

# 近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 14 年度		番号 氏名	99168064
指導教官	藤井 大地 助教授		榛葉 亮
題名	廃タイヤを利用した住宅免震に関する研究		

## 1. はじめに

近年、環境問題に非常に関心が高まる中、廃棄物の建築材料への利用が様々試みられている。エコセメントや再生コンクリートはその代表的な例である。著者らは、このような廃棄物の内、廃タイヤに注目し、これを建築材料として利用できないかを検討した。

廃タイヤは、約 80%が自動車のタイヤ交換時に発生し、本数で年間約 9900 万本、重量で約 94 万 3 千トンと、莫大な量となっている。この内、88%がリサイクルされているが、内訳は、タイヤを燃やして熱エネルギーとして利用するサーマルリサイクルが 48%、再生タイヤとして使うリサイクルが 21%、タイヤを粉砕して再利用するマテリアルリサイクルが 19%である。しかしながら、タイヤを燃やすサーマルリサイクルは、ダイオキシンの発生や焼却後の廃棄物処理の問題等があり、望ましいリサイクル方法ではない。したがって、サーマルリサイクル以外の利用法が模索されているのが現状である。

これまで、廃タイヤの建材としての利用は、廃タイヤをコンクリートの骨材として利用することを提案した湯浅らの研究<sup>1)</sup>が挙げられるが、これ以外には見あたらない。著者らは、当初、住宅免震用の積層ゴムとしての利用を検討したが、タイヤには、スチール等のゴム以外の材料が含まれており、積層ゴムとしての利用は適当でないことがわかった。しかし、住宅免震は、安価にできれば、自動車のエアバッグと同様に多くの物件に普及させることができるため、多量の廃タイヤを処理できる可能性がある。そこで、次に考えたことは、大地震の際に、住宅全体を滑らせ、滑る範囲を制御するためのバネとして廃タイヤを利用することである。

ところで、現行の住宅設計では、基礎と建物は緊結することが義務づけられている。しかしながら、昔の住宅は、柱が玉石に置かれるだけの構造が多く、基礎と緊結されることは希であった(図-1 参照)。これは、現代の免震技術の考え方からすれば、大地震時に、建物が滑ることによって地震力を弱める一種の免震構造であったと考えられる。そうすると、昔の知恵を現在の住宅設計に復活されることは意義深いことであり、また、このような方法によれば、最近の住宅免震装置のように建築コストを上げることなく、免震住宅を造ることができる。

しかしながら、市街地の住宅において、大地震時に滑る構造を採用すると、隣接建物と接触したり、あるいは衝突する危険性がある。また、変位があまり大きいと、地震後の現状復帰が大変になり、配管、電気設備等にも支障をきたす。したがって、建物の滑る範囲は、ある程度限定する必要がある。そこで、著者らは、廃タイヤを建物の基礎内部に配置し、滑る範囲を制御するためのバネとして利用することを提案する。

以上の考え方にもとづき、本論文第 2 章では、著者らが提案する廃タイヤを利用した住宅免震の概要を説明する。第 3 章では、このような免震建物の設計を行うために開発した Excel VBA による振動解析ソフトについて説明する。第 4 章では、本ソフトによる解析例を示し、廃タイヤを利用した免震基礎の地震応答特性を検討する。第 5 章では、以上の結論と今後の展望について示す。



図 - 1 昔の木造住宅の基礎<sup>2)</sup>

## 2. 廃タイヤを利用した住宅免震の概要

図-2 は、著者らの提案する廃タイヤを利用した住宅免震の基礎伏概要図を示したものである。廃タイヤを基礎の外側に配置すると景観を害すため、タイヤはすべて基礎の内側に収めている。また、柱の基部は、中地震程度では摩擦力によって滑らないものとし、大地震時には滑るように設計する。また、滑りが生じた場合は、柱間を繋ぐ梁によってタイヤに力を伝達し、タイヤをバネとして働かせる。そして、大地震の後には、オイルジャッキ等で現状復帰をはかるものとする。

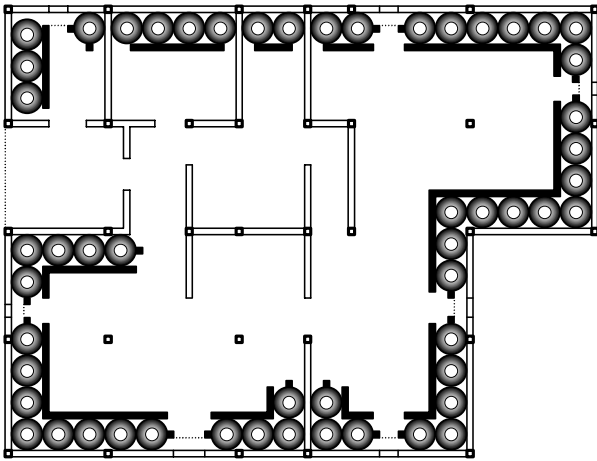


図 - 2 住宅免震構造の床伏概要図

### 3. 免震建物の振動解析ソフト

免震建物の設計に利用することを目的として、Excel VBA を利用した振動解析ソフトを作成した。なお、Excel VBA による構造解析ソフトの作成方法に関しては、文献 3) を参照。

図 - 3 は、本振動解析ソフトの解析モデルを示している。このモデルにおける運動方程式は次式のように書ける。

$$\text{基礎} \quad c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0$$

$$\text{建物} \quad m \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = -m \ddot{x}_0$$

ここに、 $m$  は建物の質量、 $k_1$  と  $c_1$  は基礎の剛性と減衰、 $k_2$  と  $c_2$  は建物の剛性と減衰である。

図 - 2 に示すような免震建物の解析を行うために、まず、柱脚部の滑りに対する摩擦係数を定める。そして、クーロン摩擦を仮定し、基礎に加わるせん断力が（摩擦係数 × 建物の重量）に達するまでは、基礎パネの剛性を非常に高くし、これを超えると、タイヤのパネ剛性に变化させる。すなわち、基礎パネの荷重 - 変位関係を Bi-Linear 型にモデル化する。

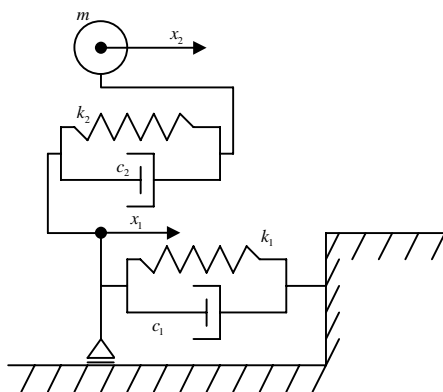


図 - 3 解析モデル

図 - 4 は、本ソフトのデータ入力のためのフォームを示している。図に示すように、建物データ、基礎データ、地震データを入力し、地震応答タグの[応答計算]ボタンをクリックすると、地震応答計算が行われ、Excel のセル上に変位、速度、加速度の時刻歴応答値が出力される（図 - 5 参照）。

また、本ソフトでは、時刻歴変位応答をアニメーションで

表示できる。図 - 6 は、アニメーションの一部と、アニメーションの設定フォームを示したものである。



図 - 4 データ入力フォーム

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	時刻歴変位			0	-1.21184	0	0	-1.21184	0
2	時刻歴速度			0.02	-1.01142	0.000929	0.060409	-2.19234	6.59E-07
3	時刻歴加速度			0.08	-9.48896	0.009448	0.794291	-3.38222	2.98E-06
4	建物変位	0.5		0.08	-9.49126	0.009329	0.265259	-4.23087	6.54E-06
5	基礎変位	0.05		0.08	-9.59984	0.044857	0.359787	-5.42087	1.11E-05
6	時刻歴変位			0.1	-11.2381	0.022878	0.488135	-8.17984	1.07E-05
7	時刻歴速度			0.12	-12.2882	0.022365	0.541739	-8.476	2.34E-05
8	時刻歴加速度			0.14	-11.9672	0.044655	0.606189	-10.3685	3.11E-05
9	建物変位	0		0.16	-10.3074	0.099294	0.602671	-12.2719	3.08E-05
10	基礎変位	0		0.18	-2.98032	0.081811	0.523898	-3.8486	4.53E-05
11	時刻歴変位			0.2	-2.98032	0.076748	0.390563	-15.2242	5.04E-05
12	時刻歴速度	4000		0.22	-12.2682	0.083448	0.279182	-16.1413	5.48E-05
13	時刻歴加速度	637.0813		0.24	-16.4822	0.0888	0.238274	-16.8086	3.71E-05
14	建物変位	1.00E+08		0.26	-18.118	0.083205	0.237272	-17.8485	6.01E-05
15	基礎変位	0.05		0.28	-15.1112	0.081817	0.210932	-18.3285	6.28E-05
16	時刻歴変位			0.3	-13.8884	0.101184	0.128878	-18.7811	6.88E-05
17	時刻歴速度	1580000		0.32	-10.1142	0.103208	-0.09223	-19.7571	6.45E-05
18	時刻歴加速度	0		0.34	-7.67995	0.100478	-0.20073	-19.1759	6.22E-05
19	建物変位			0.36	-9.93312	0.09078	-0.438836	-18.686	5.71E-05
20	基礎変位			0.38	-6.1686	0.082328	-0.65404	-14.8735	4.85E-05
21	時刻歴変位			0.4	-12.2682	0.089872	-0.74412	-12.3539	3.97E-05
22	時刻歴速度	30		0.42	-11.7933	0.081878	-0.87311	-10.4084	3.11E-05
23	時刻歴加速度	600		0.44	-16.2552	0.042315	-0.95332	-8.13265	2.48E-05
24	建物変位	320		0.46	-8.1808	0.032694	-0.4187	-7.41123	1.92E-05
25	基礎変位			0.48	2.3089	0.024308	-0.97818	-8.65787	1.27E-05
26	時刻歴変位			0.5	3.32446	0.01414	-0.73385	-3.4586	3.34E-06
27	時刻歴速度			0.52	-4.5886	-0.00528	-0.88629	-0.6511	7.82E-06
28	時刻歴加速度			0.54	-11.9672	-0.02148	-0.72239	1.67523	-1.71E-05
29	建物変位			0.56	-13.8884	-0.02028	-0.87889	3.08837	-0.23E-05
30	基礎変位			0.58	-19.0186	-0.03748	-0.93072	3.321263	-0.4E-05
31	時刻歴変位			0.6	-24.3486	-0.03918	0.458422	2.05814	-1.8E-05
32	時刻歴速度	38.89708		0.62	-30.4382	-0.01818	1.014808	-0.88449	-6.8E-06
33	時刻歴加速度	4005708		0.64	-26.8586	0.007064	1.53916	-5.6732	1.32E-05
34	建物変位			0.66	-16.1076	0.040874	1.816882	-1.13181	3.88E-06
35	基礎変位			0.68	-18.488	0.071894	1.877347	-1.72232	3.04E-06

図 - 5 時刻歴応答値

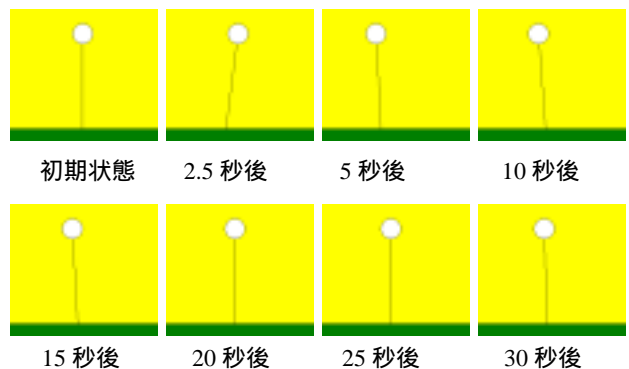


図 - 6 応答表示

4. 廃タイヤを利用した免震建物の地震応答特性

図 - 7 は、廃タイヤのバネ剛性を調査するために、圧縮試験機を用いて荷重、変位を計測している実験の様子である。実験では 5 mm ごとに圧縮力を計測し、計測値および計測値をもとに最小二乗近似により  $y = ax$  の直線を導いたものを図 - 8 に示す。この傾き  $a$  が廃タイヤのバネ剛性になる。この時の  $a = 0.94 (kgf/mm)$  であった。

なお、実験に使用した廃タイヤは、製造元：AVID サイズ：205/45Z R16 直径：56cm である。



図 - 7 実験の様子

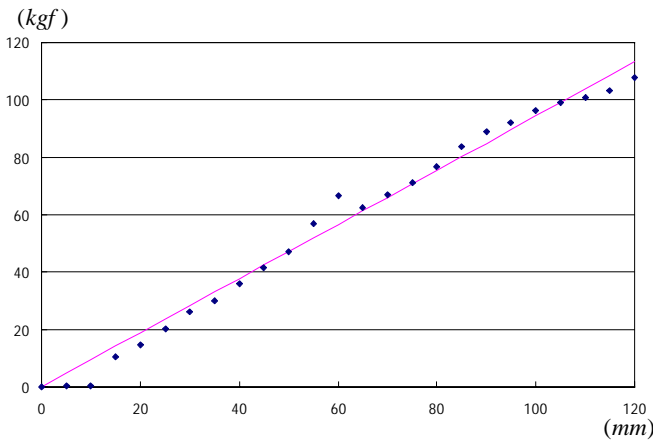


図 - 8 圧縮実験結果

以上のタイヤの剛性を用いて、第 3 章で示した免震建物の振動解析ソフトにより地震応答解析を行った。

建物のデータは固有周期を 0.5 (s)、減衰定数を 0.05、戸建住宅の総重量を 4 トンと仮定し、建物の質量を 4000 (kg)、建物の剛性を  $k = m\omega^2$  より 157913.7 (kgf/cm) とする。基礎のデータは、基礎の初期剛性を  $10^9 (kgf/cm)$ 、減衰定数を 0.01、降伏せん断力を [建物の質量 × 980 × 摩擦係数] (kgf) とし、降伏後の剛性を [  $a \times$  廃タイヤの数 ] (kgf/cm) とする。地震加速度のデータは、エルセントロ NS 波を使用、継続時間を 30 (s)、時間間隔を 0.02 (s)、加速度倍率として最大加速度を 200 gal, 400 gal, 800 gal となるように設定する。

表 - 1, 表 - 2 は、それぞれ廃タイヤがある場合と無い場合の解析結果を示している。解析では、摩擦係数を 0.3~0.6 まで 0.1 刻みで変化させている。また、比較のため、基礎固定 (摩擦係数 ) の場合の解析も行っている。廃タイヤの数は、図 - 2 より、タイヤの数が一番少ない辺を取ることにし、9 として計算した。

表より、廃タイヤがある場合と、無い場合の基礎部分の変位を比べると、ほぼ変化が無いことから、廃タイヤには、建物の変位を抑える効果は無いとこがわかる。また、建物の最大加速度は、ほぼ [摩擦係数 × 980 gal ] に比例することがわかる。

表 1 廃タイヤがある場合

加速度倍率	摩擦係数	建物最大加速度	基礎部分変位
200 (gal)	0.3	315.1 (gal)	1.1 (cm)
	0.4	401.9 (gal)	0.6 (cm)
	0.5	479.3 (gal)	0 (cm)
	0.6	479.3 (gal)	0 (cm)
		479.3 (gal)	0 (cm)
400 (gal)	0.3	358.8 (gal)	3.1 (cm)
	0.4	443.8 (gal)	2.7 (cm)
	0.5	537.2 (gal)	2.5 (cm)
	0.6	630.2 (gal)	2.3 (cm)
		958.7 (gal)	0 (cm)
800 (gal)	0.3	434.5 (gal)	6.7 (cm)
	0.4	530.4 (gal)	6.6 (cm)
	0.5	625.7 (gal)	6.5 (cm)
	0.6	717.5 (gal)	6.3 (cm)
		1917.4 (gal)	0 (cm)

表 2 廃タイヤが無い場合

加速度倍率	摩擦係数	建物最大加速度	基礎部分変位
200 (gal)	0.3	300.0 (gal)	1.6 (cm)
	0.4	394.2 (gal)	0.7 (cm)
	0.5	479.3 (gal)	0 (cm)
	0.6	479.3 (gal)	0 (cm)
		479.3 (gal)	0 (cm)
400 (gal)	0.3	305.0 (gal)	3.7 (cm)
	0.4	402.4 (gal)	3.0 (cm)
	0.5	499.5 (gal)	2.6 (cm)
	0.6	600.1 (gal)	3.1 (cm)
		958.7 (gal)	0 (cm)
800 (gal)	0.3	314.2 (gal)	7.7 (cm)
	0.4	412.1 (gal)	5.7 (cm)
	0.5	512.2 (gal)	6.9 (cm)
	0.6	610.1 (gal)	7.3 (cm)
		1917.4 (gal)	0 (cm)

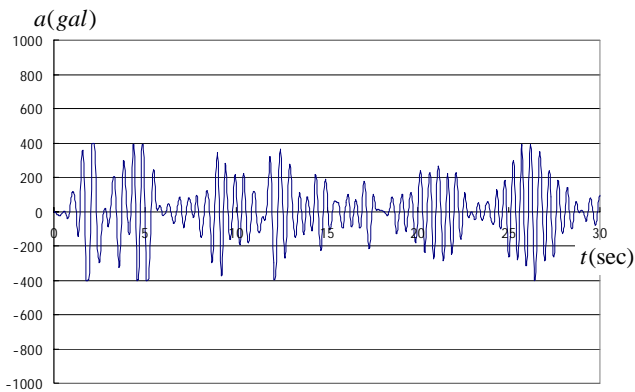


図 - 9 加速度倍率 400gal - 摩擦係数 0.4

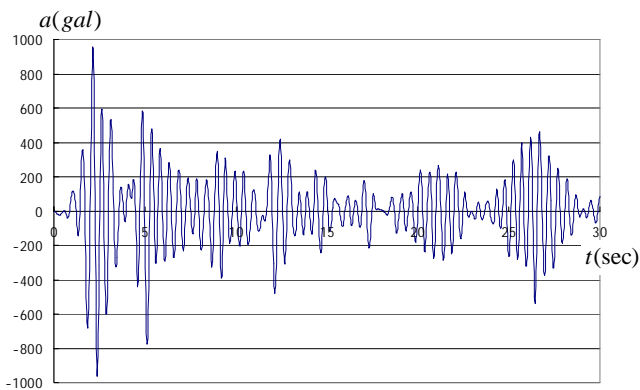


図 - 10 加速度倍率 400gal - 摩擦係数

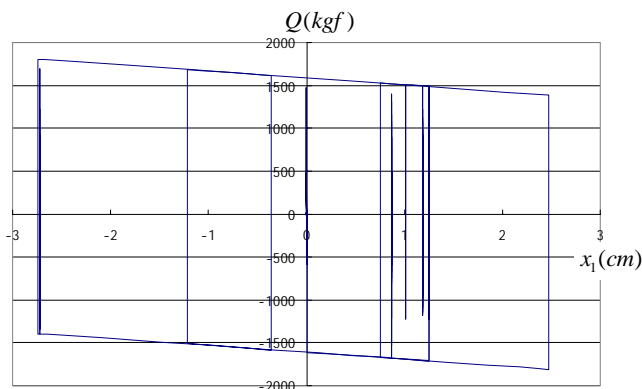


図 - 11 履歴応答

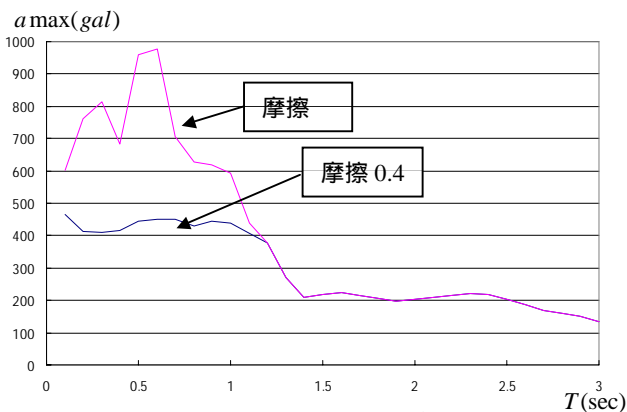


図 - 12 スペクトル比較グラフ

図 - 9, 図 - 10 は, 加速度倍率 400 gal で, 摩擦係数 0.4 の場合と基礎を固定した場合の建物の加速度応答を示している。図より, 基礎を滑らせることにより, 応答が低減されていることがわかる。

また, 図 - 11 は, 加速度倍率 400 gal で, 摩擦係数 0.4 の場合の基礎部分のせん断力と変位の履歴曲線を示したものである。図より, ほぼ綺麗な Bi-Linear となっていることがわかる。なお, 折れ曲がり点では, 精細な時間刻みで解析を行っているが, それらの点をプロットしていないため, 角が折れたように見える。

図 - 12 は, 建物の固有周期との関係进行调查するために, 加速度倍率 400 gal で, 摩擦係数 0.4 の場合と基礎固定の場合の加速度応答スペクトルを示したものである。図より, 1 秒以下の固有周期に対して, 基礎を滑らせた方が, 応答低減が得られることがわかる。

## 5. 結論および今後の展望

本論文では, 廃タイヤの有効利用として, 住宅の簡易免震への適用を検討した。本論文で提案した簡易免震は, 昔の工法を参考に, 基礎を緊結せずに滑らせ, 滑動の範囲を制御するためにタイヤを用いるものである。

本論文で提案した簡易免震の有効性を検討するために, 地震応答解析ソフトを開発し, 柱脚の滑りを Bi-Linear で近似することにより解析を行った。その結果, タイヤの剛性(弾性剛性)程度では, 建物の変位を制御することはできないこと, また, 柱脚とコンクリートの摩擦係数(0.4~0.6)では, 最大加速度 800 gal の地震に対しても最大 15 cm 程度の滑りしか生じないため, タイヤをバネとして働かせる必要はないことがわかった。

ただし, 以上の解析では, 地震波も 1 種類であり, タイヤも初期剛性しか考慮していない。また, 建物の質量についてもバリエーションが考えられるため, さらに詳しい検討が必要である。そして, もし, 非常に大きい変位が生じる例が見つければ, タイヤが衝撃吸収材として有効かどうかを検討する必要がある。以上の視点で, 今後さらに研究を進めてゆく予定である。

## 参考文献

- 1) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇, 西谷伸介: 廃タイヤのコンクリートへの有効利用に関する研究 - その 1 廃タイヤの骨材代替率と強度、変形状の関係 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.943-944, 2002.8
- 2) 重要文化財 山本家住宅修理工事報告書
- 3) 藤井大地: Excel VBA を利用した構造解析ツールの開発, 日本建築学会中国支部研究報告集, 2003.3