

# 水平ドレーンによる液状化対策工法の検討

足立有史\*・小林秀匡\*\*・脇田和試\*\*・柳 清\*\*\*・関根康正\*\*\*\*・渦岡良介\*\*\*\*\*

ドレーン材を用いた液状化対策工法は、透水性の高い砕石杭や人工のドレーンパイプを地盤に対し鉛直に所定の間隔で打設し、地震時の過剰間隙水圧を速やかに消散させることによる液状化の防止を目的としたものであり、低振動、低騒音、周辺構造物への影響が少ないなどの理由から、市街地などでの適用も増えている。一方、施工方法としては、対象地盤に対し地表面から鉛直にドレーンを打設するため、既設構造物直下地盤への適用は困難である。本研究では、既設構造物直下地盤等にも適用可能な工法として提案した水平ドレーン（人工材料）による液状化対策工法について1g場における模型振動台実験によりその効果および鉛直ドレーンとの比較について検討した。その結果、水平ドレーンによる液状化対策効果は鉛直ドレーンと同程度であることを確認した。また、水平ドレーンピッチの設定方法についても、鉛直ドレーンと同様な方法が適用可能であることを確認した。

キーワード：液状化，水平ドレーン，振動台実験，過剰間隙水圧，浸透流解析，透水試験

## 1. はじめに

一般にドレーン材を用いた液状化対策工は、鉛直にドレーン材を打設し液状化時の過剰間隙水圧を速やかに消散させることにより液状化の防止を目的とするものであるが<sup>1)</sup>、既設構造物直下などの鉛直ドレーンの施工が困難な箇所では、適用ができない場合がある。本研究では、既設構造物直下などにも適用可能な工法として提案した水平ドレーン（人工材料）を用いた液状化対策工法について1g場における模型振動台実験によりその効果および鉛直ドレーンとの比較について検討した。さらに、水平ドレーンの設計法について、鉛直ドレーンの設計法が適用可能かどうかについても検討した。

## 2. 実験概要

振動実験模型を図-1に示す。実験は表-1に示す3ケースを実施した。実験模型は土槽規模から実大の構造物の約1/10モデルとした。計測は加速度計、間隙水圧計、変位形を図-1に示す配置で実施した。

地盤は2m×0.6m×0.4mの剛土層に岐阜砂（珪砂5号）を用いて水中落下法により深さ0.3mに作製した。模型地盤の相対密度 $D_r$ は50%±3%であった。岐阜砂の基本物性および粒径加積曲線を表-2および図-2に示す。10%粒径 $D_{10}$ 、50%粒径 $D_{50}$ および均等係数 $U_c$ はそれぞれ、0.28mm、0.54mmおよび2.107であった。また、非排水繰返し三軸試験より $D_r=50\%$ における液状

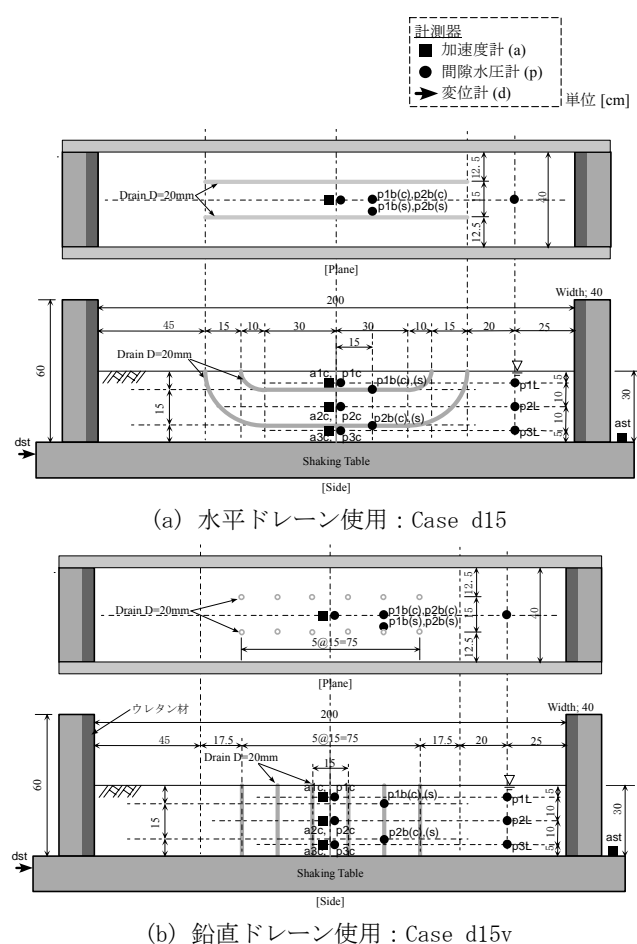


図-1 振動実験模型

化強度は $R_{L20}=0.19$ (DA5%)であった。また、間隙水には水道水を用いた。ドレーン材は耐熱性高分子樹脂導水管

\*技術研究所 \*\*技術第一部 \*\*\*三井金属エンジニアリング(株) \*\*\*\*関根工業(有) \*\*\*\*\*東北大学

表-1 実験ケース

ケース名	模型概要
Case nond	ドレーンなし
Case d15	水平ドレーン@15cm
Case d15v	鉛直ドレーン@15cm

表-2 岐阜砂 (珪砂 5号) の基本物性

土粒子の密度 $\rho_s$	2.633 g/cm <sup>3</sup>
最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$	1.475 g/cm <sup>3</sup>
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	1.745 g/cm <sup>3</sup>

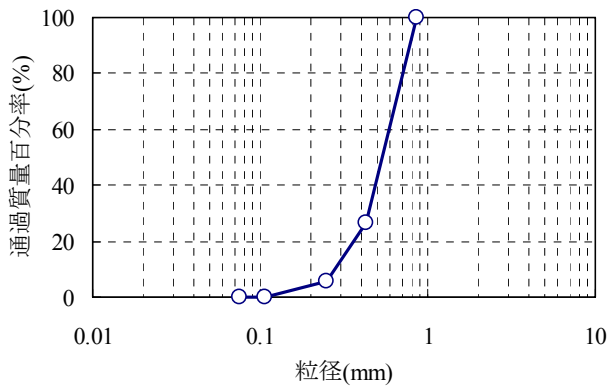


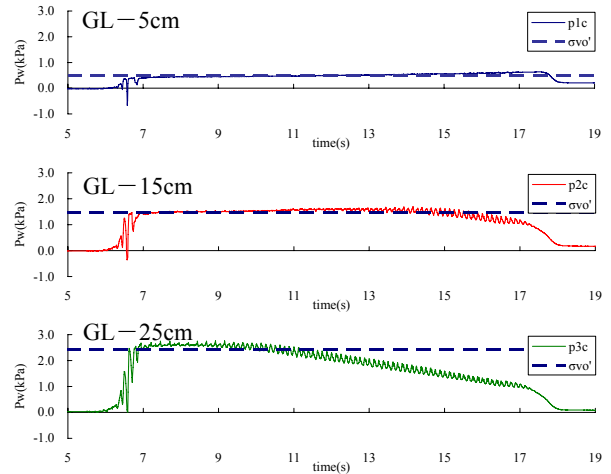
図-2 岐阜砂 (珪砂 5号) の粒形加積曲線



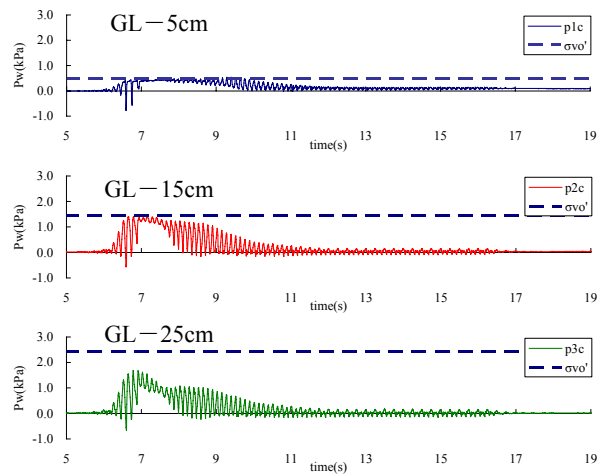
写真-1 実験に用いたドレーン模型

(クラドレン P,  $\phi$  20mm) に砂粒子流入防止のためのナイロンメッシュ (500 $\mu$ m) を巻きつけたものを使用した (写真-1 参照)。鉛直ドレーンおよび水平ドレーンの両ケースにおいては、単位体積あたりのドレーン長が等しくなるようドレーンを配置した。

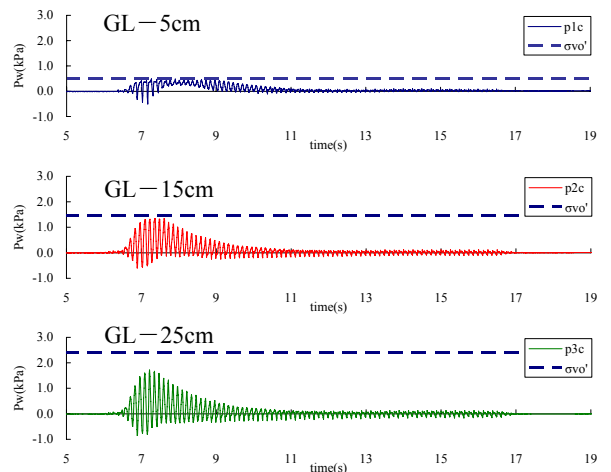
加振方向は土槽長手方向とし、入力波は正弦波で周波数 4Hz、前後 1 秒間のテーパ部を含む計 12 秒とした。最大加速度は 170Gal である。各ケースとも本加振前に過剰間隙水圧が上昇しない程度の加速度 (70Gal, 12sec) で均し加振を行った。



(a) 無対策 Case\_nond\_170Gal

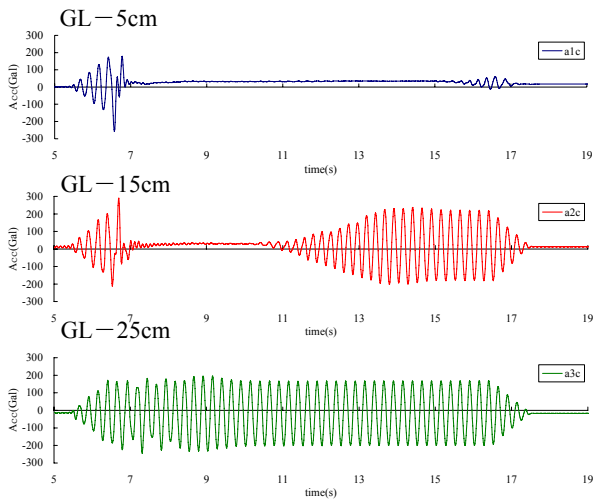


(b) 水平ドレーン Case\_d15\_170Gal

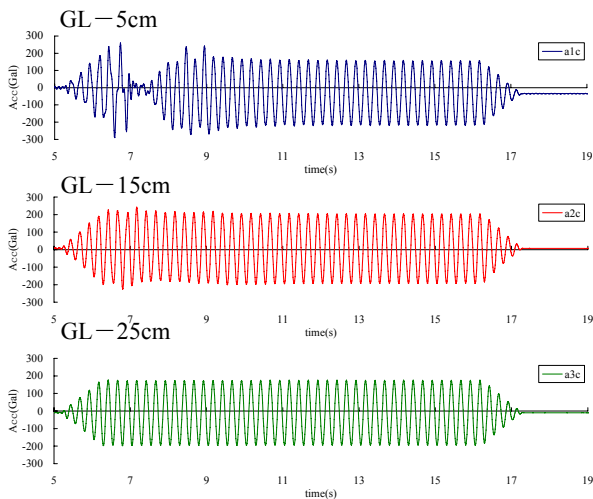


(c) 鉛直ドレーン Case\_d15v\_170Gal

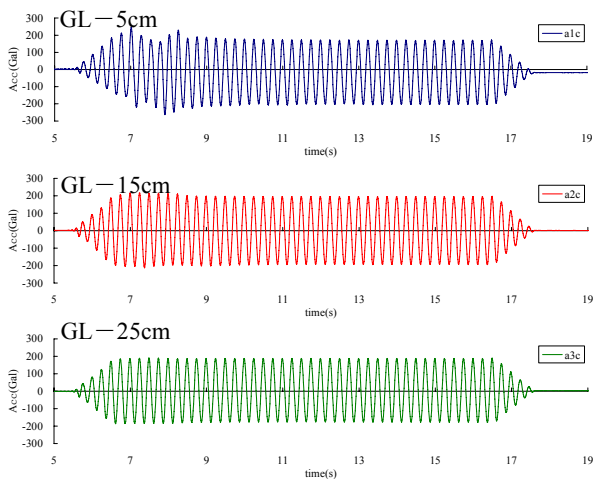
図-3 土層中央部の過剰間隙水圧時刻歴



(a) 無対策 Case\_nond2\_170Gal



(b) 水平ドレーン Case\_d15\_170Gal



(c) 鉛直ドレーン Case\_d15v\_170Gal

図-4 土層中央部の加速度時刻歴

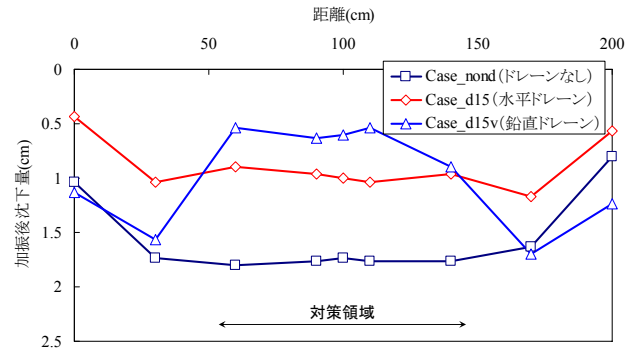


図-5 加振後の地表面沈下量（土槽長手方向の分布）

### 3. 実験結果

#### (1) 水平ドレーンの効果

図-3 に土層中央部における各深度の過剰間隙水圧の時刻歴を示す。図中には、各深度における初期有効上載圧  $\sigma'_{v0}$ （点線）もあわせて示している。無対策地盤の場合、加振開始直後に各深度とも過剰間隙水圧が初期有効上載圧に達したことがわかる。その状態は約 2 秒間継続し、その後、土層下部の水圧の消散が始まり、加振終了と同時にすべての点で水圧が消散した。一方、水平ドレーンを配置した対策地盤は、加振直後過剰間隙水圧の上昇は確認されるものの GL-15cm および GL-25cm の位置では過剰間隙水圧比の最大値が一時的にそれぞれ 0.96 および 0.61 まで上昇しているが、完全液状化に至らず、その後消散に向かっている。また、図-3 と同じ位置で計測された加速度計の時刻歴波形を図-4 に示しているが、地盤の液状化に伴い、加速度応答がほとんど生じていない状態となり、その後、地盤深部の過剰間隙水圧の消散に伴い、加速度応答も回復し、剛性の回復が見られる。

図-5 に示す加振後の地表面沈下量の比較から、無対策時に比べ対策ありでは地表面沈下量が約半分程度まで減少していることが確認された。これにより、過剰間隙水圧の早期消散とともに地震後の沈下量の低減についても、液状化対策としての水平ドレーンによる過剰間隙水圧消散の効果が確認された。

#### (2) 水平ドレーンと鉛直ドレーンの比較

図-3 (b), (c) より両ケースとも、加振後まもなく過剰間隙水圧が上昇し始めているが、GL-25cm および GL-15cm では、初期有効上載圧に達することなく過剰間隙水圧が消散し始め、加振後約 2 秒後には過剰間隙水圧がほぼゼロとなっている。また、GL-5cm では、加振開始約 1 秒後に過剰間隙水圧が初期有効上載圧に達し、液状化に

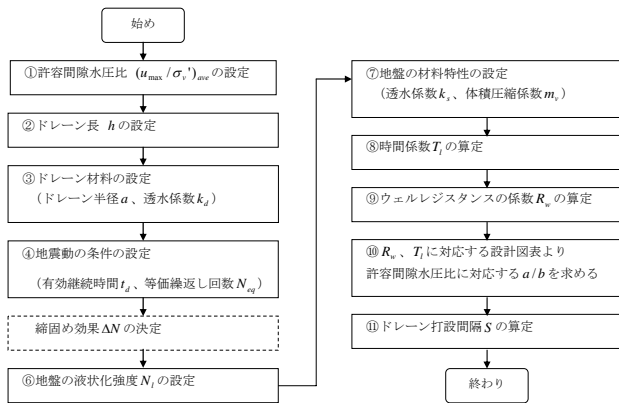


図-6 ドレーン打設間隔設定手順

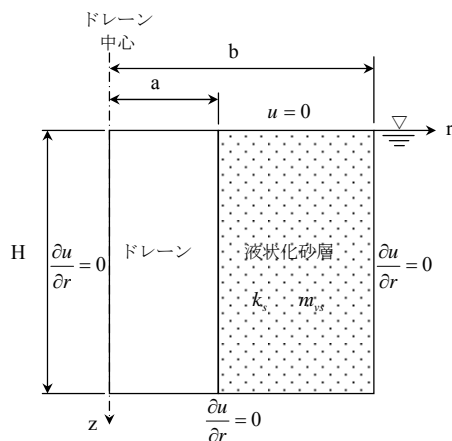


図-7 柱状ドレーンの解析モデル

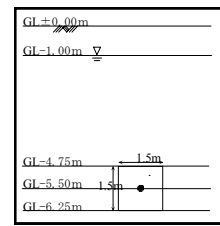
至っているが、両ケースとも速やかに水圧の消散が行われ、他点と同様に加振後約 2 秒後には過剰間隙水圧がほぼゼロとなっている。また、図-4(b), (c)の加速動応答波形からも、応答の低下は表層付近の一部分に限られており、地盤剛性が低下した状態が継続していないこともわかる。図-5 より、加振後の地表面沈下は対策工の効果により無対策時と比べ対策時は両ケースとも 1/2 以下となった。ただし、対策領域における沈下量は鉛直ドレーン比べ水平ドレーンを用いた場合の方が 3 mm 程度大きな値となった。本実験の場合、水平ドレーン対策時の排水長が鉛直ドレーンに比べ平均 1.9 倍程度長いことが水圧消散効果および沈下量に差異が生じた要因のひとつであると考えられる。

#### 4. 設計法に関する検討

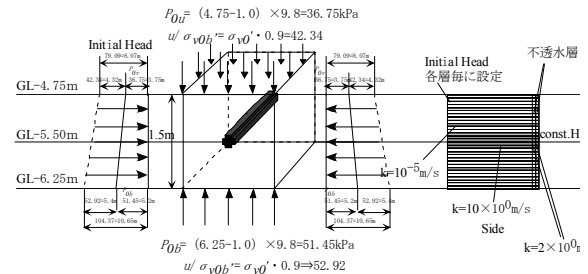
ここでは、今回提案した水平ドレーンを用いた液状化対策工法の設計について、既存工法である鉛直ドレーンを用いた場合の設計法に適用可能かどうかについて検討した。

##### (1) 鉛直ドレーンの設計法

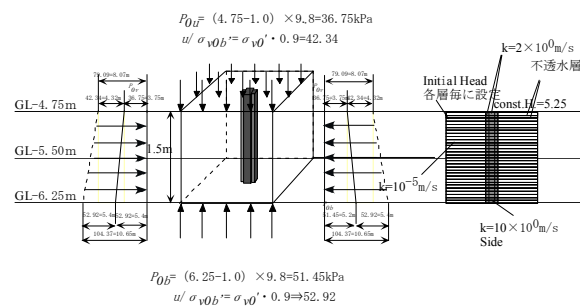
従来から用いられている鉛直グラベルドレーンおよび



(a) 解析対象位置



(b) 水平ドレーンの場合



(c) 鉛直ドレーンの場合

図-8 解析条件

鉛直パイプドレーンによる液状化対策工法では、ドレーン打設間隔の設定として図-6 に示す手順が一般的である。鉛直ドレーンの場合、地震時に発生する過剰間隙水圧が許容値を満足するようにドレーン径、打設間隔を設定する方法として、地震による過剰間隙水圧の発生項を考慮した浸透流解析に基づいた手法が一般に用いられている。この方法は、図-7 に示すように各ドレーンの支配する砂質土層の等価円柱の半径を  $b$ 、ドレーンの半径を  $a$  とし、ドレーンによる改良地盤の地震時挙動を水平方向のみの浸透を考慮した軸対象問題として式 (1) を解くことにより作成した設計図表を使用する場合が多い<sup>2)</sup>

$$\frac{k_s}{m_v \cdot \gamma_w} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right] = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $\gamma_w$  : 水の単位体積重量

$k_s$  : 砂層透水係数

$m_v$  : 砂層の体積圧縮係数

$u$  : 間隙水圧 (消散と発生と重ね合わせたもの)

$u_g$  : 繰返しせん断により発生する間隙水圧

$r$  : 半径

$t$  : 時間

表-3 解析パラメータ

地盤透水係数 $k_s$	$1 \times 10^{-5} \text{m/sec}$
ドレーン透水係数 $k_d$	10m/sec
比貯留率 $S$	$1 \times 10^{-5}$
比算出率 $S_v$	0.2
計算時間	3.0sec

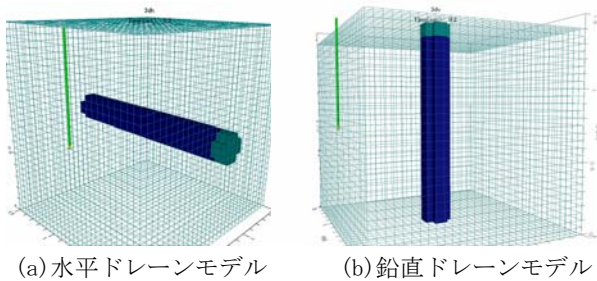


図-9 解析モデル図及び観測ポイント

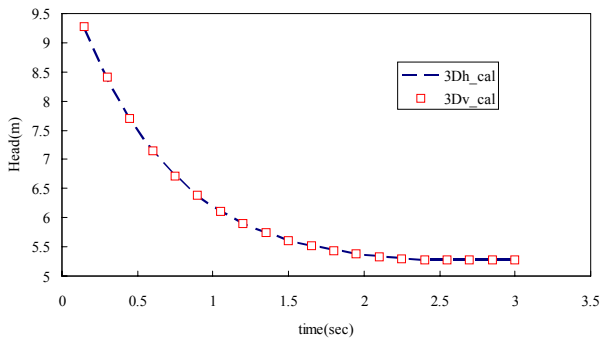


図-10 水頭の時刻歴 (P1 地点)

実際のドレーン材の透水性は有限であり、ドレーン内部の排水抵抗を式(2)に示すウェルレジスタンス係数により定義し、設計に考慮している。

$$R_w = (8/\pi^2)(k_s/k_d)(h/a)^2 \quad (2)$$

ここに、 $k_s$  : 地盤の透水係数 (cm/s)

$k_d$  : ドレーンの鉛直透水係数 (cm/s)

$h$  : ドレーンの長さ (cm)

$a$  : ドレーンの半径 (cm)

(2) 3次元浸透流解析によるドレーン効果の比較

上述したように水平方向のみの浸透を考慮した鉛直ドレーンの打設間隔の設定方法が水平ドレーンに対しても適用可能であるためには、深度方向に変化する過剰間隙水圧の分布状況を考慮した際の、水圧消散速度がドレーンの配置方向(鉛直および水平)によって変化しないことを確認する必要があると判断し、本研究では、3次元浸透流解析を実施することにより確認を行った。

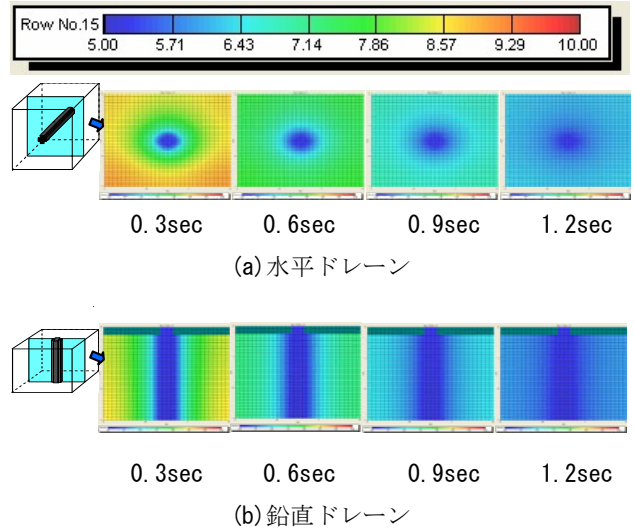


図-11 各時刻における水頭コンター

ここでは、鉛直ドレーンと水平ドレーンにおいて排水抵抗を同一条件としてドレーン敷設方向の違いによる過剰間隙水圧消散効果の比較について、3次元浸透流解析を行った。

a) 解析条件

図-8に解析条件を示す。検討はGL-5.5mの地点の地盤を対象とした。対象地盤の地下水位はGL-1.0mである。解析パラメータを表-3に示す。ドレーン径はφ200mmで打設間隔は1.5mである。1本の鉛直および水平ドレーンを中心とした1辺1.5mの立方体の範囲をモデル化し、全要素に対し過剰間隙水圧(初期鉛直有効応力の90%)を考慮した初期水頭を設定し、ドレーン端部からは水圧が消散できるよう、一定水頭として自由水面の水頭を与えた。解析は有限差分法による浸透流解析プログラムMODFLOW2000を用いて実施した。

b) 解析結果

3次元浸透流解析結果のうち、P1地点(図-9参照)での水頭の時刻歴を図-10に示す。このグラフから鉛直ドレーンと水平ドレーンの過剰間隙水圧消散速度は同等であると判断できる。また、各時刻における水頭コンターを図-11に示す。図は解析対象領域内の同一断面(中心部円直面)について比較を行っている。水平および鉛直の両ケースとも時間の経過とともにドレーンに近い部分から水頭が低下していることが確認できる。また、排水距離が同じ地点では水平及び鉛直配置とも同様な水頭低下を示しており、3次元の過剰間隙水圧分布を考慮した場合についても、鉛直ドレーンと水平ドレーンの水圧消散効果は同等と評価できることを確認した。



写真-2 2重管式ドレーン

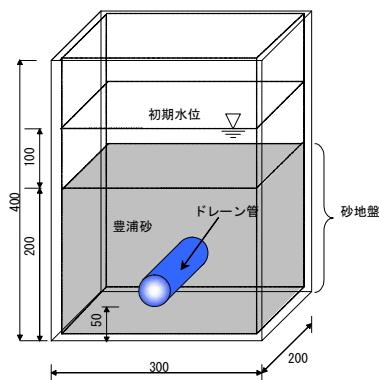


図-12 模型概要

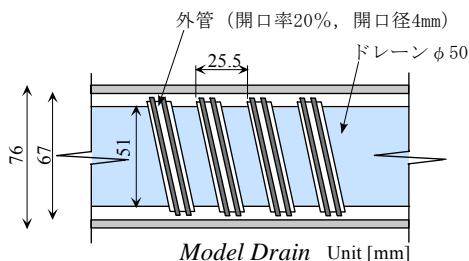


図-13 2重管式ドレーン模型概要

### (3) 2重管式ドレーンの透水性性能実験 (外管の影響)

本工法は、ドレーン施工時に地盤内を水平に引き込む際、ドレーン管に作用する引張り力を負担する目的で、開口率20%程度の有孔管を外管とした2重管構造を採用している(写真-2)。このため、地震時の上昇した過剰間隙水圧を消散するため地盤からドレーン管に間隙水が移動する際、外管の存在により、透水性が低下することが考えられる。設計において適正なドレーン打設間隔を設定するためには、外管による透水性の低下を適切に評価する必要があると判断し、透水性に関する模型実験を行った。

#### ① 実験条件

表-4 豊浦砂の基本物性

土粒子の密度 $\rho_s$	2.665 g/cm <sup>3</sup>
最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$	1.354 g/cm <sup>3</sup>
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	1.641 g/cm <sup>3</sup>

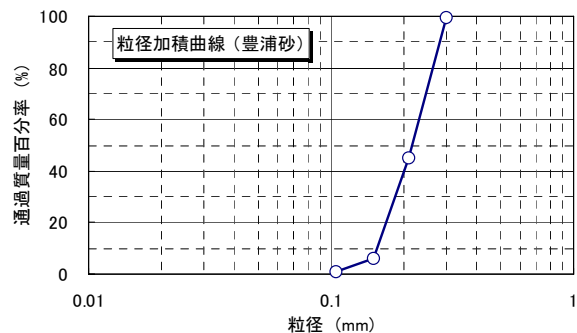


図-14 豊浦砂の粒径加積曲線

内管 (ドレーン)	外管 1	外管 2
ポリプロピレン不織布管 (TDR-50)	塩ビ管VP65 開口率: 10%	塩ビ管VP65 開口率: 20%
内径51mm 外形60.5mm	内径67mm 外形76mm 肉厚4.5mm 開口径4mm	

写真-3 ドレーン模型材料

模型概要および2重管式ドレーン模型構造を図-12および図-13に示す。模型土層はアクリル製の土槽(幅30cm×高さ40cm×奥行き20cm)に豊浦砂を用い地盤を作成した。豊浦砂の基本物性および粒径加積曲線を表-4および図-14に示す。土槽底面から50mm上部まで地盤が完成した段階で、ドレーン模型を設置し、その後、上部の地盤を作成した。模型地盤の相対密度は $D_r=55\%$ であった。ドレーン設置位置のアクリル土槽前面にはドレーン径と同一の開口部を設け、地盤からドレーンに浸透した水が土槽から排水されるようになっている。ドレーン模型は写真-3に示す材料を用いて作成した。実験ケースは表-5に示すように外管の有無および外管の開口率を変化させた計3ケースを実施した。2重管ドレーンの場合、内管と外管の隙間および外管の開口部は周辺地盤と同等の密度で土が詰まっている状態で実験を行った。実験方法は、初期状態として土層表面から高さ10cmの位置に水位を設定し、水が浸透しドレーン端部から排水する際の水位の降下量と、その経過時間を測定した。

表-5 実験ケース

ケース	ドレーン仕様
1	ドレーン (内管のみ)
2	ドレーン+外管 (開口率10%)
3	ドレーン+外管 (開口率20%)

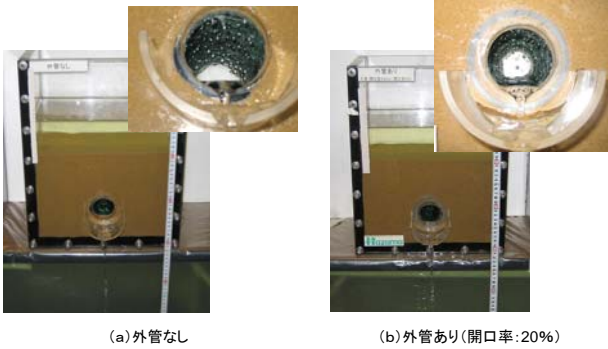


写真-4 透水実験状況

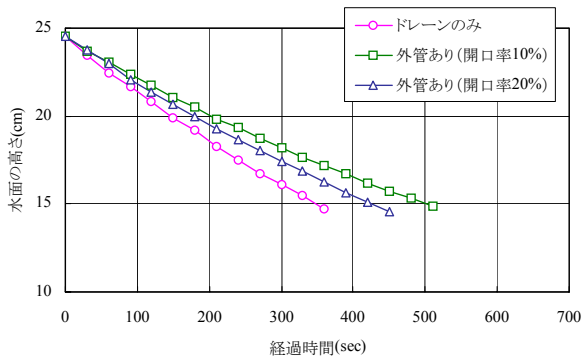


図-15 水位の変化

②実験結果

透水実験状況を写真-4 に示す。写真からは地盤からの浸透状況に大きな違いは確認できない。各ケースにおける水位の変化を図-15 に、また、土の変水位透水試験の整理法 3) に基づいて算定した見かけの透水係数を図-16 に示す。これらの結果は、水温 15℃における値に補正したものである。これらの図からドレーン (内管) のみ、ドレーン+外管 (開口率 20%)、ドレーン+外管 (開口率 10%) の順に透水性能が低下することが確認された。この結果より、外管の有無および外管の開口率により透水排水性能が低下し、過剰間隙水圧の消散に影響を及ぼすことが予想され、水平ドレーンの設計において、この排水性能の低下を考慮する必要があると考えられる。

そこで、間隙水が地盤から外管の開口部を通りドレーン管に浸透する状態を図-17 のようにモデル化した。すなわち、外管を開口率に応じて透水断面積が低減した 1 つの層とみなし、外管の肉厚  $t$  とドレーンの支配する地盤の等価円柱の半径  $b$  との異なる透水係数を有する 2 層が成層状態と仮定するものがある。これにより、式(3)を用い地盤と外管の 2 層の平均的な透水係数を算定することが可能となる。

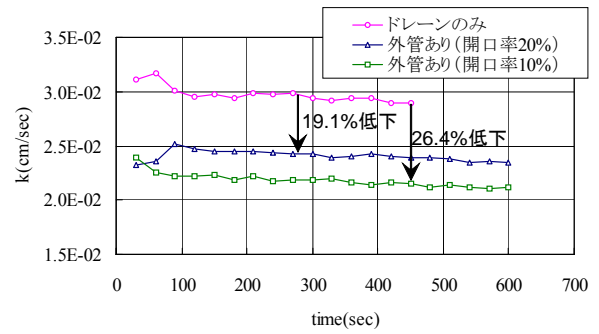


図-16 見かけの透水係数の変化

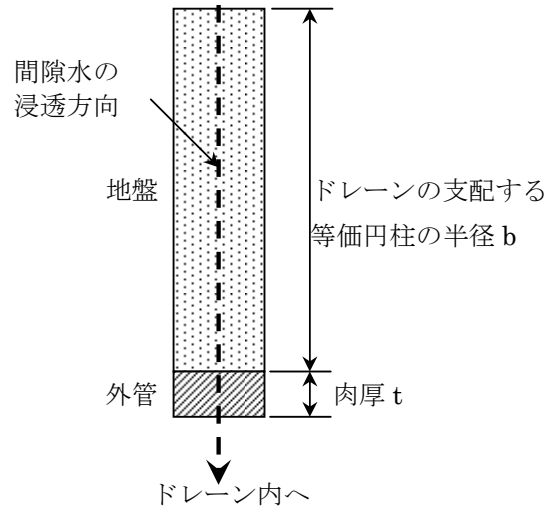


図-17 外管を考慮した透水係数の算定モデル

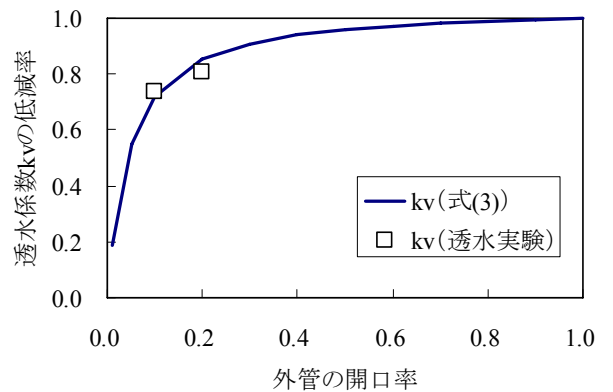


図-18 外管の影響を考慮した透水係数の低減率

$$\bar{k}_v = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{k_i}} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{k}_v$  : 地盤と外管の平均的な透水係数 (cm/s)  
 $k_i$  : 各層の透水係数 (cm/s)

$d_i$  : 各層の層厚 (cm)

豊浦砂  $d_1 = 10cm, k = 2.72 \times 10^{-2} cm/sec$

外管  $d_1 = 0.45cm, k = \text{開口率} \times 2.72 \times 10^{-2} cm/sec$

式(3)を用い外管がないドレーンに対し外管の開口率  
が変化した際の平均的な透水係数の低下率を算定した結  
果と、今回の透水実験の結果から算定した低下率を合わ  
せてプロットしたものを図-18に示す。ここで、外管部  
の透水係数は地盤の透水係数に外管の開口率を乗じた値  
とした。今回実施した外管の開口率(10%および20%)  
については、2層系を仮定した算定結果とほぼ一致する  
ことが確認された。これらの結果から、設計時の2重管  
式水平ドレーンの外管による透水性能の低減効果は、外  
管の肉厚 $t$ とドレーンの支配する地盤の等価円柱の半径  
 $b$ の成層状態を仮定した平均的な透水係数を液状化対策  
対象地盤の透水係数として採用することで考慮すること  
が可能であると考えられる。

## 5. まとめ

水平ドレーンによる過剰間隙水圧消散を目的とした液  
状化対策工の対策効果を検討するため1g場での小型模  
型振動台実験を実施するとともに、水平ドレーンの設計  
法に関して鉛直ドレーンと設計法の適用性について検討  
を行った結果、以下のことを確認した。

①模型振動実験より、水平ドレーンによる過剰間隙水圧  
消散および沈下低減効果を確認した。また、水平ドレー  
ンによる対策は鉛直ドレーン同等の対策効果を期待で  
きることがわかった。

②実地盤の水頭条件を想定した3次元浸透流解析により、  
排水抵抗が同一の場合、水平ドレーンおよび鉛直ドレー  
ンの水圧低減速度は同等であることがわかった。これに  
より、鉛直ドレーンによる設計法と同様な方法により打  
設ピッチの算定を行うことが可能となる。

③2重管式ドレーンを使用した場合、外管の存在により、  
地盤からドレーンに間隙水が移動する際の透水性能が低  
下することが確認された。この透水性能の低下について  
は、模型透水実験の結果から、外管の肉厚 $t$ とドレーン  
の支配する地盤の等価円柱の半径 $b$ の成層状態を仮定し  
た平均的な透水係数を採用することで考慮することがで  
きる。

## 参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：液状化対策工法, pp. 363-410, 2004
- 2) 建設省土木研究所他：液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)、平成11年3月
- 3) 地盤工学会：土質試験の方法と解説-第一回改訂版-, 2000.

---

## A Study on Countermeasure against Liquefaction by Horizontal Drain Pipe

Yuji ADACHI, Hidemasa KOBAYASHI, Kazushi WAKITA,  
Kiyoshi YANAGI, Yasumasa SEKINE and Ryosuke UZUOKA

In this study, the effect of horizontal drain pipes as a countermeasure against liquefaction proposed by authors was examined by model shaking tests under 1.0g gravitational field and was compared with the vertical drain pipe method. As a result, it was confirmed that the countermeasure effect against liquefaction by horizontal drain pipes was commensurable with that by the vertical drain method. Moreover, the design method of the vertical drain method was shown applicable to the horizontal drain pipe method.