

既設地下構造物の横断面内の免震対策

春海正和¹・嶋村貞夫¹・河西 寛¹

¹正会員 (株)鴻池組 土木本部土木設計部 (〒541 大阪府大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

本報告では、既設地下構造物の免震対策の一つとして、地表面からトンネルの両側に柔らかい免震層を鉛直壁状に設置することを提案し、免震層の設置深度、トンネルからの離隔距離、および免震層の厚さが地震時増分断面力に及ぼす影響について、2次元 FEM モデルによる地震応答解析と応答変位法解析により検討した。その結果、トンネルの耐震性に大きく影響する地震時増分曲げモーメントとせん断力は、免震層をできるだけトンネル側壁に近づけてトンネル下面深さの 2 倍以上の深さまで設置すると効果的であることが分かった。今回の条件では、トンネルの側壁から 1.0m の位置に地表面から 20m の深さまで、厚さ 10cm の免震層を設けた場合は 6~7 割に、厚さ 30cm の免震層を設けた場合は 4~5 割に減少した。

Key Words: seismic isolation, earthquake, tunnel, 2D-FEM analysis, section force

1. はじめに

トンネル等の地下構造物は、地震時に生じる地盤変形に追従して動く特性がある。このため、構造物の剛性を高めて耐震性を向上しようとしても、地震時増分断面力はその分増大することになってしまう。ところが、地震時の地盤の変形(ひずみ)が構造物に伝達するのを遮断あるいは減少するといった免震構造であれば、地震時増分断面力の減少が可能である^{1), 2)}。矩形断面トンネルの全周に柔らかい免震層を直に設置した場合、横断方向の地震時増分断面力は 1/2 程度にまで減少することが確認されている^{3), 4)}。しかしながら、既設の地下構造物に関しては、全周に免震層を直に設置することが困難であるため、何らかの工夫が必要になる。

本報告では、既設トンネルの両側に地表面から柔らかい免震層を鉛直壁状に設置することを提案し、免震層の設置深度、トンネルからの離隔距離、および免震層の厚さが矩形断面トンネルの横断方向の地震時増分断面力に及ぼす影響について検討した。解析には、主に 2 次元 FEM モデルに 1 次モードの地盤変位を生じさせる「地盤慣性力に基づく応答変位法」³⁾による線形解析を適用した。

2. 解析モデルおよび条件

(1) 検討対象構造物および地盤

検討の対象とした地盤は層厚 30m の均一地盤とし、構

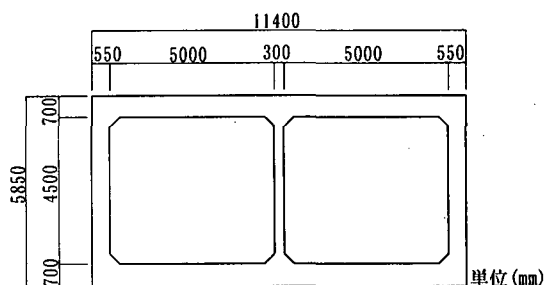


図-1 検討対象構造物の断面図

造物は図-1 に示す鉄筋コンクリート造の 2 連ボックスカルバートとした。地下構造物の両側に設置する免震層のせん断弾性係数は地盤の 1/100 を基本とした。表-1~2 に構造物、地盤および免震層の入力定数を示す。

(2) 解析モデル

解析モデルはトンネル中心から表層地盤厚の 3 倍 (90m) の範囲を解析領域とし、対称性を考慮してトンネル中心軸を含む左半分のものを作成した。地盤および免震層はアイソパラメトリック平面ひずみ要素でモデル化し、トンネル構造部材は平面骨組み要素でモデル化した。骨組み要素に剛域は設けず、軸線はハンチの影響を無視した部材断面の図心軸線と一致させた。図-2 に要素分割図を示す。

解析モデル境界面の拘束条件は、底面が完全固定、左側面および右側面(対称面)が鉛直方向の変位を固定とした。

表-1 構造物の入力定数

	側壁	中壁(半分)	上床版	下床版
単位体積重量 γ (tf/m ³)	2.50			
弾性係数 E (tf/m ²)	2.6×10^6			
断面積 A (m ² /m)	0.55	0.15	0.65	0.70
断面2次モーメント I (m ⁴ /m)	6.932×10^{-3}	5.625×10^{-4}	1.144×10^{-2}	1.429×10^{-2}

表-2 地盤および免震層の入力定数

	地盤	免震層
単位体積重量 γ (tf/m ³)	1.6	1.0
弾性係数 E (tf/m ²)	6440	64.4
せん断弾性係数 G (tf/m ²)	2160	21.6
ポアソン比 ν	0.49	0.49

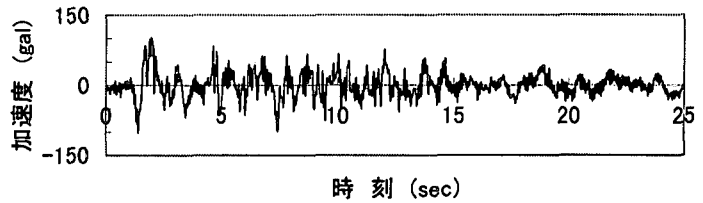
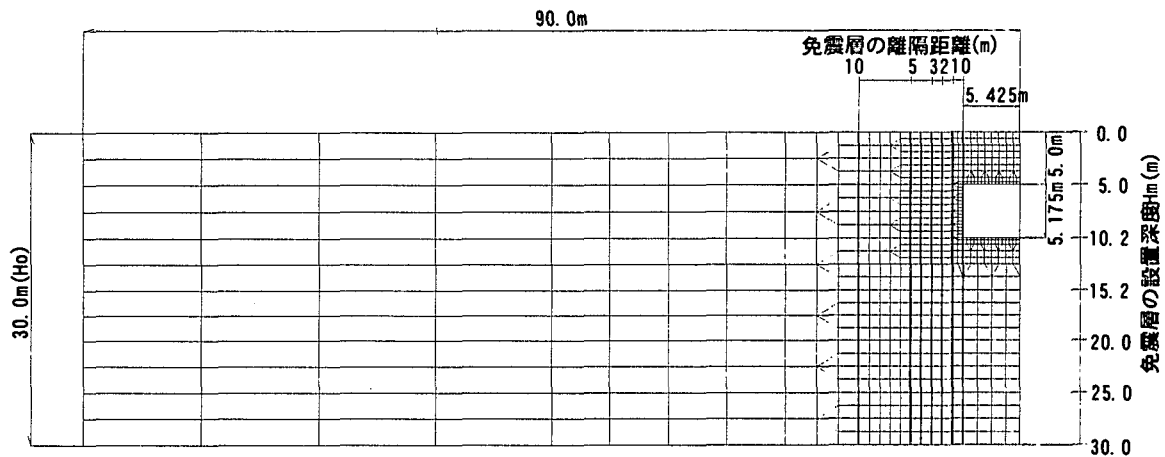
図-3 入力地震動⁵⁾

図-2 要素分割図

(3)解析手法

「地盤慣性力に基づく応答変位法」は、式(1)より求めた要素中心深さにおける水平方向加速度から水平方向慣性力を算出し、これを全要素に物体力として作用させることによりモデルに1次モードの変位分布を生じさせる方法である。

$$\alpha(z) = -\frac{8 \cdot S_v}{T_s} \cos\left(\frac{\pi z}{2 H_o}\right) \quad (1)$$

ここに、

$\alpha(z)$: 地表面からの深さ z における水平方向加速度

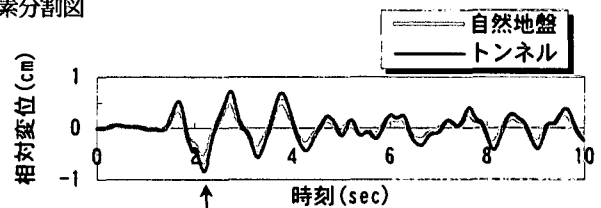
S_v : 設計応答速度で $S_v=0.24$ (m/sec)とした

T_s : 表層地盤の固有周期で $T_s=1.043$ (sec)とした

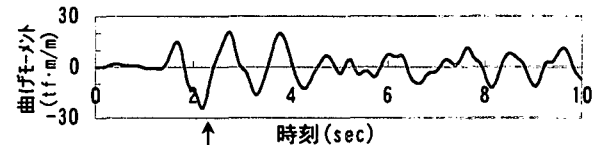
H_o : 表層地盤厚で $H_o=30$ (m)とした

3. 地震時挙動と免震効果

地下構造物は地震時に地盤中で独自の振動をすることなく、地盤の変形に追随することが知られている。図-4は、免震層がない場合の解析モデル底面に図-3に示す道路橋示方書耐震設計編の動的解析用加速度波形⁵⁾を水平入力した応答解析結果より、トンネルの影響が及ばないと考えられる地盤部分(トンネル中心から78.75mの地点、以降この地点を自然地盤と呼ぶ)におけるトン



(a) 上下床版間の水平方向相対変位



(b) 側壁下端の曲げモーメント

図-4 地震応答解析による時刻歴応答

ネル上床版深さと下床版深さ間の水平方向相対変位と、トンネル上床版と下床版の水平方向相対変位、並びにトンネル側壁下端の曲げモーメントの時刻歴をそれぞれ示したものである。トンネル上下床版間の水平方向相対変位は自然地盤の相対変位と同位相で振動していることから、トンネルは地盤の変形に追随して変形していることがわかる。このため、トンネル上床版と下床版の深さにおける自然地盤の相対変位が最大となる時刻(図中の矢印)において、側壁の曲げモーメントは最大となる。これ以外の断面力についても同様である。

表-4は、地震応答解析により得られた免震層がない場合に対する免震層がある場合の最大断面力の比率(以

表-4 地震時増分最大断面力の低減率

		地震応答解析	「地盤慣性力に基づく応答変位法」
側壁	M/Mo	0.77	0.78
	Q/Qo	0.73	0.74
	N/No	0.95	1.05
中壁	M/Mo	0.81	0.80
	Q/Qo	0.82	0.83
	N/No	-	-

M/Mo: 曲げモーメント低減率

Q/Qo: せん断力低減率

N/No: 軸力低減率

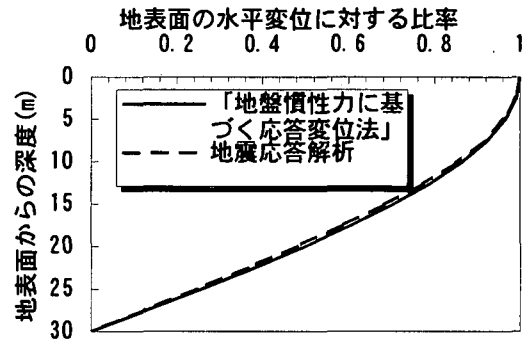


図-5 自然地盤の水平変位分布形状

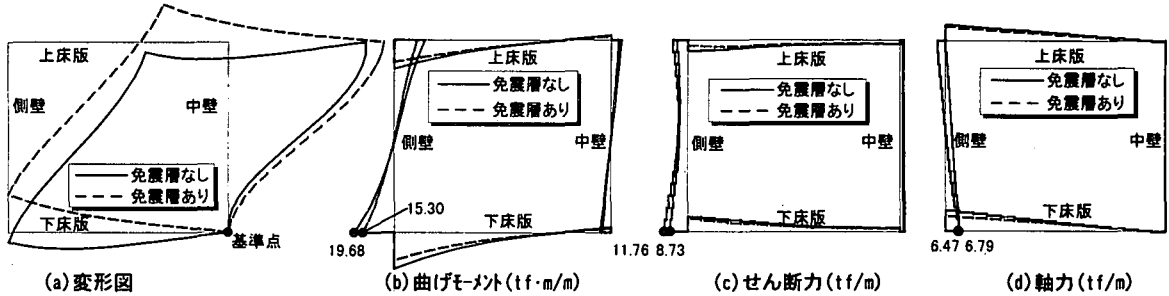


図-6 トンネルの変形および地震時増分断面力分布

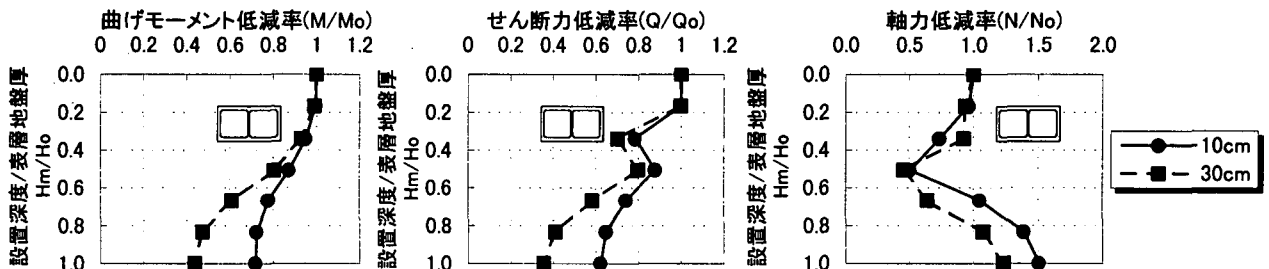


図-7 免震層の設置深度がトンネル側壁の最大断面力に及ぼす影響

降、断面力の低減率と呼ぶ)を、地盤慣性力に基づく応答変位法により得られた比率と比較して示したものである。免震層は厚さ 10cm、トンネル側壁から 1.0m の間隔をあけて地表面から 20m の深さまで設置した条件である。以後、免震層の設置に関して特記のない場合には、この設置条件の場合である。

今回の解析は免震効果に注目して実施したため、応答量の絶対値そのものは必ずしも一致していないが、地盤慣性力に基づく応答変位法による結果は、地震応答解析による結果を精度良く表していることが分かる。これは、図-5 に示す最大断面力発生時刻における自然地盤の変位分布形状を見ると明らかなように、今回の条件では表層地盤の地震時変位に及ぼす高次モードの影響が少ないためと考えられる。したがって、表層地盤の地震時変位に及ぼす高次モードの影響が少ない場合には、地盤慣性力に基づく応答変位法を適用することが可能である。

図-6 は、地盤慣性力に基づく応答変位法による解析結果より、免震層がない場合と免震層がある場合のトンネルの変形と断面力分布を示したものである。免震層を設けることにより、トンネルの回転変形が助長され、水

平方方向のせん断変形が減少していることが分かる。また、断面力に関しては、分布形状が均一化され、最大値が低下していることが分かる。

以降、地盤慣性力に基づく応答変位法を用いた影響解析結果について述べる。

4. 免震層の設置深度の影響

図-7 は、地表面からの免震層の設置深度がトンネル側壁の地震時増分最大断面力に及ぼす影響を示したものである。実線が免震層の厚さが 10cm の場合、破線が 30cm の場合であり、免震層とトンネル側壁との離隔距離は 1.0m である。図の縦軸は、表層地盤厚 30m に対する免震層の設置深度の比率 (H_m/H_o) であり、横軸は免震層による地震時増分最大断面力の低減率である。曲げモーメントとせん断力は、概ね設置深度が深くなるほど小さくなる傾向を示し、免震層の設置深度がトンネル下面深さの 2 倍 ($H_m/H_o=0.67$) 以上であれば、より大きな免震効果を得ることができる。この現象は免震層が厚いほど顕在化する。しかし、トンネル下面深さ ($H_m/H_o=0.34$) までの

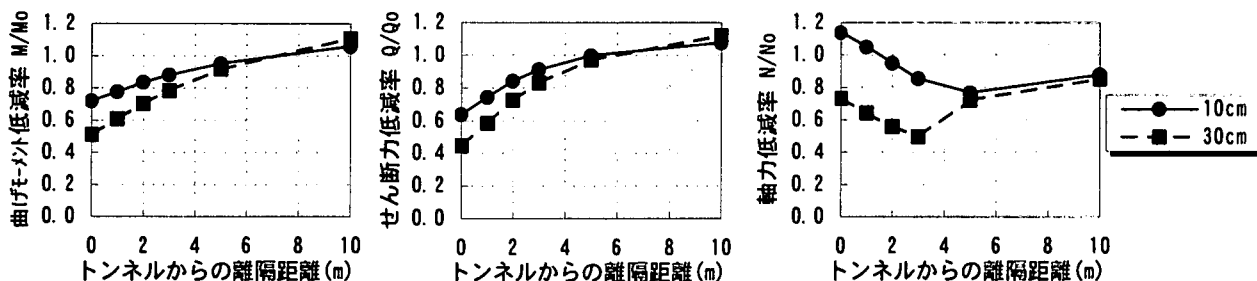


図-8 免震層の離隔距離がトンネル側壁の最大断面力に及ぼす影響

比較的浅い場合には、免震層が厚い場合でも免震効果は現れ難い。

これに対し、軸力は免震層の設置深度が表層地盤厚の半分($H_m/H_0=0.50$)のときに最も小さくなり、それ以上になると大きくなる傾向を示す。

5. 免震層の離隔距離の影響

図-8 は、免震層とトンネル側壁との純間隔が側壁の地震時増分最大断面力に及ぼす影響を示したものである。実線が免震層の厚さが10cmの場合、破線が30cmの場合であり、免震層の設置深度は地表面から20m($H_m/H_0=0.67$)である。図-8では、縦軸が最大断面力の低減率を表す。

曲げモーメントとせん断力は、免震層をできるだけトンネルに近づけて設置するほど小さくなる。トンネル高さ程度(約5m)離して設置した場合には、殆ど免震効果が現れない。5m程度以内の離隔距離であれば、離隔距離が近く、かつ免震層が厚いほど免震効果は大きくなる。

一方、軸力は免震層の離隔距離が3~5m程度のときに最小になり、それ以下ではトンネルに近づくほど大きくなる傾向を示す。

6. まとめと今後の課題

本報告では、既設地下構造物の免震対策の一つとして、地表面からトンネルの両側に免震層を設けることを提案し、免震層の設置深度、トンネルからの離隔距離および免震層の厚さが、トンネル横断方向断面力に対する免震効果に及ぼす影響について検討した。

その結果、トンネルの耐震性を左右すると考えられる地震時増分曲げモーメントとせん断力に対しては、免震層をトンネル下面深さの2倍以上の深さまで設置し、できるだけトンネルに近づけて設置するのが効果的であることが判明した。また、免震層をトンネル下面深さまでの浅い範囲に設置した場合やトンネル側壁からトンネル高さ程度(約5m)離して設置した場合には、殆ど免震効果が現れないことも判明した。

今回の条件では、トンネル側壁から1.0mの間隔をあけて地表面から20mの深さまで厚さ10cmの免震層を設置した場合には、地震時増分曲げモーメントとせん断力は6~7割に減少し、同様に厚さ30cmの免震層の場合には4~5割に減少した。このことから、地表面から既設地下構造物の両側に免震層を設ける方法は、有効な免震対策の一つであることが確認された。

今後は、免震層の施工方法等に関する検討も実施し、免震層を用いた既設地下構造物の免震対策の実現に向けて努力したい。

最後に、本報告では、建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび民間17社による共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」の研究成果の一部を引用させて頂いたことを記し、関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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)・飛島建設(株)・(株)間組・フジタ工業(株)：地下構造物の耐震設計技術に関する研究，平成元年度共同研究報告書，pp. 282-324，1990。
- 2) K. Ono, S. Shimamura and H. Kasai: Seismic Isolation For Underground Structures, Proceedings of the 4th U.S.-Japan Workshop On Earthquake Disaster Prevention For Lifeline Systems, pp. 245-259, 1991.
- 3) 建設省土木研究所・(財)土木研究センター・(株)奥村組・飛島建設(株)・(株)熊谷組・前田建設工業(株)・(株)鴻池組・佐藤工業(株)・川崎重工業(株)・(株)小松製作所・東亜道路工業(株)・旭電化工業(株)・信越化学工業(株)・住友ゴム工業(株)・東海ゴム工業(株)・日本工営(株)・日本シールドエンジニアリング(株)・日本技術開発(株)・(株)オリエンタルコンサルタンツ：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書(その1)，pp. 141-213，1996。
- 4) 河西，嶋村，笹川，春海：免震層によるトンネル横断方向の免震効果，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，土木学会，pp. 101-108，1996。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp. 151-153，1990。