

断層横断部の埋設鋼管路の挙動に関する研究

長谷川延広¹・清野純史²

¹JFEエンジニアリング株式会社 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1)
E-mail: hasegawa-nobuhiro@jfe-eng.co.jp

²京都大学大学院教授 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

断層を横断する管路の耐震設計法について、従来より管路の変形挙動に関する研究は数多くなされているが、対策工法についての研究はほとんどなされていない。断層を横断する箇所での管路の変形は、断層変位を受けると特定の位置に塑性ヒンジを形成しZ型に曲げ変形する。そこで、断層横断部における水道管路での対策工法として、管体の塑性ヒンジ発生位置に初期変形として波形部を設けることにより亀裂を生じる変形を回避し、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。

本報では、断層変位を受ける埋設鋼管の変形特性を利用し、塑性ヒンジ発生位置を推定するために、地中実験および数値解析を実施し、得られた結果を整理することで、簡易式を構築したので、その内容について報告する。

Key Words : Plastic Hinge, Pipeline, Buckling, Fault, Seismic Design.

1. はじめに

長野神城断層地震(2014年)は、東側の地盤が隆起する逆断層タイプの断層であり、震源断層となった神城断層の総延長31kmのうち北側の約20kmが動いたと考えられ、約9kmに亘って断続的に地表面に断層が出現した。

地震時に断層が動くと、断層面は地表にまで達する可能性があるため、断層を横断する水道管路、特に導・送水管や配水本管などの基幹管路においては、水供給の継続のために十分な耐震化対策が必要である。

このような断層を横断する管路の挙動については、これまでにいくつかの研究が報告されているが、具体的な耐震化対策についての研究例は少ない。

また、現行の耐震設計基準においても1995年兵庫県南部地震以降、地盤震動および液状化地盤変状に対する耐震設計法が導入された¹⁾が、断層横断箇所については整備されていないのが現状である。

そこで著者らは、水道管路において、断層横断部の対策工の1つとして波形管を利用して断層変位を吸収することができる断層用鋼管を開発した。断層用鋼管では、断層変位を効率よく吸収するために波形部の設置位置(塑性ヒンジ発生位置)を設定する必要がある

が、この設置位置は数値解析により求める必要があり、これまで多くの時間と費用を要した。

そこで本報では、埋設管路の断層変位モデルを構築し、境界条件を設定することで、塑性ヒンジ発生位置を簡易的に求める推定式を誘導した。また、推定式より算出した塑性ヒンジ発生位置を、地中実験およびFEM解析から得られた結果と比較することで、推定式の有効性の確認を行った。

2. 断層変位による管路の変形

断層面が地表面まで到達するような断層では管路が断層を横断する場合、管路に被害は極めて甚大な被害を受ける。



図-1 断層横断管路被害例(台湾集集地震)³⁾

1999年、台湾で起きた集集地震では、広い範囲に亘

って断層が地表面に出現し、断層変位は最大で12mにも達した。図-1に集集地震の被害例を示すが、断層変位に伴って管路が大きく変形していることが分かる。このように断層を横断する管路では断層変位によって特徴的な変形をすることが知られている。断層面で地盤のせん断力によって、断層面付近で管が座屈するのではなく、断層面からある程度離れた箇所でも屈曲し、管路全体としては「Z型」の変形形状を呈する。

近年発生した断層型地震のうち、断層が地表面に出現した断層としては、2014年の長野県北部地震での神城断層（最大変位0.9m）のほか、兵庫県南部地震での野島断層（最大変位1.4m）、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（最大変位2.1m）などが挙げられる。

3. 断層用鋼管の概要

断層用鋼管は、断層横断管路の対策工の1つであり、断層面に沿ってせん断方向に変位する断層変位を曲げ変形として吸収する構造を有する。

図-1のように、断層を横断する箇所の管路の変形では、断層面からある程度離れた箇所に屈曲部（塑性ヒンジ）を形成し、曲げ変形が生じる。

断層用鋼管は、このような特徴的な管路の変形を利用して、予め変形しやすい波形形状を管が屈曲する位置（塑性ヒンジ発生位置）に設けることで、図-2に示すように被災時に変形をこの波形形状に集中させ、変形位置や変形モードを制御することが可能である。また、波形部の山数を増やすことで、より大きな断層変位に対応することができ、大規模の断層変位が生じても波形部の弾塑性変形性能を活用することで管体に亀裂等が生じることなく、変形後の通水機能を確保することができる。

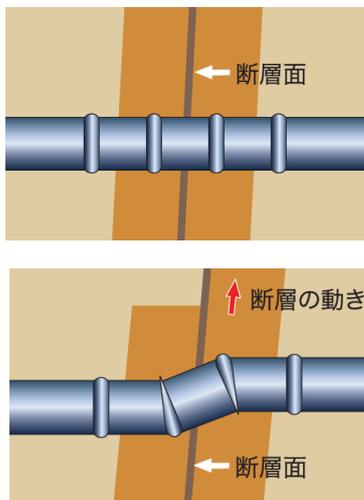


図-2 断層用鋼管の変形

4. 塑性ヒンジ位置推定式の誘導

塑性ヒンジの位置を推定する方法として、これまで地盤を考慮したFEM解析を実施し、管体に発生する最大曲げモーメント位置から算出していたが、地盤を考慮したFEM解析には多大な労力と時間が必要となり実用的でない。そこで、新たに基本モデルを考え、簡易的に塑性ヒンジ発生位置を求めることができる推定式を誘導した。

(1) 基本モデル

断層を横断する箇所での管路の土圧分布および変形を図-3のように設定し、基本方程式を考える。今回の断層変位のモデルでは左右の地盤が均一であると仮定する。また、図-4に示すように管路に働く土圧は管路のたわみ量（ w ）に比例するものとする。

(2) 推定式の誘導

$x > 0$ の区間において微分方程式を解く、方程式は式(1)のように定義する。

$$-EI \frac{d^4 w}{dx^4} - k \cdot w = 0 \quad (1)$$

ここで、 $4\beta^4 = \frac{k}{EI}$ $\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$ とおくと

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 \cdot w = 0 \quad (2)$$

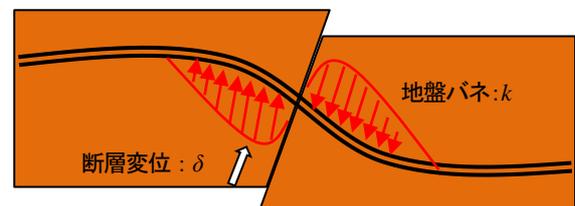


図-3 断層変位による土圧分布

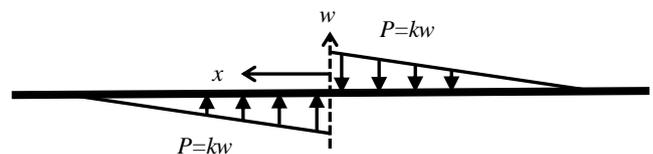


図-4 断層変位解析モデル

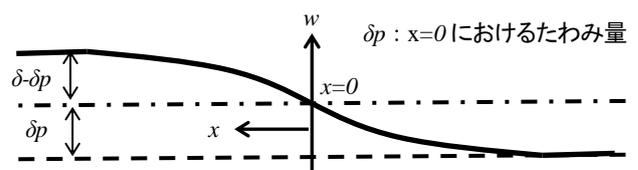


図-5 管路の変形イメージ

これより一般解は式(2)となる。

$$w(x) = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad (3)$$

境界条件を以下に設定する。

条件1: $x=\infty$ で管のたわみ量は δ 以上にはならない

条件2: $x=0$ での管のたわみ量は $w=\delta p$ とする

条件3: $x=0$ における曲げモーメントは対称条件から

$$M=0 \text{ となる}$$

条件1より, $e^{\beta x}$ の項は $x=\infty$ では発散してしまうため

$$A=B=0$$

$$w(x) = e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad (4)$$

条件2より, $x=0$ で $w=\delta p$

$$\therefore w(0) = C = \delta p \quad (5)$$

条件3より, $x=0$ で $M=0$

$$M = \frac{d^2 w}{dx^2} = 2\beta^2 e^{-\beta x} (C \sin \beta x - D \cos \beta x) \quad (6)$$

$$M(0) = 2\beta^2 \cdot (-D) = 0 \quad \therefore D = 0 \quad (7)$$

以上より, たわみ式 $w(x)$ は以下のようになる。

$$w(x) = \delta p \cdot e^{-\beta x} \cdot \cos \beta x \quad (8)$$

次に, M_{max} (塑性ヒンジ発生位置) を求める。

$$M' = \frac{d^3 w}{dx^3} = \delta p \cdot \beta^3 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) = 0 \quad (9)$$

$$\therefore x = \frac{\pi}{4\beta} \quad (10)$$

以上より, 塑性ヒンジ間距離 L は式(11)となる。

$$L = 2x = \frac{\pi}{2\beta} \quad (11)$$

5. 実験およびFEM解析結果との比較

推定式より求められる塑性ヒンジ間距離の有効性を確認するため, 口径100A×2.3tの直管を用いて, 地中実験およびFEM解析を実施し, 比較検討を行った。検討ケースは地盤反力係数をパラメータとして表-1のように設定した。

(1) 地中実験

図-6および図-7に示すような土槽を用いて管路に断層変位を与え, 直管の塑性ヒンジ発生位置の確認を行った。実験用土槽は, 幅1.0m, 深さ1.0m, 長さ5.0mであり, 土槽内に仕切りを設けて, 油圧ジャッキにより片側の土槽に強制変位を与えることで断層変位を模擬できる構造とした。供試体は100A×2.3tとし, 締め固めの度合いを変えてケース1およびケース2について実験を行った。

表-1 検討ケース

| | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|--------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| 地盤反力係数 | 0.0018kN/m ³ | 0.18kN/m ³ | 1.8kN/m ³ |

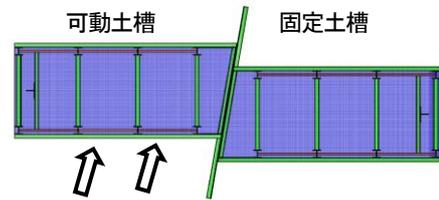


図-6 実験装置 (土槽)



図-7 実験装置写真

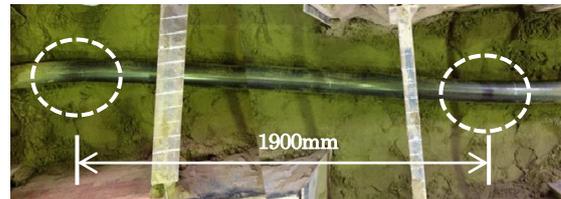


図-8 実験結果 (ケース1)

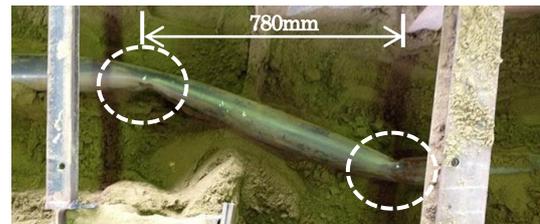


図-9 実験結果 (ケース2)

図-8および図-9に実験結果を示す。それぞれの図が示すように塑性ヒンジ間距離は $L_1=1900\text{mm}$, $L_2=780\text{mm}$ であり, 変形は断層面に対して等距離位置に発生している。

(2) FEM解析

地中実験と同条件にて, FEM解析を実施して塑性ヒンジ発生位置の確認を行った。地盤はソリッド要素, 管路はシェル要素とした。また, 締め固めの影響を考慮し, 地盤反力係数をパラメータとしケース1~ケース3について計算を行った。

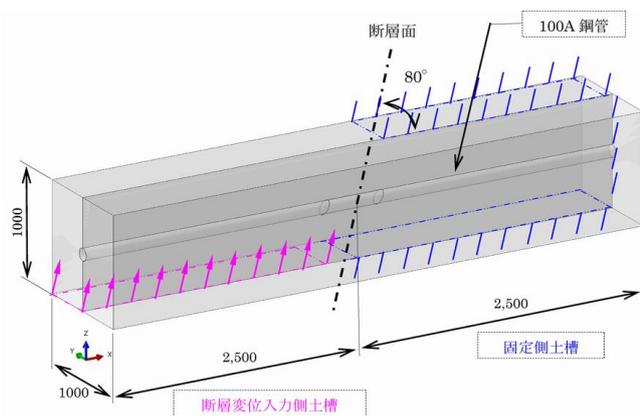


図-10 FEM解析モデル

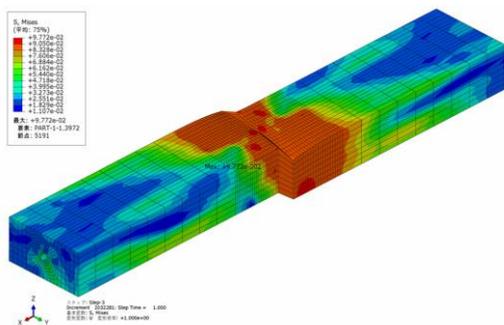


図-11 地盤変形図 (FEM解析結果)

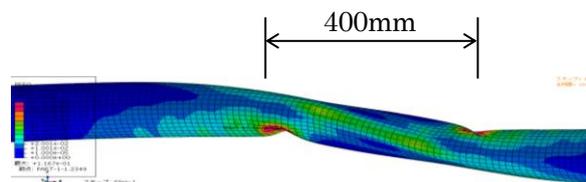


図-12 管体変形図 (ケース1)

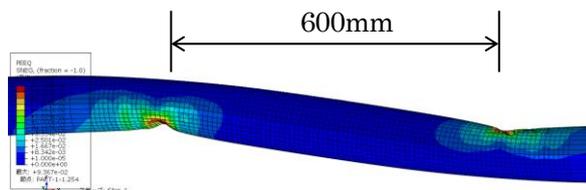


図-13 管体変形図 (ケース2)

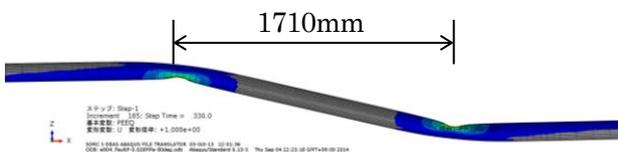


図-14 管体変形図 (ケース3)

図-10に地盤変形図、図-11～図-14にケース1～ケース3の管体変形図を示す。図-11～図-14が示すように、管路に断層変位を与えると管体に屈曲部が明確に現れ、塑性ヒンジが形成されていることがわかる。この塑性ヒンジ間距離は $L_1=1710\text{mm}$ 、 $L_2=600\text{mm}$ 、 $L_3=400\text{mm}$ となっており、地中実験を行ったケース1およびケース2を比べると実験値よりも解析値の方が若干小さな値となった。

(3) 比較結果

表-2には地中実験およびFEM解析の結果一覧を、また図-15には地盤反力係数と塑性ヒンジ間距離の関係をそれぞれ示す。図-15から推定式、FEM解析、地中実験の塑性ヒンジ間距離は、ケース1では推定式の値が若干大きくなっているものの、全体として概ね一致しており、推定式より求められる塑性ヒンジ間距離は実用上問題のない精度であると考えられる。

表-2 結果一覧 (塑性ヒンジ間距離)

| | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|-------|--------|-------|-------|
| 地中実験 | 1900mm | 780mm | — |
| FEM解析 | 1710mm | 600mm | 400mm |
| 推定式 | 2330mm | 734mm | 414mm |

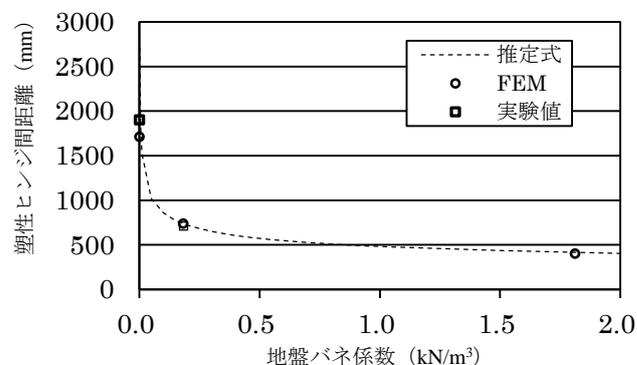


図-15 地盤反力係数と塑性ヒンジ間距離の関係

6. まとめ

本報では、簡易的に塑性ヒンジ発生位置を求めるために基本モデルを構築し、微分方程式から推定式を誘導した。また、この推定式の有効性を確認するため、地中実験およびFEM解析を実施した。この結果、推定式は実用上問題のない精度で実験値およびFEM解析値と整合しており、提案する推定式が有効であることを確認した。

今回の検討では地盤剛性をパラメータとして検討したが、今後は管路の剛性をパラメータとした場合についても実験およびFEM解析から有効性の確認を行う必要があると考える。

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) 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、2012

STUDY OF THE PLASTIC HINGE POSITION OF BURIED STEEL PIPE ON FAULT DISPLACEMENT

Nobuhiro HASEGAWA, Junji KIYONO

Nowadays, there had been experimental and numerical analysis research about large deformation behavior of pipelines in crossing faults, but there had been few researches on the countermeasures. Therefore, as a countermeasure for water pipeline for crossing faults, we have developed a steel pipe for fault (SPF) which is capable of maintaining the water flow function and to avoid the cracks by providing a wave-shaped pipe section initially. It has been observed that a pipeline in a crossing fault generates a Z-shaped deformation. In order to absorb the bending deformation effectively, the wave-shaped pipe sections are installed in the positions where the plastic hinges occur. However, a numerical analysis has to be performed simultaneously, to identify the plastic hinge positions. Therefore, it is important to create a simple practical math-formula, in order to take a countermeasure for fault efficiently. This paper shows a math formula for identifying the plastic hinge positions, based on the results of deformation of buried steel pipe on fault displacement, according to the split-box experiments and numerical analysis.