

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月30日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21686042

研究課題名（和文）振動系の移行に着目した免震高架橋の安全性評価

研究課題名（英文）SEISMIC SAFETY EVALUATIONS OF ISOLATED VIADUCT BY FOCUSING ON THE CHANGE OF VIBRATING MODES

研究代表者

松村 政秀（MATSUMURA MASAHIDE）

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：60315976

研究成果の概要（和文）：トリガーの役割を果たす高精度なノックオフ部材の開発、および部材ノックオフに伴う振動系の移行に着目し、ノックオフ部材の有用性を、載荷実験および数値シミュレーションにより検討にした。その結果、片持梁、梁、バー／ボルトの3形式部材に、適切なスリット加工を施すことによってノックオフ化が可能であり、静的な荷重を載荷する要素実験に比較すると、動的な繰返し荷重の作用を受ける場合のノックオフ荷重の制御性は必ずしも良好でないものの、部材のノックオフにより、耐震系から免震系へスムーズに移行できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：By focusing on the changes in the vibration modes of the system, which arises due to knocking-off of component members, application effects of knock-off member as a designed trigger are investigated through loading tests and numerical simulations. Main conclusions are the followings; 3 types of the knocking-off members, like a cantilever, a beam and a bar/bolt, with the slit processed at adequate part of them, can be used as knock-off members. The knock off loads of them against dynamic and cyclic loading fluctuate rather than those against static and monotonic loading, but the knock off of the designated members can enhance the seismic safety of the viaduct providing a smooth shift of the vibrating modes of the system into the isolated condition.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 5,500,000  | 1,650,000 | 7,150,000  |
| 2010年度 | 10,400,000 | 3,120,000 | 13,520,000 |
| 2011年度 | 3,500,000  | 1,050,000 | 4,550,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 19,400,000 | 5,820,000 | 25,220,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：動的応答、高架橋、免震、制振、安全性評価

## 1. 研究開始当初の背景

都市間あるいは都市内の交通輸送を担う重要な社会基盤構造物である高架橋システム（上部構造・橋脚・定着構造・支承部からなる振動系）が、強地震時に損傷を受けると、

緊急車両の通行や避難経路の確保が困難となり、交通の遮断や早期復旧の妨げになる。

したがって、特に、既存の高架橋システムを対象として強地震動に対する橋梁の安全性を確保する場合には、定着構造の補強や早

期復旧は困難であり、定着構造に損傷を与えない条件で、(1)橋脚の耐震性能向上と(2)上部構造の免震化が要求される。このとき、(3)耐震系から免震系への移行を保証できるロックオフ部材を採用し、適切なタイミングで確実にロックオフさせること、が重要であり、(4)これらが免震高架橋システム全体の強地震挙動に及ぼす影響を数値シミュレーションにより評価することも重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、強地震に対する都市内高架橋の安全性評価に関連して、(i)橋脚・免震支承・ロックオフ部材のインタラクションの影響を実務設計で考慮すべきかどうか、および(ii)部材のロックオフとそれに伴う振動系の移行(耐震系→免震系)とそのタイミングが高架橋の安全性に及ぼす影響について未解明な点が多く、(iii)サイドブロック以外の部材のロックオフ化とその高精度化、などの未検討課題の解決を図ることであり、ロックオフ部材を活用した高架橋の地震時安全性向上策の有用性に関する資料を提示する。

## 3. 研究の方法

部材がロックオフすることによる振動性状の変化、およびそのときのトリガーの役割を果たす高精度なロックオフ部材の開発に向け、主に以下にしめす解析プログラムの機能向上、および載荷実験を実施する。

- (1) ロックオフ化可能部材の抽出
- (2) 各種ロックオフ部材の性能検証実験
- (3) 解析プログラムの高度化、機能アップ
- (4) 小型振動模型を用いる振動台実験
- (5) 数値シミュレーションによる強地震時の地震応答評価

それぞれ、具体的には以下のとおりである。

### (1) ロックオフ化可能部材の抽出

桁端部の支承部付近の空間に設置可能な部材におけるロックオフ化可能部材を、文献調査および実務者からのヒアリング結果に基づいて、分類ならびに選定する。

### (2) 各種ロックオフ部材の性能検証実験

(1)の結果に基づいて、片持梁、梁、バー／ボルトの3形式のロックオフ部材を対象とし、ロックオフ性能検証のための要素実験を実施する。片持梁形式のロックオフ部材については、従来からのロックオフ荷重の再現性のみならず、ロックオフ時の変位、ならびに破断メカニズムを検証する。破断メカニズムは、画像計測および画像解析により検討する。

### (3) 解析プログラムの高度化、機能アップ

詳細な解析モデルを用いた免震高架橋システムの数値シミュレーションを実施するにあたり必須である、弾塑性有限変位解析プログラムの高度化・機能アップを図る。この解析プログラムに、部材のロックオフおよび

部材の衝突を考慮できる専用モジュールを開発し、それらを解析プログラムに組み込む。各モジュールは、荷重-変位関係に基づくマルチリニア型のバネ要素により構築し、その妥当性を要素実験および小型振動模型を用いる振動台実験の結果に基づき検証する。

### (4) 小型振動模型を用いる振動台実験

鋼製橋脚に支持され、免震支承を有する5径間連続高架橋を試設計する。このうち、橋脚上の支承および上部構造、ならびに、橋脚、橋脚上の支承および橋脚が支持する上部構造を、それぞれモデル化した縮小模型を相似則を考慮して製作し、小型振動台を用いて振動台実験を実施する。また、この振動台実験の結果は、ロックオフ部材を設置する支承部周辺部材のインタラクションの視覚的な提示、および、数値シミュレーション手法の妥当性および有効性の検証に用いる。具体的には、部材ロックオフの影響が危険側に現れる、支承部-上部構造からなる高架橋部分模型に、地震動を想定した漸増正弦波形、および相似則を考慮して縮小した観測地震加速度波形を入力する振動台実験を実施し、振動中の部材のロックオフがゴム支承の動的変形に及ぼす影響、とりわけロックオフ直後の上部構造変位急増の有無を検証する。また、この実験結果より、ロックオフモジュールによる再現性を検証する。部材ロックオフの影響が振動系に及ぼす影響を、橋脚-支承部-上部構造(重り)からなる高架橋部分模型に、地震動を想定した漸増正弦波形、および相似則を考慮して縮小した観測地震加速度波形を入力する振動台実験を実施し、振動中の部材ロックオフが橋脚とゴム支承の動的相互作用に及ぼす影響を検証する。

### (5) 数値シミュレーションによる強地震時の地震応答評価

橋脚・免震支承・ロックオフ部材のインタラクションの再現と明示に着目して、5径間連続免震高架橋システム全体の地震応答解析を実施し、部材ロックオフによる振動系の移行およびそのタイミングが高架橋システムの安全性評価に及ぼす影響を明確にする。桁端部に位置する橋脚上、および中間橋脚上で必要とされる部材のロックオフ性能が異なることから、各橋脚ごとに異なる破断特性を有するロックオフ部材を設計する。また、ロックオフ部材を用いる場合の橋脚のモデル化に関連して、構成板パネルの座屈変形を考慮する必要性の有無を明確にする。

## 4. 研究成果

### (1) ロックオフ化可能部材の抽出

桁端部では維持管理上のスペースを確保することも必要であり、特に既存の高架橋では、ロックオフ部材設置のための十分なスペースを確保できないことも考えられる。その

ため、既存部材のロックオフ化、例えば、逆T字形の鋼製支承サイドブロックおよび取付ボルトのロックオフ化が考えられる。また、ロックオフ部材を新規に設置する場合には、既存の固定支承の可動化と併せて、設置可能なロックオフ部材の形状、例えば梁形式とすることが考えられる。新設の高架橋へロックオフ部材を設置する場合には、ロックオフ直後の衝撃的な挙動発生の有無、ロックオフ後の桁同士や伸縮装置間の部材干渉の有無などの検討も必要であるが、異なる地震時性能を要求される、レベル1地震動およびレベル2地震動に対する高架橋の設計に、ロックオフ部材の活用が有用な手段になり得る。

以上に基づいて、従来から検討を進めていた片持梁形式のロックオフ部材に加え、梁形式およびバー／ボルト形式の部材のロックオフ化ならびにロックオフ性能の検証を進めることとした。

#### (2) 各種ロックオフ部材の性能検証実験

片持梁、梁、バー／ボルトの3形式のロックオフ部材のいずれの形式においても、確実な部材のロックオフが実現可能であり、一方向に荷重を漸増させる場合には、静的と動的な荷重作用の差は、既往の研究結果と同様に、約10%のロックオフ荷重の増加が見込まれることを明らかにした。また、バー／ボルトにスリット化工を施したロックオフボルトを用いる場合には、初期ボルト軸力の導入がロックオフ荷重に及ぼす影響はほとんど認められないこと、複数列のボルト群を対象とする場合の全体のロックオフ荷重は1列ボルトのロックオフ荷重のボルト本数倍となること、を明らかにした。さらに、要素実験の結果、ならびにこれまでに得られている動的な荷重作用に伴うロックオフ荷重の上昇および鋼材の公称引張強度と実引張強度との強度差に関連した係数を考慮した、ロックオフ部材の設計ロックオフ荷重の設計式、および破断時変位の算定式を提案した。

#### (3) 解析プログラムの高度化、機能アップ

(4) で述べる小型振動模型を用いる振動台実験の再現解析を行い、ロックオフ部材モジュールおよび部材衝突モジュールによる実験結果の再現性を検証した。その結果、部材衝突時のエネルギー吸収性能が若干異なることから、ロックオフ部材+極低摩擦すべり支承の組み合わせ時には、繰返し衝突後の減衰性能の高精度な再現は難しいことがわかった。しかし、既設高架橋の耐震性向上策としてロックオフ部材を用いる場合、例えば、ロックオフ部材+ゴム支承の組み合わせ時には、このモデル化に伴う差の影響は軽微であることを明らかにした。

#### (4) 小型振動模型を用いる振動台実験

1つの支承部-上部構造からなる振動模型を用いる振動台実験の結果、部材のロックオ

フ以前では、橋脚天端と重りの相対変形、すなわち支承部の変形が設置遊間内に制限され、ロックオフ後には、速やかに免震系の振動状態に移行できることを確認した。また、ロックオフ直後に、上部構造変位の急増は認められないことを明らかにした。ただし、支承の剛性が実高架橋における剛性よりも小さい場合には、ロックオフ直後の応答急増は生じ得る。一方、1つの橋脚-支承部-上部構造からなる振動模型を用いる振動台実験の結果、橋脚および支承の水平剛性の比が実高架橋に見られる水平剛性の比と概ね等しい場合には、ロックオフ直後に免震系の振動状態へ速やかに移行し、ロックオフ直後の橋脚や支承部の応答急増は認められないことを明らかにした。なお、いずれの振動台実験においても、提案した設計式に基づき設計したロックオフ部材は、ロックオフまでに2~5回程度の繰返し作用を要すること、この間にスリット部のせん断変形が進行し、このせん断変形に応じて設置遊間が拡大することを明らかにした。さらに、支承の両側に2つのロックオフ部材を設置する場合には、設置遊間の拡大に伴い、片側のロックオフ部材は破断するが、もう片方は破断に至らないこと、および破断するロックオフの設置方向は地震加速度の卓越方向の影響を受けることを明らかにした。

#### (5) 数値シミュレーションによる強地震時の地震応答評価

地震応答解析の結果、部材ロックオフ後の橋脚の応答変位および上部構造の応答変位は、免震支承のみを有する場合に比べ増加するもののロックオフしない変位制限装置を設ける場合よりも小さいこと、部材ロックオフのタイミングを適切に設定することにより、ロックオフ直後の橋脚および上部構造の相対変位、すなわち支承の変形量を最小ならしめることが可能であることを明らかにした。ただし、実際には、入力する地震加速度波形により最適なロックオフのタイミングが異なり、ロックオフ部材の最適設計法の提案には至っていないが、ロックオフ荷重をレベル1地震動により生じる水平力と同程度に設計することが現段階での最善策である。

以上より有効性が検証された本提案手法の具体的な活用事例の1つとして、次の文献の既設アーチ橋の耐震補強が挙げられる。

・杉岡弘一、間嶋信博、松下裕明、姫野岳彦、松村政秀：スリット型ロックオフ支承を用いた既設アーチ橋の耐震補強、構造工学論文集、Vol.57A、土木学会、pp.467-478、査読有り、2011.3

#### 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9件)

- ① 松村 政秀, 石原 和之, 軸部にスリットを設けた M12 高力ボルトの引張およびせん断破断実験, 構造工学論文集, 査読有り, Vol.58A, 2012.3
- ② 越智 内士, 松村 政秀, 部材のロックオフを考慮した小型振動模型の振動台実験, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, 査読有り, 第19巻, pp.375-380, 2011.11
- ③ 石原 和之, 松村 政秀, 山口 隆司, ノックオフ部材を用いた免震高架橋の地震時挙動に関する小型振動台実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第1部, 査読無し, Vol.66, pp.751-751, I-377, 2011.9
- ④ 越智 内士, 松村 政秀, 時刻歴応答解析に用いるロックオフ型サイドブロックの非線形バネモデルの検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第1部, 査読無し, Vol.66, pp.755-756, I-379, 2011.9
- ⑤ Toshiyuki Kitada, Takashi Yamaguchi, Masahide Matsumura, Technical front of steel bridges in Japan, Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig, 査読無し, pp.255-262, UniYbwM-BKI 10/6, ISSN 1431-5122, 2010.11.19
- ⑥ Masahide Matsumura, Masahiko Yoshida, Nobuhito Ochi, Dynamic response of bridge system with knocking-off members, IABSE Report, 査読無し, Volume 97, pp.344-345, Venice, 2010.9
- ⑦ 田中 賢太郎, 北原 武嗣, 頭井 洋, 松村 政秀, 制震部材を適用した橋脚基礎への水平地震力低減法の一検討, 関東学院大学工学部紀要, 査読無し, 2010.9
- ⑧ 松村 政秀, 越智 内士, 吉田 雅彦, 免震高架橋へのロックオフ型サイドブロックの設置効果, 構造工学論文集, 査読有り, Vol.56A, pp.554-563, 2010.3
- ⑨ 亀井 友紀子, 松村 政秀, 越智 内士, 北田 俊行, 吉田 雅彦, 支承サイドブロックの破断と免震高架橋の応答に関する解析的研究, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集第1部, 査読無し, I-387, 2009.9

〔学会発表〕(計6件)

- ① Masahide Matsumura, Devices of seismic safety for bridges, Proceedings of the 2012 Taiwan-Japan Bridge Workshop, pp.197-210, National Centre for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, 19-20 March, 2012

- ② Masahide Matsumura, Breaking effects of displacement limiting devices for rubber bearings, The 4th Taiwan-Japan workshop on bridge engineering, 3pages, Kyoto Univ., Kyoto, April 2-3, 2011
- ③ Nobuhito Ochi, Masahide Matsumura, Model test of isolated bridges with displacement control device which brakes under strong earthquake by Shaking table and Its dynamic response analysis, The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11+), pp.2754-2762, 18-22 September, Seoul, Korea, 2011
- ④ Kazuyuki Ishihara, Masahide Matsumura, Masahiko Yoshida, Minoru Sakaida, Knock-off effect of steel side block as displacement restrainers on dynamic response of isolated bridge structure, Keynote Lectures and Extended Abstracts of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC12, pp.656-657, 8pages in cdrom, January 26-28, Hong Kong SAR, China, 2011
- ⑤ Masahide Matsumura, Seismic devices for isolated bridge, Proceedings of the 3rd Taiwan-Japan Workshop on Bridge Engineering, pp.36-40, National Centre for Research on Earthquake Engineering, 13 March, 2010
- ⑥ Masahide Matsumura, Nobuhito Ochi, Masahiko Yoshida, Minoru Sakaida, Toshiyuki Kitada, Dynamic response of isolated bridge system considering knocking-off of side block as displacement restrainer of superstructure, German-Japanese bridge symposium, Munich, 2009.8

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松村 政秀(MATSUMURA MASAHIDE)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号: 60315976

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

狩野 正人 (KANOU MASATO)  
JIP テクノサイエンス(株)  
吉田 雅彦 (YOSHIDA MASAHICO)  
川金コア・テック(株)