

第 I 部門

常時荷重による水道管路の管体ひずみについて

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○久保田 丈司
 京都大学大学院工学研究科 正会員 清野 純史
 京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子
 大沼水道技術研究所 正会員 大沼 博幹
 POLITEC 協会 正会員 大室 秀樹

1. 研究の背景と目的

水道施設耐震工法指針¹⁾の管路の耐震設計では、常時荷重（内圧、自動車荷重、温度変化、不同沈下など）によるひずみと地震動によるひずみを合算して耐震性を評価している。ところが、この常時荷重による管体ひずみについては、水道配水用ポリエチレン管（以降青ポリ管と呼ぶ）を用いて行った地中埋設下における実験結果と日水協のモデル計算式に従って算出した結果には大きな差がある。その理由の一つとして、埋設管路に対する計算において地盤が管路の変形を拘束する効果が入り込んでいないことが挙げられる。埋設管の耐久性や耐震性を正しく評価するためには、より正確な常時荷重による管体ひずみを予測することが重要であると考え。そこで本研究では、特に軸ひずみに大きく影響する内圧と温度変化について管軸方向の地盤ばねを導入することで周辺地盤の影響を取り入れた定式化を行った。そして、得られた提案式と実験結果を比較して、提案式によるひずみ推定精度とその妥当性を検証することを本研究の目的とする。

2. 管体発生ひずみの定式化

(1) 日水協モデル計算式

内圧と温度変化のそれぞれによる日水協モデルひずみ計算式¹⁾は以下のように定められている。

a) 内圧による軸方向ひずみ

$$\varepsilon = \frac{P(D-t)}{2tE} \nu \quad (1)$$

ここに、 ε ：軸ひずみ、 P ：内圧、 ν ：ポアソン比、 D ：管外径、 t ：管厚、 E ：弾性係数である。

b) 温度変化による軸方向ひずみ

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (2)$$

ここに、 α ：管の線膨張係数、 ΔT ：温度変化である。

(2) 内圧による軸ひずみの定式化

周辺地盤による拘束を考慮した内圧による軸方向ひずみの定式化を行う。そこで、図1に示すような地盤ばねを用いた管路モデルを考える。図1の点 x における微小区間の応力作用を図2に示す。ここで点 x における管の伸び u は2つの要素に分けることができ、管軸方向に働く応力による伸びを u_1 、内圧に起因するポアソン効果による伸びを u_2 とし、その和を管の伸びとする。ここに、 $\sigma(x)$ は点 x における軸方向応力、 $f(x)$ は点 x における地盤ばねによる力である。

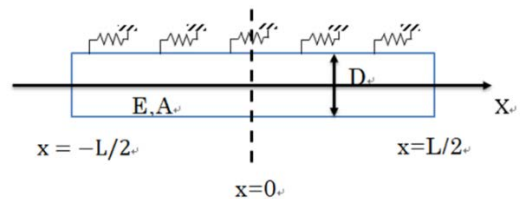


図1 地盤ばねを用いた管路モデル

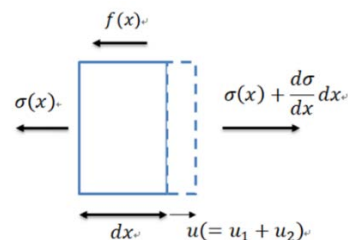
図2 点 x 近傍の微小要素の応力作用

図2から力のつり合い式を立てて整理すると、以下のような式が成り立つ。

$$\frac{d^2 u_1}{dx^2} - \frac{\pi D k_H}{EA} \left(u_1 + \frac{\sigma_\theta}{E} \nu x \right) = 0 \quad (3)$$

ここに、 k_H ：水平方向地盤反力係数、 σ_θ ：円周方向応力、 A ：管の断面積である。

$k^2 = \frac{\pi D k_H}{EA}$, $\alpha = k^2 \frac{\sigma_\theta}{E} \nu$ とおくと、式(3)は以下のような非同次の微分方程式に変形できる。

$$\frac{d^2 u_1}{dx^2} - k^2 u_1 = \alpha x \quad (4)$$

境界条件： $x = 0$ において $u = 0$ ， $x = \frac{L}{2}$ において $\sigma(L/2) = -P$ とし、 $u = u_1 + u_2$ であることを考慮すると次式の解が得られる。

$$u = \frac{\sigma\left(\frac{L}{2}\right) + \sigma_\theta v}{kE} \cdot \frac{\sinh kx}{\cosh \frac{kL}{2}} \quad (5)$$

これを x で微分すると次式のような点 x における内圧による軸方向ひずみが求まる。

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = \frac{\sigma\left(\frac{L}{2}\right) + \sigma_\theta v}{E} \cdot \frac{\cosh kx}{\cosh \frac{kL}{2}} \quad (6)$$

(3) 温度変化による軸方向ひずみの定式化

温度変化による軸ひずみも同様に図1の管路モデルを用い、また管の伸び u を、軸方向に働く応力による伸び u_1 と温度変化による膨張による伸び $\alpha \Delta T x$ の和とすると、 $u = u_1 + \alpha \Delta T x$ となる。

境界条件： $x = 0$ において $u = 0$ ， $x = \frac{L}{2}$ において $u = 0$ とし、式(4)に代入すると最終的に以下のような解が得られる。

$$u = \frac{\alpha \Delta T}{k} \cdot \frac{\sinh kx}{\cosh \frac{kL}{2}} \quad (7)$$

これを x で微分すると次式のような点 x における温度変化による軸ひずみが求まる。

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = \alpha \Delta T \cdot \frac{\cosh kx}{\cosh \frac{kL}{2}} \quad (8)$$

3. ひずみ測定実験概要

図3に示すような埋設管に冷水及び温水を循環させることで内圧、温度変化によるひずみの測定を行った。内圧は水压 1.0MPa を負荷して測定している。定式化では両端の治具をフリーの状態として計算している。また温度変化の測定では、両端の治具をフリーの状態です約 25℃ の温度変化を発生させてひずみの測定を行った²⁾。

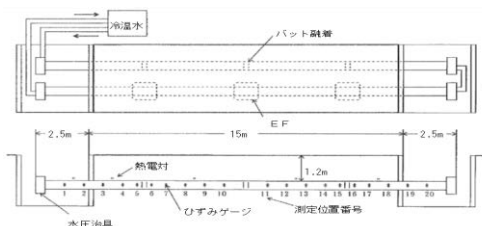


図3 温度変化のひずみ測定実験概略図²⁾

4. 実験結果との比較

本研究で導出した提案式、実験値、及び日水協モデル計算式の3つによる青ポリ管の管体ひずみを比較したものが表1である。表より周辺地盤の拘束を考慮しない日水協モデルにより算出したひずみが他の2つと比べて過大であることがわかる。また表2～4はひずみ計算で使用した諸元である。

表1 青ポリ管の管体ひずみ比較

	提案式 [%]	実験値 [%]	日水協 [%]
内圧	0.012	0.015	0.229
温度変化	0.0049	0.001	0.300

表2 計算に用いる諸元³⁾

外径 D [m]	管厚 t [m]	管長 L [m]	弾性係数 E [kN/m ²]
0.09	0.0082	15	1.0×10^6

表3 内圧に関する諸元³⁾

内圧 P [MPa]	ポアソン比 ν	水平地盤反力係数 k_H [kN/m ³]
1.0	0.46	2.0×10^4

表4 温度変化に関する諸元³⁾

温度変化 ΔT [°C]	管の線膨張係数 α [/°C]
25	1.2×10^{-4}

5. 結論

本研究では、常時荷重のうち管軸方向の変形が卓越する内圧と温度変化に着目して、周辺地盤の影響を取り入れた定式化を行い、実験結果と比較することでその有用性を検証した。その結果、周辺地盤の拘束を考慮していない日水協モデルの計算式はかなり過大なひずみを発生させることがわかった。

参考文献

- 1) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，pp291-301，1997.
- 2) 配水用ポリエチレンパイプシステム協会耐震性評価委員会：委員会資料，2021.11.12.
- 3) 水道配水用ポリエチレン管の耐震性評価検討委員会：水道配水用ポリエチレン管の耐震設計の手引き（資料編，耐震設計事例集），pp.127-129，2018年3月.