

通信用マンホールの液状化時挙動と地震防災対策

BEHAVIOR AND COUNTERMEASURES OF TELECOMMUNICATION MANHOLE DUE TO LIQUEFACTION

高田 至郎^{*}, 尾崎 竜三^{**}, 出口 大志^{***}

Shiro TAKADA, Ryuzo OZAKI, and Taishi DEGUCHI

^{*}工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒 657 神戸市灘区六甲台 1-1)

^{**}工修 神戸大学大学院 自然科学研究科生産科学専攻 (〒 657 神戸市灘区六甲台 1-1)

^{***}工学士 NTT アクセス網研究所 (〒 305 つくば市花畑 1-7-1)

The objective of this study is to investigate analytically the effect of gravel drain and grid drain method as the liquefaction remediation methods, concerning the uplift of manhole which varied on different depth. A 2-dimensional dynamic FEM is applied to the analysis on the development of the excess pore-water pressures. As a result, it is found that the increase of excess pore-water pressures that act on the bottom of the manhole are reduced by the liquefaction remediation methods. And based on the results of the FEM analysis, the examination of manhole uplift is conducted and safety factor of manhole uplift is calculated.

Keywords: Liquefaction, Excess Pore-Water Pressures, Manhole, Uplift, Gravel Drain, Grid Drain

1. はじめに

1993 年釧路沖地震, 1993 年北海道南西沖地震, 1995 年兵庫県南部地震など大規模な地震が相次いで発生し, そのたびに地盤の液状化により, 橋脚の損傷, 護岸の変状, 地中構造物の浮上といった多大な被害が発生している。また地中管路の被害も数多く報告されており, これらの管路被害要因を明らかにする研究と同時に, 液状化による被害の対策工法も研究されている。

液状化の対策工法の 1 つである「グラベルドレーン工法」¹⁾では, 過剰間隙水圧を消散させ, マンホールの浮上を抑止するためにマンホール周辺に碎石を配置している。しかし最近, 施工の簡略化および経済化を期待し, 碎石の代わりにプラスチック材を用いる「グリッドドレーン工法」²⁾が適用されるようになった。

そこで, これら対策工法の効果を確認することを目的とし, 実用に対して検討されている最も深い埋設位置までの過剰間隙水圧発生に関する解析を動的な 2 次元有効応力 FEM を用いて行った。さらに FEM 解析の結果として得られる過剰間隙水圧よりマンホール底面に作用する揚圧力を算定し, マンホールの浮上に関して検討した。

2. 液状化解析

本研究で用いている液状化解析プログラムは初期有効応力解析, 有効応力液状化解析, 過剰間隙水圧消散・沈下解析の 3 つの部分で構成されている。繰り返し載荷時

の土の非線形応力-ひずみ履歴関係としては, Hardin Drnevich モデル^{3),4)}を, 過剰間隙水圧の上昇量については, 西ら⁵⁾が提案したダイレイタンスーによる体積ひずみと繰り返し回数との関係を双曲線表示した算定式を用いている。

また地震動停止後もとの静水圧状態に戻ろうとする際の消散・沈下解析には, Biot の圧密理論⁶⁾を用いている。解析プログラムの流れを図-1 に示す。

2.1 解析モデルと入力地震波

解析対象は, 現在使用されている最大サイズのマンホール (中口径管路用 6 号 MH) をもとに, 高さ寸法を変化させて実施した。マンホールの形状を図-2 に, $H=3.2\text{m}$ の際の解析モデル図を図-3 にそれぞれ示している。

解析に用いた対象地盤の定数は, 1964 年新潟地震時に大被害を受けた昭和橋付近の地盤より決定し (図-4 参照)⁷⁾, 解析に際して地下水位は地表面下 0.6m とした。また地下水位面以深の砂層は液状化する層とした。

また本解析で用いた砂, グラベルの透水係数は, それぞれ $5.0 \times 10^{-5}\text{m/sec}$, $3.0 \times 10^{-3}\text{m/sec}$ で, グリッドの透水係数は, 縦横それぞれ 4m/sec , 0.01m/sec である。

入力地震波は, 図-5 に示すように最初の 4 秒間で振幅が 0 から 150gal まで直線的に変化し, 以降 4 秒間は振幅 150gal が継続する正弦波である。振動停止の 8 秒以降は過剰間隙水圧の消散解析となる。

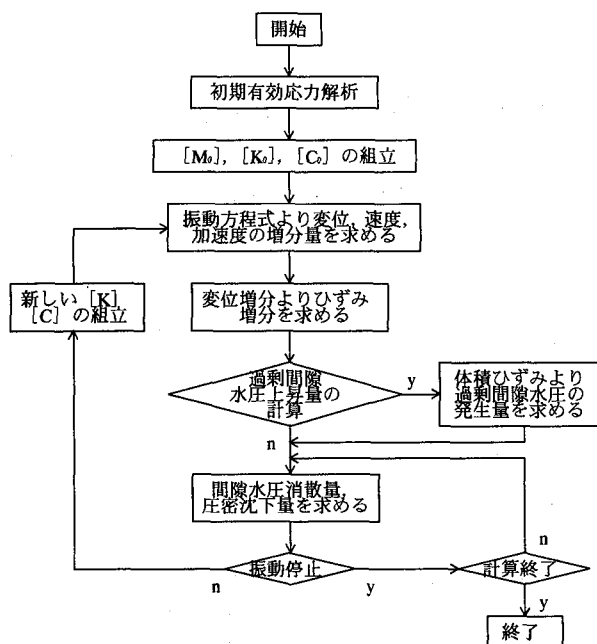


図-1 解析プログラムの流れ

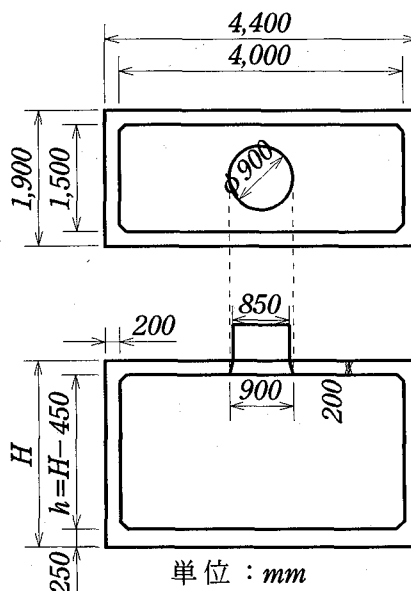


図-2 解析対象マンホール

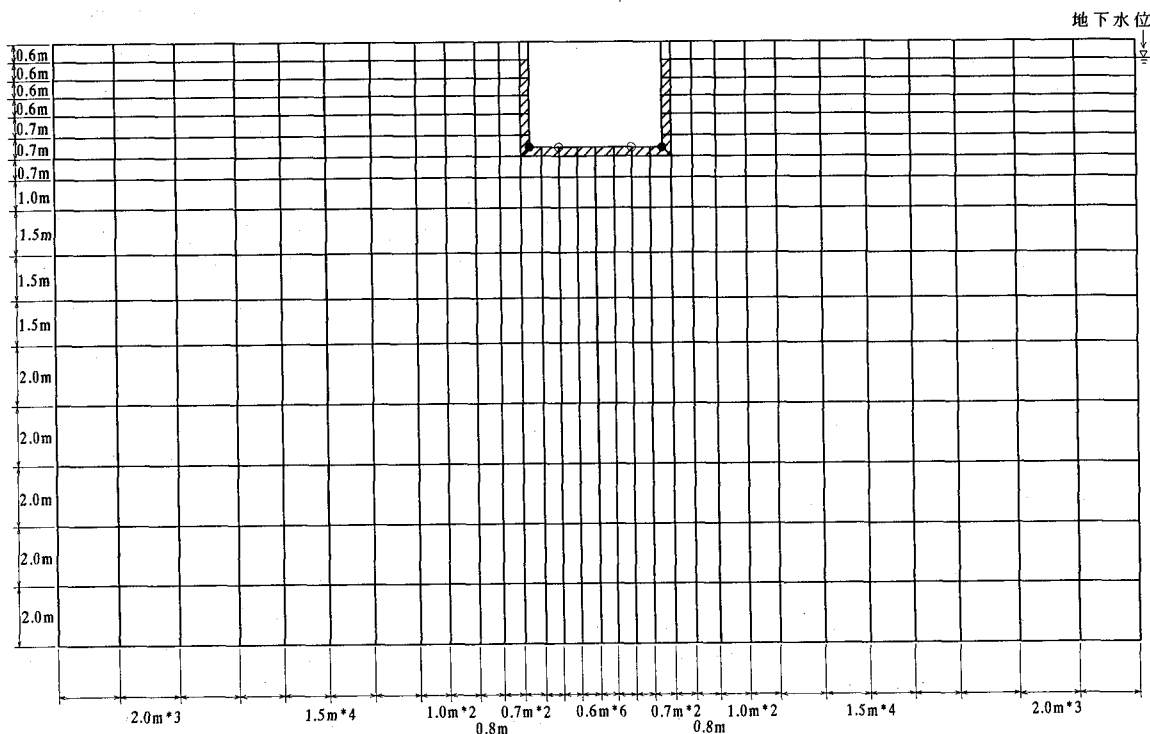


図-3 解析モデル

2.2 解析ケース

埋設深さおよび適用される対策工法にしたがい、表-1に示す12ケースの解析を行った。

1) case1 ~ case4 : グリッドドレーン工法 (図-6)

厚さ 15mm のグリッド材のモデル化は、小さい要素を取り扱うことになるため、FEM では莫大な時間を必要とし、解析が困難になる。そこでグリッド材の透水係数は、周辺の砂と比較してきわめて大きいので、グリッド材周辺を排水点と見なす。実際は遮水シートによって

横からのグリッド材への水の流入が遮断されているので、下部のグラベルと接する位置から排水される。モデル化に際しては、グリッド下端 (図-3 の●の節点) を排水点とした。

2) case5 ~ case8 : グラベルドレーン工法 (図-7)

マンホール側面のグラベル層は、遮水シートにより横からの水の流入が遮断されているため、縦方向のみ透水とし、横方向は不透水としてモデル化した。またマンホール底面のグラベル層は縦横ともに透水である。図-3

において、斜線を施したメッシュがグラベル要素である。
3) case9 ~ case12: 無対策 (図-8)
対策を施さず、図-3 の全要素を砂として解析するケースである。

2.3 解析結果

H=3.2m, 4.2m, 5.2m, 6.2m のグリッドドレーン工法、グラベルドレーン工法、無対策についてマンホール底面中央位置における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-9、図-10、図-11、図-12 にそれぞれ示している。
これらの図よりマンホール底面に作用する過剰間隙水圧は対策工法によって消散させられることが分かる。また対策工法に関してはグリッドドレーン工法、グラベルドレーン工法の順にマンホール底面に作用する過剰間隙

水圧を低減させる効果があることが分かった。
埋設深さについては無対策の場合、埋設深さが深くなるほど水圧の上昇速度が遅くなっていく。これはマンホール底面付近での有効応力が大きくなることによるものと考えられる。グラベルドレーン工法の場合にも、埋設深さが深くなるほど、水圧の上昇速度が遅くなっている。これもマンホール底面以下での有効応力が大きくなることによるものと考えられる。最も過剰間隙水圧の消散効果の大きいグリッドドレーン工法については埋設深さの深くなる H=5.2m, 6.2m の場合その効果がより顕著に表れていることが分かる。
全体としては埋設深さが深くなるほどマンホール底面以下での有効応力（拘束圧）が大きくなるためにより安全になる傾向にある。

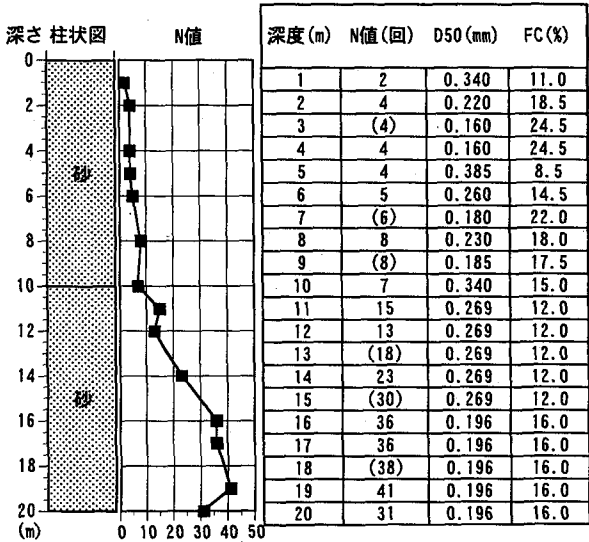


図-4 昭和大橋付近の地盤柱状図とデータ

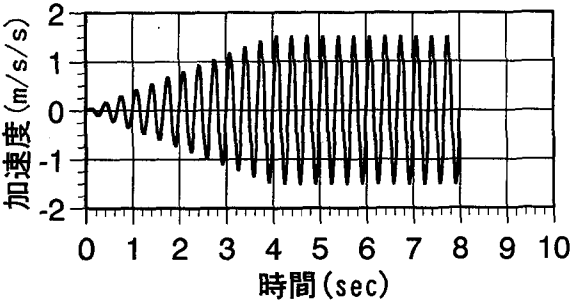


図-5 入力地震波
表-1 解析ケース

浮上抑止工法	解析ケース			
グリッドドレーン工法	case1	case2	case3	case4
グラベルドレーン工法	case5	case6	case7	case8
無対策	case9	case10	case11	case12
H 寸法 (単位: mm)	3,200	4,200	5,200	6,200

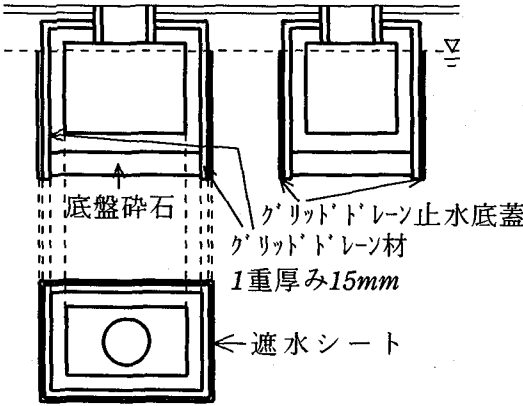


図-6 グリッドドレーン工法

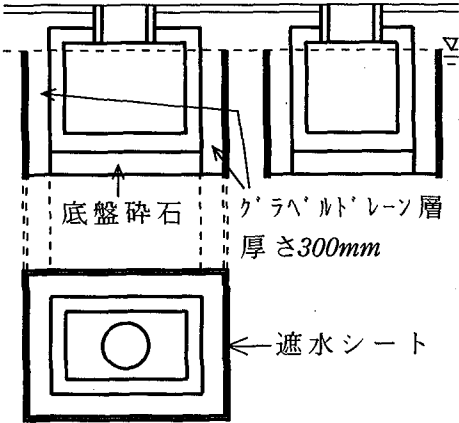


図-7 グラベルドレーン工法

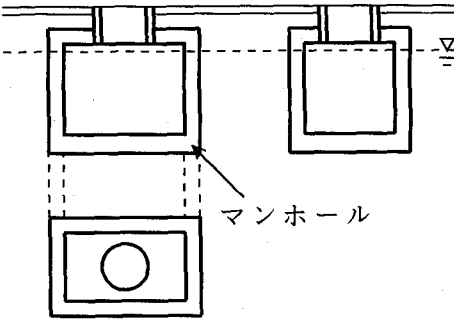


図-8 無対策

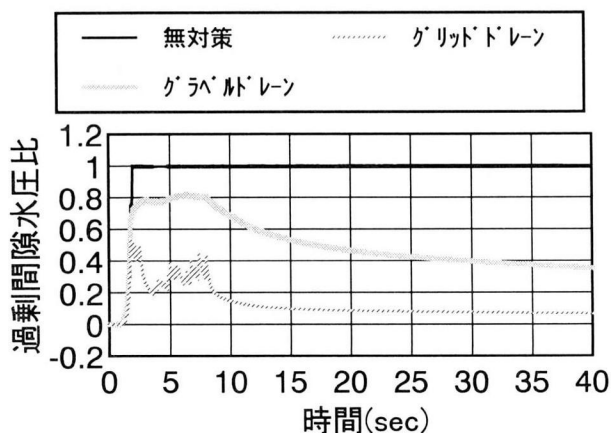


図-9 マンホール底面中央での
過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=3.2m)

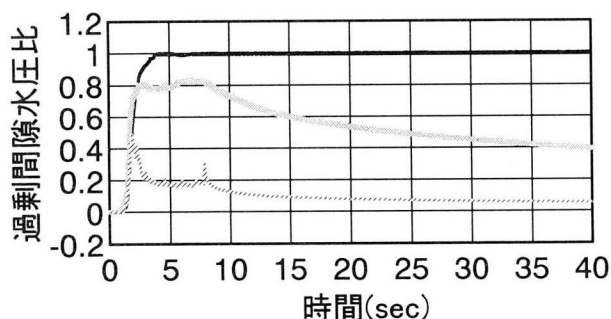


図-10 マンホール底面中央での
過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=4.2m)

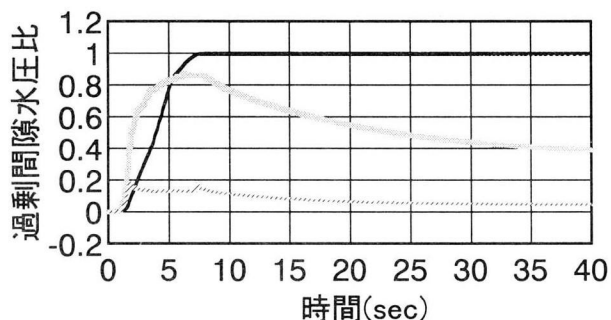


図-11 マンホール底面中央での
過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=5.2m)

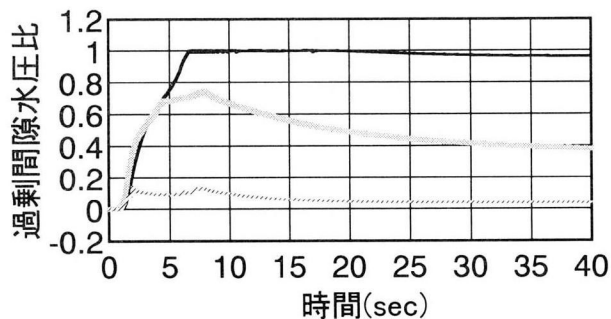


図-12 マンホール底面中央での
過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=6.2m)

3. マンホールの浮上に関する検討

マンホールの浮上計算は共同溝耐震設計要領(案)⁷⁾に

基づいて、図-13 に示す液状化地盤での力の作用状態にしたがい、上述までの FEM により得られた過剰間隙水圧よりマンホール底面に作用する揚圧力を求め、さらにマンホールの浮上とともに変化する底面位置での静水圧による揚圧力を考慮して、マンホールの浮上安全率を式(1)により算定する。

$$F_u = \frac{W_s + W_B + Q_s + Q_B + Q_h}{U_s + U_d} \quad (1)$$

ここに、 W_s ；上載土の重量、 W_B ；マンホールの自重、 Q_s ；上載土のせん断抵抗、 Q_B ；マンホール側面の抵抗（ Q_s 、 Q_B については液状化に伴い、抵抗が減少していくこと、また安全側を考慮して本検討では無視している）、 Q_h ；舗装の抵抗（舗装を無限大板として集中加重を受ける場合の抵抗をとりコンクリート路面の場合にも Q_h が 100kgf しかないのここでは無視している）、 U_s ；マンホール底面位置での静水圧による揚圧力、 U_d ；前述した過剰間隙水圧によりマンホール底面に作用する揚圧力である。

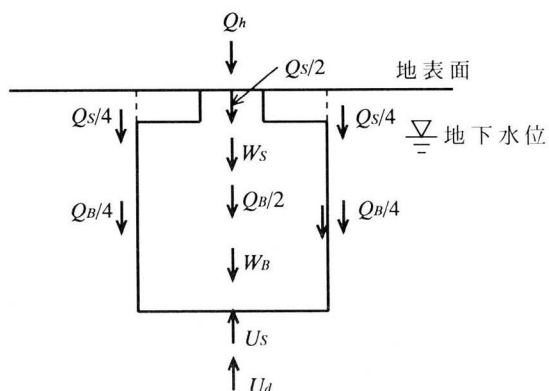


図-13 液状化地盤におけるマンホールの浮上を
考慮する力の作用状態

式(1)より得られた浮上安全率の時刻歴を H=3.2m, 4.2m, 5.2m, 6.2m のグリッドドレーン工法、グラベルドレーン工法、無対策について図-14、図-15、図-16、図-17 にそれぞれ示している。また最小浮上安全率を表-2 に示す。ここでマンホールに作用する力 $f(t)$ は式(3)のように示される。

$$f(t) = (U_s + U_d) - (W_s + W_B + Q_s + Q_B + Q_h) \quad (3)$$

その時マンホールの浮上速度は $f(t)/m$ の 1 回積分によって式(4)のように得られることになる。

$$v(t) = \int_0^t f(\tau) / m d\tau \quad (4)$$

ここで、 m ；マンホールの質量

最小浮上安全率については、浮上速度が 0 になると浮上が止まるので、最初に浮上速度が正から負になる時刻までの最も小さい値を採用した。

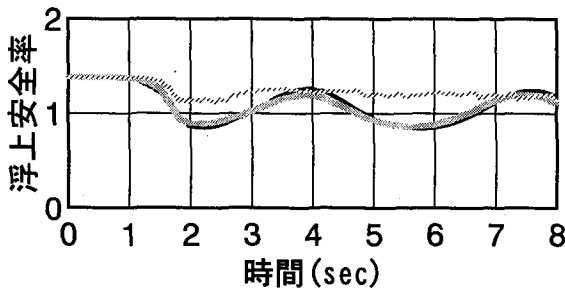


図-14 浮上安全率の時刻歴 (H=3.2m)

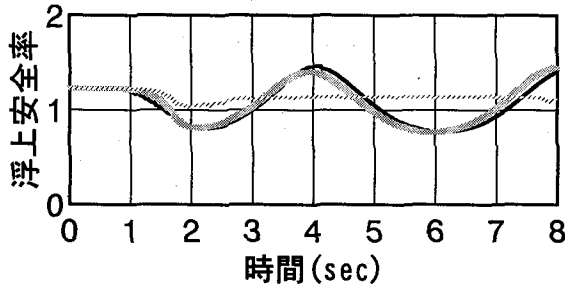


図-15 浮上安全率の時刻歴 (H=4.2m)

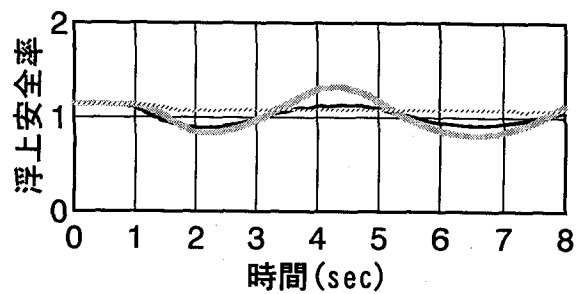
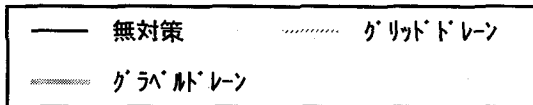


図-16 浮上安全率の時刻歴 (H=5.2m)

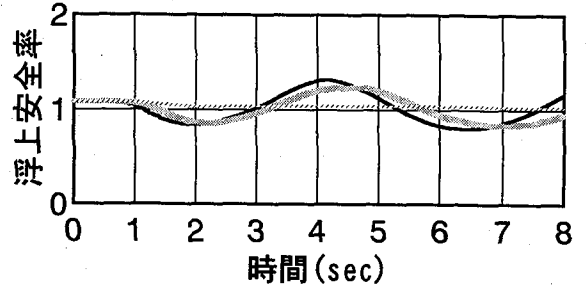


図-17 浮上安全率の時刻歴 (H=6.2m)

表-2 最小浮上安全率

対策 \ H 寸法(mm)	3,200	4,200	5,200	6,200
グリッドドレーン工法	1.115	1.021	1.057	1.025
グラベルドレーン工法	0.887	0.814	0.836	0.856
無対策	0.848	0.803	0.890	0.840

表-3 最小浮上安全率 (静水圧一定)

対策 \ H 寸法(mm)	3,200	4,200	5,200	6,200
グリッドドレーン工法	1.115	1.021	1.057	1.025
グラベルドレーン工法	0.830	0.753	0.699	0.705
無対策	0.734	0.679	0.647	0.623

図-14 から図-17 および表-2 より無対策、グラベルドレーン工法の場合には最小安全率が 1.0 以下となり、マンホールが浮上する結果となっていることが分かる。また浮上に関しても最小安全率が 1.0 以上であるグリッドドレーン工法がグラベルドレーン工法よりは安全である結果となった。グラベルドレーン工法については、H=5.2m のケースにおいて最小浮上安全率が無対策の場合よりも小さくなっているが、これは図-11 に示されるようにマンホール底面に作用する過剰間隙水圧の上昇する速度がグラベルドレーン工法において、より速いためであると考えられる。

さらにマンホールの浮上による静水圧の変化を考慮せず、底面位置での静水圧を一定とした場合の最小安全率を表-3 に示す。この条件においては当然過剰間隙水圧が最大値を取る場合に最小浮上安全率を取るようになる。表-3 についてもグリッドドレーン工法を除いては、最小安全率は 1.0 以下となっており、マンホールは浮上する結果となった。

ここで、表-2 と表-3 を比較すると表-3 の方が全体的に小さい値をとっていることが分かる。これはマンホールの浮上による静水圧の減少を考慮したことによる。つまりマンホールの浮上に関して動的に考えれば、浮上に伴う静水圧の減少を考慮する場合 (表-2) は、静水圧を一定とした場合 (表-3) より最小安全率は大きい値となるため、最も危険な状況を検討するには、静水圧を初期値に固定した状態で、最大過剰間隙水圧が作用する場合を考慮しなければならない。

4. 排水パイプを加えた検討

前述までの結果より、グラベルドレーン工法のみではマンホールの浮上を抑止することは困難であるという結果が知られた。そこで本項では新たに排水パイプをマンホール内に設置し、マンホールの浮上に関して検討を行う。

4.1 解析モデルと解析ケース

解析モデルは図-2 と同様であり、排水パイプを備えたマンホールの概略を図-18 に示す。また排水パイプとしてモデル化される排水節点は図-3 の○で示した節点である。

また解析ケースは、グラベルドレーン工法に排水パイプを設置した 4 ケース (グラベルドレーン工法+マンホール内排水パイプで表-1 の 4 種類の H 寸法) および比較としてグリッドドレーン工法に排水パイプを設置した 4 ケース (グリッドドレーン工法+マンホール内排水パイプ)

イブに表-1 の 4 種類の H 寸法) の計 8 ケースでの検討を行った。

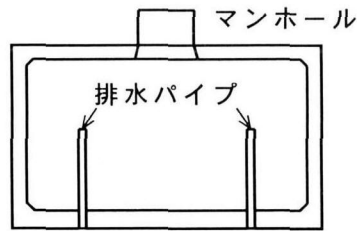


図-18 排水パイプを備えたマンホールの概略図

4.2 解析結果

H=3.2m, 4.2m, 5.2m, 6.2m の上記した 2 対策およびグリッドドレーン工法についてマンホール底面中央位置における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-19, 図-20, 図-21, 図-22 にそれぞれ示している。

これらの図より排水パイプを追加した 2 ケースは、グリッドドレーン工法の場合よりも発生する過剰間隙水圧の消散効果が高いことが分かる。またグラベル+排水パイプの場合でもグリッド+排水パイプと同程度の消散効果を示すようになる。

グリッドドレーン工法と比較すると、排水パイプの追加によりグラベルドレーン工法は過剰間隙水圧の消散効果が著しく向上することが分かる。

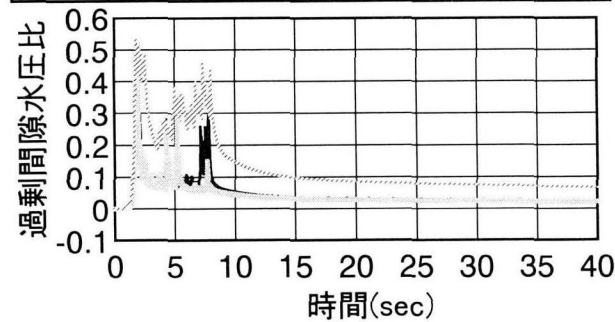
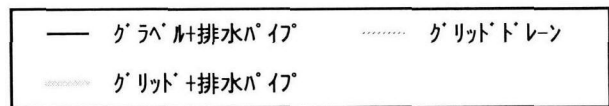


図-19 マンホール底面中央での過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=3.2m)

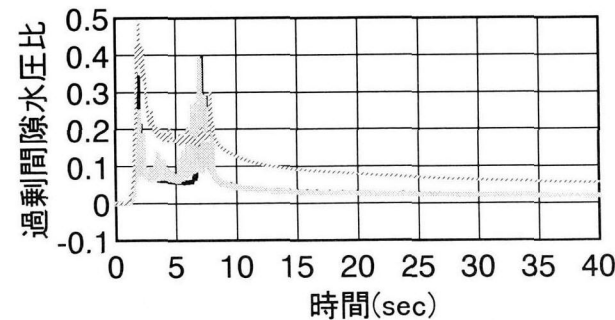


図-20 マンホール底面中央での過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=4.2m)

深さ方向に関しては、埋設深さが深くなるほど、マンホール底面以下での有効応力が大きくなるために安全になっている。

4.3 マンホール内排水量

マンホール内排水パイプを設置し、マンホール内に水を逃がすことによって底面に作用する過剰間隙水圧を減らすため、排水量がマンホールの容積以下である必要がある。そこで本節ではマンホール内への排水量について考察する。

排水点からの流出水量は以下に示す式(2)によって得られる。

$$\{Q\}=[R]\{P\} \tag{2}$$

ここで、 $\{Q\}$ ；節点から単位時間内に流出する水量ベクトル、 $[R]$ ；透水係数マトリックス、 $\{P\}$ ；節点の過剰間隙水圧ベクトルである。

式(2)より得られた各時刻での累積排水量を H=3.2m, 4.2m, 5.2m, 6.2m のグラベル+排水パイプ、グリッド+排水パイプについて図-23, 図-24, 図-25, 図-26 にそれぞれ示す。図は 2 つ設置した排水パイプのうち左側のパイプの排水量を示している。また表-4 には解析最終時刻にマンホール内に排出される総水量を示している。

これらの図表よりパイプ部からの最大排水量はマンホールの容積以下であり、十分にマンホール内に収まることが知られた。

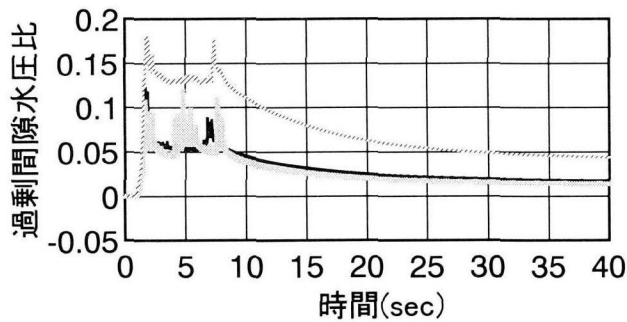


図-21 マンホール底面中央での過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=5.2m)

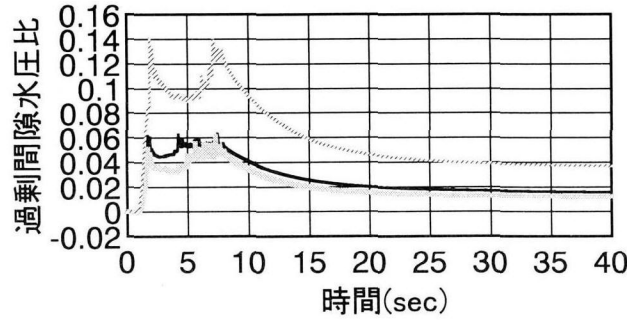


図-22 マンホール底面中央での過剰間隙水圧比の時刻歴 (H=6.2m)

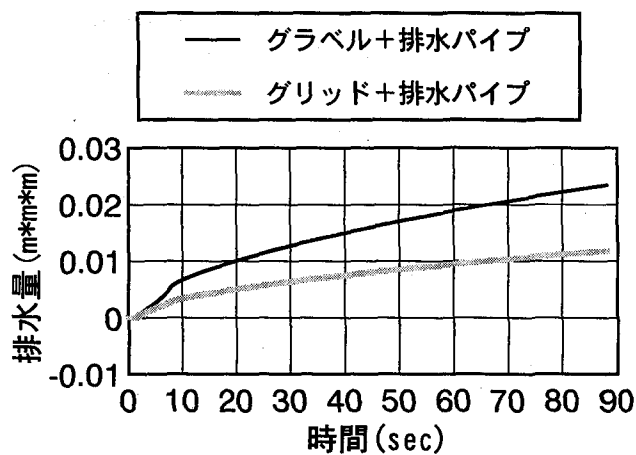


図-23 排水パイプからの累積排水量 (H=3.2m)

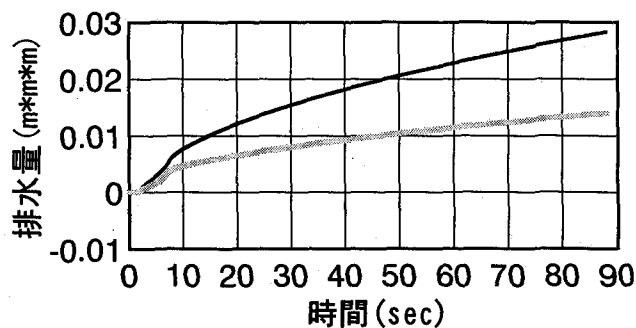


図-24 排水パイプからの累積排水量 (H=4.2m)

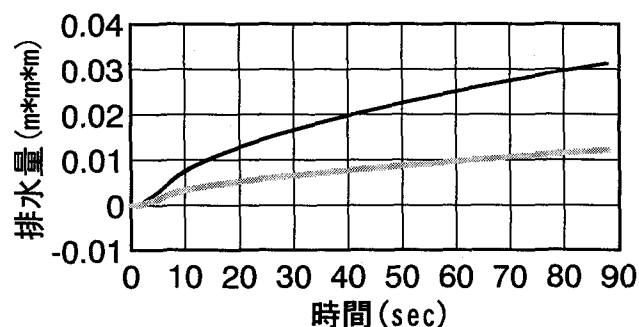


図-25 排水パイプからの累積排水量 (H=5.2m)

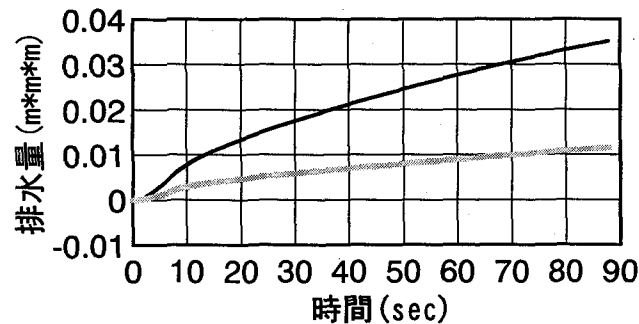


図-26 排水パイプからの累積排水量 (H=6.2m)

表-4 最終的な排水量

対策 \ H 寸法 (mm)	3,200	4,200	5,200	6,200
グラベル+排水パイプ (m³)	0.047	0.057	0.063	0.071
グリッド+排水パイプ (m³)	0.024	0.028	0.024	0.023
マンホール容積 (m³)	16.5	22.5	28.5	34.5

5. 排水パイプを設置した場合のマンホールの浮上に関する検討

排水パイプを設置した場合について、FEM で得られた過剰間隙水圧を用いてマンホール底面に作用する揚圧力を算定し、マンホールの浮上に関して検討する。

式(1)より得られる浮上安全率の時刻歴を H=3.2m, 4.2m, 5.2m, 6.2m のグラベル+排水パイプ, グリッド+排水パイプについて図-27, 図-28, 図-29, 図-30 にそれぞれ示す。また最小浮上安全率を表-5 に示す。

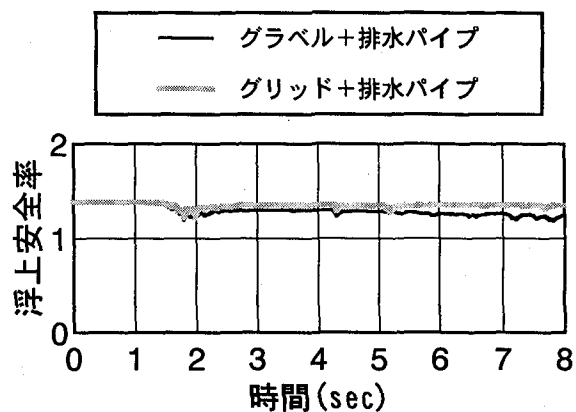


図-27 浮上安全率の時刻歴 (H=3.2m)

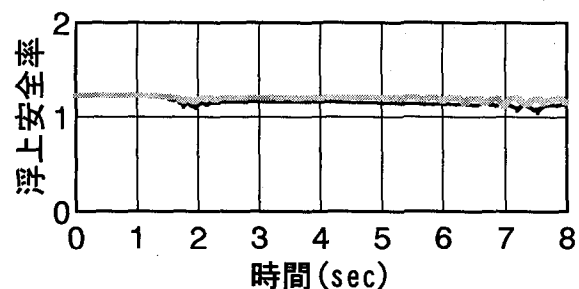


図-28 浮上安全率の時刻歴 (H=4.2m)

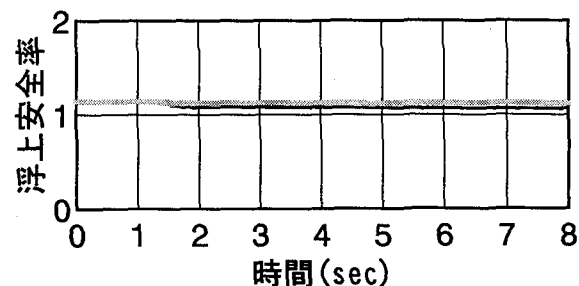


図-29 浮上安全率の時刻歴 (H=5.2m)

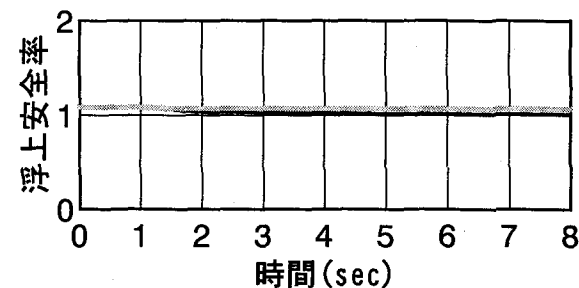


図-30 浮上安全率の時刻歴 (H=6.2m)

表-5 最小浮上安全率

対策 \ H 寸法(mm)	3,200	4,200	5,200	6,200
グラベル+排水パイプ	1.183	1.043	1.059	1.013
グリッド+排水パイプ	1.216	1.108	1.106	1.062

これらの図表よりどの H 寸法についても浮上安全率が 1.0 を下回らず、マンホールの浮上が発生することはない。またマンホールの浮上が起こらないために静水圧の変化がなく、最小浮上安全率を与える状態が前述した最も危険な状態になっている。

排水パイプを設置することでグラベルドレーン工法については浮上を抑止できると考えられる。またグリッドドレーン工法については、さらにマンホールの浮上抑止対策としての効果が増すことが知られた。

6. まとめ

本検討を行った条件内で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 提案した解析手法によって液状化時のマンホールの浮上安全率を検討することが可能であることを示した。
- 2) マンホール底面に作用する過剰間隙水圧は、グリッドドレーン工法、グラベルドレーン工法などでかなりの程度に消散させられる。
- 3) 対策についてはグリッドドレーン工法の方がより効果的である。
- 4) マンホールの埋設深さが深くなるほどマンホール底面以下での有効応力が大きくなるために安全になる傾向にある。

5) マンホールの浮上に関しては、液状化対策工法であるグラベルドレーン工法を施した解析ケースでは最小浮上安全率が 1.0 を下回るという結果になり、単独の対策としては不十分であった。

6) 排水パイプを追加した場合は、グラベルドレーン工法でも十分にマンホールの浮上を抑止することができる。またグリッドドレーン工法については、マンホールの浮上抑止効果が向上する。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発研究技術センター：埋立地の液状化対策ハンドブック，1993.3.
- 2) 国生剛治，江刺靖行，桜井彰雄：砂層の液状化現象についての数値シミュレーション，電力中央研究所報告，1982.
- 3) 佐藤靖彦，Pradan Tej, B.S., 龍岡文夫：排水・非排水繰り返し三軸試験における砂の応力～ひずみ履歴関係，第 22 回土質工学研究発表会，pp.549-552，1987.6.
- 4) 西好一，金谷守，松井家孝，当麻純一：地震時における基礎地盤の安定性評価（その 1）動的解析に基づく砂・砂礫地盤の安定性評価手法の開発，電力中央研究所報告，1986.9.
- 5) 川本眺万，林正夫：「地盤工学における有限要素解析」，培風館，1978.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1990.2.
- 7) 建設省土木研究所：共同溝耐震設計要領(案)，土木研究所資料，1984.10.

(1997 年 9 月 26 日受付)