

(25) 沉下土槽による埋設管路の大変形挙動実験

神戸大学工学部 正員 ○ 高田至郎
積水化学工業株式会社 正員 山部泰男

1.はじめに：過去の地震とくに1978年宮城県沖地震の際の埋設管の被害状況より明らかのように、管路が液動によって被害を受けるのはごく稀であり、地すべり、沈下、液状化などの地盤変位を受けた場合に圧制的に多く破壊されている。現行の耐震設計規準（石油パイプライン基準、水道施設耐震工法指針など）では、地盤変位を受けた際の管路挙動が十分解明されていないこともあって、地震液動に対する設計々算法が示されているのみで、地盤変位については別途検討することとなっている。現実の被害状況から考えても、個別検討にまかすだけでは十分と思われず、地盤変位に対する一般的な耐震設計法、耐震化対策を確立する必要がある。本研究は、地盤変位の中でもとくに地盤沈下を取り上げて、かかる変位を受ける管路の力学的挙動について検討を行なうものである。その方法論として、一つには、次節で述べるような今回新たに提案した沈下土槽を用いて、地盤沈下が埋設管に与える影響（管体応力、継手変形など）を計測するものであり、もう一つは、地盤沈下に対する理論解析モデルを設けて埋設管の挙動シミュレーションを行なって簡単な設計手法を得ようとするものである。

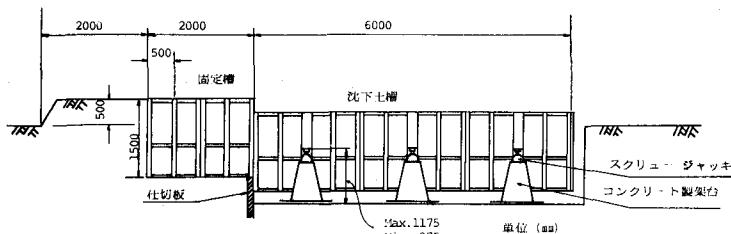


図1 実験装置図

2 沈下土槽による硬質塩化ビニル管の

挙動計測：A実験手法の沈下土槽：図1にその概要を示している。

長さ10.0m（固定土槽部分4.0mおよび沈下土槽部分6.0m）、幅1.0m、深さ1.5mで側面の大部分は土の動きを調べるために透明なアクリル製の板がはめ込まれている。沈下土槽部は6台のスクリュージャッキで支えられており、最大200mmまで上下方向に可動となっている。アクリル板には、地盤の変形を調べるためのピンを土中に埋め込むように直径5mmの穴があけられている。埋め込むピンは直径5mm長さ20mmの円錐形の塩化ビニル製のもので、その表面には彩色がほどこされており、外部から確認しやすいとしている。(2)埋設管路：実験に用いた管路はφ100mmのR2継手をもつ単管（2.5m）を3本および両端部に1.25mの管を繋いで10mの延長としている。この管体の物理諸定数、継手の形式は表1、図2に示す通りである。普通の管尺は5.0～6.0mであるが地盤特性の急変部などでは、継手の効果を生かして管体応力の増大を防ぐために、2.5mの短尺管が用いられる場合が多い。そこで本実験でも短尺管を使用している。また、地盤の沈下する境界位置を単管の中央部とするかあるいは継手部とするか管の挙動に与える影響は異なるものと推察される。本実験では継手部をもってくるとし、そうでない場合については理論シミュレーションおよび今後の実験

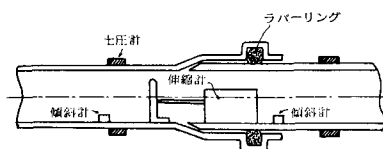


図2 継手部における測定計器

表1 管体の諸量

管長 (m)	2.5
管径 (mm)	100
管厚 (mm)	7
断面積 (cm ²)	23.5
ポアソン比	0.38
ヤング率 (kg/cm ²)	3.0×10^4
断面2次モーメント (cm ⁴)	3.38×10^2

表2 測定計器

測定計器	備考
ひずみゲージ	東京測器 WF-CA-3-11 軸方向、円周方向ひずみの測定
傾斜計	東京測器 AR-1C 継手部同軸角の測定
変位計	東京測器 SDP-50R 継手部伸縮量の測定
土圧計	共和機業 IB-2AC 管体表面土下土圧の測定
多点ひずみ計	三栄測器 TV01

によって検討を行なうこととした。(3)測定計器：測定量および用いた計器は表2に示すとおりである。管体ひずみ(軸方向および円周方向)、継手変位、管体傾斜、管体表面に作用する土圧が主な測定内容であり、各測点の位置を図3に示している。なお、継手付近における計器取り付けは図2に示す通りである。ひずみゲージ以外のリード線は管内を通して管の両端部から取り出して多点歪計に接続している。(4)管路の埋設：最初に土槽の底から40 cmまで土を収めて締め固めを行ない、その上に管を設置した。次いで継手部分など所定の位置に測定計器の取り付けを行なった。なお、ひずみゲージは予め貼布を行なっている。然る後、管を接続して水平になるように充分注意を払いながら土かぶりが高さより80 cmとなるように埋設を行なった。管路の両端はフリーの状態としている。最後に10本のピアノ線土の表面から饋入して管頂に接触させて、土槽枠に固定した標尺の読みから管の鉛直方向変位を測るようにしている。

(5)供試地盤の土質特性：実験に用いた土は、山砂でピットに自然状態で放置されてあるものを用いた。土質試験用の採土は管路埋設時に行なわれ、一度締め固めを行なった後、表面から30 cm程度の土を取り除いて、それより深い位置での土をソイルサンプラーによって採取している。

直径30 cmの板を用いた平板載荷試験の結果によれば、 $0.2 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ の地盤係数値となっている。また、粒土分布試験の結果、均等係数は2/、 d_{60} 粒土分布のよい土となっている。実験時においては含水比5~6%で締め固め度は86%前後であった。さらに三軸圧縮試験結果によれば粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ はそれぞれ0.335 気圧、 37° となっている。(6)載荷方法：現下土槽は20 tの荷重に耐えるジャッキ6本で支持されており、このジャッキを回転降下させる事によって現下土槽の自重で固定土槽との間に相対的な変位と与えることができる。現下土槽の現下量は約5 mmの現下を10回計50 mm、その後は約10 mmの現下を13回の計23ステップ/83 mmとしている。B実験結果および考察(1)管体ひずみおよび応力：図3に示すように管路延長方向の16個所、各個所で円周方向4点の合計64測点で、管軸方向および円周方向2成分、計128成分のひずみを計測している。測定の一例として各現下ステップにおける管頂部のひずみ分布を図4に示している。頂部軸方向のひずみに関しては、最大値は、境界面より少し現下側に入った位置(110、9、境界面より53 cm)で生じている。次いで境界面より少し固定側の位置で大きな値となっている。これら両位置でのひずみの符号は逆であり、境界面での少し手前(固定側)で管路が上に凸の形をとり、変形をし、次いで地盤の変形とともに大きく現下していることが伺われる。最大値は 200×10^{-6} 程度である。頂部円周方向のひずみに関してもほぼ同様であるが最大値は 50×10^{-6} 程度で小さい。図5は各現下ステップにおける管体

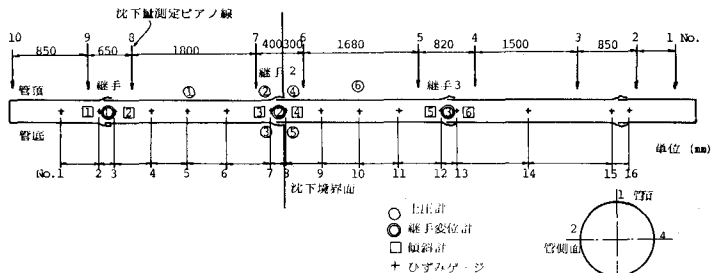


図3 測定計器取り付け位置

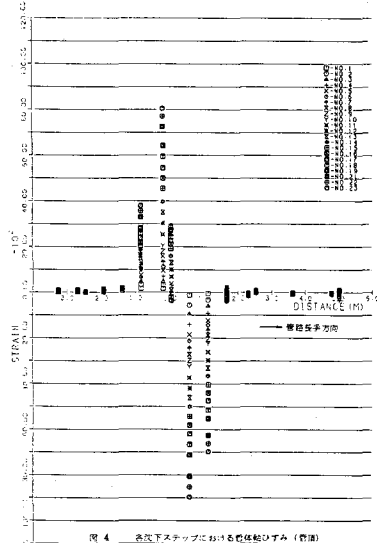


図4 各現下ステップにおける管体軸ひずみ(断面)

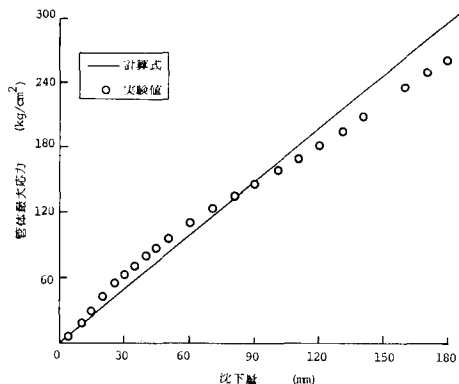


図5 沈下量と最大応力の関係

応力の最大値のみをプロットしたものである。沈下量とはほぼ1次比例の関係にあることが分かる。硬質塩化ビニル管の設計では安全率5.0を見込んで許容応力値を100%と定めているので、沈下量60mm程度は許容されていることになる。しかし180mmの沈下量でも管体にクラックは見当らなかったため終局強度は可成り高いことが推測される。(2)継手伸縮量および継手回転角：図6、図7に沈下量と継手抜け量および継手回転角の関係を示している。断面境界面およびその両側250cmの位置で固定槽側内と沈下槽側内に継手が設けられている。回転角は境界面Bでは沈下量に比例して増大しており、180mmの沈下量で約5°となっている。本実験に用いられているRR継手では継手の許容回転角は約1°程度であるので、これ以上の値が測定されているものは管の弾性変形を含んだものであると推測される。PVCのような管路は比較的変形しやすいために継手の回転に関しては単純管のような挙動をす

よと見なしてよいであろう。このB継手の回転角は正值であり、上に凸の変形を引き起こす回転となっている。一方、A継手ではほとんど回転角を生じていない。Cでは負の方向に0.2~0.5°程度であり下に凸の管変形であることが分かる。これに対応して継手の抜け量は沈下槽、固定槽の継手では小さく、境界面にあるB継手で最大5mm程度である。沈下量60mm程度までは、ほとんどBの継手のみが抜け、それ以上の沈下量になって始めてA、Cも抜け始めている。後述する管路変形の計測結果とも合わせて考えれば、沈下境界面位置では沈下変形に伴う軸方向ひずみが大きくなり抜けが生じやすいと考えることが出来る。RR継手の抜け許容値は30mm程度であるので180mmの沈下量ではかなり余裕を留めている。(3)管路の変形：計測既知量を境界条件としてはりの単純曲げ変形に関する微分方程式を解くことによって管路全体の変形状態を知ることができ、このようにして求めた結果を図8に示している。応力、回転角の分布からも予想し得る変形となっている。境界面から1.5m程度離れたところに既に変形をしておらず応力がゼロに近づく領域とも対応している。また、境界面より固定槽側では管が盛り上がっていることが分かる。これらの傾向は、この程度の沈下量ではほとんど同様である。(4)地盤変形およびクラック：地盤に差し込んだピンの動きによって測定した側面地盤の動き、クラック伝播の様子およびPVC管中心線の変形状態を各沈下ステップ毎に同一図に記入し、ステップ22の状態を図9に示した。地盤の変形は沈下量が大きくなるにつれて著しくなるがその範囲は境界面付近に限られている傾向にある。沈下量の最大となるステップ22についてみると境界面付近で地盤は著しく上下方向にずれ、固定および沈下槽のそれぞれの領域では変形も急激に小さ

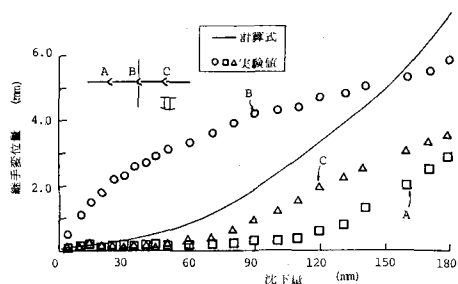


図6 沈下量と継手変位の関係

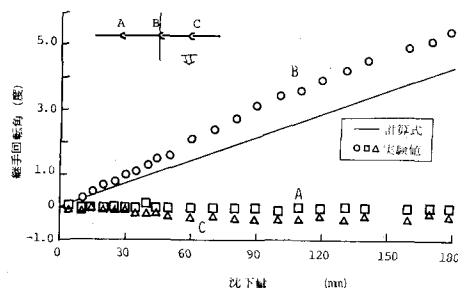


図7 沈下量と継手回転角の関係

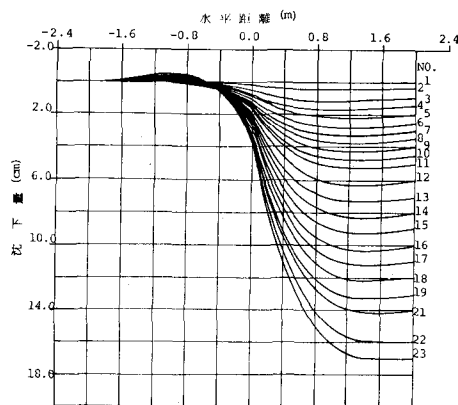


図8 管路変形曲線

き、クラック伝播の様子およびPVC管中心線の変形状態を各沈下ステップ毎に同一図に記入し、ステップ22の状態を図9に示した。地盤の変形は沈下量が大きくなるにつれて著しくなるがその範囲は境界面付近に限られている傾向にある。沈下量の最大となるステップ22についてみると境界面付近で地盤は著しく上下方向にずれ、固定および沈下槽のそれぞれの領域では変形も急激に小さ

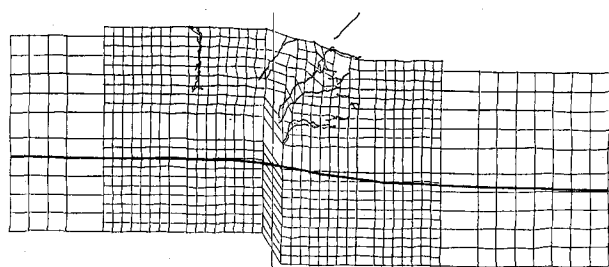


図9 地盤変形、クラックおよび管変形

くならぬに反して、管路は、固定土槽・境界・沈下土槽へと滑らかに変形しているのが特徴である。すなわち、PVC管と土の剛性の違いによって、管の動きと地盤の動きにずれが生ずることになる。一方、クラックについてみれば、step法から明瞭にあらわれて徐々に伝播してゆく様子が伺われる。

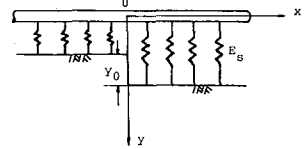


図 10 沈下を受ける管路の解析モデル

クラックが生じ始めるのは境界位置ではなく、ある角度をもってくさび状にクラックが生じるのが分かる。それもある位置より深い所ではクラックは生じにくく地表面近くの浅い位置に数多く発生している。この地盤沈下を受ける管路の応答計算：地盤沈下を受ける管路の設計手法を検証するために図10の数理モデルを用いる。図10の運動方程式は次式である。

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} + E_s y_1 = 0 \quad (x \leq 0), \quad EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s (y_2 - y_0) = 0 \quad (x \geq 0) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{境界条件は} \quad x=0: y_1 = y_2, y_1' = y_2', y_1'' = y_2'', y_1''' = y_2''', y_1^{(4)} = y_2^{(4)} \quad x \rightarrow \infty: y_2 = y_0, y_2' = y_2'' = y_2''' = y_2^{(4)} = 0, \\ x \rightarrow -\infty: y_1 = 0, y_1' = y_1'' = y_1''' = y_1^{(4)} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)の条件のもとで式(1)を解くと次式で変位が得られる。

$$y_1 = y_0 e^{\beta x} \cos \beta x / 2, \quad y_2 = y_0 (-e^{-\beta x} \cos \beta x / 2) \quad (3)$$

ここに、 $\beta^4 = E_s / 4EI$ 、式(3)より最大変位 y_{max} 、最大たわみ角 φ_{max} 、最大モーメント M_{max} は次のようになる。

$$\begin{aligned} y_{max} = y_0 (1 + \sqrt{2} e^{\frac{\pi}{4}} / 4) \quad \text{at} \quad x = 3\pi / 4\beta, \quad \varphi_{max} = \beta y_0 / 2 \quad \text{at} \quad x = 0, \\ M_{max} = -y_0 EI \beta^2 e^{\frac{\pi}{4}} / \sqrt{2} \quad \text{at} \quad x = \pi / 4\beta \end{aligned} \quad (4)$$

$\sigma_{max} = M_{max} \cdot D / I$ の関係から最大曲げ応力 σ_{max} は

$$\sigma_{max} = \pm y_0 E D \beta^2 e^{\frac{\pi}{4}} / \sqrt{2} \quad (5)$$

となり、 D は管径である。沈下境界面位置に継手がおかれている場合、その位置と最大管路変位を生ずる位置($x = 3\pi / 4\beta$)の間で軸方向のひずみが最大となるであろう事が推察される。その間における管軸方向伸び量が沈下地盤内にある管路の継手によって受け持たれるものと考えれば、継手変位量 Δ は近似的に次式で与えられる。

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{3\pi}{4\beta}\right)^2 + y_1^2 - \frac{3\pi}{4\beta}} \cdot y_1 = \left(\frac{1}{2} + \sqrt{2} e^{\frac{\pi}{4}} / 4\right) y_0 = 0.5335 y_0 \quad (6)$$

また生じ得る最大の継手回転角は、管路の沈下変形状態から判断して、継手変位の場合と同様、沈下境界面から最大沈下変位の位置に向う方向に生ずることが推察される。この時、継手の回転角は沈下境界面で生じて、その角度 θ_{max} は式(6)を参照して次のようになる。

$$\theta_{max} = \tan^{-1} y_1 / \left(\frac{3\pi}{4\beta}\right) \quad (7)$$

ここに y_1 は式(6)で与えられる量である。

沈下量が17.0/cmの場合について式(6)による沈下曲線と実験値を比較した結果式(1)~式(7)によるものは弾性理論解であるにもかかわらず、よく一致してしていることが知られた。最大応力、継手変位、継手回転角の値は図5~図7の図中の実線で示している。継手変位の場合は沈下量の小さい所で過小に評価しがちであるが、その他は推定式が実験値の傾向をよく説明し得ることが分かる。最大応力の位置も実験値で約5.7cm、推定式で4.2cmとなっており、ひずみ測定位置の配置から考えてよく合っていると言える。上式を沈下を受ける管路の力学的諸量の推定に用い、ある種の安全率を乗じて管路設計値とすることは十分の意義があると考えられる。

本研究のうち、沈下土槽による実験は、積水化学管工機材研究所と神戸大学工学部耐震工学研究室との共同研究として実施されたものであり、おまに実験の計画、手法は神戸大学が担当し、実験の実施、結果の整理は積水化学管工機材研究所が担当したものである。関係各位に感謝の意を表する次第である。