

高密度常時微動計測に基づく軟弱地盤に立地する杭基礎中層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

山下善也 *1 護 雅史 *2
 福和伸夫 *3 飛田 潤 *4
 井上波彦 *5

Zenya YAMASHITA *1
 Nobuo FUKUWA *3
 Jun TOBITA *4
 Namihiko INOUE *5

キーワード:
 高密度常時微動計測、地震観測、軟弱地盤、中層RC造建物、地盤と建物の動的相互作用

Keywords:
 High density microtremor measurement, Seismic observation, Soft ground, Mid-rise RC building, Soil-structure interaction

We performed high density microtremor measurements and earthquake observation for a mid-rise RC building which is prepared for seismic retrofitting. S-wave velocity profile of surface around soft ground is estimated and the soil-structure interaction effect on the dynamic characteristics of the building is indicated. Based on the high density measurement, we estimate that the foundation-input-motion and denote the complex three-dimensional vibration characteristics including out-of-plane deformation of the first floor slab.

1. はじめに

濃尾平野西部の沖積低地に位置するT市庁舎(写真1)は地域の防災拠点としての重要な施設である。本建物は1976年に竣工され、竣工当時としては典型的な庁舎建物であるが、耐震性能不足と診断され、耐震改修が計画されている。耐震改修前の振動性状を実証的に明らかにすることは、より実状に即した解析モデルの作成や改修効果の評価のために重要であり社会的、研究的意義がとても大きい。また、市庁舎は地震後も機能性を維持する必要があり、基礎を含めた建物全体を対象として動的相互作用効果を考慮した振動特性を分析することは極めて重要であるが、同様な建物の詳細な振動挙動を明らかにする高密度観測にいたってはその報告例はみられない。そこで、本建物を対象とし、従来にない高密度な常時微動計測や地震観測を実施した。本論ではこれらの計測・観測によって得られた、周辺の表層地盤構造と地盤震動特性、現状の建物振動特性や相互作用効果について報告する。

2. 対象建物及び計測の概要

対象の市庁舎は地上5階、塔屋2階の杭基礎RC造建物である。基礎形式は根入れが無く、基礎梁で連結された独立フーチング一つにつき2~5本のPC杭($\phi=500\text{mm}$)により支持されている。PC杭は、杭先端がGL-47.0mの支持杭である。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

スパン×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。

常時微動測は、図1に示すようにa)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)、b)建物を中心とした微動計測2(2012年11月18日実施)、c)d)地震計設置点での微動計測3(2013年12月3日実施)の3回にわたって、高密度同時計測(100Hz、30分間)を行った。以降の分析には微動記録を20.48秒に区切りアン

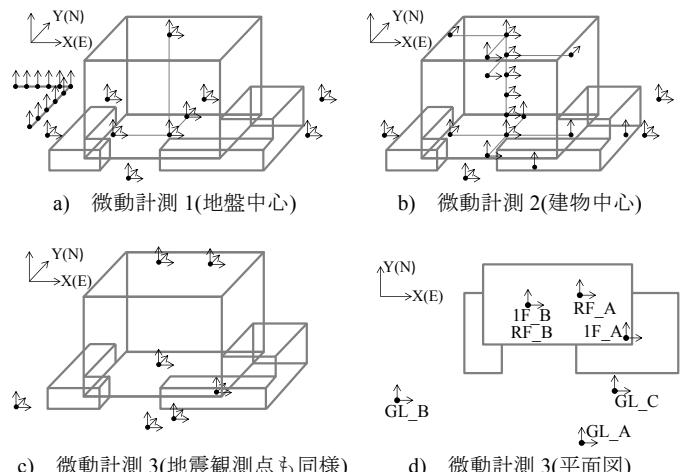


図1 構築した観測体制

本稿は2013年度日本建築学会大会（北海道）にて著者が発表した内容をまとめ、考察を加えて再構成したものである。

*¹ 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生
 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

*¹ Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

*² 名古屋大学減災連携研究センター 特任教授・博士（工学）

*² Designated Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*³ 名古屋大学減災連携研究センター長 教授・工博

*³ Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*⁴ 名古屋大学灾害対策室長 教授・工博

*⁴ Prof., Disaster Management Office, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*⁵ 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部基準認証システム研究室主任研究官

*⁵ Senior Researcher, Standards and Accreditation System Division, National Institute for Land and Infrastructure Management, M.L.I.T.



写真1 市庁舎(北東より)

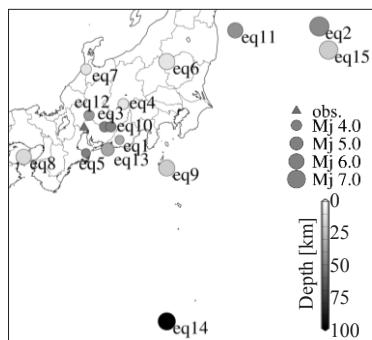


図2 観測した地震の震央位置
及びマグニチュード

表1 観測した地震の諸元

eq	Date	Time	Mj	Epicentral distance[km]	震源地	Max.Acc.[gal]		
						RF_A	1F_A	GL_A
1	2012/11/24	11:48	3.6	110	静岡県西部	1.03(NS)	-	-
2	2012/12/07	17:18	7.4	737	三陸沖	3.90(NS)	-	2.90(EW)
3	2013/02/06	13:47	4.1	60	愛知県西部	10.2(NS)	5.99(NS)	9.12(NS)
4	2013/02/15	18:18	4.3	134	長野県南部	3.19(EW)	1.30(EW)	2.34(EW)
5	2013/02/19	19:15	3.5	76	三重県南部	0.78(NS)	0.35(NS)	-
6	2013/02/25	16:23	6.2	307	栃木県北部	-	0.45(EW)	-
7	2013/04/04	01:58	4.3	124	石川県加賀地方	0.64(EW)	-	-
8	2013/04/13	05:33	6.0	225	淡路島	4.82(NS)	3.09(NS)	3.27(EW)
9	2013/04/17	18:02	6.2	309	三宅島近海	0.61(EW)	0.45(EW)	-
10	2013/04/20	00:48	4.0	96	長野県南部	3.46(NS)	1.66(NS)	2.52(NS)
11	2013/05/18	14:48	5.9	517	福島県沖	-	0.40(NS)	-
12	2013/07/17	20:32	4.0	39	岐阜県美濃中西部	9.12(EW)	3.44(NS)	5.71(NS)
13	2013/08/03	09:56	5.1	94	遠州灘	5.30(NS)	2.09(EW)	2.33(NS)
14	2013/09/04	09:18	6.8	638	鳥島近海	1.18(EW)	1.10(EW)	1.08(EW)
15	2013/10/26	02:10	7.1	740	福島県沖	1.17(NS)	1.01(NS)	0.89(NS)

サンプル平均して用いる。地震観測については図1c)に示したように、5階天井スラブ上に2点(RF_A,B)、1階床スラブ上に2点(1F_A,B)、地盤上に3点(GL_A,B,C)の計7点にそれぞれに3成分の地震計を設置した。地震観測によって収録した地震の一覧を図2、表1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

本節では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。図4には同敷地内におけるN値から推定したS波速度¹⁾を重ね描いた。L字アレイ探査結果を42m以浅の堆積層の層厚で重み付け平均して求めた平均S波速度は約170m/sである、これを用いて、1/4波長則に基づき工学的基盤からの卓越振動数を推定すると1.1Hzとなった。一方、市庁舎敷地内で測定した微動記録のH/Vスペクトル(図5)からは1.0~1.3Hzにピークが見られることから、浅部地盤に起因する卓越振動数であると推測できる。また、図5に併せて示している市庁舎から500m程度離れたK-NET²⁾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スペクトル及び、図6に示す遠州灘の地震(eq13,2013年8月3日発生)のH/Vスペクトルにおいても同様の震動特性であることが確認できる。さらに図4に重ねて示すようにAICP10近傍の病院敷地内におけるPS検層結果³⁾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る。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ため、市庁舎とその周辺地盤は、ほぼ水平成層地盤であると推測される。

4. 地震時及び微動時の基本的な建物振動特性

本節では、地震時および微動時における相互作用効果を含めた基

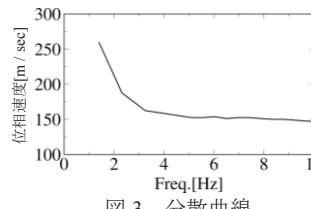


図3 分散曲線

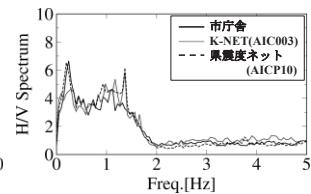


図5 常時微動のH/Vスペクトル

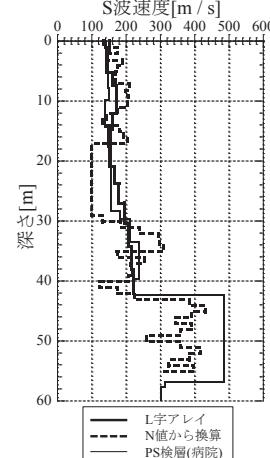


図4 S波速度構造

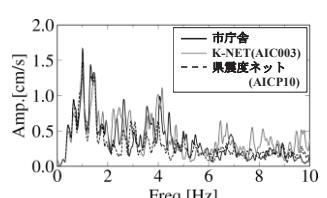


図6 地震動のH/Vスペクトル

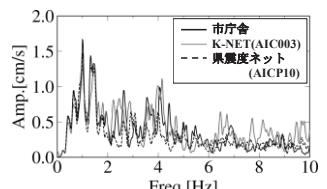


図7 加速度フーリエスペクトル

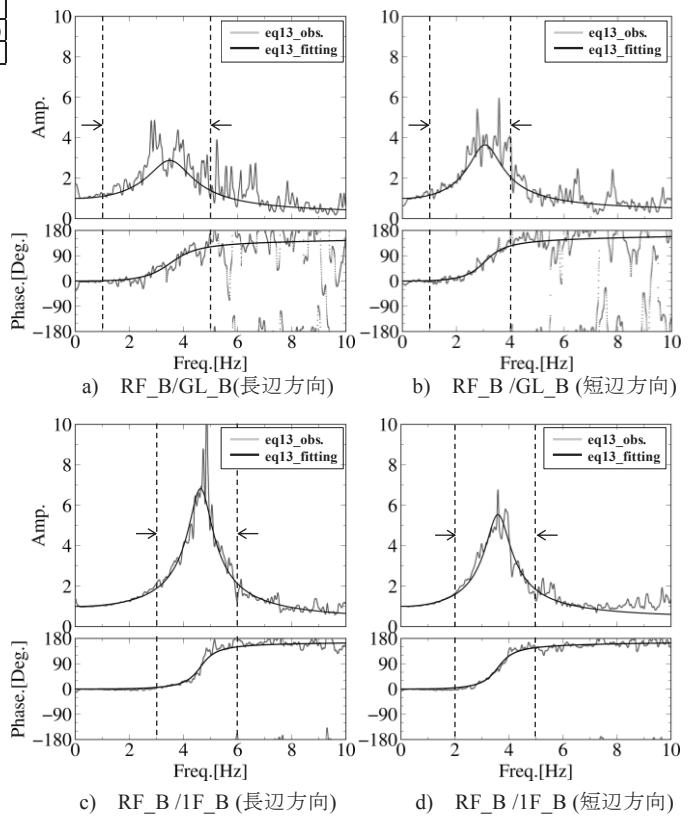


図8 地震時の伝達関数

本的な建物振動特性について明らかにする。市庁舎地盤観測点(GL_B)、AIC003、AICP10で収録した地震時(eq13)のフーリエ振幅スペクトル(EW成分)を図7に示す。この地震記録から計算した地盤建物連成系(RF_B/GL_B)、スウェイ固定系(RF_B/1F_B)の伝達関数に、各々の同定結果を重ねて図8に示す。なお、システム同定は1次固有振動数のみを対象とし、位相差を考慮した地盤建物連成系に等価な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。微動計測 3 によって得られた記録から計算した地盤建物連成系(RF_B/GL_B)、スウェイ固定系(RF_B/1F_B)の伝達関数を図 9 に示す。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は、1.5~3.0Hz(図 9 中 I 区間)において、RFに対する振幅レベルならびに位相差が同等である。このため、地盤観測点と 1F 観測点が同じような挙動をしており、地盤と基礎が一体的に挙動をしていると考えられる。微動記録に対して、地震記録と同様にシステム同定を行った。ただし振幅のみを考慮した。表 2 に地震記録及び微動記録に対する同定結果を示す。減衰定数は後述する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が、地震記録、微動記録ともにスウェイ固定系に対する地盤建物連成系の固有振動数の低下が明瞭で、動的相互作用効果が大きいことが確認された。なお、長辺方向のスウェイ固定系固有振動数において、地震時と微動時の結果に差が見られる。これは、地震時の結果を踏まえれば、微動時の伝達関数の 4.8Hz にみられる谷による影響であると考えており、微動時における長辺方向のスウェイ固定系に対するフィッティングには課題が残る。なお、3 回の微動計測のいずれにおいてもこの谷を確認している。

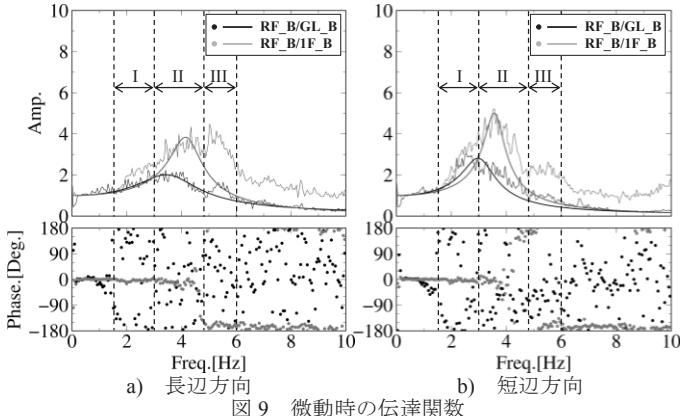


表 2 固有振動数と減衰定数
固有振動数[Hz] / 減衰定数[%]

	RF/GL		RF/1F	
	長辺方向	短辺方向	長辺方向	短辺方向
微動計測3	3.3 / 21	3.1 / 11	4.2 / 12	3.6 / 12
eq13	3.4 / 23	3.1 / 12	4.7 / 7.4	3.6 / 9.2

5. 建物の立体的な振動特性

5.1 ロッキング挙動と基礎スラブの面外変形

微動計測 2 において、建物 1 階 6 地点の微動計のうち 2 つを選び、その上下成分の差と設置間隔よりロッキング回転角 θ を算出し、スウェイ・ロッキング固定系の伝達関数($RF/(1F+H\theta)$)を計算した(図 10)。 H は等価高さを示す。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、建物固有振動数及び減衰の評価が、計算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。A,B,C の配置では面外変形もロッキング回転角として抽出してしまい、ロッキング回転角を過大評価することにより伝達関数のピーク高さが低くなっていると考えられる。図 10 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 11)、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

12 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 3.0~4.8Hz(図中 II 区間)にかけて励起されていることが分かる。この振動数域における位相速度は、図 3 の分散曲線より約 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る可能性が考えられる。

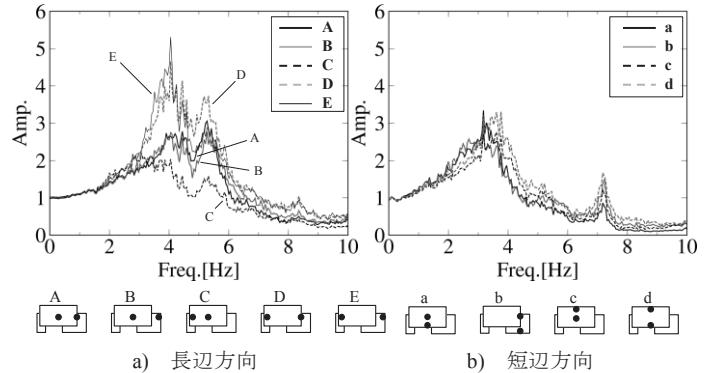


図 10 微動計配置による伝達関数($RF/(1F+H\theta)$)の違い

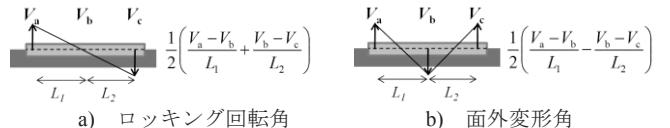


図 11 ロッキング回転角、面外変形角算出の概念図

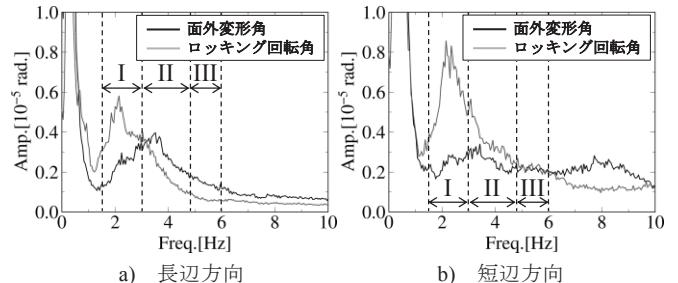


図 12 ロッキング回転角と面外変形角の角速度フーリエスペクトル

以上を踏まえ、本建物の微動時におけるスウェイ・ロッキング固定系の伝達関数は、面外変形の影響が最も少ないと考えられる D, d に示す端部に設置した微動計の記録を用いて計算することが妥当といえる。カーブフィットによる、長辺/短辺方向における固有振動数と減衰定数は、それぞれ 4.2Hz/3.6Hz、10%/17% となった。図 10 と図 9 ならびにカーブフィットの結果と表 2 を比較すると、ロッキング挙動による振動数変化は僅かであり、スウェイに比べロッキングの影響は小さいと言え、これは杭基礎によるためと考えられる。

5.2 同一階における挙動の比較

微動時(mt)と地震時(eq)における同一階における建物応答の違いを確認する。図 13 に示すように、屋上階(RF)と 1 階(1F)それぞれで地震計 A/地震計 B の伝達関数を計算した。RF では長辺方向にほぼ直線上に地震計を設置したため、長辺方向成分の増幅は見られないが、短辺方向の 3Hz 以上の高振動数域において、地震計 B に対して地震計 A では振幅が 0.7 倍から 1.5 倍の範囲で増幅しており、この振動数域において床のねじれを伴う並進挙動が存在している可能性がある。1F では、3Hz から 5Hz にかけて特に短辺方向において地震

計 B に対する地震計 A の振幅比が 1.5 倍程度大きい。この振動数域における RF での地震計 A/B の振幅比は 0.7 程度であることから、建物全体がねじれている可能性が推測される。これらの振幅比の傾向は RF、1F いずれも地震時、微動時とも同様であり、同一階であっても観測点によって応答が異なっている事が明らかとなった。

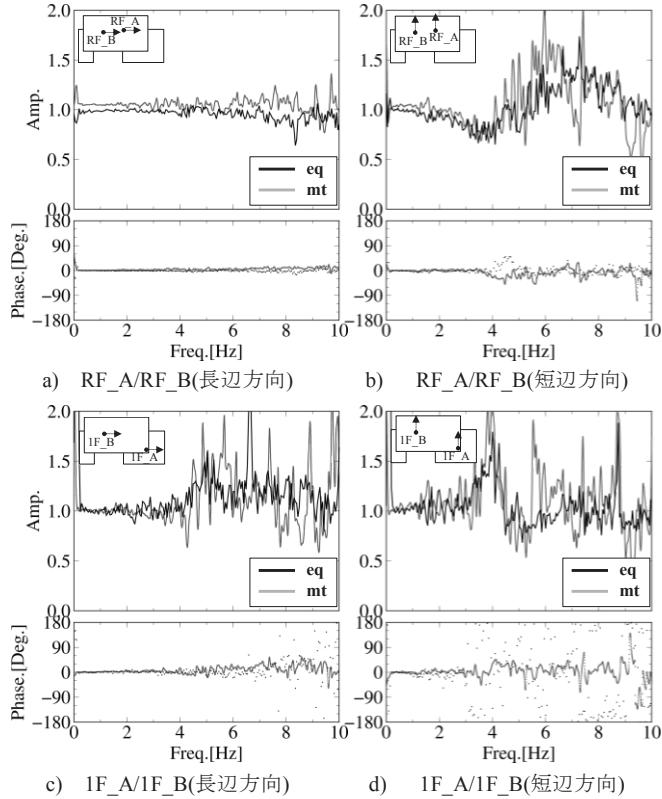


図 13 地震時と微動時における同一階観測点の
伝達関数に基づく比較

5.3 アニメーションツールによる立体的挙動の確認

図 9 の伝達関数や図 12 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(1.5~3.0Hz)、II(3.0~4.8Hz)、III(4.8~6.0Hz))における立体的な挙動を、微動計測 2 の記録についてアニメーションによる可視化ツール⁴⁾を用いて確認した(図 14)。黒点は観測点位置を示し、黒点間は直線で結ばれている。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。アニメーションのキャプチャに際して、南、西視点では屋上観測点の記録は描画していない。また、表示倍率は全ての図において一定とし、t はキャプチャ時刻を示す。キャプチャ前 0.1 秒程度の軌跡を残して描画した。I 区間である a)、b) では、長辺・短辺方向それぞれで地盤と基礎スラブが一体となったロッキング挙動をしていることを確認した。これは、図 9 の地盤建物連成系及びスウェイ固定系に共通して励起しているが図 10 のスウェイ・ロッキング固定系では励起されないこと、図 12 のロッキング回転角が励起されていることと対応する。II 区間である c)、e) で基礎スラブの面外変形を捉えることができ、図 12 に示す結果と対応した。c)、d)、f) では上階でのねじれが確認された。これは 5.2 で考察した振動数域に対応する。d) に比べて c) 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。II、

III 区間をまたいで、d)、f)、g) で上部構造の弾性変形を確認した。このことからも、4.8Hz の谷で分けず、II、III 区間を併せてスウェイ固定系ならびにスウェイ・ロッキング固定系の伝達関数を評価すべきであると考えている。以上のように複数の挙動が同一振動数帯に確認され、複雑な振動特性を有していることが図 8 や図 9 に示す伝達関数のピークを不明瞭にする一因と考えられる。

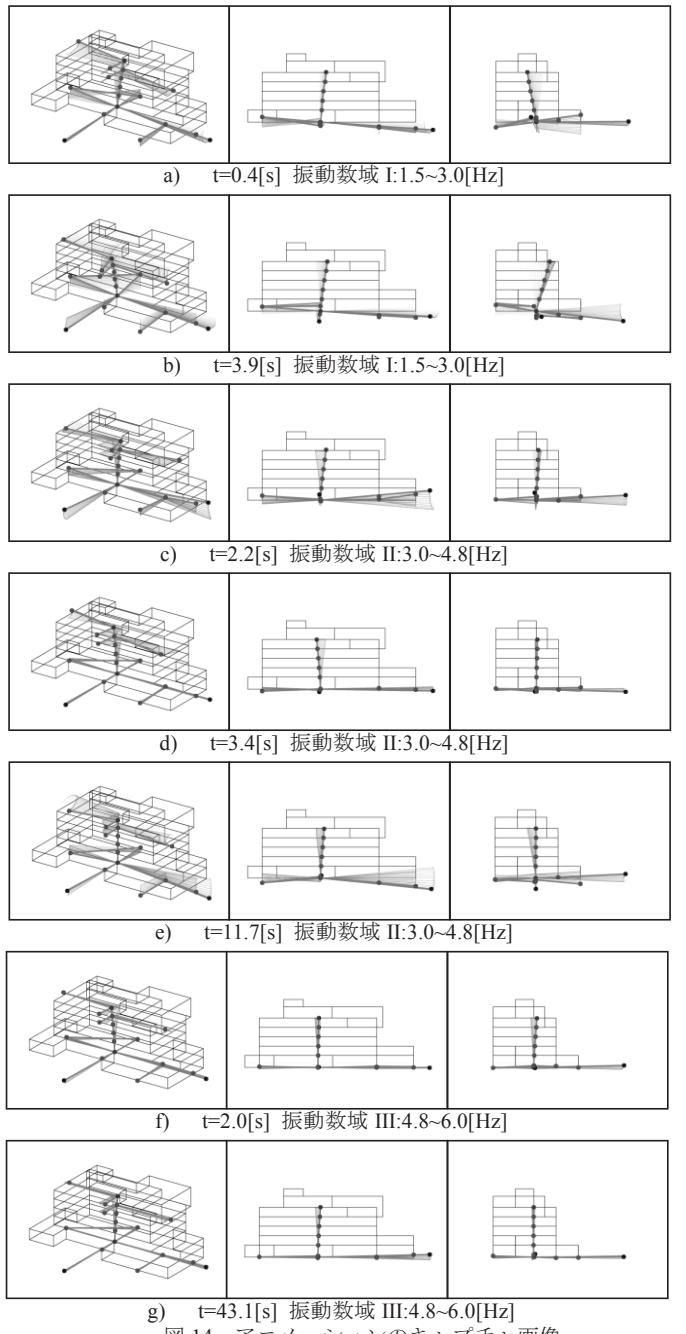


図 14 アニメーションのキャプチャ画像
(各段左より視点:南東、南、西)

6. 微動時および地震時における入力損失効果

基礎スラブ上(1 階中央)観測点と地盤観測点のフーリエスペクトル比(有効入力動)によって微動時における入力損失効果を評価する。基礎に対して十字に 4 つの地盤観測点(GL_E,W,N,S)を配置(図 15)した微動計測 1 によって得られたそれぞれの記録を用いて算出した有効入力動を図 16 に示す。1Hz 以上からコヒーレンスが急激に低下し

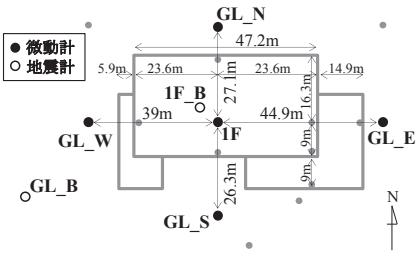


図 15 観測点配置図(1F・地盤)

ているものの、水平、上下方向ともに3Hz付近からスペクトル比が1を下回っていることから、入力損失効果が生じていると推測される。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による影響が含まれておらず、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によるもの⁵⁶⁾と捉え、これを上述の有効入力動と

比較、検討する。星谷らは一直線上に配した一成分の観測記録に基づき、一方向について検討しているが、本手法では水平上下の三方向について検討を行えるよう観測点配置と平均化の方法を工夫した。建物四方を囲んで配した4自由地盤観測点(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考え、これと自由地盤とのスペクトル比を図17に示す。平均化は以下(1)~(3)式に示す方法で成分毎に行った。

$$GL_Avg = (GL_E + GL_W + (GL_N + GL_S)/2)/3 \quad (1) \text{ 長辺方向}$$

$$GL_Avg = ((GL_E + GL_W)/2 + GL_N + GL_S)/3 \quad (2) \text{ 短辺方向}$$

$$GL_Avg = (GL_E + GL_W + GL_N + GL_S)/4 \quad (3) \text{ 上下方向}$$

また、地震時(1F/GL(eq))、微動時(1F/GL(mt))における有効入力動をこれに重ね描く。基礎の大きさと周辺地盤の位相速度(図3)を考慮し、a)、b)水平方向の3Hz以上において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、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。一方0.0~3.0Hzの低振動数域については、2.0~2.2Hz付近に谷があり有効入力動と調和的とはいえない。この谷は、地盤観測点の各成分が同時に逆位相となり、GL_Avg.が小さくなつたためと考えられるが、今後のさらなる検討・検証を加えていきたい。c)上下方向については、微動時と比べて、地震時における入力損失効果が明瞭でない。微動時ではレイリー波による上下動が基礎スラブにより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。

7.まとめ

本論では、中層RC造4階建物について、3種の計測体制による高密度常時微動計測や継続的地震観測によって得られた知見を報告した。まず、軟弱地盤である周辺地盤の震動特性や地盤構造を複数の調査結果から総合的に明らかにした。次に、固有振動数をはじめと

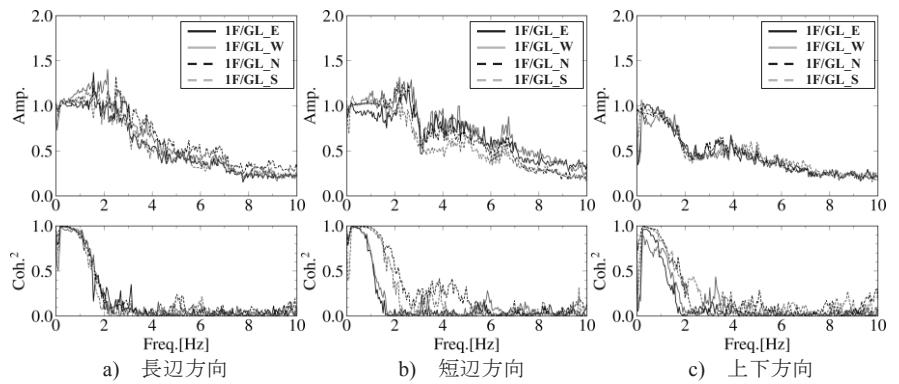


図 16 入力損失の評価(1F/各地盤観測点:微動時)

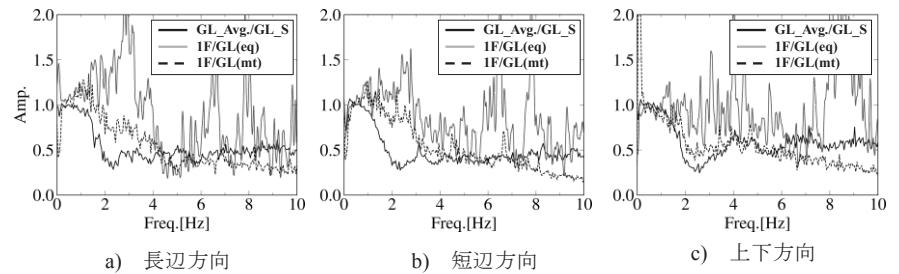


図 17 入力損失の評価

する建物の基本的振動特性を求め、それらの結果から地盤と建物の動的相互作用効果が大きいことを示した。また、微動時ならびに地震時における並進運動に連成したねじれ挙動や、微動時の基礎スラブの面外変形をはじめとする複雑な立体挙動の存在を捉え、これをアニメーションツールで確認することができた。さらには、基礎入力動の推定に基づく入力損失効果の新たな評価法を試みた。さらなる検討や検証を要するものの、検討範囲内では、手法の安定性が確認できた。

今後は、今回確認された複雑な挙動の大地震時における発現可能性や耐震性能に与える影響を評価、検証することを目指して、地震観測を継続することに加え、数値解析の実施をしていく。それらの知見を活かし、より実状に即した応答予測や耐震補強法、耐震性能の評価へつなげていく予定である。

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-,pp81,2003.12 (2013.12 参照)
- 2)防災科学技術研究所強ネットワーク K-NET : <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>, 2013.10 参照
- 3)一般財団法人日本建築センター：ビルディングレター,pp.61~63,2004.4
- 4)廣野衣美、牧原慎一郎、福和伸夫、飛田潤、護雅史、小島宏章：多点多成分振動観測記録の効果的な分析を支援する動画アプリケーションの開発、日本建築学会技術報告集,第14巻,第28号,pp.423~428,2008.10
- 5)星谷勝、石井清：RC造4階建物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,pp.13~20, 1982.11
- 6)日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.2

[2014年2月19日原稿受理 2014年5月19日採用決定]