

地震動が作用する配水管の耐震性能に関する 一考察

鈴木 崇伸¹

¹ 正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)
E-mail: tsuzuki@toyo.jp

本報告はガス導管と水道管の耐震設計の現状を整理した上で、管軸方向の分布バネが完全降伏する場合の近似解を用いて管の耐力値に相当する地盤変位と速度を計算する方法を提案している。管の耐力値を標準的な埋設条件を仮定して地震動の大きさに変換することにより、管の性能をわかりやすく表示できる。

Key Words: water distribution pipe, ground displacement, resistance capacity, bi-linear subgrade reaction

1. はじめに

2022年に改訂された水道施設耐震設計指針¹⁾では性能設計が全面的に採用され、兵庫県南部地震の被害を回避できれば十分という従前の設計法が見直された。地震応答の解析技術や耐震構造に関連する新技術に対応する設計体系であり、設計の自由度を高めて効率よく耐震化を進める体系となっている。しかし水道管の設計においては従前の指針²⁾を引用することもできる内容となっており、急激な変革による混乱を避ける意図も感じられる。

性能設計は適切にモデル化した荷重とつくる側が保証できる耐力値を比較して要求性能を判断する体系である。水道管の場合、耐力値の保証は管材メーカーが行うことになり、水道工事の施工会社はマニュアルに従って埋設をするだけで耐力値には関係しない。荷重のモデル化は耐震上懸念がある部分に着目し、これまでの地震被害等をもとにモデル化した荷重設定法が決められる。

日本では石油パイプライン設計指針³⁾で用いられた分布バネで支持された無限長のほりに正弦波状の地盤変位が作用するモデルを用いて埋設管の耐震性評価を行ってきた。このモデルを使えば、地盤変位と地表面に沿った波長、埋設管の剛性と分布バネを使って管に作用する荷重を計算できる。簡便な計算であり、長年の実績により広く用いられている現状があるが、地盤変位と波長の設定方法や管の剛性と分布バネの設定方法は統一的な考え方はないのが現状である。

本報告は地盤変位、地表に沿った波長、管の剛性、分布バネに関して研究の現状の整理をした上で、標準的な

埋設状態を仮定したときの管の耐力値に相当する地盤変位に注目して分析を行っている。波長は半世紀近く研究が進展していない項目であるが、今後の精緻な性能設計の基礎資料になると考える。

2. 現行の指針類の整理

(1) 基礎方程式

水道管では管軸方向と管軸直角方向の変形を考え、ガス導管⁴⁾⁵⁾では管軸方向だけを考える設計体系となっている。小口径の水道配水管の場合、曲げ変形の影響は小さいため軸変形の影響に絞って分析を進める。配水管の軸剛性 EA 、分布バネ係数 K 、地盤変位振幅 U 、地盤変位の波長 L として管の軸変位 u の方程式は以下となる。

$$EAu'' - Ku = -KU \sin \frac{2\pi}{L}x \quad (1)$$

無限長の周期境界条件で方程式を解いた結果が石油パイプライン設計指針において採用され、現在でも用いられている応答変位法の基礎方程式になっている。

方程式を手順通りに解くと指数関数の一般解が消えて特解となる三角関数だけが残る式となる。この式は設計指針によって計算手順とパラメータが定められているが、提示した式を使って解を表示すると次式となる。4つのパラメータによって軸変位を計算できる式となっている。

$$u(x) = C_a U \sin \frac{2\pi}{L}x, \quad C_a = \frac{1}{1 + \frac{EA}{K} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} \quad (2)$$

計算される軸変位は地盤変位を一定割合で小さくした三

角関数であり、軸力は1/4波長分位相がずれるため、地盤変位の節の位置で最大となる。

前述の周期境界に対する解析解は無有限長さの均質なほうが前提条件であり、途中に固定点など不規則な構造部位が入る場合には、一般解の指数項が影響するため断面力が割り増される点に留意して結果の評価をする必要がある。鈴木は^{6,7)}を半無限として固定境界や移動境界とした解析解をまとめている。

(2) 地盤変位の振幅U

現行の多くの指針類では2つの地震動レベルが定められており、安全性の照査には1995年兵庫県南部地震の地震記録から計算した設計応答スペクトルが用いられている。埋設管の場合、強震記録を基盤に引き戻して、表層地盤を1質点系で近似して地盤固有周期ごとの応答速度により作用する地震動の大きさを規定している。地盤の応答を計算する場合には基本モードの刺激係数(4π)を乗じた値となり、埋設位置によって地震動の大きさを低減する。水道ではこの振幅を2方向にベクトル分解して計算するため管軸方向の変位は1/√2倍となる。

水道とガスで共通しているレベル2地震動の設計速度応答スペクトルは以下の式となり図-1に示している。

$$S_v[\text{cm/s}] = \begin{cases} 159T^{1.30} & (T < 0.7\text{s}) \\ 100 & (T > 0.7\text{s}) \end{cases} \quad (3)$$

刺激係数を用い、定常振動を仮定して地表の変位振幅Uを計算すると以下となる。

$$U = \frac{2T}{\pi^2} S_v(T) \quad (4)$$

地盤固有周期と地震動の大きさという観測量と対比しやすいパラメータであり、性能設計において重要視される。およそ1.3m/sが地動速度の目安となる。

(3) 正弦波の波長L

地盤変位を近似した三角関数の波長Lは地盤変位の変化率であるひずみを規定するパラメータであるが、兵庫県南部地震後の改訂²⁾で見直されることはなく、従来の計算法が継続された。そのかわりに地盤の不均一さを考慮して地盤のひずみを割り増しする係数が導入されている。

正弦波の波長の計算法は水道とガスで異なった方法となっている。水道の場合²⁾、表層と基盤のせん断波の波長の調和平均を算出し、地表に対して45度の方向に進行するとして√2倍とされている。表層と基盤のせん断波速度をβ₁、β₀とし地盤固有周期をTとすると波長の計算式は

$$L = 2\sqrt{2} \left(\frac{1}{\beta_1 T} + \frac{1}{\beta_0 T} \right)^{-1} \quad (5)$$

となる。2つの波長の中間の値が計算される。L = cTと

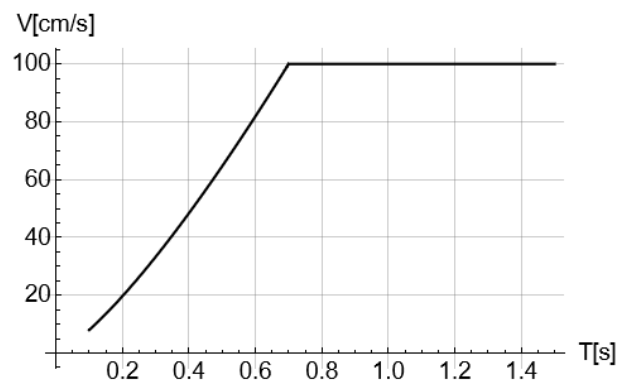


図-1 埋設管の設計速度応答スペクトル

して水平方向に進行する波の速さcを計算すると

$$c = \frac{2\sqrt{2}}{1 + \beta_0/\beta_1} \beta_0 \quad (6)$$

となる。波の速さcは基盤のせん断波速度に比例し、さらに表層のせん断波速度が小さいほど波の速さcは小さくなる。ここでβ₁ = 100m/s, β₀ = 300m/sとして波長を試算すると

$$L = cT = 212T \quad (7)$$

となり、地盤固有周期に比例する式が得られる。

ガスの指針^{4,5)}では地震観測記録をもとに地表に沿って進行する波の速さを計算した式が用いられている。式で表すと

$$c = 406T^{0.739} \quad (0.15\text{s} < T < 2.5\text{s}) \quad (8)$$

となり、波長を計算すると

$$L = 406T^{1.739} \quad (9)$$

となる。べき関数になっておりわかりにくいので水道とガスの波長を、地盤固有周期をパラメータにして比較したのが図-2である。水道は前述のせん断波速度の式を表示している。短周期の領域では両者はおよそ同等であるが、周期が長くなるとガス指針の波長が大きくなるのがわかる。

(4) 地盤のひずみ

埋設管の軸変形に影響する地盤のひずみを比較してみ

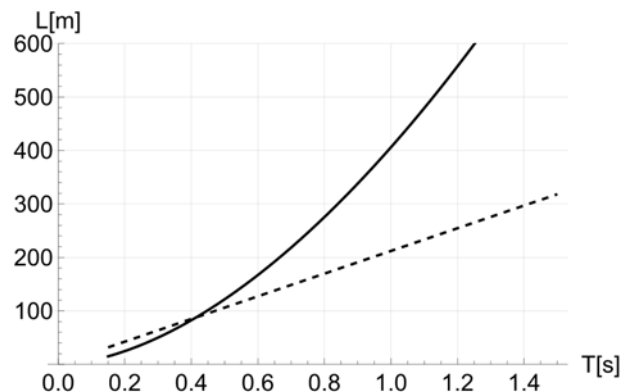


図-2 地表の波長の比較 (実線: ガス, 点線: 水道)

る。地盤ひずみ ε の計算式は地盤変位と波長から計算できるが、地盤の速度振幅 V を用いると速度振幅を波の速さ c でわった簡単な式が成り立つ。速度振幅と波の速さの比の方が直観的に理解しやすい計算式である。

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{L} U = \frac{V}{c} \quad (10)$$

水道の場合、地震動の大きさを決める地盤変位をベクトル分解して軸変形と曲げ変形の計算を行うが、小口径管の場合には曲げ変形は無視できるので軸変形だけを計算する。

水道の場合には $\beta_1 = 100\text{m/s}, \beta_0 = 300\text{m/s}$ として

$$\varepsilon = \frac{4}{\pi} \frac{S_v}{\sqrt{2}c} = 0.424 S_v \quad (11)$$

ガスの場合には

$$\varepsilon = \frac{4 S_v}{\pi c} = \begin{cases} 0.499T^{0.561} & (T < 0.7\text{s}) \\ 0.314T^{-0.739} & (T > 0.7\text{s}) \end{cases} \quad (12)$$

となる。ただし S_v は m 単位とし、ひずみは $\%$ 単位として計算する式になっている。

図-3 に両者の比較を示すが、最大で 0.4% 程度のひずみとなり、軸変形に関しては同等の作用となっていることが確認できる。この計算結果を地盤の不均一さにより割増しする計算は非常に難解であり、新水道指針では動的解析を推奨している。

(5) 分布バネ K

地盤変位を埋設管に伝える分布バネは指針によって異なった計算法となっており、整理が進んでいない量である。地盤のせん断剛性から推定する方法、埋設管の摺動実験に基づく方法、同じ方程式となる杭の実験結果を引用する方法などがあり、さらに管と地盤の相対変位が大きい場合には等分布力となるバイリニアモデルも一般に用いられている。性能設計にあたって整理をしなければいけない項目と考える。

管と地盤の間ですべりが生じる場合の計算式がガスの設計指針他で採用されているが、Shinozuka & Koike⁸⁾ の定式化に基づいている。ここではもう少し簡素化した計

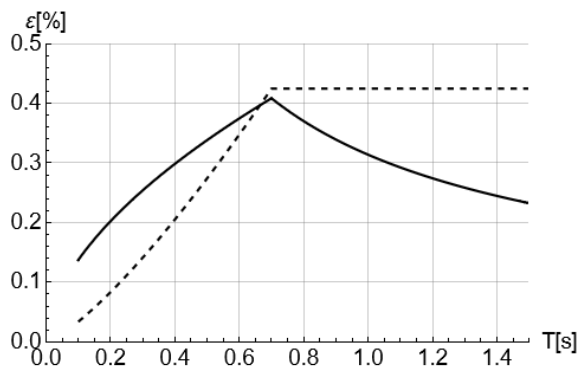


図-3 地表の伸縮ひずみの比較 (実線: ガス, 点線: 水道)

算式を紹介しておく。図-4 に示すように地盤反力が等分布力 $K\Delta_g$ になるときの管と地盤の相対変位を Δ_g とすると、正弦波の腹の位置においてこの条件にあてはまる地盤変位の振幅 U_g が計算できる。

$$U_g = \frac{\Delta_g}{1 - C_a} = \left(1 + \frac{L^2 K}{4\pi^2 EA}\right) \Delta_g \quad (13)$$

この振幅よりも作用する変位振幅が大きい場合には正弦波の腹の部分から等分布力が作用する区間が広がっていく。分布バネ条件から等分布力 $K\Delta_g$ に代わる位置を x_0 とおくと

$$(1 - C_a) U \sin \frac{2\pi}{L} x_0 = \Delta_g \quad (14)$$

周期境界の条件に従うとして原点の軸力を $L/4$ の区間の分布力から計算する。

$$N(0) = (1 - C_a) KU \int_0^{x_0} \sin \frac{2\pi}{L} x dx + K\Delta_g \int_{x_0}^{L/4} dx \quad (15)$$

積分計算を行い、式を整理すると

$$N(0) = \frac{KL\Delta_g}{2\pi} \left\{ \frac{U}{U_g} - \sqrt{\left(\frac{U}{U_g}\right)^2 - 1} + \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{U_g}{U} \right\} \quad (16)$$

が得られる。 $U \rightarrow \infty$ とすると $\{\}$ 内は $\pi/2$ に収束する。

この特徴を利用して、鈴木は分布バネが完全弾塑性型の場合の最大軸力をバイリニア型の近似解として計算する方法を提案している。

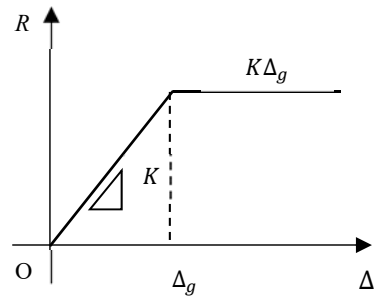


図-4 地盤反力のバイリニア近似モデル

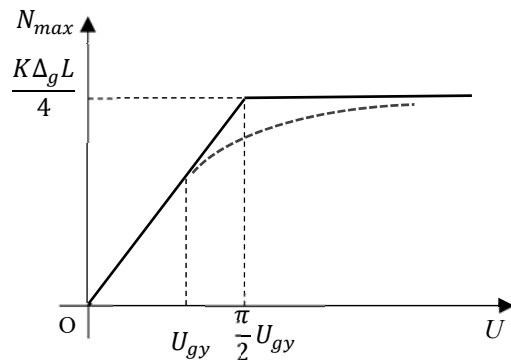


図-5 地盤の変位振幅と最大軸力の関係

$$U_{gy} = \frac{\pi}{2} U_g \quad (16)$$

$$N_{max} = \begin{cases} \frac{2\pi EAC_a}{L} U & (U < U_{gy}) \\ \frac{K\Delta_g L}{4} & (U > U_{gy}) \end{cases} \quad (17)$$

図-5 に軸力 N と地盤変位の振幅 U の関係を示している。軸力の上限値は単位長さ当たりの地盤反力 $K\Delta_g$ と波長 L に比例する。波長は水平方向に進む波の速さ c と周期 T の積であり、周期が長くなるほど上限値が大きくなる。基礎方程式の4つのパラメータに等分布力を決める管と地盤の相対変位 Δ_g を追加した計算式であるが、パラメータ数は高々5個である。

3. 耐力値に相当する地盤変位の計算

(1) 計算方法

前述した基礎方程式を用いて軸力あるいは軸ひずみを計算すればパイプメーカーが保証する耐力値と比較することができる。パラメータは5個であるが、地盤変位 U に注目して耐力値 N_0 に相当する地盤変位 U_0 を計算する。地盤変位と軸力が比例する $N_0 < K\Delta_g L/4$ の場合には

$$U_0 = \frac{N_0 L}{2\pi EAC_a} \quad (18)$$

が計算式となる。波長 L が大きくなれば耐力値に相当する地盤変位は比例的に大きくなる。 $N_0 > K\Delta_g L/4$ の場合、耐力値が全区間に等分布力が作用する条件の最大値を上回るため、耐力値に相当する地盤変位は計算できない。ここで耐力値 N_0 とバイリニアモデルの上限値が一致する波長 L_0 を計算すると

$$L_0 = \frac{4N_0}{K\Delta_g} \quad (19)$$

となる。この波長ははりの全区間に等分布力が作用する条件において耐力値とつり合い条件を満たしており、耐力値に相当する地盤変位 U_0 の最小値を与える。式(18)に式(19)を代入すると以下となる。

$$U_0 = \frac{2N_0^2}{\pi EAK\Delta_g C_a} \quad (20)$$

波長は地盤固有周期に比例するとしているので、地表に沿って進行する波の速さ c を使って、この条件に相当する周期 T を計算することができる。

$$T = \frac{L_0}{c} = \frac{4N_0}{cK\Delta_g} \quad (21)$$

図-5 に示したバイリニアの関係において上限値を耐力値 N_0 として折れ曲がり点に相当する地盤変位と周期を計算していることになるが、この条件式は管の性能を評価するのに利用することができる。また定常振動として

速度振幅に変換すると

$$V_0 = \frac{N_0}{EAC_a} c \quad (22)$$

となる。管材の照査用のひずみと地表に沿って進む波の速さ c 、周期境界の振幅の倍率 C_a がパラメータとなり、管の限界ひずみに相当する地盤ひずみを計算する式になっている。

本稿では分布バネ K と降伏変位 Δ_g 、地表に沿って進む波の速さ c を共通にして管種ごとの比較計算を行ってみる。軸剛性 EA と耐力値は公開された資料に基づき管種ごとの特性に合わせて設定する。軸剛性に関して基礎方程式に合わせるため等価剛性を用いて非線形性を近似する⁹⁾。計算結果を元に管種による応答の違いを分析してみる。

(2) 鋼管¹⁰⁾

0.1%程度のひずみで降伏する材料であるが、降伏以降も一定のひずみまでは塑性変形できる材料である。要素実験の結果から座屈変形が限界値とされていて、板厚を t 、口径を D として圧縮力に対する限界ひずみは以下の式となっている。

$$\varepsilon_0 = 46 \frac{t}{D} [\%] \quad (23)$$

軸剛性が大きいと、比較的小さな地盤変位から管と地盤の間にすべりを生じて軸力が低減される。材料の塑性化により軸剛性は小さくなることから限界ひずみと降伏ひずみを用いて割線剛性を定義して等価応答計算を行う。等価軸剛性は初期軸剛性を EA 、降伏ひずみを ε_y として

$$EA_{eq} = EA \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_0} \quad (24)$$

とする。

(3) ダクタイル鋳鉄管¹¹⁾

ダクタイル鋳鉄の管材自体は鋼管と同様に軸剛性が大きい。伸縮機構をもつ継手を一定間隔に配置する構造にして、地盤変位に追従しやすい機構としている。鈴木が示した方法に従い、一定値に達すると離脱防止機構をもつ伸縮継手と管の等価軸剛性を用いて最大軸力を計算する。この場合、等価軸剛性は管材の軸剛性に比べてかなり小さくなる。継手の間隔 L_p 、管体の軸剛性 EA 、伸縮接手のバネ係数 k_j として

$$EA_{eq} = L_p \left(\frac{L_p - 1}{EA} + \frac{1}{k_j} \right)^{-1} \quad (25)$$

が等価軸剛性の計算式となる⁹⁾。伸縮接手のバネ係数 k_j は継手の実験データから決めることができる。

伸縮継手の離脱防止力として $3D$ [kN] (D は mm 単位の口径) がメーカー保証値となっていて、口径ごとに軸

力の限界値 N_0 が規定されている。

(4) ポリエチレン管¹²⁾

配水管用ポリエチレンは 10%程度のみずみにおいて降伏する材料であるが、降伏以降は材質が変化するため降伏点以下で限界値が設定されている。パイプの繰り返し伸縮試験の結果から 3%みずみまでは大きな残留みずみも生じることなく弾性的性質を有している。またみずみが大きくなるとヤング率が低下する材料であり、評価するみずみレベルに応じてヤング率を低下させて最大軸力を計算する。対象とするみずみレベルのヤング率を \bar{E} として

$$EA_{eq} = \bar{E}A \quad (26)$$

$$N_0 = EA_{eq}\varepsilon_0 \quad (27)$$

とする。

4. 水道配水管の比較

(1) 比較方法

地盤の条件から地震動の大きさを決め、埋設管の構造条件と埋設に関する条件を用いて照査用の荷重を決めて埋設管の耐力値と比較するのが通常の設計の流れとなる。ここでは地震動の大きさを未知量として、標準的な埋設の条件を仮定して耐力値に相当する地盤変位を計算する。表-1に解析条件を整理している。地盤の条件として地震波の速さ c は旧水道指針のせん断波速度の調和平均の計算式を採用し、式(1)に示した $c=212\text{m/s}$ を仮定する。構造条件は限界状態に対応する等価剛性を管種ごとに計算する。小口径の配水管を対象にすることから埋設に関する条件としてガス指針の管軸方向の地盤拘束力を引用して計算する。単位面積当たりの地盤拘束力の上限値は $\tau_{cr} = 15\text{kPa}$ 、上限値に達する相対変位は $\Delta_g = 2.5\text{mm}$ とする。この τ_{cr} は1.8mの埋設位置を仮定していて、配水管の埋設深さよりも深い条件であるが、配水管には分水栓が取り付けられ地盤拘束力の増大が見込まれることを考慮して決めている。単位面積当たりの地盤ばね係数は 6MN/m^3 となっている。

波の速さ c を仮定して式(20)の耐力値に相当する地盤変位 U_0 と式(16)の地盤反力が上限値に達する地盤変位 U_{gy} を計算した結果を紹介する。波長は周期 T に比例して増減することから、周期 T を変数にしてそれぞれの地盤変位を計算している。黒線は表-2に示す $\phi 100$ のダクタイル鋳鉄管、青線は $\phi 100$ のポリエチレン管の計算結果であり、実線は U_0 、点線は U_{gy} としている。

実線が点線を上回る周期において管の耐力値に相当する軸力に達することはなく、逆に点線が実線を上回る周期では耐力値に相当する地盤変位を決めることができる。

表-1 評価の設定条件

区分	解析条件
地盤の条件	地盤固有周期 T 、地表に沿って進む地震波の速さ c 、波長 cT
埋設管の構造条件	等価軸剛性 EA_{eq}
埋設に関する条件	はりの分布バネ係数 K 、分布バネが降伏する変位 Δ_g

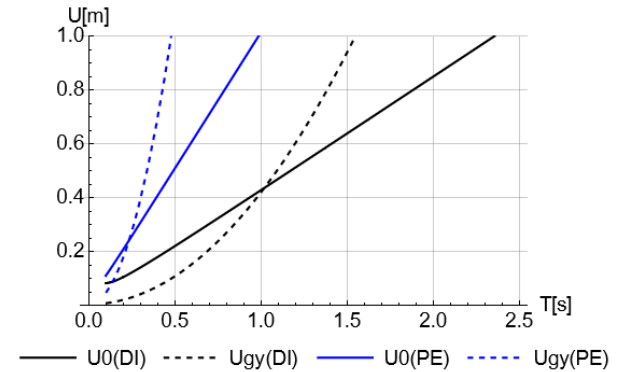


図-6 周期 T による U_0 と U_{gy} の変化

U_0 は周期 T に関して増加関数であり、耐力値に相当する地盤変位の最小値は点線と実線の交点となる。この地盤変位の計算式が式(20)であり、周期 T の計算式が式(21)となっている。

旧水道指針に従って波の速さ c を設定し、ガス指針に従って分布バネの条件 K と Δ_g を設定した計算結果をもとに、管種ごとの相対比較をするとともにパラメータの感度分析を行ってみる。

(2) 計算結果と分析

前述した計算条件に従い実在の管の計算結果を紹介する。表-2は $\phi 100$ の配水管としてダクタイル鋳鉄管とポリエチレン管の結果をまとめている。ダクタイル管の等価軸剛性はダクタイル鋳鉄管協会の技術資料を引用し、ポリエチレン管の等価軸剛性は配水管用ポリエチレンパイプシステム協会の技術資料を引用して数値を設定している。照査値に相当する地盤変位はそれぞれ、43cmと24cmとなっており、速度になおすと2.7m/s、6.5m/sになる。旧水道指針の最大地震動レベルは1.3m/sであり、直線配管では十分な耐震性能になっていることが確認できる。

表-3は $\phi 300$ の配水管として鋼管とダクタイル鋳鉄管の計算結果を示している。照査値に相当する地盤変位はそれぞれ55cmと51cmであり、速度に換算すると2.0m/sと2.9m/sになる。この場合も旧水道指針の最大地震動レベルを上回っており、十分な耐震性能を有していることが確認できる。

波の速さ c 、分布バネ係数 K 、分布バネの降伏変位 Δ_g を固定して4種類の管の計算結果を紹介したが、これら

表-2 100mm 管の概算値 ($c=212\text{m/s}$)

項目	ダク管	ポリ管
外径 D	118mm	125mm
管厚 t	7.5mm	11.4mm
軸剛性 EA	416MN	4.07MN
等価軸剛性 EA_{eq}	23.9MN	2.44MN
分布バネ係数 K	2.2MN/m ²	2.4MN/m ²
分布バネの降伏変位 Δ_g	0.0025m	0.0025m
周期 T	1.02s	0.23s
C_a	0.991	0.984
照査用の軸力 N_0	300kN	73.2kN
照査値に相当する変位 U_0	0.435m	0.241m
照査値に相当する速度 V_0	2.69m/s	6.46m/s

表-3 300mm 管の概算値 ($c=212\text{m/s}$)

項目	鋼管	ダク管
外径 D	318.5mm	322.8mm
管厚 t	6.9mm	7.5mm
軸剛性 EA	1380MN	1190MN
等価軸剛性 EA_{eq}	149MN	66.9MN
分布バネ係数 K	6.0MN/m ²	6.1MN/m ²
分布バネの降伏変位 Δ_g	0.0025m	0.0025m
周期 T	1.73s	1.12s
C_a	0.993	0.992
照査用の軸力 N_0	1380kN	900kN
照査値に相当する変位 U_0	0.546m	0.511m
照査値に相当する速度 V_0	1.98m/s	2.87m/s

のパラメータを変えることにより感度分析を行うことができる。小口径の配水管の試算を行った結果から以下のことがいえる。

- ・波の速さ c は耐力値に相当する地盤変位 U_0 に影響しないが、速度振幅 V_0 は c に比例して増減する。
- ・地盤反力の上限值 $K\Delta_g$ に反比例して地盤変位 U_0 が増減する。分布バネ係数 K 単独の変化は結果にほとんど影響しない。

4. まとめ

本報告はガス導管と水道管の耐震設計の現状を整理し

た上で、管軸方向の分布バネが完全降伏する場合の近似解を用いて管の耐力値に相当する地盤変位と速度を計算する方法を提案している。管の耐力値を標準的な埋設条件を仮定して地震動の大きさに変換することにより、管の性能をわかりやすく表示できる。

性能設計では十分な安全余裕があるならば詳細な検討は不要となり、逆に安全余裕がない部分に関して丁寧な説明が必要とされる。応答変位法では波長や地盤バネなどの条件が結果に影響するが、性能に及ぼす影響が大きい項目に関してエビデンスを提示する必要がある。

参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版, 2022.
- 2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版, 2009.
- 3) 通商産業省・運輸省・建設省・自治省：石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示, 1973.
- 4) 日本ガス協会：中低圧ガス道管耐震設計指針 2013 年改定版, 2013.
- 5) 日本ガス協会：高圧ガス道管耐震設計指針 2013 年改定版, 2013.
- 6) 鈴木崇伸：応答変位法による地中構造物の軸変形解析に関する一考察, 土木学会論文集, Vol.65, No.1(地震工学論文集第 30 巻), pp. 263-272, 2009.
- 7) 鈴木崇伸：地中構造物の地震時応答を提言する構造の評価方法, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp. 678-687, 2014.
- 8) M. Shinozuka, T. Koike: Estimation of structural strains in underground lifeline pipes, Lifeline Earthquake Engineering-Buried Pipelines Seismic Risk, ASME, New York, 1979.
- 9) 鈴木崇伸：等価剛性を用いた継手式埋設管の継手部変位量の算定法, 土木学会構造工学論文集 69A, pp.243-252, 2023.
- 10) 日本水道鋼管協会：水道用埋設鋼管路耐震設計基準 (WSP029-2006), 2006.
- 11) 日本ダクタイル鉄管協会：GX 型ダクタイル鉄管呼び径 75~450(JDPA T 56), 2020.
- 12) 水道配水用ポリエチレン管の耐震性評価検討委員会：水道配水用ポリエチレン管の耐震設計の手引き, 2019.