

# (108) 地層境界をまたぐシールドトンネル横断面に生ずる地震時応力の特性

大成建設(株) 正員 志波 由紀夫  
 同上 正員 ○ 岡本 晋

## 1. はじめに

大深度・大口径シールドトンネルの現実的な問題として、トンネル横断面が軟質・硬質層の境界をまたぐ場面が予想される。このような地盤構造では、層境界で振動モードが変化しこの近傍の地盤ひずみが大きくなるためトンネルに生ずる地震時応力も大きくなることが考えられる。そこで、著者らは2層地盤系の動的FEM解析を行いトンネル横断面に生ずる地震時応力の基本的特性を把握した。また、均質地盤中のトンネルを対象として開発した耐震解析手法<sup>1)</sup>を2層地盤系の問題に拡張し、動的FEM解析結果との比較を行った。

## 2. 2層地盤系の動的FEM解析

### 2-1 解析ケースおよび解析法の概要

図-1に示す厚さ50mの2層地盤系が1次モードで振動するするときのシールドトンネルの定常応答を検討した。検討ケースを表-1に示す。層境界位置、軟質・硬質層のインピーダンス比を変化させた他、トンネル全体が硬質層内にある場合も考えた。また、比較対象のため均質地盤系のケースも加え、検討ケースを合計7ケースとした。FEM解析領域の側方および底面にはそれぞれエネルギー伝達境界・粘性境界を設け、覆工は、はり要素を正72角形の骨組みにしてモデル化した。覆工の諸元は表-2に示すとおりである。入力地震動は、各ケースとも、表層地盤の基本固有周波数を持つ調和波とし、加速度振幅は解放基盤面上で100 Gal(入射波としては50 Gal)となるようにした。また、トンネルの基本的な応答特性を調べることを目的としたことから、地盤物性のひずみ依存性は考慮せず線形解析とした。

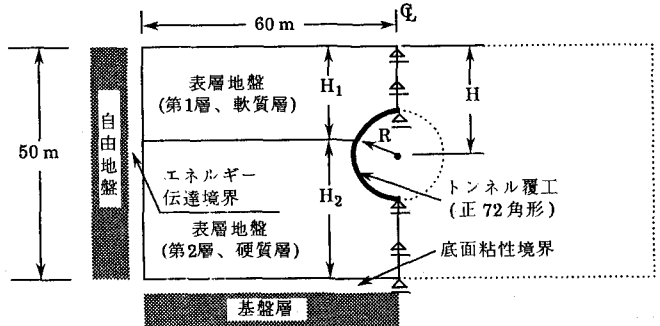


図-1 検討対象地盤とFEMの概要

表-1(a) 解析ケース

ケース No.	地盤系	第1層		第2層		トンネル深度 H(m)	基本固有周波数 (Hz)	備考
		厚さ H <sub>1</sub> (m)	層名	厚さ H <sub>2</sub> (m)	層名			
1	2層	25	I層	25	II層	25	0.961	層境界が横断面中央
2	2層	21	I層	29	II層	25	1.044	層境界が横断面上部
3	2層	29	I層	21	II層	25	0.883	層境界が横断面下部
4	2層	25	I層	25	B層	25	1.115	第2層の物性変更
5	2層	25	I層	25	II層	40	0.961	トンネルが第2層内
6	均質	50	I層	---	---	25	0.600	軟質な均質地盤
7	均質	50	II層	---	---	25	1.200	硬質な均質地盤

表-2 トンネル覆工の諸元

物性	トンネル覆工
口径 2R (m)	16
覆工厚 (m)	0.8
密度 (t/m <sup>3</sup> )	2.6
ヤング率 (tf/m <sup>2</sup> )	3.5×10 <sup>8</sup>
ポアソン比	0.17

表-1(b) 地盤の物性値

層名	密度 ρ (t/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 V <sub>s</sub> (m/s)	ポアソン比 ν	減衰定数
I層(軟質層)	1.6	120	0.45	0.02
II層(硬質層)	1.8	240	0.40	0.02
B層(基盤層)	2.0	400	0.35	0.02

## 2-2 解析結果

地盤とトンネルの応答最大値を表-3に、ケース1の断面力の分布を図-2にそれぞれ示す。また、2層地盤中のトンネルに生ずる断面力を均質地盤中のトンネル断面力と比較した時の比率を表-4に示す。入力地震動の周波数が各ケースで異なるため、表-4では断面力を次の2方法で基準化して比率をとった。

地表面変位( $U_h$ )1cm当たりで基準化 ..... 1次振動モードの影響が現れる。

地震動の速度応答スペクトル( $S_v$ )1cm/sec当たりで基準化 .... 振動モードの影響だけでなく地盤の揺れやすさの影響も現れる。

なお、比較対象とした均質地盤としては、軟質層と同一の物性を持つ場合と硬質層と同一の物性を持つ場合の2ケースを考えた。

2層地盤中のトンネルに生ずる断面力を均質地盤中のトンネル応力と比較したところ、以下に示す特性が見られた。

- ① 曲げモーメントおよびせん断力の最大値は、トンネルが軟質層・硬質層それぞれと同一の物性を持つ均質地盤中にある場合よりも大きい。また、均質地盤中のトンネル応力に対する比率は、

表-3 地盤およびトンネルの応答最大値  
(動的FEM解析結果, 入力加速度100Gal当たり)

ケース No.	層境界 位置	表層地盤の応答		トンネルの応答					
		地表面 加速度 (Gal)	地表面 変位 $U_h$ (cm)	曲げモーメント (tf·m/m)		せん断力 (tf/m)		軸力 (tf/m)	
				最大値	発生位置	最大値	発生位置	最大値	発生位置
1	90°	324	8.56	<u>144.5</u> 95.9	45° 100°	37.0 <u>55.2</u>	0° 85°	<u>98.1</u> 97.3	50° 140°
2	60°	297	6.60	<u>93.9</u> 49.5	40° 140°	28.2 <u>31.2</u>	0° 60°	78.8 <u>94.5</u>	50° 135°
3	120°	344	10.84	169.4 <u>170.9</u>	50° 120°	40.8 <u>51.4</u>	0° 95°	98.5 <u>112.1</u>	50° 135°
4	90°	343	6.73	139.2 <u>139.4</u>	45° 95°	36.7 <u>68.5</u>	0° 90°	<u>101.1</u> 92.3	50° 135°
5	---	325	8.61	69.2 <u>91.4</u>	45° 150°	18.2 <u>35.6</u>	0° 180°	<u>125.1</u> 111.0	50° 145°
6	---	367	25.00	235.7	135°	61.6	180°	150.0	135°
7	---	178	2.77	37.6	135°	10.0	180°	68.8	135°

- ② 軸力の最大値は、トンネルが軟質層と同一の物性を持つ均質地盤中にある場合よりも大きい。特にせん断力に関してこの傾向が強く見られる。
- ③ せん断力に関しては最大値発生位置が地層境界に近い場合が多く、また、この付近で分布形状が大きく変化することが多いが、曲げモーメントと軸力の特性に関しては地層境界位置との単純な関係が見られなかった。

- ④ 横断面が完全に硬質層内に入っている場合でも、断面力の分布形状が均質地盤中のトンネルの場合とは若干異なり、2層地盤構造の影響が見られる。

表-4 均質地盤中のトンネル応力に対する比率

ケース No.	最大曲げモーメント		最大せん断力		最大軸力	
	$U_h$ による 基準化	$S_v$ による 基準化	$U_h$ による 基準化	$S_v$ による 基準化	$U_h$ による 基準化	$S_v$ による 基準化
1	1.79 1.24	1.26 1.75	2.62 1.79	1.84 2.51	1.91 0.46	1.34 0.65
2	1.51 1.05	1.02 1.41	1.92 1.31	1.30 1.77	2.39 0.58	1.60 0.78
3	1.67 1.16	1.30 1.81	1.93 1.31	1.49 2.03	1.72 0.42	1.33 0.65
4	2.20 (1.37)	1.29 (2.68)	4.14 (2.50)	2.42 (4.88)	2.50 (0.22)	1.46 (0.43)
5	(0.85) (0.63)	(0.60) (0.88)	(1.31) (0.96)	(0.92) (1.35)	(1.97) (0.50)	(1.38) (0.70)

注) 上段の数字はケース6(軟質な均質地盤)に対する比率を、下段の数字はケース7(硬質な均質地盤)に対する比率を示す。また、ケース4,5の( )内の値は均質地盤系の動的FEMの結果がないため、開発した耐震計算法(参考文献)による計算値を用いた。

### 3. 簡易解析手法

#### 3-1 簡易解析手法の概要

図-3に示す2層地盤中のトンネルに発生する地震時断面力の簡便な解析手法の開発を試みた。本手法は均質地盤中のトンネルを対象に開発した耐震解析手法<sup>1)</sup>を2層地盤中のトンネルに拡張したものである<sup>2)</sup>。解析手法の基本的な考え方を以下に示す。

- ① トンネル横断面を剛性が一様な弾性床上のリングにモデル化した。
- ② 弾性床上のリングには、地震力として自然地盤(トンネルがない状態の地盤)においてトンネル位置に生ずる変位を相互作用ばねを介して作用させると同時に、自然地盤においてトンネル位置に生ずる地盤内部の応力を直接作用させた。リングの慣性力は無視した。
- ③ 自然地盤は1次固有モードで振動すると仮定した。
- ④ 地盤およびリングの非弾性的挙動は考慮しなかった。
- ⑤ 地盤とリングの相互作用ばねは、本来は2層地盤構造の各層間の相互作用を考慮した上で評価すべきであるが、ここでは簡単のため、図-4に示すように、軟質層(物性I)・硬質層(物性II)の物性を持った均質な無限弾性体中の円孔に載荷した時の力と変位の関係<sup>3)</sup>からそれぞれの層のばね定数を独立に算出し、これらを形式的に2層地盤の各層にあてはめた。

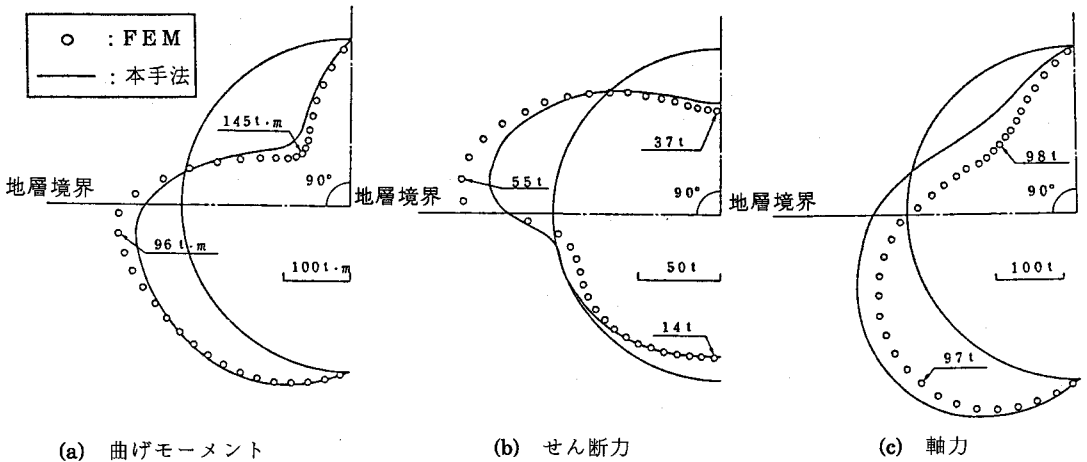


図-2 ケース1の断面力分布(断面力の数値は奥行き1m当たりの値)

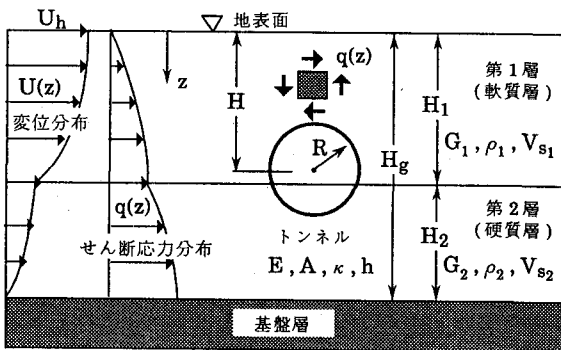


図-3 2層地盤中のシールドトンネル

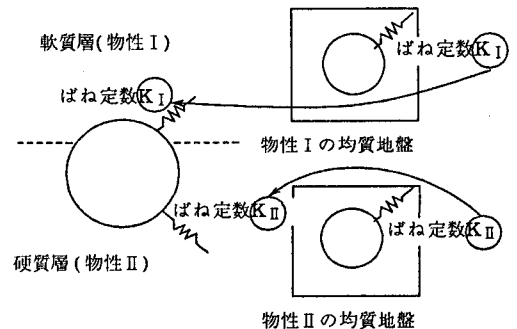


図-4 相互作用ばねの設定方法

### 3-2 動的FEM解析結果との比較

簡易解析手法によって算定された最大断面力を動的FEM解析の結果と比較して表-5に示す。また、断面力の分布を比較した例を図-2に示した。簡易解析手法の解析精度について以下に示す特性が見られた。

- ① 均質地盤中のトンネルに対する解析精度は95%~103%となり、良好な結果が得られた。
- ② これに対し、2層地盤中のトンネルに対する解析精度は全般に低く、断面力の最大値が動的FEM解析の結果の半分以下となるケース(ケース5のせん断力)もあった。
- ③ 地層境界がトンネル横断面を横切る場合は、層境界付近のトンネル応力の急激な変化を十分表現できず、曲げモーメントとせん断力の最大値が動的FEMより小さく評価された。
- ④ 軸力は最大値が発生する横断面の下半分では動的FEMより大きかったが、上半分では逆に小さかった。
- ⑤ トンネル横断面が完全に硬質層内に入っている場合(ケース5)は、一見、均質地盤と同程度の解析精度が得られるように考えられるが、最大断面力に関してはこのケースの解析精度が最も低かった。ただし、このケースではトンネル下端が基盤層にかなり近づいているため、これが断面力の発生に影響を及ぼしたことが考えられる。

2層地盤中のトンネルに対する簡易解析手法の精度が低かったことについては、均質地盤中のトンネルに対する解析精度が良好であることからトンネル横断面への地震力の作用方法に原因があるとは考えにくく、トンネル・地盤間の相互作用ばねに均質地盤を対象とした比較的単純なばねを便宜的に適用したため、地層境界付近で複雑に変化する相互作用力を適切に評価できなかったことが大きな理由と考えられる。

#### 4. まとめ

地層境界をまたぐシールドトンネル横断面に生ずる地震時応力の特性を動的FEM解析によって検討した結果、均質地盤中のトンネルに比べてせん断力および曲げモーメントが大きくなることがわかった。また、均質地盤中のトンネルを対象に開発した簡便な耐震解析手法を2層地盤中のトンネルに拡張し、その適用性を検討した。検討結果によると、2層地盤系を対象とした場合は均質地盤系を対象とした場合より解析精度が低いことがわかった。精度が低かった主な理由としては、2層構造地盤・トンネル間の相互作用ばねの設定に問題のあることが考えられる。今後、より高精度の解析手法を開発するためには、相互作用ばねを適切に評価することが必要である。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)に関する共同研究」の一環として実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 志波由紀夫・岡本晋:シールドトンネルの横断面方向の耐震計算法の提案,土木学会論文集(投稿中)
- 2) 建設省土木研究所・(財)先端建設技術センター・(株)奥村組・鹿島建設(株)・(株)鴻池組・清水建設(株)・大成建設(株)・飛鳥建設(株)・(株)間組・(株)フジタ:地下構造物の耐震設計技術に関する研究 平成2年度共同研究報告書

連絡先)神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1  
大成建設株式会社 技術研究所  
地震・風研究グループ TEL(045) 812-1211

表-5 簡易計算法と動的FEMとの比較  
(入力加速度100Gal当たりの値)

地盤系	ケース No.	トンネルの応答					
		最大曲げモーメント (tf・m/m)		最大せん断力 (tf/m)		最大軸力 (tf/m)	
		FEM	本計算法	FEM	本計算法	FEM	本計算法
2層	1	144.5	121.7 (0.84)	55.2	38.7 (0.70)	98.1	121.1 (1.23)
	2	93.9	86.5 (0.92)	31.2	26.2 (0.84)	94.5	98.5 (1.04)
	3	170.9	152.8 (0.89)	51.4	44.8 (0.87)	112.1	144.4 (1.29)
	4	139.4	110.5 (0.79)	68.5	41.8 (0.61)	101.1	138.8 (1.37)
	5	91.4	61.6 (0.67)	35.6	15.6 (0.44)	125.1	106.0 (0.85)
均質	6	235.7	241.3 (1.02)	61.6	63.7 (1.03)	150.0	148.8 (0.99)
	7	37.6	37.0 (0.98)	10.0	9.9 (0.99)	68.8	65.6 (0.95)

( )内は動的FEMに対する比率