

京都大学大学院 学生員 ○松島 弘
京都大学工学研究科 正会員 五十嵐晃
京都大学工学研究科 正会員 党 紀

1. はじめに

発展途上国における地震災害対策の一環として建物や橋梁への免震技術の普及を図る上で、免震支承の低コスト化は、重要な課題の一つとなっている。この観点から、自動車用廃タイヤを矩形状に切り出すことで作製される、廃タイヤゴムパッド (Scrap Tire Rubber Pad, 以下 STRP) の低コスト免震材としての利用が提案され、その適用性を決定する最も重要な特性値である限界せん断ひずみの実験的・理論的検討が行われている。しかしながら、矩形の形状のため、STRP の性能特性の水平面内の載荷方向に関する依存性が予想され、免震材としての適用にあたってはその影響を明らかにする必要がある。本研究では、STRP の限界せん断ひずみの載荷方向依存性に着目し、一定面圧作用下での水平せん断の条件での載荷試験を行うとともに、有限要素解析および理論的推定に基づく検討を行った。

2. STRP 免震材の特性

一般的に利用されている自動車用ゴムタイヤは、方向の異なる鋼線群が層を成すようにゴム材料の中に埋め込まれて形成されている。そのため、STRP は構造物重量を支持する際の面圧に対しては鋼線層によるゴムの拘束効果により比較的高い鉛直剛性を発揮する一方、水平力によるせん断変形に対しては剛性が小さい特性を持つ。また、0.12 程度の等価減衰定数に相当するエネルギー吸収性能を持つことが明らかにされており、免震材として望ましい材料特性を有する。

構造物重量の支持性能を確保しつつ所要の水平剛性および水平変形能を得るため、STRP を複数枚重ねて免震

材として使用する。STRP 層数や層間の接着の有無による性能の相違の検討により、STRP が建物の免震材として適用可能であることが確認されている。

STRP を用いた構造設計は、設計地震スペクトルに対応する地震応答による最大せん断ひずみが STRP の許容せん断ひずみ内に収まることを確認することとなる。許容せん断ひずみは、矩形辺方向のせん断変位時の水平変位一荷重関係において、極限荷重となる状態を限界せん断変形性能として考慮した検討が行われている。しかしながら、辺方向とは異なる斜め方向への載荷によるせん断変形については、矩形形状のため等方向性が保証されないため、方向により性能限界が異なることが予想される。

3. STRP 供試体の概要

載荷試験に用いた STRP 供試体は、大型車用ラジアルタイヤを 100mm×100mm の正方形形状に切り出し、上部のトレッド部を削ったものである。図-1 においても観察できるように、STRP の内部にはタイヤの周方向に直行する方向に配置された最下層のカーカス層とそれを基準として $\pm 70^\circ$ の方向に配置された4層のベルト層の5つの鋼線層が配置されている。STRP 内の鋼線層の配置を図-2に示す。

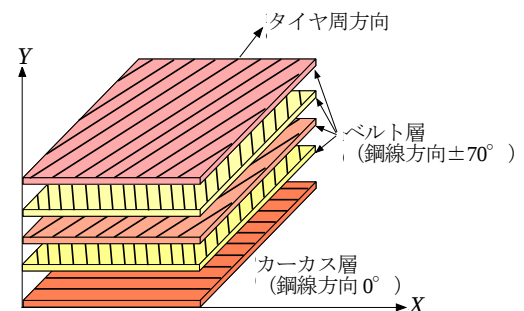


図-2 STRP 内部構造の概要

4. 水平せん断試験

図-3に示すように、STRPを4枚重ね接着したものをSTRP-4と呼び、免震材の供試体とした。4体のSTRP-4を対象に、面圧5MPaに対応する軸力を載荷しながら、



図-1 廃タイヤゴムパッド (STRP)



図-3 STRP-4 供試体と载荷方向

異なる载荷方向（図-2 における X 軸を基準に、各々0°，15°，30°，45°）での水平せん断試験を行った。図-4に、単調载荷実験より得られたせん断応力-せん断ひずみ曲線，および繰返し载荷実験より得られた変位-復元力曲線を示す。単調载荷実験では，载荷角度が辺方向よりも45°方向に近づくほど限界せん断ひずみが増加することが示されている。表-1 に载荷方向ごとの安定限界値を示す。

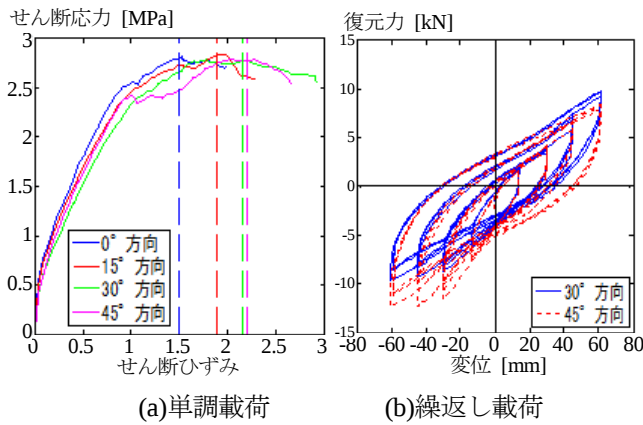


図-4 せん断試験結果

表-1 载荷方向ごとの安定限界値

载荷方向	0°	15°	30°	45°
安定限界	60mm	76mm	86mm	88mm

5. 3次元有限要素解析

3次元有限要素法による载荷方向依存性の解析を試みた。STRP内の鋼線層をrebar要素で表現し，ゴム材料要素へ組み込むことでモデル化を行った。熱分解ガスクロマトグラフィーによりSTRPのゴムを天然ゴムと判定さ

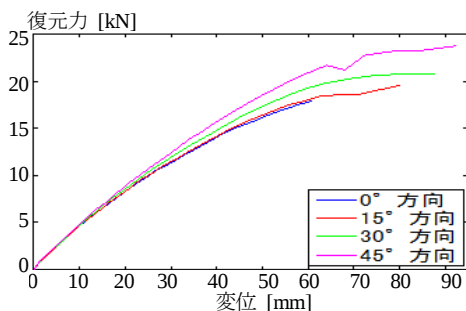


図-5 有限要素解析結果

れているので，構成則には天然ゴムの解析に使われるMooney-Rivlinモデルを用い，ダンベル試験片による一軸引張試験から同定した材料定数を設定している。解析結果を図-5に示す。载荷方向が45°に向けて増加するほど限界せん断ひずみが増加する結果は，実験と整合している。

6. 安定限界の理論的推定

軸力作用下でのせん断変形時にSTRPの水平荷重が極限値に達し水平剛性がゼロとなる限界状態は，軸力による座屈，または回転・浮き上がりによる2つの要因による安定限界のいずれかに対応するものと解釈できる。これら2つのメカニズムによる矩形STRPの斜め方向せん断時の安定限界の理論推定を検討し，実験値と比較することでその適用可能性を検討した。

(1) Haringxの理論に基づく性能限界の推定

Haringxの理論はせん断変形時の積層ゴムの水平剛性や座屈荷重を評価する際に用いられる。せん断変形のない時の座屈荷重 $P_{cr,0}$ と斜め方向のせん断変形を考慮した有効面積 A_r を式(1)に当てはめせん断変形時の座屈荷重 P_{cr} を求め，せん断試験における圧縮応力5MPaで安定限界となるような有効面積およびせん断変位（安定限界値）を求めた。表-2に示すように実験値と理論値は概ね一致し，この方法による理論的推定は適用可能と考えられる。

$$P_{cr} = P_{cr,0} \left[\frac{A_r}{A} \right] \quad (1)$$

表-2 理論値と実験値の比較

载荷方向	15°	30°	45°
実験値	76mm	86mm	88mm
理論値	83mm	84.7mm	85.5mm

(2) 回転・浮き上がりによる性能限界の推定

圧縮力 p とせん断力の回転モーメントの釣り合い式に，斜め方向せん断変位 δ 時の水平復元力を考慮すると δ に関する方程式(2)が得られる。ここに， b は载荷方向長さ， G はせん断弾性係数， t_r はゴム総厚である。これを解くと， $\delta = b$ なる解を得る。この値は座屈による安定限界値よりも大きい値であることから，前述の座屈安定限界により全体の安定性が決定されると結論される。

$$\delta^2 \left(\frac{G}{t_r} \frac{h}{b} \right) - \delta \left(p + \frac{G}{t_r} h \right) + pb = 0 \quad (2)$$