

# 間隙水圧消散工法の性能設計に向けた 取り組み

小野 大和<sup>1</sup>・林 健太郎<sup>1</sup>・太田 正規<sup>2</sup>・浅田 英幸<sup>2</sup>・山崎 浩之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

<sup>2</sup>正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1-3)

<sup>3</sup>正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

間隙水圧消散工法は、地震時に発生した過剰間隙水を素早く排水し、過剰間隙水圧を消散させることで地盤の液状化を防ぎ、砂のせん断剛性の低下を妨げる工法である。なかでもプラスチック製のドレーン材を使用した工法（DEPP 工法）は、施工が低騒音・低振動であり、施工時に構造物に圧力を与えにくい工法であることから、過去 300 万 m の施工実績を重ねてきた。しかし、DEPP 工法は地震後の変位等が明確にされておらず、性能設計に対応していない。本報告は DEPP 工法の性能設計を目標に、せん断土槽を用いた 1G 場振動台模型実験を行った過程で得られた知見をまとめたものである。

**キーワード:** 間隙水圧, ドレーン, 排水, 沈下量

## 1. はじめに

地盤改良による液状化対策は、既に数多くの工法が採用されているが、市街地や既設構造物近傍で施工する場合には振動、騒音の少ない工法が望ましい。

このような要望を背景に、人工材ドレーンによる間隙水圧消散工法（以下DEPP工法とする）が開発されて20年が経過した。本工法の特徴は工場で生産されたプラスチック製ドレーン材を圧入式で打設し、低振動・低騒音で周辺地盤に土圧をかけずに施工することができることである。今までに300万mの施工実績<sup>1)</sup>があり、液状化対策の代表的工法の1つとして認識されている<sup>2)</sup>。

また、2003年9月に発生した十勝沖地震ではDEPP工法により耐震補強された釧路港の港湾構造物を現地調査したところ、ほとんど地震による被害は受けていなかった。

しかしながら、本工法の現行設計では安全率を基にした性能照査は行われているものの<sup>3)</sup>、限界状態における変形量等を明確に定義されていなかったため、性能設計に対応していなかった。本論文ではこの課題を解決するために、ドレーンの打設ピッチと地震後の沈下量の関係に着目して、1G場での振動台実験を行った。また、模型実験による検証を行うと共に、得られた結果から沈下量のモデル化を行った。

## 2. 試験方法

### (1) 実験方法概要

水平砂地盤模型にドレーンを等間隔に配置し、加振を行った。ドレーン間に間隙水圧計を深度方向に複数個配置し、過剰間隙水圧の計時変化を測定した。同時にドレーンからの排水量及び表層の沈下を計測した。

ドレーンの間隔を徐々に変えることで、地盤中に発生する過剰間隙水圧と排水量、表層沈下の関係を調べた。

### (2) 実験材料

実験地盤には相馬珪砂5号を用いた。粒径加積曲線を図-1に示す。相馬珪砂5号の土粒子密度は  $\rho_s=2.644\text{g/cm}^3$ 、最小密度  $\rho_{\min}=1.261\text{g/cm}^3$ 、最大密度  $\rho_{\max}=1.599\text{g/cm}^3$  である。また地表面には不透水層を設置する目的でベントナイトを敷設した。

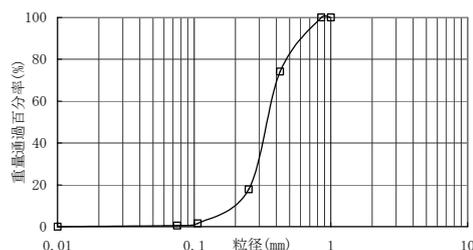


図-1 砂地盤粒径加積曲線(相馬珪砂5号)



(左：モデルドレーン 右：実物大ドレーン)  
写真-1 実験で用いたドレーン



写真-2 せん断土槽全景写真(Case3)

過剰間隙水圧消散材料として、モデルドレーンと実物大ドレーンを使用した。モデルドレーンは直径20mm、実物大ドレーンは直径95mmである(写真-1)。モデルドレーンは線径0.34mm目合1.30mmのステンレス製織網をφ20mmに成形し、フィルター材として透水性の良いポリエステル布でその周囲を覆った。実物大ドレーンは現場で使用されるものであり、フィルター材には高密度ポリエチレン製織維が用いられ、高密度ポリエチレンで螺旋状に補強してあるものである。双方とも砂が入り込まないように下端はフィルター材で塞いだ。

### (3) 実験装置、地盤条件

本実験で用いた振動台は電気油圧サーボ式であり、最大2000Galまで加振可能なものである。土槽には横200cm×縦100cm×高さ100cmのせん断土槽を用いた(写真-2)。地盤は、まずドレーンを所定ピッチで配置した後、水中落下法で砂を投入し、作成した。地盤高さは90cmであり、相対密度は60%である。この地盤の透水係数は別途、定水位透水試験で確かめたところ、 $k_s=0.010\text{cm/sec}$ であった。地表面には予め水で膨潤させたバントナイトを2cm敷設し、不透水層を模擬した。

また、加振中ドレーンから排水された排水量と沈下量の関係を明らかにするため、排水ポンプを用意し、排水量を計測した。排水ホースの高さは砂層の

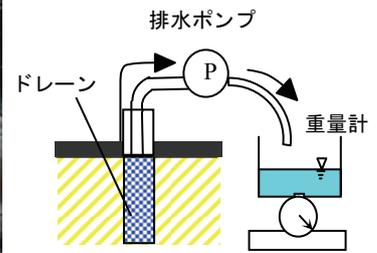


写真-3 排水量計測状況 図-2 排水量計測模式図

表-1 実験ケース一覧

Case	ドレーンピッチ	加振条件
1	無対策	10Hz 150Gal 20波+180波
2	モデル 60 cm	10Hz 150Gal 20波
3	モデル 45 cm	10Hz 150Gal 20波+180波
4	モデル 30 cm	10Hz 150Gal 20波+180波
5	モデル 25 cm	10Hz 150Gal 20波+180波
6	モデル 20 cm	10Hz 150Gal 20波+180波
7	無対策	2Hz 50Gal+100Gal 20波
8	実物 60 cm	2Hz 50Gal+100Gal 20波

天端とした(写真-3、図-2)。

### (4) 実験ケース

実験ケース一覧を表-1に示す。加振中に発生する過剰間隙水圧比と沈下量の関係を調べることを目的として、ドレーンのピッチを決定した。

当実験では相似則に井合の相似則<sup>4)</sup>を用いた。想定液状化地盤を9mとして、実験スケールは1/10である。実際の地震動の周波数を2Hz程度とすると、井合の相似則によれば、モデルスケールにおいて周波数は10Hzである。無対策およびモデルドレーンを使用したCase1～Case6までは10Hz 150Galで、実物大ドレーンを使用したCase7や実地盤を想定した無対策Case6では、2Hz 100Galで加振を行った。加振波には正弦波を用いた。

加振はまず20波から行い、間隙水圧、沈下量等を測定し終えた後、30分程度おいて、さらに180波加振を行った。

### (5) 計測器の設置位置

図-3に計測器設置位置例を示す。計測器位置はドレーンからの平面的な距離を勘案し、決定した。間隙水圧計、加速度計は上、中、下段に設置した。鉛直変位計は、直下の間隙水圧比との相関を取るために、間隙水圧計と平面的に同位になるように設置した。

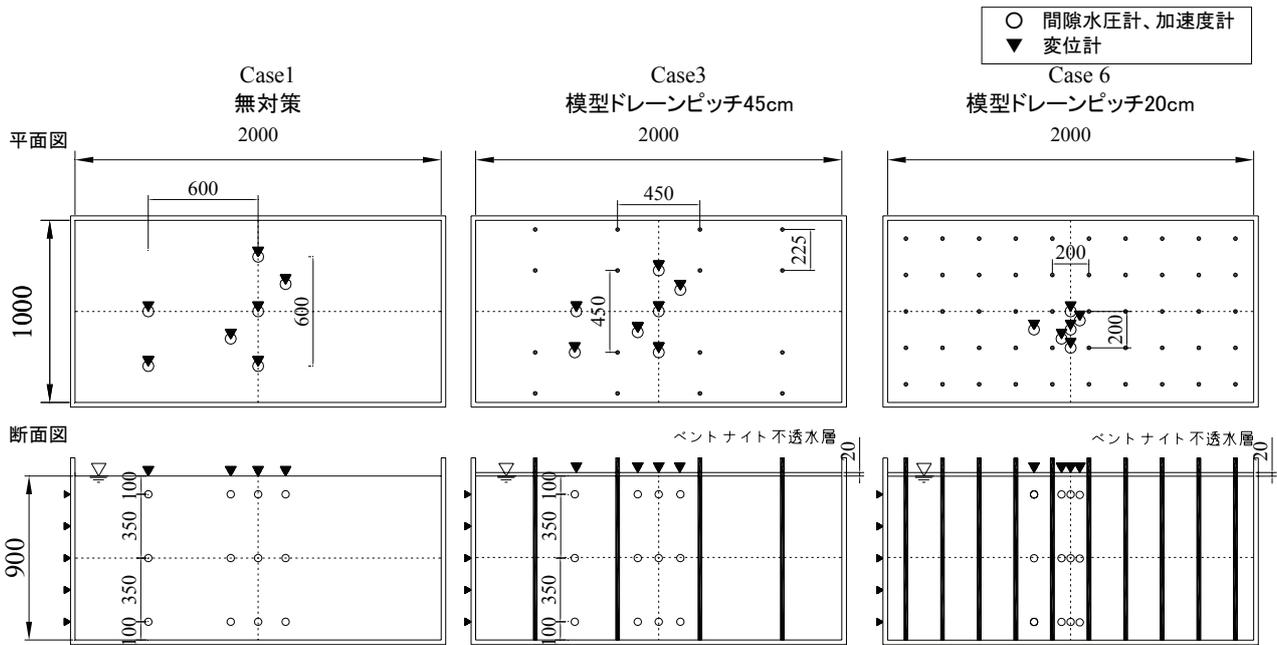


図-3 計測器設置位置例

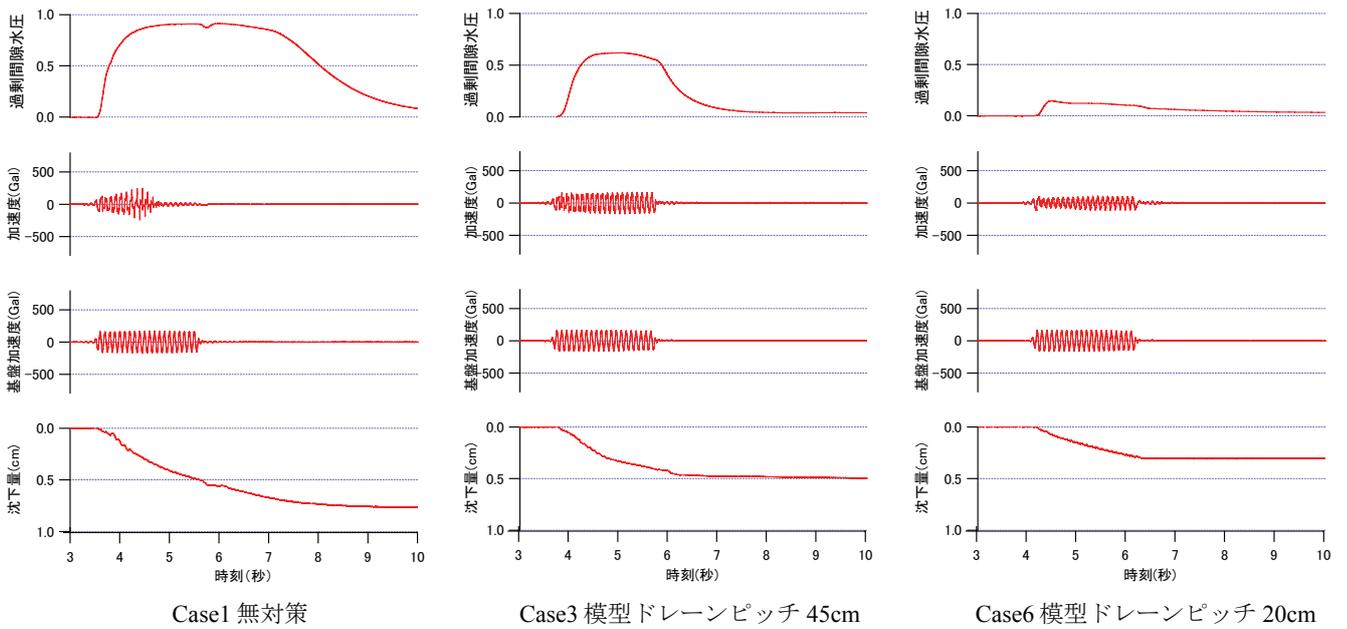


図-4 実験結果一覧

壁面部に水平変位計を設置し、同一時刻の水平変位の差を設置間高さで割ることで、せん断ひずみを算定した。データは1/512秒に1回計測した。

### 3. 試験結果

#### (1) 実験結果一覧

図-4に加振条件20波での実験結果の一例を示す。過剰間隙水圧比、加速度、鉛直変位は土槽の中心にある間隙水圧計と加速度計、その直上の変位計で計

測したものである。

基盤加速度は 150Gal で推移しているが、Case1 無対策において、加速度計は加振中に減衰している。

これは加振中に周囲の地盤が液状化し、剛性を徐々に失ったことにより、土が加速度を伝播しなくなったことを示している。したがって、10Hz 150Gal 20 波の加振で無対策模型地盤は液状化に至ることが分かった。一方、Case3, 6 は同一加振条件で、加振中の加速度計の値は減衰しておらず、液状化に至っていないことが分かる。

表-2 模型地盤パラメータ

パラメータ	値
地盤の透水係数 $k_s$	0.010(cm/sec)
地盤の体積圧縮係数 $m_v$	0.0001(m <sup>2</sup> /kN)
液状化に至る時間 $t_l$	0.25(sec)
水の単位体積重量 $\gamma_w$	10.1(kN/m <sup>3</sup> )
対象深度 $h$	90(cm)
ドレーンの半径 $a$	1(cm)
ドレーンの影響範囲 $b$	0.565 × ドレーンピッチ
ドレーンの透水係数 $k_d$	800(cm/sec)
ウエルレジスタンス $R_w$	0.082
時間係数 $T_l$	250

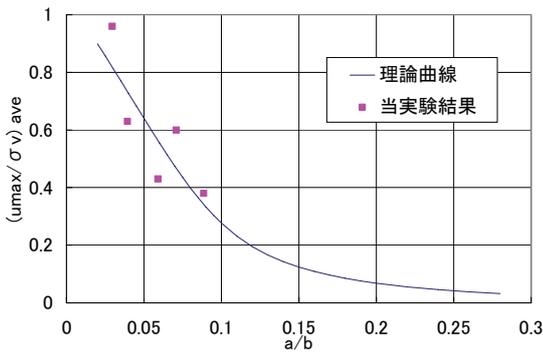


図-5 既往の設計手法と当実験結果比較

これはドレーンの排水機能により、液状化に至らず、せん断剛性が残っていることを示している。これは、排水機能とせん断剛性に相関関係があることを示唆するものである。

## (2) 既往の研究、設計法との比較

一般的な間隙水圧消散工法の設計手法<sup>5), 6), 7)</sup>ではドレーンの排水抵抗値  $R_w$ (ウエルレジスタンス)、地盤の液状化しにくさを表す時間係数  $T_l$ (値が小さくなるほど間隙水圧が上昇しにくくなる)を計算で求め、最大過剰間隙水圧比を決定することでドレーンピッチを決定する。

表-2 に当実験で用いた相馬珪砂 5 号地盤および、模型ドレーンの物性値を示す。 $R_w$ 、 $T_l$  は(1)式、(2)式のように表すことができることから、 $R_w$ 、 $T_l$  は同じく表-2 に示したような値となる。

$$R_w = \frac{8k_s h^2}{\pi^2 k_d a^2} \quad (1)$$

$$T_l = \frac{k_s t_l}{m_v \gamma_w a^2} \quad (2)$$

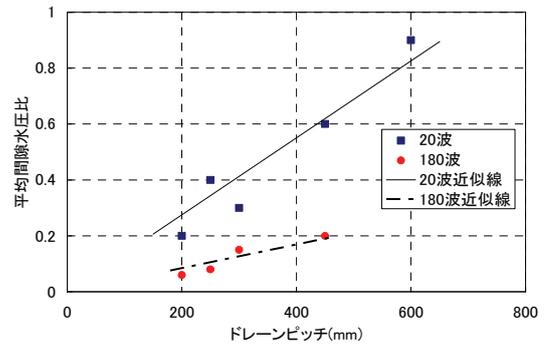


図-6 平均過剰間隙水圧比—ドレーンピッチ

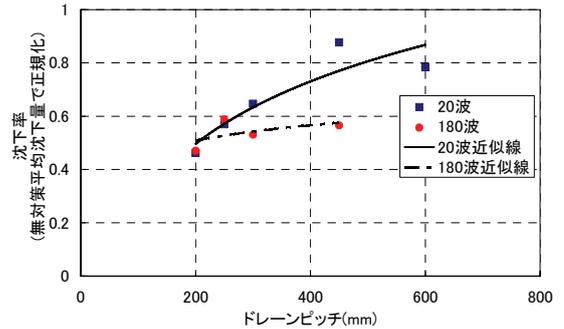


図-7 沈下率—ドレーンピッチ

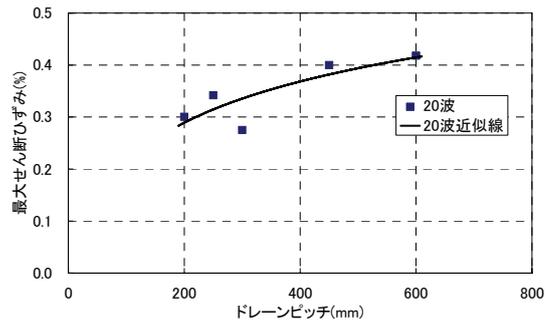


図-8 最大せん断ひずみ—ドレーンピッチ

地盤の透水係数  $k_s$  は前述したように定水位透水試験により求めた。体積圧縮係数  $m_v$  は繰り返し三軸試験により以下の手順で求めた。表乾状態の相馬珪砂 5 号を空中落下させ、直径 5cm、高さ 10cm、相対密度 60%の乾燥供試体を作成した。二酸化炭素で間隙空気を静かに置換したのち、通水し、100kPa で等方圧密した。応力比 0.16 にて非排水条件化で繰返し載荷し、過剰間隙水圧比 0.5 に上昇した時点で載荷を終了し、排水コックを開けて排水量  $\Delta V$  を計測した。排水量  $\Delta V$  と体積  $V$ 、最大過剰間隙水圧比  $u_{max}$  には(3)式の関係がある<sup>8)</sup>ことから体積圧縮係数  $m_v$  は表-2 のように決定された。

$$m_v = \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{u_{max}} \quad (3)$$

この  $m_v$  の値を模型地盤の代表値として採用した。



写真-4 水平変位計土槽側面 設置状況

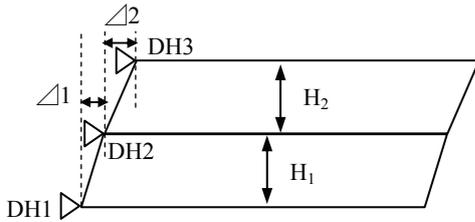


図-9 せん断ひずみ概念図

『液状化に至る時間  $t_l$ 』は Case1 無対策 20 波加振において加振開始時刻から過剰間隙水圧比が 0.8 以上になるまでの時間で決定した。

一般的に間隙水圧消散工法的设计図表は図-5 のように、過剰間隙水圧比と  $a/b$  ( $a$ : ドレーンの半径,  $b$ : ドレーンピッチ) の関係で表されることが多い。図-5 の曲線は表-2 で示したパラメータから計算した理論曲線であり、■で図-5 に示したのが当実験で得られた値である。

このように本実験の結果は既往の研究、設計法による理論値と良く一致した。

### (3) ドレーンの効果

図-6 はドレーンピッチと平均過剰間隙水圧比(加振中の過剰間隙水圧比を時間平均したもの)の関係である。ドレーンピッチが密になるに従い、発生する間隙水圧が減少することが分かる。また、180 波の平均過剰間隙水圧比が 20 波に比べて小さいのは、長時間の加振により、地盤が締めり、水圧が低下するため、時間平均すると小さな値になるためである。

図-7 は沈下率とドレーンピッチの関係を示したものである(各ケースの沈下量を Case1 無対策の沈下量で割り、正規化したものを『沈下率』として示す)。

図-6 と同様に、図-7 ではドレーンピッチが密になるほど沈下の発生量が抑制されていることが分かる。

図-8 はせん断土槽全体が受けた最大せん断ひずみとドレーンピッチの関係をまとめたものである。

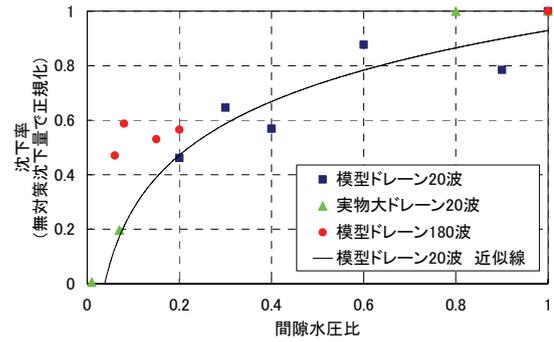


図-10 沈下率 - 平均間隙水圧比

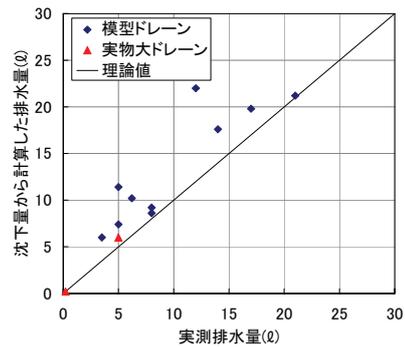


図-11 計算排水量 - 実測排水量

ドレーンが密に打設されるほど、せん断ひずみが減少していることが分かる。実験では、せん断土槽の側面に複数の水平変位計を設置してある(写真-4)。これら水平変位計の同時刻における計測値を利用して、図-9 のような考え方でせん断ひずみを求めた。ある時刻において、水平変位計 DH1 に対し DH2 が  $\Delta_1$  ずれていたとすると、DH1 と DH2 間のせん断ひずみ  $\gamma_1$  は  $\gamma_1 = \Delta_1 / H_1 \times 100$  で表される。同様にそれぞれの変位計の差分から、せん断ひずみを計算できる。

各層のせん断ひずみの最大値を  $\gamma_{n \max}$ 、各層厚を  $H_n$ 、総層厚を  $H_{\text{sum}}$  とすると、この土槽が受けた最大せん断ひずみ  $\gamma_{\max}$  は(4)式のように表すことができる。

$$\gamma_{\max} = \sum_n \frac{\gamma_{n \max} \cdot H_n}{H_{\text{sum}}} \quad (4)$$

図-10 は今回実施したすべてのケースでの、平均過剰間隙水圧比と沈下率の関係をプロットしたものである。近似線は模型ドレーン 20 波に対してのものであるが、すべてのケースの傾向を良く表している。この図は模型、実物大、加振回数に関係なく、過剰間隙水圧比と沈下率の間には有意な関係があることを示している。

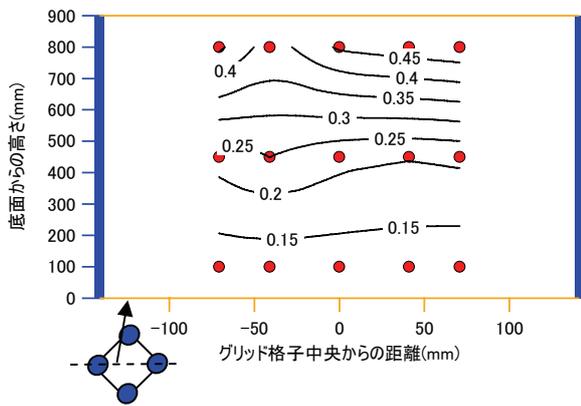


図-12 Case6 間隙水圧比コンター図

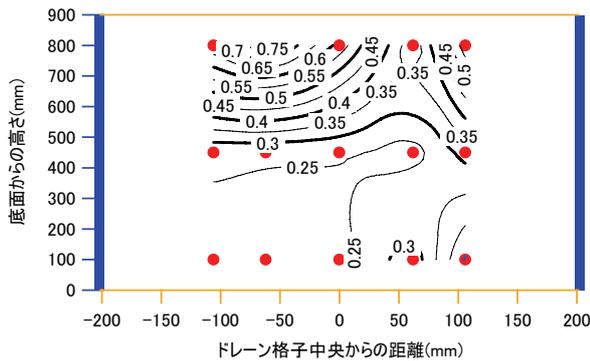


図-13 Case5 間隙水圧比コンター図

したがって、過剰間隙水圧比を抑制することで、地震時の沈下量を抑えることができると考えられる。

ここで、本実験では地盤に偏荷重がないため、排水量は沈下量×面積になると考えられる。ドレーンからの排水量の実測値と、沈下量に面積を掛けた計算排水量の関係を図-11 に示した。図のように、排水量と沈下量の関係に 1:1 の関係があることが確認できた。

#### 4. 沈下量を推定するモデルの提案

模型試験の結果を踏まえ、本研究では過剰間隙水圧比から沈下量を推定するモデルの提案を試みる。

##### (1) 被圧帯水層を持つ井戸のモデル

既往の研究として、松原、三原ら<sup>9)</sup>による過剰間隙水圧比と排水量の関係があるが、本論文ではこの関係式を考慮し、より簡便に間隙水圧から排水量を導く方法を提案する。

図-12 は、Case6 模型ドレーンピッチ 20cm の地盤に 10Hz 150Gal で加振中の間隙水圧比コンター図である。ドレーン格子の対角線で断面を取り、縦軸は土槽高さ、横軸は水平距離を表している。

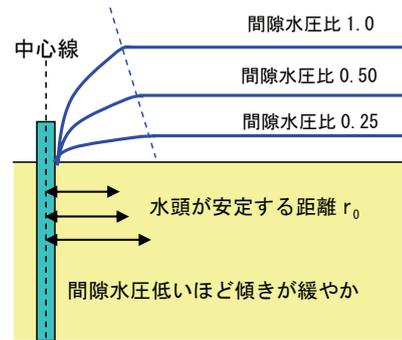


図-14 ドレーンからの距離と間隙水圧比模式図

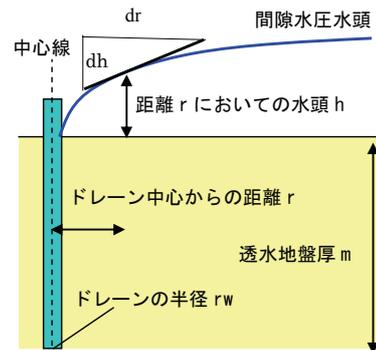


図-15 ドレーン周辺の模式図  
(被圧帯水層を持つ井戸のモデル)

横軸はドレーンから最も離れた地点(ドレーン格子の中央)を 0 として表した。図中の左右縦軸青太線はドレーンの位置を、●は間隙水圧計の位置を示している。図-13 は同じく Case5 加振中のコンター図である。

図-12、図-13 の過剰間隙水圧比の分布からは『ドレーン格子の中央(ドレーンから最も遠い地点)で最も間隙水圧比が大きくなる』<sup>10)</sup>という現象が認められない。むしろ過剰間隙水圧比は、同一深度であれば一定値を示す傾向がある。

Case5,6 以外の実験ケースにおいても同様の傾向が認められる。一方、ドレーンの内部の間隙水圧は 0 となるはずである。したがって、図-14 のように、間隙水圧比はドレーンの周辺で急激に減少し、ドレーン中心から、ある距離  $r_0$  だけ離れると一定と考えられる。

この仮定によると、ドレーン中心からの距離  $r$  において、 $0 \leq r \leq r_0$  の範囲では、ドレーンに流入する間隙水は水頭を一定に持つ定常流とみなすことができる。

いま、1 本のドレーンをモデル化すると、図-15 のようになるので、被圧帯水層を持つ井戸のモデルが適応できる。ドレーン中心からの距離  $r$  での水頭を  $h$ 、勾配を  $dh/dr$ 、ドレーンの半径を  $r_w$ 、透水地盤厚  $m$ 、地盤の透水係数を  $k_s$ 、単位時間当たりの排

表-3 模型ドレーン 10Hz 150Gal 20波

ドレーンピッチ	平均沈下量(mm)	計算排水量(cm <sup>3</sup> )	平均間隙水圧比	r <sub>0</sub> /r <sub>w</sub>
60cm	5.1	10200	0.85	1.38
45cm	5.7	11400	0.60	1.50
30cm	4.2	8400	0.30	1.52
25cm	3.7	7400	0.40	2.31
20cm	3.0	6000	0.20	2.24

表-4 模型ドレーン 10Hz 150Gal 180波

ドレーンピッチ	平均沈下量(mm)	計算排水量(cm <sup>3</sup> )	平均間隙水圧比	r <sub>0</sub> /r <sub>w</sub>
45cm	10.6	21200	0.20	1.93
30cm	9.9	19800	0.15	2.30
25cm	11.0	22000	0.08	1.66
20cm	8.8	17600	0.06	2.10

表-5 実物大ドレーンピッチ 60cm 2Hz 20波

加振条件	平均沈下量(mm)	計算排水量(cm <sup>3</sup> )	平均間隙水圧比	r <sub>0</sub> /r <sub>w</sub>
100Gal	3.6	6973	0.07	1.21
50Gal	0.1	194	0.01	2.72

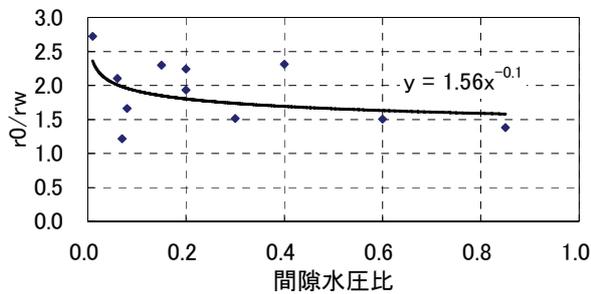


図-16 ドレーン影響範囲 r<sub>0</sub>/r<sub>w</sub> - 間隙水圧比関係

水量を  $q$  とすると、被圧帯水層を持つ井戸のダルシー則<sup>11)</sup>は(5)式のように表される。

$$q = 2\pi r \cdot m \cdot k_s \frac{dh}{dr} = \text{const.} \quad (5)$$

ドレーンの端部  $r=r_w$  において水頭  $h=0$ 、間隙水圧比が一定となる距離  $r=r_0$  において間隙水圧計で計測された間隙水圧比  $U$ 、土被り圧  $\sigma'$  を用いて、 $h=U \cdot \sigma'$  の条件で(5)式を積分すると(6)式を得る。

$$\int dh = \frac{q}{2\pi k_s \cdot m} \int \frac{dr}{r}$$

$$\Rightarrow h - 0 = U\sigma' = \frac{q}{2\pi k_s \cdot m} \ln \frac{r_0}{r_w}$$

$$\Leftrightarrow q = \frac{2\pi k_s \cdot m \cdot U \cdot \sigma'}{\ln(r_0/r_w)} \quad (6)$$

実験における総排水量  $Q$  はドレーンの本数  $n$ 、加振時間  $t$  を用いて  $Q=q \cdot n \cdot t$  となるので、あるドレーンピッチでの排水量は(7)式のように表される。

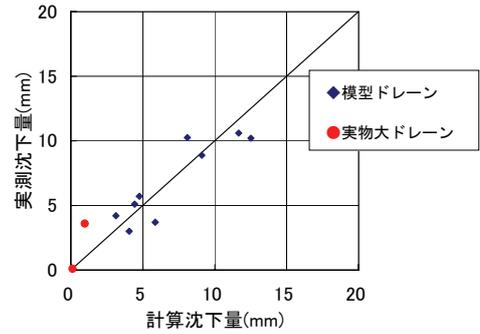


図-17 計算沈下量と実測沈下量の比較

$$Q = q \cdot n \cdot t = \frac{2\pi k_s \cdot m \cdot U \cdot \sigma' \cdot n \cdot t}{\ln(r_0/r_w)} \quad (7)$$

## (2) 沈下量推定式の提案

(7)式において、無対策地盤から決定されるパラメータは  $k_s$ 、 $m$ 、 $\sigma'$  である。また、ドレーンの本数  $n$  や継続時間  $t$  は初期条件から求めることができる。したがって、平均過剰間隙水圧比  $U$  と  $r_0/r_w$  の関係が排水量  $Q$  を決定する上で重要である。

当実験では平均過剰間隙水圧比  $U$  が計測され、排水量  $Q$  は沈下量から計算で求めることができるため、 $r_0/r_w$  を逆算し、傾向をつかむことができる。

表-3、表-4、表-5 で各ケースの平均沈下量を示した。図-11 に示したように、排水量と沈下量には 1:1 の関係があることから、平均過剰間隙水圧比  $U$  を(7)式に代入すれば、 $r_0/r_w$  が算出される。 $r_0/r_w$  -  $U$  の関係をプロットすると図-16 のようになる。ドレーンの見かけの影響範囲を示す  $r_0/r_w$  は平均過剰間隙水圧比  $U$  が高いほど小さい。すなわち、加振時にドレーンの排水能力を超えるほどの間隙水が周辺地盤から供給されると、ドレーンから排水しきれない分、地盤の間隙水圧は上昇する。この際、ドレーンの影響範囲は小さくなり、ドレーン近傍で著しいヘッド差を形成することになる。

図-16 の関係を近似線で示すと(8)式になる

$$\frac{r_0}{r_w} = 1.56 \cdot U^{-0.10} \quad (8)$$

(7)式に(8)式を代入すると(9)式のようになる

$$Q = \frac{2\pi k_s \cdot m \cdot U \cdot \sigma' \cdot n \cdot t}{\ln\left(1.56U^{-0.10}\right)} \quad (9)$$

この式が実験データと、整合性を持っているか確かめるため、(9)式に実験で計測された平均間隙水圧比を代入し、排水量をもとめ、計算沈下量を求め

た。実測沈下量と比較すると、図-17 のようになる。よって、(7)式の近似線は実験データを良く表しているといえる。

## 5. まとめ

本実験は地震後の地盤の変形量を推定することを最終的な目標として行われた。本年度は水平地盤のみの実験であったが、沈下量の算定等以下の結果を得られた。

- ・過剰間隙水圧比、沈下量、最大せん断ひずみとドレーンピッチの間には有意な関係がある。過剰間隙水圧比を低く抑えることで、せん断剛性の低下を妨げ、沈下量を抑制できるものと考えられる。この事からも過剰間隙水圧比がドレーンの性能を規定する上で重要なパラメータであることが確認できた。
- ・沈下量から計算した排水量と実測排水量は、概ね一致した。
- ・実験諸条件を現行設計法に当てはめてドレーンピッチを決定したところ、過剰間隙水圧比の実験値は理論値とほぼ一致した。この事から、現行設計法は過剰間隙水圧比を求める上で有効である。
- ・現行設計法は、対象地盤の想定地震波をもとに、構造物の重要性を考え目標過剰間隙水圧比を決定する。目標間隙水圧比が設定されれば、被圧帯水層を持つ井戸のダルシー則を利用した排水量推定

- 式から、地震後の沈下量を予測することができる。
- ・排水量推定式は実物大ドレーンを含め、沈下量を良く表現していた。
- ・ただし、継続地震動が長い場合には、(9)式における  $t$  の増加につれて、過大に沈下量を評価する可能性があるため、今後改善していく必要がある。

## 参考文献

- 1)例えば 総合土木研究所：基礎工,1995.2 pp88-91
- 2)例えば (財) 沿岸開発技術センター：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997.8.pp189-192
- 3)DEPP工法技術資料：DEPP工法委員会,H18.3pp19-39
- 4)井合 進：1G場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則,港湾技術研究所報告Vol.27,No3 pp1-24
- 5)㈱産業技術サービスセンター：実用軟弱地盤対策技術総覧 第3編第10章液状化対策での排水促進工法 1993,pp745-771
- 6)地盤工学会：軟弱地盤対策工法1988 pp242-255
- 7)H.BOLTON SEED, JOHN R BOOKER：Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drain System,1976.4
- 8)石原研而：土質力学(丸善)1999.2 pp121-136
- 9)松原勝己, 三原正哉：グラベルドレーン工法の設計手法に関する研究(間組研究年報1987年) pp51-63
- 10)高橋徹ら：グラベルドレーンによる構造物周辺地盤の液状化時過剰間隙水圧抑制効果(その1),第40回地盤工学研究発表会pp2249-2250
- 11)山本荘毅：揚水試験と井戸管理(㈱昭晃堂)1974,pp60-62