

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 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560476

研究課題名（和文）

多様な耐震性能を設定可能な高性能鋼を活用したハイブリッド鋼部材の開発

研究課題名（英文）

Development of hybrid steel piers in which the various seismic performance can be set by applying high performance steel

研究代表者

小野 潔 (ONO KIYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60324802

研究成果の概要（和文）：

本研究では、鋼部材として橋梁の耐震性能上重要な役割をはたす鋼製橋脚を対象に、高性能鋼である橋梁用高降伏点鋼板 SBHS を縦リブに使用したハイブリッド構造とすることで、既往の研究では得ることが難しい耐力の上昇を抑え変形能を向上させるという耐震性能を有するハイブリッド鋼製橋脚を開発している。また、SBHS の機械的性質および繰り返し塑性履歴特性に関する情報を得るとともに、SBHS の繰り返し塑性履歴を精度良く再現できる構成則の提案も行っている。

研究成果の概要（英文）：

This paper presents the hybrid steel bridge piers which have the seismic performance that ductility can be improved with containing increase in ultimate strength by applying 'Higher yield strength steel plates for bridges (SBHS)' to vertical stiffeners. Furthermore, the constitutive equation which can express hysteretic behavior of SBHS under cyclic loading with good accuracy is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：鋼構造，耐震工学，橋梁工学

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：ハイブリッド構造，高性能鋼，鋼製橋脚，耐震性能，SBHS

1. 研究開始当初の背景

日本は世界有数の地震国であり、橋梁をはじめとした社会基盤施設は兵庫県南部地震クラスの非常に大きな地震に対しても、損傷を限定的なものに留める等、所定の耐震性能を有していることが求められる。橋脚は橋梁

の耐震性能を考える上で非常に重要な部材である。橋脚の中でも、鋼製橋脚は、RC 橋脚と比較して、用地幅の狭い場所や、地盤条件の悪い場所に建設される等、制約条件の多い中で建設されるため、多様な耐震性能が求められる。多様な耐震性能の中でも、基礎へ

の負担を軽減することという観点から、耐力の上昇を抑えて変形能を向上させるといった耐震性能が必要とされる場合が多い。しかしながら、この耐震性能は、既往の鋼製橋脚の耐震性能に関する研究成果からは得ることが難しい性能となっている。

ところで、橋梁用の高性能鋼材として、高い降伏強度を有する橋梁用高降伏点鋼板 SBHS が JIS 化された。この SBHS の高降伏点という特性を活用することで、今までにない鋼製橋脚の塑性履歴特性、耐震性能が得られる可能性がある。

2. 研究の目的

上記 1 の背景のもと、本研究では、高性能鋼として SBHS を縦リブに使用したハイブリッド鋼部材に着目した。ハイブリッド鋼部材とは、図-1 に示すように、フランジおよびウェブと縦リブとで強度の異なる鋼材を使用した鋼部材のことである。そして、鋼部材の中でも、橋梁の耐震性能上の重要な役割を果たす鋼製橋脚を対象に、SBHS を縦リブに用いたハイブリッド構造とすることで、耐力の上昇を抑え変形能の向上が可能なハイブリッド鋼製橋の提案を行う。

3. 研究の方法

本研究では、上記 2 の SBHS を縦リブに使用したハイブリッド鋼製橋脚の提案を行うため、以下の研究を行った。

(1)SBHS の材料試験

SBHS を使用したハイブリッド鋼製橋脚の開発を行うには、SBHS の機械的性質を把握する必要がある。しかしながら、SBHS の機械的性質に関する情報は、SM490、SM570 等の従来の鋼材と比較して絶対的に少ない。特に、SBHS700 の機械的性質の統計量に関する情報については、著者らは存在を知らない。また、鋼製橋脚の弾塑性挙動を解析で精度よく評価するには、鋼材の繰り返し塑性履歴特性を把握し、それを精度よく再現できる構成則が必要となってくる。しかしながら、SBHS の繰り返し塑性履歴特性に関する情報はなく、その結果、SBHS の塑性履歴特性を精度良く再現できる構成則も提案されていない。

そこで、本研究では SBHS500 および SBHS700 を対象に、引張試験を行い機械的性質に関する情報の収集の収集するとともに、繰り返し材料試験を行い塑性履歴特性に関する情報の収集も行う。そして、引張試験結果および繰り返し材料試験結果をもとに、SBHS500 および SBHS700 の繰り返し塑性履歴特性を精度良く再現できる構成則の提案を行う。

(2)SBHS を用いたハイブリッド構造の耐力および変形能に関する実験的研究

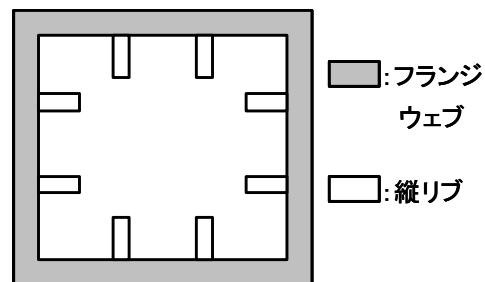


図-1 ハイブリッド構造

縦リブとフランジおよびウェブで異なる種類（強度）の鋼材を用いたハイブリッド鋼製橋脚の耐力および変形能に関する実験的研究は、非常に少ないながらも既往の研究で行われている。しかしながら、既往の実験的研究におけるハイブリッド鋼製橋脚では、SBHS は使用されておらず、その耐力および変形能に関する情報は得られていない。また、解析的検討を行う場合でも、実験結果との比較により、解析手法の妥当性を検証することが必要となる。そこで、本研究では、一般的な鋼製橋脚と同様、縦リブとフランジおよびウェブで同じ種類の普通鋼（SM490）を用いた供試体、縦リブに SBHS(SBHS700)を、フランジおよびウェブに普通鋼(SM490)を用いた供試体を使用して正負交番載荷実験を行う。さらに、鋼製橋脚の耐力および変形能を大きな影響を与える断面性能としてのハイブリッド補剛板の特性についても把握するため、ハイブリッド補剛板の一軸圧縮試験も行う。そして、これら実験結果を基に、SBHS を縦リブに用いたハイブリッド鋼製橋脚の耐力および変形能に関する情報を得るとともに、一般的な鋼製橋脚とハイブリッド鋼製橋脚の耐力および変形能の違いについて検討を行う。

(3)解析による SBHS を用いたハイブリッド構造の耐力および変形能の把握・評価

多種多様な力学パラメータ、縦リブとフランジおよびウェブの鋼材の降伏強度・塑性履歴特性の組み合わせを有するハイブリッド鋼製橋脚の耐力および変形能を実験のみで把握・評価することは困難である。先述の 3.(1)の研究で開発する SBHS を含む各種鋼材の塑性履歴特性を精度よく再現できる構成則を用いた弾塑性有限変位解析を行い、力学パラメータ、鋼材（強度、塑性履歴特性）を変化させてハイブリッド鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析を行う。そして、解析結果をもとに、耐震性能上、効率的な鋼材（強度、塑性履歴特性）の組合せ、ハイブリッド鋼製橋脚の耐震性能に影響を与える力学パラメータ等、幅広くハイブリッド鋼製橋脚の耐震性能の把握・評価を行う。

(4)SBHS を用いたハイブリッド鋼製橋脚の開発

上記の(2)の正負交番実験結果, (3)の弾塑性有限変位解析結果からハイブリッド鋼製橋脚の耐震性能を把握・評価するとともに, 耐力および変形能に影響を与えるパラメータの提案を行う。そして, これらの研究を総括して, 耐力の上昇を抑え変形能の向上が可能なハイブリッド鋼製橋脚の開発を行う。

4. 研究成果

(1)SBHS の機械的性質

引張試験は容量1000kNの万能試験機を使用して行った。SBHS500 および SBHS700 の鋼板から JIS Z 2201 で規定される 5 号試験片を製作して引張試験を行った。また, SBHS500 および SBHS700 の板厚はいずれも 9mm と 12mm の 2 種類であり, それぞれの板厚に対してロール方向, ロール直角方向に対して試験片を 5 本ずつ製作した。

図-2 に, 引張試験から得られる公称応力-公称ひずみ関係の一例 (SBHS500, $t=9\text{mm}$) の例を示す。図-2 において, JIS で規定される降伏点の下限値を青の点線で, 引張強さの範囲を緑の一点鎖線でそれぞれ示している。また, JIS G 3140 で規定される SBHS500 および SBHS700 の機械的性質を表-1 に, 引張試験結果の平均値を表-2 に示す。表-1 および表-2 より, 本研究で対象とした SBHS の機械的性質については以下のことが分かる。

- ・ SBHS500, SBHS700 いずれについても, 降伏強度は JIS の引張強さに達するもしくはそれに近い程度に大きい。
- ・ SBHS700 の引張強さは, JIS の引張強さの下限値に近い値となっている。
- ・ 降伏比について, SBHS500 で 91~94%, SBHS700 で 94%~99%と, 非常に大きな値となっている。

上述の通り, 本研究で, SBHS500 および SBHS700 の機械的性質に関する情報を得ている。しかしながら, SM490 等比較して, 特に SBHS700 については機械的性質に関する情報が少ないため, 今後も引き続きそれら情報を収集していく必要がある。

(2)SBHS の構成則

SBHS の繰り返し塑性履歴特性を把握し, 構成則の開発を行うため, SBHS500, SBHS700 を対象に, デジタル油圧サーボ式材料試験機を使用して, 繰り返し載荷材料実験を行った。なお, 研究代表らは, 既往の研究で SM490, SM570 等の鋼材の塑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が, SBHS への適用の妥当性は検証されていない。そこで, この構成則を利用することで, SBHS の塑性履歴特性を精度良く再現できる構成則を検討する。

構成式の概要を以下に示す。図-3 (b) の点 0~8 は図-3 (a) の点 0~8 に対応している(点 4, 7 を除く)。図-3 (b) において, 一軸状態における塑性履歴曲線の真応力 - 塑性ひずみの関係を 0-1 の初期弾性域, 1-3, 5-6, 8 以降の単調載荷曲線に準ずる領域, 3-5, 6-8 の遷移領域に分け, さらに単調載荷曲線に準ずる領域を 1-2 の降伏棚, 2-3, 5-6, 8 以降のひずみ硬化開始後の領域に, 遷移領域を 3-4, 6-7 の弾性域, 4-5, 7-8 の非線形遷移領域に分けて表現している。

本研究では, 上述の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, 構成則

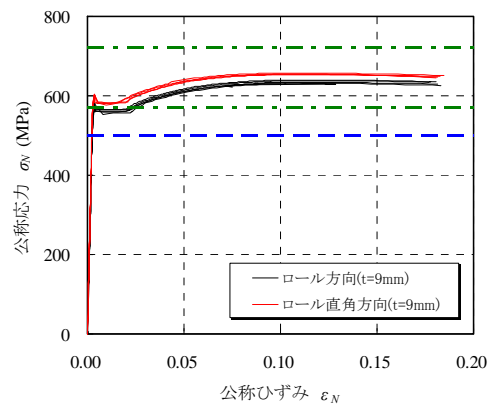


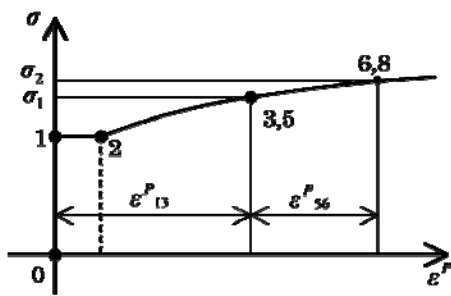
図-2 公称応力-公称ひずみ関係

表-1 JIS の SBHS の機械的性質

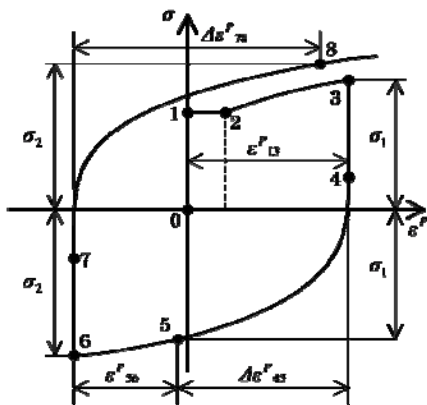
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び		
			板厚 (mm)	試験片	伸び (%)
SBHS500	500 ≤	570~720	6 ≤ t ≤ 16	5号	19 ≤
SBHS700	700 ≤	780~930	6 ≤ t ≤ 16	5号	16 ≤

表-2 引張試験結果

鋼種	板厚 (mm)	切断方向	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	降伏比 (%)	伸び (%)
SBHS500	9	ロール	581	636	91	29
		直角	605	657	92	27
	12	ロール	589	630	94	33
		直角	574	632	91	33
SBHS700	9	ロール	770	796	97	25
		直角	785	802	98	24
	12	ロール	772	818	94	30
		直角	826	835	99	28



(a) 単調荷重曲線



(b) 繰り返し荷重曲線

図-3 構成則の概要

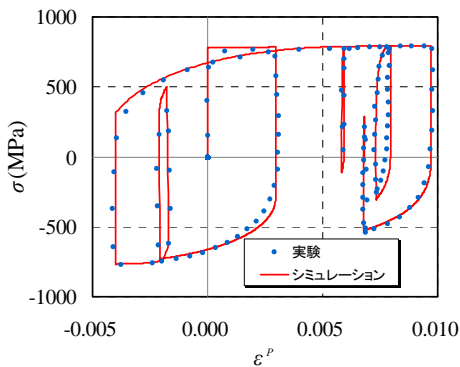
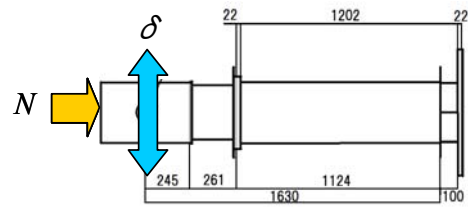
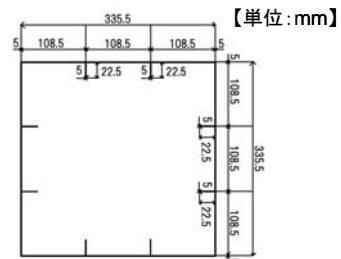


図-4 実験結果とシミュレーション結果

の SBHS への適用性の検証を行うため、ランダム荷重材料試験を行い、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-4 に SBHS700 について、決定した定数を使用した構成則によるシミュレーション結果と実験結果を比較したものを示す。図-4 より、本研究で検討を行った構成則は SBHS700 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。また、SBHS500 に



(側面図)



(断面図)

図-5 供試体および荷重状況

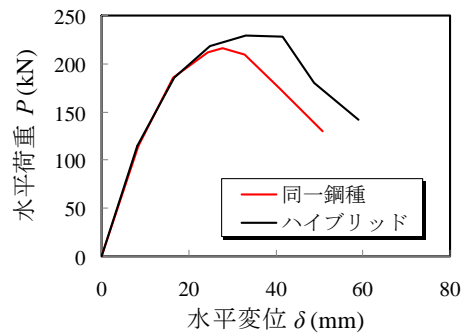


図-6 包絡線の比較

についても、図-4 と同様、構成則で実験結果を精度良く再現できていることを確認している。よって、本研究で検討を行った構成則で SBHS の塑性履歴特性を精度良く表現可能である。

(3) 実験によるハイブリッド鋼製橋脚の耐力および変形能の評価

まず、正負交番荷重実験結果を示す。図-5 に、供試体の概略寸法および正負交番荷重実験の状況図を示す。いずれの供試体もフランジおよびウェブは SM490 を使用して、縦リブは、ハイブリッド鋼製橋脚を想定した供試体では SBHS700 を、一般的な鋼製橋脚を想定した供試体では SM490 をそれぞれ使用して製作されている。荷重方法は、既往の鋼製橋脚の正負交番荷重実験と同様、一定軸力 N (降伏軸力の 15% の軸力) を与えた状態で、 $+\delta_y$, $-\delta_y$, $+2\delta_y$, $-2\delta_y$, ... といった両振りの漸増型の水平変位 δ を供試体の頂部に与えた。図-6 に、正負交番荷重実験の水平荷重-水平変位関係から得られる包絡線を比較したも

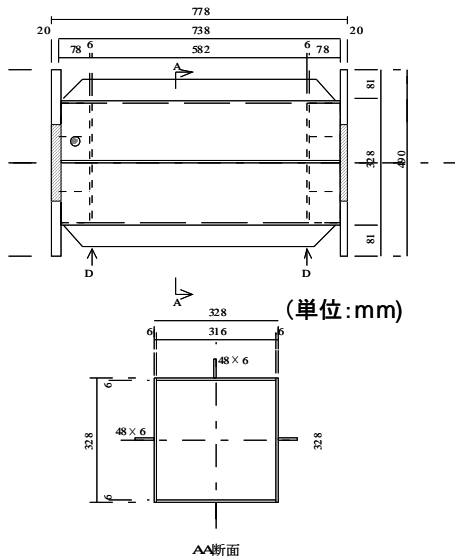


図-7 供試体（一軸圧縮試験）



図-8 実験の状況

のを示す。図-6 に示すように、ハイブリッド鋼製橋脚は、一般的な鋼製橋脚と比較して、耐力の上昇を抑えて変形能を向上するという耐震性能が得られている。

次に、一軸圧縮試験結果を示す。供試体の概略寸法を図-7 に、一軸圧縮試験の状況を図-8 に示す。一軸圧縮試験で用いるいずれの供試体のフランジおよびウェブは SS400 を使用して、縦リブは、ハイブリッド補剛板を想定した供試体では SBHS700 を、一般的な補剛板を想定した供試体では SS400 をそれぞれ使用して製作されている。载荷は軸力を単調増加させて行った。図-9 に実験から得られた軸力-軸方向変位関係を示す。図-9 に示す通り、ハイブリッド構造の補剛断面供試体では、一般的な補剛断面の供試体と比較して、耐力の上昇を抑えて変形能が向上している。

以上のことから、SBHS700 を縦リブに用

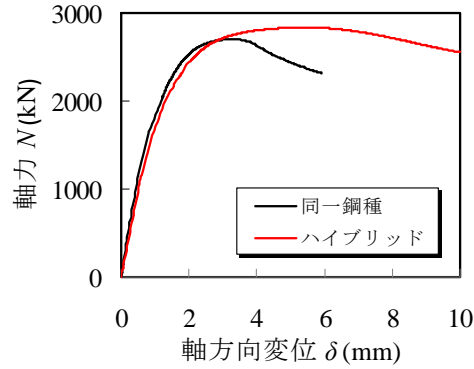


図-9 包絡線の比較

いたハイブリッド構造の補剛板では、断面性能として耐力の上昇を抑え変形能を向上させる性能を発揮することが可能となり、その結果、ハイブリッド鋼製橋脚でも耐力の上昇を抑えて変形能を向上させる耐震性能が実現可能となる。

(4) 多様な耐震性能を設定可能なハイブリッド鋼製橋脚

(3)の実験結果との比較により妥当性を検証したシェル要素を用いた弾塑性有限変位解析により、ハイブリッド鋼製橋脚の耐震性能に関する情報を幅広く収集した。そして、解析結果をもとに、多様な耐震性能のうち、本研究で対象とする、耐力の上昇を抑えて変形能を向上させるために必要な座屈パラメータについての検討を行った。なお、弾塑性有限変位解析では、(2)で提案を行った SBHS の塑性履歴特性を精度よく再現できる構成則を用いた。

解析結果によれば、SBHS700 を縦リブに用いた鋼製橋脚では、縦リブの降伏強度が高いことから橋脚基部の補剛板の座屈による面外変形が抑制され、その結果、耐力の上昇を抑えて変形能を向上させるといった耐震性能の実現が可能である。それに対して、縦リブに SBHS500 を用いた場合には、SBHS700 を用いた場合と比較して、変形能の向上が期待できない。また、縦リブの剛性が強すぎる場合、縦リブ間のパネルの座屈パラメータが大きく座屈耐力が小さい場合には、変形能に対して耐力が上昇が大きくなり過ぎ、必要とする耐震性能が得られない。そこで、耐力の上昇を抑え変形能を向上させるハイブリッド鋼製橋脚を実現するのに必要な座屈パラメータの提案も行っている。

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 5 件)

- ①S. HASHIMOTO, K. ONO and S. OKADA: AN EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES AND CONSTITUTIVE EQUATION OF SBHS500, Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2013.9, 査読無 (印刷中).
- ②K. HAMAMURA, K. ONO, M. MATSUMURA, T. TARUI and S. KODA: AN EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF SBHS700 AND APPLICATION OF SBHS700 TO STIFFENED PLATES, Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2013.9. 査読無 (印刷中).
- ③橋本祥太, 小野潔, 北市さゆり, 岡田誠司: 繰り返し塑性履歴を受ける SBHS の構成則に関する実験的研究, 第 16 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, 2013.7, 査読無 (印刷中).
- ④浜村圭太, 小野潔, 松村政秀, 幸田真也: SBHS700 を縦リブに使用したハイブリッド鋼製短柱の耐力および変形能に関する実験的研究, 第 16 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, 2013.7, 査読無 (印刷中).
- ⑤Takahiro Tarui, Kiyoshi Ono, Masahide Matsumura and Jumpei Yoshiyama: Study on Mechanical Property of Higher Yield Strength Steel Plates for Bridges, Proceedings of the 9th German-Japanese Bridge Symposium, CD-ROM, 2012.9, 査読無.

〔学会発表〕(計 6 件)

- ①橋本祥太, 小野潔, 北市さゆり, 山田信司, 岡田誠司: SBHS700 の構成則および既往の高張力鋼との比較, 土木学会 平成 25 年度全国大会 第 68 回年次学術講演会, 2013.9, 日本大学 (千葉県習志野市).
- ②浜村圭太, 小野潔, 松村政秀, 幸田真也: SBHS700 を用いたハイブリッド鋼製短柱の耐力および変形能に関する実験的研究, 平成 25 年度全国大会 第 68 回年次学術講演会, 2013.9, 日本大学 (千葉県習志野市).
- ③橋本祥太, 小野潔, 山田信司, 垂井敬寛: SBHS700 の塑性履歴特性と構成則, 平成 25 年度 土木学会関西支部年次学術講演会, 2013.6.9, 大阪市立大学 (大阪市).
- ④浜村圭太, 小野潔, 松村政秀, 垂井敬寛, 幸田真也: ハイブリッド鋼製短柱の耐力および変形能に関する実験的研究, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2013.6.9, 大阪市立大学 (大阪市).
- ⑤垂井敬寛, 小野潔, 松村政秀, 吉山純平: SBHS500 および SBHS700 の機械的性質に関する研究, 土木学会 平成 24 年度全国大会 第 67 回年次学術講演会, 2012.9, 名古屋大学 (名

古屋市).

〔その他〕

<http://www.dma.jim.osaka-u.ac.jp/view?l=ja&u=3829&k=%E5%B0%8F%E9%87%8E%E6%BD%94&kc=1&sm=keyword&sl=ja&sp=1>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 潔 (ONO KIYOSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60324802

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

なし