
地盤液状化に対する埋設管の変位挙動解析

Seismic Analysis of Buried Pipeline against Liquefaction Hazard

小池 武(Takeshi Koike) 今井 俊雄(Toshio Imai)

要旨：

側方流動を受ける埋設管路の変位挙動を推定するための解析手法を開発した。解析対象は直管、曲管、分岐管であり、地盤液状化にともなって発生した数メートル単位の側方流動に対する管路系の弾塑性挙動を解析する理論式の定式化を行なった。直管については、管材および周辺地盤の弾塑性特性、大変位挙動を考慮した解析手法を開発し、異形管については、簡易解析手法を提案した。数値検討は、全塑性モーメントを超える材端曲げモーメントが作用した場合の曲管たわみ角や側方流動に対する分岐管枝管部の軸ひずみについて行った。

Synopsis：

An analytical method has been developed to predict the structural behavior of buried pipelines which are suffering from lateral spreading in a liquefaction site. The elasto-plastic behavior of pipeline systems including straight pipe and geometrical piping which are installed in the liquefied ground is analyzed and theoretically formulated as a beam structural system. Frictional effect and soil reaction forces are taken into consideration in this analysis. Numerical calculation are conducted for bend pipes and tee-junctions.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Seismic Analysis of Buried Pipeline against Liquefaction Hazard



小池 武
Takeshi Koike
エンジニアリング事業
本部 エネルギー・水
道事業部 エネルギ
ー・水道技術部 主査
(部長)・工博



今井 俊雄
Toshio Inai
エンジニアリング事業
本部 エネルギー・水
道事業部 エネルギ
ー・水道技術部 主査
(課長補)

要旨

側方流動を受ける埋設管路の変位挙動を推定するための解析手法を開発した。解析対象は直管、曲管、分岐管であり、地盤液状化にともなって発生した数メートル単位の側方流動に対する管路系の弾塑性挙動を解析する理論式の定式化を行なった。直管については、管材および周辺地盤の弾塑性特性、大変位挙動を考慮した解析手法を開発し、異形管については、簡易解析手法を提案した。数値検討は、全塑性モーメントを超える材端曲げモーメントが作用した場合の曲管たわみ角や側方流動に対する分岐管枝管部の軸ひずみについて行なった。

Synopsis:

An analytical method has been developed to predict the structural behavior of buried pipelines which are suffering from lateral spreading in a liquefaction site. The elasto-plastic behavior of pipeline systems including straight pipe and geometrical piping which are installed in the liquefied ground is analyzed and theoretically formulated as a beam structural system. Frictional effect and soil reaction forces are taken into consideration in this analysis. Numerical calculation are conducted for bend pipes and tee-junctions.

1 はじめに

地震が発生すると、地震波動による地盤震動が発生すると同時に、液状化危険度の高い砂質地盤では側方流動などの地盤変状が発生する可能性がある。

本論文では、数メートル規模の地盤強制変位が埋設管路に作用した場合の管変位挙動を予測する新しい解析手法を提示する。特に、管の大変形にともなう軸ひずみ評価²⁾に重点を置き、さらに異形管に発生する管ひずみの簡易算定手法を提案する。

2 地盤変状

地盤変状に対する埋設管路の影響を評価するためには、変位の発生する区間(幅)と変位量の双方の情報が必要である。しかしながら、最近の研究成果³⁾では、護岸近傍での変位量について定量的な情報が得られたものの、変位幅の推定については、その予測式を得るには至っていない。

Fig. 1 は 1995 年兵庫県南部地震における埋立地の地盤変状分布を示したものである。各メッシュは 10 m 区画であり、地表面の平面的な変形状態をメッシュのゆがみで表示している。同図によると、地盤変位幅は数 10 m から 100 m にわたって変化しており、かな

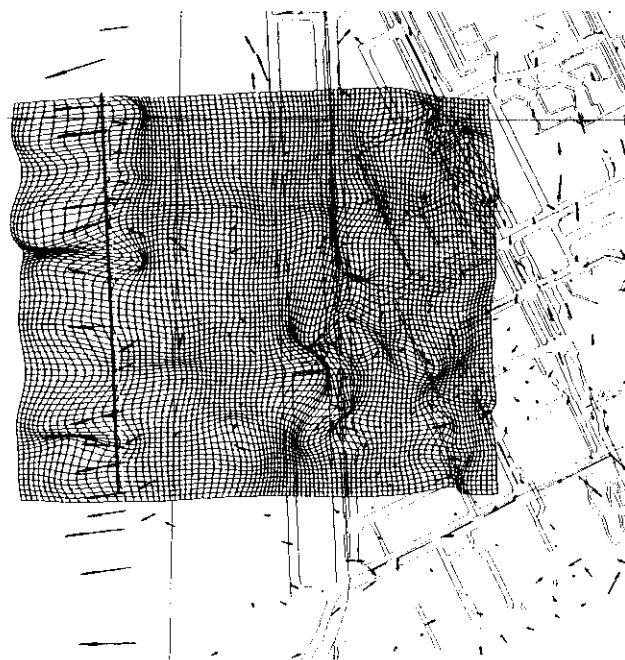


Fig. 1 Spatial ground movements

ずしも一定値に限定できない状況を示している。

以下では、液状化による側方流動が発生する地盤が区間幅 L_w で存在し、側方流動量 Δ_{LT} の変位が発生する場合に、そこを通過する

* 平成9年10月3日原稿受付

埋設管路挙動について検討する。ここでは、埋設管路が液化化層内に敷設されている場合を検討するが、液化化層の上層に敷設されている場合も、上層地盤の物性常数を使用して同様の解析を行なうことができる。

3 側方流動に対する直管の挙動解析

3.1 基本方針

液化化地盤を横断する管路は、管軸直角方向に側方流動を受けると、大きなたわみ変形と軸方向伸びを発生して側方流動変位を吸収しようとする。

このような管路の大変位挙動を解析するために、Fig. 2 に示す解析モデルを提案する。

3.1.1 解析モデル

Fig. 2 は、液化化地盤を横断する管路の左半分の変形状況を示したものである。同図の特徴を列挙すると以下になる。

- (1) 液化化周辺地盤では、弾性状態と塑性状態の地盤領域が発生する。
- (2) 弾性領域では、埋設管路は弾性床土に配置されていると仮定できる。したがって、地盤反力は地盤ばね定数でモデル化できる。
- (3) 塑性領域では、受働土圧に基づく限界地盤反力を上限とする地盤反力が管路に作用する。
- (4) 液化化領域では、受働土圧に基づく限界地盤反力を上限とする地盤反力が管路に作用する。
- (5) 埋設管路位置が液化化層より上層に位置する場合には、液化化地盤の限界地盤反力は塑性領域のそれと一致する。
- (6) 埋設管路は、側方流動により大変形を生じるため、曲げモーメントだけでなく引張力の影響を無視できない。

Fig. 2 に示す k_e, k_p, k_l は、それぞれの地盤における地盤ばね²⁾を示し、 L_e, L_p, L_w はその区間長さである。管変位 Δ は、側方流動による管路中央部のたわみ量であり、 d_c, d_n はそれぞれ液化化地盤、塑性地盤での管路のたわみ量を示している。

Fig. 3 は、弾性領域、塑性領域、液化化領域それぞれの領域における管路に作用する部材力と周辺摩擦力 f_e, f_p, f_l および地盤反力 P_s, P_p, P_l の分布状況を示している。

弾性領域では、地盤反力 P_s は地盤ばねを用いて評価できるが、塑性領域、液化化領域の地盤反力 P_p, P_l はそれぞれの地盤が保有する反力の限界値、すなわち受働土圧に基づく限界地盤反力を採用するためある一定値で表現することになる。

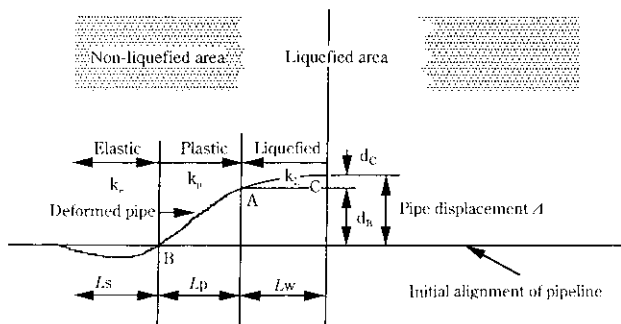


Fig. 2 Pipeline displacement by lateral spreading in the liquefied area

3.1.2 地盤特性

管路に作用する単位幅当りの地盤反力 P_s, P_p が、それぞれ次式で与えられるとする。

$$P_s = q_s D, \quad P_p = q_p D$$

ここで、 D は管口径、 q_s, q_p は単位面積当りの地盤反力であり、それぞれ次式で求められる。

$$q_s = \frac{1}{2}(1 + K_0)\gamma Z, \quad q_p = \gamma Z N_q$$

ただし、 γ は土の単位体積重量、 K_0 は静止土圧係数、 Z は管中心までの埋設深さ、 N_q は耐荷力係数。

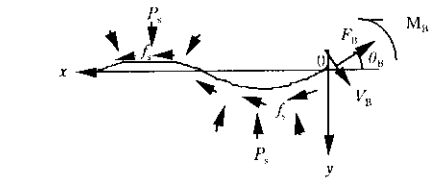
一方、単位幅当りの摩擦係数は、周辺土と管の間の内部摩擦角 ϕ_p を用いて、それぞれ次式で求められる。

$$f_s = \pi D q_s \tan \phi_p, \quad f_p = \pi D q_p \tan \phi_p$$

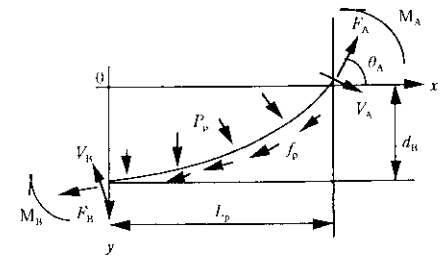
弾性地盤は、弾性床としてモデル化するため、地盤反力を地盤ばね係数で表現する。すなわち、地盤反力とばね係数 k, k_s は Fig. 4 に示すように次式で結ばれる。

$$P_s = k_s y, \quad q_s = k y$$

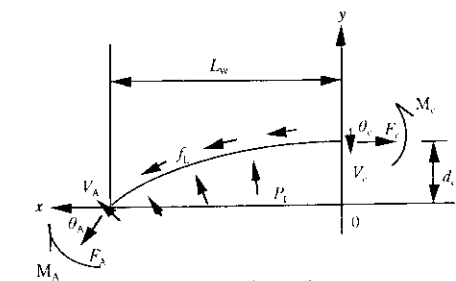
したがって、



(1) Elastic soil ground



(2) Plastic soil ground



(3) Liquefied soil ground

Fig. 3 Loading conditions of pipeline segments in the elastic, plastic and liquefied soil areas

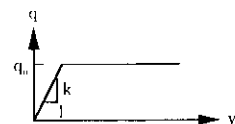


Fig. 4 Soil reaction in the elastic ground

$$k_s = kD$$

となる。

3.2 直線管路の挙動解析

3.2.1 弾性領域

いま、解析を簡略化するため材端に作用する軸力 F_B が対象領域内で一定と仮定する。弾性床土の梁には F_B による軸力が作用するため、管に関する釣合い方程式は次式となる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_s y - F_B \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 E, I は管の弾性係数と断面二次モーメントである。また、上記の方程式は、Fig. 3 に示す材端 B の境界条件を満足しなければならない。

$$y(0) = 0, \quad \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=0} = -\frac{M_B}{EI}, \quad \frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} = \theta_B, \quad \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=0} = -\frac{V_B}{EI}$$

上式を解くと、たわみ曲線と材端部材力が得られる

$$y = \exp(-ax) \frac{\sin(bx)}{b}, \quad M_B = 2a\theta_B EI, \quad V_B = (b^2 - 3a^2)\theta_B EI$$

ただし、

$$a = \sqrt{\lambda_s^2 + \frac{F_B}{4EI}}, \quad b = \sqrt{\lambda_s^2 - \frac{F_B}{4EI}}, \quad \lambda_s = \sqrt[4]{\frac{k_s}{EI}}, \quad L_s = \frac{F_B}{f_s}$$

3.2.2 塑性領域

塑性領域では、管は材端モーメント、軸力、せん断力および中間の地盤反力、摩擦力により釣り合っている。この釣り合い状態にある管の変形形状が弾性曲線で表現できると仮定する。ただし、Fig. 3 の材端 A および B の境界条件として次式を満足しなければならない。

$$y(0) = 0, \quad y'(0) = \theta_B, \quad y(L_p) = -d_B, \quad y'(L_p) = -\frac{M_A}{EI}$$

上式を解くと、

$$\begin{aligned} y &= \frac{\rho_p}{24EI} x^4 + \frac{d_B + L_p \theta_p - \frac{5}{24EI} P_p L_p^4 - \frac{M_A}{2EI} L_p^2}{2L_p^3} x^3 \\ &\quad + \left\{ \frac{M_A}{4EI} - \frac{3(d_B + \theta_B L_p)}{2L_p^2} + \frac{P_p L_p^2}{16EI} \right\} x^2 + \theta_B x \\ \theta_A &= -\frac{P_p L_p^3}{48EI} + \frac{M_A L_p}{4EI} - \frac{3(d_B - \theta_B L_p)}{2L_p} + \theta_B \\ \theta_B &= \frac{-\frac{d_B}{L_p} + \frac{M_A L_p}{6EI} + \frac{P_p L_p^3}{24EI}}{1 - \frac{2}{3} a L_p} \end{aligned}$$

その他の変数 F_A, F_B, V_A は、未知数 d_B, L_p の関数として次式より求められる。

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \cos \theta_B & -\sin \theta_A & -\cos \theta_A \\ \sin \theta_B & \cos \theta_A & -\sin \theta_A \\ d_B \cos \theta_B & L_p \cos \theta_A & -L_p \sin \theta_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_B \\ V_A \\ F_A \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P_p d_B - V_B \sin \theta_B - f_p L_p \\ V_B \cos \theta_B - P_p L_p - f_p d_B \\ M_A - M_B - V_B \sin \theta_B - f_p A_0 - P_p (d_L^2 - d_B^2)/2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで、

$$A_0 = \int_A^B r ds \equiv \frac{L_p d_B}{2}$$

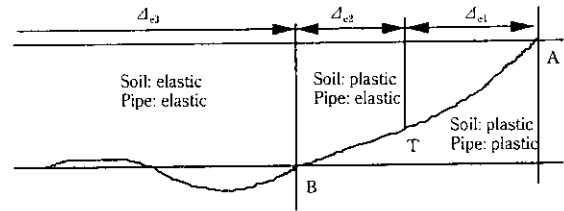


Fig. 5 Compatibility condition in the pipe elongation

3.2.3 液状化領域

管の変形形状は、塑性領域と同様の手法により求めることができる。ただし、液状化地盤の地盤反力は塑性領域の地盤反力に比例して、次式で与えられるとする。

$$P_L = \alpha P_p$$

ここで、 α は液状化層で 1.0 以下の値である。

Fig. 3 の材端 C の境界条件を考慮すると、

$$y(0) = 0, \quad y'(L_w) = \theta_c, \quad y(L_w) = -d_c$$

管変位形状および材端部材力は次式で求められる。

$$\begin{aligned} y &= -\frac{P_L}{24EI} x^4 + \left(\frac{M_A - M_C}{6EIL_w} + \frac{P_L L_w}{12EI} \right) x^3 - \frac{M_A}{2EI} x^2 + \theta_A x \\ d_c &= -\frac{P_L L_w^4}{24EI} + \frac{M_A L_w^3}{3EI} + \theta_A L_w \\ M_A &= \frac{P_L L_w^3}{6} - \frac{2EI\theta_A}{L_w} \\ &\begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & -\cos \theta_c & 0 \\ -d_c \cos \theta_c & -d_c \sin \theta_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_c \\ V_c \\ M_c \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} F_A \cos \theta_A + V_A \sin \theta_A + f_L L_w + P_L d_c \\ F_A \sin \theta_A - V_A \cos \theta_A + F_L d_c - P_L L_w \\ M_A - F_A L_w \sin \theta_A + V_A L_w \cos \theta_A - f_L A_0 + P_L (d_L^2 - d_c^2)/2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3.2.4 適合条件

管の変形形状を弾性曲線と仮定したが、その適合性を満足させるには、Fig. 5 に示すそれぞれの区間のひずみ積分値から得られる伸び量が、管の変形形状を積分して得られる伸び量 Δ_C に一致しなければならない。すなわち、

$$\Delta_C = \Delta_{c1} + \Delta_{c2} + \Delta_{c3} \quad (2)$$

4 側方流動に対する異形管の挙動解析

4.1 曲管

曲管部が液状化区間に配置されて、側方流動を受けた場合には、Fig. 6 に示すように曲管に接続する直管部材端に管軸方向および管軸直角方向にそれぞれ Δ_r, Δ_t の強制変位が作用する。その結果、曲管材端部にも曲げモーメント、軸方向引張力、せん断力が発生して、Fig. 7 に示す曲管のたわみ角 θ_B を生じる。この時、曲管の部材力によるたわみ角 ψ は、次式で求めることができる⁹⁾。

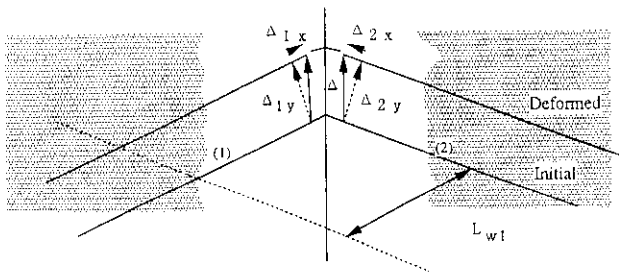


Fig. 6 Bend pipe displacement in the lateral spreading

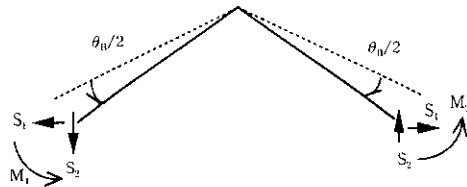


Fig. 7 Deflections of bend pipe

$$\theta_B = \psi \frac{nR^2}{EI} \left\{ \frac{M_2}{R} + S_1 \left(\frac{1 - \cos \psi}{\psi} - \sin \psi \right) - S_2 \left(\cos \psi - \frac{\sin \psi}{\psi} \right) \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 R ：曲率半径、 n ：たわみ係数、また M_2 , S_1 , S_2 は曲管材端に作用する部材力である。

4.2 分岐管

分岐管部が Fig. 8 に示すように液状化区間に配置され側方流動を受けると、主管部は直管とほぼ同様な挙動を示し、枝管部は Δ_N , Δ_L の強制変位を受けることになる。主管部は枝管部の存在による拘束力を付加的に受けるがその影響は小さいと推定される。したがって、分岐管の地震時安全性照査は、枝管部に接続する軸管の材端ひずみ値によってその安全性を判定することができる。

軸直角方向変位 Δ_N による枝管部材端の引張ひずみ ϵ_N は次式で与えられる。

$$\epsilon_N = \frac{\tau_{cr}}{Et} L_{cr}, \quad L_{cr} = \sqrt{\frac{2Et\Delta_N}{\tau_{cr}}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 τ_{cr} , t はそれぞれ管・周辺地盤間のすべり開始せん断応力および管厚である。

一方、軸方向変位 Δ_L による枝管部の曲げ引張ひずみは Fig. 9 に示す変形形状を示す。この時、分岐管の最大ひずみ ϵ_L は次式で求められる。

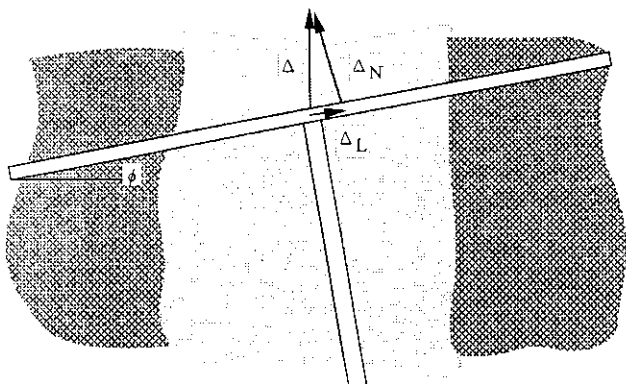


Fig. 8 Displacement of Tee-junction

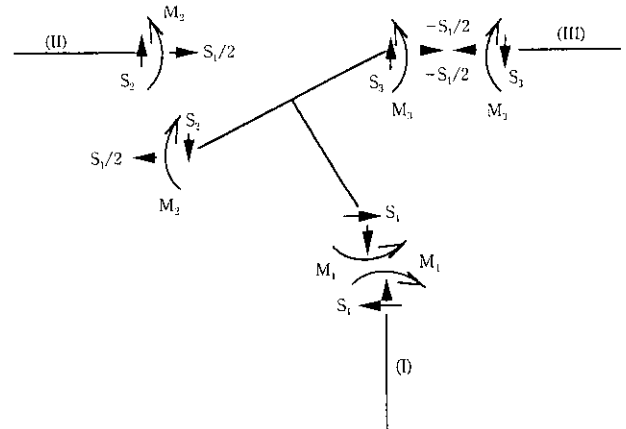


Fig. 9 Loading conditions of Tee-junction

$$\epsilon_L = \frac{M_1 D_1}{2EI_1} + \frac{-S_2 + S_3}{A_1} \dots \dots \dots (5)$$

5 数値検討事例

側方流動を受けた管路異形管部の変位挙動を数値検討する。Fig. 10 は側方流動により曲管に接続する直管材端部の曲げモーメントと曲管のたわみ角 θ_B の関係を (2) 式に従って求めたものである。図中の曲げモーメント M_2 は、Fig. 7 に示す曲管の材端曲げモーメントであり、全塑性モーメント M_p を基準にして 1~1.5 倍の値を採用した。また、材端の軸力、せん断力はそれぞれ降伏応力に対応する部材力 S_y の 50% と仮定した。使用したデータは、管口径 D : 609.6 mm, 管厚 t : 12.7 mm, 曲率半径 R : 3D, 降伏応力 σ_y : 41400 N/cm² である。Fig. 10 によると、90° 曲管では曲げモーメントが全塑性モーメントを超えるとたわみ角が 20° 以上となり、一方、90° 以外の曲管では最大 4° 程度に止まっている。このことは、側方流動に対する変位吸収能力の面で 90° 曲管が優れているが、発生する局部ひずみも相当に大きいことを示唆している。

Fig. 11 は、(4) 式に従って地盤変位に対する分岐管枝管部の軸

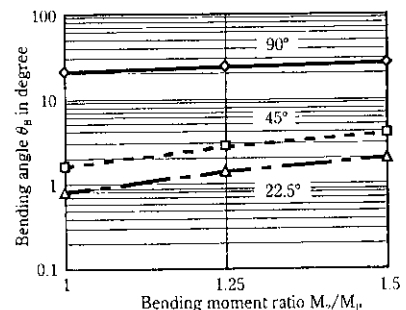


Fig. 10 Bend pipe deflection due to bending moment

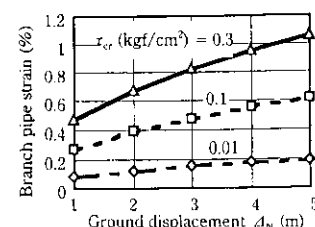


Fig. 11 Axial strain of Tee-junction by lateral spreading

ひずみを推定したものである。同図に示すように、数メートル単位の地盤変状に対して、管と周辺地盤間のすべりを考慮すると、すべり開始せん断応力 τ_{cr} が 2.9 N/cm^2 の場合でもせいぜい1%に止まることがわかる。

6 まとめ

側方流動を受ける埋設管路の変位挙動を推定するための解析手法を開発した。対象とする管路系は直管、曲管および分岐管であり、

直管については管材および周辺地盤の弾塑性挙動を考慮した解析手法を開発し、異形管については簡易解析手法を提案した。得られた成果をまとめると以下の通りである。

- (1) 引張力を考慮した直管の大変位挙動解析手法により、液状化地盤の側方流動によって管路に発生する受働土圧から管路変位を推定する理論式を定式化した。
- (2) 曲管の安全性評価式として曲管のたわみ角算定式を提出し、分岐管の安全性評価式として枝管材端部のひずみ評価式を与えた。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書（耐震設計編）（改訂版）、（1996）
- 2) 小池 武、中野昭三郎、今井俊雄：「埋設管路のひずみ設計法について」、第22回地震工学研究発表会、（1993）、467-470
- 3) 濱田政則、磯山龍二、若松加寿江：「兵庫県南部地震 阪神地区における液状化地盤変状と地盤条件」、地震予知総合研究振興会、（1995）
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針（改訂版）、日本水道協会、（1997）
- 5) 小池 武：埋設パイプラインの耐震解析、川崎製鉄技報、**19**(1987)2、128-133
- 6) T. Koike: "Structural strains of the buried pipeline under seismic risk", Proceedings of the Trilateral Seminar-Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, Taipei (Taiwan), (1985)