

## I - B449 材料非線形を考慮した埋設パイプラインの耐震設計

N K K 正会員 鈴木 信久  
 新日本製鐵 正会員 竹内 貴司  
 早稲田大学 フェロー 濱田 政則

## 1 緒言

石油パイプライン技術規準(1974)<sup>1)</sup>および水道施設耐震工法指針・解説(1979)<sup>2)</sup>では、地盤反力特性および鋼管材料特性の線形性を前提として、応答変位法による耐震設計式を規定している。この指針は地震動レベル1を対象としているが、地震動レベル2を考慮した新しい耐震設計では、地盤反力特性および鋼管の材料特性の非線形性を考慮した設計式が必要となる。本文では、水道施設耐震工法指針の改訂に際して提案した埋設パイプラインの非線形応答計算の方法について報告する。

## 2 計算方法の概要および前提条件

真っ直ぐなパイプに対してせん断波が斜めに入射する場合、パイプと地盤の軸方向変位は図1(a)のように表される。また、地盤反力特性および材料の線形性を仮定した場合、パイプに作用する摩擦力は図1(b)のように分布する。パイプと地盤が滑ることを考慮して、地盤反力特性を弾完全塑性のバイリニアモデルで表すと、パイプに作用する摩擦力は図1(c)のように分布する。図で、摩擦力が一定値を示している部分が滑り領域であり、この領域では、パイプと地盤の間に滑りが生じており、パイプには最大摩擦力 $\tau_{cr}$ が外力として作用している。

今年度改訂された水道施設耐震工法指針・解説(1979)<sup>3)</sup>では、地震動レベル2に対する設計用速度応答スペクトルとして、 $S_{vmax}=100\text{cm/sec}$ が規定されている。地盤反力特性として、パイプの軸方向への地盤剛性係数を $K_1=C_1\gamma V_s^2/g$ 、最大摩擦力を $\tau_{cr}=0.1\text{kgf/cm}^2$ と仮定し、 $N=5$ の沖積世粘性土に対し呼び径1000, 2000, 3000mmの溶接鋼管の滑り領域の割合を計算すると図2のようになる。ここに、 $C_1$ : 係数、 $\gamma$ : 地盤の単位体積重量、 $V_s$ : せん断弾性波速度、 $g$ : 重力加速度である。

図に示すように、地盤の固有周期が0.3~2.0秒の範囲では、パイプの90%以上が滑り領域となっている。このことは、ほぼパイプ全体が滑っていることになるので、パイプに作用する摩擦力分布を図1(d)のように安全側に表すことができる。

## 3 材料の非線形性を考慮した応答計算

水道設計指針の地震動レベル2に対して、地盤の歪み $\varepsilon_g$ とパイプの歪み $\varepsilon_p$ をFEMで計算した一般的な傾向を図3に示す。

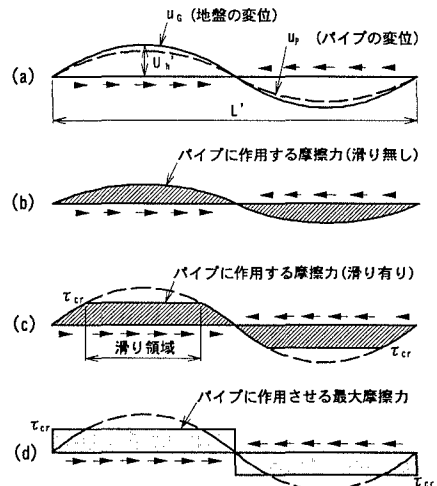


図1 パイプに作用する摩擦力分布

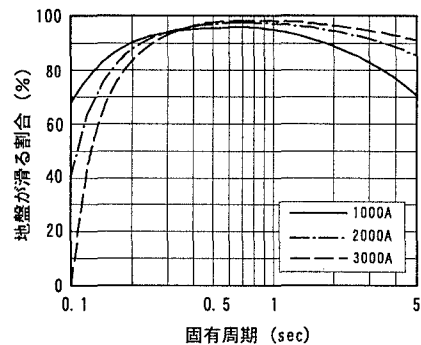


図2 溶接鋼管の滑り領域の割合

キーワード: 埋設管、耐震設計、応答変位法、非線形、弾塑性設計

連絡先: 〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1 NKKエンジニアリング研究所 Tel/044-322-6234 Fax/6521  
 〒169 東京都新宿区大久保3-4-1 早稲田大学理工学部土木工学科 Tel/03-3208-0349 Fax/0349

図に示すように、 $\varepsilon_G$ は $S_v$ に対応して三直線で表され、 $\varepsilon_p$ も三直線で表される。しかし、 $\varepsilon_p$ と $\varepsilon_G$ の三直線は物理的な意味が異なり、 $\varepsilon_p$ の三直線は、パイプが弾性域にある領域、部分的に降伏した領域、地盤の歪みと一致した領域に対応している。

パイプの全長に沿って最大摩擦力 $\tau_{cr}$ が作用する場合、パイプに発生する最大軸力 $N_{max}$ は(1)式で表され、パイプが弾性的場合には、パイプの最大軸ひずみ $\varepsilon_{pmax}$ は(2)式で表される。

$$N_{max} = \pi D \tau_{cr} L' / 4 = \pi D \tau_{cr} L / (2\sqrt{2}) \cdots \cdots (1)$$

$$\varepsilon_{pmax} = \pi D \tau_{cr} L / (2\sqrt{2} E A) = L / \xi \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $D$ ：パイプの径、 $L'$ ：地震動の見かけの波長、 $L$ ：地震動の波長、 $E$ ：パイプの弾性係数、 $t$ ：パイプの厚さを表

し、 $\xi = 2\sqrt{2} E t / \tau_{cr}$ である。

(2)式をパイプの降伏歪みと等値して、波長について整理すると、パイプが降伏する限界の波長 $L_y$ が次式のような

$$L_y = \xi \varepsilon_y \cdots \cdots (3)$$

さらに、パイプが降伏した後の接線係数を $E_2 = \kappa E$ で表すと、パイプが部分的に降伏した場合の $\varepsilon_{pmax}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{pmax} &= \tau_{cr} L / (2\sqrt{2} \kappa E t) + (1 - 1/\kappa) \varepsilon_y \\ &= L / (\kappa \xi) + (1 - 1/\kappa) \varepsilon_y \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

ここに、 $\kappa$ ：パイプの加工硬化係数である。

また、上式の $\varepsilon_{pmax}$ は $\varepsilon_{Gmax}$ を超えないことを条件とすれば、式の適用範囲の上限が定義される。つまり、(4)式の $\varepsilon_{pmax}$ と $\varepsilon_{Gmax}$ を等値して、波長について整理すると次式が得られ、波長が $L_G$ よりも長い領域では、 $\varepsilon_{pmax}$ は $\varepsilon_{Gmax}$ と等しくなる。

$$L_G = \kappa \xi \{ \varepsilon_{Gmax} - (1 - 1/\kappa) \varepsilon_y \} \cdots \cdots (5)$$

以上の適用範囲と設計式を整理すると、表1のようなになる。

#### 4 結 言

地震動レベル2を対象として、地盤反力特性および鋼管材料の非線型を考慮した、埋設パイプラインの耐震設計式について概説した。本文に示した設計式は、式の適用範囲を明確にすることによって、既往の耐震設計式<sup>4)</sup>よりも簡単な形式で表され、図4に示すように精度の高い計算結果が得られている。

改訂された水道指針では、地震動レベル1については滑りを考慮しないことを原則としているが、最大摩擦力として $\tau_{cr} = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ を考慮した場合、地盤の固有周期が0.4～2.0秒の範囲で、パイプの40～80%の長さが滑ることになる。したがって、地震動レベル1に対しても、本文で示したパイプの全長に最大摩擦力を作用させる安全側の設計式が有効である。

参考文献 1) (社)日本道路協会：石油パイプライン技術規準，1974。 2) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1979。 3) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997。 4) (社)日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針，1983。

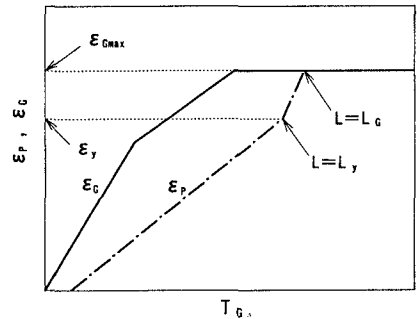


図3 FEM解析による基本解のモデル

表1 非線形性を考慮した耐震設計式

| 波長：L               | パイプの軸歪み： $\varepsilon_{pmax}$                                 |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|
| $L \leq L_y$       | $\frac{L}{\xi}$                                               |
| $L_y < L \leq L_G$ | $\frac{L}{\kappa \xi} + (1 - \frac{1}{\kappa}) \varepsilon_y$ |
| $L_G < L$          | $\varepsilon_{Gmax}$                                          |

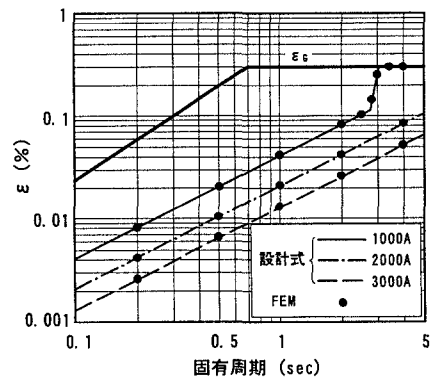


図4 耐震設計式とFEM解の比較