取付部の柔性を考慮した免震用 積層ゴムの水平剛性評価

ESTIMATE OF HORIZONTAL STIFFNESS OF LAMINATED RUBBER BEARING CONCERNED WITH FLEXIBILITY OF INSTALLATION ELEMENT

浅野三男 —— *1 横脇重雄 —— *2

Mitsuo ASANO —— *1 Shigeo MINEWAKI —— *2

キーワード：
免震構造, 積層ゴム, 水平剛性, 曲げ剛性, 取付部材

Keywords:
Seismic isolated structure, Laminated rubber bearing, Horizontal stiffness, Bending stiffness, Installation element

It is necessary to evaluate bending deformation of laminated rubber bearing and installation elements when the installation elements cannot be assumed to be rigid. We obtained following test results. (1) Bending stiffness have non-linearity and dependence on vertical load. (2) Additional shear deformation is induced by internal force caused by vertical load and inclination of rubber sheets. We formulated horizontal stiffness of laminated rubber bearing assuming that only compression area can bear bending moment. The formula can evaluate additional shear deformation and bending stiffness. We proposed a practicable analytical method which consider flexibility of installation elements and P- δ effect.

1. はじめに

従来、免震用積層ゴムの取付部は、上下の構造部材を充分剛強なものとした上で、積層ゴムの両端が剛であるとの仮定により設計されている。しかしながら、近年、免震構造の適用範囲拡大に伴い、柱中間又は柱頭・柱脚などに積層ゴムを配置する場合や、杭頭や基礎マツスラブ直上に積層ゴムを設置して基礎梁断面を軽微なものとしたり或いは省略したりする場合など、取付部を剛と仮定できないケースが出現している。その場合、積層ゴムの取付部材の曲げ変形により積層ゴム端部に回転が生じ、鉛直荷重の分力が積層ゴムのせん断方向に働くことにより水平変形が増分することとなる。このため、従来の水平剛性評価法では適切な評価を得られない可能性がある。取付部材の変形による積層ゴム端部の回転を評価するためには、積層ゴムの曲げ剛性を適切にモデル化し、周辺構造部材と一体とした架構解析を行う必要がある。

積層ゴム端部の回転に注目した研究としては、これまで、土木免震橋を対象とした確認実験¹⁾や、中間層免震建築等を対象として、積層ゴムに水平、鉛直及び回転を同時に加力した実験^{2)~5)}が行われている。それらの報告では、曲げ剛性が非線形性及び軸力依存性を示すことが実験的に確認されているが、評価モデルを提示するには至っていない。また、文献⁶⁾では Haringx 理論に基づき積層ゴム端部の水平と回転変形を評価できる剛性マトリックスを導いているが、積層ゴムの曲げ剛性を線形と扱っている。そのため、文献⁵⁾における実験値との対照では、回転角が大きいところで差違を生じている。文献⁷⁾は曲げ剛性の非線形性を考慮した積層ゴムの水平剛性式を提案しているが、曲げ剛性の非線形性を記述するパラメーターは、積

層ゴムの加力試験の結果を参照して経験的に定める必要があり、曲げ剛性の力学的モデルの評価については言及していない。また、取付部材と積層ゴムを一体とした架構解析により水平剛性を評価しようとした事例は無い。

本報告では、第2、3節で積層ゴム端部回転に伴う水平変形増分の発現状況や、純曲げモーメント状態における曲げ剛性の非線形性の把握を目的とした実験結果について述べる。これらの実験はモデル作成のために評価が必要となる現象を抽出することを目的としている。また、第4節では第3節での実験結果を説明できる、軸力、曲げ、せん断の組合せ応力状態における積層ゴムの水平剛性評価法を導く。第5節では免震層と架構とを一体に解析した事例を示す。

2. 実験計画

取付部材の変形に伴う積層ゴムの力学性状をモデル化する資料とするため、①積層ゴム曲げ剛性の非線形性及び軸力依存性、及び②ゴムシートの傾きから生じる鉛直荷重のゴムシート面内方向成分によるせん断変形の増加を把握する必要がある。本研究では、①に対し、純曲げ状態における積層ゴムの曲げ剛性把握実験(図1)、②に対しては傾いた積層ゴムの圧縮せん断実験(図2)を行った。

2. 1 試験体概要

表1に試験体の概要を示す。試験体は2次形状係数が2、3、4の天然ゴム系積層ゴムで外径(内径)は350(70)mm、せん断弾性係数は、 $G=6.0\text{kg/cm}^2$ である。2次形状係数が実用に供せられているものよりも小さな範囲にあるのは、曲げ変形の影響を明確に把握することを意図したためである。

注) 本報告は日本建築学会大会(1998)¹¹⁾で発表したものに加筆したものである。

*1 榊竹中工務店技術研究所 研究員
(〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

*2 榊竹中工務店技術研究所 研究員・博士(工学)

*1 Researcher, Takenaka Corporation, R & D Institute

*2 Researcher, Takenaka Corporation, R & D Institute, Dr. Eng.

表1 試験体概要

試験体	ゴム厚 (mm)	内部鋼板厚 (mm)	総高さ (mm)	1次 形状係数	2次 形状係数
S ₂ =2	2.0×88層	1.1	271.7	35	2
S ₂ =3	2.0×58層	1.1	178.7	35	3
S ₂ =4	2.0×44層	1.1	135.3	35	4

図1 加力装置（曲げ剛性把握実験）

表2 加力ケース（曲げ剛性把握実験）

導入軸力	20tf (21.6kg/cm ²)	50tf (54.1kg/cm ²)	100tf (108.3kg/cm ²)	200tf (216.5kg/cm ²)
S ₂ =2	○	○	○	○
S ₂ =3	○	○	○	○
S ₂ =4	○	○	○	○

目標回転角：±1/200、±1/100、±1/50（加力は荷重制御）

図2 加力装置（圧縮せん断実験）

表3 加力パラメータ（圧縮せん断実験）

試験体	積層ゴムの傾き φ	導入軸力 (t) () は面圧 (kg/cm ²)	導入せん断歪み γ%
S ₂ =2	0, 1/200	0 (0.)	-100~100
	1/100	50 (54.14)	
	1/50	100 (108.3)	
S ₂ =3	0	0 (0.)	-150~150
	1/200	50 (54.14)	
	1/100	100 (108.3)	
S ₂ =4	0, 1/200	0 (0.)	-200~200
	1/100	50 (54.14)	
	1/50	100 (108.3)	

2. 2 曲げ剛性把握実験

図1に加力装置を示す。鉛直用ジャッキにより一定の軸力下におかれた積層ゴムに、左右2台のジャッキ軸力をコントロールすることにより剛梁を介して純曲げモーメントを与える。表2に加力ケースを示す。

2. 3 傾いた積層ゴムの圧縮せん断実験

図2に加力装置を示す。調整プレートで上下端部に等しい傾きを与えた積層ゴムに一定軸力を載荷した後、水平方向に力加する。表3に加力パラメータを示す。

3. 実験結果

3. 1 曲げ剛性把握実験結果

図3に導入軸力20tfと100tfの場合の曲げモーメントと回転角の関係を示す。実験結果は同一振幅で3ループづつ力加を行った内、2ループ目のみを表示したものである。また、破線は実験結果の各ループのピーク値を結んだものであり、やや太い線は次節で求める計算値である（以下同様）。

曲げ剛性と回転角の関係は、それぞれの実験条件に対して、ある曲げモーメントに至ると急激に回転角が増加するバイリニア的傾向を示す。2次形状係数により曲げ剛性は異なるが、回転角が急増する曲げモーメントは形状係数によらず、導入軸力20tfのとき4t・m程度、導入軸力100tfのとき8~10t・mと軸力によってほぼ一定となり、軸力が大きい方がその荷重は大きい。

3. 2 傾いた積層ゴムの圧縮せん断実験結果

図4に傾いた積層ゴムに鉛直荷重のみを与えた場合の鉛直荷重と水平変位の関係を示す。傾きが大きくなるにつれ、せん断変形の増加がみられる。これは鉛直荷重のゴムシート面内方向成分の分力が大きくなることが水平変形を増大させているものと考えられる。

（以下、この変形を付加せん断変形と呼ぶ。）また、付加せん断変形が大きなケースでは、鉛直荷重の増大により変形の増加が発散傾向になる現象がある。これはP-δ効果の曲げモーメントが付加せん断変形の増大により更に増加していくという相乗効果によると考えられる。

図5に積層ゴムの傾きが1/50の場合のせん断力と水平変位の関係を示す。図のa)、c)、e)は鉛直荷重0であり、b)、d)、f)は鉛直荷重100tfを与えた場合である。b)、d)、f)では鉛直荷重の増加により、せん断力0で付加せん断変形が生じ、更に水平加力による剛性は低下する。これらはゴムシート面内方向成分の発生と、P-δ効果による曲げモーメントの増加によるものと考えられる。

図6に導入軸力100tfで、傾き0の場合を示す。図5のb)、d)、f)と比較すると、積層ゴム端部の傾きが異なっても、付加せん断変形による初期シフト分を除いて、水平加力による荷重変形関係に大きな違いがないことがわかる。

4. 取付部柔性を考慮した積層ゴムの水平剛性評価

本節では、前節実験結果をもとに、積層ゴムの水平剛性式を提示する。

曲げ剛性把握実験では、積層ゴムの曲げ剛性は回転角が大きくなるにつれ低下し、鉛直荷重が大きいときにはその低下が抑制される傾向が見られた。これは、鉛直荷重による曲げモーメントにより積層ゴム内に引張り領域が形成されるが、軸圧縮力がその形成を抑制することによると考えられる。そこで、積層ゴムの圧縮領域のみを曲げに有効な断面とすることで曲げ剛性を評価する。

傾いた積層ゴムの圧縮せん断実験では、積層ゴム端部傾きによる水平変形の増加と、鉛直荷重が大きくなるにつれ水平剛性が低下

図3 曲げモーメントと回転角の関係

図4 鉛直荷重と水平変形の関係

図5 せん断力と水平変形の関係 ($\phi=1/50$)

図6 せん断力と水平変形の関係 ($\phi=0$)

する現象が見られた。前者については、鉛直荷重のゴムシート面内方向成分によるせん断変形を単純に累加することによって、後者については、 $P-\delta$ 効果による曲げモーメントの増加と、曲げ剛性の非線形性によって説明する。

4. 1 積層ゴムの曲げ剛性式

上下面が剛板で拘束されたゴムに曲げモーメントが作用する場合(図7参照)、モーメント M と回転角 θ の関係は次式で表される。

図7 ゴムシートに作用する曲げモーメントと回転角の概念図

$$M = \frac{E_{rb} \cdot I_{eq}}{t_r} \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

t_r : ゴムシート厚

E_{rb} : 曲げに関する見かけの弾性率であり、文献⁸⁾による。

$$E_{rb} = \frac{E_b \cdot E_\infty}{E_b + E_\infty} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(但し、ここでは $E_\infty = \infty$ とした。)

I_{eq} : 有効断面2次モーメント

ここで、圧縮領域が曲げモーメントの伝達に有効であるとするモデルを考える。すなわち、 I_{eq} の算定に当たっては、図8に示すように直線分布の応力分布を仮定し、引張り応力が作用する部分を無視する。

1) 中立軸がゴムシート面外にある場合

$$I_{eq} = \frac{\pi}{64} \cdot l^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

2) 中立軸がゴムシート面内にある場合

このとき、 $v-v'$ 軸まわりの有効断面2次モーメントは次式で表される。⁹⁾

$$I_v = \frac{l^4}{8} \cdot \left[-\cos \alpha \cdot \left\{ \frac{\sin^3 \alpha}{3} - \frac{\cos \alpha}{2} \cdot (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) \right\} + \frac{1}{4} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) - \frac{1}{3} \cdot \sin^3 \alpha \cdot \cos \alpha \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

よって、圧縮部分のみの有効断面2次モーメントは(5)式で表される。

$$I_{eq} = I_v - \{A - A(\alpha)\} \cdot x_1^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで

$$\sigma_0 = \frac{W}{A - A(\alpha)} \quad , \quad x_1 = \frac{\sigma_0}{\sigma_{max}} \cdot x_n \quad \dots\dots\dots (6)$$

4. 2 曲げ剛性式の評価

図3に上記曲げ剛性式と実験値との対応を示す。計算式による曲げモーメントは、実験値を下回る値となったが、剛性が急激に低下する傾向について、剛性低下が開始する回転角やその面圧に対する依存性を良く評価している。計算値が実験値を下回った理由とし

て、引張域を無視したことが考えられるが、ここでは、引張域の寄与を表現するためには曲げ剛性式がいたずらに複雑になることや、引張域の寄与を無視することが曲げ変形による影響を安全側に評価することなどを考えて、現状の評価式を採用する。

図8 ゴムシートの応力分布

4. 3 傾きを有する積層ゴムの水平剛性式

曲げ変形及び材端の傾きを考慮した水平剛性式を提示する。図9のように両端に同じ傾き ϕ を有する積層ゴムに鉛直荷重 W 、せん断力 Q が作用した場合、積層ゴム端部の曲げモーメントは(7)式となる。

図9 傾きを有する積層ゴムの諸元

$$M = \frac{1}{2} Q \cdot H + \frac{1}{2} W \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (7)$$

水平変位 δ をせん断変形 δ_s と曲げ変形 δ_b に分けて考える。

$$\delta = \delta_s + \delta_b \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 δ_s は次式から成ると考える。

$$\delta_s = \frac{Q}{k_s} + \frac{W \cdot \delta_b}{H_R \cdot k_s} + \frac{W \cdot \phi}{k_s} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(k_s は純せん断剛性、 H_R はゴムシートの総厚)

δ_s の第1項は純せん断変形、第2、3項はそれぞれ積層ゴムの曲げ変形に伴う各ゴムシートの傾きと取付部の傾きによって生じる鉛直荷重による付加せん断変形である。 δ_b は(10)式で表される。

$$\delta_b = \delta_B + \frac{\delta_B}{H_R} \cdot H_S \quad (H_S \text{ は中間鋼板の総厚}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

δ_b の第1項 δ_B はゴム部の曲げ変形で、第2項は中間鋼板の剛体回転変形の水平方向成分である。ここでは、Lindley の式¹⁰⁾を参考にして、中間鋼板自体は剛と仮定した。

水平剛性の評価手順として、まず、 δ を仮定し、(7)式で積層ゴム端部の曲げモーメントを得る。積層ゴムを高さ方向に $2n$ 層に分割し、各区間の曲げモーメントを求む。曲げモーメント分布が逆対称型のときには、図10のようになる。

図10 積層ゴム曲げ変形の算定

各区間の曲げモーメントに対して前節で得られた曲げ剛性式から各区間の曲げ剛性を算定することで、 δ_B を以下のように求める。積層ゴムの下層から第 i 層目における曲げモーメント及び有効断面2次モーメントをそれぞれ M_i 、 I_{eq-i} その曲げモーメントによる水平変形及び回転角をそれぞれ δ_{Bi} 、 θ_i とすると、(11)式を用いて、 δ_B は(12)式で求められる。以下、(10)、(9)式を順次用いて δ_B 、 δ_S を求む。(8)式の等号が成立すれば、次ステップに進む。

$$\delta_{Bi} = \frac{M_i \cdot \left(\frac{H_R}{2 \cdot n}\right)^2}{2 \cdot E_{rb} \cdot I_{eq-i}} \quad , \quad \theta_i = \frac{M_i \cdot \frac{H_R}{2 \cdot n}}{E_{rb} \cdot I_{eq-i}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\delta_B = 2 \left[\sum_{i=1}^n \delta_{Bi} + \sum_{i=1}^{n-1} \theta_i \cdot t_R \cdot (n-i) \right] \quad \dots\dots\dots (12)$$

4. 4 水平剛性式の評価

図4～6に計算値と実験の対応を示す。本検討ではハードニングを考慮に入れていないが、それ以前の実験値について、初期の付加せん断変形量と剛性の変化を良く表現している。

なお、本検討におけるせん断弾性率 G の値は、純せん断剛性評価式における G の値をそのまま用いた。これは、現在一般的に用いられる形状の積層ゴムで純せん断剛性が評価される面圧50～100 kg/cm²、せん断ひずみ50～100%の条件では殆ど剛性低下が生じず、純せん断剛性評価式における G をそのままゴムシートのせん断弾率数 G として良いと考えたからである。

4. 5 実大鉛入り積層ゴム圧縮せん断実験による評価式の検証

水平剛性評価式を検証するため、実大の鉛入り積層ゴム(800φ)に対する圧縮せん断実験結果との比較を行う。積層ゴムの水平剛性の低下があらわれる変形領域で、鉛プラグが完全な塑性化状態にあると想定すれば、本手法は、鉛プラグ入り積層ゴムの骨格曲線の評価にも適用できると考えられる。鉛プラグ入り積層ゴムの諸元を表4に示す。図11に面圧60、120、180kg/cm²の時のせん断力と水平変形との関係を示す。

面圧180kg/cm²では、変形が大きいところで計算値は剛性低下の傾向を大きめに評価するが、面圧60kg/cm²～120kg/cm²では実験値と計算値は良い対応を示した。これは、計算値がハードニングを考慮していないため、面圧180kg/cm²時にハードニングによる影響が顕著にあらわれたためと考えられる。

表4 鉛入り積層ゴムの諸元 $G=6.0\text{kg/cm}^2$

名称	外径 (cm)	鉛径 (cm)	ゴム厚 (mm)	内部鋼板 (mm)	2次形状係数 S_2
LRB800	80	16	6.0×33層	3.1×32層	4.04

図11 せん断力と水平変形との関係

5. 架構と積層ゴムの一体解析

5. 1 モデル化

前節で述べたモデルを用いて、免震層特性を評価するためには、積層ゴムと架構を一体解析する必要がある。架構解析に汎用的に用いられるツールには、大変形問題や幾何学的非線形を扱えないものも多いが、そのような場合でも免震層における $P-\delta$ 効果の外力をいかに与えるということ、付加せん断変形をいかに与えるかということを解決すれば解析が可能となる。図12に解析モデル概念図を示す。 $P-\delta$ 効果の曲げモーメントについては、 $P-\delta$ 効果によって部材に生じる曲げモーメントは部材のせん断変形には寄与しないので、積層ゴムをせん断変形要素と曲げ変形要素に分け、せん断剛性を ∞ とした曲げ変形要素に等価なせん断力として与えることとする。付加せん断変形は、解析の各ステップ毎に求まる積層ゴムの曲げ変形 δ_B と材端回転角 ϕ から、(9)式の第2、3項で求められる。

5. 2 解析事例

検討の対象は、図13に概要を示すRC3階建ての既存免震構造物である。解析架構は2通りのみを対象とした。2スパン平面フレームで、免震層はダンパーを無視した積層ゴムのみのモデルとした。表5に積層ゴムの諸元を示す。積層ゴムの鉛直及びせん断剛性($G \cdot A/H_R$ 、 G :せん断弾性率、 A :断面積、 H_R :ゴム総厚)は弾性とした。また、曲げ剛性は前節の手法を用いて得られた荷重-変形関係から β リニア型の復元力特性(面圧50kg/cm²時:長期軸力)を設定し、M-N相関を用いることにより軸力依存性を考慮できるモデルとした。ここで、実験結果から軸応力の増加による曲げ耐力の上昇傾向に頭打ちの傾向がみられるため、モデルにおいては100kg/cm²以上の M_p を一定とした(図14参照)。

図12 解析モデル概念図

図13 検討建屋

表5 積層ゴム諸元

名称	外径 (cm)	内径 (cm)	ゴム厚 (mm)	2次形状係数 S_2	せん断剛性 (tf/cm)	鉛直剛性 (tf/cm)
RB650	65	10	6.0×26層	4.17	1.246	1446.5
RB900	90	10	7.5×23層	5.22	2.185	3061.8

図14 積層ゴムの曲げ剛性及びM-N相関

図15 免震層の復元力特性

図15に上記モデルを用いた静的漸増解析により求められた免震層の復元力特性を現行の評価式（純せん断剛性、Lindleyの水平剛性式¹⁰⁾）の結果と共に示す。本解析手法では、現行法に比べ変形が大きくなる。これは、積層ゴムの曲げ剛性の非線形性及び取付部材の柔性による付加せん断変形が評価されたため、それらを表現できない現行の手法では水平変形を過小評価する可能性がある。

6. まとめ

免震用積層ゴムの取付部が剛と仮定できない適用形態に対しては、取付部材や積層ゴムの曲げ変形を考慮した評価手法が必要となる。本報告では、その評価手法の確立に向けた実験的検討及び評価モデルの提案について述べた。本報告の知見は以下のようにまとめられる。

- ・積層ゴムの曲げ剛性には非線形性及び軸力依存性がある。純曲げモーメント-回転角関係において、回転角が急増する荷重は、鉛直荷重（圧縮）の増大に伴い大きくなり、2次形状係数にはほとんど影響されない。
- ・傾きに伴う付加せん断変形（せん断変形の増分）は、鉛直荷重のゴムシート面内方向成分によるものと考えることで説明できる。
- ・両端に傾きを与えた時の水平方向の荷重変形関係には、鉛直荷重による初期シフト分を除き、端部傾き量による差はみられない。
- ・積層ゴム内部の圧縮領域のみを有効であるとした曲げ剛性評価モデル及びゴムシートの傾きに伴う付加せん断変形評価モデルにより、水平剛性評価式を提示した。これによる計算値は、実験結果と良い対応を示した。
- ・積層ゴムと架構とを一体解析し、取付部の柔性及びP-δ効果による外力を考慮する実用的な解析手法を提案した。また、既存免震構造物へ本検討手法を適用させ、免震層の復元力特性を評価した。本手法によれば、取付部材の変形に伴う剛性低下が表現でき、従来の評価法では、変形を過小評価するおそれがある。

参考文献

- 1) 家村浩和: 曲げ・変動軸力荷重条件下における免震支承の復元力特性, 第1回免震・制震コロキウム講演論文集, 1996, pp305-312
- 2) 林篤, 豊田将文: 天然ゴム系積層ゴムの曲げ変形特性に関する基礎研究-その1、その2, 日本建築学会学術講演梗概, pp699-702, 1996
- 3) 鈴木重信: 積層ゴムの曲げ剛性に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概, pp539-540, 1998
- 4) 大山秀美: 積層ゴムのオフセットせん断変形時における鉛直及び回転性能評価試験, 日本建築学会学術講演梗概, pp541-542, 1998
- 5) 三山剛史: 杭頭免震を想定した積層ゴムの静的加力試験-その1、その2, 日本建築学会学術講演梗概, pp567-570, 1998
- 6) 飯塚真巨: 積層ゴムの剛性マトリックス, 日本建築学会学術講演梗概, pp619-620, 1995
- 7) 免震構造設計指針, 日本建築学会, pp545-563, 1993
- 8) 藤田聡, 藤田隆史: 重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験, 第3報, 生産研究 38巻, 第4号, 1986
- 9) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」, pp. 235-266, 1988
- 10) Lindley, P.B: Natural Rubber Structural Bearings, Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structure, Vol. ACI, 1981
- 11) 嶺脇重雄, 浅野三男: 取付部材の柔性を考慮した免震用積層ゴムの水平剛性評価に関する研究-その1、その2, 日本建築学会学術講演梗概, pp563-566, 1998

[1998年10月19日原稿受理 1999年2月8日採用決定]