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）
E-mail:sasaki@catfish.dpri.kyotu-u.ac.jp

[2]正会員　京都大学准教授　防災研究所（〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail:yos@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

[3]正会員　京都大学教授　防災研究所（〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究では，構造系の地震時挙動を把握するための実験手法として提案された，擬動的実験の一つである遠心場ハイブリッド実験を対象とし，この実験手法の適用性向上に関する検討を実施している．既往のハイブリッド実験システムでは地盤振動の効果や基礎のロッキングの影響を考えることができないため，新たにこれらの影響を考慮できるハイブリッド実験システムを構築し，シミュレーションによる考察を行った．その結果，対象とした遠心場振動台実験では地盤変形が小さいため基礎のロッキングを考慮することでハイブリッド実験によりこの実験結果を追うことが可能であることを示した．

Key Words : *hybrid experiment, soil-foundation-structure interaction, centrifuge, rocking*

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結果に差が生じる原因を検討するために，実験システムの差異に着目し，地盤振動，基礎のロッキング

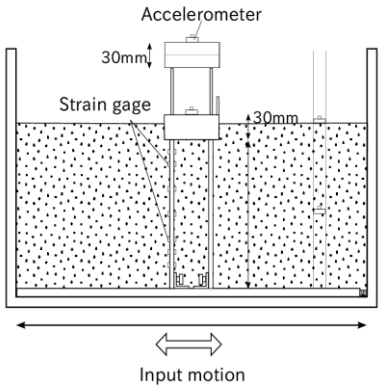

図-1 振動台実験模型

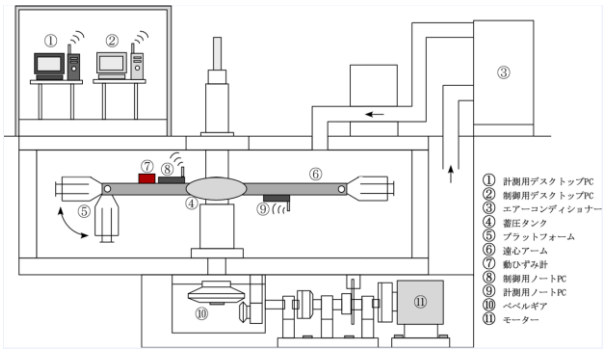

図-2　遠心力載荷装置

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

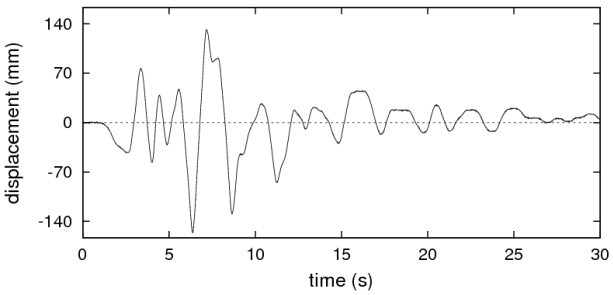

図-3 入力変位波形

などを考慮できるハイブリッド実験システムを提案することでそれぞれの影響に関する考察を実施する．

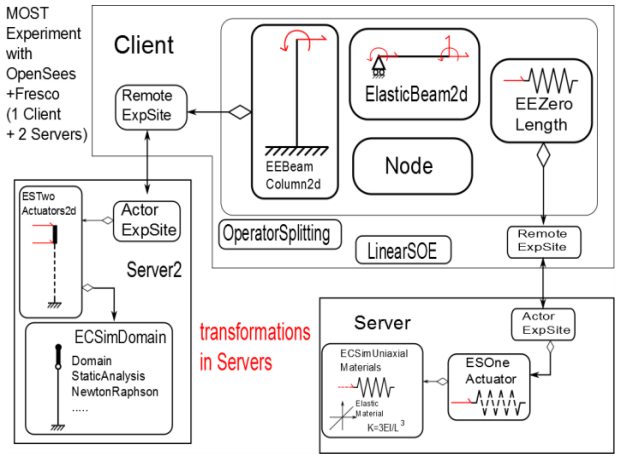

図-4 OpenFresco のクラス図

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解析と模型実験を組み合わせて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，

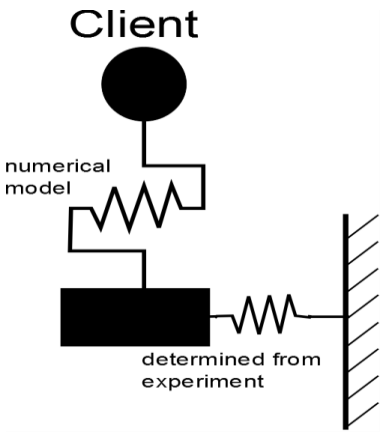

図-5 ハイブリッド実験における系のモデル化

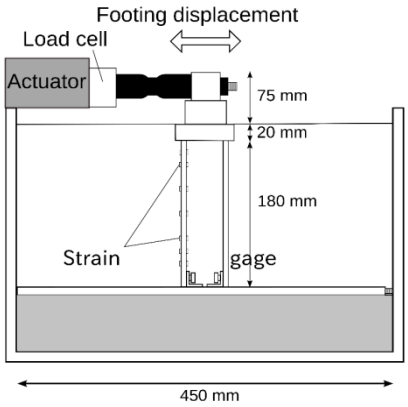

図-6 遠心場での静的載荷実験システム

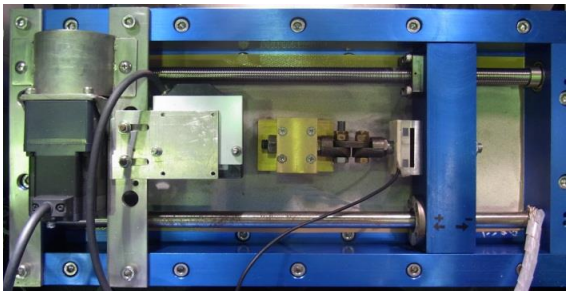

図-7 土槽上部から見た実験装置

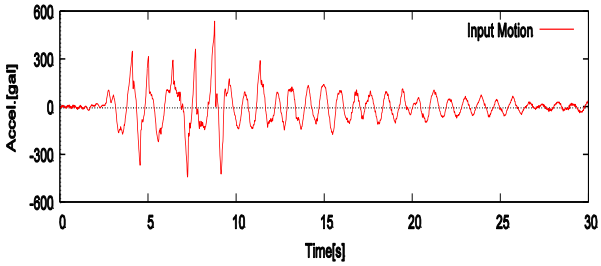

図-8 入力加速度波形

ハイブリッドシミュレーションフレームワークであるOpenFresco[3]を用い，数値解析部にはOpenSees[4]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載荷実験より決定される．基礎部への載荷実験の模式図を図-6に，土槽上部の写真を図-7に示す．この静的載荷実験では，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．

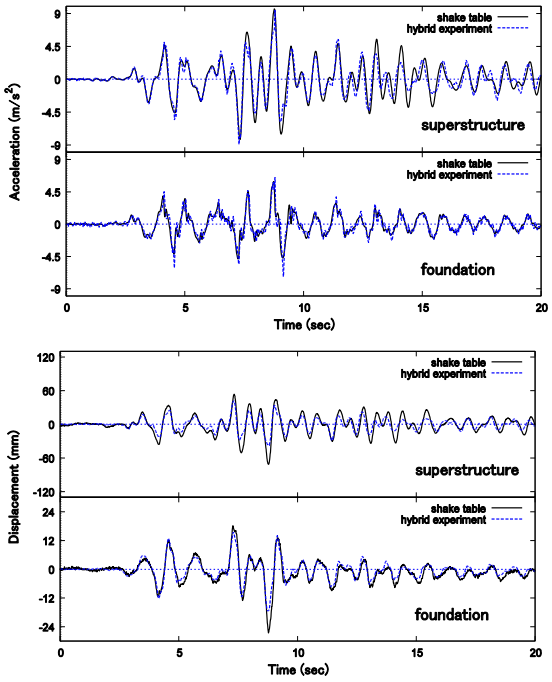

図-9 加速度時刻歴および変位時刻歴

(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

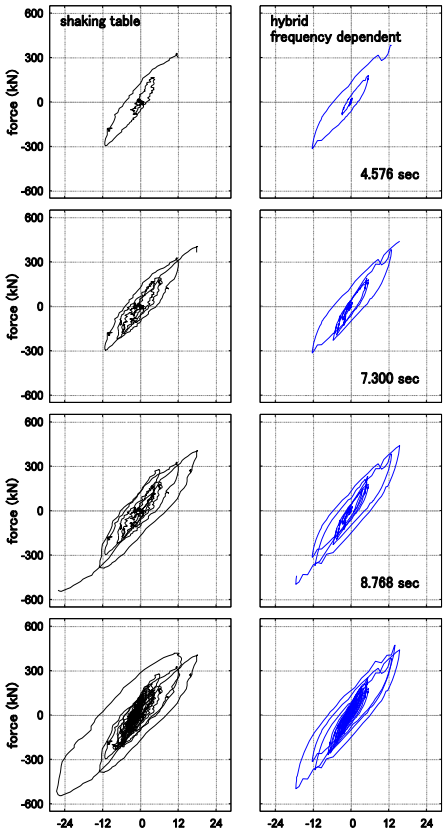

図-10 履歴曲線の時間変化

を，下が変位時刻歴を示している．結果は全て実物スケールである．以下，断りがな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だと考察した[25]．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．

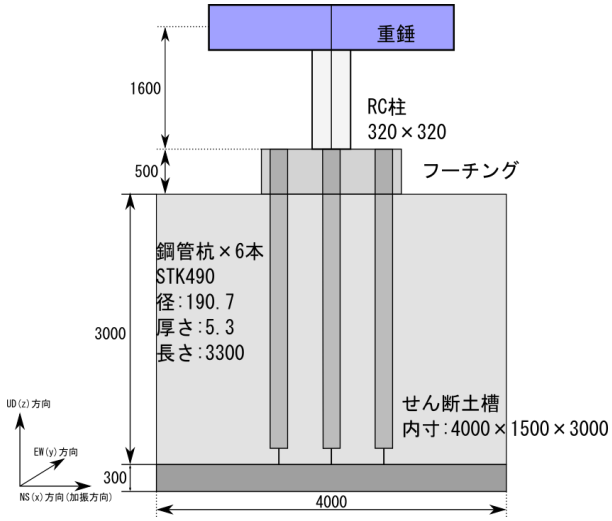

図-11 1G場振動台実験模型

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，次章以降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・基礎のロッキングを考慮したハイブリッド実験システムの提案とその妥当性

(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，筆者ら[6]が開発した，周辺地盤の振動を考慮できるハイブリッド実験システムとその妥当性に関する検討を行い，次章では遠心場振動台実験・遠心場ハイブリッド実験における周辺地盤の振動や基礎のロッキングが系の応答に与える影響について，開発したモデルをもとにシミュレーションを実施し，考察する．

(2) シミュレーション対象実験

まず初めに，地盤振動を考慮したハイブリッド実験システムの妥当性を評価するため，高橋ら[7] により実施された1G場振動台実験(図-11)との比較を行う．この1G場振動台実験では，構造物の非線形挙動に着目した動的相互作用の評価を行うことが目的であったため，構造模型としては配筋などの構造細目を満足することができる中

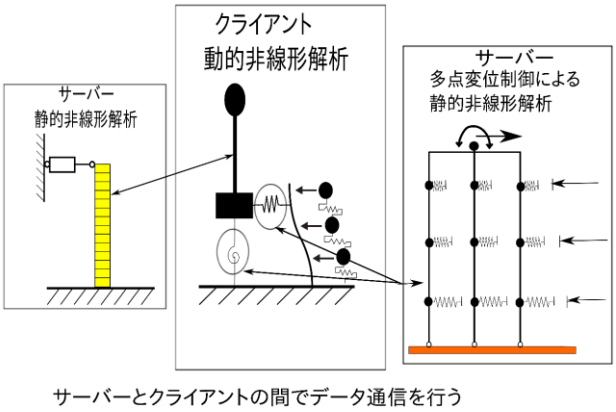

図-12 分散ハイブリッド実験システム

型RC柱模型を用いている．RC柱模型は320mm×320mmの正方形断面を有し，主鉄筋はD10を16本，帯鉄筋はD4を40mm間隔に配筋したものである．

RC柱模型に軸力と慣性力を作用させるため，柱の天頂部に10.1tの鋼製重錘を設置している．重錘の重心は柱基部から高さ1600mmにあり，一辺2000mm，高さ585mmである．

杭基礎は，単杭とならないことと，RC柱が非線形化する場合にも塑性化しないことを考慮して設計された．その結果，外径190.7mm，長さ3300mm，厚さ5.3mmの鋼管杭6本から構成されている．鋼管はSTK490の材料で作成され，降伏強度は466N/mm^2，弾性係数は2.18×10^5 N/mm^{2}である．フーチング部には質量0.7tの鋼製フーチングを用いている．杭頭部はフーチング内にモルタルで剛接合され，杭端部は土槽底面でヒンジ結合となるようにD25の鉄筋で接合した．また，杭頭部での塑性変形を防ぐため，杭の上端から900mmはモルタルにより充填されている．

この実験に使用した土槽は，内寸で4000mm×1500mm×3000mm(長さ×奥行き×高さ)，全23段のせん断土槽である．地盤は硅砂6号の乾燥差を使用し，約3mの高さまで相対密度80%を目標として締め固めている．

入力波にはJR鷹取波北西45°成分を用いている．

(3) 解析概要

図-12が今回使用するハイブリッド実験システムである．1G場振動台実験の実験模型は図-12のクライアントのように，構造物は柱要素，杭基礎-地盤系はスウェイ・ロッキングモデルとしてモデル化される．ここで，地盤の変形を考えるため，地盤を３質点のバネ-マス系でモデル化しており，基礎にはフーチングの慣性力に加え，地盤の変形に対応した力が相互作用ばねを介して与えられる．ここでは，実験シミュレーションを行うため，２つのサーバーにおいて，構造物および杭基礎-地盤系

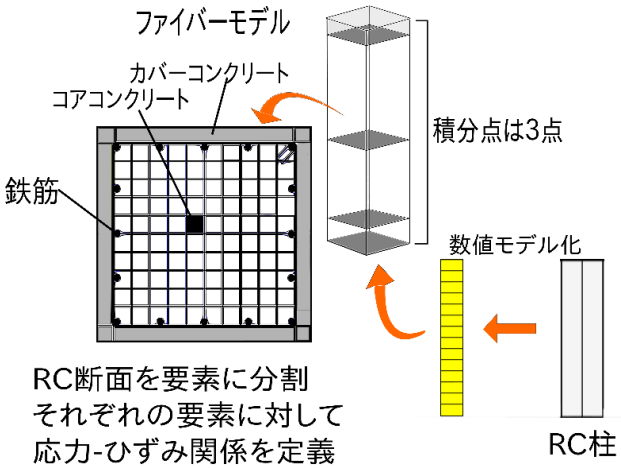

図-13 構造部の数値モデル化

に対する非線形静的載荷解析を実施する．このシステムの大きな特徴として，杭基礎-地盤系の静的非線形解析ではフーチングへの静的載荷に加え，地盤への土槽外部からの載荷を再現しているという点，また柱要素には基礎の回転を除去した変形が載荷される点が挙げられる．なお，クライアントとサーバーの間でデータ通信を行うため，クライアントとサーバー相互が地理的に離れていても実験を行うことが可能である．分散実験を実施することと，クライアントサーバー間で相似則が適用されることより，構造物と基礎の模型を一体で作成する必要がなく，遠心場内の基礎に対して重力場の非線形構造物を考えることも可能になる．

(4) 実験部の数値モデル化

ハイブリッド実験シミュレーションでは，全体システムに対する数値モデルを単純なモデルで表現できる一方，それぞれの部材の特性はサーバーでの解析結果によるため，サーバーにおけるモデル化は詳細である必要がある．ここでは，シミュレーションに必要なものである構造部，基礎部，地盤部，相互作用部のモデル化に関する説明を行う．

a) 構造部

図-13に，サーバーにおける構造部(RC柱)のモデル化の詳細を示す．RC柱はRC断面をコアコンクリート100分割，カバーコンクリートは図のように8分割したのちにそれぞれ10分割したファイバー要素でモデル化をした．コンクリートにはKent-Parkモデル，鉄筋にはGiuffre-Menegotto-Pintoモデルを適用した．コアコンクリート，カバーコンクリートの圧縮強度はそれぞれ42.2N/mm^2，40.8N/mm^{2}とし，鉄筋の降伏強度は394N/mm^2，弾性係数は2.10×10^{5}N/mm^2，二次剛性比は0.01とした．柱頂部には重錘による荷重を設定する．なお，RC柱の重量は重錘

の重量に比べ，極小さいものとする．

このモデルに対し，柱頂部へ水平強制変形を与える静的載荷実験シミュレーションを実行する．

b) 基礎部

図-14に，サーバーにおける基礎部のモデル化の詳細を示す．杭は6本の杭を3本の弾性体の梁要素で表現し，杭2本が受ける力を1本の梁が受けるものとした．本研究では遠心力載荷装置を用いたハイブリッド実験を念頭において検討を行っているため，装置の制約から土槽を外部より3点で載荷することとし，深さ0.2m，1.2m，2.2m，3.0mの点に杭の質量を設定した，また，フーチングに関しては剛性の高い水平方向の梁要素を考え，中央に質量を設定することで表現した．

このモデルに対し，フーチング部に水平および回転方向の強制変形を与えるとともに，地盤部へも強制水平変形を与える，静的載荷シミュレーションを実行する．なお，地盤に与える変位の計算および相互作用ばねの決定方法に関しては，(c)，(d)に示す．

c) 地盤部

ハイブリッド実験では，土槽外部から与える地盤の変位は周辺地盤の変位を計算することにより決定される．この地盤変位はクライアントの地盤モデルに対する応答計算により求められる．周辺地盤のモデル化は，骨格曲線に双曲線モデルを使い，履歴曲線は骨格曲線にMasing則を適用することで行った．地盤ばねは1G場振動台実験結果より３層に分け，それぞれに異なるばねを設定した．また，深さ0.2m，1.2m，2.2m，3.0mの点に質量を設定した．なお，地盤の密度は1.45tf/m^{3}であり，地盤のせん断弾性係数は24505kN/m^{2}である．

1G場振動台実験で用いた地盤材料の一次元非線形地盤応答解析による非線形動的特性とのフィッティングから骨格曲線および履歴曲線を決定した．

d) 相互作用部

杭と地盤の間の相互作用ばねはWinklerばねとし，Boulangerらによって提案されたdynamic p-y型の荷重-変位関係[8]を満たすものとしてモデル化した．この相互作用ばねは，弾性ばね，塑性ばね，杭周辺の地盤が杭と剥離するときに働く相互作用ばねからなる．

本研究では，地盤と杭は剥離しないものとし，これらのパラメータを鉄道標準[9,10]に基づき決定した．

相互作用ばねの初期剛性は以下の式で求められる．

$$K_h = k_h \cdot D \cdot \Delta l \qquad (1)$$

K_h は設計水平ばね定数，k_h は設計水平地盤反力係数，D は杭の直径，Δl は水平ばねを設定する杭の長さである．なお，k_h は以下の式に従って算出した．

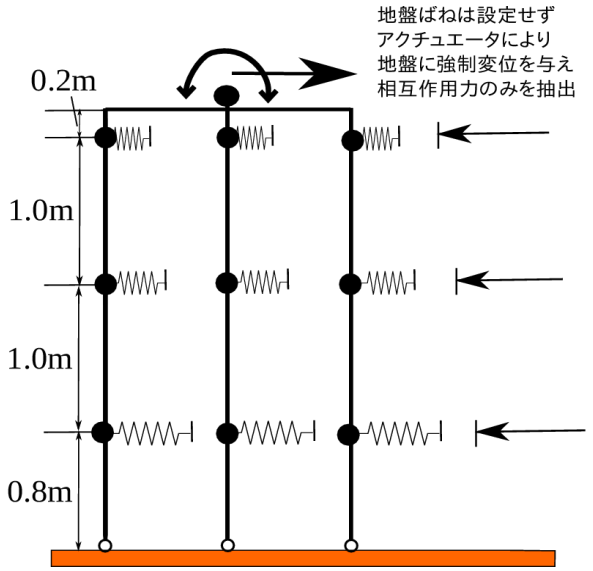

図-14 基礎部の数値モデル化

$$k_h = f_{rk} \cdot (0.6 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-\frac{3}{4}}) \qquad (2)$$

ここで，α は E_0 の算定方法に対する補正係数で，ここでは0.25である．また，E_0 は地盤の変形係数 $(= 2500 \cdot N)$，N は水平方向地盤の N 値，f_{rk} は地盤抵抗係数(=1.0)である．

相互作用ばねの最大荷重は以下の式より算出した．

$$P_e = p_e(z) \cdot D \cdot \Delta l \qquad (3)$$

ここで，P_e は有効抵抗土圧，$p_e(z)$ は深さ z における有効抵抗土圧力度を表す．本研究では砂質土を対象としているため，$p_e(z)$ は以下の式で算出した．

$$p_e(z) = f_{rp} \cdot \alpha \cdot \gamma_e \cdot z \cdot K_P \qquad (4)$$

α は杭前面の形状係数(=3)，γ_e は深さ z までの平均有効単位体積重量である．また，K_P は受動土圧係数であり，以下の式で算出される．

$$K_P = \tan^2(45° + \phi / 2) \qquad (5)$$

ここに，ϕ は深さ z の土のせん断抵抗角(°)，z は有効抵抗土圧力度を求める深さ，f_{rp} は土圧力度の算出に用いる地盤抵抗係数(=1.0)である．

⑸ 解析結果

図-15に地盤変形を拘束した場合の解析結果，**図-16**に地盤変形を考慮した場合の解析結果を示す．どちらの結果においても，基礎のロッキングは考慮してある．

図-15の結果より，RC柱の変位時刻歴においては，1G場振動台実験結果とシミュレーションの結果は一致しているが，フーチングの変位時刻歴では，シミュレーションと振動台実験の結果が全く異なったものであること

が読み取れる．特に，最大応答値で見ればおよそ20倍の差が生じている．基礎部の履歴曲線についても，振動台実験結果が紡錘型の曲線であるのに対し，シミュレーション結果は直線となっている．この結果より，RC柱の挙動に関する検討を行うのであれば本実験システムでも有意な結果が得られると思われるが，基礎の挙動を正しく評価することはできないといえる．

図-16の結果より，RC柱では変位時刻歴および履歴曲線ともに振動台実験と近い結果を得ることができた．これに関しては，図-15における検討でも同様の結果が得られていることから，RC柱が非線形化して大きな変形が生じるような入力波の場合は，RC柱は地盤の変形による影響をあまり受けないということが分かる．フーチングの変位時刻歴では，シミュレーション結果が振動台実験の結果をよく追えており，図-15の結果に比べ，応答が劇的に改善していることが分かる．基礎部の履歴曲線においても，シミュレーション結果は振動台実験と同様の紡錘型の曲線を描いていることから，本提案システムは地盤の履歴減衰を評価できていることが分かる．

また，図-15と図-16の比較より，地盤が大きく非線形化するときに基礎の応答に大きな影響を与えるものは地盤の変形であり，基礎のロッキングの影響は相対的に小さいものとみなせる．

4. 遠心場振動台実験および遠心場ハイブリッド実験における地盤振動と基礎のロッキングの影響

(1) 概要

本章では，遠心場ハイブリッド実験が遠心場振動台実験に比べ最大応答値を過小評価する原因を，ハイブリッド実験シミュレーションを通じて検証する．

(2) 周辺地盤の地盤振動が遠心場ハイブリッド実験結果に与える影響

ここでは，本研究で対象とした遠心場振動台実験・遠心場ハイブリッド実験において地盤振動の影響を考えるために，図-17のモデルを使用することとする．図-17は遠心場ハイブリッド実験において地盤振動を考えられるように図-12のモデルを若干修正したものであり，図-17に示した実験システムを想定したものである．クライアントにおける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．また，ここでは基礎のロッキングの影響を除外するために基礎は水平方向のばねでのみ支持されているものとした．サーバーでは図-14と同様に杭を弾性の梁要素で表現し，地盤のパラメータは遠心場振動台実験のパラメータを参考に，３章と同様に決定した．

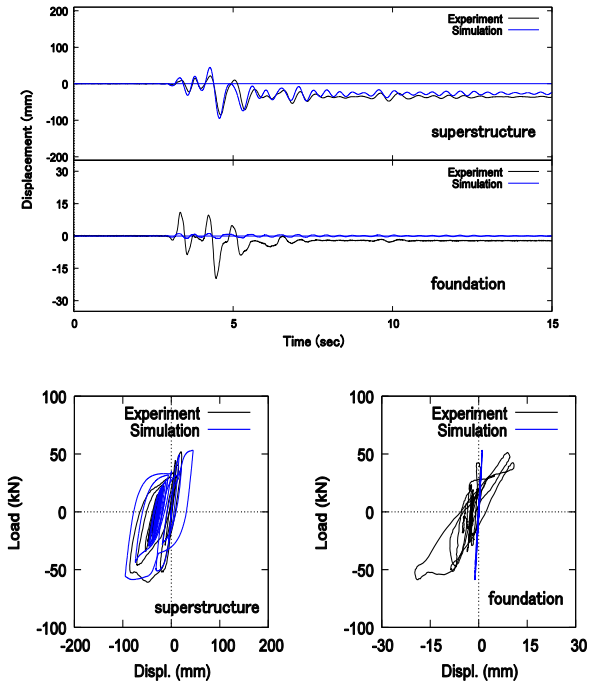

図-15　地盤変形を考慮しない解析結果

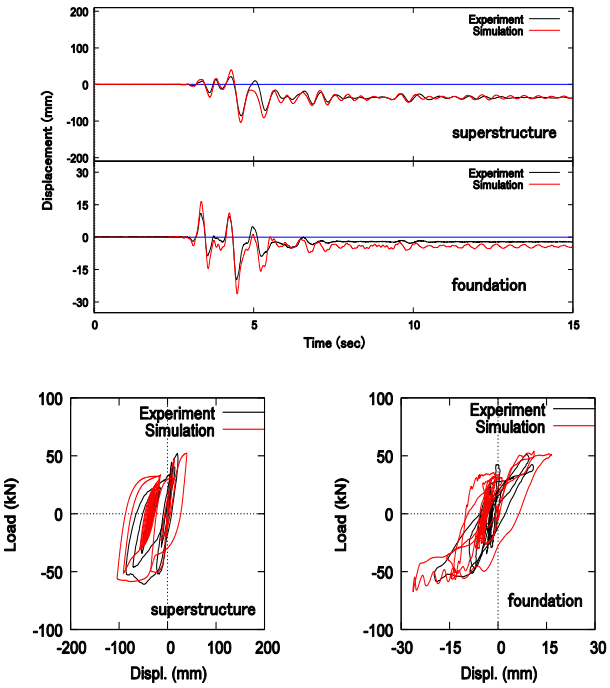

図-16　地盤変形を考慮した解析結果

(3) 解析結果および考察

図-19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

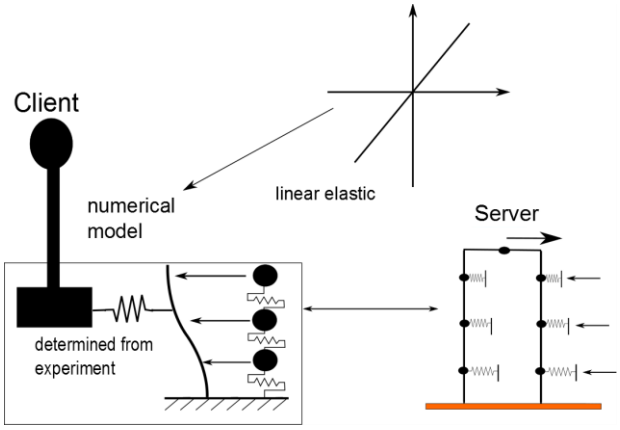

図-17　地盤変形を考慮したハイブリッド実験システム

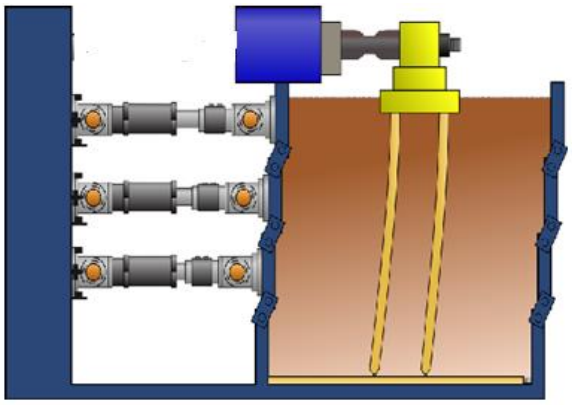

図-18 せん断変形を与えられる土槽

較結果を，図-20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-20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，非常に小さな変形であることがわかる．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．

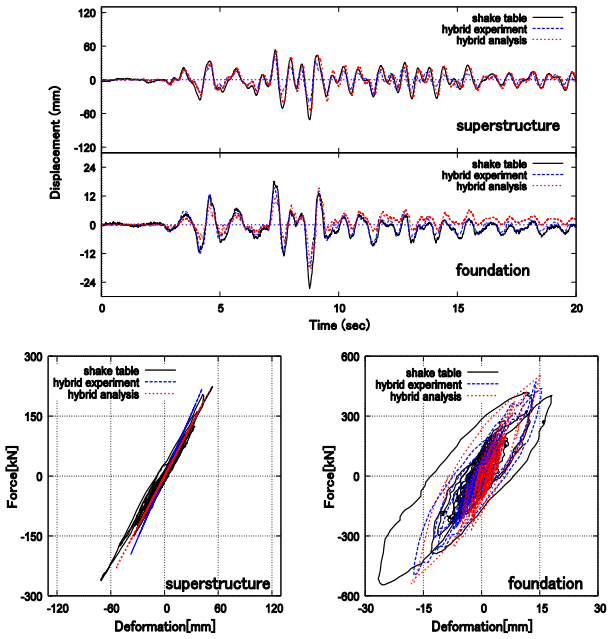

図-19　地盤変形を考慮したハイブリッドシミュレーション

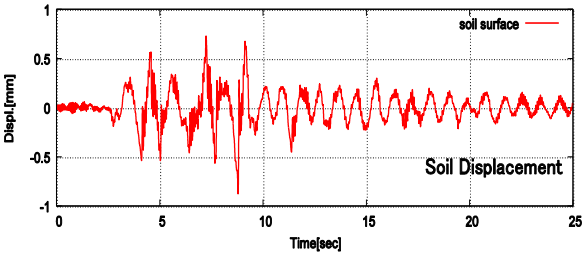

図-20　地盤の変位時刻歴

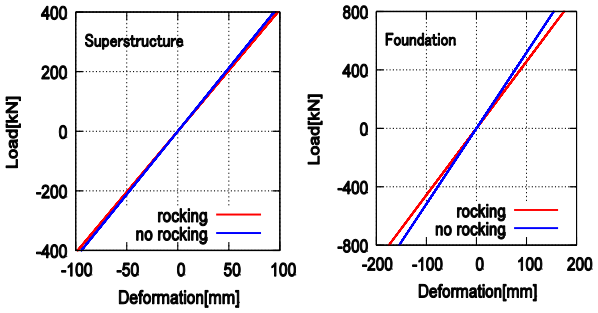

図-21　ロッキングの有無による水平剛性の違い

(4)　基礎のロッキングが遠心場ハイブリッド実験結果に与える影響

ハイブリッド実験では図-5に示す通り，地震応答計算の際に構造物-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，基礎部の載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

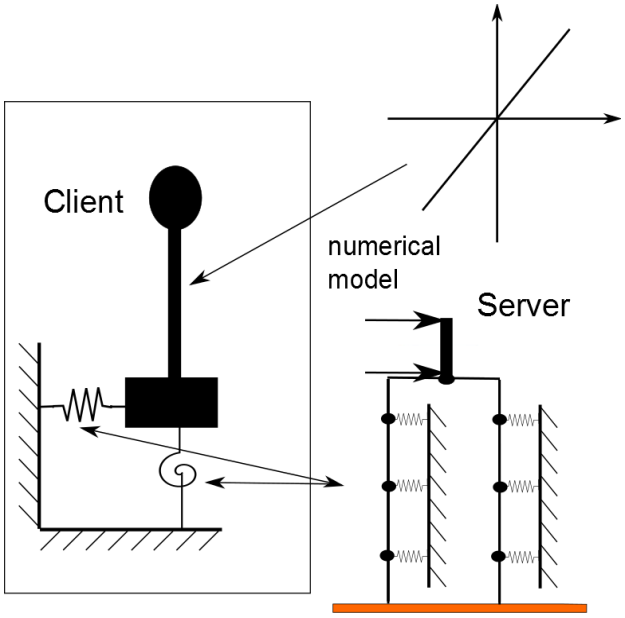

図-22 基礎のロッキングを考慮できるハイブリッド実験システム

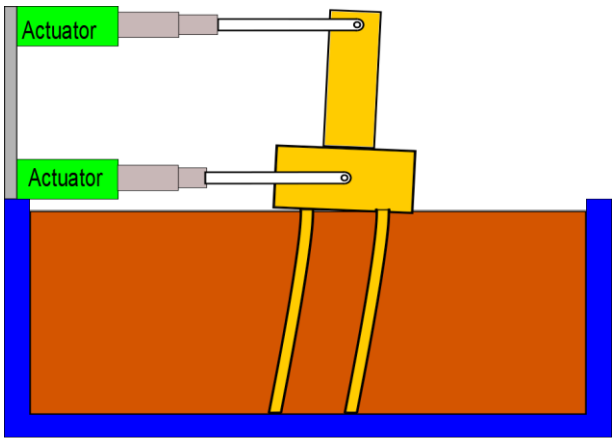

図-23 基礎にロッキングを与える実験システムの一例

物・フーチング以外の慣性力(たとえば杭や周辺地盤)を考えることができない.

一方で，振動台実験で用いた模型は図-1に示す通りの構造であるが，理論上は上部構造物・フーチングともにあらゆる方向の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.

図-21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載荷解析結果を示す．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，ロッキングを考え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.

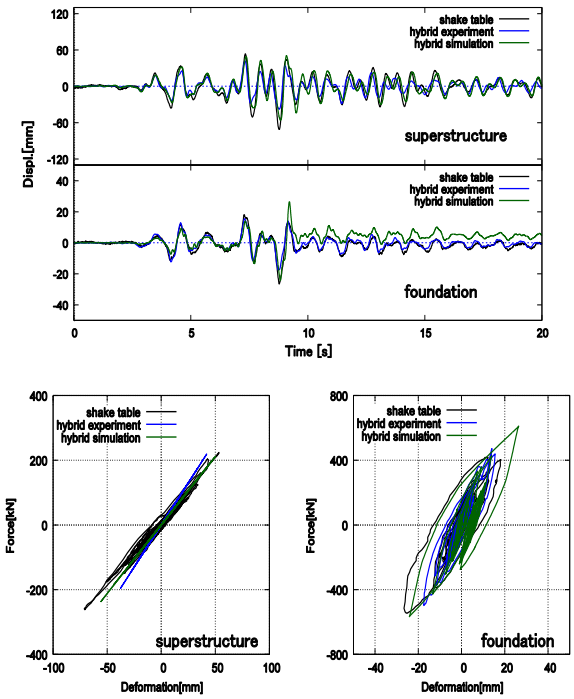

図-24 Case1 の解析結果

以上の点と周辺地盤の影響が比較的小さいことを考慮すると，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で系の応答が変化することが期待できる.

(5) 解析概要

図-22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．このシステムは図-12のシステムにおいて，地盤変形を拘束し，上部構造物を数値モデル化したケースに相当する．サーバーにおける基礎部への載荷方法としては，図-23に示すように，フーチングの上部に剛体を設け，フーチングの重心と剛体頂部にヒンジを介してアクチュエータを設置し，水平変位を与えることで，フーチングに回転変位を与える方法を想定した．地盤は固定地盤で，杭と周辺地盤との間の相互作用ばねも図-14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イ・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

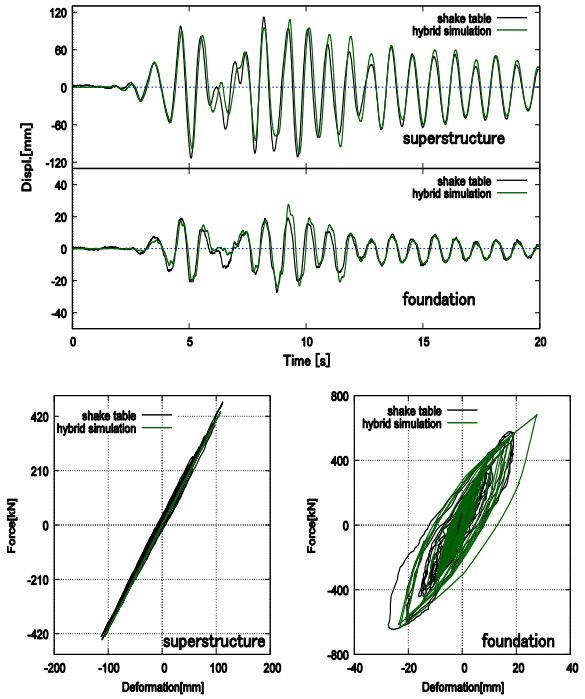

図-25 Case2の解析結果

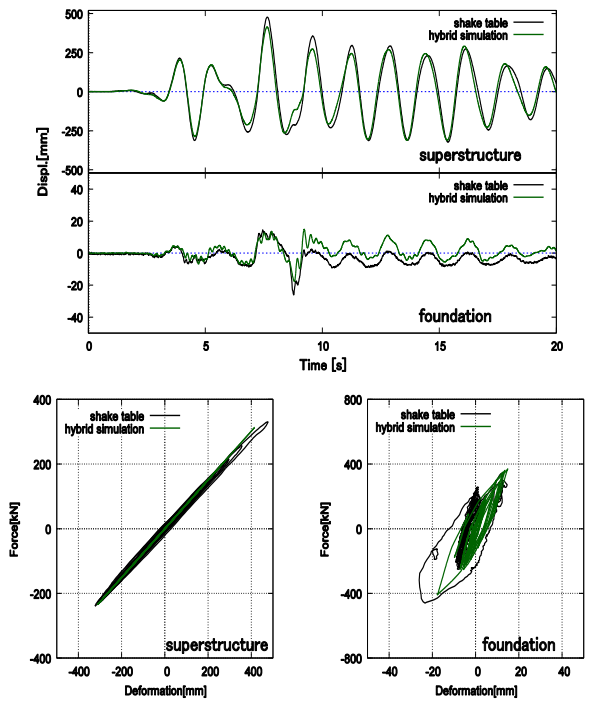

図-26 Case3の解析結果

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．

(6) 解析結果および考察

シミュレーションの結果を図-24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-19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-25はCase2の，図-26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，地盤変形の小さな構造物-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．まとめ

本検討では，擬動的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，地盤振動および基礎のロッキングを考慮できるハイブリッド実験システムを提案し，実験の制約条件が実験結果に与える影響について解析的に検証した．その結果，地盤変形が小さい時の系の地震時挙動は，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．一方で，1G場振動台実験によるシステムの妥当性の検討では，基礎の応答に与える影響は地盤振動が支配的であることを示した．

本検討ではフーチングの上につけた剛体とフーチングの重心に水平変位を与えることでスウェイ・ロッキング動を与えるものとして検証を実施した．しかしながら，フーチングの重心位置は模型によって異なり，場合によっては重心を外した位置に載荷しなければならないこともある．その際には重心からのずれを考慮に入れてアクチュエータを制御する必要があり，制御がやや煩雑になる．

また，非線形構造物を有する系の地震時挙動評価においては，分散実験を遠心場ハイブリッド実験に組み込むことで適用が可能である．

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．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.barkeley.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) 高橋良和，西村俊亮，室野剛隆，江尻譲嗣，田中浩一，樋口俊一：RC構造物-杭基礎-地盤系の一体大型模型を用いた振動台実験に基づく地震時破壊挙動の評価，第31回土木学会地震工学研究発表会公演論文集.
8) R.W.Boulanger,et al.(1999).'SEISMIC SOIL-PILE-STRUCTURE INTERACTION EXPERIMENTS AND ANALYSYS' *J.Geotech.Engrg.*,ASCE,125(9),750-759.
9) 鉄道総合技術研究所 編，鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，平成11年10月．
10) 最新 地中・基礎構造の耐震設計[改訂増補版]，九州大学出版会，2001年11月．

ANALYTICAL STUDY ON IMPROVEMENT OF HYBRID EXPERIMENT IN CENTRIFUGAL FIELD

Yoshiyuki SASAKI, Yoshikazu TAKAHASHI and Sumio SAWADA

Hybrid experiment in centrifugal field is focused on this study. This experimental method is one of the pseudo dynamic test and has developed to grasp the dynamic response of the structural system during the earthquake more easily. In this research, the experimental system is improved to be able to consider both movement of soil and rocking of footing. As a result of simulation of hybrid experiment, it revealed that hybrid experiment can reproduce the shake table test in centrifugal field with considering rocking of footing.