

下水道用マンホールの地震対策の開発 ～浮上抑制対策と管口の可とう性確保～

小西 康彦¹・飛田 哲男²・高橋 和雄³・竹内 幹雄⁴

¹正会員 (株) 日水コン 東京下水道本部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

E-mail:konisi_y@nissuicon.co.jp

²正会員 京都大学防災研究所 助教 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

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

³正会員 長崎大学社会開発工学科 教授 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

E-mail:takahasi@civil.nagasaki-u.ac.jp

⁴正会員 (株) 日水コン 東京下水道本部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

E-mail:takeuti_m@nissuicon.co.jp

2004年新潟県中越地震ではマンホールの浮上が1,400箇所以上も発生し、長期間にわたって下水道機能が麻痺して住民に過度のストレスを感じさせる結果となった。筆者らは、マンホールの浮上を抑制する装置の開発に着手し、世界最大規模の液状化実験に参加して、浮上抑制効果を実証した。この装置を新設・既設の両方に利用できることを目指し、特に既設マンホールへの適用を視野に、液状化時におけるマンホール浮上のメカニズムの解明、最大浮上量の推定、既設マンホールの開口方法、開口時の地山崩壊防止手法、起振によるマンホール周辺の締め固め方法など設計法から施工法までの一連の手法の確立を目指して開発を進めている。本論ではこれまでの開発で確認された事項と今後の実証実験の予定について報告する。

Key Words : manhole, liquefaction, earthquake, drain, filtration device

1. はじめに

わが国の全国平均の下水道普及率は昭和40年度(1965年)の8%から右肩上がりに上昇を続け、平成18年度(2006年)には71%となり、中・大都市ではほぼ100%を達成している状況となっている。一方、地震による管路施設の被害状況は、1964年の新潟地震時に管路延長25km程度が被災を受けている¹⁾ものの全国平均の下水道普及率8%の時代であり、特に下水道施設の被害が注目されることはなかった。

下水道施設の被害が全国的に注目されだしたのは、全国平均の下水道普及率がほぼ50%を達成した1993年釧路沖地震以降であろう。この地震で、釧路市では管路の総延長948kmのうち2.2kmに液状化によると見られる被害が発生したため布設替えとなり、また450箇所のマンホールに被害が発生した。¹⁾

兵庫県南部地震が発生した1995年は全国平均の下水

道普及率が54%であるが、地震被害が最も大きかった神戸市はほぼ普及率100%であったため、下水道施設への被害が拡大した。神戸市は、管路総延長3,800kmのうち約60kmに被害を受け、マンホールは3,000箇所被害が発生した¹⁾。そのため、長期間に渡ってトイレの使用が制限されるなど、市民生活に多大の影響を与えた。この地震では、液状化によると見られる管路施設の被害よりも、地震時の構造体の挙動の違いによる被害が多く発生していることに特徴がある。

その後、2003年の宮城北部地震や十勝沖地震において、埋戻し土の液状化によるとされる管路やマンホールの被害が発生して全国的に注目を集め、2004年新潟県中越地震においても同様に埋戻し土の液状化により管路総延長3,300kmの実に4.6%に被害が発生した。2007年に発生した能登半島地震や新潟県中越沖地震においても同様の被害が発生しており、今や埋戻し土の液状化による下水道管路施設の被害は、下水道整備が全国に拡大し

て下水道普及率が上昇していくに従って拡大の一途をたどっている。

筆者らは、下水道管路施設の被害のうち、最も被害が大きいと思われる埋戻し土の液状化によるマンホールの浮上及びマンホールと本管の接続部の破損に注目し、その対策について研究開発を行い、その効果について良好な結果を得たのでここに報告する。

2. これまでの地震によるマンホールの浮上被害

マンホールの浮上が全国紙で紹介され、話題となって問題視されたのは 1993 年釧路沖地震以降と考えられる。釧路沖地震では、450 箇所のマンホールに被害が発生した¹⁾。1994 年北海道東方沖地震でもマンホール浮上が報告されている。一方、兵庫県南部地震におけるマンホール被害は、マンホールブロックや蓋が水平方向にずれているものが大多数であり、マンホールの浮上は少ない。

兵庫県南部地震以降、下水道管路施設におけるマンホールの浮上が非常に顕著となっている。2003 年十勝沖地震では 230 箇所のマンホール浮上が発生している¹⁾。2004 年新潟県中越地震では 2,719 箇所のマンホールが被災したが、そのうち 1,453 箇所のマンホールが浮上した²⁾。2007 年能登半島地震では 147 箇所、2007 年新潟県中越沖地震では 463 箇所のマンホール浮上が報告³⁾されている。

このように、近年の大地震による下水道管路施設の被害はマンホールの浮上が特徴的である。代表的な地震時におけるマンホール浮上の事例写真を写真-2.1～写真-2.4 に示す。



写真-2.1 1993 年釧路沖地震⁴⁾



写真-2.2 2003 年十勝沖地震



写真-2.3 2004 年中越地震



写真-2.4 2007 年能登半島地震

3. マンホール浮上の原因

マンホール隆起と道路面沈下の原因と指摘されているのが、周辺地盤が液状化の恐れのない地盤における埋戻し土の液状化である。周辺地盤が液状化を起こすような地盤であれば、埋戻し部に液状化が集中することはなく管路の被害は比較的小さい。1993 年釧路沖地震や 2004 年中越地震で被害が発生した箇所は、周辺地盤が透水性の悪い、かつ軟弱な地盤等に開削で下水管を埋設し、砂で埋戻しを行い、しかも締め固めが不十分なケースが多かった。2007 年能登半島地震でも、周辺地盤が砂質シルトや砂混じり粘土、粘土質シルト等の軟弱な地盤において砂による埋め戻しを行った箇所においてマンホール浮上が顕著であった。2007 年新潟県中越沖地震においても同様に、扇状地で周辺地盤が軟弱な粘性土地盤において埋め戻しに購入砂を使用している箇所にマンホール浮上の被害が多かった。また、いずれも地下水位は比較的高い位置であった。

液状化によるマンホールや管渠の浮上のメカニズムを図-3.1 に示す。地震によりマンホール周辺の地盤が液状化を起こすと、マンホール側壁と地盤との摩擦抵抗が減少するとともに過剰間隙水圧の作用によりマンホール底部に揚圧力が発生し、マンホールが浮上する。そのとき、マンホールの底部に負圧が発生し周りの砂が負圧を埋めようと底部に回りこんでくる。このような挙動が連続して発生して、荷重のバランスが釣り合うまでマンホールは浮上する。

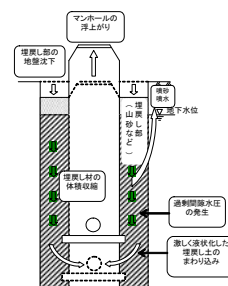


図-3.1 管路施設被害のメカニズム⁵⁾

4. 装置の概要

(1) 過剰間隙水圧の解消

マンホールが浮上する直接的な原因である過剰間隙水圧の解消を目的に、ろ過器と誘導管で構成した浮上抑制装置を開発した。浮上を抑制するメカニズムとしては、常時においては図-4.1 に示すように、誘導管を周辺地盤の地下水位より上まで立ち上げておき、地震時には図-4.2 に示すように、過剰間隙水圧が上昇するにしたがつてろ過器に地下水が浸入して誘導管を通じてマンホール内に排出される仕組みである。ろ過器には下水汚泥

焼却灰を固めたろ過材を充填させて砂のマンホール内への流出を抑制する。図-4.3 に装置の平面図，図-4.4 に装置の断面図，写真-4.1 に装置内観，写真-4.2 にろ過器外観を示す。

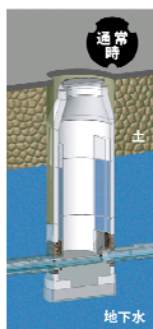


図-4.1 常時

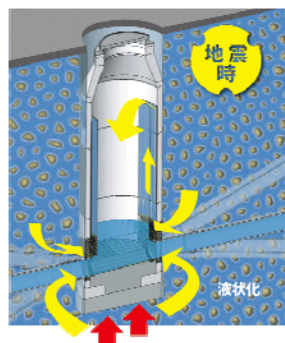


図-4.2 地震時

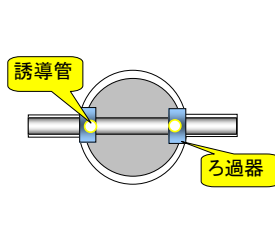


図-4.3 装置の平面図

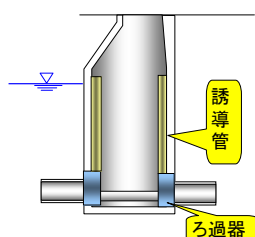


図-4.4 装置の断面図



写真-4.1 装置内観



写真-4.2 ろ過器外観

(2) 管口の可とう性

管口の可とう性を確保するための工夫として、図-4.5 に示すように受口の奥の部分が拡径され本管の先端部分の動きを拘束しない構造とした。

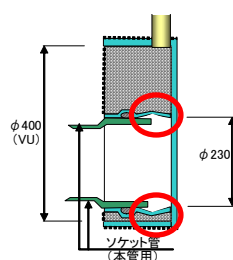


図-4.5 管口の可とう性確保

(3) 起振による締め固め効果

地震発生直後、開発した装置が所定の機能を発揮するまでには多少のタイムラグが予想される。このタイムラグによる初期浮上の防止と、液状化時にもマンホール周囲の地盤との摩擦力に期待して浮上を抑制する目的で、起振機によりマンホール全体を強制的に振動させ、マンホール壁面の極近傍の地盤を液状化させて過剰間隙水圧

を開発した装置で吸収する方法を併用する。イメージ図を図-4.6に示す。

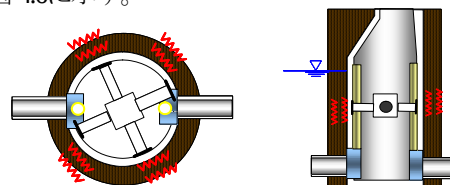


図-4.6 起振時イメージ図

5. 水理実験

(1) 目的

開発した装置は、液状化時の過剰間隙水圧を消散させる機能を持つが、下水道用マンホールとしての機能を損なうことなくその機能を発揮させる必要がある。そのため、液状化時の泥水から砂をろ過するフィルター機能を把握する目的で水理実験を行った。

(2) 実験装置とケース

実験装置を図-5.1 に示す。液状化時の過剰間隙水圧を再現するため、常時の水頭差 2.1m に対して 3.8m ($2.1\text{m} \times 1.8\text{ t/m}^3$) の水頭差を設けている。前胴部（装置 a）を周辺地盤とし、後胴部（装置 b）をマンホールに設置したろ過器、流出管を誘導管と想定している。装置 a には埋戻し土として砂を、ろ過器にはろ過材として下水汚泥焼却灰を低強度で固めた骨材（メサライト）を充填する。高架水槽（50cm×50cm×71.5cm）に水を溜め、バルブ a を開放して装置 a に過剰間隙水圧を作用させ、ネット及びメサライトによる砂のろ過機能とろ過できずに流出した砂の量を計測した。実験装置の外観を写真-

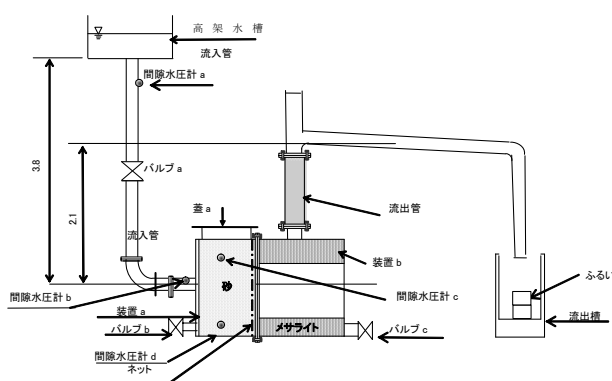


図-5.1 水理実験装置



写真-5.1 実験装置外観

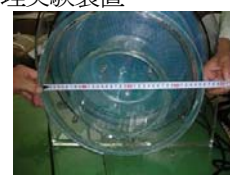


写真-5.2 ろ過器モデル

表-5.1 実験ケースとその条件

ケース	ろ過器径 (mm)	砂の層厚 (mm)	砂の種類	砂の締固め	フィルター材		流入管形状
					ネット(mm)	メサライト	
1	350	500	豊浦砂	ゆるい	1.8	粗骨材	直管
2	350	500	セメント用砂	ゆるい	1.8	粗骨材	直管
3	350	500	セメント用砂	水締め	1.8	粗骨材	直管
4	300	500	セメント用砂	水締め	3.0	粗骨材	直管
5	350	500	セメント用砂	水締め	3.0	粗骨材	直管
6	400	500	セメント用砂	水締め	3.0	粗骨材	直管
7	350	500	セメント用砂	水締め	3.0	粗骨材	直管
8	350	200	セメント用砂	水締め	3.9	粗骨材	直管
9	350	200	セメント用砂	水締め	6.4	粗骨材	直管
10	350	200	セメント用砂	水締め	3.0	粗骨材	直管
11	350	200	豊浦砂	水締め	1.0	粗骨材	オリフィス

表-5.2 各ケースにおける砂の移動量

ケース	砂の種類	砂の締固め	フィルター材		ろ過器径 mm	装置aの 砂重量 kg	砂の移動量			
			メサライトの 種類	ネット mm			メサライト部 kg	流出槽部 kg	計 kg	移動率 %
1	豊浦砂	ゆるい	粗骨材	1.8	350	112.5	2.65	32.55	35.2	31.3
2	セメント用砂	ゆるい	粗骨材	1.8	350	103.4	0	0	0	0
3	セメント用砂	水締め	粗骨材	1.8	350	105.3	0	0	0	0
4	セメント用砂	水締め	粗骨材	3.0	300	109.2	0	0	0	0
5	セメント用砂	水締め	粗骨材	3.0	350	109.2	0	0	0	0
6	セメント用砂	水締め	粗骨材	3.0	400	109.2	0	0	0	0
7	セメント用砂	水締め	粗骨材	3.0	350	116.6	0	0	0	0
8	セメント用砂	水締め	粗骨材	3.9	350	116.6	1.55	0	1.55	1.3
9	セメント用砂	水締め	粗骨材	6.4	350	116.6	0.75	0	0.75	0.6
10	セメント用砂	水締め	粗骨材	3.0	350	102.7	0	0	0	0
11	豊浦砂	水締め	粗骨材	1.0	350	112.3	6.4	19.15	25.55	22.8

5.1 に、装置 b を写真-5.2 に示す。また、実験ケースとその条件を表-5.1 に示す。

(3) 実験結果

各ケースにおける砂の移動量（ネットを通過した量）を表-5.2 に示す。豊浦砂を使用したケース 1 及び 11 ではそれぞれ 31.3%、22.8%がネットを通過し、7.5%、25%がろ過材に捕捉された。ケース 11 の移動率が少ないのは砂の締固め程度の違いが大きく影響しているものと推察される。豊浦砂を用いた場合のネットは 1mm 以上では効果は小さいことがわかる。

セメント用砂を用いたケースでは、ネット 3.0mm までは砂の移動がなく、それ以上になるとネットより砂が流出するもののろ過材により全て捕捉される結果となった。

(4) 考察

フィルターに関する一般的な式として、式(5a)に示すテルツァギーの式がある。

$$F_{15}/B_{15} > K, F_{15}/B_{85} < K \quad (5a)$$

ここに、 B_i ：コア材料の i % 粒径、 F_i ：フィルター材料の i % 粒径、 K ：テルツァギー定数 (=4)

式(5a)より、ネットをフィルターとして使用する場合の目幅は式(5b)により求められる。

$$4B_{15} < F_{15} < 4B_{85} \quad (5b)$$

また、メサライトをフィルター材として使用できる砂の粒径は式(5c)により求められる。

$$B_{15} < F_{15}/4, B_{85} > F_{15}/4 \quad (5c)$$

表-5.2 の実験結果と表-5.3 を用いた式(5a)、(5b)、(5c)による算出結果を比較して、式の有効性を評価すると以下の通りとなる。

① 豊浦砂

式(5b)より、 $0.5\text{mm} < F < 0.9\text{mm}$ となり、対象とする豊浦砂のフィルター機能としては 0.9mm 以下のネットを使用する必要があるが、実験では 1mm ネットを使用したため 31.3%の砂の移動率となりフィルター機能を満足せず、式の有用性が証明される結果となった。

② セメント用砂

式(5b)より、 $0.92\text{mm} < F < 7.6\text{mm}$ となり、対象とするセメント用砂のフィルター機能としては 1mm 以上 7mm 以下のネットを使用する必要があるが、実験では 1.8mm から 6.4mm のネットを使用してほぼフィルター機能を満足する結果となっており、式の有用性が確認された。

③ メサライト

式(5c)より、 $F = 1.4\text{mm}$ となり、 1.4mm 以上の砂のフィルター材として有用と判断される。

以上より、本工法におけるネット目幅及びメサライト

によるフィルター機能は式(5a)により表現できることがわかった。

表-5.3 砂とろ過材の粒径

砂の種類	15%粒径 (mm)	20%粒径 (mm)	85%粒径 (mm)
豊浦砂	0.125	0.13	0.225
セメント用砂	0.23	0.28	1.9
石狩新港砂	0.036	0.06	0.27
メサライト	5.6	6.3	14.5

6. 液状化実験における実証

(1) 実験概要

国土交通省航空局と（独）港湾空港技術研究所は平成19年10月27日、北海道石狩新港埋立地内で世界最大規模の液状化実験を実施した。この実験は、1本当たりGL-4.5mとGL-9mに2kgと4kgのダイナマイトをそれぞれ装着した発破孔約600本を、0.2秒間隔で約2分強連続して爆発させ強制的に液状化を発生させるものである。この実験に実物大の4基の1号マンホール（深さ3m）を表-6.1に示すような条件で埋設し、開発した浮上抑制装置の効果の実証を行った。

表-6.1 実験に用いたマンホールの条件

マンホール番号	ろ過器径 (mm)	本管径 (mm)	設置場所	ネットメッシュ (mm)
M1	対策なし			
M2	Φ300	Φ200	本管部2箇所	1.8×1.8
M3	Φ350	Φ200	本管部2箇所	1.0×1.0
M4	Φ200	Φ200	側部2箇所	1.8×1.8

(2) 実験結果

実験前、実験直後、実験後のそれぞれの状態を写真-6.1～写真-6.3に示す。写真-6.2は、4基のマンホールの中心部に設置した発破孔から過剰間隙水圧の上昇に伴って泥水の噴発が約5mほど上がっている状況である。実験後、マンホール周辺は写真-6.3のように泥水溜まりの状態となった。



写真-6.1 実験前 写真-6.2 実験数分後 写真-6.3 実験後

表-6.2にそれぞれのマンホールの浮上量とマンホール内の滞水水位を示す。対策のないM1が最も浮上量が多く、次にろ過器外径φ300のM2、ろ過器外径φ350のM3の順となり、最も浮上量が少なかったのはM4であった。また、滞水量はM2が最も多く、次がM3、M4の順でM1は皆無であった。

表-6.2 浮上量とマンホール内滞水水位

日時	項目	M1(ピンク)	M2(オレンジ)	M3(黄色)	M4(白)
10/27	浮上量(cm)	12.3	8.8	5.1	2.6
	滞水水位(cm)	0.0	96.5	58.5	21.5
10/30	浮上量(cm)	10.4	7.0	4.0	1.6
	滞水水位(cm)	0.0	102.5	79.5	25.0

次に、ろ過器直上と90°位置における間隙水圧計の計測結果を図-6.1に示す。ろ過器直上では間隙水圧の上昇は抑えられ、一方でろ過器による低減効果は90°位置までは及ばないことがわかる。

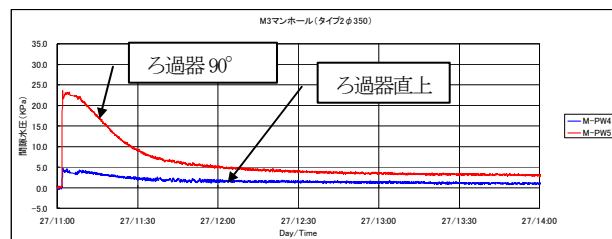


図-6.1 間隙水圧の計測結果 (M3)

(3) 考察

ろ過面積の小さいM2よりも大きいM3に浮上抑制効果が高いという結果が得られ、浮上量とろ過面積には図-6.2に示すような相関が見られ、式(6a)で表される。

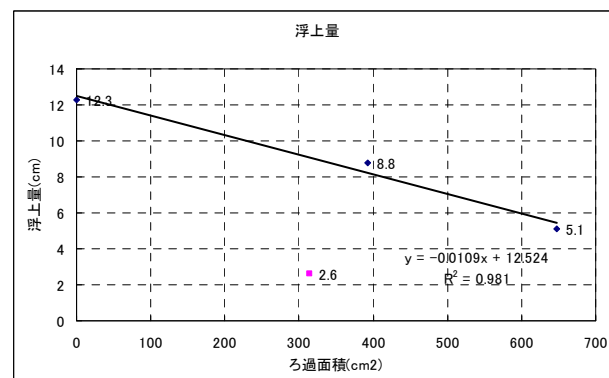


図-6.2 浮上量とろ過器面積

$$y = -0.0109 \cdot x + 12.524 \quad (6a) \\ (R^2 = 0.981)$$

また、マンホール底部に作用する過剰間隙水圧は、ろ過器の設置位置で最小となり、漸増しながら90度位置で最大となる。したがって、ろ過器による過剰間隙水圧の解消範囲は、ろ過器を設置した箇所の±45度付近まで及び、それを超えろ過器の効果はなくなると想定できる。

7. 浮上量の推定式

(1) 最大浮上量および最大沈下量の算定式

筆者らは、以下に示す仮定条件の下で、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報告⁶⁾した。

- ①浮上りの過程は非排水（埋戻し土の体積不変）とする。
- ②埋戻し土は一様に沈下する。
- 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地下水位以浅の非液状化層厚は不変とする。
- ⑤簡略化のため本管は無視し、マンホール躯体の斜壁についても無視する。

導出にあたってのモデル図を図-7.1 に、マンホールの最大浮上量 Δf の推定式を式(7a)に、埋戻し土の最大沈下量 Δs の推定式を式(7b)にそれぞれ示す。

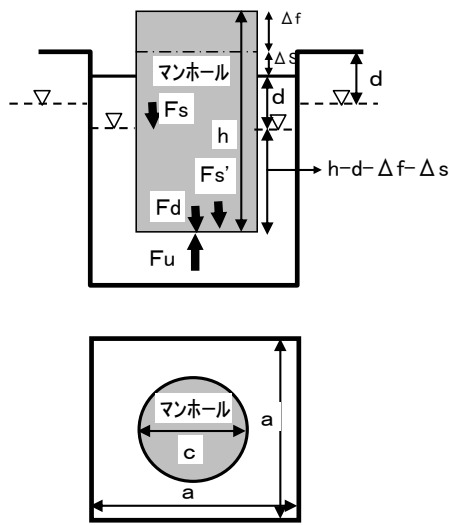


図-7.1 モデル図

$$\Delta f = \left\{ 1 - \pi \left[\frac{c}{2a} \right]^2 \right\} \times \left\{ R_1 h - R_2 d - \frac{R_3 (Fs + Fs')}{\pi} \left[\frac{2}{c} \right]^2 \right\} \quad (7a)$$

$$\Delta s = \pi \left[\frac{c}{2a} \right]^2 (R_1 h - R_2 d) - \frac{R_3 (Fs + Fs')}{a} \quad (7b)$$

ここに、 c : マンホール直径(m)

a : トレンチの幅(m)

h : マンホール深(m)

d : 地下水位 (GL-) (m)

γ_m : マンホールの単位体積重量 (kN/m^3)

γ_t : 地下水位以浅の埋戻し土の単位体積重量

($=17\text{kN/m}^3$)

γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3)

γ_{sat} : 埋戻し土の飽和単位体積重量 ($=17\text{kN/m}^3$)

γ' : 液状化土層の水中単位体積重量

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

β : 過剰間隙水圧比 ($=1$)

K : 静止土圧係数 ($=0.5$)

K' : 地震時土圧係数 ($=1.0$)

δ : 地下水位以浅の土のせん断抵抗角

δ' : 地下水位以深の土のせん断抵抗角

σ_{v1} : 地下水位以浅のマノール中央での有効上載圧 (kN/m^2)

σ_{v2} : 地下水位以深のマノール中央での有効上載圧 (kN/m^2)

F_s : 地下水位以浅の埋戻し土とマノール間の摩擦力 (kN)

F_s' : 地下水位以深の埋戻し土とマノール間の摩擦力 (kN)

$$R_1 = 1 - \frac{\gamma_m}{\beta \gamma' + \gamma_w} \quad (7c)$$

$$R_2 = 1 - \frac{\beta \cdot \gamma_t}{\beta \gamma' + \gamma_w} \quad (7d)$$

$$R_3 = \frac{1}{(\beta \gamma' + \gamma_w)} \quad (7e)$$

式(7a)及び式(7b)を用いて、1号マンホール、 $\gamma_t = 17\text{kN/m}^3$ の場合について、 d/h をパラメータとした場合の埋戻し土の最大沈下量 $\Delta s/h$ とマンホールの最大浮上量 $\Delta f/h$ を求めると、図-7.2 及び図-7.3の通りとなる。ここで、図-7.2 は地下水位以深における周面摩擦力 F_s' を考慮する場合の結果であり、一方、図-7.3は同じく F_s' を考慮しない場合の結果である。

地盤が液状化すると、その液状化の程度によってマンホールと埋戻し土との周面摩擦力 F_s' が徐々に低下し、揚圧力 F_u が鉛直荷重($F_d + F_s + F_s'$)より大きくなるとマンホールの浮上が始まる。そして、 $F_s' = 0$ で浮上量は最大となる。

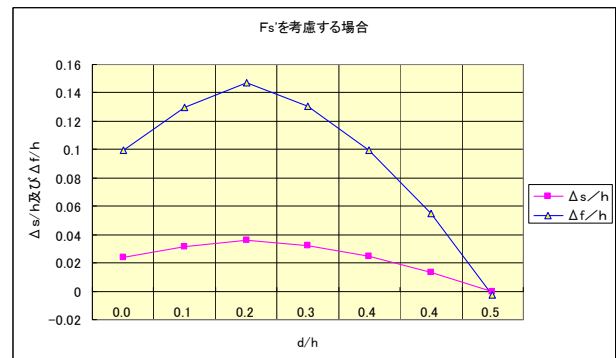


図-7.2 周面摩擦 F_s' を考慮する場合の $\Delta s/h$ と $\Delta f/h$ の例 ($\phi' = 1/3 \phi = 10^\circ$ の場合)

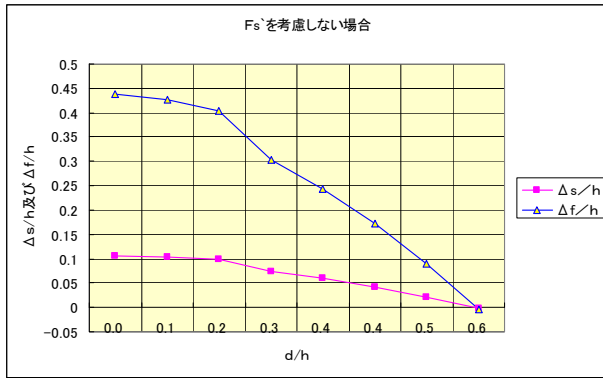


図-7.3 周面摩擦 F_s を考慮しない場合の $\Delta s/h$ と $\Delta f/h$ の例

(2) 開発した装置の効果

ろ過器による過剰間隙水圧の解消効果は、ろ過器設置箇所でも最大となり、徐々に小さくなりながら±45度付近で最小となる。ここで、この解消効果を低減係数 k で表すと、式(7a)、式(7b)、式(7c)における R_p 、 R_s 、 R_g は以下の通りとなる。ここに、 k はろ過器の効果による揚圧力の低減率で表す。 $k=0.5$ とし、 d/h をパラメーターとした場合の埋戻し土の最大沈下量 $\Delta s/h$ とマンホールの最大浮上量 $\Delta f/h$ を求めると、図-7.4の通りとなる。

$$R_1' = 1 - \frac{\gamma_m}{k \cdot \beta \cdot \gamma' + \gamma_w} \quad (7f)$$

$$R_2' = 1 - \frac{k \cdot \beta \cdot \gamma_t}{k \cdot \beta \cdot \gamma' + \gamma_w} \quad (7g)$$

$$R_3' = \frac{1}{k \cdot \beta \cdot \gamma' + \gamma_w} \quad (7h)$$

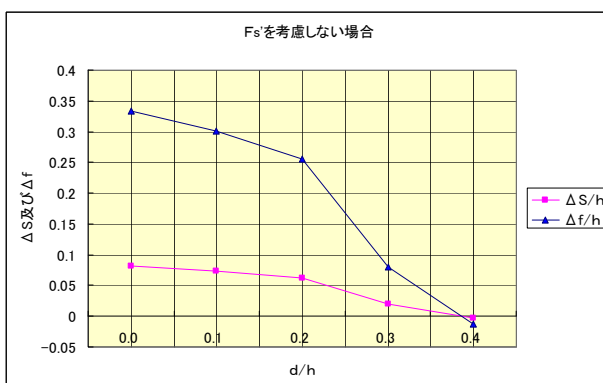


図-7.4 周面摩擦 F_s を考慮せず、間隙水圧の低減係数 $k=0.5$ とした場合の $\Delta s/h$ と $\Delta f/h$ の例

(3) 式の考察と検証

図-7.2は埋戻し土のせん断抵抗角が 30° の場合に、液状化時の壁面摩擦角が $1/3$ に低減した場合の試算結果である。図-7.2より、周面摩擦を考慮した場合の浮上量は、地下水位がマンホール深に対し2割になる状態で最大となることがわかる。つまり、マンホール深が3mの場合、地下水位がGL-0.6mで最大浮上量となる。また、埋戻し土の最大沈下量についても同様の条件となる。

図-7.3より、周面摩擦を考慮しない場合の浮上量は、地下水位が高いほど大きくなりGL-0mで最大となることがわかる。

過去の地震では、写真-2.1～写真-2.4に示したように、マンホールの浮上量は1.0～1.5mにもなっている。中越地震発生の前に豪雨により地下水位が高くなっていたこと、地震の規模が大きく埋戻し土が完全に液状化を起し周面摩擦 $F_s=0$ であったと想定し、マンホール深 $h=3m$ 、地下水位 $d=0.5m$ とすると、 $d/h=0.17$ であるから図-7.3より、

$$\Delta f/h = 0.42 \quad \Delta s/h = 0.1$$

となり、マンホールの浮上量 Δf は1.26mで写真-2.1～写真-2.4に示したように、中越地震他の被害とよく一致する。また、参考として、沈下率 $\Delta s/h$ は液状化による沈下率として新耐震指針⁷⁾に記載されている中越地震における沈下率0.075～0.1の最大値と一致する。

一方、ろ過器を設置した場合の効果として、揚圧力の低減係数 $k=0.5$ とした場合について、周面摩擦力を考慮する場合に図-7.2と同様に ϕ' を 10° とすると、浮上しないこととなる。そのため、周面摩擦力を考慮しない場合のみを図-7.4に示す。同様の条件でマンホールの浮上量を求めると、図-7.4より、

$$\Delta f/h = 0.28 \quad \Delta s/h = 0.07$$

で、マンホールの浮上量は0.84mとなり、ろ過器を設置することによる効果は0.42m分(33%)となる。つまり、ろ過器により揚圧力が半減したと仮定しても、浮上抑制効果は33%しかなく、起振によるマンホール壁面の締め固めを併用することがマンホールの浮上を抑制するためには重要となることを示している。

8. 施工法の確立

(1) 既設マンホールへの適用

本装置を既存のマンホールに適用するには、装置を取り付けるためにマンホール側壁に $\phi 450$ 程度の開口部を設ける必要がある。1号マンホールの内径は900mmと非常に狭い空間であり、この狭い空間の中で開口できるカッターを開発する必要がある。また、マンホール周辺地

盤は液状化しやすい地下水位以下の砂地盤であり、開口により地盤崩壊を起こす。地盤崩壊を防止し、しかも装置を設置した後は通水機能を保持するような方法を開発する必要がある。加えて、先に示したように装置の機能を発揮するまでのタイムラグ対策を考慮する必要がある。

(2) 狭い空間で開口できるカッターの開発

1号マンホールは地上の蓋枠部分がφ600mmであり、斜壁ブロックにより拡張してφ900mmとなる構造である。したがって、カッターはφ600mmから搬入可能で窄孔時はφ900mmの空間で施工ができることが条件となる。また、マンホール躯体には鉄筋が配置されているため、鉄筋を切断可能であることが条件となる。図-8.1に開発したカッターの人孔内配置図、写真-8.1にカッター設置状況、写真-8.2に開口状況を示す。

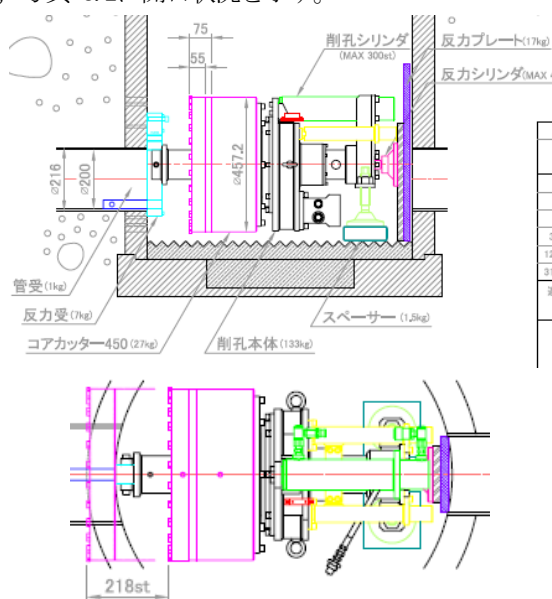


図-8.1 人孔内配置図



写真-8.1 カッター設置



写真-8.2 開口状況

(3) 簡易な凍結工法の開発

マンホール側壁の開口時における地山崩壊防止対策として、従来は薬液注入工による地盤改良が多いが、本工法は装置の設置後には透水性を確保するため地盤改良はできない。そこで、開口後装置を設置するまでの間の地山の崩壊を防止するため、地盤を-196℃の液体窒素により短時間に凍結する「簡易な凍結工法」を開発した。冷却方法としては、図-8.2に示す空気冷却方式

と図-8.3に示す貼付凍結管方式があり、現場条件に応じて選定することとなる。このうち、貼付凍結管方式について実証実験を終えてほぼ施工方法を確立している。空気冷却方式については今後、実証実験を行って確立する予定である。

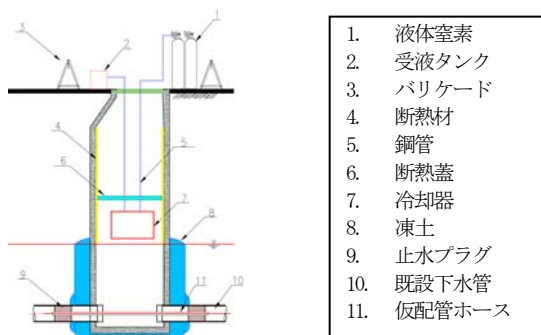


図-8.2 空気冷却方式

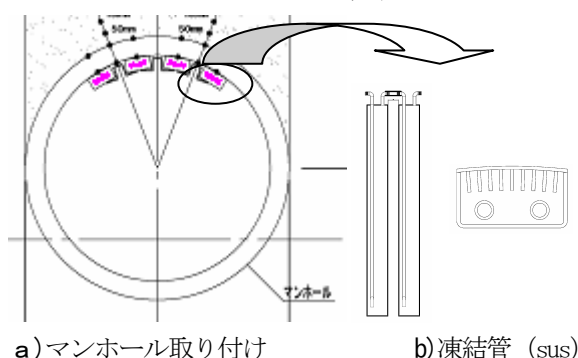


図-8.3 貼付凍結管方式

(4) マンホールの起振による締め固め

マンホール壁面と近傍地盤のせん断抵抗を強化する目的で、起振器をマンホール内に設置しマンホール全体を振動させることを目指して起振器を開発中である。今後、実物大のマンホールを使って、振動数や振幅、起振力などをパラメータとして実験を行う予定である。

9. まとめと今後の予定

(1) まとめ

地震により下水道施設に被害が発生して、下水道機能が停止しトイレの使用ができなくなるという事態は、都会に住む住民の一人としてあまり想像したくない。空気や水と同様に、当たり前で使用しているトイレは一旦水を流してしまえば後はそれがどのようにして流れていつて処理されているか、一般の住民にとってはほとんど関心はないであろう。

現在、下水道普及率は全国平均で70%を超えて、今や都会に住む住民だけのための下水道ではない。一方、地震は東海・東南海・南海・首都圏直下など何時発生して

もおかしくないと言われている状況の中で、北陸や東北、北海道等で頻繁に発生しており、全国何処で発生してもおかしくない状況である。

このような状況の中で、地震時にも下水道機能が停止することなく、最小限の機能を確保するために必要な対策を講ずる必要がある。その対策の一つとして、マンホールの浮上防止対策に着目して開発を進めており、これまでに確立した事項を以下に示す。

- ① 周辺地盤の砂に対するネット及びろ過材のフィルター機能はテルツァギーの式 (5a) で検証できる。
- ② 実物大の液状化実験において、開発した装置の浮上抑制効果を確認したが、浮上量とろ過面積には式 (6a) に示すように明らかな相関があった。
- ③ マンホールと本管接続部は装置の工夫により可とう性を確保できる。
- ④ 筆者らが示したマンホールの最大浮上量の算定式 (7a) による試算結果と、過去の地震の被害状況はよく合致する。
- ⑤ ろ過器による浮上抑制効果の試算結果では、マンホール底面に作用する揚圧力の低減率を50%と仮定した場合に浮上量を33%低減する程度しかないことがわかった。一方、起振器の効果によりマンホール壁面と近傍地盤のせん断抵抗角 ϕ' を 10° ($1/3 \phi$) とすると浮上は発生しないこととなり、起振器による効果は非常に大きいことがわかった。
- ⑥ 既設マンホールに対する施工法の確立として、マンホール内部からの開口用カッターの開発、地山崩壊防止対策の簡易凍結工法の確立、及びマンホール近傍地盤を締め固める起振器の開発を進めており、ほぼ確立の目処が立った。

(2) 今後の予定

今後、(独) 港湾空港技術研究所との共同研究により、実物大の1号マンホールを使用した起振実験及び浮上抑制効果の実証実験を大型振動台を使用して行う予定である。また、空港敷地内において試験施工も行う予定であり、これらの実験結果については本論文に追加して報告を予定している。

謝辞：本文をまとめるに当たり、(独) 港湾空港技術研究所の菅野高弘領域長、中澤博志特別研究員、京都大学の井合進教授には貴重な助言を頂いた。紙面を借りてここにお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) (社) 日本下水道協会, 下水道の地震対策マニュアル, 平成9年8月, pp121
- 2) 新潟県土木部都市局下水道課, 下水道災害復旧の記録(概要版) - 新潟県中越大地震 -, 2006
- 3) 下水道地震対策技術検討委員会, 能登半島地震, 新潟県中越沖地震の総括と耐震対策の評価および下水道の担うべき機能を継続的に確保する方法の考え方, 平成20年10月
- 4) 国土技術政策総合研究所報告 NO. 27, 土木研究所, 平成13年度 下水道関係調査研究年次報告集, pp281-pp286
- 5) 山田仁吉, 月刊下水道, Vol. 3, No. 10, 1980, pp40-43
- 6) 小西康彦, 飛田哲男, 高橋和雄, 竹内幹雄: マンホール浮上量の推定法と浮上抑制効果の実証, 下水道協会誌, Vol. 45 NO. 553, 2008. 11, pp99-pp111
- 7) (社) 日本下水道協会, 下水道施設の耐震対策指針と解説, 2006年版

(2009. 3.19 受付)

Development of Earthquake Countermeasures of Sewage Manhole — Uplifting Control Measures And Flexible Manhole Joint —

Yasuhiko KONISHI, Tetsuo TOBITA, Kazuo TAKAHASHI, Mikio TAKEUTI

In the 2004 Niigata-ken Chuetsu, Japan, Earthquake, more than 1,400 of uplifted manholes were counted. It caused suspension of the use of sewage systems over a long period of time after the earthquake and gave inconvenience and frustration to residents in the affected area. We started the development of the device that controlled uplifting of the manhole. We participated in the liquidizing experiment of the world's largest scale, and proved the uplifting controlling effect. We aimed to use these devices for both new manhole and existing. Especially, we aimed at application to the existing manhole. We aimed at the development of a series of technique from the design method to the construction method in view like the clarification of mechanism of manhole uplifting when liquidizing it and estimation of uplift maximum displacement and method of coring of existing manhole and method of hardening tightening the ground around manhole by vibration, etc. This paper reports the matter confirmed by current development and the schedule of the experiment in the future.