

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○北川 純
JFE エンジニアリング 正会員 今井 俊雄

JFE エンジニアリング 正会員 長谷川 延広
京都大学大学院工学研究科 正会員 小池 武

1. はじめに

日本には数多くの活断層が存在する．したがって，パイプラインが断層を横断する可能性も高い．

そこで，大きな断層変位の吸収を目的とする断層用鋼管¹⁾が開発された．断層用鋼管は，予め変形しやすい山状の部位を設けることで，回転変形が可能であり，それにより，断層変位を吸収できる．ここで，確実に断層変位を吸収し，かつパイプが破断しないために，断層面前後の適切な配置間隔を決定する必要があるが，現状では有効な決定方法が無く，従来は試行錯誤的に FEM 解析によって検討してきた．この状況を解決するため，ここでは最適配置間隔評価のための簡易式を開発する．

2. 断層用鋼管を挿入したパイプのモデル化と解析

弾性床土上の梁として，断層を横断して配置されたパイプラインを想定する．断層面を挟んで L の間隔で，断層用鋼管を配置する．

鉛直方向の断層変位 Δ_y が生じた時のパイプは図-1 のような挙動を示すと考えられる．

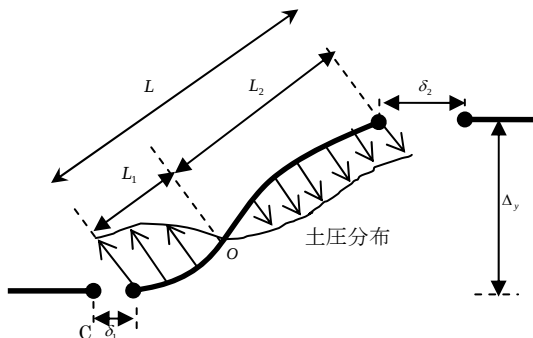


図-1 断層用鋼管に挟まれた区間の一般モデル

パイプが変形する時，一般的には，ある点 O を中心として，左右で異なる地盤反力を受ける．また，パイプの連続性を保つため，左右の隣接パイプがそれぞれ δ_1 ， δ_2 だけ軸方向に伸びる．本研究では簡単のため，パイプライン周辺の荷重条件が上下方向で等しいと仮定する．それにより， O 点まわりの左右の土圧分布が等しく， $L_1 = L_2$ ， $\delta_1 = \delta_2$ が成り立つ．この時，パイプ

周辺の荷重条件は，図-2 のように示される．

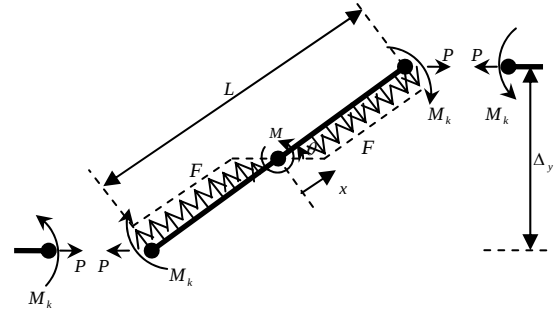


図-2 断層用鋼管に挟まれた区間の簡易モデル

簡易モデルの荷重条件について説明する．断層変位 Δ_y は，曲げモーメント M がパイプの中心に作用し，長さ L のパイプが角度 θ 回転することで，置き換えられる．その時，式(1)が得られる．

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta_y}{L} \right) \quad (1)$$

パイプが回転する時に地盤反力 F ，隣接パイプの引張り力 P を受ける．断層用鋼管が回転バネ特性を示すと仮定し，曲げモーメント M_k が配置箇所に作用する．

地盤反力は完全弾塑性型と仮定し，軸方向，軸直角方向にそれぞれ地盤バネ K_H ， K_V とする．

断層用鋼管の回転バネは，断層用鋼管の曲げ性能確認実験¹⁾の結果を参考にする．

断層用鋼管に挟まれた区間が全塑性状態にならない条件は式(2)で与えられる．

$$|\sigma_x| = |\sigma_M + \sigma_P| \leq \sigma_B \quad (2)$$

ここで， σ_M ， σ_P ， σ_x ， σ_B は，それぞれ軸直角方向応力，軸方向応力，軸直角方向と軸方向の合成応力，全塑性モーメント時の応力である．

埋設直管の限界ひずみ時の管端 C 点の限界伸び δ_m より，隣接パイプが破断しない条件として，式(3)が成立する．

$$\delta = \frac{L}{2} (1 - \cos \theta) \leq \delta_m \quad (3)$$

一方，弾性床土上の梁の基礎式(4)が成立する．

$$\begin{aligned} EA \frac{d^2 u}{dx^2} &= K_H (u_G - u) \\ EI \frac{d^4 v}{dx^4} &= K_V (v_G - v) \end{aligned} \quad (4)$$

ところで、断層変位による地盤変位 u_G , v_G がパイプのたわみ変位 u , v より格段に大きいと想定し、式(4)より u , v を削除すると、断層用鋼管に挟まれた区間における軸直角方向の応力分布式(5)が得られる。

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

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

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

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

図-3 は、 $\sigma_p = 0$ という条件下で式(5)をグラフ化したものである。配置間隔 L を 7.0m, 断層変位 Δ_y を 1.44m としたものである。

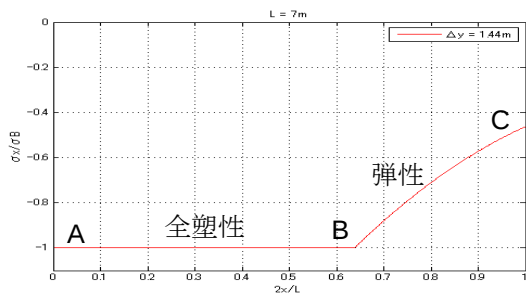


図-3 応力分布($L=7.0m$, $\Delta_y=1.44m$, $\sigma_p=0$)

A 点はパイプの中心で、C 点は断層用鋼管配置箇所である。図-3 から、座屈発生懸念のある全塑性区間長を具体的に知ることができる。

図-4 は、式(3)をグラフ化したもので、配置間隔 L が 3m, 5m, 7m, 9m の場合における隣接パイプの伸び δ と曲げ角度 θ の関係を示す。縦軸に伸び δ と限界伸び δ_m の比をとる。 $\delta = \delta_m$ となる区間では、隣接パイプが破断していることを表す。 $\delta = \delta_m$ となった時の角度を限界曲げ角度とする。

図-5 は、式(1)をグラフ化したもので、配置間隔 L が 3m, 5m, 7m, 9m の場合における断層変位 Δ_y と曲げ角度 θ の関係を示す。式(1)と限界曲げ角度の交点を限界断層変位とし、それ以上の断層変位に対しては、隣接パイプが破断することから対応できないことを表す。

したがって、断層変位量に対して、破断を回避する一対の断層用鋼管の配置間隔を推定することができる。

3. FEM 解析結果との比較

FEM 解析はシェル要素で行われた。図-6 より、梁要素で解析された簡易モデル結果との比較を行った結果、

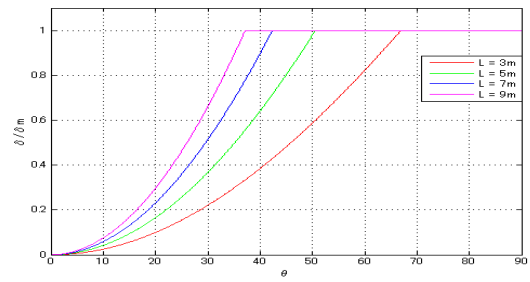


図-4 隣接パイプの伸び δ と曲げ角度 θ の関係

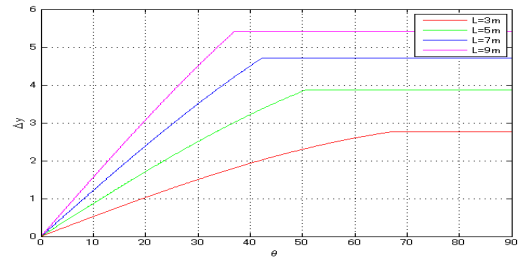


図-5 断層変位 Δ_y と曲げ角度 θ の関係

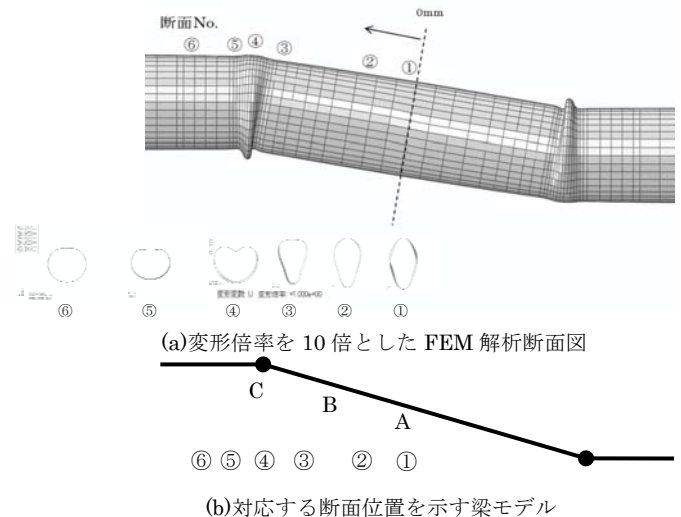


図-6 簡易モデルと FEM 解析結果の比較

簡易モデルでは、全塑性状態としか把握できなかった区間 AB の断面変形の詳細を FEM 解析で知ることができる。

4. 結論

与えられた断層変位量に対して、破断を回避する一対の断層用鋼管の配置間隔を推定する手法を開発した。また、FEM 解析結果における断面変形の傾向と簡易モデル解析結果とが矛盾しないことが確認できた。

参考文献

- 1) 長谷川延広, 長嶺浩, 今井俊雄: 座屈波形を利用した水道向け「断層用鋼管」の開発, JFE 技報 No.31, pp.74-78, 2012