

断層用鋼管の開発

長谷川 延 広・今 井 俊 雄

わが国には膨大な数の活断層が全国的に広く分布しており、水道ライフラインなど数多くの線状構造物がこれらを横断して布設されている。断層横断部では、想定される変位量が桁違いに大きいことから、実用的な対策が十分に整備されておらず、従来は断層を避けた路線選定を行うなどの消極的な対策が主流であった。本論では、上記の課題を解決するため水道管路を対象に開発した「断層用鋼管」についてその概要ならびに設計事例を紹介する。

キーワード：活断層，断層変位，水道用鋼管，ライフライン，耐震化，座屈波形，弾塑性変形

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震を契機に水道施設耐震工法指針・解説¹⁾が1997年に改訂され、地中に埋設される水道管路についても2種類の地震動レベル、施設の重要度に応じた要求耐震性能が規定されたほか、液状化に伴う地盤変状の影響についても言及され、地震動と地盤変状の双方に対する耐震安全性照査の必要性が認識されるようになった。ただし、活断層については特別な言及はなされておらず、一般論として路線選定においては良好な地盤を選定すべきである旨の記述や、地盤急変部における伸縮可撓管の適用例等が示されているに過ぎない。

一方、ISO 2394²⁾やEurocode³⁾など欧州連合を中心に信頼性設計理論に基づく性能設計体系の構築が推進されたことに呼応し、わが国においても性能規定型設計法の普及が図られるようになってきた。水道施設耐震工法指針についても上記の動向を踏まえ、従来の仕様規定型に代わって性能規定型設計の考え方が導入され、これまでの指針よりも具体的に構造物の目的とこれに適合する機能および要求される耐震性能が明確化された。ただし改訂指針⁴⁾においても、活断層近傍の水道施設に対して、十分な耐震性を有するよう配慮すべきであることについては言及されたものの、実際の対策については具体的な記述がなされていない。

ところで、2011年東北地方太平洋沖地震ではMw 9.0という観測史上4番目の大地震に伴って東北地方の広い範囲で大規模な地殻変動が発生した。この地殻変動によって福島県の塩ノ平断層(図-1参照)



図-1 塩ノ平断層の地盤変状(鉛直方向1.8m)⁵⁾

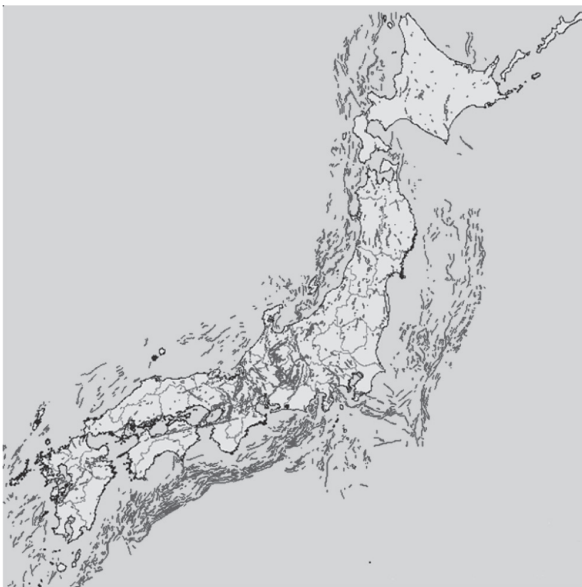
など各地で断層変位が生じたほか、活断層の動きが活発化し、数多くの断層型地震が発生している。断層を横断する水道管路に対しては上記のように伸縮可撓管を連続的に多数配置するなどの対策が提示されているものの、膨大なコストを要するために現実的に実施されている例は殆ど無いのが現状であり、その意味では断層横断部においては、これまで実用的な耐震対策が十分に整備されていなかったものと言えよう。

著者らは、上記課題を解決するために「断層用鋼管」を開発^{6), 7)}した。断層用鋼管は、断層面前後の直管部に予め山状の変形部(座屈波形部)を設けることで断層変位の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機能を有する水道用鋼管である。この機能により、断層面の滑りなど地震時に数メートルオーダーの極めて大きな地盤変状が局所的に発生した場合においても漏水を生ずることなく内空断面を確保

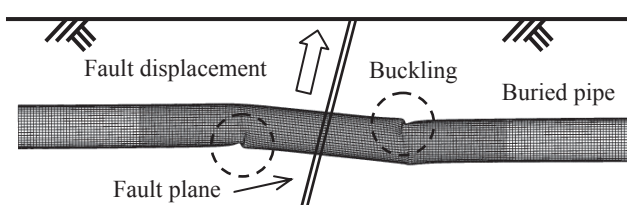
して通水機能を維持することができる。本報では、開発した断層用鋼管の概要ならびに設計事例を紹介する。

2. 地震時荷重としての断層変位

図一2にその分布を示すが、わが国における活断層はこれまでに2,000箇所以上⁸⁾確認されており、現在も追加調査によって新たな活断層の存在が確認されている。一般的な活断層の長さは数km～数十km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2m以上の断層変位が生ずるものと考えられている。断層は、滑り面の方向によって正断層、逆断層、横ずれ断層などに分類できるが、わが国における断層の大半は逆断層型であると言われている。断層を横断して布設された鋼管路を想定した場合、正断層では管軸に対して引張方向の強制変位が作用するのに対して、逆断層ではその反対に軸圧縮方向の曲げが作用する。このような強制変位を受けると、鋼管には図一3に示すような座屈現象が生じる。座屈の発生位置は鋼管の初期不整（製造上のごく僅かな非対称形状や管厚の差など）に影響を受けるため、座屈が発生する限界ひずみを推定することは可能でも、座屈がどの部位に



図一2 わが国における活断層の分布⁸⁾



図一3 断層変位による鋼管路の座屈変形

生ずるかを予測することは極めて困難である。また、一旦座屈が生じてしまうと、その後の鋼管の変形がどのように進展するかを予測することも困難であり、変形の進展状況によっては亀裂・漏水の発生に繋がるため、地震動に対する鋼管路の耐震設計では、座屈発生限界ひずみを基にした耐震安全性照査を行っている。

以上を踏まえて、本開発では逆断層を横断して布設された埋設鋼管路を対象として、2m以上の断層変位が生じた場合においても通水機能を維持できる鋼管の開発を目標とした。

3. 断層横断部における要求耐震性能

前述のように、現行の耐震工法指針⁴⁾は性能規定型設計を指向しており、地震動に対する埋設鋼管路の要求耐震性能は表一1のように規定されている。

表一1 地震動に対する鋼管路の要求耐震性能

地震動	要求性能	内容
レベル1	耐震性能1 (使用限界状態)	力学的特性が弾性域を超えない (許容ひずみを超えない) 限界状態
レベル2	耐震性能2 (修復限界状態)	部分的に塑性化しても漏水が発生しない限界状態

このとき、レベル2地震動に対しては修復限界状態として、軸圧縮を受ける鋼管の座屈開始限界ひずみ相当値が安全照査値として規定されているが、前述の座屈現象における特性を考慮しているため、実際に漏水が発生しない限界値（亀裂発生限界ひずみ）からは安全側に大きくかけ離れている（ただしその度合は個体差による初期不整の影響が大きく評価困難）ものと考えられる。

一方、断層変位や地滑り等の大規模な地盤変状に対しては上記レベル2地震動のケースと同様に、「部分的に塑性化しても漏水が発生しない限界状態」が要求されるが、照査値として座屈開始限界ひずみ相当値を適用したのでは、その変位量の大きさから、対応が極めて困難であると考えられる。

そこで、鋼管の座屈開始限界ひずみを限界値とせず、亀裂発生限界ひずみまでの領域を有効に活用することで、「部分的に塑性化しても漏水が発生せず、通水機能を確保可能な限界の状態」を満足する構造を検討することとした。

開発した断層用鋼管は、断層の滑りを伴う大地震発生後、長期にわたって通水機能を保持することができるが、大規模な塑性変形を許容しているため、発震後

数年以内程度の期間で同部位の健全度調査や必要に応じて部分的更新を行うことを前提とした製品である。

4. 断層用鋼管の開発

(1) 基本原理

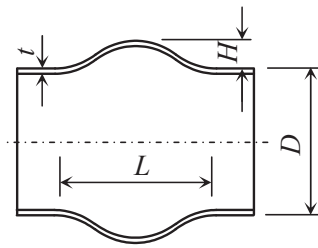
図一1に示すように逆断層を横断して布設された鋼管路に断層変位を与えると、断層の滑り面前後で鋼管に座屈が生ずる。座屈の発生位置は断層変位によって鋼管路に作用する曲げモーメントが最大となる位置近傍と想定されるが、前述のように鋼管の微小な初期不整形に影響を受けるため、その位置の特定は難しい。また、座屈発生後の変形の進展状況によって亀裂・漏水発生限界値は大きければつきを持って変動することが予想される。そこで、図一4のように直管に予め初期変形を与えておき、座屈変形が生じ易い（曲げ変形が集中する）箇所を設けることで、変形の発生位置ならびに変形の進展モードを制御し、大規模な強制変位に対しても、亀裂・漏水の発生を抑制して通水機能を確認できる鋼管の構造を考えた。この形状としては、薄肉円筒の軸圧縮の際に派生する座屈波形を基に以下のように設定した。

長さ： $L = n \cdot L_w$ (1)

高さ： $H = m \cdot t$ (2)

ただし、 L_w は(3)式で与えられるTimoshenko⁹⁾の座屈半波長の理論式、 n 、 m は整数、 r は管中心半径、 t は管厚をそれぞれ示す。

$L_w = 1.72 \sqrt{r \cdot t}$ (3)



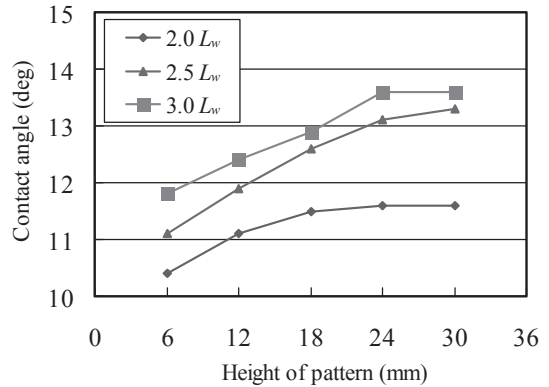
図一4 断層用鋼管の座屈波形

(2) 最適形状の選定

図一4に示す座屈波形を有する鋼管（φ600×6t）について、吸収可能な曲げ角度が最大となる最適形状を、FEMモデルを用いたパラメトリックスタディにより求めた。解析パラメータとしては、波形の長さLならびに高さHを選定した。波形部は管の曲げ変形の進展に従い、山部が成長して管の内壁同士が接触する状態を呈するが、本研究ではこの状態の管の曲げ角

度を「内面接触角度」と称し、断層用鋼管の設計上の許容曲げ角度として規定した。

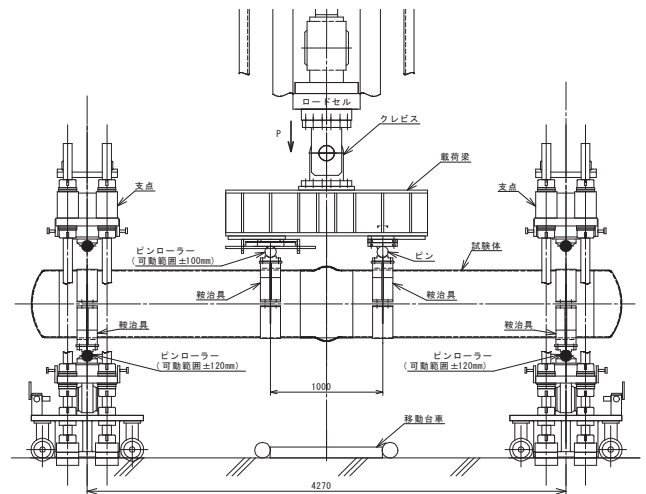
図一5にその結果を示す。長さLについてはL = 225 mm (3.0 L_w) のケースで内面接触角度が最大となることがわかる。また、高さHについては、大きくする程内面接触角度が大きくなる傾向がうかがえるが、H = 24 mm (4t) 以上では横ばいとなるため、L = 3.0 L_w および H = 4t を最適形状として選定した。



図一5 内面接触角度に及ぼす波形長さ・高さの影響

(3) 実管による性能試験

FEM解析によって得られた最適な波形形状の性能を確認するため、3MN構造物試験機を用いて図一6に示す実管の曲げ試験を実施した。実験では亀裂発生の有無を確認するため、管内に内圧0.1MPaを作用させた状態で、試験機のストローク限界まで曲げを与えた。



図一6 実管の曲げ試験装置

図一7ならびに図一8には試験中の供試管外観を示すが、前者は内面接触角度まで曲げを与えた状態、後者は試験機ストローク限界（曲げ角度30°以上）の状態をそれぞれ示す。図一7の状態では、曲げ変形



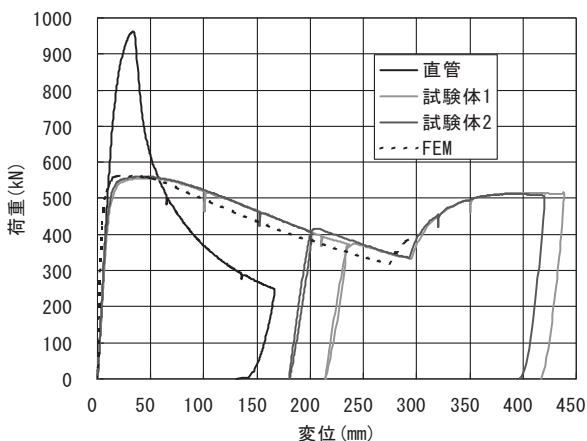
図一七 曲げ試験状況 (内面接触角度)



図一八 曲げ試験状況 (ストローク最大)

は剛性の小さい波形部に集中しており、左右対称の山が形成されていることが確認できる。さらに曲げ角度を大きくしていくと、波形部に形成された山が横方向に倒れ込む挙動を示すが、図一八の状態に至っても亀裂発生は確認されなかった。したがって、断層用鋼管の設計上の許容曲げ角度として規定した内面接触角度と亀裂発生限界曲げ角度の間には十分な余裕があるものと考えられる。

図一九には、直管ならびに断層用鋼管の曲げ試験結果(荷重—変位曲線)をFEM解析結果と併せて表示している。断層用鋼管の最大荷重は直管の座屈開始荷重の60%程度であり、波形部が選択的に変形している様子がうかがえる。さらに、断層用鋼管では曲げ



図一九 直管ならびに断層用鋼管の曲げ試験結果

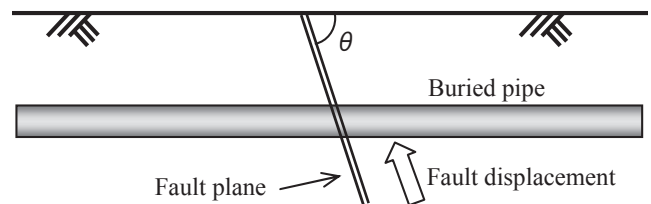
角度の増大に伴って荷重は徐々に低減していくが、内面接触角度を境に反力が回復する。図中に示すFEM解析の結果(破線)は、内面接触角度を実験値と比較して若干小さく評価しているものの、概ね実験値を再現できているものと考えられる。

5. 断層用鋼管の検討事例

(1) 配管設計法

断層用鋼管の計画・設計に際しては、布設される断層毎に異なる想定変位量、断層傾斜角度、埋設位置、地盤条件等に合わせて最適な配管方法を決定する必要がある。口径・管厚については、当該路線における水理的条件ならびに埋設条件から、一般の埋設管路と同様に決定されるが、断層用鋼管の山数ならびにその配置方法は、断層の条件によって決定される。

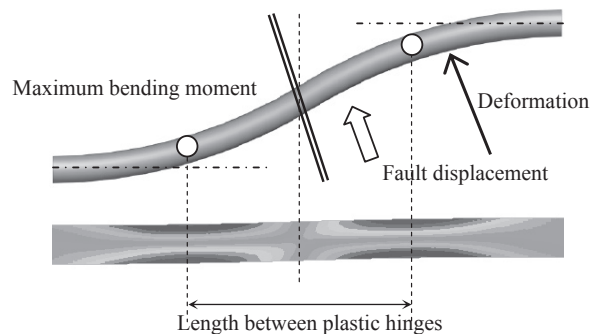
ここでは、図一十に示す逆断層の横断を想定した断層用鋼管の設計フローについて紹介する。



図一十 想定した配管条件

(2) 設置間隔の検討

図一十に示すように、断層面を横断する直管路に対し、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。すると、図一十一のように断層面を中心に管路に曲げが生じ、変位の進行に伴って図中の○印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よう計画する。



図一十一 塑性ヒンジ位置

(3) 山数の検討

次に断層パラメータとして与えられた断層変位量ならびに上記で設定した塑性ヒンジ間距離より、断層用鋼管1本当たりの所要曲げ角度を(4)式より計算する(図-12)。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12°程度であることから、これに基づいて断層用鋼管の山数を設定する。断層用鋼管の山数は、1~3山を標準としており、それぞれI型~III型と呼んでいる。

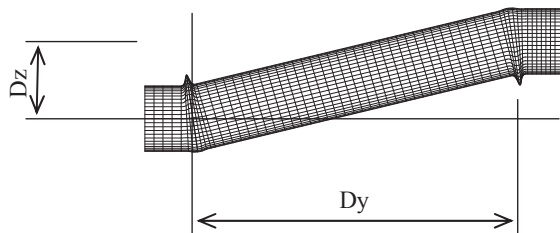


図-12 所要曲げ角度の計算方法

$$\theta = \tan\left(\frac{D_z}{D_y}\right) \quad (4)$$

ここに θ : 曲げ角度(°)

D_y : 塑性ヒンジ間距離(m)

D_z : 鉛直断層変位量(m)

(4) FEM解析による安全性照査

上記で設定した設置間隔ならびに山数を有する断層用鋼管の耐震安全性照査は、FEMモデルを用いた解析によって行う。図-13は、その一例を示したものであるが、曲げ変形は波形部に集中しており、かつ曲げ角度が内面接触角度に至っていないことから、山数ならびに波形部の配置間隔について妥当であると判断できる。

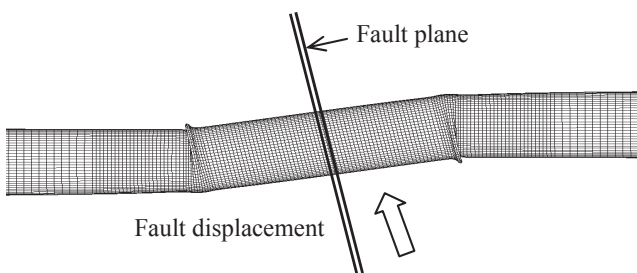


図-13 FEMモデルによる安全性照査

6. おわりに

以上、水道向けに開発した断層用鋼管の概要ならびに実管試験に基づく曲げ性能の確認、検討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断部に対しても、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。

断層用鋼管については、現在日本水道鋼管協会(WSP)において規格化作業が進められており、今年度中にはWSP規格として制定・発刊される見通しである。また、2011年東北地方太平洋沖地震においては、可撓管の脱管による漏水被害が多数報告¹⁰⁾されているが、断層用鋼管は、脱管のおそれが無い耐震性可撓管としての利用可能性もあることから、現在適用拡大に向けた検討を進めているところである。

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。

JICMA

《参考文献》

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 1997年版，日本水道協会，1997。
- 2) ISO：ISO 2394 General principles on reliability for structures, 3rd edition, 1998。
- 3) EUROCODE：EUROCODE 0 Basis for structural design, EN 1990 Eurocode 0 basis, 1990。
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009年版，日本水道協会，2009。
- 5) http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori/, 2012。
- 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回日米台耐震ワークショップ，2009。
- 7) 長谷川延広，今井俊雄，長嶺浩，中島良和，座屈波形を利用した断層用鋼管の開発。日本工業用水協会第46回研究発表会，2011。
- 8) 活断層研究会編，新編日本の活断層—分布図と資料—，東京大学出版会，1991。
- 9) Timoshenko，座屈理論，コロナ社，1954。
- 10) 楢田泰子ら，土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，2011。

【筆者紹介】

長谷川 延広 (はせがわ のぶひろ)
JFEエンジニアリング(株)
アクア事業部 水道管路技術部 管路技術室
副課長



今井 俊雄 (いまい としお)
JFEエンジニアリング(株)
アクア事業部
水道管路技術部長

