

地震動を受ける埋設パイプラインの変形量算定手法

東京ガス株式会社 正会員 ○三津谷 維基

1. はじめに

高圧ガス導管耐震設計指針^[1](以下, ガス耐震)には, 埋設された直管に地震動が作用した場合に管に生じるひずみの算定式^[2]が示されているものの, 直管の一部に変形特性が異なる部位が存在する場合は対象としていない. また, 弾完全塑性体の応力-ひずみ関係を仮定していることから, 塑性域における加工硬化特性を考慮した変形量の算定も不能である.

このような場合において, 有限要素解析による求解は有効であるものの, 多種多様な諸元を有した管材に対して逐一変形解析を実行することは, 実務上困難となる場合が多い. この度, 地震動を受ける部材の変形量を算定する方程式を新たに導出し, 上記の問題を解決するに至ったため, その概要を以下に示す.

2. 想定事象と変形量算定手法

図1のように正弦波状の地盤変位が作用する場合を想定する. 地震動を受ける長延長の直管の中央に変形特性が異なる部位(図1ではバネとして示す)が存在し, その荷重-変位関係が既知の場合を想定する.

作用する地盤変位との間に生じる相対変位により, 直管には軸方向の地盤拘束力が作用する. これは直管に発生する軸力 F の変化を意味するため式1が成立する(D :外径, τ :単位表面積あたりの軸方向地盤拘束力). ここで τ は, 管と地盤の相対変位 δ の関数である.

$$\frac{dF}{dx} = -\pi D \tau(\delta) \quad (1)$$

管と地盤の相対変位 δ は, 作用する地盤変位と管の移動量 u の差で表される. 正弦波状の地盤変位分布の場合, 式2が成立する. L は地盤変位の波長, U_h は最大地盤変位量である.

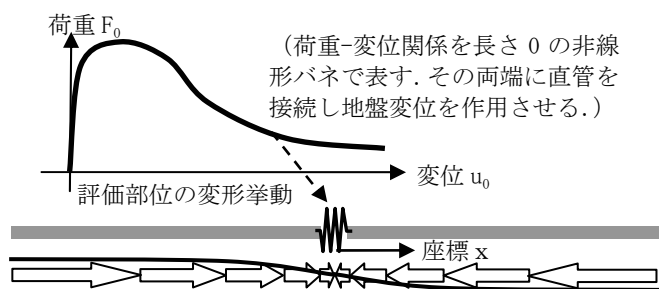


図1 地盤変位の作用

$$\frac{dF}{dx} = -\pi D \tau \left(-U_h \sin \left(\frac{x}{L} 2\pi \right) - u \right) \quad (2)$$

次に, 管の移動量 u は原点における管の移動量 u_0 と原点から位置 x までのひずみの積分値の和で表される(式3). ここで, 原点における管の移動量 u_0 は, 座屈部などの変形特性が異なる部位が存在することにより生じる移動量, つまり, 純粋な軸方向変形(式3の右辺第2項で求められる変形)以外に起因する移動量を意味する.

$$u = u_0 + \int_0^x \varepsilon dx \quad (3)$$

応力-ひずみ関係を $\sigma(\varepsilon)$ とすると, 式4の関係より式5が導かれる. S は管の断面積(定数)である.

$$F = S \cdot \sigma(\varepsilon) \quad (4)$$

$$\frac{dF}{dx} = S \cdot \frac{d}{dx} \sigma(\varepsilon) = S \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (5)$$

ここで式3より, 式6が成立する.

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (6)$$

これを式5に代入し, 式7が得られる. 式2および式7より, 正弦波状の地盤変位を想定した一般形として式8が導かれる(ただし $d\sigma/d\varepsilon \neq 0$).

$$\frac{dF}{dx} = S \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (7)$$

$$\frac{d^2 u}{dx^2} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = -\frac{\pi D}{S} \cdot \tau \left(-U_h \sin \left(\frac{x}{L} 2\pi \right) - u \right) \quad (8)$$

安全側の評価結果を得るため $x=L/4$ において拘束がないものとする. 荷重0つまり $\varepsilon = du/dx = 0$ である. また, 式3より $x=0$ では $u=u_0$ である. これらの境界条件を満たす $x=0$ でのひずみ ($du/dx = \varepsilon$) を求めれば, これを応力に変換し断面積を乗じることにより $x=0$ における作用荷重, すなわち, 図1でバネとして表した変形特性の異なる部位に作用する荷重が算定される.

算定には数値積分を用いる. 計算手順を以下に示す.

- ① $x=L/4$ における移動量 u として適当な値 $u_{L/4}$ を仮定する.
- ② 既知となっている $du/dx = \varepsilon$ と, 設定した応力-ひずみ関係から $d\sigma/d\varepsilon$ を求める.
- ③ 式8により

キーワード 耐震性, 埋設線状構造物, ガス導管, 地盤拘束力

連絡先 〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 1-7-7 東京ガス パイプライン技術センター

d^2u/dx^2 を求める。④ x を微減させた際の du/dx を前ステップの d^2u/dx^2 と du/dx から、 u を前ステップの du/dx と u から求める。⑤ ②～④を $x=0$ になるまで繰り返す。⑥ 算出された $x=0$ における u の値が u_0 と等しくなるような $u_{L/4}$ の値を収束計算により求める。

以上より、 $x=0$ つまり評価対象部位に作用する荷重 F_0 と変位 u_0 や $x=0 \sim L/4$ における軸力 F の分布等が算定可能である。

3. 妥当性検証

3.1 変形特性が一樣な場合

地震動を受けた一樣な直管に生じるひずみの算定を行った。一樣な直管では $u_0=0$ である。想定すべき地震動特性は図2に示すように地盤の固有周期に依存する形で設定した^[1]。本手法による算定結果を、ガス耐震に示される算定例と合わせて図3に示す(なお、数値積分の際の分割数は100とし、収束計算にはMS-Excelのソルバー機能を用いた)。図3に示すように、本手法により得られた管ひずみは、有限要素解析結果と一致した。

3.2 変形特性が異なる部位を有する場合

図1の中央に設定する変形特性が異なる部位の例として、図4に破線で示す2種類の荷重-変位関係を仮定した。変形特性が異なる部位を対象とする場合には、原点における管の移動量 u_0 をいくつか設定し、それぞれの u_0 に対応する荷重 F_0 を算出する。得られた荷重- F_0 と変位- u_0 を図4に実線で示す。破線と実線が交わる点があいを意味する。図4より、荷重-変位関係Aでは固有周期によらず1mm程度の微小な変形に留まるのに対し、Bでは固有周期0.8～1.0sにおいては交点が存在せず大きな変形に至るという結果が得られた。

一方、同様の状況を想定した有限要素解析結果を図5に示す。図4に示した結果と同様、Aでは1mm程度の微小な変形に留まるのに対し、Bでは0.8～0.9sの固有周期において大きな変形に至るという結果が得られた。

以上より、本提案手法により、正弦波状の地盤変位が作用した場合に生じる変形量を、有限要素解析と同等の精度で算定できることが確認された。

4. まとめ

正弦波状の地盤変位が作用した場合を想定した直管の変形量を、有限要素解析に比して簡便に算定できる手法を新たに考案した。本手法は、評価対象となる配管系の一部に変形特性が異なる部位が存在する場合にも適用でき、また、材料の加工硬化特性をも考慮することが可能である。

参考文献

- [1] 日本ガス協会, 高圧ガス導管耐震設計指針, 2000.
- [2] 小池, 埋設パイプラインの地震時ひずみ評価, 土木学会論文報告集, No. 331, pp. 13-27, 1983.

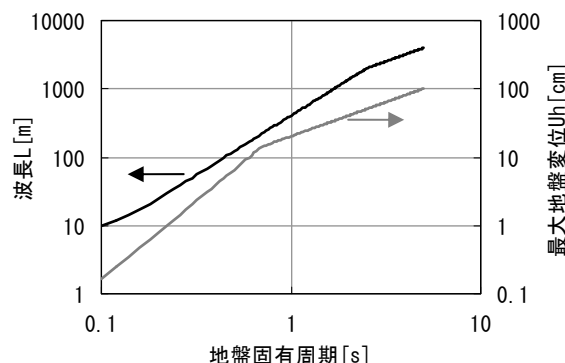


図2 想定した地盤変位波長と最大変位

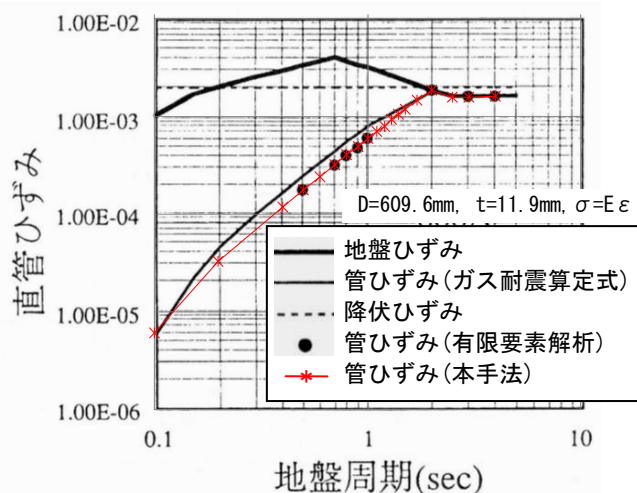


図3 変形特性が一樣な場合のひずみ算定結果

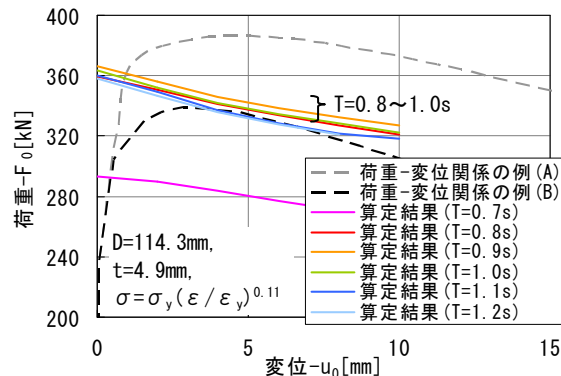


図4 変形特性が異なる部位を対象とした算定例(本手法)

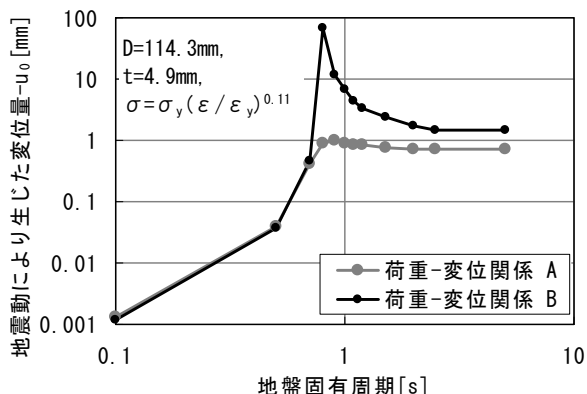


図5 変形特性が異なる部位を対象とした算定例(有限要素解析)