

(120) 不整形軟弱地盤中の長軸埋設構造物の地震応答性状

岡山大学大学院	学生員	内野 博樹
岡山大学博士課程	学生員	Maher ADAM
岡山大学環境理工学部	正会員	竹宮 宏和

1. まえがき

過去の地震被害が谷地盤や沖積地盤などの不整形な地盤に多く集中しており、また不整形地盤の震動特性に関する研究で、不規則な境界面から発する散乱波のため、水平層の地盤とは大きく異なる応答性状が指摘されている。最近の構造物の長大化、長軸化に伴って地形を反映しての地盤内の波動伝播特性、増幅特性が埋設構造物の地震応答性状に大きく関わってくる。

地形/地盤の条件による地震波の空間分布に関しては、著者らも、振動数領域応答解析から、沖積層地盤の諸元と入射波の種別、入射波長、入射角等についてのパラメータ解析を行ってきた。傾斜基盤を有する地形の散乱波動場の特徴として、基盤面での水平方向成分の地震波入射に対しても、鉛直方向の地盤の応答がかなりの程度誘発されることで、これは長軸構造物へかなりの程度の曲げ変形が懸念される。従来のライフライン系の延長で耐震設計の検討を軸方向のみに限定するのは当を得ない。

本論文では、埋設シールドトンネル構造物を対象に、前論文の有限要素 (FE) 領域に構造物を含め、遠地盤 (半無限基盤) の境界要素 (BE) 領域とのハイブリッド法解析¹⁾を行い、地震時の応答性状を把握した。

2. FEMとBEMのハイブリッド解析の概要

振動数領域： BE領域の波動場の解析から遠地盤インピーダンス K_{bb}^* は仮想ソース法から評価され

$$K_{hh}^* = \hat{H}^T [\hat{G}^T]^{-1} \hat{H} \quad (1)$$

一方、FE領域における地盤と構造物 (はり) とを併せた動的剛性マトリックス D による支配方程式をインターフェイス S (添字 b) と内部節点 (添字 i) に分割して表と

$$\begin{bmatrix} D_{ii} & D_{ib} \\ D_{bi} & D_{bb} + K_{bb}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{U}_i \\ \hat{U}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \hat{P}_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに $\hat{U}_i$: FE領域内部の節点変位、 $\hat{U}_b$: FE領域とBE領域のインターフェイス上の節点変位、 $\hat{P}_b$: 同節点力、地震波の入射によるインターフェイス節点への入力、自然地盤応答による変位 $\hat{U}^f$ と節点力 $\hat{P}^f$ から次式で求められ

$$\hat{P}_b = K_{hh}^* \hat{U}^f - \hat{P}^f \quad (3)$$

時間領域解析： 遠地盤領域の散乱波動場を境界要素法から定式化すると

$$H^0(U^K - U^{IK}) - G^0(T^K - T^{IK}) = - \sum_{k=1}^{K-1} \{ H^{K-k} U^k - G^{K-k} T^k \} = -F^K \quad (4)$$

ただし、 G 、 H はそれぞれ変位、表面力グリーン関数マトリックスである。

埋設構造物を含む近傍地盤を有限要素法から多自由度系としての支配方程式は

$$M \ddot{U}^K + C \dot{U}^K + K U^K = F_F^K(t) \quad (5)$$

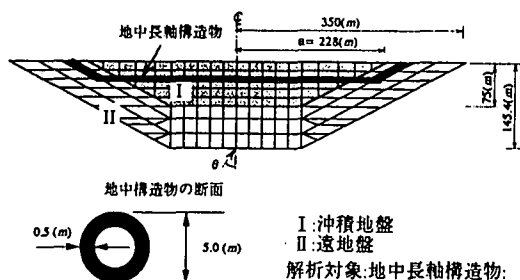
重み付き残差法から上記の両領域を結合すると

$$\begin{aligned} & \left[\mathbf{M}_F + \gamma \Delta t_F \mathbf{C}_F + \beta (\Delta t_F)^2 \mathbf{K}_F + \alpha (\Delta t_F)^2 \mathbf{K}_B \right] \mathbf{U}^{K+i/N} + \\ & \left[-2\mathbf{M}_F + (1-2\gamma) \Delta t_F \mathbf{C}_F + (1/2-2\beta+\gamma) (\Delta t_F)^2 \mathbf{K}_F + (1-\alpha) (\Delta t_F)^2 \mathbf{K}_B \right] \mathbf{U}^{K+(i-1)/N} + \\ & \left[\mathbf{M}_F - (1-\gamma) \Delta t_F \mathbf{C}_F + (1/2+\beta-\gamma) (\Delta t_F)^2 \mathbf{K}_F \right] \mathbf{U}^{K+(i-2)/N} = \\ & \alpha (\Delta t_F)^2 \mathbf{K}_B^{0,K+i/N} + (1-\alpha) (\Delta t_F)^2 \mathbf{K}_B^{0,K+(i-1)/N} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{M}_F$ 、 $\mathbf{C}_F$ 、 $\mathbf{K}_F$ は有限要素領域内の質量、減衰、および剛性マトリックスを、 $\mathbf{K}_B$ は遠地盤剛性、 Δt_F は時間刻みを表す。 $(\alpha=1/2, \beta=1/4, \gamma=1/2)$ 。

3. 数値解析例

解析モデルとして、図1に示す様な半無限地盤上の均質な不整形沖積層内に埋設されたシールド・トンネルを選んだ。その地盤物性を表1、2に掲げる。平面歪みモデル化においては、奥行きを2D(D=トンネルの直径)とした。解析に際して、加振ソースの配置は前論文のFig.3.bに示したものである。入射波にはSV波を仮定して、鉛直からの傾斜角を $\theta=0^\circ$ 、 30° とする。入射波長としては、無次元振動数 $\eta=2a/\lambda$ (入射波長 λ に対する不整形地盤の表面幅 $2a$)を導入した。



断面積 A	7.07 (m ²)
ポアソン比 ν	0.25
密度 ρ	2.5 (t/m ³)
断面二次モーメント I_z	18.11 (m ⁴)
断面二次極モーメント I_x	36.22 (m ⁴)
せん断弾性係数 G	1.2×10^{11} (N/m ²)
減衰定数 β	0.05

表1 構造物の物性値

図1 解析対象のモデル

領域番号	ポアソン比	密度	せん断弾性係数	減衰定数
I	0.45	1.60 (t/m ³)	6.4×10^4 (N/m ²)	0.05
II	0.35	2.0 (t/m ³)	5.0×10^5 (N/m ²)	0.005

表2 地盤の物性値

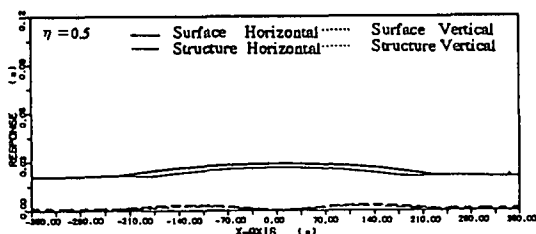


図2 変位応答 ($\theta=0^\circ$)

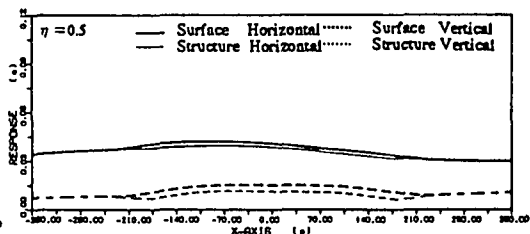


図3 変位応答 ($\theta=30^\circ$)

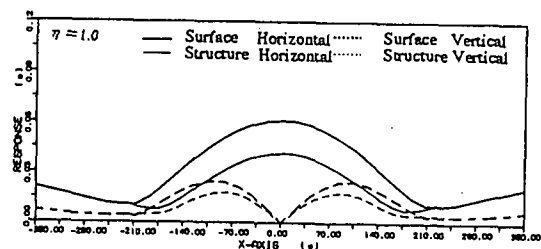


図4 変位応答 ($\theta = 0^\circ$)

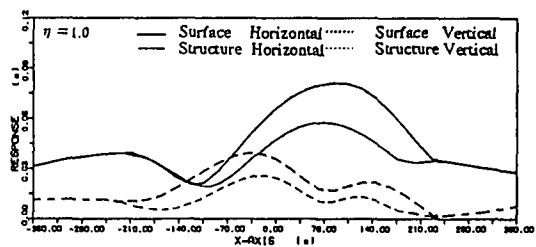


図5 変位応答 ($\theta = 30^\circ$)

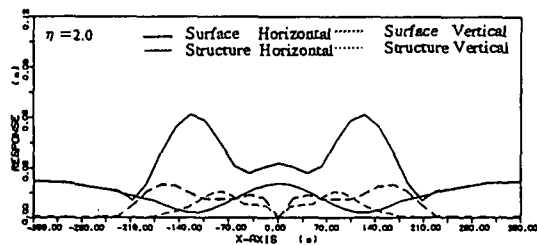


図6 変位応答 ($\theta = 0^\circ$)

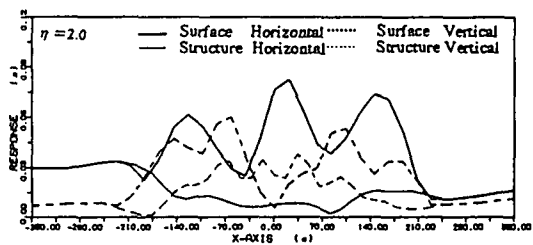


図7 変位応答 ($\theta = 30^\circ$)

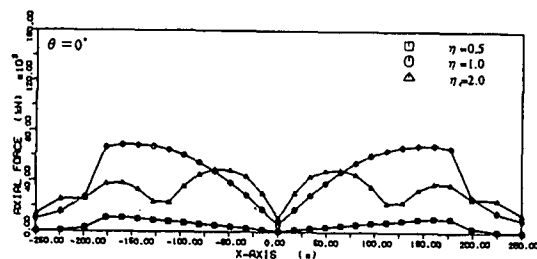


図8 軸力分布 ($\theta = 0^\circ$)

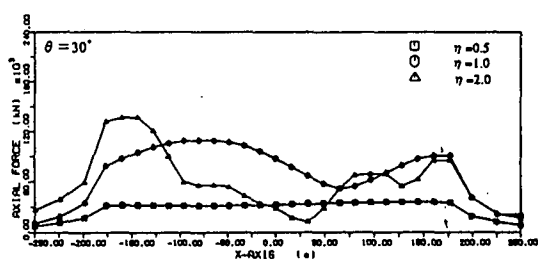


図9 軸力分布 ($\theta = 30^\circ$)

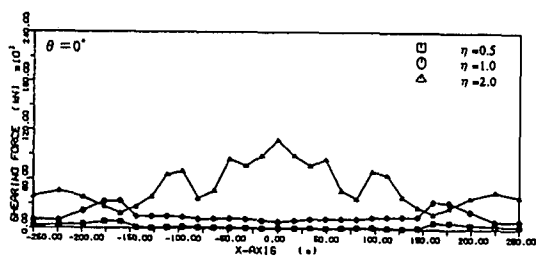


図10 せん断力分布 ($\theta = 0^\circ$)

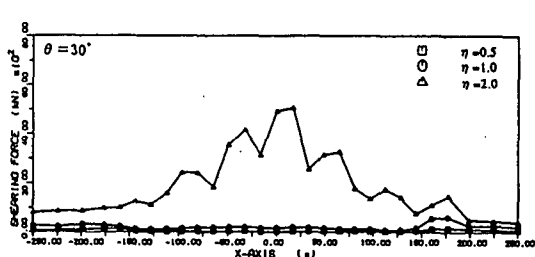


図11 せん断力分布 ($\theta = 30^\circ$)

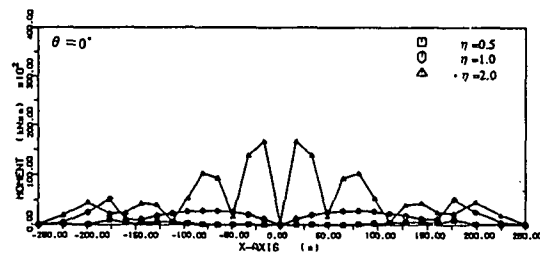


図12 曲げモーメント分布 ($\theta = 0^\circ$)

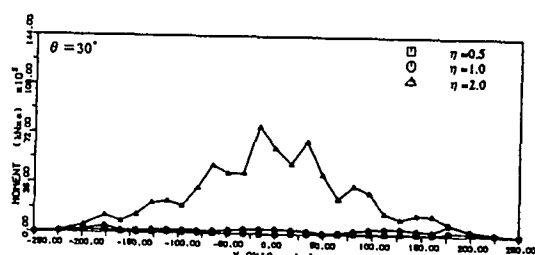


図13 曲げモーメント分布 ($\theta = 30^\circ$)

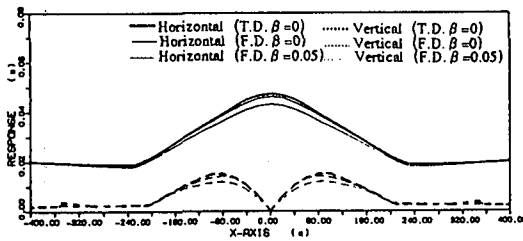


図14 時間領域解と振動数領域解の比較

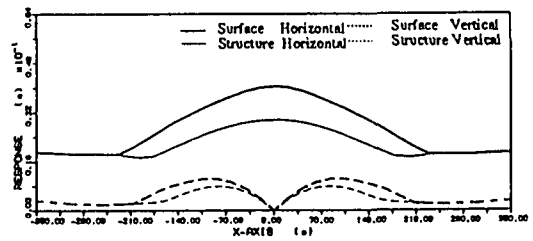


図15 合成波入射時の変位分布 ($\theta = 0^\circ$)

図2～7はSV波入射(単位振幅1cm)に対する変位応答で、構造物と併せて不整形地盤の地表面についても描いてある。無次元振動数 η と入射角 θ によって著しく応答の様相は変化する。 η が小さいと構造物位置と地表面とではそれほど応答差はない。しかし、 η と共にそれらの差は大きくなる。そして傾斜基盤面上の応答の鉛直成分は大きくなる。

傾斜入射下では、場所によっては鉛直応答が水平成分を上回る。図8～13は構造物の断面力で、振動数に比例して増大しているが、 $\eta=2$ になると急激に大きい応答値となっている。軸力は地盤の物性が急変する箇所でも最大値を呈している。SV波の傾斜入射時には、鉛直入射時より大きな応答となる。曲げモーメント、せん断力の分布では、モデルの中央部で大きな応答を示す。軸力による応力を比較して、曲げ応力は η が小さいと数%以内であるが、 $\eta=2$ では最大値で30%にも達してくる。

図14は減衰なしにおいて振動数領域解(数値解析上遠地盤に対して内部減衰に0.5%を考慮)を高速フーリエ変換により時間領域に変換したものと時間領域解とを比較した。入射波にはリッカー波($\eta=0.73$, $\theta=0^\circ$)を用いた。これより振動数領域解から変換されたものと時間領域解とは、ほぼ一致する。沖積地盤に内部減衰5%の時の応答も示した。

図15～16はリッカー波から成る合成波(フーリエスペクトルの卓越振動数 $\eta=0.71$)入射時の応答である。これらの応答の大きさは振動数領域解、リッカー波の合成波、1波のリッカー波の順である。

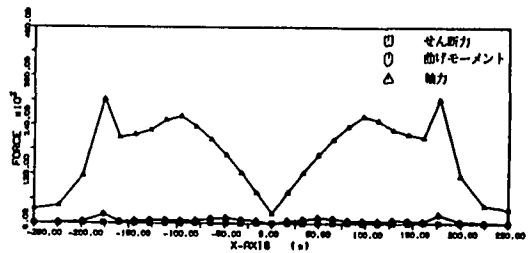


図16 合成波入射時の断面力分布 ($\theta = 0^\circ$)

4. むすび

不整形沖積地盤内の埋設シールド・トンネルのパラメータ解析から得られた知見は、

(1)不整形沖積地盤内の応答増幅により、無次元振動数 η が大きくなるにつれて対象構造物の中央部で曲げの応答性状が顕著に現れてくる。

(2)SV波の鉛直入射の場合、 η 値によって軸力の最大分布は変化する。 $\eta=1$ では、立ち上がり部では鉛直方向わたっての地盤変形のため大きな軸力が発生する。曲げの応力は大きくないが、 $\eta=2$ となると軸応力の1/3程度にまで達する。SV波の傾斜入射の場合、最大の断面力分布を与える入射角が存在し、 $\theta=30^\circ$ のときが、他の角度よりも大きな応答となった。

参考文献

- 1) Takemiya, H., Tomono, T., Ono, M. and Suda, K.: 2-D Irregular site response characteristics by BEM-FEM hybrid analysis, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.9, No.2, pp.141s-150s, Proc. JSCE, No.450/I-20, 1992.
- 2) Takemiya, H. and Adam, M., Seismic behavior of underground tunnel at irregular site, XI African Regional Conf. soil Mechanics and Found. Eng., Egypt, 1995.12.