

地下構造物の中柱に設置する変位吸収装置 (免震装置)の提案とその機能評価

鈴木 猛康¹・金子 誉²・田中 港³・田村 重四郎⁴・福田 健⁵

¹正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所 土木系研究開発部 (〒300-22 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 土木系研究開発部 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

³正会員 (株)熊谷組技術研究所 土木系研究開発部 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

⁴フェロー 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275 千葉県習志野市泉町1-2-1)

⁵工修 信越化学工業(株) シリコン事業本部 (〒100 東京都千代田区大手町2-6-1朝日東海ビル)

地下鉄駅部等の幅広断面の地下構造物に設置される中柱は、常時に大きな上載荷重を軸力で支持している。地震時に中柱が崩壊し、上載荷重を支持できなくなると、兵庫県南部地震の際に大開駅で見られたような崩落という大惨事に繋がる。本論文では、このような大惨事を防止することを目的とし、高軸力下で地震時水平変位を吸収できる簡便な中柱の免震装置を提案している。数値解析を実施し、変位吸収型の免震装置の有効性を示すとともに、装置の実現性に対して考察を加え、装置開発に向けた今後の課題を示している。

Key Words : seismic isolation device, center columns for a tunnel, static FEM analyses.

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、開削工法で施工された地下鉄トンネルに大きな被害が発生した。もっとも被害の激しかった神戸高速鉄道・大開駅の被害要因に関しては、現地被害状況の調査と数値解析を通じて、複数の研究者により分析が行われている^{1,2,3)}。これらの分析で、常時に大きな軸力を支持している中柱のせん断破壊を主因とし、中柱の支持力が失われたことによって、上床版が破壊し、崩落に至った点で共通の結論が得られている。一方側壁に関しては、地震による変形によって地震時に曲げ破壊に至ったとする考え方と、地震時には破壊にまで至らないが上床版の崩落にともなって破壊が発生したとする考え方がある。しかし、側壁が曲げ破壊を起こし、ピン構造となったとしても、地下構造物の場合周囲が地盤であるため、変形が過度に進行するわけではなく、常時の上載荷重を中柱が支持できれば、崩壊までは至らないと考えられる。

Suzuki¹⁾はこのような中柱を有する矩形トンネルの地震時断面力低減を目的として、中柱の免震化を提案し、数値解析によって中柱の地震時曲げモーメ

ントならびにせん断力低減に効果を発揮することを示した。そこで提案されている中柱の免震装置は、スチール製のリングの積層体の内部にゴムを封入したもので、軸力はスチールで支持し、水平変位はリング間のすべりで吸収するもので、さらにゴムにより各滑り面の吸収変位を均等化する構造である。数値解析では、免震装置は中柱の上部に設置され、曲げ剛性 EI の小さな梁としてモデル化されていたため、免震装置の構造を十分反映させたモデル化となっていなかった。

そこで本論文では、まず地下鉄駅部のように中柱を有する幅広断面の地下構造物の崩壊の防止が、中柱に簡単な水平変位吸収型の免震装置を設置することによって可能となることを、数値解析によって示す。さらに、高軸力を受けながら所期の免震効果を発揮できる装置の必要条件について考察し、装置開発に向けての今後の課題を示している。

2. 中柱免震のコンセプト

ここでは、まず地下構造物の中柱に耐震設計上要求される機能を整理し、それに基づいて中柱免震の

コンセプトを示す。

(1) 常時の中柱の機能

図-1(a)に示すとおり、トンネルは常時上載圧を支えており、中柱には大きな圧縮力が作用している。

(2) 地震時の中柱の機能

トンネル横断面内の地震応答について考えると、図-1(b)に示すように、周辺地盤のせん断変形に伴いトンネルは変形する。この際、トンネルの変形を支配するのは地盤とトンネル上下床版・側壁の剛性であり、相対的に剛性の小さな中柱は、トンネルの変形には寄与しないと考えられる。

中柱に求められる機能は、トンネルの変形に追従できる変形性能と耐力をもち、地震の継続時間中および地震後に上載圧を支持する機能を失わないことである。

(3) 中柱免震のコンセプト

中柱が地震時のトンネルの変形に追従する必要があるれば、中柱は地震時にも単に上載圧を支持できればよいことになる。そこで、図-1(c)に示すように、高軸力を支持しながら、上下床版間の相対変形を吸収できる装置を中柱の上端部に挿入すれば、中柱に過度の変形を生じさせない。したがって、中柱が上載圧の支持機能を失わないため、トンネル崩壊を防止できるものと期待される。

3. 数値解析によるコンセプトの検証

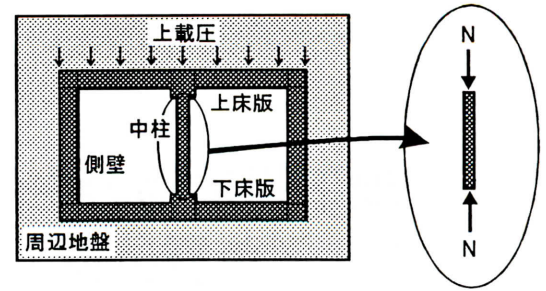
前章で示した中柱免震のコンセプトを検証するために、応答震度法⁴⁾による静的FEM解析を行った。ここでは、変位吸収装置なし・有りの2ケースの解析を行い、両ケースでトンネルの変形に大きな違いが生じないこと、ならびに装置有りのケースにおいて上下床版間の相対変位を装置部分で十分吸収できることを確認する。

(1) 解析モデル

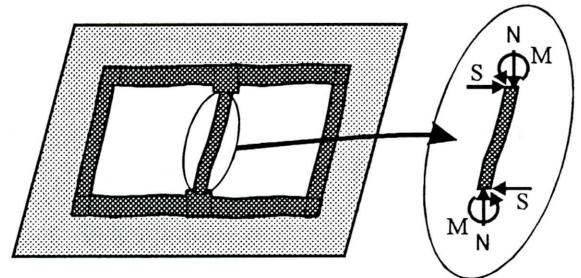
a) 地盤モデルおよび加速度分布

図-2に解析に用いた二次元FEMモデルを示す。地表から厚さ14.17mの沖積粘土層と5.00mの洪積砂層とからなる、計19.17mの表層地盤を想定した。表-1に設定した地盤の物性値を示す。

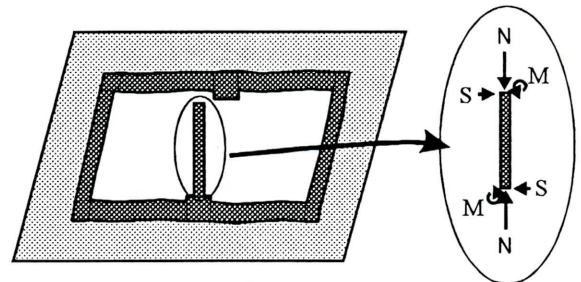
また、FEM解析に先立ち、自由地盤の一次元波動応答解析を行って加速度分布を求めた。ここでは、1995年兵庫県南部地震の神戸大学の記録(NS成分)



(a) 常時: 中柱は高軸力を支持。



(b) 地震時: 中柱には強制変形によるせん断力、曲げモーメントが作用。



(c) 中柱免震時: 中柱がトンネルの変形から絶縁され、作用断面力が極めて小さくなる。

図-1 地下構造物の中柱の機能と中柱免震のコンセプト

を基盤に2Eとして入力し、地盤のひずみエネルギーの総和が最大となる時刻の加速度分布として図-3を得た。FEM解析では、これを用いて各要素の慣性力を求め、水平方向に物体力として作用させた。

b) トンネルモデル

神戸高速鉄道・大開駅²⁾を参考にしてトンネルモデルを設定した。幅17.00m、高さ7.17mの開削トンネルが土被り5.00mで構築されているものとした。中柱は断面寸法が0.4m×1.0mで、3.5m間隔に配置されている。図-4にモデル図を、表-2に部材の物性値を示す。なお、部材の断面剛性は全断面有効のコンクリート断面として与えた。

c) 変位吸収装置

変位吸収装置は、中柱上端の要素を15cm切取り、その両側の節点を十分剛な軸方向バネと回転バネで連結することで表現した。したがって、変位吸収装

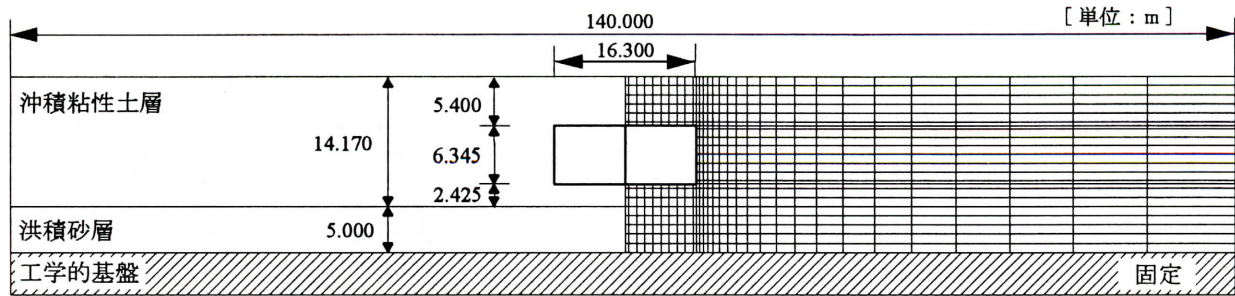


図-2 解析地盤モデル

表-1 想定地盤の物性値

地盤種	せん断波速度 Vs [m/s]	単位体積重量 γ [tf/m ³]	ポアソン比 ν	Q値	層厚 d [m]
沖積粘土層	100.0	1.7	0.48	3.3	14.17
洪積砂層	350.0	1.8	0.49	7.1	5.00
工学的基盤	500.0	2.2	0.43	21.7	100.00

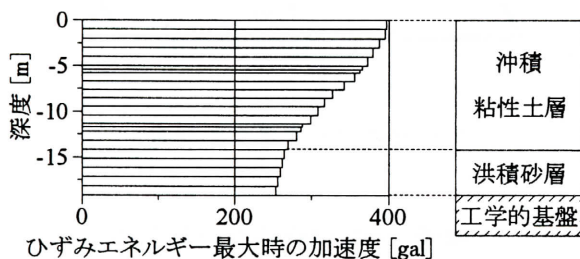


図-3 神戸大学記録(NS)に対する加速度分布

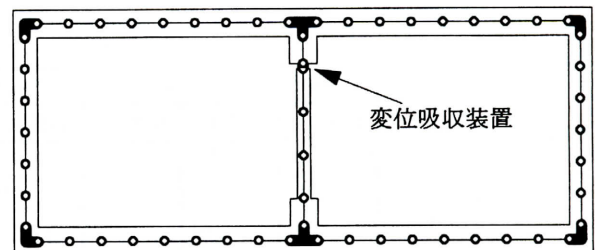


図-4 トンネルモデル

表-2 トンネルモデルの諸元

	断面高 h [m]	断面幅 b [m]	断面積 A [m ²]	断面二次モーメント I [m ⁴]	単位体積重量 γ [tf/m ³]	ポアソン比 ν	ヤング率 E [tf/m ²]
上床版	0.800	1.000	0.800	0.043	2.50	0.20	2.50E+06
側壁	0.700	1.000	0.700	0.029	2.50	0.20	2.50E+06
下床版	0.850	1.000	0.850	0.051	2.50	0.20	2.50E+06
縦梁	0.800	1.000	0.800	0.043	2.50	0.20	2.50E+06
中柱	0.400	0.286	0.114	0.002	2.50	0.20	2.50E+06

置は水平変位成分のみを絶縁する構造として設定したことになる。

(2) 解析結果

図-5および表-3に、トンネルの変位について変位吸収装置なし・ありのケースを比較して示す。まず、トンネルの水平変位についてみると、変位吸収装置

を挿入することで、上下床版の相対変位はわずかに約6～7%増えるだけで、大きな差違はみらない。したがって、中柱はトンネル全体の変形にはほとんど寄与しないことがわかる。

また、図-5(a)の装置なしのケースでは、上下床版の相対により、強制的に中柱が大きく変形させられている様子が読みとれる。一方、図-5(b)装置ありの

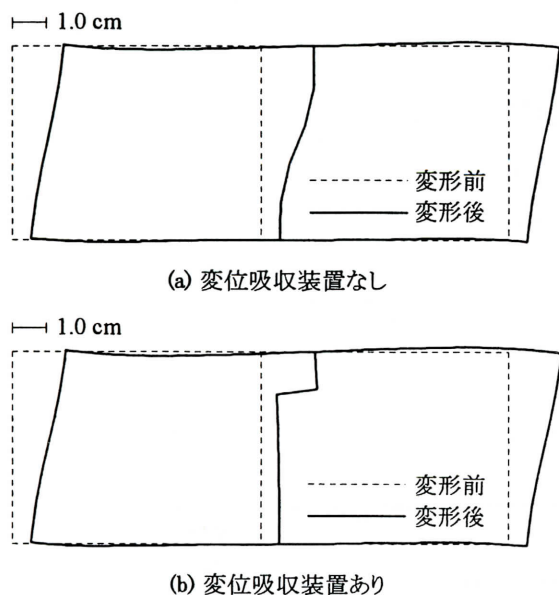


図-5 変位吸収装置の有無によるトンネルの変形状の違い

表-3 変位吸収装置の有無によるトンネルの変位の違い

		水平変位 (cm)		回転角 ($\times 10^{-6}$ rad)	
		装置なし	装置あり	装置なし	装置あり
側 壁	上床版	1.69	1.75	-1,060	-1,180
	下床版	0.62	0.60	-868	-909
	相対変位	1.08	1.15	—	—
中 柱	上床版	1.70	1.75	215	430
	下床版	0.61	0.60	-16	94
	相対変位	1.09	1.15	—	—
変 位 吸 収 装 置	装置上	1.72	1.81	66	427
	装置下	1.71	0.51	-563	427
	相対変位	0.01	1.30	—	—

ケースは、上下床版間の相対変位を装置が吸収しており、中柱の変形が極めて小さくなることがわかる。

なお、表-3において装置の変形量が上下床版の相対変位より13%大きくなっているが、これは上下床版が中柱との接合部でたわみ角をもつためである。

4. 変位吸収装置の機構

数値解析から、中柱上部に水平変位を吸収する装置を用いることで、中柱の変形を大幅に抑えられることがわかった。このような状態を実現する機構として、滑りや転がり摩擦を利用するタイプと、弾性ゴムのせん断変形を利用するタイプとが考えられ

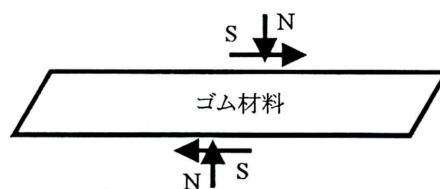
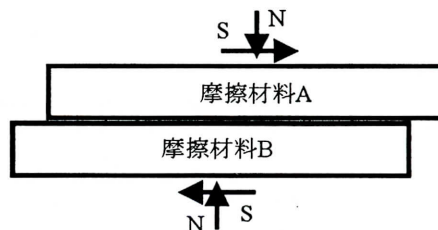
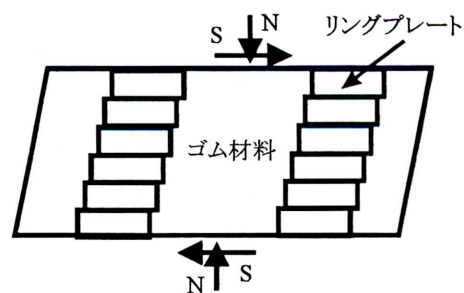


図-6 変位吸収装置の概念図

る。さらに、前者の一種としてSuzuki は多段リング型で内部にゴム系の材料を封入した装置を提案している¹⁾。図-6にこれらの装置の概念図を示す。以下、装置の実現性についてタイプ別に簡単に考察する。

(1) 多段式の摩擦タイプの装置

図-6(a)に示すような構造で、基本的にはリング間の滑りを利用して変位を吸収しようとするものである。さらに、多段にすることで吸収変位量の分散を狙っており、分散を確実に行うためにゴム系材料をリング内に封入しておく。

このような装置の実現性に関して、摩擦タイプとしての事項は次の(2)で共通して述べる。滑り面を多段に設けることで懸念されるのは、摩擦係数がばらつくことである。その場合、相対的に摩擦係数が小さな面が先行して滑る。一旦滑りはじめると、そこでは静止摩擦から動摩擦に移るために伝達される摩擦力が小さくなり、他の面ではなお滑りにくくな

る。このような現象を防止するためにゴム系材料を用いるが、高軸力下で大きな摩擦力が作用している中で、十分に機能するか否かは未知であり、その理論的解明と実験的検証が今後の課題として挙げられる。

(2) 摩擦タイプの装置

図-6(b)に示すように、摩擦係数の小さな材料を用いて滑りや転がりにより変位を吸収しようとするものである。このタイプの装置では、滑り面の摩擦力が中柱に作用するせん断力の上限值となるため、トンネルの変形量とは独立に、中柱の作用断面力を定めることができる。

ここで、クーロン摩擦を仮定すると、摩擦力は摩擦係数と軸力の積として与えられる。一般に、静止摩擦係数は動摩擦係数より大きいので、装置を介して中柱に作用する最大せん断力は静止摩擦力で規定される。つまり、装置が変形を吸収し始める瞬間において中柱が耐力にどの程度余裕をもっているかで免震効果が評価される。

以下、神戸高速鉄道・大開駅²⁾に耐震補強として中柱免震を行う場合を例にとり、変位吸収装置の実現性を検討する。まず、中柱には常時約350tfの軸力が作用しており、せん断耐力が約70tfであるから、摩擦係数は、

$$\mu < 70/350 = 0.20$$

でなければならない。次に、曲げ耐力に関しては、中柱のじん性率が1.3と小さいので、降伏曲げモーメントを対象として検討する。降伏曲げモーメントは約130tf-m、柱の高さは約4.0mであり、変位吸収装置で曲げモーメントを伝達するものとすれば、摩擦係数は、

$$\mu < 130/(350 \times 4.0/2) = 0.19$$

でなければならない。以上より、摩擦係数が0.1～0.15程度であれば免震効果が期待でき、この程度の摩擦係数であれば実現性が高いといえる。

今後の課題としては、実験を通して、高軸力下において所期の性能を発揮する安価な摩擦材料を選定すること、装置の摩擦型履歴特性を組み込んだ地震応答解析を行い、中柱の断面力低減効果を指標とした免震効果の評価を行うこと等が挙げられる。

(3) 弾性ゴムタイプの装置

図-6(c)に示すように、ゴムのせん断変形に変位を吸収しようとするものである。橋梁のゴム支承に用いられるような天然ゴムやクロロプレンゴムでは、最大許容圧縮応力度は80kgf/cm²程度にとられる。こ

こでも大開駅を例にとって考えると、常時の軸力350tfを中柱の断面積0.4m²で割ると、面圧は87.5kgf/cm²となり許容値を満足しない。さらに、上下地震動で200tfの軸力が加わることを考えれば、圧縮力により強い材料を用意しなければならない。したがって、現時点では弾性ゴムタイプの変位吸収装置は実現性に乏しいと考えられる。

5. まとめ

本論文では、常時に大きな上載荷重を軸力で支持している地下構造物の中柱の破壊がトンネルの崩落に繋がることから、その防止のための有効な手段として中柱免震を取り上げ、数値解析を含む検討を行った。本論文から得られた結論をまとめると以下のとおりである。

(1) 幅広地下構造物が地震時に崩壊することを防止するためには、中柱が上載圧を支持する機能を損なわないことが重要であるとの見地から、中柱免震のコンセプトを示した。すなわち、中柱上部に水平変位を吸収できる装置を設置することで、地震時に中柱をトンネルの変形から絶縁して過度の変形を与えず、軸力の支持機能のみを果させるものである。

(2) 応答震度法により、中柱を有するトンネルと周辺地盤の静的FEM解析を行った結果、水平変位装置で水平変位を十分に吸収し、地震時に中柱に生じる変形を極めて小さく抑えられることが示された。また、変位吸収装置で吸収すべき変位は、トンネル上下床版間の相対変位より10%強大きいことがわかった。

(3) 変位吸収装置として、弾性ゴムのせん断変形を利用するタイプでは、中柱に作用する軸力による面圧を支えることができず、このタイプの装置は現実的でない。

(4) 変位吸収装置として、滑りや転がり摩擦を利用するタイプでは、中柱に作用する最大せん断力は装置の静止摩擦力で規定される。所要の免震効果を得るための摩擦係数を試算したところ0.1～0.15であり、十分に実現性があることがわかった。今後の装置開発に当たっては、高軸力下において所期の摩擦係数が得られる安価な摩擦材料の選定と、装置の摩擦型履歴特性を組み込んだ動的解析を行い、中柱の断面力低減を指標とした免震効果の確認が重要である。

(5) 滑り摩擦を利用した変位吸収装置をさらに発展させたものとして、リングプレートを多段にする

ことで吸収変位量の分散を図る装置を提案した。今後の課題として、分散を確実にを行うためにリング内に封入するゴム系材料が、所期の機能を果たすことを理論、実験の両面から確認することが挙げられる。

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, *Proc. 11WCEE*, Acapulco, 1996.
- 2) 矢的照夫, 梅原俊夫, 青木一二三, 中村晋, 江寄順一, 末富岩雄: 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開

駅の被害とその要因分析, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 303-320, 1996.

- 3) 脇尚信, 大槻明, 大西有三: 兵庫県南部地震による地下鉄構造物の被害メカニズムの一考察, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp. 221-226, 1996.
- 4) 片山幾夫, 足立正信, 嶋田穰, 都築富雄, 瀬下雄一: 地中埋設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法」の提案, 土木学会第40回年次学術講演会, 第I部門, pp. 737-738, 1985.

(1996.9.14受付)

PROPOSAL OF THE DEFORMATION ABSORBER (SEISMIC ISOLATION DEVICE) ATTACHED TO CENTER COLUMNS OF UNDERGROUND STRUCTURES AND EVALUATION OF ITS FUNCTION

Takeyasu SUZUKI, Isao KANEKO, Minato TANAKA,
Choshiro TAMURA and Takeshi HUKUDA

In underground structures with a wide cross-section such as a station section of a subway tunnel, center columns support extremely large overburden pressure by their axial forces under a static condition. The collapse of center columns leads a severe disaster as a complete failure of tunnels which we have experienced in the Daikai Station due to the Hyogoken-Nanbu earthquake. As a countermeasure to such a disaster, the simple seismic isolation device attached to a center column, absorbing seismic shear deformation under a high axial force condition, is proposed in this paper. Numerical simulations are carried out and seismic isolation effects are presented. Then, the appropriate structure for the device are discussed.