

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19360108

研究課題名（和文） 超大型振動台を用いた実システムの精密振動試験に関する研究

研究課題名（英文） Precision dynamic test for real systems using large shaking table

研究代表者

田川 泰敬（TAGAWA YASUTAKA）

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授

研究者番号：20216807

研究成果の概要：

振動試験装置に大型の試験体（構造物）を載せ耐震実験などを行う場合、振動台は搭載構造物から大きな力を受け、振動台の動きは目標のそれとは大きく異なったものとなる。これにより、多大な費用をかけた実験において有効なデータが得られない問題がある。そこで、本研究では、実際の大型振動台の挙動を精度よく模擬できる振動台を作成し、我々がこれまで提案してきた種々のモデル化および制御手法を、この装置に適用することにより、大型振動台を用いた実システムの有効な加振実験手法の確立のための基礎を固めることに成功した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2008 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：大型振動台制御、E-Defense、Dual Model Matching(DMM)、被加振体反力、運動制御

1. 研究開始当初の背景

1995年1月に発生した兵庫県南部地震による大災害の経験から、実大規模の試験体を用いた耐震評価の重要性が明らかになった。この事実に基づき、防災科学技術研究所によって大規模振動実験施設(以下、E-Defenseと呼ぶ)の建設が計画され、震災

10年後の2005年、兵庫県三木市に完成した。本施設は、20m×15mの超大型振動台を有し、1200トンの試験体（4階建鉄筋コンクリート建物に相当）を兵庫県南部地震クラスの強さで3次元加振できる世界有数の振動実験施設である。

現在、E-Defense利用の第1ステージとし

て、土木・建築分野において精力的な実験が実施されている。しかし、これらの実験の多くは構造物（試験体）の破壊自体に主眼をおいたものであり、結果として試験体は破壊には至るものの、現状、その破壊過程は“機械技術者”の立場から見て十分な精度を有しているとは言い難い。我々は、この非常に高額かつ大きなポテンシャルを秘めた施設を、将来にわたり有効かつ継続的に利用し、我国の地震防災技術開発に役立てていくためには、次の2点が緊急かつ重要な技術的課題であると考えている。

(1) 加振精度の向上によるより信頼性の高いデータの蓄積

(2) 新たな実験手法の確立による新たな試験対象の獲得

これらを達成することにより、従来困難とされてきた、機械システムを含んだ構造物の精密加振実験や、より大型の構造物を対象とした加振実験などが可能となり、E-Defenseを利用した画期的な地震防災技術の開発が格段に加速されることが期待できる。

本申請課題は、E-Defenseに代表される大型振動台において、我々がキー・テクノロジーであるとする、上記2項目を達成するための基盤研究を実施した。

2. 研究の目的

(1) 加振精度向上に関する基盤研究

多くの振動台ユーザは、振動台が、与えられた目標波形通りに正確に動くものと考えがちである。しかし、実際には大型の試験体が搭載される場合、振動台は試験体からの大きな反力の影響を受け、振動台の動きは目標のそれとは大きく異なったものとなる。従来、この問題に対しては、本実験の前に予備的な加振実験（試加振）を数回実施し、この結果に基づいて制御系への入力

を修正する“試加振による入力補正”が用いられてきた。しかし、E-Defenseで想定される多くの実験、例えば、試験体の破壊過程を検証する実験や、地盤の変形に関する実験などでは、試加振を行うことができず、ただ一度の加振で高額な実験を成功に導かなければならない。

我々は、E-Defenseの完成前より、この問題の重要性を認識し、研究を行ってきた。また、数多くの振動台の制御を手掛けてきた適応制御の権威である英国Bristol大学のDavid.P.Stoten教授も本問題の重要性を理解し、英国王立協会(Royal Society)に対して日本とのジョイント・プログラムを申請したところ、これが認められ、日英において活発に共同研究が進められている。本申請課題以前に得られた成果としては、試験体の反力を推定しこれを制御に反映させる“反力補償法”の提案、また、Stoten教授らの適応フィードフォワード補償（FFMCS）の提唱などがある。さらに、本申請の研究代表者である田川は、シミュレーションに基づく新たな制御手法（IDCS）を考案し、この手法の有効性を英国Bristol大での実験によって実証した。本手法は特に実システムにおいて効果を発揮することを特徴としており、振動台の制御においても大いに成果が期待できる。

しかし、これらの手法の有効性は、申請課題提出以前の段階においては、シミュレーション、あるいは小規模な装置を用いた実証実験に止まっており、次のステップにおいて直ちにE-Defenseのような大型振動台に適用するには危険が伴う。本申請課題では、上記手法をより実機に近い装置に適用し、将来的な超大型振動台への実装を詳細に検討する。

(2) 新たな実験手法の確立に向けての基盤

研究

E-Defenseに代表されるような世界最大級の大型振動台とはいえ、搭載できる実スケールの試験体には限界が存在し(最大5、6階建相当の構造物)、実在する多くのより大型な構造物や機械システムをそのまま搭載して加振することはできない。そのため、大型振動台を用いた実システムの有効な加振実験手法の確立が非常に重要な問題となっている。一方、建築構造解析の分野では、大型の構造物をいくつかの部分(サブストラクチャー)に分け、部分ごとにその特性解析実験を行い、その結果を数値計算により統合する”擬似動的試験法(Pseudo-dynamic testing)”と呼ばれる手法が注目を集めている。しかし、この手法は基本的に静的な実験結果に基づくものであり、地震時の応答解析などにおいて精度の高いデータが得られる保障はない。

そこで、我々は本申請課題において、大型振動台を用い、動的な影響を考慮可能な“ダイナミック・サブストラクチャリング法”の基盤技術の確立を目指す。本手法により、限界重量を上回る大型試験体の加振実験も可能となる。

3. 研究の方法

(1) 加振精度向上に関する基盤研究

研究目的において述べたように、振動台は加振対象である試験体からの反力の影響を強く受け加振制御性能が著しく劣化することがある。図1にその典型的な例を2つ示す。試験体の有する減衰係数が非常に小さな場合、加振エネルギーの大部分が試験体の共振に消費され、振動台の振幅が減少する。したがって、試験体の共振周波数において、振動台の制御性能が著しく劣化する[図1(a)]。2つ目は、試験体の背が高く、その重心が高い位置に存在する場合、試験

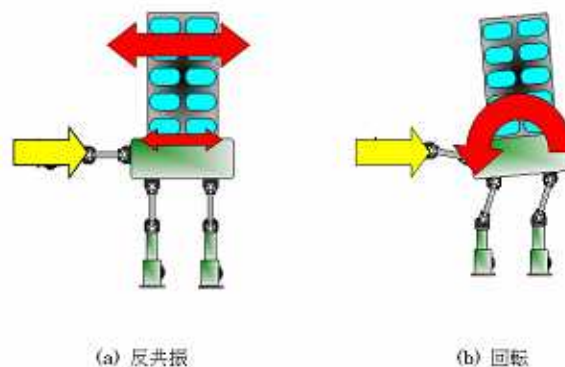


図1 振動台制御に関する典型的な問題を水平に加振しようとしても、重心周りのモーメントが発生し、振動台に不必要な回転(ピッチング)が発生する[図1(b)]。このような場合、加振によるエネルギーが回転に消費され、試験体に十分なエネルギーを与えられず、実験が失敗に終わるケースがある。我々は、これまでに上記の問題を解決するいくつかの手法を提案してきた。本研究では、これらの手法を、実際の1次元油圧振動台および3次元電動振動台に適用し、その有効性を実証する。具体的な計画を以下に示す。

振動台の設計・製作

上記のふたつの問題を解決するため、試験体を搭載可能な1次元油圧振動台および3次元電動振動台を製作する。

振動台および試験体の同定実験

の振動台を用いた利用し同定実験を行う。

振動台および試験体のモデル化

の結果をもとに振動台および試験体の数値モデルを作成する。

同定モデルに基づく制御器の設計

2種類の実験装置に対し、我々の提案するDMMによる制御器を設計する。

シミュレーションによる制御系評価

で設計された制御器を で得られたモデルに適用し、制御系をシミュレーションにより評価し、実験で用いる制御器を

絞り込む。

制御実験

、 で得られた制御器を、 の振動台に適用する。

制御実験結果の評価

の結果を評価するとともにE-Defenseなどのより大型の振動台への適用可能性を詳細に検討する。

論文発表などによる成果の公表

(2) 新たな実験手法の確立に向けての基盤研究

一般に振動台が搭載できる試験体の大きさ・質量には上限が存在し、これを超える試験体の加振実験は不可能である。これは、超大型振動台であるE-Defenseといえども同様であり、加振試験が望まれている多くの対象において、その大きさの制約から加振実験が困難な状況にある。これを解決する1つの有効な手段としては、大規模構造物(試験体)を構成する要素を加振可能な大きさまで分割し、これにダイナミック・サブストラクチャリング法(DSS法)を適用することが考えられる。DSS法では、試験体の一部構造物をを数値モデル化し、このモデルを用いたリアルタイム・シミュレーションにより、反力を算出後、アクチュエータを用いてこの反力を、実モデル部分に加えることにより、全体モデルを用いた加振試験を模擬する。本申請課題では、E-DefenseによるDSS法の実現を念頭に置き、その第一ステップとして、E-Defenseの挙動を精度良く再現できる詳細シミュレータの開発を行う。

4. 研究成果

本研究で得られた具体的な成果を以下に示す。

(1) 新たに電動型3自由度加振装置を製

作し、これに対して動特性同定実験を実施し、その挙動を精度よく表わす数学モデルを導出するとともに、この数学モデルをベースに、我々が提案するDual Model Matching (DMM) 法により制御器を設計し、高周波数領域まで優れた目標値追従特性を有する制御系が実現できることを実験により実証した。

[本年度D&Dシンポジウムにおいて発表]

(2) 大型振動台が従来より困難であった長周期地震の再現を、積層ゴムによる共振を利用するとともに、田川が提案するIDCS法により入力波形を生成することにより、世界最大の振動台E-Defenseにより再現することに成功した。

[文献：雑誌論文の 、 、学会発表の]

(3) 被加振体となる構造物の減衰が小さい場合、被加振体の反力の影響により、共振周波数近傍において振動台の加振性能が劣化する問題に対して、DMM法により有効な制御器を設計することによりその性能を著しく改善できることを、油圧加振装置により実験により実証した。

[文献：雑誌論文の 、学会発表の 、]

(4) E-Defenseを用いた大規模実験の膨大なデータに基づき、E-Defenseの各構成要素ごとに詳細な数値モデルを作成し、これをもとに振動台システム全体の挙動を精度良く表現するE-Defenseシミュレータの開発に成功した。

[文献：雑誌論文の、学会発表の、]

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 4件)

Y. Tagawa, R. Tagawa and D.P. Stoten, Characteristic Transfer Function Matrix-based Linear Feedback Control System Analysis and Synthesis, International Journal of Control, Vol.82, Issue 4, 2008, 585-602. 査読あり

榎田竜太, 梶原浩一, 他3名、超高層建物の地震応答を再現する震動台実験手法の開発、日本建築学会構造系論文集、634巻、2008、pp. 2111-2117. 査読あり

長江拓也, 梶原浩一, 他6名、家具および非構造部材に着目する高層建物の地震応答再現実験、日本建築学会構造系論文集、628巻、2008、pp. 1007-1014. 査読あり

Y. Tagawa and K. Kajiwara, Controller development for the E-Defense shaking table, Proc. IMechE Part I, J. Systems and Control Engineering, Vol. 221, 2007, pp. 171 - 181. 査読あり

[学会発表](計 5件)

堀口幸一郎, 田川泰敬, 弘中浩二, 試験体反力とサーボ特性に着目した油圧加振機の制御系設計、第51回自動制御連合講演会、2008年11月22日、山形県

梶原浩一, 他8名、試験体のシステム同定と弾性地震応答(高層建物の

耐震性評価に関するE-ディフェンス実験-その4) 日本建築学会大会、2008年9月18日、広島県

田川泰敬, 永山貴教, 林洋一, 梶原浩一, 超大型振動台シミュレータの精度向上に関する研究、Dynamics & Design Conference 2008、2008年9月2日、神奈川県

弘中浩二, 三浦淳, 堀口幸一郎, 田川泰敬, 供試体反力を考慮した振動台制御、Dynamics & Design Conference 2008、2008年9月2日、神奈川県

田川泰敬, 梶原浩一, 他2名、超大型振動台のシミュレーションツールの開発、第10回運動と振動の制御シンポジウム、2007年8月、東京

[その他]

本申請テーマで2009年度、日本機械学会論文集1報投稿中、学会発表2件決定

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田川 泰敬 (TAGAWA YASUTAKA)
東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授
研究者番号：20216807

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

梶原 浩一 (KAJIWARA KOICHI)
防災科学技術研究所・
兵庫耐震工学研究センター・主任研究員
研究者番号：10450256
佐藤 栄児 (SATO EIJI)
防災科学技術研究所・
兵庫耐震工学研究センター・主任研究員
研究者番号：60343761

(4) 研究協力者

David P. Stoten
英国 Bristol 大学・
工学部機械工学科・教授