

マンホールの浮上りに関する遠心模型実験

井合 進¹・飛田哲男²・今井淳一郎³

¹京都大学防災研究所教授（〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail:iai@geotech.dpri.kyoto-u.ac.jp

²京都大学防災研究所助手（〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail:tobita@geotech.dpri.kyoto-u.ac.jp

³京都大学防災研究所（〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail:imai@geotech.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究では、液状化地盤中に設置されたマンホールの浮上りについて遠心力载荷模型実験を通じた検討を行った。遠心力载荷模型実験では、地盤の密度および加振加速度を変化させ、延べ6ケースの実験を実施した。遠心模型実験により、マンホール模型浮上りの際に測定した過剰間隙水圧の値を基に、現行設計基準類などに示されている簡易法による浮上り安全率を算定したところ、この安全率と浮上りの挙動とは矛盾する結果となり、有限要素法などによる変形解析の重要性が改めて確認される結果となった。

Key Words : Buried structure, centrifuge model test, earthquake, liquefaction, uplift

1. はじめに

新潟県中越地震におけるマンホールの浮上りの事例（写真-1）にも見られるとおり、液状化地盤中に設置された埋設構造物においては、地盤変位が構造物に与える影響に加えて、浮上りに対する検討も必要となる。本研究では、遠心力载荷模型実験を通じた検討を以下のような方法により行った。



写真-1 新潟県中越地震における小千谷市でのマンホールの浮上り状況

2. マンホール浮上りの遠心载荷模型実験方法

本実験には京都大学防災研究所の遠心力载荷装置を使用した。有効回転半径は2.5m、容量は24G・tonである。ここでGは重力加速度である。最大遠心加速度は振動台を用いない静的な実験の場合200G、振動台を用いる動的な実験の場合は振動台の性能による制限から50Gである。本実験は縮尺1/20の模型を用いて20Gの遠心場で行った。土槽は寸が45cm×30cm×15cm(長さ×高さ×奥行き)で鋼製の剛土槽を使用した。片方の側面がアクリル張りで、地盤の鉛直断面を観察することができる。

本実験におけるマンホールのモデルは、マンホール原型を1/20にした外径40mm、長さ80mmの塩化ビニール管を使用した（写真-2）。作成したマンホー



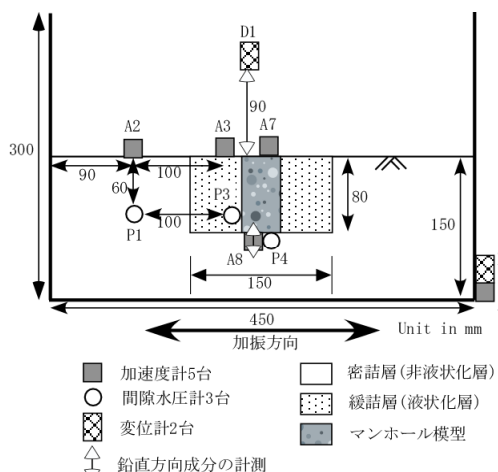
写真-2 遠心力模型実験におけるマンホール模型

ル模型の中にゴム板を入れて密度が 0.4g/cm^3 になるように調整した。

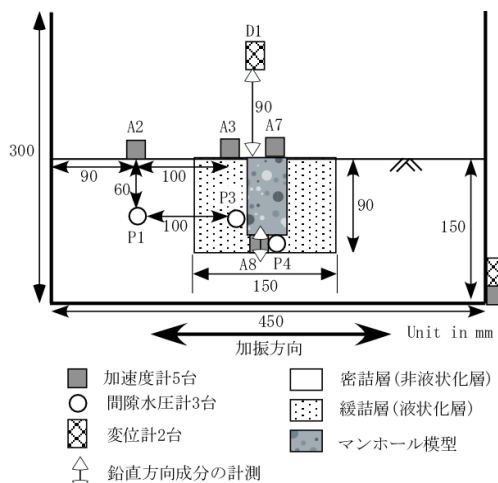
本研究で行った実験ケースを表-1に示す。入力波は全ケース周波数 25Hz (モデルスケール)の正弦波10波である。実験は、入力加速度振幅を $0.3\sim 0.8$ と変化した3種類のそれぞれに対し、マンホール模型直下の地盤条件を図-1に示すように密詰と緩詰にした2断面、延べ6ケース行った。Case1～Case3はマンホール模型直下に液状化層がない場合(本研究では密詰地盤と呼ぶ)の振動実験、Case4～Case6はマンホール模型直下に 1cm の液状化層がある場合(本研究では緩詰地盤と呼ぶ)の振動実験である。地盤の作成にはすべての実験ケースで硅砂7号を用いた。

表-1 模型実験ケース

Case	地盤条件	最大入力加速度(G)	相対密度：密詰層(%)	相対密度：緩詰層(%)
1	マンホール模型直下が密詰め	0.8	85.0	35.4
2		0.7	92.6	42.6
3		0.3	86.2	38.7
4	マンホール模型直下が緩詰め	0.8	84.4	38.4
5		0.7	87.9	37.1
6		0.3	80.9	36.3



(a)マンホール直下が締固め地盤



(b)マンホール直下地盤が緩詰め地盤

図-1 遠心模型実験断面

3. マンホール浮上りの遠心载荷模型実験結果

液状化地盤中に設置された埋設構造物の浮上りに関する遠心力载荷実験の結果の例を、写真-3に示す。同図に示すとおり、浮き上がったマンホール模型側面には、砂の付着は見られず、マンホール模型周囲の地盤の盛り上がりなどもなく、浮上りの形態は、概ね地震後に原位置で観察されたマンホールの浮上りの形態と同様であった。

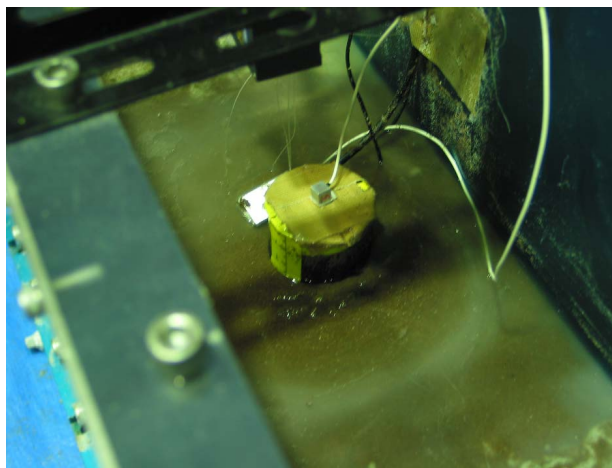


写真-3 加振後のマンホール模型の浮上りの状況 (Case-4)

加振中の地盤加速度およびマンホールの浮上量の時刻歴の例を図-2に、また、これに対応する過剰間隙水圧の時刻歴を図-3に示す。マンホール周囲の地盤は埋戻しの条件を考慮して揺詰めとし、その他の地盤は密な地盤として、地盤模型を作成しているが、密な地盤においては、加振後に一旦間隙水圧が負圧を見せるように挙動しているのが、興味深い。

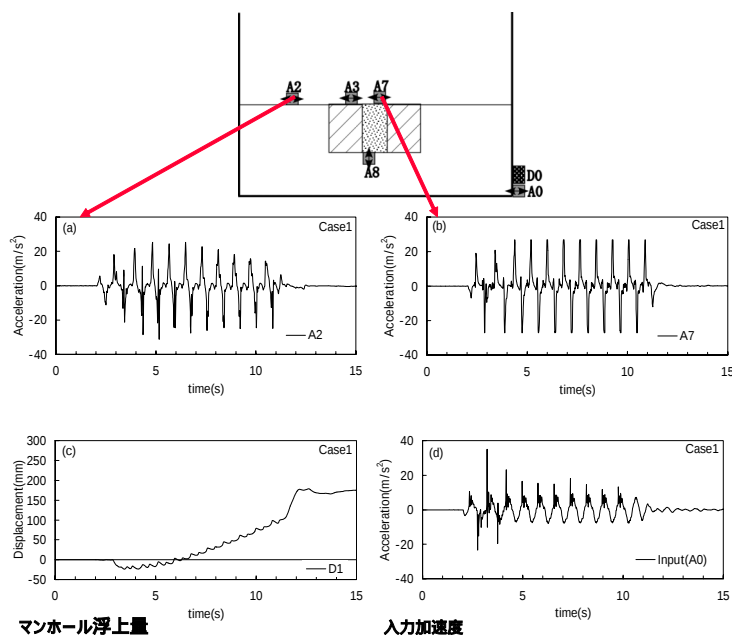


図-2 地盤各部の加速度とマンホールの浮上量の時刻歴 (Case-1)

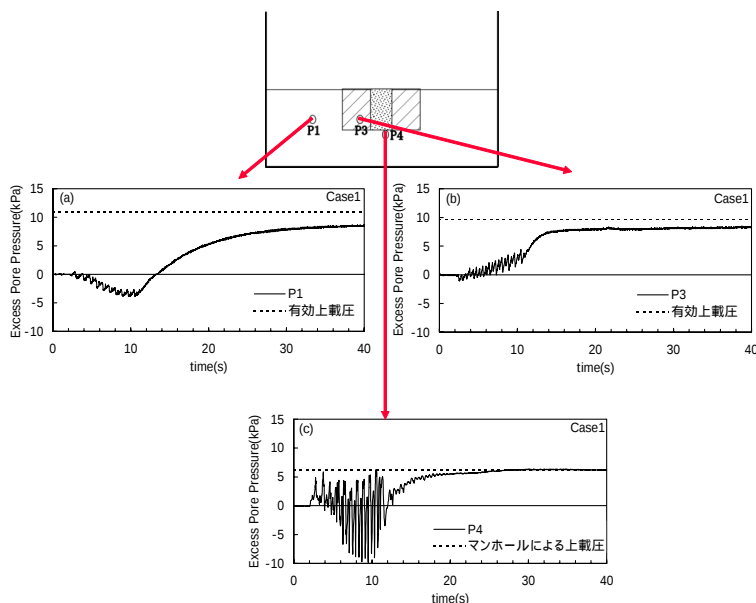


図-3 マンホール浮上り実験における過剰間隙水圧の時刻歴(Case-1)

マンホールの浮上量を，加振加速度と地盤条件に応じてとりまとめたものを図-4に示す．マンホールの浮上量は，入力加速度の大きさにかかわらず，マンホール直下の地盤が緩詰地盤のほうが密詰地盤の場合よりも大きく，約1.4倍から約2.0倍になっている．

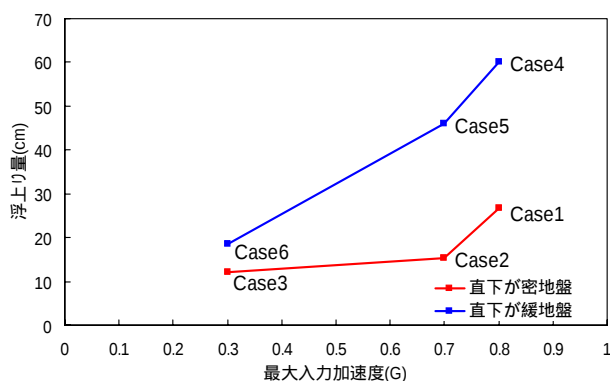


図-4 最大入力加速度とマンホールの最終浮上量の関係

埋設構造物の浮上りの簡易判定では，現行規準類などで，浮力と自重の力のバランスに基づく，浮上り安全率を用いる方法が示されている．今回の模型実験においては，過剰間隙水圧も測定されていることから，このような簡易的な安全率の算定がどの程度適用性を有するかについて，図-5に示すような力のバランスに基づいて検討した．この力のバランスを，定式化すれば，式(1)～(6)のとおりとなる．

$$F = (W_b + Q_b) / (U_s + U_d) \quad (1)$$

$$Q_b = \mu \cdot N' \quad (2)$$

$$N' = K_0 \cdot L \cdot (1 - R_u) \cdot \left(\int \gamma_{sub} \cdot z \, dz \right) \quad (3)$$

$$K_0 = (1 - \sin \Phi') \cdot (1 - R_u) + R_u \quad (4)$$

$$U_s = \gamma_w \cdot V \quad (5)$$

$$U_d = R_u' \cdot \sigma_v' \cdot A \quad (6)$$

ここに，

F ：浮上り安全率

W_b ：マンホールの自重

Q_b ：マンホール側面の摩擦抵抗

U_s ：マンホール底面に作用する静水圧による揚圧力

U_d ：マンホール底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力

μ ：マンホール側面と砂地盤との摩擦係数

N' ：マンホール側面に働く静止土圧合力

K_0 ：静止土圧係数

L ：マンホール底面の周長

γ_{sub} ：緩詰地盤の水中単位体積重量

R_u ：マンホール周囲の緩詰層における過剰間隙水圧比

R_u' ：マンホール直下の地盤における過剰間隙水圧比

Φ' ：砂の内部摩擦角

γ_w ：水の単位体積重量

V ：マンホールの体積

σ_v' ：マンホールによる上載圧

A ：マンホールの底面積

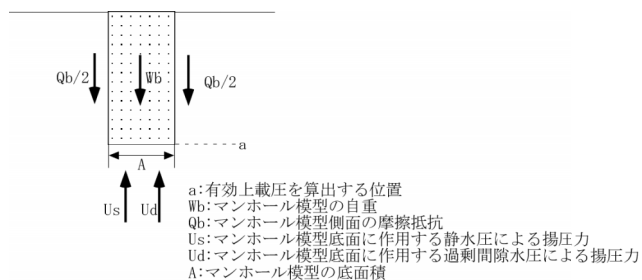


図-5 マンホールに作用する力の概念図

式(2)に示すように Q_b は， N' に μ をかけることにより求めた．また，式(4)に示すように K_0 に関しては， $R_u=0$ のとき $K_0 = 1 - \sin \Phi'$ ， $R_u=1$ のとき $K_0 = 1$ となることから， K_0 を R_u の一次関数と近似的にみなした．その他の諸定数は，表-2に示すとおりである．

表-2 浮上り安全率の算出に使用した基本データ

W_b (マンホールの重量)	3.15	kN
U_s (静水圧による揚圧力)	7.87	kN
μ (マンホール側面と砂との摩擦係数)	0.27 (= $\tan 15^\circ$)	
L (マンホールの周長)	2.51	m
Φ' (砂の内部摩擦角)	33	°
V (マンホールの体積)	0.80	m ³
A (マンホールの底面積)	0.50	m ²
σ_v' (マンホールによる上載圧)	6.27	kN/m ²

浮上り安全率は，加振中の過剰間隙水圧の平均的な値をもとに算定したもの（図-6）および加振直後の過剰間隙水圧の値をもとに算定したもの（図-7）の2種類を求めた．直下が密詰層であるCase1～Case3は，浮上り安全率がほぼ0.7程度，浮上り量がほぼ20cm程度である．これに対し，直下が緩詰層であるCase4～Case6は，浮上り安全率が約0.6～約

0.8, 浮上り量が20cmから60cmとばらつきがある。

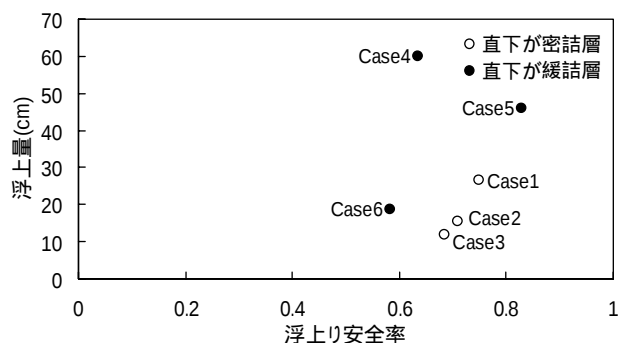


図-6 加振中の過剰間隙水圧を用いて算定した浮上り安全率

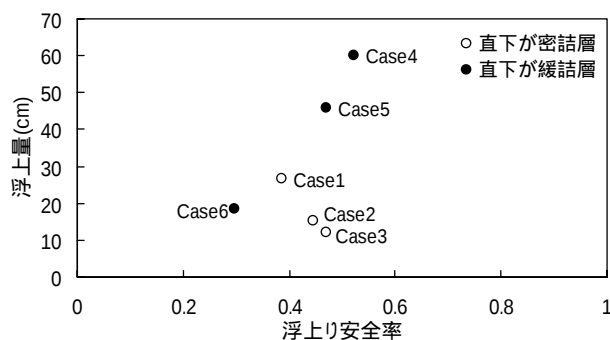


図-7 加振直後の過剰間隙水圧を用いて算定した浮上り安全率

この傾向は加振終了後で見た時も同じである。したがって、どちらの図においても両者の間に強い相関は見られない。加振中、加振後どちらの場合にも共

通していたのは、Case6が一番浮上り安全率が低かったことである。もし、浮上り安全率が低いほど浮上り量が大きいと考えれば、Case6において最もマンホールが浮き上がらなければならない。しかし、Case6のマンホールの浮上り量は20cm程度であり、Case6よりも浮上り安全率の大きいCase4に比べてはるかに小さい。よって、マンホールの浮上り量を定量的に評価するには浮上り安全率だけでは不十分であり、マンホール底部への土の回り込みの影響なども考慮に入れなければならないと考えられる。

4. 結論

液状化地盤中に設置された埋設構造物の浮上りに関する遠心模型実験により、マンホール模型浮上りの際に測定した過剰間隙水圧の値を基に、現行設計基準類などに示されている簡易法による浮上り安全率を算定したところ、この安全率と浮上りの挙動とは整合しない結果となり、有限要素解析などによる変形解析の重要性が改めて確認される結果となった。

謝辞：本研究は、文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」（大大特）の一環として実施したものである。

(2005. 6. 14 受付)

CENTRIFUGE MODEL TESTS OF UPLIFT BEHAVIOR OF MANHOLE IN LIQUEFIABLE DEPOSIT

Susumu Iai, Tetsuo Tobita, and Junichiro Imai

The paper reports a series of centrifuge model tests on uplift behavior of manhole in liquefiable deposit. A total of six cases of model tests are reported where density of the model deposit and intensity of input accelerations are varied. Measured excess pore water pressures around the manhole model are used for computing safety factor against the threshold level for uplift. The computed safety factor and the degree of measured uplift are not consistent with each other, implying that deformation analysis such as through finite element method may be important to evaluate the degree of uplift of manhole in liquefiable deposit.