

周波数依存型地盤ばねを用いた遠心場ハイブリッド地震応答実験の開発

東京電力 正会員 ○小寺 雅子
京都大学防災研究所 正会員 高橋 良和

1. はじめに

構造物の地震応答を考える上で、地盤の影響は大きく、構造物と地盤の動的相互作用に関する研究は、解析的、実験的の両面から精力的に行われている。地盤を対象とした実験研究を行う場合、遠心模型実験が有効である。これは遠心力によって高重力場を発生させ、縮小模型と実大スケールの地盤応力状態を一致させることができるためであるが、遠心模型実験では模型が小さすぎるために、複雑な構造物を再現することは難しく、上部構造物の非線形性などを適切に評価することは困難である。この問題を解決する方法として、遠心場ハイブリッド実験を適用する手法を提案する。ハイブリッド実験とは、コンピューターで行う数値解析と実際の加力実験を組み合わせることで構造物の地震応答を再現する実験手法である。

本研究では動的相互作用を表現する付加質量効果、逸散減衰効果を取り入れるために、周波数依存型地盤ばねを用いた構造物－杭基礎－地盤系遠心場ハイブリッド実験を実施した。また遠心場振動台実験との比較から動的相互作用問題への適用性を検討する。

2. 構造物－杭－地盤系のモデル化

対象とするモデルは図 1(a)に示す、構造物－基礎－地盤系である。これを遠心場ハイブリッド実験では線形構造物と基礎の水平振動のみを対象とした 2 質点系のモデルに置き換えて、動的相互作用を取り扱う。図 1(b)に示すように、遠心場ハイブリッド実験では構造物と地盤の相互作用を表す周波数依存型地盤ばねを設定し、この復元力 R を実験から求める。 $F_1 \cdot F_2$ は上部構造物とフーチングの慣性力を表している。ハイブリッド実験の運動方程式は次式のようにになる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [R] = -[M]\{\ddot{U}_g\} \quad (1)$$

ここで、 $m_1 \cdot m_2$ は上部構造物及びフーチングの質量、 x は上部構造物及び基礎部のフーチング位置の水平変位、 U_g は地盤変位を表す。上部構造物の剛性は振動台実験で得られた結果を基に設定し、上部構造物の減衰は 0 とし

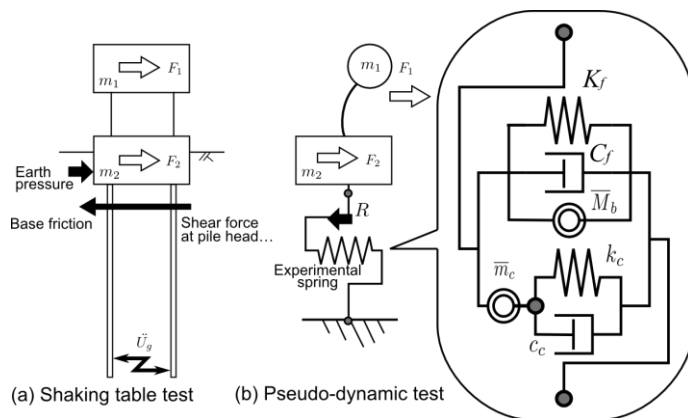


図 1 モデル図

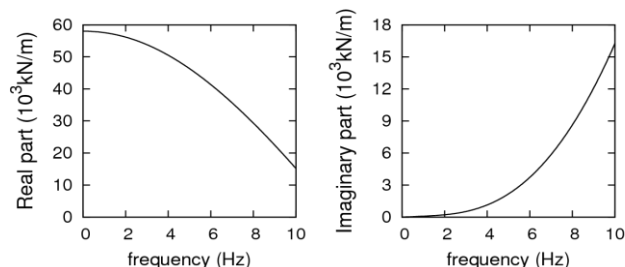


図 2 周波数依存型地盤ばねの複素剛性

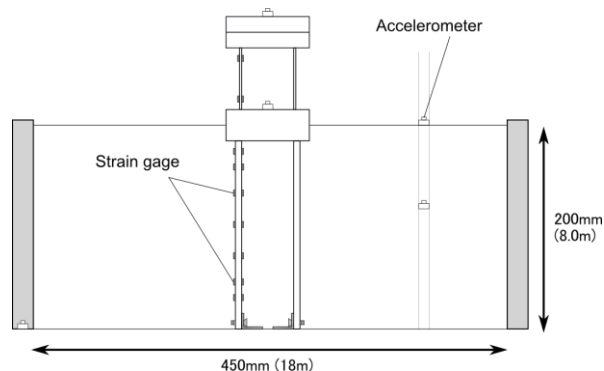


図 3 遠心場振動台実験模式図

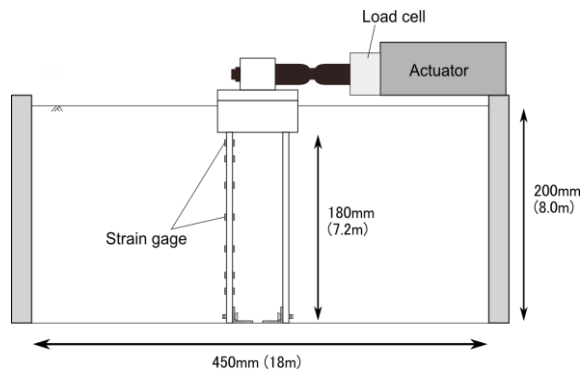


図 4 遠心場ハイブリッド実験模式図

キーワード 動的相互作用, 遠心力载荷装置, ハイブリッド実験, 周波数依存性

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 TEL 0774-38-4069

た。

3. 周波数依存ばねを用いた時刻歴応答解析

時間領域において周波数依存性を考慮するために、節点間の相対加速度に比例した反力を発生させる反力生成要素を用いて図1のような数値モデルを使用した。

この時、基礎の周波数領域での応答特性は次式のようになる。

$$K_f \bar{M}_b \omega^2 + \frac{\bar{m}_c \omega^2 \left(\frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} - \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} \right)^2 + \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2}} + j\omega \left\{ C_f + \frac{\bar{m}_c \omega^2 \frac{\bar{m}_c c_c \omega^2}{k_c}}{\left(1 - \frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} \right)^2 + \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2}} \right\} \quad (2)$$

これを複素剛性とみなし、数値解析を行った。

実験に使用した複素剛性を図2に示す。

4. 実験概要

実験は京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用い、40G 場で行った。土槽は剛土槽を用い、地盤材料には珪砂7号を使用し、相対密度が約60%になるように調整した。基礎模型は質量0.754kgの真鍮製フーチングに4本の杭模型(幅5mm、奥行き10mmの角柱りん青銅杭)で構成され、杭頭、杭端共に剛結合とした。そのため、基礎のロッキングによる変形は抑制され、スウェイ変形が卓越するモデルとなる。土槽、地盤、杭模型は両実験に共通である。

遠心振動台実験の模式図を図3に示す。上部構造物は板ばねと真鍮製(質量0.855kg)で構成され、固有周期は80.1Hzである。フーチングと上部構造物の質量となるおもりはりん青銅製の板ばね4枚で連結されており、接続はすべて剛結である。入力波はJR鷹取記録EW成分加速度記録を積分し、最大振幅4mm、時間を1/40に調整した変位を用いた。

遠心場ハイブリッド実験の模式図を図4に示す。アクチュエーターとの連結が可能な高さまで、基礎上面に剛ブロックを付加している。地盤応答は振動台実験で得られた加速度記録を入力し、実物スケールによる運動方程式を解き計算する。計算で得られたフーチングの変位を相似則に従い変換し、アクチュエーターの水平移動によって、フーチングの変位制御を行う。

6. 遠心場振動台実験、ハイブリッド実験の比較

図5に両実験の変位時刻歴比較を図6に基礎部の履歴曲線の比較を示す。位相、振幅がよく一致しており、こ

の実験では残留変位の方向まで再現できている。ただし、基礎部の最大応答値に大きく差が出ており、履歴曲線も最大ループのみ違いが見られる。これは、遠心場ハイブリッド実験では地盤に载荷していないため、地盤の変形は起こらない。そのため基礎部と地盤の相対変位が大きくなり、基礎部にかかる反力が遠心場振動台実験よりも大きくなり、変位が小さくなると考えられる。

7. まとめ

周波数依存型地盤ばねを用いた遠心場ハイブリッド実験を提案し、付加質量効果、逸散減衰効果、地盤特性を反映したシミュレーションを行った。遠心場振動台実験と比較した結果、非常に良い精度で一致したが、地盤変形が大きい場合は遠心場ハイブリッド実験では評価が難しいことを確認した。さらに適用範囲を広げるためには、地盤模型に直接载荷するシステムが必要であると考えられる。

参考文献

高橋良和, 小寺雅子: 動的相互作用問題への遠心力場ハイブリッド実験手法の適用性, 土木学会構造工学論文集, No.56A, 2010.3

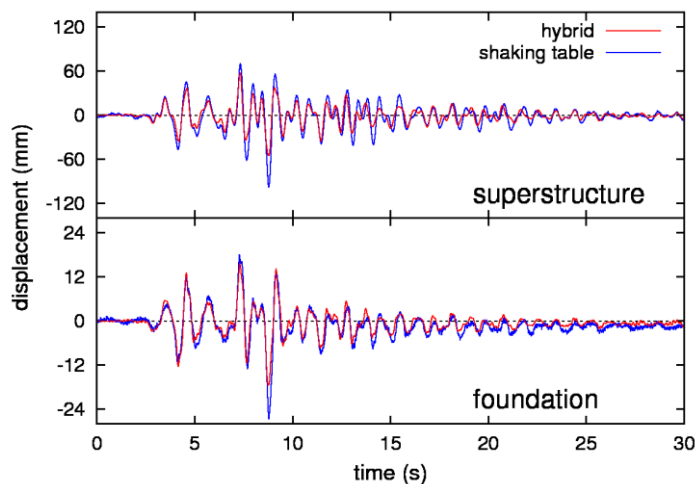


図5 変位時刻歴の比較

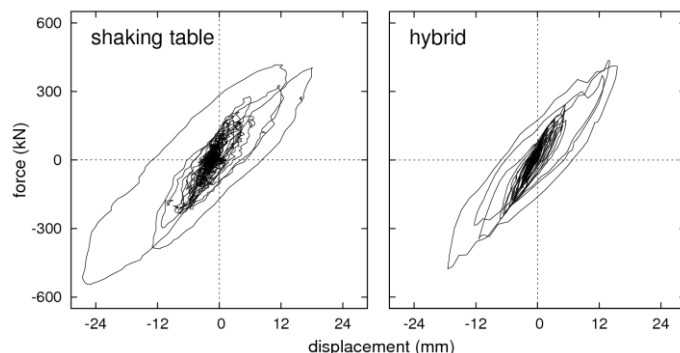


図6 基礎部履歴曲線の比較