

3次元大自由度モデルによる地盤—構造物連成系の地震応答 F E M解析

米澤 健次 穴吹 拓也 樋口 俊一
伊藤 浩二 堤内 隆広 江尻 讓嗣

**Nonlinear Seismic Response Analysis of Soil-Structure System
using Precise 3D Finite Element Model**

Kenji Yonezawa Takuya Anabuki Shunichi Higuchi
Koji Ito Takahiro Tsutsumiuchi Joji Ejiri

Abstract

There has been a recent demand for nonlinear finite element analysis using large-scale models that represent both the ground and the structure. Therefore authors have developed large-scale and high-speed calculation FEM analysis software that can reproduce the nonlinear behavior of the ground and the structure in consideration of the soil-structure interaction during an earthquake. Centrifuge shaking table tests with 1/25-scale models of an RC pile foundation and RC culvert installed in the ground were also conducted to obtain fundamental data to verify the analysis accuracy. In this study, finite element analyses using precise 3D models were conducted for two cases of the centrifuge shaking table tests. The results confirmed that the nonlinear responses of both the ground and the structures were reasonably reproduced by the analyses.

概 要

近年、3次元要素を用いて地盤や構造物の形状を細部にわたり忠実に再現した詳細なモデルによる非線形地震応答 F E M解析のニーズが高まっている。そこで、筆者らは地震時における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 F E M解析プログラムの大自由度化・高速化を図り¹⁾、さらに、その解析精度の検証用データを取得するために、乾燥砂地盤中に埋め込んだ杭基礎及び地下カルバートの1/25縮尺模型による遠心力振動台実験を行った。ここでは、それらの実験を対象とした3次元大自由度モデルによる地盤—構造物連成系の非線形地震応答解析を行った。その結果、解析は実験の挙動を良好な精度で再現できることが確認でき、地盤と構造物の非線形連成挙動に対する大自由度モデルによる F E M解析手法の適用性を検証した。

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地盤—構造物連成系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、構造物の損傷は許容して部材変形を耐震性能評価の指標とすることが合理的な設計につながり、地盤と構造物全体を解析できる有限要素法(F E M)が設計の有力なツールとして期待されている。これまで地盤—構造物連成系の解析では、地盤をばねに置き換えて解析する、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次元解析が主に用いられてきた。しかし、地盤及び構造物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、さらには、2次元解析では3次元の形状の構造物を2次元に置き換えてモデル化するため、その解析結果を評価する際には、安全率を大きく見込まざるを得ない場合がある。

一方、近年のコンピューター性能の向上に伴い、実物の形状を忠実に再現できる3次元要素による大自由度解析が注目されている。しかし、現在、3次元要素を用いた

大自由度の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、地盤と構造物を3次元要素により詳細にモデル化した大自由度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、解析プログラム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 F E M解析プログラムの大自由度モデルへの対応と高速化を図った(以下、FINAL-GEO¹⁾)。

ここでは、乾燥砂地盤中に埋め込んだRC造杭基礎及びRC造地下カルバートの1/25縮尺模型による遠心力振動台実験^{2) 3)}を対象とした3次元非線形地震応答解析を行い、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次元大自由度 F E M解析の妥当性を検証した。

2. 検証対象の遠心力模型振動実験**2.1 実験概要**

実験は、杭基礎及び地中構造物を対象として2ケース実

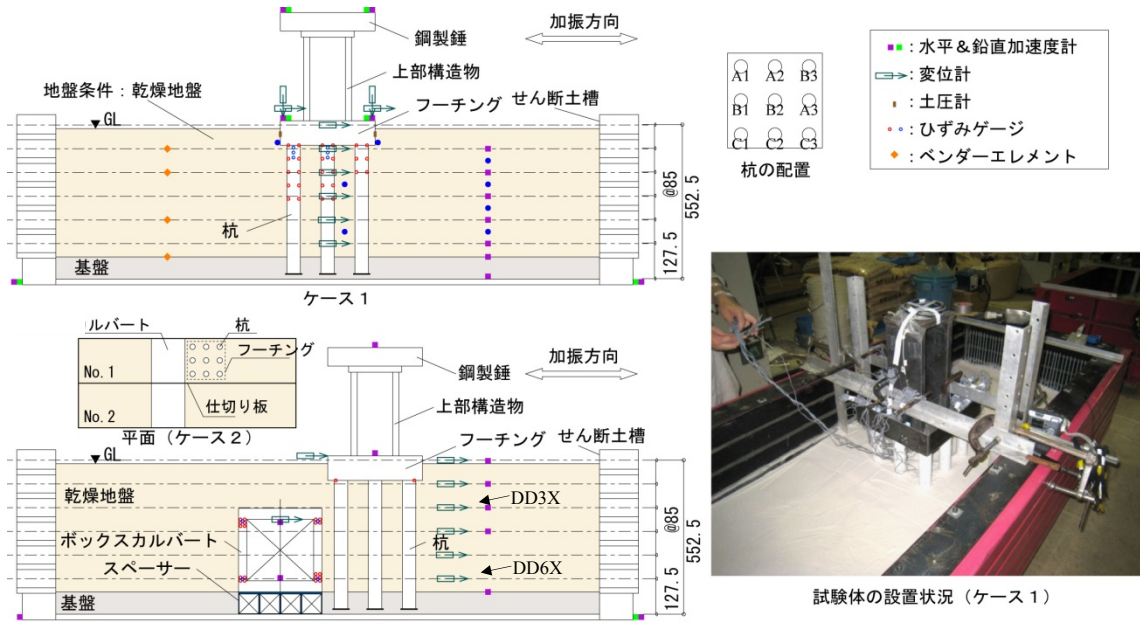


Fig. 1 試験体及び計測位置の概要
Profiles of Specimen and Instrumentation Plans

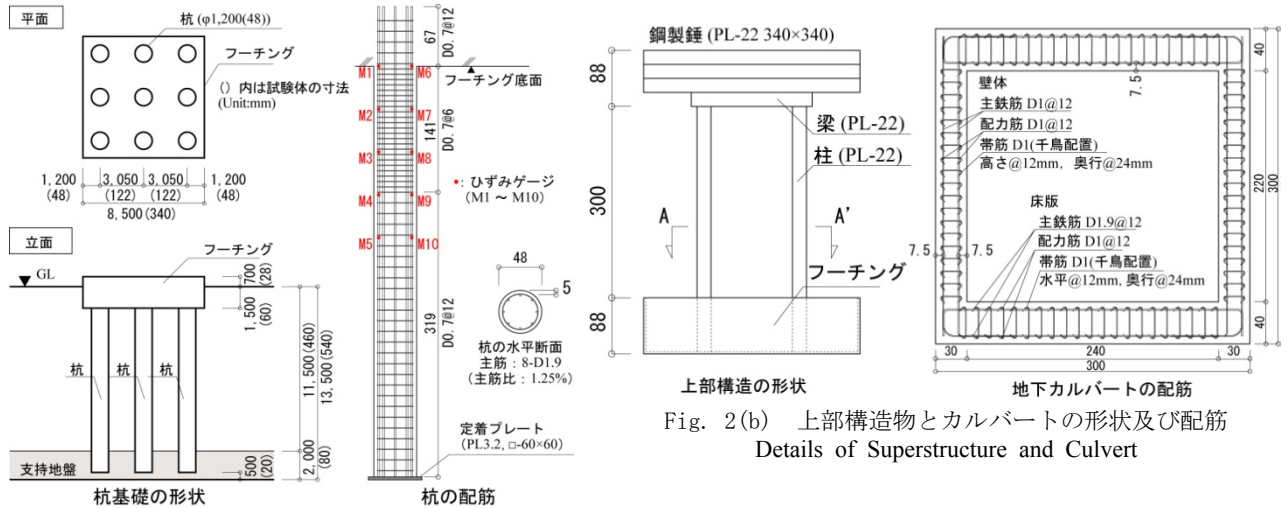


Fig. 2(a) 杭基礎の形状及び配筋
Configuration and Rebar Arrangements of Pile Foundation

施した。杭基礎は道路橋示方書の設計計算例を参考に、平面形状が8.5m×8.5mのフーチングに直径1.2mのRC造杭を9本配置した支持杭基礎を想定した。地中構造物としては、外寸7.5m×7.5m、壁厚0.75m、頂版及び底版厚さ1.0mの地下カルバートを想定した。試験体は1/25縮小模型とし、土槽内の乾燥地盤中に埋込み、ケース1では杭基礎単体の非線形挙動に対する基礎データを得ることを目的とし、ケース2では地下カルバートを対象として、非線形領域の基礎データを得るとともに、地下構造物の非線形挙動に対する隣接構造物の影響を把握することを目的とした。Fig.1に両ケースの試験体形状、寸法及び試験体設置状況を示す。ケース1では、土槽中央に杭基礎を設置し、ケース2では土槽内を2分割にし、一方には地下カルバート単体を設置し、他方には杭基礎を地下カルバートに隣接させ、直接、両者を比較することで隣接構造物による影響を明らかにする。これらの実験では、せん断土

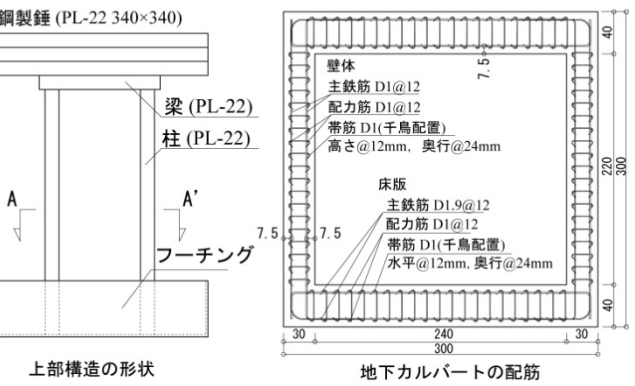


Fig. 2(b) 上部構造物とカルバートの形状及び配筋
Details of Superstructure and Culvert

槽を用い、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。なお、ケース2において近接させる杭基礎は、飽和地盤中の支持杭を模擬した既往の杭基礎遠心実験⁴⁾で使用した試験体を用いた。

2.2 試験体概要

試験体の詳細寸法及び配筋をFig.2(a)(b)に示す。

杭基礎は同断面の9本の杭とフーチングからなる。杭は直径48mm(実大1.2m相当)のRC造で、杭とフーチングは剛接合として一体化している。

上部構造物は厚さ22mmの鋼板を用いた門形フレームに鋼製錘(65kg)を接続したものとした。

Fig.2(b)にRC造地下カルバート(以下、カルバートと称す)模型の断面寸法及び配筋を示す。断面寸法は、実大の1/25縮尺として外寸300mm×300mm、内寸240mm×220mm、壁厚を30mmとした。

両試験体ともに、コンクリートは粗骨材と細骨材は縮尺率1/25を目標に骨材の粒度調整したマイクロコンクリートを使用し、鉄筋には異形鉄筋と同様に節を有してい

縮尺鉄筋を用いた。支持地盤は珪砂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て、表層地盤は7号珪砂を用いた乾燥砂地盤とした。

マイクロコンクリート、縮尺鉄筋及び地盤の材料特性等の詳細は文献^{2) 3)}を参照されたい。

2.3 加振条件

両ケースともに自重として25Gの遠心力を作用させながら、水平1方向に兵庫県南部地震ポートアイランド波形を用いた加振を実施した。加振は地震波による微小加振から開始し、No.1からNo.6まで徐々に入力レベルを漸増させた。Table 1に各加振の振動台上の最大応答加速度を示す。なお、以降の結果は、縮尺模型の力学量で示す。

2.4 実験結果の概要

2.4.1 ケース1の実験結果 加振No.6のフーチング上部中央の応答変位の時刻歴をFig.3に示す。ケース1においては、加振No.5では杭主筋の降伏が確認でき、加振No.6では地盤および構造物ともに非線形領域に達していた。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(Fig.12参照)。

2.4.2 ケース2の実験結果 ここでは、カルバートの応答性状に着目して考察する。加振No.5で壁主筋が降伏し、地盤及び構造物ともに非線形領域に達していた。Fig.4に加振No.3及び加振No.6におけるカルバートの層間変形角の時刻歴と周辺地盤の変形角の時刻歴を示す。カルバートの層間変形角は、上下床版の相対変位を内法高さ220mmで除して求め、地盤変形角はカルバートの高さに合わせて、Fig.1に示す変位計DD3XとDD6Xの相対変位を変位計の距離で除して求めた。主筋が未降伏である加振初期(No.3)の杭基礎がある場合とない場合の時刻歴を比較すると、時刻0.3秒~0.5秒間の応答振幅が異なり、杭がある場合に比べ、無い場合の方が応答層間変形角は大きく、近接構造物の有無がカルバートの応答性状に影響を及ぼしていることがわかった。また、周辺地盤とカルバートの剛性差が大きいために周辺地盤とカルバ

ートは明らかに異なる挙動を示していた。一方、地盤と構造物の両者が非線形応答に至る加振No.6の応答性状に関しては、両者の波形に顕著な差異はなく、近接構造物の有無による影響は殆ど見られなかった。また、周辺地盤とカルバートの変形挙動は概ね一致していることを確認した。以上より、本実験においては、地下構造物の非線形挙動に対する隣接構造物の影響は、線形領域では顕著に表れるが、非線形領域においては殆ど現れないことを確認した。これは、加振を経るごとにカルバートの剛性が低下したことと同様に、鉄筋が降伏に至った杭基礎の剛性も、地盤の変形に影響を及ぼさない程度まで低下したためと考えられる。なお、カルバートが隣接することによる杭基礎の応答性状に関しては、別途、検討する予定である。

3. 3次元非線形地震応答解析

解析には当社開発プログラム「FINAL」の材料構成則を組み込み、大自由度・高速化を目的に開発した「FINAL-GEO」¹⁾を用いた。

3.1 解析モデル

Fig.5(a)(b)に解析モデルを示す。形状、载荷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

Table 1 入力最大加速度の一覧
List of Maximum Acceleration of Input (Unit: m/s²)

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Case1	2.9	2.8	91.7	119.7	185.1	262.6
Case2	25.8	43.8	88.1	66.9	186.5	315.6

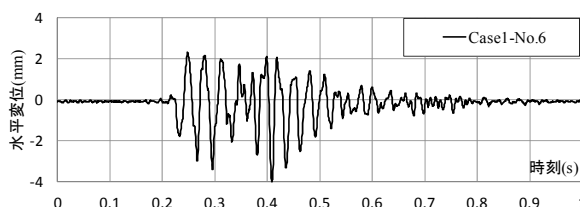


Fig.3 フーチングの応答変位の時刻歴(Case1, No. 6)
Time Histories of Response Displacement of Footing

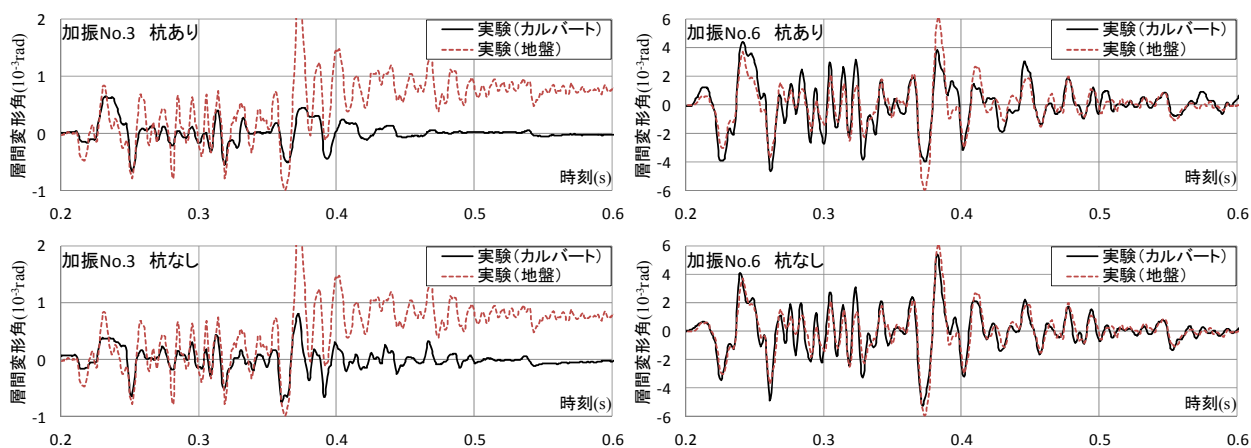


Fig.4 カルバートと地盤の応答層間変形角の時刻歴の比較(Case2, 加振No. 3&6)
Comparison of Time Histories of Drift Angles of Culvert and Ground

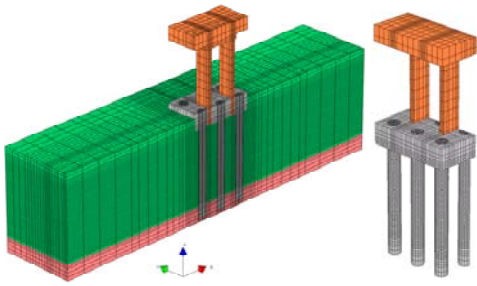


Fig. 5(a) 解析モデル (Case1)
Analysis Model for Case1

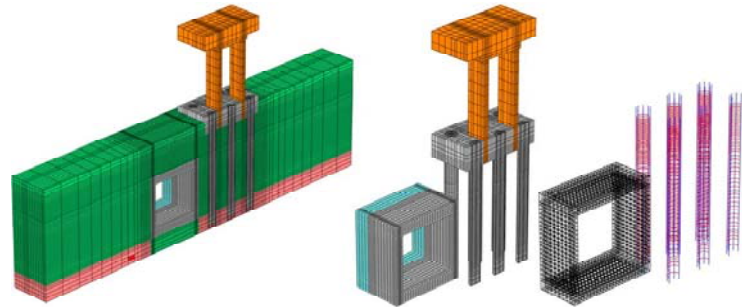


Fig. 5(b) 解析モデル (Case2)
Analysis Model for Case2

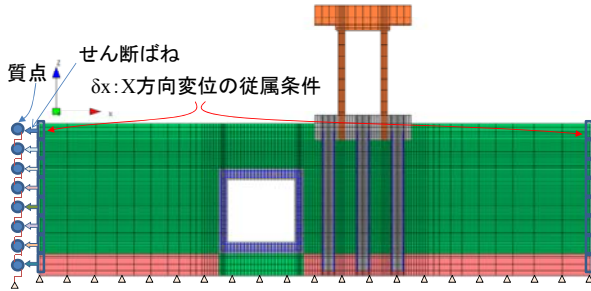


Fig. 6 土槽のモデル化と境界条件
Idealization of Container and Boundary Condition

ト及び地盤には六面体要素を、カルバートと杭基礎の主筋やせん断補強筋はトラス要素を、フーチングの鋼製型枠には四角形要素を用いた。コンクリートと鉄筋間の相対滑りは考慮せず、地盤とフーチング及び杭体の界面は、せん断剛性はゼロとし、法線方向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、両ケースともに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。

3.2 境界条件, 時間増分, 及び検討対象加振

境界条件としては、Fig.6に示すように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(Fig.6のx方向変位)が同じになるように従属条件を与え、せん断土槽の質量及び剛性を考慮した。

解析対象とした加振は、両ケースともに実験で杭主筋の降伏が観測された加振No.5の前後No.4～No.6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槽底面で測定した加速度を用いた。

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、求解法は接線剛性法とした。

粘性減衰は初期剛性比例としてモデル全体の一次固有振動数に対して1%を仮定した。

3.3 材料構成則

コンクリート及びグラウトの主応力～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⁵⁾、軟化域は中村モデル⁷⁾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。繰返し載荷時の履歴特性は長沼らのモデル⁵⁾により表した(Fig.7

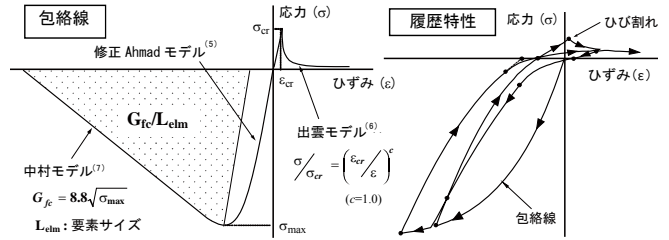


Fig. 7 コンクリートの応力～ひずみ関係
Stress - Strain Relationship of Concrete

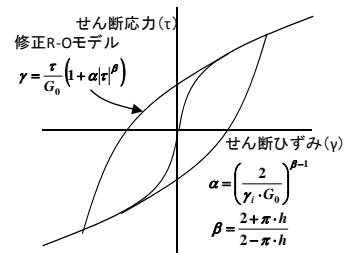


Fig. 8 地盤のτ～γ関係
Shear Stress - Strain Relationship of Ground

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、繰返し載荷時の履歴特性はMasing則に従うものとした。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算定した。地盤の非線形性を考慮する材料の応力～ひずみ関係をFig.8に示す。支持地盤、鋼製の上部構造物は弾性を仮定した。

3.4 解析結果

3.4.1 計算速度 解析には、CPU: Intel(R) Xeon Processor X5670, Clock speed 2.93GHz, 31.9GB RAM, OS: Microsoft Windows Server 2003 R2 x64 Standard Edition SP2を用い、両ケースともに1STEPあたり約2.2分程度の計算速度であった。

3.4.2 ケース1の解析結果 加振No.4～No.6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Fig.9に示す。また、Fig.10及びFig.11には加振No.5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

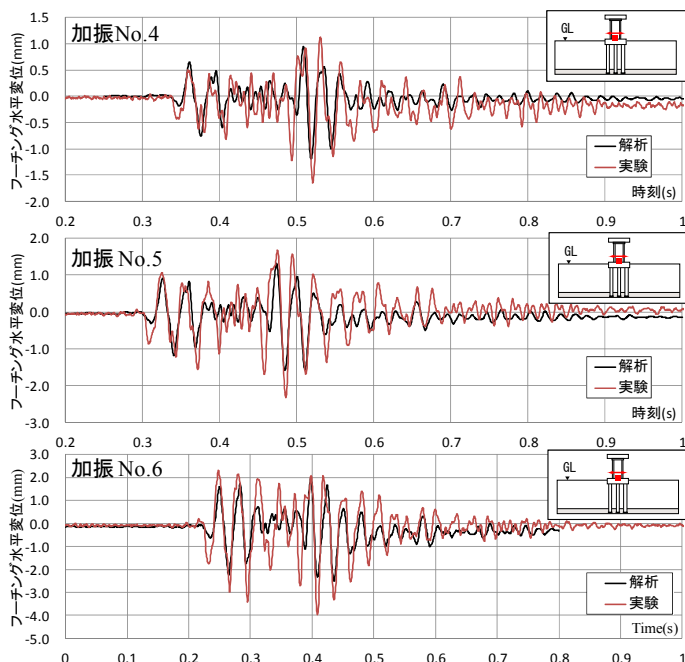


Fig. 9 フーチング応答水平変位の時刻歴の比較 (Case1)
Comparison of Time History of Footing's Displacement

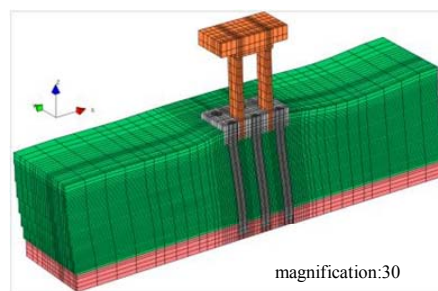


Fig. 10 モデル全体の变形状況
Maximum Deformation Mode

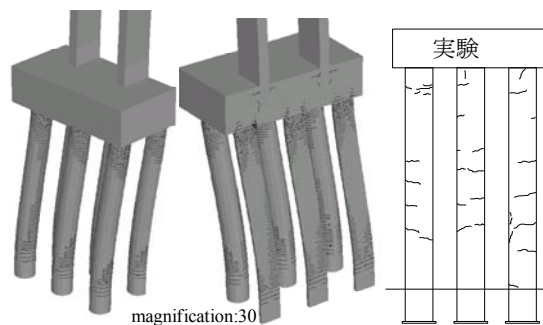


Fig. 11 杭基礎の損傷状況
Damage of Pile Foundation

Fig. 12 ひび割れ状況
Crack Pattern after Test

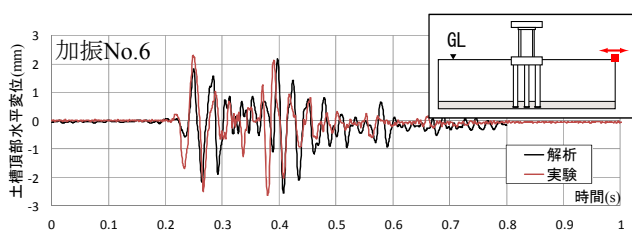


Fig. 13 土槽頂部の応答水平変位の時刻歴の比較 (Case1)
Comparison of Time Histories of Container's Displacement

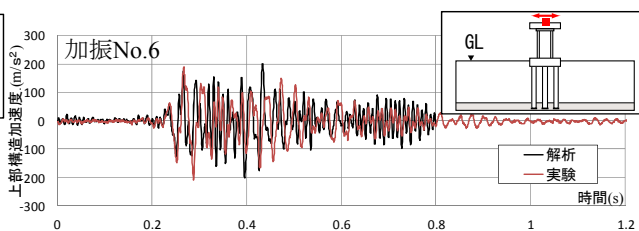


Fig. 14 上部構造頂部の応答加速度の時刻歴の比較 (Case1)
Comparison of Time Histories of Superstructure's Acceleration

ング応答水平変位の時刻歴に関しては、加振No.6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No.4とNo.5における波形、応答値は実験と解析は良好な対応を示している。

Fig.12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、また、Fig.11とFig.12は同時期のひび割れ状況ではないため(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。しかし、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わかる。加振No.6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Fig.13に、上部構造物天端の応答加速度の時刻歴をFig.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、波形の形状や最大値は概ね良好な対応を示している。

Fig.15に杭頭部主筋ひずみの時刻歴を比較して示す。ひずみが大きくなる時刻が若干異なるが、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。

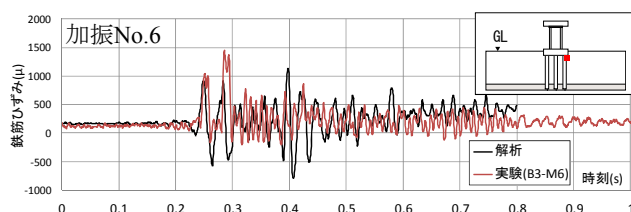


Fig. 15 杭主筋ひずみの時刻歴の比較 (Case1)
Comparison of Time Histories of Rebar Strain

3.4.3 ケース2の解析結果 解析と実験の比較として加振No.6における杭基礎が近接する場合と近接しない場合の地下カルバートの応答層間変位の時刻歴の比較をFig.16に示し、加振No.4とNo.6における土槽上部の水平変位の時刻歴の比較をFig.17に示す。カルバートの最大応答層間変位に関して、杭基礎が近接する場合において、解析が実験よりも大きめの値を示したが、解析と実験は概ね同様の応答波形を示し、両者は良好な対応を示した。土槽の変形に関しても、No.4加振においては概ね実験と解析の波形が一致し、No.6加振に対しては若干の差異はあるが、最大応答値やその発生時刻など、良好に対応している。

Fig.18に加振No.4～No.6におけるフーチング中央の加

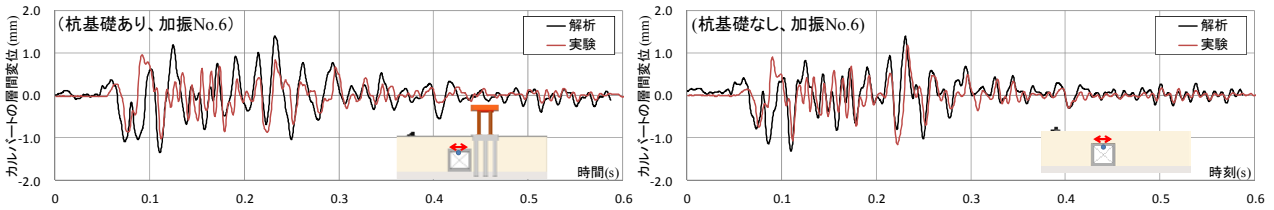


Fig. 16 カルバートの層間変位の時刻歴の比較(Case2, 杭基礎の有無)

Comparison of Time Histories of Culvert's Relative Story Displacement (Case2, with or without Pile Foundation)

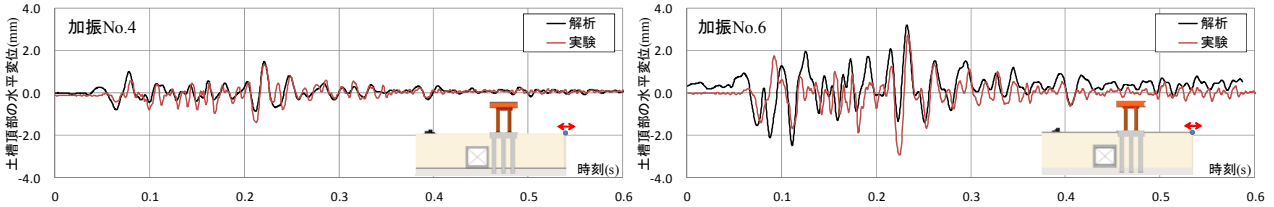


Fig. 17 土槽頂部の水平変位の時刻歴の比較(Case2, 加振No.4 & No.6, 杭基礎の有)

Comparison of Time Histories of Container's Displacement (Case2, Excitation No.4 & No.6, with Pile Foundation)

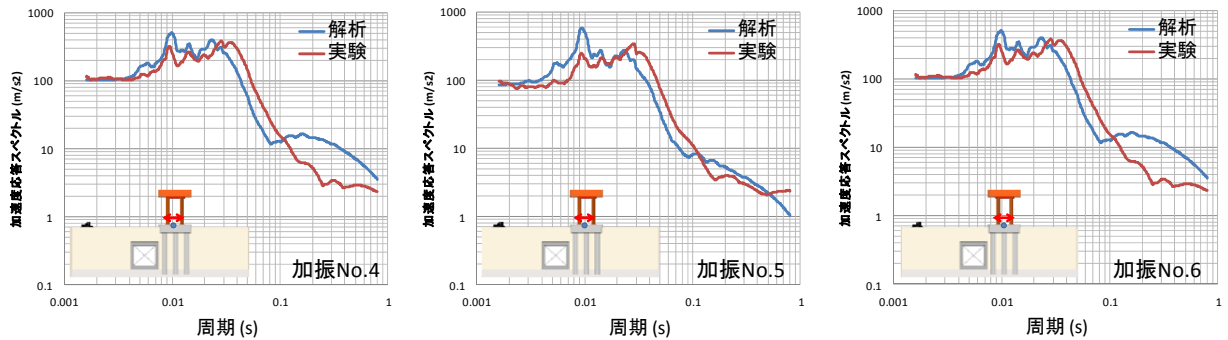


Fig. 18 フーチング上部中央の加速度応答スペクトルの比較(Case2)

Comparison of Acceleration Response Spectrum at Center of Footing

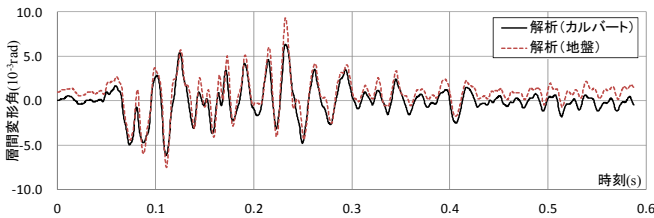


Fig. 19 カルバートと地盤の層間変形角の時刻歴の比較
Comparison of Drift Angle between Culvert and Ground

速度応答スペクトルの比較を示す。応答加速度は、周期0.02~0.03秒以下の短周期領域に関しては、解析の方が実験よりも大きく、それ以降の長周期領域は、実験の方が解析に比べて大きく両者に差異が見られる。しかし、解析と実験の応答加速度のピークの周期は概ね一致しており、フーチング上部の応答性状に関して解析と実験は良好に対応していることがわかる。応答スペクトルにおける約0.01秒程度のピークは、上部構造物の固有周期が0.01秒程度であることから、上部構造物の振動に励起されたモードが現れており、0.02~0.03秒程度のピークは地盤変形の振動モードが現れたものと推察できる。地盤変形によるピークは、加振が進むごとに非線形化により長周期化する傾向が見られ、この点に関しても解析と実験の傾向は同じである。一方、この実験と解析の差異の理由としては、解析では上部構造、杭基礎、地盤及び土槽で構

成される試験体の固有振動数に対して減衰を定め一様に与えているため、上部構造物単体の振動に対しては、大きめの減衰の設定になっていたことが挙げられる。

実験結果において、Fig.4に示すようにカルバートと地盤(土槽)の層間変形角を比較し、加振No.6においては、両者の変形挙動がほぼ一致することを考察した。解析においても同様の方法によりカルバートと地盤(土槽)の層間変形角を比較した。Fig.19に加振No.6における解析結果による両者の変形角の比較を示す。解析においても地盤とカルバートの変形挙動は概ね一致し、この点に関しても実験と解析は同様な傾向が示されている。

解析結果のカルバートの最大変位時における杭基礎とカルバートの鉄筋降伏状況、コンクリート最小主応力コンター及びひび割れ状況をFig.20に示す。カルバートは、側壁の両端において、杭基礎に関しては杭頭部及び杭固定部において、鉄筋降伏及びひび割れが生じ、塑性ヒンジが形成されている。これらの損傷状況は、実験終了後のひび割れ観察及び鉄筋ひずみ状況と整合している。

4. まとめ

地盤と構造物の非線形連成挙動に対する大自由度モデルによるFEM解析手法の適用性を検証するために、地

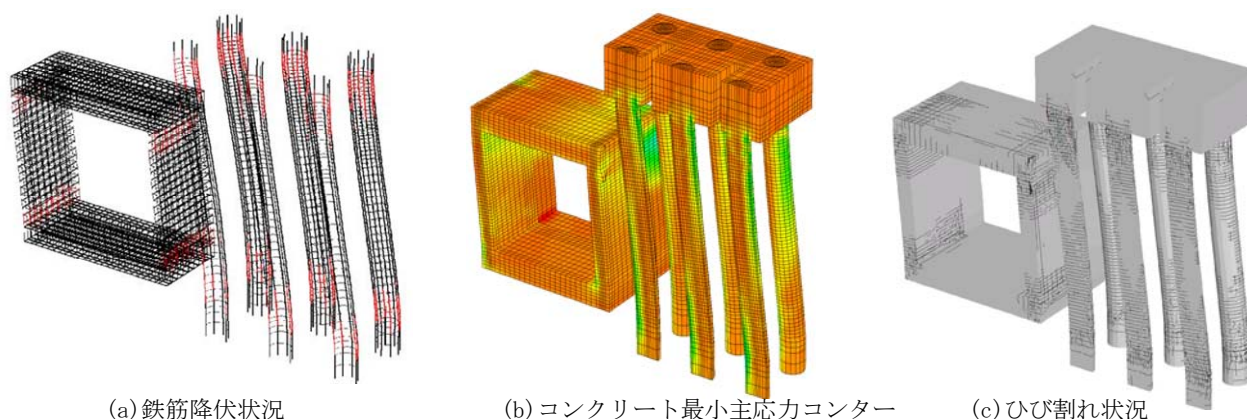


Fig. 20 解析から得られた損傷状況 (Case2)
Damage Condition Obtained from Analysis for Case2

盤中に埋め込んだ杭基礎及び地下カルバートの1/25縮尺模型遠心力振動台実験を対象として地盤—構造物連成系の非線形地震応答解析を行った。杭基礎フーチング、土槽及びカルバートの応答変位、杭主筋の応答ひずみ、及び基礎フーチングと上部構造の応答加速度について、実験と解析を比較した結果、本報で用いた3次元大自由度モデルを用いることにより、地盤と構造物の連成非線形挙動を良好な精度で再現できることが分かった。

解析においては、コンクリートや地盤の応力、及び、鉄筋応力・ひずみ等、実験では得られないデータを得ることができるため、今後、これらの解析結果を詳細に考察し、基礎及び地下構造物のより合理的な耐震安全性評価法の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 米澤健次, 他: 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, CD-ROM, (2011)
- 2) 穴吹拓也, 他: RC杭基礎を対象とした遠心振動実験と構造物—地盤連成系FEM解析, 第13回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, (2010)
- 3) 米澤健次, 他: 杭基礎に隣接したRC地中構造物の地震時挙動に関する研究, 土木学会論文集A1, Vol.68, No.4, I_652-I_659, (2012)
- 4) 鈴木正寛, 他: RC杭基礎構造物の遠心模型振動実験, 第66回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-504, (2011)
- 5) 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, (2004)
- 6) 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)
- 7) Nakamura H, et al.: 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)