

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04568

研究課題名(和文) 極大地震動作用下の挙動を踏まえた免震橋の限界状態の再評価と損傷制御設計法の構築

研究課題名(英文) RE-EVALUATION OF LIMIT STATES CONSIDERING RESPONSE UNDER EXTREME GROUND MOTIONS AND DAMAGE CONTROL DESIGN FOR BRIDGES WITH ISOLATORS AND DAMPERS

研究代表者

松崎 裕 (MATSUZAKI, Hiroshi)

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

研究者番号：10506504

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)：鉛プラグ入り積層ゴム支承を有する免震橋において、RC橋脚の終局耐力に対する免震支承のハードニング開始点における水平荷重の比率を耐力比とし、鉄筋の過強度の影響を含む橋脚の耐力のばらつき等を踏まえて、耐力比を1.2程度以上とすれば、50年間にわたる免震支承の経年劣化を考慮しても免震支承の破断可能性を十分に低減できることが明らかとなった。また、橋脚が河川内に位置する場合などのように、RC橋脚の速やかな復旧が難しい場合には、アンカーボルトを破断させることで、過大な応答を抑制し、免震支承のゴム部における破断、RC橋脚の終局変位への到達のような長期の復旧期間を要する損傷モードを回避できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東北地方太平洋沖地震や熊本地震の際に、免震支承を含む橋梁用積層ゴム系支承に亀裂や破断が生じたが、国民生活や企業の経済活動の地震災害時における継続性の観点からも、地震後の速やかな供用再開のためには、長期の復旧期間を要する損傷モードは回避する必要がある。本研究では、免震支承の経年劣化や、地震動評価から構造物の応答・限界値に介在する各種不確定性を踏まえた上で、長期の復旧期間を要する免震支承のゴム部における破断や、RC橋脚の終局変位への到達を回避できる損傷制御設計法を構築したことに学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：The possibility of rupture of lead rubber bearings can be significantly reduced by setting the capacity ratio of the strength at hardening initiation of the lead rubber bearings to the ultimate strength of the column to 1.2 or greater, regardless of the aging deterioration of lead rubber bearings. It was also shown that the ultimate failure of rubber layers of the lead rubber bearings and the bridge columns, which requires a long repair time, can be sufficiently avoided under extreme ground motions by rupture of the anchor bolts, even if the aging deterioration of bearings is considered.

研究分野：構造工学、地震工学

キーワード：免震橋 復旧性 損傷モード 地震時損傷制御 フラジリティ評価 鉛プラグ入り積層ゴム支承 経年劣化 破断

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

2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震において、鉛プラグ入り積層ゴム支承を含めて、橋梁用積層ゴム系支承に破断が生じた。積層ゴム系支承の破断要因としては、地震動作用に加えて、経年劣化や地盤変状等の複数の要因があるとの指摘がなされている。また、近年、原子力発電所等の重要施設だけでなく、社会インフラに対しても、設計地震動の強度を超過する地震動作用（以降、極大地震動）の下での安全性向上等に関する各種検討が進められている。

研究代表者も、免震橋・制震橋を対象として検討を進めており、極大地震動作用下では主たるエネルギー吸収を担う部材が設計における想定とは異なる部材に移行し、損傷する部材も変化し得ることを明らかにしてきた。近年の地震被害においても、設計における想定とは異なる形で、ゴム系支承の本体および取付ボルトでの破断、ダンパーの取付部の破壊が、3次元的に複雑な挙動をしやすい形式の橋梁を中心に生じ、部材が本来有する性能を十分に発揮できていない形で生じた地震被害が少なくない。地震災害直後でも救急活動や物資の輸送に使用されるべき緊急輸送道路上の橋梁については、設計地震動に対する安全性の照査のみならず、極大地震動を含めて、最終的にどの部材の損傷で構造系としての損傷が決定されるのか、また、その安全性・復旧性をより向上させるための方策について検討しておくことが肝要である。

2. 研究の目的

本研究では、既往の地震被害の教訓や、構造系としての地震時挙動から予見される被害に基づき、1) 設計における想定とは異なる地震動が作用した場合の地震応答の変化点を踏まえて照査に用いる限界状態・耐力階層化を再評価し、2) 各部材が本来発揮すべき性能を発揮した上で、粘り強く抵抗して安全性が高く、速やかに復旧できる免制震橋を実現するための損傷制御設計法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 対象構造系と損傷制御設計法の考え方

本研究では、RC橋脚および鉛プラグ入り積層ゴム支承によって支持された連続鋼鈹桁を有する免震橋を対象とした。そして、設計地震動に対する地震応答と極大地震動作用下での地震応答の違いを支配する、免震支承のハードニング後の荷重増加に着目した。その上で、RC橋脚の終局耐力に対する免震支承のハードニング開始点における水平荷重の比を免震支承-RC橋脚間の耐力比として用いた。設計地震動に対しては、免震支承が先行して降伏することで、免震支承において主たる地震エネルギーを吸収するが、極大地震動作用下において、免震支承が破断しないように、免震支承-RC橋脚間の耐力比を確保し、耐力階層化を図ることが基本になる。

一方で、河川内に位置する橋脚には増水時期には修復のためのアクセスが難しくなるが、こうした橋脚の復旧性も問題になる場合には、免震支承を破断させないだけでなく、RC橋脚も終局的損傷を回避する必要がある。そこで、アンカーボルトを破断させることで、免震支承に過大なせん断ひずみが生じることや、RC橋脚の終局変位への到達について回避することを検討した。ここで、アンカーボルトの破断については、アンカーボルトの材料強度のばらつきが小さく、他の部材との間で耐力格差を設けて意図的に損傷させやすいこと、また、連続桁であれば落橋に至りにくいこと、ジャッキアップのための空間確保も含めて、アンカーボルトの破断後における復旧が行いやすいことも、アンカーボルトを損傷部材とした理由である。

(2) 免震橋のモデル化と解析方法

3. (1)で述べた免震橋における1基の橋脚で支持された振動単位を解析対象とし、上部構造-免震支承-RC橋脚から成る構造系を2質点2自由度系モデルとしてモデル化した。免震支承については、極大地震動作用下における免震支承でのハードニングを含む荷重の増加と、それに伴う免震支承-RC橋脚間の相互作用を考慮するために、ハードニングを考慮したトリリニアモデルによってモデル化した。ハードニング開始点については、経年劣化の有無に拘らずに200%であることが報告されていることに基づいて200%と設定した。RC橋脚については、骨格曲線を完全弾塑性型とし、履歴曲線をTakeda型モデルによりモデル化した。

こうしたモデル化を行った上で、地震動強度を変化させた非線形動的解析を個別に繰り返し行い、地震動強度と構造系の地震応答の関係を明らかにできる漸増動的解析を行った。さらには、免震支承はゴム部での破断あるいはアンカーボルトでの破断、RC橋脚は終局変位をそれぞれの終局限界状態として、免震支承およびRC橋脚の材料特性および力学的特性に関する不確定性を考慮した免震橋の動的解析に基づくフラジリティ評価を行った。

(3) 免震支承の経年劣化

本研究では、熱酸化劣化に伴う鉛プラグ入り積層ゴム支承のせん断剛性の増加および破断ひずみの低減を考慮した評価を行った。せん断剛性の変化に比べて、破断ひずみの低減については知見が少ないが、概ねせん断剛性の増加率と同じ程度で破断ひずみが低減しているとの報告に基づいて、経年劣化が免震支承の力学的特性に及ぼす影響を考慮した。

	応答値	限界値
μ	—	—
$\mu \pm \sigma$	- - -	- - -

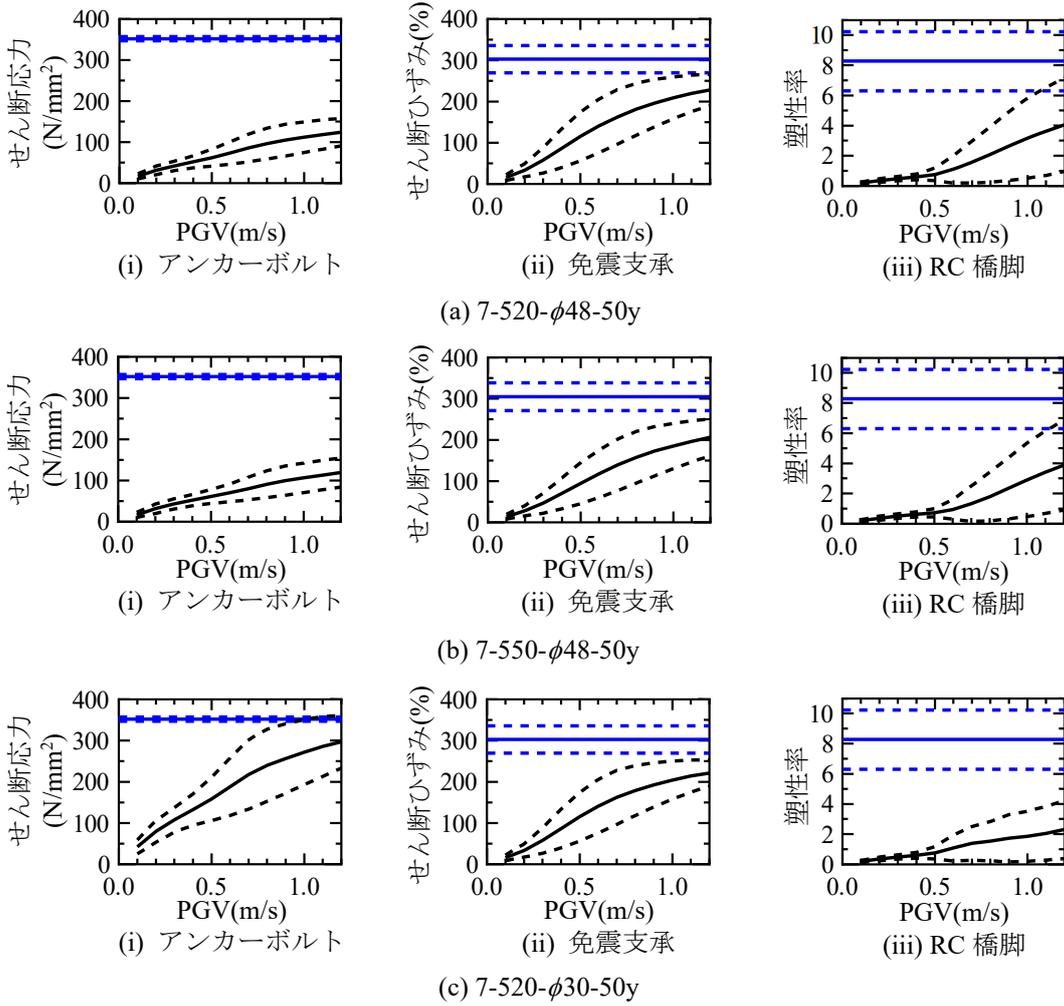


図1 地表最大速度 PGV と各部材の応答値・限界値の関係

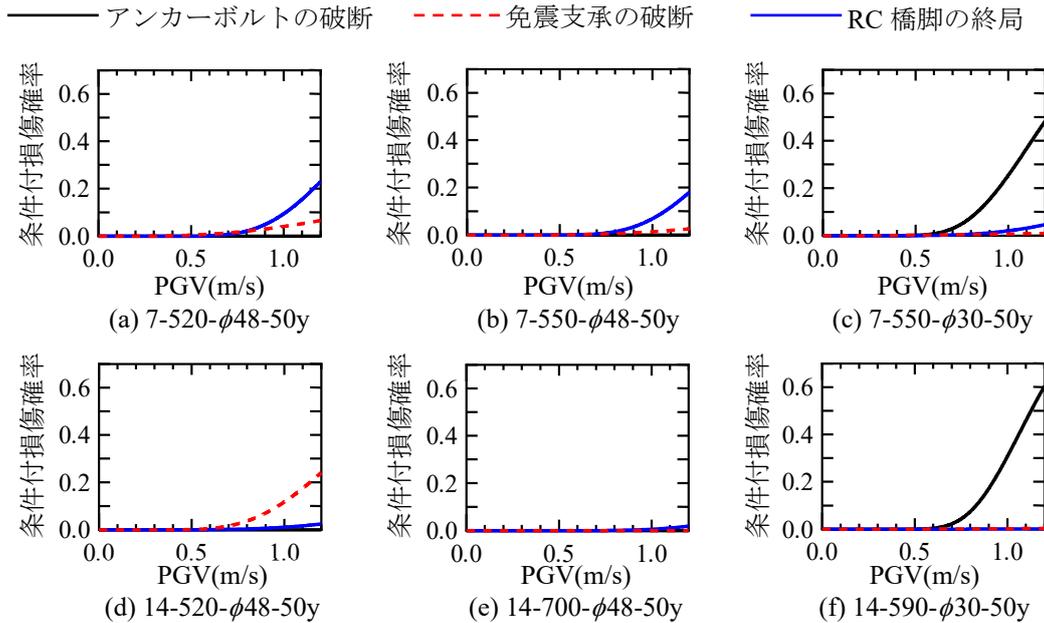


図2 フラジリティ曲線

(4) 入力地震動群

国内のI種地盤上で観測された地表最大速度 (PGV) が 0.50m/s 以上の地震動を選定し、地表

最大速度を所定の値に調整して対象とした免震橋に入力することで、漸増動的解析およびフラジリティ評価を行った。

4. 研究成果

3. (1)で述べた損傷制御設計法の有効性について、漸増動的解析およびフラジリティ解析の結果の例を示しながら述べる。

(1) 漸増動的解析

漸増動的解析結果の例として、橋脚高 7m の熊本市にある免震橋に関して、50 年経過後の免震支承の経年劣化を考慮した地表最大速度 PGV と各応答値・限界値の関係について、平均値 (μ) および平均値 \pm 標準偏差 ($\mu\pm\sigma$) の曲線として図 1 に示す。図中の H-S- ϕ X-Ty は、橋脚高 H、免震支承の平面寸法の最大値 S、直径 X のアンカーボルト、供用年数 T 年の構造物であることを示す。図 1(a)および(b)は、いずれもアンカーボルトが $\phi 48$ であるが、支承寸法が 550mm \times 550mm へと大きくなり、免震支承-RC 橋脚間における耐力比の増加に伴って、免震支承の破断に対する裕度は増加している。一方で、RC 橋脚は、支承寸法の増加に伴う耐力比の増加により、終局変位に到達する地表最大速度は増加し、安全性は向上しているものの、免震支承よりも RC 橋脚が終局限界状態に到達しやすい損傷モードに変わりはない。支承寸法を 520mm \times 520mm のままとして、アンカーボルトを $\phi 30$ とした場合には、免震支承の応答せん断ひずみの大きい側の裾野部分がアンカーボルトの破断によって強く影響を受け、 $\mu+\sigma$ の曲線が下側に移動し、それに伴って、RC 橋脚の最大応答が有意に低減している。このように、アンカーボルトの破断は、免震支承の過大なせん断変形の防止と RC 橋脚の応答の低減の両者に寄与する。

(2) フラジリティ解析

図 2 にフラジリティ曲線の例を示す。漸増動的解析結果からも明らかなように、橋脚高が 7m と低い場合には、RC 橋脚の塑性化後における応答のばらつきが大きく、図 2(a)のように、主に RC 橋脚が終局限界状態に到達することで、構造系としての終局限界状態が決定される。そして、免震支承の支承寸法を大きくすることで、免震支承-RC 橋脚間の耐力階層化により、免震支承のゴム部で破断する可能性は小さくなるが、極大地震動作用下において RC 橋脚で損傷することには変わらない。一方で、極大地震動作用下でアンカーボルトを破断させることにより、図 2(c)のように、RC 橋脚における終局的損傷を回避できることが示されている。

続いて、図 2(d)~(f)に示されている橋脚高 14m の場合のフラジリティ曲線を基に考察する。図 2(d)に示されるように、橋脚高 7m の場合と異なり、主として免震支承の破断により構造系としての終局限界状態が決定される。そして、耐力比が 1.2 以上となるように支承寸法を大きくすることで、免震支承-RC 橋脚間の耐力階層化が十分になされ、図 2(e)のように、免震支承の破断を回避できる。一方で、図 2(f)に示されるように、図 2(e)に比べて小さい支承寸法でありながら、復旧が容易なアンカーボルトを破断させることにより、免震支承のゴム部の破断および RC 橋脚の終局的損傷のいずれも回避できることが確認される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroshi Matsuzaki	4. 巻 18
2. 論文標題 Time-dependent seismic reliability of isolated bridges considering ageing deterioration of lead rubber bearings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 1526 ~ 1541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2022.2063907	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 松崎裕	4. 巻 67A
2. 論文標題 道路橋および道路ネットワークのレジリエンス評価における性能指標および性能の回復過程のモデル化に関する現状と課題	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 139 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.67A.139	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 松崎裕	4. 巻 23
2. 論文標題 社会基盤施設の耐震設計に関する動向と被災時の応急対応における自衛隊の役割	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 防衛施設学会誌	6. 最初と最後の頁 63 ~ 67
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 無
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 松崎裕	4. 巻 42
2. 論文標題 超過作用下における免震支承 - RC橋脚系の非線形地震応答特性に関する基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 769 ~ 774
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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 H. Matsuzaki
2. 発表標題 Effect of Column Height on the Reliability of Seismically Isolated Bridges
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (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 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 H. Matsuzaki
2. 発表標題 Performance of retrofitted bridges by seismic isolation considering aging of isolators
3. 学会等名 The 11th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松崎裕
2. 発表標題 橋脚高および鉛プラグ入り積層ゴム支承の経年劣化が免震橋の地震時損傷モードに及ぼす影響に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本地震工学会第16回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Matsuzaki
2. 発表標題 Seismic performance assessment of bridges with deteriorated isolators
3. 学会等名 The 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Matsuzaki
2. 発表標題 Life-cycle performance assessment of seismically isolated bridges considering aging deterioration of seismic isolators
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Matsuzaki
2. 発表標題 Response displacement control of isolated bridges subjected to severe ground motions
3. 学会等名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroschi Matsuzaki, Yohei Kubo, Maki Oikawa and Shigeki Unjoh
2. 発表標題 Seismic Performance of Isolated Bridges Considering Long-term Deterioration of Isolators
3. 学会等名 The 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------