

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420483

研究課題名(和文) 高性能鋼を活用した制震機能を有するハイブリッド横つなぎ材の開発

研究課題名(英文) Development of hybrid lateral bracing systems which have damping effects by using high performance steel

研究代表者

小野 潔 (Ono, Kiyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60324802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：鋼橋の横構等の横つなぎ材は、鋼橋の全体の耐震性能上、大きな役割を果たしている。そこで、本研究では、横つなぎ材、横つなぎ材と他の部材との接合部であるガセット部を、橋梁用の高性能鋼であるSBHSを用いてハイブリッド構造化することで、横つなぎ材の耐震性能向上および橋梁全体の耐震性能向上に資する手法の提案を行った。そして、鋼アーチ橋を対象とした動的解析により、提案手法による耐震性能向上を確認している。

研究成果の概要(英文)：Lateral bracings are important members for improving the seismic performance of steel bridges. The purpose of this study is to improve the seismic performance of the steel bridges as a whole by improving the seismic performance of lateral bracings. From the viewpoint of improving the seismic performance of lateral bracings, it is indispensable to improve the seismic performance of gussets which connect lateral bracings to the other members. Therefore, this study focuses on not only lateral bracings but also gussets as lateral bracing systems. The methods which make them hybrid structures by using high performance steel 'SBHS' is investigated. The validity of the proposed methods is confirmed by the dynamic analysis of a steel arch bridge.

研究分野：鋼構造，橋梁工学，耐震工学

キーワード：ハイブリッド構造 横つなぎ材 耐震性能向上策 高性能鋼 SBHS 制震 ダンパー

### 1. 研究開始当初の背景

道路橋示方書・耐震設計編の改定により、鋼製橋脚等の橋脚を中心に耐震性能の向上が図られ、その耐震性能は大きく向上してきている。他方、兵庫県南部地震およびそれ以降の巨大地震において、鋼橋が倒壊する等の重大な損傷ではないものの、鋼アーチ橋、鋼トラス橋等の上横構、対傾構等の横つなぎ材では、座屈損傷の例が少なからず報告されている。既往の研究によれば、横つなぎ材に座屈損傷が発生して座屈変形が進展すると、横つなぎ材による荷重分配効果が失われ、1本のアーチリブに水平力が集中してアーチ橋全体の耐力が急激に低下することが報告されている。よって、地震時に橋梁全体の安全性を確保するためには、横つなぎ材に大きな座屈損傷を発生させないことが非常に重要となる。さらに、遠くない将来に発生する確立が高いとされている東南海地震等の巨大地震では、過去に観測された巨大地震以上の強度を有する地震動、長周期・長継続時間等の特徴を有する地震動が発生する可能性も指摘されている。よって、今後発生することが予想される巨大地震動において、横つなぎ材に大きな座屈損傷が発生し、橋梁の倒壊等の重大な被害を引き起こす危険性がある。

### 2. 研究の目的

巨大な地震力に対しても横つなぎ材に重大な座屈損傷を生じさせないため、(a)横つなぎ材の断面寸法・板厚等を大きくして耐力を増加させる、(b)横つなぎ材を座屈拘束ブレース等の制震デバイスに取替える、等の手法が現在採用されている。しかし、(a)の手法では、横つなぎ材の耐力が増加するため、アーチリブや弦材等の主部材、主部材と横つなぎ材の接合部であるガセットが損傷する危険性があるとともに、断面アップ(鋼重増)はコスト増にもつながる。(b)の手法は、耐震性能の向上は可能であるが、制震デバイスが高価であるためコスト高となる問題がある。そこで、本研究では、高性能鋼を活用したハイブリッド構造とすることで、橋梁全体の耐震性能向上に有効となる、耐力の上昇を抑えながら変形能を向上させ、履歴吸収エネルギーによる制震効果も期待できる横つなぎ材を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

横つなぎ材とアーチリブ等をつなぐガセット部に損傷が発生すると、横つなぎ材はその耐震性能を十分発揮できない。また、既往の巨大地震の鋼橋の被害では、ガセット部の損傷例も報告されている。横つなぎ材の耐震性能向上を図る上で、ガセット部は非常に重要な役割を果たす。そこで、本研究では、横つなぎ材およびそのガセット部について、高性能鋼を活用したハイブリッド構造とすることで、耐震性能を向上させるとともに、ガセット部については制震効果を有するダン

パーの役割をはたすことにより橋梁全体の耐震性能を向上させる手法を開発するため、以下に示す方法で研究を実施した。

#### (1)SBHS400の繰り返し材料試験

SBHSを使用したハイブリッド構造の塑性履歴特性を解析により適切に評価するには、SBHSの繰り返し塑性履歴特性を精度良く再現できる構成則が必要である。研究代表者らは、既往の研究で、橋梁用の高性能鋼であるSBHSのうち、SBHS500およびSBHS700については繰り返し材料試験を実施して、その塑性履歴特性を把握し、構成則の提案を行っている。しかしながら、SBHS400については、JIS化された時期が遅かったこともあり、繰り返し材料試験による繰り返し塑性履歴特性の把握、提案式の提案も行われていない。そこで、本研究では、SBHSとしてSBHS400を対象に繰り返し材料試験を実施してその塑性履歴特性を把握するとともに、構成式の提案を行う。

#### (2)動的解析によるせん断パネル型ダンパーの塑性履歴特性等が橋梁の地震時応答に与える影響の評価

ガセット部にハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーを導入して横つなぎ材および橋梁全体の耐震性能向上を図るためには、どのような塑性履歴特性を有するダンパーが有効である等の評価が重要となってくる。そこで、鋼アーチ橋を対象に、ダンパーの塑性履歴モデルやダンパーの設置位置を変えて動的解析を実施し、ダンパーの塑性履歴特性等が橋梁の地震時応答に与える影響について把握を行う。その結果を基に、鋼橋の耐震性能向上を図る上で望ましいダンパーの塑性履歴特性等について検討を行う。

#### (3)SBHSを使用したハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーの弾塑性挙動の把握および履歴モデル設定法に関する検討

橋梁の耐震設計で用いる解析レベルを考慮すれば、ダンパーの履歴特性として、バイリニア型もしくはトリリニア型の骨格曲線で、移動硬化型の繰り返し履歴特性を有するような、簡便なモデルで再現できるものが望ましい。また、実現したい履歴特性を得るためには、ハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーのフランジおよびウェブに使用する鋼種の組み合わせ、座屈パラメータがせん断パネル型ダンパーの塑性履歴特性に与える影響について把握し、その結果を基に、せん断パネル型ダンパーのフランジおよびウェブに用いる鋼種、断面寸法等を決定する必要がある。さらに、上記の(2)の検討結果から得られる、耐震性能向上に効果的な塑性履歴特性をダンパーが有することが望ましい。よって、実験および解析により、せん断パネル型ダンパーに用いる鋼種の組み合わせ、座屈パラメータがハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーの弾塑性挙動に与える影響

について検討する。

#### (4)横つなぎ材のハイブリッド構造化による耐震性能向上

ガセット部だけではなく、横つなぎ材自体の耐震性能を向上させることも重要である。横つなぎ材に求められる耐震性能として、耐力の上昇を抑えつつ変形能を向上させる性能がある。研究代表者の既往の研究で、フランジおよびウェブに SM400、縦リブに SBHS700 を使用した箱形断面のハイブリッド鋼製短柱では、耐力を抑えて変形能を向上させる性能の得られる可能性を示している。しかしながら、縦リブの剛性が耐震性能に与える影響については、検討されていない。そこで、本研究では、実験により縦リブの剛性が矩形断面のハイブリッド鋼製短柱の耐力に与える影響について検討を行う。

#### (5)提案手法の有用性の確認

鋼アーチ橋を対象に、横つなぎ材のガセット部に提案する SBHS を使用したハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーを導入して動的解析を行い、提案手法による耐震性能向上について具体的に確認を行う。

### 4. 研究成果

#### (1)SBHS400 の構成則

研究代表らは、既往の研究で SBHS のうち、SBHS500 および SBHS700 の性履歴特性を精度良く再現できる構成則の提案をおこなっている。この構成則の、SBHS400 への適用性の検討を行った。

構成則の材料定数を決定するため、単調載荷試験（引張試験）、弾性域の大きさの減少を調べる試験、両振り実験の 3 種類の試験を行った。そして、図-1 に示すように、SBHS400 のランダム載荷材料試験結果と構成則によるシミュレーション結果と比較を行った。図-1 より、本研究の構成則は SBHS400 の塑性履歴特性を精度良く再現できていることが分かる。

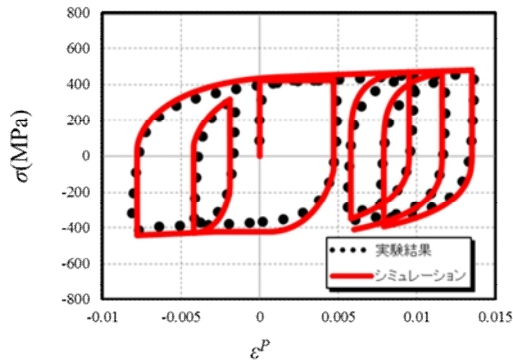


図-1 実験とシミュレーションの比較

#### (2)耐震性能向上に有効なせん断パネル型ダンパーの履歴特性等

耐震性能向上に有効なハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーの履歴モデル、設置位置について検討を行うため、上路式鋼ローゼ橋等を対象として、ダンパーの履歴モデルおよび設置位置を変更してファイバーモデルにより動的解析を行った。図-2 に解析モデルの一例として鋼ローゼ橋の解析モデルを、図-3 にせん断パネル型ダンパーの履歴モデルの骨格曲線、図-4 に大きな応答ひずみが発生したアーチリブの基部の要素の応答ひずみの最大値（絶対値）と図-2 に示すモデルの降伏荷重  $Q_y$  および剛比  $r(=E_2/E_1)$  との関係を示す。図-2 のファイバーモデルの応力-ひずみ関係は、線形モデルとした。図-4 より、本研究で対象とした鋼アーチ橋については、降伏荷重が小さく、剛比が小さいダンパーほど、最大応答ひずみが小さく、耐震性能向上が図れることが分かる。なお、ダンパーの設置位置に関しては、大きな断面力の発生している部材およびその近傍にダンパーを設置した場合に、より大きな最大応答ひずみの低減効果が得られている。

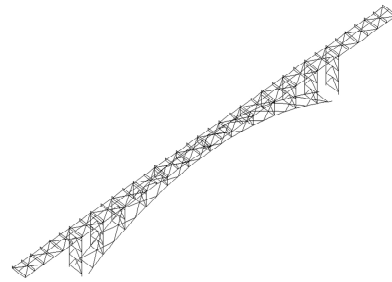


図-2 上路式鋼ローゼ橋

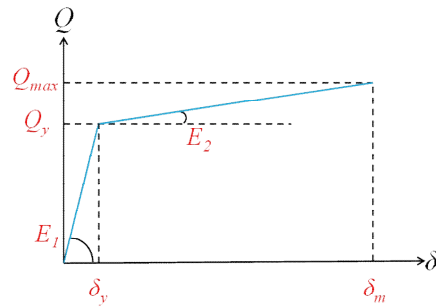


図-3 履歴モデルの骨格曲線

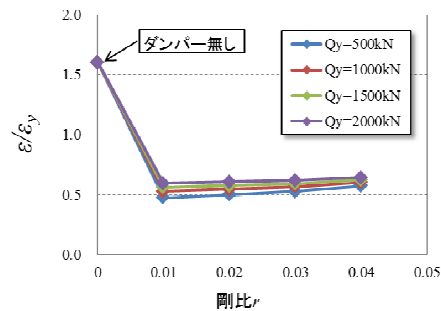


図-4 降伏荷重・剛比と応答ひずみの関係

### (3)ハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーの塑性履歴特性と履歴モデル

ハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーの弾塑性挙動に関する基礎的データを得るため、現在の橋梁で一般的に用いられる鋼材のうち、最も降伏強度の大きいSM570と最も降伏強度の小さいSM400を使用して供試体を製作して、正負交番载荷実験を行った。そして、その実験結果と弾塑性有限変位解析結果との比較を行い、パラメトリック解析に用いる弾塑性有限変位解析の妥当性を確認した。妥当性の確認された弾塑性有限変位解析により、解析モデルのせん断パネル型ダンパーのフランジおよびウェブの鋼種の組み合わせ、座屈パラメータを変更して多くの解析を実施した。これから実験結果および解析結果によれば、せん断パネル型ダンパーの弾塑性挙動は、フランジが座屈することがなれば、ウェブに使用する鋼材の塑性履歴特性の影響を受けることが判明した。そこで、鋼材の繰り返し塑性履歴特性がバイリニア型に近く、かつ最大耐力が大きくなるようにするため、ウェブにSBHS700、フランジにSM400を使用した解析モデルを用いて弾塑性有限変位解析を実施した。繰り返し解析結果とプッシュオーバー（単調载荷）解析結果を比較したものを図-5に示す。図-5より、繰り返し解析から得られる荷重-変位関係は、繰り返しに伴う荷重の上昇がほとんどなく、その荷重-変位関係の包絡線は、プッシュオーバー解析から得られる荷重-変位関係と近いものとなっている。このことは、移動硬化則のバイリニアモデル等の簡便な履歴モデルで、ダンパーの塑性特性を表現できる可能性を示している。図-6に、移動硬化則のバイリニアモデルと繰り返し解析結果を比較したものを示す。SBHS700をウェブ、SM400をフランジに用いた供試体の正負交番载荷実験は実施してないため、より確実性を担保するために実験を実施することは必要ではあるが、図-6より、移動硬化則のバイリニアモデルは解析結果の履歴曲線を比較的精度良く再現しており、本研究で目的とする履歴特性を実現できていることが分かる。

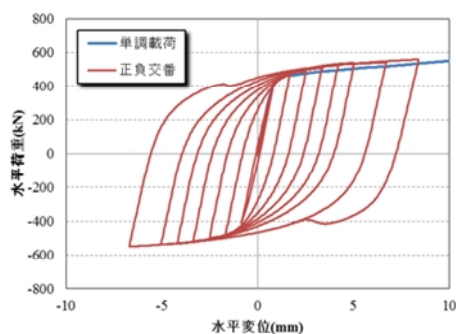


図-5 単調解析と繰り返し解析

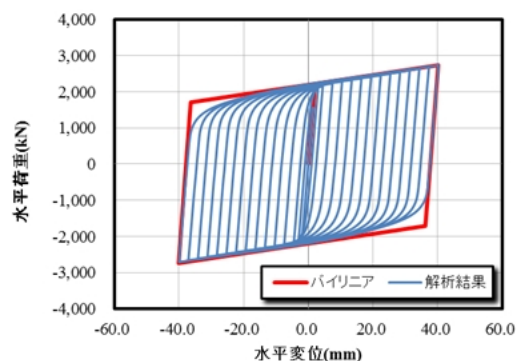


図-6 バイリニアモデルによる再現性

### (4)縦リブの剛性がハイブリッド鋼製短柱の耐力に与える影響

縦リブの剛性がハイブリッド鋼製短柱の耐力に与える影響について検討するため、縦リブの剛性を変えた矩形断面ハイブリッド鋼製短柱 2 体の軸圧縮試験を行った。なお、比較のため、縦リブのない無補剛矩形断面供試体 1 体の軸圧縮試験も実施している。ハイブリッド構造の 2 体の供試体は縦リブにSBHS700、フランジおよびウェブに SM400 を使用しており、供試体 H-1 の補剛材剛比は 1 程度、供試体 H-4 の補剛材剛比は 4 程度である。図-7 に供試体 H-4 の概略図を、図-8 に実験の実施状況の一例を、図-9 に実験から得られる供試体 H-1 および H-4 の軸力-軸方向変位関係を示す。試験装置の関係で最大耐力までは载荷できていないが、供試体 H-1 と供試体 H-4 の耐力には大きな差がないことがわかる。今後、実験により最大耐力が観察されるまで载荷し、最大耐力のみではなく最大耐力時の変位についても検討を行う必要があるが、図-9 より、本研究で対象とした程度の縦リブの剛性の違いは、ハイブリッド鋼製短柱の耐力に大きな影響を与えない可能性がある。

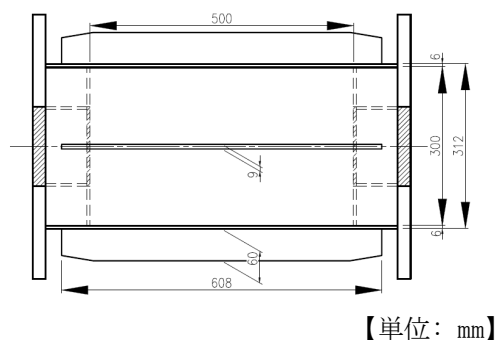


図-7 供試体 H-4 の概略図





図-8 実験の状況

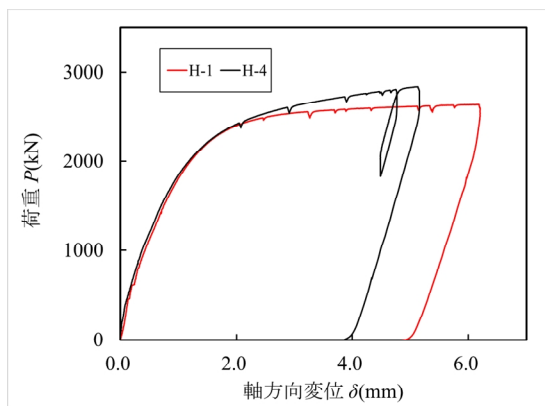


図-9 縦リブの剛性が耐力に与える影響

(5)提案手法による耐震性能向上の確認

図-2の上路式鋼アーチ橋に対して、本研究で提案したSBHSを使用したハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーをガセット部に導入した解析モデルを作成し、道路橋示方書で規定される設計地震動を用いて動的解析を実施した。なお、せん断パネル型ダンパーは、先述の(3)の検討結果に基づき、効率的に耐震性能向上効果が得られる箇所に設置するとともに、復元力モデルを設定した。図-10にせん断パネル型ダンパーを導入する前と後のアーチリブで発生する最大応答ひずみを比較したものを示す。図-10より、横つなぎ材のガセット部を本研究で提案したハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーとすることで、アーチリブに発生する最大応答ひずみを大幅に低減できており、耐震性能が大幅に改善できていることが判明した。

(6)得られた成果の位置づけ、今後の課題等

平成28年4月に発生した熊本地震において、地震動の大きさが原因と考えられる落橋等の重大な損傷事例は報告されていないものの、鋼桁の横つなぎ材の座屈損傷例は報告

されている。よって、本研究の着眼点は非常に的確であったのみでなく、本研究の成果は、熊本地震での被害を受けた鋼橋の耐震補強に資する非常に有益なものである。また、海外の鋼橋でも日本の鋼橋と同様の横つなぎ材を有する橋梁構造は存在するため、本研究の成果は日本のみならず、海外の鋼橋の耐震性能向上に資するものであると言える。

なお、本研究では、SBHSの塑性履歴特性を精度よく再現できる構成則でハイブリッド構造のせん断パネル型ダンパーの弾塑性挙動について検討を行ったが、より確実性を高めるためにSBHSを使用したダンパーの実験を実施することが有用であると考えられる。また、ハイブリッド構造の縦リブの剛性が変形能に与える影響について、実験的に確認することも重要である。さらに、今までの研究で実施されているような各部材に着目した耐震性能向上策の検討の他、次の研究ステップとして、橋梁全体のシステムとして耐震性能の向上を図るための研究が重要になってくる。

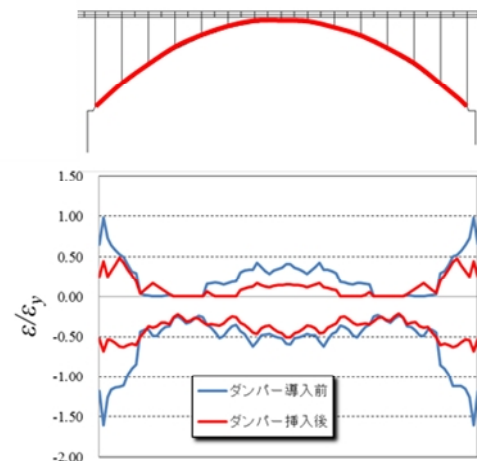


図-10 提案手法による耐震性能向上

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 Kanji Santo, Kiyoshi Ono and Kazuya Magoshi: Study on Effective Installation Place of Shear Panel Dampers of Steel Arch Bridges, Proceedings of the 11th German-Japanese Bridge Symposium, Osaka, Japan, August, 2016, 査読無(掲載決定)。

② Hakari Osogoe, Kiyoshi Ono, Shojiro Kataoka and Kazuya Magoshi: An Analytical Study on Seismic Response Characteristics of Steel Lohse Bridge against Estimated Earthquake Ground Motions during the Nankai Trough Earthquake, Proceedings of the 11th German-Japanese Bridge

Symposium, Osaka, Japan, August, 2016, 査読無 (掲載決定).

③安宅俊樹, 小野潔, 松村政秀, 岡田誠司, 加藤健太郎: 縦リブの剛性がハイブリッド鋼製短柱の耐力に及ぼす影響に関する実験的研究, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2016, 査読無 (掲載決定).

④尾曾越計, 小野潔, 片岡正次郎, 馬越一也: 南海トラフ巨大地震動に対する鋼ローゼ橋の地震時応答に関する研究, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2016, 査読無 (掲載決定).

⑤川井健吾, 小野潔, 市川尚樹, 山田信司, 宮下剛: SBHS400 の構成則に関する実験的研究, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2016, 査読無 (掲載決定).

⑥Tatsuya Ishikawa, Kiyoshi Ono and Kazuya Magoshi: EFFECT OF REVISED DESIGN EARTHQUAKE GROUND MOTIONS CONSIDERING ZONE FACTORS ON DYNAMIC RESPONSE OF STEEL ARCH BRIDGES, Proceedings of 14th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp.1557-1561, CD-ROM, 2016, 査読有.

⑦Shota Hashimoto, Kiyoshi Ono, Kazuo Endo and Seiji Okada: An Analytical Study on Elasto-plastic Behavior of Steel Bridge Piers Made of SHY685, Proceedings of the 10th Japanese-German Bridge Symposium, Munich, Germany, September, CD-ROM, 2014, 査読無.

⑧Tatsuya Ishikawa and Kiyoshi Ono: Influence of Revised Type I Design Earthquake Ground Motions on Dynamic Response of Steel Arch Bridges: Proceedings of the 10th Japanese-German Bridge Symposium, Munich, Germany, September, CD-ROM, 2014, 査読無.

⑨小野潔, 橋本祥太, 遠藤和男, 岡田誠司: 高強度鋼 SHY685 を用いた矩形断面鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する解析的検討, 第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 371~374, 2014, 査読無.

[学会発表] (計 7 件)

①山東寛司, 石川達也, 小野潔, 馬越一也, 奈良敬: 鋼ローゼ橋におけるせん断パネル型ダンパーの挿入位置に関する考察, 平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016. 9, 東北大学 (宮城県仙台市).

②山東寛司, 石川達也, 小野潔, 馬越一也, 奈良敬: せん断パネル型ダンパーの復元力特性の違いが鋼ローゼ橋の地震時応答に与える影響, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2016. 6. 11, 立命館大学 (滋賀県草津市).

③石川達也, 小野潔, 馬越一也: 改定された設計地震動が鋼ランガー橋の地震時応答に与える影響, 平成 27 年度土木学会全国大会

第 70 回年次学術講演会, 2015, 9, 岡山大学 (岡山県岡山市)

④橋本祥太, 小野潔, 石川達也, 北市さゆり, 山田信司, 岡田誠司: 強度および降伏比の異なる鋼材の塑性履歴特性と構成則, 平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2014. 5. 31, 大阪産業大学 (大阪府大東市).

⑤石川達也, 小野潔, 道谷梓, 馬越一也: 鋼ローゼ橋の時刻歴応答解析に用いる鋼部材の応力-ひずみ関係に関する検討, 平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2014. 5. 31, 大阪産業大学 (大阪府大東市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小野 潔 (ONO KIYOSHI)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 60324802

### (2) 研究分担者

松村 政秀 (MATSUMURA MASAHIDE)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 60315976

### (3) 連携研究者

なし