

耐震型ダクティル鉄管を用いた 断層横断部の管路設計方法の研究

小田 圭太¹・岸 正蔵¹・宮島 昌克²

¹正会員 株式会社クボタ 鉄管研究部（〒660-0095 兵庫県尼崎市大浜町2丁目26番地）
E-mail:keita.oda@kubota.com

²正会員 金沢大学大学院教授 自然科学研究科（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail:miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

地震時の地表地震断層によって、導送水管のような重要な幹線管路が被害を受けると、長期にわたる断水につながる恐れがある。しかしながら、これまでに耐震型ダクティル鉄管（鎖構造管路）による断層横断部の管路設計手法は確立されていなかった。そこで、耐震型ダクティル鉄管を用いた断層対策管路の管路設計手法について研究した。まず、断層横断部の管路設計に使用する管路挙動解析の妥当性を検証するために、実管を用いた断層模擬実験を行い、実験と管路挙動解析の結果がよく一致することを確認した。管路挙動解析により、鎖構造管路は1.6m程度の断層変位に対しては特殊な対策は不要であり、1.6m以上の断層変位に対しては長尺継ぎ輪を用いた管路設計が有効という知見を得た。地表断層の出現位置のばらつきを考慮した、耐震型ダクティル鉄管による断層対策管路の設計手法を提案した。

Key Words : fault, earthquake resistant ductile iron pipe, pipeline behavior analysis

1. はじめに

日本の陸域には2000を超える活断層が存在すると推定されている。近年では、2011年福島県浜通り地震で約1.8m¹⁾、2016年熊本地震で約2.0m²⁾の地表断層による地盤変位が観測されている。

管路と交差するように地表断層が生じると、局所的に管路と地盤の間に相対変位が生じるため、管路が多大な被害を受ける可能性がある。1971年サンフェルナンド地震では、サンフェルナンド断層近傍の水道管、ガス管、下水管の破裂や座屈破壊が報告されている³⁾⁴⁾。また、1999年台湾集集地震では、断層変位によって管路が圧縮されて座屈し、Z字形に変形した事例が報告されている⁵⁾。

断層変位に対する管路挙動については、鋼管などの一体構造管路や、ダクティル铸铁管などの継手構造管路を対象に研究がなされている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。継手構造管路のうち、継手部が離脱防止機構を有する耐震型ダクティル鉄管からなる管路については、土槽実験や解析による、断層横断部の管路挙動の研究等がなされているが⁹⁾¹⁰⁾、断層横断部の管路設計法は確立されていなかった。

耐震型ダクティル鉄管は継手部が自由に伸縮・屈曲し、一定量伸び出すと抜け出さない構造であり、地震時の大

きい地盤変位を吸収することができる。これまでの40年間、耐震型ダクティル鉄管は1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震など多くの地震を経験してきたが、被害は報告されていない。また、耐震型ダクティル鉄管が液状化などの地盤変位に追従した事例は数多く報告されている¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。

本研究では、耐震型ダクティル鉄管による断層横断部の管路設計法の確立を目的とし、実管を用いた断層模擬実験および有限要素法による管路挙動解析を行った。実験により妥当性を確認した管路挙動解析を用いて、大口径管路挙動解析を行い、断層変位に対して、耐震継手および耐震継手の10倍の伸縮性能を有する長尺継ぎ輪を用いた配管が有効であることを検証し、断層の出現位置のばらつきを考慮した管路設計法を提案した。

2. 耐震型ダクティル鉄管の挙動

図-1に耐震型ダクティル鉄管の一例として、GX形ダクティル鉄管の伸縮挙動を示す。表-1にGX形ダクティル鉄管の継手性能を示す。GX形ダクティル鉄管の継手は管長の±1%の伸縮性能を有しており、限界まで伸び出しても挿し口突部とロックリングが引っ掛かることで、継手が抜け出すことなく、地盤変位に追従できる。

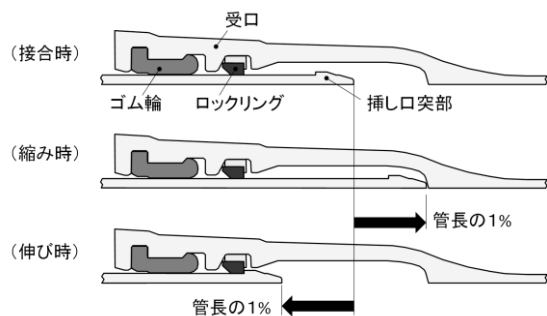


図-1 GX形ダクトイル鉄管の挙動

表-1 GX形ダクトイル鉄管の性能

項目	性能
継手伸縮量	管長の±1%
離脱防止性能	3DkN (D：呼び径[mm])
最大屈曲角度	8°

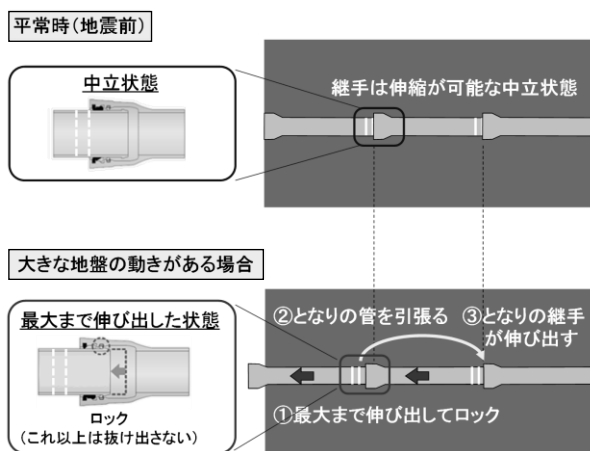


図-2 地盤変位を受けた耐震型ダクトイル鉄管の挙動

図-2に地滑りのような地盤変位に対する耐震型ダクトイル鉄管の挙動の概要を示す。一つの継手の伸縮量が限界に達しても、隣の継手が伸び出すことで大きな地盤変位を吸収する。あたかも鎖のように挙動することから、鎖構造管路とも呼ばれる。

3. 実管を用いた断層模擬実験

断層変位を受けた耐震型ダクトイル鉄管の挙動を確認するために、土砂箱を用いた断層模擬実験を行った。

(1) 実験方法

図-3に実験方法、表-2に実験条件を示す。長さ9.5m、幅3.2m、高さ2.3mの2分割の土砂箱の中に、呼び径200 GX形ダクトイル管路を土被り0.8mで埋設し、片側の土砂箱をアクチュエータを用いて1.2m水平方向に移動させ、管路挙動を計測した。各継手は伸び量が40mmとなるように接合した。図-4に管路埋設後の実験装置を示す。

表-2 実験条件

項目	条件
継手形式	G X形
呼び径	200mm
継手数	4個
管長	3m
地盤の種類	砂質地盤
地盤のN値	15
土被り	0.8m
断層変位量	1.2m
断層交差角	50°

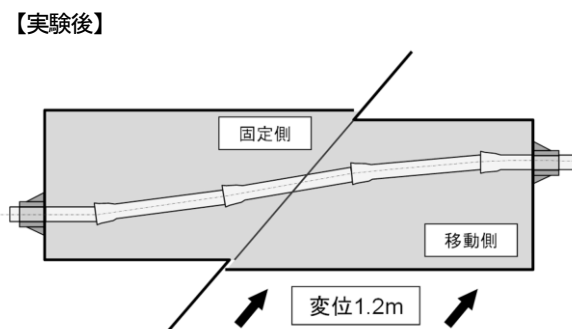
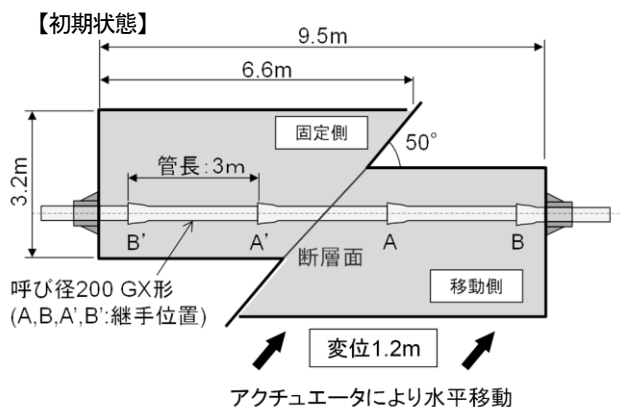


図-3 実験方法

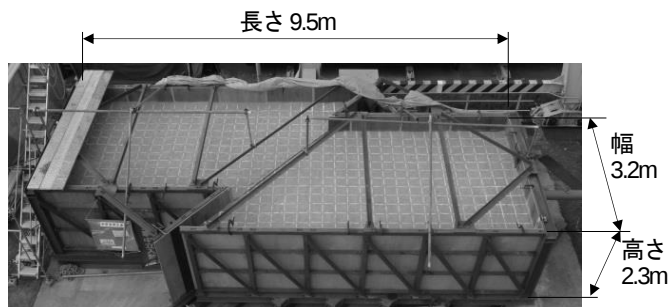


図-4 実験装置 (管路布設後)



図-5 実験後の土砂箱の状態

(2) 実験結果

図-5に実験後の土砂箱の状態，図-6に実験後の管路の状態を示す。耐震型ダクトイル鉄管は鎖構造管路挙動により，断層変位によく追従できることが判った。

a) 継手伸縮量

図-7に継手伸縮量と断層変位量の関係を示す。断層近傍に位置する継手A，A'が限界まで伸び出した後，隣の継手B，B'が伸び出した。断層近傍の継手が限界まで伸び出しても，継手の離脱防止機構により隣の管が引っぱられ，隣の継手が伸び出して地盤変位を吸収した。

b) 継手屈曲角度

図-8に継手屈曲角度と断層変位量の関係を示す。断層近傍に位置する継手A，A'が $5\sim 6^\circ$ まで屈曲した後に，継手B，B'が屈曲し，管軸直角方向の地盤変位を吸収した。

c) 管路挙動

管路は地盤変位によく追従し，管体に変形は見られなかった。断層近傍の継手が限界まで伸縮・屈曲しても，隣の継手が次々に伸縮・屈曲し，管路全体で地盤変位を吸収する鎖構造管路挙動が確認された。



図-6 実験後の管路の状態

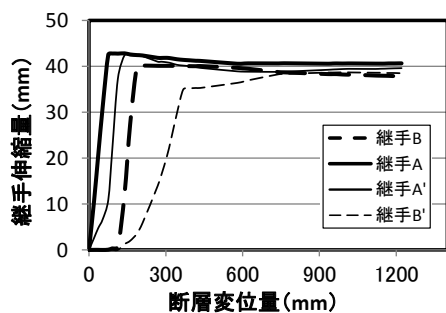


図-7 継手伸縮量

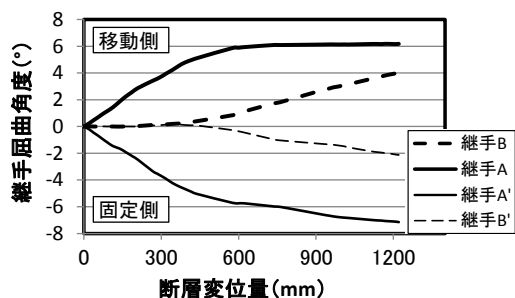


図-8 継手屈曲角度

4. 断層横断部の管路挙動解析

断層模擬実験の結果と管路挙動解析の結果を比較し，管路挙動解析手法の妥当性を確認した（使用ソフトウェア：DYNA2E）。

(1) 解析モデルの概要

図-9に解析モデルの概要を示す。管をはり（またはシェル），継手ばね，地盤ばねをばねとするモデルとし，材料非線形性および幾何学的非線性を考慮した。断層面を境界として，片側の地盤節点に強制変位を与えることで，断層模擬実験をモデル化した（図-10）。

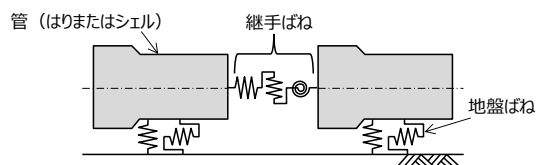


図-9 解析モデルの概要

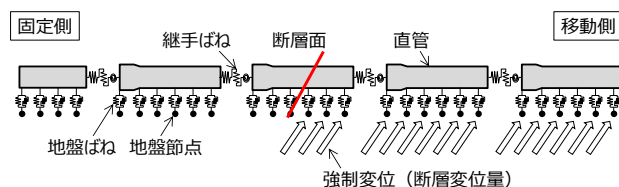


図-10 断層模擬実験のモデル化

(2) 継手ばね

継手ばねは基礎実験結果から設定した。例として，図-11に回転ばねを求める実験状況を示す。図-12に実験結果から求めた継手ばねを示す。軸方向ばねは管とゴム輪が滑り継手部が伸びる領域（変位量 $0\sim \delta a$ ）と，離脱防止機構により伸縮が止まる領域（変位量 $\delta a\sim$ ）で異なるばね定数を設定した。回転ばねは継手内部で管が接触する 5.3° を超えると曲がりにくくなるように設定した。



図-11 継手ばね（回転ばね）設定のための実験状況

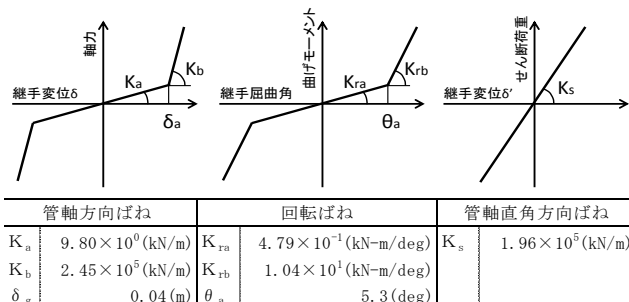


図-12 継手ばね（呼び径 200 G X形）

(3) 地盤ばね

管軸方向地盤ばねは、文献14)を参考に式 (1a) , 式 (1b) のように設定した。管と地盤のすべりを考慮し、管と地盤の相対変位が限界値を超えればばね定数が小さくなるバイリニアモデルで設定した。

管軸直角方向地盤ばねは地盤反力係数から式 (2a) , 式 (2b) のように設定した (図-13) 。

$$k_1 = \pi \cdot D \cdot \left(h + \frac{D}{2} \right) \cdot \tan \Delta / \delta_a \quad (1a)$$

$$k_2 = 0.001 \cdot k_1 \quad (1b)$$

$$k_{t1} = K \cdot D \cdot \lambda \quad (2a)$$

$$k_{t2} = 0.001 \cdot k_{t1} \quad (2b)$$

ここに、

- k_1, k_2 : 管軸方向地盤ばね定数
- k_{t1}, k_{t2} : 管軸直角方向地盤ばね定数
- D : 管の直径
- γ : 土の単位体積重量(=16kN/m³)
- h : 土被り(=3.0m)
- Δ : 土の内部摩擦角
- K : 地盤反力係数(=20,700kN/m³)
- ℓ : 管の単位長さ
- δ_a : 滑り開始時の管と地盤の相対変位

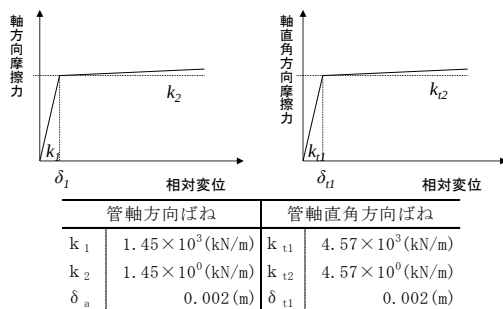


図-13 地盤ばね

(4) 解析結果と実験結果の比較

図-14に解析結果と実験結果の継手屈曲角度の比較を示す。解析結果と実験結果でよく一致しており、管路挙動解析手法の妥当性を確認できた。

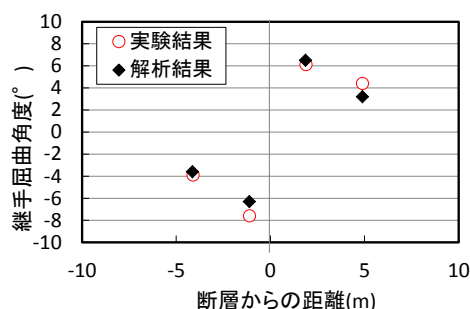


図-14 解析結果と実験結果の比較

5. 大口径管路の管路挙動解析

大口径管路の管路挙動解析を行い、断層変位に対する性能を確認した。また、断層変位に対して有効な管路設計方法を検証した (使用ソフトウェア: Marc.Mentat) 。

(1) 解析条件

図-15、表-3に解析条件を示す。また、図-16に継手ばね、図-17に地盤ばねを示す。対象管路は呼び径1500 US形ダクタイル鉄管とし、管路の全長は管路の両端が断層変位の影響を受けない十分な長さである200mとした。通常、US形継手は圧縮状態 (伸縮量: 管長の+1%) で配管されるが、今回は圧縮量と伸び量が同じになるよう (伸縮量: 管長の±0.5%) モデル化した。断層は水平方向変位 1.7m、鉛直方向変位 3m、交差角度 60° の逆断層とし、継手部に交差するように設定した。

本報告の断層変位量は鉛直方向変位を指すものとする。

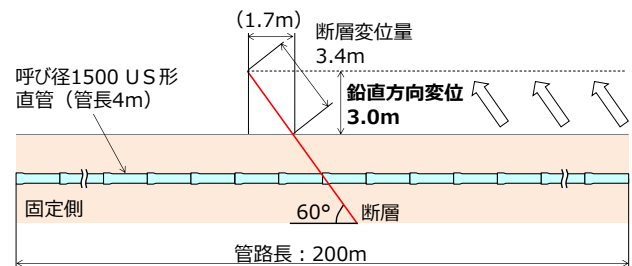


図-15 解析条件 (断層対策無し)

表-3 解析条件

項目	条件
継手形式	US形
呼び径	1500mm
管長	4m
管路長	200m
継手伸縮量	±47.5mm
断層の種類	逆断層
断層変位量	3.4m
断層交差角	60°
地盤反力係数	33,827kN/m ³

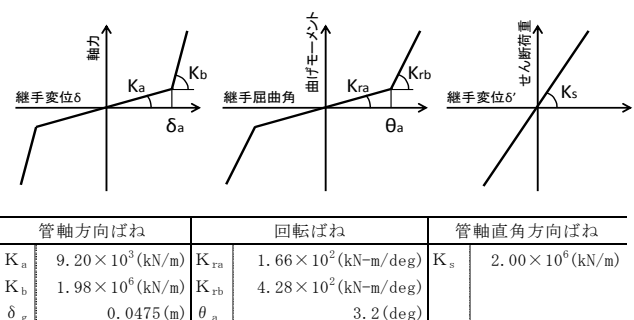


図-16 継手ばね (呼び径 1500 US 形)

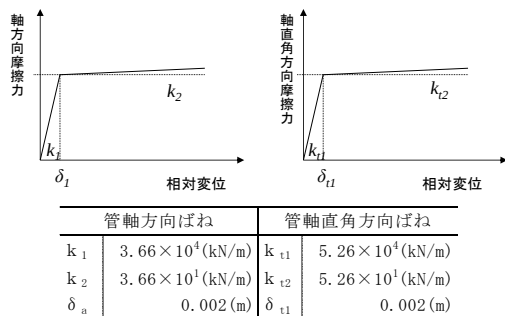


図-17 地盤ばね

(2) 評価基準

表-4に評価項目を示す。管路の安全性は軸力，継手屈曲角度，管体応力で評価した。軸力は3DkN（D：呼び径mm）である4,500kN以下，継手屈曲角度は4.0°以下，応力はダクタイル鋳鉄の耐力270MPa以下とすることで，弾性設計することができる。

表-4 評価項目

評価項目	許容値	呼び径1500US形の例
軸力	3DkN (D:呼び径[mm])	4500kN
継手屈曲角度	継手の限界屈曲角度	4.0°
管体発生応力	ダクタイル鋳鉄の耐力	270MPa

(3) 解析結果

表-5に解析結果の一覧を示す。断層対策を施していない管路でも，断層変位 1.6m 程度まではすべての基準値を満足した。しかしながら，1.6m より大きい断層変位を受けると，軸力が基準値を超過し，断層変位 3.0m では軸力，継手屈曲角度が基準値を超過した。

図-18～図-21に解析結果を示す。解析結果の横軸は断層の位置を 0m としたときの管軸方向の座標である。

図-18に示すように，断層変位に追従して管路が変形した。断層近傍では，断層変位量以上に鉛直方向に変位している継手があった。

図-19に継手屈曲角度の解析結果を示す。継手屈曲角度の正負の符号は屈曲する向きを示す。断層変位が 3.0m のときには，断層近傍の複数の継手が基準値の 4° を超えて屈曲していた。また，32m の範囲で継手が 1° 以上屈曲していた。

図-20に軸力の解析結果を示す。軸力の正負はそれぞれ引張（+），圧縮（-）を示す。いずれの断層変位量でも，断層面の位置で圧縮力が最大であった。断層変位量が 1.6m を超えると，軸力の最大値が基準値の 3DkN を超過し，断層変位 3m では広い範囲で 3DkN を超過した。これは図-21に示すように，140m の範囲で継手が限界まで圧縮されたために，広い範囲で管路と地盤に相対変位が生じ，地盤から受ける摩擦力が大きくなったためであると考えられる。

表-5 解析結果一覧

断層変位量 (m)	軸力 (kN)	継手屈曲角度 (deg)	応力 (MPa)
1.6	4314	3.7	49
3.0	9460	4.6	111
許容値	4500	4.0	270

* 下線部は許容値を超過した項目

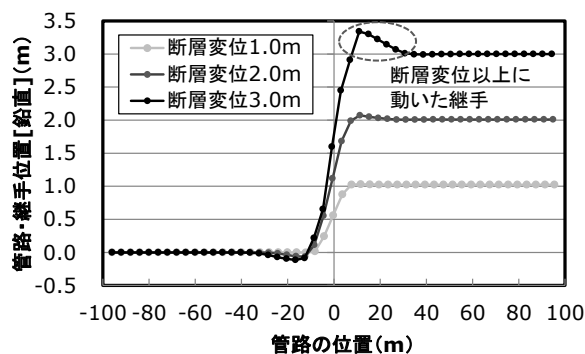


図-18 管路・継手の変位量

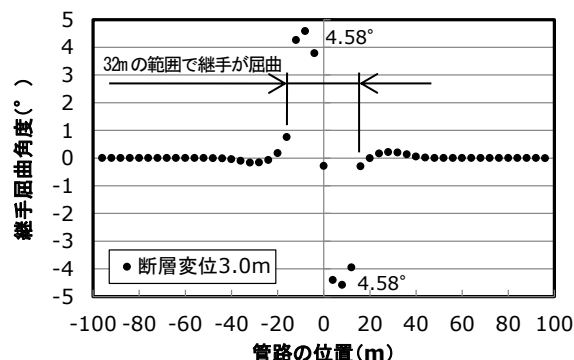


図-19 継手屈曲角度

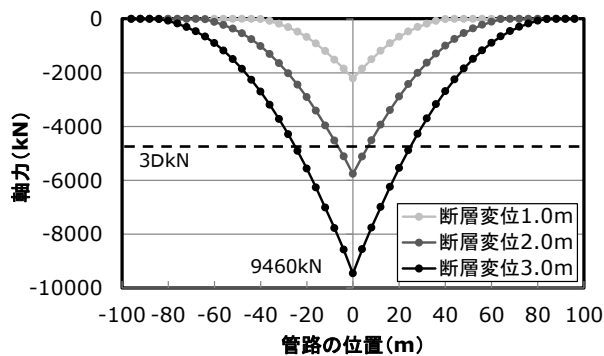


図-20 軸力

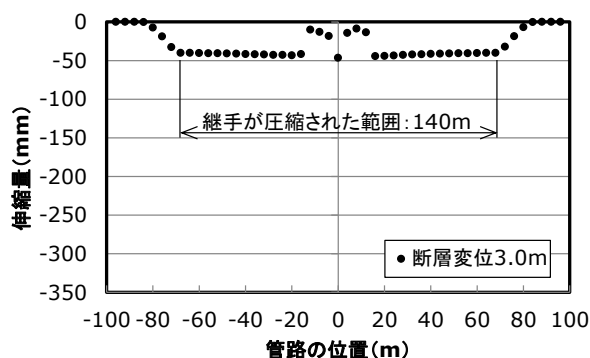


図-21 継手伸縮量

6. 長尺継ぎ輪による断層対策

大きい地盤変位に追従するためには、より狭い範囲で断層変位を吸収させる必要がある。そこで、図-22に示すように、直管継手の10倍の伸縮性能を有する長尺継ぎ輪を配置することで、地盤変位を大きく吸収させる。

長尺継ぎ輪は継手が 1° 以上屈曲している範囲を挟むように設置する。上述の例では、図-19に示すように、36mの範囲で継手が 1° 以上屈曲しているため、長尺継ぎ輪の設置間隔（スパン）は36mとなる。

図-23に示すように長尺継ぎ輪を36m間隔で配置し、管路挙動解析を行った。その他の解析条件は表-3と同じ。

表-6、図-24～図-27に解析結果を示す。図中の白抜きのプロットは長尺継ぎ輪継手部の位置である。

図-24に示すように、断層変位を吸収するために継手が圧縮される範囲は72mであった。長尺継ぎ輪が集中的に変位を吸収し（図中白抜部）、地盤からの影響範囲を極度に小さくできたことで、地盤から受ける摩擦力が低減され、軸力を大幅に低減できた（図-25）。長尺継ぎ輪を境に軸力が大幅に変化し、長尺継ぎ輪から断層面にかけて軸力が増加していることから、長尺継ぎ輪の間隔が軸力低減効果を考える上で重要であることが判る。

図-26に管路の変位を示す。軸力が低減されたため、図-26A部の管路変位が軽減された。これにより、図-27に示すように、長尺継ぎ輪を使用した管路では直管管路と比較して継手屈曲角度が低減され、基準値以下の 4° 以下になった。

以上の結果から、長尺継ぎ輪を用いた断層対策管路は、3mの断層変位に弾性範囲内で追従可能であり、断層変位に対して有効な管路設計方法であることが判った。

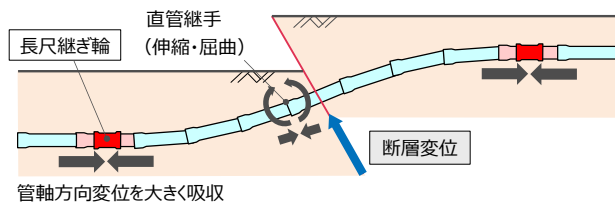


図-22 長尺継ぎ輪を使用した断層対策

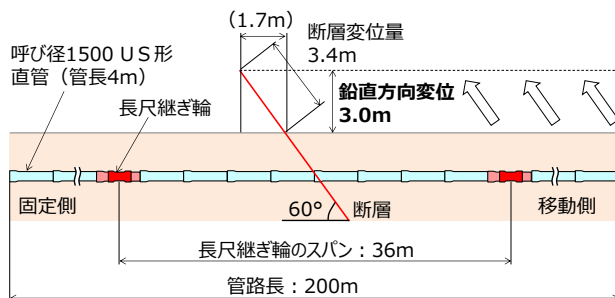


図-23 解析条件（断層対策管路）

表-6 解析結果

断層変位量 (m)	軸力 (kN)	継手屈曲角度 (deg)	応力 (MPa)
3.0	4360	3.8	85
許容値	4500	4.0	270

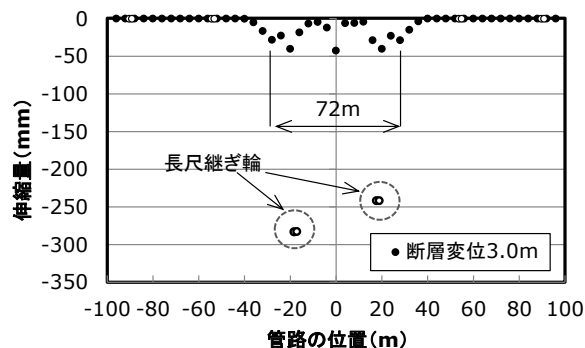


図-24 継手伸縮量

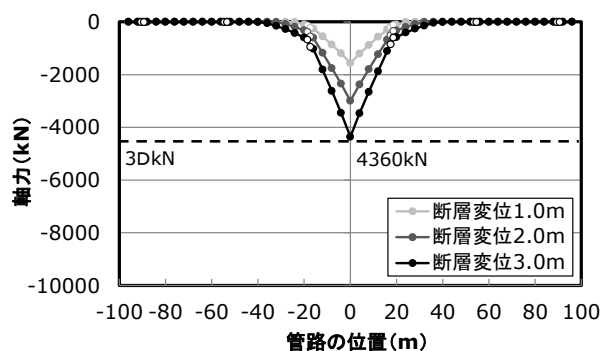


図-25 軸力

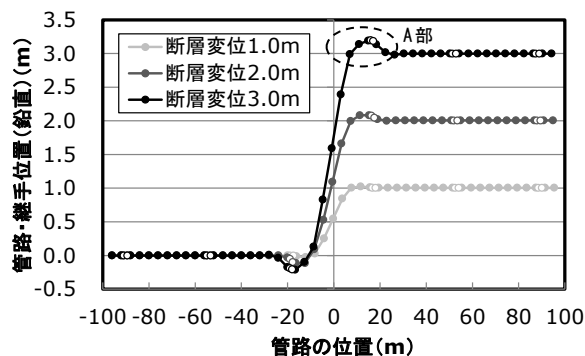


図-26 管路・継手の変位量

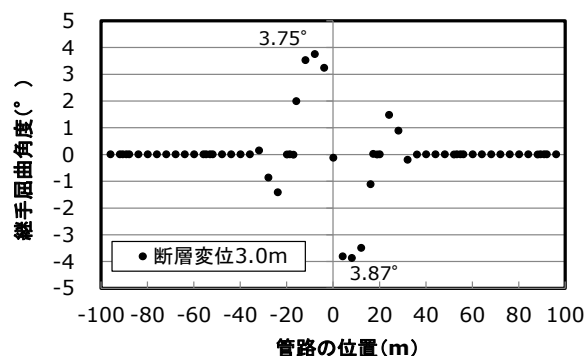
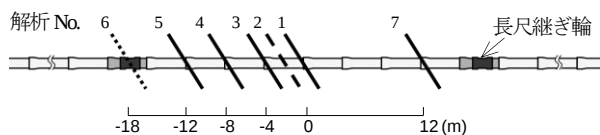


図-27 管路・継手の変位量

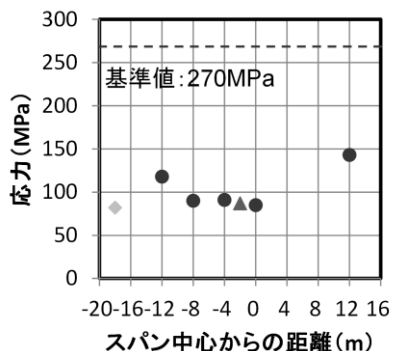
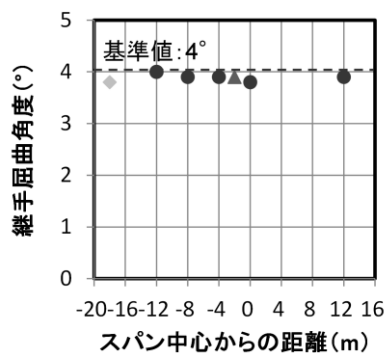
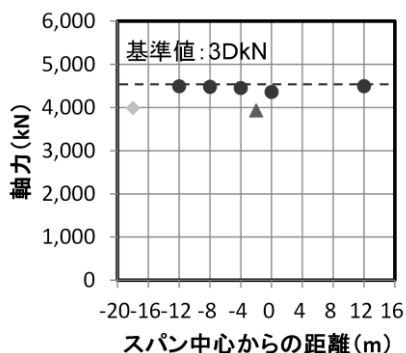
7. 断層出現位置が明確でない場合の影響評価

上述の解析では、断層面の位置を継手部として均等に長尺継ぎ輪を配置した。しかしながら、通常、地表断層の出現位置は特定できず、幅を持って示される。そこで、断層出現位置が明確でない場合の安全性を確認した。



断層の位置	解析 No.
継手部	1, 3, 4, 5, 7
管体部	2
長尺継ぎ輪部	6

図-28 解析条件



● 継手部 ▲ 管体部 ◆ 長尺継ぎ輪部

図-29 解析結果（断層出現位置による比較）

(1) 解析条件

図-28に解析条件を示す。断層が継手部、管体部、長尺継ぎ輪部に生じた場合を考え、No. 1～7の7条件の断層位置で管路挙動解析を行った。断層出現位置を除いて、解析条件は図-23および表-3と同じとした。

(2) 解析結果

図-29に断層変位3mでの最大軸力、最大継手屈曲角度、最大応力の解析結果を示す。いずれも基準値以下であった。断層が交差する位置によって、数値に大きい差はないため、長尺継ぎ輪で挟まれた範囲のどこに断層変位が生じても安全性は確保できると考えられる。

(3) 設計例

図-30に断層想定範囲が幅を持つ場合の設計例を示す。断層想定範囲を挟むように長尺継ぎ輪をスパンSで配置する。なお、スパンSは管路挙動解析で基準値を満足するスパンとする。例えば、上述の解析例であれば、スパンSは36mとなる。このように設計することで、断層想定範囲のどこに断層が生じても、断層を長尺継ぎ輪で挟むことができるため、管路の安全性を確保できると考えられる。

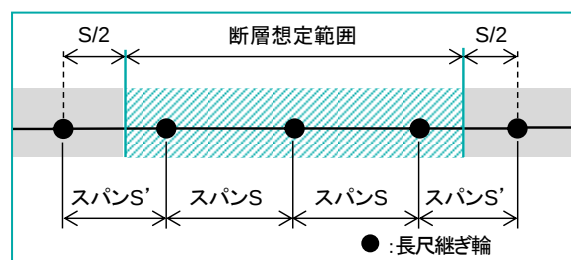


図-30 断層想定範囲が幅を持つ場合の設計例

8. 断層対策管路の設計手法

図-31に断層対策管路の設計フローを示す。まず、断層対策無しで管路挙動解析を行い、継手屈曲角度・管体発生応力・軸力を評価する。これまでの研究結果^{15) 16)}から、管径によって異なるが、おおむね断層変位が1.6m程度であれば、断層対策無しで断層変位に追従できることが判っている。

継手屈曲角度・管体発生応力が評価基準を満足しない場合は、通常の耐震継手の2倍屈曲可能な継ぎ輪を用いた管路で再計算する。軸力が評価基準を満足しない場合は通常の耐震継手の約10倍の伸縮性能を有する長尺継ぎ輪を用いた管路で再計算する。継ぎ輪・長尺継ぎ輪の間隔（スパン）は管路挙動解析の繰り返し計算によって決定する。最後に、地震時に地表断層が出現すると想定される範囲を基に、管路に断層対策を施す範囲を決定する。

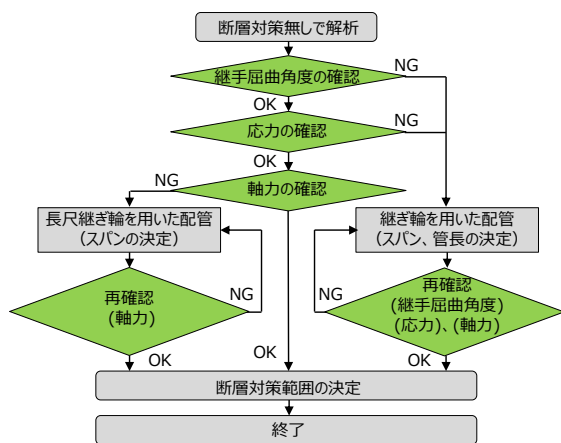


図-31 設計フロー

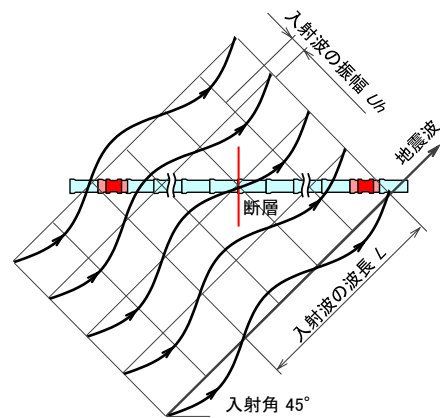


図-33 地震波と断層の位置関係

9. 断層変位後のレベル2地震動に対する安全性

地下に布設されている管路に損傷が生じた場合、速やかな機能回復は難しい。したがって、断層変位を受けた後、そのまま継続して健全に使用できることが重要である。そこで、断層変位を受けた後に、さらにレベル2地震動による地盤変位を受けた場合の性能照査を行った。

図-32に検討対象としたモデル地盤を示す。表-6に管路の位置で生じるレベル2地震動による地震波の諸元を示す（算出方法は「水道施設耐震工法指針・解説¹⁷⁾」参照）。断層変位および管路の条件は図-23と同じとした。

図-33に示すように、地震波の入射角は管路に対して45°とし、断層位置の位相が0となる条件（断層位置で軸方向・軸直角方向変位の増分が最大となる条件）で管路挙動解析を行った。

表-7に解析結果の比較、図-34に解析結果の例として軸力の比較を示す。軸力、継手屈曲角度、応力はいずれも基準値以下であったが、軸力が若干上昇していた。断層横断部の管路設計時には、レベル2地震動により生じる軸力を差し引いた値を許容値として、軸力を評価することで、より安全な管路を構築できることが確認された。

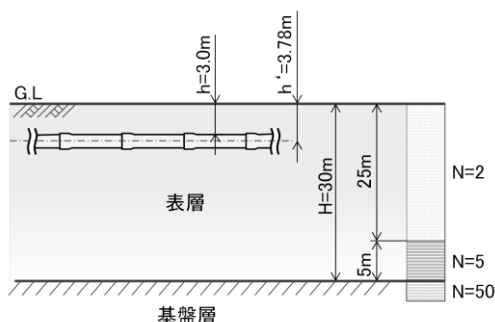


図-32 地盤モデル

表-6 レベル2地震動による地震波

管軸上の地盤の水平方向振幅 U/h	0.155m
地震時の波長 L	194.6m

表-7 解析結果の比較

地盤変位	軸力 (kN)	継手屈曲角度 (deg)	応力 (MPa)
断層変位＋ レベル2地震動	4486	3.8	82
断層変位	4360	3.8	85
許容値	4500	4.0	270

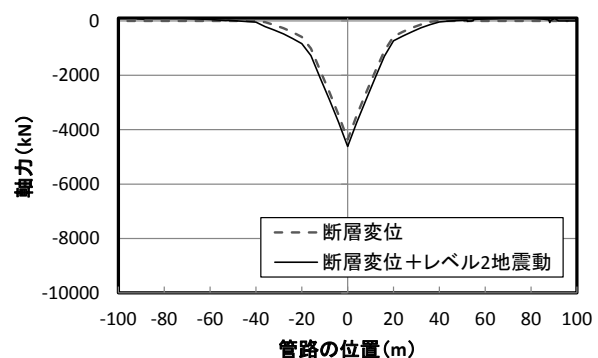


図-34 軸力の比較（断層変位量3.0m）

10. まとめ

本研究では、断層模擬実験を行い、断層部の耐震型ダクタイル鉄管の挙動を確認するとともに、管路挙動解析の妥当性を確認した。また、大口径管路を対象に管路挙動解析を行い、長尺継ぎ輪を用いた設計方法の有効性の検証、および断層横断部の設計手法の考察を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 断層模擬実験により、耐震型ダクタイル鉄管は鎖構造管路の挙動を示し、断層変位に無理なく追従することを確認した。
- 2) 断層模擬実験をモデル化して管路挙動解析を行った結果、解析結果と実験結果はおおむね一致しており、解析手法の妥当性が確認できた。
- 3) 呼び径1500 U S形ダクタイル管路は1.6m程度の断層変位に継手の伸縮・屈曲で追従でき、断層変位後の管路

は弾性範囲内であった。

- 4) 1.6mを超える断層変位に対しては、通常の直管継手の10倍の伸縮代を有する長尺継ぎ輪を配置することで、3mを超える断層変位に弾性範囲内で追従可能であった。
- 5) 断層の位置が特定できない場合の設計方法および断層対策管路の設計フローを示した。
- 6) レベル2地震動による地盤変位を考慮した管路挙動解析を行うことで、より安全な管路を構築できることが確認された。

参考文献

- 1) 黒澤英樹ほか9名：2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層，活断層研究，36号，pp.23-30，2012。
- 2) Ohashi K. and Tamura. T. : An outcrop of the active Futagawa Fault, which ruptured during the 2016 Kumamoto earthquake, *Journal Geol. Soc. Japan*, Vol. 122 (2016) No. 12, 2016.
- 3) U. S. Geological Survey: Surface Faulting, The San Fernando, California, Earthquake February 9, 1971, *U. S. Geological Survey, Professional paper* 733, 55-76, 1971.
- 4) Ariman T., Lee B. J., Chen Q. : Failure of buried pipeline under large ground deformation, *Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 49, pp.63-75, 1987.
- 5) 高田至郎，劉愛文：断層を横断するパイプラインの被害写真集～最近の地震災害の分析～，2003。
- 6) 高田至郎，Nemat Hassani，福田克己：断層を横断する地中管路の設計法の提案，土木学会論文集 No.668，1-54，pp.187-194，2001。
- 7) O'Rourke, T. D., Trautmann, C. H: Analytical Modeling of Buried Pipeline Response to Permanent Earthquake Displacements, *National Science Foundation, Washington, DC. Engineering and Applied Science.*, 1980.
- 8) O'Rourke, M.J., Liu, X. : Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects, *MCEER Technical Reports*, 1999.
- 9) 金子正吾，宮島昌克：断層横断部の耐震継手ダクトイル鉄管の挙動推定方法の研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 4, pp. I-210-I-217, 2015.
- 10) Erami ,M.H., et al.: Study on applicability of currently used soil-pipe interaction equations for segmented buried pipelines subjected to fault movement, *Proceedings of ASCE Pipeline Conference*, pp.1256-1264, 2014.
- 11) 三浦久人：阪神・淡路大震災による耐震型ダクトイル鉄管の挙動調査，ダクトイル鉄管，第 61 号，pp.41-48, 1996.
- 12) 三島洋一ほか 3 名：2000 年鳥取県西部地震により液状化の発生した埋立地での NS 形ダクトイル鉄管管路の挙動調査，ダクトイル鉄管，第 70 号，pp.30-36, 2001.
- 13) 金子正吾，宮島昌克：東日本大震災における津波被災地域の耐震形ダクトイル鉄管管路の挙動調査，平成 25 年度全国会議(水道研究発表会)講演集，pp.776-777, 2013.
- 14) American Society of Civil Engineers: Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, *Journal of the Transportation Engineering Division, ASCE*, pp.150-163, 1984.
- 15) 金子正吾ほか 3 名：ダクトイル鉄管による断層対策（Ⅱ）—断層横断部の管路設計方法の研究—，平成 29 年度全国会議(水道研究発表会)講演集，pp.870-871, 2017.
- 16) Oda K., Miyajima M., Ishihara T.: Pipeline design method against large fault displacement, *Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference*, PVP2015-45709, 2015.
- 17) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説（2009 年版），2009.

Study of pipeline design method of a fault crossing section with earthquake resistant ductile iron pipe

Keita ODA, Shozo KISHI, Masakatsu MIYAJIMA

This study proposes a method for designing a water pipeline system against fault displacements by using earthquake-resistant ductile iron pipes (ERDIP). An ERDIP pipeline is capable of absorbing the large ground displacements that occur during severe earthquakes by movement of its joints (expansion, contraction, and deflection) and the use of a joint locking system. We conducted fault rupture testing by using earthquake resistant ductile iron pipe (ERDIP) and simulation analysis of pipeline behavior. We found that ERDIP is capable of absorbing fault displacement with flexible joint performance, exhibiting desirable extension, contraction and deflection. We also confirmed that the analysis method was valid by comparing the theoretical and experimental data. Using this analysis method we performed simulation of large pipeline behavior and verified the effectiveness of pipeline design using a long collar with a large extension for protection against larger fault displacements. In addition, we established a novel pipeline design method that allows for the random appearance of a fault.