

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18136

研究課題名(和文) 鋼製橋脚を有する免震橋の破壊解析と想定外地震のための危機耐性評価法の開発

研究課題名(英文) Collapse Analysis and Anti-Catastrophe Assessment Method for Isolated Bridges with Steel Piers

研究代表者

党 紀 (DANG, Ji)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60623535

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)：高減衰ゴム支承の縮小試験体を用いた繰り返し載荷実験および神戸地震動を用いたハイブリッドシミュレーション実験で得られた結果と解析で得られた結果を比較することによって、提案した修正 Park-Wenモデルの妥当性を検証した。高速道路高架橋の地震応答解析において、2質点系モデルを用い構築し、漸増動的解析を行い、前述した危機耐性を評価するための基礎データと破壊パターンとその確率を把握する。漸増解析によって得られた構造物の倒壊確率について、設計地震動レベルを大きく超えたレベルに発生することがほとんどであるが、ゴム支承が破断することによって、落橋が発生することが主な最終破壊状態となっている。

研究成果の概要(英文)：In this study, the proposed Modified Park-Wen Model is verified by quasi-static loading test and Sub-Structure Pseudo-Dynamic Simulations with Kobe Earthquake and scaled High-Damping Rubber (HDR) bearings. Seismic response simulation for highway viaduct bridges were conducted. As its numerical model, a simplified Two-Degree-Of-Freedom model is used in Incremental Dynamic Analysis (IDA) to evaluate the Anti-Catastrophe Performance of this kind of structures under Design-Level-exceeded earthquakes, and to cumulate basic data about structural collapsing pattern and their probabilities. Using the fragility curves from result of IDA, though, the collapse probability is low for design level earthquake, most possible collapsing pattern under design exceeded earthquakes is the broken of rubber bearings.

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：危機耐性 倒壊確率 想定外地震動 漸増動的解析 リスク評価

### 1. 研究開始当初の背景

橋梁等の耐震設計は今まで、想定レベルの地震に対し、構造物が耐力低下までの応答変位が生じないであれば、破壊しない(安全)としている。ただし、構造物の地震応答は動的挙動であり、静的耐力が低下しても必ずしも動的倒壊に至るわけではない。今までは、設計の便宜を優先して、具体的な破壊分析は必要としていない。

近年の大地震などの自然災害の発生を受け、防災能力を向上するために、世界各国の耐震設計に新たな知見を盛り込めるように様々な努力が行われている。例えば、アメリカの緊急事態管理庁(Federal Emergency Management Agency, FEMA)は、2006年から自然災害や人的災害リスクが国全体の国力や財政負担および経済に及ぼす影響を把握するため、次世代の耐震性能設計法(NGPBSD)を開発し、各災害のシナリオ、発生確率を把握し、破壊した場合の損失を見積もるようにリスク評価と管理などが可能とする方法を提案されている。

一方、1995年の兵庫県南部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震などの想定外地震の発生をきっかけにして、日本でも想定外地震を確率的に認識する意識が高まった。特に、鉄道橋の設計では、従来の安全性と復旧性に対して、破壊を防ぐ(安全)設計の上に、壊滅的な状態(危機)に陥りにくいという危機耐性の概念が検討されている。ただし、固定されたレベルにこだわらず、地震の強さに応じて、構造物がどのような応答、損傷、破壊することを連続的に予測する解析技術がこの危機耐性を評価するためにもっとも重要部分である。

### 2. 研究の目的

想定外地震動を受ける免震橋の危機耐性を評価する手法の開発を目指して、本研究では下記の内容を実施することを目的としている。

(1)免震ゴム支承の破壊領域の载荷実験を用いて、ゴム支承の破壊が繰り返し载荷による影響を観察し、数値モデル改良する。免震ゴム支承の修正 Park-Wen と鋼製橋脚の曲線近似モデルを両方用いて、免震鋼製橋脚系橋梁の非線形地震応答解析モデルを構築する。

(2)上記のモデルに大量の地震動を入力し、漸増動的解析(IDA)より、構造物が倒壊や落橋するなどの動的破壊まで耐えられた地震動強さや落橋ケースと倒壊ケースのそれぞれの発生確率を解明する。

(3)最後に、橋梁の危機耐性を定量的に評価する方法を検討し鋼製橋脚を有する免震橋の試算例を用い、実用化できる指標を提案する。

### 3. 研究の方法

#### (1)免震ゴム支承の破壊実験

実物の1/4縮小モデルを用い、ゴム支承の破壊挙動を十分再現できると思われる。実験3

セットを実施する。その1、試験体に鉛直荷重を加え、水平方向にせん断変位を試験体が破断するまで与えることにより、最大荷重や最大変形能など数値モデルに重要な情報を得る。その2、せん断歪みを50%ずつ漸増し、試験体破壊まで正負交番载荷し、地震時のように繰り返し変形される場合の破壊特性、繰り返しによる損傷の累積の有無を観察する。その3、载荷と地震応答解析を同時行うハイブリッド実験を実施する。地震動の大きさを少しずつ漸増し、破壊まで载荷する。これによる破壊と応答履歴が直接に分かる。

#### (2)修正 Park-Wen モデルの妥当性の検証

実験で得られた結果を用いて、モデルの検証を行う。単調载荷で得られた荷重変位関係を用いて修正 Park-Wen モデルのパラメータを同定する。また修正 Park-Wen モデルにゴム支承の破壊歪みなどの破壊条件を仮定し、改良を行う。修正 Park-Wen モデルを用いて繰り返し载荷の再現解析を行う。

#### (3)橋梁解析モデルの構築

本研究では、高速道路高架橋の地震応答解析において、2質点系モデルを用い構築する。支承部のみが変形し、それによる荷重は修正 Park-Wen モデルで計算する。桁の質量は実構造物の支承の面圧などを参考して設計する。橋脚の変形と荷重関係は研究代表者らが開発した曲線近似モデルで計算する。橋脚部の質量は経験的に上部工の1/4とする。

#### (4)漸増動的解析と倒壊分析

ここでは、漸増動的解析を行い、前述した危機耐性を評価するための基礎データと破壊パターンとその確率を把握する。本研究では、様々な地震動100本以上が必要と考えている。解析用地震動は、アメリカの PEER と日本の気象庁および防災科研(K-net)から、大地震で記録した強い揺れの加速度記録をダウンロードする。記録の数が不足している場合、アメリカの PEER からもっと幅広い地震動を導入する。地震動のPGAを100galとなるようにスケールして、構造モデルに入力

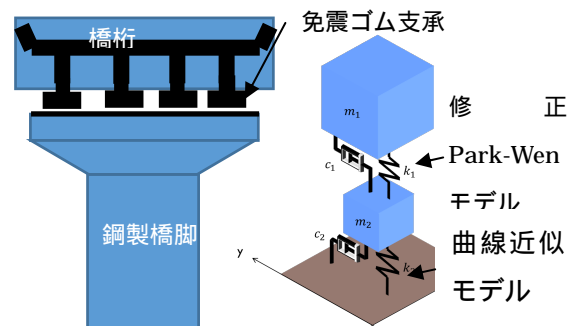


図1 本研究の解析モデル

して、応答を求める。構造が破壊となるまで、地震動を100galずつに漸増して構造応答を計算する。

地震動が大きくなれば、構造が倒壊しやすくなるが、地震動の特性が様々となるため、

一律した結果が得られない。構造の破壊を確率論的に評価する。ある地震動レベル、破壊した場合と破壊していない場合の確率を計算し、それぞれ A.倒壊と B.落橋パターンの確率でまとめ、地震動レベルの増大に対して、破壊確率とその内訳の変化（フラジリティカーブ）を分析する。

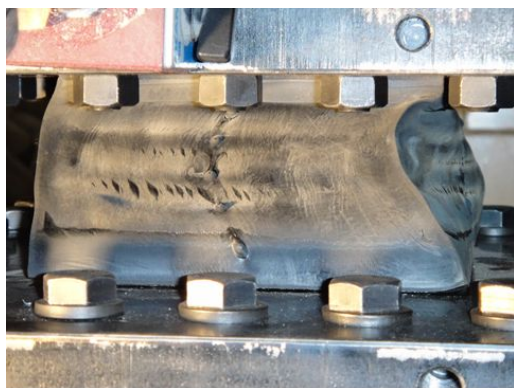


図2 高減衰ゴム支承の載荷実験

#### 4. 研究成果

本研究では、漸増動的解析によりフラジリティ特性を評価し、損傷発生確率や損傷コストを考慮した地震リスク評価を行うことで、免制震橋の危機耐性評価を試みた。なお、従来の耐震橋梁と免震橋梁のもとで、さらに危機耐性の優れた機能分散型免制震橋梁も合わせて提案した。本研究によって得られた知見は以下のとおりである。

(1)本研究では、ゴム支承を対象とした終局実験結果に基づく尤度関数を用いたベイズ法により、劣化ゴム支承の変形性能の確率分布の推定を行った。本手法で用いた手法による場合、将来試験結果が追加的に得られた場合においても、ベイズ法により破断ひずみ分布を随時更新することができる。

(2)ゴム支承の破断ひずみのばらつきを考慮した橋梁構造の簡易モデルを用いた耐震性能評価では、橋脚の降伏震度 0.2 の場合には、橋脚の終局状態が支承の破断に先行することが圧倒的に多い。これに対し、橋脚の耐震補強を行った場合を想定した降伏震度 0.3 の場合は、支承の破断が先行する確率が大きくなり、支承の経年劣化が橋梁の耐震性能に大きく影響することが分かった。

(3) 漸増解析によって得られた構造物の倒壊確率について、設計地震動レベルを大きく超えたレベルに発生することがほとんどであるが、ゴム支承が破断することによって、落橋が発生することが主な最終破壊状態となっている。設計地震動を超えた大きい地震による応答では、橋脚や橋台の地震応答がそれぞれ異なるケースにおいても、全支承部材破壊時における橋梁全体の破壊状態により、比較的損傷リスクが大きい人的被害損失が地震リスクに大きく影響していること

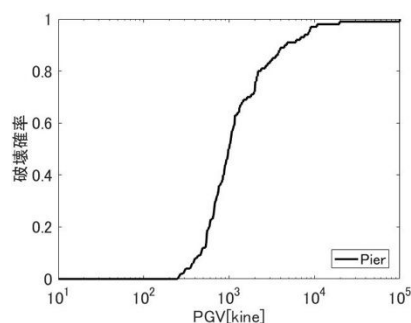
が分かった。

(4) 支承部材の終局状態発生確率には、橋台の地震耐力が影響している。橋台部の免震ゴム支承の機能を一部ダンパーに分散することによって、追加する減衰性能が発揮し、橋脚の破壊が抑えられ、橋脚の再構築による復旧の長期化が抑えられる。

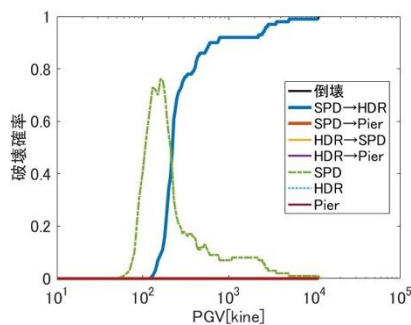
(5) 免制震橋のフラジリティは、構造系の主な終局状態におけるフラジリティが免震橋のものに近い形状を描くが、より安価で施工が容易な支承部材の組合せにより、経済的かつ早急な復旧が可能となる。

(6) 対象橋梁などを参考に部材に関する数値や道路交通ネットワークの状態を仮定したので、実際の破壊的狀況を考慮できたとは言い難い。

(7) フラジリティに関しては、橋台に関してより実際の状況に近い解析が必要ではあったが、橋台の地震応答は現在においても研究課題である。橋梁構造物の危機耐性を向上させるには、実際の破壊的狀況における地震応答の解明や、それによる道路交通ネットワークへの影響など、更なる研究が必要である。



(a) 耐震橋梁



(b) 機能分散を考慮した免震橋

図3 地震フラジリティカーブ

#### 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)

Ji Dang, Huihui Yuan, Igarashi Akira, Tetsuhiko Aoki: Multiple-Spring Model for Square-Section Steel Bridge Columns under Bidirectional Seismic Load, Journal of Structural

Engineering ASCE, Vol.143 Issue.5, 2017.

党紀、蛭沢佑紀、五十嵐晃: 水平2方向地震動を受ける免震橋の応答特性に関する漸増動的解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 72(4), pp.791-732,2016.

党紀、佐藤拓、五十嵐晃、足立幸郎、林訓裕: ペイズ確率推定と漸増動的解析(IDA)による経年劣化支承(リング沓)の耐震性能評価, 土木学会論文集 A1,72(4),pp.542-554, 2016.

党紀、五十嵐晃、村越雄太: 高減衰ゴム支承の水平2方向・大ひずみ変形時の挙動を表現した2方向復元力モデルの開発, 土木学会論文集 A1,72(1), pp.250-262, 2016.

〔学会発表〕(計 7 件)

秋池佑香, 党紀, Bidha L. Joshi, 石山昌幸, 山崎信宏, 染谷 優太: 地震リスクを用いた機能分散型免制震橋の危機耐性評価, 日本地震工学会・大会-2017, 日本地震工学会・大会-2017 梗概集,13,P2-31.1-10, 2017.

新井大輔, 党紀: 回転変位を考慮した曲線橋に対する水平2方向地震動解析, 日本地震工学会・大会-2017, 日本地震工学会・大会-2017 梗概集,13,P3-17.1-8, 2017.

山崎信宏, 石山昌幸, 染谷優太, 党紀, 秋池佑香: 危機耐性と経年変化を考慮した機能分散免制震装置の基本性能確認, 日本地震工学会・大会-2017, 日本地震工学会・大会-2017 梗概集,13(1),P4-22.1-8, 2017.

新井 大輔, 党紀: 免震ゴム支承と鋼製橋脚の2方向非線形相互作用を考慮した橋梁の地震応答特性, 土木学会第72回年次学術講演会, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集,72(1), 1-586.1-2, 2017.

党紀, Bidha L. Joshi, 石山昌幸, 山崎信宏, 原田孝志, 染谷優太: 極軟鋼せん断パネルの等方硬化による機能分散型免制震橋の地震応答の影響, 土木学会第72回年次学術講演会, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集,72(1),1-596.1-2,2017.

秋池佑香, 党紀, 山崎信宏, 石山昌幸, 原田孝志: 地震リスクを用いた機能分散型免制震橋の危機耐性評価, 土木学会第72回年次学術講演会, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集,72(1), 1-598.1-2, 2017.

林訓裕, 五十嵐晃, 足立幸郎, 党紀: 経年劣化 LRB を有する高架道路橋の地震リスク評価, 土木学会第72回年次学術講演会, 土木学会第72回年次学術講演会

講演概要集,72(1),1-577.1-2, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

党 紀 (DANG Ji)  
埼玉大学・理工学研究科・助教  
研究者番号: 60623535

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

( )