

飽和地盤中の構造物変位に伴う間隙水圧の発生とDEMシミュレーション

末広 俊夫¹・高橋 聡¹・中瀬 仁²・溜 幸生²・阪口 秀³・小長井 一男⁴

¹東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

E-mail:suehiro.toshio@tepcoco.jp, E-mail:takahasi.satoru@tepcoco.jp

²東電設計株式会社 土木本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

E-mail:nakase@tepscoco.jp, E-mail:etamari@tepscoco.jp

³独立行政法人海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

E-mail:sakaguchih@jamstec.go.jp

⁴東京大学 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:konagai@iis.u-tokyo.ac.jp

強震時に地盤が液状化する際、埋設管が動土圧の作用により浮上し、埋設管周囲の過剰間隙水圧は低下してこれをむしろ抑制する方向に作用する現象に着目している。飽和地盤中で液状化や側方流動の影響により周辺地盤との間に生じる相対変位の大きさに応じた過剰間隙水圧が埋設管の運動を抑制する現象である。これまでこの影響については研究されていない。本研究では、飽和地盤中に埋設した剛な円盤を強制的に引き上げる模型実験と3次元個別要素法によるシミュレーション検討を行った。その結果、円盤底面の水圧低下を再現するためには、構造物変位で生じる間隙と発生する負の過剰間隙水圧とを関係づける係数を、貯留係数に換算して $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 程度とするのがよいことが分かった。

Key Words : Pore water pressure, Suction, Uplifting, Liquefaction, Seepage analysis, DEM

1. はじめに

強震時に地盤が液状化してマンホールや埋設管などの地中埋設物が浮上する被害が多発している。従来、このような場合、浮力と過剰間隙水圧を作用させて安定性検討がなされてきた。しかし、著者らの実験的研究¹⁾によれば(図-1)、振動時に埋設管が土粒子から受ける動土圧の作用により浮上するメカニズムがあり、このとき埋設管底部の過剰間隙水圧は負になる場合がある。この現象を詳細に検討するために、液状化に伴う過剰間隙水圧の変動を計算する機能を付加した3次元個別要素法(Distinct Element Method²⁾、以下DEMと言う)を開発し、振動実験のシミュレーションを行っている。ここで、埋設管周囲に作用する動土圧や過剰間隙水圧による作用についての計算精度を検証する必要がある。そのため、単純な境界条件の模型実験を実施し、負の間隙水圧の発生に着目したシミュレーションを行った。本論文では、模型実験の結果と、DEMと浸透流解析を用いて土粒子の運動による過剰間隙水圧の発生と消散を考慮したシミュレーションについて述べる。

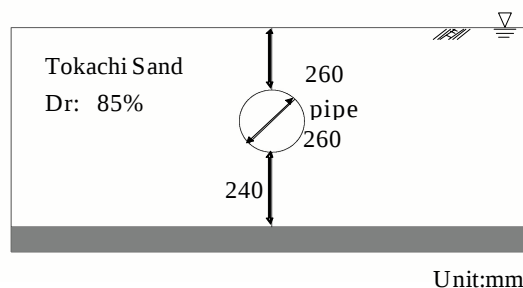


図-1 既往研究における実験地盤と埋設管

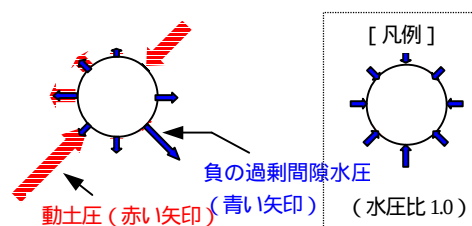


図-2 計測された動土圧および負の過剰間隙水圧の分布
(凡例：水圧比1の過剰間隙水圧分布)

本論に入る前に、文献1)の考察について簡単に述べる。せん断土槽を用いた振動台実験において、液状化過程にある飽和地盤中の埋設管模型(図-1)の動土圧(土圧増分)と負の過剰間隙水圧分布を図-2に示す。なお、図-2は地盤の変形が図上で左方向に進行し、埋設管に作用する動土圧が比較的大きくなる時刻の分布である。底面の固定境界に近く、土粒子の運動の拘束が大きい左下の動土圧が大きくなり、右上の動土圧も大きい。そのため、埋設管は左上方向へ移動するので、上方向の鉛直変位(浮上)が発生する。また、埋設管周囲では地盤のせん断ひずみが大きくなりやすく、限界ひずみを容易に超えてサイクリックモビリティを生じるので、埋設管から離れた地盤部に比べて相対的に過剰間隙水圧が低い傾向がある。埋設管周囲で過剰間隙水圧の作用が負であり、特に右下の水圧が大きいことから、埋設管の左上方向の運動を考慮すると、過剰間隙水圧が埋設管の運動を抑制していると考えられる。

2. 飽和地盤中の円盤の引き上げ実験

実験の概要を図-3に示す。水圧計や土圧計を図-4のように取り付け付けた剛性の高い円盤(図-5)を土槽(図-6)に作成した飽和地盤に埋設し強制的に引き上げる。载荷速度、円盤の埋設深さ、円盤の半径は実験パラメータである。地盤材料に用いた豊浦砂の特性を表-1に示す。

実験終了時における模型の様子を図-7に示す。円盤の引き上げに伴って、円盤端部から形成されると思われるすべり面がまず地表に現れ、埋設深さ30cmのケースでは、すべり面に沿ってドーナツ状に土塊が崩壊する。埋設深さ15cmのケース(写真は、引き上げ速度10mm/s)においては、すべり面の面に土塊が付着したまま上昇した。円盤底部には、いずれの実験においても空隙が発生していた。

埋設深さ15cm、引き上げ速度5mm/sにおけるアクチュエータの変位と荷重および円盤底面の水圧波形(いずれも初期値からの増分で極性は負となっている)を図-8に示す。円盤中央のP1と中間のP2の水圧波形は、重なっており、端部のP3のみこれらに比べて2割程度小さかった。水圧波形と、アクチュエータの荷重波形の形状が対応している。

簡単な計算によれば、アクチュエータの荷重に対する円盤底面の負圧の寄与は70%程度であった。円盤の引き上げが継続しているにもかかわらず、水圧がピークを示す理由については4章で考察する。

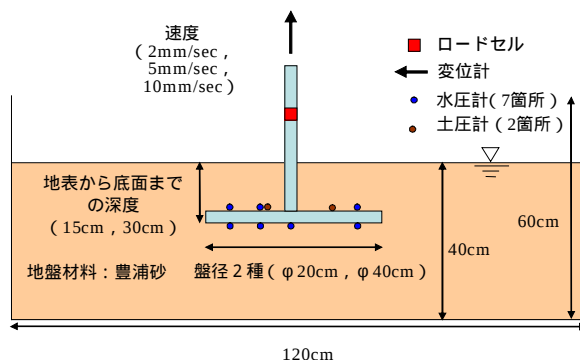


図-3 飽和地盤中の引き上げ実験の概要

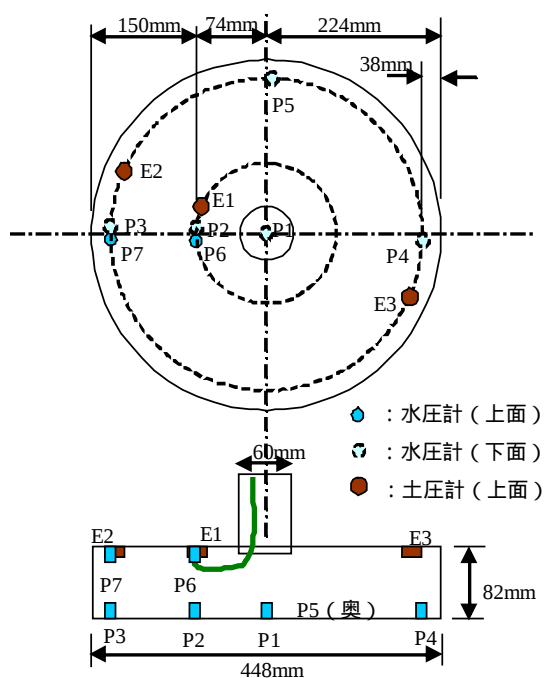


図-4 計測機器配置

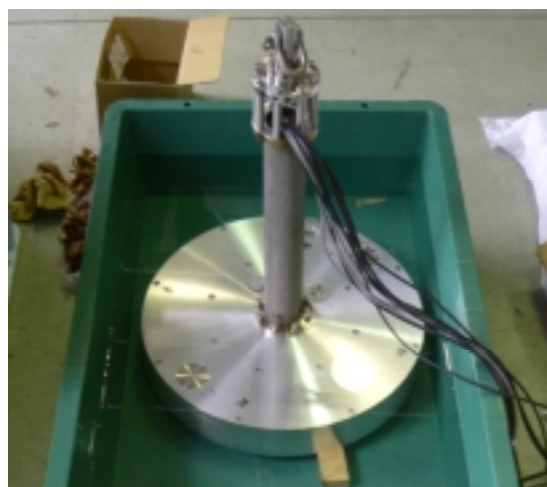


図-5 引き上げ実験に用いた円盤

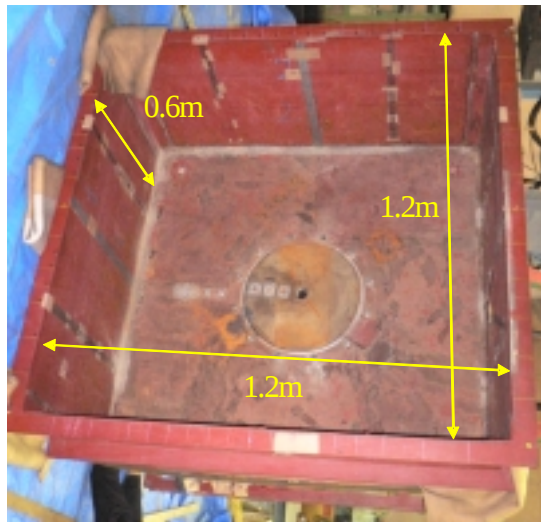


図-6 鋼製土槽

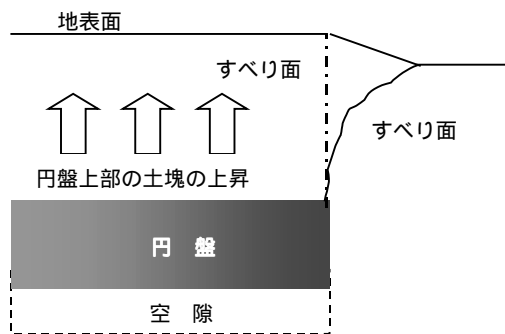
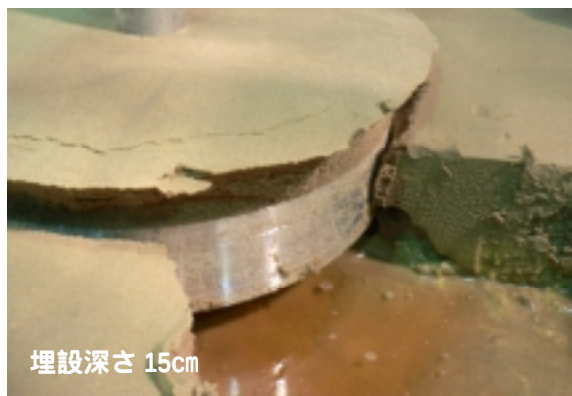
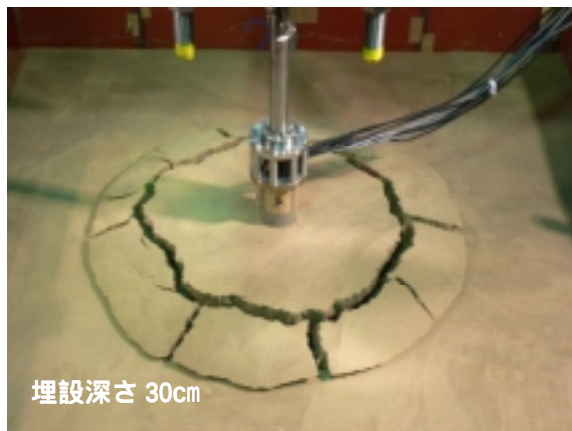


図-7 実験終了後の模型

表-1 豊浦砂の物性

平均粒径 D_{50} (mm)		0.162
土粒子の比重		2.654
均等係数	D_{60}	0.173
	D_{10}	0.125
	Uc	1.38
最大， 最小間隙比	e_{max}	1.005
	e_{min}	0.609
透水係数（測定値）		1.0×10^{-4} m/s

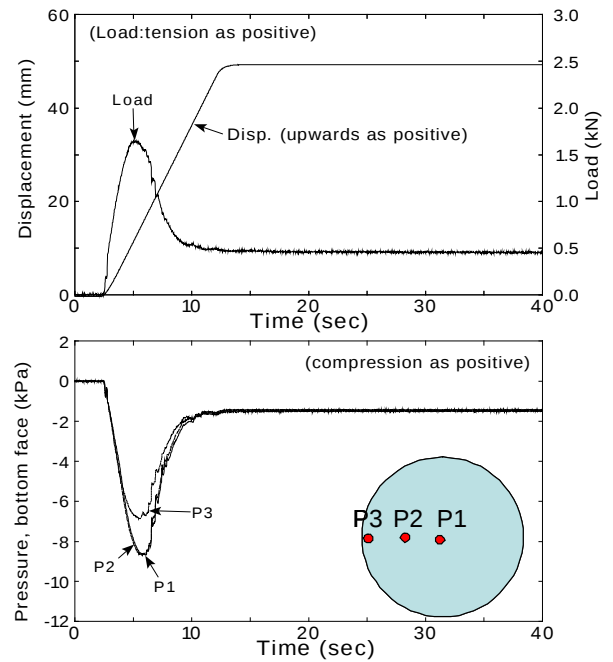


図-8 上段：アクチュエータの変位と荷重，
下段：円盤底面の水圧波形
(埋設深さ15cm，引上げ速度5mm/s)

実験パラメータと円盤中央の水圧のピーク値（負）の関係を図-9に示す．引上げ速度が大きく，相対密度が大きいほど水圧のピークも大きい結果となった．また，円盤の直径が大きいほど水圧のピークも大きく，埋設深さが大きいほど水圧のピーク値も大きくなる結果となった．

3．浸透流解析によるシミュレーション

ここでは，2次元浸透流解析³⁾による検討を行う．図-10に解析モデルを示す．円盤の初期位置を不透水層とした．透水量係数は，透水係数に奥行きを乗じた値である．実験では円盤を強制変位させたが，このシミュレーションでは不透水層の位置を変えずに，円盤の引き上げに伴って底面に生じる間隙に比例する水圧増分を

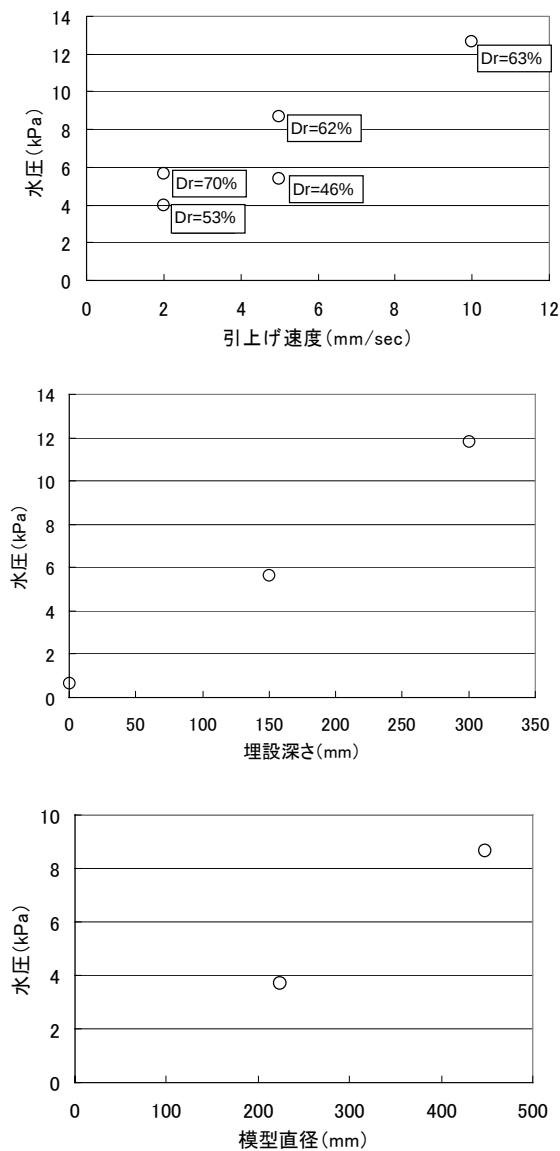


図-9 実験パラメータと水圧のピーク値(円盤中央P1)の関係
 上段：引き上げ速度，地盤相対密度(埋設深さ15cm)
 中段：円盤の直径(埋設深さ15cm，引き上げ速度5mm/s)
 下段：埋設深さ(引き上げ速度5mm/s)

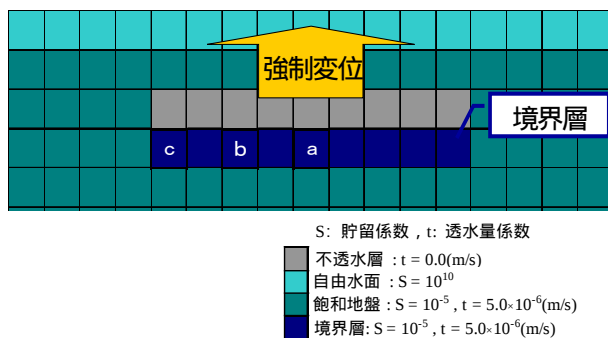


図-10 浸透流解析のモデル

円盤を引き上げている時間中連続的に境界層に発生させることによりこれをモデル化した．解析領域の側面方向ならびに底面方向の境界条件は，不透水条件とした．間隙増分と水圧増分の関係を次式に示す．なお，貯留係数は，単位体積の地盤に対して単位水頭の圧力が作用する際に新たに蓄えられる水の量を表す無次元のパラメータであり，浸透流解析に用いられる物理量である．式(2)を誘導するために定義したように，体積圧縮係数と比例関係にある．

$$P_{mdl} = -\alpha \times t \times V_y / m_v \quad (1)$$

ここで

$$1/(V_{cell} \times S_{cell}) \equiv \alpha / m_v$$

とおくと

$$P_{act} = - t \times V_y / (V_{cell} \times S_{cell}) \quad (2)$$

ここに

P_{mdl} : 水圧増分 (ピエゾ水頭)

α : 係数

t : 時間間隔

V_y : 円盤の上昇速度

m_v : セルの体積圧縮係数

V_{cell} : セルの体積

S_{cell} : 貯留係数の形に置き換えた

体積圧縮係数

飽和地盤および境界層のパラメータは豊浦砂のそれと対応する．

埋設深さ 15cm，載荷速度 10mm/s の実験に対するシミュレーション結果を，図-11 に示す．図は，模型底面中央における静水圧を 0 とした水圧の時系列である．シミュレーションの S008 は， S_{cell} の値が 0.008 であることを意味する．実験ではピークを形成し，最終的には円盤 5cm 引き上げによる水深の変化に対応した 0.5kPa に落ち着く．浸透流解析では水圧があるレベルで定常状態に落ち着く．

S_{cell} の値を 0.005 ～ 0.008 程度にすることによって，実験で発生している水圧のピーク値を再現することができそうである．

シミュレーション結果 (S005) における各観測点の水

圧波形を図-12 に示す．図-10 に示した位置 a と位置 b の水圧にほとんど差はないのに対して円盤端部 c の水圧低下レベルが a,b に比べて小さくなっており，実験結果と整合している．载荷速度が大きい方が水圧低下レベルが大きくなる点についても図-13 に示すとおり実験結果と整合している．

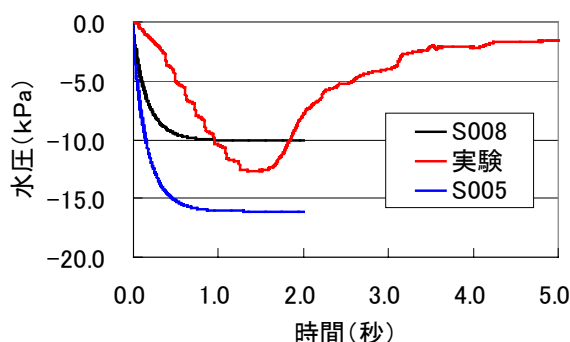


図-11 体積圧縮率による水圧の違い

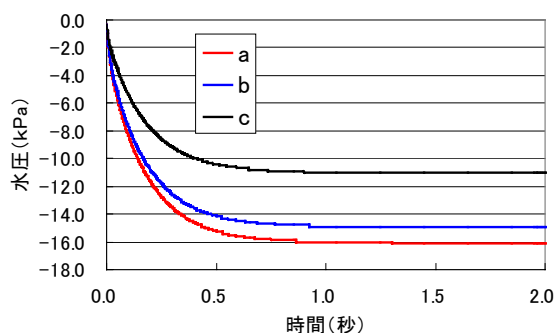


図-12 $S_{cell} = 0.005$ (S005) の水圧の時系列

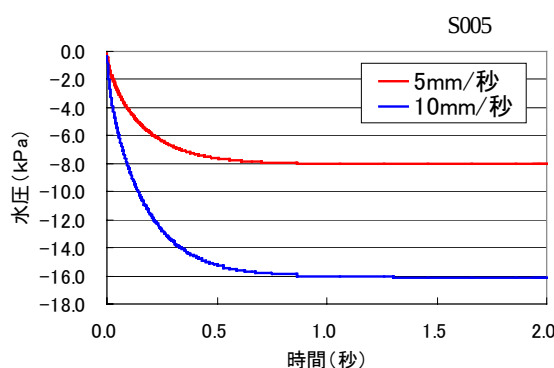


図-13 引上げ速度による水圧の違い

4．個別要素法と浸透流解析のカップリング解析

円盤を上げると円盤底面に負の水圧が発生する現象は浸透流解析を用いて再現できた。実験では負圧の発生によって土粒子が円盤底面付近に引き寄せられ，発生した負圧が緩和されることになる．このような相互作用をシミュレーションするために，ここでは，DEMと浸透流解析を組み合わせ，土粒子の運動による過剰間隙水圧の発生と消散を考慮したシミュレーション⁴⁾を行う．

(1) 過剰間隙水圧の作用を考慮する方法

図-14にシミュレーションの流れを示す．以下に過剰間隙水圧の作用を考慮する方法について述べる．過剰間隙水圧計算は，要素移動による寄与と水圧の勾配によるその消散の寄与を考慮し次式で表されるとする．

$$P_t = P_{t-t} + P_{act} + P_{spg} \quad (3)$$

ここに

P_t : 現在の過剰間隙水圧 (ピエゾ水頭)

P_{t-t} : t 秒前の過剰間隙水圧 (ピエゾ水頭)

P_{act} : 要素移動による間隙増分に伴う水圧増分

P_{spg} : 水圧勾配による水圧の増分 (浸透流解析)

水圧の消散を計算するために浸透流解析を用いる．これらの計算をするため図-15に示す絶対座標上のマイクロゾーンを考える．簡単のため2次元問題とする．

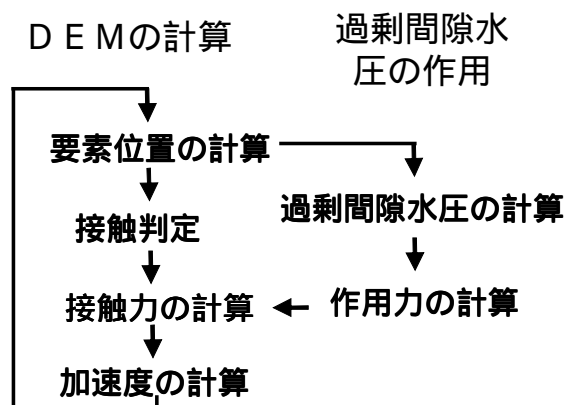


図-14 DEMシミュレーションの流れ

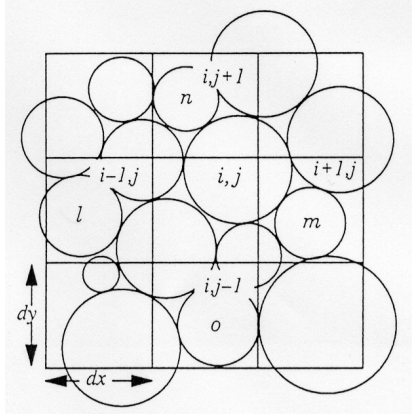


図-15 DEMの要素と間隙水の相互作用を考慮するためのマイクロゾーン

要素移動による水圧増分は次式で表される．

$$P_{act} = -\alpha \times V / m_v \quad (4)$$

ここで

$$1/(V_{cell} \times S_{act}) \equiv \alpha / m_v$$

とくと

$$P_{act} = - V / (V_{cell} \times S_{act}) \quad (5)$$

ここに

P_{act} : 水圧増分 (ピエゾ水頭)

α : 係数

V : 粒子の運動による間隙増分

m_v : セルの体積圧縮係数

V_{cell} : セルの体積

S_{act} : 貯留係数の形に置き換えた体積圧縮係数

要素移動によるマイクロゾーン(i, j)の間隙増分は、次式で計算される．

$$\Delta V^{(i,j)} = \Delta V_{(i-1,j)}^{(i,j)} + \Delta V_{(i+1,j)}^{(i,j)} + \Delta V_{(i,j-1)}^{(i,j)} + \Delta V_{(i,j+1)}^{(i,j)} \quad (6)$$

ここに、

$$\Delta V_{(i-1,j)}^{(i,j)}, \Delta V_{(i+1,j)}^{(i,j)}, \Delta V_{(i,j-1)}^{(i,j)} \text{ および } \Delta V_{(i,j+1)}^{(i,j)}$$

は隣接するセルの貢献、 $\Delta x^{(l)}, \Delta y^{(l)}$ および $v^{(l)}$ は

要素 l の x および y 方向の変位増分と体積を示す．マイクロゾーン($i-1, j$)の寄与 $\Delta V_{(i-1,j)}^{(i,j)}$ は次式で表される．他のマイクロゾーンの寄与も同様である．

$$\Delta V_{(i-1,j)}^{(i,j)} = -dy \times \sum_l \Delta x^{(l)} v^{(l)} / \sum_l v^{(l)} \quad (7)$$

時刻 t におけるセル(i, j)の中心点の過剰間隙水圧を $P^{(i,j)}$ とすると各セル間における水圧の勾配により作用する物体力は次式のように表せる．

$$B_x^{(k)(i,j;t)} = \frac{P^{(i+1,j;t)} - P^{(i-1,j;t)}}{2dx} v^{(k)} \text{ and}$$

$$B_y^{(k)(i,j;t)} = \frac{P^{(i,j+1;t)} - P^{(i,j-1;t)}}{2dy} v^{(k)}$$

$$B_x^{(k)(i,j;t)} : k \text{ 番目の要素に働く } x \text{ 方向の物体力}$$

$$B_y^{(k)(i,j;t)} : k \text{ 番目の要素に働く } y \text{ 方向の物体力}$$

(8)

各項における定数2は、両隣のセル中心間の距離を表すためのものである．この物体力を、図-14に示すDEMの接触力と合わせることで、間隙水圧の作用を考慮することができ、土粒子と間隙水の相互作用を計算することができる．

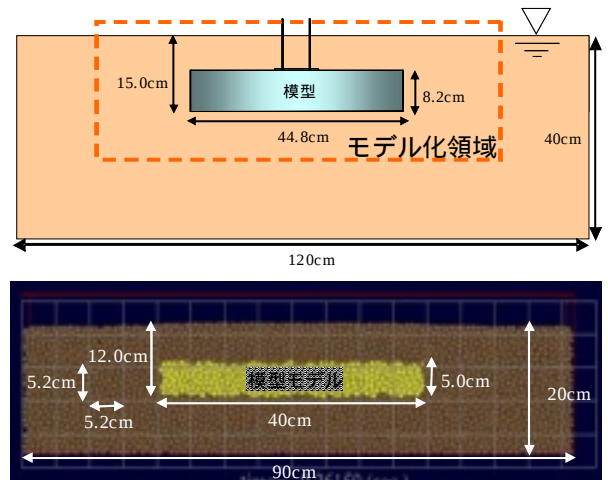


図-16 DEMのシミュレーションモデル

(2) 実験のモデル化

カップリング解析の DEM のシミュレーションモデルを図-16 に示す．計算短縮のため，対象をオレンジの点線枠で示す範囲とし，奥行き方向は浸透流解析におけるセル（立方体）の奥行き方向のサイズを考慮して 5.2cm を切り出した領域をモデル化した．シミュレーションに用いた DEM の要素数は 9,052 である．パッキングおよびシミュレーションに用いた解析パラメータを表-2 に示す．なお，図-16 の初期状態を DEM シミュレーションにより作成することをパッキングという．パッキング時の要素間摩擦角，転がり摩擦⁵⁾係数を調整することにより，初期間隙比をコントロールできる．別途検討⁶⁾の結果，表-2 のパラメータによりパッキングを行えば初期間隙比が 0.88 程度になることがわかっている．

一方，実験の間隙比は 0.76 であった．また，載荷時に表-2 の要素間摩擦角，転がり摩擦係数を用いることにより，地盤モデルは内部摩擦角 30° 程度のせん断強度を発揮することが，別途検討⁶⁾の結果わかっている．実験とのこれらの条件の不一致の影響は，今後の課題としたい．

DEM 要素の回転に関する自由度は 3 成分ともに考慮しており，表-2 に示す回転に抵抗する転がり摩擦を設定し，砂粒子同士のインターロッキングの効果を表現している．「模型モデル」を構成する粒子同士は，バネ係数と転がり摩擦係数を十分大きくとることにより剛結合とし，剛体として振る舞うよう定義した．

浸透流解析は 2 次元で行った．3 次元 DEM シミュレーションは，奥行きをマイクロゾーンのセル 1 つ分としていることと対応させている．円盤引き上げ速度 10mm/sec の実験を対象に，円盤モデル部の要素を上方方向に強制変位した．

浸透流解析のモデルを図-17 に示す．円盤の不透水性を表すため図示する位置に不透水面を設定した．初期には，底面層に DEM の模型モデルが存在する．模型および土粒子を表す要素の移動に伴う間隙増分をすべてのセルにおいて式(5)により算定し，水圧増分を計算するとともに，これによって生じる水圧勾配による水圧の消散を浸透流解析により計算する．

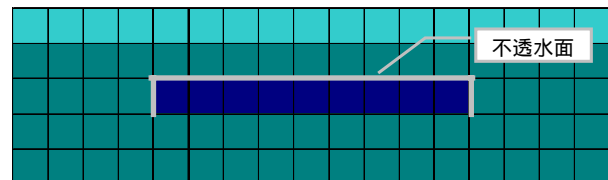
表-3 に示すように，貯留係数の形に置き換えた体積圧縮係数と，透水量係数をパラメータとして 2 ケースシミュレーションを行った．

(3) シミュレーション結果

底面中央の水圧波形について，実験とケース1およびケース2を図-18 に比較する．この実験では，図-19 に示すように，載荷後 1.5 秒後すべり面が地表に現れる．このタイミングと実験の水圧がピークを発現するタイミン

表-2 DEM のパラメータ

要素の密度 (kg/m ³)	2,600
平均要素半径(mm)	10
要素半径のばらつき，標準偏差(mm)	0.1
法線方向ばね係数 (N/m)	2.0E ⁰⁷
接線方向ばね係数 (N/m)	5.0E ⁰⁵
法線方向減衰係数 (N・sec/m)	8.25E ⁰¹
接線方向減衰係数 (N・sec/m)	1.43E ⁻⁴
要素間摩擦角(度)，パッキング時	30.0
転がり摩擦係数，パッキング時	0.05
要素間摩擦角(度)，載荷時	30.0
転がり摩擦係数，載荷時	0.1
時間間隔(sec)	1.0E ⁻⁰⁶



S: 貯留係数, t: 透水量係数
 自由水面: $S = 10^{10}$
 飽和地盤: $S = 10^{-5}$, $t = 5.0 \times 10^{-6}$ (m/s)
 底面層: $S = 10^{-5}$, $t = 1.0 \times 10^{-4}$ (m/s)

図-17 浸透流解析のシミュレーションモデル

表-3 シミュレーションケース

	S_{at}	透水量係数(m ² /s)
ケース 1	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-6} , 周辺地盤は時間の関数，
ケース 2	4.0×10^{-3}	5.0×10^{-6}

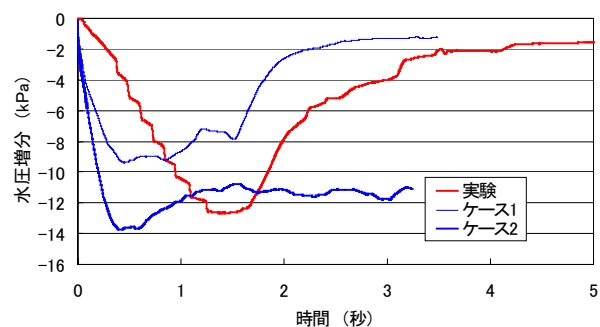


図-18 底面中央水圧波形の比較

グが一致しているので、このとき、すべり面の形成とともに円盤底面から地表に連なるみずみちができ、図-20に示すようにケース1の周辺地盤に対応する領域の透水量係数が1.5秒の時間をかけて十分大きくなると考えた。

ケース1では、この方法により1.5秒以降、負の水圧が実験と同じ傾向で低下している。シミュレーションにおける最初の水圧のピークは、負圧によって粒子が円盤底面付近に引き寄せられたため生じると思われる。ケース2ではピークの後負圧が低下することはない。

今のところ、実験のようなピークを再現するためには、すべり面に沿うみずみちの発生を、ケース1のような方法で表現するしかない。シミュレーション結果の分析によれば、DEMにおいても円盤側面付近にすべり面に該当する間隙増大領域を観察することができるので、1)マイクロゾーンの間隙と透水量係数を関数にすること、2)マイクロゾーンを小さくすること、3)要素半径を小さくすること、により精度向上が期待できる。

水圧のピークの値は、体積圧縮係数をコントロールすることによりフィティングできる。その値は、貯留係数の形に置き換えて、 $5.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ の範囲である。

図-21に、実験のトレンチとシミュレーションの比較を示す。円盤底面付近の地盤が円盤にひきつけられて持ち上がっている様子と円盤側面付近の地盤が円盤底面に回り込もうと沈下している様子が対応している。

シミュレーション結果を分析した結果、円盤底部にできた間隙の幅は、ケース1では25mmであり、円盤底面付近の地盤の持ち上がりは、周辺地盤の透水量係数を大きくし始めた1.5秒を境に停止したことがわかった。実験では円盤底部にできた間隙の幅は20mmであった。この間隙の幅は両者でおおむね対応しているので、実験においてもすべり面に沿ってみずみちが発生し、円盤底面付近の地盤の持ち上がりが停止したものと思われる。

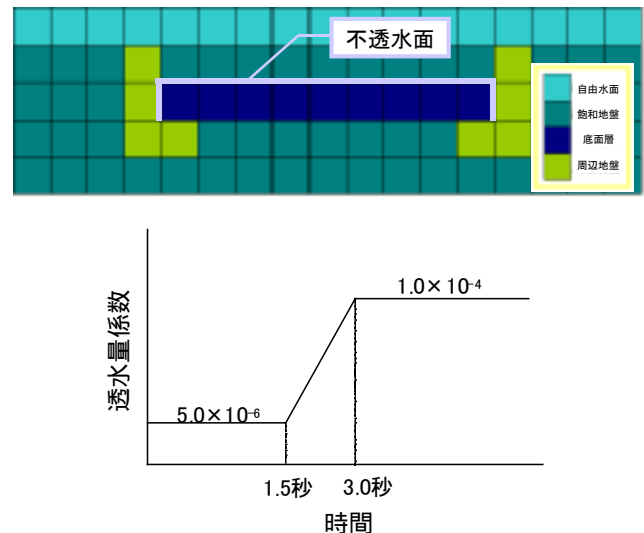


図-20 ケース1の周辺地盤における透水量係数

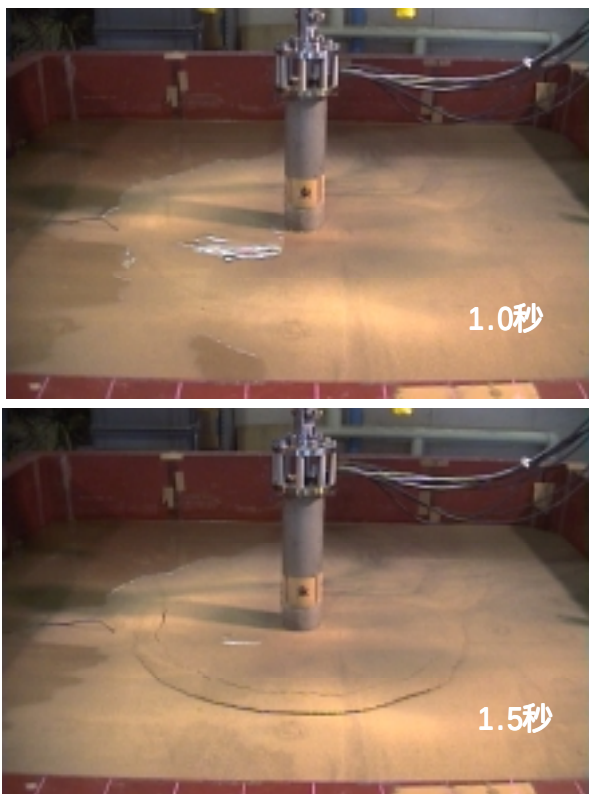
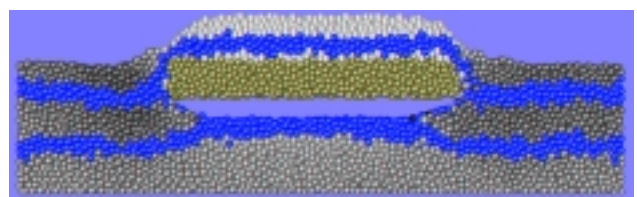


図-19 地表にすべり面が現れるタイミング



(a)実験(埋設深さ30cm, 引上げ速度5mm/s)



(b)ケース1(埋設深さ12cm, 引上げ速度5mm/s)

図-21 実験のトレンチとシミュレーションの比較

5. まとめ

飽和砂中に円盤を埋設し引き上げる模型実験を行い、液状化地盤中の埋設管周囲の相互作用を解析するDEMのパラメータ設定のための知見を得た。

円盤底面の負の水圧は引上げに伴って大きくなるが、すべり面に沿ってみずみちが発生した瞬間、急速に低下し始める。DEMと浸透流解析をカップリングすることにより、円盤底面付近の土粒子が円盤にひき寄せられて持ち上がる様子と円盤側面付近の土粒子が円盤底面に回り込もうと沈下している様子を再現できた。

水圧のピーク値は、体積圧縮係数をコントロールすることによりフィッティングできる。その値は、貯留係数の形に置き換えて、 $5.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ の範囲であった。

すべり面に沿うみずみちの表現は、現状のDEM要素のサイズでは難しい。

以上のことから、液状化地盤中の埋設管の周囲で起こる動土圧と過剰間隙水圧の変化に伴う相互作用をDEMと浸透流解析をカップリングすることにより合理的に評価できる可能性があることがわかった。

- 2) Cundall, P.A.: A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems, Proc. of the Symposium of the Intl. Soc. of Rock Mech., Nancy, France, Vol. 1, 132-150, 1971.
- 3) W. キンツェルバッハ：パソコンによる地下水解析，森北出版，監訳，上田年比古，1990。
- 4) 中瀬仁，石川博之，武田智吉：個別要素法による室内せん断試験のシミュレーション，第24回地震工学研究発表会講演論文集，489-492．1997
- 5) Sakaguchi H. *et.al.*: Plugging of flow of granular materials during the discharge from a silo, IJMP, Vol.B7, 1949-1963, 1993.
- 6) 柴広和，中瀬仁，末広俊夫，高橋聡，吉田郁政：3次元個別要素法の入力パラメータと発揮される強度の関係について，土木学会第62回年次学術講演概要集，(投稿中)，2007.

(2007.4.6 受付)

参考文献

- 1) 末広俊夫，中瀬仁，阪口秀，河端俊典，毛利栄征：強震時における埋設管浮上メカニズム，第12回日本地震工学シンポジウム，論文番号101，2006.

A STUDY ON THE BEHAVIOR OF SATURATED SOIL AT THE VICINITY OF BURIED STRUCTURES SUBJECTED TO LARGE RELATIVE DISPLACEMENTS

Toshio SUEHIRO, Japan TAKAHASHI, Hitoshi NAKASE, Yukio TAMARI, Hide SAKAGUCHI and Kazuo KONAGAI

The behavior of the saturated soil at the vicinity of a buried rigid structure subjected to large vertical displacements was studied by experimental and numerical simulations to develop a precise model for seismic uplift behaviors. A series of 1G model tests was conducted on a discoid rigid structure model embedded in saturated cohesionless soil. Then, the numerical simulations were performed by using Distinct Element Method (DEM) in which the seepage analysis model was introduced. It was shown that the movements of surrounding soil, generation of negative pore water pressures at the bottom were successfully simulated by controlling the coefficient of volume compressibility in the model.