マンホールの浮上抑制効果の検証に関する 遠心模型実験・数値解析的研究

森篤史1・福田謙太郎1・スレンソッキアン1・中村ゆかり2・中野雅章2

¹日本工営(株)中央研究所 試験・実験センター(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304) ²日本工営(株)中央研究所 先端研究センター(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

マンホールを含めた下水道管路施設の耐震化事業は,対象となる施設数が多く,未だ耐震化 率も低い状況にあり,耐震化には長期間を要する見込みである.従来,下水道管路施設の耐震 化にあたっては,過去の地震被害の特徴を踏まえ,各被害形態に対応する耐震化工法が開発, 現場適用されている.本研究では,マンホールの浮上り現象に対し,接続されている下水道管 や各耐震化工法を加味した浮上抑制効果を検証し,複合的な耐震性の評価方法の確立を目的に 遠心力模型実験及び有限要素法解析を実施した.耐震性の評価手法を構築することで効率的, 効果的な耐震化事業促進へ寄与すると考えられる.

Key Words: 液状化,下水道管路施設の耐震化,マンホールの浮上,遠心模型実験, 動的有効応力解析

1. 研究背景

下水道マンホールの浮上り被害は,道路交通を阻 害し発災直後の道路啓開や救命救急活動,その後の 復旧活動を妨げるとともに,下水道ネットワークを 途絶させ,下水道機能を低下させる.また,下水道 機能の復旧の遅れは上水道の機能回復にも影響し, 地域の生活環境の質や公衆衛生を悪化させる等多方 面へ影響を及ぼす要因となる.令和6年能登半島地 震においても,マンホールの浮上り被害が確認され た一方,事前に耐震化対策が実施されたマンホール では,浮上り抑制効果も報告されている¹⁾(図-1).

下水道管理者は、マンホールを含めた下水道管路 施設の耐震化に取り組んでいるが、令和4年末時点 の全国の重要幹線延長約9万kmの耐震化率は、56% に留まる²⁾.地震後に多方面かつ甚大な影響を与え る一方で、未耐震化施設の多い下水道管路施設に対 して、如何に効率的に耐震化事業を促進するかが課 題である.



図-1 令和6年能登半島地震マンホールの被害状況1)

2. 研究目的

下水道管路施設の耐震化にあたっては、過去の地 震被害と特徴を踏まえ、各被害形態に対応する耐震 化工法が開発され、現場適用されている。例えば、 マンホールと管接続部への既設人孔耐震化工法³⁾ (図-2),フロートレス工法⁴⁾(図-3),管更生工法 ⁵⁾が挙げられる。



図-3 フロートレス工法概念図⁴⁾

本研究で着目したマンホールの浮上現象に対して は、直接的に浮上を抑制するフロートレス工法以外 の耐震対策がマンホールの浮上抑制に効果を発揮す る可能性も想定される.また、既往研究40では、マ ンホール単独構造での研究事例が多く、マンホール と下水道管が一体化している構造での液状化時の地 震時挙動や浮上抑制効果も未解明な状況である.

本研究では,接続されている下水道管や前述の3 つの耐震化工法を加味した複合的な耐震性の評価方 法を確立し,効率的,効果的な下水道管路施設耐震 化事業の促進に資することを目的に,遠心力模型実 験及び有限要素法解析により,マンホールの地震時 挙動や浮上抑制効果を検証した.

なお、本研究は、東京都下水道サービス株式会社 の業務委託により実施したものである.

3. 遠心力模型実験

(1) 実験条件

実験は、日本工営(株)所有の遠心力装置(図-4) にて、30Gの遠心力加速度場で実施した.遠心力場 で実験を行うことで、実物の1/30の長さの模型で、 構造及び地盤の地震時挙動を表現可能となる⁶.

検討(実験及び解析)ケースの一覧を表-1に示す. Caselは,無対策ケース,Case2~4は,耐震化工法 単独ケース,Case5は、3工法を組合わせたケースで ある.なお,基礎的な検討として,地盤のみ、マン ホールのみの検討も行っている.すべてのケースの 入力波形は、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象 台記録波形を用いた(図-5).

実験模式図の例として、Case5の模型配置, 寸法, 計測位置等を図-6に示す.地盤条件は,液状化を想 定した豊浦砂(相対密度54%)とし,その表面を地 下水位とした.豊浦砂中に配置した管路は,7か所 の継手部を有し,その両端にマンホールを配置して いる.計測項目は,加速度,過剰間隙水圧,地表変 位,管のひずみ等とした.各耐震化工法は,対策概 念や特徴,相似則を考慮の上,要素試験も行い,対 策効果を表現可能な模型を作成した(図-7~9).



図-4 遠心力実験装置全景



表-1 検討ケース(実験・解析共通)

解析 ケース	SRM 既設人孔 耐震化工法	FM フロートレス 工法	LP 管更生 工法
Case1	×	×	×
Case2	0	×	×
Case3	×	0	×
Case4	×	×	0
Case5	0	0	0



 CH36
 CH32
 CH38

 ①
 2
 3
 4
 5
 6
 7

図-6 実験模式図例 (Case5) 模型スケール





図-9 管更生工法 (LM) の模型状況

(2) 実験結果

以降に示す実験結果は、全て実物換算によるもの である.また、紙面の都合により、計測結果グラフ 類は、次節の数値解析の章で解析結果と合わせて提 示した.ここでは、模型の地震時挙動について示す.

実験後の地表鉛直残留変位分布を図-10に示す. Case1 (無対策) では,加振により地盤が液状化し,約15cmのマンホール (人孔)の浮上りが確認された. 一方,Case3 (FM) では,地盤はCase1と同様に液状 化していたが,マンホールの浮上りは,約5cm程度 であった.これらの結果より,マンホールと下水道 管の一体化構造時においても,フロートレス工法に よるマンホールの浮上抑制効果が発揮されるこが確 認された他,下水道管直上の地盤隆起も抑制されて いることが確認された.

実験後の模型状況の写真を図-11に示す.同写真 は、下水道管継手の屈曲状況を観察するために、模 型の形を維持しながら取り出したものである. Case1(無対策)の写真を見ると、実験後に下水道 管中央付近の継手で屈曲が生じていることが確認さ れた.一方、Case4(LP)では、下水道管内部に設 置された更生管により管剛性が高くなり、屈曲が生 じておらず、今回の条件では、地震時に下水道管の 屈曲が抑制されていることが確認された.

4. 有限要素法による数値解析

(1) 解析条件

解析手法は、地盤の液状化や、過剰間隙水圧の消 散を考慮した地盤の変形挙動を一連の流れで表現す ることが可能な動的有効応力解析を採用し、具体的 には、0ka et al. (1991)⁷による液状化解析プログ ラムLIQCAを使用した.

解析モデル図例としてCase5 (3工法)の解析モデル図を図-12示す.解析モデルは、実物換算の寸法とし、マンホールと下水道管図心位置を通る二次元断面で作成した.地下水位及び排水境界は、実験に合わせて舗装部と液状化層(豊浦砂Dr=54%)の境界に設定した.境界条件は、実験条件に合わせ、剛土槽を模擬した底面固定、側方鉛直ローラーとした. 外力条件は、土層底面の計測加速度をモデル底面

に入力し,解析時間は,地震後の過剰間隙水圧の消 散過程も含め888秒間とした. 地盤パラメータは、土の繰返し非排水三軸試験 (JGS0541)を行い、供試体の挙動を再現した1要素の シミュレーションを実施し、液状化強度やせん断ひ ずみを再現可能な値とした(図-12中の数値).

フロートレス工法のモデル化は、既往検討の実験 結果等⁴⁾を参考に、マンホール壁面に対する地盤の せん断抵抗の保持を目的に、マンホールと地層間に ジョイント要素を配置し、地層構成や対策有無に応 じ、摩擦抵抗角を設定した⁸⁾.



図-11 実験後の模型状況

(2) 解析結果

過剰間隙水圧比の時刻歴と入力加速度を図-13に 示す.入力加速度が最大となる8秒付近で実験,解 析ともに過剰間隙水圧比は1.0近くとなり,液状化 状態となっている.

Case1(無対策)のマンホール左側(CH2)の鉛直変位 の時刻歴の比較を図-14に示す.マンホールの残留 変位は,実験結果が17.8cmに対し,解析結果が 19.1cmと良好に再現できていることが確認された.



図-12 解析モデル図例 (Case5)

左マンホール側下水道管のモーメントの時刻歴を 図-15に示す. Case2 (SRM)の方が4kNm程度(50s付 近)小さい傾向が確認され、下水道管とマンホール 間の相互作用が小さくなっている. 接続部可とう化 により、地震の揺れが吸収され浮上抑制へ繋がった と考えられる.

マンホール浮上り量(実験・解析)の相関図を図 -16に示す.図-16より,実験・解析結果共に各対策 は,無対策に対し,浮上抑制がみられ,浮上抑制効 その傾向は,実験と解析で同様の結果であった.

3工法の組合せケースが、最も浮上抑制効果が高 く、各工法の抑制効果が蓄積される結果であった. 各工法の抑制原理は、それぞれ、既設人孔耐震化工 法(SRM)は、接続部可とう化による地震の揺れの吸 収、フロートレス工法(FM)は、マンホール壁面に対 する地盤のせん断抵抗の保持、管更生工法(LP)は、 更生管による管の屈曲低減であり、各工法のマン ホール浮上抑制の原理が異なることで、複合的な浮 上抑制効果が発揮されたと考えられる.





図-16 マンホール浮上り量(実験・解析)

5. まとめと今後の課題

実験と解析から以下の4点が明らかになった.

- ① 既往のマンホール浮上抑制工法(FM)は、下水 道管と一体化しても浮上抑制効果を発揮した.
- ② 接続部可とう化工法(SRM)により,地震エネ ルギーが減衰され,浮上抑制へ繋がった.
- 管更生工法(LM)により管の屈曲が減少し,浮 上抑制へ繋がった.
- ④ 3工法の組合せ時の浮上抑制効果が最も高く複合的な浮上抑制効果を確認できた。

今回設定した解析モデルは、浮上量を表現出来て いると考えられ、今後は、模型土槽の制約で実験の 実施が難しいマンホールに複数の下水道管が接続す る条件や、管径や管種が異なる構造に対して、更な るマンホールの浮上抑制効果を検証する予定である. 将来的には、実験や解析の結果を用いて、従来は 構造毎に評価されていた浮上に対する耐震性を、施 工済・施工予定の耐震化工法を加味した浮上抑制効 果(低減率等)として定量化した上で、下水道ネッ トワークとして評価可能な方法の構築へ展開する構 想である.それにより、例えば、老朽化対策として 管更生が計画された下水道管に接続するマンホール への浮上抑制工法実施の優先度判定といった耐震化 の優先箇所の選定、耐震化工法の効果的な組合せの 提案、耐震化が必要な施設の絞り込み等が可能とな ると考えられる. 複合的な耐震性の評価を可能とす ることで、限られた人的資源・財源を合理的に活用 した耐震化事業の促進、地域の防災レジリエンスの 向上に寄与するものと考えられる.

参考文献

- 1) 国土交通省:第2回上下水道地震対策検討委員会資料3-1「上下水道施設の被害状況について」, 2024.
- 2) 国土交通省:第1回上下水道地震対策検討委員会資料4 「上下水道施設の被害状況について」,2024.
- 3)財団法人下水道新技術推進機構:非開削による既設下 水道マンホール耐震化工法「既設人孔耐震化工法」, 建設技術審査証明,2020.
- 4) 財団法人 下水道新技術推進機構:液状化現象によるマンホールの浮上抑制技術「フロートレス工法」,建設技術審査証明,2022.
- 5) 財団法人 下水道新技術推進機構:下水道管きょの更生 工法-形成工法・熱形成タイプ-および取付管の修繕工 法「オメガライナー工法」,建設技術審査証明,2020.
- 6) 武藤真, 福田謙太郎, 堀口陽子, 大沢昌玄: 液状化による マンホールの浮上抑制に対する耐震化工法の実験的研 究, 下水道協会誌, 11月号, pp. 130-139, 2023.
- 7) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T. and Kato, M.: A finite element analysis of liquefaction of seabed due to wave action, Geo-Coast'91, pp. 621-626, 1991.
- 8) 武藤真,森篤史,福田謙太郎,堀口陽子,小林義和,大沢昌 玄:液状化によるマンホールの浮上抑制に対する耐震 化工法の数値解析的研究,下水道協会誌,5月号, pp.90-108, 2024.