# 引抜成形GFRPボルト接合部における ボルト軸力低下に関する考察

# 松本 幸大

正会員 豊橋技術科学大学 准教授 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ケ丘1-1)
E-mail:y-matsum@ace.tut.ac.jp

FRPは軽量・高強度で、耐久性に優れていることから建設構造物へ応用されつつあり、それらの設計事例も見られる。FRPを主構造部材とした接合方法は機械接合や接着接合、両者を併用させた接合方法等が用いられており、機械接合を行う場合、支圧接合が一般に用いられるが、摩擦力を期待した接合の検討も行うことで高強度材料の特性をより発揮できると考えられる。しかし、FRPは樹脂が粘弾性の性質を有することから、鋼構造で主として用いられている高力ボルト接合を援用しようとすると軸力や耐力の経時変化が予想される。そこで本研究では、鋼/FRPボルト接合部に対し、座金の板厚などの実験変数を設定し、ボルト軸力の変化を長期的に計測した結果について考察するとともに経時変化の実験式を提案する。

Key Words : GFRP, bolted joint, bolt tension, relaxatioin

#### 1. はじめに

軽量・高強度で、耐久性に優れているFRPの建設構造 物へ応用が広がっており,実験・解析研究資料や実構造 物の調査結果なども公表されている<sup>1,2</sup>。FRPを主構造部 材とした接合方法は機械接合や接着接合,両者を併用さ せた接合方法等が用いられており,機械接合を行う場合, 支圧接合が一般に用いられるが、接合部にクリアランス を有する支圧接合は初期変形段階での剛性が低い点が懸 念される<sup>23</sup>。また、引抜成形材では強化繊維が主として 軸方向となっている場合が多く, その場合, 材料強度に 比して支圧強度が低いことから、接合効率を上げるため には多数のボルトが必要になるなどの課題がある。支圧 強度に関しては、筆者らの実験研究<sup>4</sup>において、多軸基 材を用いたFRP板の高い支圧強度が明らかとなっている が、建設構造部材として用いる際に都合が良い等断面長 尺部材は引抜成形によって制作されることが多く、その 際に多軸強化基材を多く用いることは製造コストの上昇 や、部材軸剛性の低下につながってしまう。こうしたこ とから, FRP機械接合部においても鋼構造接合部と同様 の摩擦接合を利用することを目的とした研究開発が進め られている<sup>2</sup>。しかし、FRPを構成するマトリックス樹 脂は粘弾性の性質を有し、中でも鋼構造で主として用い られる高力ボルト接合部では高い張力で締め付けること

から軸力や耐力の経時変化が報告されている5.70。

そこで本研究では、FRPと摩擦面処理された鋼板との 複合構造接合部を想定し、ボルト締付後の軸力のモニタ リングおよび軸力低下傾向の把握、さらに軸力低下の予 測式の提案を行う。これらの結果を踏まえ、鋼FRP複合 構造の接合部設計に必要な基礎的な資料を得ることを目 的としている。

#### 2. 使用材料

試験体は表-1,図-1に示す引抜成形GFRP溝型断面材 (AGCマテックス プラアロイ C100B [-100x48x 6.3x6.3,繊維含有率57%)とショットブラスト処理され た鋼板(PL-9,SS400)を用いた。図-1には本実験で用い るFRP材の構成も示している。用いたGFRP材は主とし て軸方向繊維で構成されており、ボルト締めによる面外 応力に対してはマトリックス樹脂(不飽和ポリエステル 樹脂)の影響が大きいと考えられる。

表-1 FRPの機械的性質

	規格値	実験値
引張強度 [MPa]	平均350以上	435
縦引張弾性係数 [GPa]	平均27以上	38



# 3. 試験体と試験変数

実験変数を表-2に示す。ボルト軸力の計測にはボルト 軸部の被接合材厚さの中央位置に歪ゲージを埋め込むこ とでボルトの軸歪を計測し、ボルト軸力に換算する方法 を採用した。図-2に試験体の概要と試験の様子を示す。 高力ボルトはF10T, M20を用い, ボルト孔径はボルトの 呼び径に2mm加えた値とした。実験変数は座金、座金の 厚さ、本締めトルク値としている。座金は高力ボルトセ ットに標準添付されている丸座金に加え、角型座金(56 ×56mm) を用いている。これはJISB1256 平座金 附 属書に示されている寸法の座金であり比較的入手しやす いものとして採用した。角型座金の板厚は4.5,6,9mmと した。ボルトの本締めトルク値は高力ボルト標準ボルト 張力相当の475Nmに加え, 300,150,60Nmとした。なお 60Nmの締付トルクはM20用バネ座金が閉じるトルクに 相当する。各試験体名はそれぞれ、W40が高力ボルトセ ットの丸座金, W56が角型座金でその後のPLはその板厚, T475,T300,T150,T60が本締のトルク値を意味している。 また、トルク値が300Nmと475Nmの試験体ではトルク値 150Nmで1次締めを行った。締付時のトルク管理はプリ



図-3 試験状況

セット型トルクレンチを用いて行った。図-2および図-3 に試験体の一例と試験状況を示す。

## 4. 試験結果

図4に実験より得られたボルト軸力の時刻歴を示す。 計測期間は約1ヶ月とし、屋内環境下で行った。図4よ り締付直後に軸力は急激に低下し、その後は緩やかな変 化となっている。ボルトの締め付けは、プリセット型ト ルクレンチによって管理しているが、高力ボルトセット のみで締め付けた試験体についてはボルト軸力にバラつ きが大きいが、大型座金を用いることで安定した導入ト ルクとなっていることが分かる。図-5は図4の横軸を経 過時間(秒)の常用対数で表したものである。図-5より ボルト張力の低下は概ね線形の変化を示していると言え る。このことから、長期変化の予測も可能であることが 示唆される。図-6には締付1ヶ月後の残存ボルト軸力率

変数

ボルト種	座金	締付トルク [Nm]	試験体名
高力ボルトセッ F10T, M20 高力ボルトセット+PL 高力ボルトセット+PL	高力ボルトセット	60	W40T60
		150	W40T150
		300	W40T300
		475	W40T475
	高力ボルトセット + PL4.5角型座金	150	W56PL4.5T150
		300	W56PL4.5T300
		475	W56PLA.5T475
	高力ボルトセット+PL6角型座金	150	W56PL6T150
		475	W56PL6T475
	高力ボルトセット+PL9角型座金	150	W56PL9T150
		300	W56PL9T300
		475	W56PL9T475





を示す。残存実力率は初期ボルト張力で締付1ヶ月後の ボルト軸力を除した値である。試験体ごとのバラつきは あるものの,トルク値の上昇に伴って残存軸力率が低下 することが分かる。一方,大型の座金である角型座金を 用いること、またその板厚を厚くすることで残存軸力率 が上昇することが分かる。これは、高張力で締付けるこ とでFRP のクリープ変形が大きくなったためであると考 えられる。また、全ての試験体において、角型座金を用 いることで約5~10%改善されていることがわかる。こ れは、FRPと鋼板の接する面積が大きくなることで応力 が平面的に分散したためであると考えられる。さらに、 座金の厚さを大きくすることで更に5%前後改善されて いることがわかる。これは、厚さが増すことで応力がよ り広範囲に分散したためである。

#### 5. ボルト軸力の経時変化に関する推定式

本章では,前章の結果を基にボルト軸力の経時変化に 関する推定式を考察する。粘弾性体の時刻歴変化は,一 般にMaxwellモデル・Kelvin–Voigtモデル等で表現される が、ボルト張力低下の傾向としては、締付直後に急激に 低下し、その後は緩やかな変化となる性状であり、上記 のモデルでは時刻歴変化に対応した物理定数の設定が困 難であったこと、並びに既往の樹脂材料のクリープ特性 を分析した結果<sup>例えば文解8</sup>を参考に次式を提案する。

$$T = T_0 \left( 1 - C_1 \times \sigma_0^{C_2} \times t^{C_3} \right) \tag{1}$$

ここで、Tはボルト締付t秒後のボルト張力、T<sub>0</sub>は初期 のボルト張力、tはボルト締付後の経過時間[秒]、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、 C<sub>3</sub>は実験より求める定数である。また、G<sub>0</sub>はボルト軸力 によってFRP板材に作用する面外圧縮応力度であり、図-7に示すようにボルト頭の座面径d<sub>w</sub>から45度方向に広げ た影響部の面積で初期のボルト張力を除した値である。 これにより、大型座金やその板厚による応力分散の影響 を考慮している。図-7より、G<sub>0</sub>は次式より算出できる。

$$\sigma_{0} = T_{0} / \left\{ \frac{\pi}{4} \left[ \left( d_{w} + 2t_{w} \right)^{2} - d_{H}^{2} \right] \right\}$$
(2)

ここで $t_w$ は座金の総厚さ、 $d_H$ はボルト孔径である。また、 JIS B 1186を参照すると、F10T、M20の場合、 $d_w$ は29mm、 高力ボルトセットのみの場合の $t_w$ は4.5mmとなる。



凶-7 小小下按古前00小在凶

図-8に式(1)を用いて算出したボルト張力の経時変化の 状況と、図-4で示した実験結果との比較例を示す。実験 の結果より、式(1)の各定数はC<sub>1</sub>=0.1, C<sub>2</sub>=0.1, C<sub>3</sub>=0.055とし た。実験は各試験変数について2体以上行っているが、 締付時の導入トルクの誤差により初期ボルト軸力T<sub>0</sub>に差 があることから、各試験変数について1例のみを示して いる。全ての試験体において実験結果と良い対応を示し ており、全ての試験体において実験結果と良い対応を示し ており、全ての試験体において、締付後10日~1ヶ月の 範囲において、+5%~-10%の範囲で推定可能であるこ とが分かった。従って、推定式は導入トルクの大きさや 大型座金の使用によるFRPの面外応力低減等の影響を加 味してボルト軸力の経時変化が分析な可能であると考え



図-8 ボルト軸力の経時変化と推定結果との対応

ボルト軸力[kN]



図-9 推定式による長期のボルト軸力の経時変化

られる。

図-9には、式(1)を用いてF10T, M20 ( $T_0$  =180kN)のボルト軸力の経時変化を長期に亘って計算した結果である。 図-9より式(1)は経過時間が無限となっても、ある値に収束する関数とはなっていない。しかしながら、推定範囲としては長くとも数十年と考えられることから、実用上、問題ないと判断している。図-9より、ボルト軸力100kNに達する経過時間を例にとると、高力ボルトセットのみの場合は約1年、本研究で用いた56mm×56mmの角型座金で板厚4.5mmを用いると約3年、板厚9mmでは約10年が得られる。

文献5)では、板厚12mmのGFRP(繊維含有率56.5%、 基材構成は図-1に同じ、マトリックス樹脂はビニルエス テル)を板厚9mmの鋼板で挟み込み( $t_w$  =13.5mm), F10T, M20で192kNと216kNの軸力で締め付けた場合の経 時変化が報告されている。本報の試験条件と近いことか ら結果を比較すると、式(1)による評価は、1ヶ月で約 25%、1年で約40%の低下となり、実験結果<sup>9</sup>の約15%、 約20%に比して大きい結果となった。この原因としては、 鋼板表面処理の状況の違いや樹脂・繊維配向の影響が考 えられるが、式(1)の時間に関する係数 $C_3$ のみを0.038する と、良く対応することが確かめられている。

以上の分析より,式(1)の形式でボルト軸力の経時変 化を仮定することが可能で,1ヶ月程度のボルト軸力変 化をモニターすることで,概ね材料のボルト張力低下傾 向が把握できると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では鋼板とFRP を用いた複合構造接合部の力学 特性についてボルト軸力の計測を通して、その軸力低下 の傾向と改善法、さらに軸力低下の推定式を提案した。 得られた知見を以下に示す。



図-10 文献5)の残存軸力に対応した式(1)の係数

- 角型座金を用いることや、その板厚を増し、FRPへの面外圧縮力を低減することでボルト軸力の低下を改善できることを示した。
- 2) 式(1)の形式でボルト軸力の経時変化を推定可能で あることを示した。

なお、本試験変数の範囲では、ボルト径およびFRP板厚 の変数が考慮されていない。今後、本研究で提案した*C*<sub>1</sub> ~*C*<sub>3</sub>が他のボルト径においても適当可能であることを 確かめる予定である。また、板厚が増すことで残存軸力 率がより低下することが予想されるが、これは式(1)の*C*<sub>1</sub> にFRP板厚のパラメータを導入することを予定している。

謝辞:本研究の一部は科学研究費補助金 若手B(課題 番号23760522,26820229)の助成を受けたものです。実験 には元豊橋技術科学大学 博士前期課程 中森啓太氏を はじめの古賀惟彬氏,川北拓未氏の多大な協力を得た。 AGCマテックス 西田賢二氏には,材料提供および材 料に関するコメントを頂いた。ここに記して謝意を表し ます。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:構造工学シリーズ 14 FRP 橋梁-技術と その展望-, 2004
- 2) 土木学会:複合構造レポート 09 FRP 部材の接合お よび鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 2013
- 中村一史,前田研一,睦好宏史,松井孝洋,柳沼謙 ー:リベット接合と接着接合によるハイブリッド FRP桁の連結方法に関する実験的研究,第4回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム 講演概要集, pp.95-103,2012.11
- 松本幸大,山田聖志,花田幸大,川北拓未,小宮巌: GFRP および HFRP 形材の支圧強度と破壊性状,強化 プラスチックス,第58巻,第2号,pp.46-48,2012.2
- 木嶋健,勝野壽男,小林憲治,日野伸一,西崎至: FRP ボルト接合における軸力の経時変化に関する実験的検討,土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要 集,CS10-004, pp.449-450, 2006.9
- 6) 橋本国太郎,杉浦邦征:高力ボルト摩擦接合された

GFRP 部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的 考察, 土木学会 構造工学論文集, Vol.58A, pp.935-945, 2012.3

- 松本幸大,中森啓太,山田聖志: 引抜成形 FRP 部材 を用いた摩擦接合部の長期性状に関する考察,日本 建築学会 構造工学論文集,Vol.59B, pp.93-99, 2013.3
- 8) 松原知子,田中享二,内田昌宏:エポキシ樹脂系塗 り床材の圧縮クリープの計測,日本建築学会関東支

部研究報告集, pp.145-148, 1998.2

- 渡辺武美:ガラス繊維強化不飽和ポリエステル樹脂 のクリープ挙動,高分子論文集, Vol.39, No.1, pp.15-21, 1982
- 10) 山本晃:ねじ締結の原理と設計,養賢堂, 1995

## Fundamental study of relaxation of bolt tension for joint of plutruded GFRP

## Yukihiro MATSUMOTO

FRP have recently applied to various civil structures and the retrofit technique has also been developed. However, it was pointed out that a bolt tension decreases when a structure is composed of FRP. In this paper, the monitoring of the bolt tension were carried out through various experiments and the estimation method of the relaxation of bolt tension were investigated. Firstly, the effects of washers for bolt tension of FRP/Steel composite joints were investigated in detail. Secondly, the out-of-plane simplified stress distribution of FRP member is calculated by the idealized model. Based on these, the estimation method of remaining bolt tension is simply proposed in this paper.