

管更生材料の耐震性能評価のための3次元非線形有限要素解析

古川愛子*

1. 研究の目的

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。従来の水道管の老朽化対策として、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、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新しい更生工法に着目した。プリライナーによって既設管と更生管の間に生じていた拘束力が減少し、更生管は既設管内部を滑らかに動けるようになるため、地震時に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、3次元有限要素解析を用いて曲げ試験の再現解析を行い、実験結果と解析結果の一致を確認することで、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. 研究の方法

日本内圧管更生工法協会によって実施された曲げ試験では、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。载荷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载荷し、鉛直下向きの変位と鉛直上向きの反力が計測された。曲げ試験において、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た。

まず、3次元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。载荷円柱はソリッド要素(周方向に28分割、奥行き方向に8分割)で、支点(レール鋼)は可動支承によりモデル化した。既設管と更生管は弾塑性体とし、要素試験で得られた応力-ひずみ関係を元に材料非線形をモデル化した。既設管のヤング率は 1.76×10^5 N/mm²、降伏強度は293 N/mm²であり、更生管のヤング率は 1.05×10^4 N/mm²、降伏強度は235 N/mm²である。降伏判定にはMises応力を用いている。载荷円柱は弾性体とし、ヤング率は 2.00×10^4 N/mm²とした。なお、有限変形を考慮している。既設管同士の間と既設管と载荷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に抵抗するとした。摩擦係数は既

*京都大学・准教授

設管同士が0.4、既設管と載荷円柱間が0.6とした。既設管と更生管の間にはジョイント要素を設定し、プライナーの有無による違いをジョイント要素の接線方向剛性の違いによって表現することとし、要素試験で得られた非線形特性を使用した。ジョイント要素の法線方向の剛性は、圧縮方向は剛、引張方向は0とした。載荷円柱に鉛直下向きに漸増変位を与え、曲げ試験を再現した。

次に、3次元有限要素解析により2層構造間の耐震性評価を行った。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。なお、本解析の既設管には老朽管に多い高級鋳鉄管を想定しており、掘り起こし管の要素試験により物性値を決定している。更生管およびジョイント要素の物性値は前節と同じである。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。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。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。地盤ばねの剛性は管軸方向の地盤を24490N/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。

3. 得られた成果

まず、曲げ試験の解析結果について述べる。荷重-変位関係を実験と解析で比較したところ、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ことを確認した。解析でも、プライナー有の方が既設管の開きが大きく、実験結果と良い対応をしていることを確認した。以上より、ジョイント要素の接線方向剛性によってプライナーを表現する本解析手法が妥当であると考えられる。

次に、3次元有限要素解析による2層構造間の耐震性評価結果を述べる。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減少していることが読み取れる。最大値を比較すると、軸方向変位は約1/2、軸方向ひずみは約1/3に低減した。これは、プライナーによって更生管が降伏しにくいこと、即ちプライナーの有効性を示唆している。

4. 謝辞

本研究は、株式会社オール様からの受託研究として執り行われたものです。研究遂行にあたり、貴重なご助言をくださった日本内圧管更生工法協会の島口昌男様、中村徹也様、高岡駿様に心より感謝申し上げます。

発表論文

- ・高岡駿、中村徹也、古川愛子、清野純史：プライナーを使用した管更生工法の3次元有限要素解析に基づく耐震性評価、令和4年度日本水道協会全国会議（水道研究発表会）、2022.10.19.
- ・古川愛子、清野純史、島口昌男、中村徹也、高岡駿、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、日本地震工学会・地中構造物に作用する地盤反力に関する研究委員会報告会、2023年1月。

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.