

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31日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560525

研究課題名（和文） 冷間成形角形鋼管柱の火災時高温状態と火災後再使用時の
力学的挙動に関する実験的研究研究課題名（英文） Experimental Study on Compression Behavior of Cold-formed SHS Columns
at Elevated and Cool-down Temperatures

研究代表者

岡部 猛（OKABE TAKESHI）

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：40117338

研究成果の概要（和文）：

冷間ロール成形角形鋼管の高温時と加熱後冷却時の圧縮試験と数値解析を行い、局部座屈を伴う柱材の軸圧縮挙動に関する多数の物理的実験データを蓄積するとともに理論的な分析考察を行った。ここで、定常温度下と非定常温度下とで実施した二種類の短柱圧縮実験において、ひずみ塑性率が殆ど同じあるとの実験的事実を確認したことは極めて重要である。この知見を各種の温度や軸荷重下で行った鋼柱の曲げ座屈実験結果に適用することにより、局部座屈の影響を分析することができる。

研究成果の概要（英文）：

Stub-column and column tests at elevated temperatures were performed for three different square hollow sections (SHS) of steel grade STKR400 in Japan. The main objective of these tests are to evaluate variations in the compressive behavior of steel columns due to different width-to-thickness ratios, to investigate the reduction of column strength by constant elevated temperatures, and to verify the accuracy of the finite-element model based on the shell theory. Especially it was shown that the deformation capacity of stub-column tests at various temperatures converged into almost a single curve.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：建築耐火構造

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：耐火設計、鋼構造、冷間成形、柱材、曲げ座屈、局部座屈、高温クリープ

1. 研究開始当初の背景

冷間成形角形鋼管は建築骨組の柱材として様々な利点を有しているため、低層から高層に至るまで建築骨組の柱材に多用されている。また、常温時の力学的特性に関しては材料レベルから部材、骨組レベルに至るまで多数の実験的研究が行われ、様々な性能が明

らかにされている。

しかしながら、本研究を開始した当初は、高温時の冷間成形角形鋼管の力学的挙動を明らかにする実験的研究は極めて少なかった。筆者の知る限り BCR295 と STKR400 で作成された鋼柱材の載荷加熱試験例が各 1 例、加熱後冷却時の力学的挙動を明らかにする

実験的研究が1例存在するのみであった。

冷間成形角形柱を使用した鋼構建造物の耐火設計を成立させるためには、材料レベルから部材、骨組レベルに至るまで詳細な実験的研究を蓄積する必要があると考えた。

2. 研究の目的

製作過程で複雑な塑性加工を受けている冷間成形角形鋼管は、火災加熱時には力学的特性が原鋼板に戻る等の強度低下傾向をはじめとする大きな変質が予想される。また、火災後の再使用時の耐震性能も変化する可能性が高いと考えられる。

本研究は、冷間成形角形鋼管柱の耐火性能と火災後再使用時の耐震性能に関する基本的な資料を実験的に明らかにすることが主目的であり、以下の2点を従目的とする。

- (1) 冷間成形角形鋼管柱の高温状態での圧縮挙動（火災時挙動）を明らかにする。
- (2) 火災後の再使用時の地震による鋼管柱材の挙動（火災後再使用時の地震時挙動）を明らかにする。

3. 研究の方法

火災時高温状態の冷間ロール成形角形鋼管柱の局部座屈を伴う圧縮挙動特性を明らかにする目的で、3種類の幅厚比を設定した短柱と柱材の高温時の圧縮実験を行った。

また、火災後の再使用時における冷間ロール成形角形鋼管の局部座屈を伴う圧縮挙動特性を明らかにする目的で、3種類の幅厚比を設定した短柱と柱材の加熱冷却後の常温時圧縮実験を行った。

(1) 試験体

表1に短柱試験体の寸法や材料強度等の諸条件を示す。短柱試験体は100mmサイズの冷間ロール成形角形鋼管で、材長は断面幅の3倍300mmとし平押しの条件で圧縮した。

柱試験体は同じ鋼管で材長760mmの角形鋼管の両端に20mm厚のエンドプレートを溶接して全長800mmとし、試験体が座屈する面内でピン支持となるように、柱試験体の両端に半円形断面のローラーを取り付けた。ピン間距離は800mmである。

(2) 高温圧縮実験の方法

高温時の圧縮実験は、(A)一定温度実験、と(B)一定荷重・漸増温度実験の二種類の実験を行った。

(A)一定温度実験では、実験温度を常温、400, 500, 600, 700℃の5種類設定し、軸ひずみ速度1.0%/分を目標に載荷し、一定温度下での軸荷重・軸変形関係を調べた。

(B)一定荷重・漸増温度実験では、長期許容圧縮荷重の1.4, 1.0, 0.6倍の一定軸荷重を載荷し、電気炉温度を5℃/分の温度速度で上昇させ、高温状態で軸荷重を支持できなくなる挙動（崩壊挙動）を調べた。

表1 鋼管柱試験体の諸条件

D×t (mm)	幅厚比 D/t	幅厚比 ランク	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	基準化 細長比
100x6.0	16.7	FA	379	431	0.29
100x4.5	22.2	FA	397	457	0.29
100x3.2	31.3	FA	378	427	0.28

(3) 加熱冷却後の圧縮実験の方法

試験体は、温度上昇速度5℃/分で700℃まで上昇させ、最高温度700℃を約1時間保持し、その後加熱を中止し徐冷した。圧縮試験方法は、(2)の短柱圧縮試験や柱材の中心圧縮試験と同様の方法で行った。

4. 研究成果

(1) 主な成果

(A) 一定温度実験の結果

図1、図2は(A)一定温度実験により得られた板厚6.0と3.2の短柱と柱材の軸荷重・軸変形関係である。この図の縦軸は軸力を断面積で除した平均応力で、横軸は軸変形を材長で除した平均軸ひずみで表している。また、図中の▼印は各温度での最大荷重位置を、短い縦線は局部座屈が生じて荷重が低下したと判断した時点を表している。

図1（短柱）の板厚6mmの試験体では、ある程度の塑性挙動を経た後、軸ひずみがそれぞれ3%程度で、局部座屈の影響と思われる荷重低下が起こっている。一方、板厚3.2mmの場合は軸ひずみ0.5%程度で最大荷重を示し、局部座屈による急激な荷重低下が起こっている。

図3は短柱試験体の耐力上昇率 $\tau_0 = \sigma_{max} / \sigma_y$ を、図4は同じく短柱試験体のひずみ塑性率 $\mu_0 = \epsilon_{max} / \epsilon_y$ を一般化幅厚比 $\beta = D/t (\epsilon_y)^{1/2}$ を横軸にして表したものである。ただし、 σ_{max} と ϵ_{max} は図1の短い縦線で表した位置の応力とひずみであり、 ϵ_y は実験温度での降伏ひずみである。

図3の耐力上昇率 τ_0 に明確な特徴は見られないが、図4のひずみ塑性率 μ_0 は実験温度に関係なく一般化幅厚比 β の関数として単一のカーブで整理できることが分かる¹⁾。なお、耐力上昇率はひずみ塑性率と従属関係にあるので、短柱の基準カーブから推定することができる。

図2の柱材の軸荷重・軸変形関係のうち、板厚6mmの試験体では、曲げ座屈により最大荷重を経て一旦荷重が下がり始め、軸ひずみがそれぞれ1.5%程度で、それまでと比較的に急な荷重低下が起こっている。これは局部座屈による耐力低下と思われるので、図中に短い縦線で発生位置を示した。

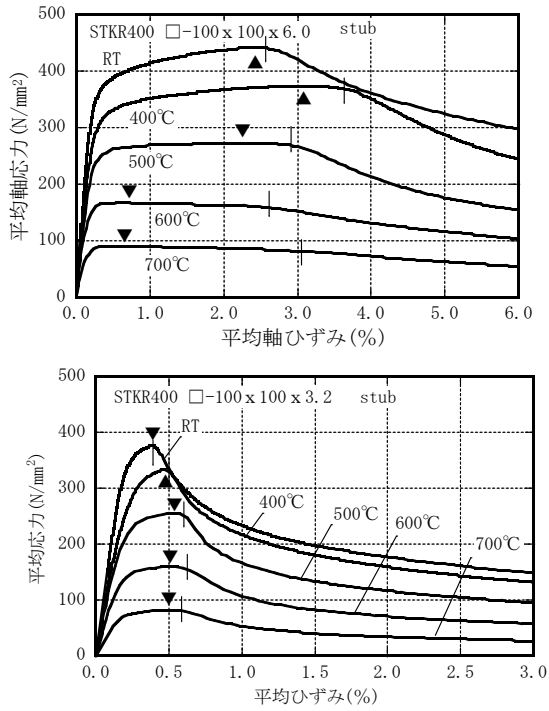


図1 軸力・軸変形関係
(短柱試験体、一定温度実験)

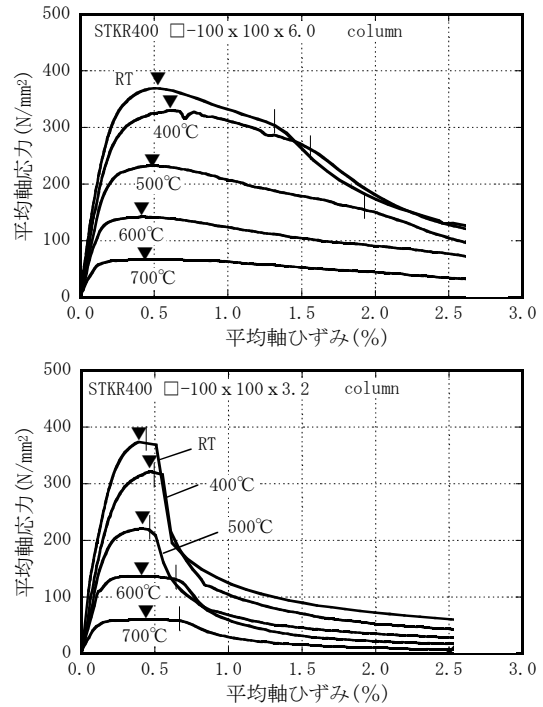


図2 軸力・軸変形関係
(柱試験体、一定温度実験)

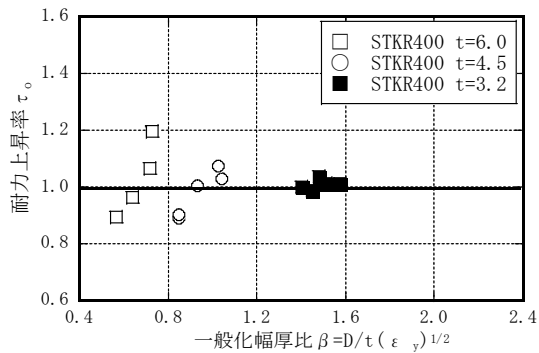


図3 耐力上昇率

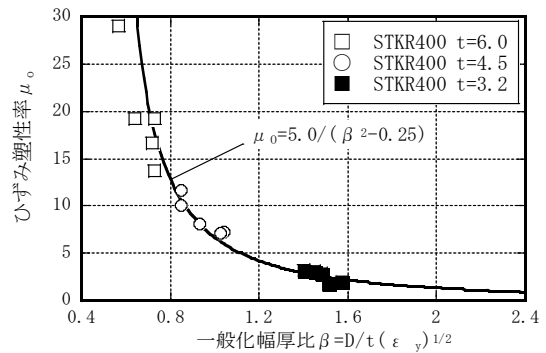


図4 ひずみ塑性率

ただし試験温度 600℃と 700℃における板厚 6mm の試験体の場合は、この挙動は明確ではない。

また、板厚 3.2mm の柱試験体の挙動は、短柱圧縮試験の挙動(図1 下段)と殆ど同じである。従って、曲げ座屈と局部座屈が前後してほぼ同時に起こっていると思われる。

(B)一定荷重・漸増温度実験の結果

図5、図6は短柱と柱材の(A)実験と(B)実験の軸荷重・軸変形関係を平均軸応力・平均軸ひずみ関係で表したものである。ただし、(B)実験の結果は丸印で表されており、軸ひずみからは熱膨張ひずみを取り除かれている。また、(B)実験の結果に示されている▼印は軸荷重を支持できなくなった時点を表

している。

図5、図6の形で表示することで温度や荷重履歴の異なる(A)実験と(B)実験の結果を直接比較することができる。

図5より、(A)実験の局部座屈の影響で荷重が低下し始めるひずみと(B)実験の軸荷重を支持できなくなるひずみはほぼ一致していることが分かる。これは大変貴重な実験結果であり、鋼短柱圧縮挙動においては、温度や荷重履歴が異なる場合でも局部座屈限界ひずみはほぼ等しくなることを示している。

図6の上段より、板厚 6mm の(B)実験では、曲げ座屈による分岐が起こった後の曲げ座屈後挙動中に荷重支持能力が失われており、この時点で局部座屈は生じていないと思われる。また、図は示していないが板厚 4.5mm の

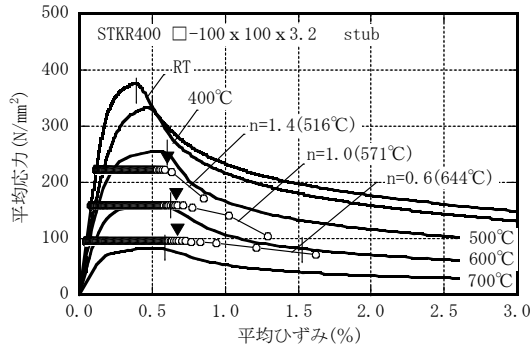
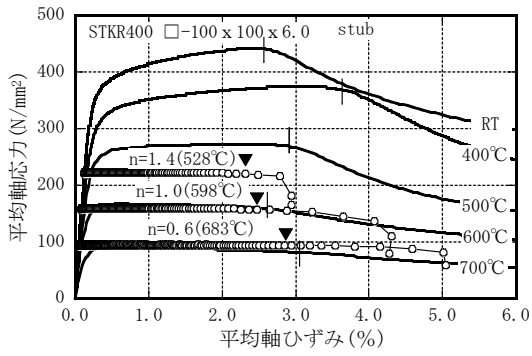


図5 軸力・軸変形関係（一定温度実験、一定荷重・漸増温度実験）

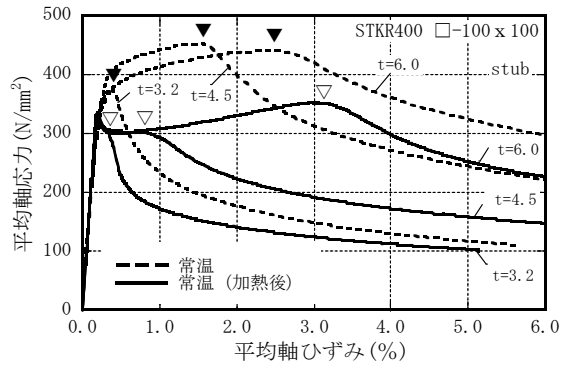


図7 軸力・軸変形関係（加熱後常温時）



n=1.0 t=6.0 t=4.5 t=3.2

写真1 実験後の柱試験体
（一定荷重・漸増温度）

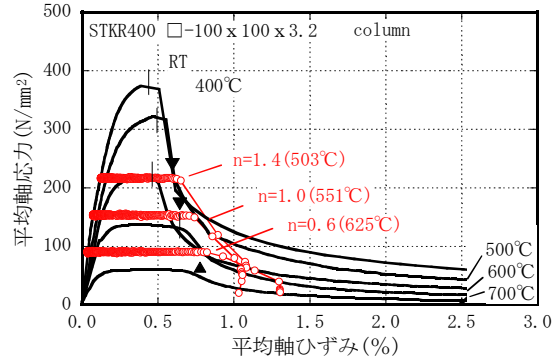
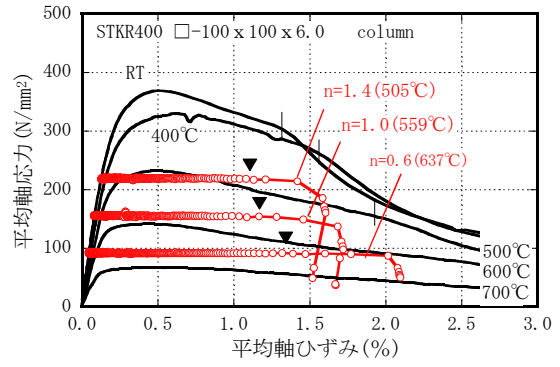


図6 軸力・軸変形関係（一定温度実験、一定荷重・漸増温度実験）

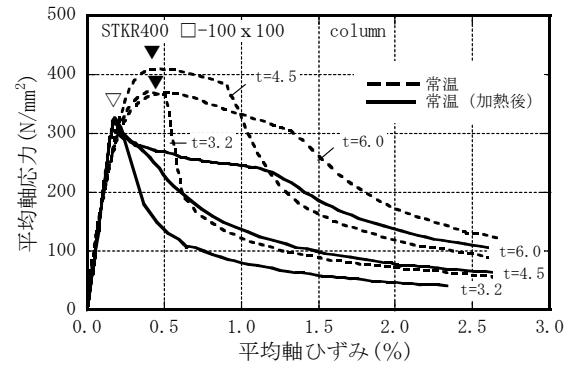


図8 軸力・軸変形関係（加熱後常温時）



T=RT(焼鈍) t=6.0 t=4.5 t=3.2

写真2 実験後の短柱試験体（加熱後常温時）



T=RT (焼鈍) t=6.0 t=4.5 t=3.2

写真3 実験後の短柱試験体 (加熱後常温時)

(B)実験では、まず曲げ座屈による分岐たわみが生じた後、曲げ座屈後挙動中に局部座屈が連成し生じることで荷重支持能力が失われている。

なお、図6下段より板厚3.2mmの(B)実験では、曲げ座屈による分岐たわみが生じた前後に局部座屈が起り荷重支持能力が失われていると考えられる。

写真1は(B)実験の軸力比 $n=1.0$ の場合の実験後の試験体の様子である。全ての試験体に材の湾曲や折れ曲りが見られ、特に板厚4.5mmと3.2mmの試験体には明確な局部座屈波形が残留している。このことは上記の考察を裏付けるものである。

加熱後常温時実験の結果

図7、8は、(A)、(B)実験と同じ角形鋼管で作製した短柱と柱材の加熱後の常温時の軸荷重・軸変形関係である。ただし、加熱後の試験体の結果を実線で、非加熱の試験体の結果を破線で示している。また、図中の▼印は非加熱試験体の、▽印は加熱後常温時の試験体の最大荷重位置を表している。

図7より、短柱の場合、全ての板厚の試験体で加熱冷却されたことにより強度が低下している。また、加熱冷却されたことによりひずみ塑性率が増加するのは板厚6mm($D/t=16.7$)の試験体のみであり、板厚4.5mmと3.2mm($D/t=22.2, 31.3$)の試験体は減少していることが分かる。

なお、加熱冷却された試験体の降伏強さはどの板厚の試験体も殆ど同じ値を示しており、板厚が異なっても元の素材は同じ材料である可能性が高いと考えられる。

図8より、柱材の場合、全ての板厚の試験体で加熱冷却されたことにより強度と粘りの低下が起り、どの板厚の試験体も最大強度は殆ど同じ値を示すことが分かる。

結論

冷間ロール成形角形鋼管材の高温時と加

熱後冷却時の圧縮試験を行い、局部座屈を伴う圧縮挙動に関する多数の実験データを蓄積した。

実験の結果、特に短柱圧縮実験におけるひずみ塑性率は(A)実験と(B)実験で殆ど同じあるとの結果を得た。この結果は局部座屈に関しては(A)実験と(B)実験で差異がないことを意味しており、非常に興味深い。

また、この結果を用いることにより両端単純支持されて中心圧縮荷重を受ける鋼柱の高温時の曲げ座屈後の局部座屈発生を予測することができると考えられるので、極めて重要な結果が得られたと言える。

なお、有限要素法による数値解析法は、材料データを適切に与えることで実験値を大略説明する解析値を与えることが分かった。

(2) 得られた成果の国内外における位置付けとインパクト

本研究で得られた成果は、現在、日本建築学会鋼構造耐火設計小委員会にて公開審議中であり、次期の鋼構造耐火設計指針において冷間成形鋼管柱の耐火設計の部分に採択される見込みである。

なお、地震の少ない欧州の耐火設計研究で取り扱われる冷間成形材は、日本で問題にされるものに比較して大きな幅厚比をもつものが多く、弱塑性域での局部座屈挙動を呈する。従って、本研究のように大きな弾塑性クリープ変形域での局部座屈研究は稀であり、大変貴重な実験資料である。

(3) 今後の展望

直近の課題は、本研究で得られた成果を学術雑誌、特に英文のジャーナルに投稿し公表することである。

また、現在の鋼構造耐火設計指針で取り扱われている鋼材はSS400やSN490等の圧延普通鋼材に限られているので、使用が増加している冷間成形鋼管柱材の設計資料を鋼構造耐火設計指針に盛り込むことも課題である。

更に、本研究で採用した研究手法は、鋼構造柱材の耐火性能を分析する方法として非常に有効であると強く確信した。今後、圧延普通鋼材、鋼強度鋼、耐火鋼、ステンレス鋼等の建築用の各種の鋼材で作製された柱材に対して、同様な研究を展開したいと考えている。

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13件)

- ① 尾崎達也、黒岩裕樹、安部武雄、岡部猛、角形鋼管柱の火災時および火災後の中心圧縮挙動 その1 短柱の高温圧縮試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、

- 73-74, 2012、査読なし
- ② 黒岩裕樹、尾崎達也、安部武雄、岡部猛、角形鋼管柱の火災時および火災後の中心圧縮挙動 その2 両端単純支持の柱材の高温圧縮試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、75-76, 2012、査読なし
 - ③ 岡部猛、尾崎達也、黒岩裕樹、安部武雄、角形鋼管柱の火災時および火災後の中心圧縮挙動 その3 加熱後常温時の圧縮挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、77-78, 2012、査読なし
 - ④ 黒岩裕樹、尾崎達也、安部武雄、岡部猛、中心圧縮荷重を受ける角形鋼管柱の高温弾塑性クリープ挙動、鋼構造年次論文報告集、705-710, 2011 査読あり
 - ⑤ 黒岩裕樹、尾崎達也、安部武雄、岡部猛、中心圧縮荷重を受ける角形鋼管柱の高温弾塑性クリープ挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、83-84, 2011、査読なし
 - ⑥ 尾崎達也、黒岩裕樹、安部武雄、岡部猛、中心圧縮荷重を受けるH形断面鋼柱の高温弾塑性クリープ挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、82-83, 2011、査読なし
 - ⑦ Yuuki Kuroiwa, Takeo Ave and Takeshi Okabe, Compression Behavior of Cold-Formed Steel Box Stub-Columns at High Temperatures, Proc. of 9th Pacific Structural Steel Conference, Vol.2, 1114-1120, 2010、査読あり
 - ⑧ 黒岩裕樹、安部武雄、岡部猛、強制部材角を受ける冷間成形角形鋼管柱材の高温時の圧縮挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、37-38, 2010、査読なし
 - ⑨ 黒岩裕樹、安部武雄、岡部猛、冷間成形角形鋼管短柱の高温時の圧縮挙動、日本建築学会研究報告九州支部第49号、361-364, 2010、査読なし
 - ⑩ Takeshi Okabe, Constitutive model and finite element procedure for the analysis of the inelastic behavior of steel columns in fire, Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, Vol.9, No.1, 85-88, 2009、査読あり
 - ⑪ Takeshi Okabe, Verification on Steel Constitutive Models in Japanese and European Fire Resistant Design Codes, Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, Vol.9, No.1, 89-92, 2009、査読あり
 - ⑫ 岡部猛、安部武雄、冷間成形角形鋼管短柱の高温圧縮挙動に関する研究、日本建築学会大会学術講演会, 215-216, 2009. 8. 28、査読なし
 - ⑬ 岡部猛、安部武雄、冷間成形角形鋼管短柱の高温圧縮挙動の有限要素解析、日本

火災学会研究発表会、310-311, 2009. 5. 20、査読なし

[学会発表] (計10件)

- ① 黒岩裕樹、中心圧縮荷重を受ける角形鋼管柱の高温弾塑性クリープ挙動、鋼構造年次論文シンポジウム、2011年11月18日、東京ファッションタウンTFTビル
- ② 黒岩裕樹、中心圧縮荷重を受ける角形鋼管柱の高温弾塑性クリープ挙動、日本建築学会大会学術講演会、2011年8月28日、早稲田大学
- ③ 尾崎達也、中心圧縮荷重を受けるH形断面鋼柱の高温弾塑性クリープ挙動、日本建築学会大会学術講演会、2011年8月28日、早稲田大学
- ④ Yuuki Kuroiwa, Compression Behavior of Cold-Formed Steel Box Stub-Columns at High Temperatures, Proc. 9th Pacific Structural Steel Conference, 2010年10月20日、北京
- ⑤ 黒岩裕樹、強制部材角を受ける冷間成形角形鋼管柱材の高温時の圧縮挙動、日本建築学会大会学術講演会、2010年9月9日、富山大学
- ⑥ 黒岩裕樹、冷間成形角形鋼管短柱の高温時の圧縮挙動、日本建築学会九州支部研究報告会、2010年3月7日、長崎総合科学大学
- ⑦ Takeshi Okabe, Constitutive model and finite element procedure for the analysis of the inelastic behavior of steel columns in fire, The 4th International Symposium on Temporal Design in Architecture and the Environment, 2009年11月2日、熊本大学
- ⑧ Takeshi Okabe, Verification on Steel Constitutive Models in Japanese and European Fire Resistant Design Codes, The 4th International Symposium on Temporal Design in Architecture and the Environment, 2009年11月2日、熊本大学
- ⑨ 岡部猛、冷間成形角形鋼管短柱の高温圧縮挙動に関する研究、日本建築学会大会学術講演会、2009. 8. 28、東北学院大学(仙台市)
- ⑩ 岡部猛、冷間成形角形鋼管短柱の高温圧縮挙動の有限要素解析、日本火災学会研究発表会、2009. 5. 20、東京理科大学(東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡部 猛 (OKABE TAKESHI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：40117338