

I - 425

埋設パイプラインの長柱座屈

NKK 正会員 鈴木 信久

NKK 正会員 松山 英治

1 まえがき

埋設パイプラインの地震被害の一つに、長柱モードの座屈(図1)があり、国内では、新潟地震(1964)、日本海中部地震(1983)、北海道南西沖地震(1993)で確認されている。このような地震被害は、地盤変状によってパイプラインに圧縮力が発生するためである¹⁾²⁾。本論文では、溶接パイプラインを対象として後座屈挙動を解析し、パイプラインの軸力と変形量の関係を検討する。

2 解析の前提条件

埋設パイプラインの座屈後の変形状況を図1に示す。解析の前提条件として、次のような前提条件を設定する。①パイプは弾性体とする。②管軸直角方向の地盤反力は分布荷重とし、上向きと下向きの荷重強度は独立とする。

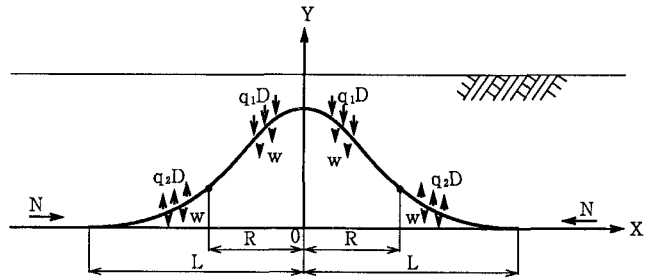


図1 溶接パイプラインの座屈後の変形

3 埋設パイプラインの後座屈解析

座標系を図1のように定義すると、 $0 \leq x \leq R$ ではパイプの鉛直変位が水平変位よりも大きくなり、 $R \leq x \leq L$ では水平変位が鉛直変位よりも大きくなる。このような場合、パイプに作用する最大地盤反力が $x = R$ を境界として変化するため、前者では下向き、後者では上向きとなる。したがって、座屈後のパイプの釣合方程式は次式のように表される。

$$y_1'' + \kappa^2 y_1 = -\gamma_1^3 (\frac{1}{2} R^2 - R L + \frac{1}{2} x^2) + \frac{1}{2} \gamma_2^3 (L - R)^2 \quad (0 \leq x \leq R) \quad (1)$$

$$y_2'' + \kappa^2 y_2 = \gamma_1^3 R (L - x) + \frac{1}{2} L (L - 2R) \gamma_2^3 - x (x - 2R) \quad (R \leq x \leq L) \quad (2)$$

ここに、 $\kappa = \{N/(EA)_p\}^{1/2}$ 、 N :パイプの軸力、 V : $x = L$ における鉛直反力、 R :パイプの軸変位と鉛直変位が等しい点の x 座標、 y_1 : $0 \leq x \leq R$ における鉛直変位、 y_2 : $R \leq x \leq L$ における鉛直変位、 $\gamma_1 = \{(w + q_1 D)/(EI)_p\}^{1/3}$ 、 $\gamma_2 = \{(w + q_2 D)/(EI)_p\}^{1/3}$ 、 q_1 : $0 \leq x \leq R$ における単位面積あたりの最大地盤反力、 q_2 : $R \leq x \leq L$ における単位面積あたりの最大地盤反力。

境界条件として $y_1'(0) = 0$ 、 $y_2(L) = 0$ 、 $y_2'(L) = 0$ を考慮し、さらに $x = \pm R$ における連続条件として、 $y_1(R) = y_2(R)$ 、 $y_1'(R) = y_2'(R)$ を考慮して上記の微分方程式を解くと、座屈後のパイプの変形が求められる。したがって、パイプの最大鉛直変位 $y_{\max}$ は(3)式のように表され、座屈荷重と最大鉛直変位の関係は(4)式のように表される。

$$y_{\max} = y_1(0) = \frac{\gamma_1^3}{\kappa^4} \{C_{AA} + 1 - \frac{\kappa_R^2}{2} + \kappa_R \kappa_L + \frac{\gamma_2^3}{2} (\kappa_L - \kappa_R)^2\} \quad (3)$$

$$\frac{\kappa^3}{\gamma_1^3} = \left(\frac{\kappa^4}{\gamma_1^3}\right)^{3/4} \frac{1}{(\gamma_1^3)^{1/4}} = \left\{ \frac{2 C_{AA} + 2 - \kappa_R^2 + 2 \kappa_R \kappa_L + \gamma_2^3 (\kappa_L - \kappa_R)^2}{2 \gamma_1 y_{\max}} \right\}^{3/4} \quad (4)$$

4 数値計算例

計算例として、150Aモデル（呼び径150mm, 外径=165.2mm, 管厚=5.0mm）をとりあげ、管軸直角方向の地盤反力特性の低減率をパラメータにしたパイプラインの変形曲線を図2に示す。ただし地盤反力特性は、高圧ガス導管耐震設計指針³⁾の値を適用し、 $k=1.89\text{kgf/cm}^3$ 、 $v_{cx}=1.0\text{cm}$ とした。図に示すように、地盤反力特性を低減させない場合（ $k=1.0k$ ）、パイプの変形領域は6~10mであるが、反力特性を低減させるに従って、 $k=0.1k$ では12~20m、 $k=0.01k$ では20~30mと増加している。

さらに、高圧ガス導管で一般的に使用されているパイプラインの挙動と比較するため、600Aモデル（600, 609.6, 9.5）および750Aモデル（750, 762.0, 10.3）をとりあげ、それぞれの管径に対する鉛直変位の増加に伴う軸力の変化を図3に示す。これらの図によると、各管径では地盤反力特性を低減させるに従って軸力が低減しているが、管径の増加に伴って、軸力も増加している。

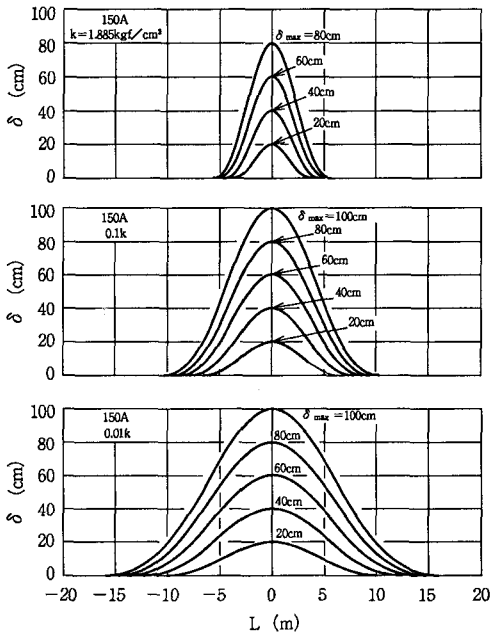


図2 変形曲線に及ぼす地盤反力特性の影響

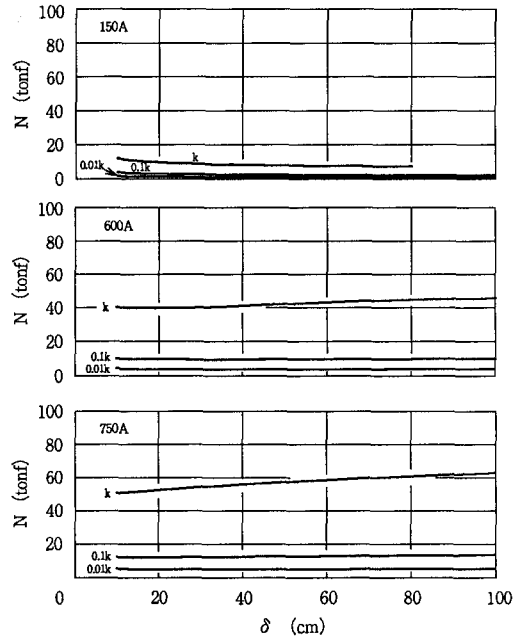


図3 管径による軸力の変化

5 まとめ

本論文では、溶接パイプラインを対象として長柱モードの座屈解析を行い、埋設パイプラインの変形曲線に及ぼす地盤の反力特性の影響と、軸力に及ぼす管径の影響を調べた。ただし、埋設パイプラインの後座屈解析では、パイプの軸力を独立変数としているため、液化化に伴って発生する地盤変状との関係については検討していない。この点に関しては、埋設パイプラインの耐震設計を実施するにあたって、耐震対策の必要性を判断する重要なポイントとなるため、別途検討が必要である。

参考文献

- 1) Meyersohn W.D. and O'Rourke, T.D. : "Pipeline Buckling Caused by Compressive Ground Failure During Earthquake," NCEER-91-0001, Third US-Japan Workshop on Liquefaction, pp.471-488, 1991.
- 2) Kyriakides, S., Yun, H.D. and Yew, C.H. : "Buckling of Buried Pipelines Due to Large Ground Movements," ASME, PVP-Vol.77, pp.140-150, 1983. 3) (社)日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針, 1982.