

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02228

研究課題名（和文）免震機能を有する構造物の過大变位抑制効果を検証する非線形振動台実験の高性能制御

研究課題名（英文）High-performance control of nonlinear shaking table tests performed for examinations of displacement suppression of seismic isolation buildings

研究代表者

榎田 竜太（Enokida, Ryuta）

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） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、滑りによる振動台制御の劣化問題に関して、非線形制御である Nonlinear Signal-Based Control (NSBC) をその振動台に応用することで、その解決を目指す。初めに、滑りを伴う各種構造物の振動台実験に NSBC を適用した数値解析的検討と安定性解析を構築した。次いで、直置き型構造物などのすべりを伴う各種の構造物を実際に積載させた振動台実験を NSBC で実施し、その精度を既存手法と比較した。3種類のすべりを伴う振動台実験（剛試験体、直置き型構造物、残留滑り変位を抑制するストッパー付直置き型構造物）において、NSBC が非常に高い制精度を発揮し、その優位性を明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震時に、免震効果を発揮する直置き型構造物の開発が進められている。その有効性を振動台実験が検証されるが、すべりによる強非線形系現象が、振動台制御に大きく影響してしまう。そのため既存の制御手法では、直置き型構造物の振動台実験を高精度に実現することができないという課題があった。この問題に対して、本研究によって、非線形制御手法の NSBC がそれを解決できることを示し、かつ、その実験の安定性を事前に評価できるようになった。これによって、今後、直置き型構造物のような滑りを伴う構造物の振動台実験がこれまで以上に精緻に行えるようになり、今後の耐震性向上に大きく貢献することから、学術・社会的意義も非常に高い。

研究成果の概要（英文）：This study addresses the issue of shake table control degradation caused by sliding of a system placed on the table, by applying Nonlinear Signal-Based Control (NSBC) to this issue. First, we have developed numerical simulation for shake table experiments based on NSBC for sliding structures and its stability analysis. Then, we have applied NSBC to actual shake table experiments with different sliding structures such as a rigid sliding mass and a free-standing structure. The control accuracies of NSBC were evaluated in the comparison with the conventional feedforward controller based on an inversed transfer function of the controlled system. In these experiments, NSBC achieved the expected experiments even with any of the sliding systems with accurate control of the shake table acceleration. The experimental examination clarified its superiority over the conventional method.

研究分野：地震工学

キーワード：非線形制御 直置き型構造物 残留滑り変位抑制 クッションストッパー 地震応答推定 振動台実験
免震効果 黒鉛潤滑

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

大きな地震時に、すべりによって免震効果を発揮する直置き型構造物の開発が進められており、その効果を振動台実験で検証されることが多い。しかしながら、すべりは強非線形現象であり、振動台がその影響を受けてしまい、制御対象の逆伝達関数を用いるこれまでの制御手法では、正確に所定の波形を実現できなくなってしまうことがある。これは、ある地震波で揺すられている直置き型構造物の挙動を検証したいにもかかわらず、その構造物の非線形挙動が振動台の動きを邪魔してしまい、その地震波での検証ができなくなってしまう。そのため、すべり現象が伴う構造物の振動台実験における振動台の加振制御性能が低下してしまう。さらに、過大な滑りを抑制するために復元力機構をすべり面に追加させた場合には、その機構によって非線形特性がさらに強まり、振動台の制御をさらに困難としてしまう。そのため、既存の制御手法では、直置き型構造物の振動台実験を高精度に実現することができないという課題があった。

2. 研究の目的

本研究では、すべり免震効果を有する直置き型構造物の非線形挙動による振動台の制御性能劣化を克服することを目的としている。この目的実現のために、非線形制御手法である **Nonlinear Signal-Based Control (NSBC)** をその振動台制御に応用し、既存の制御手法である逆伝達関数法との制御精度を比較することで、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、直置き型構造物を積載させた振動台に NSBC を応用し、既存の制御手法である逆伝達関数法との制御精度を比較することで、NSBC の有効性を検証する。本研究の目的を遂行のために、下記の 4 課題に細分化して、研究を展開した。

- (1) 滑りを伴う各種構造物に関わる振動台実験に NSBC を応用した場合の数値解析的検討と安定性解析の構築
- (2) 剛試験体のすべりに関わる振動台実験における NSBC の応用と実験的検証
- (3) 直置き型構造物を積載した振動台実験における NSBC の応用の実験的検証
- (4) 残留滑り変位を抑制するストッパーを有する直置き型構造物を積載した振動台実験における NSBC の応用

4. 研究成果

以下に、(1), (2), (3), (4) で得られた研究成果を簡潔にまとめる。

(1): 滑りを伴う各種構造物に関わる振動台実験に NSBC を応用した数値解析的検討と安定性解析の構築

(1) では、すべりによる免震効果を発揮する直置き型構造物等を対象に、すべりやストッパーとの接触などの強非線形現象が伴う直置き型構造物を積載した振動台に NSBC を応用した数値解析的検討に取り組んだ。また、すべる物体がある程度の柔軟性を持つと、不安定滑りのスティックスリップ現象が生じる。このスティックスリップ現象を表現できる **Karnopp** モデルを数値解

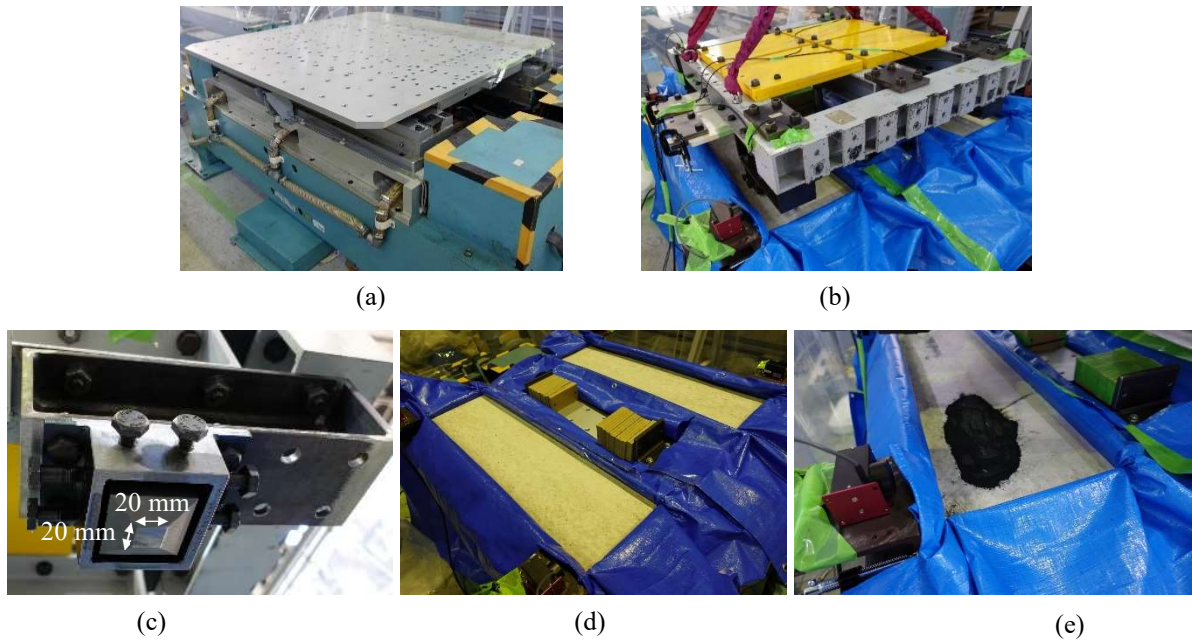


図1 すべり剛試験体に関する実験装置: (a) 振動台, (b)剛試験体, (c) 摩擦面接触要素, (d)摩擦面のモルタル基部, (e)摩擦面の潤滑用黒鉛

析モデルに組み込み、この現象が振動台制御へ及ぼす影響を数値解析的に評価できるようにした。加えて、滑りやストッパーによる非線形性を考慮できる NSBC の安定性解析を構築した。

さらに、直置き型構造物とストッパーとの接触による変位抑制効果を検討し、ストッパーの剛性とその接触によって構造物に励起される応答量を解析的に明らかにした。これによって、上部構造物に過大な応答量を励起させずに、直置き型構造物の残留変位量を大幅に低減できることも明らかにした。

(2) : 剛試験体のすべりに関わる振動台実験における NSBC の応用と実験的検証

(2)では、剛試験体を滑らせる振動台実験（図1）に関して、NSBC と既存の制御手法（逆伝達関数法）の両手法を用いることで、それぞれの制御性能を実験的に検証した。なお、NSBC の実験に関する安定性は(1)で確立した安定性解析で事前に評価した。この実験では、振動台と同程度の質量を有する鋼製フレームに剛試験体（図1(b)）を模擬し、その剛試験体に各種の摩擦要素（図1(c, d, e)）を持たせることで、そのすべり面に0.2-0.4程度の摩擦係数を実現した。この実験では、逆伝達関数法では、剛体が振動台上をすべることによって、振動台制御が劣化し、振動台上で再現された加速度の制御精度が著しく低下した。これに対して、NSBC では、滑りによる制御性能の低下がほとんど生じず、既存の逆伝達関数法よりもはるかに高い精度で制御できることを実験的に明らかにした（図2参照）。

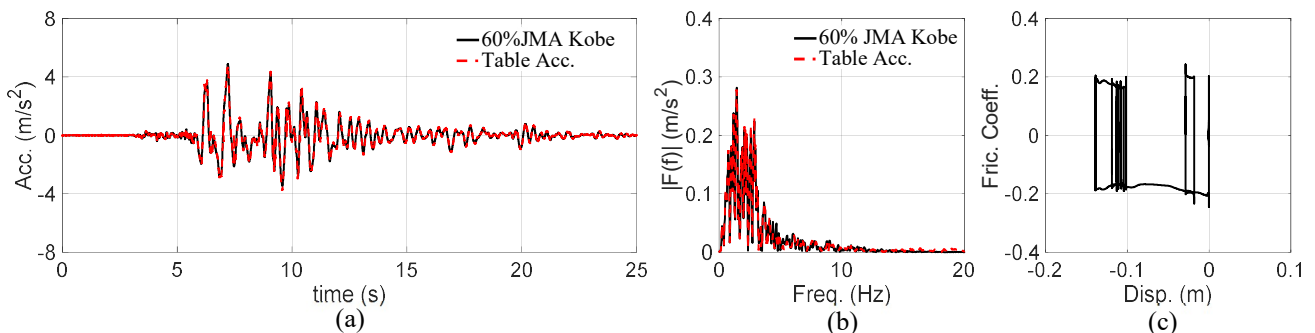


図2 NSBC を用いたすべり剛試験体の振動台実験結果 : (a)振動台加速度, (b) 振動台加速度のフーリエ振幅スペクトル, (c)すべり面のせん断力係数とすべり変位。

(3): 直置き型構造物を積載した振動台実験における NSBC の応用の実験的検証

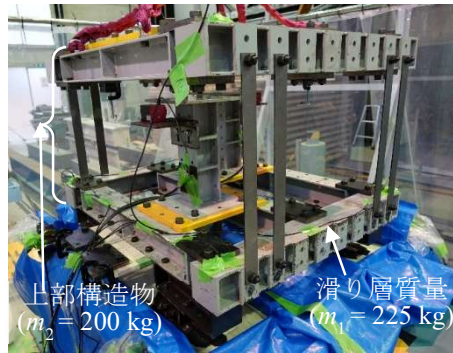


図3 直置き型構造物

(3)では、図3の試験体を図1(a,c,d,e)の試験装置と組み合わせることで、すべりによる免震効果を発揮する直置き型構造物に関する振動台実験を実施した。この直置き型構造物を用いた振動台実験において、逆伝達関数法では、直置き型構造物のすべりとスティックスリップ現象によって、振動台上の加速度の制御精度が極端に低下し、所定の地震加速度波を実現することができなかった。一方、NSBCを用いた振動台実験では、大きなすべりが生じ、強非線形性が生じているにも関わらず、所定の地震加速度波形を高い精度で実現できた(図4)。なお、この実験で得られた直置き型構造物の上部構造物の応答量は、(1)で検討した解析による推定値と高い整合性を示し、その解析の有効性が実験的にも示された。

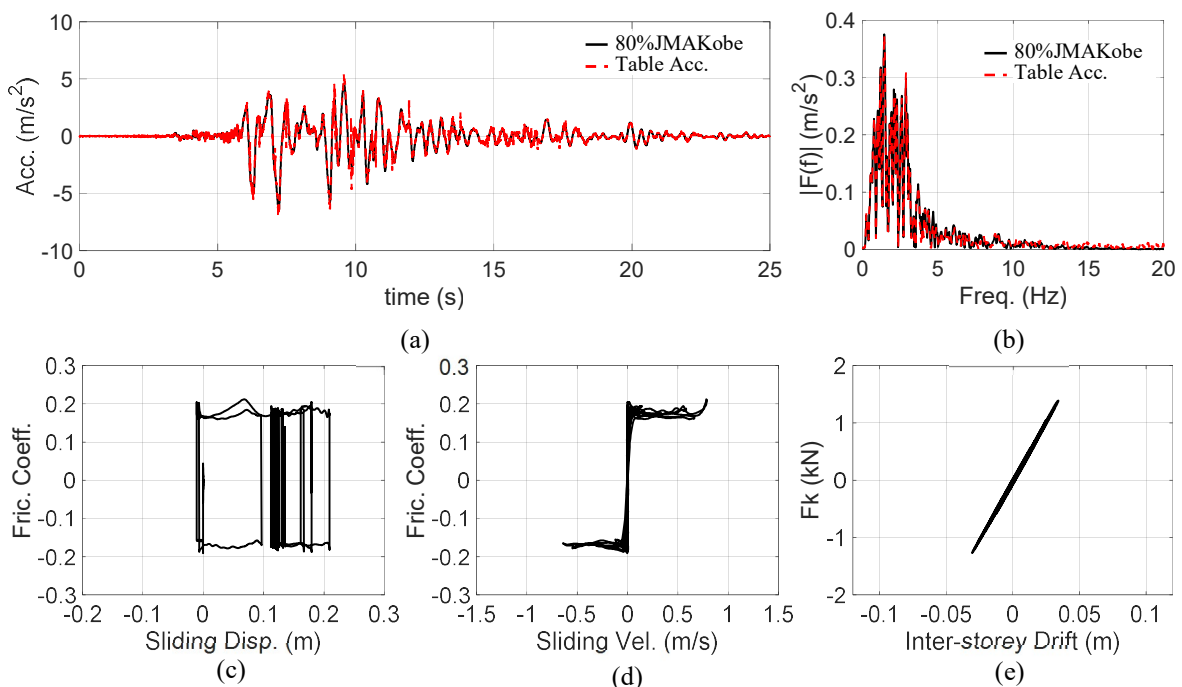


図4 NSBCを用いた直置き型構造物の実験結果：(a)振動台加速度，(b)振動台加速度のフーリエ振幅スペクトル，(c)摩擦係数とすべり変位，(d)摩擦係数とすべり速度，(e)上部構造物の履歴。

(4):残留すべり変位を抑制するストッパーを有する直置き型構造物を積載した振動台実験における NSBC の応用



図5 クッションストッパー.

(4)では、図5のクッションストッパーを(3)で実現した直置き型構造物の試験体に設置し、残留すべり変位を抑制する実験を実施した。この実験では、ストッパーによる復元力によって、単に滑らせる以上に強い非線形性を呈する。この実験にも NSBC を応用し、その制御性能を検証した。実際に実施した振動台実験では、図6のように、所定の地震加速度波形を高精度で振動台上に実現することができ、所定の加振実験を実現した。この実験で用いたストッパーよりも、4倍程度の硬さを持たせたストッパーの実験においても、同様の結果を得ることができた。これによって、ストッパーを有する直置き型構造物の振動台実験において、NSBCが非常に有効であることが明確となった。また、この実験では、正しくストッパーを設計することで、直置き型構造物に過大な負担を生じさせず、かつ残留すべり変位も低減できることが示された。これは、直置き型構造物の今後の実用化に向けた開発に非常に有益な知見となるものである。

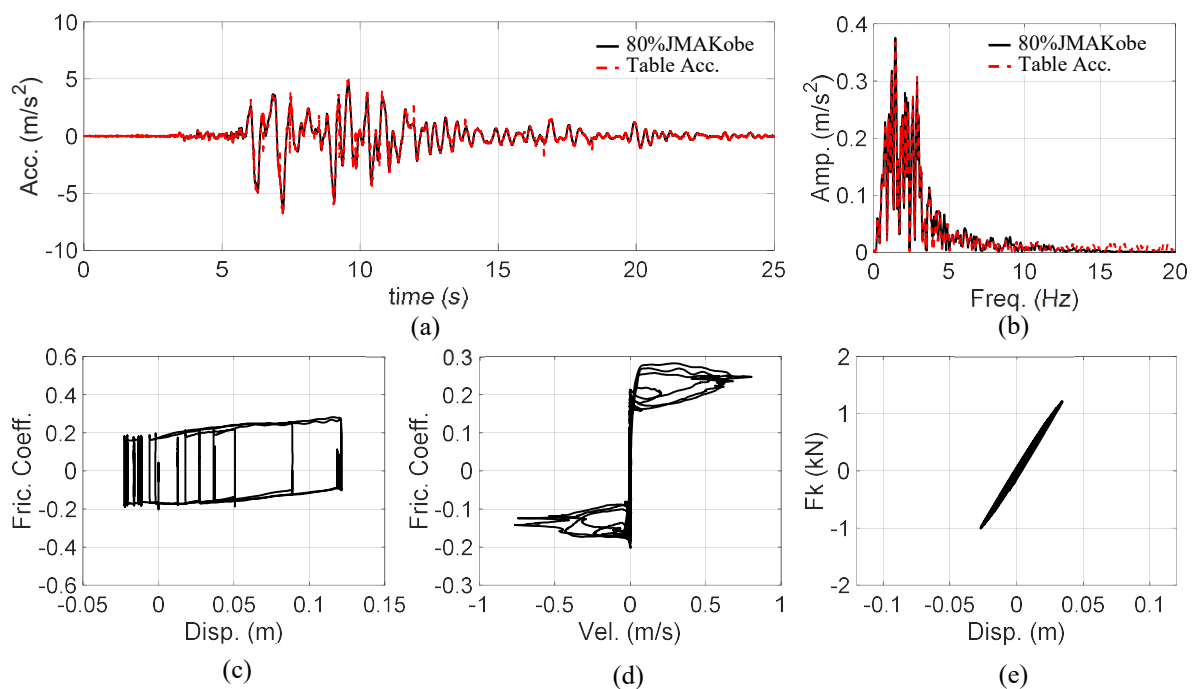


図6 クッションストッパー付き直置き型構造物の実験結果：(a)振動台加速度，(b)振動台加速度のフーリエ振幅スペクトル，(c)すべり面のせん断力係数とすべり変位，(d)すべり面のせん断力係数とすべり速度，(e)上部構造物の履歴。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Enokida Ryuta	4. 巻 29
2. 論文標題 Nonlinear substructuring control for simultaneous control of acceleration and displacement in shake table substructuring experiments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 e2882
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/stc.2882	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 150
2. 論文標題 Suppression of residual sliding displacement of flat-sliding structures by cushion stoppers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 106905 ~ 106905
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.soildyn.2021.106905	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, Ikago Kohju, Kajiwara Koichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Numerically disturbed shake table experimentation to examine nonlinear signal-based control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbui.2022.964394	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 181
2. 論文標題 Enhancement of nonlinear signal-based control to estimate earthquake excitations from absolute acceleration responses of nonlinear structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 109486 ~ 109486
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ymsp.2022.109486	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, Ikago Kohju, Guo Jia, Kajiwara Koichi	4. 巻 52
2. 論文標題 Nonlinear signal based control for shake table experiments with sliding masses	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering & Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 1908 ~ 1931
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eqe.3852	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, Kajiwara Koichi	4. 巻 2023
2. 論文標題 Enhancements of Nonlinear Substructuring Control for Shake Table Experiments on Severely Damaged Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 1 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2023/6648638	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	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・主幹研究員 (82102)	
研究分担者	五十子 幸樹 (Ikago Kohju) (20521983)	東北大学・災害科学国際研究所・教授 (11301)	
研究分担者	池永 昌容 (Ikenaga Masahiro) (50552402)	関西大学・環境都市工学部・准教授 (34416)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	郭 佳 (Guo Jia) (50868081)	京都大学・農学研究科・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関