

# 断層横断管路の耐震設計手法の提案

長谷川延広<sup>1</sup>・清野純史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:nobuhiro-hasegawa@jfe-eng.co.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

日本列島には 2000 を超える膨大な数の活断層が存在するため、線状構造物であるライフラインは断層横断の可能性を排除することが難しく、その耐震対策が望まれている。

断層横断パイプラインの大変形挙動については、従来より実験的および数値解析的研究が数多くなされているが、横断パイプラインの破断を回避する工法についての研究は僅少であったと言わざるを得ない。

本研究では、水道管路における断層横断部での対策工法として、管体の一部に初期変形(座屈波形)を設けることによりダイヤモンド座屈等の亀裂を生じる変形を回避し、亀裂・断水することなく通水機能を維持することができる断層用鋼管を開発したので、その概要およびそれを用いた断層横断管路の耐震設計法を提案する。

**Key Words :** Pipeline, Buckling, Fault, Seismic Design.

## 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震ではMw9.0の巨大地震が発生し、東北地方沿岸各地に大規模な津波被害をもたらしたが、日本列島を構成する地殻全体の応力バランスにも影響を与えた可能性があり、今後の内陸地震活動への影響が懸念されることになった。国内各地に分布する活断層は内陸地震を引き起こす潜在的危険個所であり、場合によっては地表面上に断層変位を現出することもある。

未確認の断層線を横断する埋設管路は、正断層・逆断層によって管路が伸張する場合や座屈変形を生じる場合も発生するが、いずれにしても管路断面が大幅に減少するか、場合によっては断面損傷さらには亀裂発生により漏洩事故が発生することになる。

従来、日本国内では、埋設パイプラインの耐震設計法は、1995年兵庫県南部地震を契機に地盤震動に対する埋設管路の耐震設計法の大幅改定<sup>1)</sup>がなされ、さらに液状化地盤変状に対する耐震設計法(水道、ガス)も整備されたが、現在に至るまでも断層変位に対する耐震設計法は整備されていない。

著者らは、断層区間を横断する水道用鋼管を対象として、断層用鋼管を用いた断層横断対策工法を開発した。本報告では新たに開発した断層用鋼管の概要につ

いて紹介するとともに、この断層用鋼管を用いた断層横断対策工法のための耐震設計法を提案する。

## 2. 活断層分布と管路の断層被害

図-1に、日本における活断層の分布を示す。日本においては、これまで陸域だけで2,000箇所以上の活断層<sup>3)</sup>の存在が確認されており、近年の詳細な活断層調査に伴って、その数はさらに増加する傾向にある。さらに東北地方太平洋沖地震の地殻変動により、その発生確率も見直されている。活断層の長さは一般的に数km～数十kmあり、これらの活断層が滑りを生じた場合、平均で2m以上の断層変位が発生すると想定されている。



図-1 日本の活断層分布<sup>4)</sup>

近年に起きた地震での断層変位としては、兵庫県南部地震において野島断層が最大で2.1m、2011年に起きた東北地方太平洋沖地震の余震で出現した塩ノ平断層では最大2.2mの変位を記録した。また、1999年に台湾で発生した集集地震では、断層の最大変位が12mにも達し、図-2に示すように管路に大きな被害が発生している。この図は断層を横断して布設された埋設鋼管の被害例であるが、「Z型」に塑性変形している。図-2の「Z型」塑性変形がどのようなメカニズムで発生するかを確認するために、図-3に示すように管路および地盤をモデル化しFEM解析をおこなった。管路をシェル要素、地盤をソリッド要素でモデル化し、図-2中の矢印方向に断層変位が進むように強制変位を与えた。解析結果は図-3に示すように、断層面から一定間隔離れた両側の箇所では対称的な座屈変形を発生し、断層横断面では必ずしも変形は見られず、図-2の観察結果と整合する解析結果を得ることができた。

解析結果から、断層変位が生じると管路は断層面を中心にして回転運動が生じる。この際に断層面では地盤せん断力が生じるがパイプの剛性が地盤せん断力に対して十分な剛性を持っているため、せん断面では座屈までは至らない。しかしながら、断層変位によりパイプは回転方向に力が作用し、断層面から一定間隔離れた両側の箇所では曲げが生じ、最大曲げモーメント発生箇所では全塑性モーメント達すると座屈が開始し、塑性ヒンジが形成される。図-3のように曲げ変形は塑性ヒンジのみに集中する。したがって最大曲げモーメント発生位置に曲げを吸収する対策を講じるのが最も効果が高いと考えた。そこで、曲げ変形を吸収する構造として鋼管の弾塑性変形性能を十分に活用した断層用鋼管を開発した。

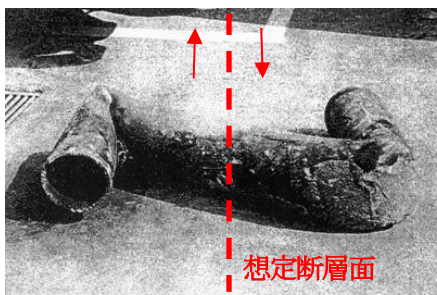


図-2 管路被害例 (台湾集集地震) <sup>4)</sup>

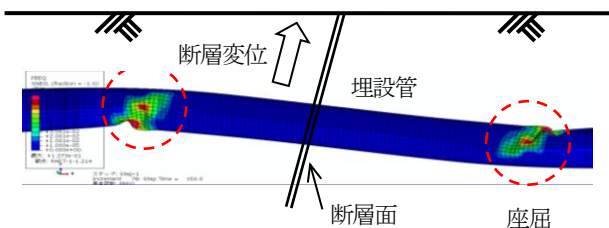


図-3 逆断層による管路の座屈

### 3. 断層用鋼管概要

#### 3.1 形状の決定

鋼管のような円筒シェルの軸圧縮座屈では、薄肉であるほど初期不整 (僅かな非対称性等) の影響が大きく、初期不整の位置や程度によって座屈の変形形状や座屈荷重が変化する。図-3に示す逆断層前後では、管路は圧縮ならびに曲げ変形を受けるが、実管の初期不整は全ての管で異なるため、座屈発生位置やその後の変形を予測することは困難である。逆に、管が変形しやすいような形状を初期変形として与えておけば、この部分に変形を集中させることができる。

断層用鋼管では、この初期変形の形状として円筒シェルに軸圧縮を加えた場合の変形モードである座屈波形を与えた。波幅についてはTimoshenkoの座屈半波長の理論<sup>5)</sup>から求めた波長の数倍を、波高さについては管厚の数倍程度をそれぞれ設定し、FEM解析により最適形状を選定した。<sup>6)</sup>

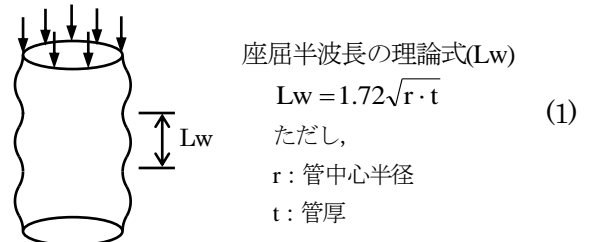


図-4 軸圧縮における円筒シェルの変形

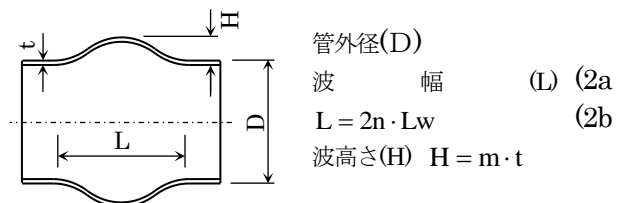


図-5 山部の仕様

#### 3.2 曲げ性能確認実験

FEM解析で決定した最適形状での断層用鋼管の変形性能を確認するため、口径600A、管厚6.0mmの実管を用いて曲げ試験を行った。図-6に示すように変形は波形部のみに集中しており、山部は左右対称の山が形成されていることを確認した。また、図-7に示すように実験から得られた内面接触角度は12.6°であり、同実験を再現したFEM解析から得られた内面接触角度は13.6°であった。実験値に比較してFEM解析値は若干大きいですが、これは管厚のバラツキなどによる初期不整が変形に影響したと思われる。しかしながら、概ね一致しておりFEM解析を用いることで変形を再現できると判断できる。

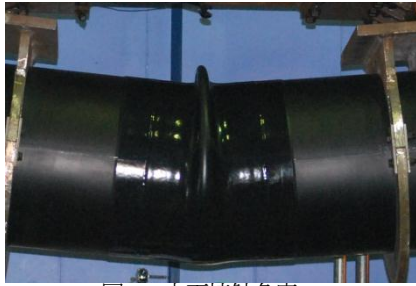


図-6 内面接触角度

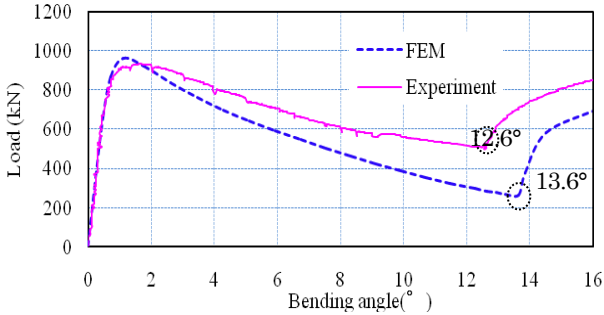


図-7 実験結果と FEM 解析の比較

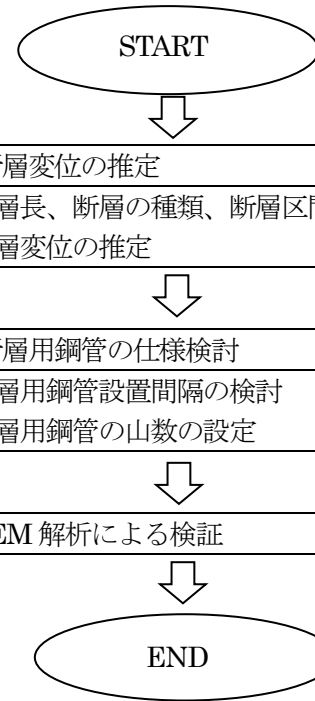


図-8 設計フロー

#### 4. 断層横断部における管路の設計方法

断層横断部における管路の挙動に関しては、これまでいくつかの研究が報告されている。耐震設計法としては高田<sup>7)</sup>が提案する簡易的な計算方法等があるが、これらの設計方法は、断層変位によって管路に発生する最大歪みを計算するものの、断層変位による管路損傷を回避するための対策方法については何も触れていない。また、2009年に改正された水道施設耐震工法指針・解説<sup>2)</sup>では断層横断部における管路に対しての対策例として伸縮可とう管を複数設置した例が挙げられているが設置後の対策工を含めての設計方法は未だに確立されていないのが現状である。そこで、断層を横断する管路の対策工として著者らが開発した断層用鋼管を適用した場合の耐震設計方法を新たに提案する。図-8は、提案する断層横断管路の設計フローである。

##### 4.1 断層変位の推定

埋設パイプラインが横断する断層区間幅（破砕帯幅）とその断層変位量は、式(3)およびで算定する。

断層区間幅<sup>8)</sup>

$$W = 1.65 \times 10^{-3} L_F^{1.15} \quad (3)$$

ここで、W：破砕帯幅 (m)

$L_F$ ：断層長 (m)

断層変位推定式<sup>9)</sup>

$$\text{Log} D_{\max} = 1.16 M_w - 7.69 \quad (4)$$

ここで、 $D_{\max}$ ：断層の最大変位量 (m)

$M_w$ ：モーメントマグニチュード

##### 4.2 断層用鋼管の仕様検討

###### 4.2.1 断層用鋼管設置間隔の検討

2章で指摘したように、逆断層モードの断層が変位するとき横断管路は断層面から両側のある一定距離の位置に曲げ変形が発生する。そして、その塑性ヒンジ発生位置は、管路周辺の地盤剛性に依存するものと推定される。したがって、断層変位量、断層変位方向、地盤剛性、管路剛性を設計条件としたときの塑性ヒンジ発生位置が、断層用鋼管設置間隔の候補と考えられる。

設置間隔については管の変形が塑性ヒンジ位置に集中するため、FEM解析を実施して、最大曲げモーメント発生位置を求める方法が考えられるがFEM解析には多大な時間を費やすことから、ここでは設置間隔を求める簡易式を誘導し、最適な設置間隔を決定するものとする。

図-9は断層変位が生じた場合に断層用鋼管を含む管路の簡易モデルである。

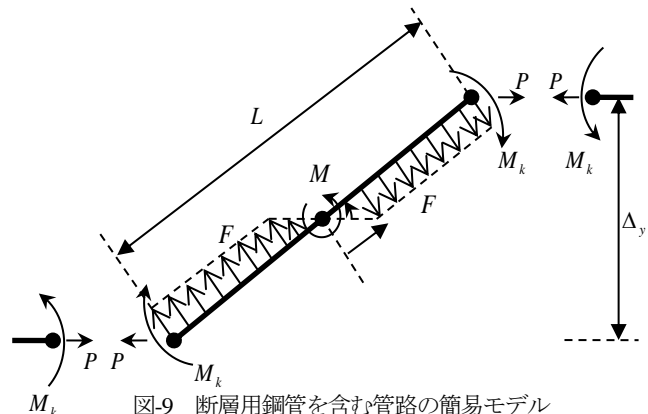


図-9 断層用鋼管を含む管路の簡易モデル

簡易モデルは図-9 に示すように断層変位  $\Delta y$  を発生させるには、曲げモーメント  $M$  をパイプの中心に作用させる必要がある。ここでは、断層変位  $\Delta y$  を設置間隔  $L$  のパイプを角度  $\theta$  まで回転させることになる曲げモーメント  $M$  に置き換えて考える。曲げモーメント  $M$  が与えられると、設置間隔  $L$  の区間でパイプが回転して地盤反力  $F$  が発生し、区間の端部には隣接パイプとの引張力  $P$  が発生する。さらに断層用鋼管を回転バネとして、曲げモーメント  $M_k$  を生じるものとする。隣接パイプの引張力  $P$  を考慮することで、全体の釣合条件を保つことができる。また、地盤反力は常にパイプの軸直角方向に作用ものとする。簡略式の誘導ではパイプラインは弾性床上の梁であると仮定し、図-9 より地盤反力  $F$  をバネ支持区間と等分布荷重区間に分けると、基本方程式は式(5a)および式(5b)ようになる。ただし、地盤反力  $F$  はバネ支持区間では  $F = K_v x \sin \theta$ 、等分布荷重区間では  $F = K_v \Delta_0$  としている。

ここで、 $v(x)$  はパイプの軸直角変位、 $EI$  は曲げ剛性、 $K_v$  は軸直角方向地盤バネ係数とし上下方向で同一な地盤と仮定した。

また、境界条件を  $v, v', v'', v'''$  が  $x = \Delta_0 / \sin \theta$  で連続であるとすると、式(6a)および式(6b)で表される。軸直角曲げ応力分布  $\sigma_M / \sigma_B$  は、式(7a)および式(7b)で表される。

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = F = K_v x \sin \theta \quad 0 \leq x \leq \frac{\Delta_0}{\sin \theta} \quad (5a)$$

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = F = K_v \Delta_0 \quad \frac{\Delta_0}{\sin \theta} \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (5b)$$

$$0 \leq \frac{2x}{L} \leq \frac{2\Delta_0}{L \sin \theta} \quad \text{のとき,}$$

$$\frac{\sigma_M}{\sigma_B} = \frac{1}{1.27 M_y} \left[ \begin{array}{l} -\frac{1}{48} K_v L^3 \sin \theta \cdot \left(\frac{2x}{L}\right)^3 + \frac{1}{8} K_v L^2 \Delta_0 \left\{ \left(2 - \frac{2\Delta_0}{L \sin \theta}\right) \cdot \left(\frac{2x}{L}\right) - 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{2\Delta_0}{L \sin \theta}\right)^2 \right\} \\ -\frac{1}{2} PL \sin \theta \cdot \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \end{array} \right] - \frac{M_k}{M_p} \quad (7a)$$

$$\frac{2\Delta_0}{L \sin \theta} \leq \frac{2x}{L} \leq 1 \quad \text{のとき,}$$

$$\frac{\sigma_M}{\sigma_B} = \frac{1}{1.27 M_y} \left[ -\frac{1}{8} K_v L^2 \Delta_0 \left(1 - \frac{2x}{L}\right)^2 - \frac{1}{2} PL \sin \theta \cdot \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \right] - \frac{M_k}{M_p} \quad (7b)$$

ここで、 $\sigma_M$  : 軸直角方向曲げ応力

$\sigma_B$  : 座屈応力

$\Delta_0$  : 軸直角方向地盤降伏変位

$K_v$  : 軸直角方向地盤バネ係数

$M_y$  : 全塑性モーメント

$P$  : 隣接パイプの引張力

$\sigma_M / \sigma_B$  は設置間隔  $L$  の中央からの距離  $x$  における軸直角曲げ応力および座屈応力の比であり、 $\sigma_M / \sigma_B$  が -1 を超えると全塑性状態となり、設置間隔  $L$  の区間のどの領域で全塑性状態に達するか計算することができる。

図-10 は、式(7a)および式(7b)を用いて算出した断層変位と許容曲げ角度の関係を表している。このグラフを用いて設定した断層変位および許容曲げ角度 (1 山 :  $12^\circ$  , 2 山 :  $24^\circ$  , 3 山 :  $36^\circ$  ) から最適な設置間隔を設定する。

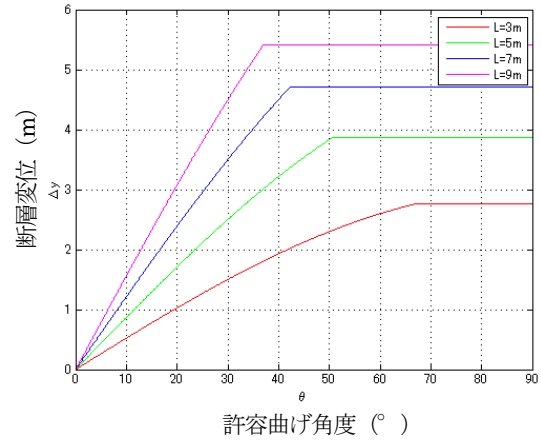
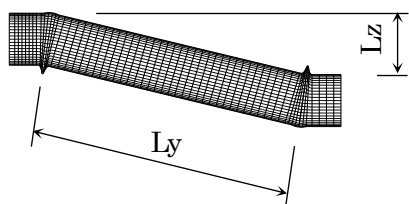


図-10 断層変位と曲げ角度の関係

#### 4.2.2 断層用鋼管の山数の検討

断層変位量および設置間隔より、曲げ角度を式(8)から計算する。断層用鋼管の1山当たりの許容曲げ角度は図-12に示すFEM解析により算出したD/t(口径管厚比)と内部接触角度口径の関係から、水道用鋼管として一般的に使用しているD/tの範囲100.6~113.3では概ね13°程度であるため、安全側の値として12°として設定した。なお、図-12が示すようにD/tを小さくすることで許容曲げ角度を大きく設定することもできるが、管厚を2倍に厚くしても内面接触角度は1.5倍程度であり効果は小さい。



$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{L_z}{L_y} \right) \quad (8)$$

ここで、 $\theta$  : 曲げ角度 (°)  
 $L_y$  : 塑性ヒンジ間距離 (m)  
 $L_z$  : 鉛直断層変位量 (m)

図-11 山数の検討

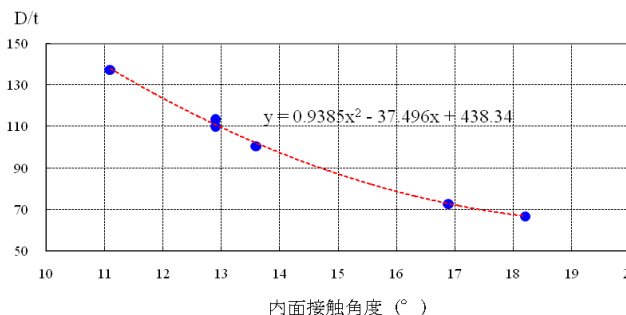


図-12 D/tと内面接触角度の関係

また、断層変位と設置間隔の関係から許容曲げ角度よりも曲げ角度が大きくなる場合は山数を増やすことで対応が可能である。山が複数ある場合は、1山目の内面が接触すると反力が増加し変形が2山目へと移行していく。図-13は実管(φ50)を使った連動性の確認であり、図-14はその断面である。管に曲げ変形を与えると左側の山が先に変形し内面が接触すると、山の変形が右側の山に移行する。



図-13 連動性の確認(実管)



図-14 連動性の確認(断面)

### 5 FEM解析による検証

以下に、断層を横断する管路の対策工として、断層用鋼管を利用した場合の耐震設計法について適用事例を紹介する。

#### 5.1 検討条件

対象とする断層を図-15に、検討条件を表-2にそれぞれ示す

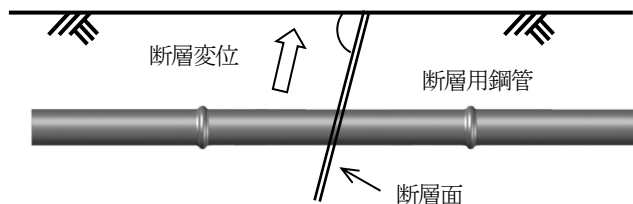


図-15 検討モデル

表-2 検討条件

鋼管	呼び径	2400A	
	管厚	24mm	
	材質	SS400	
	弾性係数	2.0×10 <sup>5</sup>	
	降伏応力	225 N/mm <sup>2</sup>	
地盤	地盤バネ係数	鉛直	0.1726 N/mm <sup>3</sup>
		水平	0.0324 N/mm <sup>3</sup>
	降伏変位	鉛直	5.0 mm
		水平	4.0 mm
地盤拘束力	鉛直	0.863 N/mm <sup>2</sup>	
	水平	0.129 N/mm <sup>2</sup>	
断層	断層タイプ	逆断層	
	断層角度	74°	
	断層変位	1.44m	

#### 5.2 管路のモデル化

図-16のように管路のモデル化では地盤はソリッド要素、管はシェルでモデル化している。地盤と管路は接触で定義し管路の全長を120m(50D)とすることで端部は断層変位の影響が及ばない範囲とした。

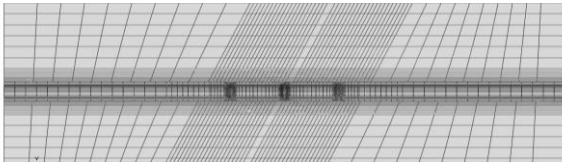


図-16 管路のモデル化

### 5.3 解析結果

図-10 より設置間隔を決定し、地盤に断層変位を与えて断層用鋼管の曲げ性能の確認を行った。解析結果では、図-17のように山部に曲げモーメントが作用し、山部のみに変形が集中しているのが分かる。図-17に示すように断層変位 1.44m での曲げ角度は 11.2°であり許容曲げ角度 (12°) 以内である。

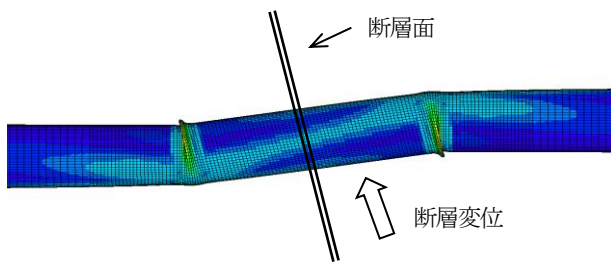


図-17 解析結果 (変形図)

## 6 おわりに

本報告では断層用鋼管の概要ならびに断層用鋼管を用いた断層横断対策工法のための耐震設計法の提案、その適用事例について紹介した。

断層用鋼管は、鋼管の弾塑性変形性能を十分に活用することで、極めて大きな断層変位にも追従し、変形後も通水断面を確保し、震災時においても水道ライフラインとしての機能を維持しようとするものである。また、許容値に対して限界値までが十分に余裕があるため、想定以上の変位が生じたとしても漏水には至ることはない。断層用鋼管を用いた対策によってこれまで積極的な耐震対策を講ずることができなかった断層を横断する管路についても、具体的な耐震対策が検討できる環境が整備されたものと考えられる。本対策が現在全国的に進められている水道耐震化の一助となれば幸甚である。

### 参考文献

- 1) 高圧ガス導管液状化耐震設計指針. 日本ガス協会(2007)
- 2) 水道施設耐震工法指針・解説. 日本水道協会(2009)
- 3) 地震調査研究推進本部ホームページ (<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>)
- 4) 活断層研究会編, 新編日本の活断層一分布図と資料一, 東京大学出版会, 2012
- 5) Timoshenko, 座屈理論. コロナ社(1954)
- 6) 長谷川延広, 今井俊雄, 鈴木信久, Development of High Seismic Performance Pipe for Crossing Active Faults. 第6回日米耐震ワークショップ (2009)
- 7) 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(2001) No.668 /I54 p187\_194
- 8) 片岡正次郎, 日下部毅明, 内陸地震規模・タイプと地表地震断層の特性との関係. 土木学会論文集(2005) No.801/I-73 21-32
- 9) 金折祐司, 断層の影響はどこまで及んでいるか. Jour.Japan Soc,Eng,Geol, VOL41,No6,pp.323-332,2001

## SEISMIC DESIGN APPROACH FOR STEEL PIPELINES CROSSING ACTIVE FAULTS

Nobuhiro HASEGAWA, Junji KIYONO

Because an extremely large number of active faults exceeding 2000 exist in the Japanese archipelago, it is difficult to eliminate the possibility that water pipelines and other lifeline systems, which are linearly long-extended structures, may cross faults. Thus, earthquake-proof countermeasures for fault crossing pipelines have been desired. There are many previous studies on large deformation behavior of fault-crossing pipelines not only in empirical approach but also in numerical method. However, little research has examined construction methods for avoiding rupture of these pipelines. In the present study, "Steel Pipe for crossing Fault (SPF)" was developed as a construction countermeasure for water pipelines that must cross faults. One pair of the developed SPF's which are located across the fault line can avoid extreme shear deformation of the pipeline near the fault-crossing zone, and thereby prevents buckling or tear failure at the fault-crossing point. This report presents seismic performance of SPF and proposes a seismic design method for fault-crossing pipelines using SPF.