

第 I 部門

断層を横切る地中埋設管の挙動に関する数値解析的研究

京都大学工学部 学生員 ○鈴木 秀弥 京都大学大学院 正会員 清野純史
京都大学大学院 正会員 古川愛子

1. 研究の目的

2018 年現在, 日本の水道普及率は 97% を超えており, 我々の生活を常に支えてくれている. また災害の際に, 命をつなぐ水を通す水道管は最も重要なライフラインの一つであるといえる. 一方近年では, 熊本地震をはじめとする地表地震断層を伴う地震が発生しており, 断層変位による地中埋設管の被害は大変多い. 特に断層変位が埋設管に与える影響はとて大きく, 引張や圧縮変形とともに大きな曲げ変形を伴う (写真 1).

写真 1 断層変位による被害¹⁾

そこで先行研究²⁾では, 断層変位による管路の曲げ変形を抑制する断層横断用耐震鋼管が開発された. これは鋼管にあらかじめ曲げ変形を起こしやすい山形の波形部を設けることで曲げ変形を誘導し, 座屈変形を防ぐものである. この変形を抑制する波形部の設置間隔については, Chang 式から導くことができる³⁾とされているが, Chang 式では軸力を無視しているため, 断層と埋設管の交差角 (断層角度) の影響が考慮されていない. そこで本研究では, 簡易的な有限変形解析を行うことで断層角度がどのように埋設管の変形に影響を及ぼすのか, その挙動傾向の把握を研究の目的とした.

2. Chang の式について

断層対策管路の 1 つとして開発された断層用鋼管では, 断層変位による座屈変形を効率よく吸収するために最大曲げモーメント発生位置に波形部を設けることが望ましいと考えられている. そこで, 埋設管の断層変位による最大曲げモーメントの発生位置を簡易的に求める理論推定式が導出されている²⁾. 地盤条件は以下を仮定している.

- ・ 断層面の左右の地盤は断層面に対して対称
- ・ 断層角度は 90° とし軸力は無視
- ・ 管路に働く土圧は管路のたわみに比例する
- ・ 断層変位量は $2\delta_p$

管路の変形イメージ図を図 1 に示す. 原点を点 O にとり, そこから水平方向に x 軸, 鉛直方向に y 軸をとる. $x=0$ が断層面である. 原点における管路の変位量は $-\delta_p$ となる. $x > 0$ の区間においてたわみの微分方程式 (1) を解く.

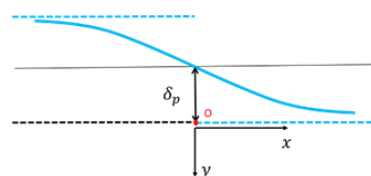


図 1 管路の変形イメージ図

$$-EI \frac{d^4 y}{dx^4} - ky = 0 \quad (1)$$

ここで, y : 管路のたわみ量 (mm)

EI : 曲げ剛性 (kN・mm²)

k : 地盤反力係数 (kN/mm³) とおくと

式(1)の一般解は次のようになる. ($\beta = \sqrt[4]{k/4EI}$)

$$y(x) = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad (2)$$

また境界条件を以下のように設定する.

条件 1: $x = \infty$ で管のたわみ量は $y \approx 0$ とする.

条件 2: $x = 0$ で管のたわみ量は $y = -\delta_p$ とする.

条件 3: 対称条件から $x = 0$ において $M = 0$.

これらより, たわみ $y(x)$, 曲げモーメント $M(x)$, 最大曲げモーメント発生位置 LM は以下のようになる.

$$y(x) = -\delta_p e^{-\beta x} \cos \beta x \quad (3)$$

$$M(x) = 2EI\beta^2 \delta_p e^{-\beta x} \sin \beta x \quad (4)$$

$$LM = \frac{\pi}{4\beta} \quad (5)$$

3.有限要素解析

様々な断層角度下における埋設管の挙動把握と Chang 式の妥当性の検証のために有限要素解析を行った。解析モデルは埋設管を梁要素、地盤を

表 1 解析パラメータ

管径 R	2000mm
弾性係数 E	200kN/mm
鉛直ばね定数	3.6kN/mm
水平ばね定数	1.8kN/mm
要素数	2500 個
1 要素の長さ	10mm

ばねで表現した有限変形解析である (図 2)。断層変位はばねに強制変位を与えることで表現した。解析パラメータは表 1 に示す。解析ケースは、y 方向への断層変位が 1000, 2000, 3000mm の 3 ケース、断層角度 α が 90° , 63° , 45° の 3 ケースの 9 ケース (A1~C3) である (表 2)。

4.解析結果

図 3~11 に埋設管の変形図, M 図, N 図の解析結

表 2 断層変位全 9 ケース

変位 (mm)	1($\alpha = 90^\circ$)		2($\alpha = 63^\circ$)		3($\alpha = 45^\circ$)	
	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直	水平
A	1000	0	1000	500	1000	1000
B	2000	0	2000	1000	2000	2000
C	3000	0	3000	1500	3000	3000

果と Chang 式の比較を $x>0$ について示す。変形図, M 図ともに断層角度 90° の場合は全ケースにおいて Chang 式と解析結果に精度の高い一致が見られた。一方で断層角度が浅くなると解析における曲げモーメントが全体的に大きくなり誤差が大きくなっていくことが確認できた。また N 図から断層角度が浅く、断層変位が大きいほど管路に大きな圧縮力が加わることが分かった。この軸力の誤差から、断層角度の浅い場合で M 図に誤差が生じたと考えられる。しかし、最大曲げモーメント発生位置 LM は断層角度が変化してもほぼ変わらないため、Chang 式が LM を求める手法として有効であると考えられる。

5.参考文献

- 1) 日本水道産業新聞社：断層を横断するパイプラインの被害写真集—最近の地震被害の分析—, 2003
- 2) 長谷川延広：断層横断管路の耐震設計手法に関する研究, 京都大学博士論文, 2016

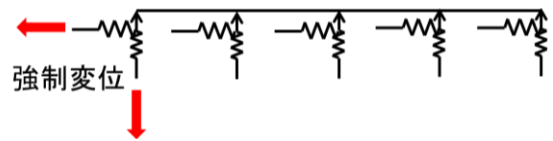


図 2 解析モデルのイメージ図

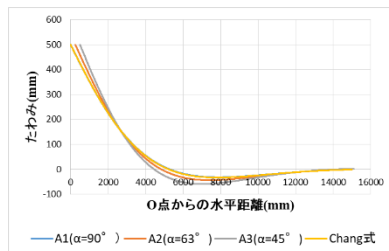


図 3 CaseA の変形図

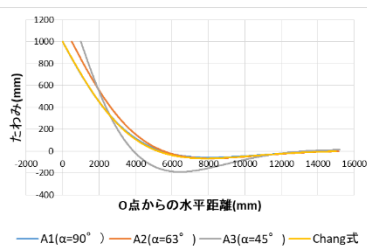


図 4 CaseB の変形図

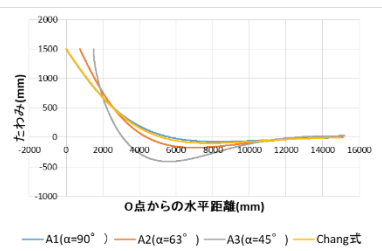


図 5 CaseC の変形図

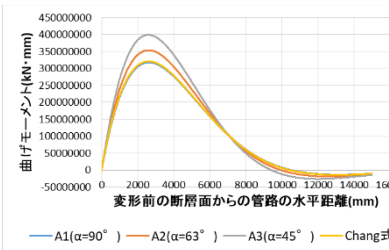


図 6 CaseA の M 図

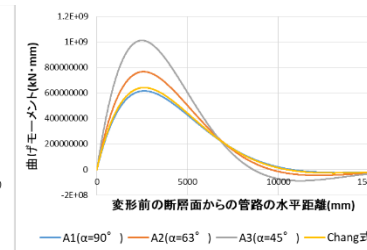


図 7 CaseB の M 図

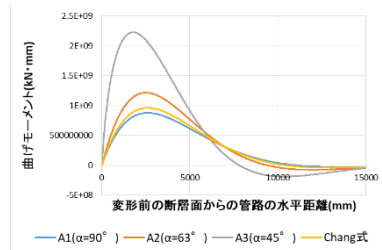


図 8 CaseC の M 図

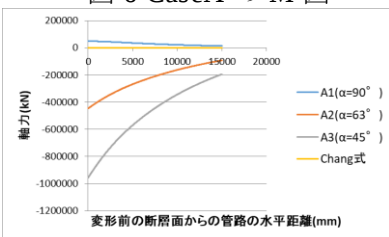


図 9 CaseA の N 図

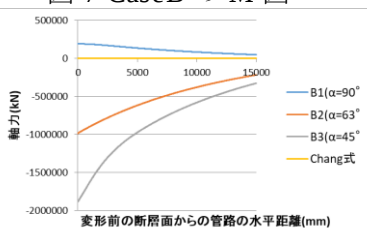


図 10 CaseB の N 図

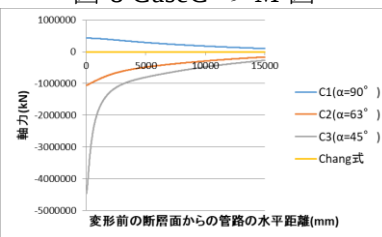


図 11 CaseC の N 図