

近畿大学工業技術研究科建築学専攻修士論文概要

平成 16 年度		番号 氏名	03309208
指導教官	森村 毅 教授		榛葉 亮
題名	廃タイヤを利用した戸建住宅の免震基礎に関する研究		

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。本研究では、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、2002 年のデータ¹⁾では、約 80%が自動車のタイヤ交換時に発生し、本数で年間約 1 億 600 万本、重量で 104 万トンと、莫大な量となっている。この内、88.5%がリサイクルされているが、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の比率が 56%と高く、ダイオキシンの発生や焼却後の廃棄物処理の問題などが指摘されている。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。

廃タイヤの建材としての利用に関する研究は、熊谷らの研究や湯浅ら²⁾の研究が挙げられるが、非常に少ない。そこで、本研究では、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、積層ゴムとしての再利用は適当でないことがわかった。そこで、次に、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を考えた。

そこで、昔の住宅は、柱が玉石に置かれるだけの構造に注目した(図-1 参照)。建物は、中地震程度では摩擦によって動かず、大規模な地震時のみ滑動し、地震力を低減する。



図-1 昔の木造住宅の基礎³⁾

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。したがって、建物の滑る範囲は、ある程度制御する必要がある。そこで、本研究では、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考えた。

このような基礎の滑り摩擦を利用する原始的な免震基礎では、最近開発されている免震基礎のような大きな長周期化は期待できないが、最近の研究で、建物の大きな長周期化が必ずしも安全とは限らないことが指摘されはじめた。例えば、2003 年北海道十勝沖地震では、非常に長周期の振動により、重油タンクが被害を受けた。このような長周期振動は、都市部の地下構造が大域的にすり鉢状になっているためと考えられている。したがって、免震住宅が必ずしも大地震において効果的であるとは限らない。

以上のこのようなことを考慮すると、基礎を切断する原始的な工法は、施工が容易で、既存建物にも適用できるという利点がある。また、滑り変位を制御するバネとして廃タイヤが利用できれば、環境問題への貢献も大きいものと考えられる。そこで、本研究では、図-2 に示すように基礎の犬走り下部を切断し、廃タイヤを建物の基礎内部に配置して滑る範囲を制御するバネとして利用する戸建住宅の基礎モデルを提案する。そして、模型実験と解析により、このような戸建免震基礎の有効性について検討を行う。

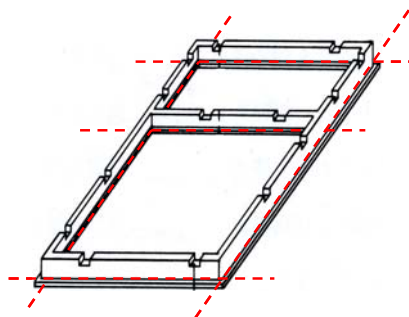


図-2 基礎の切断位置

2. 免震建物の地震応答解析

本論文では、まず、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⁴⁾。

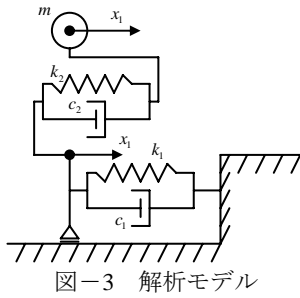
図-3 は、振動解析モデルを示している。このモデルにおける運動方程式は次式のように書ける。

$$\text{基礎} \quad c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (1)$$

$$\text{建物} \quad m \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = -m \ddot{x}_0 \quad (2)$$

ここに、 m は建物の質量、 k_1 と c_1 は免震基礎の剛性と減衰、 k_2 と c_2 は建物の剛性と減衰、 x_0 は地動速度である。

基礎の剛性 k_1 は、クーロン摩擦を仮定し、静止摩擦力以下では、大きな剛性を与え、それを超えると廃タイヤのバネ剛性に変化させる (Bi-Linear 特性)。また、(1)、(2) 式の運動方程式は平均加速度法によって数値積分を行う。



3 戸建免震基礎模型による実験

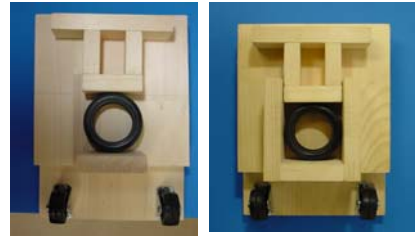
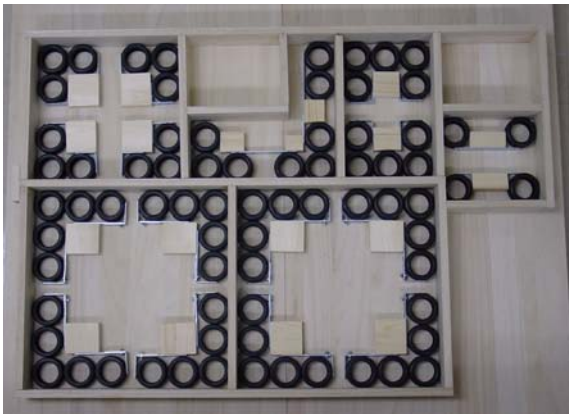
本研究で提案する免震基礎の有効性を確かめるため、一般的な住宅の基礎伏図を用い、図-4 に示すような模型を作成した。図に示す、犬走り部分は、基礎板には固定せず、基礎内部のタイヤ止め矩形ブロックは基礎板に固定している。タイヤには、ラジコンの模型タイヤを用いている。

まず、模型タイヤの特性を調査するために、図-5 に示すような、実験装置を作成した。図-5(左)1つのタイヤの剛性を計測するための装置で、図-5(右)タイヤ同士の相互干渉を考慮して、側面を拘束した場合の剛性を計測するための装置である。

図-6 は、図-5 の装置を用いて、計測した荷重変位関係を示している。最小二乗近似により、線形剛性を求めると、拘束なしの場合が、 0.5093 (kgf/cm) になり、拘束ありの場合は、 2.2130 (kgf/cm) になった。

図-7 は、火災時を考慮して、タイヤ部分を土に埋めたことを想定したモデルを示している。図-8 は、この場合のタイヤの剛性を、計測するための実験の様子を示している。図-8 は、この場合の実験結果(荷重変位図)を示している。図-7 と同様に、タイヤの線形剛性は、拘束なしの場合は 0.828 (kgf/cm) になり、拘束ありの場合は 7.097 (kgf/cm) になった。

次に、図-4 の模型に対して、犬走りの部分に荷重を加えたときの荷重と変位の関係を計測し線形剛性を求めた結果、 26.3 (kgf/cm) になった。同様に、図-7 のモデルに対しても、同様な実験を行い、線形剛性を求めた結果、 134.4 (kgf/cm) である。



(kgf)

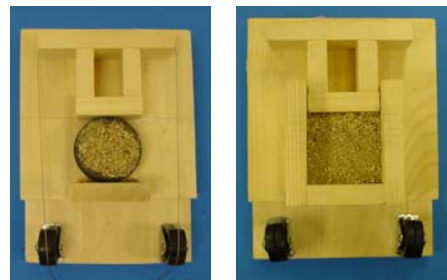
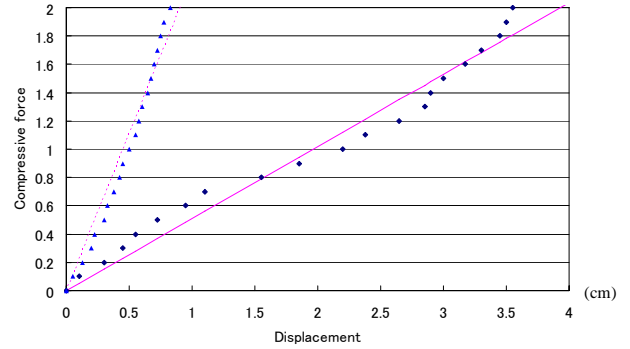
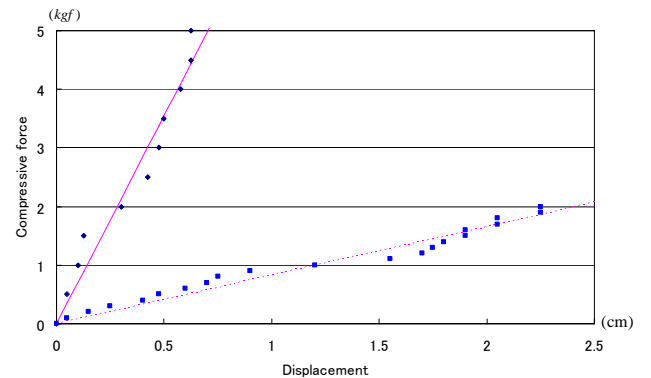


図-8 模型タイヤ砂入りの実験



4 実物廃タイヤの剛性を求める実験

次に、第3章の模型と実際の建物との整合性をとるために、実物廃タイヤのバネ剛性を計測する実験を行った。実験は、図-10に示すように、圧縮試験機を用いて行った。図-11は、このときの実験結果(荷重変位関係)を示している。また、この場合の線形剛性を求めた結果、9.4(kgf/cm)となった。



図-10 実験の様子

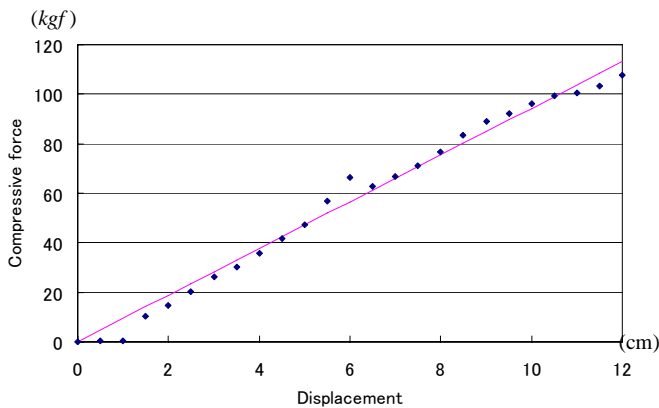


図-11 荷重-変位グラフ

5 免震基礎の廃タイヤ剛性を求めるための解析

第3章の模型実験の結果から、実際の建物の免震基礎の廃タイヤ剛性を予測するためには、模型実験を解析によってシュミレートし、第4章の実際の廃タイヤの剛性と整合するように、現実の建物をモデル化すれば良い。本研究では、モデル化は容易な骨組解析法を用いる。

まず、1個のタイヤは、図-12に示すようなトラスモデルで近似する。図-12のモデルでは、側面拘束の無いタイヤの剛性を、⑤部材の軸方向剛性で近似する。また、側面拘束がある場合の付加剛性を①②③④部材の地軸方向剛性で近似する。図-5、図-8の結果と整合するように、材料定数を決定すると、図-13に示す値となる。

次に図-14に示すような解析モデルを作成し、図-4、図-7の廃タイヤ剛性をシュミレートした。なお、図-14のモデルでは、荷重に抵抗しないと思われるタイヤは省略している。解析の結果、砂なしの剛性は31.3(kgf/cm)、砂ありの剛性は175.6(kgf/cm)となった。模型実験の結果では、前者が26.3(kgf/cm)になり、後者が134.4(kgf/cm)になった。解析の方が若干高剛性となるが、ほぼ実験をシュミレートできていると思われる。

次に、実物大の免震基礎の廃タイヤ剛性を求めるためには、図-12のタイヤモデルの材料定数を設定する必要がある。まず、実物タイヤの剛性は第4章の結果より9.4(kgf/cm)であ

る。次に図-5の実験結果を参考に、4倍の37.6(kgf/cm)とする。また、砂入りの場合は、模型実験と同様な比率で剛性が上がるものと仮定し、それぞれの材料定数を図-15のように決定した。また、図-14のモデルを、実物大のスケールに拡大し、解析を行なった結果、免震基礎の廃タイヤ剛性は、砂なしの場合が536(kgf/cm)砂ありの場合が1611(kgf/cm)となった。

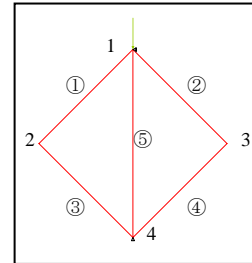


図-12 トラスモデル

模型タイヤの材料定数		
$E = 1(\text{kgf}/\text{cm}^2)$,	$A_1 = 13.5(\text{cm}^2)$,	$A_2 = 2.85(\text{cm}^2)$
砂入りの場合の材料定数		
$E = 1(\text{kgf}/\text{cm}^2)$,	$A_1 = 49.6(\text{cm}^2)$,	$A_2 = 4.65(\text{cm}^2)$

図-13 模型タイヤの材料定数

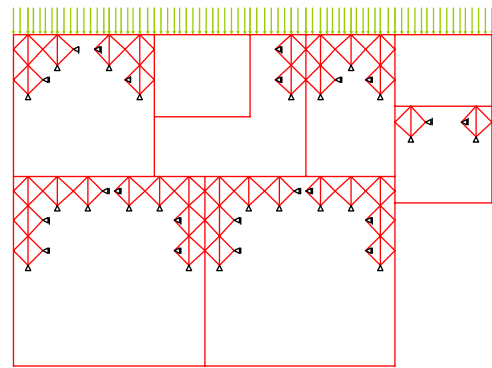


図-14 全体解析モデル

実物タイヤの材料定数		
$E = 10(\text{kgf}/\text{cm}^2)$,	$A_1 = 223.5(\text{cm}^2)$,	$A_2 = 52.65(\text{cm}^2)$,
砂入りの場合の材料定数		
$E = 10(\text{kgf}/\text{cm}^2)$,	$A_1 = 820.245(\text{cm}^2)$,	$A_2 = 85.8195(\text{cm}^2)$,

図-15 実物タイヤの材料定数

6 免震戸建住宅の地震応答解析

第5章で求めた廃タイヤ剛性を用いて、図-3の解析モデルにより、免震基礎を有する戸建住宅の解析を行った。解析に必要な解析においた設定したデータ表-1に示す。

地震波のデータとしては、近年起こった4種の地震を選出した。表-2は解析結果を示している。なお、摩擦係数 μ は、基礎と地盤が緊結された場合を想定している。

表-2より、芸予地震、宮城県沖地震、十勝沖地震に関しては、タイヤなしに比較してタイヤありの最大変位が小さくなっている。特に、十勝沖地震ではその傾向が顕著である。しかし、新潟県中越地震では、タイヤなしに比較して、タイ

ヤありの最大変位が大きくなる場合がある。これは、滑動後の免震建物の固有周期が、新潟県中越地震の波動と共振したためであると考えられる。

図-15～図-17 は、宮城県沖地震の E-W 波の変位応答履歴を示したものである。図に示すように、タイヤありの変位応答が小さくなっていることがわかる。

表-1 解析データ

建物データ	固有周期	0.2(s)
	減衰定数	0.05
	建物質量	40000(kgf)/980(cm/s ²)
	建物剛性	39478417.61(kgf/cm)
基礎データ	初期剛性	10 ⁹ (kg/cm)
	減衰定数	0.01
	降伏せん断力	[建物質量×980×摩擦係数](kgf)
	降伏後剛性	536(kg/cm)、1611(kg/cm)
	継続時間	100(s)~120(s)
地震加速度データ	地震波	・ 茨野地震 ・ 宮城県沖地震 ・ 十勝中地震 ・ 新潟県中越地震
	時間間隔	0.01(s)、0.02(s)

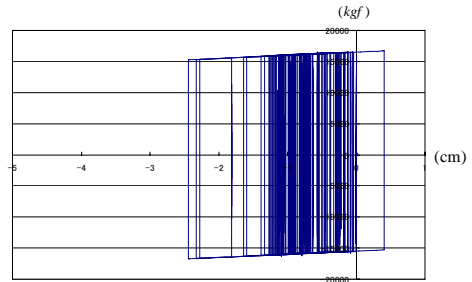


図-16 宮城県沖地震 EW 波・摩擦 0.4・タイヤあり

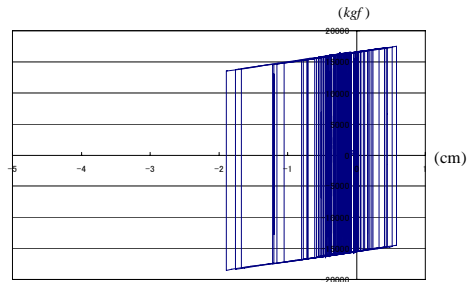


図-17 宮城県沖地震 EW 波摩擦 0.4・タイヤあり砂入り

表-2 解析結果

地震名	方位倍率	摩擦係数	タイヤなし		タイヤあり		タイヤあり砂入り	
			建物最大加速度	基礎最大変位	建物最大加速度	基礎最大変位	建物最大加速度	基礎最大変位
茨野地震	N-S波	0.3	321.30(gal)	1.9(cm)	317.12(gal)	1.4(cm)	322.54(gal)	1.1(cm)
		0.4	419.30(gal)	1.1(cm)	418.63(gal)	1.0(cm)	421.40(gal)	0.9(cm)
		0.5	518.46(gal)	0.4(cm)	517.87(gal)	0.4(cm)	522.63(gal)	0.4(cm)
		∞	803.95(gal)	0(cm)	803.95(gal)	0(cm)	803.95(gal)	0(cm)
	E-W波	0.3	310.52(gal)	0.9(cm)	312.50(gal)	0.9(cm)	334.95(gal)	0.8(cm)
		0.4	407.04(gal)	0.9(cm)	407.54(gal)	0.8(cm)	419.18(gal)	0.6(cm)
		0.5	503.21(gal)	0.7(cm)	500.51(gal)	0.5(cm)	509.29(gal)	0.4(cm)
		∞	1060.13(gal)	0(cm)	1060.13(gal)	0(cm)	1060.13(gal)	0(cm)
宮城県沖地震	N-S波	0.3	337.13(gal)	3.7(cm)	372.09(gal)	3.8(cm)	454.96(gal)	3.6(cm)
		0.4	433.87(gal)	4.1(cm)	468.83(gal)	3.7(cm)	538.89(gal)	3.2(cm)
		0.5	532.30(gal)	6.0(cm)	551.19(gal)	3.9(cm)	616.21(gal)	2.9(cm)
		∞	4716.64(gal)	0(cm)	4716.64(gal)	0(cm)	4716.64(gal)	0(cm)
	E-W波	0.3	322.78(gal)	5.5(cm)	326.88(gal)	2.7(cm)	364.27(gal)	1.9(cm)
		0.4	427.16(gal)	4.6(cm)	421.55(gal)	2.4(cm)	458.68(gal)	1.8(cm)
		0.5	528.07(gal)	3.6(cm)	521.01(gal)	2.0(cm)	557.41(gal)	1.8(cm)
		∞	3703.18(gal)	0(cm)	3703.18(gal)	0(cm)	3703.18(gal)	0(cm)
十勝沖地震	N-S波	0.3	352.56(gal)	19.1(cm)	359.84(gal)	3.9(cm)	423.95(gal)	3.3(cm)
		0.4	451.26(gal)	15.6(cm)	443.53(gal)	4.0(cm)	488.06(gal)	3.1(cm)
		0.5	550.37(gal)	11.3(cm)	541.76(gal)	4.2(cm)	585.12(gal)	3.2(cm)
		∞	2076.37(gal)	0(cm)	2076.37(gal)	0(cm)	2076.37(gal)	0(cm)
	E-W波	0.3	348.36(gal)	22.1(cm)	365.77(gal)	4.4(cm)	445.78(gal)	3.4(cm)
		0.4	450.76(gal)	18.8(cm)	453.51(gal)	3.9(cm)	519.23(gal)	3.1(cm)
		0.5	550.93(gal)	12.3(cm)	541.49(gal)	3.5(cm)	590.46(gal)	2.8(cm)
		∞	2183.53(gal)	0(cm)	2183.53(gal)	0(cm)	2183.53(gal)	0(cm)
新潟県中越地震	N-S波	0.3	354.18(gal)	13.8(cm)	518.24(gal)	15.3(cm)	1041.90(gal)	19.0(cm)
		0.4	438.92(gal)	12.7(cm)	536.27(gal)	10.2(cm)	922.65(gal)	13.5(cm)
		0.5	522.99(gal)	9.0(cm)	606.69(gal)	8.8(cm)	788.43(gal)	7.6(cm)
		∞	1511.52(gal)	0(cm)	1511.52(gal)	0(cm)	1511.52(gal)	0(cm)
	E-W波	0.3	360.25(gal)	17.9(cm)	586.74(gal)	20.9(cm)	1211.59(gal)	23.1(cm)
		0.4	451.98(gal)	15.4(cm)	635.78(gal)	17.3(cm)	1061.70(gal)	16.8(cm)
		0.5	538.88(gal)	12.3(cm)	673.54(gal)	12.9(cm)	951.51(gal)	11.5(cm)
		∞	2056.74(gal)	0(cm)	2056.74(gal)	0(cm)	2056.74(gal)	0(cm)

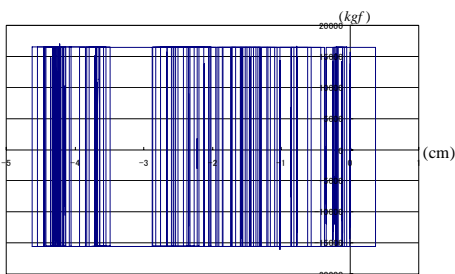


図-15 宮城県沖地震 EW 波・摩擦 0.4・タイヤなし

7 結論

本論文では、昔の住宅を参考に、基礎を緊結せずに、地震時に建物を滑らせ建物に伝わる地震のエネルギーを低減する工法を提案し、また、その滑る範囲を制御するため、基礎内部に廃タイヤを配置し、干渉パネと利用する新たな免震基礎工法を提案した。そして、免震基礎の有効性を検討するためモデルを制作し、免震基礎に配置したタイヤの剛性を調べる実験を行った。次に、実際の建物に設置した免震基礎のタイヤの剛性を特定するために、骨組解析により、模型実験をシュミレートし、解析によって実際の建物のタイヤ剛性を求めた。以上によって求めたタイヤ剛性を用いて、数種の地震波に対する、免震住宅モデルの地震応答解析を行った結果、ほとんどの地震波に対しては、廃タイヤによる、変位制御が有効であることが確かめられた。しかし、新潟県中越地震に対しては、タイヤの変位制御効果は見られなかった。

本研究では、廃タイヤの剛性のみを考慮し、基礎切断面の摩擦による減衰および、タイヤの変形による減衰は考慮しなかった。特に土に埋めたタイヤに関してはかなりの減衰効果があるものと考えられる。このような減衰効果を考慮すれば、タイヤの変位制御効果は、もっと大きくなるものだと考えられる。この点については、今後の研究課題である。

参考文献

- 1) JCA 株式会社ジェイシーエー <http://www.tire-recycle.jp/>
- 2) 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、変形性状の関係—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.943-944, 2002.8
- 3) 重要文化財 山本家住宅修理工事報告書