

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19676004

研究課題名（和文） 既存耐震実験施設の有機的連携による防災技術向上策の開発

研究課題名（英文） Improvement of Disaster Mitigation Technology by Functional Cooperation of Existing Seismic Test Facilities

研究代表者

高橋 良和（TAKAHASHI YOSHIKAZU）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10283623

研究成果の概要（和文）：本研究は、土木構造システムの非線形動的挙動の把握を統一目標にして、構造要素挙動の定量的把握と大規模システム挙動の把握に関する2つの課題について、3種類の規模の異なる実験を連携することにより、その検討を行った。世界最大振動台における16体模型一斉加振実験による統計的評価、民間企業最大規模振動台における地盤・基礎を有するRC柱の実験による構造システム挙動評価である。また、大規模システムの振動台実験代替技術として、マルチスケール分散ハイブリッド実験手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：For the evaluation of dynamic nonlinear of civil infrastructural systems, this study consists of 2 major challenges by 3 different-scale experimental tests. Simultaneous shake table tests of 16 RC columns were conducted at the world largest 3D shake table, E-Defense, and the statistical data can be obtained. At Obayashi Corporation, shake table tests of a large-scale structural system specimen in which a RC column with foundation and soil were conducted. As the alternative technique of large-scale shake table tests, a multi-scale distributed hybrid simulation was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2008年度	16,700,000	5,010,000	21,710,000
2009年度	34,900,000	10,470,000	45,370,000
2010年度	27,200,000	8,160,000	35,360,000
2011年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
総計	88,900,000	26,670,000	115,570,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震防災，振動台実験，ハイブリッドシミュレーション，動的非線形挙動

## 1. 研究開始当初の背景

構造物の耐震設計の背景となる、動的応答特性の基礎データは、まず実験的手法により求められることになるが、静的実験に比べて動の実験は装置や試験体の制約が多く、定量的評価するための十分な数のデータが得られているとは言えないのが現状である。ただし、土木構造分野においても従来実施されて

いた静的実験を中心とする体系から、動的挙動・応答を再現しようとする高度な実験体系へと展開してきており、世界最大の振動台 E-ディフェンスが稼働を始めたこと、また地理的分散実験が現実的な実験の手法の選択肢となりつつある現在、改めて土木構造の動的挙動を知るための実験的研究を再構築する時期に来ていると考える。

## 2. 研究の目的

本研究は、既存実験施設を有機的に連携し、「構造物全体の崩壊過程を見極める」、「崩壊過程の動的挙動予測精度を上げる」防災技術向上策を構築することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では、大きく分けて①構造物の動的応答特性の定量的評価、②構造システムの動的応答特性の把握の2つの課題に対し、世界最大震動台による同一設計による構要素の一斉加振実験、民間最大規模振動台による大型構造システム模型による振動実験、そしてその代替手法として提案するマルチスケール分散ハイブリッド実験手法の確立と遠心場荷重施設によるハイブリッド実験の、規模が異なる3種類の実験により検討を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 構造物の動的応答特性の定量的評価

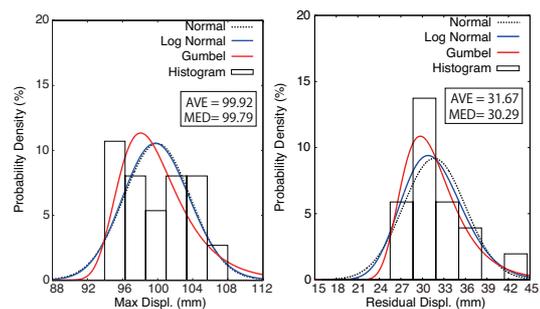
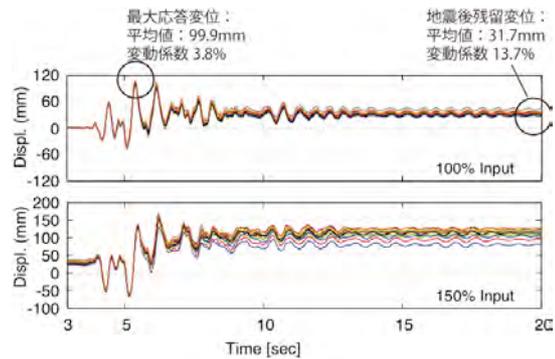
構造物の動的応答特性には不確実性が存在する。従来では材料強度特性のばらつきを用いた数値解析により、応答の不確実性が間接的に評価されてきたが、本テーマでは、代表的な構造物としてRC橋脚を対象とし、応答の不確実性を評価しうるデータを計測するため、縮小RC橋脚模型16体の一斉加振実験を中心とした一連の研究を実施した。

一般に振動台の制御は、試験体の応答による相互作用の影響を受ける。その制御は試験体が非線形挙動を示すほど困難となるため、複数回の振動台実験による比較研究は困難となる。そこで本研究では、2009年度に同一設計、同時製作の16体の試験体を、世界最大三次元震動台 E-ディフェンスの1つのテーブル(20×15m)上に設置し、一斉加振することにより、同一動的作用を保証した動的応答特性の基礎データの収集を行った。比較研究の前提条件である動的作用の同一性を担保しつつ、線形応答から非線形応答に至る地震応答特性の不確実性を評価しうるデータを得ることができた。

大きく非線形応答した実験(100% Input)において、耐震設計指標である変位応答の最大値および残留変位に着目すると、最大応答値および残留変位の変動係数がそれぞれ3.8%、13.7%であった。入力地震の変動係数2.5%、構造物ばらつきの目安である固有周期の変動係数4.8%であること、また非線形動的応答結果であることを考えると、最大応答変位のばらつきは極めて小さいものといえる。一方、残留変位の変動係数が最大応答値の約4倍程度の値であることは、残留変位を用いた検討における不確実性の議論の基礎データとなる。



E-ディフェンスにおける一斉加振実験



非線形動的応答の比較と確率モデル

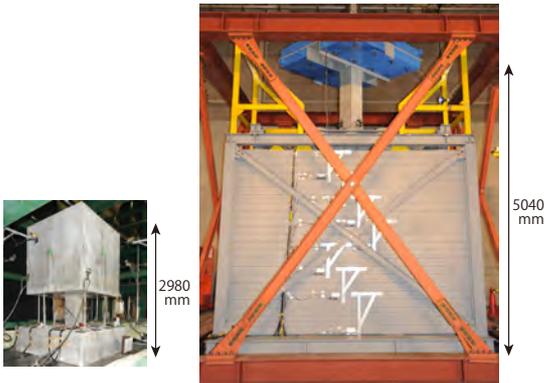
### (2) 非線形構造物-基礎-地盤系からなる大規模構造システムの動的応答特性

橋梁や建築構造物は地盤上に建設されるため、その動的応答特性は地盤や基礎の影響を強く受ける。構造物の耐震設計において、主たる塑性化は地上構造物に発生させることを基本としているものの、従来より実施されている振動台実験では、上部構造物を線形構造としてモデル化し、基礎の非線形挙動に着目しているものがほとんどであり、実際の耐震設計に即した動的相互作用実験は実施されていないのが現状である。本研究では、上部構造の非線形挙動を十分に再現しうる模型による構造物-杭基礎-地盤システムの振動台実験を、2010年に実施した。

実験模型の上部構造は、(1)節で示した E-ディフェンス実験で用いたものと同じ RC 柱に、質量 10.1t の重錘を載荷したものである。この柱の基礎として、長さ 3300mm の鋼管杭 6 本からなる杭基礎を設計し、珪砂 6 号の地盤

中に設置した。

加振レベルを様々に変化させ、RC柱および地盤部の荷重-変位関係を得た。杭の曲げモーメント分布結果などに基づく実験結果より、振動レベルが小さい場合には慣性力相互作用が顕著であるものの、振動レベルが大きくなるにつれて、RC柱が非線形化し、慣性力が頭打ちとなるとともに地盤変形の影響が大きくなり、相対的に相互作用の影響が小さくなることなどが明らかとなった。



構造要素モデルと構造システムモデル

### (3) 大規模構造システムの動的応答特性を把握するための振動台実験代替技術の開発

振動台実験は、構造システムを対象とすると、非常に大規模となるため、その代替技術の開発が急務である。特に、土木構造物は地盤上に建設されるが、地盤と構造物を組み合わせた実験では、1 G場の動的実験において、異なる相似則が適用されてきたなど、様々な問題が存在している。そこで、中小型実験施設を活用するための方法論の構築に関する研究を進め、基礎・地盤が実験模型として遠心場で静的载荷し、上部構造を数値モデルとして構造システムをモデル化した、遠心場ハイブリッドシミュレーション（擬似動的载荷実験）を提案、実施した。ハイブリッド実験を地盤系研究で用いられる遠心力载荷装置において実施するのは世界でも初めての試みである。制約はあるものの、静的载荷実験にも関わらず遠心場振動台実験結果と同等の結果を得ることができた。

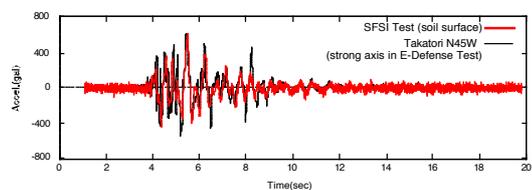
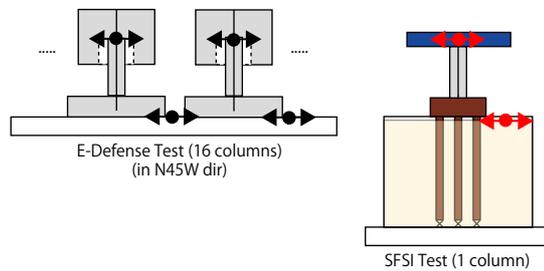


遠心場载荷装置におけるハイブリッド実験

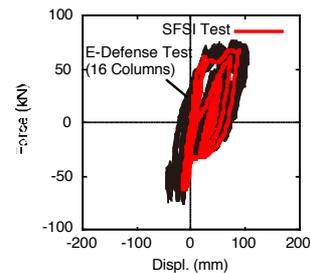
### (4) 規模の異なる実験プロジェクトの有機的連携による実験結果の再評価

#### ①研究成果(1)と研究成果(2)の連携

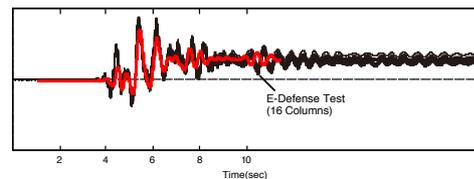
本研究では、E-ディフェンスにおける構造要素模型実験と大林組における杭基礎-地盤系を有する構造システム模型実験では、同じ設計によるRC柱を用いている。これより、両者を比較することで、動的相互作用の影響を見ることができる。RC柱の基部における加速度、柱頂部の変位応答の比較を示す。地表面における加速度が、設定通り、E-ディフェンス実験の振動台加速度とほぼ同等であることから、柱頂部の応答性状の際は、動的相互作用によるものと考えられる。変位応答性状は基礎の有無に関わらず大きく異なるものではないものの、基礎を有する方が最大応答後の振動減衰が大きい。これは地盤における非線形挙動や逸散減衰等の影響と考えられる。



(a) Acceleration at the base level of RC columns



(b) Load - Displ. Hysteresis Loops of RC columns



(c) Displacement Response of RC columns

実験プロジェクト(1)と(2)の連携評価

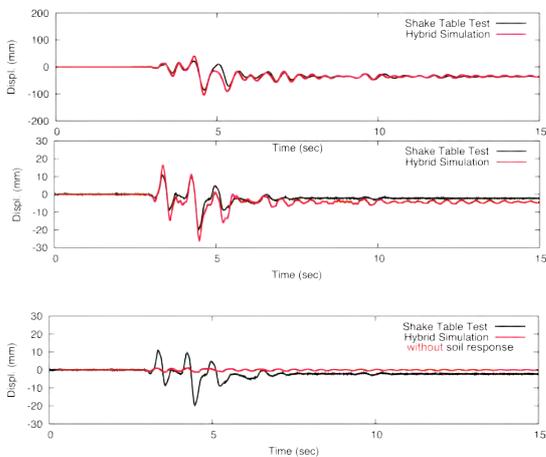
## ②研究成果(2)と研究成果(3)の連携

本研究では、大林組における杭基礎-地盤を有する構造システム模型の振動台実験とハイブリッド実験手法に関する研究を連携し、防災技術向上策の検討を行う。

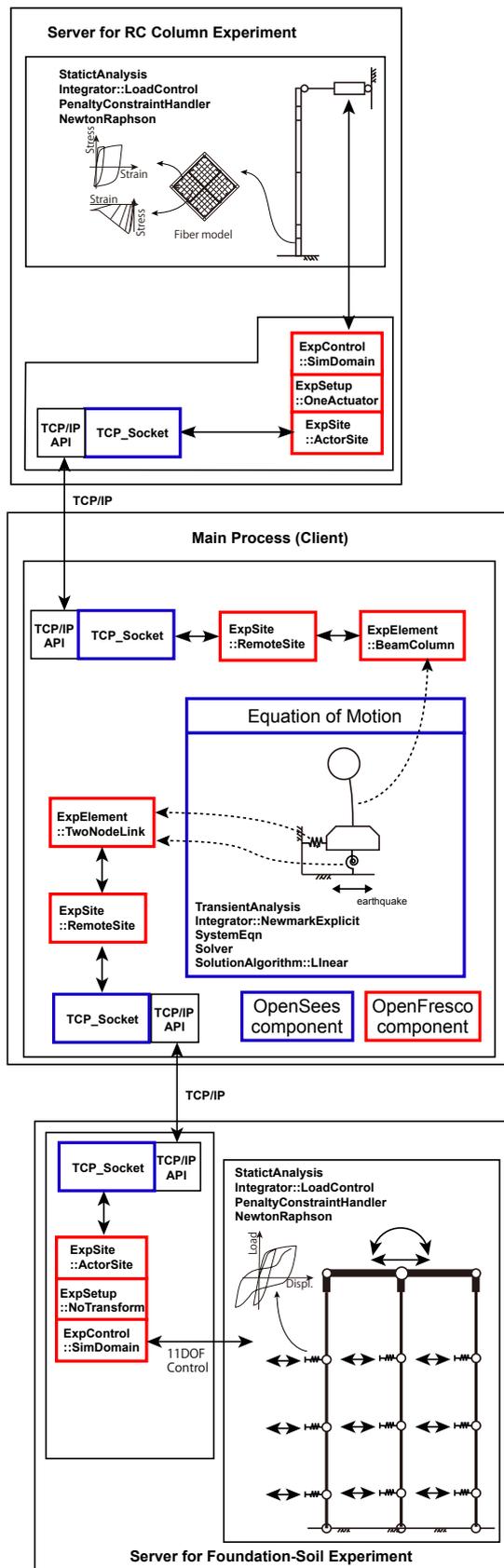
研究成果(3)により、地盤・基礎部を遠心場载荷装置に設置したハイブリッド実験の有効性が確認されている。研究成果(2)では、地盤挙動を拘束させないためにせん断土槽を用いており、実験においても地盤の動的変形が無視できないことが確認されている。そこで、研究成果(3)のシステムを拡張し、基礎部のみならず地盤部も外部より悪条件により载荷するシステムを仮想し、マルチスケールハイブリッド実験手法の開発とその適用性に関する検討を行った。

RC柱部は複雑な構造細目を満足させるために1G場で载荷実験を行い、基礎・地盤系は遠心力場での载荷実験を行うことを想定した、RC柱部および杭基礎-地盤部を多自由度モデルとした分散非線形「静的」解析を組み合わせたマルチスケールハイブリッドシミュレーションを実施した。

固定土槽を用い、フーチング上のスウェイ・ロッキング応答をやり取りするだけでは、研究成果(2)で実施した大型構造システム模型実験を再現することはできない。そのため、新たに土槽の外部から地盤に変位を与える実験システムを提案し、これを使うことにより、フーチングや地盤の応答に関し、1G場大型構造システム実験と同様の応答を示すことができる可能性をシミュレーションにより示すことができた。ただし、遠心場において、制御すべき変位は極めて小さなものとなり、多自由度同時制御を実現するための技術的課題も大きい。これらの課題を克服すること、あるいは地盤変形の影響が大きくない問題を設定することにより、マルチスケールハイブリッド実験手法を実施・検証する必要がある。



実験プロジェクト(2)と(3)の連携評価



マルチスケールハイブリッドシミュレーション (OpenFresco/OpenSees)

## 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)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 中村英之, 高橋良和, 澤田純男: 複合応力作用下における摩擦減衰機構を有する集合RC柱の弾塑性変形性能, 土木学会論文集A1, 査読有, Vol. 68, No.4, pp. I\_577-I\_583, 2012, DOI: 10.2208/jscejsee.68.I\_577
- ② Kawashima, K., Zafra, R.G., Sasaki, T., Kajiwara, K., Nakayama, M., Unjoh, S., Sakai, J., Kosa, K., Takahashi, Y., and Yabe, M. Seismic Performance of a Full-Size Polypropylene Fiber Reinforced Cement Composite Bridge Column Based on E-Defense Shake Table Experiments, Journal of Earthquake Engineering, 査読有, Vol. 16, No. 4, pp. 463-495, 2012, DOI:10.1080/13632469.2011.651558
- ③ 山下拓三, 堀宗朗, 小国健二, 岡澤重信, 牧剛史, 高橋良和: 大規模有限要素法解析のためのコンクリートの非線形構成則の再定式化, 土木学会論文集A2, 査読有, Vol. 67, No. 1, pp. 145-154, 2011, DOI: 10.2208/jscejam.67.145
- ④ 後藤浩之・佐藤芳樹・澤田純男・高橋良和: BE-FE 融合要素を用いた微小空隙を含む 2 次元媒質の静弾性解析, 土木学会論文集 A2, 査読有, Vol. 67, No. 2, pp. I\_153-I\_159, 2011, DOI: 10.2208/jscejam.67.I\_153
- ⑤ 高橋良和・小寺雅子, 動的相互作用問題への遠心力場ハイブリッド実験手法の適用性, 土木学会構造工学論文集, 査読有, Vol. 56A, pp. 334-341, 2010, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/56A/0/56A\\_0\\_334/article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/56A/0/56A_0_334/article/-char/ja/)
- ⑥ Kawashima, K., Sasaki, T., Kajiwara, K., Ukon, H., Unjoh, S., Sakai, J., Takahashi, Y., Kosa, K., and Yabe, M. Seismic Performance of a Flexural Failure Type Reinforced Concrete Bridge Column based on E-Defense Excitation, Journal of JSCE, 査読有, Vol. 65, No. 2, pp. 267-285, 2009, DOI: 10.2208/jscej.65.267
- ⑦ 高橋良和: 分散ハイブリッド実験による大規模構造物の動的応答評価, 査読無, 日本地震工学会誌, Vol. 10, pp. 12-15, 2009, <http://www.jaee.gr.jp/stack/mag-j/kaishi10r1.pdf>
- ⑧ 若木伸也・高橋良和・澤田純男, X線CT法を用いたコンクリート円柱供試体

の内部構成情報の抽出, 土木学会論文集A1, 査読有, Vol. 65, No. 1, pp. 399-405, 2009, DOI: 10.2208/jscejsee.65.399

[学会発表] (計 31 件)

- ① Yoshikazu Takahashi and Masako Kodera. Pseudo-dynamic tests -foundation-soil field for structure -foundation-soil systems, Proc. of The 15th World Conference on Earthquake Engineering, アブストラクト査読, Paper No. 3992, Lisbon, Portugal, 2012/9/26.
- ② Nishimura, S., Takahashi, Y., Murono, Y., Nishimura, T., and Ejiri, J. Shake table test of nonlinear structure-pile foundation-soil system, Proc. of The 15th World Conference on Earthquake Engineering, アブストラクト査読, Paper No. 4289, Lisbon, Portugal, 2012/9/26.
- ③ 佐々木義志・高橋良和・澤田純男: 慣性力相互作用およびキネマティック相互作用を考慮した構造物-杭基礎-地盤系に関するハイブリッド実験システムの提案, 第 15 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム論文集, pp. 425-430, 土木学会 (東京), 2012/7/25.
- ④ Yoshikazu Takahashi. Improvement of disaster mitigation technology by effective collaboration between small/middle/large scale experimental projects, Proceedings of the International Workshop on Advances in Seismic Experiments and Computations, 招待講演, 名城大学 (名古屋市), 2012/3/12.
- ⑤ 高橋良和・西村俊亮・室野剛隆・江尻譲嗣・田中浩一・樋口俊一: 上部構造が非線形化する構造物-杭基礎-地盤システム振動台実験, 第 31 回土木学会地震工学研究発表会, 東京大学 (東京), 2011/11/17.
- ⑥ 高橋良和・小林望: 縮小RC模型 16 体一斉加振実験による地震応答の不確定性評価, 第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム論文集, 土木学会 (東京), 2011/7/28.
- ⑦ 高橋良和・井本佳秀・綿島崇倫, アンボンド芯材を活用したRC橋脚の動的応答特性, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会, 東京大学 (東京), 2009/5/19.
- ⑧ 佐藤芳樹・高橋良和・澤田純男, 横拘束コンクリート供試体の一軸圧縮挙動に関する一考察, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会, 東京大学 (東京), 2009/5/19.

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/~yos/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋良和 (TAKAHASHI YOSHIKAZU)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10283623