

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

Application of Pseudo-dynamic Test Method in Centrifugal Field for Soil-Foundation-Structure Interaction

高橋良和*, 小寺雅子**

Yoshikazu Takahashi, Masako Koderu

*博士(工学), 京都大学准教授, 防災研究所(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

**京都大学修士課程, 工学研究科都市社会工学専攻(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The pseudo-dynamic test method in centrifugal field is proposed. To clarify the effectiveness of the test method, shaking table tests are also conducted. As the result, the proposed pseudo-dynamic test can simulate seismic response considering the inertia dynamic interaction between the soil and the superstructure. The results of pseudo-dynamic test, including the displacement response and the deformation of piles, are good agreement with that of shaking table test. Assuming that hysteretic model of the structure is a nonlinear steel column, it can evaluate the effects of the nonlinear superstructure. In addition, the centrifuge similitude is the same as that of the pseudo-dynamic test. Therefore, the pseudo-dynamic test is a powerful tool for soil-structure interaction.

Key Words: centrifuge, hybrid simulation, soil-structure interaction

キーワード: 遠心力載荷装置, ハイブリッド地震応答実験, 動的相互作用

1. はじめに

構造物の地震応答を考える上で、地盤の影響は無視し得ず、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。有限要素法、境界要素法による、地盤と構造物の両者の挙動について同時に数値解析を行う方法では、自動的に相互作用を取り込むことができる。土岐ら¹⁾は有限要素法を用いた地震応答解析において剥離、滑動現象を表現し得るモデルを提案し、さらに土岐・三浦²⁾は地盤の非弾性挙動についても検討した。また、弾性波動論と有限要素法を組み合わせた薄層要素法を用いての数値解析³⁾も多く行われている。しかし、このような解析法は、多大な演算時間と記憶容量を要するため、上部構造物と杭を質点系モデルにおきかえた Penzien⁴⁾型モデルや、それを改良した修正 Penzien モデル⁵⁾などの簡易モデルが使われることが多い。そこで必要となるのが、地盤と構造物の間に動的地盤ばねを設定することである。特に水平方向と回転方向に分けて考えたモデルを、スウェー・ロッキングモデル (SR モデル) と呼び、広く使われているモデルであるが、地盤ばねの評価には不確定な要素が多いため、様々な評価方法が提案されている。

一方、実験的研究としては、振動台実験や遠心模型実

験などが行われている。防災科学研究所が三木市に建設した実大三次元震動破壊実験施設 (通称:E-ディフェンス) を用いて、田端ら⁶⁾は乾燥地盤における杭基礎の地震時破壊メカニズムと三次元振動の影響を考察している。地盤を対象とした実験研究を 1G 場で実施するには E-ディフェンスのような超大型施設を用いる以外、厳密に相似則を満足させることができないため、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遠心場振動台実験が有効である。しかしながら、遠心模型実験では模型が小さすぎるために、コンクリート構造物など、複雑な上部構造物の非線形性を適切に評価することは困難である。本研究では、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問題に対するハイブリッド実験の適用性について整理し、その一つの応用例として構造物-杭基礎-地盤系の遠心ハイブリッド実験 (擬似動的実験) を実施する。また全体系による遠心振動台実験も実施し、その結果の比較から動的相互作用問題への適用性を検討する。

2. 動的相互作用問題へのハイブリッド実験の適用性

2.1 慣性力相互作用とキネマティック相互作用

動的相互作用は主に二つの種類に分けられる。構造物が振動する場合には、構造物の振動応答の結果生じた慣性力が地盤に加わり、地盤がその力に対し抵抗する。一方、地盤が振動する場合には、地盤変形によって生じる力が構造物に加わる。前者を慣性力相互作用、後者をキネマティック相互作用と呼び、構造物と地盤との剛性の違いや、揺れの振動数によってどちらの影響が卓越するか決まる。

基礎へ入力される地震動が、基礎の剛性、形状およびその配置によって、自由地盤の地震動と比べて低減する効果を入力損失効果と呼び、キネマティック相互作用に分類される。慣性力相互作用としては構造物の振動エネルギーが地盤に逃げていくため、構造物の振動が減衰する効果である地下逸散効果などがある。

2.2 慣性力相互作用問題への適用

(1) 動的地盤ばね

動的相互作用を考慮するためには、地盤と構造物の間に動的地盤ばねを設定する必要がある。一般に動的地盤ばねは周波数依存型であり、変形に比例した抵抗力を生み出すばね的な効果と、変形速度に比例した抵抗力を生み出すダッシュポッド的な効果が含まれる。動的アクチュエータを用いたハイブリッド実験の場合、周波数依存問題は自動的に解決できるが、静的加力によるハイブリッド実験（擬似動的実験）の場合、周波数依存ばねを時間領域で扱うための工夫が必要となる。土岐ら⁷⁻¹⁰⁾は、1 G場における実物大基礎-地盤系の動的相互作用問題において、ハイブリッド実験を適用した。事前に行った基礎-地盤系の動的実験の結果から、周波数依存性を示す地盤ばねの複素剛性 k を推定し、この結果をハイブリッド実験で考慮できるモデルを提案している。提案された手法の運動方程式を式(1)に示す。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C_0 \frac{dx}{dt} + R = -M \frac{d^2 U_g}{dt^2} - \int_{-\infty}^{\infty} k(t-\tau) R(\tau) d\tau \quad (1)$$

M は質量マトリクス、 k 、 C_0 はそれぞれ複素剛性、減衰マトリクスを表し、動的実験から推定される。 R は復元力、 x と C_0 は応答変位、入力変位ベクトルを表す。複素剛性 k は周波数 ω の関数であり、これによって周波数依存性を考慮している。本手法は動的地盤ばねを求めるために動的実験が必要であり、縮小模型を用いた場合には、後述する相似則の関係より、さらに高周波領域による動的実験が必要となるため、実験、制御が困難となると考えられる。

ただし地盤の周波数依存性（複素剛性）の実部 $K \cdot \omega^2 M$ は、一般に $\omega=0$ を頂点とする上に凸の放物線で近似でき、

虚部の $i\omega C$ は $\omega=0$ で原点を通り右上がりの直線で近似できる¹¹⁾。したがって地盤が非線形化する場合には、固有振動数が短くなり、剛性や減衰における周波数依存性の影響は相対的に小さくなる。また減衰についても、地盤の非線形による履歴減衰が大きいと、逸散減衰の効果も相対的に小さくなる。このような場合には周波数に依存しない地盤ばね¹²⁾が用いられることが多く、従来のハイブリッド実験における定式化を用いることができる。地盤の非線形を取り扱うため、縮小模型を用いる場合には実大スケールの地盤応力状態と一致させることができる遠心場での载荷実験が有効である。

(2) 構造物慣性力による相互作用

構造物慣性力による地盤の変形は、基礎部をアクチュエータで加力することによりハイブリッド実験で適用可能である。基礎-地盤系をスウェイ-ロッキング系にモデル化する場合、これらの変形を再現するために複数のアクチュエータが必要となる。

2.3 キネマティック相互作用問題への適用

(1) 地盤変形による相互作用

一般に地盤変形による構造物への影響をハイブリッド実験で再現することは困難であると考えられるが、鉄道総合研究所で開発されたようなせん断土槽の外部より複数アクチュエータで加力する方法¹³⁾を応用することにより、ハイブリッド実験でも取り扱うことができる可能性はある。

(2) 入力損失効果

基礎の剛性により地盤が拘束されることによる入力損失効果は、基礎-地盤系モデルを振動台上に設置することで理論的には再現可能となる。この場合動的実験となるため、構造物との相互作用を実験的に再現するためには、動的アクチュエータが必要となる。動的アクチュエータと振動台を融合させたハイブリッド実験の検討例はあるものの、大規模なシステムが必要となる。

2.4 相似則

遠心場ハイブリッド実験では相似則の検討は特に重要である。本節では遠心実験、1G場振動台実験、ハイブリッド実験の相似則を比較検討し、遠心場ハイブリッド実験への適用性を考察する。

実物についての運動方程式をたてると、

$$M_p \frac{d^2 x_p}{dt_p^2} + C_p \frac{dx_p}{dt_p} + R_p = -M_p \frac{d^2 u_{gp}}{dt_p^2} \quad (2)$$

下添字 p は実物を、 m は模型を表す。実物と供試体モデルの物理量の関係は次式で与えられる。

$$x_p = \alpha_l x_m, \quad u_{gp} = \alpha_l u_{gm}, \quad t_p = \alpha_t t_m \quad (3)$$

$$M_p = \alpha_m M_m, \quad R_p = \alpha_r R_m, \quad C_p = \alpha_c C_m$$

これを式(2)に代入して整理すると

$$\left(\frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_t^2} \right) \frac{d^2 x_m}{dt_m^2} + \left(\frac{\alpha_l \cdot \alpha_c}{\alpha_t} \right) \frac{dx_m}{dt_m} + (\alpha_r) R_m = \left(\frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_t^2} \right) \frac{d^2 u_{gm}}{dt_m^2} \quad (4)$$

ここで式(4)の各項の係数が等しければ式(2)と等価になり、模型も実物と等価になる。したがって、

$$\frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_t^2} = \frac{\alpha_l \cdot \alpha_c}{\alpha_t} = \alpha_r \quad (5)$$

の成立が必要である。模型縮尺を $1/n$ とすると $\alpha_F = n$ であり、材料を実物と同じものを用いると質量密度比が1になるため、 $\alpha_m = n^3$ となる。

1G 場実験では、加速度の相似比が1に固定されるため、

$$\frac{\alpha_l}{\alpha_t^2} = 1 \quad \therefore \alpha_t = \sqrt{n} \quad (6)$$

ここで応力比を1、すなわち $\alpha_R = n^2$ とすると、式(5)が成立しなくなり、相似則を満足できない。そこで1G場実験では模型質量の他に付加質量を加えることで強制的に $\alpha_m = n^2$ にして式(5)を成立させる。

遠心場、ハイブリッド実験ではひずみ速度依存性を考慮していない。そのため R は静荷重の場合と同一であると考えられるため $\alpha_R = n^2$ となる。これを式(5)に代入して加速度の相似比を求めると、

$$\alpha_t^2 = \frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_r} = n^2 \quad \therefore \alpha_t = n \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_l}{\alpha_t^2} = \frac{1}{n} \quad (8)$$

遠心場では遠心力により重力加速度をコントロールし、この相似則を満足させている。ハイブリッド実験において、計算機と模型の間にやり取りされる数値は復元力 R と変位 x のみであるので、質量や時間などの物理量は計算機上で与えられているにすぎない。そのため、実験では応力だけを一致させれば良いので、アクチュエータなどで応力状態を再現し、相似則を満足させる。3つの相似則をまとめたものを表-1に示す。

以上より、遠心模型実験とハイブリッド実験は同じ相似則で記述されることが分かる。

表-1 相似則（実物/模型）

	1G 場 振動台実験 ¹⁴⁾	遠心場 ¹⁵⁾	ハイブリッド 実験 ¹⁶⁾
長さ	n	n	n
質量密度	1	1	1
質量	n ³	n ³	n ³
	1	1	1
応力	付加質量を加えて 相似則を満足	遠心力により 応力状態を再現	軸方向に外力を与え 応力状態を再現
加速度	1	1/n	1/n
時間	n ^{1/2}	n	n

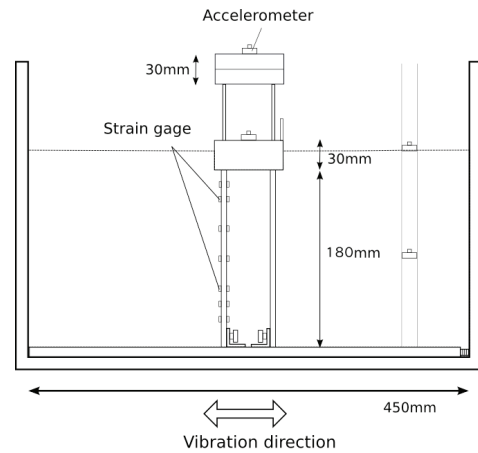


図-1 振動台実験模型

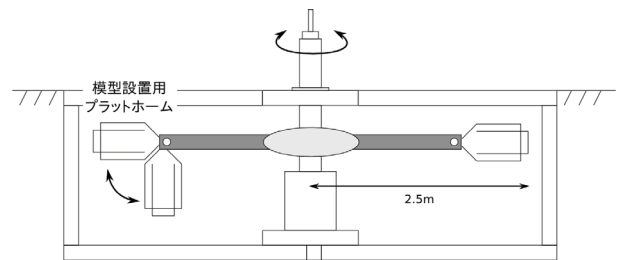


図-2 遠心力载荷装置模式図

3. 実験概要

3.1 実験対象問題

本研究では、遠心場ハイブリッド実験の適用例として、図-1に示すような問題を考える。ここで、地盤の挙動はひずみレベルで数%以上の非線形化することを想定する。ただし基礎部（フーチング）を静的アクチュエータで加力するシステムを用いることから、ハイブリッド実験手法の中でも擬似的実験を実施することになる。結果、動的相互作用問題のうち、構造物慣性力による相互作用を考え、周波数非依存型地盤ばねを想定する問題を

表-2 珪砂7号の物理的特性

土粒子の比重	2.661
最大密度 (g/cm^3)	1.568
最小密度 (g/cm^3)	1.229
最大間隙比	1.164
最小間隙比	0.703

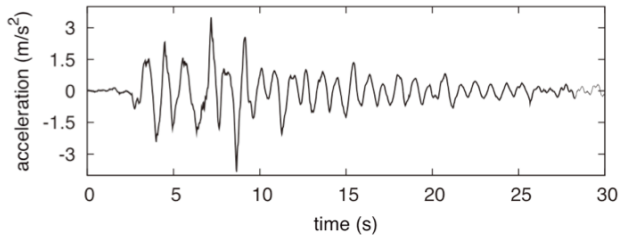


図-3 入力地震動

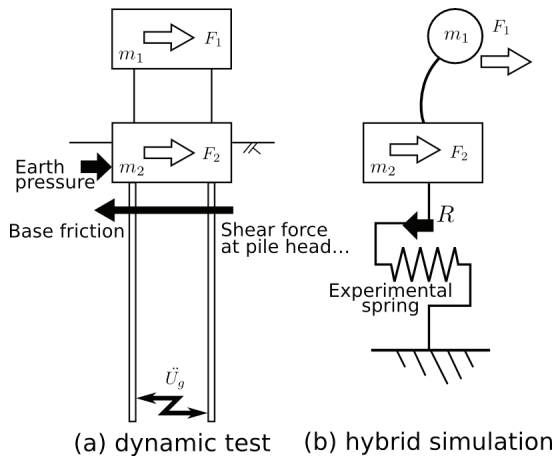


図-4 モデル図

取り扱う。

3.2 共通システム

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。遠心力载荷装置は、実験容量 24G-ton で、最大積載質量は 120 kg である (図-2)。

土槽は内寸 450×150×300 mm(長さ×奥行き×高さ)の剛土槽を使用した。また地盤材料には珪砂7号の乾燥砂(表-2)を用い、空中落下法により相対密度 70 %になるように、またフーチングが 20 mm まで根入れされるように調整した。作成した地盤の固有振動数は、75 Hz である。

基礎模型は厚さ 30 mm、質量 0.752 kg の真鍮製のフーチングに 4 本の杭模型(幅 6 mm、奥行き 10 mm の角柱アルミ杭)で構成され、杭頭、杭端共に剛結合とし、またひずみゲージを 7 断面に設置した。剛結合としたため、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。フーチングには地盤作成時に構造物真下にも砂が均等にいきわたるようにするため、

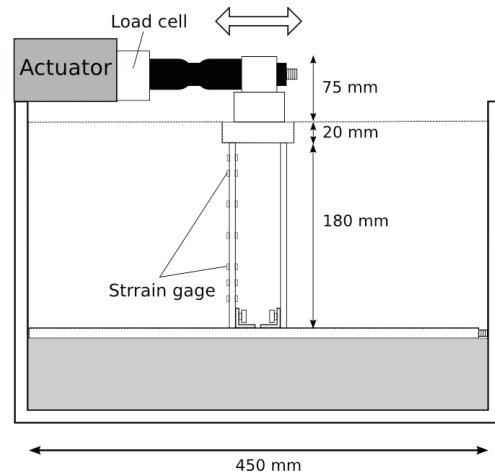


図-5 ハイブリッド実験模型

中央に直径 25 mm の穴が空いている。

土槽、地盤、杭模型は両実験に共通である。

3.3 振動台実験

実験対象問題の正解として、遠心場振動台実験を実施する。振動台実験で使用した模型(図-1)は、杭、フーチング、および上部構造物で構成されている。上部構造物は板ばねと真鍮製のおもり(質量は 0.858 kg)で構成され、その固有振動数は 53 Hz である。ここでは、地盤よりも上部構造物の方が固有周期が長くなるように選定している。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バネ 4 で連結されており、この接続はすべて剛結である。板バネにも 2 断面にひずみゲージを設置している。

また、ひずみゲージの他に加速度計 5 台、レーザ変位計 2 台、入力変位用のギャップセンサ 1 台を使用した。すべてのデータはデジタル下部に設置されたデジタル動ひずみ測定器のアンプでチャンネルごとに増幅・デジタル化され、無線 LAN を介して観測室内の計測用デスクトップパソコンに記録される。入力波は JR 鷹取記録 EW 成分変位波形を最大振幅 4 mm、時間を 1/40 に調整したものを用了。最大加速度は 154 m/s^2 である。振動台で再現された加速度波形を実物スケールで表したものを図-3 に示す。

3.4 ハイブリッド実験

実験対象モデルに作用する力を図示すると図-4(a)のようになる。これをハイブリッド実験では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-4(b)に示すように、ハイブリッド実験では構造物と地盤の相互作用を表す地盤ばねを設定し、この復元力 R を実験から求める。 F_1 、 F_2 は上部構造物とフーチングの慣性力を表しており、この合計 $F_1 + F_2$ は復元力 R と釣り合い関係にある。この復元力 R には、杭頭せん断力や土圧、摩擦力など、慣性力

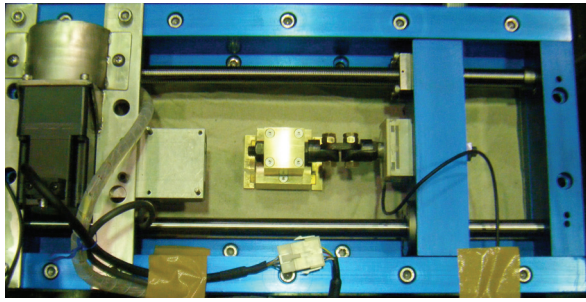


図-6 ハイブリッド実験上部

を除いた基礎部にかかる力すべてが含まれており、実験で発現する非線形性を考慮することができる。ハイブリッド実験では図-5に示すようにフーチングの反力を計測しており、これには地盤・杭基礎による影響も含まれている。そのため本稿では、基礎より上部の構造を上部構造、地盤・杭基礎を含むフーチングを下部構造と呼ぶこととする。

本研究におけるハイブリッド実験の運動方程式は次式のようになる。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + R = -M \frac{d^2 U_g}{dt^2} \quad (9)$$

ここで、 M は上部構造物及びフーチングの質量を含む行列であり、 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、 C は地盤の非線形の影響が大きいと考え、 0 とした。

ハイブリッド実験の模式図を図-5に、土槽上部の写真を図-6に示す。アクチュエータはステッピングモーターとボールネジにより構成され、基礎部上面を載荷し、荷重と変位を計測している。遠心場では変位が小さくなる

ため、デジタル変位計により精度を確保している。

ハイブリッド実験システムは、ハイブリッドシミュレーションフレームワークである OpenFresco¹⁷⁻²⁰⁾を、数値解析部は OpenSees²¹⁾を用いて構築した。OpenFresco はハイブリッド実験を含む実験手法を仮想化したもの(図-7)であり、NEESit²⁰⁾より自由に利用できるようになっている。OpenFresco では、数値解析部と実験のインターフェースとして ExperimentalSite を用い、解析における自由度と実験における自由度の変換を ExperimentalSetup、実験制御システムとのインターフェースとして ExperimentalControl を用いている。本実験システムに適用するために、ExperimentalControl 部を拡張し、ステッピングモーターにより加力制御を可能とした。他の部分は OpenFresco に既存のシステムを用いている。

変位データ、荷重データは無線 LAN を介してモバイルノートパソコンに記録され、アクチュエータもこのパソコンで制御する。ひずみデータは振動台実験と同じ計測システムで取得されるため、厳密な同期はしていない。

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、アクチュエータの水平移動によって、フーチングの変位制御を行う。地震応答計算はオペレーター・スプリッティング法による数値積分法を用いる。

入力波は振動台実験で得られた加速度(図-3)を用いた。

4. 振動台実験とハイブリッド実験の比較

実験結果は相似則により実物スケールで記す。図-8に両実験の地盤下端からの相対変位時刻歴を示す。両実験結果は上部構造物、基礎部共にその振幅、周期など応答

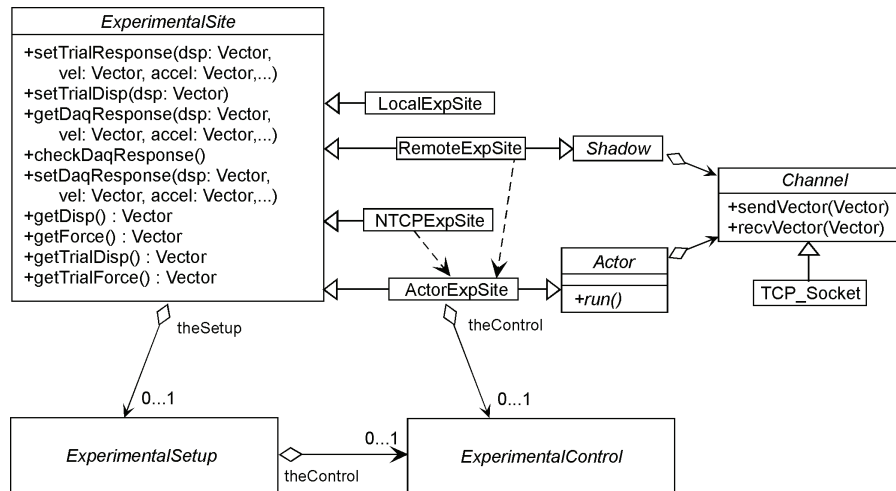


図-7 OpenFresco クラス図

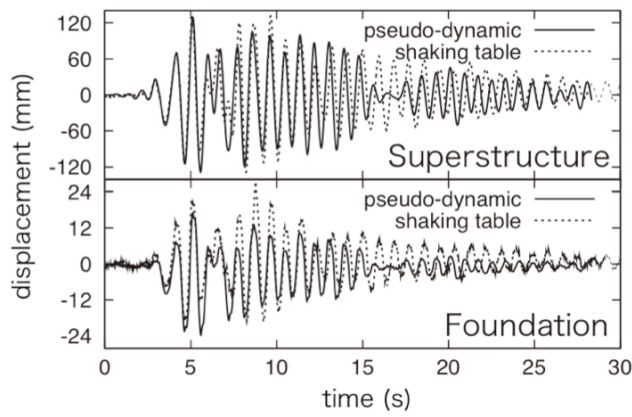
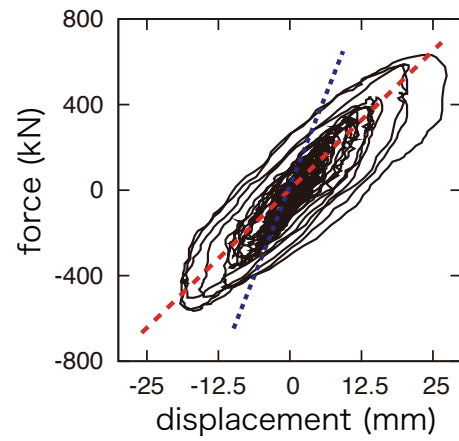
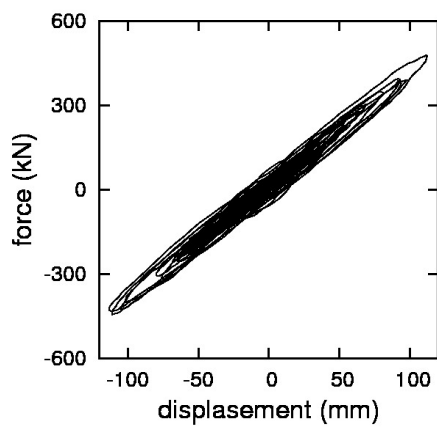


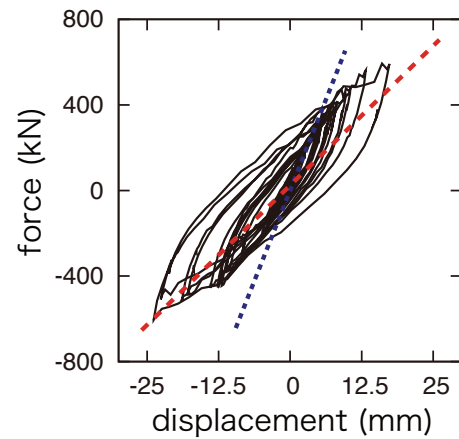
図-8 変位応答時刻歴の比較



(a) shaking table test

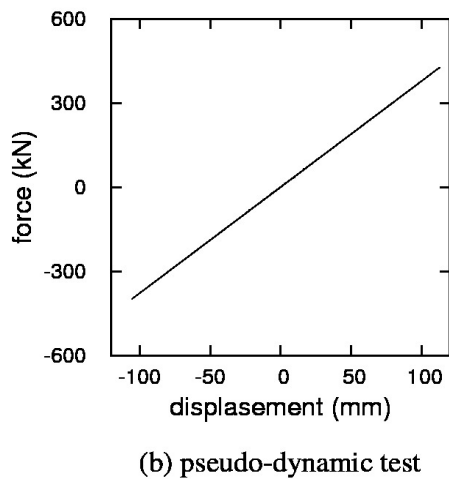


(a) shaking table test



(b) pseudodynamic test

図-10 下部構造の履歴曲線の比較



(b) pseudo-dynamic test

図-9 上部構造の履歴曲線の比較

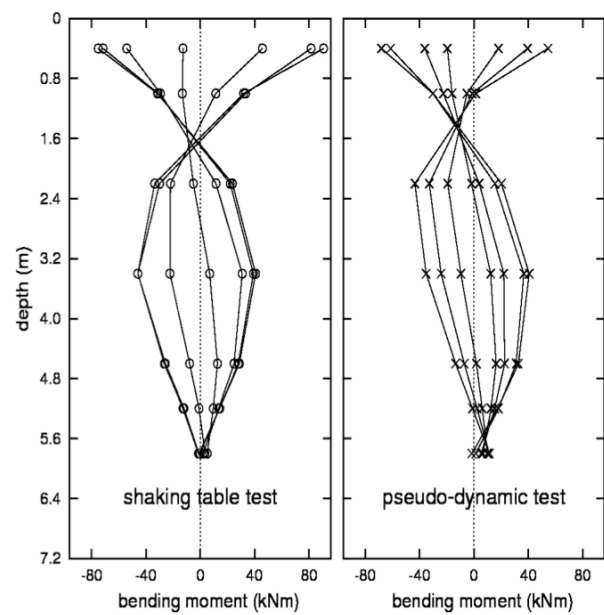


図-11 曲げモーメント分布

性状は良く一致している。今回の実験では上部構造物の固有周期が地盤よりも長く、慣性力相互作用が卓越するように設定している。2.2節で考察した通り、擬似動の実験では逸散減衰を考慮することはできないが、図-8ではほぼ振幅も再現できていることから、本実験で用いた構造パラメータでは逸散減衰の影響は大きくないものと判断できる。

図-9、図-10はそれぞれ上部構造および下部構造の履歴曲線の比較である。また図中には初期・等価剛性の線を示している。振動台実験における荷重は、質点に設置した加速度記録に質量を乗じて算出している。そのため、図-9(a)には粘性減衰に起因すると考えられる履歴が確認できる。ハイブリッド実験では粘性減衰は設定していないが、図-8の変位時刻歴では振動の減衰に関して大きな差は見られず、上部構造の減衰の影響は大きくないと判断できる。また下部構造の履歴曲線は、上部構造同様、振動台実験結果に粘性減衰によるものと思われる形状の丸みが確認できるが、その初期剛性、等価剛性、全体の形状について、ハイブリッド実験が振動台実験をほぼ再現していることが見てとれる。

図-11に4.32～4.816秒での杭の曲げモーメント分布の比較を示す。変曲点の位置、モーメント最大値がほぼ一致している。実際の計測時間に直すと、振動台実験は0.0132秒、ハイブリッド実験は306秒になる。時間スケールの違いにもかかわらず、同様の結果が得られたことから考えて、遠心場ハイブリッド実験は杭の変形に対する地盤の抵抗を含む挙動を十分な精度で表現することができていると言える。

5. 非線形構造物の応答

ハイブリッド実験では上部構造物の数値モデルを自由に变化させることができ、非線形構造物を設定することが容易である。ここでは下部構造はそのままに、上部構造を鋼柱にモデル化して遠心場ハイブリッド実験を実施した。ここで上部構造の数値履歴モデルはGiuffre-Menegotto-Pintoモデルである。

図-12、図-13に変位時刻歴と履歴曲線を示す。図-8～図-10に比べて基礎部の変位が小さい。上部構造物が履歴応答により入力エネルギーの一部を吸収した結果、上部構造の応答が小さくなり、結果、基礎部の応答も小さくなっている。このように上部構造が非線形化した際の下部構造の応答の変化等を評価することができた。

6. まとめ

本研究では、動的相互作用問題に対するハイブリッド実験手法の適用性について考察し、遠心荷重装置を用いたハイブリッド実験を提案し、その適用性について検討した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

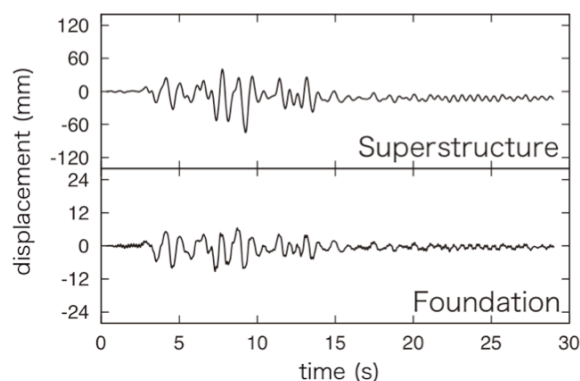


図-12 非線形上部構造物を有する上下部構造の変位応答時刻歴

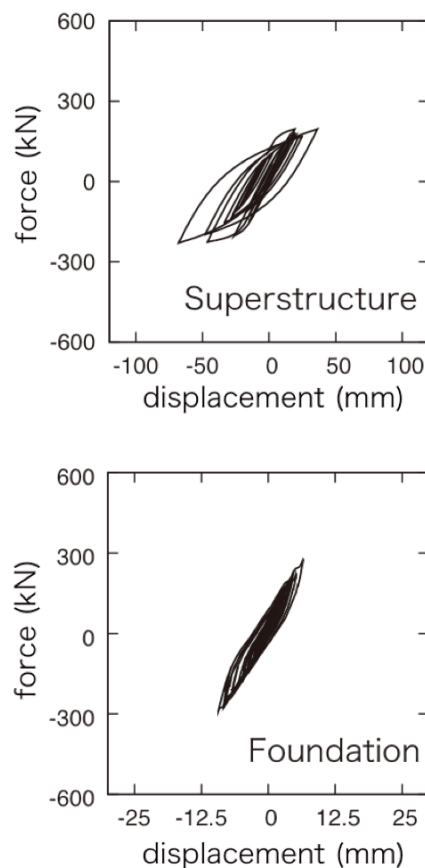


図-13 非線形上部構造物時の履歴曲線

- ・ハイブリッド実験、1G 場振動台実験、遠心力荷重実験における相似則を比較検討し、ハイブリッド実験と遠心力荷重実験における相似則が一致することを確認した。
- ・動的相互作用を検討することができる遠心場振動台実験に対し、上部構造を数値解析、下部構造および地盤を遠心場における荷重実験とした遠心場ハイブリッド実験を実施し、振動台実験結果との比較において、基礎や上部構造の変形やその応答性状について、良好に再現することができることを確認した。

・非線形の上部構造物を設定した遠心場ハイブリッド実験を行い、上部構造のエネルギー吸収により、下部構造部の応答が小さくなることを評価した。従来の遠心場振動台実験では、模型が小さくなることから、複雑な非線形構造物を検討することは困難である。以上より、遠心場ハイブリッド実験は、構造物・地盤が非線形となる現象を取り扱うための、有力な実験手法であることが示された。

一方、ここで検討した内容は動的相互作用問題の中で限られた現象を再現したに過ぎない。特にキネマティック相互作用については、载荷システムの変更を含む検討が必要である。逸散減衰が卓越すると考えられる問題については、別途実験を実施することにより基礎に数値減衰を加えることで評価できることを確認しているが、詳細は別稿にて紹介する予定である。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金（若手研究(S)19676004 番，代表：高橋良和）の助成を受けて実施したものである。遠心力载荷装置による実験に際し、京都大学防災研究所飛田哲男助教のご支援、ご助力を得た。ここに厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 土岐憲三，佐藤忠信，三浦房紀：強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動，土木学会論文報告集，第 302 号，31-41，1980年10月。
- 2) 土岐憲三，三浦房紀：地盤構造物系の非線形地震応答解析，土木学会論文報告集，第 317 号，61-68，1982 年 1月。
- 3) 田治見宏，下村幸男：3 次元薄層要素による建物－地盤系の動的解析，日本建築学会論文報告集，第 243 号，41-51，1976年5月。
- 4) Penzien J., C.F.Scheffey, R.A.Parmelee: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, Jour. of the Eng. Mechanics Division, ASCE, vol.90, NoEM3, pp223-254, 1964.
- 5) 河村壮一：埋立地盤に建つ杭支持構造物の地震動観測と解析 (その7)Penzien型モデルと集約型モデル，日本建築学会大会学術講演概要集，415-416，1975年10月。
- 6) 田端憲太郎，佐藤正義，時松孝次，鈴木比呂子：E-ディフェンスによる非液化化地盤中の杭基礎の震動実験(その1:大型せん断土槽を用いた水平地盤実験の概要)，日本建築学会大会学術講演梗概集，2007年8月。
- 7) 土岐憲三，佐藤忠信，清野純史，Garmroudi, N.K., 吉川正昭：杭基礎の非線形復元力に関するハイブリッド実験，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，pp.11-22，1989年4月。
- 8) 土岐憲三，佐藤忠信，清野純史，Garmroudi, N.K., 吉川正昭：地盤-杭基礎系の非線形動的相互作用に関するハイブリッド実験，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，pp.13-23，1990年4月。
- 9) 土岐憲三，佐藤忠信，清野純史，Garmroudi, N.K., 吉川正昭：地盤-杭基礎系の動的相互作用を考慮したハイブリッド実験と地震観測事例の比較，京都大学防災研究所年報，第34号B-2，pp.15-26，1991年4月。
- 10) Toki, K., Sato, T., Kiyono, J., Garmroudi, N.K., Emi, S. and Yoshikawa, M.: Hybrid Experiments on Non-linear Earthquake-induced Soil-Structure Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, pp.709-723, 1990.
- 11) 小長井一男：地盤と構造物の地震工学，東京大学出版会，2002年12月。
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV下部構造編，2003年3月。
- 13) 神田政幸，西岡英俊，山畑栄，高橋一人，甲斐輝雅：鉛直力・水平力・モーメントおよび鉛直変位・水平変位・回転角による载荷制御可能な基礎構造物の载荷試験装置の開発，第40回地盤工学研究発表講演集，pp.1461-1462，2005年6月。
- 14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造実験評価研究委員会報告書，163-164，2004年3月。
- 15) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集，第275号 69-77，1978年7月。
- 16) 才塚邦宏，伊藤義人，木曾英滋，宇佐美勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察，土木学会論文集，第507号I-30，179-190，1995 年1月。
- 17) Takahashi, Y. and Fenves, G.L.: Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 267-291, 2006.
- 18) Schellenberg, and Mahin, S.A.: Application of an Experimental Software Framework to Hybrid Simulation of Structures through Collapse. Proc. of 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, paper No. 1221, 2006.
- 19) Fenves, G.L., McKenna, F., Scott, M.H., and Takahashi, Y.: An object-oriented software environment for collaborative network simulation. Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper No. 1492, 2004.
- 20) OpenFresco web site. (2009). <https://neesforge.nees.org/project/openfresco/>
- 21) OpenSees web site. (2009). <http://opensees.berkeley.edu>

(2009 年 9 月 24 日受付)