

地震によるマンホールの最大浮上量の推定法

京都大学防災研究所 正会員 ○飛田 哲男  
 京都大学防災研究所 正会員 井合 進  
 京都大学大学院社会基盤工学専攻 姜 基天  
 (株) 日水コン 原園 照二  
 (株) 日水コン 小西 康彦

1. 目的

大地震時にマンホールの浮上りが生じた事例は数多く報告されている<sup>例え</sup>ば<sup>1, 2)</sup>。本研究では、マンホールの浮上り体積と埋戻し土の沈下体積とが等体積であるという条件下で力のつりあい式を解く事により、マンホールの最大浮上り量と埋戻し土の最大沈下量の推定式を導出する。また、その適用性を遠心模型実験結果により確認する。

2. マンホールの最大浮上量の推定式

大地震時にマンホールが浮上する第一義的な要因は、埋戻し土の液状化である。液状化による過剰間隙水圧の上昇によりマンホール底面に作用する上向きの力が、マンホールの自重、側面に作用する摩擦力および下水管接続部の抵抗力の合力を上回ったとき、浮上りが生じる。ただし、いったん浮上がった後沈まないためには、マンホール直下に埋戻し土が回り込まなければならない。したがって、浮上りの過程が非排水条件だと仮定すれば、マンホール直下に回り込んだ土の体積分、すなわち浮上したマンホール本体の体積分の沈下が埋戻し領域に発生すると考えてよい。ここでは、上で述べた力のつりあい式を、マンホールの浮上り体積と埋戻し土の沈下体積が等しいという条件下で解くことにより、マンホールの最大浮上り量と埋戻し土の最大沈下量の推定式を導出する。これにあたり以下を仮定する。①浮上りの過程は非排水(体積不変)とする。②周辺地盤は一様に沈下する。③マンホールは傾斜することなく鉛直にのみ移動する。④地下水面以浅の非液状化層厚は不変とする。⑤簡略化のためマンホールに接続する埋設管は無視する。

最大浮上量の推定式を導出するに当たり、図-1に示すように、1辺の長さが  $a$  の正方形の掘削範囲の中に、鉛直長さ  $h$  のマンホールを考える。ここで、掘削深さはマンホールの長さ  $h$  よりも大きいとする。マンホールの直径は  $c$  で、単純化のため上下面を閉じた中空円柱とする。また、地表面からの地下水水位深さを  $d$  とする。先に述べたように、マンホールの浮上り体積とその直下に回り込んだ土の体積とを等値すれば、

$$\pi \left(\frac{c}{2}\right)^2 \Delta f = \left\{ a^2 - \pi \left(\frac{c}{2}\right)^2 \right\} \Delta s \quad (1)$$

を得る。ここで、マンホールの浮上り変位量を  $\Delta f$ 、埋戻し土の沈下変位量を  $\Delta s$  とする。式(1)を  $\Delta f$  について整理すれば、

$$\Delta f = \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\frac{2a}{c}\right)^2 - 1 \right\} \Delta s \quad (2)$$

次に、浮上りが発生する瞬間のマンホール底面での力のつりあいを考えると、図-1に示すように、マンホールの自重による力  $F_d$  とマンホール周面に作用する摩擦力  $F_s$  とが、浮上力  $F_u$  とつりあっているので、

$$F_d + F_s = F_u \quad (3)$$

ここで、式(3)の左辺を図-2に示すパラメータで書き直すと、

$$F_d + F_s = \pi \left(\frac{c}{2}\right)^2 \left\{ \gamma_m h - \gamma_w (h - d - \Delta f - \Delta s) \right\} + F_s \quad (4)$$

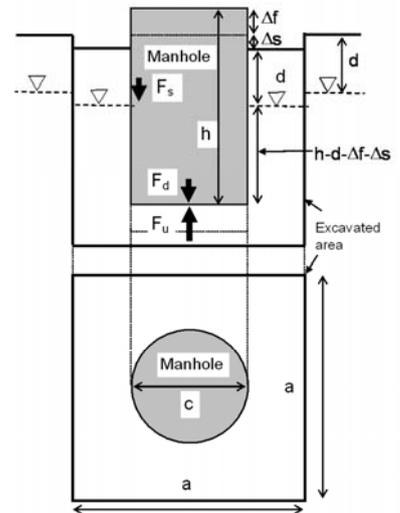


図-1 理想化されたマンホール、埋戻し土および原地盤

表-1 地盤の諸元

Max. void ratio	$e_{max}$	1.19
Min. void ratio	$e_{min}$	0.710
Relative density	$D_r$	50 %
Unit weight of water	$\gamma_w$	9.8 kN/m <sup>3</sup>
Void ratio	$e$	0.95
Density	$G_s$	2.66
Degree of saturation	$S_r$	30 %
Unit weight of wet sand	$\gamma_t$	14.8 kN/m <sup>3</sup>
Unit weight of saturated sand	$\gamma_{sat}$	18.1 kN/m <sup>3</sup>
Unit weight of submerged sand	$\gamma'$	8.3 kN/m <sup>3</sup>

表-2 マンホールの諸元

Aluminum	Unit weight	$\gamma_s$	26.5 kN/m <sup>3</sup>
	Length	$h$	3.0 m
	Diameter	$c$	1.1 m
	Wall thickness	$t$	0.1 m
Manhole	Mass of sensors	$m$	68 kg
	Mass of base slab		1.7 kN
	Total weight		27.3 kN
	Volume		2.86 m <sup>3</sup>
	Unit weight	$\gamma_m$	9.57 kN/m <sup>3</sup>
Excavation width	$a$		2.0 m
Ground water depth	$d$		1.0 m
Factor of safety against liquefaction	$F_L$		1.0
Excess pore water pressure ratio	$\beta$		1.0
Friction angle b/w concrete and soil	$\delta$		10 deg
Coefficient of lateral earth pressure	$K$		0.5

キーワード マンホール, 浮上り, 液状化, 地震  
 連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所

ここで、 $\gamma_m$ はマンホールの単位体積重量、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量である。また、地下水位以浅についてのみ側面摩擦力が生じるものと仮定すれば、 $F_s$ は、

$$F_s = 2\pi \frac{c}{2} dK\sigma_v' \tan \delta = \pi cdK\sigma_v' \tan \delta \quad (5)$$

となる。ただし、 $K$ は側方土圧係数、 $\sigma_v'$ は鉛直有効応力、 $\delta$ はマンホール側面と土の摩擦角である。

また、液状化による過剰間隙水圧  $u$  によりマンホール底面に作用する鉛直上向きの力は、

$$F_u = \pi \left( \frac{c}{2} \right)^2 (\gamma_l d + \beta \sigma_v') = \pi \left( \frac{c}{2} \right)^2 \{ \gamma_l d + \beta \gamma' (h - d - \Delta f - \Delta s) \} \quad (6)$$

ここで、 $\gamma_l$ は地下水位以浅の非液状化土層の単位体積重量、 $\gamma'$ は液状化土層の水中単位体積重量 ( $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ )、 $\beta$ は過剰間隙水圧比である。ここで、式(4)と式(6)を式(3)に代入し、 $\Delta s$  について解くと、

$$\Delta s = \left( 1 - \frac{\gamma_m}{\beta \gamma' + \gamma_w} \right) h - \left( 1 - \frac{\gamma_l}{\beta \gamma' + \gamma_w} \right) d - \frac{F_s}{\pi(\beta \gamma' + \gamma_w)} \left( \frac{2}{c} \right)^2 - \Delta f \quad (7)$$

を得る。さらに、式(7)を式(2)に代入し、 $\Delta f$ について解くとマンホールの最大浮上がり量の推定式として、

$$\Delta f = \left\{ 1 - \pi \left( \frac{c}{2a} \right)^2 \right\} \left\{ \left( 1 - \frac{\gamma_m}{\beta \gamma' + \gamma_w} \right) h - \left( 1 - \frac{\gamma_l}{\beta \gamma' + \gamma_w} \right) d - \frac{F_s}{\pi(\beta \gamma' + \gamma_w)} \left( \frac{2}{c} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

を得る。また、式(8)を式(7)に代入し整理すると、埋戻し土の最大沈下量推定式として次式を得る。

$$\Delta s = \pi \left( \frac{c}{2a} \right)^2 \left[ \left\{ 1 - \frac{\gamma_m}{\beta \gamma' + \gamma_w} \right\} h - \left\{ 1 - \frac{\gamma_l}{\beta \gamma' + \gamma_w} \right\} d \right] - \frac{F_s}{a^2(\beta \gamma' + \gamma_w)} \quad (9)$$

図-2 は、表-1 と表-2 に示すパラメータを式(8)に代入して、マンホール長さ  $h$  で正規化した浮上がり量と地下水位深さ  $d$  の関係である。同図(a)は側面摩擦を考慮しない場合、同図(b)は考慮した場合である。また、同図中には埋戻し土の単位体積重量を変化させたときの曲線もあわせて示す。

3. 遠心模型実験による推定式の検証

遠心模型実験は  $d/h = 0.0$  の場合1ケースと  $d/h = 0.33$  の場合6ケースについて行った。先と同様、表-1 と表-2 に示すパラメータを式(8)と式(9)に代入し、 $d/h = 0.0$  と  $0.33$  に対しプロットした図が図-3 である。ただし、ここでは浮上を正に、沈下を負にとっている。また、地下水位面より上方については、マンホール側面と土との間に摩擦を考慮している。同図より、実験で得られた浮上量と沈下量は、両者共に提案法で規定される最大値の範囲内に収まっていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、これまでに明らかになった浮上がりの発生メカニズムを基に、浮上がりが生じた後の力のつりあい式を解く事により、マンホールの最大浮上量と埋戻し土の最大沈下量の推定式を導出した。これにより、埋戻し土の単位体積重量、地下水位、掘削幅の影響等を定量的に考察することができることを示した。また、埋戻し土の液状化安全率と過剰間隙水圧比との関係を用い、液状化安全率に対する最大浮上がり量を推定することができることを示した。今後、浮上がり対策工の有効性などを検討するに当たり、その有効性を  $F_L$  値に換算できる場合には、本提案手法を活用することができる。

参考文献

- 1)安田進・規矩大義: 下水道施設の被害, 平成16年新潟県中越地震被害調査報告会 梗概集, pp. 131-135, 2004.
- 2)地盤工学会: 液状化による地中埋設構造物の浮上り被害に関する研究報告会資料, p115, 2003.

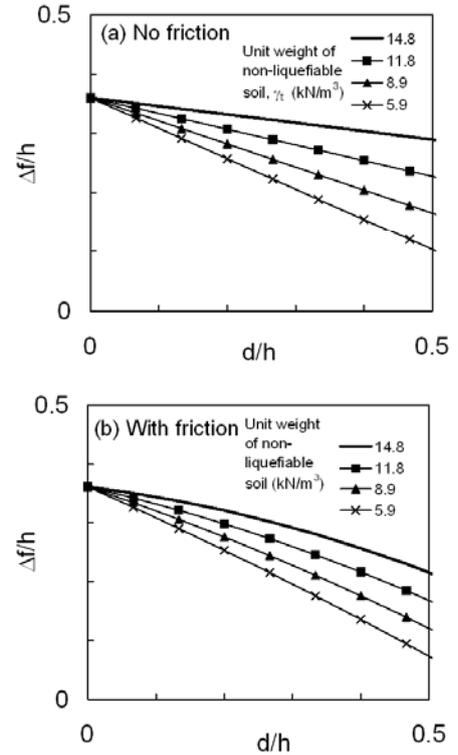


図-2 マンホール高さ  $h$  で正規化した地下水位深さと最大浮上がり量との関係: (a) 周面摩擦を考慮しない場合, (b) 周面摩擦を考慮した場合

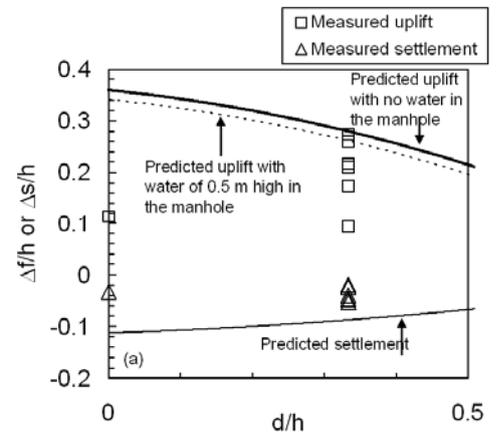


図-3 実験結果と提案法により予測される最大浮上がり量と最大沈下量: 浸水によるマンホール重量の増加を考慮した場合を点線で示す