

近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 15 年度		番号	00168117
指導教官	藤井 大地 助教授	氏名	和所 勇生
題名	廃タイヤを利用した免震住宅の構造計画に関する研究		

1 はじめに

世界有数の地震大国である日本において、地震は避ける事ができない。そして今、近い将来に東海地震が起きるのではないかと考えられ、人々の地震への関心は高まっている。

地震の被害を防ぐ為に私たちはできる限りの準備をする必要がある。自然災害は人間の想像を超えた部分があり、阪神大震災の時も震度7でも耐えられると予想された高速道路が倒壊している。こういった、想像を超えた被害もありうる。だからこそ、それに対して万全の住宅対策をとる事が大事であり、まず負傷者の割合の最も高い、家具・電化製品の下敷きを防ぐことが最重要対策であると考えられる。(図1参照)したがって、地震対策としては、地震の揺れに耐える耐震住宅よりも地震の揺れを建物に伝えない免震住宅の方が適していると思われる。

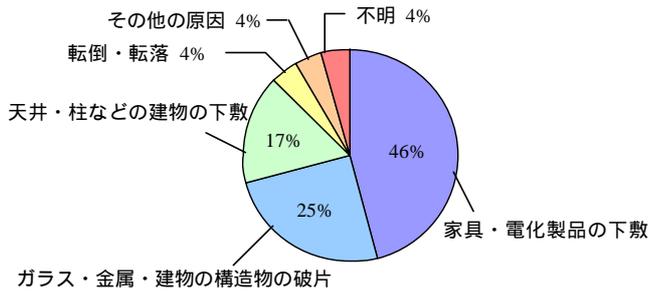


図1 地震による負傷者の原因

しかしながら、最近の研究で、都市部(東京、名古屋、大阪)の地下構造が、すり鉢状のフレームを持ち、その上に比較的軟らかい地盤が乗っているため、大規模地震が起こると非常に周期の長い(5秒~10秒)振動が起こり、予想外の被害をもたらすことが指摘され始めた。十勝沖地震の重油タンク火災は、この長周期地震の影響を受けている。このため、建物の周期を伸張する免震住宅が必ずしも大規模地震において効果を発揮するとは限らない。

そこで、昨年、榛葉、藤井は、昔の住宅の基礎が玉石に置かれるだけの構造であったことに注目し、建物と基礎を緊結しない工法を提案している。すなわち、このような建物は、中規模程度の地震では摩擦によって動かず、100年に一度程度の大規模地震時のみ滑動し、地震力を低減する。しかし、市街地の住宅において、この構造を採用すると、隣接建物との接触や衝突の危険性がある。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、榛葉、藤井は、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

めの干渉バネとして利用することを提案している。

本研究では、これまでの研究をさらに発展させ、模型タイヤを使用した基礎部分の1/10模型を製作した。そして、これを骨組構造にモデル化し、数値解析により、廃タイヤのバネ剛性を求める方法を開発した。そして、これをもとに、地震応答解析を行い、本工法の有効性を検討した。

以下、本論文第2章では、免震住宅の現状について述べる。第3章では、免震住宅の解析理論について示す。第4章では、免震住宅模型による実験方法と結果について示す。第5章では、実験の解析シミュレーションについて示す。最終第6章では、結論と今後の展望を述べる。

2 免震住宅の現状

免震に関して、ビル・マンションなどでは徐々に普及し始めているが、戸建て住宅に関しては、まだまだ普及しているとは言い難い。戸建の免震住宅もいくつかのハウスメーカー等で導入されているが、消費者にとって容易に払える額ではない。このコストが高いという点が、戸建住宅の免震化の普及の一番の問題である。ここで免震住宅をいくつか紹介する。

2.1 免震住宅の紹介

この免震住宅は、基礎に敷かれたつるつるのステンレス版の上に鉄骨の支柱が乗せてあり、支柱の下部分にテフロン加工された金属が取り付けられており、建物がスケートリンク上に建っているような状態である。そして、建物を乗せる鉄骨と基礎とを積層ゴムでつなぎ、地震時にはゆっくりとした周期で建物を振動させ、地震後は元の位置に引き戻す役割をする。(図2、3参照)



図2 積層ゴム



図3 スライダー

この他にも、パンタグラフ式減衰装置(図4)、風揺れ固定装置(図5)、単球式転がり支承(図6)の3つの装置を使用した免震住宅もある。



図4



図5



図6

3 免震住宅の解析理論

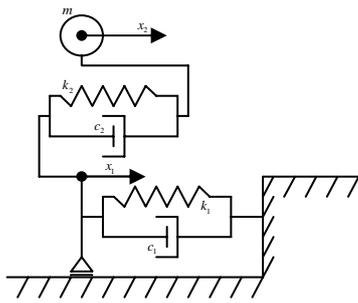


図7 解析モデル

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を表す。

$$\begin{cases} \text{第1層} & m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) = -m_1 \ddot{y}_0 \\ \text{一般層} & m_i \ddot{y}_i + k_i (y_i - y_{i-1}) - k_{i+1} (y_{i+1} - y_i) = -m_i \ddot{y}_0 \quad (i = 2 \sim N-1) \\ \text{最上層} & m_N \ddot{y}_N + k_N (y_N - y_{N-1}) = -m_N \ddot{y}_0 \end{cases} \quad (3.1)$$

(3.1)式よりモデル化した運動方程式を表すと、

$$\text{第1層} \quad c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{最上層} \quad m \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = -m \ddot{x}_0 \quad (3.3)$$

となる。

これら(3.2)式、(3.3)式の2層をマトリクス形で表せば、

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = -m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_0$$

となる。

4 模型実験と骨組モデル解析

4.1 住宅模型

ラジコンのタイヤを使用し基礎部分の模型を製作する。フレーム部分は基礎で地震時には動き、タイヤに接した四角いものと金属部分が、タイヤ止めとして設置している。

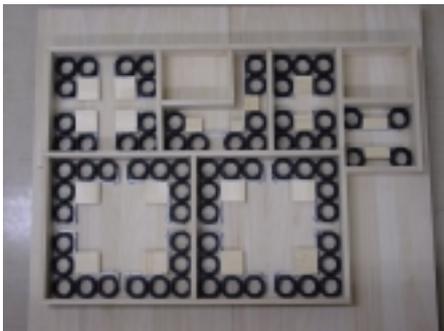


図8 1/10スケール

4.2 模型タイヤのバネ剛性

模型タイヤのバネ剛性を測る実験を行い、実験から出た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。この傾きを本研究で使用した模型タイヤのバネ剛性とする。(表1、図9参照)

表1 模型タイヤのバネ剛性の比

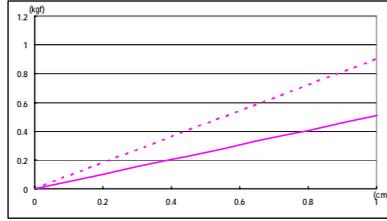


図9 実験の様子

- ・タイヤを拘束した場合のバネ剛性(点線)
 $a = 0.9038 \text{ kgf/cm}$
- ・タイヤを拘束しない場合のバネ剛性(実線)
 $a = 0.5071 \text{ kgf/cm}$

4.3 模型タイヤの骨組モデル化

Excel VBA を利用した骨組解析ソフトを使用し、本研究で使用した模型タイヤのモデル化を行う。

まず、図10のように接点、要素を与え、模型タイヤをひし形の骨組モデルとして考えた。次に、模型タイヤとのバネ剛性を合わせる為、4.2節のバネ剛性をそれぞれ K とし次式より δ を求める。 $K = \frac{1}{\delta}$ より、

$$\text{拘束がある場合} \quad 0.9 = \frac{1}{\delta} \quad \delta = 1.1$$

$$\text{拘束がない場合} \quad 0.5 = \frac{1}{\delta} \quad \delta = 2$$

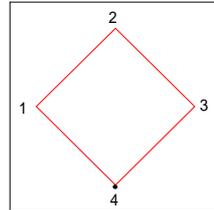


図10 骨組モデル

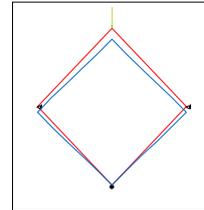


図11 拘束あり

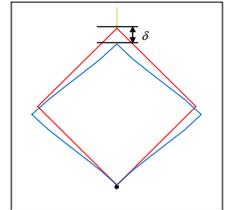


図12 拘束なし

(は完全固定を意味する)

δ を求め、ヤング係数 E を固定しそれぞれ δ の値になるよう、断面積 A と断面二次モーメント I の値を変えていった。

$$E = 1 \text{ kgf/cm}^2, \quad A = 6 \text{ cm}^2, \quad I = 1.5 \text{ cm}^4$$

これらの値を本研究のタイヤの骨組モデルとする。

4.4 模型タイヤの相互干渉

4.3節で導き出した模型タイヤの骨組モデルを使い、タイヤが2個並んで接している場合の相互干渉について調べる。図13のようにタイヤを2個並べ、模型タイヤと骨組モデルの変位をそれぞれ調べる。



図13

- ・模型タイヤのバネ剛性
 1.4 kgf/cm
- ・骨組モデルのバネ剛性
 1.2 kgf/cm

これよりタイヤ単体の場合と比べると、タイヤを並べることにより、剛性が高くなることがわかる

4.5 模型による実験

図 8 の模型を使用し、ペットボトルに水を入れ荷重を与える実験を行った。実験の様子を図 14 に示す。丸印をつけた部分のタイヤが変形している。

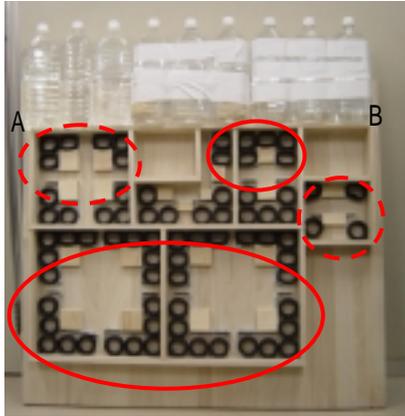


図 14 実験の様子



図 15 点線部拡大図



図 16 点線部拡大図

4.6 模型の骨組モデル解析

図 17 は図 8 を骨組モデルにしたものである。タイヤ止め部分は拘束されていて、地震力の向きによって、作用するタイヤの数や位置が変わってくる。A 点と B 点の変位を骨組解析によって求める。

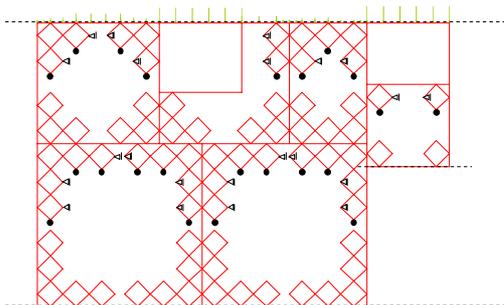


図 17 骨組モデル

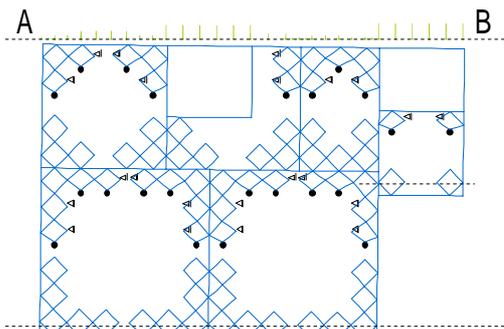


図 18 荷重を与えた時

4.7 実験結果と解析結果との比較

4.5 節と 4.6 節の実験の結果を表 2 に示す。両実験とも A 点と B 点では B 点の変位の方が大きいことがわかった。これは、A 点と B 点での作用するタイヤの数が大きく影響していると考えられる。

表 2 実験結果と解析結果の比較

荷重の大きさ (kg)	模型による実験		モデル化による解析	
	A 点変位 (cm)	B 点変位 (cm)	A 点変位 (cm)	B 点変位 (cm)
1	0.05	0.10	0.03	0.05
2	0.10	0.15	0.07	0.10
3	0.15	0.20	0.10	0.15
4	0.20	0.29	0.14	0.20
5	0.28	0.35	0.17	0.25
6	0.30	0.40	0.20	0.30
7	0.35	0.50	0.24	0.35
8	0.37	0.51	0.27	0.40
9	0.38	0.52	0.31	0.45
10	0.40	0.60	0.34	0.50
11	0.45	0.75	0.37	0.55
12	0.48	0.89	0.41	0.60
13	0.50	0.90	0.44	0.65
14	0.55	1.00	0.48	0.70
15	0.57	1.10	0.51	0.75
16	0.60	1.20	0.54	0.80

この結果より、

- ・ 模型のパネ剛性 18.0kgf/cm
- ・ 骨組モデルのパネ剛性 23.8kgf/cm

以上より、模型と骨組モデルのパネ剛性を比べると、模型の精度等を考慮するとほぼ同じであると考えてよい。

5 免震住宅骨組モデル解析

4 節で、模型と骨組モデルのパネ剛性は、ほぼ同じであるとわかった。これより、実際の住宅のパネ剛性を知るため、本来のスケールで骨組モデル化し解析を行う。

5.1 タイヤの骨組モデル化

タイヤのパネ剛性は、

拘束した場合 $a = 16.8 \text{kgf/cm}$

拘束しなかった場合 $a = 9.4 \text{kgf/cm}$

4.3 節と同じ方法により、タイヤの骨組モデルのデータは、 $E = 10 \text{kgf/cm}$ 、 $A = 110.5 \text{cm}^2$ 、 $I = 2924 \text{cm}^4$ となる。

5.2 骨組モデル解析

解析結果を表 3 に示す。

表 3 解析結果

荷重の大きさ (kg)	A 点変位 (cm)	B 点変位 (cm)
1	0.00183	0.00268
2	0.00365	0.00536
3	0.00548	0.00804
4	0.00730	0.01072
5	0.00913	0.01340
6	0.01095	0.01608
7	0.01278	0.01876
8	0.01460	0.02144
9	0.01643	0.02412
10	0.01825	0.02680
11	0.02008	0.02948
12	0.02190	0.03216
13	0.02373	0.03484
14	0.02555	0.03752
15	0.02738	0.04020
16	0.02921	0.04288

表 3 より住宅骨組モデルのパネ剛性は、443.9kgf/cm となる。

6 解析シミュレーション

6.1 地震応答解析

Excel VBA を利用した振動解析ソフトを使用し地震応答解析を行った。

免震建物の解析を行う為に、まず、柱脚部の滑りに対する摩擦係数を定める。次に、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、基礎バネの剛性を非常に高くし、これを超えると、タイヤのバネ剛性に变化させる。すなわち、基礎バネの荷重 - 変位関係を Bi-Linear 型にモデル化する。

図 19 は、データ入力のためのフォームを示し、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。

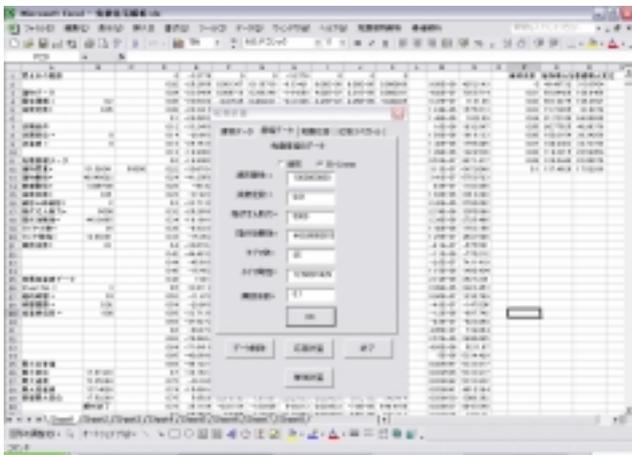


図 19 地震応答解析

建物のデータは固有周期を 0.5 s 、減衰定数を 0.05 、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 5.2 節の結果より、 443.9 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。廃タイヤの数は、四方から地震力を与えた時に、タイヤの作用する数が一番少ないのを取ることとし、 35 とし計算した。

6.2 解析結果

表 4 はそれぞれ建物質量 40 t の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。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。解析より、普通コンクリートの摩擦係数 $0.3\sim 0.4$ では、建物がほとんど動かなかった。また、加速度倍率が低い場合は、タイヤの影響を受けず、 800 gal 、 1000 gal では、多少ではあるがタイヤの影響を受けた。

表 4 解析結果

加速度倍率	摩擦係数	タイヤあり		タイヤなし	
		最大加速度	基礎変位	最大加速度	基礎変位
200gal	0.05	73.3	1.9	58.7	2.2
	0.1	111.0	1.0	109.3	1.2
	0.3	305.5	0.1	305.5	0.1
	0.4	381.2	0	381.2	0
400gal	0.05	132.7	7.1	68.8	8.5
	0.1	146.6	3.8	117.3	4.3
	0.3	318.3	0.5	318.2	0.5
	0.4	411.2	0.8	404.8	0.8
800gal	0.05	287.0	20.7	90.5	75.8
	0.1	265.5	14.1	137.5	17.0
	0.3	373.3	6.1	335.3	7.0
	0.4	443.9	4.0	437.2	4.7
1000gal	0.05	369.1	27.9	102.1	80.5
	0.1	337.0	20.4	148.7	37.1
	0.3	418.2	9.7	342.1	9.8
	0.4	486.2	7.2	459.1	8.3

7 結論

本論文では、昔の建物を参考に基礎を緊結しない工法を提案し、また、大規模地震時に建物の滑る範囲を制御するため、廃タイヤを基礎内部に設置し、干渉バネとして利用することを提案している。本研究では、この工法の有効性を検討するため、模型を製作し、また、これを骨組構造にモデル化することにより解析を行った。

タイヤ実験より、タイヤを拘束した場合としなかった場合の比較で、拘束した場合の剛性が拘束しなかった場合の剛性の約 1.8 倍になることがわかった。また、タイヤの相互干渉より、タイヤ 2 個を並べ、荷重を与えると、タイヤ 1 個の拘束時の場合と比べて剛性が約 1.5 倍になることがわかった。模型実験により、模型と骨組モデルの剛性を比較すると、多少の差はあったものの、模型の精度などを考慮するとほぼ同じであることがわかった。また、基礎の降伏後の剛性は、昨年、榎葉が導いた数値(タイヤ 1 個の剛性×数)より、約 1.3 倍大きくなることがわかった。

その結果、地震応答解析において、普通コンクリートの摩擦係数 $0.3\sim 0.4$ では、建物はほとんど移動せず、最大加速度 200 gal 、 400 gal の場合では、タイヤの影響を受けないことがわかった。しかし、最大加速度 800 gal 、 1000 gal の場合では、多少ではあるがタイヤが干渉バネとして働くことがわかった。

今回の解析は、タイヤの剛性が、一定の範囲で行っている。しかし、実際には、変形が進むと、タイヤは硬化するため、そのような影響を考慮した解析が今後必要である。また、基礎内に設置したときのタイヤの臭いや防火の問題も解決しなければならない。

参考文献

- 1) 一条工務店 <http://www.ichijo.co.jp/contents.html>
- 2) ダイワハウス <http://www.daiwahouse.co.jp/jutaku/menshin/>
- 3) セキスイハイム神奈川 <http://www.kanagawa-sekisui.com/>
- 4) 柴田明德：最新耐震構造解析、森北出版
- 5) 榎葉亮：平成 14 年度卒業論文