フランジ厚さを变化させた天然ゴム系積層ゴムの引張試験

THE TENSILE TESTS OF NATURAL RUBBER BEARINGS FOCUSED ON THE EFFECT OF THE STEEL FLANGE PLATES

加藤隆一 — *1   岡 研二郎 — *1
 高山峯夫 — *2   國津博昭 — *3
 貞許美和 — *3

Ryuichi KATO — *1   Kenjiro OKA — *1
 Mineo TAKAYAMA — *2   Hiroaki KUNITSU — *3
 Miwa SADAMOTO — *3

キーワード：
 天然ゴム系積層ゴム, 引張試験, フランジ厚さ, スケール効果

Keywords:
 Natural rubber bearings, Tensile tests, Steel flange plate, Scale effect

In this study, tensile tests for the Natural Rubber Bearings were performed to investigate the vertical and horizontal restoring force characteristics and the scale effect in small extensional region, as well as the influence of the thickness of the flange plate. From the results of tensile tests, the extensional stiffness was sensitive to the flange plate thickness and scale rule was effective at small extensional region. The deformation of the flange plate subjected to tensile load can be expressed by the simple theoretical equation. Consequently the behavior of rubber bearings under tensile load can be evaluated including the deformation of the flange plate.

1. はじめに

兵庫県南部地震により多大な人的・物的被害をもたらした阪神淡路大震災以降、免震構造は積層ゴムを中心とし、官庁や病院、共同住宅をはじめとする建築物に適用され、日本では、既に 800 棟以上の免震建物が建設されている。最近では、高層建築や戸建住宅、中間階免震などにも積層ゴムあるいはそれ以外の免震装置を適用する事例も現れている。

近年では高層建築物への適用も増加してきている。高層建築物が地震を受けた場合、外側の柱には引き抜き力が発生作用する可能性があるとの報告¹⁾がある。また、実際に -1N/mm^2 程度の引張面圧を想定して、建設された構造物の事例もある。

積層ゴムの引張について、Gent²⁾は、天然ゴムのゴムブロックについて、引張試験を実施し、ゴム材料のヤング率の約 0.5~1.0 倍に相当する応力度の範囲で内部クラックであるボイドが発生すること示した。高山³⁾は天然ゴム系積層ゴムについて、単純引張試験に関して破断まで、全ゴム厚さの3倍程度の変形能力を確認しているが、引張が作用する場合でも、ヤング率程度以下の応力とすべきであるとの見解を述べている。また、大鳥⁴⁾は、天然ゴム系積層ゴムについて、引張許容応力の設定法について提案し、許容応力は -1N/mm^2 程度であるとの結果を報告している。

そこで、本報告では、天然ゴム系積層ゴムについて、 -1N/mm^2 程度の微小引張面圧が作用したときの、(1)微小引張領域での積層ゴムの鉛直・水平復元力特性、(2)微小引張領域での積層ゴムのスケール効果および(3)引張特性におけるフランジ厚さの影響について調べることを目的として(a)所定のせん断ひずみを与えた状態で、鉛直

方向に繰り返し引張圧縮変形を与えるオフセット引張圧縮試験と(b)鉛直方向に所定の引張変形を与えた状態で、水平方向に繰り返しせん断変形を与える引張せん断試験を行った。フランジ厚さの影響については、異なる厚さのフランジを3種類用いた。また、スケール効果については、積層ゴムのゴム直径が $\phi 500\text{mm}$ と $\phi 1000\text{mm}$ の試験体を使用した。なお、本論文では引張面圧を負(-)で表現する。

2. 試験体

図1に本試験に用いた試験体の外観を示す。積層ゴムはゴム部に一体となるように加硫接着された連結鋼板を介し、ボルトにより上下フランジが取り付けられた構造となっている。フランジは連結鋼板を介して積層ゴムと接合されている。ゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ 、 $\phi 1000\text{mm}$ の連結鋼板の厚さはそれぞれ16mmと29mmである。

ゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ の試験体は、フランジ厚さの影響をみるため、フランジの厚さを20、25および36mmの3種類とした。また、試験体のサイズによる特性の変化をみるための試験体として、ゴム直径 $\phi 1000\text{mm}$ のものを使用した。

図1 試験体外観

*1 倉敷化工(株)産業機器事業部
 (〒712-8555 倉敷市連島町矢柄四の町4630)
 *2 福岡大学工学部建築学科 助教授・工博
 *3 ㈲日建設計

*1 Kurashikikako Co., Ltd., Industrial Products Division
 *2 Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuoka Univ., Dr. Eng.
 *3 Nikken Sekkei Ltd.

φ1000mmのフランジ厚さは、36mmで、φ500mmのフランジ20mmの試験体とはほぼ相似形となっている。

試験体として用いた積層ゴムの仕様を表1に示す。試験体には、中心孔がなく、1次形状係数 S_1 は33、 S_2 は5.1であり、ゴム直径φ500とφ1000の試験体は相似形状である。ゴム材料は、せん断弾性率 $G0.44\text{N/mm}^2$ のものを用いた。なお、使用した試験体は、鋼板露出型であり、被覆ゴムは取り付けられていない。

表1 試験体の仕様

積層ゴム諸元	NB45-500			NB45-1000
	A	B	C	
1 せん断弾性率 G (N/mm ²)	0.44			0.44
2 ゴム直径 D (mm)	500			1000
3 ゴムシート厚 t_R (mm)	3.75			7.5
4 ゴム層数 n	26			26
5 ゴム総厚 L (mm)	97.5			195
6 1次形状係数 S_1	33.3			33.3
7 2次形状係数 S_2	5.1			5.1
8 フランジ外径 D_f (mm)	780			1400
9 フランジ厚さ(外周) t_{f1} (mm)	20			36
10 フランジボルト芯間(P.C.D.) D_{fp} (mm)	690			1265

3. 試験方法

(1) 試験機と計測

試験機には圧縮せん断試験機を使用した。試験機の仕様は、鉛直荷重15MN、水平荷重4MN、水平変位±500mmである。計測は水平荷重、鉛直荷重、水平変位および鉛直変位を基本とした。

(2) 試験条件

今回の試験は、(a)所定のせん断変形を与えた状態での、引張圧縮試験(オフセット引張圧縮試験)、(b)鉛直方向に所定の引張ひずみまたは引張面圧を与えた状態での、せん断試験(引張せん断試験)および(c)単純引張試験を実施した。その試験载荷パターンを表2に示す。引張試験前後の鉛直・水平ばね特性の変化を評価するため、途中で基本特性の評価を実施している。

表2 引張試験の载荷パターン

オフセット引張圧縮試験は、オフセットせん断ひずみ0、100および200%の3水準変化させ、面圧が $-0.5 \sim 1.0$ 、 $-1.0 \sim 10\text{N/mm}^2$ となるような鉛直荷重を与えた。引張せん断試験の鉛直方向の条件について、面圧は0、 -0.5 および -1.0N/mm^2 の3水準、引張ひずみは10

と25%の2水準変化させた、このとき水平方向のせん断ひずみを±100、±200および±250%となる変形を与えた。ただし、ゴム直径φ1000mmについては、せん断ひずみ±200%まででとめている。単純引張試験は引張ひずみ50、75および100%の変形を与えた。各引張試験の加力の繰り返し数は5回である。基本特性は設計面圧 $15\text{N/mm}^2 \pm 30\%$ となる鉛直荷重を作用させた時の鉛直剛性、および設計面圧 15N/mm^2 におけるせん断ひずみ±100、±200および±250%時の水平剛性を求めている。基本特性については、3回の繰り返し回数である。

今回の試験では、各試験におけるフランジの変形量(浮き上がり量)を測定するため、試験体を取り付けている試験機の圧盤にスリットを設け、変位センサーを図2のように配置している。各サイズの試験体のフランジ中心、フランジ中央部およびボルト固定部近傍の3ヶ所の変形量を測定した。水平の加力方向は図2に示す矢印の方向である。なお、センサー位置はボルト穴を避けて加力中心から 22.5° 回転させている。

試験体 φ500:①、②、③ φ1000:①、③、④

図2 フランジ変形量測定ポイント

(3) 特性値算出方法

各試験の鉛直・水平剛性の算出方法を図3に示す。特性値の算出は、各試験において得られた最大・最小荷重値と最大・最小変位値を用いた等価剛性により評価した。ただし、初期・基本特性の鉛直剛性は、所定の面圧となる鉛直荷重の±30%の範囲における荷重・変位値を用い鉛直剛性を求めている。

(a)圧縮剛性 $K_c=P_{\max}/Y_{\max}$

(b)引張剛性 $K_t=P_{\min}/Y_{\min}$

①引張-圧縮剛性

水平剛性 $K_h=(Q_{\max}-Q_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$

②水平剛性

鉛直剛性 $K_v=(P_{\max}-P_{\min})/(Y_{\max}-Y_{\min})$

③鉛直剛性(基本)

図3 特性値算出方法

4. 試験結果

(1) オフセット引張圧縮試験

ゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ 、フランジ厚さ 20mm に対する試験結果を図 4 に示す。同図はオフセットせん断ひずみを 0、100 および 200%と 3 水準変化させ、面圧 $10 \sim -1.0\text{N/mm}^2$ 与えたときの鉛直方向の履歴曲線である。オフセットせん断ひずみの増加とともに圧縮剛性は低下し、引張剛性も低下していることが分かる。

図 4 鉛直方向の履歴曲線

(a) フランジ厚さの影響

図 5 にゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ のフランジ厚さ 20mm と 36mm の単純引張圧縮試験から得られた鉛直方向の履歴曲線を示す。フランジ厚さの違いにより圧縮・引張剛性が異なり、特に引張側の履歴の差が大きい。

図 6 と図 7 にフランジ厚さと引張剛性(弾性係数に換算)の関係を示す。フランジが厚いほど引張剛性が高くなるのがわかるが、フランジ厚さ 20mm と 25mm の結果の差は小さい。面圧 -0.5N/mm^2 のとき、フランジ厚さ 20mm に対し、36mm は 2 倍以上の引張剛性がある。しかしながら、面圧 -1.0N/mm^2 の結果はそれに比べ、差が小さくなっていることが分かる。これは図 8 に示すように、履歴曲線の形状から、フランジ厚さが 36mm の結果は、フランジが剛なため他の結果に比べ、積層ゴムのゴム部の変形が降伏域に近づき剛性が低下したためと思われる。

図 5 フランジ厚さの違いによる鉛直履歴特性 ($\gamma=0\%$) 図 6 面圧 -0.5N/mm^2 のときの引張剛性 図 7 面圧 -1.0N/mm^2 のときの引張剛性

図 8 フランジ厚さ 36mm の面圧による引張履歴特性の変化

(b) スケールの影響

図 9 にゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ と $\phi 1000\text{mm}$ オフセットせん断ひずみ 200%における履歴曲線を示す。両試験体の履歴曲線はほぼ一致していることが分かる。また、図 10 にオフセットせん断ひずみと引張剛性の比較を示す。このときのゴム直径 $\phi 1000\text{mm}$ の引張剛性は $\phi 500\text{mm}$ に比べ、相対的に剛性が低い。これは、両試験体のフランジや中間鋼板の仕様が完全に相似形になっていないことに起因するものだと思う。

図 9 スケールの違いによる鉛直履歴特性 ($\gamma=200\%$)

図 10 スケールの違いによる引張剛性

(2) 引張せん断試験

図 11 にゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ フランジ厚さ 20mm に対する面圧を 15 、 0 、 -0.5 および -1.0N/mm^2 と 4 水準変化させ、せん断ひずみ $\gamma = \pm 250\%$ 与えたときの水平方向の履歴曲線を示す。面圧 $0 \sim -1.0\text{N/mm}^2$ の履歴曲線の面積は、面圧 15N/mm^2 における履歴曲線に比べ若干小さいことが分かる。また、履歴曲線の形状についてみると、面圧 -1.0N/mm^2 の曲線は他の条件に比べ、やや直線状になっている。図 12 に引張ひずみを 2 水準変化させ、せん断ひずみ $\gamma = \pm 250\%$ 与えたときの水平方向の履歴曲線を示す。それぞれの履歴曲線は面圧 -0.5 と -1.0N/mm^2 に対する履歴曲線とほぼ同じ形状である。

図 11 一定の引張面圧を与えたときの水平履歴特性

図 12 一定の引張ひずみを与えたときの水平履歴特性

(a) フランジ厚さの影響

図 13 と図 14 にそれぞれ、フランジ厚さ 20mm と 36mm の面圧 -1.0N/mm^2 、せん断ひずみ $\pm 250\%$ の時の引張せん断試験で得られた履歴特性を示す。水平履歴と鉛直ひずみともに良い一致を示している。図 15 に引張面圧を作用させたときのフランジ厚さごとの水平剛性（せん断弾性率に換算）のひずみ依存性を示す。水平剛性はフランジ厚さに影響を受けないことが分かる。また、面圧 -1.0N/mm^2 のとき、鉛直方向に約 25% のひずみを生じているため、水平剛性は面圧 15N/mm^2 のときに比べ若干上昇するが、大きくは変化しない。

図 13 フランジ厚さの違いによる水平履歴特性

図 14 フランジ厚さの違いによる鉛直履歴特性

(a) フランジ厚さ 20mm (b) フランジ厚さ 36mm

図 15 フランジ厚さの違いによる水平剛性の変化

引張ひずみ 10% と 25% における水平剛性のひずみ依存特性は、面圧 -0.5 と -1.0N/mm^2 のときと同等の特性を示す。特に、面圧 -1.0N/mm^2 の鉛直ひずみは 25% に相当することから、水平剛性もほぼ同値であった。

(b) スケールの影響

図 16 と図 17 に面圧 -1.0N/mm^2 、せん断ひずみ $\pm 200\%$ のときの、引張せん断試験結果を示す。水平方向の履歴特性はほぼサイズによらず一致している。鉛直ひずみの履歴曲線は、やや異なる性状を示しているが、鉛直ひずみの大きさはほぼ同等である。図 18 に面圧を変化させたときのひずみ依存特性を示す。このときの結果は、図 15 に示すゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ の結果と同じ傾向にあり、水平剛性については、スケールの影響は小さいものと考えられる。

図 16 スケールの違いによる水平履歴特性

図 17 スケールの違いによる鉛直履歴特性

図 18 スケールの違いによる水平剛性

(3)単純引張試験

(a) フランジ厚さの影響

図 19 にゴム直径 500mm の異なるフランジ厚さの単純引張試験で得られる 1 サイクルと 5 サイクル目の履歴特性を示す。変形の小さいところではフランジ厚さの影響を受けているが、変形の大きいところでは、履歴曲線とはほぼ一致していることが分かる。このことから、引張変形の大きいところでは積層ゴムのゴム部の変形が支配的になり、フランジ厚さの影響が小さくなっていることが分かる。

(b)スケールの影響

図 20 に、異なるサイズの単純引張試験について、変形の小さい領域、大きい領域ともに履歴曲線が若干異なっている。フランジ厚さはほぼ相似形状だが、中間鋼板その他の仕様が完全な相似形ではないことに起因すると思われる。

図 19 フランジ厚さの違いによる引張大変形特性

図 20 スケールの違いによる引張大変形特性

(4)引張経験前後の基本特性変化

図 21 と図 22 に異なるフランジ厚さとサイズの引張前後の基本特性の変化を示す。鉛直剛性については、若干の変動が見られるが、水平剛性についての変動は非常に小さいことが分かる。フランジ厚さ、スケールの影響も小さいと思われる。

図 21 基本特性試験での鉛直剛性の変化

図 22 基本特性試験での水平剛性の変化 ($\gamma = \pm 200\%$)

(5)フランジの変形の検討

図 23 にオフセット引張圧縮試験結果で得られるフランジ中心、中央部およびボルト近傍のフランジ変形量を示す。最大変形はフランジ中心で、外周に向かって変形量は小さくなっている。

図 23 フランジの変形量と時間関係

フランジを単純な円板と仮定し、周辺は単純支持、同心円(連結鋼板部分)に等分布荷重 p が作用しているモデルを考えると、フランジの面外変形量は次式で与えられる。

$0 \leq r \leq b$ のとき

$$\delta = \frac{pb^4}{16D} \left[\frac{r^4}{4b^4} - \frac{4a^2 - (1-\nu)b^2}{2(1+\nu)a^2} \left(\frac{r}{b} \right)^2 - \left(2 \frac{r^2}{b^2} + 1 \right) \ln \frac{b}{a} + \frac{4(3+\nu)a^2 - (7+3\nu)b^2}{4(1+\nu)b^2} \right] \quad \dots (1)$$

$b \leq r \leq a$ のとき

$$\delta = \frac{pb^4}{16D} \left[\frac{1}{2(1+\nu)} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \left\{ 2(3+\nu) \frac{a^2}{b^2} - (1-\nu) \right\} - \left(1 + \frac{2r^2}{b^2} \right) \ln \frac{a}{r} \right] \quad \dots (2)$$

ここで $D = Eh^3 / \{12(1-\nu^2)\}$ 、 E : ヤング率、 ν : ポアソン比、 h : 板厚、 a : ボルトとフランジ中心の距離および b : 連結鋼板半径である。

図 24 に異なるフランジ厚さの変形量(理論値)と実測値を示す。実測値に比べ、理論値が大きいことが分かる。そこで、連結鋼板のフランジの上側に出ている部分(高さ t_r')の体積をフランジ円周方向に均等に振り分けた“等価なフランジ厚さ”により理論値を計算した。そのときの等価フランジ厚さの増分 Δt は次式で与えられる。

$$\Delta t = \left(\frac{D_r}{D_{fp}} \right)^2 t_r' \quad \dots (3)$$

ここで、 D_r : 連結鋼板直径、 D_{fp} : フランジボルト PCD である。ゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ と $\phi 1000\text{mm}$ の t_r' は、それぞれ 12 と 20mm である。

板厚 h を式(3)を考慮して厚くした結果を図 25 に示す。各フランジ位置での変形量の大きさと円周方向の変形量の分布もよく一致していることが分かる。図 26 にゴム直径 $\phi 1000\text{mm}$ の結果と $\phi 500\text{mm}$ の実測値をスケール倍(2 倍)したときの値を示す。各実測値とも理論値に良い一致を示す。このことから、等価なフランジ厚さを考慮することでフランジの変形を模擬できることが分かり、スケール則も適用可能であると思われる。

フランジと積層ゴムを単純な直列ばねと仮定し、実測したフランジ変形量から、積層ゴム本体(フランジを除く)の引張剛性を求めることにした。フランジの変形量はフランジ中心とフランジ中央部の平均値を用いた。その結果を表 3 に示す。積層ゴムは均一に引張られていない

図 24 面圧 -1.0N/mm^2 におけるフランジの変形(ゴム直径 $\phi 500$)

図 25 連結鋼板を考慮したフランジの変形(ゴム直径 $\phi 500$)

図 26 連結鋼板を考慮したフランジの変形(ゴム直径 $\phi 1000$)

表 3 積層ゴム本体の見かけの剛性の算出

フランジ厚さ mm	全体の引張剛性 MN/m	フランジ変形の 平均値 mm	鉛直荷重 kN	フランジの剛性 MN/m	積層ゴムの剛性 MN/m
20	84	0.18	102	300	193
25	81	0.15	103	438	130
36	129	0.07	127	2318	146

ため、見かけの剛性ではあるが、ある一定値に収束する傾向にあることが分かる。

5.まとめ

天然ゴム系積層ゴムについて、引張試験を実施し、フランジ厚さとスケールの影響およびフランジの変形について検討し、以下の結果が得られた。

- (1) オフセットせん断引張一圧縮試験により得られた結果から、引張剛性はフランジの厚みに対し敏感であることがわかった。
- (2) 引張せん断試験では、引張面圧 -1.0N/mm^2 で鉛直方向に積層ゴムが伸びあがっていく傾向がある(引張せん断時の鉛直ひずみで 10~20%に相当)が、水平剛性に及ぼす影響は小さい。また水平剛性はフランジの厚みには影響されない。
- (3) ゴム直径 $\phi 500\text{mm}$ と $\phi 1000\text{mm}$ の試験結果から、微小引張領域の特性は概ね一致することが分かった。
- (4) オフセットせん断引張一圧縮試験、単純引張試験の結果からフランジが厚いほど弾性勾配が大きくなることから、フランジがある程度薄いほうが積層ゴム本体への影響が小さいと考えられる。ただ、どの程度まで薄くすることが可能であるかは積層ゴムの局部ひずみや局部応力に着目した検討が必要であろう。
- (5) 引張経過後の基本特性(鉛直・水平剛性)は、保持される。
- (6) フランジ変形量は、等価なフランジ厚さを考慮することで簡単なモデルを用いて推定可能である。

今後、フランジの引張変形について、積層ゴムの詳細な仕様を取り入れた FEM 解析などを実施することにより、フランジの設計法の提案が可能であると考えられる。

(参考文献)

- 1) 小崎, 藤田他: 超高層免震建物に適用する天然系積層ゴムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp639 - pp640, 2000
- 2) Gent, A.N.: Elastic Stability of Rubber Compression Springs, Journal Mechanical Engineering Science, pp318 - pp 326, 1964
- 3) 高山: 免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界特性, 日本建築学会技術報告集, pp160 - pp165, 1995
- 4) 大鳥: 積層ゴム免震要素の引張許容応力設定に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp535 - pp536, 1997

[2001年10月19日原稿受理 2002年2月18日採用決定]