

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02288

研究課題名（和文）拡大孔・長孔を適用した高力ボルト摩擦接合による高汎用性を可能とする設計施工法

研究課題名（英文）Versatile design and construction method using high-strength bolt friction joints applying enlarged and slotted holes

研究代表者

桑原 進（Kawahara, Susumu）

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10243172

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の最終目的は、拡大孔・スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合部を一般的に実用可能にすることである。そのために（1）同摩擦接合部のすべり耐力や最大耐力を実験ならびにFEM解析により検討し、孔形状・寸法・方向、すべり耐力と降伏耐力の比、摩擦面処理などの変数が及ぼす影響を明らかにした。（2）梁継手に同接合部を適用した場合の力学性状を載荷実験で明らかにし、骨組解析に使用する力学モデルを提案した。（3）前述の力学モデルを適用した骨組解析より地震時の最大応答を検討した。（4）高力ボルト導入張力に及ぼす締付け施工法の影響とリラクゼーション性状を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の構造物の巨大化に伴い、鋼構造物の不可避な製作誤差・施工誤差を施工現場で解消するため、高力ボルト摩擦接合部の拡大孔、スロット孔の潜在的な需要が高まっている。この要求に答えることが本研究の最終的な目標である。同工法は国内だけに限らず、海外展開時、特に鋼構造物材の製造技術、溶接技能が未熟な鋼構造後進国への展開にあたり大きな利点となる。また、高力ボルト摩擦接合は溶接接合と比較すると、経験の浅い技能者でも施工環境・条件によらず安定した高い接合部性能を実現しやすい施工法あり、近年の技能者の不足・高齢化を鑑みれば、国内でも同工法の重要性は今後も大きく高まる。

研究成果の概要（英文）：The ultimate goal of this research is to make high-strength bolt friction joints with enlarged and slotted holes practicable. In order to achieve this goal, (1) the slip strength and maximum strength of these friction joints were investigated experimentally and by FEM analysis to clarify the effects of variables such as hole shape, size, and direction, ratio of slip strength to yield strength, and friction surface treatment. (2) The mechanical properties of the same joints applied to beam joints were clarified by experiments, and a mechanical model was proposed for use in the framework analysis. (3) The maximum response during an earthquake was investigated from the analysis of the framework using the aforementioned mechanical model. (4) The effect of tightening method on bolt tension and relaxation properties were confirmed.

研究分野：建築鋼構造

キーワード：高力ボルト 摩擦接合 スロット孔 拡大孔 梁継手 FEM 力学モデル OS法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

高力ボルト摩擦接合は、溶接接合と並び鋼構造物を構築するために重要な接合方法の一つである。溶接技能者の技能、施工環境・条件によって接合部の性能に大きな影響を及ぼす溶接接合と比較すると、高力ボルト摩擦接合部は比較的経験の浅い技能者でも施工環境・条件によらず安定した高い接合部性能を実現しやすい施工方法である。近年の技能者の不足・高齢化や、少子化に伴う新規技能者の減少を鑑みれば、鋼構造の接合部における高力ボルト摩擦接合部の重要は今後も大きく高まると考えられる。

近年の構造物の高層化・巨大化、鋼材の高張力化・極厚化に伴い、高力ボルト摩擦接合部にも高耐力化が求められている。筆者らは、ボルトの高強度化、摩擦処理施工・管理法による高すべり係数化、新しいボルト締付け施工法による高導入ボルト張力化などの研究成果によりその要求に答えてきた。また、構造物の製作・施工には不可避な製作誤差・施工誤差が伴う。これに対し高力ボルトを用いた接合部ではボルト孔のクリアランスを利用し誤差を吸収することで構造物としての施工精度を確保してきた。しかしながら構造物が巨大化・長スパン化することにより、製作・施工精度を高めても一般的なボルト孔ではその誤差を吸収できない場合が生じ始めている。これを解決するため、ボルト孔に拡大孔（通常よりも大きな孔径）やスロット孔（長孔）の適用が考えられる。建築基準法施工令では高力ボルト孔径はボルトの呼び径+2mmと決められており、拡大孔やスロット孔の適用には個別に国土交通大臣の認定が必要となるため、建築分野においては一般的に用いられていないが、潜在的な需要は大変高い。実際、米国<sup>①</sup>、Euro<sup>②</sup>の基規準には拡大孔・スロット孔に関する記述があり、国内でも多くの制約条件を付して個別認定を取得し、拡大孔・スロット孔を実建物に適用した事例もある。また、拡大孔に関しては、すべり実験による研究成果が報告<sup>③</sup>されている。

今回、改めてこの問題を取り上げたのは、スロット孔の設計用すべり耐力に関して、米国、Euroの基規準を「覆す」実験結果<sup>④</sup>が報告されたことが発端である。両基規準では、スロットの長孔方向に対して平行に応力が作用する場合よりも、それ以外の方向（垂直方向を含む）に対して応力が作用する場合に大きな設計用すべり耐力を設定している。しかしながら、前述の実験結果では大小関係が全く逆の結果となっている。この結果には、ボルトの軸力、すべり耐力、母材・添板のボルト孔近傍の剛性・耐力が関係しているものと考えられ、これらの諸条件とすべり係数の関係を明らかにし、設計法を確立、国内・国外の基規準・指針に反映させる必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、拡大孔・スロット孔を適用した高力ボルト摩擦接合部のすべり耐力や最大耐力を検討し、各種変数が及ぼす影響を明らかにする、また、高力ボルト締付け施工（特にOS法適用時）の問題点に関する検討、拡大孔・スロット孔を接合部に適用が骨組の構造性能に及ぼす影響について検討する。これらの問題を解決することにより、拡大孔・スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合部を一般的に実用化することが最終的な目標である。

### 3. 研究の方法

前述の目的に対して以下の実験、解析を実施し、設計・施工法を検討した。

(1) 拡大孔・スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合部のすべり試験：以下の実験変数を対象としたすべり試験を実施し、変数がすべり性状に及ぼす影響を明らかにした。

拡大孔の径（標準径、標準径+2mm）、スロット孔の径（標準径、標準径+2mm）、スロット孔の長さ（ボルト径×1.5（短スロット）、×2.5（長スロット））、摩擦面処理（赤錆面、アルミ溶射面）スロット孔と作用応力の方向（0、45、90°）、スロット孔とボルト挿入位置の関係（中央、端）、母材・添板の板厚・板幅、縁端距離、ボルト径（M16、M22）、ボルト強度（F10T、F14T）、

実験変数による影響を検証するとともに、次の解析の比較対象とした。なお、一部の試験体では、高力ボルト締付け後1～3ヶ月間放置し、その間のボルト張力を計測、リラクゼーション性状を確認した。また、すべり試験後の試験体を利用して接合部の破壊実験を実施、接合部の破断耐力を検証した。

(2) 拡大孔・スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合部のFEM解析：前述の高力ボルト摩擦接合部すべり実験、高力ボルト張力導入試験をFEM解析にて再現した。実験結果との比較からFEM解析の妥当性を検証した。また、実験で検証できない範囲の変数の影響を確認、また、実験でのばらつき（摩擦係数など）を除去し、実験変数の影響を明確化した。本解析により、締付け時の材間圧縮力分布、すべり時のボルト孔周りの応力状態、変形状態を確認し、実験変数の影響の原因を検証した。解析には汎用解析ソフト Marc を使用した。

(3) ボルト締付け時の導入張力に及ぼす拡大孔・スロット孔の影響に関するFEM解析：著者ら研究を進めているOS法（旧名：新耐力点法）を用いる場合を対象とし、拡大孔・スロット孔に対する締付け施工が、従来の標準孔の場合と同様に施工できるかをFEM解析により検証した。解析には前項と同様に汎用解析ソフト Marc を使用した。

(4) スロット孔を用いた梁継手の載荷試験：実際のH形鋼梁継手接合部にスロット孔を適用し

た場合の力学性状を確認する。梁継手の曲げ試験を行い、その力学性状、特にすべり性状を確認した。実験変数は、ボルト孔（標準孔、スロット孔（超スロット・短スロット孔））、接合方法（高力ボルト摩擦接合、支圧ボルト接合）とし、いずれも漸増繰返し载荷を実施した。

(5) 骨組解析用力学モデルの提案と同接合部が骨組の構造性能に及ぼす影響：前述のすべり試験、梁継手試験、それらの解析結果より梁継手、ブレース接合部の骨組解析用の解析モデルを提案した。また、同モデルを梁継手に組み込んだ骨組の解析を実施し、骨組全体の構造性能に及ぼす影響を静的プッシュオーバー解析、地震応答解析結果より検証した。解析には市販されている汎用構造解析プログラム SNAP を用いた。

#### 4. 研究成果

(1) 拡大孔・スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合部のすべり試験：すべり試験、リラクセーション試験、破壊試験より得られた結果を以下に列記する。なお、図1にはF10T、M22、赤錆面の2面摩擦試験体より得られたすべり係数一覧を示す。

- 標準孔を用いた試験体（標準試験体）と比較して、拡大孔、短スロット孔、長スロット孔の順ですべり係数が小さくなる。
- 標準孔と拡大孔（標準孔+2mm）、スロット孔の短径が標準孔と同じ試験体と拡大孔と同じ試験体の相違は数%に留まる。
- 応力方向とスロット孔の長径方向がすべり係数に及ぼす影響は、標準試験体と同じ鋼板幅であるシリーズ（図1中赤印）で顕著である。長径方向が応力方向と平行な0°試験体より、直交する90°試験体ですべり係数が小さくなり、長スロットの場合は10%程度低下する。一方、有効断面積（縁端距離）を一定としたシリーズ（図1中青印）では、すべり係数に及ぼす孔方向の影響は小さい。
- 既往の実験結果④、本実験結果における孔方向の影響は、接合部耐力比（すべり耐力と正味断面降伏耐力の比）で説明することができる。本実験での結果より接合部耐力比とすべり係数の関係の近似式を算出した（図2参照）。

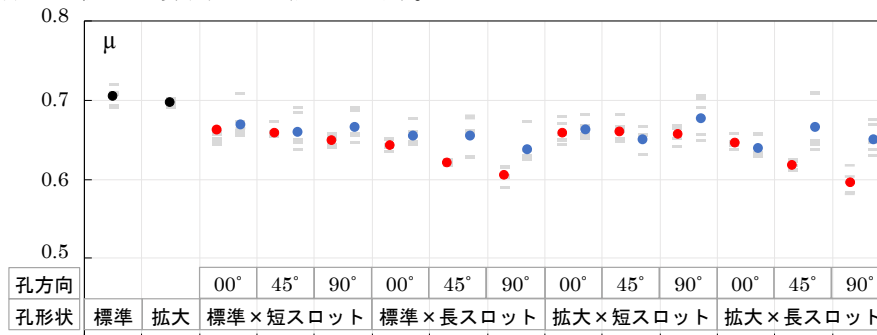


図1 すべり係数  $\mu$ （孔形状・孔方向の影響、赤：幅一定、青：有効断面積一定）

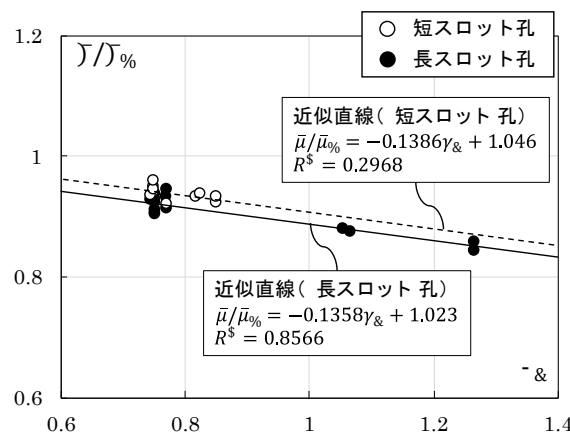


図2 すべり係数（標準孔で無次元化）と接合部耐力比の関係（2019年度実施分）

- 本研究で実施した鋼板板厚では、標準孔とスロット孔試験体におけるリラクセーションには有意差は認められなかった。
- F14T、M22 ボルトを使用したアルミ溶射処理摩擦面によるすべり試験体においても、前述のF10T、M22、赤錆面と同じ傾向が見られたが、長スロット孔、90°方向では、初期剛性の低下によりすべり量0.2mmですべり耐力が決定したため、有効断面積一定の場合でも0°方向よりも90°方向ですべり係数の低下が見られた。
- 前述のスロット孔の長径方向がすべり係数に及ぼす影響は、標準試験体と同じ鋼板幅であるシリーズで顕著である。長径方向が応力方向と平行な0°試験体より、直交する90°試験体ですべり係数が小さくなり、長スロットの場合は10%程度低下する。一方、有効断面積（縁端距離）を一定とした場合、すべり係数に及ぼす孔方向の影響は非常に小さい。

- ・ 上記の孔方向の影響は、接合部耐力比（すべり耐力と正味断面降伏耐力の比）で説明することができる。本実験での結果より接合部耐力比とすべり係数の関係の近似式を算出した。
- (2) 拡大孔・スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合部の FEM 解析：前述のすべり試験では不可避であった摩擦面や測定上のばらつきを FEM 解析で除外することにより、各種変数の影響とその原因を明らかにするとともに、実験では未検討であった変数についても検討を行った。得られた結果を以下に列記する。
  - ・ 実験の模擬解析を実施し、90° 方向長スロット孔ですべり係数に最大 1 割の乖離が見られたものの、実験結果と解析結果は概ね良い対応を示した。また、接触面の応力度分布とすべり試験体の実験後の摩擦面状況も概ね一致していることから、解析結果の妥当性を確認した。
  - ・ 接合部耐力比を主変数とした FEM 解析を実施し、孔形状・孔寸法・孔方向がすべり係数に及ぼす影響を明らかにした。図 3 には M22、F10T、赤錆面、長スロット孔の結果を示すが、接合部耐力比が大きくなるにしたがい、すべり係数が低下することがわかる。また、標準孔と長スロット 0° 方向の間には接合部耐力比によらず一定の差があり、これが孔形状・孔寸法による影響と考えられる。一方、長スロット 90° 方向では接合部耐力比増大によるすべり係数低下が緩和されており、これは図中に示す座金の接触位置で母材の最大応力が発生していないことに起因する。
  - ・ ボルト径による影響を検討し、ボルト軸断面積と添板厚の比がすべり係数に影響を及ぼすことを確認した。なお、本研究で採用したボルト径・添板厚の組み合わせでは、実験で採用した M22 試験体ですべり係数が一番小さくなることを確認した。
  - ・ 実験では実施しなかったボルトの行列数がすべり係数に及ぼす影響を FEM 解析により明らかにした。

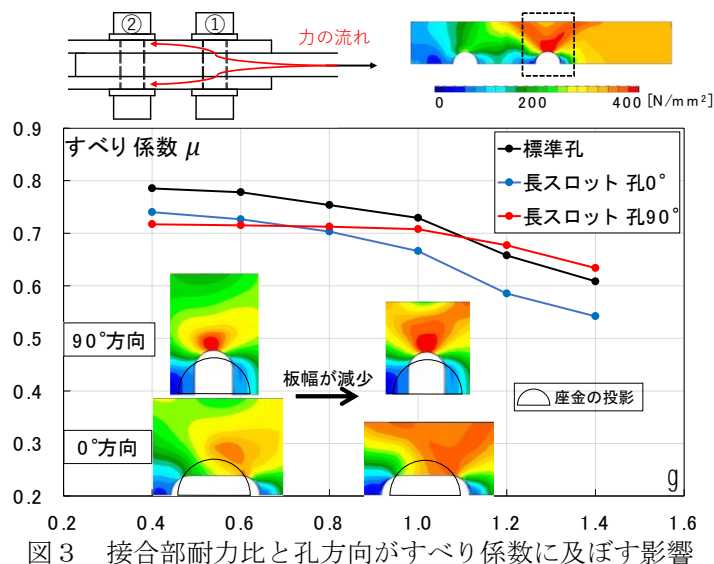


図 3 接合部耐力比と孔方向がすべり係数に及ぼす影響

- (3) ボルト締付け時の導入張力に及ぼす拡大孔・スロット孔の影響に関する FEM 解析：OS 法によるボルト張力導入を模擬した解析により、標準孔とスロット孔における導入張力の差異が数%に留まることを確認した。
- (4) スロット孔を用いた梁継手の荷重試験：梁継手の荷重試験より得られた結果を以下に列記する。
  - ・ 繰返し曲げ荷重試験より、図 4 に示すような継手の曲げモーメント-継手回転角関係を得ることができた。
  - ・ 最初の主すべり時のすべり係数が、標準孔と短スロット孔がほぼ同等、長スロット孔では 15% 程度低下した。また、図中の△印はボルト側面がボルト孔側面に接触し支圧状態に達する回転角を計算にて求めた値を示すが、実験での耐力上昇位置と概ね一致することを確認した。
  - ・ 本試験体での短スロット・長スロット孔では、支圧状態に至るまでそれぞれ 0.05、0.08rad もの回転角を要することが確認された。

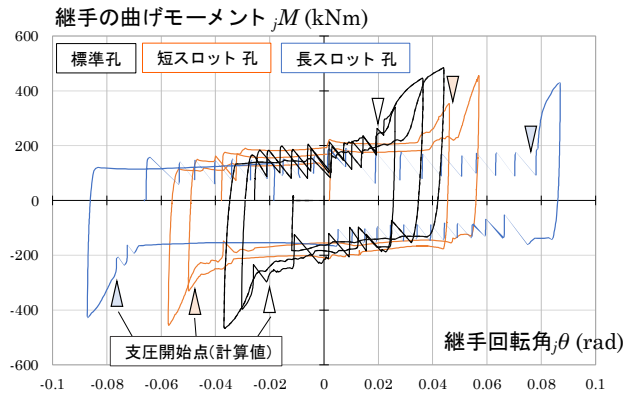


図4 梁継手に作用するモーメントと継手回転角の関係

(5) 骨組解析用力学モデルの提案と同接合部が骨組の構造性能に及ぼす影響：検討により得られた結果を以下に列記する。

- ・ 図5に示すような力学モデルを構築することにより、梁継手のモーメント-回転角関係を模擬できることを確認した。なお、本モデルは市販の骨組解析プログラムに搭載されているバネを組み合わせることで再現が可能となる。ボルトのクリアランス（標準孔・拡大孔・スロット孔）やすべり耐力を自由に設定することが可能である。
- ・ 同力学モデルを梁継手に適用した3層骨組の静的プッシュオーバー解析、地震応答解析を実施し、クリアランス、すべり耐力が骨組の層間変形角、応答性状に及ぼす影響について考察をした。

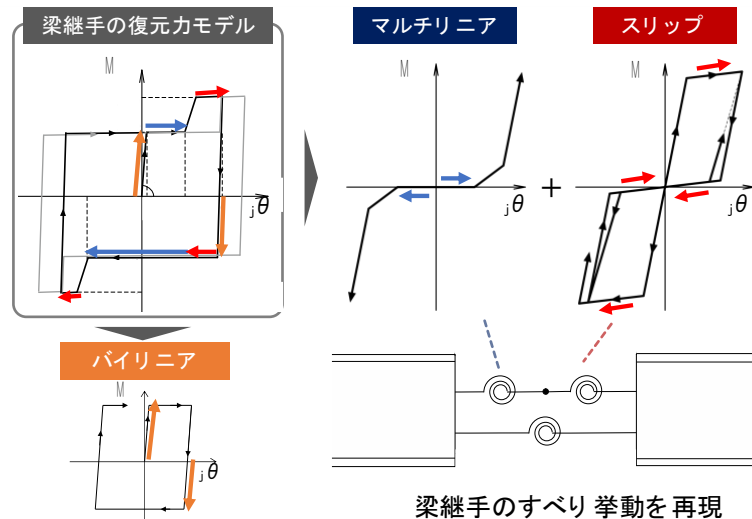


図5 梁継手の力学モデル

参考文献

- ① AASHTO：Standard Specifications for Highway Bridges、2003。
- ② ECCS：European Recommendations for bolted connections：in structural steelwork、1985
- ③ 田中淳夫、増田浩志、脇山廣三、辻岡静雄、平井敬二、立山英二：過大孔・スロット孔を有する高力摩擦接合部の力学性状、日本鋼構造協会鋼構造論文集、第5巻第20号、pp. 35-44、1998。12
- ④ 久米建一、西谷隆之、石井大吾：スロット孔および過大孔を有する高力ボルト摩擦接合部のすべり係数試験（その1、2）：日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III、pp. 933-936、2018。9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 桑原進, 安原慎吾, 加藤あゆみ	4. 巻 67B
2. 論文標題 スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響 すべり試験による検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 177-185
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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前川陽一, 桑原進, 木下哲平, 安部基喜
2. 発表標題 スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部に及ぼすアルミ溶射摩擦面とボルト軸径の影響 その1 すべり試験
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会（北海道）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下哲平, 桑原進, 前川陽一, 安部基喜
2. 発表標題 スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部に及ぼすアルミ溶射摩擦面とボルト軸径の影響 その2. FEM解析
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会（北海道）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野嶋亜門, 桑原進, 稲森遼汰
2. 発表標題 スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合およびボルト支圧接合による H形鋼梁継手の漸増繰返し曲げ載荷実験（その1. 実験計画）
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会（北海道）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲森遼冴, 桑原進, 野嶋亜門
2. 発表標題 スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合およびボルト支圧接合による H形鋼梁継手の漸増繰返し曲げ載荷実験 (その2. 実験結果)
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森健志, 桑原進, 佐々木良介
2. 発表標題 ボルト支圧接合梁継手のすべり挙動を考慮した平面骨組の地震応答性状 その1 解析概要とプッシュオーバー性状
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木良介, 森健志, 桑原進
2. 発表標題 ボルト支圧接合梁継手のすべり挙動を考慮した平面骨組の地震応答性状 その2 地震応答性状と最大応答の簡易予測法
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 進藤正基, 桑原進
2. 発表標題 OS法 (新耐力点法) によるボルト張力導入に及ぼすボルト孔形状の影響 FEM解析による検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑原進, 安原慎吾, 加藤あゆみ
2. 発表標題 スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響 (その1 概要)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安原慎吾, 桑原進, 加藤あゆみ
2. 発表標題 スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響 (その2 すべり試験結果)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤あゆみ, 桑原進, 安原慎吾
2. 発表標題 スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響 (その3 FEM解析結果)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川陽一, 桑原進, 安原慎吾
2. 発表標題 スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の力学性状 (その1 すべり実験)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 安原慎吾, 桑原進, 前川陽一
2. 発表標題 スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の力学性状 (その2 支圧破壊実験)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安部基喜, 桑原進
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼすスロット孔の影響に関するFEM解析 その1. 解析概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑原進, 安部基喜
2. 発表標題 高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼすスロット孔の影響に関するFEM解析 その2. 考察と評価式
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 洪将, 桑原進, 藤原美由紀, 佐々木良介, 長谷川隆
2. 発表標題 ボルト支圧接合梁継手のすべり挙動に伴う平面骨組の変形性状 その1 理論・数値解析による検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木良介, 桑原進, 藤原美由紀, 洪将, 長谷川隆
2. 発表標題 ボルト支圧接合梁継手のすべり挙動に伴う平面骨組の変形性状 その2 骨組の各変数の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原美由紀, 桑原進, 洪将, 佐々木良介, 長谷川隆
2. 発表標題 ボルト支圧接合梁継手のすべり挙動に伴う平面骨組の変形性状 その3 層間変形角の簡略化推定法
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021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
研究分担者	畑中 祐紀  (Hatanaka Yuki)  (50876969)	大阪大学・工学研究科・助教    (14401)	

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
---------	---------