

(80) 継手特性を考慮したSHELLモデル 地中管路地震応答解析

神戸大学工学部 高田至郎
積水化学工業㈱ 東 俊司

1. はじめに 本文では大口径かつ可撓性の地中管路を対象として地震応答解析を実施した。解析には従来のはり理論では考慮できなかった断面変形解析を導入する必要上から2次元回転体シェル理論を用いている。これまでに、管路長手方向の地震外力（P波、地割れ）に対する応答解析結果については報告した¹⁾。今回は、管路長手軸直交方向にも地震外力を受けた場合の数値計算結果を報告する。管路長手軸方向に地震外力を受ける場合には管路断面周辺の拘束力は円周方向に一樣と見なし得るが、今回のように軸直交方向の地震外力では円周方向に地盤拘束力の分布が異なる。シェル解析理論を用いることによって、円周方向での拘束力分布を考慮することが可能となった。また、従来のはり理論と本手法による結果の比較も行っている。

2. シェル理論の定式化

図1に解析に使用されている円柱座標の任意シェル要素 e_{ij} を示している。 $V_i(T_i)$

図中の記号は以下の通りである。

- u_i : 軸方向の変位 T_i : 円周方向の力
- v_i : 円周方向の変位 H_i : 半径方向の力
- w_i : 半径方向の変位 M_i : 節円上の接線回りのモーメント
- Q_i : 軸方向の力 β_i : 節円上の接線回りの回転角

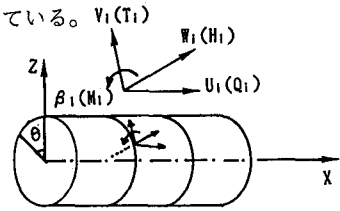


図1 円筒座標系要素

本解析では、マトリックス変位法を用いた。荷重をパイプ円周に沿ってSINおよびCOS関数として展開する。そして、その振幅を取り扱うことによってパイプの円周上の任意点の変位あるいは、応力を求めるものである。つまり軸対称の荷重をフーリエ展開し、その各々のフーリエ級数に対して荷重増分法により非線形地震応答を計算するものである。

要素 e_{ij} の支配方程式は式(1)となる。

$$\{f_{ijn}\} + \{P_n\} = ([K_n] + [K_s]) \{d_{ijn}\} \quad (1)$$

ここで

- $[K_n]$: パイプラインの剛性マトリックス
- $[K_s]$: 土のバネによる剛性マトリックス
- $\{f_{ijn}\}$: 接点の力のベクトル
- $\{P_n\}$: 荷重ベクトル

次に、相対地盤変位が円周に沿ってcos関数で分布すると考えると半径方向の地盤圧は

$$P_z = [W_a(x) - w_a(x)] k'_z \cos \theta \quad (2)$$

ここで、

$$k'_z \cos \theta = \begin{cases} 0 & \dots \pi/2 < \theta < 3\pi/2 \\ k_z \cos \theta & \dots -\pi/2 < \theta < \pi/2 \end{cases} \quad (3)$$

上記は有限フーリエ級数によって次のように近似される。

$$k' z \cos \theta = k_z \left\{ \frac{1}{\pi} + \cos \theta / 2 + (-1)^{k+1} 2 / \pi \cdot \Sigma \cos 2k \theta / (4k^2 - 1) \right\} \quad (4)$$

したがって、適当な項数までを考慮することによって、引張りが作用しない地盤ばねを導入することができる。

円筒座標系の要素における節点力の定義とジョイント要素継手部分を図2に示す。Goodmanのジョイント線要素をx軸のまわりに回転させてシェル要素との連結をはかりモデル化した。ジョイント部におけるせん断剛性は、Timoshenkoによるせん断を無視できないはり理論を適用して管路本体と同程度に剛とした。

ジョイント要素の節点変位ベクトル $\{d_{ijn}\}$ 、節点力ベクトル $\{f_{ijn}\}$ との関係は次式で表される。

$$\{f_{ijn}\} = [K] \{d_{ijn}\} \quad (5)$$

ここに $[K]$ はジョイント要素の剛性マトリックスである。

円筒系ジョイント要素の剛性マトリックスを求めるために、両辺に $[\lambda^m]$ を乗じて、両辺を円周に沿って $\theta = 0$ から 2π まで積分を行い三角関数の直交関数より次式を得る。

$$\int_0^{2\pi} [\lambda^m] [\lambda_n] r d\theta \{f_{ijn}\} = \int_0^{2\pi} [\lambda^m] [K] [\lambda_n] r d\theta \{d_{ijn}\} \quad (6)$$

ここに、 $[\lambda_n] = \text{diag} [\cos n\theta \quad \sin n\theta \quad \cos n\theta \quad \cos n\theta \quad \cos n\theta \quad \cos n\theta \quad \sin n\theta \quad \cos n\theta]$

ジョイント要素剛性マトリックスを全体マトリックスに組み合わせて計算が可能となる。

3. 数値解析例

(1) 解析対象管路モデル 管路と地盤系のモデル図を図3に示す。管路円周まわりは、軸方向、円周方向、半径方向のばねで支持されているものとしてモデル化した。半径方向のばねについては、実際上の地盤圧分布を考慮して管路に引張力が作用しないものとしている。ただし、各方向における地盤ばね特性はガス導管耐震設計指針によるものを用いた。

管路の諸元を表-1に示す。継手は5m間隔に存在している。

(2) 荷重モデル 入力地震波動として、管路長手軸方向45度下方から入射するSV波を用い、波長100mの正弦波で振幅2.5cmとした。また、地盤変状を表現するモデルとして管路中央部から地盤が45度上方に5cmのずれ運動をずらしとしている。

(3) 地震波動に対する数値計算結果 図4は地震波動(SV波)に対する管体の軸方向の管頂部での応力を示している。シェルモデルでの継手を考慮した解析結果は、はりモデルを用いた解析結果よりも応力値は小さい。継手を考慮していない解析では、はり理論、シ

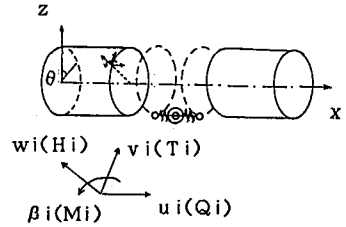


図2 円筒座標系要素とジョイント要素

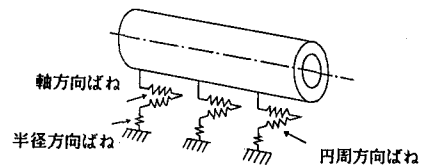


図3 管路と地盤系のモデル

表-1 管路の諸元

管径 (mm)	800
管厚 (mm)	20
断面積 (mm ²)	5314
断面2次モーメント (mm ⁴)	12.6
ヤング率 (kgf/cm ²)	90000
ポアソン比	0.2

シェル理論ともほぼ同じ応答値を得た。これらは、図5に示す軸方向の変位応答から継手考慮の解析の方が地盤変位をよく吸収しているのがわかる。図6は、半径方向の管路管上部の変位である。ここで注目したいのは、まずシェル理論による結果は、はり理論解析の結果よりも小さい。これは、半径方向の地盤は引っ張りを受けずとしてバネを片側のみだけに展開していることによる。また、同じ理由によりシェル解析では地盤が圧縮を受ける側の方が大きく変位していることが伺える。さらに、はりモデルでもシェルモデルでも継手の有無による違いはない。これは、はりモデルでは伝達マトリックス法で方程式を解いているが、継手部両端ではせん断方向の変位を同じにしていることによる。シェル解析では、このことを考慮するために継手部で管路の本体と同じせん断剛性をもたせていることによる。図7、図8はそれぞれ軸方向、半径方向の地盤ばね定数を示している。これらにより、滑りの判定をすることができる。図より、軸方向は継手の伸縮特性により地盤に良く追従しているのが知られる。しかし、軸直交方向にはそれらの差異はみられない。若干端部の非線形状態が違うのは、軸方向の滑りの影響である。図9は、管路の断面円の傾きを表すもので、継手部では、継手の屈曲特性の影響で管路の曲げを継手部が吸収しているのが確認される。

(4) 地盤変状に対する解析結果 図10は地盤変状(地盤のずれ運動)による軸方向応力のシェル解析とはり解析との差異を示すものである。これによれば、はりモデルの方が大きく応力を算出しているが、ともに継手の影響で管体のすべての部分で応力の低減を確認できる。図11は円周方向応力を示すものである。継手部で応力の低減が確認される。はりモデル解析では、勿論この円周方向応力は算出できない。図12は、管路底部の軸方向の変位を示している。軸方向では、継手部で変位をよく吸収しているのが分かる。図13は、半径方向の管上部の変位である。シェル理論解析による結果は、はり理論解析による結果よりも小さい応答値を示す。これは、半径方向の地盤は管路に対して引張力を与えないことに起因する。また、シェル解析において継手の有無による変位が継手番号4-5間でずれているのは、図14に示すように継手部の回転特性の影響と考えられる。図15、図16は、軸方向と半径方向の地盤ばね定数を示している。これらから継手の効果で管路挙動が地盤に追従している現象がよく説明できる。とくに、その現象は軸方向の地盤の動きに対しての方が大きい。

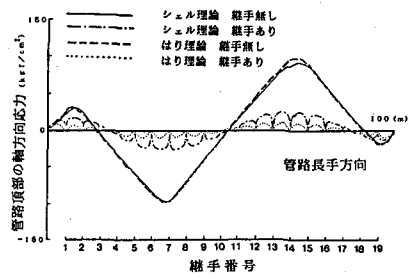


図4 管路頂部の軸方向応力の分布

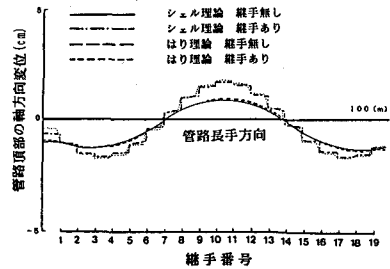


図5 管路頂部の軸方向変位

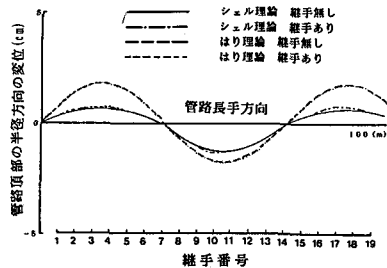


図6 管路頂部の半径方向変位

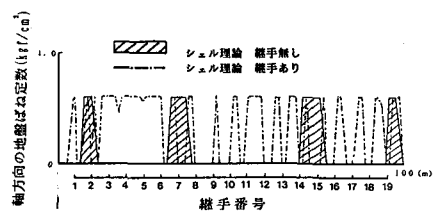


図7 軸方向の地盤ばね定数

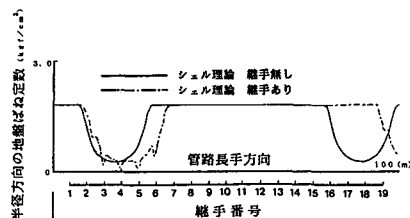


図8 半径方向の地盤ばね定数

4. おわりに 以上、管路軸直交方向に変動する地震外力に対して継手の有無による応答の差異を比較検討した。その結果、継手の伸縮、曲げによって応力が低減される効果が確認できた。また、シェルモデルを用いることにより、はりモデルでは考慮できない管路の円周回りの応力分布あるいは管路の断面方向の変形を求めることができた。

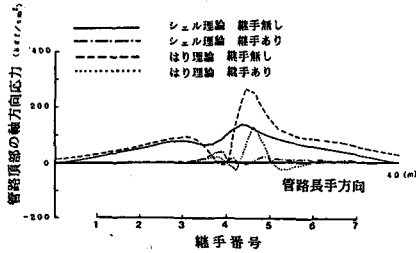


図10 管路頂部の軸方向応力の分布

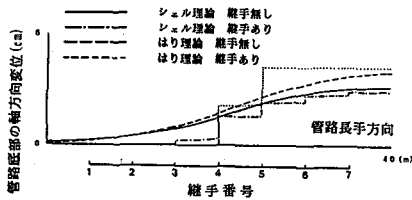


図12 管路底部の軸方向変位

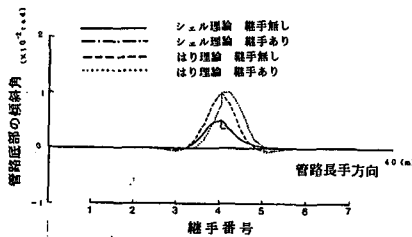


図14 管路頂部の傾斜角

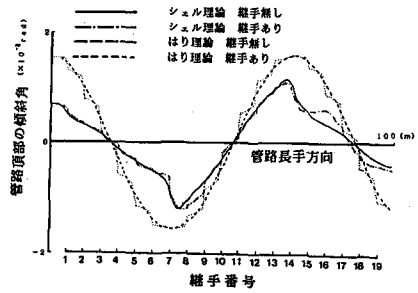


図9 管路頂部の傾斜角

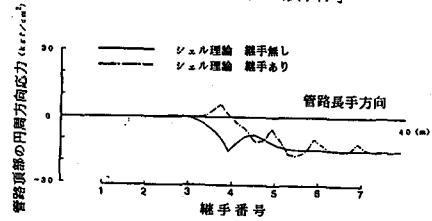


図11 管路頂部の円周方向応力の分布

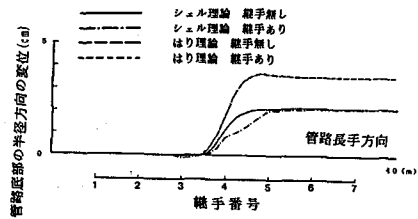


図13 管路底部の半径方向変位

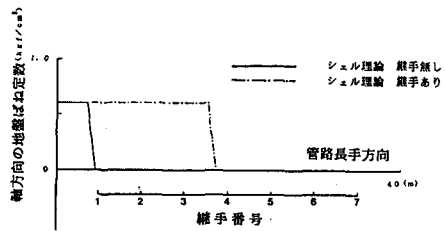


図15 軸方向の地盤ばね定数

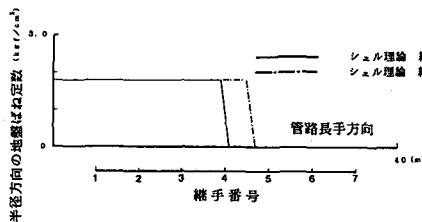


図16 半径方向の地盤ばね定数

参考文献 1) 高田至郎・東俊司: ジョイントを考慮したSHELLモデル地中管路地震応答解析、平成2年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集、1990.6.

〒657 神戸市灘区六甲台町1-1神戸大学工学部 高田至郎 (078)881-1212(内線5181)