

委託研究報告書

ジオダブルサンド工法の液状化特性
模型実験の結果と評価

2013 年 7 月

日本大学工学部土木工学科

地盤防災工学研究室

准教授 仙頭 紀明

目次

1	はじめに	1
1.1	実験の目的	1
1.2	検討項目	1
2	実験方法	3
2.1	実験の実施体制.....	3
2.2	実験期間	3
2.3	実験場所	3
2.4	使用試験機	3
2.5	模型材料	5
2.5.1	模型地盤材料（珪砂）	5
2.5.2	トヨドレン透水管 模擬材.....	7
2.5.3	テフオンドドレインプラス 模擬材.....	8
2.5.4	X グリッド 模擬材.....	9
2.5.5	道路舗装模型 セメント配合砂.....	9
2.6	遠心載荷実験.....	10
2.6.1	実験に用いた土槽.....	10
2.6.2	使用センサー.....	11
2.6.3	地盤作製と飽和.....	12
2.6.4	入力波	12
2.7	実験ケース	13
3	実験結果と改良効果の評価.....	20
3.1	地表面の変状の状況.....	20
3.2	間隙水圧	23
3.3	地表面変位	26
4	まとめと今後の課題.....	27

図目次

図 1-1	実験の概要図 ジオダブルサンド工法の効果検証.....	2
図 2-1	粒径加積曲線	7
図 2-2	排水ラインの概要	11
図 2-3	Case1（国道・未対策）	15
図 2-4	Case2（国道・対策工）	16
図 2-5	Case3（県道・未対策）	17
図 2-6	Case4（県道・対策工）	18
図 2-7	Case5（県道・対策工・ドレーンなし）	19
図 3-1	間隙水圧の時刻歴の比較	25
図 3-2	地表面沈下量の比較	26

表目次

表 2-1	飯豊硅砂 6 号の物性	6
表 2-2	各加振のステップにおける波数と加振時間.....	12
表 2-3	実験ケース表	13
表 2-4	センサー対応表	14

写真目次

写真 2-1	遠心载荷装置	4
写真 2-2	振動台	4
写真 2-3	一軸引張試験装置	5
写真 2-4	飯豊硅砂 6 号	6
写真 2-5	トヨドレン模型	8
写真 2-6	テフオンドドレインプラス模型	8
写真 2-7	X グリッド模型	9
写真 2-8	道路舗装模型	10
写真 2-9	実験土槽	11
写真 3-1	加振前後の地表面状況 (Case3 未対策)	21
写真 3-2	加振前後の地表面状況 (Case4 対策工)	22
写真 3-3	加振前後の地表面状況 (Case5 対策工・ドレーンなし)	23

1 はじめに

ジオダブルサンド工法はテフォンドドレインプラス（以下テフォンド）、エックスグリッド（格子状シート）、そして透水管から構成され、地震発生時には過剰間隙水圧の上昇によって噴き上がろうとする地下水をテフォンドで遮断し、同時に透水管で間隙水圧を消散させるシステムをもつ工法である。この工法を道路や駐車場等に適用することで液状化の影響が抑制されることが期待される。

1.1 実験の目的

遠心載荷装置を用いて、本工法の液状化に対する効果を模型レベルで確認することを目的とした。ここでいう効果とは、道路舗装模型が破損しないこと、道路直下の過剰間隙水圧が抑制されること、道路の沈下が抑制されることである。

1.2 検討項目

本実験では、ジオダブルサンド工法の効果について、①国道への対策効果、②県道・市道への対策効果、について検討を行うため模型舗装厚さと対策工法の有無について異なる模型地盤を作製し実験を行った。さらに対策工有りのケースにおいても、透水管による排水効果の有無についても検討を行った。以下に実験ケースと検討項目を示す。なお、国道は舗装厚を厚くしたケース、県道・市道は、模型路盤の厚さを薄くしたケースである。

Case1：国道を対象とした対策を施さないケース

Case2：国道を対象とした対策工を施したケース

Case3：県道・市道を対象とした対策を施さないケース

Case4：県道・市道を対象とした対策工を施したケース

Case5：県道・市道を対象とした対策工（ドレーン排水管無し）を施したケース。

以下，実施する模型実験の概要図である．

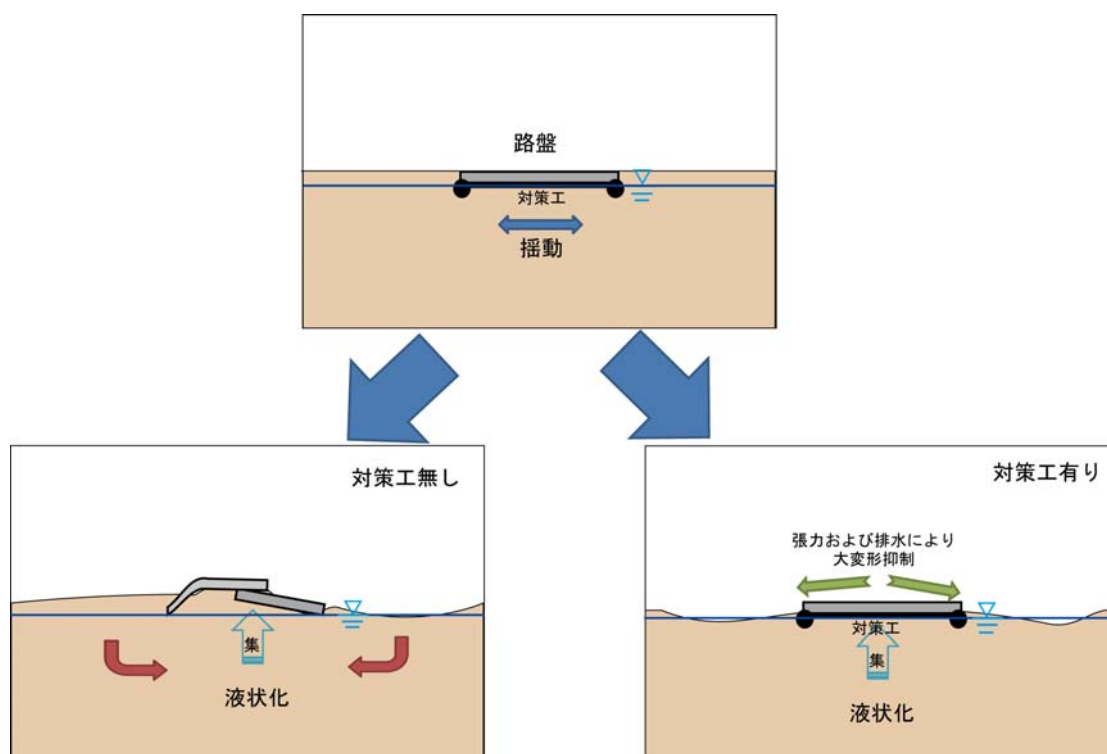


図 1-1 実験の概要図 ジオダブルサンド工法の効果検証

2 実験方法

2.1 実験の実施体制

以下，本実験を実施するにあたり組織した体制である．

① 技術的指導

日本大学 工学部 土木工学科 准教授 仙頭紀明

② 実験班

ペンタテクノサービス(株) 技術部

2.2 実験期間

実験実施期間は，2013 年 4 月 1 日～2013 年 5 月 31 日である．

2.3 実験場所

ペンタテクノサービス株式会社（五洋建設株式会社 技術研究所 内）

329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1

2.4 使用試験機

① 遠心載荷実験装置（振動台を含む）

② 一軸試験装置（引張）

③ 地盤工学会指定土質試験器具



写真 2-1 遠心载荷装置



写真 2-2 振動台



写真 2-3 一軸引張試験装置

2.5 模型材料

本実験で用いる材料は次のものである．

- ① 模型地盤材料（珪砂）
- ② トヨドレン透水管 模擬材
- ③ テフオンドドレインプラス 模擬材
- ④ X グリッド 模擬材
- ⑤ 道路路盤模型 セメント配合砂

2.5.1 模型地盤材料（珪砂）

実験に用いた材料は、液状化しやすい地盤を作製するため、珪砂系の材料として、飯豊珪砂 6 号を用いた．以下、実験に用いた砂試料の諸元を示す．



写真 2-4 飯豊硅砂 6 号

表 2-1 飯豊硅砂 6 号の物性

項目	単位	
土粒子密度 ρ_s	g/cm^3	2.643
透水係数 k	m/s	2.80×10^{-4}
最大間隙比 $e_{\max}$		0.89
最小間隙比 $e_{\min}$		0.53
最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$	g/cm^3	1.727
最小乾燥密度 $\rho_{d\min}$	g/cm^3	1.395

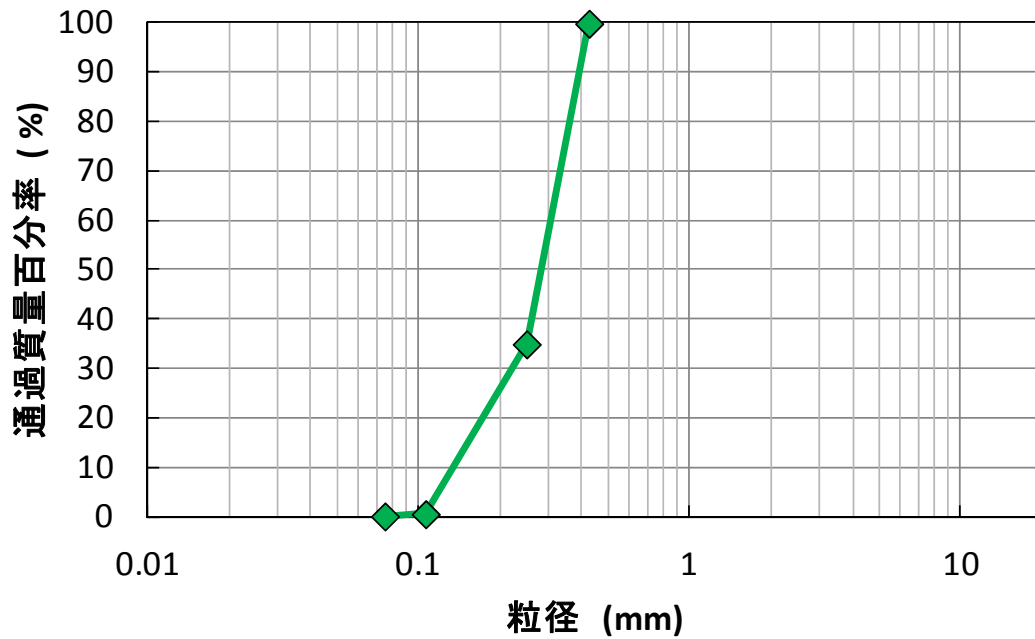


図 2-1 粒径加積曲線

2.5.2 トヨドレン透水管 模擬材

トヨドレン模型は、排水ドレーン管の模型であるため、振動時の地盤のせん断挙動に寄与しないものを選定する必要がある。本実験では、ドレーン材自体が地盤の動きを拘束しないようにコイル状に加工した針金を芯材として透水性の良いレース素材のフィルターを巻き付けた直径 10mm(実寸：200mm)の円筒材を使用し、所定の位置に配置した。なお、ドレーンのウェルレジスタンスについては、今回ドレーン自体を水平に配置しているため考慮していない。また、振動中にドレーンに排水される間隙水は、定量ポンプにより模型土槽外に排出されるよう工夫している。なお、既往の遠心模型実験より今回用いたドレーン模型が十分な透水性能を有することは確認済みである。

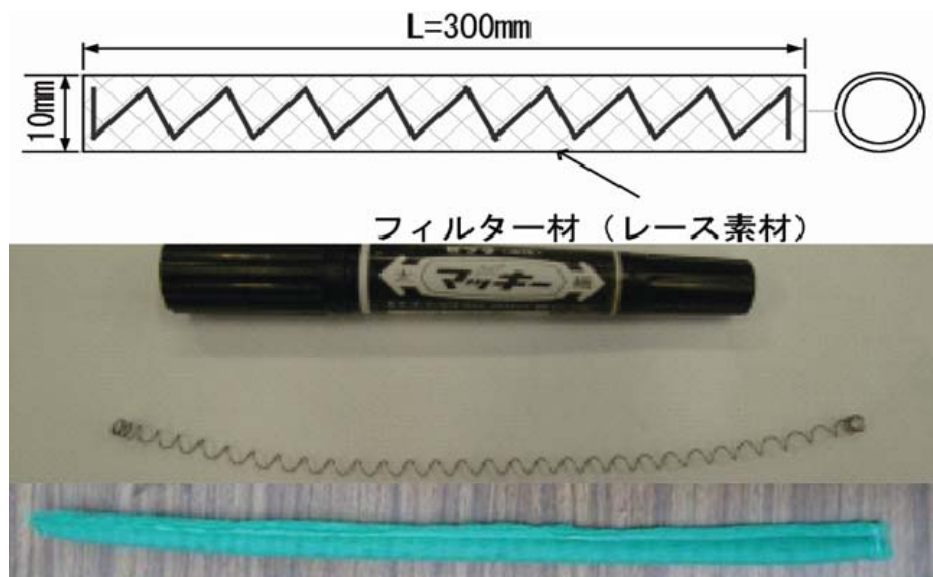


写真 2-5 トヨドレン模型

2.5.3 テフオンドレインプラス 模擬材

模型材を決定するために引張試験を実施し引張強度を把握, 遠心 20G 場で 1G 場相当の材料となるよう材料を決定した (後述参照のこと).

模型材は, ポリカーボネート(厚さ 0.25mm)であり, 引張強度は 14kN/m である.

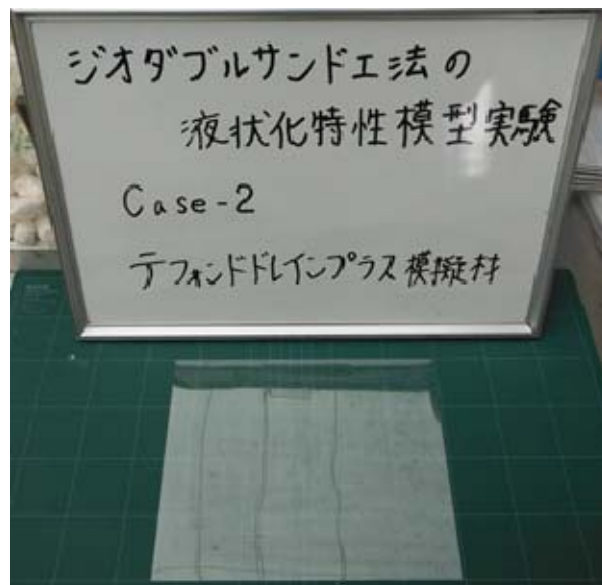


写真 2-6 テフオンドレインプラス模型

2.5.4 X グリッド 模擬材

事前実験により得られている X グリッドの引張強度を基に遠心 20G 場で 1G 場相当の材料となるよう材料を決定した。

模型材は、アクリル樹脂で引張強度は 40kN/m である。

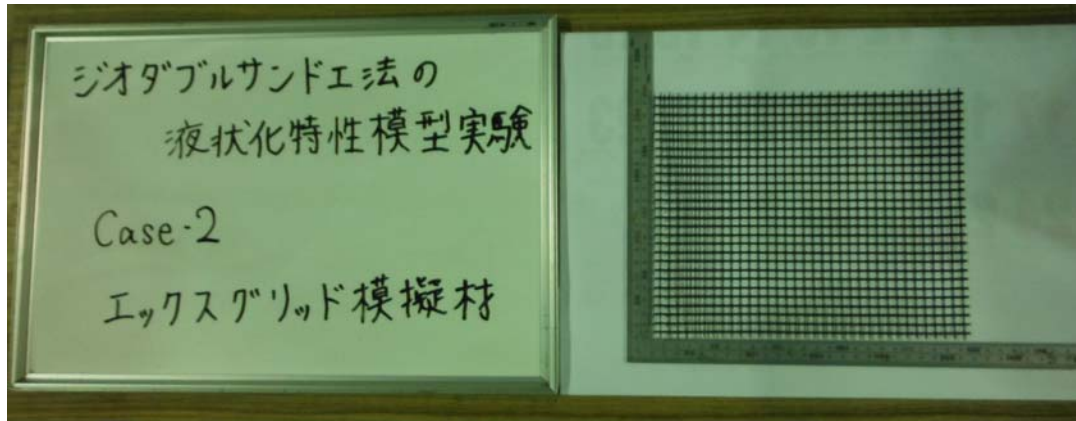


写真 2-7 X グリッド模型

2.5.5 道路舗装模型 セメント配合砂

道路舗装は、珪砂 6 号と粘土（カオリン）を重量比 8 : 2 で混合した材料に重量比で 1.0% のセメント添加を行い、含水比 11.0% 相当の水を加え固化させたセメント改良砂を下記所定のサイズに整形したものを用了。なお、単位体積重量は $\gamma = 21 \text{kN/m}^3$ に調整した。

砂：飯豊珪砂 6 号

粘土：カオリン HA

セメント：普通ポルトランドセメント（太平洋セメント製）

路盤サイズ：幅：200mm×奥行き：248mm×厚さ：15mm および 30mm（試験ケース毎に異なる）



写真 2-8 道路舗装模型

2.6 遠心載荷実験

小型土槽内に模擬道路地盤を作製し，遠心載荷装置で地震波を模型に加振することで液状化を発生させ，道路の変位や地盤の間隙水圧の変化を測定して，工法の効果確認を行った．

2.6.1 実験に用いた土槽

使用する土槽は，写真のような $W250 \times L600 \times H400$ のアルミ合金製剛土槽である．加振時にトヨドレン模型より排水される間隙水については，模型土槽外部にロータリーポンプを配置，土槽外部に設置した水槽（排水受け）に排出されるように排水ラインを加工した．



写真 2-9 実験土槽

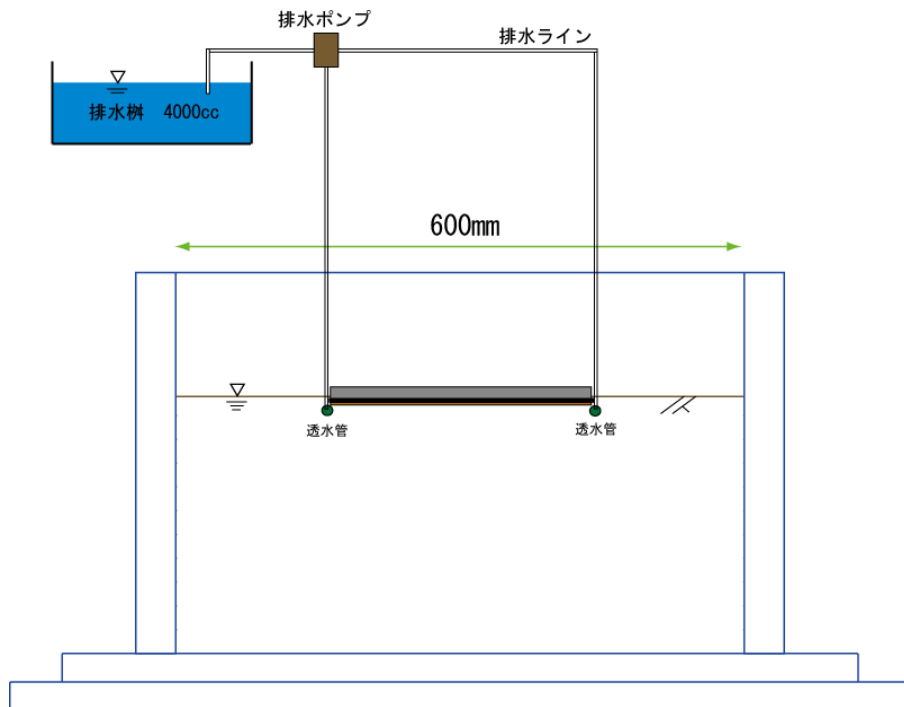


図 2-2 排水ラインの概要

2.6.2 使用センサー

模型地盤には、地盤の挙動を把握する目的で、間隙水圧計と加速度計を設置した。

- ①間隙水圧計 : SSK 製 (容量 : 200kPa) × 2, Druck 社 (容量 : 100kPa) × 2
- ②加速度計 : セコニック製 (容量 : 200G) × 4
- ③レーザー変位計 : キーエンス製 容量 : 100±40mm × 2 (路盤および液状化地盤)

2.6.3 地盤作製と飽和

地盤は、相対密度 D_r が 50% になるように湿潤締固め法（初期含水比 5.0%）で作製した。地盤作製後、メトロース水溶液を予め真空ポンプで減圧したものを、遠心場 20G 下において模型地盤に下部より注入、飽和させた。実験ケースの地下水位は舗装下部（ドレーン位置）とした。

＜地盤作製手順＞

- ① 1G 場で相対密度 50% になるように、数段階で作製。
- ② 20G（遠心場）にて地下水位面まで通水⇒飽和
- ③ 1G 場にて路盤，ジオダブルサンド工法模型配置
- ④ 20G 場にて，圧密⇒振動実験開始

2.6.4 入力波

入力地震波は実寸スケールで最大加速度 200gal，周波数 3Hz の正弦波を加振した。波数は 60 波を基本ケースとした。ただし最初に実施した舗装が厚い無対策のケース（Case1）において路盤にクラックが入るなどの変化が見受けられなかった為，表に示すように載荷回数をステップごとに増やしていった。加振間の時間は 5 分以上間隔をあけているため残留水圧などはない。加振のパターンは Case1～Case5 まで同じ条件とした。

表 2-2 各加振のステップにおける波数と加振時間

ステップ	波数	加振時間(秒)（模型）	加振時間（秒）（実スケール）
1	60	1	20
2	60	1	20
3	300	5	100
4	300	5	100
5	600	10	200
6	1200	19.98	400

2.7 実験ケース

実験ケースの想定道路と内容をまとめたものを示す。各ケースの断面図および平面図と計測センサーの設置状況を以下に示す。なお、図中のセンサー番号については表に示すように加速度計には、頭文字に A をつけて、間隙水圧計には頭文字に P をつけて、変位計には D をつけて、その後に通し番号を付けて区別した。

表 2-3 実験ケース表

Case	対策	想定道路	内容
Case1	未対策	国道	上層路盤と下層路盤のみ
Case2	対策工	国道	上層路盤と下層路盤の間にメッシュシートを設置し 下層路盤直下に遮水シート及び透水管を設置。
Case3	未対策	県道(市道)	上層路盤のみ
Case4	対策工	県道(市道)	上層路盤中にメッシュシートを設置し 遮水シート，透水管を設置。
Case5	対策工 ドレーン無	県道(市道)	上層路盤中にメッシュシートを設置し 遮水シートを設置。ただし，ドレーンを配置していない。

表 2-4 センサー対応表

番号	名称	種別	備考
CH1	P1	間隙水圧計	道路中心・上層
CH2	P2		道路端部・上層
CH3	P3		道路中心・下層
CH4	P4		道路端部・下層
CH5	A1	加速度計	道路中心・上層
CH6	A2		道路端部・上層
CH7	A3		道路中心・下層
CH8	A4		道路端部・下層
CH9	A5		土槽（入力地震波）
CH10	D1	変位計	道路中心の表面
CH11	D2		道路より離れた地表面

Case1 センサー配置図

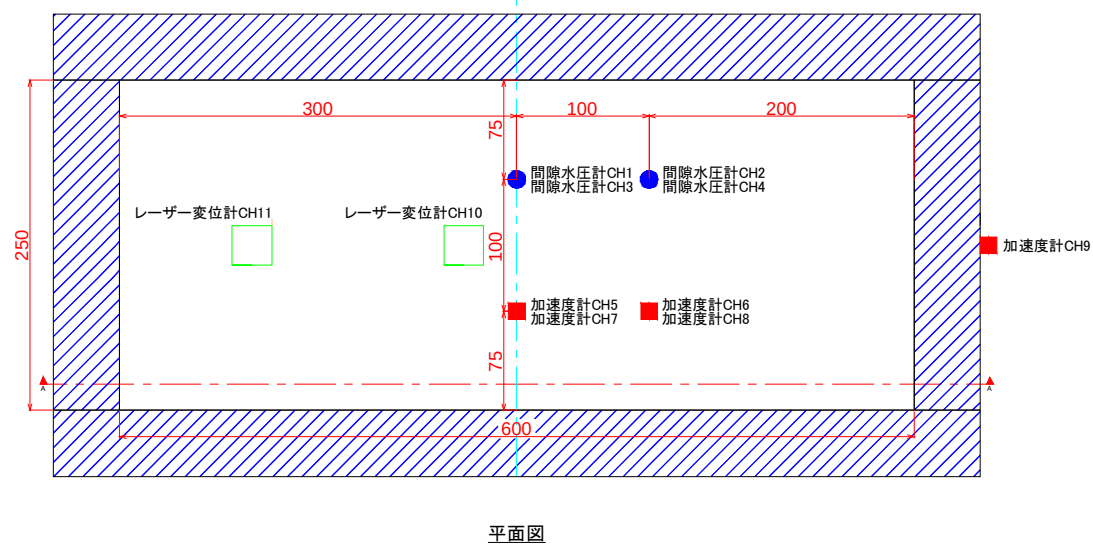
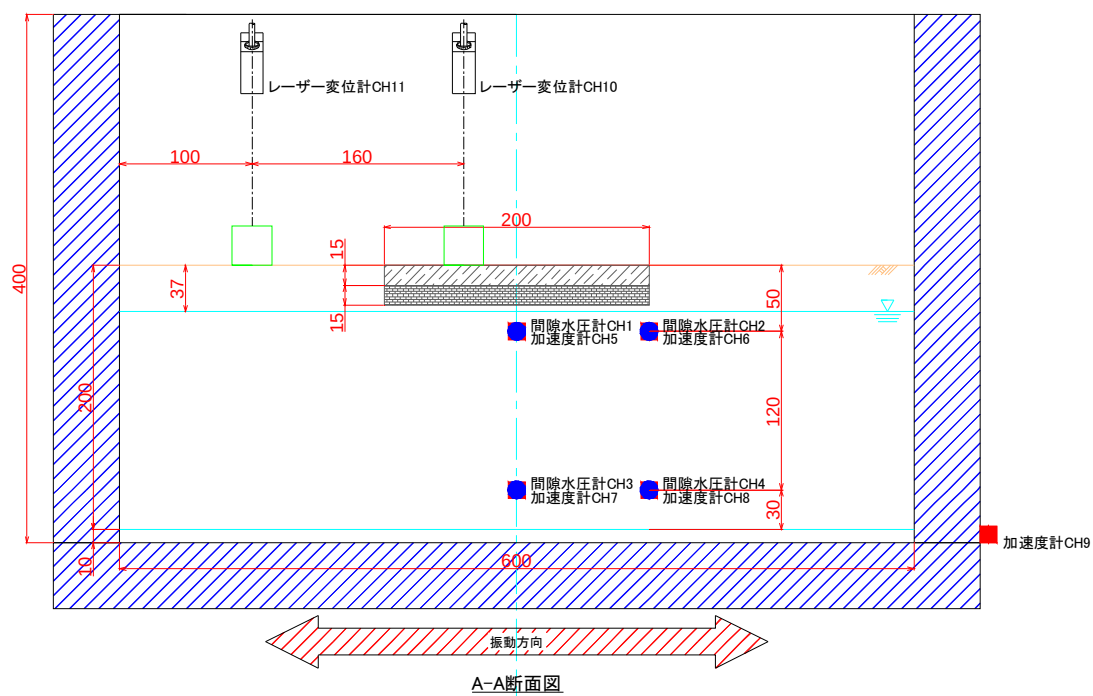


図 2-3 Case1 (国道・未対策)

Case2 センサー配置図

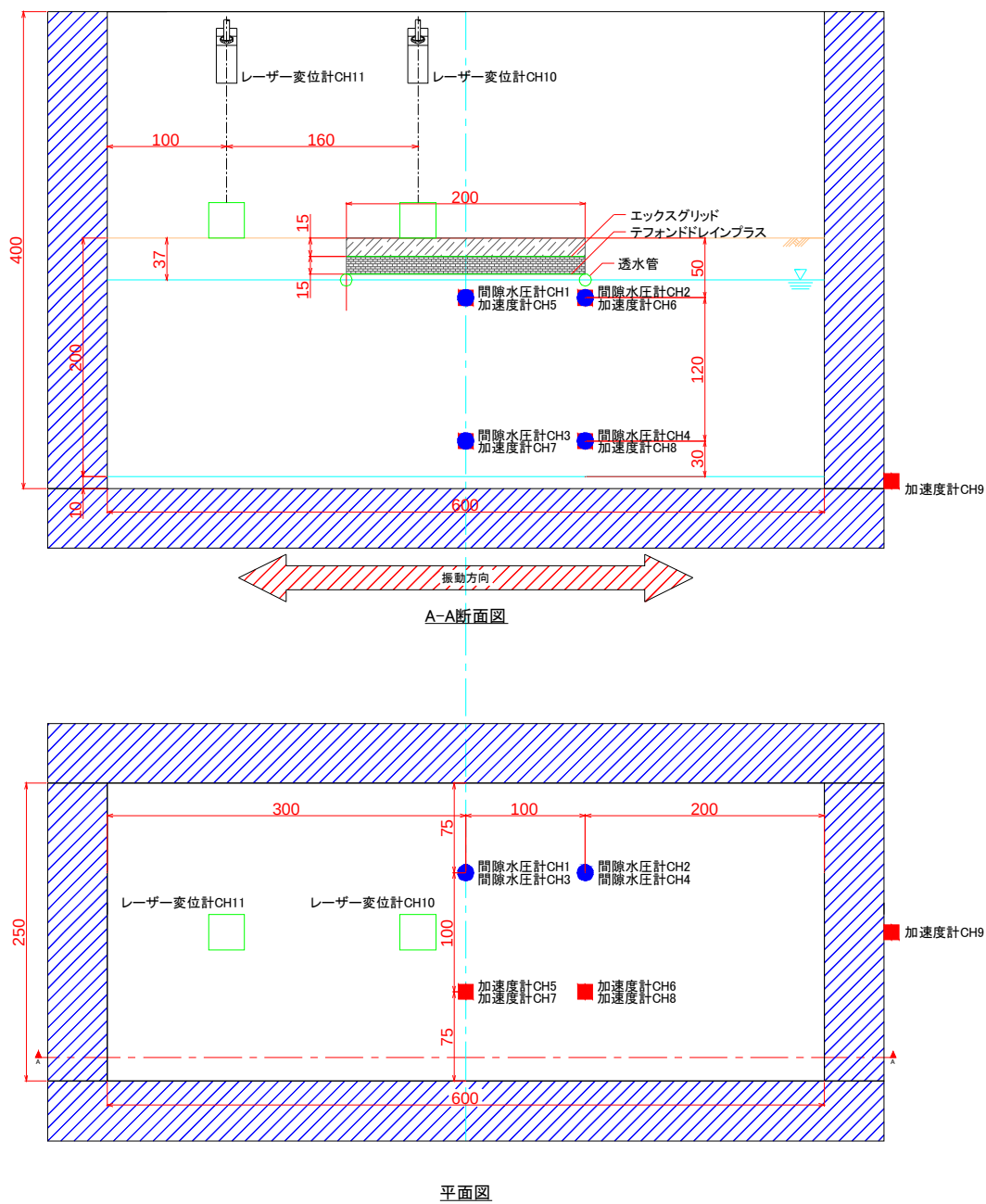


図 2-4 Case2 (国道・対策工)

Case3 センサー配置図

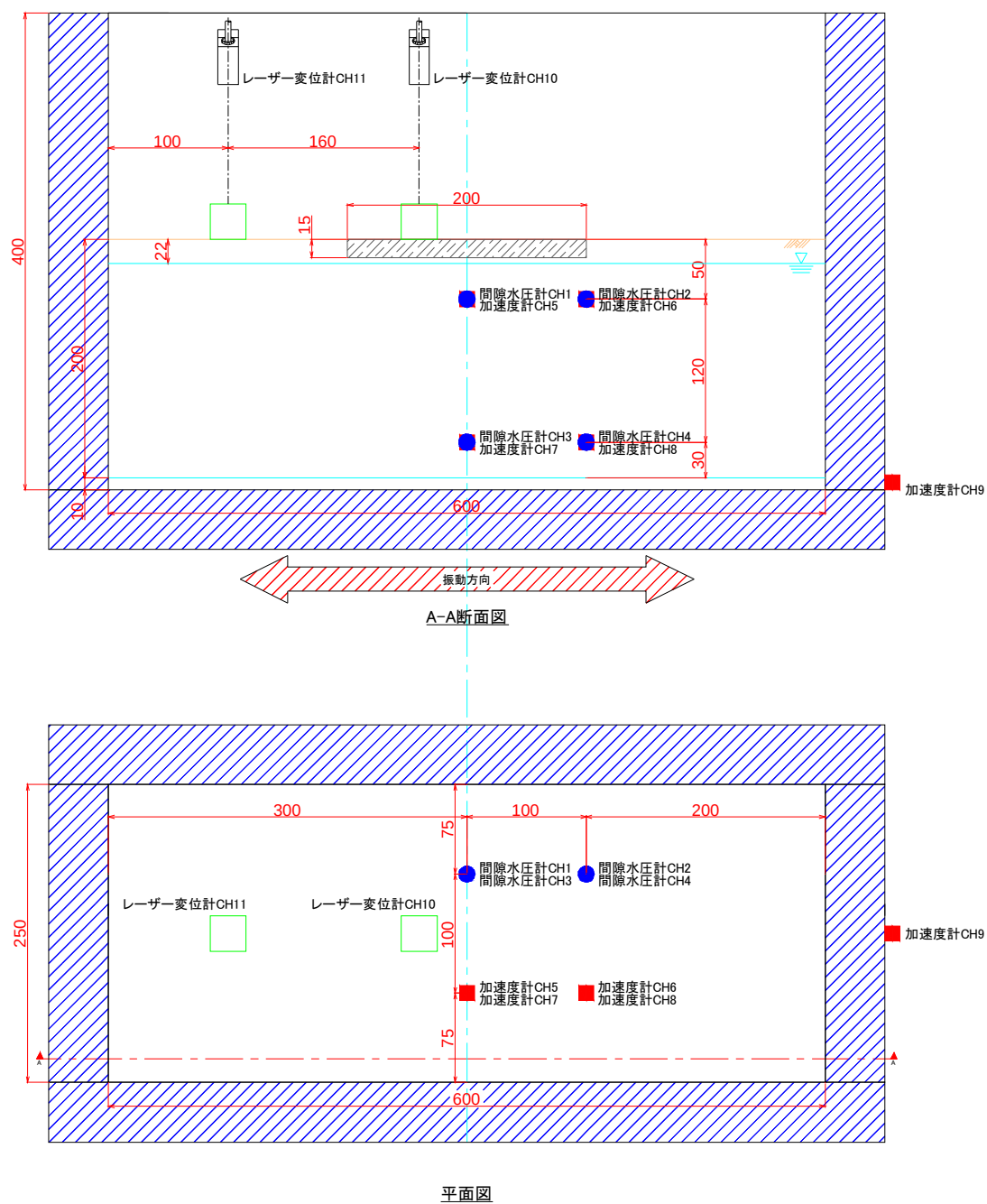


図 2-5 Case3 (県道・未対策)

Case4 センサー配置図

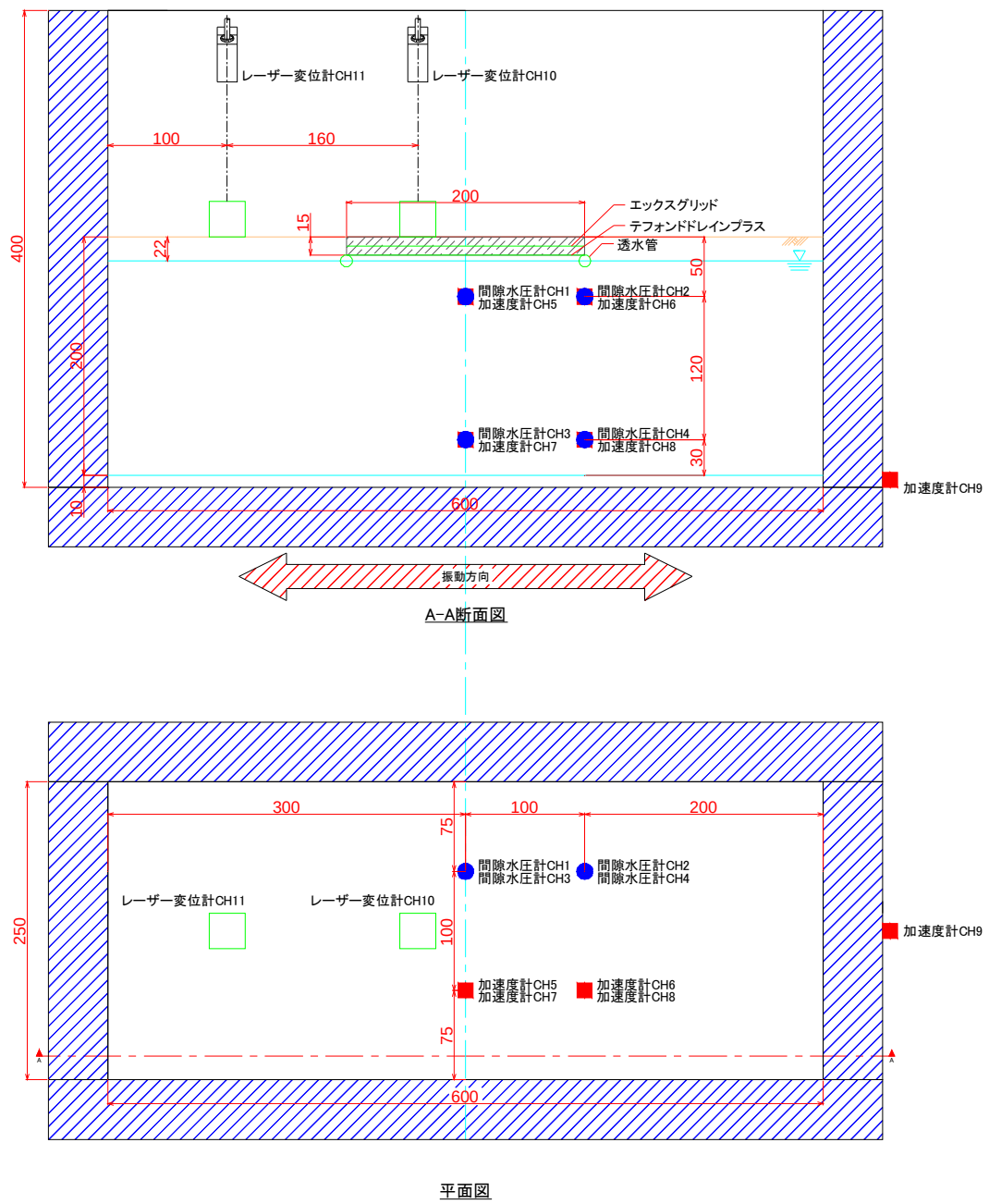


図 2-6 Case4 (県道・対策工)

Case5 センサー配置図

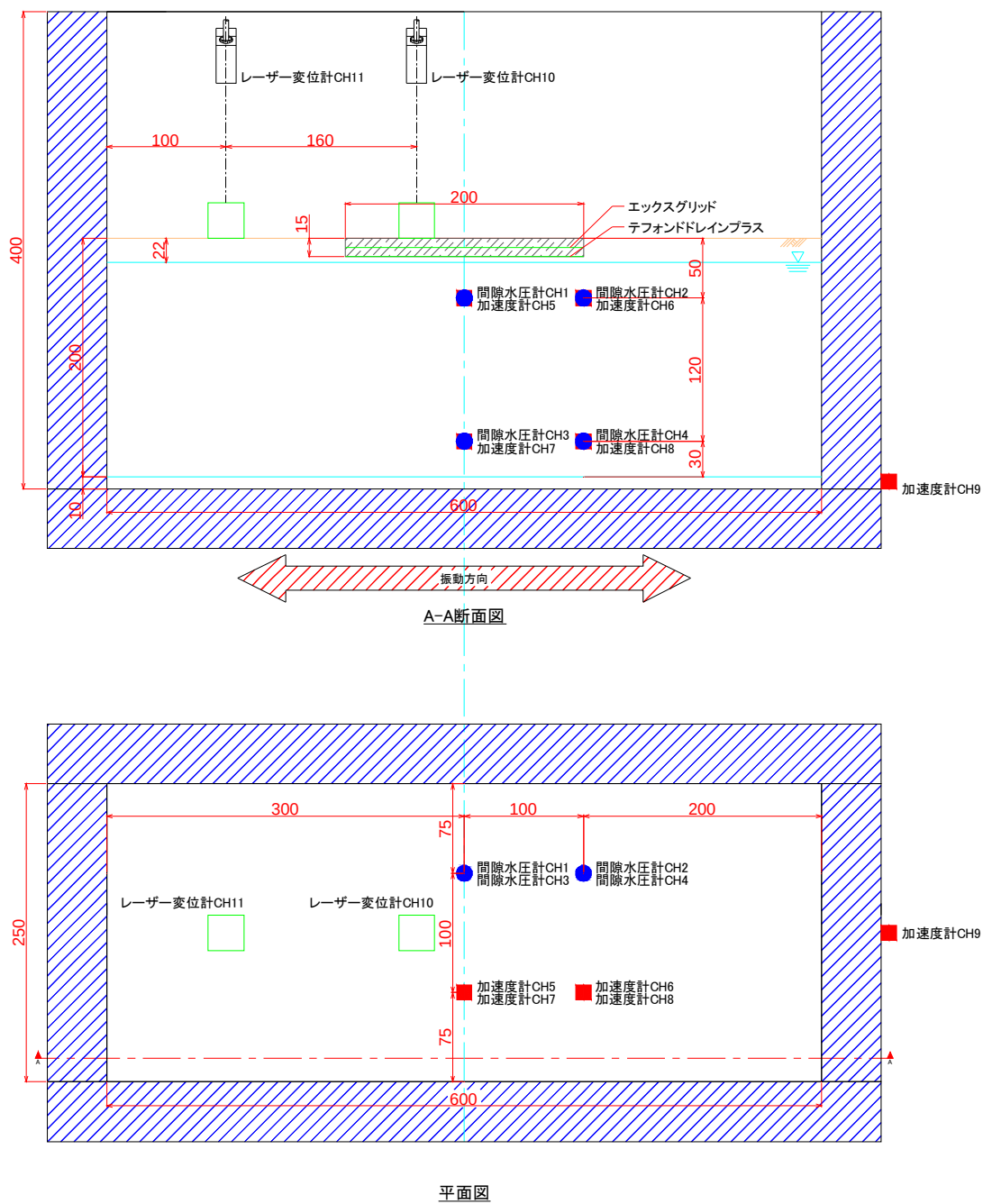


図 2-7 Case5 (県道・対策工・ドレーンなし)

3 実験結果と改良効果の評価

ここでは、県道の実験結果（Case3~Case5）を中心に遠心模型実験結果を示し、対策工の効果を評価する。まず土槽上部に設置したビデオカメラの映像より、加振前と加振後の画像から道路の変状と周辺地盤の液状化の状況の評価した。さらに間隙水圧計からは液状化の程度を、変位計からは地盤沈下量について評価した。

なおここでは前述の 1 から 6 の各加振ステップごとに沈下が発生し、当初の地盤密度よりも大きくなっていることから、最初の加振ステップの結果をもとに評価するものとする。なお、国道の結果は、剛な土槽に対して、表層に非液状化層が厚めに設定されたことから、地盤の動きが拘束されたため、地盤に液状化は見られず対策の有無の違いが明確に見られなかったため、ここでは考察を省略した。

本報告書では各センサーの応答結果のうち、代表的なものを示すが、それ以外のデータ結果については付録として示すこととする。

3.1 地表面の変状の状況

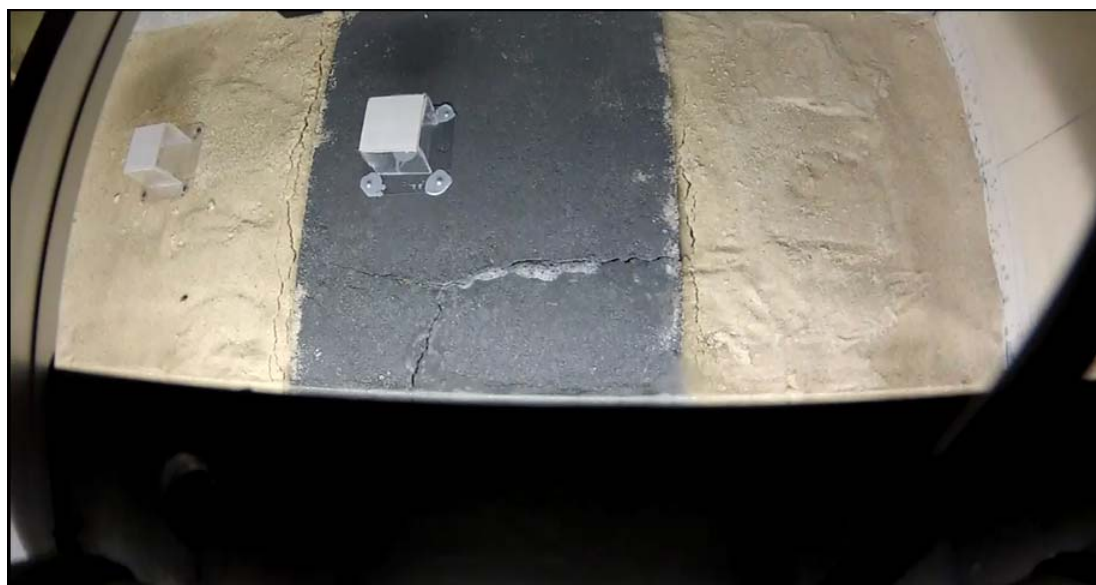
未対策のケース（Case3）では、加振に伴って舗装表面で土槽長手方向ならびにその直交方向にクラックが確認できた。またこれらのクラックからは、地盤の間隙水が噴出したことから、道路模型に発生したクラックは道路の底部まで達しており、道路が破壊したことがわかる。さらに道路と周辺地盤の境界には道路面と並行（写真では縦方向）にクラックが発生している。

対策工があるケース（Case4）には、舗装面に亀裂は見られず、道路は健全であった。また未対策で見られた道路と周辺地盤境界付近の亀裂は観察されなかった。さらに、地表面の色の違いによる湿り具合の違いに着目すると道路端部周辺は乾いているように見えるが、道路から離れると地盤の液状化のため地表面は浸潤しているように見える。このことから、ドレーンは土槽全体にその効果を発揮するのではなく、ドレーン周辺のある範囲に限られているものと考えられる。

ドレーンを設置していないケース（Case5）は補強材の補強効果により補強効果が確認できた。しかし未対策と同様に道路と周辺地盤間にクラックが確認できた。さらに舗装周辺部で地表面が浸潤しており、道路に液状化の影響が表れている。これは液状化により道路底面直下に間隙水が移動し、さらに水平方向に移動することで地表面に表れたものと考えられる。



Case3_1 加振前



Case3_1 加振後

写真 3-1 加振前後の地表面状況（Case3 未対策）



Case4_1 加振前



Case4_1 加振後

写真 3-2 加振前後の地表面状況 (Case4 対策工)



Case5_1 加振前



Case5_1 加振後

写真 3-3 加振前後の地表面状況 (Case5 対策工・ドレーンなし)

3.2 間隙水圧

間隙水圧の時刻歴を示す。道路の変状に密接な関係がある浅い位置に設置された水圧計 (P1, P2) の挙動に注目する。P1 は道路中心位置, P2 は道路端部位置である。2 つのセンサー設置位置の有効土被り圧は 13.2kPa であるため, 間隙水圧 (静水圧を差し

引いた過剰間隙水圧に相当)がこの有効土被り圧と等しくなれば液状化に達したといえる。間隙水圧により液状化を判断すると、Case5の間隙水圧が最も高く液状化したといえる。一方でドレーンを入れたCase4では液状化しておらず、間隙水圧は、液状化に相当する間隙水圧の約7割に抑制されており対策効果が表れている。

一方、未対策のCase3はCase4と同程度の間隙水圧となった。これは、前述のように舗装面を貫通するクラックから間隙水が噴出し、間隙水圧の蓄積を抑制したものと考えられる。すなわち、クラックが水抜き効果を発揮したことになるが、舗装が破壊していることが問題である。

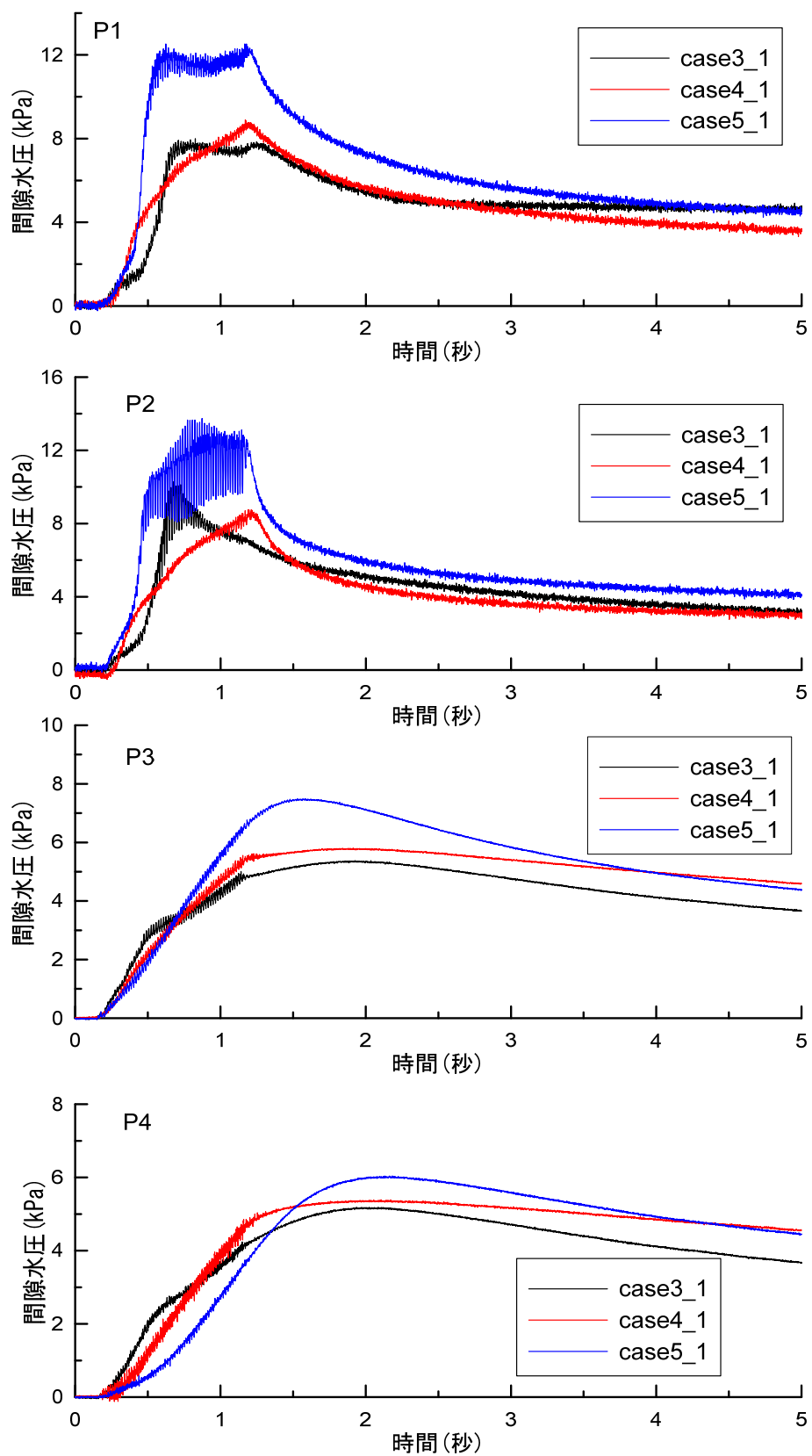


図 3-1 間隙水圧の時刻歴の比較

3.3 地表面変位

地表面沈下量の時刻歴の傾向を示す。ここで、D1 は道路中心から 20mm 離れた道路上、D2 は道路から 80mm 離れた位置の自由地盤である。道路面の変位は Case4, Case3, Case5 の順に大きくなった。Case4 と Case5 に着目すると Case4 は Case5 の約 4 割に抑えられており、道路端部の底部付近にドレーンを設置することが、沈下を抑制することに貢献していることがわかる。Case3 は Case5 と比べて約半分に沈下が収まっているが、これは前述のようにクラックからの間隙水噴出による間隙水圧抑制効果によるものと考えられる。

一方、自由地盤に着目すると Case5 と Case4 の沈下量はほぼ同程度となっている。これは、ドレーンの効果はドレーンを設置した道路とその周辺部の限られた範囲に限定されることを示唆している。一方、Case3 では、Case4, Case5 と比べて沈下量がかなり小さくなっている。これはクラックからの排水による効果と推定されるが、今回の実験結果から得られる情報だけではその原因について判断できない。

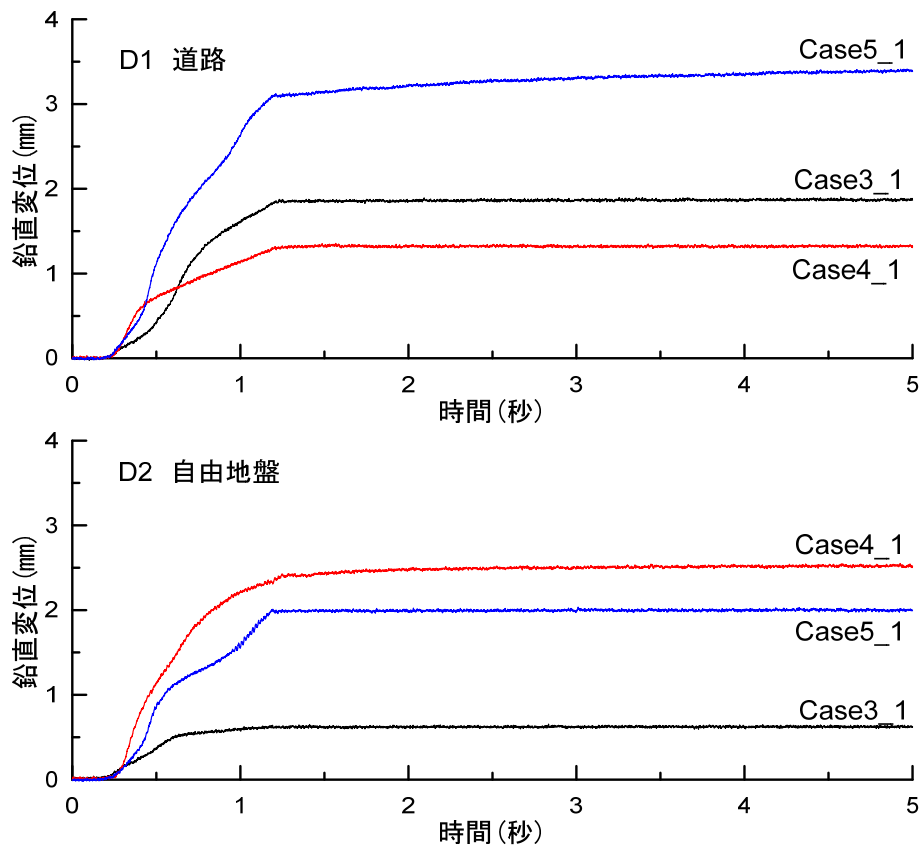


図 3-2 地表面沈下量の比較

4 まとめと今後の課題

ジオダブルサンド工法の液状化対策効果を確認するために、遠心載荷模型振動実験を行い以下のことがわかった。

- (1) X グリッドとテフオンドドレーンプラスによる道路の補強効果が確認された。一方、未対策のケースでは道路の底部まで達するクラックが発生し、地盤の間隙水が噴出する結果となった。
- (2) ドレーンを設置することで、道路近傍地盤の間隙水圧がドレーン無しの場合に比べて7割程度に抑えられ液状化の影響を抑制することができた。その結果、道路部の沈下を抑制できた。

今後の課題として以下の点があげられる。

- (1) ドレーンにより間隙水圧が抑制される範囲、すなわちドレーンの影響範囲を把握する必要がある。さらにこの影響範囲内の間隙水圧の値を把握する必要がある。
- (2) 今回の模型実験では、補強材とドレーンの組み合わせにより液状化の影響を抑制することが定性的に確認できた。今後は、液状化解析等の数値解析を併用することで定量評価方法を確立する必要がある。