

土木研究所資料

ガラスリサイクル材を用いた 下水道管路施設の埋戻しに関する遠心模型実験

平成20年4月

独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ土質・振動チーム

Copyright © (2008) 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、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、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。

ガラスリサイクル材を用いた 下水道管路施設の埋戻しに関する遠心模型実験

材料地盤研究グループ土質・振動チーム

上席研究員 杉田 秀樹

主任研究員 佐々木哲也

国土交通省四国地方整備局河川部地域河川課
企画部研究企画課

課 長 石原 雅規*

技 師 水橋 正典*

要旨

2003 年十勝沖地震や 2004 年新潟県中越地震では、埋戻し土の液状化による下水道管路やマンホールの浮き上がり等の被害が多発し、このような被害の軽減を図ることが急務となっている。一方、近年では管路布設に際し、建設発生土等の各種リサイクル材料が埋戻し材料として用いられるようになってきており、このようなリサイクル材料の液状化被害防止の観点からの性能についても検討が求められている。本資料は、ガラスリサイクル材を用いた埋戻しの液状化対策としての効果を検討することを目的に実施した動的遠心模型実験の結果をとりまとめたものである。

キーワード：ガラスリサイクル材、液状化、埋戻し、遠心力模型実験

**元 耐震研究グループ振動チーム研究員

目 次

1. 序論	1
1.1. 研究の背景	1
1.2. 研究内容と本資料の構成	1
2. 動的遠心模型実験の方法	2
2.1. 実験目的及び実験内容	2
2.2. 試験装置	2
2.2.1. 大型動的遠心力載荷試験装置の概要	2
2.2.2. 大型動的遠心力載荷試験装置の仕様	4
2.3. 実験方法	5
2.3.1. 実験の概要	5
2.3.2. 地盤材料	7
2.3.3. 地盤の作製方法	8
2.3.4. 埋設管模型	12
2.3.5. データ測定項目	14
2.3.6. 加振方法	18
2.4. 模型地盤の密度	20
3. 実験結果と考察	21
3.1. 模型の変形状況	21
3.2. 埋設管の浮上り量と地盤の沈下量	26
3.3. 過剰間隙水圧と加速度の分布	28
3.4. 実験結果の考察	42
3.4.1. 各ケースの状況	42
3.4.2. 粒径の大きさが遠心模型実験の結果に与える影響	45
3.4.3. 締固め度が埋設管の浮上り抑制効果に与える影響	46
3.5. まとめ	46
4. 結論	47
付属資料 動的遠心模型実験の時刻歴図	49

1. 序論

1.1. 研究の背景

2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2004年新潟県中越沖地震では、埋戻し部の液状化により下水道管路やマンホールの浮上り等の被害が多発した^{1),2),3),4)}。埋戻し土の液状化による被害は、下水道管路施設の機能に影響を及ぼしたほか、路面の亀裂や段差等による道路交通機能にも大きな影響を与えた。地震後の下水道施設の機能確保および緊急車両等の交通機能の確保の観点から、このような下水道管路施設の埋戻し部の液状化による被害の軽減を図ることが急務となっている⁵⁾。

一方、近年では管路布設に際し、建設発生土等の各種リサイクル材料が埋戻し材料として用いられるようになってきている。このようなリサイクル材料の中には、固結作用や透水性の高さにより液状化防止の効果が期待できる材料もあり、これらの材料について液状化被害防止の観点からの性能について検討が求められている。このような状況のもと、本研究ではガラスリサイクル材料について下水道管路施設の液状化対策防止の観点からの適用性について検討を行った。

現在わが国では多くのガラスびんが使用後に回収され、細かく破碎された後、ガラスびんの原材料であるカレットに加工されている。しかし、茶色を除く色つきのガラスびんは、色調がばらつく、熱膨張係数が異なるなどの理由から再利用しにくく、その多くは使用後に廃棄されている。このような問題を解決するための再利用製品として、廃ガラスリサイクル粗粒材料（以下、ガラスリサイクル材）が開発されている。

ガラスリサイクル材は一般に高い透水性能を有しており、下水道管路施設の埋戻し材料として使用した場合、液状化対策としての効果が期待できる。「下水道耐震対策指針と解説」⁶⁾では、液状化対策としての砕石等による埋戻しに適する材料の目安として、10%粒径の範囲が示されている。しかし、この値は「道路橋示方書・同解説 耐震設計編」⁷⁾における液状化判定の対象となる土質の範囲を考慮して設定されたものであり、その適用性については十分に検証がなされたものではない。このため、ガラスリサイクル材の埋設管の液状化対策としての適用にあたっては、その効果を検証するとともに、液状化対策として適用可能なガラスリサイクル材の透水性、粒径の把握が必要である。

そこで本研究では、ガラスリサイクル材の液状化対策として適用を目的に、主にガラスリサイクル材の粒径に着目し、動的遠心模型実験によりガラスリサイクル材の埋設管の液状化対策としての効果を検討した。

1.2. 研究内容と本資料の構成

本研究は、動的遠心模型実験により、下水道管路施設の埋戻し部の液状化対策として、ガラスリサイクル材の適用性について検討を行うものである。

第2章では模型実験の方法を、第3章では模型実験の結果と考察を、第4章では結論を、それぞれ示している。また、各実験ケースの収録データの時刻歴を付属資料に示している。

2. 動的遠心模型実験の方法

2.1. 実験目的及び実験内容

下水道管路施設の埋戻し部の液状化対策としてのガラスリサイクル材の適用性を把握することを目的として動的遠心模型実験を行った。実験では、ガラスリサイクル材の粒度分布、間隙流体の粘性、模型の縮尺を変化させて、15Gおよび25Gの遠心力場において加振実験を行った。

2.2. 試験装置

2.2.1. 大型動的遠心力载荷試験装置の概要

遠心力载荷実験は、実際の構造物を幾何学的に縮小した模型や地盤を土槽内に作製し、実験装置で遠心加速度を与え、所定の遠心加速度の下で次元の加振を行い地盤の挙動を調べるものである。縮小されて作製した模型や地盤と実現象との間には、表 2.2.1 に示すような相似則が成り立ち、実物大実験に近い測定結果を得ることが可能である。

図 2.2.1 に、本実験で使用した大型動的遠心力载荷試験装置の概要を示す。揺動架台が振り上がった位置の回転腕には、CCDカメラと高速度カメラが取り付けられており、これらのカメラによって模型や地盤の挙動を観察することができる。

表 2.2.1 遠心力载荷実験における相似則

項目	密度	長さ	加速度		質量	力	応力	ひずみ	時間	
			遠心時	加振時					動的現象	浸透現象
実物	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
模型	1	1/N	N	N	1/N ³	1/N ²	1	1	1/N	1/N ²

注) ・N : 遠心加速度(G)

・1/N : 縮尺率

大型動的遠心力载荷試験装置 Geotechnical Centrifuge

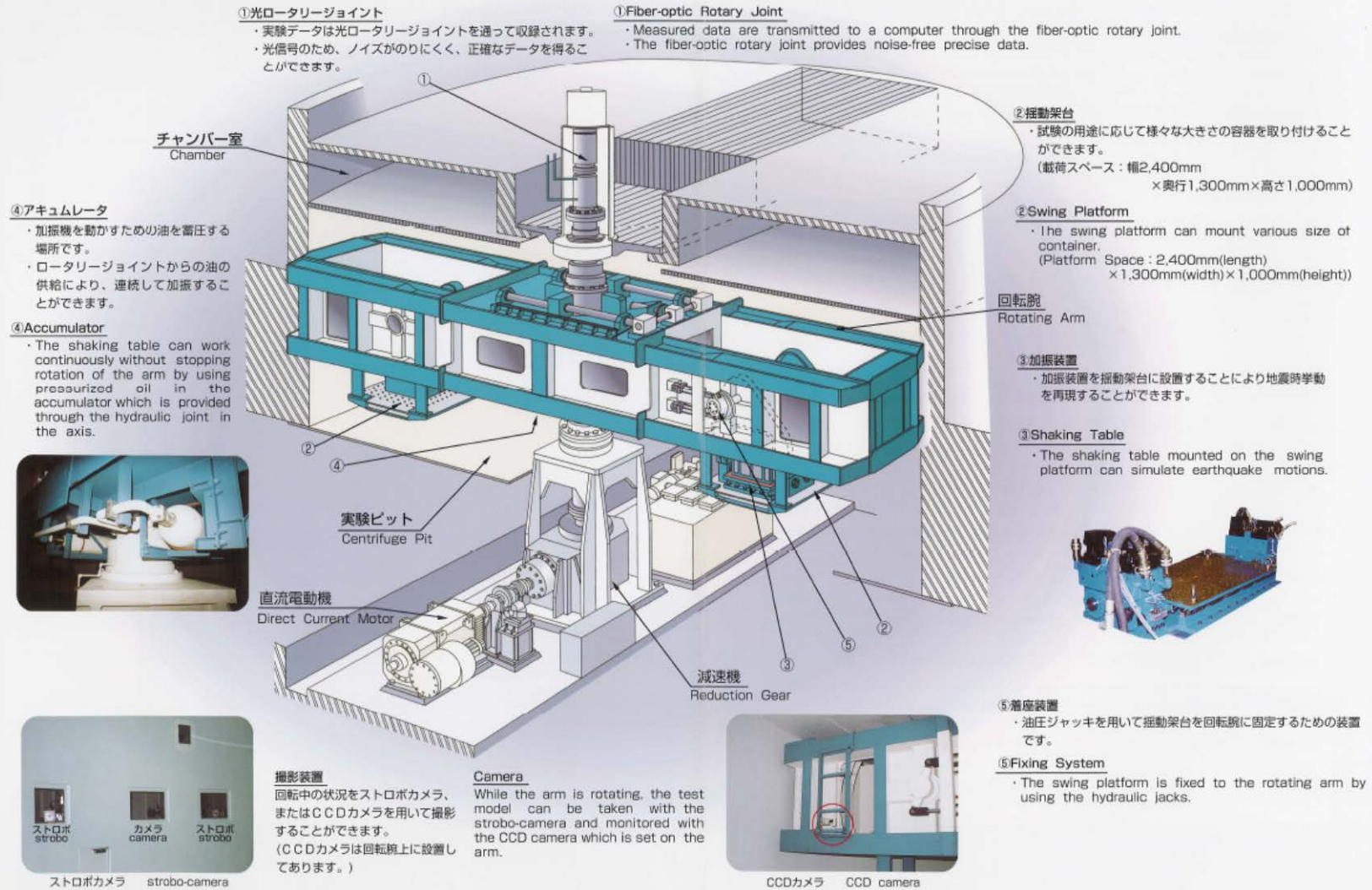


図 2.2.1 大型動的遠心力载荷試験装置の概要図

2.2.2. 大型動的遠心力载荷試験装置の仕様

実験に用いた大型遠心力実験装置の仕様は、表 2.2.2 に示すとおりである。

表 2.2.2 大型動的遠心力载荷実験装置の仕様

遠心力 载荷装置	有効回転半径	6600 mm
	最大遠心加速度	静的試験：150G 動的試験：100G
	最大積載容量	400 ton・G
	揺動架台 2台	静的試験：両側 動的試験：片側
	容器の载荷スペース	幅 2400mm,奥行き 1300mm 高さ 1000mm
加振装置	台の大きさ	幅 1700mm,奥行き 1000mm
	最大加振容量	40 ton・G
	最大加振加速度	40 G
	最大速度	900mm/s
	最大変位	±5 mm
	加振周波数	10~400 Hz
計測機能	光伝送方式	
	測定点数	静的試験：100ch 動的試験：80ch

2.3. 実験方法

2.3.1. 実験の概要

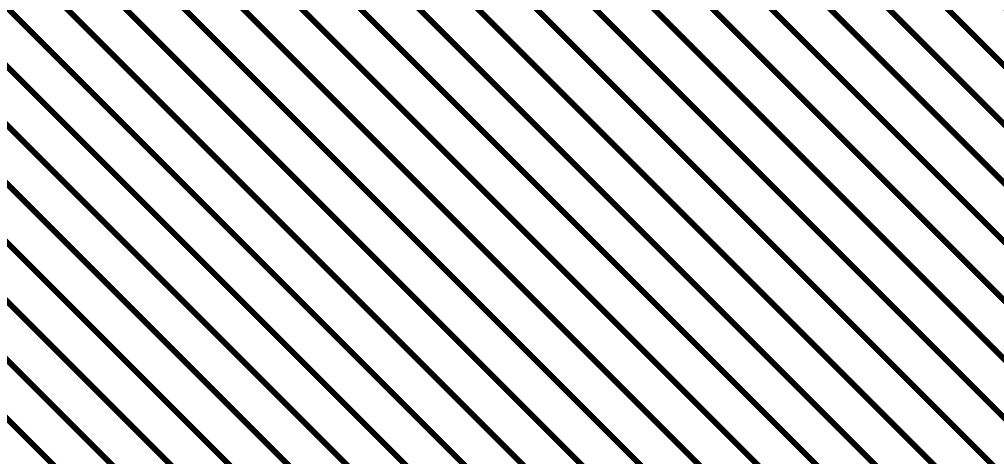
模型断面図を図 2.3.1 に、模型実験の条件を表 2.3.1 にそれぞれ示す。

模型は、実物の 1/25 あるいは 1/15 を想定し、周辺地盤と管渠模型を埋設した 3 つの埋戻し部からなるものである。

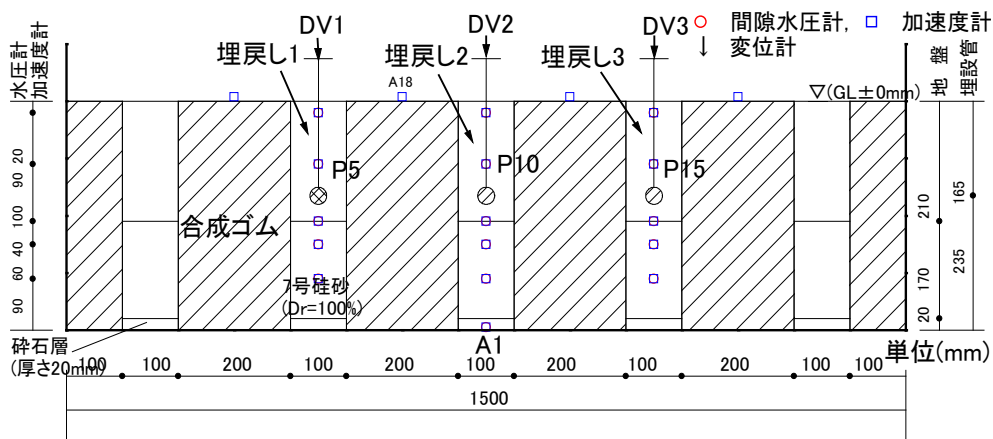
Case06-00 の模型は、実物の 1/25 の縮尺を想定し、粒度分布の異なる 3 種類のガラスリサイクル材による埋戻し部からなるものである。埋設管の設置深度は 80mm (実物換算 2m) である。 Case07-00 および Case08-00 の模型は、実物の 1/15 の縮尺を想定し、Case07-00 では豊浦砂、ガラスリサイクル材、ファインサンドの 3 種類の材料による埋戻し部からなるものであり、Case08-00 では粒度分布の異なる 3 種類のガラスリサイクル材による埋戻し部からなるものである。埋設管の設置深度は、165mm (実物換算 2.475m) である。

いずれのケースにおいても、周辺地盤は軟弱粘性土地盤を想定した合成ゴム ($E=1.1\text{MN/m}^2$) である。埋戻し部下方は土槽底面からの間隙流体の注入を可能にするため 7 号珪砂を用い、液状化が生じないように相対密度 100% を目標にできるだけ密に締め固めて作成した。また、地下水位は地表面に設定した。

以降に、模型の詳細について示す。



(a) Case06-00 (25G)



(b) Case07-00, Case08-00 (15G)

図 2.3.1 模型断面図

表 2.3.1 模型実験の条件

CASE	STEP	遠心 加速度 (G)	地盤条件								地下水位 G. L. (mm)	間隙流体	加振条件				
			埋戻し土 1 (締固め度、 相対密度)	埋戻し土 2 (締固め度)	埋戻し土 3 (締固め度、 相対密度)	ダミー 埋戻し土 (相対密度) (締固め度)	原地盤	支持層 (相対密度)	埋設管 深度 (mm)	埋戻し土 の層厚 (mm)			入力波形	周波数 (Hz)	加振加速度 A1 (G)		
															最大	最小	平均
06-00	1	25	ガラスリサイ クル材 1 (D=90%)	ガラスリサイ クル材 2 (D=90%)	ガラスリサイ クル材 3 (D=90%)	-	合成ゴム	7号硅砂 (Dr=100%)	80	100	±0	メチルセ ルロース 水溶液 25cs	sin波	25	10.0	-10.1	10.0
07-00	1	15	豊浦砂 (Dr=65%)	ガラスリサイ クル材 3' (D=83%)	ファイン サンド (Dr=60%)	7号硅砂 (Dr=70%)	合成ゴム	7号硅砂 (Dr=100%)	165	210	±0	メチルセ ルロース 水溶液 3cs	sin波	30	8.0	-7.5	7.8
08-01	1	15	ガラスリサイ クル材 3' (D=90%)	ガラスリサイ クル材 4' (D=90%)	ガラスリサイ クル材 5' (D=90%)	7号硅砂 (Dr=70%)	合成ゴム	7号硅砂 (Dr=100%)	165	210	±0	メチルセ ルロース 水溶液 3cs	sin波	30	8.1	-8.4	8.2

2.3.2. 地盤材料

埋戻し材料には粒径の異なるガラスリサイクル材、豊浦砂及びナスファインサンド(カヤ興産(株)。以下「ファインサンド」と称する)を用いた。実験に用いた地盤材料の土質工学的特性の一覧を表 2.3.2 に、埋戻し部に用いた材料の粒度分布を図 2.3.2 にそれぞれ示す。ガラスリサイクル材料については、事前に 4.75mm のふるいを通した後、所定の粒度分布となるよう調整した。

後述するように、ガラスリサイクル材 1~3 を用いた Case06-00 の実験結果から、ガラスリサイクル材の粒径の影響が無視できない可能性考えられた。このため、Case07-00、Case08-00 で用いたガラスリサイクル材 1'、ガラスリサイクル材 2'、ガラスリサイクル材 3' は、粒径の影響を軽減するために、最大粒径がそれぞれガラスリサイクル材 1、2、3 の 1/5 となるよう粒度調整を行ったものである。

表 2.3.2 地盤材料の物理・安定化特性

材 料	D_{50} (mm)	FC (%)	突き固め試験		最大最小密度試験	
			ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)
ガラスリサイクル材 1 (2.0~4.75mm)	3.36	—	1.448	0.5	—	—
ガラスリサイクル材 2 (0.85~4.75mm)	2.02	—	1.491	1	—	—
ガラスリサイクル材 3 (0~4.75mm)	1.54	—	1.674	2.9	—	—
ガラスリサイクル材 1' (0.425~0.85mm)	0.64	—	1.498	3.2	—	—
ガラスリサイクル材 2' (0.25~0.85mm)	0.41	—	1.522	1.0	—	—
ガラスリサイクル材 3' (0.85mm以下)	0.32	—	1.657	1.1	1.606	1.107
豊浦砂	0.175	2	1.579	16.2	1.647	1.340
ファインサンド	0.045	97	1.777	16.9	1.85	1.25
7号珪砂	0.173	—	1.627	—	1.627	1.256

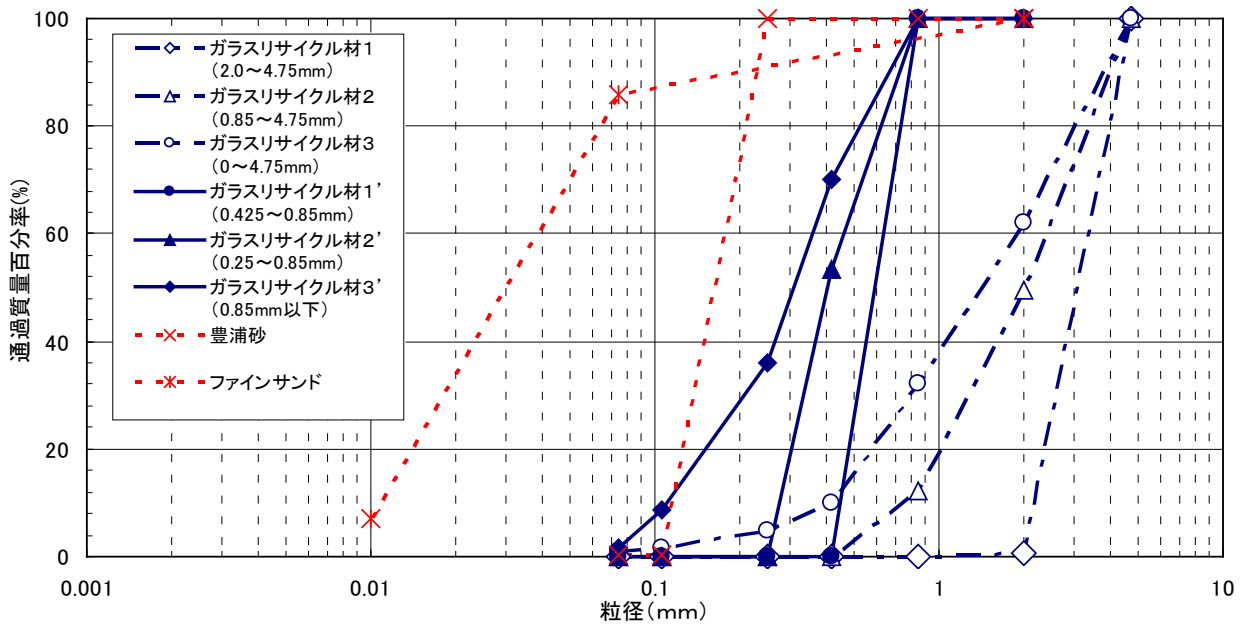


図 2.3.2 埋戻し材料の粒度分布

2.3.3. 地盤の作製方法

(1) 地盤の作成方法

本実験における地盤作製方法の概要を表 2.3.3 に示す。

表 2.3.3 地盤材料及び作製方法

地盤材料		試験ケース	作製方法
埋戻し土	ガラスリサイクル材	全ケース	材料を損傷しないようにスプーンを用いて静かに投入し作製。
	豊浦砂 ファイサンド	CASE07-00	サンドホッパーを用いて空中落下法により作製。
原地盤	合成ゴム	全ケース	弾性係数 $E=1.1\text{MN/m}^2$ 程度。 せん断試験を実施して、弾性係数を算出。 支持層作製前に予め土槽に固定。
支持層	7号珪砂	全ケース	実験土槽内において、突固め棒によりできるだけ密に締固めて作製。

(a) 原地盤

原地盤には、既往の地震で被害が著しかった泥炭地盤泥などと同程度の軟弱地盤を模擬して、写真 2.3.1、写真 2.3.2 のような合成ゴムを用いた。直径 50mm、高さ 100mmの合成ゴム供試体を用いた一軸圧縮試験及び動的変形試験結果から求めた合成ゴムのヤング係数 E は、一軸圧縮試験で $E=0.9\text{MN/m}^2$ 、有効拘束圧を 49kN/m^2 かけた動的変形試験ではひずみレベル依存性は見られず $E=1.1\sim 1.2\text{MN/m}^2$ であった。

原地盤を模擬した合成ゴムは所定の寸法に合わせて加工し、下部に実験土槽底面との固定用に2箇所孔が開けられている。さらに、埋戻し部の飽和のための通水路を確保するために底面端部に切り欠きを設けている。写真 2.3.1 に示すように合成ゴムには下部の穴に鋼棒を通して固定用のアングルを取り付けており、アングルを土層底面にボルト締めすることで合成ゴムを固定した。

実験土槽ガラス面と接する面には、埋戻し土や間隙水の流入を防ぐために、すき間テープを貼り付けた。このすき間テープはガラス面とわずかに接触しているだけなので、両者の摩擦は無視することが出来る。さらに、正面には加振時挙動を調べるために標点を貼り付けた。

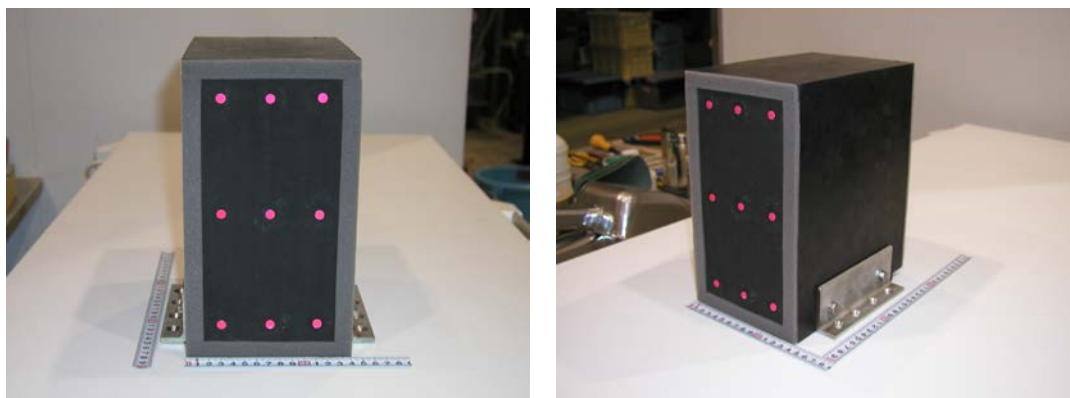


写真 2.3.1 Case06-00 で用いた原地盤（合成ゴム）



写真 2.3.2 Case07-00, Case08-00 で用いた原地盤（合成ゴム）

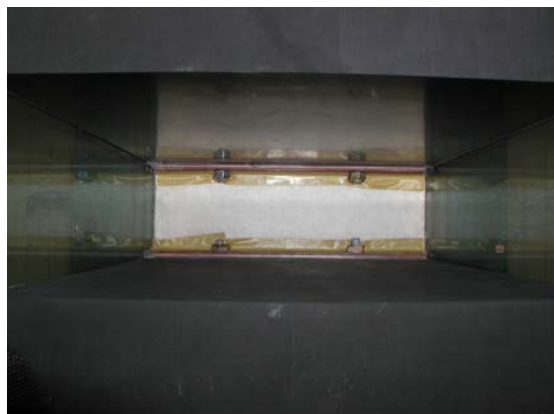
(b) 7号珪砂による支持層の作製

埋戻し部下部の支持層は市販の7号珪砂砕石を用いた。作製は締固め方法により行い、突き固め棒をできるだけ押し固めて作製した。作製層厚は、20mmピッチとした。

なお、支持層の下位には厚さ10mmの飽和用砕石層を設けた。砕石層の上面には、埋戻し土の流入を防ぐため不織布で覆った。



(i) 砕石層の作製状況



(ii) 不織布の敷設状況

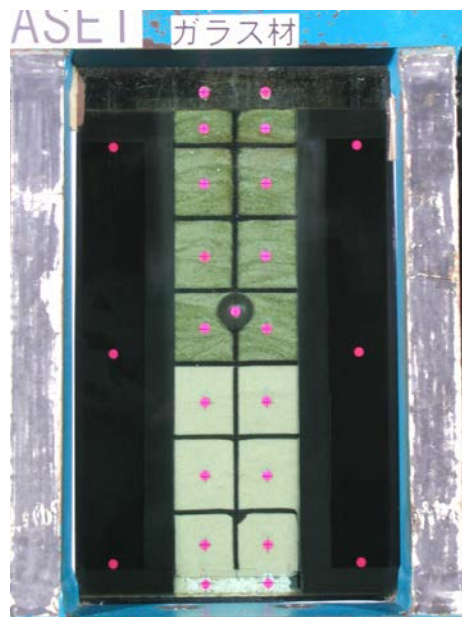
写真 2.3.3 飽和用砕石層の状況

(c) ガラスリサイクル材による埋戻し部の作製

ガラスリサイクル材による埋戻し部は、写真 2.3.4 に示すようにガラスリサイクル材を損傷しないようにスプーンを用いて所定の密度になるよう作製した。



(i) 地盤作製時

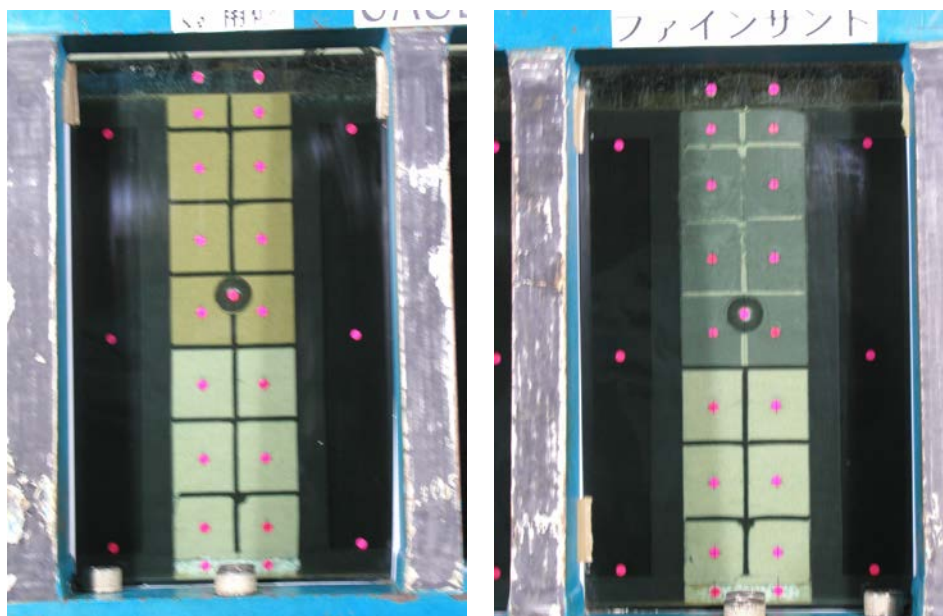


(ii) 地盤作製後

写真 2.3.4 ガラスリサイクル材による埋戻し部の状況

(d) 豊浦砂及びファインサンド埋戻し部の作製

豊浦砂及びファインサンドによる埋戻し部は、サンドホッパーを用いて空中落下法により所定の密度になるよう作製した（写真 2.3.5）。



(i) 豊浦砂

(ii) ファインサンド

写真 2.3.5 豊浦砂及びファインサンドによる埋戻し部の状況

(2) 密度管理

地盤密度の管理は、所定の層厚毎に投入した材料の質量と層厚を測定することで行った。各ケースの締固め度や相対密度は、各層毎の平均値から算出した。

(3) メッシュ作製と標点の設置

加振前後における地盤変形状況の観察を行うため、写真 2.3.4、写真 2.3.5 に示すように土槽前面ガラス面に水平方向と鉛直方向のメッシュを作製した。メッシュ材料は、地盤が7号珪砂のケースは黒色に染色した珪砂を、山砂と江戸崎砂の場合は、白色の7号珪砂をそのまま用いた。

水平方向のメッシュは、へらを用いてガラス面外側から水平性を確認しながら作成した。鉛直方向メッシュは、ガラス面内側の所定位置に設置した凹型アルミ棒にあらかじめ色砂を入れ、地盤の作製層厚毎にアルミ棒を引き抜いて作製した。

さらに加振前後における地盤の変形状況を観察するための標点を、土槽前面のガラス面に貼り付けた。標点には直径 8mm のアルミ製リベットを用いた。標点の表面は地盤の色と対照的なピンク色で着色した。この上端面と土槽前面には両者の摩擦を出来るだけ低減するためグリースを塗布した。

(4) 地盤の飽和

間隙流体には所定の粘度に調整したメチルセルロース（信越化学製）水溶液を用いた。Case06-00 では加振時の遠心加速度 25Gに合わせて、メチルセルロース水溶液の粘度を水の 25 倍（25cs）に調整した。また、Case07-00 およびCase08-00 では、後述するようにガラス材の粒径の影響が無視できない可能性があるため、粒径効果軽減のためガラス材の最大粒径をCase06-00 の 1/5 を想定し、これに伴い透水係数が 1/5 程度になると仮定し、見かけの透水係数が実物換算の 1/15 となるように、間隙流体の粘性を水の 3 倍（3cs）に設定した。

地盤の飽和は負圧法により行った。飽和方法は、まず土槽全体を脱気槽にいれ真空ポンプで約 98kPa の負圧を与え、実験土槽全体を真空状態にした。その後、真空状態で実験土槽側面 2 箇所に設置した注入パイプにメトロゾを滴下した。この注入パイプは支持層下位に設けた厚さ 10mmの飽和用碎石層につながっており、地盤の下位からボイリングを起こすことなく埋戻し土を飽和することができる。なお、埋戻し土の碎石層への流入を防ぐために、底面の碎石層上面には不織布を敷いた。

2.3.4. 埋設管模型

(1) 埋設管の仕様

埋設管模型の全景を、写真 2.3.6, 写真 2.3.7 に示す。Case06-00 で使用した埋設管は、直径 21mm, 長さ 194.5mmの亚克力製中空管である。また、Case07-00 およびCase08-00 で使用した埋設管は、直径 30mm, 長さ 295mmの亚克力製中空管である。模型にはレーザー変位形用ターゲットの固定用アルミ棒が取り付けられている。また、Case07-00 およびCase08-00 で使用した埋設管については、地盤飽和時の負圧による管の破損を防止するための空気孔が取り付けられている。埋設管模型下方には加速度計と間隙水圧計をあらかじめ設置し、また模型挙動を観察するため、側面中央に標点（ピンク色に着色したアルミ製リベット）を貼り付けた。

(2) 埋設管の密度調整

埋設管模型のみかけ密度は、 $\rho_m=0.81\text{g/cm}^3$ となるように真ちゅう製の丸棒を用いて調整した。真ちゅう棒は、加振中に移動して埋設管の重心位置が変化しないように、模型内側の最下部に接着材で固定した。

(3) 埋設管の設置

埋設管模型はメジャーやレベル等で設置深度や水平位置を微調整してから慎重に静置した。

なお、周辺地盤の合成ゴムと同様に、埋設管模型土槽奥行き方向の側面にスポンジを貼り付けガラス面にわずかに接触させるようにし、模型とガラス面間に生じる摩擦の低減及び砂の流入防止を図った。このスポンジとガラス面とはわずかに接触しているのもであるため、両者間に発生する摩擦力はほとんどなく、この摩擦力が模型の浮上りに及ぼす影響は無視できる。



写真 2.3.6 Case06-00 で用いた埋設管模型

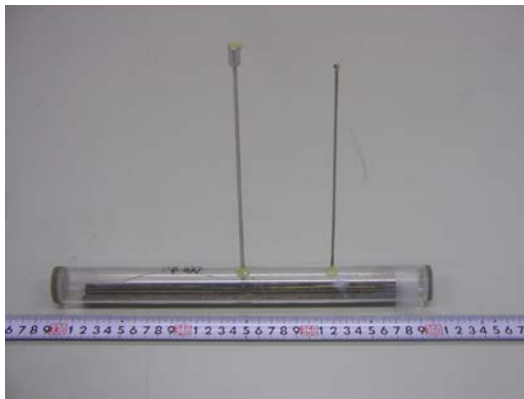


写真 2.3.7 Case07-00 およびCas08-00 で用いた埋設管模型

2.3.5. データ測定項目

動的遠心模型実験における測定項目は表 2.3.4 に示すとおりである。計測器と標点の設置位置を図 2.3.3～図 2.3.5 に示す。計測項目は、埋戻し部及び支持地盤の間隙水圧，埋戻し部，周辺地盤，土層の応答加速度，埋設管及び埋戻し部地表面の鉛直変位である。標点は，実験土槽前面の他，地盤沈下を測定するため地表面に設置しており，実験前後に重力場においてメジャーにより測定した。

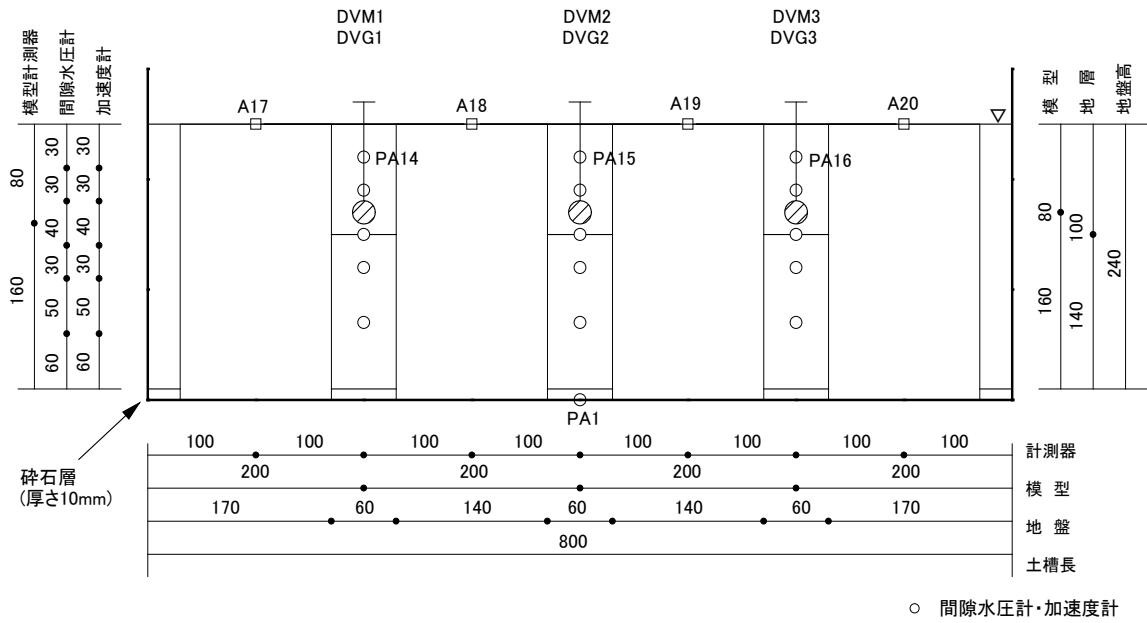
収録データの符号については，模型及び地盤変位では浮上り方向が正（沈下方向が負），地盤及び入力加速度では土槽前面に向かって左方向への加速を正とした。

表 2.3.4 測定項目一覧表

計測器	設置位置	Case06-00	Case07-00	Case08-00	備考
間隙水圧計	地盤	12	15	15	
	土槽	1	1	1	
加速度計	地盤	17	15	19	
	土槽・振動台	2	2	2	
変位計	埋戻し部	3	4	4	鉛直方向
	埋設管模型	3	3	3	鉛直方向
標点	地盤，模型	一式	一式	一式	

<計測器設置位置図>

Case06-00



<標点・メッシュ位置図>

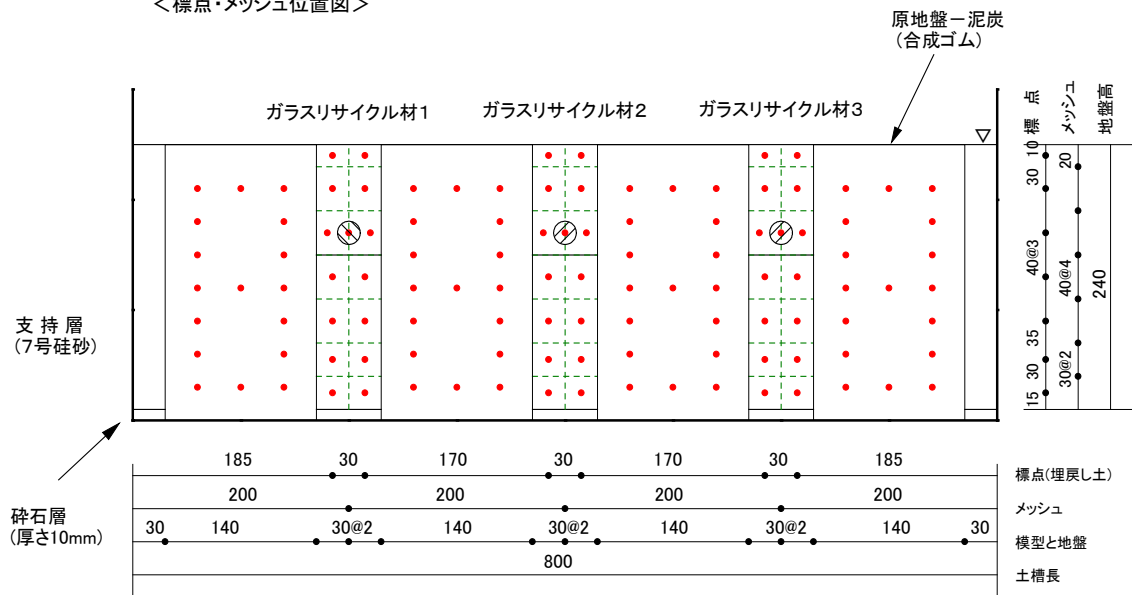
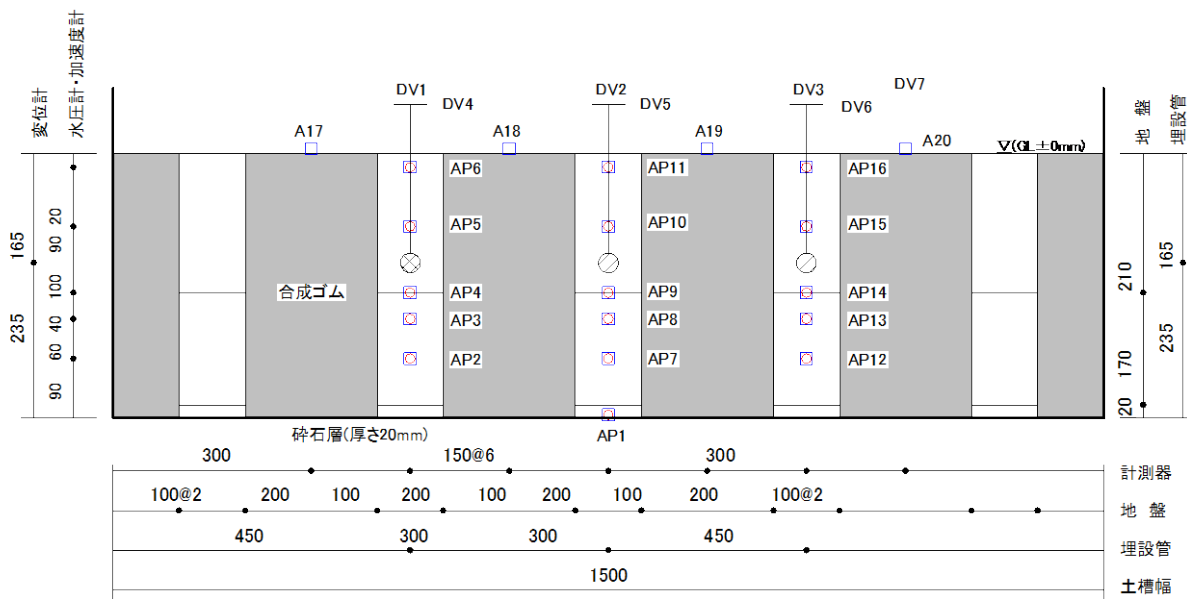


図 2.3.3 Case06-00 の計測器および標点・メッシュ位置図

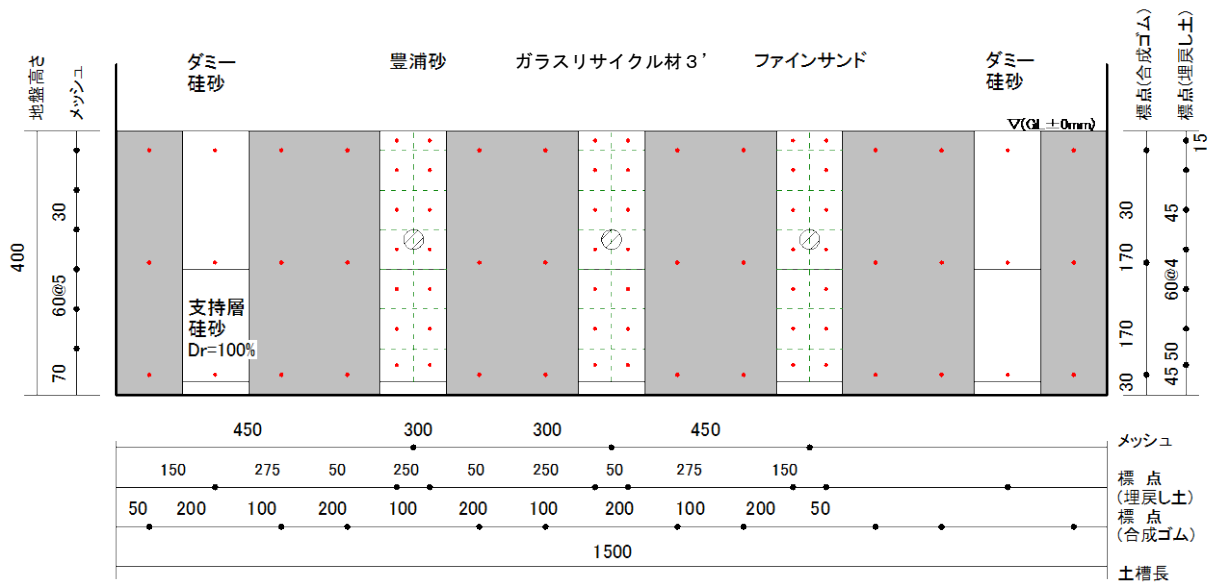
<計測器位置図>

Case07-00



- 間隙水圧計
- 加速度計
- メッシュ
- 標点

<標点・メッシュ位置図>

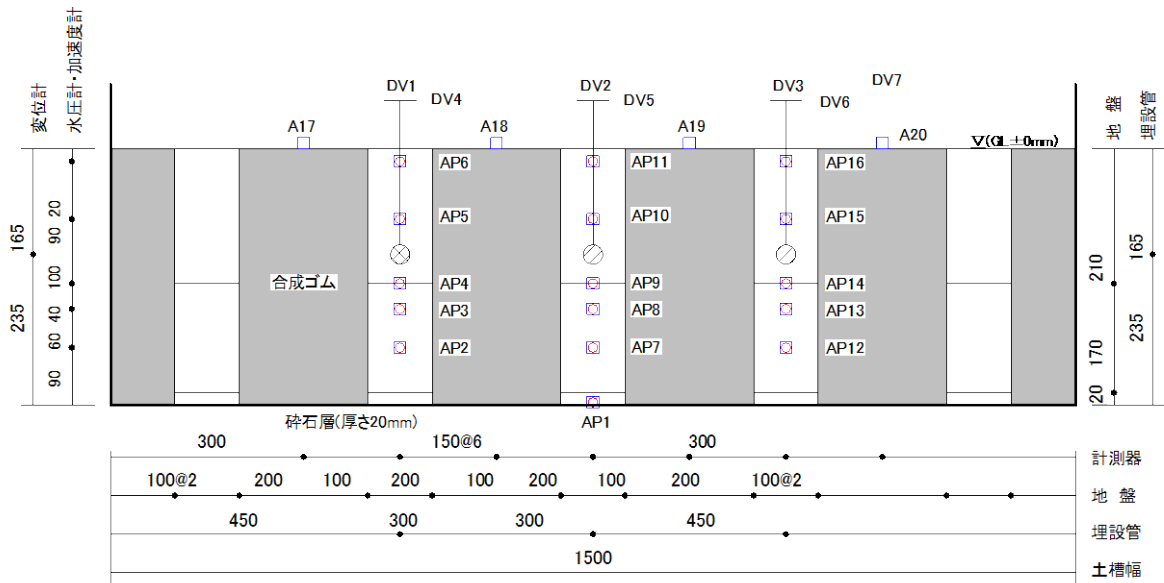


・単位: mm

図 2.3.4 Case07-00 の計測器および標点・メッシュ位置図

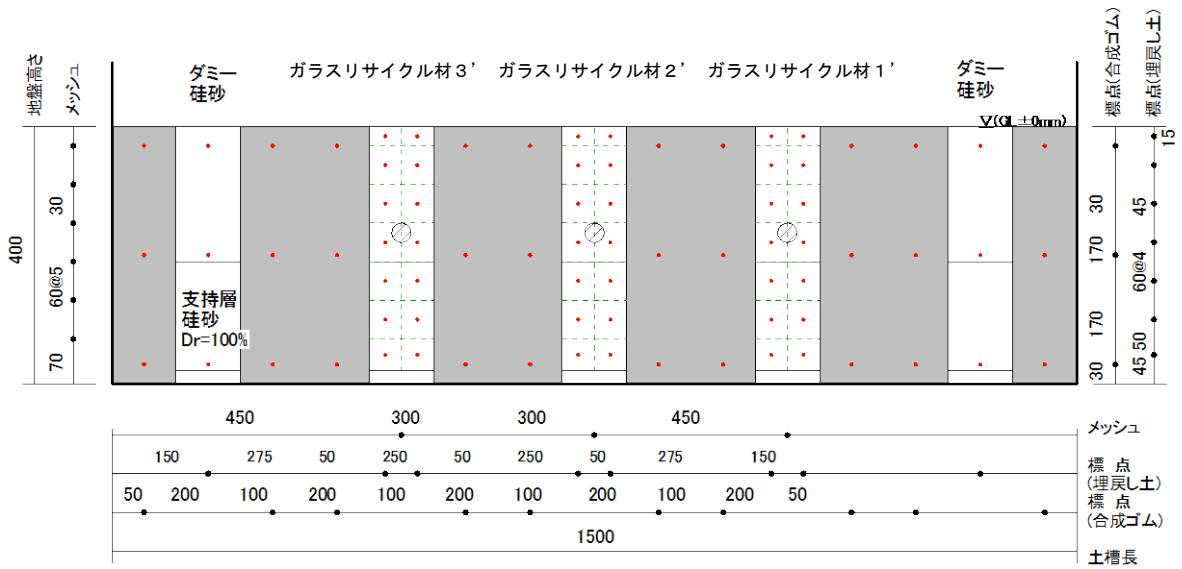
<計測器位置図>

Case08-00



- 間隙水圧計 (Piezometer)
- 加速度計 (Accelerometer)
- メッシュ (Mesh)
- 標点 (Marker)

<標点・メッシュ位置図>



・単位:mm

図 2.3.5 Case08-00 の計測器および標点・メッシュ位置図

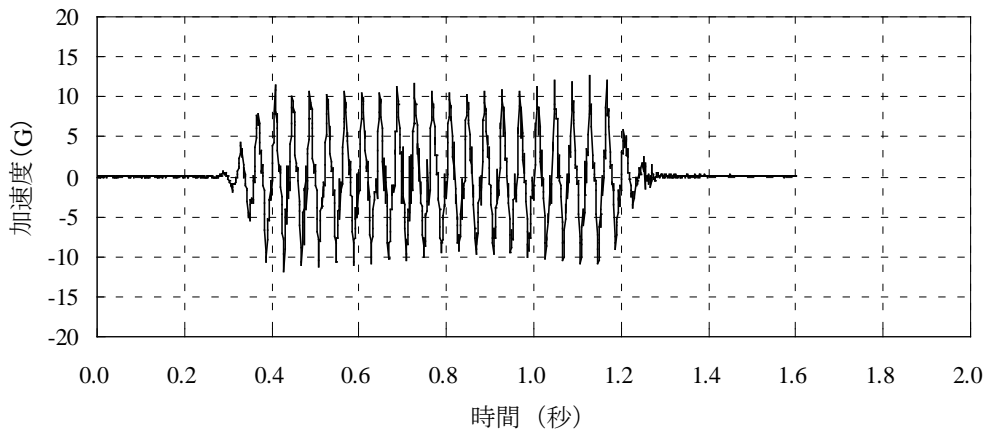
2.3.6. 加振方法

入力加速度波形を図 2.3.6 に示す。

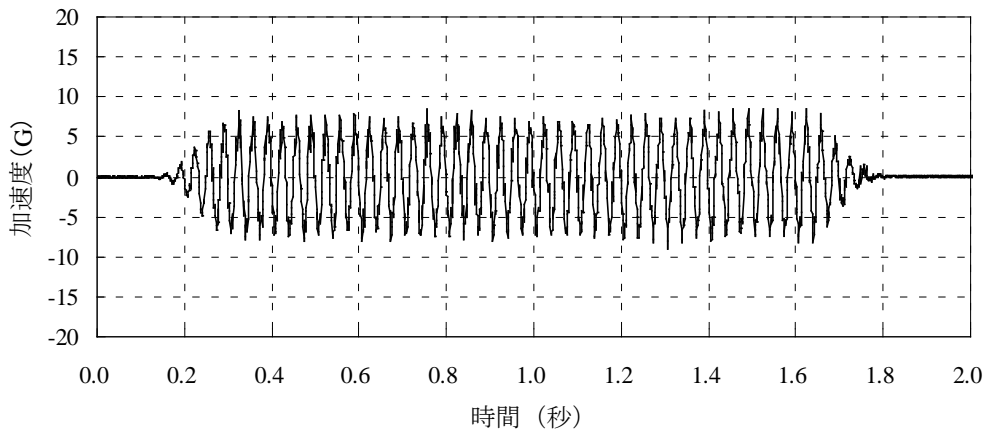
Case06-00 で使用した入力波は、周波数 25 Hz、振幅 10G の正弦波（実換算 1Hz 約 400gal 相当）20 波の前後に同じ周波数で 5 波ずつのエンベロープ部を設けたものである。一方、Case07-00 および Case08-00 で使用した入力波は、周波数 30 Hz、振幅 8G の正弦波（実換算 2Hz 500gal 相当）40 波の前後に同じ周波数で 5 波ずつのエンベロープ部を設けたものである。

模型地盤の揺動架台への設置から加振までの手順は以下のとおりである。

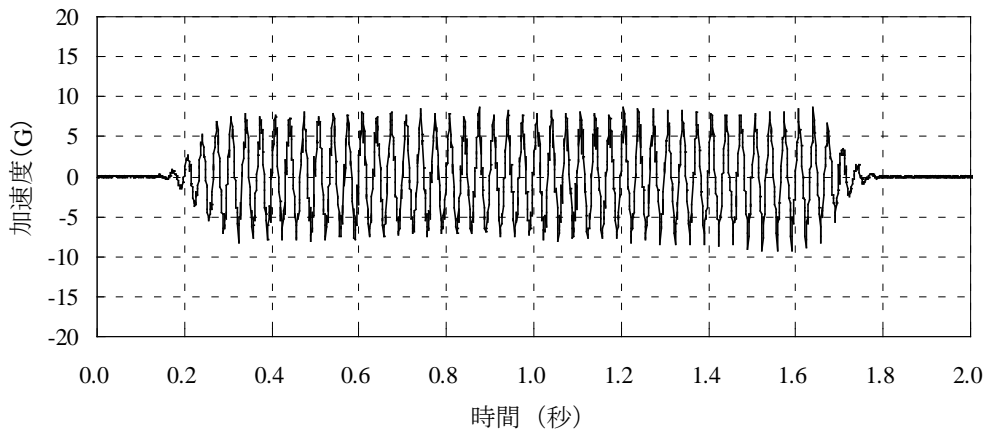
- ①遠心加速度を、所定の加速度（Case06-00 では 15G、Case07-00 および Case08-00 では 25G）まで毎分 5G の割合で上昇させる。
- ②地盤や模型の沈下がほぼ定常状態になったのを確認してから、一旦遠心加速度を重力場に戻す。
- ③写真撮影や地表面標点沈下量の測定及び変位計の付け替えを行った後、再度所定の遠心加速度まで上昇させる。
- ④計測データが定常状態になったら、加振装置暖気のための予備加振を行う。
- ⑤予備加振終了後、初期値計測を行い、データ収録装置と高速度カメラを外部トリガーモードに設定した後、CCD カメラ録画をスタートさせてから本加振を行う。
- ⑥本加振終了後、データを保存してから遠心加速度を重力場に戻す。
- ⑦写真撮影及び標点変位測定を行って、模型地盤を解体する。



(a) Case06-00



(b) Case07-00



(c) Case08-00

図 2.3.6 実験で使用した入力加速度波形

2.4. 模型地盤の密度

地盤作製時における地盤の密度管理結果を表 2.4.1 に示す。

表 2.4.1 の地盤の密度を基にして、間隙水圧計設置位置の有効上載圧を算定しており、算定結果は表 3.3.3, 表 3.3.4, 表 3.3.7, 表 3.3.8, 表 3.3.9, 表 3.3.10 の一覧表に整理した。

表 2.4.1 地盤の密度管理結果

ケース	位置	地盤の種類	地盤材料	乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	締固め度 Dc [%]	相対密度 Dr [%]
06-00	埋戻し1	埋戻し部	ガラス材1	1.322	91.3	—
		支持層	7号珪砂	1.619	—	98.33
	埋戻し2	埋戻し部	ガラス材2	1.361	91.3	—
		支持層	7号珪砂	1.619	—	98.33
	埋戻し3	埋戻し部	ガラス材3	1.527	91.2	—
		支持層	7号珪砂	1.619	—	98.33
07-00	埋戻し1	埋戻し部	豊浦砂	1.526	96.6	65.39
		支持層	7号珪砂	1.643	—	103.3
	埋戻し2	埋戻し部	ガラス材3'	1.368	82.6	61.4
		支持層	7号珪砂	1.644	—	103.5
	埋戻し3	埋戻し部	ファインサンド	1.554	87.5	60.32
		支持層	7号珪砂	1.647	—	14.11
08-00	埋戻し1	埋戻し部	ガラス材3'	1.490	89.9	82.73
		支持層	7号珪砂	1.636	—	103.3
	埋戻し2	埋戻し部	ガラス材2'	1.369	89.9	—
		支持層	7号珪砂	1.627	—	100.0
	埋戻し3	埋戻し部	ガラス材1'	1.346	89.9	—
		支持層	7号珪砂	1.625	—	99.6

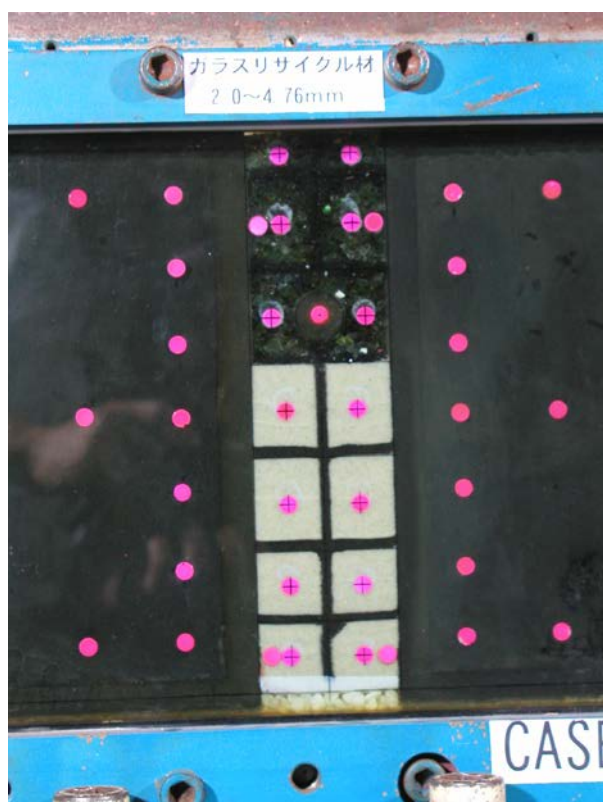
3. 実験結果と考察

本章では、主に埋設管の浮上り量、埋戻し部の沈下量、地盤の応答加速度や過剰間隙水圧等について整理した結果を示す。各実験で模型内に設置したセンサーから得られた時刻歴波形は巻末資料に添付した。なお、本研究で実施した実験では模型の縮尺がケースにより異なるため、実験結果は重力場換算した値で示すこととする。

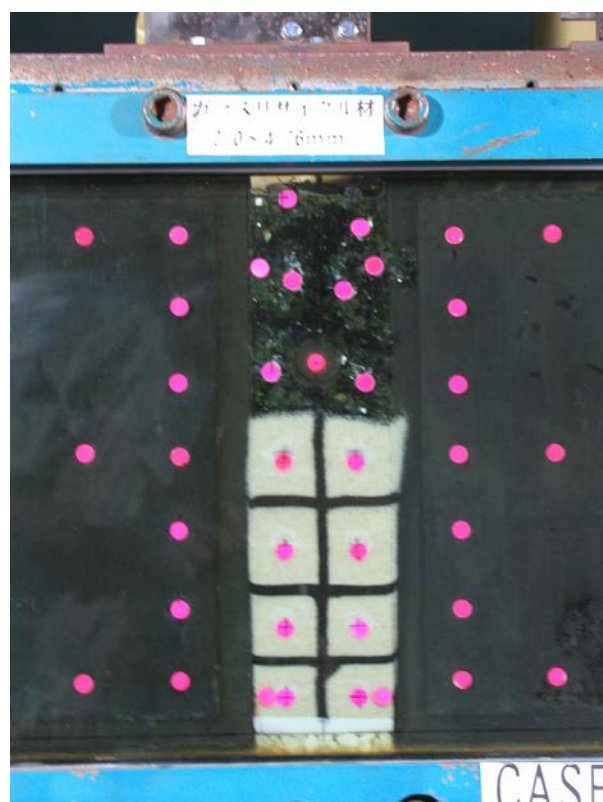
3.1. 模型の変形状況

Case06-00～Case08-00 の各ケースの加振前後の状況を写真 3.1.1～写真 3.1.3 にそれぞれ示す。

埋設管が大きく浮上がったのは、Case07-00 のガラスリサイクル材 3' (粒径 0.85mm以下) による埋戻しとファインサンドによる埋戻しのケースであった。これらのケースでは、管路模型の周辺に設置している標点およびメッシュの移動状況から、埋設管模型の浮上がりにもない埋戻し土が管路模型直下へ回り込むように変形している。また、埋設管模型に浮上がりが生じなかったケースにおいても、埋戻し土の液状化に伴う体積圧縮により埋戻し部の地表面が沈下した。ただし、支持層とした珪砂層にも沈下が生じており、埋戻し部地表面の沈下には支持層の沈下分も含まれていると考えられる。



加振前



加振後

写真 3.1.1(a) Case05-00 ガラスリサイクル材 1 の加振前後の状況



加振前



加振後

写真 3.1.1(b) Case05-00 ガラスリサイクル材 2 の加振前後の状況

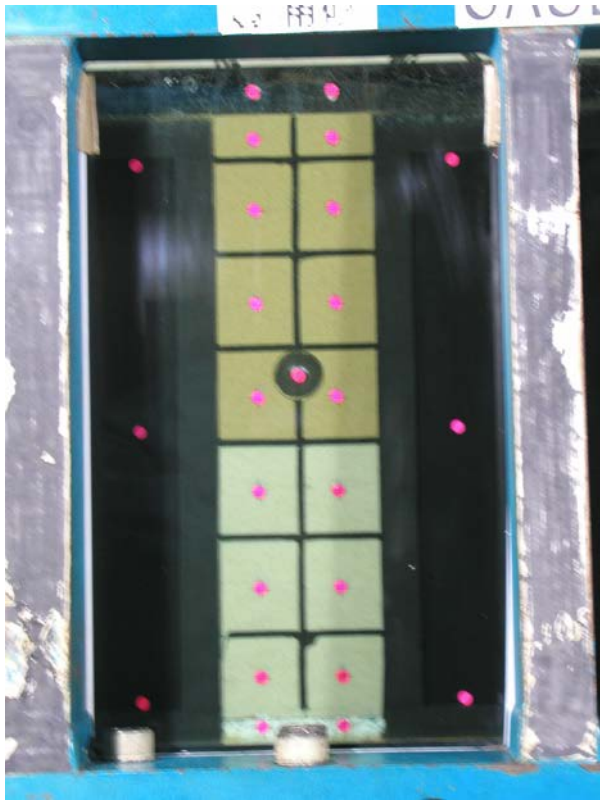


加振前

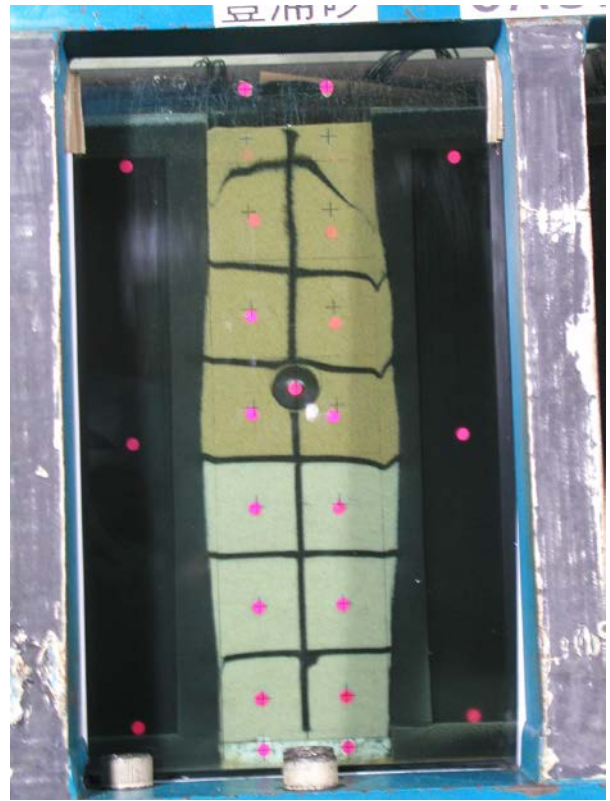


加振後

写真 3.1.1(c) Case05-00 ガラスリサイクル材 3 の加振前後の状況

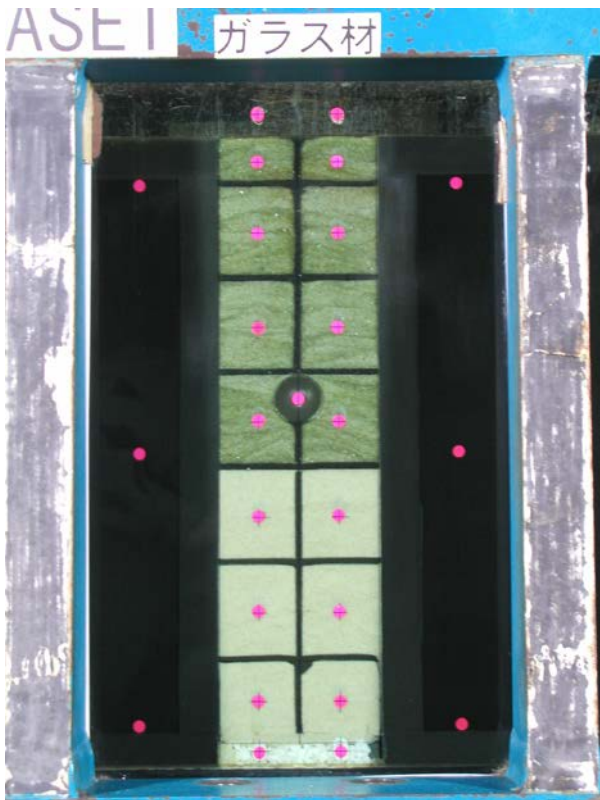


加振前



加振後

写真 3.1.2(a) Case06-00 豊浦砂の加振前後の状況

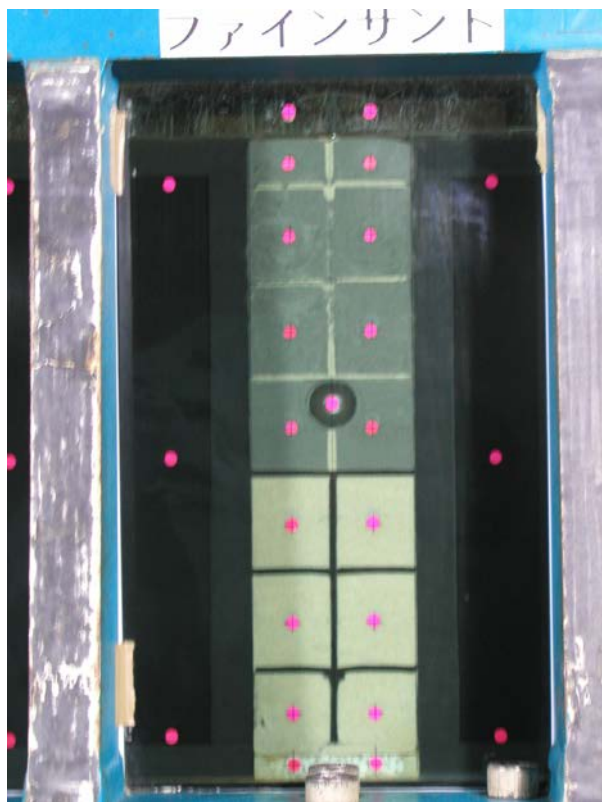


加振前



加振後

写真 3.1.2(b) Case06-00 ガラスリサイクル材 3' の加振前後の状況

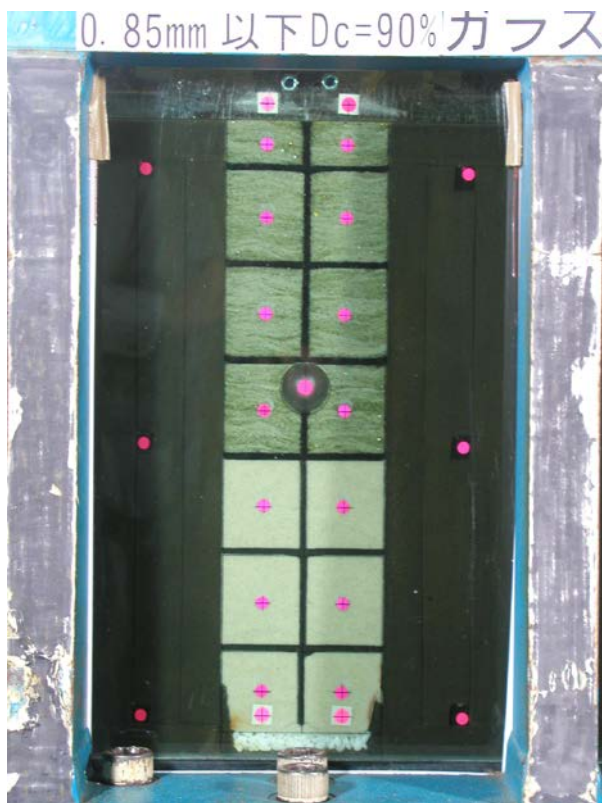


加振前

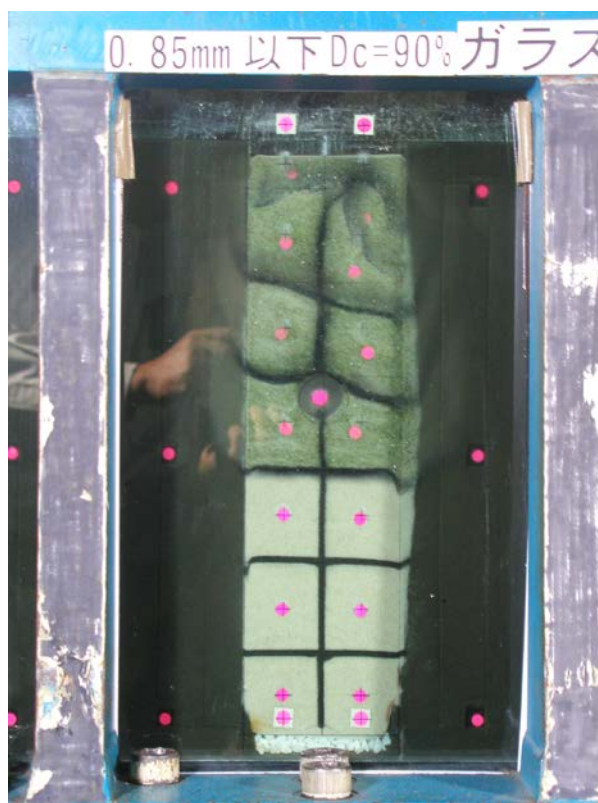


加振後

写真 3.1.2(c) Case06-00 ファインサンドの加振前後の状況

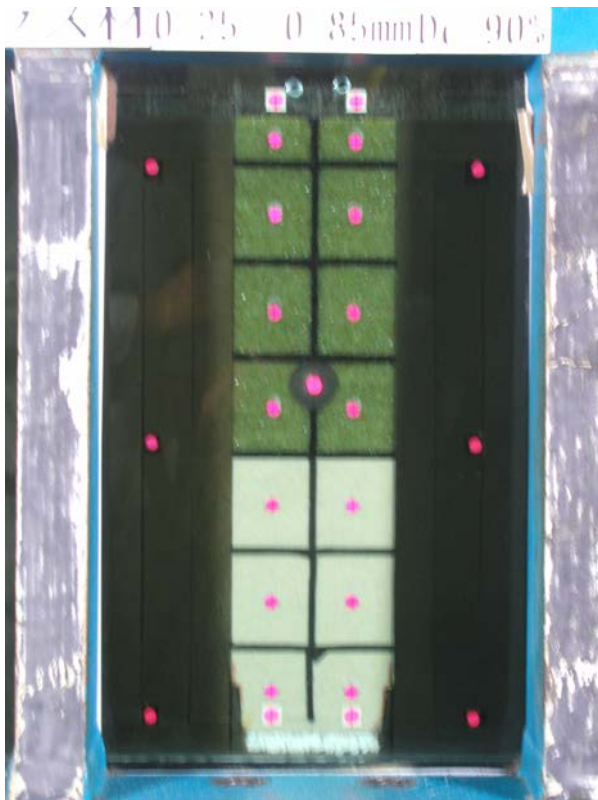


加振前



加振後

写真 3.1.3(a) Case07-00 ガラスリサイクル材3'の加振前後の状況



加振前

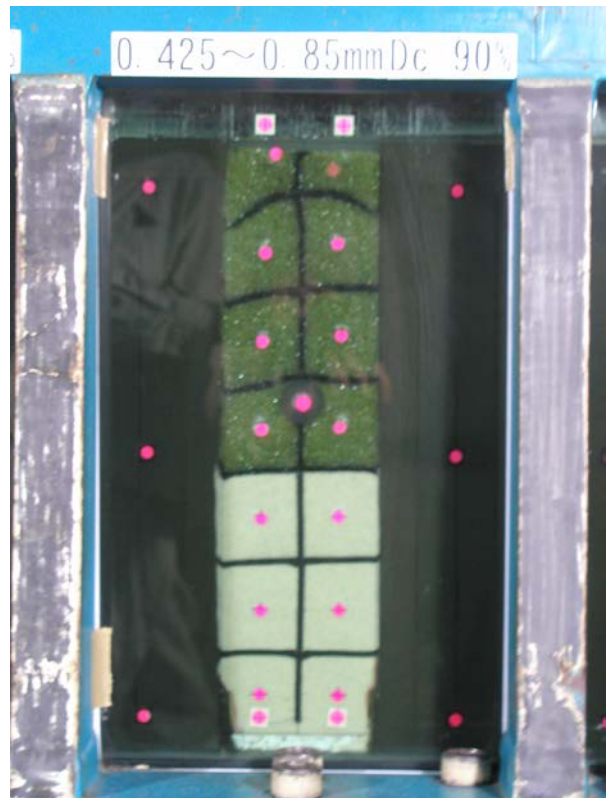


加振後

写真 3.1.3(b) Case07-00 ガラスリサイクル材 2' の加振前後の状況



加振前



加振後

写真 3.1.3(c) Case07-00 ガラスリサイクル材 1' の加振前後の状況

3.2. 埋設管の浮上り量と地盤の沈下量

埋設管の浮上り量と埋戻し部地表面の沈下量を表 3.2.1 に示す。Case07-00 のガラスリサイクル材 3' (粒径 0.85mm以下) による埋戻しとファインサンドでは、加振中の変位計測用のターゲットのスレにより変位計による計測が途中で不能となっているため、加振後の最終浮上り量には実験後のメジャーによる計測値を示している。

図 3.2.1, 図 3.2.2 に各ケースの浮上り変位と埋戻し部の沈下量を示す。これらの値は加振終了後の最終値である。

埋設管が大きく浮上がったのは、Case07-00 のガラスリサイクル材 3' (粒径 0.85mm以下) による埋戻しとファインサンドによる埋戻しである。ガラスリサイクル材 3' の締固め度は 80%程度であり、他のガラスリサイクル材による埋戻し部と比較して緩い状態であったことが、埋設管が大きく浮上がった要因として考えられる。

埋戻し部の沈下については、いずれのケースにおいても比較的大きな沈下が生じている。ただし、3.1 でも述べたとおり、支持層とした珪砂層にも沈下が生じており、埋戻し部地表面の沈下には支持層の沈下分も含まれている。

表 3.2.1 埋設管の浮上り量と埋戻し部の沈下量

埋設管浮上がり量 (実換算)

CASE	STEP	地盤条件			埋設管1 DVM1 DV1 (m)		埋設管2 DVM2 DV2 (m)		埋設管3 DVM3 DV3 (m)	
		埋戻し土1	埋戻し土2	埋戻し土3	最大値	残留値	最大値	残留値	最大値	残留値
06-00	1	ガラス リサイクル材 1	ガラス リサイクル材 2	ガラス リサイクル材 3	0.00	-0.04	0.00	-0.07	0.10	0.02
07-00	1	豊浦砂	ガラス リサイクル材 3'	ファインサンド	0.01	-0.03	0.32	<u>0.28</u>	0.34	<u>0.19</u>
08-00	1	ガラス リサイクル材 3'	ガラス リサイクル材 2'	ガラス リサイクル材 1'	0.04	0.02	0.00	-0.04	0.03	-0.02

埋設管：浮上り方向が正

地盤：沈下方向が負

埋戻し部沈下量 (実換算)

CASE	STEP	地盤条件			埋戻し土1 DVG1 DV4 (m)		埋戻し土2 DVG2 DV5 (m)		埋戻し土3 DVG3 DV6 (m)		原地盤 DV7 (m)	
		埋戻し土1	埋戻し土2	埋戻し土3	最小値	残留値	最小値	残留値	最小値	残留値	最小値	残留値
06-00	1	ガラス リサイクル材 1	ガラス リサイクル材 2	ガラス リサイクル材 3	-0.27	-0.27	-0.87	-0.87	-0.67	-0.67	-	-
07-00	1	豊浦砂	ガラス リサイクル材 3'	ファインサンド	-0.68	-0.68	-0.67	-0.67	-0.57	-0.55	0.00	0.00
08-00	1	ガラス リサイクル材 3'	ガラス リサイクル材 2'	ガラス リサイクル材 1'	-0.72	-0.72	-0.26	-0.26	-0.20	-0.20	0.00	0.01

下線は変位計ターゲットのずれ、レンジオーバーのため、実験終了後重力場にて計測した値

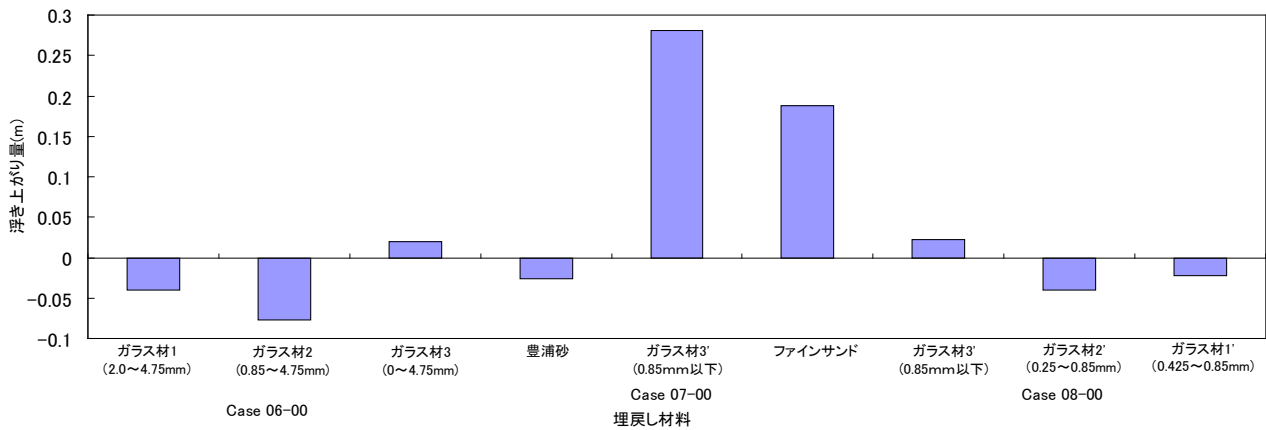


図 3.2.1 各ケースの最終浮き上がり量 (重力場換算)

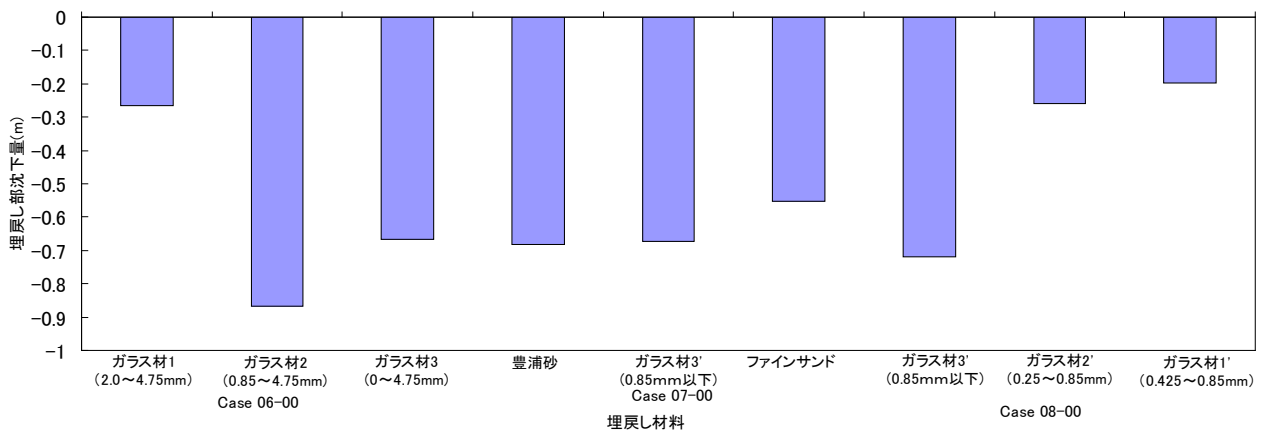


図 3.2.2 各ケースの埋戻し部の沈下量 (重力場換算)

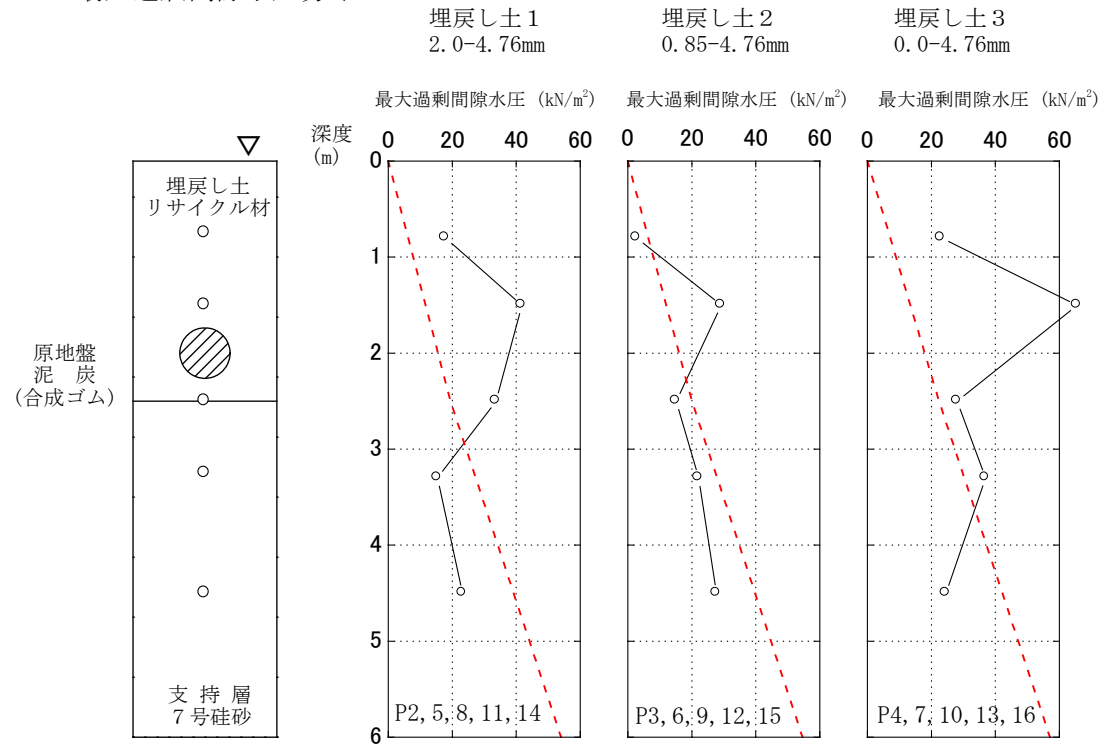
3.3. 過剰間隙水圧と加速度の分布

各ケースで測定した最大過剰間隙水圧と最大応答加速度の深度方向分布および加振後の過剰間隙水圧の深度方向分布を図 3.3.1～図 3.3.6 に示した。これらの数値データは、表 3.3.1～表 3.3.10 の一覧表に示している。なお、加振後の過剰間隙水圧の値については、Case06-00 については 1.4 秒、Case07-00 と Case08-00 については 1.8 秒の値を用いている。

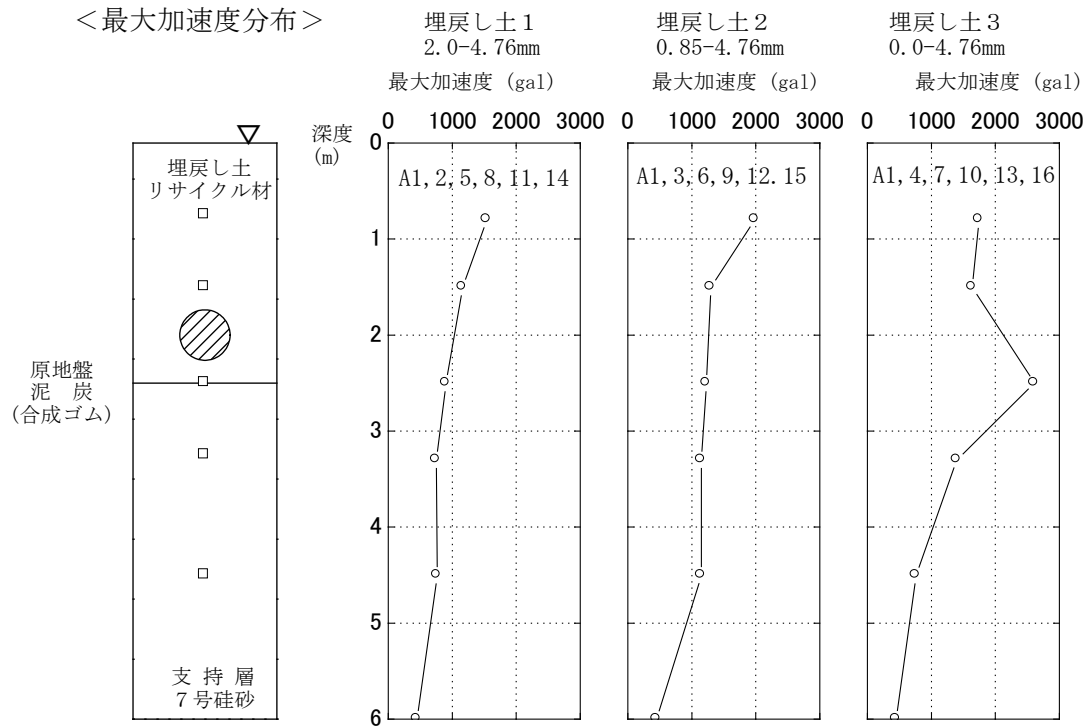
いずれの埋戻しにおいても、加振中の埋戻し土における最大過剰間隙水圧は有効上載圧を上回っている。これは加振中の水圧の動的成分を計測しているものと考えられる。が、過剰間隙水圧の消散の速さは、埋戻し材料により異なっており、細粒分の多い埋戻し材料ほど透水係数が低く、過剰間隙水圧の消散が遅くなっていた。

また、いずれの埋戻し部についても、深度が浅くなり地表面に近づくほど、応答加速度が大きくなる傾向が見られた。これは泥炭地盤を模擬した合成ゴム製の原地盤の振動成分が、そのまま埋戻し土に伝播しているためであると考えられる。

<最大過剰間隙水圧分布>



<最大加速度分布>



注) ・深度6mの最大加速度は加振加速度(A0)。

図 3.3.1 最大過剰間隙水圧と応答加速度の深度方向分布 (Case06-00)

<加振後の過剰間隙水圧分布>

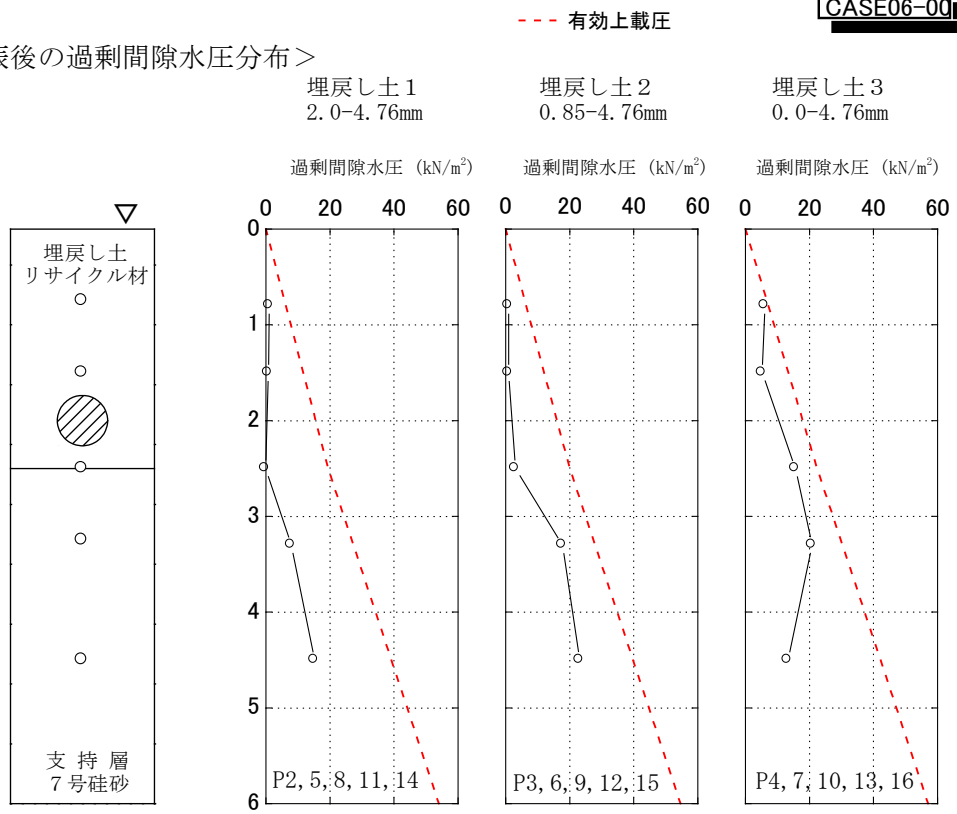


図 3.3.2 加振終了直後の過剰間隙水圧の深度方向分布 (Case06-00)

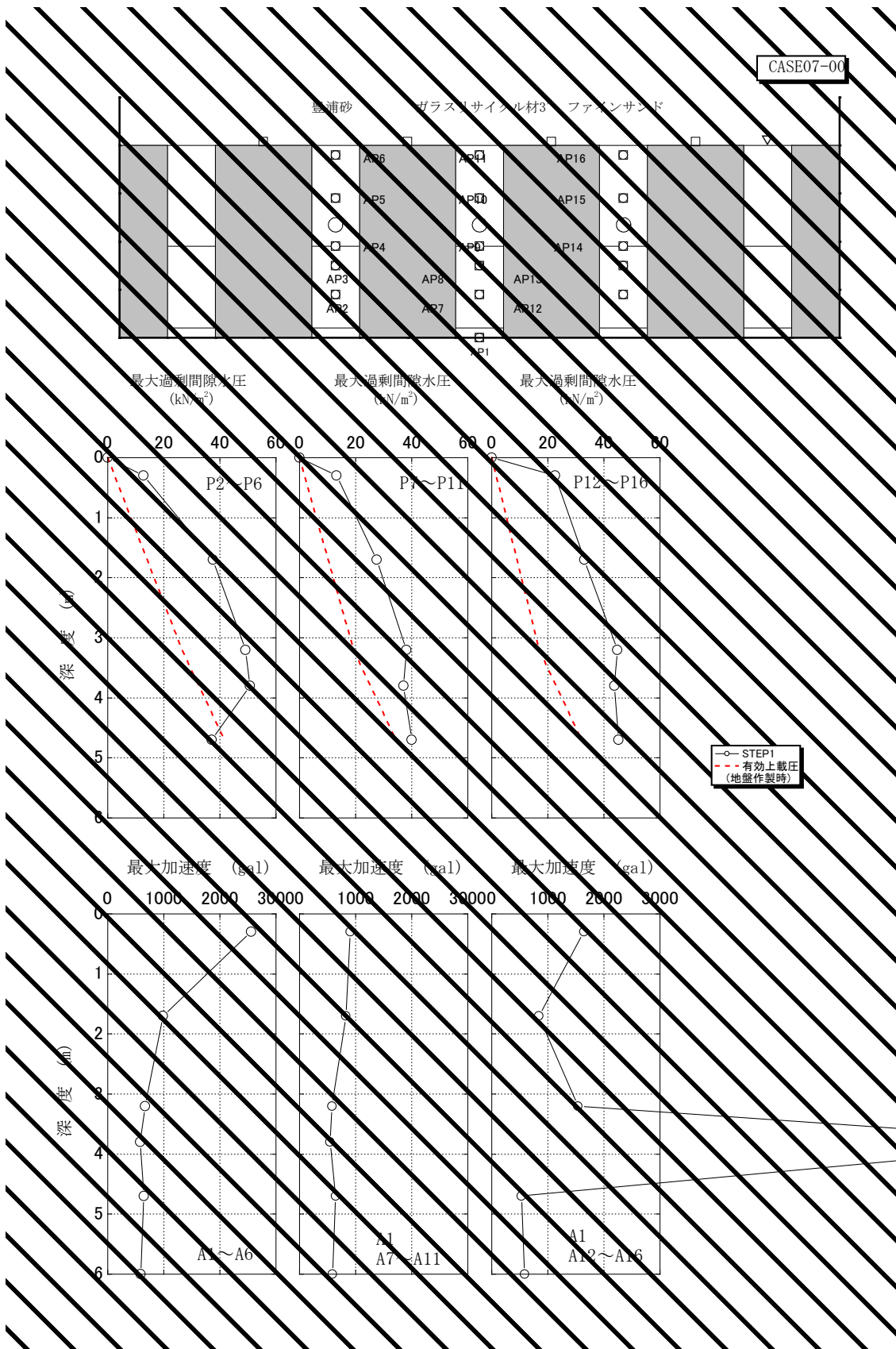


図 3.3.3 最大過剰間隙水圧と応答加速度の深度方向分布 (Case07-00)

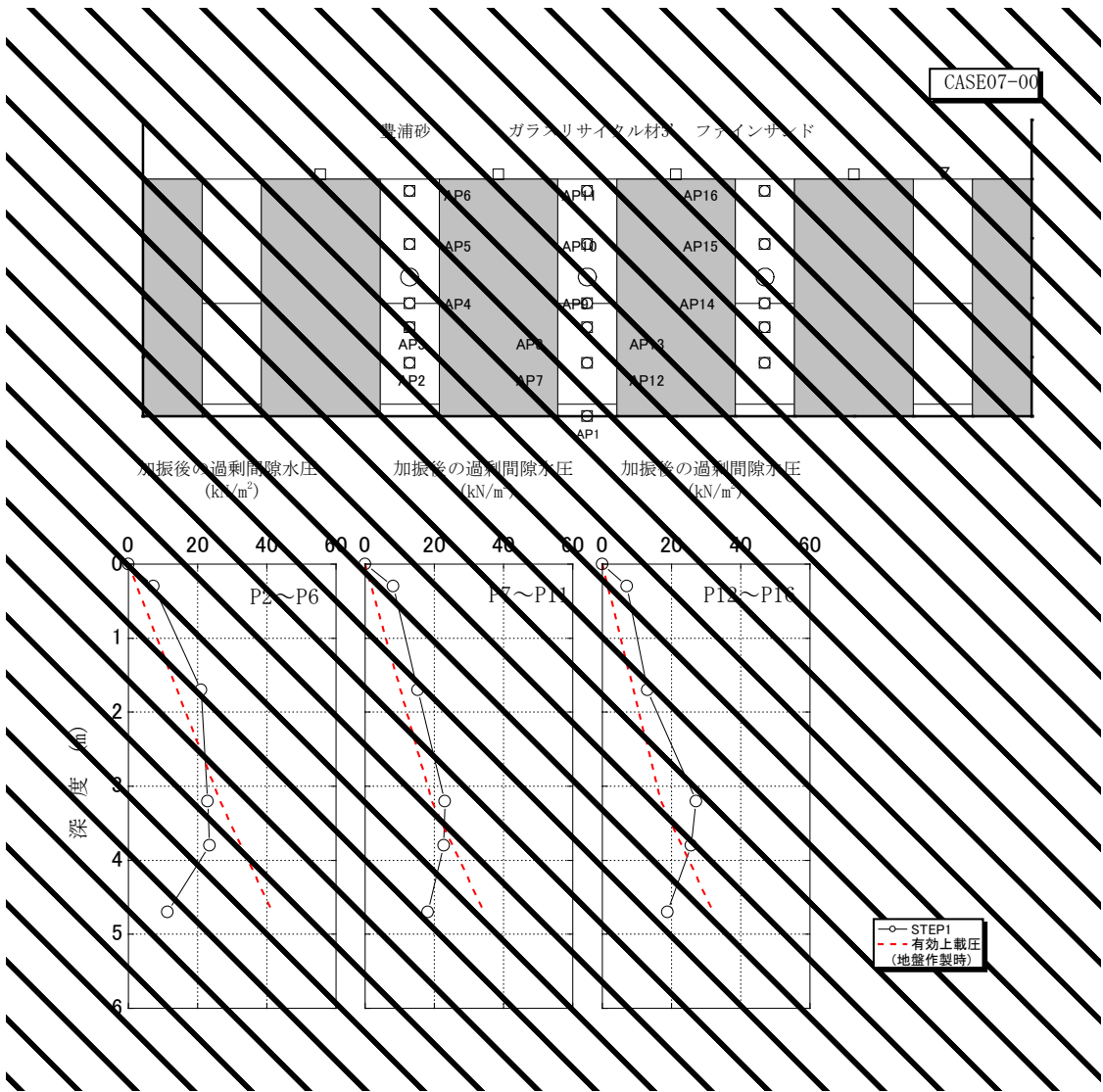


図 3.3.4 加振終了直後の過剰間隙水圧の深度方向分布 (Case07-00)

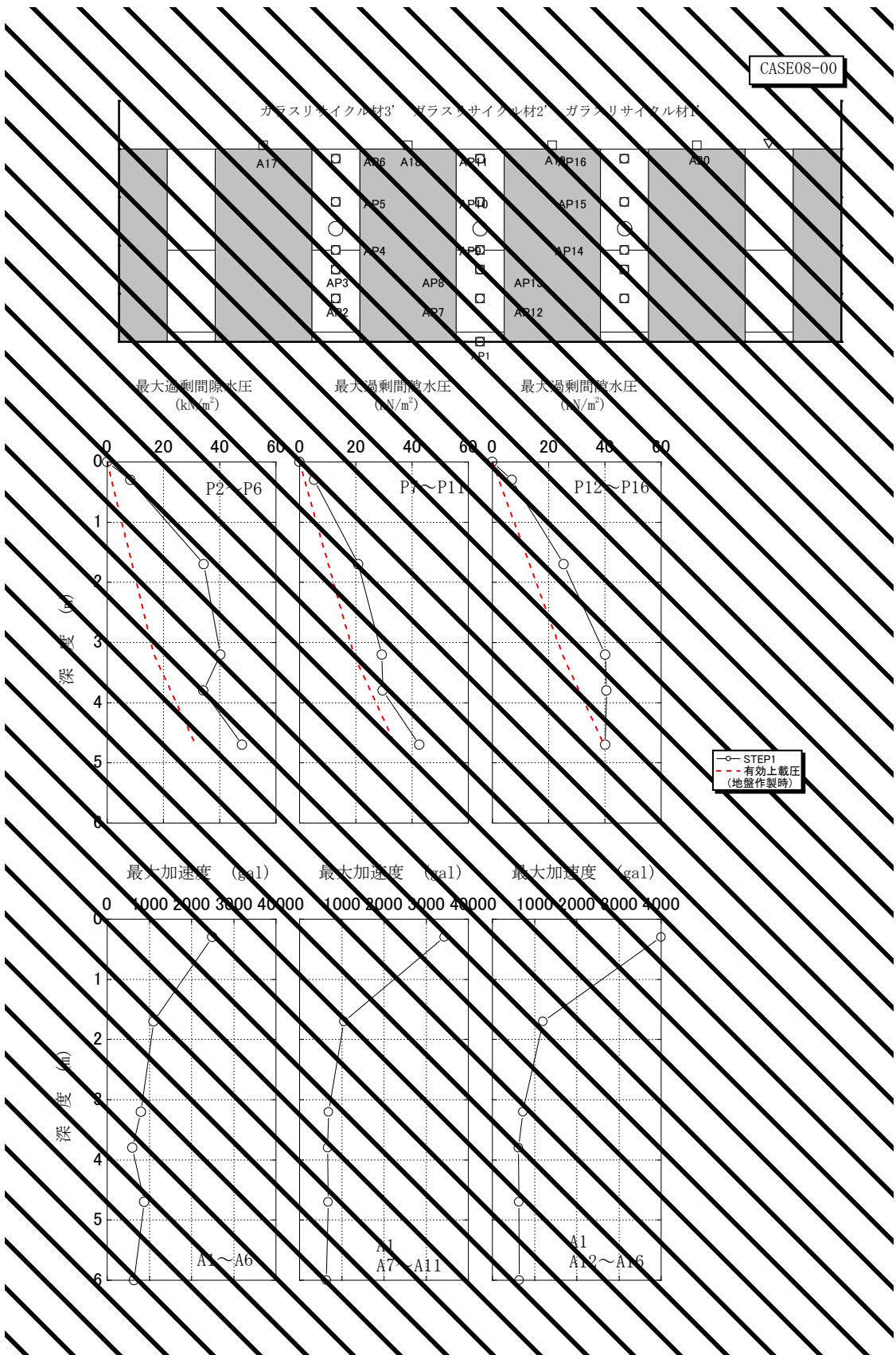


図 3.3.5 最大過剰間隙水圧と応答加速度の深度方向分布 (Case08-00)

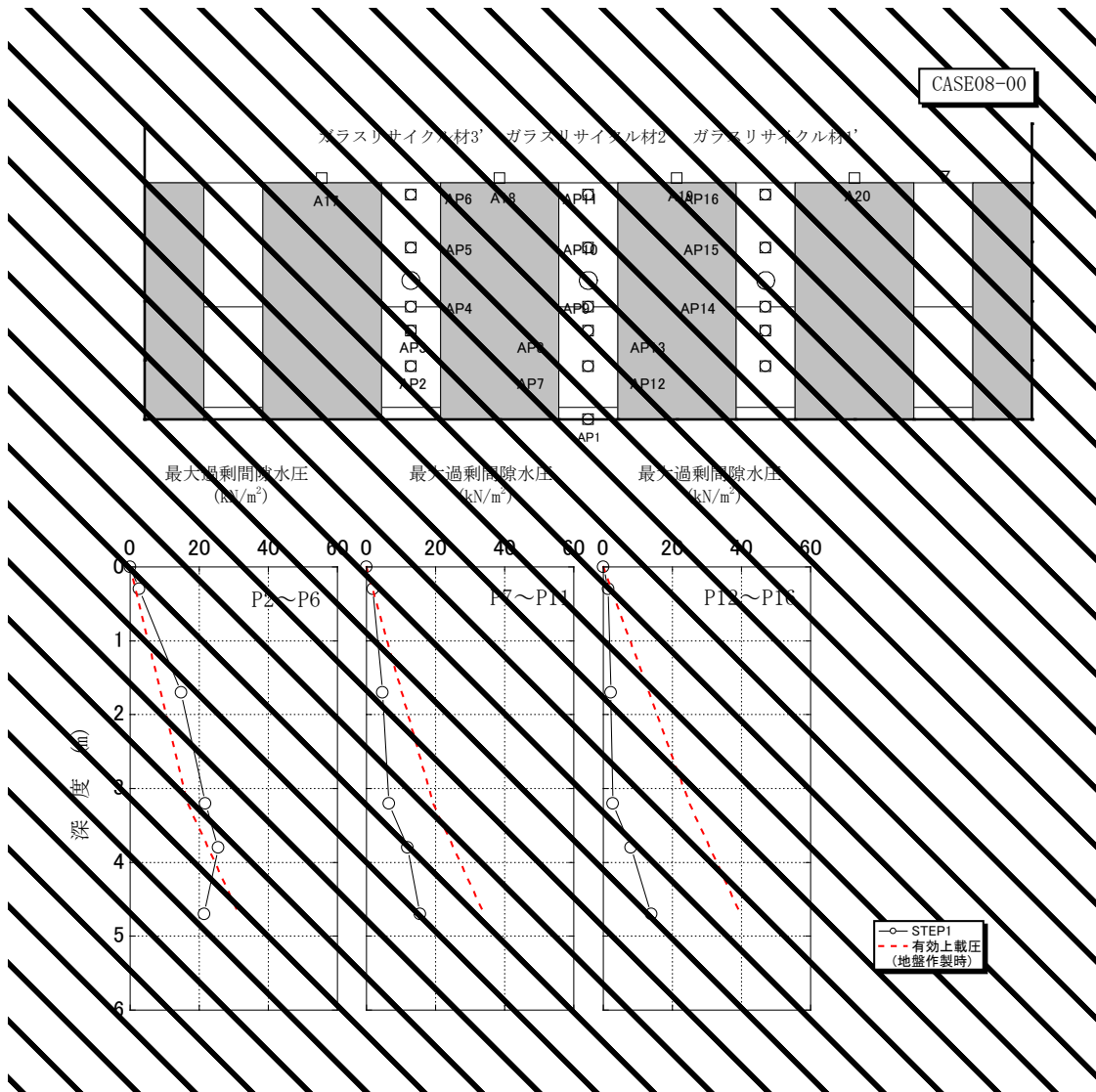


図 3.3.6 加振終了直後の過剰間隙水圧の深度方向分布 (Case08-00)

表 3.3.1 測定値の最大・最小値一覧表 (Case06-00)

計測器		Case06-00					
		最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
加速度計 (gal)	A0	495.2	-464.5				
	A1	447.26	-452.04				
	A2	717.07	-764.47				
	A3	847.23	-1151.38				
	A4	761.92	-727.94				
	A5	672.42	-751.68				
	A6	1149.65	-933.56				
	A7	1251.83	-1399.06				
	A8	758.82	-904.25				
	A9	1229.74	-1231.39				
	A10	1365.20	-2611.74				
	A11	870.97	-1163.39				
	A12	1245.60	-1296.21				
	A13	1531.03	-1640.94				
	A14	958.12	-1541.50				
	A15	1500.50	-1986.53				
	A16	1422.92	-1743.32				
	A17	601.35	-888.79				
	A18	1033.50	-1592.91				
	A19	1467.03	-1400.12				
A20	867.5	-800.3					
間隙水圧計 (kN/m ²)	P1	14.4	-15.6				
	P2	23.2	-51.2				
	P3	27.7	-58.9				
	P4	24.6	-30.2				
	P5	15.4	-19.7				
	P6	22.1	-38.6				
	P7	36.9	-40.9				
	P8	33.7	-26.1				
	P9	15.2	-21.4				
	P10	28.1	-10.6				
	P11	41.8	-28.1				
	P12	29.2	-26.9				
	P13	65.6	-17.6				
	P14	17.9	-11.2				
	P15	2.7	-1.2				
	P16	23.0	-14.9				
変位計 (m)	DVM1	0.0578	-0.0493				
	DVM2	0.0090	-0.2533				
	DVM3	0.0245	-0.0613				
	DVG4	0.1068	-0.0273				
	DVG5	0.0348	-0.0078				
	DVG6	0.1510	-0.0010				

表 3.3.2 最大・最小加速度応答倍率一覧表 (Case06-00)

計測器		Case06-00					
		最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
加速度計	A0	1.11	1.03				
	A1	1.00	1.00				
	A2	1.60	1.69				
	A3	1.89	2.55				
	A4	1.70	1.61				
	A5	1.50	1.66				
	A6	2.57	2.07				
	A7	2.80	3.09				
	A8	1.70	2.00				
	A9	2.75	2.72				
	A10	3.05	5.78				
	A11	1.95	2.57				
	A12	2.78	2.87				
	A13	3.42	3.63				
	A14	2.14	3.41				
	A15	3.35	4.39				
	A16	3.18	3.86				
	A17	1.34	1.97				
	A18	2.31	3.52				
	A19	3.28	3.10				
A20	1.94	1.77					

表 3.3.3 最大過剰間隙水圧比一覧表 (Case06-00)

計測器		推定有効上載圧 (kN/m ²)	最大過剰間隙水圧		最大過剰間隙水圧比	
			Case06-00 (kN/m ²)		Case06-00	
間隙水圧計	P1	57.00	14.37		0.25	
	P2	39.20	23.25		0.59	
	P3	39.70	27.70		0.70	
	P4	42.20	24.57		0.58	
	P5	26.80	15.40		0.57	
	P6	27.40	22.10		0.81	
	P7	29.80	36.93		1.24	
	P8	19.40	33.68		1.74	
	P9	20.00	15.16		0.76	
	P10	22.40	28.05		1.25	
	P11	11.60	41.78		3.60	
	P12	12.00	29.20		2.43	
	P13	13.40	65.60		4.90	
	P14	5.80	17.85		3.08	
	P15	6.00	2.67		0.44	
	P16	6.70	22.98		3.43	

表 3.3.4 加振直後の過剰間隙水圧比一覧表 (Case06-00)

計測器		推定有効上載圧 (kN/m ²)	加振直後の過剰間隙水圧		加振直後の過剰間隙水圧比	
			Case06-00 (kN/m ²)		Case06-00	
間隙水圧計	P1	57.00	5.22		0.09	
	P2	39.20	15.20		0.39	
	P3	39.70	23.15		0.58	
	P4	42.20	13.26		0.31	
	P5	26.80	7.96		0.30	
	P6	27.40	17.76		0.65	
	P7	29.80	20.87		0.70	
	P8	19.40	-0.06		0.00	
	P9	20.00	3.07		0.15	
	P10	22.40	15.62		0.70	
	P11	11.60	0.74		0.06	
	P12	12.00	0.93		0.08	
	P13	13.40	5.24		0.39	
	P14	5.80	1.10		0.19	
	P15	6.00	0.91		0.15	
	P16	6.70	6.08		0.91	

表 3.3.5 測定値の最大・最小値一覧表 (Case07-00, Case08-00)

計測器		Case07-00		Case08-00		最大値	最小値
		最大値	最小値	最大値	最小値		
加速度計 (gal)	A0	558.0	-592.2	566.7	-611.4		
	A1	583.85	-527.72	580.08	-640.04		
	A2	642.69	-590.43	593.30	-879.50		
	A3	460.55	-579.53	594.30	-572.57		
	A4	617.17	-667.47	797.49	-674.86		
	A5	987.87	-966.15	1105.19	-929.27		
	A6	2011.64	-2557.01	2455.97	-2497.43		
	A7	580.37	-642.14	643.32	-679.77		
	A8	544.81	-519.66	643.11	-666.30		
	A9	556.42	-581.64	690.75	-671.59		
	A10	640.84	-828.42	1019.26	-1051.17		
	A11	909.32	-777.54	3149.86	-3425.85		
	A12	531.66	-520.56	549.66	-628.76		
	A13	10744.57	-259.41	618.12	-609.92		
	A14	1532.91	-509.53	728.56	-675.45		
	A15	756.94	-840.72	1198.39	-1065.82		
	A16	1648.34	-1558.87	3336.51	-3998.36		
	A17			1450.64	-1258.75		
	A18			1170.73	-1165.82		
	A19			1614.33	-1367.78		
A20			1310.6	-1400.7			
間隙水圧計 (kN/m ²)	P1	25.5	-10.9	24.6	-16.3		
	P2	37.1	-2.1	47.9	-26.8		
	P3	50.8	-44.0	34.2	-23.2		
	P4	49.2	-35.6	40.3	-18.1		
	P5	37.6	-45.8	34.3	-15.6		
	P6	12.7	-13.9	8.3	-11.8		
	P7	40.1	-33.2	42.6	-49.7		
	P8	37.1	-14.2	29.6	-27.9		
	P9	38.1	-0.3	29.2	-27.8		
	P10	27.6	-0.3	20.9	-27.8		
	P11	13.2	-5.3	5.2	-16.3		
	P12	45.3	-35.3	40.1	-43.2		
	P13	43.8	-32.3	40.6	-42.1		
	P14	44.8	-17.2	40.2	-39.9		
	P15	33.0	-6.7	25.3	-28.2		
	P16	22.6	-18.9	7.0	-17.3		
変位計 (m)	DV1	0.0056	-0.0579	0.0370	-0.0559		
	DV2	0.3171	-0.1984	0.0011	-0.0973		
	DV3	0.0000	-0.1608	0.0257	-0.0265		
	DV4	0.6819	-0.0242	0.7220	-0.0332		
	DV5	0.6723	-0.0008	0.2610	-0.0005		
	DV6	0.5666	-0.0331	0.1984	-0.0295		
	DV7	0.0015	-0.0131	0.0038	-0.0126		

表 3.3.6 最大・最小加速度応答倍率一覧表 (Case07-00, Case08-00)

計測器		Case07-00		Case08-00		最大値	最小値
		最大値	最小値	最大値	最小値		
加速度計	A0	0.96	1.12	0.98	0.96		
	A1	1.00	1.00	1.00	1.00		
	A2	1.10	1.12	1.02	1.37		
	A3	0.79	1.10	1.02	0.89		
	A4	1.06	1.26	1.37	1.05		
	A5	1.69	1.83	1.91	1.45		
	A6	3.45	4.85	4.23	3.90		
	A7	0.99	1.22	1.11	1.06		
	A8	0.93	0.98	1.11	1.04		
	A9	0.95	1.10	1.19	1.05		
	A10	1.10	1.57	1.76	1.64		
	A11	1.56	1.47	5.43	5.35		
	A12	0.91	0.99	0.95	0.98		
	A13	18.40	0.49	1.07	0.95		
	A14	2.63	0.97	1.26	1.06		
	A15	1.30	1.59	2.07	1.67		
	A16	2.82	2.95	5.75	6.25		
	A17	0.00	0.00	2.50	1.97		
	A18	0.00	0.00	2.02	1.82		
	A19	0.00	0.00	2.78	2.14		
A20	0.00	0.00	2.26	2.19			

表 3.3.7 最大過剰間隙水圧比一覧表 (Case07-00)

計測器		推定 有効上載圧 (kN/m ²)	最大過剰間隙水圧		最大過剰間隙水圧比	
			Case07-00 (kN/m ²)		Case07-00	
間隙水圧計	P1	47.95	25.53		0.53	
	P2	41.54	37.09		0.89	
	P3	32.50	50.75		1.56	
	P4	26.48	49.18		1.86	
	P5	13.87	37.56		2.71	
	P6	2.52	12.70		5.03	
	P7	34.39	40.05		1.16	
	P8	25.35	37.06		1.46	
	P9	19.33	38.14		1.97	
	P10	10.12	27.56		2.72	
	P11	1.84	13.23		7.19	
	P12	32.07	45.28		1.41	
	P13	23.04	43.81		1.90	
	P14	17.01	44.75		2.63	
	P15	8.91	33.00		3.70	
	P16	1.62	22.60		13.95	

表 3.3.8 加振直後の過剰間隙水圧比一覧表 (Case07-00)

計測器		推定 有効上載圧 (kN/m ²)	加振直後の過剰間隙水圧		加振直後の過剰間隙水圧比	
			Case07-00 (kN/m ²)		Case07-00	
間隙水圧計	P1	47.95	7.93		0.17	
	P2	41.54	11.34		0.27	
	P3	32.50	23.51		0.72	
	P4	26.48	22.93		0.87	
	P5	13.87	20.97		1.51	
	P6	2.52	7.22		2.86	
	P7	34.39	18.09		0.53	
	P8	25.35	22.81		0.90	
	P9	19.33	23.11		1.20	
	P10	10.12	15.20		1.50	
	P11	1.84	8.05		4.37	
	P12	32.07	18.85		0.59	
	P13	23.04	25.72		1.12	
	P14	17.01	27.13		1.60	
	P15	8.91	13.08		1.47	
	P16	1.62	7.08		4.37	

表 3.3.9 最大過剰間隙水圧比一覧表 (Case08-00)

計測器		推定 有効上載圧 (kN/m ²)	最大過剰間隙水圧		最大過剰間隙水圧比	
			Case08-00 (kN/m ²)		Case08-00	
間隙水圧計	P1	47.35	24.60		0.52	
	P2	31.42	47.92		1.52	
	P3	22.54	34.16		1.52	
	P4	16.62	40.31		2.43	
	P5	8.70	34.35		3.95	
	P6	1.58	8.33		5.26	
	P7	34.02	42.59		1.25	
	P8	25.14	29.57		1.18	
	P9	19.21	29.23		1.52	
	P10	10.06	20.89		2.08	
	P11	1.83	5.24		2.86	
	P12	39.72	40.14		1.01	
	P13	30.83	40.61		1.32	
	P14	24.91	40.17		1.61	
	P15	13.05	25.33		1.94	
	P16	2.37	6.96		2.93	

表 3.3.10 加振直後の過剰間隙水圧比一覧表 (Case08-00)

計測器		推定 有効上載圧 (kN/m ²)	加振直後の過剰間隙水圧		加振直後の過剰間隙水圧比	
			Case08-00 (kN/m ²)		Case08-00	
間隙水圧計	P1	47.35	15.81		0.33	
	P2	31.42	21.47		0.68	
	P3	22.54	25.53		1.13	
	P4	16.62	21.77		1.31	
	P5	8.70	14.77		1.70	
	P6	1.58	2.67		1.69	
	P7	34.02	15.55		0.46	
	P8	25.14	11.82		0.47	
	P9	19.21	6.53		0.34	
	P10	10.06	4.64		0.46	
	P11	1.83	1.92		1.05	
	P12	39.72	13.98		0.35	
	P13	30.83	7.97		0.26	
	P14	24.91	2.77		0.11	
	P15	13.05	2.23		0.17	
	P16	2.37	1.40		0.59	

3.4. 実験結果の考察

3.4.1. 各ケースの状況

(1) Case 06-00

ガラスリサイクル材の粒径が埋戻し材の地震時液状化による埋設管浮上り対策効果へ与える影響について調べるため、Case06-00では、ガラスリサイクル材1（粒径2.0~4.75mm）、ガラスリサイクル材2（粒径0.85~4.75mm）、ガラスリサイクル材3（粒径0~4.75mm）の3種類の粒径の異なるガラスリサイクル材について比較を行った。

図3.4.1に埋設管の浮上り量の時刻歴を示す。Case06-00では、粒径の細かいガラスリサイクル材3で若干の浮上がりが見られたが、いずれの埋戻し部についても埋戻し部の液状化に伴う埋設管の大きな浮上りが見られなかった。図3.4.2に埋設管模型の上側の埋戻し部における加振時の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。粒径の細かいガラスリサイクル材3では加振後の過剰間隙水圧の上昇が見られるが、ガラスリサイクル材1およびガラスリサイクル材2では過剰間隙水圧の上昇が見られなかった。これらのことから、ガラスリサイクル材は透水性が高く、過剰間隙水圧が上昇しにくいいため、埋設管の浮上り抑制効果があるものと考えられる。

ただし、Case06-00では模型の縮尺が1/25と小さく、実験に使用したガラスリサイクル材の最大粒径4.75mmに対し、埋設管模型と周辺地盤との隙間が20mm程度しかないため、粒径効果により埋設管の浮上りが抑制された可能性も考えられる。

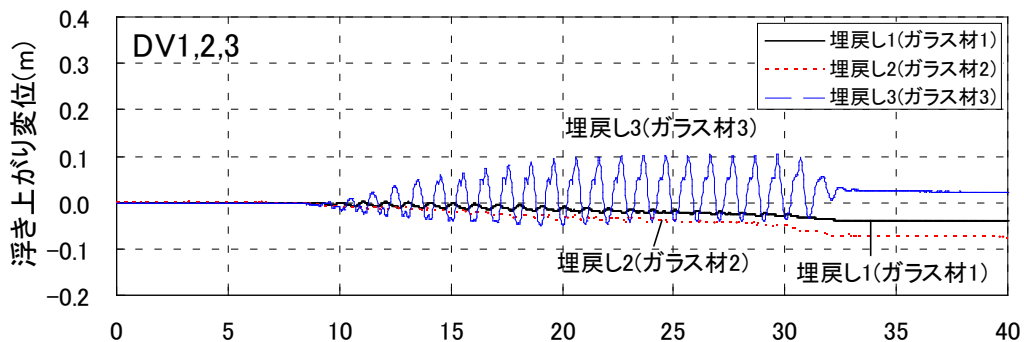


図 3.4.1 Case06-00 埋設管浮上り量の時刻歴

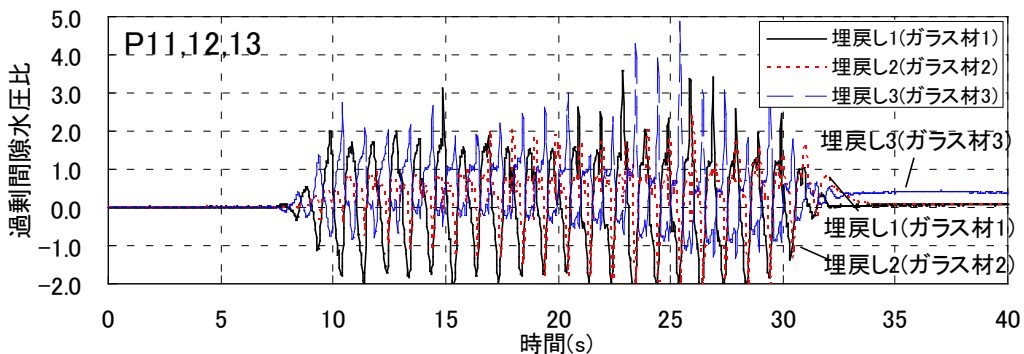


図 3.4.2 Case06-00 過剰間隙水圧比の時刻歴

(2) Case07-00

Case07-00 では、埋戻し材の土粒子の違いが埋戻し材の地震時液状化による埋設管浮上り対策効果へ与える影響について調べるため、豊浦砂、ガラスリサイクル材3' (粒径 0.85mm以下)、ファインサンドの3種類の異なる埋戻し材を用いて実験を行ったものである。豊浦砂とガラスリサイクル材4については、粒径、透水係数がほぼ同程度となっており、ファインサンドは豊浦砂やガラスリサイクル材と比較して粒径が小さく、透水係数も低い材料である。

図 3.4.3 に埋設管の浮上り量の時刻歴を示す。豊浦砂による埋戻しでは埋設管の大きな浮上りが生じていなかったが、ガラスリサイクル材3'とファインサンドによる埋戻しでは埋設管の大きな浮上りが生じていた。図 3.4.4 に埋設管模型の上側の埋戻し材中における加振時の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。いずれの埋戻し材についても過剰間隙水圧の上昇が見られ、ガラスリサイクル材3'とファインサンドによる埋戻しでは過剰間隙水圧の消散が遅かったが、豊浦砂による埋戻しでは他の材料による埋戻しと比較して過剰間隙水圧の消散が早かった。

豊浦砂による埋戻しでは、圧密過程において大きな沈下が生じており加振前における密度が高くなっていたこと、見かけの透水係数が他の埋戻し材と比較して高かったこと等が、埋設管の浮上りが抑制された要因として考えられる。ファインサンドによる埋戻しでは、粒径が小さく透水性が低かったため、埋設管の大きな浮上りが生じたものと考えられる。また、ガラスリサイクル材3'による埋戻しでは、Case06-00と比較して締固め度が83%程度と低かったこと、Case06-00と比較して細かい粒径の材料を使用したために粒径効果の影響が軽減されたこと等が、埋設管の浮上りが大きくなった要因として考えられる。

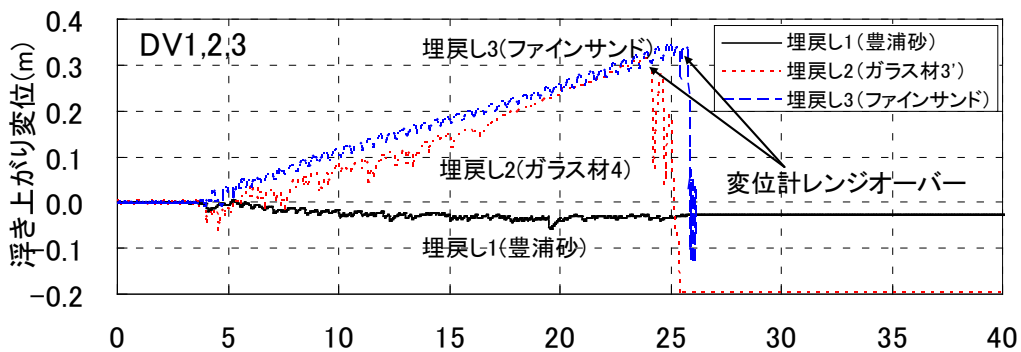


図 3.4.3 Case07-00 埋設管浮上り量の時刻歴

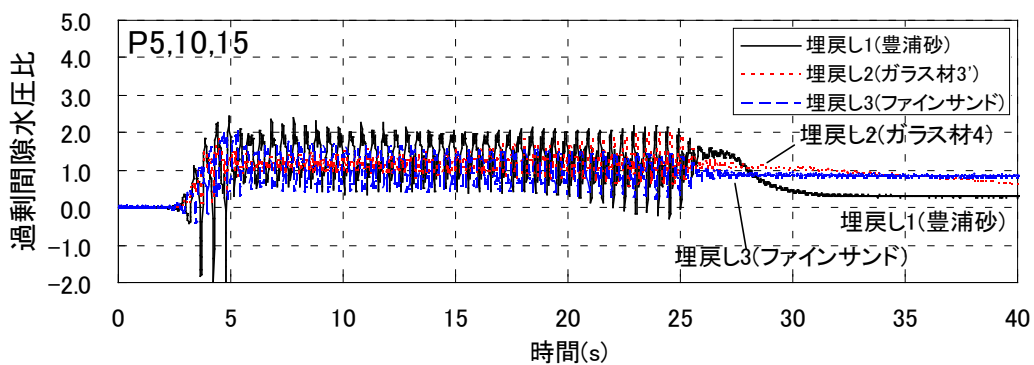


図 3.4.4 Case07-00 過剰間隙水圧比の時刻歴

(3) Case08-00

Case07-00 におけるガラスリサイクル材3' による埋戻し箇所では、埋戻し部の液状化による埋設管の大きな浮上りが見られたが、これは粒径効果の低減と密度の2つの要因が影響した可能性も考えられた。そこで、Case08-00 では、Case06-00 で用いたガラスリサイクル材の粒径の1/5に調整したガラスリサイクル材1'、2'、3' を用いて、締固め度をCase06-00 と同程度の90%として埋戻し地盤を作製した。

図3.4.5に埋設管の浮上り量の時刻歴を示す。ガラスリサイクル材3' による埋戻しでは、埋設管のわずかな浮上りが生じていたものの、ガラスリサイクル材1' およびガラスリサイクル材2' による埋戻しでは、埋設管の浮上りは生じていなかった。図3.4.6に埋設管模型の上側の埋戻し材中における加振時の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。ガラスリサイクル材1' およびガラスリサイクル材2' による埋戻しでは、加振直後に過剰間隙水圧が消散していたが、ガラスリサイクル材3' による埋戻しでは過剰間隙水圧の消散がやや遅れていた。

また、ガラスリサイクル材6およびガラスリサイクル材7による埋戻しと異なり、ガラスリサイクル材5で埋設管にわずかな浮上りが生じた原因として、ガラスリサイクル材5は粒径が細かいため、透水係数が低く、過剰間隙水圧が消散しにくかったことが考えられる。

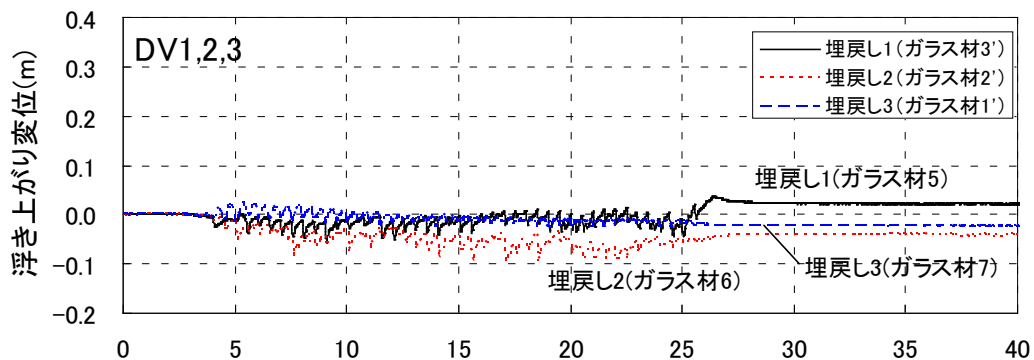


図 3.4.5 Case08-00 埋設管浮上り量の時刻歴

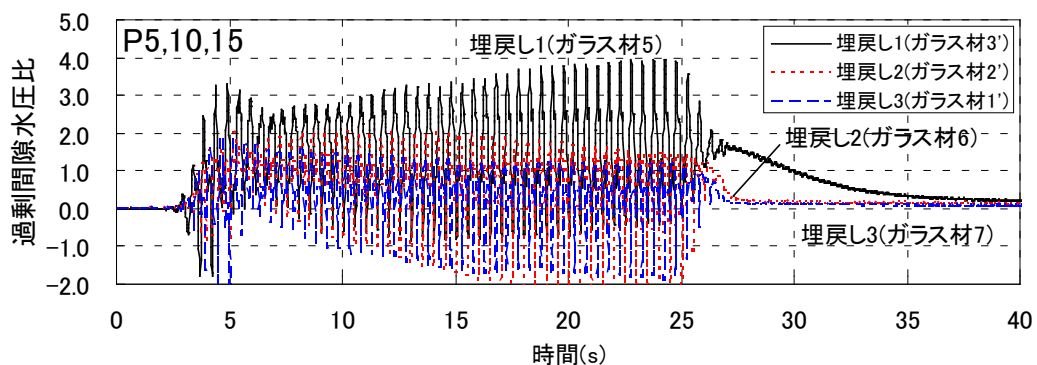


図 3.4.6 Case08-00 過剰間隙水圧比の時刻歴

3.4.2. 粒径の大きさが遠心模型実験の結果に与える影響

Case06-00 では埋戻し部の液状化による埋設管の浮上りが見られなかったが、管渠模型と周辺地盤の隙間は 20mm程度しかなく、用いたガラス材の最大粒径(4.75mm)を考えると、粒径効果により管路模型の浮き上がりが抑制された可能性も考えられる。このため、Case07-00 およびCase08-00 では、粒径効果の軽減のため、模型の縮尺を 1/15 とするとともに、ガラス材の最大粒径をCase06-00 の 1/5 に設定し、これに伴い透水係数が 1/5 程度になると仮定し、見かけの透水係数が実物換算の 1/15 となるように間隙流体の粘度を調整した。従って、Case06-00 とCase08-00 は、加振周波数に違いがあるものの、埋戻し部の締固め度及び透水係数については等価な条件に設定している。すなわちCase06-00 ガラスリサイクル材 1, 2, 3 はCase08-00 のガラスリサイクル材 1', 2', 3'のケースに対応している。

図 3.4.7, 図 3.4.8 にCase06-00, Case08-00 の埋設管の浮上がり量と埋戻し部の沈下量を比較した図を示す。Case06-00, Case08-00 とともに材料の平均粒径が小さいほど浮き上がり量, 埋戻し部の沈下量とも大きくなる傾向がみられ、その大きさもほぼ整合している。このため、今回の実験では粒径効果による管路模型の浮き上がり抑制の有無は明確には確認できなかった。ただし、両ケースの締固め度は 90%程度で浮上がり量は最大でも 2cm程度（実換算）であり、埋戻し部の締固め度が高いためもともと浮き上がりが生じる条件では無かった可能性もある。今後より大きな浮き上がりが生じ得る条件での検討が必要である。

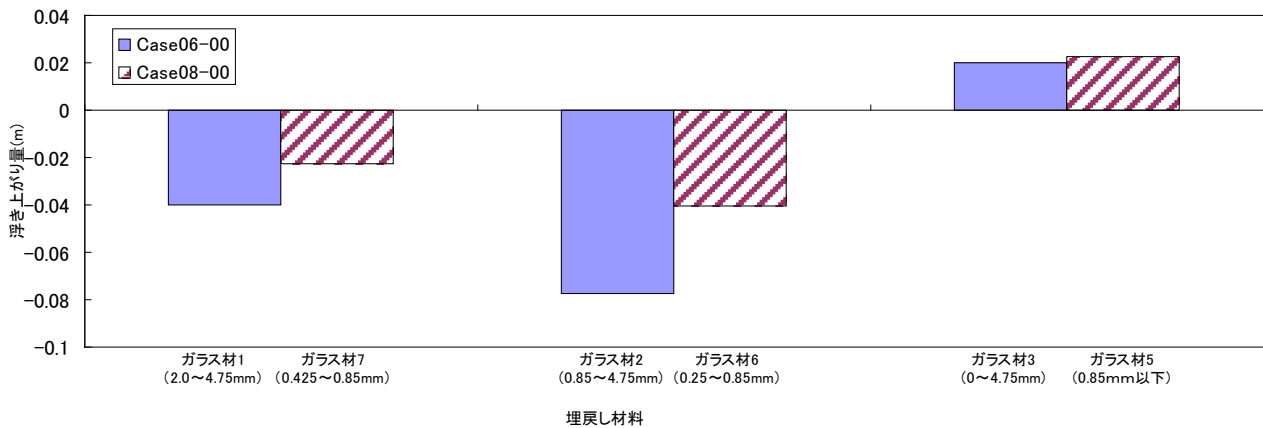


図 3.4.7 Case06-00, Case08-00 の最終浮き上がり量の比較（重力場換算）

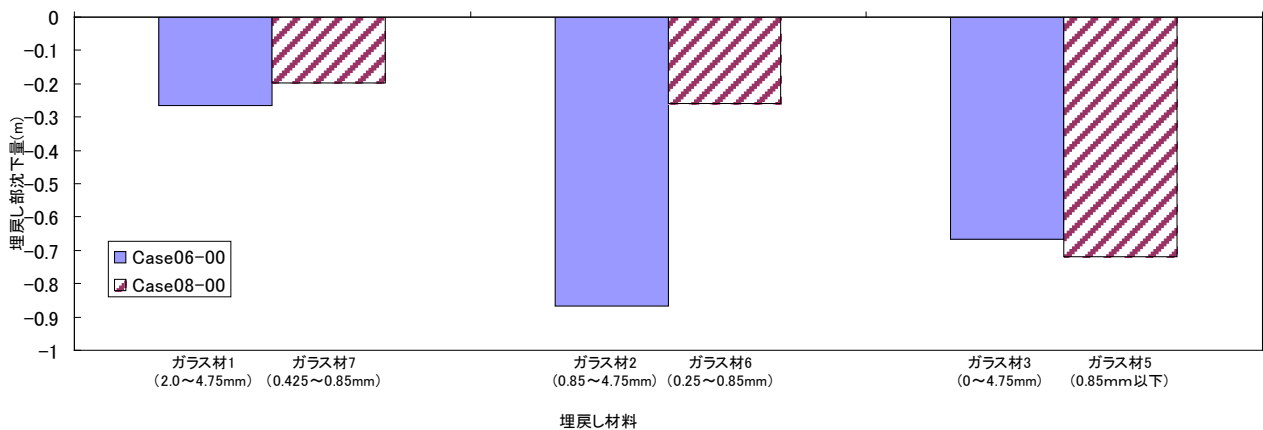


図 3.4.8 Case06-00, Case08-00 の埋戻し部地表面沈下量の比較（重力場換算）

3.4.3. 締固め度が埋設管の浮上り抑制効果に与える影響

Case07-00 のガラスリサイクル材 3' による埋戻しと Case08-00 のガラスリサイクル材 3' による埋戻しは、同一のガラスリサイクル材を使用しており、締固め度のみが異なるケースである。締固め度が 80% 程度である Case07-00 のガラスリサイクル材 3' による埋戻しでは、埋設管に 0.28m 程度の大きな浮上りが生じたのに対し、締固め度が 90% 程度である Case08-00 のガラスリサイクル材 3' では埋設管の大きな浮上りは生じていなかった。図 3.3.4, 図 3.3.6 に示した過剰間隙水圧の分布図より、いずれのケースも加振終了直後の過剰間隙水圧は有効上載圧に達しており、埋戻し土は液状化している。一方、応答加速度の最大値は締固め度が 90% 程度のケースで地表面付近に大きな増幅が見られる。これらは、密度の大きいケースでは、サイクリックモビリティにより、地盤の剛性が回復し、加速度が伝播するためである。図 3.4.4, 図 3.4.6 に示した過剰間隙水圧比の時刻歴から、締固め度 90% のケースでは過剰間隙水圧の波形がスパイク状になっている。

このようなことから、締固め度 90% 程度のケースでは埋戻し土の過剰間隙水圧が上昇したとしても、繰り返し载荷に伴う変形抵抗が高く、埋設管の浮上がりは低減したものと考えられる。したがって、平均粒径が小さく比較的透水性が低いガラスリサイクル材 3' であっても、締固め度が 90% 程度以上確保されていれば、埋戻し部の液状化による埋設管の浮上り被害を抑制できるものと考えられる。

3.5. まとめ

埋設管の埋戻し材としてガラスリサイクル材を用いた動的遠心模型実験の結果、以下の知見を得た。

- ① 粒径 0~4.75mm, 粒径 0.85mm 以下に粒土調整したガラス材およびファインサンドの平均粒径の小さい材料の場合、透水係数が低く、過剰間隙水圧の消散が遅いため、締固め度が低い場合には埋設管の浮上りが生じやすい。
- ② 平均粒径の小さい材料の場合であっても、十分な締固めを行うことにより、埋設管の浮上りを抑制することができた。
- ③ 粒径 2.0~4.75mm, 粒径 0.85~4.75mm に粒土調整したガラスリサイクル材は、透水性が高く、過剰間隙水圧が上昇しにくいため、埋設管の浮上り抑制効果があった。
- ④ 平均粒径の小さいガラスリサイクル材料であっても、締固め度が 90% 程度確保されていれば、埋設管の浮上りを抑制することができる。
- ⑤ 模型実験の結果に及ぼす粒子寸法の影響や、透水係数の影響等については今後さらなる検討が必要である。

4. 結論

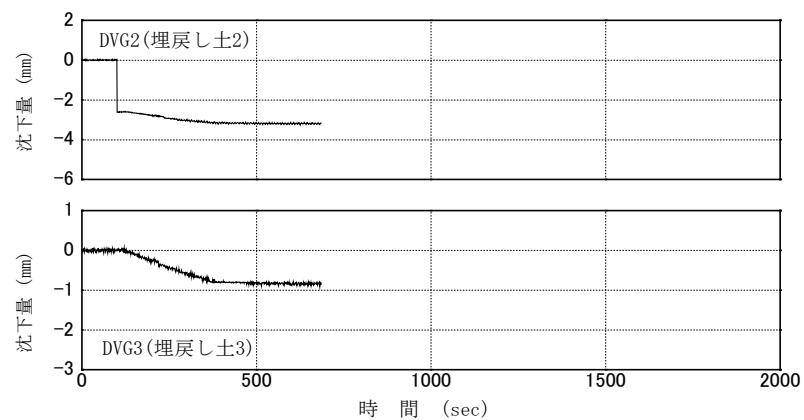
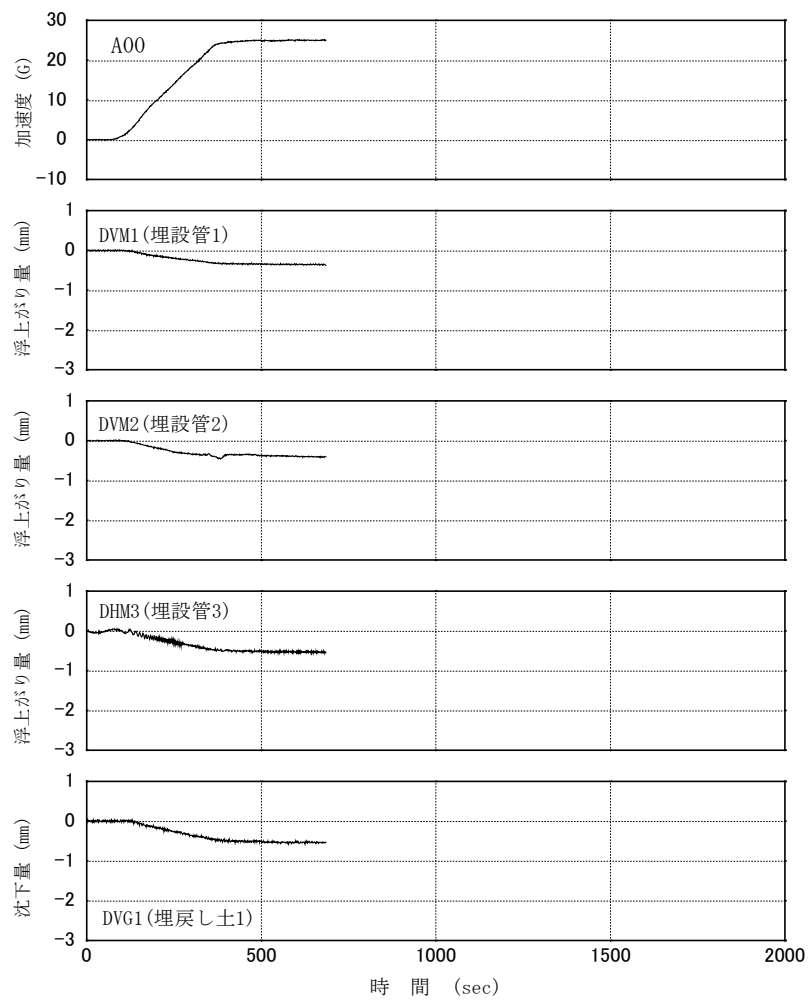
本研究では、ガラスリサイクル材による下水道管路施設の埋戻しに関する動的遠心模型実験を行い、ガラスリサイクル材の液状化対策としての有効性について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① 粒径 2.0~4.75mm, 粒径 0.85~4.75mmに粒土調整したガラスリサイクル材は、透水性が高く、過剰間隙水圧が上昇しにくいいため、埋設管の浮上り抑制効果があった。
- ② 粒径 0~4.75mm, 粒径 0.85mm以下に粒土調整したガラス材およびファインサンドの平均粒径の小さい材料の場合、透水係数が低く、過剰間隙水圧の消散が遅いため、締固め度が低い場合には埋設管の浮上りが生じやすい。
- ③ 平均粒径の小さいガラスリサイクル材料であっても、締固め度が 90%程度確保されていれば、埋設管の浮上りを抑制することができる。
- ④ 豊浦砂による埋戻しでは、加振終了後速やかに過剰間隙水圧が消散していることから、他の埋戻し条件と比較して見かけの透水性が高いため管路模型の浮き上がりが抑制されたものと考えられる。
- ⑤ 液状化による浮上りに及ぼす粒子寸法の影響や、透水係数の影響等については今後さらなる検討が必要である。

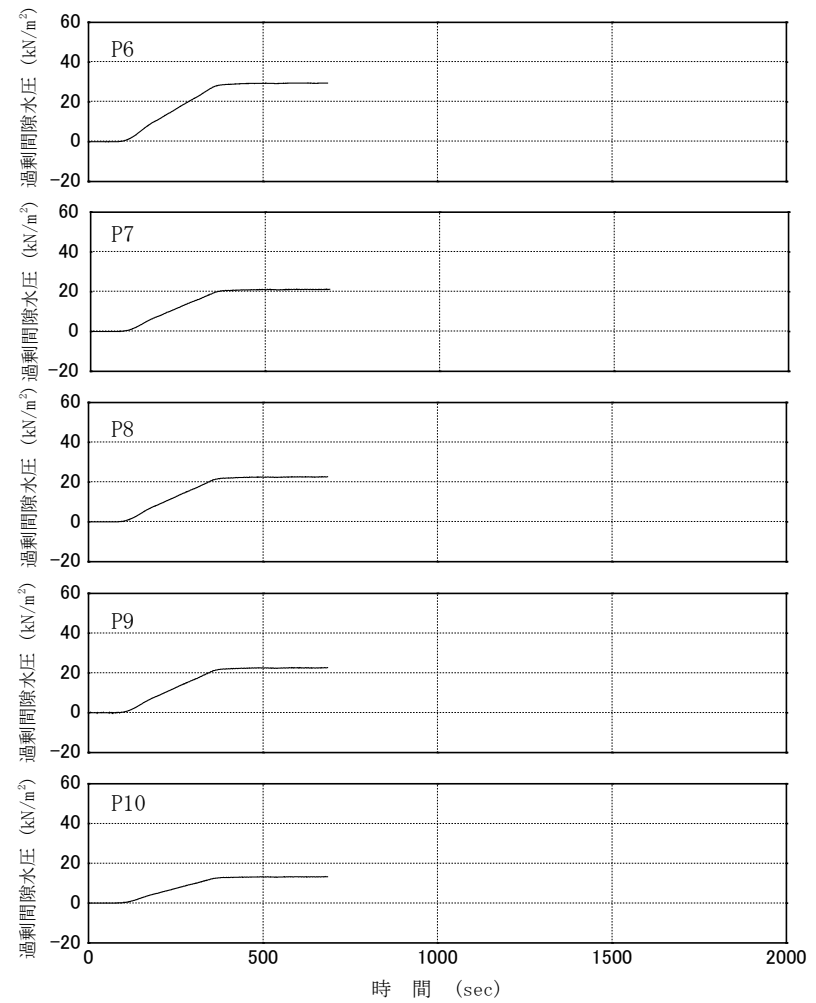
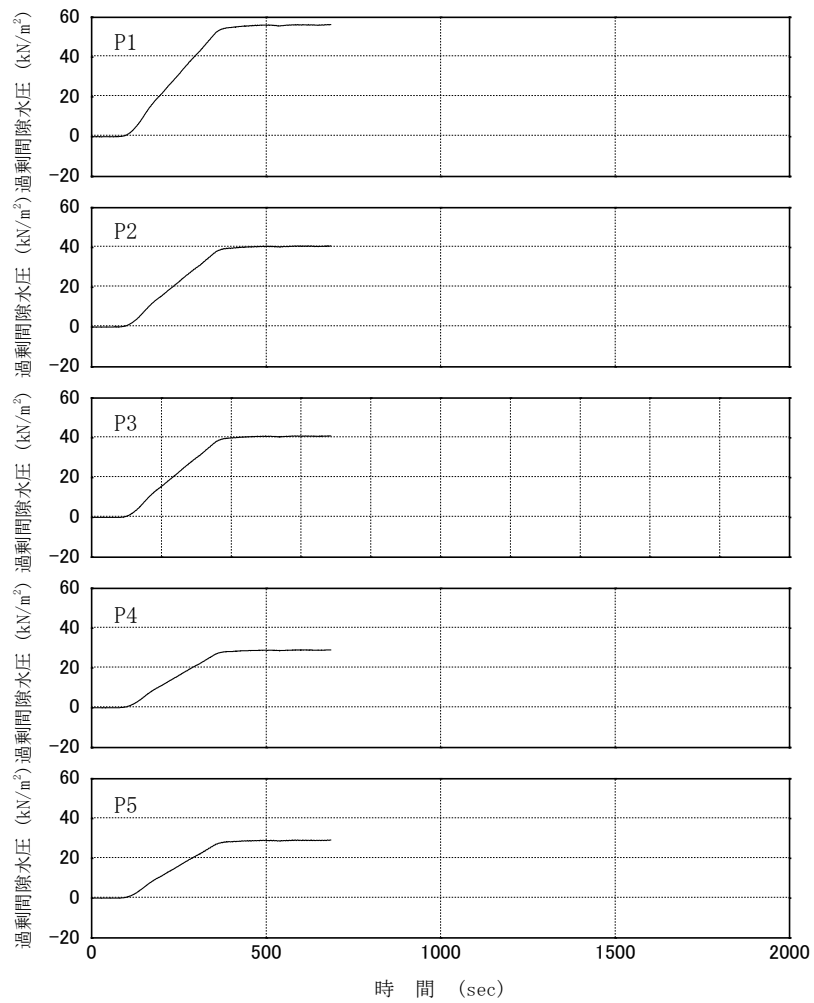
謝辞

本研究に用いたガラスリサイクル材料はガラス・リソーシング（株）よりご提供いただいたものである。また、ガラスリサイクル材料の実験については、東京大学 古関潤一教授からご助言をいただくとともに、東京大学学生 三上大道君にガラス材の室内試験を行っていただいた。ここに記して感謝の意を表する。

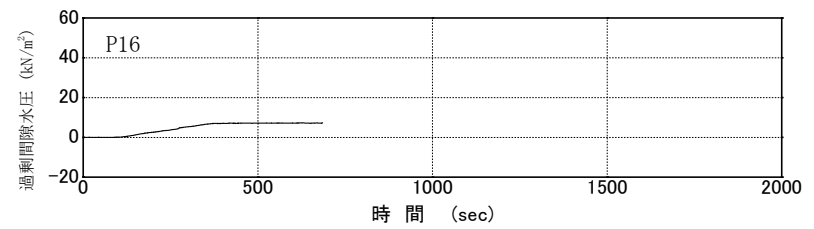
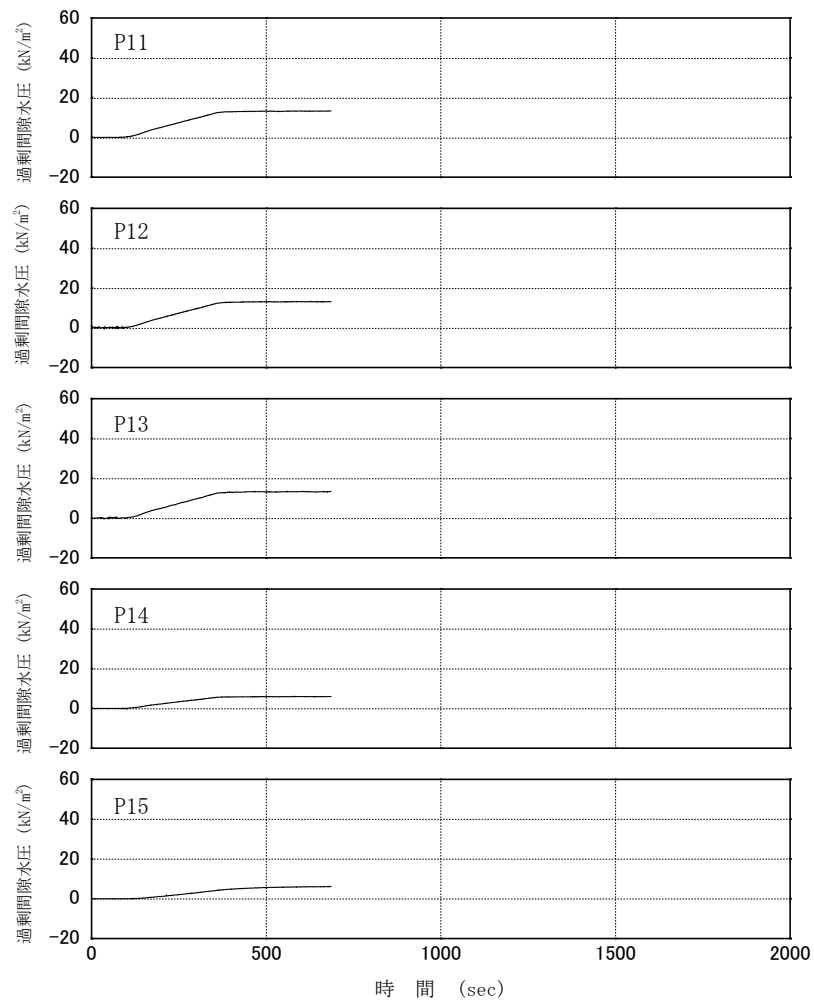
付属資料 動的遠心模型実験の時刻歴図



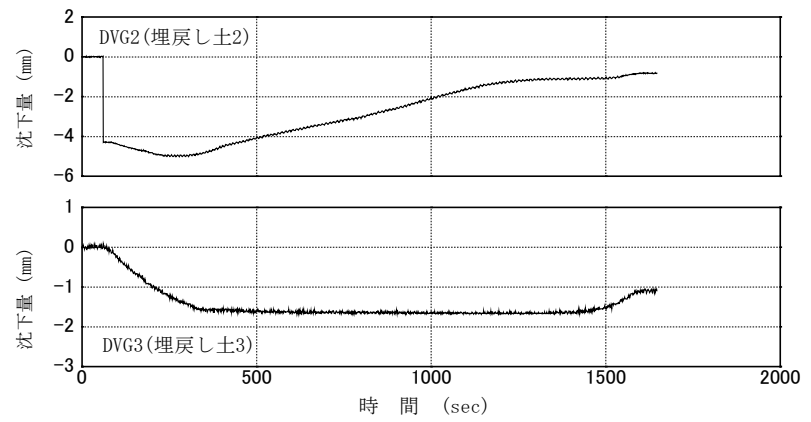
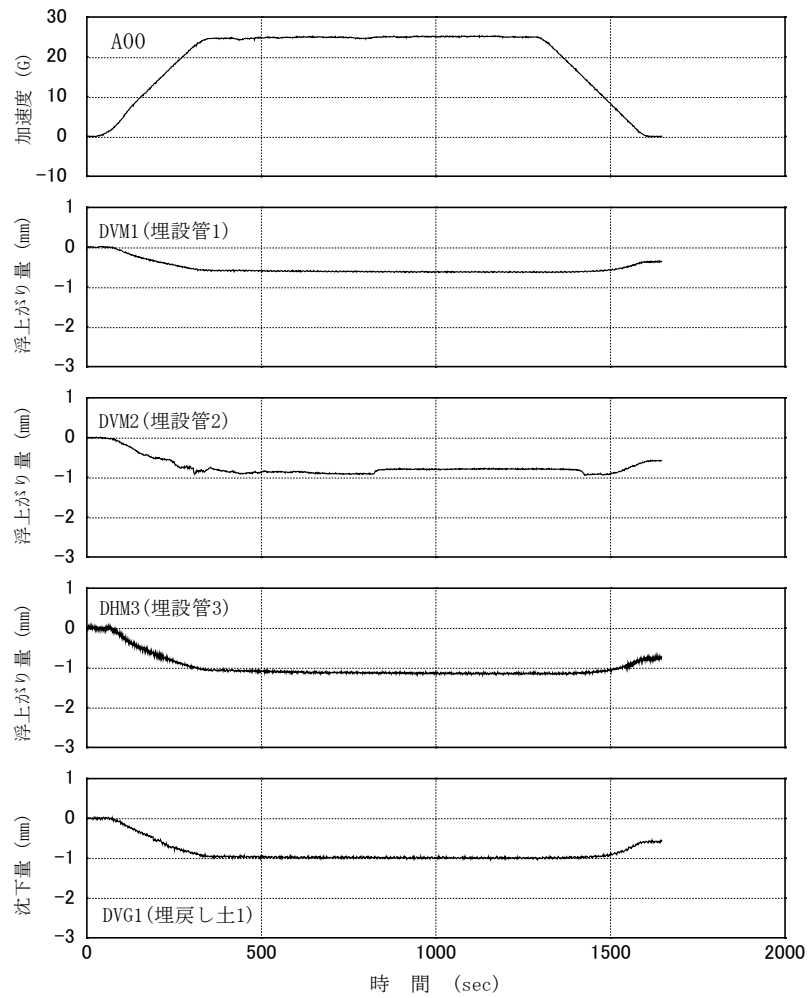
付図 1.1 (a) Case06-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その 1)



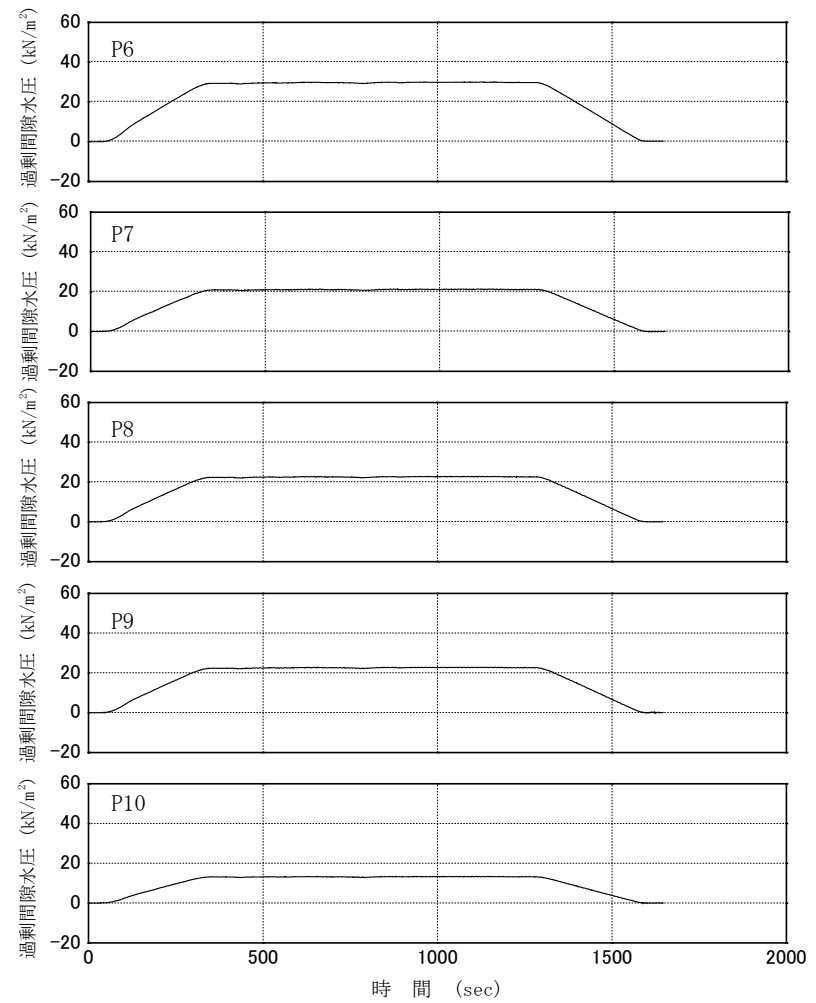
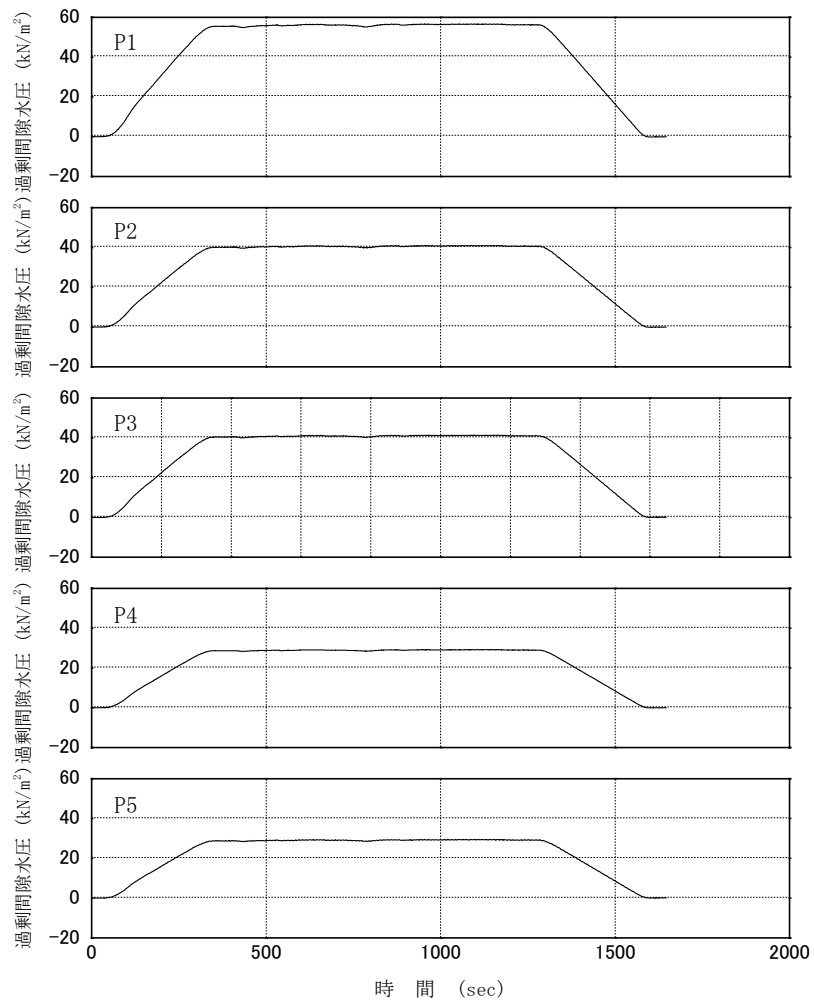
付図 1.1 (b) Case06-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その 2)



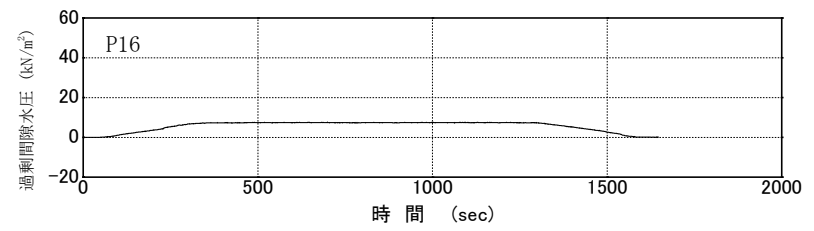
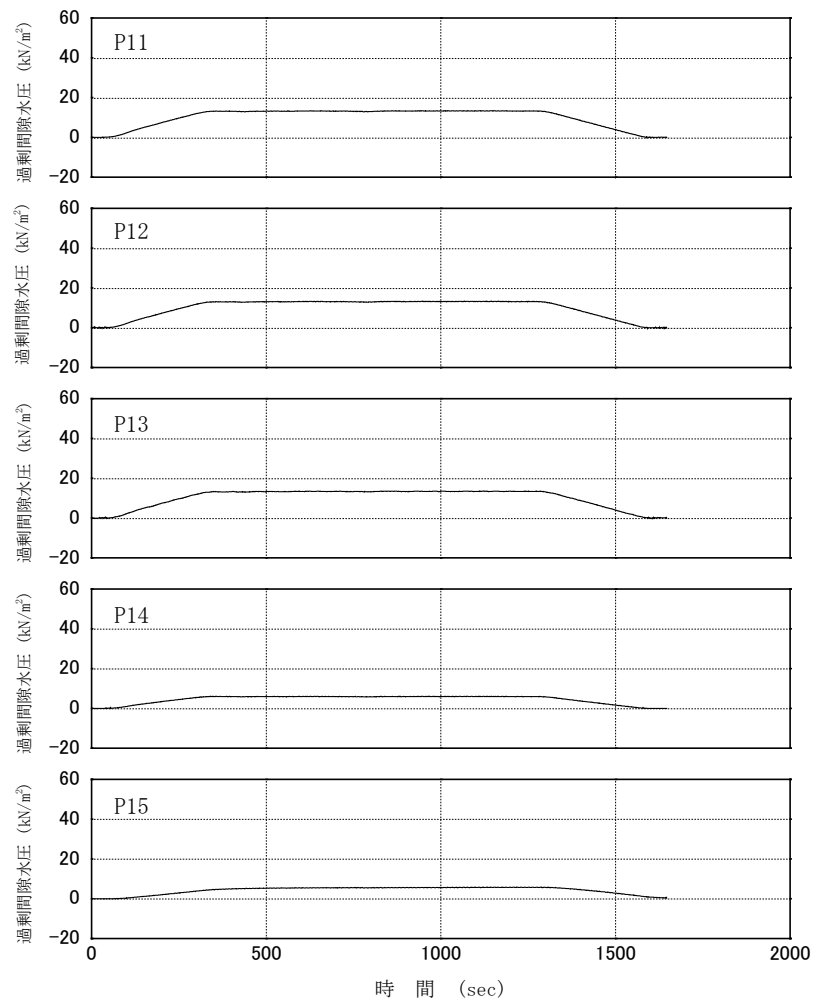
付図 1.1 (c) Case06-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その3)



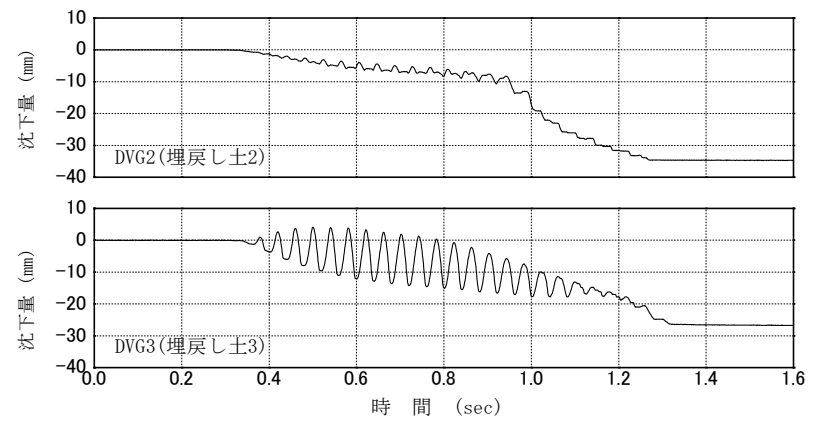
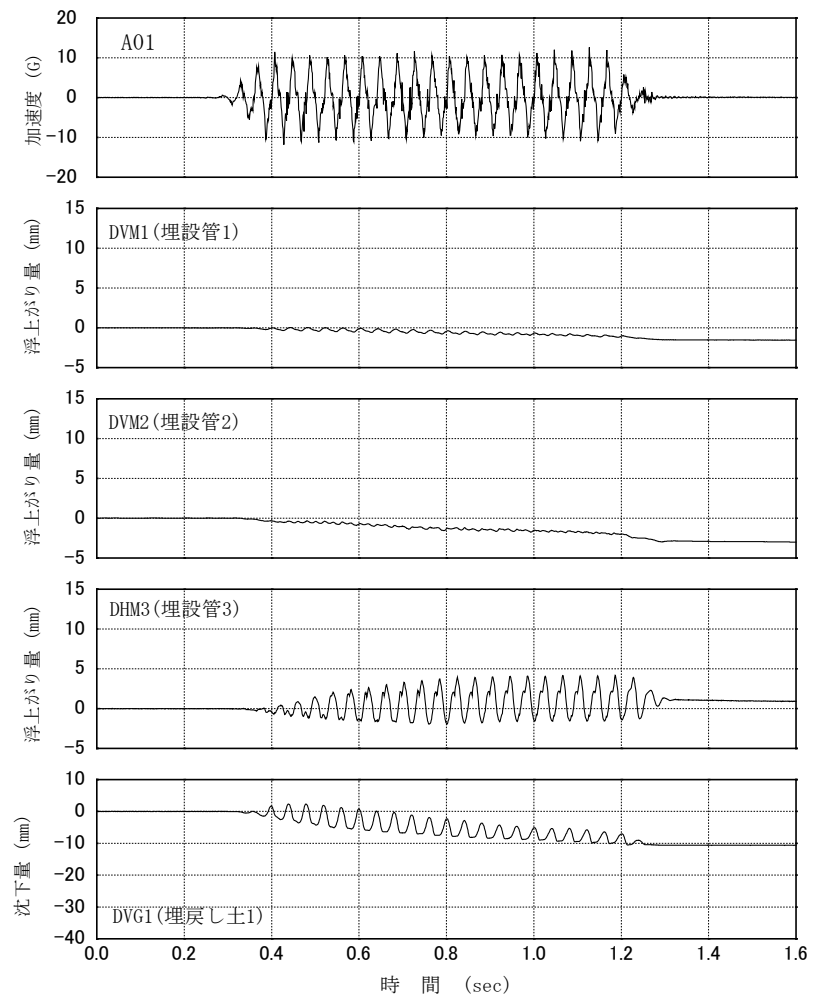
付図 1.2 (a) Case06-00 圧密過程の時刻歴波形図 (その 1)



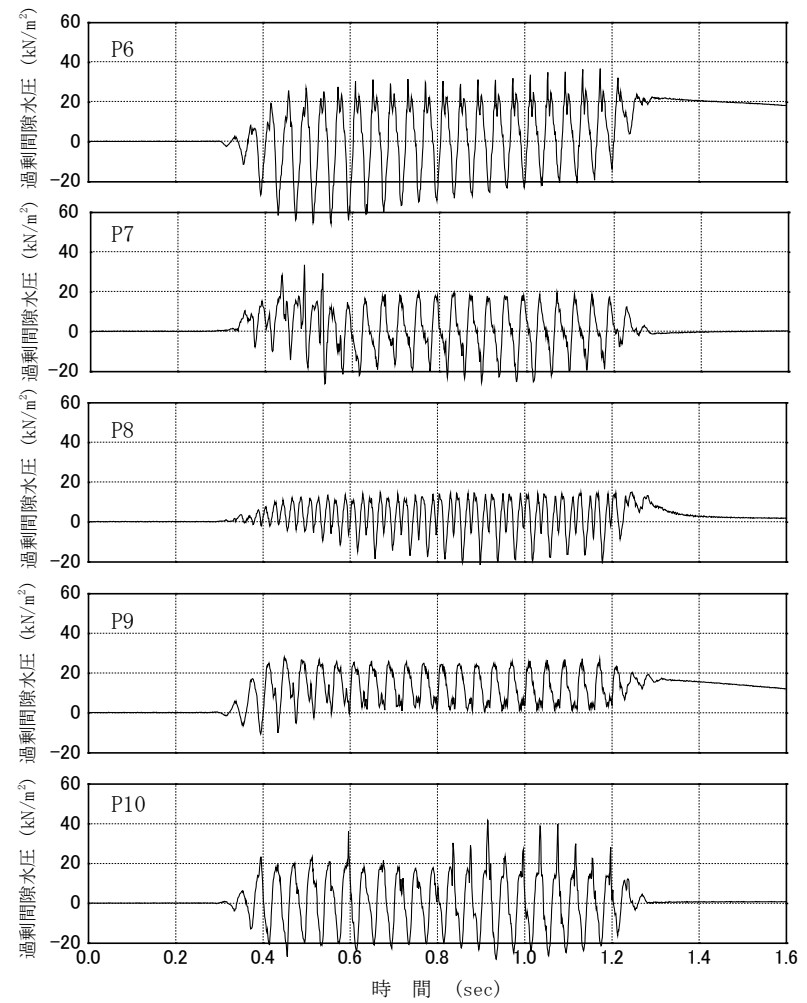
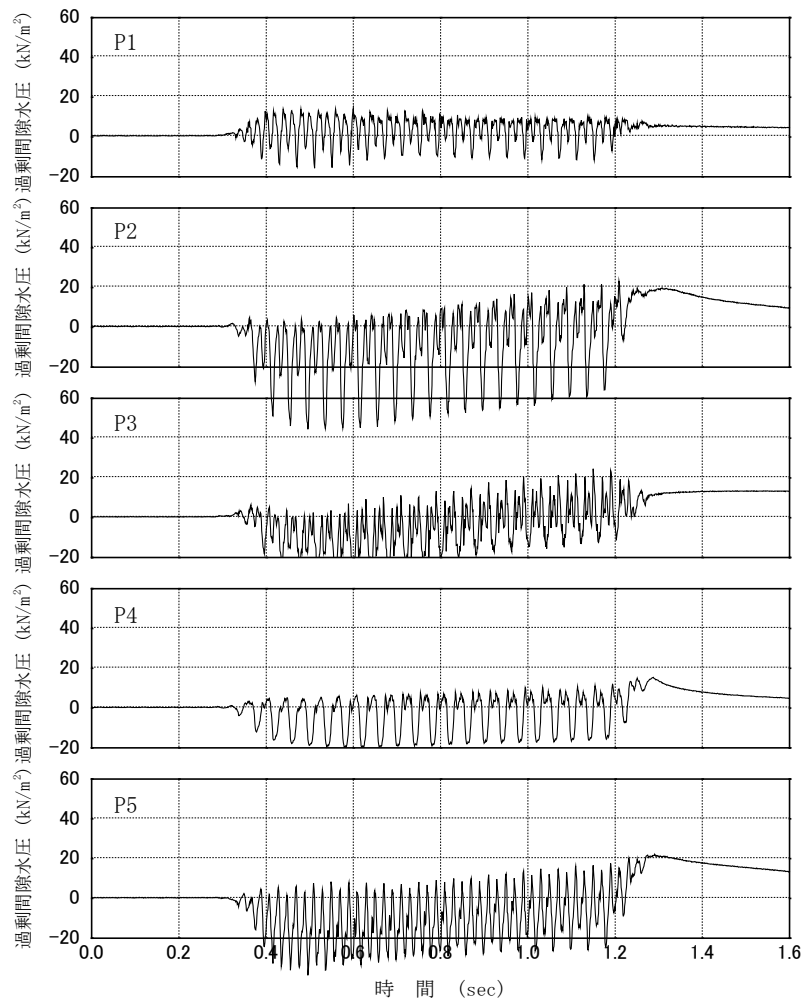
付図 1.2 (b) Case06-00 圧密過程の時刻歴波形図 (その 2)



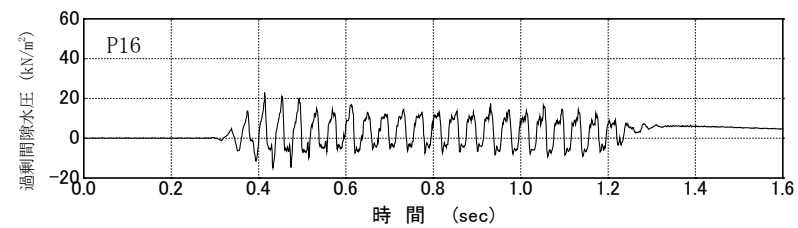
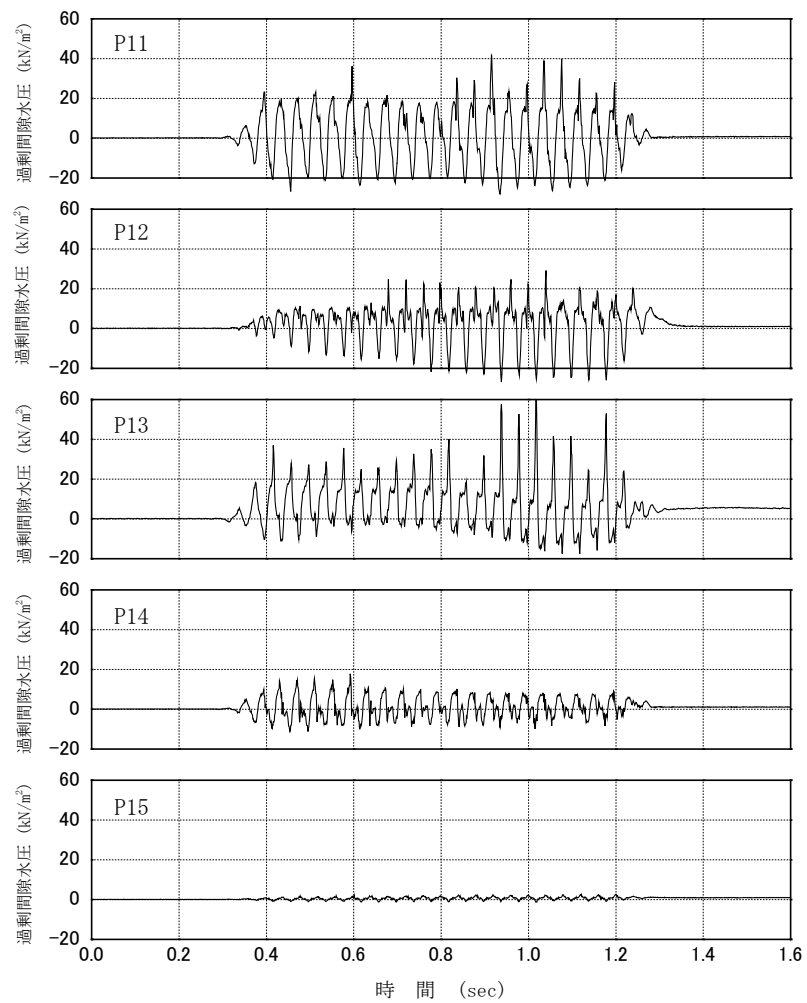
付図 1.2 (c) Case06-00 圧密過程の時刻歴波形図 (その 3)



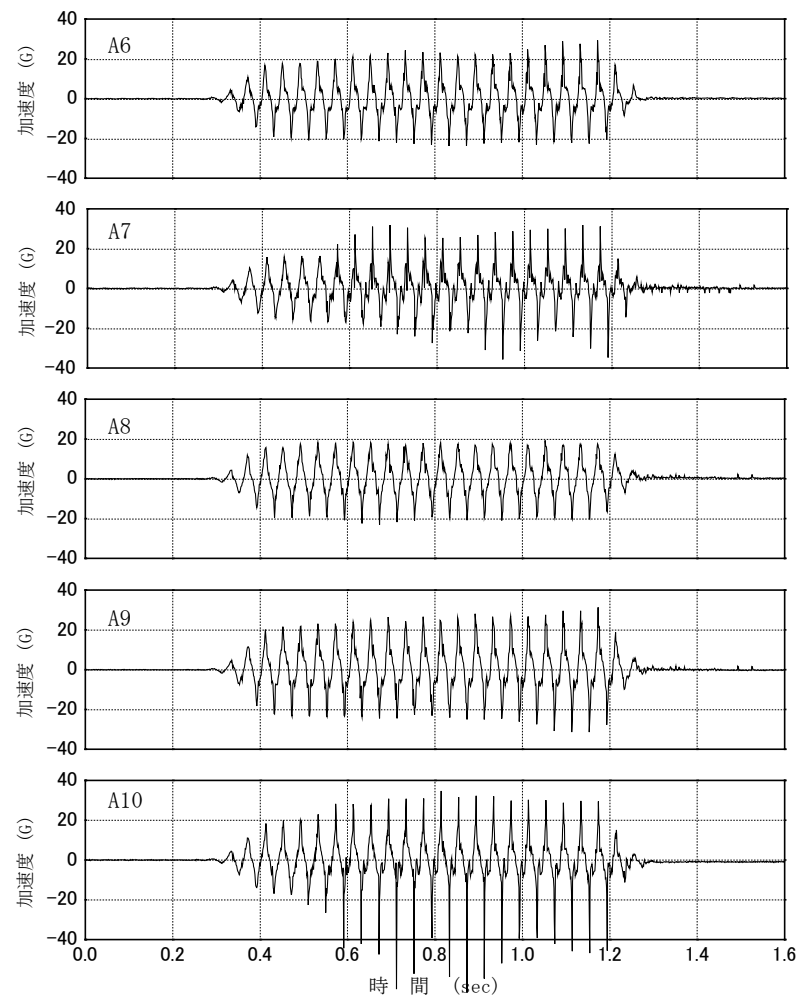
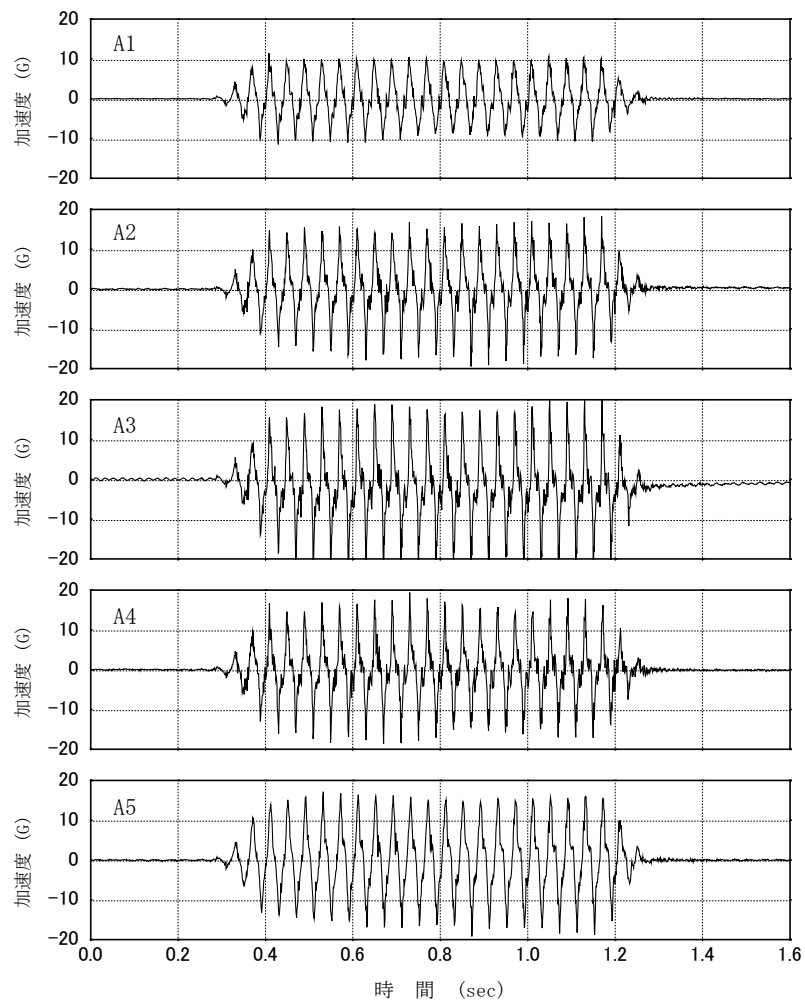
付図 1.3 (a) Case06-00 加振時の時刻歴波形図 (その 1)



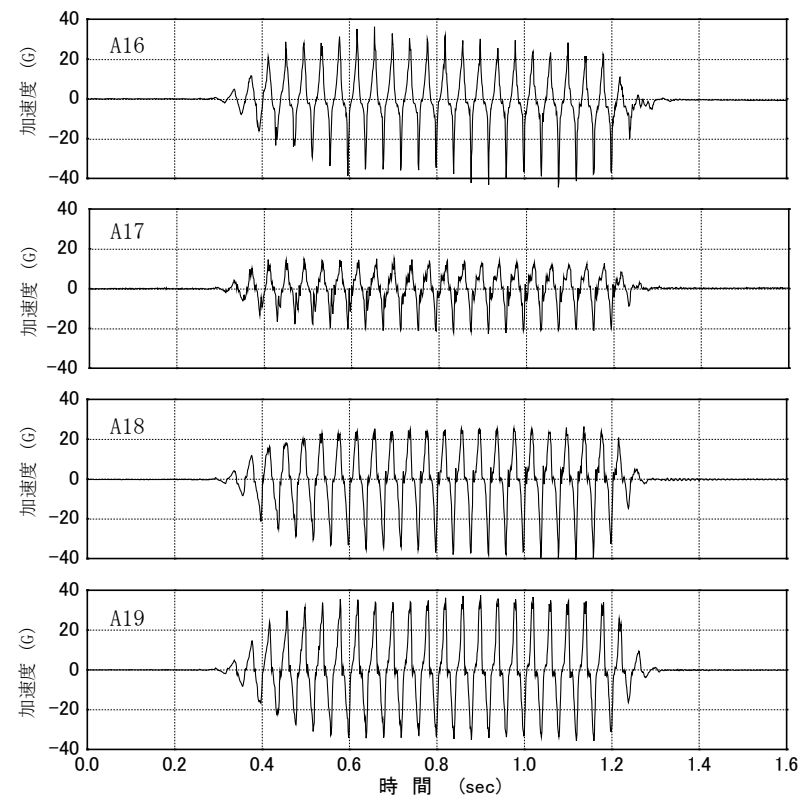
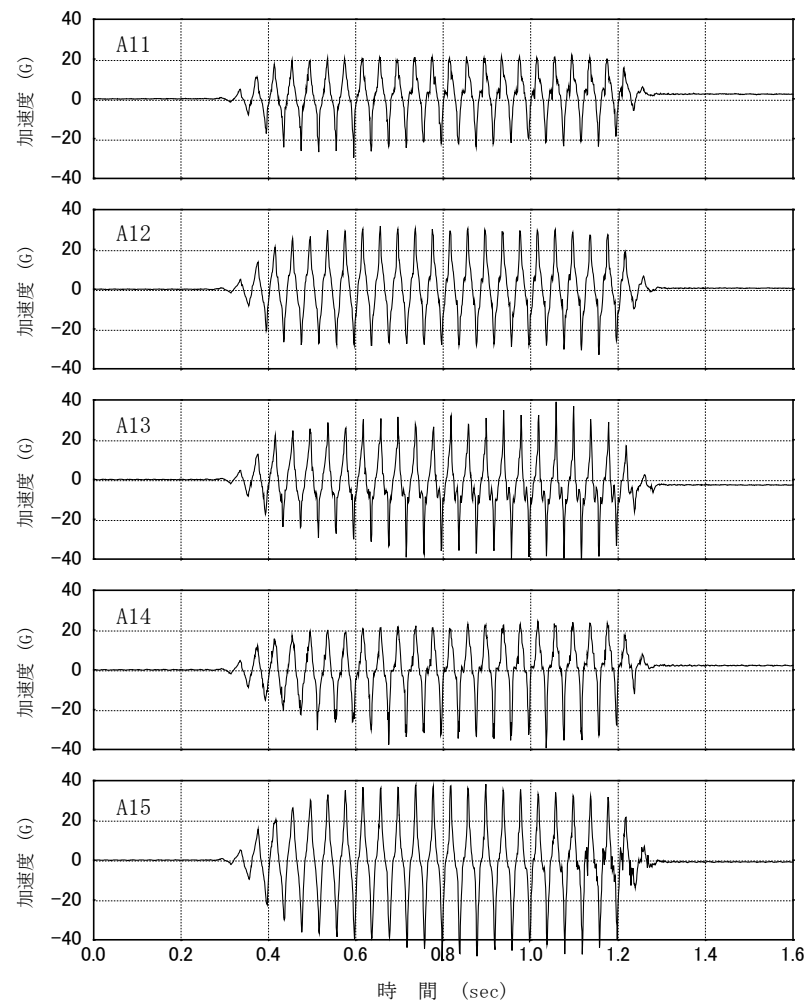
付図 1.3 (b) Case06-00 加振時の時刻歴波形図 (その 2)



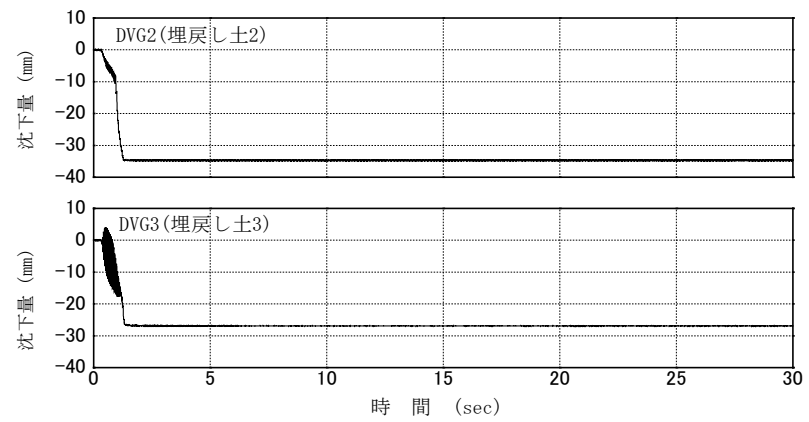
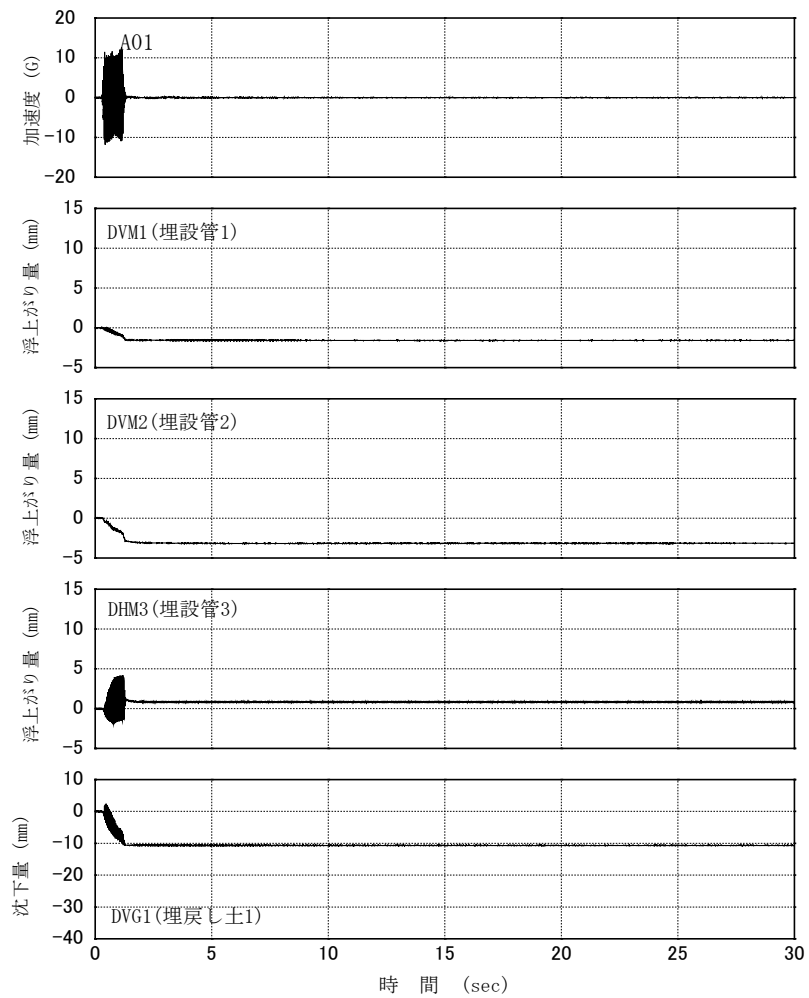
付図 1.3 (c) Case06-00 加振時の時刻歴波形図 (その 3)



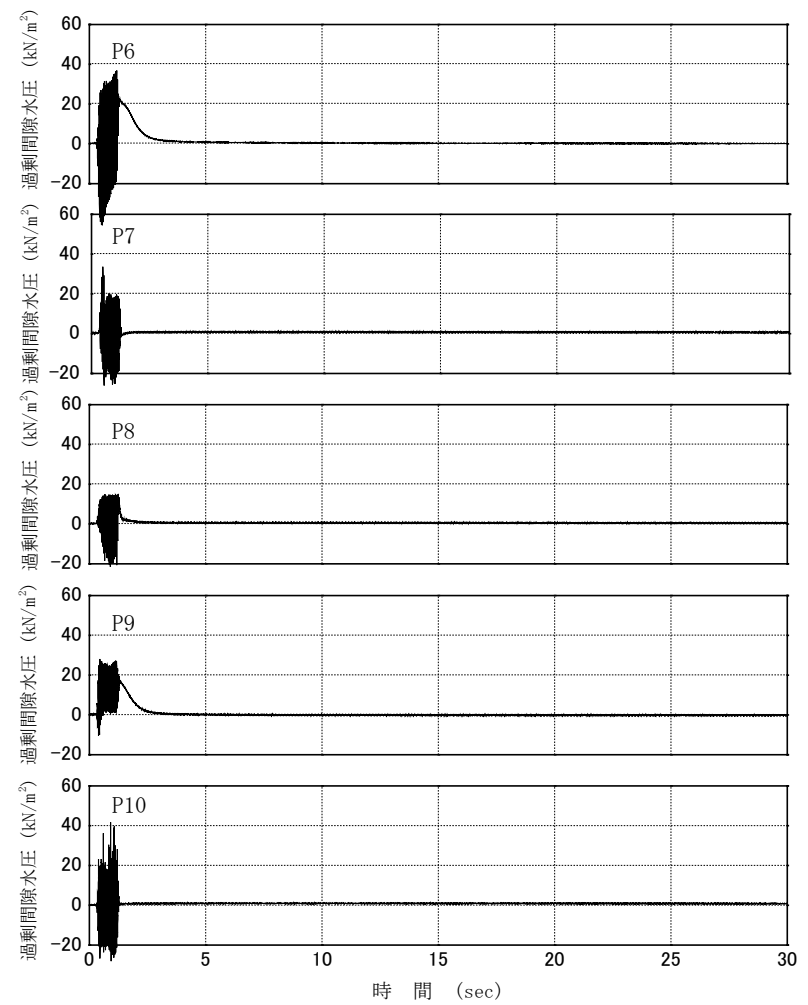
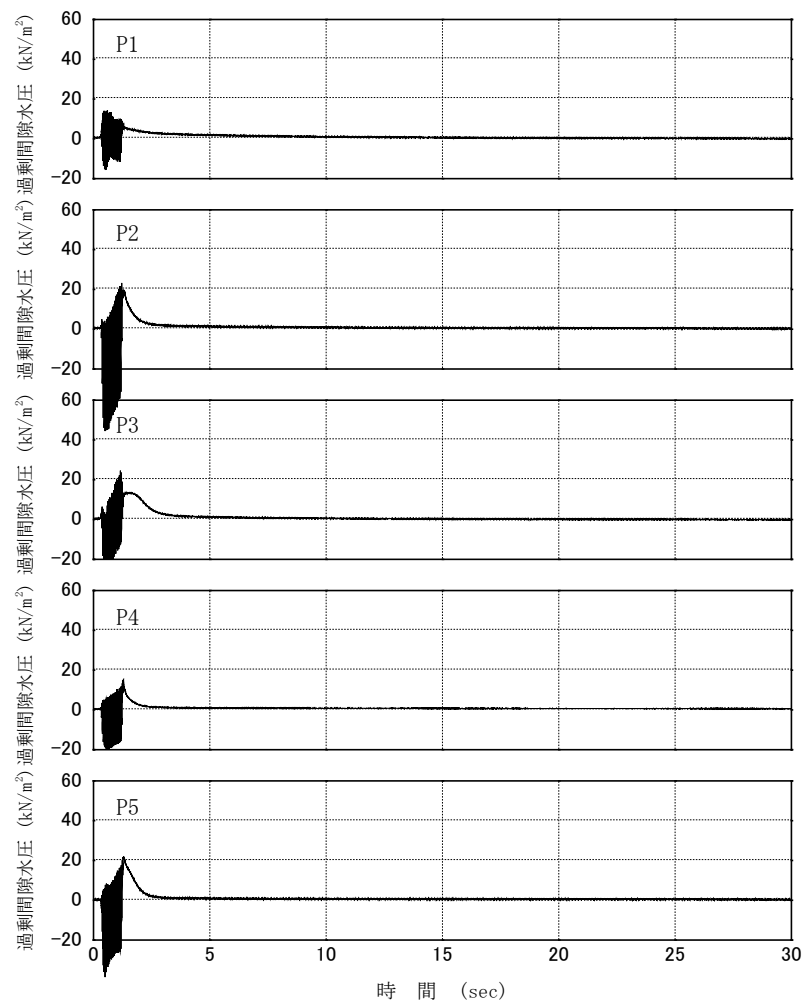
付図 1.3 (d) Case06-00 加振時の時刻歴波形図 (その 4)



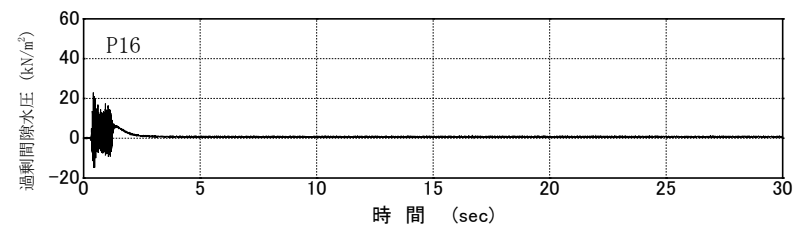
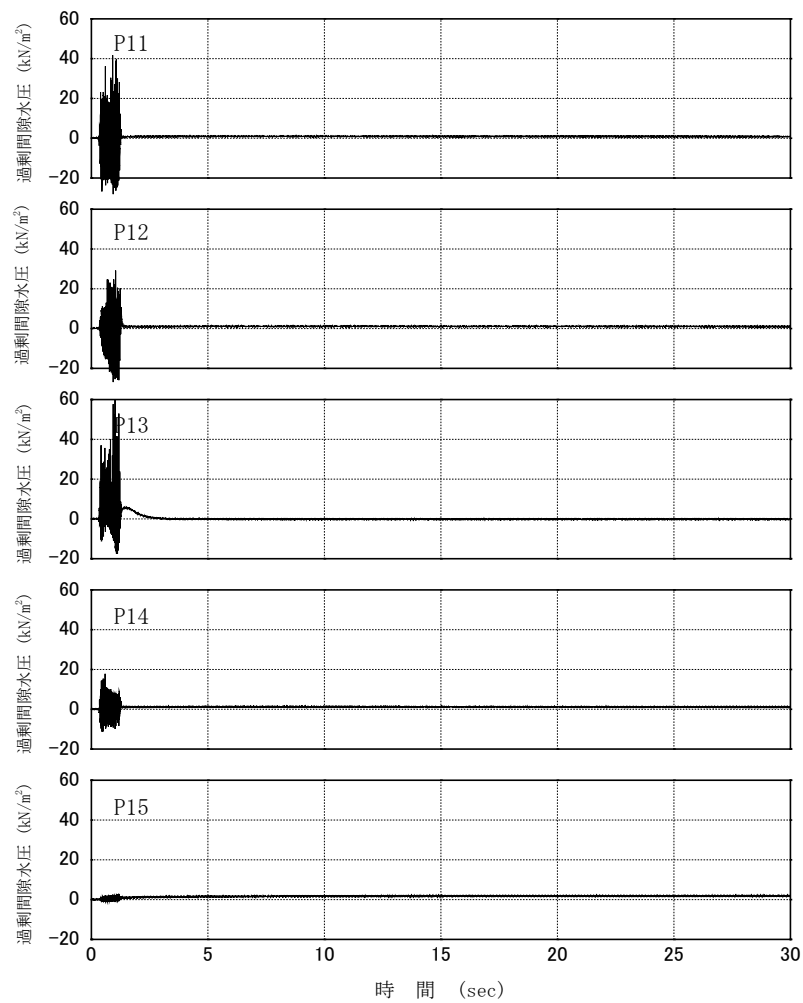
付図 1.3 (e) Case06-00 加振時の時刻歴波形図 (その 5)



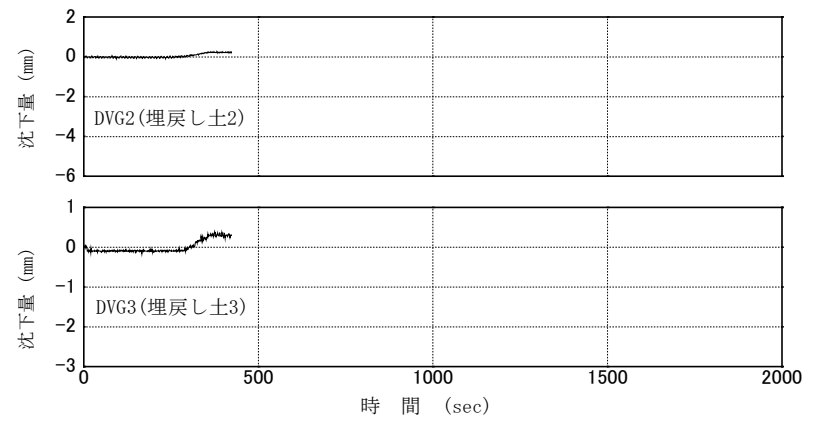
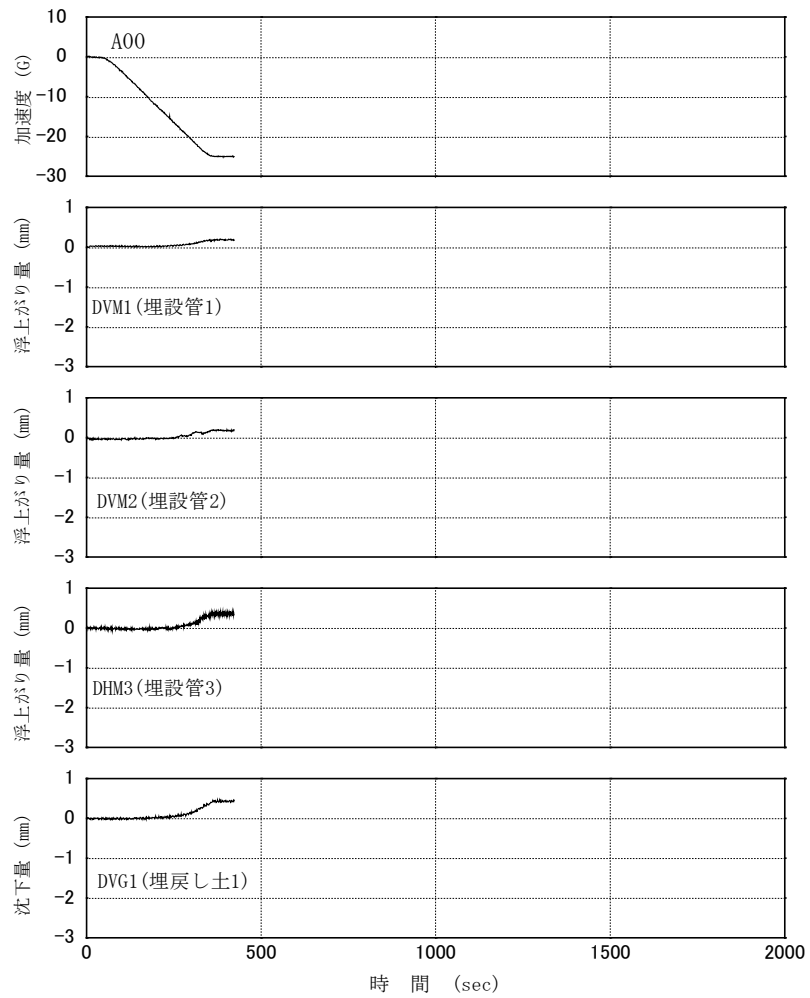
付図 1.4 (a) Case06-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その 1)



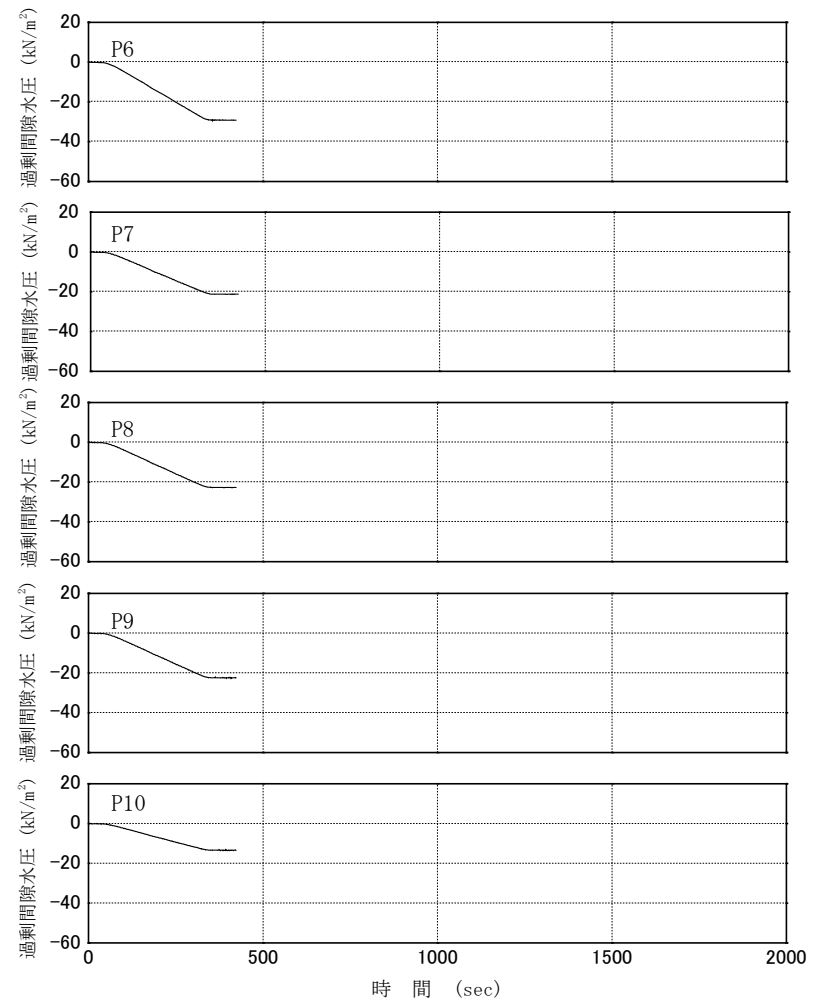
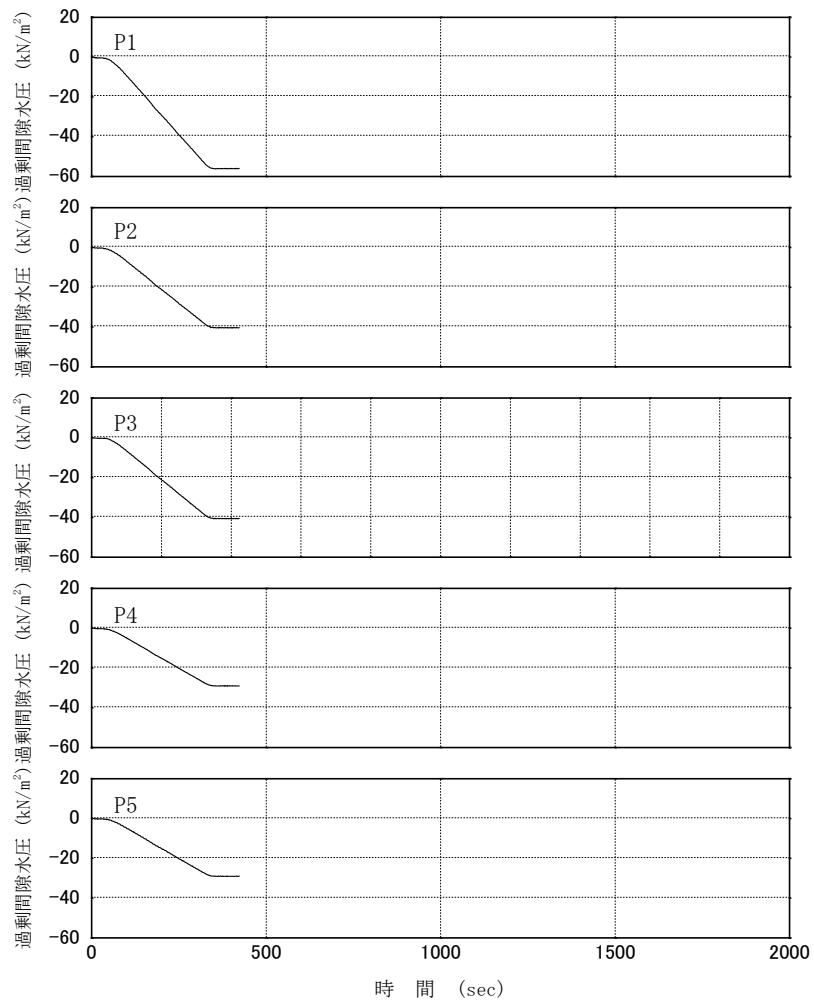
付図 1.4 (b) Case06-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その 2)



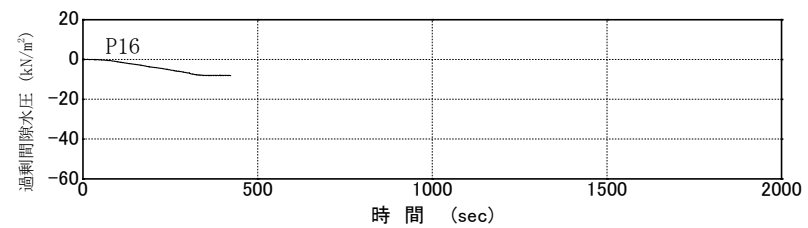
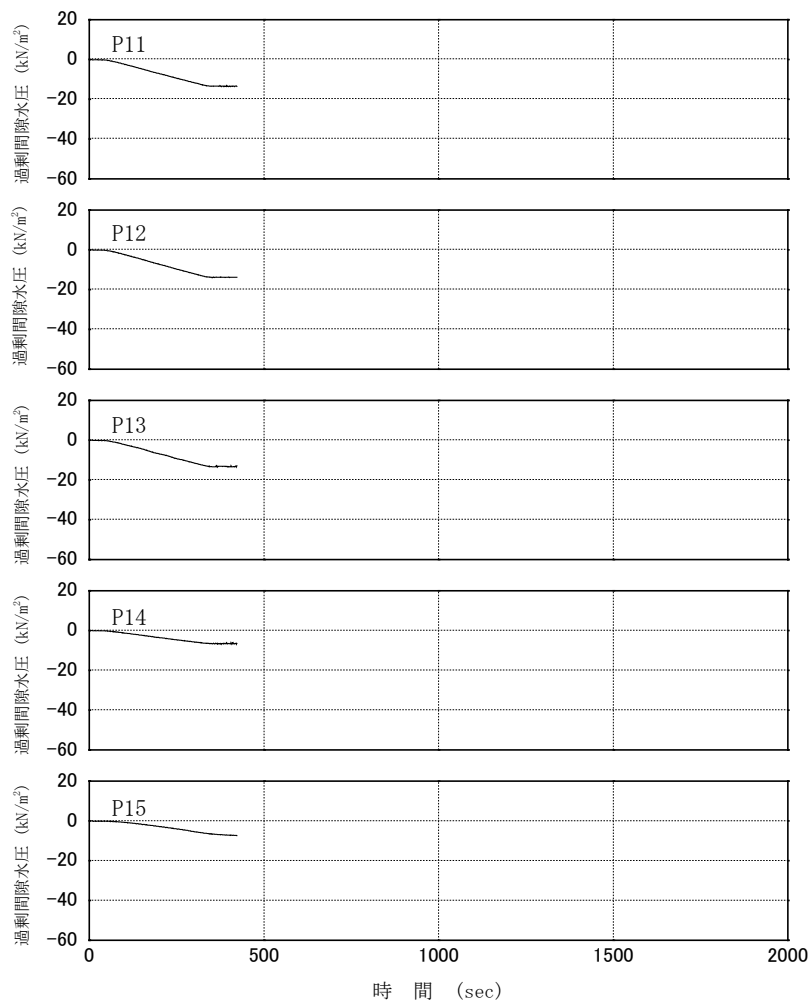
付図 1.4 (c) Case06-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その 3)



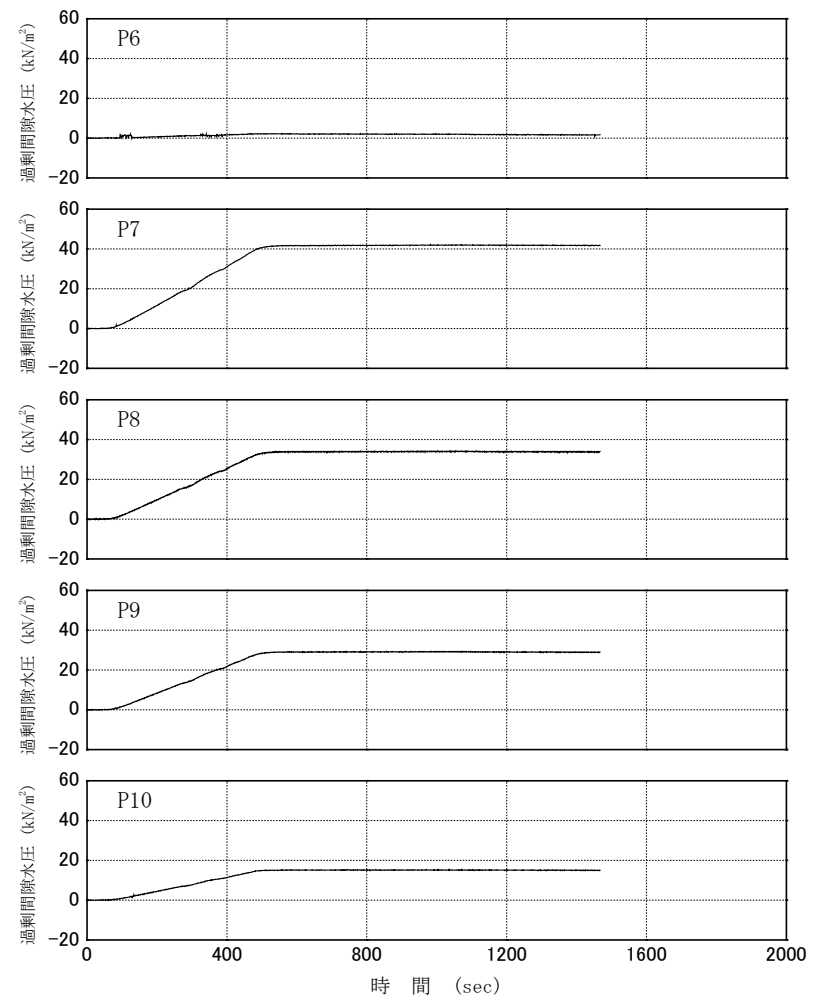
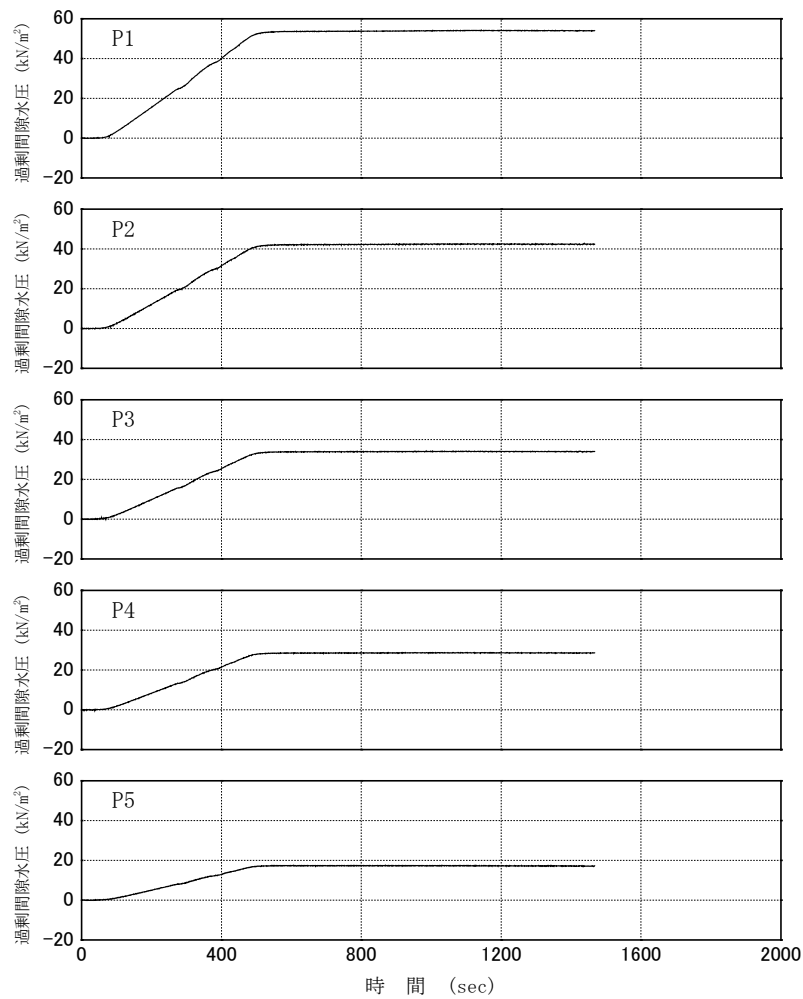
付図 1.5 (a) Case06-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その1)



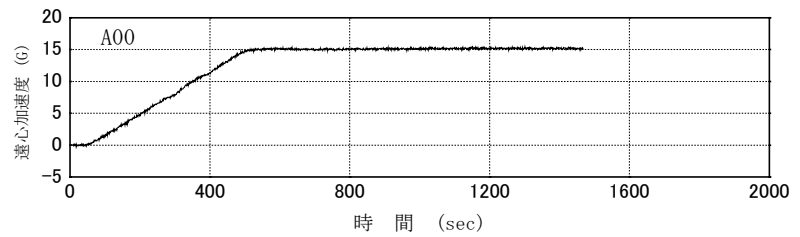
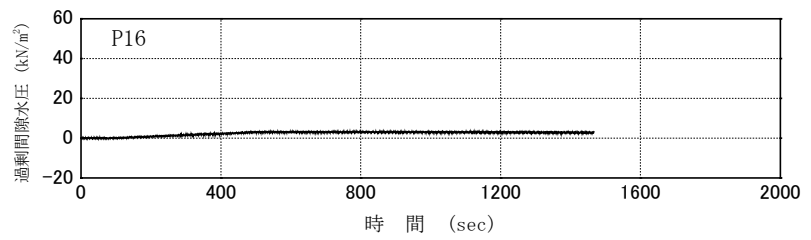
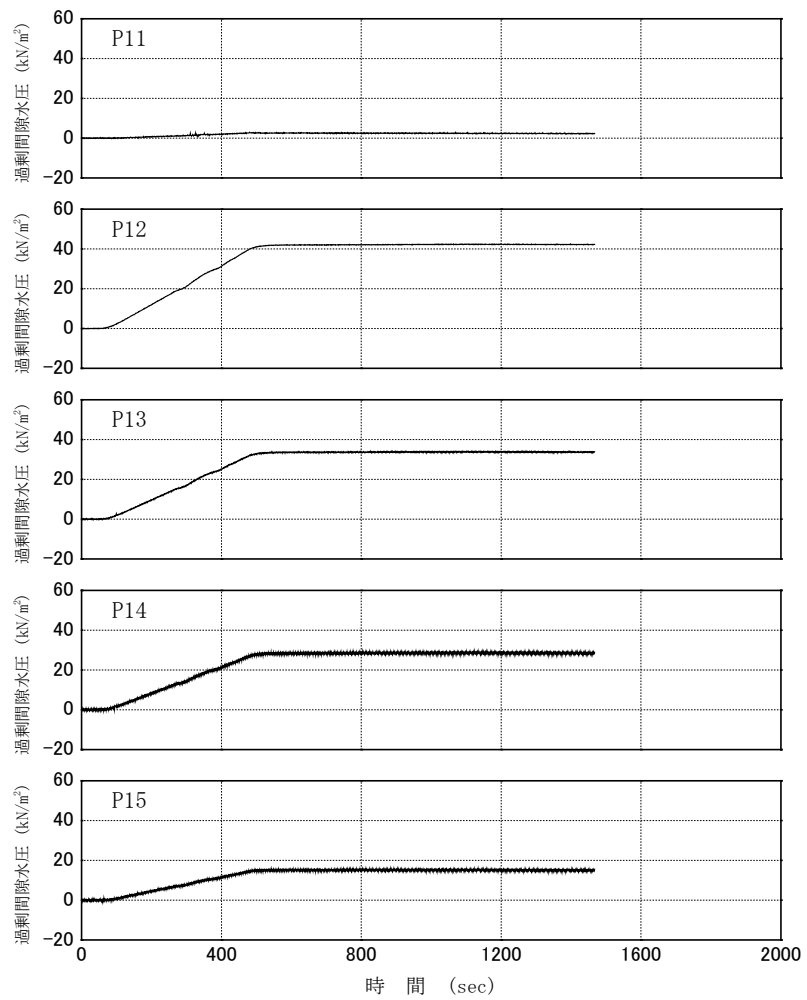
付図 1.5 (b) Case06-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その 2)



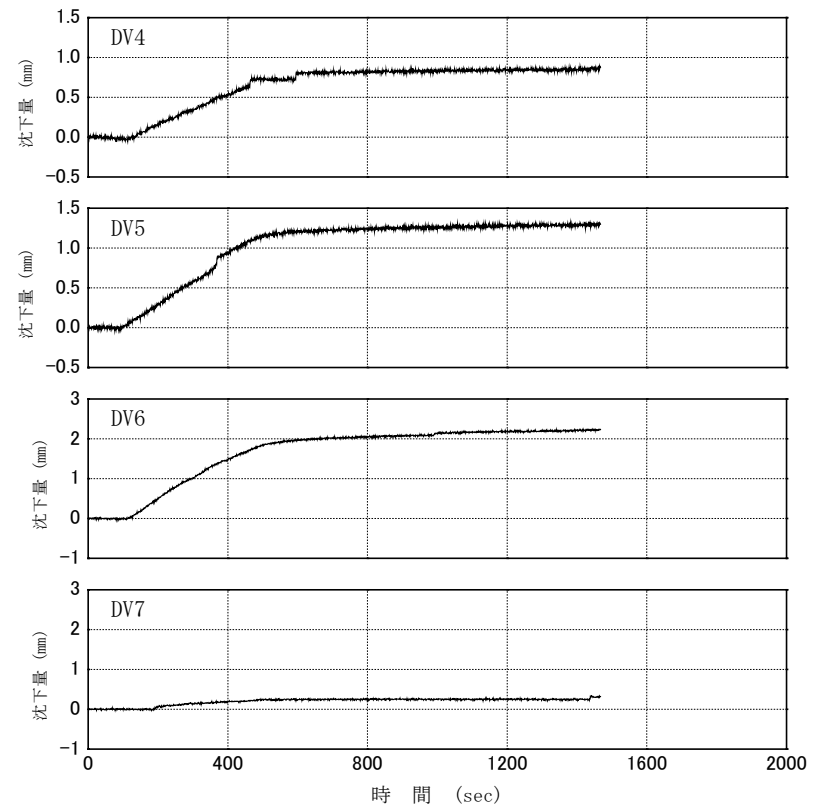
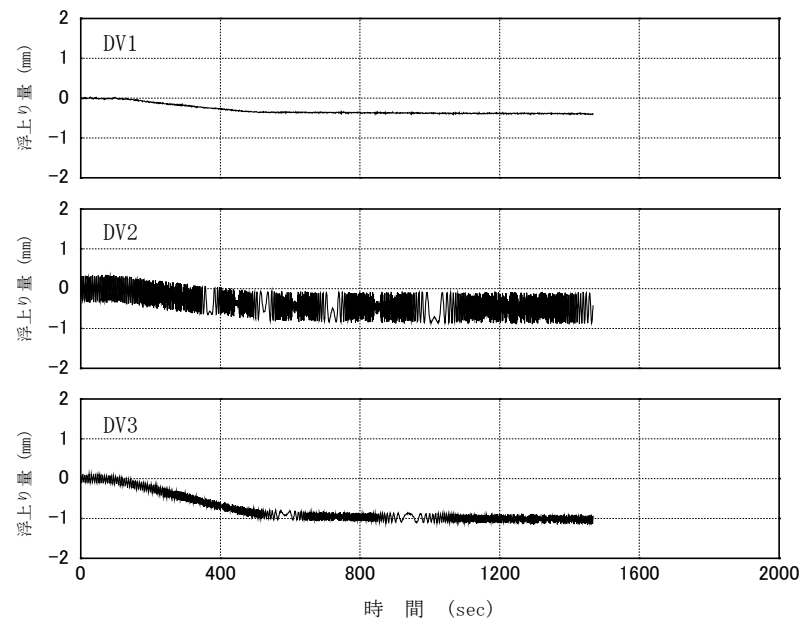
付図 1.5 (c) Case06-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その3)



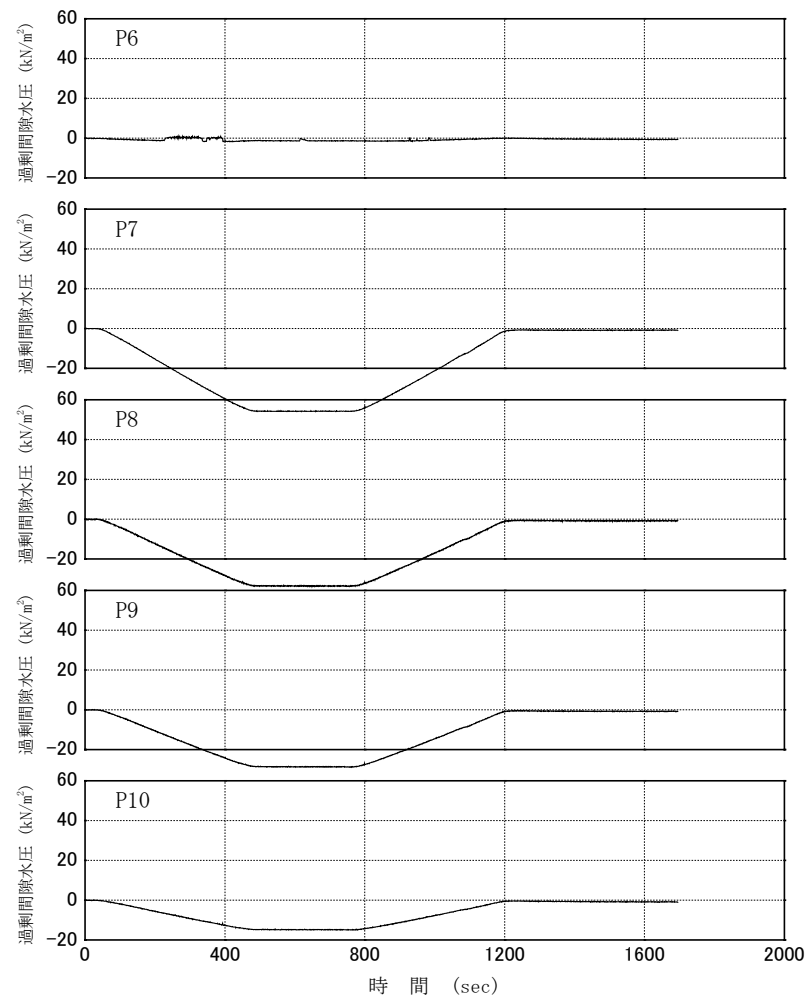
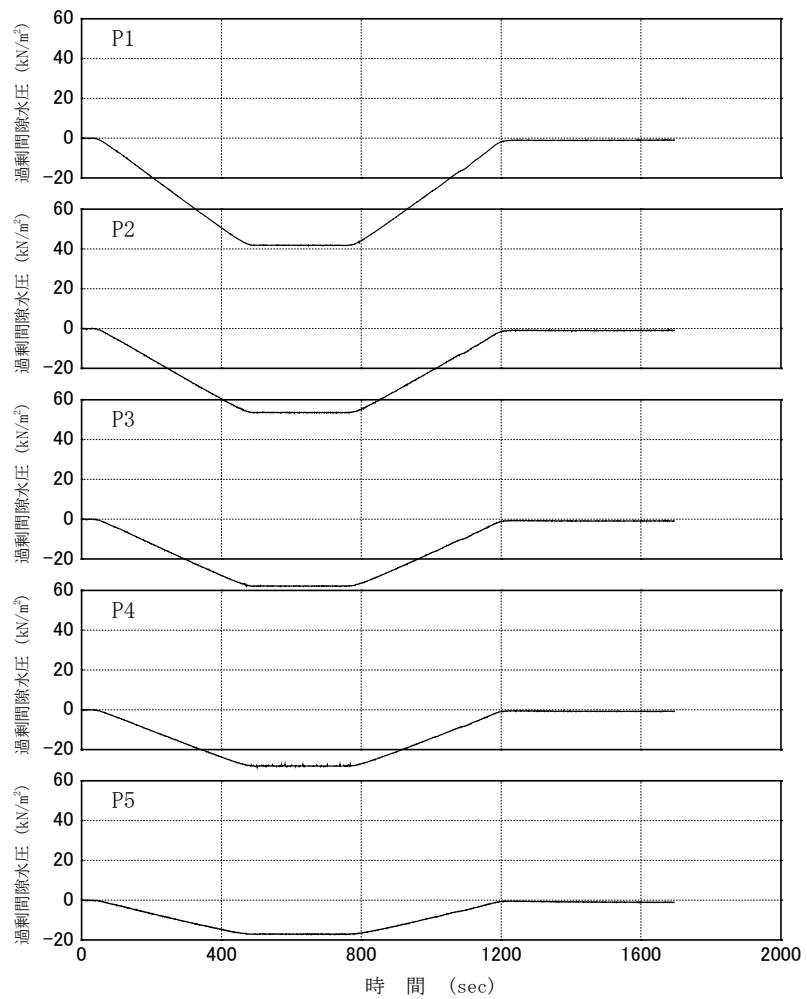
付図 2.1 (a) Case07-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その 1)



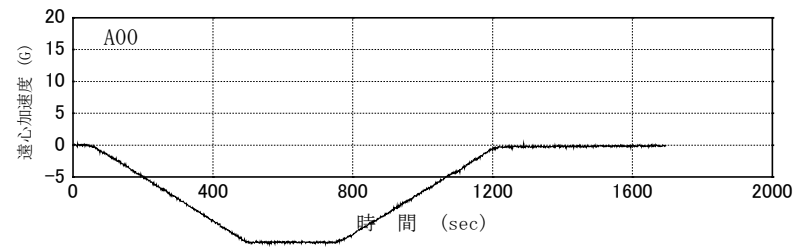
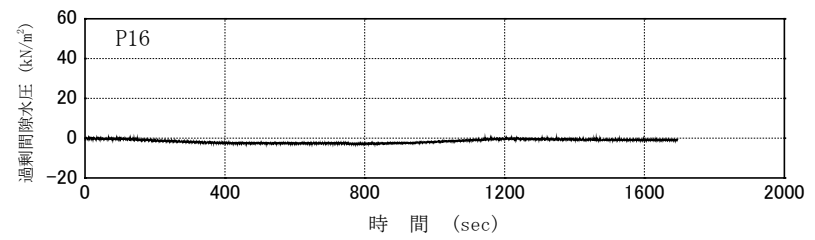
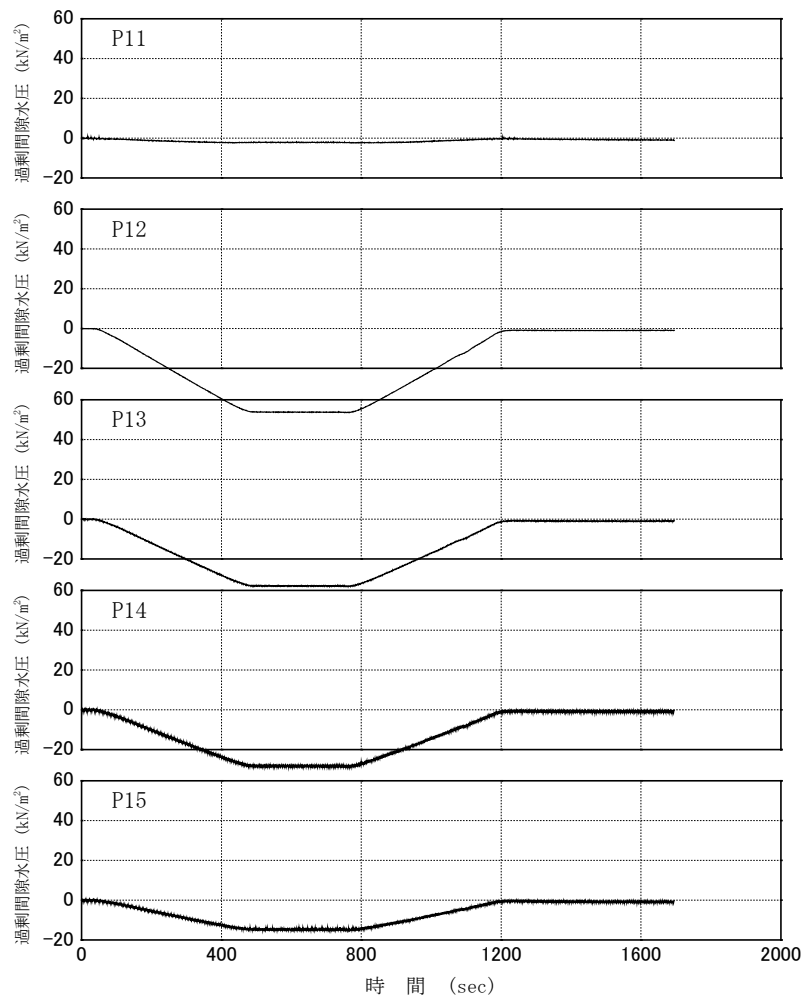
付図 2.1 (b) Case07-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その 2)



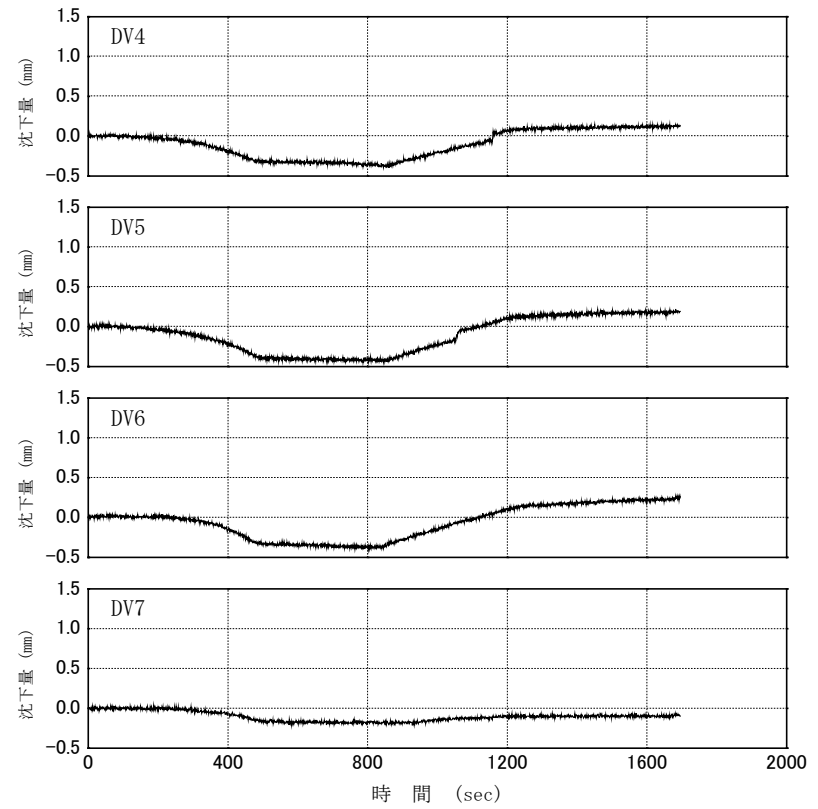
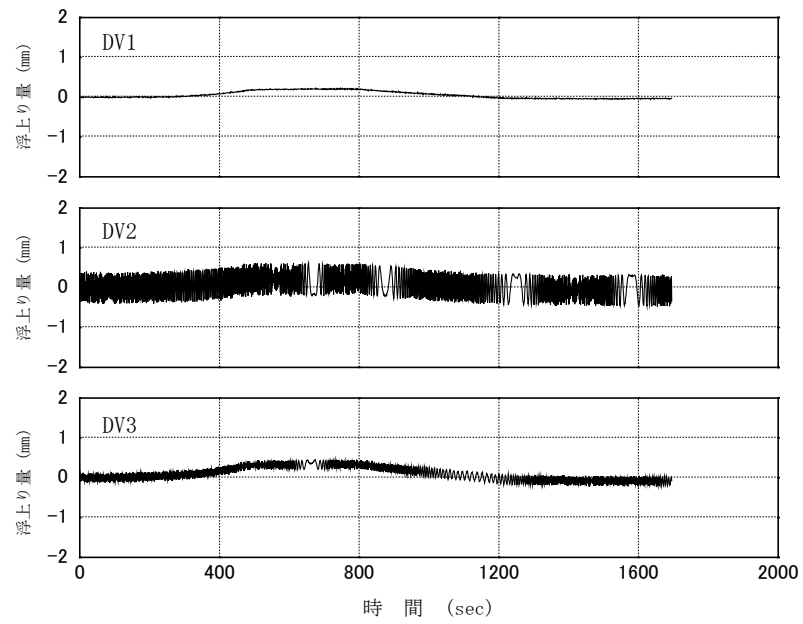
付図 2.1 (c) Case07-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その3)



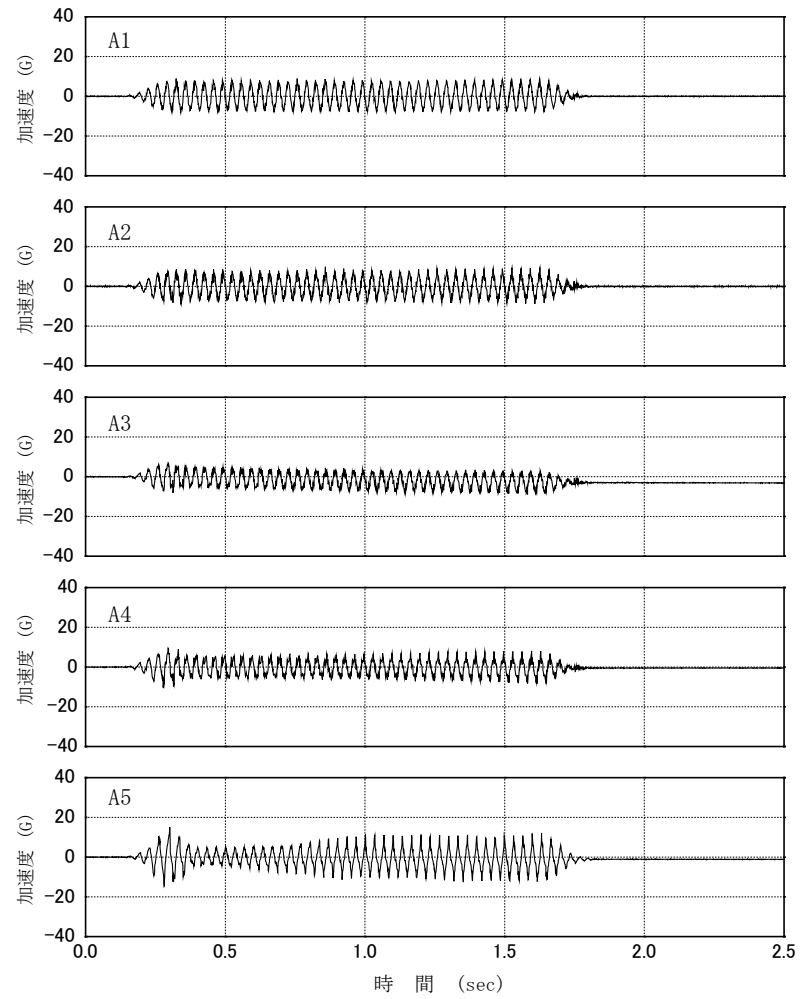
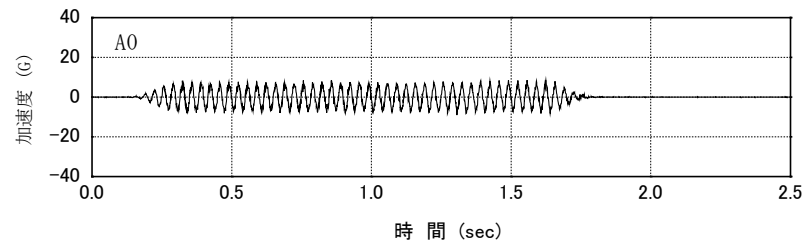
付図 2.1 (d) Case07-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その 4)



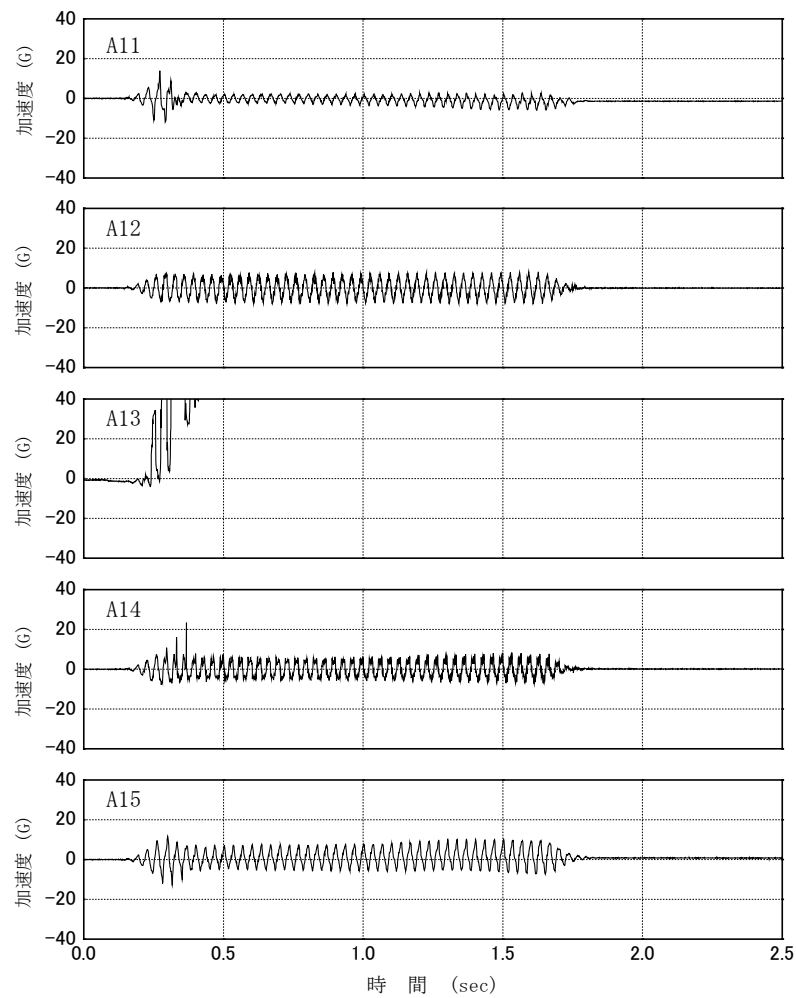
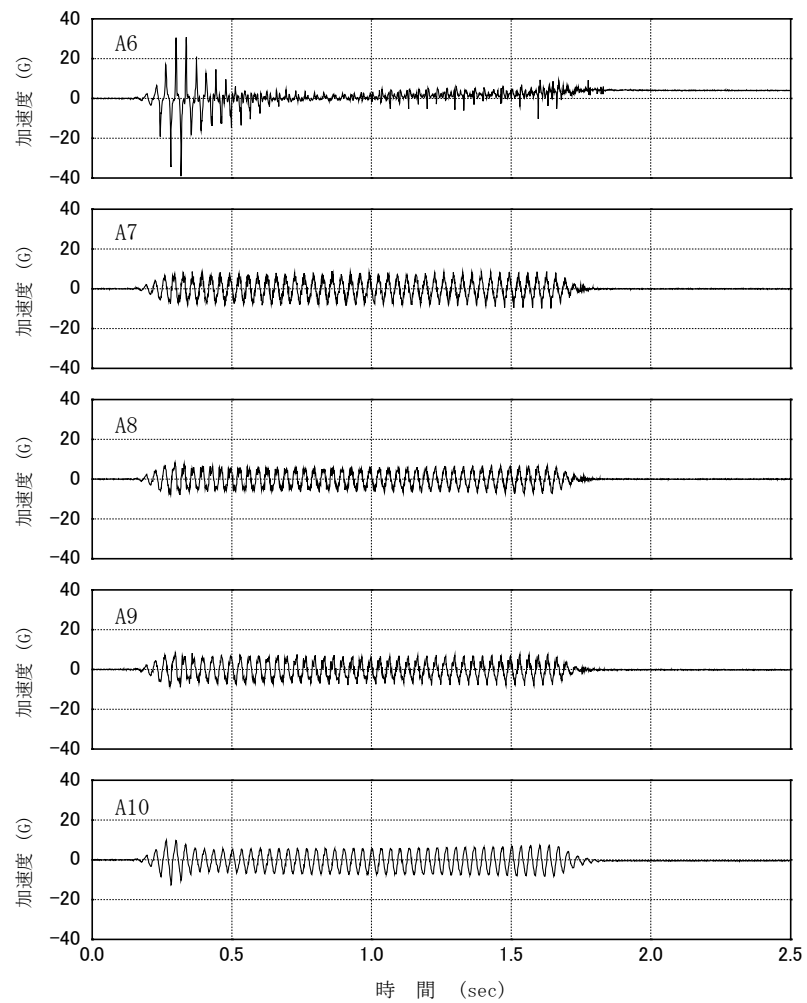
付図 2.1 (e) Case07-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その 5)



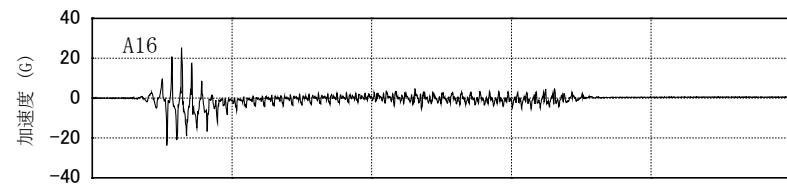
付図 2.1 (f) Case07-00 遠心加速度上昇中の時刻歴波形図 (その6)



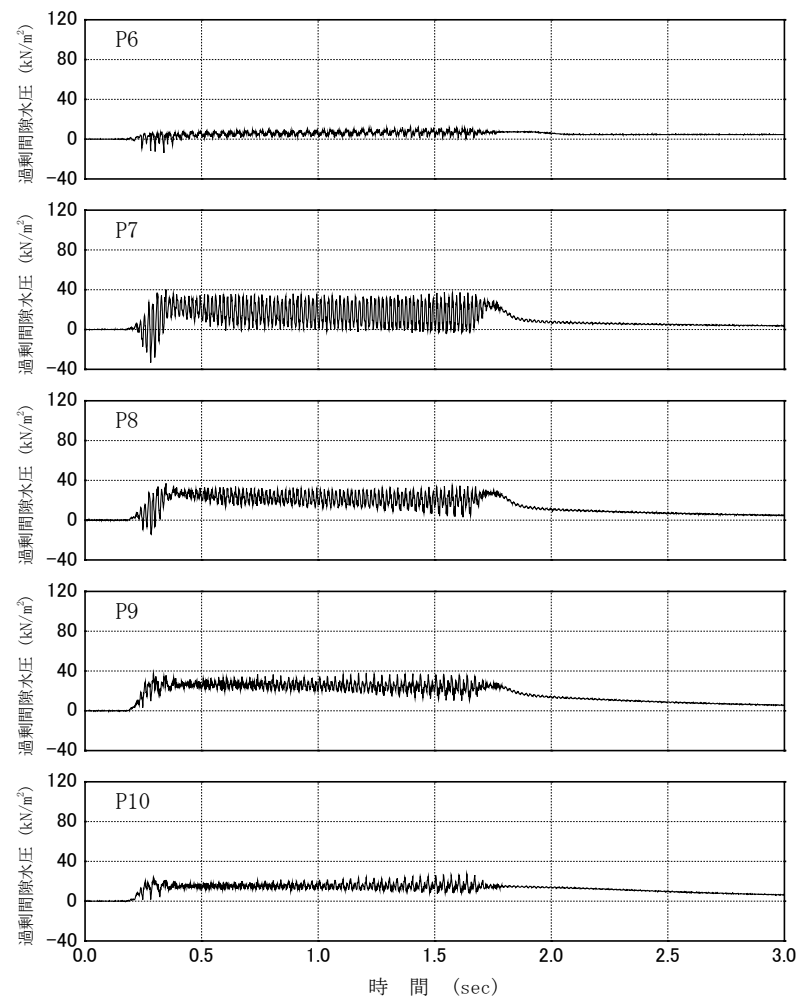
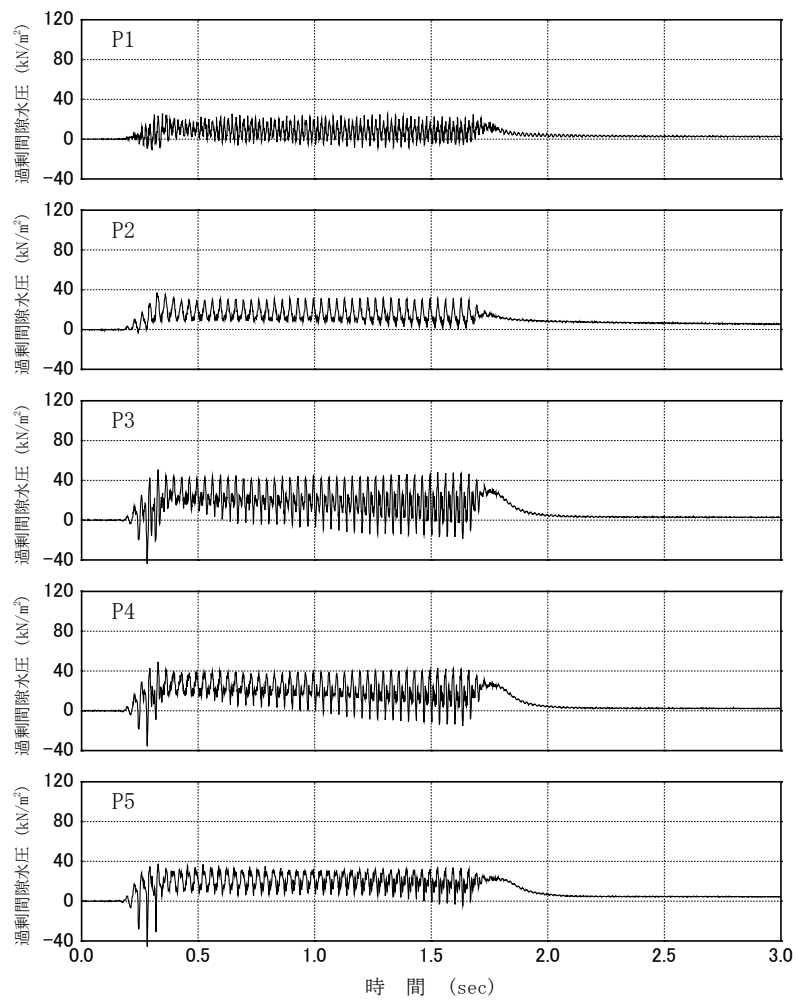
付図 2.2 (a) Case07-00 加振時の時刻歴波形図 (その 1)



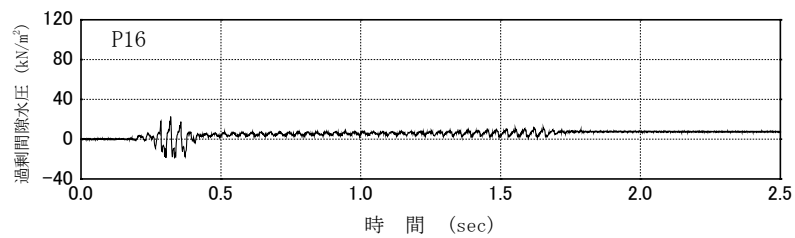
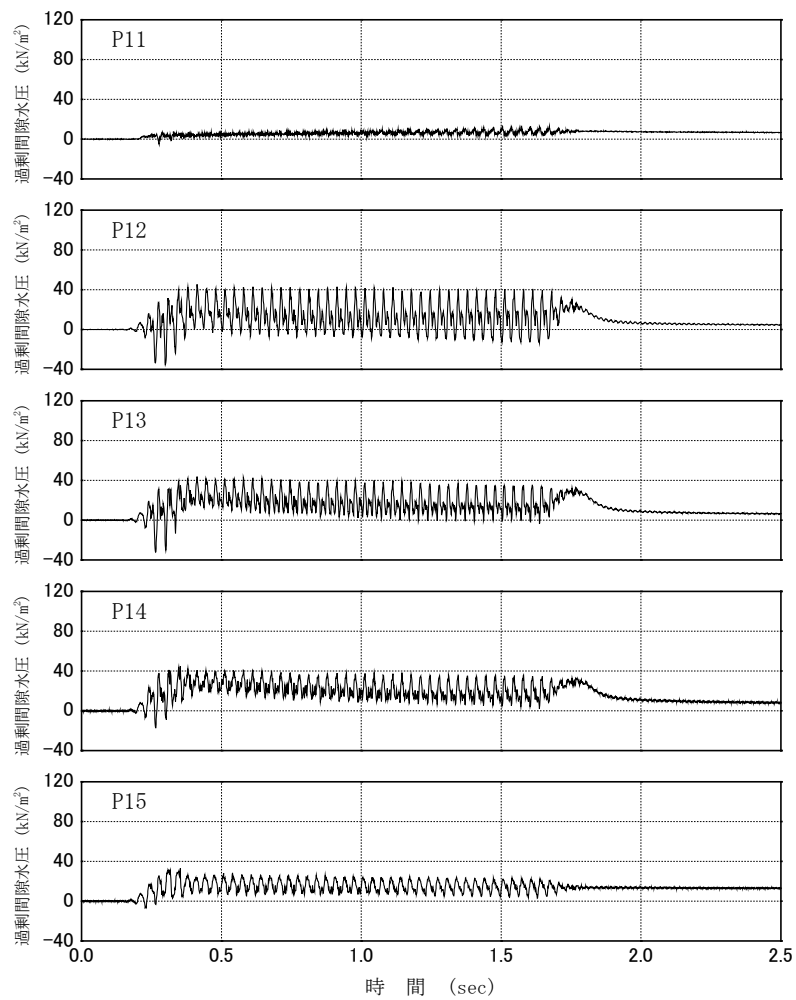
付図 2.2 (b) Case07-00 加振時の時刻歴波形図 (その 2)



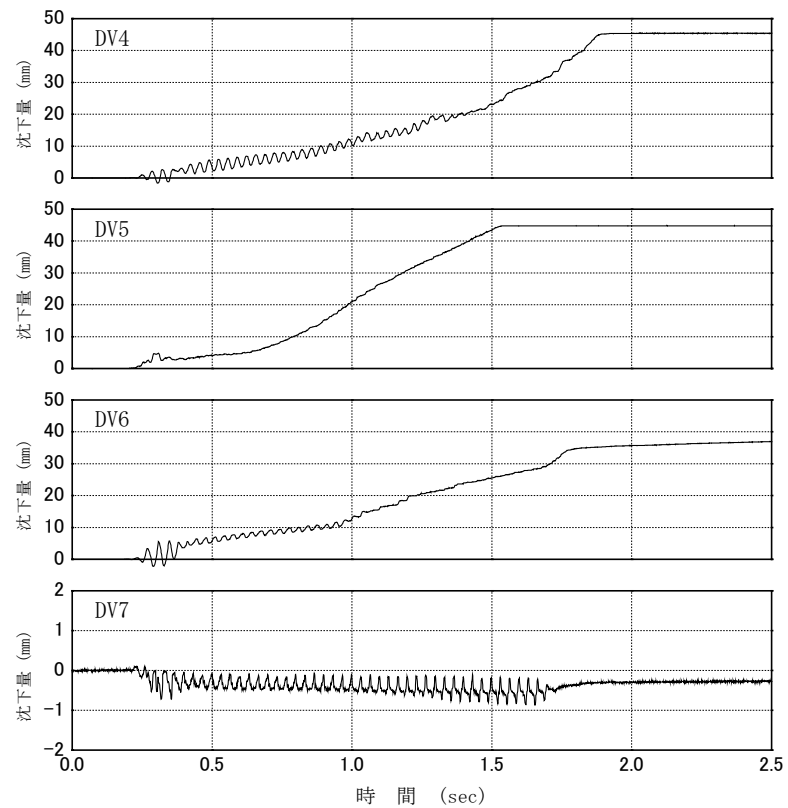
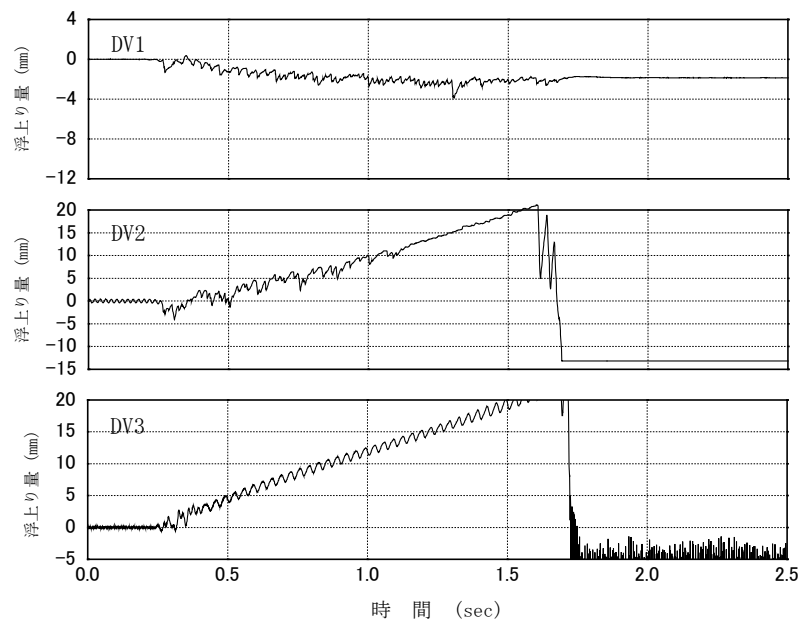
付図 2.2 (c) Case07-00 加振時の時刻歴波形図 (その 3)



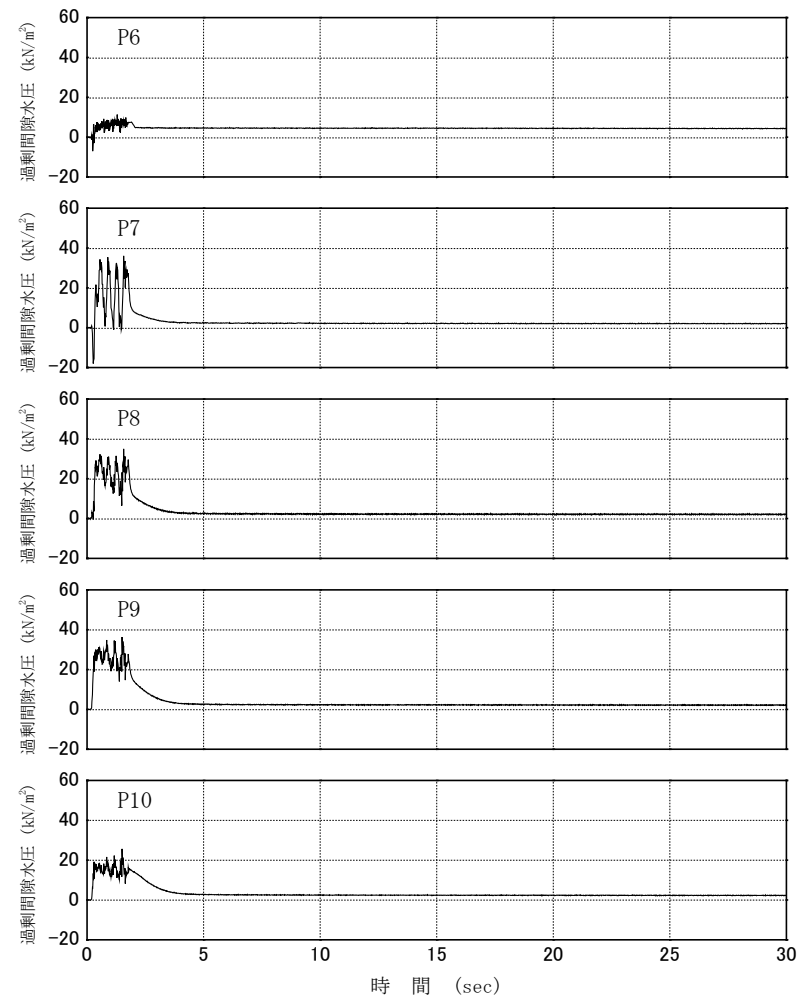
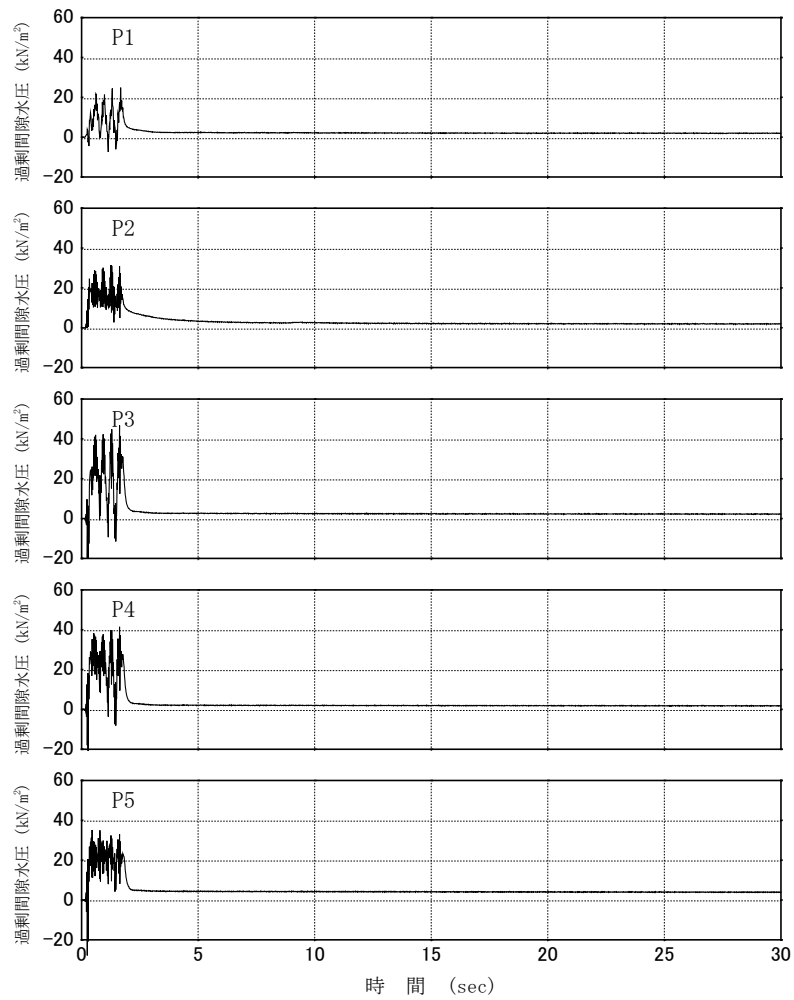
付図 2.2 (d) Case07-00 加振時の時刻歴波形図 (その 4)



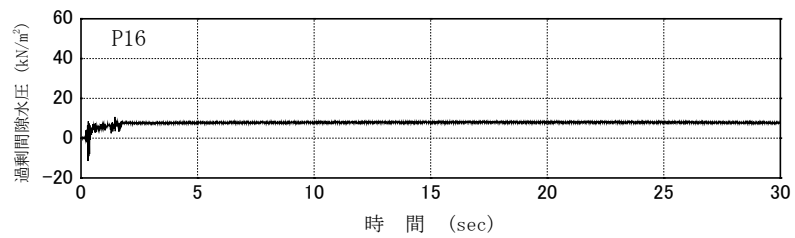
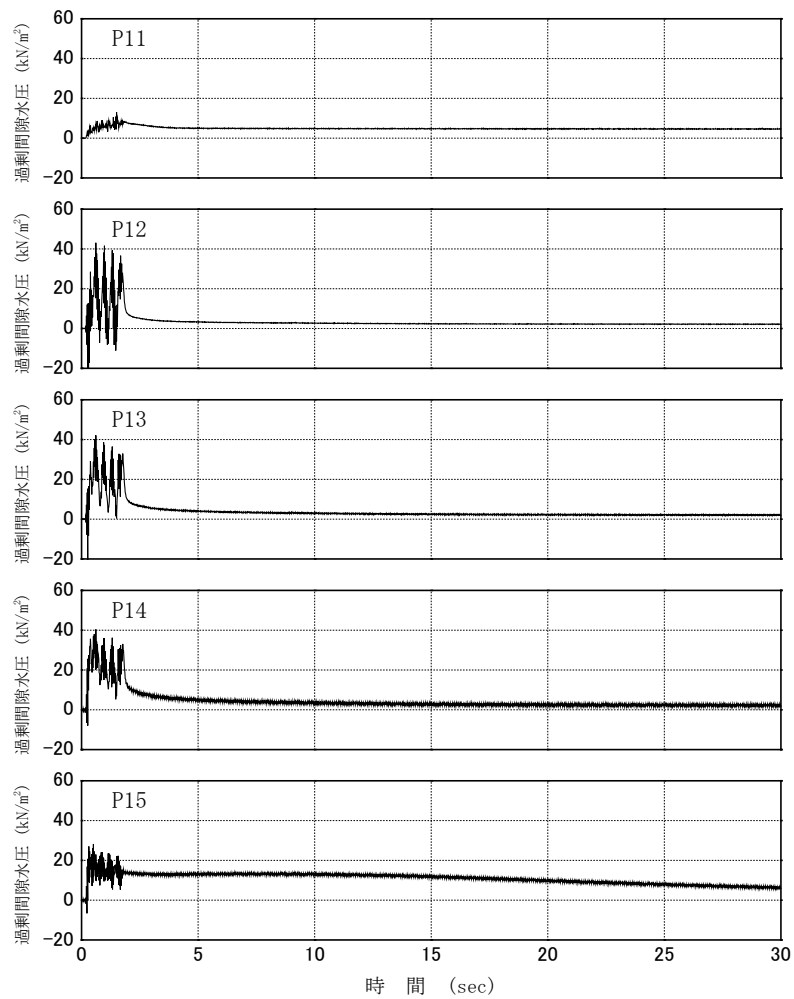
付図 2.2 (e) Case07-00 加振時の時刻歴波形図 (その 5)



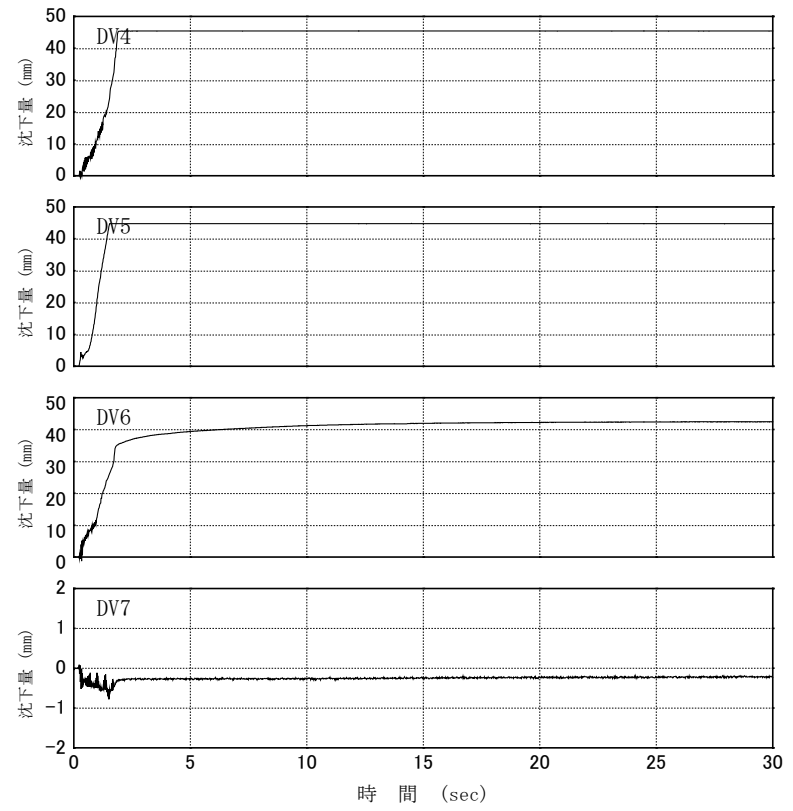
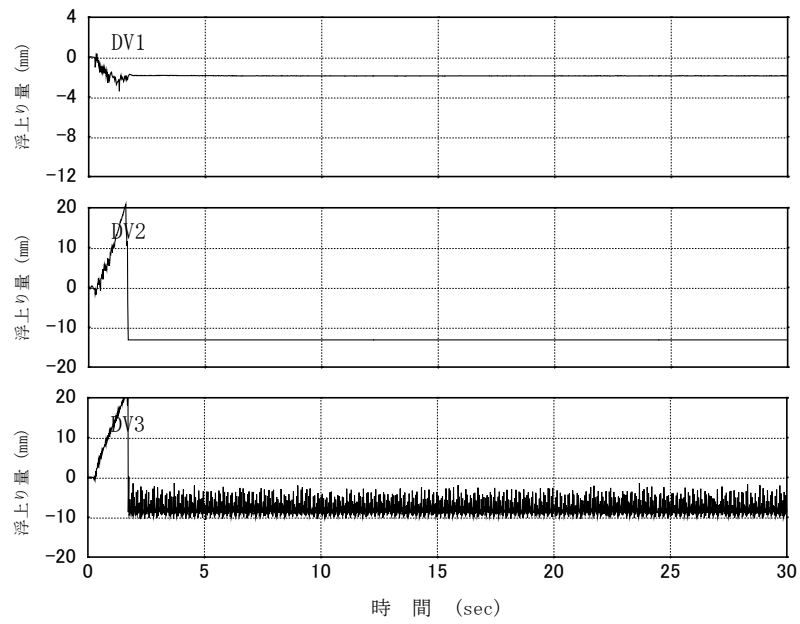
付図 2.2 (f) Case07-00 加振時の時刻歴波形図 (その 6)



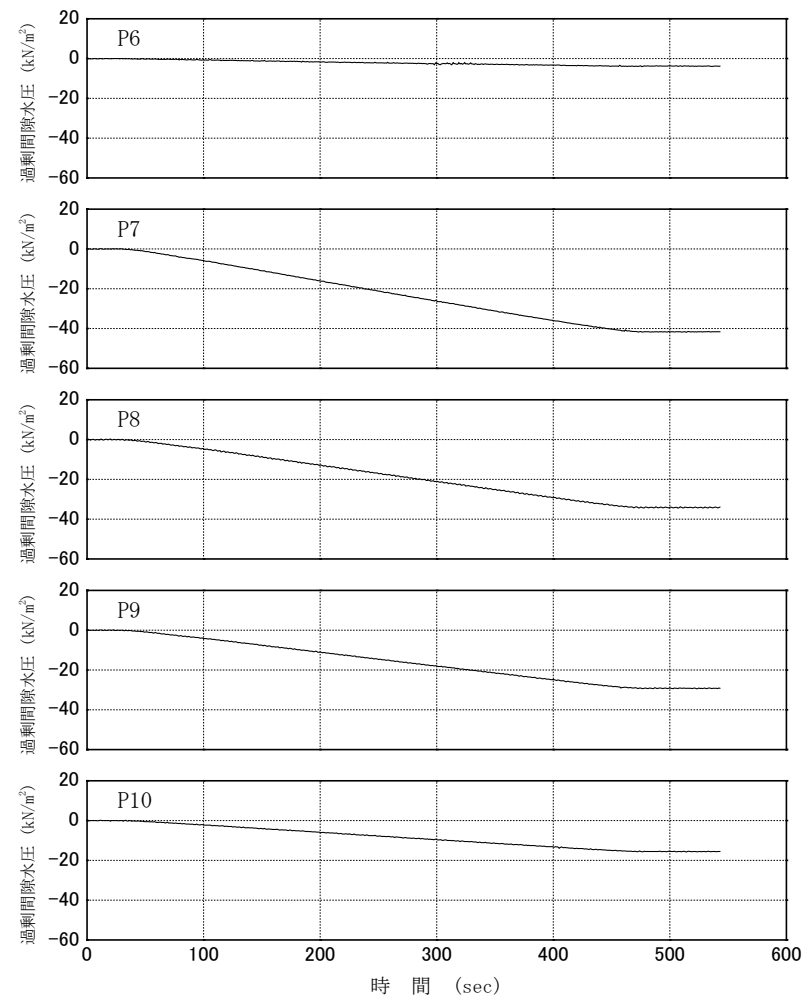
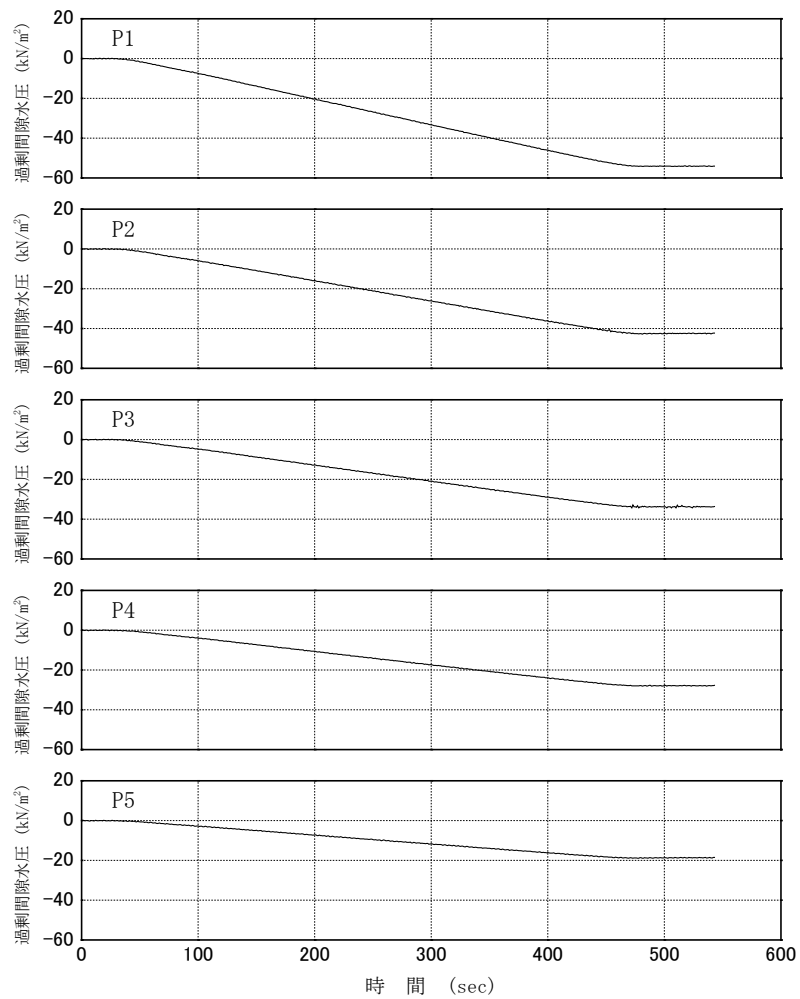
付図 2.3 (a) Case07-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その 1)



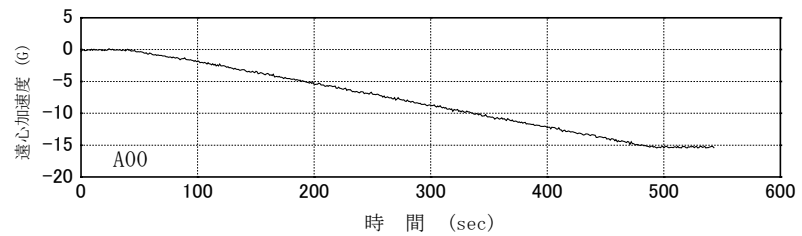
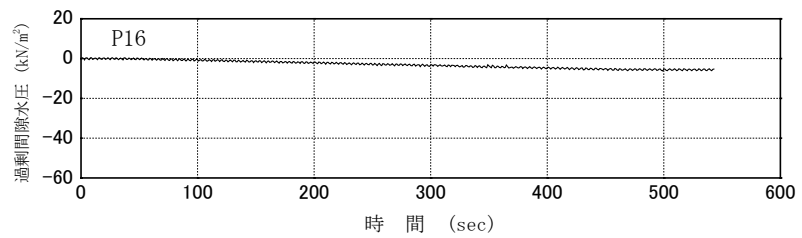
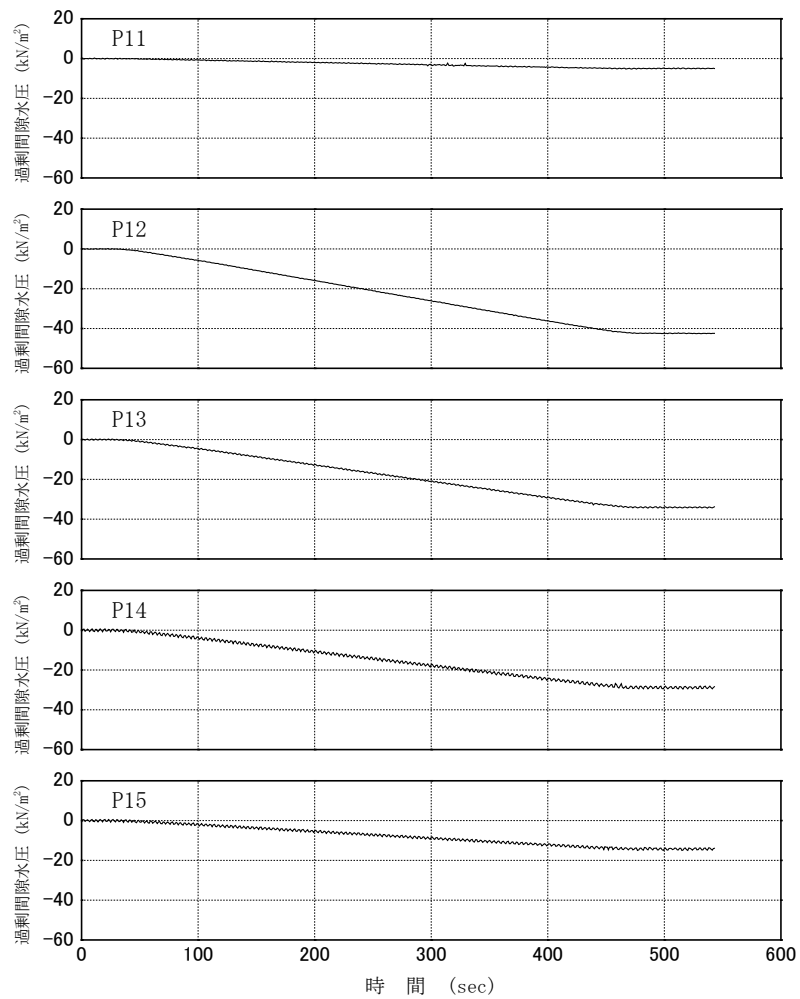
付図 2.3 (b) Case07-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その2)



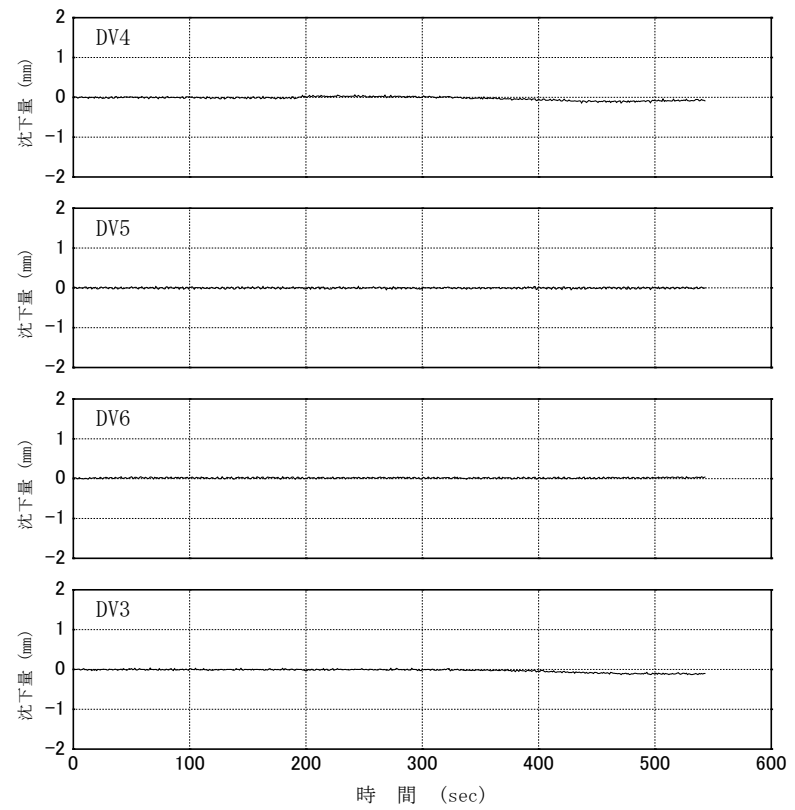
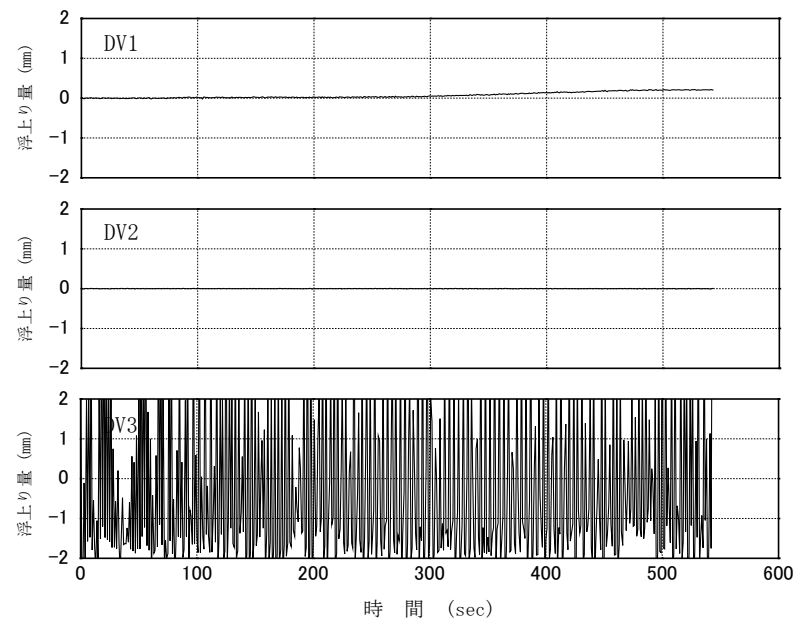
付図 2.3 (c) Case07-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その3)



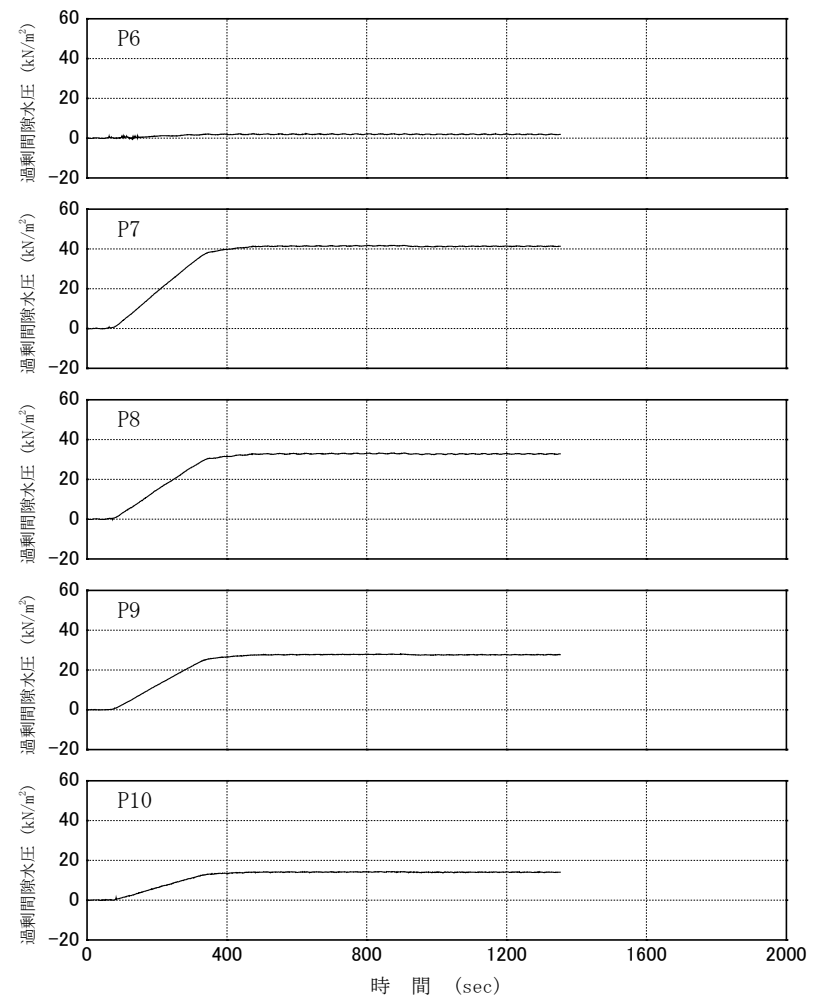
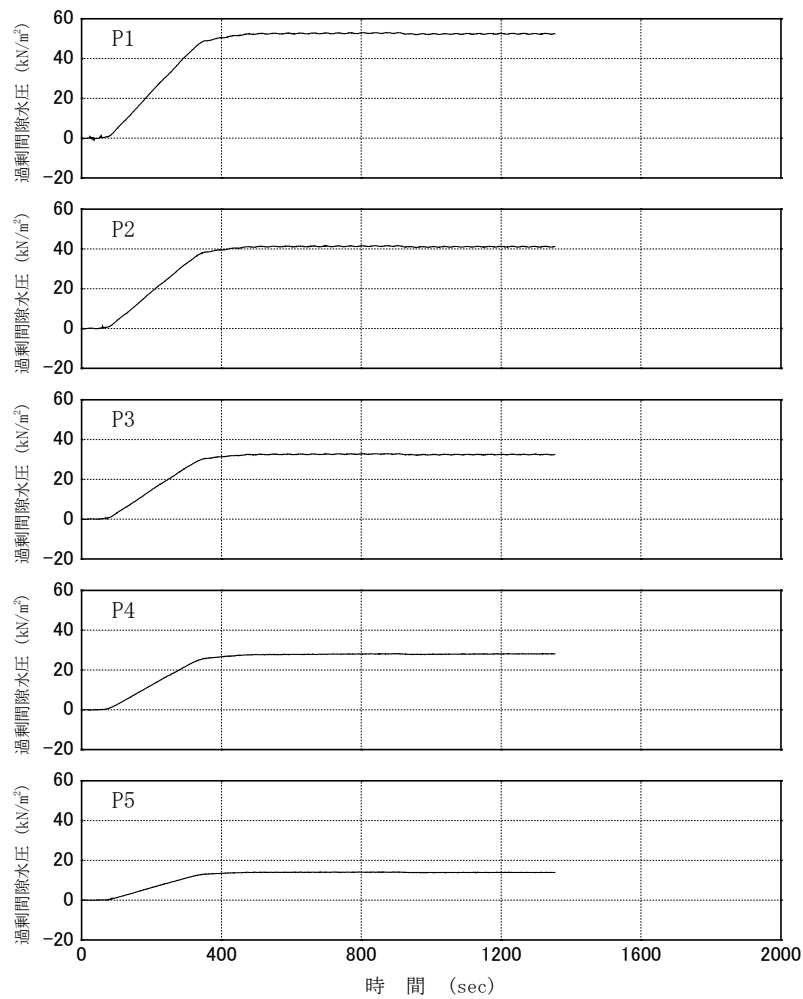
付図 2.4 (a) Case07-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その 1)



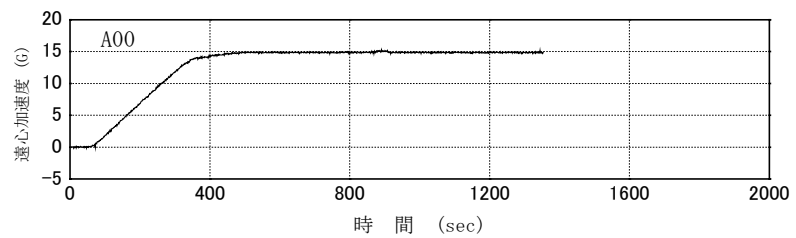
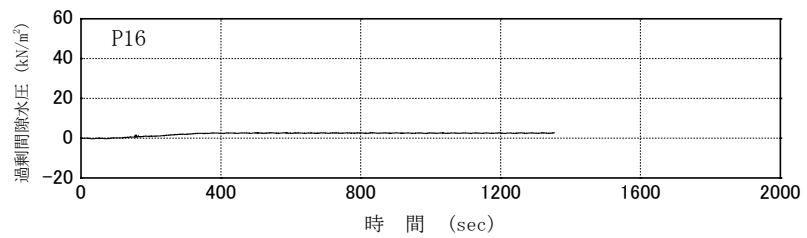
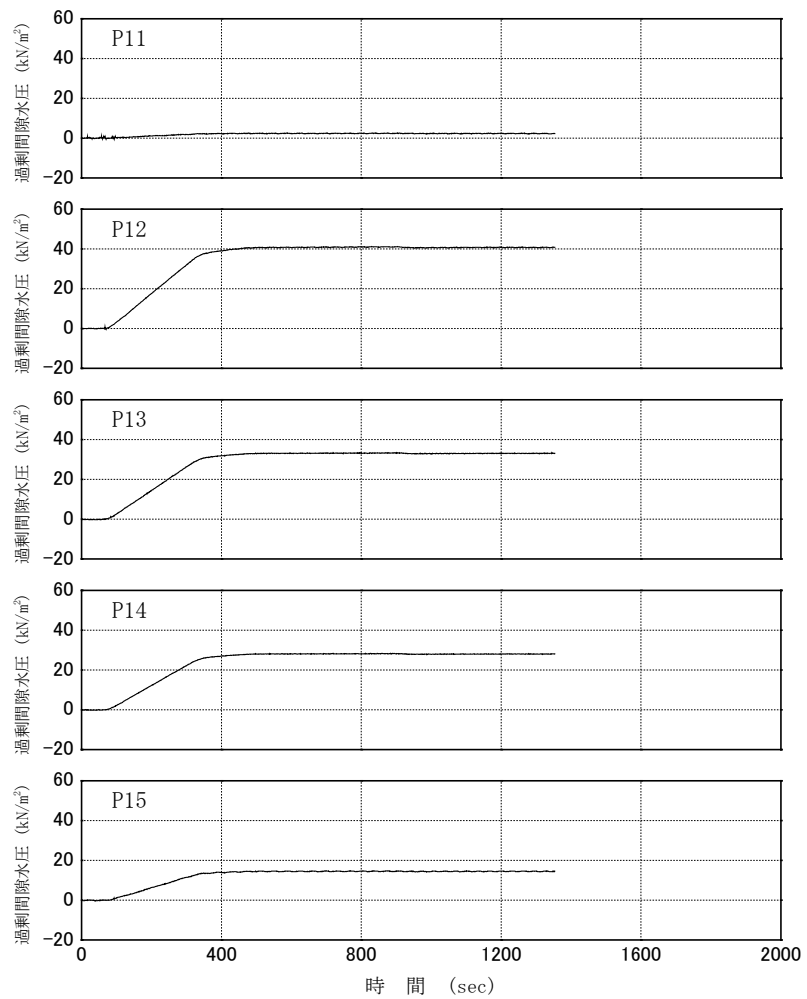
付図 2.4 (b) Case07-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その 2)



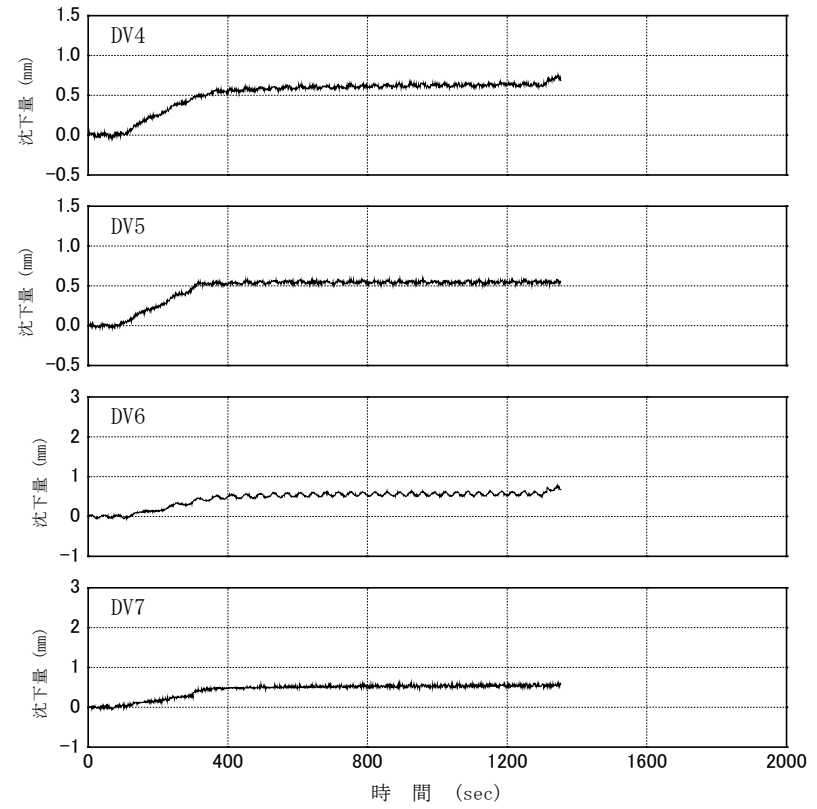
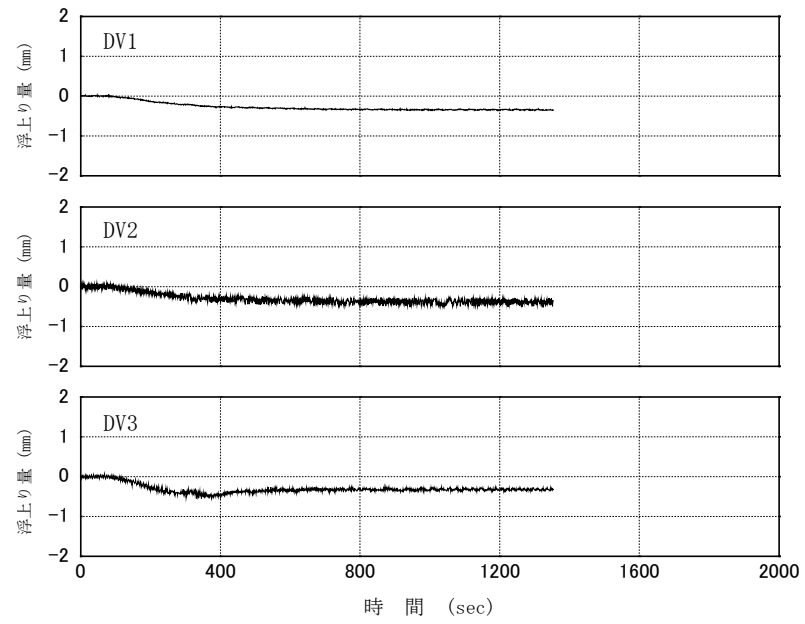
付図 2.4 (c) Case07-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その 3)



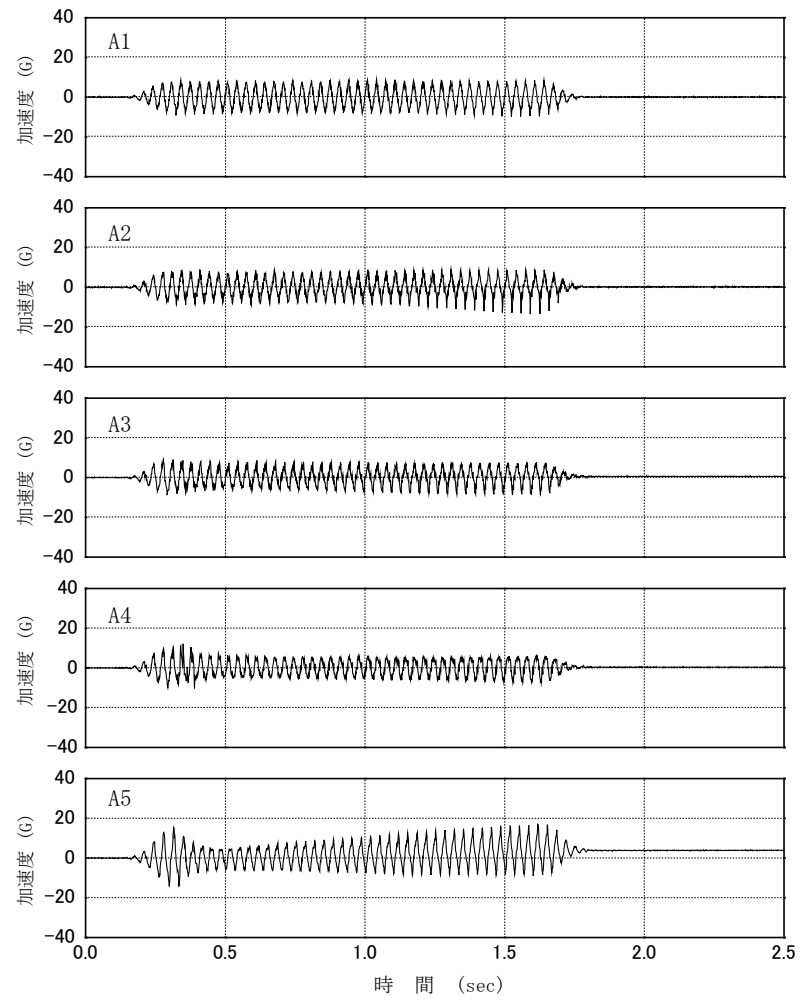
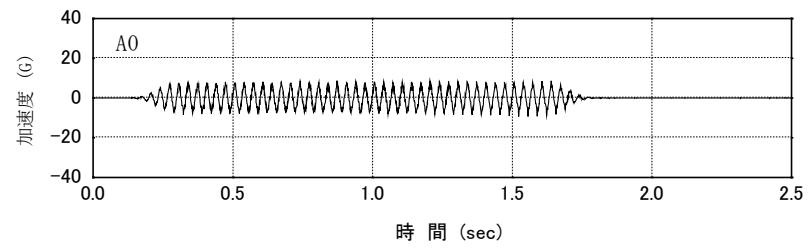
付図 3.1 (a) Case08-00 遠心加速度上昇時の時刻歴波形図 (その1)



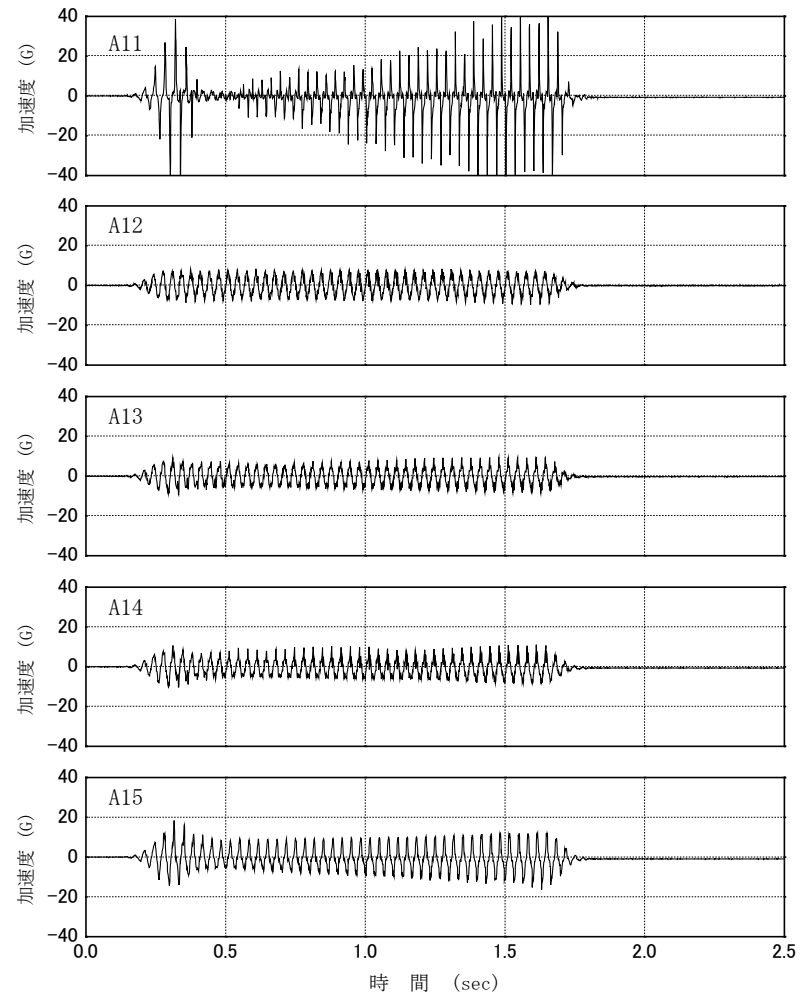
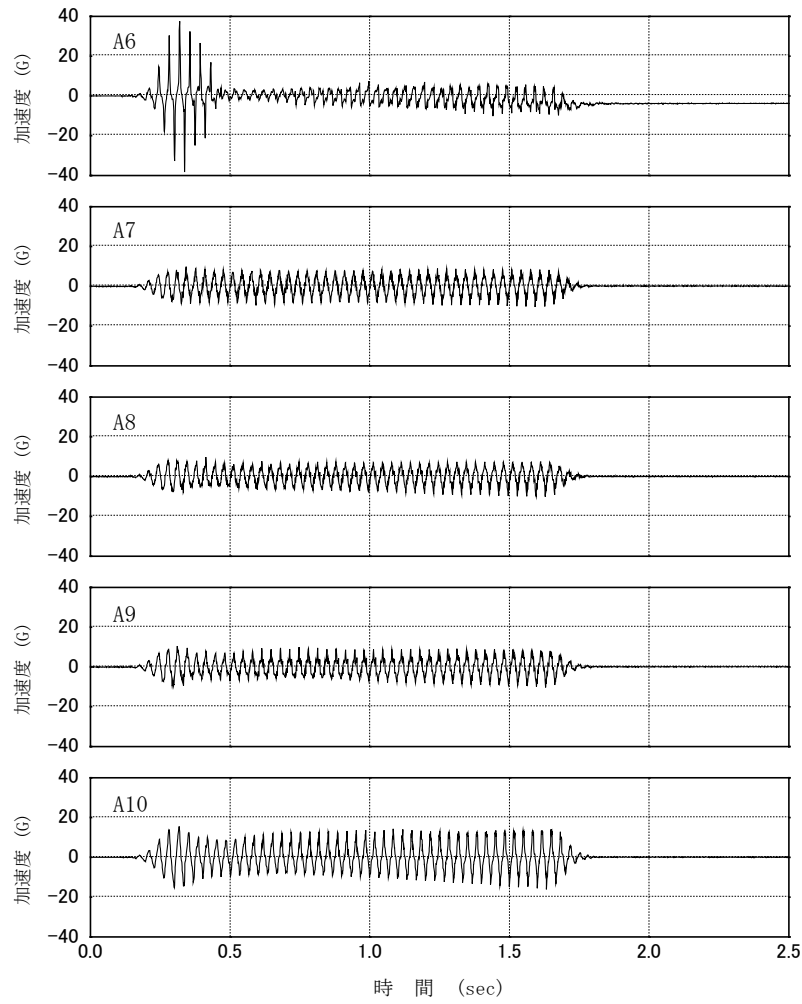
付図 3.1 (b) Case08-00 遠心加速度上昇時の時刻歴波形図 (その 2)



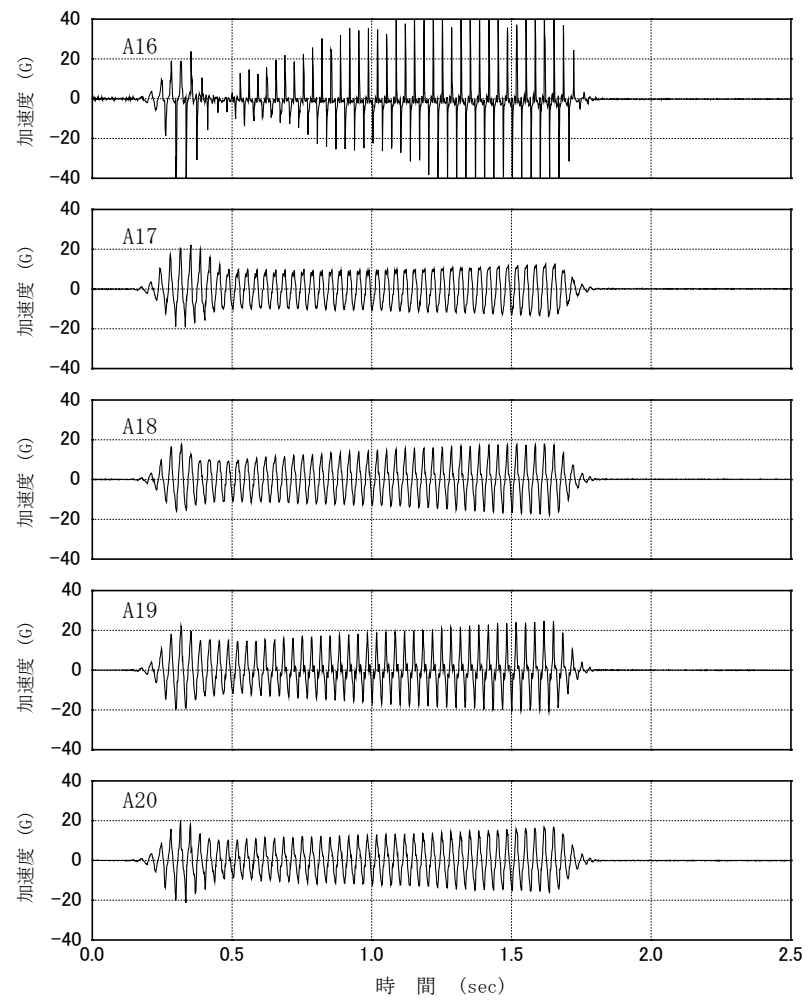
付図 3.1 (c) Case08-00 遠心加速度上昇時の時刻歴波形図 (その3)



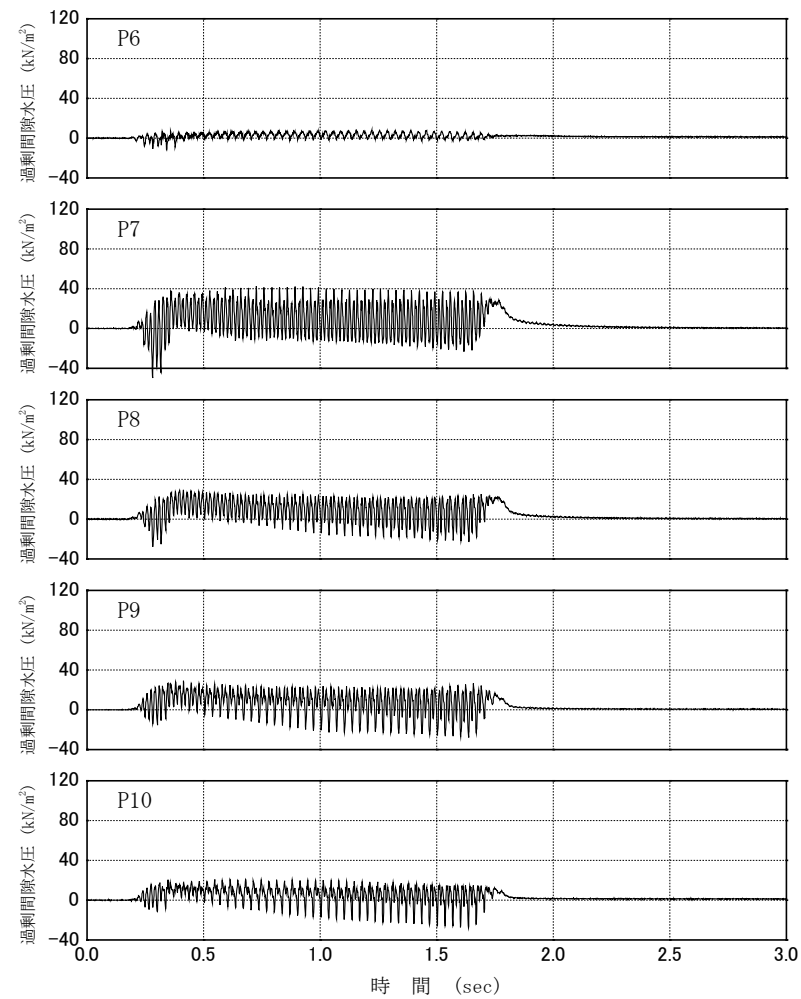
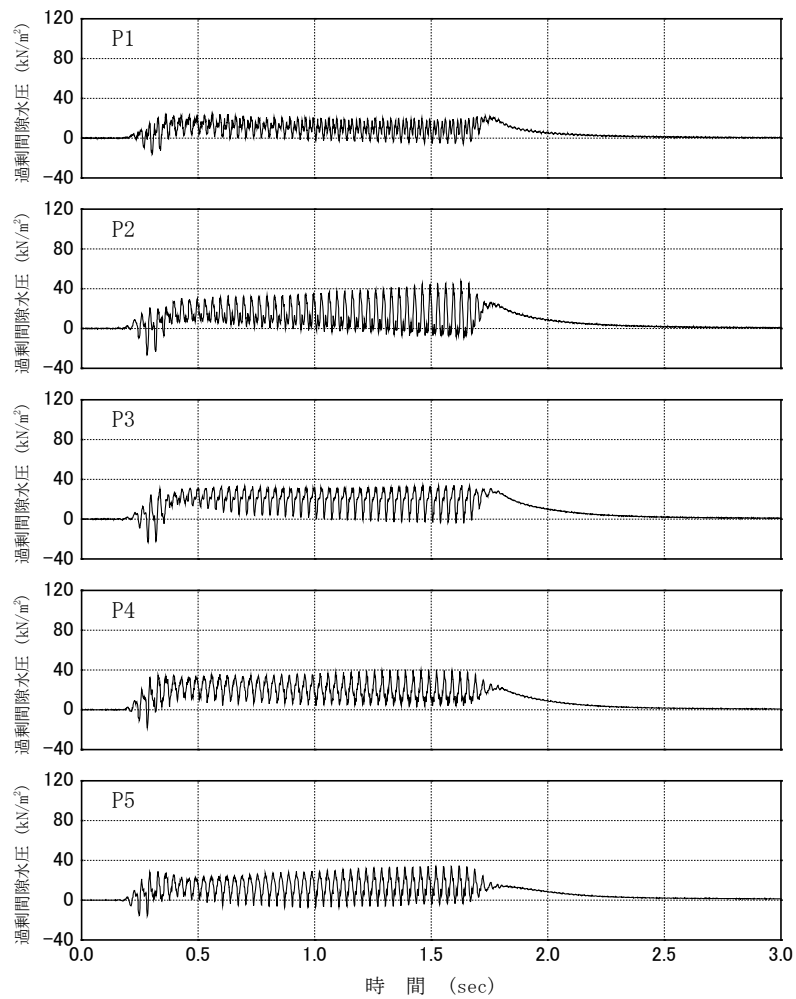
付図 3.2 (a) Case08-00 加振時の時刻歴波形図 (その 1)



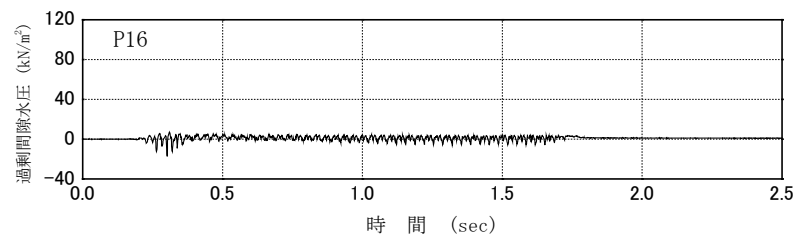
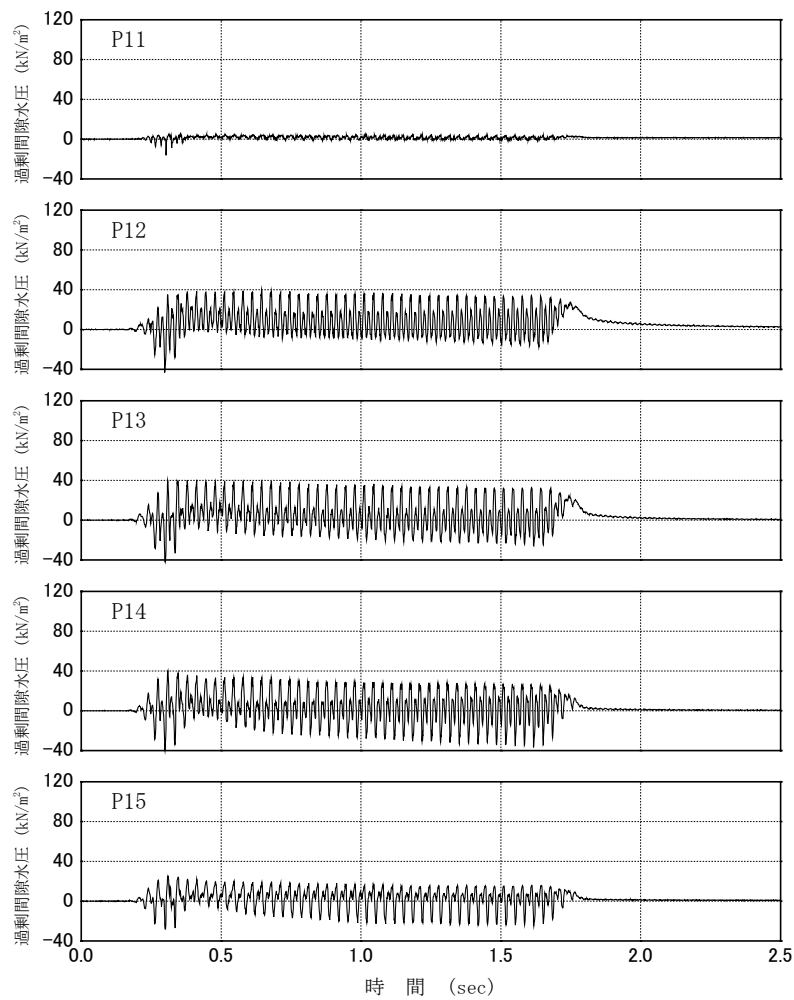
付図 3.2 (b) Case08-00 加振時の時刻歴波形図 (その 2)



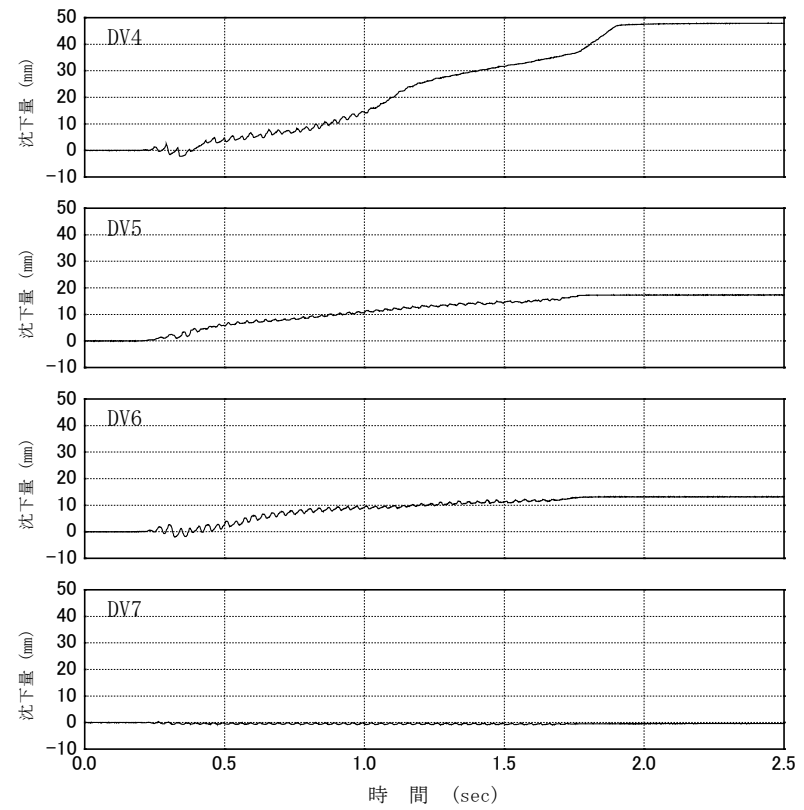
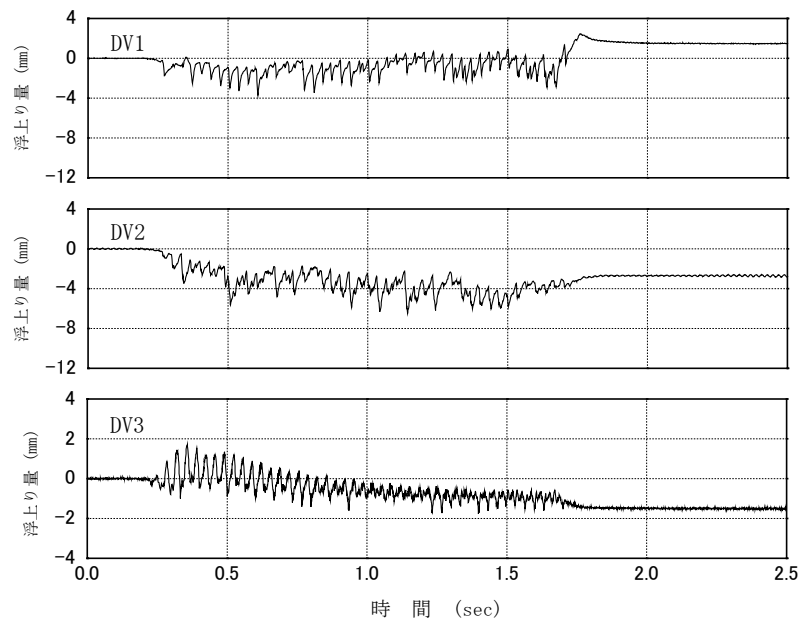
付図 3.2 (c) Case08-00 加振時の時刻歴波形図 (その 3)



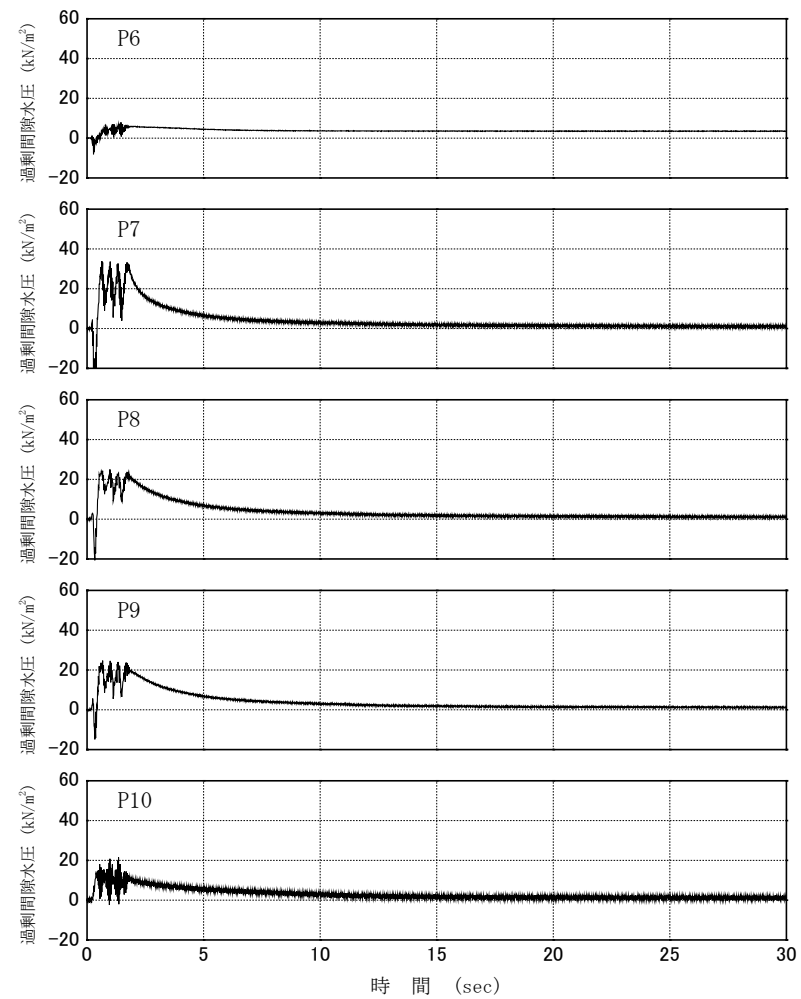
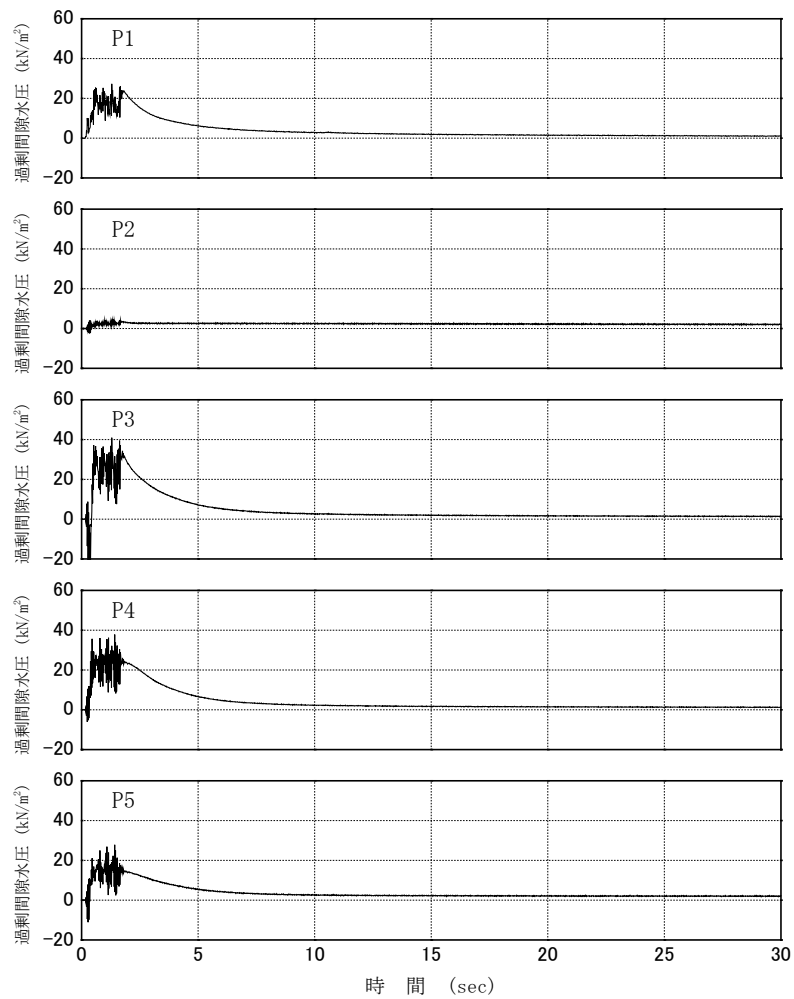
付図 3.2 (d) Case08-00 加振時の時刻歴波形図 (その4)



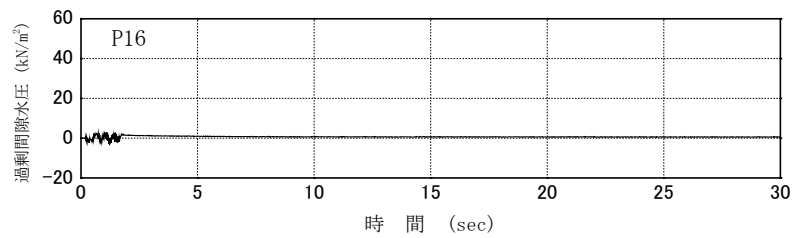
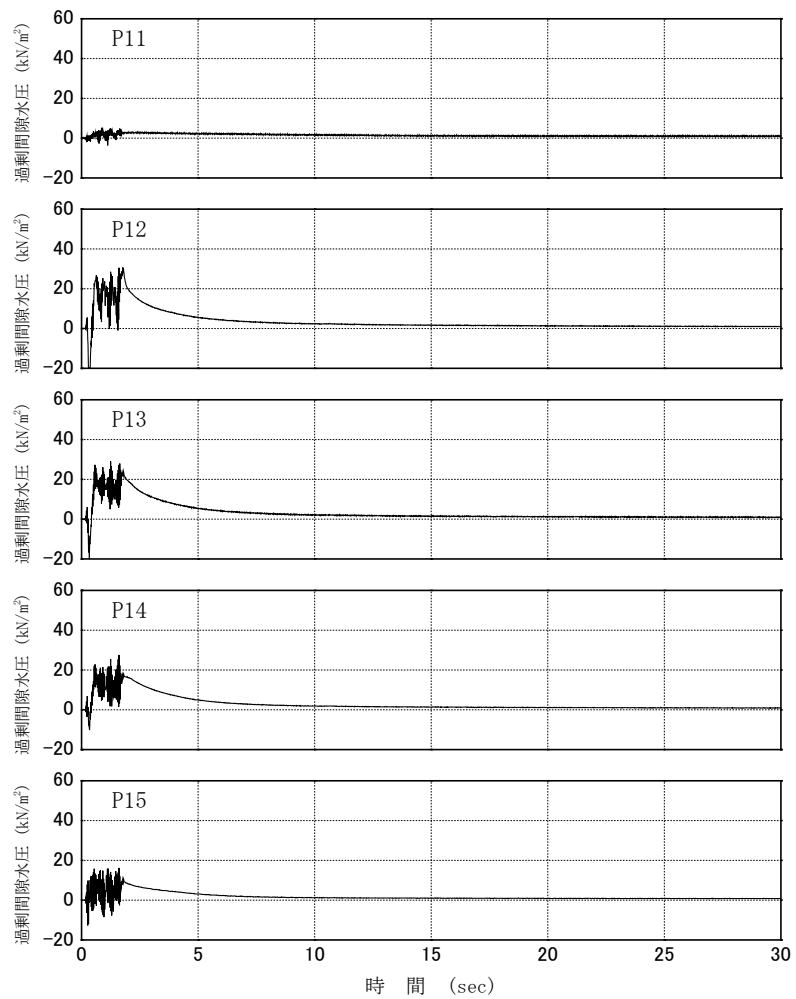
付図 3.2 (e) Case08-00 加振時の時刻歴波形図 (その 5)



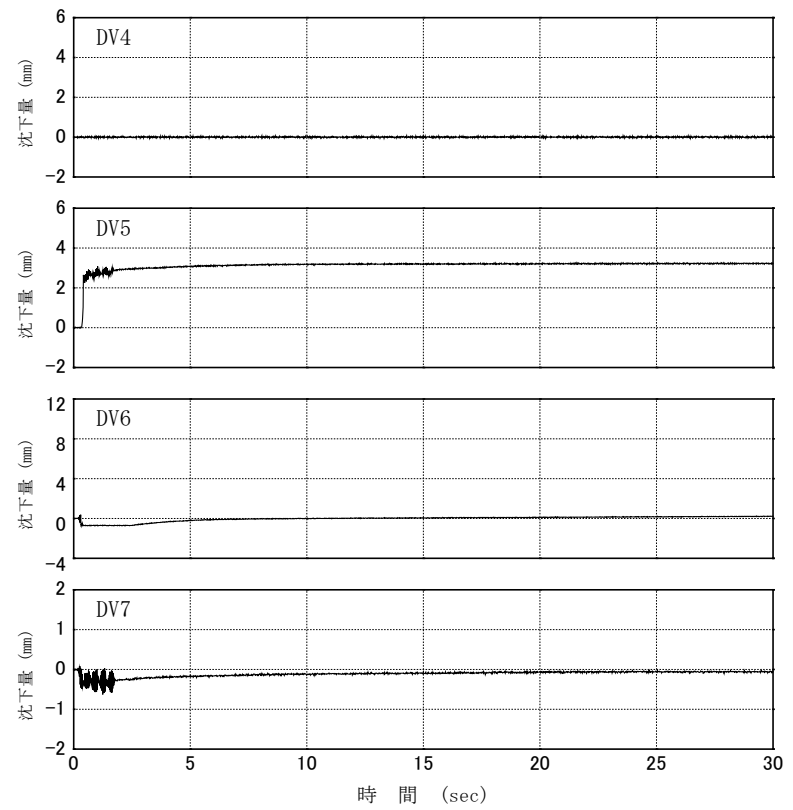
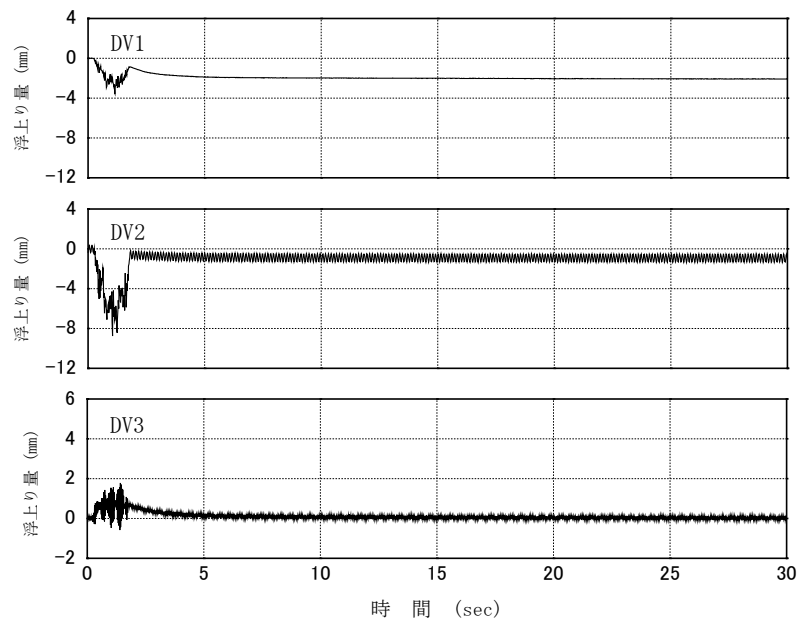
付図 3.2 (f) Case08-00 加振時の時刻歴波形図 (その 6)



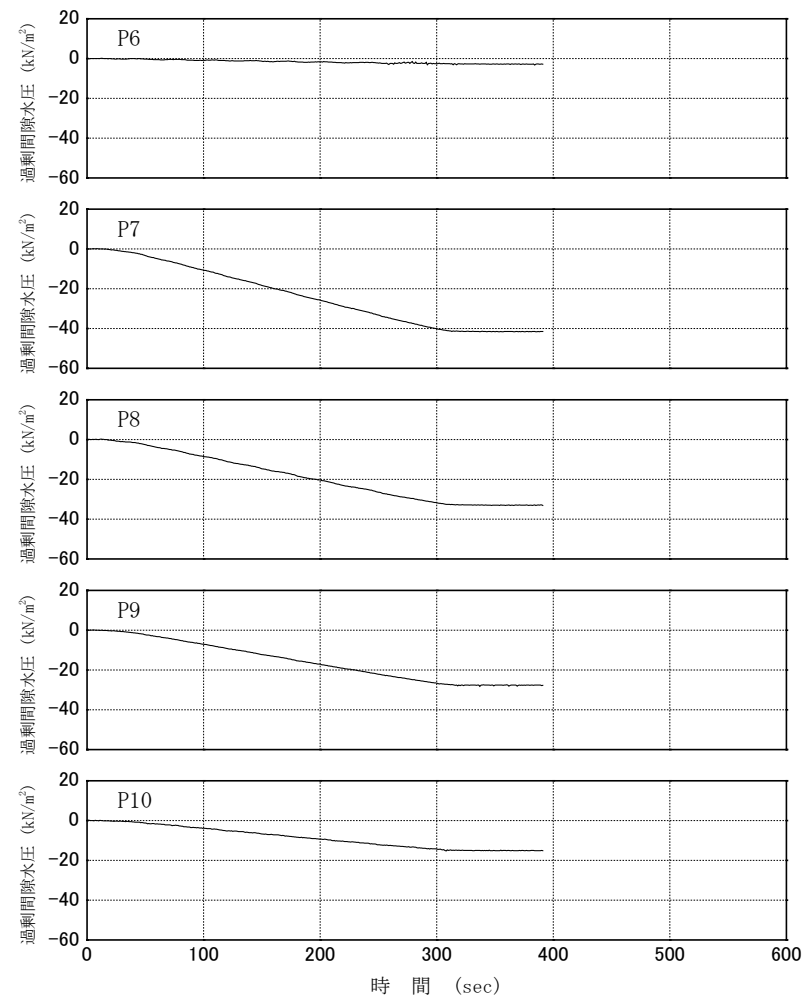
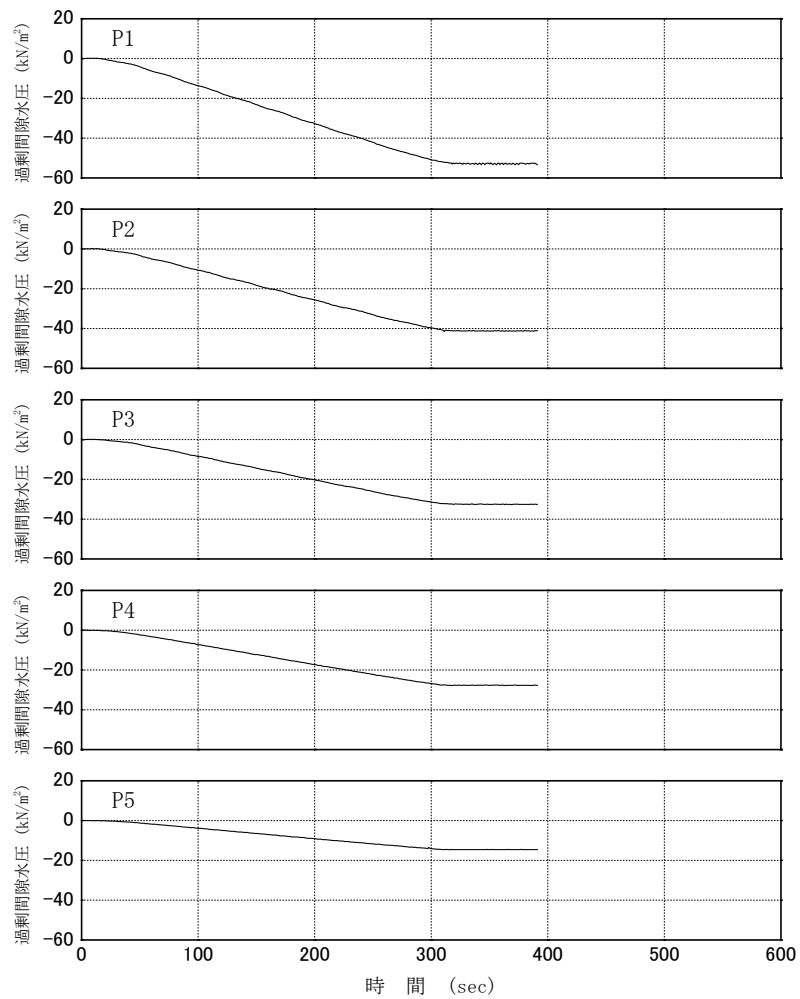
付図 3.3 (a) Case08-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その 1)



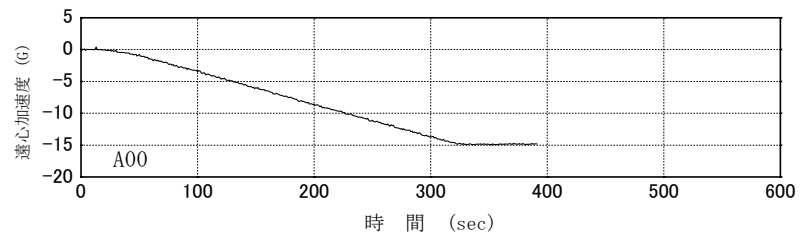
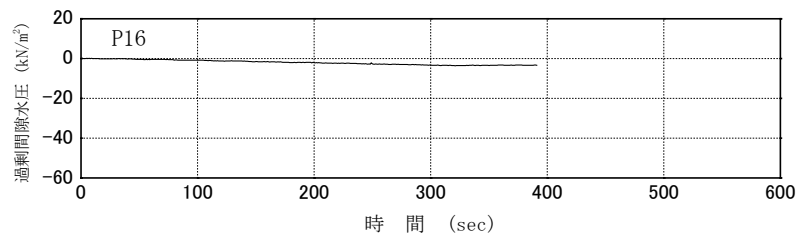
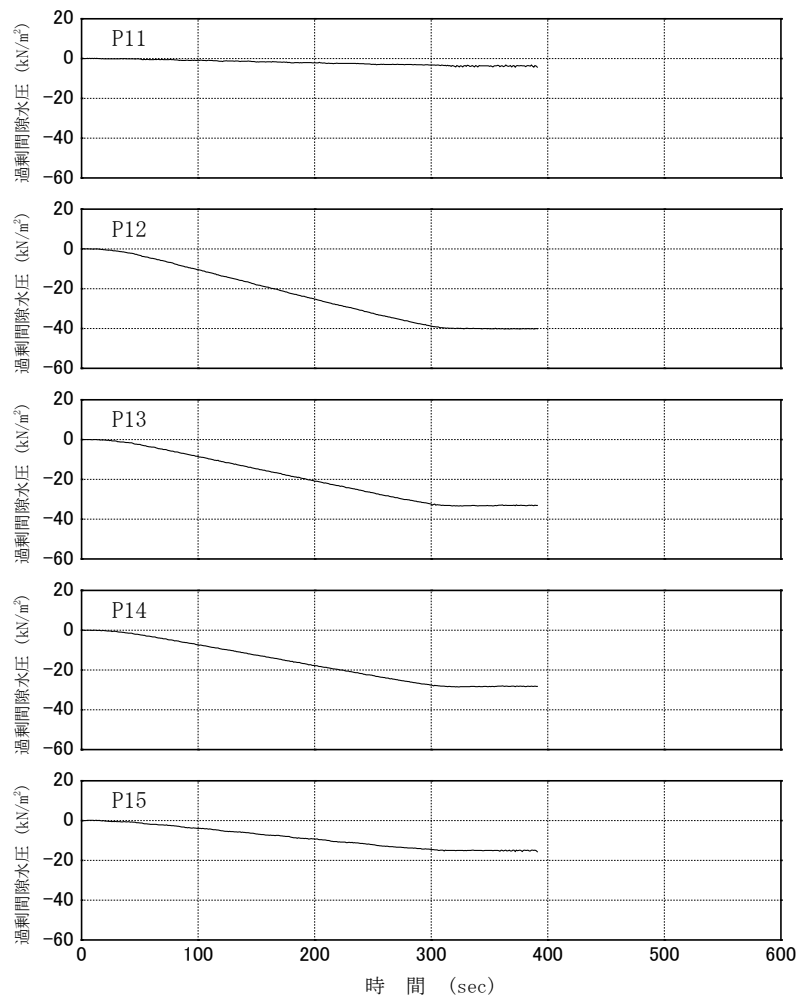
付図 3.3 (b) Case08-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その2)



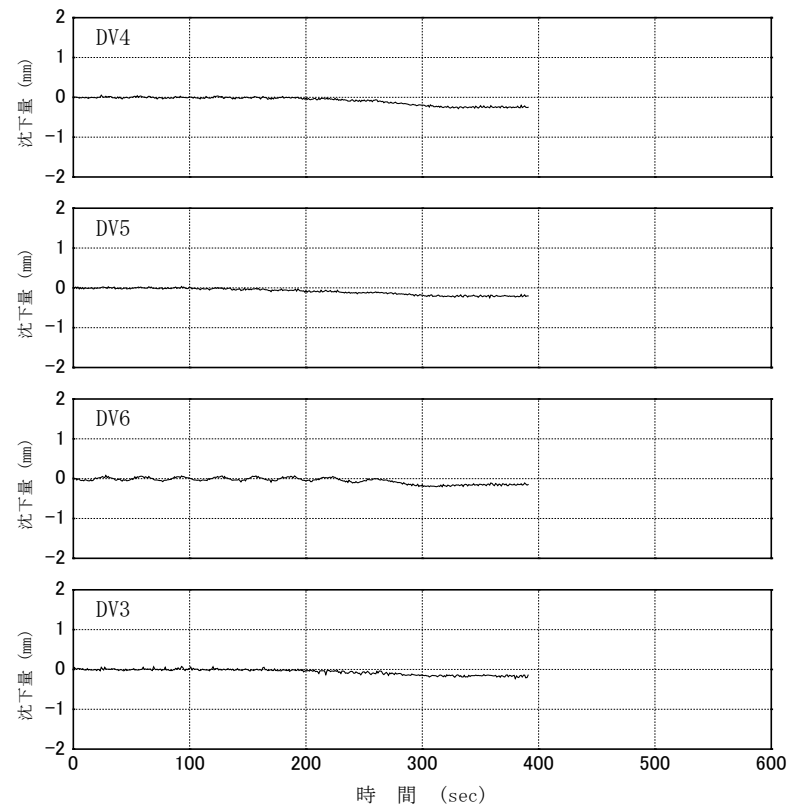
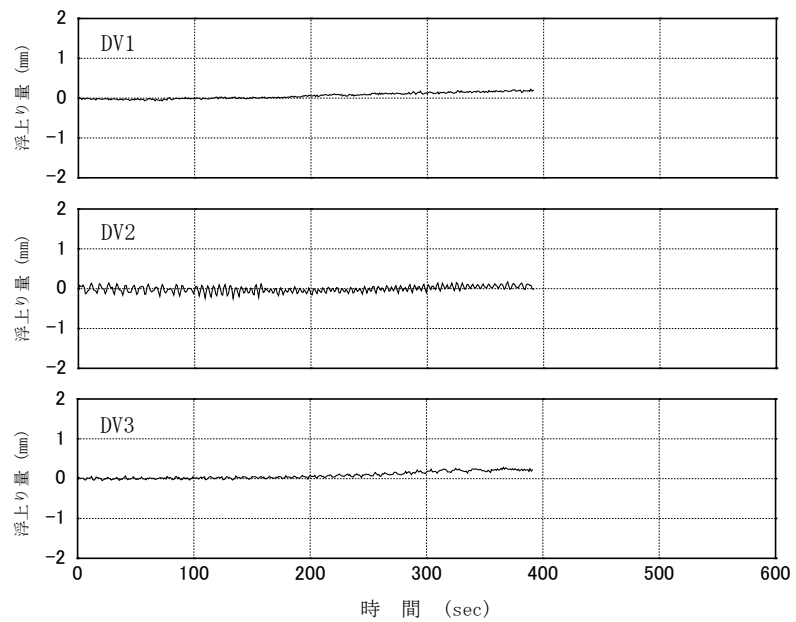
付図 3.3 (c) Case08-00 過剰間隙水圧消散時の時刻歴波形図 (その 3)



付図 3.4 (a) Case08-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その1)



付図 3.4 (b) Case08-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その 2)



付図 3.4 (c) Case08-00 遠心加速度下降時の時刻歴波形図 (その3)