

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04429

研究課題名(和文) 火災高温時における建築鋼構造の鋼材ひずみ速度の詳細検討と耐火設計の高度化

研究課題名(英文) Detailed examination on steel strain rate for steel structures subjected to fire and developments of upgrading of fire resistant design

研究代表者

尾崎 文宣(Ozaki, Fuminobu)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：40434039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：研究課題では、今まで詳細な検討・評価されてこなかった「高温時鋼材のひずみ速度」と「鋼部材の火災時終局強度」の関係を解明するために、ひずみ速度に着目した素材引張試験、鋼部材の高温載荷実験と数値解析を実施し、火災時におけるひずみ速度が部材終局耐力と崩壊温度に及ぼす影響を検討した。

ひずみ速度を変化させた高温引張試験、荷重一定・温度漸増と荷重一定・温度漸増の鋼梁の3点曲げ実験、加熱速度と載荷速度が変化した場合の鋼柱の載荷加熱実験と数値解析を行い、加熱速度や荷重比が異なる場合の梁と柱の耐火性能(崩壊温度、荷重支持能力)とひずみ速度の関係明らかにし、耐火設計に用いるべき最適ひずみ速度を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究でひずみ速度の実態が解明されることで、現行高温素材試験の画一的なひずみ速度設定値が持つ工学的意味と問題点を明らかにし、建築耐火向けの新試験法の提案を目指した。高温曲げ強度はひずみ速度が大きな場合(3 σ_r 7%/min.)のひずみ2%時応力の有効降伏強度、高温全体座屈はひずみ速度が小さな場合(0.3%/min.)の0.2%offset耐力で評価可能であることが分かった。通常試験のひずみ速度は全体座屈評価に、一方、試験途中でひずみ速度を上昇させた鋼材強度は高温曲げ強度に対応可能で、現行の素材試験結果を活用し、試験途中でひずみ速度を意図的に上げるという新試験法で、梁と柱の高温強度が評価できる。

研究成果の概要(英文)：The bending strength, flexural buckling strength, and collapse temperature of steel members were examined by steady and transient state tests with various heating and deformation rates to clarify relationships between those fire resistance and steel strain rate. The stress-strain relationships for mild steels at elevated temperatures were obtained by coupon tests under three strain rates. A bending test using a beam specimen was conducted to examine the effects of the deformation rates under steady-state conditions and the heating rates under transient state conditions. Flexural buckling tests were conducted under steady-state and transient-state conditions. It was clarified that the bending strength and collapse temperature are evaluated by the full plastic moment using the effective strength under fast strain rates. The flexural buckling strength and collapse temperature are approximately evaluated by the buckling strength using 0.002-offset yield strength under a slow strain rate.

研究分野：建築鋼構造耐火

キーワード：耐火 鋼構造 ひずみ速度 高温曲げ実験 高温座屈実験

1. 研究開始当初の背景

高温時の鋼材強度は、載荷時のひずみ速度によって大きく変化するという特徴的な傾向が見られる。常温時はひずみ速度 $\dot{\varepsilon} (= d\varepsilon / dt)$ では殆ど耐力変化しないが、600℃では大きく変化する。このことは、部材が高温崩壊するときの変形(ひずみ)速度が異なれば、得られる荷重支持能力(高温終局強度)も大きく異なることを意味する。鋼材の高温ひずみ速度の影響は、高温クリープ現象と同じく比較的良く知られた課題であるものの、現状の建築耐火研究・技術開発においてそれを詳細に検討し、ひずみ速度の影響を統一的に評価できる耐火性能評価法の提案は皆無であった。

2. 研究の目的

火災時におけるひずみ速度変化が部材終局耐力・変形性能に及ぼす影響を検討し、ひずみ速度の視点から鋼材の高温時機械的性質～部材実耐力・実変形性能の関係を新たに明らかにする。得られた成果は、建築耐火実務設計で利用可能な設計強度と各種部材耐力に反映させることで鋼構造耐火設計を高度化し、また部材崩壊までのひずみ速度の実態が解明されることで、JISに規定された現行高温素材試験の画一的なひずみ速度設定値が持つ工学的意味と問題点を明らかにし、建築耐火向け新試験法の開発と提案を目指す。

3. 研究の方法

ひずみ速度に着目した素材引張試験、鋼部材の高温載荷実験と数値解析を実施し、火災時におけるひずみ速度が部材終局耐力と崩壊温度に及ぼす影響を検討した。まず、ひずみ速度を変化させた高温素材試験を実施し、ひずみ速度の影響を考慮した高温時公称応力～公称ひずみ関係式を新たに提案する。さらに矩形断面の小型鋼梁と鋼柱に対し、荷重一定・温度漸増条件下でそれぞれ高温曲げおよび座屈実験を行い、温度上昇速度(加熱速度)の変化が鋼部材耐力に及ぼす影響を検討する。さらに実験で得た鋼部材耐力と各ひずみ速度下の鋼材高温有効降伏耐力との比較を行う。

4. 研究成果

応力ひずみ関係の提案

図1～4に各ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の高温素材引張試験結果(SN400B)を示す。 $\dot{\varepsilon}=0.3\%/min$ の試験を基準にし、高温域でひずみ速度を大きくした。図4に見るように、 $\dot{\varepsilon}=0.3\%/min$ のときには一様伸びが非常に小さくて応力低下する。本研究では文献¹⁾で提案されている高温応力ひずみ関係式を参考にするものの、それは常温～300℃でみられる降伏棚が考慮されていない、後述の基準応力 σ_0 と基準ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ の値が我が国の耐火分野で用いられている慣用値と異なる、真応力真ひずみ関係のため高温域の低ひずみ速度時に見られる低一様伸びとそれ以降の応力低下が考慮できないことがあり、これらを解決するため、温度 T 、公称ひずみ ε 、公称ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ をパラメータとした公称応力～公称ひずみ関係を次式(1)で与えることと

$$\sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_0 \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \quad (1)$$

する。

σ_0 : ひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = 0.003 [1/min]$ の基準応力値

$\dot{\varepsilon}_0$: 基準ひずみ速度(=0.003[1/min])

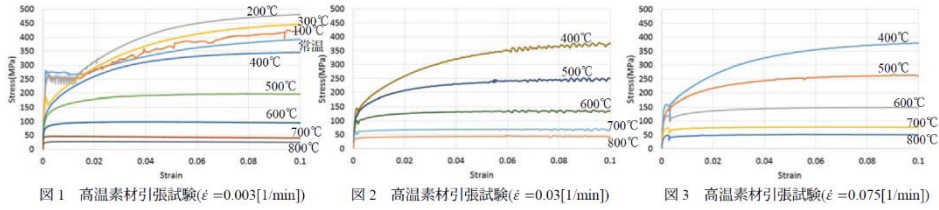


図1 高温素材引張試験($\dot{\epsilon}=0.003[1/min]$) 図2 高温素材引張試験($\dot{\epsilon}=0.03[1/min]$) 図3 高温素材引張試験($\dot{\epsilon}=0.075[1/min]$)

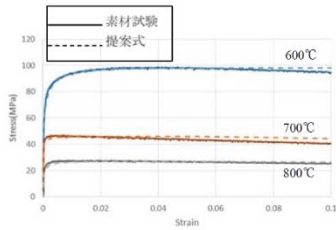


図4 高温素材引張試験の拡大図($\dot{\epsilon}=0.003[1/min]$)

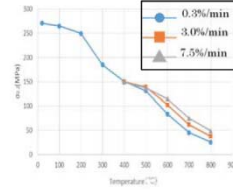


図5 降伏応力(0.2%offset 耐力)

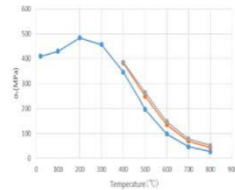


図6 引張強さ

基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ を 0.3%/min に設定することで、基準応力値 σ_0 は今まで数多く蓄積された 0.3%/min の素材引張試験結果から決定できる。また $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_0$ のときは、十分にひずみ速度が小さいことから $\dot{\epsilon}_0$ 時の応力ひずみ関係で与えられるものとする。基準応力 σ_0 は次の(2)~(5)式で与える。

$$\epsilon < \epsilon_y: \sigma_0 = E\epsilon \quad (2)$$

$$\epsilon_y < \epsilon \leq \epsilon_{st}: \sigma_0 = \sigma_y \quad (3)$$

$$\epsilon_{st} < \epsilon \leq \alpha\epsilon_u: \sigma_0 = \sigma_u - (\sigma_u - \sigma_y) \left(\frac{\alpha\epsilon_u^k - \epsilon^k}{\alpha\epsilon_u^k - \epsilon_{st}^k} \right)^n \quad (4)$$

$$\alpha\epsilon_u < \epsilon: \sigma_0 = \sigma_u - (\sigma_{20} - \sigma_u) \left(\frac{\alpha\epsilon_u - \epsilon}{\alpha\epsilon_u - \epsilon_{20}} \right) \quad (5)$$

ここに、

E: ヤング率, σ_y : 降伏応力(0.2%offset 耐力), σ_u : 引張強さ,
 ϵ_y : 降伏ひずみ(σ_y/E), ϵ_{st} : 降伏棚終了ひずみ, ϵ_u : 一様伸び,
 σ_{20} : ひずみ 20%時応力, ϵ_{20} : 20%時ひずみ

k と n: ひずみ硬化に関する係数, α : 一様伸びの温度とひずみ速度に関する係数

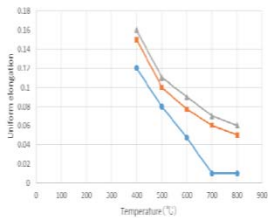


図7 一様伸び

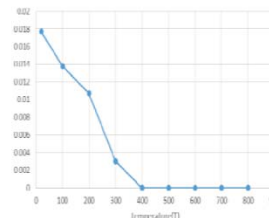


図8 降伏棚終了ひずみ

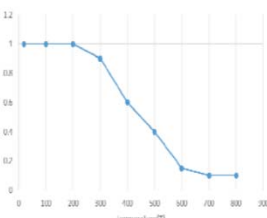


図9 ひずみ硬化に関する係数 k

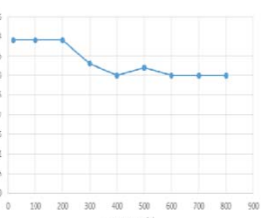


図10 ひずみ硬化に関する係数 n

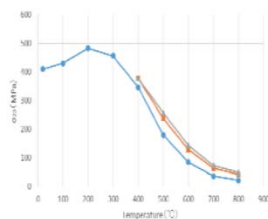


図11 ひずみ 20%時応力

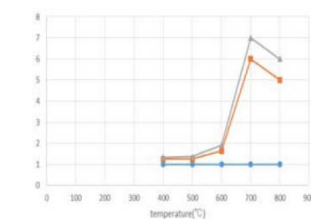


図12 一様伸びの温度とひずみ速度に関する係数 alpha

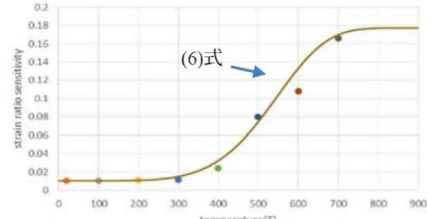


図13 ひずみ速度に関するパラメータ m

図5~12に各パラメータを示し、E, σ_y , σ_u , ϵ_{st} , n, kは 0.3%/min の試験結果を温度 T で、一方 alpha は図12中のデータを温度 T とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で線形補間することで任意温度の基準応力ひずみ関係を得る。なお E は AIJ 鋼構造耐火設計指針³⁾の値を用いた。

(1)式中のひずみ速度敏感性係数 $m^{1,2)}$ は下式で評価する。

$$m = m_0 + m_3 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{T}{m_2}\right)^{m_1}\right) \right] \quad (6)$$

ここに、

$$m_0 = 0.0103, m_1 = 5.5, m_2 = 587, m_3 = 0.169$$

図 13 のプロット印は、(1)式が素材引張試験結果におおよそ一致する場合の m の値であり、一方実線が式(6)であり、図 13 中のプロット印をほぼ通るように設定した。図 4, 14~16 には式(1)による応力~ひずみ関係(破線)を示しており、素材引張試験結果を十分に再現できている。

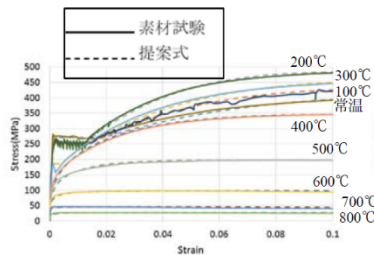


図 14 素材試験と提案式の比較($\dot{\epsilon} = 0.003[1/min]$)

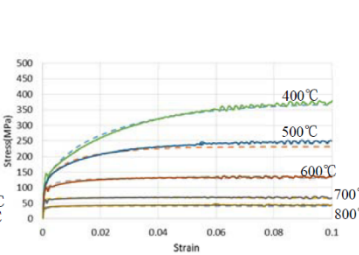


図 15 素材試験と提案式の比較($\dot{\epsilon} = 0.03[1/min]$)

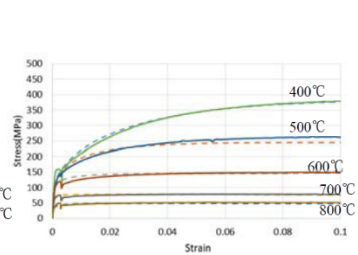


図 16 素材試験と提案式の比較($\dot{\epsilon} = 0.075[1/min]$)

高温曲げ実験と解析

曲げ実験

鋼梁の高温曲げ挙動に対するひずみ速度および加熱速度の影響を検討するために、単純支持の小型鋼梁試験体を用いた荷重一定・温度漸増実験を実施した。試験体には SN400B 材を用い、試験体断面は $d=12mm \times b=18mm$ の弱軸矩形

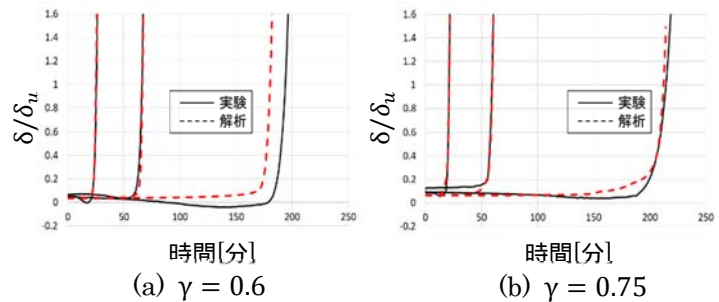


図 17 時間変形関係

断面、試験体長さ L は $150mm$ とし、梁中央部にせん断力の 1 点载荷を行った。実験パラメータとして加熱速度を 35 /分, 10 /分, 3 /分の 3 種類、および一定荷重の荷重比 $\gamma (= M/M_y)$ を $\gamma = 0.3, 0.45, 0.6, 0.75$ の 4 種類とし、合計 12 体の実験を実施した。

曲げ実験結果

図 17 に試験体中央部のたわみ温度履歴 (黒線) を、試験体中央部のたわみ時間履歴 (黒線) の一例を示す。本研究では、たわみが限界たわみ $\delta_u (= (2L)^2 / (400d))^3$ に達した時点の温度を崩壊温度 T_u とする。またひずみ速度の影響を考慮した本課題で開発した解析⁴⁾の数値解析結果も示している。解析モデルの鋼梁(要素分割数は 50)に対して、実験で計測された载荷速度および加熱速度を用いることで、実験と同一条件下の鋼梁の高温弾塑性挙動を得た。図に見るように、実験と解析結果は概ね一致していることがわかる。すなわち数値解析モデルの妥当性が確認できる。

高温座屈実験

座屈実験条件

鋼梁試験体と同一鋼板を用いた両端ピン支持の矩形断面の鋼柱試験体を作成し、荷重一定・温度漸増の高温座屈実験を実施した。試験体長さ L が $121mm$ (細長比 $\lambda = 35$) と $242mm$ ($\lambda = 70$) の 2 種類とした。実験パラメータとして、加熱速度を 14 /分, 3 /分の 2 種類、および作用柱軸力は $P = \gamma P_y$ (P_y : 常温降伏荷重、 γ :

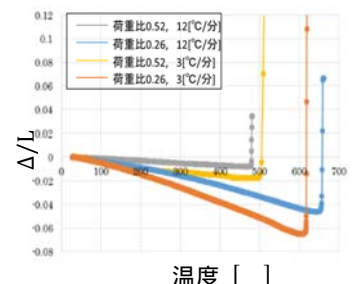


図 18 温度-材軸変形ひずみ関係

荷重比)で与え、細長比 $\lambda = 35$ に対しては $\gamma = 0.29, 0.52$ 、細長比 $\lambda = 70$ に対しては $\gamma = 0.26, 0.52$ とした。合計 8 体の試験を実施した。

実験結果

図 18 に温度-材軸変形ひずみ (材軸変形 Δ /材長 L) 関係を示す。図に見るように、同一荷重比下の崩壊温度を比べると、加熱速度の変化によって崩壊温度(座屈温度)に差が表れており、高温座屈挙動に対しては加熱速度の変化が崩壊温度にも影響を及ぼしていることがわかる。

耐力及び崩壊温度と強度低下率の比較

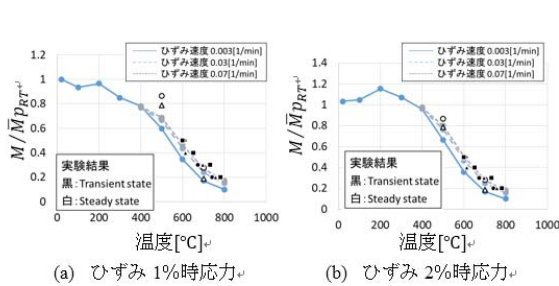


図 19 鋼梁の曲げ耐力評価

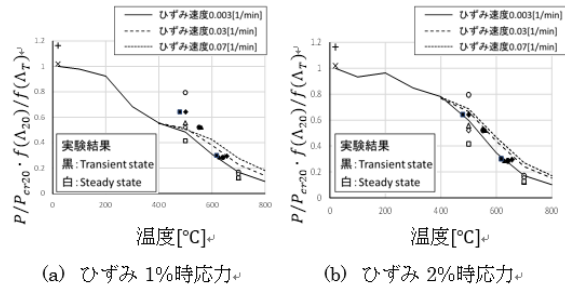


図 20 鋼柱の座屈耐力評価

図 19 には、本実験の曲げ実験の崩壊温度(黒プロット印)の他、温度一定・荷重漸増下において載荷速度を変化させた場合の鋼梁の高温曲げ試験結果³⁾の比較を示す。図に見るように、実験で得た様々な加熱および載荷速度下の梁崩壊温度と最大曲げ耐力(黒色)は、耐火設計で用いられるひずみ速度 0.003[1/min]のひずみ 1%時耐力がその下限に、一方ひずみ速度 0.07[1/min]のひずみ 2%時耐力がその上限に近いことがわかる。図 20 には、素材試験の 0.2% offset 耐力及びひずみ 1%時応力と柱の座屈実験結果(温度一定・荷重漸増実験結果⁵⁾も含む)との比較を示す。図 22 縦軸は、座屈荷重 P を文献⁶⁾で提案された常温座屈耐力式(1)で無次元化した値である。図に見るように、様々な加熱および載荷速度下の高温座屈実験結果は、ひずみ速度が 0.003[1/min]の場合の 0.2% offset 耐力に近いことがわかる。

すなわち、高温曲げ強度はひずみ速度が大きな場合(3or7%/min.)のひずみ 2%時耐力の有効降伏強度、高温全体座屈はひずみ速度が小さな場合(0.3%/min.)の 0.2% offset 耐力で評価可能であることが分かった。通常試験のひずみ速度は全体座屈評価に、一方、試験途中でひずみ速度を上昇させた鋼材強度は高温曲げ強度に対応可能で、現行の素材試験結果を活用し、試験途中にひずみ速度を意図的に上げるという新試験法で、梁と柱の高温強度が評価できると考えられる。

参考文献

- 1) Willian Luecke, Stephen W. Banovic, J. David McColskey : High-temperature tensile constitutive data and models for structural steels in fire, Technical Note (NIST TN) – 1714, November 30, 2011
- 2) アルバレスゴンザレスクラマリア, 岡部猛 : ひずみ速度制御引張試験のデータによる乗算型の粘性モデルの同定 構造用鋼材の高温時の時間依存性挙動に関する研究その 1, 日本建築学会構造論文集, No.734, pp.605-612, 2017年6月
- 3) 日本建築学会 : 鋼構造耐火設計指針, 2017年6月
- 4) 梅村巧, 尾崎文宣 : 鋼材ひずみ速度が建築鋼部材の耐火性能に及ぼす効果, 日本建築学会構造工学論文集, Vol66B, 2020.3
- 5) 岡田陽奈乃, 梅村巧, 尾崎文宣 : 温度一定荷重漸増下において載荷速度を変化させた場合の鋼部材高温耐力評価
- 6) 日本建築学会 : 鋼構造塑性設計指針, 丸善出版株式会社, 2017.2

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 岡田陽奈乃 梅村巧 尾崎文宣	4. 巻 -
2. 論文標題 温度一定・荷重漸増下において載荷速度を変化させた 場合の鋼部材高温耐力評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本火災学会研究発表会梗概集	6. 最初と最後の頁 119-120
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 尾崎文宣、梅村巧	4. 巻 防火
2. 論文標題 荷重一定・温度漸増下において加熱速度が鋼部材の崩壊温度に及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）	6. 最初と最後の頁 95-96
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Fuminobu OZAKI and Takumi Umemura	4. 巻 -
2. 論文標題 Studies on bending strength and collapse temperature of a steel beam considering effects of steel strain rate and heating rate at elevated temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PROCEEDINGS of The 11th International Conference on Structures in Fire(Sif2020)	6. 最初と最後の頁 639-649
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 梅村巧, 尾崎文宣	4. 巻 Vol. 66B
2. 論文標題 鋼材ひずみ速度が建築鋼部材の耐火性能に及ぼす効果 - ひずみ速度を考慮した鋼材高温時応力～ひずみ関係の定式化と片持梁の面内数値解析 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 Takumi Umemura, Fuminobu OZAKI	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects that change in strain ratio causes to structural fire resistance of a steel member: Formulation of stress-strain relationships considering effects of strain ratio and verification based on in-plane analyses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PROCEEDINGS Steel Structures with Resilience and Sustainability	6. 最初と最後の頁 -
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 梅村巧, 尾崎文宣	4. 巻 防火
2. 論文標題 鋼材ひずみ速度の影響を考慮した高温時応力ひずみ関係式の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)	6. 最初と最後の頁 1-2
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 Fuminobu OZAKI, Takumi Umemura	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects that change in strain ratio causes to structural fire resistance of a steel member: Formulation of stress-strain relationships considering effects of strain ratio and verification based on in-plane analyses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications	6. 最初と最後の頁 1932-1936
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 尾崎文宣	4. 巻 防火
2. 論文標題 高温時における鋼材のひずみ速度変化が鋼部材の耐火性能に及ぼす影響 - 片持梁の面内解析による検討 -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北)	6. 最初と最後の頁 293-294
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Takumi Umemura, Fuminobu OZAKI
2. 発表標題 Effects that change in strain ratio causes to structural fire resistance of a steel member: Formulation of stress-strain relationships considering effects of strain ratio and verification based on in-plane analyses
3. 学会等名 PSSC'19 TOKYO The 12th Pacific Structural Steel Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅村巧, 尾崎文宣
2. 発表標題 鋼材ひずみ速度の影響を考慮した高温時応力ひずみ関係式の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fuminobu OZAKI, Takumi Umemura
2. 発表標題 Effects that change in strain ratio causes to structural fire resistance of a steel member: Formulation of stress-strain relationships considering effects of strain ratio and verification based on in-plane analyses
3. 学会等名 The 7th international conference on structural engineering, mechanics and computation
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎文宣
2. 発表標題 高温時における鋼材のひずみ速度変化が鋼部材の耐火性能に及ぼす影響 - 片持梁の面内解析による検討 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾崎文宣、梅村巧
2. 発表標題 荷重一定・温度漸増下において加熱速度が鋼部材の崩壊温度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fuminobu OZAKI and Takumi Umemura
2. 発表標題 udies on bending strength and collapse temperature of a steel beam considering effects of steel strain rate and heating rate at elevated temperatures
3. 学会等名 The 11th International Conference on Structures in Fire(Sif2020)
4. 発表年 2020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

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		
ドイツ	ルール大学ボーフム校		