

地下構造物の中柱用免震装置の基礎実験

鈴木 猛康¹・金子 誉²・田村 重四郎³・小長井 一男⁴・松本 達治⁵・山田 博⁶

¹正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

²正会員 工修 (株)熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

³フェロー 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-0006 千葉県習志野市泉町1-2-1)

⁴正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第1部 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

⁵工修 住友ゴム工業(株) 産業品事業部 (〒651-0072 兵庫県神戸市中央区脇浜町3-6-9)

⁶東海ゴム工業(株) 産業用品事業部 (〒485-8550 愛知県小牧市北外山哥津3600)

中柱を有する地下構造物が大地震時に受ける横断面変形に対する安全性を確保するためには、中柱自身や中柱と覆工との接合部の破壊を防止することが重要である。筆者らは、中柱の上下に回転剛性の小さな免震装置を設置することで地震時増分断面力を大幅に低減できるものと考え、2タイプの装置の開発を行った。本論文では、まず数値解析に基づいて免震装置の回転剛性の目標値を設定し、次に開発した免震装置の構造を示し、最後に試作した免震装置を用いて行った載荷試験の結果について報告する。

Key Words : isolation device, mid-column, underground structure, loading tests

1. はじめに

地下構造物横断面の剛性は、一般に周辺地盤のせん断剛性と同等かそれ以下であるため、地下構造物は地震時の際、地盤のせん断変形に追従して大きな横断面変形を受ける。一般に、地下構造物の中柱は1,000tf程度あるいはそれ以上の高軸力を支持している。兵庫県南部地震における地下鉄駅舎の被害のように、中柱自身や中柱と構造部材との接合部が破壊すると、地下構造物にとって致命的な破壊モードである崩壊にいたる可能性があるため、レベル2地震動に対する中柱の地震時安全性の確保が不可欠と言える¹⁾。

近年、建築物や橋梁では免震構造物が多数建設されており、主に積層ゴム支承がアイソレータとして採用される。しかし、積層ゴム支承の一般的な面圧100kgf/cm²で軸力1,000tfを受けるとすると、1辺が1mの正方形断面を必要とし、建築限界の厳しい地下鉄等への適用は現実的でない。また、高軸圧に対する伴うクリープ変形を抑制するためには1層のゴム厚を薄くする必要があるが、積層ゴム支承の回転剛性がかなり大きくなって、地震時増分断面力の低減効果も限られたものとなる²⁾。

積層ゴム支承以外では、中柱上下端をヒンジ構造とする方法が考えられる。しかし、常時の高軸力を、ある程度偏心した状態でも安定して支持するには、回転変位吸収機能の他に特殊な構造や加工を必要とする高価な装置となる。そこで、高軸圧で偏心した常時荷重を安定して支持し、地震時には構造物上下端の相対変位を効率的に吸収できるような、地下構造物の中柱用として実用的な免震装置を開発した。

本論文では、まず数値解析に基づいて、免震装置に要求される回転剛性について考察し、装置開発の目標値を設定している。次に、開発中した2種類の免震装置の構造を示す。最後に、免震装置の縮小模型を用いて行った載荷試験の結果について示し、目標通りの装置を開発できたことを報告する。

2. 数値解析に基づく免震装置の回転剛性設定

(1) 解析概要と解析ケース

解析の対象としたトンネルは、地下鉄の駅舎程度の断面を想定し、図-1に示す幅約20m、高さ約8mで2本の中柱を有する3心円のシールドトンネルとした。地盤は表層厚28mの均質地盤とし、トンネルはせん断ひずみの大きくなる基盤に近い土被り15mの深さに設置した。なお、表層地盤の物性値は、せん断波速度120m/s、単位体積重量1.47tf/m³とした。

図-2に解析に用いた有限要素メッシュの分割を示す。断面の対称性を利用したハーフモデルとし、地盤は平面ひずみ要素、セグメントと中柱は梁要素でモデル化した。表-1にセグメントと中柱の物性値を示す。

中柱の上下端とセグメント(カモメ部)の間には軸力、せん断力ならびに曲げモーメントを伝達する3つのバネでモデル化し、表-2に示すように伸縮とせん断バネには∞の剛性を与え、回転バネを0(ピン結合)から6000tf・m/rad/mまでの7水準に変化させたケースと∞(剛結)としたケースの解析を行った。

地震荷重は、表層地盤の基本せん断振動モードの地盤慣性力を静的に要素節点に作用させる地盤慣性力

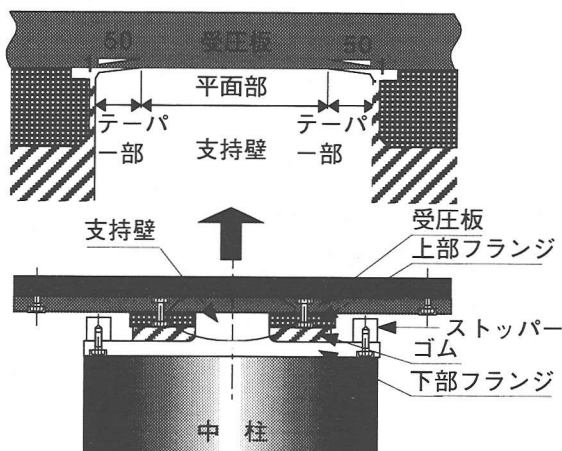


図-5 形状復元力を利用した免震装置

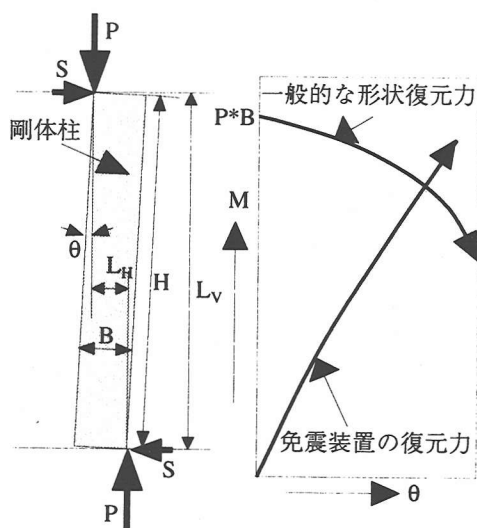


図-6 形状復元力利用の免震装置の復元力特性

H , 幅を B とすると, SH が PB を超えたときに回転が開始し, 一般の剛体柱の復元モーメント M と回転角 θ の関係は図-6の曲線ようになる。しかし, 免震装置では支持壁の平面部の両側にテーパ部が設けられ, 前述の金属同士の滑らかな面接触が実現されることにより, ある回転角の範囲ではほぼ一定の回転バネとみなせるような履歴となる。

(2) 滑動+回転を利用したピン構造型免震装置

図-7に滑動+回転を利用したピン構造型免震装置の構造を模式的に示す。本装置は, ウレタンゴムの薄いフィルムでコーティングされた金属曲面(摺動面)の滑動と回転によって, 変位吸収を可能とした免震装置である。ある程度の軸力が作用すれば, 摺動面の摩擦は極めて小さくなるため, 中柱上下端の相対変位により装置の滑動と回転変形は一義的に決まる。図-8は, 中柱上下の床版を, 水平面を保持しながら, 水平方向に u だけ強制的に変形させたときに, 免震装置に発生する滑動 δ と回転変形 θ を模式的に示したものである。図のように摺動面で滑りが発生すれば, 2つの免震装置の活動面の中心を結ぶ直線上に中柱の中心線が

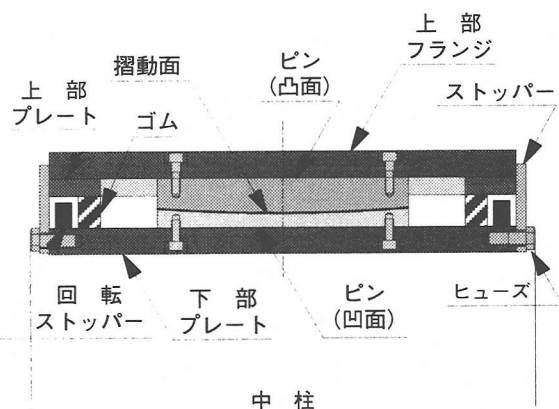


図-7 滑動+回転を利用したピン構造型免震装置

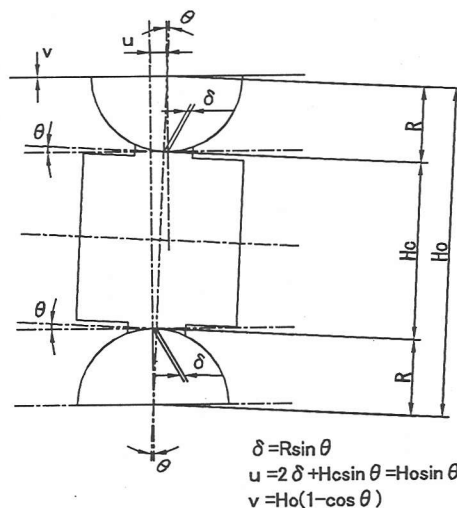


図-8 滑動+回転併用の免震装置の変形状態

移動するので, 免震装置の滑動は $\delta = R \sin \theta$, 回転は $\theta = \sin^{-1}(u/Ho)$ で与えられる。なお, 柱の回転に伴って, 上下床版には鉛直相対変位 $v = H(1 - \cos \theta)$ が生じる。

4. 免震装置の性能確認実験

(1) 実験方法

図-9に示すように, 中柱の上下に免震装置を取り付けた模型を用いて, 鉛直荷重を一定に保持した状態で水平変位を加え, 水平反力を計測した。模型の縮尺は実物の1/2としたが, 柱の高さだけは1/10である。

(2) 形状復元力を利用した回転吸収型免震装置

鉛直荷重を相似率通りに設定すれば実構造物の1/4の250tfであるが, 形状復元力は鉛直荷重に依存するので150tfと75tfのケースを追加して実験を行った。なお, 免震装置の支持壁の平面部の幅は50mmで, その両側に幅12.5mmのテーパ部を設けており, 支持壁の材質はS45Cで受圧版のSS400より硬度を高めた。

図-10は, 実験で得られた水平力と水平変位の関係を示したものである。鉛直荷重を変えると, それにほぼ比例した水平反力が得られており, 前述の形状復元

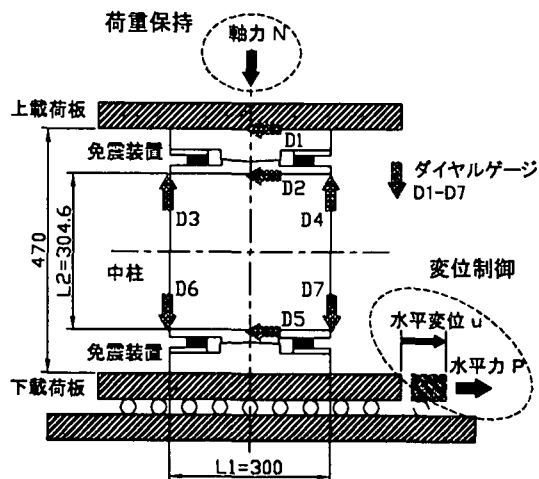


図-9 性能確認実験の荷重方法

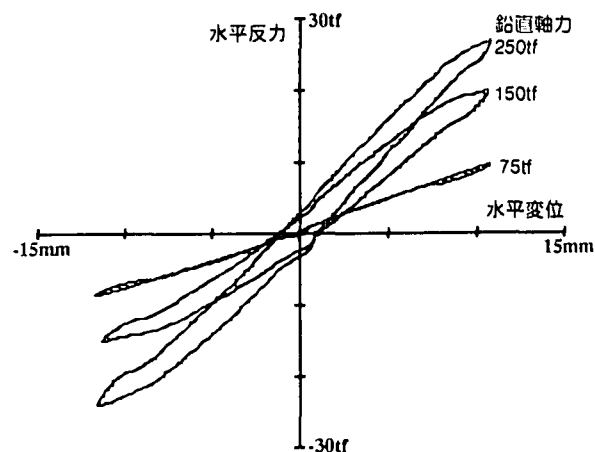


図-10 形状復元力利用の免震装置の荷重-変位関係

表-3 滑動+回転併用の免震装置の変形状態 (回転角:rad, 変位:寸法:mm)

(a) 計測値			(b) 水平変位uから導かれる理論値					(c) 計測値D2～D7による実験値				
記号	10mm 変位	20mm 変位				10mm 変位	20mm 変位				10mm 変位	20mm 変位
D1	10.01	20.02	回 転 角	上装置	$\theta = \sin^{-1}(u/H_o)$	0.00538	0.01076	回 転 角	上装置	$\theta u = \tan^{-1}((D4-D3)/L1)$	0.00563	0.01127
D2	5.94	11.88		下装置					$\theta l = \tan^{-1}((D6-D7)/L1)$	0.00571	0.01142	
D3	-0.91	-1.82		中柱					$\theta c = \tan^{-1}((D2-D5)/L2)$	0.00561	0.01126	
D4	0.78	1.56	水 平 変 位	上装置	$\delta = R\sin \theta$	4.038	8.076	水 平 変 位	上装置	$\delta u = R\sin(\theta u)$	4.225	8.449
D5	4.23	8.45		下装置					$\delta l = R\sin(\theta l)$	4.284	8.568	
D6	0.96	1.92		中柱					$\delta c = R\sin(\theta c)$	2.016	4.044	
D7	-0.78	-1.56		合計					$u = D1$	10.010	20.020	
Hc=359.12, R=750.00, Ho=1839.12			鉛直変位	$v = H_o(1 - \cos \theta)$		0.027	0.108	鉛直変位	v		0.023	0.110

力の特徴が顕著にあらわれている。

また、軸力250tfの基本ケースについて回転バネ定数を計算すると270tf・m/radであり、実物大での目標値2000tf・m/radの達成の見通しが得られた。

(2) 滑動+回転を利用したピン構造型免震装置

土被りが浅く、中柱の軸力が小さなトンネルにこのタイプの免震装置を適用する場合には、摺動面の確実な滑りが難しくなると考え、鉛直荷重を相似率に合せて250tfとした基本ケースに加えて、8tfと極端に小さくしたケースの実験も行った。また、免震装置や柱の変形状態を詳細に調べるために、図-9に示したようにD1~D7の7個のダイヤルゲージを設置して、下側載荷板に対する相対変位を計測した。

表-3は、実験条件の厳しい軸力8tfのケースの結果を用い、前章で述べた通りの変形状態が生じたか否かを確かめたものである。D1で直接計測される相対変位uから理論的に求めた免震装置と中柱の回転角ならびに水平変位は、D2~D7の計測値から求まる値とそれぞれ非常に良く一致しており、本装置の変位吸収機構が想定した通りであることが確かめられた。

5. まとめ

本論文では、以下にまとめるような知見が得られた。

- ①地下構造物中柱の上下端に、ピン構造あるいは適度な回転バネの免震装置を設置することで十分な免震効果が得られる。
- ②2種類の免震装置を考案し、それぞれについて変位吸収機構の特徴を整理した上で、装置を試作して性能確認実験を実施し、想定した変位吸収機構を確めた。今後は実用化に向けて、形状復元力利用型免震装置の回転バネの設計式の確立や、滑動+回転利用型免震装置の常時荷重に対するヒューズ機構の確認のための実験等を行う予定である。

参考文献

- 1) Suzuki, T.: Damages of urban tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the evaluation of seismic isolation effect, CD-ROM of the 11WCEE, Acapulco, Mexico, 1996.
- 2) 金子他: 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, pp.63-70, 1998.
- 3) 建設省土木研究所他: 地下構造物の免震設計法マニュアル(案), 1998.9.
- 4) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 1997.