

令和元年6月27日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04401

研究課題名(和文) 新接合面処理と支圧接合強度を活用したコンパクトな高強度高変形能摩擦接合継手の開発

研究課題名(英文) Development on frictional type compact joint having high-resistance and ductility by utilizing new faying surface treatment and the bearing strength of bolt

研究代表者

山口 隆司 (Yamaguchi, Takashi)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50283643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：高強度高変形能摩擦接合継手の開発には、すべてのボルトが同時に支圧状態に移行し、その強度を活用することが必要である。本研究では、テーパ継手などによる断面変化、接合面のせん断抵抗メカニズムの改良という2つの観点からこの課題に取り組んだ。については、載荷実験とFEM解析によりテーパによるすべり耐力や支圧耐力が向上することは確認できたものの、各ボルトのすべり挙動や荷重分担を均等化することは難しかった。については、ウレア樹脂と薄膜金属メッシュによる立体層内構造を構築した新接合面処理を開発し、継手の載荷実験により各ボルトの荷重分担の均等化、すべり挙動の一樣化の可能性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、高力ボルト摩擦接合継手における各ボルトの荷重分担の不均一性は、テーパを用いた力学的な断面変化による改善は難しく、接合面の性能変化により改善できることが明らかとなった。すなわち、摩擦接合継手の荷重伝達機構のブレークスルーは可能であり、ボルト接合部の更なる縮小化・高機能化の方向性が示された。新接合面処理による研究がさらに発展すれば、メガストラクチャーの接合部においてボルト接合を適用することも視野に入れることができ、新たな構造物・架設方法の創出に繋がる。このように、本研究の学術的・社会的意義は大きく、基礎研究としての役割を十分に果たした。

研究成果の概要(英文)：To development frictional bolted compact joint which has high resistance and ductility, it's needed to make uniform the slip and after-slip behaviour of all bolts in the joint and utilize their bearing strength. We tried to solve this problem by varying the cross-sectional shape in longitudinal direction such as tapered joint (method (1)) and improving the frictional resisting mechanism in the faying surface (method (2)). As for method 1, simple tensile tests and FEA of frictional bolted joints were conducted. From these results, slip and bearing resistance of the joint was enhanced but the slip behaviour of each bolt were not equalized. As for method 2, new faying surface treatment method was developed what is to make the steric structures of polyurea resin and thin nickel mesh. The tensile tests of grouped joint coated with the new faying surface was conducted. From the results, it's found that the slip behaviour of each bolt was equalized by the new faying surface treatment.

研究分野：構造工学，地震工学

キーワード：高力ボルト摩擦接合継手 新接合面処理 すべり係数 テーパー継手 ウレア樹脂 支圧強度

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

我が国における鋼橋などの鋼構造物の代表的な現場部材接合法である高力ボルト摩擦接合継手は、すべり限界（摩擦力の限界）に対して設計され、すべり限界以降におけるボルトとボルト孔壁の支圧による耐力上昇を有効に活用しておらず、極大地震動などの巨大な外力に対して接合部構造が大型化する問題を抱えている。

摩擦接合継手における各ボルトの荷重分担率は、摩擦抵抗の原理上、図-1 に示すように不均等になる。この荷重分担が不均等であることから、各ボルト位置でのすべり・支圧が個々のタイミングで発生し、各ボルト孔の支圧変形が均等とならず、局所的な破壊が生じやすい。したがって、各ボルト孔の支圧変形を均等化し、すべてのボルトの支圧力を有効に活用すれば、これまででない、コンパクトかつ高強度・高変形能な摩擦接合継手の開発が可能と考えられる。

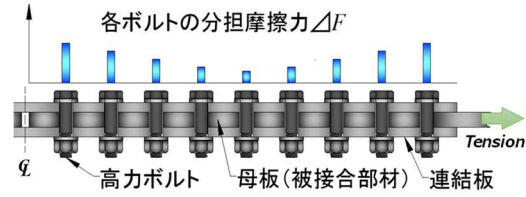


図-1 多列継手の荷重分担率（イメージ図）

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、すべり挙動を支配する接合面の塗膜層内に立体構造を構築し、各ボルト位置におけるせん断強度（摩擦係数）とせん断変形、および接触圧との関係を調整することで荷重分担率とすべり挙動を一様化させる接合面処理を検討すること、また、それによりボルトの支圧強度を活用して、コンパクトかつ高強度・高変形能な高力ボルト摩擦接合継手を開発することである。

なお、力学的アプローチとして、母板と連結板の剛性差に着目し、両者の断面形状を長手方向に変化させることで各ボルト位置のすべり挙動を一様化させる方法も併せて検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 部材軸方向の断面形状変化による剛性差に着目した荷重分担・すべり挙動の一様化

両勾配のテーパーを有する山形継手や片勾配のテーパーを有するテーパー継手の引張試験と圧縮試験を行い、力学的な観点から各ボルト位置のすべり挙動を一様化させる方法を検討した。試験体ケースおよび試験体形状を図-2 に、载荷試験の試験状況を図-3 に示す。

引張・圧縮試験の結果より、山形継手（ケース：VP）は通常の継手（NP）よりすべり耐力・支圧耐力の向上が確認されたことから、継手内におけるテーパー頂部の位置とテーパー深さが支圧開始時の耐力に及ぼす影響を有限要素解析（図-4、図-5：解析モデル、表-1：解析ケース）で確認した。

また、数値解析のみの検討ではあるが、摩擦接合の多列継手の一部を支圧ボルトとし、荷重分担の一様化を試みる方法も検討した。（論文業績①，学会発表②）

#### (2) 新接合面処理の開発および摩擦接合継手への実装

各ボルト位置の荷重分担率を一様化するための新接合面処理として、せん断変形能の高

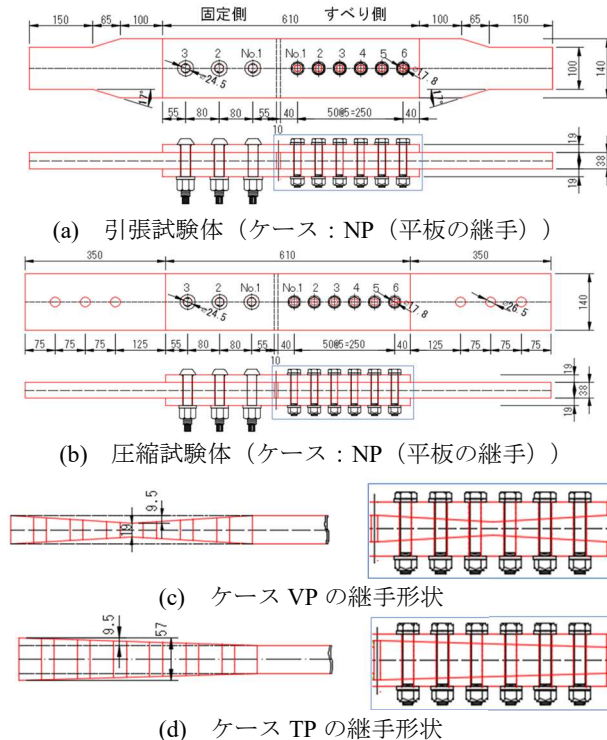


図-2 引張・圧縮試験体の形状（単位：mm）



図-3 山形継手・テーパー継手の载荷試験

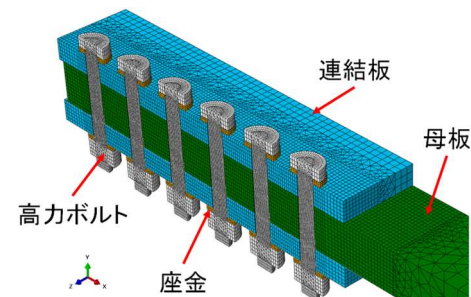


図-4 静的引張解析の有限要素モデル

ウレア樹脂の内部に薄板パンチングメタルや薄膜金属メッシュを挿入し、塗膜層内に立体構造を構築する手法をパイロット的に採用した。ここでは、**図-3(a)**と同一形状の引張試験体(NP)を用いて、この新接合面処理が継手のすべり挙動に及ぼす影響を確認した。

試験ケースを表-2に示す。表-2には試験で確認されたすべり荷重も合わせて示している。

### (3) 群配置を有する新接合面処理継手の性能確認

(2)の引張試験において、各ボルト位置でのすべり挙動の一様化が確認されたPUS\_NId2を対象に、群継手での性能確認試験(**図-6**)を行った。試験体形状は、**図-7**の通り、板厚が9mm、すべり側のボルト配置が3行3列の群配置である。試験ケースは表-3の通り、接合面処理(ショットブラスト、無機ジンクリッチペイント、新接合面処理(表-2のPUS\_NId2と同じ接合面処理)、ボルト配置間隔(A, B, C)をパラメータとしている。

なお、試験機の載荷能力の関係上、純断面降伏後の1,000kNで除荷した。

### (4) 小型すべり試験機の開発およびそれをを用いた塗膜の摩擦係数-接触圧関係の解明、実用化に向けた新接合面処理の改良

(2),(3)の引張試験より、新接合面処理により、すべり耐力、純断面降伏耐力、終局耐力が向上することを確認した。しかしながら、新接合面処理を実構造へ適用するためには、ウレア樹脂の現場塗布工程の省略、樹脂の紫外線劣化をはじめ耐久性・製作性の観点から、未硬化のウレア樹脂層の表層に防錆効果に優れた無機ジンクリッチペイントを吹付ける必要があると考えられる。ここでは、新接合面処理をウレア樹脂と無機ジンクリッチペイントの積層体にした場合の塗膜の摩擦係数と接触圧の関係を試験により調査した。試験には、文献1)を参考に開発した小型鋼板すべり試験機(**図-8**および**図-9**)を用いた。試験ケースを表-4に、新接合面処理におけるウレア樹脂層(第1層)の塗布状況を**図-10**にそれぞれ示す。

### (5) 摩擦接合継手の解析モデルの高精度化

摩擦接合継手のすべり後挙動を数値解析により検討できるように、試験結果と整合し、かつ計算時間が短い、簡易なモデリングおよび解析手法の条件についても検討した(論文業績③, 学会発表⑤)。さらに、3.(2)の単行配置, 3.(3)の群配置の結果を比較・考察する上で、ボルト行数がすべり後挙動に及ぼす影響を確認した。(論文発表⑥, 学会発表③④)

## 4. 研究成果

### (1) 3.1(1)に関する成果(テーパー継手)

山形継手のすべり係数は、表-5の通り、通常の継手のそれに対して引張試験では4%程度、圧縮試験では7%程度増加した。しかし、各ボルト位置の荷重-相対変位の関係は一致せず、すべり挙動を一様化することはできなかった。

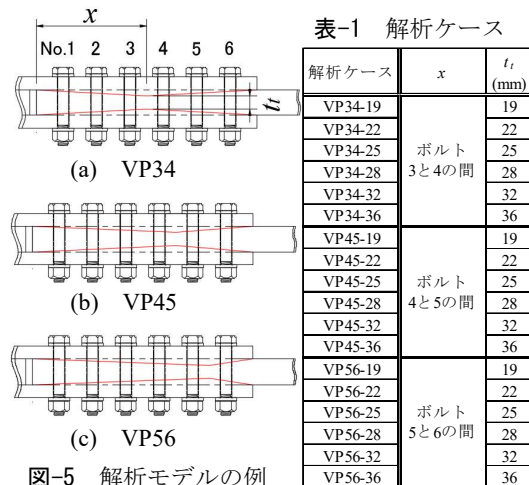


図-5 解析モデルの例

表-2 新接合面処理継手の引張試験のケース

試験ケース	接合面処理	すべり荷重(kN)	最大荷重(kN)
BR	ブラスト	627	1657
PUS	ウレア樹脂のみ (樹脂硬化前に本締め)	921	1655
PUL	ウレア樹脂のみ (樹脂硬化後に本締め)	804	1676
PUS_PA	ウレア樹脂+パンチングメタル	795	1674
NI	ニッケルメッシュのみ	742	1666
PUS_NI	ウレア樹脂+ニッケルメッシュ	950	1677
PUS_NId2	ウレア樹脂+ニッケルメッシュ (メッシュの線径がNIの2倍)	976	1715

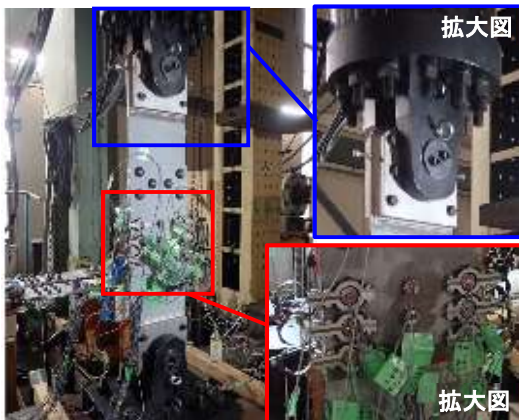


図-6 3行3列群継手の引張試験の状況

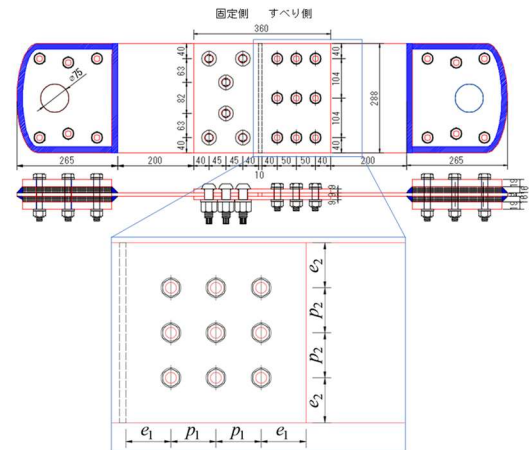


図-7 試験体の形状寸法(単位:mm)

表-3 3行3列群継手の引張試験のケース

試験ケース	ボルト配置	接合面処理	純断面降伏荷重(kN)
A-Z	$e_1=40, p_1=50$ $e_2=40, p_2=104$	無機ジンク	721
A-BR		ブラスト	696
A-NE		新接合面処理	789
B-Z	$e_1=72, p_1=72$ $e_2=40, p_2=104$	無機ジンク	774
B-BR		ブラスト	693
B-NE		新接合面処理	750
C-Z	$e_1=72, p_1=72$ $e_2=72, p_2=72$	無機ジンク	789
C-BR		ブラスト	762
C-NE		新接合面処理	821



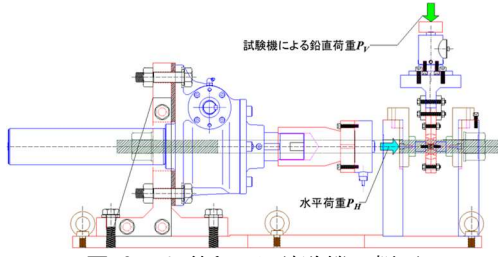


図-8 小型すべり試験機の概要

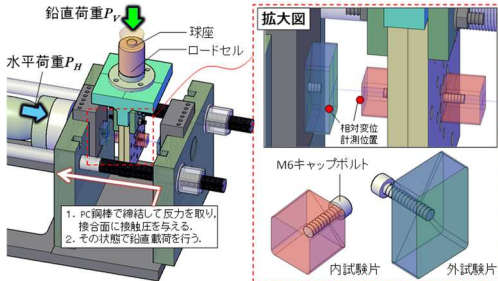


図-9 試験体のセッティングおよび試験方法

表-4 小型すべり試験のケース

試験ケース	鋼種	試験片辺長(公称) a mm	接合面断面積(公称) A mm <sup>2</sup>	接合面処理	初期接触圧設計値 p <sub>d</sub> N/mm <sup>2</sup>	N数
BR-60	SS 400	20	400	ショットブラストのみ	60	5
BR-120					120	5
BR-180					180	5
Z-60				下地処理: ショットブラスト	60	4
Z-120					120	4
Z-180					180	5
PUS_Ni+Z-60				下地処理: ショットブラスト	60	5
PUS_Ni+Z-120					120	5
PUS_Ni+Z-180					180	5
PUS_HC+Z-60				下地処理: ショットブラスト	60	3
PUS_HC+Z-120					120	9
PUS_HC+Z-180					180	3

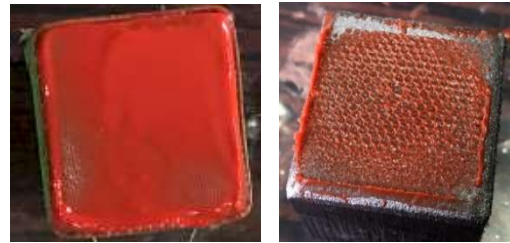


図-10 ウレア樹脂層(第1層目)の塗装状況  
(a) ケース PUS\_Ni+Z (b) ケース PUS\_HC+Z

山形継手の FEM 解析では、継手最外縁(端部)のボルトが支圧状態に移行した時を支圧開始点と定義し、支圧開始時の荷重  $P_b$  を母板の総断面降伏耐力  $P_{ygd}$  で無次元化した  $P_b/P_{ygd}$  とテーパ頂部における母板と連結板(2枚分)の軸剛性比  $E_m A_{t-m} / E_{spl} A_{t-spl}$  の関係(図-11)をもとに、テーパ頂部の位置・深さの影響を評価した。山形継手の支圧開始荷重は通常継手(NP)のそれよりも大きく、テーパの噛み合わせ効果により耐力が向上していることがわかる。テーパ頂部はすべりと純断面降伏に関わる継手外側のボルト間に設ける方が望ましく、テーパ深さはテーパ部の降伏が支圧開始よりも早く発生しないよう、母板厚の半分以下とするのがよい。テーパ部の降伏が発生しない場合、 $P_b/P_{ygd}$  と  $E_m A_{t-m} / E_{spl} A_{t-spl}$  は線形関係となった。FEM 解析上でもすべり挙動は一様化しなかった。

(2) 3.1(2)に関する成果(新接合面処理を開発するための継手引張試験)

荷重と各ボルト位置における母板と連結板の相対変位の関係を図-12 に示す。縦軸は荷重を母板の総断面降伏耐力  $P_{ygd}$  で無次元化した無次元化荷重  $P/P_{ygd}$  である。図-13 にはすべりから支圧開始点までを対象に相対変位増分と荷重増分の関係を整理した。

ボルトの軸ひずみから評価した支圧開始点は、図-12 の通り、ブラスト(BR)の場合はボルト位置で異なるが、新接合面処理(PUS\_Nid2)の場合はすべてのボルト位置で一致した。また、図-13 の通り、PUS\_Nid2 では相対変位増分もボルト位置によらず同程度となり、相対変位増分と荷重増分は線形関係を呈した。相対変位増分の最大値も BR のそれより大きく低下し、緩慢なすべりが発生した。また、すべり荷重と最大荷重も全ケース中で最大であった。

以上より、新接合面処理により、各ボルト位置でのすべり挙動を一様化するとともに、耐力を向上させることができたことを示した。

(3) 3.1(3)に関する成果(群継手を有する新接合面処理継手の性能)

荷重と継手全体変位の関係を図-14 に示す。縦軸は図-12 と同じく無次元化荷重  $P/P_{ygd}$  である。大きな荷重低下とすべり音は接合面処理がブラスト(BR)の場合にのみ確認された。すべてのケースにおいて、純断面降伏が先に発生する降伏先行型の継手の挙動を示した。弾性範囲の初期剛性は、図-14 に示すように、いずれの接合面処理の場合でもほぼ同じであった。

接合面処理が力学挙動に影響を及ぼしたのは純断面降伏以降であった。純断面降伏の発生順序は、摩擦係数の違いが影響して、B-BR が最も低い荷重で降伏、B-Z と B-NE はほぼ同じ荷重で降伏した。さらに、B-NE はウレア樹脂の優れたせん断変形能により、荷重を維持・増加させつつ、大きく変位を増やした後に支圧状態に移行した。以上より、新接合面処理の性能は複数行列を有する実構造物の継手においても発揮し、群状態にあるボルトの支圧力も有効に活用できると考えられる。

(4) 3.1(4)に関する成果(実構造へ実装可能な新接合面処理の検討)

各接合面処理における、摩擦係数  $\mu_2$  とすべり時接触圧  $p_{slip}$  の関係を図-15 に示す。  $\mu_2$  と

表-5 引張・圧縮試験でのすべり係数

試験体形状	N数	すべり係数の平均値	
		引張試験	圧縮試験
NP	3	0.74	0.77
VP	2	0.77	0.82
TP	2	0.74	0.69

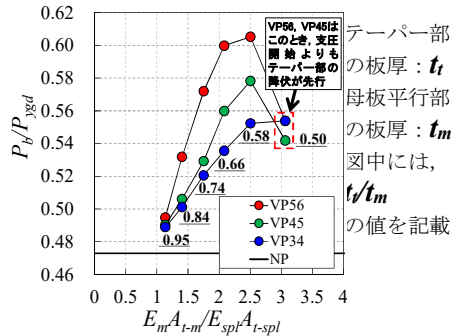


図-11 テーパー頂部の位置と深さが支圧開始荷重に及ぼす影響

$p_{slip}$  は以下のように計算した。

$$\mu_2 = \frac{P_{Vs}}{n \times P_{Hs}} \quad (1), \quad p_{slip} = \frac{P_{Hs}}{A} \quad (2)$$

ここに、 $P_{Vs}$  : すべり時の鉛直荷重、 $n (=2)$  : 接合面数、 $P_{Hs}$  : すべり時の水平荷重、 $A$  : 形状計測に基づいた公称接触面積である。

図-15 に示すように、新接合面処理の PUS\_NI+Z と PUS\_HC+Z の摩擦係数は、ブラスト試験体と同じく、すべり時接触圧に影響されづらい。一方、無機ジンクリッチペイントの摩擦係数は、すべり時接触圧に影響されることがわかった。試験結果から導いた無機ジンクの  $\mu_2 - p_{slip}$  近似曲線の決定係数  $R^2$  は 0.90 と高く、この結果を数値解析で使用するクーロン摩擦モデルに組み込むことですべりに伴う荷重低下を解析上で再現し、摩擦接合継手のすべり・すべり後挙動の数値解析精度が向上すると考えられる。

図-16 には無機ジンクリッチペイント(Z)と新接合面処理(PUS\_NI+Z)の初期接触圧の設計値  $p_d = 180 \text{ N/mm}^2$  のケースを代表して、接触面積に働く平均せん断応力  $\tau_{avg} = P_H / (2A)$  と内-外試験片の相対変位  $\delta_r$  の関係を示す。図-16 の通り、Type Z の場合、相対変位が 0.20 mm 程度ですべりが発生した。すべり時のせん断応力  $\tau_{slip}$  は試験体ごとにばらつきが大きかった。一方、Type PUS\_NI+Z の場合、相対変位が 2.0 mm 程度ですべりが発生しており、Type Z に比べて 10 倍程度の変形性能を示した。 $\tau_{slip}$  は Z より小さいものの、すべての試験体で  $50 \text{ N/mm}^2 < \tau_{slip} < 60 \text{ N/mm}^2$  の範囲に収まり、安定したせん断強度を有していることが確認できた。

PUS\_NI+Z の載荷後の接合面を、図-17 に示す。図-17 の通り、ウレア層と無機ジンク層を跨ぐ形で凝集破壊が発生していた。

#### (5) おわりに

本研究により、高力ボルト摩擦接合継手における各ボルトの荷重分担の不均一性は、テーパーを用いた力学的な断面変化による改善は難しく、接合面の性能変化により改善できることが明らかとなった。接合面処理を検討することでボルト接合部の更なる縮小化・高機能化の方向性が示された。

今後は、新接合面処理によるすべり挙動の一樣化の程度、各ボルトの支圧力を試験および数値解析的に定量化したいと考えている。

また、その効果を更に高めるため、ウレア樹脂層内を補強している金属メッシュの線径や目開きを各ボルト位置で変化させるなど、層内立体構造の最適化を考えていきたい。また、繰返し力や衝撃力など作用力の種類、ひずみ速度が新接合面処理継手の性能に及ぼす影響も検討課題である。

耐久性については屋外暴露試験等を通して、ウレア層内の金属メッシュと連結板の異種金属間腐食、ウレア層と無機ジンク層からなる積層体の付着耐久性を評価する必要がある。参考文献

- 1) 三宅健, 桑原進, 村井剛, 立山英二, 中平和人, 野澤裕和 : 高力ボルト接合部の現場施工の簡略化に関する実験的考察 (その 1 水濡れによる影響), 日本建築学会学術講演会概要集, pp.571-572, 2005.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大 : 高力ボルト摩擦接合継手の引張荷重実験における試験体ボルト行数のすべりおよび母板降伏挙動への影響に関する基礎的研究, 構造工学論

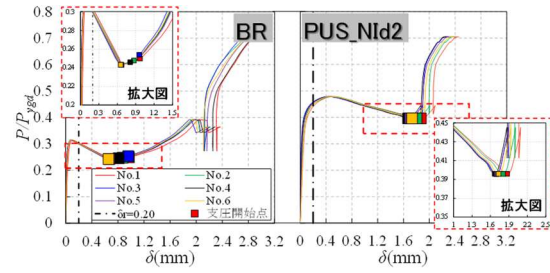
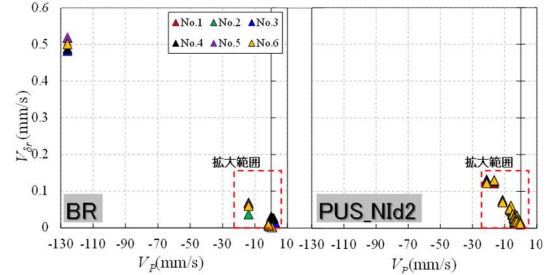
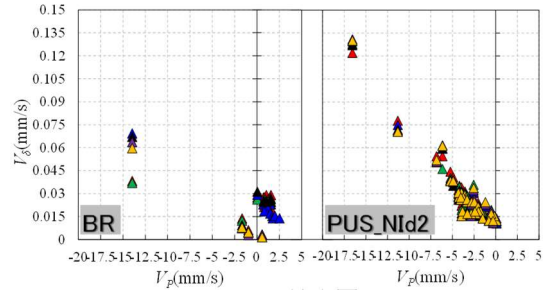


図-12 荷重と各ボルト孔位置における母板と連結板の相対変位の関係



(a) 全体図



(b) 拡大図

( $V_{\delta_r} < 0.15 \text{ mm/s}$ ,  $-20 \text{ mm/s} < V_p < 5 \text{ mm/s}$ )

図-13 各ボルト位置の相対変位増分  $V_{\delta_r}$  と荷重増分  $V_p$  の関係

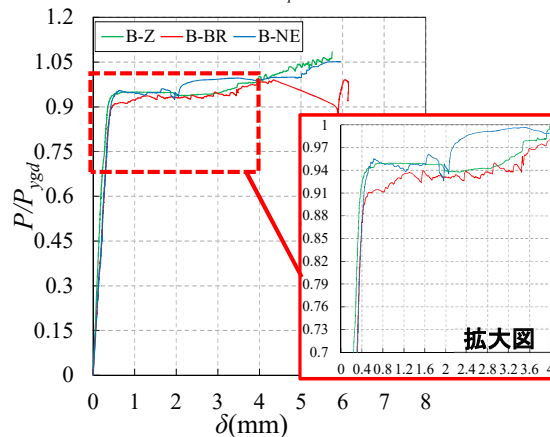


図-14 荷重と継手全体変位の関係(3行3列継手)



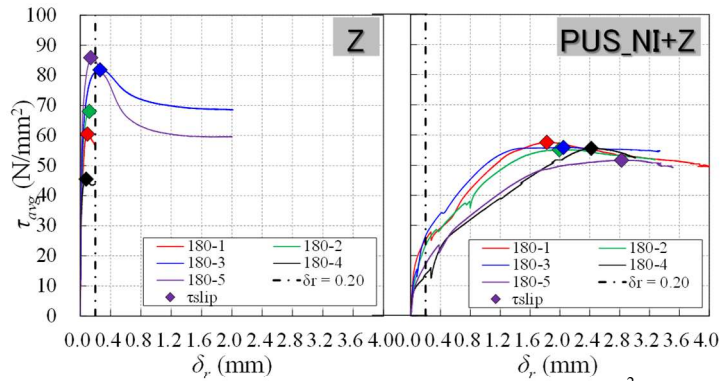
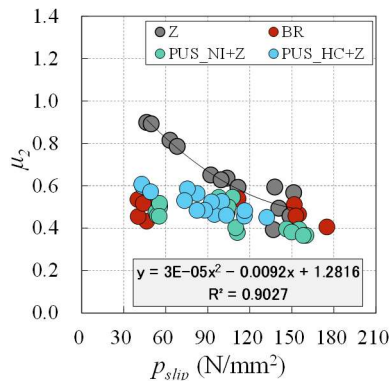


図-15 摩擦係数-すべり時接触圧の関係 図-16 平均せん断応力-相対変位の関係( $p_d=180 \text{ N/mm}^2$ の場合)

- 文集, Vol. 65A, pp. 365-376, 2019.3.
- ② 森山仁志, 高井俊和, 山口隆司, 山本佑大: 高力ボルト摩擦接合継手の支圧挙動評価のための解析モデルの検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 26, pp. 526-533, 2018.11
  - ③ Yuta YAMAMOTO, Hitoshi MORIYAMA, Takashi YAMAGUCHI, Toshikazu TAKAI: Study on Enhancement of Slip Resistance of High Strength Bolted Frictional Joint Focusing on Shape of Joint Surface, 12th Japanese-German Bridge Symposium 6-pages, Munich, Germany, September, 2018. 9.
  - ④ 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大: 一面摩擦高力ボルト摩擦接合継手の荷重作用時の面外変形に着目した力学的挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 636-649, 2018.3.
  - ⑤ 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大: 多列高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力向上に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.25, pp.1-7, 2017.11.
  - ⑥ 山本佑大, 森山仁志, 山口隆司, 高井俊和: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力向上に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集 Vol.25, pp.24-31, 2017.11.
- [学会発表] (計 6 件)
- ① 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司: 高力ボルト摩擦接合継手の引張荷重時の母板降伏線のコバ面到達位置に関する解析的検討, 2019 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-3, 2019.5.
  - ② 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり後耐力の評価のための FE モデリング手法, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, I-176, pp. 351-352, 2018.8.
  - ③ 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大: 高力ボルト摩擦接合継手の板幅方向の連続性が母板の降伏挙動に与える影響, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2018.6.
  - ④ 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大: 高力ボルト摩擦接合継手の横拘束のすべり挙動に与える影響, 土木学会西部支部研究発表会概要集, I-020, pp. 39-40, 2018.3.
  - ⑤ 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大, 三宅綾里: 一部に支圧ボルトを用いた多列高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動, 土木学会, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, I-618, pp.1235-1236, 2017.9.
  - ⑥ 高井俊和, 森山仁志, 山口隆司, 山本佑大, 高田直幸: 接触面にテーパを付けた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に関する解析的研究, 平成 29 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-6, 2017.5.
- [図書] (計 0 件), [産業財産権] ○出願状況 (計 0 件), ○取得状況 (計 0 件)  
[その他] なし



図-17 PUS\_NI+Z (5 体目)の荷重後の状況

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 高井 俊和

ローマ字氏名: TAKAI Toshikazu

所属研究機関名: 九州工業大学

部局名: 建設社会工学研究系

職名: 助教

研究者番号: 00759433

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 森山 仁志

ローマ字氏名: MORIYAMA Hitoshi