

個別要素法による構造物の浮き上がりシミュレーション

中瀬 仁¹・嶋田 昌義²・弘重 智彦³

¹ 正会員 工博 東電設計株式会社技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

² 正会員 東京電力株式会社電力技術研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

³ 工修 東京電力株式会社電力技術研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

液状化地盤における地中埋設構造物について、従来の液状化判定に基づく検討を適用した場合、十分締め固められた良質な埋め立て地盤や、浮き上がりが生じにくいと考えられる細粒分を含む埋め立て地盤においても浮き上がると判定され、膨大な対策費が必要となる場合が想定される。著者のグループでは、浮き上がりを許容する性能設計を視野においた検討を進めており、本稿では過去に報告された実験結果を対象に、DEM(個別要素法)を用いた浮上量予測に対するシミュレーション研究を実施した内容について報告する。シミュレーションでは、地盤を締め固める対策を施したケースに比べて無対策の構造物の浮上量が大きくなり、定性的な浮上の傾向が実験と一致した。また、液状化地盤が構造物下部に回り込むメカニズムも再現できた。

Key words: numerical simulation, liquefaction, uplift, and buoyancy

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、地盤の側方流動等液状化現象に起因する被害も甚大であった。しかしながら、マンホール、下水管等の浮き上がり被害についての報告は見当たらない。現行の浮き上がりに対する設計で用いられる判定は、浮力とこれに対する抵抗力の釣り合いによるものであり、液状化の程度、振動の継続時間、地盤条件、構造物の形状等浮き上がりの程度を支配すると思われる要因については加味されない。また、浮き上がるか否かの判定による設計は経済的であるとは言えないであろう。著者らは、このような研究ニーズを背景に、浮き上がりを許容する性能設計を視野においた検討を進めている。本研究では、建設省土木研究所で実施された掘割道路模型の浮き上がり実験¹⁾を対象に個別要素法によるシミュレーション解析を実施し、浮き上がり問題に対するフィージビリティを確かめる。

2. 解析条件と解析ケース

検討の対象とする断面を図-1 に示す。ケース 1 は重力場において、高さ 25cm、幅 30cm の掘割道路模型(見かけの比重 1.52)を相対密度 65%程度の豊浦砂に埋設し水で飽和させた模型に対応する。ケース 2

は土槽底部 19.5cm の範囲を十分締め固めた(相対密度 90%)模型、ケース 3 は掘割道路模型両側を十分締め固めた模型(実験では土槽底部 9.0cm も締め固められている)である。文献では、これらの模型に対して 5Hz の正弦波形の振幅を段階的に増加させて再加振されており、加速度ごとの累積変形結果と有限要素法による残留変形解析結果が示されている。

ケース 1 とケース 2 の比較により、液状化層の厚さと浮き上がり量の関係を把握することができ、ケース 1 とケース 3 の比較により、締め固めによる対策工の効果を把握することができる。

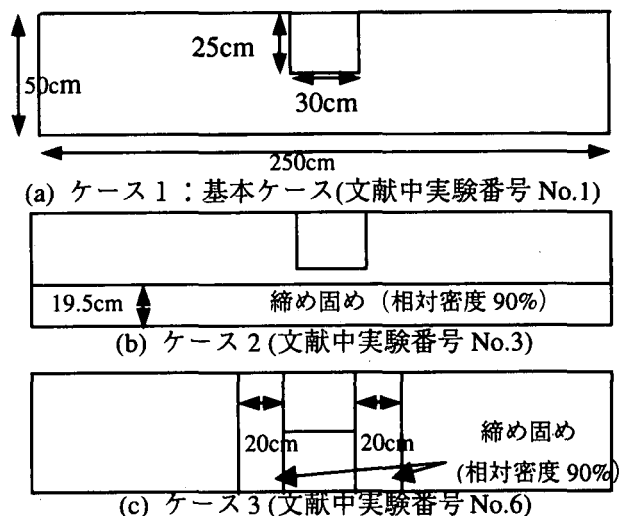


図-1 解析対象断面

実験では、ケース1の掘割道路模型の浮き上がりが他より大きく、入力振幅の低い段階で生じる結果となった。

ここでは、これらのシミュレーション対象に対し個別要素法を適用する。

個別要素法 Cundall²⁾は、不連続面で区切られた要素の集合体に対し、個々の要素が運動方程式を満足し、要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として、要素の集合体の挙動を時間軸上で数値解析する手法である。これに、間隙水を考慮する³⁾ことにより液状化現象をシミュレーションすることが可能になった。

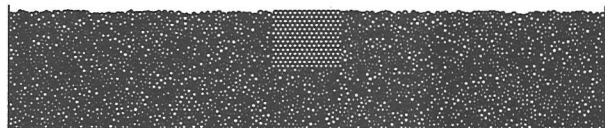
基本ケース、ケース2およびケース3に対するシミュレーションモデルを図-2の(a)、(b)および(c)にそれぞれ示す。実験土槽と対応するよう、幅1.5m高さ50cmの剛な境界で区切られた領域に約6,000の円要素を敷き詰めて初期状態を作成した。

ケース2およびケース3の淡色の領域は、パッキングの際、他の領域より間隙比が小さくなるように要素間の摩擦係数を0とした。他の領域の摩擦係数は、24°である。この結果、淡色の領域の間隙比は0.18程度、他の領域の間隙比は0.22程度になっている⁴⁾と考えられる。

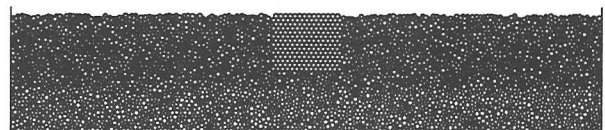
掘割モデルは、直径2cmの要素を203個バネで互いに連結⁵⁾することによりモデル化した。そのサイズは実験と対応させた。地盤、掘り割りの見かけの密度は、実験と対応するよう配慮した。

シミュレーションに用いた地盤モデルの材料定数を表-1に示す。地盤モデルの発揮する内部摩擦角は20°程度であると考えられる。

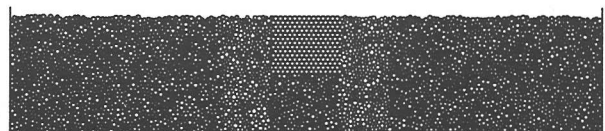
表に示したばね係数を用いた場合、基本ケースのモデル地盤のせん断波速度は44m/s程度になると推定される。



(a) ケース1(要素数:5705個(D50:1.55cm、均等係数1.5))



(b) ケース2(要素数:5773個(D50:1.55cm、均等係数1.5))



(c) ケース3(要素数:5755個(D50:1.55cm、均等係数1.5))

図-2 解析モデル

地下水は地表面まで浸潤しており、水圧の消散は、多孔質体の浸透流解析を用いて計算している。モデル地盤の透水係数は、豊浦砂のそれと対応させた。貯留係数は水の体積弾性圧縮係数の逆数に比例する係数である。

表-2に掘割道路模型のモデルの材料定数を示す。本稿では、掘割道路を表す要素内部には、間隙水は浸透しないが要素間には間隙水が浸透するモデル化になっており改善の余地がある。

入力波形は正弦波5Hz、20波、200galとし、入力加速度に比例する慣性力を要素に作用させた。

3. シミュレーション結果

加振時間は4秒間でケース1は、加振終了後2秒間放置した場合までシミュレーションを続けた。0秒から4秒間に生じた土粒子の変位ベクトルの分布を図-3に示す。ベクトルの長さは実際の変位の2倍にして表した。

ケース1においては、掘割道路モデルが地盤から4cm程度突き出しており、その浮き上がりは近傍の

表-1 材料定数(地盤材料)

円要素の密度 (kg/m ³)	1.65E ⁰³
法線方向ばね係数 (N/m)	2.80E ⁰⁸
接線方向ばね係数 (N/m)	1.00E ⁰⁸
法線方向減衰係数 (N・sec/m)	1.11E ⁰⁴
接線方向減衰係数 (N・sec/m)	6.68E ⁰³
要素間摩擦角 (度)	24.0

表-2 材料定数(掘割道路模型)

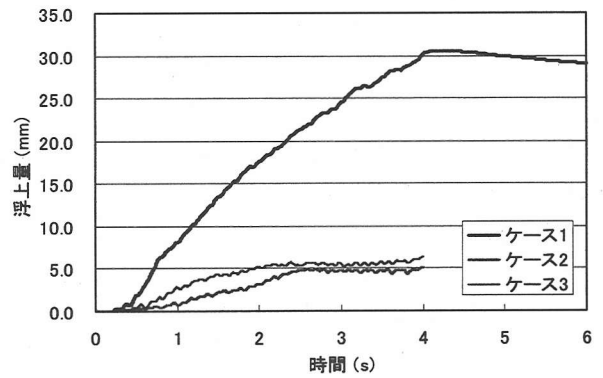
円要素の密度 (kg/m ³)	2.40E ⁰³
法線方向ばね係数 (N/m)	2.00E ⁰⁸
接線方向ばね係数 (N/m)	0.72E ⁰⁸
法線方向減衰係数 (N・sec/m)	6.72E ⁰³
接線方向減衰係数 (N・sec/m)	4.03E ⁰³
要素間摩擦角 (度)	24.0
転がり摩擦角 θ_r (度)	0.0
時間間隔 (sec)	2.0E ⁻⁰⁵
透水係数 (m/s)	2.0E ⁻⁰⁴
貯留係数	1.0E ⁻⁰⁵

地盤を巻き込んで生じている。土粒子の回り込みは掘割道路モデル下方への地盤深部に及ぶほど著しく生じている。この結果、掘割道路モデルとその近傍地盤の浮き上がりや周辺地盤の沈下の対比は明瞭になっている。

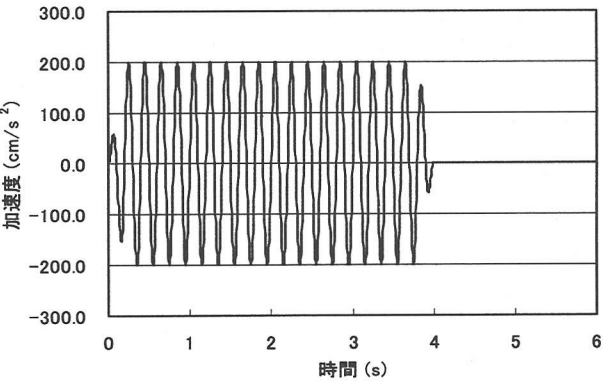
ケース 2 においては、掘割道路モデルが地盤から 3cm 程度突き出しているものの、地表面の形状はケース 1 に比べて平坦なままであった。締め固めた地盤領域が頑丈で土粒子の回り込みは地盤深部にまでは波及していない。

ケース 3 における掘割道路モデルの地盤からの突き出しは、2cm 程度で最も小さい。しかし地表面は、中央部が高く周辺部へ向かってなだらかに傾斜しており、周辺から中央部への土粒子の全体的な回り込みを示唆している。土粒子の回り込みが左右対称に行われておらず、掘割モデルを中心として全体的に右方向へ流れているので、回り込みの様子はわかりにくい。しかしながら、地盤深部における土粒子の上層からの影響を受けている様子は観察できる。

図-4(b)の入力波に対するケース 1、ケース 2 およびケース 3 における掘割道路モデルの浮上の時刻歴を図-4(a)に比較する。ケース 1 の掘割道路モデルは 4 秒間の加振中間断なく浮上を続けるが、ケース 2 およびケース 3 は 2.5 秒以降浮上波形が頭打ちする。ケース 1 の浮上量が他より大きくなる傾向は、実験



(a) 掘割道路モデルの浮上量(絶対鉛直変位増分)



(b) 入力波形

図-4 掘割道路モデルの浮上量の比較

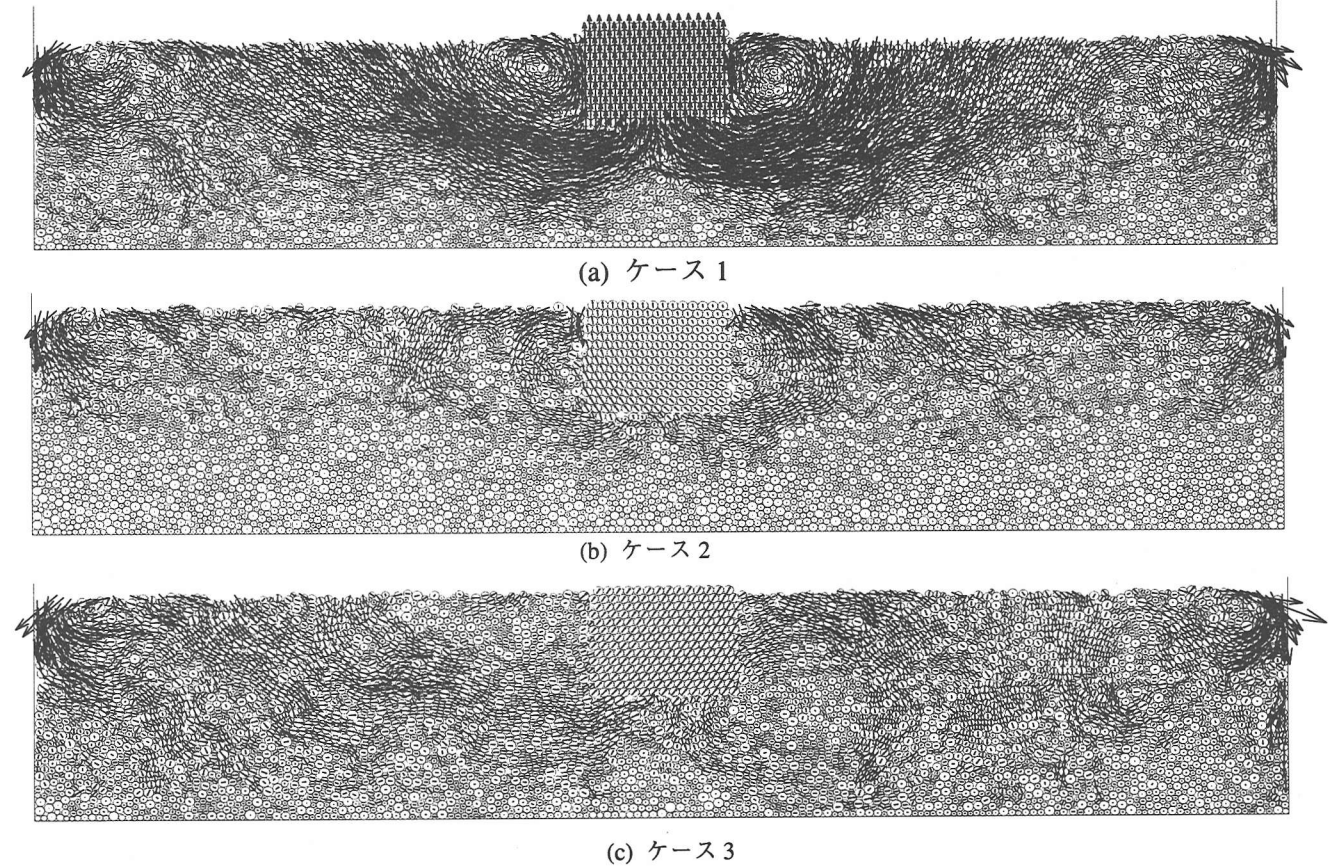


図-3 粒子の変位ベクトル分布(ベクトルの長さは実際の変位の 2 倍)

と一致している。

ケース 1, ケース 2 およびケース 3 における掘割道路モデル直下における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-5に比較する。ケース 1 は 3 波程度の加振により、加振に伴う水圧の変動は消滅し、0.5 を上回る領域で脈動のような大きな振動を繰り返しながら上昇を続ける傾向を見せる。ケース 2 は、加振に伴う水圧の変動が 10 波程度継続し、その上限値は 0.7 程度に達するものの、それ以上水圧が上昇する傾向は認められない。ケース 3 は 7 波程度の加振により、加振に伴う水圧の変動は消滅し、0.5 を上回る領域を推移するものの、それ以上水圧が上昇する傾向は認められない。

ケース 1, ケース 2 およびケース 3 の加振開始 3 秒後における法線方向接触力の分布を図-6に比較する。要素間の線分は、色の濃淡で接触力の強度を示す。接触力は、モデル底面の深度に対する要素深度の比の逆数を乗じることにより、深度方向に正規化した。ケース 1 は、地盤のかかなりの範囲で接触力が激減するかまたは接触点そのものが失われている。ケース 2 は、締め固められた地盤下層部で有効な接触力が広い範囲で残存している。ケース 3 では掘割モデル両側の領域において接触力が残存している様子がわかる。ケース 2 およびケース 3 の有効な接触力の残存している領域では、間隙水圧が十分に上昇していないことを示しており、図-5 と対応している。

4. おわりに

重力場における掘割道路模型に対する模型振動実験結果を対象に、DEM(個別要素法)を用いたシミュレーション研究を実施した。その結果、地盤を締め固める対策を施したケースに比べて無対策の構造物の浮上量が大きくなり、定性的な浮上の傾向が実験と一致した。また、液状化地盤が構造物下部に回り込むメカニズムも再現できた。今後実施するシミュレーション研究では、浮き上がり現象が継続的に進行するメカニズムを把握したり、対策工の効果を比較すること等を目的とする予定である。本研究は、地盤工学会「液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究委員会」で実施された検討の一部である。個別要素法はプログラムは、京都大学澤田純男氏の DEMS を改良して用いた。

参考文献

- 1)古関潤一・古賀泰之・森下義(1988):掘割道路の地震時浮き上がりに関する模型振動実験および残留変形解析,土木学会第43回年次学術講演会,IIIpp444-445

- 2) Cundall, P.A., A. and Strack, O.D.L.(1979): A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique 29, No.1, pp.47-65
- 3)中瀬仁・石川博之・武田智吉(1997):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,pp489-492
- 4)中瀬仁・本田中・西野隆之(2001):個別要素法摩擦パラメータを設定するためのねじりせん断シミュレーション,第35回地盤工学研究発表会,投稿中
- 5)目黒公郎(1988):粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析,地震研究所彙報,Vol.63,pp.409-468

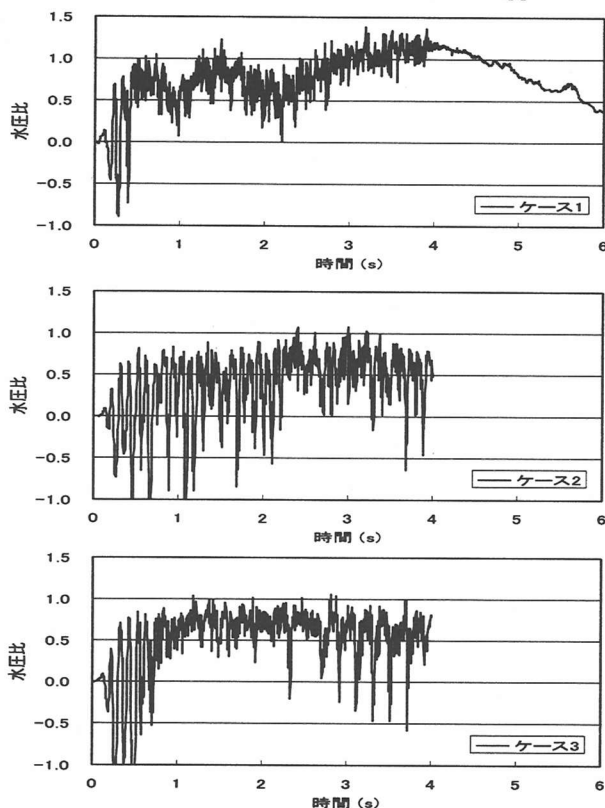


図-5 水圧比波形の比較
(掘割道路モデル直下,深度 25cm)

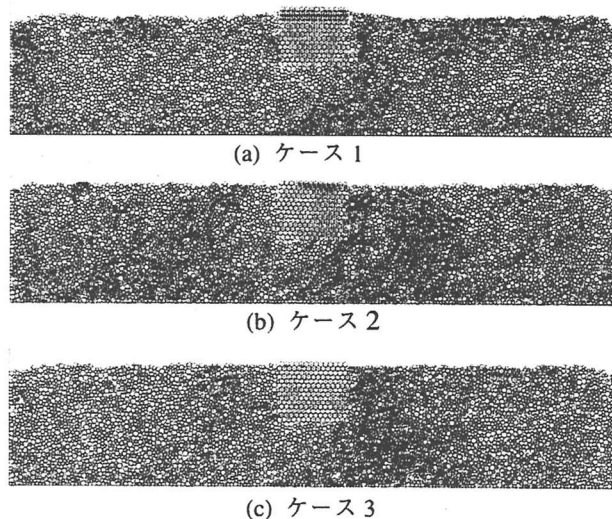


図-6 法線方向接触力分布の比較(3 秒後)