

I - 130

液状化地盤の側方移動による埋設パイプラインの曲げ変形

NKK 正会員 鈴木信久

NKK 正会員 矢野達夫

NKK 正会員 松山英治

1 まえがき

砂地盤の液状化により、地盤には様々なパターンの永久変位が発生する¹⁾。このうち、地盤の永久変位が埋設パイプラインの軸と直交する水平方向に発生する流動パターンを側方移動と呼んでいる。このように地盤が側方移動することによって、埋設パイプラインには曲げ変形が発生する。本研究では、液状化地盤の側方変位分布をシンプルな三角関数で定義し、パイプラインの曲げ変形を地盤の変位曲線で近似できる「撓み性パイプライン」の力学的特性を明らかにするとともに、地盤の反力特性との関係を検討する。

2 側方移動する液状化地盤の変位分布関数

図1に示すように、水平方向への地盤変位はパイプラインの軸と直角方向に発生するものと仮定し、地盤の変位分布を(1)式のように余弦関数で近似する^{2, 3)}。

$$v_s(x) = \delta/2 \{1 + \cos(\lambda x)\} \quad (1)$$

ここに、 δ ：最大側方地盤変位、 $\lambda = 2\pi/W$ 、 W ：側方地盤変位の幅（地盤の移動領域の幅）を表している。

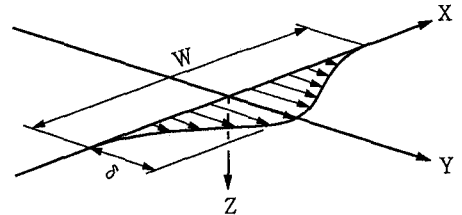


図1 液状化地盤の側方変位分布

3 埋設パイプラインの曲げ変形解析

直線パイプラインと地盤反力特性を線形モデルで仮定すると、基礎微分方程式は次式のように表される。

$$EI v_p(x) \quad (4) = -K_N \{v_p(x) - v_s(x)\} \quad (0 \leq x \leq W/2) \quad (2) \quad EI v_p(x) \quad (4) = -K_N v_p(x) \quad (W/2 < x) \quad (3)$$

ここに、 v_p 、 v_s ：パイプラインおよび地盤の側方変位、 K_N ：液状化領域における管軸直角方向地盤反力係数、 $K_N = k_N D$ 、 D ：パイプ外径、 $\gamma = (K_{N0}/4EI)^{1/4}$ 、 K_{N0} ：非液状化領域における管軸直角方向地盤反力係数。

境界条件として、変位の対称性と地盤の移動領域と静止領域の境界における連続性を考慮すると、(2)式は(4)式のように整理され、(3)式は(5)式のように表される。

$$v_p(x) = C_1 \sin(\beta x) \sinh(\beta x) + C_2 \cos(\beta x) \cosh(\beta x) + C_3 x^2 + C_4 + (C_5 x^2 + C_6) \cos(\lambda x) + C_7 x \sin(\lambda x) \quad (4)$$

$$v_p(x) = \exp[-\gamma(x-W/2)] \{C_8 \sin(\gamma x) + C_9 \cos(\gamma x)\} \quad (5)$$

ただし、式中の係数 $C_1 \sim C_9$ および定数 $P_1 \sim P_9$ は次式で与えられる。 $C_1 = \{(P_7 + \gamma P_6)P_2 + (P_7/2 - \gamma^2 P_5)P_4\} / (P_1 P_4 - P_2 P_3)$ 、 $C_2 = -\{(P_7 + \gamma P_6)P_1 + (P_7/2 - \gamma^2 P_5)P_3\} / (P_1 P_4 - P_2 P_3)$ 、 $C_3 = 0$ 、 $C_4 = \delta/2$ 、 $C_5 = 0$ 、 $C_6 = \{2\beta^4 / (\lambda^4 + 4\beta^4)\} \delta$ 、 $C_7 = 0$ 、 $C_8 = C_1 \{\sin \xi \sinh \xi + \beta/\gamma (\sin \xi \cosh \xi + \cos \xi \sinh \xi)\} + C_2 \{\cos \xi \cosh \xi + \beta/\gamma (\cos \xi \sinh \xi - \sin \xi \cosh \xi)\} + P_5$ 、 $C_9 = C_1 \sin \xi \sinh \xi + C_2 \cos \xi \cosh \xi + P_5$ 、 $P_1 = \gamma^2 \{\sin \xi \sinh \xi - \beta^2/\gamma^2 \cos \xi \cosh \xi + \beta^3/\gamma^3 (\sin \xi \cosh \xi - \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_2 = \gamma^2 \{\cos \xi \cosh \xi + \beta^2/\gamma^2 \sin \xi \sinh \xi + \beta^3/\gamma^3 (\sin \xi \cosh \xi + \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_3 = \beta \gamma \{\cos \xi \sinh \xi + \sin \xi \cosh \xi + 2\beta/\gamma \cos \xi \cosh \xi - \beta^2/\gamma^2 (\sin \xi \cosh \xi - \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_4 = \beta \gamma \{\cos \xi \sinh \xi - \sin \xi \cosh \xi - 2\beta/\gamma \sin \xi \sinh \xi - \beta^2/\gamma^2 (\sin \xi \cosh \xi + \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_5 = C_4$ 、 $P_6 = 4\pi^2 C_6 / W^2$ 。

ここに、 $\beta = (K_N/4EI)^{1/4}$ 、 $\lambda = 2\pi/W$ 、 $\xi = \beta W/2$ 。

4 撓み性パイプラインの定義

さて、直線パイプラインの曲げ変形を表す(4)式および(5)式は線形解であるため、パイプラインおよび全ての地盤反力が線形領域にある場合に適用される。したがって、管軸直角方向の地盤反力特性を弾性～完全塑性のパイリニアモデルで表すと、線形解の適用範囲は、埋設パイプラインと地盤の最大相対変位が地盤

反力の降伏変位 u_y を超えない条件によって決定される。パイプラインと地盤の最大相対変位はモデルの対称軸 ($x=0$) で発生するため、(4)式に $x=0$ を代入することにより、適用範囲が(6)式のように求められ、さらに(7)式のように変形される。したがって(7)式により、「撓み性パイプライン」の力学的特性が地盤反力係数とは独立に最大反力の関数として定義される。

$$ED^3 t \leq \frac{K_N W^4}{\pi^5 \{\delta / u_y - 2\}} \approx \frac{K_N u_y W^4}{\pi^5 \delta} \quad (6)$$

$$ED^2 t = \frac{K_N u_y W^4}{\pi^5 \delta} = \frac{q_u W^4}{\pi^5 \delta} \quad (7)$$

5 側方変位分布を考慮した撓み性パイプラインの定義

地盤の側方変位分布を(1)式のように表すと、最大変位 δ (m) と側方変位の幅 W (m) の関係は(8)式および(9)式のように表される^{2,3)}。これらを(6)式に代入すると(10)、(11)式が得られる。

$$\delta = W/100 \quad (0 < W \leq 150\text{m}) \quad (8)$$

$$\delta = 1 + W/300 \quad (150 \leq W < 500\text{m}) \quad (9)$$

$$ED^2 t \leq \frac{q_u W^4}{\pi^5 \delta} = \frac{100 q_u W^3}{\pi^5} \quad (0 < W \leq 150\text{m}) \quad (10)$$

$$ED^2 t \leq \frac{q_u W^4}{\pi^5 \delta} = \frac{300 q_u W^4}{\pi^5 (W+300)} \quad (150 \leq W < 500\text{m}) \quad (11)$$

6 撓み性パイプラインの特性限界

(10)式および(11)式に基づいて描いた撓み性パイプラインの特性限界線を図2に示す。特性限界線とは、(10)式および(11)式で等号が成立する関係を表しており、図のように、 q_u と W の関係について表されている。また、撓み性パイプラインは特性限界線の上側の領域の条件を満足するものである。

図2の特性限界線は、呼び径100mm (外径=114.3mm, 管厚=4.5mm)、150mm (165.2, 5.0)、300mm (318.5, 8.4)、600mm (609.6, 12.7) について描いたものである。ただし、地盤の側方変位幅は500m以下の範囲に限定してある。

図2から以下のことが読み取れる。

- ① 100～600mmの何れも、 W の増加に伴って q_u は低下しており、各特性限界線は平行である。
- ② 呼び径が大きなパイプラインほど特性限界線は上に位置している。したがって呼び径が大きいほど、一定の最大地盤反力 q_u に対して限界変位幅 W は大きくなり、一定の W に対して q_u は大きくなる。
- ③ 特性限界線は最大地盤反力の変化に対しては比較的鈍感であるが、呼び径の変化に対しては敏感である。

7 まとめ

側方への地盤変位を受ける直線パイプラインの曲げ変形を解析し、パイプラインの力学的特性を表すパラメータ (E, D, t) と側方に変位する液状化地盤の特性を表すパラメータ (W, δ, q_u) の関係から、埋設パイプラインが地盤の変形に追従する「撓み性パイプライン」の力学的特性を明らかにした。これにより、液状化に伴って発生する側方移動が埋設パイプラインに及ぼす影響を定量的に把握することができ、液状化対策の必要性を検討するためにも有用な情報を提供することができるものと考えられる。

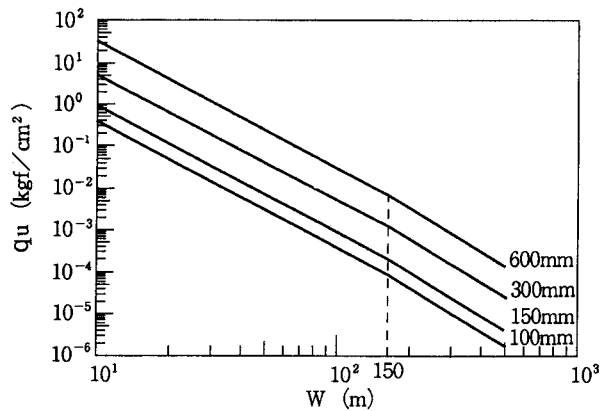


図2 撓み性パイプラインの特性限界線図

参考文献 1) (財)地震予知総合研究振興会：-日米共同研究-地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究，昭和63年度報告書，821p.，1989. 2) 鈴木信久，中根宏行：'埋設パイプラインの耐震設計における地盤の永久変位分布のモデル化'，構造工学論文集，Vol.36A，1365-1376，1989. 3) Suzuki, N and Hagio, A : "Safety Assessment of Welded Pipelines Undergoing Large Ground Deformation," Proc. of PL Div., ASCE, 108-119, 1990.