

線状地中構造物の軸方向地盤バネ定数に及ぼす波長の影響

-ポアソン比と境界条件の影響に関するパラメータ解析-

東電設計 正会員 松原勝己

ハザマ 正会員 浦野和彦

1. 概要

現在、シールドトンネルや共同溝などの線状地中構造物縦断方向の耐震検討は、自由地盤の地震時変位を、地盤バネを介して構造物縦断方向に静的に作用させて断面力を求める応答変位法が用いられることが多い。その際、地盤バネの設定値と設定方法が重要な問題となるが、現状では地盤のせん断剛性の定数倍で評価する方法や静的有限要素法を用いる方法などが用いられている。筆者は地盤バネの算定法として静的弾性論を用いる方法を提案した¹⁾が、算定式導入にあたり線状地中構造物が縦断方向に一樣な変位を示すという仮定に基づいていた。しかしながら、実際には縦断方向の変位分布が存在すると考えられるため、一樣な変位を有する場合とは異なった地盤バネ値になることが予想される。軸対称 FEM を用いて縦断方向の変位分布を導入した検討²⁾によれば、地盤変位の波長が有限になることで地盤バネ値が大きくなることが指摘されている。筆者は先に、線状地中構造物縦断方向に正弦波状の変位分布を仮定し、静的弾性論に基づく反力・変位関係から軸方向地盤バネ定数を算定した³⁾が、本報では同様の手法を用い、地盤変位波長、地盤のポアソン比および境界条件が地盤バネ定数に及ぼす影響に関しパラメータスタディを実施したものである。

2. 解析式

図-1 に示すように、中空円柱内部にせん断応力を作用させたときの変位解を求める。一般に、 $r-z$ 座標に関する二次元軸対称問題の応力関数 ϕ は、式(1)の重調和方程式を満足する⁴⁾。

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\nabla^2 = \partial^2 / \partial r^2 + 1/r \cdot \partial / \partial r + \partial^2 / \partial z^2$ である。

中空円柱内部において z 方向に正弦波状に変化する応力が作用した時、式(1)の一般解は式(2)で表される。また、境界条件として中空円柱内面のせん断応力と中空円柱外面の変位を指定し、式(3)で表す。

$$\phi = \sin(kz) \{ a_0 I_0(kr) + a_1 kr I_1(kr) + b_0 K_0(kr) + b_1 kr K_1(kr) \} \quad (2)$$

$$r=b ; \tau_{rz} = p(z), \sigma_r = 0 \quad (3a)$$

$$r=a ; u=w=0 \quad (3b)$$

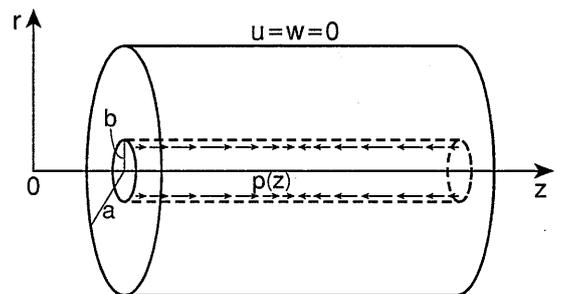


図-1 解析モデル

ここに、 k : 波数 (波長を L として $k=2\pi/L$)、 $I_n(kr), K_n(kr)$: n 次の第 1 種および第 2 種変形ベッセル関数、 a_0, a_1, b_0, b_1 : 境界条件によって決まる係数、 $p(z)$: 作用せん断応力の分布形状を定める既知関数である。

式(2)の一般解が式(3a)および(3b)の 4 つの境界条件を満足することから、4 つの未知定数 a_0, a_1, b_0 および b_1 に関する連立方程式が式(4)で得られる。

$$a_0 I_1(\kappa) - b_0 K_1(\kappa) + a_1 \{ \kappa I_0(\kappa) + 2(1-\nu) I_1(\kappa) \} + b_1 \{ -\kappa K_0(\kappa) + 2(1-\nu) K_1(\kappa) \} = (L/2\pi)^3 p_0 \quad (4a)$$

$$-a_0 \{ I_0(\kappa) - 1/\kappa I_1(\kappa) \} + b_0 \{ -K_0(\kappa) - 1/\kappa K_1(\kappa) \} + a_1 \{ -(1-2\nu) I_0(\kappa) - \kappa I_1(\kappa) \} - b_1 \{ -(1-2\nu) K_0(\kappa) + \kappa K_1(\kappa) \} = 0 \quad (4b)$$

$$a_0 I_1(\kappa \lambda) - b_0 K_1(\kappa \lambda) + a_1 \kappa \lambda I_0(\kappa \lambda) - b_1 \kappa \lambda K_0(\kappa \lambda) = 0 \quad (4c)$$

$$a_0 I_0(\kappa \lambda) + b_0 K_0(\kappa \lambda) + a_1 \{ \kappa \lambda I_1(\kappa \lambda) + 4(1-\nu) I_0(\kappa \lambda) \} + b_1 \{ \kappa \lambda K_1(\kappa \lambda) - 4(1-\nu) K_0(\kappa \lambda) \} = 0 \quad (4d)$$

キーワード: 線状地中構造物, 地盤バネ, 耐震設計, 波長, 縦断方向

住所: 〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計上野センター 6F TEL:03-5818-7793 FAX:03-5818-7608

ここに、 $\alpha = 2b/L$, $\beta = a/b$ であり、前者は構造物半径と波長の比に、後者は構造物半径と変位を固定した半径の比に関係している。また、 p_0 は作用せん断応力の振幅 ($p(z)=p_0\sin(kz)$) であり、 ν は地盤のポアソン比である。 $r=b$ における最大変位を w_{max} として、地盤バネ定数 k を $k=2bp_0/w_{max}$ で定義すれば、式(5)が得られる。

$$k = \frac{G}{\beta} \quad (5a)$$

$$= 4 \frac{G}{\beta} \frac{1}{f(\alpha, \beta)} \quad (5b)$$

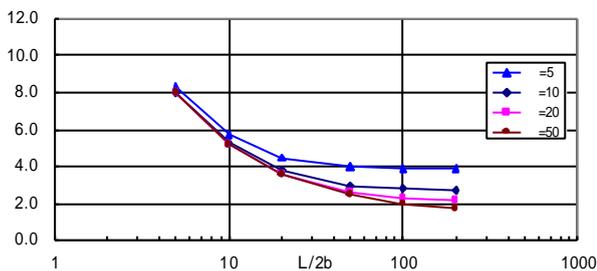
$$f(\alpha, \beta) = (L/2b)^3 p_0 = a_0 I_0(\alpha) + b_0 K_0(\alpha) + a_1 \{ I_1(\alpha) + 4(1-\nu) I_0(\alpha) \} + b_1 \{ K_1(\alpha) - 4(1-\nu) K_0(\alpha) \} \quad (5c)$$

である。すなわち、 $f(\alpha, \beta)$ は $(L/2b)^3 p_0 = 1$ として式(4)の連立方程式を解いたとき、式(5c)の右辺の値である。

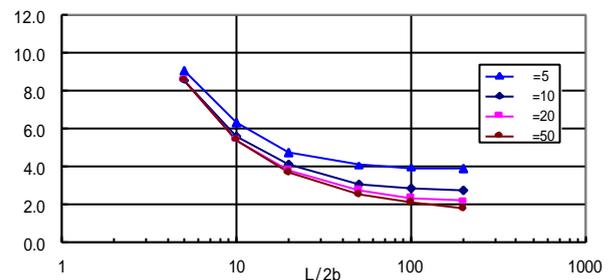
式(4)および(5)から軸方向地盤バネ定数は、地盤のせん断弾性係数 G 、地盤のポアソン比 ν 、構造物直径に対する波長の比 $L/2b$ および構造物半径に対する変位固定の半径の比 β に関係することがわかる。

3. 数値計算結果

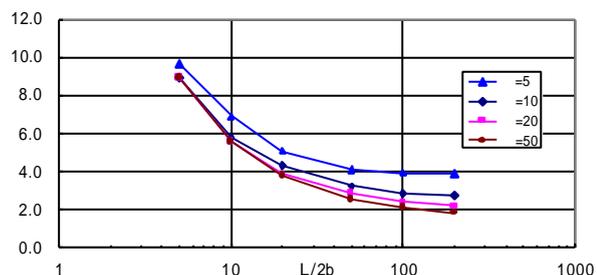
図-2 に数値計算結果を示す。ポアソン比を一定にしたケースと β を一定にしたケースを示しているが、いずれも構造物直径に対する波長の比が小さくなるほど、せん断弾性係数に対する地盤バネ定数の比 k/G が大きくなることわかる。また、波長が大きくなると k/G が一定値に近づく傾向がみられるが、その値は波長を無視したときの値¹⁾ (k/G が 5, 10, 20 および 50 でそれぞれ 3.903, 2.729, 2.097 および 1.606) に等しくなっている。図-2より、 $L/(2b)$ が 10 のとき波長を無視したバネ定数の 2~3 倍程度、一方 $L/(2b)$ が 100 でほぼ波長を無視したバネ定数になること示されている。図-2(d)は、 β を一定にしてポアソン比の影響を示しており、ポアソン比が大きくなるほど k/G が大きくなる傾向がみられるが、図示したポアソン比の範囲内ではポアソン比の変化の影響は小さいことがわかる。



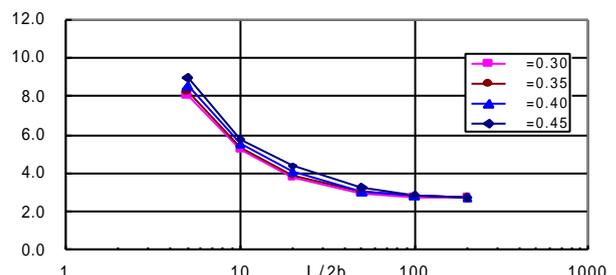
(a)ポアソン比一定 ($\nu = 0.3$)



(b)ポアソン比一定 ($\nu = 0.4$)



(c)ポアソン比一定 ($\nu = 0.45$)



(d) 一定 ($\beta = 10$)

図-2 地盤バネ定数と波長の関係

<参考文献> 1)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 No.570/ -40, pp.249-258, 1997 2)佐野祐一, 高田至郎, 嶋村貞夫, 河西寛: 応答変位法で用いる地盤バネ定数に関する検討, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集 -B, pp.890-891, 1994 3)松原勝己, 星谷勝: 線状地中構造物の軸方向地盤バネ定数に及ぼす波長の影響, 第 26 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.146-147, 1999 4)テイシェンコ・グ・デーア: 弾性論, 金多潔監訳, コロナ社, 1973