

(88) 埋設管路—地盤系の弾塑性解析に関する一考察

防衛大学校 土木工学教室 正員 ○佐藤 絃志
石川 信 隆

1. まえがき 現在の埋設管路に対する地震応答解析法は、地震時外力として地盤変形を考え、地盤ばねを介して管路に作用させるという、いわゆる準静的応答変位法が多く用いられている。従来からこのような応答変位法に基づく埋設管路の耐震性についての研究が数多くなされてきたが、これらの研究はいずれも管体を弾性体、地盤を弾塑性型のばねモデルとして取り扱い、与えられた地盤変形のもとで管路に発生する応力やひずみを算定したものである。しかしながら、最近では配管材料の進歩や実験データの蓄積から、管体に弾性限界を越えた変形やひずみを許す方向になってきており、ガス導管耐震設計指針^{(1)~(4)}（以下ガス導管指針と呼ぶ）では、高圧ガス導管に対してひずみ1%を基準とした設計法が提示されている。設計面では、このように管体の塑性変形を容認する方向に向っているが、解析面ではこれを考慮した埋設管路系の弾塑性解析法がまだ確立されていないように思われる。

本研究は、上記のような観点から埋設管路の耐震性評価に対する基礎的資料を得るため、応答変位法に基づく埋設管路系の効率的な弾塑性解析法の開発を試みないのである。ここでは、まず直線鋼管路を取り上げて、管軸方向に地盤の強制変位を受けるときの埋設管路系の弾塑性解析手法を、線形計画法（LP）を用いて定式化した。次に、数値計算例としてガス導管指針にある埋設管路の諸数値を用いて、管路両端にスネークパイプのような剛性の低い管を用いたときの埋設管路の弾塑性挙動や管路のひずみ分布を調べ、さらに管路両端に強制変位を与えた場合の管路の挙動など、より実際的な問題についても検討した。

2. 線形計画法（LP）による埋設管路の弾塑性解析

解析に当っては、慣用の応答変位法と単純弾性理論の仮定に従うほか、次の仮定を用いる。

(1) 実際の埋設管路は、図-1のように管を棒要素、地盤をばね要素に分割した構造モデルに置換できるものとする。

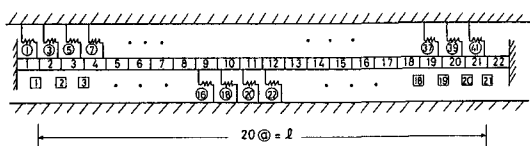


図-1 埋設管路系モデル

(2) 管要素および地盤ばね要素は、図-2(a), (b)に示されるような完全弾塑性型の特性をもつものとする。

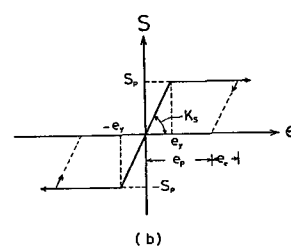
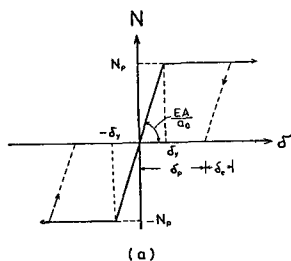


図-2 要素特性
(a) 管の棒要素
(b) 地盤のばね要素

ここでいう弾塑性解析とは、埋設管路にある地盤変位 u_s （ただし、 α = 地盤変位係数、 u_s = 与えられた一定の強制地盤変位）が作用するとき各要素の降伏を逐次追跡しながら系全体の極限状態とそのときの最大地盤変位係数 α_{max} を求める手法である。さて、従来の地盤—構造系の弾塑性解析法⁽⁵⁾を拡張して、埋設管路の解析に必要な基本的条件を増分形式で表わせば表-1のようになる。

式(1)は構造全体のつり合い条件式(⑤)を、式(2)は変形適合条件式(③)を、式(3)は要素内力 ΔN 、 ΔS と弾性内変形 $\Delta \epsilon_e$ 、 $\Delta \epsilon_e$ との関係式(④)を、また、式(4)は要素内変形 $\Delta \epsilon$ 、 $\Delta \epsilon_e$ が弾性内変形 $\Delta \epsilon_e$ 、 $\Delta \epsilon_e$ と塑性内変形 $\Delta \epsilon_p$ 、 $\Delta \epsilon_p$ との和になることを、さらに式(5)は塑性内変形 $\Delta \epsilon_p$ 、 $\Delta \epsilon_p$ が塑性乗数 $\Delta \lambda_N$ 、 $\Delta \lambda_S$ に比例することを示している。次に、式(6)は降伏条件式(⑦)を、式(9)、(10)は管要素および地盤ばね要素の塑性流れ条件(⑧)と意味し、式(10)は除荷(unloading)の影響をも考慮できることを示している。

ただし、 ΔN = 管要素の軸力増分ベクトル； ΔS = 地盤ばね要素の摩擦力増分ベクトル； ΔF = 摩擦カ以外の外力増分ベクトル； Δu = 節点変位増分ベクトル； $\Delta \delta$ 、 $\Delta \delta_e$ = 管要素の軸方向変形増分ベクトルおよび軸方向弾性変形増分ベクトル； Δe 、 Δe_e = 地盤ばね要素の相対すべり変位増分ベクトルおよび相対すべり弾性変位増分ベクトル； C_N 、 C_s = 管要素および地盤ばね要素に関する適合マトリックス； k_N 、 k_s = 管要素および地盤ばね要素の集合剛性マトリックス； $\Delta \delta_p$ 、 Δe_p = 管要素の軸方向塑性変形増分および地盤ばね要素の相対すべり塑性変位増分ベクトル； L_N 、 L_s = 管要素および地盤ばね要素の降伏線の単位外向き法線マトリックス； $\Delta \lambda_N$ 、 $\Delta \lambda_s$ = 管要素および地盤ばね要素の塑性乗数増分ベクトルで、塑性変形増分に対応した量； $\phi_N(\phi_s)$ 、 $\bar{\phi}_N(\bar{\phi}_s)$ 、 $\Delta \phi_N(\Delta \phi_s)$ = 管要素(地盤ばね要素)のそれぞれ現段階、前段階および増分量を示す降伏関数ベクトル； $\bar{N}$ 、 $\bar{S}$ = 前段階での管要素の軸力ベクトルおよび地盤ばね要素の摩擦カベクトル； N_p 、 S_p = 管要素の降伏軸力ベクトルおよび地盤ばね要素の限界摩擦カベクトル。なお、角子 T は転置マトリックスを示す。

表-1の基本的条件はある地盤変位増分 $\Delta \alpha$ ($\Delta \alpha \leq \Delta \alpha_p$: ある要素が降伏してから、次にどこの要素が降伏するまでの地盤変位係数増分)に対して成立するので、 $\Delta \alpha$ を最大化させることによって各要素間の降伏を追跡することが可能となる($\Delta \alpha_p = \max \Delta \alpha$)。すなわち、埋設管路の弾塑性増分解析の基本式を応力法に基づいて定式化すれば表-2のようになる。表-2は、LPのシンプレックス法を用いて解かれるが、現段階における値は、ここで得た増分量に前段階の値を加算することにより表-3のように得られる。

3. 数値計算例および考察

2.で述べた埋設管路系の弾塑性解析手法を用いて、標準的な直線管路の挙動を検討した。この解析では、系全体が極限状態に達するときの崩壊モードと最大地盤変位係数(α_{max})をおめながら、この α_{max} は、埋設管路全体として耐力および変形性能にある強制地盤変位モードの何倍まで耐えられるかを示すパラメータである。なお、ここでいう崩壊モードとは、解析上の極限状態に対応するもので、管体の降伏による崩壊状態と地盤ばねのみが降伏して管路系に最大応力を与えるような極限状態とを指している。

数値計算モデルには、ガス導管指針の計算例と同じSTPY 41とよばれる鋼管(外径: 40.64cm, 肉厚: 0.79cm)を用い、地盤ばね要素に関するデータの内、管表面単位面積当りの管軸方向地盤ばね係数の値には、 $k_s = 0.6 \text{ kg/cm}^3$ を採用した。構造系は、図-1に示すような管路を20等分した有限要素にモデル化した。ただし、計算上は22要素とし、両端の2要素の強度、剛性やその部分の地盤ばねの値を調節することにより

表-1 基本的条件

(E)	$C_N^T \Delta N + C_s^T \Delta S = \Delta F$	(1)
(C)	$C_N \Delta u = \Delta \delta$, $C_s(\Delta u - \Delta \alpha u_s) = \Delta e$	(2a), (2b)
(H)	$\Delta N = k_N \Delta \delta_e$, $\Delta S = k_s \Delta e_e$	(3a), (3b)
	where	
	$\Delta \delta = \Delta \delta_e + \Delta \delta_p$, $\Delta e = \Delta e_e + \Delta e_p$	(4a), (4b)
	$\Delta \delta_p = L_N \Delta \lambda_N$, $\Delta e_p = L_s \Delta \lambda_s$	(5a), (5b)
(Y)	$\phi_N = \bar{\phi}_N + \Delta \phi_N \leq 0$, $\phi_s = \bar{\phi}_s + \Delta \phi_s \leq 0$	(6a), (6b)
	where	
	$\bar{\phi}_N = L_N^T \bar{N} - N_p$; $\Delta \phi_N = L_N^T \Delta N$	(7a), (7b)
	$\bar{\phi}_s = L_s^T \bar{S} - S_p$; $\Delta \phi_s = L_s^T \Delta S$	(8a), (8b)
(P)	$\bar{\phi}_N^T \Delta \lambda_N = 0$, $\bar{\phi}_s^T \Delta \lambda_s = 0$	(9a), (9b)
	$\Delta \phi_N^T \Delta \lambda_N = 0$, $\Delta \phi_s^T \Delta \lambda_s = 0$	(10a), (10b)

表-2 LPによる弾塑性増分解析

Given:	$C_N, C_S, L_N, L_S, N_p, S_p, K_N^T, K_S^T, u_S, \bar{N}, \bar{S}$
Find:	$\Delta N, \Delta S, \Delta u, \Delta \lambda_N, \Delta \lambda_S, \Phi_N, \Phi_S$
Object :	$\Delta \alpha \longrightarrow \text{maximize}$ (11a)
Constraint :	
	$C_N^T \Delta N + C_S^T \Delta S = 0$ (11b)
	$L_N \Delta \lambda_N + K_N^T \Delta N - C_N \Delta u = 0$ (11c)
	$L_S \Delta \lambda_S + K_S^T \Delta S - C_S(\Delta u - \Delta \alpha u_S) = 0$ (11d)
	$L_N \Delta N + (-\Phi_N) = L_N^T \bar{N} - N_p, -\Phi_N \geq 0$ (11e)
	$L_S \Delta S + (-\Phi_S) = L_S^T \bar{S} - S_p, -\Phi_S \geq 0$ (11f)
	$\bar{\Phi}_N^T \Delta \lambda_N = 0, \quad \bar{\Phi}_S^T \Delta \lambda_S = 0$ (11g), (11h)
	$\Delta \Phi_N^T \Delta \lambda_N = 0, \quad \Delta \Phi_S^T \Delta \lambda_S = 0$ (11i), (11j)
	$\Delta \lambda_N \geq 0, \quad \Delta \lambda_S \geq 0$ (11k), (11l)
where	
	$\bar{\Phi}_N = L_N^T \bar{N} - N_p, \quad \bar{\Phi}_S = L_S^T \bar{S} - S_p$
	$\Delta \Phi_N = L_N^T \Delta N, \quad \Delta \Phi_S = L_S^T \Delta S$

表-3

$N = \bar{N} + \Delta N$, $S = \bar{S} + \Delta S$	(12a), (12b)
$u = \bar{u} + \Delta u$, $\alpha = \bar{\alpha} + \Delta \alpha$	(12c), (12d)
$\lambda_N = \bar{\lambda}_N + \Delta \lambda_N$, $\lambda_s = \bar{\lambda}_s + \Delta \lambda_s$	(12e), (12f)

管路の境界条件に対応させている。管軸方向の強制地盤変位としては正弦波状の変位を仮定し、管路に対し1波長および半波長の2種類の変位モードを標準として用いた。

(1) 計算例 1: 継手剛性の違いによる影響

ここでは、長さ100mの管路を対象として、管路両端に継手を考慮した場合と考慮しない場合の計算を行い、継手の有無および継手剛性の違いが管路の弾塑性挙動に与える影響を検討した。なお、ここで取扱っている継手は、例えば、スネークパイプのような直管部に近い特性をもっていると考えられるものであり、計算上は図-1のモデルにおいて両端部の管要素の剛性 (K_{PJ}) および降伏軸力 (N_{PJ}) を他の要素の $1/30$ (スネークパイプ I 型を想定)、 $1/900$ (スネークパイプ II 型) とし、またその部分の地盤の影響を除去するため、該当する地盤ばね要素の数は他の $1/1000$ に低減した。図-3は、結果の一例として両端にスネーク I 型の継手を設けた場合の $e_y = 0.3 \text{ cm}$ について、1波長および半波長の地盤変位モードに対する最大地盤変位係数 α_{max} と崩壊モードを示したものである。これら2種類の地盤変位モードに対しては、

いずれも地盤ばねのみの降伏によって極限状態に達していることがわかる。なお、図-3中の黒塗りしたばね要素の数字は降伏する順番を示したものである。

図-4は、1波長の地盤変位モードの場合について、継手剛性の影響を調べるため、地盤変位係数 α と管路中の最大ひずみ ϵ_{max} との関係を示したものである。これより管の最大ひずみは、継手を設けることにより、緩和されず、逆に大きくなっていることがわかる。このことは、1波長の地盤変位モードの場合、管路の両端に継手を設けることにより管路中央部に境に両側の管路がそれぞれ反対の方向に動きやすくなり、結果として管路中央部に応力の集中が生ずるためと考えられる。またスネークパイプの剛性の違いによる影響は、この場合さほど顕著ではない。

一方、図-5は半波長の地盤変位モードに対する同様の関係を示したものである。この場合、継手を設けることにより最大ひずみは約 $1/2$ に小さくなり、管路中でひずみが最大になる位置も管路端から $1/4$ 点近傍に移動している。このことを調べるため、図-6に継手剛性の変化が管路中のひずみ分布に与える影響を示した。この図から、継手剛性の低下により管路のひずみ分布がある一定の状態に移行しており、またひずみの最大になる位置が固定端から管路の $1/4$ 点近傍に移動していく様子が見られる。

INPUT DATA		
$D = 40.64 \text{ cm}$	$N_p = 227470 \text{ kg}$	$e_y = 0.3 \text{ cm}$
$t = 0.79 \text{ cm}$	$K_p = 415380 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$	Both ends are connected with joints
$A = 987 \text{ cm}^2$	$S_p = 5745 \text{ kg}$	
$l = 100 \text{ m}$	$K_s = 19150 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$	
$n = 20$		
$a_p = 500 \text{ cm}$		

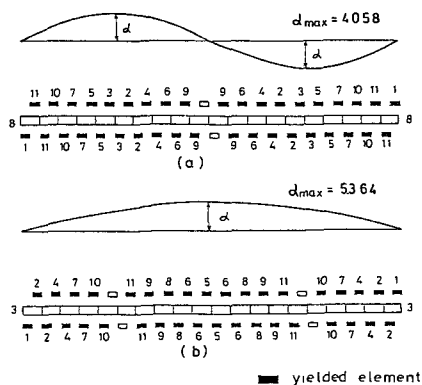


図-3 両端に継手(スネークパイプ I 型)をもつ管路の崩壊モード

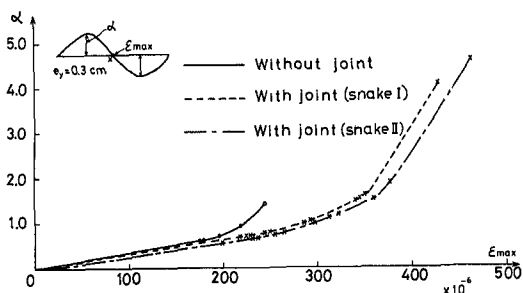


図-4 地盤変位モード1波長のときの継手剛性の影響: $\alpha - \epsilon_{max}$ 関係

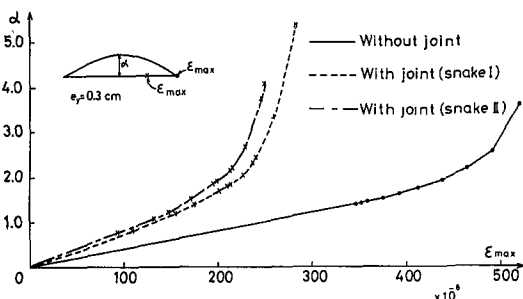


図-5 地盤変位モード半波長のときの継手剛性の影響: $\alpha - \epsilon_{max}$ 関係

(2) 計算例 2: 管路両端に強制変位を受ける直線管路

ここでは、直線管路の両端がマスの大きな構造物(例えばマンホールなど)に固定されており、その構造物が地震時に左右に移動したことにより、管路の両端に強制変位を与える場合を取り扱う。計算上は、図-1のモデルにおいて、管路の両端を地盤の動きに固定するように地盤ばねを調節し、図-7(a)のような cosine 波状の地盤変位を与えた。図-7(b)は、この地盤変位モードに対する最大地盤変位係数 α_{max} および崩壊に至るまでの降伏過程を示したものである。この場合、系は管体の降伏によって極限状態に達しており、いわゆる管路の崩壊状態になっている。この系の降伏過程では、まず初めに地盤ばねが降伏し、その後管体の降伏が中央部から始まり、次第に管の降伏が進むと、それまでに降伏して一定の摩擦力を保っていた地盤ばねの摩擦力が弾性範囲内に戻り、いわゆる除荷現象が起きていることが認められた。図-8は、管体各要素のひずみの挙動を系の初期降伏から崩壊に至るまで追跡したものである。図中の E_{cr} 、 E_a はそれぞれガス導管指針に規定されている圧縮側および引張側の許容ひずみである。この図より、この系の許容ひずみは E_{cr} で決まり、その時の地盤変位係数は $\alpha = 22$ となる。これは、管路の両端に 22cm の強制変位を与えると最大ひずみ (E_{10}) が E_{cr} (0.69%) に達することを示している。

4 あとがき 本研究の結果、地盤変形を受ける埋設管路系に対する効率的な弾塑性解析手法が確立できた。本文では、軸方向問題のみを取り扱っているが、管軸直角方向の地盤変形を受ける場合も全く同様の方法で解析できる。なお、ここでの解析は応力法に基づく手法であるが、大規模かつ複雑な構造物系を取り扱うには、変形法による解析が便利であり、現在2次元あるいは立体配管系への応用を含めて検討中である。(参考文献)

1) 梶中他: 地震時土の歪より見た埋設パイプラインの耐震性, 電力や中央研究所技術研究所報告, No. 69087, 1970. 4. 2) 北出他: 地中埋設管の耐震強度, 三菱重工業報, Vol. 11, No. 4, 1974. 7.

3) 宮島他: 静的摩擦に基づく埋設管の地震時応力計算法, 埋設管に関するシンポジウム, S. 50. 9, 4) 高田: 埋設管路-地盤系の復元力特性と地震応答解析, 土木学会論文報告集, 249号, 1976. 5, 5) 日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針, S. 57. 3. 6) 石川他: 地盤-構造系の弾塑性解析に関する一考察, 土木学会36回大会(I), S. 56. 10. 7) 前出5), 8) 東京螺旋管製作所: スネークパイプについて(技術資料)

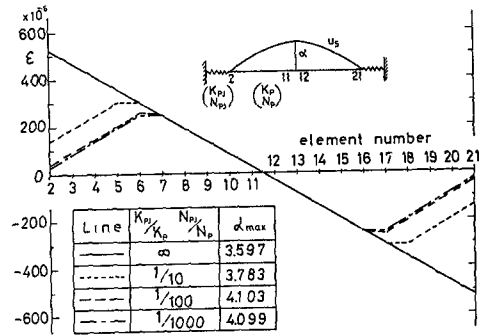


図-6 管路のひずみ分布におよぼす継手剛性の影響

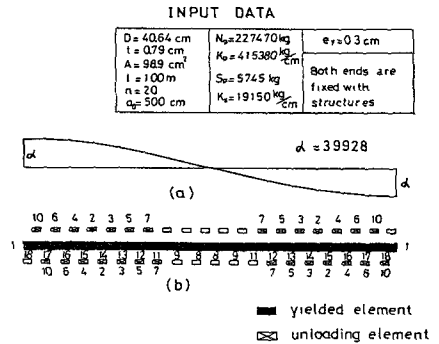


図-7 両端に強制変位を受ける管路 (a) 地盤変位モード, (b) 崩壊モード

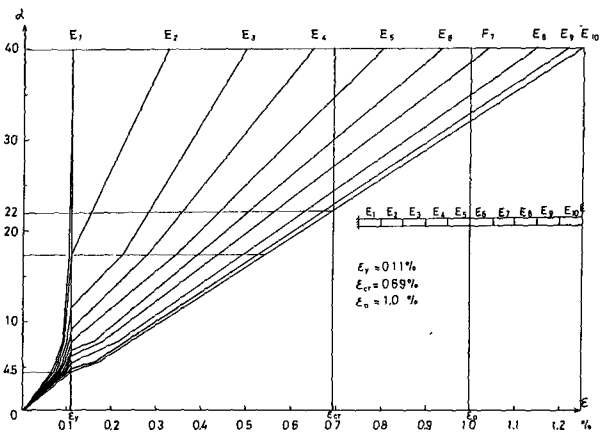


図-8 地盤変位係数(α)-各要素のひずみ(E)関係