

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560706

研究課題名(和文) 環境負荷の低減と高耐震性を旨とした鋼・コンクリート合成柱材の開発

研究課題名(英文) Development of Steel and Concrete Composite Columns Aimed for Labor-Saving and Higher Earthquake Resistant Properties

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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：地震国である我が国においては、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ことを目的として、消費エネルギーの低減および省人化・省力化された構造部材および骨組を開発することが望まれている。

本研究は、十字鉄骨とコンクリートで構成された八角形断面の鉄骨コンクリート柱材を提案し、各種影響因子が柱材の弾塑性変形性状に及ぼす影響を調べ、その構造性能を調べてきた。研究の結果、本柱材は鉄骨鉄筋コンクリート構造と同等以上の耐震性能を保持していることが明らかとなり、本構造が建設に伴う環境負荷の低減に寄与しながら高耐震性能の建築構造物を建設するのに適した工法であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The authors have been investigated Steel and Concrete composite columns (SC columns). In this thesis, the seismic performance of SC columns of the octagonal cross section was investigated. For the difference of axial force ratio, material strength and the steel flange width-thickness ratio to examine the effect on the elastic-plastic behavior of the SC columns, experiments and analysis were carried out.

Result of the studies, the following mentions became clear; 1) this octagonal cross sectional columns have good earthquake resistant properties. 2) Since the ratio of action axial force against the compression strength of the cross-section is as high as about 0.5 steel flange buckles, reinforced by the band plate becomes effective. 3) As a result of the elastic-plastic analysis of SC columns, this analysis revealed that it is possible to accurately track the experimental behavior.

研究分野：工学

キーワード：耐震性能 鋼コンクリート合成柱 コンクリートの拘束効果 鉄骨形状 軸力比

1. 研究開始当初の背景

地震国である我が国においては、優れた耐震性能を維持しながら建築物の建設に伴う環境負荷を低減させることを目的として、消費エネルギーの低減及び省人化・省力化された構造部材および骨組を開発することが望まれている。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構造（以下SRC構造と略す）が挙げられるが、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。そこで、本研究では図1に示す八角形断面の鉄骨コンクリート（SC）柱を提案し、その弾塑性変形性状を調べることにした。

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SC柱を開発することを目的として、図2に示すように、十字鉄骨を用いて、主筋およびせん断補強筋を省き、薄肉鋼管でコンクリートを横補強したSC柱材の弾塑性挙動を実験および解析的に調べ、幅厚比が100程度の薄肉鋼管で横補強しても、その性能はSRCと同等以上であり、断面の圧縮耐力の60%程度の高軸力下においても優れた耐震性能を示すことを明らかとした。薄肉鋼管で横補強したSC柱が優れた構造性能を示す理由は、図3に示すように内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束効果が非常に大きく、鉄骨の外のコンクリートのみを薄肉鋼管で横拘束すればよいことに依るものである。

しかしながら、建築構造物の全ての柱材を薄肉鋼管で横補強することが省力化を目指す上で課題となる。そこで、本研究では、耐震性能を損なうことなく、さらなる環境負荷低減を目指すため、図1に示す、さらに簡素化されたSC柱材の弾塑性挙動を調べ、鉄骨とコンクリートの合成効果を考慮した合理的な構造性能評価法を明らかにすることを目的とする。建築構造物において、ブレース又は耐震壁が取付く柱など厳しい応力状態にある柱には図2に示す薄肉鋼管で

横補強したSC柱を配置すべきであるが、応力的に余裕のある柱には、図1に示す簡素化されたSC柱を配置することで耐震性能に優れた建物を建設することが可能と考えられる。

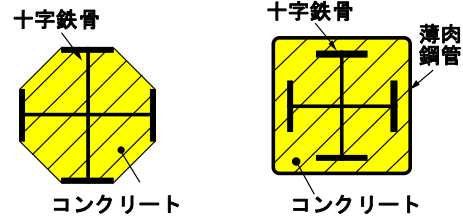


図1 本研究で対象とするSC柱断面

図2 薄肉鋼管で横補強したSC断面(既往研究)

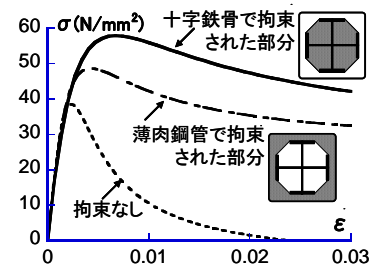


図3 薄肉鋼管で横補強したSC柱材のコンクリートの構成則

最近、コンクリート充填鋼管（CFT）の研究が盛んに行われ、多くの高層建物に使用されている。角形鋼管を用いたCFTは鋼管厚が薄い場合、鋼管によるコンクリートの拘束効果が薄れるため、ある一定の鋼管のボリュームが必要となる。一方、本SC柱材は鉄骨フランジが局部座屈するまでは、ウェブの引張力によりコンクリートを横拘束する効果が期待できるため、同等の構造性能を持つCFT柱に比べて鋼材の使用量を減少させることが可能と考えられる。

2. 研究の目的

図1に示す八角形SC柱は図3に示す鉄骨によるコンクリートの拘束効果は小さくなると考えられるが、その拘束効果を定量的に評価することが本研究の第一の目的である。本SC柱が地震荷重に対応する荷重を受けるときの弾塑性挙動に及ぼす影響因子として、作用軸力、鉄骨フランジの幅厚比およびコンクリート強度の違いなどが考えられる。そこでSC柱材の弾塑性挙動を

実験および弾塑性解析で明らかにすると共に、各種因子がSC柱の弾塑性挙動に及ぼす影響を定量的に評価し、力学的に合理的な構造的な性能評価法および安定限界軸力を提案することが本研究の第二・第三の目的である。

3. 研究の方法

(1) 試験体概要

八角形 SC 柱材の鉄骨により横拘束されたコンクリートの構成側を調べるために、中心圧縮実験を行った。さらに、地震時応力に対応する、一定軸力と繰り返し水平力を柱材に載荷する実験を行った。中心圧縮実験で得られた鋼材によるコンクリートの拘束効果を調べ、八角形 SC 柱材の弾塑性変形性状を調べるとともに、解析で実験挙動の追跡を行った。図 4 に八角形 SC 柱材の試験体を示す。

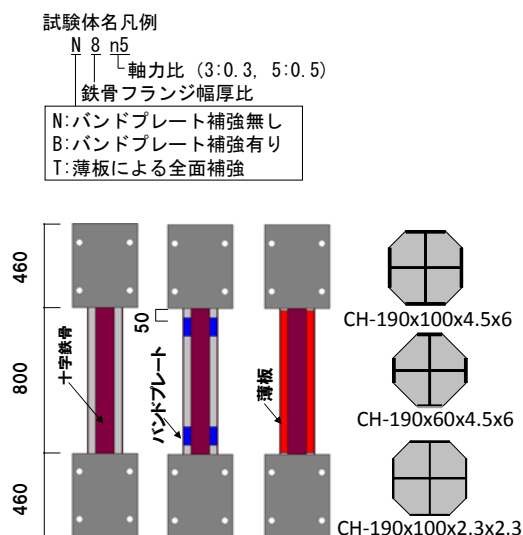


図 4 SC 柱試験体

試験体は、柱断面 190mm×190mm の八角形断面で柱材長 800mm のせん断スパン比 2 を有する試験体を計 17 体製作した。実験変数にはフランジ幅厚比(5, 8, 11, 22), コンクリート強度(30N/mm² 級, 70N/mm² 級), 軸力比 n (断面の圧縮耐力に対する作用軸力の比で 0.3, 0.5, 0.6), 補強材の有無(バンドプレートによる端部補強, 薄板による全面補強)を選んだ。バンドプレート有りの試験体は、柱頭・柱脚フェイスから 50mm 離れたところに 100mm 幅のバンドプレートを

隅肉溶接している。薄鋼板で全面補強した試験体 T11n5 は、薄鋼板に軸力と曲げを負担させないようにするために、柱頭・柱脚フェイスから 10mm の隙間を設けている。

(2) 載荷方法

柱の水平力載荷実験の載荷装置を図 5 に示す。載荷は、2000kN の鉛直ジャッキによって所定の軸力を載荷した後、500kN の水平ジャッキで正負交番繰返し水平力を載荷した。載荷形式は、部材角 $R=3.0\%$ まで 0.5% ずつ漸増させ、その後部材角 $R=4.0\%$, 6.0% まで載荷した。なお、各変位振幅とも 2 サイクルずつ繰返している。

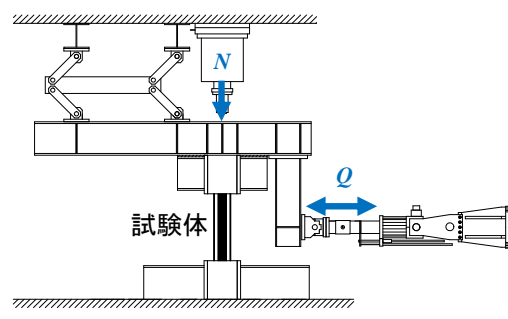


図 5 柱の水平力載荷装置

(3) 鉄骨によるコンクリートの拘束効果

コンクリートの応力-歪関係式は多くのモデルが提案されているが、本研究では直線型横補強鋼材による強度上昇を評価できる崎野・孫モデルを元にした。十字鉄骨のフランジがコンクリートを拘束するので、コンクリートの側圧により十字鉄骨のウェブには材長方向に対して垂直方向に引張力がかかると同時に、フランジに面外方向の応力が作用することになる(図 6 参照)。コンクリートの側圧はウェブの引張降伏とフランジの面外方向の全塑性モーメントのいずれか小さい方で決まり、その側圧 σ_{r2} は式(1)で表されるものとした。

$$\sigma_{r2} = \min \left(\frac{t_w}{b'} \cdot w \sigma_y, \frac{2t_f^2}{b^2} \cdot f \sigma_y \right) \quad (1)$$

ここで、 b' : フランジ長さ(= $b-t_w$), b : フランジ幅, t_w, t_f : それぞれ、ウェブとフランジの板厚, $f \sigma_y$: フランジの降伏点である。

鉄骨が開断面なので、鉄骨に囲まれたコンクリートが一様に σ_{r2} の側圧を受けるとは考えにくい。この領域のコンクリートの応力を一様と考えるために、有効拘束係数 k' を考慮した。これを用いて、鉄骨で拘束されたコンクリートの圧縮強度を式(2)で評価する。 $k' \cdot \sigma_{r2}$ は強度上昇であり、崎野・孫モデルの $k_e \cdot \sigma_{re}$ に対応する。

$$k' \cdot \sigma_{r2} = {}_c \sigma_{cB2} - {}_c \sigma_B \quad (2)$$

ここで、 ${}_c \sigma_{cB2}$ ：十字鉄骨で拘束されたコンクリート強度であり、実験結果から式(3)で算出する。 ${}_c \sigma_B$ ：シリンダー強度である。

$${}_c \sigma_{cB2} = \frac{{}_c N_{\max}}{{}_c A} \quad (3)$$

ここで、 ${}_c N_{\max}$ ：実験によるコンクリートの最大軸力、 ${}_c A$ ：コンクリートの断面積である。

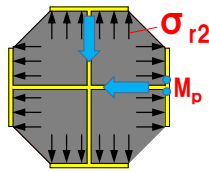


図6 コンクリートの側圧

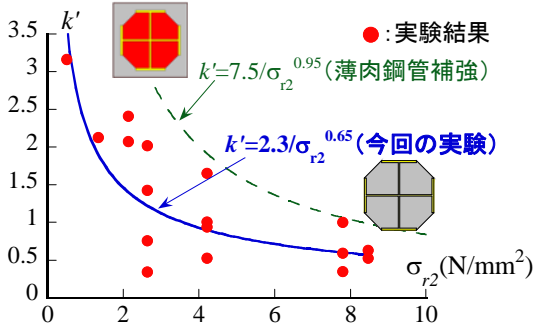


図7 有効拘束係数

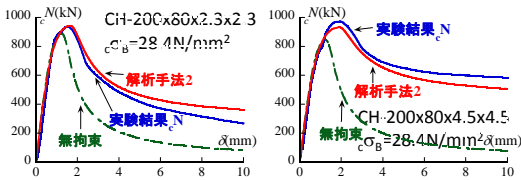


図8 中心圧縮実験と解析によるコンクリートの構成側の対応

実験耐力から k' と σ_{r2} の関係を求めた結果を図7に示す。実験から得られた k' と σ_{r2} の関係をプロットで示す。このプロットを近似して、式(4)の回帰曲線が得られた。

$$k' = 2.3 / \sigma_{r2}^{0.65} \quad (4)$$

中心圧縮実験で得られた実験挙動と解析結果の比較例を図8に示す。図より、十字鉄骨で拘束されたコンクリートは無拘束状態と比べ変形能力が向上していることがわかる。また、最大耐力及び最大耐力発揮後の降り勾配を精度良く評価していることが分かる。

(4) 軸力と水平力を受けるSC柱材の実験挙動

図9に水平力 Q 一部材角 R 関係の一例を示す。

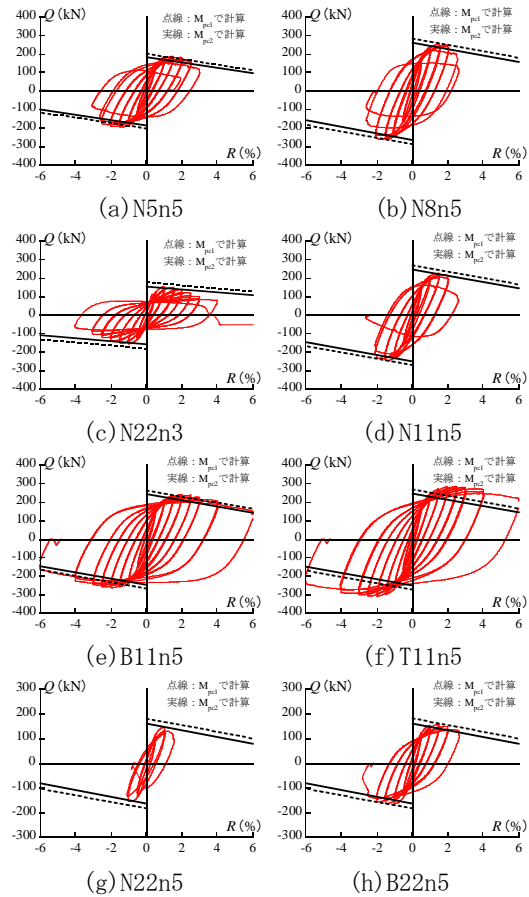


図9 水平力一部材角関係

図中の点線は、鋼材の降伏応力度およびコンクリートの圧縮強度を用いて計算した一般化累加強度 M_{pc1} を柱頭、柱脚部でそれぞれ発揮するとして式(5)で求めた塑性崩壊機構形成時の耐力である。同図中の実線はSRC規準によるコンクリートの低減係数 c_{ru} を用いて計算した一般化累加強度 M_{pc2} で求めたものである。

$$Q = \frac{M_{pc}}{L} - N \cdot R \quad (5)$$

ここで、 L ：柱の固定端から反曲点(材長の間中点を想定)までの長さ、 N ：柱軸力、 R ：部材角である。

図では示していないがコンクリート強度30 N/mm²級の試験体は高軸力下でも優れた耐震性能を示した。図9より、柱脚でフランジ補強をしていない試験体N5n5, N8n5, N22n3, N22n5は、部材角の増大とともに耐力の低下がみられ、部材角 $R=4.0\%$ 以下で急激に耐力が低下した。一方で、柱脚部をバンドプレートあるいは鋼板で補強した試験体B11n5及びT11n5は、圧縮耐力に対する作用軸力の比が0.5と高軸力下でも、大変形時まで耐力を保持でき、エネルギー吸収能力に優れた紡錘形の履歴性状を示し、部材角 $R=6.0\%$ まで耐力の低下がなかった。フランジ幅厚比が22の試験体B22n5でも、バンドプレート補強することにより変形能力が向上していることがわかる。

(5) SC 柱材の弾塑性解析の概要

解析モデルを弾塑性バネ部と剛体からなるものと考え、柱材の変形を弾塑性バネ部に集中させ(図10参照)、その点での断面のモーメント-曲率関係を求め、力の釣合を満足させることにより、柱材の挙動を解析した。弾塑性バネ部での断面のモーメント-曲率関係は平面保持の仮定のもとで断面区分法により求めた。鋼材およびコンクリートの応力-歪関係を図11に示す。

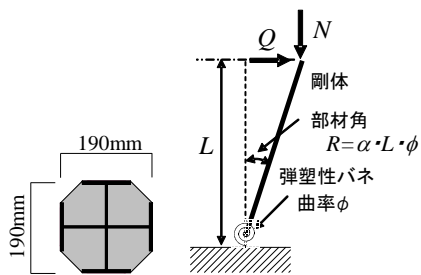
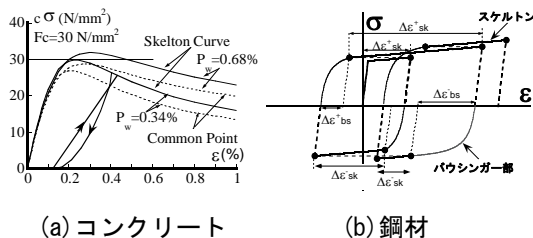


図10 柱材の解析モデル



(a) コンクリート (b) 鋼材

図11 材料の応力-歪関係

(6) 実験結果と解析結果の比較及び考察

図12に実験挙動と解析結果の比較の例を示す。図より、軸力比 $n=0.3, 0.5$ に関わらず、解析結果が実験挙動を最大耐力、耐力低下、除荷剛性を

含め精度良く追跡できていることが分かる。軸力比 $n=0.5$ の高軸力比の試験体においては、実験の方が先に軸力保持不能となっているが、概ね本解析は実験を良く追跡できている。

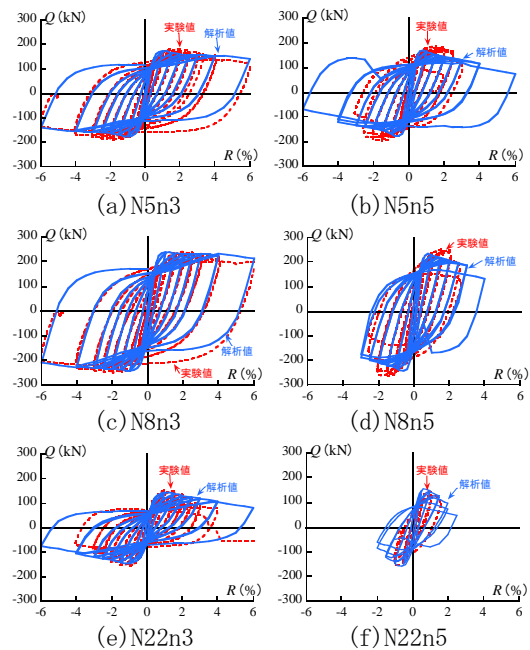


図12 実験と解析の比較

(7) 実験および解析のまとめ

図1に示す八角形断面のSC柱材の中心圧縮実験および地震力に対応する鉛直軸力と繰り返し水平力を作用する実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 本研究で提案するSC柱材は、軸力比 n が0.3程度では、履歴ループが紡錘形となり、優れた構造性能を示す。しかし、補強を行わない場合、軸力比 n が0.5と高くなると、大きな変形では、急激な耐力低下が見られた。
- 2) 軸力比が0.5程度の高軸力の場合、鉄骨フランジの幅厚比に関わらず、バンドプレートで補強することによって柱材の変形能力を向上させることができる。
- 3) コンクリートの構成則を考慮した柱材の弾塑性解析は、八角形断面からなるSC柱材の実験挙動を精度よく追跡することができる。

4. 研究成果

図1に示すSC柱材は、SRC柱材に比べ建設現場での施工も容易であり、構造性能上も内蔵鉄骨

のせいを大きくでき、高強度材料の有効利用が可能となり、断面の曲げ剛性や抵抗力などの構造性能を容易に調整できる点も特徴である。

図1に示すSC柱材は、薄肉鋼管で横補強せずとも、鉄骨によるコンクリートの拘束効果が期待できるため、本柱材は優れた耐震性能を発揮できることを示し、SRCと同等以上の耐震性能を保持することを明らかにすることができた。

この成果を元に、今後、この合成柱材の復元力特性を明確にすると共に、柱梁接合部のディテールについて調べていく必要がある。

建築構造物の設計・施工において、本研究で対象とした簡素化された八角形SC柱の弾塑性変形性状を明らかにしたことは学術上も実務上も意義があるものと考えられる。本研究で対象としたSC柱材と薄肉鋼管で拘束したSC柱を適切に配置することで、優れた耐震性能を保持しながら、環境負荷の低減にも繋がる有効な建築構造物が建設可能となり、社会的な意義は大きいと考えられる。

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7件)

- ① 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 川原健輔: 八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36/No. 2, pp. 1039-1044, 2014. 7, 査読有
- ② 河野公晴, 倉富洋, 田中照久, 堺純一: 端部補強した八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36/No. 2, pp. 1045-1050, 2014. 7, 査読有
- ③ 倉富洋, 堺純一, 田中照久: 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 60B, pp. 65-71, 2014. 3, 査読有.
- ④ 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の圧縮性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 2, pp. 1171-1176, 2013. 7, 査読有.
- ⑤ 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 多数回繰返し水平力を受ける鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力の実験的研究日本建築学会, 構造系論文集, Vol. 78, No. 686, pp. 875-884, 2013. 4, 日本建築学会構

造系論文集, Vol. 78, No. 686, pp. 875-884, 2013. 4, 査読有.

- ⑥ 倉富洋, 堺純一, 田中照久: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力の定式化, 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 第10回, pp. 4-1~8, 2013. 11.
- ⑦ 川原健輔, 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合成柱材の弾塑性性状に関する実験的研究, 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 第10回, pp. 13-1~8, 2013. 11.

[学会発表] (計7件)

- ① 河野公晴, 堺純一, 倉富洋, 田中照久: 八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状・バンドプレートによる補強効果について-, 日本建築学会大会, 神戸大学(兵庫県神戸市), 2014.9.12.
- ② 河野公晴, 倉富洋, 田中照久, 堺純一: 八角形断面からなるSC柱と鉄骨梁フランジ間の応力伝達に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告会, 熊本県立大学(熊本県熊本市), 2015. 3.1.
- ③ 倉富洋, 堺純一, 田中照久: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力の算定法, 日本建築学会九州支部研究報告会, 佐賀大学(佐賀県佐賀市), 2014. 3.2.
- ④ 河野公晴, 堺純一, 倉富洋, 田中照久: 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 その1 バンドプレートおよび薄板による補強効果, 日本建築学会九州支部研究報告会, 佐賀大学(佐賀県佐賀市), 2014. 3.2.
- ⑤ 川原健輔, 倉富洋, 田中照久, 堺純一: 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 その2 解析手法の提案, 日本建築学会九州支部研究報告会, 佐賀大学(佐賀県佐賀市), 2014. 3.2.
- ⑥ 川原健輔, 倉富洋, 堺純一, 田中照久: 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会, 北海道大学(北海道札幌市), 2013. 8. 30.
- ⑦ 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 川原健輔: 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性性状に関する実験的研究 その2 柱材の曲げせん断性状, 日本建築学会大会, 北海道大学(北海道札幌市), 2013. 8. 30

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

田中 照久 (TANAKA Teruhisa)
福岡大学・工学部・助手
研究者番号: 90588667