

水道用管路更生工法の耐震性能検証

石関 宏真¹・宮島 昌克²

¹ 非会員 芦森工業株式会社 パルテム・防災技術開発部 (〒566-0001 大阪府摂津市千里丘 7-11-61)

E-mail:hiromasa_ishizeki@ashimori.co.jp

² 正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

管路更生工法は、老朽化した管路の腐食・漏水防止および管路更新を目的とした非開削技術である。今回、水道管路に施工した更生管（現場硬化管）について耐震性能を検証する。まず、耐震性能の実態評価として、パルテムH L工法の被災地実績調査を実施した。その結果、更生管の多くは地震時に被害が多い非耐震継手管路に施工されていたが、被災地において被害報告がないことが確認された。よって、更生管の施工が非耐震継手管路の耐震性能を向上させると推察された。

また、地震時挙動の検証実験および適切な耐震計算方法の検討を実施した。実験によって既設継手管路と更生管の一体化挙動が確認されたことから、一定の条件下において管路更生施工管路への鋼管耐震計算方法の適用が可能となった。加えて、自立型更生管の性能試験を実施し、レベル 1、レベル 2 地震動に対する許容歪みを設定した。本検証により、耐震計算を用いた更生管に対する耐震性能評価が可能となった。

Key Words: trenchless techniques, pipe renovation method, water main, paltem, seismic performance

1. はじめに

近年、高度経済成長期に整備された多くの水道管路が更新時期を迎えており、耐震化を兼ねた管路の更新が課題となっている。対策としては、耐震管への布設替え工事を中心となっている。一方で、幹線道路下や軌道下、河川下などの開削困難場所に対しては、非開削技術である管路更生工法が検討されるケースも増えている。

管路更生工法は、空気圧を利用した反転技術等を用いて更生材料を既設管内に挿入し、現場で硬化させることで新たな管（更生管）を形成する非開削技術である。更生材料は、ポリエステル不織布やガラスマット等で構成されたライナーに硬化性樹脂を含浸させたものである。

図-1に反転概要図、図-2に更生管構造図を示す。

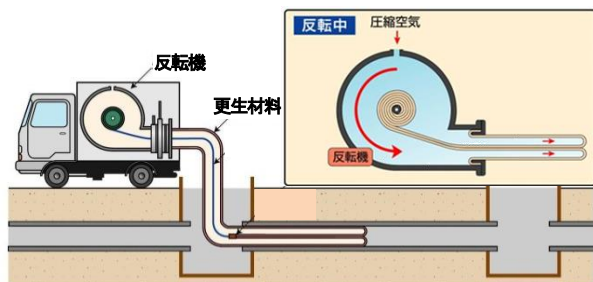


図-1 反転概要図

ガスおよび下水分野においては管路更生工法についてのガイドラインが規定されており、耐震性についても内部媒体の漏洩防止という観点で要求性能が定義されている。一方で、水道分野においては、管路更生工法の特に自立型更生材料についての要求性能が明確に規定されていないのが現状である。

パルテムH L工法では、従来の腐食・漏水防止を目的としたホース内張材料に加え、管路更新を目的とした自立型更生材料を開発・実用化してきた。今回、金沢大学の宮島教授とともに取り組んだ自立型更生材料「H Lパイプ」の耐震性能に関する独自の検証・評価を報告する。

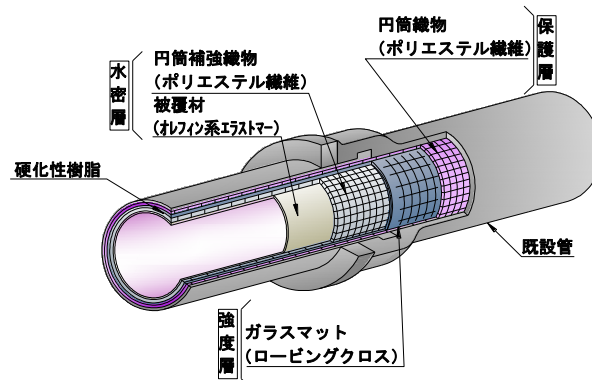


図-2 更生管構造図 (例: H Lパイプ)

2. 被災地における施工実績調査

(1) 地震時の管路被害

地震時における老朽管路の被害状況としては、図-3¹⁾に示すとおり、厚生労働省資料において耐震管に区分されている管路以外、すなわち非耐震管路の被害率が顕著である。布設年度の古い铸铁管および鋼管（ねじ込み継手）については、初期性能の低さに加え、老朽化も進んでいるが原因と推察される。また、铸铁管の被害形態としては、図-4²⁾に示すような継手の抜出しによる漏水が多く報告されている。

(2) パルテムH L工法施工管種

パルテムH L工法の水道分野における国内施工実績は2016年3月現在で390 kmとなっており、対象管種は図-5に示すとおり64.4%が铸铁管である。また、更生対象となる管路は補修・補強が必要な老朽管路であり、継手種別は開発年度の古いK形継手以前の非耐震継手である。

(3) 地震被害調査文献と施工実績の照合

パルテムH L工法の施工管種は、地震時被害の多い非

耐震継手管路が大部分を占めるが、一方で、過去の地震発生時において、パルテムH L工法施工管路の被害報告は、これまで確認されていない。しかしながら、パルテムH L工法の施工による耐震性能の向上を評価するためには、地震時の管路被害が大きかった場所にどの程度の施工実績が存在するのかを明らかにする必要がある。

兵庫県南部地震では、神戸市の4,000kmの配水管で約1,000件の被害があったにもかかわらず、パルテムH L工法の施工管路1,143mには異常がみられなかったという報告³⁾もあるが、他の地震については詳細な調査がなされていなかった。被災地における施工管路の実態を把握するため、過去の地震被害調査文献⁴⁾とパルテムH L工法施工場所を照合させた。

対象地震挙動については、耐震適合性の評価対象とされている震度6強以上⁵⁾および地盤の液状化を選定した。調査精度については、震度6強以上は市町村単位まで、液状化確認地区は町区字単位までとした。表-1に震度6強以上の被災地における施工実績調査結果、表-2に液状化確認地区における施工実績調査結果を示す。ただし、施工延長にはホース内張材料も含まれる。

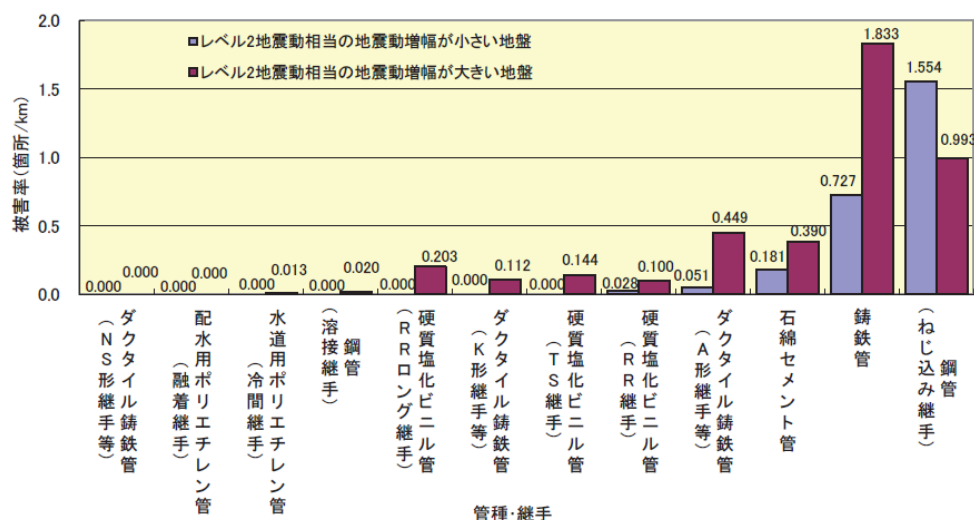


図-3 東日本大震災における管種・継手別被害率¹⁾



図-4 非耐震継手 (K形継手) の離脱²⁾

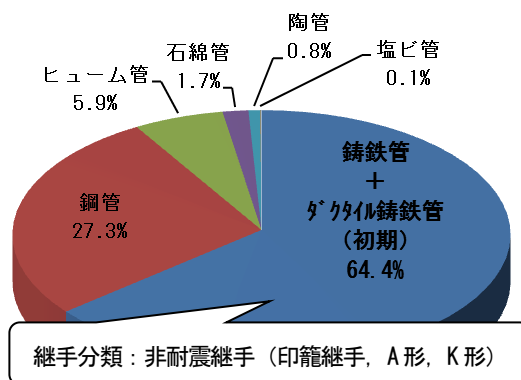


図-5 パルテムH L工法対象管種

調査の結果、パルテムH工法は震度 6 強以上の被災地に 6,690m、液状化確認地区に 2,904m の施工がなされており、かつ該当する自治体からの被害報告はないことが明らかとなった。震度 6 強以上および液状化確認地区において非耐震継手管路の被害が甚大であったことを勘案すると、パルテムH工法の施工によって、非耐震継

手管路の耐震性能は向上したと考えられる。

液状化確認地区の区町字単位には施工場所の特定がなされていない施工実績が残されている。発注者や施工業者へのヒアリング等を継続し、更なる被災地実績の照合を進めている。

表-1 被災地施工実績（震度 6 強以上）

年月日	地震名称	県名	市区町村	施工延長（m）	被害状況
				市町村単位	
1995.1.17	兵庫県南部	兵庫	神戸市	1,143	被害報告 無し
2004.10.23	新潟県中越	新潟	長岡市	132	
2007.3.25	能登半島	石川	七尾市	40	
2007.7.16	新潟県中越沖	新潟	長岡市	132	
2011.3.11	東北地方 太平洋沖	宮城	仙台市，大崎市 石巻市，登米市	571	
		福島	須賀川市	125	
		茨城	日立市	4,547	
			合計	6,690	

表-2 被災地施工実績（液状化確認地区）

年度	地震名称	県名	液状化確認地区			被害状況
			市町村	施工延長 (m)		
				市区町村 単位	区町字 単位	
1995.1.17	兵庫県南部	兵庫	神戸市	1,143	88	被害報告 無し
2000.10.6	鳥取県西部	鳥取	米子市	161	照合中	
2004.10.23	新潟県中越	新潟	見附市，長岡市	2,332	1,423	
2011.3.11	東北地方 太平洋沖	宮城	仙台市，大崎市 石巻市，登米市	538	83	
		福島	須賀川市 いわき市	152	照合中	
		茨城	日立市，水戸市 ひたちなか市 稲敷市，石岡市	4,678	照合中	
		千葉	千葉市，市川市 山武郡	1,357	照合中	
		埼玉	川口市，熊谷市 行田市	2,465	照合中	
		東京	江東区，中央区 品川区，墨田区 大田区，板橋区 北区，江戸川区 港区	4,278	照合中	
		神奈川	横浜市，川崎市	12,949	1,310	
			合計	30,053	2,904	

3. 地震時挙動の検証

(1) 継手構造管路の地震時挙動

管路更生施工管路の地震時挙動を推察する場合、更生管は直接埋設ではなく、既設管の内部に存在していることを考慮する必要がある。既設管の挙動、すなわち継手変位挙動が更生管に大きな影響を与えと考えられる。

管路更生工法の対象管路は、非耐震継手を有する老朽化した管路がほとんどである。非耐震継手は離脱防止機能が無いために、地震時には継手の拔出しが原因となる漏水被害が多く報告されている。

継手の拔出しに至るメカニズムを検証した既報告⁷⁾によると、継手の拔出し抵抗力が継手の拔出し力以下であるため、継手の拔出し挙動が発生すると示唆している。

また、継手の拔出し力は、ダクタイル鋳鉄管に働く管体応力が継手に働き作用するものとし、震度4程度以上の地震時の観測結果から得られた式⁹⁾を用いて、式(1)のように推定されている。

$$R = \sigma_{2L} \times A = \frac{\pi \cdot D \cdot \tau \cdot L}{2A} \times A \quad (1)$$

ここで、

R : 継手拔出し力

σ_{2L} : レベル2地震動時軸応力

A : 管断面積

D : 管外径

τ : 地盤と既設管の摩擦係数 (=0.0098N/mm²)⁹⁾

L : 管長

(2) 管路更生施工管路の継手拔出し抵抗

一方で、管路更生施工管路は既設管内面に更生管が密着した状態となっており、管路更生施工後の既設継手は非常に動きにくい状態にあると考えられる。動きにくさの要因としては、反転圧による密着性、内水圧による周方向への径膨張特性、硬化性樹脂(エポキシ樹脂)による接着性、という更生管に働く3つの特性が考えられる。図-6に管路更生施工管路の構造と特性を示す。

ここで、既設管と更生管の滑りにくさを確認するため、摩擦力測定試験を実施した。短い鋼管に更生管を施工し、更生管上端部から試験機によって管軸方向の荷重を作用させ、鋼管と更生管の界面に滑りが生じる際に必要な荷重を測定する。測定荷重を鋼管と更生管の接触面積で除すことにより、滑りにくさの指標となる摩擦力を算出する。硬化性樹脂による接着性の影響を把握するために、3本の試験体のうち、No.2 および No.3 は、鋼管と更生管の界面にナイロンチューブを設置している。図-7に試験概要図、表-3に試験結果を示す。

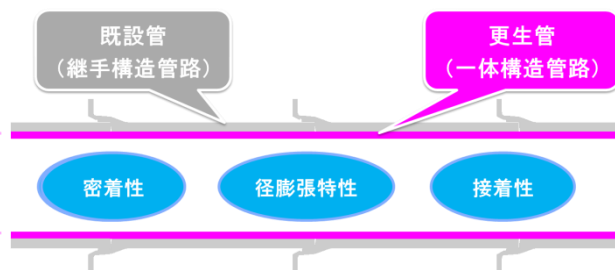


図-6 管路更生施工管路の構造と3つの特性

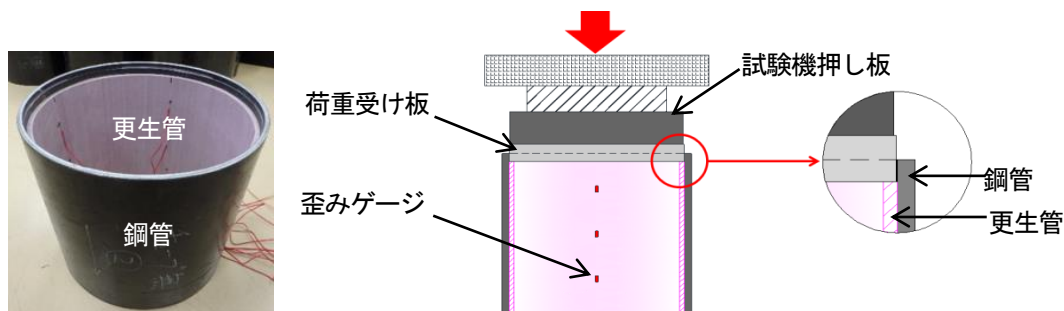


図-7 摩擦力測定試験概要

表-3 摩擦力測定試験結果

更生材料		H Lパイプ φ300, t=4.0mm			(参考) 別試験
既設材料		鋼管 φ300, L=300mm			
試験体		No.1	No.2	No.3	
介在材料 (t=0.2mm～0.8mm)		－	介在材料 A	介在材料 B	介在材料 A
更生管特性	密着性	✓	✓	✓	✓
	径膨張特性	－	－	－	✓(0.75MPa)
	接着性	✓	－	－	－
既設管と更生管の摩擦係数 (N/mm ²)		0.411	0.025	0.025	0.096
(参考) 地盤と既設管の摩擦係数 ⁹⁾ (N/mm ²)		0.0098			

反転圧による密着性および硬化性樹脂による接着性が作用する No.1 の摩擦力は、地盤と既設管の摩擦力 (0.0098N/mm^2) ⁹⁾ の約 40 倍であった。密着性のみが作用する No.2, No.3 の摩擦力でも、約 2.5 倍であった。また、別試験の参考値であるが、密着性と内水圧による周方向への径膨張特性が作用する場合の摩擦力は、約 10 倍の大きさになることが確認されている。

実際の現場においては、この 3 つの特性が同時に作用すると考えられるため、管路更生施工管路においては、地盤と既設管の摩擦力よりも、既設管と更生管の摩擦力の方が 40 倍以上大きいことが明らかになった。

よって、非耐震継手に拔出し挙動が生じるような荷重が作用した場合でも、管路更生施工後の継手部には拔出し挙動は生じないと推察される。

(3) 管路更生施工管路による挙動検証

次に、管路更生を施工した模擬配管を用いて地震時挙動再現実験を実施した。

a) 供試体作製

ダクタイル鋳鉄管 300 mm (モルタルライニング管, 6 m×2 本) を K 形継手にて接続したものをを用いる。ダクタイル鋳鉄管の K 形継手を規定差し込み位置に設置し、自立型更生管 300mm (t=4.0mm) を施工する。

また、本実験においては、既設管内面状態によって左右される更生管の接着性の影響を排除するため、標準施工では使用しない介在材料 (ナイロン系チューブ, 厚み 0.2 mm 程度) をダクタイル鋳鉄管と更生管の界面に設置している。

b) 実験条件

現場での最高使用圧力を想定した内圧 0.75MPa を供試体に作用させた状態で、継手部に取り付けた油圧ジャッキを用いて管軸水平方向の荷重を作用させ、継手部に設置した変位計にて変位量を測定する。継手部への作用荷重 (地震時想定荷重) は、上述の式(1)にて算出した値 27.69kN に、実験上の安全率 2 を乗じた 60kN を採用した。この荷重は、既報告 ⁷⁾ によると K 形継手に拔出し挙動が生じる大きさである。図-8、図-9 に実験状況を示す。

c) 実験結果

表-4 に実験結果を示す。管路更生施工管路の継手は、計算された地震荷重の 2 倍にあたる 60kN の管軸水平方向荷重が作用しても継手部変位 (継手の拔出し挙動) は生じなかった。実験後、荷重を増加させて挙動を確認した結果、地震荷重の 15 倍にあたる 400kN 程度で継手部変位が生じた。

d) 考察

本実験においては、既設管と更生管の界面にナイロンチューブを設置しており、硬化性樹脂の接着性が消去されている。施工前の既設管内面状況によって左右されるとはいえ、実際の管路更生施工管路においては、硬化性樹脂の接着性が作用するため、継手部は本実験よりも強固に固定されている。よって、管路更生施工管路は地震時において、既設継手管路と更生管が一体化するかのような挙動を示すことが明らかとなった。地震時の継手の拔出し挙動が抑制されるという点から、非耐震継手管路の耐震性能が向上したと言える。

また、自立型更生管の強度面に着目すると、地震時荷重の 15 倍の荷重を作用させた場合においても、更生管に破損、漏れ等の異常は生じなかった。加えて、実験後に実施された水圧試験においても、設計仕様である 5.0MPa 以上の破断圧を維持した。よって、自立型更生管は地震荷重作用中および作用後ともに地震時荷重に対して十分な強度を有すると推察される。



図-8 模擬配管図

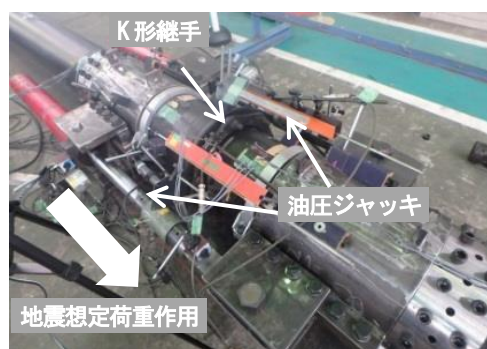


図-9 継手部拡大

表-4 実験結果

項目		内容
条件	模擬配管	DCIPφ300×6m×2 本 K形継手
	内圧, 作用荷重	0.75MPa, 60kN
結果		継手部変位無し 更生管の破損・漏水無し
(参考) 継手部変位荷重		427kN

4. 耐震計算方法の検討

前項で更生管による非耐震継手の抜出し挙動抑制効果および自立型更生管の地震時荷重に対する十分な強度が確認されたが、汎用的な耐震性能評価としては十分ではない。更生管の地震時における強度性能に対する安全性を評価する手段として、各現場条件を反映した耐震計算方法の確立が必要である。更生管の耐震性能評価について、地震時における更生管の発生歪みと、更生管の許容歪みを比較する方法を提案する。

(1) 更生管の発生歪み算出

水道施設耐震工法指針には一体構造管路である溶接鋼管の応答変位法による耐震計算方法が明記されている。更生管も継ぎ目の無い一体構造管路であるが、既設管路の内部に布設されていることから、更生管への溶接鋼管耐震計算方法の適用が困難であった。

今回、管路更生施工管路における既設管路と更生管の一体化挙動が検証されたことから、外側が鋼材に覆われた一体構造管路としての計算モデル化が可能となり、溶接鋼管耐震計算を用いた発生歪み算出方法が、管路更生施工管路に適用可能であると理論的に裏付けられた。

ただし、計算に用いる引張弾性率については、鋼材と更生管には大きな差異がある。安全設計の観点から、発生歪みが大きく算出される更生管の引張弾性率を採用する。加えて、溶接鋼管計算では考慮される管と周辺地盤間でのすべりは採用しないものとした。

(2) 許容歪みの設定

自立型更生材料を用いる場合、既設管路の強度は期待しないため、許容歪みについては更生管単体の強度性能にて設定する。

a) レベル1地震動

レベル1地震動は、「力学的特性が弾性域を超えない限界の状態」を満足することを要求性能とした。一般的な鋼材等は降伏点を境界として、弾性域と塑性域の範囲が明確であるが、更生管の応力-歪み曲線には明確な降伏点がなく、弾性域を読み取ることが困難である。したがって、弾性域判断指標として、繰返し歪み作用による残留歪み測定試験を実施し、弾性限度範囲内での更生管のレベル1許容歪みの設定を行った。

破壊歪みに3以上の安全率を考慮した0.6%を作用歪みとし、試験を実施した。結果、繰返し歪み作用後の応力0MPa時の残留歪みは0.1%以下であることが確認された。図-10に試験状況、図-11に応力-歪み曲線を示す。

一般に降伏点を有しない脆性材料（ガラス、コンクリート等）や延性材料（プラスチック、ゴム等）では、図



図-10 試験状況

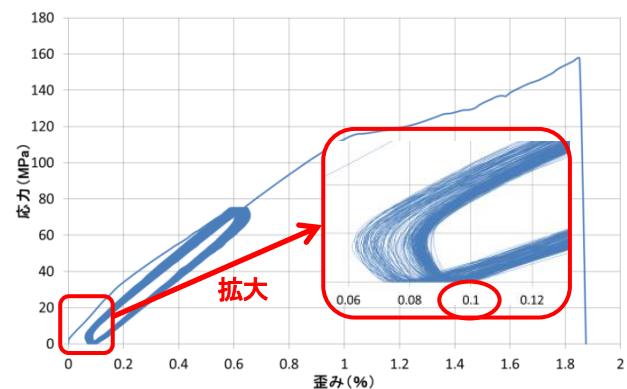


図-11 応力-歪み曲線

表-5 残留歪み試験結果

作用歪み (%)	供試体 No.	残留歪み (%)	繰返し後引張強さ (MPa)
0.60	1	0.07	(平均) 160
	2	0.09	
	3	0.07	
無し	4	-	159

0.2%の残留歪みが残る応力を降伏応力とみなす。今回確認された更生管の残留歪みは0.1%以下であることから、十分な安全性を確保していると言える。

また、試験後供試体の引張強さを測定した結果、強度低下もみられないことから、要求性能を満足していると判断し、レベル1地震動の許容歪みは0.6%と設定する。表-5に試験結果を示す。

b) レベル2地震動

レベル2地震動は、「部分的に塑性化しても漏水が発生しない限界の状態」を満足することを要求性能とした。レベル1地震動と同じく明確な検証方法が無い場合、レベル2地震動を想定した歪みを動的に作用させ、更生管の健全性を確認することで、レベル2許容歪みの設定を行った。

表-6 動的繰返し試験結果

作用歪み (%)	供試体 No.	繰返し後 供試体状態	繰返し後 引張強さ (MPa)
1.20	1	破損無し	(平均) 137
	2		
	3		
無し	4	-	140

破壊歪みに 1.5 以上の安全率を考慮した 1.2% を作用歪みとし、試験を実施した。結果、供試体に破断等の損傷は生じないことが確認された。

また、試験後供試体の引張強さを測定した結果、強度低下もみられないことから、要求性能を満足していると判断し、レベル 2 地震動の許容歪みは 1.2% と設定する。表-6 に試験結果を示す。

5. おわりに

今回の検証では、被災実績調査による実態把握、管路更生施工管路を模擬した地震時挙動検証実験、自立型更生管の耐震計算方法検討の 3 点について取り組み、以下のことが確認された。

- ・バルテム H L 工法施工管路には、震度 6 強以上および液状化確認地区における被害報告は無い。
- ・管路更生施工管路には、既設管と更生管の摩擦力が作用するため、地震時の非耐震継手の抜出し挙動が抑制される。
- ・自立型管路更生（H L パイプ）施工管路においては、地震時想定荷重の 15 倍以上の荷重（427kN）が作用しなければ、継手変位は生じない。
- ・地震時想定荷重の 15 倍以上の荷重（427kN）が作用しても自立型更生管（H L パイプ）に異常は生じない。

- ・溶接鋼管の耐震計算方法を応用することで、管路更生施工管路の地震時歪みの算出が可能となった。
- ・各地震動挙動を想定した性能試験により、自立型更生管（H L パイプ）の許容歪みをレベル 1 地震動が 0.6%、レベル 2 地震動が 1.2% と設定した。

一連の検証と評価の結果、管路更生工法の施工によって老朽化した水道管路の耐震性能が向上すると考えられる。さらに、各現場条件を反映した耐震計算が可能となったことから、更生管の耐震性能を評価する一つの手段ができたと考える。

今後は、貴重な被災地での施工実績を活用し、実験・解析による理論データと追跡調査の追加による実態データの両軸にて検証を追加し、地盤沈下等の地盤変状についても知見を深めていく所存である。

参考文献

- 1) 平成 25 年度管路の耐震化に関する検討会：管路の耐震化に関する検討報告書，p.47，2014.
- 2) 岡部洋：水道管路の復旧支援と震災対策-東日本大震災の復興に向けて-，東日本大震災上下水道シンポジウム，2012.
- 3) 財団法人防災研究協会：埋設管の地震時被害とホースライニング施工管の耐震性に関する研究，1997.
- 4) 平成 25 年度管路の耐震化に関する検討会：管路の耐震化に関する検討報告書，p.25，2014.
- 5) 国土交通省関東地方整備局，社団法人地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明，2011.
- 6) 気象庁：震度データベース，
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>（2016 年 3 月時点）
- 7) 熊木芳宏，宮島昌克：ダクタイル鋳鉄管の継手別被害と地震動に関する一考察，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68No.4，pp.I_195-I_201，2012.
- 8) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，I 総論，p.262，2009.
- 9) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，I 総論，p.91，p.265，2009.

(?)

TESTING OF SEISMIC PERFORMANCE OF PRESSURE WATER MAIN WITH PIPE RENOVATION METHOD

Hiromasa ISHIZEKI, Masakatsu MIYAJIMA

Pipe renovation method is a trenchless technology that is used for the purpose of corrosion/leak prevention and renewal of deteriorated pipelines. This paper presents an evaluation for seismic performance of cured-in-place pipe (CIPP, a trenchless renovation method) that is installed in water main. First, a survey on PALTEM HL method used in quake-stricken areas was conducted to evaluate actual seismic performance. The survey concluded that there was no damage report of CIPPs in stricken areas even though the CIPPs were mostly installed in pipelines with non-anti-seismic joints that significantly suffer damage during earthquakes. Therefore it was conceived that CIPP had improved seismic performance of pipelines with non-anti-seismic joints.

A verification test of seismic behavior and a consideration of a suitable calculation method for seismic design were also performed. In the verification test, a host pipe and CIPP integrally behaved as sort of a single, continuous pipeline, and this result allows seismic design calculation method of a welded steel pipe to be applied to a pipeline with CIPP under certain conditions. In addition, allowable stresses of CIPP for Level-1 and Level-2 earthquakes were determined by performance tests on fully-structural CIPP. This verification study enabled an evaluation of seismic performance for CIPP using seismic design calculation.