



ダクタイル鉄管の耐震性 および長期耐久性 (第二版)

- 1 耐震継手ダクタイル鉄管は、地震による被害がない。
- 2 大地震だけでなく、津波や豪雨などの自然災害への対策にもなり得る。
- 3 耐震計算法が地震観測結果に基づいて確立されている。
- 4 レベル2地震動に対しても弾性設計されており、管体に変形は残らない。
- 5 大地震後に液状化地盤などにおいて管路の挙動を実際に調査し、鎖構造管路の有効性および再度の地震に対する耐震性が検証されている。
- 6 耐震性能1を満たす断層横断部の設計方法が確立している。
- 7 管体の引張強さや伸びなど材質が長期間使用しても変化しない。
- 8 材質・性能の長期耐久性が促進試験だけでなく、実際に長期間使用された管で検証されている。



一般社団法人
日本ダクタイル鉄管協会

はじめに

日本の水道管路は老朽化が進行しており、さらに東日本大震災等の度重なる大地震、および台風や豪雨等が全国各地で頻発し、そのたびごとに管路が被災し断水が発生している。

このようなことから、水道の基盤強化を進め、安定給水を確保するために、管路の更新を一層促進していく必要がある。更新に当たっては長期間の使用に耐え、地震や水害などの自然災害にも強いことが求められている。

ダクタイト鉄管はこれまで長期間使用された実績があり、特に耐震継手ダクタイト鉄管は地震による被害がなく、レベル2地震動や悪い地盤での実績延長も長く、水道を支える基幹施設の一つとして働いている。

日本ダクタイト鉄管協会では、実際に使用されている管路でダクタイト鉄管の耐震性と長期耐久性を調査してきた。

その調査結果をまとめて、2014年に資料「ダクタイト鉄管の耐震性および長期耐久性」を第一版として発行した。

その後、台風や豪雨等の自然災害に耐えた管路や、従前よりも長期間使用された管路の調査データが収集でき、断層横断部の管路設計方法も開発されたので、新たなデータを追加して第二版として整理した。

ダクタイト鉄管の耐震性および長期耐久性

- ① 耐震継手ダクタイト鉄管は、地震による被害がない。
- ② 大地震だけでなく、津波や豪雨などの自然災害への対策にもなり得る。
- ③ 耐震計算法が地震観測結果に基づいて確立されている。
- ④ レベル2地震動に対しても弾性設計されており、管体に変形は残らない。
- ⑤ 大地震後に液状化地盤などにおいて管路の挙動を実際に調査し、鎖構造管路の有効性および再度の地震に対する耐震性が検証されている。
- ⑥ 耐震性能1を満たす断層横断部の設計方法が確立している。
- ⑦ 管体の引張強さや伸びなど材質が長期間使用しても変化しない。
- ⑧ 材質・性能の長期耐久性が促進試験だけでなく、実際に長期間使用された管で検証されている。

特長 ①

耐震継手ダクタイトイル鉄管は、地震による被害がない。

耐震継手ダクタイトイル鉄管は、阪神淡路大震災、東日本大震災をはじめとする過去の大地震において、悪い地盤でのレベル2地震動、液状化地盤にも多くの管路が埋設されていたが、地震による被害は報告されていない¹⁾²⁾。

さらに、一般継手ダクタイトイル鉄管で被害が多く発生した液状化地域でも耐震継手ダクタイトイル鉄管に被害がないことが確認されている。

① 阪神淡路大震災で全面的に液状化が発生した神戸市ポートアイランドでの管路被害と耐震継手ダクタイトイル鉄管の埋設状況を図1に示す。一般継手ダクタイトイル鉄管に34件の被害が発生したが、耐震継手ダクタイトイル鉄管の被害は報告されていない。

② 東日本大震災で液状化が広範囲に発生した浦安市での管路被害と耐震継手ダクタイトイル鉄管の埋設状況を図2に示す。一般継手ダクタイトイル鉄管に320件の被害が発生したが、同地域に埋設された27kmの耐震継手ダクタイトイル鉄管の被害は報告されていない。

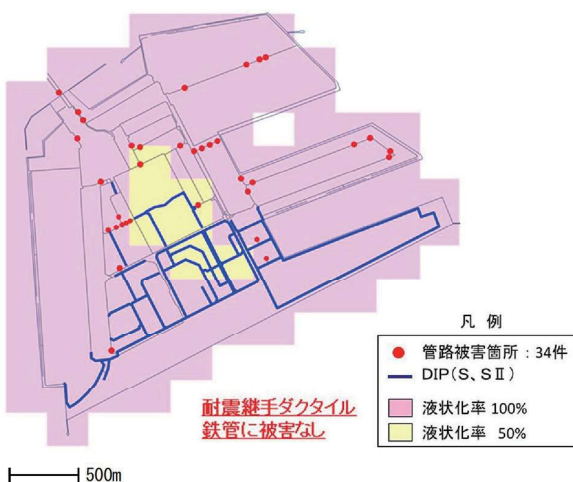


図1 液状化による管路被害集中箇所でも被害がなかった耐震継手ダクタイトイル鉄管
(阪神淡路大震災、神戸市ポートアイランド)

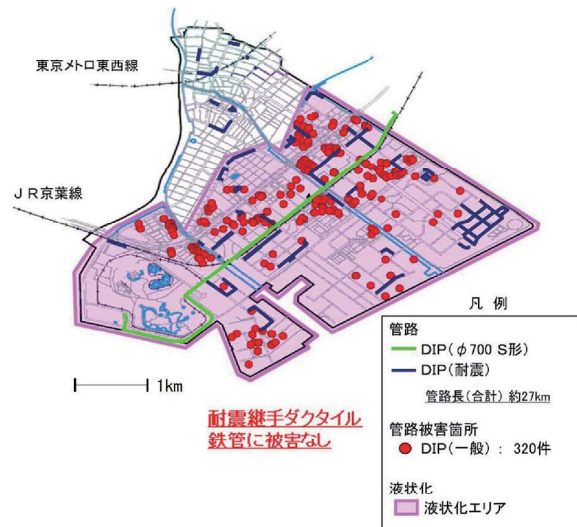


図2 液状化による管路被害集中箇所でも被害がなかった耐震継手ダクタイトイル鉄管
(東日本大震災、浦安市)

特長 ②

大地震だけでなく、津波や豪雨などの自然災害への対策にもなり得る。

図3および図4に示すように、耐震継手ダクタイトイル鉄管が津波や豪雨による道路崩壊に耐えた事例が多数報告されている³⁾。図5の管路には、津波により流されたコンテナが管に衝突し、管の上に乗っているが、被害がなかった。



図3 津波による道路崩壊に耐えた耐震管路



図4 豪雨による道路崩壊に耐えた耐震管路



図5 東日本大震災の津波に耐えた耐震管路

耐えた管路の一部では、継手伸縮量や継手屈曲角度を計測している。図4に示した道路崩壊に耐えた管路の継手屈曲角度を図6に示す。呼び径75および100のN S形継手は、最大屈曲角度8°まではそのまま使用することができる。しかし、呼び径75ではこれを超えて8.7°屈曲していた。そこで、表1に示す様々な試験条件で継手の水密性および離脱防止性能を検証し、異常がないことを確認したうえで、道路復旧時に元の位置に戻してそのまま使い続けた⁴⁾。

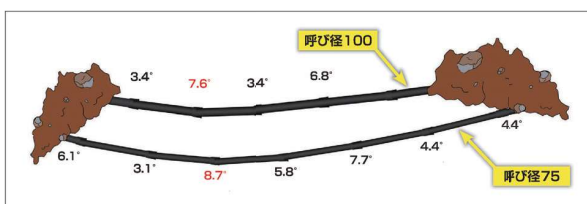


図6 道路崩壊に耐えた管路(図4)の継手屈曲角度

表1 道路崩壊に耐えた管の試験条件

項目	試験条件	結果
水密性試験	① 継手を8.7° 屈曲させ、水圧3.0MPa を負荷し5分間保持	異常なし
	② 継手を真直状態に戻した後、①とは逆方向に8° 屈曲させ、水圧3.0MPa を負荷し5分間保持	
離脱防止試験	継手を8.7° 屈曲させ、真直状態に戻した後、引張力225kNを10回負荷	異常なし

このように、地震対策として耐震継手ダクトイル鉄管を用いて管路を整備することにより、津波や豪雨などの自然災害対策にもなり得る。

特長 ③
耐震計算法が地震観測結果に基づいて確立されている。

耐震継手ダクトイル鉄管の地震時の挙動と作用する力を明らかにするため、1972年から八戸市に3箇所の観測所を設置し、地震時の継手伸縮量や管体発生応力などを計測してきた。地震時の管路挙動観測システムの例を図7に示す。例えば、図8に一例として示す計測結果から次式が得られた⁵⁾。

$$\text{継手伸縮量} e = \varepsilon \times l$$

(ε :地盤ひずみ、 l :管長)

ダクトイル鉄管の耐震計算法は、これら実際の観測データの分析に基づいて確立され、水道施設耐震工法指針・解説2009年版(日本水道協会)に、専門委員会における審議を経て記載されている。

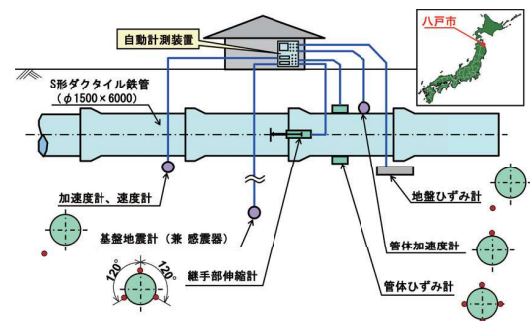


図7 地震時の管路挙動観測システム例

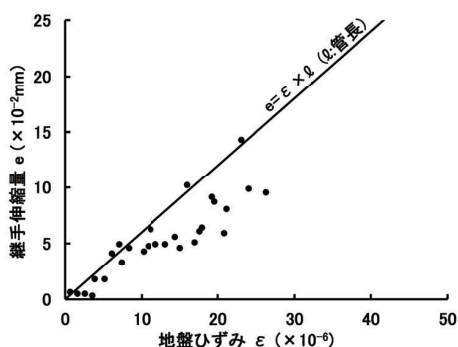


図8 地震観測で得られたデータの例 (地盤ひずみと継手伸縮量)

特長 ④

レベル2地震動に対しても弾性設計されており、管体に変形は残らない。

ダクティル鉄管の耐震計算では、レベル2地震動に対しても、弾性域で安全性を照査する⁶⁾。すなわち、レベル2地震動でも管体に変形は残らない。これは、水道施設耐震工法指針・解説2009年版(日本水道協会)で定める耐震性能の区分に従うと、レベル1地震動、レベル2地震動ともに耐震性能1に該当する。

表2 継手構造管路の耐震性能と照査基準⁶⁾

	レベル1地震動	レベル2地震動
照査基準	弾性設計	弾性設計
	① 管体応力 ≤ 許容応力	
	② 継手部伸縮量 ≤ 設計照査用最大伸縮量	
耐震性能	耐震性能1	耐震性能1

※ 耐震性能1：地震によって健全な機能を損なわない性能

特長 ⑤

大地震後に液状化地盤などにおいて管路の挙動を実際に調査し、鎖構造管路の有効性および再度の地震に対する耐震性が検証されている。

1.大地震後の管路の挙動調査

当協会では、阪神淡路大震災や東日本大震災をはじめとする大地震の後に、漏水の有無だけでなく、液状化発生地域での地盤沈下や側方流動、さらに盛土が崩壊した箇所に埋設された管路にテレビカメラを挿入するなどして、継手伸縮量や継手屈曲角度を計測してきた。耐震管路の調査実績を図9に示す。これまでに13箇所を調査している。

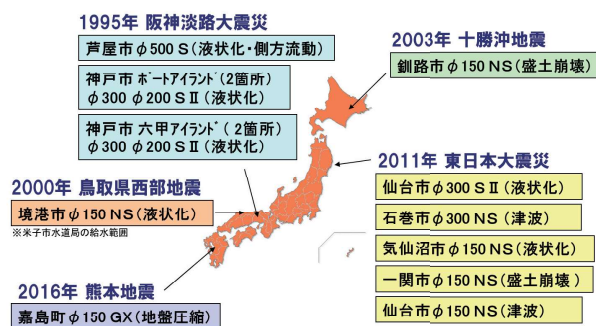


図9 耐震管路の挙動調査実績^{7)~14)}

一例として、東日本大震災で液状化に耐えた管路の計測結果を図10に示す¹²⁾。この調査から以下の結果が得られた。

- ① 地盤歪み(継手の伸縮)は一様ではなく局所に集中する。
- ② 一つの継手が最大まで伸びて隣の継手を順次引張り、局所に集中する大きな地盤歪みを吸収する。

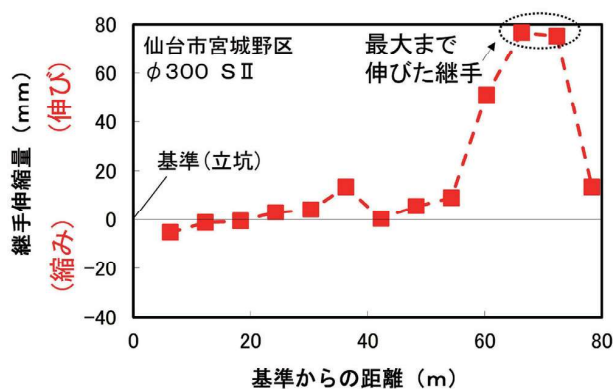


図10 東日本大震災の管路挙動調査結果

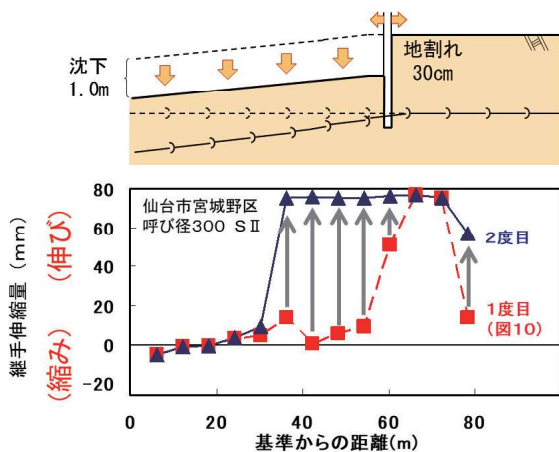
2.大地震を経験した後の耐震性

近年、巨大地震が頻発しており、いつ次の大地震が発生してもおかしくない。すなわち同じ地域が何回も大地震にみまわれる可能性もある。さらに、管路は地中に埋設され、状態を確認することや補修をすることが難しい。これらのことから、水道管路は1回の地震に耐えるだけでなく、繰り返し起こる大地震に耐え、地震後もそのまま継続して使用できることが求められる。

図10の東日本大震災で液状化に耐えた管路の調査結果では、まだほとんど伸縮していない継手もあり、管路全体での伸び率は約0.3%で、許容値1%よりも小さく、管路全体としては十分に伸縮できる余裕があることがわかった。

【管路全体での伸び率】
伸び率 約0.3% < 許容値1%

図10の状態からさらに1mの沈下と、30cmの地割れが同時に発生するなど、大地震の時のシミュレーション結果を図11に示す。2度目の地震に対しても継手が順次伸び出し、管路全体で大きな地盤の動きを吸収できている。



【管路全体での伸び率】
伸び率 約0.8% < 許容値1%

図11 2度目の地震に対するシミュレーション結果

特長 ⑥

耐震性能1を満たす断層横断部の設計方法が確立している。

耐震継手ダクティル鉄管では、図12に示す実管を用いた実験、および幾何学的非線形性と材料の非線形性を考慮したFEM解析を行い、断層横断部の管路設計方法を検証している。FEM解析モデルを図13に、実験と解析の継手屈曲角度の比較を図14に示す。実験結果と解析結果はよく一致しており、FEM解析が断層横断部の管路設計に有効であることが確認できた。



図12 実管を用いた実験

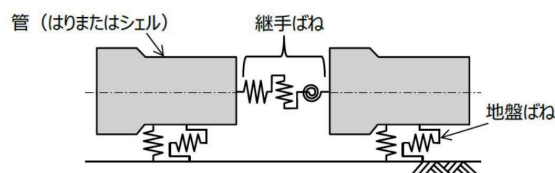


図13 FEM解析モデル

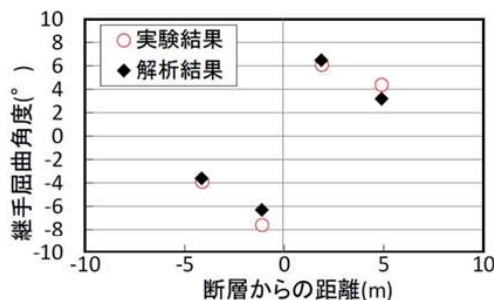


図14 実験結果と解析結果の比較

断層横断部の設計照査基準を表3に示す。断層横断部の管路設計は弾性設計である。図15に示すように、断層変位が大きい場合は長尺継ぎ輪や継ぎ輪を配置して対応する。この長尺継ぎ輪や継ぎ輪の配置や個数を含めて設計手順を確立した¹⁵⁾（日本ダクタイトイル鉄管協会「耐震型ダクタイトイル鉄管による断層対策管路の設計 JCPA T 64」）。

表3 断層横断部の設計照査基準

照査項目	照査基準
継手屈曲角度	各継手の許容値以下
応力	ダクタイトイル鑄鉄の耐力以下 (270MPa)
軸力	3DkN以下 D:呼び径mm

注 耐震性能1を満たすように設定されている。

耐震継手ダクタイトイル鉄管の断層対策の特長をまとめると次のとおりとなる。

- ① 耐震性能1を満たすので、断層変位を受けた後も継続して使用できる。
- ② 地盤条件にもよるが、1.5m以下の断層変位に対しては通常の管路で安全であり特別な対策は必要としない。
- ③ 断層出現位置は正確に予測することは難しいため、断層出現位置のばらつきを考慮した範囲で示されることが多いが、この設計方法に従えば断層がどこに出現しても管路は安全であることが確認されている。

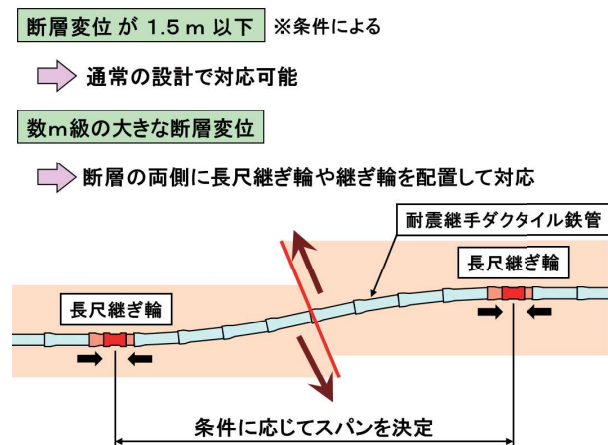


図15 断層横断部の管路設計方法

特長 ⑦

管体の引張強さや伸びなど材質が長期間使用しても変化しない。

実際に使用されてきたダクタイトイル鉄管（最大で53年間使用）の管体の引張強さを図16に、伸びを図17に示す。長期間使用しても管体の引張強さおよび伸びに経時的な変化がない。

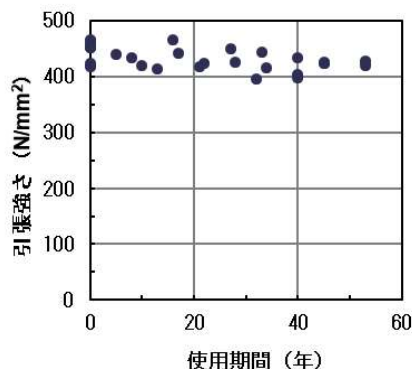


図16 長期間使用された管体の引張強さ

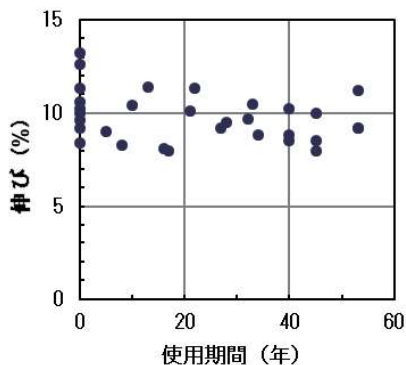


図17 長期間使用された管体の伸び

特長 ⑧

材質・性能の長期耐久性が促進試験だけでなく、実際に長期間使用された管で検証されている

1. ゴム輪

実際に使用されてきたゴム輪（最大で53年間使用）の引張強さを図18に、硬度を図19に示す。長期間使用してもゴム輪の引張強さおよび硬度には、経年による大きな変化はない。

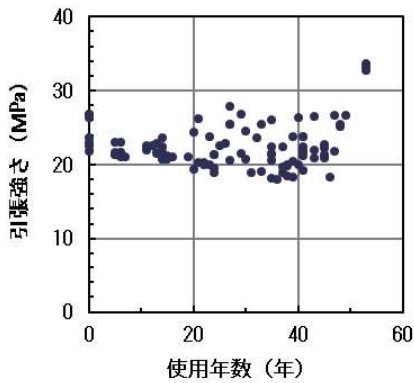


図18 長期間使用されたゴム輪の引張強さ

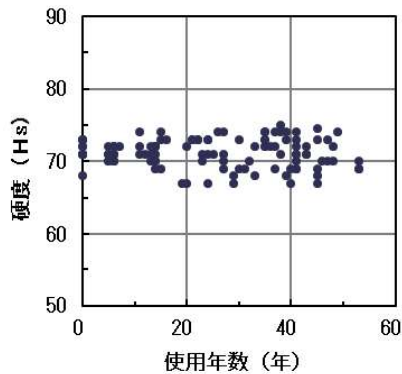


図19 長期間使用されたゴム輪の硬度

2. 水密性能

53年間使用された管(呼び径700・A形)の水密試験結果を表4に示す¹⁶⁾。地震時の揺れや地盤沈下を想定し、継手に管軸方向の変位、並びに曲げ変位を各々繰り返し与えた状態で水圧負荷試験を行った。いずれの場合も漏水を生じず、高い水密性能を保持していることを確認した。

表4 水密試験結果

条件	繰り返し回数	負荷水圧	保持時間	結果
繰り返し伸縮 ±32.5mm	10回	0.85MPa	5分	漏水なし
繰り返し屈曲 ±2.5°	10回	0.85MPa	5分	漏水なし



図20 53年間使用された管の外観状況

3. 離脱防止性能

41年間使用された管(呼び径450・SII形)や、38年間使用された管(呼び径1000・S形)の離脱防止性能を調査した¹⁷⁾。調査した管の供用期間中に発生した地震の回数を表5に示す。これらの管は過去震度6以上の地震を2回経験している。

表5 供用期間中に発生した地震の回数(八戸市)

震度	IV	V	VI
発生回数*	35	7	2

※ 1975年～2008年に発生し、震度IV以上のもの

離脱防止試験結果を表6に示す。試験は継手部に3DkN(D:呼び径mm)相当の引張力を19回負荷し、20回目に3DkN相当よりも大きな引張力を与えた。引張力を繰り返し負荷しても継手部に異常はなく、新品と同じ性能を保持している。

表6 繰り返し離脱防止試験結果

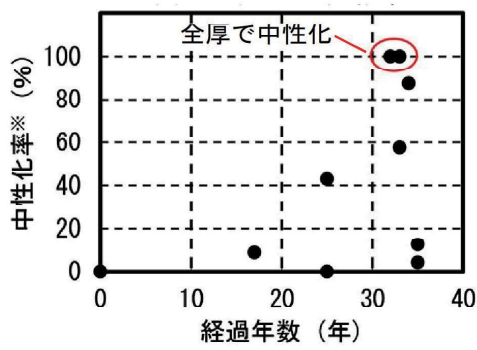
口径・継手(使用年数)	負荷条件	結果
呼び径450・SII形(41年間使用)	引張力 1,350kN ×19回 引張力 1,600kN ×1回	異常なし
呼び径1000・S形(38年間使用)	引張力 3,000kN ×19回 引張力 4,000kN ×1回	異常なし

このように、長期間使用され、複数回の大地震を経験した後でも十分な耐震性を有しており、次の地震にも耐えられることが検証できた。

4. 内面塗覆装

(1) モルタルライニング

最大で35年間使用された管を、食塩水(濃度3%)に24週間浸漬させた後、管内面の発錆状況を調べた¹⁸⁾。モルタルライニングの中性化深さを図21に示す。全厚で中性化しているものもあったが、すべての供試体で鉄部の発錆はなく、モルタルライニングが防食性を有していることを確認した。全厚で中性化していたものの塩水浸漬後の状況を図22に示す。



※ 中性化率：モルタルライニング厚さに対する中性化深さの割合

図21 中性化深さの測定結果



備考 比較のためモルタルライニングを完全に取除いた管片で行った試験では4週間で発錆がみられた。

図22 塩水浸漬試験結果

(2) 内面エポキシ樹脂粉体塗装

39年間使用された粉体塗膜の状況を図23に示す。長期間使用しても、粉体塗膜に膨れや剥離などの異常はなく、錆も発生していなかった。

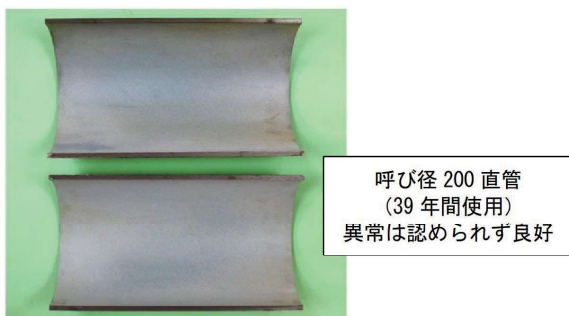


図23 粉体塗膜の状況

さらに、19～39年間使用された内面エポキシ樹脂粉体塗膜の付着強さ、吸水率、インピーダンスおよび塩素浸透深さを調査した¹⁹⁾。調査結果を図24から図27に示す。付着強さ、吸水率、インピーダンスは新品と同等であり、粉体塗膜の劣化は認められなかった。また、塗膜表面からの塩素浸透深さは、塗膜の厚さ約300 μm に対して20 μm 以内であり、内面エポキシ樹脂粉体塗装は優れた長期耐久性を有することを確認した。

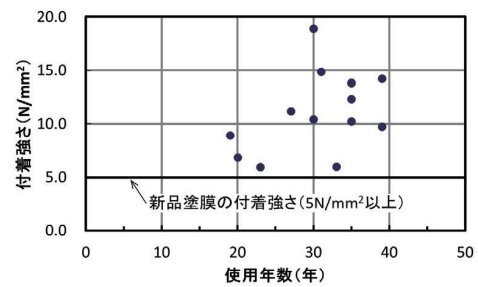


図24 粉体塗膜の付着強さ

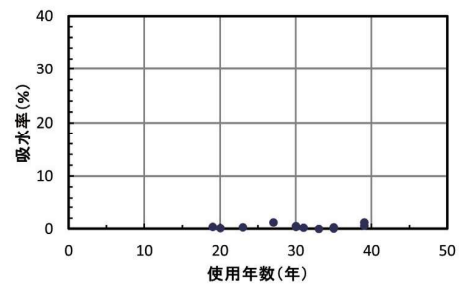


図25 粉体塗膜の吸水率

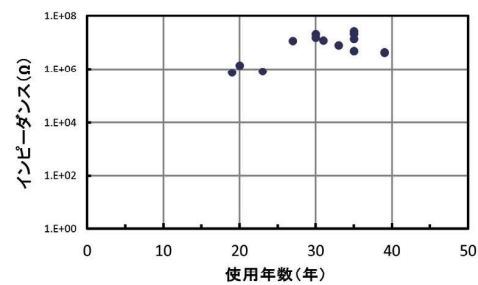


図26 粉体塗膜のインピーダンス

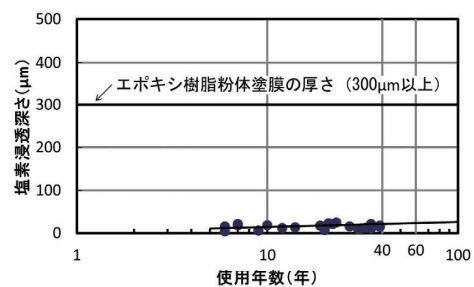


図27 粉体塗膜の塩素浸透深さ

5. 外面塗覆装

(1) ポリエチレンスリーブ

ポリエチレンスリーブは管外面に装着して、以下に示す①～④の防食効果が期待できる。

- ① 腐食性土壌と管の接触を断ち腐食を防ぐ。
- ② 管の周辺を均一な状態に保ちマクロセル腐食を防ぐ。
- ③ ポリエチレンスリーブ内へ水が侵入しても侵入水の移動を防止し溶存酸素の供給を防ぐことで腐食の進行を防ぐ。
- ④ 迷走電流を遮蔽して電食を防ぐ。

ポリエチレンスリーブが装着されていた管の状態を継続して調査しており、最大で41年間使用された管の管体に腐食が無いことを確認している。また、ポリエチレンスリーブの引張強さを図28に、伸びを図29に示す。埋設当時の規格値は、引張強さ10MPa以上、伸び250%以上である。物性値は少しずつ低下しているものの、41年間使用された後も、当時の規格値を満足していた。

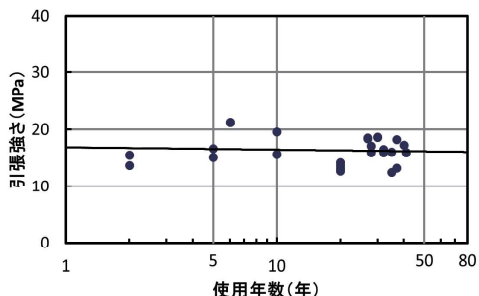


図28 長期間使用されたポリエチレンスリーブの引張強さ

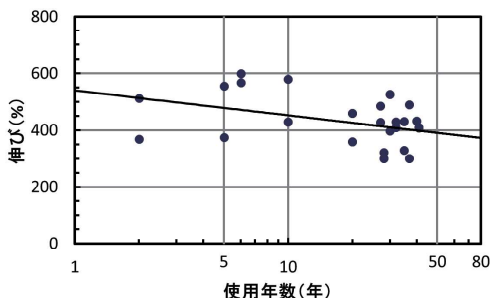


図29 長期間使用されたポリエチレンスリーブの伸び

(2) 外面耐食塗装

外面塗装は合成樹脂塗装が一般的に用いられている。GX形管には耐食性を向上させた外面耐食塗装が開発された。この外面耐食塗装は、施工現場で想定される傷に対しても、自己防食機能により優れた耐食性を示している。

外面耐食塗装の仕様は、促進試験（複合サイクル試験 JIS K 5621）の結果ばかりではなく、実際の管路における腐食深さおよび埋設土壌に関する分析結果と組み合わせて、長期にわたる防食性能を発揮できるように、決定されている。

この腐食深さと埋設土壌の分析には、過去40年間に収集された、全国約3000地点の調査データを用いた。

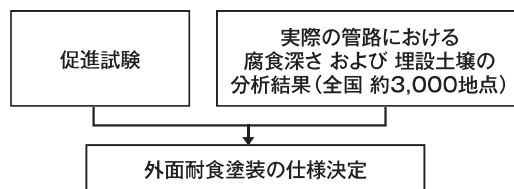


図30 外面耐食塗装の仕様決定法

この外面耐食塗装管を腐食性の高い土壌に埋設し、管の状態を継続して調査している。

- ① 腐食性の比較的高い泥炭(ANSI評価点13.5～15.5点)に10年間埋設された管の状況を図31に示す。外面耐食塗装管に腐食はなかった。
- ② 腐食性の極めて高い海成粘土(ANSI評価点19点)に5年間埋設された管の状況を図32に示す。管には傷を付けて埋設している。合成樹脂塗装の管では傷部に最大腐食深さ0.4mmの腐食が発生したが、外面耐食塗装管では傷部にも腐食はなかった。

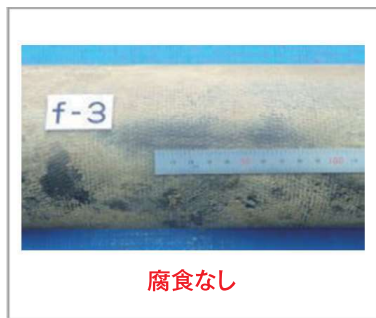


図31 泥炭での埋設試験(10年間埋設)

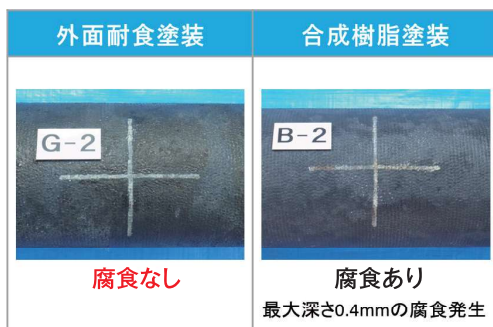


図32 海成粘土での埋設試験(5年間埋設)

おわりに

日本ダクタイル鉄管協会は、耐震継手ダクタイル鉄管を今後も安心してお使い頂けるよう、実際に使用されている管路での耐震性や長期耐久性の調査・研究を継続し、日本の高水準な水道管路の構築に貢献していきたい。

【参考文献】

参考文献に関する詳細は
右のQRコードよりご確認できます。→



- 1) 日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析、1996、p14
- 2) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書、2013、p2～73
- 3) 小泉明：「耐震継手ダクタイル鉄管が自然災害に耐えた事例集—台風・豪雨・津波等による災害—」、水道産業新聞社、2018、p5～15
- 4) 三原正幸(松山市公営企業局)：「豪雨による護岸道路崩壊で露出したダクタイル管路の健全性の検証」、平成30年度全国会議(水道研究発表会)講演集、2018、p416～417
- 5) 小軽米松太郎、大沢章広 他：「埋設管路の地震時挙動観測」、水道協会雑誌 第601号、1984、p2～20
- 6) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説2009年版 I 総論、2009、p87～92
- 7) 三浦久人(神戸市水道局)：「阪神淡路大震災による耐震形ダクタイル鉄管の挙動調査(ポートアイランド、六甲アイランド)」、ダクタイル鉄管 第61号、1996、p41～48
- 8) 山岸悟(芦屋市水道部)：「阪神・淡路大震災による呼び径500mmS形ダクタイル管路の挙動調査(芦屋浜)」、ダクタイル鉄管 第67号、1999、p31～35
- 9) 三島洋一(米子市水道部)：「2000年鳥取西部地震により液状化の発生した埋立地でのNS形ダクタイル鉄管管路の挙動調査」、ダクタイル鉄管 第70号、2001、p30～36
- 10) 金子正吾、鉛山敦一、戸島敏雄：「2003年十勝沖地震における水道管路被害調査結果概要」、ダクタイル鉄管 第75号、2004、p59～75
- 11) 小野和将(一関市水道部)：「東日本大震災における道路盛土部のNS形ダクタイル鉄管管路の挙動調査」、ダクタイル鉄管 第90号、2012、p20～27
- 12) 宮島昌克、岸正蔵、金子正吾：「東日本大震災における津波被害地域の耐震形ダクタイル鉄管管路の挙動調査結果」、ダクタイル鉄管 第92号、2013、p12～19
- 13) 飯出淳、宮島昌克 他：「津波対策としての耐震ダクタイル鉄管の有効性研究」、平成29年度全国会議(水道研究発表会)講演集、2017、p850～851
- 14) 金子正吾、池田幸平、宮島昌克：「2016年熊本地震におけるダクタイル鉄管の調査結果」、平成28年度全国会議(水道研究発表会)講演集、2016、p840～841
- 15) 日本ダクタイル鉄管協会：「耐震型ダクタイル鉄管による断層対策管路の設計 JCPA T 64」、2020
- 16) 宮崎俊之、丹羽真一(桂沢水道企業団)：「国内最初の遠心力铸造法によるダクタイル鉄管の調査-53年間埋設後の調査結果-」、平成25年度全国会議(水道研究発表会)講演集、2013、p376～377
- 17) 内宮靖隆、古川勲(八戸圏域水道企業団)：「耐震管S形ダクタイル鉄管φ1,000経年管(38年間埋設)の調査結果」、平成25年度全国会議(水道研究発表会)講演集、2013、p378～379
- 18) 滝沢智、牛窪俊之、森田裕之、石井和男、近藤秀一：「ダクタイル鉄管のモルタルライニングの中性化と機能劣化に関する研究」、水道協会雑誌 第923号、2011、p2～10
- 19) 日本ダクタイル鉄管協会：「ダクタイル鉄管の長期耐久性の検証—粉体塗装、ゴム輪、ポリエチレンスリーブ、モルタルライニングの調査—」、ダクタイル鉄管 第104号、2019、p58～65



一般社団法人
日本ダクタイル鉄管協会

<https://www.jdpa.gr.jp>

本部・関東支部	〒102-0074	東京都千代田区九段南4丁目8番9号(日本水道会館)
		電話03(3264)6655(代) FAX03(3264)5075
関西支部	〒542-0081	大阪市中央区南船場4丁目12番12号(ニッセイ心斎橋ウエスト)
		電話06(6245)0401 FAX06(6245)0300
北海道支部	〒060-0002	札幌市中央区北2条西2丁目41番地(札幌2・2ビル)
		電話011(251)8710 FAX011(522)5310
東北支部	〒980-0014	仙台市青葉区本町2丁目5番1号(オーク仙台ビル)
		電話022(261)0462 FAX022(399)6590
中部支部	〒450-0002	名古屋市中村区名駅3丁目22番8号(大東海ビル)
		電話052(561)3075 FAX052(433)8338
中国四国支部	〒730-0032	広島市中区立町2番23号(野村不動産広島ビル8階)
		電話082(545)3596 FAX082(545)3586
九州支部	〒810-0001	福岡市中央区天神2丁目14番2号(福岡証券ビル)
		電話092(771)8928 FAX092(406)2256