

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282103

研究課題名(和文) 地盤災害予測のための拡張型相似則に基づく遠心力場での一斉実験・一斉解析

研究課題名(英文) Multiple centrifuge tests and numerical analyses for geotechnical hazard prediction based on generalized scaling law

研究代表者

井合 進 (Iai, Susumu)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：20359780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：大地震時の液状化などの地盤災害を高精度に再現する遠心力場での空間・時間スケール縮小模型実験において、従来の縮尺の限界(50分の1)を超え、100～1000分の1の縮尺領域での新たな模型実験を可能とする拡張型相似則に基づいた地盤災害予測の高精度化を図ることを目的とする。このため、遠心力場での一斉実験(3研究機関による同時平行での同一模型の実験)および一斉解析(海外の研究機関を含む4研究機関による同時平行での同一模型実験の解析(ブラインド予測形式))による地盤災害予測を行うことにより、予測精度の飛躍的な高度化を図った。

研究成果の概要(英文)：Geo-hazards induced by strong earthquakes, including liquefaction, have been evaluated by centrifuge model tests by scaling spacial and time factors into smaller model scales. The objective of this research is to achieve a high precision in geo-hazards evaluation by applying the generalized scaling law, which expands the limitation of scaling factor (1:50) in the conventional centrifuge model tests into the scaling factors ranging from 1:100 to 1:1000. By performing parallel centrifuge tests by three research groups and also running parallel numerical analyses by four research groups, including overseas institutions, referring to the same prototype geo-hazards, this research project has achieved the high precision in geo-hazards evaluation.

研究分野：地盤地震工学

キーワード：液状化 遠心力場 相似則 地盤流動 国際研究者交流

1. 研究開始当初の背景

大地震時の地盤災害は、液状化をはじめとする地盤の著しい非線形性が支配的な影響を与える。さらに、地震による動的な外力と重力による静的な外力の同時作用下における地盤と構造物の相互作用が影響する、という極めて複雑な学術上の課題である。

この課題解決に向け、従来、遠心力場での模型振動実験が実施されてきたが、その模型縮尺には遠心加速度による限界（50分の1）があり、この限界が、大規模な都市施設を対象とする研究上の懸案事項となっていた。

また、地盤災害予測における従来の研究は、個別の研究機関において、個別の実験施設や数値解析手法を用いた単独プロジェクトとして実施されてきた。これらの従来の研究アプローチでは、当該実施機関内における種々の結果の整合性・再現性は確保されるが、仮に、他の研究機関が同一課題について取り組んだ場合に、その結果に再現性や整合性があるか、という意味での結果の普遍性・客観性についての検討は、皆無であった。

このため、遠心力場での模型実験における模型縮尺の限界を大幅に打破する新たな原理の導入と、既往の単一研究グループによる研究アプローチでの限界を打破するための新たな研究体制の導入が、地盤災害予測精度の向上のために急務とされてきた。

2. 研究の目的

大地震時の液状化などの地盤災害を高精度に再現する遠心力場での空間・時間スケール縮小模型実験において、従来の縮尺の限界（50分の1）を超え、100～1000分の1の縮尺領域での新たな模型実験を可能とする拡張型相似則を新たに導入し、これに基づいた地盤災害予測の高精度化を図ることを目的とする。

また、実験結果、解析結果の普遍性を高めるため、遠心力場での一斉実験（3研究機関による同時平行での同一模型の実験）および一斉解析（4研究機関による同時平行での同一模型実験の解析（ブラインド予測形式））による地盤災害予測を行うことにより、予測精度の飛躍的な高度化を図ることを目的とする。

従来の地盤災害予測研究は、個々の研究機関において、個別の実験施設や数値解析手法を用いた単独プロジェクトとして実施されてきたが、本研究では、複数の研究グループが連携して行う点に獨創性がある。

3. 研究の方法

遠心力場における相似側として、本研究で新たに導入する「拡張型相似則」とは、仮想模型の概念を導入して、2段階スケールに基づいて縮尺するものである。既往の遠心模型実験では、遠心力載荷装置の性能限界に依りて定まる原型の寸法/模型の寸法 = の上限を超える模型実験は実施できなかったが、

拡張型相似則を用いることにより、これまでの上限値の μ 倍に相当する原型の寸法/模型の寸法 = μ という縮尺での模型実験が可能となり（図1）、地盤流動災害のように広域が対象となる問題や大規模な都市施設の耐震問題の解決に力を発揮すると期待されている。

拡張型相似則については、これまでの研究で、基礎的な水平成層地盤についての適用性が明らかにされてきたが、災害に直結する地盤流動現象への適用性の検討は未だなされていない。本研究では、これについて原型を一定に保ち、仮想模型の縮尺を種々に変化させた新型の Modeling of Models（「模型」の模型実験）により検討した。

地盤流動は予測が一段と難しい問題でありながら、災害に直結する課題であり、既往の研究アプローチとしての個別の研究機関による研究では、図2上段に示すように、当該機関で実施した実験と解析の整合性は確認できるが、その結果にどの程度の精度や普遍性があるかについては、不明であった。

本研究における一斉解析・一斉実験では、地盤条件・加振条件について、標準的と考えられる“同一”実験条件・解析条件で、初回の検討を行った。その結果は、実験者・解析者に依存して地盤の飽和度などの隠れた諸条件が異なる結果、予測が難しい現象であるほど、ばらつきが大きくなることが予想される（図2中段）。これを基に、複数の実験者・解析者が一同に会して、その原因を検討し、この結果を反映して、再実験・再解析を実施した。最終的には、ばらつきの要因となる詳細原因が明らかになり、その結果を反映した実験・解析結果が、すべて整合するようになり、これに基づく、精度の高い普遍性のある地盤災害予測が可能となっていくことが期待される（図2下段）。以上の基本コンセプトに基づいて、本研究を実施した。

研究期間内には、地盤災害研究の基本となる水平成層地盤と傾斜地盤の地盤系、および液状化により地盤流動が発生する傾斜地盤中に打設された杭を対象とする地盤・構造物系、を対象として研究を行った。

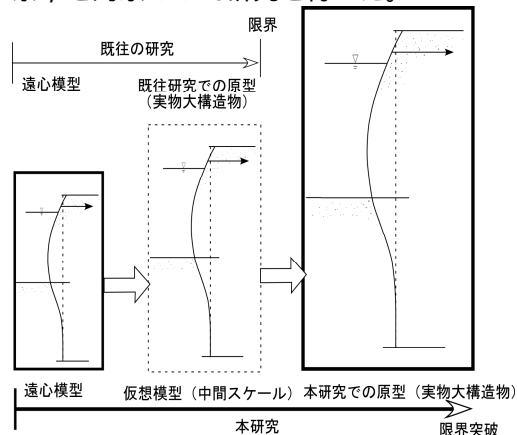


図1 遠心力場における拡張型相似則の適用研究の概念図（矢板式護岸構造物の場合）

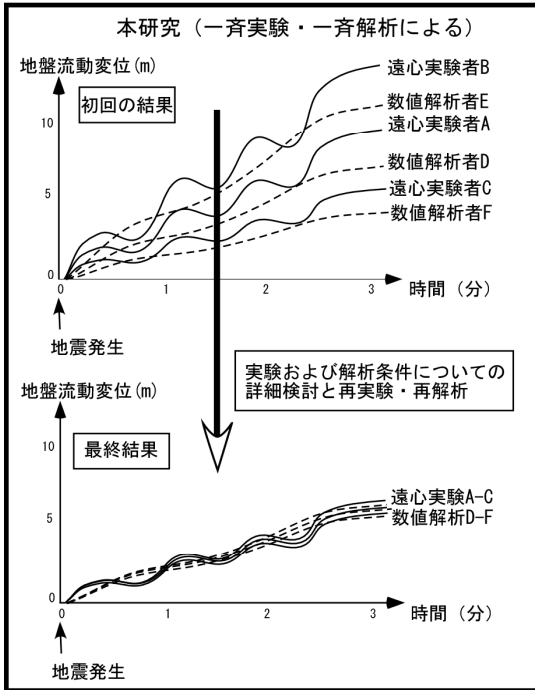
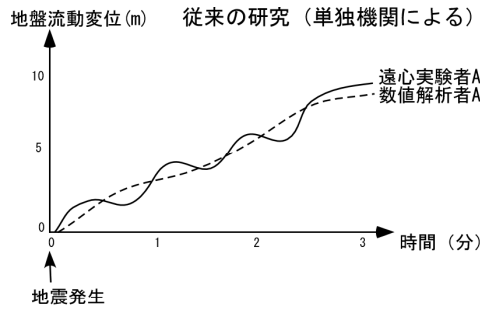


図2 本研究（一斉実験・一斉解析）で得られる結果の概念図（地盤流動の場合）

遠心力場での一斉実験には、京都大学、愛媛大学、東京工業大学の3機関が参画し、表1に示す諸元の遠心载荷装置を用いた。

また、一斉解析には、液状化解析の実務で実績を有するFLIP（京都大学・明窓社）およびLIQCA（徳島大学）に加え、大変形（有限ひずみ）解析理論を組み込んだFLIP TULIP（JR総研・京都大学）を用い、さらには、米国GWU/RPIグループの参画も得て、4種類の数値解析を実施して、相互比較を行った。

表1 一斉実験に用いた遠心载荷装置諸元

	京都大学KU	東京工業大学TIT	愛媛大学EU
有効半径 (m)	2.5	2.45	0.8
せん断土槽内寸 (m)	0.5(W) x 0.2(D) x 0.32(H)	0.5(W) x 0.2(D) x 0.315(H)	0.4(W) x 0.16(D) x 0.22(H)
積載容量 G ton	24	50	6

4. 研究成果

本研究期間中に対象とした各種の地盤・構造物系のうち、液状化により地盤流動が発生

する傾斜地盤中に打設された杭の挙動に関する一斉実験、一斉解析についての研究成果を中心として以下に示す。

(1) 一斉実験結果

図3に、京都大学による実験に用いられた模型実験断面を示す。東京工業大学での模型実験断面も同様である。なお、愛媛大学での模型実験断面の高さは、図3に示す断面の高さの約2/3となっている（表1）。

遠心模型実験では、模型縮尺を原型の寸法/模型の寸法 = $\mu=100$ に統一し、そのうちの遠心力場での縮尺を $=50, 30, 21, 13$ （それぞれCase1~4）と変化させた。この結果得られた杭頭および地盤変位の実験結果は、図4に示すとおり、異なる実験条件で得られたにもかかわらず、相互により一致を見られ、拡張型相似側の適用性が確認された。また、異なる実験実施機関相互の比較でも、整合性のある実験結果が得られる見通しとなった。

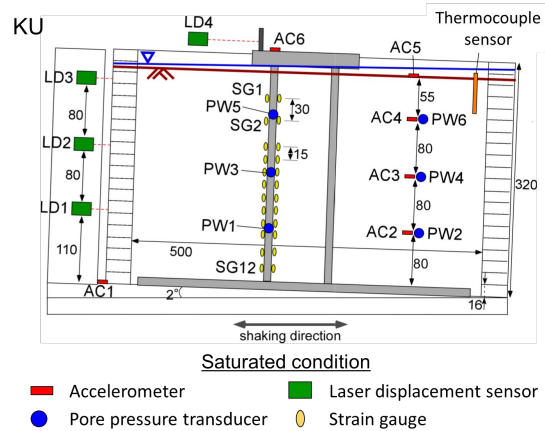


図3 模型実験断面

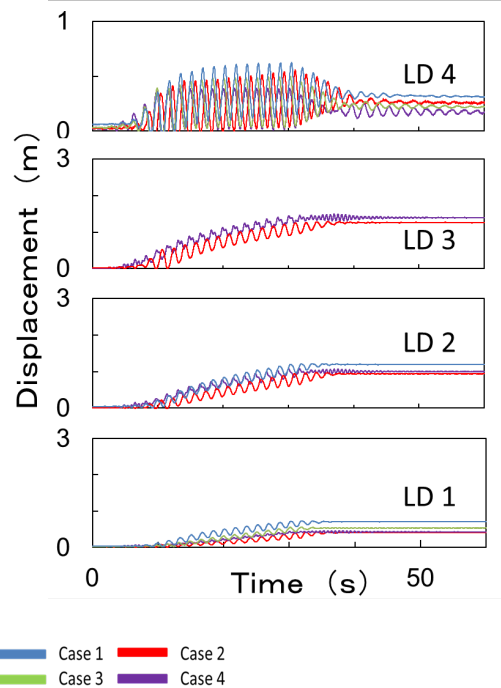


図4 傾斜地盤中の杭模型の杭頭（LD4）および地盤変位（LD1~3）の実験結果（拡張型相似側による原型値に換算）

(2)一斉解析結果

一斉解析では、原型に換算した値について複数の解析を行った。

FLIP（京都大学・明窓社）による解析は2次元解析とし、杭と地盤の3次元な相互作用を表現する機構として、杭・地盤相互作用バネ要素を用いて解析した。解析に用いた地盤パラメータは、地盤模型に用いた豊浦砂の要素試験結果に基づいて決定している。解析による杭頭(LD4)および地盤変位(LD1~3)を模型実験結果の代表値と比較したところ、図5に示すとおり、解析結果は実験結果よりも小さめの値となったが、杭に発生する残留曲げモーメントは、図6に示すとおり、概ね整合性のある結果となった。

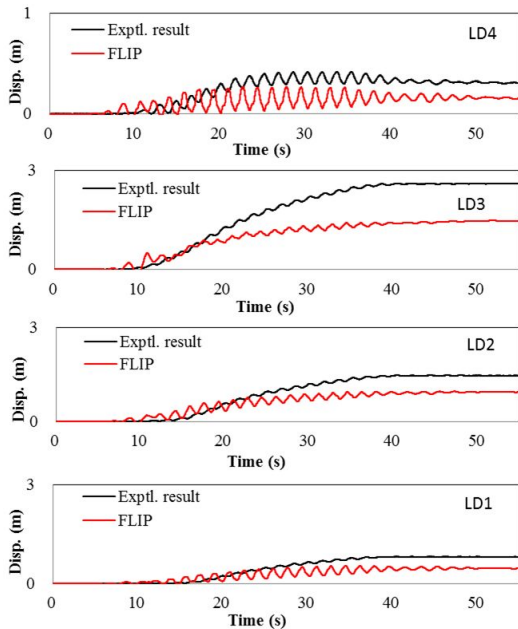


図5 傾斜地盤中の杭模型の杭頭(LD4)および地盤変位(LD1~3)の実験と解析結果の比較(FLIP)

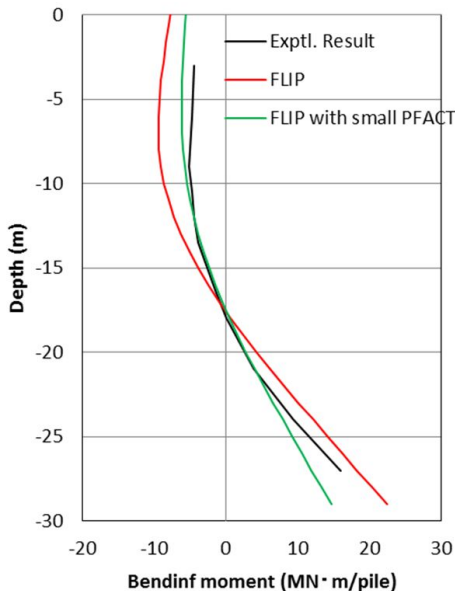


図6 傾斜地盤中の杭模型の残留曲げモーメントの実験と解析結果の比較(FLIP)

他方、LIQCA（徳島大学）による解析は、3次元解析とした。解析結果は図7に示すとおりとなり、地盤変位(LD1~3)は実験結果と整合性のある結果が得られたが、杭頭変位(LD4)は、実験結果よりも小さめの値となった。杭に発生する残留曲げモーメントは、図8に示すとおり、実験結果と概ね整合性のある結果が得られた。

その他、米国グループによる解析も3次元解析としたが、地表面付近において、杭と地

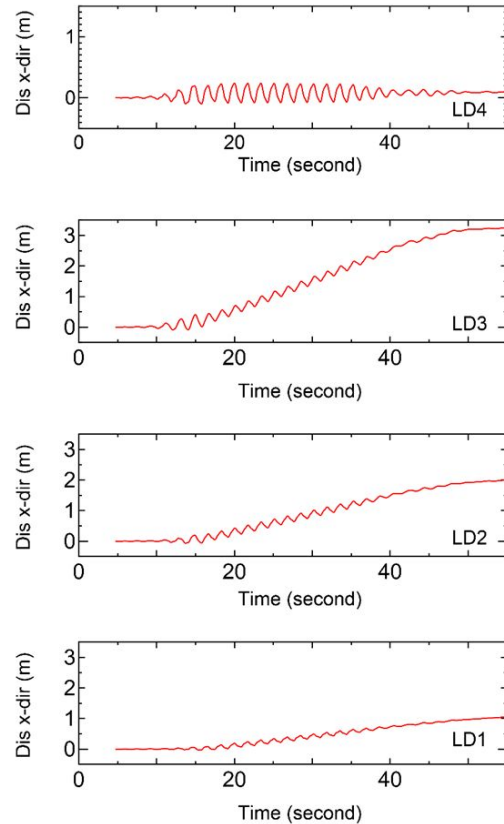


図7 傾斜地盤中の杭模型の杭頭(LD4)および地盤変位(LD1~3)の解析結果(LIQCA)

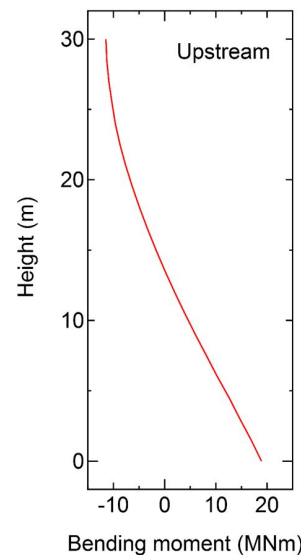


図8 傾斜地盤中の杭模型の残留曲げモーメントの解析結果(LIQCA)

盤の相互作用により、過剰間隙水圧に著しい負圧が発生する傾向が見られた。また、変位については、実験と解析との整合性が見られるが、加速度については、実験と解析での整合性が見られないなど、今後検討を要する点も見られた。

(3)研究成果のまとめと意義

本研究により、従来の遠心力場での模型縮尺の限界(50分の1)を超えた大縮尺領域における大深度の地盤、従来よりも大型で複雑な地盤・構造物の被害予測が可能となり、その予測精度や予測の信頼度が格段に向上する見通しが得られた。

また、本研究は、本研究分野における世界で最先端の研究プロジェクトの実現という国際的な意義を有するもので、米・英なども連携した世界規模での大規模プロジェクト開始への先導的なリーダーシップを提供するものとなり、LEAP (Liquefaction Experiment and Analysis Projects)という総称で、複数の国際プロジェクトの推進へ向けた大きな潮流を形成する形で発展している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計37件)

Ueda, K. & Iai, S., Numerical predictions for centrifuge model tests of a liquefiable sloping ground using a strain space multiple mechanism model based on the finite strain theory, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 査読有, 92, 2017 (in print)

Tobita, T., Ashino, T., Ren, J. & Iai, S., Effect of the radial gravity field on dynamic response of saturated sloping grounds in centrifuge model testing, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 査読有, 92, 2017 (in print)

Ueda, K., Iai, S. & Tobita, T., Centrifuge model tests and large deformation analyses of a breakwater subject to combined effects of tsunami, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 査読有, 91, 2016, 294-303

〔学会発表〕(計33件)

Iai, S., Numerical analysis modelling of liquefaction: current status and remaining issues, 招待講演, LEAP Washington Workshop, 2015, Washington DC, USA

Towhata, I., Qualification of residential land from the viewpoint of liquefaction vulnerability, 招待講演, 6th International Conference on

Earthquake Geotechnical Engineering, 2015, Christchurch, New Zealand

〔図書〕(計7件)

Iai, S. (ed), *Developments in Earthquake Geotechnics*, Springer, 2017, 300 (in print)

Tobita, T., Manzari, M., Ozutsumi, O., Ueda, K., Uzuoka, R., and Iai, S., *Benchmark centrifuge tests and analyses of liquefaction-induced lateral spreading during earthquake*, Taylor & Francis Group, London, 2015, 127-182

Iai, S. (ed), *Geotechnics for Catastrophic Flooding Events*, Balkema, 2014, 255

6. 研究組織

(1)研究代表者

井合 進 (IAI, Susumu)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 20359780

(2)研究分担者

飛田哲男 (TOBITA, Tetsuo)
関西大学・工学部・准教授
研究者番号: 0034058

菅野高弘 (SUGANO, Takahiro)
国立研究開発法人海上・港湾・空港技術研究所・特別研究官
研究者番号: 10187635

東畑郁生 (TOWHATA, Ikuo)
関東学院大学・理工学部・客員教授
研究者番号: 20155500

竹村次朗 (TAKEMURA, Jiro)
東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 40179669

渦岡良介 (UZUOKA, Ryosuke)
徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号: 40333306

岡村未対 (OKAMURA, Mitsu)
愛媛大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 50251624

一井康二 (ICHI, Koji)
広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 70371771

太田秀樹 (OHTA, Hideki)

中央大学・研究開発機構・教授
研究者番号： 80026187

(3)研究協力者

小堤 治 (OZUTSUMI, Osamu)
(株)明窓社・代表取締役

上田恭平 (UEDA, Kyohei)
(財)JR総合研究所・研究員(2016.3まで) / 京都大学防災研究所・助教(2016.4より)

澤田俊一 (SAWADA, Shunichi)
植村一瑛 (UEMURA, Kazuaki)
応用地質 (株)

Majid MANZARI
George Washington University, USA,
Professor

Mourad ZEGHAL
Rensselaer Polytechnic Institute, USA,
Professor

Bruce KUTTER
University of California, Davis, USA,
Professor

Gopal MADABUSHI
University of Cambridge, U.K.,
Professor