

第 I 部門 3 次元有限要素解析による低摩擦型水道更生管の有効性評価

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○種子島佑希

京都大学大学院工学研究科 正会員 古川愛子 清野純史

日本内圧管更生工法協会 非会員 島口昌男 中村徹也 高岡駿

1. 研究の背景および目的

高度経済成長期に整備された多くの水道管の老朽化が進み、計画的な維持管理が必要となっている。従来の維持管理では、耐震性の高い管路に布設替えする対応が基本として行われてきた。しかし近年は経済的要因や地理的要因により布設替えが困難な場所が出てきたため、一部の水道管において更生工法が実用化されてきた。更生工法は、非掘削技術の一つであり、施工期間、施工コストを削減できるという特徴がある。しかしながら、更生工法を用いた管路の耐震性に関する研究事例は十分ではない。

本研究では、低摩擦型の更生材を用いた 2 層構造管に着目した。既設管と更生管の間に摩擦を軽減させるプリライナーを配置することで、従来の既設管と更生管の間に生じていた拘束力が減少し、地震時に更生管が既設管内部を滑らかに動くことができるため、更生管に生じるひずみの低減が期待できる。本研究に先立ち、日本内圧管更生工法協会によってプリライナーが有る場合と無い場合の 2 通りの 2 層構造管の曲げ試験結果が実施されている¹⁾。本研究では、有限要素解析を用いて曲げ試験の再現解析を行い、解析手法の妥当性を検証する。その後、地震によって生じる地盤変位に対する 2 層構造管の挙動解析を行い、プリライナーの有用性を検証することを目的とする。

2. 2 層構造管の曲げ試験概要

日本内圧管更生工法協会によって実施された曲げ試験の供試体と実験装置の模式図を図 1 に示す¹⁾。図 1 はプリライナーが有る供試体の模式図である。既設管（ダクタイル鋳鉄管、外径 271mm、厚さ 8.5mm）は、長さが 500mm の 2 本の管路が直列に連なっており、全長 1000mm である。継手はなく 2 つの管路は接しているだけである。更生管（スーパー Re パイプ、外径 254mm、厚さ 3.3mm）の長さは 1000mm である。既設管は、900mm 離して配置された 2 個のレール鋼の上に設置された。荷重は変位制御によって行われた。既設管の中央上側に円柱（直径 75mm、長さ 150mm）が設置され、万能試験機で鉛直下向きに荷重し、鉛直下向きの変位と鉛直上向きの反力が計測された。試験後の供試体の様子は図 2 の通りであり、プリライナーが無い供試体では既設管と更生管は一体となって挙動しており、既設管は中央で開いていない。一方、プリライナーが有る供試体では既設管と更生管の間の摩擦が小さいため相対変位が生じており、既設管は中央で開いていることが見てとれる。荷重-変位関係の結果は次節で示す。

3. 2 層構造管の曲げ試験の再現解析

非線形有限要素解析により曲げ試験の再現解析を行った。既設管と更生管はシェル要素でモデル化し、要素サイズは軸方向に 10mm とし、周方向に 48 分割した。支点（レール鋼）は 1 辺が約 10mm のソリッド要素で、荷重円柱もソリッド要素（周方向に 28 分割、奥行き方向に 8 分割）でモデル化した。ヤング率は既設管が $1.62 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、更生管が $1.05 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、支点・円柱が $2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。既設管と更生管は弾塑性体、支点と円柱は弾性体と仮定した。既設管の降伏強度は 270 N/mm^2 で降伏後の剛性は初期剛性の 1.36×10^{-4} 倍とした。更生管の降伏強度は 235 N/mm^2 で完全弾塑性とした。降伏判定には Mises 応力を用いた。なお、有限変形を考慮している。

2 本の既設管同士の間、既設管と支点・荷重円柱の間に接触を定義し、接触している場合は圧縮と摩擦（摩擦係数 0.2）に抵抗するとした。既設管と更生管の間は初期状態において接着状態と仮定し、接着が切れた後は接触状態に移行すると仮定した。プリライナーの有無による違いは、接着状態における強度（無： $6.967 \times 10^{-1} \text{ N/mm}^2$ 、有： $4.37 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ ）と接触に移行した後の摩擦係数（無：0.5、有：0.04）の違いによって表現した。

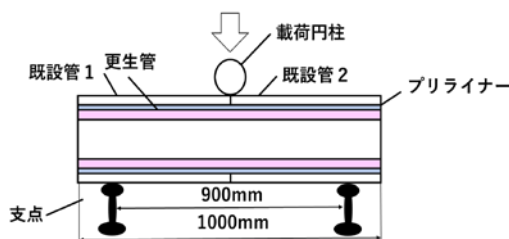
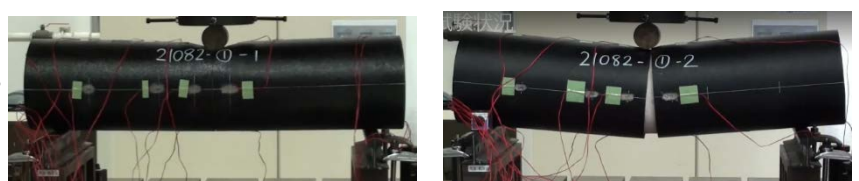


図 1 曲げ試験概要（プリライナー有）



(a) プリライナー無し

(b) プリライナー有

図 2 荷重後の試験体の様子

載荷円柱に鉛直下向きの漸増変位を与え、曲げ試験を再現した。荷重－変位関係を実験と解析で比較したものを図3に示す。プライナー無・有のいずれも、実験が最大荷重に達するまでは良く一致している。図4に、実験での最大荷重発生時変位を与えたときの解析モデルの様子を示す。プライナー有の方が既設管の開きが大きく、図2に示した実験結果と良い対応をしている。以上より、本解析手法が妥当であると考え、次節の検討に移る。

4. 2層構造管の耐震性評価

水道施設耐震工法指針²⁾に記載の応答変位法の考えに従い、2層構造管の耐震性を検証した。既設管と更生管をシェル要素でモデル化し、地盤ばねを介して既設管に地盤変位を与えた(図5)。プライナーの有無による更生管の応答を比較することで、プライナーの有用性を検証する。既設管(管径200mm, 厚さ8.5mm)は、長さが5mの管路を継手で20本つなぎ総延長を100mとした(図5)。既設管内側の更生管(管径183mm, 厚さ3.3mm)の総延長も100mである。既設管・更生管の要素サイズは軸方向に1m, 周方向に16分割とした。継手はばねでモデル化し、管軸直角方向のばね定数は 1.96×10^5 N/mm, 管軸方向は老朽管の継手として用いられるA形継手とほぼ同じ特性を持つとされるG型継手のデータを採用した(図6)。地盤ばねの剛性は管軸方向を375 N/mm, 管軸直角方向を750N/mmとした。継手と地盤ばね定数は周方向のばねの数で按分している。

地盤変位はレベル2地震動を仮定し、波長が100m, 振幅が13.45cmの正弦波とした。区間中央で引張りずみが最大となるような地盤変位を管軸方向に作用させ、その際の更生管の軸方向変位と軸方向ひずみを求めた。解析結果は図7の通りである。プライナー無の場合と比較して、プライナー有の場合は更生管の軸方向変位と軸方向ひずみが大幅に減少していることが読み取れる。これは、プライナーによって更生管が降伏しにくいことを示唆しており、プライナーの有効性を確認することができた。

5. 結論

有限要素法を用いて2層構造管の曲げ試験の再現解析を行ったところ、実験と解析の荷重－変位関係が良い精度で一致した。また、プライナー有の場合に既設管が中央で開く様子も再現することができた。応答変位法の考えに倣い2層構造管に地盤変位を与えたところ、プライナー有の方が更生管に生じる軸方向変位も軸方向ひずみも大幅に低減されており、プライナーによって2層構造管の耐震性が向上することを確認することができた。

参考文献

- 1) 日本内圧管更生工法協会：更生管の性能確認試験(継手部の屈曲滑り挙動の確認)，2021。
- 2) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，I 総論，2009。

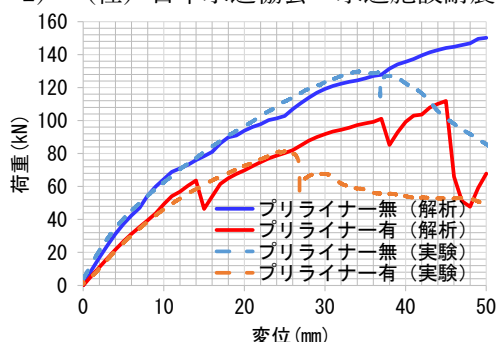


図3 荷重－変位関係の比較

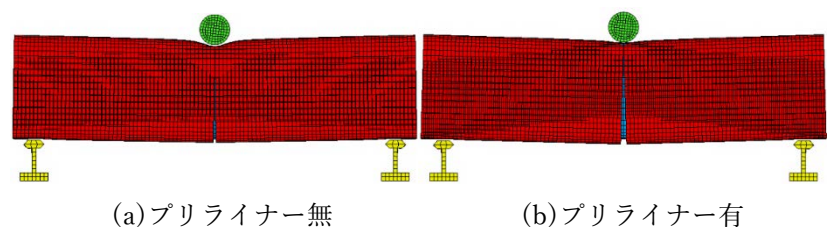


図4 実験の最大荷重発生時と同じ強制変位に対する解析モデルの様子

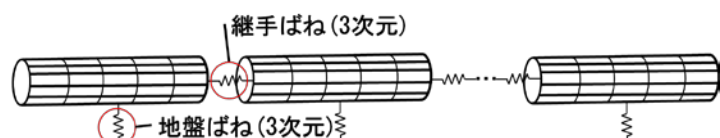


図5 総延長100mの既設管，継手ばね，地盤ばねの解析モデル

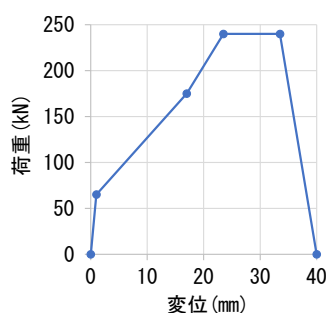


図6 継手ばね特性(引張)

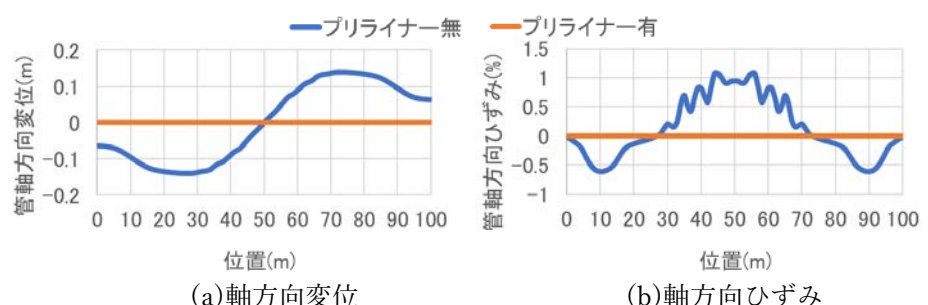


図7 更生管に生じる軸方向変位と軸方向ひずみの比較