

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420554

研究課題名(和文) 高強度鋼(H-SA700A)用の複半月充填支圧ボルト接合法の基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Bearing Bolt Joint using Half-Moon Shaped Bolts for High-Strength Steel Member

研究代表者

玉井 宏章(TAMAI, Hiroyuki)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：80207224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：府省連携プロジェクトとしてH-SA700Aという高強度鋼が開発され、震度7でも弾性挙動して無損傷となりうる高強度鋼乾式組立梁柱材が研究代表者も含め多くの研究者により開発された。建築構造材として利用するには部材を接合する技術が必要となるが、高強度のため現状使われている接合法ではその部分が大掛かりとなりすぎて実用に耐えられない。本研究は、この高強度鋼建築構造材の接合技術として、まったく新しい「充填支圧ボルト接合法」を提案し、この接合法に関して載荷試験、有限要素解析を行って、新しい接合法の特性を示し、この種の高強度鋼建築部材を将来の高度化建築物へ適用可能とする基礎的技術を提供した。

研究成果の概要(英文)：High-Strength Steel Grade H-SA700A was developed by Steel Maker as Japanese Government Project. Many Researchers proposed the Weld-free Built-up Frame system made by the High-strength Steel which is kept an elastic resistance under severe earthquake ground motion. It means no damaged building structure after the severe earthquake. To use the High-Strength Steel member for building structure, it is required the effective joint technology. To solve the problem, I present the shear joint using half-moon-shaped bearing bolt as an effective fastener between high-strength steel members. Experimental studies were carried out to clarify the maximum strength of the bolted joint and the elastic stiffness of beam flange joint. Also, materially and geometrically non-linear finite element analyses were carried out to show the fundamental mechanical properties of the joint with half-moon shaped bearing bolts.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：鋼構造 支圧ボルト接合 自己充填 高強度鋼 制振主架構

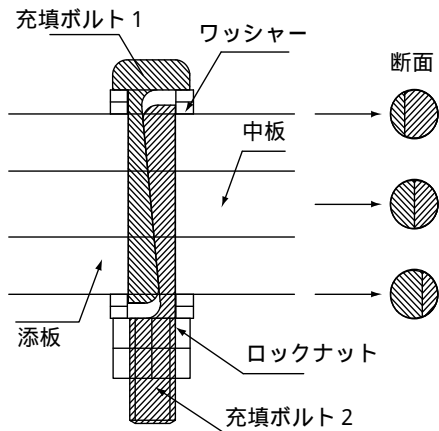
1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、建築構造用高強度鋼 H-SA700A を用いた乾式組立材を示し、その力学特性を明らかにした。これは溶接の熱影響を極力排除し、熟練工を必要としない摩擦ボルト接合で材を組立てており、リサイクル、リユース性も考慮した弾性架構用の柱材である。

建築構造用高強度鋼 H-SA700A は普通鋼 SN400 の約 2 倍の耐力を有しているため、この材を用いて建築空間を構成するためには摩擦ボルト接合を用いる場合、仕口、継手には単純に従来の 2 倍のボルト本数が必要となり、接合部分が大きくなるとともにボルト本数も多くなりすぎるので、高強度鋼の普及の障害となることが予想された。

研究代表者はこの問題を解決する 1 手法として新しい複半月充填ボルト接合法を提案している。この接合法の模式図を図 1 に、試作ボルトを図 2 に示す。この接合方法は、半月形断面のボルトが、ボルト孔を荷重方向にギャップをなくすように充填するので、複半月テーパ充填ボルトと呼ぶこととした。

4 枚のワッシャーはボルトの締め付け力によって軸方向に弾性変形で縮んでいる。繰り返し荷重に対して、ボルトねじとナットには緩みは生じず、ずれが生じてボルト孔が拡張されても、ワッシャーの弾性変形が復元され、充填ボルト 2 が入り込むため、せん断方向にボルトの緩みは生じない。この自己充填機能を複半月充填ボルトは有している。複半月テーパ充填ボルト接合は、リベット接合と同等程度(0.2mm 以内)にギャップは解消されるため、従来の高力ボルト支圧接合の問題点を解決でき、かつ、ボルト鋼種を 14T とした高強度性能をボルトせん断耐力として発揮できるので、板厚が厚く、高強度の鋼材に対して効率のよい接合が期待できる。弾性接合を設計の基準に考えると、摩擦ボルト接合の約半分が高強度鋼の接合が可能となると予想された。



(a) ボルトセット(側面図) (b) 充填状況(断面図)

図 1 複半月テーパ充填ボルトの模式図

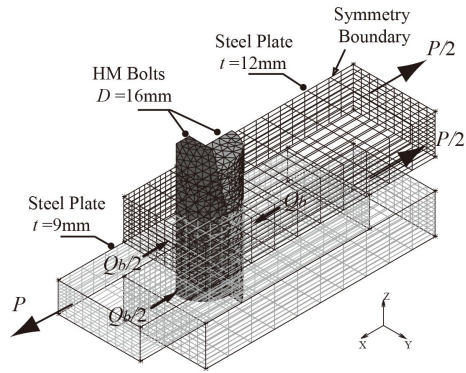


図 2 継手の構成要素と充填ボルトの半領域要素分割

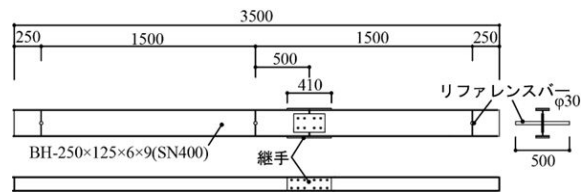


図 3 梁継手試験体

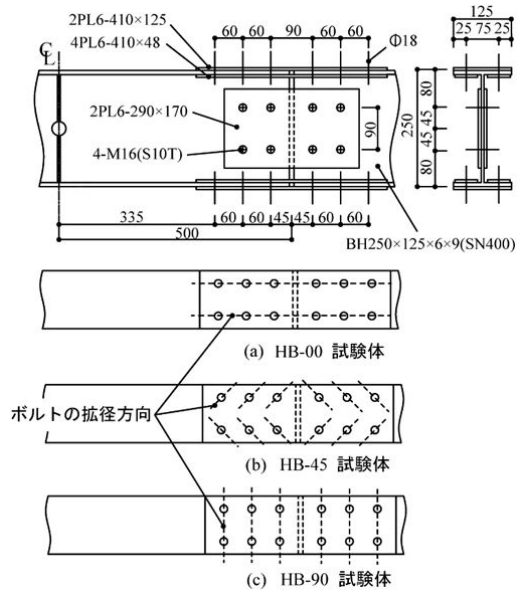


図 4 梁継手詳細

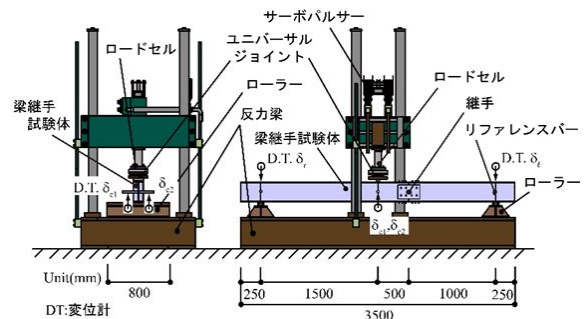


図 5 荷装置

本研究課題は、高強度鋼建築構造物を実用化可能とするための新しい充填支圧ボルト接合の開発に関する基礎的研究である。

2. 研究の目的

上述の背景から、提案する複半月充填支圧ボルト接合を高強度鋼部材に適用するために以下の3項目を研究目的とした。

(1) 支圧破壊解明では、ボルト、有孔鋼板の崩壊荷重から終局荷重を求め、高強度鋼板(H-SA700A)と14T超強度充填ボルトとで接合部試験体を製作して、端あき距離を実験変数とする充填支圧ボルト接合部の引張試験を行って、最大耐力、変形状、接合効率を示す。剛体ボルトと有孔鋼板との接触問題、大塑性歪、複合非線形有限要素法を用いて解析を行う。高強度鋼H-SA700Aの真応力-真塑性歪をモデル化し、高強度鋼(H-SA700A)の弾性限支圧耐力評価式を提示する。

(2) 充填機構検証では、テーパ面摩擦係数、ワッシャーばね定数、テーパ角との関係式、充填拡径メカニズムを定式化する。ボルト軸方向力導入時の挙動実験を実験的に検討しワッシャーを複数枚利用した、ばね定数調整機能を示した。接合部試験体を用いた片側繰返し引張試験を行って、充填ボルトの拡径効果を検証する。テーパ面でのすべりが生じる場合の解析と充填ボルト拡径による形状変化、鋼板の部分塑性化に伴う形状変化を考慮して接合部の剛性評価を行う。所要のテーパ面摩擦係数とスリップバックしないためにテーパ角を示す。

(3) 梁継手への適用では、弾性解析によって梁継手剛性評価式を、塑性解析によって継手耐力評価式を誘導する。充填ボルト接合梁継手について正負交番漸増振幅繰返し载荷試験を行って、添板位置が接合剛性に及ぼす影響を示し、継手の終局状況を確認する。片側圧縮定振幅繰返し载荷試験を行って、短期荷重時のボルトの充填機構を確認する。ボルトのせん断破壊で終局とならず、変形性能を評価・重視した接合設計法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 支圧破壊解明

接合部の降伏荷重は、剛性の低下率から、最大耐力は、ボルトが破損するか中板、添板が大変形して引きちぎられるかで決められる。その挙動を究明するために、大変形大歪問題用の鋼素材応力-歪関係モデル、アドバンスングフロント法及びテトメッシュ法によるリゾーニング手法、接解、離間問題の解法、摩擦のモデル化、体積ロッキング回避のための要素選定を行なった。

挙動を追跡するためには、解析対象の対称性を考慮して図2の半領域について解がなく

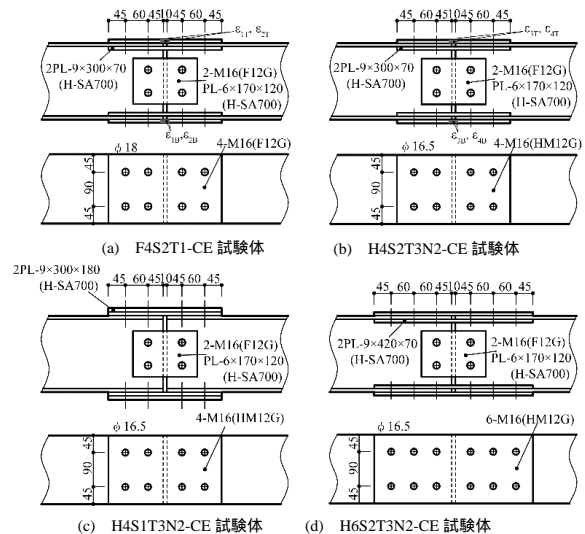


図6 試験体の継手詳細

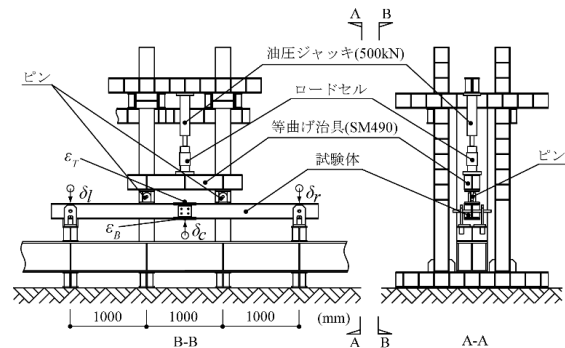


図7 载荷装置図と計測計画

てはならない2つの部分の充填ボルト1組、中板1枚と添板2枚の半領域が対象となる。

2枚の添板は弾性変形のみが生じ、中板と充填ボルトが強塑性状態となる。これらの構成要素の変形と荷重の関係を力が釣り合うように、1度に解くと立体なので多大の計算時間を要することとなる。

これを以下の仮定を導入して計算を大幅に縮減した。

添板は十分に耐力があり塑性化しない。

ボルトの接触断面は円形を保ち、その接触面の変形は小さい。

ボルト中心から、中板100mm位置までの相対変位はボルトせん断と中板のボルト接触位置からの伸びの和として表せる。

中板の端抜け挙動は、板厚の塑性化に伴う盛り上がりの影響を受けない。

大規模な問題を2つの領域に分けて、個別に分散して解き、継手の複合非線形の問題を簡単に解く手法を用いた。

(2) 充填機構検証

本システムの充填機構を検証するため、複半月充填ボルト接合について、自己充填機能の有効性とボルトを複数本用いた場合の剛性確

保の程度を継手の仕様を変化させた試験体を製作し、載荷試験を行ってその性状を把握した。載荷実験の概要を以下に示す。

図3に試験体を示す。試験体は、図4に示す継手様式を変化させたものを用意した。

上下フランジに添板(PL6-410 × 125, SN400) 2枚を介し、二面せん断状態で充填ボルト(F10T, M16)を上下各12本、計24本を用いて支圧接合したHM試験体、HM試験体と同様で、ボルト接合形式のみを摩擦接合(S10T, M16)としたFB試験体及び、支圧接合(14T, M16)としたNB試験体を用意した。HB試験体はボルトの拡径方向を0度:HB-00, 45度:HB-45, 90度:HB-90と変化させた試験体を用意した。載荷装置を図5に示す。

上部クロスヘッドから、試験体中央に圧縮荷重 P を作用させ片振り荷重振幅繰返し載荷を行った。加力プログラムは荷重制御で、継手位置の鋼梁のフランジ縁応力を応力振幅比 $R (= \sigma_{min} / \sigma_{max})$ を0.1, 降伏応力に対する最大応力振幅の比 σ_{max} / σ_y を0.3とし、振動数は1Hzで5000回繰返し載荷した。なお、フランジ縁応力は、継手部の曲げ剛性は鋼梁と同等とした計算値より求めた。

(3) 梁継手への適用

適用性を検討するため、充填ボルトを用いた梁継手試験体について正負交番繰返し載荷実験を行った。

図6に試験体の継手詳細をそれぞれ示す。試験体は、全長3500mm、支点間3000mmの梁(BH-200×180×6×9, H-SA700A)に、中央部に継手を設けたものである。シリーズでは接合形式、シリーズではボルト本数、シリーズではせん断断面数、シリーズではボルトの初期導入張力、シリーズでは皿ばね座金の位置、シリーズでは皿ばね座金の枚数、シリーズでは応力波形を変化させる。また、シリーズについては終局まで載荷を行い、弾塑性域での挙動と終局状態を確認する。試験体はフランジの接合方法を変化させたもので、ウェブはすべて添板(PL6-170 × 120, H-SA700A)を介して、高力ボルト(12GSHTB)4本で摩擦接合している。充填ボルトは高力ボルト(12GSHTB)を用いて作成したものを使用する。図7に載荷装置を示す。試験体の両端をピンとローラーで支持し、等曲げ治具(BH-200×200×6×9, SM490)とロードセルを介し中央部より左右に500mmの点で漸増繰返し載荷を行う。加力プログラムは、シリーズ ~ は荷重制御で圧縮と引張を1サイクルとし、正負交番漸増繰返し載荷として、20kN, 40kN, 60kN, 80kN, 100kNの荷重振幅について各2サイクルずつ載荷する。シリーズは弾塑性範囲で加力することとし、変位制御で圧縮と引張を1サイクルとし、正負交番漸増繰返し載荷として5mm, 10mm, 15mm,

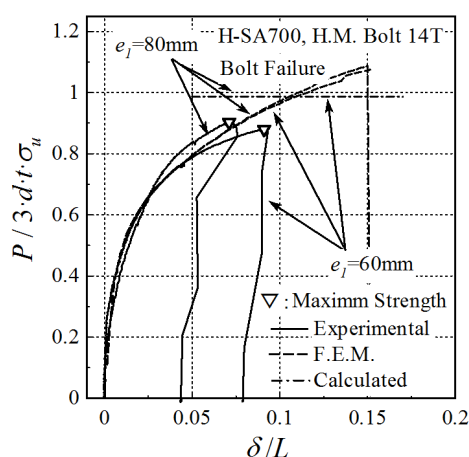
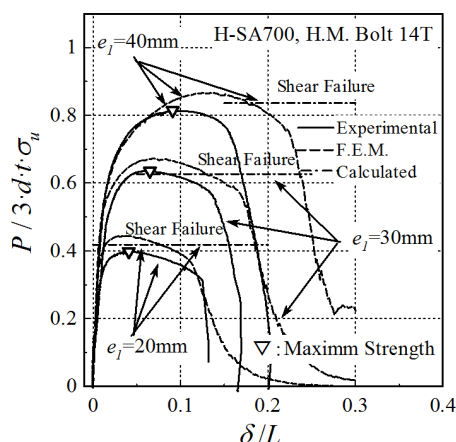


図8 充填ボルトとH-SA700中板の場合の実験値、解析値及び評価値

20mm, 25mm, 30mmの荷重振幅について各2サイクルずつ載荷し、その後終局まで圧縮単調載荷を行った。

4. 研究成果

(1) 支圧破壊解明

支圧破壊解明のために行った、解析、実験結果を図8に示す。図8には、支圧耐力評価値で無次元化した継手の荷重 $P/3dt_u$ と計測区間で無次元化した継手の変形 δ/L との関係を充填ボルトとH-SA700A中板の場合について示す。提案する複半月充填ボルト接合継手について中板をSM490, H-SA700Aとして引張試験を行うとともに、接触問題、複合非線形問題として有限要素法解析で行ってその耐荷性状比較、検討した。得られた知見は以下のように要約できる。

分散型解析によりボルトの折損性状、最大耐力値については、若干誤差があるもののSM490, H-SA700A中板のせん断力については工学上十分な精度の荷重-変形問題を追跡できる。

支圧耐力評価値までは、充填ボルト軸部は十分な耐力を有している。中板の孔に大きな変形が生じボルトに曲げ変形すると最小断面部が引張破断する。

継手の添板に大きな変形が生じない場合、H-SA700A 中板を充填ボルト接合すると支圧耐力評価値までの高い接合耐力を保持しつつ、かつ初期剛性を十分確保することができる。

(2) 充填機構検証

充填機構の検証を行うための梁継手試験体の片振り繰返し載荷試験結果を図9, 10に示す。図9は、継手が完全な場合の梁の剛性 K_s に対する梁継手試験体の剛性と繰返し載荷回数 N との関係 (FB: 摩擦接合, HM: 充填支圧接合, NB: 支圧接合) について示す。図10にはHM試験体についてボルトの拡径方向違いによる梁継手試験体の剛性 K_s と繰返し載荷回数 N との関係 (HB-00: 拡径方向0度, HB-45: 拡径方向45度, HB-90: 拡径方向90度) を示す。

これらの結果から以下のことがわかる。

充填ボルト最小断面部の降伏耐力の半分程度の張力で摩擦接合と同程度の十分な剛性を発揮する。

1Hz, 5000回程度の繰返し載荷によっても、充填ボルトは、スリップバックしない。

普通ボルト支圧接合試験体(NB試験体)は継手が完全な場合の剛性 K_s と比べ初期から62%程度の低い剛性を示し載荷の繰返しに伴って剛性は漸減する。

支圧接合したNB試験体とHM試験体の剛性差から、本接合法によれば、充填ボルトの自己充填機能が良好に作動し、継手の剛性を維持・確保する。

梁の長手方向に対する充填ボルトの拡径方向を45°と大きく変化させても(HB-45)、正しく設置した場合(HB-00)の継手剛性と比べ剛性の低下は10%ほどである。従って、施工の際、ボルトの拡径方向の多少のずれは気にする必要はなく、高い施工性が期待できる。

(3) 梁継手への適用

梁継手への適用性を見るための実験結果を図11に示す。

図11にはシリーズのH4S2T3N2-CP試験体について P/P_a w/l 関係を示す。図11(a)には漸増振幅サイクルから、9, 10サイクル目を抜き出したものを、図11(b)には最終圧縮サイクルについて示す。

得られた知見を以下に示す。

充填ボルト接合試験体では、通常の支圧接合で見られるスリップ特性は見られず、正負交番の繰返し荷重に対し、良好に自己充填機能を発揮する。

充填ボルト試験体の降伏耐力と最大耐力は提案する設計式により良好に予測できる。

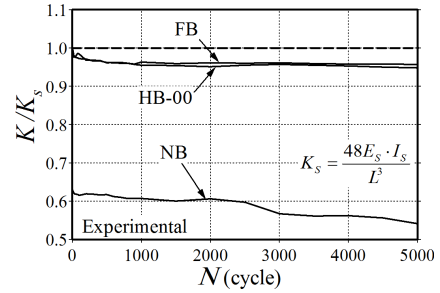


図9 無次元化梁継手剛性-繰返し回数関係 (接合方法変化)

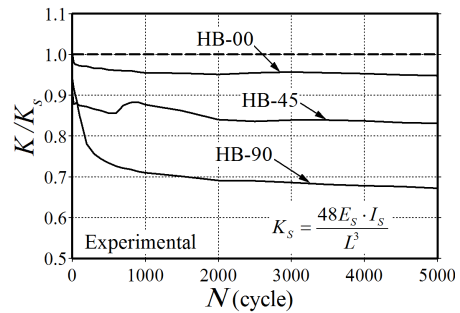
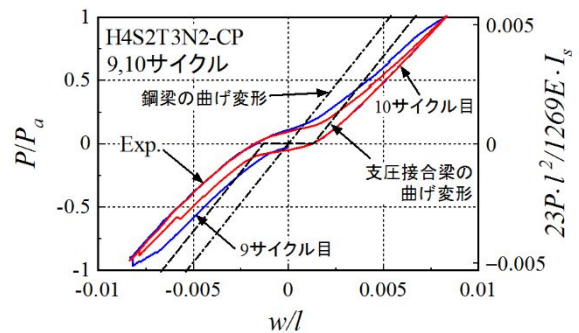
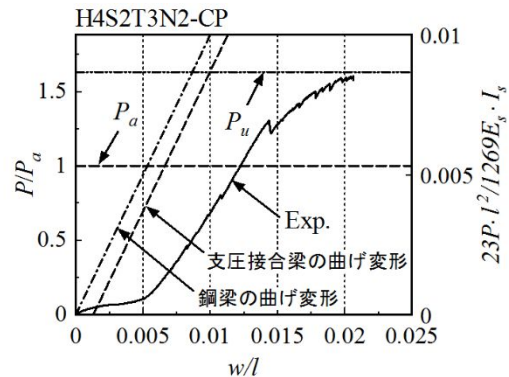


図10 無次元化荷重-繰返し回数関係 (ボルト拡径方向変化)



(a) 漸増振幅サイクル



(b) 最終圧縮サイクル

図11 無次元化荷重 無次元化中央たわみ関係 (H4S2T3N2-CP 試験体)

充填ボルト接合梁継手の剛性は、ボルトの初期導入張力量に大きな影響はない。

今後、フランジ板厚を適正に設計した梁継手について載荷試験を行って、終局設計条件の満足度を調査する必要がある。

本研究で、充填支圧接合に関する実験データが蓄積され、支圧接合部の弾性限支圧耐力や、様々な継手形式ディテールとその剛性確保技術の方向性が示されれば、高強度鋼 H-SA700A 用の支圧ボルト接合は、普通鋼に対する摩擦ボルトと同等のボルト本数で済む技術であることが認識されて H-SA700A 鋼建築構造物の設計が容易となる。また、鋼製ダンパーと高強度鋼材による建築構造物の安全性・経済性がより認知されると考えられる。そのため同じコストで充実した社会資本が得られるので、本研究課題の社会的貢献度は非常に高いと考えられる。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文](計7件)

玉井宏章, 中島康太, 桐山尚大, 山西央朗, 高松隆夫, 高強度鋼用の複半月充填ボルトのせん断降伏強度について, 鋼構造年次論文報告集, (査読付), 第24巻, pp. 755-762, 2016.11.

Hiroyuki Tamai, Kazuhiko Kasai, Deformation Capacity of Steel Shear Panel Damper and its Reflection to AIJ Requirements, Journal of Disaster Research, (査読付), No.1, Vol.11, pp.125-135, 2016.2.

玉井宏章, 桐山尚大, 山下祥平, 山西央朗, 高松隆夫, 複半月充填ボルト支圧接合部の降伏強度について, 鋼構造年次論文報告集, (査読付), 第23巻, pp.272-277, 2015.11.

玉井宏章, 桐山尚大, 中島康太, 山西央朗, 高松隆夫, 皿ばね座金付き複半月充填ボルト支圧接合梁継手の繰返し載荷試験, 鋼構造年次論文報告集, (査読付), 第23巻, pp.278-284, 2015.11.

玉井宏章, 桐山尚大, 複半月充填ボルト支圧接合法について, 日本建築学会構造系論文集(査読付), 第80巻, 第709号, pp.511-518, 2015.3.

[学会発表](計12件)

森田真理乃, 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 中島康太, 複半月充填支圧ボルト接合梁継手の曲げ剛性と耐力 その1 検討概要, 日本建築学会九州支部研究報告, 第56号, 発表場所(長崎大学・長崎県・長崎市) 2017.3.5.

桐山尚大, 玉井宏章, 中島康太, 山西央朗, 高松隆夫, 高強度鋼用の複半月充填ボルトのせん断降伏強度について その1 実験及び解析概要, No.22558, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分冊, (福岡大学・福岡県・福岡市) 2016.8.24.

中島康太, 玉井宏章, 桐山尚大, 山下祥平, 村木仁哉, 複半月充填ボルトのせん断降伏強度の検討 その1 実験及び解析概要, 日本建築学会九州支部研究報告, 第55号, (琉球大学・沖縄県・那覇市) 2016.3.6.

山下祥平, 玉井宏章, 桐山尚大, 中島康太, 山西央朗, 高松隆夫, 高強度鋼用の複半月充填ボルト支圧接合継手の繰返し載荷試験 その1 試験概要 No.22508, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分冊, (東海大学・神奈川県・平塚市) 2015.9.4.

山下祥平, 玉井宏章, 桐山尚大, 中島康太, 有限要素法解析による支圧降伏耐力式の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 第54号, (熊本県立大学・熊本県・熊本市), 2015.3.1.

[その他]

ホームページ等

<http://tmarc2.st.nagasaki-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

玉井 宏章 (TAMAI, Hiroyuki)
長崎大学・工学研究科・教授
研究者番号: 80207224