

座屈波形を利用した水道向け「断層用鋼管」の開発

Development of “Steel Pipe for Crossing Fault (SPF)” Using Buckling Pattern for Water Pipelines

長谷川延広 HASEGAWA Nobuhiro JFE エンジニアリング 都市環境本部 アクア事業部 水道管路技術部管路技術室 副課長
長嶺 浩 NAGAMINE Hiroshi JFE エンジニアリング 都市環境本部 アクア事業部 水道管路技術部管路技術室長
今井 俊雄 IMAI Toshio JFE エンジニアリング 都市環境本部 アクア事業部 水道管路技術部長・工博

要旨

JFE エンジニアリングでは、断層を横過する水道管路の耐震安全性を確保するため、極めて大きな断層変位を吸収できる「断層用鋼管」を開発した。断層用鋼管は、断層面前後の直管にあらかじめ山状の変形部（座屈波形部）を設けることで、断層変位吸収の際に管路に生ずる変形の位置や変形モードを制御することを可能としている。この機能により、断層面の前後など、地震時に数メートルに及ぶ極めて大きな地盤変位が局所的に発生した場合においても、漏水を生じることなく、内空断面を確保して管路の通水機能を維持することができる。

Abstract:

JFE Engineering has developed “Steel Pipe for Crossing Fault (SPF),” which can absorb extremely large fault displacement in order to secure the seismic safety of water pipelines crossing faults. Installation of plural SPF deformation nodes (buckling pattern sections) in straight pipes before and after a fault enables control of the location and mode of deformation in the pipeline when absorbing fault displacement. This function makes it possible to maintain inner section of the pipe, and thereby maintain the water supply with no leakage, even in very large earthquakes with ground transformation of several meters around the fault plane.

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震を契機に、政府は全国にわたる総合的な地震対策の推進を目的とした地震調査研究推進本部を設置し、活断層の調査研究を進めてきた。同調査結果によれば、わが国には現在までに 2 000 ヶ所以上の活断層の存在が確認されているが、その長さは数キロから数十キロメートルに及び、さらにこれらの活断層が滑りを生じた場合、平均で 2 m 以上の断層変位が生ずるものと考えられている。

水道用鋼管は、レベル 2 地震動に対しても十分な耐震安全性を有する耐震管として導・送水管などの重要基幹管路を中心に利用されているが、断層面の滑りのように数メートルオーダーの局所的な大変位が想定される箇所、とりわけ逆断層のように管に圧縮方向の曲げ変形が作用する場合には、座屈変形を生じ、通水機能に支障を生ずる可能性が否定できない。しかしながら、上記のように断層の分布数ならびに長さ故に断層を回避して水道管路を配管することは困難であり、さらにこれまで有効な対策が準備されていなかったことから、全国的にも活断層に対する水道管路の耐震対策はほとんど採られていないのが現状である。そこで、JFE

エンジニアリングでは、震災時において活断層に滑り変位が生じて、管路に亀裂や漏水を生ずることなく、通水機能を維持できる断層用鋼管を開発した^{1,2)}。本稿では、断層用鋼管の概要、実証実験ならびに適用事例について紹介する。

2. 断層用鋼管の概要

2.1 開発コンセプト

逆断層を横過して布設された鋼管路に図 1 のように大きな断層変位を与えると、断層面の前後で座屈を生ずる。この断層変位は、断層面の滑りに伴って局所的に作用し、かつ数メートル規模の極めて大きいものであるため、たとえば高強度鋼を用いるなど管の材料特性で対応することは困難

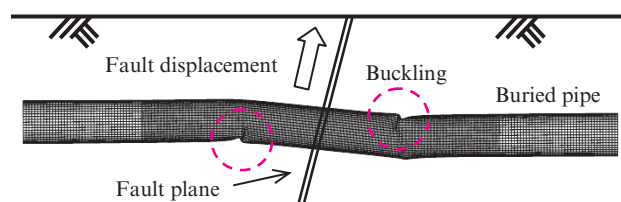


図 1 断層変位による管路の変形

Fig. 1 Deformation of buried pipeline caused by fault displacement

である。

そこで、断層変位に対しては、管体強度に依存するのではなく、鋼の弾塑性変形性能によって大変位を吸収できる構造を有する水道用鋼管の開発を指向した。

断層用鋼管に対する耐震要求性能の設定に際しては、(1)断層面の滑り事象は再来期間が1000年程度と非常に長いこと、(2)想定される断層変位は1方向のみの永久変位であることから、対応すべきイベントは管路の供用期間中に高々1回で、かつ断層変位は1方向のみ(低サイクル疲労については非考慮)との条件を設けた。また、水道施設耐震工法指針・解説(2009年)に基づき、通常の地震動以外の断層変位による大イベントに対して、「部分的に塑性化しても漏水が発生しない限界の状態」を満足するものとし、鋼管の塑性変形は許容するが、亀裂の発生は回避し、かつ塑性変形した場合でも送水の継続が可能な断面を確保できる構造を検討することとした。

2.2 波形部の形状

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(僅かな非対称性など)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1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、実管の初期不整はすべ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

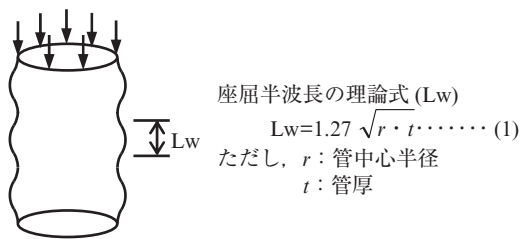


図2 円筒シェルの軸圧縮変形モード

Fig. 2 Deformation mode of cylindrical shell under axial compression

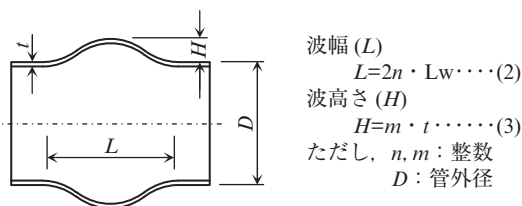


図3 座屈波形部緒元

Fig. 3 Specification of designed buckling pattern

た。波幅については Timoshenko の座屈半波長の理論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 (有限要素法) 解析により最適形状を選定した(図2, 3)。

2.3 FEM 解析による形状決定

上記で設定した座屈波形に関する曲げ変形性能の確認および形状の最適化のために FEM 解析を実施した。最適形状は、波幅 (L) および波高さ (H)、管厚 (t) を変数としたパラメトリックスタディを行なって、最大の許容曲げ角度が得られる条件として求めた。なお、許容曲げ角度については以下の考えに基づいて求めた。すなわち、「高圧ガス導管液状化耐震設計指針」(2007年)では、図4に示すように直管を強制的に曲げて、亀裂発生限界状態を実験的に求めているが、ここではまず曲げによって生成された山部において管壁の内面側が接触し、さらに曲げが進行して反力が増加すると山が倒れ始め、この倒れ込みが進行すると亀裂が発生するメカニズムが確認されている。このことから安全性を考慮し、図4のような倒れ込みが始まる前の内面接触時の角度を許容曲げ角度として設定した。

最適形状の選定のための FEM 解析では、波形部に曲げのみが作用するように図5のような単純曲げモデルとした。解析結果を図6に示す。同結果から、波幅については $L = 3.0 L_w$ のケースで内面接触角度が最大となることが分かる。また、波高さについては、高さを大きくする程内面接触角度が大きくなる傾向がうかがえるが、 $H = 24 \text{ mm}$ ($4t$) 以上では横ばいとなるため、 $L = 3.0 L_w$ および $H = 4t$ を最適形状として選定した。

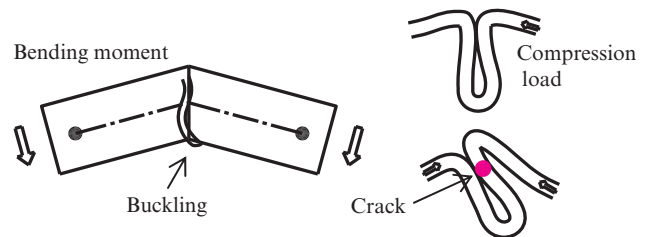


図4 鋼管変形時の亀裂発生メカニズム

Fig. 4 Crack initiation mechanism of steel pipe bending

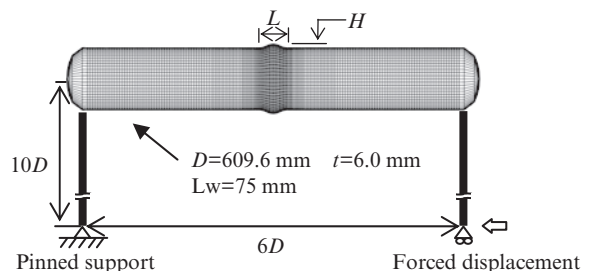


図5 最適形状決定のための解析モデル

Fig. 5 Analytical model for the selection of the best specification of buckling pattern

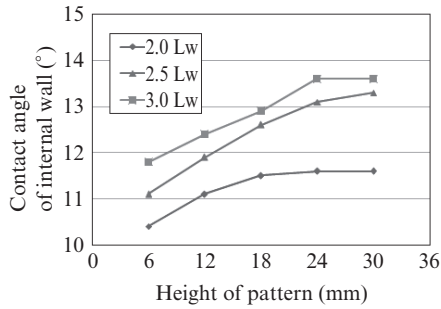


図6 内面接触角度に及ぼす波高さ、波幅の影響

Fig. 6 Calculation results of contact angle for several wave height, H and half wavelength of buckling, L_w



写真1 実験装置

Photo 1 Apparatus of pipe bending test

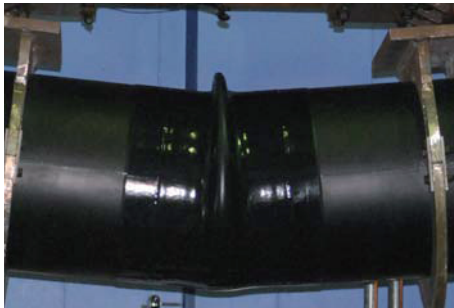


写真2 内面接触時状況 ($\theta=12.6^\circ$)

Photo 2 Deformation of test pipe at contact angle of inner wall ($\theta=12.6^\circ$)

3. 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なった。実験は写真1に示す3MN構造物試験機を用いた4点曲げにより実施した。

写真2および図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ものの、ほぼ一致した。また、変形は波形部のみに集中しており、波形部は左右対称の山が形成されていることを確認した。

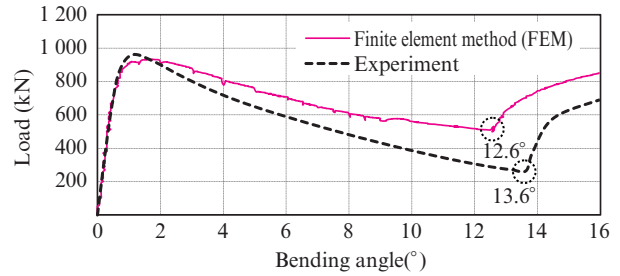


図7 曲げ試験における荷重と曲げ角度の関係

Fig. 7 Relation between bending loads and bending angles

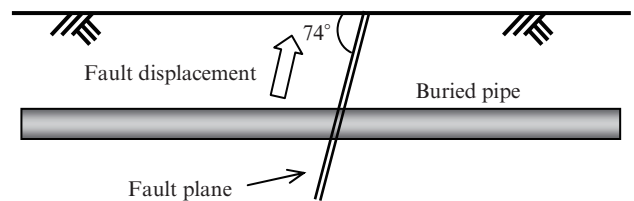


図8 検討モデル

Fig. 8 Model of case study

表1 検討条件

Table 1 Basic conditions for case study

Steel pipe	Nominal diameter	2 400A
	Wall thickness	21 mm
	Material	SS400
	Young's modulus	$2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	Yield stress	225 N/mm^2
Fault	Fault type	Reverse
	Fault angle	74°
	Fault displacement	1.440 m

4. 断層用鋼管の適用事例

断層を横過する管路を対象とした具体的な断層用鋼管の適用事例について概説する。

4.1 検討条件

対象とする断層を図8に、検討条件を表1にそれぞれ示す。

4.2 設置間隔の検討

断層面を横過する直管路に対し、断層面の滑りに伴う強制変位が作用した場合を想定する。図9のように断層面を中心に管路には曲げが生じ、変位の進行に伴って図中の○印の位置における曲げモーメントが全塑性モーメントに到達して塑性ヒンジが形成される。そこで、効率良く断層変位を吸収するために、曲げモーメントが最大となる塑性ヒンジ位置に断層用鋼管を配置する。塑性ヒンジの設置間隔についてはFEM解析によって求める。

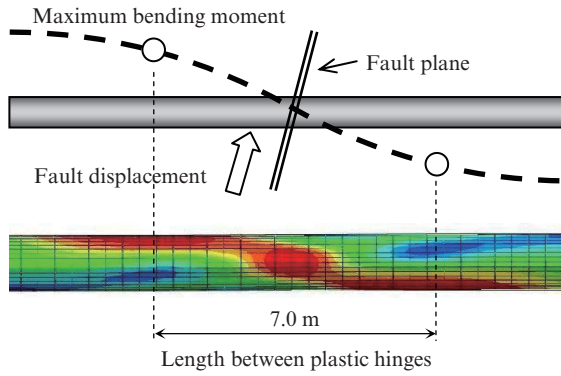


図9 塑性ヒンジ間距離

Fig. 9 Plastic hinges on pipe crossing fault

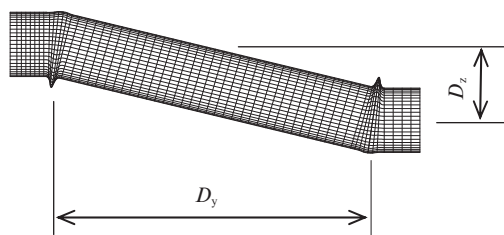


図10 山数の設定方法

Fig. 10 Design method for the required number of buckling pattern

4.3 山数の設定

断層パラメータとして与えられた断層変位量および上記で設定した塑性ヒンジ間距離より、曲げ角度を計算する。断層用鋼管の1山当たりの許容曲げ角度は口径と管厚の関係によっても異なるが、概ね13°程度であることから、安全側の値として許容曲げ角度を12°として、断層用鋼管の山数を設定する。たとえば3山設置すると許容曲げ角度は36°となる。

上記の断層変位および塑性ヒンジ間距離から曲げ角度を算出すると約11°となるため、許容曲げ角度(12°)よりも小さくなり、1山で変位を吸収することができる(図10)。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D_z}{D_y} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 θ : 曲げ角度(°)

D_y : 塑性ヒンジ間距離 (7.0 m)

D_z : 鉛直断層変位量 (1.380 m)

4.4 FEM 解析による性能確認

塑性ヒンジ発生位置に1山の断層用鋼管を配置し、断層変位(1.440 m)を与えて断層用鋼管の曲げ性能の確認をFEM 解析により行なった。

解析結果では、図11のように山部に曲げモーメントが作

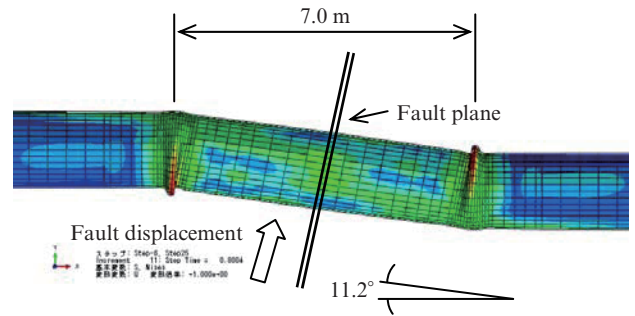


図11 検討事例における山部の挙動

Fig. 11 Deformation of designed buckling patterns in the case study

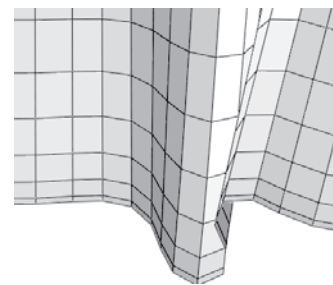


図12 波形部の変形形状

Fig. 12 Deformation of designed buckling pattern

用し、山部のみに変形が集中していることが分かる。

図11に示すように、断層変位1.440 mでの曲げ角度は11.2°であり許容曲げ角度(12°)以内である。また、図12に示すように、管壁は内面接触に至っておらず、許容曲げ角度以内であることを確認した。

5. おわりに

断層用鋼管の概要ならびに実証実験での曲げ性能の確認、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、震災時における水道ライフラインの供給継続を確保しようとするものであるが、本開発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横過部に対しても、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。本開発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) 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回日米台耐震ワークショップ. 2009.
- 2) 長谷川延広, 今井俊雄, 長嶺浩, 中島和良. 座屈波形を利用した断層用鋼管イブの開発. 日本工業用水協会第46回研究発表会. 2011, p. 31-34.

- 3) 高田至郎; Hassani Nemat; 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, p. 187-194.
- 4) 高田至郎, 李騰雁, 梁建文. 断層を横断する地中管路の耐震設計法. 第24回地震工学研究発表会講演論文集. 2007, p. 969-972.
- 5) 高圧ガス導管液状化耐震設計指針. 日本ガス協会, 2007.
- 6) Timoshenko. 座屈理論, コロナ社, 1954.



長谷川延広



長嶺 浩



今井 俊雄