

3匹の子ぶたの家の地震応答～最も賢い子ぶたはだれか～

田中 亮多¹, 森 文香²

¹ 東大寺学園高等学校, ² 福井県立藤島高等学校

要旨

3匹の子ぶたの物語には藁、木、煉瓦の3つの家が登場する。オオカミに吹き飛ばされなかったのは煉瓦の家である。では、子ぶたを襲ったのがオオカミではなく、地震であったらどうなるか。現実世界で耐震性が高いのは、同様に煉瓦の家なのか、それとも藁や木の家なのか疑問を持った。

本研究では、まずこれら3種類の材料特性を把握することにした。これら材料で片持ち梁を作製し、先端におもりを下げ、部材形状とそのときのたわみの測定値からヤング係数を算定した。次に、棒材とおもりにより1質点系モデルを作製し、小型振動台上で振動させ、共振周期を測定した。各材料のヤング係数を用いて算定した振動周期とを比較した。さらに3種類の材料を用いて製作した建物の縮小モデルでの振動台実験を行った。周期と振幅が異なる幾種類かのsin波を入力し、振動性状を比較した。最後に建物モデルが破壊するまで振幅を徐々に大きくする実験を行った。

以上のような実験および数値解析結果から、どの材料で製作された家にも耐震性に優れているといえる特性があることがわかった。特に木の家は振動させても倒壊することはなく、振動によって倒壊した藁の家や損傷した煉瓦の家と比較して耐震性に優れていた。一方、耐震性が高いとはどういう意味なのかについても考察した。自重が軽い藁は倒壊しても住む人に危害を加える可能性が低い点においては耐震性に優れているといえる。

重要語句：ヤング係数，強度，振動方程式，振動台，周期，建物，耐震性

序論

3匹の子ぶたはお馴染みの物語であり、誰もが煉瓦の家の強度が高いイメージを持つだろう。しかし、藁、木、煉瓦の3つの家の中で強度が最も高いのは本当に煉瓦の家なのだろうか。そこで我々は3つの家の耐震性について考察することを目的とした。地震に強いという定義を考えてみると倒壊の可能性が低いこと、地震動に共振しにくいことなどが挙げられるが、本研究では倒壊しにくく、また倒壊しても住む子ぶたに被害を与える可能性が

小さいことを「地震に強い」あるいは「耐震性が高い」の定義とした。

地震は日本人にとって身近な現象であり、建築物を設計する際に考慮すべき点である。人間の命を守る建築物の役割である優れた耐震性を持つ家を製作した最も賢い子ぶたを特定するためには、3つの材料それぞれの特性を十分に理解することが必要不可欠である。

まずこれら3種類の材料特性を把握することにした。これら材料で片持ち梁を作製し、先端におもりを下げ、部材形状とそのときのたわみの測定値からヤング係数を算定した。次に、棒材とおもりにより1質点系モデルを作製し、小型振動台上で振動させた。実験から得られた応答性状と振動方程式から導かれた計算値を比較し、入力波と応答の関係を調査した。これにより、減衰力の影響や実験における測定値の信頼性について考察した。

さらに3種類の材料を用いて製作した建物の縮小モデルでの振動台実験を行った。周期と振幅が異なる幾種類かのsin波を入力し、加速度、速度、変位などの応答性状を比較した。最後に建物モデルが破壊するまで振幅を徐々に大きくする実験を行った。

材料実験

概要

3つの材料の力学特性を調べる。振動方程式を用いて入力に応じた応答が生じているかを確認し、実験における誤差の原因を考察する。

方法・結果

1) 片持ち梁の先端におもりを吊り下げ、たわみ δ の測定値からヤング係数 E を算定する。

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI}$$

2) 棒材とおもりにより作製した1質点系モデルを振動台上で振動させ、共振する振動数 f を記録し、剛性 k とヤング係数 E を求める。

内容に関する連絡先：

西山 峰広（京都大学大学院工学研究科）

nishiyama.minchiro.8a@kyoto-u.ac.jp

表1 材料特性

材料	質量 m (kg)	振動数 f (Hz)	剛性 k (N/m)	ヤング係数 E (N/mm ²)
藁	2.83×10 ⁻¹	3.35	7.42×10 ¹	1.48×10 ¹
木	1.22	1.42×10 ¹	7.48×10 ³	1.50×10 ³
煉瓦	9.72×10 ⁻¹	4.51	8.39×10 ¹	1.68×10 ¹

体積は木、煉瓦は20×20×120 (mm)、藁はおおむね体積が一致するように束を制作した。図の質量mはこれらを測定した質量の値を表示している。

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{3EI}{l^3}$$

3) 振動方程式用いて実験結果と計算結果を比較する。
振動方程式

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -ma$$

の右辺を入力、左辺を応答として比較

- m：質量 (kg)
- $\ddot{x}$ ：相対加速度 (m/s²)
- c：減衰定数 (N・s/m)
- $\dot{x}$ ：相対速度 (m/s)
- k：剛性 (N/m)
- x：相対変位 (m)
- a：入力加速度 (m/s²)

表1に示すように剛性とヤング係数は、木、煉瓦、藁の順で大きい。また、入力と応答に誤差は見られたものの、図1からおおむね概形が一致したことが分かる。しかしここで測定した材料のヤング係数は一般的な材料のヤング係数とは異なる。その理由として、藁は束にする際の結び方、煉瓦は接着剤の強度が1) 2) において影響したことが考えられる。また、全ての部材における誤差の原因としては減衰力 (cx) を考慮していない点や、今回は棒状の材料を用いたため材料ごとの特性が表れにくかった点が考えられる。

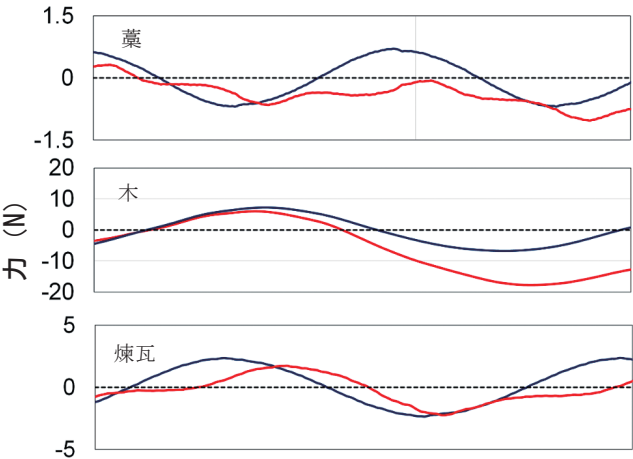


図1 運動方程式における入力と応答の比較 (赤：応答 青：入力)

建物実験 1

概要

建物の縮小モデルを製作して3種類のsin波で振動させる。加速度計による計測結果から、加速度、速度、変位を求め、3種類の材料でできた建物の振動性状を比較する。

方法・結果

- 1) 振動台を用いて以下の3種類のsin波で加振し、加速度計により加速度を計測した。
 - ア) 入力加速度2.2 m/s² 振動数4.5 Hz
 - イ) 入力加速度3.5 m/s² 振動数7.0 Hz
 - ウ) 入力加速度3.4 m/s² 振動数25 Hz
- 2) 得られた加速度から変位、速度を算定した。

設計・施工

振動台の寸法を考慮し、建物の縮小モデルの寸法を決定した。

- 寸法 柱 20×20×120 (mm) 4本
- 梁 20×20×80 (mm) 4本
- 藁 乾燥した藁を直径20 mmになるようにタコ糸で束にして作成
- 木 エゾ松の角柱を木工用ボンドで接着し作成
- 煉瓦 1×1×2 cmのレンガを瞬間接着剤で接着し作成 図3のように組み合わせて柱、梁を作成

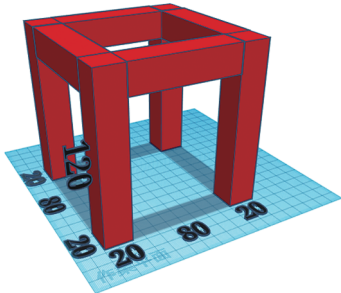


図2 設計寸法



図3 建物モデル写真

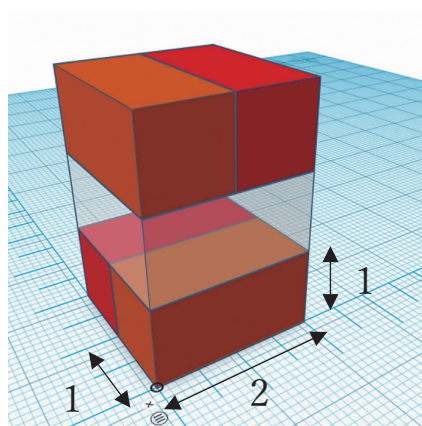


図4 煉瓦・梁・柱 接合部分

(おもりはそれぞれの屋根と梁の間の部分に加速度計とともに固定して振動させた)

加速度、速度、変位のいずれも藁が最も大きい値を示したが、木と煉瓦の間にはあまり差が見られなかった。

建物実験 2

概要

3つの建物の倒壊の様子を観察するため、建物が倒壊するまで振幅を大きくする。

破壊状況

藁は柱脚の固定が外れて振動台から転落し、屋根が落下した。煉瓦には柱の接着剤の部分からの損傷が見られた。木は倒壊しなかった。

考察

部材実験について

振動方程式で導いた入力値(外力)と部材の応答(慣性力+復元力)がおおむね一致し、それぞれの材料特性と減衰力が把握できた。

また、この材料特性から次の実験で、藁が一番大きな変位を示すのではないかと予測できた。

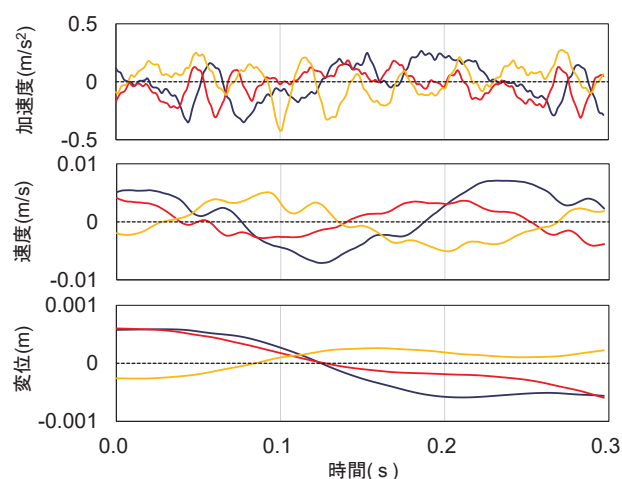
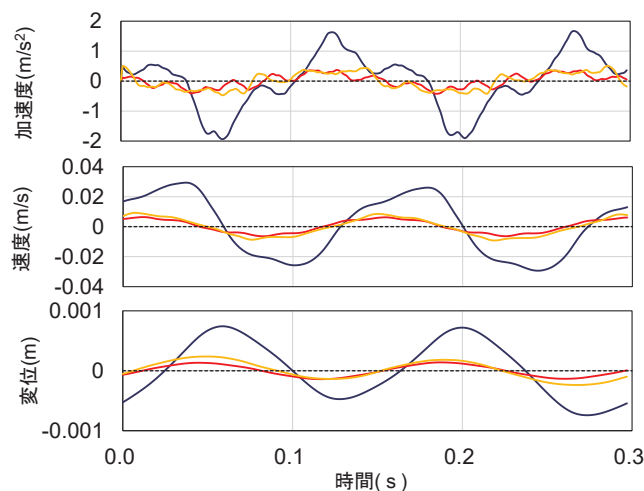
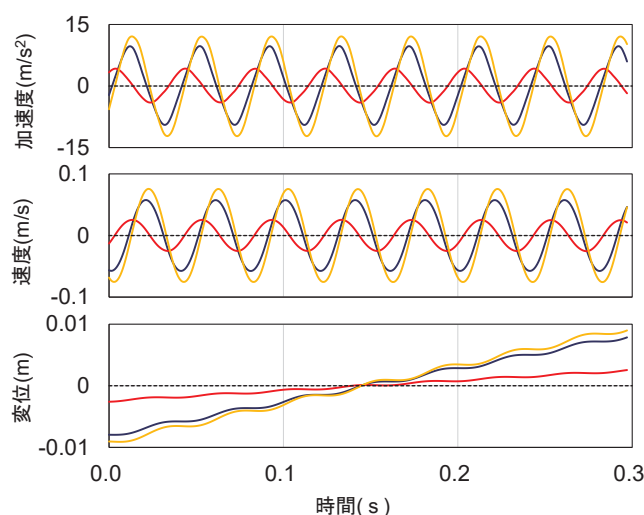
同じsin波入力で3つの建物の振動性状比較

木、煉瓦の変位はほぼ一致し、藁はそれら2つのおよそ3~4倍の変位を示した。このように藁は木や煉瓦の比べて最も大きい変位を示し、剛性から予想された応答が確認できた。

また、藁と煉瓦の剛性が近い値なのに変位に大きな差が出たのは、藁の柱の振動台への接合が十分ではなかったためと思われる。

振動数の異なるsin波入力に対する振動性状比較

剛性の小さい藁は周期の長い波で大きく振動し、剛性の大きい木・煉瓦は周期の短い波で大きく振動する。

図5 入力加速度2.2 m/s² 振動数4.5 Hz (青：藁 赤：木 黄：煉瓦 以下同様)図6 入力加速度3.5 m/s² 振動数7.0 Hz図7 入力加速度3.4 m/s² 振動数25 Hz

sin波の振幅を大きくする入力による倒壊実験

この実験では左右にゆらすのみであったため、上下方向の揺れに対する耐震性は分からなかったが、煉瓦、藁

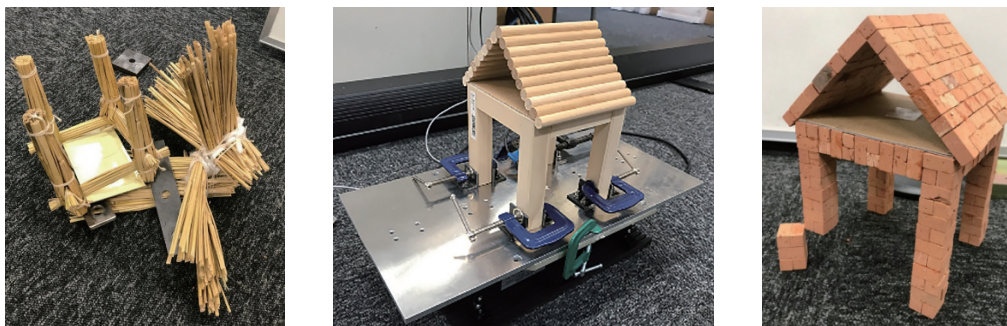


図8 破壊状況（左から藁，木，煉瓦）

ともに接合部分がはずれ，結果は同じになると考えられる．藁は徐々に建物が傾き，最終的には揺れとおもりの重さに耐えられなくなり柱の下部が振動台から外れて倒壊した．今回は，これ以上強く固定することが出来なかったが，もっと強く固定すれば，より強い振動にも耐えられたかもしれない．煉瓦に関しては，振動台に接合していた部分の境目の接合が外れ，柱1本が損傷した．

材料特性に基づいて考察すると，骨組みは最後まで壊れなかった木を使い，屋根は破損したときに内部への被害が最も少ないと思われる藁を使うのが最適と思われる．

結論

地震に強いということ，倒壊しにくく，また，倒壊した場合の内部への被害がより少ないことと定義する．この場合，破壊することが不可能であり接合も簡単である木が一番地震に強く，次いで損傷しても完全に倒壊することのなかった煉瓦が強いと考えられる．接合に関して木は木工用ボンドという材料の接合に適した接合方法を用いたため，強度が大きくなったことが考えられる．また煉瓦は，接着剤の強度が直接耐震性に影響することも分かったため，左右の揺れだけではなく，上下に揺らすなどといった条件によっては木よりも耐震性に優れることがあるだろう．藁については倒壊しても自重が小さく，危害を与える可能性が低い点では耐震性に優れているといえる．

謝辞

本研究を進めるにあたり京都大学大学院工学研究科建築学専攻の西山峰広教授，藤平剛久技術職員，TAであった劉媛さん，山田諒さんには温かいご指導を賜りました．半年間ありがとうございました．