

## マンホールの浮上対策に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE MANHOLE STABILIZING  
TECHNIQUES AGAINST LIQUEFACTION

中野雅弘\*・佐々木康\*\*・吉川正昭\*\*\*・服部浩明\*\*\*\*

By Masahiro NAKANO, Yasushi SASAKI, Masaaki YOSHIKAWA and Hiroaki HATTORI

If the ground where a manhole is constructed is susceptible to liquefaction during earthquake, the manhole may float up straight or cant. A series of model shaking tests were conducted 1) to investigate the failure phenomena due to liquefaction, and 2) to test the effectiveness of four types of manhole stabilization techniques against liquefaction, such as surrounding with crushed grain and sheet pile or dewatering to the bottom level of the manhole, compared with a manhole employing no stabilization technique.

Based on measured accelerations, excessive pore pressures, and observed floating up and settlement, this paper describes the effectiveness of stabilizing techniques. Surrounding a manhole with crushed grain and sheet pile or dewatering to a depth at the bottom of the manhole was found to be effective.

*Keywords: model shaking tests, liquefaction, manhole stabilization techniques, crushed grain, sheet pile, dewatering*

## 1. 緒 言

地震による電気通信の途絶は一時的であれ、情報化社会では大きな社会的混乱を招く。そのためには、電気通信屋外設備の耐震性向上を図り、被災時の情報機能を確保することが、地震発生時の防災活動と、震後の早期復旧対策のため必要である。管路、とう道などの電気通信屋外設備の数は増加の一途をたどり、都市内では管路あるいはとう道（または共同溝）などの地中埋設物内に通信ケーブルが納められる傾向にある。過去の地震被害例によると<sup>1),2)</sup>、液状化で地盤が変状した地域では電気通信屋外設備のうち、マンホールは浮上、傾斜、沈下などの被害を受け、マンホールの移動量が大きい場合には地下管路との継手部が離脱し、電気通信への影響が大きいため、これらの被害を防止する対策が必要であると考えられる。

マンホールの浮上、沈下などの対策方法として、マンホールの底版を拡幅し、見掛けの比重を増加させる方法、マンホールのまわりに矢板を打ち込み、矢板の補剛効果によりマンホール周辺部の液状化発生を低減させる方法、マンホールの底面に杭を打設し、水平と鉛直の支持力を高める方法、液状化時の過剰間隙水圧の上昇を防ぎ、液状化発生の程度を小さくするため、マンホール周辺を砕石で囲う方法、砕石ドレーンパイルをマンホール底面下に用いる方法、盲暗渠の設置によりマンホール周辺の地下水位をマンホール底面以深に低下させるなどの方法<sup>3)</sup>がある。

これらの方法の施工性、経済性、防止効果の確実性などを比較検討した結果、マンホールの底部と側方を砕石で囲む方法、これに矢板囲いを加える方法や地下水位を低下させる方法が先に報告した<sup>4)</sup>電柱の液状化対策と同様、比較的有効な方法であると想定される。

本研究で取り扱うマンホールは見掛けの比重が周辺地盤に比べて小さいため、液状化の程度に応じて浮き上がる。

この現象に対して砕石や矢板による対策を施した効果を検討するため、模型振動実験を行った。まず、振動台を水平一方向に加振することにより、模型地盤が液状化し、この中に設置したマンホールが浮上がりを生じると

\* 正会員 工修 日本電信電話(株)東京支社設備建設本部土木部担当部長(〒108 港区港南1-9-1 NTT 品川 TWINS)

\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所地震防災部長(〒305 つくば市大字旭1)

\*\*\* 正会員 工博 (株)奥村組筑波研究所耐震研究課主任研究員(〒303-33 つくば市大字大砂387)

\*\*\*\* 正会員 工修 日本電信電話(株)筑波フィールド技術開発センタ技師(〒305 つくば市花畑1-7-1)

きの過剰間隙水圧，応答加速度，沈下量などの挙動を求めた。次いで，砕石，砕石と矢板併用などの対策を施した場合，地下水位をマンホール高さの中間，マンホールの底部へと変えた場合の模型振動実験を行っている。本論文はこれらの結果と対策を施さない場合の挙動を比較することにより対策の効果を論じたものである。また，マンホールの浮上の要因を検討するため，地盤の移動状態も併せて考察している。

2. 実験方法

(1) 模型と実物との相似則および模型材料

対象マンホールは標準サイズのコンクリート製3号マンホール（縦1.84 m，横2.84 m，高さ1.95 m）が液状化層厚5.5 mの砂地盤に，地表から0.5 mの地点に埋設された場合を想定している。縮尺1/5の模型は Fig. 1 に示すように，地下水位が地表にある単体のマンホールを想定し，地下管路は省略した。このマンホールに対し，砕石をマンホール周辺と底部に用いた場合，砕石の周辺を矢板で囲った場合，地下水位を GL-30 cm と GL-50 cm に下げた場合の基礎形式を Fig. 2 に示し，その実物想定値を Table 1 に示す。

模型と実物の相似則と相似比の関係を Table 2 に示す。これを用いて Table 1 の実物想定値から，模型目標値を求めて Table 1 に併記する。相似則は両者の物理現象に関連する主要  $\pi$  値が等しい<sup>5)-9)</sup>として求めたもので，この相似則を用いて，微小入力時の模型の目標値を

求めた。

実験に用いた模型地盤材料は浅間山砂で平均粒径  $D_{50}$  が 0.33 mm から 0.4 mm，均等係数  $U_c$  が 2.2，乾燥密度の最大値が約 1.7 g/cm<sup>3</sup>，最小値が約 1.4 g/cm<sup>3</sup> である。板たき法によりせん断波速度  $V_s$  を求めると，相対密度  $D_r$  が約 40 % の模型飽和地盤の  $V_s$  は地表地盤で約 50 m/s となる。マンホールの浮上がりに伴う底面地盤の移動状況を求めるため，色砂の薄層を上下，水平両方向に格子状に敷設し，残留変形の状態を把握しようとした。模型地盤の作成には空中落下法を用い，落下高さは  $D_r$  が約 40 % になるように，約 40 cm とし，ホッパーの4か所から乾燥砂を自然落下させた。模型地盤作

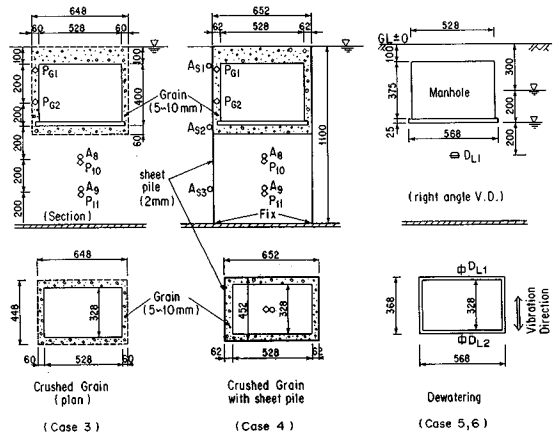


Fig. 2 Manhole Stabilizing Techniques.

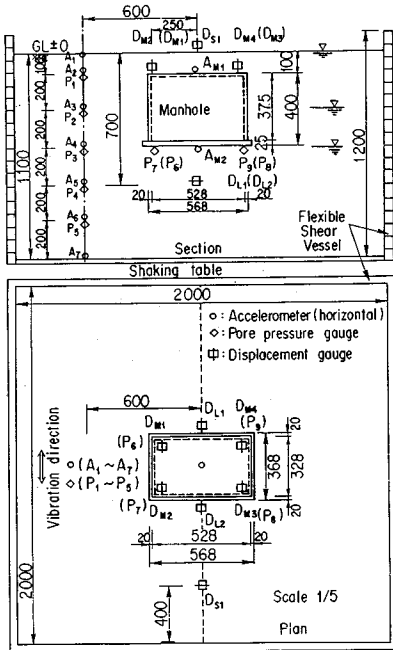


Fig. 1 Ground-Manhole Model.

Table 1 Design Details of Prototype and Model.

	Prototype	Model Aim
<b>MANHOLE</b>		
Material	R. C.	Acryl acid resin
Weight (KN)	96.0	0.77
Volume (m <sup>3</sup> )	8.7	0.07
Width, Breadth, Length (m)	2.84, 1.84, 1.95	0.57, 0.37, 0.20
Apparent specific gravity	1.13	1.13
Young's Modulus (MPa)	$2.1 \times 10^4$	$4.2 \times 10^3$
Poisson's Rat's	0.17	0.17
<b>GROUND SYSTEM</b>		
Material	Saturated Sand	Sengenyama Sand
Depth (m)	5.5	1.1
Dry Density (g/cm <sup>3</sup> )	Max. 1.7 Min. 1.4	Max. 1.76 Min. 1.44
Relative Density (%)	40	40
Vs (m/s)	110	50
Natural Frequency (Hz)	5.0	11.3
<b>STABILIZING</b>		
Crushed Grain		
Grain Size (mm)	20~30	4~6 (5~10)
Thickness of Layer (cm)	30	6
Crushed Grain with Sheet Pile		
Material	Steel	Aluminum
Width, Breadth, Length (cm)	326.0, 226.0, 550.0	65.2, 45.2, 110.0
Thickness (mm)	50	1(2)
Young's Modulus (MPa)	$2.1 \times 10^5$	$4.2 \times 10^4$
Dewatering		
Ground water level (cm)	GL-150	GL-30
Ground water level (cm)	GL-250	GL-50

( ) Value in execution

Table 2 Similarity and Scale Factor.

Function	Similar Systems	Scale Factor
Length	$l_m/l_p$	1/5
Deflection	$l_m/l_p$	1/5
Volume	$(l_m/l_p)^3$	1/125
Density	$\rho_m/\rho_p$	1
Unit Weight	$(\rho_m/\rho_p)(g_m/g_p)$	1
Mass	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)^3$	1/125
Time	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	1/2.24
Period	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	1/2.24
Frequency	$(l_m/l_p)^{-1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	2.24
Velocity	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	1/2.24
Elastic Modulus	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p) \times (\varepsilon_m/\varepsilon_p)^{-1}(\nu_m/\nu_p)$	1/5
Stress	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p)$	1/5
Moment of Inertia	$(l_m/l_p)^4$	1/625
Strain	$\varepsilon_m/\varepsilon_p$	1
Poisson's Ratio	$\nu_m/\nu_p$	1
Damping Constant	$h_m/h_p$	1
Acceleration	$\alpha_m/\alpha_p$	1

製後、土槽底部から注水し、約 24 時間放置し、飽和させた。後述の Fig. 12 (a) に示すように、色砂は層厚約 2 cm の青色で、マンホール底面を中心に約 20 cm 間隔で、水平方向に 4 層敷きつめ、上下方向にマンホールセンターから 10 cm 間隔 (幅 20 cm、高さ 60 cm) で左右に 4 層ずつ作った。また、マンホール模型はアクリル酸樹脂を用い、模型と実物の見掛けの比重が等しくなるように作製した。

## (2) 実験設備と実験条件

実験に用いた振動台<sup>7)</sup>は、三次元 6 自由度のねじり振動を再現できる。液状化特性は水平一方向加振<sup>9)</sup>で求められるため、水平方向加振を行った。測定に用いた加速度計、間隙水圧計、インダクタンス式変位計などの仕様は文献 4) の Table 3 に示したので省略する。せん断土槽は Fig. 1 に示すように平面形状が 1 辺 2 m の正方形の薄層軽量鋼製枠をボールベアリングを介して 15 段に積み重ねたもので、SH 波の鉛直伝播時の変形モードを模型地盤が再現できるように作られている。

本研究の実験の種類は Table 3 に示すように単一系の地盤 (ケース 1)、マンホール-地盤全体系 (ケース 2)、マンホール-砕石-地盤全体系 (ケース 3)、マンホール-砕石・矢板併用-地盤全体系 (ケース 4)、マンホール-地下水位 GL-30 cm の地盤全体系 (ケース 5)、マンホール-地下水位 GL-50 cm (ケース 6) の地盤全体系の 6 種類とした。

せん断上槽の中央に埋設したマンホール上部 GL-10 cm と底部 GL-50 cm に加速度計 AM 1, AM 2, 周辺地盤の地表と地中部に加速度計 A<sub>1</sub>~A<sub>7</sub> と間隙水圧計 P<sub>1</sub>~P<sub>5</sub>, マンホールの底部 4 隅の地盤に間隙水圧計 P<sub>6</sub>~P<sub>9</sub> を配置した。マンホール中心から 65 cm の振動方向の地表に変位計 D<sub>s1</sub>, マンホール頂部 4 隅に変位計 D<sub>m1</sub>

Table 3 Types of experiment.

Case	Types of Experiment	Water Level (cm)
1	Ground system	G. L. ± 0
2	Standard	G. L. ± 0
3	Crushed grain	G. L. ± 0
4	Crushed grain with sheet pile	G. L. ± 0
5	Dewatering	G. L. -30
6	Dewatering	G. L. -50

~D<sub>m4</sub> とマンホール浮上に伴う地盤の側方移動による水平変位を求めるためにマンホール底部から 20 cm 下の GL-70 cm でマンホール中心から 18.4 cm の振動方向に変位計 D<sub>L1</sub>, D<sub>L2</sub> を配置した。これらの測点のほかに、Fig. 2 に示したように砕石を用いた対策には加速度計と間隙水圧計をそれぞれ GL-70 cm の A<sub>3</sub>, P<sub>10</sub> と GL-90 cm の A<sub>9</sub>, P<sub>11</sub> の位置に配置し、厚さ 6 cm のマンホール側壁の砕石の中には間隙水圧計を GL-10 cm の P<sub>G1</sub> と GL-30 cm の P<sub>G2</sub> の位置に配置した。砕石・矢板併用時には、加速度計を矢板の GL-10 cm, -50 cm, -90 cm の A<sub>s1</sub>, A<sub>s2</sub>, A<sub>s3</sub> の位置に配置した。

まず、線形領域でのマンホール-地盤全体系の共振特性を求めるため、同一の模型に対し、入力加速度 10 ガルの 1 Hz から 30 Hz の振動数成分を均等に含む継続時間 20 秒のホワイトノイズと、加振振動数 30 Hz から 1 Hz を 0.5 Hz きざみで与えるスイープ波動による加振を行った。次いで、正弦波加振では予備実験で入力加速度を 30, 60, 90, 120, 220 ガルと変えて、液状化発生の状況を過剰間隙水圧の分布を用いて求めた。その結果、振動数 2 Hz、入力波数 20 波の正弦波で加振すると、入力加速度 120 ガルまでは完全液状化状態には至らず液状化進行状態<sup>7)~9)</sup>にあり、入力加速度 220 ガル時に完全液状化の状態になることが判明した。そこで、地中深部の過剰間隙水圧が有効上載圧に至らない入力加速度 120 ガルと有効上載圧に至る 220 ガルを用い、両者を比較することにより、液状化時の破壊現象を調べた。既往の実験と予備実験の結果から判断して、完全液状化を生じる時間が 10 秒、繰り返し回数が 20 回のとき、データの解析が行いやすいため、振動数を 2 Hz とした。実際の不規則な地震入力による応答は正弦波加振よりかなり小さくなるため、本研究では省略した。

## 3. 実験結果

### (1) 単一系の地盤 (ケース 1)

地盤単一系のせん断振動の固有振動数の  $f = V_s/4H$  (H: 層厚) による計算値により 11.2 Hz となる。模型地盤のスイープ加振による共振振動数とホワイトノイズ

入力による卓越振動数は両者とも 11 Hz 近傍にあり、理論値にほぼ近い。減衰定数は  $1/\sqrt{2}$  法によると約 6% となる。

次に、液状化の程度と入力加速度の大きさの関係を求めるため、地盤単一系に 30 ガル、60 ガル、120 ガル、220 ガルと順次、入力加速度を大きくして、2 Hz の正弦波加振実験を行い、各入力加速度ごとに過剰間隙水圧の深度分布を求め Fig. 3 に示す。同図に併記した初期有効上載圧曲線と過剰間隙水圧の最大値分布から、入力加速度が 30 ガルから 120 ガルまでは完全液状化状態まで至らず、220 ガル時はほぼ全層にわたって完全に液状化状態に至っていることがわかる。

(2) マンホール-地盤全体系 (ケース 2~6)

マンホール-地盤全体系を 10 ガルのスweep加振したときの周辺地盤の最大応答加速度を変位に換算して Fig. 4 に示し、同図に共振振動数を併記した。各種対策

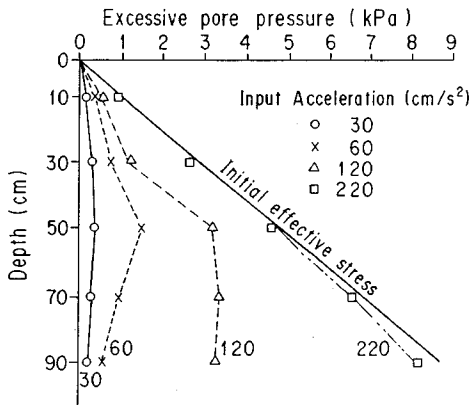


Fig. 3 Vertical Distribution of Excessive Pore Pressure (Ground System).

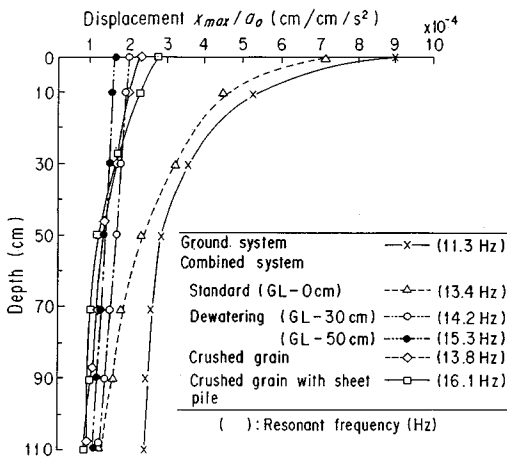


Fig. 4 Displacement Mode (10 cm/s², at the resonant frequency).

に対する入力加速度が 9 ガルから 11 ガルの範囲でばらつくため、入力加速度で応答変位を基準化している。次に、120 ガルと 220 ガルの正弦波加振による応答変位の最大値を Fig. 5 に示す。同図に 220 ガル入力時のマンホール頂部 GL-10 cm の最大変位を括弧で併記した。

次に、各ケースの過剰間隙水圧比の時刻歴の代表例としてマンホール底部四隅の平均値を Fig. 6 に示し、正弦波加振による 120 ガルと 220 ガル入力時の液状化の程度を比較する。縦軸には過剰間隙水圧の発生量を初期有効上載圧で除した過剰間隙水圧比を用い、横軸の波数 20 は加振時間 10 秒に相当する。周辺地盤の深さ方向の過剰間隙水圧を 1 秒から加振終了の 10 秒まで 1 秒間隔で Fig. 7 に示し、各種対策による液状化程度の深度分布を比較する。Fig. 6 で過剰間隙水圧比の大きい場合は Fig. 7 の深さ方向の分布でもほとんどの測点で有効上載圧曲線に近づくことがわかる。また、砕石が過剰間隙水

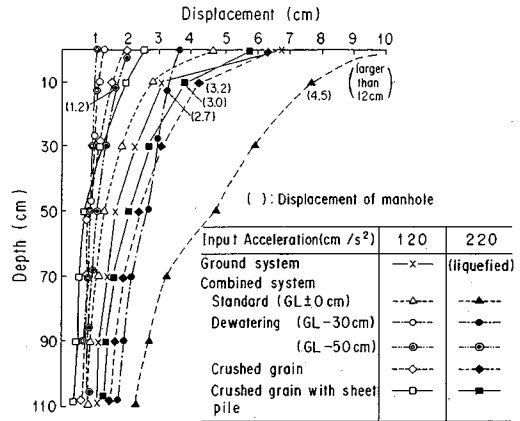


Fig. 5 Maximum Displacement Mode of Manhole (120 cm/s² and 220 cm/s²).

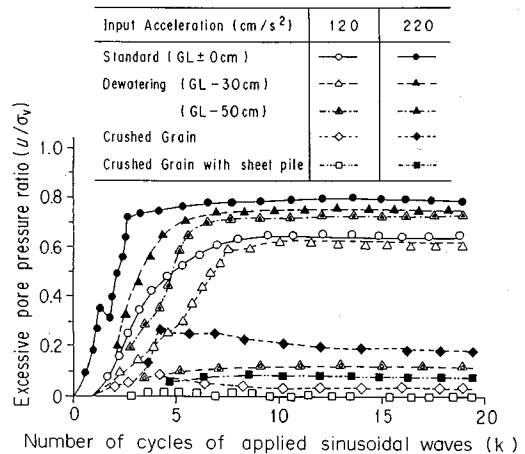


Fig. 6 Time Histories of Excessive Pore Pressures (at the manhole bottom).

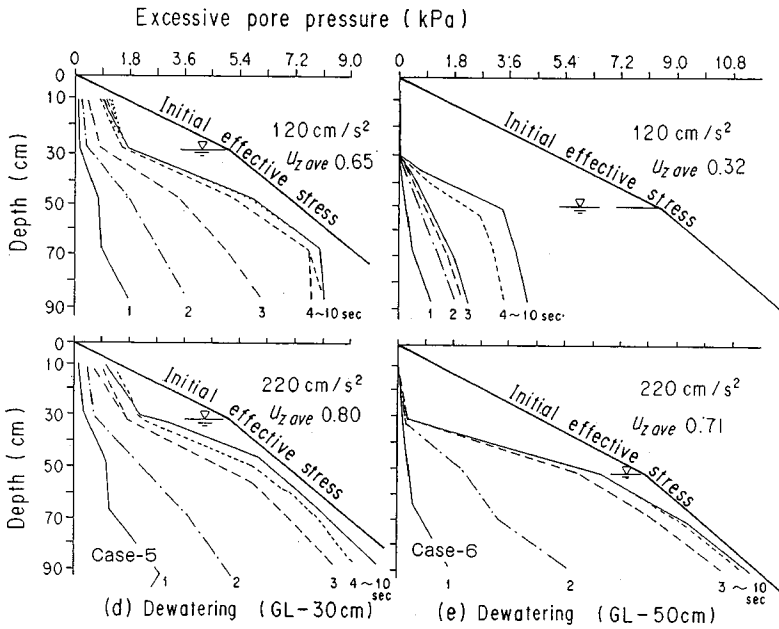
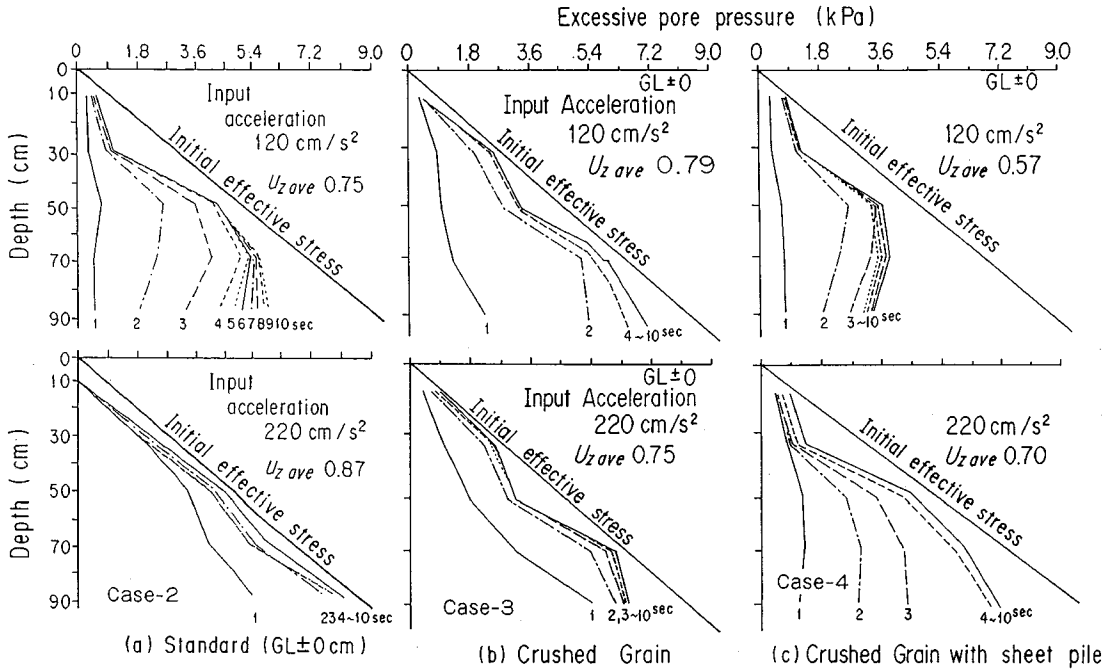


Fig. 7 Vertical Distribution of Excessive Pore Pressure (time histories).

圧の上昇を防止する効果を求めるためマンホール側壁部に設けた碎石層内の GL-30 cm の  $P_{Gz}$  と砂層 GL-70 cm の  $P_{10}$  の過剰間隙水圧比を比較して Fig. 8 に示す。同図に併記した  $TP_0$ ,  $TP_s$  は碎石と碎石・矢板併用時の測点  $P_{10}$  の過剰間隙水圧比が最大値に至る時刻を示す。さらに、碎石・矢板併用時の碎石の間隙水の消散効果と矢板の制振効果を考察するため、同一深度の矢板内と外

の周辺地盤部の間隙水圧を比較して Fig. 9 に示す。次いで、各種対策による周辺地盤の応答加速度の最大値の深度分布を Fig. 10 に示す。同図は入力波形 2 波に相当する 1 秒間の応答加速度の最大値を 1 秒きざみで加振終了時の 10 秒まで求めたものである。

(3) マンホールの浮上と側方移動

次に、マンホール浮上現象を明確にするため、220 ガ

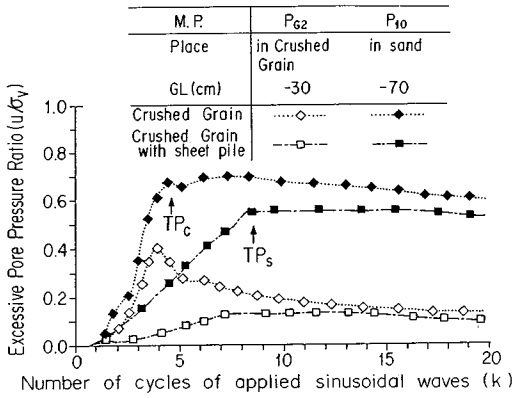


Fig. 8 Time Histories of Excessive Pore Pressure (case 3, 4).

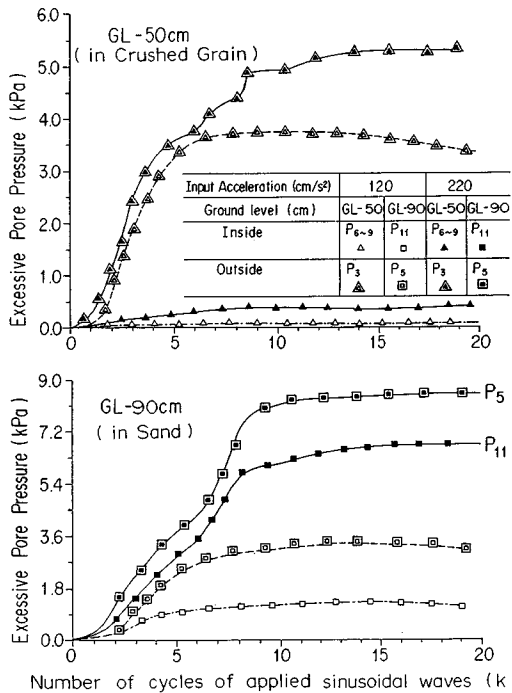


Fig. 9 Time Histories of Excessive Pore Pressure (Earthquake response prevention effectiveness of sheet pile).

ル入力時のマンホール底部付近の砂の移動状況を Fig. 11 の上から 2 段目の経時変化図に示した。

Fig. 11 はマンホールの浮上量が多い未対策の場合 (ケース 2) と逆にマンホールが沈下する地下水位 GL-50 cm (ケース 6) の時刻変化を示した。GL-70 cm の側方移動量  $D_{L1}$ ,  $D_{L2}$  ともマンホールセンター方向に移動するため、両者の平均値を示した。側方移動の測定値は地盤の沈下量も含むため、地表地盤の沈下量を用いて、GL-70 cm の沈下量を比例計算で推定し、沈下分を引いた値を最上段の経時変化図に示し、沈下量を含んだ場

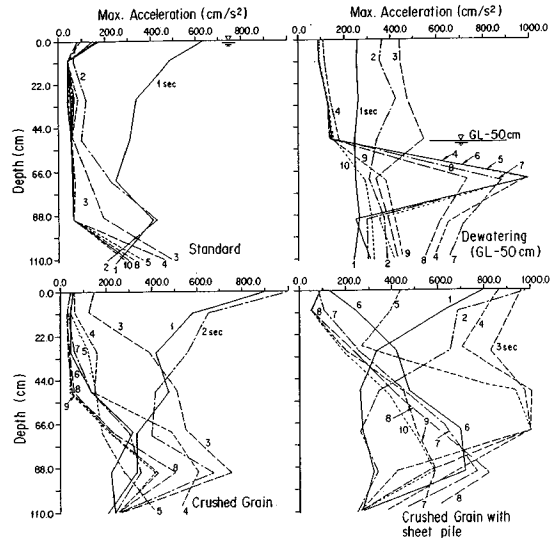


Fig. 10 Vertical Distribution of Response Accelerations.

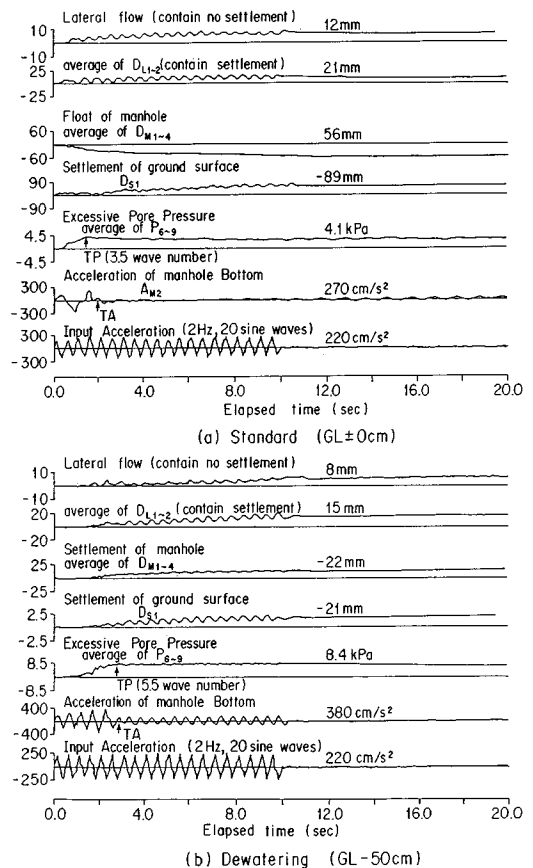


Fig. 11 Time Histories of Settlement, Excessives Pore Pressures and Accelerations.

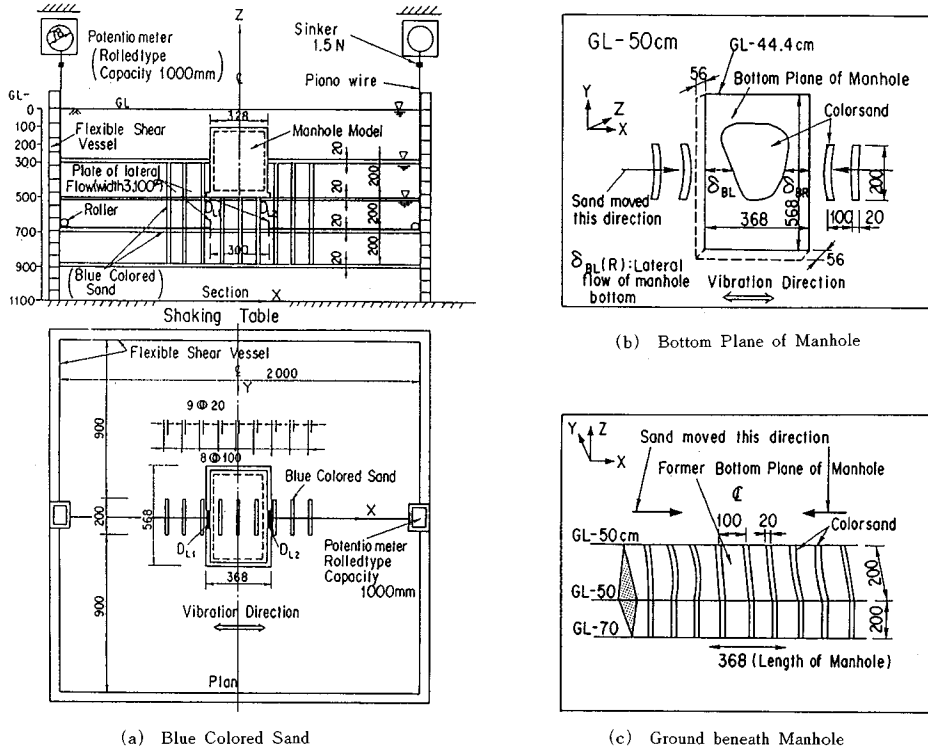


Fig. 12 Sideward Changes of Colored Sand.

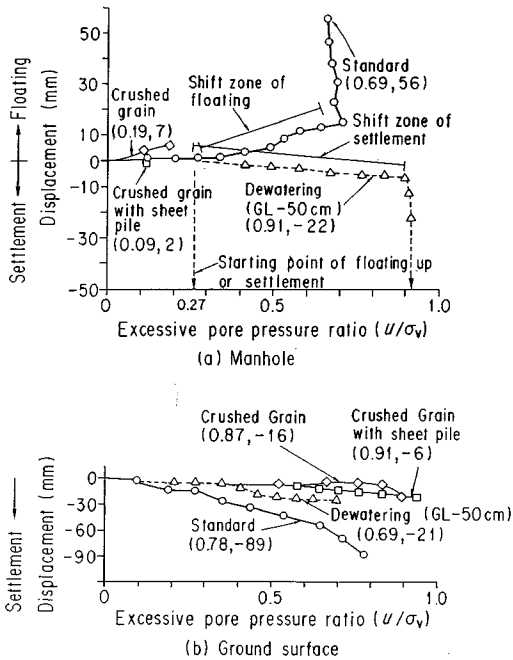


Fig. 13 Settlement and floating up of manhole and Ground surface.

合を2段目に示した。また、マンホールの浮上量、周辺地盤の地表面沈下量、マンホール底版の過剰間隙水圧と応答加速度、入力加速度波形を併記して、側方移動量との関係を調べた。このため、過剰間隙水圧が最大値に至る時刻 TP と応答加速度が低下する時刻 TA を併記した。また、実験終了後に観察した色砂の変形状態を Fig. 12 に示す。同図 (b), (c) から、マンホール底版直下 (GL-50 cm) および直下地盤 (GL-50, 70 cm) はマンホールの浮上に伴って、地盤が矢印の方向に流動していることがわかる。さらに、各種対策時の過剰間隙水圧比と浮上または沈下量の関係を Fig. 13 に示し、マンホールの浮上と沈下の様相を考察する。同図の (a), (b) はそれぞれマンホールと周辺地盤地表部での結果を示し、括弧内の数値は過剰間隙水圧比と最終の浮上または沈下量を表わしている。また、マンホールと周辺地盤地表面の浮上または沈下量を Table 4 に示し、周辺地盤の最終沈下量を基準にしたマンホールの相対浮上量を求めた。

#### 4. 考 察

##### (1) 共振特性と応答変位

微小入力時の各種対策を施したマンホール-地盤の動的相互作用により生じる現象を把握するため、共振振動

Table 4 Settlement or Floating up of Ground and Manhole.

Input Acceleration (cm/s <sup>2</sup> )	Ground ①		Manhole ②		Relative Settlement ②-①	
	120	220	120	220	120	220
Ground System	-20	-92	—	—	20	92
Combined System						
Standard (GL±0cm)	-27	-89	41	56	68	145
Dewatering (GL-30cm)	-31	-76	25	31	56	107
(GL-50cm)	-2	-22	2	-22	4	0
Crushed Grain	-22	-16	4	7	26	23
Crushed Grain with sheet pile	-3	-6	-1	2	2	8

unit: mm, +: Floating up, -: Settlement

数、応答倍率、減衰定数を求めて、Table 5 に示す。マンホール部と地盤部では応答倍率、減衰定数が異なるのに対して、両者の共振振動数はほぼ一致した。マンホールと地盤の応答倍率を比較するとマンホールの方が地盤より応答倍率が小さくなる。減衰定数はマンホールの方が地盤より多少大きくなる。したがって、マンホールは周辺地盤の動きに支配され、マンホールの振動が卓越しないことがわかる。また、各種対策時の共振振動数は地盤単一系の 11.3 Hz に比べ、未対策の場合（ケース 2）13.4 Hz、地下水位低下 GL-30 cm（ケース 5）と同 GL-50 cm（ケース 6）による対策でそれぞれ 14.2 Hz と 15.3 Hz、砕石による対策（ケース 3）13.8 Hz、砕石・矢板併用による対策（ケース 4）16.1 Hz となる。共振振動数、減衰定数は、各種対策時の方が、地盤単一系に比べて大きくなる。この結果、各種対策による応答変位は地盤単一系よりも小さくなり、微小振動時にはマンホールの周辺地盤が遠方地盤に比べて過剰間隙水圧の上昇が少なくなる。

次に、2 Hz の正弦波加振による 120 ガルと 220 ガル時の各種対策時の周辺地盤の応答変位モード（Fig. 5）から、最大応答変位は未対策の場合（ケース 2）、砕石（ケース 3）、地下水位低下 GL-30 cm（ケース 5）、砕石・矢板併用（ケース 4）、地下水位低下 GL-50 cm（ケース 6）の対策の順に小さくなる。括弧で示したマンホール頂部の最大応答変位は周辺地盤より小さい。

## (2) 液状化特性

### a) 過剰間隙水圧

地盤単一系の正弦波の入力加速度と過剰間隙水圧（以下  $U$  と略す）との関係（Fig. 3）から、120 ガル、220 ガルの入力時にそれぞれ液状化進行状態、完全液状化状態になっていることがわかった。各種対策によるマンホール底部の過剰間隙水圧比  $U/\sigma'_v$  の経時変化（Fig. 6）から 120 ガル入力時では完全な液状化状態に至らず、 $U/\sigma'_v$  の最大値はケース 2、ケース 5、ケース 6、ケース 3、ケース 4 の順に小さくなる。220 ガル入力時も 120 ガルと同様に順に  $U/\sigma'_v$  の値が小さくなる。周辺地盤の  $U$  の深さ方向の経時変化（Fig. 7）から 220 ガル入

Table 5 Resonant Frequency, Magnification and Damping constant.

	Resonant frequency(Hz)	Magnification			Damping constant(%)	
		ground①	manhole②	②/①	ground	manhole
Standard(GL±0cm)	13.4	14.6	12.2	0.84	3.4	4.1
Dewatering (GL-30cm)	14.2	10.7	9.7	0.92	4.5	5.2
(GL-50cm)	15.3	10.6	9.7	0.92	4.4	5.2
Crushed Grain	13.8	11.8	11.1	0.94	4.0	4.9
Crushed Grain with sheet pile	16.1	11.0	10.6	0.96	3.8	4.7

力時、ケース 2 は加振 2 秒目から  $U$  が初期有効上載圧曲線に接近し、完全液状化状態となる。地下水位を下げたケース 5 とケース 6 の場合は、地下水位よりも上部地盤の  $U$  が上昇せず、地下水位より深地中地盤で  $U$  が上昇する。地下水位低下時の初期有効上載圧曲線の値が対策前に比べて大きく、地下水位位置が深い方が浅い場合に比べて初期有効上載圧が大きいため、 $U$  の初期有効上載圧曲線に至る時刻が地下水位を低下させると遅くなる。また、砕石と砕石・矢板併用時は両者とも未対策の場合に比べて地中地盤部の  $U$  が初期有効上載圧曲線に至る時刻が遅くなる。

矢板で囲うことによる制振効果<sup>10)</sup>は Fig. 9 から、液状化進行時の場合には矢板外に比べて矢板内の  $U$  の最大値が砂層 (GL-90 cm) で約 1/3 倍、砕石層 (GL-50 cm) で約 1/12 倍と小さくなることから説明できる。完全液状化状態となると液状化進行中より矢板内、外の差は少なくなるが、矢板内は矢板外に比べて小さく GL-90 cm の砂層で約 0.8 倍程度となる。さらに、ケース 3 とケース 4 の繰り返し回数に対する過剰間隙水圧比  $U/\sigma'_v$  を示す Fig. 8 において、砕石に矢板を併用した場合（ケース 4）の  $U/\sigma'_v$  が最大値に至る時刻  $TP_s$  が砕石を施した場合（ケース 3）の  $TP_s$  より遅れる原因は、砕石による過剰間隙水圧の消散効果のほかに、矢板の剛性による制振効果が働いたためといえる。次に、液状化の程度を一測点でなく地盤全体で表現するため次式を用いて、地盤全体の平均過剰間隙水圧比  $U_{z,ave}$  の最大値を求め、Fig. 7 に併記した。ここで、 $U_{z,ave}$  は、各時刻ごとに求めた結果、10 秒後に最大値を示したので、10 秒後の値を示す。

$$U_{z,ave} = \int_0^z u dz / \int_0^z \sigma'_v dz$$

$U_{z,ave}$  : 深さ  $z$  の平均過剰間隙水圧比

$\sigma'_v$  : 初期有効上載圧

各測点の分布を用いて求めた各種対策の液状化の程度と  $U_{z,ave}$  の最大値による各種対策の液状化の程度とが類似の傾向を示していることから、 $U_{z,ave}$  は各種対策に関する液状化の程度の指標になることがわかる。

### b) 応答加速度



各種対策時の周辺地盤部の最大応答加速度深度分布の経時変化を示す Fig. 10 より、未対策のケース 2 は地表から液状化が深部へと進行するに従い、応答加速度の最大値が地表から地中深部へと移動する。全層の最大応答加速度が低下し、3 秒後には、深部まで液状化したことがわかる。一方、地下水位低下 GL-50 cm (ケース 6) では、加振開始 7 秒後に地中深部で最大応答加速度を生じ、その後、液状化により応答加速度は小さくなる。地下水位を低下させると液状化を生じる時刻が遅くなるのが応答加速度分布からも説明できる。碎石や碎石・矢板併用による対策時にも、周辺地盤で同様のことがわかる。

### c) 浮上現象と側方移動量

マンホールの浮上量は Table 4 から 220 ガル入力時、未対策の場合 (ケース 2) が約 5.6 cm、地下水位低下 GL-30 cm (ケース 5) が約 3.1 cm となる。地下水位低下 GL-50 cm (ケース 6) で逆に約 2.2 cm 沈下する。碎石と碎石・矢板併用時それぞれの浮上量は約 0.7 cm と約 0.2 cm と小さく、ほとんど浮上しない。120 ガル入力時にも、各種対策の浮上量の大小関係は 220 ガル入力時と同じ傾向となる。入力後の沈下した地表面を基準に考えると、無対策の場合の浮上量は約 14.5 cm となり、実物に換算すると約 70 cm 浮上したことになる。日本海中部地震の際にマンホールが浮上した事例によれば、液状化層厚が約 5 m で約 50~60 cm 浮上したことが報告されている。本実験の場合、地下水位が地表面にあり、地下管路を省略していること、入力振動数を 2 Hz として 20 回繰り返して完全液状化を生じさせたことなどから、液状化により模型マンホールが浮上しやすい状態にあるため、約 70 cm の浮上量は、妥当な結果を得たと考える。次に、過剰間隙水圧が最大値に至る時刻 TP を Fig. 11 の未対策の場合 (ケース 2) と地下水位低下 GL-50 cm (ケース 6) で比較すると、TP はケース 2 の方がケース 6 より短く、液状化が早く生じるため、側方移動、浮上または沈下も早い時期に生じることがわかる。ケース 2 のマンホールの浮上、周辺地盤の沈下、側方移動量は加振とほぼ同時に生じるのに対し、地下水位を GL-50 cm に低下させると加振から少し遅れて生じる。両者ともに、マンホールの浮上、周辺地盤の沈下、側方移動量は過剰間隙水圧が最大値に至る時刻 TP を境界とし、はじめ急で、TP を過ぎると緩やかになる。

また、マンホールの浮上に伴いどの部分の砂がどの程度移動するかを確認した。マンホール浮上後の色砂の変状状況 Fig. 12 からマンホール底版の下の側方から、流動砂が底部へ回り込んだと考えた。そこでこの結果を用いてマンホール底版近傍地盤のマンホール浮上に伴うマンホール底部への流動量を 3 角柱と考えて求めた流入量

はマンホールの浮上に伴う流動量に類似した<sup>11)</sup>。さらに、液状化の程度と浮上または沈下量の Fig. 13 から、対策前のマンホールは  $U/\sigma'_v$  が約 0.27 近傍から浮上を開始し、 $U/\sigma'_v$  の進行に対して浮上量が少ない遷移領域をへて、 $U/\sigma'_v$  が約 0.7 のとき約 5 cm 浮上する。このことから浮上に抵抗していた周辺摩擦が液状化によって消失し、浮力とのつり合いがくずれてマンホールが浮上するとき、液状化の程度と浮上量の間に遷移領域 (徐々に浮き上がり (または沈下し) その点を超えると急に浮き上がる (または沈下する) 領域のことを示す) が存在することが推定される。地下水位低下 GL-50 cm の対策時の遷移領域は  $U/\sigma'_v$  が約 0.91 と対策前に比べて大きい。また、碎石や碎石・矢板併用による対策時には、 $U/\sigma'_v$  の値が小さく、浮上または沈下する場合の  $U/\sigma'_v$  の値が約 0.27 まで至らないことがわかる。

### d) 液状化防止対策効果

各種対策時のマンホール浮上に対する効果を過剰間隙水圧比の最大値に到達する時刻、地盤の応答加速度の変化、マンホールの浮上量、マンホール底版近傍の側方移動量曲線などから考えて、液状化防止対策効果としては次のことがいえる。まず、碎石のみによる対策の場合、過剰間隙水圧の上昇を消散させる効果により、浮上量を未対策の場合に比べ約 1/6 程度に減少でき、碎石層による浮上防止効果が期待できる。さらに、碎石・矢板併用による対策の場合、浮上量を未対策の場合の約 1/18 程度に減少でき、碎石層による過剰間隙水圧の上昇を消散させる効果と矢板による制振効果を有した対策といえる。また、地下水位と浮上量の関係は地下水位をマンホールの下方に低下させるほど、液状化が遅れ、浮上量は小さくなることがわかる。マンホール底部まで地下水位を低下させると、マンホールは浮上せずに逆に沈下する。

## 5. ま と め

マンホール-地盤全体系に液状化対策を施した場合を未対策の場合と比較し、要約すると以下のとおりである。

(1) 微小入力時のマンホール-地盤全体系の応答特性はマンホール部の方が地盤部より応答倍率が小さい。すなわち、マンホールは周辺地盤の動きに支配され、マンホールの振動はあまり卓越しない。一方、周辺地盤が液状化を生じる 220 ガル入力時はマンホールは約 56 mm 浮上し、周辺地盤は約 89 mm 沈下するため、浮上防止対策を行う必要がある。

(2) 過去の被害事例から判断して、未対策の場合の 14.5 cm、実物に換算すると約 70 cm は、妥当な結果である。

(3) 各種対策による周辺地盤の最大応答変位は未対策の場合に比べて、碎石、地下水位低下 GL-30 cm、

碎石・矢板併用，地下水位低下 GL-50 cm の対策順に小さくなる．特に，碎石による対策の方が地下水位低下 GL-50 cm による対策より小さくなる．これは碎石層による過剰間隙水圧の上昇を消散させる効果のためである．碎石・矢板併用時には，この効果に矢板剛性による制振効果が加わる．

(4) マンホールの浮上量は，未対策の場合，地下水位低下 GL-30 cm，碎石，碎石・矢板併用，地下水位低下 GL-50 cm の対策順に小さくなる．また，マンホールが浮き上がるときには，マンホール底版周辺から，砂が回り込むことが確認された．

(5) 浮上現象は未対策のマンホールが加振とほぼ同時に生じるのに対し，各種対策時は加振から少し遅れてマンホールが浮上する．液状化程度を表わす過剰間隙水圧比  $U/\sigma'_v$  を用いて浮上現象を考察すると，対策を施さない場合のマンホールは  $U/\sigma'_v$  が約 0.3 近傍で，揚圧力がマンホールと地盤との摩擦力より大きくなりマンホールは浮上を開始し，その後  $U/\sigma'_v$  が約 0.7 になるまで浮上せず， $U/\sigma'_v$  が約 0.7 のとき，約 5 cm 浮上する．また，碎石や碎石・矢板併用による対策を用いるとマンホールが大きく浮上する  $U/\sigma'_v$  に至らない．

## 6. あとがき

マンホールが浮上するとき，どの部分の砂がマンホール底版へ流動するかを求めることは困難である．本論文では，その第 1 段階として色砂層と側方移動量を測定し，マンホール底部近傍の 3 角柱形状の地盤がマンホール底部に流入することを確かめた．特に，マンホール底版の下に流入する砂の量は，周辺地盤の液状化に伴う強度低下と地盤内の応力の不平衡の程度に左右されると考えられるが，この点については，さらに検討が必要である．また，均質な地盤中で，マンホールは真直に浮上せず，傾斜しながら浮上する場合も生じた．特に，傾斜しながら浮上する現象の解明は今後の課題である．

**謝 辞：**本研究は地下構造物の地盤変状対策に関する調査研究に関する委員会のもとに行われた．委員長で

ある久保慶三郎東大名誉教授にはまとめるにあたり貴重なご示唆をいただいた．また，実験をはじめるところに建設省土木研究所の岩崎敏男研究調整官から貴重なご助言をいただいた．さらに，本実験は奥村組筑波研究所の実験施設を利用して行われたもので，荒野政信主任研究員から，実験を行うにあたり，貴重なご助力をいただいた．ここに記して深謝の意を表したい．

## 参 考 文 献

- 1) 中野雅弘・沢橋剛志：電気通信土木設備の耐震性の向上をめざして，NTT 施設，Vol. 37, No. 12, pp. 50~57, 1985.
- 2) 中野雅弘・沢橋剛志，ほか：日本海中部地震による通信土木設備の被害状況について，第 39 回土木学会年次講演会，第 1 部，pp. 675~676, 1986. 9.
- 3) 古賀泰之・辻田 満，ほか：耐震地盤改良工法に関する共同研究報告書（その 1，2），建設省土木研究所，昭和 62 年 8 月.
- 4) 中野雅弘・吉川正昭・斎藤 通・荒野政信：電柱基礎地盤の液状化対策に関する実験的研究，土木学会論文集，第 404 号 / I-11, pp. 405~413, 1989.
- 5) 吉川正昭・黒岩真彦・山田善一：模型地盤を用いた鉄塔一杭基礎一の非線形連成振動に関する実験的研究，土木学会論文集，第 334 号，pp. 53~61, 1983. 6.
- 6) 吉川正昭・吉川 実・土岐憲三：高架橋基礎の制振効果に関する実験的研究，土質工学会論文報告集，Vol. 26, No. 1, pp. 163~173, March 1986.
- 7) 吉川正昭・荒野政信・山田善一：模型砂層地盤の液状化現象，土と基礎，No. 1645, pp. 45~51, December 1986.
- 8) 吉川正昭・荒野政信・山田善一：模型杭基礎と液状化現象，土と基礎，No. 1987, pp. 31~36, April 1987.
- 9) 吉川正昭・荒野政信・山田善一：上下・水平同時加振時の模型杭基礎と液状化現象，土質工学会論文報告集，Vol. 27, No. 4, pp. 197~204, December 1987.
- 10) 吉川正昭・荒野政信：枠で囲むことによる液状化現象の遅延効果，土木学会第 42 回年次学術講演会，第 1 部，pp. 868~869, November 1987.
- 11) 吉川正昭・中野雅弘・服部浩明・荒野政信：地中構造物の浮上現象（その 1，2），第 23 回土質工学研究発表会，pp. 1029~1032, 1988. 6.

(1988. 10. 14・受付)