

# 微動記録・地震記録に基づく基礎入力動の推定

## ESTIMATION OF FOUNDATION-INPUT-MOTION BASED ON AMBIENT VIBRATION TESTS AND SEISMIC DATA

天竺貴仁 ——— \* 1 護 雅史 ——— \* 2  
福和伸夫 ——— \* 3 飛田 潤 ——— \* 4

Takahito AMANO ——— \* 1 Masafumi MORI ——— \* 2  
Nobuo FUKUWA ——— \* 3 Jun TOBITA ——— \* 4

キーワード：  
基礎入力動, 動的相互作用, 常時微動計測, 建設時, 免震建物

Keywords:  
Foundation-input-motion, Soil-structure-interaction, Ambient vibration tests, Construction, Base-isolated buildings

The method for estimation of foundation-input-motion based on ambient vibration tests is presented. In the proposed method, several theirs of construction are averaged to estimate foundation-input-motion. But, if we average them simply in frequency domain, we obtain foundation-input-motion which is affected by superstructure. We exclude affection of superstructure by using Fourier-spectral-ratio of top-floor's per basement-floor's. Relation between estimation precision and number of averaging samples are discussed. Base-isolated buildings have isolated-layer between basement and superstructure. Therefore, inertial force of superstructure doesn't affect foundation-input-motion of earthquakes. By using earthquakes data of base-isolated buildings, we obtain foundation-input-motion which is not affected by superstructure.

### 1. はじめに

近年の地震被害では、地盤で観測された地震動の強さに比較して建物の被害が少ない例<sup>例えば1)</sup>がある。この要因として、設計では考慮されていない建物の余力や、建物と地盤との動的相互作用効果が挙げられる。その中でも入力との相互作用効果については、観測や実験による実測に基づく研究や、高度なプログラムを使用した数値解析などにより精力的に研究がなされている。しかし、実測記録を用いると上部構造物の慣性力の影響により、入力損失効果は不明瞭となる。実測記録から上部構造物の影響を除いた基礎入力動を求める手法として、岡野ら<sup>2)</sup>によるシステム同定を行う手法もあるが、一般にシステム同定は容易ではない。一方、数値解析で基礎入力動を求めるためには、高度な地盤-建物プログラムを使用する必要があるが、例えば、設計者が動的相互作用効果を考慮したスウェイ・ロッキングモデルによる検討を行う場合に、容易に基礎入力動を求めることが難しい状況にある。

以上のような背景から、基礎入力動を簡易に求めることは、応答解析モデルの精度向上にとって非常に有意義である。本論文では、建設時に計測した常時微動記録を用いて、上部構造物の影響を除いた基礎入力動を推定する。ある建物の建設段階で順次計測された複数回の常時微動記録を用いて平均化することで、上部構造物の影響を除いた基礎入力動を推定し、その妥当性について検討する。また、理論解析において基礎入力動を計算する際には鉛直下方入射とするなど、基礎入力動を考慮する際には実体波が卓越していると考えられる地震記録を用いて上記の検討をすることが望ましい。しかし、地震記録は容易に収録することができないため、微動計測記録を用

いて上記の検討を行う。微動計測記録を用いた本手法が有効であれば、建設時に計測を行うことで容易に基礎入力動が得られ、本手法の汎用性は高いと考えられる。

また、基礎免震建物は、基礎と上部構造物の間に免震層を有するため、上部構造物の慣性力が基礎に伝わりにくく、地震時で免震層変形が卓越するような際にはその傾向が顕著である。そこで、地震時の免震建物の有効入力動(基礎/地表のフーリエスペクトル比)を用いて基礎入力動の推定を試みる。その際、免震層変形がどの程度の際に上部構造物の影響を除けるかについて、理論解析・実測記録の両面から検討を行う。本手法が有効であれば、多くの基礎免震建物での記録を蓄積することで、基礎形状・地盤条件が類似している建物において、高度な理論計算を行わなくとも比較的容易に基礎入

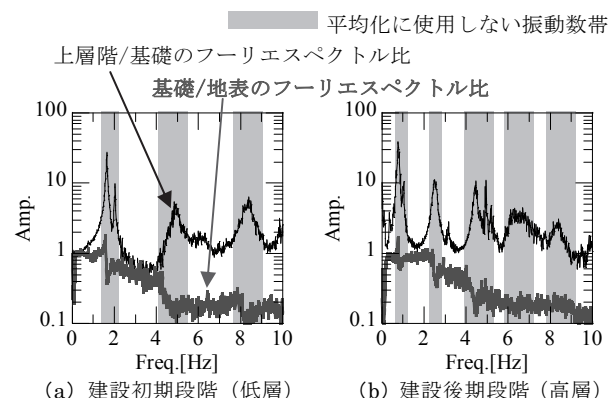


図1 基礎入力動(地表応答に対する無質量基礎応答のフーリエスペクトル比)を推定するイメージ

<sup>1)</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 博士課程前期  
(〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)  
<sup>2)</sup> 名古屋大学減災連携研究センター 特任教授・博士(工学)  
<sup>3)</sup> 名古屋大学減災連携研究センター長 教授・工博  
<sup>4)</sup> 名古屋大学災害対策室長 教授・工博

<sup>1)</sup> Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.  
<sup>2)</sup> Designated Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.  
<sup>3)</sup> Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.  
<sup>4)</sup> Prof., Disaster Management Office, Nagoya Univ., Dr. Eng.

力動が推定できるようになる。

尚、本論では、水平方向の基礎入力動を対象とし検討する。また、

地表応答に対する無質量基礎応答のフーリエスペクトル比を基礎入力動として用いることとする。

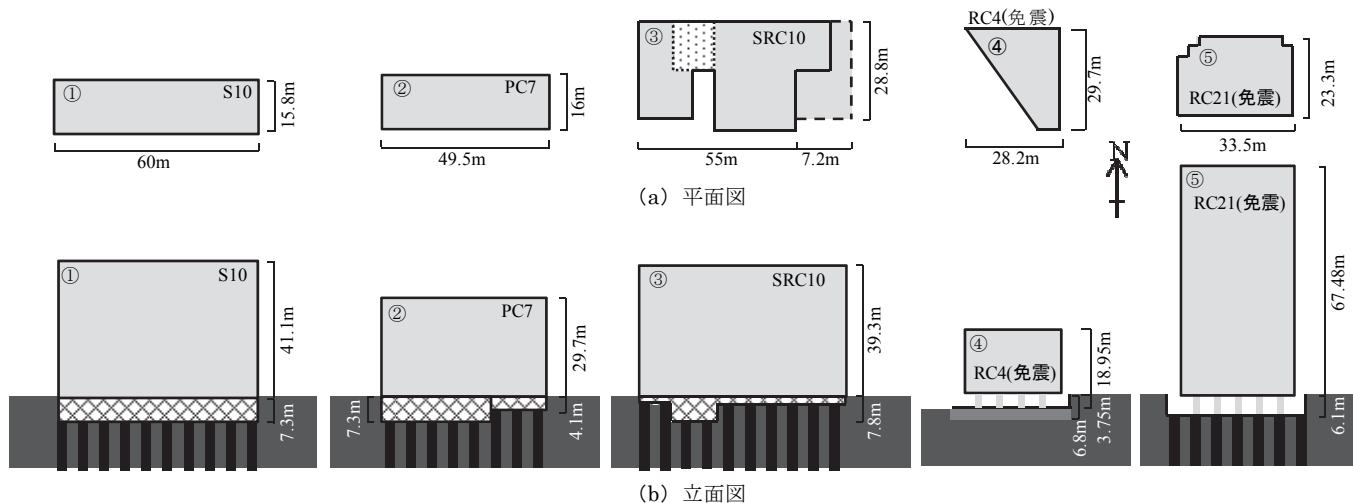


図2 検討対象建物の概形

表1 検討対象建物の概要

建物No.		①	②	③	④	⑤
階数	地上	10階	7階	10階	4階+屋上実験室	21階
	地下	1階	1階	1階	基礎免震	基礎免震
構造種別		S造	PCaPC造	SRC造	RC造	RC造
根入れ深さ		GL-7.3m	GL-4.1m	GL-2.5m	GL-3.75m	GL-6.1m
			(GL-7.3m)	(GL-7.8m)	(GL-0.0m)	
平面アスペクト比		3.8	3.1	2.2	1.1	1.4
基礎種別		場所打ち杭	PHC杭	PHC杭	直接基礎	場所打ち杭
杭長		51.2m	34.9m	39.3m	-	29.9m
			(32.7m)	(34.0m)		
連成系	EW	0.90Hz	2.7Hz	2.1Hz	2.3Hz*	0.75Hz*
固有振動数	NS	0.90Hz	2.4Hz	2.0Hz	2.1Hz*	0.65Hz*
微動計測の記録数		8	7	11	6	20

\*は微動時の固有振動数

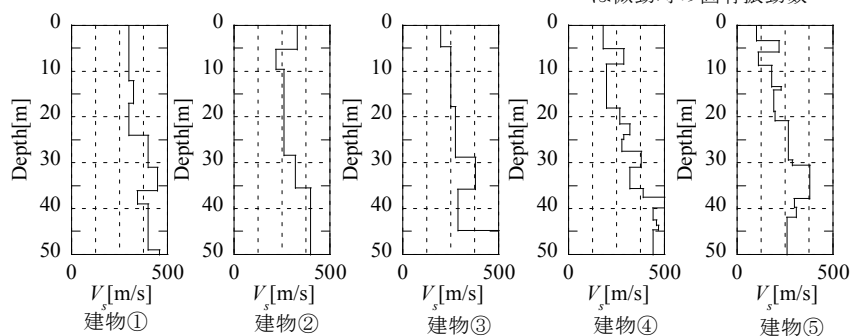


図3 対象建物における  $V_s$  分布

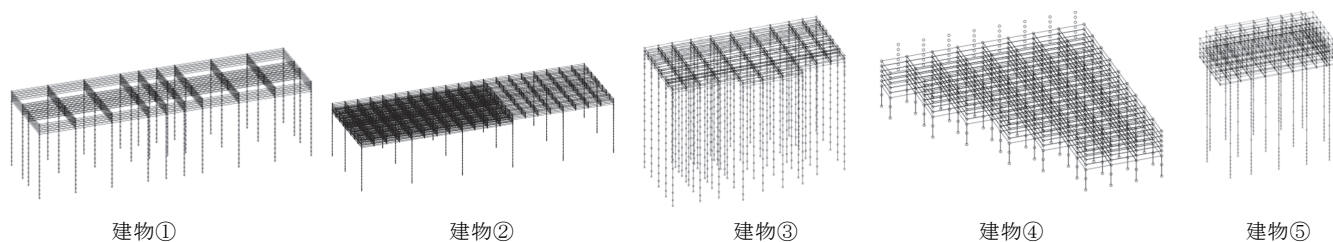


図4 理論解析の解析モデル(杭基礎モデル)

## 2. 建設時の微動記録を用いた基礎入力動の推定方法

基礎入力動の推定に用いるために、建設中の建物において、継続的に地表・基礎・上層階の3点にセンサーを配し微動計測を行う。ここで、上層階は各施工段階での最上階から1~3階下の階としている。それらで得られた記録の中から、建物の異なる建設段階における常時微動記録の有効入力動（地表応答に対する建物基礎応答のフーリエスペクトル比として定義）を用いて、振動数領域で平均化する。その際、単純に平均化するだけでは上部構造物の影響を除ききれない。そこで、本論文における平均化の方法として、各有効入力動において上層階/基礎のフーリエスペクトル比から、上部構造物が有効入力動に影響している振動数域を目視により判定し、その振動数域に関しては平均化の際に用いない（図1参照）。建設の進捗に併せ、除外範囲が低振動数側に推移するため、建設段階の異なる記録を用いることで基礎入力動を推定することが可能となる。また、上層階/基礎のフーリエスペクトル比では高次モードのピークが不明瞭な場合があり、上部構造物が影響している振動数域を特定できないことがある。そのような

際は、高振動数域は対象から除く。

### 3. 本手法による基礎入力動の推定

#### 3. 1 検討対象建物

本研究グループではいくつかの建物について、建設時に継続的に微動計測を行ってきた(例えば3~6)。微動計測、及び分析においては、1回の計測を30分、サンプリング周波数を100Hz、1セグメントのデータ数を8192個、セグメント数は21としている。それらの中から、検討対象とする建物の概形を図2・表1に示す。基礎形状・基礎形式・構造種別・建物高さ・計測回数が様々である建物に対して検討を行う。尚、建物④及び建物⑤は免震建物であるが、表1においてそれらの固有振動数は微動時の地盤建物連成系での値である。また、建物④は基礎底面下全域をGL-6.8mまで地盤改良しており、更に建物北側には根入れがない。対象建物の敷地における $V_s$ 分布を図3に示す。建物④の $V_s$ 分布は地盤改良前のものである。建物①~④は名古屋大学東山キャンパス構内に建設されているものであり、建物⑤は名古屋市内の熱田台地の端に建設されている。尚、地表観測点の設置位置によっては建物応答の影響を少なからず受ける可能性が考えられる。今回検討対象とした建物群に対する観測は、例えば、建物⑤では、約20m離れた地点に設置するなど、周辺建物の立地状況にも配慮して、建物応答の影響がなるべく少なくなるように設置しているが、影響の定量的評価については、今後の課題としたい。

#### 3. 2 理論解析結果との比較

本手法の有効性を検討するために、理論解析解との比較を行う。理論解析解は、対象建物において地盤・杭・根入れ部分を考慮してモデル化し、薄層要素法と有限要素法をフレキシブルボリューム法で組み合わせた方法<sup>7)</sup>により計算したものを用いる。理論解析については、杭は梁要素でモデル化し、基礎については六面体ソリッド要素で無質量の剛体とし、EW・NS方向それぞれにせん断波を鉛直下方入射とした。地盤のモデル化については、図3の地層構成をさらに分割し、0Hz~10Hzの振動数帯の成分の精度が十分保証される分割数とした。また、モデル底部からの反射波の影響を除くため、解析モデルの深さを表層地盤の物性値、及び対象建物の固有周期等を考慮して、3,000m以上とした。杭のヤング係数は、 $3.8 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 、材料減衰3%、地盤の材料減衰は1%とした。計算点に関しては、0.1Hzから10Hzまで0.1Hz刻みで計算を行い、2Hzまでの長周期域に関しては、分解能を考慮し、0.05Hz刻みで計算を行った。建物④では、地盤改良部分を護ら<sup>8)</sup>の研究を参考に、物性が等価な杭として扱う。その際、杭が曲げ変形をしないよう、断面2次モーメントを大きくしている。また、建物北側に根入れがないことを考慮し、解析モデルの建物北側に空気層を用意する。図4に建物①~⑤の解析モデルを示す。

図5に本手法で推定した基礎入力動と理論解析解を重ねて示す。図5より、NS方向ではEW方向と比較し、本手法による基礎入力動と理論解析解の対応が良い。また、EW方向は短周期域において理論解析解より振幅比が小さくなっている。これは、簡易評価式である山原の式(式(1))<sup>9) 10)</sup>からもわかるように、基礎入力動には基礎幅も影響する。EW方向は長辺方向となることが多く、解析が鉛直下方入射であることに対して、微動記録は表面波も含まれているため基礎幅の影響が表れたためと考えられる。平面アスペクト比が最も

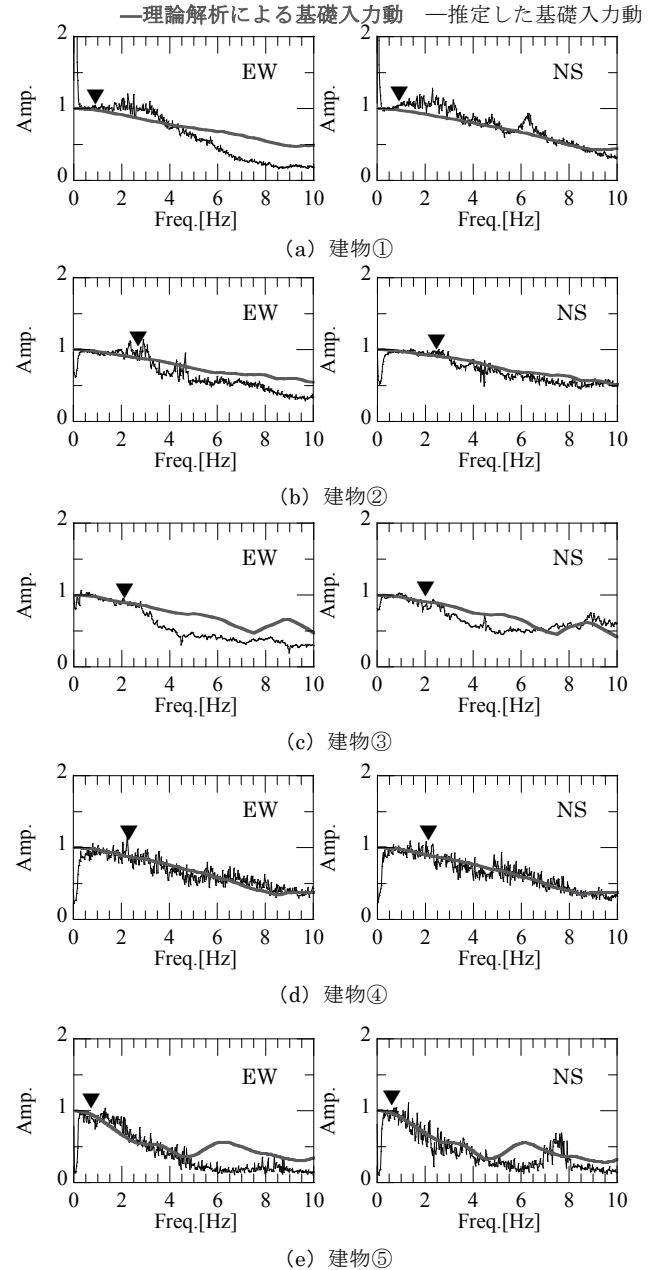


図5 建設時の常時微動記録を用いて推定した基礎入力動と理論解析による基礎入力動  
(▼は上棟時の建物の固有振動数)

大きい建物①のEW方向において理論解析解と対応が悪いこと、平面アスペクト比がほぼ1である建物④においてEW・NS両方向で理論解析解と対応が良いことはこれを示唆している。尚、式(1)において、 $V_s$ は表層地盤のせん断波速度で、 $B$ は基礎幅を表わしている。

$$H(\omega) = \left| \frac{\sin \alpha \omega}{\alpha \omega} \right| \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{B}{2V_s}$$

短周期域では理論解析解と対応が悪いケースも見られるが、どの建物においても1次固有振動数付近では適切に評価できている。以上のことから、本手法により微動記録を用いて推定した基礎入力動は、長周期域では十分精度が高く、地震時を想定した理論解析解と

の対応は良好である。

#### 4. 平均化に用いた記録数と推定精度

##### 4. 1 理論解析に基づく平均化に用いた記録数と推定精度の関係

本手法では、上部構造物も同時に観測することによって上部構造物の影響を除くことが可能となる。しかし、建設現場での計測は危

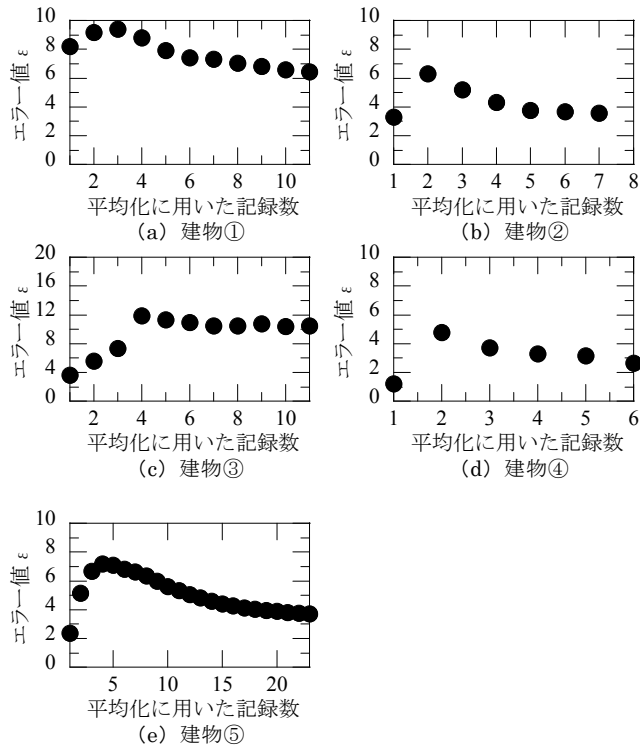


図6 平均化に用いた記録数と推定精度の関係 (EW方向)

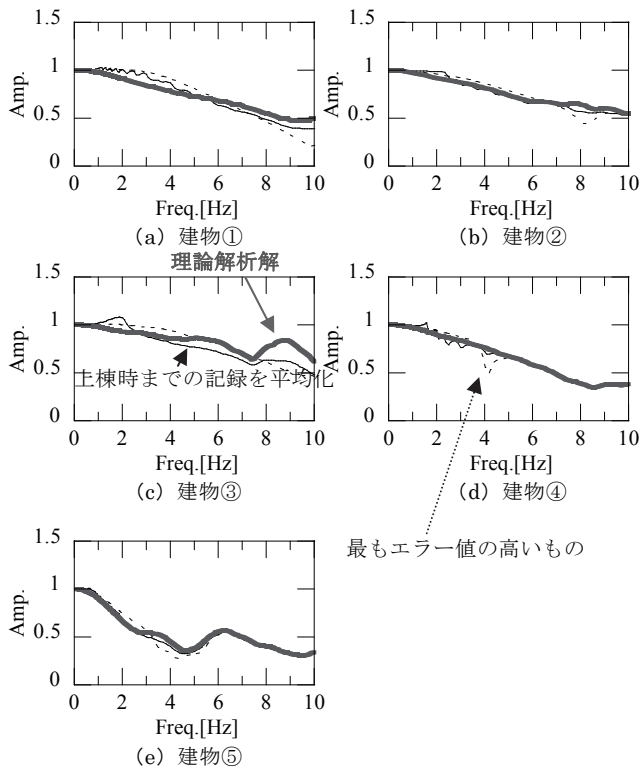


図7 上棟時までの記録を平均化した基礎入力動と最もエラー値が大きかった基礎入力動

険も伴い、上層階に設置できないこともある。また、低層状態では固有周期が明瞭に見えない場合もあり、上部構造物の影響を適切に除外できないことがある。そのため、上部構造物の影響を排除せず、振動数領域で単純に平均化しても精度よい基礎入力動が得られることが重要である。そこで、地盤・杭・根入れ部分・上部構造物を考慮してモデル化し理論解析を行い、上部構造物は建設段階を模擬し1層ずつ階層を増やし、各建設段階における有効入力動を計算する。各建設段階までの有効入力動を用いて振動数領域で単純に平均化し、無質量剛基礎での理論解析解(以後、基礎入力動)との比較を行い、平均化に用いた記録数と推定精度の関係について検討する。上部構造物に関しては、建物①に関しては小島<sup>5)</sup>によるもの、建物②は海野<sup>11)</sup>によるもの、建物③に関しては白瀬<sup>12)</sup>による質量・剛性分布を用い、建物④⑤に関しては設計資料を参考とした。推定精度は式(2)を用いて検討する。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x(f_i) - y(f_i))^2} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon$ は基礎入力動とのエラー値、 $k$ は振動数の計算点の総数、 $x(f_i)$ は計算点 $i$ での基礎入力動、 $y(f_i)$ は計算点 $i$ での建設段階の記録を平均化したものである。尚、建物①と建物⑤は建物竣工時の固有振動数は1Hzを下回る長周期建物である。そのため、3次モードまで考慮するとしても5Hz程度であり、建物①と建物⑤に関しては5Hzまでで推定精度を評価する。また、基礎スラブ打設済み時を便宜上、平均化に用いた記録数1と表記する。

図6に平均化に用いた記録数と推定精度の関係を、図7に無質量剛基礎での基礎入力動と建物竣工時までの記録を用いて平均化したものと最もエラー値 $\varepsilon$ の大きかった際のものを示す。本検討ではEW・NS方向で同様の傾向となったため、紙幅の都合上、EWのみの結果を記載する。図6より、どの建物でも平均化に用いた記録数が多くなると推定精度の向上が見られた。建物①や建物③の平均化に用いた記録数が少ない時に推定精度が良いのは、その建設段階での上部構造物の固有振動数が評価区間外であったためである。また、ほとんどのケースで基礎スラブ打設済み時の記録を用いる際に、最も推定精度が良かった。しかし、平均化に用いた記録数を多くすることで、基礎スラブ打設済み時と推定精度をほぼ同値にすることができる。これは図7からも明瞭である。

##### 4. 2 実測記録に基づく平均化に用いた記録数と推定精度の関係

4.1と同様の検討を、微動計測による実測記録を用いて検討する。検討対象建物は、基礎スラブ打設済み時から建物竣工時までの全建設段階での記録が得られている建物③を用いる。図8に平均化に用いた記録数と推定精度の関係を示す。図8(a)のEWでは基礎スラブ打設済み時の推定精度が高いが、図8(b)のNSでは基礎スラブ打設済み時より平均化に用いた記録数が多い方が推定精度は良くなった。実測記録では、種々要因が影響するため観測記録は乱される。

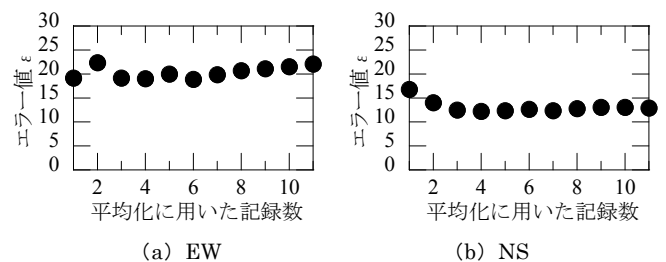


図8 実測記録に基づく

平均化に用いた記録数と推定精度の関係 (建物③)



それ故、必ずしも基礎スラブ打設済み時の記録が最も推定精度が良いわけではない。また、応答解析では基礎入力動は無質量剛基礎で計算したものをを用いるが、基礎スラブ打設済み時には、基礎質量による固有モードの影響が含まれる。そのため、多くの建設段階の記録を用いることでその影響を除くことができ、推定精度が向上すると考えられる。これは図 8 (b) から考察できる。

以上のことから、実測記録から基礎入力動を推定するには、基礎質量の影響や、実測記録の不確実性を除くために、建設段階の異なる多くの記録を用いて推定することが望ましい。

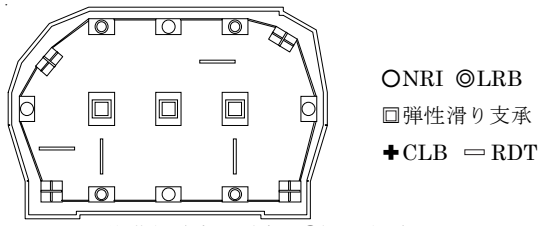


図 9 基礎免震建物（建物⑤）の免震層伏図

表 2 各解析ケースでの免震層の剛性と上部構造物の等価剛性

解析ケース	剛性[kN/cm]
① 微動時	21832
② 滑り始め変形時	2667
③ LRB初期降伏時	1623
④ 中地震時	991
⑤ L1地震時	573
⑥ L2地震時	253
上部構造物の等価剛性	9093

## 5. 地震時の免震建物の有効入力動を用いた基礎入力動の推定

### 5. 1 理論解析に基づく検討

建物⑤の上部構造物・基礎・杭をモデル化した解析モデルを用いて、免震層変形と基礎入力動の推定精度について検討を行う。建物⑤の免震層伏図を図 9 に示す。建物⑤は天然ゴム系積層ゴム(NRI)、鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)、弾性滑り支承、直動転がり支承(CLB)、減衰コマ(RDT)を用いているため、免震層の剛性は免震層変形に依存する。そのため、免震層変形に応じた等価剛性を用いて検討する。また、設計資料では、CLBの転がり始め変形は0.01cm、弾性滑り支承の滑り始め変形は1cm、LRBの初期降伏変形は2.86cmである。

免震層の剛性を①微動時、②滑り始め変形時（免震層変形 1cm）、③LRB 初期降伏時（免震層変形 2.86cm）、④中地震時（免震層変形 5cm）⑤L1 地震時（免震層変形 10cm）、⑥L2 地震時（免震層変形 40cm）の計 6 ケースについて理論解析を行う。表 2 に各解析モデルの免震層剛性と上部構造物の等価剛性を示す。図 10 に各ケースで得られた基礎入力動と無質量剛基礎での基礎入力動を示す。また、式 (2) を用いてエラー値を算定し、図中に示す。図 10 より、③LRB 初期降伏時には上部構造物の影響が見られるが、④中地震時には上部構造物の影響がほとんどなくエラー値も小さい。また、中地震時には、L2 地震時とほぼ同程度のエラー値であることから、LRB が塑性化し、免震周期が明瞭に現れる地震動では推定精度が高いと考えられる。

### 5. 2 実測記録に基づく検討

地震観測による実測記録を用いて、地震時の基礎免震建物の有効

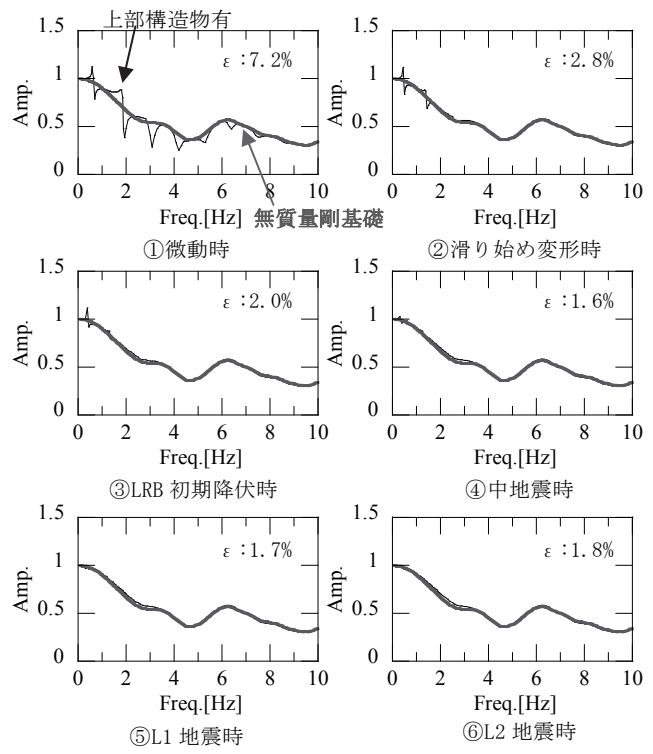


図 10 免震層の剛性と理論解との比較

入力動と理論解析解との対応を検討する。本研究グループでは多くの免震建物について地震観測を行っている(例えば 13) 14) が、2011 年東北地方太平洋沖地震を経験し、最も免震層変形の大きかった名古屋大学鶴舞キャンパスに立地する基礎免震建物を用いて検討する。対象建物の概形を図 11 に示す。対象建物は、RC 造（一部 SRC 造）の病院建物で、4 階建ての基礎免震建物である。上部構造物の固有振動数は 1 次固有振動数が 2.9Hz、2 次固有振動数が 8.0Hz である<sup>15)</sup>。免震装置は、NRI、LRB、CLB、オイルダンパを用いており<sup>13)</sup>、設計資料では LRB の初期降伏変形は 1.57cm である。敷地内では液状化対策として基礎底面の 75%を地盤改良している<sup>13)</sup>。理論解析では、図 12 に示す通り、地盤改良を行った所に関しては建物④と同様に、物性が等価な杭としてモデル化した<sup>8)</sup>。また、地盤条件は図 13 に示す通り、建設地の地盤改良前の  $V_s$  分布<sup>13)</sup>を用いる。免震層変形に対する基礎入力動の推定精度に関して検討するために、東北地方太平洋沖地震と遠州灘の地震（2013. 8. 3）を用いる。各地震での免震層の変位オービットを図 14 に示す。図 14 (a) より最大変形時は LRB の初期降伏変形とほぼ同値であり、LRB のバラツキ等の影響もあるため塑性化したとは断言できない。また、図 14 (a) より EW 方向に大きく変形したことが分かる。また、遠州灘の地震の際は弾性変形内である。

図 15 に東北地方太平洋沖地震での対象建物での有効入力動と理論解析解を示し、図 16 に遠州灘の地震時の有効入力動と理論解析解を示す。尚、図中に▼で示すのは、上部構造物の固有振動数である。図 15 (a) より、免震層変形の大きかった EW 方向では、東北地方太平洋沖地震での有効入力動では理論解析解との対応が良く、図 15 (b)や図 16 で見られる上部構造物の影響を除くことができ、適切に基礎入力動を推定できている。

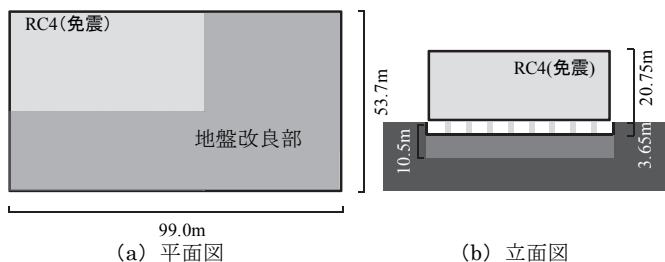


図 11 基礎免震建物の概形

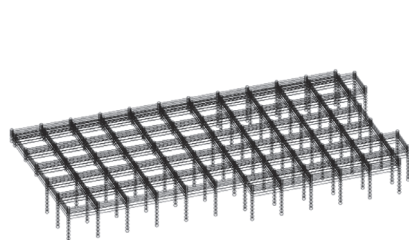


図 12 理論解析モデル

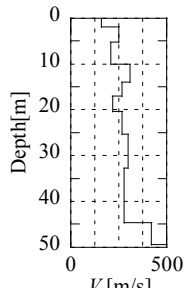


図 13 地盤の  $V_s$  分布

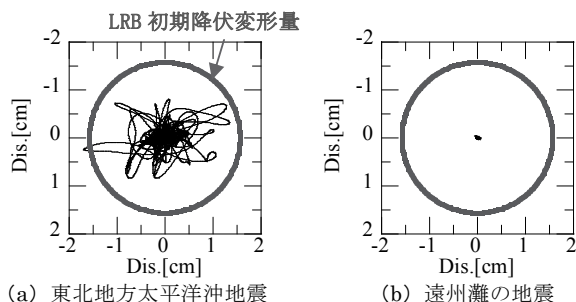


図 14 免震層の変位オービット

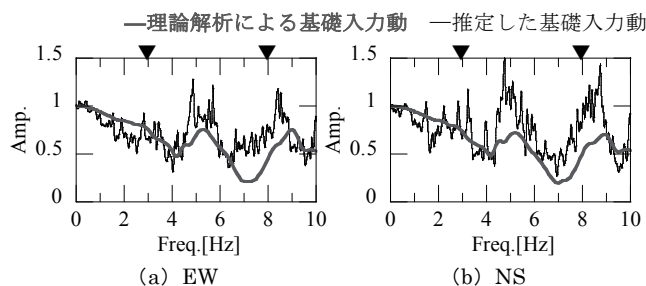


図 15 東北地方太平洋沖地震での有効入力動と理論解析

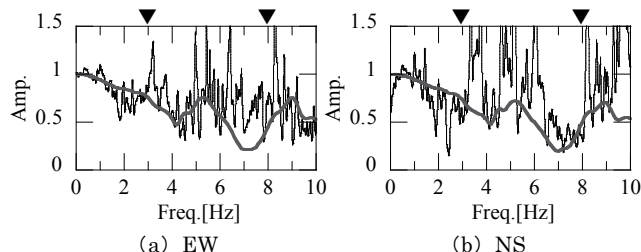


図 16 遠州灘の地震での有効入力動と理論解析

## 6. 結論

建物の建設段階で順次計測された複数回の常時微動記録で得られた有効入力動を平均化することにより、上部構造物の影響を除いた基礎入力動の推定を試みた。また、地震時の基礎免震建物の有効入力動を用いて基礎入力動を推定することを試みた。本論で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 微動記録を用いても、長周期域においては、どの建物においても適切に地震時を想定した基礎入力動を推定できることを示した。

(2) 短周期域に関しては、長辺方向で対応が悪いケースが多く、基礎幅が影響していることを示した。

(3) 平均化に用いた記録数と推定精度の関係は、理論解析を用いると、基礎スラブ打設済み時が最も推定精度が高くなるケースが多かった。しかし、平均化に用いた記録数を多くするとほぼ同値の推定精度が得られることが分かった。

(4) 微動計測、及び地震観測における実測記録には基礎質量による固有モードの影響や、種々要因による観測記録の不確実性がある。それらの影響を除くために、多くの記録を用いて基礎入力動を推定することが望ましいことを示した。

(5) 地震時の基礎免震建物の有効入力動を用いて、基礎入力動の推定を行った。小地震動時では上部構造物の影響が含まれるが、免震周期が明瞭に発現するような中地震動以上では、免震建物の有効入力動には上部構造物の影響が少なく、適切に基礎入力動を推定できることを理論解析及び実測記録を基に明らかにした。

建設時の微動記録を用いた基礎入力動の推定に関しては、階数が多い中層・高層建物を用いて検討した。低層建物では、平均化に用いることができる記録数も限られるため、それらでも適切に評価できるかについては今後の課題である。また、地震時の基礎免震建物の有効入力動を用いた基礎入力動の推定に関しては、日本全国に立地する免震建物での記録を統計的に分析し、本手法の妥当性の更なる検討とデータの蓄積を行うことが必要である。そのため、基礎免震建物において観測体制を充実させることが重要である。

## 参考文献

- 宮本裕司ほか：2004年新潟県中越地震での地震動と建物応答に関する研究（その1～その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.455-460，2006.9
- 岡野創，小豆畑達哉，井上波彦，飯場正紀，鹿嶋俊英，酒向裕司：観測記録から推測される地盤—構造物の動的相互作用による建物応答低減効果，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.696，pp.237-246，2014.2
- 飛田潤，福和伸夫，松井政樹，小島宏章：建設時の継続的な振動観測に基づく高層建物の振動特性，日本建築学会構造系論文集，第73巻，第625号，pp.391-398，2008.3
- 小島宏章，福和伸夫，飛田潤：プレキャストプレストレストコンクリート造建物の建設段階に伴う振動特性の変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.647-648，2004.8
- 小島宏章：実測記録に基づく中低層建物の動的相互作用効果に関する研究，名古屋大学学位論文，2005.3
- 天竺貴仁，高橋武宏，福和伸夫，護雅史，飛田潤：建設時の継続的観測に基づく超高層免震建物の振動特性の変化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.525-526，2013.8
- 文学章：地盤と構造物との動的相互作用における基礎形状・基礎形式・隣接建物の影響に関する解析的研究，名古屋大学学位論文，2006.3
- 護雅史，後藤圭佑，福和伸夫：改良地盤に支持された中層免震建物の振動性状に関する研究（その2）地盤改良がインピーダンスに与える影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.27-28，2008.9
- 山原浩：地震時地動と地震波の入力損失（第1報），日本建築学会論文報告集，第165号，pp.61-66，1969.11
- 山原浩：地震時地動と地震波の入力損失（第2報），日本建築学会論文報告集，第165号，pp.25-30，1970.1
- 海野元伸，福和伸夫，飛田潤：高密度観測・強制加振実験に基づく地盤—建物連成系の立体振動性状及び履歴特性評価，構造工学論文集，Vol.57B，pp.239-248，2011.3
- 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
- 周方圓，護雅史，福和伸夫：改良地盤上に立地した免震建物の地震時応答性状に関する考察，日本建築学会技術報告集，第17巻，第36号，pp.473-478，2011.6
- 長谷川泰隆，飛田潤，福和伸夫，八木茂治，北村敏也：実大免震建物の振動実験と強震観測，構造工学論文集，Vol.46B，pp.307-316，2000.3
- 護雅史，福和伸夫，飛田潤，後藤圭佑：改良地盤に支持された免震建物の振動特性に関する研究（その1）地震観測記録に基づく建物応答特性分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.639-640，2010.9

[2014年2月18日原稿受理 2014年4月10日採用決定]