

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

もりあつし ふくだけんたろう なかむら なかのまさあき
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。

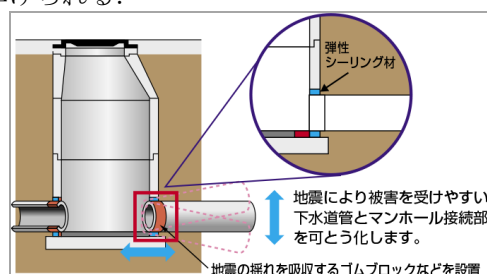


図-2 既設人孔耐震化工法概念図³⁾

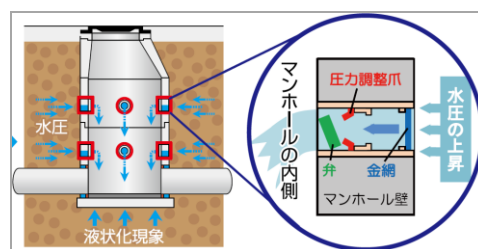


図-3 フロートレス工法概念図⁴⁾

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⁴⁾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。Case1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

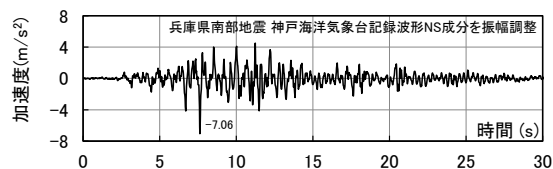


図-5 入力地震動

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	○	×	×
Case3	×	○	×
Case4	×	×	○
Case5	○	○	○

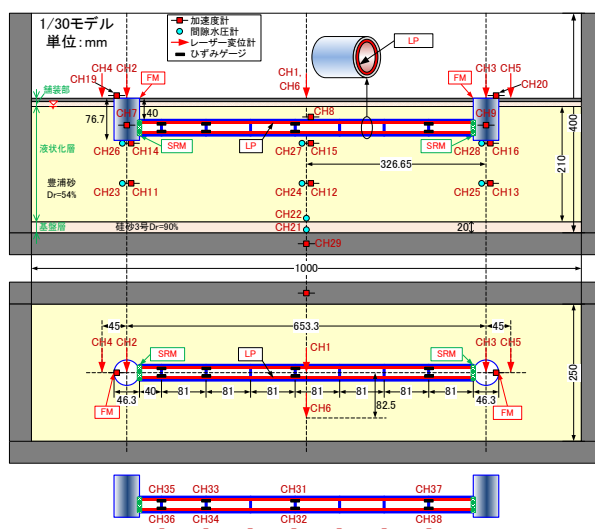


図-6 実験模式図例(Case5) 模型スケール

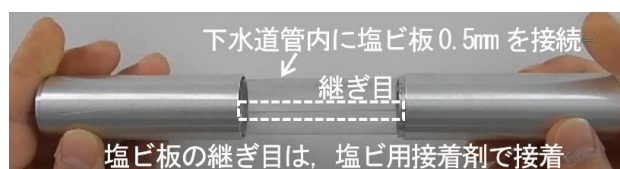


図-7 既設人孔耐震化工法(SRM)の模型状況



図-8 フロートレス工法(FM)の模型状況



図-9 管更生工法(LM)の模型状況

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。

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、浮上抑制効果の傾向は、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。

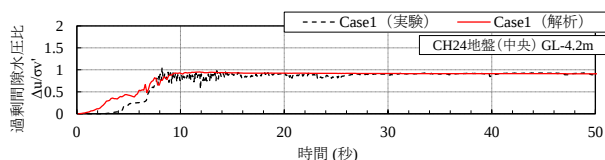


図-13 過剰間隙水圧比の時刻歴の比較 (Case1)

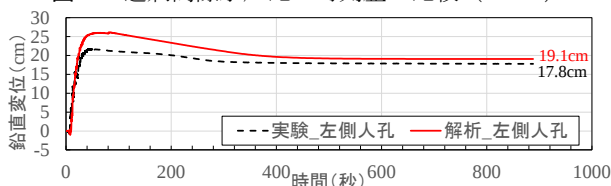


図-14 マンホールの鉛直変位の時刻歴の比較 (Case1)

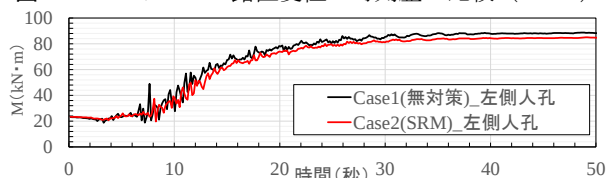


図-15 左マンホール側下水道管のモーメント (Case1・2)

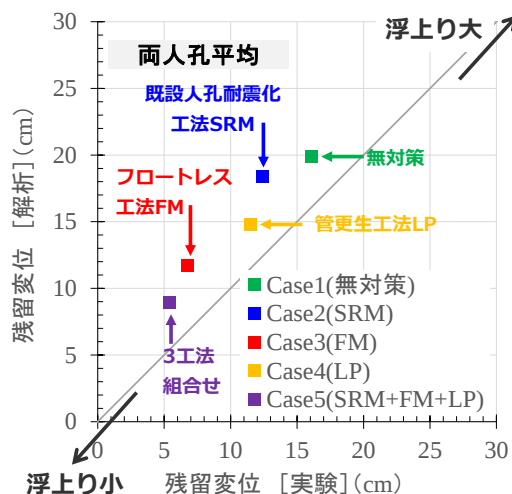


図-16 マンホール浮上り量 (実験・解析)

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。
- ③ 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：下水道管きよの更生工法-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。