地盤-構造物系の非線形動的応答解析の 不確かさにおける地盤物性の影響に関する検討

樋口 俊一

正会員 株式会社大林組技術本部 技術研究所構造技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640) E-mail: higuchi.shunichi@obayashi.co.jp

近年,構造物の耐震設計に地震応答解析の適用が一般的となりつつあり,地盤-構造物の連成問題について,初期構造モデルや非線形モデルに関する解析手法の妥当性検証の必要性が認識されてきた.従来の解析コード等の妥当性検証は,必要条件としての実験等の再現性を示したものであるが,実構造物設計への適用を念頭とした場合には,十分条件として予測性能の幅を示す不確実さの定量化(≒安全率の設定)が必要になると考えられる.本検討では液状化地盤中の杭基礎を例として,地盤モデルの設定にばらつきを与え,実験値に対する予測性能の幅の評価を試みた.

Key Words: Numerical simulation, Dynamic response, Soil-structure interaction, Uncertainty

1. はじめに

近年,高性能コンピューターの汎用化を背景として, 工学シミュレーションに対する V&V (Verification and Validation)の必要性が認識されてきた.例えば米国機械 学会 (ASME)では 2001 年より V&V の規格制定作業が 行われ,2012 年からは毎年 V&V シンポジウムを開催し, 規格に対する意見収集と情報交換を行っている.これは, 数値シミュレーションを設計等の意思決定に用いる際に, 計算結果をユーザーや社会に信頼してもらう (credibility の確保)ための枠組として V&V を位置付けているから である¹⁾.

土木学会においてはコンクリート分野にける数値解析 V&V への取り組みや、応用力学委員会による「土木分 野の数値解析における V&V に関する小委員会」がある。 後者が 2015 年および 2017 年の全国大会で開催した V&V に関する研究討論会には多くの参加者を集め、V&V へ の関心の高さが示された³.構造物の耐震設計および照 査実務において地震応答解析の適用が一般的となりつつ あるなかで、地震工学委員会は 2017 年より「地盤・構 造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の 体系化に関する研究小委員会」を立ち上げ、地盤・構造 物の非線形地震応答解析に関する V&V の課題整理と、 実務展開を見据えた考え方の体系化に取り組んでいる³.

本研究は上記の「地盤・構造物の非線形地震応答解析 法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員 会」の活動において実施した,液状化地盤中の杭基礎を 対象とした評価事例について述べるものである.具体的 には遠心模型実験結果を対象として,(1)初期モデルの 設定と実験結果に対する再現性の検証,(2)地盤モデル の設定にばらつきを与えた場合の実験値に対する予測性 能の幅の評価,に関する事例を示した.

2. 解析ターゲットとした実験の概要

解析対象は筆者らが過去に実施した液状化地盤中の杭 基礎構造物に関する遠心模型振動実験(図-1:縮尺 1/25) とした⁴. この実験では,表-1,図-2に示すように大小 異なる加振レベル(同一波形)による地盤および構造物 の応答が得られており,大加振(入力加速度実機 6.0m/s² 相当)では地盤の液状化と RC 製模型杭の塑性化(コン クリートのひび割れと鉄筋降伏)が観測されている.

3. 検証解析

(1) 解析方法

検証解析は2次元有効応力解析により実施した.本研 究で使用した動的有効応力解析プログラム O-EFECT⁹は, 士骨格と間隙水の連成効果を厳密に評価した飽和多孔質 媒体の Biot の多次元圧密方程式を基礎式とし⁹,地盤構 成モデルには松岡モデルに繰返し載荷を考慮できるパラ メータを導入している⁹.また,基礎杭は鉄筋コンクリ



(a) 解析モデルの構成と代表的な出力評価位置

(c) 模型杭の載荷試験シミュレーション結果



ートの非線形性^{&9}を考慮したファーバー要素でモデル 化し、加振による杭の損傷の再現を試みた.

解析モデル(図-3(a))に関する詳細は文献4に譲るが、 本検討においては先ずそれぞれの材料特性を反映した構 成要素レベルでの応答を検証した.すなわち、(b)に示 す土要素の液状化シミュレーション,(C)に示す模型杭 の載荷試験シミュレーション,をそれぞれ実施して妥当 性を検証した.

次に全体系としての検証として、2. で述べた大小異なる加振レベルの遠心模型実験結果に対し、①初期構造

モデルの確からしさの検証,②被害モードの再現性の検 証,を実施した.

なお,解析は模型スケールで実施した.これは,遠心 模型実験での計測精度等に係る現象が実機換算により判 別できなくなる場合があるためである.

(2) 初期構造モデルの検証

初期構造モデルの検証は、入力加速度10m/s²相当(実 機入力加速度0.2m/s²,以降、入力加速度は実験値で記 述)の微小加振による地盤応答をターゲットとした.こ のとき地盤は線形を仮定し、減衰定数は図-4(a)の加速度 応答(実験値赤,解析値青)が整合するようにパラスタ で設定した.

図-4(b)に示すとおり、モデル地盤のせん断波速度 Vs の推定式¹⁰による初期地盤モデルの加速度伝達関数(地 表面/入力:青)は、観測値(赤:f=54Hz)と良く一致 していることが確認できた.なお、パラスタで同定した 減衰定数は地盤が h=0.05、構造が h=0.01 である.

(3) 被害モードの検証

被害モードの再現性は、モデル地盤の非線形性を設定 し、小加振(d3:25m/s²)、中加振(d4:75m/s²)および大 加振(d5:150m/s²)により検証することとした.入力地 震動時刻歴の一例を図-5に示す.加振波は全て同一波形 である.

実験の再現性を評価する項目として、加速度時刻歴, フーチング変位時刻歴および過剰間隙水圧比時刻歴を抽 出し、実験結果と比較したものを図-6に示す. なお各抽 出値は実験値が赤、解析値が青である. 抽出位置は図-3 を参照されたい.

a)加速度時刻歷

図-6①に示す,各ケースにおける構造物頂部加速度時 刻歴から,各加振において応答加速度の大きさや位相が 概ね整合していることがわかる.中加振および大加振の 実験値においては短周期の応答が出現しており,同様の 応答は②に示す地盤加速度にも認められる.

②の地盤加速度は、小加振では基盤加速度が最大 25m/s²に対し、実験値および解析値ともに地表付近の応 答は20m/s²と振幅比が1程度である。それに対して中加 振では基盤75m/s²に対して地表25m/s²と振幅比が小さく なり、液状化地盤の特徴が表れた。また、大加振では基 盤150m/s²に対して実験値は最大100m/s²(0.15sのスパイ ク除く)、解析値は最大20m/s²(0.18sのスパイク除く) 程度で振幅比は小さい。また、これらを後述する過剰間 隙水圧比時刻歴と比較してみると、地盤が全層にわたっ て液状化する時刻において振幅が増大しなくなり、液状 化地盤の加速度応答の特徴を示していることがわかる。



b)フーチング変位時刻歴

図-6③に示すフーチング最大水平変位は加振レベルに 応じ、それぞれの応答値が増大するとともに、その振幅 オーダーや位相は実験値と解析値で整合している.小加 振では加振後半部において解析値が大きいが、これは実 験と解析で地盤の液状化程度が異なっているからと考え られる.一方、地盤が液状化する場合には最大応答値に ついては解析値は実験値の 60%~70%に留まった.

c)過剰間隙水圧比時刻歴

図-6④、⑤に示す過剰間隙水圧比時刻歴では、中加振、 大加振の実験値、解析値いずれにおいても時刻 =0.2s 付 近で全層液状化に至る.また、大加振においては大きな 動水圧の発生も再現されている.小加振においては加振 が終了する時刻 =0.5s 付近以降も地盤深部において水圧 の上昇が継続している.なお、大加振については時刻歴 を-0.2s-0.8s の区間について示したが、これには過剰間隙 水圧の発生時刻が小・中加振よりも早く始まるからであ る.この要因は元波に対する振幅乗率の拡大に伴い、加 振波に含まれる主要動前の微小振幅も同様に拡大されて 入力される影響と考えられる.

d) 杭の損傷モードの再現性

図-7 に中加振と大加振における基礎杭/杭頭鉄筋ひず み応答を比較する.比較位置は左杭(B1杭)のフーチ ング直下に位置する鉄筋である.ここで鉄筋ひずみは降 伏を判断する必要性から初期値をゼロとして振幅を増分 評価する等の操作はしていない.すなわち,ここで示す 実験値の初期値は遠心載荷による初期応力,あるいは加 振履歴を反映した初期ひずみであるのに対し,解析値は ①構造物頂部加速度



図-8 大加振における地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴と t=0.125s での地中分布

加振履歴のない初期応力解析結果のみを反映した初期ひ ずみである.

中加振においては実験値では杭左縁(B1-M1)におい て 1,000µを超えるひずみが観測されているのに対して, 解析ではほぼ同じ位置でのひずみ(14305-M1)振幅が小 さい.一方,杭右縁(B1-M6)においては実験,解析で は振幅,位相とも類似したひずみ波形(14305-M6)が見 られる.これは、コンクリートクラックの発生の有無に 起因すると推定される.ひずみ計測点付近のかぶりコン クリートにクラックが入り目開きすると、その位置での 鉄筋のひずみは一気に増大することから、実験では目開 きが生じた可能性が考えられ、杭左側の実験値(B1-M1) に見られる繰り返しの大きなひずみの発生はそれを示唆 している.

大加振では実験値と解析値の鉄筋のひずみ応答は杭左 右縁とも良く一致している.図-6(c)③フーチング変位応 答時刻歴と比較すると,最大ひずみ発生時刻 t=0.124s は フーチング左向きの変位最大時刻とほぼ一致し,その大 きさも実験値(B1-M1)3,250μに対し,解析値(14305-M1)2,820μであり,いずれも降伏している.一方杭右 縁での最大ひずみ発生時刻 t=0.145s はフーチング右向き の変位最大時刻で,実験値(B1-M6)1,200μ,解析値

(14305-M6) 770µでいずれも降伏していない. なお, 前述のとおり大加振時の鉄筋ひずみは過去の加振履歴に よる累積値からスタートしているため,解析値に対して より大きなずれが生じている.

杭鉄筋のひずみ応答について図-8に整理した過剰間隙 水圧時刻歴とその深度分布との関係を考察すると、鉄筋 ひずみが最大値を示し、降伏する時刻 ⊨0.124s は、過剰 間隙水圧比が液状化層全層おいて1に達していない時刻 であることがわかる.すなわち、地盤が完全液状化しな い状態で杭に被害モードが出現したこととなる.

e)群杭効果

ひずみ時刻歴は、MI(杭頭左縁)、M6(杭頭右縁) ともに最大振幅出現後についても位相・振幅とも実験値 と解析値は整合的である.これらの特徴を群杭効果を念 頭に考察する.群杭効果とは杭間地盤の荷重分担が前後 に杭が存在することにより低下する(地盤ばねが低減す る)効果である.本ケースにおいて MI は杭左縁で杭基 礎の外側であり、M6 は杭右縁で杭基礎の内側となるた め、BI 杭にはフーチング変位が左向きの場合には周辺 地盤からの地盤反力が期待できるが、右向き変位の場合 には群杭効果のため地盤反力が低減されることとなる. したがって、フーチング変位左向の場合に杭頭に発生す る反時計周り曲げモーメントは大きく、フーチング変位

る反時計周り曲げモーメントは大きく、フーチング変位 右向の場合に杭頭に発生する時計周り曲げモーメントは 相対的に小さくなる.このことから、実験および解析で 見られた M1 と M6 の鉄筋ひずみの応答特性の違いが説

表-2 初期地盤剛性の評価ケース

ケース	-s2	Ν	+s2
変動係数 CV	-0.2	基本	+0.2
V _{sm} (m/s)	113	142	170
G _{0m} (kN/m ²)	24,400	38,200	54,900

Vsm: 基準拘束圧 σcm'=100kN/m²での Vs



図-9 初期剛性にばらつきを与えた応答時刻歴の比較

明できる.

以上から、本ケースは地盤が全層液状化には至らない 時刻において杭頭が損傷する複雑なイベントを示すにも 関わらず、遠心模型実験における被害モードの解析での 再現性を群杭効果を含めて確認することができた.

4. 予測性能評価解析

地盤モデルのばらつきとして,前述の大加振ケースで の応答値を基準として,①初期地盤剛性,②液状化強度, について予測性能に及ぼす影響を検討する.

ここでは予測性能の評価項目として, (a)フーチング 変位及び(b) 杭頭鉄筋ひずみについて抽出することとした.

(1) 初期地盤剛性の影響

表-2に示す初期地盤剛性について評価することとした. 解析モデルの初期地盤剛性は推定した V_s により与えているため、その基準値(V_{sn} :基準拘束圧での V_s)に対して変動係数 $CV=\pm 0.2$ を適用した.なお、原子力施設の地

震 PRA標準¹¹⁾では CV=0.1 としている.

図-9 に応答時刻歴を比較して示す. (a)フーチング変 位には地盤モデルの差異による違いは見られないが, (b) 杭頭鉄筋ひずみ(B1-M1:断面左側,B1-M6:断面右 側)では,最大値には違いは見られないが,初期せん断 剛性を小さく設定したケース-s2においてM1に過渡的な 応答ひずみ(緑)振幅が大きくなる傾向が見られる.た だし,鉄筋ひずみ応答の差異は杭の被害モードに影響を 及ぼすほどではなく,このように地盤が完全液状化する 場合には,初期地盤剛性のばらつきの影響が消失してし まう可能性が示唆される.

(2) 液状化強度の影響

ここでは液状化強度の影響として、液状化強度 RL20に ついて基準値である RL20=0.24 (DA=5%) に対して RL20=0.20 および RL20=0.28 を設定し、影響を把握すること とした.図-10 に土要素の液状化シミュレーション結果 を示す.具体的には硬化パラメータ ks⁵のみを変動させ て液状化強度をフィッティングした.なお全体モデルに おいても同様としたが、ksには拘束圧依存性を持たせて いることから、深度により設定値は異なる.

図-11 に応答時刻歴を比較して示す. (a)フーチング変 位には地盤モデルの差異による違いは見られないが, (b) 杭頭鉄筋ひずみ(B1-M1:断面左側,B1-M6:断面右 側)では,M1において最大値に違いが見られ,液状化 強度を小さく設定したケース R120=0.20(緑)の応答ひず み振幅が大きく,液状化強度を大きく設定したケース R120=0.28(紫)ほど小さくなっていく傾向が見られる. 最大ひずみの大きさは R120=0.20(緑)が 2,830µ, R120=0.28(紫)が 2,160µとなった.この検証例では鉄筋 ひずみ応答の差異は杭の被害モードに影響を及ぼすもの ではないが,構造物の条件等が異なる場合には,液状化 強度のばらつきは損傷モードに影響を及ぼす可能性が示 唆される.

5. 結論

本検討では液状化地盤中の杭基礎の遠心模型実験を例 として、地盤モデルの設定にばらつきを与え、実験値に 対する予測性能の幅の評価を試みた.得られた知見を以 下に示す.

・4 段階(実機入力加速度 0.2m/s², 1.0m/s², 3.0m/s², 6.0m/s²)の加振データに対して実験の再現性を評価した ところ,加速度,変位および地盤の過剰間隙水圧応答の 再現性を確認できた.

・被害モードの評価として、杭の応答(鉄筋降伏)を検 討した.その結果、大加振での再現性は良好であったが、 中加振では乖離が見られた.これは、かぶりコンクリー



図-11 液状化強度を変動させた場合の応答時刻歴の比較

トのクラックの発生の有無に起因すると推定される. ・大加振のケースについては、実験結果が地盤が全層液 状化には至らない時刻で杭頭が損傷する複雑なイベント を示すにも関わらず、遠心模型実験における被害モード について解析での再現性を群杭効果を含めて確認するこ とができた.

・大加振を対象とした予測性能評価解析の結果,初期地 盤剛性のばらつきの影響は地盤の液状化により消失して しまうことが示唆された.一方,液状化強度のばらつき により基礎杭の鉄筋に発生するひずみの大きさに差異が 認められ,損傷モードに影響を及ぼす可能性が示唆され た.

参考文献

 越塚誠一,高野直樹,山田貴博,吉田有一郎,櫻井英行, 長谷川浩志,松井和己:V&Vの最近の進展,計算工学 講演会論文集 Vol.21, 2016 年 5 月.

- 2) <u>http://www.jsce.or.jp/committee/amc/report.html</u>
- 3) http://committees.jsce.or.jp/eec218/
- 4) 樋口俊一,堤内隆広,大塚林菜,伊藤浩二,江尻譲嗣: 礎構造物の遠心模型振動実験,土木学会論文集 A1 (構造・地震工学),Vol. 68巻,No. 4, pp. I_642-I_651, 2012.
- 伊藤浩二:動的有効応力解析プログラム「EFECT」 (その 1)-基礎理論と地盤構成モデルー,大林組技術 研究所報, No.51, 1995.
- Biot, M. A. : Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Journal of Applied Physics, Vol.33, No.4, pp.1482-1498, 1962.
- 7) Matsuoka, H. and Sakakibara, K. : A constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation,

Soils and Foundations, Vol.27, No.4, pp.73-88, 1987.

- 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, 1995.
- 9) 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.
- 10) 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,土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, Vol. 57, pp.1129-1130, 2002.
- (一社)日本原子力学会:AESI-SC-P006:2007日本 原子力学会標準原子力発電所の地震を起因とした確 率論的安全性評価実施基準:2007,2007年.

QUANTIFICATION OF UNCERTAINTIY IN DYNAMIC ANARYSIS APPLIED TO NON-LINEAR RESPONSE OF A SOIL-STRUCTURE SYSTEM

Shunichi HIGUCHI

As background of general application of dynamic analyses to seismic design in recent years, necessity of validation in numerical code in terms of both initial modeling and non-linear element responses is recognized.

The author conducted code validation, utilizing 2D dynamic effective stress FEM targeting on dynamic centrifuge experiment result regarding the piled foundation built in liquefiable sandy ground.

Then, parameter studies with respect to properties of ground material were performed to estimate dispersion of prediction performance of the code as quantification of uncertainties.