

複円形シールドトンネルの中柱に用いる免震装置の回転剛性に関する解析的検討

(株)熊谷組技術研究所 正会員 ○金子 誉 鈴木 猛康
同 正会員 鄭 志誠 勝川 藤太
日本大学生産工学部 田村 重四郎
東京大学生産技術研究所 正会員 小長井 一男

1. はじめに

近年、合理的で経済的な断面とされる複円形シールドトンネルが、地下鉄駅部建設において多く採用されるようになってきている。複円形シールドトンネルは、「中柱」やそれと接合する「カモメ・セグメント」といった、単円形シールドトンネルにはない構造要素を有している。兵庫県南部地震では中柱を有する開削トンネル駅舎に被害が生じたことから、複円形シールドトンネルについても耐震設計法の研究が行われるようになってきた^{1, 2, 3)}。筆者らは、これまでに3心円シールドトンネルを対象として数値解析を行い、レベル2地震時に中柱が受ける層間変位は変形角にして約1/50にも達し、それに伴って中柱やカモメ・セグメントに大きなせん断力や曲げモーメントが発生することを確認するとともに、単に積層ゴム支承を用いるだけでは十分な地震時断面力の低減効果が得られないことを明らかにしてきた⁴⁾。これは、中柱に常時作用する高軸力を積層ゴム支承が長期にわたって安定的に支持するには、軸剛性を大きく設定しなければならず、それが回転剛性の増大を招いて回転変形による変位吸収を阻害すること、せん断剛性にも実用上の下限値を規定してしまい、せん断変形だけでは十分な変位吸収ができないことを示している。

そこで、中柱の上下端に回転剛性が小さな免震装置を設置して層間変位を吸収させる場合を想定し、中柱やカモメ・セグメントの地震時増分断面力の低減効果から、装置に許容される回転剛性の大きさを検討すべく、数値解析を行ったので報告する。

2. 解析方法

解析対象トンネルは地下鉄駅舎程度の断面を想定して、図-1に示すような幅が約20m、高さが約8mの3心円形のシールドトンネルとし、厚さ28mの表層地盤内に土被り約15mで施工されているものとした。ここで、表層地盤は表-1に示す2種類を扱うものとし、いずれも均質地盤とした。

解析モデルは図-2に示すような2次元モデルを用い、地盤は平面ひずみ要素、トンネルは単位奥行き当りの剛性に換算した梁要素でモデル化した。トンネルの入力データを表-2に示す。また、免震装置は中柱の上下端にそれぞれ、軸力、せん断力ならびに曲げモーメントを伝達する3個のバネ要素を置くことでモデル化した。軸バネとせん断バネは十分大きな値とし、回転バネは0~58,860kN・m/rad/m(0~6000tf・m/rad/m)の範囲で変化させて与えた。

解析方法には、FEMモデルに地盤慣性力を静的に与えてトンネルの応答を求める方法⁵⁾を採用した。まず、「水道施設耐震工法指針⁶⁾で地震動レベル2の基盤地震動として規定される速度応答スペクトルを用い、均質なせん断土柱の基本振動モードを対

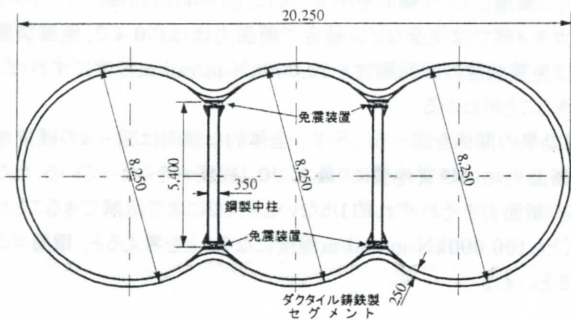


図-1 検討対象トンネル

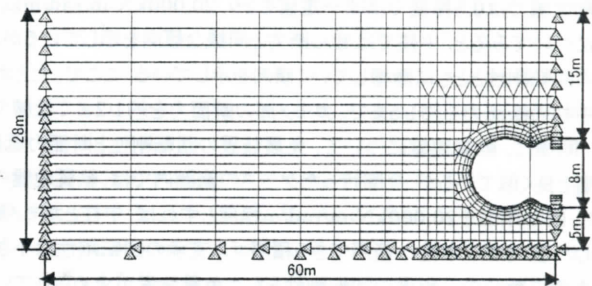


図-2 FEMメッシュ分割

表-1 表層地盤の特性値

	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断波速度 (m/s)	ポアソン比	固有周期 (s)
硬質地盤(砂質土)	16.7	200	0.48	0.56
軟質地盤(粘性土)	14.7	120	0.49	0.93

表-2 トンネルモデルの入力データ

	断面積 (m ² /m)	断面2次モーメント (m ⁴ /m)	弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比
円弧部	0.031	0.00025 (0.9I)	1.67×10 ⁸	0.25
カモメ部	0.051~0.086	0.00065~0.00460 (0.9I)	1.67×10 ⁸	0.25
中柱	0.054	0.00084(I)	2.06×10 ⁸	0.30

An analytical study on the rotational stiffness of isolation devices placed at the top and bottom of center columns in a shield-driven tunnel with multi-circular cross-section; Isao KANEKO, Takeyasu SUZUKI, Shisei TEI (Kumagai Gumi Co., Ltd.), Choshiro TAMURA (Nihon University) and Kazuo KONAGAI (University of Tokyo)

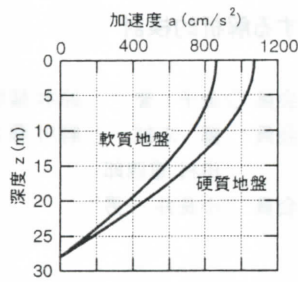


図-3 加速度分布

象として、正弦波状の加速度分布を求めた。図-3は、このようにして求めた加速度の深度分布であり、地表面加速度は、硬質地盤で10.69m/s²、軟質地盤で8.60m/s²である。次に、この深度分布に相当する各メッシュの地盤慣性力を算出し、それを解析モデルの各節点に静的な水平外力として与え、トンネルの応答を求めた。

3. 解析結果

表-3は中柱上下端を剛結としたケースのトンネルの応答⁴⁾を示したものであり、これを基準として免震装置を設置したときの地震時増分断面力の低減効果を見ていく。

図-4は、硬質地盤について、横軸に免震装置の回転剛性を、縦軸に免震装置ありのモデルと剛結モデルの断面力の比をとって示したものである。

図-4(a)のせん断力の断面力比についてみると、中柱では免震装置の回転剛性にほぼ比例する傾向を示し、カモメ部では低剛性域では0.5程度でほぼ一定値をとり、20,000kN-m/rad/m以上で漸増していく傾向を示す。次に、図-4(b)の曲げモーメントについてみると、中柱ではせん断力と同様な傾向を示しているが、カモメ部では完全なピン結合で断面力比は約0.4で、免震装置の回転剛性とともな増していく傾向を示している。ここで、たとえば免震装置の回転剛性を20,000kN-m/rad/m程度にすれば、中柱の断面力を約1/5まで、カモメ部の断面力を約1/2まで低減できることがわかる。

同様に、軟質地盤について、免震装置の回転剛性と断面力低減効果の関係を図-5に示す。全体的な傾向は図-4の硬質地盤と良く似ているが、今回行ったケースの範囲内では、軟質地盤の断面力比は硬質地盤より最大で0.1程度大きくなっている。ただし、回転剛性を20,000kN-m/rad/m程度とすれば、中柱とカモメ部の断面力をそれぞれ約1/5ないし約1/2にまで低減できることがわかる。なお、中柱へ適用できる積層ゴム支承の回転剛性は小さくとも100,000kN-m/rad/m程度になることを考えると、積層ゴム支承の数分の一程度の回転剛性をもつ免震装置が求められているといえる。

4. まとめ

地下鉄駅舎を想定した3心円形シールドトンネルを対象として静的FEM解析を実施した結果、回転剛性が20,000kN-m/rad/m程度の免震装置を中柱上下端に設置して、トンネルの層間変位を免震装置の回転変形として吸収することで、中柱やカモメ部の地震時増分断面力を、それぞれ1/5ないし1/2程度にまで低減できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 田村重四郎, 牧野達謙, 星秀明, 小長井一男, 三神厚, 片桐俊彦: 2連型円形シールドトンネルの地震時の挙動に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会 I, pp.756-757, 1998.10.
- 2) 室谷耕輔, 羽矢洋, 西村昭彦, 横溝文行, 大保直人: 単円・複円形シールドトンネルの模型振動実験概要および実験結果, トンネル工学研究論文・報告集, 第8巻, pp.395-400, 1998.11.
- 3) 西山誠治, 加藤淳一, 西村昭彦, 鈴木猛康, 浦野和彦: 単円・複円形シールドトンネル模型振動実験の解析, トンネル工学研究論文・報告集, 第8巻, pp.389-394, 1998.11.
- 4) 金子誉, 鈴木猛康, 鄭志誠, 田村重四郎, 小長井一男: 複円形シールドトンネルの中柱免震装置の要求性能に関する考察, トンネル工学研究論文・報告集, 第8巻, pp.63-70, 1998.11.
- 5) 大塚久哲, 星隈順一, 村井和彦, 田中努, 橋義規: 地盤慣性力に基づく応答変位法を用いた地下構造物横断方向の耐震設計法, 土木学会年次学術講演会 I, pp.906-907, 1997.9.
- 6) (社)日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 1997.

表-3 中柱上下端を剛結としたケースのトンネルの応答⁴⁾

	せん断力(kN/m)		曲げモーメント(kN-m/m)		中柱の変形角
	中柱	カモメ部	中柱	カモメ部	
硬質地盤	383	628	1040	844	1/119
軟質地盤	559	618	1521	1030	1/65

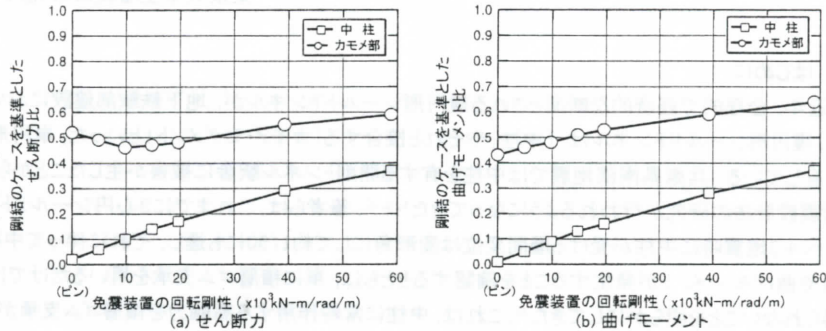


図-4 免震装置の回転剛性と断面力低減効果の関係(硬質地盤のケース)

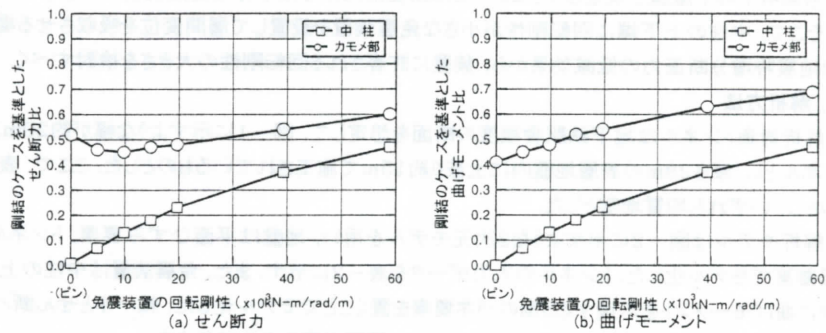


図-5 免震装置の回転剛性と断面力低減効果の関係(軟質地盤のケース)