

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04319

研究課題名(和文)実時間ハイブリッド動的載荷実験による機能分散型免制震橋の性能検証

研究課題名(英文)Real Time Hybrid Simulation for Function Separated Seismic Isolation Bridge

研究代表者

党 紀(Dang, Ji)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60623535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：想定を上まわる大地震などの災害において、免震支承などが破壊されることを念頭に、従来ではゴム支承に集中していた機能を複数のデバイスに分散する機能分散型免制震が提案された。従来の耐震構造と比較した地震応答解析を行い、地震応答が抑えられ、破壊がSPDに集中することを確認した。本研究では実時間ハイブリッドを行い、直列したシリンダーダンパーとSPDがそれぞれ小さい揺れと大きい揺れを吸収する機能分散手法を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、(1)高度な制御を必要とするため、実時間ハイブリッド実験の載荷システムを構築し、実験システムが正しく作動するかを検証した。(2)実時間ハイブリッド実験を行い、変形が鋼製ダンパーに集中する機能を検証し、想定外地震時に、提案構造の損傷誘導機能が実証された。(3)実務設計に向け、制震ダンパーの挙動を簡単なモデルで解析する場合の精度を検証し、リスクに基づいた設計手法を検討した。

研究成果の概要(英文)：Considering that seismic isolation bearings may be broken due to the large earthquake that exceeds design level, the function-separated seismic isolation system have been proposed to distribute the functions that were previously concentrated on rubber bearings to multiple devices. Seismic response analysis compared to conventional seismic structures confirmed that seismic response was suppressed and rupture was concentrated in SPDs. In this study, the real-time hybrid simulations were conducted to verify the function separated bridge in which the cylinder damper and SPD in series absorb small and large shaking, respectively.

研究分野：地震工学、橋梁耐震免制震

キーワード：危機耐性 免震性能 機能分散 実時間ハイブリッド実験 リスクに基づいた耐震設計

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1995年の兵庫県南部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震、2016年の熊本地震など、設計上の想定をはるかに上回る揺れが十数年内に連続発生し、想定を超える大地震において、道路橋などの構造物に大きな破壊が生じて、壊滅的な状態にならない、被害を最小限に抑え、すなわち危機耐性を有する構造物の開発が極めて重要な課題の一つとして見られている。

今まで、東北地震や熊本地震などでゴム支承の破壊を念頭に、従来ではゴム支承に集中した鉛直支持、水平変形、地震力減衰などの機能を複数のデバイスに分散する機能分散型免制震が提案された。

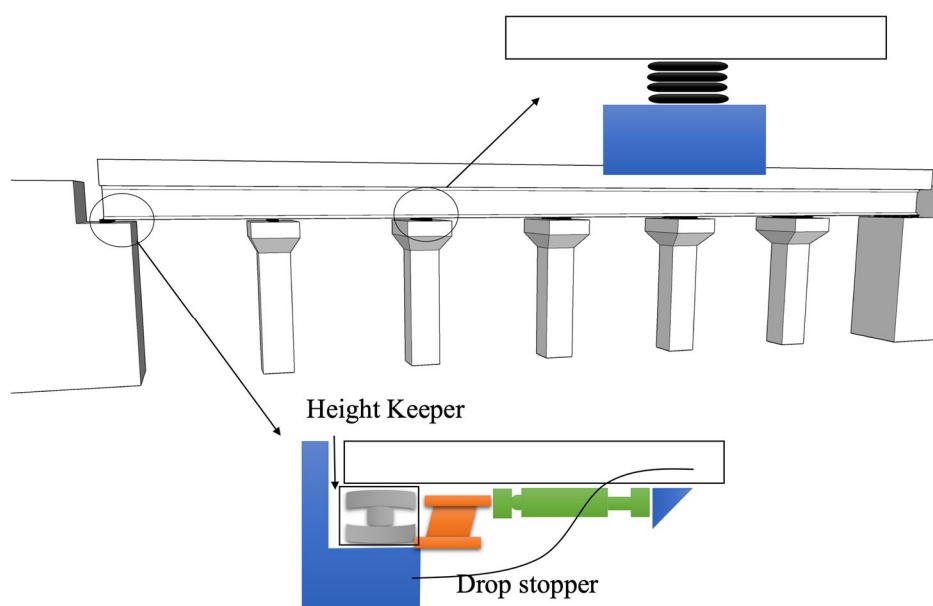


図1 機能分散型免制震橋の概要

この構造形式の特徴として、

Maxwell粘弾性モデルの原理を利用して、橋梁の桁が温度によってゆっくりと伸縮する時、抵抗力の小さいピンガムダンパーが変形を吸収し、地震のように大きく揺れる時、鋼製ダンパーだけが変形して、地震エネルギーを吸収する。

想定をはるかに超えた大地震を受け、橋梁の損傷がSPDに誘導され、すべり支承が鉛直支持機能を担い、通行しながら復旧を行えばよい。大地震時の被害を最小限に抑える。SPDを先に損傷させることで、復旧時に比較的高価で交換が難しいHDRの破断リスクを抑制できる。

従来構造系と比較した地震応答解析を行い、構造系全体の地震応答が抑えられたとともに、損傷がSPDに集中することを確認した。しかし、複雑な非線形が生じるSPDと速度依存性のあるシリンドーダンパーを直列することで、上述の便宜が生じるものの、例えばゆっくりと揺れる地震の場合、シリンドーダンパーがロックせず、鋼製ダンパーが地震エネルギーを十分に吸収できなくなることや、構造全体系が他の部材に損傷が集中してしまうことが発生する可能性があるため、このような大胆な構造形式の提案にあたり、解析だけではなく、動的載荷実験、特に実時間ハイブリッド実験による検証が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、実時間ハイブリッド実験システムを構築し、機能分散免制震橋の地震時機能分散と損傷誘導メカニズムを実験で検証し、具体的に下記の点を解明することを目的としている。

実時間ハイブリッドを行い、速度依存ダンパー（図1緑色）と直列されたSPD（図1オレンジ色）が揺れの小さい時に不動で、揺れの大きい時だけ作動する想定を検証する。

複雑な構造系の場合、ダンパーの降伏耐荷力の大きさによって、構造系の損傷の分布がどのように変化するのか？すなわち適切な耐荷力の設定で構造系の損傷をSPDに誘導できるのかを検証する。

これらの実験結果に基づき、提案構造形式の簡易なモデルで解析し、実験結果とよく一致するのかを検討し、実務的な設計手法を提案する。

## 3. 研究の方法

本研究では実時間ハイブリッド実験システムを開発し、ハイブリッド実験を用いて提案構造の妥当性と解析モデルの正確性を検証し、想定外地震動を受ける機能分散免震橋の危機耐性設計を目指して、図2に示すように、本研究では下記の内容を実施する。

制震ダンパーの予備荷重実験の荷重装置をそのまま利用して、実時間ハイブリッド実験の制御システムを開発する。

- 構造全体系をコンピューターに数値解析モデルとして、地震応答解析を行うが、非線形特性が複雑で、時間依存性のある部材のみ、実寸法の動的荷重を行う。
- 微小時間刻みで細かい制御を実施するために、基本的にデジタルデータ処理システム(DSP)を用いA/D変換(信号計測)、D/A変換(信号制御)を行う。
- 構造振動の応答解析と実験フィードバックを用いる応答の修正は実験の中心的なアルゴリズムであり、この部分は制御PCでのプログラムを開発する。

実時間ハイブリッド実験を行い、地震荷重された時、シリンダーダンパーがロックされ変形が鋼製ダンパーに集中する機能を検証し、想定外地震時に、提案構造の損傷誘導機能を実証する。

実務設計に向け、制震ダンパーの挙動を簡単なモデルで解析する場合の精度を検証し、簡易な設計手法を検討する。

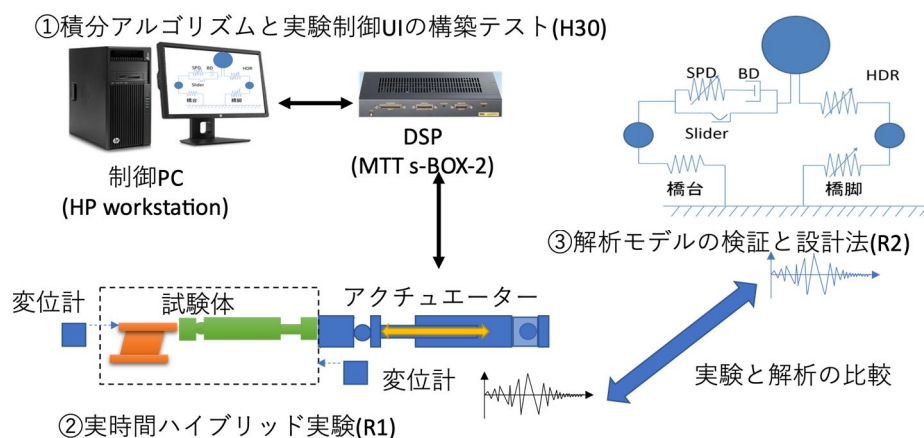


図2 本研究の研究手法

## 4. 研究成果

本研究では、高度な制御を必要とするため、実時間ハイブリッド実験の制御システムを構築し、実験システムが正しく作動するかを検証した。実時間ハイブリッド実験を行い、変形が鋼製ダンパーに集中する機能を検証し、想定外地震時に、提案構造の損傷誘導機能が実証された。実務設計に向け、制震ダンパーの挙動を簡単なモデルで解析する場合の精度を検証し、リスクに基づいた設計手法を検討した。得られた主な研究成果は以下でまとめる。

(1)本研究では実時間ハイブリッド実験の制御システムを開発した。

本研究におけるハイブリッド実験は、構造モデル全体の非線形地震応答が解析部で行われ、研究対象となる直列ダンパーだけが抽出され実験部で制御される。制御装置は、定格出力 $\pm 1000\text{kN}$ 、ストローク $\pm 250\text{mm}$ の水平アクチュエータを有している動的制御システムを用いた。水平アクチュエータは、入力される外部変位(制御目標変位)で制御されている。実験の制御システムには、運動方程式や復元力の数値解析を Host PC で行うシステムと、DSP (Digital Signal Processor) で行うシステムの2種類を用いた。



図3 制御時の様子

(2)実時間ハイブリッド実験を行い、提案構造の損傷誘導機能の実証。

制御速度が $20\text{mm/s}$ ( $2\text{ kine}$ )としたハイブリッド実験の結果と Host PC を用いた実時間ハイブリッド実験の結果では、両者の差がほぼなく、安定した地震応答を得られている。しかし、Host PC の CPU clock を用いて、微小時間の演算を正確な時間間隔で制御することが難しく、実際の実行時間は実時間の8倍もかかっていた。正確な時間倍率で実時間制御を行うために、DSP を用いた実験を行った。

DSP 制御で行った実時間ハイブリッド実験では、ほぼ制御通りで実時間の制御を実現できたが、得られた応答も図4に示すように、Host-PC で得られた応答とほぼ同じの振幅のものが得られた。実験の制御変位と実際計測した実験変位を比較すると、微小な時間遅れが生じている。時間遅れによる発振を抑制するために、FIR フィルタによる時間遅れの補正も試みた。

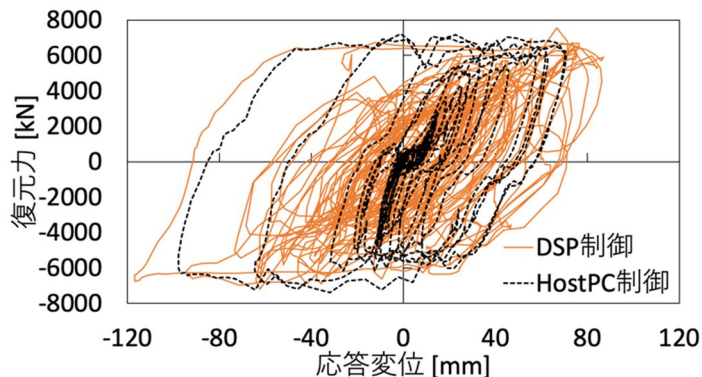


図4 Host PC 及び DSP 制御したハイブリッド実験の結果

実験結果より、直列ダンパーは、通常時に上部工からの水平交通振動や温度伸縮に対応するため、低速度になるほど応答変位が顕著になると考える。また、実時間載荷時の等価剛性が解析モデルに漸近したことから、復元力に関しては解析モデルに近いと考察する。載荷速度が高速になるほど応答変位は解析値に漸近し、等価剛性が解析モデルに近くなるが、直列ダンパーのシリンダ型ダンパーの応答が解析値より大幅に振動したことで、他部材および構造系全体の応答変位が解析値より大きく振動した。より信頼性の高い実験データを得るには制御システムと載荷装置との間で調整が重要であり、データを得る前に試験体を用いた試験を複数回行う必要があるため、この実時間ハイブリッド実験手法の改良は今後の課題である。

### (3) 機能分散免制震橋のリスク評価

機能分散を考慮した免制震橋を対象に、従来の耐震橋と免震橋と比較して、危機耐性の向上を定量的評価することを試みた。漸増動的解析より、機能分散の設計方針の通り、安価で取り替え易いSPDが先行破壊することが判明した。また、地震リスク評価を行い、機能分散により免制震橋の損失コストは従来の約 1/2 に抑えられ、道路交通ネットワークを考慮した損失も小さくなる。機能分散を考慮した免制震橋を採用することにより、免震橋が経済的かつ早急な復旧が可能となり、被害地域の復旧に貢献することが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 秋池 佑香, 党 紀, 山崎 信宏, 石山 昌幸, 染谷 優太	4. 巻 74
2. 論文標題 機能分散された免制震橋の地震リスク評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 pp. I_955-I_963
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ji Dang, Yuka Akiike, Nobuhiro Yamazaki
2. 発表標題 Seismic Risk Analysis and Hybrid Simulation for Function Separation Bridge
3. 学会等名 The Third International Bridge Seismic Workshop（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ji Dang, Yuka Akiike, Nobuhiro Yamazaki
2. 発表標題 Risk Based Seismic Resilience Evaluation for Function Separated Bridge
3. 学会等名 The 6th International Conference on Engineering, Energy, and Environment（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋池 佑香, 党 紀, 山崎 信宏, 染谷 優太
2. 発表標題 直列ダンパーの実時間ハイブリッド実験の開発
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎 信宏、染谷 優太、党 紀、秋池 佑
2. 発表標題 実時間ハイブリッド実験による直列ダンパーの性能 検証
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Yamazaki, J. Dang, Y. Akiike, M. Ishiyama, Y. Someya
2. 発表標題 Real-time Hybrid Experiment of "CaSS" for Function Separated Bridge
3. 学会等名 Proceeding of 17 WCEE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 党 紀, 秋池 佑香, 山崎 信宏
2. 発表標題 直列ダンパーの動的性能挙動のためのハイブリッド実験
3. 学会等名 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔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
研究協力者	奥井 義昭  (Okui Yoshiaki)  (40214051)	埼玉大学・理工学研究科・教授	

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
研究協力者	五十嵐 晃 (Akira Igarashi)  (80263101)	京都大学・防災研究所・教授	
研究協力者	山崎 信宏 (Yamazaki Nobuhiro)	日本鑄造	

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