

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420502

研究課題名(和文) 地盤構造物系に対する遠心模型実験における拡張型相似則の適用性に関する研究

研究課題名(英文) Validation of the generalized scaling law for dynamic soil structure interaction problem

研究代表者

飛田 哲男 (Tobita, Testuo)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：00346058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、拡張型相似則の妥当性の検証を行うことを目的とした。遠心加速度が4.9gから50gの範囲において、曲げモーメント、加速度、過剰間隙水圧に関する同相似則の適用性が確認された。拘束圧が小さい場合に、同相似則の適用限界が示された。また、複数の研究機関と共同で飽和傾斜地盤の側方変位に着目した実験を行った。その結果、変位の相似則は、同一研究機関の結果は妥当であったが、機関ごとでは入力加速度等が異なり、実換算変位量はばらついた。また、海外の研究機関(米英中台湾日)と共同で飽和傾斜砂地盤について一斉実験を行った。その結果を国際ジャーナルに投稿中である。

研究成果の概要(英文)：The generalized scaling laws for bending moment, acceleration and pore pressure are validated through the shaking table tests of various centrifugal acceleration levels. A limitation was revealed when the small centrifuge acceleration is used (4.9g) which causes a low level of confining stress. Comparison of the results of identical experiments among several research institutes showed some variations of lateral deformation of the liquefied ground because of difficulties associated with generating the identical input motions. Overseas collaboration (UK, USA, China, Taiwan, Japan) was established to conduct the identical experiments and compare results in the workshop held in Washington DC in 2015. In the workshop, causes of variation observed in the test results were clarified and procedure to have better agreements among test results were discussed for the future collaboration. Details of the experiments and their results are under publication.

研究分野：地盤地震工学

キーワード：遠心模型実験 相似則 一斉試験 液状化 杭

1. 研究開始当初の背景

近年、地盤地震工学の分野では、数値解析法の発展と共にその妥当性を検討するため、大規模な地盤・構造物系に対する模型実験の必要性が高まっている。しかし、既存の実験装置では振動台の搭載容量等、実験模型の寸法に制限がある。そこで Iai and Tobita et al. (2005)は、遠心場での地盤・構造物系の動的模型実験における拡張型相似則を提案した(表1)。この相似則は、平成 18-19 年度科学研究費補助金(研究分担/研究代表: 京都大学井合進教授)等を活用し、我々の研究グループにより基本的な物理パラメータに対し精密に検証され適用性が示されてきた(西田ら 2007, 矢追ら 2010, Tobita et al. 2009, 2011, 2012)。しかし、変形量や曲げモーメントといった構造物の設計における重要なパラメータについては、相似係数が大きく高精度な計測方法が要求されることが判明したため、未だ十分に検証されていない。これらのパラメータについても同相似則が成立することが確認されれば、既存の遠心力载荷装置を用いて、より大規模な地盤・構造物系に対し模型実験が可能となり、同分野のブレークスルーとなることが期待される。

2. 研究の目的

本研究は、拡張型相似則という一般性を有する原理の適用性を検証するものである。遠心力場における拡張型相似則 (Iai & Tobita et al. 2005) とは、「1G 場における相似則」(縮尺:  $1/\mu$ ) (Iai 1989) と「遠心場における相似則」(縮尺:  $1/\eta$ ) とを複合した 2 段階の相似則である。最大のメリットは、遠心場における模型縮尺をこれまでの  $1/\eta$  から  $1/(\mu\eta)$  に小さくすることができることであり、長大構造物に対する模型実験が可能となる(表1, 図1)。本研究は、高い計測精度が要求されるためこれまで検証が困難であった変形量や曲げモーメント等の物理量に着目し、同相似則の適用性を検証し、地盤・構造物系の耐震設計技術に資する成果を得ることを目的とする。

表1 拡張型相似則の変換係数

|         | 仮想 1g 場       | 遠心場         | 実物/遠心場                  |
|---------|---------------|-------------|-------------------------|
| 長さ      | $\mu$         | $\eta$      | $\mu \eta$              |
| 時間      | $\mu^{0.75}$  | $\eta$      | $\mu^{0.75} \eta$       |
| 加速度     | 1             | $\eta^{-1}$ | $\eta^{-1}$             |
| 変位      | $\mu^{1.5}$   | $\eta$      | $\mu^{1.5} \eta$        |
| 水圧      | $\mu$         | 1           | $\mu$                   |
| 間隙流体の粘性 | $\mu^{-0.75}$ | $\eta^{-1}$ | $\mu^{-0.75} \eta^{-1}$ |

$\mu$  = 実物 / 仮想 1g 場  
 $\eta$  = 仮想 1g 場 / 遠心場

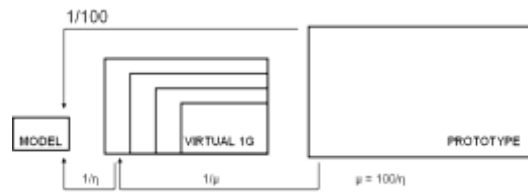


図1 拡張型相似則と提案する Modeling of models の概念図

3. 研究の方法

本研究では、遠心力場での地盤・構造物系の動的模型実験における拡張型相似則について、異なる遠心場において行った実験の実物換算値が一致することをもって、適用性の検証を行う(図1)。特に、相似係数が大きい物理パラメータに関する検証を目的とするため、模型製作及び各種計測において高い精度が要求される。このため系統的な実験計画を策定し、規格化した方法で模型の作成を行う。本研究では、特に模型地盤の強度と入力加速度の原型換算値を各実験ケースで統一させる必要があるため、加振実験前に所要の精度が得られていることを確認する。さらに、実験の再現性についても確認することは必須である。

4. 研究成果

乾燥および飽和水平成層地盤内に、杭下端と杭頭固定条件の杭を 2x2 に配置した構造物を設置した杭・地盤系を対象に一連の動的遠心模型実験を実施した(図2)。この実験を通じ、加速度、過剰間隙水圧、地盤強度、曲げモーメント等に関する拡張型相似則の適用性を検証した。乾燥砂を用いた実験では、相似係数の組み合わせを 4 パターン、飽和砂を用いた実験では同 3 パターン考慮した。当初の予定では、乾燥砂の傾斜地盤で実験するとしていたが、より基本的条件での相似則の適用性を検討するため、まず水平成層地盤で乾燥砂と飽和砂による実験を行うこととした。得られた結論は以下の通りである。遠心加速度が 4.9g から 50g の範囲において、曲げモーメント、加速度、過剰間隙水圧に関する拡張型相似則の適用性が確認された。ただし、4.9g の場合には、杭頭が負の方向に変位する場合に、曲げモーメントの鉛直分布が他のケースと一致しない結果となった。その原因として、地盤の相対密度の違い、杭頭の加速度の違い、地盤のせん断剛性の違いに着目し検討した。その結果、拘束圧の小さい 4.9g の場合、他のケースよりも地盤のせん断剛性が小さいことがわかった。これは拡張型相似則の限界を示すものであると考えられる。

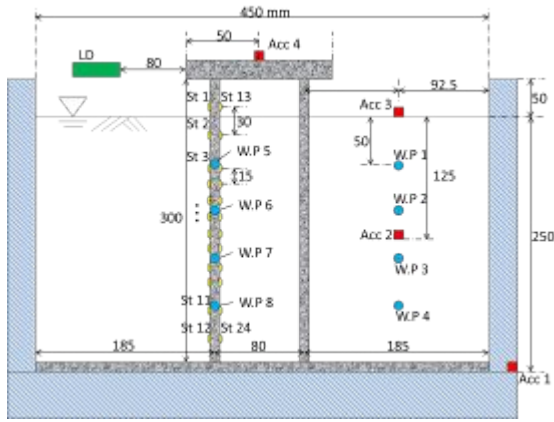


図2 実験模型断面図(Case 5~7) [LD: レーザー変位計, Acc: 加速度計, St: ひずみゲージ, W.P: 水圧計]

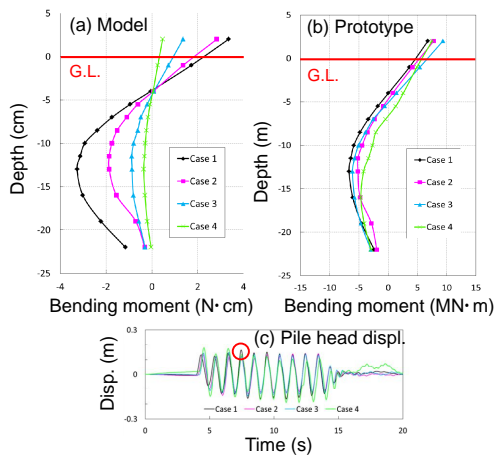


図3 乾燥砂地盤における曲げモーメント分布 (Case 1-4): (a)模型, (b)原型, (c) 杭頭変位時刻歴

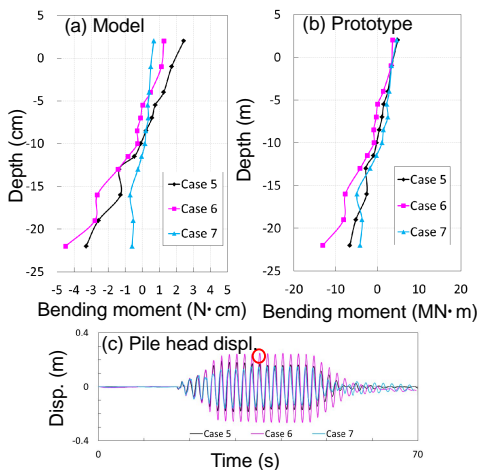


図4 飽和砂地盤における曲げモーメント分布 (Case 1-4): (a)模型, (b)原型, (c) 杭頭変位時刻歴

次に、傾斜地盤の液状化時の挙動について、特に側方変位量に着目して実験を行った。また、同相似則の検証に対する信頼性を確保するため、他の3つの研究機関（国内2，海外1）と共同で一斉実験を行った。その結果、

変位の相似則については、同一研究機関の結果を比較すれば、妥当とみなせる結果が得られた。しかし、機関ごとの実験結果を比較すると、入力加速度の違いや装置の違いのため、実物換算した変位量にはばらつきが見られる結果となった。

加速度に関する拡張型相似則は、センサーの傾斜による残留値を除き、全てのケースにおいて時間領域、周波数領域でよく一致し、10g から 50 g の遠心場で同相似則の適用性が確認できた。過剰間隙水圧の上昇と消散過程については、先と同様の遠心場においては、おおむね一致し同相似則の適用性が確認できた。側方変位については、25g 場と 50g 場では、加振開始から 20 秒までよく一致する傾向が見られたが、残留変位量については有意な差が生じている。このことから、拡張型相似則の限界として考えられる 10g 以下の低い遠心場に加え、同相似則の適用に当たっては、変位の大きさについても遠心力の大きさと縮尺の関係から許容できない誤差が生ずることがわかった。すなわち、20%を超えるような大きなせん断ひずみが発生する液状化時の地盤模型に対する拡張型相似則の適用性について、理論的な誤差の大きさを求めておく必要がある。

表2 実験ケース (KU)

| Case | 遠心力 (g) | 仮想 1g 場 $\mu$ | 遠心場 | 仮想 1g 場*遠心場 $\mu^*$ |
|------|---------|---------------|-----|---------------------|
| 1 平坦 | 10      | 10            | 10  | 100                 |
| 2 平坦 | 25      | 4             | 25  | 100                 |
| 3 平坦 | 50      | 2             | 50  | 100                 |
| 4 傾斜 | 25      | 4             | 25  | 100                 |
| 5 傾斜 | 50      | 2             | 50  | 100                 |

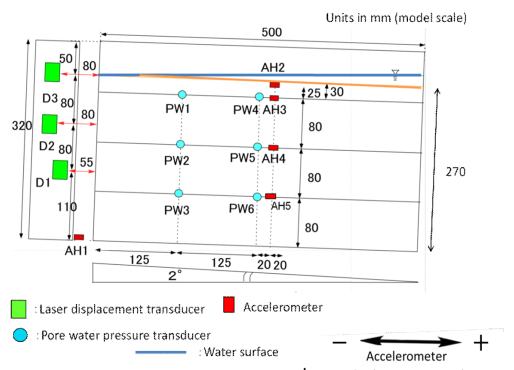
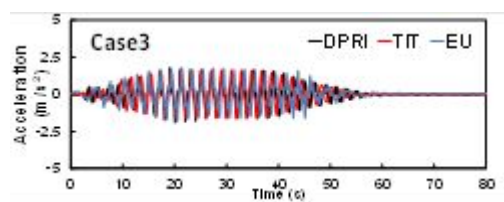


図5 模型断面図 (KU)



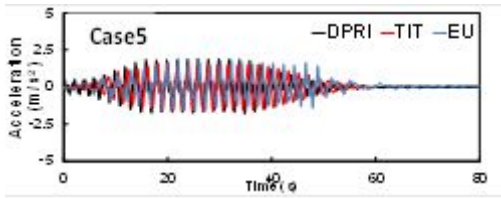


図 6 入力加速度時刻歴の比較

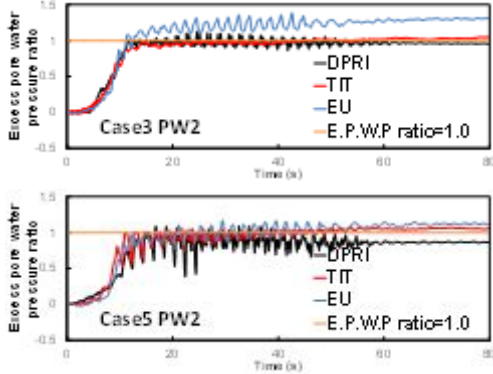


図 7 加振時の過剰間隙水圧時刻歴の比較

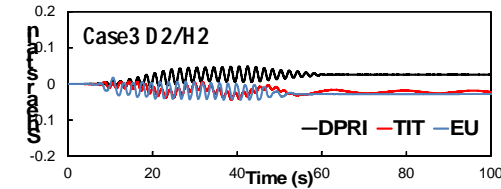


図 8 平坦地盤せん断ひずみ時刻歴

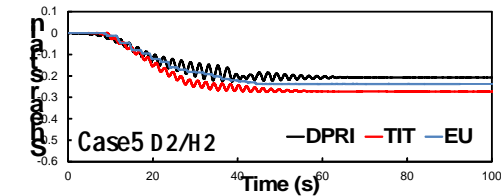
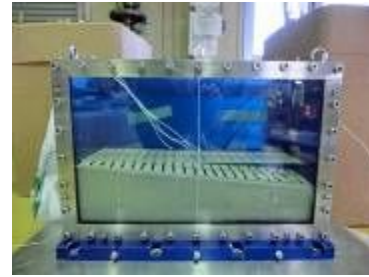


図 9 傾斜地盤せん断ひずみ時刻歴

本研究では、国際プロジェクトへの展開を目指して、海外の研究機関と共同で実験を行った（米国、英国、中国、台湾、日本）。実施した実験は、参加機関で同一の砂、模型諸元を有する地盤模型を剛土層内に作成し、その動特性を調べるものである。地盤は飽和傾斜地盤とし、加振段階を徐々に増加させたときの、応答加速度、過剰間隙水圧、地盤変形量を測定した。特に本研究では、地表面形状の違いに着目して検討した（図 10）。その結果、地盤応答加速度にばらつきが見られたので、その原因について考察し、半径方向の遠心加速度の影響であることを明らかにした。成果は国際共同研究としてジャーナルに投稿中である。

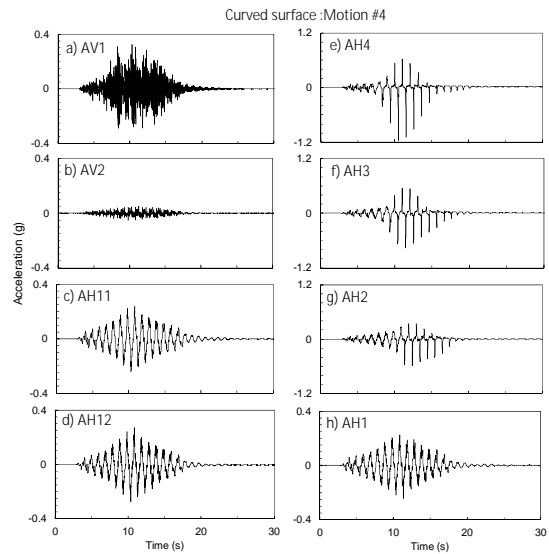


(a) 円弧地盤

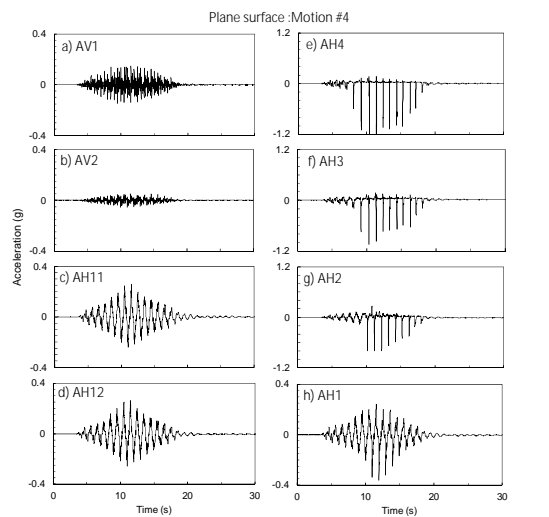


(b) 平面地盤

図 10 一斉試験で検討した地盤形状



(a) 円弧地盤



(b) 平面地盤

図 11 加速度時刻歴(入力加速度大)

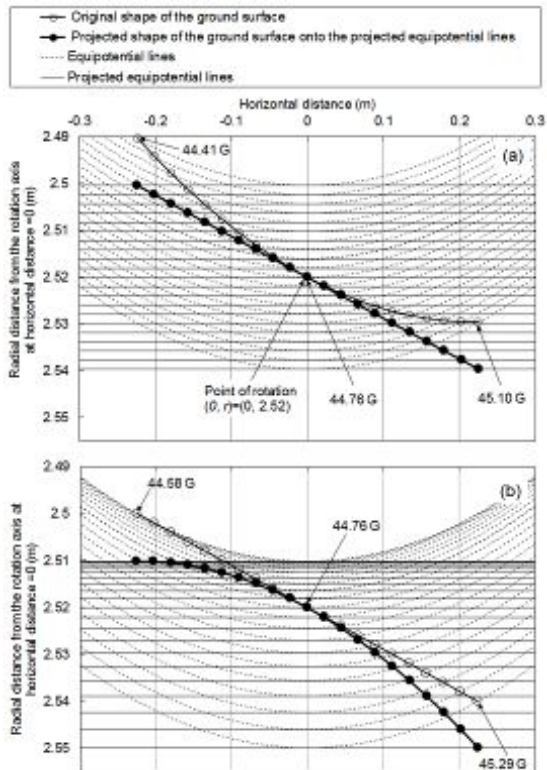


図 12 模型地盤の形状（白丸）と遠心加速度の等値線上にプロットした地盤形状: (a)円弧地盤, (b)平面地盤

<引用文献>

Iai, S. Tobita, T. and Nakahara, T. (2005). "Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests." *Geotechnique*, 55(5), 355-362.

Iai, S. (1989). "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field." *Soils and Foundations*, 29(1), 105-118.

Tobita, T., Iai, S., von der Tann, L. and Yaoi, Y. (2011). "Application of the generalised scaling law to saturated ground." *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 11(4), 138-155.

飛田哲男, Escoffier, S., Chazelas, J. L., 井合進 (2012). "遠心模型実験における拡張型相似則の適用性." *地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012, 地盤工学会関西支部*, 159-166.

Tobita, T., Iai, S., and Noda, S. (2009). "Study on generalized scaling law in centrifuge modeling with flat layered media." *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ICSMGE)*, M. Hamza et al. (Eds.), Alexandria, Egypt, 664-667.

西田一磨, 飛田哲男, 井合進. (2007). "杭模型による拡張型相似則の検証." 第 42 回地盤工学研究発表会 (名古屋), 645.

矢追祐土, 井合進, 飛田哲男. (2010). "水平成層飽和砂質地盤に対する拡張型相似則の適用性." 第 45 回地盤工学研究発表会 (松山), E-07-759.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6 件)

Tobita, T. and Iai, S. (2015) New modelling of models for dynamic behavior of a pile foundation. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15ARC), Fukuoka, Japan <http://doi.org/10.3208/jgssp.JPN-026>.

Tobita, T., Manzari, M., Ozutsumi, O., Ueda, K., Uzuoka, R., and Iai, S. (2015). "Benchmark centrifuge tests and analyses of liquefaction-induced lateral spreading during earthquake." *Geotechnics for Catastrophic Flooding Events - Iai (Ed)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02709-1, 127-182.

Manzari, M.T., Kutter, B.L., Zeghal, M., Iai, S., Tobita, T., Madabhushi, S.P.G., Haigh, S.K., Mejia, L., Gutierrez, D.A., Armstrong, R.J., Sharp, M.K., Chen, Y.M. and Zhou, Y.G. (2015). "LEAP projects." *Geotechnics for Catastrophic Flooding Events - Iai (Ed)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02709-1, pp. 109-116.

Masuda, S., Tobita, T. and Iai, S. (2014). "Validation of the generalized scaling law for liquefaction-induced lateral spreading." *EIT-JSCE Joint International Symposium on International Resource Development for Disaster-Resilient Countries 2014*, August 25-27, 2014, Bangkok, Thailand.

白可, 飛田哲男, 井合進. (2015). "側方流動に関する拡張型相似則の検証." 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会, III-31.

Tobita, T., Masuda, S., and Iai, S. (2014). "New modeling of models for liquefaction-induced lateral spreading." 第 14 回日本地震工学シンポジウム, 3293-3302.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飛田哲男 (TOBITA, Tetsuo)  
 京都大学防災研究所・准教授  
 研究者番号: 00346058