

**投稿論文** (和文ノート)  
**TECHNICAL  
NOTE**

# 半無限不整形地盤内のシールド・トンネルの 縦断面地震応答性状

竹宮宏和<sup>1</sup>・須田清隆<sup>2</sup>・小野正樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700 岡山市津島中3)

<sup>2</sup>正会員 工修 (株)ハザマ, 土木総括本部技術設計第一部 (〒107 東京都港区北青山二丁目)

本論文では、半無限地盤上の不整形沖積地盤解析における著者らの前論文<sup>1)</sup>の有限要素法 (FEM) と境界要素法 (BEM) の振動数領域解ハイブリッド法解析を発展させて、不整形沖積地盤内の埋設シールド・トンネル構造物を対象にその縦断面内の地震時応答性状を入射波種別、波長と沖積層幅、入射角をパラメータにして把握したものである。

**Key Words** : *extended buried structure, seismic response, irregular site, hybridmethod, FEM, BEM, frequency domain*

## 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から、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中点とする長軸化に伴って、地形を反映した上で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<sup>1)</sup>、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、長軸構造物には曲げ変形が発生することが懸念される。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注目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<sup>1)</sup>の有限要素 (FE) 領域に構造物を含め、遠地盤 (半無限地盤) の境界要素 (BE) 領域とのハイブリッド法解析を行い、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

定式化の本質のみについて、前論文から引用する。したがって以下の式番号で [ ] 内は同論文での使用番号

である。

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

$$K_{\beta\beta}^* = \hat{H}^T [\hat{G}]^{-1} \hat{H} \quad (1) [41]$$

一方、FE 領域における地盤と構造物 (はり) と仮定を併せた動的剛性マトリックス  $D$  [28] 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  $i$ ) に分割して表すと

$$\begin{bmatrix} D_{ii} & D_{ib} \\ D_{bi} & D_{bb} + K_{\beta\beta}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{U}_i \\ \hat{U}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \hat{P}_b \end{Bmatrix} \quad (2) [40]$$

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は、自然地盤応答による変位  $U^f$  と節点力  $P^f$  から次式で求められる

$$\hat{P}_b = K_{\beta\beta}^* \hat{U}^f - P^f \quad (3) [42]$$

## 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 波とレーリ波を仮定して、前者には鉛直からの傾斜角を  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  とした。いずれも地震はモデルの

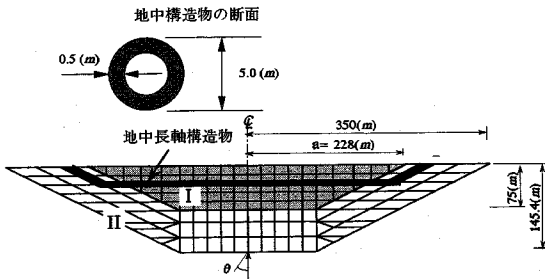


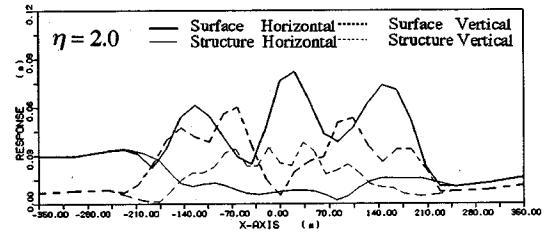
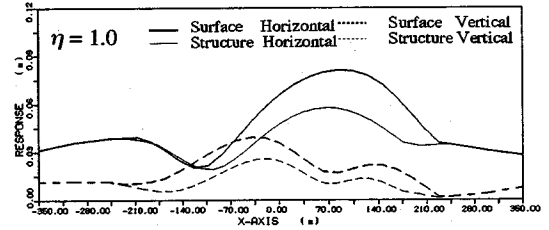
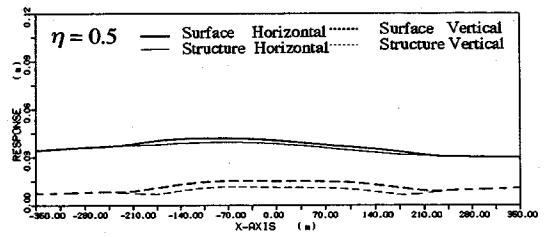
図-1 半無限基礎上の沖積層地盤と地中構造物のモデル化

表-1 地盤の物性値

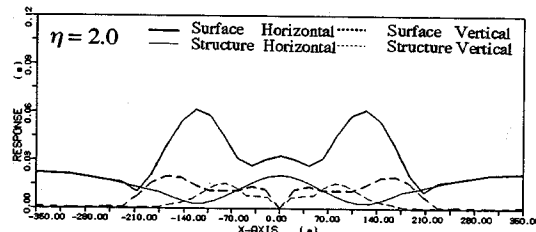
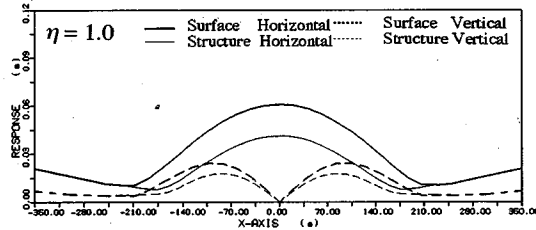
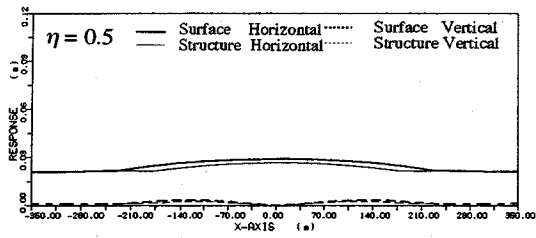
領域番号	ポアソン比	密度	せん断弾性係数	減衰定数
I	0.45	1.60 (t/m <sup>3</sup> )	6.4 * 10 <sup>4</sup> (N/m <sup>2</sup> )	0.05
II	0.35	2.0 (t/m <sup>3</sup> )	5.0 * 10 <sup>5</sup> (N/m <sup>2</sup> )	0.005

表-2 地中構造の物性値

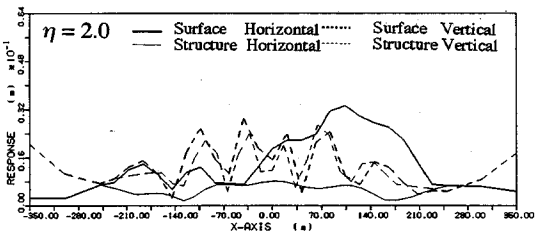
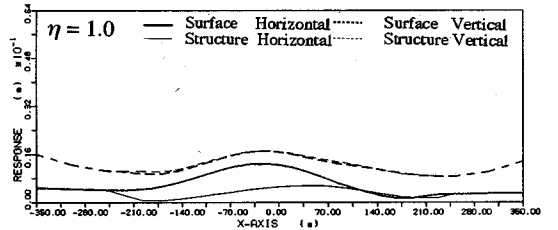
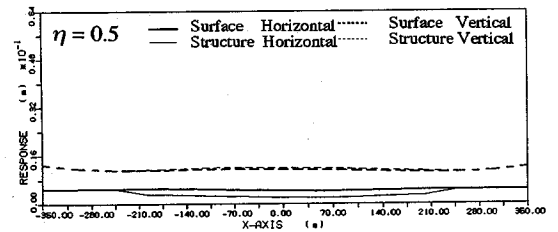
断面積 A	7.07 (m <sup>2</sup> )
ポアソン比 ν	0.25
密度 ρ	2.5 (t/m <sup>3</sup> )
断面二次モーメント I <sub>z</sub>	18.11 (m <sup>4</sup> )
断面二次極モーメント I <sub>x</sub>	36.22 (m <sup>4</sup> )
せん断弾性係数 G	1.2 * 10 <sup>7</sup> (N/m <sup>2</sup> )
減衰定数 β	0.05



(b)  $\theta = 30^\circ$  入射



(a)  $\theta = 0^\circ$  入射



(c)  $\theta = 60^\circ$  入射

図-2 SV波入射による地中構造物および地表面の変位応答

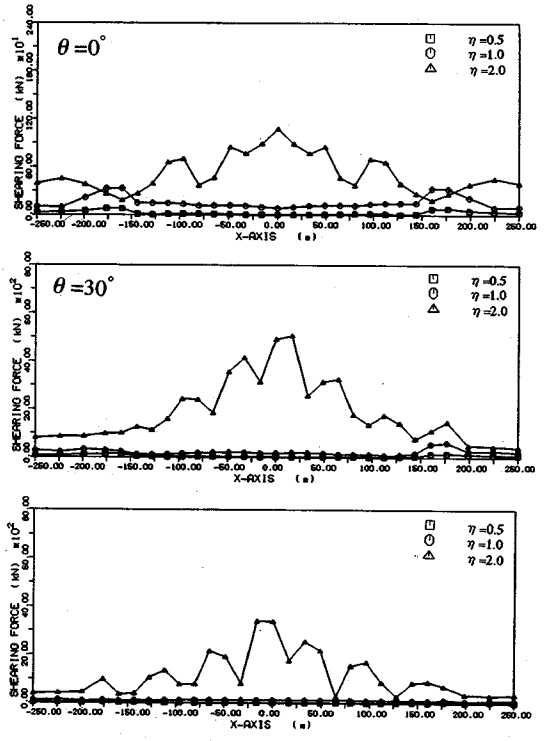
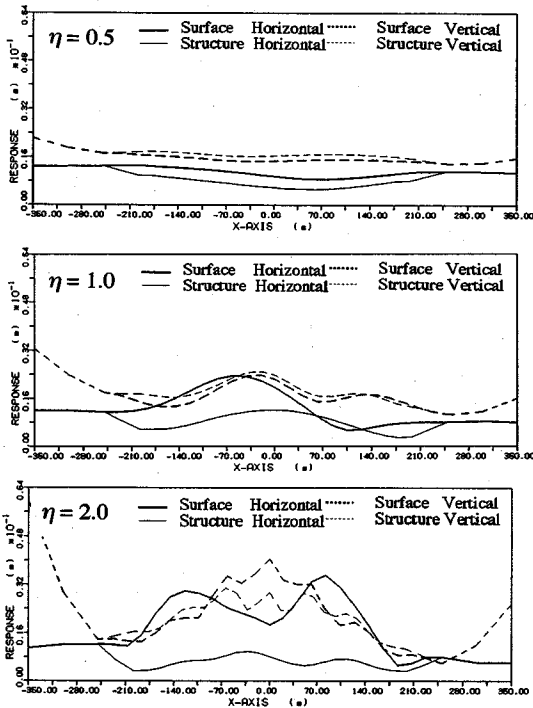
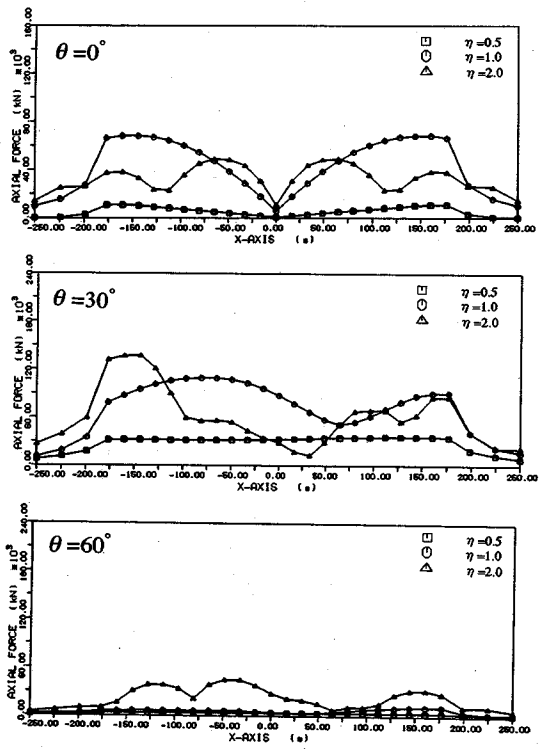
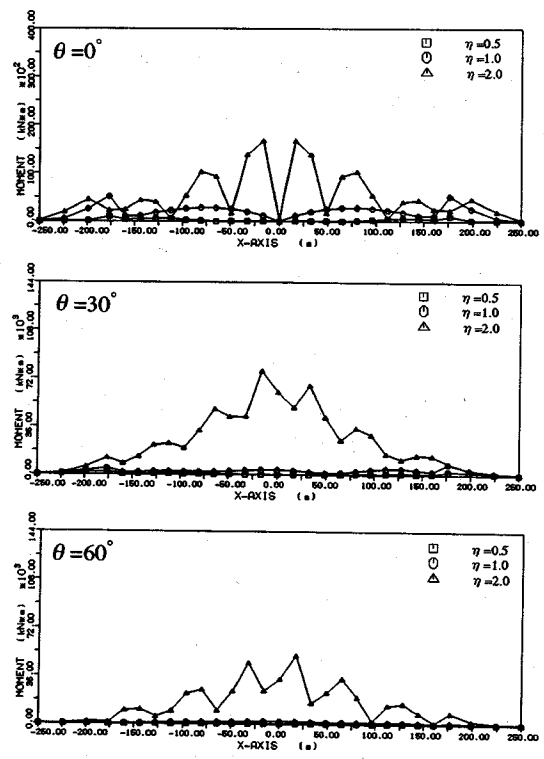


図-3 レーリ波入射による地中構造物および地表面の変位応答

(b) せん断力分布

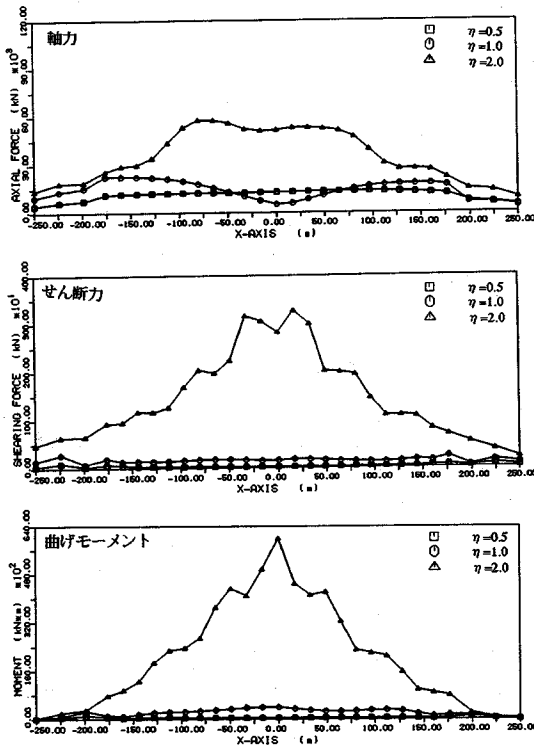


(a) 軸力分布



(c) 曲げモーメント分布

図-4 SV波入射による地中構造物の断面力応答



図—5 レーリ波入射による地中構造物の断面力応答

左端から右端への波動伝播とする。入射波長としては、無次元振動数  $\eta = 2A/\lambda$  (入射波長  $\lambda$  に対する不整形地盤の表面幅  $2A$ ) を導入した。

図—2 は SV 波入射 (単位振幅 1 cm) 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  $\eta$  と入射角  $\theta$  によって著しく応答の様相は変化する。 $\eta$  が小さいと構造物位置と地表面とはそれほど応答差はない。しかし、 $\eta$  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は鉛直成分が大きくなる。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—3 はレーリ波に対する結果で、 $\eta$  が小さいときでも鉛直応答が水平成分を上回っている。

## ALONG-AXIS SEISMIC BEHAVIOR OF SHIELD TUNNELS IN IRREGULAR ALLUVIUM ON HALFSpace SOIL

Hirokazu TAKEMIYA, Kiyotaka SUDA and Masaki ONO

The authors have developed a hybrid method of FEM and BEM in the frequency domain for the in-plane analysis of alluvium deposits on a stiffer halfspace. This paper is an extension of it so as to include structures inside the FEM discretization and demonstrates the seismic behavior of extended shield tunnel structures in an alluvium. Parameter studies includes the effects of seismic wave types, dimensionless frequency that defines the wave length against alluvium width and angle of wave incidence. The importance of bending behavior besides axial one is emphasized in the example topography.

図—4、図—5 は構造物の断面力分布で、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、前述の水平方向変位と併せて、 $\theta = 30^\circ$  のときが  $\theta = 60^\circ$  のときより大きな応答を示し、入射に対して前方の方が後方の方より大きい。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。 $\theta = 30^\circ$  のとき非常に大きな応答である。レーリ波入射による断面力もモデルの中央部においてもかなりの軸力が発生している。全体的に SV 波の  $\theta = 60^\circ$  入射の様相、応答値に近い。

軸力による応力と比較して、曲げ応力は  $\eta$  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。

## 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  $\eta$  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、 $\eta$  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た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。
- (4) レーリ波の入射では、 $\eta = 2$  のとき大きな断面力が対象構造物の中央部で発生する。

### 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.450/1-20, 1992.7. (1994.3.14 受付)