

# Study of behavior of ductile iron pipeline with earthquake resistant joint buried across a fault

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/42283">http://hdl.handle.net/2297/42283</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



(学位論文要旨)

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の挙動に関する研究

Study of behavior of ductile iron pipeline with earthquake resistant joint buried across a fault

金沢大学大学院 自然科学研究科

専攻：環境科学

学籍番号：1223142002

氏名：金子正吾

This study is focusing on behavior of ductile iron pipelines with earthquake resistant joint buried across a fault used widely for water pipelines in Japan. It is necessary to design a pipeline carefully in case of crossing a fault, because the partially large displacement occurs on the pipelines when a fault moves by an earthquake. Although there are some researches on behavior of steel pipelines which cross a fault, there are few studies of ductile iron pipelines. In this study, we investigated the behavior of pipeline buried across a fault by experiments using the actual pipes and simulation analysis. As a result, we studied the behavior of ductile iron pipeline with earthquake resistant joint buried across a fault clearly. In addition, we confirmed that we could evaluate the safety of pipeline against the fault movement by deflection angle in each joint, and we clarified the availability of an estimate method of behavior of ductile iron pipeline with earthquake resistant joints buried across a fault.

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、マグニチュード9.0を記録し、被災地は液状化などの地盤変状や津波により甚大な被害を受けた。水道管路も多大な被害を受け、250万世帯以上において断水となり、市民生活にも大きく影響を及ぼした。

水道管路の地震対策として、耐震継手ダクタイル鉄管が一般的に使用される。耐震継手は管長の1%伸縮することができ、地震時には最大8°屈曲することができる。管本体も600MPa程度の曲げ強度を有する。これまでの数々の大地震で被害は報告されておらず、さらに地震による液状化などの地盤変位に対しても多くの実績を有し、調査研究されている。

一方、地震により断層が動く場合もあるが、管路挙動を詳細に研究した事例は少なく、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の設計方法は未だ確立されていない。

そこで本研究では、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動を詳細に把握し、その配管設計方法を確立することを目的とする。

## 2. 土槽を用いた挙動実験

### 2.1 実験方法

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動を明らかにするため、実管路を用いた土槽実験を行った。2分割の土槽の中に呼び径75で管長1mのNS形ダクタイル鉄管を埋設し、一方の土槽を変位させることによって断層挙動を表現した。土槽の変位はゆっくり変位させる静的変位と、落下させる動的変位の2通りについて行った。静的に変位させた実験土槽を図1に、実験条件を表1に示す。

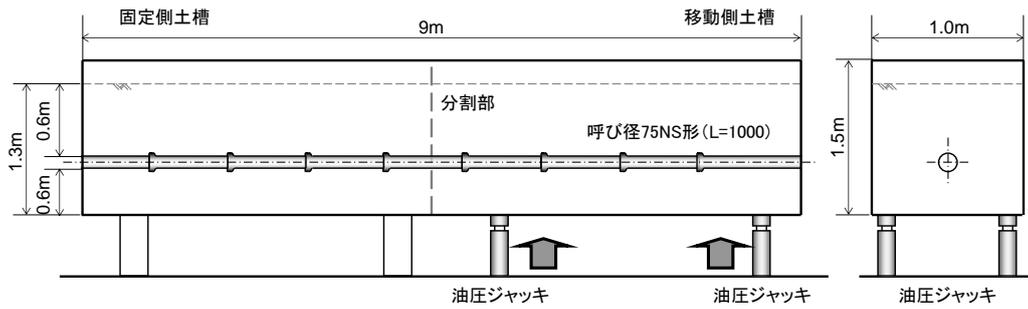


図1 実験土槽（静的変位の例）

表1 実験条件

	静的変位	動の変位
供試管	呼び径75NS形ダクタイル鉄管	
管路長さ	L=1m×9(全長9m)	L=1m×15(全長15m)
断層変位量：V	500mm 鉛直方向：500mm 水平方向：0mm	346mm 鉛直方向：300mm 水平方向：173mm
断層の傾き	90°	60°
変位速度 変位させる方法	約0.2mm/sec程度 油圧ジャッキで上昇	1.0m/s 自然落下
地盤種類	砂質地盤	
締固め	N値15程度	

## 2.2 実験結果

断層変位後の継手屈曲角の計測結果を、静的変位について図2に、動の変位について図3に示す。いずれも、断層分割部を挟む継手の屈曲角が大きかった。また、静的変位の固定側土槽では分割部に近い継手Aよりも隣の継手Bの屈曲角の方が大きく、動の変位の移動側土槽でも、分割部に近い継手A'よりも隣の継手B'の屈曲角の方が大きかった。

移動側土槽は、静的変位では上側に、動の変位では下側に変位する。このため静的変位では固定側土槽内の管路は管上側からの地盤反力を受け、動の変位では逆に移動側土槽内の管路が管上側からの地盤反力を受ける。このため、静的変位実験と動の変位実験では分割部を挟んで逆の現象が起こっているが、挙動の傾向は変位条件に関係なく同じと考えることができる。

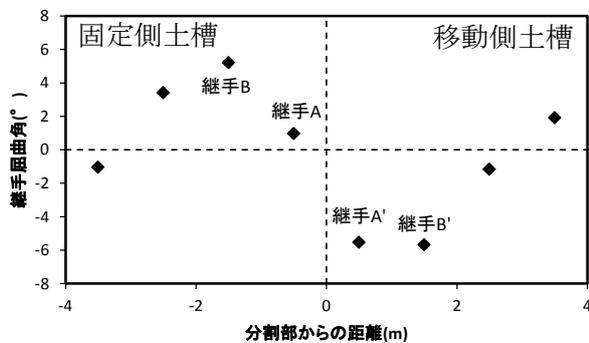


図2 継手屈曲角の計測結果（静的変位）

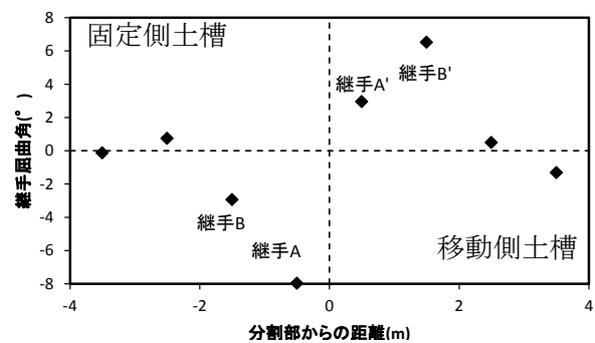


図3 継手屈曲角の計測結果（動の変位）

### 3. 断層横断部の管路挙動シミュレーション解析

#### 3.1 解析手法

日本にあるすべての断層挙動を実験で確認することは不可能であるため、シミュレーション解析により確認する。埋設管路の挙動解析は、管路を弾性床土上の梁と見なし、継手および地盤をばねでモデル化して FEM 解析を実施した。一般に管は地盤と一緒に挙動することおよび静的変位実験と動変位実験で同じ傾向がみられたことから、静的解析手法を採用した。

継手ばねは、図 4 に示すように実験結果などをもとに非線形ばねで設定した。地盤ばねも、図 5 に示すように管と地盤の滑りなどを考慮し、バイリニアで設定した。また、管軸直角方向の地盤ばねは、管が上方向に変位する場合と下方向に変位する場合とで異なるばね定数を設定した。

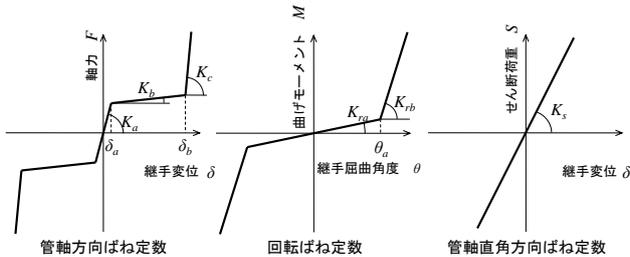


図 4 継手ばねの概要図

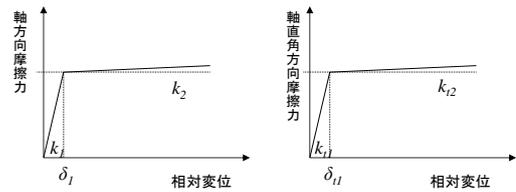


図 5 地盤ばねの概要図

#### 3.2 実験結果の検証

本解析が実験結果を再現できるかどうか確認するため、実験と同じ条件で解析を実施した。断層変位後の継手屈曲角の測定結果と解析結果を図 6 (静的変位) および図 7 (動変位) に示す。解析結果は実験結果と比較的によく一致しており、本解析手法が妥当であることを確認した。

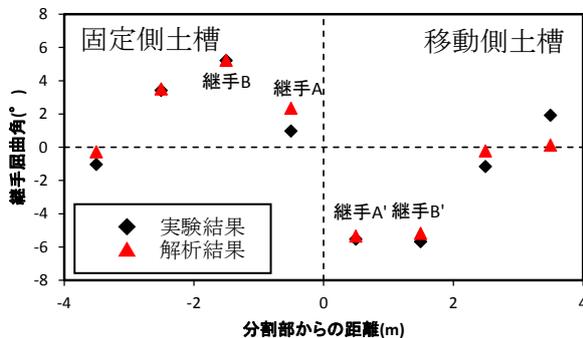


図 6 継手屈曲角の解析結果 (静的変位)

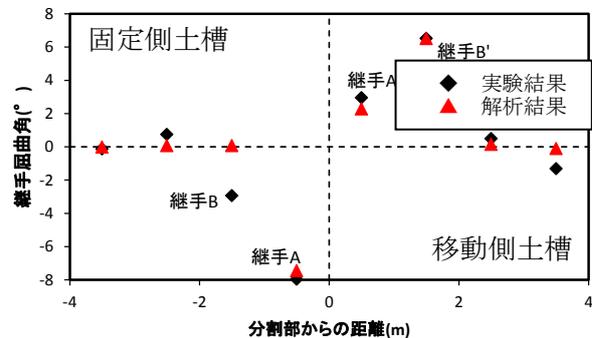
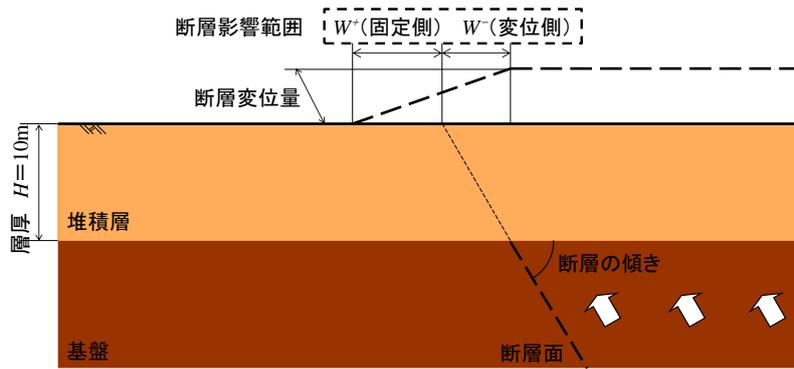


図 7 継手屈曲角の解析結果 (動変位)

#### 3.3 解析条件

##### 1)断層条件

解析対象とする断層条件は、既存公開データをもとに、断層の傾き  $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  で断層の傾き 3m の逆断層とした。平地の基盤断層は沖積層などの堆積物で覆われている場合が多く、断層の動きに伴う堆積層の挙動が重要な問題となる。既存研究事例をもとに、断層の動きに伴う地表の影響範囲 (以後、「断層影響範囲」と呼ぶ) と堆積層の層厚を図 8 のように設定した。



断層の傾き	45°	60°	90°
$W^+$ (固定側)	$0.3 \cdot H = 3\text{m}$	$0.4 \cdot H = 4\text{m}$	$0.4 \cdot H = 4\text{m}$
$W^-$ (変位側)	$0.4 \cdot H = 4\text{m}$	$0.1 \cdot H = 1\text{m}$	$0.2 \cdot H = 2\text{m}$

H: 堆積層の層厚

図8 断層影響範囲

## 2) 管路条件

管路モデルを図9に、解析条件を表2に示す。対象管路は代表的な耐震継手ダクトイル鉄管であるNS形ダクトイル鉄管の直線状管路とし、断層位置や管長を変えて解析を行った。断層影響範囲とその周辺の非影響範囲（固定側及び変位側地盤）の境界部に継手部がある場合、またはない場合で解析を行い、位置による影響を考慮した。

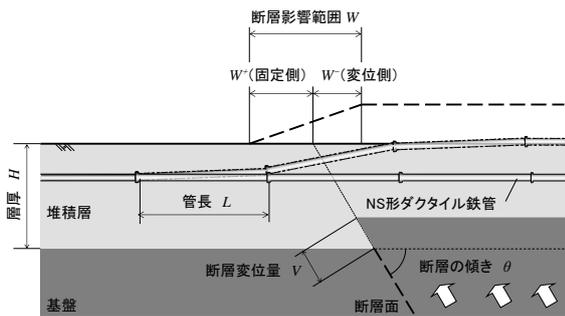


図9 管路モデル

表2 解析条件

断層の型	逆断層
断層変位量: $V$	3.0m
断層の傾き: $\theta$	45°、60°、90°
管路	NS形ダクトイル鉄管
呼び径	75、100、150、200、250
管長: $L$	定尺(5m または 4m)、定尺×1/2、1m
堆積層の地盤条件	沖積層砂質地盤 (N値 15 相当)
堆積層の層厚: $H$	10m

## 3.4 解析結果

管路挙動の解析結果の代表例として、呼び径75、管長は定尺×1/2、断層の傾き60°、変位側地盤の境界部に継手がある場合について、図10に示す。断層近傍継手の断層変位に対する継手屈曲角の解析結果を図11に示す。断層変位に従い境界部の継手  $B_1$ 、 $C_1$  が最初に動き、その後隣の継手が動いていた。

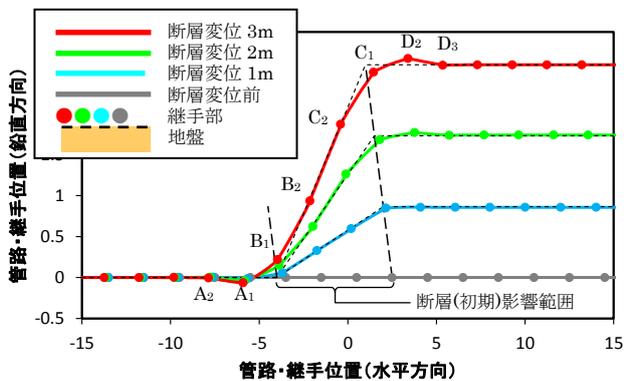


図10 管路挙動の解析結果例

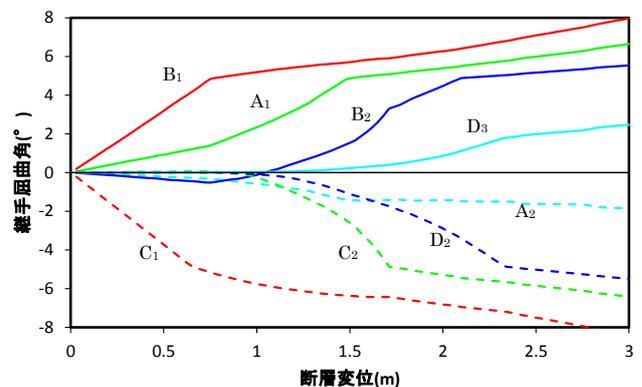


図11 各継手の屈曲角の解析結果例

呼び径 75、管長は定尺、断層の傾き 60°、変位側地盤の境界部に継手がある場合の境界部の継手 C<sub>1</sub>の継手屈曲角の解析結果を図 12 に、管体発生応力の解析結果を図 13 に示す。継手屈曲角の安全性の評価基準は継手屈曲性能の 8°、管体発生応力の安全性の評価基準は管体曲げ強度の耐力相当の 400MPa とした。評価基準に達するときの断層変位を「許容断層変位」と定義する。図 12 より継手屈曲角で決まる許容断層変位は 1.89m で、管体発生応力で決まる許容断層変位は約 2m であり、継手屈曲角での評価が管路にとって厳しく、いずれの条件でもこの傾向が確認された。また、管長 1m ではいずれの評価でも基準値を超えることはなかった。

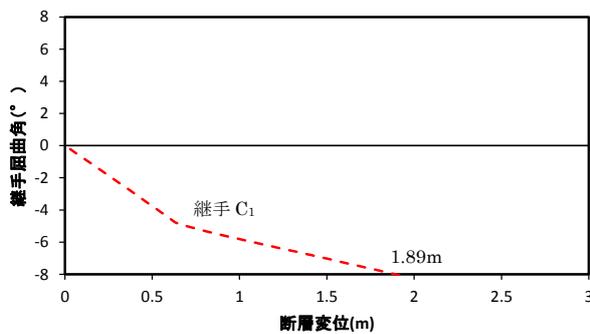


図 12 継手屈曲角の解析結果例

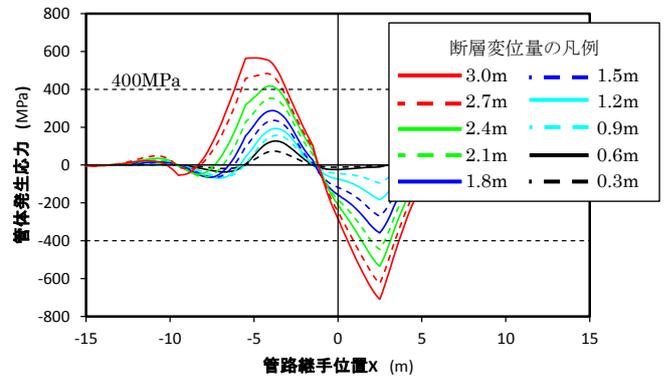


図 13 管体発生応力の解析結果例

#### 4. 断層横断部の配管設計方法の提案

##### 4.1 管路挙動のモデル化

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管において、断層変位により最も大きく屈曲するのは、断層影響範囲との境界部にある継手であるので、固定側地盤との境界部の継手挙動を例として考える。

今、図 14 のように断層が  $V$  だけ変位することにより、断層影響範囲と非影響範囲との境界部の継手 A<sub>1</sub> と、隣の継手 A<sub>2</sub> および B<sub>2</sub> は断層変位に追従して幾何学的に挙動すると仮定し、継手 A<sub>1</sub> の屈曲角  $\beta_{A1}$  を考える。耐震継手ダクタイル鉄管の継手挙動は、屈曲角がある一定値(呼び径 75 の場合 4.9°)に達すると継手部内部で管が接触し曲がりにくくなる。このため、例えば呼び径 75 の場合、 $\beta_{A1}$  が 4.9° に達するまでは管と地盤は同じ動きをするが、4.9° を超えると継手 A<sub>1</sub> は地盤の動きに追随せず相対変位が生じ、隣の継手 A<sub>2</sub> や B<sub>2</sub> が屈曲し始めると考えられる。地盤との相対変位量については、4.9° 以降の断層変位量と比例するものとし、比例定数を用いて式(1)のように算出した。この比例定数は、境界部の継手の動きやすさを表しており、ここでは「変位影響度」と呼ぶことにする。

$$\delta_{A1} = k_{A1} \cdot \delta \quad (1)$$

ここで、

- $\delta_{A1}$  : 継手 A<sub>1</sub> の地盤との相対変位量
- $\delta$  : 継手屈曲角 4.9° 以降の断層変位
- $k_{A1}$  : 比例定数 (変位影響度)

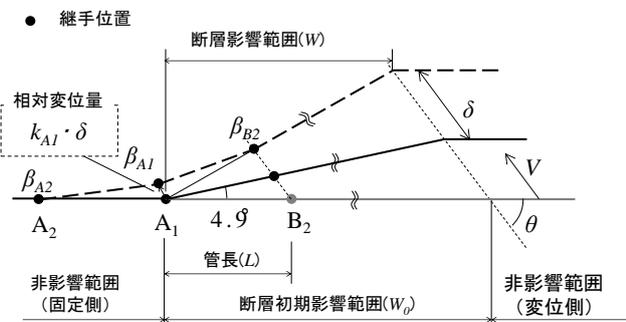


図 14 検討モデル

#### 4.2 継手屈曲角の算出

呼び径 75 を例に考える。継手屈曲角が  $4.9^\circ$  よりも小さい領域では、管と地盤は同じ動きをすることから、管路挙動すなわち継手の位置座標は幾何学的に算出できる。継手屈曲角が  $4.9^\circ$  を超える領域では、継手  $A_1$  と地盤との相対変位量、すなわち変位影響度  $k$  値が求まると、各継手の位置座標を算出できる。継手  $A_1$  および隣の継手  $A_2$ 、 $B_2$  の位置座標が求まると、式(2)より継手  $A_1$  の屈曲角  $\beta_{A1}$  が算出できる。断層変位前後の継手  $A_2$ 、 $A_1$ 、 $B_2$  の位置座標をまとめると、表 3 および図 15 のようになる。

$$\beta_{A1} = \tan^{-1} \frac{y_{B2} - y_{A1}}{x_{B2} - x_{A1}} - \tan^{-1} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{x_{A1} - x_{A2}} \quad (2)$$

ここで、

$x_j$  : 継手  $j$  の x 座標

$y_j$  : 継手  $j$  の y 座標

表 3 各継手位置座標

		$A_2$	$A_1$	$B_2$
変位前	$x_1$	$x_{1A2} = -L$	$x_{1A1} = 0$	$x_{1B2} = L$
	$y_1$	$y_{1A2} = 0$	$y_{1A1} = 0$	$y_{1B2} = 0$
$4.9^\circ$ 屈曲時	$x_2$	$x_{2A2} = -L$	$x_{2A1} = 0$	$x_{2B2} = L - \frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \cos \theta$
	$y_2$	$y_{2A2} = 0$	$y_{2A1} = 0$	$y_{2B2} = \frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \sin \theta$
$4.9^\circ$ 以上 屈曲時	$x_3$	$x_{3A2} = -L$	$x_{3A1} = \frac{-k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$	$x_{3B2} = x_{2B2} - \frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$
	$y_3$	$y_{3A2} = 0$	$y_{3A1} = \frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$	$y_{3B2} = y_{2B2} + \frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$

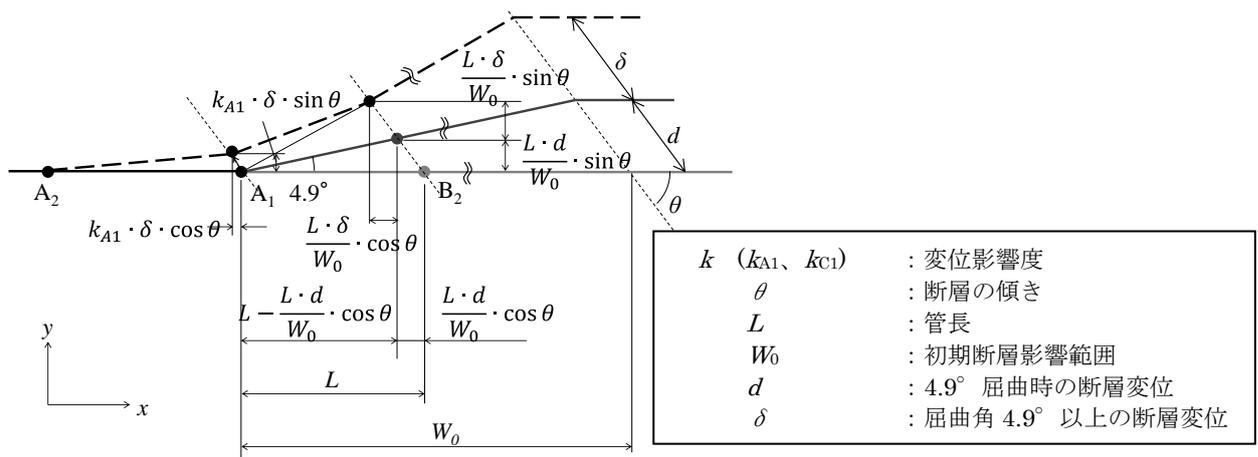


図 15 各継手位置の座標

### 4.3 管路挙動推定式

変位影響度  $k$  値は断層影響範囲と非影響範囲との境界部にある継手の動きやすさを意味し、継手の屈曲特性と地盤特性との間に相関があると考えられる。継手の屈曲特性は管の呼び径を、地盤特性は管長、断層の傾きおよび継手部の位置を代表値とする。 $k$  値は、断層変位量 0.03m 毎の継手屈曲角の解析結果と推定結果との残差から算出される決定係数  $R^2$  が最大になるよう算出した。 $k$  値の算出結果をもとに、表 4 に示す各項目を目的変数およびそのカテゴリとし、数量化理論 I 類により式(3)のように  $k$  値の推定式を導出した。表 4 には導出結果を一部補正した各目的変数のカテゴリースコアを併せて示す。

$$k = P_{1i} \cdot x_{1i} + P_{2i} \cdot x_{2i} + P_{3i} \cdot x_{3i} + P_{4i} \cdot x_{4i} \quad (3)$$

ここで、

$k$  : 推定剛性係数

$P_{ni}$  : 目的変数  $n$  カテゴリ  $i$  の係数

$x_{ni}$  : 0 または 1

表 4 目的変数およびカテゴリースコア

呼び径 $P_1$		管長 $P_2$		断層の傾き $P_3$		継手部の位置 $P_4$	
75	0.070	定尺	0.070	45°	0.015	固定側	0.010
100	0.050	定尺×1/2	-0.005	60°	0.060	変位側	0.000
150	0.080			90°	0.075		
200	0.040						
250	0.095						

### 4.4 継手屈曲角の推定および配管設計方法の検討

式(3)で推定した  $k$  値をもとに算出した継手屈曲角を、解析結果と併せて図 16 に示す。解析結果では許容断層変位量は 2.76m であるのに対し、推定式による推定では 2.19m とやや短かった。解析結果との間にやや乖離があるが、これは解析結果よりも安全側の推定となるように  $k$  値の推定におけるカテゴリースコアを丸めたためであり、管路の安全上は問題ないと考えられる。

以上から、次の手順により断層横断部の耐震継手ダクティル鉄管を配管設計することができる。

断層条件（断層変位量、断層の傾き）および管路条件（呼び径、管長）から、式(3)および表 4 により変位影響度  $k$  値を推定する。 $k$  値が推定されると表 3 より各継手の位置座標が算出できるため、式(2)より断層影響範囲の境界部の継手屈曲角が算出できる。こうして推定された継手屈曲角が、継手の安全性の評価基準値である 8° を下回っているかどうかで管路の安全性を評価する。管路の安全性が確保できない場合は、管長を短くして再度  $k$  値の推定～安全性の評価を実施する。安全性が確保できる場合は、当該の管路条件（呼び径、管長）にて断層横断部に配管できることになる。

## 5. 結論

本研究は、断層横断部の耐震継手ダクティル鉄管において、断層が動いた時どのように挙動するかを解明し、どのように配管すれば管路の安全性が保たれるか、配管設計の提案を行った。本研究のまとめを以下に示す。

①実管路を用いた土槽実験による断層横断部の耐震継手ダクティル鉄管の管路挙動調査の結果、断層近傍は管路と地盤との間に相対変位が生じること、変位条件にかかわらず挙動の傾向は同じであることが分かった。

②断層横断部の管路挙動シミュレーション解析を行った結果、断層影響範囲との境界部が最も大きく屈曲すること、継手屈曲角による評価が管路にとって最も厳しい条件であること、管長を短くすると許容断層変位量が長くなることが分かった。

③断層横断部の管路挙動調査及びシミュレーション解析をもとに、断層横断部の管路挙動の推定手法及び管路の安全性評価手法を立案でき、管路配管設計方法を提案できた。

以上

平成27年1月28日

## 学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の挙動に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所属 環境科学 専攻

(2) 氏名 金子 正吾

3. 審査結果の要旨（600～650字）

本学位申請論文に関し、第1回審査委員会を開催し審査方法を決定するとともに、論文の内容について検討した。さらに、平成27年1月28日に行なわれた口頭発表後に第2回審査委員会を開き、協議の結果、以下のように判定した。

本論文は、これまで多くの地震において耐震性能を発揮している耐震継手ダクタイル鉄管に注目し、断層横断部における挙動特性を解明し、具体的な配管設計法を提案しようとしたものである。まず、実管路と断層再現土槽を用いた実験により断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の挙動を解明し、次に、シミュレーション解析によってそれを再現するとともに、詳細な解析を行なうことにより断層横断部の管路挙動を一般化し、管路挙動推定式を導出した。さらに、具体的な配管設計法を提案した。本研究で得られた成果は、ライフライン地震工学上の価値が極めて高いと認められることから、本委員会は本論文が博士（工学）に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印）○合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）