

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

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

地盤と構造物の間の動的相互作用を評価するため、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なされてきた¹⁾。しかしながら、振動台実験は実験規模が大きくなり、数多く実験を行うことが困難であり、遠心場実験では小型模型を使用するため、構造物を詳細にモデル化することが困難である。この問題を解決するために、高橋らは遠心場ハイブリッド実験を提案し、慣性力相互作用に着目した検討を行った²⁾。この実験では、遠心場振動台実験と比較することにより、その応答を精度よく評価再現できることを示しているが、地盤変形が大きくなると基礎の応答を小さく見積もることも指摘している。以上の観点から、本研究では地盤の変形をも考慮したハイブリッド実験システムを提案し、実験の予備検討として、ハイブリッド実験シミュレーションを行うものである。

2. ハイブリッド実験シミュレーション概要

(1) シミュレーション対象実験

図-1に本研究で対象とした、高橋ら³⁾の1G場振動台実験で用いられた実験模型を示す。この実験では、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、単杭としないことと、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/mm²、弾性係数は 2.18×10^5 N/mm²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。

実験の結果、構造物が非線形化するような入力波に対しては地盤も大きく非線形化し、地盤の変形が構造系に与える影響が強くなることが示された。

(2) ハイブリッド実験システム

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。ハイブリッド実験を用いた動的相互作用に関する既往の研究には、

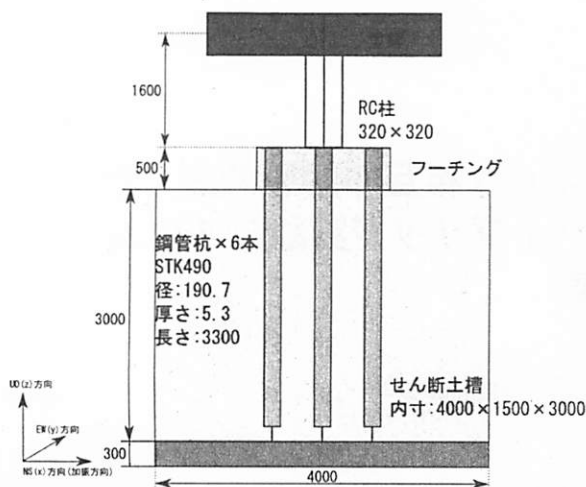
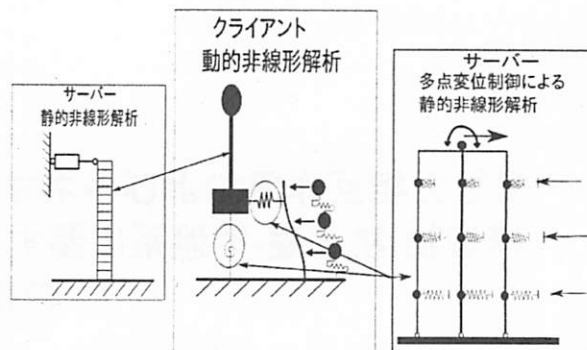


図-1 1G 場振動台実験模型

高橋らによる遠心場ハイブリッド実験²⁾が挙げられる。この実験では、構造物-杭基礎-地盤系に対し、構造物を数値モデル化し、杭基礎-地盤系に対しては遠心場における静的載荷実験を実施することで、慣性力相互作用に着目した検討がなされた。

本研究では、複雑な構造物の非線形性、および地盤-基礎系の応答をを実験的に正しく評価することを目的に、分散ハイブリッド実験を適用する。図-2 本研究で作成したハイブリッド実験モデルを示す。モデル化および解析にはOpenSees⁴⁾、OpenFresco⁵⁾を使用した。

ハイブリッド実験ではクライアントサーバーシステムを用いる。ハイブリッド実験において、全体システムは図-2のクライアントのように、構造物は柱要素、杭基礎-地盤系はスウェー・ロッキングモデルとしてモデル化される。ここで、地盤の変形を考慮するため、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。ハイブリッド実験では、全体システムモデルに対する運動方程式を解くことにより地震応答解析を実行するが、柱要素およびスウェー・ロッキングばねの特性は載荷実験により決定される。本研究では、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-地盤系に対する非線形静的載荷解析を実施する。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



サーバーとクライアントの間でデータ通信を行う

図-2 分散ハイブリッド実験システム

離れていても実験を行うことが可能である。

(3) 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物、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) 構造物

図-3に、サーバーにおける構造物(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8分割したファイバー要素でモデル化した。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/mm²、40.8N/mm²とし、鉄筋の降伏強度は394N/mm²、弾性係数は2.10×10⁵N/mm²、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-4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

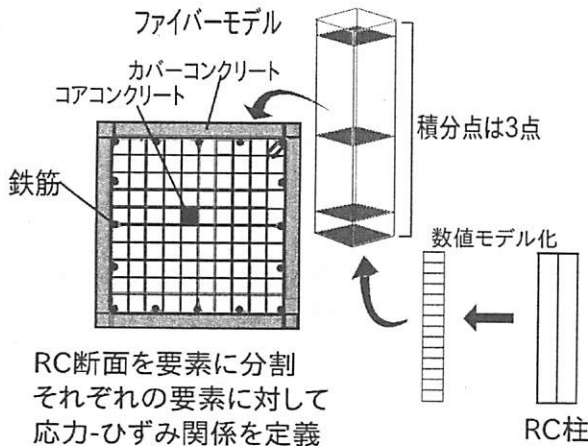


図-3 構造部の数値モデル化

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同時に、地盤部へも強制水平変形を与える、静的载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 1.45 tf/m^3 であり、地盤のせん断弾性係数は 24505 kN/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⁶⁾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^{7,8)}に基づき決定した。

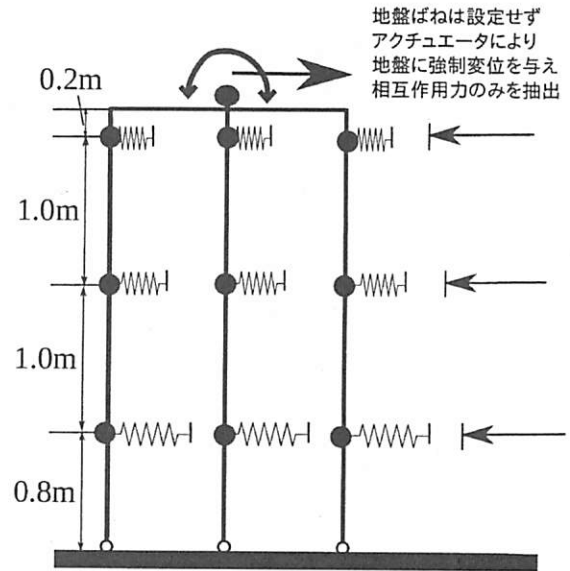


図-4 基礎部の数値モデル化

相互作用ばねの初期剛性は以下の式で求められる。

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

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。

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

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。

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

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。

$$p_e(z) = f_{rp} \cdot \alpha \cdot \gamma_e \cdot z \cdot K_p \quad (4)$$

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。

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad (5)$$

ここに、 ϕ は深さ z の土のせん断抵抗角($^\circ$)、 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。

3. 地盤の変形を考慮しないハイブリッド実験シミュレーションの結果

本章では、図-2に示した実験システムに対し、地

盤固定条件でシミュレーションを行った。地盤の変形を拘束した結果、この実験システムで考えられるのは主に慣性力相互作用のみである。入力波は、1 G場振動台実験で用いたものと同じものを使用した。図-5に1 G場振動台実験の結果とこの実験システムによるシミュレーションの結果の比較結果を示す。

RC柱の変位時刻歴においては、1 G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分かる。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。ゆえに、本対象模型におけるRC柱-杭基礎-地盤系に対し動的相互作用問題を考える際には、地盤の変形を考慮することが重要である。

4. 地盤の変形を考慮したハイブリッド実験シミュレーション結果

3章の考察では、動的相互作用を考える際には地盤の変形を考慮に入れることが重要であることが分かった。ここに、図-2のシステムを用いて行った、地盤の変形を考慮に入れたハイブリッド実験シミュ

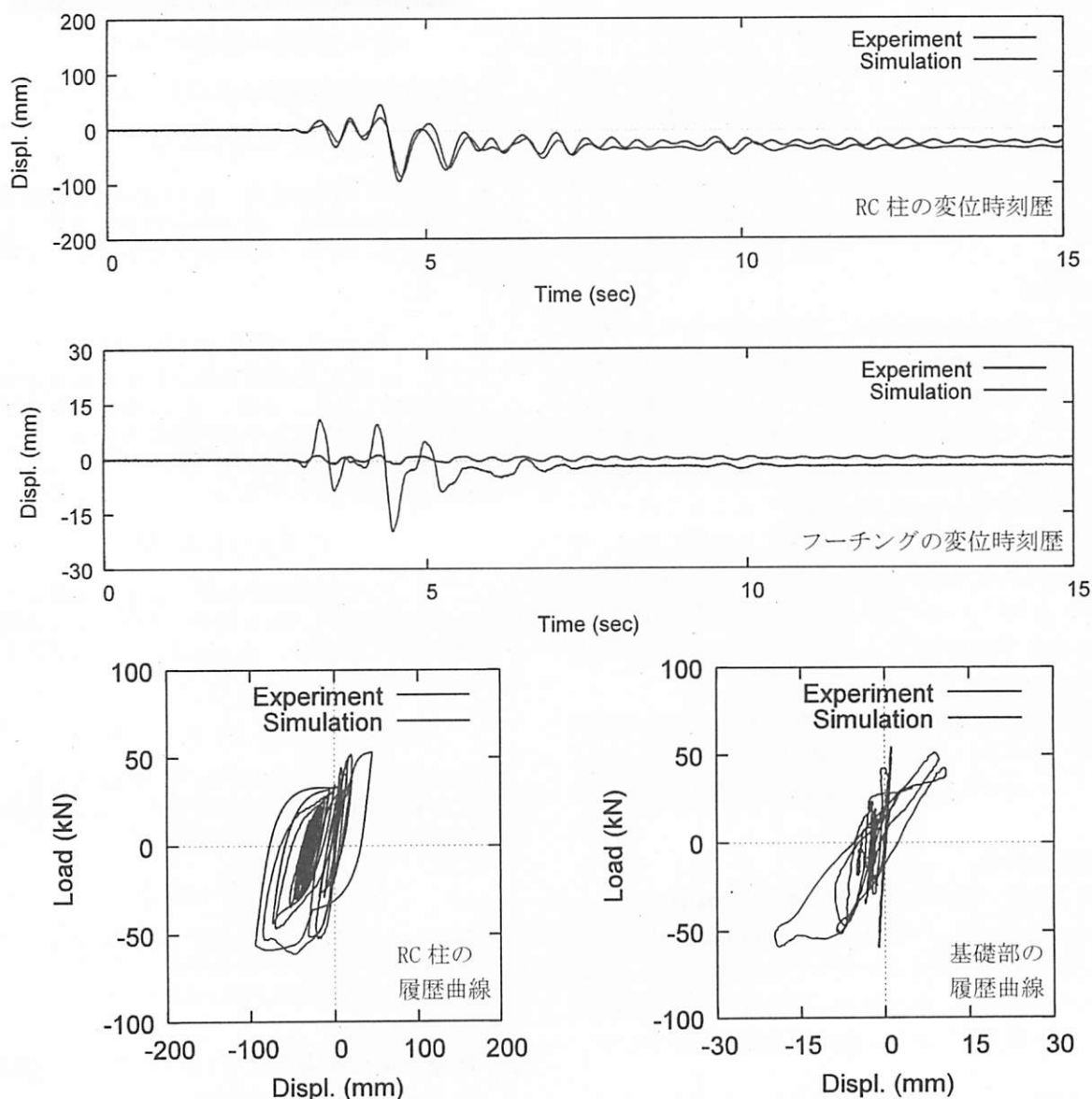


図-5 慣性力相互作用にのみ着目したシステムによるハイブリッド実験シミュレーション結果

レーションの結果と1G場振動台実験の結果を図-6に示す。入力波は1G場振動台実験で用いたものと同じものを使用した。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、3章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-5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。

5. 結論

1G場振動台実験を分散ハイブリッド実験で評価するため、非線形動的解析と、RC柱部・杭基礎-地盤を多自由度モデルとした非線形静的解析とを組み合わせる実験シミュレーション法を構築した。また、地盤の変形を考慮するため、土槽の外部から地盤に変位を与える実験システムを提案し、それに対するシミュレーションを実施した。その結果、フーチング以下の応答に関しては地盤の履歴減衰を考慮に入れた評価が可能であることが示された。ゆえに、動的相互作用の評価を行うにあたって本提案システム

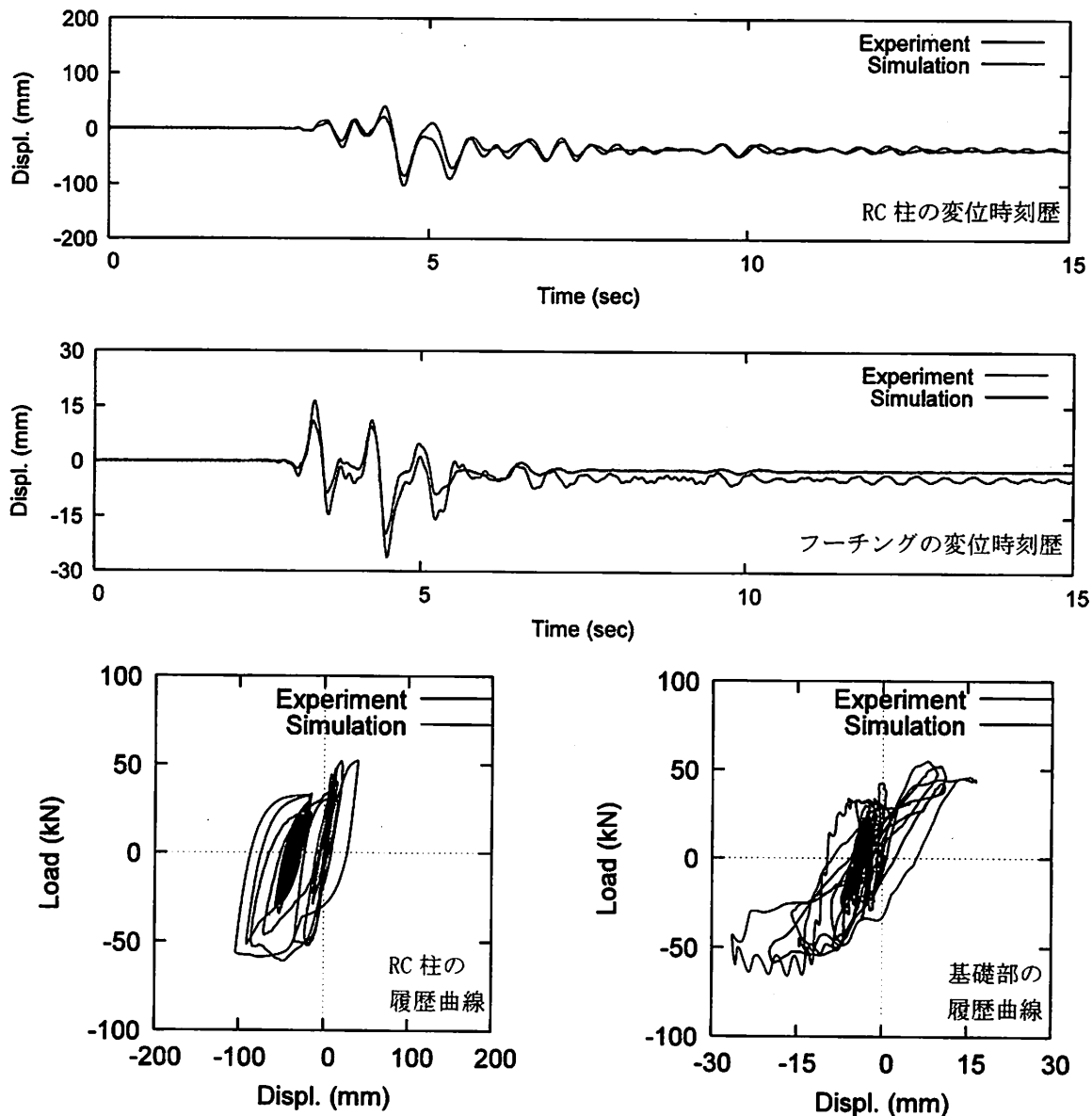


図-6 本提案手法によるシミュレーション結果

を適用することは妥当であるといえる。

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：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，構造工学論文集 Vol.56A，2011年。
- 3) 高橋良和，西村俊亮，室野剛隆，江尻諒嗣，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。
- 4) OpenSeesホームページ：<http://opensees.berkeley.edu/>
- 5) OpenFrescoホームページ：<https://nees.org/resources/858>
- 6) Ross W.Boulanger, et al.(1999). 'SEISMIC SOIL-PILE-STRUCTURE INTERACTION EXPERIMENTS AND ANALYSIS' *J.Geotech.Engrg.*, ASCE, 125(9), 750-759.
- 7) 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。
- 8) 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。