

## 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 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560604

研究課題名（和文）省力化と高耐震性を旨とした鋼・コンクリート合成柱と耐震要素を組合せた骨組の開発

研究課題名（英文）Development of Steel and Concrete Composite Structures 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

研究成果の概要（和文）：本研究では、省力化・高耐震性を旨として研究を行ってきた鉄骨コンクリート柱材と鉄骨で構成された骨組に鋼ブレースを挿入した混合構造骨組の弾塑性変形性状について調べた。実験および解析の結果、細長比 87 程度のブレースを挿入することによって、柱に変動軸力が作用するが、柱に作用する軸力が圧縮耐力の 50% の圧縮軸力が作用しても骨組は安定な挙動を示すことを明らかとした。

研究成果の概要（英文）：The authors have been investigated SC columns composed of cruciform steel section and concrete covered by thin steel tube and made clear that the SC columns showed large earthquake resistant performance under large axial load.

In this thesis, an elastic-plastic behavior of braced frames composed of steel concrete composite columns (SC columns) and steel beam was investigated, and it was made clear that the braced frames showed large earthquake resistant properties under large axial compressive load caused of setting steel braces.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：骨組の耐震性能，鋼コンクリート合成柱，鉄骨梁，鉄骨ブレース，変動軸力

## 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

工及び工事に加え、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の解決すべき問題がある。

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エネルギー化・省力化・省人化を旨とした鋼・

コンクリート合成柱（SC柱）を開発することを目的として、図1に示すように、SRC柱断面から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断面を横補強した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を超える薄肉鋼管で横補強しても、その構造性能はSRC構造と同等以上であることを明らかとした（H17・18年度科研補助金・基盤(C)、例えば本報告書の〔雑誌論文〕の②にまとめている）。

さらに、柱の内蔵鉄骨と梁鉄骨を溶接接合したディテールで設計したSC柱と鉄骨梁で構成された十字形骨組の荷重実験を行い、梁崩壊先行型はもとより、柱崩壊先行型の設計をしても大変形域まで安定した優れた耐震性能を持つことを明らかにしている（H19・20年度科研補助金・基盤(C)、例えば本報告書の〔雑誌論文〕の⑤にまとめている）。

本研究では、薄肉鋼管で横補強した柱材を建築構造物に使用する上で、ブレースなどの耐震性能を組込む場合の骨組の挙動を調べることを目的としている。

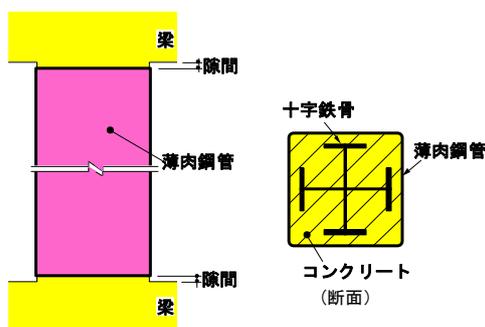


図1 SC柱

## 2. 研究の目的

本研究で調べているSC柱は構造性能が高いことから柱断面を小さくできるが、ラーメン構造では骨組の剛性が小さくなるので、水平力に抵抗する耐震要素を組入れる必要がある。その結果、周辺の柱に大きな変動軸力が作用することになる。本柱材は断面圧縮耐力の60%程度の圧縮軸力が作用しても大変形まで優れた耐震性能を示すが、ラーメン骨組と耐震要素の特徴を生かすための組合せの条件については未検討であり、その条件を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、鉄骨ブレースを耐震要素として組込んだ骨組の荷重実験を行い、本合成骨組の弾塑性挙動を明らかにすると共に、構造性能評価法を提案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、薄肉鋼管で横補強したSC柱と鉄骨梁で構成された骨組に鋼製ブレースを組み込んだ骨組の弾塑性挙動を実験的に明

らかにするために、ラーメン骨組とブレース付き骨組の2種類の試験体を製作した。ブレース付の試験体を図2に示す（ラーメン試験体は図2のブレースがない骨組である）。試験体は、骨組に作用する軸力が変動するものと変動しないものの2種類とし、荷重装置を変えることで、変動軸力の影響をみている。さらに、ブレースの有無を実験変数に加え、計4体の荷重実験を行った。なお、ブレースの弱軸回りの細長比は両端ピン支持さえりている境界条件で87である。実験変数を表1に示す。実験の荷重装置を図3に示す。荷重は、試験体の柱脚を固定端とし、両柱頭に軸力を荷重している。同図(a)は変動軸力が無い試験体の荷重装置を、同図(b)は変動軸力を作用させる試験体の荷重装置を示す。両荷重とも、鉛直方向のジャッキで1,000kNの荷重を加えて保持した状態で、繰り返し水平荷重を正負交番に2回荷重した。層間変形角（以下Rと略）が3.0%までは0.5%刻みで荷重し、それ以降は1.0%刻みで荷重を行った。水平荷重の加力点は変動軸力の無い試験体は基礎上面から1250mmの位置に、変動軸力を加える試験体は基礎上面から2500mmの位置である。なお変動軸力を作用させる試験体は、加力装置の転倒モーメントによって柱の軸力を変動させた。

本研究では、荷重実験結果をもとに骨組の弾塑性変形状を調べるために、試験体の柱、梁、ブレースの各部の応力状態について解析的に調べた。

表1 実験変数

試験体名	変動軸力	柱、梁鉄骨寸法	ブレース有無
N1	無	柱： 2H-150x60x4.5x6	無
B1	無	梁： H-200x80x4.5x6	有 <sup>*)</sup>
N2	有	柱： H-200x80x4.5x6	無
B2	有	梁： H-200x80x4.5x6	有 <sup>*)</sup>

注\*) ブレース断面：H-70x70x4.5x4.5  
薄肉鋼管断面：□-200x200x2.3

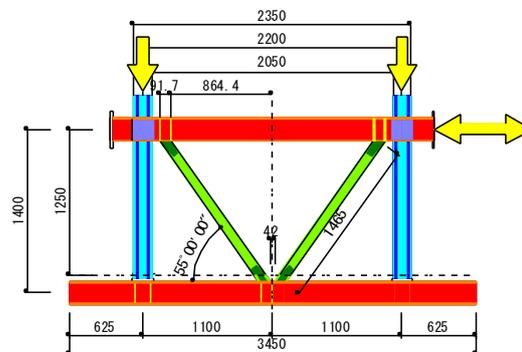
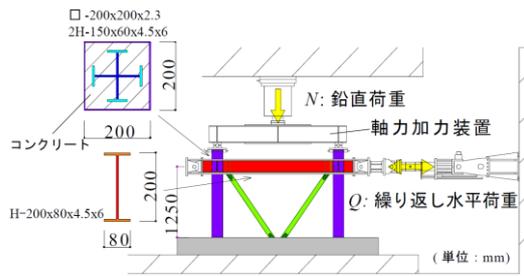
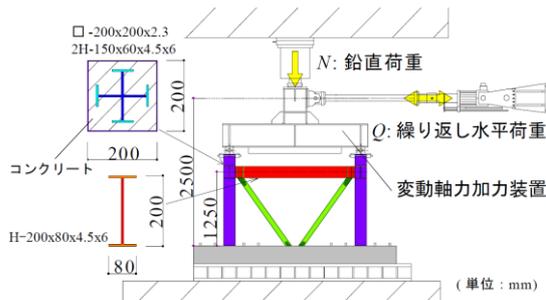


図2 SC柱および鉄骨梁骨組



(a) 変動軸力無（平成 21 年度載荷実験）



(b) 変動軸力有（平成 22 年度載荷実験）

図 3 載荷装置

#### 4. 研究成果

##### (1) 骨組試験体の履歴性状

図 4 に各試験体の履歴性状を示す。図中の  $Q_{u1}$  は梁端と柱脚に塑性ヒンジが形成されるとして求めた計算耐力である。塑性ヒンジの耐力には、鋼材の実降伏点とコンクリートのシリンダー圧縮強度を用いて計算した一般化累加強度を使用した。  $Q_{u2}$  はブレースの耐力

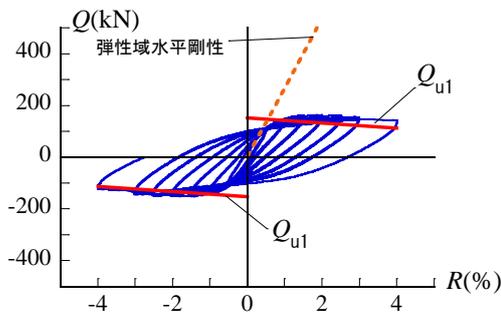
をラーメン骨組の耐力に加えたもので、ブレースの圧縮耐力として鋼構造限界状態設計指針の曲げ座屈限界耐力を用いて算定した。

##### (a) 試験体N1とN2の履歴性状

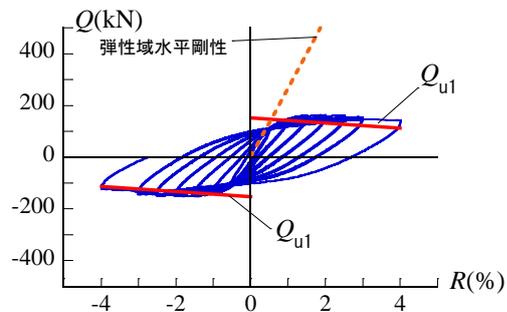
図 4 の (a) より試験体N1は  $R=+1.5\%$  の 1 回目で計算耐力  $Q_{u1}$  を発揮している。最大水平耐力は  $R=+1.5\%$  の 1 回目の 179kN である。最大水平耐力を発揮してからは曲げ耐力を保持している。  $R=+3.0\%$  の 1 回目に梁端部の下フランジが局部座屈を、ついで  $R=-3.0\%$  の 2 回目に鉄骨梁が大きく横座屈が生じるといった不安定現象を起し曲げ耐力が低下したため実験を終了した。柱脚、柱頭に大きな損傷はない。

図 4 の (b) より試験体N2は  $R=+1.5\%$  の 1 回目で計算耐力  $Q_{u1}$  を発揮している。最大水平耐力は  $R=+2.0\%$  の 1 回目の 162kN である。最大水平耐力を発揮してからは曲げ耐力を維持している。  $R=+3.0\%$  の 1 回目で梁端部の下フランジが局部座屈を起し、ついで  $R=-4.0\%$  の 1 回目で鉄骨梁が横座屈を起し曲げ耐力が低下したため実験を終了した。柱脚、柱頭に大きな損傷はない。図 4 の (a), (c) より試験体N2はN1と比べると  $R=3.0\%$  を超えて曲げ耐力の低下が少ない。この違いは鉄骨梁の局部座屈にある。試験体N1は梁端部の下フランジに座屈波形の大きな局部座屈が生じた。試験体N2の梁端部の下フランジには座屈防止のスチフナが溶接されており、スチフナ間に局部座屈が生じたため、フランジの座屈波形が小さかった。スチフナの有無により局部座屈波長の異なる座屈が起り局部座屈発生後の骨組の挙動に影響したと考えられる。

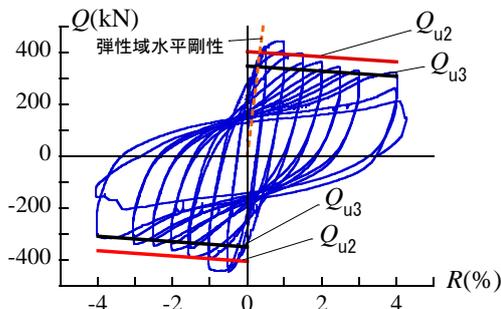
##### (b) 試験体B1とB2の履歴性状



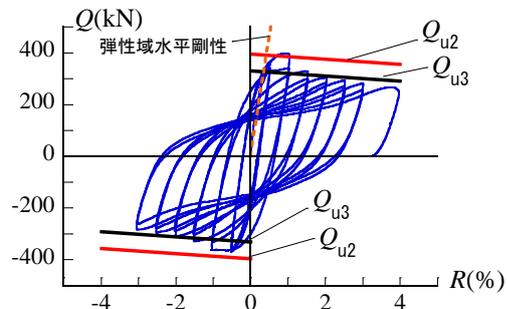
(a) N1 試験体



(b) N2 試験体



(c) B1 試験体



(d) B2 試験体

図 4 水平力 H-層間変形角 R 関係

図4の(c)より試験体B1は $R=+1.0\%$ の1回目  
で計算耐力 $Q_{u2}$ を發揮している。 $Q_{u2}$ はラ  
ーメン骨組の耐力 $Q_{u1}$ にブレースの引張降伏耐力  
と曲げ座屈耐力の水平方向成分の耐力を加え  
た計算耐力である。水平方向成分を最大水平  
耐力444kNを發揮したのは $R=+1.0\%$ の1回目  
である。 $Q_{u3}$ は $Q_{u1}$ にブレース1本の引張降伏耐力  
の水平方向成分を加えた耐力である。最大水  
平耐力發揮後は $R=-1.0\%$ の1回目で梁端部の下  
フランジに局部座屈を起し、ついで $R=-1.0\%$   
の2回目で圧縮側のブレースが弱軸方向に面  
内座屈するといった不安定現象を起し、曲  
げ耐力が低下した。 $R=-2.0\%$ の2回目に圧縮側  
ブレースのブレース梁接合部の溶接面に亀裂  
が入り、 $R=-2.5\%$ の1回目に引張ブレース側の  
梁のスチフナーが破断し、梁端部の上フランジ  
が局部座屈を起したため、さらに曲げ耐力  
が低下をした。 $R=-4.0\%$ の1回目で引張側ブ  
レース中央部のフランジに亀裂が入り、 $R=-4.0\%$   
の2回目で引張側ブレース中央部のフランジ  
が破断したため曲げ耐力が著しく低下し、実  
験を終了した。柱脚、柱頭に大きな損傷はな  
い。

図4の(d)より試験体B2は $R=+1.0\%$ の1回  
目ので計算耐力 $Q_{u2}$ と同等の曲げ耐力を發揮  
している。最大水平耐力396kNを發揮した  
 $R=-1.0\%$ の1回目と、 $R=+1.0\%$ の2回目に圧  
縮側の両ブレースが弱軸方向に面内座屈す  
るといった不安定現象によって曲げ耐力が低  
下した。 $R=+2.0\%$ の1回目でブレース端部で  
局部座屈が生じ、大きく変形したため、引張  
側ブレースのブレース梁接合部のブレース  
溶接面に亀裂が入った。 $R=+4.0\%$ の1回目で、  
東側のブレースの中央部のフランジが破断  
し、耐力が著しく低下したので実験を終了  
した。柱脚柱頭に大きな損傷はない。

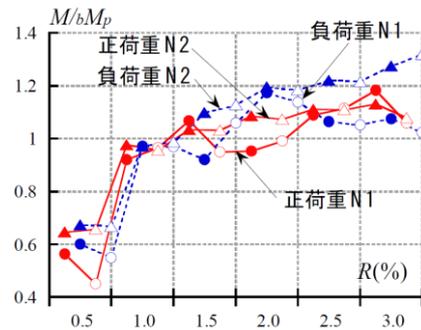
図4の(c),(d)より試験体B1とB2はブ  
レースの圧縮耐力を鋼構造限界状態設計指針  
の曲げ座屈限界耐力で評価すると試験体B1  
は計算耐力以上の耐力を發揮し、試験体B2  
は計算耐力と同等の耐力を發揮した。試験体  
B2はB1より早期にブレースが弱軸方向に面  
内座屈しているため曲げ耐力が低下してい  
る。ブレースは水平力のほかに鉛直荷重から  
の影響を受けるため、試験体B2は大きな変  
動軸力によって早期にブレースが座屈した  
と考えられる。ブレース座屈後はブレースが  
引張力に対して抵抗しているので破断する  
までは耐力を維持できる。試験体B2の  
 $R=+1.5\%$ の1回目の最大耐力は329kNである。  
座屈耐力を含めた $Q_{u2}$ で評価すると計算耐力  
382kN、座屈耐力を無視した $Q_{u3}$ で評価す  
ると計算耐力316kNとなり、実験耐力を安全  
側に評価できる。

## (2) 骨組の弾塑性解析

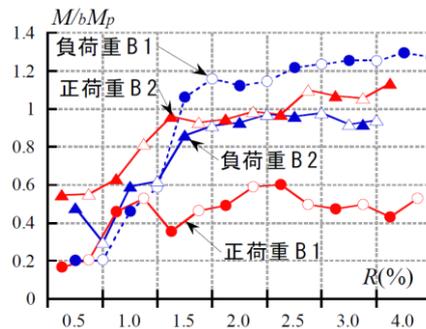
鉄骨梁に貼付した歪ゲージをもとに、梁の  
材長方向の曲げ分布を求め、さらに、鉄骨ブ  
レースに貼付した歪ゲージをもとに、ブレース

の負担軸力と負担モーメントを求め、骨組  
の各部の応力状態を分析した。

図5は梁部材の梁端部での弾塑性変形性状  
を示すもので、断面の全塑性モーメントで無  
次元化している。これらの図より、ラーメン、  
ブレース付骨組とも層間変形角が $1.5/100$   
radで全塑性モーメントを發揮していること  
と、変動軸力による梁の弾塑性変形性状に及  
ぼす影響はほとんどないことがわかる。



(a) ラーメン骨組 (N1 および N2)



(b) ブレース付骨組 (B1 および B2)

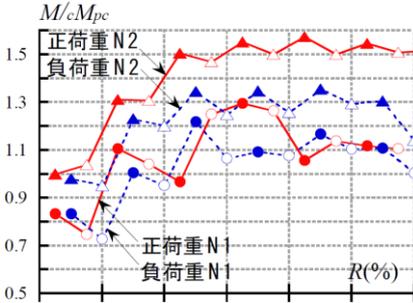
図5 層間変形角ごとの梁の応力分布

図6は柱脚部の弾塑性変形性状を示すも  
ので、断面の累加強度 $cMpc$ で無次元化して  
いる。これらの図より、ラーメン骨組およ  
びブレース付骨組ともに、変動軸力の有無  
による柱脚部の弾塑性挙動に及ぼす影響  
があることがわかる。

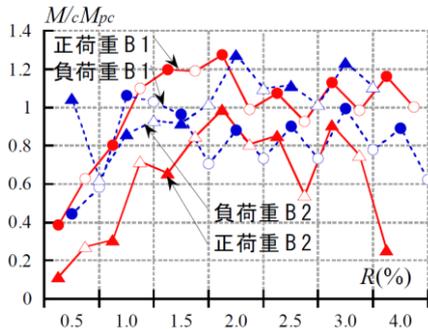
図7はブレース付骨組の柱の負担軸力を  
示している。なお、軸力を断面圧縮耐力  
で無次元化している。これらの図より、  
変動軸力が作用するB2試験体では、最  
大で、圧縮耐力の50%の軸力が作用して  
いることがわかる ( $R=1/100$ 時)。また、  
その後の変形域でも、軸力は断面圧縮耐  
力の45%の高軸力を負担していることが  
わかる。

図8は試験体に作用させた水平力に対  
する、ブレースの負担水平力の割合を示  
したものである。この図より、変動軸力  
を加えた試験体の方が変動軸力がない  
試験体に比べてブレースの抵抗割合が  
高いことがわかる。これは、ブレースに  
用いた鋼材の降伏強度がB1試験体に  
比べてB2試験体が高いことによる

ことと、変動軸力により高圧縮軸力下に置かれた柱の曲げ抵抗が小さくなることの影響であると考えられる。また、この図より、細長比 87 のブレースが大変形で座屈しても、ブレースは全水平力の 5 割 (B1 試験体) および 7 割 (B2 試験体) 以上の耐力を保持できていることがわかる。



(a) ラーメン骨組 (N1 および N2)



(b) ブレース付骨組 (B1 および B2)

図 6 層間変形角ごとの柱脚の応力分布

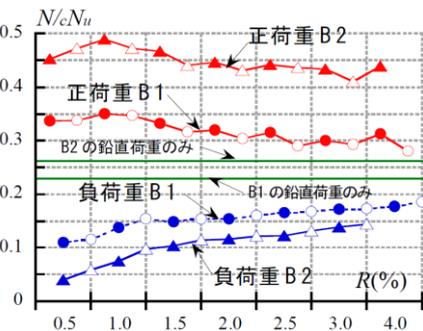


図 7 ブレース付骨組の柱の負担圧縮軸力

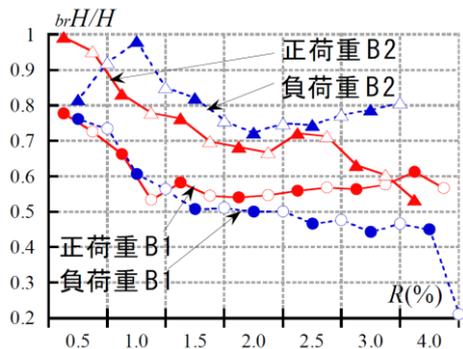


図 8 水平荷重に対するブレースの負担力

### (3) 研究成果のまとめ

ブレース付きの SC 柱・S 梁の骨組の載荷実験を行い、以下のことが明らかとなった。

- (a) 長比 87 程度のブレースを組み込むことで、水平剛性がラーメン骨組の 3.5 倍になる。しかし、骨組に変動軸力を含む高軸力が作用するとブレースは鉛直荷重の影響を受けるため、早期に座屈が起こり、骨組の変形性状に影響が出る。
- (b) ブレース付き骨組の耐力を算定するとき、ブレースの圧縮耐力に鋼構造限界状態設計指針の曲げ座屈限界耐力を使用すると、骨組の最大耐力を精度良く評価することができるが、変動軸力によってフレームとブレースが同時に耐力を発揮する前にブレースが座屈するため、計算耐力に対する余力が小さくなる。
- (c) SC 柱が高い圧縮耐力をもっているため、軸力比の最大圧縮が 0.49 と高軸力を負担しても柱頭及び柱脚には大きな損傷は無く、鋼管の座屈及び破断も発生しなかった。鋼管に損傷が無かったため、塑性域でもコンクリートの剥離を抑え、高い性能を維持できた。そのため変動軸力の有無で骨組の破壊モードに変化は無く、ブレースが安定した挙動を示した。
- (d) 解析により、骨組の応力分布を分析した結果、ブレースの溶接部分に亀裂が生じる前まではフレームとブレースの水平力の負担割合を明らかにすることが出来た。その結果、部材角が 0.5% 程度では、ブレースがほとんどの水平力を負担し、変形が大きくなるに従い、ブレースの負担割合が少なくなるが、部材角が 2.0% を超える大きな変形域でも、ブレースの水平力負担割合は 50%~70% を保持している。

### 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 10 件)

- ① 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復元力特性-骨格曲線の定式化-, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 673 号, pp. 491-498, 2012. 3, 査読有
- ② 田中勝也, 堺純一, 田中照久: 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性変形性状, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 2/58B, pp. 429-436, 2012. 3, 査読有
- ③ 倉富洋, 堺純一, 他 2 名: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の構造性能及び安定限界軸力に関する研究, 日本コンクリート工学学会年次論文報告集, Vol. 33, No. 2, pp. 1129-1134, 2011. 7, 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弾塑性性状に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 2/57B, pp. 527-534, 2011. 3, 査読有
- ⑤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弾塑性性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 1153-1158, 2010. 7, 査読有
- ⑥小川一貴, 堺純一, 田中照久: 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成されたブレース付混合構造骨組の弾塑性性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 1117-1122, 2010. 7, 査読有
- ⑦堺純一, 倉富洋, 田中照久, 河本裕行: 薄肉鋼管で横補強された鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性性状, 第8回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp. 6-1~6-8, 2009. 10, 査読有
- ⑧小川一貴, 堺純一, 田中照久: 薄肉鋼管で横補強された鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性性状, コンクリート工学年次論文集, 第31巻, No. 2, pp. 1207-1212, 2009. 7, 査読有
- ⑨倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 薄肉鋼管で横補強された鋼・コンクリート合成柱材のコンクリートの構成則に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第31巻, No. 2, pp. 1201-1206, 2009. 7, 査読有
- ⑩堺純一, 田中照久, 倉富洋: 十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート部材のコンクリートの構成則に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第31巻, No. 2, pp. 1135-1140, 2009. 7, 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- ①則松一揮, 堺純一, 他 4 名: 薄肉鋼管で横補強された鉄骨コンクリート柱材の構造性能評価法-骨格曲線の定式化-, 日本建築学会九州支部研究報告会, 西日本工業大学, 2012. 3. 4.
- ②田中勝也, 堺純一, 田中照久: 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性性状-骨組みの応力分布の解析-, 日本建築学会九州支部研究報告会, 西日本工業大学, 2012. 3. 4.
- ③倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告会, 西日本工業大学, 2012. 3. 4.
- ④高岸幸成, 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 鋼・コンクリート合成柱材のコンクリートの構成則に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告会, 西日本工業大学, 2012. 3. 4.
- ⑤田中勝也, 堺純一, 田中照久: 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾

塑性性状, 日本建築学会大会学術講演会, 早稲田大学, 2011. 8. 24.

- ⑥高岸幸成, 堺純一, 田中照久, 河本裕行, 倉富洋: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の構造性能評価法 その2 骨格曲線の定式化, 日本建築学会大会学術講演会, 早稲田大学, 2011. 8. 24.
- ⑦倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行, 高岸幸成: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の構造性能評価法 その1 安定限界軸力について, 日本建築学会大会学術講演会, 早稲田大学, 2011. 8. 24.
- ⑧田中勝也, 小川一貴, 堺純一, 田中照久: 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性性状, 日本建築学会九州支部研究報告会, 鹿児島大学, 2011. 3. 6.
- ⑨倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性性状に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告会, 鹿児島大学, 2011. 3. 6.
- ⑩小川一貴, 堺純一, 他 1 名, 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成されたブレース付き混合構造骨組の弾塑性性状, 日本建築学会大会学術講演会, 富山大学, 2010. 9. 10.
- ⑪倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 鋼・コンクリート合成柱材のコンクリートの構成則に関する研究, 日本建築学会大会学術講演会, 富山大学, 2010. 9. 10.
- ⑫小川一貴, 堺純一, 田中照久, 堤洋樹: 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性変形性状, 日本建築学会九州支部研究報告会, 長崎総合科学大学, 2010. 3. 7.
- ⑬倉富洋, 堺純一, 他 2 名: 鋼・コンクリート合成柱材のコンクリートの構成則に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告会, 長崎総合科学大学, 2010. 3. 7.
- ⑭倉富洋, 堺純一, 田中照久: 鋼・コンクリート合成柱材のコンクリートの構成則に関する研究, 日本建築学会大会学術講演会, 東北学院大学, 2009. 8. 27.
- ⑮小川一貴, 堺純一, 田中照久: 薄肉鋼管で横補強された鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性性状, 日本建築学会大会学術講演会, 東北学院大学, 2009. 8. 27.

## 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

津田 恵吾 (TSUDA KEIGO)  
北九州市立大学・国際環境工学部・教授  
研究者番号: 50112305