

実測に基づく基礎入力動の推定に関する研究

Estimation of Foundation-Input-Motion Based on Vibration Observation

基礎入力動
微動計測動的相互作用
免震地震観測
高層正会員 ○天竺 貴仁*
正会員 高橋 武宏**
正会員 福和 伸夫***
正会員 護 雅史****
正会員 飛田 潤*****Amano Takahito
Takahashi Takehiro
Fukuwa Nobuo
Mori Masafumi
Tobita Jun

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、地震観測の重要性が叫ばれ、防災技術科学研究所により K-NET、KiK-net が整備され、地盤系の観測体制の充実が図られた。しかし、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¹⁾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等が挙げられる。

その中でも入力相互効果については、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の相互作用効果による影響が含まれ、純粋な基礎入力動を求めることはできない。岡野ら²⁾は上部構造物の影響を除いた基礎入力動を求めるために、システム同定を行うことで実測記録から基礎入力動を求めている。しかし、システム同定を行うことは一般に容易ではない。一方、基礎入力動を計算するプログラムは非常に高度であり、一般の設計者は容易に基礎入力動を求めることができない。

以上のことから基礎入力動を簡易に求めることは非常に有意義である。本研究では、建設中の建物を継続的に観測・計測を行うため、建設の進捗にあわせ上部構造物の周期は変化していく³⁾。そのため、建設時期の異なる有効入力動の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、実測記録を基に算出できると考え、その妥当性について検討する。

2. 対象建物と観測概要

対象建物は1階と基礎との間に免震層を有し、上棟時の高さが67.5mの高層免震建物である。建物の概形を図1に示す。根入れ深さは6.1mである。また、基礎構造は

場所打ち鋼管コンクリート杭であり、杭長は29.9mである。基礎幅は長辺方向(EW方向)33.5m、短辺方向(NS方向)23.3mである。建設地点は名古屋市中心部であり、地盤種別は第2種地盤に相当する。当該敷地でのボーリングデータを図2に、常時微動計測に基づくH/Vスペクトルを図3に示す。深部地盤の卓越振動数は図3と既往の研究⁴⁾から0.25Hz程度であり、浅部地盤の卓越振動数は1.2Hzである。図1に示すように、地盤、免震ピット、1階についてはセンサーを常設とし、上層階に設置したセンサーは建設

の進捗にあわせて、1階ずつ上層階に移設し観測を行った³⁾。観測には、キネメトリック社Altus ETNAを用いた。また、免震層を含めた建物全体の1次固有振動数は、観測期間中に0.6Hz~2.5Hzの幅で推移した。

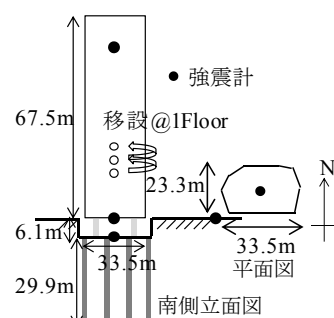


図1 建物概形と観測点配置

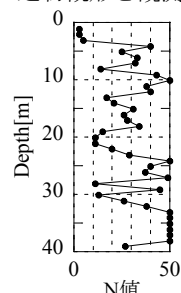


図2 建設地における地盤のN値分布

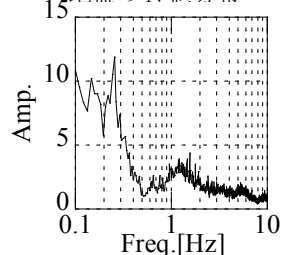


図3 建設地の常時微動記録におけるH/Vスペクトル

* 名古屋大学大学院環境学研究科 博士課程前期
** 名古屋大学減災連携研究センター 研究員・工修
*** 名古屋大学減災連携研究センター長 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長 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Researcher, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., M.Eng
Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr.Eng
Assoc.Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr.Eng
Prof., Disaster Mitigation Office, Nagoya Univ., Dr.Eng

3. 検討に用いた観測記録の概要

2012.10.10 から 2013.08.05 までの 1 年弱の期間で計 25 の地震記録が収録された。その内、基礎入力動を求める上で、震源が比較的近傍で実体波が卓越していると考えられる地震を対象として検討を行う。有効入力動の平均化に用いた地震の震央位置を図 4 に示す。また、地表面と免震ピットでの最大加速度を表 1 にまとめる。免震ピット/地表のフーリエスペクトル比を図 5 に示す。

一方、微動記録に関しては、計 17 回計測を行った。それらの免震ピット/地表のフーリエスペクトル比の一例を図 6 に示す。尚、微動記録に関しては 17 回の計測結果を用いて平均化を行う。以後、平均化に用いた各々のフーリエスペクトル比についてサンプルと称し検討を行う。

図 5、6 より、2Hz 付近から振幅倍率は 1 より低下し、5Hz 付近では振幅倍率は非常に小さくなり、建物高さに関係なく同様の傾向となった。これは簡易評価式とも対応している。簡易評価式として、鉛直下方入射を仮定した地表面に対する基礎入力動の水平成分に関しては原田の提案式⁵⁾があり、式 (1) で表わされる。また、表面波に対しての基礎入力動の簡易評価式である山原の式⁶⁾は式 (2) で表わされる。式 (1)、(2) から上部構造物に影響されないことが分かる。ただし、図 5、6 では上部構造

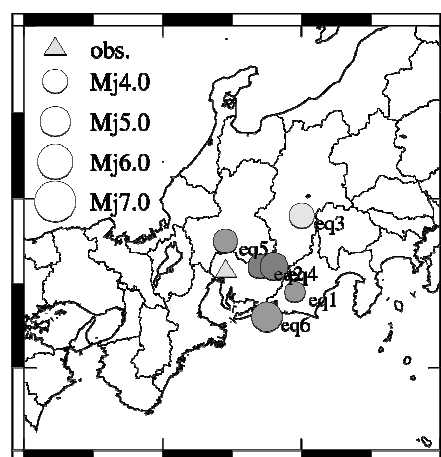


図 4 検討に用いた地震の震央位置

表 1 検討に用いた地震記録一覧

| Date | M. | Eq. Name | 最大加速度[cm/s/s] | | 震源距離 [km] | 震源深さ [km] |
|------------|-----|----------|---------------|-------|--------------|--------------|
| | | | 地表 | 免震ピット | | |
| 2012.11.24 | 3.6 | eq.1 | 2.7 | 0.9 | 114 | 40 |
| 2013.02.06 | 4.1 | eq.2 | 9.9 | 3.1 | 55 | 50 |
| 2013.02.15 | 4.3 | eq.3 | 1.9 | 0.7 | 142 | 10 |
| 2013.04.20 | 4.8 | eq.4 | 2.8 | 1.0 | 78 | 50 |
| 2013.07.17 | 4.0 | eq.5 | 3.8 | 1.6 | 40 | 40 |
| 2013.08.03 | 5.1 | eq.6 | 11.1 | 4.3 | 89 | 40 |

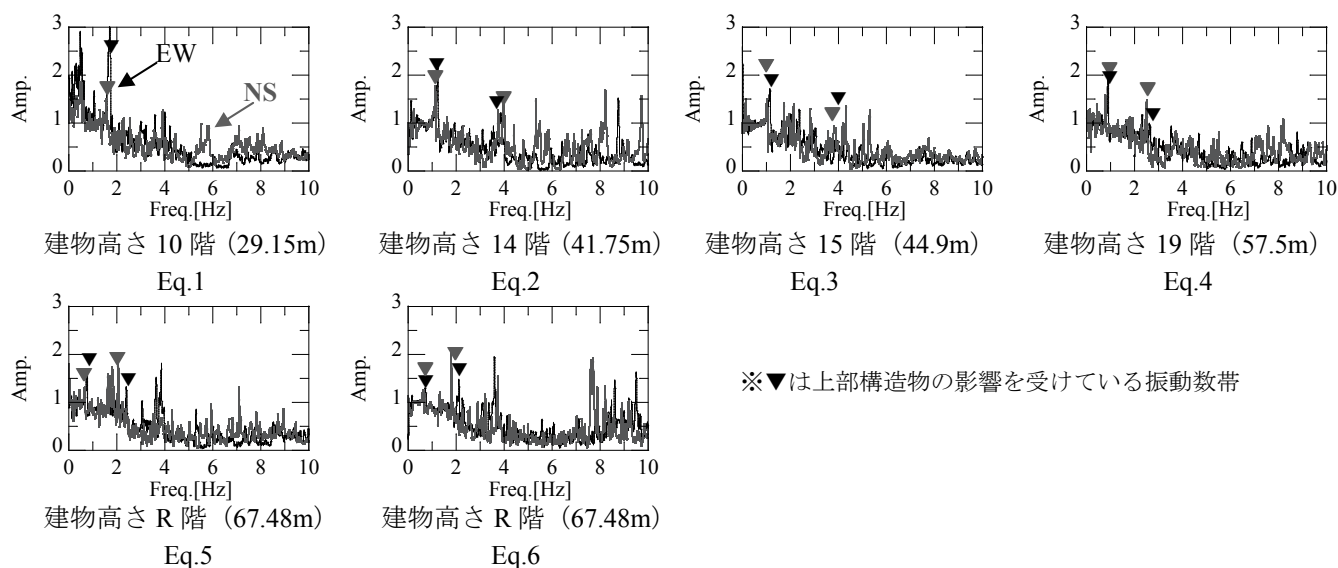


図 5 基礎入力動の推定に用いた有効入力動（地震時）

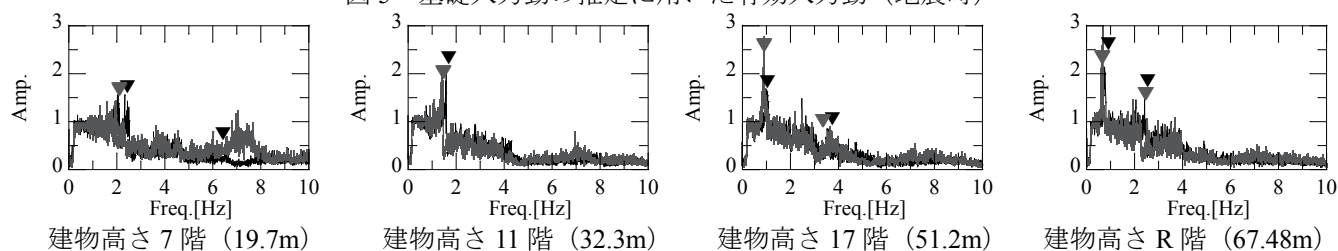


図 6 基礎入力動の推定に用いた有効入力動の例（微動時）

物の慣性力の影響で、上部構造物の固有振動数付近で振幅が増幅されており、入力損失効果が乱されている。

$$H(\varpi) = \begin{cases} \left| \frac{\sin(kD_f)}{(kD_f)} \right| & 0 \leq kD_f \leq \frac{\pi}{2} \\ 0.63 & \frac{\pi}{2} \leq kD_f \end{cases} \quad (1)$$

$$k = \frac{\varpi}{V_s \sqrt{1 + 2ih_s}}$$

V_s : 表層地盤のせん断波速度

h_s : 表層地盤材料の減衰定数

D_f : 根入れ深さ

$$H(\varpi) = \left| \frac{\sin \alpha \varpi}{\alpha \varpi} \right| \quad (2)$$

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

B : 基礎幅

4. 基礎入力動の推定方法

図 5、6 より実測記録には上部構造物の影響を含むため、数回の限られた観測記録を用いて、単純に振動数領域で平均化するだけでは上部構造物の影響を排除しきれない。そこで、本研究における平均化の方法として、各サンプルにおいて、上層階/免震ピットのフーリエスペクトル比から、上部構造物が影響している振動数域を求め、その振動数域に関しては平均化する際にサンプルとして使用せずに平均化を行う。また、上層階/免震ピット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る。そのような際は、高振動数域全てをサンプルから除外し、平均化を行うことを試る。

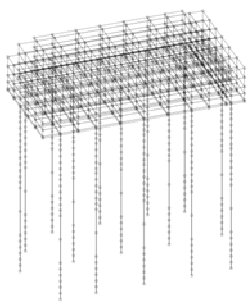


図 7 計算モデル概要
杭—基礎モデル

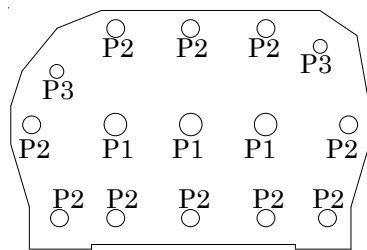


図 8 杭伏図

表 2 杭諸元

| | 種類 | 杭径 [mm] | 鋼管厚 [mm] | E [kN/m ²] | I [m ⁴] | 減衰h [%] | 杭長 [m] |
|----|-------|------------|-------------|---------------------------|------------------------|------------|-----------|
| P1 | 場所打ち | 2400 | 17 | 3.8*10 ⁷ | 1.6286 | 3.0 | 29.9 |
| P2 | 鋼管コン | 1900 | 14 | 3.8*10 ⁷ | 0.6397 | 3.0 | 29.9 |
| P3 | クリート杭 | 1500 | 12 | 3.8*10 ⁷ | 0.2485 | 3.0 | 29.9 |

5. 推定結果の理論解析結果・簡易評価式との比較

本手法が適切な基礎入力動を推定できるかを検討するために、理論解析結果、簡易評価式との比較を行う。

理論解析として、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を行い、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⁷⁾によって基礎入力動を計算した。図 7 に計算モデル、図 8 に杭伏図、表 2 に杭諸元、図 9 に地盤の V_s 分布を示す。計算モデルについては、基礎は無質量剛基礎、根入れ深さは 6.1m とし、1 柱 1 本杭で EW・NS 方向それぞれに鉛直下方入射とした。

本対象建物は杭基礎建物であり、式(1)では杭の影響を反映することができない。そこで、河辺ら⁸⁾による次式を用いて杭を考慮したものについても検討を行う。

$$L_{eq} = \pi(\sum EI / G)^{1/4} / 4 \quad (3)$$

$$D_{feq} = D_f + L_{eq}$$

L_{eq} : 杭による等価根入れ深さ

E : 杭のヤング係数

I : 杭の断面2次モーメント

G : 地盤のせん断弾性係数

D_{feq} : 杭を考慮した際の根入れ深さ

V_s は根入れ深さ (6.1m) までの V_s を層厚で重み付け平均したもの (150m/s)、表層地盤材料の減衰定数 h_s は 3%とした。また、地盤のせん断弾性係数 G は杭端までの層厚で重み付け平均したものを用いる。また、式 (2) の山原の式では、 V_s は前述のもの、基礎幅 B は面積等価の円の直径 (31.5m) とした。

図 10、11 に本手法により推定した基礎入力動 (地震時と微動時)、理論解析による基礎入力動、原田と河辺の提案式による基礎入力動 (杭考慮なしと杭考慮有り)、山原の式による基礎入力動を示す。図 10、11 より、本手法では 5Hz あたりまでは理論解析結果とよく対応している。図 5 で見られた低振動数域におけるピークを取り除けており、上部構造物の影響を除外できているが、地震記録

では微動記録と比較すると上部構造物の影響が表れている。地震記録では微動記録と比較してサンプルが少ないため上部構造物の影響を排除しきれなかったのではないかと考えられる。一方、高振動数域では適切に評価できていない。これは、実測記録では高次モードについて明瞭なピークが見えないこともあり、サンプル数が少なくなるため、適切に評価できなかったのではないかと考えられる。また、原田の提案式で

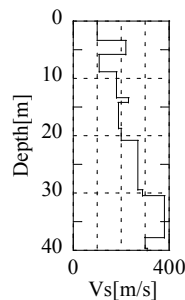


図 9 建設地の
 V_s 分布

は、杭を考慮することにより理論解析解との対応がよくなり、3Hz 辺りまでは評価できていることが分かる。本手法は山原の式との対応も良好なものであった。

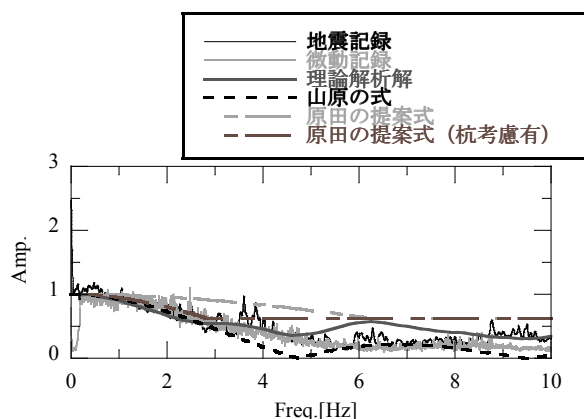


図 10 推定した基礎入力動（EW 方向）と理論解析・簡易評価式による基礎入力動との比較

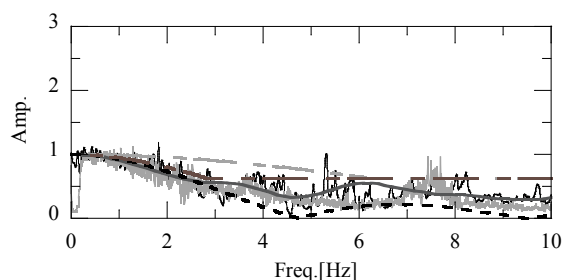


図 11 推定した基礎入力動（NS 方向）と理論解析・簡易評価式による基礎入力動との比較

地震記録から推定した基礎入力動と微動記録から推定した基礎入力動の形状は類似していた。しかし、簡易評価式からもわかるように、地震記録のような鉛直下方入射に対しては根入れ深さで定まるものに対して、微動記録のような表面波に対しては基礎幅で定まる。本対象建物では基礎幅と杭を考慮したみかけの根入れ深さの関係によって、偶然、両者の基礎入力動の形状が類似したと考えられる。

6. まとめ

本論文では建設中の建物を継続的に観測・計測を行い、建設時期の異なる有効入力動を用いて平均化を行い、上部構造物の影響を除いた基礎入力動を求めた。これにより得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本研究での推定方法を用いることで上部構造物の影響を除いた基礎入力動を得られることを確認した。
- (2) 地震記録と比較して、微動記録はサンプル数も多かったため、推定精度が向上することがわかった。
- (3) 本手法で推定した基礎入力動を理論解析結果と比較

したところ、低振動数域では適切に評価できていることを確認した。

(4) 原田の提案式と比較したところ、簡易評価式では河辺の式により杭を考慮することで理論解析解との対応はよくなることを確認した。

(5) 本手法を山原の式と比較したところ、対応が良好であることを確認した。

尚、本対象建物の固有振動数は上棟時に 0.6Hz であり、比較的高次モードのピークが読み取りやすい。中低層建物において適用が可能かどうかについては今後の課題である。また、観測回数と精度の関係について、上部構造物を含めたモデリングをすることで、解析的に検討することも重要である。

謝辞

本研究で実施した建設時の地震・微動計測や振動実験に関して、一条工務店、徳倉建設ほか建設作業現場の方々に多大なご協力をいただきました。観測とデータ分析に大林組技術研究所（元名古屋大学）の小島宏章氏ほか、名古屋大学の平井敬助教授をはじめ大学院生・学生に多大な協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1)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.456-460，2006.9
- 2) 岡野創，小豆畑達哉，飯場正紀，鹿嶋俊英：地震観測に基づく杭基礎建物の地震入力・応答評価、その 3 観測記録から推定される入力と慣性力相互作用による応答低減効果，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.5-6，2013.8
- 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
- 4)中村仁，福和伸夫，高橋広人，飛田潤，堀啓輔：常時微動計測に基づく名古屋市域の地盤震動特性と地盤構造推定に関する研究，構造工学論文集，pp.413-421，2000.3
- 5)原田隆典，久保慶三郎，片山恒雄：有効地震動の計算式とその実測例による検討，土木学会論文集，第 362 号/I-4，pp.435-440，1985.10
- 6)山原浩：地震時地動と地震波の入力損失，日本建築学会論文報告集，第 165 号，pp.61-66，1969.11 および第 167 号，pp.25-30，1970.1
- 7)文学章：地盤と構造物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・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
- 8)河辺美穂，関崇夫：埋込みを有する群杭基礎の基礎入力動の簡易評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.369-370，2009.8