

(82) 地中立体配管路の応答・耐震解析

神戸大学工学部 正員 高田至郎, 学生員 田邊輝司 良
 栗本鉄工 正員 徳山貴信

1. はじめに: 中小口径埋設管は立体的に配管される場合が多く、これらが地盤状下あるいは地震を受ける際の挙動を明らかにすることは、防災上必要な課題である。立体配管路の解析では、3次元的な取扱いとなり、従来の2次元解析とは異なる手法を要する。本文では、著者らが従来開発してきた埋設管の2次元非線形地震応答解析プログラム ERAUL^① (Earthquake Response Analysis of Underground Lifelines) を3次元に拡張した計算機プログラム ERAUL(II)の手法を示すとともに、有継手鋼鉄管および鋼管の管路システムについての計算例、さらに、地中立体配管路についての挙動実験結果^②と本プログラムによりシミュレートした結果について述べる。

2. 解析手法: 数値計算は伝達マトリックス法^③による。高精度計算・無次元化および修正伝達マトリックス法^④を採用することによって伝達過程における桁落ちを防いでいる。図1には、部材座標系における解析モデルを示している。管体モデルである弾性ばりがる方向の連続した非線形地盤ばねで支持されており、継手は、伸縮・せん断・回転の非線形ばねでモデル化されている。擬似静的問題として取扱い、ある瞬間における管路に沿う地盤変形が求下あるいは地震波伝播に対応して入力される。

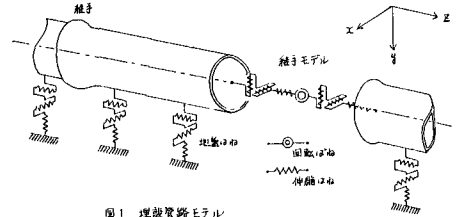


図1 埋設管路モデル

図2は、部材座標系と全体座標系の関係を示している。後述する格間格点伝達マトリックスは、本図より得られる座標変換マトリックスを用いて全体座標系での関係として表現され、各部材力は全体座標系量として伝達される。また、管路に対して任意方向成分で入力する地盤強制変形は、同じく座標変換マトリックスを用いて、各部材への配分される荷重項の計算に与する。

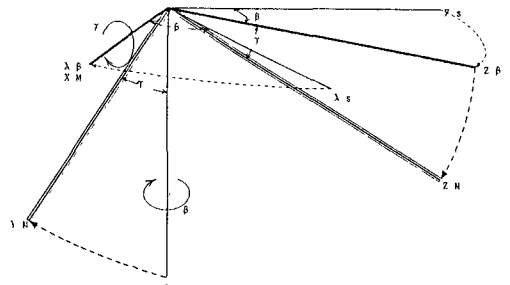


図2 全体座標系と部材座標系

部材座標系における格間格点伝達マトリックスは、それぞれ(1)、(2)式の釣合方程式によって求められ、各部材の左右端あるいは隣接部材の左右端の状態量を関係づけるマトリックスである。修正伝達マトリックス^⑤の概要は次の様である。変位Uと力Qの間に $\alpha U + \beta Q = \bar{P}$ あるいは $\alpha U + \beta Q = \bar{F}$ が成立する。本式は左端から右端へ状態量を伝達する際の関係式を与える係数 α , β , \bar{P} あるいは逆方向での α , β , \bar{F} が決定される。任意部材端での状態量が求まる事を示している。伝達過程では、当然、 α , β , \bar{P} 等の成分の絶対値が増大するので、適切な判断基準に従い、上式の両辺に α^{-1} , β^{-1} 等を乗じて、新たな α , β , \bar{P} 等を求め、ノルムを下げ伝達計算を行い、桁落ちを防ぐものである。

3. モデルと数値計算結果:

(A) 波動伝播を受ける鋼管路および継手鋼鉄管路; 図3に示すような地中立体配管路モデルを用いて、鋼管と継手鋼鉄管路に

管軸方向(軸ひずみ)	$-EA \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} + K_{sz} W = K_{sz} W_s$	
管軸直交方向(曲げひずみ)	$EI_y \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} + K_{sx} U = K_{sx} U_s$	--- (1)
	$EI_x \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} + K_{sy} V = K_{sy} V_s$	
U, V, W ;	XYZ 軸方向管体変位 (cm)	E : 管体の弾性係数 (kg/cm^2)
U_s, V_s, W_s ;	"	地盤強制変位 (cm) A : 断面積 (cm^2)
K_{sx}, K_{sy}, K_{sz} ;	"	地盤ばね定数 (kg/cm^2)
I_x, I_y ;	XY 軸まわりの管体断面2次モーメント (cm^4)	
$W^* = W^R + (-N/K_w)^R$		
$\theta_x^* = \theta_x^R + (-M_x/K_{wx})^R$		--- (2)
$\theta_y^* = \theta_y^R + (-M_y/K_{wy})^R$		
$\varphi^* = \varphi^R + (-T/K_r)^R$		
W, Z 軸方向変位 (cm), $\theta_x, \theta_y, \varphi$;	XYZ 軸まわりの回転角 (rad)	
K_w ;	軸方向伸縮ばね定数 (kg/cm)	
K_{wx}, K_{wy}, K_r ;	XY, Z 軸まわりの回転ばね定数 ($kg\ cm/rad$)	

対して、2種類の入力地震動を用いて数値計算を行った。入力波動はいずれも波長122.8cm、振幅1.0cmで、1つは管路の屈曲部に正弦波の腹がくる場合で、他方は、同位置に節がくる場合である。管路の諸元入力特性を表1、2に、地盤ばね特性と銑鉄管の継手特性を図4、5に示す。地盤ばね定数はガス導管耐震設計指針^⑧を参考に定め、継手はガス低圧管路に用いられているものである。

図6、7、8には屈曲部で正弦波の腹がくる場合(CASE1)について銑鉄管の継手伸縮量、管体軸心力および鋼管の管体軸心力を示した。屈曲部では若干複雑な挙動を示すものの、継手伸縮量は地盤ひずみ分布形状と対応していることが分かる。管路の両端部は地盤と同様に動くこと仮定した境界条件を用いているために、端部で最大地盤ひずみが入力されることにより、鋼管路では端部で 2.29 kg/cm^2 の大きい応力値となる。しかし、銑鉄管路では継手の引抜け、押し込みによって応力が緩和され、端部で鋼管路の $1/9$ 程度の応力値である。また、図より知られるように、銑鉄管路では、屈曲部でも継手の配置によって応力集中位置が異なるのに対し、鋼管路では屈曲点で応力集中が発生している。

図9、10、11には、屈曲部に入力正弦波の節がくる場合(CASE2)について同様の計算結果を示した。継手伸縮量はやはり、地盤のひずみ分布の形状に相似である。この場合には、屈曲部B、C、D(図3参照)には、地盤変位が入力しないために、屈曲部の挙動はCASE1の場合ほど複雑ではない。鋼管路での応力値も 3.68 kg/cm^2 程度に収まっている。

(B)地盤沈下を受ける鋼管路および継手銑鉄管路；図3~5に示す同じモデルに対して、D、E部分にのみ一様地盤沈下が生じた場合について両管路の挙動を検討した。図12、13には銑鉄管についての結果を示している。D、E管が一樣に20cm沈下した場合について継手の抜け量と管底軸方向応力を示したものである。管路への影響は地盤の沈下部と不動部の境界近傍のみに現われている。境界付近の継手がわずかに引抜け、銑鉄管の管

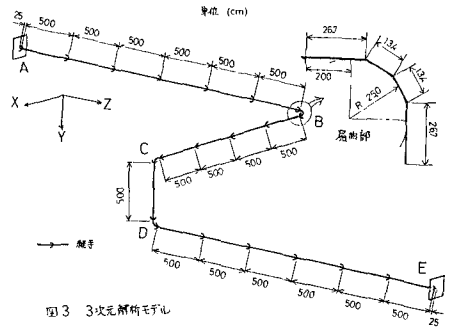


図3 3次元解析モデル

表1 管体諸元値

	外径(cm)	内径(cm)	断面積(cm^2)	断面2次モーメント(cm^4)	弾性係数(kg/cm^2)
鋼管	16.52	15.52	25.16	809.05	2.1×10^6
銑鉄管	16.90	15.20	42.66	1383.95	1.7×10^6

表2 入力地震波動の諸元

	振幅(cm)	時間(s)	波長(cm)	種類	入力位置
CASE 1	1.0	1.0	0.1228×10^5	P波	屈曲部・腹
CASE 2	1.0	0.25	0.1228×10^5	P波	屈曲部・節

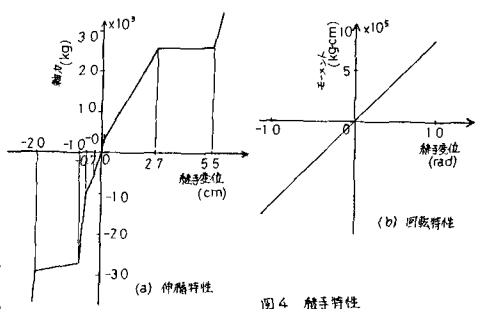


図4 継手特性

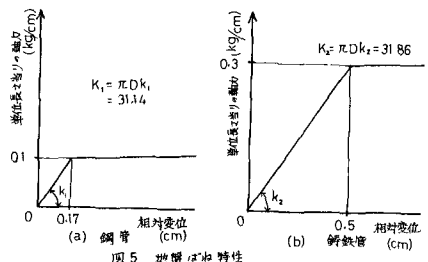


図5 地盤ばね特性

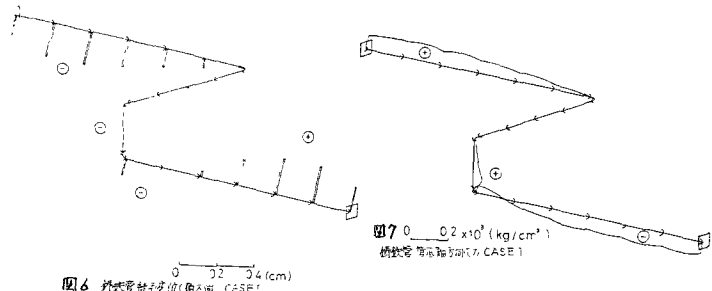


図6 外側管継手変位(節を両) CASE1

図7 $0.2 \times 10^3 (\text{kg}/\text{cm}^2)$ 銑鉄管管底軸方向力(CASE1)

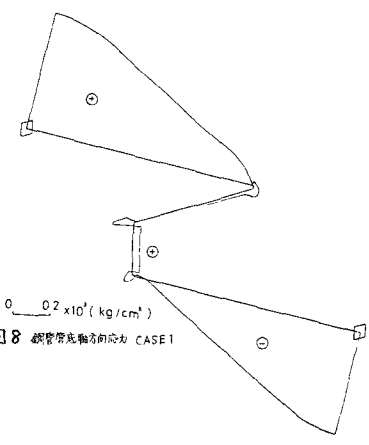


図8 鋼管管底軸方向力 CASE1

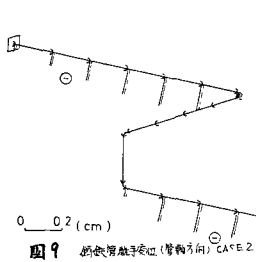


図9 鋼鉄管継手接点(管軸方向) CASE 2

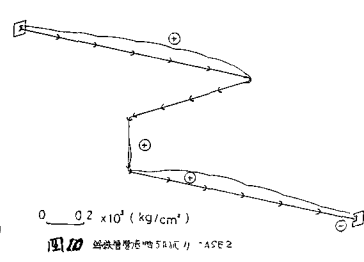


図10 鋼鉄管管体曲げモーメント CASE 2

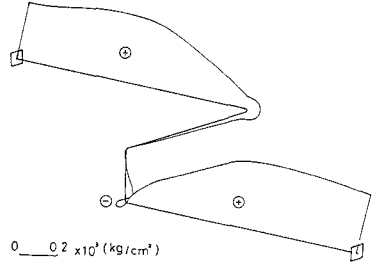


図11 鋼鉄管管体曲げモーメント CASE 2

体応力は、継手間で変形が強
制される部分に集中している。
この場合には、管体応力が、
750 kg/cm²程度に達し回転、
伸縮によつてうまく応力を逃
がしているとは言えない。実
設計上は継手の配置が重要な
ポイントとなる。この場合の
最大継手回転角は1°未満で
あった。図14には、鋼管路
が20cm沈下を受けた場合の
応力分布状況を示した。やは
り、地盤の沈下部・不動部の
境界近傍で応力が集中してい
る。この場合でも管体応力は
915 kg/cm²程
度で、十分鋼管の許容応力以
内に収まっている。図15には、
上述と同一の
モデルに対して、沈下量を変
化させた場合の鋼管・鋳鉄管
の最大値を示した。両者の
関係は、鋳鉄管ではほぼ比
例的であることが知られる。
鋼管では沈下量が大きくな
ると最大応力が若干低下す
る傾向が見られる。これは、
鋳鉄管に比較して、幾何学
的形狀も含めて、変形が容
易であるためと推察される。

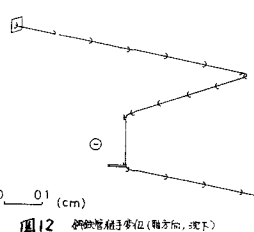


図12 鋼鉄管継手変位(軸方向、沈下)

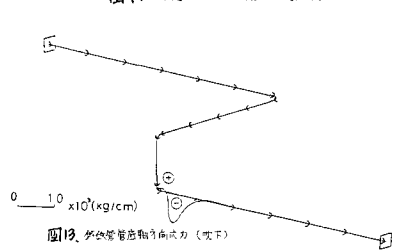


図13 鋼鉄管管体曲げモーメント(沈下)

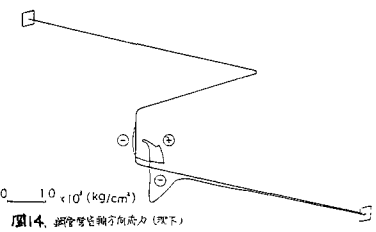


図14 鋼管路曲げモーメント(沈下)

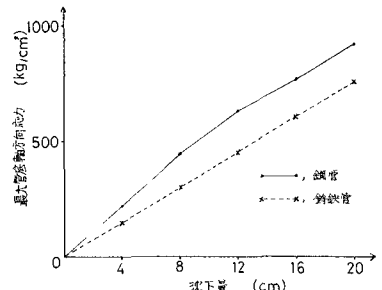


図15 沈下-応力曲線

度で、十分鋼管の許容応力以
内に収まっている。図15には、
上述と同一の
モデルに対して、沈下量を変
化させた場合の鋼管・鋳鉄管
の最大値を示した。両者の
関係は、鋳鉄管ではほぼ比
例的であることが知られる。
鋼管では沈下量が大きくな
ると最大応力が若干低下す
る傾向が見られる。これは、
鋳鉄管に比較して、幾何学
的形狀も含めて、変形が容
易であるためと推察される。

(c) 地中立体配管路の挙動実験シミュレーション：日本ガス協会では、地中立体供給管の挙動実験を実施して、その結果が報告されている。本節では、開発した ERAUL(Ⅱ)プログラムによつて実験結果がどの程度シミュレートできるかを試みた。実験は3種類の管路モデルについて行なわれているが、継手特性の知られた2種類のモデルについて検討を行なう。図16, 17に実験管路モデルを示した。いずれもエルボ返し立体配管と呼ばれているもので、一方は張出しが長く、他方は、エルボ返しを連続して用いた張出し長の短いものである。本エルボ返しはぬじ鋼管継手となつており、継手の圧縮および引張特性は実験によつて図18のように知られている。ぬじ継手であるので、伸縮の余裕は少ない。また、継手の曲げ特性試験の結果は図19に示した。管径は、いずれもφ25のものである。

ERAUL(Ⅱ)によつて計算するには、地盤ばね特性(軸方向および軸直角方向についてのすべり限界、変位、ばね定数)、継手の回転特性がさらに必要である。しかし、これらを決定するには十分な情報は得られていない。そこで、本文では、上記諸数値をパラメーターとして1つのモデルについての実験傾向を最もよく表現するように決定し、しかる後、決定されたパラメーターを用いて、他方のモデルについて挙動解析を実施した。決定された地盤ばね定数は、軸方向および軸直角方向とも、すべり出しの変位0.5cm、地盤ばね定数は図4に示すk₁の0.2である。ガス導管耐震設計基準では0.6としているが、小口径管路であることとを考慮すると異常に小さい値とは思われない。さらに継手の回転特性は0.5 × 10⁵ kg·cm/radであった。この値は、地中立体配管路の変形特性に

きわめて敏感な量である。

実験は、図16、17に示す管路の一端に強制引張りにより変位を与えた

時のBに作用する軸方向力、管体ひずみ、変形量を測定している。

図20、21にはモデル(I),(II)がそれぞれ5cm、10cmの端部引張変形を受けた場合のシミュレーションによる管路変形状態を示している。実験終了時の変形は図22、23のように測定されている。モデル(II)では、ほぼ対応しているが、モデル(I)では、小さな変形となっている。図20、21からも知られるように、垂直下方に向く位置にあるエルボの回転特性が、変形性状に重要な寄与をする。図24、25には、変位荷重特性について、実験とシミュレーションの結果を比較している。両者はよい対応をしていると考えられる。

参考文献：①高田至郎・山部泰男・高橋俊二；硬質塩化ビニル管の地震時挙動シミュレーション，水道協会雑誌，1954 第547号 ②日本ガス協会；ガス工作物設置基準調査委員会実験報告，1955.11 ③中村秀治；数値誤差の改善を考慮した伝達率リクス法の提案，土木学会論文報告集 No.289, P43~53, 1979.9 ④日本ガス協会；ガス導管耐震設計指針，日本ガス協会発行，1957.3

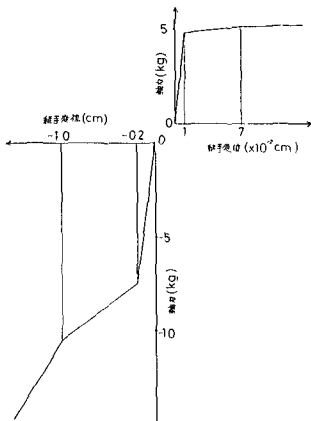
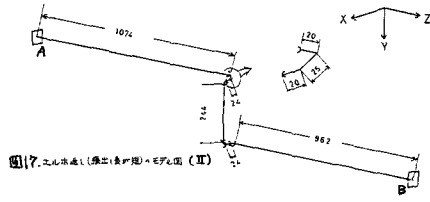
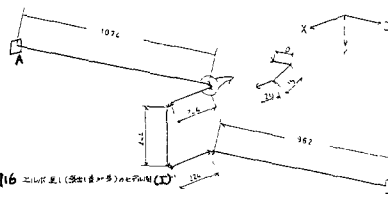


図18. よい継手接続特性

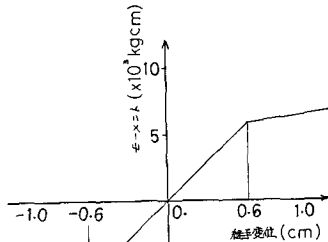


図19. よい継手接続特性

0.5 (cm) 図20 エルボ部(引出し長加長)変位図

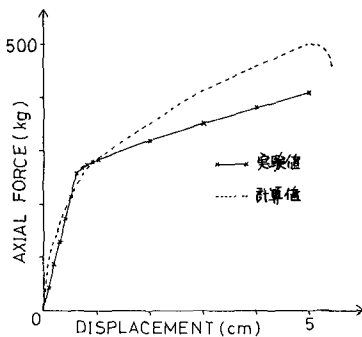


図24 変位荷重曲線(引出し長加長)

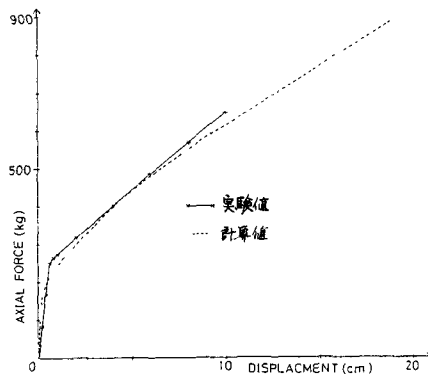


図25 変位荷重曲線(引出し長加短)

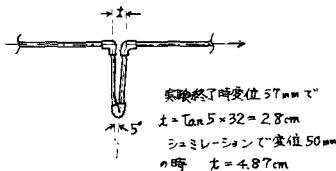


図22 エルボ部(引出し長加長)の変形状況

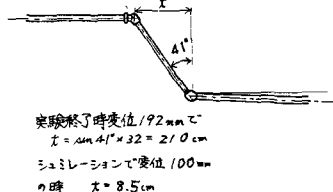


図23 エルボ部(引出し長加短)の変形状況