

I-570

埋設構造物のための地盤モデル

— 岡本・田村モデルの改良 —

○ 中日本建設コンサルタント	正会員	僧理栄司
中日本建設コンサルタント	正会員	久保田領一郎
中日本建設コンサルタント	正会員	前本尚二
豊橋技術科学大学	正会員	加藤史郎

1. はじめに 共同溝等の地下埋設構造物は、慣性力よりも地盤変位に大きく影響を受けると言われており、その設計にあたっては地盤変位に着目した解析を行なう必要がある。地盤変位を求めるために、田村⁽¹⁾・浜田⁽²⁾等は、埋設構造物の軸に直交する面によって地盤を多くのセグメントに分割し、セグメント毎に等価な一自由度系剪断バネモデルに置換する方法(以下、岡本・田村モデルと称する)を提案しており、この方法は一般にも広く利用されている。しかしながら、このモデルにおいては、隣接する地盤要素間のバネ定数の決定において、一方の地盤要素を固定して考える設定となっている。

そこで本稿においては、この点を改良し、隣接する地盤要素間のバネ定数が両要素間の相対変形に対応して決定されるよう定式化を行なっている。本定式化においては、エネルギー的な考えを導入しており、バネ定数の決定に地盤の動的特性がより適正に取り入れられるようになっている。そして、様々な地盤形状に対するその効果について検討を行っている。

2. 隣接地盤要素間のバネ定数の決定に関する定式化 図1に示す*i*番目の地盤セグメントの変位 ${}^i x(t)$ は、地盤が一次モードで振動すると仮定すると、次式の様になる。

$${}^i x(t) = {}^i \{X_1\} \cdot {}^i \beta_1 \cdot {}^i \alpha_1(t) \quad (1)$$

ここに、 ${}^i \{X_1\}$: *i* 番目の地盤セグメントの一次固有モード; ${}^i \beta_1$: *i* 番目の地盤セグメントの刺激係数; ${}^i \alpha_1(t)$: *i* 番目のセグメントの等価剪断一自由度系の応答値; である。

i+1番目の地盤セグメントの変位 ${}^{i+1} x(t)$ も同様に表わすと、結局*i*番目と*i*+1番目の地盤セグメントの間に生じる相対変位 ${}^{i, i+1} \Delta(t)$ は、次の様に表わすことができる。

$$\{^{i, i+1} \Delta(t)\} = {}^{i+1} x(t) - {}^i x(t) = {}^{i+1} \{X_1\} \cdot {}^{i+1} \beta_1 \cdot {}^{i+1} \alpha_1(t) - {}^i \{X_1\} \cdot {}^i \beta_1 \cdot {}^i \alpha_1(t) \quad (2)$$

次に、図1の*i*番目と*i*+1番目の地盤セグメントの第*j*層における軸直交方向の剪断剛性を、バネ定数 ${}^{i, i+1} W_j$ として表示すると、次の様になる。

$${}^{i, i+1} W_j = \frac{1}{(L_i/2) / ({}^i G_j \cdot {}^i H_j \cdot B) + (L_{i+1}/2) / ({}^{i+1} G_j \cdot {}^{i+1} H_j \cdot B)} \quad (3)$$

従って、*i*番目と*i*+1番目の地盤セグメントの間に生じる仮想歪エネルギー $\delta U^{i, i+1}$ は、(2)式と(3)式を用いて次の様に表わすことができる。

$$\begin{aligned} \delta U^{i, i+1} &= \{^{i, i+1} \delta \Delta(t)\}^T \cdot \{^{i, i+1} W\} \cdot \{^{i, i+1} \Delta(t)\} \\ &= \{^{i+1} \{X_1\}^T \cdot {}^{i+1} \beta_1 \cdot {}^{i+1} \delta \alpha_1(t) - {}^i \{X_1\}^T \cdot {}^i \beta_1 \cdot {}^i \delta \alpha_1(t)\} \cdot \{^{i, i+1} W\} \\ &\quad \cdot \{^{i+1} \{X_1\} \cdot {}^{i+1} \beta_1 \cdot {}^{i+1} \alpha_1(t) - {}^i \{X_1\} \cdot {}^i \beta_1 \cdot {}^i \alpha_1(t)\} \\ &= \{^i \delta \alpha_1(t) \quad {}^{i+1} \delta \alpha_1(t)\} \cdot \{G\} \cdot \begin{Bmatrix} {}^i \alpha_1(t) \\ {}^{i+1} \alpha_1(t) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\{^{i, i+1} W\}$ は、(2)式で表わされる ${}^{i, i+1} W_j$ を対角項とする対角マトリックスである。また $\{G\}$ は、次式で表わされる隣接地盤セグメント間のばねを表わす剛性マトリックスである。

$$\{G\} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{12} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 G_{11} &= ({}^1\beta_1)^{2 \cdot 1} \{X_1\}^T \cdot [{}^{1 \cdot 1+1}W] \cdot {}^1\{X_1\} \\
 G_{12} &= -{}^1\beta_1 \cdot {}^{1+1}\beta_1 \cdot {}^{1+1}\{X_1\}^T \cdot [{}^{1 \cdot 1+1}W] \cdot {}^1\{X_1\} \\
 G_{22} &= ({}^{1+1}\beta_1)^{2 \cdot 1+1} \{X_1\}^T \cdot [{}^{1 \cdot 1+1}W] \cdot {}^{1+1}\{X_1\}
 \end{aligned} \quad (6)$$

以上のように、(6)式を用いることによって隣接地盤セグメント間の剛性を考慮したバネは求められる。

3. 地盤形状の影響 岡本・田村モデルと本定式化について、地盤形状を変えてその違いについて検討した。検討した地盤形状を図2ならびに表1に示す。その結果を表2に、隣接地盤セグメント間バネの両端に反対方向の単位変形を加えた場合にバネに生じる力として示した。また、その結果を岡本・田村モデルとの比の形で示したのが図3である。同図には、比較のために、地盤セグメントの各層の剛性の直列和を利用したバネ定数⁽³⁾の結果も示している。その図より、隣接地盤セグメント間の地盤形状の違いが大きくなるほど、本定式化との違いが大きくなることが分かる。

4. まとめ 埋設構造物の設計に多く用いられる岡本・田村モデルにおける隣接地盤セグメント間バネについて改良を加えた結果、隣接地盤間の地盤形状の違いによって、その影響が大きくなることが分かった。

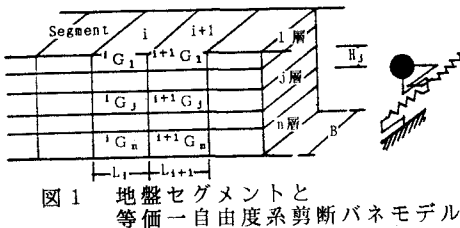


図1 地盤セグメントと等価一自由度系剪断バネモデル

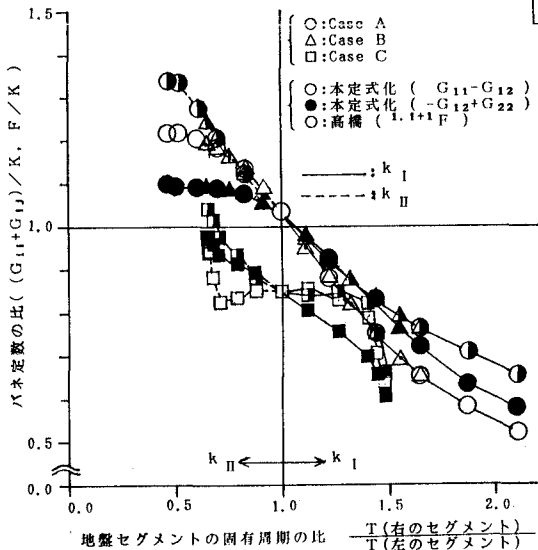


図3 隣接地盤セグメント間のバネ定数の比較(岡本・田村モデルとの比により表現)

岡本・田村の方法(バネ定数: ${}^{1 \cdot 1+1}K$)

$${}^{1 \cdot 1+1}K = \frac{{}^{1+1}\beta_1 \cdot B}{(L_i + L_{i+1})/2} \sum_j {}^{1+1}G_j \cdot H_j \cdot {}^{1+1}X_{1j}$$

高橋の方法(バネ定数: ${}^{1 \cdot 1+1}F$)

$${}^{1 \cdot 1+1}F = \frac{1}{1/k_i + 1/{}^{1+1}k_i}$$

$${}^1k_i = ({}^1\beta_1)^{2 \cdot 1} \{X_1\} \cdot ({}^1f) \cdot {}^1\{X_1\}$$

1f は、 ${}^1f = {}^1G_j \cdot H_j \cdot B / (L_i/2)$ を対角項とする対角マトリックスである。

表1 解析ケース

解析 Case	A	B	C
0	$H_L=0$	$H_L=0$	$H_L=0, H_T=0$
1	$H_L=2$	$H_L=2$	$H_L=0, H_T=2$
2	$H_L=4$	$H_L=4$	$H_L=0, H_T=4$
3	$H_L=6$	$H_L=6$	$H_L=0, H_T=6$
4	$H_L=8$	$H_L=8$	$H_L=2, H_T=6$
5	$H_L=10$	$H_L=10$	$H_L=4, H_T=6$

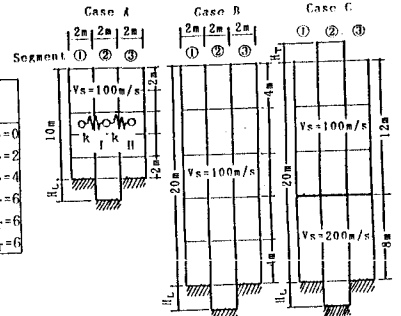


図2 解析モデル

表2 隣接地盤セグメント間のバネ定数

Model	A0	A1	A2	A3	A4	A5
固有周期	0.402	0.486	0.573	0.664	0.755	0.845
${}^{1 \cdot 1+1}K$	16963	20721	24602	28464	32288	36078
$G_{11}-G_{12}$	17572	18193	18434	18509	18518	18503
$-G_{12}+G_{22}$	17572	19242	20081	20453	20601	20645
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}F$	17572	19061	20424	21621	22653	23542
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}K$	16963	16963	16963	16963	16963	16963
$G_{11}-G_{12}$	17572	19242	20081	20453	20601	20645
$-G_{12}+G_{22}$	17572	18193	18434	18509	18518	18503
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}F$	17572	19061	20546	21621	22653	23542

Model	B0	B1	B2	B3	B4	B5
固有周期	0.803	0.887	0.973	1.060	1.145	1.238
${}^{1 \cdot 1+1}K$	33926	37612	41411	45320	49204	53076
$G_{11}-G_{12}$	35145	35897	36386	36689	36868	36968
$-G_{12}+G_{22}$	35145	37064	38484	39482	40162	40613
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}F$	35145	36660	38123	39523	40847	42087
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}K$	33926	33926	33926	33926	33926	33926
$G_{11}-G_{12}$	35145	37064	38484	39482	40162	40613
$-G_{12}+G_{22}$	35145	35897	36386	36689	36868	36968
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}F$	38298	38298	38298	38298	38298	38298

Model	C0	C1	C2	C3	C4	C5
固有周期	0.567	0.643	0.719	0.796	0.818	0.841
${}^{1 \cdot 1+1}K$	38425	40238	42675	45493	51886	59940
$G_{11}-G_{12}$	32522	34246	35241	35815	36728	37634
$-G_{12}+G_{22}$	32522	32512	32214	31749	33929	36399
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}F$	32522	34023	35797	37599	38715	40041
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}K$	38425	39425	39425	38425	38425	39425
$G_{11}-G_{12}$	32522	32512	32214	31749	33929	36399
$-G_{12}+G_{22}$	32522	34246	35241	35815	36728	37634
${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}F$	32522	34023	35797	37599	38715	40041

k_i : 第1セグメントと第2セグメントの間のバネ定数

k_{i+1} : 第2セグメントと第3セグメントの間のバネ定数

${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}K$: 田村の方法; $G_{11}-G_{12}$, $-G_{12}+G_{22}$: 本定式化

${}^{2 \cdot 1 \cdot 1+1}F$: 高橋の方法

- 参考文献: 1) C. Tamura, S. Okamoto and M. Hamada: "Dynamic behavior of a submerged tunnel during earthquakes"; Report of the Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Vol. 24, No. 5, March, 1975, pp. 1-77.
2) 浜田政則・泉博充: 「沈埋トンネルの地震応答計算」; 土木学会第26回年次学術講演概要集, 第1部, 1971, pp. 317-320.
3) 高橋是友: 「地盤と埋設構造物の動的応答解析法」; 豊橋技術科学大学大学院修士論文, 昭和62年。