

## 高密度常時微動計測に基づく杭基礎中層 RC 造建物の振動特性と動的相互作用効果

Effects of Soil-Structure Interaction and Vibration Characteristics of a Mid-Rise Pile Supported RC Building  
based on High Density Microtremor Measurement

高密度常時微動計測 中層 RC 造建物	地震観測 杭基礎	軟弱地盤 動的相互作用	正会員 同 同	○山下 善也* 福和 伸夫** 護 雅史*** 飛田 潤****	YAMASHITA Zenya FUKUWA Nobuo MORI Masafumi TOBITA Jun
------------------------	-------------	----------------	---------------	---	--

## 1. はじめに

濃尾平野中西部に位置する某市庁舎(写真 1)は、防災・減災対策の基幹である重要施設であるが、耐震性能が不足していることから、今後、耐震補強工事が計画されている。耐震補強前の建物振動特性を把握することは、被害予測や耐震補強効果評価の解析モデルの作成ならびに補強前後における振動性状の変化を捉えるために極めて重要である。また、対象建物は軟弱地盤に立地する杭基礎中層 RC 造建物であり、地盤と建物の動的相互作用効果が大きいこと、平面・立面形状が不整形であり複雑な振動特性を有すること、これらが耐震補強によって変化することが推測される。そこで本研究ではこの庁舎建築を対象とし強震観測や高密度な常時微動計測を実施することで、耐震補強前の現状の振動特性と相互作用効果の影響を把握することを目的とする。

## 2. 対象建物及び計測の概要

市庁舎は 1976 年に竣工された上部 5 階、塔屋 2 階の杭基礎 RC 造建物である。ボーリング結果より工学的基盤上面の深さは 42m と推定される。基礎形式は杭先端が GL-44.0m の PC 杭による支持杭で根入れはない。平面形状は長辺方向 8 スパン(47.2m)×短辺方向 3 スパン(25.3m)の長方形平面を基本とし、1、2 階には 1~2 スパン程度の小室が付随する。2 階には吹き抜け(長辺 1×短辺 2 スパン)を、5 階には 20.8m×14.3m の平面で 2 層吹き抜けの議事堂を有する。階高は 1 階が 4.8m で、他階が 3.8m である。強震観測として、建物内の屋上と 1 階それぞれに 2 点、地盤上に 3 点の計 7 点にそれぞれ 3 成分の地震計を設置した。常時微動計測は、地盤を中心とした L 字アレイ探査を含む微動計測 1(2012 年 11 月 4 日実施)と、建物を中心とした微動計測 2(2012 年 11 月 18 日実施)の 2 回の高密度同時計測ならびに、全強震観測点近傍(7 点)での微動計測 3(2013 年 11 月 5 日実施)を行った(図 1)。

強震観測によって得られた地震記録を表 1、図 2 に示す。

## 3. 対象建物周辺における表層地盤構造と震動特性

地盤構造とその震動特性の推定は、地震時の地盤増幅や動的相互作用効果を考慮する上で重要である。そこで市庁舎とその近傍の地盤構造に関する分析を行う。

市庁舎敷地内における L 字アレイ探査によって得られた分散曲線を図 3 に、S 波速度構造を図 4 に示す。これに同敷地内における N 値から推定した S 波速度<sup>1)</sup>を重ね描いた。堆積層における平均的な S 波速度は、層厚を重みとして求めると約 170m/s となり、軟弱な地盤であることが推測された。この平均 S 波速度を用い、1/4 波長則に基づき推定した工学的基盤からの固有振動数は 1.1Hz であり、市庁舎における微動記録の H/V スペクトル(図 5)にピークが見られる 1.0~1.3Hz は、浅部地盤に起因する卓越振動数と推測される。市庁舎から 500m 程度離れた K-NET 観測点(AIC003)と愛知県震度情報ネットワークシステム観測点(AICP10)の 2 地点における微動 H/V スペクトル(図 5)及び、遠州灘の地震(eq13, 2013 年 8 月 3 日発生)の H/V スペクトル(図 6)においても同様の震動特性であることを確認している。また、AICP10 近傍の病院敷地内における PS 検層記録<sup>2)</sup>は市庁舎における L 字アレイ探査によって推定した S 波速度構造とよい対応が見られた(図 4)。以上のように、スペクトル形状及び、S 波速度構造が地点によらず類似していることから、市庁舎とその周辺は、ほぼ水平成層地盤であると推測される。

## 4. 建物の基本的な振動特性

eq13 での記録を分析して、地震時の建物の基本的な振動特性を把握する。市庁舎地盤観測点(GL)、AIC003、AICP10 で収録したこの地震記録のフーリエスペクトル(EW 成分)を図 7 に示す。地震記録から推定した地盤建物連成系(RF/GL)、スウェイ固定系(RF/1F)の伝達関数に、各々の同定結果を重ねて図 8 に示す。システム同定は 1

\* 名古屋大学環境学研究所・大学院生

\*\* 名古屋大学減災連携研究センター・教授・工博

\*\*\* 名古屋大学減災連携研究センター・准教授・博士(工学)

\*\*\*\* 名古屋大学災害対策室・教授・工博

Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Prof., Disaster Management Office, Nagoya Univ., Dr. Eng.

次固有振動数のみを対象とし、位相差を考慮した 1 自由度系の伝達関数を推定することにより行った。図中に矢印でフィッティング区間を示す。次に常時微動計測記録から推定した地盤建物連成系(RF/GL)、スウェイ固定系(RF/1F)、スウェイ・ロッキング固定系(RF/(1F+H $\theta$ ))の伝達関数を図 9 に示す。ここで  $H$  は有効高さを、 $\theta$  は建物両端部に設置した微動計の上下成分の差より算出したロッキング回転角を表す。長辺・短辺方向のスウェイ固定系と地盤建物連成系の伝達関数に共通した 2.0～3.0Hz(図 9 中 I 区間)は、地盤と基礎が一体となった挙動をしていると考えられる。短辺方向については、杭基礎建物であるがロッキング挙動が生じている可能性がある。微動時の伝達関数の振幅に対して 1 自由度系の理論伝達関数をカーブフィットさせてシステム同定を行った。表 2 に地震記録及び微動記録に対する同定結果を示す。減衰定数は複雑な立体的挙動や相互作用効果等の影響による過大評価の可能性がある、今後の検討を要するものの、地震記録、微動記録ともに建物固有振動数に対する地盤-建物連成系の固有振動数の低下が明瞭で、動的相互作用効果の影響が大きいことが確認された。

#### 5. 微動時、地震時における入力損失効果

地盤のフーリエスペクトルと基礎上のフーリエスペクトルの差が入力損失効果を表すと考え、地盤観測点の記録を入力、基礎スラブ上(1 階中央)の記録を出力とした伝達関数(有効入力動)を用いて微動時の入力損失効果の評価する。基礎に対して十字に配置(図 10)した 4 つの地盤観測点(GL\_E,W,N,S)それぞれで算出した微動時における有効入力動を図 11 に示す。振幅倍率が 1 よりも小さくなっている振動数域において入力損失効果が生じていると推測される。1Hz 以上からコヒーレンスが急激に低下しているため、信頼度が高いとはいえないものの、水平、上下方向ともに 3Hz 付近から入力損失効果を確認できる。この傾向は地盤観測点の位置によらず確認される。

1 階での観測記録には上部構造ならびに基礎の質量等による影響が含まれており、自由地盤に対する無質量基礎の応答(基礎入力動)とは異なったものとなる。そこで入力損失効果を建物による地盤の拘束に伴う入力動の平均化の効果と捉え、地盤観測記録を平均することによって基礎入力動の算出を試み、これを有効入力動と比較、検討する。4 つの地盤観測点(GL\_E,W,N,S)で得られた記録を時刻歴で平均化(GL\_Avg.)したものを無質量基礎の応答とし、これと自由地盤とのスペクトル比を図 12 に示す。また、地震時(1F/GL(eq))及び微動時(1F/GL(mt))における有効入力動をこれに重ね描く。平均化は以下の式(1)～(3)に示す方法で成分毎に行った。

$$\text{長辺方向 } GL\_Avg = \frac{GL\_E + GL\_W + \frac{GL\_N + GL\_S}{2}}{3} \quad (1)$$

$$\text{短辺方向 } GL\_Avg = \frac{\frac{GL\_E + GL\_W}{2} + GL\_N + GL\_S}{3} \quad (2)$$

$$\text{上下方向 } GL\_Avg = \frac{GL\_E + GL\_W + GL\_N + GL\_S}{4} \quad (3)$$

基礎の大きさと周辺地盤の位相速度(図 3)を考慮し、水平方向の 3Hz 以上に着目すると、この手法で推定した入力損失効果の傾向は有効入力動によるそれに調和的であるといえる。また有効入力動よりも乱れが少ないという結果については、さらなる検討を要するものの、この手法による基礎入力動の推定可能性を示していると考えている。2～2.2Hz 付近の谷は、地盤観測点の各成分が同時刻に逆位相となり GL\_Avg. が小さくなったためと考えられる。上下方向については地震時における入力損失効果が明瞭に見られない。この理由として、微動時ではレイリー波による上下動が基礎スラブによって拘束され、入力損失効果が現れているのに対し、地震時は工学的基盤における上下動が支持杭によって伝達されている可能性が考えられる。

#### 6. 微動時における建物の立体的な振動特性

建物 1 階の 6 地点に設置した上下成分の微動計から、2 点間の差によりロッキング回転角  $\theta$  を算出し、それらを基に RF/(1F+H $\theta$ ) の伝達関数を推定した(図 13)。振幅倍率について、短辺方向では微動計設置位置による影響は認められないが、長辺方向では 2～5 倍と大きな差が見られ、固有振動数及び減衰の評価が、推定に用いる微動計設置位置によって大きく異なる可能性があることが明らかになった。この原因として基礎スラブが面外方向に変形している可能性が考えられる。そこで、図 13 の D、d に示す端部に設置した微動計の上下成分から基礎スラブの面外変形角を算出し(図 14)、ロッキング回転角と比較した。そのフーリエスペクトルを図 15 に示す。基礎スラブの面外変形角は、短辺方向では小さいが長辺方向では 3.0～4.5Hz にかけて励起されていることが分かる。図 3 の分散曲線よりこの振動数域における位相速度は、約 160m/s と推定され、この時の波長は 45m 程度となる。基礎幅が 47m であるため、表面波の波長と基礎幅が近接する時に大きな面外変形が生じている可能性がある。

図 9 の伝達関数や図 15 のフーリエスペクトルにおけるピークを含む振動数域(I～V)における立体的な挙動を、アニメーションツールを用いて確認した(図 16)。水平上下の 3 成分を計測していない地点は同階中央水平成分及び 1 階の上下成分で補完している。ア、イ、ケでは地盤と基礎スラブが一体となったロッキング挙動が確認された。カ、ク、コでは基礎スラブの面外変形が、ウ、エ、オ、

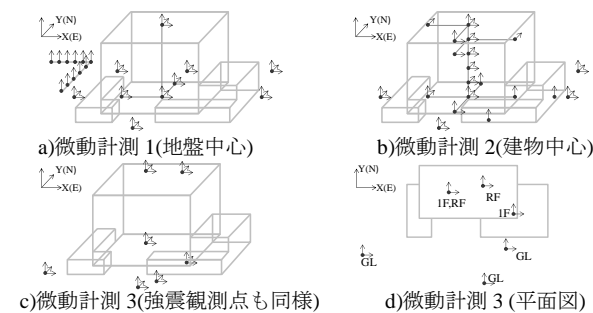


図1 観測体制



図2 観測した地震の震央位置及びマグニチュード

表1 観測した地震の諸元

	Date	Time	Mj	Epicentral distance[km]	Max.Acc.[gal]		
					RF	1F	GL
eq1	2012/11/24	11:48	3.6	110	1.03(NS)	-	-
eq2	2012/12/07	17:18	7.4	737	3.90(NS)	-	2.90(EW)
eq3	2013/02/06	13:47	4.1	60	9.12(NS)	5.99(NS)	10.2(NS)
eq4	2013/02/15	18:18	4.3	134	3.19(EW)	1.30(EW)	2.34(EW)
eq5	2013/02/19	19:15	3.5	76	0.78(NS)	0.35(NS)	-
eq6	2013/02/25	16:23	6.2	307	-	0.45(EW)	-
eq7	2013/04/04	01:58	4.3	124	0.64(EW)	-	-
eq8	2013/04/13	05:33	6.0	225	4.82(NS)	3.09(NS)	3.27(EW)
eq9	2013/04/17	18:02	6.2	309	0.61(EW)	0.49(EW)	-
eq10	2013/04/20	00:48	4.0	96	3.46(NS)	1.66(NS)	2.52(NS)
eq11	2013/05/18	14:48	5.9	517	-	0.40(NS)	-
eq12	2013/07/17	20:32	4.0	39	9.12(EW)	3.43(NS)	5.71(NS)
eq13	2013/08/03	09:56	5.1	94	5.30(NS)	2.10(EW)	2.33(NS)
eq14	2013/09/04	09:18	6.8	638	1.18(EW)	1.10(EW)	1.08(EW)
eq15	2013/10/26	02:10	7.1	740	1.2(NS)	1.0(NS)	0.9(NS)

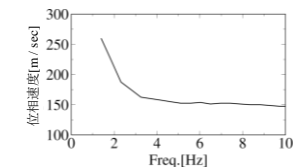


図3 分散曲線

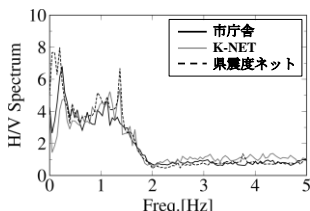


図5 常時微動のH/Vスペクトル

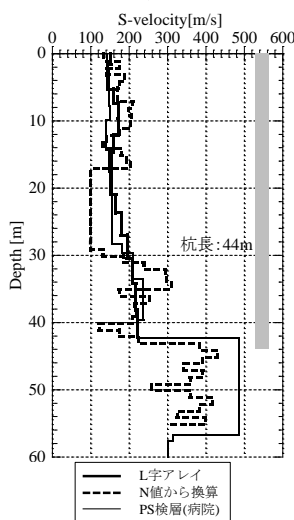


図4 S波速度構造

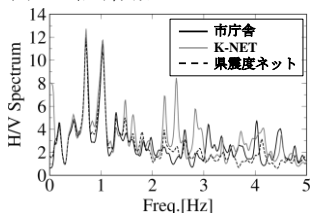


図6 地震時のH/Vスペクトル

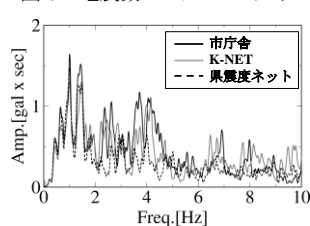


図7 地震時のフーリエスペクトル (eq13のEW成分)

キでは上階でのねじれが確認された。エ、オに比べてウ、カは建物西端部の振幅が大きく、ねじれの中心が東にずれた挙動をしており、これは議事堂を有する5階の影響と考えられる。エ、キ、クでは弾性変形を、コでは建物のロッキング挙動を確認した。以上のような複数の挙動が同一振動数帯に確認される複雑な振動特性を有していることが伝達関数のピークを不明瞭にする一因と考えられる。

## 7. まとめ

本論では、軟弱地盤である周辺地盤の震動特性や固有振動数等の基本的な建物振動特性を推定し、動的相互作用効果が大きいことを明らかにした。高密度観測に基づいた詳細な分析により、入力損失効果の評価をするとともに、基礎スラブの面外変形等、微動時の複雑な挙動を捉えることができた。今後は、さらなる分析を進め、得られた知見を活かして耐震性能評価や応答予測へとつなげていきたい。

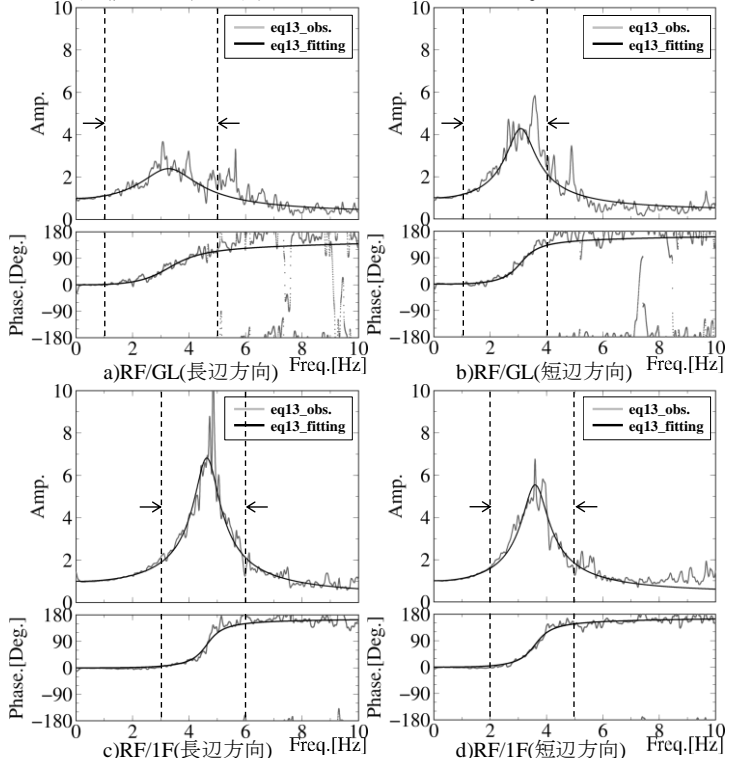


図8 地震時の伝達関数

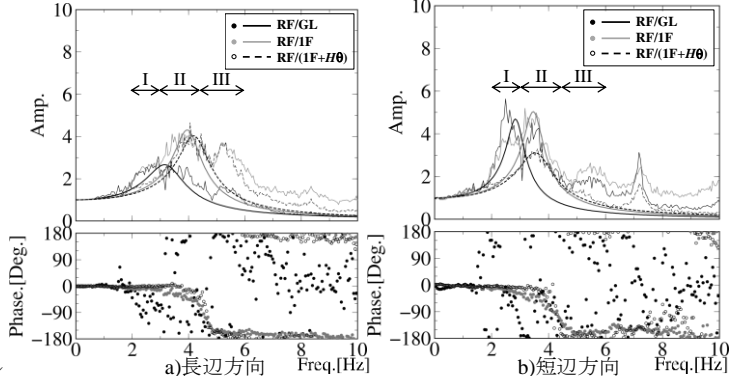


図9 微動時の伝達関数

表 2 固有振動数と減衰定数

a) 地震時

	固有振動数[Hz] / 減衰定数[%]	
	長辺方向	短辺方向
RF/GL	3.4 / 23	3.1 / 12
RF/1F	4.7 / 7.4	3.6 / 9.2
RF/(1F+Hθ)		

b) 微動時

	固有振動数[Hz] / 減衰定数[%]	
	長辺方向	短辺方向
RF/GL	3.3 / 21	2.9 / 11
RF/1F	4.1 / 12	3.5 / 12
RF/(1F+Hθ)	4.2 / 10	3.6 / 17

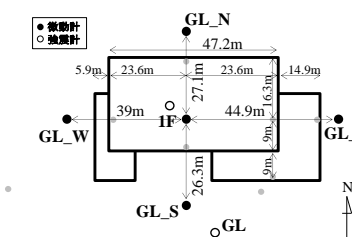


図 10 観測点配置図(1F・地盤)

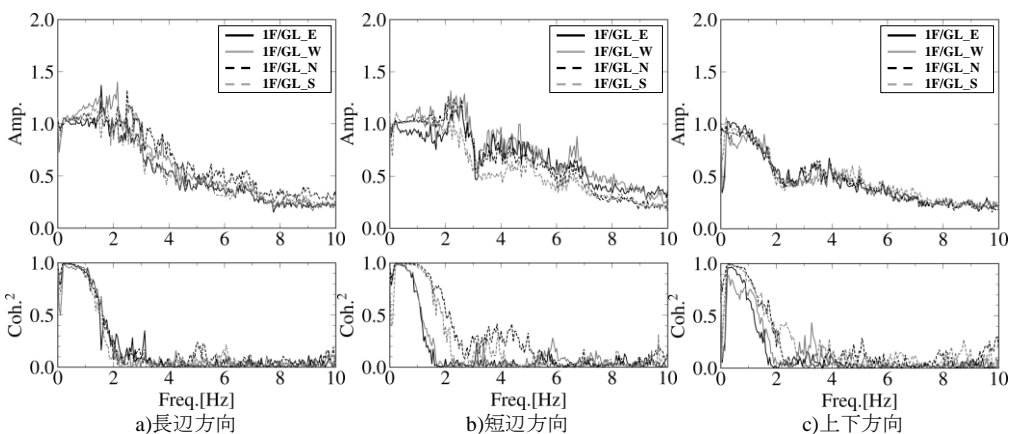


図 11 伝達関数による入力損失効果の評価(1F/各地盤観測点:微動時)

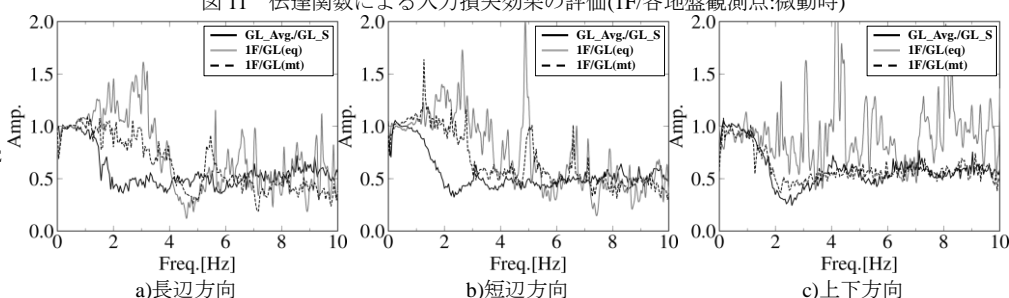


図 12 伝達関数による入力損失効果の評価

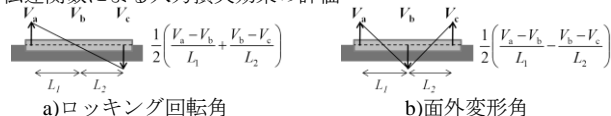


図 14 ロッキング回転角と面外変形角の概念図

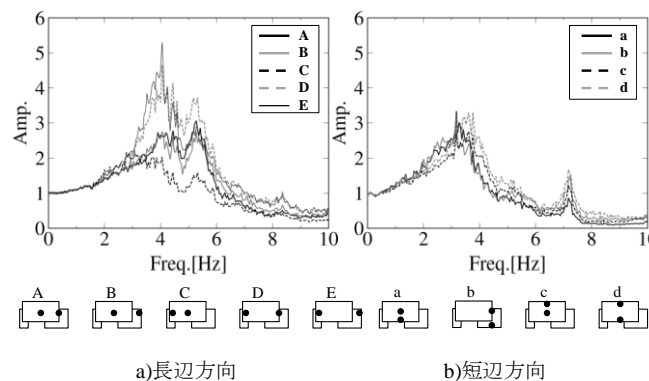


図 13 微動計配置の違いによる伝達関数(RF/1F+Hθ)の比

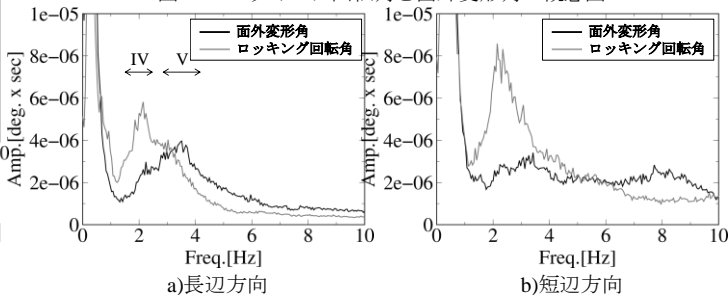


図 15 ロッキング回転角と面外変形角のフーリエスペクトル

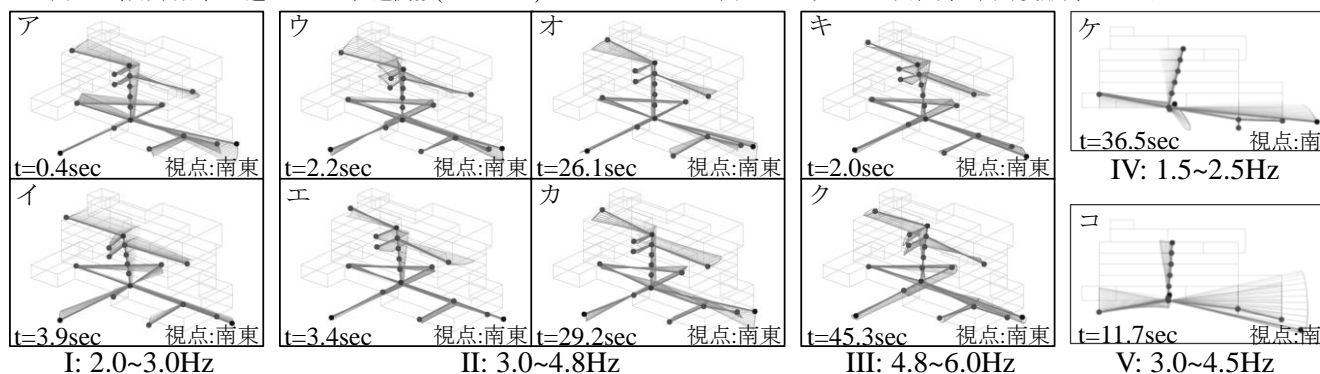


図 16 アニメーションによる挙動の確認

【謝辞】 一部の地震記録に防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET および、国土技術政策総合研究所 井上波彦氏より頂いた記録を使用させて頂いたいただきました。

【参考文献】 1)内閣府：東南海、南海地震等に関する専門調査会(第 16 回)-地盤構造に関する資料-、pp81、2013.12  
2)一般財団法人日本建築センター：ビルディングレター、pp61-63、2004.4  
3)星谷勝、石井清：RC 造 4 階校舎の実測資料による地震波の入力損失の効果の検討、土木学会論文報告集 pp13-20、1982.11