

(121) 埋設管路のひずみ設計法について

川崎製鐵（株）鋼構造研究所

小池 武

同上

中野昭三郎

同上

今井俊雄

1.はじめに

高压パイプラインは、生産・備蓄基地を起点とし、都市間を結ぶ長距離幹線パイプラインとして建設されるが、そのルートは各種道路下や占用地であり、いくつかの河川、鉄道、道路横断部分を含むことになる。事前の調査結果に基づき管路敷設ルートは潜在危険度を有する地区を避けて設定されるのが原則であるが、沿岸部に位置する我が国の都市立地の性格からパイプラインルートは沖積地盤とくに軟弱地盤地区の通過を避けることができない。

厚い軟弱地盤に埋設される管路の耐震設計では、管歪みの増大に対応するため、石油パイプライン技術基準など現行の許容応力度設計法では管厚の増加や鋼材の高強度化によって対処してきた。しかし、これらの方策は管軸歪みを低減させるのに必ずしも有効でなく、逆に管肉厚の増加が管軸方向伸びを抑制するため、周辺地盤と埋設管路間のすべりによる相対変位は一層増加し隣接異形管部の発生歪みを増加させることになり、耐震性向上を目的としたにもかかわらず必ずしも管路系全体の耐震性を確保できないことになる。

上述の矛盾は、地盤震動を外荷重とする管路の耐震設計では本来許容歪み設計法を適用しなければならない所に、許容応力度設計法を適用したことから生じたものである。この問題を解決するため、本研究では地盤震動に対する埋設管路の耐震設計法として歪み設計法の適用性について検討した。

2.現行耐震設計法

埋設管路に関する現行耐震設計法は、石油パイプライン技術基準¹⁾を中心とする許容応力度設計法とガス導管耐震設計指針²⁾の歪み基準に基づく設計法とが分野毎の対象管路に対してそれぞれ独立に適用されてきた。前者は、周辺地盤と埋設管路間のすべりによる相対変位を無視する立場で、また後者は逆にすべりによる相対変位を考慮する立場でその設計体系を形成している。

すべりによる相対変位を無視する設計体系では、地盤変位による埋設管路の最大管歪みは直管部に現われ、異形管部での管歪み発生は無視される。もしこの時直管部での発生応力度が許容応力度を超過した場合は設計方策として管厚を増加するか管材料を高強度化する対応がとられる。しかし、高強度材料の採用は管軸歪み低減には全く効果がなく、また、管厚増加の場合は管軸歪みは小さくなるが周辺地盤と埋設管路間の相対変位は増大し、実際の管路系に含まれる異形管部の変形でその相対変位が吸収されることになる。この方式に従うならば、管厚を増加すればするほど相対変位が大きくなり、この設計法で最初から無視している異形管部に皺寄せが集中することになる。

慣性力を受ける地上構造物では、力のつりあい条件が変化する降伏応力度は一種の破壊限界状態であるため許容応力度設計法に基づく耐震設計はその合理性を有している。一方、地盤変位を外荷重として受ける埋設管路は、管破断伸び・塑性疲労（引張領域）または座屈破壊（圧縮領域）に至ってはじめて破壊限界状態に達するのであり、許容応力度設計法の破壊限界状態に相当する降伏歪み状態では周囲の地盤変形に拘束されて何等の力学的不安定状態も発生しない。

以上の考察より、地盤埋設管路の間のすべりを無視した許容応力度設計法に基づく現行耐震設計法は、耐震性を向上させようとすればする程、考察の対象としない管路の一部（異形管部）に負荷を懸け、しかも真の破壊限界状態に対応する安全性照査は実行されていないことになる。

一方、ガス導管耐震設計指針は、歪み基準を導入することで許容応力度設計法における上述の問題点を排除す

るとともに、相対変位を考慮することで異形管部の歪み評価を行っている。しかし、相対変位が後述するように過大のため異形管部の歪みが相当程度過大になっていると言わざるを得ない。

いま、Fig.1に示す軟弱地盤モデルを用いて現行耐震設計法による埋設管路（管外径600mm）歪みを算定した結果をFig.2に示す。同図によると、直管歪みについてはガス導管耐震設計指針は短波長領域ですべりによる低減傾向を示し、石油パイプライン技術基準がその領域で一定値傾向を示すのと同対照的である。また、ガス導管耐震設計指針による異形管歪みは全般的に地盤歪みを上回る傾向を示し、とくにT字管でその傾向が著しい。

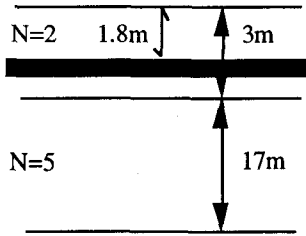


Fig.1 Model ground

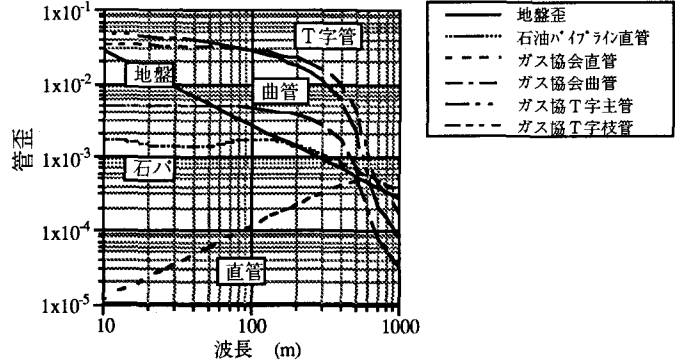


Fig.2 Pipe strains for various current design codes

3.直管の地震時歪み

すべりを考慮した埋設管路の地震時歪みは、文献（3）に示す以下の諸式で算定することができる。

$$\varepsilon_s = q_s \beta_s \varepsilon_G \quad \dots\dots (1)$$

$$\Delta = (1 - q_s^* \beta_s) u_G \quad \dots\dots (2)$$

$$\varepsilon_B = f_B(\Delta, \phi) \quad \dots\dots (3)$$

$$\varepsilon_T = f_T(\Delta, \phi) \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 u_G 、 Δ 、 ε_G 、 ε_s 、 ε_B 、 ε_T 、 β_s 、 ϕ はそれぞれ地震時地盤変位、周辺地盤埋設管路間相対変位、地盤歪み、埋設管路直管・曲管・T字管歪み、歪み変換係数、地震波の埋設管路への入射角。すべり低減係数 q_s 、 q_s^* 、 f_B 、 f_T の具体的な関数形は文献（3,4）に示す。ただし、剪断応力比に対するすべり低減係数をFig.3に示す。

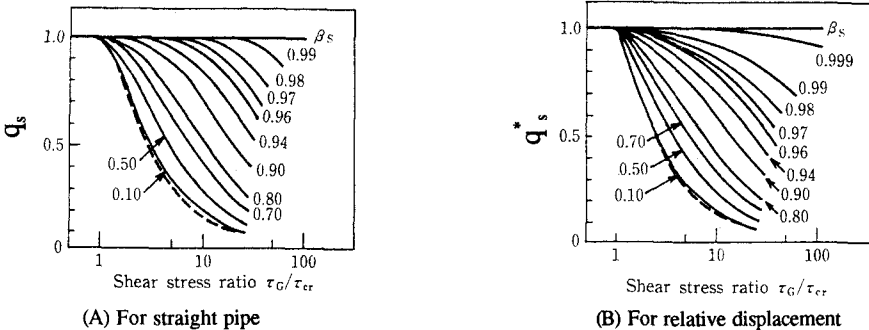


Fig.3 Slippage factors for straight pipe and relative displacement

式(1)～(2)に基づいて埋設管路歪みを算定した結果をFig.4に示す。同図では、管厚を10,15,20mmと変化させた場合の直管歪みおよび曲管歪み（67.5°曲管、地震波入射角 $\phi=0$ ）と伝播波長との関係を示している。管厚を増

加させると、直管の軸方向歪みは確かに低減するが、前述したように曲管歪みは長波長区間（約200m以上）で逆に増加することになる。

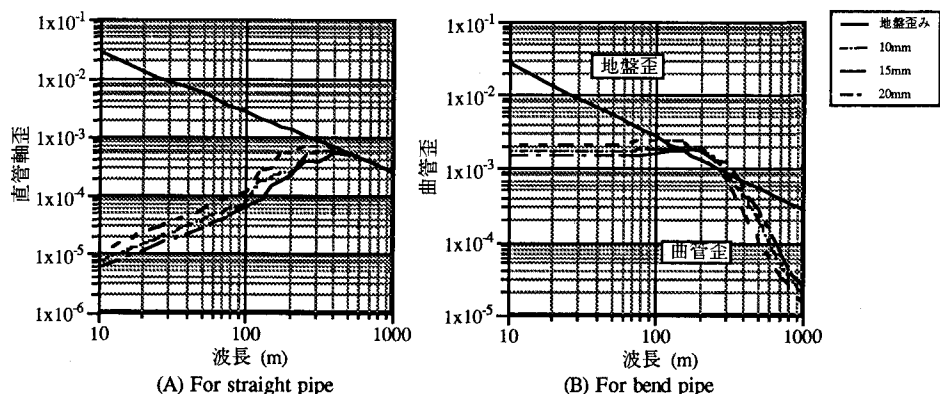


Fig.4 Analytical results of pipe strains for various wall thicknesses

4.異形管の地震時ひずみ

Fig.1に示す地盤モデル（67.5° 曲管、主枝同口径T字管、地震波入射角 $\phi=0$ ）に対し、式(1)～(4)に基づいて埋設管路歪みを算定した結果をFig.5に示す。同図は直管、曲管、T字管の管歪みの解析解を示しているが、Fig.2に示す現行設計法に基づくそれぞれの値と比較すると、解析解の異形管歪みは曲管の一部を除いてほぼ全波長区間で地盤歪みより小さな値を示しており、現行設計法の異形管歪みが地盤歪みより比較的大きな値を示しているのと対照的である。この両者の差異は、現行設計法では相対変位を求める際にFig.3に示す最小値（波線）^{2, 5)}を採用したため、結果として相対変位を過大に評価したことによる。

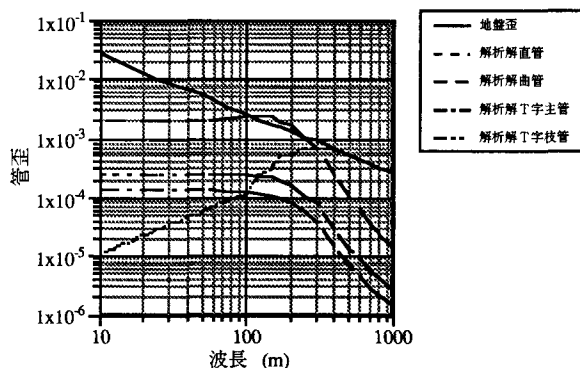


Fig.5 Analytical results of pipe elements

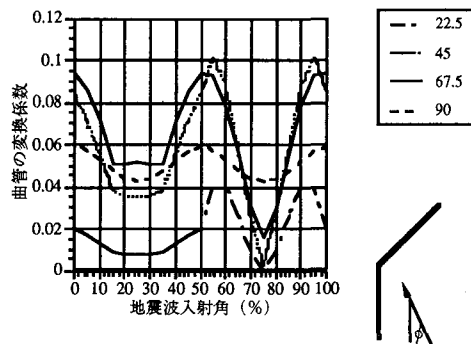


Fig.6 Conversion factors of bend for various incident angles

Fig.6は地震波が曲管に入射する角度 ϕ に対する様々の曲管(90°、67.5°、45°、22.5°)の歪み変換係数を示している。同図によると、歪み変換係数の最大値は45° 曲管の場合であるが、最大値をとる入射角の範囲は狭く、より広範囲の入射角に対して全般的に67.5° 曲管の方が相対的に大きな値を占めていると言える。一方、現行の耐震設計法のガス導管耐震設計指針では90° 曲管に対応する歪み変換係数が用いられており、この係数により評価された曲管歪みの値が必ずしも曲管の最大値でないことに留意する必要がある。

Fig.7は4種類の曲管に対する曲管歪みと地震波長との関係であり、その図はFig.6で指摘した結果を反映している。すなわち、67.5° 曲管が最大歪みを示し地震波長100～250m区間では地盤歪みを最大50%程度超過しているが、その他の地震波長区間ではいずれの曲管の管歪みも地盤歪みを上回ることがないことを示している。しかも、曲管歪みの地盤歪みからの超過量はFig.2に示す現行耐震設計法の曲管歪みの場合と比較すると相当小さいことがわかる。また、短波長区間（約100m以下）の曲管歪み（67.5° 曲管）の値がFig.2の石油パイプライン技術基準

の直管歪みの値とほぼ同程度の大きさであることは興味深い。

Fig.8は管径を300、600、900mmと変化させた場合の曲管歪み（67.5° 曲管）と地震波長の関係を示している。図中の曲線は、小口径管ほど短波長側にずれる傾向を示しているが、全体的には口径に関わらず近似的な特徴を示し、曲管歪みが地盤歪みを超過する量も同程度である。

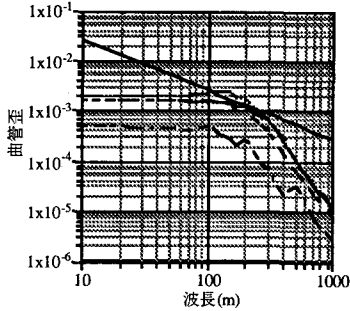


Fig.7 Pipe strains for various bends

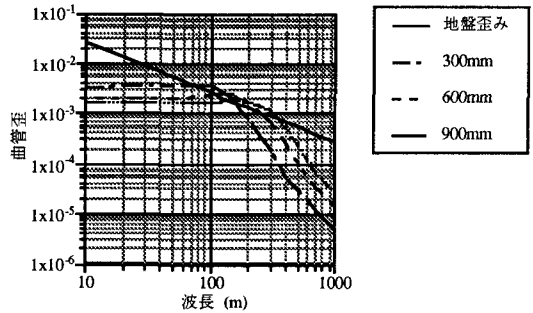


Fig.8 Pipe strains for bend with various diameters

Fig.9は、T字管（主管口径D1、枝管口径D2、地震波入射角 $\phi=0$ ）に対する管歪みと地震波長の関係を主管口径比D2/D1をパラメータとして求めたものである。D2/D1=0.5,0.75,1.0の範囲に亘って、T字管歪みは地盤歪みを下回っているが、この結果はFig.2の現行耐震設計法の結果と大いに異なっている。これは、式(2)の相対変位を過大に評価した場合の影響がT字管に大きく現われる傾向を持つことを示している。

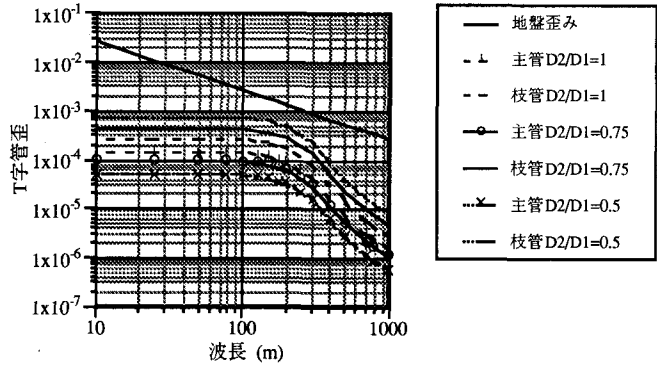


Fig.9 Pipe strains for various tee-junctions

5.まとめ

軟弱地盤に敷設する埋設管路の耐震設計法について、現行耐震設計法と解析解とを比較することで現行設計法の問題点を抽出するとともに、解析解に基づく埋設管歪みの数値的検討を行った。得られた成果は以下の通り。

- 1)埋設管路の耐震設計において許容応力度設計法に基づいて得られる耐震方策の管厚の厚肉化や管材の高強度化は、必ずしも管路系全体の耐震性向上には結びつかない。これは地盤震動を外荷重とする管路の耐震設計では本来許容歪み設計法を適用しなければならない所に許容応力度設計法を適用したことから生じたものである。
- 2)現行のガス導管耐震設計指針は相対変位の評価が過大な分異形管とくにT字管の管歪みを過大評価する傾向がある。一方、異形管歪みの数値解析結果は曲管歪みの一部を除いて地盤歪みを上回らないことを示している。

参考文献

- 1)日本道路協会：石油パイプラインの地震対策に関する調査報告書、1974。
- 2)日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針、1982。
- 3)小池 武：埋設パイプラインの耐震解析、川崎製鉄技報 Vol.19,No.2,1987,pp.56-61。
- 4)Koike,T.:Structural strains of the buried pipeline under seismic risk, Proceedings of the Trilateral Seminar-Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, 1985,pp.281-295。
- 5)小池 武：埋設パイプラインの地震時ひずみ評価、土木学会論文報告集、No.331,1983,pp.13-24。

連絡先：千葉市稲毛区長沼町351 川崎製鉄（株）鋼構造研究所 小池 武 Tel:043-258-7092,Fax:043-259-3014