

液状化傾斜地盤の地震時挙動予測高精度化に向けた遠心模型実験及び有効応力解析

和田 冬馬¹・上田 恭平²・渦岡 良介³

¹京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: wada.touma.67a@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: uzuoka.ryosuke.6z@kyoto-u.ac.jp

これまで研究者達によって数々の研究が重ねられ、遠心模型実験や有効応力解析について多くの知見が蓄積されて来た。一方、従来の研究や実務での地盤挙動予測では、一つの実験結果と一つの解析結果の比較により、実験者や解析者の主観的な判断によってその結果の妥当性の確認がなされることが多かった。つまり地盤挙動予測の精度は実験者と計算者に強く依存しており、挙動予測の客観的な妥当性が保証されていないことが多いのが現状である。本研究では、地盤挙動予測の客観的な妥当性を高めることを目的に、液状化傾斜地盤の地震時挙動を対象として複数の遠心模型実験及び有効応力解析を行い、実験及び解析結果に対してより定量的な評価を試みた。その結果、実験結果や解析結果を瞬間値ではなく時刻歴として評価する考え方をを用いて、そのばらつきや妥当性について定量的に評価することが出来た。これにより、より客観的な実験結果や解析結果の評価が可能になる一種の展望を示した。

Key Words : *liquefiable inclined ground, centrifuge model test, effective stress analysis, verification and validation*

1. はじめに

一般に地盤・構造物を含んだ系の地震時の挙動は非線形であり、これらの挙動を研究する手段の一つとして、遠心模型実験及び有効応力解析がある。新潟地震以降、研究者達によって数々の研究が重ねられ、それぞれの手法について多くの知見が蓄積されて来た。一方、従来の研究や実務での地盤挙動予測では、一つの実験結果と一つの解析結果の比較により、実験者や解析者の主観的な判断によってその結果の妥当性の確認がなされることが多かった。つまり地盤挙動予測の精度は実験者と計算者に強く依存しており、挙動予測の客観的な妥当性が保証されていないことが多いのが現状である。この問題を克服し、実験及び解析による挙動予測の客観的な信頼性・信用性を向上させるために、V&V (Verification & Validation) という考え方が注目されている。V&Vではシミュレーションと実験の双方の不確かさの定量化 (UQ) が要求されるのが特徴である¹⁾ (図-1)。データの客観的な信頼性を向上するためには、図-1に示すイメージのよ

うな各種モデル化の不確かさの定量化に基づいてその結果の妥当性を確認する方法論を提案する必要がある。その第一歩として本研究では、地盤挙動予測の客観的な妥当性を高めることを目的に、液状化傾斜地盤の地震時挙動を対象として複数の遠心模型実験及び有効応力解析を行い、実験及び解析結果に対してより定量的な評価を試みた。その際、結果の評価方法として、瞬間値ではなく時刻歴として評価する考え方をを用いた。

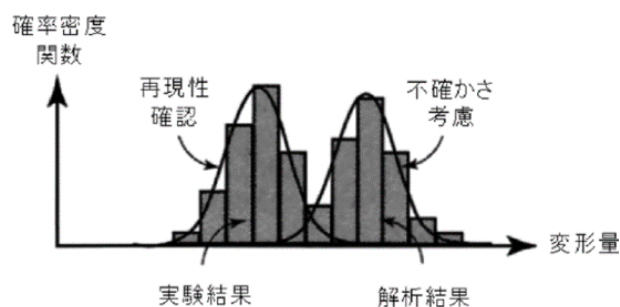


図-1 UQに基づく妥当性の確認¹⁾

2. 遠心模型実験

(1) 模型実験の概要

本実験は、京都大学防災研究所の遠心模型装置を使用し、遠心場の相似則を用い、実物の 1/40 の模型に対し 40G 場で行った。模型断面図を図-2に示す。地盤試料はオタワ砂 F65 を用い、空中落下法により間隙比 0.6 で地盤を作成した。間隙流体にはメトロース（粘性 40cSt）を使用した。入力波は周波数 1Hz、継続時間 20s の増幅減衰 sin 波で、片振幅は case1~case4 で 150 (gal), case5, case6 で 250 (gal), case7 で 300 (gal) を目標とした。

(2) 模型実験の結果

得られた入力波とその Arias Intensity, AH4における応答加速度時刻歴を図-3に示す。図-4にPWP1, PWP9における過剰間隙水圧時刻歴を示す。入力波が似たケース間でも加速度や水圧の応答に差が見られる。

3. 有効応力解析

本解析では case1 を対象として再現解析を行ったのち、

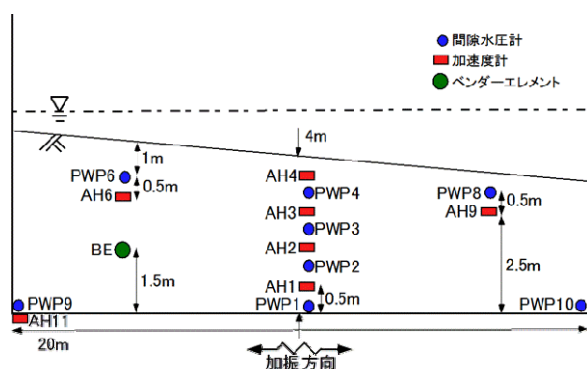


図-2 模型断面図

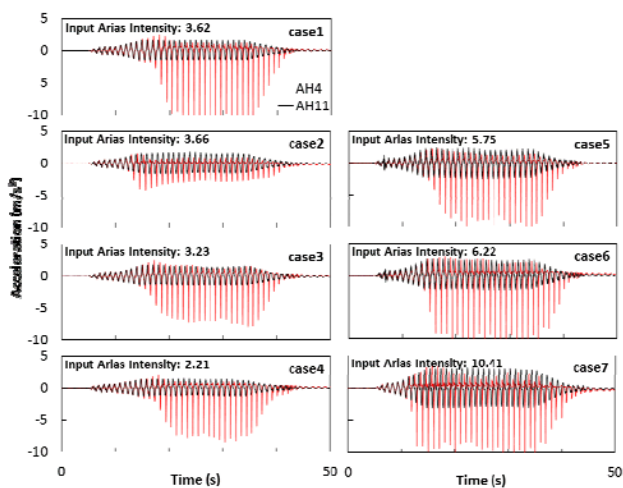


図-3 入力及び応答加速度時刻歴

同じ液状化パラメータを用いて全てのケースに対して解析を行った。同じ液状化パラメータを用いたのは、実験の全てのケースではほぼ等しい間隙比を得たからである。どのケースも実験結果に対して解析結果が示す傾向は等しかったため、ここでは case1 の解析結果を示す。図-5に AH1, AH4, PWP1, PWP9 における時刻歴の解析結果を示す。AH1, AH4 で解析結果が実験結果より小さい傾向にある。PWP1 では解析結果が負に振れている。PWP9 では解析が実験と概ね一致している。また、全ケースの地表面中央の水平変位時刻歴を図-6に示す。解析は実験結果を倍半以内で比較的うまく表現できていると言える。

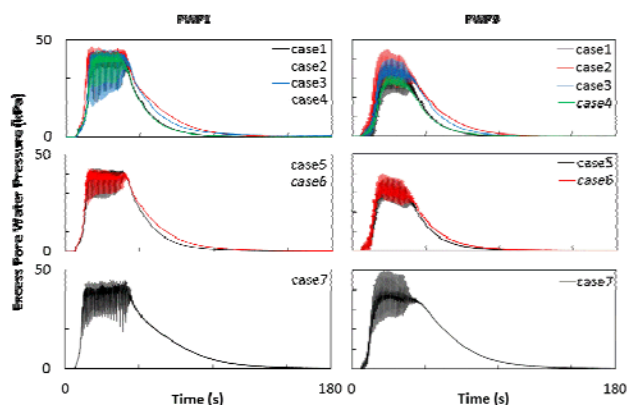


図-4 過剰間隙水圧時刻歴

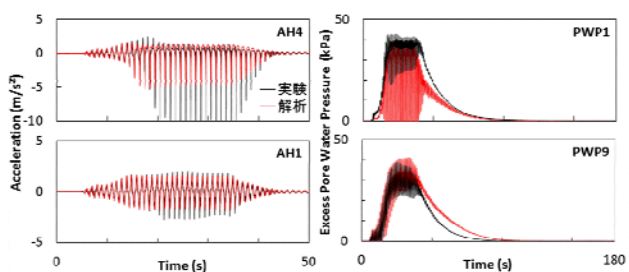


図-5 case1 の解析結果

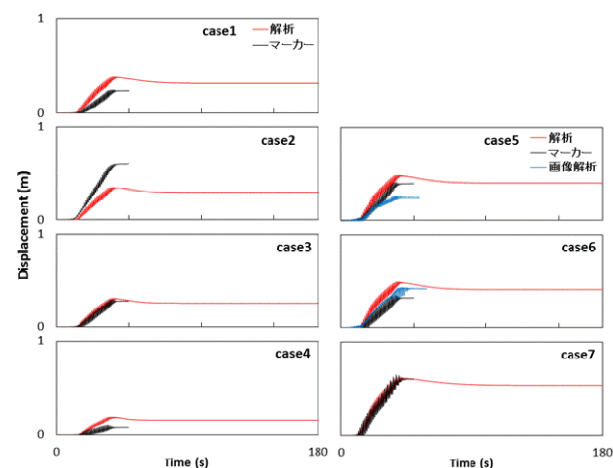


図-6 地表面中央の水平変位時刻歴

4. 実験及び解析結果の評価

実験結果にはケース間で差が存在している．このケース間の差をある瞬間の記録値をもって比較するのも一つの方法ではあるが，時刻歴としての包括的な評価にはならない．そこで，ここでは時刻歴としての差の評価を定量的に行った．時刻歴の評価手法としてはEARTH²⁾を用いる．EARTHは時刻歴の差（Error）を位相の差（Phase Error），振幅の差（Magnitude Error），振動数の差（Slope Error）に分けて考える方法である．ここでは振幅の差と振動数の差を用いて，case2～case4の実験結果の，case1の実験結果に対する差を評価した（図-7，図-8）．実験結果の時刻歴についての差を定量的に評価することが出来た．例えば，入力加速度時刻歴の差はcase1とcase4で大きいものに対して，case1とcase2の応答加速度時刻歴の差が大きい傾向にあることが分かる．また，図-9にAH1, AH4, PWP1, PWP9におけるcase2～case4の実験結果及びcase1の解析結果の，case1の実験結果に対する差を示した．AH1, AH4及びPWP9に関しては，解析結果の振幅の差，振動数の差は他の実験のそれと比較して同水準であることから，妥当な解析結果であったと考えることが出来る．PWP1に関しては解析結果の振幅の差，振動数の差共に他の実験に比べて非常に大きくなってしまったことから，解析結果の時刻歴としての妥当性は低いと考えることが出来る．

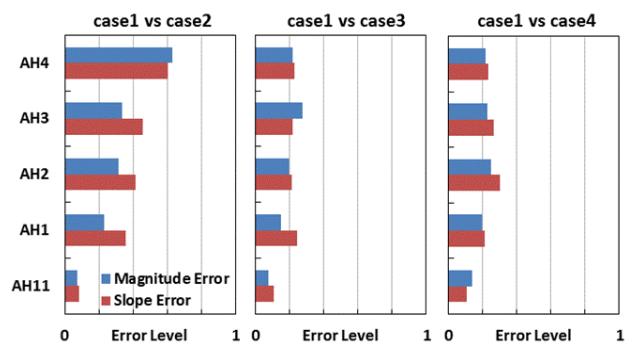


図-7 加速度時刻歴の case1 に対する差

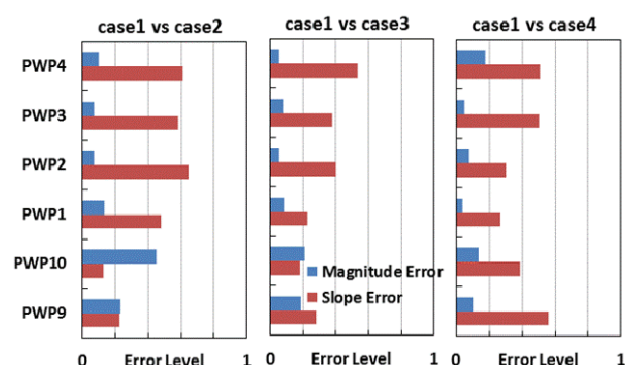


図-8 過剰間隙水圧時刻歴の case1 に対する差

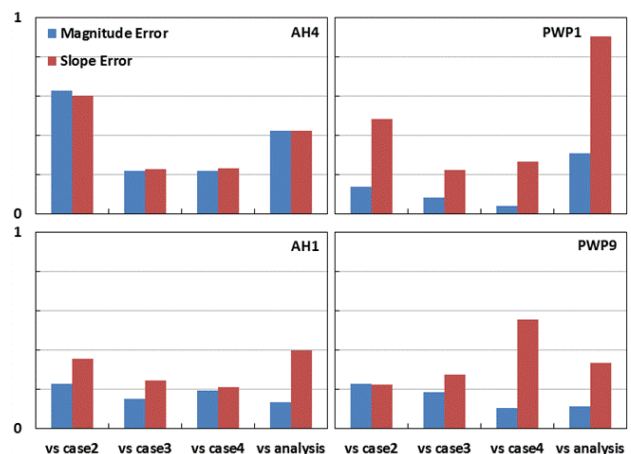


図-9 case2～case4 の実験結果及び case1 の解析結果の case1 の実験結果に対する差

5. まとめ

実験結果及び解析結果の客観的な妥当性を確保するためには，複数の実験及び解析を行いその結果のばらつきを評価したうえで示す必要がある．本研究では実験結果や解析結果の差をある瞬間の値のみではなく，時刻歴の差として定量的に評価することが出来た．また，それを元に解析結果の妥当性について評価することが出来た．これにより，より多面的な実験結果や解析結果の評価が可能になる一種の展望を示した．

参考文献

- 1) ASME: An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid-Mechanics V&V10. 1, 2012.
- 2) H. Sarin, M. Kokkolaras, G.Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat, R.-J. Yang: Comparing Time Histories for Validation of Simulation Models: Error Measures and Metrics, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 132, 061401-1-10, 2010.

(2018. ?? ?? 受付)

CENTRIFUGE MODEL TESTS AND EFFECTIVE STRESS ANALYSES FOR HIGHER-ACCURACY PREDICTION OF THE SEISMIC BEHAVIOR OF LIQUEFIABLE SLOPING GROUND

Kyohei UEDA, Toma WADA and Ryosuke UZUOKA

The behavior of soil-structure systems during earthquakes is commonly complicated and non-linear. One way to investigate this complex behavior is centrifuge model tests or effective stress analyses. Both techniques have been under intense investigation since 1970s, and their reliability is thought to be improving because of accumulated scientific knowledge. However, a practical process for validation of analytical procedures has not yet been established, in particular for liquefaction phenomena, as commonly recognized among geotechnical engineering community. This may be because the validation process is conventionally carried out compared with a one-time experiment and the degree of coincidence between the experimental and analysis results is hard to evaluate in a quantitative way: the prediction accuracy of seismic ground response strongly depends on experimenters and analysts, and does not generally consider the variation in experimental and analysis results. To overcome the problem and improve the reliability of the prediction techniques (i.e., centrifuge model tests, effective stress analyses), we carried out in this study multiple centrifuge model tests on the seismic behavior of liquefiable sloping ground, targeting a unique prototype, and subsequently performed effective stress analyses for each test result. In comparison of experimental and/or analysis results, uncertainty quantification (UQ) framework was introduced to estimate the variations and validate the computational model: an error measure called EARTH, in which a total error is given as a sum of phase, magnitude, and slope errors, was used in this study to quantify discrepancy between time histories of experimental or analysis results (e.g., response acceleration, excess pore water pressure, and lateral displacement). By directly comparing the time histories using the error measure, the variation in numerical simulations was assessed in a quantitative manner, as well as that in centrifuge experiments; this suggests that the validity of computational techniques can be evaluated in an objective way by considering both experimental and analytical variations.