

# (174) 液状化地盤の側方変位による埋設パイプラインの変形

NKKエンジニアリング研究所 鈴木 信久  
 同 上 矢野 達夫  
 同 上 松山 英治

## 1 まえがき

砂地盤の液状化により、地盤には様々な永久変位が発生する<sup>1)</sup>。このような永久変位のうち、地盤の永久変位が埋設管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に移動することによって、埋設管には曲げ変形が発生する。本研究では、まず、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て、埋設管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」の力学的特性について検討し、次に、埋設管に作用する液状化地盤の抵抗力の測定実験を土槽を用いて行い、埋設管の変位速度が地盤のばね特性に及ぼす影響および地盤の変位速度が「撓み性パイプライン」の変形におよぼす影響について検討した。

## 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、側方への地盤変位は埋設管の軸と直角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<sup>2,3)</sup>。

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

ここに、 $\delta$ :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。

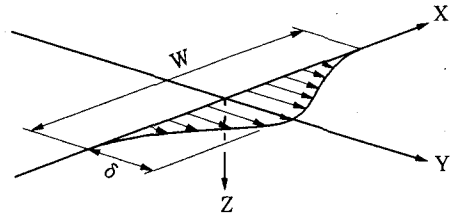


図1 液状化地盤の側方変位分布

## 3 埋設管の曲げ変形解析

埋設管と地盤反力特性の両方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。

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

ここに、 $K_N$ :液状化領域における管軸直角方向地盤反力係数、 $K_N = k_N D$ 、 $D$ :埋設管外径、 $\gamma = (K_N / 4EI)^{1/4}$ 、 $K_{N0}$ :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、変位分布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。 $C_1 = \{(P_7 + \gamma P_6)P_2 + (P_7/2 - \gamma^2 P_5)P_4\} / (P_1 P_4 - P_2 P_3)$ 、 $C_2 = -\{(P_7 + \gamma P_6)P_1 + (P_7/2 - \gamma^2 P_5)P_3\} / (P_1 P_4 - P_2 P_3)$ 、 $C_3 = 0$ 、 $C_4 = \delta/2$ 、 $C_5 = 0$ 、 $C_6 = \{2\beta^4 / (\lambda^4 + 4\beta^4)\} \delta$ 、 $C_7 = 0$ 、 $C_8 = C_1 \{\sin \xi \sinh \xi + \beta/\gamma (\sin \xi \cosh \xi + \cos \xi \sinh \xi)\} + C_2 \{\cos \xi \cosh \xi + \beta/\gamma (\cos \xi \sinh \xi - \sin \xi \cosh \xi)\} + P_5$ 、 $C_9 = C_1 \sin \xi \sinh \xi + C_2 \cos \xi \cosh \xi + P_5$ 、 $P_1 = \gamma^2 \{\sin \xi \sinh \xi - \beta^2/\gamma^2 \cos \xi \cosh \xi + \beta^3/\gamma^3 (\sin \xi \cosh \xi - \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_2 = \gamma^2 \{\cos \xi \cosh \xi + \beta^2/\gamma^2 \sin \xi \sinh \xi + \beta^3/\gamma^3 (\sin \xi \cosh \xi + \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_3 = \beta \gamma \{\cos \xi \sinh \xi + \sin \xi \cosh \xi + 2\beta/\gamma \cos \xi \cosh \xi - \beta^2/\gamma^2 (\sin \xi \cosh \xi - \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_4 = \beta \gamma \{\cos \xi \sinh \xi - \sin \xi \cosh \xi - 2\beta/\gamma \sin \xi \sinh \xi - \beta^2/\gamma^2 (\sin \xi \cosh \xi + \cos \xi \sinh \xi)\}$ 、 $P_5 = C_4$ 、 $P_6 = 4\pi^2 C_6 / W^2$ 、 $P_7 = 2C_3 + (\pi^2 - 2)C_5 + 4\pi^2 C_6 / W^2 - 4\pi C_7 / W$ 。ここに、 $\beta = (K_N / 4EI)^{1/4}$ 、 $\lambda = 2\pi/W$ 、 $\xi = \beta W/2$ 。

#### 4 撓み性直管モデルの定義

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図2に示すように弾性～完全塑性のバイリニアモデルで表すと、線形解の適用範囲は、埋設管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。埋設管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、「たわみ性直管」が力学的に定義される。

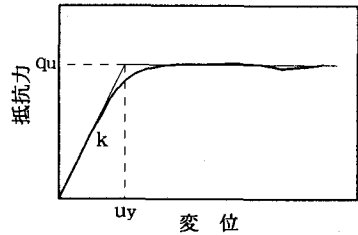


図2 バイリニアモデルの定義

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

この時の埋設管の最大ひずみも、モデルの対象軸( $x=0$ )で発生し(4)式より(7)式ようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_p = & -D/2\{2C_1 \beta^2 \cos(\beta x) \cosh(\beta x) - 2C_2 \beta^2 \sin(\beta x) \sinh(\beta x) + 2C_3 + C_6 \cos(\lambda x) (2 - \lambda^2 x^2) \\ & - 4C_5 \lambda x \sin(\lambda x) - C_6 \lambda^2 \cos(\lambda x) + 2C_7 \lambda \cos(\lambda x) - C_7 \lambda^2 \sin(\lambda x)\} \end{aligned} \quad (7)$$

#### 5 側方変位分布を考慮したたわみ性直管の定義

さて地盤の側方変位分布を(1)式のように表した場合、最大変位( $\delta$ (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<sup>3, 4)</sup>。したがって、これらを(6)式に代入すると(10)式と(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3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100A(外径=114.3mm, 管厚=4.5mm)、150A(165.2, 5.0)、300A(318.5, 8.4)、600A(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3から以下のことが観察される。

- ①どの口径でも、 $W$ 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口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。したがって口径が大きいほど、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、口径の変化に対しては敏感である。

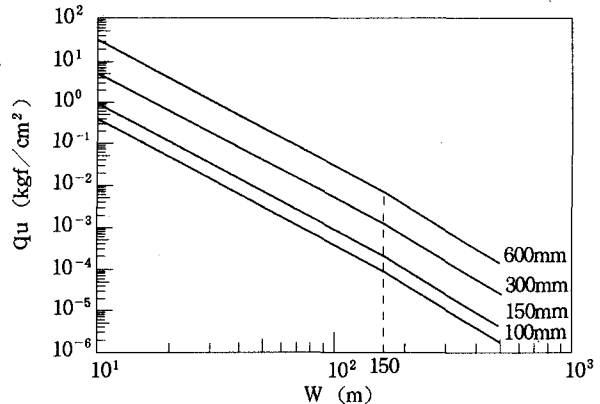


図3 撓み性パイプラインの特性限界線図

## 7 埋設管に作用する液状化地盤の抵抗力測定実験の概要

実験装置の全体概要を図4に示す。実験土槽は、幅1.5m、深さ1.5m、長さ2.0mの鋼製で、側壁にはアクリル板を取り付けた。また土槽の下部には、実験地盤を液状化させるための加圧室を設けた。実験地盤を液状化させるため、定格吐出量 $0.2\text{m}^3/\text{min}$ 、全揚程30mの水中ポンプを使用し実験土槽底部の加圧室に注水した。これにより、土槽内の実験地盤に上昇流を発生させながら間隙水圧を上昇させた。液状化した実験地盤の抵抗力を測定する円柱供試体は外径50mm、長さ30cmのアルミ管を使用し埋設深さは管中心位置で200mmとした。液状化地盤内に設置した円柱供試体は、強制動揺装置から下げた支持アームに接続し強制動揺装置を水平に最大変位20cmで移動させた。

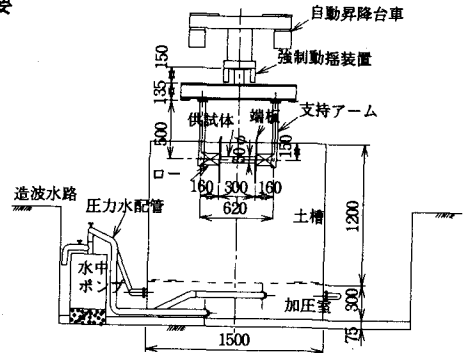


図4 実験装置概要図

## 8 実験結果

### (1) 埋設管に作用する抵抗力～変位曲線

変位速度が $V=0.43, 3.70, 8.84\text{cm}/\text{sec}$ の3ケースについて、代表的な荷重～変位曲線を図4～図6に示す。ただし、この実験時における土槽底部での過剰間隙水圧比は、 $0.827\sim 0.877$ であり、完全液状化状態にはなっていないものと思われる。各変位速度における荷重～変位関係を見ると、 $V=0.43\text{cm}/\text{sec}$ では変形の初期段階において荷重が線形的に増加した後で明確な降伏点が表れ、変位の増加にかかわらず荷重強度はほぼ一定となっている。 $V=3.70\text{cm}/\text{sec}$ について見ると、全体的な傾向は $V=0.43\text{cm}/\text{sec}$ よりも滑らかな曲線となっており、降伏変位の増加と最大荷重の上昇が認められる。 $V=8.84\text{cm}/\text{sec}$ では、さらにその傾向が顕著に表れている。

### (2) 変位速度による地盤ばね特性の変化

ここでは、(1)に示した荷重～変位曲線を図2に示すように、弾性～完全塑性のバイリニアモデルで近似し、バイリニアモデルを表す三つのパラメータ、管軸直角方向地盤反力係数( $k$ )、降伏変位( $u_y$ )、最大地盤抵抗力( $q_u$ )と供試体の変位速度の関係を図8～図10に示す。それぞれについて $V=0\sim 10\text{cm}/\text{sec}$ の範囲で2次曲線で回帰すると(12)～(14)式になる。

$$k = 0.000350V^2 - 0.00699V + 0.0482 \quad (12)$$

$$q_u = -0.000374V^2 + 0.00748V + 0.0364 \quad (13)$$

$$u_y = -0.0352V^2 + 0.7041V + 0.440 \quad (14)$$

埋設管と地盤の相対変位速度に関して基本変位速度として

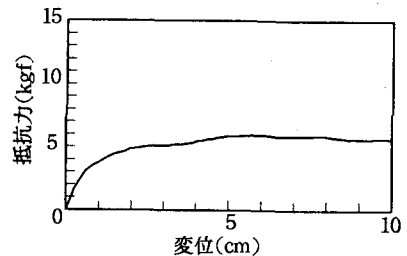


図5 抵抗力と変位の関係( $V=0.43\text{cm}/\text{sec}$ )

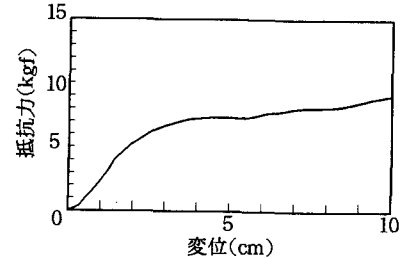


図6 抵抗力と変位の関係( $V=3.70\text{cm}/\text{sec}$ )

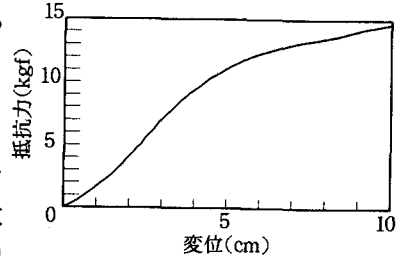


図7 抵抗力と変位の関係( $V=8.84\text{cm}/\text{sec}$ )

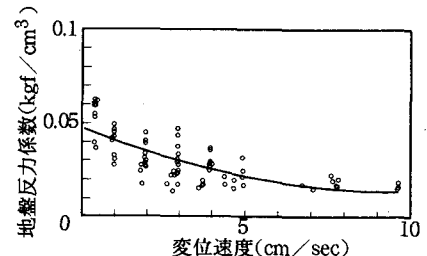


図8 地盤反力係数と変位速度の関係

1.0cm/secを選定し、地盤ばね特性を表す各パラメータ ( $k$ ,  $q_u$ ,  $u_v$ ) の値及びそれらと  $V=10\text{cm/sec}$  における各パラメータの比を表1に示す。各パラメータのうちで  $u_v$  が最も大きく変動している。

### 9 まとめ

側方変位を受ける直線埋設管の曲げ変形解析を行い、埋設管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 ( $W, \delta, q_u$ ) の関係から埋設管が地盤の変形に追従する「たわみ性埋設管」の力学的特性を表した。また、試験土槽内における液状化実験により、液状化地盤中で埋設管 (口径50mm) に作用する地盤ばね特性の変化を、変位速度をパラメータとして調べた。

ここで、呼び径100A, 150A, 300A, 600Aのものについて、最大地盤抵抗力を  $0.0435\text{kgf/cm}^2$  ((13)式に基本変位速度として  $V=1.0\text{cm/sec}$  を代入した。) として (10) 式より限界側方変位幅および (7) 式、(1) 式より最大ひずみについて計算したものを表2に示した。ただし、地盤反力係数 ( $k_{No}$ ) は  $1.885\text{kg/cm}^3$  とし、液状化時による低減率は、図8より  $3/100$  ( $K_N=0.03 \times K_{No}=0.03k_{No} \times D$ ) とした。また、相対変位速度が実験条件の範囲内であれば、変位速度の増加に伴う  $q_u$ ,  $k_N$  の最大増加率は、表1よりそれぞれ、1.697倍、0.320倍であることから限界側方変位幅および埋設管の最大ひずみについて計算したものは、表3のようになる。最大ひずみは、(1) 式より求めたものが、(7) 式より求めたものより常に大きい結果になっている。また、このような側方変位幅の変動は、解析モデルの全体寸法から考えると、余り大きな影響を及ぼしていないことが分かる。

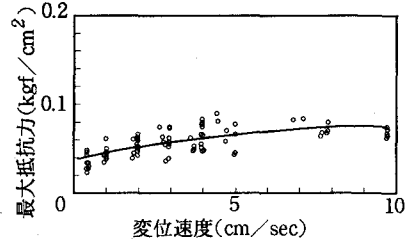


図9 最大抵抗力と変位速度の関係

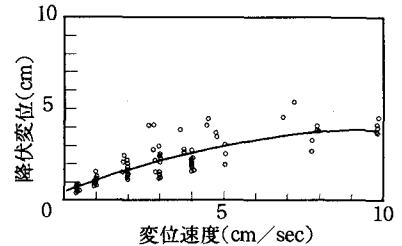


図10 降伏変位と変位速度の関係

表1 地盤ばね特性に及ぼす変位速度の影響

	V (cm/sec)		$V_{10}/V_1$
	1	10	
$k$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.0416	0.0133	0.320
$q_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.0435	0.0738	1.697
$u_v$ (cm)	1.1090	3.9611	3.572

表2 限界側方幅及び埋設管の最大ひずみ ( $V=1.0\text{cm/s}$ )

	W (m)	$\epsilon$ (7)式 (%)	$\epsilon$ (1)式 (%)
100A	20.6	0.036	0.055
150A	27.2	0.050	0.060
300A	50.1	0.061	0.063
600A	88.7	0.068	0.068

表3 限界変位幅及び埋設管の最大ひずみ ( $V=10.0\text{cm/s}$ )

	W (m)	$\epsilon$ (7)式 (%)	$\epsilon$ (1)式 (%)
100A	17.2	0.032	0.066
150A	22.8	0.036	0.071
300A	42.0	0.040	0.075
600A	74.3	0.040	0.081

- 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年度調査・研究報告書, 821p., 1989.  
 2) (財)地震予知総合研究振興会: 1989年ロマ・ブリエタ地震被害調査報告書, 236p., 1990.  
 3) 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, pp. 1365-1376, 1989.  
 4) Suzuki, N and Hagio, A: "Safety Assessment of Welded Pipelines Undergoing Large Ground Deformation," Proc. of PL Div., ASCE, pp. 108-119, 1990.  
 5) 山下裕司, ワラント・ルンテ, 東畑郁生: 液状化した砂地盤が側方流動するときの埋設管の挙動, 第27回土質工学研究発表会, 417, 1992.