

## 4 層骨組構造模型の浮き上がり振動台実験

## —地震波入力に対する減振効果—

Shaking table test of a four story frame model  
- Rocking effect for seismic waves -

北海学園大学大学院工学研究科  
北海学園大学工学部

○学生員  
フェロー

沢江和樹 (Kazuki Sawae)  
当麻庄司 (Shouji Toma)

## 1. はじめに

地震に対する構造物の減振効果として、ロッキングが生じた場合の研究が行われている<sup>1)2)3)</sup>。筆者らも、昨年度入力波に Sweep 波を用いた場合の浮き上がり実験を行った<sup>4)</sup>。これにより、実験で使用した4層骨組構造模型の固有値特性を確認し、Sweep 波に対する減振効果を検証した。昨年度のこの実験より得られた浮き上がり効果は、以下の通りである。

- ① 浮き上がりは共振時の1次モードで発生し、2、3次モードでは発生しなかった。
- ② 水平応答加速度については、1次モード共振時に上層部での減振効果が大きかった。
- ③ 柱のひずみについては、1次モード共振時に下層部での減振効果が大きかった。
- ④ 鉛直応答加速度は、浮き上がりが発生すると構造物がロッキング振動をするため大きくなる。特に、浮き上がりの落下時に模型が振動台に衝突し、その衝撃により局所的に過大な加速度が発生する。

本年度は、入力波に兵庫県南部地震波と ElCentro 地震波を用いて同様の振動台実験を行い、地震波入力の場合の浮き上がり効果を検証する。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験器材

## (1) 振動台

実験の状態を図-1に示す。本実験で用いた振動台は永久磁石式2軸方向振動機((株)サンエス製)であり、デジタル入力制御することができる。図-1は、水平方向振動台の上に鉛直方向の加振機が搭載されている状態である。なお、本試験では水平方向のみ加振した。

## (2) 構造模型

実験で使用した構造物は、図-1に示す4階層骨組構造物模型である。実験では、模型の床面と振動台をボ

ルトで4箇所固定したものを、固定模型とする。また、ロッキングによる浮き上がりを許容するため、ボルトを緩めた状態としたものを、浮き上がり模型とする。

## (3) 加速度計の配置

水平方向加速度計の配置は、図-1に示すように、振動台と各階床面の中央に配置する。鉛直方向の加速度計は、振動台中央、3階と最上階の床面左右に配置した。

## (4) ひずみゲージの配置

構造物の柱部材のひずみを調べるために、ひずみゲージを左側柱部材の外側片面に貼付した。貼付箇所は、図-2に示すように各階床面から1cmの位置である。

## 2.2 実験方法

本実験では、4層骨組構造物模型に図-2に示す兵庫県南部地震波と ElCentro 地震波を入力する。兵庫県南部地震は比較的継続時間が短く短周期の波形であるのに対し、ElCentro 地震波は継続時間が長く長周期の波形である。これらの地震波に対し、構造物模型を固定した場合と浮き上がりを許容した場合で、実験結果を比較する。

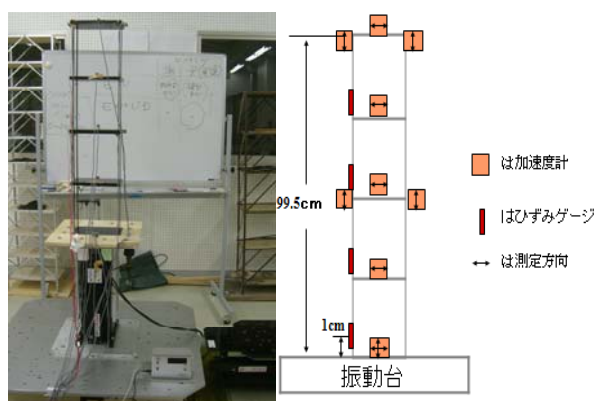


図-1 実験装置とセンサー配置

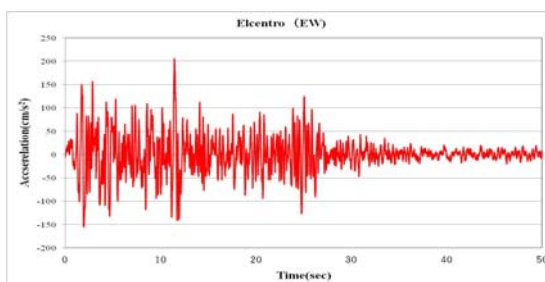
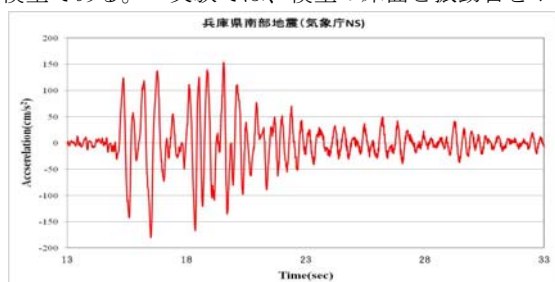
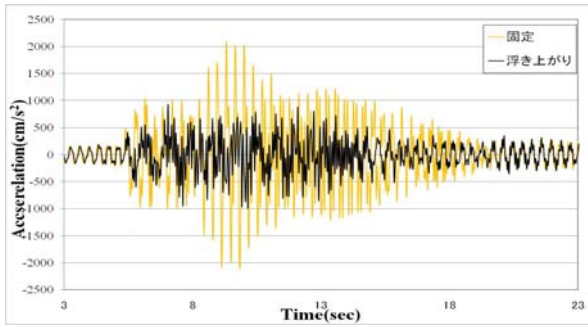
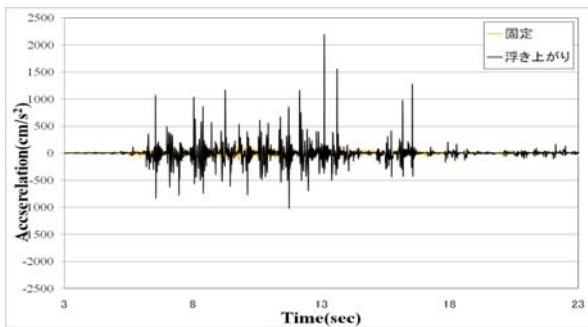


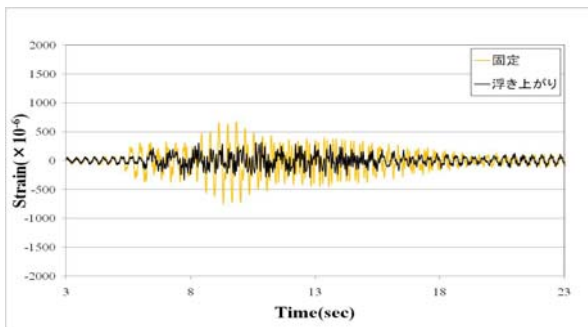
図-2 入力地震波（兵庫県南部地震波と ElCentro 地震波）



(a) 水平加速度応答（最上部（上）、2階床（下））

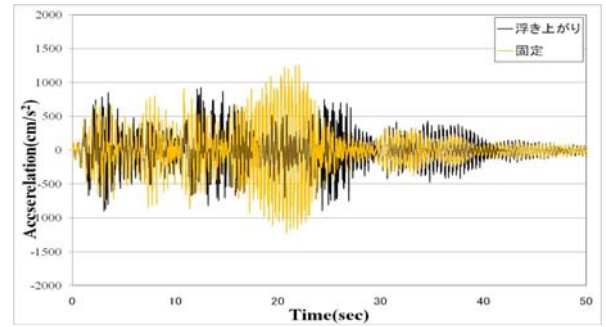


(b) 最上部（左側）鉛直加速度応答

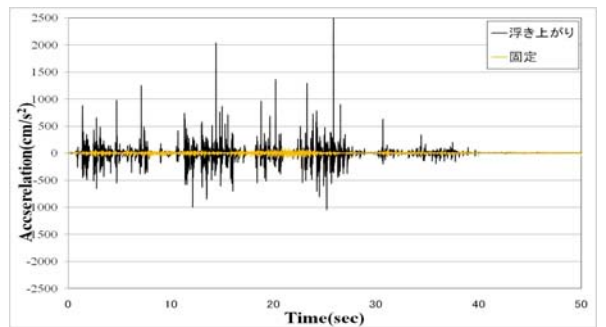


(c) ひずみの比較（4階柱（上）、1階柱（下））

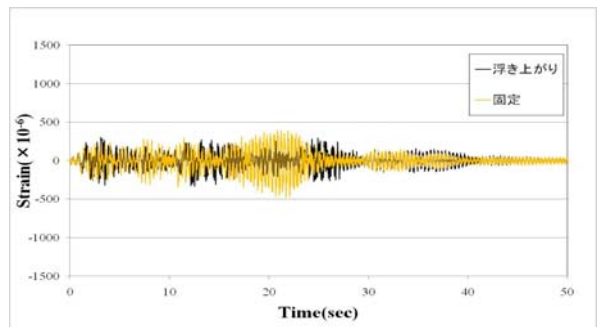
図-3 兵庫県南部地震波による応答値比較



(a) 水平加速度応答（最上部（上）、2階床（下））



(b) 最上部（左側）鉛直加速度応答



(c) ひずみの比較（4階柱（上）、1階柱（下））

図-4 ElCentro 地震波による応答値比較

### 3. 実験結果

#### 3.1 兵庫県南部地震

##### (1) 水平応答加速度

本節では、入力波を兵庫県南部地震波とした実験について述べる。入力波は、気象庁で測定された NS 地震波の 0.22 倍とした。図－3 に、それぞれ(a) 最上階（屋上）と 2 階床面の水平方向応答加速度、(b)最上階（屋上）左側の鉛直方向応答加速度および(c) 4 階柱と 1 階柱のひずみの計測結果を示した。

初めに、水平方向応答加速度について固定した場合と浮き上がりが発生した場合で比較する。図－3 (a)の下図をみると、2 階床面では浮き上がりによる減振効果が見られるものの、固定時と浮き上がり時でそれほど大きな違いがないことがわかる。

図－3 (a)の上図をみると、最上部（屋上）の水平応答加速度は、固定時の最大加速度  $2100 \text{ cm/s}^2$  に対し浮き上がり時は  $1000 \text{ cm/s}^2$  であり、浮き上がり効果による減振効果が非常に大きい。浮き上がりは 1 次モード共振時に生じるため、減振効果が最も顕著に現れたのは振幅の大きい最上部（屋上）である。3 階と 4 階の床面でも計測を行ったが、同様な傾向であった。

##### (2) 鉛直応答加速度

次に、鉛直方向応答加速度で比較する。図－3 (b)には、最上部（屋上）床面左側での鉛直方向応答加速度の測定結果を示す。浮き上がりの場合、局所的に波形が大きくなっているところがあり、これは浮き上がりにより模型と振動台が衝突したときに生じた衝撃による加速度と考えられる。鉛直応答加速度は、最上部床面右側および 3 階左右でも計測しているが、最上部左側と同様な結果であった。

##### (3) ひずみ

最後に、ひずみによる比較を行う。図－3 (c)の上図は 4 階柱、下図は 1 階柱のひずみの測定結果（片面）を示したものである。固定時には、4 階柱に比べ 1 階柱のほうがひずみは大きくなっているが、浮き上がり時には 1 階柱では大きな減少がみられた。これは、固定時は模型が振動台に拘束されているため、柱部材が大きく曲げられるためである。浮き上がり時の波形は、固定時に比べ短周期の波を含んだ複雑な形になっている。

以上より、入力波を兵庫県南部地震波として浮き上がり効果による減振効果の検証を行った結果、次のことが言える。

- ①水平方向応答加速度は、浮き上がり効果により大きな減振効果がみられた。
- ②鉛直方向応答加速度は、浮き上がりによって模型が落下時に振動台と衝突し、その衝撃によって局所的に非常に大きくなった。
- ③ひずみは、浮き上がりによって柱の曲げモーメントが小さくなるので、低層部で大きな減少が見られた。一方、最上部（4 階）では浮き上がりによるひずみの減少は小さかった。

#### 3.2 ElCentro 地震波

##### (1) 水平応答加速度

次に、入力波を ElCentro 地震波とした実験について述べる。図－4 に、実験で計測された応答加速度およびひずみの波形を示す。本実験では、ElCentro 地震波（EW）を等倍率で入力した。

初めに、水平方向応答加速度を比較する。図－4 (a)の上図は最上部（屋上）、下図は 2 階床面の応答加速度波形を示したものである。最上部（屋上）と 2 階床面の応答を全体的に比較すると、兵庫県南部地震波の時に見られたような階層による大きな違いはここでは見られない。また、浮き上がりによる水平方向応答加速度の減振効果は、兵庫県南部地震に比べ小さかった。

##### (2) 鉛直応答加速度

次に、図－4 (b)の最上部（屋上）左側で計測された鉛直方向応答加速度について比較を行う。兵庫県南部地震波の結果でも、局所的な応答加速度波形が計測されたが、ElCentro 地震波でも同様の波形が観測された。鉛直応答加速度で衝突が見られたところは、浮き上がり時の水平応答加速度が大きいところでもある。なお、3 階左側の計測結果も最上部と同じ傾向の波形であった。

##### (3) ひずみ

最後に、ひずみによる比較を行う。図－4 (c)の上図に 4 階柱、下図に 1 階柱のひずみの測定結果を示した。固定時と浮き上がり時のひずみを比較すると、浮き上がり効果により、固定時で最大ひずみが観測された 20 秒付近で、ひずみの減少が顕著にみられる。その他の範囲では、固定時と浮き上がり時で大きな波形の差は見られなかった。

以上より、入力波を ElCentro 地震波として浮き上がりによる減振効果の検証を行った結果、以下のことが言える。

- ①水平方向応答加速度では、各階層で浮き上がりによる減振効果は、兵庫県南部地震に比べ小さかった。
- ②鉛直方向応答加速度では、浮き上がり時は兵庫県南部地震同様に応答波形が局所的に大きくなっており、模型と振動台の衝突によるものであると考えられる。
- ③ひずみは、浮き上がり効果により固定時の最大応答時に大きな減少が見られた。しかし、その他の範囲では、減振効果は小さかった。

#### 4. FFT 解析結果

本節では、前節の水平方向応答加速度に FFT 解析を行い、固定時と浮き上がり時の周期成分の比較を行う。図－5 に、兵庫県南部地震を入力波とした時の各階層の FFT 解析の結果を示す。図－5 (a)は振動台における固定時の周波数成分を示し、(b)～(e)は各階層における固定と浮き上がりの比較を示す。

昨年度の実験より、本実験に用いた 4 階層骨組み模型の 1 次、2 次および 3 次の固有周波数は、それぞれ 2.9Hz、8.8Hz、13.6Hz であることがわかっている<sup>4)</sup>。図－5 をみると、これらの固有周波数付近で各階の応答が大きくなっていることがわかる。

固定時にはそれぞれの振動モードに応じて、各階での応答振幅が大きくなっている。すなわち、2 次の固有周波数（モード）では、4 階で振動の節となるため応答が

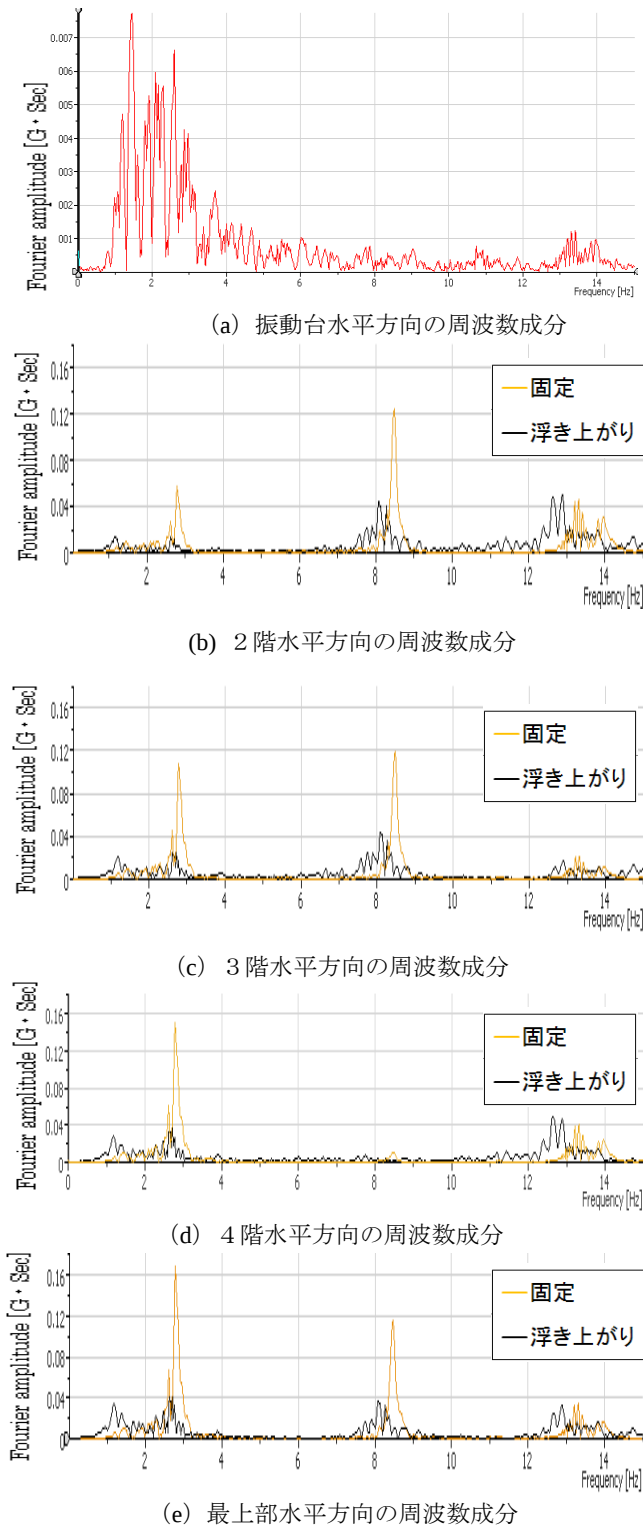


図-5 水平応答加速度のFFT解析結果(兵庫県南部地震)

小さいことがわかる(図-5(d))。そして、これらの固有周波数付近での振幅は、浮き上がりによって大きく低下している。

3次の固有周波数付近では、各層で固定時と浮き上がり時では大きさに違いはなかった。この結果より、1次と2次の固有周波数付近では浮き上がり効果により、水平加速度応答が大きく低下することがわかった。

ElCentro地震波の実験結果についてもFFT解析を行ったが、これらの結果と同様であった。

## 5. まとめ

ここでは、地震時の浮き上がりによりどのような減振効果があるかを検討するため、入力波を兵庫県南部地震波(NS)とElCentro地震波(EW)として、4層骨組構造物模型を用いて振動台実験をおこなった。この実験の結果、次のようなことがわかった。

### (1) 水平応答加速度

兵庫県南部地震では、浮き上がり時に上層部で応答加速度の大きな減振効果がみられる。ElCentro地震では、兵庫県南部地震に比べ減振効果は小さかった。

### (2) 鉛直応答加速度

双方の地震で、浮き上りの落下時に模型の底面が振動台に衝突するため、その衝撃により局所的に過大な加速度が発生した。

### (3) 柱のひずみ

浮き上がり効果により、下層部に働く曲げモーメントが大きく低下するため、双方の地震でひずみは大きく減少した。

### (4) 水平応答加速度のFFT解析

兵庫県南部地震波の水平応答加速度をFFT解析した結果、1次固有周波数付近では浮き上がりにより大きく応答は低下する。3次固有周波数では、差はほとんど生じない。ここでは示していないが、ElCentro地震波の実験でも同様の結果となった。

以上の結果より、地震波により浮き上がりによる効果の程度は異なるが、減振効果は期待できる。しかし、浮き上がり時の衝突により発生する鉛直加速度への対策が今後の課題である。

今回の実験では、模型の応答振幅が適当な大きさになるようにしたため、入力波の原波に対する倍率が兵庫県南部地震波とElCentro地震波では異なる。今後、入力波の倍率を変えたときに減振効果が変化するかどうかを検討する必要がある。しかし、両入力波で応答振幅がほぼ同様な大きさになるようにしたため、本実験により定性的な傾向は把握できたものと思われる。

また、本実験で使用した地震波以外を入力波とした場合、どのような影響を与えるのであるかも課題である。

## 参考文献

- 1) 緑川光正、須藤智文、麻里哲広、小豆畑達哉、石原正：ベースプレート降伏により柱脚浮き上りを許容した10層鉄骨架構の3次元地震応答、日本建築学会構造系論文集、第74巻、第637号、pp. 495-502、2009年3月。
- 2) 豊巻真悟、麻里哲広、緑川光正、石山祐二：構造物の浮き上がりと応答に及ぼす地震動上下成分の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、2006年9月。
- 3) 和田章、山田哲、小野泰寛、小林勝己、佐々木康人：弾性地盤上の建築構造物の地震時浮き上がり現象に関する基礎実験、日本建築学会構造系論文集、第595号、pp. 57-64、2005年9月。
- 4) 沢江和樹、当麻庄司：4層骨組構造模型の浮き上がり振動台実験—Sweep波入力に対する減振効果—、土木学会北海道支部論文、2010年2月。