

# 廃タイヤゴムパッド免震材の材料特性と 変形性能の検討

五十嵐 晃<sup>1</sup>・松島 弘<sup>2</sup>・Mishra Huma Kanta<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻修士課程 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:matsushima.hiroshi.73e@st.kyoto-u.co.jp

<sup>3</sup>京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻博士後期課程 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:mishra.kanta.34a@st.kyoto-u.co.jp

発展途上国向け低コスト用の廃タイヤパッドを用いた免震材料の利用が提案されているが、その性能は明確に調査されていない。本研究では廃タイヤパッドの材料同定を熱分解ガスクロマトグラフィーにより行い、変形性能を水平せん断試験と有限要素解析を用いて行った。熱分解ガスクロマトグラフィー分析により廃タイヤパッドの材料を然ゴムであると同定した。せん断試験ではせん断ひずみ100%相当の変形性能を有することを示し、解析結果とも概ね一致する結果が得られた。

**Key Words :** *STRP isolators FEM,Pyrolysis Gas Chromatograph, Mooney-Rivlin model,shear test*

## 1. はじめに

構造物の地震時性能を確保する工学的手法としての免震の基本的な原理は、よく知られている通り、構造物の固有振動周期を長周期化するとともに減衰性能を付加することで、構造物に対する地震作用の影響を低減するものである。我が国等においては橋梁、建物等への適用がの技術規定も整備され広く利用されているのに対して、発展途上国においては、主に経済性との関係から工学的な意味での免震技術の導入は極めて限定的であり、あったとしても重要構造物に限定されているのが実情である。技術的な理由のほか、免震支承など必要資材そのもののコストが発展途上国の一般的な建築物への導入あるいは普及が困難となっている一因である<sup>1)</sup>ことは明らかである。

ゴム材料を用いた免震支承は、鋼板とゴム層を重ねた構造をしたいわゆる積層ゴム支承が主流であるのに対し、経済性を追求する産業上の要請からの新たな種類の免震支承の研究開発は、研究的なアイデアを含め活発に行われている。建物向けのゴム系支承の低コスト化を試みたものとしては繊維補強ゴム支承 (fiber-reinforced elastomeric isolators<sup>2)</sup>) などがその代表である。これとは別の発想で、Turerら<sup>3)</sup>は低コストの免震を実現する方法として、自動

車用廃タイヤを矩形上に切り出して作製される廃タイヤゴムパッド (Scrap Tire Rubber Pad, 以下STRP) を利用することを提案した。廃タイヤゴムは低コストかつ容易に入手可能な材料であること、また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ため、STRPは積層ゴム支承と同様に、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ことに着目したものである。

Turerら<sup>3)</sup>はSTRPを重ねて免震材として載荷試験や振動試験を行った結果に基づき、タイヤの製品ブランドにより異なる圧縮応力および水平せん断時のせん断応力やせん断変形の限界値、パッド形状の方向性による水平剛性の相違や免震効果などを明らかにしたが、上記のような様々な特性の決定要因やメカニズム、適用範囲あるいは判断基準を明らかにするには至っていない。したがって、実際にSTRPを免震材料として用いる場合に発現が期待できる性能には不明な点が多く、より詳細を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、STRPを用いた免震材を作製し、熱分解ガスクロマトグラフィーによるタイヤゴム材料の

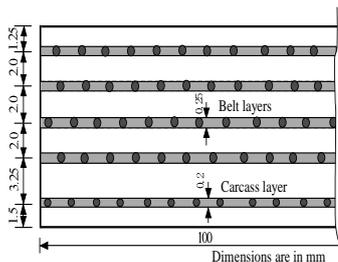
同定および、ダンベル試験片を使った一軸引張試験により得られた材料定数を用いることで、複数枚重ねられたSTRPの面圧作用下のせん断変形時の挙動や限界値をどの程度説明できるのかを調査するため、基本的な性能を調べる載荷試験と有限要素解析を並行して行い、それら間の整合性および免震材としての性能を検討した。

## 2. STRP供試体の概要

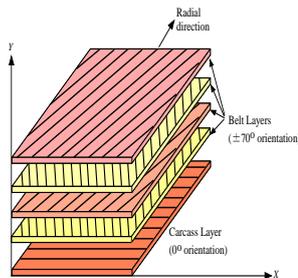
図-1に示すSTRP供試体を作成し、本検討の対象とした。タイヤ再生のため回収された大型車用ラジアルタイヤの廃タイヤを調達し、矩形に切り出し加工を行いパッド状の形状とする。今回は100mm×100mmの正方形とした。今回用いたタイヤはブリジストンタイヤの385/65R22である。図-1でも観察できるように、STRPの内部には5つの鋼線層が確認され、これらの鋼線はねじられたひとつのこよりのように構成されている。そのSTRP内の配置の概要を図-2に示す。タイヤの円周に直交する方向に配置された最下層のカーカスコードを基準として、その上（タイヤの外周側）に4層のプレーカーコード（ベルト層）が配置されこれらは交互に $\pm 70^\circ$ の角度の方向を成している。表-1に、STRPの諸元の数値を示す。



図-1 STRP供試体



(a) 断面寸法の概要



(b) 鋼線層の概要と方向性

図-2 STRPの内部構造の概要

表-1 STRP諸元

形状	幅	100mm
	一層の厚さ	12mm
	総厚さ	72mm
鋼線	断面積（カーカス）	0.44mm <sup>2</sup> /本
	断面積（ベルト）	0.63mm <sup>2</sup> /本
	ヤング係数	200GPa
	ポアソン比	0.3

## 3. ゴム材料の同定

一般的に自動車用タイヤには天然ゴム（NR）、合成ゴム（SBRなど）、あるいは双方が用いられており、今回使用したSTRPのゴム材料を把握する必要がある。廃タイヤをSTRPに加工する際に最外部のベルト層より上側の部分よりゴム試料を採取し、熱分解ガスクロマトグラフィー（Py-GC）による材料分析を行った。

Py-GCはゴムを含むポリマー材料の同定法としてJIS規格K6231においても規定されている手法であり、熱でポリマーを分解し気体状態にした低分子成分をキャリアガスに乗せて分離カラム中に展開することで分離を行う手法である。試料が微量でよく、試料によってカラムを取り換えることで、精度のよい分析が行えるのが特徴である。図-3にPy-GCの設備構成を示す。Py-GCを行う際にはカラムの選択が重要であり、今回用いたカラムは、試料との相互作用によりピークを分離する固定相に微極性の5%ジフェニルバジメチルポリシロキサンを使用し、長さは30mのものであった。試料成分はカラムの一端より導入され、沸点の低い順にカラム内を通過し分離されるため、カラム他端位置での水素炎イオン化検出器（FID）の出力の時間データがクロマトグラムとして得られる。これを既知の物質の標準クロマトグラムと比較・分析することにより、試料の組成を判定する。

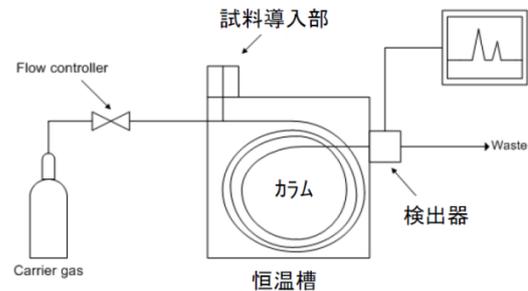
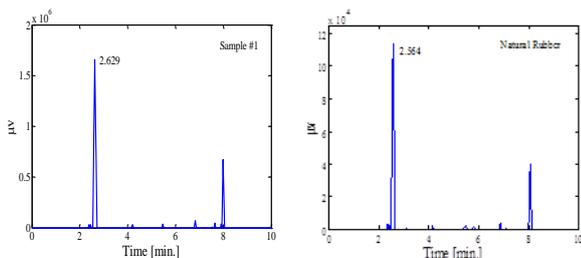


図-3 Py-GCの装置原理説明図



(a) STRP 試料 (b) 標準:天然ゴム

図-4 Py-GCによるクロマトグラム

製作したSTRPと同一の層のゴムのうち、外周に近い側より2か所よりゴムのサンプルを採取し、Py-GCを実施した。得られたクロマトグラムを図-4aに示す。既知の天然ゴムに対する標準グラムとグラフとの一致度が高いことから、今回対象としたSTRPのゴムは天然ゴム(NR)と判断される。以降の結果の解釈においてはSTRPのゴムは天然ゴムであると前提することとした。

#### 4. 水平せん断载荷試験

図-5に示すようなSTRPを6枚重ねた供試体(STRP-6と呼ぶ)の水平せん断载荷試験を行った。図-6の実験の概要図が示すように、STRP-6は試験機の上部和下部の鋼板の間に設置され、STRP-6に面圧5MPaに対応する軸力を鉛直方向のアクチュエータで与えつつ、水平方向のアクチュエータにより単調増加及び漸増繰返しの変位(12mm, 24mm, 36mm, 48mm, 60mm, )を与えた。

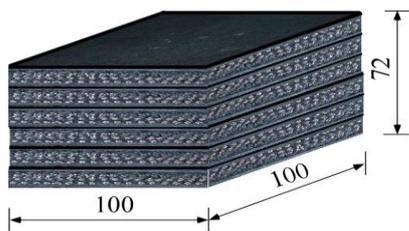


図-5 STRP-6供試体

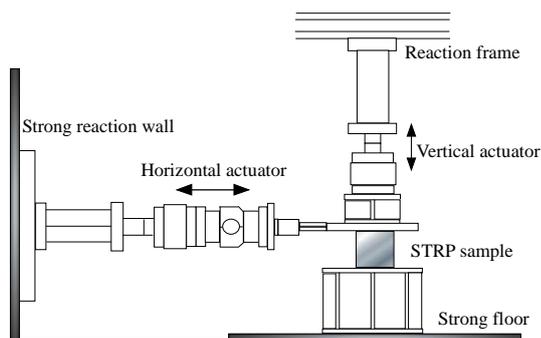
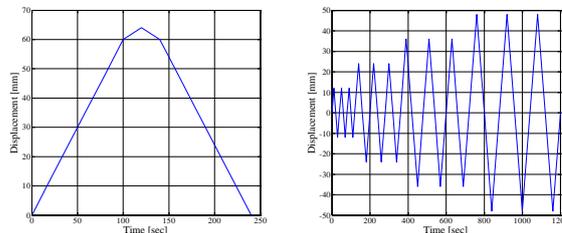


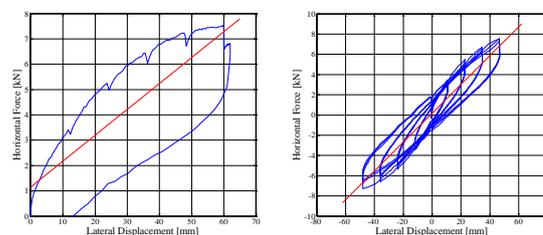
図-6 水平せん断载荷試験概要図

それぞれの载荷履歴を図-7に示す。载荷中にSTRP間のすべりは観察されなかったが図-8aの試験結果に示すように、単調载荷では100%のせん断に相当する60mmでSTRP間にずれが生じたため、この値を変形の限界値とした。



(a) 単調载荷 (b) 漸増繰返し载荷

図-7 水平せん断载荷変位



(a) 単調载荷 (b) 漸増繰返し载荷

図-8 载荷実験結果

それぞれの载荷履歴に対応したSTRP-6の水平剛性( $k_{eff}$ )を、次式のように最大荷重と最大変位に基づいて算出した。

$$k_{eff} = \frac{F^+ - F^-}{\Delta^+ - \Delta^-} \quad (1)$$

ここに、 $F^+$ 、 $F^-$ 、 $\Delta^+$ 、 $\Delta^-$ は、繰返し载荷における正側・負側それぞれの水平荷重および水平変位の最大値である。さらに等価減衰定数( $\beta_{eff}$ )は次の式を用いて算出した。

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{E_{loop}}{k_{eff}(\Delta^+ + \Delta^-)^2} \right] \quad (2)$$

ここに、 $E_{loop}$ は履歴ループの面積で表される、1サイクルあたりの吸収エネルギーである。表-2にそれぞれの载荷試験における水平剛性を示す。

表-2 STRPの水平剛性

载荷	最大水平変位	水平剛性
単調	48mm	142.5kN/m
繰返し	62mm	102.2kN/m

図-8bの繰返し载荷で得られた履歴復元力特性を見ると、STRPのゴムが一般に減衰の小さいNRであるにもかかわらず、履歴ループ面積が大きいことから履歴エネルギー吸収が相当のレベルになることが推測される。等価減衰定数を算出した結果はサイクル振幅により変動するものの、おおよそ12%程度となっている。STRPが水平せん断変形に対して同様の大きさの等価減衰定数を持つ事は既往の研究結果<sup>3)</sup>でも報告されており、これは免震材として用いるには望ましい特性であると言える。比較的大きな履歴減衰特性が生じる原因は、鋼線ストランド内での摩擦による効果によるものと考えられているが、今後詳細なメカニズムを解明する必要があるものと考えられる。

## 5. 有限要素解析

2次元の有限要素モデルによるSTRP - 6供試体のせん断変形挙動の解析を行った。

### (1) 一軸引張試験と材料定数の同定

STRPの材料定数を把握するためにJIS規格K6251に定める3号ダンベル試験片に準拠した一軸引張試験を行った。図-9に試験機および試験の状況を示す。試験は単調载荷、繰返し载荷 (25mm, 50mm, 75mm, 100mm) をそれぞれ行い、試験片が破断するまで载荷した。

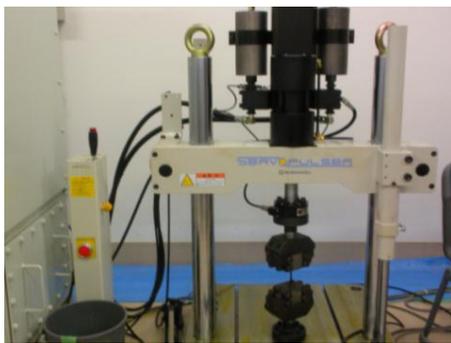


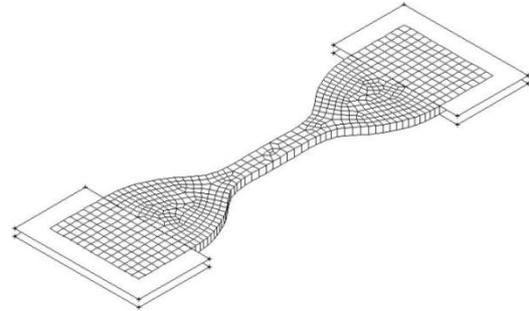
図-9 一軸引張試験

ゴムを非圧縮性等方超弾性体としてモデル化する事とし、その構成則としてしばしば用いられるMooney-Rivlinモデルで表現することとした。以下にMooney-Rivlinのひずみエネルギー密度関数を示す

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (3)$$

ここに、 $C_{10}$ 、 $C_{01}$ 、 $C_{11}$ は材料定数であり、 $I_1$ 、 $I_2$ はCauchy-Greenひずみ不変量である。Mooney-Rivlinモデル

の定数を決定する際には、図-10aに示すダンベル試験片および(グリップ部を含む)の8節点3次元要素を用いたモデル化を行い、試験データ曲線と解析による曲線のフィッティングによる決定を行った。図-10b, cに引張試験の結果を示し、表-3に設定されたMooney-Rivlinモデルの材料定数を示す。



(a) ダンベル試験片の有限要素モデル

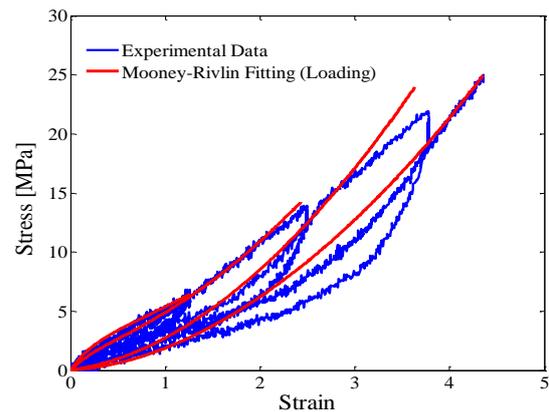
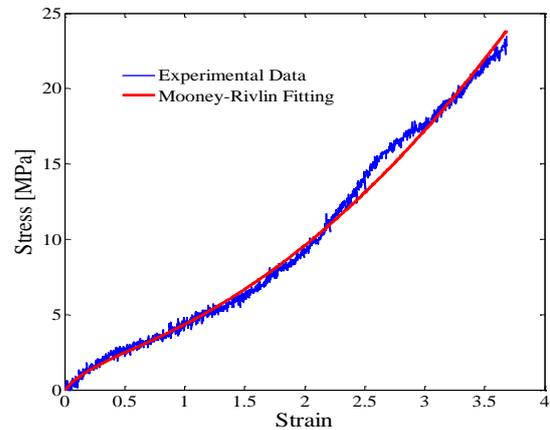


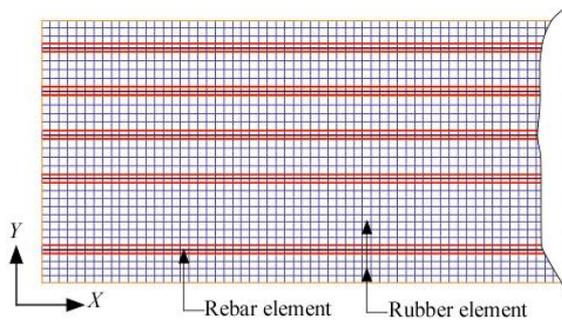
図-10 一軸引張試験結果

表-3 Mooney-Rivlinモデルの材料定数

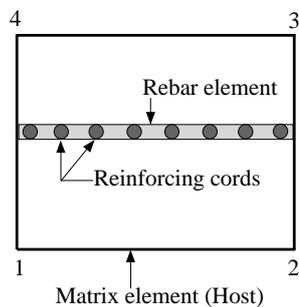
$C_{10}$	0.400 MPa
$C_{01}$	1.223 MPa
$C_{11}$	0.188 MPa

## (2) モデル化

前述の表-1, 3に基づき, 各々のSTRP断面に対して図-11aに示すような有限要素モデルを作成し, これを6層重ねることによって要素数47, 200のモデルとした。ゴム材料には, 上述の手順で決定したMooney-Rivlinモデルの構成則を与えた四辺形要素を用いた。ゴム材料中に埋め込まれた鋼線を表現するため, 鋼線層の位置のゴムの四辺形要素にrebar要素を図-1b2に示すように結合している。母材とrebar要素は同じ節点を共有するため, 自由度が増加せず計算時間が大きくならないメリットがある。また, 重ねたSTRP間の摩擦係数を0.95, STRPと鋼板間の摩擦係数を0.8と設定した。



(a) 単層STRPの有限要素モデル



(b) Rebar要素の母材要素への埋め込み

図-11 STRP供試体の有限要素モデル

## (3) 解析結果

解析により得られた変形状態および応力を図-12に示す。実験において限界変形に相当する103%せん断の場合の結果であり, 応力は鉛直方向の軸圧縮応力を示している。図-14には解析により得られた荷重-変位関係を, 実験結果と比較したものを示す。実験と解析結果は概ね良好な一致が見られ, 妥当な結果と考えられる。これらの解析結果からも, 本検討で用いたSTRP-6の変位性能限界は実験で示されたせん断ひずみ100%程度までと考えられる。STRP-6の限界せん断変形は, 圧縮応力領域

がゴムパッドの安定限界値に関連していることから, アスペクト比を変更することでせん断変形限界をより高めることができると考えられる。

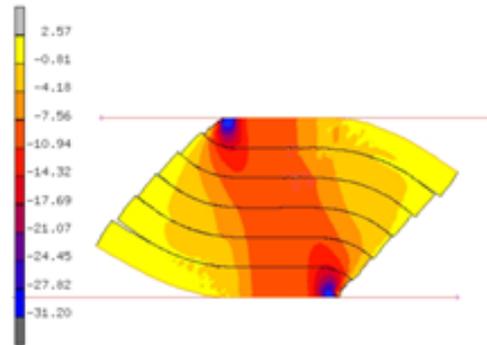


図-12 有限要素解析結果

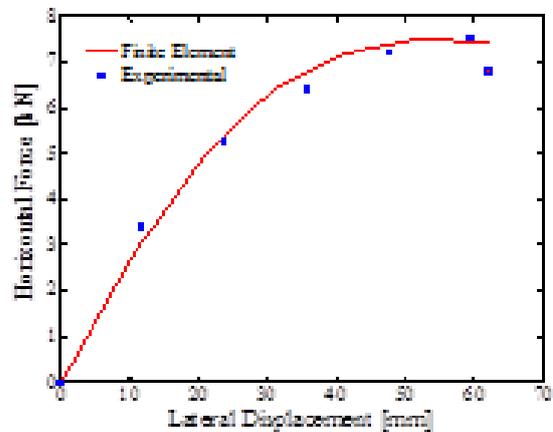


図-13 有限要素解析による荷重-変位関係

## 6. 結論

本研究では, 廃タイヤゴムパッド (STRP) を使った免震材料の材料特性を熱分解ガスクロマトグラフィー分析により明らかにするとともに, STRPを重ねた免震材料の変形性能を水平せん断試験を行い確認し, 有限要素解析との比較を行った。本研究で得られた知見を示せば, 以下の通りである。

- 大型車用の廃タイヤから作製した本研究の対象としたSTRPの材料分析を熱分解ガスクロマトグラフィーにより行い, 材料同定をこの手順で行うことができる。本研究で用いたSTRPの場合, ゴムは天然ゴム (NR) であると判定した。
- STRPを6層重ねたSTRP-6の水平せん断試験を軸応力5MPaのもとで行った。せん断変形性能は100%ひずみ程度であった。また, 等価減衰定数は12%程度の値を示した。

c) ダンベル試験片の一軸引張試験を行い、有限要素解析のモデルとして使用するMooney-rivlinモデルの材料定数を同定し、それを用いて2次元有限要素解析を実施した。荷重-変位関係において、解析と実験結果は概ね一致する結果が得られた。

謝辞：Py-GC試験分析にご助力を頂いた東海ゴム工業株式会社の関係各位、および有限要素解析でご協力いただいた古川愛子准教授（京都大学）に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) Kelly, J. M., Seismic isolation system for developing countries, *Earthquake Spectra*, Vol.18, No.3, pp.385-406, 2002.
- 2) Toopchi-Nezhad H., Tait, M. J., Drysdale, R. G., Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 15, No.6, pp.876-900, 2008.
- 3) A. Turer, B.Özden, Seismic base isolation using low-cost Scrap Tire Pads (STP). *Materials and Structures*, Vol. 41, No.5, pp.891-908, 2008.
- 4) MSC Marc, Theory and user information, Volume A, MSC software Corporation, 2010.

(2012.9.25 受付)

## Investigation of material properties and shear deformation capacity of scrap tire rubber pad isolators

Akira IGARASHI, Hirsohi MATSUSHIMA and MISHRA Huma Kanta

Performance of a low cost base isolation system using scrap tire rubber pad (STRP) for developing countries is investigated. In this paper, pyrolysis gas chromatography (Py-GC) to identify the material of STRP and lateral shear test and finite element analysis to know deformation capacity are conducted. The Py-GC analysis shows the main constituent of STRP rubber is natural rubber. In shear loading tests, STRP isolator specimen has capacity of shear strain level of 100% when loaded with 5MPa axial pressure. The results of experimental test and FE analysis were generally consistent.