

遠心力載荷装置を用いた擬動的実験による 動的相互作用評価の可能性と課題

佐々木義志¹・高橋良和²・澤田純男³

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

²正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

³正会員 博(工) 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

1. はじめに

動的相互作用を考慮した構造物-杭基礎-地盤系の地震時挙動を把握するため、古くから振動台、遠心力載荷装置などを用いた実験的検討が数多く実施されてきた¹⁾。特に、遠心力載荷装置を用いた実験手法では、相似則の観点から、超小型模型の使用、加振時間の短縮が可能となり、重力場で実施する振動台実験に比べ大幅にコストを削減することができる。一方で、超小型模型を使用する性質上、RCのような非線形構造物や複雑な形状を有する構造物を作成することは極めて困難である。このような背景から、高橋らは擬動的実験の一つである遠心場ハイブリッド実験を提案し、40Gの重力場で慣性力相互作用を考えた系の地震時挙動に関する検討を行った²⁾。そして、遠心場振動台実験の結果と比較することで、系の地震時挙動が遠心場ハイブリッド実験によってよく追えることを示した。一方で、遠心場ハイブリッド実験では遠心場振動台実験に比べ基礎の応答を小さく見積もってしまうという問題点も指摘している。以上の観点から、本検討では遠心場ハイブリッド実験と、遠心場振動台実験の実験システムの違いが実験結果に与える影響を、実験シミュレーションを通じて評価し、実験精度の向上に重要となる要素を見つけ出すことを目的とする。

2. 既往のハイブリッド実験とその問題点

(1) 実験対象問題

高橋らは、図-1に示す構造物-杭基礎-地盤系に対し、ハイブリッド実験の適用可能性を評価した。こ

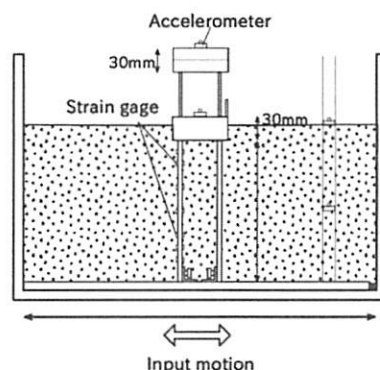


図-1 振動台実験模型

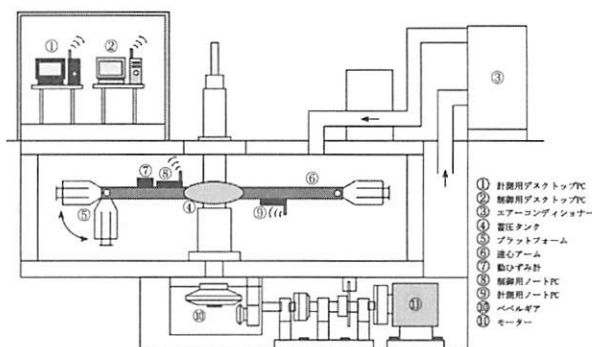


図-2 遠心力載荷装置

の実験では、固定土槽中に設置された杭基礎のフーチング部にアクチュエータを用いて、水平方向にのみ加力するシステムを用いることから、動的相互作用問題のうち慣性力相互作用に限定した検討を行っている。

(2) 共通システム

この実験には京都大学防災研究所の遠心力載荷装

表-1 実験条件

		Case1		Case2		Case3	
		モデルスケール	実スケール	モデルスケール	実スケール	モデルスケール	実スケール
板ばね	幅	10mm	40cm	10mm	40cm	10mm	40cm
	厚さ	2.0mm	8.0cm	2.0mm	8.0cm	1.5mm	6.0cm
	長さ	59mm	236cm	59mm	236cm	84mm	336cm
重錘		0.424kg	27.1t	0.855kg	54.7t	0.855kg	54.7t

置が使用された。図-2はその模式図である。遠心力
載荷装置の実験容量は24G-ton，最大積載質量は
120kg，最大遠心加速度は静的実験時で200G，動的
実験時で50Gである。

土槽は内寸450mm×150mm×300mm（長さ×奥行き
×高さ）の固定土槽が使用された。地盤材料には硅砂
7号の乾燥砂を用い，空中落下法により相対密度が
70%になるように，かつフーチングが20mmまで根
入れされるように調整された。

基礎部の模型はフーチングと杭から構成され，杭
模型は幅6mm，奥行き10mmの長方形断面を有する
りん青銅製の杭4本で，杭頭とフーチング，杭端と
床板はともに剛結されている。フーチングは上下2
つのブロックから構成されており，杭と剛結されて
いるブロックにはフーチング直下にも砂を入れるこ
とができるよう，直径25mmの穴が空いている。上
下のブロックを合わせたフーチングの寸法は，幅
70mm，奥行き50mm，高さ30mmであり，その質量
は0.7655kgとなっている。これは実スケールで49.0t
の質量を有することになる。

(3) 遠心場振動台実験

遠心場振動台実験は，構造物-杭基礎-地盤系の全
体システムを対象に実施するものである。この実験
で使用した模型は図-1に示す通り，杭基礎，フーチ
ング，上部構造物を模擬するりん青銅製の板ばね4
枚と真鍮製の重錘で構成されている。重錘の質量と
板ばねのサイズは変更可能であり，上部構造物の固
有周期を調整することができる。この実験で使用し
た上部構造部材のパラメータを表-1に示す。フーチ
ングと上部構造物の質量となる重錘はりん青銅製の
板ばねで剛結されている。

振動台の振動負荷装置は変位制御であるため，実
験では，兵庫県南部地震において観測されたJR鷹取
記録EW成分の変位波形を，最大振幅4mm，時間を
1/40に調整したものが入力波として使用された。入
力変位波形を図-3に示す。

(4) 遠心場ハイブリッド実験

ハイブリッド実験とは，コンピュータによる数値

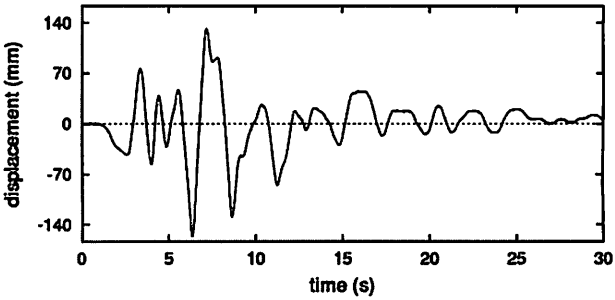


図-3 入力変位波形

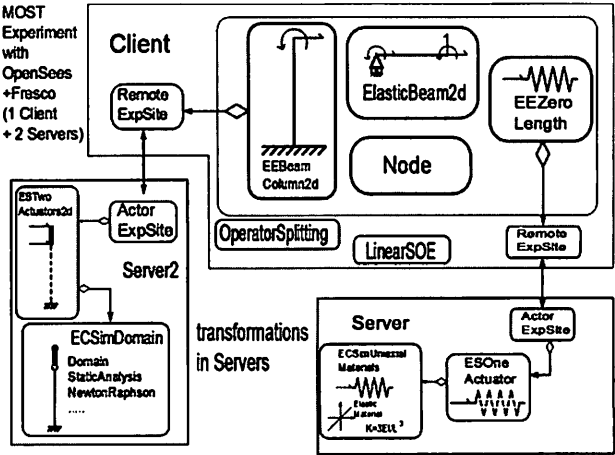


図-4 OpenFresco のクラス図

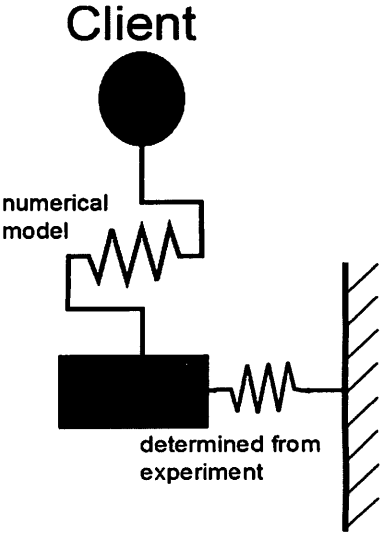


図-5 ハイブリッド実験における系のモデル化

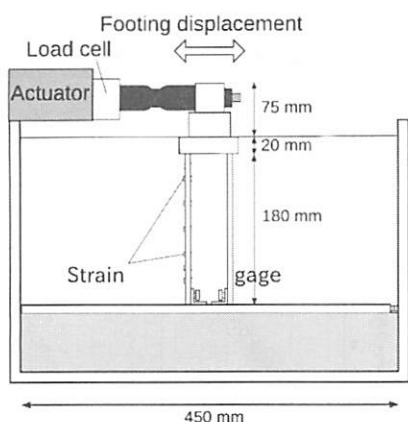


図-6 遠心場での静的载荷実験システム

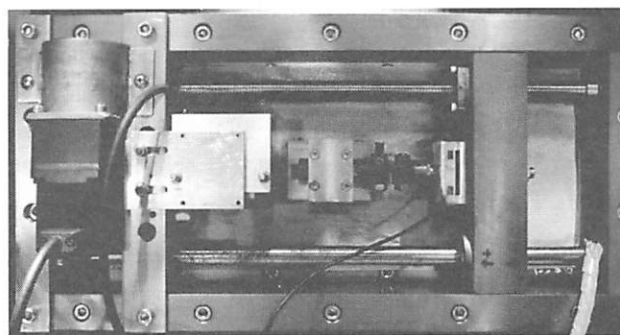


図-7 土槽上部から見た実験装置

解析と模型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地震応答実験手法である。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OpenFresco³⁾を用い、数値解析部にはOpenSees⁴⁾を用いている。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であり、使いたい人が自由に利用することができるフリーソフトウェアである。OpenFrescoのクラス図を図-4に示す。

遠心場ハイブリッド実験では、図-1の遠心場振動台実験システムを図-5のようにモデル化することで、構造物-杭基礎-地盤系の運動が、構造物と基礎の2質点の水平振動問題に置き換えられる。ここで、基礎部のばねの特性は遠心場での杭基礎-地盤系に対する静的载荷実験より決定される。基礎部への载荷実験の模式図を図-6に、土槽上部の写真を図-7に示す。この静的载荷実験では、フーチングにかかる周面摩擦力や杭頭のせん断力、土圧など、上部構造物の慣性力を除いたすべての力を考慮することができる。それらの影響を先の2質点系モデルの基礎部のばねに反映させることで、実験で生じる非線形挙動を数値解析の中に取り込むことが可能となる。

地震応答は遠心場振動台実験で得られた振動台の加速度(図-8)を入力し、計算機内で実物スケールに対応する運動方程式を解くことによって実行される。そして、その結果得られたフーチングの変位を、相似則にしたがって模型スケールの変位に変換し、与えるべき水平変位をアクチュエータに指示する。計算は陽的Newmark法による数値積分法が適用された。

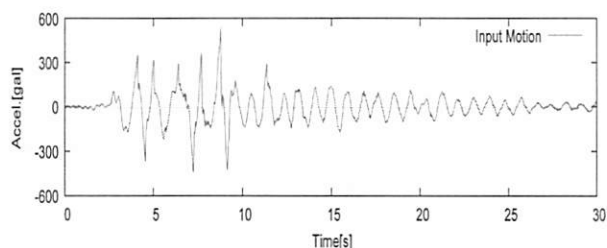


図-8 入力加速度波形

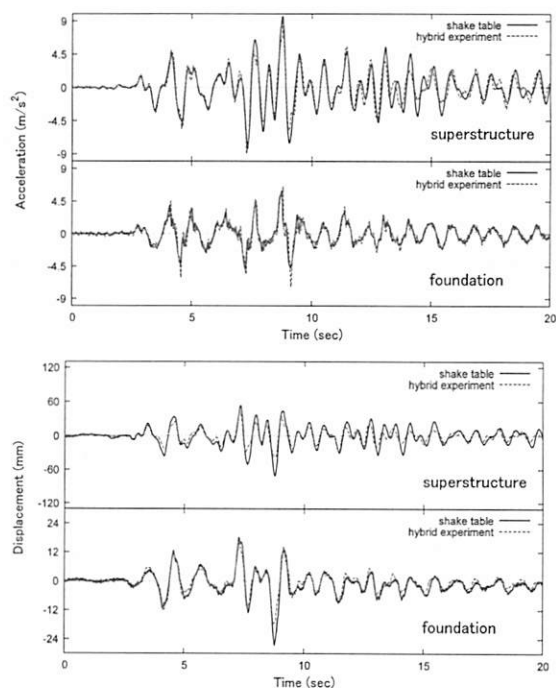


図-9 加速度時刻歴および変位時刻歴

全て実物スケールである。以下、断りが無い限り数値は全て実物スケールで表記してある。

図-9を見ると、加速度時刻歴では遠心場振動台実験と遠心場ハイブリッド実験が非常によい一致を示していることが読み取れる。変位時刻歴を見ても、上部構造物およびフーチングの最大応答値を除く部分では両者の値は概ね一致しているといえる。しか

(5) 既往のハイブリッド実験における課題

遠心場ハイブリッド実験と遠心場振動台実験の結果(Case1)を図-9、図-10に示す⁵⁾。図-9の上が加速度時刻歴を、下が変位時刻歴を示している。結果は

しながら、最大応答値付近では遠心場ハイブリッド実験の再現性が悪い。

図-10はフーチングの履歴曲線を、時間を追って描いたものである⁵⁾。図-9と合わせて判断すると、遠心場ハイブリッド実験では最大応答値に達する前と、最大応答値以降のフーチングの応答については遠心場振動台実験の結果を非常によく再現できている一方で、遠心場振動台実験の最大ループを含む最大応答値付近の応答が再現できていないということが言える。高橋らはこの最大ループが現れる理由を、杭基礎周辺の地盤がともに振動することによってフーチングの応答が大きくなる、キネマティック相互作用によるものと考察した^{2,5)}。そして、この遠心場ハイブリッド実験のシステムは慣性力相互作用に限定した実験システムであるため、周辺地盤の変形を考慮できず、そのために遠心場ハイブリッド実験では遠心場振動台実験の最大ループを再現できなかったと結論付けている。

いずれにせよ、現行のハイブリッド実験システムでは振動台実験に比べて最大応答値を小さく見積もるという問題がある。一般に、工学的には最大応答値が重要であるため、応答を小さく見積もることは重大な欠点となりうる。ゆえに、次節では最大応答値が小さくなる原因について、ハイブリッド実験と振動台実験の実験システムの違いに着目して考察する。

3. 地盤振動を考慮に入れたハイブリッド実験シミュレーション

(1) 実験システムの相違点

2章で述べたとおり、振動台実験では地盤には慣性力およびキネマティック相互作用の両者が発生するが、既存のハイブリッド実験ではキネマティック相互作用は考慮できていない。また、最大応答変位を過小評価する理由として、この地盤振動を考慮していないためと考えた。本章では、この周辺地盤の振動が系の応答に与える影響について考察する。

(2) 解析概要

図-11は地盤変形を考えられるハイブリッド実験システムであり、筆者ら⁶⁾が開発したモデルを今回比較の対象とした実験条件に合わせて調整したものである。ここでは、このモデルを用いたシミュレーションを実施することで、地盤変形の影響に関する考察を行う。この実験システムにおいて、クライアントにおける基礎部のばねの特性は、サーバーでの

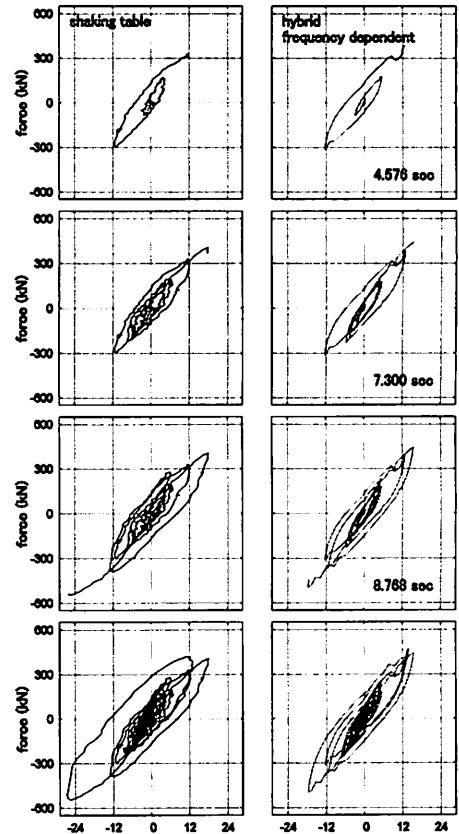


図-10 履歴曲線の時間変化

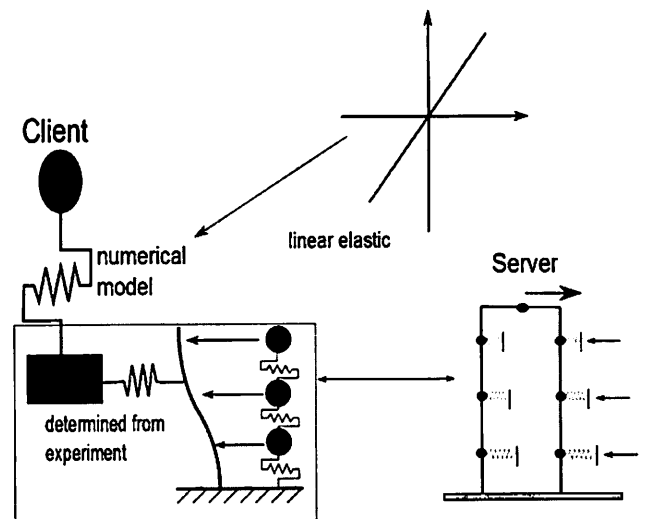


図-11 地盤変形を考慮できるハイブリッド実験システム

フーチングと地盤への水平方向への静的載荷によって決定される。そして、サーバーで与えられる地盤の変形量は、クライアント内の地盤要素の動的解析により決まる。ここで、地盤はせん断変形が卓越するものとして図のようにせん断ばねでモデル化し、そのばねの構成則には双曲線モデルを適用した。また、地盤のパラメータの設定には、遠心場振動台実験のパラメータと実験結果を用いている。クライア

ントにおける上部構造物はせん断ばねでモデル化し、実験と同様に線形弾性体とした。

本検討では、サーバーにおいて静的非線形解析を行うため、杭およびフーチングを弾性の梁要素で表現した。また、杭と地盤の間の相互作用ばねにはBourangerらによるdynamic P-yばね⁷⁾を適用した。

(3) 解析結果および考察

図-12にこの実験システムを用いたシミュレーション結果と遠心場振動台実験、遠心場ハイブリッド実験の比較結果を、図-13に解析により得られた周辺地盤地表面の変位時刻歴を示す。上部構造物・基礎部の変位時刻歴を見ると、シミュレーションの結果は遠心場ハイブリッド実験の結果と変わらない値を示している。なお、上部構造物の遠心場振動台実験結果への一致度が向上しているのは、上部構造物の剛性を実験結果にフィッティングさせたためであり、地盤変形を考慮したためではない。また、履歴曲線を見ても、その形は遠心場ハイブリッド実験の結果とほぼ同じで、遠心場振動台実験の最大応答値とは依然、大きな開きがある。よって、この履歴曲線は遠心場振動台実験の最大ループを再現しているとは言い難く、地盤変形が系の応答に与える影響は非常に小さいものと考えられる。

また、図-13の変位時刻歴より、地表面の応答は最大でも0.9mm程度の値である。ここで、地盤の深さが8mであることから、見かけのせん断ひずみを計算することができ、その値は約0.011%となる。一般に、見かけのせん断ひずみが0.2%を超過すると、地盤が大きく変形しているとされるが、今回の実験ケースではその目安となる値の1/20ほどであることから、地盤はほとんど変形していないとみなすことができる。したがって、遠心場ハイブリッド実験において基礎の最大応答値を小さく見積もってしまう原因は地盤の運動にはないと推察される。ゆえに、今回対象としている問題では、地盤の運動は考える必要がなく、固定地盤として検討を進めてもよいものと思われる。

以上の点から、次章ではハイブリッド実験においてフーチングのロッキングと杭の慣性力を考慮に入れることの妥当性を検証する。

4. ロッキングと慣性力を考慮に入れたハイブリッド実験シミュレーション

(1) 実験システムの相違点

ハイブリッド実験では図-5に示す通り、地震応答

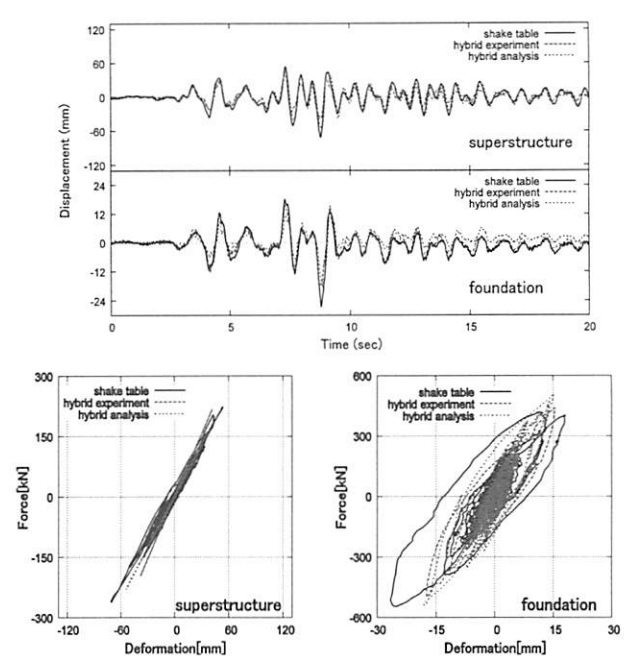


図-12 地盤変形を考慮したハイブリッドシミュレーション

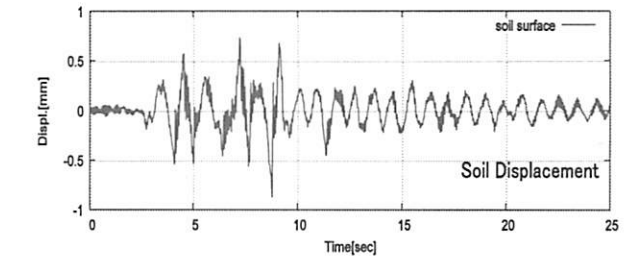


図-13 地盤の変位時刻歴

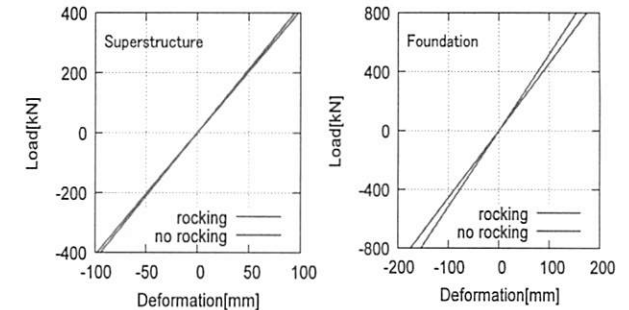


図-14 ロッキングの有無による水平剛性の違い

計算の際に構造物-杭基礎-地盤系の変形をせん断変形のみであると仮定している。また、基礎部の载荷実験でもフーチングに対し水平方向の変位のみ与えている。そして、ハイブリッド実験は擬動的実験であるため、上部構造物・フーチング以外の慣性力(たとえば杭や周辺地盤)を考慮することができない。

一方で、振動台実験で用いたモデルは図-1に示す通りの構造であるが、理論上は上部構造物・フーチングともに水平・鉛直・回転の3自由度を有すること

になる。また、実験結果には系を構成する要素すべての慣性力が含まれており、応答変位にその影響が含まれていることが考えられる。

以上の点から、構造物-杭基礎-地盤系へのハイブリッド実験に対し、ロッキングと慣性力の影響を組み込むことが望ましいと思われる。

図-14に上部構造物上端および基礎部におけるロッキングの有無を考慮した正負交番载荷解析結果を示す。左側が上部構造物、右側が杭基礎に対する解析結果を表す。横軸が水平変形量、縦軸が水平荷重を表し、構造物および基礎部の材料パラメータは高橋ら²⁾の値を参考に設定した。

上部構造物の解析結果では、上端の回転自由度の拘束によって見かけの剛性が4%程度変化した。一方、基礎部の解析結果では、フーチングの回転自由度の拘束によって剛性が12%程度変化することが読み取れる。この結果から、ハイブリッド実験において、上部構造物に関してはせん断変形を仮定しても差し支えないが、基礎部に関しては、水平方向の剛性が大きく変化しているため、ロッキングを考慮することで基礎の応答が大きくなる可能性が十分にあると思われる。

(2) 解析概要

図-15に今回のシミュレーションで使用するハイブリッド実験システムを示す。上部構造物は上端の回転自由度を拘束することでせん断変形するものとし、断面積が 0.182m^2 の梁要素でモデル化した。この断面積は、遠心場振動台実験で使用した上部構造物の板ばねの断面積4枚分の総和である。なお、剛性は実験結果とフィッティングすることで決定した。基礎部は、サーバーでは図-12と同様に杭を弾性の梁要素で表現し、基礎部への载荷方法としてはフーチングの重心に水平・回転変位を与える方法を想定した。地盤は固定地盤とし、杭と周辺地盤との間の相互作用ばねも図-12と同様の構成則を適用した。また、クライアントではばねの剛性がサーバーの解析結果より定まるスウェー・ロッキングモデルで表現し、フーチングの質量には杭4本の質量の半分の質量を加え、フーチング自体の質量と寸法から定まる回転慣性を設定した。モデル化および解析にはOpenSees, OpenFrescoを使用し、陽的Newmark法による数値積分を行った。なお、入力地震動は図-8に示した加速度時刻歴を使用した。

(3) 解析結果および考察

3章の実験システムによるシミュレーションの結果

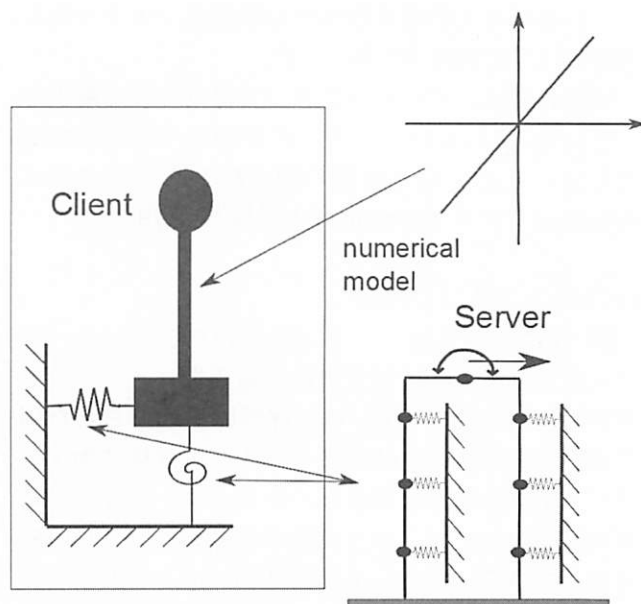


図-15 提案するハイブリッド実験システム

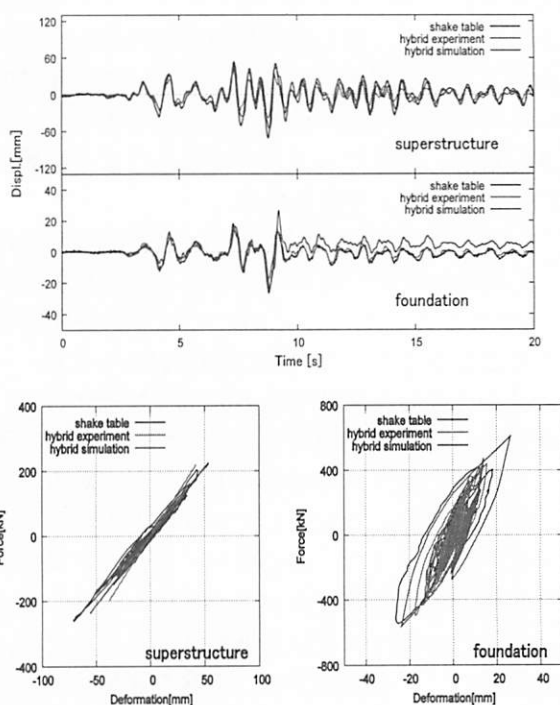


図-16 Case1の解析結果

果を図-16に示す。なお、図中には比較のため、Case1の遠心場振動台実験および遠心場ハイブリッド実験の結果を合わせて示してある。

上部構造物については、構造物の剛性をシミュレーションと遠心場振動台実験とで合わせた結果、図-13での考察と同様に、変位時刻歴から応答が改善していることが読み取れる。9秒付近の最大応答が遠心場振動台実験結果に近づき、その後の振動も遠心場振動台実験結果とほぼ同じ位相・大きさで推移

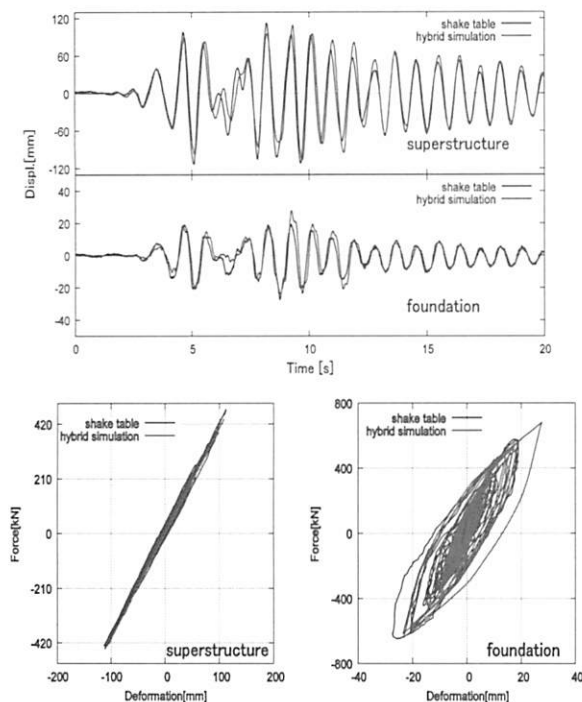


図-17 Case2の解析結果

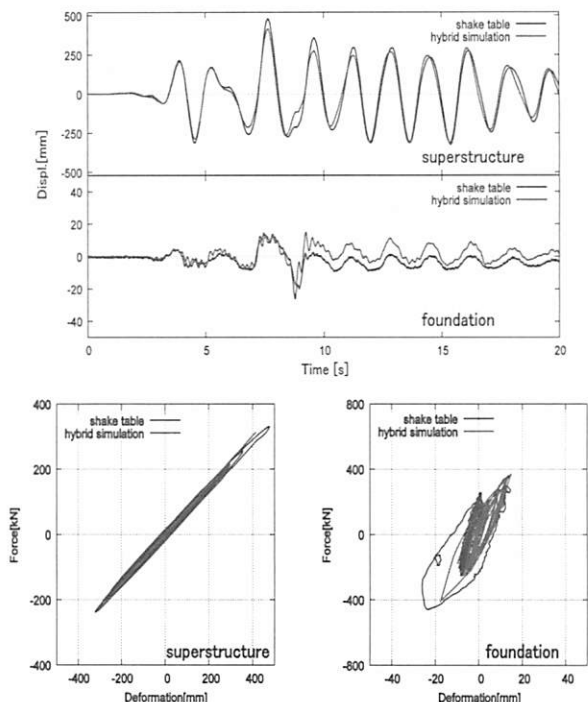


図-18 Case3の解析結果

している点が大きな特徴である。

基礎部の応答では、変位時刻歴を見ると、シミュレーション結果は遠心場振動台実験の最大応答をよく再現できているといえる。履歴曲線を見ても、遠心場ハイブリッド実験の結果と比較して応答が飛躍的に改善されることが読み取れる。一方、最大ピーク後の応答に関しては遠心場ハイブリッド実験の方が遠心場振動台実験の挙動をよく再現できているといえる。これは、実験では杭の動いた背面の隙間に砂が入り込むことで正側への変形が抑制されるが、今回使用したシミュレーションモデルでは系の連続性を仮定しており、このような砂の不連続的な運動を表現できないために生じた差であると考えられる。

図-17はCase2の、図-18はCase3のシミュレーション結果と遠心場振動台実験結果の比較図である。これらを見ると、Case3の基礎の変位時刻歴・履歴曲線を除きかなりよい精度で両者が一致していることが分かる。また、Case3の基礎の挙動についても、最大応答や残留変位に課題はあるものの、ピークの出るタイミングがシミュレーションと遠心場振動台実験で一致している。

以上の考察から、構造物-杭基礎-地盤系に対する遠心場ハイブリッド実験の適用性を向上させるためには、フーチングのスウェイ動に加え、フーチングのロッキングと杭の慣性力を考慮することが必要であるといえよう。

5. 結論

本検討では、擬動の実験の一種である遠心場ハイブリッド実験の実験精度を向上させるために、遠心場ハイブリッド実験と遠心場振動台実験の実験システムの差異に着目して、実験の制約条件が結果に与える影響について検証した。その結果、系の地震時挙動は、従来の遠心場ハイブリッド実験では無視されていたフーチングのロッキングと杭の慣性力の効果にも大きく依存することを、ロッキングと慣性力を考慮に入れたハイブリッド実験シミュレーションにより示した。さらに、遠心場ハイブリッド実験との比較が実施されていなかった他の遠心場振動台実験についても、同様のハイブリッドシミュレーションモデルによる解析結果との比較を行い、ロッキングと慣性力を考えたハイブリッド実験システムの有効性を示した。

本検討ではスウェイ・ロッキング動をフーチングの重心に直接与えるものとして検証を実施した。スウェイ動に関しては、従来の実験システムで十分な変位を与えることが可能であるが、ロッキング動については、模型の大きさゆえにフーチングの重心に直接载荷することが困難である。したがって、フーチングの上部に剛体を取り付け、その剛体を水平方向に押すことでフーチングにモーメントを与える方法をとるなど、実験的にロッキングを考慮するためには工夫が必要である。また、その载荷システムで

正しいロッキング動が得られるかを実験的に検討することも求められている。さらに、フーチングに加算する杭の質量を、本検討では便宜的に杭全体の質量の半分としたが、この値もまた合理的に算出する必要がある。これらの課題を解決することで、遠心場ハイブリッド実験は実用化に大きく近づくことが予想される。

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。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 時松孝次，鈴木比呂子，佐藤正義：地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響，日本建築学会構造系論文集 第587号、125-132，2005年1月。
- 2) 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，構造工学論文集 Vol.56A，pp.334-341，2010年。
- 3) OpenFrescoホームページ：<https://nees.org/resources/858>
- 4) OpenSeesホームページ：<http://opensees.berkeley.edu/>
- 5) 小寺雅子：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手法の開発，京都大学大学院工学研究科修士論文，2011年。
- 6) 佐々木義志，高橋良和，澤田純男：慣性力相互作用およびキネマティック相互作用を考慮した構造物-杭基礎-地盤系に関するハイブリッド実験システムの提案，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム公演論文集，2012年7月
- 7) R.W.Boulanger, et al. (1999). 'SEISMIC SOIL-PILE-STRUCTURE INTERACTION EXPERIMENTS AND ANALYSIS' *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 125(9), 750-759.