

## ゴムと鋼板からなる免震装置の鉛直方向剛性とその近似モデル

Approximation of vertical stiffness of isolation device made up of rubber and steel plates

三神厚\*, 小沼優\*\*, 小長井一男\*\*\*, 澤田勉\*\*\*\*

Atsushi Mikami, Masaru Koeki, Kazuo Konagai, Tsutomu Sawada

\*博(工), 徳島大学助手, 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

\*\* 徳島大学大学院生, 工学研究科建設工学専攻 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

\*\*\* 工博, 東京大学教授, 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

\*\*\*\* 工博, 徳島大学教授, 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

A seismic isolation column joint has been presented by the authors for the purpose of mitigating the stress resultant in the center columns of tunnels. It is required that the device be flexible in the rotation so that it reduces the stress resultant induced in the column. This requirement can only be achieved when first, and at very least, the device can sustain a heavy overburden soil mass. This study qualifies combinations of possible parameter sets of the device, so that these parameters provide the device that can have a greater vertical yielding strength than the assumed vertical load. By using these parameters and the stiffness computed subsequently, approximate expressions of the vertical stiffnesses are obtained.

Key Words: Tunnel, seismic isolation, center column

キーワード: トンネル, 免震, 中柱

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では, それまであまり目立った被害が見られなかったトンネル構造物に甚大な被害が生じた. 開削工法によって建設された神戸高速鉄道大開駅の駅舎部分の被害はその一例で, 常時に上載土圧を支えていた中柱が破壊した結果, 上床版がくの字に折れ曲がる大きな被害が生じた. 大開駅の被害原因については, 土被り部分のマスの水平方向慣性力による影響や上下床版間の水平方向相対変位による影響が考えられている<sup>1)</sup>.

このような甚大な被害を防ぐためには何らかの措置が必要であるが, 地盤に追従して動く性質を有するトンネル構造物では, 躯体の剛性を高めることによって断面力が増加するため, 必ずしもその耐震性を高めることにはならない.

そこで別の方法として免震化手法が考えられる. 構造物外周に弾性体であるゴムを用いて免震層を形成し構造物と地盤の間の相対変位を吸収する手法は, 兵庫県南部地震以前からその検討が始められており, すでに実用化されている<sup>2)</sup>. しかしながら, この手法はトンネル躯体に働くせん断力の低減に有効であるものの, 壁面法線方向にはたらく力による変形は免れない<sup>3)</sup>. その他, トンネル外周面に特殊な塗料を塗布することによって地震時に構造物と地盤との間にすべりを発生させるすべり型免震構造についても近年提案されている<sup>4)</sup>.

大開駅のような中柱を有する地下構造物については, より直接的な免震手法が提案されている. 現在までに提案されているものとしては, 中柱上端を水平可動とする構造<sup>5)</sup>, 中柱両端をピン構造としたもの<sup>6)</sup>, さらにそれに形状効果による復元力を持たせたもの<sup>7)</sup>がある. その他, 鉛直方向に剛で回転に対してはフレキシブルなゴムと鋼板からなる鼓状免震装置も著者らによって提案されている<sup>8)</sup>. これは各自由度にある大きさの剛性を有する免震装置であるが, 回転および水平方向の剛性が上載荷重の大きさにほとんど依存しないという利点を有している<sup>9)</sup>. この免震装置の剛性の値は, 装置の材料特性やサイズの関数であると同時に形状の関数にもなっている. それゆえ, その性能が十分に発揮されるためには, 免震装置形状を適切に設定することが重要である. この免震装置は前述のような利点を有する反面, その形態が複雑であるため, その実用化にあたっては各自由度の剛性を簡易なばねモデルで表現することが必要である. その際, 免震装置は上載荷重を安全に支えることが必要条件であり, その必要条件を満たす範囲内でこの免震装置の性能を表す回転および水平方向の剛性を最適化することになる.

本研究では, このゴムと鋼板からなる免震装置の鉛直方向剛性とそれを決定づけるパラメーターとの関係についてまず検討を行い, 装置形状を適切に決定することが鉛直方向の耐荷能力を高めることを示す. その上で,  $4.9 \times 10^6 \text{ N}$  ないしは  $9.8 \times 10^6 \text{ N}$  の上載荷重を閾値に設定した場合に,

それを上回る鉛直方向の降伏強度を得ることができる装置諸元の組み合わせを求めた。さらに実務の便を図るため、それらのパラメーターの値を説明変量に、鉛直方向剛性を目的変量に設定して重回帰分析を行い、鉛直方向剛性の近似式を得ることを試みた。

## 2. 免震装置のメカニズム

### 2.1 免震装置の概念図

上下方向に十分な剛性を有し、回転または水平方向に対する剛性が小さいという、トンネル中柱の免震装置に対する要求性能を満足する装置の1つとして、ゴムと鋼板からなる免震装置を図-1に示す。

この装置は上下端が剛で、左右が円弧状の鋼板でゴムが挟まれていて、上下方向に荷重が作用すると左右の鋼板が中へ窪もうとするが、ゴムは一般に非圧縮性であるから、このモードの変形に対し強く抵抗する。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にフレキシブルであることが期待される。

以下では、図-2に示すように装置のゴムの部分を4節点アイソパラメトリック要素、鋼板部分を梁要素でモデル化し、奥行き方向に平面ひずみ状態を仮定し、2次元有限要素解析によって装置の物理的特性を検討する。この免震装置の機能を安全に発揮させるためには、免震装置を構成する各材料を許容ひずみ範囲内で用いる必要がある。特に、免震装置の側面に用いられる鋼板の破壊は、免震機能を維持できなくなるばかりか、免震装置そのものの崩壊という致命的な結果につながる可能性がある。そこで、鋼板をヤング率が  $E_s = 2.1 \times 10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$ 、降伏ひずみを0.2%の完全弾塑性材料とし、鋼板が降伏した後の装置の適用は考えない。ゴムは線形弾性体とし、そのヤング率として  $E_R = 3.0 \times 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)}$  または  $E_R = 1.5 \times 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)}$  を仮定する。これらのゴムのヤング率の値は、通常工業用として用いられるゴム材料の中で比較的硬度が大きいものと比較的小さいものを想定し値を設定した。ゴムのポアソン比については  $\nu_R = 0.499$  とした。

### 2.2 鉛直方向の初期剛性

この免震装置が常時および地震時に安定であるためには、常時に作用する上載土圧を免震装置の弾性範囲内で支持するように設計する必要がある。

鉛直方向の初期剛性と左右の鋼板アーチのくぼみ量(以下、インデンテーションと呼ぶ)との関係を、2種類のゴムの硬さと2種類の鋼板厚を考慮してプロットしたものが図-3である。負のインデンテーションは装置の側面が左右に膨れている状態を示しており、また正のインデンテーションは装置の側面が窪んだ状態であることを示している。ゴムの剛性の値がいずれの場合でも、正のインデンテーションの領域における剛性の値の方が負のインデンテ

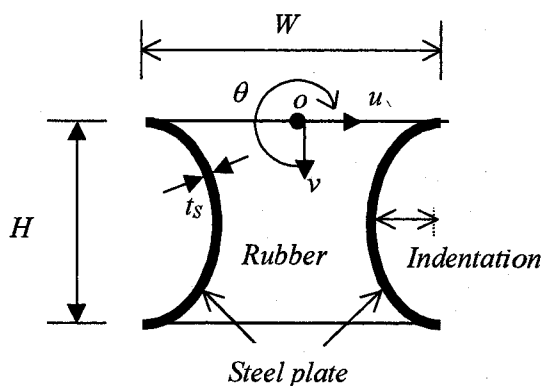


図-1 ゴムと鋼板からなる免震装置の概念図

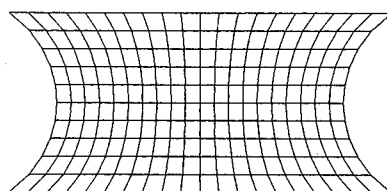


図-2 有限要素メッシュモデル

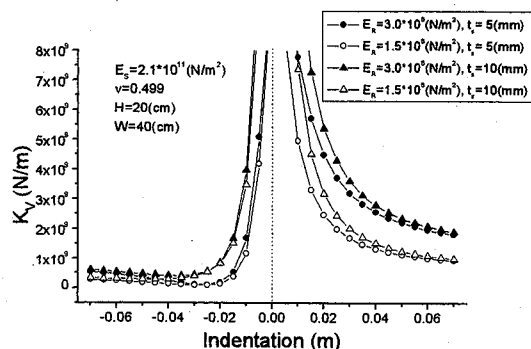


図-3 鉛直方向剛性とインデンテーションの関係

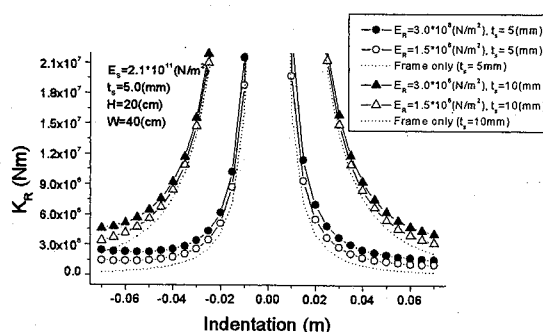


図-4 回転剛性とインデンテーションの関係

ーションの場合より大きくなっており、この装置の特徴が現れている。また、正のインデンテーションの領域においては、ゴムそのもののヤング率の違いによって、免震装置の鉛直方向剛性に顕著な違いが現れている。設計においては、埋め戻し時に生じる免震装置の鉛直方向変位に対するスラブの変形が許容できるか否か検討する必要があるが、本研究は基礎的な検討を目的としているので、この点については検討を行わない。一方、鋼板厚の違いによる免震装置の鉛直方向剛性の違いはさほど見られない。インデンテーションが零で鉛直方向剛性が最大になっているが、この状態では直立した鋼板に大きな圧縮力が作用しているので、座屈荷重以上の上載荷重ではバックリングを起こし不安定になる懸念がある。

### 2.3 回転に対する初期剛性

次に回転に対する装置の剛性とインデンテーションとの関係を図-4に示す。鉛直方向初期剛性の検討の際と同様、2種類のゴムの硬さと2種類の鋼板厚を考慮している。また、ゴムを取り除いたフレームだけの剛性をそれぞれ点線で表している。ゴムが免震装置の剛性に及ぼす寄与度は、特にインデンテーションが大きい領域で大きくなっているが、これは形状効果によって免震装置剛性に対する鋼板による寄与度が低下したためで、ゴムによる剛性の大きさ自体はあまり変化していない。またゴムのヤング率の違いが免震装置の回転剛性に及ぼす影響はあまり見られず、その一方で、鋼板の厚さの違いによる影響は顕著である。したがって、免震装置の回転剛性については、装置側面の鋼板厚が重要な役割を果たしていることがわかる。

### 3. 鉛直方向の降伏強度

以上の検討から、ゴムと鋼板からなる免震装置の鉛直方向剛性を大きく、回転剛性を小さくするためには、硬めのゴムを用いて、鋼板厚さを薄めにとることがポイントになることがわかる。しかしながら、鋼板厚さが薄くなると、それだけ鋼板に作用する応力の値が大きくなり、降伏に至る危険性が増すことになる。そこで以下では、免震装置の鉛直方向の降伏強度と鋼板の厚さとの関係について検討する。

#### 3.1 荷重～変位曲線

図-5は、幅40cm、高さ20cmの免震装置の側面アーチのインデンテーションを5cmにした場合の鉛直荷重と変位の関係を3種類の異なる鋼板厚を考慮してプロットしたものである。ここでの解析では、鋼板を完全弾塑性材料としており、その降伏ひずみを0.2%としている。

荷重～変位曲線の折れ曲がった部分で側面鋼板が降伏したことを示しており、それより大きな荷重強度は期待できない。そこで、この点を装置の降伏強度と考える。これらの直線の傾きが鉛直方向の初期剛性を意味するが、これらの値が鋼板の厚さにほとんど依存しないことは興味深い。これは装置の軸方向の初期剛性がゴムの非圧縮特性に

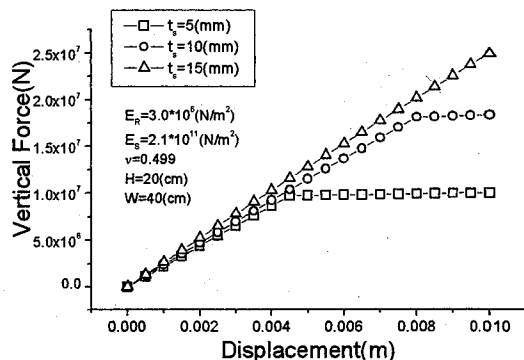


図-5 鉛直方向の荷重～変位曲線

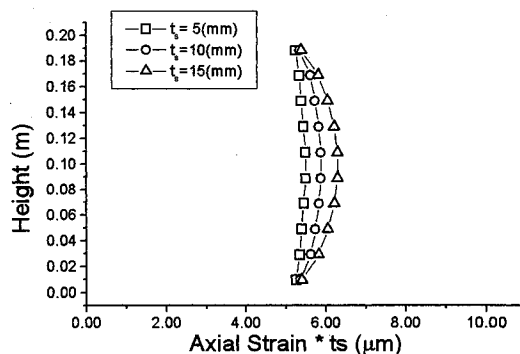


図-6 免震装置鋼板の軸方向ひずみ分布

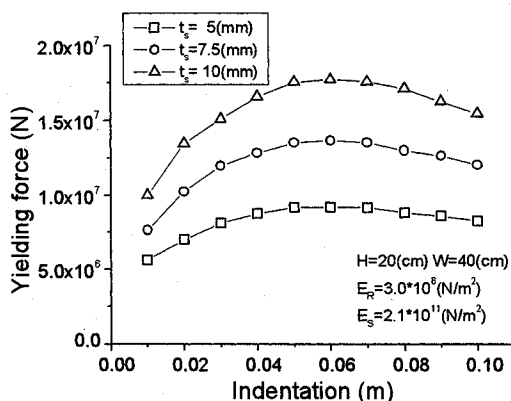


図-7 降伏強度と装置形状の関係

依存したものであるためだと考えられる。

これら3種類の異なる厚さの鋼板を有する免震装置に鉛直方向に  $4.9 \times 10^6$  (N) の鉛直荷重を与えたときの、鋼板に発生する軸ひずみに鋼板厚  $t_s$  を乗じた値の装置高さ方向の分布を図-6に示す。鋼板中央部において最大の軸

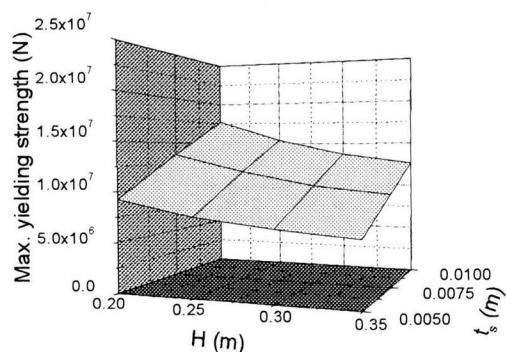


図-8 最大降伏強度と装置高さ，鋼板厚との関係  
( $W=40\text{cm}$ ，ゴムのヤング率 $=3.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )

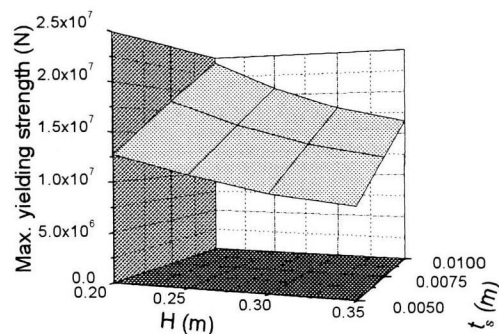


図-10 最大降伏強度と装置高さ，鋼板厚との関係  
( $W=60\text{cm}$ ，ゴムのヤング率 $=3.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )

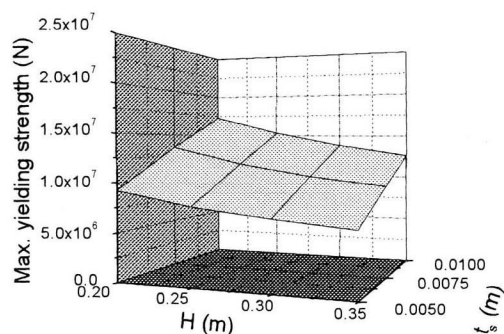


図-9 最大降伏強度と装置高さ，鋼板厚との関係  
( $W=40\text{cm}$ ，ゴムのヤング率 $=1.5 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )

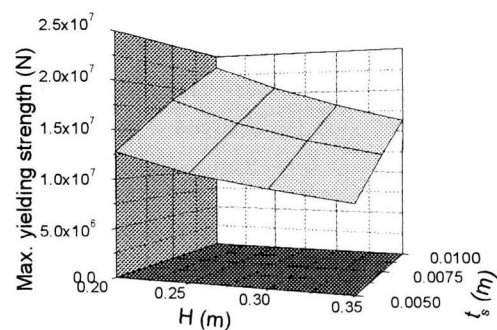


図-11 最大降伏強度と装置高さ，鋼板厚との関係  
( $W=60\text{cm}$ ，ゴムのヤング率 $=1.5 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )

方向ひずみが発生している。鋼板の初期形状として円弧を仮定しているため、軸方向ひずみの分布はどれも滑らかであり、鋼板に沿って際立った応力の変動は発生していない。また3つの曲線がほとんど重なることから、鋼板の受け持つ断面力が鋼板厚さにほとんど依存していないことがわかる。ここでの検討では、鋼板に発生する最大ひずみが0.2%を超えていない。

### 3.2 免震装置の降伏強度と形状との関係

図-7は、幅40cm、高さ20cmの免震装置において、3種類の異なる鋼板厚さ5mm、7.5mm、10mmを考慮した時の免震装置の鉛直方向降伏強度とインデンテーションの関係を図示したもので、縦軸に鉛直方向降伏強度を、横軸にはインデンテーションを1cmおきにとっている。またここではゴムのヤング率を $3.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$ にしている。免震装置の形状が同じならば、側面の鋼板厚が大きいほど降伏強度は大きくなっている。鋼板厚が等しい場合には、インデンテーションの違い、すなわち、装置形状の違いによって降伏強度の値が変化し、ある形状を与えた場合には降伏強度の値がピークになる傾向を示す。このように、免震

装置の形状を変化させることによって、各自由度における剛性を制御することが可能であることがこの免震装置の1つの特徴である。

### 3.3 最大降伏強度

このように、この免震装置では形状を変化させることにより、鉛直方向剛性の値を変化させることができる。そこで次に免震装置の降伏強度が最大になる時の形状(インデンテーション)に着目し、最大降伏強度と装置の各パラメーターとの関係について検討する。免震装置の幅は中柱の幅による制約のもと決定されるため、ここでは幾つかの値を仮定する。また奥行き方向には単位長さを仮定する。前の検討と同様、鋼板の剛性の値は $E_s=2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ とし、ゴムのヤング率については2種類の値を考慮する。以上の条件のもとでは、この免震装置の鉛直方向の最大降伏強度は、装置の高さと側面鋼板の板厚の関数となる。そこで、横軸に装置高さと側面鋼板厚をとり、縦軸に最大降伏強度をとってその関係をプロットしてみる。

図-8、図-9は免震装置の装置幅 $W$ が40cmの場合について、免震装置の鉛直方向の最大降伏強度と装置高さ $H$ 、

鋼板板厚 $t_s$ の関係を示したもので、それぞれゴムのヤング率を $3.0 \times 10^6 (\text{N/m}^2)$ 、 $1.5 \times 10^6 (\text{N/m}^2)$ と与えている。ともに装置の高さが低いほど、また側面鋼板の板厚が厚いほど、鉛直方向に取り得る最大降伏強度の値が大きくなることがわかる。またゴムのヤング率の違いによる最大降伏強度の差がほとんど見られないことから、本研究の検討の範囲内では、鉛直方向に取り得る最大の降伏強度は、ゴムの剛性の大小にほとんど依存しないことがわかる。

同様に、免震装置の幅 $W$ を60cmとした時の、装置の鉛直方向降伏強度と装置高さ $H$ 、側面鋼板厚 $t_s$ との関係を2種類のゴムのヤング率( $3.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$ または $1.5 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )を考慮してプロットしたものをそれぞれ図-10、図-11に示す。この場合も $W=40\text{cm}$ の場合と同様、装置の高さが低いほど、また側面鋼板の板厚が厚いほど鉛直方向に取りうる最大降伏強度の値が大きくなっている。また装置幅が $W=60\text{cm}$ に増えた場合でも、図-10と図-11の間にはほとんど差が見られないことから、鉛直方向に取り得る最大の降伏強度は、ゴムの剛性の大小にはほとんど依存しないことがわかる。図-8,9と図-10,11との比較から、装置幅が増えたと鉛直方向の降伏強度も概ね同程度の比率で増えていることもわかる。

### 3.4 取り得るパラメーター範囲の設定

このように免震装置の剛性は、装置サイズ(幅、高さ)、形状(くぼみ量)、鋼板厚、材料特性(鋼とゴムのヤング率)によって決定される。その免震設計においては、装置が取り得る様々な形態に対して、各自由度の剛性が簡易に求められるような剛性の近似関数表現が有効である。前述のように、トンネル中柱の免震装置では、想定される大きな上載荷重をまず安全に支えることが必要条件であり、その上で回転あるいは水平方向の自由度に対する免震装置の剛性の最適化を図り、中柱に発生する断面力の低減を図ることになる。したがって、免震装置の各自由度における剛性の近似関数表現を求めるにあたっては、装置の各パラメーターの取り得る範囲、すなわち関数の定義域を適切に与えることが必要条件である。ここではそのための手順を示すことにする。

一例として、前述の図-7によって中柱の幅からの制約により免震装置の幅が $W=40(\text{cm})$ に決定された時に取り得る各パラメーターの組み合わせを考えてみる。仮に降伏強度を $4.9 \times 10^6 \text{N}$ に設定すると、ここで考えているいずれの鋼板厚さの場合においても、あらゆるインデンテーションの値が定義域に入る。ところが、降伏強度を $9.8 \times 10^6 \text{N}$ に設定すると、鋼板厚さが5mmの場合には免震装置形状をいかに設定しても降伏強度を満たすことができず、また鋼板厚さを10mmに設定すればここで考えているあらゆる形状(インデンテーション)が可能となる。鋼板厚さが7.5mmの場合には、インデンテーションとして2cm~10cmの範囲の値を与えるならば上載荷重を降伏強度内で支えることが可能となる。

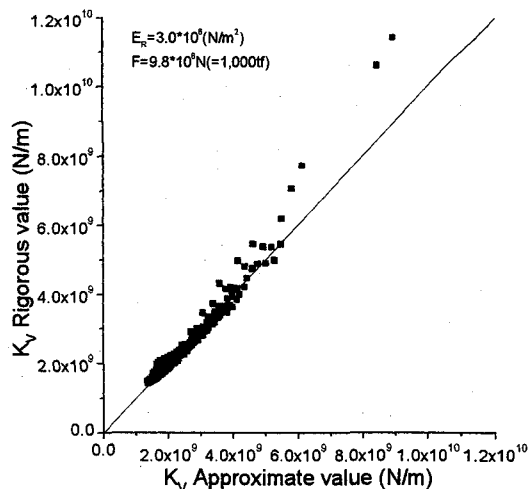


図-12 鉛直方向剛性の近似関数の精度  
(上載荷重： $9.8 \times 10^6 \text{N}$ )

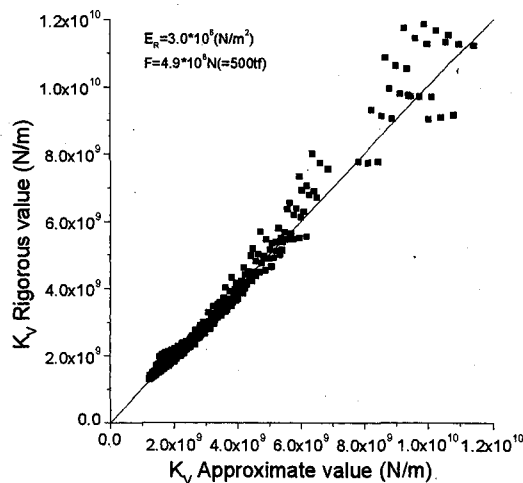


図-13 鉛直方向剛性の近似関数の精度  
(上載荷重： $4.9 \times 10^6 \text{N}$ )

ここでは、大小2種類の上載荷重として、 $9.8 \times 10^6 \text{N}$ ないし $4.9 \times 10^6 \text{N}$ の上載荷重を想定し、それぞれに対して表-1に示すすべてのパラメーターの組み合わせを考えた。ここまでの検討から、ゴムのヤング率の大小は鉛直方向の初期剛性には関係が大きいものの、回転剛性や鉛直方向の降伏強度にはさほど影響しないことから、本研究で想定した2種類のゴムのうち硬い方のゴム( $E_r=3.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )のみを考えて以下の検討を行う。そのうえで、前述の降伏に対する安全性の検討の手順を施し、降伏強度が上載荷重を上回ることができる装置諸元の組み合わせを抽出した。その結果、 $9.8 \times 10^6 (\text{N})$ の上載荷重に対しては272通り、 $4.9 \times 10^6 (\text{N})$ の上載荷重に対しては475通りの装置パラメーターの組み合わせを考えることができた。

表-1 考慮した免震装置のパラメーターの範囲

| 諸元              | 考慮した値の範囲                                        |
|-----------------|-------------------------------------------------|
| $W(m)$          | 0.40, 0.50, 0.60                                |
| $H(m)$          | 0.20, 0.25, 0.30, 0.35                          |
| $t_s(mm)$       | 5, 7.5, 10                                      |
| Indent.<br>(cm) | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10(H=20)                      |
|                 | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12(H=25)                |
|                 | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15(H=30)       |
|                 | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17(H=35) |

#### 4. 鉛直方向剛性の近似関数

以上述べたように、免震装置が満足すべき降伏強度を設定すれば、装置が鉛直方向の自由度に対して最低限満足しなくてはならない条件としてパラメーターの定義域が決まってくる。ここでは、 $9.8 \times 10^6 N$  ないし  $4.9 \times 10^6 N$  の上載荷重を降伏荷重が上回る装置形態を与えるパラメーターの組み合わせのそれぞれに対し、有限要素解析によって鉛直方向の初期剛性を求め、それぞれ説明変量、目的変量として重回帰分析を行い、鉛直方向剛性の近似関数表現を見出す。

##### 4.1 重回帰分析

説明変量として免震装置の高さ  $H$ 、幅  $W$ 、鋼板厚  $t_s$ 、インデンテーション  $I$  の4つを、目的変量として鉛直方向初期剛性  $K_v$  を考えるが、このうちインデンテーションと鉛直方向の初期剛性については、それぞれの値の対数を取り重回帰分析を行った。

$9.8 \times 10^6 N$  の上載荷重を想定した場合については、以下の近似式を得ることができた。

$$\log K_v = c_1 + c_2 H + c_3 W + c_4 t_s + c_5 \log I \quad (1)$$

ただし、各係数の値は以下の通りである。

$$c_1 = 8.25, c_2 = 0.482, c_3 = 0.225, c_4 = 6.27, c_5 = -0.704$$

また単位については、 $K_v = K_v (N/m)$ 、 $H = H(m)$ 、 $W = W(m)$ 、 $t_s = t_s(m)$ 、 $I = I(m)$  である。

$4.9 \times 10^6 N$  の上載荷重を想定した場合については、次の近似式を得ることができた。

$$\log K_v = e_1 + e_2 H + e_3 W + e_4 t_s + e_5 \log I \quad (2)$$

ただし、各係数の値は以下の通りである。

$$e_1 = 8.20, e_2 = 0.573, e_3 = 0.163, e_4 = 8.96, e_5 = -0.734$$

単位については  $9.8 \times 10^6 N$  の上載荷重を想定した場合と同様である。

得られた近似式の精度を検証するため、図-12、図-13の縦軸に FEM による厳密な鉛直方向剛性の値を、横軸に

近似式から算定される鉛直方向剛性の値をとって両者を比較してみる。それぞれの図とも大変良い相関を示していることがわかる。相関係数についてはそれぞれ  $R=0.979$ 、 $R=0.988$  であった。また両方の図とも、近似値と厳密解との違いが見られる部分では、近似式は鉛直方向剛性を過小評価する傾向にあり、概ね安全側の近似式となっていることもわかる。

#### 5. まとめ

本研究では、まずゴムと鋼板からなる免震装置の鉛直方向剛性と装置パラメーターとの関係を詳細に検討した。この免震装置は、鉛直方向に剛で、回転に対してフレキシブルであることが要求される。検討の結果、上載荷重によって生じるスラブの変形を考慮して用いるゴムの硬度を設定し、また装置側面の鋼板厚を変化させてフレキシビリティを確保することが重要であることがわかった。

しかしながら、装置のフレキシビリティを確保するために側面の鋼板を薄くすると、鋼板が降伏してしまう危険性がある。この免震装置では、形状を適切に設定することにより同じ鋼板厚さを有する場合でもより大きな上載荷重を支えることができる。すなわち、ある最適形状のもとで最大降伏強度に至る傾向を有する。そこで、この免震装置の最大降伏強度と鋼板厚さ、装置の高さの関係について詳細に検討した。その結果、鋼板厚が厚いほど、また装置高さが低いほど最大降伏強度は大きくなり、その傾向は、装置の幅が異なる場合でもほぼ同様であった。

以上の知見をもとにして、ある上載荷重が設定された場合に、免震装置の降伏強度が上載荷重を上回るような装置の諸元の組み合わせを抜き出し、それを説明変量に、それぞれのパラメーターの組み合わせに対応する鉛直方向剛性の有限要素解を目的変量に取り重回帰分析を行い、鉛直方向剛性の近似式を求めた。その結果、大変精度の良い鉛直方向剛性の近似式を得ることができた。

ここでは鉛直方向の必要条件として、免震装置の降伏強度が上載荷重を上回ることを設定し、その条件を満たすような装置のパラメーターの範囲を示した。今後、回転および水平方向の剛性の近似関数を求めるにあたっては、ここで得られたパラメーターの範囲を定義域として設定し、その範囲内で重回帰分析を実施することにより、より合理的な近似関数が得られるものと思われる。また、免震装置の降伏強度を簡便に求めるための近似関数についても検討していく必要がある。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、社団法人 日本鉄鋼連盟「土木鋼構造教育助成金制度」による教育奨励金を活用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Iida, H. Hiroto, T. Yoshida N. and Iwafuji M. : Damage to Daikai subway station, Special Issue of Soils and Foundations,

Japanese Geotechnical Society, pp.283-300, 1996.

- 2) 鈴木猛康, 河西寛, 諸橋澄, 田中勉: 地下免震技術の現状と展望, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.303-310, 土木学会, 2000.
- 3) Konagai, K. : Diagonal expansion and contraction of a circular tunnel during earthquakes, Jour. of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol.591/I-43, pp.91s-95s, 1998.
- 4) 鈴木猛康, 勝川藤太: 滑動塗料を用いた地下構造物の免震構造, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.311-318, 土木学会, 2000.
- 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) 中村敏晴, 栗本雅裕, 竹内幹雄, 遠藤達巳: ボックスカルバートの中柱上端スライダー化の効果, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.325-330, 土木学会, 2000.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 三神厚, 小長井一男, 澤田勉: トンネル中柱の免震装置形状と各自由度における剛性の関係, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.415-420, 2001

(2002年9月13日受付)