

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560677

研究課題名(和文)高力ボルト接合部の火災高温時および冷却過程における耐力・変形・破断性状

研究課題名(英文)Resistance, deformation behaviour and failure of high strength bolted connections in fire

研究代表者

平島 岳夫(Hirashima, Takeo)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20334170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、火災時における高力ボルト摩擦接合継手の耐力・変形・破断挙動を実験によって明らかにした。継手の高温時最大引張耐力を温度漸増実験から得て、7.5%/分のひずみ速度下での高温引張試験で得られた引張強さをを用いてその耐力を評価できることを示した。継手の変形・破断挙動については、ボルトせん断破断型の場合に比べて、はしぬけ破断型(ボルト径に対して板厚が小さな継手)の方が火災時とその冷却過程での破断が生じにくいことを定量的に示した。また上記の実験に基づき、火災時における継手の構成要素モデルを構築し、そのモデルを解析プログラムに組み込み、鋼骨組の火災時挙動に継手が与える影響を検討できるようになった。

研究成果の概要(英文)：Resistance, deformation behaviour and failure of splice connections with high strength friction grip bolts exposed to fire were clarified by this experimental study. Maximum load from high temperature transient tests of the connection agreed with or slightly exceeded the calculated results based on the material test results under the strain rate of 7.5%/min. The ductility of the joints was larger for the thin-plate specimen (tear-out failure type) than for the thick-plate specimen (bolt in shear failure type) in case of not only the heating phase but also the cooling phase in fire. On the basis of these test results, the analytical model of the connection was proposed with the component-based method and the model was adopted in the program of structural fire behaviour for steel frames. This enables the analysis on the behaviour and robustness of steel frames on the connection behaviour in case of the fire.

研究分野：建築耐火構造

キーワード：鋼構造 耐火設計 高力ボルト摩擦接合継手 最大引張耐力 はしぬけ破断 ボルトせん断破断 火災
後冷却過程 構成要素モデル

1. 研究開始当初の背景

高力ボルト摩擦接合継手(以下、継手)は、鋼材を現場でつなぐための代表的な接合方法である。高力ボルトは一般鋼材に比べて高温時の強度低下が著しく、火災時に鋼骨組の熱膨張変形によって、継手が破断する恐れがある。これより我が国の建築法規は、継手の破断に対する上限温度として、鋼構造物の火災時鋼材温度を 550 に制限している。

一方、筆者らは、鋼材温度が 500 を超える領域で高力ボルトの延性が増大して継手が容易に破断しないこと、また保有耐力接合設計された梁継手では火災時に破断が生じ難いことを示してきた。継手の仕様や荷重の大きさによらず一律に鋼材温度の制限値が定められている現状は、保守的な状況にある。この状況からの進展を図るには、継手の高温時耐力のみに着眼するのではなく、その高温時変形挙動を踏まえた構造解析モデルを構築し、鋼骨組のロバスト性を解析的に検討する必要がある。しかし、継手の高温時変形挙動に関するデータは未だ少ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、火災時における高力ボルト摩擦接合継手の耐力・変形・破断挙動を実験によって明らかにし、その挙動を数値解析プログラムに組み込むための構造解析モデルを構築し、鋼骨組内部にある継手の火災時およびその冷却過程における破断条件を明らかにすることである。

本研究の特徴は、継手の火災時挙動に関する既往の研究で不足していた、以下の3項目に着眼したことである。

- ・高温時における継手のはしめ破断挙動
- ・火災時に継手が破断するときの速度
- ・加熱後冷却過程における破断挙動

3. 研究の方法

前述した目的を達成するため、高力ボルト摩擦接合継手の高温引張実験を実施し、継手の仕様とその耐力・変形・破断挙動に与える影響を明らかにした。また、この実験に使用する高力ボルト鋼材と母材に関して JIS G 0567 に準拠した高温引張試験を実施し、耐力計算および変形挙動に関わる数値解析に必要な高温時力学的特性を得た。これらの実験結果に有限要素解析による検討を加え、火災加熱を受ける継手の構造解析モデルを構築した。以下、より具体的に説明する。

(1) 高温時における変形・破断挙動の把握

継手の高温時変形・破断挙動は、一定高温下における継手の高温引張実験(以下、一定温度実験)によって把握した。一定温度実験の実験条件は、継手の板厚・はしあき・ボルトの締付け・鋼材温度とした。高力ボルト(F10T)の呼び径は 20mm または 22mm とし、母材(SN400B または SN490B)の板厚は 9mm および 19 mm とした。母材板厚 9mm の継手試

験体ではしめ破断挙動を、母材板厚 19mm の継手試験体でボルト破断挙動を検討した。継手のはしめ破断挙動に影響を及ぼすはしあきは、ボルト呼び径の 1.5 倍・2.5 倍・3.5 倍の 3 種類とした。鋼材温度は、常温・400・500・600・700 の 5 種類とした。一定温度実験において継手の温度は、目標温度の ± 5 以内で制御された。継手を含む 600mm の区間を相対変位測定区間とし、負荷速度は 0.6mm/分を目標とした。一定温度実験から得られる情報は、各温度における荷重～変位関係および実験後の変形実測値である。以上、計 30 体の一定温度実験を実施した。

(2) 高温時耐力の把握と評価

高温時における継手の最大引張耐力は、従来、前述の一定温度実験より得られてきた。しかし、本研究の途中で一定温度実験より得られる継手の最大引張耐力が負荷速度に大きく依存することが分かり、一定荷重下かつ温度漸増下における継手の高温引張実験(以下、温度漸増実験)にて継手の高温時耐力を検討する方針に変更した。実火災時は温度漸増実験での状態に近く、温度漸増実験による崩壊温度から継手の最大引張耐力を得た。

温度漸増実験の実験条件は、継手の板厚・はしあき・一定荷重値・加熱速度とした。加熱前に与える一定荷重は、一定温度実験で得られた最大荷重または高温素材試験より得た引張強度を用いた最大引張耐力とした。加熱速度は、5 /分および 10 /分の 2 種類とした。板厚とはしあきに関する実験条件は、一定温度実験と同様とした。以上、計 18 体の温度漸増実験を実施した。

継手の火災時耐力評価方法を検討するため、高温素材試験から高力ボルト鋼材と母材の高温引張強度を得て、その高温引張強度を日本建築学会・鋼構造接合部指針の耐力計算式に適用し、継手の実験結果と比較した。

(3) 加熱後冷却過程における破断挙動の把握

加熱後冷却過程における破断挙動は、加熱冷却後における継手の引張実験および加熱後冷却過程における継手の変位拘束実験によって検討した。実験条件は加熱履歴最高温度(500 と 700)および母材板厚(9mm と 19mm)とし、計 6 体の実験を実施した。

(4) 継手の構造解析モデルの構築

火災加熱を受ける継手の構造解析モデルには、component-based model (以下、構成要素モデルと称す)に基づくバネモデルを用いた。その構成要素モデルの剛性に関わる高温時定数は一定温度実験により、その耐力に関わる値は温度漸増実験により与えた。また構成要素モデルの検討と共に、汎用ソフト Abaqus による有限要素解析での検討も実施した。

実験より得られた構成要素モデルを、千葉大学で開発している火災応答フレーム解析プログラムに組み込んだ。

4. 研究成果

本研究の成果は、3種類の実験（一定温度実験、温度漸増実験、加熱冷却実験）の結果およびその分析から得られたものが主である。以下、前節「研究の方法」の項目に対応させ、それらの成果を具体的に述べる。

(1) 高温時における変形・破断挙動の把握

継手の一定温度実験より得られた各温度の荷重～変位関係（F10T-M20 ボルト，はしあき $e=50\text{mm}$ ）から、板厚の影響を検討した結果を図1に示す。黒線で示す板厚 $t=19\text{mm}$ と赤線で示す板厚 $t=9\text{mm}$ では大きく異なる結果となった。板厚 19mm の実験では常温～700 まで全てボルト破断であった。最大荷重時の変位は小さく、常温と400 では最大荷重に到達した後、小さな変位で破断した。500 と700 では最大荷重以降に直線的に低下し、ボルト径以上の変位に到達するまで破断はしなかった。板厚 9mm の実験では、常温・400 でははしめけ破断、500 と700 ではボルト孔の拡大を伴いながらも最終的にはボルト破断となった。母材板よりも高力ボルトの高温時強度残存率が小さいことから、板厚が小さく常温時ではボルト破断になり得ない場合でも、高温時ではボルト破断へ変わり得ることを示した。はしめけ破断した400 の例を図2の(a)に、ボルト破断した500 の例を図2の(b)に示す。板厚が小さい場合、ボルト孔側部の支圧変形が卓越し、最大荷重時の変位は大きくなった。また、これより継手が破断するときの変位も大きくなり、継手の変形能力が増大した。

母材板厚 9mm の一定温度実験から得た荷重～変形関係より、継手のはしあきがその変形挙動に及ぼす影響を図3示す。はしめけ破断になる場合、温度に関わらず、破断時の変位がはしあきより若干小さな値となった。

ボルト締付けの有無は最大耐力と破断時変形には影響を及ぼさず、常温に比べて500 では剛性への影響も小さかった。

(2) 高温時耐力の把握と評価

本研究では、ボルト1本あたりの継手の高温時耐力が下式で評価できることを示した。

$$P_u = \min(P_{u1}, P_{u2}, P_{u3}) \quad ()$$

$$P_{u1} = 0.6m A_{bs} \sigma_{bu} \quad \dots \text{ボルト破断} \quad ()$$

$$P_{u2} = A_n \sigma_u \quad \dots \text{ボルト孔欠損断面破断} \quad ()$$

$$P_{u3} = et \sigma_u \quad \dots \text{はしめけ破断} \quad ()$$

ここで、 σ_{bu} ：高力ボルトの引張強さ、 σ_u ：鋼材の引張強さ、 A_{bs} ：高力ボルト軸部の公称断面積、 A_n ：ボルト孔欠損を差し引いた母材の正味断面積、 m ：せん断断面数、 e ：はしあき、 t ：母材板厚である。上記の式()～式()は、日本建築学会・接合部設計指針に基づく式である。これらの式に JIS G 0567 の高温引張試験から得られる引張強さ（ひずみ速度 7.5% /分程度の負荷方法で得られた値）を代入することで継手の高温時最大引張耐力を評価できることを明らかにした。

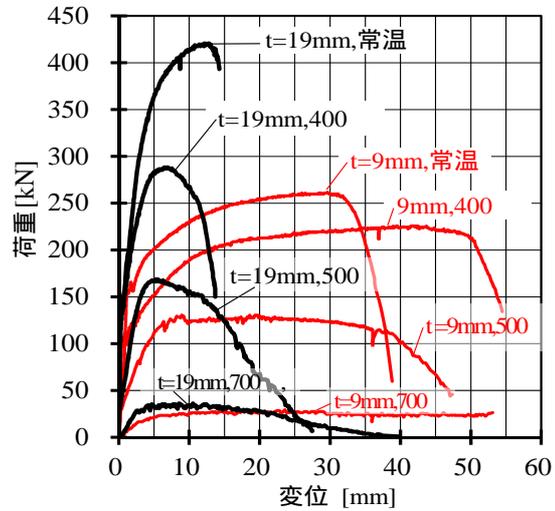
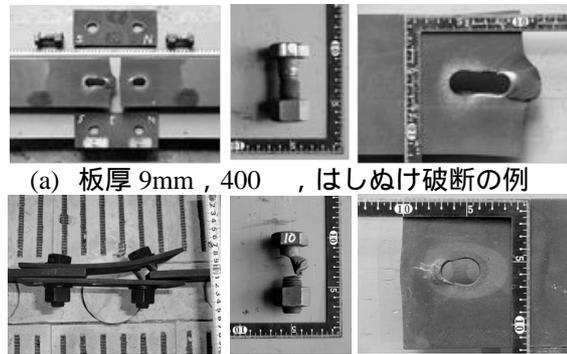


図1 継手の変形挙動に及ぼす板厚の影響



(a) 板厚 9mm , 400 , はしめけ破断の例

(b) 板厚 9mm , 500 , ボルト破断の例

図2 継手の破断状況

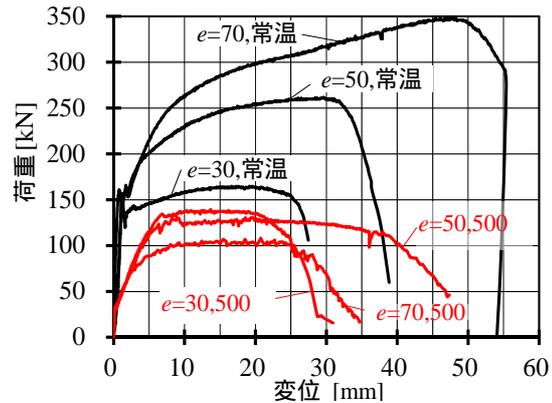


図3 継手の変形挙動に及ぼすはしあきの影響

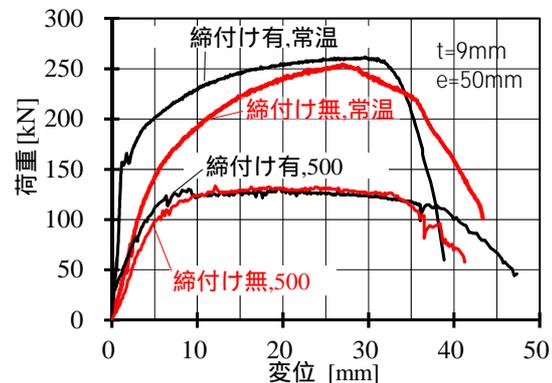


図4 継手の変形挙動に及ぼすボルト締付けの影響

図5の(a)と(b)に示すように、一定温度実験(ST)の結果は耐力計算値を下回るものがあるが、温度漸増実験(TR)の場合は全ての結果が耐力計算値を上回った。また、はしめけ破断とボルト破断の両者の場合において、耐力計算値は実験結果と概ね一致した。温度漸増実験において、高温時の耐力が上昇する理由は、図6に示すように破断時に継手部の速度が急増し、塑性変形が増大する部位が硬化するためである。また別の温度漸増実験結果から、鋼材温度上昇速度がその限界温度に及ぼす影響が小さいことも明らかにした。

(3) 加熱後冷却過程における破断挙動の把握

鋼構造の小梁端部のウェブ継手においては、火災加熱中よりも、加熱冷却過程の収縮時に破断が生じる可能性が指摘されている。本研究では、この状況を模擬した実験から、継手の仕様加熱後冷却過程における破断挙動に及ぼす影響を検討した。その結果を図7に示す。両者の結果とも、500℃まで加熱した状態で一般的な継手のクリアランス10mm程度の変位を与え、その後試験体端部の変位を拘束したまま放冷した場合の挙動を示したものである。板厚9mmの場合、放冷して常温に戻ったときの荷重が224kNで、その後再度載荷したが変形25mmまで破断しなかった。一方、板厚19mmの場合、放冷過程の161℃に至った際、ボルトがせん断破壊した。以上、ボルト径に対して母材板厚が小さく2面せん断の場合は、火災冷却時でもその収縮変形が継手の支圧変形として吸収されて破断しにくくなることを明らかにした。

また、加熱冷却後における継手の引張実験および素材試験結果から、その引張強さを前記の式(1)～式(4)に代入して加熱冷却後の継手の最大引張耐力を評価できること、はしめけ破断となる場合で継手の変形能力が増大することを明らかにした。

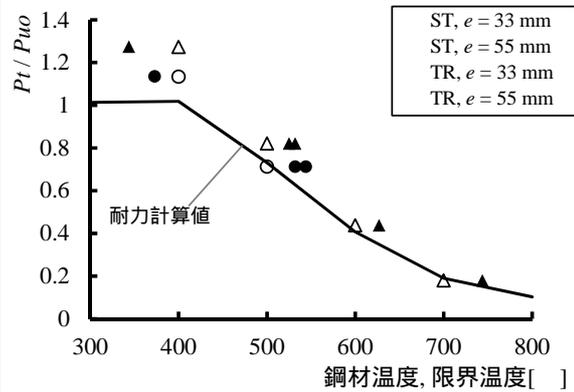
(4) 継手の構造解析モデルの構築

継手の構成要素モデルの概要を図8に示す。構成要素モデルの基本形は、ボルトと母材板の寸法・強度から、剛性・耐力・変形性状を表した直列のバネモデルである。梁継手の場合は、図8に示す基本形のバネ要素が、上下フランジおよびウェブ位置にそれぞれ配置され、梁要素の線材と線材を繋ぐ節点に集約される。本研究では梁継手の基本的な構成要素となる図8の数値解析モデルを実験結果から与えた。母材の力 F_{beam} と変位 δ_{beam} に関する主要な式を以下に示す。

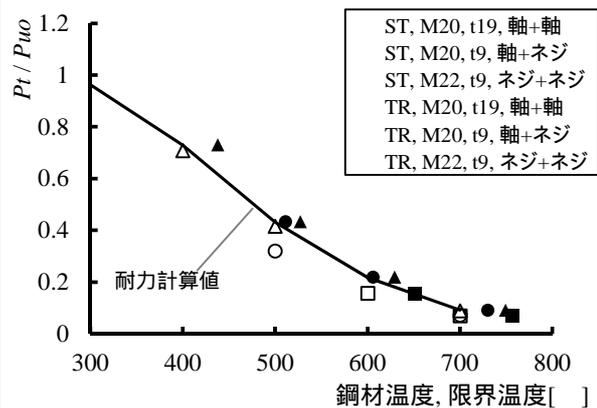
$$F_{beam} = P_{u3} \left\{ \frac{\psi\Delta}{(1+\Delta^{0.5})^2} - \phi\Delta \right\} \quad ()$$

$$\Delta = \frac{\delta_{beam}}{P_{u3}} \cdot \frac{1}{1/K_{br} + 1/K_b + 1/K_v} \quad ()$$

$$K_{br} = \Omega \cdot t \cdot f_y (d/25.8)^{0.8} \quad ()$$



(a) はしめけ破断の場合



(b) ボルト破断の場合

図5 継手の高温時最大引張耐力

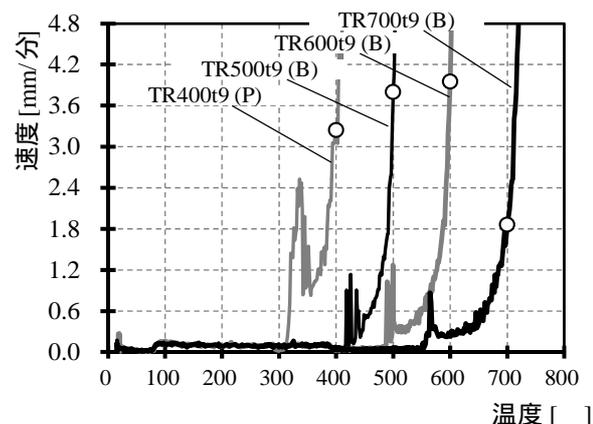


図6 継手の速度～温度関係 (板厚9mm)

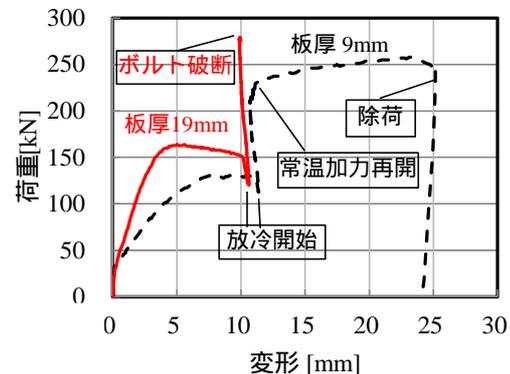


図7 冷却過程での継手の応力と破断性状 (はしあき e=50mm)

上式の記号に関する説明は割愛するが、支圧剛性 K_{br} の曲線適合係数 は一定温度実験に基づいて修正された値である。式()で与えるはしめけ耐力 P_{t3} は温度漸増実験でその適合性が確認されたものである。ボルトに関する力と変位の関係は、Hongxia ら(2009 年)による構成要素モデルの式で概ね評価できることを示した。継手の実験と構成要素モデル(CB モデル)と有限要素解析(FEA)の比較例として、はしめけ破断した場合の結果(板厚 9mm ,はしあき 30mm ,500)を図 9 の(a)に、ボルト破断した場合の結果(板厚 19mm , 500)を図 9 の(b)に示す。ソリッド要素を用いた有限要素解析では、はしめけ破断した継手の変形の様子を模擬することはできたが、ボルト破断した継手の最大荷重以降の挙動を対応させるのは困難であった。以上のように実験結果に対応させた継手の構成要素モデルを、火災応答フレーム解析プログラムに組み込んだ。これより、鋼構造骨組の火災時挙動に継手が与える影響を検討できるようになった。

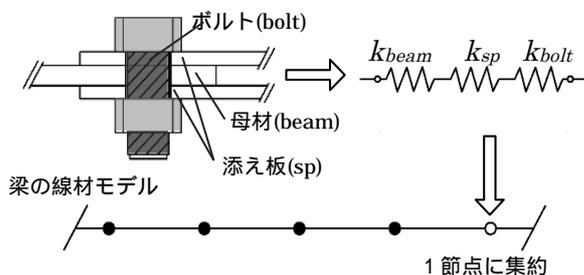
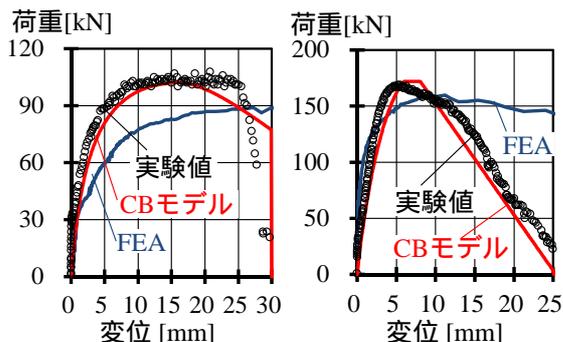


図 8 継手の構成要素モデルの概要



(a) はしめけ破断の例 (b) ボルト破断の例
図 9 継手の実験値との対応

(5) 研究成果のまとめ

本研究の成果を以下にまとめる。
継手が火災時に破断する際は速度が増大して塑性変形部位が硬化する。これより負荷方法 7.5%/分のひずみ速度下の高温素材試験で得られる引張強さを用いて、継手の最大引張耐力を評価できることを示した。継手の変形挙動は、はしめけ破断とボルト破断の場合で大きく異なった。はしめけ破断型(ボルト径に対して板厚が薄い継手)の方が、火災時とその冷却過程での破断が生じにくいことを定量的に示した。

構成要素モデルを用いて継手部における力と変位の関係を数式化し、このモデルを火災応答フレーム解析プログラムに組み込み、鋼構造骨組の火災時挙動に継手が与える影響を検討できるようにした。

(6) 国内外における位置づけとインパクト

本研究の成果は、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、2017 年刊行予定の鋼構造耐火設計指針に反映される見込みである。国外でも高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重～変位関係に関するデータは極めて少なく、本研究で示した継手の構成要素モデルは汎用性の高い数値解析モデルに成り得る。

(7) 今後の課題と展望

直近の課題は、鋼骨組内部にある継手の火災時・冷却過程における破断条件を、継手の構成要素モデルを組み込んだ火災応答解析によって明らかにすることである。この結果から、火災時における鋼骨組のロバスト性の考察も可能となる。鋼構造の耐火設計における「継手の破断に対する上限温度 550 」を撤廃し、合理的な耐火設計方法を考案するための基礎資料が概ね整ったといえる。

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 17 件)

安藤秀平、ロバートドゥウィプトゥラ、平島岳夫、火災時に高力ボルト摩擦接合梁継手が破断する時の速度に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)、査読無(2015)

ロバートドゥウィプトゥラ、安藤秀平、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重-変形関係(その 4 数値解析モデル)、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)、査読無(2015)

安藤秀平、平島岳夫、火災時における高力ボルト摩擦接合継手の最大引張耐力、日本建築学会構造系論文集、査読有、第 80 巻、第 712 号、961-970(2015)

Robert Dwiputra、安藤秀平、平島岳夫、高温時における高力ボルト摩擦接合継手の数値解析モデル、日本火災学会、平成 27 年度研究発表会概要集、査読無、136-137(2015)

安藤秀平、Robert Dwiputra、平島岳夫、火災時における高力ボルト摩擦接合継手の最大引張耐力、日本火災学会、平成 27 年度研究発表会概要集、査読無、134-135(2015)

平島岳夫、江寄佑、安藤秀平、高温時における高力ボルト摩擦接合継手の変形形状、日本建築学会構造系論文集、査読有、第 79 巻、第 698 号、541-548(2014)

平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手を有

する鋼梁の耐火性、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火 OS)、査読無、223-226 (2014)

安藤秀平、平島岳夫、松本匠、渡邊健太、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重 - 変形関係 (その 3 はしめけ破断型継手の挙動)、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)、査読無、223-226(2014)

T. Hirashima, Y. Esaki, S. Ando, Load-deformation behaviour of bolted double-splice friction joints at elevated temperature, Proceedings of 8th international Conference on Structures in fire, 査読有, 819-826 (2014)

安藤秀平、江寄佑、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の火災冷却後における荷重 - 変形関係および冷却過程での挙動、日本火災学会、平成 26 年度研究発表会概要集、査読無、126-127 (2014)

Takeo Hirashima, The Critical Temperature of Steel Beams with Moment-Resisting Beam-Splice Connections, Proceedings of the 7th International Symposium on Steel Structures, 査読無、250-251 (2013)

安藤秀平、江寄佑、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重 - 変形関係 (その 1 継手の高温引張実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)、査読無、59-60 (2013)

江寄佑、安藤秀平、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重 - 変形関係 (その 2 Component-based model)、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)、査読無、61-62 (2013)

T. Hirashima, Mariati Taib, Bernice Wong, Ian Burgess, The behaviour of steel beams with moment-resisting beam-splice connections in fire, Proceedings of 7th international Conference on Structures in fire, 査読有, 125-134 (2012)

Mariati Taib, Ian Burgess, T. Hirashima, A component-based model for moment-resisting beam-splice connections with high-strength bolts at elevated temperature, Proceedings of 7th international Conference on Structures in fire, 査読有, 135-144 (2012)

(他 2 件)

[学会発表] (計 15 件)

安藤秀平、ロバートドゥウィプトラ、平島岳夫、火災時に高力ボルト摩擦接合梁継手が破断する時の速度に関する考察、日本建築学会大会、2015 年 9 月 4 日、東海大学、神奈川県平塚市

ロバートドゥウィプトラ、安藤秀平、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重-変形関係 (その 4 数値解析モデル)、日本建築学会大会、2015 年 9 月 4 日、東海大学、神奈川県平塚市
安藤秀平、Robert Dwiputra、平島岳夫、火災時における高力ボルト摩擦接合継手の最大引張耐力、日本火災学会研究発表

会、2015 年 5 月 16 日、山形大学、山形県米沢市

Robert Dwiputra、安藤秀平、平島岳夫、高温時における高力ボルト摩擦接合継手の数値解析モデル、日本火災学会研究発表会、2015 年 5 月 16 日、山形大学、山形県米沢市

平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手を有する鋼梁の耐火性、日本建築学会大会 OS、2014 年 9 月 12 日、神戸大学、神戸市
安藤秀平、平島岳夫、松本匠、渡邊健太、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重 - 変形関係 (その 3 はしめけ破断型継手の挙動)、日本建築学会大会、2014 年 9 月 12 日、神戸大学、神戸市

T. Hirashima, Y. Esaki, S. Ando, Load-deformation behaviour of bolted double-splice friction joints at elevated temperature, 8th international Conference on Structures in fire, 2014 年 6 月 12 日、Tongji University, China

安藤秀平、江寄佑、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の火災冷却後における荷重 - 変形関係および冷却過程での挙動、日本火災学会研究発表会、2014 年 5 月 27 日、東京理科大学、東京都新宿区

Takeo Hirashima, The Critical Temperature of Steel Beams with Moment-Resisting Beam-Splice Connections, 7th International Symposium on Steel Structures, 2013 年 11 月 8 日、Jeju, Korea

安藤秀平、江寄佑、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重 - 変形関係 (その 1 継手の高温引張実験)、日本建築学会大会、2013 年 8 月 30 日、北海道大学、札幌市

江寄佑、安藤秀平、平島岳夫、高力ボルト摩擦接合継手の高温時における荷重 - 変形関係 (その 2 Component-based model)、日本建築学会大会、2013 年 8 月 30 日、北海道大学、札幌市

T. Hirashima, Mariati Taib, Bernice Wong, Ian Burgess, The behaviour of steel beams with moment-resisting beam-splice connections in fire, 7th international Conference on Structures in fire, 2012 年 6 月 6 日、ETH Zurich, Switzerland

Mariati Taib, Ian Burgess, T. Hirashima, A component-based model for moment-resisting beam-splice connections with high-strength bolts at elevated temperature, 7th international Conference on Structures in fire, 2012 年 6 月 6 日、ETH Zurich, Switzerland

(他 2 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平島 岳夫 (HIRASHIMA TAKEO)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20334170