

I-616 円形地中構造物の横断面の耐震計算に用いる地盤ばねの検討

大成建設(株) 正会員 渡辺和明
同上 正会員 志波由紀夫

1. はじめに

応答変位法による地中構造物の耐震計算において、地盤ばねの評価は重要な検討項目の1つである。特にシールドトンネルのような円形断面を持つ構造物の横断面の耐震計算においては、地盤ばねの合理的なモデル化手法がないのが実情である。本研究は、均質地盤中の円孔の変形挙動を解析して地盤ばねの特性を調べるとともに、既に提案した地盤ばねのモデル化手法¹⁾の妥当性を検討したものである。

2. 検討方法

図-1に示すような均質地盤中の円孔表面に載荷した時の変位を2次元静的FEMを用いて算出し、荷重と変位の関係から地盤ばねのばね定数等を検討した。対象とした地盤・円孔条件は表-1に示す4ケースである。荷重については、図-2にその一例を示すように、円孔の円周方向にフーリエモードで表した形とし、表-2に示す18ケースの載荷条件を考えた。各荷重の振幅は1tf/m²とした。

3. 地盤ばねの提案モデル¹⁾

均質な無限弾性体中の円孔の挙動は下式で表される。

$$\text{放射方向反力} ; \sigma = \sum_{n=0}^{\infty} (K_n \cdot W_n + K_n' \cdot V_n) \cdot \sin(n\theta)$$

$$\text{接線方向反力} ; \tau = \sum_{n=0}^{\infty} (K_n \cdot V_n + K_n' \cdot W_n) \cdot \cos(n\theta)$$

ここに、 K_n, K_n' が地盤ばねに相当し、次のように定式化される。

$$K_n = \frac{2G}{R} \times \begin{cases} 1 & ; n=0 \\ 2 & ; n=1 \\ \frac{2n+1-2\nu(n+1)}{3-4\nu} & ; n \geq 2 \end{cases} \quad K_n' = \frac{2G}{R} \times \begin{cases} 0 & ; n=0,1 \\ \frac{n+1-2\nu(n+1)}{3-4\nu} & ; n \geq 2 \end{cases}$$

W_n, V_n ; 放射、接線方向変位 K_n, K_n' ; 主ばね、従ばね
 G ; 表層地盤のせん断弾性係数 R ; 円孔半径
 ν ; 表層地盤のポアソン比 n ; フーリエ次数

一般に、地盤ばねは荷重とそれによる変位の方向が同一で、かつ、各点で独立に挙動するWinkler型のばねでモデル化される場合が多い。これに対し、ここで提案した地盤ばねは次のような特徴を持つ。

- ① ばねの作用が放射方向と接線方向とで独立ではなく、互いに連成する。そこで、与えた荷重または変位と同じ方向に作用するばね(K_n)を"主ばね"、これと直交する方向に作用するばね(K_n')を"従ばね"と呼ぶことにする。
- ② 円孔の変形モード(変位を円周方向にフーリエ級数展開した時の次数)によってばね定数が変化する。

4. 地盤ばねの整理方法

図-3は基本形のケースにR-S-2の荷重を載荷したときの発生変位を示したものである。放射方向のみに載荷したケースであるが、接

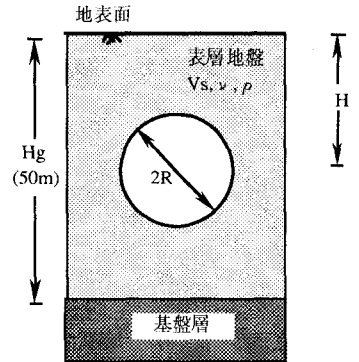


図-1 検討対象

表-1 地盤・トンネル条件

ケース NO.	せん断波速度 (m/s)	密度 ρ (t/m ³)	ポアソン比 ν	1.1径 2R (m)	H/Hg
1 (基本形)	120	1.6	0.45	16	0.5
2 (深度変更)	120	1.6	0.45	16	0.8
3 (1.1径変更)	120	1.6	0.45	6	0.5
4 (Vs変更)	240	1.8	0.40	16	0.5

表-2 載荷条件

載荷方向	関数系	フーリエ次数
放射 (R)	Sin波 (S)	n = 0, 1, 2, 3, 4
接線 (T)	Cos波 (C)	

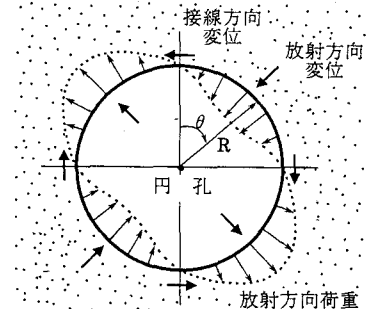


図-2 荷重ケース; R-S-2 (放射、Sin波、2次)

線方向にも無視できない大きさの変位が生じている。また、図-4に放射方向変位をフーリエ変換した場合の振幅の比率を示したが、与えた荷重モード(2次モード)以外の変位モードも生じている。この例のように、算出された変位から一義的に地盤ばね定数を決定するのは容易でない。そこで、ここではFEMの解析結果から、次の2種類の方法で地盤ばね定数を整理した。

- (a) 単純に、円孔表面上の荷重の大きさをそこでの発生変位で除し、それらの平均値をとる。
- (b) 発生変位においては載荷荷重と同じモードが卓越することから、放射方向および接線方向の変位をそれぞれフーリエ変換し、載荷荷重と同じ次数のフーリエ振幅を取り出して、前記の提案モデルにおける主ばねと従ばねに対応するばねのばね定数 K_n 、 K_n' を求める。

5. 検討結果

表-3に地盤ばねの算定結果を示した。表中の(a)、(b)は上に示した方法で整理したものである。また、耐震計算の実務でしばしば用いられている共同溝耐震設計要領(案)²⁾および道路橋示方書³⁾によるばね定数を、参考として示した。他の検討ケースの結果も含め、地盤ばねの特性に関して次のことが明らかになった。

- ① 地盤ばね定数は円孔表面の変形モードによって異なり、変形モードのフーリエ次数が高くなるほど地盤ばね定数が大きくなる。
- ② 提案モデルは、各地盤・円孔ケースの1次モードにおいて、また、円孔が基盤面に接近している場合に誤差が大きい。これは、提案式の誘導時に1次モードの変位が収束するように荷重のつり合いの仮定を設けたりことと、地表面および基盤面が考慮されていないことによる。しかし、耐震計算においては2次モードの変形が重要であり、このモードのばねに関しては良好にモデル化できている。

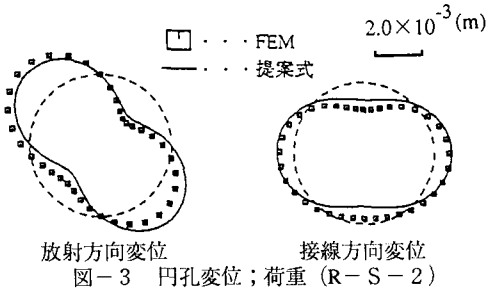


図-3 円孔変位; 荷重(R-S-2)

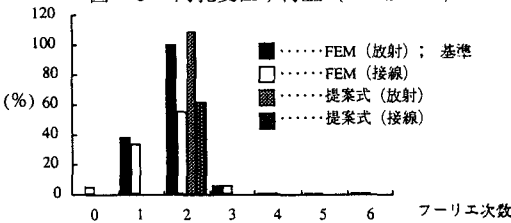


図-4 発生変位のフーリエ係数比率 ; 荷重(R-S-2)

表-3 地盤ばね比較表; ケースNo.1 (基本形)

荷重 ケース	主ばね (tf/m^3)				従ばね (tf/m^3)		
	提案式	(a)	(b)	(c)	(d)	提案式	(b)
R-S-1	1176	391	716	426	3253	0	502
R-S-2	1127	938	1197	426	3253	637	661
R-S-3	1665	1584	1797	426	3253	686	682
R-S-4	2204	2251	2431	426	3253	735	669
T-C-0	588	623	620	426	3253	0	0
T-C-1	1176	403	730	426	3253	0	502
T-C-2	1127	946	1201	426	3253	637	662
T-C-3	1665	1574	1795	426	3253	686	682
T-C-4	2204	2279	2448	426	3253	735	669

- (a) FEMによる載荷荷重と発生変位の割算による評価法
- (b) 放射・接線方向荷重を同時に載荷したと仮定した評価法
- (c) 共同溝設計指針(案)を参考にした評価法
- (d) 道路橋示方書IV(下部構造編)を参考にした評価法

6. まとめ

円形断面の地中構造物の耐震計算に用いる地盤ばねを検討した結果、提案した地盤ばねモデルの有用性が確認された。ただし、これは均質地盤を対象としたものであり、地盤が均質でない場合の地盤ばねについては、今後検討する必要がある。なお、本研究は建設省総合技術開発プロジェクト「地下空間の建設技術の開発(地下構造物の耐震設計技術の開発)に関する共同研究」⁴⁾の一環として実施したものである。

参考文献

- 1)志波他:シールドトンネルの横断面方向の地震時断面力の計算法,土木学会論文集, No437, pp.193~202, 1991年
- 2)国土開発技術研究センター:共同溝耐震設計要領(案), 1984年
- 3)日本道路協会:道路橋示方書(I共通編・IV下部構造編)・同解説, pp.193~196, 1990年
- 4)建設省土木研究所・先端建設技術センター・奥村組・鹿島建設・鴻池組・清水建設・大成建設・飛鳥建設・間組・フジタ:地下構造物の耐震設計技術に関する研究, 平成3年度共同研究報告書, 1992年