

論文 3次元大規模モデルによる地盤と構造物の非線形連成 FEM 解析

米澤 健次^{*1}・穴吹 拓也^{*2}・樋口 俊一^{*3}

要旨: 近年, 計算機の性能が飛躍的に向上し, 地盤や構造物を詳細に再現した 3次元大規模モデルによる非線形 FEM 解析のニーズが高まっている。そこで, 筆者らは地盤と構造物の非線形連成挙動を良好な精度で再現できる FEM 解析ソフトの大規模化・高速化を図った¹⁾。ここでは, その解析精度の妥当性を検証するために, 乾燥砂地盤中に埋め込んだ杭基礎の 1/25 縮尺模型による遠心力振動台実験とその実験を対象とした 3次元非線形連成 FEM 解析を行った。解析と実験の比較により, 解析が実験の挙動を良好な精度で再現できることを確認し, 地盤と構造物の非線形連成挙動に対する大規模モデルによる FEM 解析手法の妥当性を検証した。
キーワード: 遠心力振動台実験, 杭基礎, 地盤連成解析, 非線形 FEM 解析

1. はじめに

地中構造物や基礎構造物の耐震性能を評価するためには構造物～地盤連成系での非線形応答特性を把握する必要がある。また, 近年の設計用入力地震動レベルの増大に伴い, 構造物の多少の損傷は許容して部材変形を耐震性能評価の指標とする流れが見られるようになり, 有限要素法 (FEM) を用いた構造物～地盤連成系の解析が設計の有力なツールとして期待されている。これら構造物と地盤の連成系の解析では, 地盤をばねに置き換えて解析するか, あるいは, 地盤と構造物を平面ひずみ要素でモデル化した 2次元解析が主流である。しかし, 構造物及び地盤の非線形領域までを対象とした動的挙動については未解明な部分が多く, さらに, 2次元解析等では 3次元的な形状の構造物を 2次元に置き換えてモデル化するため, 様々な仮定が必要になり, 的確に実現象を再現できているとは言い難い。

このよう背景の中, 近年のコンピューター技術の発達に伴い, 実物の形状を忠実に再現できる 3次元要素による大規模解析が注目されている。しかし, 現在, 3次元要素を用いた大規模解析例も発表されつつあるが, 弾性解析に留まるものが殆どで, 非線形解析の例は少なく,

その解析精度を実験結果との比較により検証した例は少ないのが現状である。また, 構造物と地盤を 3次元要素により詳細にモデル化した大規模解析を実現するためには, 膨大な記憶容量と計算の高速化が必要になるため, 解析ソフトもそれに対応すべく改良が必要になる。

そこで, 筆者らは地盤と構造物の非線形連成挙動を良好な精度で再現できる FEM 解析ソフトの大規模化・高速化を図った (以下, FINAL-GEO¹⁾と称す)。

ここでは, 乾燥砂地盤中に埋め込んだ杭基礎の 1/25 縮尺模型による遠心力振動台実験とその実験を対象とした 3次元非線形連成 FEM 解析を行い, 解析と実験の比較により, 地盤と構造物の非線形連成挙動に対する 3次元大規模 FEM 解析の妥当性を検証した。

2. 遠心力模型振動実験

2.1 実験概要

本遠心力模型振動実験は, RC 造杭基礎の非線形域までの応答性状を把握するとともに, 構造物および地盤の材料非線形性を考慮した連成系解析手法の検証用データを得るために実施した。図-1 及び写真-1 に土槽, 地盤及び試験体の設置状況を示す。実験では, せん断土槽を

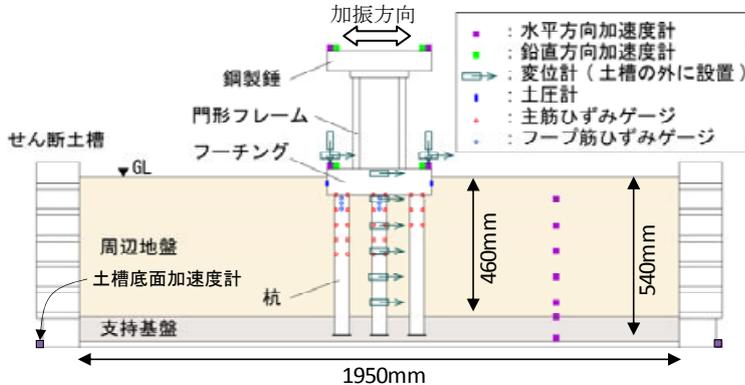


図-1 試験体設置状況及び計測位置

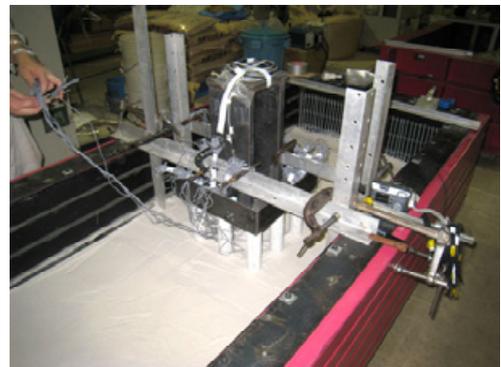


写真-1 試験体設置状況

*1 株式会社 大林組 技術研究所 博士 (工学) (正会員)
 *2 株式会社 大林組 技術研究所 修士 (工学) (正会員)
 *3 株式会社 大林組 技術研究所 博士 (工学) (非会員)

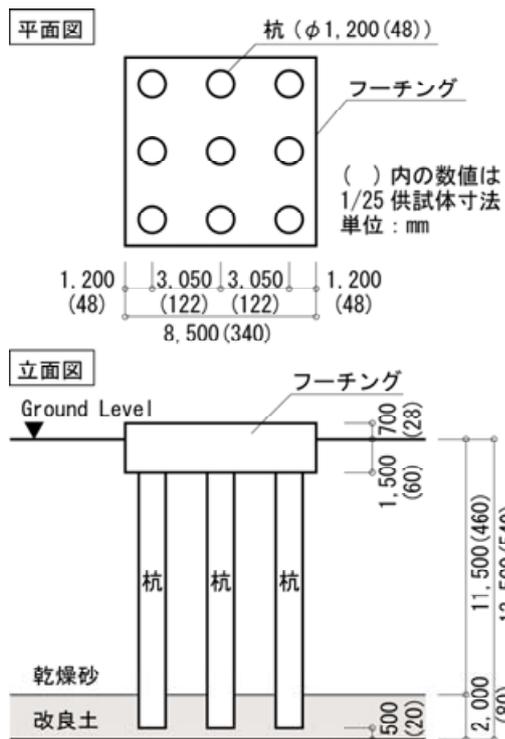


図-2 杭基礎の詳細

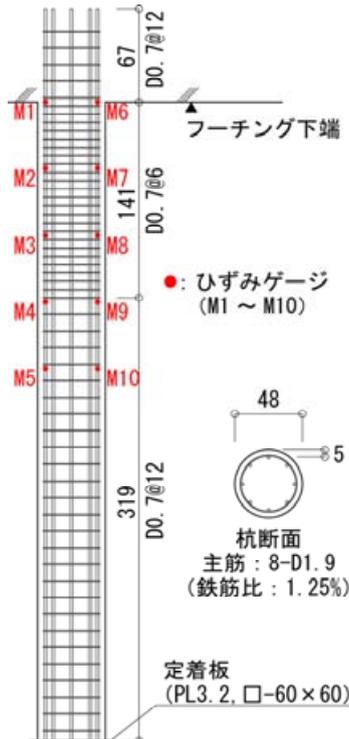


図-3 杭の配筋

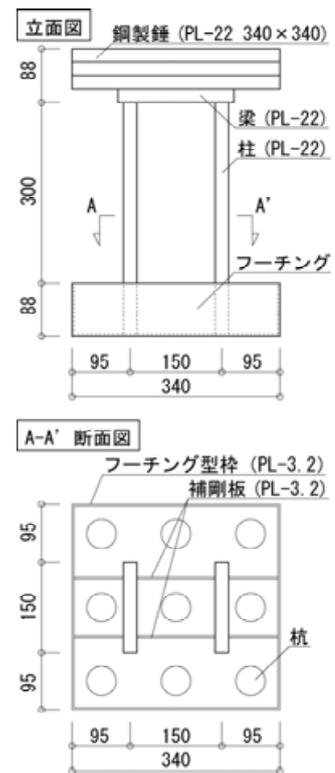


図-4 上部構造物とフーチングの詳細

用い、基礎杭模型の縮尺は 1/25 として、自重方向に 25G の遠心力を作用させた状態で水平 1 方向加振を実施した。

2.2 杭基礎および上部構造物

杭基礎は同断面の 9 本の杭とフーチングからなる。図-2 に杭基礎の詳細を示す。杭は直径 48mm (実大 1.2m 相当) の RC 造で、主筋は 8-D1.9、せん断補強筋は杭頭部において D0.7@6、一般部において D0.7@12 とした。図-3 に杭の配筋を示す。鉄筋は縮尺鉄筋を使用した。縮尺鉄筋は一般に使用される異形鉄筋と同様に節を有している。縮尺鉄筋の材料特性を表-1 に、コンクリート等の材料特性を表-2 に示す。コンクリートは表-3 に示す配合のマイクロコンクリートであり、粗骨材と細骨材は縮尺率 1/25 を目標に骨材の粒度調整を行った。

フーチングは杭に対して十分剛となるように鋼製の型枠にグラウトを充填して作成した。型枠は図-4 に示す形状で、外周、底板および補剛用の仕切り板をそれぞれ 3.2mm の鋼板で作成した。底板の杭位置に孔を設け、杭主筋を折曲げずに杭頭部をフーチング内に通し、型枠にグラウトを充填して杭とフーチングを一体化した。

上部構造物は、図-4 に示すように、厚さ 22mm の鋼板を用いた門形フレームに鋼製錘を接続したものとした。フレーム脚部はフーチング型枠の底板まで伸ばして溶接し、脚部で剛接合とした。

2.3 地盤

支持地盤は砂 7 号、セメント及び水を混合したセメント改良土基盤とし、せん断波速度 300~400m/s 程度

表-1 縮尺異形鉄筋の材料特性

| 部位 | 径 [mm] | ヤング係数 [N/mm ²] | 降伏強度 [N/mm ²] |
|--------|-----------|-------------------------------|------------------------------|
| せん断補強筋 | 0.7 | 216000 | 415 |
| 主筋 | 1.9 | 185000 | 314 |

表-2 コンクリート、グラウト及びモルタルの材料

| 部位 | 密度 [t/m ³] | ヤング係数 [N/mm ²] | 圧縮強度 [N/mm ²] |
|-------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 杭 | 2.21 | 29200 | 35.0 |
| フーチング | 2.14 | 24600 | 50.7 |
| 支持地盤 | 1.92 | 516 | 2.58 |

表-3 コンクリートの配合

| W/C (%) | s/a (%) | フロー (mm) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | 配合比 (%) | |
|---------|---------|----------|---------|--------------------------|-----|-----|------|---------|------|
| | | | | W | C | S | G | 減水剤 | 増粘剤 |
| 93 | 43 | 300 | 6.0 | 195 | 210 | 767 | 1036 | 3.0 | 0.02 |

・セメント(C)は普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)とした。
 ・細骨材(S)は飯豊産ケイ砂(7号)、稲田産ケイ砂(8号)、石灰石微粉末(特級)を重量比混合割合=1:3:6で混合したものとした。(混合表乾密度2.57 g/cm³)
 ・粗骨材: 飯豊産ケイ砂(4号)、(5号)、(6号)を重量比混合割合=1:7:2で混合したものとした。(混合表乾密度2.62 g/cm³)
 ・混和剤の配合比はセメント+石灰石粉末の単位量に対する比を表す。

表-4 周辺地盤の特性

| バンダーエレメント | | 周辺地盤特性 | | |
|-----------|------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|
| No. | 位置 (mm) | せん断波速度 (m/s) | せん断弾性係数 (N/mm ²) | 有効拘束圧 (N/mm ²) |
| 1 | GL-72.5 | 133 | 25.6 | 26.1 |
| 2 | GL-157.5 | | | |
| 3 | GL-327.5 | 163 | 38.7 | 92.4 |
| 4 | GL-460 | | | |

表-5 加振ケース（入力加速度）

| ケースNo. | 振動台上の最大加速度 | 備考 |
|--------|-----------------------|-----------|
| | (m/s ²) | |
| d1 | 294 (実大12gal相当) | 微小加振 |
| d2 | 284 (実大11gal相当) | 微小加振 |
| d3 | 9,168 (実大367gal相当) | |
| d4 | 11,970 (実大479gal相当) | |
| d5 | 18,511 (実大740gal相当) | 主筋降伏ひずみ発生 |
| d6 | 26,255 (実大1,050gal相当) | |

基盤層を想定した。支持地盤への杭の埋込み深さは60mmとし、杭の先端には引抜き防止のための定着板(PL-3.2, □-60×60)を設けた。

周辺地盤は砂砂7号を空中落下法で撒出して、相対密度(Dr)を84%, 乾燥密度(γd)を1.45 t/m³とした。遠心振動実験前に実施した遠心加速度25Gにおけるベンダーエレメント⁷⁾によるせん断波速度計測から得た地盤特性を表-4に示す。

2.4 加振条件

自重として25G(実物1G相当)の遠心力を作用させながら、水平1方向に図-5に示す兵庫県南部地震ポートアイランド波形を用いた6ケース(表-5)の加振を実施した(d1~d6の順に加振)。

2.5 計測及び実験結果概要

本実験においては、振動台上の加速度、地盤内部の加速度、フーチング天端の加速度、鋼製錘天端の加速度、せん断土槽の各層変位、フーチング天端の変位、フーチング側面の土圧、杭頭部近傍の主筋及びフープ筋のひずみを計測した。計測器の配置を図-1に併記した。

実大740gal相当の加振d5において、杭主筋が降伏し、構造物と地盤ともに非線形領域に達していることを確認した。実験終了後の杭の損傷状況は、曲げひび割れは多数観察されたが、せん断ひび割れは生じていなかった(図-12参照)。

3. 3次元大規模モデルによる連成非線形FEM解析

3.1 解析ソフト¹⁾

解析の規模や計算速度は、計算機の性能だけでなく、主に連立方程式の解法に依存する。連立方程式の解法としては、スカイライン法など、ガウスの消去法に代表される直接法や共役勾配法に代表される反復法が挙げられる。直接法では、解が一義的に定まる利点があるが、大規模な解析モデルになると膨大な記憶容量が必要となるため、計算機の性能が向上しても解析モデルの規模が制限される場合があった。一方、反復法は、解を求めるのに収束計算が必要であるが、行列を記憶するための容量が少なく抑えられるため、大規模な連立方程式の解法を

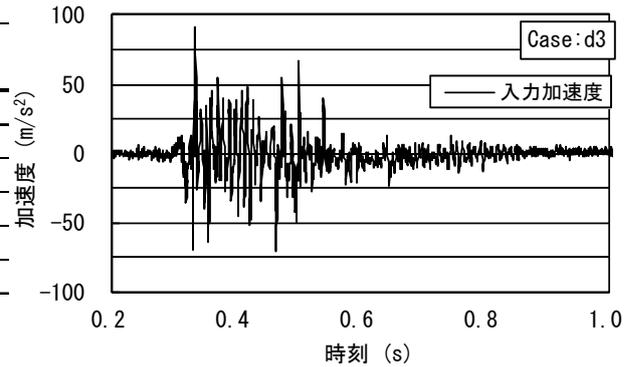


図-5 入力加速度波形

可能にする。そこで、反復法の共役勾配法に基づいた解法を採用した大規模高速化FEMソフト「FINAL-GEO」を開発し、コンクリートに対しては「FINAL」²⁾の材料構成則を、地盤に対しては一般的に用いられる非線形構成則を導入した。

3.2 モデル化手法

図-6に解析モデルを示す。形状、荷重条件の対称性を用いて、試験体の半分をモデル化した。コンクリート及び地盤には六面体要素を、杭基礎の主筋及びせん断補強筋はトラス要素を用い、フーチングの鋼製型枠は四辺形シェル要素を用いて表現した。なお、コンクリートと鉄筋は共有節点として定義し、両者の相対滑りは考慮せず、地盤とフーチング及び杭躯体の界面は、せん断方向の剛性はゼロとし、法線方向の剛性を無限大とした接合要素を配し、地盤と躯体間のすべりを考慮した。

なお、解析モデルの総節点数は約17万、総自由度数は約48万である。

3.3 境界条件及び時間増分

境界条件としては、モデル底面を完全固定とし、せん断土槽のモデル化として、地盤両側面におけるそれぞれの節点の水平変位(図-6のx方向変位)が同じになるように従属条件を与えた。解析の時間増分は、5/10000秒として、合計継続時間2.6秒の解析を行った(総解析ステップ数:5200)。なお、材料非線形における求解法には接線剛性法を用いた。

3.4 解析対象加振ケース

解析対象とした加振ケースは、実験において杭主筋の降伏が観測された加振ケースd5の前後d4~d6の3加振として、連続解析を行った。解析における入力は、実験においてせん断土層底面で測定した加速度を用いた。

3.5 材料構成則

杭のコンクリート及びフーチングのグラウトの主応力~等価一軸ひずみ関係としては、圧縮側の上昇域は修正Ahmadモデル³⁾、軟化域は中村モデル⁵⁾を用い、引張側はひび割れまでを線形とし、ひび割れ後は引張軟化を仮定した。繰返し荷重時の履歴特性は長沼らのモデル⁶⁾

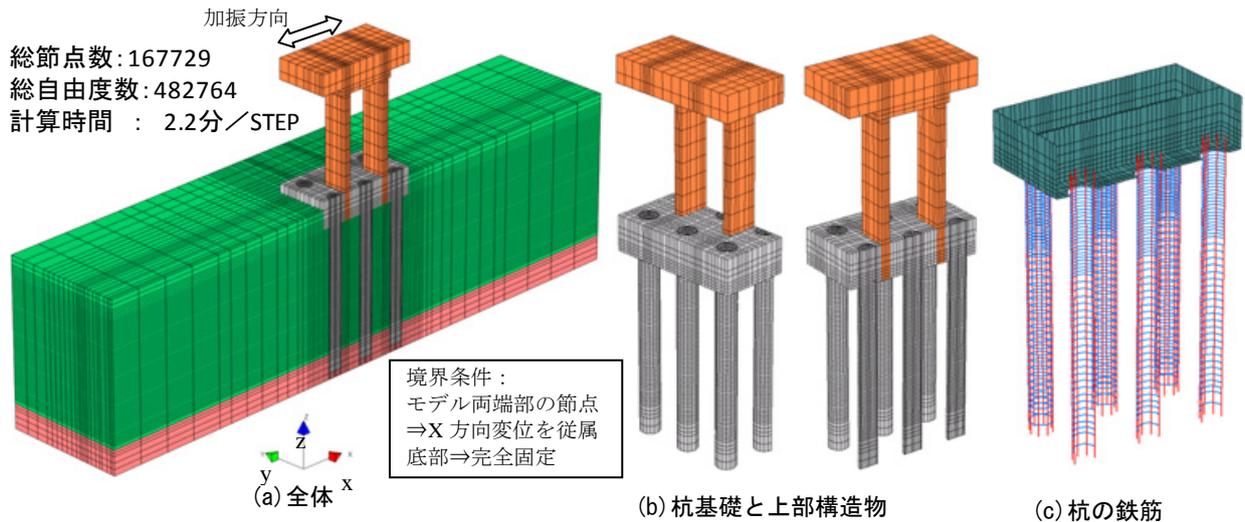


図-6 解析モデル

により表した(図-7参照)。鉄筋の応力～ひずみ関係は降伏点を折れ点とする完全弾塑性モデルとした。

周辺地盤のせん断応力～せん断ひずみ関係は修正 Ramberg-Osgoodモデルで表し、繰返し载荷時の履歴特性はMasing則に従うものとした。ここで、基準ひずみ(γ_i : 剛性が初期せん断弾性係数(G_0)の1/2になる時のひずみ)は1000 μ 、最大減衰定数(h)は21.6%を仮定した。なお、土の初期せん断弾性係数は拘束圧に依存するものとし、地表面より深い位置にある要素ほどせん断剛性が大きくなるものとして、(1)式により算定した。

$$G_0 = G_{0m} \times \left(\frac{\sigma_c'}{\sigma_{cm}'} \right)^{0.325} \quad (1)$$

ここで、 σ_c' は各要素深さにおける有効拘束圧、 G_{0m} 及び σ_{cm}' はベンダーエレメント No.1, No.2 によるせん断波速度の計測結果から求めたせん断弾性係数及びその位置における有効拘束圧(表-4 参照)である。非線形性を考慮する材料の応力～ひずみ関係を図-8 に示す。支持地盤、鋼製の上部構造物は弾性を仮定した。

4. 解析結果

4.1 計算速度

計算機には、Microsoft Windows Server 2003 R2 x64 Standard Edition SP2 (Intel(R) Xeon CPU X5670 @2.93GHz, 31.9GB RAM)を用い、1STEPを約2.2分程度の速度で計算できた。

4.2 解析結果と実験結果の比較

加振3ケース(d4～d6)のフーチング上端中央の応答水平変位の時刻歴について実験と解析の比較を図-9に示す。また、図-10及び図-11にはd5加振におけるフーチングの最大変位時におけるモデル全体の変形状況及び杭基礎のひび割れ状況を示す。

フーチング応答水平変位の時刻歴に関しては、加振d6

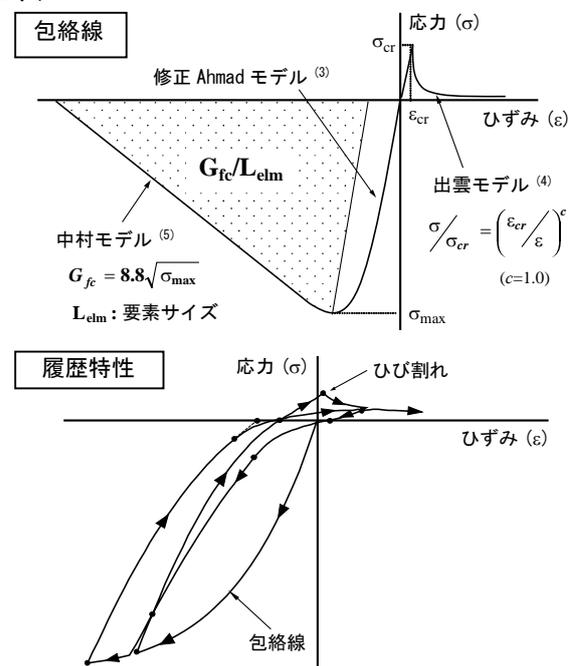


図-7 コンクリートの主応力～等価一軸ひずみ関係

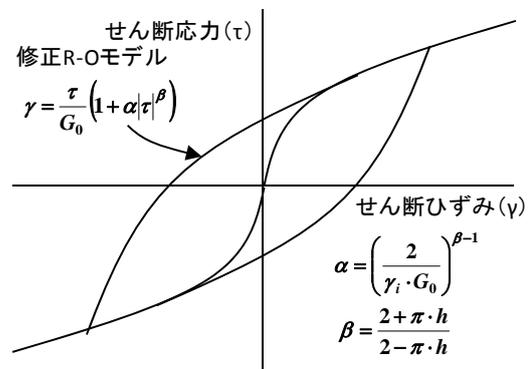


図-8 周辺地盤の $\tau \sim \gamma$ モデル

においては、解析の応答変位は実験に比べて若干小さめであるが、加振d4とd5における波形、応答値は実験と解析は良好な対応を示し、解析は実験における杭基礎の非線形挙動を良好に再現していることがわかる。図-12

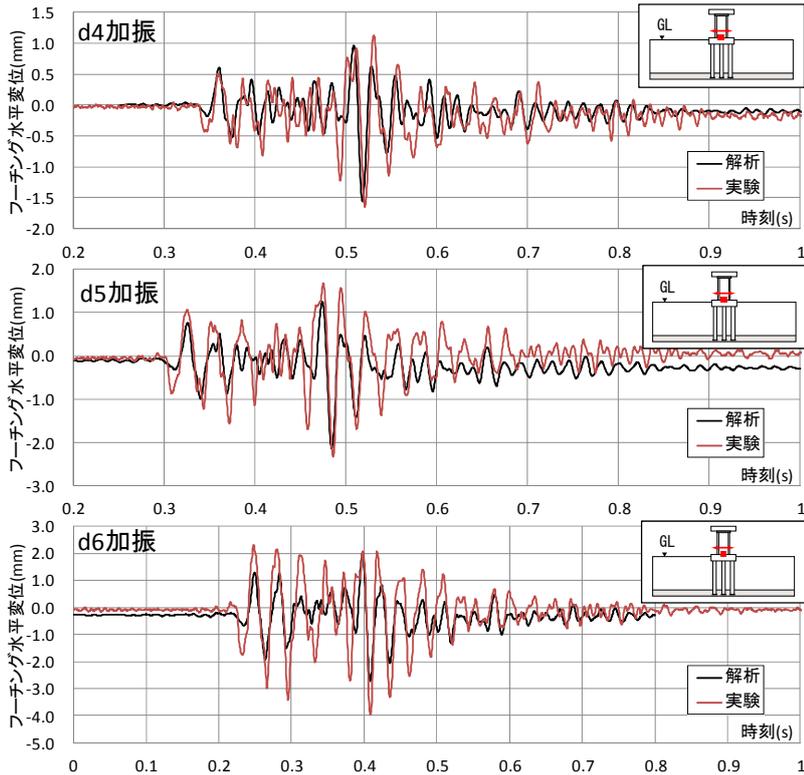


図-9 フーチング上端中央の応答水平変位の時刻歴の比較（加振 d4～d6）

に実験における杭の最終ひび割れ状況を示す。解析においては要素内の平均ひずみとして表わす分布ひび割れモデルを採用しており、かつ、図-11と図-12は同時期のひび割れ状況を示していないため（解析：最大応答時、実験：実験終了時）、ひび割れ本数やひび割れ間隔などを直接的に比較することはできないが、解析と実験のひび割れ状況から、両者ともに杭頭部、杭端部及び中腹部に曲げひび割れが生じ、せん断による斜めひび割れは生じておらず、同様の傾向を示していることが確認できる。

d6加振における実験と解析の比較として、せん断土槽上端の応答水平変位の時刻歴を図-13に、上部構造物天端の応答加速度の時刻歴を図-14に示す。せん断土槽の応答水平変位及び上部構造物天端の応答加速度の比較に関しては、解析と実験で若干の差異は見られるが、波形の形状や最大応答値は概ね良好な対応を示している。

図-15に解析と実験の杭頭部主筋ひずみの時刻歴を比較して示す。実験における鉄筋ひずみの測定は、鉄筋に貼付したひずみゲージにより測定している。そのひずみゲージの位置をひび割れが横切るか否かで、鉄筋ひずみの値は大きくことなるため、要素の平均ひずみとして扱う解析との直接的な比較は難しいが、図より、ひずみが大きくなる周期が若干異なるものの、最大応答値等は概ね一致しており、定性的な傾向が再現できていることがわかる。

d5加振におけるフーチングの最大変位時における杭

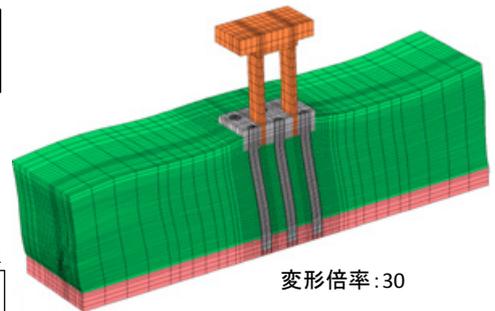


図-10 変形状況（加振 d5 最大応答時）



図-11 ひび割れ状況（加振 d5 最大応答時）

基礎コンクリート部の最小主応力コンターを図-16に示す。杭頭部及び杭端部の応力が最も大きく、それらの部位が最も大きな損傷を受けたことがわかる。

加振 d4～d6におけるフーチング応答水平変位と応答加速度、土槽水平変位、及び、上部構造物天端の応答加速度について、解析と実験の最大応答値の比較を表-6に示す。

フーチングの水平変位に関しては、d4及びd5における対応性が良好であるが、フーチングの加速度、土槽の水平変位及び上部構造物の加速度に関しては、d4、d5、d6の順に入力が大きくなるに従い、実験と解析の対応性が良くなる傾向を示している。この理由としては、実験ではd4加振の前に、d1～d3の加振を行っており、その加振で周辺地盤の非線形化が若干表れたことが推察され、それらの影響を解析で考慮していないことが挙げられる。

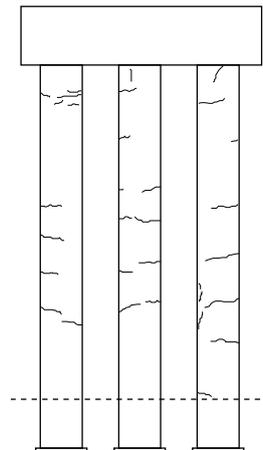


図-12 最終ひび割れ状況（実験）

5. まとめ

非線形化領域における地盤とRC構造物の連成作用に着目した1/25縮尺模型のRC杭基礎を用いた遠心力振動台実験と解析を行い、それらの結果を比較することで、

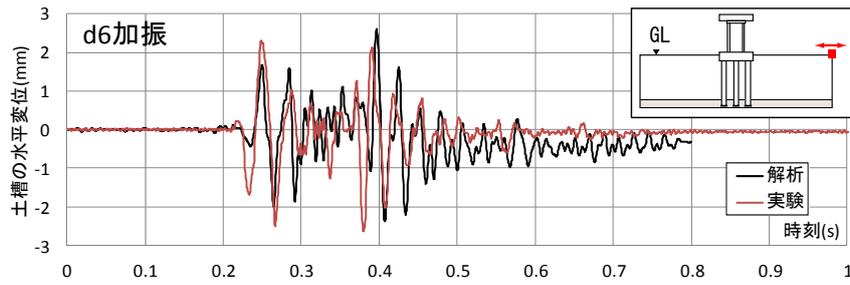


図-13 土槽上端の応答水平変位の時刻歴の比較 (加振 d6)

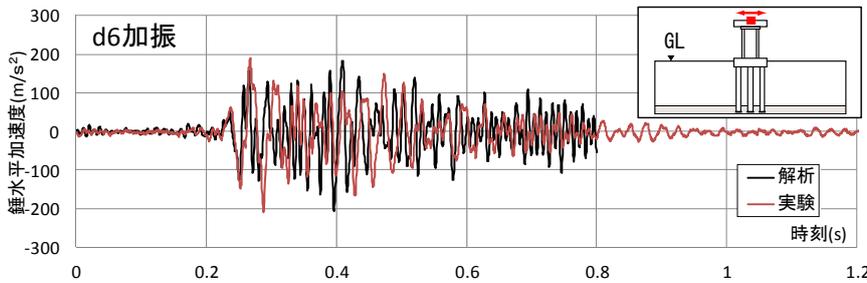


図-14 上部構造物の応答加速度の時刻歴の比較 (加振 d6)

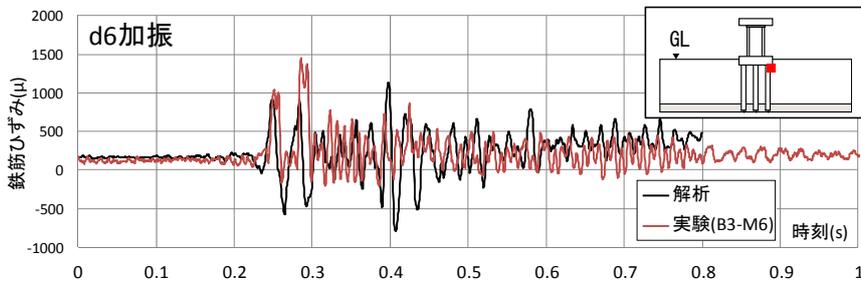


図-15 杭頭主筋ひずみの時刻歴の比較 (加振 d6)

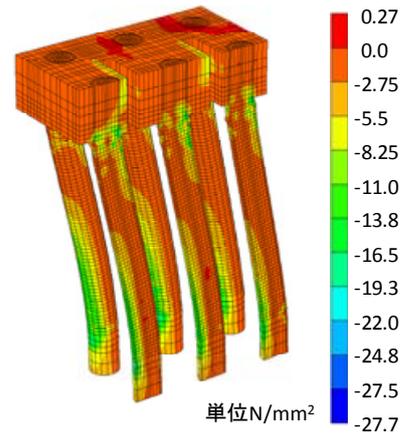


図-16 最小主応力コンター

表-6 最大応答値の比較

| | | 加振ケース | | |
|----------------------------------|-----|-------|-------|-------|
| | | d4 | d5 | d6 |
| フーチング 水平変位 mm | 実験 | -1.65 | -2.33 | -3.98 |
| | 解析 | -1.56 | -2.13 | -2.70 |
| | 解/実 | 0.95 | 0.91 | 0.68 |
| フーチング 加速度 m/s ² | 実験 | -95 | -150 | -158 |
| | 解析 | 133 | 152 | -155 |
| | 解/実 | 1.40 | 1.01 | 0.98 |
| 土槽変位 mm | 実験 | -0.93 | 1.58 | -2.63 |
| | 解析 | -1.31 | 1.73 | 2.58 |
| | 解/実 | 1.41 | 1.09 | 0.98 |
| 上部構造 加速度 m/s ² | 実験 | -118 | -143 | -209 |
| | 解析 | -185 | -209 | -206 |
| | 解/実 | 1.57 | 1.47 | 0.99 |

大規模モデルによる FEM 解析の精度を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 地盤に埋め込まれた杭基礎の非線形挙動に対する検証として、実験と解析のフーチングの応答水平変位を比較した。その結果、最も入力が大きな d6 加振に関しては、解析の応答値は実験に比べ小さめであったが、d4, d5 加振においては、解析と実験は良好な対応を示した。
- (2) 土槽の変位、上部構造物の加速度に関しては、加振レベルが大きくなるに従い、解析と実験の対応性が向上し、d6 加振の最大応答値は概ね一致した。
- (3) 杭主筋ひずみ及び杭のひび割れ状況に関して、解析は実験の定性的な傾向を再現できた。

以上より、改良の余地は残すものの、ここで仮定した解析手法により、非線形領域における地盤と RC 構造物の連成作用が概ね良好な精度で再現できることを確認した。

参考文献

- 1) 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻譲嗣: 大規模・高速化非線形 FEM 解析ソフト「FINAL-GEO」, 大林組技術

研究所報, No.75, 2011.12, CD-ROM

- 2) Naganuma, K., et al. : Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three Dimensional Finite Element Method, 13th WCEE, Vancouver, B.C., Canada, Paper No.586, Aug. 2004
- 3) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1955
- 4) 出雲淳一, 他: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 5) Nakamura H, Higai T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 6) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.135-142, 2000
- 7) 佐藤清: ベンダーエレメントを用いた遠心重力場での地盤の S 波速度・P 波速度の測定, 第 57 回土木学会年次学術講演会概要集 (CD-ROM), 2002.