

1. まえがき これまで埋設管路―地盤系の弾塑性解析法を定式化し、この手法による直線管路や平面管路の解析とともに、多くの震害例の報告されている地盤急変部に埋設された管路の地震時挙動を考察するなど、主として解析的な面に主眼をおいた研究を行ってきた。本文は、これらの研究結果をもとに埋設管路の耐震性評価に対する弾塑性解析法の応用性について検討した結果について述べたものである。

2. 耐震設計の現状と解析手法 一般に、埋設管路の耐震設計においては、まず輸送量、内圧、土圧等から決められた管径、管厚に対して（1次設計）、埋設管路の大部分を占めるような地盤に埋設される管路についてその安全性を照査する。さらに、これまでの地震において震害例が多く報告されている地形・地質の急変部および異形管のような管路の構造急変部について検討を行い安全性を確認する（2次設計）。

表-1は、これらを1次および2次設計として、それぞれの目的、評価基準、解析手法、入力データについて整理したものである。このうち、2次設計と位置づけられる耐震性評価のための耐震設計基準（指針）として現在用いられているものはい

表-1 埋設管路の設計

	目的	評価基準	解析手法	入力データ
1次設計	断面決定 管径、管厚、...	許容応力度 $\sigma \leq \sigma_a$	弾性解析	輸送量 内圧、土圧
2次設計	耐震性評価による 断面のチェック (安全性の確認) 耐震限界の評価	許容応力度 $\sigma \leq \sigma_a$ または 許容ひずみ (塑性域) $\epsilon \leq \epsilon_a$ $\delta \leq \delta_a$	弾性解析 (弾塑性解析)	管路構造 地震動入力 地盤条件

れも応答変位法に基づくものである。初期の石油パイプライン技術基準¹⁾から最新のガス導管耐震設計指針²⁾へ至る過程で特徴的なことは(1) 評価基準が許容応力度から許容ひずみへ、さらには弾性範囲を越えて塑性ひずみまで容認されてきたこと、(2) 地盤ばねについても、線形から管軸方向について

はすべりを考慮した弾塑性型へ移行したこと、(3) 対象とする入力地震動が任意の方向から入射するS波から表面波の影響を考慮した管軸方向へ入射するP波になったこと、などである。各分野でそれぞれ管種や内容物などに特殊性はあるが、耐震設計におけるこのような流れは1つの注目される現象である。

その理由としては、管材料の高品質化に伴い耐用期間中に1、2度の大地震に対しては管体の塑性域での応答を利用しようという考え方や観測結果、実験データの蓄積などにより、埋設管路の耐震性に係わる諸因子、例えば入力地震動や地盤の影響についての理解が深まってきたことが挙げられる。

設計分野でのこのような流れにもかかわらず、解析面では管体の塑性変形を考慮した埋設管路―地盤系の弾塑性解析法は確立されていなかった。しかし、すでに報告したように曲り部を有する平面管路では、普通の地盤変位でも固定部や曲り部には管体の降伏がみられ³⁾、また、基盤が傾斜しているような、いわゆる地盤急変部では条件によっては直線管路でも振幅10cm程度の地盤変位に対しても管体の一部に降伏が生じている⁴⁾。従って、管路に発生する塑性変形を正しく評価するためにも、また許容ひずみを評価基準とする新しい耐震設計法への対応のためにも埋設管路―地盤系の弾塑性解析法の確立が必要になってきた。このような観点から、直線管路や任意の平面管路を対象とした管体の塑性変形を考慮できる弾塑性解析法について線形計画法(LP)を利用して定式化し、提案している³⁾。

3. 数値計算による検討 以上、埋設管路の耐震設計の現状と弾塑性解析の必要性について述べてきた。次に、これらのことを1つの数値計算例を通して具体的に検討する。モデルは、図-1に示されているよう

な地盤急変部に埋設された直線管路 (SGP40A) である。ここでは地盤急変部の長さを50mとし、またその地盤に対する地盤変位分布を図-2のように仮定した。

図-2(a), (b)は、地盤変位係数 $\alpha = 4.0$ に対する地盤急変部付近の軸ひずみおよび軸力分布を、弾性解析 (従来の方法) と弾塑性解析とを比較して示したものである。なお、ここでいう弾性および弾塑性とは管体の取り扱いに限ってのことであり、両手法とも地盤の影響は弾塑性的に扱っている。地盤ばね定数などの詳細なデータや解析手法については文献⁴⁾を参照されたい。

両解析法による計算結果の比較より、(1) 管体に発生する軸ひずみは、弾塑性解析では地盤急変部で非常に大きくなっているが他の部分では弾性解析よりかなり小さくなっていること、(2) 軸力は弾塑性解析では当然降伏軸力 N_p (この場合 7.24ton) を越えないが、弾性解析では N_p を越えて非常に大きくなっていること、(3) この例の場合弾性限界は $\alpha = 5.7$ であること、などがわかる。

次に、これらの結果を耐震設計における評価基準との関係から検討する。

(1) 評価基準を許容応力度とする場合：

たとえば、許容応力度を降伏点応力とすれば、この管路系に対して $\alpha = 5.7$ の地盤変位が限界となる。

(2) 評価基準を許容ひずみとする場合：

1) 弾塑性解析を行ったとき

ガス導管耐震設計指針によるこの管の許容ひずみは 1.0 % である。図-2 (a) より $\alpha = 4.0$ に対して、この場合の最大ひずみは約0.7 % であるので、従ってこの管路は $\alpha = 4.0$ の地盤変位に対しても耐震設計上問題がないといえる。

2) 弾性解析を行ったとき

弾性計算では、ひずみの集中する部分で、弾塑性解析よりひずみを過小に評価し、これをもとに耐震性の評価を行えば危険側の結果を与えるので注意すべきである。

4. あとがき

本報告は埋設管路の耐震設計の中での弾塑性解析の応用性などを検討したものである。その結果をまとめれば以下になる。従来の弾性解析法は、許容応力度にもとづく設計に対しては十分な適用性をもっているが、許容ひずみにもとづく設計の場合、特に大地震時における評価への適用には問題がある。従って、実際問題としては許容値を低くするなどの配慮が必要になる。一方、弾塑性解析法は許容ひずみにもとづく新しい耐震設計へ十分な適用性をもっており、大地震時に発生する塑性域のひずみ (変形) を正しく評価できるという利点がある反面、fiber strain そのものの評価は難しいので塑性変形量 (例えば、平面管路の曲り部に生ずる塑性回転角など) に着目した新しい評価基準を考慮する必要がある。

(参考文献) 1) 自治省告示：官報号外第36号, 1974. 2) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針, 1982. 3) 佐藤・香月・石川：強制地盤変位を受ける平面埋設管路の弾塑性解析, 土木学会論文集, 第 350号, pp. 217~226, 1984. 10. 4) 佐藤・石川：地盤急変部における埋設管路の地震時挙動に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 31A, pp. 427~437, 1985. 3.

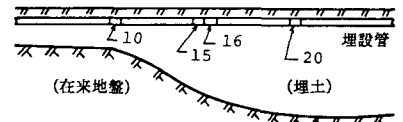


図-1 地盤急変部に埋設された管路

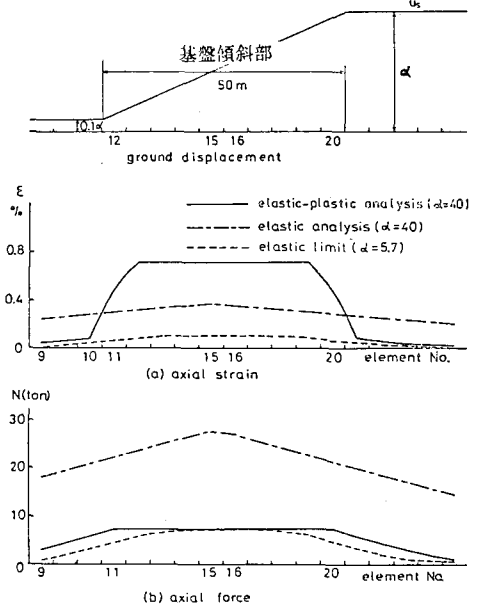


図-2 地盤急変部における管路の挙動 (SGP40A)

—弾性解析と弾塑性解析との比較—