

天然ゴム系積層ゴムの限界性能曲線

加藤隆一（倉敷化工株式会社，kato@kuraka.co.jp）

岡研二郎（倉敷化工株式会社，okaken@kuraka.co.jp）

高山峯夫（福岡大学工学部建築学科，mineot@fukuoka-u.ac.jp）

免震構造の普及とその適用範囲の拡大により、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が現れている。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し、反対側の柱には常時荷重の2～3倍程度の圧縮軸力が作用する可能性があるとの報告¹⁾がある。このことから、地震時の圧縮方向の面圧変動や引張方向の変形を含んだ広い領域に対し、破断限界まで含めた性能を示す限界曲線の把握が必要とされている。天然ゴム系積層ゴムについては、種々の特性を評価する研究が行われ、その性能が明らかとなってきたが、さらなる適用範囲の拡大のため、限界性能に関する研究が行われているところである。積層ゴムの限界特性についての研究は、Gent²⁾、藤田³⁾、高山⁴⁾らにより、理論的・実験的に進められてきたが、サイズの大きい積層ゴムについては、試験機性能の制約を受けるため、試験データが少なく、圧縮破壊試験に至っては高山・多田⁵⁾によって行われた数例のみである。また積層ゴムの性能評価用の統一された試験方法は規定されていないのが現状である。

そこで、本報では天然系積層ゴムについて、積層ゴムの限界特性を検証するための有効な試験方法を提案し、それに基づいて積層ゴムの限界性能曲線を求めることを目的としている。天然ゴム系積層ゴムの試験体は、ゴム直径 500～1000mm、全てのサイズとも形状係数 $S_1=33$ 、 $S_2=5.1$ の相似形状のものを使用し、ゴム材料のせん断弾性率は0.29、0.34、0.39 および 0.44N/mm^2 の4種類とした。限界性能を求めるための3種類の異なる評価試験は(1)所定のせん断変形を与えた状態からの圧縮・引張試験(オフセット圧縮・引張試験)、(2)所定の圧縮・引張荷重を載荷した状態からのせん断変形試験(圧縮せん断試験)および(3)所定の圧縮荷重を載荷した状態から一方向に破断または座屈にいたるまで加力する試験(圧縮せん断破壊試験)である。

オフセット圧縮・引張試験では鉛直方向の座屈と破断、せん断破壊試験では、水平方向の座屈を評価し、圧縮せん断試験では、水平ばね定数の面圧依存特性から推定される座屈面圧を評価した。全ての鉛直方向圧縮側の試験結果を3種類の評価方法により、座屈面圧とせん断ひずみの関係を求め、せん断弾性率 G により無次元化した面圧 (σ/G) について整理した図を以下に示す。オフセット圧縮試験と圧縮せん断破壊試験からは限界曲線 1 (終局限界)、圧縮せん断試験からは限界曲線 2 (安定限界)を得ることができた。

今回の試験から、引張・圧縮限界曲線を求める過程において、得られた知見を以下に示す。

圧縮せん断試験から推定されたせん断の座屈面圧は積層ゴムのサイズに依存しない。

オフセット圧縮と圧縮せん断破壊試験により求めた限界曲線の傾向から、圧縮方向の座屈とせん断方向の座屈は、同等の現象として扱うことが可能である。

試験体の二次形状係数 S_2 が5程度で相似形状である場合、各評価方法により算定した座屈面圧はせん断弾性率により無次元化することで、サイズ・せん断弾性率に依存しないパラメータとして評価可能である。

圧縮せん断とオフセット圧縮・圧縮せん断破壊試験により評価した座屈限界は、それぞれ、積層ゴムの安定限界と終局限界に大別することが可能である。

以上の結果をふまえ、今回提案した3種類の限界性能評価方法は限界曲線を求める上で、有効な手法であることが確認できたと考える。

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(その1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp639-pp640，2000。

2)A.N.Gent：Elastic Stability of Rubber Compression Springs,Journal Mechanical Engineering Science, pp318 - pp 326, 1964.

3)藤田他：建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1～3報)，日本機械学会論文集，pp71-pp81・pp2618-pp2623，1987・1988

4)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。

5)高山・多田他：積層ゴムアイソレータの限界耐力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(その1～2)，pp593-pp596，1991

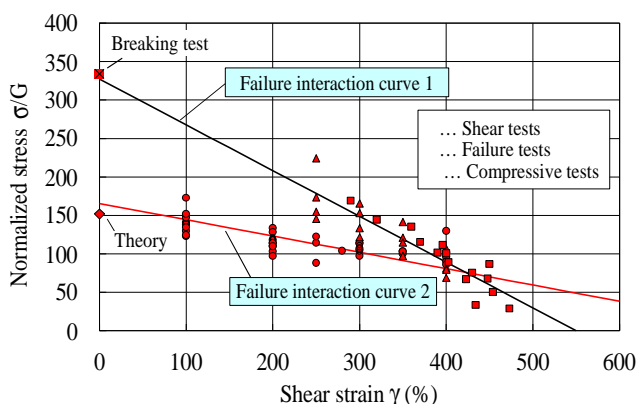


Fig.1. Relation between normalized stress and shear strain.

天然ゴム系積層ゴムの限界性能曲線 (FAILURE INTERACTION CURVE OF NATURAL RUBBER BEARINGS)

加藤 隆一¹, 岡 研二郎¹, 高山 峯夫²

¹ 倉敷化工株式会社, 産業機器事業部
Ryuichi Kato, Kurashikikako Co, Ltd., kato@kuraka.co.jp

¹ 倉敷化工株式会社, 産業機器事業部
Kenjiro Oka, Kurashikikako Co, Ltd., okaken@kuraka.co.jp

² 福岡大学工学部建築学科, 助教授 工博
Mineo Takayama, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuoka University, mineot@fukuoka-u.ac.jp

SUMMARY

The application of seismic isolation technology is spread to various structures, and the most of them use laminated rubber bearings. The research of ultimate characteristics of laminated rubber bearings has been advanced theoretically and experimentally, but there are no standard testing methods for estimating them. In this paper, several testing methods for estimating the ultimate capacity of the Natural Rubber Bearings were present and the failure interaction curve of them is clarified according to proposed methods.

キーワード: 天然ゴム系積層ゴム, 限界性能曲線, 座屈面圧

Key words: Natural Rubber Bearings, Failure Interaction Curve, Buckling Stress

1 はじめに

兵庫県南部地震による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、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 棟以上の免震建築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。

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し、反対側の柱には常時荷重の 2 ~ 3 倍程度の圧縮軸力が作用する可能性があるとの報告¹⁾もある。このことから、地震時の圧縮方向の面圧変動や引張方向の変形を含んだ広い領域に対し、破断限界まで含めた性能を示す限界曲線の把握が必要とされている。

天然ゴム系積層ゴムについては、種々の特性を評価する研究が行われ、その性能が明らかとなってきたが、さらにその適用範囲を広げるため、限界性能に関する研究が行われているところである。積層ゴムの限界特性についての研究は、Gent²⁾、藤田³⁾、高山⁴⁾らにより、理論的・実験的に進められてきたが、サイズの大きい積層ゴムについては、試験機性能の制約を受けるため、試験データが少なく、圧

縮破壊試験に至っては高山・多田⁵⁾らによって行われた数例のみである。また積層ゴムの性能評価用の統一された試験方法は規定されていないのが現状である。

そこで、本報では天然系積層ゴムについて、積層ゴムの限界特性を検証するための有効な試験方法を提案し、それに基づいて積層ゴムの限界性能曲線を求めることを目的としている。試験方法として、(1)所定のせん断変形を与えた状態からの圧縮・引張試験、(2)所定の圧縮・引張荷重を載荷した状態からのせん断変形試験および(3)所定の圧縮荷重を載荷した状態から一方向に破断または座屈にいたるまで加力する試験の異なる 3 種類の評価試験を実施し、その特性の比較・検討を行った結果について報告する。

2 試験体

図 1 に本試験で用いる積層ゴムの外観図を示す。積層ゴム形状は、ゴム直径 D 、ゴム一層厚さ t_r 及びゴム層数 n により決定される。これらの形状は、1 次形状係数 $S_1 = (\text{ゴムシート拘束面積} / \text{ゴムシート自由表面積}) = D / (4t_r)$ 、2 次形状係数 $S_2 = (\text{ゴム直径} / \text{全ゴム層厚さ}) = D / (n \times t_r)$ で

まとめられる。 S_1 は、積層ゴムの高剛性と耐力をもたらす中間鋼板の拘束効果を表す指標であり、面圧によるばね定数の変化(面圧依存特性)に影響を与える因子である。また、 S_2 は積層ゴムの曲げの影響と許容変形に影響を与える因子である。本試験で用いた試験体は、ゴム直径 500~1000mm で、全てのサイズとも $S_1=33$ 、 $S_2=5.1$ の相似形状である。その試験体の諸元を表1に示す。また、ゴム材料はせん断弾性率 G が 0.29、0.34、0.39 および 0.44 N/mm^2 の4種類である。本試験では、試験体サイズの影響を考慮するために、サイズごとに4種類のゴム材料を組み合わせ特性を評価した。

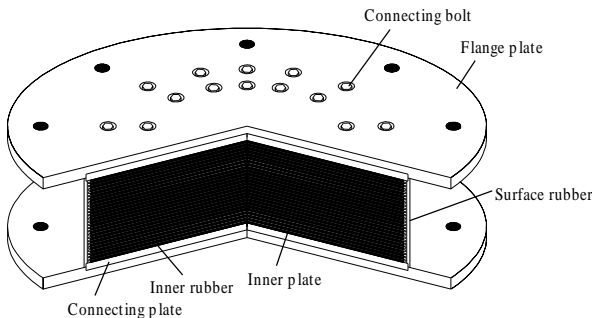


Fig.1. Feature of Natural Rubber Bearings.

Table1: Specification of NRB

| Diameter of a rubber sheet : D (mm) | 500 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|--|------|-------|-------|-------|-------|
| Thickness of a rubber sheet : t_R (mm) | 3.8 | 5.3 | 6.0 | 6.8 | 7.5 |
| Numbers of rubber sheets : n | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| Total thickness : $n \times t_R$ (mm) | 97.5 | 137.8 | 156.0 | 176.8 | 195.0 |
| Shape factor : S_1 | 33 | | | | |
| Shape factor : S_2 | 5.1 | | | | |

3 試験方法

3.1 試験機

試験機には、鉛直方向と水平方向に変形を与えることができる2軸試験機を使用した。試験機の仕様は、鉛直荷重 15MN、水平荷重 4MN、水平変位 ± 500 mm である。測定方法は水平荷重、鉛直荷重、水平変位および鉛直変位を基本とした。

3.2 試験条件

(a) オフセット圧縮・引張試験

試験体に所定のせん断ひずみに相当する水平変位を与え、鉛直圧縮方向と引張方向に変形を加える。圧縮側については、せん断ひずみ 0、100、150、200、250、300、350 および 400% の8水準に対して、鉛直荷重を最大 15MN まで与えた。そのときの鉛直ばね特性に基づいて、座屈傾向が見られた面圧から座屈限界を評価する。

引張側では、せん断ひずみ 0、100、200 および 300% の4水準に対して、鉛直引張ひずみを 5 10 25 50 75 100% と与えるひずみを漸増させ、各ひずみについて 10 回の繰り返し加力を与えた。

(b) 圧縮せん断試験

試験体に所定の面圧となる鉛直荷重を与え、所定のせん

断ひずみとなる水平変位を与えたときのばね定数を測定する。面圧を最小 4.9~最大 29.4 N/mm^2 、せん断ひずみを最小 ± 50 ~最大 ± 400 % まで変化させたときの水平ばね特性により、面圧に対する水平ばね定数の変化(面圧依存特性)を評価し、座屈限界を推定する。試験時の面圧とせん断ひずみの組み合わせを表2に示す。各試験体サイズのせん断ひずみ・面圧設定条件の最大値は、試験機の載荷能力の限界があるため、表2の点線のようにになる。表内の数値は加力の繰り返し数を示す。

Table2: Test conditions of shearing tests

| | Compressive stress σ (N/mm^2) | Shear strain γ (%) | | | | | | |
|--|--|---------------------------|-----|-------------|-----|------------|------------|-----|
| | | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 |
| | 4.9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 9.8 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 14.7 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 19.6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 24.5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 29.4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | | | | $\phi 900$ | | $\phi 700$ | $\phi 500$ | |
| | | | | $\phi 1000$ | | $\phi 800$ | | |

(c) 圧縮せん断破壊試験

試験体に一定面圧となる鉛直荷重を与えたまま、水平方向に座屈または破断するまで単調にせん断変形させる。そのとき与えた面圧と座屈または破断ひずみを用いて、座屈限界を評価する。与える面圧は 9.8、14.7、19.6、29.4、39.2 および 49.0 N/mm^2 の6水準を用いた。

(a)と(c)の試験については、試験体に高面圧となる鉛直荷重を課すため、サイズの小さなゴム直径 500mm の試験体を用いた。

3.3 限界特性の評価方法

(a) オフセット圧縮・引張試験

圧縮側については、試験体に所定のせん断ひずみを与えた状態から、単調に鉛直荷重を与えたときの鉛直荷重 変位関係は図2ように得られる。この履歴曲線から、鉛直剛性を算出し、図2のように鉛直剛性 変位関係に整理する。このときの最大鉛直剛性 K_{vmax} の 0.9 倍の剛性に対応する鉛直荷重を圧縮の座屈面圧 σ_{ver} として求めた。限界特性評価パラメータは与えたせん断ひずみと圧縮の座屈面圧である。

引張側は、所定のせん断ひずみを与えた状態で、鉛直方向に引張加力を与えた時、破断に至ったひずみによりその性能を評価した。限界特性評価パラメータは、せん断ひずみと破断ひずみである。

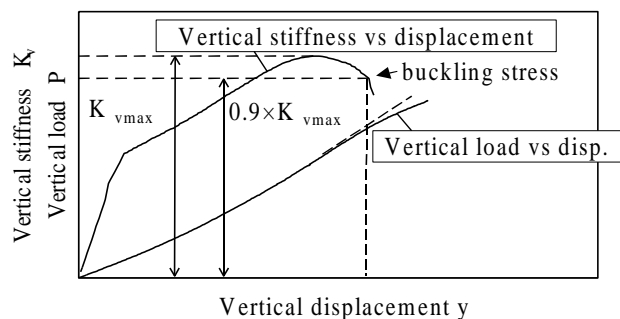


Fig.2. Evaluation of compressive tests.

(b) 圧縮せん断試験

圧縮せん断特性による評価は、試験により得られる履歴曲線から水平ばね特性を求め、評価する。水平ばね特性は、高せん断ひずみ領域でのハードニングの影響を受けにくく、面圧の増加にともなう水平ばね特性の低下傾向が明確に表現できる接線剛性を用いる。接線剛性は、3サイクル目の水平ばね特性のせん断ひずみ -100%と+100%の2点を結んだ直線の傾き(往復)の平均値として算出する。

接線剛性を求め、面圧と剛性の関係をプロットすると図3のような関係となる。水平剛性と面圧依存性に関する理論式⁶⁾は、式(1)で与えられる。

$$K_H / K_{H0} = 1 - (\sigma / \sigma_{Hcr})^2 \quad (1)$$

ここで、 K_{H0} : 面圧が0のときの接線剛性、 σ_{Hcr} : せん断の座屈面圧である。試験結果に上式を適用することで、せん断の座屈面圧 σ_{Hcr} を推定することができる。 σ_{Hcr} は図3より水平剛性が0となるときの面圧に相当することが分かる。限界特性の評価パラメータはせん断ひずみと推定されたせん断の座屈面圧である。

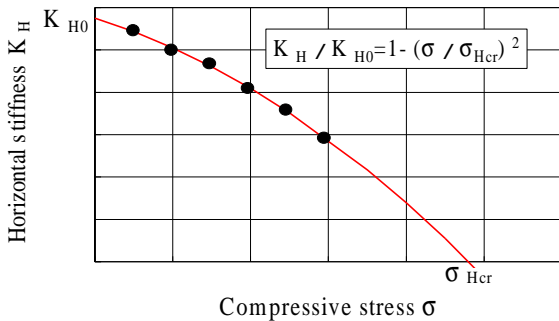


Fig.3. Evaluation of shearing tests.

(c) 圧縮せん断破壊試験

一定面圧となる鉛直荷重を与え、水平方向に単調に変形を与えたとき、試験体が座屈に至ったとき、すなわち水平剛性が0となるせん断ひずみを座屈ひずみ γ_b と定義した。また、座屈しない場合は、破断点により評価した。限界特性評価パラメータは与えた面圧と座屈ひずみである。

4 試験結果

本試験では4種類のゴム材料について評価を行ったが、ほぼ同じ傾向の結果が得られたので、せん断弾性率 0.34 N/mm²の結果を中心に報告する。

4.1 オフセット圧縮・引張試験

(a) 圧縮

図4に、オフセットせん断ひずみ0~400%に対する、圧縮応力を最大70N/mm²まで課したときの圧縮履歴特性を示す。せん断ひずみの増加にともない鉛直剛性は低下する傾向にあることがわかる。オフセットせん断ひずみ250%以

上で、履歴曲線はある一定応力から緩やかに勾配が変化し、座屈に至っていることが分かる。ただし、70N/mm²は試験機として、最高面圧を示し、せん断ひずみ200%以下では座屈していないことを示している。

図4に示す履歴曲線から評価方法3.3(a)により、鉛直剛性から圧縮の座屈面圧 σ_{vcr} を算出した。その圧縮の座屈面圧をせん断ひずみについて整理すると図5のようになる。オフセット圧縮試験から得られる圧縮限界曲線は点線のようになる。

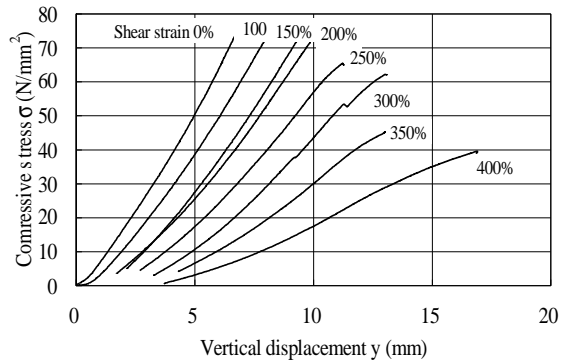


Fig.4. Vertical characteristics by compressive tests (G0.34).

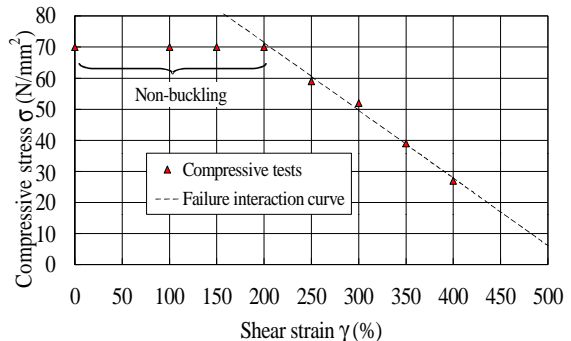


Fig.5. Relation between buckling stress and shear strain (G0.34).

(b) 引張

図6にオフセットせん断ひずみ100%における、引張ひずみ5~100%の引張履歴特性を示す。引張ひずみ5、10%における履歴曲線はほぼ線形であるが、25%を越えるとある一定ひずみから履歴曲線が折れ曲がったようになり降伏したような性状を示す。また図7にせん断ひずみ0、100および200%における引張ひずみ100%の履歴曲線を示す。せん断ひずみが大きくなると、履歴曲線の折れ曲がり点の引張応力は低下し、履歴曲線の勾配は増加する傾向にあるが、破断しなかった。せん断ひずみ300%では引張ひずみ48%で破断に至った。

今回の結果とせん断ひずみ0%における引張破断試験結果(参考値:破断引張ひずみ303%)を図8のように整理した。引張破断限界は、2つの引張破断結果と圧縮せん断試験における平均的な破断ひずみ400%を考慮すると図8によ

な限界曲線を得ることができる。また、使用限界は安全側を考慮し、図に示すように設定することができる。

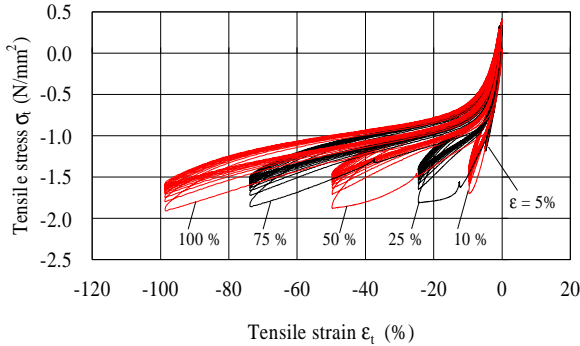


Fig.6. Tensile stress-strain curves under shear strain 100% (G0.44).

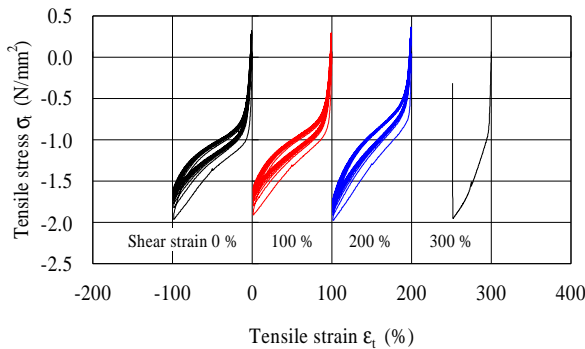


Fig.7. Tensile stress-strain curves under shear strain 0,100,200 and 300% (G0.44).

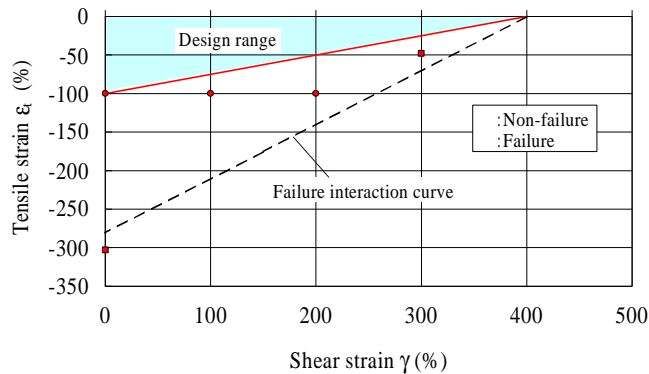


Fig.8. Results for tensile tests and failure interaction curve.

4.2 圧縮せん断試験

ゴム直径 500mm の試験体について、面圧 19.6、24.5 および 29.4 N/mm²、せん断ひずみ ± 300、350 および 400% のときの履歴曲線例を図 9 に示す。面圧が大きくなるに従い、履歴ループの面積は徐々に大きくなる傾向にある。また、履歴曲線の 0 変位近傍の線形性が崩れるようになることが分かる。

面圧 4.9 ~ 29.4 N/mm²、せん断ひずみ 100 ~ 400% のとき得られる接線線剛性 K_H を求め、面圧 9.8N/mm²、せん断ひずみ ± 100% の際の剛性を基準とした剛性比として、面圧

について整理すると図 10 のようになる。面圧・せん断ひずみが増加することにより、剛性が低下傾向にあることが見て取れる。この面圧と剛性の変化が式(1)に従うと仮定し、各せん断ひずみごとに近似理論式を算出した。この近似曲線を図 10 に点線で示す。ただし、剛性は、面圧 9.8N/mm²、せん断ひずみ 100% の剛性を基準とした接線剛性比として示す。この近似理論式から、水平剛性 $K_H=0$ となる点を各せん断ひずみにおけるせん断の座屈面圧 H_{Cr} とした。

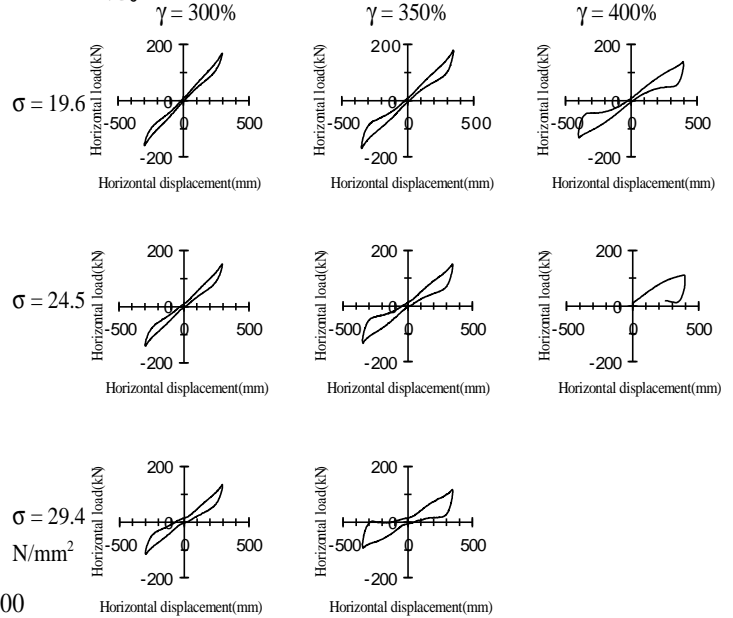


Fig.9. Horizontal load-displacement curves (G0.34).

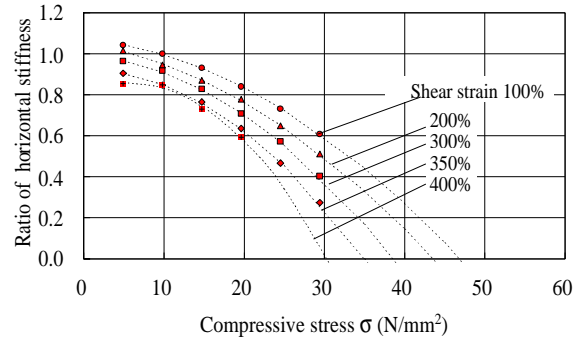


Fig.10. Relation between K_H and σ (G0.34).

ゴム直径 500、700、1000mm のせん断の座屈面圧 H_{Cr} をせん断ひずみについて整理すると、図 11 のようになり推定されたせん断の座屈面圧 H_{Cr} は、試験体サイズに依らず、ほぼ一致することが分かる。また、圧縮せん断試験により得られる限界線は同図に示すようになる。座屈面圧の理論式³⁾

$$H_{Cr} = S_1 S_2 G \quad (2)$$

により算定した理論値(=0.9)を × 印で図 11 に示す。本

手法により評価した限界曲線の延長上にあることが分かり、良い一致を示している。

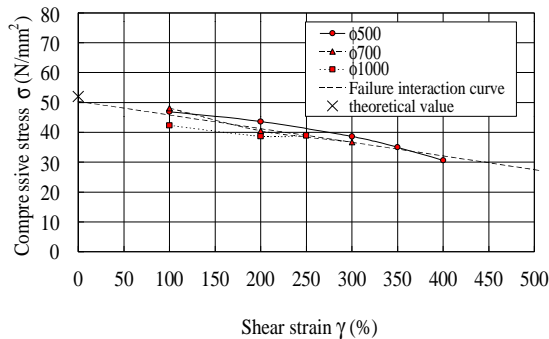


Fig.11. Relation between buckling stress and shear strain (G0.34).

4.3 圧縮せん断破壊試験

図 12 に面圧 9.8 ~ 49.0N/mm²において、座屈または破断に至った時の履歴曲線を示す。面圧の上昇とともに座屈傾向が顕著になり、座屈ひずみ ϵ_b は低下する傾向にあることが分かる。図 12 の結果を面圧と座屈ひずみについて整理すると図 13 のようになる。同図に圧縮せん断破壊試験から得られる限界曲線を示す。

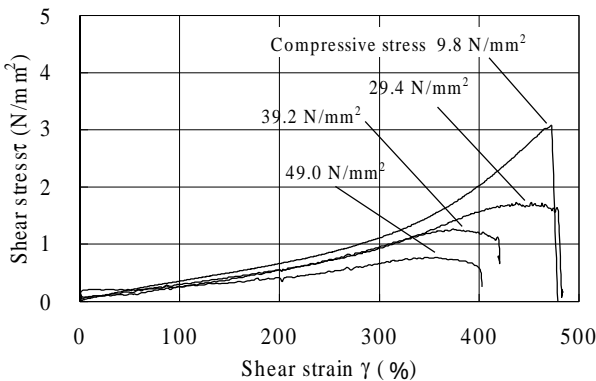


Fig.12. Shear stress-strain curves by failure tests (G0.34).

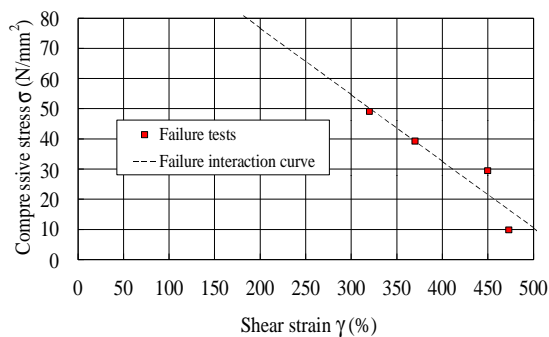


Fig.13. Relation between compressive stress and buckling strain by failure tests (G0.34).

4.4 限界曲線の考え方

(a) 圧縮

4.1 オフセット圧縮試験、4.2 圧縮せん断試験により得られた座屈面圧と 4.3 圧縮せん断破壊試験の試験面圧を各ゴム材料のせん断弾性率で無次元化した面圧(σ/G)について整理しなおすと、図 14 のようになる。

オフセット圧縮試験と圧縮せん断破壊試験結果は同じ直線上に分布していることがわかる。このことは、水平方向と鉛直方向と評価している方向は異なるものの、積層ゴムの特性をほぼ同等に扱うことが可能であることを示唆していると思われる。また、全ての評価試験より算定した限界面圧はゴム材料のせん断弾性率に依らず、ほぼ同じ直線上にあることが分かる。これは、試験体形状が相似であるため、面圧をせん断弾性率により基準化して評価することが可能であることを示している。

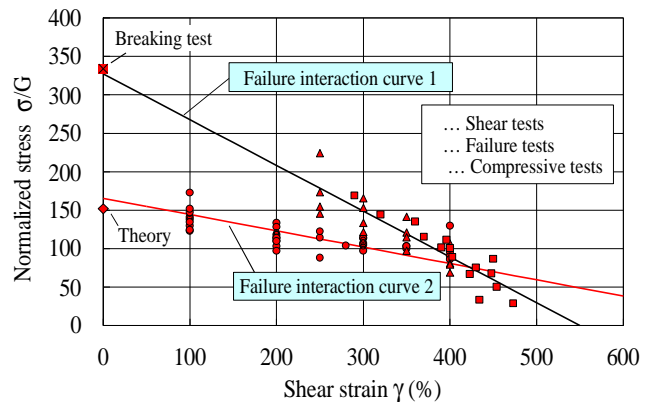


Fig.14. Relation between normalized stress and shear strain.

オフセット圧縮試験と圧縮せん断破壊試験から評価した座屈限界は圧縮せん断試験により評価した限界に比べかなり高いことが分かる。これは圧縮せん断試験より評価した座屈面圧が、積層ゴムの復元力特性を比較的安定に保持できる領域を評価しているのに対し、オフセット圧縮試験と圧縮せん断破壊試験より評価した座屈面圧が、積層ゴムとしての終局性能を評価していることに起因していると考えられる。

また、圧縮せん断試験から得られる限界線 1 のせん断ひずみ 0%における値は、式(2)より得られる理論値と一致し、オフセット圧縮・圧縮せん断破壊試験より得られるせん断ひずみ 0%における値は、圧縮破壊試験結果⁵⁾に良い一致を示す。

(b) 引張 - 圧縮限界曲線

引張方向については座屈などの不安定現象はみられないため、引張方向の破断限界を把握した上で設計範囲を決定することが必要となる。特に引張は引張荷重が小さい代わりに変形能力が高い、そのため引張側については、その変形量である引張ひずみにより評価することが適切であると思われる。従って、今回の試験結果 4.1(b)で求めたように破断限界または設計限界を決めることができる。

圧縮限界については、本手法などを用い、破断限界を決定し、安全率をみた安定限界変形(設計限界)を考え、それに基づき設計範囲を決めることができる。図 15 に引張・圧縮方向の限界曲線の概念図を示す。

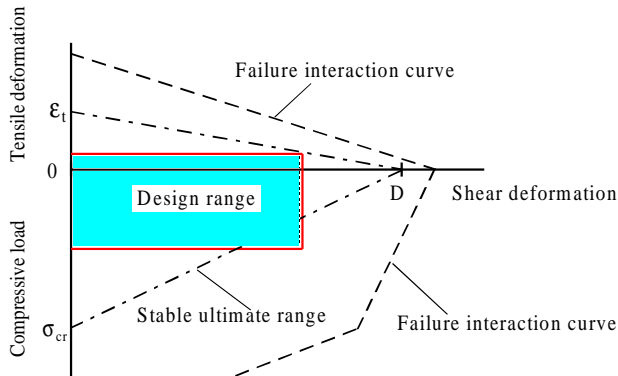


Fig.15. Concept of failure interaction curve.

5 まとめ

天然ゴム系積層ゴムを対象とし、(1)オフセット圧縮・引張、(2)圧縮せん断および(3)圧縮せん断破壊試験の異なる3種類の試験方法により、引張・圧縮限界曲線を求めた。今回の試験において得られた知見を以下に示す。

圧縮せん断試験から推定されたせん断の座屈面圧は積層ゴムのサイズに依存しない。
 オフセット圧縮と圧縮せん断破壊試験により求めた限界曲線の傾向から、圧縮方向の座屈とせん断方向の座屈は、同等の現象として扱うことが可能であると考えられる。
 試験体の二次形状係数 S_2 が 5 程度で相似形状である場合、各評価方法により算定した座屈面圧はせん断弾性率により無次元化することで、サイズ・せん断弾性率に依存しないパラメータとして評価可能であると考えられる。

圧縮せん断とオフセット圧縮・圧縮せん断破壊試験により評価した座屈限界は、それぞれ、積層ゴムの安定限界と終局限界に大別することが可能であると考えられる。各限界のせん断ひずみ 0%における実験値は、それぞれ理論値と圧縮破壊結果に良い一致を示す。

以上の結果をふまえ、今回提案した3種類の限界性能評価方法は、限界曲線を求めるうえで有効な手法であることが確認できたと考えられる。しかしながら、試験機の制約上、小さなサイズの試験体のみ用いている結果については、スケール効果を確認する必要があるため、今後実大サイズの試験体による検証が必要である。また、今回とりあげた天然ゴム系積層ゴム以外の積層ゴムについて、提案した手法が適用可能であるかについても検討が必要だと思われる。

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(その1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp639-pp640，2000.
- 2)A.N.Gent：Elastic Stability of Rubber Compression Springs,Journal Mechanical Engineering Science, pp318 - pp 326, 1964.
- 3)藤田他：建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1～3報)，日本機械学会論文集，pp71-pp81・pp2618-pp2623，1987・1988
- 4)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.
- 5)高山・多田他：積層ゴムアイソレータの限界耐力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(その1～2)，pp593-pp596，1991
- 6)Buckle,I.G.andLiu,H：Stability of Elastomeric Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, ATC-17-1, Vol.1, 1993