

# 断層変位を受けた耐震継手ダクティル鉄管管路の挙動確認実験と再現解析

## Experiment and Reproduction Analysis of Behavior of Seismic-Type Ductile Iron Pipelines Subjected to Fault Displacements

森本皓一\* 小仲正純\* 沼田尚文\* 高木啓介\* 宮島昌克\*\*  
 Koichi Morimoto Masazumi Konaka Naofumi Numata Keisuke Takagi Masakatsu Miyajima

日本国内には多数の活断層が分布し、中には確認されていない活断層も存在する。これらの断層変位を受けた基幹管路に被害が生じれば、断水の影響が長期に及ぶ恐れがある。耐震継手ダクティル鉄管で構成される鎖構造管路は継手の伸縮・屈曲性能、および離脱防止性能により断層変位に追従できることから断層対策にも有効であり、日本ダクティル鉄管協会において設計フローが取りまとめられている。断層対策を検討する配管設計では FEM 解析（有限要素法）により断層変位を受けた管路の挙動を推定するため、解析モデルや入力条件の精査が重要となる。大変位を受けた管路の挙動推定に特化した解析方法の妥当性確認が必要となることから、土槽を用いて断層変位を受けた耐震継手ダクティル鉄管管路の挙動確認実験を実施し、併せて再現解析を実施した。挙動確認実験の結果、耐震継手ダクティル鉄管管路は鎖構造管路の特性を発揮することを確認した。また、再現解析により解析値は実験値を概ね良好に再現できていたことから、解析方法の妥当性を確認できた。

In Japan, there are many active geological faults, and some active faults have not yet been discovered. In the event of main water pipelines being damaged by fault displacements, the water supply may be stopped for a long time. Pipelines with a chain-link structure are composed of seismic-type ductile iron pipes and are able to withstand fault displacements because their joints have an extension and a contraction function and bend performance, and separation preventing performance. Japan Ductile Iron Pipe Association demonstrated this with a pipeline design flow across a fault line. FEM analysis is used in the design of piping to handle fault displacements. So scrutinizing the analysis model and the input conditions are important when running the analysis. This paper conducted an experiment and reproduction analysis of the behavior of seismic-type ductile iron pipelines subjected to fault displacements to confirm the validity of the analysis. In the experiment, the seismic-type ductile iron pipelines performed with the characteristics of a chain-link structure and absorbed the fault displacement. This proved the analysis method was valid because the analysis values could reproduce the experimental values well.

### 1 断層の概要と管路の断層対策の現状

日本国内には多数の活断層が分布し（図1）、中には確認されていない活断層も存在する。代表的な断層のタイプを図2に示す。国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層データベース<sup>1)</sup>に登録された活断層のうち、約半数は地盤が圧縮方向に変位する逆断層である。これらの断層変位を受けた基幹管路に被害が生じれば、断水の影響が長期に及ぶ恐れがある。平成28年（2016年）熊本地震をはじめ、近年断層変位に起因する地震が多く発生したことを背景に公益社団法人 日本水道協会 水道施設耐震工法指針・解説が改訂され、管路の断層対策の重要性や断層横断部の配管設計事例について盛り込まれたことから、断層横断部の配管設計のニーズは高まりつつある。こうした背景を受け、メーカーおよび業界団体から断層対策に特化した製品や設計方法が提案されている。

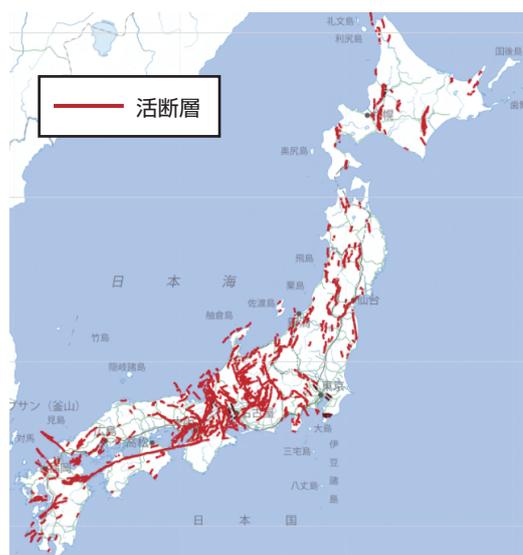


図1 日本国内の活断層分布<sup>1)</sup>

\* パイプシステム事業部 パイプソリューション統括部 \*\* 金沢大学

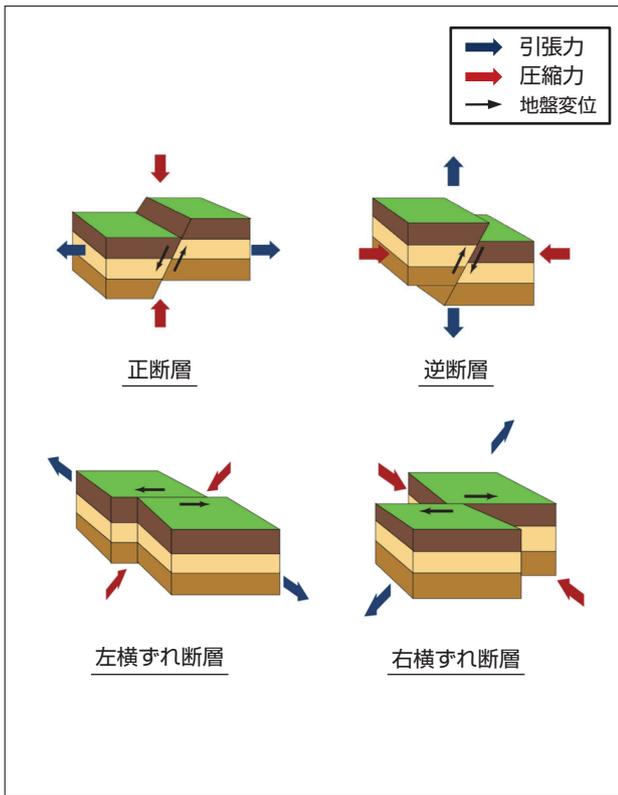


図2 断層のタイプ<sup>2)</sup>

## 2 耐震継手管を用いた断層横断部の配管設計

図3に耐震継手ダクタイル鉄管の継手構造を示す。

耐震継手ダクタイル鉄管で構成される鎖構造管路は、図4に示す通り、継手の伸縮、屈曲、および離脱防止性能により地盤変位に追従できることから、断層対策にも有効である。断層対策を検討する配管設計ではFEM解析により断層変位を受けた管路の挙動を推定するため、解析モデルや入力条件の精査が重要となる。そこで、解析方法の妥当性を確認するため、土槽を用いて断層変位を受けた耐震継手ダクタイル鉄管管路の挙動確認実験を行い、併せて再現解析を実施した。

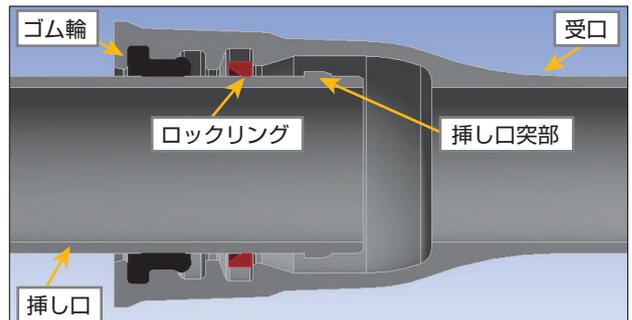


図3 耐震継手ダクタイル鉄管の継手構造 (正規接合状態)

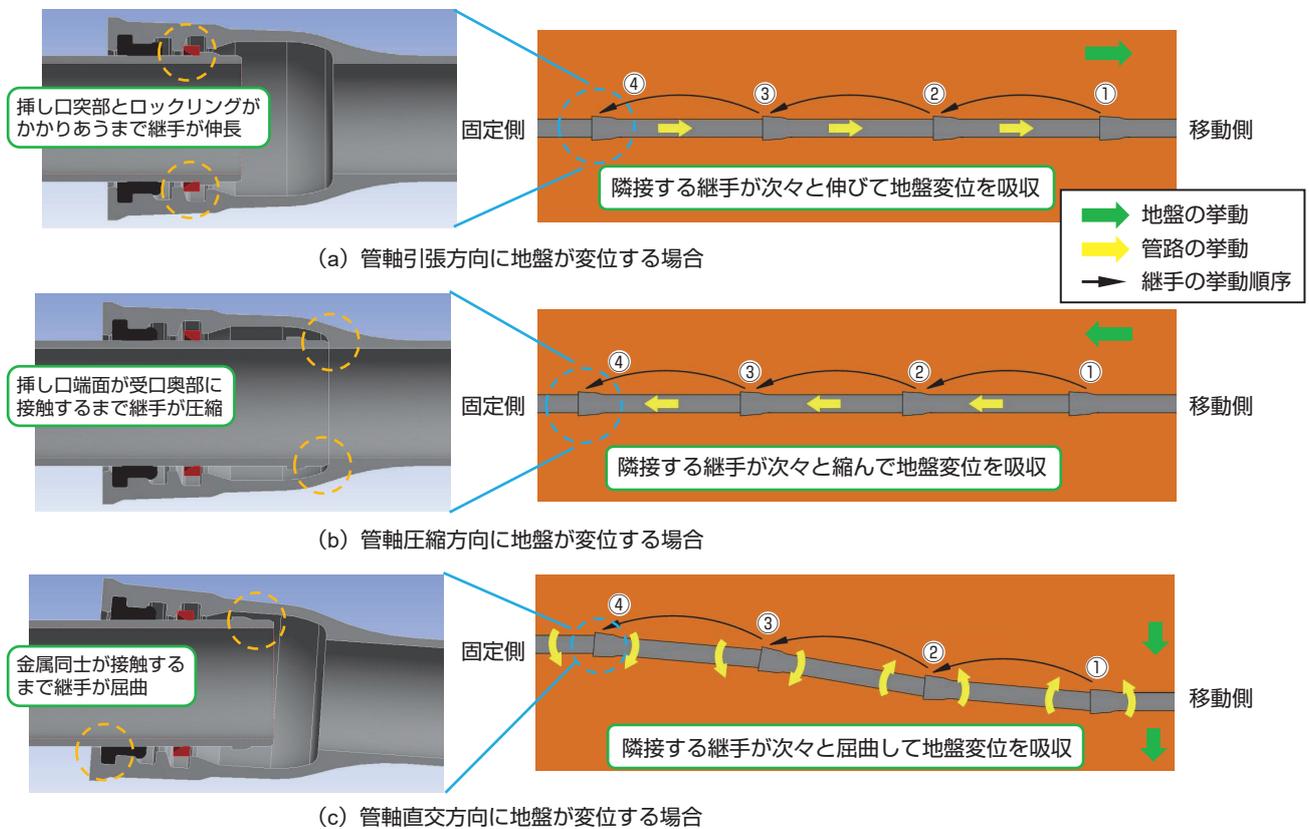


図4 地盤変位を受けた耐震継手ダクタイル鉄管管路の挙動

### 3 管路の挙動確認実験

#### 3.1 実験方法

表1に実験条件を示す。実験では、日本国内で登録されている断層のうち約半数を占める逆断層を模擬することとした。ただし、縦ずれ断層である逆断層を模擬して実験することは困難であったため、逆断層と同じく地盤が管軸圧縮方向に変位するように管路と断層面を45°で交差させた横ずれ断層を模擬して実験を実施した。

図5に実験方法を示す。粒径5 mm以下の真砂土をコンパクターにより締め固めて地盤を作成し、スウェーデン式サウンディング試験により地盤の締め具合を表すN値を計測した。実験では2つの土槽のうち片側の土槽を管軸圧縮方向に移動させて、断層変位を模擬した。土槽には最大1 mの変位を与え、継手屈曲角、継手伸縮量、管体直部の軸方向ひずみを計測した。なお、土槽端部では管軸方向のみ管路が自由に変位し、管軸直交、回転方向には管路を固定する条件とした。

表1 実験条件

項目		条件
管路条件	対象管種	φ 200 GX 形
	管1本の有効長	2 m
地盤条件	地盤材料	真砂土
	N値	10.5
断層条件	土被り	0.6 m
	断層変位量	1 m (土槽移動方向)
	管路と断層との交差角	45°

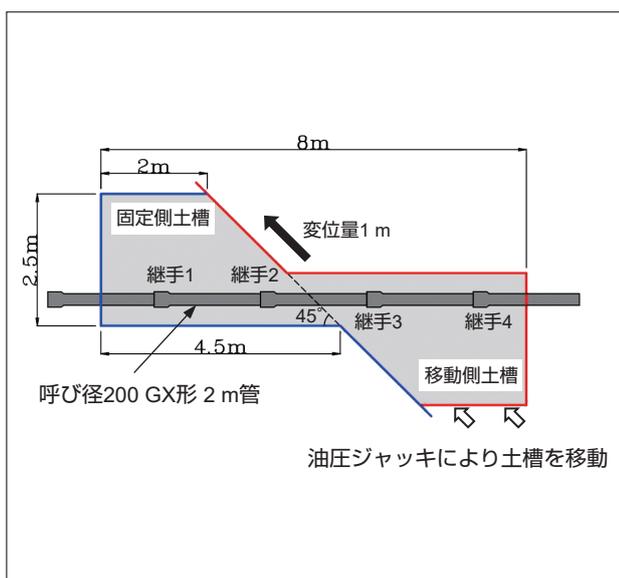


図5 実験方法（平面図）

#### 3.2 実験結果

##### 1) 管路の変位状況

図6に実験前の土槽表層の地盤状況を示し、図7に実験後の管路変位状況を示す。図7より、土槽内の全ての継手が屈曲することで管路が断層変位に追従していることが確認できた。

##### 2) 管路の挙動

図8に継手屈曲角、継手伸縮量、軸方向ひずみの実験結果を示す。図8(c)に示す軸方向ひずみにおいては、受口側から見た管横部を管左横部、管右横部と表した。継手屈曲角においては、断層を模擬した土槽境界部に近い継手2、3から屈曲が始まり、次に隣接する継手1、4が屈曲することがわかった。一方で、継手伸縮量においては土槽境界部に近い継手2、3から圧縮され次に隣接する継手1、4が圧縮されたが、両土槽で継手圧縮量が異なる結果となった。軸方向ひずみにおいては土槽境界部に位置する管③から軸方向ひずみが発生し、次に隣接する管②、④でより大きな軸方向ひずみが発生したことがわかった。なお、いずれの管でも管横部両側で引張ひずみ、圧縮ひずみが同程度発生したことから、管体には曲げ応力が作用していることが確認できた。

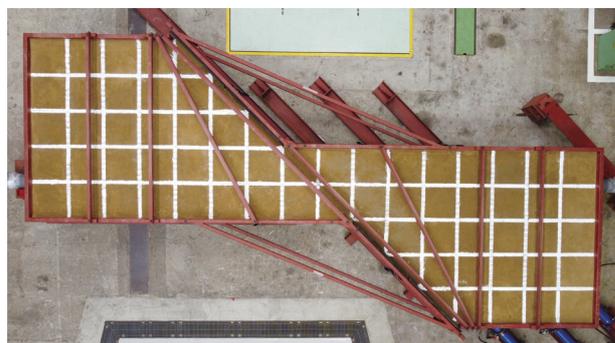


図6 実験前の地盤状況



図7 実験後（土槽移動量1 m、掘上後）の管路変位状況

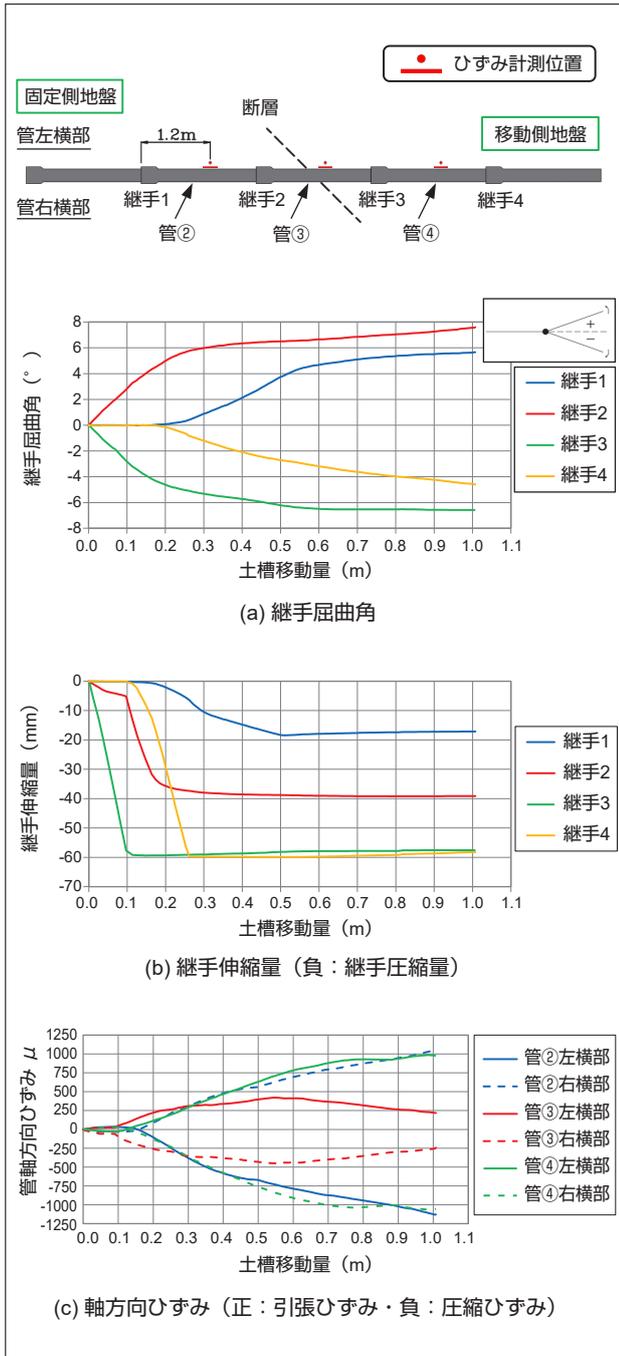


図8 実験結果

## 4 管路挙動の再現解析

実験を模擬して、FEM解析により断層変位を受けた管路挙動の再現解析を実施した。

### 4.1 解析方法

#### 1) 解析モデル

図9に解析方法を示す。解析には、管路をはり要素、継手や地盤をばね要素でモデル化したはり-ばねモデルを用いた。移動側地盤に位置する地盤質点に断層変位を与え、固定側地盤に位置する地盤質点を固定することで、実験条件を模擬した解析を実施した。

#### 2) 継手ばね特性

図10に継手モデルを示し、表2に継手ばね特性を示す。継手の挙動を表現するため、ばね要素を管軸、せん断、回転方向にそれぞれモデル化した。継手ばね特性は、継手性能試験結果などを基に設定した。

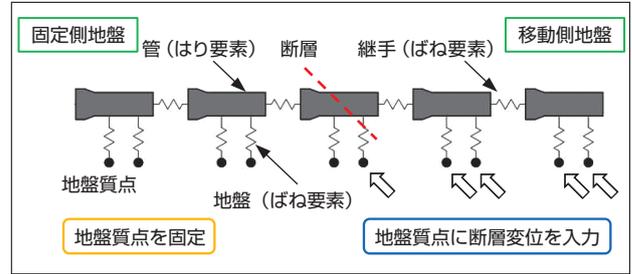


図9 解析方法

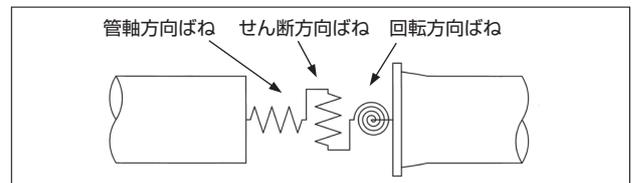


図10 継手モデル

表2 継手ばね特性

管軸方向ばね		
	$S_{a1}$	46 (kN/m)
	$S_{a2}$	257,968 (kN/m)
せん断方向ばね		
	$S_{b1}$	896,000 (kN/m)
回転方向ばね		
	$S_{c1}$	0.53 (kN・m/deg)
	$S_{c2}$	13.5 (kN・m/deg)
	$\theta_{c1}$	5.6 (deg)

### 3) 地盤ばね特性

図11に地盤モデルを示し、表3に地盤ばね特性を示す。管路周辺の地盤をばね要素でモデル化し、ばね要素を管路に対して管軸、管軸直交方向に接続した。地盤ばね特性は、参考文献3)～5)を基に設定した。

## 4.2 解析結果

継手屈曲角、軸方向応力を対象に、実験値と解析値とを比較した。

### 1) 継手屈曲角

図12(a)に、土槽移動量1mでの継手屈曲角の実験値と解析値との比較結果を示す。図12(a)より、継手屈曲角において、解析値は一部の継手で実験値と差異が見られるものの実験値を概ね良好に再現できていることが確認できた。なお、実験では地盤の締固め状況の差異や各土槽での継手圧縮量の違いが継手屈曲角に影響を及

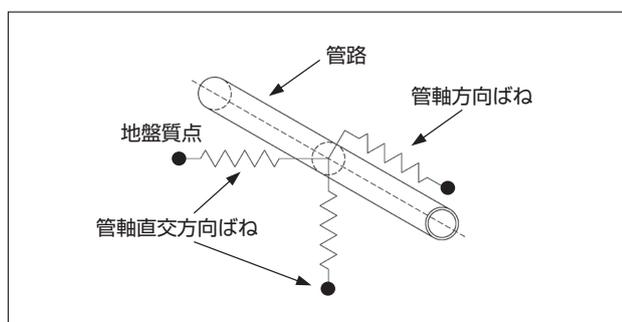


図11 地盤モデル

表3 地盤ばね特性

管軸方向ばね	単位長さあたりの管軸方向摩擦力	
	管と地盤との相対変位	
	$K_1$	1,548 (kN/m)
	$K_2$	1.55 (kN/m)
	$\delta_1$	3.81 (mm)
管軸直交方向ばね	単位長さあたりの管軸直交方向地盤反力	
	管と地盤との相対変位	
	$K_{t1}$	3,950 (kN/m)
	$K_{t2}$	3.95 (kN/m)
	$\delta_{t1}$	8.26 (mm)

ぼしたと推測されるが、FEM解析ではそのような違いを考慮していないため、一部で実験値と解析値に差異が生じたと考えられる。

### 2) 軸方向応力

図12(b)に、土槽移動量1mでの軸方向応力の実験値と解析値との比較結果を示す。ここでは管右横部の軸方向応力で両者を比較した。軸方向応力の実験値は、計測した管体直部のひずみにダクティル鉄のヤング率  $1.6 \times 10^5 \text{N/mm}^2$  を乗じて求めた。また、解析ではひずみ計測位置の前後0.5mでも軸方向応力を算出した。図12(b)より、軸方向応力においても解析値は実験値を概ね良好に再現できていることを確認できた。

## 5 断層横断部の配管設計フロー

一般社団法人 日本ダクティル鉄管協会資料「耐震型ダクティル鉄管による断層対策管路の設計」<sup>3)</sup>には、断層横断部の配管設計フローが取りまとめられている(図13)。ここでは、配管設計フローに基づいた設計方法の習得に向けケーススタディを行ったので、その内容について記述する。

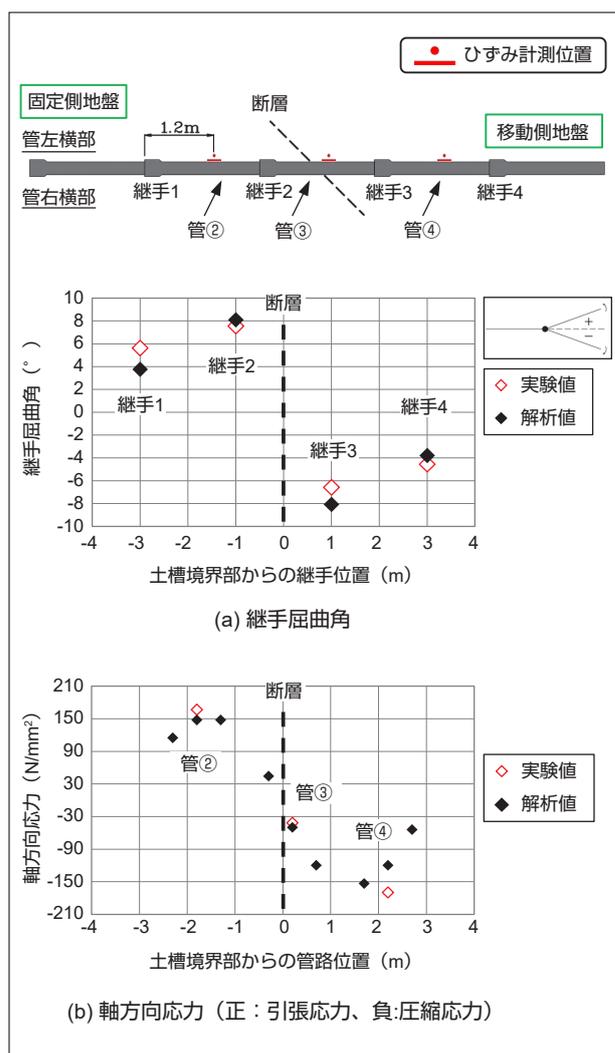


図12 実験値と解析値との比較結果

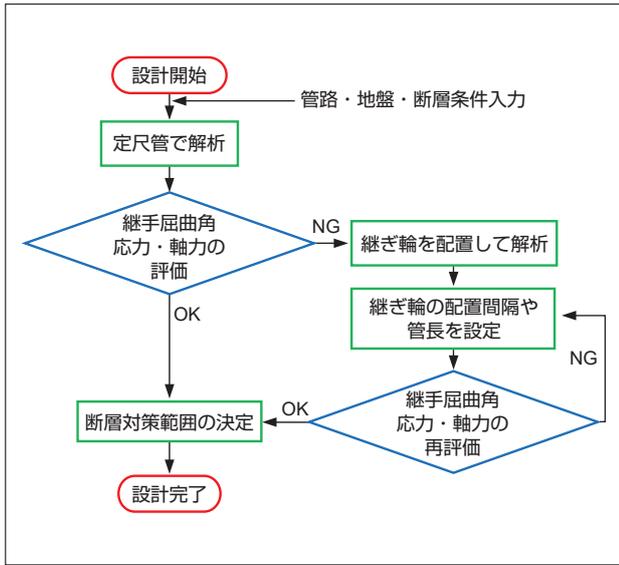


図13 断層横断部の配管設計フロー

### 5.1 ケーススタディの条件

図14に管路と断層との位置関係を示し、表4にケーススタディの条件を示す。対象管種や地盤条件などは管路挙動確認実験と同一条件として、管軸圧縮方向に地盤変位が生じるように断層変位を与えた。断層変位量は、実験時の2倍となる2mとした。なお、断層変位量が1.5m以上となれば、継ぎ輪などを用いる特別な断層対策が必要とされている<sup>3)</sup>。表5に、ケーススタディで用いる一般継手および継ぎ輪の継手ばね特性を示す。表5中の赤線は、継ぎ輪の継手ばね特性である。管軸方向においては継ぎ輪の特徴を反映し、一般継手と比較して縮み代 $\delta$ を5倍確保した(圧縮代を確保する場合)<sup>6)</sup>。また、回転方向では継ぎ輪内部の2ヶ所で継手が屈曲するため、変曲点となる継手屈曲角 $\theta$ を一般継手の2倍と設定した。

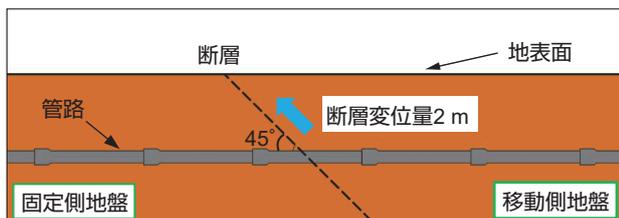


図14 管路と断層との位置関係

表4 ケーススタディの条件

項目	条件	
管路条件	対象管種	$\phi$ 200 GX 形
地盤条件	N 値	10.5
	土被り	0.6 m
断層条件	断層変位量	2 m
	管路と断層との交差角	45°

表5 一般継手および継ぎ輪の継手ばね特性 (黒線：一般継手・赤線：継ぎ輪)

管軸方向ばね		
	$S_{a1}$	46 (kN/m)
	$S_{a2}$	257,968 (kN/m)
	$\delta_{a1}$	50 (mm)
	$\delta_{a2}$	-50 (mm)
せん断方向ばね		
	$S_{b1}$	896,000 (kN/m)
回転方向ばね		
	$S_{c1}$	0.53 (kN・m/deg)
	$S_{c2}$	13.5 (kN・m/deg)
	$\theta_{c1}$	5.6 (deg)
	$\theta_{c2}$	11.2 (deg)

### 5.2 ケーススタディの結果

$\phi$  200 GX 形を弾性範囲内で用いるため、判定対象となる継手屈曲角、軸方向応力、軸力が目標値以下となるように配管設計を実施した。なお、本事例では図13に示す設計フローのうち、「断層対策範囲の決定」については省略した。本報での目標値は、以下の通り設定した<sup>3),7)</sup>。

継手屈曲角：8° (地震時や地盤沈下時の最大屈曲角)  
 軸方向応力：270 N/mm<sup>2</sup> (ダクタイル鋳鉄の0.2%耐力)  
 軸力：600 kN (離脱防止力 3 DkN (D：呼び径 [mm]))

表6にケーススタディの結果を示す。定尺5 m管のみ配管したケース1では、継手屈曲角および軸方向応力が目標値を超過した。設計フローに従い断層を挟むように継ぎ輪を配置しさらに継ぎ輪の配置間隔を小さくすることで、継手屈曲角や軸方向応力が低下してケース3で全ての項目が目標値を満たす結果となった。図15にケース1～3における断層横断部の配管を示し、図16に全3ケースでの継手屈曲角、軸方向応力、軸力の比較結果を示す。本事例では軸方向応力のうち引張応力と比較して圧縮応力が大きくなるため、管に圧縮応力最大値が発生する位置の値を示した。図16より継ぎ輪を短い間隔で配置することで大きな地盤変位を吸収し、断層近傍で発生した大きな継手屈曲角や軸方向応力、軸力が低下していることが確認できる。なお、実際には断層想定範囲を考慮の上、経済性などを加味して配管方法を決定することとなる。

表6 ケーススタディの結果

ケース名	配管条件	判定		
		継手屈曲角	応力	軸力
1	定尺5 m管で配管	NG	NG	OK
2	断層横断部に4 m 間隔で継ぎ輪を4つ配置	NG	NG	OK
3	断層横断部に2 m 間隔で継ぎ輪を4つ配置	OK	OK	OK

6 まとめ

断層横断部の配管設計に用いる FEM 解析の妥当性を確認するため、土槽を用いて断層変位を受けた耐震継手ダクティル鉄管管路の挙動確認実験を行い、併せて再現解析を実施した。実験の結果、断層変位に伴い断層に近

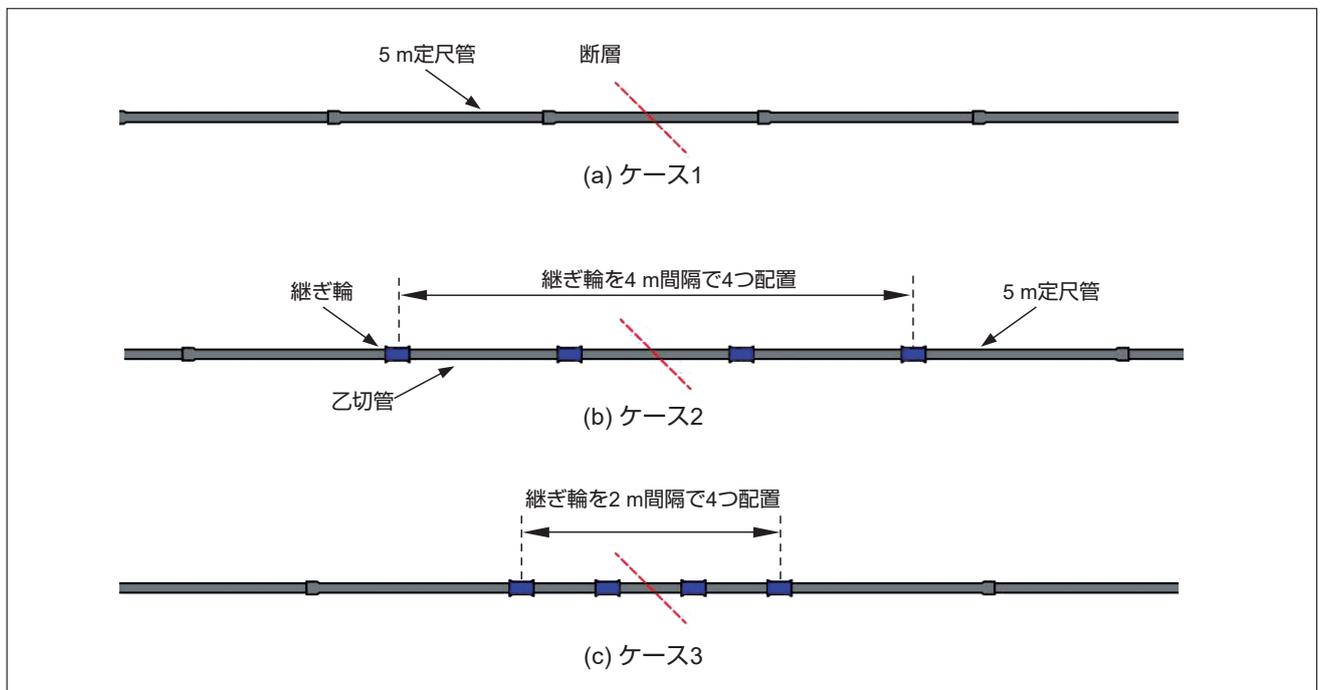


図15 断層横断部の配管

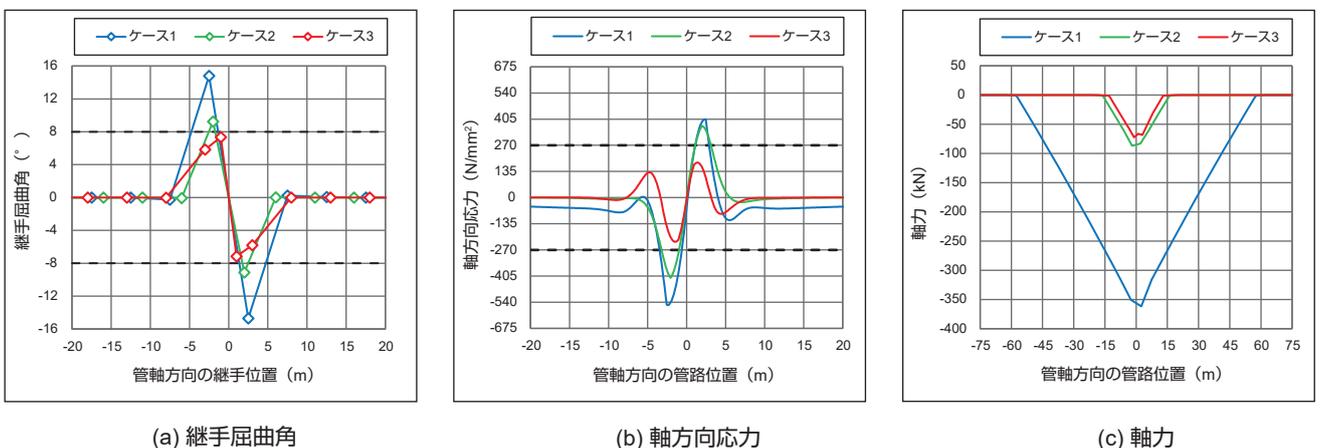


図16 ケーススタディによる断層横断部の管路挙動比較結果（黒破線：目標値）

い継手から伸縮、屈曲が始まり、受口内面と挿し口外面が接触すれば隣合う継手が伸縮、屈曲する鎖構造管路の特性が発揮されることを確認した。また、再現解析により比較対象とした継手屈曲角、軸方向応力共に解析値は実験値を概ね良好に再現できていたことから、解析方法の妥当性を確認した。さらに、一事例として設計フローを基に断層横断部の配管設計に関するケーススタディを実施し、継ぎ輪を用いる断層対策の有効性を確認した。

## 7 おわりに

耐震継手ダクタイル鉄管による配管設計は弾性設計法を前提としていることから、通常配管の状態であっても一定量の断層変位に対して管路は追従可能であり、潜在している断層に対しても有効な対策となる。近年頻発する地震に対する管路の対策を講じる上で、埋設管路の挙動を検証することが大切であり、FEM 解析による管路挙動解析の重要性は今後益々高まるものと考えている。

今回妥当性が確認された解析方法を基に管路設計方法の構築に取り組むと共に、地震時に記録された耐震継手管の挙動や非耐震管の被害状況を基に管路挙動を推定することで、解析方法のさらなる精度向上に努める。断層対策に特化した技術開発やより有効な断層横断部の配管設計の提案を目指して研究に取り組むことで、本研究が水道管路のさらなる強靱化の一助になれば幸いである。

### 参考文献：

- 1) (国研)産業技術総合研究所：活断層データベース(最終閲覧日 2022.11.4) <https://gbank.gsj.jp/activefault/>
- 2) 文部科学省：地震調査研究推進本部事務局 HP (最終閲覧日 2022.11.4) [https://www.jishin.go.jp/resource/terms/tm\\_fault/](https://www.jishin.go.jp/resource/terms/tm_fault/)
- 3) (一社) 日本ダクタイル鉄管協会：JDP A T64 耐震型ダクタイル鉄管による断層対策管路の設計(2020)、pp.9-20
- 4) ASCE: American Lifelines Alliance Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, (2001)、pp.68-76
- 5) 安藤広和, 小林実央, 小口憲武：地震時地盤の側方変位により埋設管に作用する拘束力の検討、地震工学研究発表会講演概要、第 23 卷 (1995)、pp.409-412
- 6) (一社) 日本ダクタイル鉄管協会：JDP A W16 GX 形ダクタイル鉄管 接合要領書 (2022)、pp.7-9
- 7) (一社) 日本ダクタイル鉄管協会：JDP A T57 GX 形ダクタイル鉄管管路の設計 (2021)、pp.2-4

### 執筆者：

**森本皓一**

2012 年入社

博士 (工学)

ダクタイル鉄管の研究開発に従事



**小仲正純**

2000 年入社

ダクタイル鉄管の研究開発に従事



**沼田尚文**

1991 年入社

技術士 (上下水道部門)

ダクタイル鉄管の配管設計に従事



**高木啓介**

1989 年入社

ダクタイル鉄管の配管設計

および研究開発に従事



**宮島昌克**

金沢大学 名誉教授

工学博士

