

大型せん断土槽を用いたマンホールの 浮上がり実験と有効応力解析

足立有史*・浦野和彦*・三原正哉*

1964年の新潟地震以来、大規模地震における地盤の液状化による建造物の被害が多数報告されている。中でもマンホールの浮上がり被害は、液状化による特徴的な現象である。しかしながら、地震時の浮上がり挙動に関する実現象を詳細に観察した記録は少ない。本研究では、液状化発生時のマンホールの浮上がり挙動を観察するため、大型せん断土槽を用いた実規模振動台実験を実施した。さらに、有効応力法による2次元FEM解析による数値シミュレーションを実施し、浮上がり挙動の分析を行った。

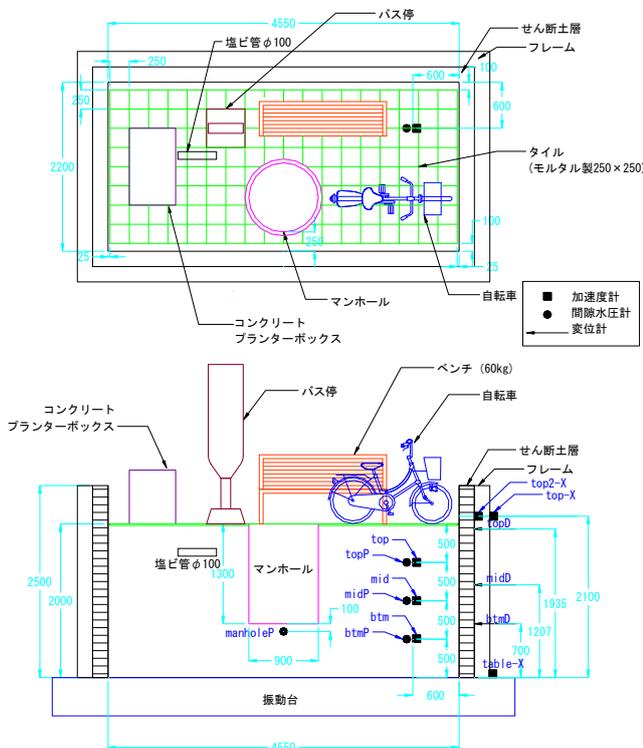
実験および解析の結果、実規模レベルでの地盤の液状化によるマンホールの浮上がり過程を詳細に観察することができ、さらに、その挙動を有効応力解析において概ね再現できることを確認した。

キーワード：振動台実験、液状化、マンホール、浮上がり、有効応力解析

1. はじめに

1964年の新潟地震以来、大規模地震における液状化による建造物の被害が多数報告されている。液状化被害の特徴として、極端な地盤の支持力低下、地盤外力の増加、地盤変位の増加、永久変形の発生がある。マンホールの浮上がりは液状化による特徴的な現象であり、被害事例も多数報告されている^{1),2)}。しかし、地震時のマンホールの浮上がり挙動を詳細に観察した記録は少なく、

被害の予測精度向上や対策工の開発、効果の検証においては、実現象の挙動把握が重要であると考えられる。本研究では、液状化発生時の実規模マンホールの浮上がり挙動を観察するため、大型せん断土槽を用いた振動台実験を実施した。さらに、有効応力法による2次元FEM解析による数値シミュレーションを実施し、浮上がり挙動の分析を行った。



実験概要

- ・地盤：東北珪砂5号, $D_r=41\%$
- ・地下水位：GL-5cm
- ・構造物(地上)：自転車, ベンチ, プランター, バス停
- ・埋設物：マンホール模型, 下水管模型

図-1 振動台実験模型

* 技術研究所

2. 実験概要

振動台実験模型を図-1に示す。実験に用いたせん断土槽は、幅 4.55m、高さ 2.5m、奥行き 2.2m（容量 25.03m³）で、約 5%のせん断ひずみまで変形可能である。振動台は、テーブルサイズが 6m×4m、最大搭載荷重 800kN であり、最大加速度は長辺方向 1G、短辺方向 3G である。模型地盤は、乾燥した珪砂 5 号を専用の砂まき装置を用いて空中落下法により作製した（写真-1 参照）。模型地盤作製後の相対密度は 41%であった。その後、土槽底面の 8 箇所注水孔より約 2 日間かけてゆっくりと地盤を飽和させた。地下水位は GL-5cm に設定した。マンホール模型は木製で、外側を防水処理し、比重が実物のマンホールと同じ（比重 1.0）になるよう内部に砂を入れた。実験に使用したその他の設置物として、GL-30cm の位置に両端を閉塞した長さ約 1.2m の下水管（塩ビ管）を、また、地上には、ベンチ、自転車、バス停標識、プランターの実物を設置した（図-1 参照）。なお、地表面には縦 250mm×横 250mm×高さ 20mm のモルタル製のタイルを敷き詰めた。そして、地盤内の加速度、間隙水圧およびせん断土槽枠の加振方向の水平変位、水平加速度を図-1に示す位置で計測した。入力加速度波形は図-2に示すように、正弦波 4Hz で加速度振幅は 350Gal、継続時間 26 秒とした。

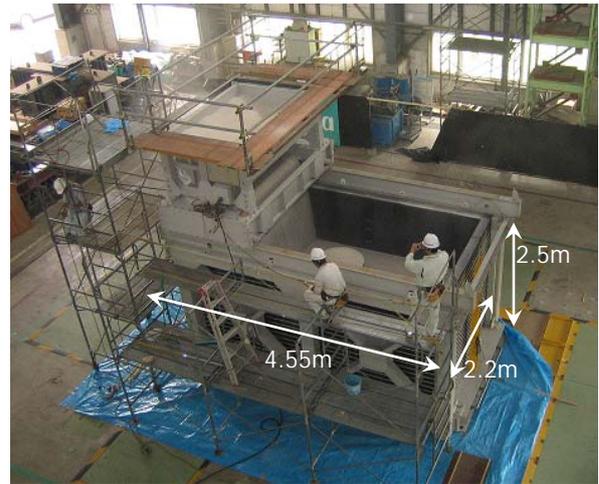


写真-1 空中落下法による地盤作製状況



写真-2 加振後地表面状況

3. 実験結果

写真-2に加振終了後の地表面の様子を示す。また、写真-3に加振中のマンホールおよび周辺地盤の様子を 5 秒毎に示す。加振直後に地表面全体から地下水が噴出し液状化に至るとともに、マンホールおよび下水管は浮上がり、地上に設置した模型の沈下や傾斜が生じた。加振後のマンホールの浮上がり量は 63cm であった。次に、地盤及び振動台の加速度および変位の時刻歴を図-3および図-4に示す。また、図-5に過剰間隙水圧の時刻歴を示す。地盤の加速度は、加振開始約 2 秒後から模型土層全層で低下する傾向が見られた。これは過剰間隙水圧の挙動から水圧上昇に伴う地盤剛性の低下による影響と考えられる。この状態は 10 秒程度継続し、その後、地盤深部から過剰間隙水圧の低下に合わせ徐々に加速度が回復する傾向が見られた。

図-6にマンホール天端中心の浮上がり量の時刻歴を示す。マンホールの浮上がりは、過剰間隙水圧が上昇し、完全液状化状態となった時刻とほぼ同時に開始し、加振途中で浮上がり量がマンホール高さの約半分の時点で一定となった。これは、マンホールの比重 1.0 であり液状

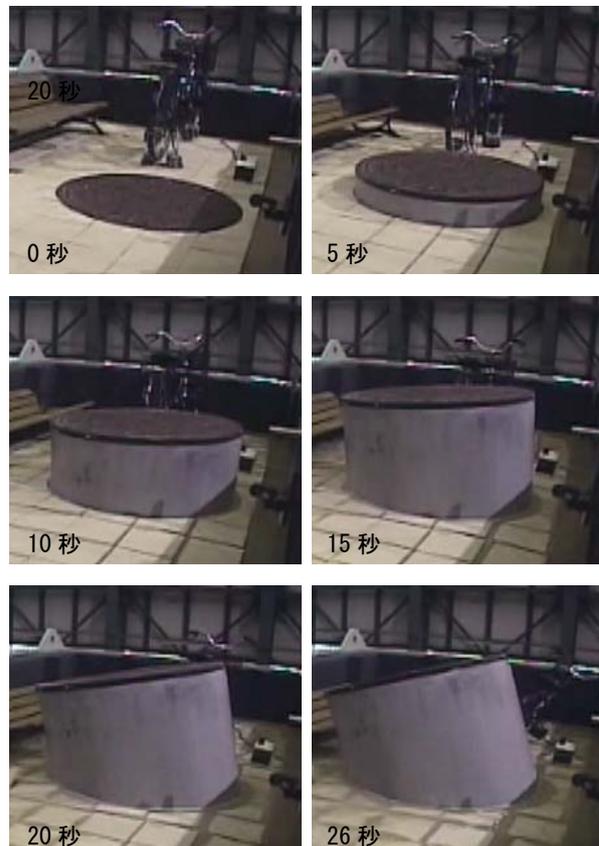


写真-3 マンホールの浮上がり状況

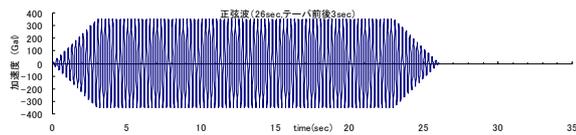


図-2 入力加速度波形

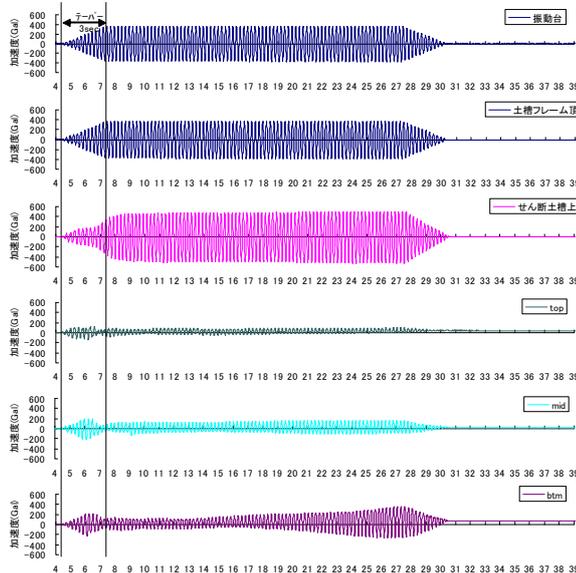


図-3 加速度時刻歴

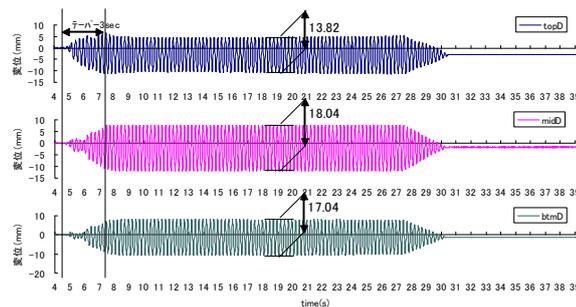


図-4 変位時刻歴

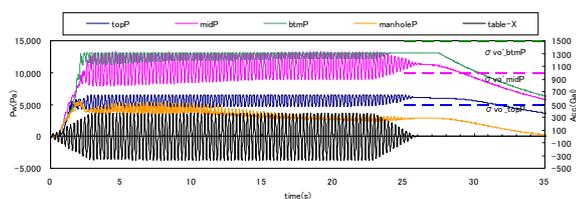


図-5 過剰間隙水圧時刻歴

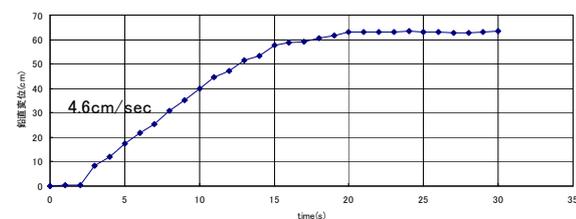


図-6 マンホール天端浮上がり変位時刻歴

化した地盤の比重約 2.0 (飽和単位堆積重量) の 1/2 であることから、液状化した地盤を流体とした場合の浮力に対してほぼつり合うまで浮上がったものと考えられる。

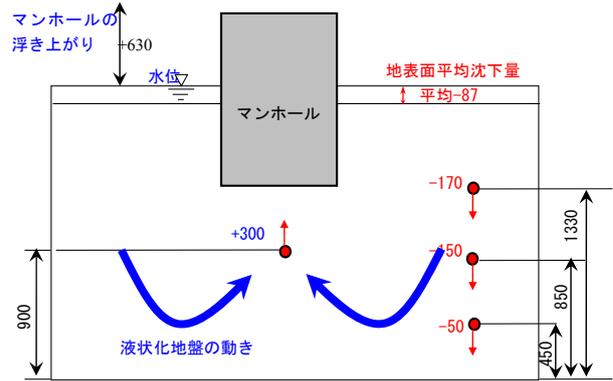


図-7 計測器の加振後の鉛直方向移動量(mm)

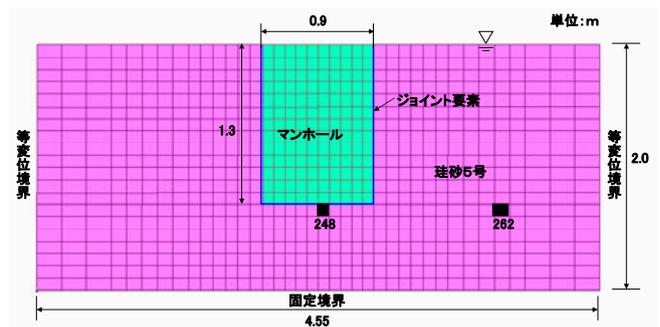


図-8 FEMメッシュ図

図-7に加振後の計測器の移動量を示す。マンホール周辺の土が下方向に移動するのに対し、マンホール直下地盤は上方向に移動していることがわかる。これらのことから、同図の矢印のように液状化地盤がマンホール下部に回りこむことでマンホールの浮上がりが生じたものと理解できる。なお、写真-2に見られるように、マンホールは、加振直角方向、土槽中心方向に向かい約 17° 傾斜して浮上がっている。これは、マンホールが土槽中心から側壁方向に 40cm ずれて配置されており、マンホールから土槽の側壁までの距離が左右均等ではないため、マンホール直下および側方地盤の液状化の程度に差異が生じることが一因と考えられる。

4. 有効応力解析

振動台実験におけるマンホールの挙動を検討するため、2次元有効応力解析を実施した。解析は液状化解析プログラム LIQA2 d 07³⁾により実施した。図-8にFEMメッシュ図を示す。モデルの境界条件はせん断土槽を考慮して定めた。表-1および表-2に地盤およびマンホールの解析パラメータを示す。地盤パラメータは、珪砂5号(D_r=50%)を対象に実施した液状化強度試験、動的変形試験、CD試験を参考に設定した。図-9に砂の弾塑性パラメータを決定するために実施した液状化強度試験の要素シミュレーション結果を示す。入力加速度は、前述

表-1 地盤パラメータ

No.			1
土層名			珪砂5号
種別			弾塑性
密度	ρ_t	(t/m^3)	1.97
せん断波速度	V_s	(m/s)	132
初期せん断弾性係数	G_0	(kPa)	34360
初期間隙比	e_0		0.690
圧縮指数	λ		0.0030
膨潤指数	κ		0.0010
擬似過圧密比	OCR*		1.0
内部摩擦角	ϕ'	(degree)	35.0
変相角	ϕ_m	(degree)	28.0
破壊応力比	M_f^*		1.158
変相応力比	M_m^*		0.909
硬化関数中のパラメータ	B_0^*		3000
硬化関数中のパラメータ	B_1^*		30
硬化関数中のパラメータ	C_f		0
基準ひずみ (塑性剛性)	γ_{ref}^{P*}		0.005
基準ひずみ (弾性剛性)	γ_{ref}^{E*}		0.010
ダクタリティー係数	$D*_0$		2.0
ダクタリティー係数	n		3.0
透水係数	k	(m/sec)	3.1E-04
無次元化初期せん断係数	$G_0/\sigma'_m{}^0$		572.7
液状化強度 (PA=5%)	R_{L20}		0.160
	備考		三軸試験

表-2 マンホールパラメータ

No.			2
土層名			マンホール
種別			弾性
密度	ρ_t	(t/m^3)	1.00
ポアソン比	ν		0.20
Laméの定数	λ	(kPa)	2777778
Laméの定数	$\mu=G_0$	(kPa)	4166667
体積弾性係数	K_0	(kPa)	5555556

の振動台実験と同じもの(図-2)を用いた。マンホールと地盤の境界部にはすべりのみ考慮したジョイント要素を配置した。ジョイント要素のせん断方向バネ定数は $0.344kN/m^2$ とした。

初期応力状態は、別途、図-8に示したFEMモデルと同じモデルを用いた初期応力解析により算定した。地盤は弾完全弾塑性モデルとし、要素の有効重量を荷重(100分割の増分解析)として与えた。地盤のヤング率は有効拘束圧の0.5乗に比例すると仮定した。また、ポアソン比は0.333、内部摩擦角は三軸圧縮試験結果から 35° とした。なお、ジョイント要素の摩擦角は0とした。

動的解析における数値解析上の条件として、計算時間増分は0.001秒とした。Rayleigh減衰として初期剛性比例型を用い、その係数は入力加速度の周波数4Hzに減衰定数1.0%程度を仮定し0.001とした。

解析結果の加振後変形図を図-10に示す。また、図-11に各時刻の有効応力減少比 $(1-\sigma'_m/\sigma'_{m0})$ のコン

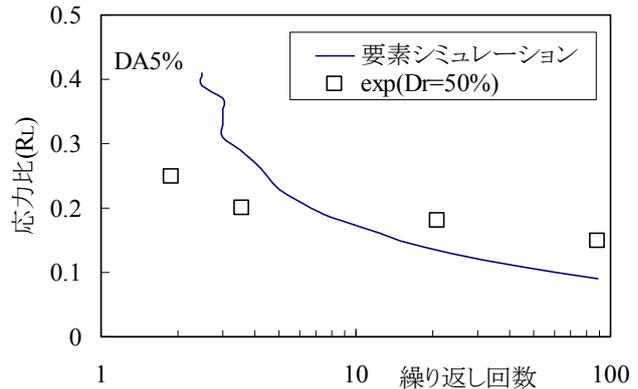


図-9 液状化強度曲線(珪砂5号)

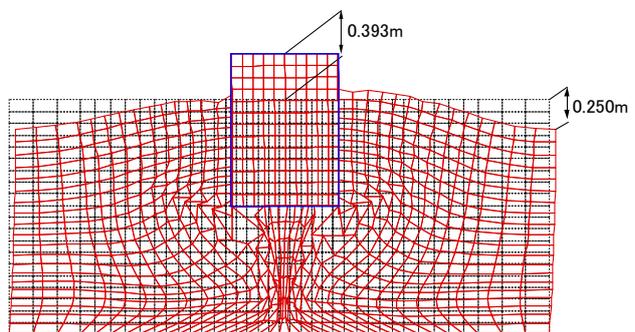
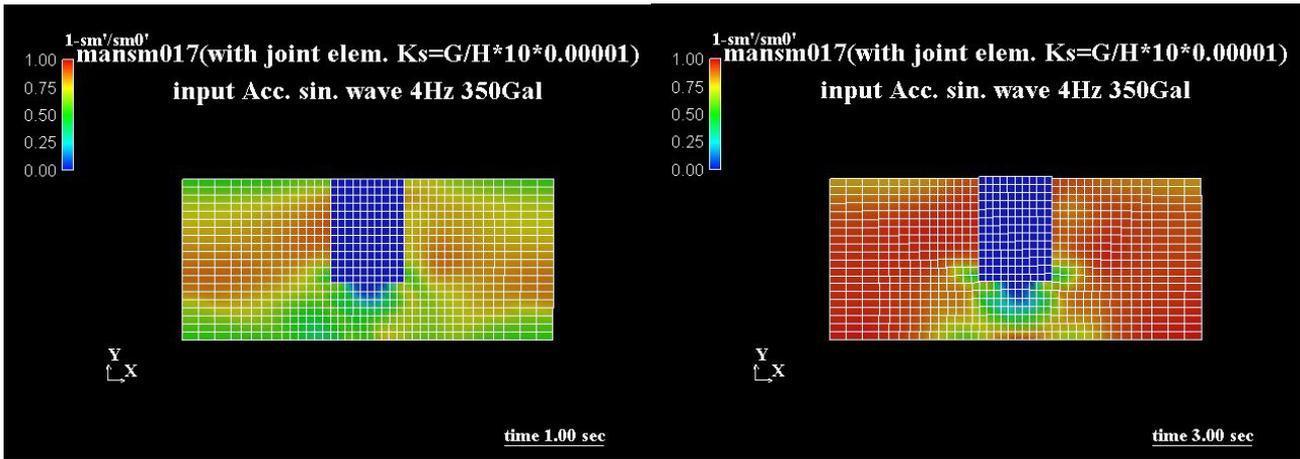


図-10 加振後変形図(解析結果)

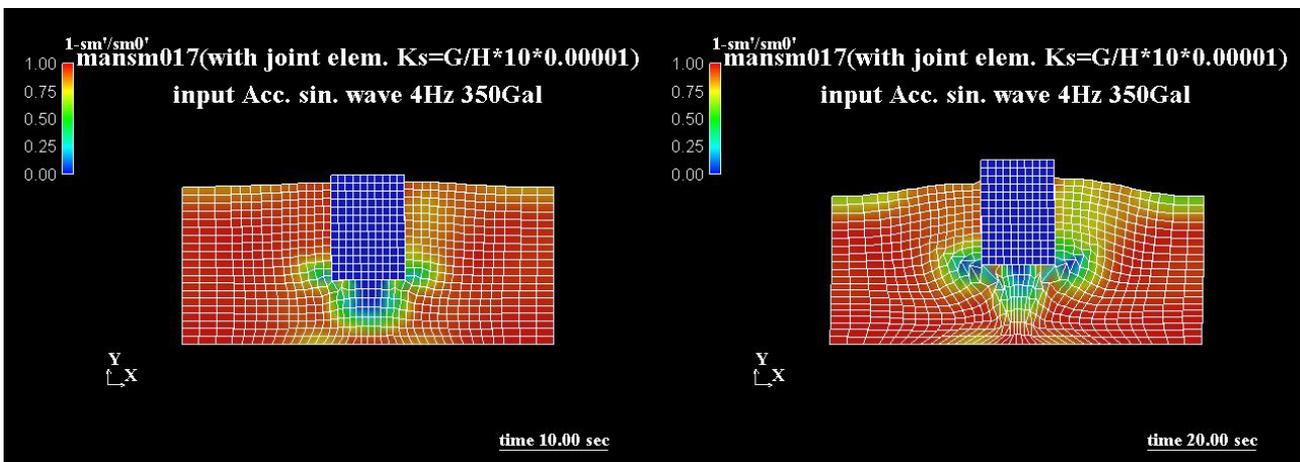
ター図を示す。マンホール側方地盤は一樣に有効応力減少比がほぼ1.0に達し液状化に至っている。一方で、マンホール直下の地盤は大きく変形しているが、有効応力は有しており液状化に至っていない。これは、マンホール直下の地盤は、周辺地盤と比べ上載圧が小さく、過剰間隙水圧が上昇しても初期の軸差応力が一定に保たれるため、モール円が破壊線に接した以降は有効応力が減少できないためである⁴⁾。図-12に図-10に示す要素における平均有効応力と偏差応力の不変量 $(\sqrt{S_{ij}S_{ij}})$ 、 S_{ij} は偏差応力テンソル)の関係を示すが、この図からもマンホール直下では偏差応力および平均有効応力の変化が小さいことがわかる。一方、マンホールの浮上がり挙動については、解析結果から次のように理解できる。液状化の発生に伴い地盤はせん断強度が急激に低下し液状体の挙動を示し、比重の軽いマンホールに対して浮力として作用する。その結果、液状化地盤がマンホールの下部へ潜り込みマンホールを押し上げるように変形したものと考えられる。この挙動は、実験時の計測器の残留変位とも整合している。

図-13にマンホールの浮上がり量の時刻歴を実験結果と合わせて示す。マンホールが浮上がりを開始する時刻は加振開始約3秒後で、その後ほぼ一定速度で浮上がる傾向は実験結果と同様である。解析結果における加振



(a) 1.0sec : 水圧上昇過程

(b) 3.0sec : 完全液状化



(c) 10.0sec : 浮上がり量 10cm

(d) 20.0sec : 浮上がり量 30cm

図-11 変位および有効応力減少比コンター

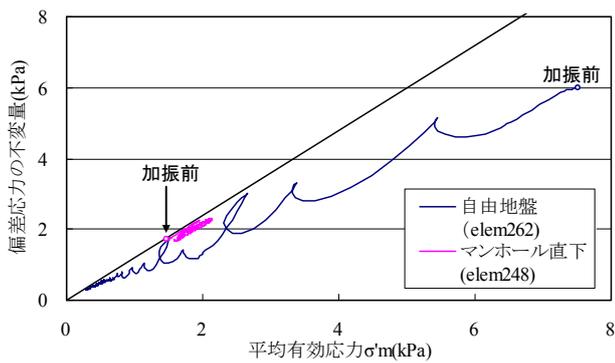


図-12 偏差応力の不変量と平均有効応力

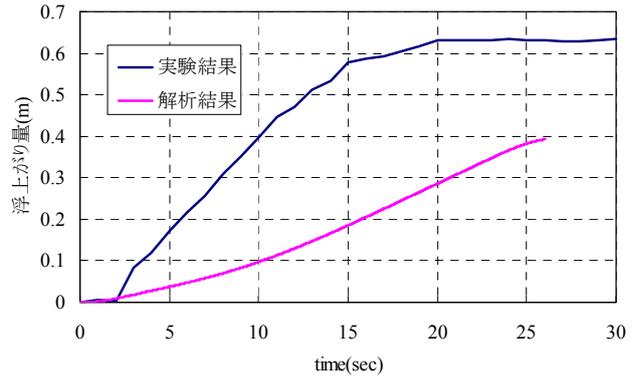


図-13 マンホールの浮上がり量の時刻歴

終了後のマンホールの浮上がり量は約 40cm であり、実験時の 63cm に対し小さ目の結果となった。これは、今回使用した解析コードで取り扱うひずみは微小ひずみであるため、マンホールの浮上がり挙動において、液状化地盤による浮力とマンホール自重のバランスを正確に表現することが困難であるためと考えられる。

図-14 および図-15 に地盤の加速度および過剰間隙

水圧の時刻歴を示す。これらの図は、実験における計測位置に最も近い節点および要素の結果を示している。図-14 から地盤の加速度は加振開始直後に入力加速度の増加に伴い上昇し、約 1.0 秒後から過剰間隙水圧の上昇に伴い減少している。その後の液状化中の地盤の加速度応答は、実験結果に比べ解析結果が小さめになっている。これは、実験ではせん断土槽の側面の拘束効果や土層深

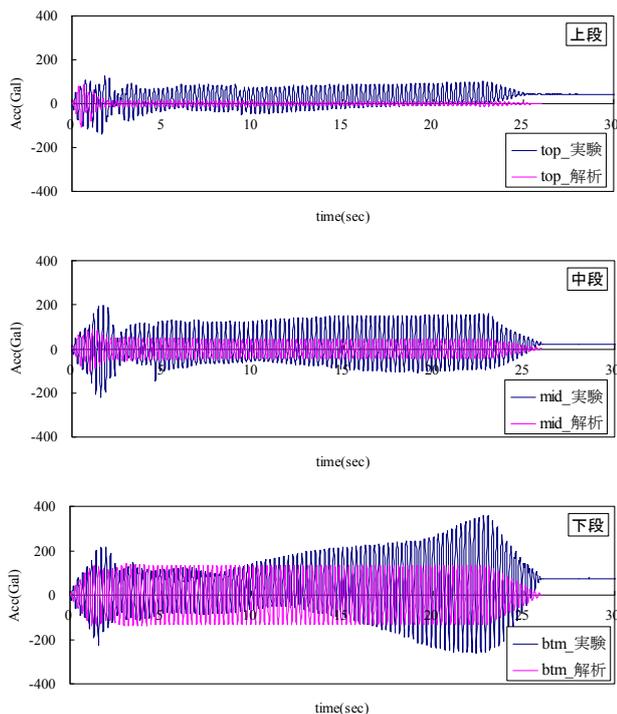


図-14 加速度時刻歴の比較（地盤側部）

部における加振後半の再堆積による地盤剛性回復の影響が考えられる。図-15 から側部地盤（上部）では、加振直後から水圧が増加する挙動が解析でも良く再現されている。一方、マンホール直下では、実験結果と解析結果で傾向が異なるが、これは地盤変位に伴い水圧計が移動したことによるものと推察される。

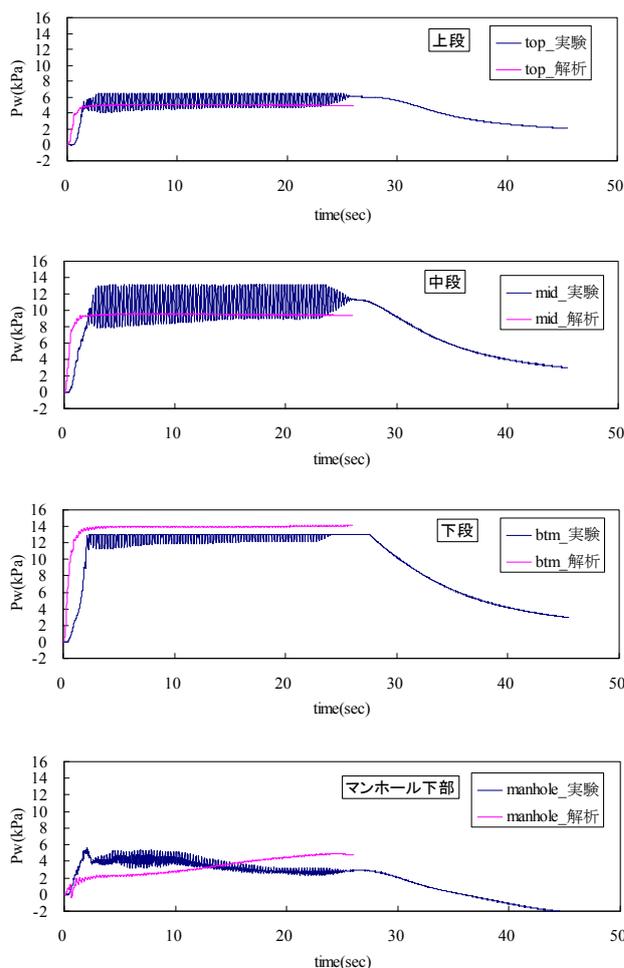


図-15 過剰間隙水圧の比較

5. まとめ

液状化時のマンホールの挙動に着目した実規模での振動台模型実験およびその有効応力解析を実施した。その結果、均質地盤に一定振幅の正弦波の振動を与えた場合の挙動として以下のことを確認した。

- ① 地盤が液状化に至った後、マンホールは浮上がりを始め、液状化が継続する間、マンホールの浮上がり速度はほぼ一定であった。
- ② マンホールの最終浮上がり量は、液状化した地盤の浮力とマンホールの自重がつり合う状態であった。
- ③ 有効応力解析結果は振動台実験結果と概ね整合することから、マンホールの浮上がりメカニズムを確認することができた。ただし、定量的な評価については、3次元効果や有限変形問題等の解析条件に影響を受けることが考えられるため、配慮が必要である。

なお、本実験は、フジテレビ「みのもんたのSOS」（2005年9月30日放映）のために実施されたものである。

参考文献

- 1) 安田進, 規矩大義, 森本徹, 田中智宏: 2003年十勝沖地震による造成地や下水道の被害, 2003年(平成15年)十勝沖地震被害調査報告会概要集, pp. 83-90, 2003.
- 2) 地盤工学会: 新潟県中越地震被害調査委員会報告書, pp. 427-453, 2007.
- 3) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA07(2007年公開版)資料, 2007.
- 4) 吉田望, 永瀬英生, 三浦均也: 液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響, 地盤の流動の発生のメカニズムと解析法(その1), 地盤工学会 液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響講習会講演資料, pp. 17-22, 2000.

A Large Scale Shear Box Shaking Table Test for Uplift Phenomenon of Manhole in Liquefaction
Ground and Its Effective Stress Analyses

Yuji ADACHI, Kazuhiko URANO and Masaya MIHARA

Since the 1964 Niigata Earthquake, the damages to several structures by liquefaction of ground have been reported in many destructive earthquakes in Japan. The features of damage by liquefaction of ground are generation of an extreme bearing capacity decrease, an increase in external force of the ground, an increase in the ground displacement, and the ground flow, etc. The uplift of manholes is a characteristic phenomenon by liquefaction of ground and a lot of damage cases have been reported. However, the number of records that observe the uplift behavior of manholes in an earthquake in detail is small. In this study, a real scale shaking table test using a large-scale shear soil container was conducted to observe the uplift behavior of manholes by ground liquefaction. In addition, the numerical simulation by two-dimensional FEM analysis by the effective stress method was executed, and the uplift behavior of manhole in liquefaction of ground was analyzed.