

◆ 特集：土木構造物の耐震補強技術 ◆

矢板締切り工法を施した地中構造物の浮上り変位量予測法

佐々木哲也* 石原雅規** 田村敬一*** 杉田秀樹****

1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として、社会資本の耐震性向上が強く求められている。下水道施設等の地中構造物の地震被害としては、地盤の液状化による被害が最も多く、このような地震被害を軽減するための耐震対策技術の開発が求められている。

矢板締切り工法は、既設の地中構造物に対する液状化対策技術として代表的なものである。矢板締切り工法の既往の設計法¹⁾では、地震時に矢板に作用する土圧に対して矢板が健全であれば、構造物に有意な浮上りは生じないという仮定を設けている。しかしながら、稀に生じる大規模地震に対しては、地中構造物としての機能を大きく損なわない範囲で浮上り変位を許容するような対策工の設計手法が合理的である。このような観点から、本報では、矢板締切り工法を施した地中構造物の地震時の浮上りメカニズムを動的遠心実験により検討し、浮上り変位量予測法を提案する。

2. 地中構造物の液状化対策に関する動的遠心模型実験

矢板締切り工法を施した地中構造物の地震時挙動を詳細に調べ、矢板締切り工法を施した場合の浮上り変位量予測法を構築するために、動的遠心模型実験を行った。

動的遠心模型実験の実験条件を表-1に、模型

の概要を図-1に示す。実験は50Gの遠心力場で行い、ケースにより矢板の有無、矢板と構造物の間隔、地下水位、構造物幅を変化させて合計5ケース実施した。実験では、内寸法が幅80cm、高さ50cm、奥行き20cmの剛な土槽の中に、層厚20cmの飽和砂地盤を作成し、砂地盤の中にアクリル製の地中構造物を設置した。Case01-01は無対策、その他のケースでは構造物両側に矢板を設置した。液状化地盤は豊浦砂を用いて相対密度約50%を目標に空中落下法により作成した。加振前後の地盤変形の観察を行うため、豊浦砂を黒に染色した色砂を用いて、土槽前面ガラス面側に、幅約0.5cmの水平方向と鉛直方向のメッシュを作成した。地中構造物の模型としては、見かけの比重が0.8になるように調整した幅10cm、高さ7.5cmのアクリル製の箱を用いた。ただし、Case03-S04のケースでは幅20cmのアクリル製の箱を用いている。構造物模型と土槽前面ガラス面の間に生じる摩擦力を低減するため、模型長手方向の側面にスポンジを貼り付けた。模型矢板は、曲げ剛性を実物と概ね合わせるために板厚4mmのアルミ板を用い、矢板下端は土槽底面に固定した。矢板には曲げひずみを測定するためのひずみゲージを貼付した。地盤作製時に、図-1に示す所定の位置に間隙水圧計と加速度計を設置した。間隙流体には、遠心加速度50Gに合わせて水の50倍の粘性となるように調整したメトローズ水溶液を用いた。

表-1 実験条件

Case	加速度 G	地盤材料	対策	模型仕様	相対密度 Dr (%)	入力波形	周波数 Hz	最大加振加速度 G
01-01	50	豊浦砂	無対策	模型幅：100mm 模型高：75mm 模型密度：0.789g/cm ³	53.6	正弦波 20波	60	22.3
03-S01			矢板 (間隔1cm)	模型幅：100mm 模型高：75mm 模型密度：0.789g/cm ³	55.1			18.2
03-S02			矢板 (間隔3.5cm)		55.8			18.4
03-S03			矢板(間隔1cm) 地下水位G.L.-50mm		57.4			18.0
03-S04			矢板(間隔1cm)		53.2			18.9

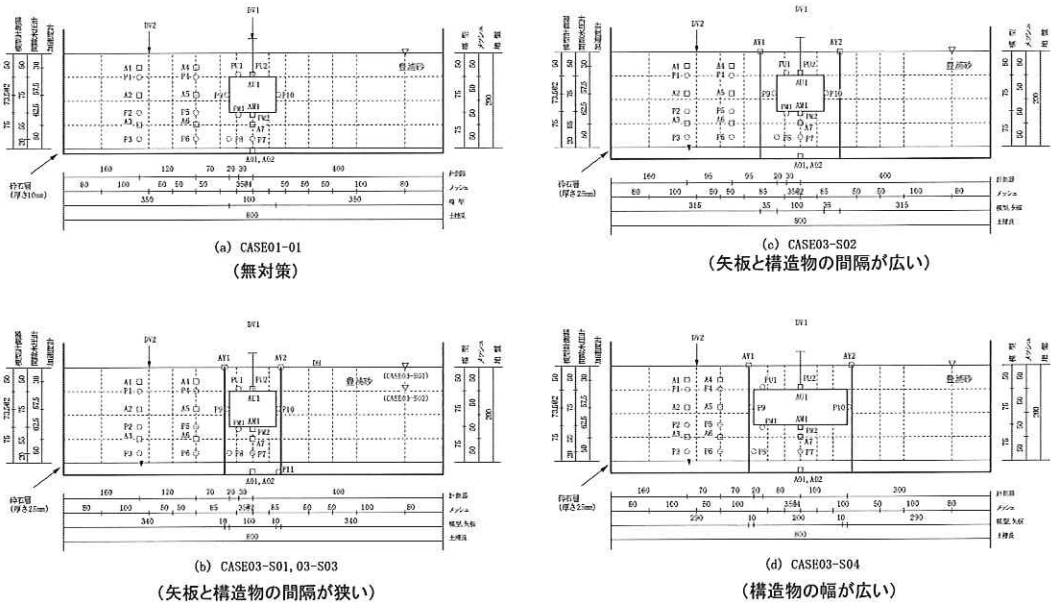


図-1 実験模型 (模型スケール)

地盤の飽和は、地盤作製後に土槽全体を脱気槽に入れ、地盤と模型内部を真空状態にしたのち、模型底部から脱気したメトロゾ水溶液を注入することにより行った。

遠心加速度は、毎分5Gの割合で遠心加速度50Gまで上昇させ、地盤や構造物模型が沈下や間隙水圧が安定したことを確認した後、加振を行った。加振波形として60Hz20G(実物換算1.2Hz約400gal)の正弦波30波を入力した。なお、このうち前後の5波はテーパ部である。

無対策の実験ケースでは、構造物の浮上りに伴い、周辺の液状化した地盤が構造物直下へ回り込んでいることが確認された。一方、矢板締切り対策を施した実験ケースでは、構造物両脇に設置した矢板が液状化した周辺地盤の構造物直下への回り込みを防いでおり、これにより構造物の浮上り変位を抑制していることが分かる。

図-2に各ケースの加振終了時点の浮上り量を示す。図中の矢板のたわみによる浮上り変位量は、加振後に撮影した模型の画像から算出した矢板のたわみによる変位面積(S_s)を構造物幅(B)で除することにより求めたものである。図-3に示すように、浮上りの原因は矢板のたわみと構造物と矢板の隙間からの砂の回り込みの2つであると考えられる。構造物直下の液状化土の体積圧縮が無視できるとすると、矢板のたわみによる変位面積(S_s)と砂の回り込み面積(S_i)の合計は、構造物の幅(B)と構造物の浮上り変位量(x)

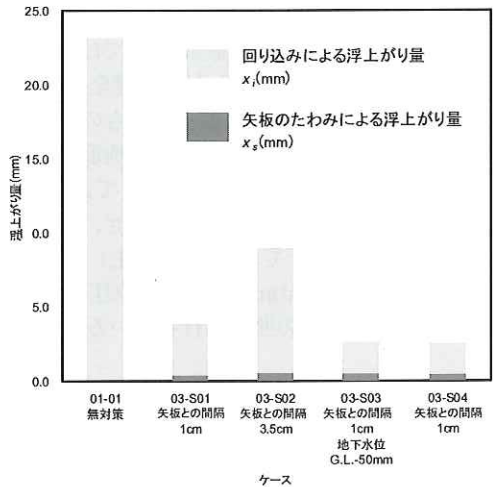


図-2 各ケースの加振終了時点の浮上り量

の積に等しい。そこで、図-2の砂の回り込みによる浮上り量は、全浮上り量から矢板のたわみによる浮上り量を引くことにより求めたものである。

図-2のCase01-01とCase03-S01を比較すると、矢板を設置することにより、浮上り変位を抑制できることが分かる。また、Case03-S01とS02の比較により、矢板と構造物の間隔が小さいほど地中構造物の浮上り量は小さくなることが分かる。これは矢板を設置することにより矢板締切り外側からの液状化した地盤の回り込みは抑制することができるが、矢板と構造物の間隔が広いと矢板締切り内の液状化した地盤が構造物直下に

回り込むことにより浮上りが生じるためである。したがって、矢板と構造物の間隔を狭くすれば高い対策効果が得られることになる。しかし、接近させると地中構造物に有害な荷重が作用することが考えられる。

なお、今回の実験結果では、矢板のたわみによる浮上り変位は非常に小さいが、これは矢板下端を土槽底面に固定した影響もあるものと考えられる。実際の施工では液状化層下の非液状化層に根入れをするため、矢板の変位はこれよりも大きくなる可能性もある。

3. 矢板締切り工法を施した地中構造物の浮上り変位量予測手法

矢板締切り工法を施した地中構造物の浮上り変位量予測法を構築するために、実験結果の整理と同様、矢板のたわみによる浮上り変位と回り込みによる浮上り変位の2成分に分離し、各成分について予測法を提案した。

3.1 矢板のたわみによる浮上り変位

矢板締切り工法の既往の設計法¹⁾では、地震時に矢板に作用する土圧に対し矢板が健全であれば、構造物に有意な浮上りは生じないものとしている。矢板には、漸増成分土圧（周辺地盤が液状化することにより増加する土圧）として式(1)で表される矢板内外の土圧差を作用させ、振動成分土圧（加速度に応じて増減する土圧）として式(2)で表される Westergaard の動水圧²⁾を作用させ、矢板の断面力の照査を行っている（図-4 参照）。

$$\Delta\sigma'_h = (1 - K_0) R_u \sigma'_{v0} = (1 - K_0) \Delta u \quad (1)$$

$$P_d = \frac{7}{8} \frac{\alpha}{g} \sqrt{Hz} (\gamma_w + R_u \gamma') \quad (2)$$

ここに、 $\Delta\sigma'_h$ ：漸増成分土圧、 K_0 ：静止土圧係数、 R_u ：過剰間隙水圧比、 σ'_{v0} ：初期有効上載圧、 Δu ：過剰間隙水圧、 P_d ：土圧振動成分、 α ：加速度、 g ：重力加速度、 H ：液状化層厚、 z ：深度、 γ_w ：水の単位体積重量、 γ' ：土の水中重量。

しかし、これらの2成分のうち振動成分土圧は矢板を水平方向に振動させるだけで残留変形には寄与せず、矢板の残留変形は漸増成分土圧により生じるものと仮定し、残留変形を求めることとした。

図-5に実験により矢板に生じた曲げモーメントの漸増成分（周辺地盤が液状化することにより

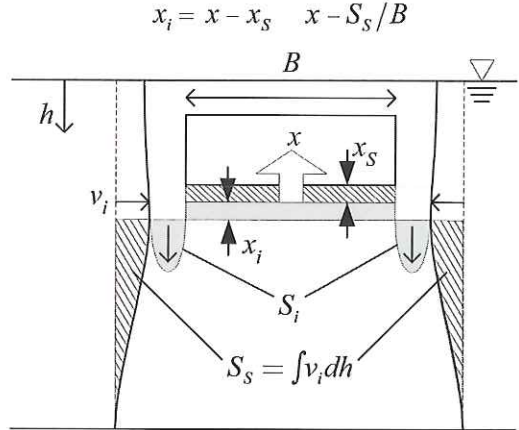


図-3 浮上り量の分離方法

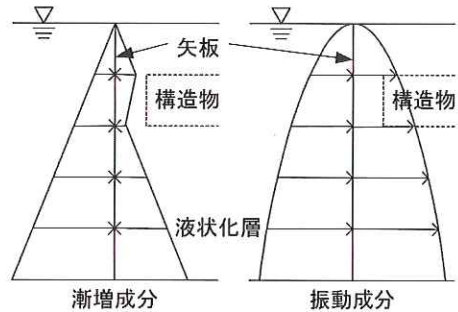


図-4 既往の設計法における設計荷重

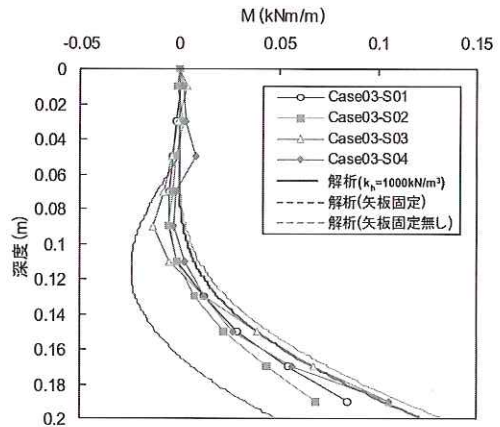
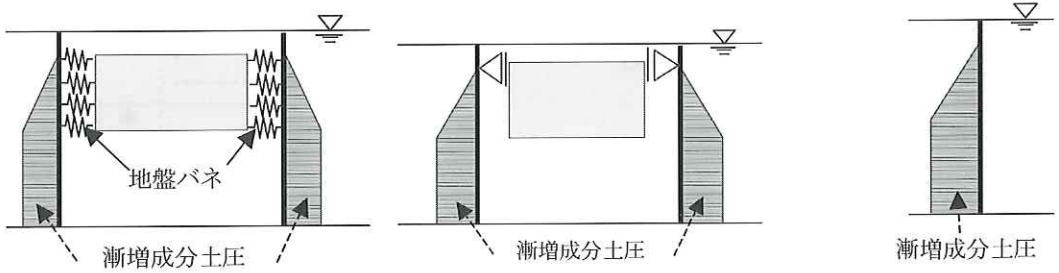


図-5 曲げモーメントの漸増成分の分布

増加した曲げモーメントであり、振動成分は含まない)の分布を示す。これらより、今回の実験では実験条件によらず矢板に生じるモーメントはほぼ同様の分布を示しているといえる。矢板の変形には矢板と構造物の間隔、地下水位、構造物幅等が影響することが考えられるが、今回の実験条件では矢板下端を固定としたため、矢板の変位が比較的小さく、これらの条件の違いがほとんど影響



(1)矢板と構造物を地盤バネで連結 (2)矢板を構造物上面で固定 (3)下端固定梁

図-6 漸増成分土圧検討モデル

しなかった可能性も考えられる。

図中には、矢板を梁でモデル化し、漸増成分土圧として式(1)で示される矢板内外の土圧差を作用させた解析結果も示している。ここで、解析モデルとしては、図-6に示す(1)矢板と構造物を地盤バネで連結したモデル、(2)構造物上端で矢板の水平方向の変位を拘束したモデル、(3)矢板を下端固定の梁としたモデル、の3種類のモデルを検討した。(1)のモデルの地盤バネ k_h は実験値との比較から $1,000 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ と仮定した。図-5より、モデル(1)および(2)による解析結果が比較的实验結果と整合していることが分かる。これより、モデル(1)あるいは(2)に地震時漸増成分土圧を作用させ、矢板に生じるたわみを求めることができるものと考えられる。このようにして矢板のたわみを求め、これらから求まる矢板の変位面積を構造物幅で除すことにより、矢板のたわみによる浮上り量 x_s を求めることができる(図-3参照)。

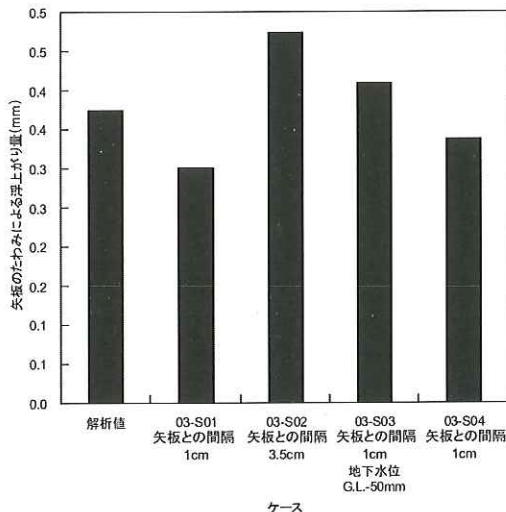


図-7 矢板のたわみによる浮上り量の比較

ここでも、2.での検討と同様に、矢板のたわみによる変位面積の内、構造物底面深度より下の部分が構造物の浮上りに寄与するものと仮定した。2.で求めた各ケースの矢板のたわみによる浮上り量 x_s の実験値と、図-6の(1)のモデルを用いた解析による予測値の比較を図-7に示す。これより、矢板と構造物を地盤バネで連結したモデルから求めた浮上り変位は実験値と比較的によく一致していることが分かる。

以上より、矢板と構造物を地盤バネで連結したモデルに漸増成分土圧を作用させることにより、矢板のたわみによる構造物の浮上り変位量の予測が可能となる。

3.2 液状化土の回り込みによる浮上り変位

ここでは、動的遠心模型実験の結果を基に、締切り矢板内の液状化土の回り込みに起因する浮上り量を予測する手法^{3),4)}について検討した。

液状化した砂を粘性流体と仮定すると、浮上り中の構造物には、浮上り速度に比例した抵抗が作用すると考えられる。そこで、構造物が浮き上がる際、構造物には構造物と上載土の自重、浮力、および浮上り速度に比例した抵抗が作用すると仮定すると、鉛直方向の運動方程式は次のように表される(図-8参照)。

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{C}{M} \frac{dx}{dt} + \frac{\rho_{sat} b g}{M} x = \frac{[M - \{\rho_l h_w + \rho_{sat}(h_0 - h_w)\} b] g}{M} \quad (3)$$

ここに、 x : 浮上り変位、 C : 液状化した土の浮上り速度に比例する抵抗を表す定数、 M : 地中構造物および上載土の単位奥行きあたりの質量、 ρ_l : 地下水位以上の土の密度、 ρ_{sat} : 砂の飽和密度、 h_w : 地下水位、 h_0 : 地中構造物の底面深さ、 B : 地中構造物の幅、 g : 重力加速度。

ここで、浮上り速度の変化は小さいため左辺

第一項の慣性項を無視し、これを初期条件 $t = 0$ 、 $x = 0$ のもとで解くと、次のようになる。

$$x = \frac{\left\{ \rho_t h_w + \rho_{sat} (h_0 - h_w) \right\} B - M}{\rho_{sat} B} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\rho_{sat} B g}{C} t\right) \right\} \quad (4)$$

地盤抵抗係数 C 以外の定数は実験条件から求まるため、これを遠心模型実験結果の浮上がり変位の時刻歴にフィッティングさせることにより C を逆算した。抵抗係数 C は F_L 、 R 、 B 、 $(B/h_b + 1)$ および初期せん断応力比等と相関が高いことから、 C はこれらのべき乗で表されると仮定し、無対策の場合の実験から得られた結果にフィッティングさせることにより以下の式を得ている⁴⁾。

$$C [t/ms] = 50000 \cdot B [m] \cdot (B/h_b + 1) \cdot \left(\frac{\sigma'_h - \sigma'_v}{2\sigma'_h} \right)^{0.5} \cdot R \cdot F_L^{1.5} \quad (5)$$

ここに、 σ'_v 、 σ'_h :それぞれ構造物底面および同深度の周辺地盤における有効上載圧。

式 (5) により抵抗係数 C を求め、式 (4) に代入することにより加振終了時の無対策の地中構造物の浮上がり量を求めることが可能となる。

ここではさらに、抵抗係数を算出する式 (5) に矢板締切り工法の効果を組み込むため、締切り矢板内の回り込みによる浮上がり変位を予測する手法を提案する。

一例として図-9にCase03-S01の結果を示す。矢板のたわみは加振加速度一波毎に求めている。ここで得られた回り込みによる変位 x_i に対して、式 (4) をフィッティングすることにより、各ケースの抵抗係数 C を求めた。このようにして得られた C と矢板と構造物の間隔等の関係を検討し、矢板締切りの効果を考慮した C の予測式を検討した。

図-10に逆算した抵抗係数とパラメータ $(1+B/h_b) \times (1+B/2b_s)$ の関係を示す。ここで、 b_s は矢板と構造物の間隔である。なお、無対策のケースでは矢板と構造物の間隔としては構造物と土槽側壁までの距離とした。これより、パラメータ $(1+B/h_b) \times (1+B/2b_s)$ と C/B の間にはほぼ比例関係があり、これにより構造物幅、矢板締切りの効果を取り込めることが分かる。

以上の検討により、矢板締切りを考慮した場合

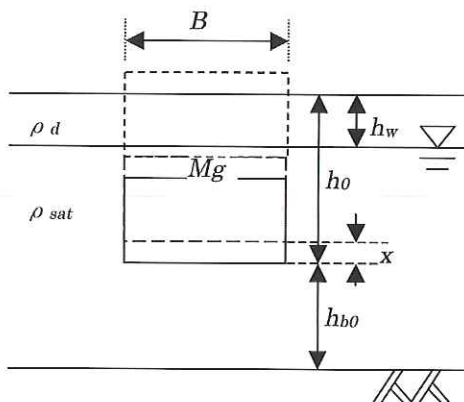


図-8 浮上がり変位予測計算モデル

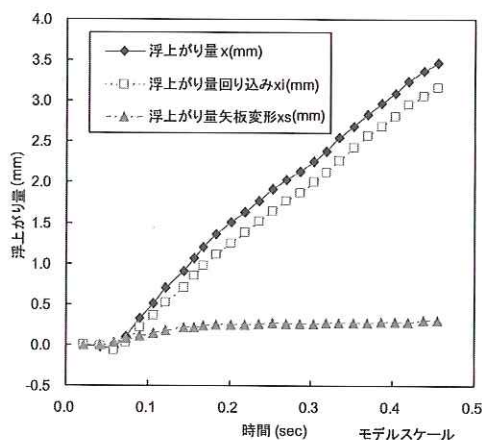


図-9 浮上がり変位の例 (Case03-S01)

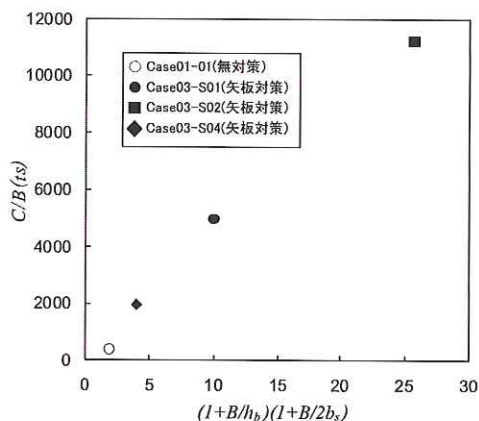


図-10 C/B と $(1+B/h_b) \times (1+B/2b_s)$

の抵抗係数は次の式で表すことができる。

$$C [t/ms] = 50000 \cdot B [m] \cdot (B/h_b + 1) \cdot (B/2b_s + 1) \cdot \left(\frac{\sigma'_h - \sigma'_v}{2\sigma'_h} \right)^{0.5} \cdot R \cdot F_L^{1.5} \quad (6)$$

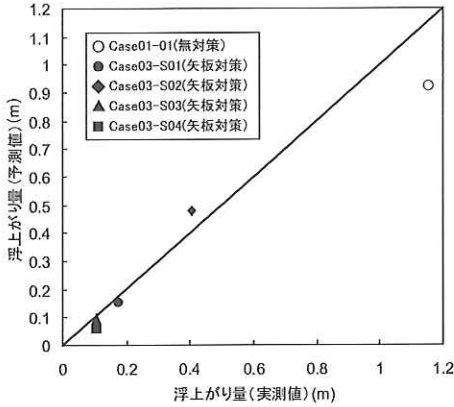


図-11 浮上り変位の実測値と予測値の比較 (重力場換算)

式 (6) により矢板縮切りを考慮した場合の抵抗係数を求め、これを用いて式 (4) により矢板縮切り工法を施した構造物の矢板縮切り内での液化化した砂の回り込みによる浮上り量を予測することができる。これに、3.1で検討した漸増成分土圧による矢板のたわみによる浮上り量を加えることにより、縮切り矢板を施した地中構造物の浮上り量の予測が可能となる。

図-11に浮上り量の実測値と予測値の比較を示す。浮上り量の予測値は式 (4)、(6) による縮切り矢板内での回り込みによる浮上り量の予測値と3.1の矢板のたわみによる浮上り量の予測値の和として求めたものである。また、変位は実物換算した値である。これより、提案した手法により無対策および矢板対策を施したケースともおおむね実測値を予測することができるが分かる。

4. まとめ

本報では、動的遠心模型実験を行い、液状化対策としての矢板縮切り工法を施した地中構造物の浮上り挙動について検討した。その結果、矢板縮切り対策を施した地中構造物の浮上り変位予測手法として、矢板のたわみによる構造物の浮上り変位を予測する手法、および浮上り中の構造物に浮上り速度に比例した抵抗が作用すると仮定した矢板縮切り内での砂の回り込みによる浮上り変位予測手法を提案した。また、提案した手法により、矢板縮切りを施した地中構造物の遠心模型実験による浮上り変位をおおむね予測できることを示した。本予測法を用いることにより、浮上り変位量に基づく矢板縮切り工法の設計の合理化が可能になるものと考えられる。今後、本予測法を用いた設計法について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：液状化対策工法設計・施工マニュアル (案)、共同研究報告書 第186号、1999。
- 2) Westergaard, H. M: Water pressure on dams during earthquakes, Trans. of ASCE, Vol.98, 1933.
- 3) 佐々木哲也・田村敬一 (2002)：地中構造物の浮上り予測手法の検討、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.1065-1070.
- 4) 佐々木哲也・田村敬一 (2003)：地中構造物の浮上り予測手法に関する検討 (その3)、第38回地盤工学研究発表会。

佐々木哲也*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム主任研究員
Tetsuya SASAKI

石原雅規*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム研究員
Masanori ISHIHARA

田村敬一***



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震災害研究官 (前 振動チーム 上席研究員), 工博
Dr. Keiichi TAMURA

杉田秀樹****



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム 上席研究員, 工博
Dr. Hideki SUGITA