

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04150

研究課題名(和文) 超々高強度フェールセーフボルトを用いたメカニカルファスニング

研究課題名(英文) Mechanical Fastening with Ultra-High-Strength Fail-Safe Bolts

研究代表者

木村 勇次 (Kimura, Yuuji)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：80253483

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：(0.2-0.6)%C-2%Si-1%Cr-1%Mo 鋼 (mass%) の温間溝ロール圧延により1.6-2.0 GPa級超高強度鋼を作製した後、温間成形でJIS M12の六角ボルトを作製し、それらの機械的性能を調査した。開発ボルトは超微細結晶粒組織を有し、1.6-2.0 GPaの超高強度で従来の調質ボルトよりも破断しにくかった。せん断強さと引張強さの間には直線関係が確認された。開発ボルトを用いた摩擦接合部の引張試験では、すべり係数が既存高強度ボルトの接合部と同等以上で、ボルト接合部での張力の顕著な低下もないことが確認された。さらに開発ボルトを用いた接合部は壊れにくいことも確認できた。

研究成果の概要(英文)：1.6-2.0 GPa-class ultra-high strength steel bars were fabricated through multi-pass warm caliber rolling for (0.2-0.6)%C-2%Si-1%Cr-1%Mo steels (mass%), and were warm formed into JIS M12 hexagon head bolts, and then their mechanical properties were investigated. The developed bolts consist of ultrafine grained structures and were demonstrated to be more ductile and tougher, compared to the conventionally quenched and tempered bolts at ultra-high tensile strength of 1.6-2.0 GPa. There was a linear relationship between shear strength and tensile strength. Friction tensile tests for joints using the developed bolts demonstrated that slip coefficient for the ultra-high-strength bolts were greater or equal to the ordinary high-strength bolts. No significant stress relaxation was observed in the bolted joints. Furthermore, the bolted joints using the ultra-high strength bolts were also observed to have high fracture resistance.

研究分野：鉄鋼材料

キーワード：低合金鋼 強度 靱性 ボルト メカニカルファスニング

1. 研究開始当初の背景

現在、土木建築分野で主に使用されている1 GPa級高力ボルト (F10T) に対して、強度が2倍の2 GPa級超高強度ボルトが実現できれば、ボルトのサイズダウンや使用本数の大幅な削減による施工効率の向上が期待できる。とくに、高強度部材との組合せによる接合部のコンパクト化により鋼構造設計の変革も期待できる。ところが、1.3 GPa以上の強度では、ボルトの遅れ破壊が問題となり、1996年に建築分野で1.4 GPa級の超高力ボルト (F14T) が実用化されるまでの約30年間、ボルトの高強度化は1 GPa級で頭打ちであった。なお遅れ破壊とは、大気腐食によって水素が鋼材中に侵入して鋼材が脆化して起こる破壊で、時間遅れ破壊の略称である。

さらに本課題で対象とする1.6~2 GPaの引張強度は冷間金型工具の強度に匹敵する。このような超高強度鋼材になると焼鈍による軟質化も困難となりボルトへの冷間鍛造成形も大きな問題となる。したがって、冷間成形と焼入れ・焼戻し処理 (調質処理) からなる調質処理プロセスでは1.4 GPa級超高力ボルトを超えた超々高強度ボルトの開発はすでに限界であった。

このような背景のもと、研究代表者らは、鋼材の変形抵抗が室温よりも低くなる500~700 °C付近の温間温度域で鋼材を加工熱処理するとともにこれをボルトに鍛造成形するという軟質化焼鈍処理省略型の新しいボルト製造プロセスを開発した。この温間加工プロセスで創製されるボルトは超微細な繊維状の結晶粒組織を有し、1.8 GPaの超高強度でも調質処理ボルトよりも壊れにくい特徴を示す。破壊特性の向上は、超微細結晶粒組織の長軸方向に沿って相対的に脆い結晶面や粒界を分布させると同時にその短軸方向には靱延性に優れた結晶面を分布させることによる。とくに長軸方向への優先的なき裂の発生がボルトの破断を抑制する方向に導くことから開発ボルトはフェールセーフ機能を有しているとみなせる (以下、フェールセーフ (FS) ボルトと記す)。

2. 研究の目的

本研究では、既存の1.4GPa級超高力ボルトの強度レベルを上回る超々高強度FSボルトを土木建築構造物、機械構造物などの接合部に適用するために必要な基礎的データを収集することを目的とした。

1) まず強度レベルが1.6~2 GPaのボルト素材 (FS鋼材) から超々高強度FSボルトを創製し、これらのFS鋼材およびボルトの金属組織と力学性能を確認した後に、FSボルトに適したナット、座金を設計、試作した。

2) ついで、これらのFSボルトセットを用いて純せん断・摩擦接合形式の要素試験を実施した。得られた結果から日本鋼構造協会に設置されたメカニカルファスニング技術

小委員会で、FSボルトの鋼構造接合部への適用性を議論した。

3. 研究の方法

1) FS鋼およびボルト創製と基本性能評価

まず、FSボルト素材として、(0.2-0.6) % C-2%Si-1%Cr-1%Mo鋼を100 kg真空溶解で作製した。ついでこれらの素材をNIMSの材料創製・加工ステーションが保有する温間溝ロール圧延装置を用いて500 °Cで温間圧延しFS鋼を作製した。FSボルトは、前述のFS鋼を用いて、温間域でのボルト頭部鍛造およびねじ転造によりJIS M12の六角ボルト形状のものを試作した。ボルトの引張強度は鋼材の炭素量を変えることで1.6~2 GPaに制御した。ナット、座金は、切削加工により作製し、調質処理でFSボルトに適した強度レベルに調整した。

FS鋼材およびボルトの組織は、光学顕微鏡法、走査型電子顕微鏡法、電子後方散乱回折法 (EBSP) などにより観察した。また、基本力学性能は、FS鋼材から切り出した引張試験片およびVノッチシャルピー衝撃試験片を用いて評価した。加えて、FS鋼材の遅れ破壊特性も水素を陰極チャージした切欠試験片を用いた低歪速度引張試験と腐食促進試験による促進試験で評価した。ボルト引張変形性能はくさび引張試験で評価した。

2) 純せん断試験、摩擦接合試験

FS鋼材に純せん断力が作用した場合の破壊特性 (最大耐力) を把握するために、直径6 mmの丸棒材を用いた純せん断実験を実施した。純せん断試験では、従来の調質処理による超々高強度材、建築で一般的に用いられる普通鋼も対象に試験を行い、破壊特性の比較を行なった。

次に、FSボルトの特性 (引張強度が高い) が活かせる高力ボルト摩擦接合部の要素実験を実施し、構造要素としての降伏耐力 (摩擦接合に主すべりが生じる荷重) を考察した。高力ボルト摩擦接合部は、高力ボルトの初期導入張力と鋼材間の摩擦係数の積で得られる抵抗力を用いた接合形式であり、高いボルト張力が導入できれば、それだけ高い荷重まで接合面ですべりを生じること無く、抵抗できる機構となっている。なお、摩擦接合形式の試験体形状は、日本建築学会が刊行する指針に基づいて設計し、実設計を想定した試験体形状とした。

最後に、FSボルトを用いたせん断力と曲げモーメント (複合応力) を受ける高力ボルト摩擦接合部の実験を実施し、ボルト単体としては、初期導入ボルト張力と摩擦面のすべり係数のみで決まる性能で (ボルトサイズ・鋼材規格によらない)、複合応力が作用する高力ボルト接合部の力学的性能が評価できるかを実験的に検証した。実験では、現在の建設現場で利用される従来型の高力ボルト (1 GPa級高力ボルト) を用いた試験体も比較の

ために準備し、その構造性能を比較した。なお、接合部実験の試験体も、日本建築学会の指針に倣って設計を行なった。

4. 研究成果

1) FS 鋼とボルトの基本性能

表 1 は、FS 鋼材の引張変形特性を示す。炭素量を 0.2～0.6% の範囲で制御した (0.2-0.6)%C-2%Si-1%Cr-1%Mo 鋼材では、引張強さが 1.6~2.0 GPa の FS 鋼材を創製できた。とくに FS 鋼では室温でのシャルピー衝撃吸収エネルギー vE が 200 J 以上の大きな値を示す点が大きな特徴であり、この値は既存の超高強度鋼の vE の数倍以上に相当する。

また引張強さが 1.8 GPa 級の FS 鋼材の遅れ破壊特性評価では、遅れ破壊を起こす限界水素量と大気腐食環境からの最大侵入水素量の比較により、FS 鋼が優れた耐遅れ破壊特性を有していることを明らかにした。

表 1 FS および調質 (QT) 鋼の機械的特性

鋼材名称	σ_y (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	EL (%)	RA (%)	vE (J)
16T(HY2)	1696	1644	15.3	57.2	251
18T(HY3)	1880	1875	14.2	45.2	219
20T(HY4)	1941	2026	9.8	26.2	256
HY4QT	1583	2003	9.2	24.9	-

図 1 に、FS 鋼の金属組織の一例を示す。FS 鋼では棒鋼材の長手方向に平行に、短軸粒径が約 0.3 μm の超微細な繊維状結晶粒組織が形成されていることが確認できた。このような超微細繊維状結晶粒組織は、FS ボルトのねじ部でも維持されていた。

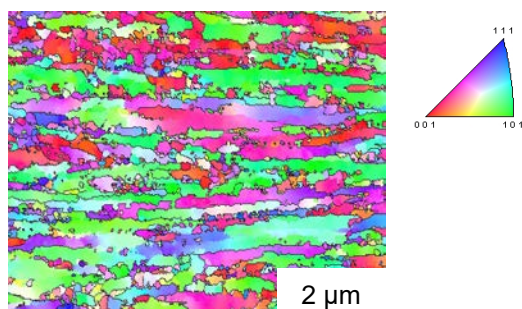


図 1 1.8 GPa 級 FS 鋼材の EBSP 分析で得られた逆局点図方位マップ。図中の黒線は、結晶方位差 15° 以上の結晶粒界を示す。

表 2 に FS ボルトのくさび引張試験結果を示す。(0.2-0.6)%C-2%Si-1%Cr-1%Mo 鋼の FS 鋼材の温間鍛造により 1.6~2.0 GPa 級の FS ボルト (16T-20T) が創製できた。なお、FS 鋼材と比較すると、FS ボルトの降伏強さが低くなっている。これは温間頭部成形時に首下 R 部近傍に形成される軟化部に関係する。また、いずれの FS ボルトもねじ部で破断し、その破面様相は竹や木材を引きちぎったときのそれと類似しており、既存の調質ボルトの壊れ方とは明らかに異なっていた。すなわ

ち、FS ボルトが破断しにくいことが確認できた。

表 2 FS ボルトのくさび引張試験結果

FS ボルト 名称	σ_y (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)
16T	1586	1639
18T	1731	1807
20T	1876	1970

また、ナットについては、その高さは、JIS B 1181:2009 で規定される M12 ナット製品の高さの約 1.2 倍の 14 mm±0.5 mm とし、硬さをビッカース硬さ Hv430~450 に調質処理した。一方、座金は JIS B 1181:2009 で規定される形状と新規形状 (F10T_M16 ボルト用の座金サイズと同等) のものを作製し、それぞれの硬さを Hv550-580 および Hv410-430 (F10T_M16 ボルト用の座金硬さ規格と同等) に調質処理した。

2) 純せん断試験、摩擦接合試験

図 2 に純せん断試験の結果を示す。横軸は FS 鋼材の引張強さ、縦軸は実験より得た最大せん断応力度である。図中の実線は実設計で利用されている理論式である。図に示すように、純せん断力下の FS 鋼は他の鋼材 (SS400, SM490A, HY4QT) と同様の傾向を示し、現行の設計式を利用してせん断耐力を評価できることを確認した。

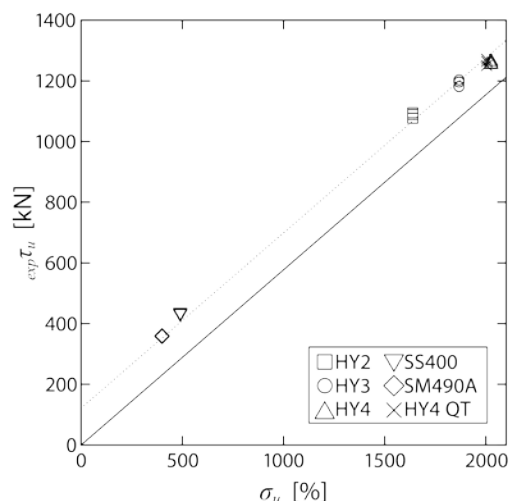


図 2 最大せん断応力度と引張強さの関係

高力ボルト摩擦接合部の要素試験では、表 3 に示す FS 鋼名称に対応する試験体の引張試験を各 4 体実施し、すべり係数の大きさを測定した。実設計で用いられるすべり係数は 0.45 であり、表 3 が示すように、試験では大きく上回る結果を得た。また、すべり係数のばらつき (変動係数) も日本建築学会の指針が示す 0.08 を下回っており、妥当な結果となることを確認した。FS ボルトを用いた摩擦接

合部の降伏耐力（すべり耐力）が現行の設計式で評価できることを確認した。

表 3 FS ボルト強度毎のすべり係数

FS ボルト 名称	平均値	標準偏差	変動係数
16T	0.759	5.26×10^{-2}	0.07
18Ta	0.723	1.30×10^{-2}	0.02
18Tb	0.761	3.35×10^{-2}	0.04
20T	0.700	0.99×10^{-2}	0.01

初期張力を導入する高力ボルト接合部では、時間経過と共に張力が抜ける「リラクゼーション」が一つの問題となりうる。図 3 は FS 鋼ボルトの張力推移を示している。従来高力ボルトと同様に、初期 12 時間以内に張力の抜けが確認できるが、それ以降では抜けはなく、従来高力ボルトと同等のリラクゼーション特性であることを確認した。従来高力ボルトと同様に扱うことが可能である結果を得た。

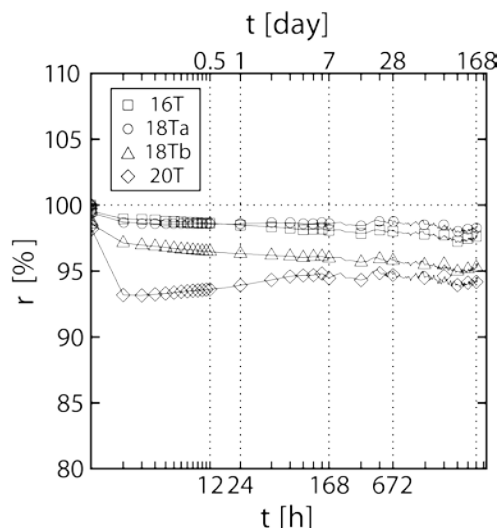


図 3 リラクゼーション特性

高力ボルト群に応力が作用する高力ボルト摩擦接合部の実験結果を図 4 に示す。図中 PB2 が FS ボルト（ボルト呼び M12×5 本）、PB3 が従来高力ボルト（ボルト呼び M16×5 本）の結果であり、その他の部材寸法は同一としている。接合部の性能である降伏耐力・最大耐力は同程度の性能を確保できていることが確認できる。したがって、現行の設計で FS ボルトが利用可能であることを示唆している。さらに、最大耐力以降の挙動を見ると、PB3（実線）は急激に耐力劣化が起きているのに対し、PB2（破線）は PB3 と比較すると緩やかな耐力劣化となっており、FS ボルトの破壊特性が靱性的であることがこの挙動に現れたと推察できる。詳細については、今後の検討課題である。

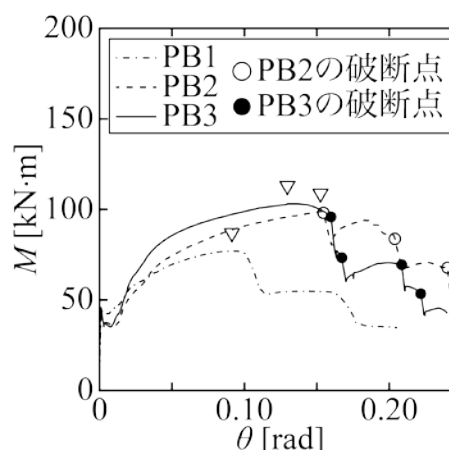


図 4 高力ボルト摩擦接合部の荷重変形関係

5. 主な表論文等

（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 3 件）

- ① 佐藤篤司, 鈴木宏彰, 木村勇次, フェールセーフ鋼を用いた超々高強度ボルトの摩擦接合部の実験, *鋼構造年次論文報告集*, 査読有, 25 巻, 2017, 84-91.
- ② Y. Kimura, T. Inoue and E. Akiyama, Warm tempforming effect on the hydrogen embrittlement of 1.8-GPa-class ultra-high-strength low-alloy steel, *Mater. Sci. Eng. A*, 査読有, Vol.703, 2017, 503-512. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.091>
- ③ Y. Kimura and T. Inoue, Combined effect of ausforming and warm tempforming on the strength and toughness of an ultra-high strength steel, *ISIJ international*, 査読有, Vol.56, 2016, 2047-2056. DOI:<http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-275>

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 木村勇次, 超々高強度ボルトの開発の現状, 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会, 2017 年 12 月 19 日, 招待講演, 大阪建築健保会館.
- ② 芹川拓人, 鈴木宏彰, 佐藤篤司, 木村勇次, 超々高強度フェールセーフボルトを用いた摩擦接合部の性能評価 その 1 フェールセーフ鋼のせん断荷重下での破壊特性, 2017 年度日本建築学会大会（中国）, 2017 年 8 月 31 日～9 月 3 日, 広島工業大学.
- ③ 鈴木宏彰, 佐藤篤司, 木村勇次, 超々高強度フェールセーフボルトを用いた摩擦接合部の性能評価 その 2 すべり試験, 2017 年度日本建築学会大会（中国）, 2017 年 8 月 31 日～9 月 3 日, 広島工業大学.

- ④ 鈴木宏彰, 佐藤篤司, 木村勇次, 超々高強度フェールセーフボルトを用いた摩擦接合部のすべり係数, 2016年度日本建築学会東海支部講演大会, 2017年2月20日~21日, 名古屋工業大学.
- ⑤ Y. Kimura and T. Inoue, Influence of prior-austenite grain structure on delamination toughening of ultra-high-strength low-alloy steels processed by warm tempforming, Thermec 2016, 招待講演, 2016年5月29日~6月3日, Graz, Austria.

〔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〕

ホームページ等

竹のようにしなやかな鉄,
<https://www.youtube.com/watch?v=14EgPAmv9x0>

6. 研究組織

(1)研究代表者

木村 勇次 (KIMURA, Yuuji)

国立研究開発法人・構造材料研究拠点・主席
研究員

研究者番号：80253483

(2)研究分担者

佐藤 篤司 (SATO, Atsushi)

名古屋工業大学大学院・工学研究科・准教授

研究者番号：00362319

(3)研究分担者

鈴木 康夫 (SUZUKI, Yasuo)

京都大学大学院・工学研究科・助教

研究者番号：50431698