

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13823

研究課題名(和文)非線形構造物の加速度制御に基づくリアルタイムサブストラクチャ振動台実験法の開発

研究課題名(英文)Real-time substructuring experimentations for acceleration control of shake tables sustaining nonlinear specimens

研究代表者

榎田 竜太 (Ryuta, Enokida)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：20788624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の一年目には、RTS振動台実験手法の基礎になる、Nonlinear Signal-Based Control (NSBC)を用いた振動台実験手法を確立した。非線形試験体を積載した振動台の実験において、既存の制御手法では、十分な制御精度を実現できなかったが、このNSBCを用いることで、ほぼ100%の制御精度を実現した。二年目には、上記の研究成果に基づいて、NSBCに基づいて開発されたNonlinear Substructuring Control (NLSC)を非線形構造物を積載した振動台実験等に適用し、サブストラクチャ振動実験を成功させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の制御手法では、構造物の塑性化が伴うような振動台実験においては、制御性能が不可避に劣化してしまい、所定の振動実験を高精度には実現できなかった。これに対して、本研究では、NSBCを振動台制御に組み込むことで、強非線形現象が伴う振動台実験において生じていた振動台の制御性能の劣化という問題を解決した。さらに、この研究成果に基づいて、NLSCを用いた非線形構造物のサブストラクチャ振動台実験を、世界に先駆けて実施することができた。

研究成果の概要(英文)：In the first year, we established a shake-table experimental scheme based on nonlinear signal-based control (NSBC), which is the key element for real-time substructuring shake-table experiments. In an experiment of a shaking table supporting a nonlinear specimen, NSBC successfully realized near 100% control accuracy of the table, while conventional control approaches failed to do so.

In the second year, based on the above research results, we conducted real-time substructuring experiments using the shake-table having the nonlinear structure. The substructuring experiments were successfully executed by nonlinear substructuring control (NLSC), which had been also developed on the basis of NSBC.

研究分野：耐震工学

キーワード：非線形制御 振動台実験 サブストラクチャ実験 油圧アクチュエータ 免震構造 安定性解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

振動試験では、要求される実験規模や性能が、試験機の性能を超えることがあり、直接の実験実施が困難な場合がある。このような問題に対して、試験対象の主要部のみを実験によって、残りの部分を数値解析によって検証するリアルタイムサブストラクチャ(RTS)実験法が、各工学(建築・土木、機械、航空)分野において高い注目を集めている。この RTS 実験を実現するため、1980 年代に Hybrid Scheme (HS)法¹⁾が開発され、2000 年代中頃に Dynamical Substructuring System (DSS)法²⁾が開発されてきている。

図 1(a)の HS 法は、伝達システムのみを制御対象とし、その逆伝達関数などを数値解析部分の出力信号に乗じることで、実験部分への入力信号を生成する。この手法では、無駄時間への安定性確保が難しく、低減衰かつ高固有振動数の試験体に対しては、発振する可能性が極めて高い^{3,4)}。一方、図 1(b)の DSS 法は、伝達システム、数値解析部分、実験部分のすべてを制御対象とし、数値解析部分と実験部分の出力信号の差が最小化されるように設計される。これによって、DSS 法は無駄時間に対して HS 法よりも 10 倍以上の高い安定性を実現できている。DSS 法で一般的に用いられる Linear Substructuring Control (LSC)²⁾は、名前の通り、試験体を含む制御対象が線形で、かつその特性が既知であることを前提としていた。そのため、試験体の非線形性や動特性を把握することを目的とした RTS 実験には適用できないという問題があった。これに対して、図 1(c)の Nonlinear Signal-Based Control (NSBC)⁵⁾を LSC に組み込んだ、新たな手法である図 1(d)の Nonlinear Substructuring Control (NLSC)が開発され、この問題が解決された^{6,7)}。

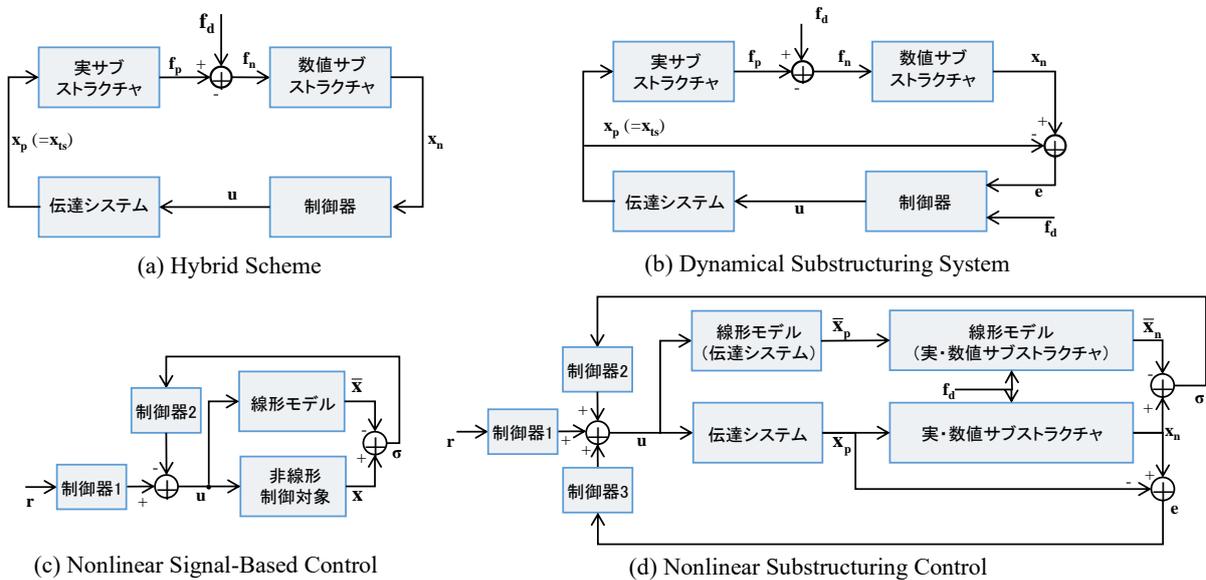


図 1 リアルタイムサブストラクチャ(RTS)実験に関わる制御手法

2. 研究の目的

現在、NLSC を用いることで、非線形性、不確定性、無駄時間の有無に関わらず、高い安定性と制御精度を有する RTS 実験が実現可能となっている。しかしながら、これまで、耐震構造物を検証するのに利用される振動台実験に対して、いまだに NLSC は適用されてきていない。本研究では、近年開発された DSS 法に基づく NLSC を用い振動台実験に適用し、非線形構造物の RTS 振動台実験法を構築する。

3. 研究の方法

振動台実験では加速度記録(地震時地動加速度など)の高精度な制御が求められており、振動台を用いた RTS 実験においても加速度制御が不可欠である。そのため、まずは、この非線形構造物搭載時の振動台の高性能な加速度制御について検討する。次いで、DSS 法に基づく NLSC を用いることで、加速度制御に基づく RTS 振動台実験法を開発する。この実験法を、耐震構造物の振動台実験と地盤・構造物の相互作用に関わる RTS 振動台実験に適用し、その有効性と実験精度を検証する。

4. 研究成果

本研究では、DSS 法の NLSC を用いることで、非線形構造物の加速度制御に基づく RTS 振動台実験法の構築を目的としている。この実現のため、一年目には、RTS 振動台実験手法の基礎となる、NSBC を用いた振動台実験手法を確立した^{8,9)}。具体的には、下記の成果を得た。

- ・ 構造物を積載した振動台のモデリング方法を考案することで、非線形構造物を積載した振動台実験への NSBC の適用方法を開発した。
- ・ ナイキストの安定理論に基づくことで、非線形構造物を搭載した振動台に NSBC の安定性解析方法を開発した。
- ・ NSBC を振動台に応用した場合に、無駄時間の推定精度が、実験の安定性を支配することを

明らかにした。また、無駄時間が高精度に把握されていない場合でも、適切に設計したフィルタを制御器に追加することで不安定性を防げることを示した。

- 非線形試験体を積載した振動台へ NSBC を応用した実験 (図 2) では、図 3 のように、既存の制御手法では、十分な制御精度を実現できなかった。一方、図 4 のように、NSBC ではほぼ 100% の制御精度を実現できることを示した。



図 2 小型振動台を用いた耐震実験

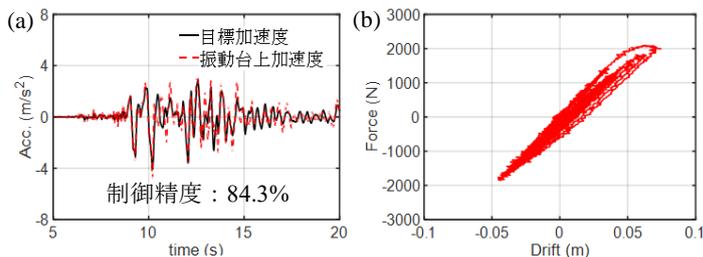


図 3 既存の手法: (a)時刻歴, (b)振動台上試験体の非線形特性

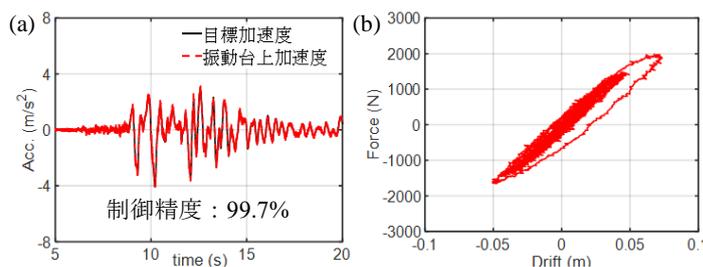


図 4 NSBC: (a)時刻歴, (b)振動台上試験体の非線形特性

二年目には、前年の NSBC による振動台制御性能の大幅な向上に基づいて、サブストラクチャ振動台実験を、NLSC を適用することで、実施した。この実験では、図 5 のように、図 2 の非線形構造物を積載した振動台を実サブストラクチャとして、地盤を模擬する 2 質点系非線形システムを数値サブストラクチャとして採用した。この実験において、NLSC とその基本手法である LSC を比較・検討することで、NLSC の制御性能の優位性を明らかに示した。また、非線形構造物を積載した振動台実験に NLSC を適用した例はこれまでになく、本研究において適用した実験がその初めての実施例となった。さらに、サブストラクチャ振動台実験の制御器設計の自動化の一環として、HS 法と DSS 法の LSC を用いた場合の制御器の設計方法を一般化した¹⁰⁾。

二年目には、振動台実験のほかに、二軸 (水平一軸、鉛直一軸) 動的試験機を用いて、免震建物を対象とした動的サブストラクチャ実験を実施した。この実験では、非線形特性を有する積層ゴムを実サブストラクチャとして扱い、積層ゴム上に位置する構造物を数値サブストラクチャとして扱った。この実験では、NLSC と LSC, ならびに、HS 法を適用することで各手法を比較し、NLSC の制御性能の高さを実験的に検証した。

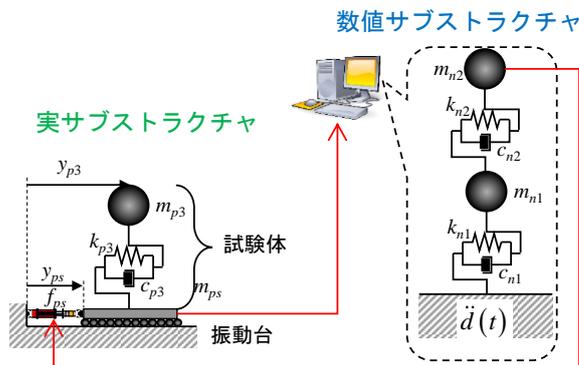


図 5 非線形構造物を対象としたサブストラクチャ振動台実験

- T. Horiuchi, M. Inoue, T. Konno, Y. Namita, Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to piping system with energy absorber, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28(10) (1999) 1121–1141.
- D. Stoten, R.A. Hyde, Adaptive control of dynamically substructured systems: the single-input single-output case, *Proceedings of the IMechE Part I, Journal of systems & control Engineering*, 220(2), March 2006, pp. 63–79.
- A. Maghareh, S.J. Dyke, A. Prakash, J.F. Rhoads, Establishing a stability switch criterion for effective implementation of real-time hybrid simulation, *Smart Structure and Systems*, 14(6) (2014) 1221–45.
- R. Enokida, D. Stoten, K. Kajiwara, Stability analysis and comparative experimentation for two substructuring

- schemes, with a pure time delay in the actuation system, *Journal of Sound and Vibration*, 346, pp. 1-16, June 2015.
- 5) R. Enokida, I. Takewaki, D. Stoten, A nonlinear signal-based control method and its applications to input identification for nonlinear SIMO problems, *Journal of Sound and Vibration*, 333, pp. 6607-6622, December 2014.
 - 6) R. Enokida, K. Kajiwara, Nonlinear substructuring control for parameter changes in multi-degree-of-freedom systems, *Journal of Sound and Vibration*, 407, pp. 63-81, October 2017.
 - 7) R. Enokida, K. Kajiwara, Nonlinear signal-based control with an error feedback action for nonlinear substructuring control, *Journal of Sound and Vibration*, 386, pp. 21-37, January 2017.
 - 8) R. Enokida, Stability of nonlinear signal-based control for nonlinear structural systems with a pure time delay, *Structural Control and Health Monitoring*, 26(8), e2365, August 2019.
 - 9) R. Enokida, K. Kajiwara, Nonlinear signal-based control for single-axis shake tables supporting nonlinear structural systems, *Structural Control and Health Monitoring*, 26(9), e2376 September 2019.
 - 10) R. Enokida, Basic examination of two substructuring schemes for shake table tests, *Structural Control and Health Monitoring*, 27(4), e2497, April 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Enokida Ryuta	4. 巻 27
2. 論文標題 Basic examination of two substructuring schemes for shake table tests	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 e2497 ~ e2497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/stc.2497	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Enokida Ryuta, Kajiwara Koichi	4. 巻 26
2. 論文標題 Nonlinear signal based control for single axis shake tables supporting nonlinear structural systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 e2376 ~ e2376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/stc.2376	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Enokida Ryuta	4. 巻 26
2. 論文標題 Stability of nonlinear signal based control for nonlinear structural systems with a pure time delay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 e2365 ~ e2365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/stc.2365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Enokida Ryuta	4. 巻 1264
2. 論文標題 A comparative study of hybrid simulation and dynamical substructuring system schemes for shake table tests	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012005 ~ 012005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1742-6596/1264/1/012005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Enokida Ryuta
2. 発表標題 A comparative study of hybrid simulation and dynamical substructuring system schemes for shake table tests
3. 学会等名 International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryuta Enokida and Koichi Kajiwara
2. 発表標題 Numerical studies of nonlinear signal-based control for shaking tables sustaining nonlinear multi-degree-of-freedom systems
3. 学会等名 The 14th International Conference on Motion and Vibration Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 振動台制御装置及び振動台制御方法	発明者 榎田竜太, 梶原浩一	権利者 国立研究開発法人防災科学技術研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2019-95345	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	梶原 浩一 (Kajiwara Koichi) (10450256)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・総括主任研究員 (82102)	