断層横断部の水道用耐震継手ダクタイル鉄管の 安全性に関する研究

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タイ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。また、耐震継手ダクタイル鉄管が地震時に動いた断層を横断するように埋設されていた事例も、これまで報告されていない。

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挙動解析を行い、管路挙動を詳細に分析するとともに、実管路を用いた検証実験により解析結果の妥当性を検証した。さらに、断層横断部における管路の安全性の向上策についても検討した。

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

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、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。

水道施設も浄水施設や管路施設などにおいて多大な被害を受け、250万世帯以上において断水となった。その一方で耐震継手ダクタイル鉄管については被害が発生しておらず、これまでの地震と同様今回もまたその優れた耐震性能が改めて実証された。

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(2011年4月11日 17:16)では活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1.8mものずれが観測されている。

地震により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、断層横断部に管路を埋設する場合慎重に設計する必要がある。一体構造管路については、高田²⁾らが不等沈下を受ける管路の挙動実験と解析を行っているなどの多くの研究例があるが、継手構造管路については断層

横断部の挙動を詳細に研究した事例は少ない。

そこで本研究では、静的解析により断層横断部における耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動を詳細に分析した。また、実管路を用いた実験により、解析結果の妥当性を検証した。さらに、断層横断部に耐震継手ダクタイル鉄管を布設する場合の管路の安全性向上策についても検討を行った。

2. 地震による水道被害と市民生活への影響

(1) 近年発生した地震

図-1に1993年以降に発生した震度6以上の地震の分布を示す。ほぼ日本全土にわたって、震度7が3回、震度6(震度6強および6弱含む)が40回の合計43回発生しており³⁾、概ね1年に2回の割合で大きな地震が発生していることになる。

表-1に阪神・淡路大震災以降の主な地震の概要^{3), 4), 5), 6)}を示す。震度6弱以上の比較的規模の大きな地震が発生すると、数万人規模で断水の影響を受けることが分かる。

図-1 1993年以降に発生した震度6以上の地震震源分布

表-1 主な地震の概要

名称	発生日	規模	最大震度	断水戸数
1995年兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災)	1995年1月17日	M7.3	7	約122万戸
2000年鳥取県西部地震	2000年10月6日	M7.3	6強	8,338戸
2001年芸予地震	2001年3月24日	M6.7	6弱	40,938戸
2003年十勝沖地震	2003年9月26日	M8.0	6弱	15,956戸
2004年新潟県中越地震	2004年10月23日	M6.8	7	129,750戸
2007年能登半島地震	2007年3月25日	M6.9	6強	13,290戸
2007年新潟県中越沖地震	2007年7月16日	M6.8	6強	58,961戸
2008年岩手・宮城内陸地震	2008年6月14日	M7.2	6強	5,560戸
2011年東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災)	2011年3月11日	M9.0	7	2,567,210戸

(2) 市民生活への影響

今日、都市化が進み、私たちの生活はライフライン（水道、電気、ガスなど）に大きく依存し、かつその機能が停止しないことを前提としている。しかし、阪神・淡路大震災以降、大きな地震が発生するとライフラインの機能が停止し、市民生活へ影響を及ぼしている。

小川⁷⁾らは、新潟県中越地震におけるライフラインの機能停止が市民生活へ及ぼす影響を把握するため、新潟県小千谷市において市民へのアンケート調査を行っている。

ライフライン（水道、電気、ガス、下水、道路、通信、交通）の機能停止による困難度の調査結果では、水道の機能停止(断水)が非常に困ったと回答した市民が7割強

と最も多かったとしている。ライフラインの中でもとりわけ水道への依存が高いと言えよう。

また、水道を利用する日常生活（風呂、洗濯、トイレ、炊事、飲料、洗面）についての困難度の調査結果では、風呂、洗濯、トイレの順に困難の割合が高く、使用水量の多い用途において困難と感じられているようである。さらにこれらの用途においては、応急給水やペットボトルなどの代替手段での対応はその必要水量においてほぼ不可能であるため、断水が日常生活の困難に直結する。

さらに大きな地震においては、一般に断水の復旧作業が長期化する。阪神・淡路大震災では、神戸市で復旧が完了したのは地震発生から3か月後の4月17日であり⁸⁾、東日本大震災では、津波被災地域を除いて復旧が完了し

たのが地震発生の後半年であった⁹⁾。

このように、水道施設の機能停止が市民生活へ与える影響は非常に大きいと考えられる。

3. 水道管路の地震対策と検証事例

(1) 水道管路の地震対策

水道施設の地震対策について、水道施設の中でも最も広範囲に分布している水道管路について検討する。

現在、水道事業体では水道管路の耐震化を積極的に進めている。水道管路の耐震化にあたっては、図-2に示すNS形ダクタイル鉄管に代表される耐震継手ダクタイル

図-2 NS形ダクタイル鉄管の継手構造と継手性能

注 1) 耐震化率は、耐震継手ダクタイル鉄管と溶接継手の鋼管の延長（平成21年度末）より算出した。

耐震化率 = $\frac{\text{耐震継手ダクタイル鉄管と溶接継手の鋼管の管路延長}}{\text{全管種の総管路延長}}$

注 2) 全てのデータには、配水支管は含んでいない。

図-3 耐震化率と被害率の関係⁹⁾

鉄管が一般的に用いられている。これらの耐震継手は、伸縮性能、屈曲性能および離脱防止性能を有しており、地震時の大きな外力に対しても耐えることが可能である。

これまでの地震において被害は発生しておらず、東日本大震災においても約1000km布設されていたが被害はなかった。

厚生労働省では、東日本大震災における水道管路被害と耐震化率の関係を図-3のように分析している(※一部加筆⁹⁾。地盤条件や管路構成など各事業体の諸条件が異なるため単純な比較はできないが、概ね耐震化率が高くなるほど被害率が低くなっていた。

(2) 耐震継手管路の液状化地盤での検証事例

地震によって水道管路に物理的被害が生じる原因は主に2通りある。一つは振動や波動の伝播による揺れによって被害が生じるもの、もう一つは地盤の永久変位によって被害が生じるものである。液状化による地盤変位や断層変位などが後者に相当する。地盤の永久変位は局部的に生じるものであるが、その変位量の大きさから、当該地盤に地震対策が施されていない非耐震継手管が埋設されていると、甚大な被害が生じるのが過去の地震においても明らかとなっている^{3), 9), 10)}。

一方、耐震継手ダクタイル鉄管の埋設地盤において、過去の大地震によって液状化が発生した事例も多く存在し、いずれの地震においても被害は一切報告されていない。また、液状化地盤に埋設されていた耐震継手ダクタイル鉄管が、地震時にどのように挙動したのかを測定した事例もいくつか報告されている。

三浦¹¹⁾は、阪神・淡路大震災後、人工島であるポートアイランドおよび六甲アイランドにおいて呼び径200および300のSⅡ形ダクタイル鉄管の挙動調査を行っている。

細井¹⁰⁾は、鳥取県西部地震後、埋め立て地である竹内団地において呼び径150のNS形ダクタイル鉄管の挙動調査を行っている。

いずれの調査においても、継手が伸縮・屈曲することで地盤変位を吸収しており、特に三浦の調査においては、一部の継手が伸びきって離脱防止機構が働いていたことも確認されている。

4. 断層横断部の水道管路挙動解析

耐震継手ダクタイル鉄管は、地盤の永久変位対策として、液状化に対しては実績を有する。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の横断部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。そこで、断層が動いた時、耐震継手ダクタイル管路がどのように挙動するか、静的非線形解析を

行うこととした。

(1) 断層モデル

a) 断層の調査

まず、対象とする断層モデルについて検討する。

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¹²⁾を公開している。2013年6月7日現在、559の活動セグメントデータが登録されており、そのうちの389件が活断層データである。

断層の型別の登録件数を表-2に示す。約半数が逆断層、4割が横ずれ断層、1割が正断層であった。

登録断層の断層変位量のヒストグラムおよび累積度数を図-4に示す。ここでの断層変位量とは、断層が1回の地震で変位する量のことで、断層長さなどの調査結果から算出された値を表す。最大変位量は9.2mであり、全データの約半数が2m以下、3/4は3m以下である一方、1m以下の断層はわずか6件であった。

今回、解析対象とする断層モデルは、断層変位量3mで傾き90度の逆断層とした。

b) 地表面への影響

活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うえで重要な問題である。

表-2 断層の型別の集計

逆断層	正断層	横ずれ断層
196	28	165

図-4 断層変位量のヒストグラム

図-5 断層変位の地表面への影響

鬼塚¹³⁾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。せん断層が地盤表面に到達した時の位置 W と模型地盤の層厚 H の関係の調査結果では、断層の傾きが90度の場合、堆積層の層厚によらず、平均的に $W/H = 0.40$ (固定側)、 $W/H = 0.23$ (変位側)と報告されている(図-5)。

堆積層の層厚に関しては、本多¹⁴⁾らが、日本列島における河口付近の沖積層の層厚分布を調査しており、最小5.2m、最大155m、平均54.7mと報告している。

沖積層厚さが厚いと断層の動きの地表面への影響範囲が大きくなり、地盤と一緒に動く管路が多くなるため、管路にとっては安全側に作用すると考えられる。そこで今回、沖積層厚さは $H = 5\text{m}$ と設定し、地表面への影響については、 $W = 0.4 \cdot H = 2\text{m}$ (固定側)、 $W = 0.2 \cdot H = 1\text{m}$ (変位側)とした。

(2) 解析手法

埋設管路の挙動解析においては、管路を弾性床土上の梁とみなし、継手および地盤をばねで表現した挙動解析手法を用いた(図-6)。特に今回は、断層変位のような変形量の大きな解析も可能な大変形解析手法(DYNA2E)¹⁵⁾を導入し、解析を実施した。

解析モデルを図-7に、解析条件を表-3に示す。管路モデルは全長320mの呼び径75のNS形ダクタイル鉄管の直線状管路で、管体中央部を断層が交差するように設定し、固定側の管端部を完全拘束とした。1本当たりの管長 L は定尺の4mとした。地盤条件は、地盤反力係数 K が約20,000kN/m³で、N値15相当の一般的な沖積層砂質地盤とし、地盤が図-7の点線のように挙動する時の管路挙動を解析により求めた。

図-6 解析手法

図-7 解析モデル (断層付近)

(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。図-8に例として回転ばねを求める実験方法を示す。図-9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併せて示す。継手屈曲の限界値である4.9度(0.085rad)を越えると曲がりにくくなるように設定した。同様に軸方向ばねも、継手の伸縮性能である±40mmを超えると離脱防止状態となり継手の伸縮が止まるように設定した。継手ばねの設定値をまとめて図-10に示す。

b) 地盤ばね

管軸方向地盤ばねは、文献16)を参考に式(1a)のように設定した。さらに、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-11)。

表-3 解析条件

断層の型	逆断層
断層変位量: V	3.0m
断層の傾き	90度
管路	呼び径75NS形ダクトイル鉄管
管長: L	4m (定尺)
管の直径: D	0.093m
管路全長	320m
土被り	1.2m
断層と管路の交差位置	管体中央
地盤条件	沖積層砂質地盤(N値15相当) 地盤反力係数 $K=20,700\text{kN/m}^3$
埋設地盤の層厚: H	5.0m
せん断層到達位置: W^+ , W^-	$W^+=0.4 \cdot H=2.0\text{m}$ (固定側) $W^-=0.2 \cdot H=1.0\text{m}$ (変位側)

図-8 継手ばね（回転ばね）設定の実験方法

図-9 継手ばね（回転ばね）の測定結果および設定

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。一方、管が地盤に対し相対的に上方へ移動する場

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

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

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

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

$$k_{d1} = \gamma \cdot \left(h + \frac{D}{2} \right) \cdot q \cdot D / \delta_1 \quad (3a)$$

$$k_{d2} = 0.002 \cdot k_{d1} \quad (3b)$$

ここで、

- D : 管の直径(=0.093m)
- γ : 土の単位体積重量(=17.7kN/m³)
- h : 土被り(=1.2m)
- Δ : 土の内部摩擦角(=36°)
- K : 地盤反力係数(=20,700kN/m³)
- ℓ : 管の単位長さ
- q : 上方移動時の係数(=2.2)
- δ_{d1} : 地盤崩壊開始点(=0.009m)

軸方向ばね		回転ばね		軸直角方向ばね	
K_a	980(kN/m)	K_{ra}	5.13(kN・m/rad)	K_s	196,000(kN/m)
K_b	9.8(kN/m)	K_{rb}	274.4(kN・m/rad)		
K_c	259,700(kN/m)	θ_a	0.0848(rad) =4.9(度)		
δ_a	0.001(m)				
δ_b	0.04(m)				

図-10 継手ばね

管軸方向		管軸直角方向		
		上方向移動		下方向移動
K_I	615(kN/m)	K_{II}	502(kN/m)	1,930(kN/m)
K_2	3.1(kN/m)	$K_{\phi 2}$	1.01(kN/m)	38.6(kN/m)
δ_I	0.00762(m)	δ_{II}	0.009(m)	0.002(m)

図-11 地盤ばね

合は、地盤の崩壊を考慮した式(3a)のように設定した¹⁶⁾。いずれも、管と地盤の相対変位が限界値を超えればね定数が小さくなるバイリニアモデルで設定した(図-11)。

(4) 解析結果

a) 継手屈曲角

固定側は断層に近い順に継手A,B,C,..., 変位側は断層に近い順に継手A',B',C',...と定義している。図-12に継手C,B,A,A',B',C'における断層変位に対する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。断層の動き始めの段階では断層に最も近い継手A,A'がまず屈曲し、屈曲角が限界に達すると、追って隣の継手B,B',C'が屈曲していた。

呼び径75NS形ダクタイル鉄管では、地震時に曲がりうる最大継手屈曲角として、 8° と規定されている。断層変位量3mでも継手屈曲角は 8° 以下であった。

b) 管体発生応力

図-13に管体発生応力の解析結果を示す。断層を挟む $\pm 15\text{m}$ の範囲において応力が発生していた。ダクタイル鉄の耐力は一般に約 270MPa とされており、断層変位

図-12 継手屈曲角の解析結果

図-13 管体発生応力の解析結果

が 1m を超えると管体発生応力の最大値は耐力を超えて塑性域に達していることが分かった。

今回の解析では塑性域に達した場合の考慮は一切しておらず、弾性域に限定して議論を行う。

5 実管路を用いた挙動試験による検証

断層横断部の管路挙動の解析結果が妥当であるかどうか、実管路を用いた検証試験により確認した。

(1) 試験方法

図-14に試験方法を、表-4に試験条件を示す。2分割の土砂箱の中に供試管を埋設し、断層を想定して片側の土砂箱を鉛直上方に 500mm 上昇させた。各継手部に取り付けた管体変位計により、管路挙動を測定した。各継手部には変位計を取り付け、伸縮量及び上下方向の屈曲角を測定した。分割部近傍では、管外面に貼付した歪ゲージにより管体発生歪を測定した。

図-14 試験方法

表-4 試験条件

供試管	呼び径75NS形ダクタイル鉄管
管路長さ	$L=1\text{m} \times 9$ (全長9m)
断層変位量: V	500mm
変位の向き	鉛直上向き
断層の傾き	90°
地盤種類	砂質地盤
土層厚さ: H	1.3m
土被り	0.6m
締固め	N値15程度

(2) 試験結果

a) 埋設地盤への影響

図-15に試験後の状況写真を示す。断層挙動の地表への影響は、固定側550mm、変位側350mmであり、 $W/H=0.42$ 、 $W/H=0.27$ と鬼塚の結果とほぼ同じであった。

b) 継手屈曲角、管体曲げモーメント

図-16のように、継手屈曲角の測定結果と解析結果はよく一致していた。最終変位時の管体発生歪から算出した管体曲げモーメントを、解析結果と併せて図-17に示す。実験結果と解析結果とで位置による発生曲げモーメントの大小にやや違いがあるものの、これは歪ゲージ貼付位置の管厚のばらつきによるものであり、両者はよく一致していると考えられる。

以上、実管路を用いた検証試験の結果、断層横断部の管路挙動の解析結果が妥当であることを確認した。

図-15 試験後の状況

図-16 継手屈曲角の測定結果

図-17 管体曲げモーメントの測定結果

6 管路の安全対策

(1) 安全性の評価方法

図-7に示す解析モデルについて、管路挙動の解析結果から、管路の安全性について検討した。管路の安全性は、管路が吸収する断層変位量(許容断層変位量)を、継手屈曲角(しきい値 8° : 地震時に曲がりうる最大角度)および管体発生応力(しきい値 270MPa : 耐力)で評価した。

前述の管長4m(定尺)管の解析では、管路の安全性を継手屈曲角で評価した場合、許容断層変位量は3m以上となったが、管体発生応力で評価した場合、1m程度であった。

そこで今回、断層付近の管長を4mから1mに短くして断層付近の継手の数を増やした場合について、最大6mの断層変位を与えたときの管路挙動解析を行い、管路の安全性を評価した。

(2) 評価結果

図-18に断層に近い継手(C, B, A, A', B', C')における断層変位に対する継手屈曲角の解析結果を示す。管長4mの場合と同様、継手が 8° 屈曲することはなく、管路の安全性を継手屈曲角で評価した場合の許容断層変位量は6m以上であった。

図-19に管体発生応力の解析結果を示す。管長を1mに

図-18 継手屈曲角の解析結果 (管長1m)

図-19 管体発生応力の解析結果 (管長1m)

して継手の数を増やすことで、管体発生応力は270MPaより小さくなり、管体発生応力で管路の安全性を評価した場合の許容断層変位量も6m以上となった。

以上、管長を短くすることで許容断層変位量が大きくなり、すなわち管路の安全性が向上することが分かった。

7. まとめ

本研究結果をまとめると、以下のようになる。

- ①大変形解析手法により、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の挙動解析を行った。実管路を用いた試験でこの手法の妥当性を確認できた。
- ②呼び径75のNS形ダクタイル鉄管の管路は、管長を1mに短くして断層近傍の継手の数を増やすと、6m以上の断層変位を吸収でき、管路の安全性が大きく向上することが分かった。

参考文献

- 1) 高田至郎ほか 4 名：地震時地盤不等沈下を受ける耐震性硬質塩化ビニル管路の挙動実験，土木学会論文集，No.619/I-47，pp.145-154，1999
- 2) 気象庁ホームページ (2013.6.10 閲覧) (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- 3) (社)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
- 4) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 1997 年版，1997
- 5) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版，2009
- 6) 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
- 7) 小川雄二郎，有村源介：新潟県中越地震における水道の機能停止が市民生活へ及ぼす影響，水道協会雑誌，第 75 巻，第 7 号，pp.14-20，2006
- 8) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災 水道復旧の記録，1996
- 9) 厚生労働省健康局水道課：平成 23 年(2011 年)東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書，2011
- 10) 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
- 11) 三浦久人：阪神・淡路大震災による耐震形ダクタイル铸铁管路の挙動調査，ダクタイル鉄管，第 61 号，pp.41-48，1996
- 12) 産業技術総合研究所ホームページ：活断層データベース (2013.6.10 閲覧) (<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>)
- 13) 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.533-542，1998
- 14) 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
- 15) 伊藤忠テクノソリューションズホームページ (2013.6.10 閲覧) (<http://www.engineering-eye.com/DYNA2E/index.html>)
- 16) Kennedy RP, Chow AW, William RA. Fault movement effect on buried oil pipeline. Transportation Engineering Journal, ASCE, 103, pp.617-633,1977

(2013. 7. 12 受付)

A Study of a Safety of Ductile Iron Water Pipelines with Earthquake Resistant Joints Buried across a Fault

Shogo KANEKO and Masakatsu MIYAJIMA

In an earthquake caused by an active fault, a gap of the fault may reach several meters. Then buried pipelines for water may be greatly affected. Therefore, water pipelines across a fault must be designed carefully. However, very little research has studied in detail the behavior of underground ductile iron pipelines in response to fault movements, and the design method is not established. In addition, the example that ductile iron pipes with earthquake resistant joints were buried across a fault which moved while an earthquake is not reported.

Therefore, in this study, we analyzed the behavior of ductile iron pipes with earthquake resistant joints buried across a fault and verified the analysis results through the experiment using the actual pipes. Furthermore, we inspected an improvement measure of the safety of ductile iron pipelines with earthquake resistant joints.