

# トンネル中柱の免震装置

Seismic Isolation Device for the Center Column of Tunnel

三 神 厚\*・小長井 一 男\*

Atsushi MIKAMI and Kazuo KONAGAI

## 1. はじめに

地下トンネルは地震に対して強いと考えられていたが、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、神戸高速鉄道大開駅に深刻な被害が発生した(写真1)。大開駅は開削工法によって建設された地下構造物で、常時においてはトンネル上の約5mの土被りを中柱が支えていたが、地震による横断方向の大きな変形により中柱が破壊し、その結果トンネル構造物の崩壊に至ったものと考えられている<sup>1)</sup>。

このような巨大地震に対して構造物の崩壊を免れるには、免震手法を用いることが一つの可能な方法である。これまで地下トンネルの免震手法としては、構造物周辺に免震材を充填し、躯体に作用するせん断力を軽減する方法<sup>2)</sup>などが検討されている。非圧縮性の免震材を用いるため、トンネル躯体に働くせん断力の低減に有効な手法であるが、壁面法線方向に働く力による変形は免れない<sup>3)</sup>。より直接的な方法として、最も厳しい応力条件下に置かれる中柱に直接免震装置を取り付け、地下構造物の崩壊を防ぐことが考えられる。本研究では、中柱に作用する高軸圧に耐



写真1 神戸高速鉄道大開駅の被害

\*東京大学生産技術研究所 第1部

表1 免震装置の機能分類

	Type 1	Type 2	Type 3	要求性能
$K_V$	大	大	大	大きい
$K_H$	小	$\infty$	$\infty$	どちらかが小さい
$K_R$	$\infty$	0	$P$ に依存	
上載圧依存性	$K_V, K_H$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	なし

ただし、 $K_V, K_H, K_R$ ：それぞれ鉛直方向、水平方向および回転に対する剛性

$M_{cr}$ ：滑り出すのに必要なモーメント

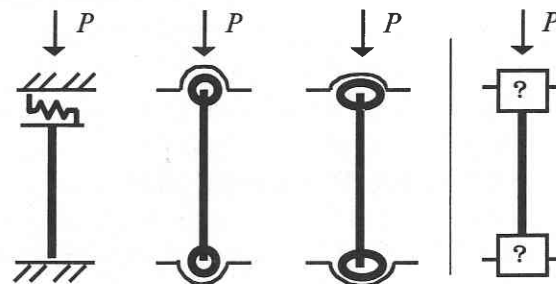


図1 各種免震装置の有する機能概念図

え、かつ中柱の免震に要求される基本的な機能を満足するものとして提案されてきた免震装置<sup>4)</sup>を分類するとともに、ゴムと鋼板を組み合わせた一つの可能な免震装置の形状を示し、その基本的な性能を検討する。

## 2. 中柱の免震装置

### 2.1 免震装置の概念図

トンネルの中柱は、常時には上下方向の大きな軸荷重を

## 研 究 速 報

支えている。地震時にはトンネル躯体が横断方向に変形されるため中柱にはさらにモーメントやせん断力が作用するようになる。そこで中柱端部に免震装置を設置し、モーメントやせん断力の低減を図ることが重要である。表1に、これまでに提案されたものを含む、いくつかの免震装置について上下、水平、および回転の各自由度に対する機能という観点から分類してみる。

Type 1 は、中柱の一端に、例えば積層ゴムのような水平方向にフレキシブルな免震装置を設置するものである。この装置は、トンネル躯体の上床が水平動のみの時に中柱に発生するせん断力の低減を図るには有効であるが、上床の回転により中柱にモーメントが発生する。 $K_v$ 、 $K_H$ とも中柱に作用する上載土圧  $P$  に若干依存する。Type 2 は両端をピンにして中柱へのモーメントの伝達を抑えようというものである。ピンがすべり出すのに必要なモーメント  $M_c$  は上載荷重  $P$  に依存する。回転に対して復元力が発生しないため、過度の回転が生ずるような場合には中柱が支えていた土圧が他の構造部材へ分担されるようになることを考慮する必要がある。Type 3 は Type 2 と異なり、中柱の変形時に形状復元力が期待できる。しかし、回転に対する剛性が上載荷重に依存するので、設計時には上載土圧を適切に推定する必要がある。

Type 1 ~ 3 は、上下方向に剛性が大きく、水平方向または回転に対する剛性が小さいという免震装置に要求される基本的性能を満たすものである。これらの性能が上載土圧などの不確定要素にさほど依存しないのであれば、設計プロセスの簡便化につながるものと考えられる。そこで、ゴムと鋼板を組み合わせた免震装置の一つの可能な形状を示し、その剛性の設計法について検討する。

## 2.2 基本性能を満たす免震装置の検討

上下方向に十分な剛性を有し、回転に対してはフレキシブルである免震装置として、図2のような免震装置を考え

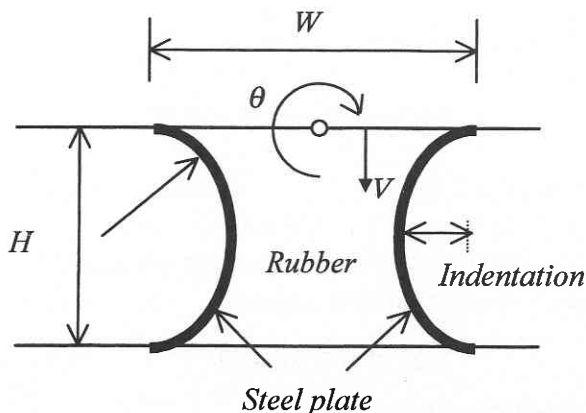


図2 ゴムと鋼板からなる免震装置の一例

る。この免震装置は、ゴムの上下端が剛、左右の側面が円弧アーチ状の鋼板で挟み込まれているものである。この装置の回転中心をゴム上端の中央において回転に対する剛性を評価するものとする。上下方向に荷重が作用すると、左右の鋼板も中へ窪もうとするが、ゴムのポアソン比  $\nu$  はほぼ0.5で非圧縮性材料であるため、このモードの変形に強く抵抗する。

一方、回転に対しては左右の鋼板が抵抗するものの、免震装置上端の回転による直接的なゴムの体積変化はほとんど生じないので、この自由度に対しては十分フレキシブルであることが期待される。このように、鉛直および回転の各自由度に対して異なった剛性発生機構を有する免震装置である。

## 3. 免震装置の各自由度における剛性の設計

### 3.1 鉛直方向の剛性に関する検討

この免震ゴム装置を常時に安定して保つためには、常時に作用する上載圧を初期剛性内で支持する必要がある。鉛直方向の剛性に寄与するパラメーターとしては免震装置側面の円弧アーチのインデンテーション（Indentation）、鋼板の厚さ等が考えられる。そこでこれらと免震装置の鉛直方向初期剛性  $K_v$  との関係調べる。なお、解析にあたっては、免震装置の奥行きを1(m)、奥行き方向には平面ひずみを仮定し、2次元有限要素解析法を用いている。

鉛直方向の初期剛性の値と左右の鋼板のアーチのインデンテーションとの関係を図3に示す（ここでインデンテーションが負の値であることは左右に膨れている状態を示す）。図中、 $E_R$ 、 $E_S$  はそれぞれゴムおよび鋼板のヤング率、 $t_s$  は鋼板の厚さ、 $\nu$  はゴムのポアソン比を示す。鉛直方向の剛性は鋼板のアーチのインデンテーションが正の値、すなわちゴムが窪んだ形状になると、これが膨れている場合に比べ剛性が大きくなっている。これは上下方向に圧縮を受けた際、左右のアーチ状の鋼板も中に入り込もうとするため、上下、左右から非圧縮性材料であるゴムを抑え込むことによる。インデンテーションが零付近で鉛直方向剛性が最大になっているが、この時には鋼板に大きな圧縮力が作用していることになるので、座屈に関する検討を行う必要がある。

図4は、側面の窪みを5(cm)として初期形状を固定した場合に、形状非線形の効果を検討した解析を行い、上載荷重～変位関係を3種類の板厚  $t_s$  について示したものである。各曲線における変曲点が鋼板の座屈する荷重を示している。鋼板の厚さは、免震装置の上下方向の初期剛性にさほど寄与しないことがわかる。免震装置に常時荷重を与えた状態が、この荷重～変位曲線の直線区間内、すなわちこ

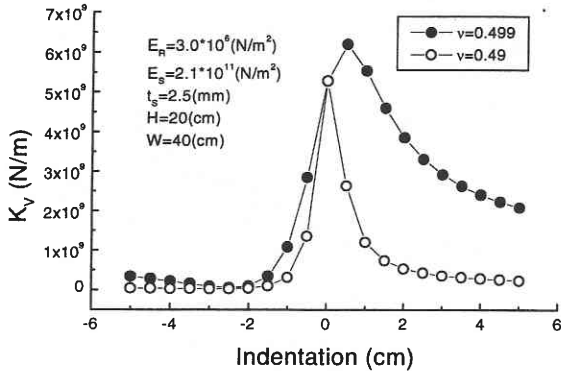


図3 免震装置の鉛直方向初期剛性とアーチのインデンテーションの関係

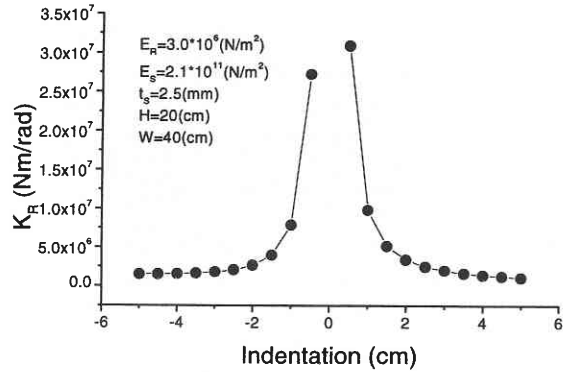


図5 免震装置の回転に対する初期剛性とアーチのインデンテーションの関係

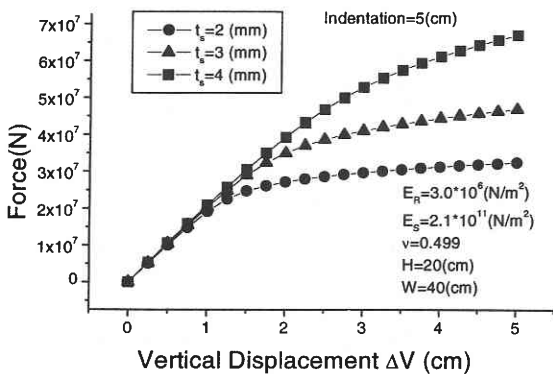


図4 上下方向の荷重～変位関係に及ぼす鋼板厚さ (ts) の影響

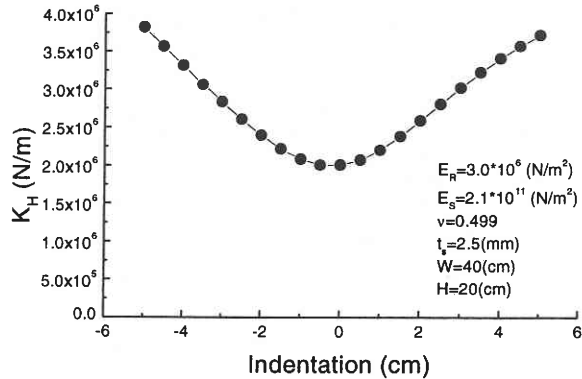


図6 免震装置の水平方向初期剛性とアーチのインデンテーションの関係

の免震装置の初期剛性区間内にあることが必要である。

### 3.2 回転に対する剛性の検討

回転に対する初期剛性と円弧アーチのインデンテーションとの関係を図5に示す。免震装置上端の回転はゴムの体積変化を伴わないので、回転に対する剛性は鋼板からなる骨格部分の剛性にほぼ等しい。したがって、インデンテーションの正負は回転に対する剛性にはほとんど関係なく、鋼板の寄与の影響が支配的であることがわかる。そのため、図4は左右ほぼ対称な形状を示している。なお、ここでの検討は上載荷重を零としている。

### 3.3 水平方向の剛性に関する検討

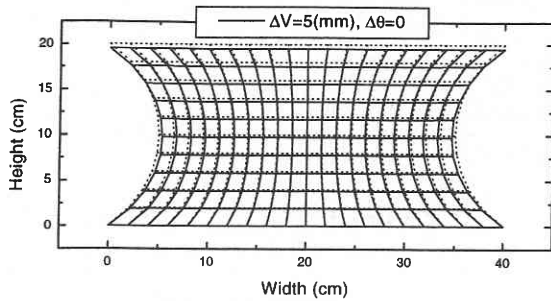
免震装置の上下端の水平方向相対変位に対する初期剛性と円弧アーチのインデンテーションとの関係を図6に示す。この場合も免震装置上下端の水平方向相対変位によるゴムの体積変化は小さいので、水平変位に対する剛性は鋼板からなる骨格部分の剛性にほぼ等しい。したがって、インデンテーションの正負は免震装置の水平方向の剛性にほとんど関係なく、鋼板の寄与の影響が支配的であることがわかる。そのため、図6は左右ほぼ対称な形状を示してい

る。なお、ここでも検討は上載荷重を零としている。

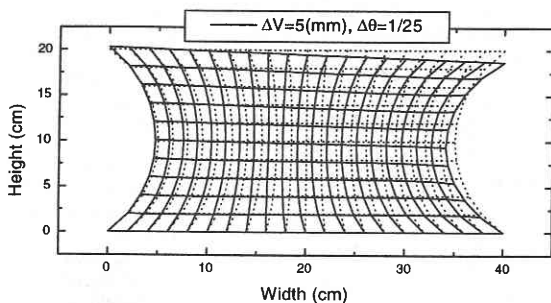
### 3.4 常時の荷重を考慮した場合の免震装置の回転および水平変位に対する剛性の検討

地震時の免震装置の回転および水平変位に対する初期剛性の検討にあたっては、まず常時の上載圧の影響と地震時の免震装置回転の影響を合わせて考える必要がある。ここでは、高さ20 (cm) の免震装置に対し、まず上下方向に5 (mm) の変位を与える (図7 (a))。さらにその上下方向変位を保持しながら回転を1/25 (rad) 加える (図7 (b))。なお、上下方向に5 (mm) の変位を与える事は、この場合、約1000 tf の上載荷重が作用したことに相当する。

図8、9には、それぞれ上下方向変位として $\Delta V = 5, 7.5, 10$  (mm) をまず与え、さらにその変位を保持しながら回転あるいは水平変位を加えた時の反力モーメントおよび反力を示す。これらは上載土圧が異なるにも関わらず、3つの曲線はほぼ一致している。このことは、免震装置の回転および水平方向剛性が上載圧にさほど依存しないことを意味している。



(a)  $\Delta V = 5(\text{mm}), \Delta\theta = 0$



(b)  $\Delta V = 5(\text{mm}), \Delta\theta = 1/25$  (rad)

図7 免震装置に対する上載荷重を考慮した場合の回転変形モード

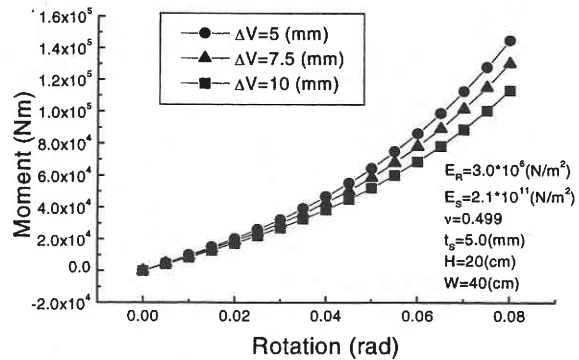


図8 免震装置にはたらくモーメント～回転関係に及ぼす上載圧の影響

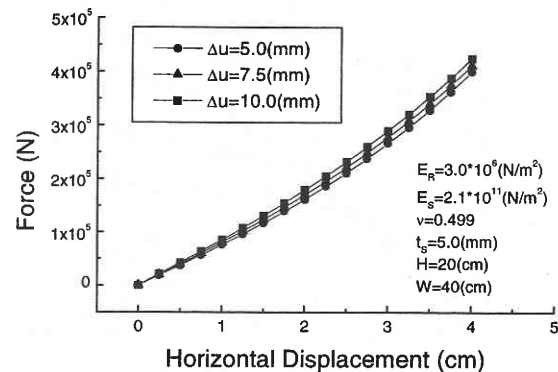


図9 免震装置にはたらく力～水平変位関係に及ぼす上載圧の影響

ま と め

トンネルの中柱の被害を軽減するための免震装置に要求される機能について、これまでに提案されているいくつかの免震装置の概念図を示しながら整理するとともに、ゴムと鋼板からなる免震装置を想定して、その各自由度の剛性の適切な与え方について検討を加えた。その結果、鉛直方向には堅く、回転に対してはフレキシブル、かつ上載荷重の影響をさほど受けたくないような免震装置の可能性を示す事ができた。

今後はこの免震装置の回転と水平変位の連成の影響について詳細に検討するとともに、鋼板の座屈に対する危険性の照査や過大な変位を防止する安全装置についても検討する予定である。さらに優れた機能を有する免震装置の形態についても検討していく。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、(株)熊谷組技術研究所 勝川藤太氏および東京大学大学院金大相氏より貴重なご助言をいただいたことに深く感謝いたします。

(1999年8月16日受理)

参 考 文 献

- 1) 矢の照夫, 梅原俊夫, 青木一二三, 中村晋, 江崎順一, 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.
- 2) 建設省土木研究所耐震研究室他: 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2), 建設省土木研究所, 1997.
- 3) Konagai, K.: Diagonal Expansion and Contraction of a Circular Tunnel during Earthquakes, Jour. of Structural Engineering and Earthquake Engineering, JSCE, Vol.591/I-43, pp.91 s-95 s, 1998.
- 4) 例えば, 鈴木猛康, 金子誉: 中柱を有する地下構造物に適用する免震装置, 橋梁と地下構造物の免震, 制震, pp.145-148, 1999.
- 5) Kaneko, I., Suzuki, T., Tei, S., Tamura, C. and Konagai, K.: Properties Necessary for the Isolation Device Placed on the Top of Center Columns in Shield-Driven Tunnels with Multi-Circular Cross-Section, Proceedings of Tunnel Engineering, Vol.8, JSCE, pp.63-70, 1998.
- 6) 三神厚, 小長井一男: ゴムと鋼板からなる免震装置の各自由度における剛性の設計, 第25回地震工学研究発表会講演論文集第2分冊, pp.777-780, 1999.