

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04452

研究課題名(和文) 高耐震性と省力化・省人化を目指した鋼・コンクリート合成構造システムの開発

研究課題名(英文) Development of steel and concrete composite structures aimed for realization of the high earthquake-resistant performance and labor and person saving for construction of the buildings

研究代表者

堺 純一 (Sakai, Junichi)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：30215587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： 著者らは十字形鉄骨を用いた八角形断面の鋼・コンクリート合成柱(SC柱)が優れた耐震性能を発揮することを示し、構造性能評価法を明らかにしてきた。

本研究では、実物大に近い断面寸法のSC柱試験体を製作し、軸力と繰返し水平力を載荷する実験を行った。実験の結果、通常の軸力程度であれば、本SC柱材の耐震性能に及ぼす寸法効果の影響がないことを明らかとした。

さらに、本SC柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の簡素化を実現する上で、柱材長間での鋼とコンクリート間の応力伝達が必要であるが、鋼とコンクリート間の付着強度は小さいため機械的ずれ止めが必要となる。本研究では、機械的ずれ止めの効果とその設計法を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震国家である我が国においては、高い耐震性能を保持する建築構造物を設計することが重要である。さらに、持続可能な建設環境を実現する為には、省人化と省力化が不可欠である。本研究では、十字鉄骨とコンクリートからなる八角形断面の鋼コンクリート合成柱(SC柱)の耐震性能を調べているが、このSC柱と鉄骨梁で構成される建築構造システムは高次元の優れた耐震性能を保持するとともに省人化・省力化の面でも効果的であることを示してきた。しかし、本SC柱は現在の建築基準法の規定のもとでは、合理的な設計ができないのが現状である。今後、この構造システムの開発研究成果を社会に還元していく活動をすべきであると考えている。

研究成果の概要(英文)： Authors showed that the octagonal sectional steel and concrete composite column(SC Column) using the cross-shaped steel showed superior earthquake resistant performance and clarified a structure performance rating system.

In this study, we carried out SC column examination body of the section dimensions that were almost size of the original building frame. From the test result, there was not influence of the scale effect to give to the earthquake-resistant performance of this SC column. To design steel beam-to-SCcolumn connection where construction is simple, the stress transmission between steel surface and concrete along column length are necessary, however it is revealed that bond strength between steel surface and concrete is small. In this study, we checked an effect and the design method of the mechanical slip stopper between steel surface and concrete.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼とコンクリートの合成構造 耐震性能 構造性能評価法 省人化・省力化工法 応力伝達 載荷実験
鋼とコンクリート間の付着 機械的ずれ止め

1. 研究開始当初の背景

地震国である我が国においては、持続可能な社会を構築するためにも優れた耐震性能を保持しながら、建築物の建設に伴う環境負荷を低減させるとともに、省人化・省力化された構造部材および骨組を開発することが喫緊の課題である。

優れた耐震性能を保持する構造として鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造があるが、鉄骨の加工工事に加え、鉄筋の配筋、コンクリート打設のための型枠工事などが必要であり、鋼構造や鉄筋コンクリート (RC) 構造、さらにコンクリート充填鋼管 (CFT) 構造に比べ工事作業量が多くなるなど解決すべき課題がある。筆者らは、SRC 構造の特徴である高耐震性能のさらなる向上と建設工事における省力化・省人化を目指した鋼・コンクリート合成柱 (SC 柱) を用いた構造システムを開発することを目的として、図 1 に示す十字鉄骨を用いた八角形断面の SC 柱材および SC 柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の耐震性能について実験および解析的に調べてきた。その結果、本 SC 柱材は SRC 柱材や CFT 柱材と同等以上の優れた構造性能を保持していることを明らかとしてきた^(例えば1)。本 SC 柱材は、十字鉄骨を用いることで、鉄骨に囲まれたコンクリートが横拘束されるため高い拘束効果が期待できることがその理由である。さらに、SC 柱と鉄骨梁で構成された十字形骨組の載荷実験を行い、力学的にも施工的にも合理的な柱梁接合部のディテールの提案を行ってきた^(例えば2)。

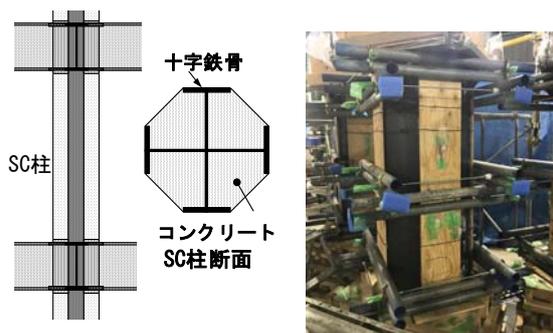


図 1 SC 柱 写真1 コンクリート打設用型枠

これまで、加力装置の関係で、比較的小さな断面寸法 (断面せいと幅が 200mm 程度) の柱材および柱梁接合部の弾塑性挙動および崩壊性状を明らかとしてきたが、実大寸法に近い断面での実験はまだ行われておらず、構造物の構造性能を評価する上で重要な寸法効果の影響について調べることができなかった。平成 28 年度に福岡大学に大型加力実験装置が設置されたことから、実大断面寸法に近い柱材および骨組の載荷実験を行うことができるようになった。本 SC 柱材を実構造物に適用する上で、実大寸法に近い柱材および柱梁接合部の載荷実験を行い、その弾塑性変形性状を調べることは非常に重要なことである。本 SC 柱材は、SRC 柱と同等かそれ以上の耐震性能を保持しているとともに、CFT 柱材に比べ鉄骨量を少なくすることが容易で環境負荷の面で大きなメリットがでてくる。また、SRC や RC 構造に比べ、主筋およびせん断補強筋の配筋作業を必要とせず、さらに、コンクリート打設用の型枠も簡素化できるため (写真 1 参照)、建設施工の面で省人化・省力化が図れる特徴もあり、学術的にも、社会的にも意義のある研究であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、実大寸法に近い断面 (幅とせいが 500mm 程度) をもつ SC 柱材に一定軸力と繰り返し水平力を載荷する実験を行う。この柱材の実験を行うことにより、既往の実験研究で得られた結果 (断面寸法が 200mm の断面) と比較することで、①寸法効果が、柱の破壊性状、鉄骨によるコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べ、その結果をもとに SC 柱材の構造性能評価法を提案することを第一の研究目的とする。

さらに、筆者らは、本 SC 柱と鉄骨梁で構成された骨組の柱梁接合部の設計を簡略化することを目的に図 2 に示す鉄骨の柱梁接合部ディテールを提案している。鉄骨加工の省略とコンクリート打設の簡易性と確実性を考慮し、外ダイヤフラム形式の柱梁接合部とすることで、梁の応力を柱に伝えるディテールを提案してきた。この接合部ディテールで梁の応力を柱に伝達できる条件を明らかとしてきたが、建築物では各層で柱に応力を伝達させておかないと最下層でコンクリートの抵抗力が期待できないことにもなり得る。また、コンクリートの乾燥収縮による鋼とコンクリート間の付着強度が低下することを考えると、柱鉄骨に機械的ずれ止めを施し、コンクリートに応力を確実に伝える手段が必要であると考えられる。そこで、②鋼とコンクリート間の応力伝達のための機械的ずれ止めの必要性とその設計法を調べることを二つ目の目的としている。

本研究で対象としている SC 柱材は、同一寸法断面の SRC 柱材に比べ、内蔵鉄骨のせいを大きくでき、高強度材料の有効利用が可能とな

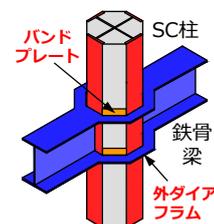


図 2 柱梁接合部

るため、部材断面寸法の縮小化や曲げ剛性および抵抗力などの構造性能を容易に調整できる。寸法効果の影響を検討して、本構造システムの構造性能評価法を提案すること、さらに、力学的も施工的にも合理的な柱梁接合部ディテールで構造的に問題が無いことを明らかにすることに本研究の学術的な特色・独創的な点がある。

3. 研究の方法

本研究では、3つのシリーズからなる柱試験体の载荷実験を行った。シリーズ1は、柱断面の寸法効果を調べることを目的とした研究である。実大寸法に近い500mmのせいを持つ柱試験体(図3参照)を製作し、柱頭に一定軸力と繰返し水平力を载荷する加力実験を行った。シリーズ2は、鋼とコンクリート間の付着特性がSC柱の挙動に及ぼす影響を調べることを目的としている。鉄骨ウェブに適切な機械的ずれ止めを取付けておけば、付着が期待できなくても本SC柱の優れた耐震性能を発揮できることを明らかにすることを目的としたものである。今回の実験では、機械的ずれ止めとして、著者らが開発しているバーリング加工された鋼板(図4参照)の四辺をウェブに溶接して取り付けた。なお、バーリングに合わせ鉄骨ウェブに孔をあけている。コンクリートと鉄骨間の付着が切れた状態を再現するために、柱頭に50mm高さのコンクリートの空隙を設けるとともに、鉄骨の表面に1mm厚のスチレンボードを貼り付けている。シリーズ3では、シリーズ2に引き続き、機械的ずれ止めの適切な配置個数を明らかにすることと、鉄骨柱のウェブの継手に高力ボルト摩擦接合を用いた場合の機械的ずれ止めの効果について調べた。各

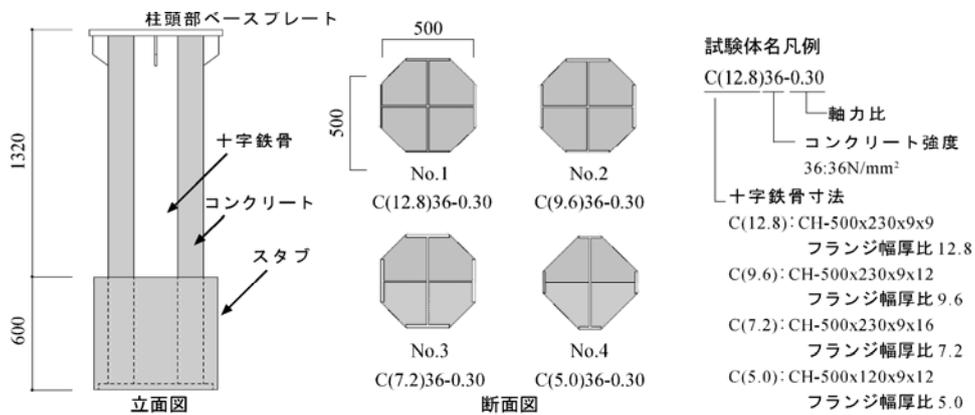


図3 シリーズ1の試験体

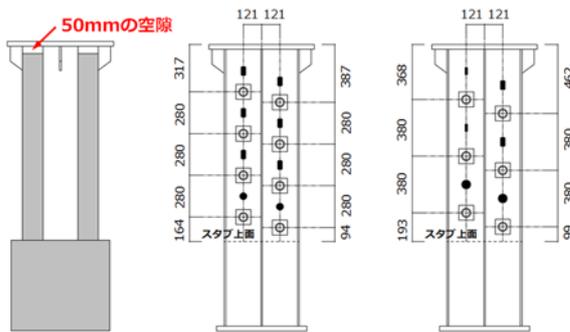


図4 シリーズ2の試験体

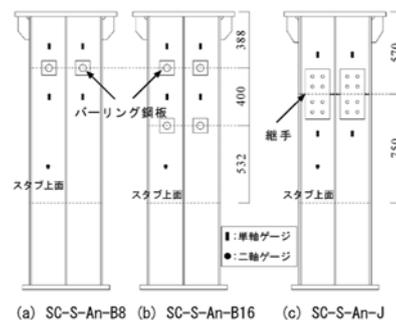


図5 シリーズ3の試験体



図6 バーリング鋼板(機械的ずれ止め)

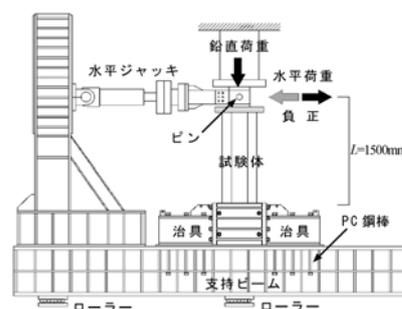


図7 加力装置

シリーズの実験で用いた試験体の断面および材長は同じである。加力装置を図7に示す。

4. 研究成果

3つのシリーズの載荷実験および弾塑性解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

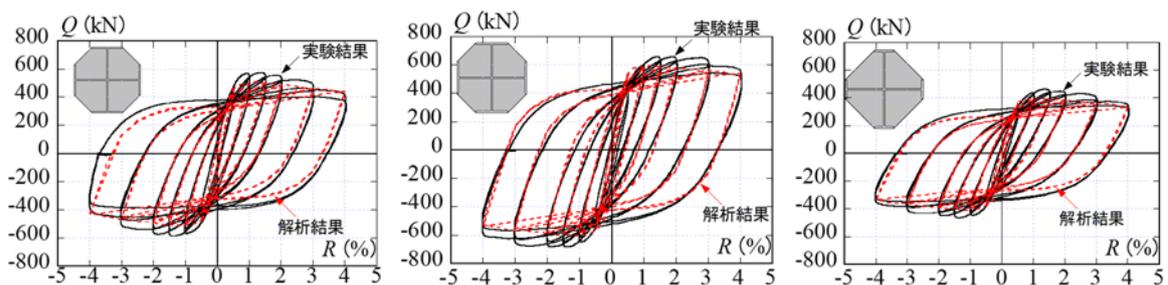
(1) SC柱の弾塑性挙動に及ぼす寸法効果の影響

シリーズ1で行った試験体の水平荷重 Q と部材角 R の関係を図8の黒実線で示す。この図では3例を示しているが、いずれの試験体も安定した弾塑性挙動を示し、高い耐震性能を保持できる柱であることがわかる。合成断面とすることで、コンクリートで拘束されたウェブには局部座屈が生じない。このため、幅厚比が大きなフランジを用いても大変形では局部座屈を生じるものの、大変形に至っても柱の曲げ耐力の低下は小さいことがわかった。これがこのSC柱の特徴である。この図で赤い破線で示した曲線は、既往の研究で行った断面せい200mmの柱材を対象に行った弾塑性解析の結果である。この弾塑性解析は、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を評価できる解析手法で既往の実験結果を精度良く追跡できるものである。この解析で今回の実大寸法のSC柱の弾塑性挙動も精度良く追跡できていることがわかる。つまり、通常設計で用いられる程度の軸力比程度であれば、柱の弾塑性変形性状に及ぼす寸法効果はほとんどなく、既往の研究結果で提案した本SC柱材の構造性能評価法を用いることができることがわかった。

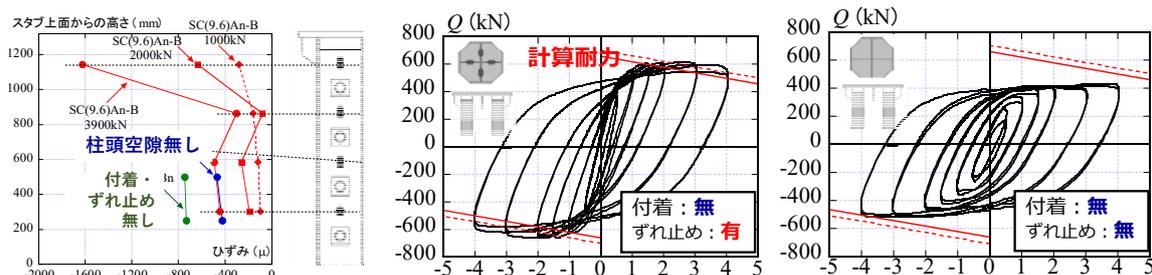
(2) 機械的ずれ止めの効果

図9(a)はシリーズ2で行ったSC柱の実験で、圧縮軸力を載荷する段階での鉄骨ウェブの歪を測定した結果である。柱頭にコンクリートの空隙がある試験体の歪を赤線で示しているが、中高層建物の最下層の軸力に相当する柱断面の圧縮耐力の30%の軸力3900kN(断面の圧縮耐力の30%)を載荷すると柱頭近傍では鉄骨の降伏歪程度まで達しているが、柱脚に向かうにつれて歪が小さくなっていることがわかる。これは機械的ずれ止めにより鉄骨からコンクリートへ圧縮軸力が伝わっていることを示している。さらに柱脚では柱頭にコンクリートの空隙がない試験体の鉄骨の歪とほぼ同程度なので、柱脚部では鉄骨とコンクリートはそれぞれが負担すべき応力状態であることを表している。ずれ止めが付いていない試験体では柱脚部で鉄骨ウェブの歪が大きく、コンクリートに必要な軸力を伝達できていない状況である。

図9(b)と(c)は所定の圧縮軸力を載荷してこれを保持した状態で水平力を載荷したときの荷重 Q と部材角 R の関係であるが、柱頭にコンクリートの空隙があってもずれ止めが付いていれば、柱脚部で鉄骨とコンクリートは一体となって挙動して、計算耐力を発揮すると共に、優れた変形能力を保持していることがわかる(同図(b)参照)。一方、ずれ止めを付けていない柱は鉄骨とコンクリートは一体とはなり得ず計算耐力を発揮出来ていないことがわかる(同図(c)参照)。これらのことから、コンクリートの乾燥収縮に伴い、鉄骨とコンクリート間の付着が切れた状態では両材料の合成効果を発揮出来ないが、機械的ずれ止めを必要個数取り付けておけば、鋼とコ

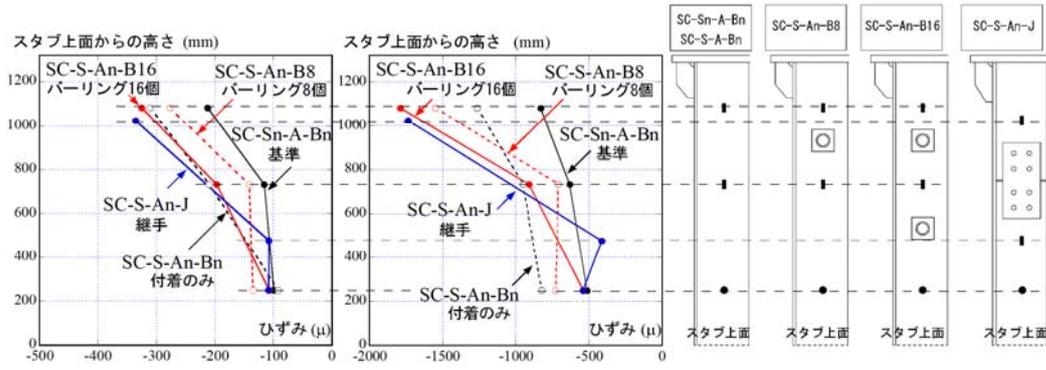


(a)鉄骨フランジ幅厚比 13 (b)鉄骨フランジ幅厚比 10 (c)鉄骨フランジ幅厚比 5
図8 シリーズ1の実験結果(SC柱の水平力 Q と部材角 R の関係)



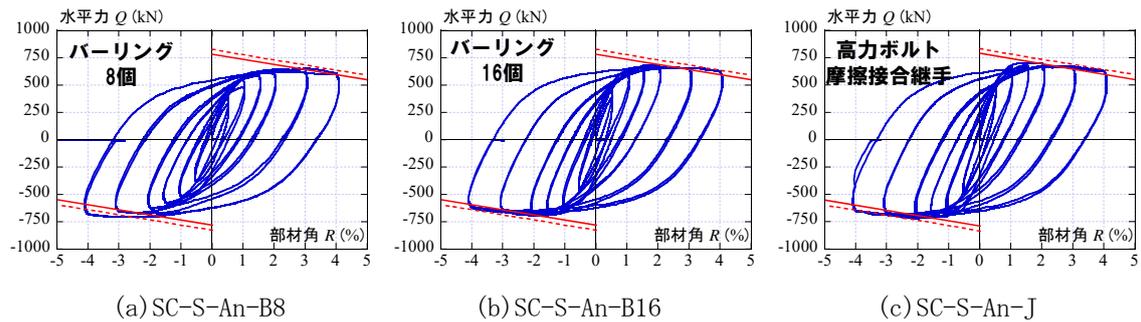
(a)軸力載荷時の鉄骨の歪 (b) Q - R 関係(ずれ止め付) (c) Q - R 関係(ずれ止め無)

図9 シリーズ2の実験結果



(a) 軸力 1000kN 載荷時 (b) 所定の軸力 4700kN 載荷時

図 10 シリーズ 3 の軸力載荷時の鉄骨の歪



(a) SC-S-An-B8

(b) SC-S-An-B16

(c) SC-S-An-J

図 11 シリーズ 3 の水平力-部材角関係

ンクリートは一体として挙動でき、優れた耐震性能を発揮できることが明らかとなった。

(3) 機械的ずれ止めの必要個数と鉄骨継手の機械的ずれ止めとしての効果

シリーズ 2 の実験で機械的ずれ止めを取り付ける効果を明らかとするため、柱の鉄骨ウェブ面にずれ止めを 64 個設置していたが、現実的にはこれは個数が多過ぎである。そこで、合成効果を発揮させるために必要な機械的ずれ止めの個数を調べる目的でシリーズ 3 の実験を行った。図 10 はずれ止めを 8 個取付けた試験体と 16 個取付けた試験体対して軸力を載荷した場合の鉄骨の歪状況を示したものである。同図(a)は軸力 1000kN を載荷したときの状況であるが、ずれ止めを 8 個取付けた試験体で鉄骨からコンクリートへ伝えるべき力をほぼ伝えきれている。しかし、圧縮耐力の 30%の軸力である 4700kN 載荷時には伝えきれていない結果となっている。一方、16 個取付けた場合、柱脚部での鉄骨の歪が柱頭にコンクリートの空隙を設けていない柱の歪と同程度の値であることから柱脚部ではコンクリートに伝えるべき軸力を伝えきれていることがわかる(同図(b)参照)。さらに、このシリーズでは柱の継手のずれ止めとしての効果をみるために柱フランジは完全溶け込み溶接、ウェブは高力ボルト摩擦接合とした継手を設けた試験体も実験を行っている。この継手を設けた試験体も、同図(b)より柱脚部ではコンクリートに伝えるべき軸力を伝えきれていることがわかる。図 11 は中高層建物の最下層の軸力に相当する柱断面の圧縮耐力の 30%の軸力を載荷したときのせん断力 Q と部材角 R の関係を示したものである。この結果より、この軸力下ではずれ止めを 16 個取付ければ SC 柱の優れた耐震性能を発揮できる(同図(b)参照)が、ずれ止め 8 個付けた試験体も計算耐力には達しているものの部材角が大きい変形での達成ということから、ずれ止め個数は不足していると判断するのが妥当と思われる(同図(a)参照)。本実験の結果より、ずれ止め 1 個が負担できる伝達能力は 200kN 程度であることがわかった。柱鉄骨のウェブ継手の添板と高力ボルトのナットが機械的ずれ止めの役目を果たし、機械的ずれ止め 16 個取り付けた試験体と同等な応力伝達機能があることがわかった(同図(c)参照)。

<参考文献>

- 1) 倉富 洋, 田中照久, 堺 純一: 十字鉄骨とコンクリートで構成された鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形状, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 86/No. 780, pp. 331-341, 2021年2月.
- 2) 淵上大貴, 倉富洋, 田中照久, 堺純一: 鋼・コンクリート合成柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の弾塑性変形状に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 64B/, 419-425, 2018年3月.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 0件）

1. 著者名 倉富洋, 松山礼佳, 田中照久, 堺 純一	4. 巻 Vol.42 B
2. 論文標題 機械的ずれ止めによる影響を考慮した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究	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 937-942
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 -

1. 著者名 倉富洋, 田中照久, 堺純一	4. 巻 Vol.86/No.780
2. 論文標題 十字鉄骨とコンクリートで構成された鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 331-341
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 -

1. 著者名 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 池田将啓	4. 巻 Vol.41/No.2
2. 論文標題 寸法効果による影響を考慮した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究	5. 発行年 2019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 1069-1075
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 -

1. 著者名 倉富洋, 松山礼佳, 田中照久, 堺純一	4. 巻 第13回
2. 論文標題 寸法効果および機械的ずれ止めによる影響を考慮した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム	6. 最初と最後の頁 54-61
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 Junichi Sakai	4. 巻 No.55
2. 論文標題 Current State of Studies of Steel Concrete Composite Structures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Steel Construction	6. 最初と最後の頁 1-4
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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 吉村威吹, 倉富洋, 田中照久, 堺純一
2. 発表標題 八角形断面からなるSC柱の弾塑性変形性状に関する実験的研究 - バーリングの配置個数及び鋼材とコンクリートの付着性状が柱材に及ぼす影響 -
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋宏一郎, 倉富洋, 田中照久, 大野敦弘, 堺純一
2. 発表標題 八角形断面からなる鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究その1, その2
3. 学会等名 日本建築学会大会講演発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堺 純一
2. 発表標題 新しい鋼コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状とその可能性
3. 学会等名 日本鉄鋼連盟第6回建築構造用鋼材と利用技術セミナー基調講演 (招待講演)
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
研究 分担者	田中 照久 (Tanaka Teruhisa) (90588667)	福岡大学・工学部・助教 (37111)	
研究 分担者	倉富 洋 (Kuratomi Yo) (50709623)	福岡大学・工学部・助教 (37111)	

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