

高力ボルト摩擦接合された GFRP 材のすべり挙動に関する一考察

長岡技術科学大学 非会員 ○千蔵 航大
長岡技術科学大学 正会員 林 厳

1. はじめに

近年、橋梁や橋梁付属物の長期供用に伴い、腐食を含む経年劣化が問題となっており、高強度・軽量・高耐食性などの優れた性質を有する Glass Fiber Reinforced Polymer（以下、GFRP）の適用が進められている。これらの構造物の接合は、現在、支圧接合や接着接合が標準的に使用されている。一方、接合部の長期耐久性や現場施工性を考えると、高力ボルト摩擦接合が望ましい。現状、すべり耐力が確保することが実験的に明らかにされているため、いくつか適用実績はあるものの、摩擦挙動の解明に至っておらず、その設計法の確立には至っていない。

今後、FEM による摩擦挙動のメカニズムなど GFRP 継手の検討することを想定して、本研究では、まず、GFRP 継手のモデル構築を試みた。そして、GFRP 継手の引張実験との比較により、すべり挙動に関する考察を行った。

2. 研究概要

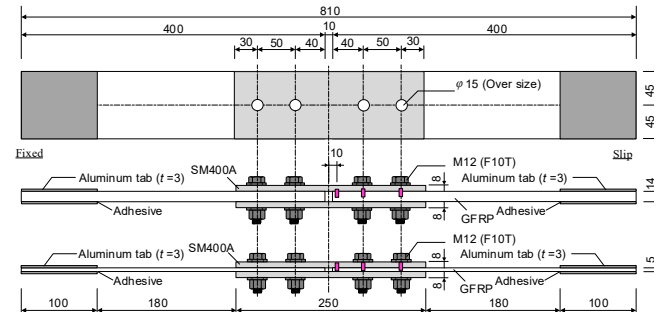
(1) 対象構造および既往研究の引張実験

図-1 に本研究で用いる短冊形すべり供試体の寸法および FE モデル、図-2 に母材 GFRP の積層構成、表 1 に材料物性値をそれぞれ示す。

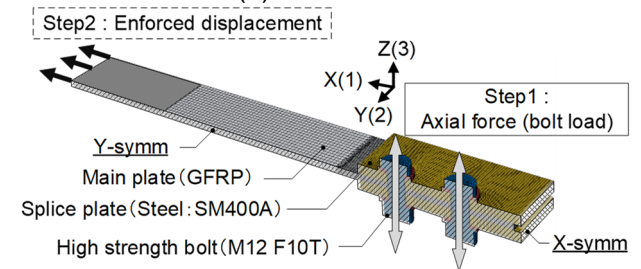
図 1 より、供試体は、実構造物における面圧になるように設計した、1 行 2 列の高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手¹⁾である。母材はロービングクロス材と、紫外線劣化によるロービング材の剥き出しを防止するために設けられたチョップドストランドマット（以下、CSM）を、人手で積層したハンドレイアップ成形材である。連結板は、ショットブラストで処理された SM400A である。使用高力ボルトは、M12 F10T として、導入ボルト軸力および载荷実験中のボルト軸力を測定するため、ボルト軸部の平行部に 2 枚の 1 軸ひずみゲージを貼付した。ボルト軸力は、1 週間のリラクセーションの後、载荷前のボルト軸力が 52.2kN となるように、ひずみ管理で締付を行った。

母材の板厚は、5mm と 14mm として、CSM は表層の一層のみであり、ロービングクロス材を増やすことにより、増厚させている。連結板の板厚は 8mm とした。

载荷実験は、図-3 に示すような最大荷重 2000kN の万能試験機を用い、荷重速度 0.5kN/s で引張荷重を加えた。計測項目は、試験機荷重および相対変位とした。なお、相対変位は、すべり側の縁端 10mm 位置、内側ボルト位置、外側ボルト位置の母材－連結板間の変位とした。



(a) 供試体形状



(b) 解析モデル

図-1 研究対象

表-1 試験ケース

Case	Molding method	Splice-plate thickness (mm)	Base-plate thickness (mm)	Surface layer lamination
M-C8-B5	Hand lay-up	8	5	CSM
M-C8-B14	Hand lay-up	8	14	CSM

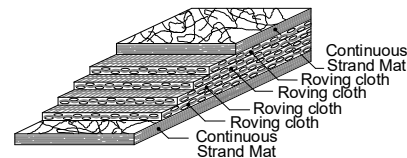


図-2 GFRP の積層構成

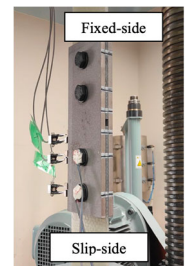


図-3 载荷実験

(2) 数値解析

図-1 に FEM に用いた解析モデルを示す。本解析は、汎用有限要素解析ソフトウェア Abaqus/Standard 2025 を用い、先述した GFRP 継手に対して、構造対称性を考慮した 1/4 モデルとした。表-2 より、鋼材には公称値を、GFRP には材料試験から得られた実測値を用いた。GFRP は直交異方性の弾性体と仮定

している。接触条件にはクーロン摩擦モデルを用いた。摩擦係数は、各ケースともに 5 体のすべり実験から得られたすべり係数を用いた。使用要素は 8 節点の低減積分ソリッド要素 (C3D8R) を使用した。解析ステップは、ボルト軸力を導入した後に、つかみ部に 2.5mm の強制変位を与えることで引張力を作用させた。

3. 結果および考察

表-2 にはすべり試験前のボルト軸力を用いて算出したすべり係数 μ_1 を示す。すべり係数は式(1)により算出した。

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

ここに、 P_{slip} ：すべり荷重、 m ：接合面数、 n ：ボルト本数、 N ：ボルト軸力である。

すべり係数は、母材厚 5mm では 0.538、母材厚 14mm では 0.698 であることが認められる。母材厚 5mm に対して、母材厚 14mm は約 23%大きい結果となった。これについての考察するため、FEM を実施した。なお、解析における摩擦係数は、すべり耐力を再現するために、実験で得られたすべり係数を導入した。

図-4 に試験機荷重と相対変位の関係を示す。相対変位は、母材と連結板間の差異を測定したものである。

実験および FEM いずれにおいても、母板厚 5mm では 30~40kN、母板厚 14mm では約 60kN までの範囲での勾配は線形を示す。この線形領域を超えると挙動は非線形となり、すべり荷重に到達した。また、相対変位は、外ボルト位置が最も大きくなり、内ボルト位置および縁端 10mm 位置はほぼ同等の応答であることがわかる。一般的な高力ボルト摩擦接合継手の場合には、外ボルト位置から順番に大きくなるが、GFRP 継手では、外ボルト位置のみが大きくなった。これは、母材の弾性係数が鋼材に比べて小さくなっており、外ボルトの外側のみが大きく変形したものと考えられる。

また、すべりが発生すると、荷重が一定で、相対変位が大きくなるが、母材厚 5mm の実験では、荷重低下していることがわかる。これは、母材 GFRP の破断が生じるものと考えるが、FEM では弾性体としてモデル化しており、破壊基準を導入していないため、その挙動が見られなかった。

鋼材の継手においては、すべり耐力と降伏耐力で評価するすべり耐力/降伏耐力によって、すべり係数が異なるため、低減係数などを用いて補正されるが、GFRP 継手の場合には、板厚 (母材の耐力) によってすべり係数が変わる可能性がある。このため、GFRP 継手の設計のための指標を今後検討する必要があると考える。

なお、現在のところ、FEM の初期勾配の傾向は実験と同様の結果を示しているが、その応答は大きく

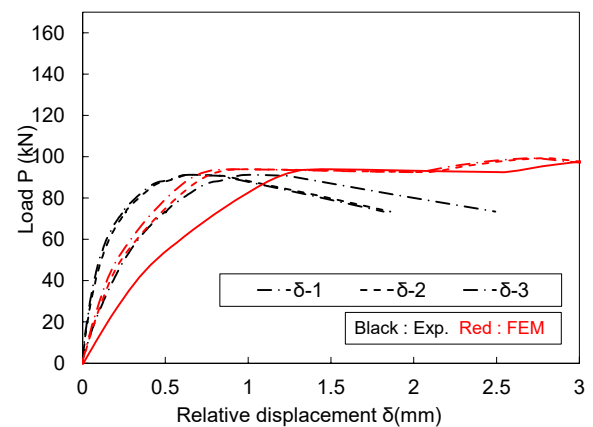
表-2 解析で使用する材料特性

(a) SM400A および F10T

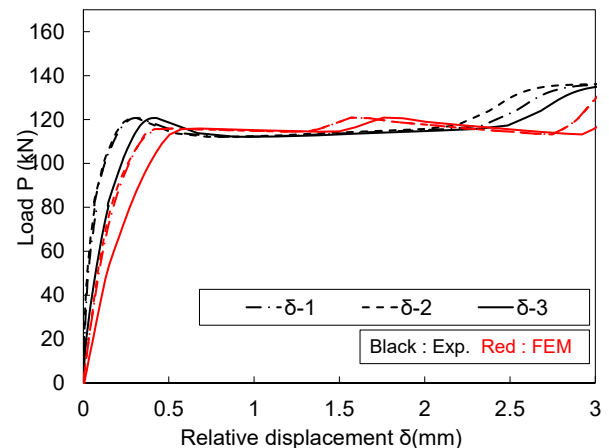
	Steel grade	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength σ_y (MPa)
Splice Plate	SM400A			337
High-strength bolt, Nut, Washer	F10T	200	0.3	1059

(b) GFRP の材料特性

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}	
GFRP+CSM (t=5mm)	28	27	27	0.2	0.1	0.1	4	4	4	0.538
GFRP+CSM (t=14mm)	28	25	25	0.2	0.1	0.1	4	4	4	0.698



(a) 板厚 5mm



(b) 板厚 14mm

図-4 荷重-相対変位関係

なっているため、今後はさらなる解析精度の向上について取り組む予定である。

参考文献

- 1) 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海: 溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手の表面処理がすべり挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1, Vol.69, pp.1035-1044, 土木学会, 2023.