

中低層杭基礎建物の地震観測に基づく上部構造慣性力と地盤変位の位相差に関する一検討

正会員 ○新井 洋*¹

建物と地盤の動的相互作用 位相差 地震観測

1. はじめに

杭基礎建物の耐震設計では、上部構造の慣性力と地盤変位を外力として如何に作用させるか、課題が残されている。上部構造慣性力と地盤変位の位相差は、動的相互作用 (SSI) の影響を強く受けると考えられる。そこで、文献2の地震観測記録を用いて、建物と地盤の固有周期および上部構造慣性力と地盤変位の位相差を推定し、両者の大小関係について検討した。

2. 建物と地盤および地震観測記録の概要²⁾

高知市中心部で地震観測を行っている中低層杭基礎建物2棟 (以下、建物A,B) の概形および各棟の屋内外に設置した3台の地震計の大凡の場所と方位を図1に示す。建物Aは2008年に竣工した共同住宅、建物Bは1995年に竣工した事務所ビルで、いずれも主体構造はRC造、地下根入れ深さ約2m (基礎梁)、PHC杭 (建物Aは杭長21mで杭径500-600mm×19本、建物Bは杭長44mで杭径500-600mm×20本) である。建物A,Bの地盤調査に基づくS波速度構造と1次せん断振動モード (刺激関数) を図2に示す。詳細は文献2を参照されたい。

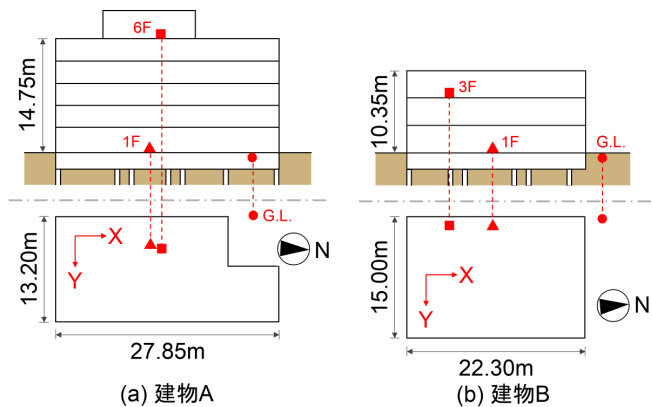


図1 建物A,Bの概形および屋内外に設置した地震計の大凡の場所と方位

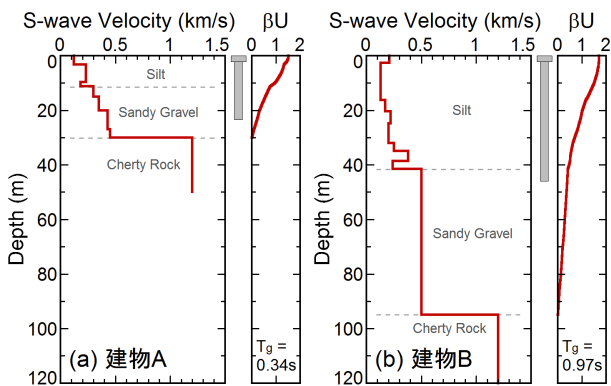


図2 建物A,Bの地盤調査に基づくS波速度構造と1次せん断振動モード (T_gは地盤の固有周期)

建物A,Bで得られた11,32地震の観測記録 (いずれも計測震度3程度以下)の水平動フーリエスペクトル比 (X,YのうちSSIの影響が現れやすい方向)の平均と標準偏差を図3(a)-(d),4(a)-(d)に○印と灰細線で示す。建物Aの構造計算書によれば、上部構造のプッシュオーバー解析に基づく1次固有周期はX,Y方向とも0.45sで、観測された水平動スペクトル比の6F/1Fのピーク周期 (X方向0.18s,Y方向0.26s:図3(a))と整合しない。建物Bの設計図書は残っていない。そこで、建物A,Bそれぞれ観測された水平動スペクトル比を説明できる建物-地盤連成系を模擬した多質点系Swayモデルを同定して、検討に用いることとした。なお、連成系モデルにRocking地盤ばねを付与しないのは、後述の逆解析においてパラメタ (剛性と減衰)の感度が低く、いずれも同定が困難だったことによる。

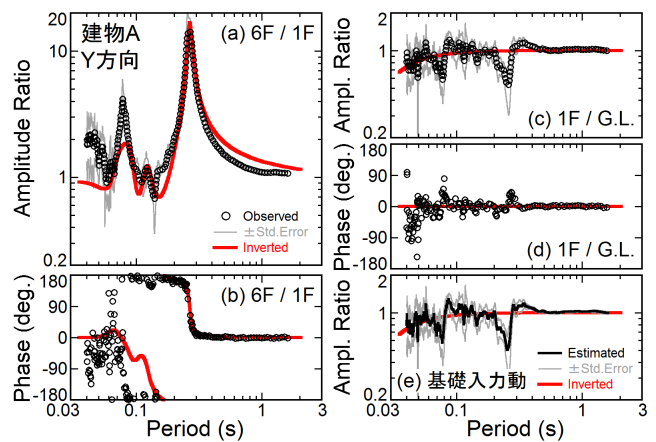


図3 建物Aで得られた11地震の水平動フーリエスペクトル比の観測値 (平均および標準偏差)と逆解析による理論値の比較

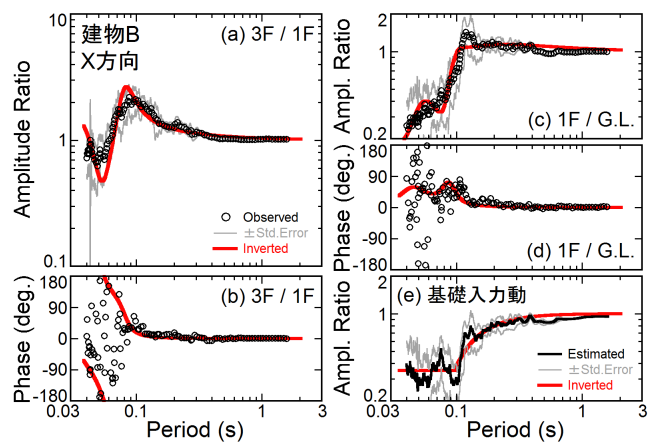


図4 建物Bで得られた32地震の水平動フーリエスペクトル比の観測値 (平均および標準偏差)と逆解析による理論値の比較

3. 水平動スペクトル比の逆解析による多質点系 Sway モデル

建物の最上階 / 1階, 1階 / 地表, 最上階 / 地表の3組の水平動フーリエスペクトル比を対象に, 観測値と理論値の規準化残差2乗和平均が最小となる多質点系 Sway モデルを, 遺伝的手法と非線形最小2乗法を併用した逆解析³⁾により同定した. この際, 理論スペクトル比は, 系のモード解析に基づく加速度伝達関数 $H(\omega)$ ((1式)^{4,5)}を用いて表現した.

$$H(\omega) = 1 + \sum_j \frac{\beta u_j \omega^2}{-\omega^2 + 2ih_j \omega_j \omega + \omega_j^2} \quad (1)$$

ここに, i は虚数単位, ω は角振動数, $\omega_j, h_j, \beta u_j$ は j 次モードの固有角振動数, 減衰定数, 応答点における刺激関数の値である. (1式)の入力となる基礎入力動は, 文献 6, 7 を参考に, η と λ_{\min} をパラメタとする(2式)の振幅比スペクトル $|\lambda(\omega)|$ を地表の水平動スペクトルに乗じて得られるものとした.

$$|\lambda(\omega)| = \max \left(\frac{\sin^2 \eta \omega}{\eta^2 \omega^2}, \lambda_{\min} \right) \quad (2)$$

系の各質点の重量は, 建物 A では構造計算書に基づいて, 建物 B では地上部分を 11-14kN/m², 地下部分を 22kN/m²と仮定した. Sway 地盤ばねの減衰は, 系に対する感度が低かったため, 減衰定数 2%と仮定して計算した.

逆解析から得られた建物 A, B の各階の層剛性と減衰定数および Sway 地盤ばね剛性を図 5 に示す. 図 3(a)-(d), 4(a)-(d)の赤実線は, 同定された系 (図 5) に対応する水平動スペクトル比の理論値で, いずれも観測値 (○印) と概ね適合している. 図 3(e), 4(e)の赤実線は, 同定された η と λ_{\min} による(2式)の基礎入力動で, 1階の観測記録から(1式)を用いて逆算した入力の変位推定値 (黒実線)と調和的である. このことは, 逆解析の妥当性を示唆している. また, 図 2-5 から, SSI の影響は相対的に, 建物 A で小さく, 建物 B で大きい可能性が推察される.

4. 上部構造慣性力と地盤変位の位相差の推定

同定された建物 A, B の多質点系 Sway モデル (図 5) と基礎入力動 (図 3(e), 4(e)) を用いて, 地表観測記録に対する建物-地盤連成系の(1), (2)式による線形応答解析を行った. また, 図 2 の地盤構造 (各層の減衰定数 2%) を用いて, 地表観測記録に対する地盤の 1 次元重複反射理論による線形応答解析⁶⁾を行った. これらの解析結果から, 上部構造の地上部分の慣性力 (1階の層せん断力) および地下部分の慣性力 (質量×応答加速度) と地盤変位 (地表-基盤の相対変位) の関係を時刻歴で求め, それぞれ最大値で規準化して描くことで, これらの位相差を推定した. 計測震度 3 程度の地震記録に対する推定例を図 6 に示す. 図の実線は, 応答解析の結果から得られた規準化した上部構造慣性力と地盤変位の関係で, これに概ね外接する楕円 (鎖線) から両者の位相差の最大値が推定される.

図 6 から, 上部構造慣性力と地盤変位の位相差は, 建物 A (建物周期 T_b / 地盤周期 $T_g = 0.5-0.8$ 程度) で最大 10-20° 程度, 建物 B ($T_b / T_g = 0.08-0.2$ 程度) で最大 30-40° 程度と推定され, SSI の影響の大小を反映している. いずれの建物も, X, Y のうち SSI の影響が現れやすい方向で位相差が若干 (5-10° 程度)

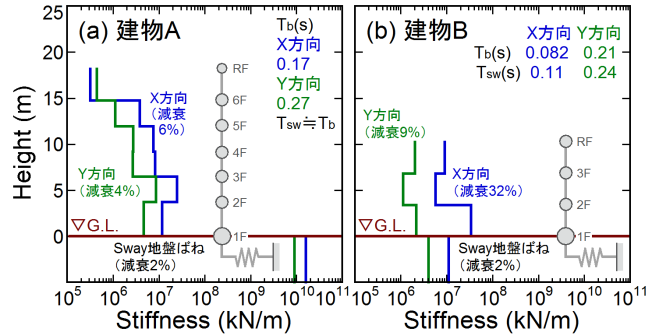


図 5 逆解析で得られた建物 A, B の各階の層剛性と減衰定数および Sway 地盤ばね剛性 (T_b, T_{sw} は建物および建物-地盤連成系の固有周期)

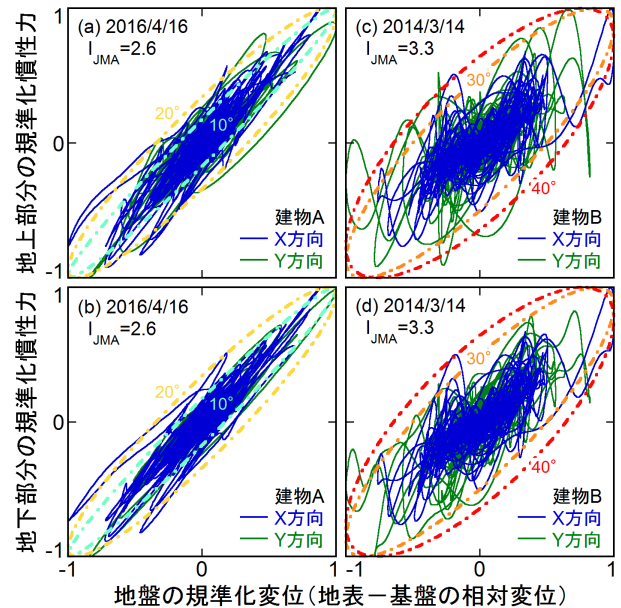


図 6 建物 A, B の上部構造の地上部分および地下部分の慣性力と地盤変位の位相差の推定例 (規準化した上部構造慣性力と地盤変位の関係)

大きい. また, 地上部分と地下部分の慣性力に同程度の位相差がある. 同様の傾向は, 他の計測震度の地震記録に対しても認められた. 以上より, 上部構造の地上部分および地下部分の慣性力と地盤変位の位相差は, T_b / T_g など SSI の影響に大きく寄与するパラメタから推定できる可能性が示唆される.

なお, 同定された Sway 地盤ばねと基礎入力動は, 3 次元 FEM や薄層法により弾性波動論から導かれる値と比較して検証する必要がある. 今後の課題としたい.

5. まとめ

中低層杭基礎建物の地震観測記録を用いて, 建物-地盤連成系を模擬した多質点系 Sway モデルを逆解析により同定し, 上部構造慣性力と地盤変位の位相差の大小を建物と地盤の固有周期の大小から推定できる可能性を示した.

謝辞: 地震観測では, 建物所有者様と高知工科大学中田慎介教授 (2016 年 7 月 13 日逝去) の多大な協力を得た. 記して謝意を示す.

【参考文献】 1) AIJ 建築基礎構造設計指針, 2019. 2) 新井: AIJ 大会, 構造 II, 263-264, 2020. 3) 新井: IOJES, 1, 613-618, 1998. 4) 長松: モード解析入門, コロナ社, 1993. 5) 斎藤: AIJ 構造系論文集, 508, 47-54, 1998. 6) 原田ほか: JSCE 論文集, 362/1-4, 435-440, 1985. 7) 岡野ほか: AIJ 構造系論文集, 696, 237-246, 2014. 8) Schnabel et al.: EERC Report, 72-12, 1972.

*1 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員・博士(工学)

*1 Chief Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.