

線状地中構造物縦断方向の耐震検討手法について

松原勝己¹・浦野和彦²

¹正会員 工修 株式会社間組 技術研究所 (〒305つくば市荻間字西向515-1)

²正会員 工修 株式会社間組 技術研究所 (〒305つくば市荻間字西向515-1)

線状地中構造物の縦断方向の耐震検討手法に関して、以下に示すような提案を行った。

- ①地盤変位振幅の算定式の導入過程を提示するとともに、表層地盤の高次変形モードを考慮した算定式を導入した。
- ②地盤変位の波長の設定法として、二層系弾性地盤の表面波(ラブ波)の群速度極小周期に対応する波長を用いる方法を示した。
- ③地盤バネ定数の設定法として、静的弾性論を用いて線状地中構造物軸方向および軸直角方向のバネを算定する方法を示した。

Key Words : seismic design, seismic deformation method, ground displacement, wave length, soil spring constant, axial direction

1. まえがき

現在、シールドトンネル、共同溝および地中埋設管等の線状地中構造物に対する縦断方向の耐震検討は、自由地盤の地震時の変位を、地盤バネを介して構造物に静的に作用させて断面力を求める応答変位法がよく用いられる。その際、入力地盤変位の振幅、入力地盤変位の波長および地盤バネ定数の設定方法と設定値が重要となる。現状の耐震設計では、地盤変位振幅の設定は、均質な一層系地盤のせん断一次変形モードに基づいて決められることが多い。また、地盤変位の波長は、表層と基盤のそれぞれの地震動波長の調和平均によって設定されている。さらに、地盤バネ定数は、地盤のせん断弾性係数の定数倍として設定されることが多い。これらの設定法は、いずれも方法の背景や前提条件、さらにはその妥当性が必ずしも明確ではないように思われる。

本報では、入力地盤変位振幅、地盤変位の波長および地盤バネの設定に関してより合理的と考えられる方法を提案した。まず、地盤変位振幅の設定に関して、その導入過程を提示することでモデル化の前提条件を明らかにするとともに、地盤変形の高次モードの寄与を考慮できる算定式を導入した。また、地盤変位の波長に関しては、物理的意味が明瞭な方法として、二層系弾性地盤にお

ける表面波(ラブ波)の群速度極小時の波長を用いることを提案した。さらに、地盤バネの設定に関して、円形断面を有する線状地中構造物に対する軸方向および軸直角方向のバネ定数の算定式を静的弾性論に基づき導入した。最後に、本報で提案する方法を用いた耐震検討手法について記述した。

2. 地盤変位振幅の算定法

(1) 地盤のモデル化と基本式

対象とする地盤として、図-1に示すように、剛な基盤

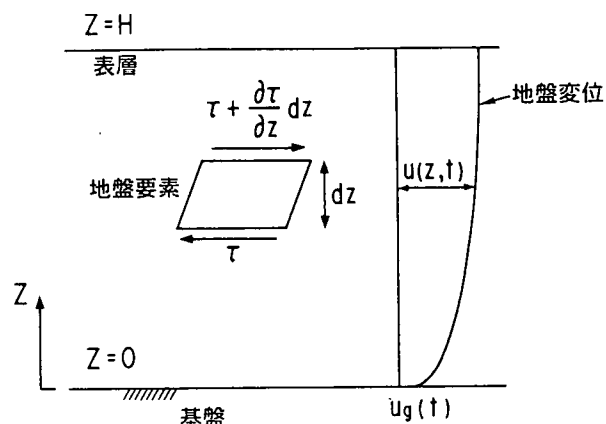


図-1 地盤変位算定の解析モデル

上に均質な物性を持つ表層が存在する一層系弾性地盤を仮定する。ただし、表層は内部減衰を有するものとする。基盤での水平地震動によって表層地盤がせん断振動するとき、モード合成法によって得られる地中変位 $u(z, t)$ は次式で表される¹⁾。

$$u(z, t) = \sum \phi_i(z) \cdot Q_i(t) \quad (1)$$

$$\phi_i(z) = \sin\{(2i-1)\pi z/2H\} \quad (2)$$

$$\frac{d^2 Q_i(t)}{dt^2} + 2h\omega_i \frac{dQ_i(t)}{dt} + \omega_i^2 Q_i(t) = -\mu_i \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

$$\omega_i = (2i-1) \frac{\pi V_s}{2H} \quad (4)$$

$$\mu_i = \frac{\int \phi_i(z) dz}{\int \{\phi_i(z)\}^2 dz} \quad (5)$$

ここに、 $u(z, t)$:高さ z の位置での時刻 t における地盤変位

$\phi_i(z)$:地盤の i 次せん断モード

$Q_i(t)$:モードに依存する時間関数

ω_i : i 次の固有円振動数

h :地盤の減衰定数

μ_i : i 次の刺激係数

(2)地盤変位の算定

地盤変位の時刻歴最大値は、式(1)を用いて次式で表される。

$$\text{MAX}\{u(z, t)\} = \text{MAX} \sum \phi_i(z) \cdot Q_i(t) \quad (6)$$

ここで、自乗和平方根法²⁾を用いて評価すれば、式(7)を得る。

$$\text{MAX}\{u(z, t)\} \approx \sqrt{[\sum \{\phi_i(z) \cdot \text{MAX}\{Q_i(t)\}\}^2]} \quad (7)$$

式(3)における $Q_i(t)$ は、固有円振動数 ω_i 、減衰定数 h を有する一自由度系に、入力加速度 $\mu_i \ddot{u}_g(t)$ が作用するときの応答変位を示している。したがって、式(8)が成立する。

$$\text{MAX}\{Q_i(t)\} = \mu_i S_D(\omega_i, h) \quad (8)$$

ここに、 $S_D(\omega_i, h)$ は、固有円振動数 ω_i 、減衰定数 h に対する、基盤地震動 $u_g(t)$ の変位応答スペクトルである。

さらに、変位応答スペクトルと速度応答スペクトルの近似的な関係として式(9)が成立する³⁾。

$$S_D(\omega_i, h) \approx (T_i/2\pi) \cdot S_V(\omega_i, h) \quad (9)$$

ここに、 $S_V(\omega_i, h)$ は、固有円振動数 ω_i 、減衰定数 h に対する、基盤地震動 $u_g(t)$ の速度応答スペクトルである。

式(7)~(9)より、式(10)が得られる。

$$\text{MAX}\{u(z, t)\} \approx \sqrt{[\sum \{\mu_i \phi_i(z) \cdot (T_i/2\pi) \cdot S_V(\omega_i, h)\}^2]} \quad (10)$$

一方、式(2)より次式が得られる。

$$\int \phi_i(z) dz = \frac{2H}{(2i-1)\pi}$$

$$\int \{\phi_i(z)\}^2 dz = H/2$$

したがって、式(5)より、式(11)が得られる。

$$\mu_i = \frac{4}{(2i-1)\pi} \quad (11)$$

式(2)、(10)および(11)を用い、さらに $T_i = T_1/(2i-1)$ (T_1 :地盤の一次固有周期)を考慮すれば、地盤変位の表示として、式(12)を得る。

$$\begin{aligned} \text{MAX}\{u(z, t)\} \\ \approx \sqrt{[\sum \{ \frac{2}{\pi^2} \frac{T_1}{(2i-1)^2} \sin^2 \frac{(2i-1)\pi z}{2H} S_V(T_i, h) \}^2]} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)は、地盤の高次変形モードをも考慮した地盤変位の算定式となっている。ここで、地盤の一次変形モードのみに着目すれば、式(13)が得られる。

$$\text{MAX}\{u(z, t)\} = \frac{2}{\pi^2} T_1 S_V(T_1, h) \sin \frac{\pi z}{2H} \quad (13)$$

以上の導入過程から、式(13)を用いて地盤変位を算定する際には、以下に示すモデル化の仮定や前提条件が存在することになる。

① 地盤は均質な物性を有する成層一層系の弾性地盤である。

② 地盤は水平地震動によってせん断振動している。

③ 地盤のせん断一次変形モードのみに着目している。

④ 地盤の減衰は振動数(モードごとの振動数)に依存しない(ただし、地盤の高次変形モードを考慮するときに関係する)。

⑤ 変位応答スペクトルに固有円振動数を乗じて速度応答スペクトルを算定する近似式を用いている。

3. 地盤変位の波長の算定法

本報では、二層系弾性地盤の表面波(ラブ波)に対する群速度極小時の波長を用いる方法を提案する。この方法は、線状地中構造物の縦断方向のひずみに影響を与えると考えられる表面波において、群速度が極小になる周期で振幅が大きくなることが理論的に指摘されている⁴⁾ことに基づくものである。

波長の算定手順を以下に示す⁵⁾。

① 式(14)に基づき、表層に対する基盤層の密度比 γ と表層に対する基盤層のせん断波速度比 β を設定する。

$$\gamma = \rho_2 / \rho_1, \quad \beta = V_{S2} / V_{S1} \quad (14)$$

ここに、 ρ_2 および ρ_1 は、それぞれ基盤および表層の密度、 V_{S2} および V_{S1} は、それぞれ基盤および表層のせん断波速度である。

② 式(15)の解を求めるため、ある x の値を仮定する。この値は、ラブ波の基本モードに対してゼロから $\pi/2$ の間にある。また、一次高次モードに対しては π から $3\pi/2$ の間にある。

$$\begin{aligned} x^2 \tan^3 x (\tan^2 x + 1)^2 + x (\tan^2 x + 1) (\tan^2 x - \gamma^2 \beta^3) \\ \cdot (\tan^2 x + \gamma^2 \beta^3) - 2 \tan x (x \tan x + 1) \\ \cdot (\tan^2 x + \gamma^2 \beta^4) (\tan^2 x + \gamma^2 \beta^2) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

③ ②で仮定したxの値に対して、式(15)の左辺を計算する。その値に対する式(15)の左辺の符号により、xの新しい値が仮定される。以上の手順を、式(15)の左辺がほぼゼロに等しくなるまで繰り返す。

④ ③の繰り返し計算で得られるxを用い、式(16)および(17)から波長Lと周期Tを求める。

$$\frac{L}{H} = \frac{2\pi\gamma\beta}{x} \sqrt{\left(\frac{\beta^2-1}{\gamma^2\beta^2+\tan^2x}\right)} \quad (16)$$

$$\left(\frac{T}{4H/Vs}\right) = \frac{\pi\gamma\beta}{2x} \sqrt{\left(\frac{\beta^2-1}{\gamma^2\beta^2+\tan^2x}\right)} \quad (17)$$

以上の方法で波長を算定した例を図-2に示す。

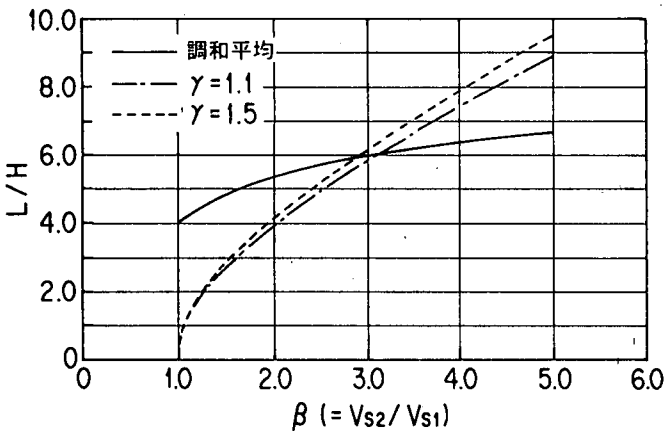


図-2 地盤変位の波長

4. 地盤バネの算定法

本報では、円形断面を有する線状地中構造物の縦断方向の解析に用いる地盤バネ定数を静的弾性論により算定する方法を提案する⁹⁾。

(1) 軸方向の地盤バネ定数

図-3に示す円孔の解析モデルを考え、円孔内部にせん断応力（作用方向は紙面直角方向）を作用させた時の変位量から地盤バネ定数を算定する。ただし、半径aの位置で変位をゼロに指定するものとする。

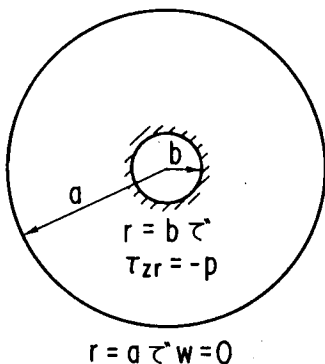


図-3 解析モデル（軸方向）

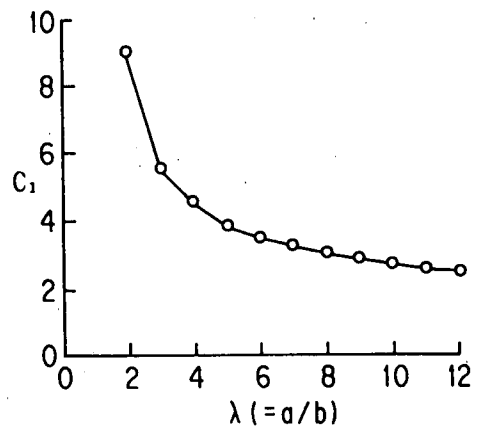


図-4 C₁とλの関係

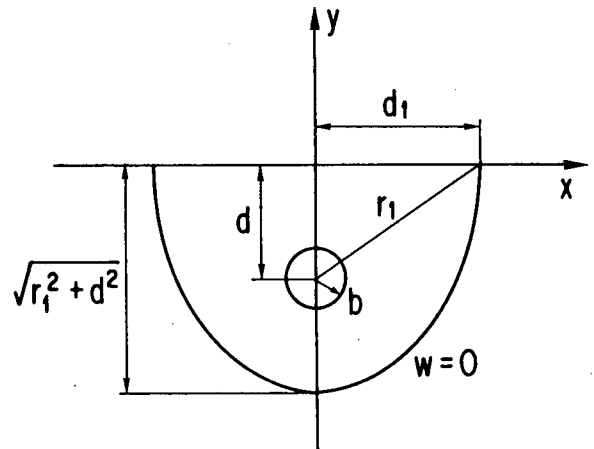


図-5 解析モデル（地表面の影響）

軸方向の地盤バネ定数 K_1 は、式(18)で表される。

$$K_1 = C_1 G, C_1 = \frac{2\pi}{\log \lambda}, \lambda = \frac{a}{b} \quad (18)$$

ここに、 G :地盤のせん断弾性係数、 b :線状地中構造物の半径、 a :変位がゼロとなる半径である。 C_1 と λ の関係を図示すれば、図-4のようになる。

また、図-5に示すように、地表面の影響を考慮する場合には、軸方向の地盤バネ定数 K_1' が式(19)で表される。

$$K_1' = C_1' G, C_1' = \frac{2\pi}{\log\{\lambda^2/(2\beta)\}} \quad (19)$$

ここに、 β :地中構造物半径 b に対する地表面から地中構造物中心までの距離 d の比(d/b)である。

(2) 軸直角方向の地盤バネ定数

図-6に示す円孔の解析モデルを考え、円孔内部に x 方向への一様な強制変位を作用させ、円孔内部から受ける反力から軸直角方向の地盤バネを算定する。ただし、半径 a の位置で変位をゼロに指定するものとする。

軸直角方向の地盤バネ定数 K_2 は、式(20)で表される。

$$K_2 = C_2 G, C_2 = \frac{8\pi(3-4\nu)(1-\nu)}{(3-4\nu)^2 \log \lambda - (\lambda^2-1)/(\lambda^2+1)} \quad (20)$$

ここに、 ν :地盤のポアソン比である。

C_2 と λ の関係を図示すれば、図-7のようになる。

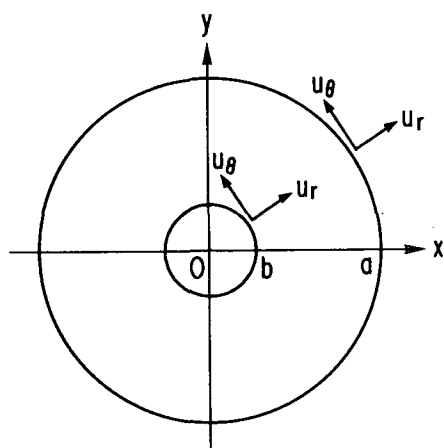


図-6 解析モデル（軸直角方向）

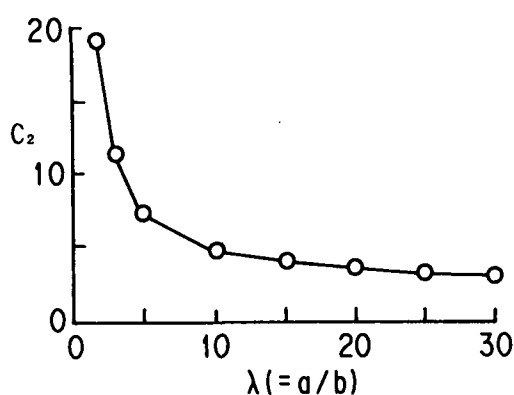


図-7 C_2 と λ の関係

5. 耐震検討の手順

本報で提案した方法を用いた場合でも、検討手順については既往の耐震検討方法と同様のフローが適用できる。

通例線状地中構造物縦断方向の耐震検討は、地中構造物を剛性の一様な梁とし、地盤を軸および軸直角方向のバネにモデル化する、「弾性床上的梁モデル」として扱われる。また、応答計算の方法は、地中構造物縦断方向に正弦波状に変化する地盤変位を地盤バネ端に作用させ、梁に発生する断面力や変位を算定・照査するものである。検討フローの一例を図-8に示す。

図-8のフローにおいて、入力地盤変位および波長の設定に式(12)および式(16)を、軸力および曲げモーメント算定時に必要な地盤バネ定数として式(18)～(20)が適用可能である。

6. あとがき

本報では、線状地中構造物縦断方向に対する既往の耐震検討方法において、方法の背景や妥当性が必ずしも明らかになっていないものに対して、より合理的と考えら

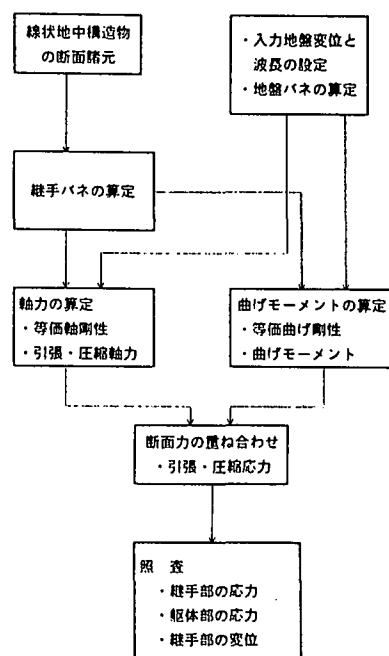


図-8 検討フローの一例

れる方法を提案した。本報で提案した方法は、いずれも既往の応答変位法による断面力算定法に組み入れることが容易であり、算定式そのものも比較的簡便な形で表されているため実用に供しやすいものと考えられる。今後は、本報で提案した方法を用いたケーススタディを実施し、既往の検討手法による結果との比較を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 松原勝己，浦野和彦：線状地中構造物の耐震設計に用いる地中変位の算定法について，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集 第1部(B)，pp. 828～829，1996
- 2) 多治見宏：建築振動学，pp. 200～201，コロナ社，1976
- 3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，pp. 142～143，鹿島出版会，1995
- 4) 佐藤泰夫：弾性波動論，pp. 243～251，岩波書店，1978
- 5) K. Matsubara, K. Hirasawa, K. Urano: On the wave length for seismic design of underground pipeline structures, *Proceedings of IS-TOKYO'95, The First Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, 1995
- 6) 松原勝己，星谷勝：線状地中構造物の耐震設計に用いる地盤バネ定数について，土木学会論文集第一部門（投稿中）