高軸力をうける地下構造物中柱用の免震装置

金子 誉1・鈴木 猛康2・勝川 藤太1・松本 達治3

	1正会員	工修	株式会社熊谷組	技術研究所(〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)
	2正会員	工博	株式会社熊谷組	技術研究所(〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)
3正会	員 工修	住友ニ	ゴム工業株式会社	建設品技術部 (〒651-0072 兵庫県神戸市中央区脇浜町3-6-9)

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、地下構造物の中柱に作用する常 時の高軸力を安定して支持しながら、地震時に生じる相対変位を効率的に吸収できる免震装置を開発した. この装置は形状復元力を利用した適度な剛性を有しており、中柱の上下端に設置することで上下床版間の 相対変位を免震装置の回転変形として効率的に吸収できるものである.本論文では、まず免震装置の構造 を示し、次に形状復元力に基づく復元力について概説し、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 : Sismic Isolation Device, column, underground structures

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 は大地震の際,地盤のせん断変形に追従して地盤と 同等に大きな横断面変形を呈することになる.兵庫 県南部地震で発生した地下鉄駅舎の崩壊は,中柱の せん断破壊によって,地下構造物が上載土圧を支持 できなくなったことが直接的な原因と考えられる. 一般に,地下構造物の中柱は常時 10,000kN

(1,000tf) 程度あるいはそれ以上の高軸力を支持 している.上述の地震被害のように,中柱自身や中 柱と覆工との接合部が破壊すると,"崩壊"という 地下構造物にとって致命的な破壊モードを導く可能 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⁾.

本論文では,まず高軸力を受ける中柱に適した材 端の接合方法について考察し,次に形状に基づく復 元力の発生機構について概説し,それを応用した免 震装置の構造を示す.さらに,免震装置の変位吸収 性能の確認と復元力特性の把握を目的として実施し た正負交番載荷実験の結果について報告する.最後 に,免震装置の一つの発展形として,場所打ちRC 柱の内部に埋め込む形式の免震装置の構造概要について紹介する.

2. 高軸力下の中柱に適した材端接合方法

図-1 は地下構造物の中柱と覆工の接合方法につい て、常時の高軸力の支持能力やレベル2 地震動を対 象として想定される層間変位に対する変形性能といっ た観点から比較したものである.図-1(a)に示す剛結 合の場合には、地震時に大きなせん断力や曲げモーメ ントが生じ、所要の耐力や変形性能を満足させること が困難となるケースもあると考えられる.そのような 場合には、地震時に生じる層間変位を中柱の上下端で 効率的に吸収し、中柱や覆工の地震時増分断面力を低 減できる免震装置が有効となる²⁾.

まず,図-1(b)に示すように,建築物や橋梁の免震 構造でアイソレータとして実績のある積層ゴムの利用 が考えられる.これは層間変位をゴムのせん断変形で 吸収しようとするものであるが,積層ゴムは面圧 1000~2000 N/cm²(100~200 kgf/cm²)程度で使 用されるので,高軸力を支持するためには平面寸法 が過大となり,また圧縮クリープ変形の防止と変位 吸収性能の確保を同時に満足させる装置高を決める ことは難しい.さらに,火災による軸力支持機能の 喪失も懸念される.

積層ゴム以外では、図-1(c)に示すように、中柱上 下端をピン接合として、層間変位を柱端の回転変位 で吸収する方法が考えられる.しかし、地震時の層 間変位や地震後の残留変位が生じたときには、常時 の高軸力が大きな転倒モーメントとして作用するた め、不安定な構造となってしまう.これは地震時の



みではなく,常時に構造物が偏荷重を受ける際にも 同様である・

そこで、図-1(d)のように中柱端部を適度な剛性を 有する回転バネで接合すれば、偏荷重を受ける場合 や地震時に大きな層間変位が生じる場合でも、中柱 は安定して高軸力を支持することができる.また、 回転剛性を小さな範囲で設定すれば、地震時にはピ ン接合とした場合と同等の回転変位吸収性能と地震 時増分断面力の低減効果を有することが、数値解析 により確かめられている³⁾.

3. 形状復元力を利用した免震装置

(1) 剛体柱の形状復元力

図-2(a)は、材端が平面形状である剛体柱が、一定軸 カ P を支持しながら強制変位を受けるときの力の作用 状況を示したものである. ①せん断力 S を増加させて いき、②転倒モーメント Mo=S·H が復元モーメント



(a) 相対変位の増加に伴う荷重点の移動



(b) 復元力特性 図-3 材端が曲面形状である剛体柱の形状復元力



図-4 免震装置の構造

 $M_{R}=P \cdot D$ と等しくなったときにはじめて動き出し,③ ④相対変位が大きくなるにつれて軸力 P の偶力間距離 が小さくなっていくので,復元モーメント $M_{R}=P \cdot L_{H}$ は 減少していく.このような形状に基づく復元特性を図 示すると図-2(b)のようになり,負の勾配を持つ不安定 なものとなる.

図-3(a)は、材端を曲面形状とした剛体柱の力の作用 状況を示したものである.①から④へと相対変位を増 加させていくと、柱端部では転がりながら接触点が移 動していく.そのため、相対変位とともに軸力の偶力 間距離も増していくので、復元特性は図-3(b)のように 正の勾配をもったものとなる.しかしながら、線接触 であるため常時における安定性に乏しい構造といえる.

(2) 免震装置の構造

図-4 に形状復元力を利用した免震装置の構造を模式 的に示す.本装置は硬度の異なる受圧版と両側にテー パー部を有する支持壁の圧接による両金属の弾塑性変 形を利用して,スムーズに回転変位を吸収できる構造



図-5 免震装置による形状復元力

				実構造	相似率
寸法	柱	直径	200 mm	600 mm	1/3
		高さ	1000 mm	3000 mm	1/3
	免震	支持壁全幅	66.67 mm	200 mm	1/3
	装置	平面部幅	33.33 mm	100 mm	1/3
	N 11. 11	テーパー幅	16.67 mm	50 mm	1/3
	1	支持壁奥行	140 mm	420 mm	1/3
		支持壁高さ	30 mm	90 mm	1/3
変位	水平	· 鉛直変位			1/3
	変形	変形角			1/1
力	<u>軸力</u> せん断力 曲げモーメント		871.1 kN	7840 kN	1/9
					1/9
					1/27
応力度			11.		1/1
ひずみ					1/1

表-1 交番載荷実験の相似率



図-6 正負交番載荷実験方法



図-7 免震装置模型の形状

となっている.中柱に常時作用する高軸力は鋼材の支 持壁の平面部で確実に支持しており,地震時でも受圧 版と支持壁は面接触を保つことができる.また,火災 を受けた後も軸力の支持機能や変位吸収機能を維持で き,設計で想定した以上に大きな相対変位が中柱に生 じた場合には,支持壁の外側に配置されたストッパー が受圧板と接触して免震措置の過度の変形を防止する とともに,軸力の一部を分担支持することで中柱の安 定性を保証している.

(3) 免震装置の形状復元力

図-5 は、上下端に免震装置を取り付けた中柱が強制 変位を受けた場合の力の作用状況を示したものである。 相対変位を受けて中柱が傾くと、主に受圧板側が弾塑 性変形することで,端部が曲面状の剛体柱と同様な変 位吸収性能と復元特性を示すものと期待される.

4. 正負交番載荷実験

(1) 実験概要

形状復元力を利用した免震装置の縮小模型を用いた 正負交番載荷実験を実施して,復元力特性について調 べた.表-1 に実験の相似率を示す.長さのディメンジ ョンをもつ実験模型の寸法と変位について相似率 1/3 とし,軸力とせん断力の相似率を(1/3)²,モーメント の相似率を(1/3)³とした.これにより,相対変位を柱 高さで除したものとして定義される変形角,応力度, およびひずみの相似率は 1/1 となっている.

	,				
軸力	制御方法	一定荷重に保持			
	荷重值	108.9 kN, 653.7 kN, 871.2 kN, 1088.8 kNの4水準			
層間変位	制御方法	変位制御			
	変 形 角	1/30			
	載荷波形	サイン波			
	載荷周期	10 秒			
	載荷回数	4 サイクル			

表-2 載荷条件と実験パラメータ





(d) 軸力 1088.8kN



図-6 に正負交番載荷実験方法を模式的に示す.中柱 の上下端に免震装置を取り付けた模型を,上下の載荷 板の間に単に挟んで置き,上側の載荷板を通して所定 の軸力が保持されるようにアクチュエータで載荷した 状態で,下側の載荷板を別のアクチュエータで変位制 御の下で所定の変位振幅で正負交番載荷した.なお, 載荷条件の詳細については表-2 に示している.

-20 L -40

-30

-20

-10

0

水平変位 (mm)

10

(c) 軸力 871.2kN

20

30

40

中柱模型には高さ 1000mm, 直径 200mm の鋼柱 (SS400)を用いた.免震装置模型は支持壁と下部フ ランジのみをモデル化するものとし, 硬質鋼 (S45C)を図-7の寸法に切出して一体成形した上で, 熱処理を施して所定の表面硬度を確保した.支持壁幅 のつち,中央の1/2が平面部,両側の1/4 づつが1/30 テーパーとなっている.受圧板模型には直径200mm, 厚さ12mmの鋼板(SS400)を用いた.

実験のパラメータについては、形状復元力に大きな 影響を及ぼすと考えられる軸力のみを変化させて実施 した.中柱模型を設定する際に想定した軸力は表-1 に 示したとおり 871.1 kN であり、載荷軸力としては表-2 に示した 108.9、653.7、871.2、1088.8 kN の4ケ ースとした.受圧板 (SS400)の降伏応力度は JIS G 3101 では 245N/mm² 以上と規定されているのに対し



図-9 軸力別の鉛直変位-水平変位関係

て,載荷軸力を支持壁平面部の面積で除して得られる 平均面圧は,上述の実験ケースではそれぞれ23,140, 187,234kNとなる.このように,載荷軸力について は,想定軸力を挟んだ2水準に,極端に小さな1水準 と平均面圧が受圧板の降伏応力度相当となる1水準を 加えたものとして設定した.

(2) 実験結果

軸力を4水準に変化させて行った正負交番載荷実 験の結果より,水平荷重-水平変位関係を図-8に比 較して示す.まず,変形角1/30に相当する最大変位 時の荷重を図-8(a)から(d)までで比較すると,それ ぞれ2,12,16,18 kNであり,軸力を大きくすると ともに復元力が増す傾向を示しており,3章で述べ た形状復元力の特徴を良く反映した結果となってい る.またこれら水平力の大きさは,中柱の断面設計 において部材端をピン結合として扱って良い程度の 復元力であり,免震装置が回転変位を効率良く吸収 しているといえる.

各軸力のケースについて個別に詳しくみていくと, まず図-8(a)の軸力108.9 kNのケースでは,ある初 期勾配をもって水平荷重-水平変位曲線が立ち上が っていることから,受圧板が変形している様子がう かがわれるが,2次勾配が負となっており,柱端部 が平面形状の剛体柱と良く似た復元力特性を呈して いる.水平変位が30mmを超えたあたりから履歴曲線 が再び正の勾配となっており,受圧板との接触面が 支持壁の平面部からテーパー部へと移行しているものと考えられる.

次に,図-8(b)の軸力653.7 kNのケースでは,有限な初期勾配とほぼフラットな2次勾配からなる弾 塑性挙動を表している.載荷時と除荷時の経路がほ ぼ等しいことから塑性変形は限られたものであるこ とが推察され,4サイクル行った交番載荷で履歴曲 線の経路に変化が見られず,載荷回数に対しても安 定した特性を呈している.図-8(c)の軸力871.2 kN のケースは,2次勾配が正となっていること以外は 軸力653.7 kNのケースと同様な復元力特性を示して いる.

最後に、図-8(d)の軸力1088.8 kNのケースは、1 サイクル目で大きな履歴ループを描いており、受圧 板が大きな塑性変形を受けていることがうかがわれ るが、2サイクル目以降は同じ経路をたどっている ことから、弾性変形が支配的となっているといえる。

図-9は,鉛直変位-水平変位関係を軸力を変えた 4ケースで比較して示したものであり,水平変位を 与えると上下の載荷板間の距離が増大する傾向を示 す.変形角1/30に相当する最大変位時の鉛直変位は, 図-9(a),(b),(c)のケースでそれぞれ0.48,0.40, 0.34 mmであり,4サイクル載荷終了後には載荷前 とほぼ同じ位置に戻っている.一方,図-9(d)のケ ースでは,1サイクル載荷した後では初期状態から 0.22mm程度沈み込みが生じ,その後も徐々に進行し て,4サイクル終了時の累積沈み込み量は0.28 mm となっている.



図-10 場所打ちRC柱内への免震装置の埋設方法

(3) 考察

軸力を変えて中柱用免震装置の正負交番載荷実験 を行った結果から考察すると、支持壁水平部の平均 面圧が受圧板の降伏応力度の60%~80%の範囲で使 用する場合には変位吸収性能、復元力特性、繰返し 載荷に対する安定性に非常に優れた免震装置として 作動するといえる.一方、平均面圧が降伏応力度の 10%程度と小さな範囲で使用する場合は、復元力曲 線の2次勾配が負になることに配慮すべきであり、 逆に平均面圧が降伏応力度相当の大きな範囲で使用 する場合には、実構造物では上下床版間が1 mm程度 縮むことに配慮する必要がある.

5. 場所打ちRC中柱用の免震装置

前章まで議論してきた免震装置は、図-4に示した ように中柱と覆工の間に挟んで設置するような構造 となっており、施工上は鋼管柱やプレキャストコン クリート柱など工場製品の柱に取り付けた上で建て 込む場合に適しており、場所打ちRC造で構造物を 構築していく場合には、仮固定方法や型枠、支保工 などが煩雑になると考えられる.

そこで、免震装置の基本的性能を維持したままで、 施工性を改善できる構造とすることが望まれる. そ の一案として、図-10に示すようにRC部材に免震 装置を埋設する方法が考えられる.ここで、接合部 における中柱の配筋は以下のコンセプトに従うもの とする.

- a. 主鉄筋は免震装置の周囲を通し、L1地震動レベルまではRCと同等の復元力特性を持たせる.
- b,免震装置部分の帯鉄筋は間引いて,L2地震動レ ベルでは免震装置の変位吸収性能に期待する.

そこで用いられる免震装置としては図-11に示す 構造が考えられる.これは、支持壁とセメントペー



図-11 場所打ちRC柱用の埋設型免震装置

ストの進入を防ぐための有孔ゴム,および受圧板で 構成し,ストッパーは廃止したものとなっている.

6. まとめ

本論文は、高軸力をうける地下構造物中柱に用い る免震装置を対象として. 適度な復元力がその形状 に基づいて得られる装置構造を提案し、正負交番載 荷実験を実施して所期の変位吸収性能と復元力特性 を有することを検証した. さらに、場所打ちRC造 の中柱内に埋設するタイプの免震装置のコンセプト を示した.

謝辞:本研究を遂行するにあたっては,日本大学 田村重四郎教授ならびに東京大学生産技術研究所 小長井一男教授の懇切なるご指導を賜りました.こ こに深く謝意を表します.

参考文献

- 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)金子他:複円形シールドトンネルの中柱免震装置の回転剛性に関する解析的検討,第34回地盤工学研究発表会,pp.858-859,1999.
- 4)日本規格協会: JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材, 1995.