

断層を横断する地中管路の耐震計算法

高田至郎¹・李騰雁²・梁建文³

¹フェロー 工博 神戸大学教授 工学部建設学科(〒657神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 Ph.D. 神戸大学助手 工学部建設学科(〒657神戸市灘区六甲台町1-1)

³M. ASCE Ph.D. 神戸大学特別研究員 工学部(〒657神戸市灘区六甲台町1-1)

兵庫県南部地震における神戸市域の地中管路被害の特徴の一つは断層地形近傍での集中的な被災である。断層地形における地震動増幅や断層傾斜地形における変状が主要な原因と考えられる。一方、野島断層の運動が地表面に食い違いを生ぜしめた淡路島では断層変位による地中管路被害を見受けられる。都市地震防災の観点から既存断層近傍での地中管路の被害メカニズムを明らかにする必要である。本研究では、断層を横断する管路を研究対象として管路をはり要素、地盤と管路の相互作用をジョイント要素、地盤を4節点アイソパラメトリック要素でモデル化し、断層運動などの大変形を受ける地中管路の耐震計算法を提案する。管路の非線形特性は材料特性だけではなく幾何学的非線形をも考慮し挙動解析を行った。また、提案手法の妥当性を検討するために、薄肉シェル要素の大変形解析を用いて比較検討を行った。さらに従来の簡易な計算法の妥当性についても検証した。

Key Words: Fault movement, Steel pipeline, Beam-model, Geometrically nonlinear analysis

1. はじめに

淡路島から六甲にかけての活断層の運動によって生じた1995年の兵庫県南部地震は、かつて経験したことのない大都市直下型の激震である。電気、ガス、水道などのライフライン施設をはじめとし、都市大動脈である高速道路や鉄道、橋梁、港湾などの都市・交通基盤などに広範囲にわたって壊滅的な打撃を与えた。今回の地震によるライフライン被害の一つの特徴としては、地震動の増幅と地盤変状に伴う会下山断層と渦ヶ森断層などの既存断層付近の地中管路の集中的な被害がある。断層近傍における地中管路の被害については、1971年米国サンフェルナンド地震と1976年中国唐山地震でも、同様の現象が発生している。とくに1971年のサンフェルナンド地震の際には、サンフェルナンド断層を横断する水道・ガス用の地中管路が大きく被害を受けた。米国では、本地震をきっかけとして断層を横断するパイプラインの耐震設計の論議が活発となっている。図-1は断層のずれと埋設管路との関係の概念図を示す¹⁾。管路の埋設方向と断層の運動形態の相違によって、地中管路に引っ張りあるいは圧縮力が生じ、管路の応答に影響を与える重要なパラメータであることが知られる。管路が地盤内で自由に移動できる仮定と微小変形

理論に基づいて、D. B. Fordら¹⁾は断層を横断する地中管路における応答ひずみの簡易な計算法を提案している。しかし、断層運動の場合には断層のずれ量が大きく、微小変形理論の適用には無理がある。たとえば、米国サンフェルナンド地震の折の断層のずれ量は150cm程度であった。また、地盤の剛性も地中管路の応答に与える影響がかなり大きいと考えられる。日本の全国には多くの活断層が存在しており、都市地震防災の観点から断層運動が管路の地震時応答に与える影響を明らかにし、既存断層近傍における地中管路の被害原因を

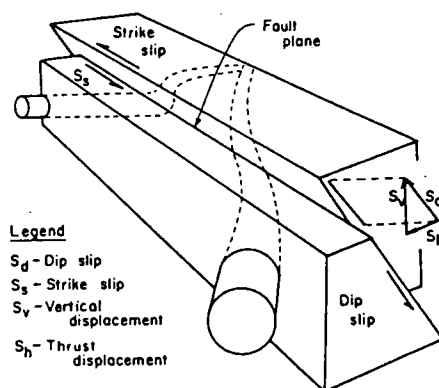
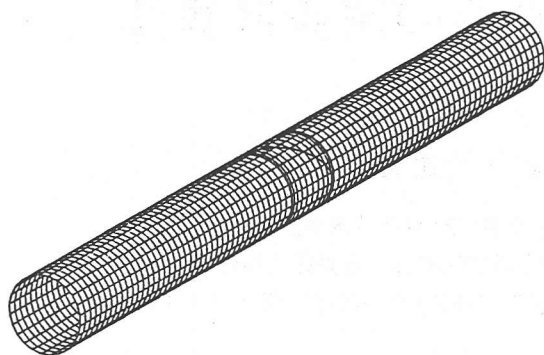
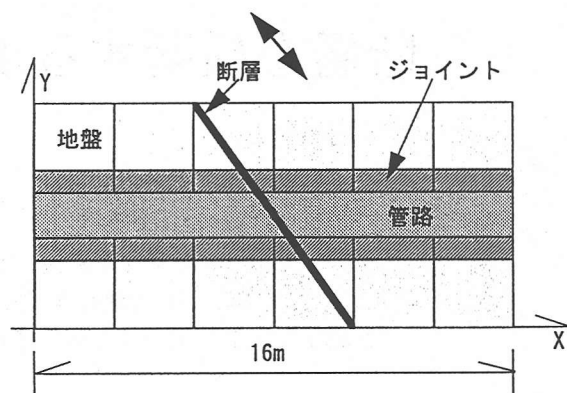


図-1 断層運動と管路との関係の概念図¹⁾



(a) シェルモデル



(b) はりモデル

図-2 解析モデル

究明するとともに、断層の影響を考慮できる地中構造物の耐震設計計算法を確立する必要がある。

本研究では、断層を横断する地中管路の地震時挙動を解明するために、大変形を解析できる幾何学的有限要素法を用いて、管路をはり要素で、管路と地盤との相互作用をジョイント要素でモデル化し、断層を横断する地中管路の耐震計算法を確立しようとするものである。また、提案手法の妥当性を検討するために、薄肉シェル要素を用いて比較検討を行った。さらに従来の簡易な計算法の妥当性についても検証した。

2. 解析モデル

今回の解析モデルは図-2に示すように、管路の全長は16mで、断層運動は管路の中央部に、管路と交差するように設定する。本研究では、はり要素で管路をモデル化する手法を提案するものであるが、その妥当性を検討するために、シェル要素を用いて断層運動による管路応答を解析し、両手法に関する比較検討も行う。はりモデルについては、地盤を平面アイソパラメトリックひずみ要素とし、管路をはり要素とする。管路と地盤の間に剥離と滑りを表現するために、管路と地盤の間にジョイント要素を考慮している。モデルの総節点数は169、管路と地盤との間のジョイント要素数は64個である。地盤は62個の平面ひずみ要素に、管路は32個のはり要素に分割されている。シェルモデルについては、管路を2208個の4節点薄肉シェル要素でモデル化する。本研究においては、地盤を3方向のばねでモデル化し、ばねの一端はシェル要素の節点と繋ぎ、他端に強制変位を与えることによって、断層の運動を表現する。地盤のばねの特性は普通地盤より硬く、図-3に示すように非線形特性を考慮できるように設定する。土のばね

係数は 0.9kg/cm^3 、限界せん断応力は 0.15kg/cm^2 である。地盤ばねが圧縮力を受けた場合にばね係数

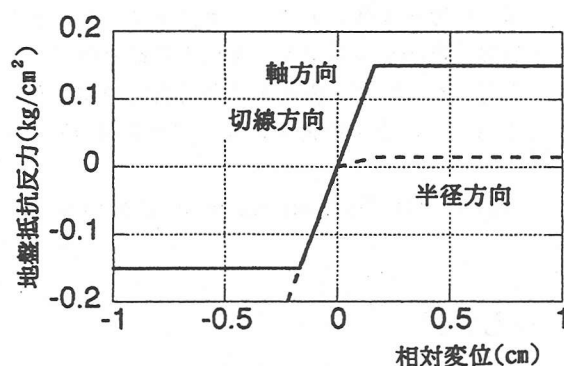


図-3 地盤の非線形特性

は変化しないと仮定する。管路の諸元を表-1に示す。鋼管材の特性はAPI規格に従って表-1の値を取っている。断層運動の外力としては、図-2に

表-1 管路の諸元

外径(cm)	肉厚(cm)	ヤング率(kg/m^2)
76.2	1.9	2.1×10^{10}
降伏歪み1	降伏歪み2	ブアソビ
0.0027	0.072	0.3

示すように左右地盤ブロックの相対変位によって正断層と逆断層の運動をシミュレーションする。

3. 解析結果と考察

今回の解析では、まず地中管路と断層面との交差角度が 45° の時に正断層と逆断層の運動について管路の応答解析を行い、はりモデルの妥当性を検討する。次に、簡易な計算方法の妥当性について検証を行う。断層のずれ量は最大50cmまでとしている。

(1)正断層の場合

図-4は断層ずれ量が10cmと50cmの時の管頂軸方向ひずみ分布を示す。実線はシェルモデルの結果、点

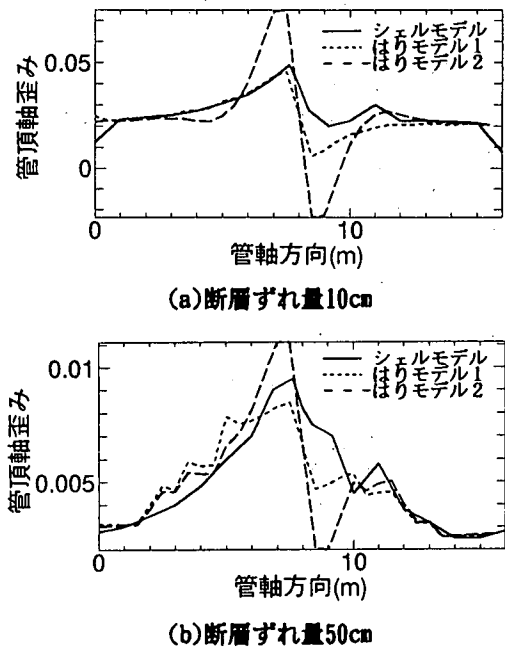


図-4 管頂軸方向ひずみ分布

線は幾何学的非線形を考慮したはりモデル（以下にはりモデル1と呼ぶ）、破線は幾何学的非線形を考慮していないはりモデル（以下にはりモデル2と呼ぶ）である。図-4によると、断層ずれ量10cmの時に管路に発生した最大引っ張りひずみは、はりモデル1が0.84%、はりモデル2が1.11%、シェルモデルが0.95%である。断層ずれ量50cmの時には、はりモデル1の最大引っ張りひずみが4.56%、はりモデル2の最大引っ張りひずみが7.49%、シェルモデルの最大引っ張りひずみが4.86%である。幾何学的非線形を考慮したはりモデル1のひずみは最大値だけではなく、分布形状もシェルモデルとよく一致していることが分かる。提案手法の妥当性が知られる。はりモデル2が管路ひずみを大きく評価する原因は軸力の曲げに対する影響を考慮しなかったためと考えられる。図-5は断層ずれ量50cmの時に管路の変状を示す。図から分かるように引っ張り軸力によって

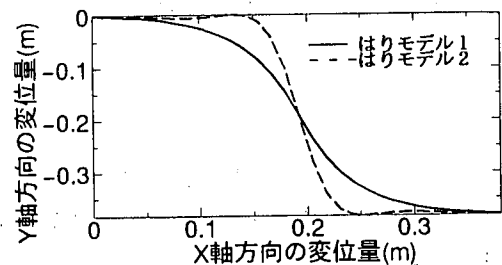


図-5 管路の変状

りモデル1の管路の変状ははりモデル2より穏やかに変化している。

(2)逆断層の場合

図-6は断層ずれ量が10cmと50cmの時に管頂軸方向ひずみを示す。図-6によると、シェルモデル・はり

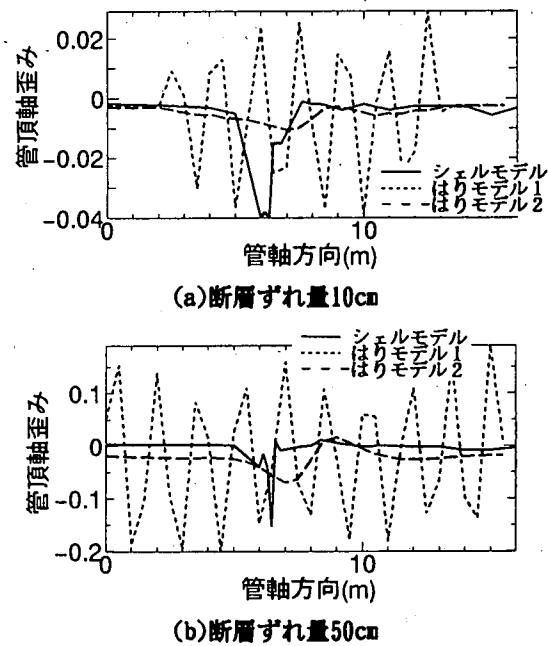


図-6 管頂軸方向ひずみ分布

モデルに拘わらず、最大ひずみは管路の中央部すなわち管路と断層の交差点に発生し始めることが分かる。断層ずれ量の増大に伴って、シェルモデルと幾何学的非線形を考慮していないはりモデル2のひずみは管路の中央部で徐々に大きくなっている。断層ずれ量10cmの時に、はりモデル2の最大圧縮ひずみは1.05%、シェルモデルの最大圧縮ひずみは4.01%である。断層ずれ量50cmの時に、はりモデル2の最大圧縮ひずみは7.06%、シェルモデルの圧縮最大ひずみは15.4%である。はりモデル2とシェルモデルの最大ひずみの差が大きいことが知られている。それに対して、幾何学的非線形を考慮したはりモデル1には、断層ずれ量の増大に従って管路のひずみは正弦波状を呈して管路の中央部から管路の両側へ波及していく。断層ずれ量10cmの時には管路に発生した最大圧縮ひずみが4.11%である。断層ずれ量50cmの時に管路に発生した最大圧縮ひずみは20.0%であるが、中央部付近では13.6%である。ガス指針によると、外径管厚比D/tが40ぐらい時の座屈時発生ひずみは2~3%である。幾何学的非線形を考慮したはりモデル1にとっては、断層ずれ量10cmの時に圧縮力の影響で管路にすでに座屈が発生していると考えられる。これはシェルモデルの解析結果からも明らか

である。図-7は逆断層運動を受ける管路の局部座屈現象を示している。はりモデルはシェルモデルと違

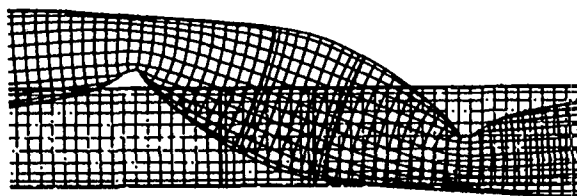
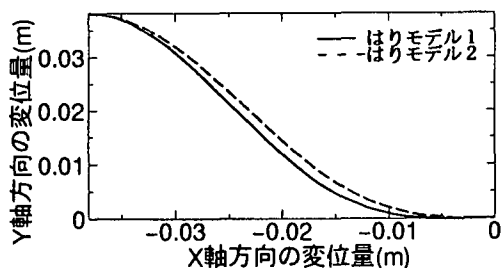
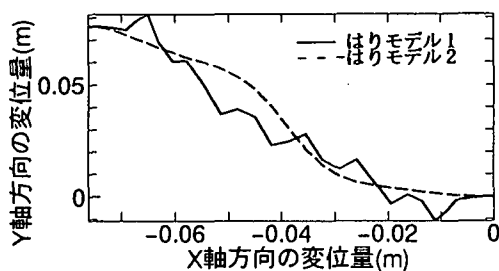


図-7 管路の局部座屈

って管路の局所的な変形を表現できなく平均的な変状しか表されない。その理由ははりモデル1の場合管路のひずみが正弦波形を呈して中央部から徐々に管路の両側に広がっていることが原因と考えられる。今回の解析では、管路の非線形特性はバイリニアだけで表現しているので、管路の中央部で座屈が起ころっても管路の応答はここに集中できなく圧縮力が両側に伝わっていくと考えられる。管路の材料非線形特性モデルはさらに改良すべきである。図-8は断層ずれ量5cmと10cmの時にはりモデル1とはりモデル2の管路の変状を示す。図から分かるように断層ず



(a)断層ずれ量5cm



(b)断層ずれ量10cm

図-8 管路の変状分布

れ量5cmの時にはりモデル1の変状ははりモデル2より少し激しいが、いずれも穏やかに変化している。しかし、断層ずれ量10cmまで増加すると、はりモデル1のほうは軸力の影響で管路の変形が中心部から両側へ徐々に乱れるようになっていく。

(3)従来の簡易な計算法の妥当性

D. B. Fordらは微小変形理論に基づいて、管路が

地盤内で自由に移動できることと、断層運動による管路の変形が円弧分布と仮定し、断層を横断する地中管路における応答ひずみの簡易な計算方法を提案した¹⁾。表-2は本解析と簡易な計算法の結果を示している。表から分かるように、簡易な計算方法は最大ひずみを小さく見積もっている。正断層の場合には本解析の結果の1/2程度、逆断層の場合には本解析結果の1/10程度である。逆断層の場合は断層のわずかな運動によっても管路に座屈が生じるから、簡易な計算法は逆断層に適用しにくいと考えられる。

表-2 各手法の最大ひずみ

断層ずれ量	はりモデル	シェルモデル	簡易方法
正断層	10cm	0.84%	0.45%
	50cm	4.56%	2.27%
逆断層	10cm	-4.11%	-0.47%
	50cm	-20.0%	-2.18%

4. まとめ

本研究では、幾何学的な非線形有限要素法を用いて断層運動による地中管路の耐震計算法を提案した。シェルモデルとの比較検討によって本研究で提案したはりモデルの妥当性が証明された。上記の解析結果から以下のような知見が得られる。

- 1) 正断層の場合、幾何学的非線形を考慮したはりモデルの解析結果はシェルモデルとよく一致している。ひずみの最大値だけではなく、ひずみの分布もよく似ている。幾何学的非線形を考慮しないと、はりモデルはひずみを大きく評価してしまう。
- 2) 逆断層の場合、幾何学的非線形を考慮したはりモデルとシェルモデルとの結果の最大値がほぼ一致しているが、ひずみの分布の一致はまだ課題が残っており、さらに改善する必要がある。
- 3) 従来の簡易な計算法は管路のひずみを小さく見積もり、正断層の場合に約はりモデルの1/2、逆断層の場合には、はりモデルの1/10程度であるので、適用しにくいと考えられる。

参考文献

- 1) D. B. Ford: JOINT DESIGN FOR PIPELINES SUBJECT TO LARGE GROUND DEFORMATIONS, PVP-Vol. 77, ASCE, pp. 160-165, 1983.
- 2) (社)日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針，1982年