

近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 16 年度		番号 氏名	01168067
指導教官	藤井 大地 助教授		高橋 修登
題名		廃タイヤを利用した免震基礎の実験と解析に関する研究	

1. はじめに

近年、環境問題に関心が高まっている中、産業廃棄物の建材への利用が様々試みられている。この中で、榛葉らは、排出量が膨大で、処理方法が問題になっている廃タイヤに注目し、これを建築分野に利用することを検討している。

榛葉らの¹⁾提案では、基礎部を水平方向に切断し、静止摩擦力を超えると滑る免震基礎の変位制御に廃タイヤを利用することを考えている。図-1 は、このような免震基礎のモデルを示している。しかし、榛葉らの提案する方式では、タイヤのバネ剛性が小さすぎて、ほとんど滑る変位が抑制されないことと、タイヤ自身が可燃性のものであるため、火災時の防災の観点で問題があることが明らかになった。

そこで、本研究では、タイヤ部分の剛性を上げること、防火性を高めるために、廃タイヤを土に埋めることを考えた。調査の結果³⁾、廃タイヤのゴムの分子は、土壌中で分解されるのに数百年（約 1100 年）かかるため、土に埋めても、タイヤの弾性力には、ほとんど影響がないことがわかった。したがって、このような方法は十分可能であると考えられる。

そこで、本論文では、榛葉らと同様の解析方法により、本論文で提案する土で埋めた廃タイヤ免震基礎の有効性を検討する。

以下、本概要 2 章では、廃タイヤを利用した免震基礎を有する戸建住宅モデルの地震応答解析法を示す。3 章では、実建物モデルの廃タイヤの剛性を求めるための解析と模型実験について説明する。4 章では、2 章に示した地震応答解析モデルにより、地震応答解析を行い、本論文で提案する廃タイヤ免震基礎の有効性を検討する。5 章では、以上のまとめを述べる。

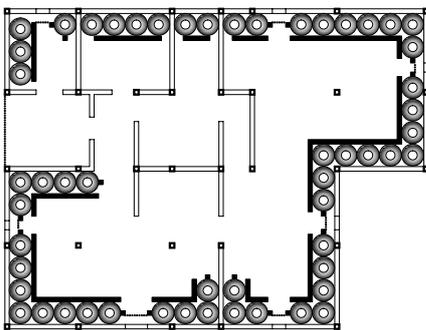


図-1 基礎内部にタイヤを配置

2. 免震建物の地震応答解析

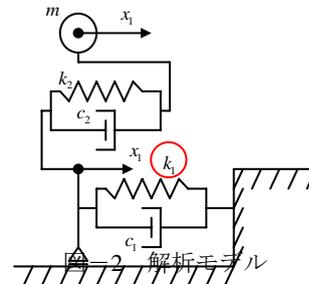
本論文では、まず、免震建物の設計に利用することを目的として、Excel VBA を利用した振動解析ソフトを作成した。¹⁾

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⁴⁾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、 \ddot{x}_0 は地動加速度である。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変化させる。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。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. 廃タイヤの剛性を求めるための解析と模型実験

(1),(2)式の運動方程式を用いて解析を行うが、建物の質量、剛性、減衰、基礎の減衰は一般的な値を与えることができますが、タイヤの剛性 k_1 が分からない。そこで、その剛性を導くために模型を製作し骨組解析とシミュレートすることにより、実際のタイヤによる剛性を導く。模型実験に用いられるタイヤは、ラジコンの模型タイヤを用いている。

まずタイヤ 1 個の剛性を計測する。図-3(左)はタイヤの両端を拘束してない実験の写真・図-3(右)は骨組モデルを示している。図-4(左)はタイヤの両端を拘束している実験の写真・図-4(右)は骨組モデルを示している。骨組モデルにおいて拘束していない場合は⑤部材(A_2)だけで近似し、拘束した場合は①②③④部材(A_1)で近似する。図-5 は、図-3・図-4 の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、拘束無は 0.5093 (kgf/cm) 、拘束有は 2.2130 (kgf/cm) となり、拘束すると約 4 倍になることが分かった。解析では実験の結果と整合するように模型タイヤの材料定数を $E=1(\text{kgf/cm}^2)$ 、 $A_1=13.5(\text{cm}^2)$ 、 $A_2=2.85(\text{cm}^2)$ 、 $I=0.0001(\text{cm}^4)$ とした。

次に、製作した 1/10 模型(図-6 参照)を元に骨組モデル化し、犬走り部分に荷重を加えた。また、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。解析で作用されないと思われるタイヤを省くと全体解析モデルは図-7 のようになった。この実験の荷重変位

関係を計測し,同様に,線形剛性を求めると,縮尺 1/10 の基礎部分模型は 26.3 (kgf/cm),解析では 31.3 (kgf/cm) となりほぼシミュレートできている。

図-8 は実物廃タイヤ拘束無の圧縮試験機を用いてバネ剛性を計測した実験を示す。図-9 は,このときの荷重変位関係を示している。同様に,線形剛性を求めた結果,9.4 (kgf/cm) となった。実物廃タイヤでは拘束の無い場合しか行っていないので先程の模型タイヤの結果より拘束有と拘束無を比較すると,4倍になっている。そこで,実物タイヤも4倍になると仮定し拘束した場合の剛性を 37.6 (kgf/cm) と設定した。

そして,模型スケールと同じように実験と解析を整合させ,実物タイヤの解析上の材料断面定数を決めた。それぞれの値は, $E=10(kgf/cm^2)$, $A_1=223.5(cm^2)$, $A_2=52.65(cm^2)$, $I=0.0001(cm^4)$ となる。その値を用い,全体解析モデルを実物大スケールにあわし解析を行った結果,免震基礎の剛性が 536 (kgf/cm) となった。この剛性を免震基礎の降伏後剛性とする。

- ・ 1~4はそれぞれ節点番号を表す。
- ・ ①~⑤はそれぞれ要素番号を表す。
- ・ △はピン支持を表す。
- ・ ◡はローラー支持を表す。
- ・ 矢印は荷重を表す。



図-3 拘束無の実験装置とその骨組モデル

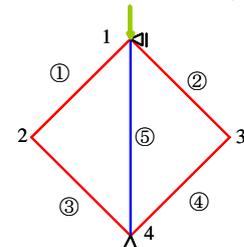


図-4 拘束有の実験装置とその骨組モデル

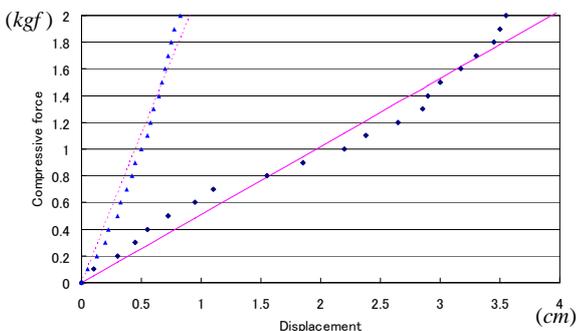
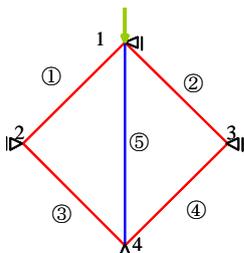


図-5 荷重-変位グラフ(模型実験拘束有・無)

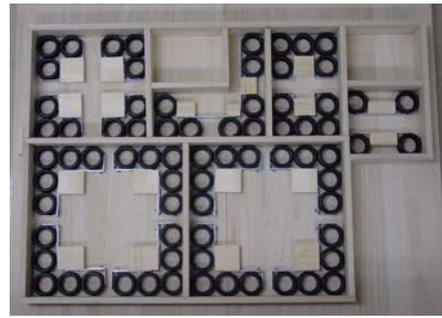


図-6 模型タイヤを使用した基礎伏 1/10 模型

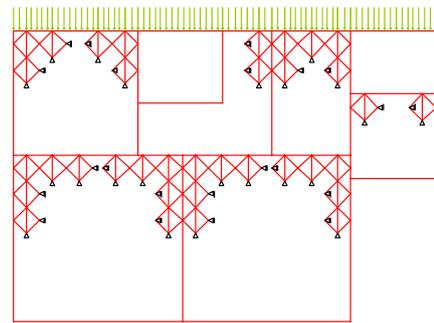


図-7 全体解析モデル



図-8 実物廃タイヤの実験の様子

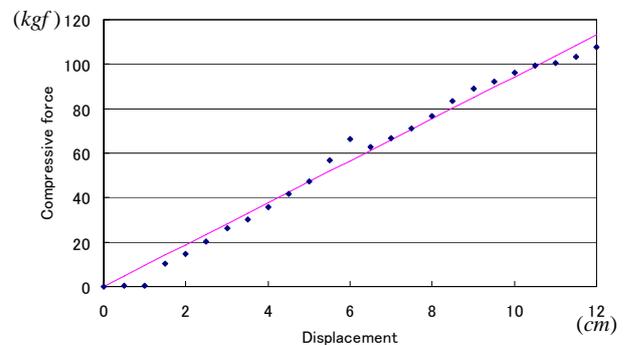


図-9 荷重-変位グラフ(実物廃タイヤ)

本研究の,課題である火災時の防災とタイヤのバネ剛性を大きくすることを目的として,タイヤを砂で埋めるモデルの検討も行った。まず,砂を入れたタイヤ1個の水平拘束無・有の剛性を計測する実験を行った。図-10(左)は水平拘束無でタイヤの中だけ砂を入れた場合で,図-10(右)は実験中の様子を示している。図-11 は水平拘束有で砂を入れた場合を示している。図-12 は,この実験により計測された荷重変位関係を示している。同様に,線形剛性を求めると,拘束なしの場合は 0.828 (kgf/cm),拘束ありの場合は 7.097 (kgf/cm) になった。解析では実験の結果と整合するように模型タイヤの材料定数を $E=1(kgf/cm^2)$, $A_1=49.6(cm^2)$, $A_2=4.65(cm^2)$, $I=0.0001(cm^4)$ とした。

図-13 は図-6 に砂を被せ、防災とタイヤのバネ剛性を大きくすることを考慮したモデルである。このモデルも図-7 と同じように骨組モデルにし、実験と解析を行ったところ、実験では134.4 (kgf/cm)、解析では 175.6 (kgf/cm) となった。解析の方が若干高剛性となるが、ほぼ実験をシミュレートできていると思われる。

そして、砂入りの場合も、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決定した。それぞれの値は、 $E=10(kgf/cm^2)$ 、 $A_1=820.245(cm^2)$ 、 $A_2=85.8195(cm^2)$ 、 $I=0.0001(cm^4)$ となる。また、図-7 の全体解析モデルを、実物大スケールにあわせ、解析を行なった結果、1611 (kgf/cm) となった。この剛性を免震基礎の降伏後剛性とする。

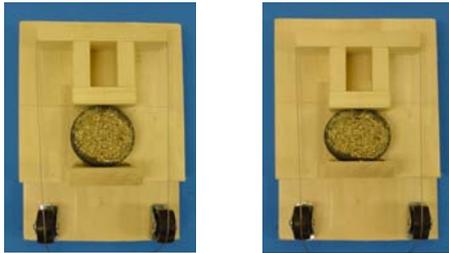


図-10 水平拘束無の実験(タイヤに砂を被せる)

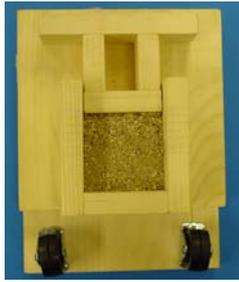


図-11 水平拘束有の実験(タイヤに砂を被せる)

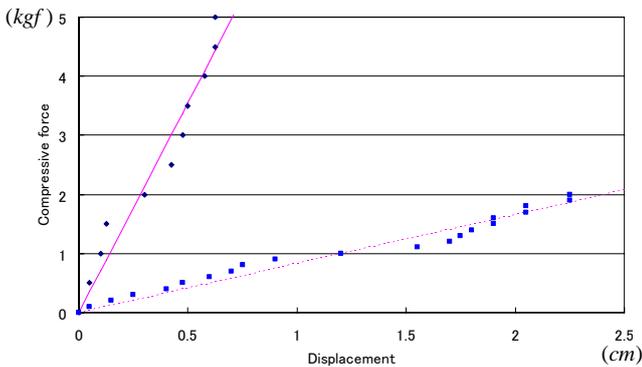


図-12 荷重-変位グラフ(タイヤに砂を被せる)



図-13 図-6 模型を砂で埋めた基礎伏せ 1/10 模型

4. 免震戸建住宅の地震応答解析

第3章で求めた廃タイヤ剛性を用いて、図-2 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、近年起こった地震を選択した。それぞれ、広島県内で被害をもたらした芸予地震、プレート内地震として規模の大きい宮城県沖地震、長周期が確認された十勝沖地震、直下型の新潟中越地震である。表-2 は解析結果を示している。地盤と基礎を切り離した場合、コンクリートの摩擦係数が0.3~0.5 であるため、摩擦係数は $0.3 \cdot 0.4 \cdot 0.5$ とし、地盤と基礎を完全固定した場合の解析を行い、建物の最大加速度と基礎部分の最大変位を求めた。なお、摩擦係数 ∞ は、基礎と地盤が緊結された場合を想定している。

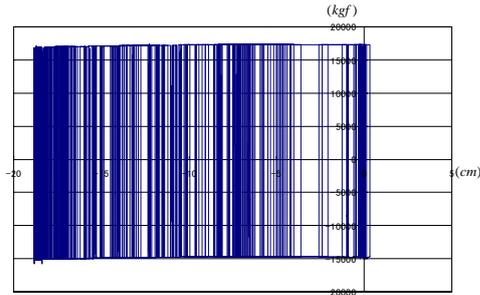
表-2 より、芸予地震、宮城県沖地震、十勝沖地震に関しては、タイヤなしに比較してタイヤありの最大変位が小さくなっている。特に、十勝沖地震ではその傾向が顕著である。図-14 は一定の剛性に達したら滑り出す様子がわかるようにした Bi-Linear で、横軸が変位で縦軸が基礎のせん断力である、こちらでも最大変位が小さくなるがよく分かる。しかし、新潟県中越地震では、タイヤなしに比較して、タイヤありの最大変位が大きくなる場合がある。これは、滑動後の免震建物の固有周期が、新潟県中越地震の波動と共振したためであると考えられる。(図-15・図-16 参照)

表-1 解析データ

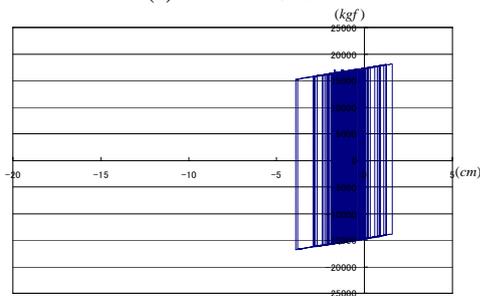
建物データ	固有周期	0.2(s)
	減衰定数	0.05
	建物質量	40000(kgf)/980(cm/s ²)
	建物剛性	39478417.61(kgf/cm)
基礎データ	初期剛性	10 ⁹ (kg/cm)
	減衰定数	0.01
	降伏せん断力	[建物質量×980×摩擦係数](kgf)
	降伏後剛性	536(kg/cm)、1611(kg/cm)
	継続時間	100(s)~120(s)
地震加速度データ	地震波	・芸予地震 ・宮城県沖地震 ・十勝沖地震 ・新潟県中越地震
	時間間隔	0.01(s)、0.02(s)

表-2 解析結果

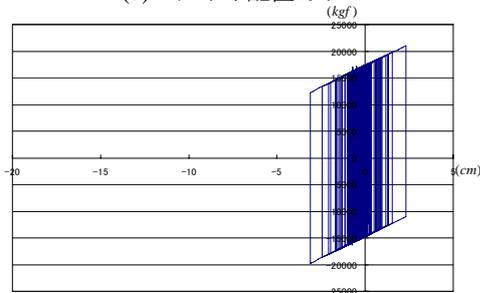
地震名	方位倍率	タイヤなし		タイヤあり		タイヤあり砂入り		
		摩擦係数	建物最大加速度	基礎最大変位	建物最大加速度	基礎最大変位	建物最大加速度	基礎最大変位
芸予地震	N-S波	0.3	321.30(gal)	1.9(cm)	317.12(gal)	1.4(cm)	322.54(gal)	1.1(cm)
		0.4	419.30(gal)	1.1(cm)	418.63(gal)	1.0(cm)	421.40(gal)	0.9(cm)
		0.5	518.46(gal)	0.4(cm)	517.87(gal)	0.4(cm)	522.63(gal)	0.4(cm)
	E-W波	∞	803.95(gal)	0(cm)	803.95(gal)	0(cm)	803.95(gal)	0(cm)
		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)
宮城県沖地震	N-S波	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)
		0.3	337.13(gal)	3.7(cm)	372.09(gal)	3.8(cm)	454.96(gal)	3.6(cm)
	E-W波	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)
十勝沖地震	N-S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)
	E-W波	∞	3703.18(gal)	0(cm)	3703.18(gal)	0(cm)	3703.18(gal)	0(cm)
		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)
新潟県中越地震	N-S波	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)
		0.3	348.36(gal)	22.1(cm)	365.77(gal)	4.4(cm)	445.78(gal)	3.4(cm)
	E-W波	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)
免震基礎	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)
	E-W波	∞	1511.52(gal)	0(cm)	1511.52(gal)	0(cm)	1511.52(gal)	0(cm)
		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)
免震基礎	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)	



(a) タイヤなし



(b) タイヤ配置あり



(c) タイヤ配置あり砂入り

図-14 十勝沖地震 EW 波 摩擦 0.4

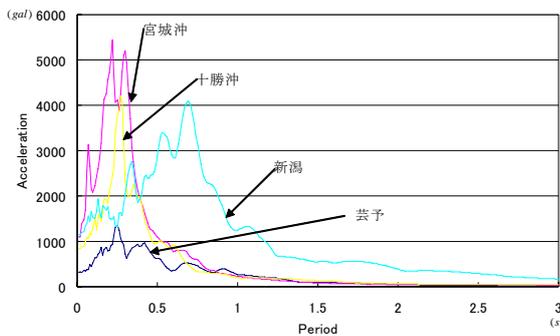


図-15 加速度応答スペクトル (NS 波)

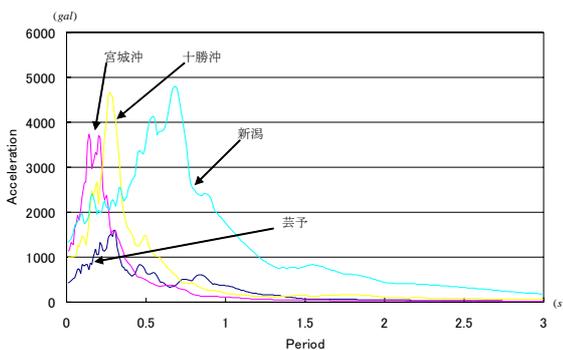


図-16 加速度応答スペクトル (EW 波)

そこで基礎の減衰を 1%から 5%,10%に変えて,新潟中越地震(タイヤあり砂入り)を解析しなおした。表-3 はその解析結果を示している。減衰を 1%と比較して減衰 5%, 10%は最大変位が小さくなり,変位制御されることが分かる

表-3

地震名	方位倍率	基礎減衰	摩擦係数	タイヤあり砂入り	
				建物最大加速度	基礎最大変位
新潟県中越地震	N-S波	0.01	0.3	1041.90(gal)	19.0(cm)
			0.4	922.65(gal)	13.5(cm)
			0.5	788.43(gal)	7.6(cm)
	E-W波		0.3	1211.59(gal)	23.1(cm)
			0.4	1061.70(gal)	16.8(cm)
			0.5	951.51(gal)	11.5(cm)
	N-S波	0.05	0.3	800.22(gal)	10.7(cm)
			0.4	784.56(gal)	7.9(cm)
			0.5	774.86(gal)	5.7(cm)
	E-W波		0.3	936.88(gal)	13.9(cm)
			0.4	902.39(gal)	10.8(cm)
			0.5	848.02(gal)	7.4(cm)
N-S波	0.1	0.3	813.19(gal)	6.6(cm)	
		0.4	814.72(gal)	5.4(cm)	
		0.5	811.52(gal)	4.1(cm)	
E-W波		0.3	892.18(gal)	9.4(cm)	
		0.4	865.02(gal)	7.2(cm)	
		0.5	833.91(gal)	4.8(cm)	

5. 結論

本研究は, 榛葉らが提案した廃タイヤを利用した免震基礎工法を進展させ, タイヤの剛性を大きくし, 基礎部分の変位抑制を増やし, また, 火災時の防災を考慮するため, タイヤを砂に埋めた免震基礎工法を提案した。

実験を解析でシミュレートし, 実物大モデルの砂に埋めたタイヤ剛性を求め, そのタイヤ剛性を用いて, 数種の地震波に対する地震応答解析を行った。その結果, ほとんどの地震波では, 砂に埋めた廃タイヤによる変位制御が有効であることがわかった。

また, 新潟県中越地震については廃タイヤの変位制御効果が見られなかったが, これは, 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, タイヤ及び砂の変形による減衰を考慮していないためと考えられたため, 減衰を大きくした解析によってこのことを検証した結果, 減衰を考慮することにより新潟県中越地震についても廃タイヤの変位制御効果があることがわかった。

参考文献

- 1) 榛葉亮, 藤井大地, 廃タイヤを利用した住宅免震に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, pp.151-154, 2003.3
- 2) 榛葉亮, 藤井大地, 廃タイヤを利用した住宅免震(その 2. 廃タイヤの剛性評価と応答解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.435-436, 2004.8
- 3) (株)フクナガエンジニアリング <http://www.kyklostire.com/>
- 4) 柴田明德, 最新耐震構造解析, 森北出版