

日本大学生産工学部における強震観測

－その6 モデルによる地震入力評価－

日大生産工(院) ○伊藤 洵 日大生産工 藤本 利昭
日大生産工(学部) 中島 拓哉

1. まえがき

建物の耐震性確保を確実なものとするためには、建物への地震入力と応答を精度良く評価することが重要である。そのため、強震観測による地盤、建物応答の実測による蓄積が必要であり、2011年東北太平洋沖地震以降多くの建物で検討されている¹⁾。

本研究では、2014年から観測を行っている39号館で得られた強震記録²⁾と、設計図書に基づいて作成した多質点系モデルより得られた解析解を比較することで、39号館の地震入力について検討する。

2. 強震観測概要

図1に対象建物の1階平面図、及び断面図を示す。対象建物は2012年に竣工した杭基礎建物であり、構造形式は鉄骨造の純ラーメン構造で、平面形状は約47m×約53mで、地上6階建ての建物高さ30.90mの建物で、6階西側が一部セットバックしている。基礎形式は、直径0.6mから1mのPHC杭基礎で、GL-31.6mの砂質層に支持されている。強震計はキャンパス内の地表面と、建物内の地上1階、3階、6階の3ヶ所に設置している。39号館の強震計はLU201_SU201型強震計で、静電容量式の加速度計と収録器で構成されている。また、地表面の強震計はK-NET95型強震計でサーボ型加速度計と収録器から構成されている。なお、各観測点では、水平2方向（NS、EW）及び鉛直方向（UD）の3成分を測定しているが、本研究ではNS、EW方向について検討した。

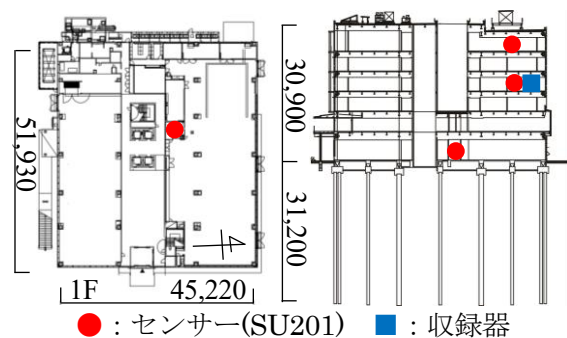


図1 1階平面図と断面図

3. 解析モデル概要

図2に振動解析モデルを示す。地震応答解析モデルは、基礎のスウェイを考慮しR階から1階までを7質点にモデル化したスウェイモデルと、1階床位置を固定としR階から2階までを6質点にモデル化した基礎固定モデルを用いる。本研究では、SRモデルのロッキング動は考慮せず、スウェイ動のみ考慮したモデルで検討する。なお、基礎固定モデルでは1階床位置を固定として直接地震動を入力し、スウェイモデルでは水平地盤ばねの外から地震動を入力する。

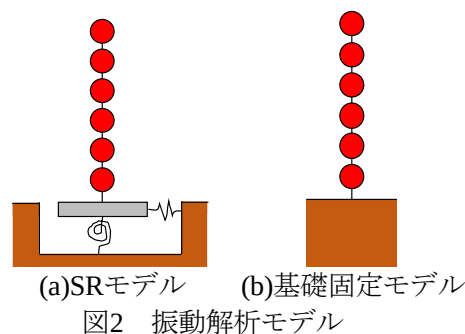


図2 振動解析モデル

3.1 上部構造

上部構造の解析モデルは設計図書を参考に、一貫構造計算ソフト³⁾を用いて作成した⁴⁾。表1に一貫構造用ソフトから得られた質量、剛性を示す。質量は、実状に近いモデルを作成するため、建物の利用率が低いと仮定して、積載荷重が載っていないものとして設定した。減衰はNS、EW方向ともに初期剛性が2%の剛性比例型とした。

表1 上部構造の質量と剛性

階	質量(kN)	剛性(kN/cm)	
		X方向	Y方向
R	9578.8	4533.0	4232.8
6	18471.0	11312.1	10427.6
5	14095.1	11945.3	11331.0
4	14188.7	12963.3	12190.0
3	12613.7	13648.5	13323.3
2	17913.2	9552.7	9720.5

3.2 下部構造

スウェイばねは地盤の影響のみ考慮したものと、杭の影響を考慮したものの2ケースで検討を行った。表2に、スウェイばね計算時に用いた地盤特性を、設計図書の地盤柱状図を参考に簡略化したものを示す。なお、地盤特性のS波速度はN値から推定し⁵⁾、減衰定数は1次元重複反射理論に基づくShake⁶⁾を用いて算出した。

(1) 地盤のみ考慮したスウェイばね

地盤による影響のみ考慮したスウェイばねの剛性と減衰は、Parmeleeの式⁷⁾を用いた。

$$k_H = \frac{6.77}{1.79 - \nu} Gr \quad \cdots (1)$$

$$C_H = \frac{6.21}{2.54 - \nu} \rho V_s r^2 \quad \cdots (2)$$

ここに、 G はせん断弾性係数であり、 $G = \rho V_s^2$ で計算する。また、 ρ は地盤密度、 V_s は地盤のS波速度とする。 ν は地盤のポアソン比、 r は基礎半径とする。なお、上式は円形剛基礎を前提としているが、簡略化のため基礎面積が等しい円の半径を基礎半径 r として用いた。

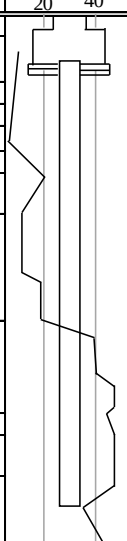
(2) 杭を考慮したスウェイばね

杭の影響を考慮したスウェイばねの剛性と減衰は、Francisの式とGazetasらによる方法⁸⁾を用い、弾性支承梁の理論解を利用して杭頭の地盤ばねを算出した。

$$K_{HG} = (4N_p E_p I_p)^{\frac{1}{4}} (k_{jsi} N_p)^{\frac{3}{4}} \quad \cdots (3)$$

$$c_{gsi} = 1.57 \rho_i B (V_{Lai} + V_{si}) \quad \cdots (4)$$

表2 地盤特性

深度 [m]	層厚 [m]	土質名	N値		密度 [t/m ³]	S波速度 [m/s]	減衰 [%]
			20	40			
0	0.9	埋土			1.5	171	2.0
	3.7	ローム			1.4	144	2.0
5	1.1	ローム			1.4	100	2.0
	0.8	粘土			1.5	126	2.0
	1.9	細砂			1.9	143	2.0
10	1.3	細砂			1.9	284	2.0
	1.6	微細砂			1.9	217	2.0
15	8.3	微細砂			1.9	183	2.0
20	6.8	微細砂			1.9	274	2.0
25	1.6	微細砂			1.7	278	2.0
	3.0	細砂			1.9	295	2.0
30	10.8	細砂			1.9	295	2.0

ここで、 N_p は杭の本数、 E_p は杭のヤング係数、 I_p は杭の断面2次モーメント、 k_{jsi} は杭周地盤ばね(Francisの式)、 V_{Lai} はLysmerの波動速度であり、 $V_{Lai} = 3.4 V_{si} / (\pi(1 - \nu_{si}))$ で計算する。

表3に求めた水平地盤ばねと減衰を示す。

表3 水平地盤ばねと減衰係数

	ばね剛性 (kN/cm)	減衰係数 (kN・s/cm)
地盤のみ (Parmeleeの式)	42921.9	1019.9
杭考慮 (Francisの式)	102938.6	1300.0 (NS)
		1287.1 (EW)

4. 地震応答解析結果

4.1 入力地震動

検討に用いた地震の詳細を表4に示す。入力地震動は、2014年8月から2019年6月末までの約5年間で、本キャンパスで観測を行っている全強震計(4号館、5号館、37号館、39号館、自由地盤)で記録が得られたもののうち、震源距離が近く、対象建物1階での計測震度相当値が大きい地震波を使用した。

4.2 伝達関数

4.2.1 基礎固定モデル

作成した解析モデルの妥当性を検討するため、基礎固定モデルに39号館1階の観測波を入力して得られたフーリエスペクトルを図3に、固有振動数一覧を表5に示す。なお、スペクトルの平滑化にはParzen型ウィンドウ幅0.2Hzを用いた。NS、EW方向ともに1次モードにおいて観測記録と対応が良いことが確認できる。

建物と地盤の動的相互作用について確認するため、39号館1階と自由地盤の観測記録によるスペクトルを図4に示す。図4より、NS、EW方向ともに1.5Hz付近から39号館1階のスペクトルが自由地盤のスペクトルよりも低減していることが確認でき、入力との相互作用による影響が確認できる。また、39号館の1次固有振動数付近で入力との相互作用による影響がみられ

表4 検討地震概要

発生日時	2015年1月26日 7時20分
震源地	千葉県北東部
震央	35°52.6'N 140°28.9'E
震源深さ	37km
マグニチュード	5.0
震度	2(習志野市鷺沼)
最大震度	4(千葉、東京)

ないことから、基礎が地表の地震動と同じように挙動すると仮定した基礎固定モデルでも、39号館の応答を概ね評価できると考えられる。

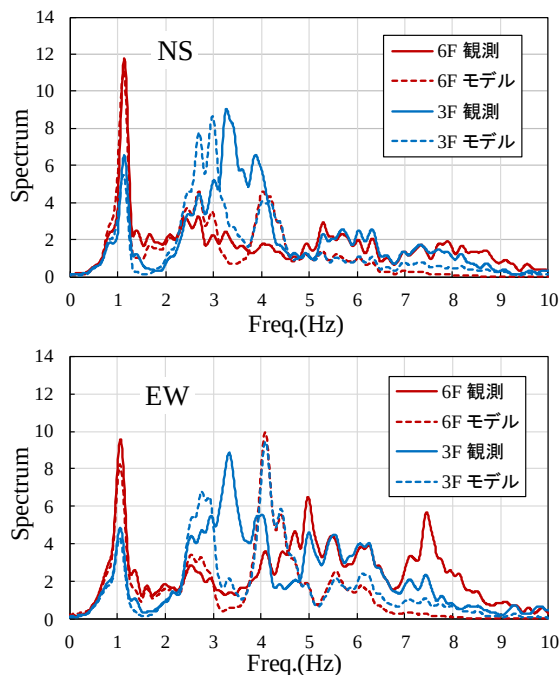


図3 観測記録と基礎固定モデルの比較

表5 固有振動数一覧

	NS方向			EW方向		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
観測	1.148	3.284	—	1.099	3.174	5.139
モデル	1.088	2.985	4.264	1.075	2.919	4.158

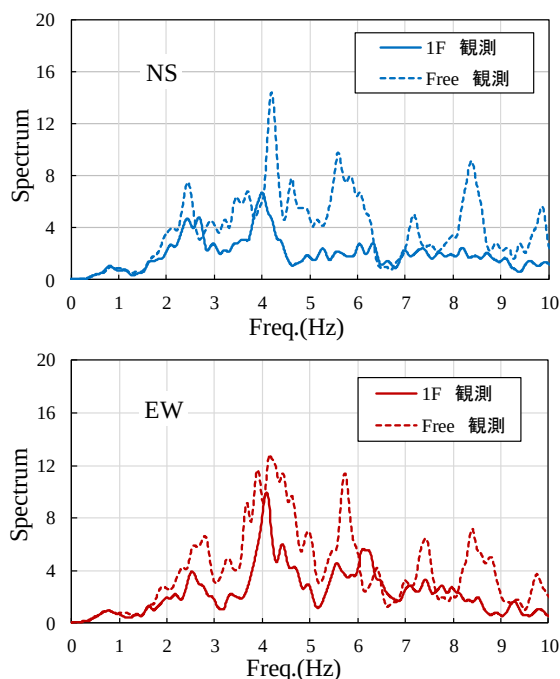


図4 観測記録による比較

4.2.2 スウェイモデル

(1), (2)式により地盤の影響を考慮したスウェイモデルと, (3), (4)式により杭を考慮したスウェイモデルの1階(基礎位置)での応答を検討する。ばね剛性と減衰を考慮したスウェイモデルに自由地盤の観測記録を入力した応答結果を39号館1階の観測記録と重ねて図5に示す。なお, 地盤変位が剛な基礎によって拘束されることで地動とは異なる基礎入力動を表現するために, 基礎の質量は無質量⁹⁾として地震波を入力した。

図5よりNS, EW方向ともに0から1.5Hz付近まで39号館1階の観測記録とモデルの応答が一致しているが, 1.5Hz以降においては観測記録とモデルの対応が良くないといえる。スウェイを考慮することで高振動数において, わずかに39号館1階の観測記録に近づいたが, 基礎固定モデル1階の応答とほとんど変わらず, スウェイを考慮した振動解析モデルでは地震入力を上手く表現することが出来なかった。

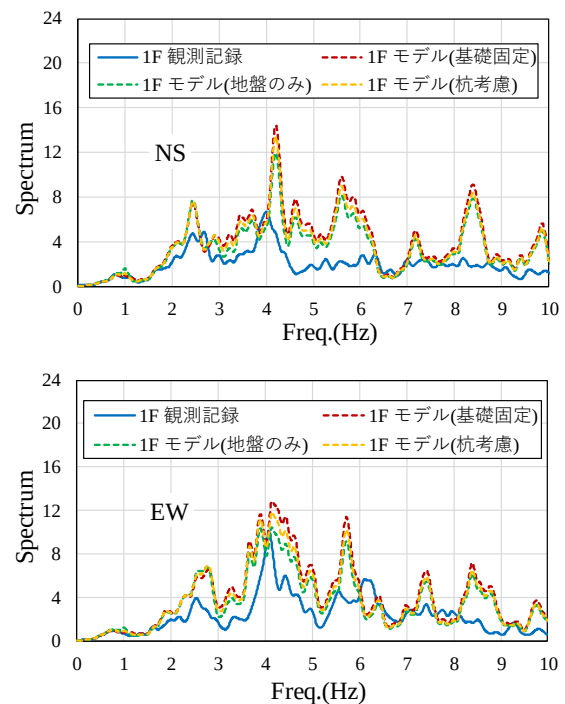


図5 観測記録とスウェイモデルの比較

4.3 入力損失の簡易評価式

検討に用いた地震は震源距離が近く実体波が卓越していると考えられるので, 入力損失の簡易評価式として, 鉛直下方入射を仮定した場合の基礎入力動を示す原田氏の提案式¹⁰⁾と, 原田氏の提案式を修正した土木学会の委員会¹¹⁾での提案式を用いた。本研究では, 原田氏の提案式, 土木学会の委員会の提案式ともに, 杭を考慮した場合の2ケースについて検討した。

4.3.1 直接基礎における簡易評価法

(a)原田氏の提案式¹⁰⁾

$$H(\omega) = \begin{cases} \sin(\omega D_f/V_s)/(\omega D_f/V_s) & \omega \leq \omega_n \\ 0.63 & \omega > \omega_n \end{cases} \quad (5)$$

ここに D_f 、 V_s はそれぞれ、基礎の根入れ深さ、根入れ深さまでの V_s を層厚で重み付け平均したものであり、 ω_n は次式で示される。

$$\omega_n = \pi V_s/(2D_f) \quad (6)$$

b)土木学会の委員会での提案式¹¹⁾

(5)式を基に耐震委員会により修正された式である。

$$H(\omega) = \begin{cases} \{\sin(\omega D_f/V_s)/(\omega D_f/V_s)\}^2 & \omega \leq \omega_n \\ 0.405 & \omega > \omega_n \end{cases} \quad (7)$$

4.3.2 杭基礎における簡易評価式

(5), (7)式において、杭による地震動の抑制効果については次式を用い、杭による等価根入れ深さ L_{eq} を考慮する¹²⁾。

$$L_{eq} = \pi(\Sigma EI/G)^{1/4}/4 \quad (8)$$

ここに、 E 、 I は杭のヤング係数、断面2次モーメント、 G は地盤のせん断弾性係数である。実際の根入れ深さと杭による等価根入れ深さを杭基礎の等価根入れ深さとし、次式で求める

$$D_{feq} = D_f + L_{eq} \quad (9)$$

4.3.3 解析解と評価式の比較

入力損失効果について、既存の簡易評価式との対応を検討した。図6に、各スウェイモデルに自由地盤の観測波を入力した際の1階の応答に対する自由地盤のフーリエスペクトル比を示す。図6より作成した各スウェイモデルのスペクトル比は、1.5Hz以降において入力損失効果による落ち込みを上手く表現できておらず、観測記録、既存の評価式との対応は良くない。

5. まとめ

39号館で得られた強震記録と、設計図書に基づいて作成した多質点系モデルより得られた解析解を比較することで、39号館の地震入力について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 上部構造モデルは1次モードにおいて観測記録と良い対応を示した。
- 2) スウェイばねを考慮することで、高振動数においてわずかに39号館1階の観測記録に近づいたが、基礎固定モデル1階の応答とほぼ変わらず、今回の仮定によるスウェイモデルでは地震入力を上手く表現できな

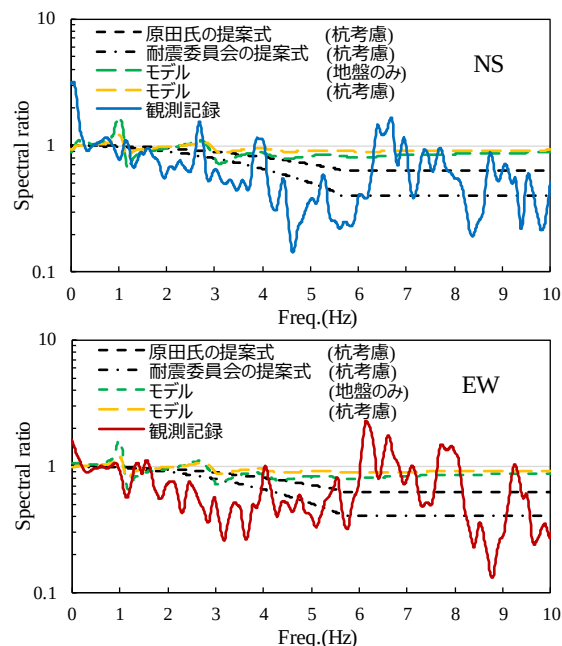


図6 解析解と評価式の比較

かった。

- 3) 観測記録、既往の評価式との比較においても、スウェイモデルの解析解は高振動数における入力損失効果の落ち込みを上手く表現できず、観測記録、評価式との対応が良くなかった。

参考文献

- 1) 北堀隆司ほか：地震観測に基づく鉄筋コンクリート集合住宅の地震入力と応答評価(その1～その3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.13-18，2013.08
- 2) 藤本利昭，師橋憲貴，下村修一，高畠秩：日本大学生産工学部における強震観測 - その3 39号館における観測の概要 -，第47回日本大学生産工学部学術講演梗概集，pp.1-4，2014.12
- 3) ユニオンシステム株式会社：SuperBuild/SS3，2017.11
- 4) ユニオンシステム株式会社：DynamicPRO，2017.11
- 5) 日本道路協会：道路教示奉書・同解説V耐震設計編，pp33，2012.3
- 6) ユニオンシステム株式会社：ShakePRO-L，2017.11
- 7) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，2015.5
- 8) 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，日本建築学会，2006.02
- 9) 西川孝夫ほか：建築の振動 応用編，朝倉書店，pp57-58，2008.8
- 10) 原田隆典，久保慶三郎，片山恒雄：有効入力動の計算式とその実測例による検討，土木学会論文集，pp435-440，1985.10
- 11) 土木学会編：動的解析と耐震設計，第2巻，動的解析の方法，技法堂出版，pp281-282，1989.7
- 12) 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，pp369-370，2009.8