積層ゴム支承の終局特性に関する実験及び解析的研究

高減衰ゴム系積層ゴム支承の終局特性予測のための材料モデル提案と破断及び座屈予測解析

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON ULTIMATE PROPERTY OF RUBBER BEARINGS

Proposal of material model to predict ultimate property and prediction analysis
of break and buckling property for high-damping rubber bearings森 隆浩^{*1}, 室田 伸夫^{*2}

Takahiro MORI and Nobuo MUROTA

Rubber bearing is one of measure isolation devices. Rubber bearings support upper structure under high vertical loading, therefore, it is very important to understand ultimate property and margin to the ultimate state to design seismically isolated structures properly. However, it is difficult to carry out ultimate property test using full-scale specimen because large scale testing machine is needed. One of the alternative method to predict performance of rubber bearings is analysis approach and finite element analysis is one of the most popular methods. Therefore authors propose analysis model to predict ultimate property of rubber bearings based on finite element analysis.

Keywords : High-Damping Rubber Bearings, Seismic Isolation, Ultimate Property, Material Model, Finite Element Analysis, Second Shape Factor

高減衰ゴム系積層ゴム, 免震, 終局特性, 材料モデル, 有限要素解析, 二次形状係数

1. はじめに

近年、防災に対する関心の高まりにより、特に高層建物を中心に建築物の免震化が進んでいる。それに伴い、積層ゴムに代表される免震装置における大地震時の効果も実証されつつある。積層ゴムは建物を支える重要部材であり、積層ゴムの終局特性に対して十分な余裕をもって免震建物を設計する必要がある。故に、積層ゴムの終局特性とその余裕度を把握することは非常に重要である。しかしながら、積層ゴムは建物の大荷重を支える大型の装置であるため、実大試験体による終局特性の把握には大規模試験機が必要であり、その試験実施は容易ではない。終局特性把握試験の代替手法として、解析による終局特性の予測が挙げられる。本研究は、終局特性を高精度に表現可能な解析モデルの提案を目的とする。解析による特性予測の有用な手法としては、有限要素法(以下、**FEM**)が挙げられ、本研究でも **FEM** を用いて積層ゴムの終局特性を予測する。

積層ゴムの終局モードには、鉛直荷重を受けた状態で水平大変形した際の積層ゴムの破断(以下、せん断破断)、同じく鉛直荷重を受けた状態で水平大変形した際の荷重支持能力喪失(以下、座屈)、過度な引張変形を受けた際の破断(以下、引張破断)、過度な鉛直荷重を受けた際の破断(以下、圧壊)など多岐にわたる。せん断破断及び引張破断は主にゴムの破断であるが、圧壊は鋼板の破断であることが知られている¹⁾。特にせん断破断及び引張破断に関しては、一般に、内部鋼板とゴムの接着剥離ではなく、ゴム破断であることが要求される。

また、多段積層ゴムのように特殊な形状の積層ゴムで顕著にみられる終局モードとして、鉛直荷重を受けた状態で水平大変形した場合でも積層ゴムの一部に大きな引張変形を生じ、局所的には引張破断とみなせるようなケースもある²⁾。更に、上下躯体をボルトなどで締結されていない積層ゴムにおいては「ロールアウト」も終局特性となりうる³⁾。本研究では、様々な終局特性の中でも特に重要と考えられる「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」の3つに注目し、既往の研究における「せん断破断ひずみ」、「引張破断ひずみ」、「座屈ひずみ」の **FEM** による判定手法を適用し、それらの終局特性を **FEM** で予測する。

積層ゴムには、天然ゴム系積層ゴム、鉛挿入型積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承など様々なタイプが存在するが、本研究では高減衰ゴム系積層ゴム(以下、**HDR**)を対象に、その終局特性を予測する。**FEM** で積層ゴムの特性を予測する際には、特にゴムの材料モデルの適切な選定が重要となる。ゴムの材料モデルとしては超弾性モデルが適用されることが多いが、**HDR** を含む積層ゴムの特性を高精度に予測可能な材料モデルが存在しないことが課題であった。そこで過去筆者らは、**HDR** の水平 2 方向加力時の水平特性を予測可能な材料モデルを提案し、その妥当性を検証した⁴⁾。本弾塑性モデルは変形履歴積分型弾塑性モデルと呼ばれており、風荷重のような一定方向加力下でのクリープ特性も予測が可能である⁵⁾。また、本弾塑性モデルは時刻歴応答解析における履歴モデルとし

^{*1} ブリヂストン免制震開発部 博士(理学)

Bridgestone Corporation, Seismic Isolation and Vibration Control Products Development Dept., Dr.Sci.

^{*2} ブリヂストン免制震開発部 Ph.D.

Bridgestone Corporation, Seismic Isolation and Vibration Control Products Development Dept., Ph.D.

でも提案されている⁹⁾。また筆者らは、天然ゴム系積層ゴムや鉛挿入型積層ゴムを対象に、積層ゴム特有の引張大変形時のボイド生成による引張剛性低下を再現できる材料モデルを提案し⁷⁾、その妥当性を検証した^{8), 9)}。更に、天然ゴム系積層ゴムや鉛挿入型積層ゴムを対象に、水平大変形時のせん断破断ひずみや、引張大変形時の引張破断ひずみを予測可能な解析手法を提案し、その妥当性を検証するとともに¹⁰⁾、様々な応用解析を実施した^{2), 11), 12)}。しかしながら、HDRのせん断破断特性、引張破断特性、座屈特性を同時に予測可能な材料モデルが未確立であることが大きな課題であった(その課題の詳細は2.2節で述べる)。そこで本研究では、初めに「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」を同時に予測可能なHDRの材料モデルを提案し¹³⁾、試験結果と比較することでその妥当性を検証する。続いて、二次形状係数 S_2 に着目し、 S_2 がHDRの終局特性に与える影響をFEMで予測する。尚、天然ゴム系積層ゴムにおける「引張破断」の S_2 依存性は筆者らによって既に報告されているが¹⁴⁾、それをHDRに展開し、更に「せん断破断」と「座屈」も同時に予測する。

2. FEMによる終局特性予測手法

2.1 終局特性予測手法の概要

前述のとおり、本研究ではHDR向けに「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」の3つの終局特性に注目した終局特性の予測手法を提案する。それぞれの予測手法を以下に示す。

<座屈>

所定の鉛直荷重を与えた状態で、水平方向に単調加力する解析を実施する。せん断応力・せん断ひずみ関係に負勾配が生じた瞬間のひずみを座屈ひずみと定義する。

<せん断破断、引張破断>

文献10)にある筆者らが提案した手法に基づいてせん断破断ひずみと引張破断ひずみを予測する。文献10)における破断ひずみ予測手法の概要は以下のとおりである。

- (1) 解析前に予め破断指標と破断クライテリア値を適切に設定
- (2) 様々な面圧での水平加力解析、様々なオフセットせん断ひずみでのオフセット引張解析を実施
- (3) 各解析において、破断起点にある要素の破断指標がクライテリア値に到達した瞬間の積層ゴムのせん断ひずみや引張ひずみをせん断破断ひずみ・引張破断ひずみと定義

文献10)では、破断指標として「最大主伸長比 λ_1 」、「最大主伸長比 λ_1 と最小主伸長比 λ_3 の線形和 $\lambda_1 + a\lambda_3$ 」、「ひずみエネルギー」の3つを提案している(a はゴム材料ごとに決まる定数である)。本研究では最も予測精度が高いと考えられる最大主伸長比と最小主伸長比の線形和 $\lambda_1 + a\lambda_3$ を破断指標として採用する。即ち、「せん断破断」と「引張破断」を評価する解析においては、想定される破断起点要素における $\lambda_1 + a\lambda_3$ があるクライテリア値 B_{cr} に達した瞬間の積層ゴム全体の変形ひずみを破断ひずみとして算定する。

以上が、「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」の予測手順であるが、HDRに関しては、ゴムの持つ減衰の影響で水平1方向加力に対し、水平2方向加力時にせん断破断ひずみが低下することが知られている^{15), 16)}。従って、HDRのせん断破断ひずみの評価では、水平2方向加力の下で評価する。「座屈」と「引張破断」も2方向加力の影響があると考えられるが、本研究では評価簡易化の目的のため、「座屈」

と「引張破断」に関しては、水平1方向加力で評価することとする。

2.2 高減衰ゴム系積層ゴムの材料モデル

本節では、「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」の3つの終局特性を同時に予測可能なHDR向けの材料モデルを提案する。前節で述べたように、過去、筆者らによって変形履歴積分型弾塑性モデルや、剛性低下を考慮した弾性モデルが提案されている。前者はHDRを対象に2方向加力含めた履歴特性を再現可能な弾塑性材料モデルであり、後者は天然ゴム材料を主対象に引張加力時のボイド発生による剛性低下を表現できる材料モデルである。文献10)にあるとおり、後者のモデルは天然ゴム系積層ゴムや鉛挿入型積層ゴムの引張破断までの引張大変形時の特性を高精度に予測可能である。HDRにおいて「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」の3つの終局特性を同時に予測するには、上記2つの材料モデルを組み合わせる必要があり、本報告ではHDRを対象に引張による剛性低下を表現できる変形履歴積分型弾塑性モデルを提案する。しかしながら、両者を組み合わせた材料モデルを単純に決定することはできない。その理由の詳細は後述するが、塑性項の構成則を適切に設定する必要があり、HDRの特性を高精度に再現可能な塑性項の材料モデルを検討する必要がある。そこでまず、適切と考えられる材料モデル、即ち、引張による剛性低下を表現できる変形履歴積分型弾塑性モデルを新たに提案する。次に、試験結果と比較することでモデルの妥当性を検証する。本研究で提案する高減衰ゴム用材料モデルを次式に示す。

$$S = 2 \frac{\partial W_{\infty}}{\partial C} + 2 \frac{\partial W_{vol}}{\partial C} + 2 \sum_{i=1}^n g_i \int_0^L \frac{d}{dL'} \left(\frac{\partial W_0}{\partial C} \right) e^{-(L-L')/l_i} dL' \quad (1)$$

$$L = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \mathbf{D}' : \mathbf{D}' dt \quad (2)$$

$$W_{\infty} = a(I_1 - 3) + b(I_1 - 3)^3 \quad (3)$$

$$W_0 = \bar{I}_1 - 3 \quad (4)$$

$$\begin{cases} W_{vol} = \frac{1}{2} \kappa_1 (J - 1)^2 & (J - 1 < 0) \\ W_{vol} = \frac{1}{2} \kappa_2 (J - 1)^2 & (0 \leq J - 1 < \varepsilon) \\ W_{vol} = \frac{1}{2} \kappa_3 (J - 1)^2 + \varepsilon(\kappa_2 - \kappa_3)(J - 1) - \frac{1}{2}(\kappa_2 - \kappa_3)\varepsilon^2 & (\varepsilon \leq J - 1) \end{cases} \quad (5)$$

S は第2 Piola-Kirchhoff 応力テンソルを、 C は右 Cauchy-Green テンソルを、 $\mathbf{D}'$ は変形速度テンソルの偏差成分を、 I_1 、 $\bar{I}_1$ はそれぞれ右 Cauchy-Green テンソルの第1不変量と第1低減不変量を、 J は変形勾配テンソルの Jacobian(即ち、体積変形率)を、 L は状態変数であり、変形開始時刻から現時刻までの相当ひずみ増分の累積値を表す。 a 、 b 、 κ_1 、 κ_2 、 κ_3 、 ε 、 g_1 、 $\dots$ 、 g_n 、 l_1 、 $\dots$ 、 l_n は材料パラメータであり、 n は塑性項の数を表す。 n は通常1~3程度であり、 n が大きい程材料定数の数も増えモデルの精度が向上するが、材料定数の同定が煩雑になる。 W_0 及び W_{∞} は等容変形に関するひずみエネルギー関数であり、 W_{vol} は体積変形に関するひずみエネルギー関数である。一般に、微圧縮性を示すゴム材料の場合、等容変形成分のひずみエネルギー関数 W_{∞} は、右 Cauchy-Green テンソルの低減不変量を用いて記述される。しかしながら、文献7)に示すように、等容変形成

分のひずみエネルギー関数に低減不変量を用い、体積変形成分に式(5)で示される剛性低下を考慮したひずみエネルギー関数を用いた場合、オフセットせん断ひずみを与えて引張加力した時や水平方向に大変形加力した時に、過度に引張剛性や水平剛性が低下する現象が見られた。そのため、体積変形成分に剛性低下を考慮したひずみエネルギー関数を用いる場合、等容変形成分のひずみエネルギー関数は低減不変量 $\bar{I}_1$ ではなく、通常の不変量 I_1 を用いて記述した。同様の問題が W_0 にも生じる可能性があり、 W_0 を通常の不変量と低減不変量のどちらで記述した方が高減衰ゴム材料の特性を適切に表現できるのか、明確ではない。しかしながら、 W_0 を通常の不変量を用いて下式(6)のように記述した場合、式(7)のように塑性項である式(1)の第3項中の偏微分が単位テンソル $\mathbf{I}$ となる。更にその単位テンソルを $\mathbf{L}$ で微分すると塑性項が零テンソル $\mathbf{O}$ となり、塑性化しない問題が生じる。一方で、式(4)のように低減不変量で W_0 を記述した場合、式(8)のように式(1)中の第3項中の偏微分が単位テンソルとはならず、 $\mathbf{L}$ で微分しても塑性項が有限の値をとる。 $\mathbf{C}^{-1}$ は右 Cauchy-Green テンソルの逆テンソルである。即ち、 W_0 を通常の不変量で記述し、 W_0 については低減不変量で記述するという特殊な HDR 向けの材料モデルを提案する。このような記述で高減衰モデルを適切に表現できるかどうかについては、3章で検証する。 W_0 を W_0 のように高次の項でモデル化しても塑性項が $\mathbf{O}$ となる問題を解決できるが、本研究では式(1)~(5)を提案する。式(7)、(8)中のテンソルの微分に関しては、例えば文献17)を参照。尚、文献13)で提案した材料モデルと、本研究で提案した材料モデル式(1)~(5)は関数形が以下の2点で異なる。1点目は、文献13)では W_0 を Yeoh モデルの3次の項を無視した材料モデルとしたが、ゴムのハードニング特性をより正確に表現できるよう、本研究では Yeoh モデルの2次の項を無視したモデルとした。2点目は、文献13)では $W_{0,el}$ の引張領域の特性をトリリニアでモデル化したが、バイリニアでも十分な精度があるため、簡単化のためバイリニアとした。

$$W_0^* = I_1 - 3 \quad (6)$$

$$\frac{\partial W_0^*}{\partial \mathbf{C}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{C}} (I_1 - 3) = \mathbf{I} \quad (7)$$

$$\frac{\partial W_0}{\partial \mathbf{C}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{C}} (\bar{I}_1 - 3) = J^{-2/3} \left(\mathbf{I} - \frac{1}{3} I_1 \mathbf{C}^{-1} \right) \quad (8)$$

3. 高減衰ゴム材料モデルの妥当性検証

2章で提案した材料モデルを適用した FEM モデルを作成し、HDR の水平1、2方向加力試験及び引張試験との比較を行い、材料モデルの妥当性を検証する。

3.1 試験及び解析概要

初めに比較対象の試験概要を説明する。試験体諸元を Table 1 に、試験条件を Table 2-5 に示す。表中の σ_s は基準面圧を表す。試験に用いた HDR は、等価水平剛性 0.620MPa、等価粘性減衰定数 0.240 の特性を有するものとした(以下、HDR-G0.6)。加力条件は、Table 2-5 からわかるように、水平1方向加力、水平2方向加力、引張加力に加えて、鉛直剛性を把握する目的で鉛直圧縮加力も実施した。Table 2 からわかるように、水平1方向加力については、せん断ひずみ依存性評価のためにせん断ひずみを徐々に大きくする漸増載荷

と、座屈・せん断破断特性評価のための単調載荷の2パターン解析した。Table 3 からわかるように、水平2方向加力では、長軸方向せん断ひずみ2、短軸方向せん断ひずみ1の8の字加力を実施した。試験における水平1方向加力の漸増載荷と2方向水平加力は縮小試験体を用いている。これは、試験機能力の都合であり、動的試験や2方向試験が実大試験体での実施が困難であったためである。一方、座屈特性を把握する水平1方向加力試験や引張試験では実大試験体を用いた。ただし、試験機能力の理由により加力条件は全て静的なものである。Table 4 からわかるように、引張試験ではオフセットせん断ひずみ1の下、鉛直方向に単調に引張変形を与えた。

試験と比較する為の FEM 解析モデルを Fig. 1 に示す。Fig. 1 からわかるように、解析条件によってモデル化の内容が異なる。水平加力が水平2方向ではなく水平1方向のみの場合は対称性を考慮した1/2モデルでモデル化し、フランジの厚みが解析結果に影響を与えると考えられる No.5 の引張加力ではフランジや取付ボルトもモデル化している。フランジの中央部厚みは 32mm、ボルト締結する端部厚みは 24mm、フランジ径は 1150mm、取付ボルト本数は 12 である。また Fig. 1 にも示したように、引張試験におけるフランジの厚みの影響を評価する目的で、フランジ・ボルトをモデル化しない場合(フランジを剛体とみなした場合)の解析も実施している。各試験体は被覆ゴムで積層部が覆われているが、解析結果に与える影響は小さいと考えモデル化を省略している。使用要素は、ゴムは六面体8節点要素、鋼材類は六面体8節点一様低減積分要素とした。水平方向要素分割数は1/2モデルで100~320程度であり、座屈や引張解析では分割数を多めとした。鉛直方向は、文献10)と同様にゴム・鋼板ともに分割していない。No.7のモデルに関しては、破断ひずみを予測することを目的に、破断指標のクライテリア値を決定するための微小要素が破断起点に設けられている¹⁰⁾。その為、No.7のみ水平方向の分割数が多い。詳細は4.1節で述べる。境界条件に関しては、フランジ・ボルトをモデル化するかどうかで異なる。フランジ・ボルトをモデル化しない場合は、ゴム最下面の境界条件は完全固定の変位0とした。ゴム最上面の境界条件は、全節点を水平2方向と鉛直方向の3自由度を持つコントロールノードとタイイングし、コントロールノードに所定の荷重と変位を与えた。最上面は回転も拘束している。フランジ・ボルトをモデル化した場合は、ゴムではなくボルト最下面を完全固定、ボルト最上面をコントロールノードでタイイングした。フランジ・ボルトをモデル化した場合の各部材間の境界条件は Table 6 に示す。内部ゴムの材料定数は試験結果に合うように決定し、塑性項の数は $n=2$ とした。 a 、 b 、 g_1 、 g_2 、 I_1 、 I_2 は高減衰積層ゴムの水平1方向加力試験から得られたせん断応力-せん断ひずみ曲線に合うように(Table 2 の Test No.: U-1、U-4)、 κ_2 、 κ_3 、 ε はオフセットせん断ひずみ1の引張試験から得られた鉛直応力-鉛直ひずみ曲線に合うように(Table 4 の Test No.: T-1)、 κ_1 は鉛直加力時の鉛直剛性の設計値に合うように(Table 5 の Test No.: V-1)決定した。 κ_1 のみ実験結果ではなく設計値に合うように決定した。内部ゴムの材料定数を表 Table 7 に、内部鋼板、フランジ、ボルトの材料定数を Table 8 に示す。尚、Test No.U-1、V-1は3サイクル加力しているが、解析は繰返しによる特性変化は小さく、計算効率も考慮し1サイクルのみとした。

Table 1 Specifications of test specimens

Specimen No.	No.1 No.2	No.3 No.4	No.5 No.6	No.7
Outer diameter (mm)	158	600	800	700
Rubber thickness (mm)	1.26	4.0	5.4	4.7
Number of layer	31	50	37	18
First shape factor S_1	31.3	36.6	36.1	36.4
Second shape factor S_2	4.05	3.0	4.0	8.3
Shear modulus (MPa)	0.620	0.620	0.620	0.620
Equivalent shear stiffness (kN/mm)	0.311	0.876	1.56	0.746
Equivalent damping ratio	0.240	0.240	0.240	0.240
Vertical stiffness (kN/mm)	684	1970	3510	2290

Table 2 Uni-directional horizontal loading conditions

Specimen No.	No.1	No.3	No.4	No.7
Test No.	U-1	U-2	U-3	U-4
Horizontal loading condition	Gradually shear strain increase loading	Monotonic loading		
Shear strain	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5	-		
Loading frequency	0.1Hz	-		
Number of cycles for each strain	3	-		
Compressive stress (MPa)	10.7 (σ_s)	6.6 (σ_s)	13.2 ($2\sigma_s$)	15.0 (σ_s)

Table 3 Bi-directional horizontal loading condition

Specimen No.	No.2
Test No.	B-1
Horizontal loading condition	Orbit: Shape of "8" (See Fig. 2) x-direction: Sin wave, 1cycle, 0.01Hz y-direction: Sin wave, 2cycles, 0.02Hz
Compressive stress (MPa)	10.7 (σ_s)

Table 4 Tensile loading condition

Specimen No.	No.5
Test No.	T-1
Tensile loading condition	Monotonic tensile loading under given offset shear strain
Offset shear strain	1

Table 5 Vertical compressive loading condition

Specimen No.	No.6
Test No.	V-1
Vertical compressive loading condition (MPa)	12.0 $\pm$ 3.6 (σ_s $\pm$ 30%)
Number of cycles	3

Table 6 Boundary conditions between each material

Flange - Base Plate	Contact (Friction coefficient: 0.4)
Bolt - Flange	Contact (Friction coefficient: 0.4)
Laminated layer - Flange	Glue contact
Other	Node share

Table 7 Material properties for rubber

a (MPa)	b (MPa)	κ_1 (MPa)	κ_2 (MPa)	κ_3 (MPa)
0.082	0.00006	1450	100	-0.15

ε	g_1 (MPa)	g_2 (MPa)	l_1	l_2
0.0175	0.44	0.07	0.15	23

Table 8 Material properties for insert plate, flange and bolt

	Yang's modulus (GPa)	Poisson ratio	Yielding stress (MPa)	Post yielding Modulus (MPa)
Insert plate	205	0.3	235	0
Flange	205	0.3	235	0
Bolt	205	0.3	-	-

Fig. 1 Analysis models

Fig. 2 Orbit of bi-directional 8-shape loading

3.2 解析結果

解析結果と試験結果の比較を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)～(h)は応力-ひずみ関係であり、Fig. 3(i)のみ荷重-変位関係である。黒線が試験結果であり、灰色線が解析結果であるが、Fig. 3(i)の鉛直加力のみ試験ではなく鉛直剛性の設計値と比較した。Fig. 3(a)より、水平 1 方向加力ではせん断ひずみ 50～250%の広い領域において、せん断応

力-せん断ひずみ曲線が試験結果と解析結果でよく一致していることがわかる。Fig. 3(b)より、破断に至るせん断ひずみ 5.72 を超える領域まで試験結果と解析結果が概ね一致していることがわかる。Fig. 3(c)より、試験と解析で座屈ひずみが若干解析の方が大きく評価されているが、基準面圧・倍面圧共に概ね結果が一致していることがわかる。Fig. 3(d)より、水平 2 方向加力時の HDR の複雑な振

舞いも高精度に再現できていることがわかる。Fig. 3(e)、(f)より、オフセットせん断ひずみ 100%の引張ひずみ 25%までの領域ではあるが、試験結果と解析結果がよく一致していることがわかる。試験機能力等の関係で HDR の引張試験に関するデータが不足しているが、文献 10)にある鉛挿入型積層ゴムの各オフセットせん断ひずみでの破断までの引張応力・引張ひずみ特性とは概ね一致した傾向が見られる。HDR と鉛挿入型積層ゴムの引張特性が同じ傾向を示すという知見はないが、同じゴムということを考えれば、他のオフセットせん断ひずみや大変形領域での特性も概ね一致することが予想される。Fig. 3(g)、(h)には、フランジをモデル化した場合としない場合での解析結果の比較を示した。特に小ひずみ領域で、フランジ厚みは引張特性に大きく影響することがわかる。Fig. 3(i)には、試験と解析の比較に加え、設計値もプロットした。試験・解析・設計値ともに鉛直剛性を表す傾きは良く一致していることがわかる。ただし鉛直変形量は解析・設計値に比べ試験の方が大きく、右側にシフトしている。これは、積層ゴムの鉛直変形量が 2、3mm と小さ

く、試験でのフランジや面盤等の変形が影響していると推測される。

以上、材料定数を適切に決定することで、式(1)~(5)の材料モデルで HDR の水平 2 方向加力や大変形含む水平加力時の特性、鉛直圧縮時の特性、鉛直引張時の特性を高精度に再現できることがわかる。試験結果に合うように材料定数を決定したため、試験結果と解析結果が一致するのは当然とも言えるが、既存の材料モデルでは試験と解析が一致する材料定数が存在しないこと自体が課題であり、本材料モデルの提案は大いに意味がある。また、材料モデルの同定に用いていない試験データとの比較(Fig. 3(c)、(d))でもよい一致が見られ、提案した材料モデルが妥当であることがわかる。FEM 解析結果において、文献 9)で見られたように W_0 を低減不変量で定義した際の、オフセットせん断ひずみを与えて引張加力した時や大変形加力した時に、過度に剛性が低下する現象も見られなかった。即ち、式(1)~(5)で与えられる本研究で提案した HDR の材料モデルで、せん断破断、引張破断、座屈の終局特性を統一的に予測が可能であり、高減衰ゴムの特性を高い精度で表現できると考えられる。

Fig. 3 Analysis results and comparison with test results

4. 二次形状係数が終局特性に与える影響解析

4.1 解析概要

既往の研究 10)では、鉛挿入型積層ゴムを対象に、様々な要因が引張破断ひずみに与える影響を解析した。製造ばらつきの影響として「積層ゴムの水平剛性ばらつき」、「積層ゴムの引張剛性ばらつき」、「ゴム自体の破断クライテリアばらつき」を評価し、構造の影響として「内部鋼板と内部ゴムの厚みの比」、「鉛プラグ有無」、「鉛プラグ配置」が引張破断特性に与える影響を評価した。本研究では、HDRを対象に鉛挿入型積層ゴムでは影響評価を実施していない「二次形状係数 S_2 」が終局特性に与える影響を評価する。文献 10)においては、「引張破断」のみの評価であったが、本研究では「引張破断」に加え、「せん断破断」と「座屈」も予測する。対象の積層ゴムは 3 章で評価した HDR-G0.6 と同じとする。1 章で述べたとおり、破断指標は $\lambda_1 + \alpha \lambda_3$ とするが、そのクライテリア値 B_{α} を事前に設定する必要がある。しかしながら、HDR-G0.6 については引張破断試験の実績がなく、せん断破断試験のみである。そこで、水平 1 方向破断試験のみからクライテリア値を決定する。ここで α も決定する必要があるが、破断試験データの不足から、 α は文献 10)と同じと仮定してせん断破断及び引張破断予測解析を実施した。文献 10)では具体的な値を省略しているが、 $\alpha=1.045$ である。水平 1 方向破断試験は、Table 2 及び Fig. 3(b)に示したゴム外径 $\phi 700$ 、二次形状係数 $S_2=8.3$ のものである。破断ひずみの結果は 5.72 であり、破断した瞬間の破断起点における破断指標 $\lambda_1 + \alpha \lambda_3$ の値は 6.223 であった。よって、6.223 をそのままクライテリア値とする。

4.2 解析モデル

解析モデルの諸元を Table 9 に示す。Table 9 からわかるように、ゴム外径 $\phi 1000$ 、 $S_1=35.2$ の積層ゴムを対象に、二次形状係数 S_2 の依存性を評価する。 S_2 をパラメータにする場合、ゴム総厚さ一定でゴム断面積を変化させる方法と、ゴム断面積を一定としてゴム総厚さを変化させる方法があり、今回は後者としたが本質的には同じである。解析モデルを Fig. 4 に示す。今回はフランジ厚みの影響を排除する目的で、フランジはモデル化を省略した。即ちフランジは十分厚く、剛体とみなせると仮定した。上述のとおり、本研究では「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」の 3 つの終局特性の S_2 依存性を予測する。「引張破断」、「座屈」は水平 1 方向加力で、「せん断破断」は水平 2 方向加力時で終局特性を予測する。Fig. 4 からわかるように、水平 1 方向加力と引張加力における破断起点は固定されており、灰色の四角形で囲まれた位置の要素である。一方、水平 2 方向加力では、「水平加力によるせん断ひずみ」と「ねじれによるせん断ひずみ」の和が最大となる点が破断起点となるが、その破断起点がどこになるかを事前に予測することが難しい。そのため、各解析ステップでの破断指標の値が最大となる要素を都度検出する。終局特性予測手法は 2.1 節で述べたとおりである。

4.3 解析ケース・解析条件

それぞれの終局特性把握解析における解析条件を Table 10-12 に示す。Table 10 に示した水平 1 方向加力で座屈ひずみを、Table 11 に示した水平 2 方向加力でせん断破断ひずみを、Table 12 に示した引張加力で引張破断ひずみを評価する。水平 2 方向加力は長軸方向

と短軸方向のせん断ひずみの比が 2:1 の楕円軌道であり、破断するまで徐々にせん断ひずみを大きくする。水平加力における面圧は 0、15、30MPa の 3 水準である(水平 2 方向加力は 15、30MPa の 2 水準のみ)。 $S_2=3.0$ の基準面圧は 6.6MPa であり、それに対しては非常に高い面圧であるが、 S_2 依存性を調べるのが目的のため、面圧はそろえた。

Fig. 4 Analysis model

Table 9 Specifications of analysis model

Model Name	S-3	S-5	S-8
Outer diameter (mm)	1000		
Inner diameter (mm)	25		
Rubber thickness (mm)	7.1		
Number of layer	47	28	17
Total rubber thickness (mm)	333.7	198.8	120.7
Insert plate thickness (mm)	4.4		
First shape factor S_1	35.2		
Second shape factor S_2	3.0	5.0	8.3
Shear modulus (MPa)	0.620		
Equivalent shear stiffness (kN/mm)	1.46	2.45	4.03
Equivalent damping ratio	0.240		
Vertical stiffness (kN/mm)	3270	5490	9040
Nominal stress σ_s (MPa)	6.6	15.0	15.0

Fig. 5 Example of bi-directional loading orbit (γ_x, γ_y)=(4, 2)

Table 10 Uni-directional horizontal loading conditions

Analysis No.	U-A	U-B	U-C
Horizontal loading condition	Monotonic loading		
Compressive stress (MPa)	0	15	30

Table 11 Bi-directional horizontal loading conditions

Analysis No.	B-A	B-B
Horizontal loading condition	Ellipse orbit loading (See Fig. 5)	
Shear strain*	(γ_x, γ_y): (3.6, 1.8), (3.8, 1.9), (4.0, 2.0), ... Shear strain gradually increases until break occurs	
Compressive stress (MPa)	15	30

※ 1 cycle for each loading condition

Table 12 Tensile loading conditions

Analysis No.	T-A	T-B	T-C	T-D	T-E
Tensile loading condition	Monotonic tensile loading under given offset shear strain				
Offset shear strain	0	1	2	3	4

4.4 解析結果

$S_2=3.0$ 、 5.0 、 8.3 の3水準で S_2 の影響を評価した結果を以下に示す。水平1方向加力及び水平2方向加力におけるせん断応力-せん断ひずみ関係の結果をそれぞれFig. 6、7に示す。 $S_2=3.0$ の面圧15、30MPaと $S_2=5.0$ の面圧30MPaの水平2方向加力では座屈により解析が不安定化し、破断に至るまでの解が得られなかったため、結果は省略している。○は破断点を、△は座屈点を表す。水平2方向加力における破断点は、楕円軌道最初の1/2サイクルのうち破断起点の破断指標が最大となった瞬間である。自明の結果ではあるが、面圧が破断ひずみに与える影響は小さいが、座屈ひずみが面圧に大きく依存することがわかる。またこれも自明の結果であるが、Fig. 6、7からわかるように、水平加力においては S_2 が大きいと破断が支配的であり、 S_2 が小さいと座屈が支配的となる。水平2方向加力解析において、 $S_2=5.0$ は長軸方向せん断ひずみ3.8で、 $S_2=8.3$ では長軸方向せん断ひずみ4.4で破断を生じた。面圧0MPaの水平1方向加力では、破断ひずみは S_2 にほとんど依存しないが、水平2方向加力では S_2 が小さい程破断ひずみが低下することがわかる。

引張加力における引張応力-引張ひずみ関係の結果をFig. 8、9に

示す。Fig. 8は大ひずみ領域、Fig. 9は小ひずみ領域である。Fig. 8、9からわかるように、オフセットせん断ひずみ0の場合は変形が一樣であるため、 S_2 の違いによる差はない。しかしながら、オフセットせん断ひずみが大きくなると、 S_2 やオフセットせん断ひずみにより、引張応力-引張ひずみ曲線の振舞が複雑に変化するが、概ねオフセットせん断ひずみが小さい程引張剛性が低下することがわかる。

縦軸に面圧を、縦軸にせん断破断ひずみ及び座屈ひずみをプロットした結果をFig. 10に示す。Fig. 10におけるせん断破断ひずみは2方向加力における破断ひずみであり、破断が最初に生じた楕円加力における長軸方向せん断ひずみである。座屈よりせん断破断が先行(即ちせん断破断ひずみ>座屈ひずみ)し、座屈が得られなかったケースではせん断破断ひずみのみ示した。その逆も同じである。また、縦軸に引張破断ひずみを、横軸にオフセットせん断ひずみをプロットした結果をFig. 11に示す。縦軸に破断ひずみではなく破断応力をプロットした図もFig. 11(b)に示した。Fig. 11において、引張ひずみ及び引張応力が0である点がプロットされているが、これは面圧0MPaでの水平1方向加力における破断ひずみを横軸上にプロットしたものである。Fig. 10、11より、 S_2 の違いによる終局特性の違いを一目で確認することができる。Fig. 11からわかるように、オフセットせん断ひずみ0と1で引張破断ひずみが大きく低下している。また、引張破断特性は S_2 が小さい程低下する。特にオフセットせん断ひずみ1では、破断ひずみが $S_2=3.0$ 、 5.0 、 8.3 それぞれで0.42、0.75、1.32であり、 S_2 により破断性能が大きく変動することがわかる。 $S_2=3.0$ ではオフセットせん断ひずみ2~4の領域において、オフセットせん断ひずみが大きい程破断ひずみ大きくなる現象が見られた。破断起点は、引張力によるモーメントと水平力によるモーメントのどちらが大きいかで破断起点が決まり、オフセットを与えた引張破断では引張力によるモーメントが大きく、破断起点はFig. 4モデル図の左上か右下となる。しかしながら、オフセット変形が大きい程水平力によるモーメントが大きくなり、水平力によるモーメントを打ち消すまでに大きな引張変形を生じる必要があるからである。ただし、特に $S_2=3.0$ の場合においては、オフセットせん断ひずみ3以上では座屈が支配的であり、荷重支持能力を喪失している領域である。従って、 $S_2=3.0$ のオフセットせん断ひずみ3以上の領域を無視すれば、 S_2 が小さい程引張破断ひずみは低下するといえる。

S_2 が小さい程破断ひずみが小さくなる原因を示すため、Fig. 12にオフセットせん断ひずみ1の引張加力で、引張ひずみが1になった瞬間の最大主ひずみ(Green-Lagrange ひずみ)コンターを示す。Fig. 12より、同じひずみ状態であっても、 S_2 が小さい程破断起点における局所的なひずみが大きくなっていることがわかる。これにより、 S_2 が小さい程破断ひずみや破断応力が低下すると考えられる。

Fig. 13には、 $S_2=8.3$ の水平2方向加力において楕円加力最初の1/2サイクルで、破断起点の破断指標が最大となった瞬間の最大主ひずみ(Green-Lagrange ひずみ)コンターを示す。加力直行方向でひずみが最大となり、その点が破断起点となると予測される。

以上、FEMによる終局特性の予測解析を実施したが、終局特性は定性的評価だけでなく定量的評価が重要となる。定量的にも試験結果と解析結果が高精度に一致し、解析による定量的評価が可能かどうかの検証は今後の課題である。

Fig. 6 Shear stress – shear strain relationship (Uni-directional loading)

Shear strain of major axis: 3.8

Shear strain of major axis: 4.4

Shear strain of minor axis: 1.9

Shear strain of minor axis: 2.2

Fig. 7 Shear stress – shear strain relationship (Bi-directional loading)

Fig. 8 Tensile stress – tensile strain relationship (Large range of tensile strain)

Fig. 9 Tensile stress – tensile strain relationship (Small range of tensile strain)

Fig. 10 Shear break strain under bi-directional loading and buckling strain

Fig. 11 Tensile break strain

Fig. 12 Maximum principal strain (Tensile loading)

Fig. 13 Maximum principal strain (Bi-directional horizontal loading)

5. まとめ

「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」の3つの終局特性に注目し、高減衰ゴム系積層ゴムを対象に、その終局特性を有限要素法で高精度に予測する解析モデルを提案した。高減衰ゴム系積層ゴムにおいては、「せん断破断」、「引張破断」、「座屈」を同時に予測可能な高減衰ゴム材料の材料モデルが存在しない課題があった。そこで、本研究では高減衰ゴムの終局特性を評価可能な材料モデルを提案した。また試験結果と比較し、解析結果と試験結果が高精度で一致し、提案した解析モデルの妥当性を確認した。特に FEM 解析結果において、文献 9)で見られたように W_0 を低減不変量で定義した際、オフセットせん断ひずみを与えて引張加力した時や、大変形加力した時に、過度に剛性が低下する現象も見られなかった。

提案した解析モデルにて、二次形状係数が高減衰ゴム系積層ゴムの終局特性に与える影響を予測した。主な新しい知見を以下に示す。

- (1) 引張加力において、二次形状係数 S_2 が小さい程、引張破断特性が低下する。これは、積層ゴム全体の引張りひずみ状態が同じであっても、 S_2 が小さい程破断起点における局所的なひずみが大きくなることによる。
- (2) 水平加力において、 S_2 が大きいとせん断破断が終局特性となりやすく、 S_2 が小さいと座屈が終局特性となりやすい。

(2) は自明の結果ではあるが、有限要素解析によりその傾向を確認することができた。本研究で実施した予測手法により、方向性のある角型積層ゴムや、局所的な引張変形により破断を生じる多段積層ゴム等、様々な仕様に対する本終局特性予測の応用が可能である。また、高減衰系積層ゴムだけでなく、天然ゴム系積層ゴムや鉛挿入型積層ゴムの終局特性も予測可能である。今後、試験結果との比較による更なる本手法の妥当性検証も必要ではあるが、試験実施が困難な終局特性を解析で予測できる有用かつ強力な解析手法であると考えられる。特に、実大試験体の終局特性把握は実施が困難であるため、縮小試験体による終局特性試験から今回提案した解析手法に

おける各種パラメータを決定し、実大試験体の終局特性を予測することが合理的である。ただし、その際にはスケール効果の把握が重要である。スケール効果は非常に重要な課題であり、今回はそのスケール効果に関しては一切考慮できていない。即ち、破断指標と破断クライテリア値は試験体サイズによらず一定としている。スケール効果も含めて終局特性を予測できる解析モデルの構築も重要な課題であり、今後は、様々なサイズの試験体による終局特性把握試験と解析の比較データの蓄積が重要である。

今回の予測手法では、「引張破断」と「座屈」の水平 2 方向加力時の影響は無視した。水平 2 方向加力の影響を考慮した「引張破断」と「座屈」の予測手法も今後の課題であると考えられる。

高減衰ゴム系積層ゴムに対する材料モデルの高精度化という観点からは、本研究では速度依存性や繰返し加力依存性が考慮されていない。実大試験体による動的試験が困難であることを考慮すると、今後は速度依存性のモデル化も課題の一つである。また、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し加力に関しては、過去筆者らによって繰返し加力による性能変化を考慮した材料モデルを提案している¹⁸⁾。そのモデルと本研究におけるモデルを組み合わせることで、更に高精度な材料モデルを構築できる可能性がある。

参考文献

- 1) Takayama, M., Tada, H., Morita, K.: Experimental Study on Critical Strength of Laminated Rubber Bearings Part2 Results of Experiments, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structure II, pp.595-596, 1991. 7
高山峯夫, 多田英之, 森田慶子: 積層ゴムアイソレータの限界耐力に関する実験研究(その 2)実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-II, pp.595-596, 1991.7
- 2) Ookouchi, Y., Shimamoto, R., Ishikawa, S., Takeuchi, Y., Inaba, S., Nemoto, T.: A development of base-isolation system applied in large input region. Part5 The ultimate behavior of two-stage rubber bearing, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structure II, pp.1184-1185, 2019.7

- 大河内靖雄, 島本龍, 石川慎也, 竹内義高, 稲葉学, 秋本 高英, 根本毅: 高震度地域対応免震システムの開発(その 5) 二段積層ゴムの終局特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-II, pp.1184-1185, 2019.7
- 3) Kelly, J. M., Marsico, M. R.: STABILITY AND POST-BUCKLING BEHAVIOR IN NONBOLTED ELASTOMERIC ISOLATORS, mathematical sciences publishers + Anti-Seismic Systems International Society, 2010
- 4) Mori, T., Kato, H., Murota, N.: FEM ANALYSIS OF HIGH DAMPING LAMINATED RUBBER BEARINGS USING AN ELASTIC-PLASTIC CONSTITUTIVE LAW OF THE DEFORMATION HISTORY INTEGRAL TYPE, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.75, No.658, pp.2171-2178, 2010. 12
森隆浩, 加藤秀章, 室田伸夫: 変形履歴積分型の弾塑性構成則を用いた高減衰積層ゴムの FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 658 号, pp.2171-2178, 2010.12
- 5) Mori, T., Nakamura, M., Murota, N., Kitamura, H., Sato, T.: EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF DYNAMIC COMPONENT OF WIND LOADING ON RESPONSE CHARACTERISTICS OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS AND MODELING FOR WIND RESPONSE ANALYSIS, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.676, pp.823-832, 2012.6
森隆浩, 加藤秀章, 竹内貞光, 菊地隆志, 室田伸夫: 風荷重の動的成分が高減衰積層ゴムの応答特性に与える影響に関する実験的研究及びその解析モデルの検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 676 号, pp.823-832, 2012.6
- 6) Kato, H., Mori, T., Murota, N., Ishii, K., Kikuchi, M.: A HYSTERESIS MODEL OF HIGH-DAMPING RUBBER BEARINGS USING AN INTEGRAL TYPE DEFORMATION HISTORY CONSTITUTIVE LAW, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.76, No.667, pp.1721-1728, 2011. 9
加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 石井建, 菊地優: 高減衰積層ゴムの変形履歴積分型復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 667 号, pp.1721-1728, 2011.9
- 7) Mori, T., Murota, N., Kikuchi, T.: FEM ANALYSIS OF THE LAMINATED RUBBER BEARINGS UNDER TENSILE AND LARGE HORIZONTAL DEFORMATION USING THE HYPERELASTIC CONSTITUTIVE LAW WITH STIFFNESS DEGRADATION DUE TO GENERATION OF VOIDS IN RUBBER, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.76, No.663, pp.917-925, 2011.5
森隆浩, 室田伸夫, 菊地隆志: ボイド発生によるゴムの剛性低下を考慮した超弾性構成則による積層ゴムの引張り変形及び水平大変形 FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 663 号, pp.917-925, 2011.5
- 8) Mori, T., Nakagawa, S., Shimamoto, R., Murota, N., Kondo, A., Nakayama, T.: Mechanical characteristics of two-tiered laminated rubber bearings for actualizing large deformation capacity. Part 7 Horizontal and tensile deformation analysis based on FEM model., Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structure II, pp.503-504, 2011.7
森隆浩, 中川進一郎, 島本龍, 室田伸夫, 近藤明洋, 中山尚之: 高い変形能力を有する二段組積層ゴムの力学挙動(その 7) FEM モデルによる水平変形・引張変形解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-II, pp.503-504, 2011.7
- 9) Mori, T., Nakamura, M., Murota, N., Kitamura, H., Sato, T.: EVALUATION OF TENSILE CHARACTERISTICS OF RUBBER BEARINGS TO DESIGN SEISMICALLY ISOLATED STRUCTURE BY DESIGN LIMIT VALUE OF TENSILE STRAIN, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.718, pp.2021-2031, 2015.12
森隆浩, 中村昌弘, 室田伸夫, 北村春幸, 佐藤利昭: 引張限界ひずみによる免震構造物設計のための積層ゴムの引張特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 718 号, pp.2021-2031, 2015.12
- 10) Mori, T., Masaki, N., Murota, N., Ikeda, M., Kosugi, S., Imaoka, T., Shimizu, H., Jimbo, M., Umeki, Y.: SIMULATION OF ULTIMATE CHARACTERISTICS OF LARGE SCALE SEISMIC ISOLATOR BASED ON LARGE DEFORMATION FINITE ELEMENT ANALYSIS, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.735, pp.663-673, 2017.5
森隆浩, 正木信男, 室田伸夫, 池田正樹, 小杉慎司, 今岡哲男, 清水弘, 神保雅一, 梅木芳人: 有限要素法による実規模免震装置の終局特性シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 735 号, pp.663-673, 2017.5
- 11) Fukasawa, T., Okamura, S., Yamamoto, T., Hirofumi, T., Moriizumi, E., Sakurai, Y., Mori, T., Masaki, N.: ULTIMATE CHARACTERIZATION OF HALF SCALE MODEL THICK RUBBER BEARINGS FOR SFR, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.740, pp.1641-1651, 2017.10
深沢剛司, 岡村茂樹, 山本智彦, 廣谷勉, 森泉瑛里子, 櫻井祐, 森隆浩, 正木信男: 高速炉に適用する厚肉積層ゴムの 1/2 縮尺試験体を用いた終局特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 740 号, pp.1641-1651, 2017.10
- 12) Inaba, S., Takeuchi, Y., Akimoto, T., Umeki, Y., Ookouchi, Y., Miyazaki, T.: A development of base-isolation system applied in large input region. Part4 The influence of middle flange of two-stage rubber bearing, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structure II, pp.1184-1185, 2017.7
稲葉学, 竹内義高, 秋本 高英, 梅木芳人, 大河内靖雄, 宮崎瑞恵: 高震度地域対応免震システムの開発(その 4) 二段積層ゴム中間フランジの影響検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-II, pp.1184-1185, 2017.7
- 13) Mori, T., Kato, H., Kikuchi, T., Nakamura, M., Murota, N.: Material model for high damping rubber bearings with the effect of stiffness degradation under tensile loading., Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structure II, pp.373-374, 2013.7
森隆浩, 加藤秀章, 菊地隆志, 中村昌弘, 室田伸夫: 引張による剛性低下を考慮した高減衰積層ゴムの材料モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-II, pp.373-374, 2013.7
- 14) Mori, T., Kato, Murota, N.: Prediction of second shape factor dependence on tensile break property of seismic isolator based on FEA., Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structure II, pp.99-100, 2019. 7
森隆浩, 室田伸夫: FEM による 2 次形状係数が積層ゴムの引張破断特性に与える影響予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-II, pp.99-100, 2019.7
- 15) Yamamoto, M., Minewaki, S., Yoneda, H., Higashino, M.: FULL-SCALE TESTS AND ANALYTICAL MODEL OF HIGH-DAMPING RUBBER BEARINGS USING TWO HORIZONTAL DIRECTIONAL LOADING, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No.638, pp.639-645, 2009.4
山本雅史, 嶺脇重雄, 米田春美, 東野雅彦: 高減衰ゴム支承の水平 2 方向加力時の力学特性に関する実大実験及びモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 638 号, pp.639-645, 2009.4
- 16) Kato, H., Mori, T., Murota, N., Suzuki, S., Minewaki, S., Yamamoto, M., Yoneda, H., Higashino, M.: AN EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON ULTIMATE PROPERTIES OF SEISMIC RUBBER BEARINGS UNDER HORIZONTAL BIAXIAL LOADING, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.16, No.32, pp.167-172, 2010.2
加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 鈴木重信, 嶺脇重雄, 山本雅史, 米田春美, 東野雅彦: 免震用積層ゴムの 2 方向加力時の限界特性に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻, 第 32 号, pp.167-172, 2010.2
- 17) Hisada, T.: Base of Tensor analysis for Non-Linear Finite Element Analysis, Maruzen Co., 1999.9
久田俊明: 有限要素法のためのテンソル解析の基礎, 丸善, 1999.9
- 18) Mori, T., Kato, H., Murota, N.: MODELING FOR ANALYSIS OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS WITH EFFECTS OF FATIGUE AND TEMPERATURE INCREASE DUE TO REPEATED DEFORMATION, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.680, pp.1517-1526, 2012. 10
森隆浩, 加藤秀章, 室田伸夫: 繰返し変形による疲労と温度上昇の効果をとり入れた高減衰積層ゴムの解析モデルの検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 680 号, pp.1517-1526, 2012.10

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON ULTIMATE PROPERTY OF RUBBER BEARINGS

Proposal of material model to predict ultimate property and prediction analysis
of break and buckling property for high-damping rubber bearings

Takahiro MORI^{*1} and *Nobuo MUROTA*^{*2}

^{*1} Bridgestone Corporation, Seismic Isolation and Vibration Control Products Development Dept., Dr.Sci.

^{*2} Bridgestone Corporation, Seismic Isolation and Vibration Control Products Development Dept., Ph.D.

Rubber bearing is one of measure isolation devices and there are many types of rubber bearing. For example, natural rubber bearings, lead rubber bearings, high-damping rubber bearings and elastomeric sliding bearings are major devices in Japan. Rubber bearings support upper structure under high vertical loading, therefore, it is very important to understand ultimate property and margin to the ultimate state to design seismically isolated structures properly. However, it is difficult to carry out ultimate property test using full-scale specimen because large scale testing machine is needed. One of the alternative method to predict performance of rubber bearings is analysis approach and finite element analysis is one of the most popular methods. Therefore authors propose analysis model to predict ultimate property of rubber bearings based on finite element analysis. In this study, proposed method is mainly focused on high-damping rubber bearings. One of the important feature of high-damping rubber bearings is that the high-damping rubber has the functions of both damping and restoring force. First, new material model for high-damping rubber bearing to predict ultimate property and ultimate property prediction method are proposed. Second, analytical example to predict second shape factor dependence of ultimate property is introduced.

Regarding rubber bearings there are various modes of ultimate state such as break under large horizontal deformation (horizontal break), break under large tensile deformation (tensile break), break under large vertical compression, buckling and roll-out. In this study, ultimate property prediction method using is proposed focusing on three ultimate modes of horizontal break, tensile break and buckling. In the case of finite element analysis, it is very important to selection material model for rubber properly. Regarding high-damping rubber bearing, however, there was no proper material model to predict ultimate property mentioned above. Therefore, new material model for high-damping rubber bearing to predict ultimate property is proposed in this paper. By comparing analysis and experiment result, validity of proposed material model for high-damping rubber bearing is shown.

In the past, as for lead rubber bearings, authors showed the various factor dependence of ultimate property. The factors are number of lead plugs, diameter of lead plug, insert plate thickness, shear modulus variability of rubber and break strain variability of rubber. In this study, authors show second shape factor (S_2) dependence of ultimate property. As a result of proposed analysis, obtained main findings are as follows:

- A. Under tensile loading, as second shape factor S_2 is smaller, tensile break strain is decrease.
- B. Under horizontal loading, as second shape factor is small, buckling mode tends to be dominant. And as second shape factor is large, break mode tends to be dominant

Findings B is obvious conclusions, however, the tendencies were predicted by finite element analysis using proposed method in this study.

(2019 年 11 月 6 日原稿受理, 2019 年 12 月 26 日採用決定)