

# (175) 不整形軟弱地盤中の長軸構造物の地震応答特性

岡山大学 竹宮 宏和

○ハザマ 須田 清隆

ハザマ 小野 正樹

## 1) はじめに

近年、土木技術の目ざましい進展に伴い、土木構造物は長大化・複雑化の一途をたどっている。また、都市部などでは、土地の有効利用という観点からも厳しい立地条件の中に巨大かつ複雑な構造物を建設するといったニーズが増加してきていることは周知の通りである。

本研究は、このような設計対象の広域化に伴って考慮すべき設計要件である不整形な基盤を有する軟弱地盤中に建設が計画されるシールドトンネル等に関して、地盤環境や構造形状の違いによる応答特性を評価し、従来用いられてきている設計解析法の妥当性について検討を加えたものである。

## 2) 設計上の課題

設計上の課題としては、構造物の長大化に伴い整形基盤を前提とする設計仮定が必ずしも成立しなくなり、現行の応答変位法等の設計方法の適用に制約がでてくる事が挙げられる。特に、基盤の不整形性や不均質な地盤構成は地盤応答に差異を生じさせる事になり、シールドトンネル構造物や長大橋梁等の長軸構造物にとって設計上重要課題となると考える。

## 3) 検討方法

一般に適用されている数値解析手法のうち、地盤-構造物系のように幾何学的に複雑なものをモデル化するには有限要素法 (FEM) が有利であり、地盤の半無限性を忠実に捉えるには境界要素法 (BEM) が適している。本研究では、これら両者の長を活かすことのできるFEM-BEMハイブリッド解析法を適用した。本手法は、遠地盤のインピーダンスをBEMのグリーン関数によって算出し、近傍地盤と構造物をFEMでモデル化して、両者の領域の境界上の節点における変位の連続条件と節点力のつりあい条件から未知節点変位を算出する解析法である (図1)。運動方程式の最終形を遠地盤  $b$  と近傍地盤・構造物  $i$  とに分けて分割マトリックス表示すれば次式となる。

$$\begin{bmatrix} D_{ii}^n & D_{ib}^n \\ D_{bi}^n & D_{bb}^n + K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u}_i^n \\ \hat{u}_b^n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ K_{bb} \hat{u}_b^s - \hat{P}_b^s \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $D^n$ は近傍地盤の動的剛性マトリックス、 $K$ は遠地盤インピーダンス、 $u^s$ は境界上での自然地盤応答変位、 $P^s$ は外力であり、 $u$ は未知変位を表わしている。

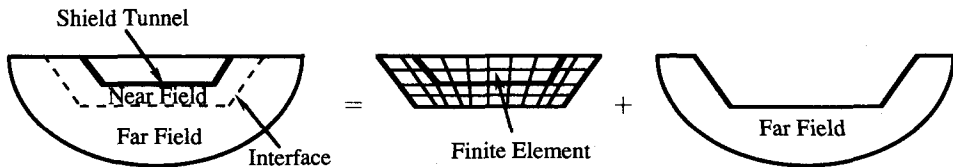


図1 FEM-BEMハイブリッド解析法

## 4) 検討モデル

### 4-1) 解析モデル

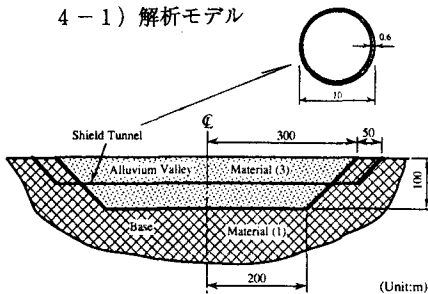


図2 解析モデル

表1 地盤物性

Material	Shear Velocity $V_s$ (m/s)	Density $\rho$ ( $\text{t/m}^3$ )	Damping Ratio $\beta$	Poisson Ratio $\nu$
(1)	300	2.0	0.02	0.30
(2)	75	1.8	0.02	0.45
(3)	100	1.8	0.02	0.45
(4)	50	1.8	0.02	0.45

表2 構造物諸元

Cross Sectional Area $A$ ( $\text{m}^2$ )	78.54
Moment Of Inertia $I$ ( $\text{m}^4$ )	196.50
Young's Modulus $E$ ( $\text{t/m}^2$ )	$2.4 \times 10^7$
Density $\rho$ ( $\text{t/m}^3$ )	2.5
Damping Ratio $\beta$	0.02
Poisson Ratio $\nu$	0.25

4-2) 数値解析モデル

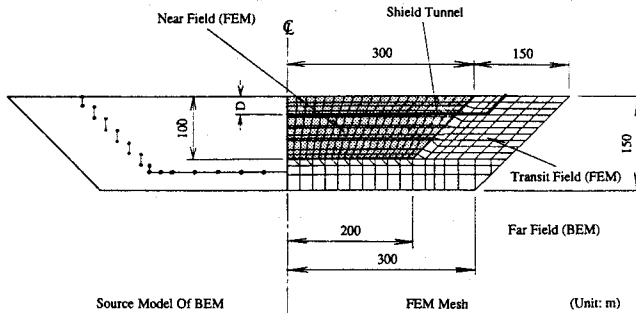


図3 数値解析モデル

4-3) 荷重条件

- ・一様地盤（基盤物性）において、地表面での入射波振幅が1.0。  
ただし、斜め入射の場合には水平方向の位相遅れを考慮。

4-4) 解析パラメータ

(1) 入射波種類

P波、SV波

(2) 入射角

$\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$

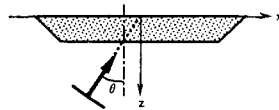


図4 入射角

(4) シールド・トンネル設置深さ

$D = 10m, 30m, 50m$

(3) 入射波振動数、入射波長

表3 入射波振動数、入射波長

No.	Frequency		Wave Length (m)	
	(rad/sec)	(Hz)	P Wave	SV Wave
1	0.628	0.10	5,615	3,000
2	1.257	0.20	2,805	1,500
3	1.571	0.25	2,245	1,200
4	1.885	0.30	1,871	1,000
5	2.199	0.35	1,603	857
6	2.513	0.40	1,403	750
7	2.827	0.45	1,247	667
8	3.142	0.50	1,122	600

5) 検討結果

5-1) 不整形基盤上での応答変位特性

図5は、P波における振動数帯域での地表面変位モード比較図であり、図6は、P波における任意振動数 ( $\omega = 2.513 \text{ rad/sec}$ ) での地表面と構造物設置位置での変位モードについて、入射角度別にまとめたものである。この結果から、不整形基盤を有するモデルでの鉛直成分の変位量と水平成分の変位量について表4に比較検討した。水平成分で見ると、構造物の設置位置が深くなると地表面の変位が増幅する傾向にある。設置位置が10mで地表面変位が  $\delta \text{ max} = 1.58$  に対して設置位置が50mでの地表面変位は  $\delta \text{ max} = 5.41$  である。また、構造物設置位置での変位でみると設置位置が10mでの地盤変位が  $\delta \text{ max} = 0.95$  に対して設置位置が50mでの地盤変位は  $\delta \text{ max} = 1.62$  である。構造物設置位置に対する地表面位置での変位比較でみると、設置位置10mでは  $k = 1.66$ 、設置位置50mでは  $k = 3.34$  と構造物位置により応答特性が多少異なる事が確認された。鉛直成分で見ると、水平成分の傾向とは逆で、構造物の設置位置が浅いほど、地表面変位が増幅している。設置位置が10mで地表面変位が  $\delta \text{ max} = 6.50$  に対して設置位置が50mでの地表面変位は  $\delta \text{ max} = 3.56$  である。また、構造物設置位置での変位でみると設置位置が10mでの地盤変位が  $\delta \text{ max} = 6.57$  に対して設置位置が50mでの地盤変位は  $\delta \text{ max} = 2.93$  である。構造物設置位置に対する地表面位置での変位比較でみると、設置位置10mでは  $k = 0.99$ 、設置位置50mでは  $k = 1.22$  と構造物位置による応答特性には大きく差がない事が確認された。

図7は、SV波における振動数帯域での地表面変位モード比較図、図8は、SV波における任意振動数 ( $\omega = 2.513 \text{ rad/sec}$ ) での地表面と構造物設置位置での変位モードについて、入射角度別にまとめたものであり、表5で比較検討をしている。この結果から、不整形基盤を有するモデルでは、鉛直成分の変位量が水平成分の変位量と同程度に出現することが確認された。水平成分で見ると、構造物の設置位置が深くなると地表面の変位が増幅している。設置位置が10mで地表面変位が  $\delta \text{ max} = 4.61$  に対して設置位置が50mでの地表面変位は  $\delta \text{ max} = 9.44$  である。また、構造物設置位置での変位でみると設置位置が10mでの

地盤変位が  $\delta \max = 2.42$  に対して設置位置が50mでの地盤変位は  $\delta \max = 1.06$  である。構造物設置位置に対する地表面位置での変位比較でみると、設置位置10mでは  $k = 1.90$ 、設置位置50mでは  $k = 8.91$  と構造物位置により応答特性がかなり異なる事が確認された。鉛直成分でみると、水平成分の傾向とは逆で、構造物の設置位置が浅いほど、地表面変位が増幅している。設置位置が10mで地表面変位が  $\delta \max = 13.1$  に対して設置位置が50mでの地表面変位は  $\delta \max = 2.92$  である。また、構造物設置位置での変位でみると設置位置が10mでの地盤変位が  $\delta \max = 13.3$  に対して設置位置が50mでの地盤変位は  $\delta \max = 2.55$  である。構造物設置位置に対する地表面位置での変位比較でみると、設置位置10mでは  $k = 0.99$ 、設置位置50mでは  $k = 1.15$  と構造物位置による応答特性には大きく差がない事が確認された。

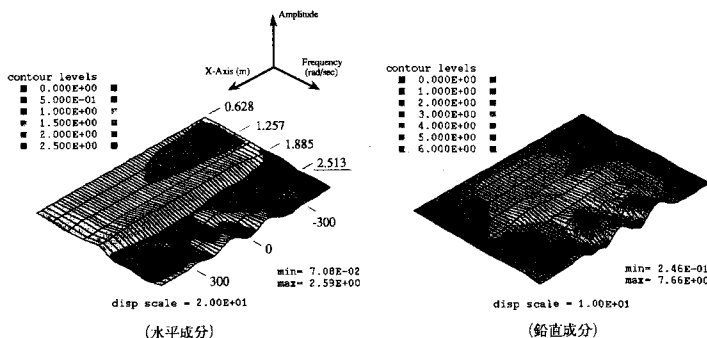


図5 地表面変位モード比較図 (P波、30°入射) 設置位置10m

表4 変位比較表 (P波、 $\omega = 2.513$ )

構造物設置位置	水平変位			鉛直変位		
	地表面	構造物	比率 k	地表面	構造物	比率 k
10 m	1.58 ( $\theta = 30^\circ$ )	0.95 ( $\theta = 45^\circ$ )	1.66	6.50 ( $\theta = 30^\circ$ )	6.57 ( $\theta = 30^\circ$ )	0.99
30 m	3.36 ( $\theta = 30^\circ$ )	1.20 ( $\theta = 30^\circ$ )	2.80	5.37 ( $\theta = 30^\circ$ )	5.39 ( $\theta = 30^\circ$ )	0.99
50 m	5.41 ( $\theta = 45^\circ$ )	1.62 ( $\theta = 45^\circ$ )	3.34	3.56 ( $\theta = 15^\circ$ )	2.93 ( $\theta = 15^\circ$ )	1.22

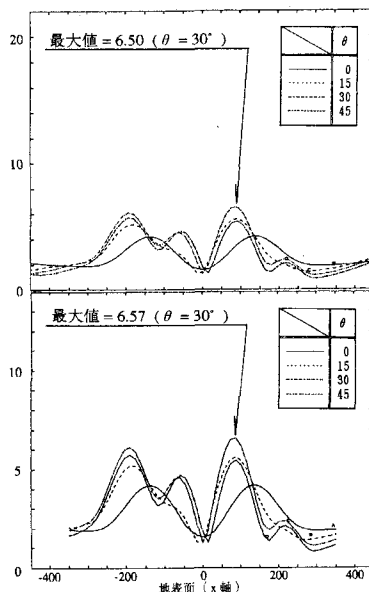


図6 変位モード図 (P波、 $\omega = 2.513$ ) 設置位置10m  
上：地表面、下：構造物

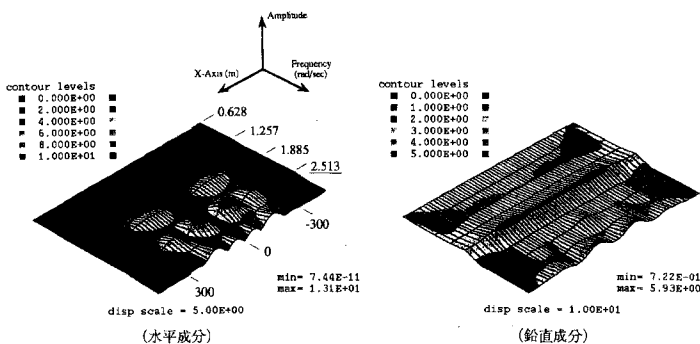


図7 地表面変位モード比較図 (SV波、鉛直入射) 設置位置10m

表5 変位比較表 (SV波、 $\omega = 2.513$ )

構造物設置位置	水平変位			鉛直変位		
	地表面	構造物	比率 k	地表面	構造物	比率 k
10 m	4.61 ( $\theta = 0^\circ$ )	2.42 ( $\theta = 0^\circ$ )	1.91	13.1 ( $\theta = 0^\circ$ )	13.3 ( $\theta = 0^\circ$ )	0.99
30 m	9.42 ( $\theta = 0^\circ$ )	3.52 ( $\theta = 0^\circ$ )	2.68	6.59 ( $\theta = 45^\circ$ )	6.63 ( $\theta = 45^\circ$ )	0.99
50 m	9.44 ( $\theta = 0^\circ$ )	2.36 ( $\theta = 30^\circ$ )	4.00	2.92 ( $\theta = 45^\circ$ )	2.55 ( $\theta = 45^\circ$ )	1.15

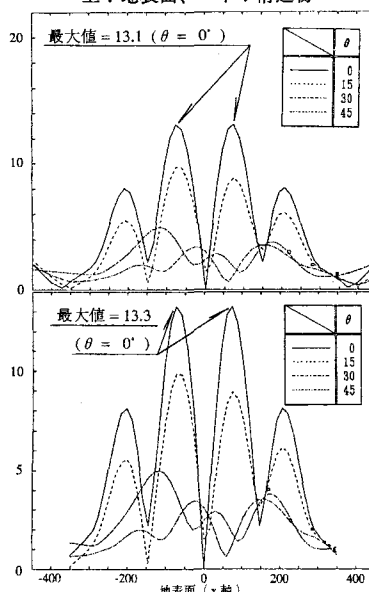


図8 変位モード図 (SV波、 $\omega = 2.513$ ) 設置位置10m  
上：地表面、下：構造物

5-2) 発生断面力による構造特性

図9は、P波とSV波におけるシールド構造物の設置深度 (d=10、30、50m) による構造物の応答特性についてまとめたものであり、表6で比較検討をしている。P波においては、構造物設置位置が浅い程、曲げモーメントが大きくなる傾向にある。設置位置10mに対する50mでの曲げモーメントの比は約27%である。また、軸力とせん断力については、設置位置が深い程、大きくなる傾向にある。それぞれの設置位置10mに対する50mでの断面力比は、軸力で約1.68倍、せん断力で約1.28倍である。一方、SV波においてもP波と比べ発生する断面力の傾向は同様であり、設置位置10mに対する50mでの曲げモーメントの比は約16%である。また、軸力とせん断力については、設置位置が深い程、大きくなる傾向にあり、それぞれの設置位置10mに対する50mでの断面力比は、軸力で約1.61倍、せん断力で約3.21倍である。波動種別での構造物応答の特徴としては、最大曲げモーメントが、P波では入射角30°前後で、SV波では入射角0°前後で発生している事である。

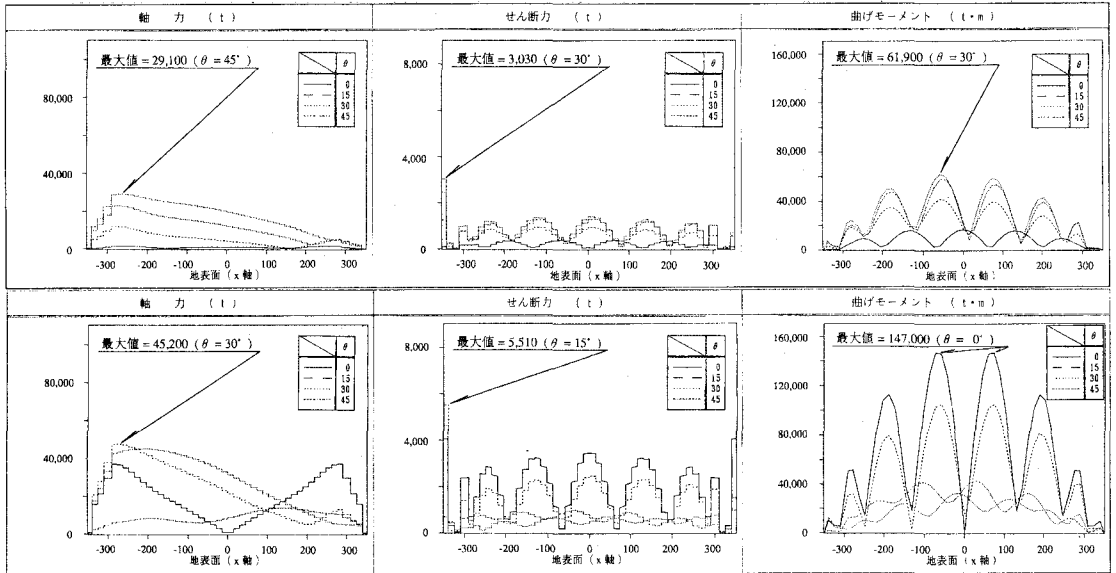


図9 構造物断面力モード図 (設置位置 10m、 $\omega = 2.513$ )

上:P波、下:SV波

表6 断面力比較表 ( $\omega = 2.513$ )

構造物 設置位置	P波			SV波		
	軸力 (t)	せん断力 (t)	曲げモーメント (t・m)	軸力 (t)	せん断力 (t)	曲げモーメント (t・m)
10 m	29,100 ( $\theta = 45^\circ$ )	3,030 ( $\theta = 30^\circ$ )	61,900 ( $\theta = 30^\circ$ )	45,200 ( $\theta = 30^\circ$ )	5,510 ( $\theta = 15^\circ$ )	147,000 ( $\theta = 0^\circ$ )
30 m	35,600 ( $\theta = 45^\circ$ )	9,090 ( $\theta = 45^\circ$ )	23,400 ( $\theta = 30^\circ$ )	61,200 ( $\theta = 30^\circ$ )	14,500 ( $\theta = 30^\circ$ )	48,600 ( $\theta = 0^\circ$ )
50 m	43,300 ( $\theta = 45^\circ$ )	10,400 ( $\theta = 45^\circ$ )	16,300 ( $\theta = 45^\circ$ )	72,700 ( $\theta = 30^\circ$ )	17,700 ( $\theta = 30^\circ$ )	24,400 ( $\theta = 30^\circ$ )

6) 考察

検討モデルが台形基盤の様な不整形基盤を有する地盤構造物の地震時挙動の特徴は、鉛直変位が出現することであり、構造物の設置位置が浅い程地盤-構造物の変位量が共に大きくなる事である。また、構造物の設置位置が深くなるに従い地表面の水平変位が増幅する事も確認された。構造物に発生する断面力の傾向も構造物の剛性や設置位置によって大きく異なる事からも従来の応答変位法等にみられる標準的設計法の適用には十分な検討も必要と考える。

参考文献

- 1) Takemiya, Suda, Ono: BEM-FEM Hybrid Analysis for Topographical Site Response Characteristics, Proc.2nd Int. Conf. Recent Advances in e.Eathq. Eng. Soil Dyn. St.Louis, Missouri, USA, 1991.3.
- 2) 竹宮・友野・須田・小野: BEM-FEMハイブリッド解析による地盤の2次元震動性状、土木学会論文集 NO.450/I-20, pp53-62, 1992.7.
- 3) 竹宮・横田・須田: 不整形軟弱地盤中の長軸埋設構造物の地震応答性状、第47回年次学術講演会、1992.9.