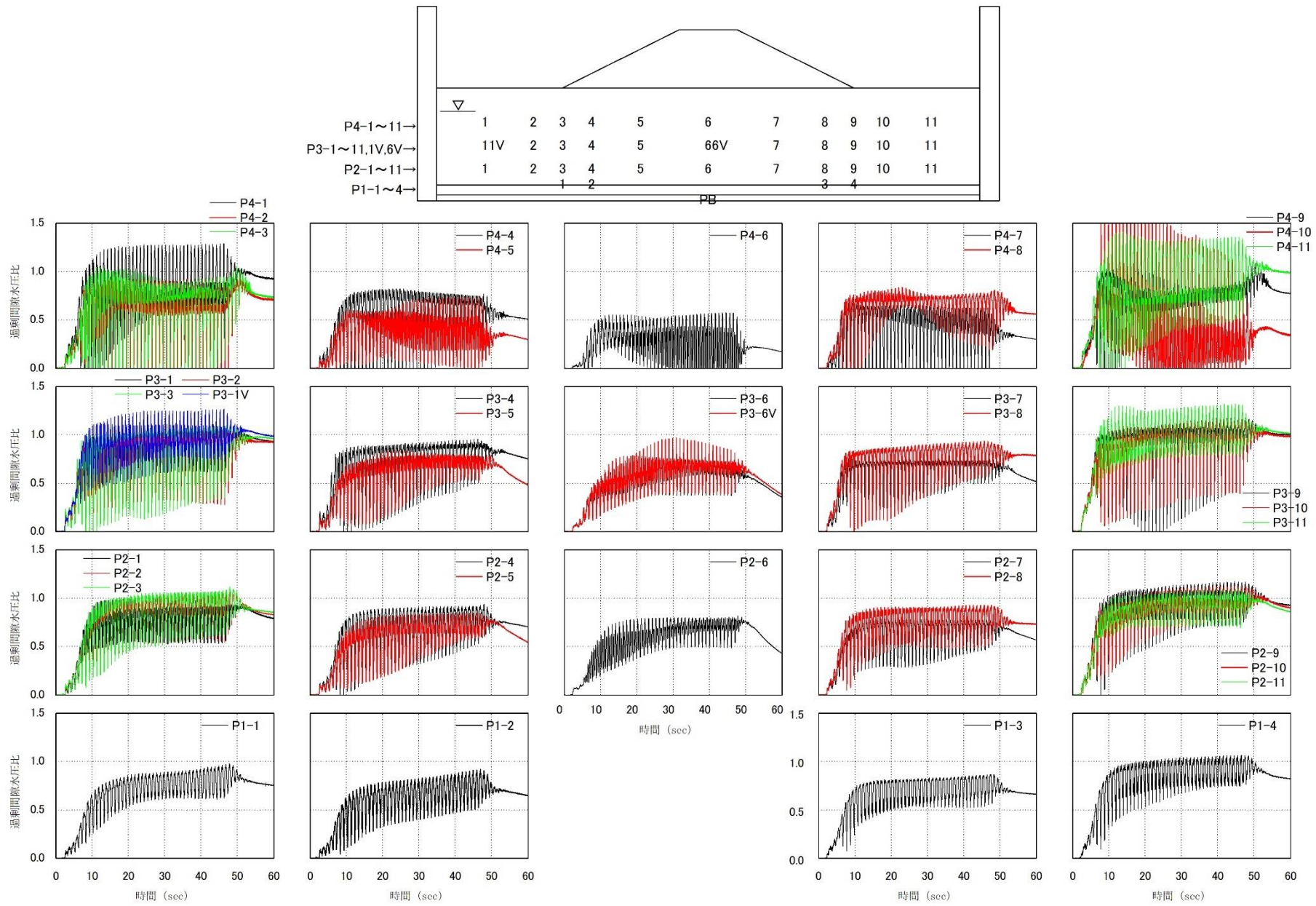


図 4.3.5 ケース 3-1 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

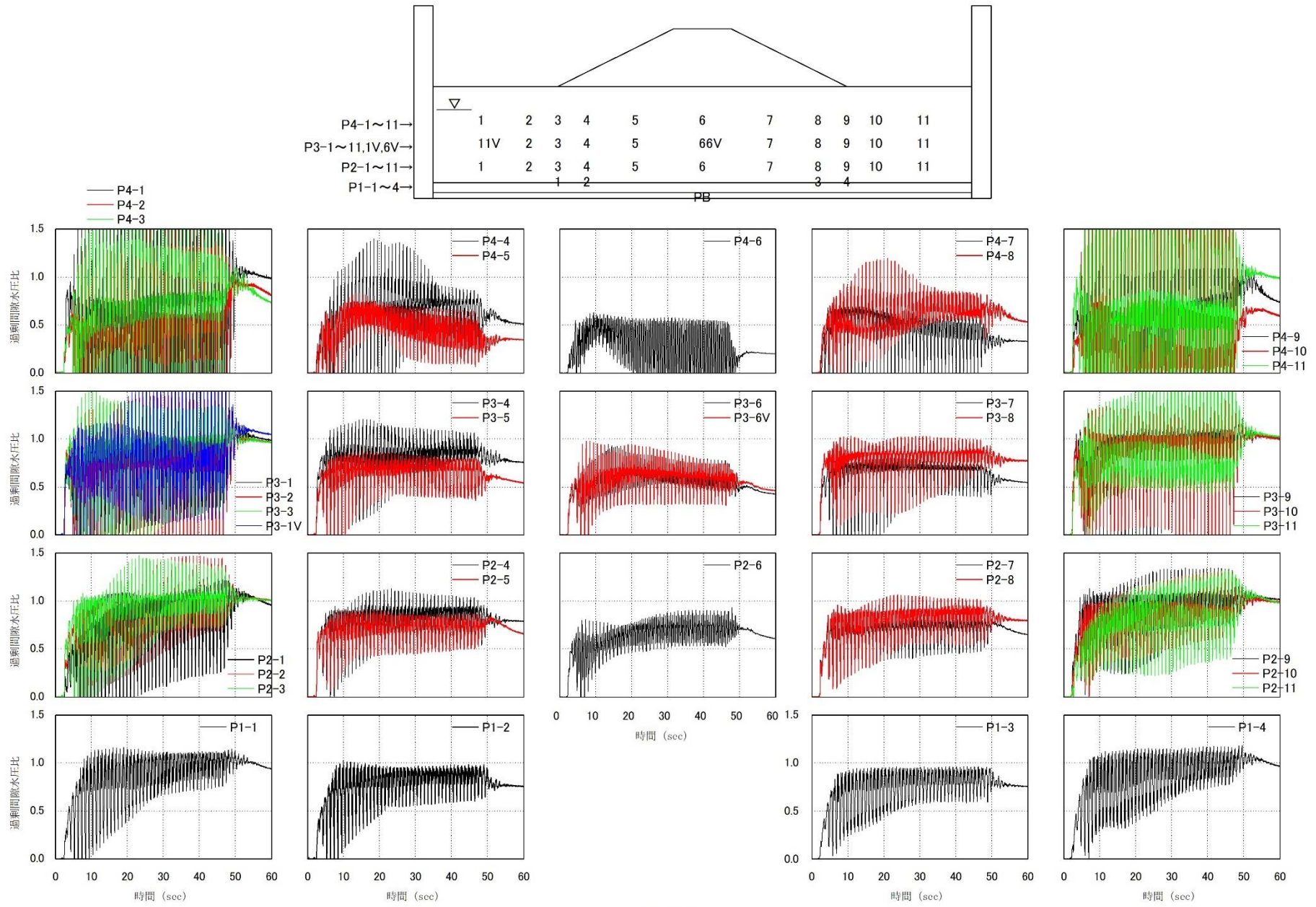


図 4.3.6 ケース 3-1 ステップ 5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

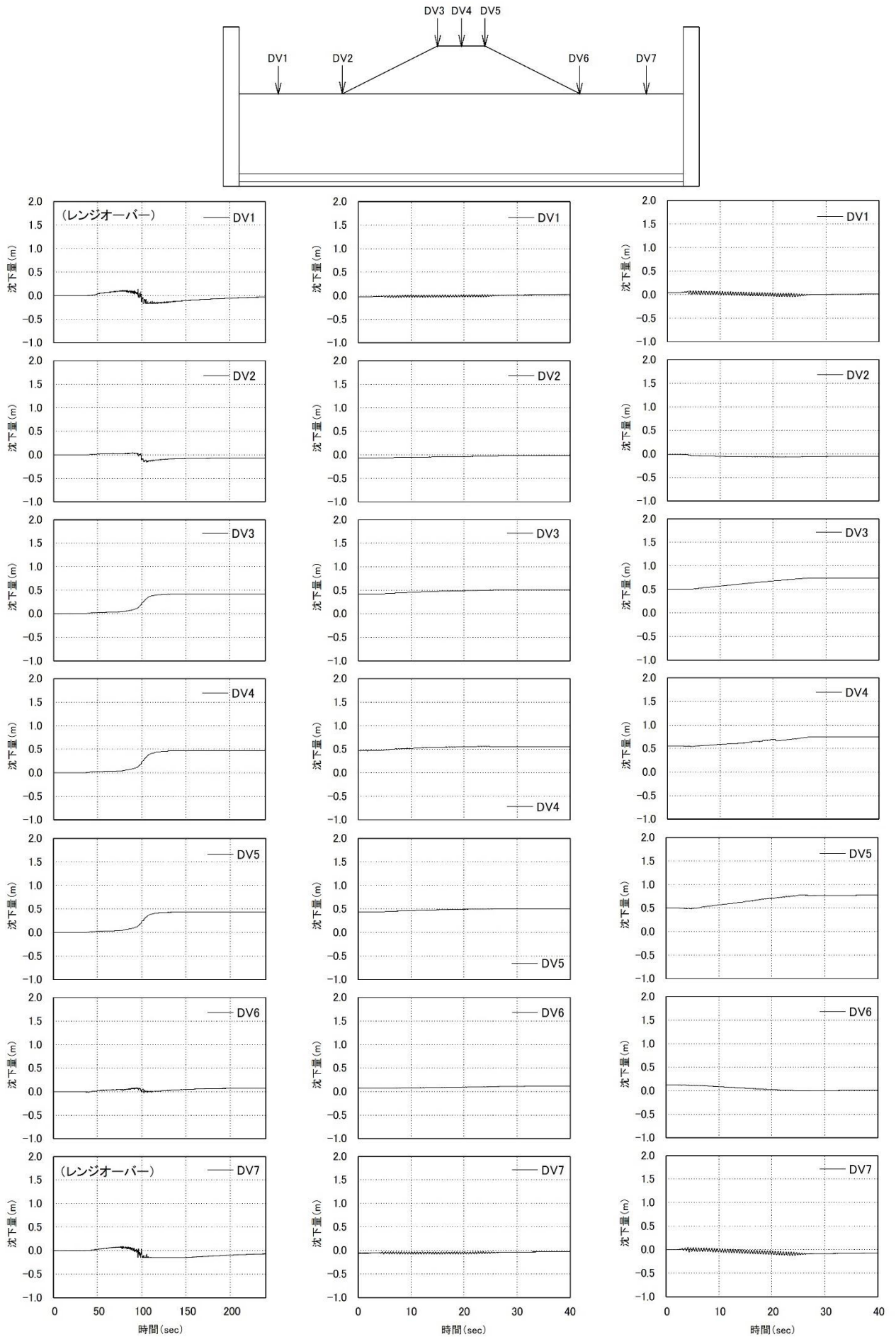
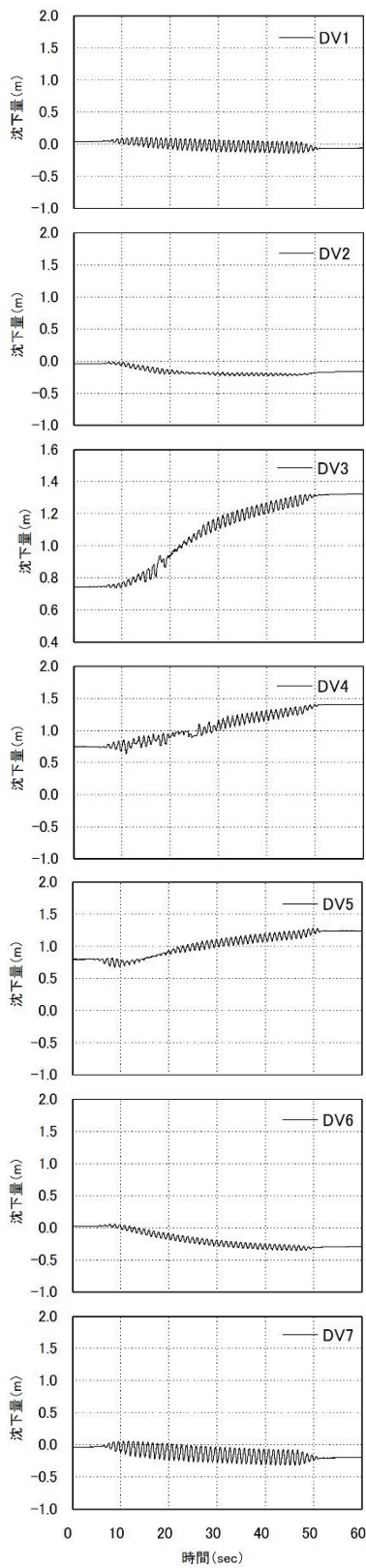
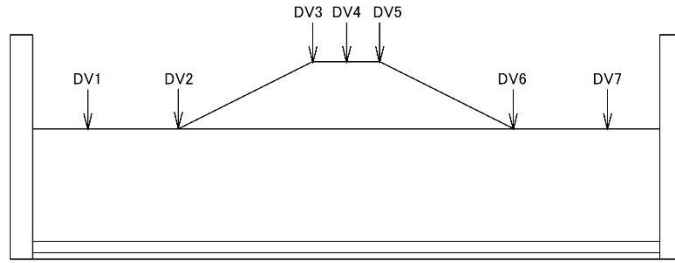
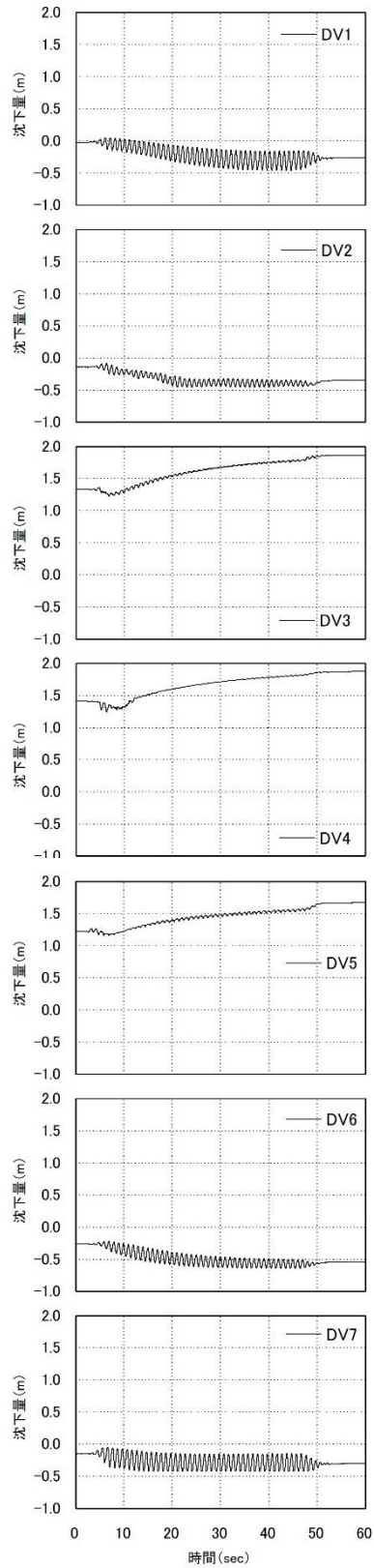


図 4.3.7 ケース 3-1 における各ステップの累積沈下量 (1/2)



(d) ステップ 4



(e) ステップ 5

図 4.3.8 ケース 3-1 における各ステップの累積沈下量 (2/2)

表 4.3.1 ケース 3-1 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	-0.024	-0.068	0.416	0.467	0.432	0.073	-0.057
2	0.042	-0.013	0.505	0.553	0.500	0.118	-0.002
3	0.039	-0.039	0.743	0.747	0.797	0.024	-0.036
4	-0.028	-0.143	1.330	1.408	1.221	-0.262	-0.152
5	-0.220	-0.302	1.880	1.885	1.681	-0.497	-0.243

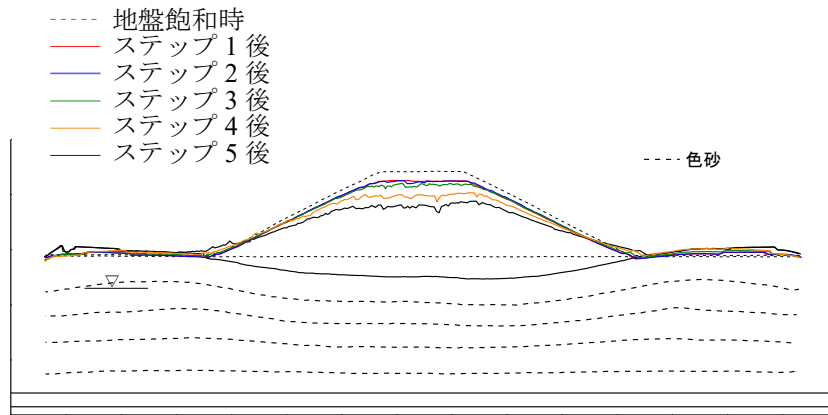
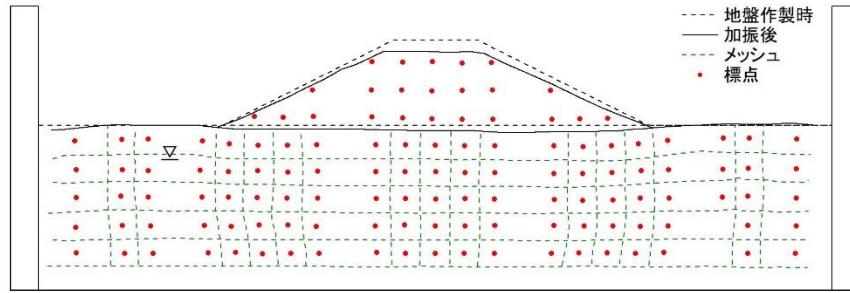


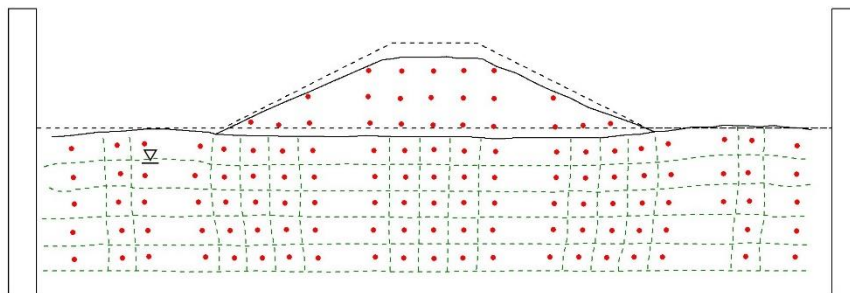
図 4.3.9 ケース 3-1 における模型の地表面形状



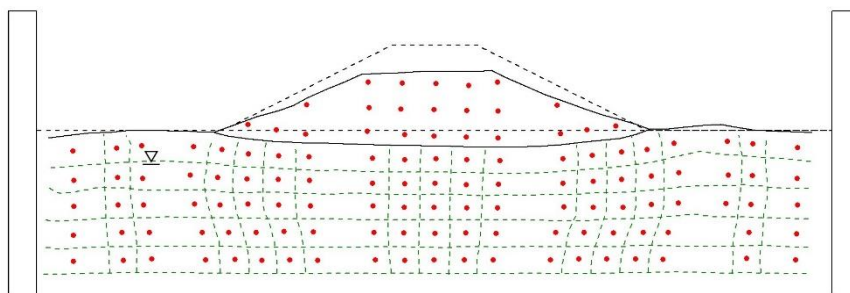
写真 4.3.1 ケース 3-1 における実験後の模型の状態 (堤体真上から撮影)



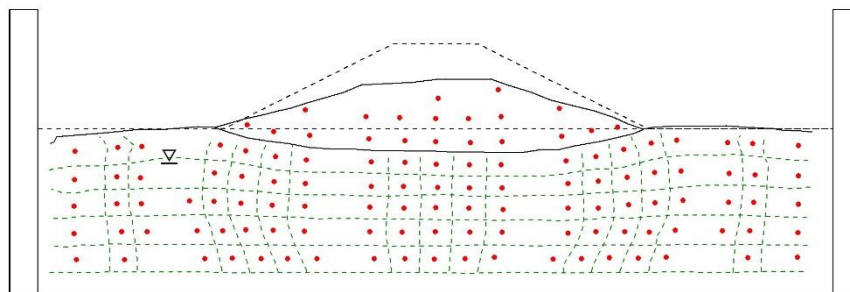
(a) ステップ 1



(b) ステップ 3



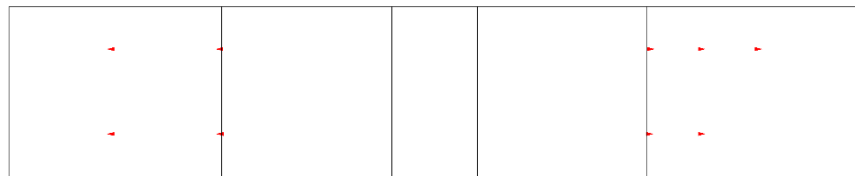
(c) ステップ 4



(d) ステップ 5

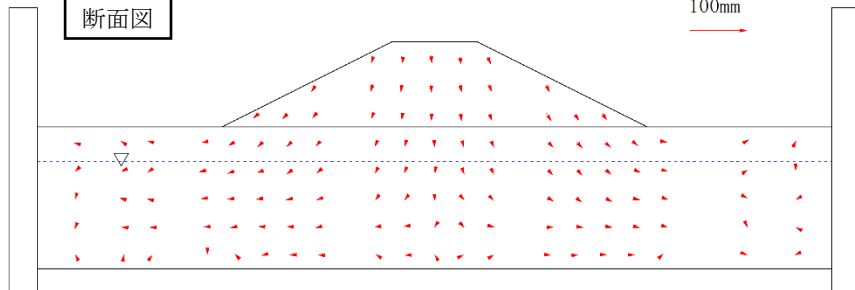
図 4.3.10 ケース 3-1 における各ステップ後の模型の変形

図 4.3.10 に各ステップ後の模型の変形を、図 4.3.11 に標点変位ベクトル図をそれぞれ示す。

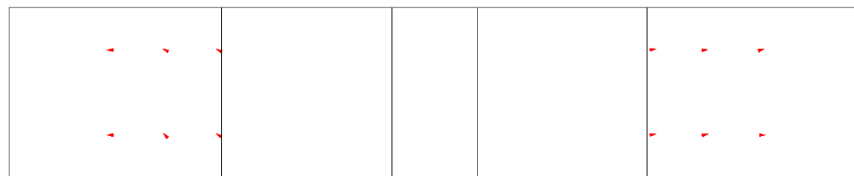


平面図
断面図

ベクトル縮尺
100mm

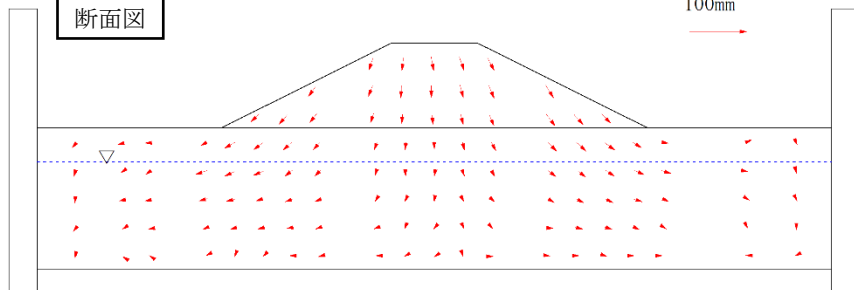


(a) ステップ 1

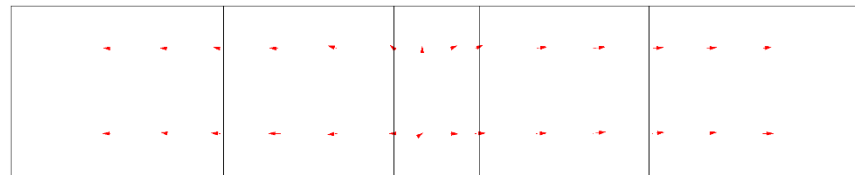


平面図
断面図

ベクトル縮尺
100mm

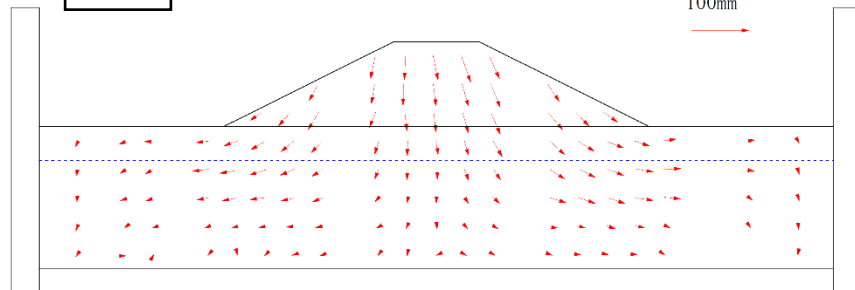


(b) ステップ 3

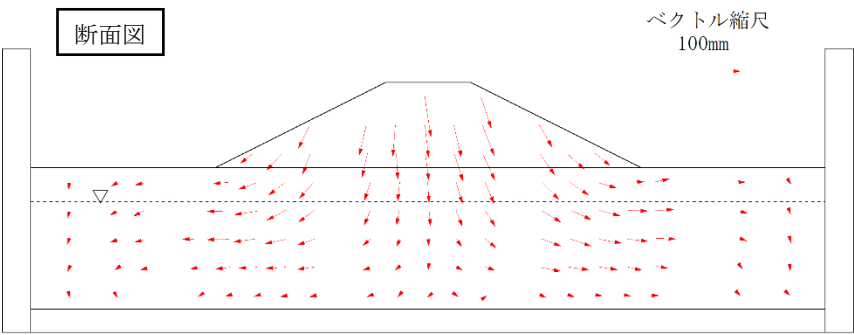


平面図
断面図

ベクトル縮尺
100mm



(c) ステップ 4



断面図

ベクトル縮尺
100mm

(d) ステップ 5

4-18

図 4.3.11 ケース 3-1 における標点変位ベクトル図

4.3.2 ケース 3-2

図 4.3.12 (本項において本図のみ模型スケールで表記) にケース 3-2 の実験模型を示す。シリーズ 2 までの実験結果から、グラベルドレーンが液状化層に接している一定の範囲で砂まじりの間隙流体が濾され、ドレーンの中央付近を間隙流体が流れたことが推察された。そこでドレーン中央付近をパイプドレーンのような透水性の高いものに置き換え、より高い排水機能が発揮されるかを比較するため、ケース 3-2 では 2 種類のドレーン (表 4.2.1) を堤体の左側、右側へそれぞれ打設し、実験を行った。堤体右側のドレーンは杭芯間隔 3m でドレーン径 1.5m、ドレーン長 6.9m のグラベルドレーンを 9 本打設し、上面には厚さ 0.6m のグラベルマットを設けた。堤体左側のドレーンは右側と同仕様で同じ間隔のグラベルドレーンの内側にドレーン径 0.6m のパイプドレーンを打設した。ドレーン上面には堤体右側と同仕様のグラベルマットを設けた。

図 4.3.13～図 4.3.17 にステップ 1～5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。液状化層における過剰間隙水圧比は、ステップ 1 ではすべての水平地盤直下 1 以上となり、ステップ 5 ではすべての水平地盤直下の水圧計に加え、一部の右側の堤体下の水圧計で 1 以上となった。ステップ 2, 3, 4 では過剰間隙水圧比が 1 以上となる水圧計は数箇所またはゼロだった。

図 4.3.18、図 4.3.19 に堤体天端 (DV3～5)、法尻 (DV2,6) および水平地盤上 (DV1,7) における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 4.3.2 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、ステップ 2 までは各変位計で近い値となったがステップ 3, 4 では DV3, 5 の沈下量が大きくなり、ステップ 5 後の最終的な沈下量は DV5 が最も沈下量が大きかった。法尻の変位はステップ 4 までは 0.1m 未満で主に沈下していたがステップ 5 では 0.8m 隆起する結果となった。模型の地表面形状から (図 4.3.20) 堤体材料が堤体中央付近 (天端周辺) から法尻方向へ移動したためであると考えられる。

写真 4.3.2 に堤体真上から見た実験後の模型の状態を示す。写真 4.3.2 より堤体法尻付近において縦断方向に削れていることがわかる。

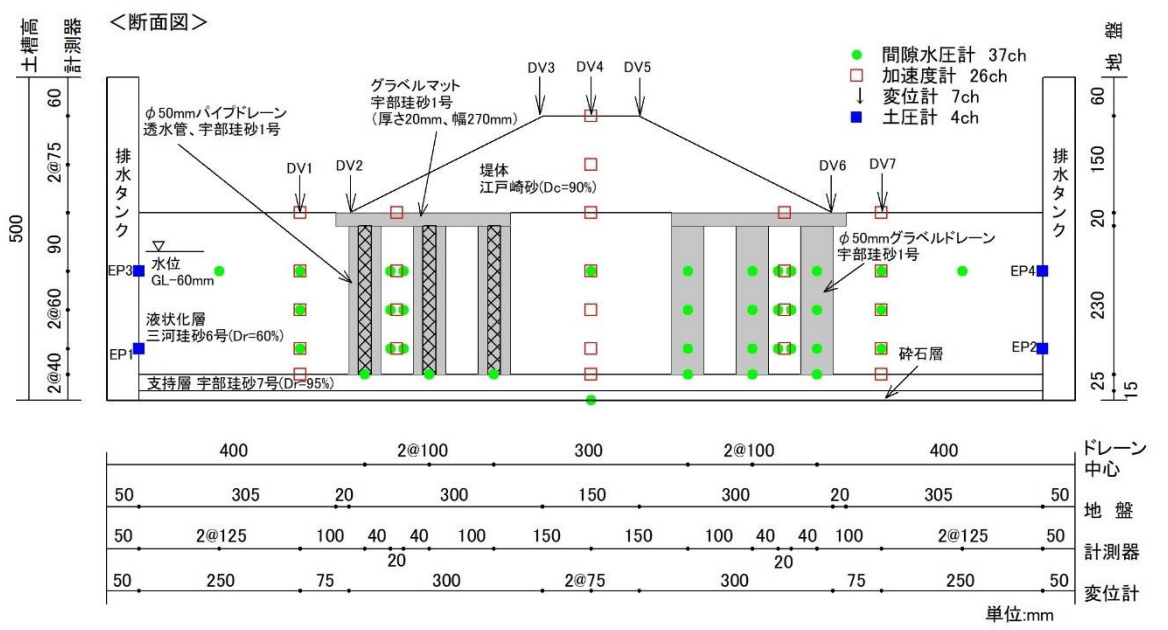
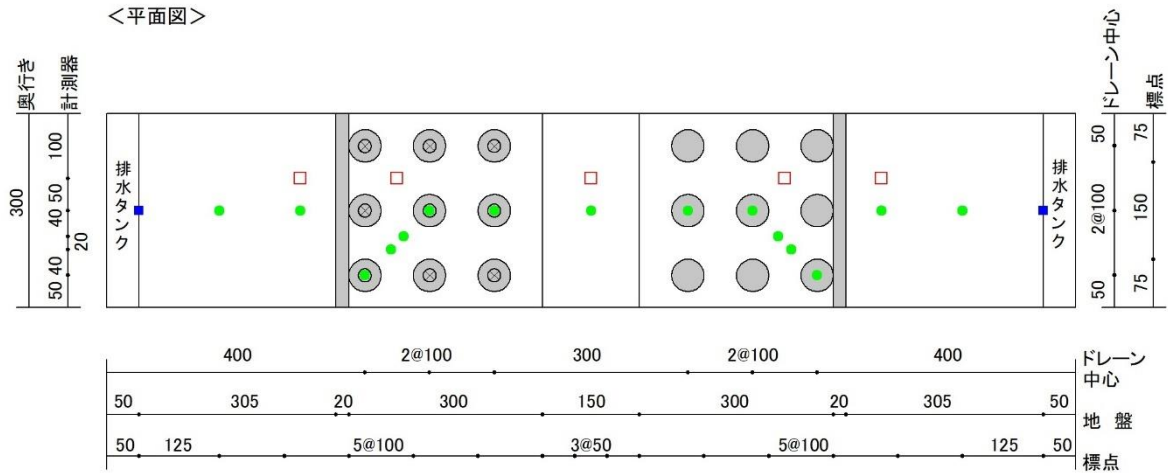


図 4.3.12 ケース 3-2 の実験模型 (寸法は模型スケール)

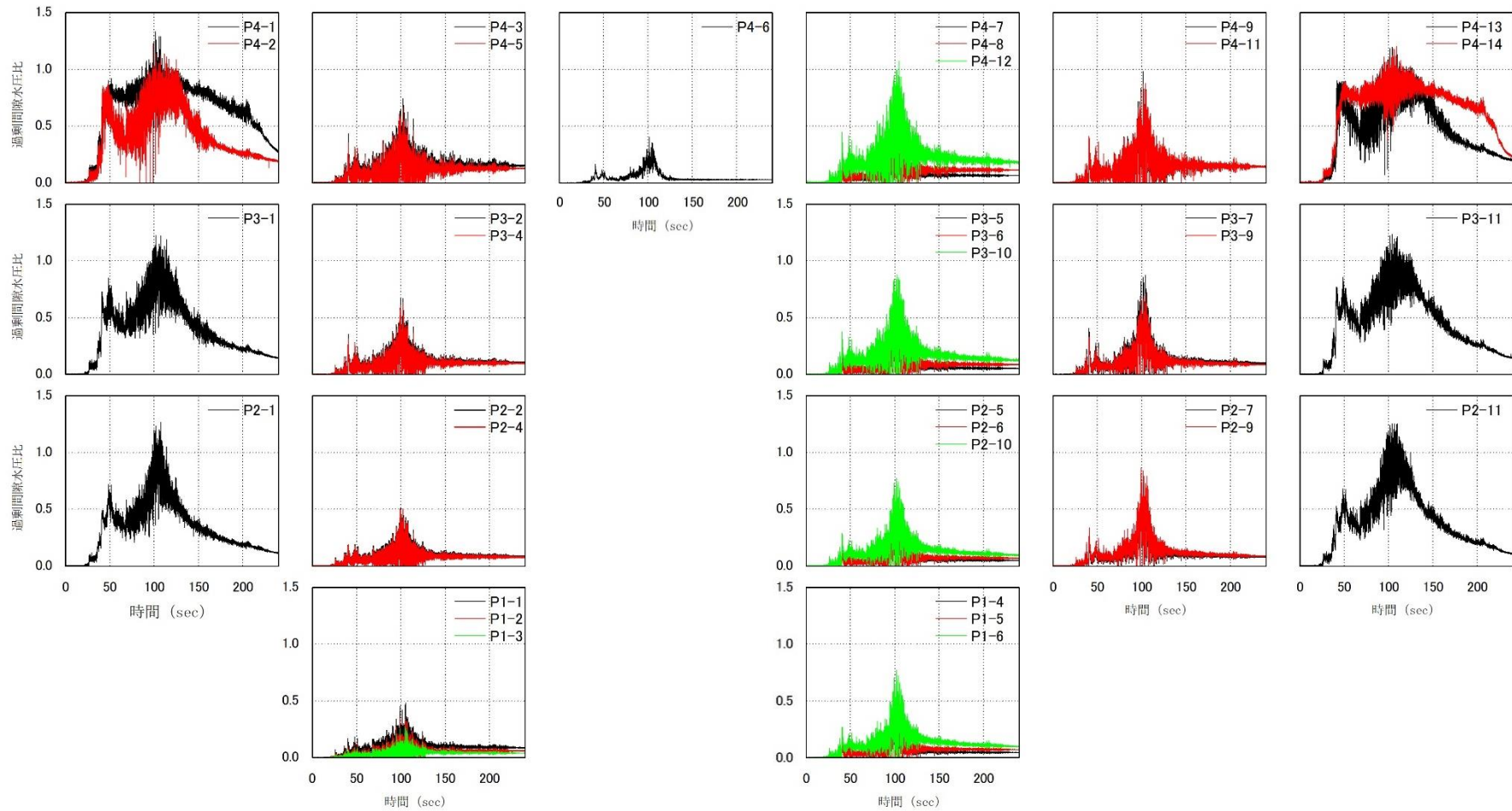
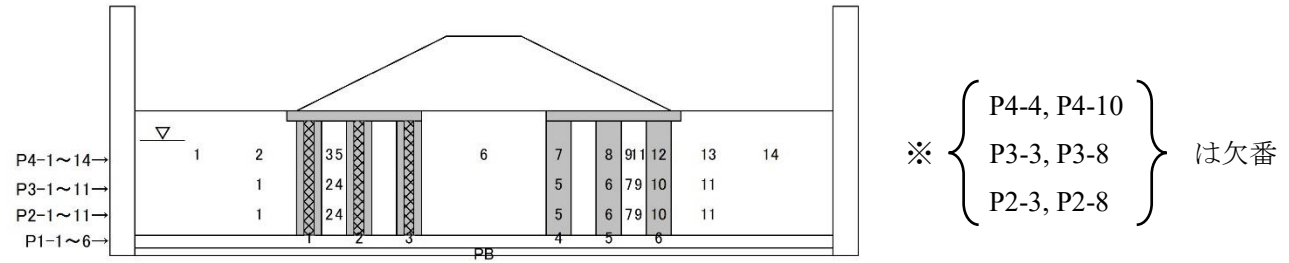
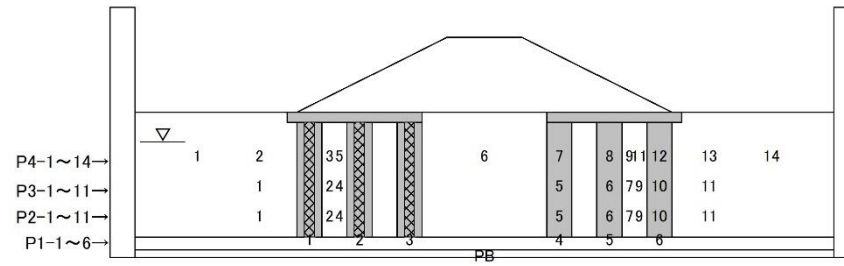


図 4.3.13 ケース 3-2 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴



※ { P4-4, P4-10 }
 { P3-3, P3-8 }
 { P2-3, P2-8 } } は欠番

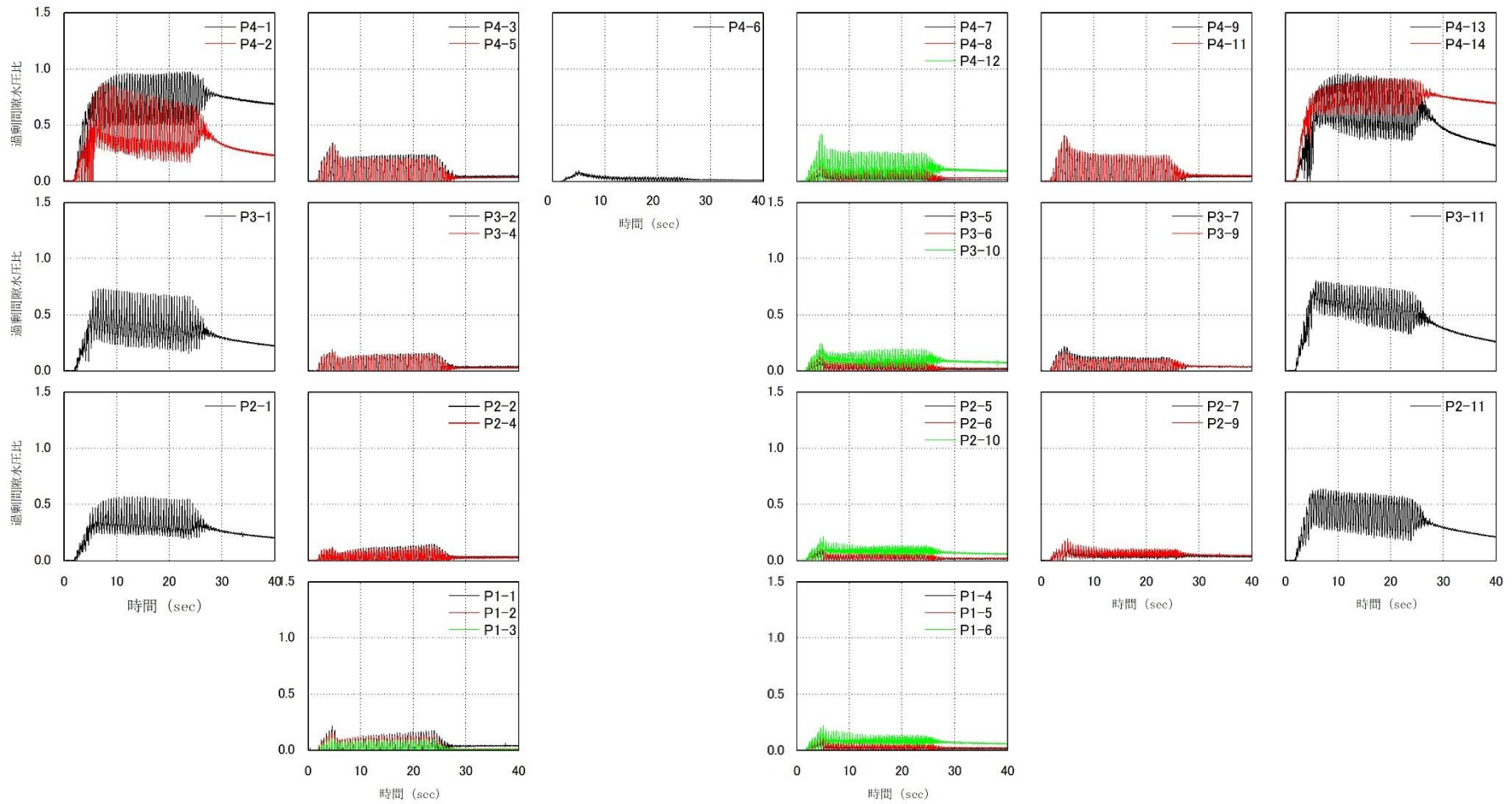


図 4.3.14 ケース 3-2 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

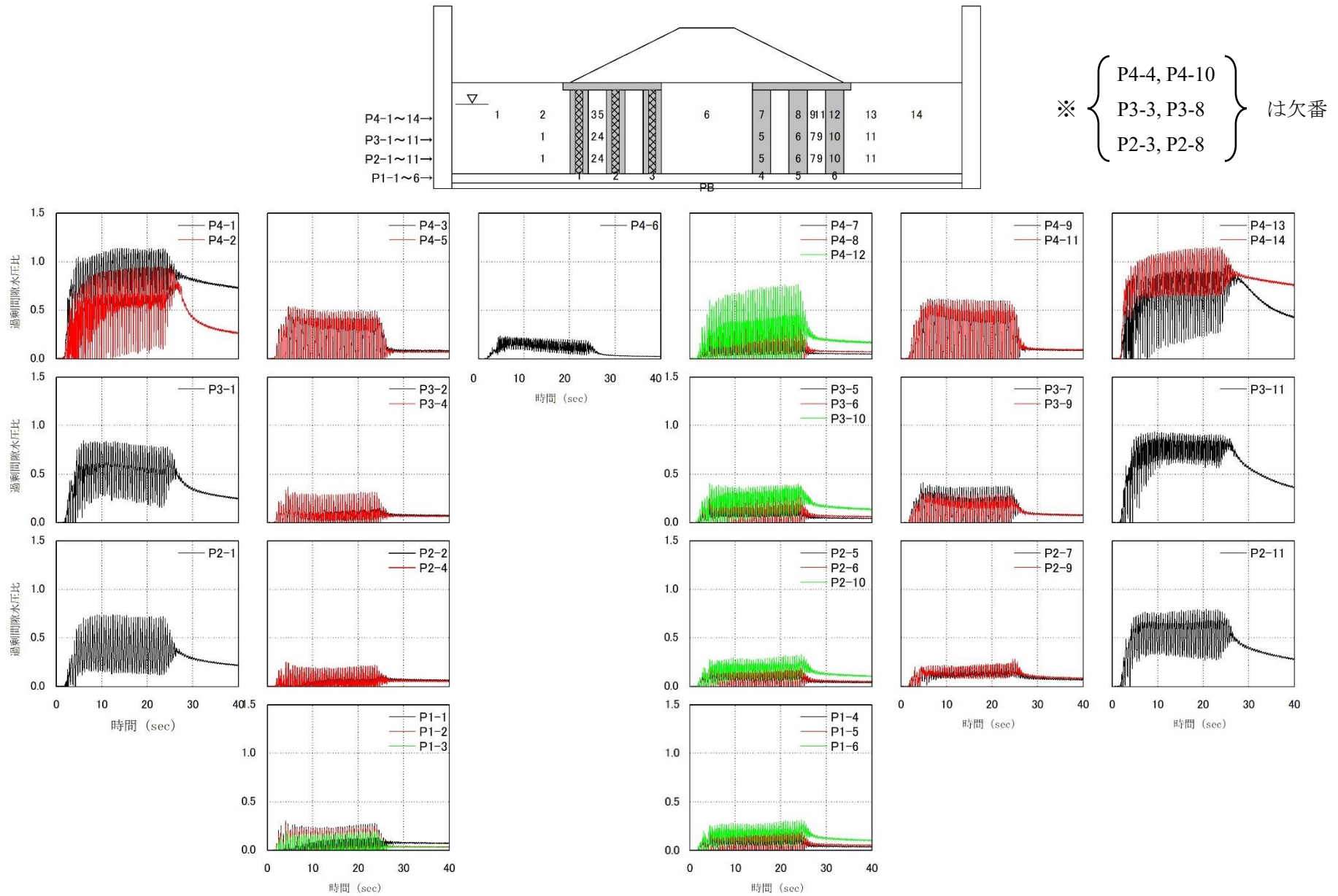
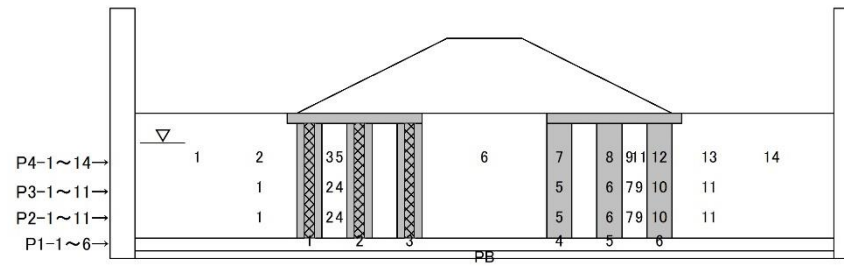


図 4.3.15 ケース 3-2 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴



※ { P4-4, P4-10 }
 { P3-3, P3-8 }
 { P2-3, P2-8 } } は欠番

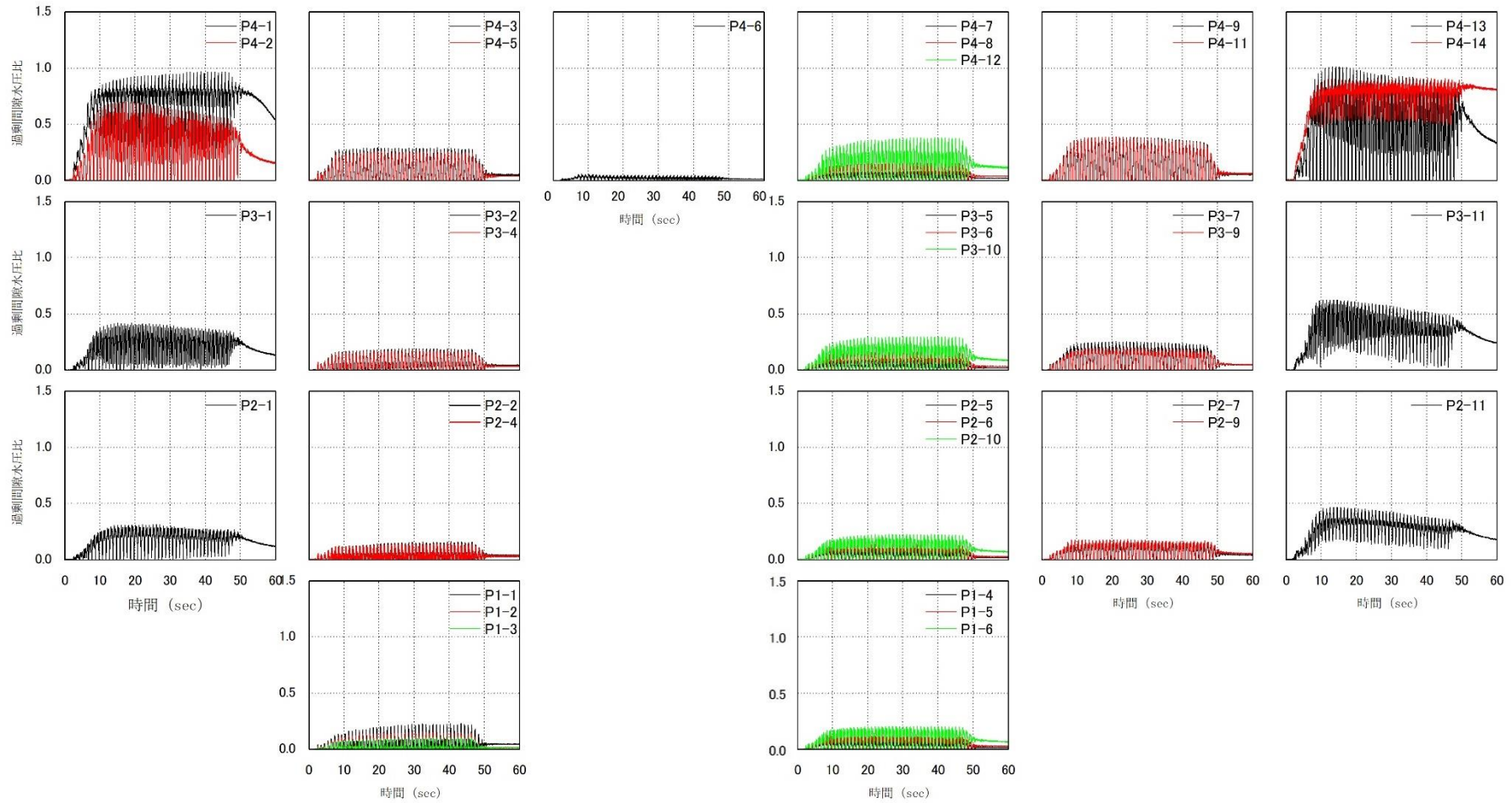


図 4.3.16 ケース 3-2 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

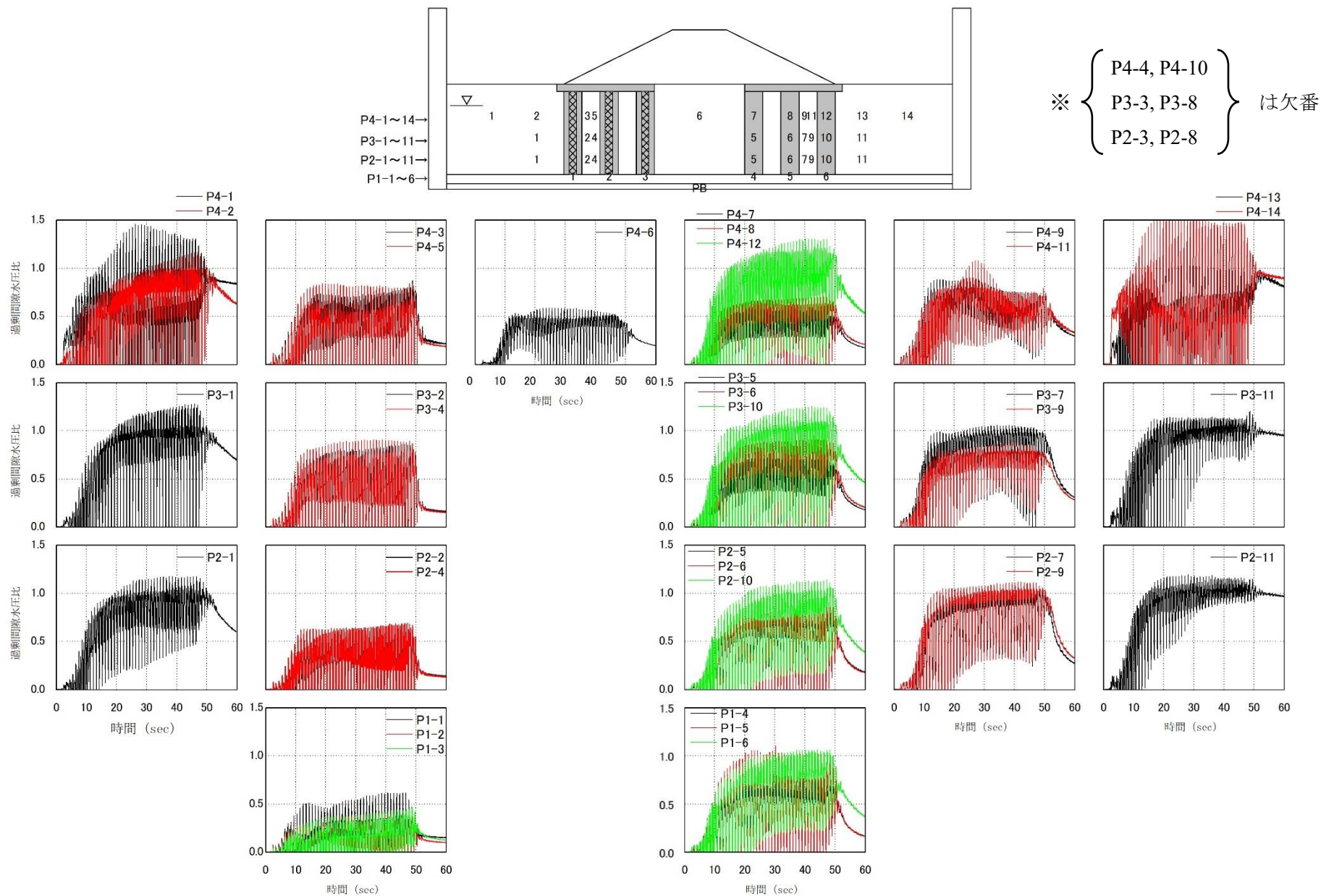
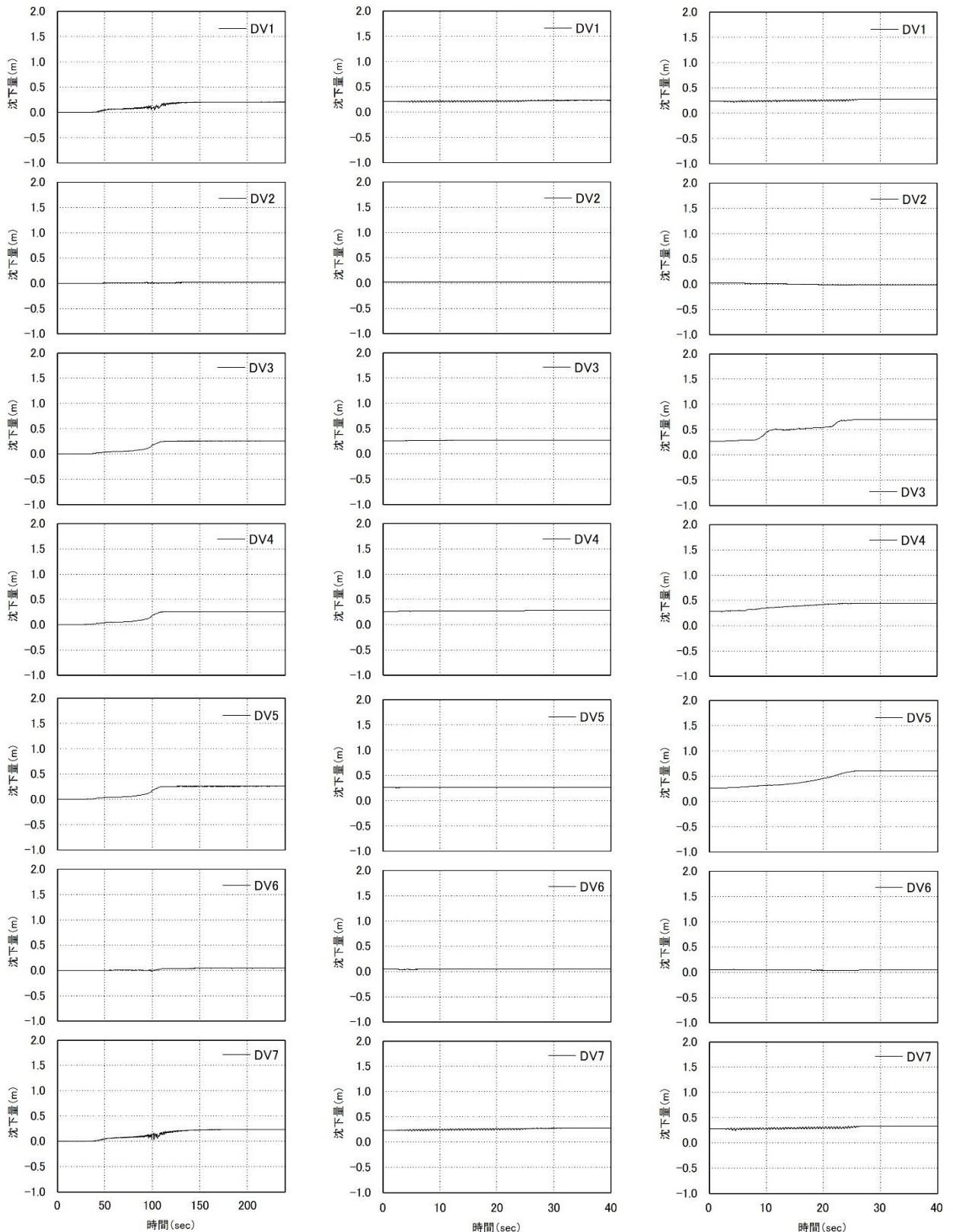
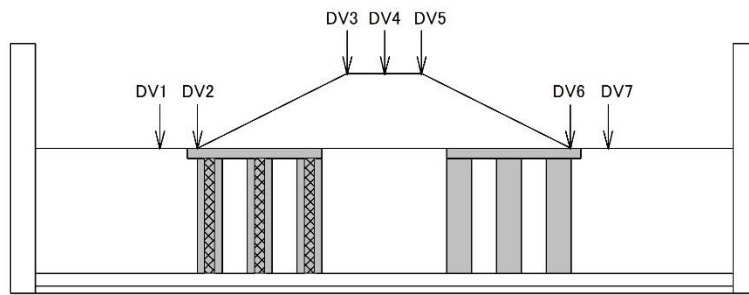


図 4.3.17 ケース 3-2 ステップ 5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

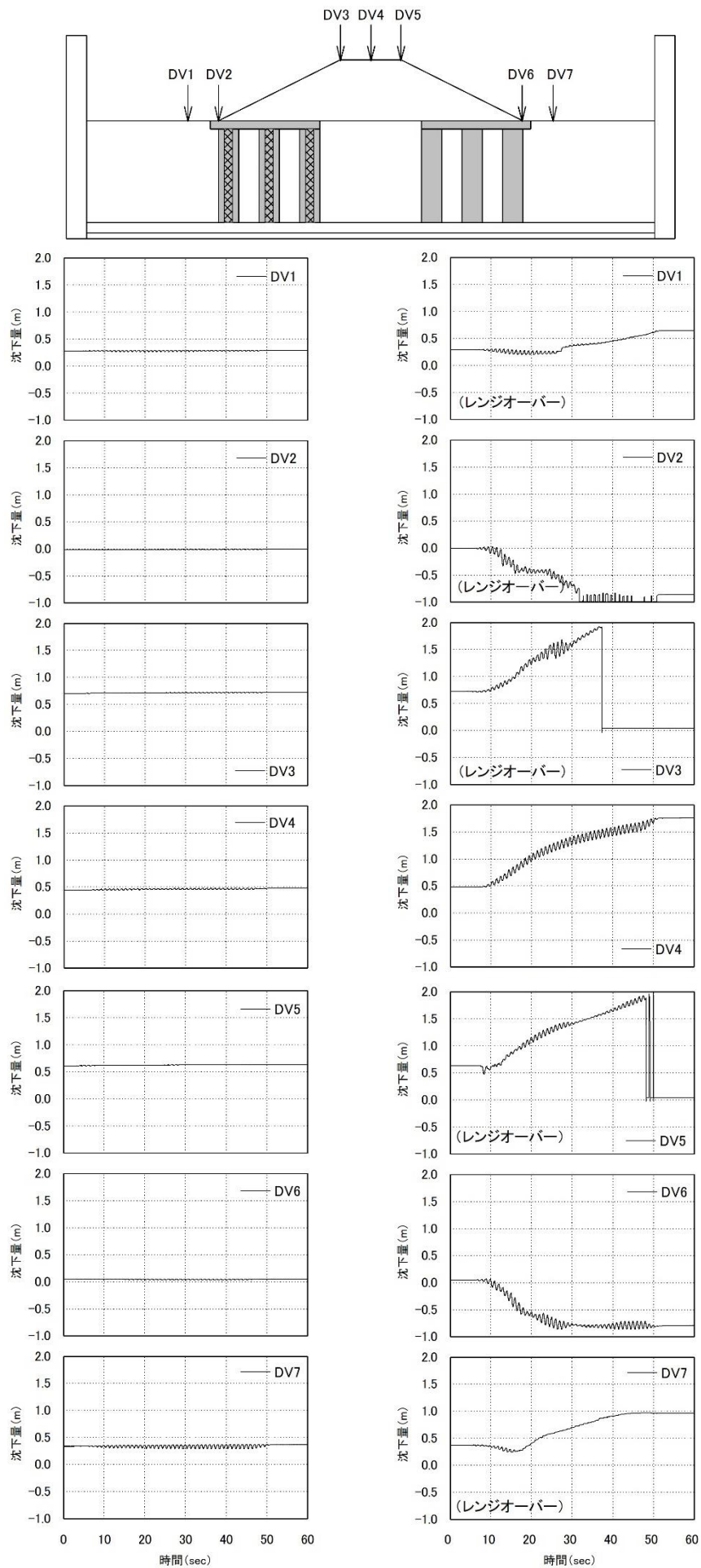


(a) ステップ 1

(b) ステップ 2

(c) ステップ 3

図 4.3.18 ケース 3-2 における各ステップの累積沈下量 (1/2)



(d) ステップ 4

(e) ステップ 5

図 4.3.19 ケース 3-2 における各ステップの累積沈下量 (2/2)

表 4.3.2 ケース 3-2 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	0.207	0.017	0.255	0.261	0.258	0.042	0.234
2	0.235	0.022	0.269	0.278	0.268	0.049	0.279
3	0.281	-0.013	0.703	0.443	0.611	0.046	0.337
4	0.291	-0.007	0.721	0.474	0.635	0.051	0.371
5	0.390	-0.856	1.650	1.772	1.350	-0.781	0.180

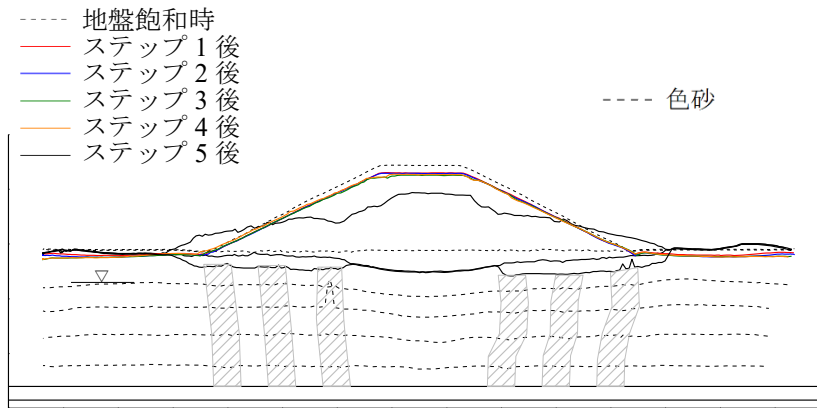
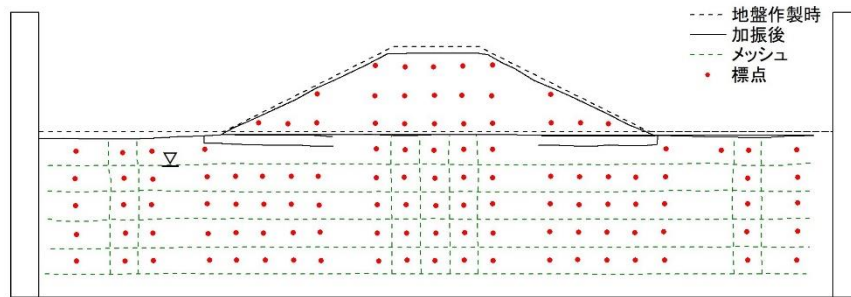


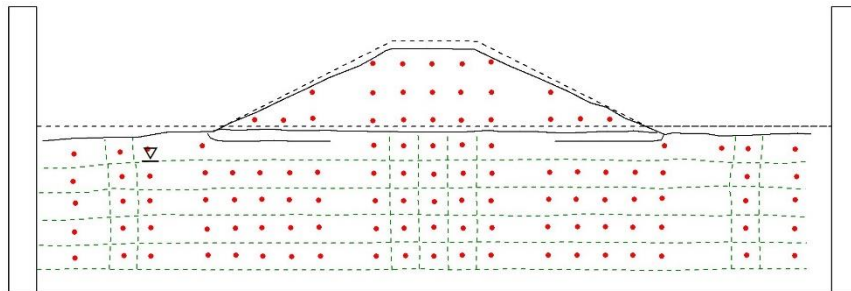
図 4.3.20 ケース 3-2 における模型の地表面形状



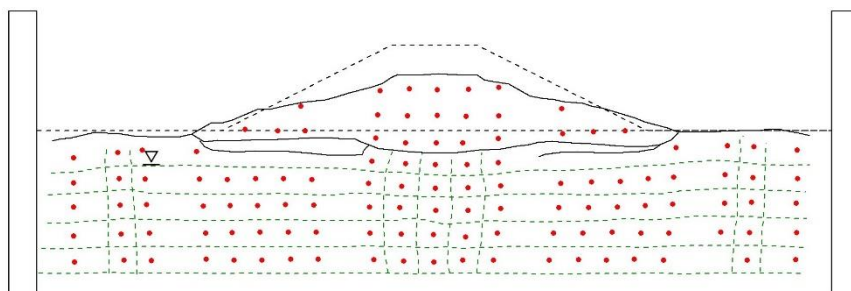
写真 4.3.2 ケース 3-2 における実験後の模型の状態 (堤体真上から撮影)



(a) ステップ 1



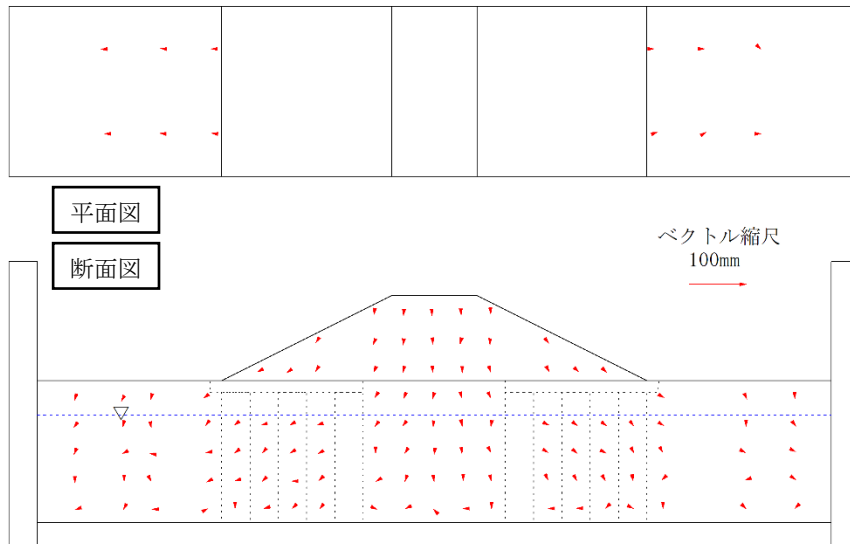
(b) ステップ 4



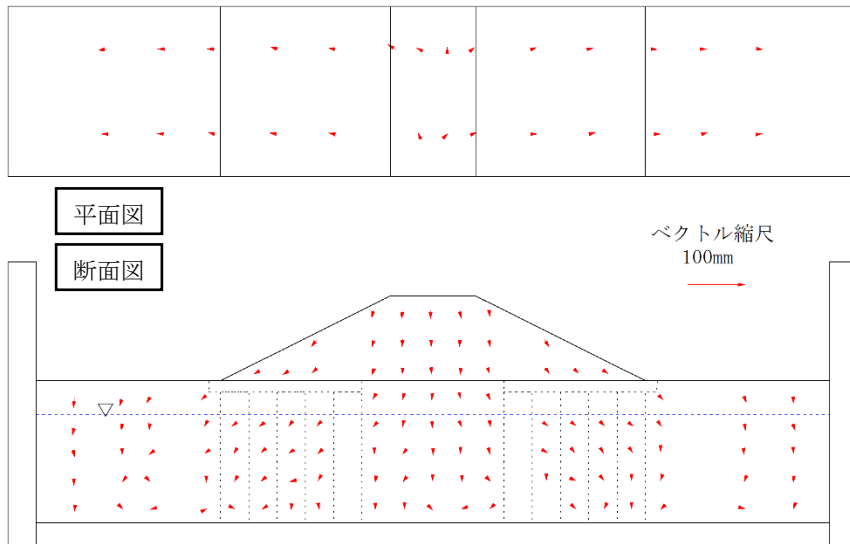
(c) ステップ 5

図 4.3.21 ケース 3-2 における各ステップ後の模型の変形

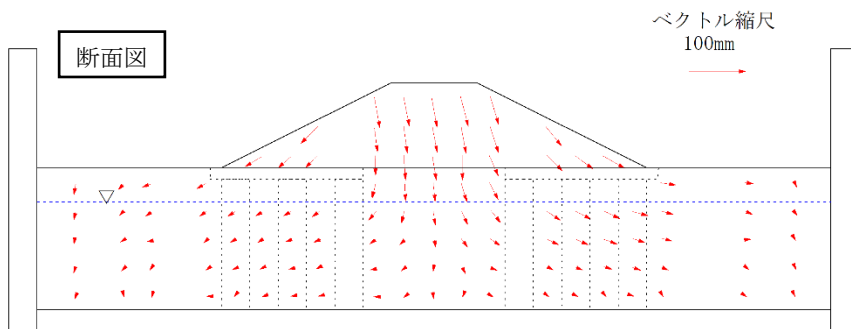
図 4.3.21 に各ステップ後の模型の変形を示す。また、図 4.3.22 に標点変位ベクトル図を示す。なお、ステップ 5 では地表面に設置した標点が地盤の動きに追従せず飛散してしまったため、地表面に設置した標点の位置を測定しなかった。



(a) ステップ 1



(b) ステップ 4



(c) ステップ 5 (標点が飛散したため平面は未測定)

図 4.3.22 ケース 3-2 における標点変位ベクトル図

4.3.3 ケース 3-3

図 4.3.23 (本項において本図のみ模型スケールで表記) にケース 3-3 の実験模型を示す。ケース 3-3 では、2 種類のドレーン (表 4.2.1) を堤体の左側、右側へそれぞれ打設し、実験を行った。堤体右側は杭芯間隔 1.2m でドレーン径 0.6m、ドレーン長 6.9m のグラベルドレーンを 42 本打設し、上面には厚さ 0.6m のグラベルマットを設けた。堤体左側は右側のドレーンと同じ径、長さのパイプドレーンを同じ間隔で打設した。ドレーン上面には堤体右側と同仕様のグラベルマットを設けた。

図 4.3.24～図 4.3.28 にステップ 1～5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。液状化層における過剰間隙水圧比は、各ステップにおいて水平地盤直下および堤体右側で 1 以上となる水圧計が多い結果であった。左側の堤体下の水圧計は比較的低い値であった。

図 4.3.29 にケース 3-3 ステップ 4 とステップ 5 におけるグラベルドレーン (右) 部の過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。ステップ 5 ではステップ 4 と比べ過剰間隙水圧の消散が遅くなっている。実験後のグラベルドレーンの水圧計設置高付近の模型開削写真 (写真 4.3.3) をみると、グラベルドレーン内にはドレーン中心まで多くの砂分が混入していることが見受けられ、ステップ 5 の段階で写真の状態に至り、消散速度に影響を与えたと考えられる。

図 4.3.30、図 4.3.31 に堤体天端 (DV3～5)、法尻 (DV2,6) および水平地盤上 (DV1,7) における各ステップの累積沈下量を示す。ステップ 5 では 4 箇所の変位計においてレンジオーバーとなった。また、表 4.3.3 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、堤体の法肩 (DV3,5) における沈下量が天端中央よりも大きく、ステップ 5 後の最終沈下量では右法肩の DV5 が最も大きかった。法尻の変位は DV2 のステップ 2、DV6 のステップ 1,2 で沈下したのに対し、その他のステップでは隆起する結果となった。模型の地表面形状から (図 4.3.32) 堤体材料が堤体中央付近 (天端周辺) から法尻方向へ移動したためであると考えられる。

写真 4.3.4 に堤体真上から見た実験後の模型の状態を示す。

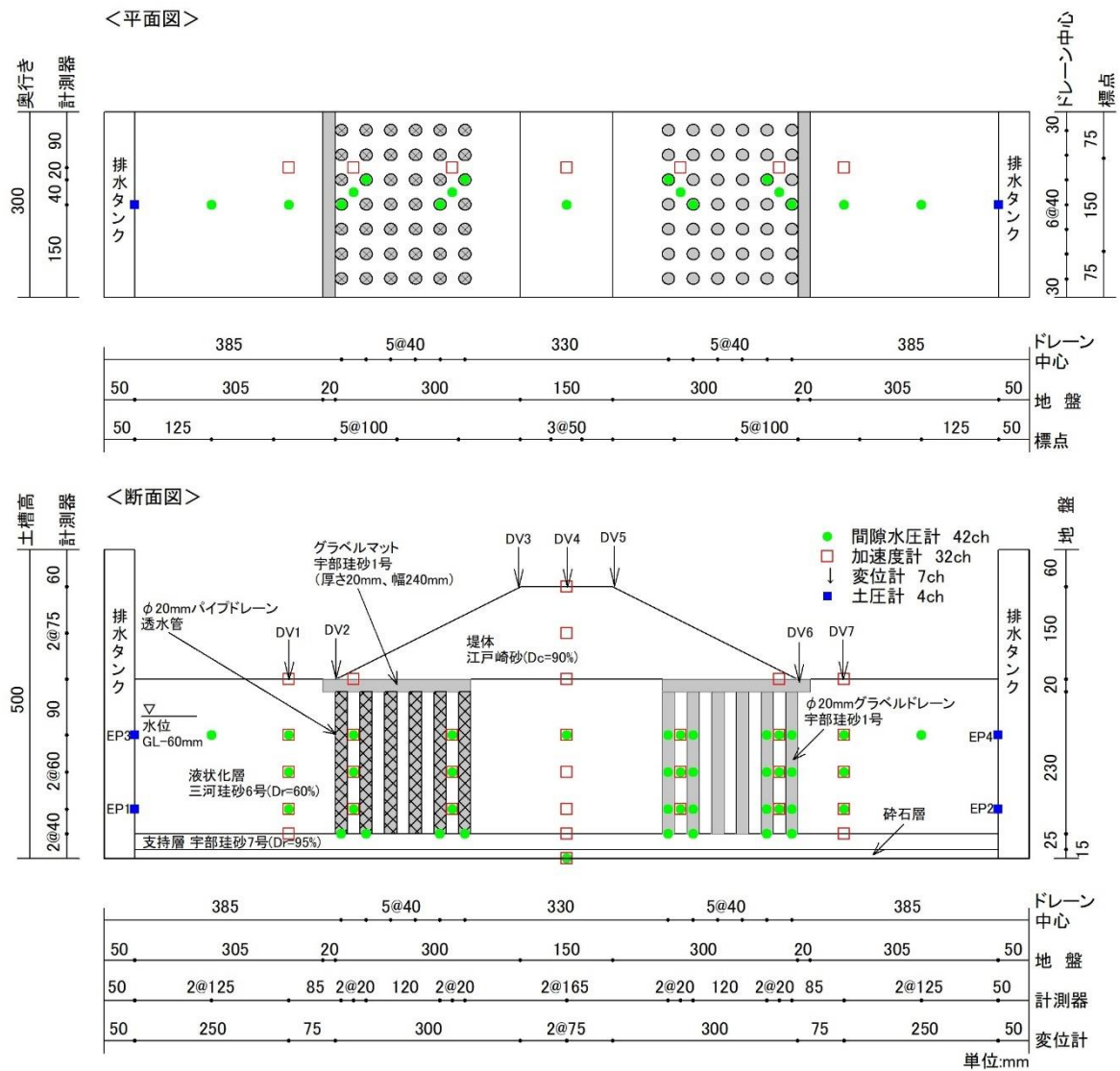


図 4.3.23 ケース 3-3 の実験模型 (寸法は模型スケール)

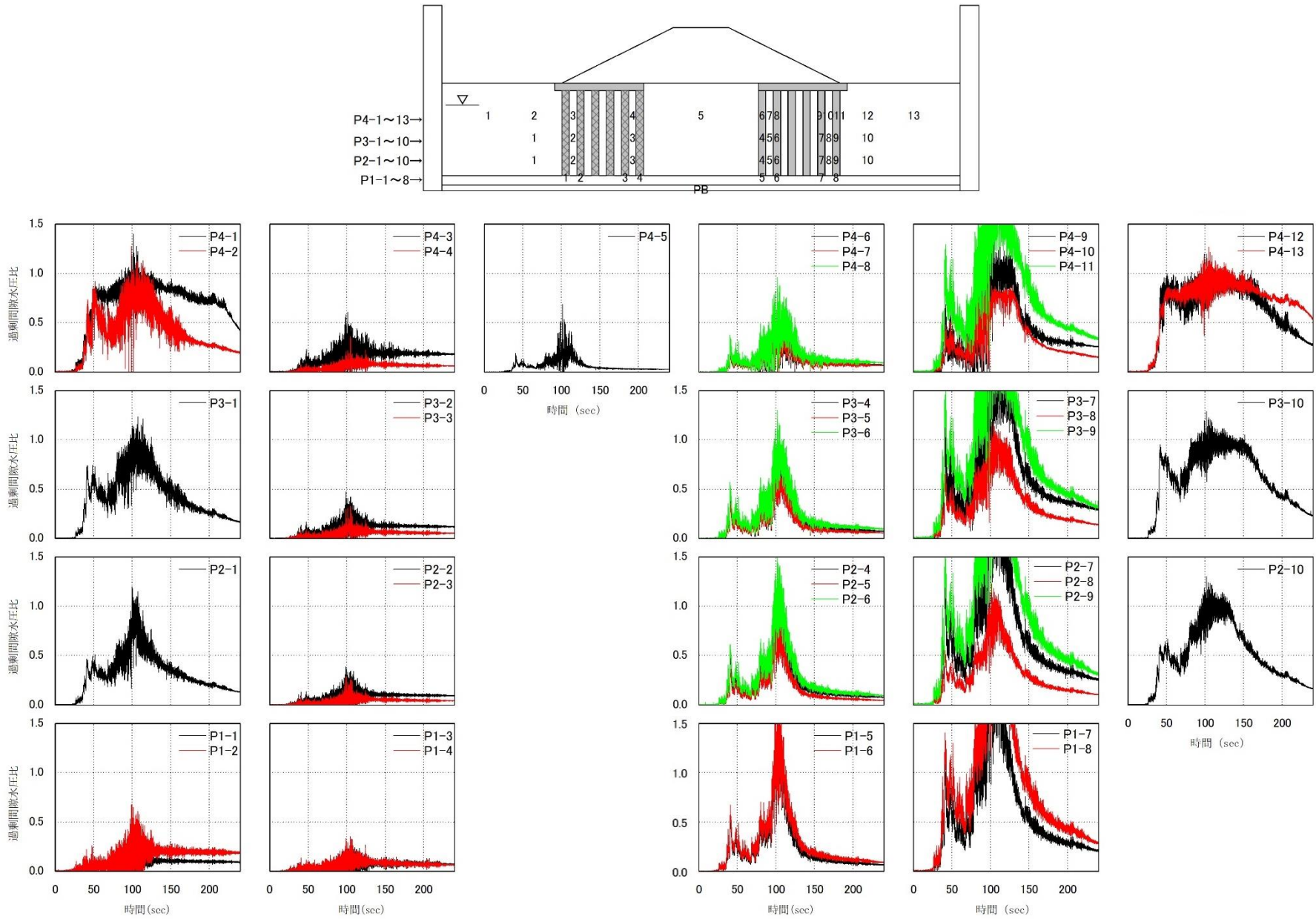


図 4.3.24 ケース 3-3 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

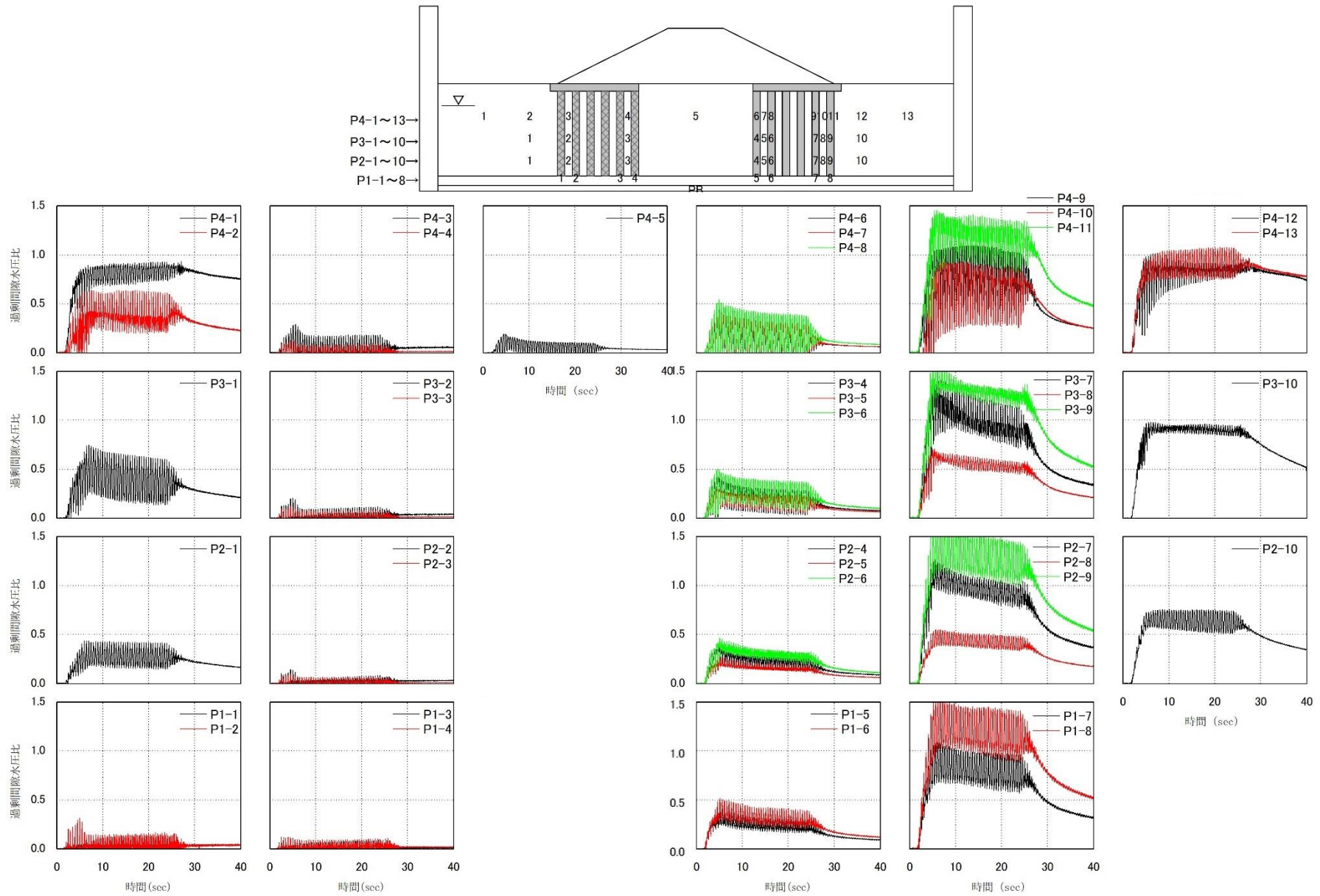


図 4.3.25 ケース 3-3 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

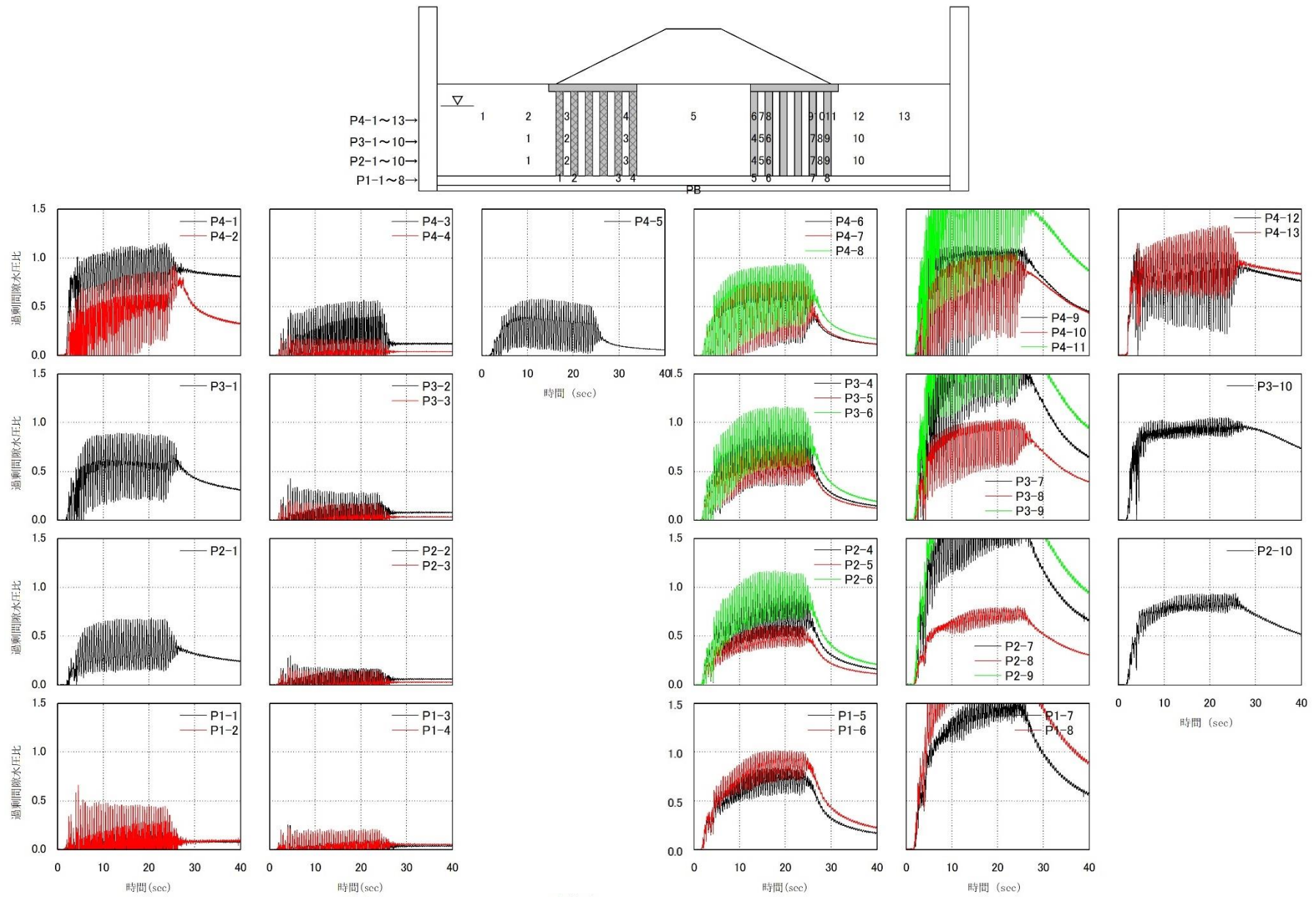


図 4.3.26 ケース 3-3 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

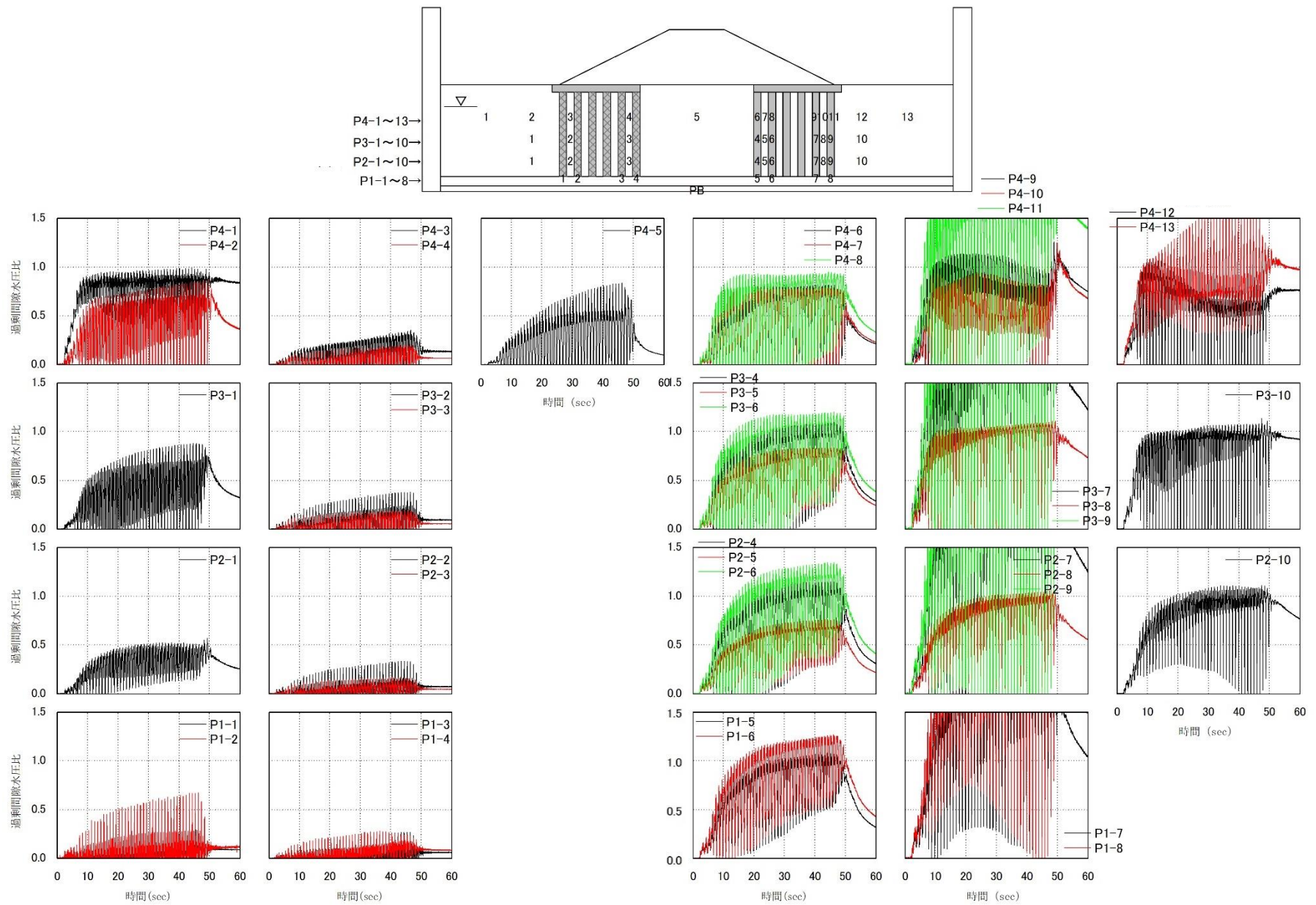


図 4.3.27 ケース 3-3 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

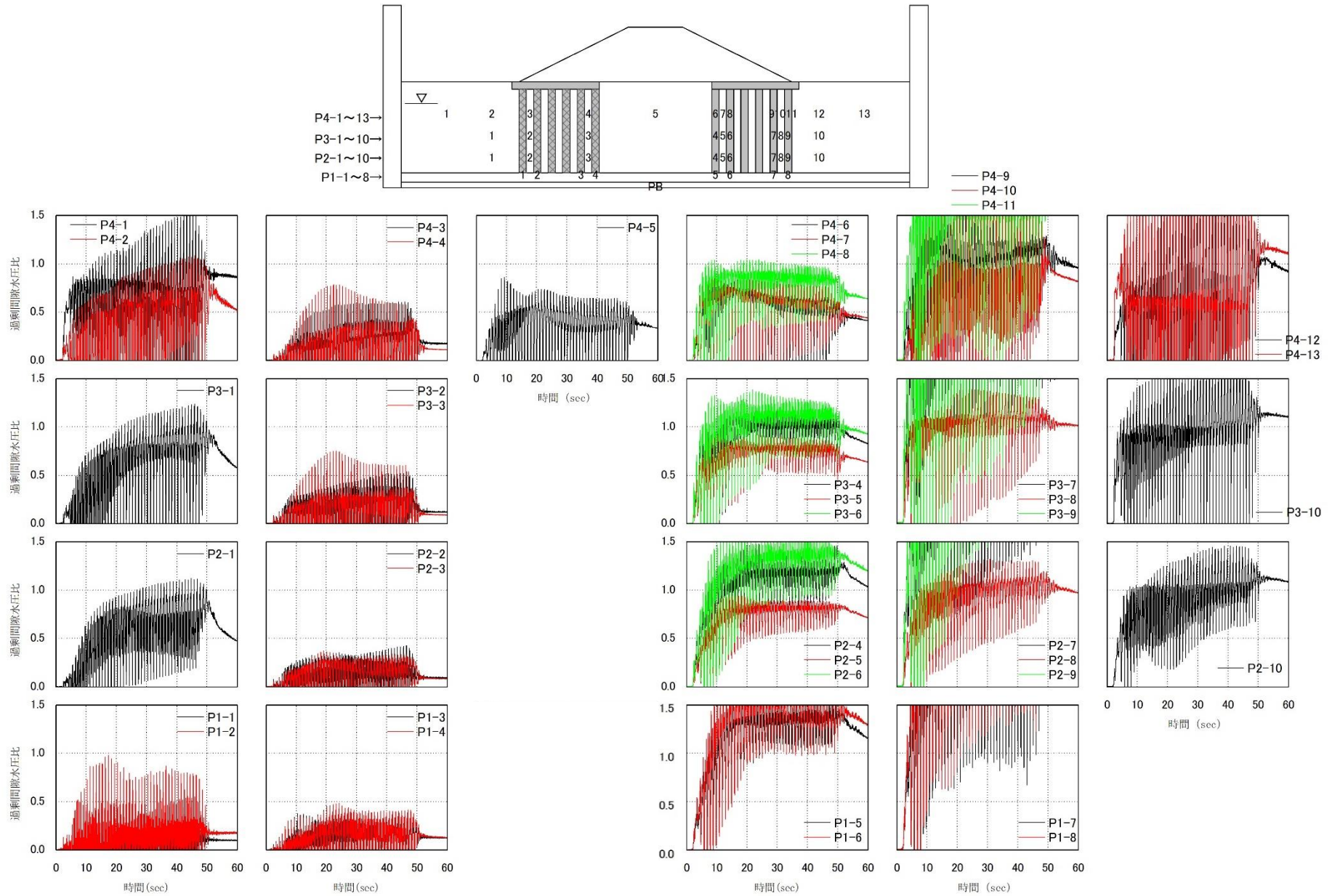


図 4.3.28 ケース 3-3 ステップ 5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

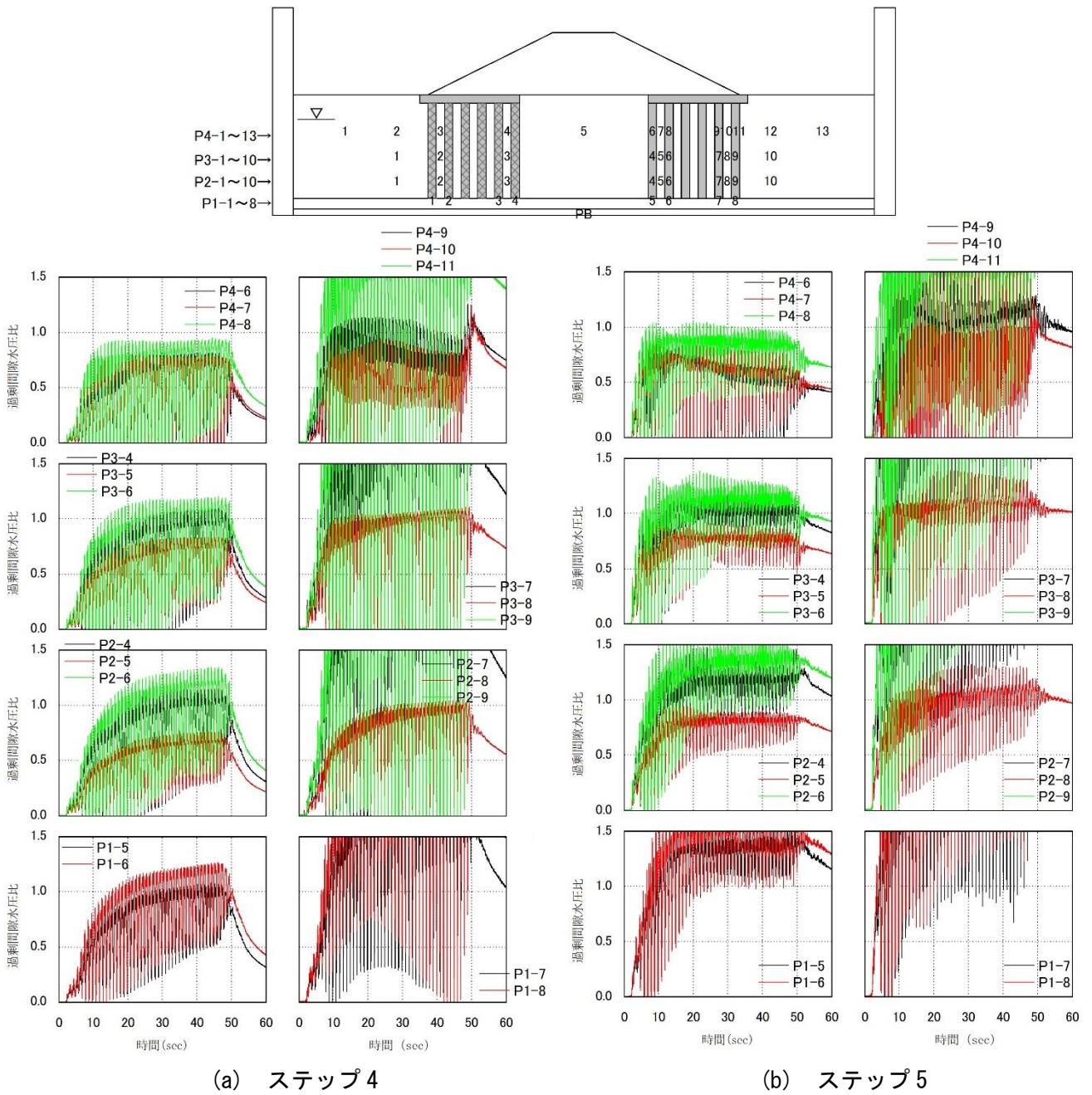


図 4.3.29 ケース 3-3 ステップ 4 およびステップ 5 の
グラベルドレーン (右) 部における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較



写真 4.3.3 水圧計設置高付近の模型開削状況

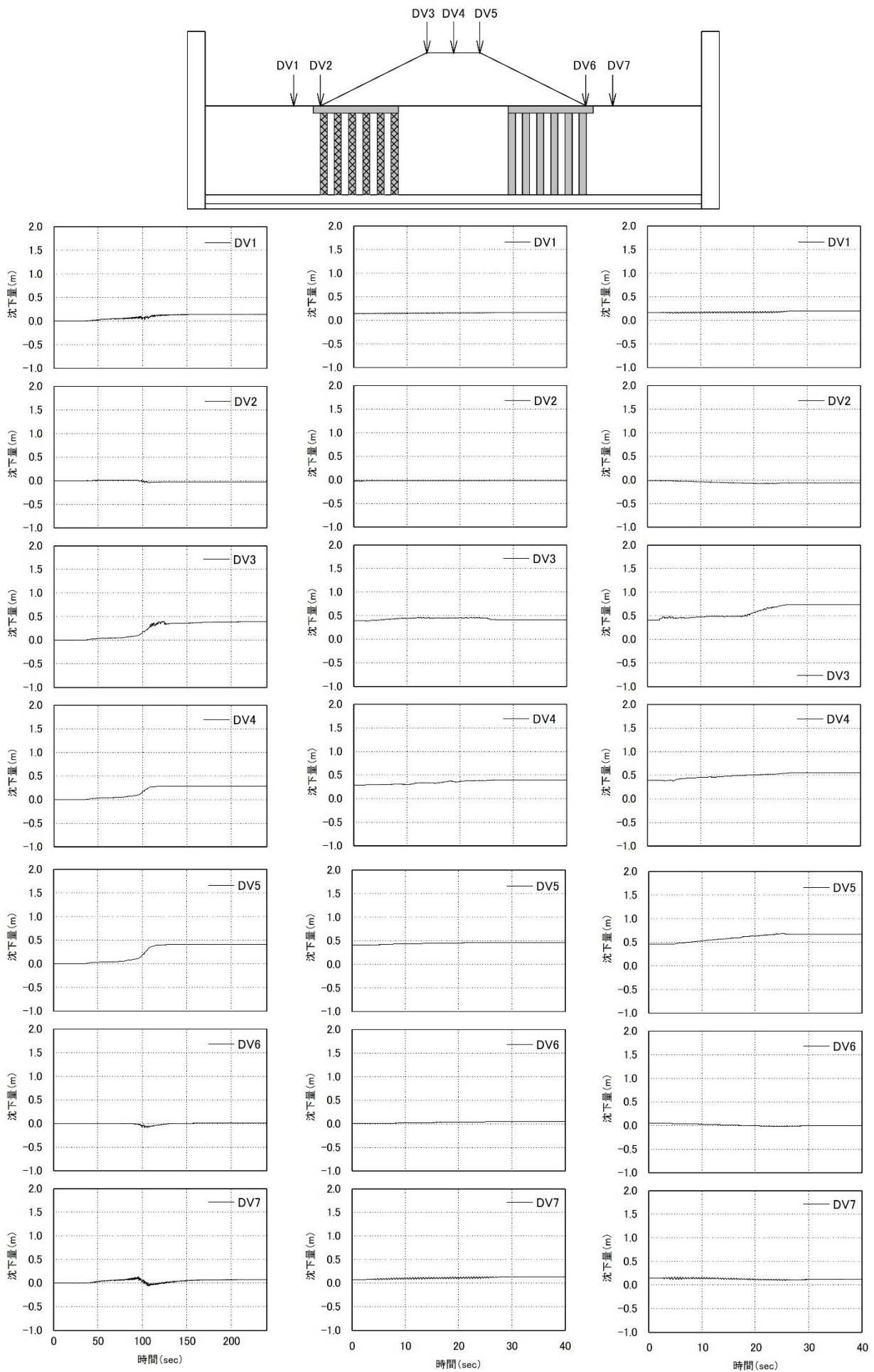
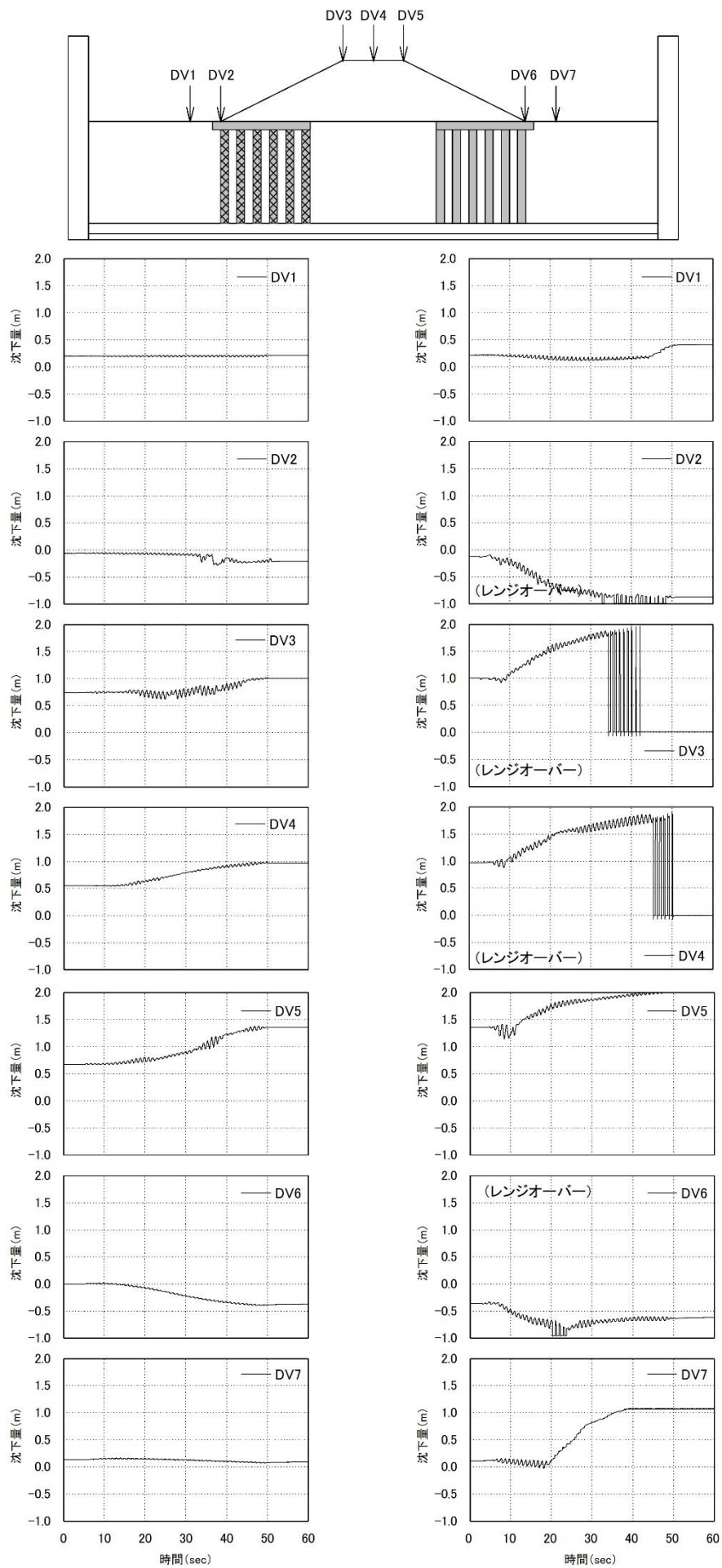


図 4.3.30 ケース 3-3 における各ステップの累積沈下量 (1/2)



(d) ステップ 4

(e) ステップ 5

図 4.3.31 ケース 3-3 における各ステップの累積沈下量 (2/2)

表 4.3.3 ケース 3-3 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	0.143	-0.022	0.388	0.288	0.407	0.008	0.074
2	0.167	-0.015	0.411	0.391	0.458	0.049	0.144
3	0.201	-0.061	0.737	0.552	0.670	-0.001	0.132
4	0.219	-0.125	1.006	0.969	1.356	-0.362	0.109
5	0.210	-0.874	1.770	1.230	2.079	-0.569	0.240

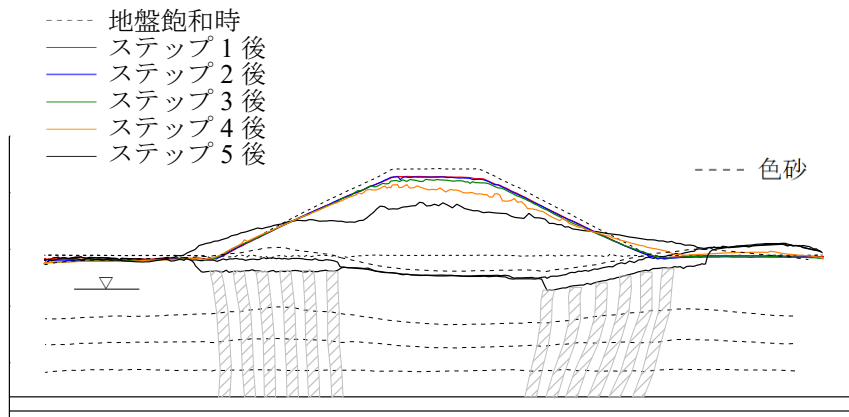
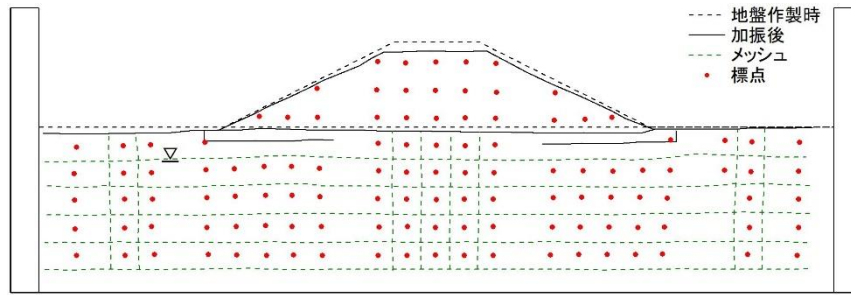


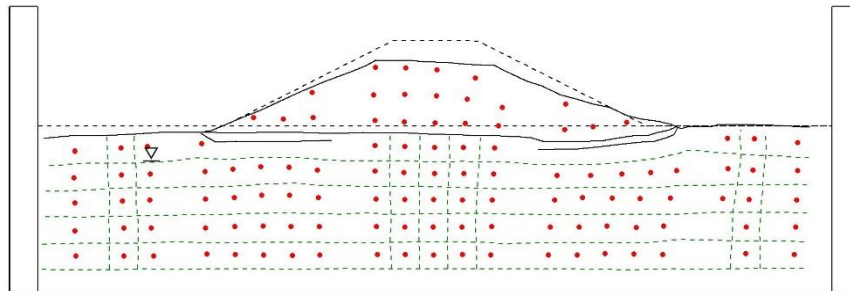
図 4.3.32 ケース 3-3 における模型の地表面形状



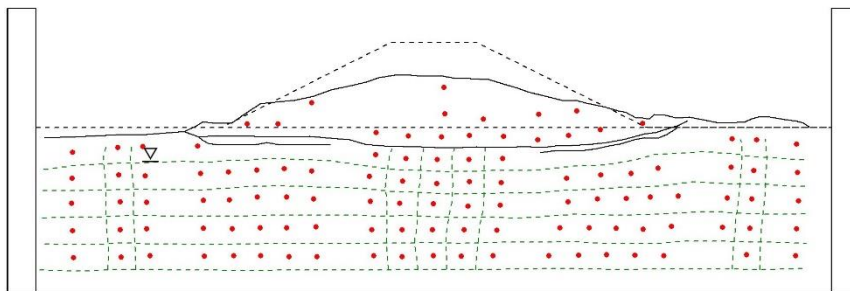
写真 4.3.4 ケース 3-3 における実験後の模型の状態 (堤体真上から撮影)



(a) ステップ 1



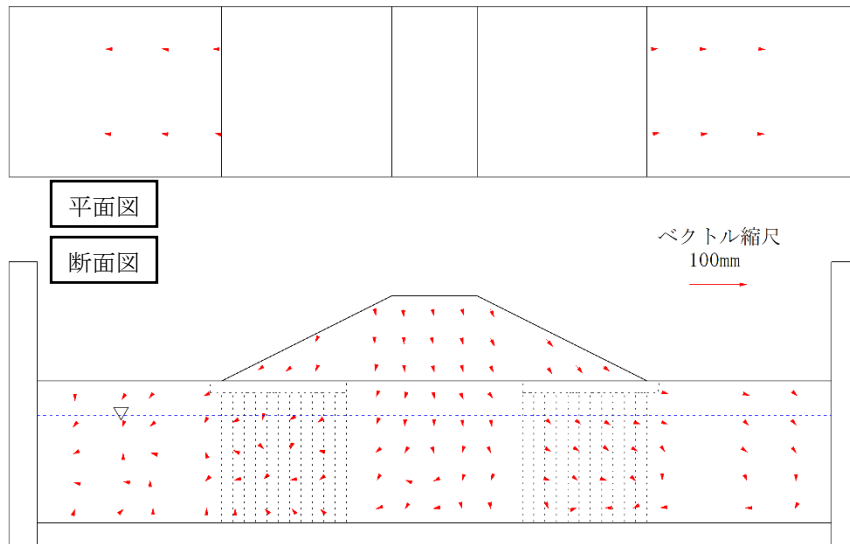
(b) ステップ 4



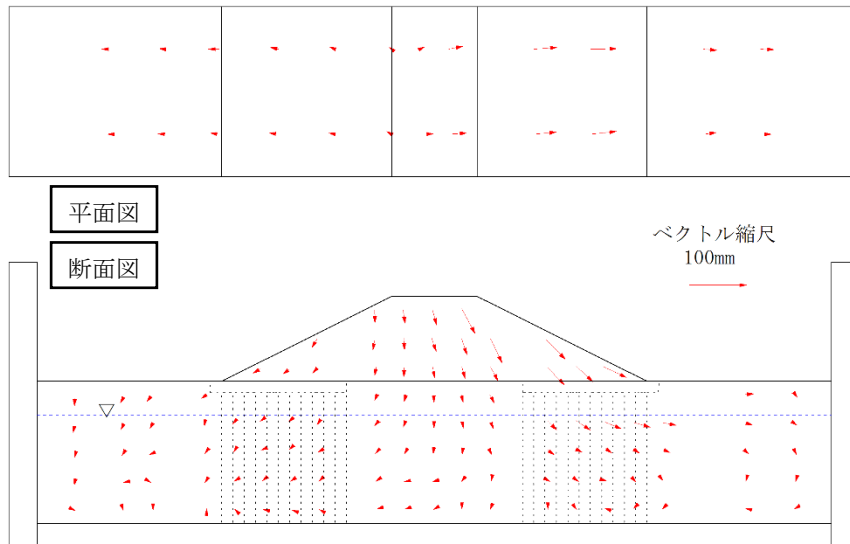
(c) ステップ 5

図 4.3.33 ケース 3-3 における各ステップ後の模型の変形

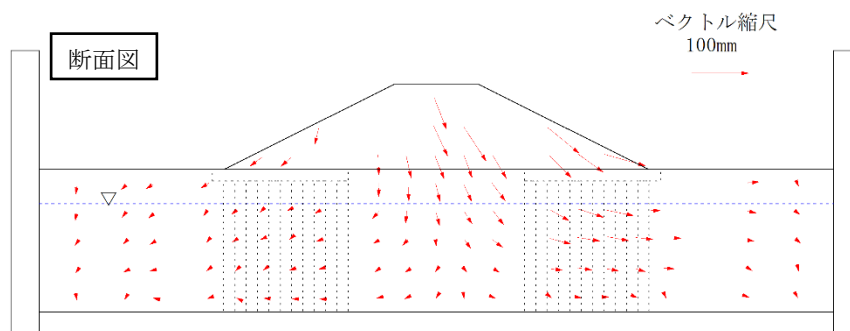
図 4.3.33 に各ステップ後の模型の変形を示す。また、図 4.3.34 に標点変位ベクトル図を示す。なお、ステップ 5 では地表面に設置した標点が地盤の動きに追従せず飛散してしまったため、地表面に設置した標点の位置を測定しなかった。



(a) ステップ 1



(b) ステップ 4



(c) ステップ 5 (標点が飛散したため平面は未測定)

図 4.3.34 ケース 3-3 における標点変位ベクトル図

4.3.4 ケース 3-4

ケース 3-4 の実験模型（図 4.2.1、本項において本図のみ模型スケールで表記）を再掲する。ケース 3-4 では、2 種類のドレーン（表 4.2.1）を堤体の左側、右側へそれぞれ打設し、実験を行った。ドレーンは堤体左側が杭芯間隔 1.8m で 25 本、堤体右側が杭芯間隔 1.2m で 42 本打設した。ドレーン径 0.6m、長さ 6.9m は堤体の左右ともに同じとした。また、ドレーンの上面には厚さ 0.6m、グラベルマットを設け、堤体左側は横 8.4m、右側は横 7.2m とした。

図 4.3.35～図 4.3.39 にステップ 1～5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。液状化層における過剰間隙水圧比は、各ステップにおいて水平地盤直下および法尻直下付近で 1 以上となる水圧計が多い結果であった。法肩直下付近の水圧計は比較的低い値であった。

図 4.3.40、図 4.3.41 に堤体天端（DV3～5）、法尻（DV2,6）および水平地盤上（DV1,7）における各ステップの累積沈下量を示す。ステップ 5 では 3 箇所の変位計においてレンジオーバーとなった。また、表 4.3.4 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、ステップ 4 まで各変位計における沈下量に大きな差はみられなかったが、ステップ 5 では右法肩の DV5 の沈下量が最も大きくなり、他の沈下計より 0.3m 弱大きい沈下量となった。法尻の変位は DV2,6 とともにステップ 4 までは 0.2m 以下の変位（隆起）であったが、ステップ 5 において 1.0m 弱と比較的大きな変位（隆起）を示した。模型の地表面形状から（図 4.3.42）堤体材料が堤体中央付近（天端周辺）から法尻方向へ移動したためであると考えられる。

写真 4.3.5 に堤体真上から見た実験後の模型の状態を示す。

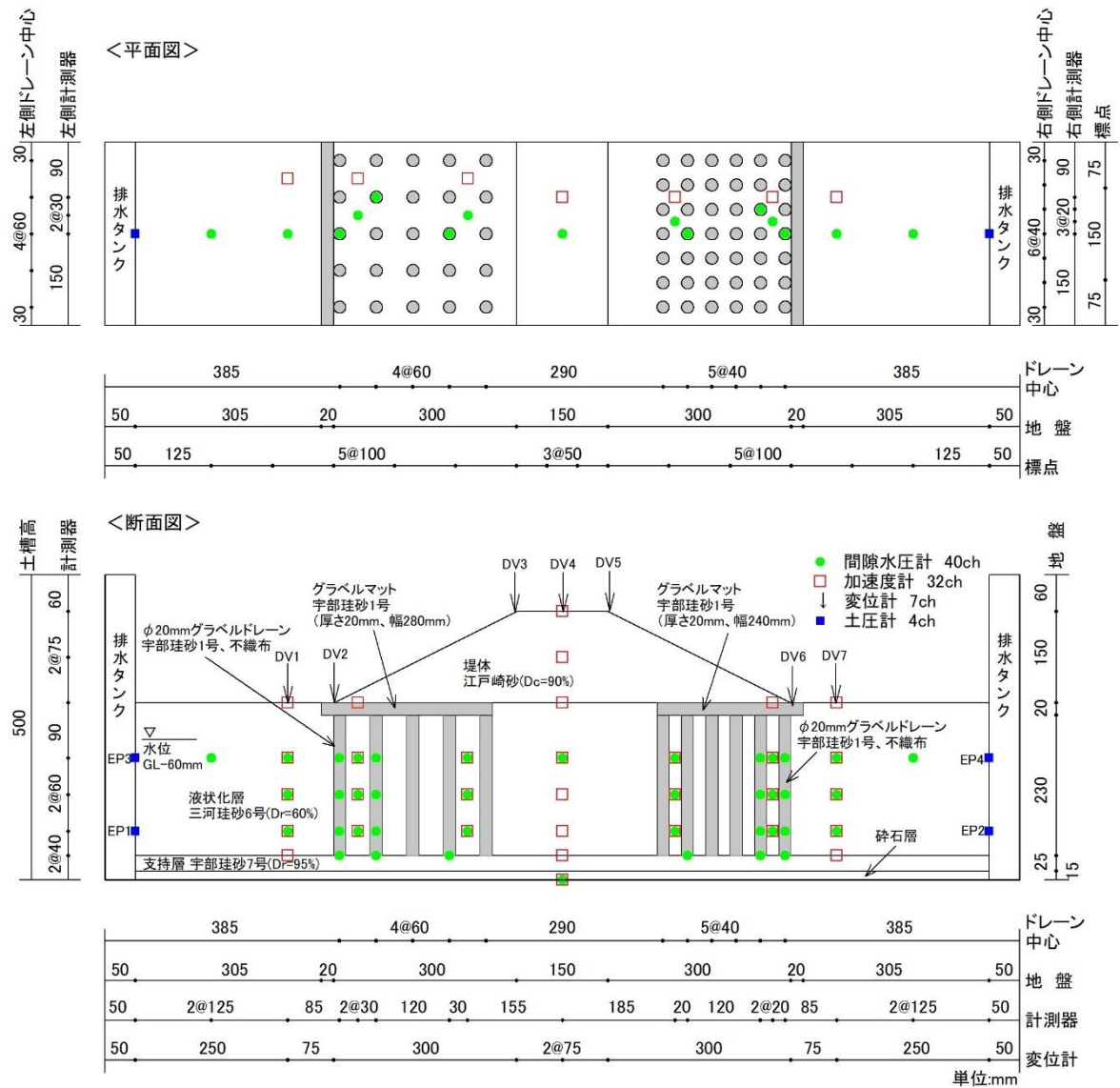


図 4.2.1 シリーズ 3 の実験模型例 (ケース 3-4、寸法は模型スケール) (再掲)

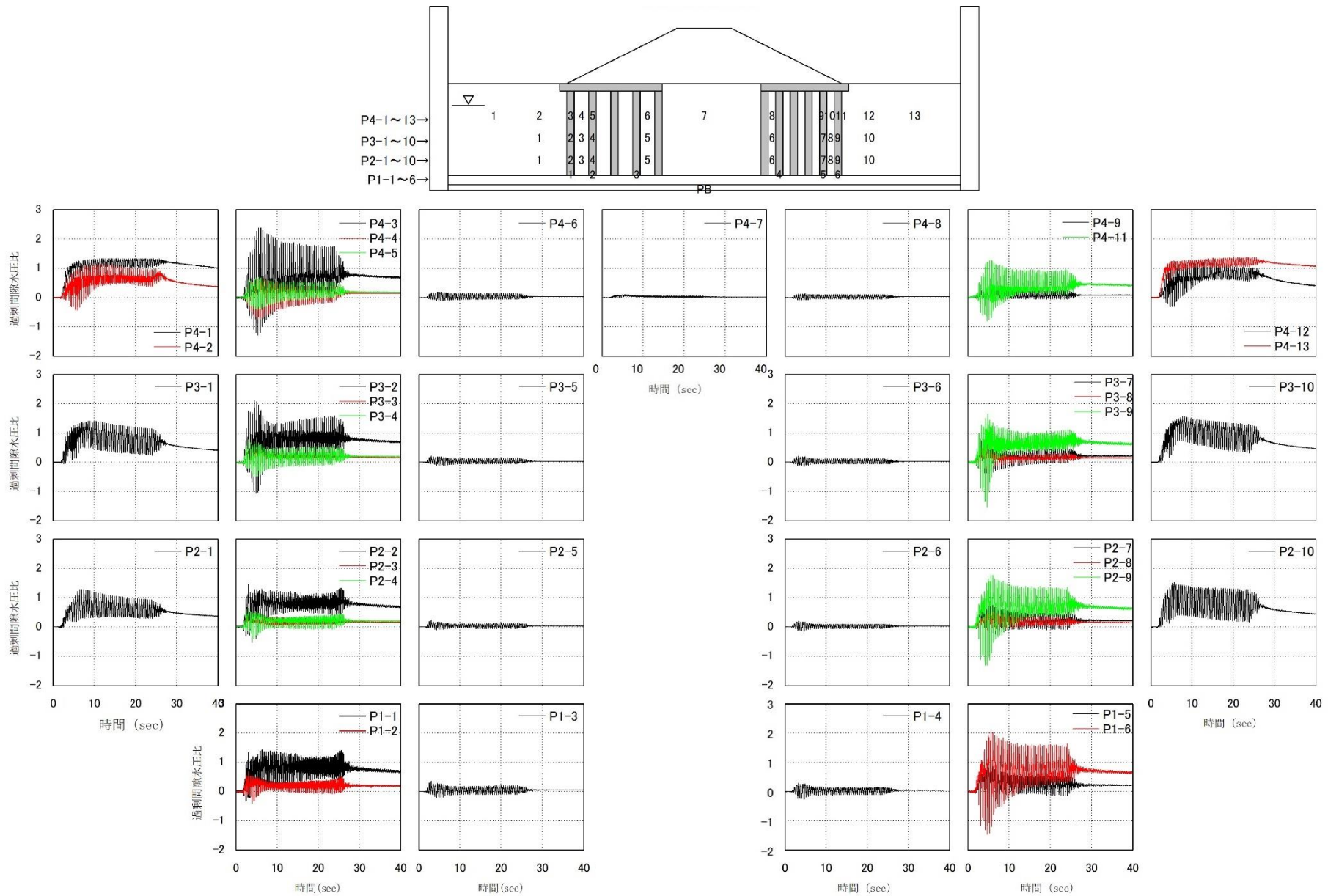


図 4.3.36 ケース 3-4 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

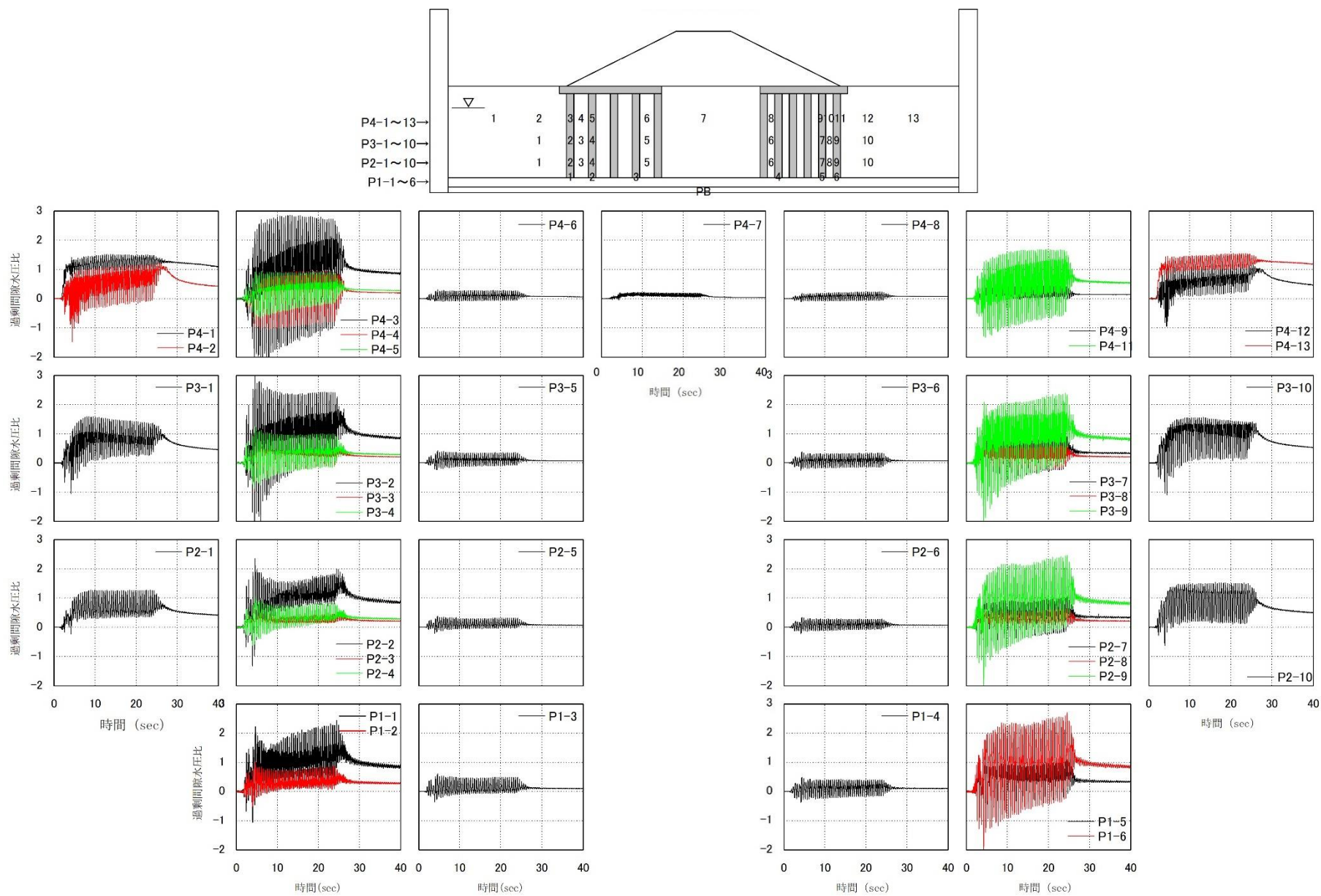


図 4.3.37 ケース 3-4 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

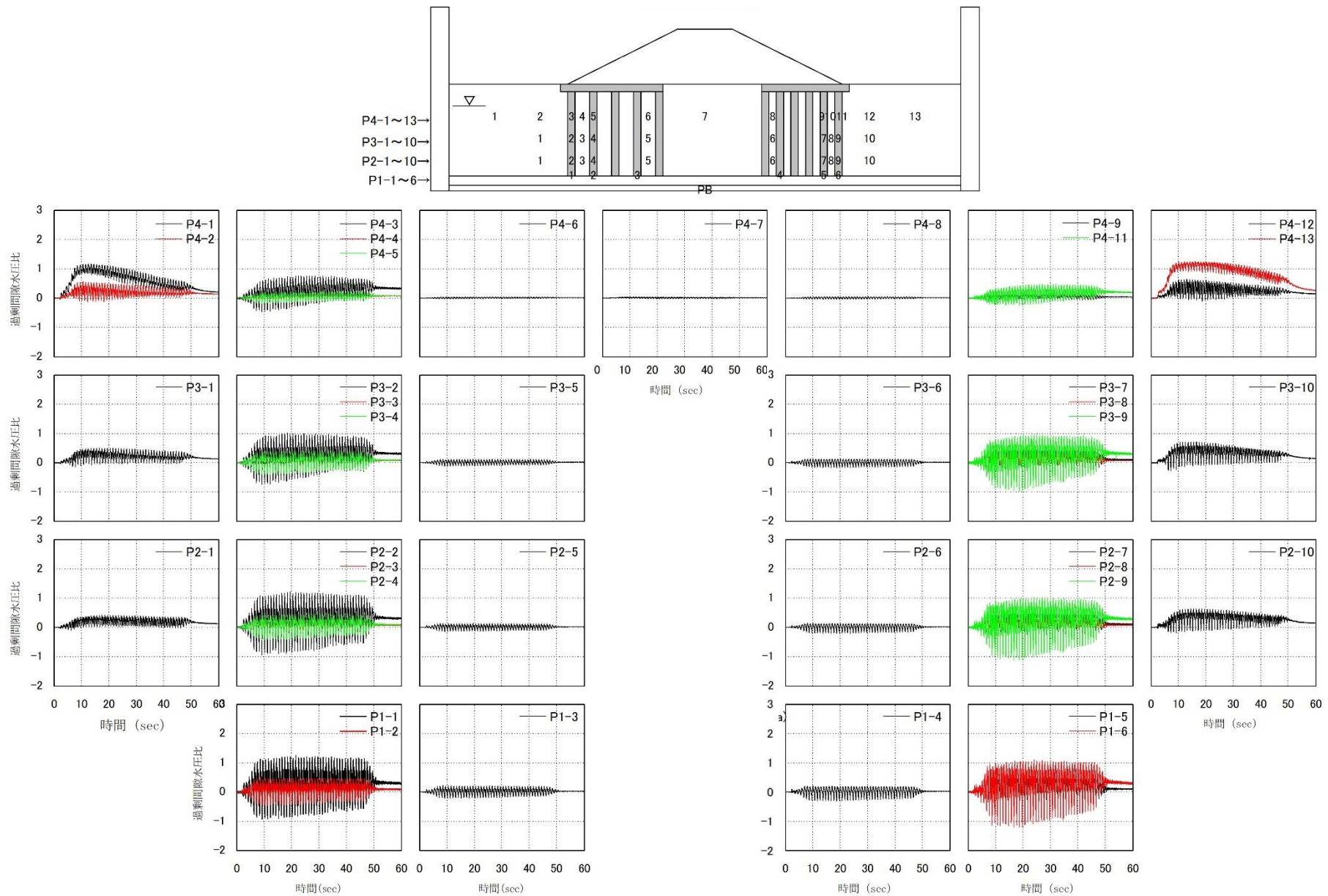


図 4.3.38 ケース 3-4 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

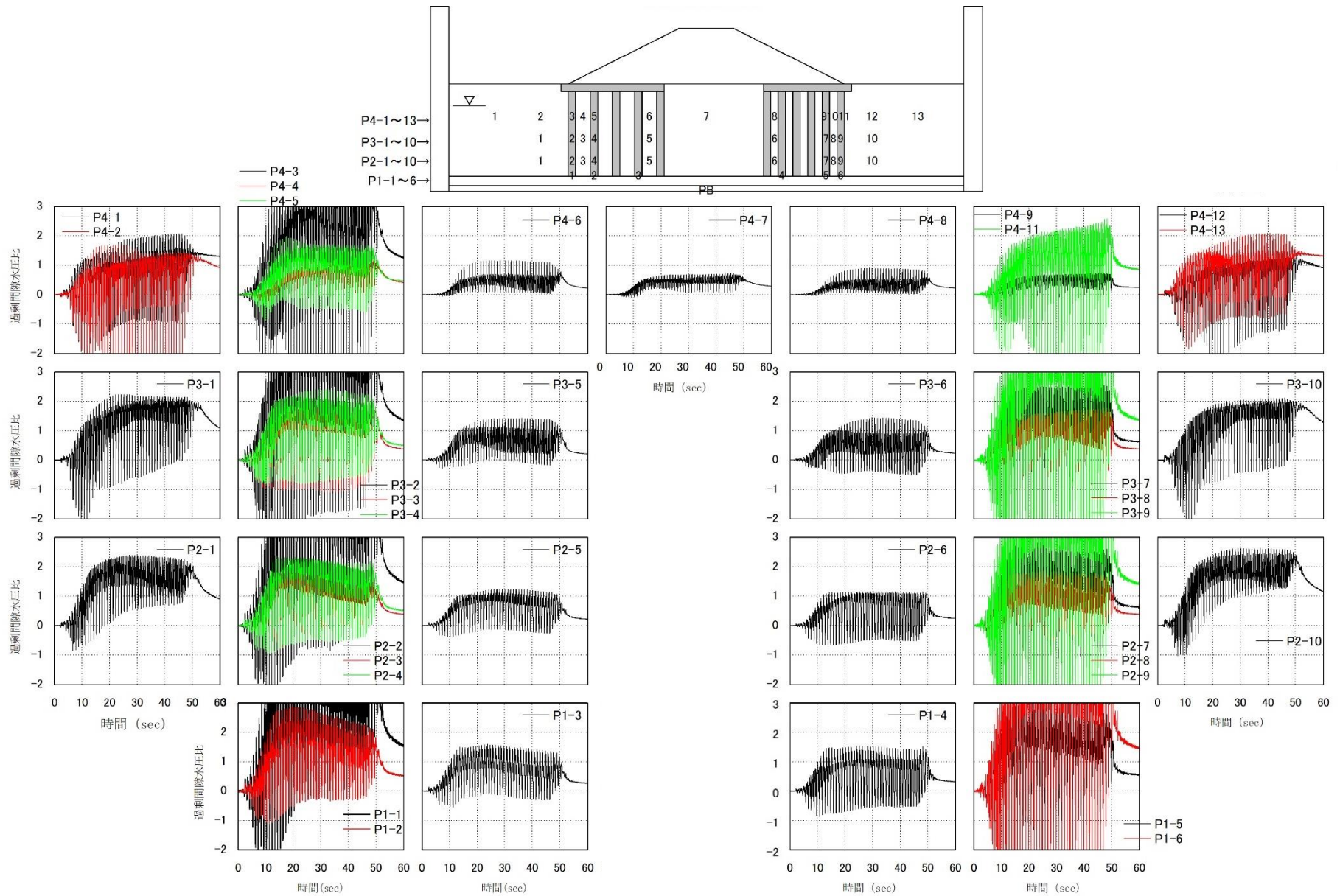
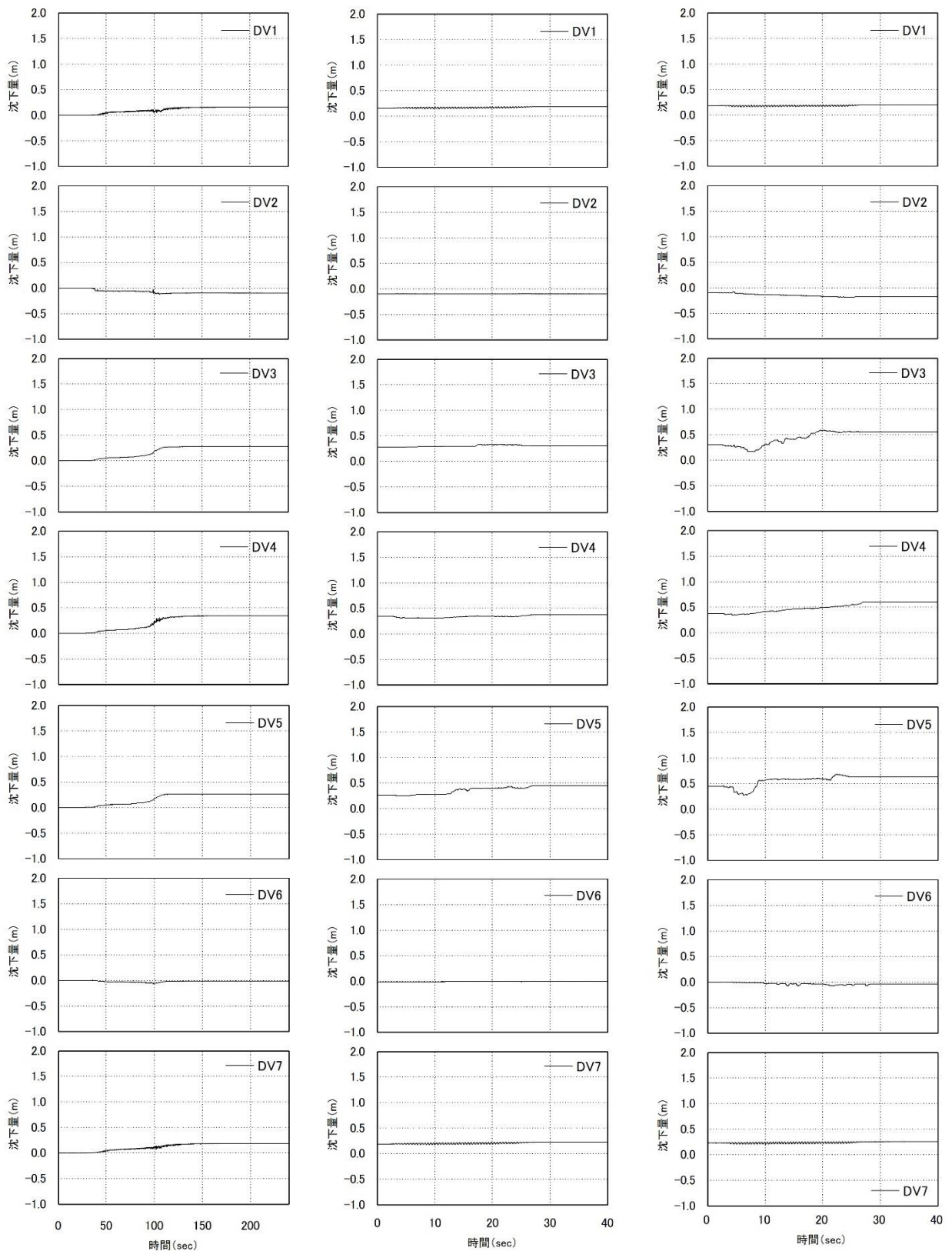
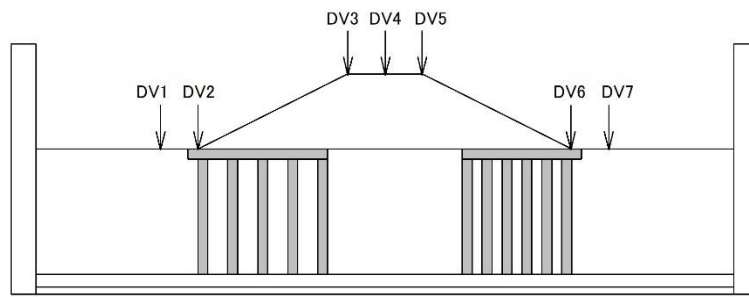
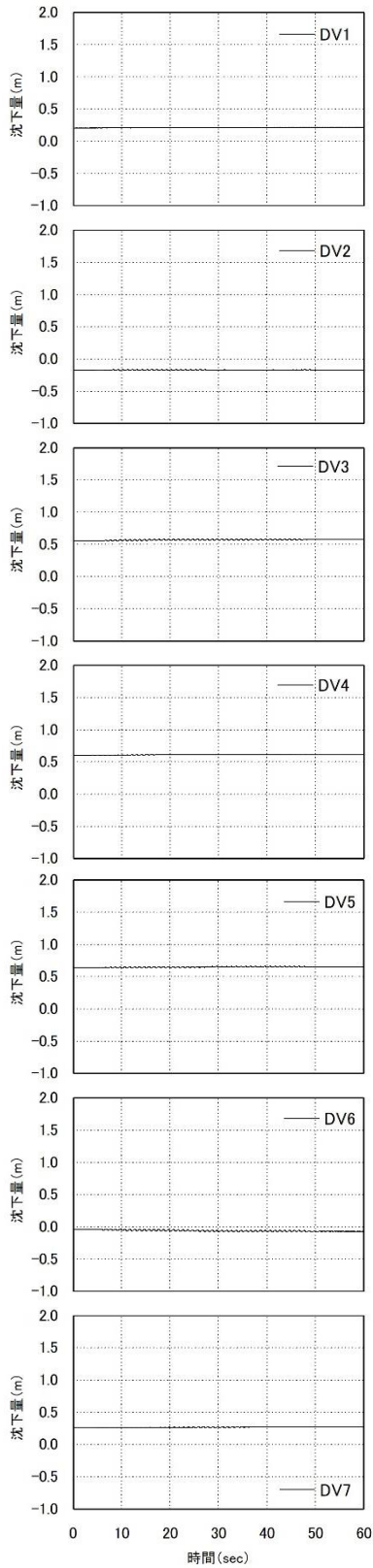
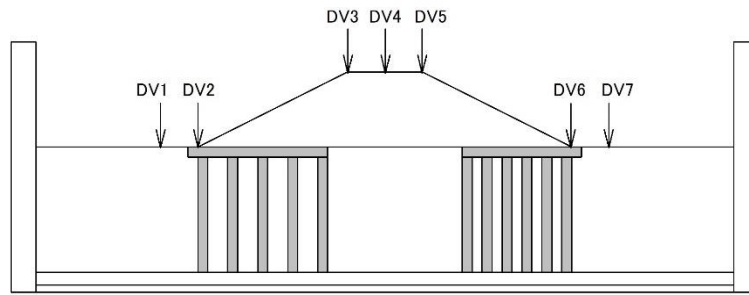


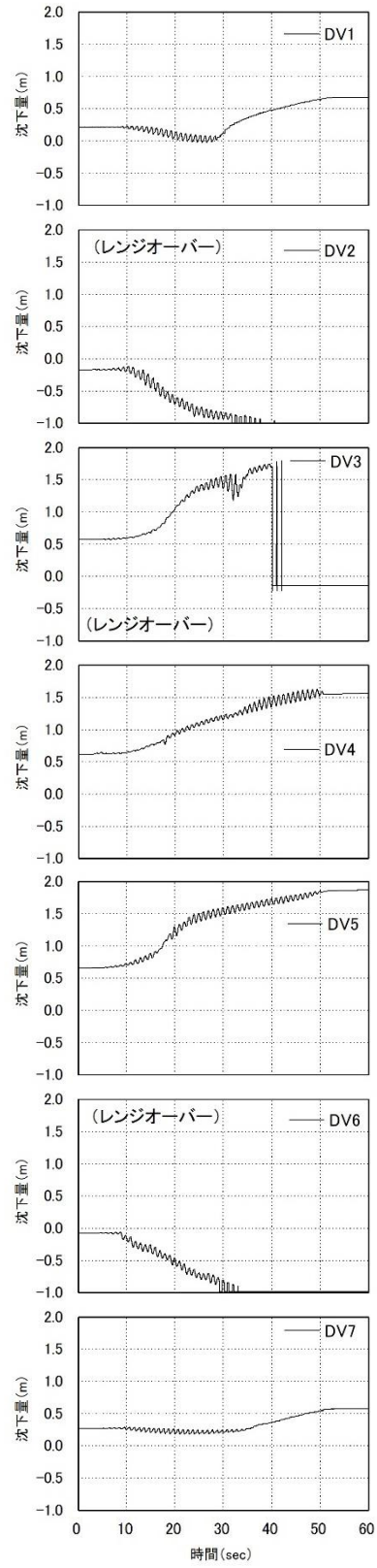
図 4.3.39 ケース 3-4 ステップ 5 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴



(a) ステップ 1 (b) ステップ 2 (c) ステップ 3
 図 4.3.40 ケース 3-4 における各ステップの累積沈下量 (1/2)



(d) ステップ 4



(e) ステップ 5

図 4.3.41 ケース 3-4 における各ステップの累積沈下量 (2/2)

表 4.3.4 ケース 3-4 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	0.159	-0.099	0.274	0.344	0.265	-0.011	0.189
2	0.186	-0.098	0.304	0.374	0.448	-0.005	0.229
3	0.206	-0.176	0.556	0.598	0.635	-0.042	0.259
4	0.213	-0.169	0.574	0.614	0.655	-0.074	0.271
5	0.060	-0.975	1.590	1.583	1.871	-0.990	0.030

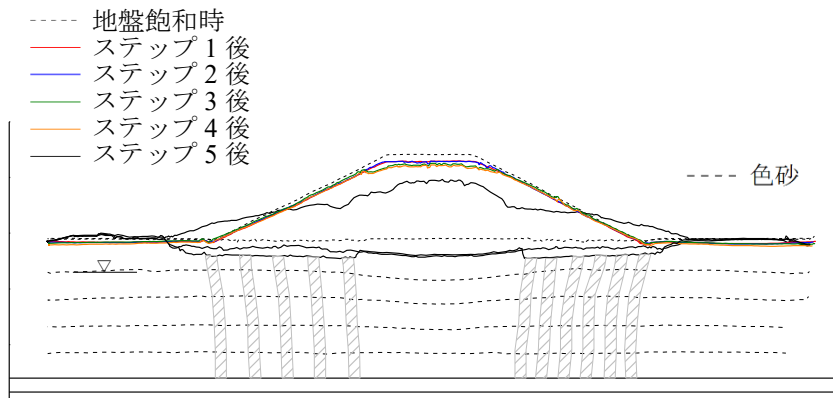


図 4.3.42 ケース 3-4 における模型の地表面形状

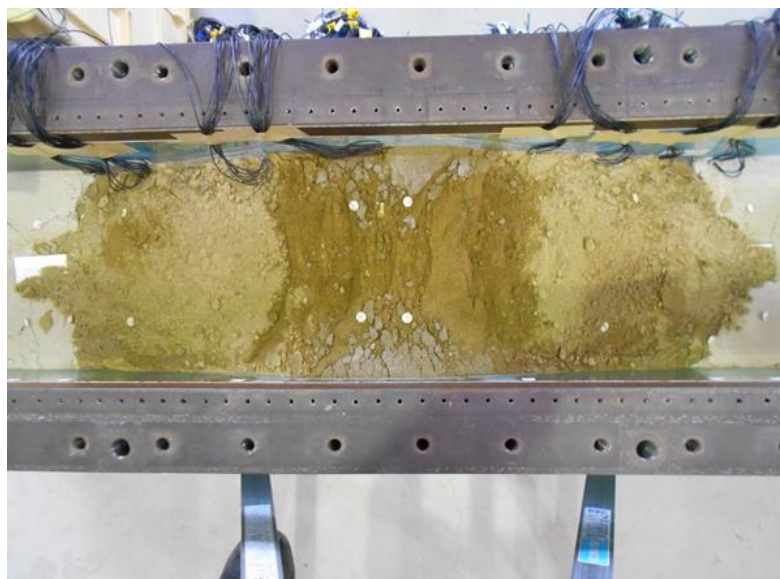
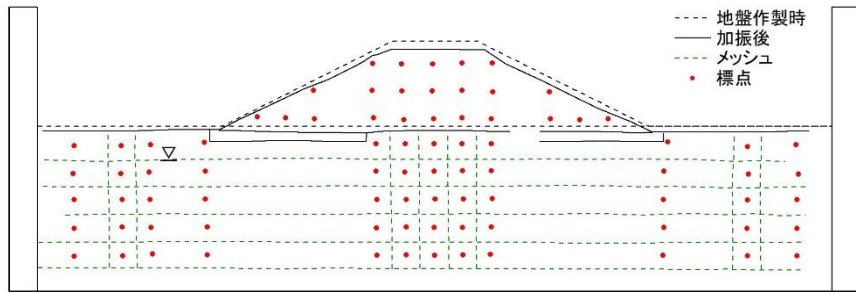
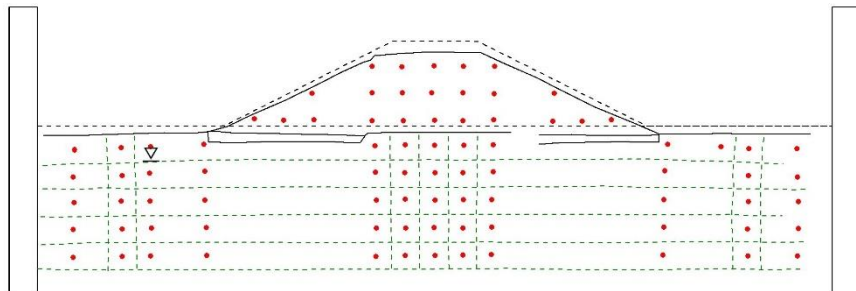


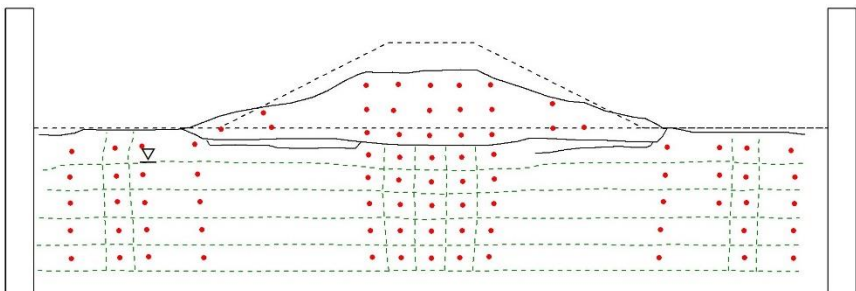
写真 4.3.5 ケース 3-4 における実験後の模型の状態 (堤体真上から撮影)



(a) ステップ 1



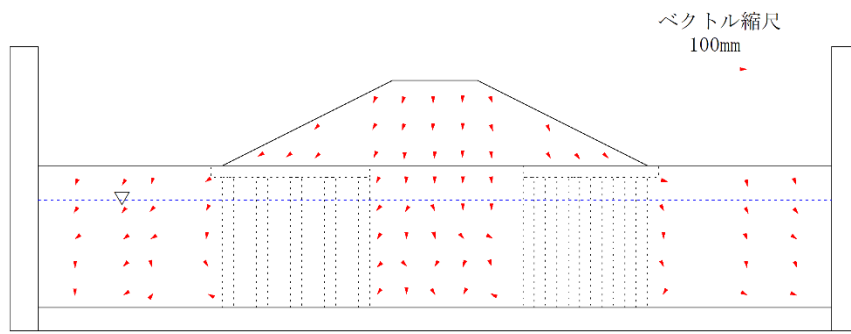
(b) ステップ 4



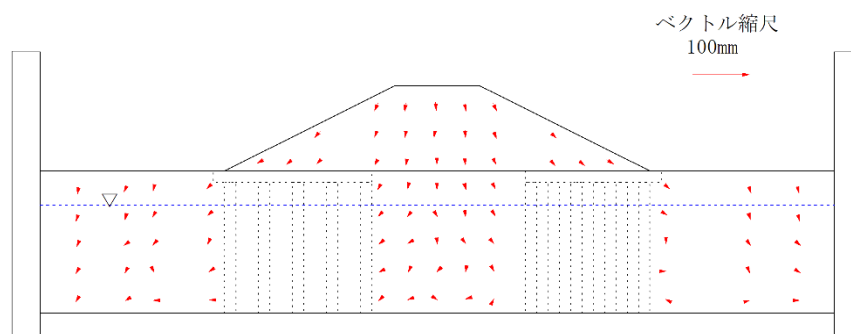
(c) ステップ 5

図 4.3.43 ケース 3-4 における各ステップ後の模型の変形

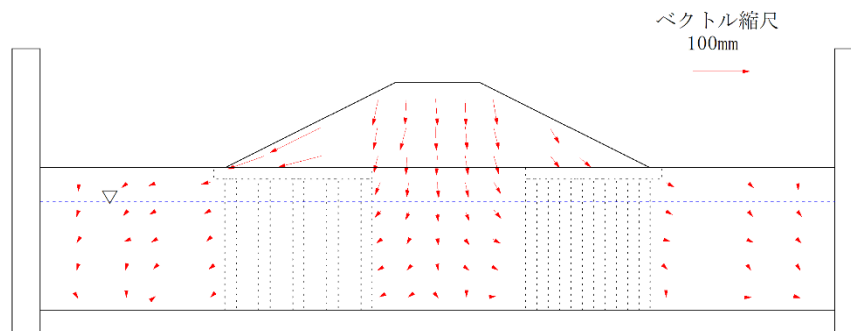
図 4.3.43 に各ステップ後の模型の変形を示す。また、図 4.3.44 に標点変位ベクトル図を示す。



(a) ステップ 1



(b) ステップ 4



(c) ステップ 5

図 4.3.44 ケース 3-4 における標点変位ベクトル図

4.4 結果のまとめ

図 4.4.1 にケース 3-1 (対策なし) およびケース 3-2 (パイプドレーン+グラベルドレーン、グラベルドレーン) のステップ 1 におけるドレーン間の過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。パイプドレーンとグラベルドレーンを組み合わせたケース 3-2 の過剰間隙水圧比をみると、パイプドレーン (左側) において過剰間隙水圧比の最大値がグラベルドレーン (右側) よりも抑えられており、パイプドレーンの方がより効果がある結果となった。左側のパイプドレーンより最大値が大きかったものの、時間全体で見ると右側のグラベルドレーンもケース 3-1 の無対策と比べると過剰間隙水圧比は抑制されており、ある程度の太さのドレーン径 (ケース 3-2 は 1.5m) であれば、グラベルドレーンでも過剰間隙水圧を抑制する効果が十分発揮し得ることが確認された。

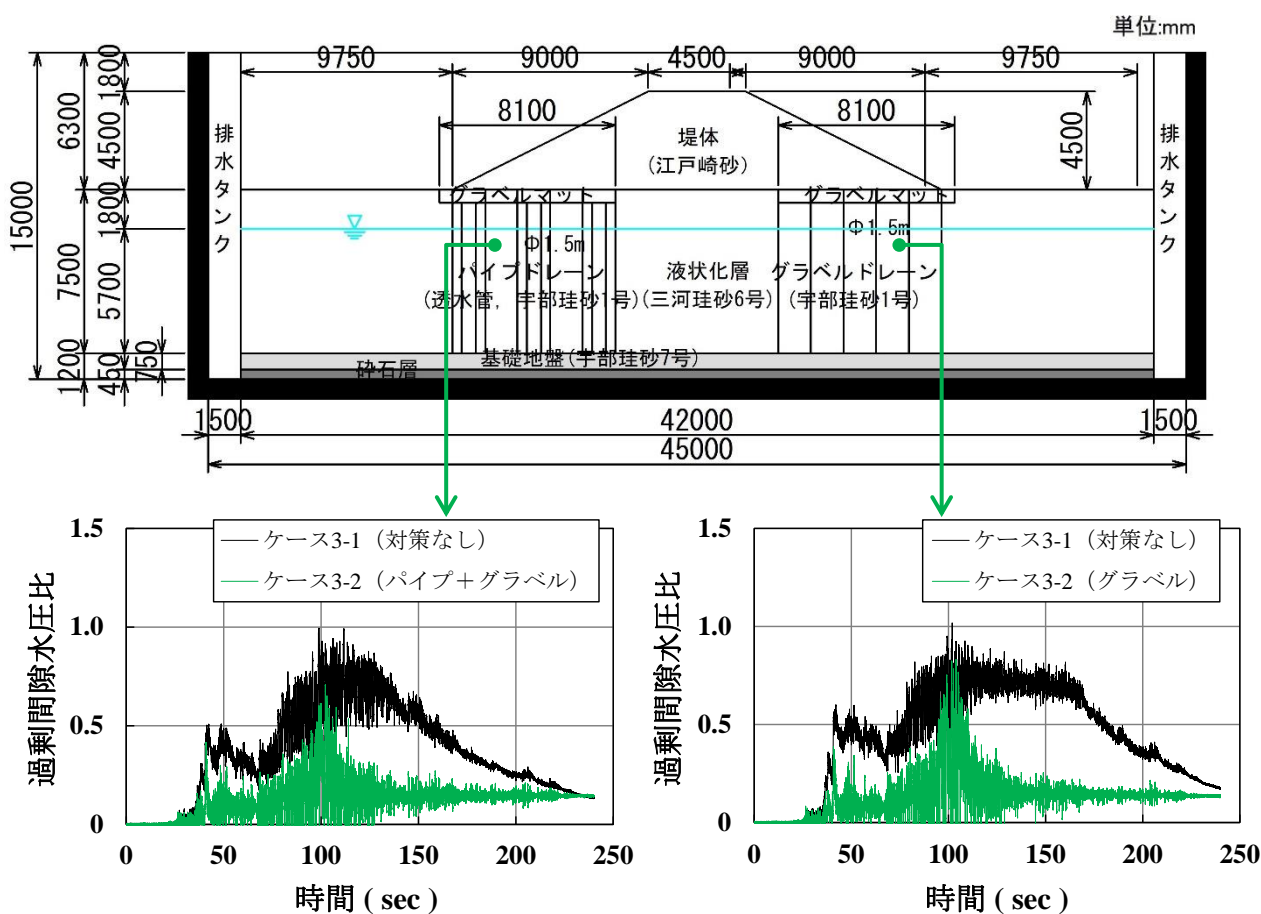


図 4.4.1 ケース 3-1 およびケース 3-2 のステップ 1 における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較

図 4.4.2 にケース 3-1 (対策なし) およびケース 3-3 (パイプドレーン、グラベルドレーン) のステップ 1 におけるドレーン間の過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。ケース 3-1 とケース 3-3 の左法尻直下を比較すると加振直後から過剰間隙水圧比の上昇抑制効果が確認され、過剰間隙水圧比の最大値では対策なしが 0.8 程度に対し、パイプドレーンは 0.5 程度となっている。グラベルドレーン側の過剰間隙水圧比では、約 130 秒までは対策なしのケース 3-1 とグラベルドレーンのケース 3-3 で大きな差はみられなかったが、約 130 秒以降の消散過程ではケース 3-3 の方が過剰間隙水圧比の低下速度が速くなっており、グラベルドレーンによる効果が確認された。ケース 3-2 のグラベルドレーン (ドレーン径 1.5m) に比べ、グラベルドレーンの効果の差が大きくなっているのは、グラベルドレーンがフィルターとしての機能を十分に発揮できず、砂まじりの間隙流体が流れたことが影響した可能性が考えられる。フィルターとしての機能が十分発揮できない場合、砂まじりの間隙流体となるだけでなく、ケース 3-3 で確認されたようにグラベルドレーン中心まで砂分が混入 (写真 4.3.3 (再掲)) し、その後目詰まりを起こす可能性も考えられる。

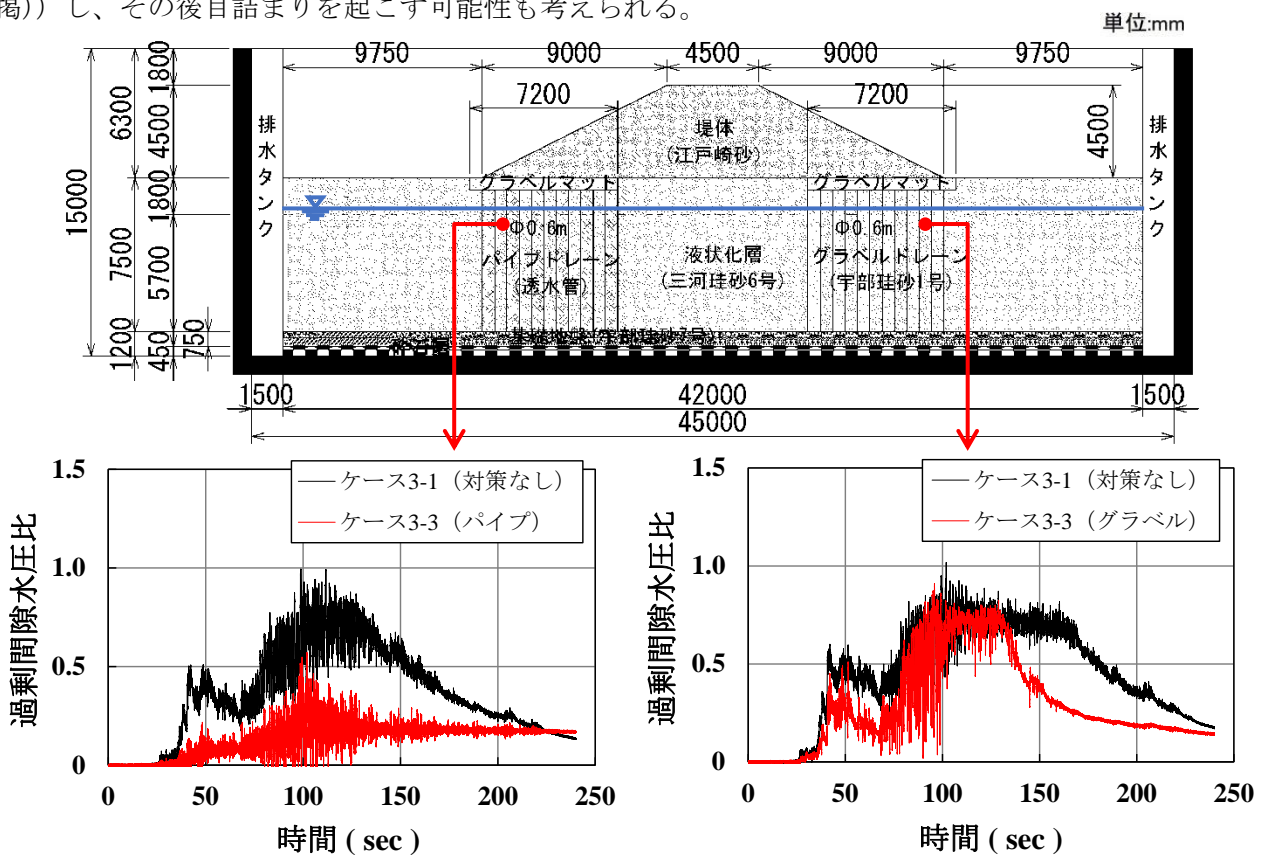


図 4.4.2 ケース 3-1 およびケース 3-3 のステップ 1 における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較



写真 4.3.3 水圧計設置高付近の模型開削状況 (再掲)

図 4.4.3 にケース 3-1 (対策なし) およびケース 3-4 (グラベルドレーン) のステップ 1 におけるドレーン間の過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。なお、前述のとおりケース 3-4 ではケース 3-3 のグラベルドレーンと異なり、グラベルドレーンの外側に不織布を巻いている。杭芯間隔が密な右側ドレーンの過剰間隙水圧比をみると、ケース 3-3 のグラベルドレーンのみとは異なり、加振直後や過剰間隙水圧比の最大値、過剰間隙水圧消散過程で過剰間隙水圧比の上昇抑制効果が確認できる。このことから、不織布を巻き砂分の混入を防ぐことによって、ドレーン径が大きなくても (ドレーン材の粒子数が多くなくても) グラベルドレーンにフィルターとしての機能がある程度発揮させ得ることがわかった。また、左側のドレーンは右側よりも杭芯間隔が疎であるため、密なものよりも過剰間隙水圧比の上昇抑制効果が小さくなっていると考えられる。

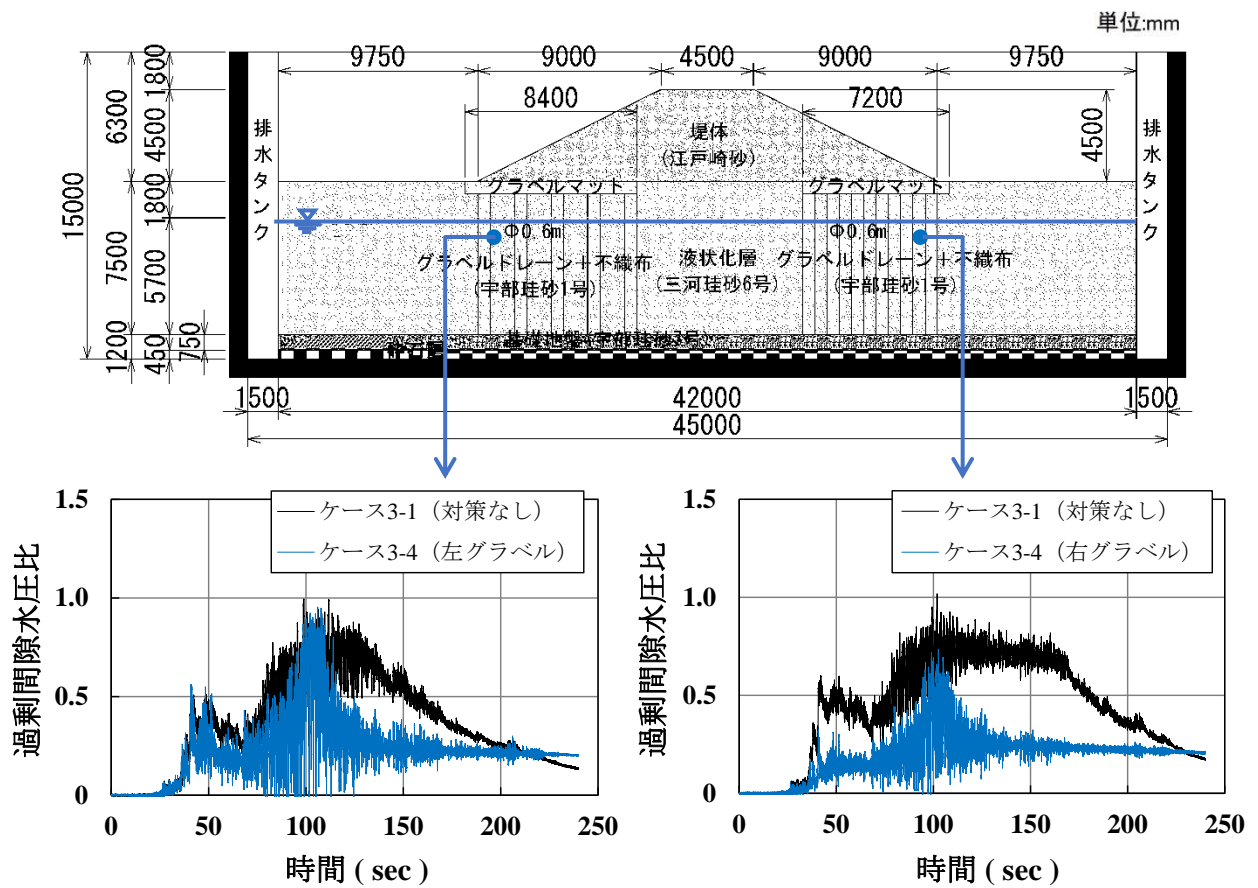


図 4.4.3 ケース 3-1 およびケース 3-4 のステップ 1 における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較

図 4.4.4 にドレーンを同じ杭芯間隔で設置したケース 3-3 (パイプドレーン、グラベルドレーン)、ケース 3-4 (グラベルドレーン)、および対策なしのケース 3-1 のステップ 5 における加振開始から 30 秒までの過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。ケース 3-3 (グラベルドレーン) の過剰間隙水圧挙動はケース 3-1 (対策なし) とほぼ変わらないことがわかる。ケース 3-4 (グラベルドレーン) は、一定レベルの加振を繰り返すと排水が間に合わなくなり、液状化状態となることが確認できる。一方、ケース 3-3 (パイプドレーン) では、液状化状態まで至らないことから、各ドレーンにおける過剰間隙水圧比の違いには、砂分の混入による影響やドレーンの鉛直方向の透水性が影響していると考えられる。

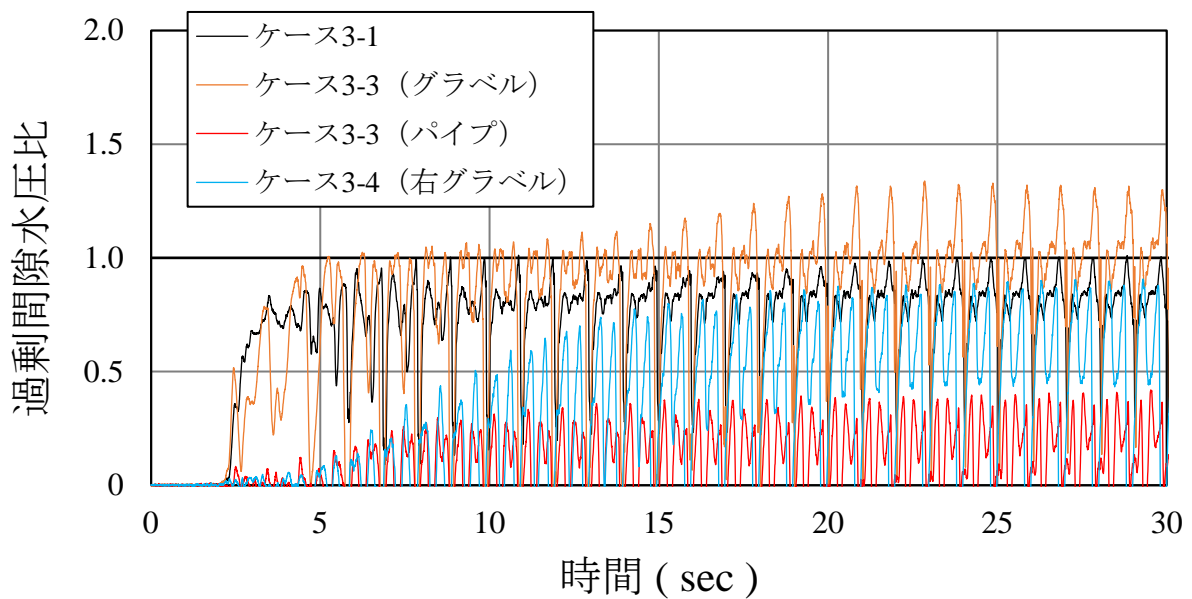


図 4.4.4 各ケースにおける過剰間隙水圧比の時刻歴の比較

5. 実験シリーズ 4

5.1 実験の目的

シリーズ 3 において、グラベルドレーンの外側に不織布を巻くことで、ドレーン径が大きくなってもグラベルドレーンがフィルターとしての機能がある程度発揮することがわかった。シリーズ 4 では、フィルターを外側に巻いたドレーン径 1.0m のグラベルドレーンを堤体の左右に同一の配置で設置し、グラベルドレーンの有無による過剰間隙水圧や堤体天端の沈下量等への影響について検討した。

5.2 実験条件

5.2.1 実験模型

実験模型として堤体盛土高 5m、法勾配 2 割、天端幅 5m、液状化層厚 10m を想定し、50G の遠心重力場において図 5.2.1 のような模型を用いて実験を行った。本シリーズではこれまでの実験シリーズと異なり、土槽端部の排水タンクを取り外し、電磁バルブにより水位調整を行った。

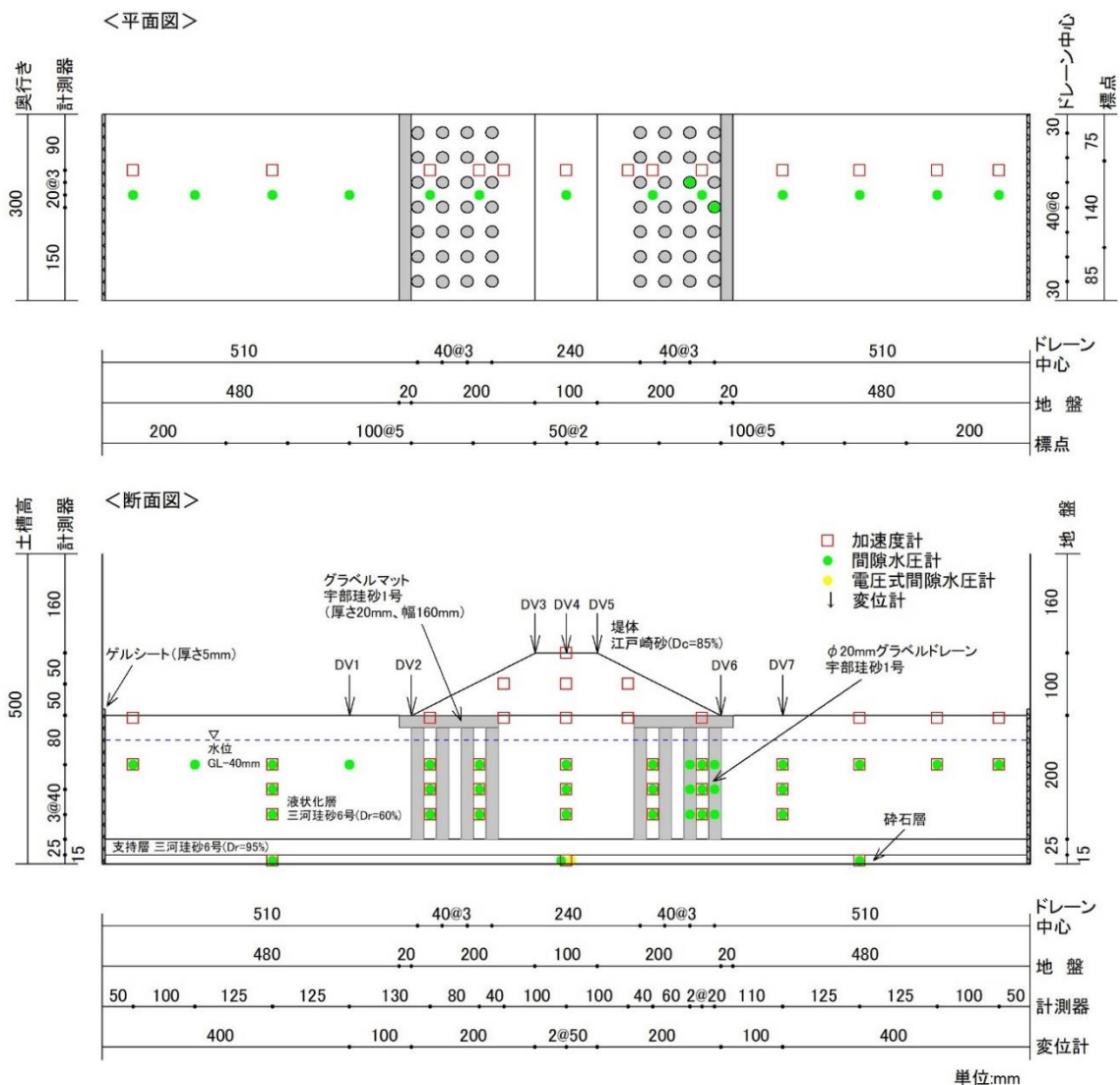


図 5.2.1 シリーズ 4 の実験模型例 (ケース 4-2、寸法は模型スケール)

実験に先立ち、加振時の土槽壁面境界からの入力波や反射波の影響を緩和するために土槽の奥行方向の両壁面をそれぞれ2分割し、計4つのエリアをそれぞれ厚さ5mmおよび30mmのゲルシート、30mmのゴムシート（各厚さは模型スケール、以下緩衝材の厚さは模型スケール）、緩衝材なしとして（図5.2.2）、図5.2.3の入力波形で試加振実験を行い、加速度、過剰間隙水圧への影響を比較した。壁面に最も近い箇所上部に設置した加速度計と水圧計の結果の比較を図5.2.4、図5.2.5にそれぞれ示す。緩衝材なしと比べ加速度が低減される結果となった。また、過剰間隙水圧は加速度と比べ緩衝材なしとの差が小さく、効果があまり得られなかった。

本結果とシートの厚さを考慮して本シリーズでは厚さ5mmのゲルシートを壁面に設置し実験を行った。また土槽の水平方向壁面には壁面摩擦低減のためにフッ素樹脂配合のコーティング剤を塗布した。ゲルシート設置状況を写真5.2.1に、コーティング剤塗布状況を写真5.2.2にそれぞれ示す。なお、加振中に地下水位が浅の不飽和層が土槽壁面に拘束され、盛土の沈下を抑制している懸念が生じたため、ケース4-3および4-4においては奥行方向壁面と接する地表面へ写真5.2.3のように切欠きを作製した。

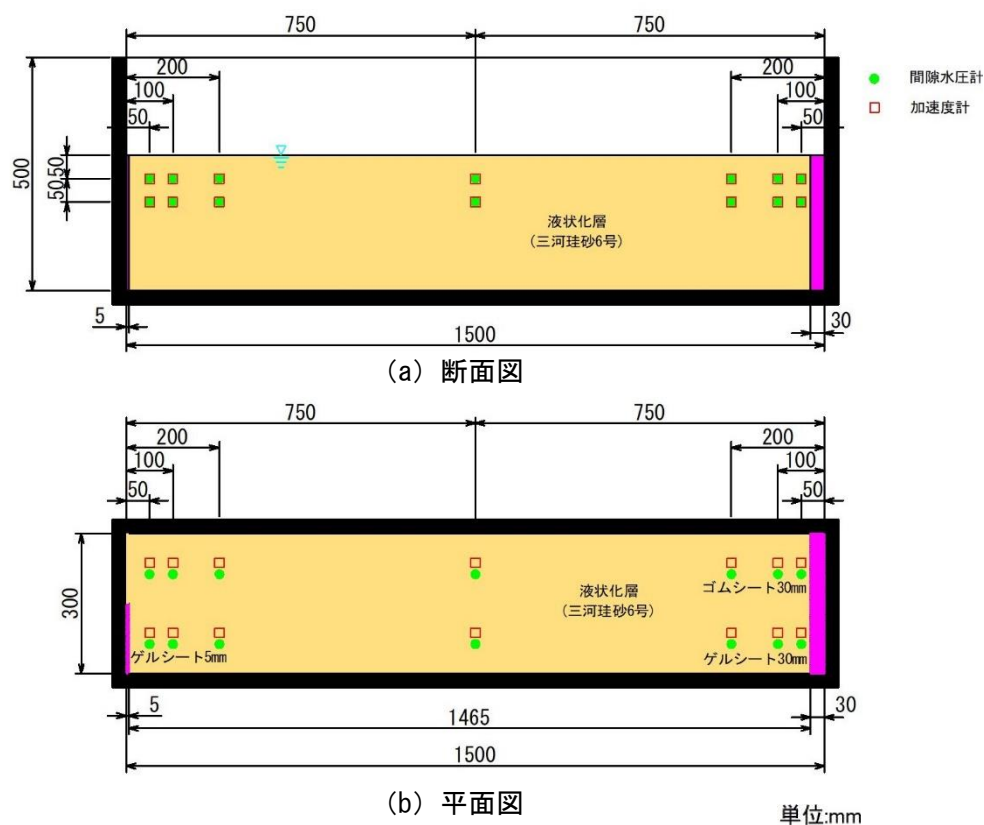


図 5.2.2 緩衝材比較の試加振実験時の模型（寸法は模型スケール）

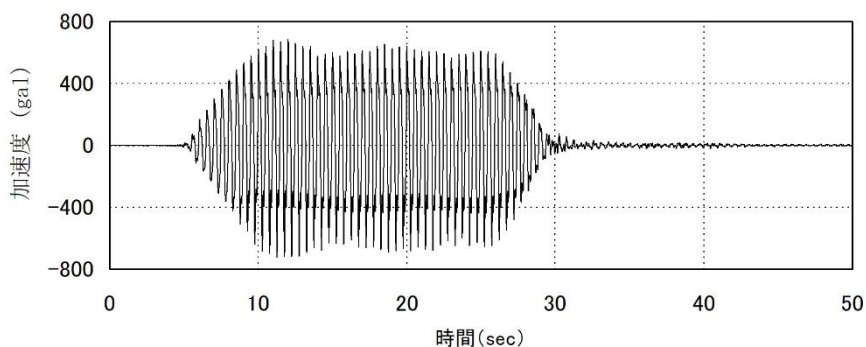
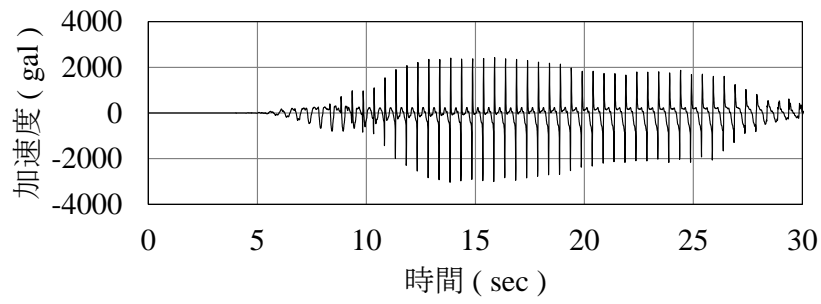
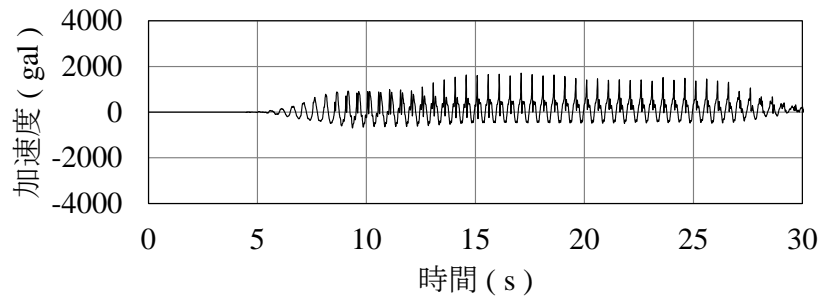


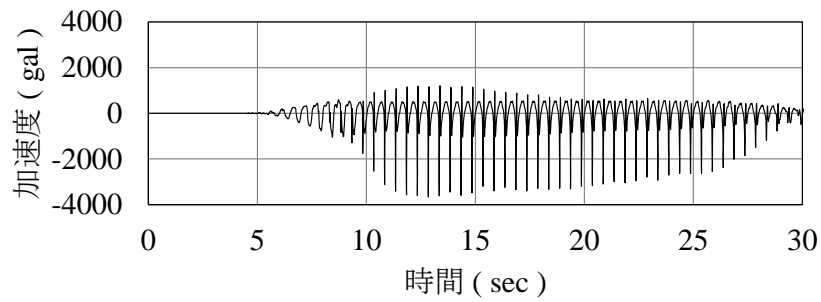
図 5.2.3 シリーズ4の試加振実験で使用了入力波形



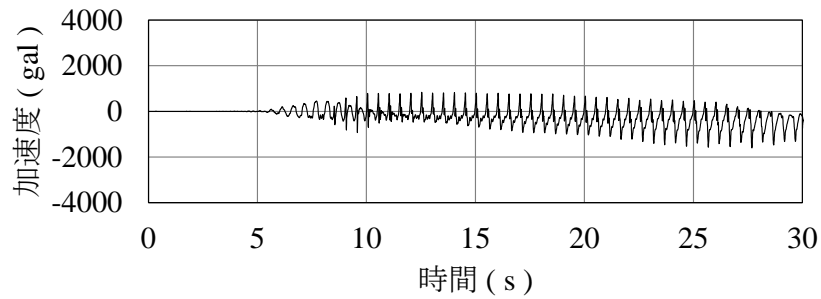
(a) 緩衝材なし



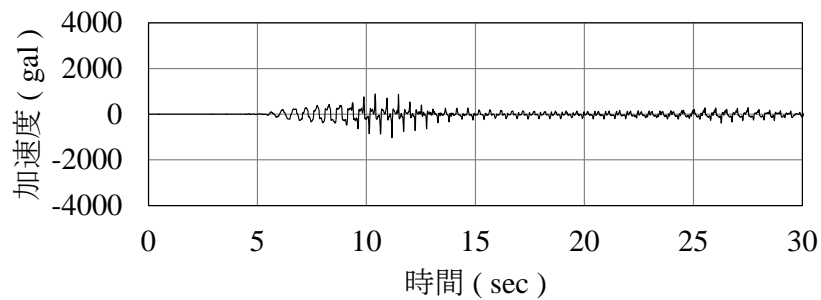
(b) ゴムシート 30mm



(c) ゲルシート 5mm

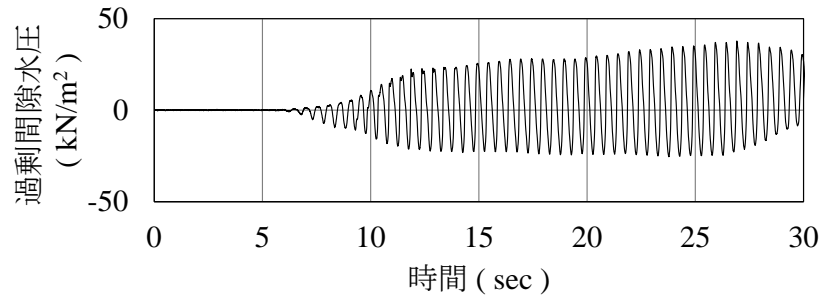


(d) ゲルシート 30mm

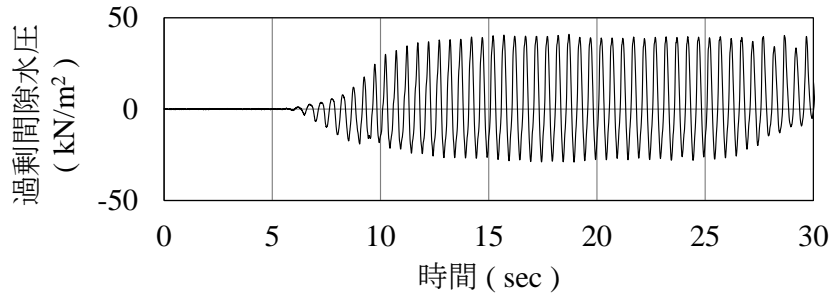


(e) 中央

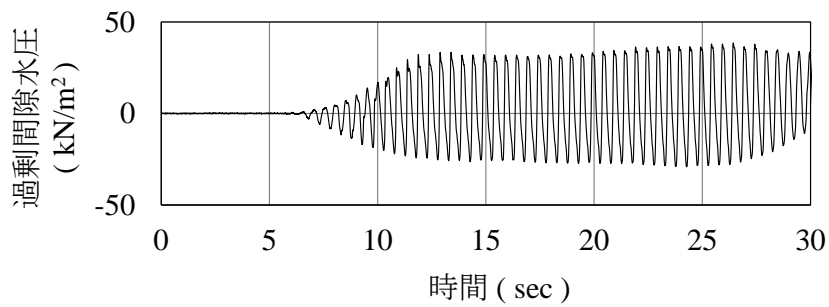
図 5.2.4 各箇所における加速度の時刻歴



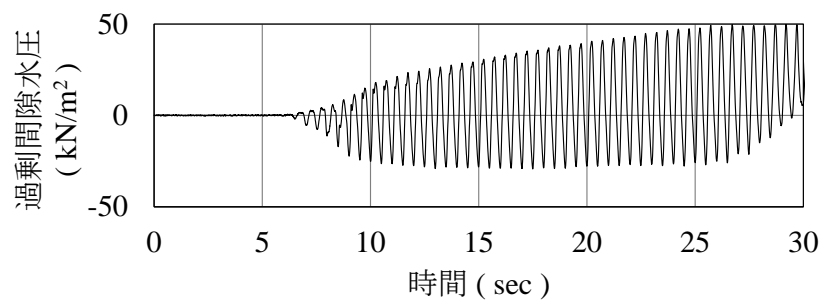
(a) 緩衝材なし



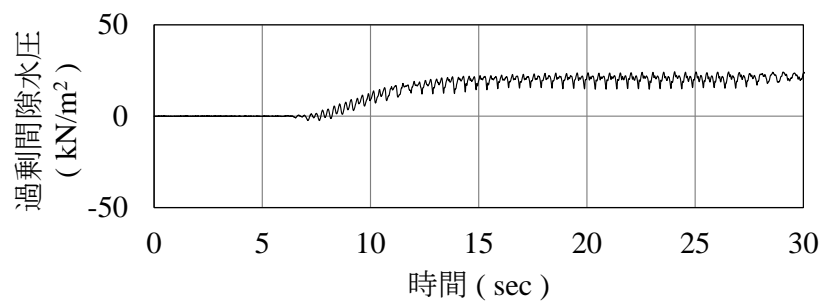
(b) ゴムシート 30mm



(c) ゲルシート 5mm



(d) ゲルシート 30mm



(e) 中央

図 5.2.5 各箇所における過剰間隙水圧の時刻歴

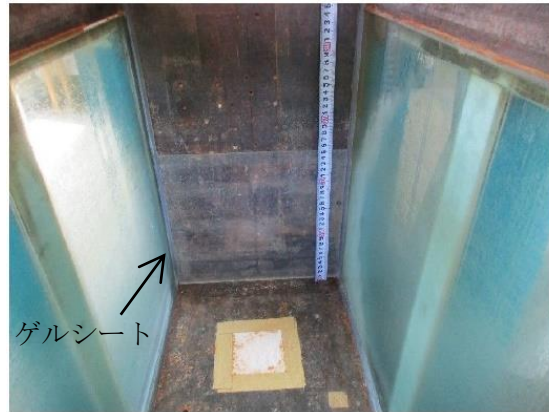


写真 5.2.1 ゲルシート設置状況



写真 5.2.2 コーティング剤塗布状況

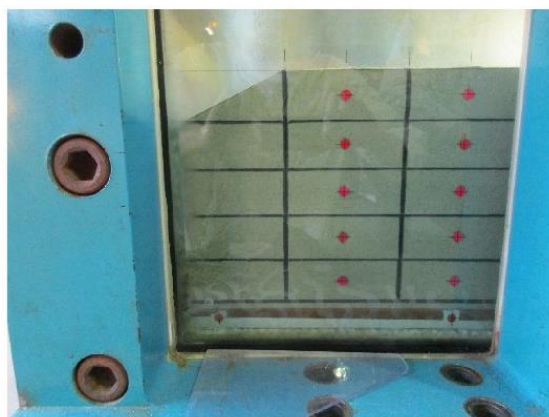


写真 5.2.3 奥行方向壁面と接する地表面への切欠き

5.2.2 実験ケース

実験ケースを表 5.2.1 に示す。シリーズ 4 では、液状化対策工（グラベルドレーン）の有無や水位の違いにより 4 ケース実施した。ドレーンは杭芯間隔 2m、ドレーン径 1m で長さ 9m のグラベルドレーンを打設し、ドレーンの上面には厚さ 1m のグラベルマットを設けた。また間隙流体には、遠心加速度（50G）に対応し、粘性を 50 倍に調整したメトローズ水溶液（信越化学工業株式会社製）を使用した。

表 5.2.1 シリーズ 4 の実験ケース（寸法は実スケール）

ケース	遠心加速度	地下水位	間隙流体	液状化対策工
4-1	50G	GL-2m	メトローズ 水溶液 (※)	なし
4-2				グラベルドレーン左右各28本 杭芯間隔： 2m ドレーン長： 9m ドレーン径： 1m グラベルマット左右各1箇所 横： 8m 厚さ： 1m
4-3		GL-1m		なし
4-4				グラベルドレーン左右各28本 杭芯間隔： 2m ドレーン長： 9m ドレーン径： 1m グラベルマット左右各1箇所 横： 8m 厚さ： 1m

※粘性は水の50倍

5.2.3 地盤材料とドレーン材

各ケースにおける模型の地盤材料を表 5.2.2 に、その物性値を表 5.2.3 に示す。

図 5.2.6 に堤体に使用した江戸崎砂と液状化層に使用した三河珪砂 6 号およびドレーン材に使用した宇部珪砂 1 号の粒径加積曲線を示す。液状化層およびドレーン材に使用する材料はフィルター基準 ($D_{G15}/D_{85} < 9^4$) を満足するよう選定した (図 5.2.7、表 5.2.4)。また、ドレーンは外側に不織布を巻いたものを使用した。

ここで、 D_{85} ：液状化層材料の通過質量百分率 85%のときの粒径

D_{G15} ：ドレーン材の通過質量百分率 15%のときの粒径

表 5.2.2 シリーズ 4 の各ケースにおける模型の地盤材料

ケース	堤体	ドレーン材 グラベルマット	液状化層	支持層	砕石層
4-1	江戸崎砂 ($D_c = 85\%$)	—	三河珪砂 6号 ($D_r = 60\%$)	三河珪砂 6号 ($D_r = 95\%$)	東北砕石 7号
4-2		宇部珪砂1号			
4-3		—			
4-4		宇部珪砂1号			

表 5.2.3 シリーズ 4 の各地盤材料の物性値

物性値		地盤材料	江戸崎砂	三河珪砂 6号	宇部珪砂 1号
		地盤種別	堤体	液状化層 支持層	ドレーン材 グラベルマット
一般	土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)		2.713	2.663	2.655
粒度	礫分含有率 (%)		0	0	99.9
	砂分含有率 (%)		81.3	95.4	0.1
	シルト分含有率 (%)		12.0	4.6	0
	粘土分含有率 (%)		6.7	0	
	均等係数 U_c		8.49	2.08	1.40
	平均粒径 D_{50} (mm)		0.160	0.230	3.10
密度最大試験最小	最大乾燥密度 ρ_{\max} (g/cm^3)		—	1.641	—
	最小乾燥密度 ρ_{\min} (g/cm^3)		—	1.290	—
試験締め	最大乾燥密度 ρ_{\max} (g/cm^3)		1.689	—	—
	最適含水比 ω_{opt} (%)		16.5	—	—
15°Cに対する透水係数 k_{15} (m/s)			—	1.38×10^{-4} (※)	2.53×10^{-2}

※液状化層の条件での透水係数

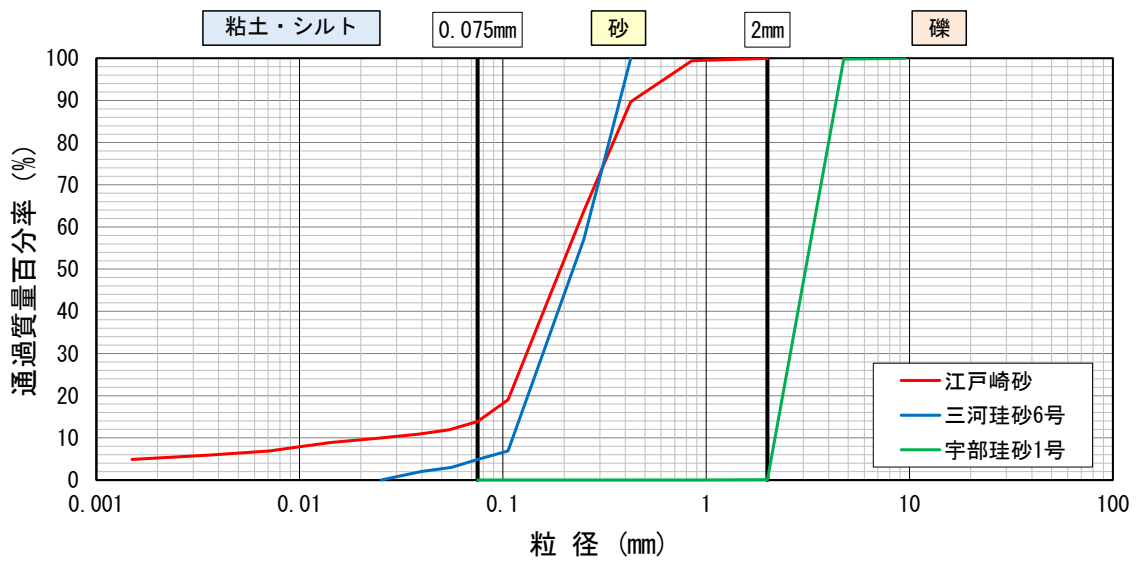


図 5.2.6 液状化層とドレーン材の粒径加積曲線

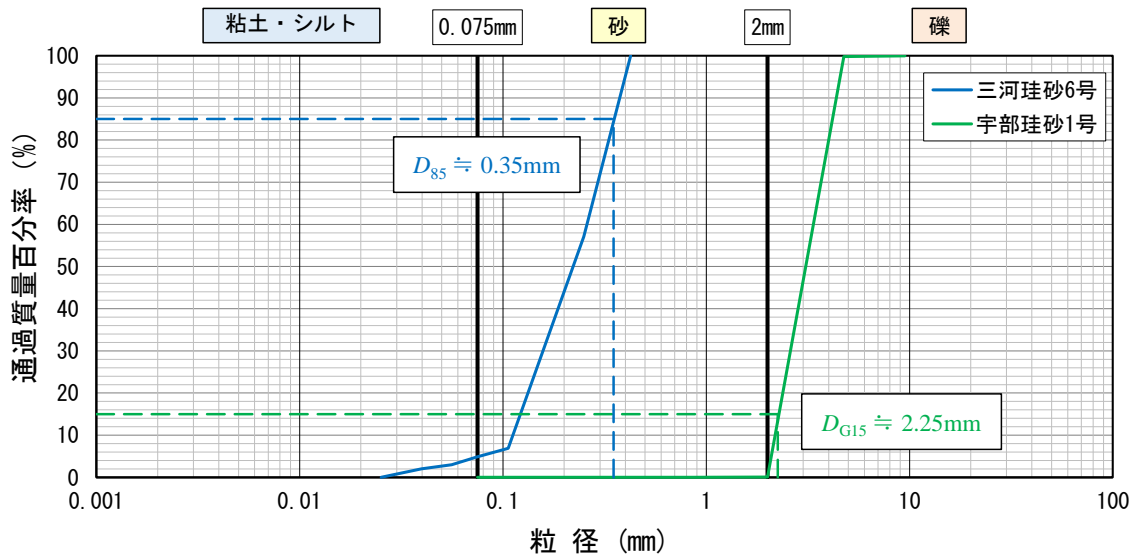


図 5.2.7 液状化層の D_{85} およびドレーン材の D_{G15}

表 5.2.4 シリーズ4における D_{G15}/D_{85} の値

地盤種別	ドレーン材	液状化層
地盤材料	宇部珪砂1号	三河珪砂6号
粒径	15%粒径 D_{G15} (mm)	85%粒径 D_{85} (mm)
	2.25	0.35
D_{G15}/D_{85}	6.4	

5.2.4 地盤の飽和方法

地盤の飽和は、シリーズ3と同様に真空槽内で模型を脱気した後、CO₂ガスを注入し再度脱気した状態で行った。浸透箇所は支持層下位の砕石層（東北砕石7号で厚さ75cm）として、液状化層下部から間隙流体（メトローズ水溶液、粘性は水の30倍）の飽和を行った。表5.2.5に各ケースにおける飽和方法を示す。

表 5.2.5 シリーズ4における地盤の飽和方法

ケース	浸透箇所	飽和手順
4-1	砕石層 (土槽底面)	1. 脱気 2. CO ₂ ガス注入 3. 脱気 4. 通水
4-2		
4-3		
4-4		

5.2.5 測定項目

実験での測定項目を表5.2.6に示す。地盤側面の標点は、液状化層では模型スケールで縦40mm×横50mm（排水タンク付近は一部75mmまたは100mm間隔）四方のメッシュ中央に、堤体では模型スケールで50mm間隔に横3列で設置した。地表面の標点は堤体の横断方向に2列で設置した。

表 5.2.6 シリーズ4の測定項目

計測器・計測物	計測位置	数量				備考
		ケース4-1	ケース4-2	ケース4-3	ケース4-4	
加速度計	地盤内	62	38	43		A1~A62
	加振テーブル	1				AT
	土槽底面	3				AB1~3
水圧計	地盤内	39	33	31	39	P1~P39
	土槽底面	3	4			PB1~PB3, PB2'
変位計	堤体天端	3				DV3~DV5（鉛直）
	水平地盤	2				DV1, DV7（鉛直）
	法尻	2				DV2, DV6（鉛直）
地表面形状	地表面	一式				重力場で横断方向にレーザー測定
標点	地表面	一式				重力場でメジャー・レーザー測定
	地盤側面					遠心力場で撮影した画像を解析

5.2.6 外力条件

加振実験で使用した入力波形を表 5.2.7、図 5.2.8 に示す。地震波（波形 1）には道路橋示方書⁵⁾のレベル 2 タイプ I 地震動（I 種地盤）である新晚翠橋の地表面加速度波形を、水平地盤面以下の逸散減衰を考慮し、元の振幅の 0.8 倍したものを採用した。各ケースにおけるステップごとの入力波形を表 5.2.8 に示す。なお、堤体断面形状の測定や地盤の観察等は各ステップの終了ごとに行った。

表 5.2.7 シリーズ 4 の加振実験で使用した入力波形

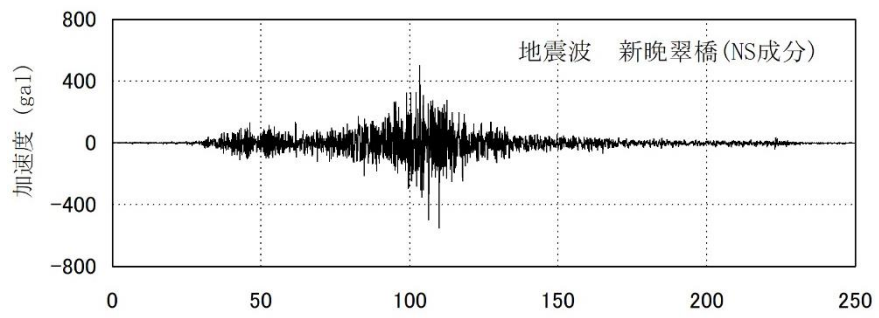
名称	入力波形	周波数 (Hz)	目標入力加速度振幅 (gal)
波形1	地震波 (※)	—	—
波形2	正弦波	2	150
波形3			300
波形4			400
波形5			500

※道路橋示方書におけるレベル2地震動（タイプ I）の動的解析用波形 I-I-3（I 種地盤、新晚翠橋周辺地盤上NS成分）を 80% に調整

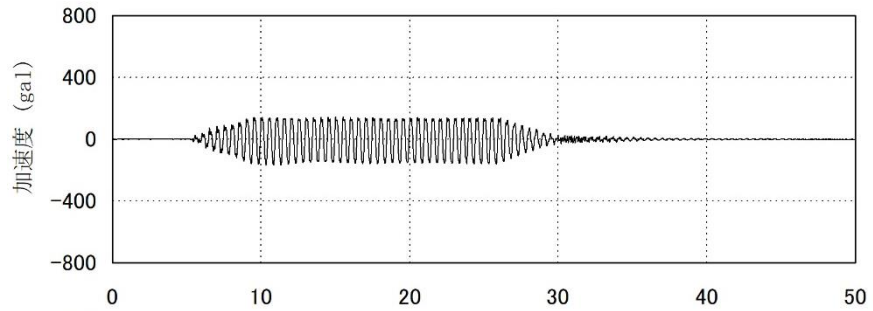
表 5.2.8 各ケースにおけるステップごとの入力波形

ステップ ケース	1	2	3	4
4-1	波形1	波形2	波形3	波形5
4-2	波形1	波形2	波形3	波形5
4-3	波形4	波形1	波形5	波形3
4-4	波形4	波形1	波形5	波形3

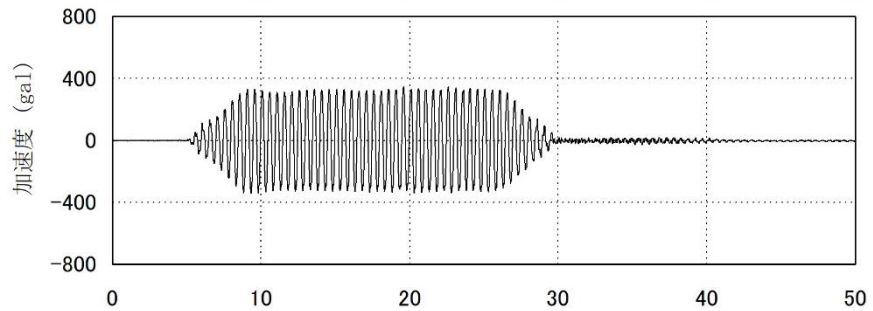
波形 1



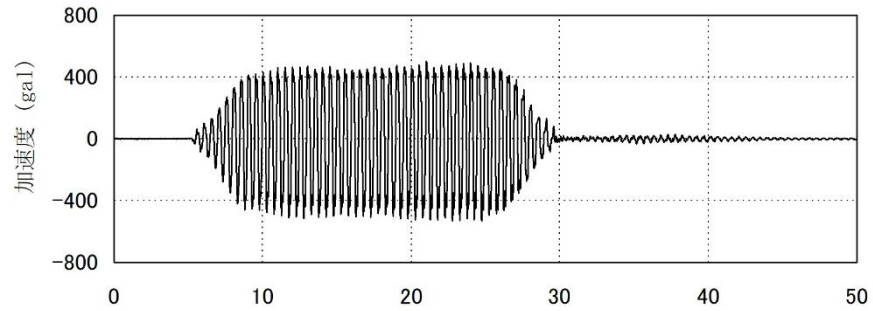
波形 2



波形 3



波形 4



波形 5

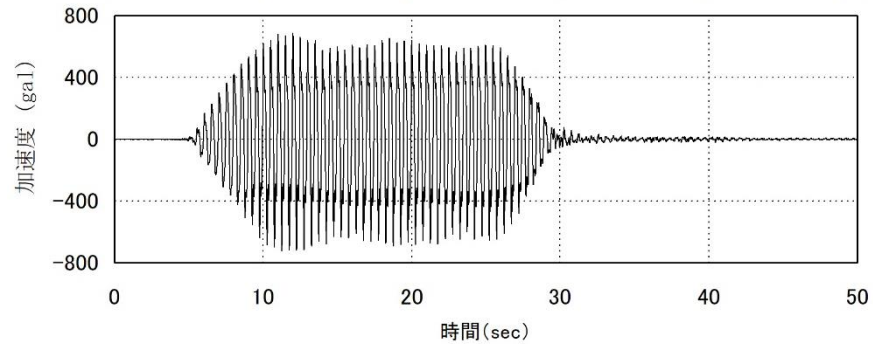


図 5.2.8 シリーズ 4 の加振実験で使用した入力波形

5.3 実験結果

5.3.1 ケース 4-1

ケース 4-1 では、液状化層に対策工を施さない条件（表 5.2.1）で実験を行った。図 5.3.1（本項において本図のみ模型スケールで表記）にケース 4-1 の実験模型を示す。水位は GL-2m とした。

図 5.3.2～図 5.3.5 にステップ 1～4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。各ステップにおいてほとんどの水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 5.3.6 に堤体天端（DV3～5）、法尻（DV2, 6）および水平地盤上（DV1, 7）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 5.3.1 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、各ステップで中央の DV4 が最も沈下量大きい結果となり、ステップ 4 では DV3, 5 よりも 0.2m 程度大きかった。法尻の変位は堤体の左右ともに沈下を示し、左右の沈下量に大きな差はみられなかった。

図 5.3.7 に模型の地表面形状を、写真 5.3.1 に堤体真上から見た実験後の模型の変形を、写真 5.3.2 に実験後の模型の開削断面をそれぞれ示す。写真 5.3.1 より堤体天端に亀甲状の亀裂が発生していることがわかる。

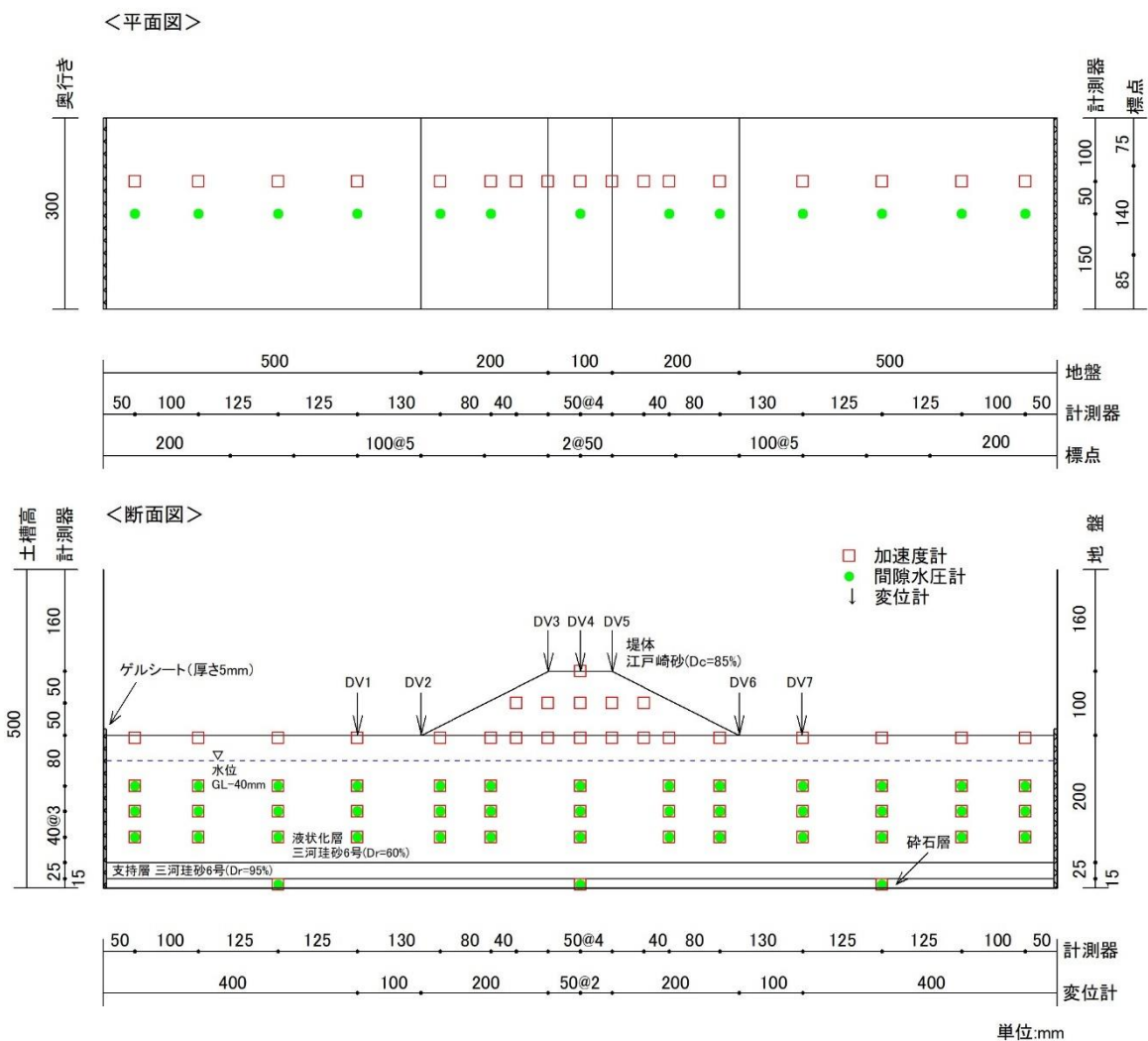


図 5.3.1 ケース 4-1 の実験模型（寸法は模型スケール）

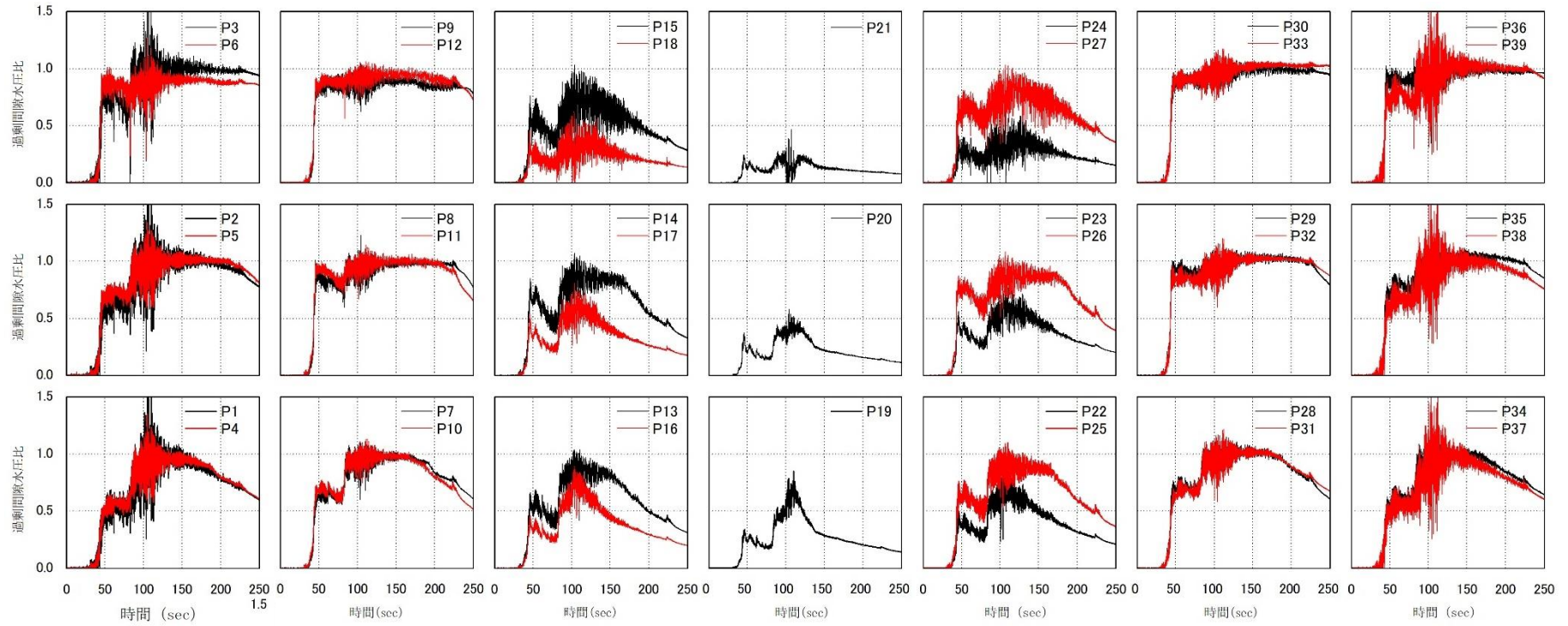
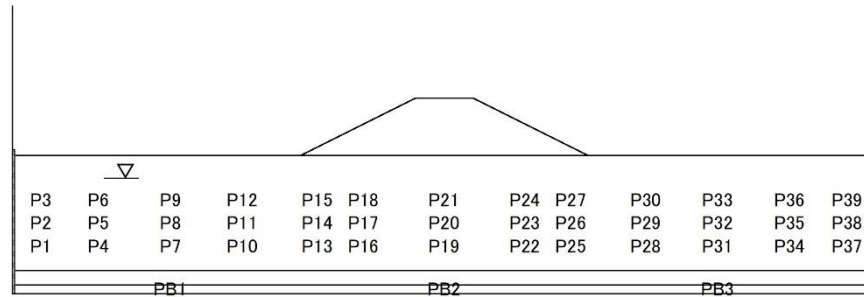


図 5.3.2 ケース 4-1 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

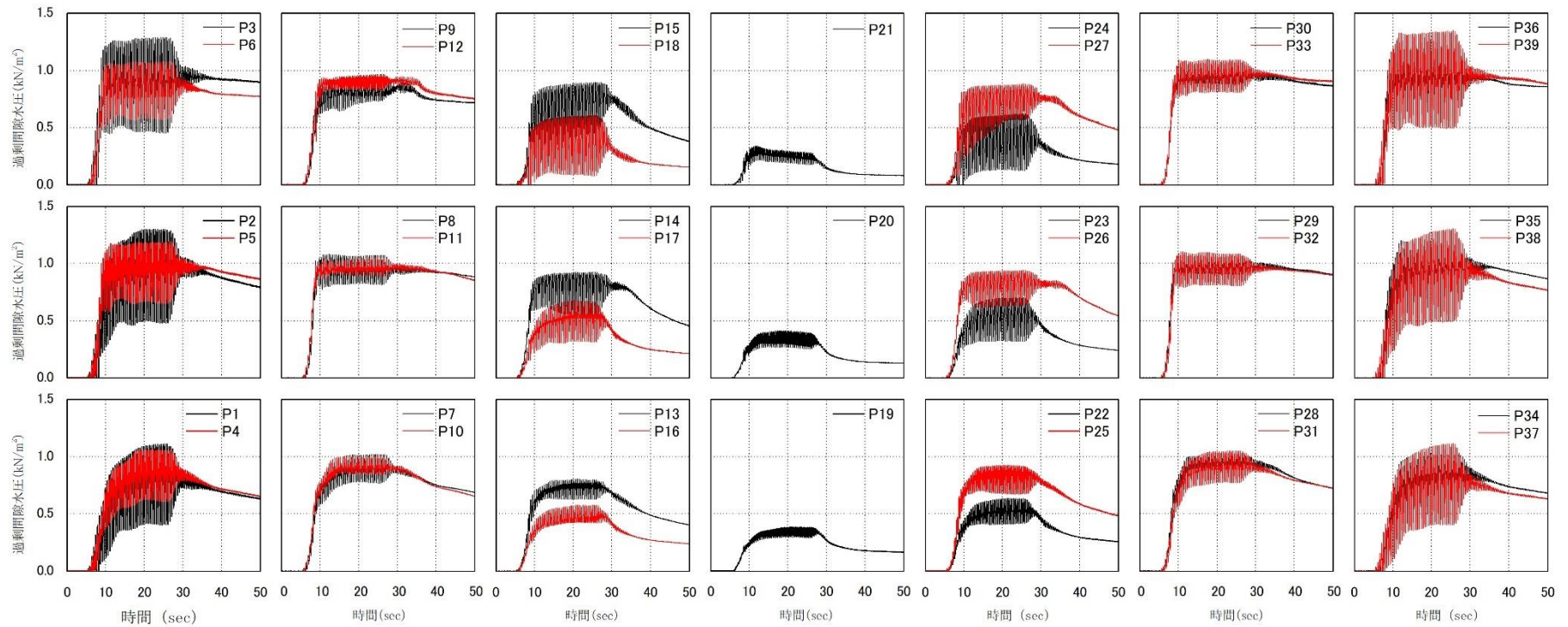
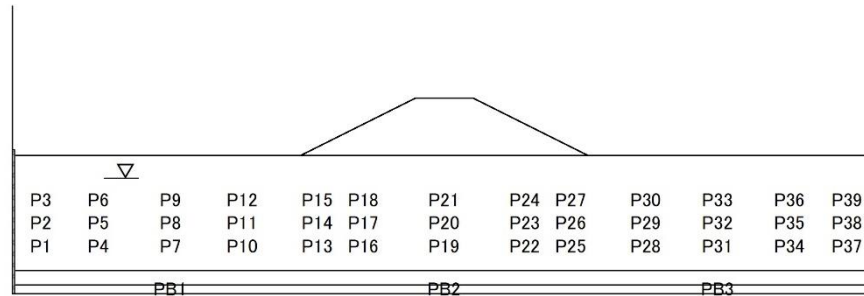


図 5.3.3 ケース 4-1 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

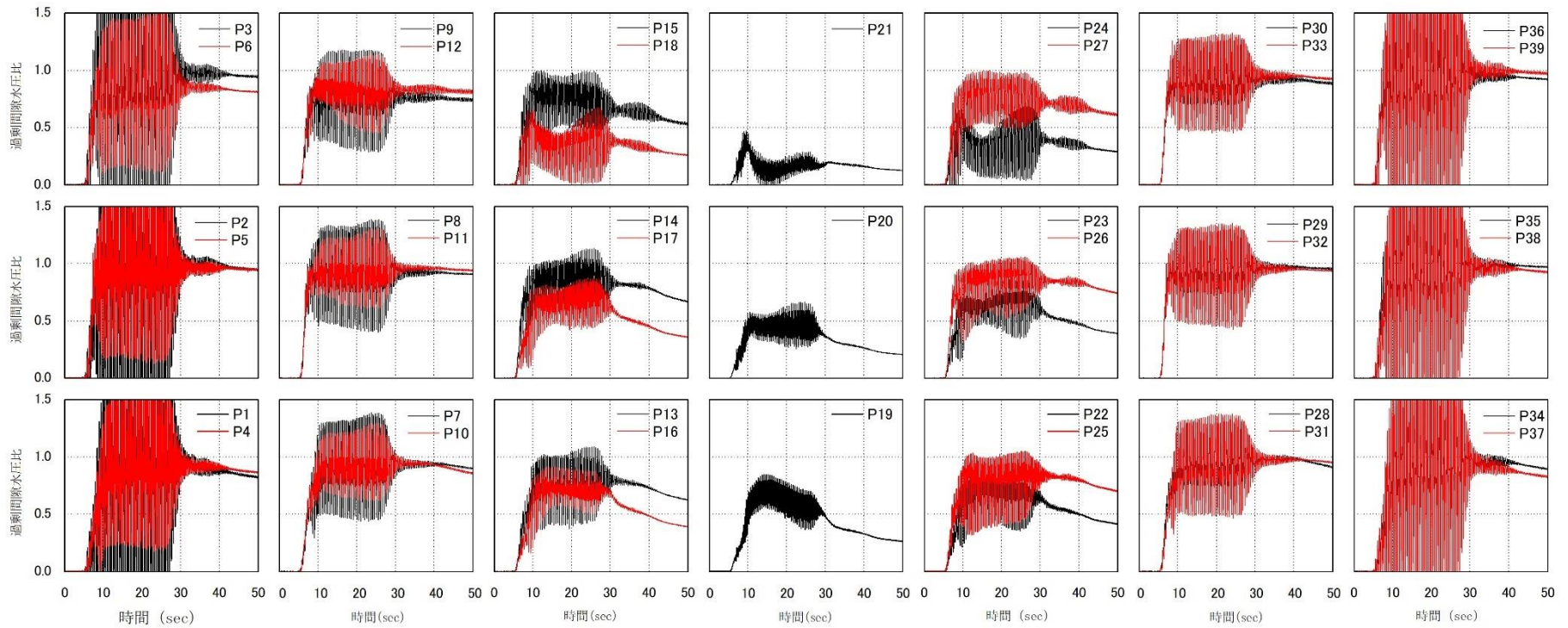
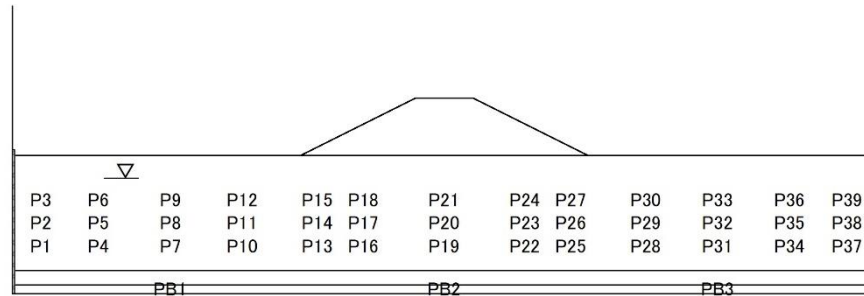


図 5.3.4 ケース 4-1 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

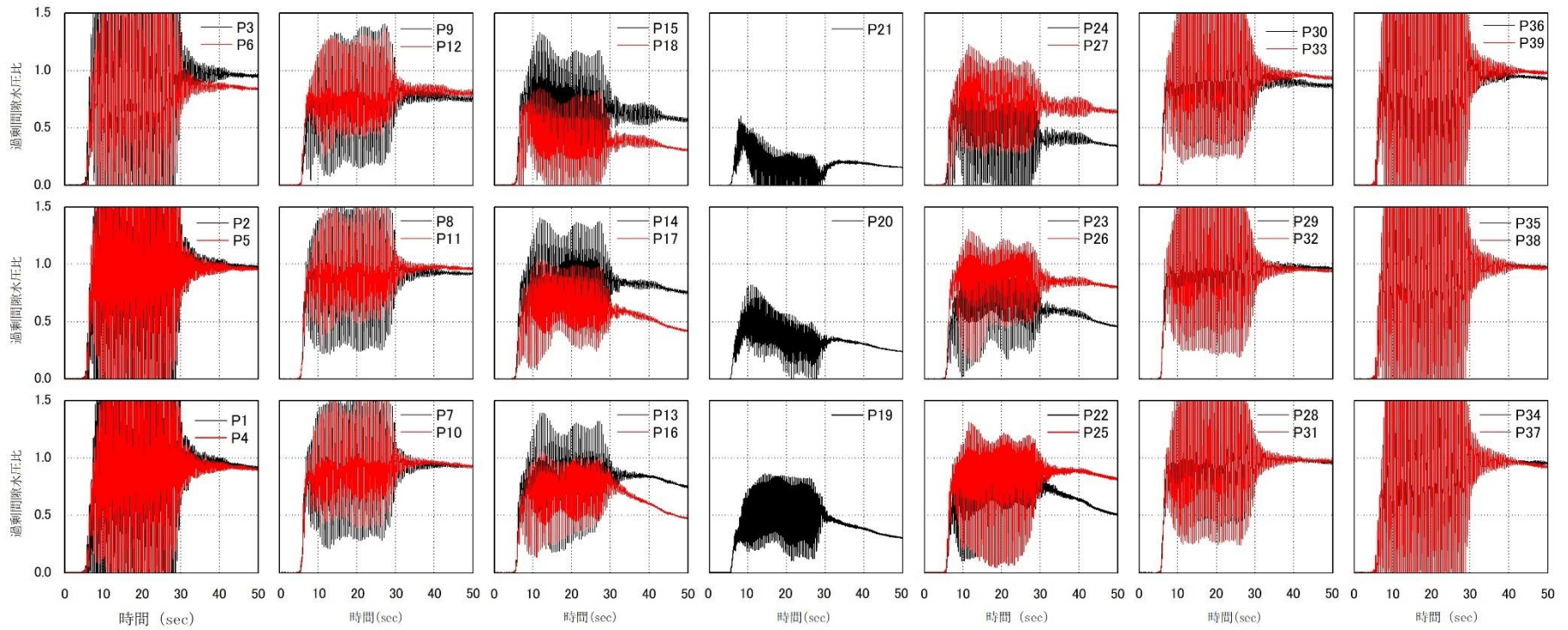
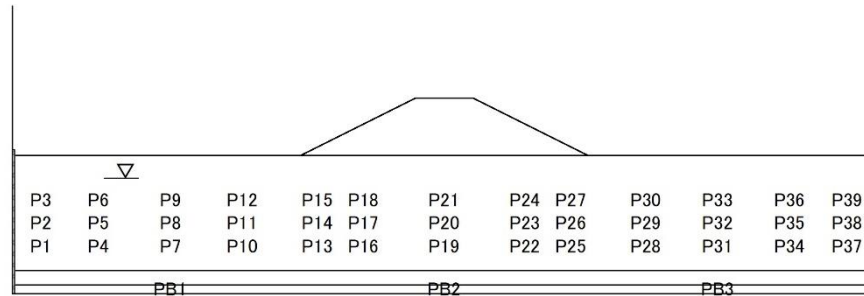


図 5.3.5 ケース 4-1 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

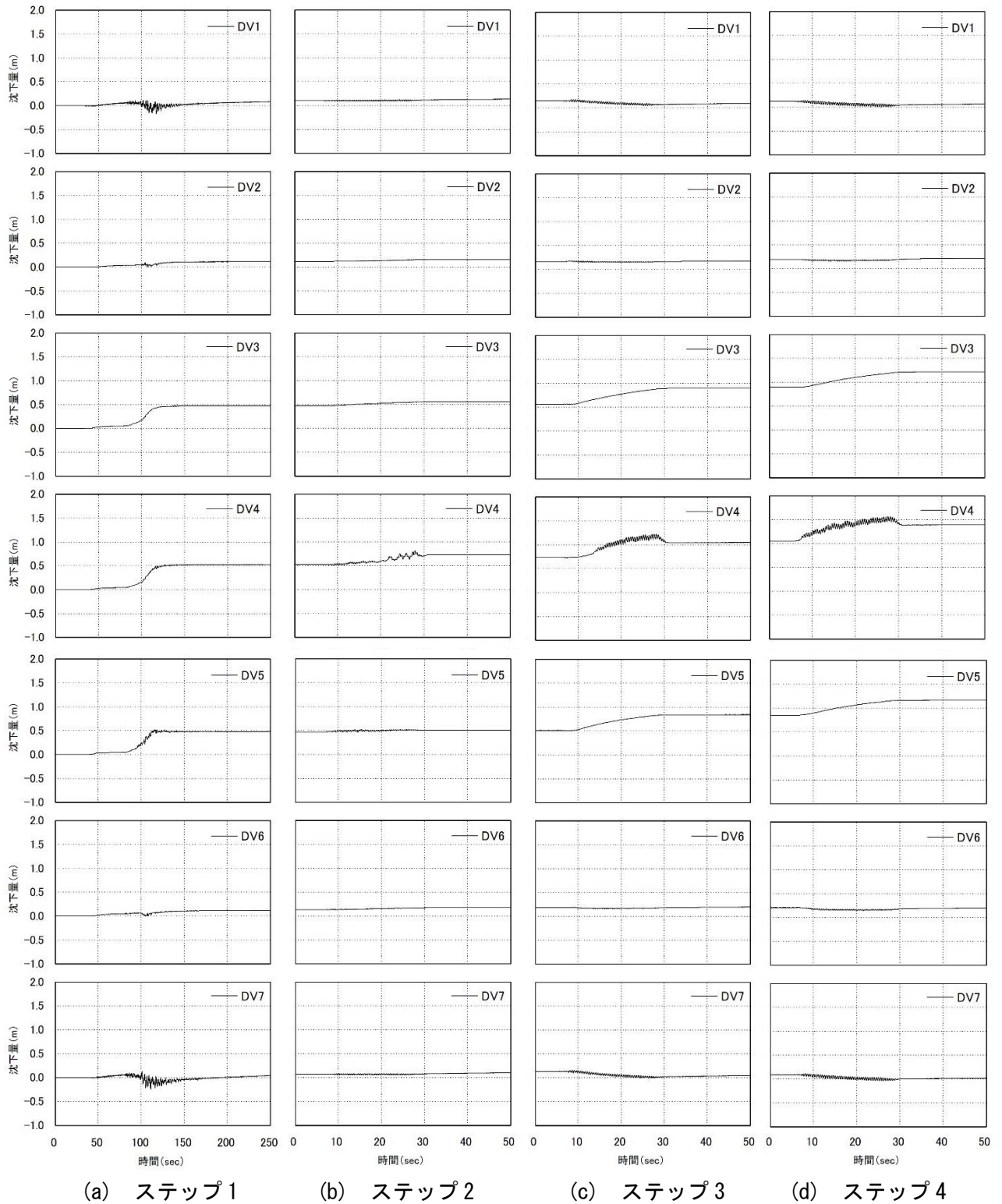
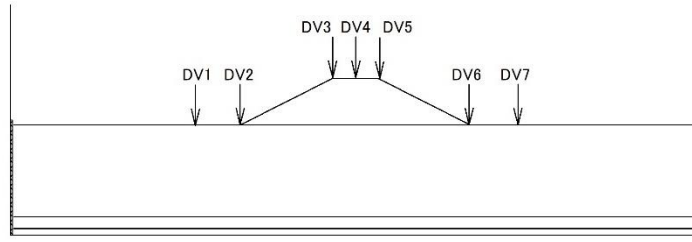


図 5.3.6 ケース 4-1 における各ステップの累積沈下量

表 5.3.1 ケース 4-1 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	0.101	0.114	0.470	0.529	0.471	0.136	0.072
2	0.151	0.168	0.557	0.730	0.511	0.184	0.132
3	0.120	0.189	0.899	1.051	0.848	0.206	0.088
4	0.095	0.230	1.223	1.396	1.180	0.217	0.059

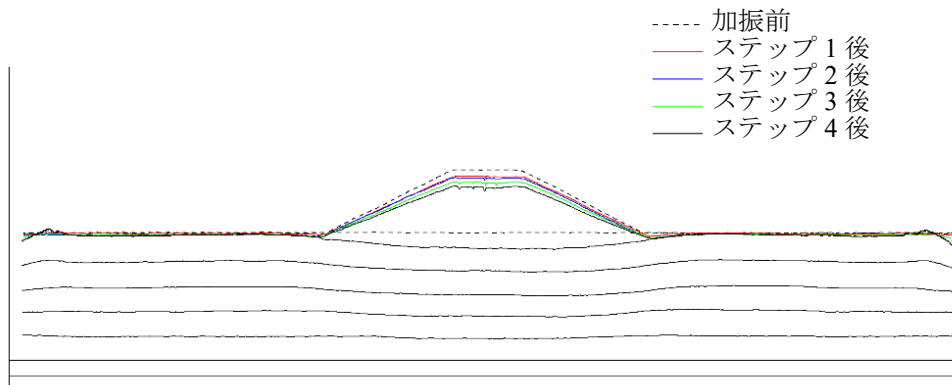


図 5.3.7 ケース 4-1 における模型の地表面形状

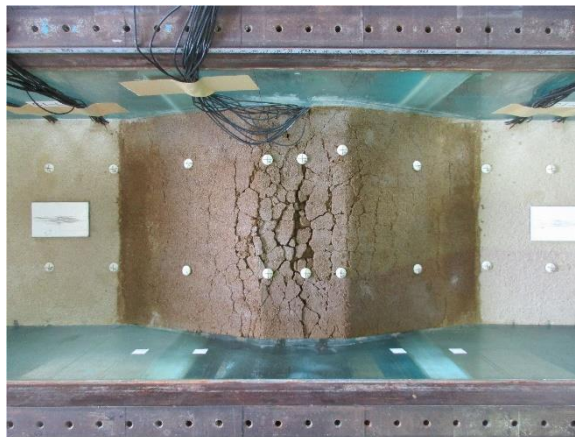


写真 5.3.1 ケース 4-1 における実験後の模型の状態
(堤体真上から撮影)

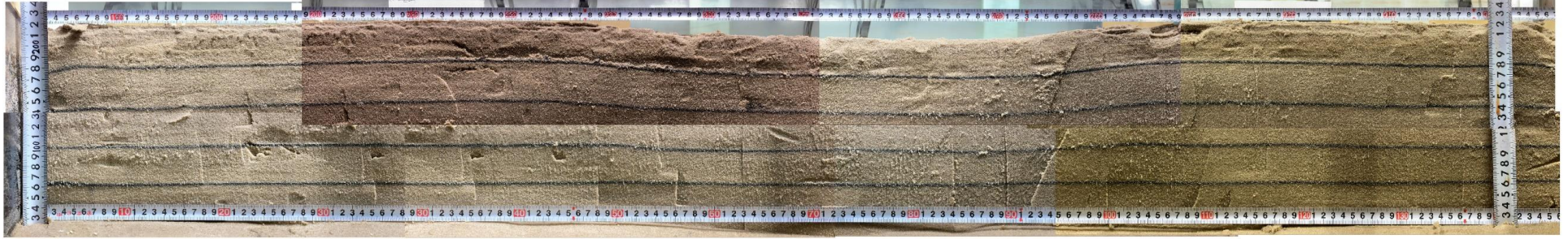
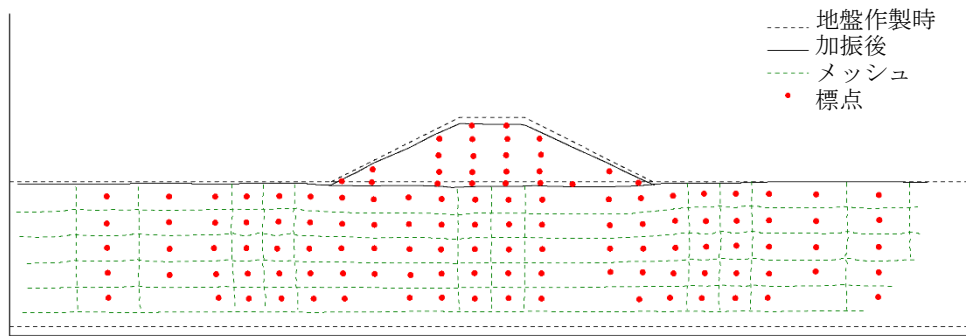
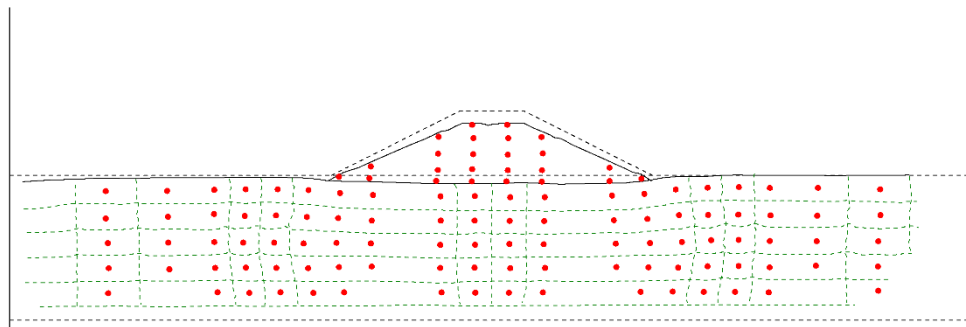


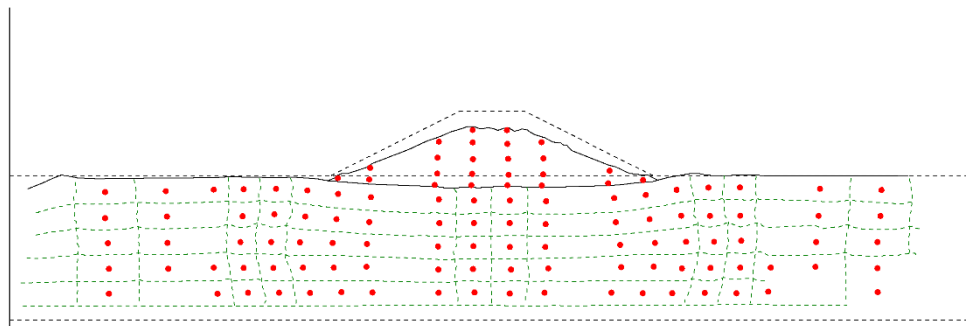
写真 5.3.2 ケース 4-1 における実験後の模型の開削断面



(a) ステップ 1



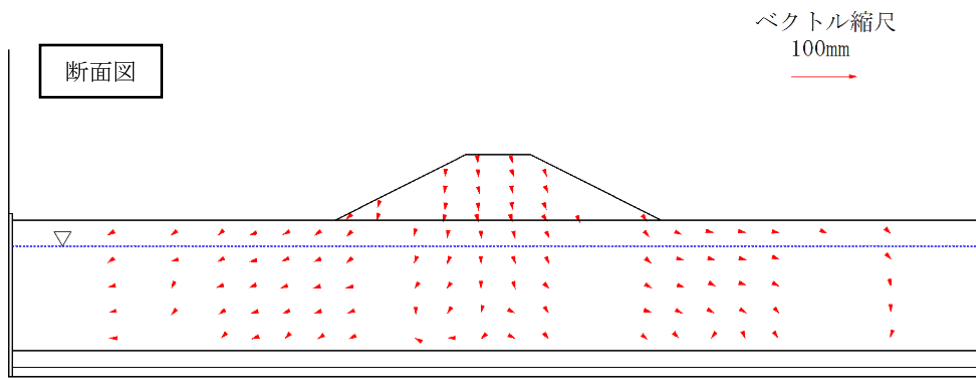
(b) ステップ 3



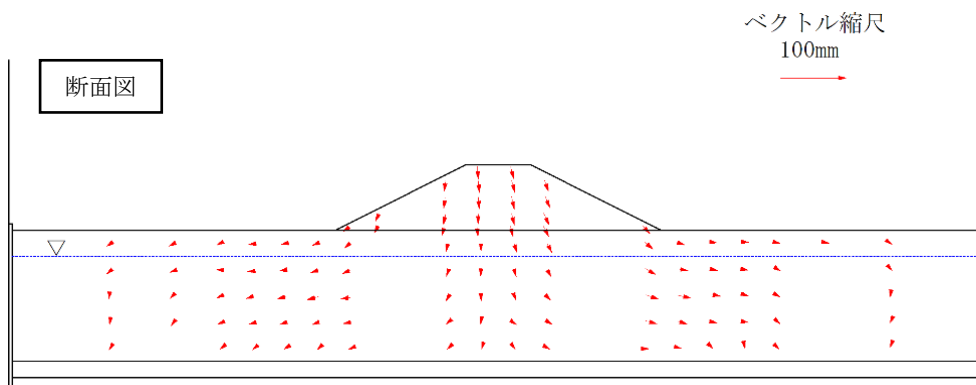
(c) ステップ 4

図 5.3.8 ケース 4-1 における各ステップ後の模型の変形

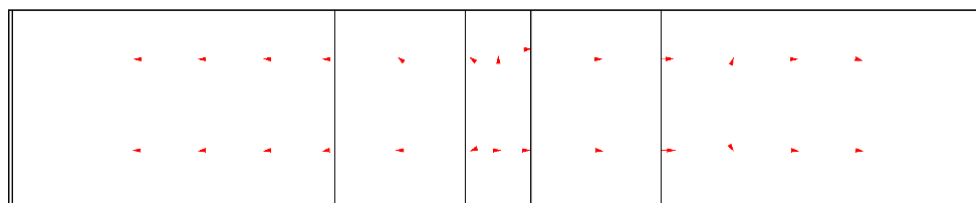
図 5.3.8 に各ステップ後の模型の変形を示す。また、図 5.3.9 に標点変位ベクトル図を示す。なお、ステップ 1, 3 では地表面に設置した標点が地盤の動きに追随せず飛散してしまったため、地表面に設置した標点の位置を測定しなかった。



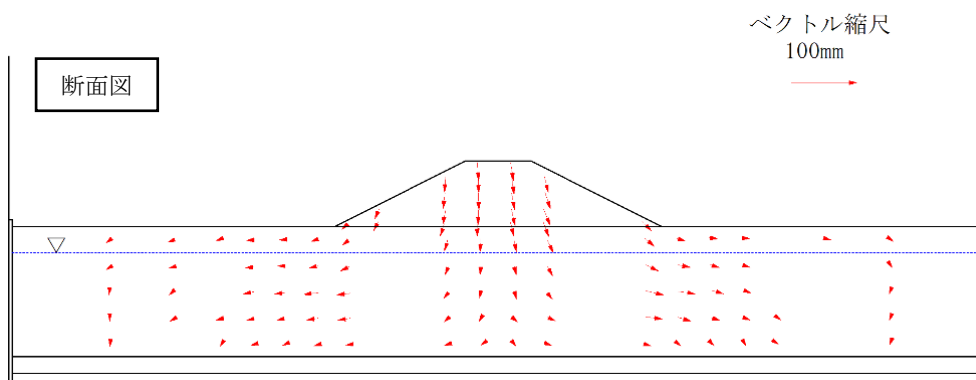
(a) ステップ 1 (平面は未測定)



(b) ステップ 3 (平面は未測定)



平面図



(c) ステップ 4

図 5.3.9 ケース 4-1 における標点変位ベクトル図

5.3.2 ケース 4-2

ケース 4-2 の実験模型（図 5.2.1、本項において本図のみ模型スケールで表記）を再掲する。ケース 4-2 では、堤体の左右へ杭芯間隔 2m、ドレーン径 1m で長さ 9m のドレーンをそれぞれ 28 本打設し、ドレーン上面には厚さ 1m のグラベルマットを設けた。また、水位は GL-2m とした。

図 5.3.10～図 5.3.13 にステップ 1～4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。各ステップにおいてほとんどの水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。堤体直下の P6～P22 においてはすべてのステップで過剰間隙水圧比が 1 以下であった。

図 5.3.14 に堤体天端（DV3～5）、法尻（DV2,6）および水平地盤上（DV1,7）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 5.3.2 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、計測位置による大きな差はみられなかったがステップ 4 の最終的な沈下量では右法肩の DV5 で最も沈下量が大きくなった。法尻の変位は堤体の左右ともにステップ 2 までは沈下し、ステップ 3 以降は隆起する結果となった。特に右法尻の DV6 では最終的な沈下量は 0m となった。模型の地表面形状（図 5.3.15）から、ステップ 3 以降の隆起は堤体（主に天端）の沈下（鉛直下向きへの堤体材料の移動）により周辺である法尻が影響を受けたと考えられる。

写真 5.3.3 に堤体真上から見た実験後の模型の変形を、写真 5.3.4 に実験後の模型の開削断面をそれぞれ示す。写真 5.3.3 より堤体天端に亀甲状の亀裂が発生していることがわかる。

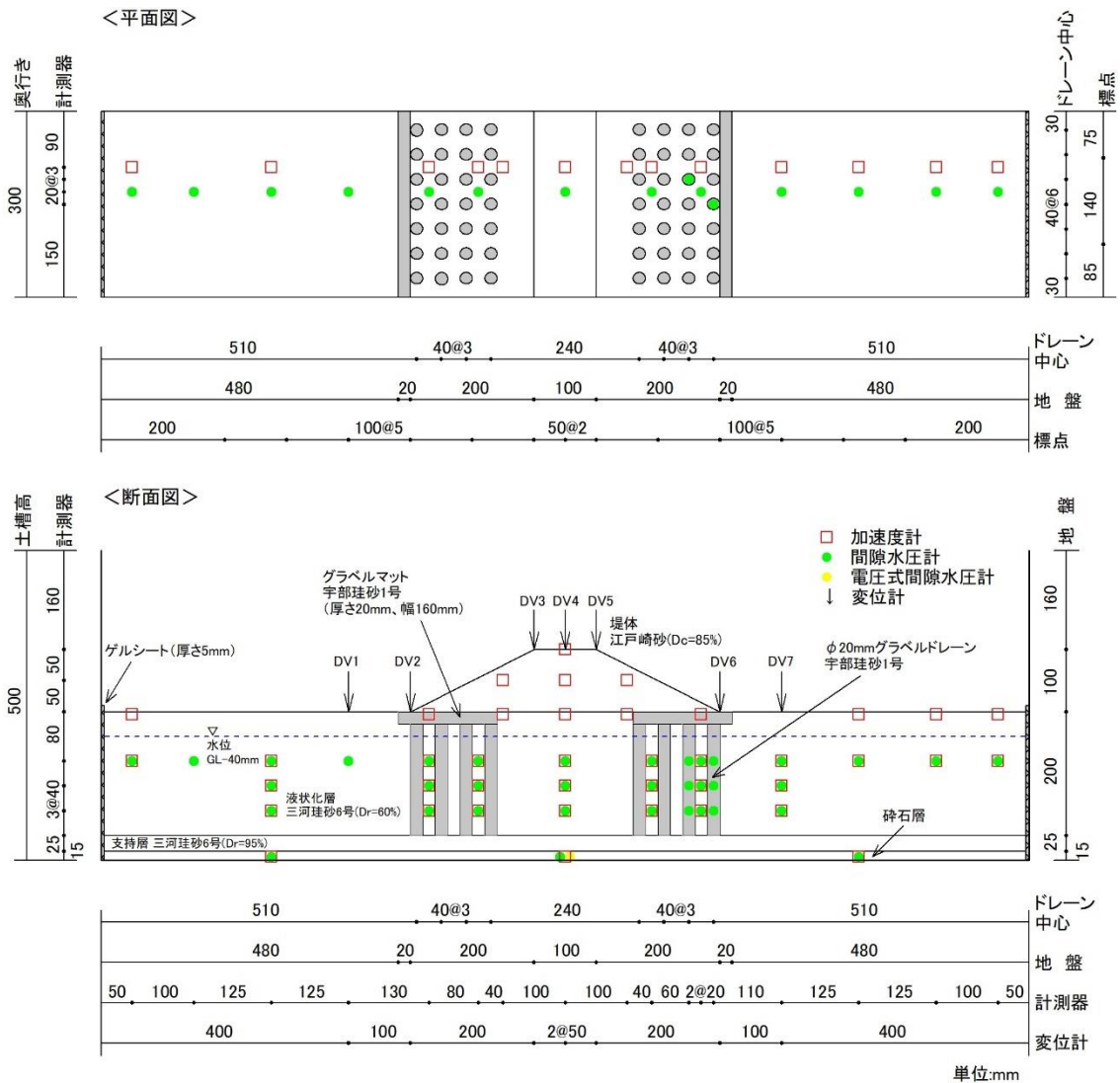


図 5.2.1 シリーズ 4 の実験模型例（ケース 4-2、寸法は模型スケール）（再掲）

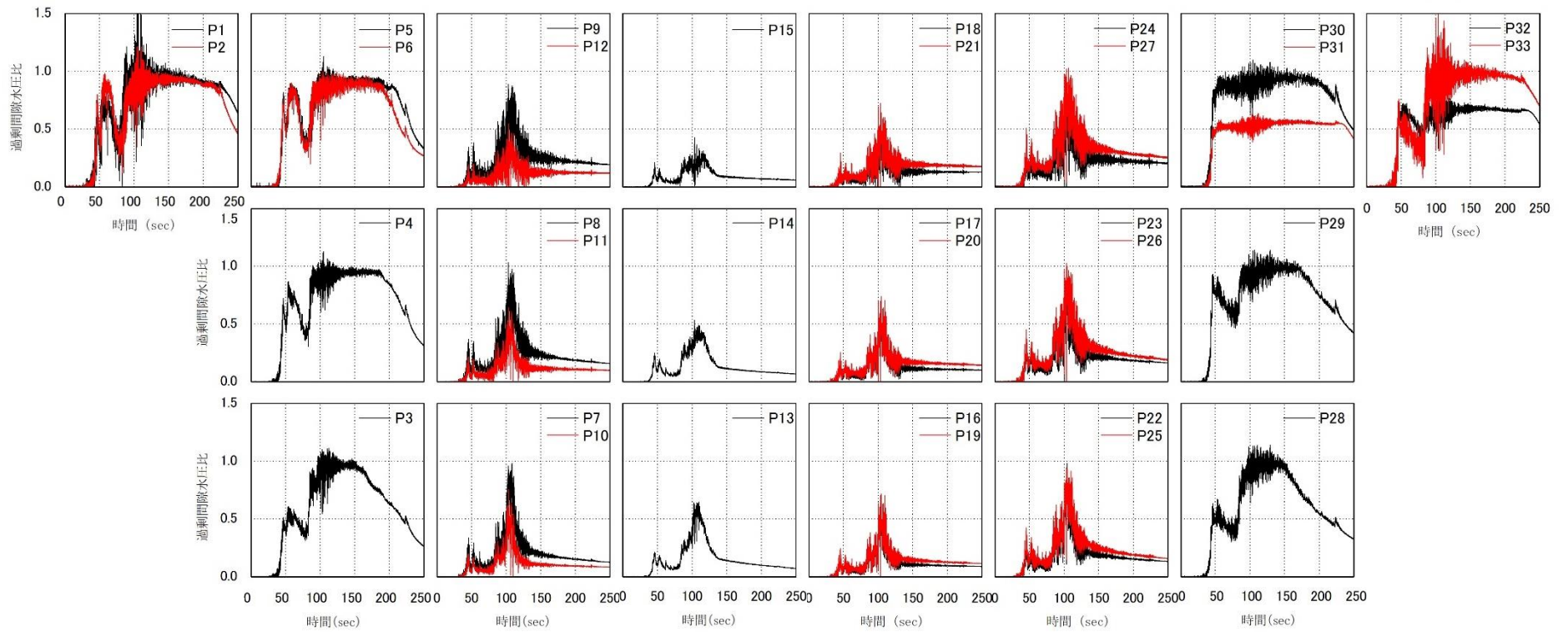
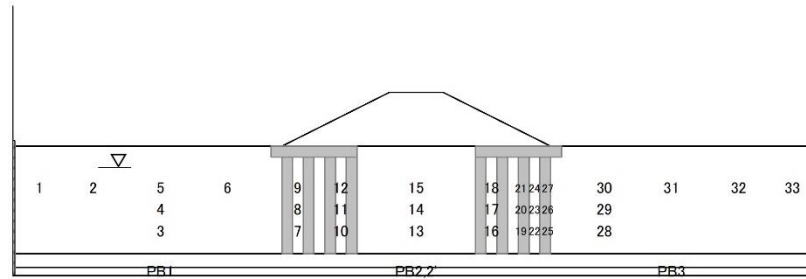


図 5.3.10 ケース 4-2 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

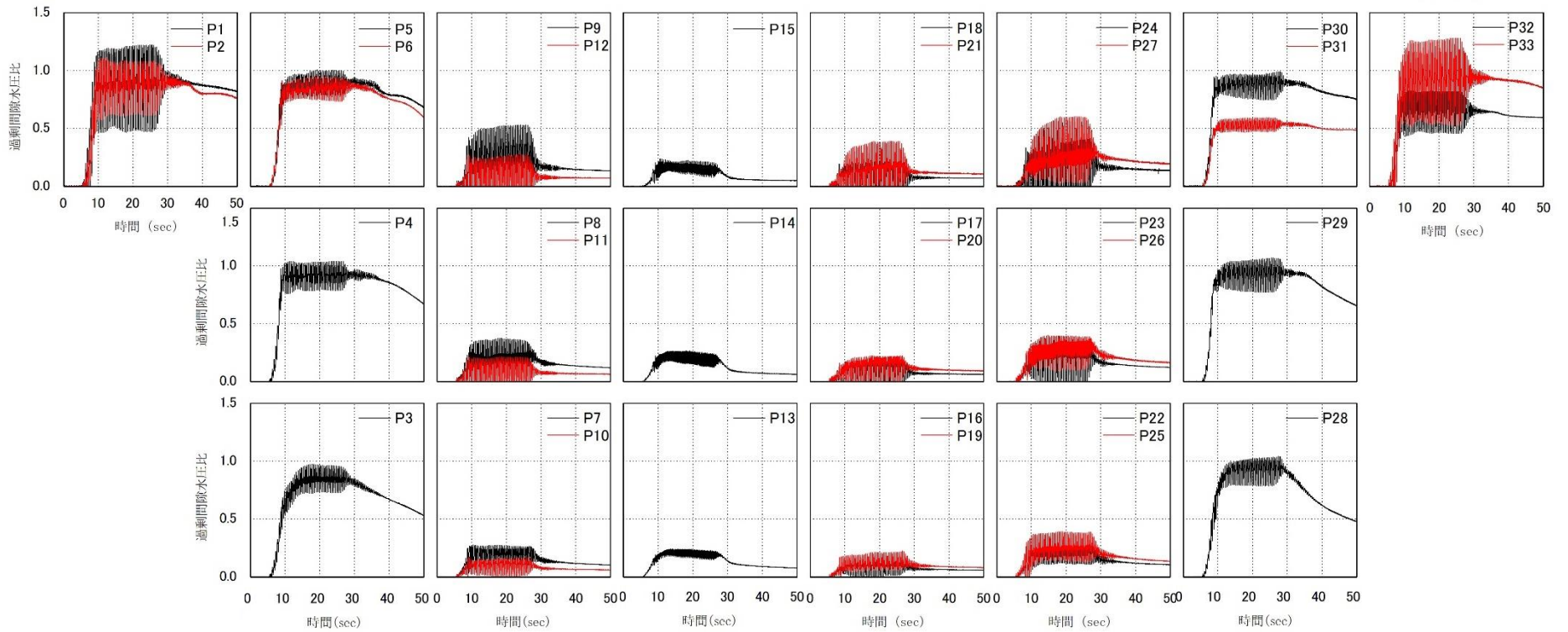
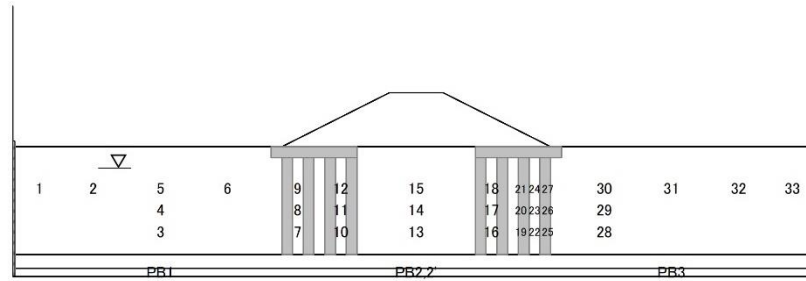


図 5.3.11 ケース 4-2 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

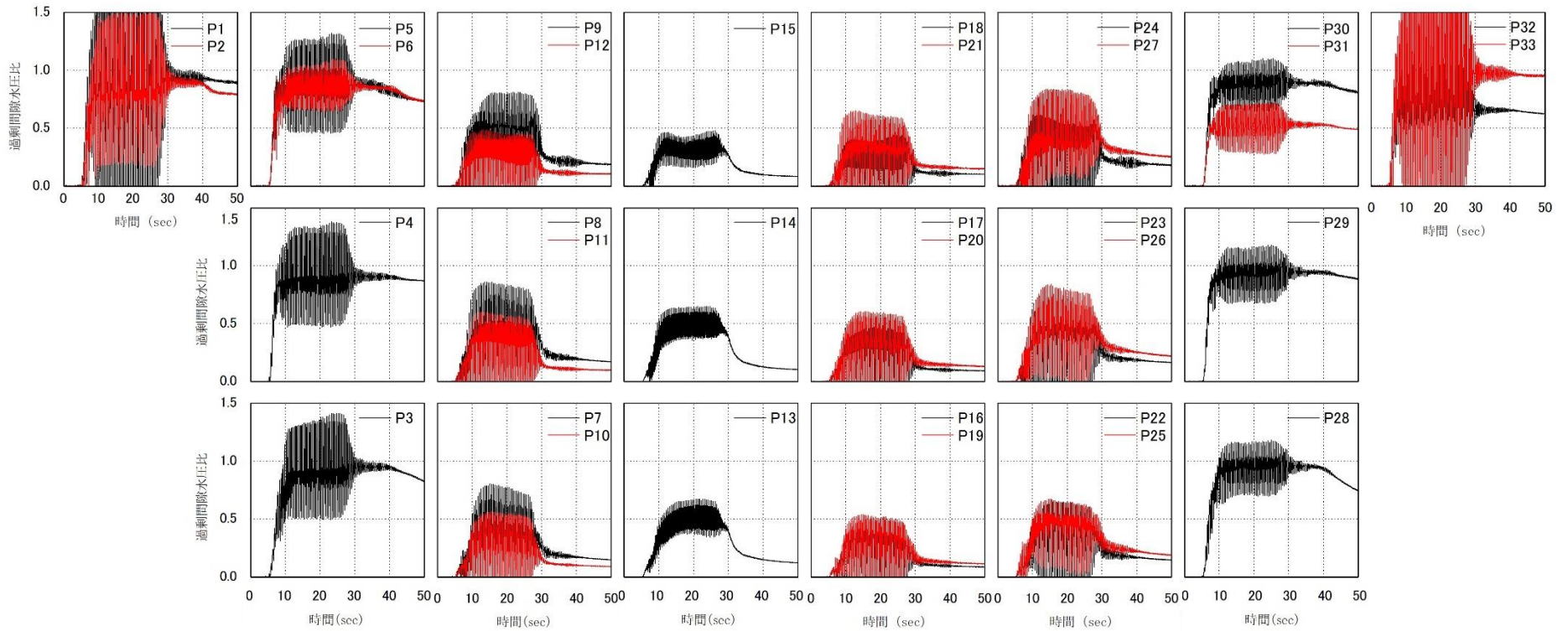
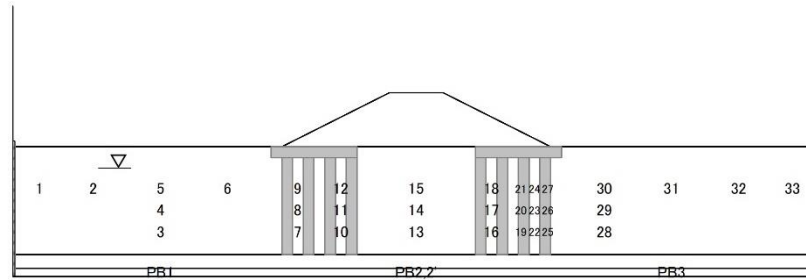


図 5.3.12 ケース 4-2 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

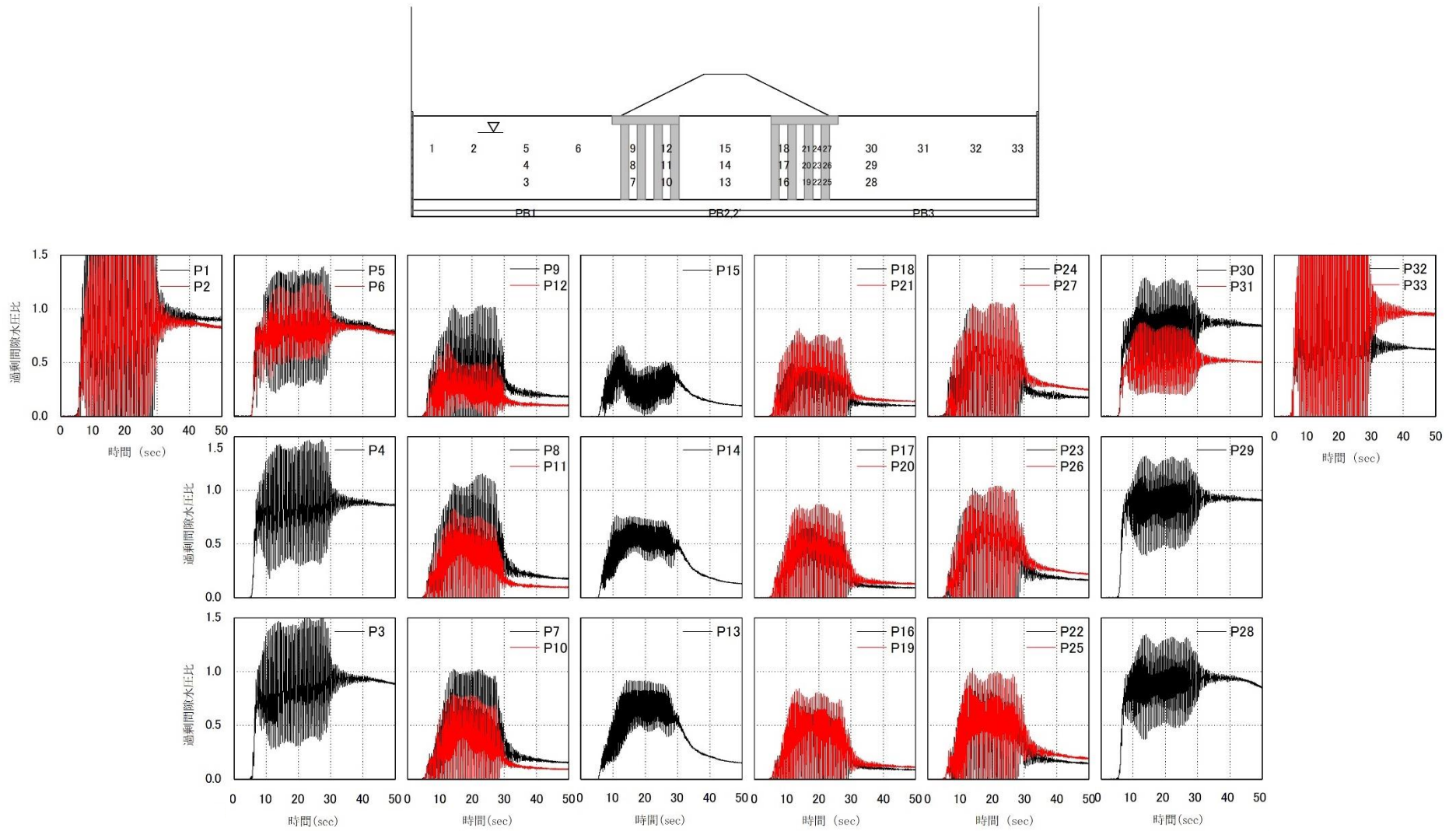
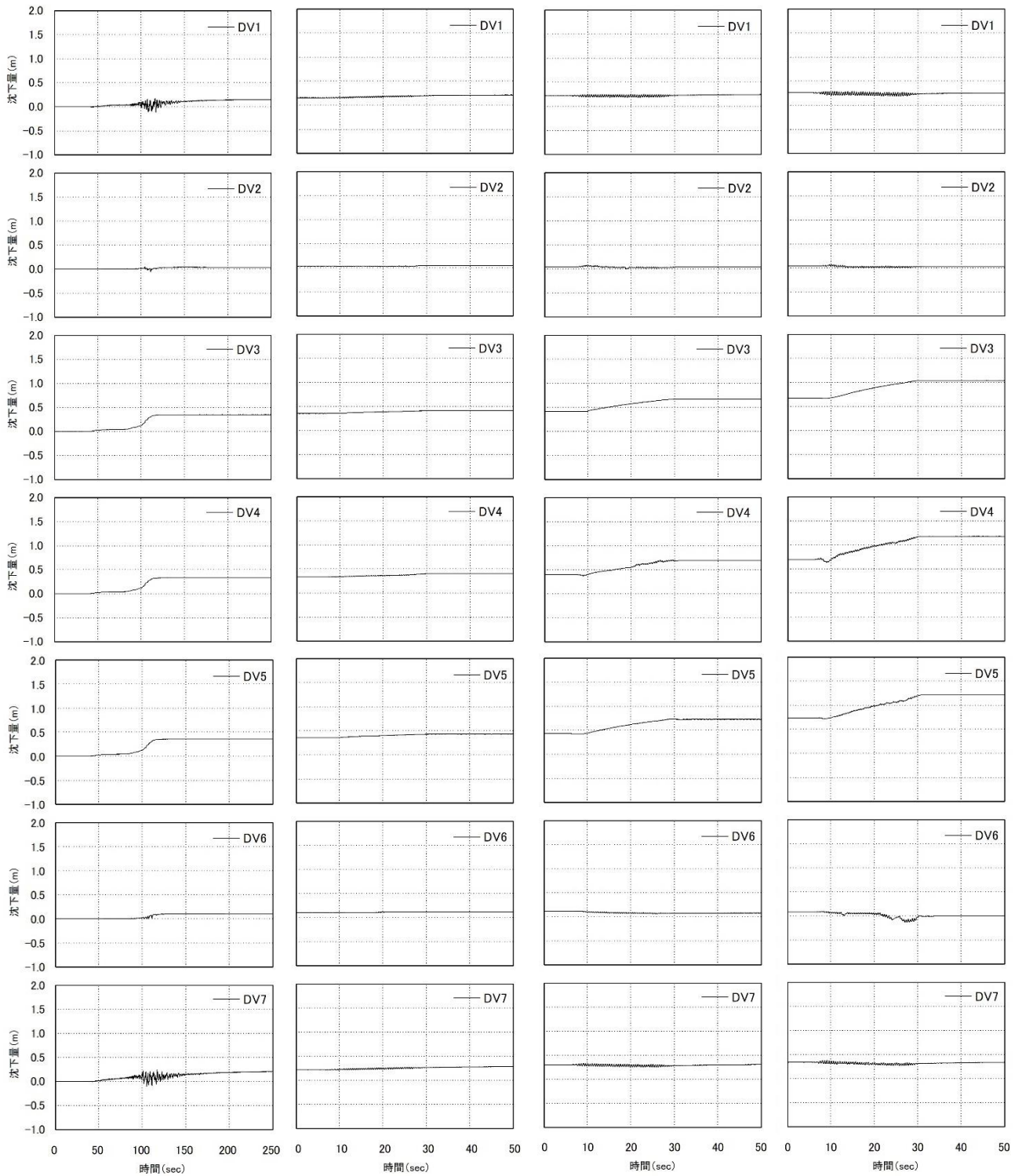
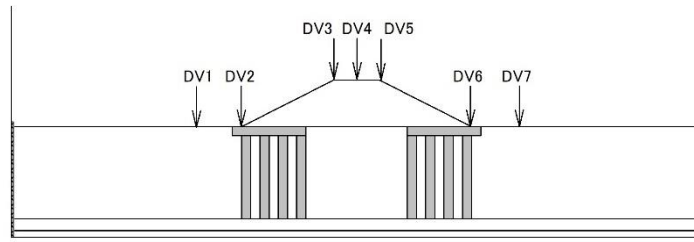


図 5.3.13 ケース 4-2 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴



(a) ステップ1

(b) ステップ2

(c) ステップ3

(d) ステップ4

図 5.3.14 ケース 4-2 における各ステップの累積沈下量

表 5.3.2 ケース 4-2 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	0.156	0.035	0.350	0.332	0.355	0.105	0.217
2	0.220	0.043	0.409	0.401	0.430	0.114	0.301
3	0.260	0.039	0.672	0.695	0.730	0.083	0.339
4	0.277	0.035	1.038	1.181	1.214	0.000	0.371

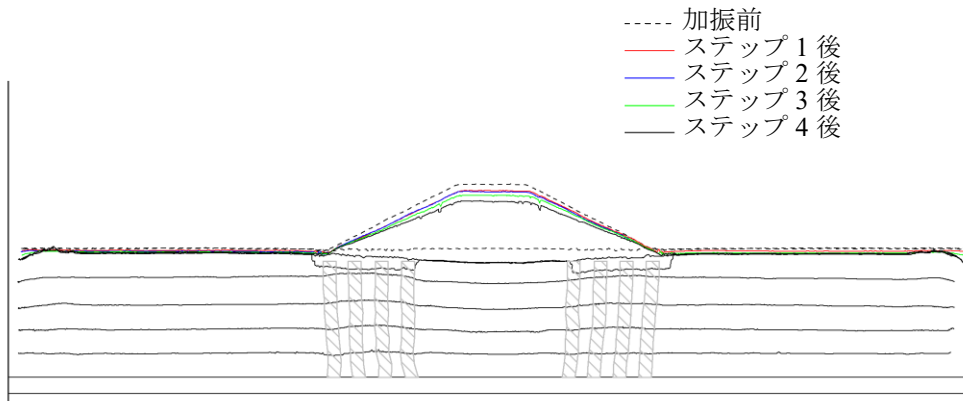


図 5.3.15 ケース 4-2 における模型の地表面形状

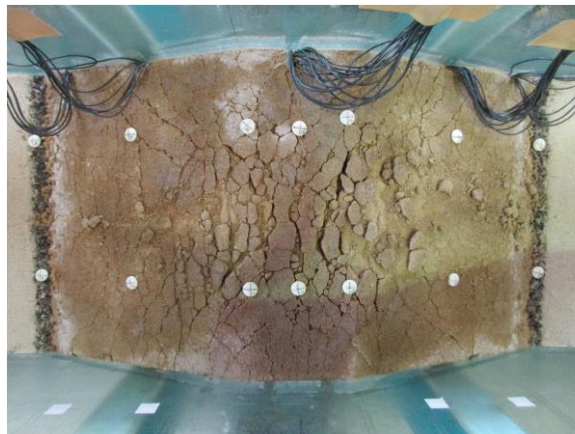
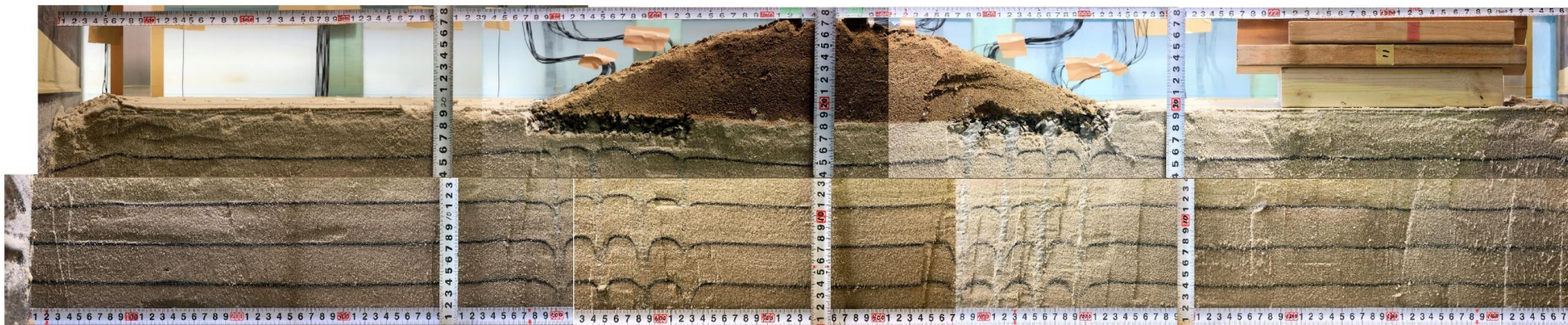
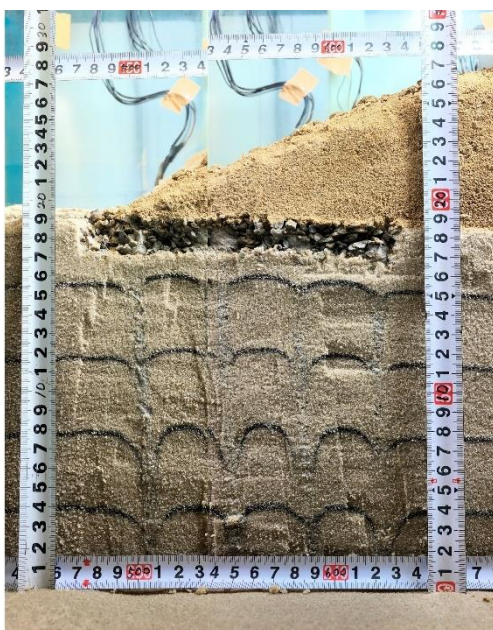


写真 5.3.3 ケース 4-2 における実験後の模型の状態 (堤体真上から撮影)



(a) 全体

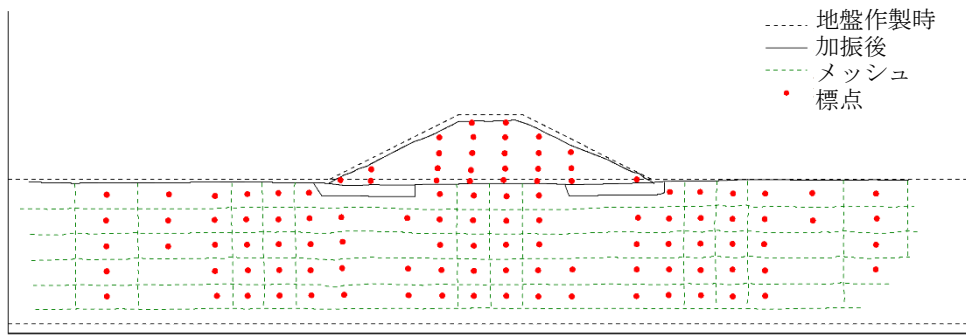


(b) 左ドレーン部

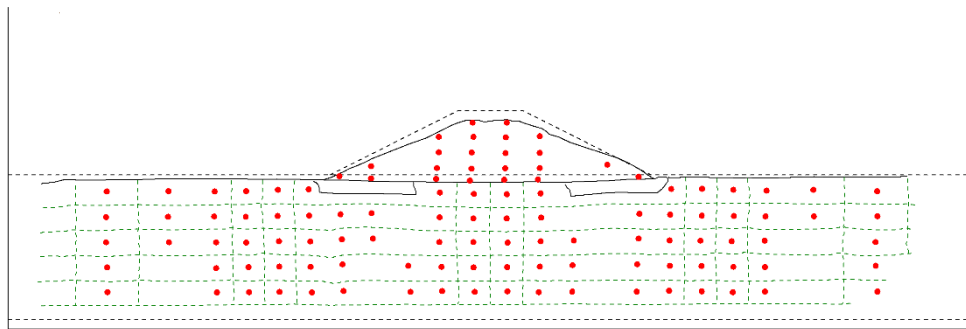


(c) 右ドレーン部

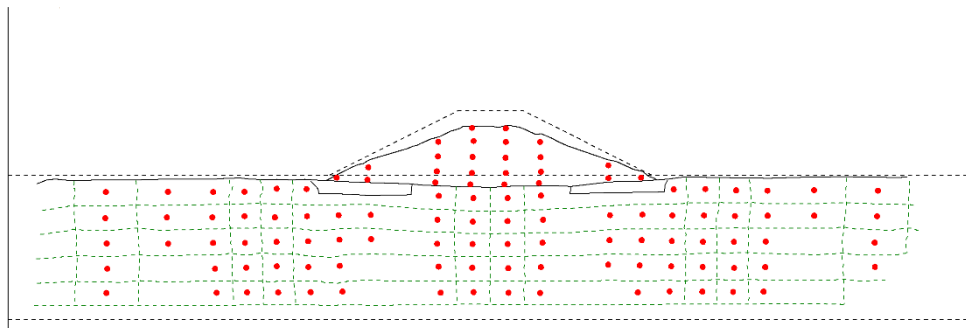
写真 5.3.4 ケース 4-2 における実験後の模型の開断面



(a) ステップ 1



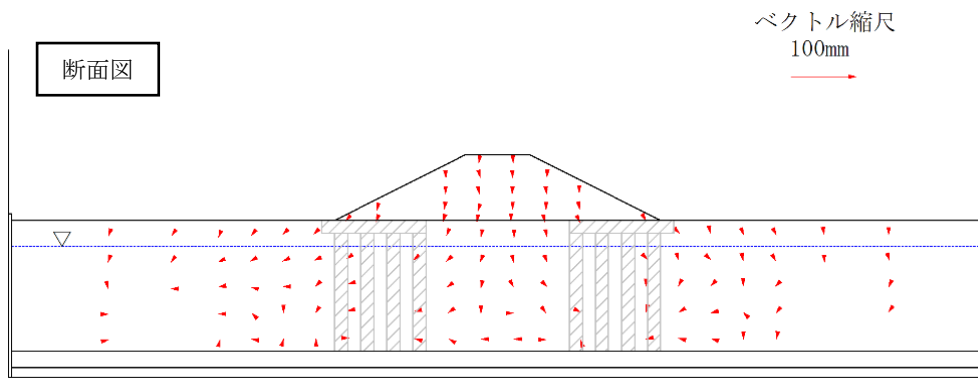
(b) ステップ 3



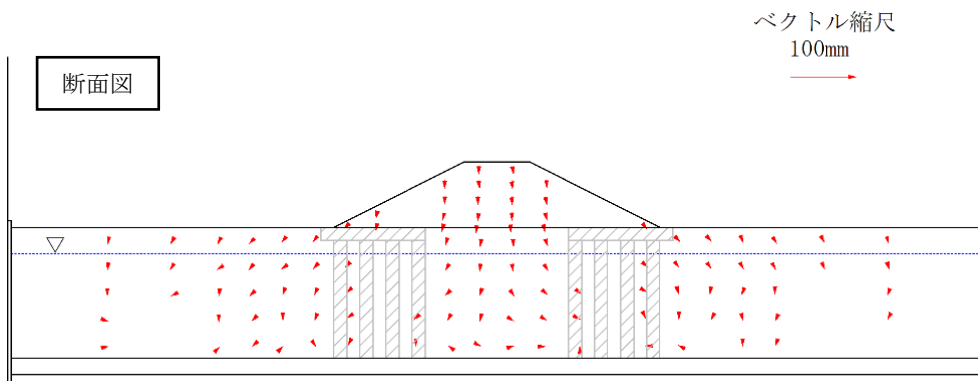
(c) ステップ 4

図 5.3.16 ケース 4-2 における各ステップ後の模型の変状

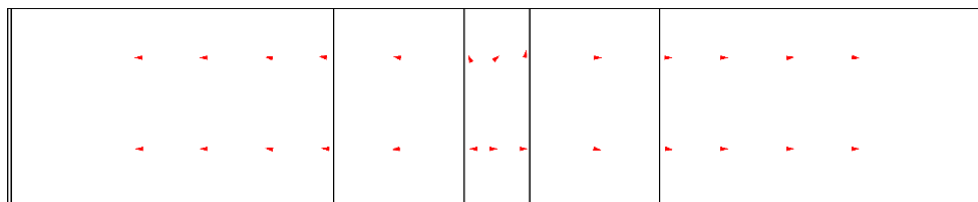
図 5.3.16 に各ステップ後の模型の変形を示す。また、図 5.3.17 に標点変位ベクトル図を示す。なお、ステップ 1,3 では地表面に設置した標点が地盤の動きに追従せず飛散してしまったため、地表面に設置した標点の位置を測定しなかった。



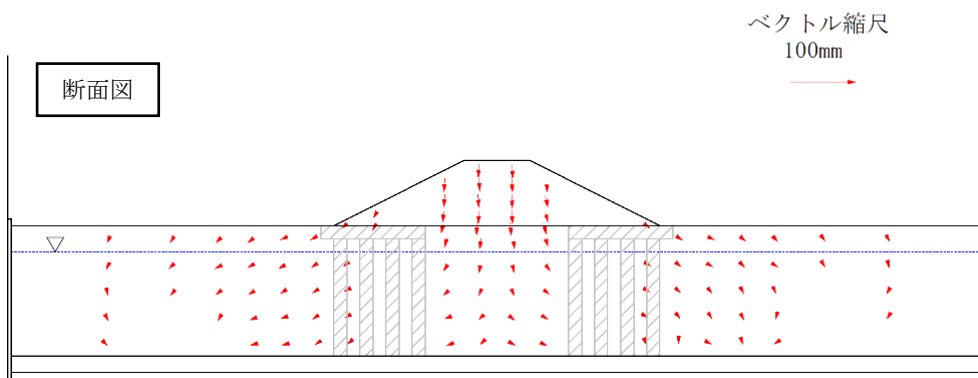
(a) ステップ 1 (平面は未測定)



(b) ステップ 3 (平面は未測定)



平面図



(c) ステップ 4

図 5.3.17 ケース 4-2 における標点変位ベクトル図

5.3.3 ケース 4-3

ケース 4-3 では、液状化層に対策工を施さない条件（表 5.2.1）で実験を行った。図 5.3.18 にケース 4-3 の実験模型を示す。水位は GL-1m とした。

図 5.3.19～図 5.3.22 にステップ 1～4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。各ステップにおいてほとんどの水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 5.3.23 に堤体天端（DV3～5）、法尻（DV2,6）および水平地盤上（DV1,7）における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 5.3.3 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、計測位置による大きな差はみられなかったがステップ 4 の最終的な沈下量では中央の DV4 で最も沈下量が大きくなった。法尻および水平地盤の変位は堤体の左右ともにステップ 2 までは沈下し、ステップ 3 以降は隆起する結果となった。模型の地表面形状（図 5.3.24）から、ステップ 3 以降の隆起は堤体（主に天端）の沈下（鉛直下向きへの堤体材料の移動）により周辺である法尻が影響を受けたと考えられる。

写真 5.3.5 に堤体真上から見た実験後の模型の変形を、写真 5.3.6 に実験後の模型の開削断面をそれぞれ示す。写真 5.3.5 より堤体天端に亀甲状の亀裂が発生していることがわかる。

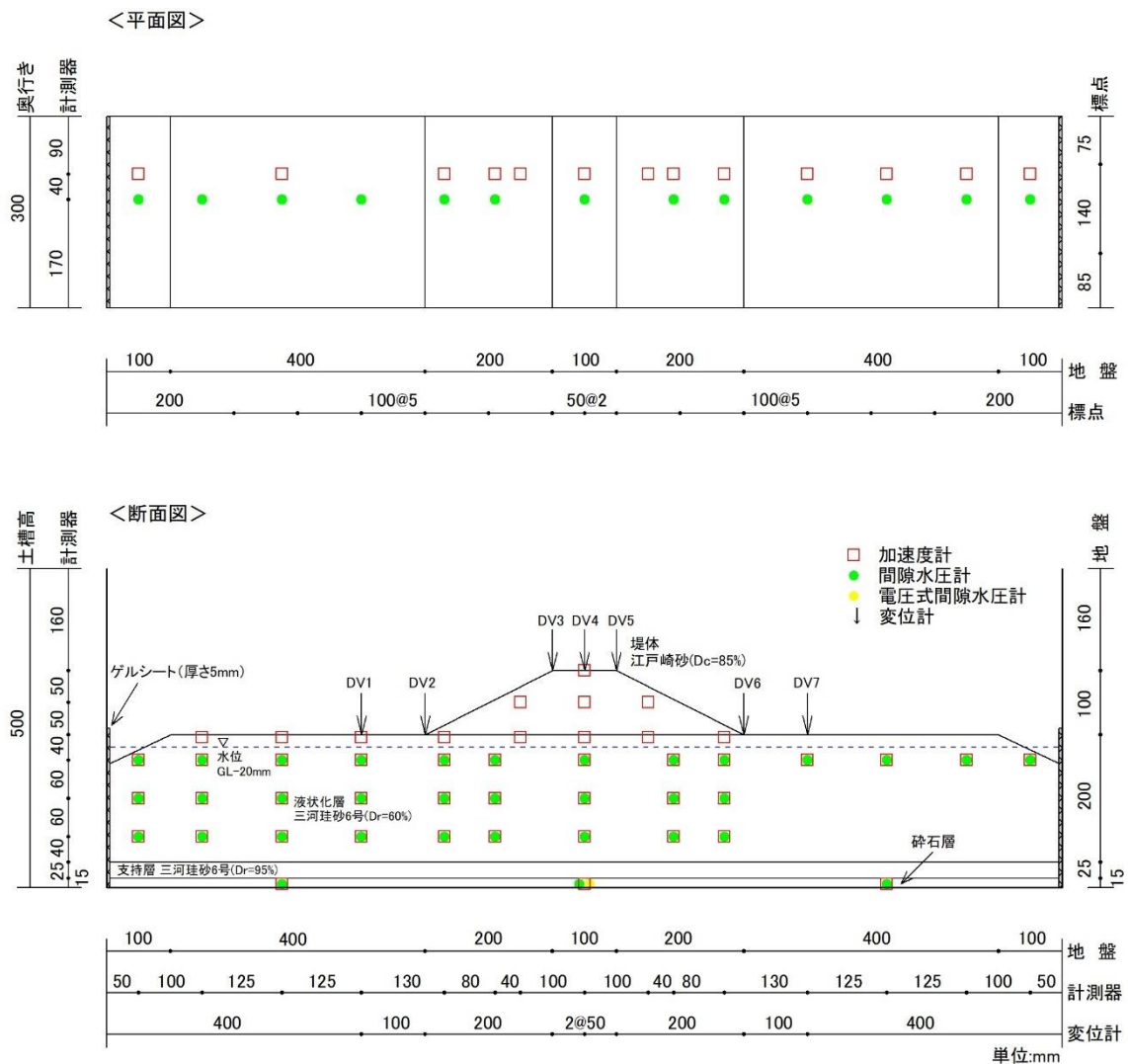


図 5.3.18 ケース 4-3 の実験模型（寸法は模型スケール）

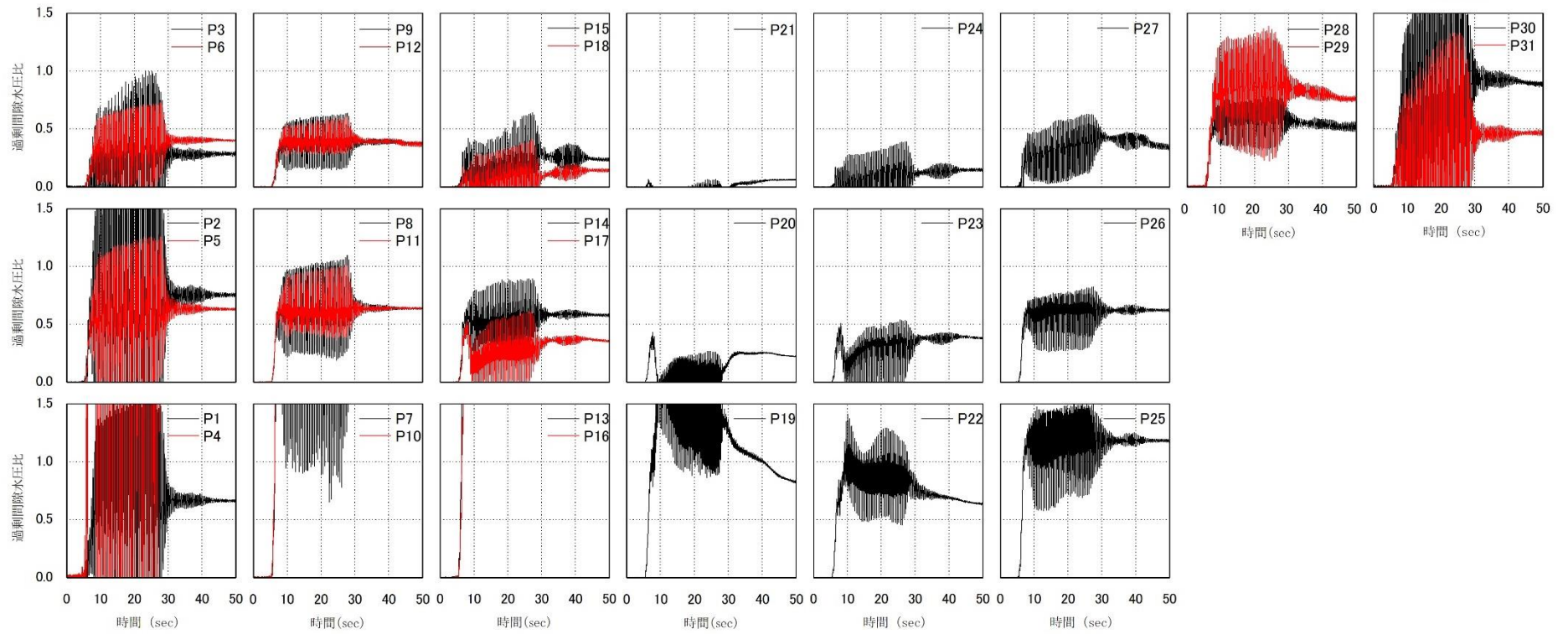
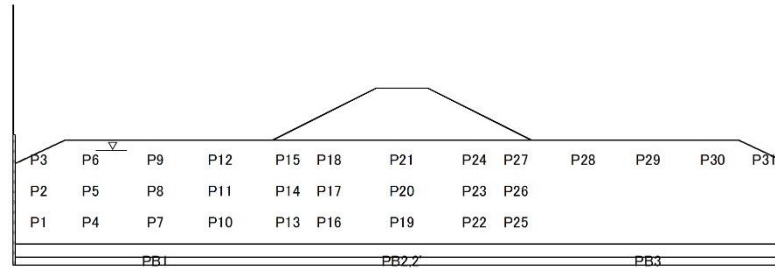


図 5.3.19 ケース 4-3 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

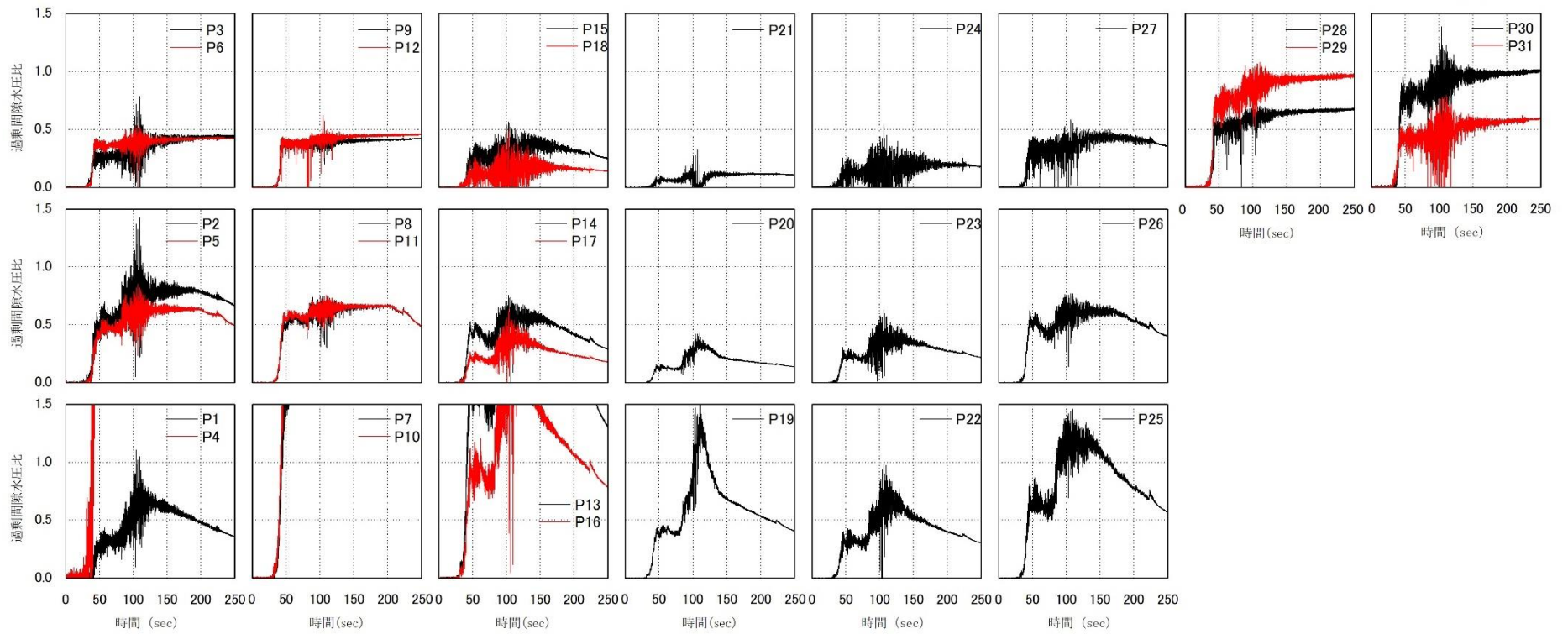
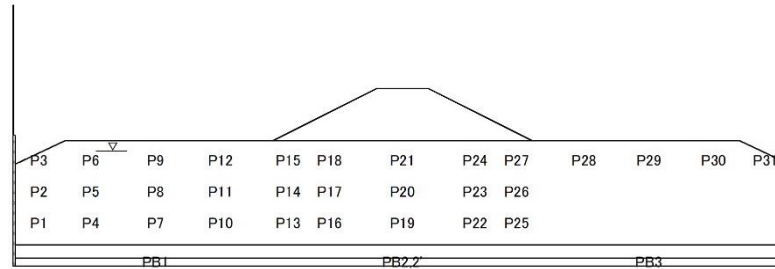


図 5.3.20 ケース 4-3 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

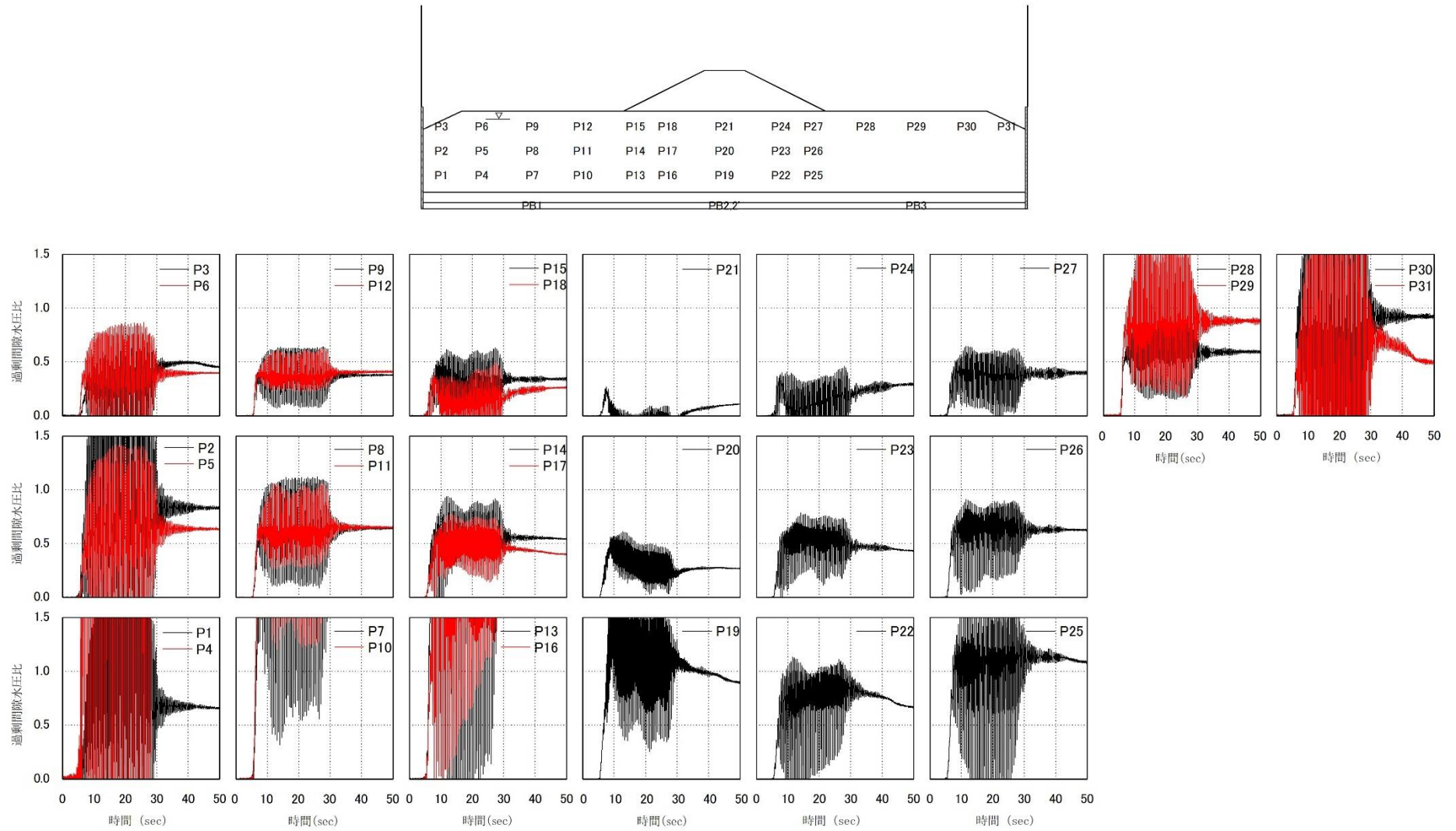


図 5.3.21 ケース 4-3 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

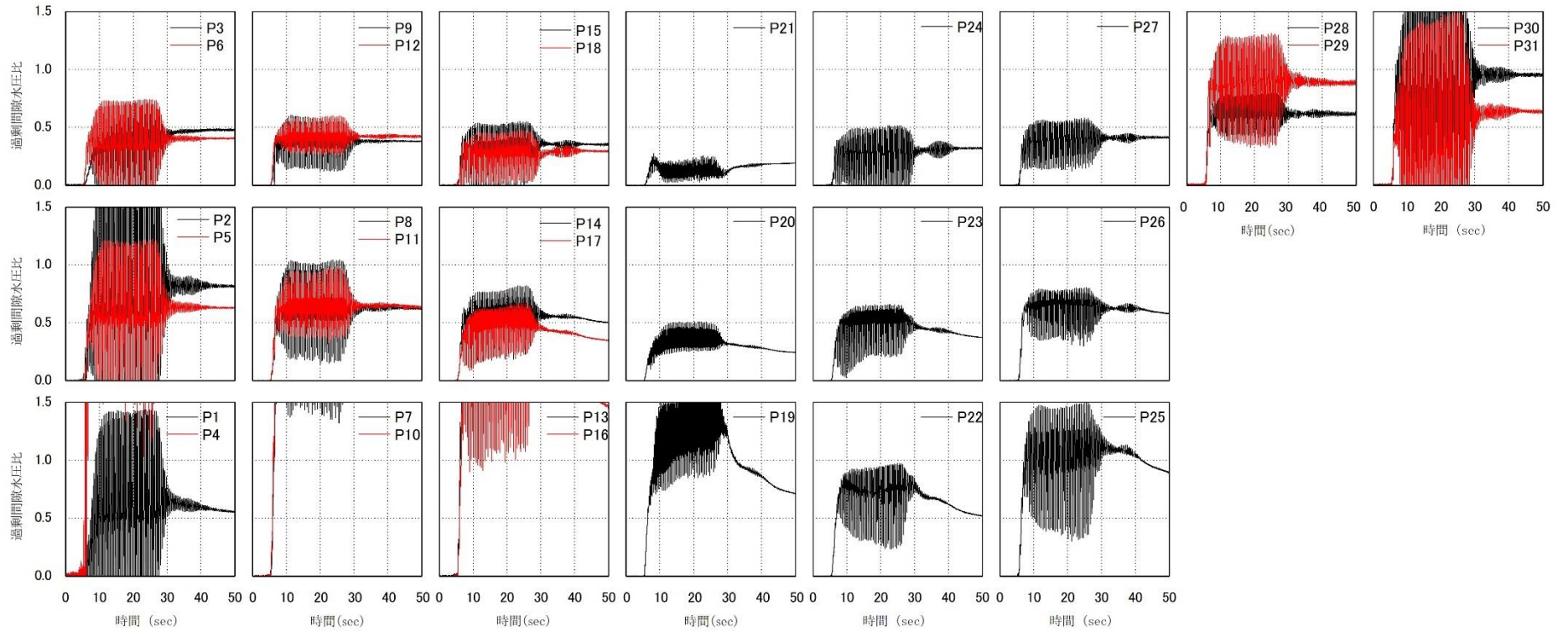
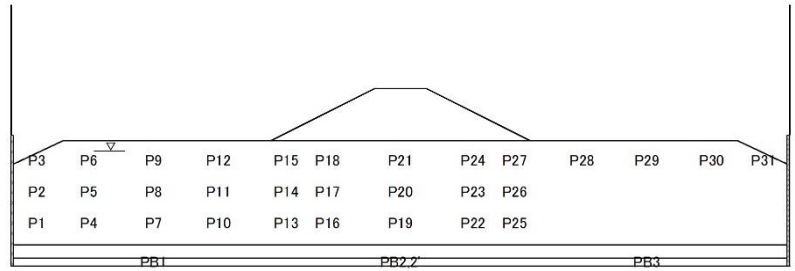


図 5.3.22 ケース 4-3 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

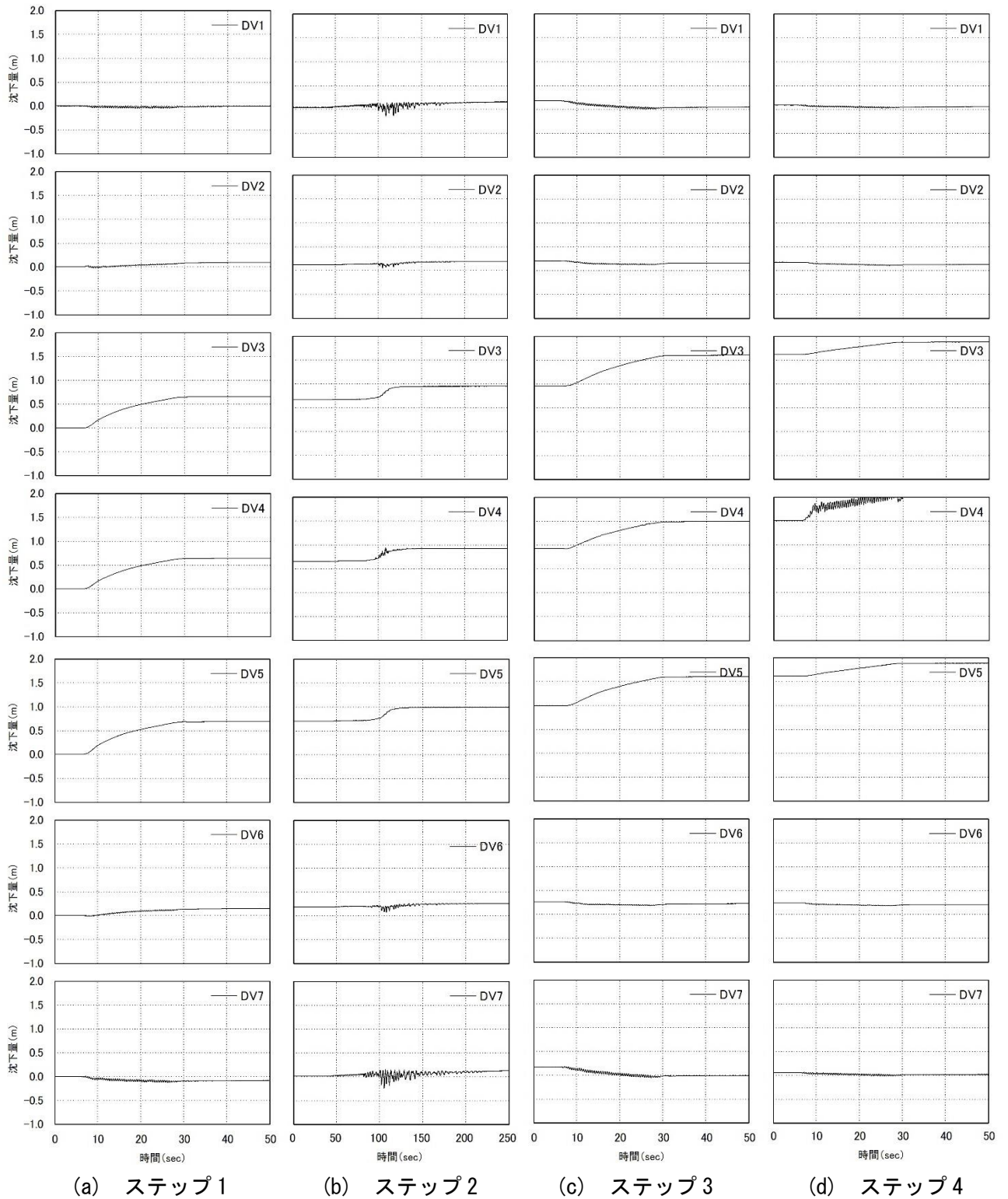
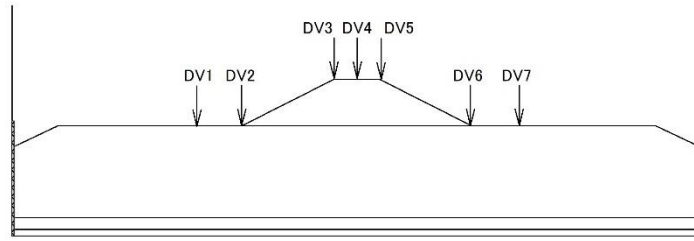


図 5.3.23 ケース 4-3 における各ステップの累積沈下量

表 5.3.3 ケース 4-3 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	0.045	0.124	0.664	0.650	0.702	0.186	0.012
2	0.182	0.202	0.951	0.927	0.992	0.261	0.175
3	0.090	0.176	1.620	1.512	1.618	0.239	0.058
4	0.081	0.139	1.881	2.038	1.890	0.216	0.052

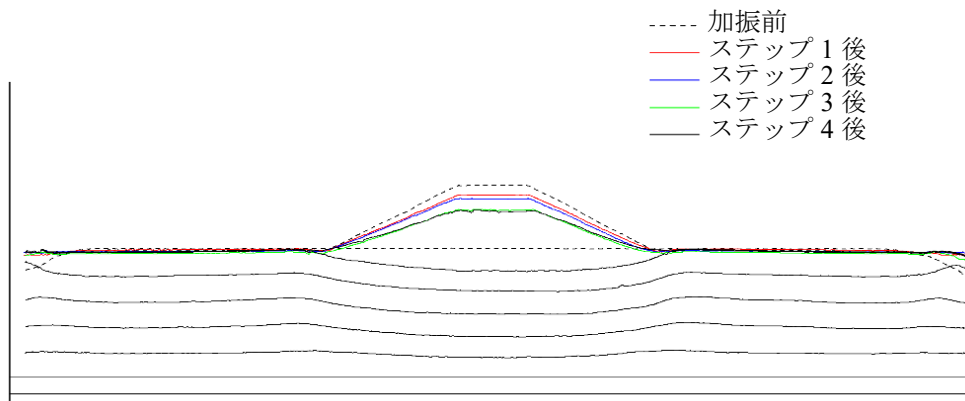


図 5.3.24 ケース 4-3 における模型の地表面形状



写真 5.3.5 ケース 4-3 における実験後の模型の状態
(堤体真上から撮影)

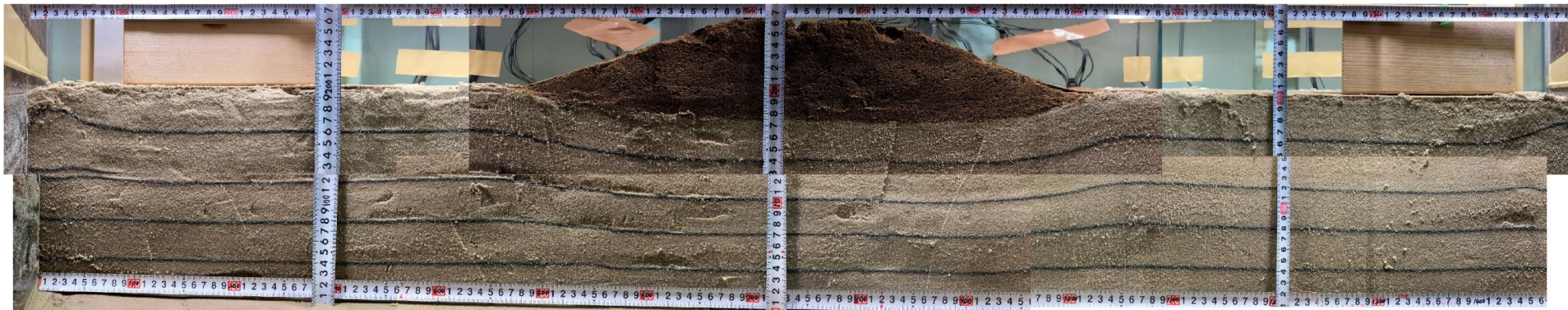
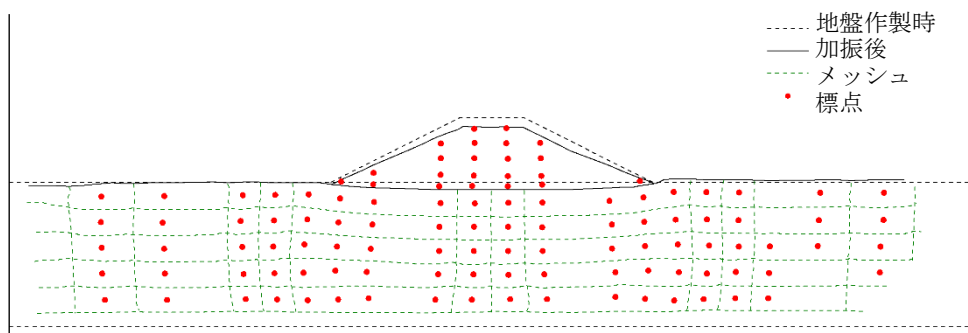
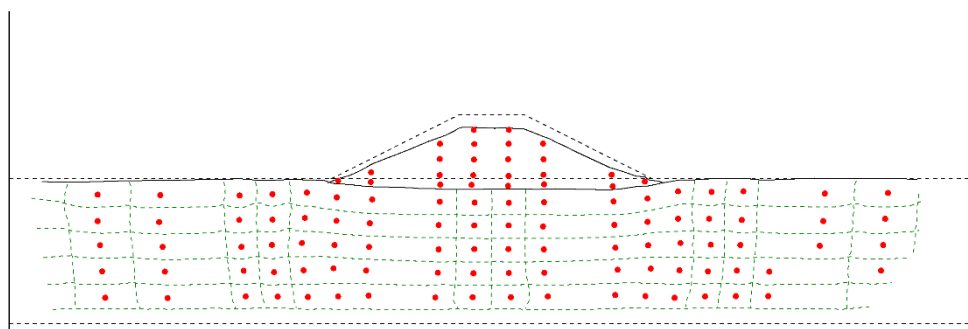


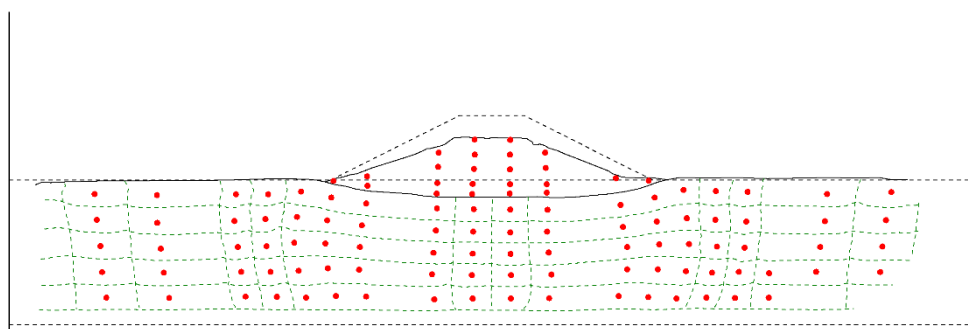
写真 5.3.6 ケース 4-3 における実験後の模型の開削断面



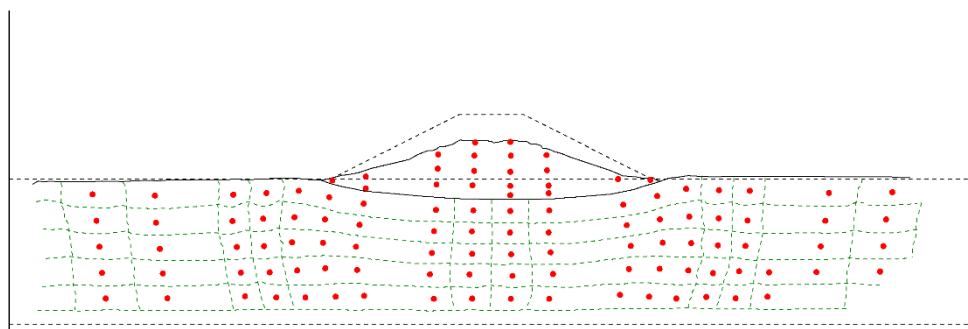
(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



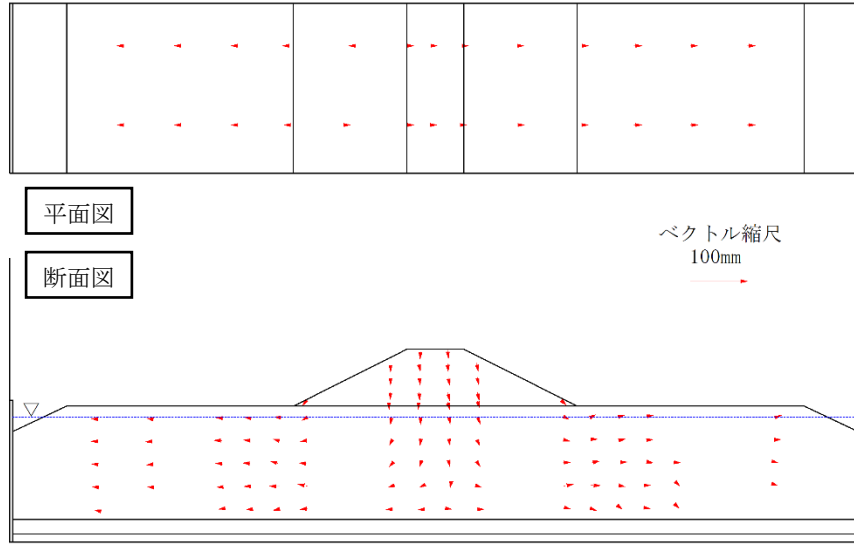
(c) ステップ 3



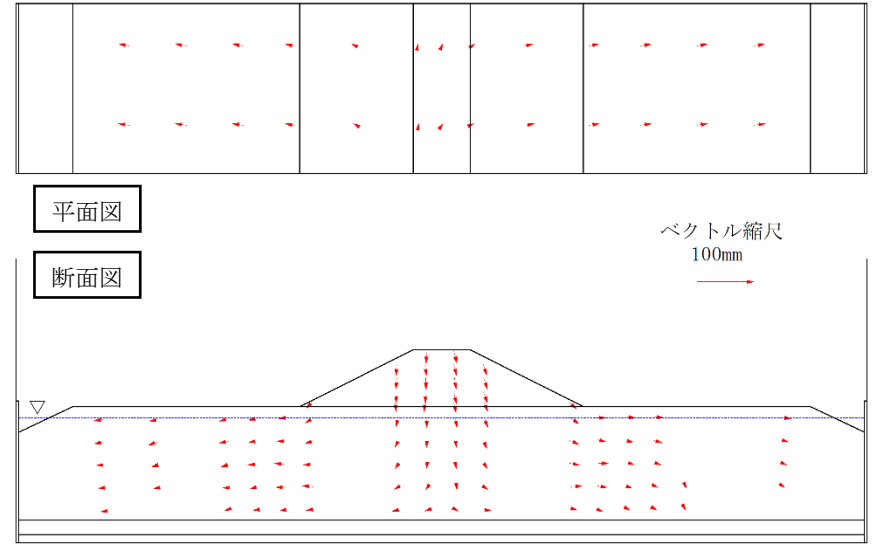
(d) ステップ 4

図 5.3.25 ケース 4-3 における各ステップ後の模型の変状

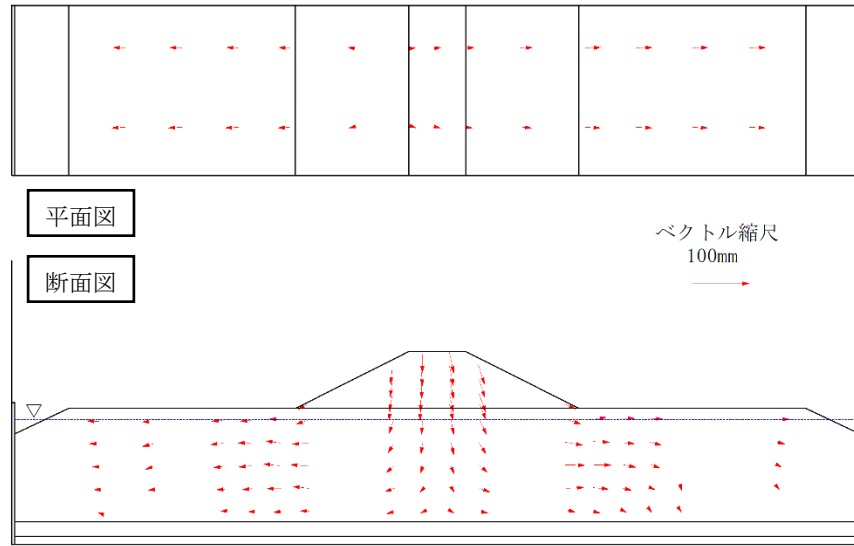
図 5.3.25 に各ステップ後の模型の変形を示す。また、図 5.3.26 に標点変位ベクトル図を示す。



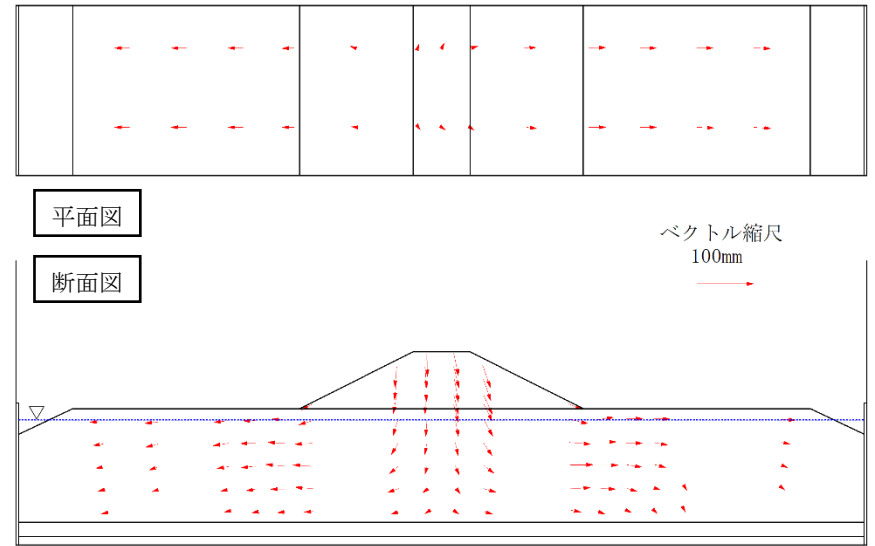
(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



(c) ステップ 3



(d) ステップ 4

図 5.3.26 ケース 4-3 における標点変位ベクトル図

5.3.4 ケース4-4

図 5.3.27 (本項において本図のみ模型スケールで表記) にケース 4-4 の実験模型を示す。ケース 4-4 では、ケース 4-2 と同様に堤体の左右へ杭芯間隔 2m、ドレーン径 1m で長さ 9m のそれぞれ 28 本打設し、ドレーン上面には厚さ 1m のグラベルマットを設けた。また、水位は GL-1m とした。

図 5.3.28～図 5.3.31 にステップ 1～4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。各ステップにおいてほとんどの水平地盤直下の水圧計において過剰間隙水圧比が 1 以上となった。

図 5.3.32 に堤体天端 (DV3～5)、法尻 (DV2,6) および水平地盤上 (DV1,7) における各ステップの累積沈下量を示す。また、表 5.3.4 にステップごとの残留沈下量を示す。

堤体天端では、計測位置による大きな差はみられなかったがステップ 4 の最終的な沈下量では中央の DV4 で最も沈下量が大きくなった。法尻および水平地盤の変位は堤体の左右ともにステップ 2 までは沈下し、ステップ 3 以降は隆起する結果となった。模型の地表面形状 (図 5.3.33) から、ステップ 3 以降の隆起は堤体 (主に天端) の沈下 (鉛直下向きへの堤体材料の移動) により周辺である法尻が影響を受けたと考えられる。

写真 5.3.7 に堤体真上から見た実験後の模型の変形を、写真 5.3.8 に実験後の模型の開削断面をそれぞれ示す。

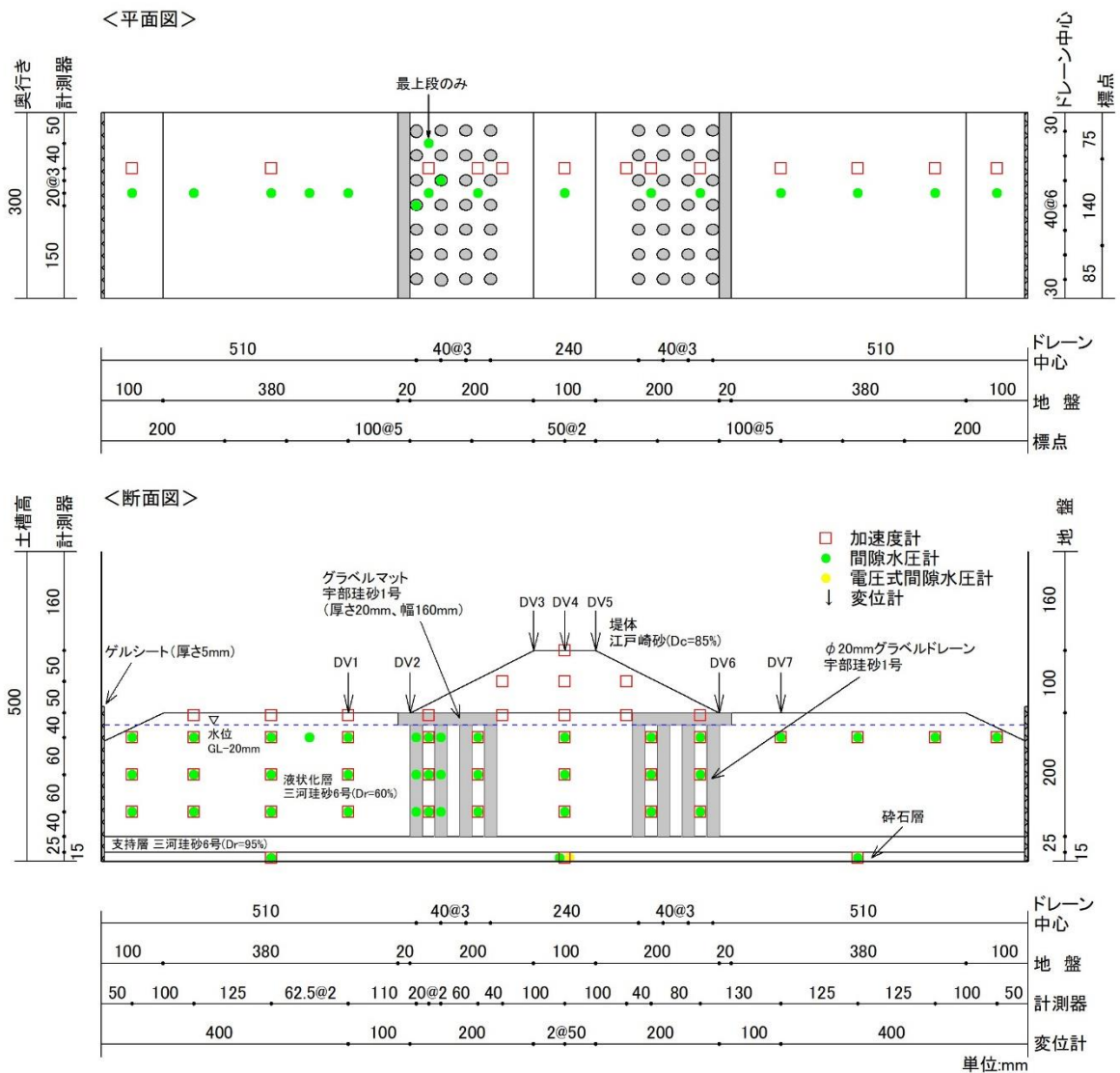


図 5.3.27 ケース 4-4 の実験模型 (寸法は模型スケール)

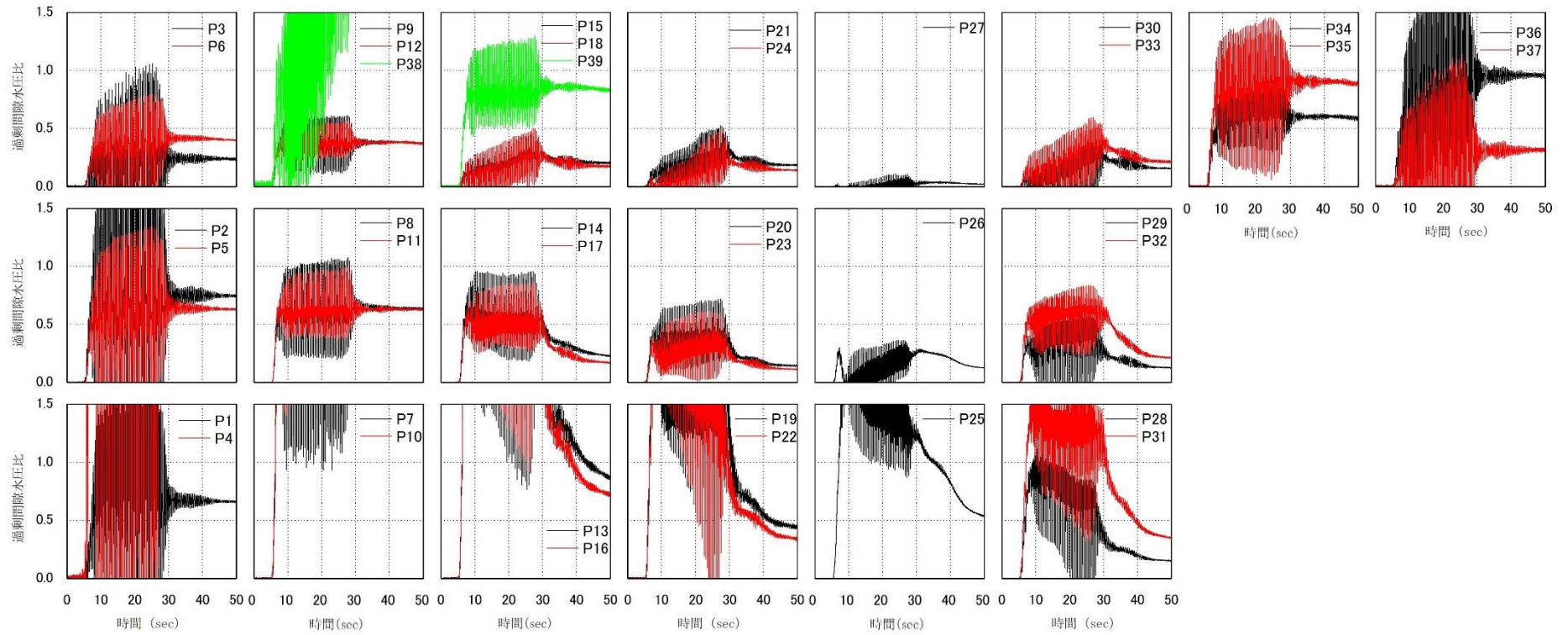
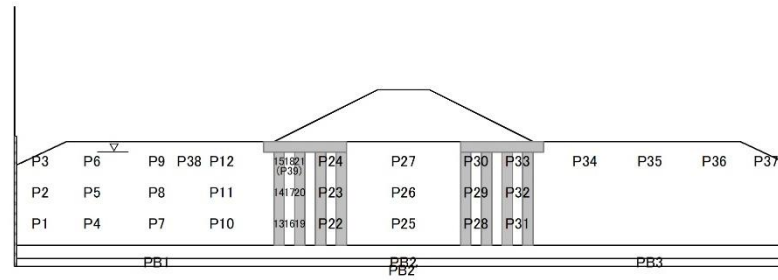


図 5.3.28 ケース 4-4 ステップ 1 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

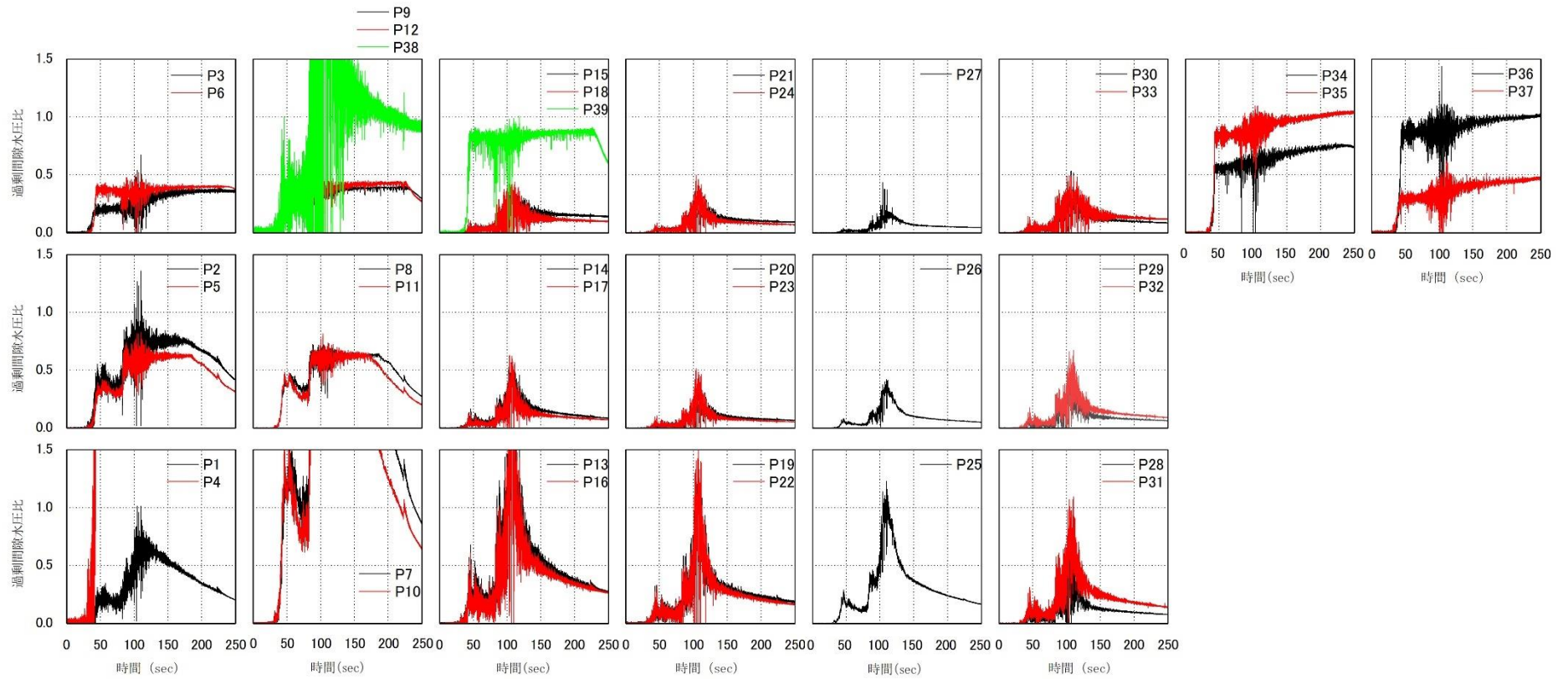
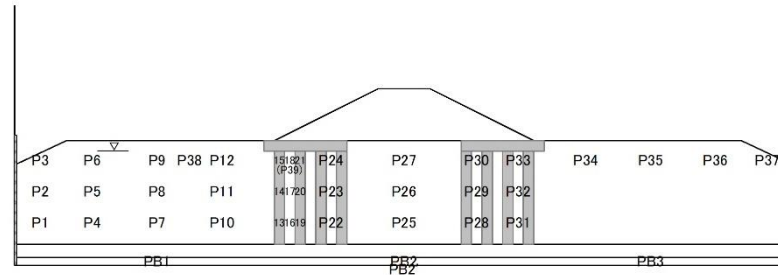


図 5.3.29 ケース 4-4 ステップ 2 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

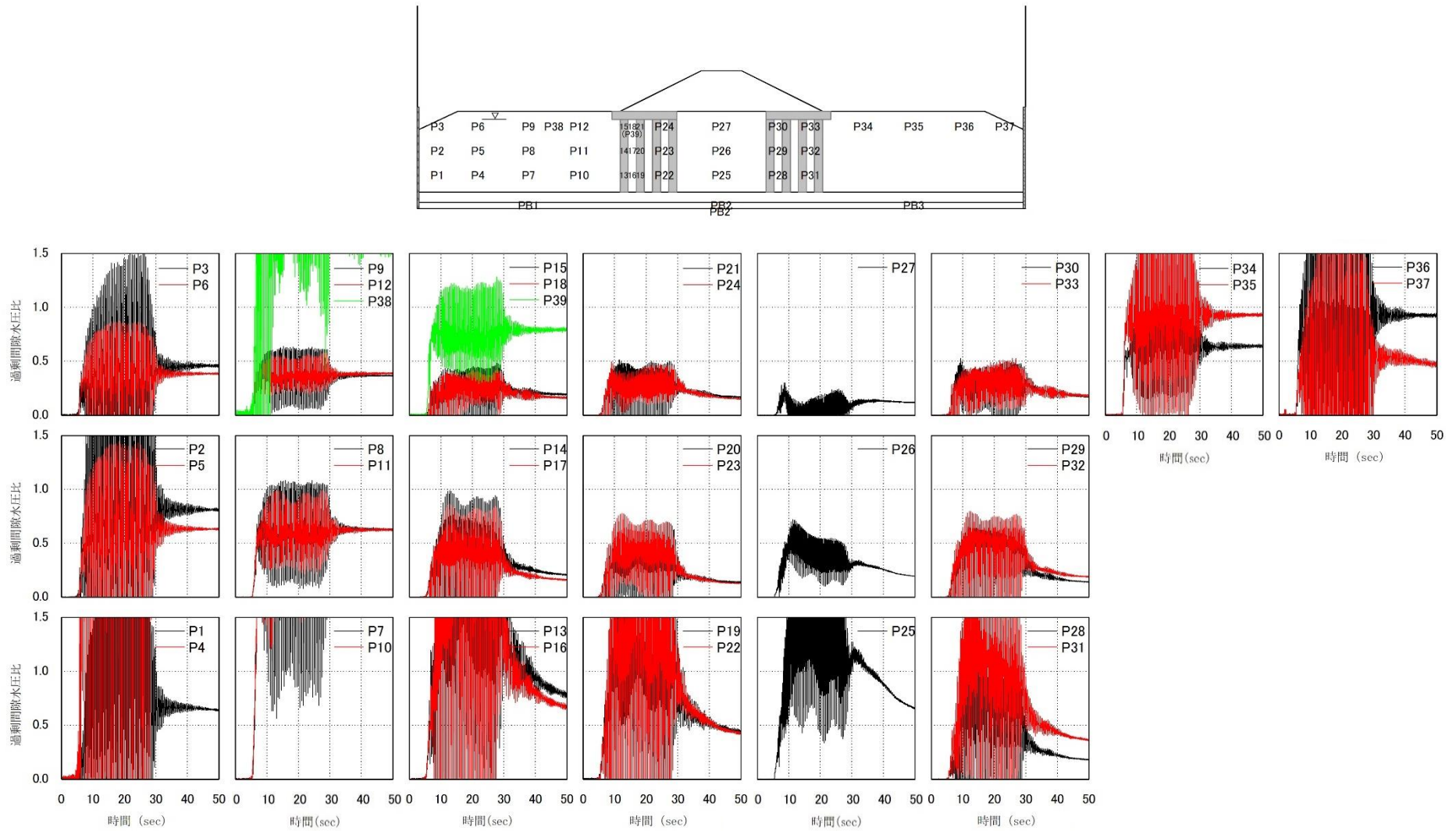


図 5.3.30 ケース 4-4 ステップ 3 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴

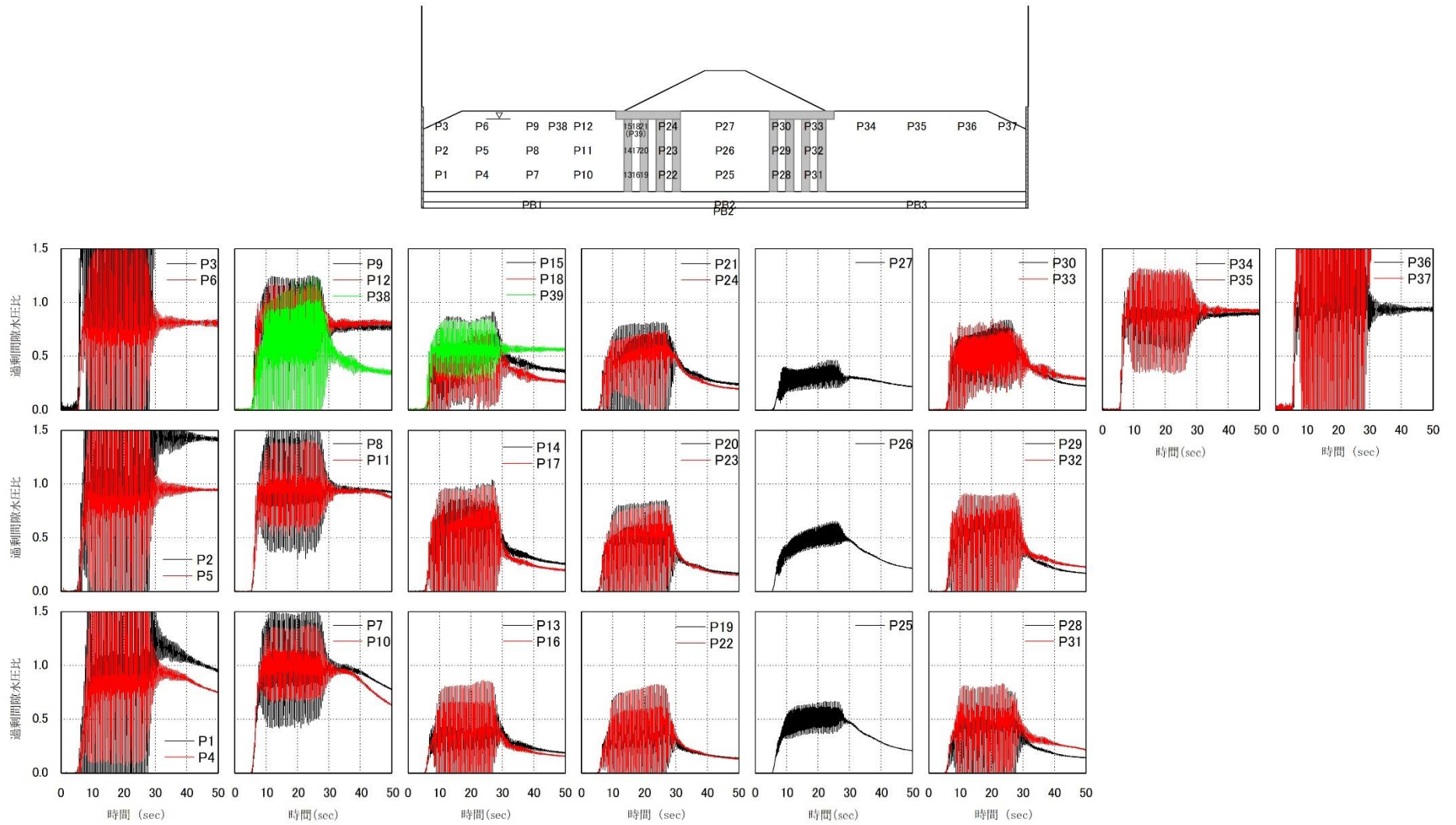
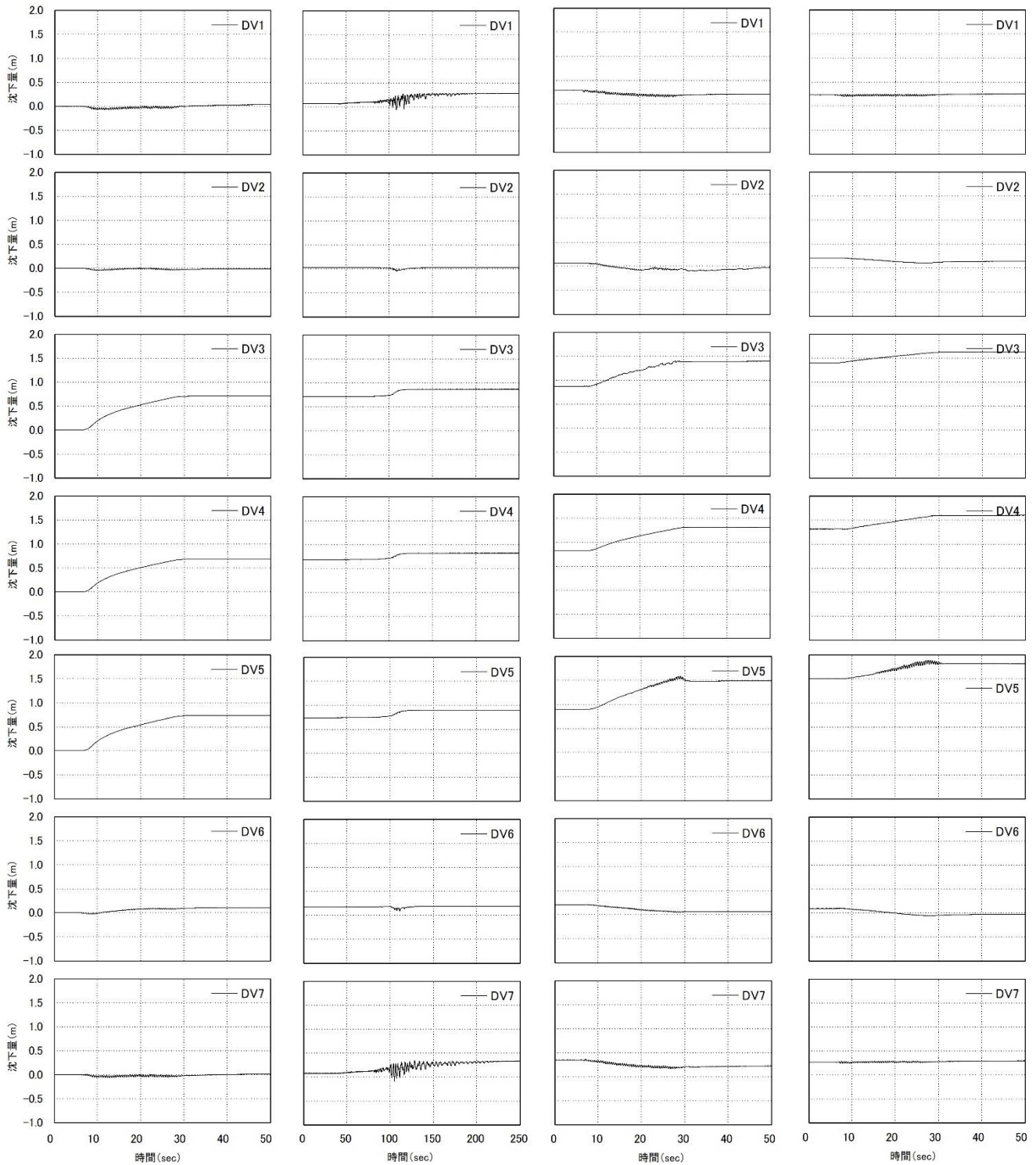
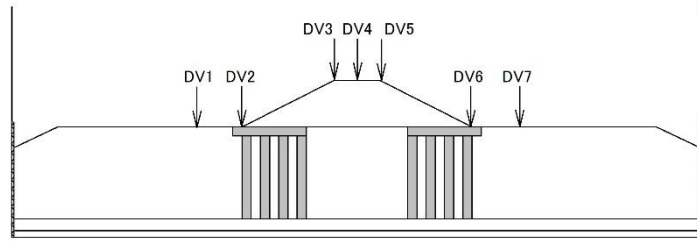


図 5.3.31 ケース 4-4 ステップ 4 の各水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴



(a) ステップ 1

(b) ステップ 2

(c) ステップ 3

(d) ステップ 4

図 5.3.32 ケース 4-4 における各ステップの累積沈下量

表 5.3.4 ケース 4-4 における残留沈下量

ステップ	残留沈下量 (m)						
	水平地盤	法尻	天端			法尻	水平地盤
	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7
1	0.065	0.025	0.714	0.687	0.740	0.165	0.079
2	0.289	0.060	0.866	0.825	0.896	0.205	0.351
3	0.229	0.214	1.402	1.313	1.503	0.094	0.264
4	0.259	0.182	1.633	1.602	1.815	0.002	0.311

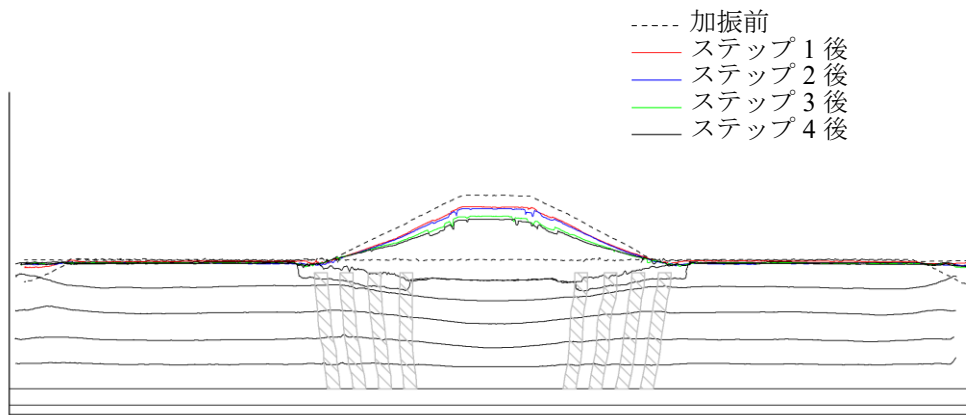


図 5.3.33 ケース 4-4 における模型の地表面形状

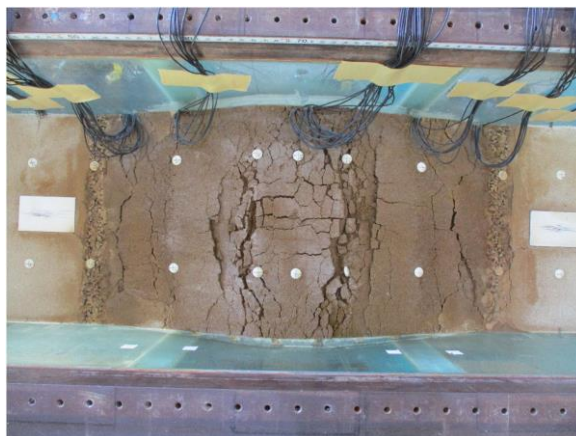
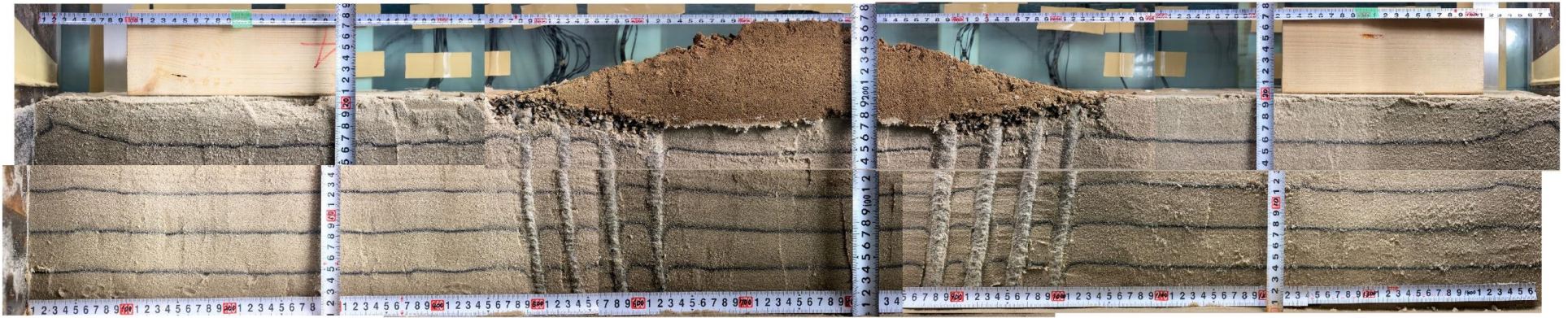


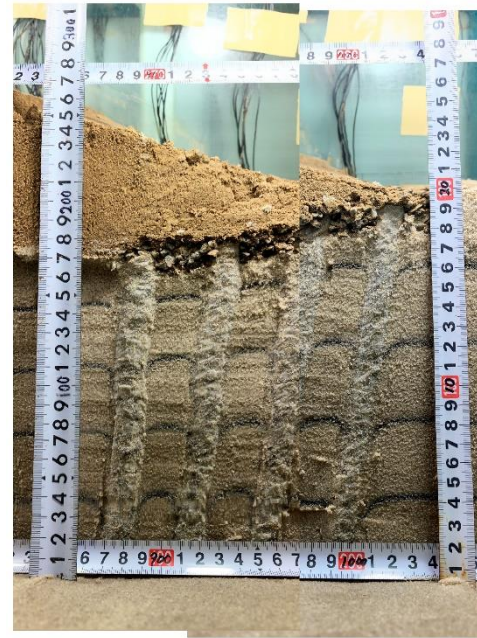
写真 5.3.7 ケース 4-4 における実験後の模型の状態 (堤体真上から撮影)



(a) 全体

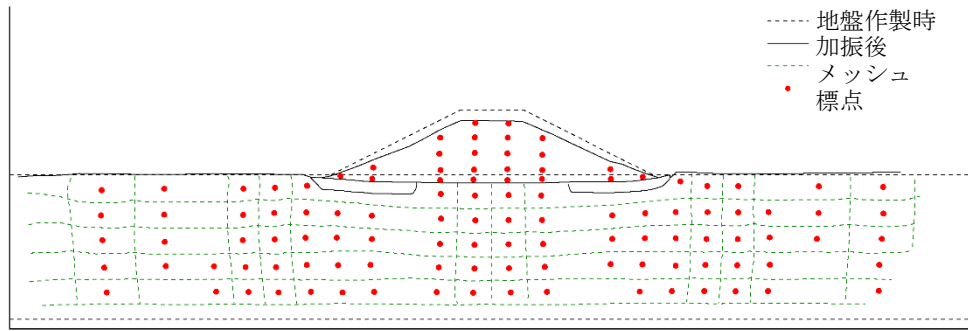


(b) 左ドレーン部

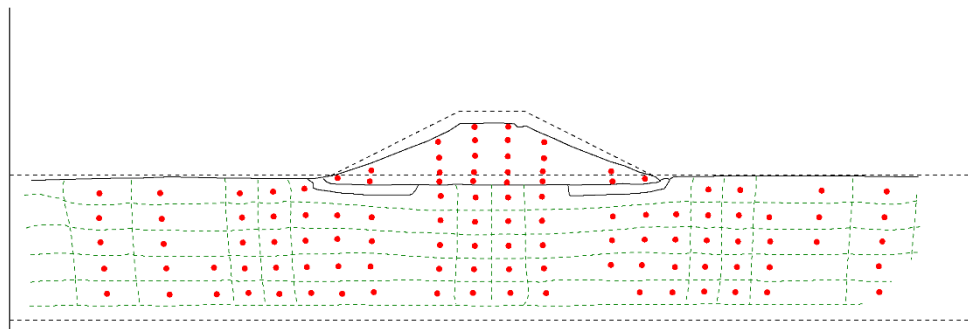


(c) 右ドレーン部

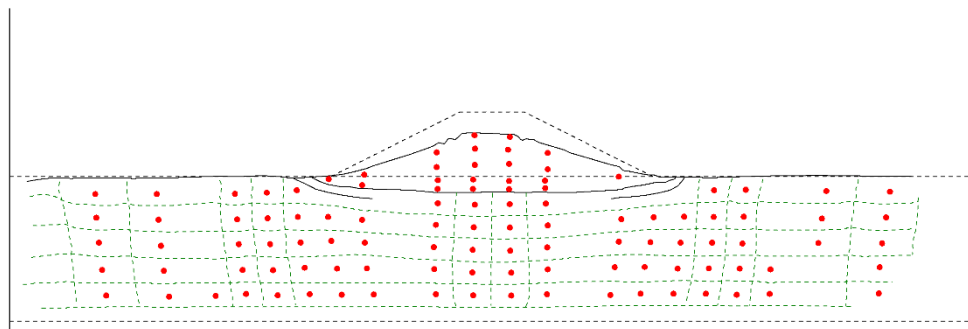
写真 5.3.8 ケース 4-4 における実験後の模型の開断面



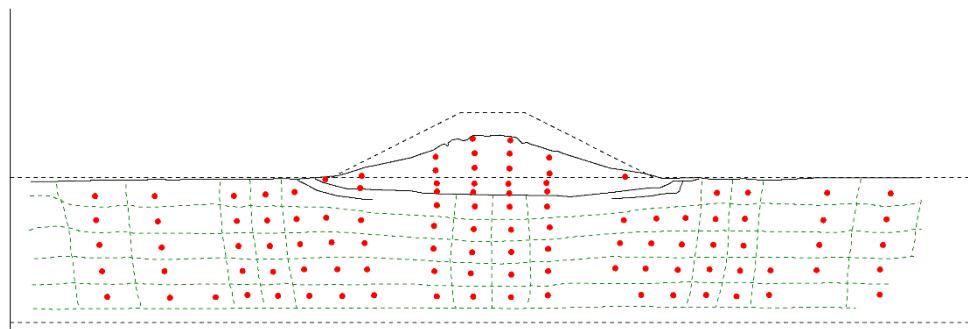
(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



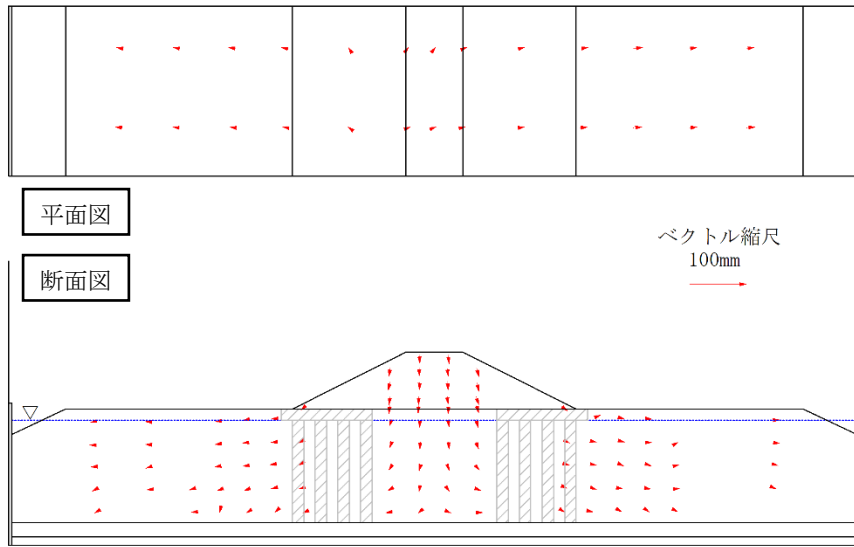
(c) ステップ 3



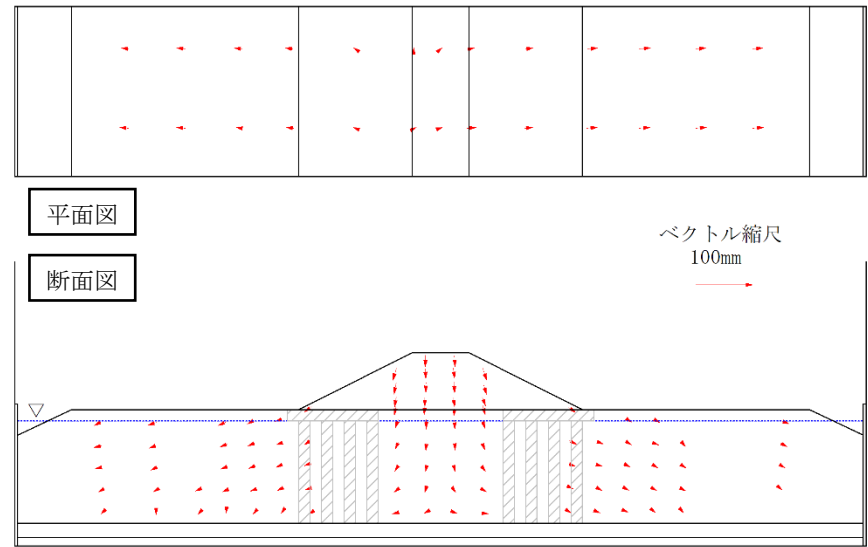
(d) ステップ 4

図 5.3.34 ケース 4-4 における各ステップ後の模型の変形

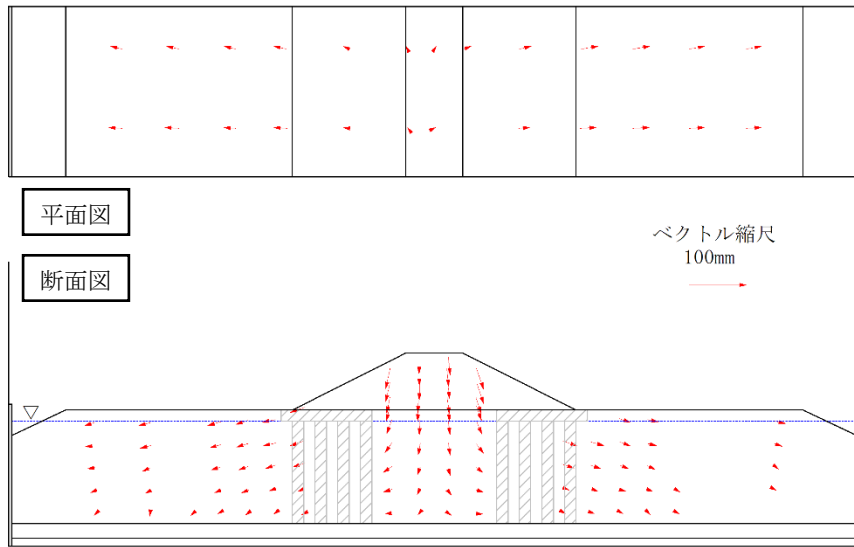
図 5.3.34 に各ステップ後の模型の変形を示す。また、図 5.3.35 に標点変位ベクトル図を示す。



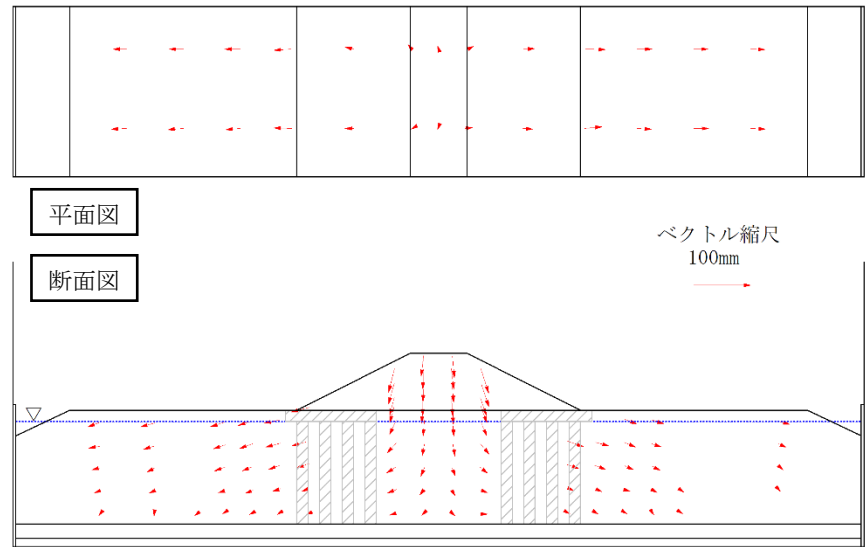
(a) ステップ 1



(b) ステップ 2



(c) ステップ 3



(d) ステップ 4

図 5.3.35 ケース 4-4 における標点変位ベクトル図

5.4 結果のまとめ

図 5.4.1 にケース 4-1 とケース 4-2 の同一箇所を設置した水圧計における過剰間隙水圧比と堤体天端の沈下量の比較を示す。グラベルドレーンを施したケース 4-2 では、ケース 4-1 と比較して常に過剰間隙水圧比が抑制されており、天端沈下量の抑制につながったと考えられる。

最大過剰間隙水圧比に至った時間（図 5.4.1 の 110 秒付近）の、液状化層全体の過剰間隙水圧比分布を図 5.4.2 に示す。ケース 4-1 の堤体下は、低い過剰間隙水圧比の領域が楔型に形成されているが、堤体法先から側壁近傍に至る水平地盤の広い範囲で過剰間隙水圧比が 1 以上となり液状化に至っている。一方で、ケース 4-2 のグラベルドレーンが施されている範囲をみると、一部で過剰間隙水圧比が 1 以上となる箇所があるが、液状化地盤全体では過剰間隙水圧比の上昇を抑えることができおり、高い過剰間隙水圧比の領域は局所的となっている。また、液状化層全体の過剰間隙水圧比分布の経時変化（図 5.4.4）をみると、ケース 4-2 ではケース 4-1 と比較して堤体下を中心に過剰間隙水圧比が広領域かつ早い段階で消散する結果となっており、高い過剰間隙水圧比の継続時間の短縮および領域の抑制にグラベルドレーンが寄与したと考えられる。

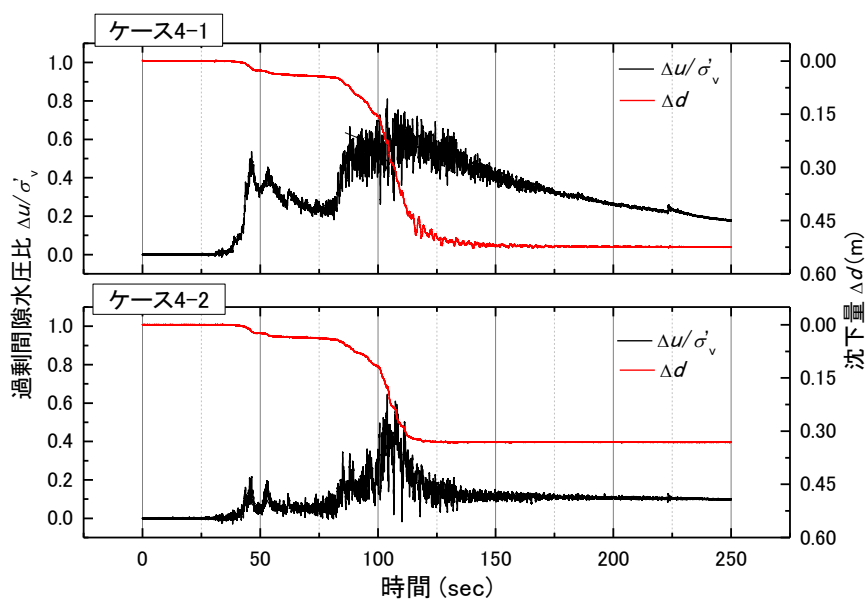
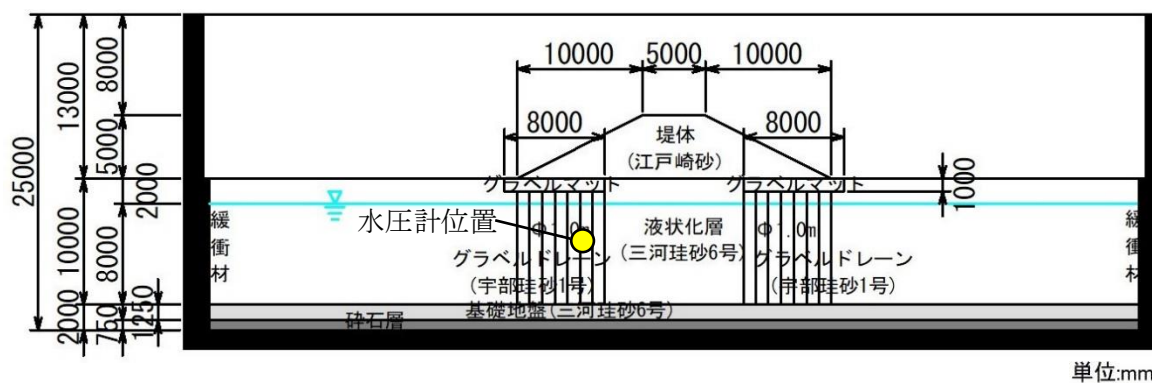


図 5.4.1 ケース 4-1 とケース 4-2 の過剰間隙水圧比と堤体天端の沈下量の比較

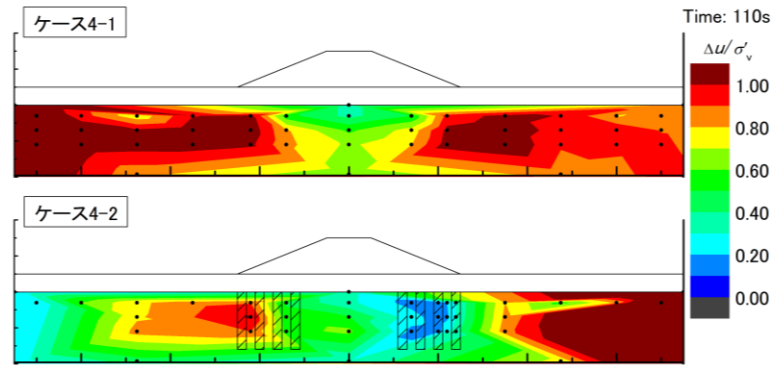


図 5.4.2 最大過剰間隙水圧比時における液状化層全体の過剰間隙水圧比分布の比較

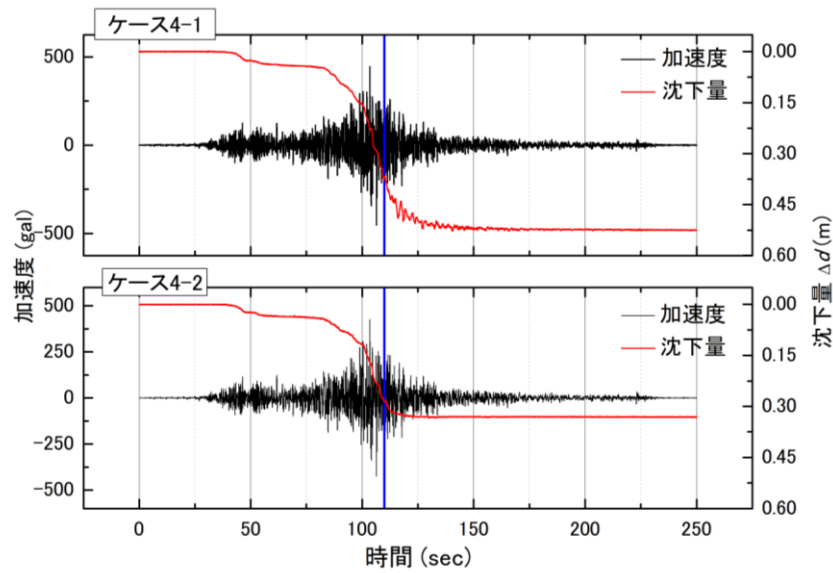
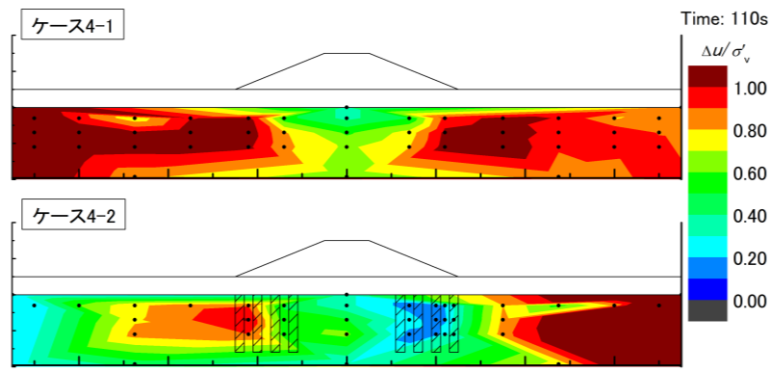
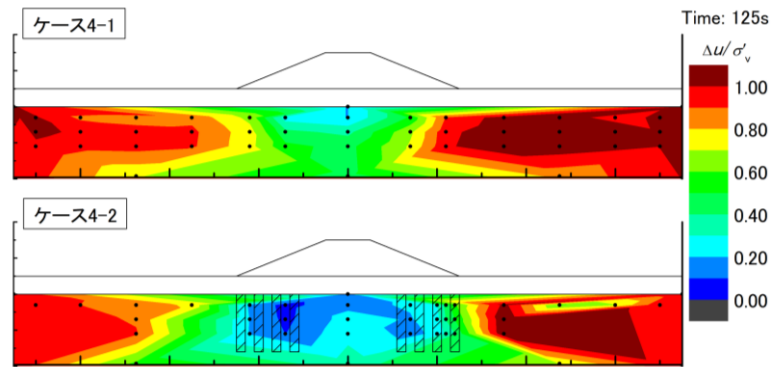


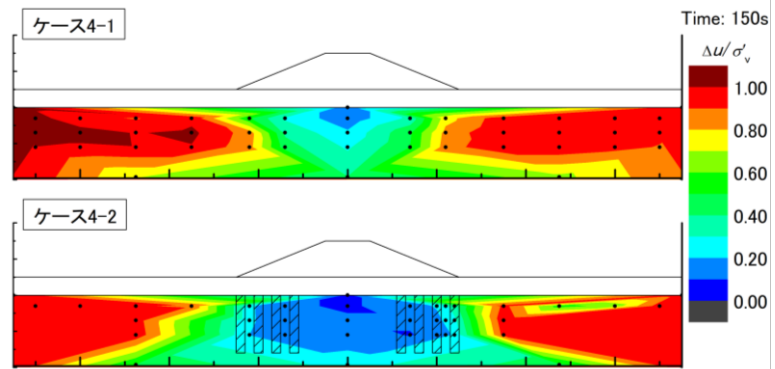
図 5.4.3 ケース 4-1 とケース 4-2 の加速度と堤体天端の沈下量の関係



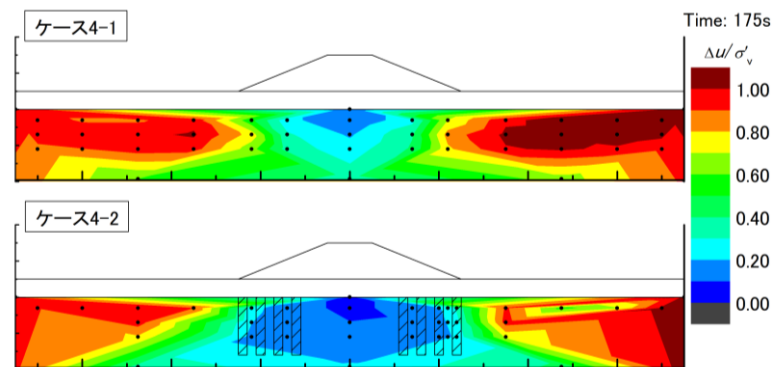
(a) 110 秒



(b) 125 秒



(c) 150 秒



(d) 175 秒

図 5.4.4 各経過時間における液状化層全体の過剰間隙水圧比分布の比較

図 5.4.5 に天端で計測した 3 点の沈下量の平均値を各ケース・ステップで比較した。まず、ケース 4-1 とケース 4-2 を比較する。ステップ 1 から 3 まではグラベルドレーンによって 3 割前後の沈下量低減効果となっているが、ステップ 4 では 1 割程度の低減効果に留まっている。ステップ 4 による沈下量の増分では、グラベルドレーンを施したケース 4-2 の方が大きいことから、グラベルドレーンが効果を発揮していないと考えるべきである。

次に、ケース 4-3 とケース 4-4 を比較する。ステップ 1 では、グラベルドレーンを施したケース 4-4 の沈下量の方が大きい。ケース 4-1 とケース 4-2 のステップ 4 と同じく、グラベルドレーンが効果を発揮していないものと考えられる。ステップ 3 でも沈下量の増分ではケース 4-3 とケース 4-4 で大差はなく、有意な効果は発揮していないと考えられる。一方で、ステップ 2 とステップ 4 では沈下量の増分に顕著な差が見られ、グラベルドレーンが効果を発揮したと考えられる。

正弦波 400gal や 500gal のような厳しい入力波形に対しては、グラベルドレーンが効果を発揮しないことが確認できた。これより、設計法を考える際には、このような粘り強くない性質が表現できる評価方法を用い、入力波形や地盤条件の不確実性を考慮することが重要になる。

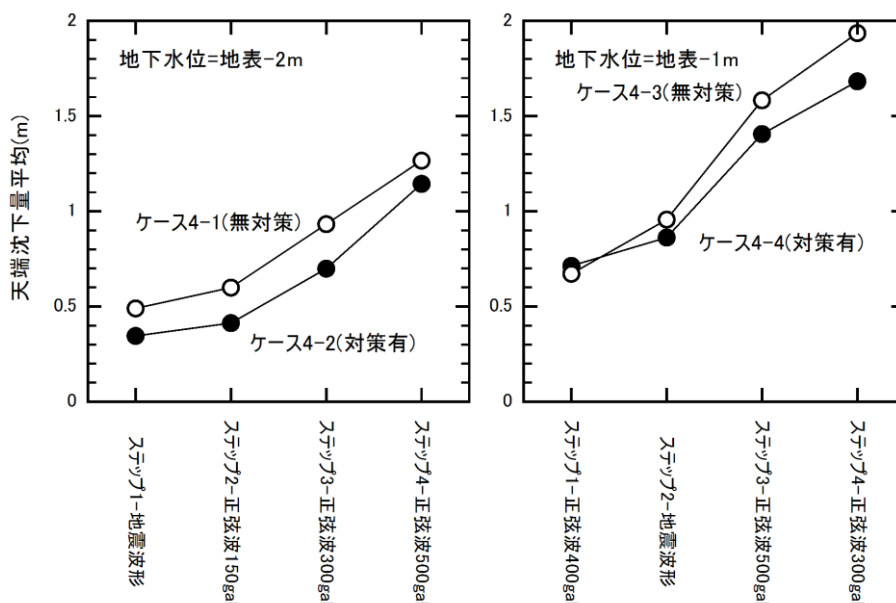


図 5.4.5 各ケース・ステップの天端沈下量の比較

6. 実験結果のまとめ

河川堤防の液状化対策として、グラベルドレーンの効果を遠心模型実験により検証した。

シリーズ1では、グラベルドレーンの有無による実験結果の比較を行った結果、グラベルドレーンを施したケースにおいて、液状化層で全体的に対策なしのケースと同程度またはそれ以上の過剰間隙水圧比が計測された。これは、液状化層の材料選定に課題があり、地盤の飽和が不十分であったことやケースごとに飽和方法を改善したため、先に実験を行った対策なしのケースは後に実験を行ったグラベルドレーンを施したケースよりも飽和度が不十分であったことが影響していると考えられる。

また、グラベルドレーンが十分な効果を発揮しなかった原因の1つとして、砂まじりの間隙流体がドレーン内を流れたために、十分な排水が行えなかったことが考えられる。ドレーンに用いた材料は、フィルター基準を満足していたが、グラベルドレーンの径に比して粒径が極めて大きくドレーン内の土粒子の数が極めて少ないために、フィルターとして機能しなかったと考えられる。また、ドレーンの表面（液状化層の境界部）では、液状化層の砂がドレーン側に入り込みドレーンの有効径が減少するため、粒の数が少ないほど減少率が大きくなる。これも効果を発揮しなかった原因の1つであると考えられる。

シリーズ1の結果を踏まえ、シリーズ2では液状化層の地盤材料を変更するとともに、グラベルドレーンの径を太くして粒の数を増やすことで効果が発揮されるかを検証した。実験の結果、ドレーン径の大きいグラベルドレーンを施したケースでは、グラベルドレーンの側面付近に液状化層の砂が混入されていることが確認されたものの、グラベルドレーンの中央には混入していないことが確認されており、過剰間隙水圧の低減も確認されたことから、排水機能が発揮されたものと考えられる。また、径の小さいグラベルドレーンはシリーズ1で述べたように、ドレーン径に対するドレーン材の粒径の比が極端に大きいためドレーンがフィルターとしての機能を発揮できなかったと考えられ、このことは遠心模型実験特有の問題であると考えられる。

シリーズ3では、グラベルドレーンのドレーン径、グラベルドレーンの不織布の有無による違いの比較やグラベルドレーンとパイプドレーンで比較を行った。過剰間隙水圧比の最大値の比較ではパイプドレーンの方がグラベルドレーンより液状化対策としての効果がみられたが、グラベルドレーンもある程度の太さのドレーン径であれば、過剰間隙水圧の抑制効果が十分発揮し得ることが確認された。また、シリーズ2で確認された遠心実験特有の問題に関して、不織布を巻いたグラベルドレーンでは加振直後や過剰間隙水圧比の最大値、過剰間隙水圧消散過程で過剰間隙水圧比の上昇抑制効果が確認され、不織布を巻き砂分の混入を防ぐことによって、シリーズ2のようにドレーン径を大きくしなくても良いことが確認できた。

シリーズ4では、グラベルドレーンのドレーン径や杭芯間隔を左右対称とし、不織布を巻いたグラベルドレーンを施したケースと対策なしのケースで比較を行った。液状化層全体の過剰間隙水圧比分布では堤体下を中心に過剰間隙水圧比が広領域かつ早い段階で消散する結果となっており、高い過剰間隙水圧比の継続時間の短縮および領域の抑制にグラベルドレーンが寄与したと考えられる。また、入力波形が厳しいとグラベルドレーンが効果を発揮しなくなることが確認されている。設計法を考える際には、このような粘り強くない性質が表現できる評価方法を用い、入力波形や地盤条件の不確実性を考慮することが重要になる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）、土木研究所資料第 3513 号、pp.42-57, 1997.10.
- 2) （国研）土木研究所：河川堤防の液状化対策の手引き、土木研究所資料第 4332 号、pp.17-21, 2016.3.
- 3) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について報告書、pp.24-26, 2011.9. https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/other/river_committee_01/06_02.pdf
- 4) 1) と同書、p.46.
- 5) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2017.12.

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4429 March 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

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