

引張軸力下における積層ゴムの力学特性に関する研究

Mechanical Characteristics of Laminated Rubber Bearings under Tensile Forces

高岡 栄治
飯塚 真巨
二村 有則¹⁾

要 約

免震構造が塔状比（高さ幅比）の大きい建物に適用されるようになり、積層ゴムに生じる引張軸力が無視できない存在となりつつある。本論は、引張軸力作用時の積層ゴムの履歴特性に関する実験的及び解析的研究について報告するものである。実験では、引張軸力作用時の詳細な履歴特性を把握することを目的として、せん断ひずみと引張ひずみをパラメータとした引張加力を実施した。試験体は直径 200mm、ゴム 1 層厚 2mm、1 次形状係数 25、2 次形状係数 3、4、5、ゴム材料 G4、G8 の低減衰積層ゴムである。また、積層ゴムの引張挙動に関する復元力モデルを提案し、実験結果のシミュレーション解析を実施した。その結果、積層ゴムの引張挙動が精度良く再現できることが確認された。

目 次

- I. はじめに
- II. 試験体と実験方法
- III. 実験結果
- IV. 結果の検討
- V. 復元力モデル
- VI. おわりに

I. はじめに

積層ゴムの力学挙動に関する研究は、主として圧縮軸力下における特性の把握を中心に進められてきた。これは、従来の中低層建物を対象とした免震構造が、積層ゴムに引張軸力を作用させないクライテリアの下で設計されてきたことによる。しかし、免震構造が塔状比（高さ幅比）の大きい建物へ適用されるようになり、免震建物の安全性を議論する際には、積層ゴムに生じる引張軸力が無視できない存在へと変わりつつある。以上の背景を踏まえて、積層ゴムの引張を対象とした研究が数多く実施されており、引張軸力が水平特性に与える影響や限界特性等についての知見が得られている^{1), 2)}。本論文は、積層ゴムの引張特性に関する実験的及び解析的研究について報告するものである。実験では、引張軸力作用下における詳細な履歴特性を把握することを目的として、積層ゴムのせん断ひずみと引張ひずみをパラメータとした様々な加力パターンに対する縮小試験体の加力試験を実施した。また、免震建物の動的応答解析プログラムへの適用を前提として、積層ゴムの引張挙動に関する復元力モデルを提案し、実験結果のシミュレーション解析によってモデルの妥当性を検証した。

II. 試験体と実験方法

1. 試験体

試験体の形状・寸法を Fig.1 に、ゴム材料の物性規格を Table 1 にそれぞれ示す。

試験体としては直径 D が 200mm、ゴム 1 層厚 t が 2mm の低減衰積層ゴムを用いた。積層ゴムの 1 次形状係数 S_1 ($D/4t$) はすべて 25 である。2 次形状係数 S_2 (D/h) については 4 を中心として、その他に一般的な使用範囲を考慮して 3、5 を補足的に加えた。 h はゴム総厚であり、2 次形状係数 3、4、5 に対してそれぞれ 66mm (2mm×33 層)、50mm (2mm×25 層)、40mm (2mm×20 層) である。ゴム材料は使用頻度の高い G4 ゴム (せん断弾性係数 $G=0.392\text{MPa}$) を主として、G8 ゴム ($G=0.784\text{MPa}$) を補足的に加えた。

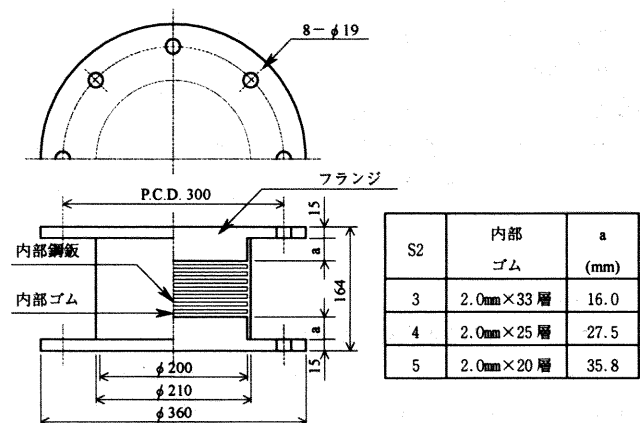


Fig.1 Detail of Specimen

1) 情報システム部

キーワード：免震構造，積層ゴム，引張軸力，
アクチュエータ，シミュレーション解析

2. 実験方法

初めに積層ゴムの特性に関する以下の諸量を定義する。

せん断応力 τ = せん断力 / 積層ゴム断面積

せん断ひずみ γ = 水平変位 / ゴム総厚

鉛直応力 (面圧) σ = 軸力 / 積層ゴム断面積

鉛直ひずみ ϵ = 鉛直変位 / ゴム総厚

なお、鉛直方向の符号については引張側を正とした。

(1) 加力プログラム

加力ケースの一覧を Table 2 に示す。試験体は各ケースにつき一体用いた。加力パターンは、オフセットせん断圧縮・引張試験、オフセット引張せん断試験に分類される。それぞれの概要を Fig.2(a), (b) に、詳細を以下に示す。

(a) オフセットせん断圧縮・引張試験

所定のオフセットせん断ひずみ γ_{target} を与え、それを保持した状態で荷重制御による圧縮加力及び変位制御による引張加力を行った。圧縮加力では応力振幅 σ_{target} の三角波を 2 サイクル与えた。ここで、 $\sigma_{\text{target}} = \sigma_D - 4.9\text{MPa}$ である。 σ_D は一般的な設計面圧であり、積層ゴムの 2 次形状係数 3, 4, 5 に対して、それぞれ -4.9, -9.8, -14.7MPa とした。引張加力では、鉛直ひずみ振幅を 50% ずつ増加させた三角波を与えた。繰り返し回数は各振幅につき 2 サイクルで、破断するまで加力した。Table 2 に γ_{target} と σ_{target} の水準を示す。

(b) オフセット引張せん断試験

所定のオフセット引張ひずみ ϵ_{target} を与え、それを保持した状態で変位制御によるせん断加力を行った。加力波形はせん断ひずみ振幅を 50% ずつ増加させた三角波とし、せん断ひずみ 100% までは両振幅、それを超える領域では片振幅とした。繰り返し回数は各振幅につき 2 サイクルで、破断するまで加力した。Table 2 に ϵ_{target} の水準を示す。

(2) 加力・計測方法

加力装置を Fig.3 に示す。水平方向の加力には 500kN アクチュエータ (振幅 $\pm 300\text{mm}$) を、鉛直方向の加力には 1000kN アクチュエータ (振幅 $\pm 300\text{mm}$) 2 台をそれぞれ用いた。加力はすべて静的 (1~5mm/s) に行い、制御にはアクチュエータ内臓の変位計及び荷重計を用いた。主な測定項目は、積層ゴムのせん断力、軸力、水平変位及び鉛直変位である。せん断力及び軸力は試験体と鉛直アクチュエータの間に設置したロードセルによって、水平変位はアクチュエータ内臓変位計によってそれぞれ測定した。鉛直変位は水平スライド装置と取付けブロックの間に設置したレーザー変位計 (振幅 300mm) によって測定した。軸力及び鉛直変位の初期値については、加力開始時に 0 となるように設定し、破断までその値を変更せずに用いた。

III. 実験結果

1. オフセットせん断圧縮・引張試験

Fig.4 及び Fig.5 に、オフセットせん断圧縮・引張試験から得られた引張加力時の鉛直応力-鉛直ひずみ ($\sigma-\epsilon$) 曲線を示す。なお、図中×の表示は破断点である。これより、以下のことが分かる。

(1) オフセットせん断ひずみ $\gamma_{\text{target}}=0$ (純引張)

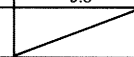
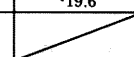
Fig.4 より、第 1 サイクルに着目すると、初期剛性は非常に高いが、G4 ゴム (ケース 01, 11, 15) では $\sigma=1.5\text{MPa}$ 程度、G8 ゴム (ケース 19) では $\sigma=3.0\text{MPa}$ 程度で剛性が急激に低下し、変形のみが進行

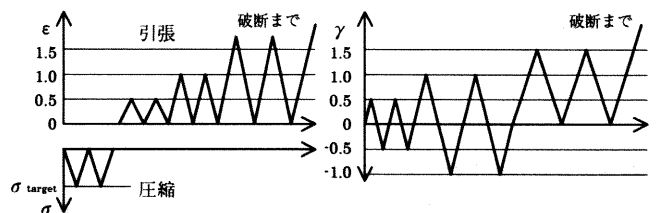
Table 1 Mechanical Properties of Rubber

項目	G4	G8
硬度 (JIS A) (度)	37 $\pm$ 5	50 $\pm$ 5
300%伸長応力 (MPa)	2.5 $\pm$ 0.6	7.8 $\pm$ 1.6
引張強度 (MPa)	17 以上	17 以上
破断伸び (%)	600 以上	550 以上
せん断弾性係数 G (MPa)	0.392	0.745
縦弾性係数 E (MPa)	1.47*	2.84
体積弾性係数 E_{∞} (MPa)	1030*	1370
ゴム硬度による補正係数 κ	0.85	0.73

*今回実験用に再評価

Table 2 Test Cases

ケース	加力パターン	S ₂	G(MPa)	γ target	σ target(MPa)	ϵ target
01	オフセットせん断 圧縮・引張	4	0.392	0	-14.7	破断 まで
02				1	-14.7	
03				2	-14.7	
04				3	-14.7	
05				4	—	
06	オフセット引張 せん断	4		破断まで		0
07						1
08						2
09						3
11	オフセットせん断 圧縮・引張	3		0	-9.8	破断 まで
12				3	-9.8	
13	オフセット引張 せん断	3		破断まで		0
14						1
15	オフセットせん断 圧縮・引張	5		0	-19.6	破断 まで
16				3	-19.6	
17	オフセット引張 せん断	5		破断まで		0
18						1
19	オフセットせん断 圧縮・引張	4	0.784	0	-14.7	破断 まで
20				3	-14.7	



(a) Compression and Tension

(b) Shear

Fig.2 Outline of Loading Pattern

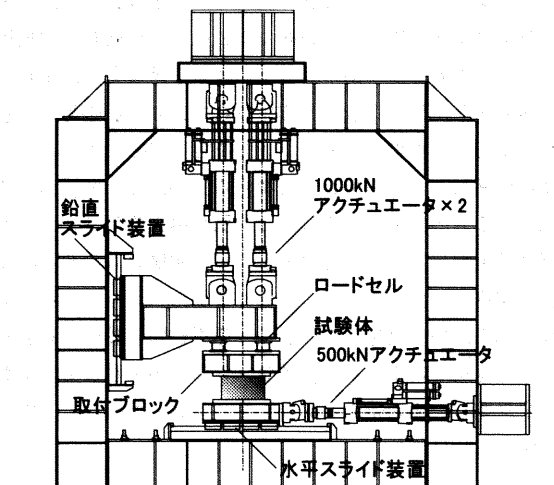
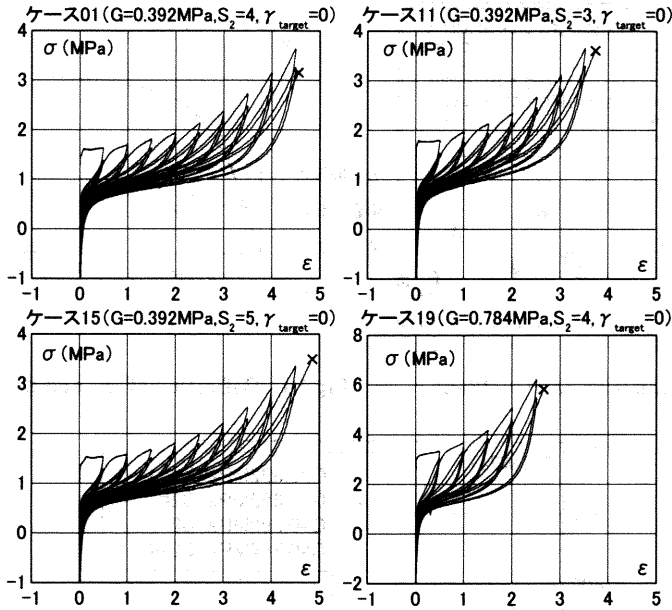
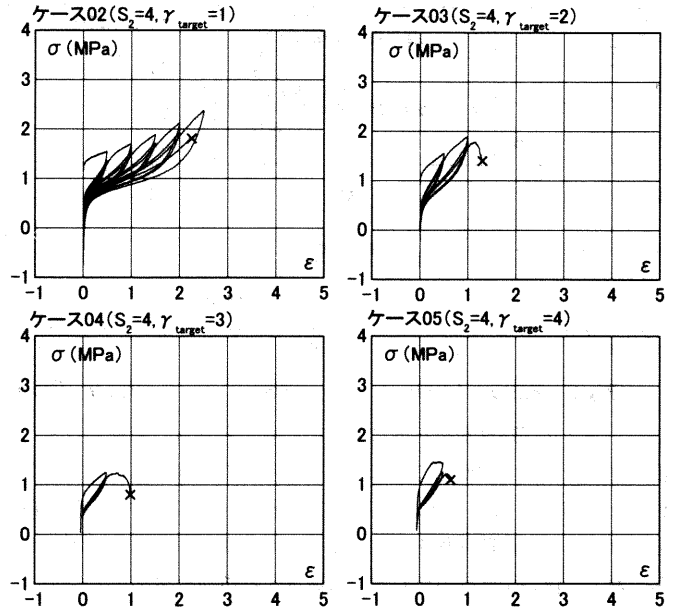


Fig.3 Loading Setup

する。それ以降のサイクルにおいては、剛性の低下する応力は第 1 サイクルの値と比較して 1/2 以下となり、さらに繰り返しによって低

Fig.4 $\sigma - \epsilon$ Curves ($\gamma_{\text{target}}=0$)Fig.5 $\sigma - \epsilon$ Curves ($\gamma_{\text{target}} \neq 0, G=0.392\text{MPa}$)

下する。鉛直ひずみが増大するとハードニング現象が顕著に現れ最終的に破断に至る。破断時の応力は G4 ゴムで 3.0~3.5MPa 程度、G8 ゴムで 6.0MPa 程度で、第 1 サイクルにおいて剛性の低下する応力の概ね 2 倍である。また、破断時の鉛直ひずみは G4 ゴムで 4~5 程度、G8 ゴムで 2.5 程度である。同一鉛直ひずみにおける繰り返しの影響に着目すると、繰り返し回数の増加に伴い応力は小さくなる。一方、G4 ゴムで 2 次形状係数の異なるケースを比較すると、破断ひずみにばらつきがあるものの履歴曲線の形状は概ね一致している。

(2) オフセットせん断ひずみ $\gamma_{\text{target}} \neq 0$

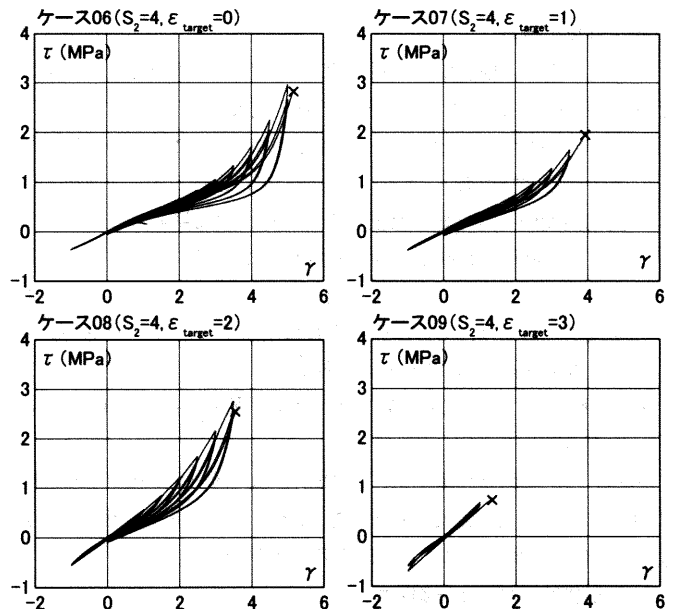
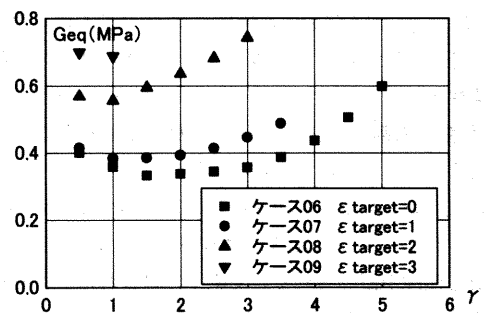
Fig.5 より、オフセットせん断ひずみ γ_{target} が大きくなるに従い破断時の鉛直ひずみが小さくなり、変形能力が低下することが分かる。また、第 1 サイクルに着目すると、 γ_{target} が大きくなるに従い、剛性低下の生じる応力が小さくなり、低下後の剛性が高くなる傾向が認められる。

2. オフセット引張せん断試験

Fig.6 にオフセット引張せん断試験から得られたせん断応力-せん断ひずみ ($\tau - \gamma$) 曲線を示す。これより、オフセット引張ひずみ ϵ_{target} が大きくなるに従い曲線全体の勾配が大きくなる傾向が認められ、破断時のせん断ひずみが小さくなることが分かる。Fig.6 より、各サイクルにおける等価せん断弾性係数 G_{eq} を求めた。ここで、等価せん断弾性係数は正側のピークと原点を結んだ割線剛性で定義した。Fig.7 に $G_{\text{eq}} - \gamma$ 関係を示す。これより、同一せん断ひずみで比較すると、等価せん断弾性係数は ϵ_{target} が大きくなるに従い大きくなる。

3. 破断限界

Fig.8 に、 $\epsilon - \gamma$ 平面において破断に至るまでの鉛直ひずみ又はせん断ひずみの最大値をプロットした破断限界を示す。これより、破断限界はせん断ひずみの増大に伴い鉛直ひずみが直線的に減少する傾向を示す。加力パターンの違いで比較すると、オフセット引張せん断試験の結果はオフセットせん断引張試験の結果を上回る傾向が見られる。また、G8 ゴムの破断限界は G4 ゴムよりも小さい。図中には直径 500mm、 $G=0.441\text{MPa}$ の天然ゴム系積層ゴムの引張ひずみ

Fig.6 $\tau - \gamma$ Curves ($G=0.392\text{MPa}$)Fig.7 $G_{\text{eq}} - \gamma$ Relationships

限界予測線¹⁾を併せて示している。これより、G4 ゴムの破断限界は限界予測線を概ね上回っていることが分かる。本試験体は縮小試験体であり、フランジ部分の厚さが直径に対して厚く設計されている

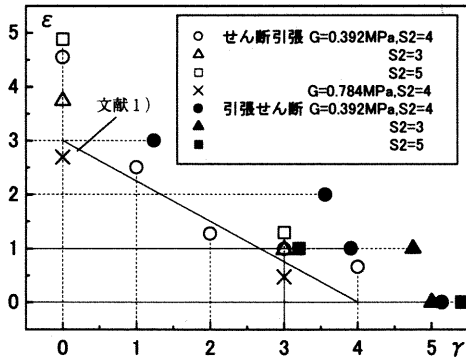


Fig.8 Failure Limit on $\epsilon - \gamma$ Plane

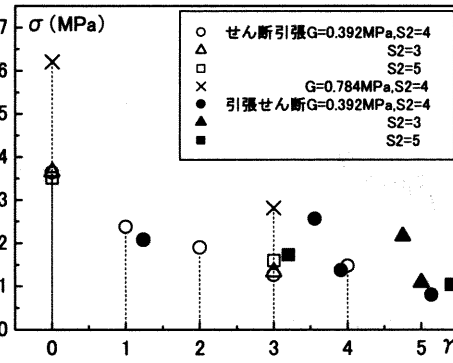


Fig.9 Failure Limit on $\sigma - \gamma$ Plane

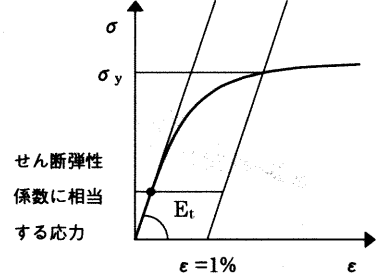


Fig.10 Definition of σ_y and E_t

ため、フランジ剛性が相対的に大きいと考えられる。結果として、積層ゴムに応力集中が起こりにくく、変形能力が向上したと推察される。Fig.9 に、 $\sigma - \gamma$ 平面において破断時の鉛直応力(一部最大値)をプロットした破断限界を示す。これより、破断限界はせん断ひずみの増大に伴い鉛直応力がわずかに減少する傾向を示す。また、G4 ゴムの破断時鉛直応力は概ね 1.0~3.5MPa 程度である。

IV. 結果の検討

オフセットせん断圧縮・引張試験より、引張初期剛性 E_t 、降伏応力 σ_y 、圧縮剛性 E_c を求めた。それぞれの定義を以下に示す。

a. 引張初期剛性 E_t 、降伏応力 σ_y (Fig.10 参照): 文献3)の定義に従う。引張試験の第1サイクルにおいて、原点と $\sigma - \epsilon$ 曲線上の比例限度内の点を結んだ直線の勾配を引張初期剛性とする。また、この直線を鉛直ひずみで引張方向に1%オフセットさせ、 $\sigma - \epsilon$ 曲線と交わった点の応力を降伏応力とする。ここで、比例限度内の点とは、せん断弾性係数に相当する応力 ($\sigma=0.392$ または 0.784MPa) に対応する点である。

b. 圧縮剛性 E_c : 圧縮試験の第2サイクルの面圧 $\sigma_D \pm 4.9\text{MPa}$ における割線剛性とする。

Fig.11 に、引張初期剛性 E_t 、圧縮剛性 E_c 、同一オフセットせん断ひずみにおける E_t/E_c 及び降伏応力 σ_y とオフセットせん断ひずみ γ_{target} の関係を示す。これより、以下のことが分かる。

1. 引張初期剛性と圧縮剛性

引張初期剛性及び圧縮剛性は共にオフセットせん断ひずみ γ_{target} が大きくなるに従い低下する。引張初期剛性に着目すると、G4 ゴム、G8 ゴム共に、 γ_{target} が3における値は γ_{target} が0における値と比較して 0.1~0.3 倍程度と小さく、オフセットせん断ひずみの付与により引張初期剛性が大きく低下する。 γ_{target} が0のケース(純引張)では、G8 ゴムの引張初期剛性はG4 ゴムの値の概ね2倍程度であり、2次形状係数による差異はほとんど認められない。

E_t/E_c は、G4 ゴムでは 0.2~0.6 程度、G8 ゴムでは 0.6~0.7 程度である。また、オフセットせん断ひずみが大きくなるに従い、 E_t/E_c は小さくなる傾向が認められる。文献1)によれば、引張初期剛性は圧縮剛性に対して非常に小さく、 E_t/E_c の値は 0.1 程度となることが $\phi 500$ に対する実験結果より示されている。本試験の結果はこの値と比較してやや大きめの値である。積層ゴム全体の引張剛性は、フランジを除いた積層ゴムのみの引張剛性とフランジの引張剛性を直列としたモデルで評価される。よって、フランジ剛性が相対的に小さ

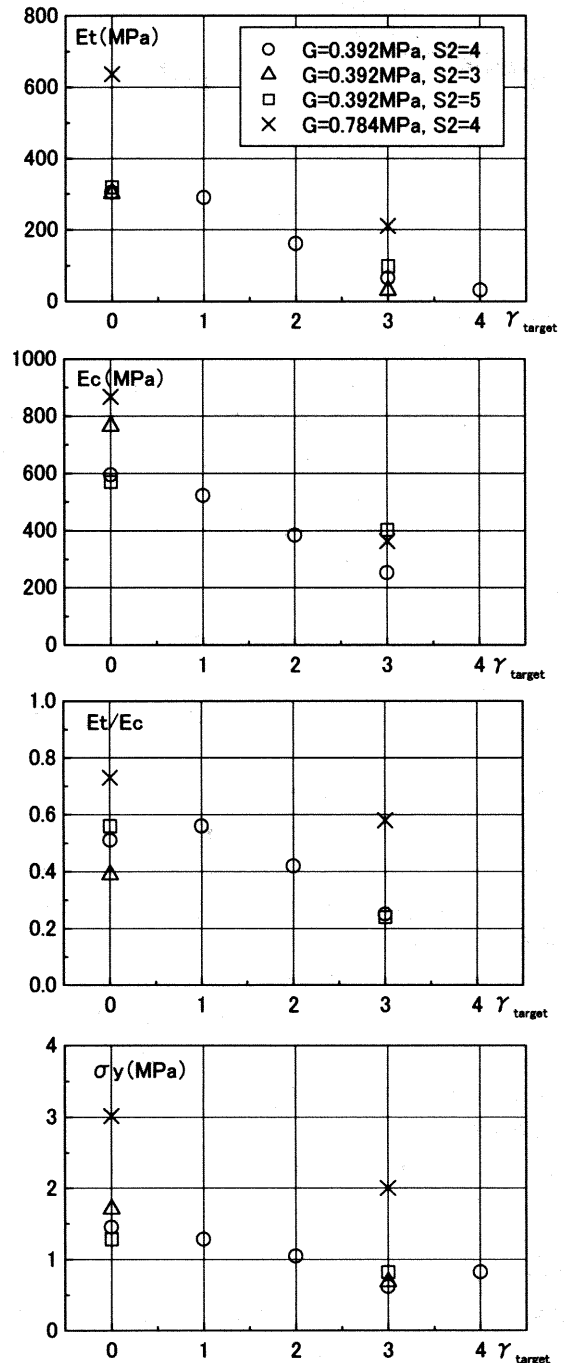


Fig.11 E_t , E_c , E_t/E_c , $\sigma_y - \gamma_{\text{target}}$ Relationships

い場合、全体剛性への寄与が大きくなる。一方、本試験体はフランジ剛性が相対的に大きいので、フランジ剛性の寄与は小さく、 E_1/E_2 が大きくなったと推察される。

2. 降伏応力

降伏応力はオフセットせん断ひずみ γ_{target} が大きくなるに従い低下する傾向が認められる。同一 γ_{target} で比較すると、G8 ゴムの降伏応力は G4 の値の概ね 2 倍程度であり、2 次形状係数による差異は小さい。 γ_{target} が 0 のケース（純引張）に着目すると、降伏応力は G4 ゴムで 1.3~1.7MPa、G8 ゴムで 3.0、3.1MPa であり、Table 1 に示した縦弾性係数の値と概ね等しい⁴⁾。

V. 復元力モデル

積層ゴムの大変形引張挙動を表現し得る復元力モデルを提案し、実験結果との比較によりモデルの妥当性を検証した。

1. モデル化方針

モデル化の対象はオフセットせん断ひずみが 0 のケースとした。積層ゴムの引張履歴曲線を、Fig.12 に示す 4 つの曲線の組み合わせによって表現した。各曲線の定義は以下のとおりである。

- a. スケルトン曲線：鉛直変形 0 から引張載荷して得られる曲線
- b. 下限曲線：全ての履歴曲線がとりうる下限を規定する曲線
- c. 除荷曲線：スケルトン曲線又は載荷曲線から除荷したときの曲線
- d. 載荷曲線：除荷曲線から載荷したときの曲線

Fig.12 に従って基本的な履歴則を示す。①~④はそれぞれ図中の番号に対応する。

- ①変形 0 からの載荷時はスケルトン曲線上を上昇する。
- ②スケルトン曲線上の点 A から除荷する場合は、下限曲線に漸近する除荷曲線上を下降する。
- ③除荷曲線上の点 B から載荷する場合は、点 A'（後述）と点 B を通る載荷曲線上を上昇する。さらに、スケルトン曲線を超えた場合は、スケルトン曲線上を上昇する。
- ④載荷曲線上の点 C から除荷する場合は、下限曲線に漸近する除荷曲線上を下降する。

2. 各曲線の定式化

(1) スケルトン曲線と下限曲線

スケルトン曲線 σ_{skl} 及び下限曲線 σ_{low} は、(1)式及び(2)式に示すハードニングを考慮した双曲線モデルによって表した。Fig.13 にスケルトン曲線と下限曲線を示す。それぞれの曲線は初期剛性 E_1 、 E_2 を持ち、ハードニング性状を有する荷重漸近曲線 σ_1 、 σ_2 に漸近する。また、繰り返しの伴う除荷時の応力低下を考慮するため、 σ_2 を最大経験ひずみに応じて減少させた。

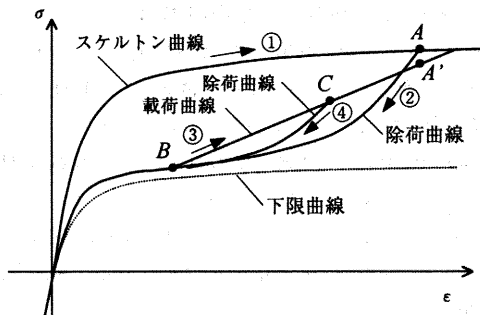


Fig.12 Definition of Curves

$$\sigma_{skl}(\epsilon) = \frac{\frac{\sigma_1(\epsilon)}{\epsilon_{1l}} \epsilon}{\left\{ 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{1l}} \right)^{s_1} \right\}^{\frac{1}{s_1}}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_{low}(\epsilon) = \frac{\frac{\sigma_2(\epsilon)}{\epsilon_{2l}} \epsilon}{\left\{ 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{2l}} \right)^{s_2} \right\}^{\frac{1}{s_2}}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\sigma_1(\epsilon) = \sigma_{1l} + a_1 \epsilon^2$: 荷重漸近曲線
 $\sigma_2(\epsilon) = (\sigma_{2l} - \alpha \cdot \epsilon_A) + a_2 \epsilon^2$: 荷重漸近曲線
 $\epsilon_{1l} = \sigma_{1l} / E_1$, $\epsilon_{2l} = \sigma_{2l} / E_2$
 σ_{1l} , σ_{2l} : 荷重漸近曲線初期値
 E_1 , E_2 : 初期剛性
 a_1 , a_2 : ハードニング性状を制御するパラメータ
 s_1 , s_2 : 関数形状の曲率を制御するパラメータ
 α : 最大経験ひずみ ϵ_A に乗ずる倍率

(2) 偏差荷重座標系の導入

除荷曲線及び載荷曲線の取り扱いを簡単にするために、下限曲線を荷重の原点とした偏差荷重座標系を導入した。座標変換は次式で表される。

$$\tilde{\sigma} = \sigma - \sigma_{low} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 σ : 真の荷重、 $\tilde{\sigma}$: 偏差荷重

Fig.14 に偏差荷重座標系における履歴曲線を示す。偏差荷重座標系におけるスケルトン曲線は次式で表される。

$$\tilde{\sigma}_{skl}(\epsilon) = \sigma_{skl}(\epsilon) - \sigma_{low}(\epsilon) \quad \dots \dots \dots (4)$$

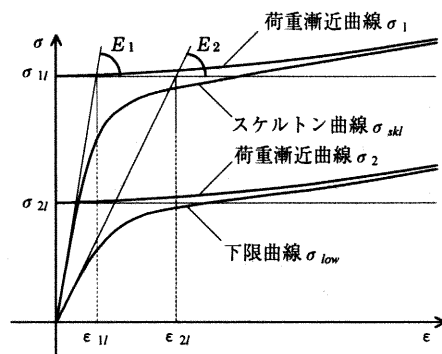


Fig.13 Skeleton Curve and Lower Limit Curve

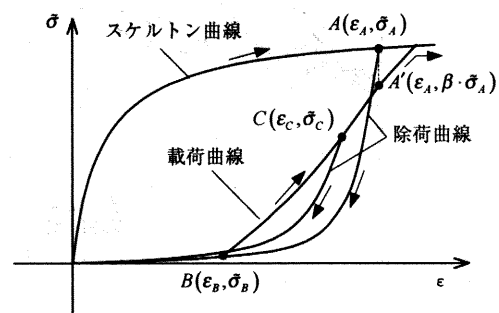


Fig.14 Deviation Force Coordinates

除荷曲線及び載荷曲線は偏差荷重座標系において定式化した。

(3) 除荷曲線

偏差荷重座標系における除荷曲線 $\bar{\sigma}_{unl}$ は、点 A 又は C を通り、 $\bar{\sigma}=0$ に漸近し、 $\varepsilon=0$ において次式を満足しなければならない。

$$\bar{\sigma}(0)=0 \text{ 及び } \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon}(0)=0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらの性状を表すもっとも単純な関数として(6)式を設定した

$$\bar{\sigma}_{unl}(\varepsilon)=a_3 \cdot \varepsilon^{s_3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 a_3 及び s_3 は曲線形状を制御するパラメータである。 a_3 は点 A 又は C を通る条件より、 s_3 を含んだ形として次式によって表される。

$$a_3 = \frac{\bar{\sigma}_A}{\varepsilon_A^{s_3}} = \frac{\bar{\sigma}_{skl}(\varepsilon_A)}{\varepsilon_A^{s_3}} \quad \text{又は} \quad a_3 = \frac{\bar{\sigma}_C}{\varepsilon_C^{s_3}} = \frac{\bar{\sigma}_{skl}(\varepsilon_C)}{\varepsilon_C^{s_3}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

(4) 載荷曲線

偏差荷重座標系における載荷曲線 $\bar{\sigma}_{loa}$ は、(8a)式、(8b)式に示す点 B と A' を通る曲線及び直線によって表した。

$$\bar{\sigma}_{loa} = a_4 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_B)^{s_4} + \sigma_B \quad (\varepsilon \leq \varepsilon_A) \quad \dots\dots\dots (8a)$$

$$\bar{\sigma}_{loa} = a_4 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_B) + \sigma_B \quad (\varepsilon > \varepsilon_A) \quad \dots\dots\dots (8b)$$

ここで、 a_4 及び s_4 は曲線形状を制御するパラメータである。点 A' は繰り返しによる応力の低下を考慮した指向点であり、その座標は応力低減率 β を用いて $(\varepsilon_A, \beta \cdot \bar{\sigma}_A)$ とする。 a_4 は点 A' を通る条件より次式によって表される。

$$a_4 = \frac{\beta \cdot \bar{\sigma}_{A'} - \bar{\sigma}_B}{(\varepsilon_{A'} - \varepsilon_B)^{s_4}} \quad (\varepsilon \leq \varepsilon_A) \quad \dots\dots\dots (9a)$$

$$a_4 = \frac{\beta \cdot \bar{\sigma}_{A'} - \bar{\sigma}_B}{\varepsilon_A - \varepsilon_B} \quad (\varepsilon > \varepsilon_A) \quad \dots\dots\dots (9b)$$

載荷曲線の応力がスケルトン曲線の応力を超えた場合、スケルトン曲線に移る。そして再び除荷の際に点 A の値が更新される。

3. 解析結果

ケース 01, 11, 15 ($G=0.392\text{MPa}$) を対象としたシミュレーション解析を実施した。対象としたひずみ領域は鉛直ひずみで 2 とした。

$E_1=305\text{MPa}$, $E_2=200\text{MPa}$, $\sigma_1=1.65\text{MPa}$, $\sigma_2=1.18\text{MPa}$
 $S_1=1.2$, $S_2=0.6$, $S_3=5$, $S_4=1.8$
 $a_1=0.8$, $a_2=1.2$, $\alpha=1.8$, $\beta=0.8$

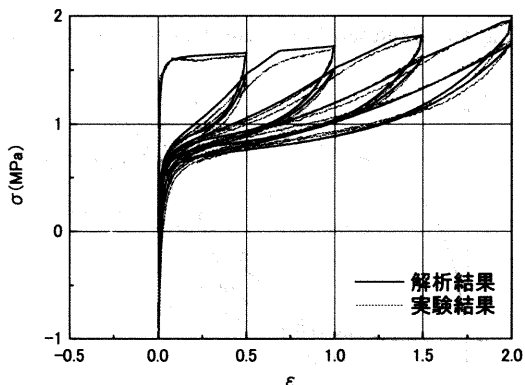


Fig.15 Comparison between Analysis and Test

E_1 及び σ_1 としては実験結果より得られた引張初期剛性及び降伏棚の応力を与えた。また、 E_2 及び σ_2 としては除荷時の履歴曲線に対応した剛性及び応力を与えた。曲線形状に関するパラメータ a_1 と a_2 及び $s_1 \sim s_4$ 、応力の倍率 α 及び β は、いずれも実験結果をシミュレートするように決定した。Fig.15 に、ケース 01 について解析結果と実験結果を比較して示す。これより、両者は良く一致していることが分かる。他のケースについても、ハードニングに関するパラメータを修正するのみで、合致度の高い解析結果が得られた。

パラメータの設定には実験等の経験を必要とするが、任意の積層ゴムを対象とする場合、引張初期剛性と降伏応力が求められれば、上記のパラメータを適宜用いることによって引張挙動の概略を表現することが可能である。

VI. おわりに

引張軸力作用下における積層ゴムの詳細な履歴特性を把握することを目的として、せん断ひずみと引張ひずみをパラメータとした縮小試験体に対する引張加力試験を実施した。また、積層ゴムの引張挙動に関する復元力モデルを提案し、実験結果のシミュレーション解析を実施した。本論より得られた主な知見を以下に示す。

- オフセットせん断ひずみが 0 のケース（純引張）の結果より、降伏応力は G4 ゴムで 1.5MPa、G8 ゴムで 3.0MPa 程度であり、縦弾性係数の値と概ね等しい。引張初期剛性の圧縮剛性に対する比は 0.4~0.7 程度であり、既往の研究と比較して大きめの評価となった。これは、縮小試験体を用いたためフランジ剛性が相対的に大きく、全体剛性への影響が小さくなったためと推察される。
- オフセットせん断ひずみが大きくなるに従い、引張初期剛性、降伏応力及び破断時の鉛直ひずみはいずれも小さくなる。
- オフセット引張ひずみが大きくなるに従い、同一せん断ひずみにおける等価せん断弾性係数は大きくなる。
- 破断限界は文献 1) に示した引張ひずみ限界予測線を概ね上回っている。これはフランジ剛性が相対的に大きいため、積層ゴムに応力集中が起こりにくく、変形能力が向上したためと推察される。
- シミュレーション解析の結果より、解析と実験は良く一致しており、曲線を組み合わせた本モデルによって積層ゴムの引張挙動を表現できることが確認された。今後、免震建物の限界挙動解析に適用していく予定である。

なお、本実験を実施するに際して、試験体を提供して頂きましたブリヂストンの関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 高山峯夫；免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能，AIJ 技術報告集第 1 号，(1995.12)，pp.160-165.
- 菊地隆志他；引き抜きを受けた積層ゴムの特性変化について，AIJ 大会（関東），(1997.9)，pp.539-540.
- 大島靖樹；積層ゴム免震要素の引張許容応力設定に関する検討，AIJ 大会（関東），(1997.9)，pp.535-536.
- Gent, A. N. and Lindley, P. B. ; Internal rupture of bonded rubber cylinders in tension, Proc. Roy. Soc. A, Vol.249, (1958.5).