

# 論文 地盤中における RC 杭基礎の非線形動的応答に関する 3次元有限要素解析

牧 剛史<sup>\*1</sup>・前川 宏一<sup>\*2</sup>・半井 健一郎<sup>\*3</sup>・平野 勝識<sup>\*4</sup>

要旨：RC 構造全体系の耐震性能照査手法の高精度化を目指し，特に液状化地盤を含めた杭基礎 - 地盤系の非線形動的応答について，3次元有限要素解析に用いる地盤の非線形構成則の開発を行った。せん断土槽を用いた既往の振動実験結果を用いた精度の検証を行い，RC 基礎と地盤の強非線形域での相互作用について検討した結果，提案モデルの適用性のある程度，具体的に提示することができた。

キーワード：RC 杭基礎，液状化，せん断土槽，振動実験，3次元有限要素解析

## 1. はじめに

兵庫県南部地震における甚大な被害を背景に，構造物の耐震設計規準類が大幅に改訂され，大地震を受ける構造物の安全性を評価する耐震性能照査が一般的となった。2002 年末改訂の土木学会コンクリート標準示方書・耐震性能照査編<sup>1)</sup>においても，基礎と周辺地盤を含めた構造全体系をモデル化し，工学的基盤から照査用地震動を入力する時刻歴応答解析に基づく耐震性能照査法が規定された。特に基礎 - 地盤系の挙動を正確に把握することの重要性は，既に一般的な認識となりつつある。また，兵庫県南部地震以後，液状化や側方流動を生じる地盤における杭基礎について，その現象や挙動は明らかにされつつある<sup>2)</sup>ものの，構造設計の観点から，液状化を生じるような地盤が基礎に及ぼす外力と抵抗力の予測と設計への適用については，未だ検討の余地を残している。

本研究では，RC 杭基礎を対象とし，特に液状化が生じるような強非線形性を呈する地盤中の杭基礎の動的挙動について，これを精緻に予測する解析手法の開発を行った。さらに，せん断土槽を用いた飽和砂地盤中における RC 杭基礎

の振動実験結果<sup>3)</sup>を用いて，解析手法の妥当性と適用範囲を検証した。液状化解析に適用する地盤構成則は様々提案されている<sup>4)</sup>が，本研究においては既存の3次元RC構成則<sup>5),6)</sup>と併用することを前提として開発したものである。

## 2. せん断土槽を用いた RC 杭基礎の振動実験

### 2.1 実験概要

せん断土槽を用いた RC 杭基礎の振動実験の装置概要図を図 - 1 に示す。幅 1.0m 奥行き 0.8m，高さ 1.0m のせん断土槽を振動台上に固定し，その底面に RC 杭基礎試験体を完全固定した。その周囲を乾燥した砂で満たし，土槽底面から水を低速で注入することによって飽和砂地盤を作製した。杭体の固有振動数と降伏震度，および実験設備の制約条件も勘案して，試験体上部には杭体断面の軸応力が  $0.8\text{N}/\text{mm}^2$  程度となるような錘を載せて，加振実験を行った。

### 2.2 実験ケースと試験体

実験要因は杭の本数（1本杭，4本杭）および地盤の状態（密，緩）の組み合わせの他に，試験体を設置しない地盤のみの加振ケース（Case-0N，0L）4本杭に錘を設置しないケース

\*1 埼玉大学 助手 工学部 建設工学科 工博（正会員）

\*2 東京大学 大学院 教授 工学系研究科 社会基盤工学専攻 工博（正会員）

\*3 東京大学 大学院 助手 工学系研究科 社会基盤工学専攻 工修（正会員）

\*4 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 工修（正会員）

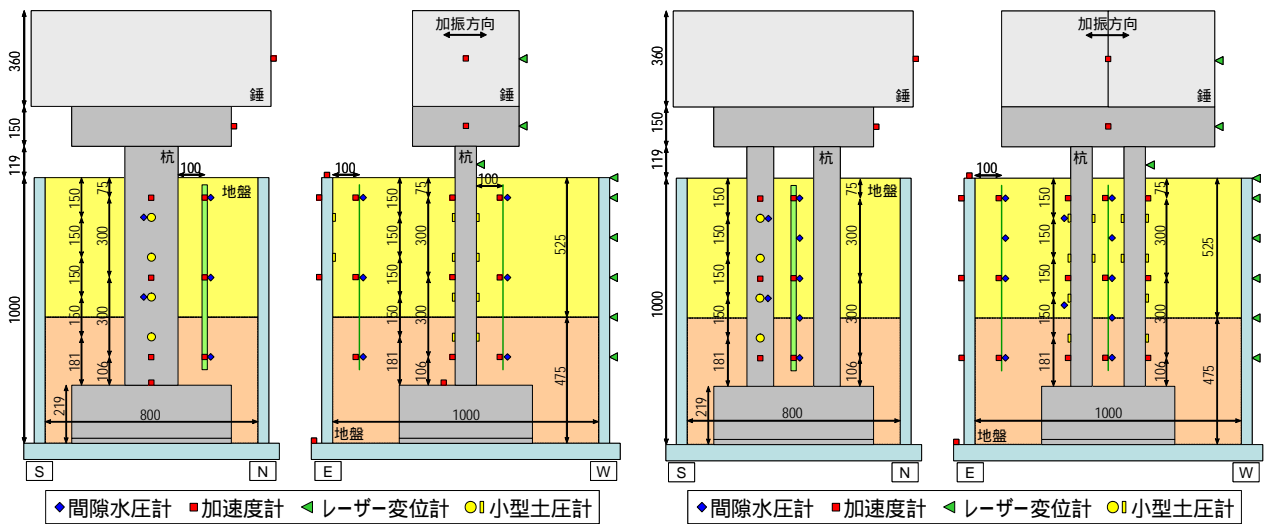


図 - 1 実験装置概要図 (左 : 1 本杭 , 右 : 4 本杭)

(Case-4N0) を含め、全 7 ケースの実験を行った。全実験ケースを一覧にして表 - 1 に示す。

地盤材料には浜岡砂<sup>3)</sup>を用い、密地盤のケースでは、深さ方向全域で相対密度 80% に締め固めた。また、緩地盤のケースでは地盤下層を相対密度 80%、上層は 40% とし、上層で液状化が生じるような条件とした。作製した地盤単体の固有振動数はおよそ 10Hz 程度である。

試験体の断面諸元を図 - 2 に示す。コンクリートの圧縮強度は  $32.5\text{N/mm}^2$ 、軸方向鉄筋の降伏強度は D10 が  $366\text{N/mm}^2$ 、D6 が  $316\text{N/mm}^2$  である。錘を含めた試験体単体の固有振動数は 1 本杭が 2.5Hz、4 本杭は 7.7Hz である。

### 2.3 入力波形

入力波は 5Hz の正弦波 10 波とし、序盤の 3 波で加速度振幅を増加、中盤 4 波は一定振幅、終盤の 3 波で振幅を減少させた。試験体が降伏する程度の塑性応答が生じることを目標として、入力最大加速度は 1000gal とした。

## 3. 振動実験の 3 次元有限要素解析

### 3.1 飽和砂地盤の非線形構成則

本研究では、東京大学で開発された 3 次元 FEM 解析コード COM3<sup>5),6)</sup> を適用した。RC 杭基礎 - 地盤系の動的応答解析を実現すべく、飽和砂地盤材料の非線形構成則の開発を行い、本コードに組み込んだ。開発した地盤構成則は、3 次

表 - 1 実験ケース

	密地盤	緩地盤
杭なし	Case-0N	Case-0L
1 本杭	Case-1N	Case-1L
4 本杭	Case-4N	Case-4N0 (錘なし)
		Case-4L

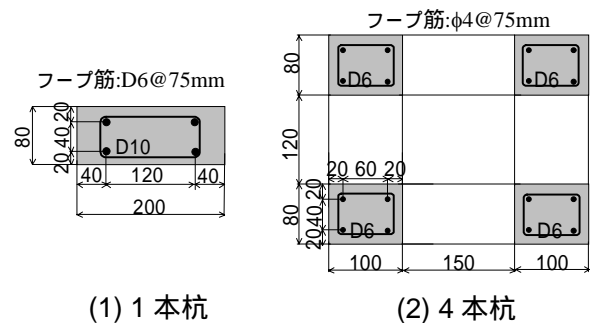


図 - 2 試験体断面 (加振は上下方向)

元応力下のコンクリート並びに高塑性領域の鋼材との数値演算上の親和性を考慮して定式化されており、地盤 - 鋼材 - コンクリートの一体解析を前提とした材料モデルとすることを念頭に置いたものである。その詳細は参考文献<sup>7)</sup>に譲り、ここでは概略のみを以下に記述する。

#### (1) 土粒子骨格の構成則

土粒子骨格の応力状態 (有効応力) は、偏差成分と平均成分の連成モデルで定式化した。

偏差成分については、完全弾塑性型の応力 - ひずみ関係を規定する複数の塑性ポテンシャルを重ね合わせて砂地盤の履歴特性を与え、低ひずみレベルから生じるせん断応力 - せん断変形

関係の非線形性を表現した。また、各塑性関数の降伏強度を平均応力に比例させることによって、せん断強度の拘束圧依存性を考慮した。

平均成分については、全平均ひずみを弾性平均ひずみ、圧密による塑性ひずみ、ダイレイタンスによる非弾性ひずみの3成分に分解し、弾性平均ひずみと体積弾性係数から全平均応力を算定した。圧密による塑性ひずみは、前川らによって提案された弾塑性破壊モデル<sup>5)</sup>に基づき、累積等価塑性偏差ひずみの関数によって定式化した。この圧密塑性ひずみは、砂地盤の初期相対密度に応じてその限界値を定めている。一方、交番ダイレイタンスに伴う非弾性ひずみについては、圧密塑性ひずみと等価偏差ひずみの関数によって与えている。

(2) 間隙水の移動を考慮しない場合

土粒子骨格間に存在する間隙水がせん断変形中に移動することを許容しない場合は、要素の全平均ひずみと間隙水の剛性に比例した間隙水圧を算定し、これを有効応力に単純に足し合わせることによって、地盤要素の全応力が求まる。すなわち、要素毎に完全非排水条件を仮定した有効応力解析となり、本論文においてはこれを「A解析」と称する。

(3) 間隙水の移動を考慮する場合

間隙水の移動を許容する場合は、その移動に伴う流体力と体積変化を考慮した定式化が必要となる。ここではBiotの定式化<sup>8)</sup>に基づいて飽和砂地盤要素の支配方程式を定めている。地盤要素の間隙率と透水係数は本来、せん断変形や圧密に伴って変化するが、ここでは初期値で一定と仮定した。要素変形に伴う間隙率と透水係数の変化の考慮については、不飽和地盤の構成則定式化と併せて今後の課題である。本論文では、間隙水の移動を考慮した有効応力解析を「B解析」と称する。

3.2 地盤構成則の適用性

Case-0N と Case-0L の地盤加振結果を用いて、提案した地盤構成則の適用性を確認した。解析に用いた要素分割を図-3に示す。加振方向に

平行な鉛直平面で分割した1/2モデルとし、左右両面の節点同士はせん断土槽を模擬した剛なトラス要素で接合し、等変位となるようにした。

上記2ケースの地表面端部位置における応答加速度の時刻歴(実験での測定位置は土槽枠上端部)を図-4に示す。Case-0Nでは、A・B解析共に、波形の位相は一致した結果が得られている。各振幅のピーク値について、粒子骨格の変形とそれに伴う水の移動が生じる加振序盤(~5.3sec)ではB解析の精度が高い。また、粒子骨格の変形速度が高く、非排水条件に近い状態で振動していると考えられる中盤以降ではA解析の精度が高い。B解析では構成則中で用いる間隙率や透水係数を初期値で一定としているために、特に地表面付近で過剰間隙水圧が上昇せず、ダイレイタンスに伴う加速度増加が現

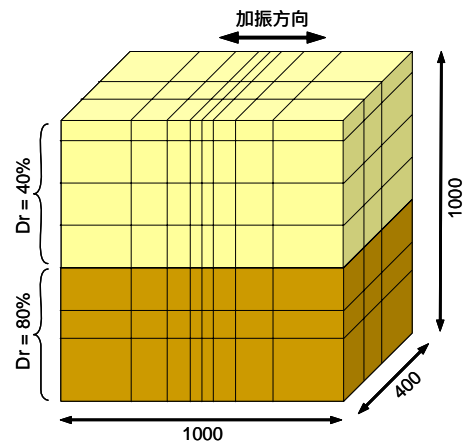


図-3 地盤加振解析モデル (Case-0L)

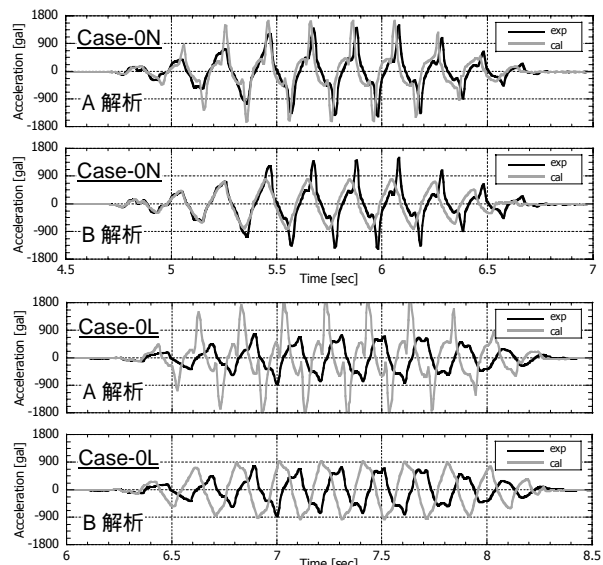


図-4 地表面の応答加速度時刻歴

れないと考えられる。A 解析では逆に序盤からパルス状の加速度応答が生じているが、今回の解析対象は杭剛性が相対的に高く、これが基礎応答に及ぼす影響はそれほど大きくないものと考え、今回設定した密地盤においては、A 解析を用いて応答をある程度再現可能と判断した。

一方、液状化を生じる Case-0L においては、応答の位相が大きく異なる。地表から深さ 350mm 付近の加速度波形は位相差を殆ど生じていなかったことを踏まえると、この原因は以下のように考察される。すなわち、第 1 波で 300gal 程度とやや大きい応答が生じており、この時に粒子骨格は大きく変化したものと考えられるが、解析ではこれを追従しきれておらず、その後の応答算定に影響しているものと考えられる。しかしながら、B 解析では A 解析に比べて、間隙水圧の上昇 間隙水の移動といった一連の現象によって、最大加速度レベルが実験と同程度にまで低減されている。以上の結果から、提案した地盤モデルはまだ改善すべき点を残しているが、マクロには応答値を評価可能と判断し、杭 - 地盤系の解析に適用することとした。

### 3.3 地盤の抵抗力・作用力と杭基礎の変形

3.2 節において精度を確認した地盤構成則を用い、杭基礎を含む実験ケースのシミュレーションを行った。ここで、杭基礎のモデル化に用いる鉄筋コンクリートの構成則は、岡村・前川らによって提案された分散ひび割れモデルに基づく既往の履歴依存型構成則<sup>5),6)</sup>を適用している。本構成則は既に、各種 RC 構造物に対する適用性が確認されているが、構成則の詳細については参考文献に譲る。

液状化を生じない密地盤のケース (Case-1N, 4N, 4N0) の応答性状および杭体に作用する地盤抵抗力・外力と基礎の変形について検討した。実験結果では、Case-4N は基礎応答、Case-4N0 は地盤応答が卓越し、Case-1N では両方が混在して位相ずれを伴う応答性状となる<sup>3)</sup>。解析に用いた要素分割の例を図 - 5 に示す。解析条件は A 解析とし、杭体と地盤との間には、高圧縮剛性

を持ち引張剛性を持たない 2 次元接合要素を設置して、杭体 - 地盤間が剥離した際の引張応力伝達を排除している。ただし、このモデル化では、杭体と地盤との間にできた空間に水が入り込む現象は表せないことに留意が必要である。

試験体錘位置 (Case-4N0 は上スタブ位置) および地表面端部位置での応答変位の時刻歴を図 - 6 に示す。地盤変形が基礎の変形に追従する Case-4N では、応答が精度よく再現されているの

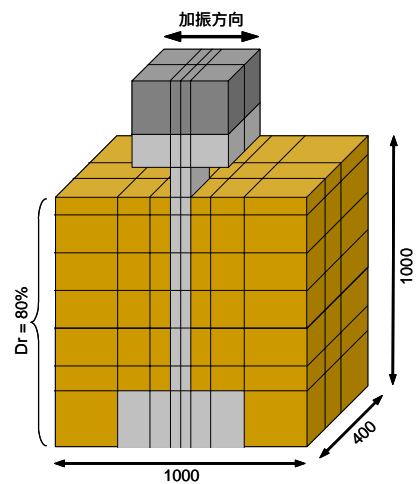


図 - 5 杭の加振解析モデルの例 (Case-1N)

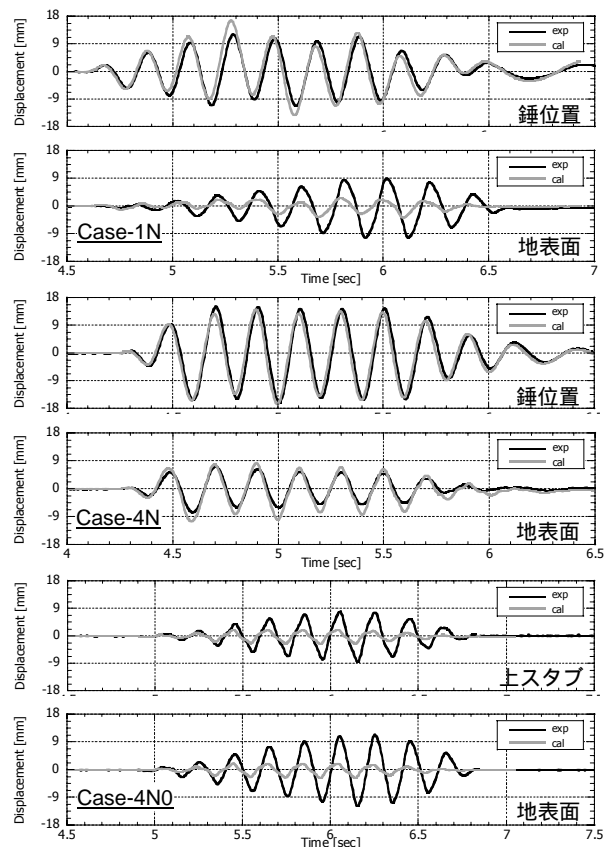


図 - 6 試験体および地表面の応答変位時刻歴

に対し、基礎と地盤が位相ずれを伴って応答する Case-1N では、地盤の応答変位を過小評価、基礎の変形が地盤変形に追随する Case-4N0 では、いずれの応答も過小評価されている。

錘位置応答変位が最大となる瞬間の杭体曲率分布を図 - 7 に示す。各杭体の降伏曲率を図中に太点線で示した。Case-4N では基礎の変形も精度よく再現されているのに対し、Case-4N0 では特に基礎の変形を過小評価している。すなわち、基礎に対する地盤反力は解析によってある程度再現できているが、地盤から基礎に作用する外力が正確に評価されていない可能性が考えられる。したがって、両方の現象が混在する Case-1N における曲率分布は、中程度の推定精度を有している。

Case-4N および Case-4N0 における杭体に作用する土圧の時刻歴を図 - 8 に示す。錘の応答変位方向に対して、前方に位置する杭体の前面における土圧値をプロットしたものである。また、G.L.-150mm における測定結果は、土圧計の容量を上回る土圧が作用したため、20kPa 程度で頭打ちとなっている。Case-4N0 では特に G.L.-300mm における土圧がかなり小さめに評価されており、これが Case-4N0 において応答変位の過小評価に寄与しているものと考えられる。

以上の結果より、基礎に対して地盤が抵抗側となるケースでは実際の現象を比較的よく再現できるが、地盤が加力側となる現象の再現性に更なる検討の余地を残している。

### 3.4 液状化地盤中の杭基礎の応答挙動

次に液状化を生じる緩地盤のケース( Case-1L, 4L ) の応答挙動について検討する。解析においては図 - 5 と同等の FEM モデルを用い、A 解析を実施した。試験体錘位置および地表面端部における応答変位の時刻歴を図 - 9 に示す。

錘位置における応答変位の実験結果と解析結果を比較すると、いずれのケースにおいても精度良く再現されている。また、Case-1L では地盤の応答変位がかなり過小評価されているのに対し、Case-4L では地盤の応答変位は若干の過小評

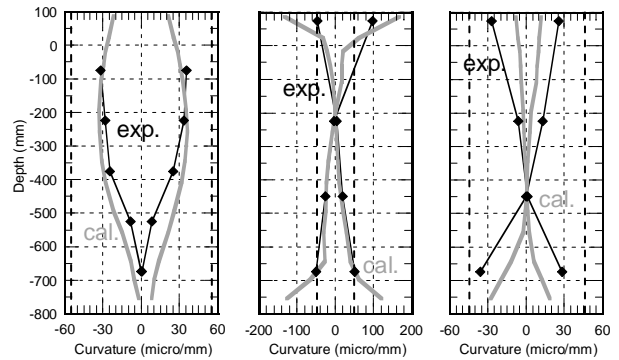


図 - 7 試験体応答変位最大時の杭体曲率分布 (左: Case-1N, 中: Case-4N, 右: Case-4N0)

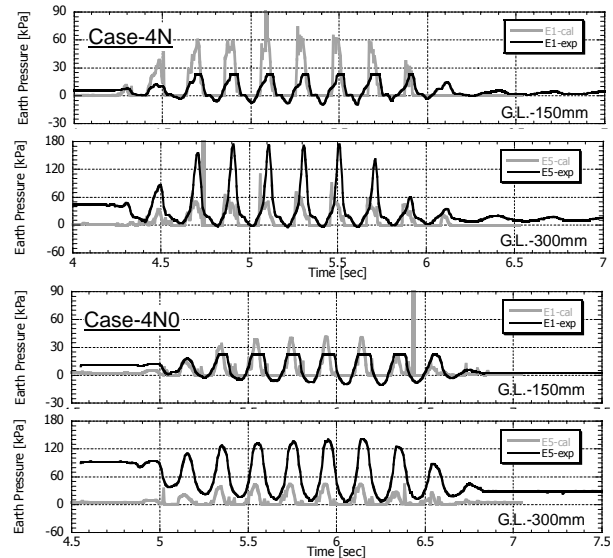


図 - 8 杭体に作用する動土圧の時刻歴

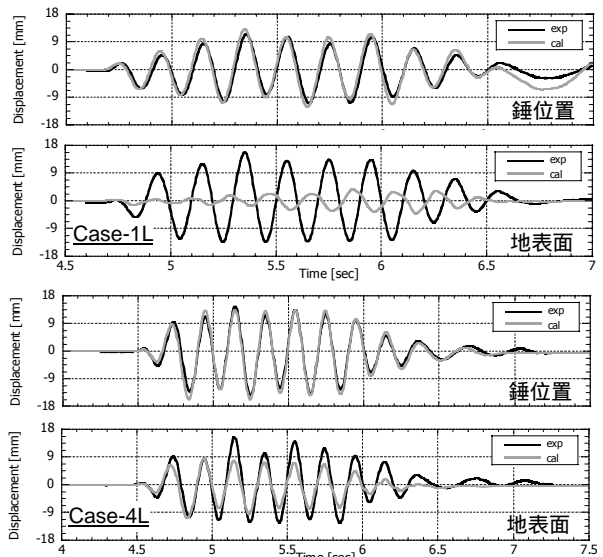


図 - 9 試験体および地表面の応答変位時刻歴

価となっている。図 - 6 に示した Case-1N の錘位置応答変位の結果と併せると、上述の傾向は次のように考察される。

Case-1L の地盤応答変位は実験と解析で位相ずれが生じていることから、全応力解析では地盤剛性を過大評価していると考えられる。また、Case-1N と Case-1L の応答変位レベルがほぼ同程度であることから、1 本杭のケースでは地盤の抵抗力成分と地盤が基礎に及ぼす外力成分とがほぼ相殺されている。したがって、解析における高めの地盤剛性評価が Case-1L の杭応答にはあまり影響しなかったものと考えられる。

一方、4 本杭のケースは基礎主体の応答となるが、上層地盤の液状化に伴い、地盤の抵抗力は殆ど消失する。しかし地盤剛性の低下により、結果として地盤応答変位は大きく現れる。解析では剛性を高めに評価するために、地盤単体としての応答変位は小さくなるが、基礎に対する抵抗力も保持されてしまうために、結果的に実験に近い応答変位レベルが得られたものと考えられる。実際には、液状化に伴う剛性低下と基礎に対する地盤の抵抗力低下の両方が正確に評価されなければならない。

Case-1L に対して B 解析を行った結果を図-10 に示す。間隙水の移動を考慮することによって地盤剛性の低下が再現され、地盤の応答変位レベルが実験結果に近づくと共に、応答の位相も一致することが分かる。

#### 4. まとめ

本研究では、液状化の発生を含む非線形地盤中における杭基礎の応答性状を精度良く評価するための解析手法の開発を念頭に置き、せん断土槽を用いた振動実験による解析精度の検証を行った。間隙水挙動を簡略的に扱った有効応力解析によっても、基礎 - 地盤系のマクロな応答挙動をある程度再現可能であるものの、地盤が加力側となる時の外力や地盤の剛性低下に伴う消失抵抗力などの定量的な評価については、地盤構成則や解析モデルの改良も含め、今後更なる検討の余地を残している。

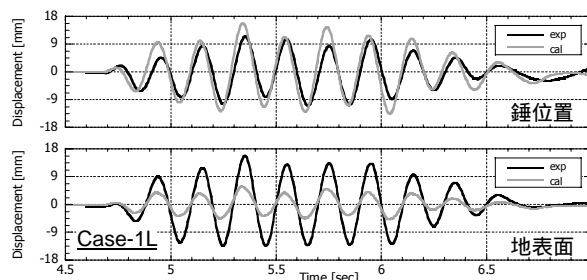


図 - 10 B 解析の結果 (Case-1L)

謝辞：振動実験の遂行に際し、鍋島信幸氏（元埼玉大学卒研究生）、笹谷輝勝氏、岸下崇裕氏、藤倉裕介氏（(株)フジタ）、土屋智史氏（(株)コムスエンジニアリング）にご協力頂きました。また、本研究の一部は科学研究費補助金 S (151068001：代表者 前川宏一) を受けて実施されたものであることを付記する。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・同解説 耐震性能照査編，2002.12
- 2) 例えば 張，濱田：液状化地盤の流動が基礎杭に及ぼす外力特性に関する研究，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.191-201，2004.7
- 3) 鍋島，牧，半井，平野：液状化を生じる地盤における RC 杭基礎の非線形応答に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.1177-1182，2004.7
- 4) 渦岡，仙頭：液状化解析と構成モデル，土と基礎，Vol.52，No.8，pp.22-24，2004.8
- 5) 岡村，前川：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 6) Maekawa, K., Pimmanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
- 7) 牧，前川，半井，平野：液状化を生じる地盤中における RC 杭基礎の非線形応答に関する研究，地盤工学会・液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム発表論文集，pp.285-290，2004.12
- 8) Pande, G. N. and Zienkiewicz, O. C.: Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads, John Wiley & Sons Ltd., pp.1-16, 1982