

# 柱状ドレーンによる液状化対策効果の計測（実験結果概要）

2011年5月8日 国土技術政策総合研究所都市研究部

## 1. 実験の目的

この実験は、ドレーンパイプを用いた水圧消散工法<sup>1)</sup>について、液状化抑制効果が及ぶ範囲（ドレーンパイプの径中心からの水平距離）を計測することを目的とする。

（注）1) 地盤に透水性の高い管を縦に挿入して水抜き穴を設け、地震の揺れで水圧が高まった地下水の抜け道とすることで、水圧が砂地盤の構造を破壊して液状化に至ることを抑制する工法

## 2. 実験の位置づけ

国土技術政策総合研究所（国総研）都市研究部では、建築研究部の協力を得て、住宅が建ち並んでいる状態で実施可能な地域ぐるみの宅地地盤の液状化対策方法を早期に見出すため、研究に取り組んでいる。

地盤の液状化対策は、更地（建物や構造物のない状態）では様々な工法が実施されている。しかし、市街地となった状態（道路と建物敷地が分離され、住宅が建ち並んだ状態）では、適用可能な工法が限られており、現時点で実用的な対策工法が確立されているとは言い難い。また、現実の住宅地は、地盤の状態や街区の形状、敷地の規模など、適切な対策方法を見出す上での前提条件が多様である。このため、国総研では、電算解析（コンピューターシミュレーション）を用いて、様々なケースについて様々な工法を組み合わせる効果の有無や程度を確認することにより、効果的かつコストの安い方法を探っている。

この実験は、上記の研究の一環として、ドレーンパイプを用いた水圧消散工法の効果の及ぶ範囲について、電算解析に用いる係数等の決定のため、実測データを得るものである。

## 3. 実験の内容

### （1）実験装置

実験は、実大サイズの試験体によることとし、長さ10m×幅3.6m×深さ5mの大型せん断土槽振動台（独立行政法人建築研究所所有）を用いた。この振動台は、土槽が大規模なことに加えて、17段のフレームを積み重ねた構造となっており、最下部のテーブルを油圧アクチュエーターで加振することにより、土槽フレームがせん断変位を伴って地表へと地震動を伝えていく動きとなることから、実際の地震動に近い状況を再現することができる特徴がある。

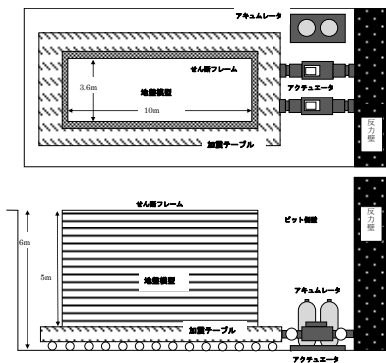


図1 実験装置（大型せん断土槽）



写真1 試験体地盤の外観

## (2) 試験体地盤

試験体地盤は、層厚が 4.8m であり、土槽下部の層厚 3.0m を非液状化層とし、土槽上部の層厚 1.8m を液状化層とした。なお、地下水位は、地表面下 0.3m とした。地盤材料には、液状化しやすい比較適粒径が揃った砂として知られる日光珪砂6号を使用した。

土槽上部の液状化層は、水中落下方式(水を張った土槽内に砂を投下する方式)により作成し、平均相対密度が  $Dr=50\%$  程度、N値2以下の緩い砂地盤であり、土槽下部の非液状化層は、層厚 50cm 毎にジオテキスタイルで補強され締め固められた相対密度  $Dr=80\%$  程度の剛な地盤である。

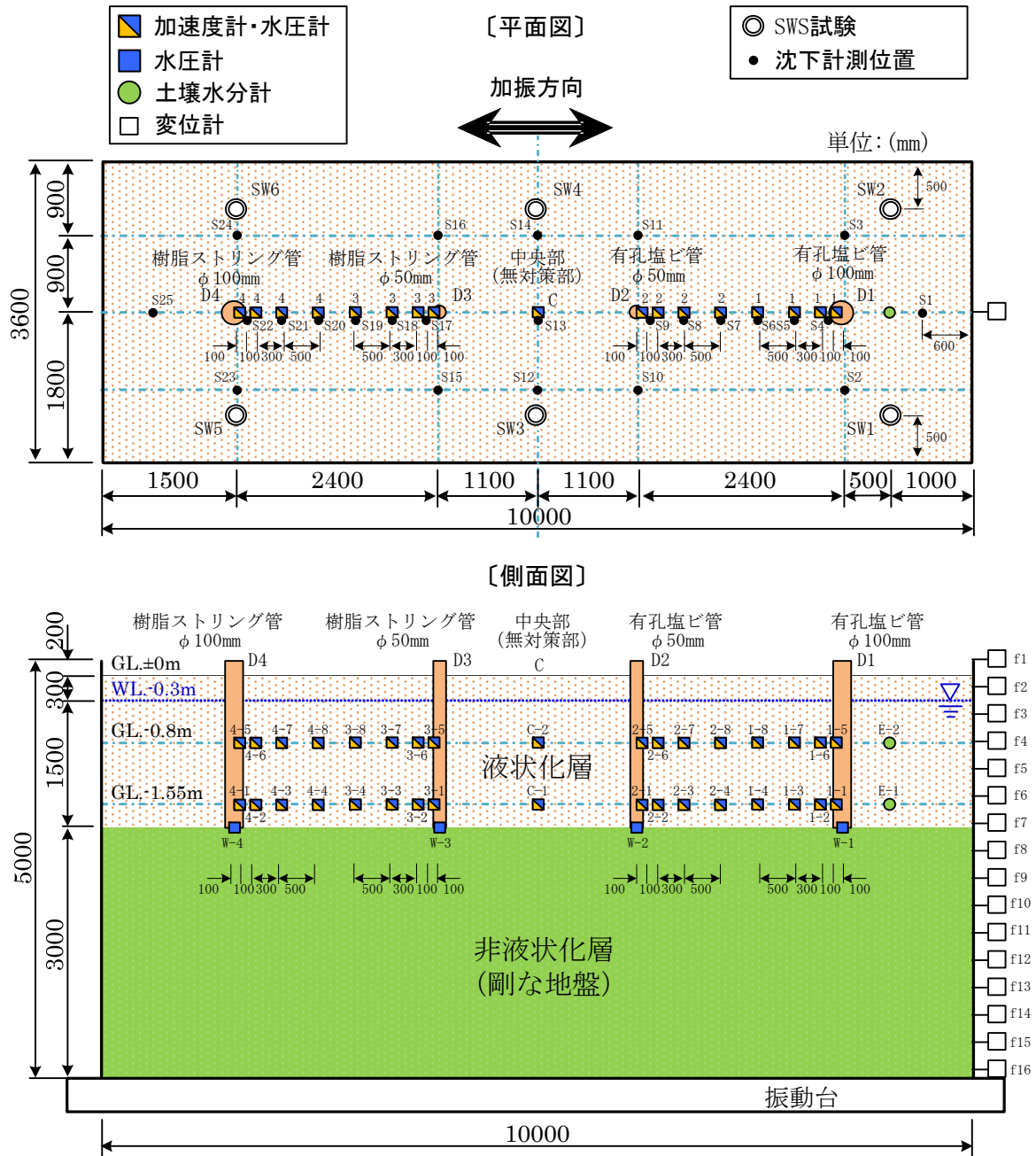


図2 試験体地盤とドレーンパイプ・センサー類の配置

### (3) ドレーンパイプの配置

ドレーンパイプには、材料を、樹脂ストリングを不規則にカールさせ中空状に積層したもの(既製品)と、観測井戸などでよく使用される有孔円形パイプ(塩ビ)にフィルター(防虫網)を被せたものの2種類とし、それぞれ径を外形100mmと50mmを用意して、合計4本で効果を比較した。

ドレーンパイプの配置は、ドレーン同士の透水半径の影響を考慮し、図2に示す配置とした。

表1 実験で使用したドレーンパイプ<sup>2)</sup>

特性 種類	材質		開口率 (%)	管内透水係数 (cm/s)	型式・外径(内径) (mm)
	パイプ	フィルター			
樹脂ストリング パイプ	ポリプロピレン 樹脂 (中空網目管)	ポリプロピレン 樹脂 (不織布)	80以上	900*	NP50 : 50 (0) NP100 : 100 (65)
有孔円形 パイプ	塩ビ (VP管)	ナイロン (防虫網)	10	2000	VP50 : 60 (51) VP100 : 114 (100)

\*導水勾配 0.25 に対する値

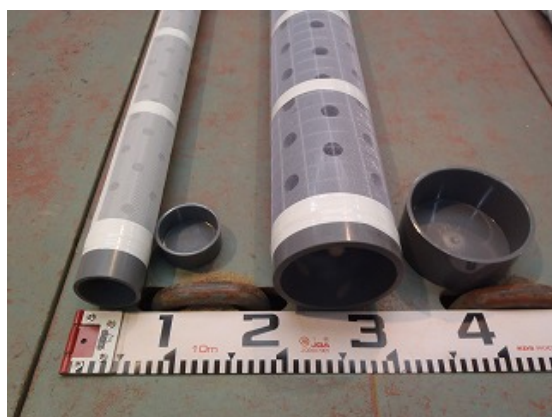


写真2 有孔円形パイプ



写真3 樹脂ストリングパイプ

(注)2) 地盤工学・実務シリーズ 18 液状化対策工法: 社団法人地盤工学会, pp.391, 平成 16 年 7 月

### (4) センサー類の配置

センサー類の配置は、電算解析のモデル化に必要な水圧変化が把握できるように、水圧計、間隙水圧計および土壌水分計を配置した。具体的には、間隙水圧計及び加速度計の配置を、図2に示すとおり、水平方向ではドレーンパイプの径中心から 10cm、20cm、50cm、100cm の位置とし、深さ方向では GL.-0.8m、GL.-1.55m の 2 深度とした。また、ドレーンパイプ内の水位をパイプ下部に設置した水圧計により計測した。

計測内容とセンサー類の対応関係を表2に示す。

表2 計測内容とセンサー類

計測内容	計測センサー	数量	計測目的
過剰間隙水圧	間隙水圧計	34	液状化による水圧の上昇 や消散の確認
ドレーンパイプ内水位	水圧計	4	ドレーンパイプ内の水位 変化の確認
応答加速度	加速度計	34	地盤および基礎模型の 応答加速度の確認
地盤飽和度	土壌水分計	2	地盤内飽和度の確認
地表面沈下量 基礎模型沈下量	レベル計	25	試験前後の地表面およ び基礎模型変位の調査

### (5) 入力波

入力波は、以下の考え方によって選定した。

まず、実験で得られたパラメータを電算解析に適用するため、波形は出来るだけシンプルなものとする。また、文献 3)を参考に、東北地方太平洋沖地震時に東京湾岸で観測された地震波を等価な繰返しせん断波に置換すると、せん断応力比 $\times 0.1 \sim 0.15$  (地表最大加速度 100~150gal)程度、周波数 1~2Hz 程度、波数 30~60 程度相当と試算される<sup>4)</sup>。この条件で試験土槽地盤の 1 次元等価線形解析を行ったところ、表3に示す結果となった。

しかし、使用する振動台の加振能力(最大速度 8.5cm/s)の制約から、この等価な繰返しせん断振動を再現することは難しい。そこで、なるべく近い振動状態となる入力条件を検討した結果、表3のうち、最大加速度 75gal、周波数 2Hz の入力波形であれば地表最大加速度が 100gal を超える程度の応答になることが予想された。

このことから、実験では、入力の最大加速度と周波数を 75gal、2Hz と決定した。また、波数は、確実に液状化が発生するよう、十分に大きな値(120 回)とした。

(注)3) 吉見吉昭:砂地盤の液状化(第2版)、技報堂出版株式会社、pp.54~59、1991

4) 新井洋:建築学会近畿支部耐震構造研究部会シンポジウム、大阪、pp. 37-50、2011、12

※ せん断応力比:せん断応力を初期有効上載圧 $\sigma_{v0}'$ で除した値

表3 入力波形解析結果

最大加速度 (gal)	周波数 (Hz)	最大速度 (cm/s)	最大変位 (cm)
50	2.00	4.08	0.33
50	1.33	6.13	0.76
50	1.00	8.30	1.36
75	2.00	6.11	0.50
75	1.33	9.19	1.14
75	1.00	12.44	2.04
100	2.00	8.15	0.67
100	1.33	12.26	1.53
100	1.00	16.59	2.73

## 4. 実験結果の概要

### (1) 目視観察

地表面の目視観察では、加振開始直後よりドレーンパイプから水が噴き出し、その後、ドレーンパイプを中心に地表面が水浸しとなった。また、ドレーンパイプの周囲の地表面は、加振が進むにつれてパイプを中心にすり鉢状の陥没を生じ、そこからも水が噴出した。さらに、ドレーンパイプから離れた場所からも噴水・噴砂が発生し、地表面が徐々に水浸しとなった。

この一面水浸しの状況により、地表面の観察だけでは、ドレーンパイプ周囲の地盤が液状化抑制されたのかどうかは判別がつかない。



写真4 加振開始直後の様子



写真5 加振終了直後の様子

### (2) ドレーンパイプ1本の効果

図3は、明らかに液状化抑制効果が認められた樹脂ストリング管(φ100mm)の近傍地盤について、深度GL-1.55mにおける過剰間隙水圧の時刻歴を示している。図より、ドレーンパイプから100cm離れた地盤では、過剰間隙水圧が加振の進行とともに上昇し、初期有効上載圧 $\sigma_{v0}'$ に達して、液状化が発生している。しかし、ドレーンパイプから50cmまでの距離の地盤では、いずれも過剰間隙水圧は上昇するものの、液状化発生レベルに達することなく、加振中ほぼ一定の値を示している。また、ドレーンパイプに近い地盤ほど過剰間隙水圧の最大値が小さくなる傾向が明瞭に見られる。

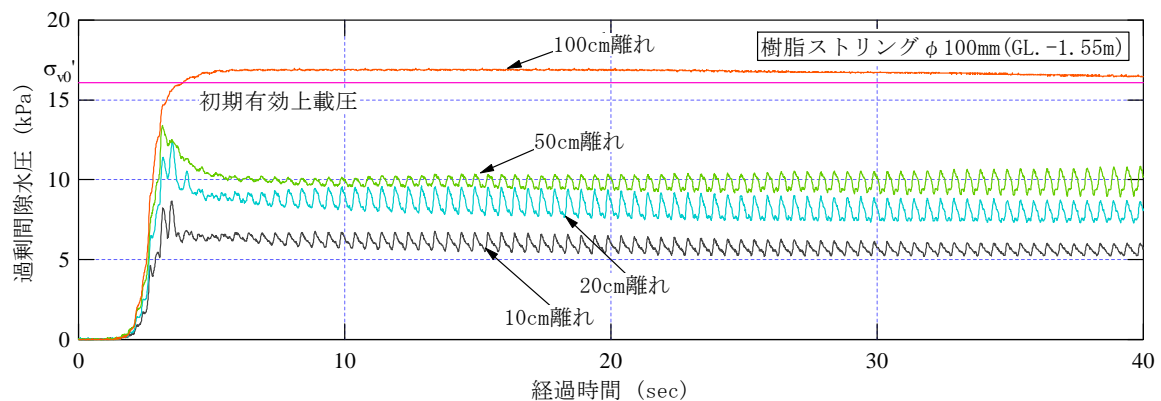


図3 水平距離別に見た過剰間隙水圧の時刻歴(樹脂ストリング管(φ100mm)GL-1.55の位置)

表4は、各ドレーンパイプ近傍地盤の過剰間隙水圧を初期有効上載圧 $\sigma_{v0}'$ で除した値(過剰間隙水圧比)の最大値を示している。一般に、過剰間隙水圧比が0.95を上回ることが液状化発生の目安とされることが多い。ただし、過剰間隙水圧比の分母となる有効上載圧は、加振に伴う地下水の移動(上昇)により時間変動するため、振動中の正確な値を測定することが難しい。このため、表4の値は、液状化発生の判定のひとつの目安としてお考え頂きたい。

表4では、過剰間隙水圧比が0.90未満の升目を緑の枠で囲っている。この部分は、液状化に達していないと考えられる。表から、深度GL-1.55mの位置において、樹脂STRING管( $\phi 100\text{mm}$ )については、管の中心から水平距離50cm程度の範囲において緩い砂地盤の液状化を抑制する効果が認められる。図3に示した傾向が、再確認される。

一方、その他のドレーンパイプでは、ごく近い水平距離10cmの位置で僅かな液状化抑制効果が見られるものの、それより遠方には十分な効果が及んでいない。また、表層部の浅い位置(GL-0.80m)では、いずれの種類のドレーンパイプも液状化を防止するには至っていない。

表4 過剰間隙水圧比の最大値(過剰間隙水圧の最大値を初期有効上載圧で除した値)

計測箇所	深度	初期有効上載圧 $\sigma_{v0}'$ (kPa)	最大過剰間隙水圧比			
			10cm 離れ	20cm 離れ	50cm 離れ	100cm 離れ
樹脂STRING管 $\phi 100\text{mm}$ D4	GL.-0.80m	9.2	1.01	0.95	1.11	1.14
	GL.-1.55m	16.1	0.54	0.77	0.87	1.06
樹脂STRING管 $\phi 50\text{mm}$ D3	GL.-0.80m	9.2	1.06	1.13	1.12	1.11
	GL.-1.55m	16.1	0.96	1.03	1.03	1.06
有孔塩ビ管 $\phi 100\text{mm}$ D1	GL.-0.80m	9.2	0.91	1.11	1.12	1.10
	GL.-1.55m	16.1	0.95	1.02	1.05	1.05
有孔塩ビ管 $\phi 50\text{mm}$ D2	GL.-0.80m	9.2	1.01	1.11	1.10	1.14
	GL.-1.55m	16.1	0.85	1.05	1.03	1.04
土槽中央部 (無対策部) C	GL.-0.80m	9.2	1.08			
	GL.-1.55m	16.1	1.04			

図4と図5は、過剰間隙水圧比の土槽内の分布を、それぞれ加振4秒後(過剰間隙水圧が上昇中の時点)と加振20秒後(加振中で過剰間隙水圧が概ね安定している時点)について、コンターで示している。この図からも、ドレーンパイプはいずれも直近の深い位置において過剰間隙水圧上昇の抑制効果が認められるが、とくに樹脂STRING管( $\phi 100\text{mm}$ )については、他のドレーンパイプに比べて顕著な水圧抑制効果が認められ、その範囲が深い位置では水平距離50cmに及び、100cmには及んでいないことが確認される。

実験後における地表面の沈下量の分布を、図6に示す。図から、地表面沈下量は、相対的に、ドレーンパイプの周辺で小さく、ドレーン間の位置で大きくなる傾向が見られる。ただし、その絶対値は、概ね20~50mm程度の範囲となっており、決して大きな沈下量ではない。

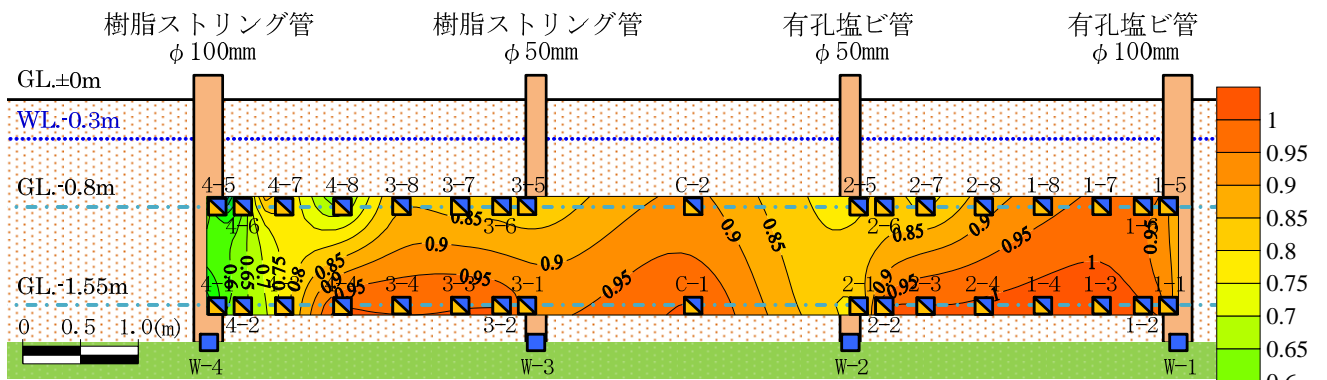


図4 過剰間隙水圧比の分布(加振4秒後)

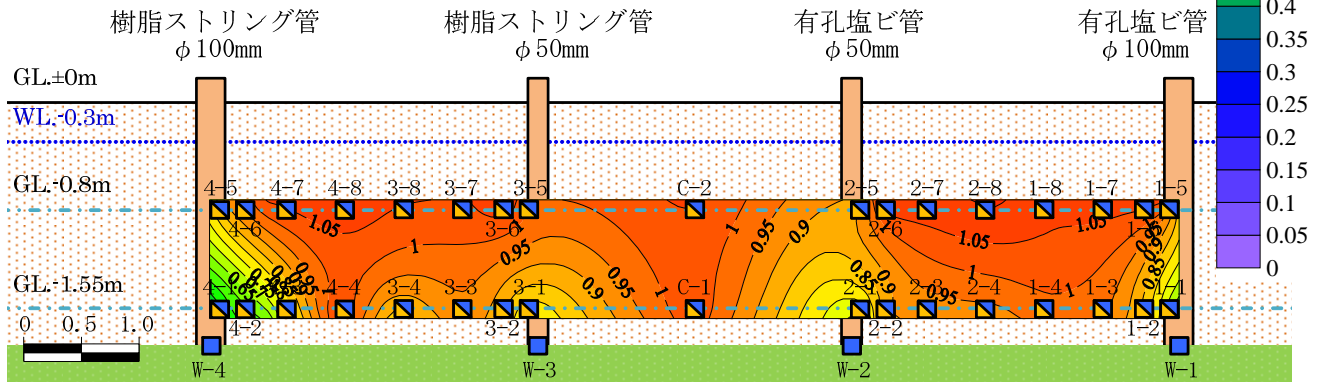


図5 過剰間隙水圧比の分布(加振20秒後)

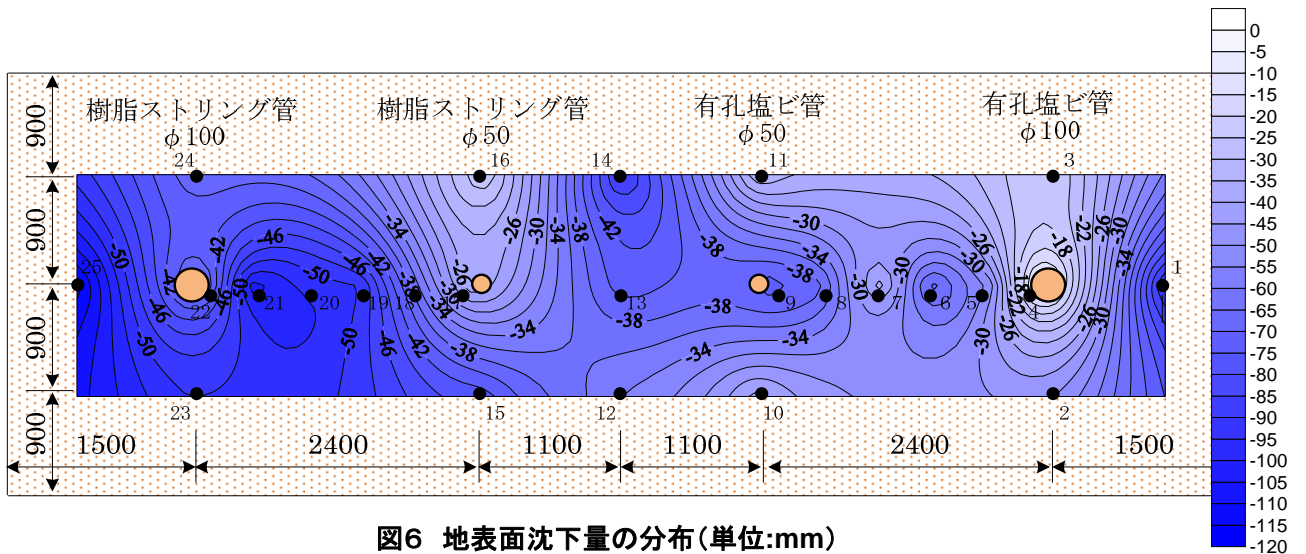


図6 地表面沈下量の分布(単位:mm)

### (3) 複数ドレーンパイプの効果

複数のドレーンパイプによる相互作用効果の有無を見るため、試験体地盤に樹脂ストリング管(φ100mm)3本を70cm間隔でL字型(加振方向および直交方向)に配置して、同様の振動実験を別途行っている。その結果、いずれもドレーンパイプ1本の場合と比べて、大きな差異は見られなかった。

### (4) ドレーンパイプの住宅基礎模型対策効果

ドレーンパイプの住宅対策効果を調べるため、試験体地盤上にコンクリート製の住宅基礎模型(寸法:幅1300mm×1300mm、高さ500mm、重量:約2.2tf(22kN、13kN/m<sup>2</sup>)を設置し、その加振方向および直交方向の2辺の中央付近に樹脂ストリング管(φ100mm)を配置して、同様の振動実験を別途行っている。その結果、ドレーンパイプ近傍地盤の過剰間隙水圧は、加振直後から上昇する水圧の値が小さくなる抑制効果が認められ、加振中においても上昇した水圧の消散が見られた。しかし、ドレーンパイプによる住宅基礎模型の沈下抑制効果は認められなかった。

### (5) 実験結果のまとめ

ドレーンパイプの液状化抑制効果は、緩い砂地盤において、東北地方太平洋沖地震時に東京湾岸で観測された地震波に概ね等価な繰返しせん断波の入力に対して、ドレーンの中心から水平距離50cm程度の範囲で効果を及ぼし、1mには達しないことが確認された。このことから、ドレーンパイプを液状化対策工として使用する場合には、概ね1mの水平間隔で配置する必要があると考えられる。

なお、ドレーンパイプのような過剰間隙水圧の消散による液状化対策工の場合、排水効果により過剰間隙水圧の蓄積する速度を低下させて液状化を抑止するため、急激に間隙水圧が上昇し、初期有効上載圧に達する場合には、液状化対策効果が発揮されない可能性がある。例えば、東北地方太平洋沖地震の東京湾岸で記録されたような加速度が比較的小さく継続時間の長い揺れ(振動型の地震動)の場合には、ここで得られた実験結果のような液状化対策効果が期待できるが、一方で、兵庫県南部地震の神戸市の埋立地で記録されたような加速度が比較的大きく継続時間の短い揺れ(衝撃型の地震動)の場合には、この実験結果どおりに水圧消散が機能するとは限らないことに留意する必要がある。