

継手板厚が高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手のすべり挙動に及ぼす影響

鋼構造研究室 千藏航大
指導教員 林 巖

1. はじめに

近年、土木構造物の老朽化が顕在化する一方、維持管理に携わる土木技術者数の減少が指摘されている。このため、「耐久性」と「施工性」を両立する技術の重要性が増している。このような要求に対し、軽量性・耐食性・比強度に優れた GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) は有力な材料選択肢であり、橋梁付属物や二次部材への適用が期待されている。GFRP 部材の接合方式としては、現場施工性と継手耐力の観点から、高力ボルトを用いた摩擦接合が有力である。一方で、GFRP 継手では高軸力下で樹脂のクリープ変形が生じ、ボルト軸力が低下する懸念¹⁾がある。加えて、既往研究²⁾により GFRP 継手の適用可能性が示されつつあるものの、現行の鋼を前提とした高力ボルト摩擦接合の設計体系を GFRP へ適用する際、板厚などの条件がすべり挙動へ与える影響は十分整理されていない。そこで本研究では、GFRP を母板とする高力ボルト摩擦接合継手を対象として、母板板厚がすべり挙動に及ぼす影響を評価することを目的とする。

2. 研究概要

(1) 数値解析

本研究では、図 1(a)に示す母板に GFRP、連結板に鋼板(SM400A)を用い、F10T-M12 高力ボルト 2 本からなる 1 行 2 列の高力ボルト摩擦接合継手を対象として、母板板厚がすべり挙動に及ぼす影響を把握するための有限要素解析を実施した。図 1(b)は本研究で使用した解析モデルを示す。解析には汎用有限要素解析コード Abaqus/Standard 2025 を用い、モデルは継手の対称性を考慮した 1/4 モデルとした。GFRP 母板は直交異方性弾性体として定義し、メッシュには主に 8 節点低減積分ソリッド要素を用いた。接触条件は母板-連結板界面に設定し、面内方向の摩擦挙動は等方性クーロン摩擦モデルにより表現した。表 1 は GFRP の材料特性を示し、表 2 には鋼材の公称値を示す。解析ケースでは H を CFRP 積層時にチョップドストランドマット(CSM)を付加しないケース、M は CSM を付加したケースを示す。パラメータ解析では H-5 の材料定数を用い、母板板厚を $t=5, 8, 11, 14$ mm の 4 条件に設定し、板厚の影響を確認した。また、実験では直接把握が困難な接触面の面圧分布やすべりの進展過程についても解析的に評価し、板厚とすべり挙動の関係を考察した。

(2) すべり実験

数値解析で得られたすべり挙動の妥当性を検証するため、図 1(a)に示す 1 行 2 列の高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手を用いて引張荷重試験を実施した。試験条件のパラメータは表 1 に示す 4 通りである。荷重中のボルト軸力を把握するため、ボルト軸部平行部に 1 軸ひずみゲージを貼付し、継手軸方向に引張

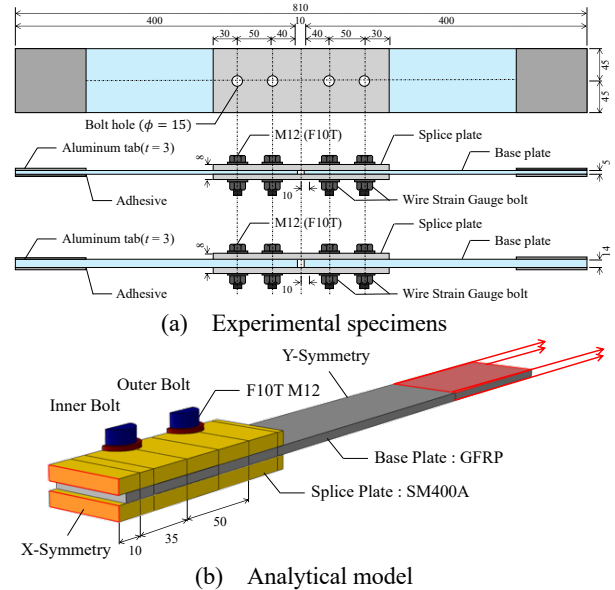


図-1 Research Subjects(Unit : mm)

表-1 Material properties of GFRP

Case	Material	Young's modulus (GPa)			Poisson's ratio			Shear elastic modulus (GPa)			Slip coefficient μ_1
		E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	
H-5	GFRP ($t=5$ mm)	22.5	24.0	24.0	0.2	0.2	0.2	5.0	10.0	10.0	0.488
H-14	GFRP ($t=14$ mm)	26.0	25.2	25.2	0.2	0.2	0.2	3.4	10.5	10.5	0.617
M-5	GFRP+CSM ($t=5$ mm)	27.9	26.6	26.6	0.2	0.2	0.2	4.6	10.7	10.7	0.538
M-14	GFRP+CSM ($t=14$ mm)	27.9	25.1	25.1	0.2	0.2	0.2	4.2	10.5	10.5	0.698

表-2 Material properties of steel

	Steel grade	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength σ_y (MPa)
Splice Plate	SM400A			337
High-strength bolt, Nut, Washer	F10T	200	0.3	1059

荷重を行った。荷重には最大荷重 2000 kN の万能試験機を用い、荷重速度は 0.5 kN/s とした。計測項目は試験機荷重および母板-連結板間の相対変位とし、相対変位はすべり側の縁端 10 mm 位置、内側ボルト位置、外側ボルト位置で計測を行った。

3. 解析・実験結果

(1) すべり挙動に及ぼす板厚の影響

図 2 は、板厚ごとの縁端 10 mm 位置における荷重と母板-連結板間の相対変位の関係について FEM 解析した結果を示す。荷重初期は荷重の増加に伴い相対変位が増加し、その後は一定荷重で相対変位が増加した。板厚が大きいほど、同一荷重に対する相対変位が小さく、荷重-相対変位曲線の初期の立ち上がり急となる傾向を示した。ここで、すべり到達前の荷重域における荷重-相対変位関係の勾配を継手の初期剛性 K_{int} と定義すると、 $t=5$ mm を 1.0 とした正規化値は、 $t=8$ mm で約 1.5、 $t=11$ mm で約 2.0、 $t=14$ mm で約 2.4 となり、初期剛性は板厚増加に伴

い単調に増大することが分かった。

(2) 荷重-相対変位関係

図3は荷重と母板-連結板間の相対変位関係を示す。実験・解析のいずれにおいても、载荷初期は概ね線形を示し、その後、非線形挙動へ移行して最大荷重となる。また、相対変位は外側ボルト位置が最大となり、内側ボルト位置および縁端10mm位置は概ね同程度の応答を示した。なお、Mシリーズについても荷重-相対変位関係の傾向はHシリーズと同様であった。表1の μ_1 は、実験により得られたすべり係数を示す。なお、本研究では最大荷重をすべり荷重 P_{slip} とし、式(1)により算出した。

$$\mu_1 = \frac{P_{slip}}{m \cdot n \cdot N} \quad (1)$$

ここに、 m ：接合面数、 n ：ボルト本数、 N ：ボルト軸力である。Hシリーズでは、母板厚5mmで $\mu_1=0.538$ 、母板厚14mmで $\mu_1=0.698$ となり、板厚14mmは5mmに対して約23%大きい結果となった。すべり係数の整理においてはCSMを含むMシリーズも同様に示し、M-5で $\mu_1=0.538$ 、M-14で $\mu_1=0.698$ と、板厚増加に伴う増大が確認された。なお解析ではすべり挙動の確認を目的として、実験で得られたすべり係数を摩擦係数として導入した。

(3) ボルト残存軸力

図4に、ボルト軸力残存率と、荷重をすべり荷重で無次元化した P/P_s の関係を示す。解析・実験ともに、 P/P_s の増加に伴い残存率が低下する傾向を示し、外側ボルトの低下が相対的に大きい。解析結果では、 $P/P_s=1.0$ における内外ボルト残存率の差はH-5で約3.5%、H-14で約1.5%であり、板厚の増加に伴いすべり到達時の内側ボルトの軸力低下が相対的に大きくなる傾向が確認された。実験でも同様に残存率の低下傾向が確認されたが、解析は実験に比べて残存率の低下をやや大きく評価する傾向がみられた。

(4) 面内せん断ひずみ

図5に母板の面内せん断ひずみコンターを示す。板厚5mmでは、外側ボルト孔縁部において高い値のせん断ひずみが局所的に集中する傾向が確認された。一方、板厚14mmでは、せん断ひずみはボルト孔周辺に局在せず、ボルトピッチ方向へ広範囲に分布した。これは、局所的な面外変形が抑制され、荷重が母板全体へ分散して伝達されたことを示唆する。

3. まとめ

- (1) 板厚をパラメータとした解析では、初期剛性は単調増加して $t=14$ mmは $t=5$ mmの約2.4倍となった。また、载荷に伴いボルト軸力は低下し外側ボルトの低下が大きい、内外差は板厚増加で縮小した。
- (2) すべり実験より、すべり係数は板厚に依存して増加した。板厚の比較ではCSMの有無にかかわらず $t=14$ mmで高いすべり耐力を示した。
- (3) 板厚の増加は荷重伝達をより広範囲へ分散させる方向に作用した。外側ボルト周辺から接触判定領域が縮小し、すべりは外側から内側へ段階的に進展する挙動を示し、外側ボルトの軸力低

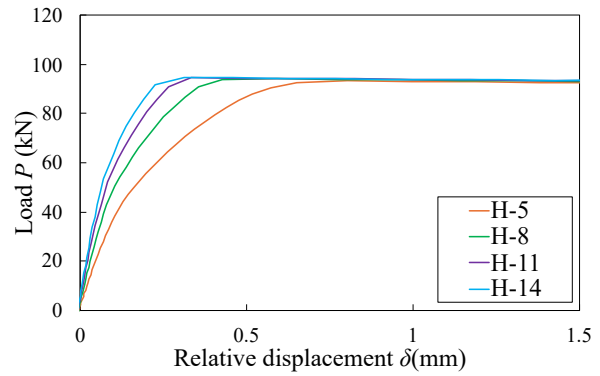


図-2 Relationship between load and relative displacement (FEM analysis for $t = 5, 8, 11, 14$ mm)

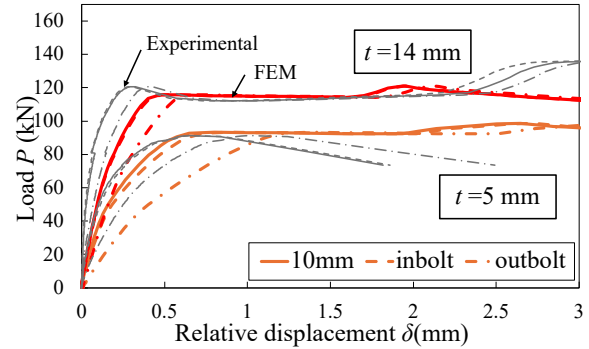


図-3 Relationship between load and relative displacement

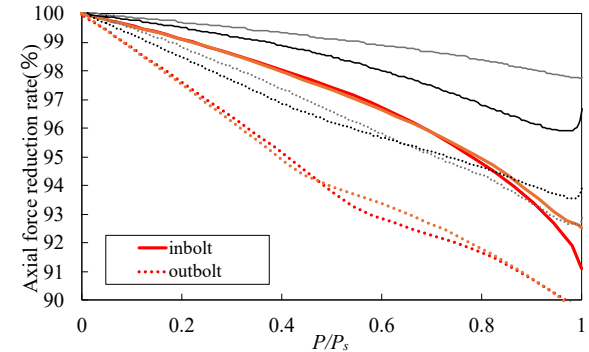


図-4 Relationship between axial force reduction rate and normalized load

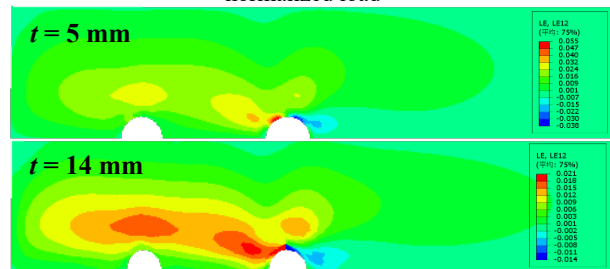


図-5 Contour mapping image of in-plane shear strain

下が先行する傾向と整合した。

REFERENCES

- (1) Hayashi, G., Sekimoto, M., Yamaguchi, T., and Kubo, K. Long-Term Relaxation Characteristics of Hot-Dip Galvanized High-Strength Bolted Frictional GFRP Joints: An Experimental Study, *J. Comp. Constr.*, Vol.29, No.1, 2025.
- (2) 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, 構造工学論文集, Vol.58A, 2012.