

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00255

研究課題名（和文）地震被害の最小化と迅速復旧を実現する次世代耐震構造の開発

研究課題名（英文）Development of Next-Generation Structural Concepts for minimizing Earthquake Damage and realizing Quick Function Recovery

研究代表者

運上 茂樹（Unjoh, Shigeki）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60355815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,610,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、リダンダントでねばり強く容易に修復可能なダメージフリー構造コンセプトを実現するマルチ・アブソーバ/マルチ・ステップ変形吸収機構を新たに提案し、模型RC橋脚の載荷実験を通じて、その有効性を実証するとともに、その変形挙動を推定可能な構造解析法を提案した。また、最小数のセンサ・システムで損傷を検知し、損傷程度を診断するビルトイン状態把握オブザーバを提案し、構造物挙動の可観測性という観点でのセンサの設置法とともに、実構造物に設置したセンサ・システムによるモニタリング観測データに基づき、構造物の状態把握と力学パラメータを予測する手法を提案し、その有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国では、南海トラフの巨大地震を始めとする大規模地震の発生の切迫性が指摘され、その被害は激甚なものとなると推定されている。震災時に避難、救援、復旧等のために不可欠となる社会インフラの機能維持のために、地震作用に対してねばり強く抵抗し、被災時にはそれを速やかに検知、診断し、容易な修復を可能とする新たな構造への転換が求められている。本研究では、こうした目的を実現するために、地震被害を受けにくいダメージフリー構造とともに、損傷状況を把握、診断する自己検知・診断構造を提案し、その実現性と有効性を実験的、解析的に検証するものであり、次世代の耐震構造としてその実用展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study presented new damage-free structural concept to significantly enhance the redundancy, ductility and repairability of current structural systems. Multi-absorber and multi-step displacement absorption concepts were newly proposed and the effectiveness was verified through the loading tests of model RC columns. The structural analysis methods to simulate the ductility behaviors were also proposed. Furthermore, built-in observer system to get the structural status and to detect the damage through the sensor system was proposed. The minimum sensor placement method based on the observability concept was proposed and the effectiveness to estimate the structural status and the mechanical properties were verified using the sensor monitoring data of the model and real structures.

研究分野：土木工学

キーワード：次世代耐震構造 ダメージフリー構造 自己検知構造 自己診断構造 大変形吸収機構

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国では、近年、2016年熊本地震などの大地震の発生により甚大な被害を引き起こすとともに、南海トラフの巨大地震、首都直下地震を始めとして、全国において大規模地震の発生の切迫性が指摘され、これらの地震による被害は激甚なものとなることが推定されている。中でも社会インフラ構造物は、震災時には、避難、救援、復旧等のために不可欠となるが、地震被害により、その機能が長期に渡り著しく影響を受ける事例も多く発生してきている。このため、想定を超えるような超過地震力に対しても、ねばり強く抵抗し、仮に被害が発生してもその状態を適格に検知、診断し、そして容易な修復を可能にする新たな構造への転換が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、想定を超える超過地震力に対しても被害を受けにくい「ダメージフリー構造(地震の影響にセンシティブではない構造)」と自らの損傷状況を把握、診断する「自己検知・自己診断構造」を提案するとともに、これらの有効性を実験的、解析的に実証することを目的とする。「ダメージフリー構造」については、リダンダントでねばり強い構造を実現する新たな構造コンセプトとして、「1) マルチ・アブゾーバ変形吸収機構」および「2) マルチ・ステップ変形吸収機構」を開発し、従来の損傷制御性能を大きく拡張させる。また、「自己検知・自己診断構造」については、最小数のセンサ・システムで損傷を検知し、その損傷程度を適格に診断する見守り機構「3) ビルトイン状態把握オブザーバ」を開発し、構造物の継続使用可能性を迅速に判断できるようにすることを目的とする。

3. 研究の方法

上記2. に示した新たな構造コンセプトである「1) マルチ・アブゾーバ変形吸収機構」および「2) マルチ・ステップ変形吸収機構」、そして、「3) ビルトイン状態把握オブザーバ」を開発するための研究方法を以下に示す。

1) マルチ・アブゾーバ変形吸収機構

橋梁橋脚への適用を想定し、本機構を実現するための構造形式として、複数の部材あるいは断面区間で変形を吸収する構造を考案する。各部材あるいは断面の損傷程度を低減させ構造全体としての変形吸収性能を格段に高めることが可能なることを、模型橋脚の載荷実験を通じて実証するとともに、その挙動を追跡可能な構造解析法を検討する。また、損傷後に容易に復旧可能な構造として、残留変位を低減するセルフセンタリング機構の導入とともに、修復時の自立を確保する部材コア部の支持構造を考案し、模型載荷実験を通じて効果検証を行う。

2) マルチ・ステップ変形吸収機構

基本構造コンセプトは1)と同じであるが、複数の変形吸収機構を段階的に制御・機能させながら、構造全体の変形吸収性能を格段に高める構造を考案する。変形吸収機構として、上部構造、支承、橋脚、基礎の変形を考慮し、その効果と制御方法について解析的に検討する。また、マルチ・ステップ変形吸収機構に適用するために新たな免震支承と損傷制御法を考案し、その効果を解析的、実験的に検討する。

3) ビルトイン状態把握オブザーバ

最小数のセンサー・システムで損傷を検知するための方法論とその効果を検討する。構造物にセンサー・システムを設置し、モニタリングによって観測データが得られた場合に構造物の状態把握と構造パラメータを特定する方法を検討する。

4. 研究成果

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

(1) マルチ・アブゾーバ変形吸収機構と容易に修復可能な構造の開発

変形性能を従来に比較して格段に高めるとともに、損傷を分散・低減し、そして復旧を容易に行うことを可能とする「マルチ・アブゾーバ変形吸収機構」を具体的に実現するための構造を提案した。セグメント形式あるいは一体型の部材を貫通緊張材によって構築する柱構造とし、複数個所でのロッキング変形によって部材全体として大変形を吸収するとともに、残留変位をほぼ0近くまで最小化可能なセルフセンタリング機構、さらに塑性ヒンジ部のコアに鋼管やエクスパンドメタルを装備し、構造物の機能性を損なうことなく補修可能な機構を導入したものである。

提案構造の有効性と制御に必要な条件を明らかにするために、合計11体の模型載荷実験を行い、想定した変形吸収性能、セルフセンタリング性能、そして補修性能を発揮可能であることを明らかにした。また、提案する変形吸収機構を再現可能な解析シミュレーションモデルを開発するとともに、実験結果との比較検証によりモデルの再現性や適用範囲、貫通軸方向鉄筋量やセグメント間に装備する応力集中緩衝層の設計方法を提案した。(参考文献1-2)

(2) マルチ・ステップ変形吸収機構の開発

上部構造，支承，橋脚，基礎で構成される橋梁構造を対象に，橋脚部材の非線形復元力特性をパラメータとした静的プッシュオーバー解析と地震応答解析を行い，支承，橋脚，そして，基礎の3部材において段階（ステップ）的に変形を吸収させ，各部材の損傷を制御，低減するとともに，構造全体として大幅に変形吸収性能の増大を図ることができることを明らかにした．また，橋脚部材の非線形特性における降伏後の剛性に基づく損傷制御設計法を提案した．（参考文献3）

(3) 新しい変形吸収機構の開発と損傷制御設計

マルチ・アブゾーバ/マルチ・ステップ変形吸収機構に適用するための新しい構造要素として，ロッキング変形によって大変形を吸収可能で，接続する部材への荷重伝達を遮断制御することが可能な免震デバイスを開発した．

地震動を受ける場合の構造物モデルの数値シミュレーションを通じて，各部材の損傷程度を低減させ，変形吸収性能を格段に高める構造を実現できることを明らかにするとともに，模型振動台実験によりその挙動性能を検証し，開発した解析モデルによって地震時の動的挙動を精度よく再現できることを明らかにした．また，開発した免震デバイス「Rocking Isolation Bearing System: RIBS」については，特許出願を行った．

さらに，免震支承の固定アンカーボルトの破断性能を考慮した損傷制御によって，構造全体の速やかな機能回復を図ることが可能となることを明らかにした．（参考文献4-7）

(4) ビルトイン状態把握オブザーバの開発と損傷検知

大変形吸収機構を有する実構造物にビルトインし，得られた観測データに基づき，その力学特性の検知を行う状態把握オブザーバについて，実際の構造物にセンサー・システムを装備し，その載荷実験から得られた計測データに基づき，カルマンフィルターを用いたパラメータ推定法の適用により，大変形吸収機構の剛性や摩擦係数などの力学パラメータを精度良く推定可能であることを明らかにした．

また，複数箇所での加速度センサによる振動モニタリングに対して，可観測性という概念を提案し，最小のセンサ数配置で構造物の挙動特性を推定する手法を提案するとともに，その手法の有効性を模型振動台実験データの分析を通じて検証した．

さらに，多点加速度センサによる振動モニタリングと機械学習による異常検知手法を構築し，鉄筋コンクリート柱の正負交番載荷実験を通じて，損傷のない健全領域と，塑性ヒンジ域での曲げひび割れおよびかぶりコンクリートの剥落を推定できる可能性のあることを明らかにした．また，直接目視点検をすることができない地中部の構造部材の損傷を掘削することなく遠隔的に推定するために，地表からの電気抵抗の測定に基づく損傷推定法を提案した．（参考文献8-12）

(5) 実構造物への試験適用とモニタリングデータ分析

大変形吸収機構を装備した実構造物（富山県）に状態把握オブザーバを設置し，モニタリング観測を継続している中，2024年1月1日に発生した能登半島地震により動的挙動データが観測された．地震発生日のうちにリモートで観測データにアクセスし，実構造物の挙動状況と損傷可能性を把握することに成功し，その実用性を明らかにした．（参考文献8）

参考文献

- 1) Xirui Li, Shigeki Unjoh: Experimental Investigation on the Seismic Behavior of Prestressed Precast Segmental Piers, the 16th Japan Earthquake Engineering Symposium (16JEES), 2023
- 2) H. Fujioka, S. Fujikura, K. Okuyama, V. Thay, S. Unjoh, H. Watase: Cyclic Loading Test on Post-Tensioned Bridge Column Improving Post-Earthquake Recovery, 8th World Conference on Earthquake Engineering (18WCEE), 2024
- 3) Shinya Kondo, Shigeki Unjoh: Development Of Multi-Step Deformation Absorption Concept To Enhance The Seismic Performance Of Bridge Structures , 8th World Conference on Structural Control and Monitoring (8WCSCM), Orlando, FL, USA, 5-8 June 2022
- 4) He Xinhao, Unjoh Shigeki: Development of rocking isolation bearing system (RIBS) to control excessive seismic responses of bridge structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.51, pp.369-392, 2021
- 5) He Xinhao, Unjoh Shigeki, Yamazaki Shinsuke, Noro Tadayuki: Development of a bidirectional rocking isolation bearing system (Bi RIBS) to control excessive seismic response of bridge structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.52, pp.3074-3096, 2023
- 6) 運上茂樹，何昕昊：特許申請，免震構造，特願 2021-207943，出願年 2021 年，特開 2023-92748，公開年 2023 年
- 7) 松崎裕，運上茂樹：アンカーボルトの破断による免震橋の地震時損傷制御，第 10 回構造物の安全性・信頼性に関するシンポジウム，JCROSSAR2023，2023
- 8) He Xinhao, Unjoh Shigeki, Inaba Naofumi, Urago Takaomi, Yamazaki Shinsuke, Noro

- Tadayuki: Full-Scale Static Loading and Free-Vibration Tests of a Real Bridge with Friction Pendulum Bearing System (FPS) and Design Parameter Estimation, Journal of Earthquake Engineering, Vol.26, pp.1-26, 2022
- 9) He Xinhao, Unjoh Shigeki, Li Dan: Unscented Kalman filter with performance recovery strategy for parameter estimation of isolation structures, Structural Control and Health Monitoring, Vol.29, pp.1-27, 2022
 - 10) He Xinhao, Li Dan, Unjoh Shigeki: Joint state-parameter estimation for structures with seismic isolation and damping systems -Theoretical observability and experimental verification Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.203 ,No.110733, pp.1-21, 2023
 - 11) 内藤 英樹、木本 智幸、藤岡 光、藤倉 修一、運上 茂樹 振動測定とオートエンコーダによる RC 部材の地震時損傷の検知 , AI・データサイエンス論文集 , Vol.3 , pp134-144 , 2022
 - 12) Alvarez Reyes Ronald Stephan, Unjoh Shigeki: A new approach for detecting the damage of underground bridge foundations using transfer resistance, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.20, pp.1-22, 2024

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 He Xinhao, Unjoh Shigeki, Yamazaki Shinsuke, Noro Tadayuki	4. 巻 52
2. 論文標題 Development of a bidirectional rocking isolation bearing system (Bi RIBS) to control excessive seismic response of bridge structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering and Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 3074 ~ 3096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eqe.3913	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 He Xinhao, Li Dan, Unjoh Shigeki	4. 巻 203
2. 論文標題 Joint state-parameter estimation for structures with seismic isolation and damping systems: Theoretical observability and experimental verification	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 110733 ~ 110733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ymsp.2023.110733	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 該当する
1. 著者名 Alvarez Reyes Ronald Stephan, Unjoh Shigeki	4. 巻 20
2. 論文標題 A new approach for detecting the damage of underground bridge foundations using transfer resistance	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 1 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2024.2319098	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 He Xinhao, Unjoh Shigeki, Li Dan	4. 巻 29
2. 論文標題 Unscented Kalman filter with performance recovery strategy for parameter estimation of isolation structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 1,27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/stc.3116	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 該当する

1. 著者名 He Xinhao, Unjoh Shigeki, Inaba Naofumi, Urago Takaomi, Yamazaki Shinsuke, Noro Tadayuki	4. 巻 26
2. 論文標題 Full-Scale Static Loading and Free-Vibration Tests of a Real Bridge with Friction Pendulum Bearing System (FPS) and Design Parameter Estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 1~26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13632469.2022.2151529	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 内藤 英樹、木本 智幸、藤岡 光、藤倉 修一、運上 茂樹	4. 巻 3
2. 論文標題 振動測定とオートエンコーダによるRC部材の地震時損傷の検知	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 134~144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.3.J2_134	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 He Xinhao, Unjoh Shigeki	4. 巻 51
2. 論文標題 Development of rocking isolation bearing system (RIBS) to control excessive seismic responses of bridge structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering and Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 369~392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eqe.3570	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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Xinhao He, Dan Li, Shigeki Unjoh
2. 発表標題 Parameter Estimation for Seismic Isolation Structures in the Presence of Pounding Problems by Unscented Kalman Filter
3. 学会等名 10th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Alvarez Ronald, Unjoh Shigeki
2. 発表標題 Damages Identification Methodology of Unseen Reinforced Concrete Foundations Using Error Analysis of Transfer Resistance
3. 学会等名 8th International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (ICCSTE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤岡光, 藤倉修一, 奥山賢人, Visal THAY, 運上茂樹, 渡瀬博
2. 発表標題 コア部にエクスパンドメタルを配置したPC 橋脚の耐震性に関する実験的研究
3. 学会等名 (公社)土木学会第26 回橋梁等の耐震設計シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤岡光, 藤倉修一, 奥山賢人, Visal THAY, 運上茂樹, 渡瀬博
2. 発表標題 コア部にエクスパンドメタルを配置したPC 橋脚の耐震性に関する研究
3. 学会等名 (公社)土木学会第43回地震工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤真弥, 運上茂樹
2. 発表標題 マルチステップ変形吸収機構に関する解析的検討
3. 学会等名 (公社)土木学会令和5年度全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田尻佳大, 何昕昊, 運上茂樹
2. 発表標題 ロッキング免震支承(RIBS)を用いた橋梁の地震応答特性評価
3. 学会等名 (公社)土木学会令和5年度全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松崎裕, 運上茂樹
2. 発表標題 アンカーボルトの破断による免震橋の地震時損傷制御
3. 学会等名 第10回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCOSAR 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xirui Li, Shigeki Unjoh
2. 発表標題 Experimental Investigation on the Seismic Behavior of Prestressed Precast Segmental Piers
3. 学会等名 第16回地震工学シンポジウム (16JEES)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xinhao He, Shigeki Unjoh, Shinsuke Yamazaki, Tadayuki Noro
2. 発表標題 RECENT ADVANCEMENTS IN THE DEVELOPMENT OF A ROCKING ISOLATION BEARING SYSTEM FOR BRIDGE STRUCTURES
3. 学会等名 18th World Conference on Earthquake Engineering (18WCEE) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Fujioka, S. Fujikura, K. Okuyama, V. Thay, S. Unjoh, H. Watase
2. 発表標題 CYCLIC LOADING TEST ON POST-TENSIONED BRIDGE COLUMN IMPROVING POST-EARTHQUAKE RECOVERY
3. 学会等名 18th World Conference on Earthquake Engineering (18WCEE) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shinya Kondo, Shigeki Unjoh
2. 発表標題 Development Of Multi-Step Deformation Absorption Concept To Enhance The Seismic Performance Of Bridge Structures
3. 学会等名 8th World Conference on Structural Control and Monitoring (8WCSCM), Orlando, FL, USA, 5-8 June 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松崎 裕, 運上 茂樹
2. 発表標題 超過作用に対する免震橋の地震時損傷制御に関する基礎的検討
3. 学会等名 (公社)土木学会 第25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤岡 光, 藤倉 修一, Thay Visal, 運上 茂樹, 渡瀬 博
2. 発表標題 地震後の復旧性能の向上を目指したPC橋脚の耐震性に関する実験的研究
3. 学会等名 (公社)土木学会 第25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤岡 光, 藤倉 修一, Visal THAY, 運上 茂樹, 渡瀬 博
2. 発表標題 地震後の復旧性能の向上を目指したPC橋脚の耐震性に関する研究
3. 学会等名 (公社)土木学会 第42回土木学会地震工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤真弥, 運上茂樹
2. 発表標題 マルチステップ変形吸収機構に関する解析的検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田尻佳大, 何昕昊, 運上茂樹
2. 発表標題 ロッキング免震支承(RIBS)を用いた橋梁の地震応答特性評価
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤岡光, 藤倉修一, 出町元大, Thay Visal, 吉川遼, 運上茂樹
2. 発表標題 地震後の復旧性能の向上を目指したPC橋脚の正負交番載荷実験
3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋亮充, 運上茂樹
2. 発表標題 マルチ変形吸収機構の提案
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口開斗, 運上茂樹
2. 発表標題 SMA 制震ダンパーを導入した免制震橋梁の震動低減効果に関する解析的研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Hosokawa, S. Unjoh
2. 発表標題 Damage analyses on the collapse of Aso-ohashi during the 2016 Kumamoto Earthquake
3. 学会等名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 免震構造	発明者 運上茂樹, 何昕昊	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-207943	出願年 2021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
研究分担者	松崎 裕 (Matsuzaki Hiroshi) (10506504)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授 (82723)	
研究分担者	内藤 英樹 (Naito Hideki) (50361142)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	藤倉 修一 (Fujikura Syuichi) (90782558)	宇都宮大学・地域デザイン科学部・教授 (12201)	

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			
中国	Southeast University			