

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 5月31日現在

機関番号：12608
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22246070
 研究課題名（和文） 鉄筋コンクリート系骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究
 研究課題名（英文） Applications of Buckling Restrained Braces in Reinforced Concrete Frames
 研究代表者
 和田 章（WADA AKIRA）
 東京工業大学・応用セラミックス研究所・名誉教授
 研究者番号：90158684

研究成果の概要（和文）：

鉄筋コンクリート骨組に座屈拘束筋違を適用するために、アンカーボルトとコッターを用いて応力伝達を図る方法を提案し、実験と解析により接合部及び架構全体の力学的挙動を把握した。この接合方法を適用した柱梁部分骨組を製作し、載荷実験を行った。実験では接合部周辺部材における応力伝達がコッターの力学性状、座屈拘束筋違の軸力伝達に及ぼす影響は小さく、本接合方法の有効性を確認した。次に、接合部の要素実験と解析から、コンクリート内部の応力伝達を把握し、既往の耐力評価式の考え方を参考にコッターの最大せん断耐力評価式を構築した。さらに座屈拘束筋違付き鉄筋コンクリート建物の地震応答解析を行った。解析の結果、座屈拘束筋違取り付けことで最大応答層間変形角を抑制できることや、耐震壁に比べてエネルギー吸収能力、靱性能を向上させることができることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

The proposal consists of BRBs in adjacent stories that share the same gusset plate, which is fastened to the concrete beam-to-column joint by prestressing bolts and is kept by a pair of RC corbels. The behavior of the BRB connection and the whole building was observed through an experimental test and followed by analysis. First, the cyclic performance of the connection of the proposed continuously braced frame system is examined through subassembly test. As a result, the effectiveness of this connection method was confirmed. Next, the shear strength of RC corbels and force transmission in stirrups and concrete are investigated by component test and finite-element analysis. In addition, a strut-and-tie model is proposed to estimate the shear strength of deep corbels. Finally, seismic response analysis of reinforced concrete building with BRBs was carried out and the dynamic performance was confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2012年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
年度			0
年度			0
総計	17,000,000	5,100,000	22,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：耐震設計 制振構造

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造の耐震性確保のために耐震壁の設置が有効であることは、関東大震災以前から提唱されており、地震被害の統計・分析からも有効性が強調されている。しかし、せん断破壊する耐震壁の性質は脆性的であり、周辺の純ラーメン骨組が最大抵抗力を發揮する比較的大きな層間変形角域においては、耐震壁はその最大抵抗力を發揮し終わっており、両者の最大耐力の合算が構造物全体の抵抗力とはなりえない。しかし、耐震壁を設置せずラーメン骨組の靱性能に過度に期待して設計した構造物については、大地震時に大きな塑性変形を受けることになり、非構造材の深刻な被害や、残留変形によって継続使用が難しくなる問題が潜在する。鋼構造の耐震性確保に用いられる筋違材についても、細長比が中程度の部材では小さな層間変形角で最大耐力を發揮した後に座屈による急激な耐力低下を生じる性質があり、先の耐震壁と同様の問題があった。しかし、1970年代頃から研究開発が始まった座屈拘束筋違などは、圧縮・引張の塑性域で安定した履歴特性を有する。座屈拘束筋違はRC骨組においても耐震性確保に有効であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究ではRC骨組に座屈拘束筋違を積極的かつ合理的に活用する方法を提案し、その力学挙動を構造実験と数値解析により総合的に解明し、具体的な設計法を構築する。

3. 研究の方法

研究は以下の6段階に分けて行った。

(1) コッター接合部の要素実験①

座屈拘束筋違の取り付け方法として柱に設けた突出部(コッター)とガセットプレート端部を接触させて応力伝達を図る方法を対象に要素実験(図1)を行った。試験体はコッターとスタブからなり、コッター寸法、コンクリート強度、コッター筋の径・定着長・本数をパラメータとして計5体の実験を行った。

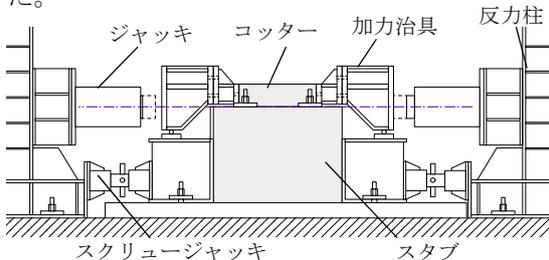


図1 コッター接合部の要素実験

(2) 座屈拘束筋違接合部を有するRC部分架構実験

提案する座屈拘束筋違の接合方法を採用

した柱梁部分架構の実験(図2)を行った。油圧ジャッキにより座屈拘束筋違からの軸力と層間変形を作用させた。試験体パラメータは梁断面、コッター筋の量、及びG.PLの締付方法とした計4体とした。

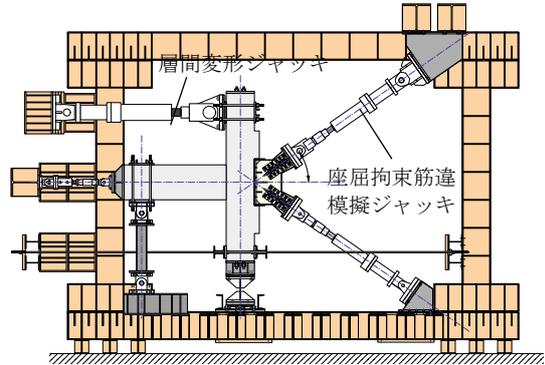


図2 座屈拘束筋違接合部を有する部分架構実験

(3) 座屈拘束筋違を取り付けた低層RC骨組の地震応答解析

3層RC建物を対象として座屈拘束筋違を適用した際の耐震性を時刻歴応答解析により検証した。検討建物は本来、耐震壁付きのラーメン骨組であるが、その耐震壁を座屈拘束筋違に置き換えて検討を行った。解析パラメータは、座屈拘束筋違の容量を高さ方向に段階的に変化させた「段階モデル」と均一に配置した「均一モデル」の2種類とした。

(4) 座屈拘束筋違を組み込んだRC部分架構実験と非線形有限要素解析

実際に鋼管コンクリートにより座屈補剛された座屈拘束筋違を組み込んだ柱梁部分骨組の載荷実験(図3)を行った。この実験より実建物に近い条件下における座屈拘束筋違とその取り付け部の力学挙動を把握し、同時に上下層の耐力差を意図的に設けることで取り付け部に水平引張力を作用させることで取り付け部における水平引張力への対応策についても検討した。

また、柱梁部分骨組を対象とした非線形有限要素法解析モデルを構築し、実験結果との対応からその妥当性を確認した。

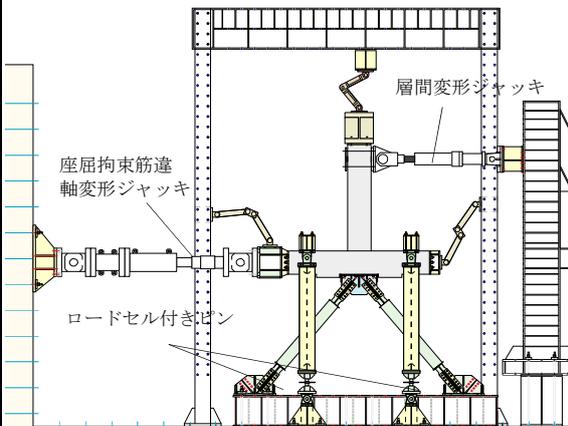


図3 座屈拘束筋違を組み込んだRC部分架構実験

(5)コッター接合部の要素実験②と非線形有限要素解析

次いで柱梁部分骨組試験体から切り出したコッター部を要素試験体として用い、せん断実験を実施した。パラメータはコッター寸法、コンクリート強度、コッター筋の定着長・本数、載荷履歴とした。さらに、この要素実験を再現する非線形有限要素解析を行った。

(6)座屈拘束筋違を取り付けた高層 RC 骨組の地震応答解析

座屈拘束筋違付き 12 層 RC 建物の地震応答解析を行った。解析では純ラーメン骨組のみ、座屈拘束筋違を取り付けた場合、耐震壁を取り付けた場合をパラメータとした。

4. 研究成果

研究の方法の合わせ、以下の 6 つに分けて成果を述べる。

(1)コッター接合部の要素実験①

①基準の C1 は約 2mm の変形量で最大耐力に達した。これに対して、コンクリート強度を小さくした C2 では耐力が低下し、コッター筋の径を小さくした C3 では耐力だけでなく、剛性の低下も見られた。定着長を半減させた C4 は最も耐力低下が著しかった。

②コッター筋のひずみ度分布 (図 4) は載荷端を降伏: ϵ_y , 反対側端部を 0 とする三角形の線形分布となる。

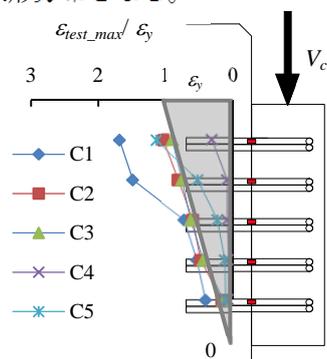


図 4 コッター筋のひずみ度分布

(2)座屈拘束筋違接合部を有する RC 部分架構実験

①座屈拘束筋違の軸力を油圧ジャッキの荷重制御により再現した結果、接合部変形のロスを含めても 1/670~1/860rad. から座屈拘束筋違を降伏させることができ、主架構より早期にエネルギー吸収を開始し、有効に機能させられることが確認できた。いずれの試験体においても接合部軸変形は最大でも $\pm 1/100$ rad. サイクル時に 1.1mm 以下、 $\pm 1/33$ rad. サイクル時に 1.5mm 以下であり、これは座屈拘束筋違の節点間に生じる軸変形の理論値に対してそれぞれ 6% 以下、3% 以下と小さい。したがって、本接合方法を用いれば接合部の変形が座屈拘束筋違の挙動に与

える影響は無視できる。

②上下層の座屈拘束筋違の作用線交点を柱心から偏心していることにより、筋違の取り付け角度が大きくなり、座屈拘束筋違の水平力負担の割合が低下する問題点がある。しかしながら、アンカーに対する曲げによる引張力の作用を低減できるだけでなく、柱梁架構に損傷を生じさせることなく層せん断力を増加させることが可能になる。

③座屈拘束筋違軸力作用点付近のコッター筋のひずみ度は、軸力の増加に伴って大きくなり、軸力が一定でフレーム力のみが増加にする際には小さくなる傾向にあるため、コッター部の挙動にはダンパー軸力の鉛直成分が支配的であり、周辺部材の影響は比較的小さいと言える。

(3)座屈拘束筋違を取り付けた低層 RC 骨組の地震応答解析

①低層建物においても適切に座屈拘束筋違を組み込むことにより、地動最大速度 50cm/sec に基準化した地震動に対しても建物の最大層間変形角を 1/100rad. 以下に抑えられることを示した。一方、上下の座屈拘束筋違の位相差により、使用した座屈拘束筋違の約 1 本分の降伏軸力に相当する水平引張力が取り付け部に作用することが明らかになった。つまり、座屈拘束筋違の取り付け部はアンカーボルトによって柱梁接合部に少なくとも使用する座屈拘束筋違 1 本分の降伏軸力で緊結しておく必要があることが分かった。

②部分骨組実験で得られた取り付け部の局所変形を考慮した時刻歴応答解析を併せて行い、取り付け部の局所変形による座屈拘束筋違の変形ロスが全体挙動に及ぼす影響は少ないことが確認できた。

(4)座屈拘束筋違を組み込んだ RC 部分架構実験と非線形有限要素解析

①全試験体において、 $R=1/50$ rad. 程度の大変形を受けても、除荷後のひび割れ幅は寸法効果を考慮しても最大で 1.0mm であり、損傷度 II と評価できる。したがって、大変形領域においても RC 架構に大きな損傷を与えることなく、高いエネルギー吸収性能を付加することが可能になる。

②座屈拘束筋違の軸変形から、弾性部 (接合部) は、いずれの試験体においても小変形領域では筋違の節点間変位に対して 10% 以上変形し、理想的な降伏層間変形角 $R=1/980$ rad. で座屈拘束筋違が降伏しない。したがって、RC 骨組に座屈拘束筋違を取り付ける場合にはこれらの変形を考慮する必要がある。

③G.PL の引張力-浮き上がり関係から、アンカーボルトを座屈拘束筋違 1 本相当の緊張力により締め付けておく方が、束材を設置するよりも引張力への対応には効果的である。束材を取り付けた 0-75S では G.PL に作

用する引張力の負担割合は 190kN : 670kN であり、これは両者の軸剛性比 1 : 3.6 と対応している。

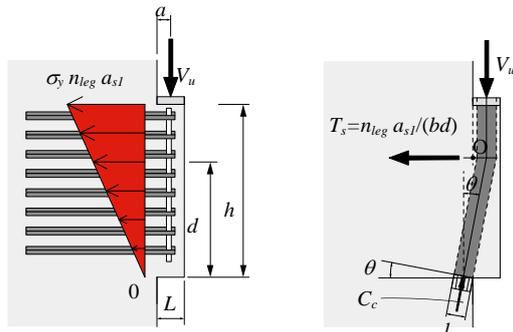
④有限要素解析を行い、実験結果との比較から本解析モデルの有効性を示した。また、座屈拘束筋連接部においてコッター筋のひずみ度分布、コンクリート主応力度分布を示し、コッターが架構の層間変形による曲げ、せん断を受ける場合と純せん断を受ける場合で大きな差異はないことを示した。

(5)コッター接合部の要素実験②と非線形有限要素解析

①コッター寸法、コンクリート強度、コッター筋の径・定着長・本数、載荷履歴を変化させたコッターの要素実験を行い、コッターのせん断耐力とコッター筋のひずみ度分布を得た。

②3次元有限要素解析を行い、耐力、剛性ともに実験結果と比較的良好な対応を示した。また、コッター筋のひずみ度分布も実験と同じ傾向であることを確認し、コンクリートの主応力度分布も示した。

③実験と解析により解明したせん断抵抗機構を、既往の Strut-and-Tie Model (図5) に適用し、耐力評価式を修正した。また、本評価式を用いてコッターの耐力を精度よく評価できることを示した。



(a)コッター筋の合力 (b)Strut-and-Tie Model
図5 コッターの耐荷機構

(6) 座屈拘束筋違を取り付けた高層 RC 骨組の地震応答解析

①座屈拘束筋違を取り付けることで最大層間変形角応答を抑えられることや、耐震壁に比べてエネルギー吸収能力、靱性能が付加できることを確認した。

②座屈拘束筋違接合部に作用する引張力も想定以上に大きくなることはなく、座屈拘束筋違 1 本分の降伏耐力相当の力でアンカーボルトを締め付けておけば、座屈拘束筋違本来の性能が発揮できることが確認された。

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3件)

- ① 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 坂田弘安: 鉄筋コンクリートコッターのせん断抵抗機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.613-618, 2012.7 (査読有)
- ② Zhe Qu, Shoichi Kishiki, Hiroyasu Sakata, Akira Wada and Yusuke Maida: Subassemblage cyclic loading test of RC frame with buckling restrained braces in zigzag configuration, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Wiley, DOI: 10.1002/eqe.2260., September. 2012. (査読有)
- ③ 毎田悠承, 吉敷祥一, 野々山昌峰, 曲哲, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 座屈拘束筋違を取り付けるための接合部を有する RC 部分架構の実験 -鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その1-, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第681号, pp.1737-1746, 2012.11 (査読有)

〔学会発表〕(計23件)

- 1) Yusuke Maida, Zhe Qu, Shoichi Kishiki, Toshio Maegawa, Makoto Hamada, Hiroyasu Sakata and Akira Wada: Experimental Study on Reinforced Concrete Frames with Buckling Restrained Braces, the 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering (10th CUEE), March 1st, 2013, Tokyo, Japan
- 2) Zhe Qu, Yusuke Maida, Shoichi Kishiki, Hiroyasu Sakata, Akira Wada, Toshio Maegawa and Makoto Hamada: Numerical Assessment of Seismic Performance of Continuously Buckling Restrained Braced RC Frames, 15th World Conference on Earthquake Engineering (15th WCEE), September 26th, 2012, Lisbon, Portugal
- 3) Yusuke Maida, Zhe Qu, Shoichi Kishiki, Toshio Maegawa, Makoto Hamada, Hiroyasu Sakata and Akira Wada: Subassemblage Test of Continuously Buckling Restrained Braced RC Frames, 15th World Conference on Earthquake Engineering (15th WCEE), September 26th, 2012, Lisbon, Portugal
- 4) 前川利雄, 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 石橋久義, 増子寛, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その7 座屈拘束筋違を取り付けた部分架構実験の結果(1), 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月14日, 名古屋大学
- 5) 宮木志伸, 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 石橋久義, 坂田弘安, 和田章:

- 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 8 座屈拘束筋違を取り付けた部分架構実験の結果(2), 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月14日, 名古屋大学
- 6) 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 仲宗根淳, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 9 有限要素解析による部分架構の力学的挙動の検討, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月14日, 名古屋大学
 - 7) 北山裕人, 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 岩渕一徳, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 10 コッターの要素実験, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月14日, 名古屋大学
 - 8) 曲哲, 毎田悠承, 吉敷祥一, 前川利雄, 岩渕一徳, 仲宗根淳, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 11 コッターの有限要素解析と耐力評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月14日, 名古屋大学
 - 9) 渡辺英彦, 河口俊郎, 前川利雄, 濱田真, 増子寛, 吉敷祥一, 曲哲, 毎田悠承, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 12 施工実験, 日本建築学会大会学術講演会, 2012年9月14日, 名古屋大学
 - 10) 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 座屈拘束筋違を取り付けた鉄筋コンクリート骨組に関する研究 その 1 部分架構実験(1), 日本建築学会関東支部研究発表会, 2012年3月9日, 建築会館
 - 11) 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 座屈拘束筋違を取り付けた鉄筋コンクリート骨組に関する研究 その 2 部分架構実験(2), 日本建築学会関東支部研究発表会, 2012年3月9日, 建築会館
 - 12) 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 座屈拘束筋違を取り付けた鉄筋コンクリート骨組に関する研究 その 3 コッター接合部のせん断抵抗機構, 日本建築学会関東支部研究発表会, 2012年3月9日, 建築会館
 - 13) Zhe Qu, Yusuke Maida, Shoichi Kishiki and Hiroyasu Sakata: Shear Resistance of Reinforced Concrete Corbels for Shear Keys, the 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and the 4th Asia Conference on Earthquake Engineering(9th CUEE and 4th ACEE Joint Conference), March 7th, 2012, Tokyo, Japan
 - 14) 前川利雄, 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 座屈拘束筋違を取り付けた鉄筋コンクリート骨組の部分架構実験 その 1 実験概要, 日本地震工学会大会, 2011年11月11日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
 - 15) 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 座屈拘束筋違を取り付けた鉄筋コンクリート骨組の部分架構実験 その 2 実験結果の考察, 日本地震工学会大会, 2011年11月11日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
 - 16) 坂田弘安, 毎田悠承, 野々山昌峰, 曲哲, 吉敷祥一, 石橋久義, 増子寛, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 1 研究目的, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学
 - 17) 前川利雄, 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 仲宗根淳, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 2 座屈拘束筋違接合部要素実験, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学
 - 18) 仲宗根淳, 毎田悠承, 野々山昌峰, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 3 座屈拘束筋違接合部を含む部分骨組の実験 1, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学
 - 19) 野々山昌峰, 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 4 座屈拘束筋違接合部を含む部分骨組の実験 2, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学
 - 20) 曲哲, 毎田悠承, 野々山昌峰, 吉敷祥一, 前川利雄, 仲宗根淳, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 5 地震応答解析による基礎検討, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学
 - 21) 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 濱田真, 岩渕一徳, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 6 座屈拘束筋違を取り付けた部分架構実験, 日本建築学会大会学術講演会, 2011年8月

23 日, 早稲田大学

- 22) Zhe Qu, Yusuke Maida, Masataka Nonoyama, Shoichi Kishiki, Hiroyasu Sakata and Akira Wada: Hybrid control test of connections for buckling restrained braces in RC continuously braced frames, 4th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering (4AESE), June 30th, 2011, Ispra, Italy
- 23) 野々山昌峰, 毎田悠承, 曲哲, 吉敷祥一, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安, 和田章: 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の接合方法に関する研究, 日本建築学会関東支部研究発表会, 2011 年 3 月 3 日, 建築会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 章 (WADA AKIRA)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・
名誉教授

研究者番号: 90158684

(2) 研究分担者

坂田 弘安 (SAKATA HIROYASU)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・
教授

研究者番号: 80205749

吉敷 祥一 (KISHIKI SHOICHI)

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号: 00447525

(3) 連携研究者

なし