

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	積層ゴムの引張変形を考慮したモデル化の違いが建物応答に与える影響と終局限界の評価
Title(English)	
著者(和文)	横田 伶未, 佐藤 大樹, 北村 春幸, 松田 頼征, 森 隆浩, 中村 昌弘, 加藤 秀章, 脇島 健二, 石田 安澄
Authors(English)	Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Yoriyuki MATSUDA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 409-412
Citation(English)	, , , pp. 409-412
発行日 / Pub. date	2017, 3

積層ゴムの引張変形を考慮したモデル化の違いが建物応答に与える影響と終局限界の評価

構造—振動

免震構造 積層ゴム 引張変形

モデル化 終局限界 アスペクト比

正会員	○ 横田 伶未 ^{*1}	正会員	佐藤 大樹 ^{*2}
〃	北村 春幸 ^{*1}	〃	松田 頼征 ^{*1}
〃	森 隆浩 ^{*3}	〃	中村 昌弘 ^{*3}
〃	加藤 秀章 ^{*3}	〃	脇島 健二 ^{*3}
〃	石田 安澄 ^{*3}		

1. はじめに

近年、アスペクト比の大きい免震建物が多く計画されており、水平動に伴う転倒モーメントに対する積層ゴムの軸力変動に注意が必要である。設計にあたっては、想定を超えた入力地震動に対して過大な引張変形や座屈に対する余裕度を確保することが重要である。

積層ゴムに生じる座屈や引張変形を表すことができるモデルとして大変形マクロモデル^{1),2)}に軸ばねを追加した修正モデルが提案されている^{3),4)}。このモデルについては、既往の研究の数多くが座屈に着目したものであり、引張変形に着目した研究はほとんどなく⁴⁾、引張実験結果との対応を検討した研究は見られない。

一般的に積層ゴムの終局限界値として、圧縮荷重下での限界性能は圧縮限界強度と限界せん断ひずみの限界曲線、引張限界は引張限界応力 1N/mm^2 として規定されている。一方、引張限界に対する制約を緩和することを目的として、引張限界ひずみ 5% で規定し、引張剛性を圧縮剛性の $1/50$ 以下とする直線で規定する方法が提案されている⁵⁾。この提案は積層ゴム単体を対象として実験的に評価したものであり、建物全体に着目して積層ゴムのモデル化の違いが建物応答に与える影響やどのような終局限界値に達するかを評価した研究はほとんどない。

本論文では、積層ゴムの引張変形の精度の向上を目的として、大変形マクロモデル（修正モデル）の軸ばねに引張実験結果に対応する非線形特性を導入する。さらにこのモデルを用いて免震建物の地震応答解析を行い、積層ゴムのモデル化の違いが建物応答に与える影響やどのような終局限界値に達するかを評価する。

2. 積層ゴムの引張変形を考慮したモデル化

大変形マクロモデルに軸ばねを追加した修正モデル^{3),4)}について、シミュレーション解析により積層ゴムの引張実験⁵⁾との比較を行う。

図1に大変形マクロモデルに軸ばねを追加した修正モデル（以下、 M_0 モデル）を示す。せん断ばね特性¹⁾を図2に、回転ばね特性¹⁾を図3に、軸ばね特性³⁾を図4(a)にそれぞれ示す。せん断ばね特性を規定するパラメータ s_1 , s_2 は、面圧 0 の状態で静的にせん断ひずみ 400% まで加力した場合のせん断応力—せん断ひずみ曲線をシミュレートするように決定する。回転ばね特性を規定するパラメータ r は、面圧 23N/mm^2 下で静的にせん断ひずみ 400% まで加力した場合のせん断応力—せん断ひずみ曲線をシミュレートするように決定する。軸ばね特性を規定するパラメータ a は、面圧 23N/mm^2 下で静的にせん断ひずみ 400% まで加力した場合の鉛直ひずみ—せん断ひずみ曲線

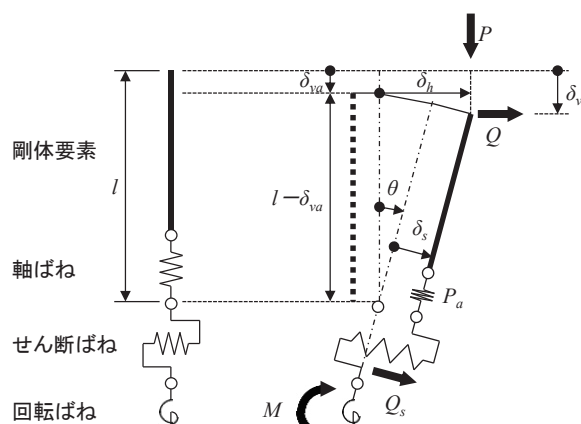


図1 大変形マクロモデル（修正モデル）

$$Q_s = GA \left\{ 1 + s_1 \left(\frac{\delta_s}{h} \right)^{s_2} \right\} \left(\frac{\delta_s}{h} \right)$$

$$\frac{M}{M_y} = 4 - \frac{3}{\left\{ 1 + \frac{r}{3} \left(\frac{\theta}{\theta_y} - 1 \right) \right\}^{\frac{1}{r}}} \left(\frac{\theta}{\theta_y} > 1 \right)$$

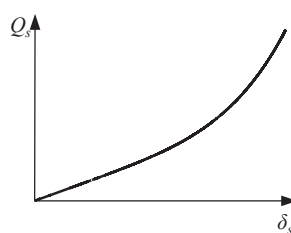


図2 せん断ばね特性

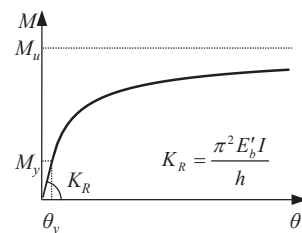


図3 回転ばね特性

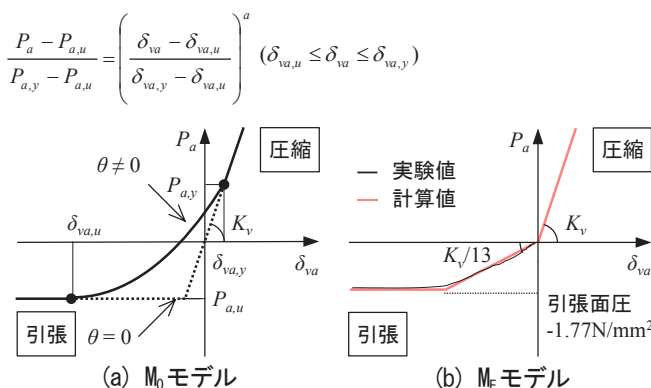


図4 軸ばね特性

をシミュレートするように決定する。解析に用いた積層ゴムの形状を表 1 に、ゴムの材料定数を表 2 に、関数パラメータを表 3 にそれぞれ示す。面圧 0, 23N/mm² 下のせん断応力—せん断ひずみ曲線を図 5 に、面圧 23N/mm² 下の鉛直ひずみ—せん断ひずみ曲線を図 6 に実験と解析で比較してそれぞれ示す。これらの図より、解析結果は実験値と概ね一致していることがわかる。

図 7 に引張特性のオフセットせん断ひずみ依存性の実験と解析の比較を示す。図より、せん断ひずみの大きさにより引張降伏する応力が変化することで、引張剛性のせん断ひずみ依存性を表すことが確認できるが、初期引張剛性の圧縮剛性に対する低下は表現できていない。そこで、初期引張剛性の低下を表現するため、図 4(b)に示した非線形特性を軸ばねに導入する(以下、M_Eモデル)。引張降伏応力、圧縮剛性に対する初期引張剛性の比は単純引張試験の引張応力—引張ひずみ曲線をシミュレートするように決定した。M_Eモデルの引張特性のオフセットせん断ひずみ依存性を図 8 に示す。図より、初期引張剛性の低下やせん断ひずみ依存性を表現できていることがわかる。

3. 免震建物の地震応答解析

3.1 建物モデル

免震建物のモデルとして、RC 造板状集合住宅を想定する。免震部材は、天然ゴム系積層ゴムに履歴系ダンパーを並列型に組み合わせたものとする。アスペクト比 1.2 の 8 階建て免震建物と、同じ総質量でアスペクト比 5.1 の 17 階建て免震建物の 2 種類の建物モデルを用いる。図 9 に建物モデルを示す。表 4 に上部構造の諸数値を示す。ゴムの材料定数は表 2 のとおりである。

3.2 解析モデル

積層ゴムのモデル化は一般的にせん断ばねと軸ばねを並列に配置したモデル(以下、並列ばねモデル)とすることが多い。そこで、積層ゴムを大変形マクロモデルと並列ばねモデルの 2 種類でモデル化し、このモデル化の違いが建物応答に与える影響を検討する。

解析モデルを図 10 に示す。解析モデルは上部構造の重量を重心位置に集約した 1 質点モデルで、質点の自由度は重心における水平、鉛直、回転の 3 自由度である²⁾。並列ばねモデルのせん断ばね特性は線形弾性とし、軸ばね特性は図 11 に示すものとする。S₀モデルは、引張限界を応力で規定した場合、引張応力を安全側に評価する線形弾性モデルである。S₁モデルは、一般的に用いられる引張特性をバイリニア型とした非線形弾性モデルである。S₂, S₃モデルは、引張限界をひずみで規定した場合、引張ひずみを安全側に評価するモデルである。S_Eモデルは、単純引張試験をバイリニア型としてシミュレートしたモデルである。大変形マクロモデルとしては、2 章で示したように、軸ばね特性を圧縮変形と曲げ変形の 2 つの関数で表した M₀モデル、引張特性をバイリニア型で表した M_Eモデルの 2 種類とする。

履歴系ダンパーの水平方向の復元力特性は完全弾塑性モデルによって表し、ダンパーの降伏変位 2.0cm に対して降伏せん断力係数 0.04 を設定する。構造減衰は鉛直方向のみ考慮し、鉛直方向の 1 次固有振動数に対して減衰定数 2%の初期剛性比例型とする。

表 1 積層ゴムの形状

直径 [mm]	225
全高さ [mm]	71.8
ゴム層の総厚さ [mm]	44.8
ゴム1層の厚さ [mm]	1.6
2次形状係数	5.02

表 2 ゴムの材料定数

せん断弾性係数 [N/mm ²]	0.392
縦弾性係数 [N/mm ²]	2.2
体積弾性係数 [N/mm ²]	1200
ゴム硬度補正係数	0.85

表 3 関数パラメータ

回転ばねの関数パラメータ	r	1.9
せん断ばねの関数パラメータ	s_1	0.004
せん断ばねの関数パラメータ	s_2	3.9
軸ばねの関数パラメータ	a	1.13

..... 実験 (面圧0) — 実験 (面圧23N/mm²)
 - - - 解析 (面圧0) — 解析 (面圧23N/mm²)

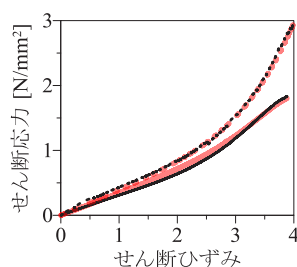


図 5 せん断応力とせん断ひずみの関係

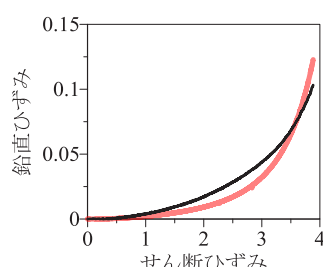
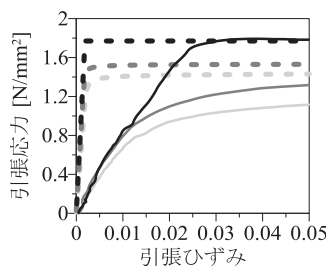
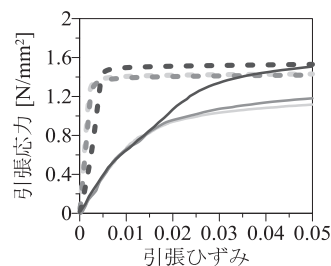


図 6 鉛直ひずみとせん断ひずみの関係

— 実験 (offset 0%) — 実験 (offset 250%)
 — 実験 (offset 150%) — 実験 (offset 300%)
 — 実験 (offset 250%) — 実験 (offset 400%)
 - - - 解析 (offset 0%) - - - 解析 (offset 250%)
 - - - 解析 (offset 150%) - - - 解析 (offset 300%)
 - - - 解析 (offset 250%) - - - 解析 (offset 400%)

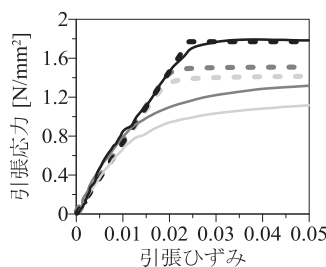


(a) offset 0, 150, 250%

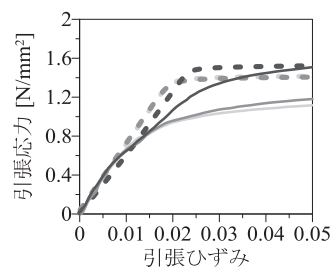


(b) offset 250, 300, 400%

図 7 引張特性のせん断ひずみ依存性 (M₀モデル)



(a) offset 0, 150, 250%



(b) offset 250, 300, 400%

図 8 引張特性のせん断ひずみ依存性 (M_Eモデル)

3.3 入力地震動

地震動は水平・上下方向に同時入力する。位相特性は内陸型地震として1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台(NS, UD成分), 2004年新潟県中越地震の川口町(EW, UD成分), 海溝型地震として1968年十勝沖地震の八戸港湾(NS, UD成分), 1978年宮城県沖地震の東北大学(NS, UD成分)を採用する。水平方向は最大速度振幅を100cm/sで基準化したものを用い, 上下方向は水平方向の基準化レベルに応じた倍率を入力する地震動に乗じる。図12に, 減衰定数を5%とした入力地震動の速度応答スペクトルを示す。

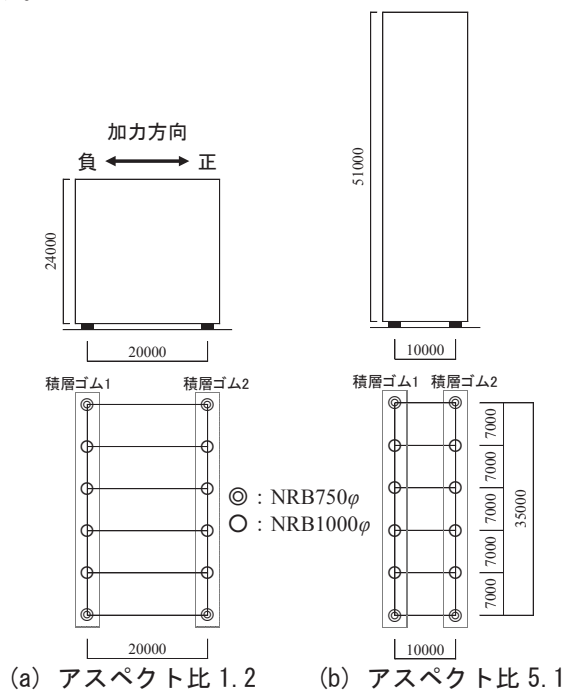


図9 建物モデル

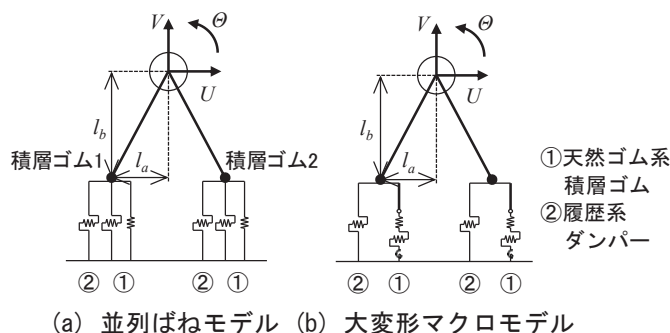


図10 解析モデル

3.4 解析結果

アスペクト比 1.2, 5.1 の積層ゴムの最大引張応力と最大引張ひずみの関係を図13, 図14にそれぞれ示す。これらの図より, 並列ばねモデルに注目すると, S_1 モデルが引張応力 1 N/mm^2 を超えない範囲ではモデルの初期引張剛性が低いほど最大引張ひずみが大きくなるが, 引張応力 1 N/mm^2 を超える範囲では S_1 モデルの最大引張ひずみが S_2 モデルと比較して大きくなる場合がある。大変形マクロモデルに注目すると, M_0 モデルと M_E モデルの最大引張ひずみはほとんど同じであり, M_0 モデルは M_E モデルと比較して最大引張応力を大きく評価する。並列ばねモデルの S_1 , S_2 , S_3 モデルと大変形マクロモデルを比較すると, 大変形マクロモデルが引張降伏応力を超えない範囲では最大引張ひずみがほとんど同じであるが, 引張降伏応力を超える範囲では大変形マクロモデルと比較して並列ばねモデルの最大引張ひずみを小さく評価する場合がある。

アスペクト比 1.2, 5.1 の積層ゴムの最大圧縮応力と最大せん断ひずみの関係を図15, 図16にそれぞれ示す。ここでは圧縮限界曲線も示している。これらの図より, 引張限界をひずみで規定した場合, 引張側の積層ゴムが引張限界ひずみ 5%まで余裕度を確保しているのに対して, 圧縮側の積層ゴムが終局限界値に達する場合がある。また, 積層ゴムのモデル化の違いが最大圧縮応力に与える影響はほとんどないことがわかる。

表4 上部構造の諸数値

アスペクト比	1.2	5.1
建物高さ [m]	24.0	51.0
建物幅 [m]	20.0	10.0
上部構造の総質量 [ton]	9000	
水平1次固有周期 [s]	4.59	
上下1次固有周期 [s]	0.09	

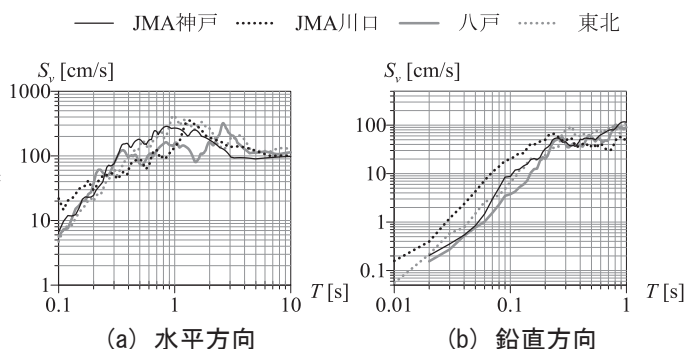
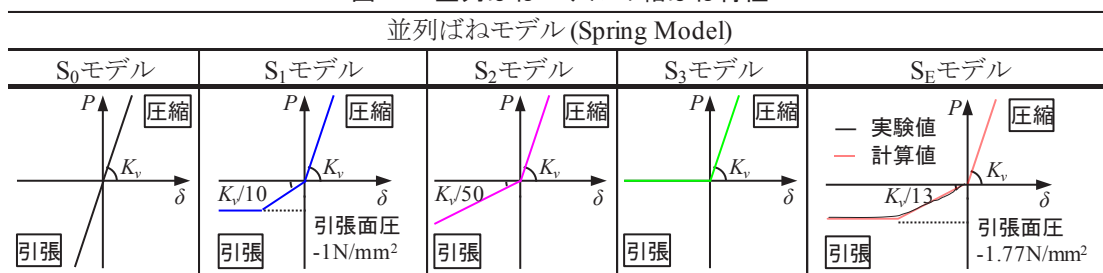


図12 入力地震動の速度応答スペクトル

図11 並列ばねモデルの軸ばね特性



4. まとめ

本論文では、積層ゴムの引張変形の精度の向上を目的として、大変形マクロモデル（修正モデル）の軸ばねに引張実験結果に対応する非線形特性を導入した。さらにこのモデルを用いて免震建物の地震応答解析を行い、積層ゴムのモデル化の違いが建物応答に与える影響やどのような終局限界値に達するかを評価した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 引張特性をバイリニア型としたモデル（ S_1 モデル）は、引張応力 1N/mm^2 を超える範囲で、引張剛性を圧縮剛性の $1/50$ とする直線で規定するモデル（ S_2 モデル）と比較して引張ひずみ量が大きくなる場合がある。
- ② 既往の大変形マクロモデル（ M_0 モデル）は、引張実験結果をシミュレートしたモデル（ M_E モデル）と同じように引張ひずみ量を評価することができる。
- ③ 並列ばねモデルは、大変形マクロモデルと比較して、大変形マクロモデルが引張降伏応力を超える範囲で引張ひずみ量を小さく評価する場合がある。

- ④ 引張限界をひずみで規定した場合、引張側の積層ゴムが引張限界ひずみ5%まで余裕度を確保しているのに対して、圧縮側の積層ゴムが終局限界値に達する場合がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会編:免震構造設計指針第2版, 545-563, 1993
- 2) 高岡栄治:積層ゴムの座屈破壊を対象とした免震建物振動台実験のシミュレーション解析, 日本建築学会構造系論文集, 第613号, 51-57, 2007.3
- 3) 飯塚真巨:積層ゴムの大変形挙動をシミュレートする巨視的力学モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第568号, 83-90, 2003.6
- 4) 高岡栄治, 竹中康雄:積層ゴムの座屈及び引張り特性を考慮した免震建物の終局挙動解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 845-846, 2009.8
- 5) 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718号, 2021-2031, 2015.12

*1 東京理科大学
*2 東京工業大学
*3 ㈱ブリヂストン

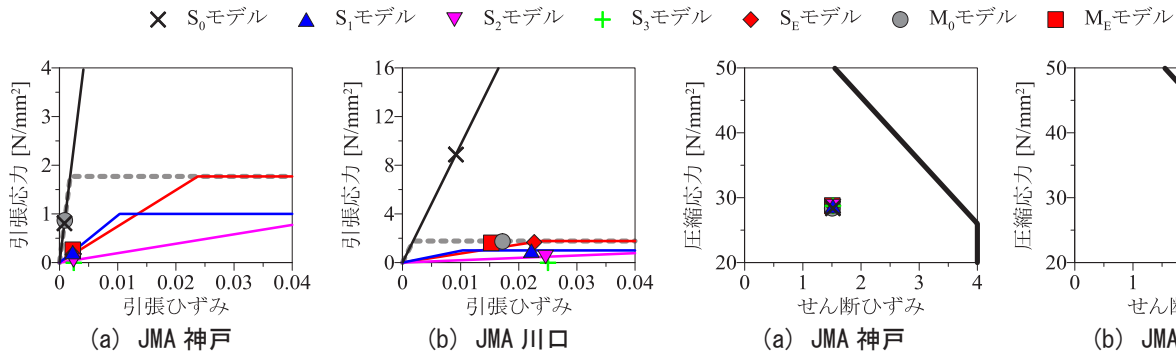


図13 積層ゴムの最大引張応力と最大引張ひずみの関係（アスペクト比 1.2）

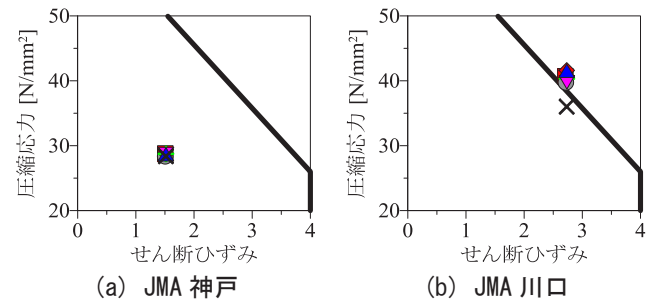


図15 積層ゴムの最大圧縮応力と最大せん断ひずみの関係（アスペクト比 1.2）

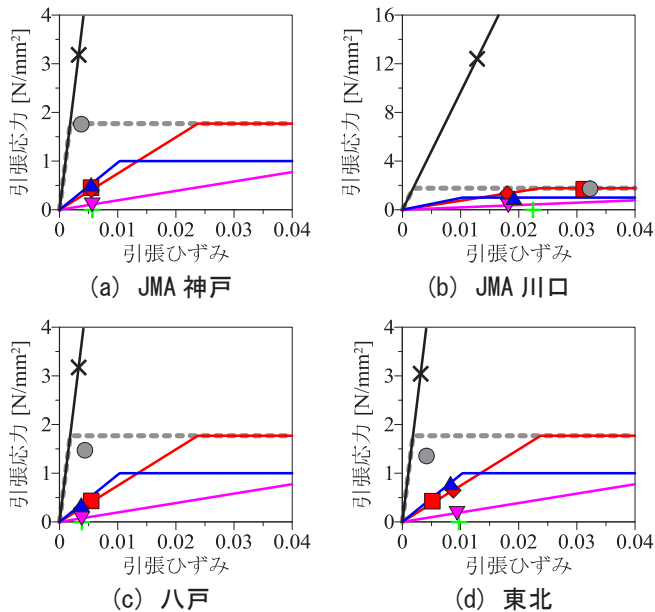


図14 積層ゴムの最大引張応力と最大引張ひずみの関係（アスペクト比 5.1）

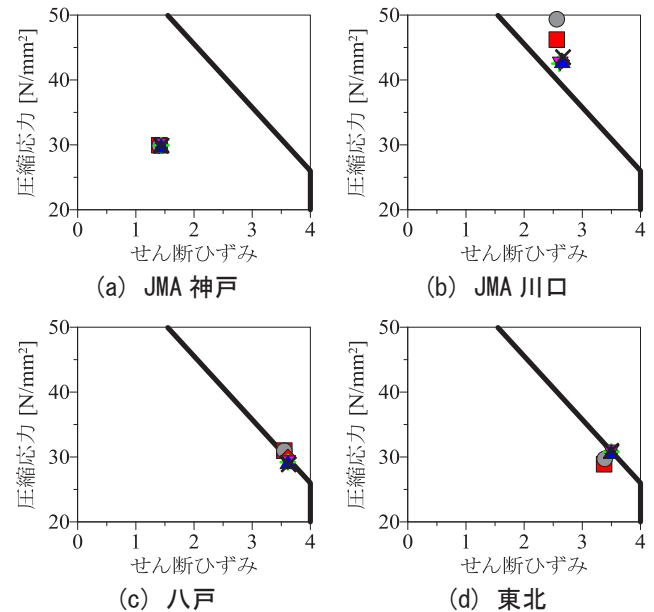


図16 積層ゴムの最大圧縮応力と最大せん断ひずみの関係（アスペクト比 5.1）