

断層横断部の耐震継手ダクティル鉄管の 挙動推定方法の研究

金子 正吾¹・宮島 昌克²

¹正会員 金沢大学大学院, 自然科学研究科 博士後期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:shogo.kaneko@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

内陸の活断層を震源とする地震では, 地表面の地盤に大きなずれが生じることがある. このため, 断層横断部に管路を布設する場合, 慎重に設計する必要がある. しかし, 断層が動いた時, 断層横断部に埋設された耐震継手ダクティル鉄管がどのように挙動するかを詳細に研究した事例は少なく, その設計方法は確立されていない.

そこで本研究では, 断層横断部の耐震継手ダクティル鉄管の挙動解析を行い, 管路挙動を詳細に分析した. さらにその分析結果をもとに, 管路挙動推定式を立案し, 断層横断部の管路の安全性の評価を試みた.

Key Words : *fault, ductile iron pipe, pipeline behavior analysis, earthquake resistant joint, estimate method*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では, 我が国の観測史上最大規模となるマグニチュード9.0を記録した. 被災地は地震による液状化などの地盤変状や津波により, 1995年阪神・淡路大震災をも凌ぐ甚大な被害を受けた.

水道施設も多大な被害を受け, 250万世帯以上において断水となった¹⁾. 一方, 水道管路の地震対策として一般的に使用される耐震継手ダクティル鉄管については, 性能不良に起因する被害は発生していない.

東日本大震災は, 海底プレート境界面の滑りにより発生したものであるが, その後に福島県いわき市で起こった地震では逆断層の動きが確認されている. その断層は地表に現れており, 約70°の傾斜角で約1.8mのずれが観測されている²⁾. 阪神・淡路大震災も, 内陸の野島断層を震源としており, 約30°の傾斜角で約2.3mのずれが観測されている³⁾.

耐震継手ダクティル鉄管は, 地盤の永久変位対策として, 液状化などの地盤変状に対しては数多くの実績を有する⁴⁾⁵⁾. しかし, 断層変位に対しては, これまで地震時に挙動した断層直上に埋設されていた事例がなく, その性能が確認されているわけではない.

断層が動いて地表にまで現れると, 地表付近の構造物

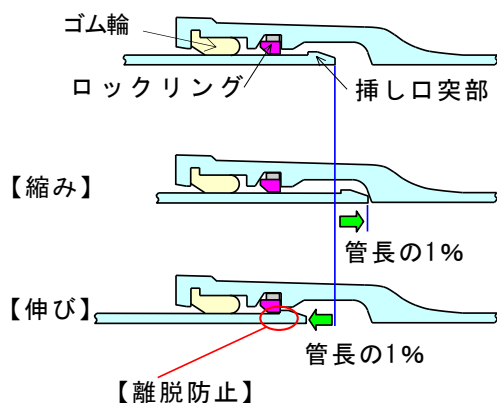
は局部的に大きなダメージを受ける場合があるため, 断層横断部の管路設計は極めて重要である. 鋼管などの一体構造管路に関しては, 高田⁶⁾らが断層横断部の設計方法を提案しているが, ダクティル鉄管などの継手構造管路においては, 断層横断部の管路挙動を詳細に研究した事例は少なく, その設計方法は確立されていない.

そこで本研究では, 断層横断部の耐震継手ダクティル鉄管がどのように挙動するか解析により詳細に検証し, その結果を基に断層横断部の管路挙動を推定する手法を提案するとともに, それによって管路の安全性が評価できることを明らかにした.

2. 耐震継手ダクティル鉄管の概要

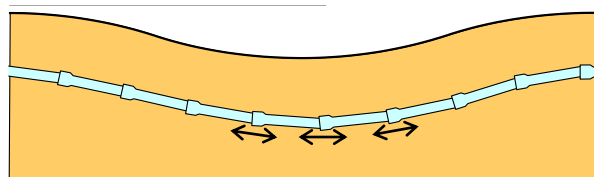
耐震継手ダクティル鉄管について, 代表例としてNS形ダクティル鉄管の継手性能⁷⁾および伸縮挙動を図-1に示す. 管長の±1%の伸縮性能を有している.

地盤沈下及び地割れした地盤内の耐震継手ダクティル鉄管の挙動の概要を図-2に示す. 一つの継手の伸縮量や屈曲角が限界に達しても, 隣の継手が挙動することによって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ている. 今回, 断層が動いた時耐震継手ダクティル鉄管がどのように挙動するか, 解析により検証することとした.

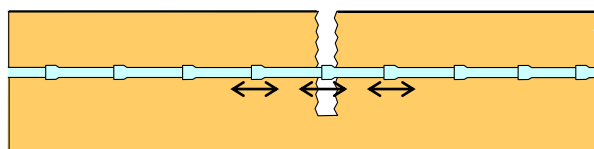


項目	性能
継手伸縮量	管長の±1%
引抜き耐力	3D (kN) (D: 呼び径mm)
最大屈曲角	8°

図-1 NS形ダクトイル鉄管の継手性能および伸縮挙動
(呼び径75～250)



(地盤沈下)



(地割れ)

図-2 耐震継手ダクトイル鉄管の地盤変位に対する挙動

3. 断層横断部の管路挙動解析手法

(1) 断層モデル

a) 既存断層の調査

独立行政法人産業技術総合研究所の活断層・地震研究センターでは、2005年より活断層データベースを公開しており⁹⁾、2014年8月1日現在変位量が明確な活断層データが389件登録されている。逆断層は約5割を占め、活断層の傾きは45°、60°、90°で9割を占めていた。活断層の変位量分布を図-3に示す。全データの約半数が2m以下、3/4は3m以下であった。

これらのデータをもとに、今回解析対象とする断層モデルは、断層変位量3mで傾き45°、60°、90°の逆断層とした。

b) 地表面への影響

日本では平野部に多くの人口が集中し、多くの水道管路が埋設されている。平野部は一般に河川の堆積作用によって形成されており、このような場所に存在する活断

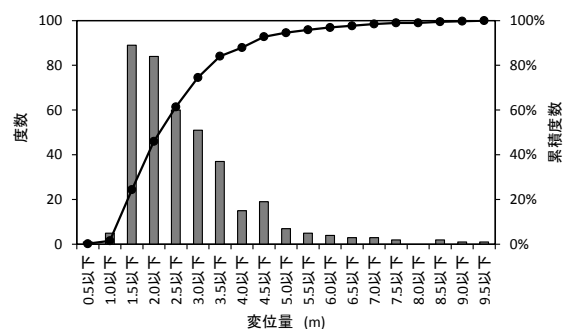
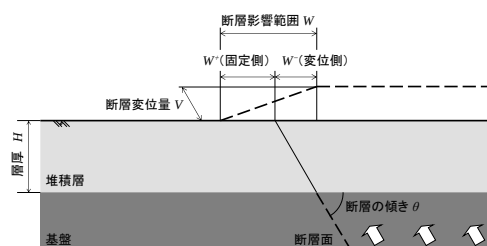


図-3 活断層の変位量分布



断層の傾き	45°	60°	90°
W^+	$0.3 \cdot H$	$0.4 \cdot H$	$0.4 \cdot H$
W^-	$0.4 \cdot H$	$0.1 \cdot H$	$0.2 \cdot H$

H: 堆積層の層厚

図-4 断層の傾き別地表面への影響範囲

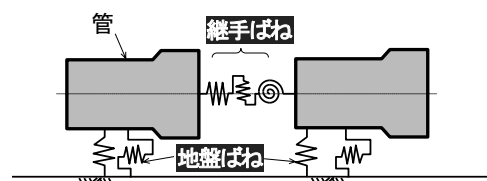


図-5 継手ばねおよび地盤ばねモデル

層は堆積層(沖積層)で覆われているため、断層の動きに伴い堆積層がどのように変形するかは管路の挙動を考える上で重要な問題である。

鬼塚⁹⁾らは模型実験において基盤断層の傾斜角や堆積層の層厚を変えた場合の地表面への影響を調査している。堆積層の層厚に関しては、本多¹⁰⁾らが日本全国の33河川を対象に河口付近の沖積層の層厚分布を調査している。河口付近の層厚は、33河川中32河川で10m以上であることから、今回沖積層の層厚は10mとし、地表面への影響範囲は鬼塚の実験結果をもとに図-4のように算出した。

(2) 解析モデル

埋設管路の挙動解析については、管路を弾性床土上の梁(剛体)と見なし、継手および地盤をばねでモデル化(図-5)してFEM解析を行った(使用ソフト:DYNA2E)¹¹⁾。

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。地盤条件はN値15相当の沖積層砂質地盤とし、地盤反力係数はN値より算出し、20,700kN/m³と設定した⁷⁾¹²⁾。土被りの影響は無視し、管

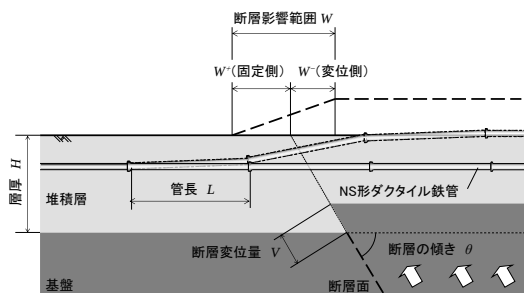


図-6 解析モデル(断層付近)

表-1 解析条件

断層の型	逆断層
断層変位量: V	3.0m
断層の傾き	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) 地盤反力係数 $K=20,700\text{kN/m}^3$
堆積層の層厚: H	10m
断層影響範囲: W (W' , W)	図-4参照

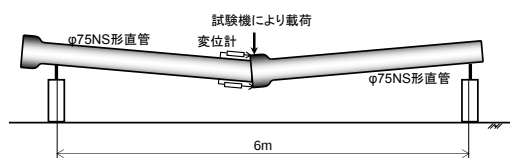


図-7 継手ばね(回転ばね)設定の実験方法

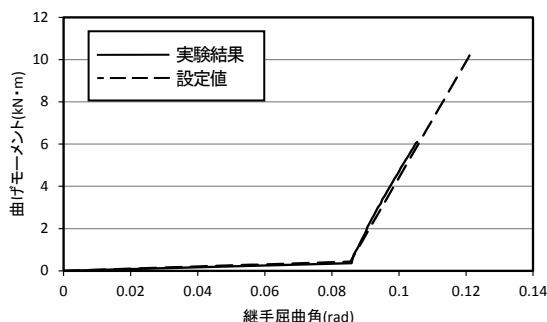


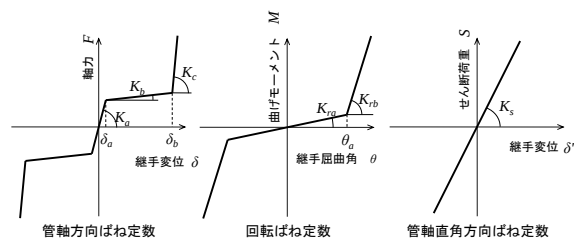
図-8 継手ばね(回転ばね)の測定結果および設定

路周辺地盤の挙動は地表面の挙動と同じとした。また、管両端が断層横断部の管路挙動に影響を与えないような管路長を対象としていることを確認し、境界条件は管端部を完全拘束とした。解析モデルを図-6に、解析条件を表-1に示す。

(3) ばねモデル

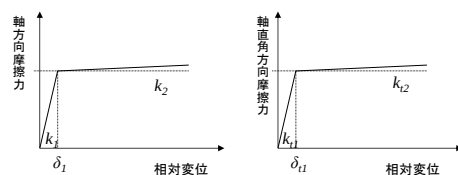
a) 継手ばね

継手ばねは実験に基づいて設定した¹³⁾。図-7に例として回転ばねを求める実験方法を示す。図-8に継手屈曲角と曲げモーメントの測定結果およびこの測定結果に基づいて設定した継手ばね定数を示す。回転ばねは継手内部で管が接触する角度(呼び径75では4.9°)を超えると曲



軸方向ばね	回転ばね	軸直角方向ばね
K_a	K_{ra}	K_s
K_b	K_{rb}	
K_c	θ_a	
δ_a		
δ_b		

図-9 継手ばね(呼び径75の場合)



管軸方向	管軸直角方向
	上方向移動
k_1	k_{11}
k_2	k_{12}
δ_1	δ_{11}

図-10 地盤ばね(呼び径75の場合)

がりにくくなるように設定した。なお、呼び径75～250のNS形ダクトイル鉄管においては、地震時に曲がりうる最大屈曲角度として8°と規定されており⁷⁾、8°以内では継手性能が保持される。

軸方向ばねは、図-1に示す継手部のゴム輪の静摩擦力で引張り力に耐える領域、管とゴム輪が滑り継手部が伸縮する領域、継手の抜け出し防止機構が働き伸縮が止まる領域でそれぞれ異なるばね定数を設定した。

一例として呼び径75における継手ばねの設定値をまとめて図-9に示す。

b) 地盤ばね

管軸方向地盤ばねは、文献14)を参考に式(1a)のように設定した。また、管と地盤の滑りを考慮し、管と地盤の相対変位が限界値を超えるとばね定数が小さくなるバイリニアモデルで設定した(図-10)。

管軸直角方向地盤ばねは、管が地盤に対し相対的に下方へ移動する場合は、地盤反力から式(2a)のように設定した。管が地盤に対し相対的に上方へ移動する場合は、地盤の崩壊を考慮した式(3a)のように設定した。いずれも、管と地盤の相対変位が限界値を超えるとばね定数が小さくなるバイリニアモデルで設定した(図-10)。

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

$$k_2 = 0.005 \cdot k_1 \quad (1b)$$

$$k_{11} = K \cdot D \cdot \ell \quad (2a)$$

$$k_{t2} = 0.02 \cdot k_{t1} \quad (2b)$$

$$k_{t1} = \gamma \cdot \left(h + \frac{D}{2} \right) \cdot q \cdot D / \delta_1 \quad (3a)$$

$$k_{t2} = 0.002 \cdot k_{t1} \quad (3b)$$

ここで、

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(=17.7kN/m ³)
h	: 土被り(=1.2m)
Δ	: 土の内部摩擦角(=36°) ¹⁵⁾
K	: 地盤反力係数(=20,700kN/m ³)
ℓ	: 管の単位長さ
q	: 上方移動時の係数(=2.2) ¹⁴⁾
δ_{tl}	: 地盤崩壊開始点

4. 解析結果

解析結果を以下に示す。解析結果の評価にあたっては、継手屈曲角8°を基準値とした。

図-11のように、断層挙動が影響しない範囲(非影響範囲)の固定側地盤中の継手において、境界に近い順に $A_1, A_2 \dots$ 、断層影響範囲の地盤中の継手において、 $B_1, B_2 \dots$ と定義する。変位側地盤との境界についても同様、継手 $C_1, C_2 \dots$ および継手 $D_1, D_2 \dots$ と定義する。継手 n の屈曲角を β_n とし、継手 A_1, B_1, C_1, D_1 から境界部までの距離をそれぞれ L_1, L_2, L_3, L_4 とする。境界部に継手がある場合は、図-12のように境界部の継手を A_1 (または C_1)

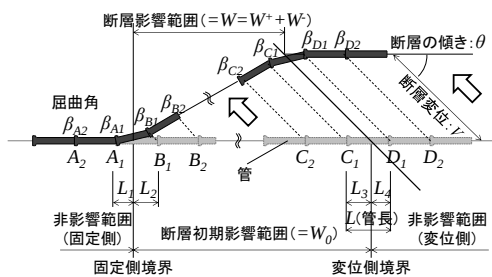


図-11 継手の定義(境界部に継手がない場合)

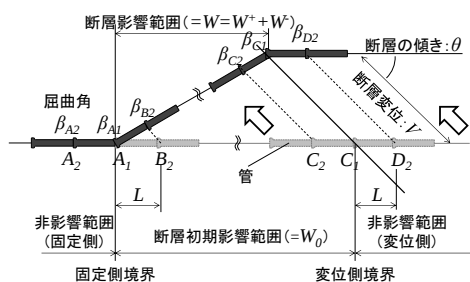


図-12 継手の定義(境界部に継手がある場合)

とし、隣の継手を A_2, B_2 (または C_2, D_2)と定義する。このとき L_1 (または L_3)=0, L_2 (または L_4)=L(管長)となる。

図-13に、呼び径75で管長2m、断層の傾き60°で断層位置を変えた場合の継手屈曲角の解析結果を示す。継手屈曲角の正負の符号は、屈曲する向きを表す。断層影響範囲と非影響範囲の境界部に継手があるときの屈曲角が最も大きく、吸収できる断層変位量が短かった($L_3=0$ の時2.76m)。また、呼び径や管長、断層の傾きを変えても同様の傾向が確認された。いずれの呼び径、断層の傾きにおいても管長1mでは8°屈曲する継手はなかった。

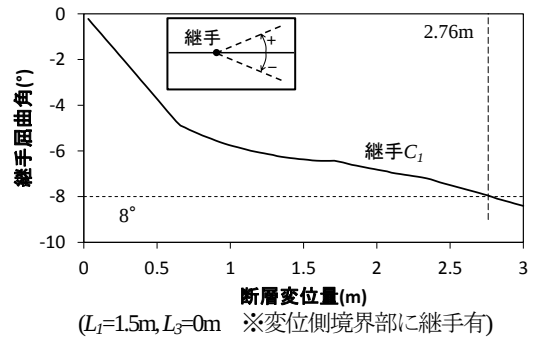
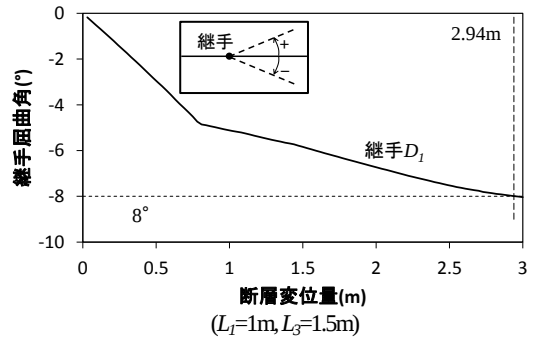
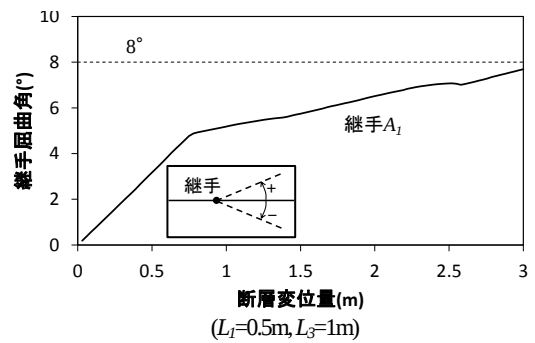
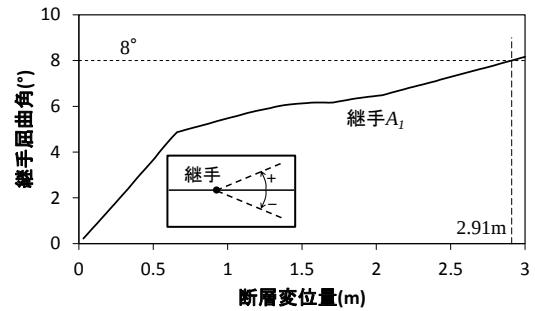


図-13 継手屈曲角の解析結果(呼び径75管長2m傾き60°)

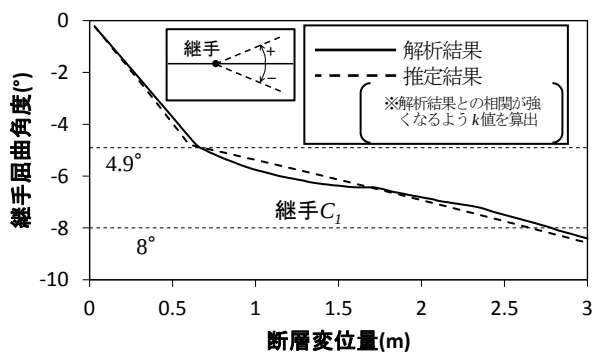


図-15 継手屈曲角の推定結果

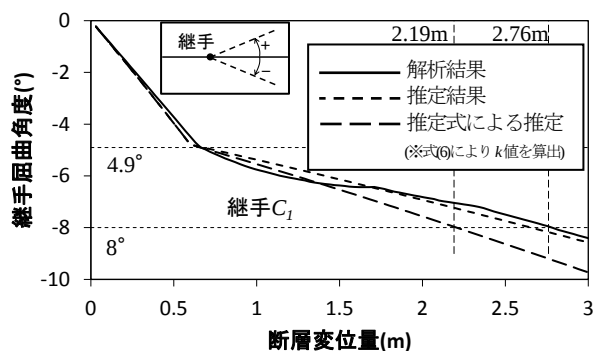


図-16 推定式による継手屈曲角の推定結果

表-3 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/2	-0.005	60°	0.060	変位側	0.000
150	0.080			90°	0.075		
200	0.040						
250	0.095						

表-4 推定結果一覧(呼び径75と250の例)

呼び径	管長	断層の傾き	8°屈曲時の断層変位(m)	
			解析結果	推定結果
75	定尺(4m)	45°	2.76	2.61
		60°	1.89	1.56
		90°	2.25	1.47
	定尺/2(2m)	45°	2.82	2.70
		60°	2.76	2.19
		90°	2.82	2.82
250	定尺(5m)	45°	2.31	2.31
		60°	1.44	1.35
		90°	1.74	1.26
	定尺/2(2.5m)	45°	3.0以上	2.70
		60°	2.64	1.83
		90°	3.0以上	2.10

6. 管路挙動推定式の立案

(1) k 値の推定

剛性係数 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、継手の屈曲性能と地盤特性との間に相関があると考えられる。各呼び径、管長、断層の傾き毎の k 値の算出結果をもとに、表-3に示す各項目を目的変数およびそのカテゴリーとし、数量化理論Ⅰ類により式(6)のように k 値の推定式を導出した。表-3に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。

$$k = P_{1i} \cdot x_{1i} + P_{2i} \cdot x_{2i} + P_{3i} \cdot x_{3i} + P_{4i} \cdot x_{4i} \quad (6)$$

ここで、

- k : 推定剛性係数
- P_{ni} : 目的変数 n カテゴリー i の係数
- x_{ni} : 0 or 1

(2) 管路挙動の推定結果

図-15と同じ条件で、式(6)で推定した k 値により算出した継手屈曲角を図-16に示す。今回の k 値は0.125で、寄与率は0.972であった。解析結果では継手が8°屈曲するまで2.76mの断層変位に耐えられるのに対し、推定式による推定では2.19mの断層変位に耐えられる。やや解析結果との乖離があるが、解析結果よりも安全側の推定となっており、管路の安全上は問題ないと考えられる。

呼び径75と250における、各断層の傾きおよび管長で最大屈曲角8°の時の断層変位量の解析結果と推定結果

の一覧を表-4に示す。いずれも推定結果の方が小さくなっており、管路にとっては安全側の推定であった。また、いずれも定尺では1m以上、定尺の半分では2m程度以上の断層変位に耐えられることが分かった。

以上のように、傾きや変位量が既知の断層横断部に管路を埋設する場合、式(5)と式(6)により断層横断部の最大屈曲角が算出でき、8°屈曲するまでにどの程度の断層変位を吸収できるかで管路の安全性を判断できる。

7. まとめ

本研究結果をまとめると、以下ようになる。

- ①断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管について管路挙動を詳細に解析した。
- ②解析結果から管路にとって最も危険な継手部を特定し、その継手が安全であるかどうかを管路の安全性の判定基準とした。
- ③管路が幾何学的に挙動するとモデル化して管路挙動推定式を導出し、継手屈曲角を推定することができた。

参考文献

- 1) 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報告書, 2012
- 2) 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
- 3) 片岡正次郎, 日下部毅明：内陸地震の規模・タイプと地表地震断層の特性との関係, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.21-32, 2005
- 4) 細井由彦：2000年鳥取県西部地震における水道管路被害分析, 水道協会雑誌, 第71巻, 第2号, pp.15-28, 2002
- 5) 三浦久人：阪神・淡路大震災による耐震形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
- 6) 高田至郎他2名：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/I-54, pp.187-194, 2001
- 7) 日本ダクトイル鉄管協会：NS形・SⅡ形・S形ダクトイル鉄管管路の設計, 2009
- 8) 産業技術総合研究所ホームページ：活断層データベース (2014.8.1 閲覧)
- 9) 鬼塚信弘ほか3名：基盤の逆断層変位に伴う地盤の変形と応力について, 応用力学論文集, Vol.2, pp.533-542, 1999
- 10) 本多啓太, 須貝俊彦：日本列島における沖積層の層厚分布特性, 地学雑誌, 119, pp.924-933, 2010
- 11) 伊藤忠テクノソリューションズホームページ (2014.8.1 閲覧)
- 12) 福岡正巳, 宇都一馬：ボーリング孔を利用した基礎地盤の横方向k値測定について, 土と基礎, 特集号- I, pp. 3-8, 1959
- 13) 金子正吾, 宮島昌克：逆断層を横断する耐震継手ダクトイル鉄管の挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.945-952, 2014
- 14) Kennedy RP, Chow AW, William RA. Fault movement effect on buried oil pipeline. Transportation Engineering Journal, ASCE 103: pp.617-633, 1977
- 15) 宮崎政三, 高橋彦治：土地地質学, 共立出版, pp.121-130, 1970

Study of an estimate method of the behavior of ductile iron pipeline with earthquake resistant joints buried across a fault

Shogo KANEKO, Masakatsu MIYAJIMA

If an earthquake occurs inland, a gap of a fault may appear at ground surface and it may reach several meters. Therefore, water pipelines across a fault must be designed carefully. However, the design method of ductile iron pipes with earthquake resistant joint buried across a fault is not established. In this study, we analyzed the behavior of ductile iron pipes with earthquake resistant joints buried across a fault and studied the behavior of joints every dip of a fault. In addition, based on the analysis, we clarified the availability of an estimate method of behavior of ductile iron pipeline with earthquake resistant joints buried across a fault.