第Ⅰ部門　材料特性のばらつき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

大阪公立大学大学院　学生員　○土生川　季永
大阪公立大学大学院　正会員　林　巌
大阪公立大学大学院　正会員　山口　隆司

1. 研究背景および目的

ガラス繊維強化ポリマー（Glass Fiber Reinforced Polymer：以下，GFRP）は軽量性，耐食性等に優れており，腐食環境下の土木構造物に適用されている．GFRP 同士の機械的な接合には，継手強度や現場施工性等の観点から，連結板に鋼材を用いた高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手の適用が望まれる．GFRP の材料特性は，鋼材よりもばらつきが大きいことが知られており，その影響を考慮して，設計すべり耐力を決める必要がある．しかし，材料特性のばらつきがすべり挙動に及ぼす影響やその程度は明らかでない．

本研究では，高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手を対象に，GFRP の材料特性をパラメータとした FE 解析を実施し，それらがすべり挙動に及ぼす影響を検討した．

2. 解析概要

汎用有限要素解析コード Abaqus/Standard2022[1]を用いて弾塑性有限変位解析を実施した．解析モデルを**図-1** に示す．諸元は文献 2)の試験体と同様とし，対称性を考慮して 1/4 モデルとした．母板が GFRP，連結板が SM400A の高力ボルト摩擦接合継手である．要素は主に 8 節点低減積分 6 面体要素を用い，メッシュサイズの遷移区間には 10 節点完全積分 4 面体要素を用いた．接触部分のメッシュサイズは 1mm を基本とした． 母板－連結板間には摩擦係数 0.522 のクーロン摩擦を付与した．基本ケースの材料特性には**表-1**, **表-2** に示す値を代入した．なお，母板の GFRP は弾性体としてモデル化した．解析ではボルト軸力を導入し，引張力として強制変位を与えた．パラメータは GFRP の材料特性とした．1 つの解析ケースで，9 つのうち 1 つの材料特性を変化させ，残りの材料特性は変化させた材料特性には影響されないとし，基本ケースの値を導入した．変動量はばらつきの影響を考慮し，±3σ（σ：標準偏差）とした[3]．

3. 解析結果および考察

図-2 に，材料特性をそれぞれ+3σ変化させた場合の荷重－相対変位関係を，**図-3** に，荷重 30kN 時点での母板

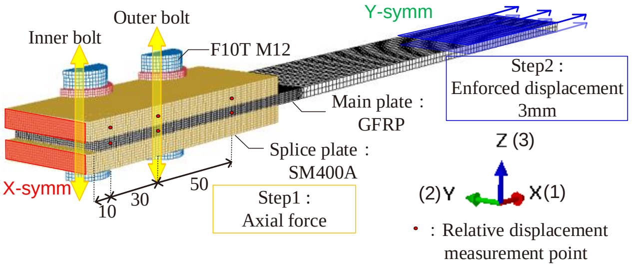


図-1　解析モデル

表-1　鋼材の材料特性

	Steel grade	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield point σ_y (MPa)	Second gradient E' (GPa)
Splice plate	SM400A	200	0.3	245.3	E/100
High-strength bolt, Nut, Washer	F10T			904.1	

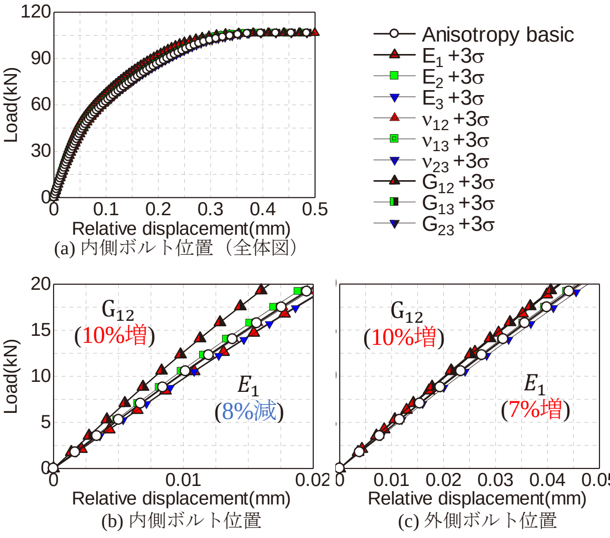
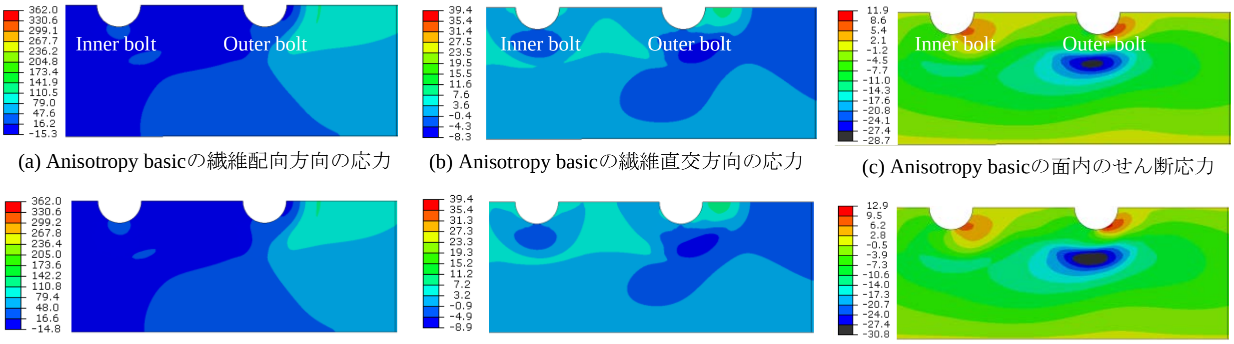


図-2　荷重－相対変位関係

表-2　GFRP の基本ケースの材料特性

	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
Mean	29.312	11.000	11.000	0.2	0.06	0.06	7.211	5.189	5.189
Standard deviation	2.124	1.265	1.265	0.00898	0.00269	0.00269	0.584	0.420	0.420

Toshie Habukawa, Gen Hayashi, Takashi Yamaguchi,
sj24502a@st.omu.ac.jp



(a) Anisotropy basicの繊維配向方向の応力　(b) Anisotropy basicの繊維直交方向の応力　(c) Anisotropy basicの面内のせん断応力

(d) E_1+3σの繊維配向方向の応力　(e) E_2+3σの繊維直交方向の応力　(f) G_{12}+3σの面内のせん断応力

図-3　荷重 20kN 時点での応力

に生じる応力を示す．**図-2** より，内側ボルト位置，外側ボルト位置のいずれにおいても面内のせん断弾性係数 G_{12} が荷重－相対変位関係の初期の傾きに及ぼす影響が最も大きかった．これは，高軸力で締結後に引張力を作用させることで外側ボルト位置よりつかみ部側の母板の変形が大きくなるためである．また，**図-3** の(a)~(c)より，特に外側ボルト周辺で，引張荷重 30kN 時点でせん断強度（27.4MPa）と同等の応力が生じ，繊維配向方向やその直交方向での引張強度や板厚方向のせん断強度に達する前に相対的に高い応力が発生している．さらに，**図-3** の(d)~(f)より，　G_{12} を変化させた場合に生じる応力も大きく，G_{12} が継手に及ぼす影響も大きい．

材料特性のばらつきの影響を考慮した結果と既往実験結果 [2]の比較を**図-4** に示す．**図-4** より，初期の傾きは，ばらつきを考慮することでそのばらつきの範囲内に概ね適合した．ただし，全体的な荷重－相対変位関係がばらつきの影響により大きく変化しておらず，30kN 以降の実験結果と基本ケースとの乖離は材料特性のばらつき以外の影響が大きいと考えられる．

図-5 にボルト軸力残存率を示す．横軸は荷重Pをすべり荷重（ここでは最大荷重P_s）で除して無次元化した値である．ボルト軸力は，すべり発生前に増加に転じる挙動を示した．**図-5** に示すように，ボルト軸力低下傾向に及ぼす材料特性のばらつきの影響は少ない．特に，外側ボルト軸力が増加に転じる荷重かつ内側ボルト軸力の低下傾向が非線形に変わる荷重レベル$P/P_s = 0.47$まではばらつきによる大きな影響はない．また，$P/P_s = 0.47$付近で外側ボルト軸力が増加に転じる時の軸力残存率を基準とした増加量はわずかであり，材料特性のばらつきの影響は小さい．内側ボルト軸力も同様の結果であった．これは，ボルト軸力残存率は母板及び連結板の板厚の変化に支配されているが，材料特性がばらついてもその変化自体は非常に小さいためであると考えられる．

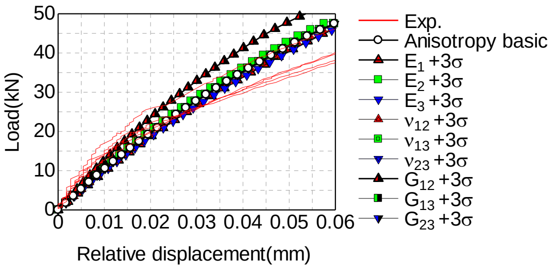
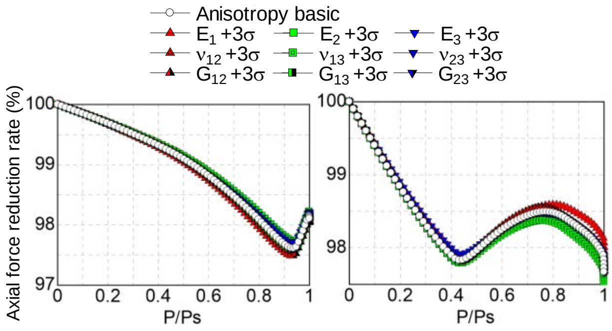


図-4　内側ボルト位置の荷重－相対変位関係の実験結果との比較



(a) 内側ボルト　(b) 外側ボルト

図-5　ボルト軸力残存率

4. 結論

高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手を対象として，材料特性のばらつきがすべり挙動に及ぼす影響を検討した．得られた主な知見を以下に示す．

1. 荷重－相対変位関係の初期の傾きに最も影響を及ぼす材料特性は面内せん断弾性係数G_{12}であり，±3σの変化に対し計測位置によって±10~23%変化した．
2. すべり荷重の 40%程度の荷重では，ボルト軸力残存率の変化に差異は見られなかった．また，すべり発生前に表れた軸力増加後のボルト軸力残存率のばらつきも小さかった．これは，材料特性のばらつきが板厚変化に与える影響は小さく，その結果，軸力残存率のばらつきも小さくなったと考えられる．

＜参考文献＞
1) SIMULIA：Abaqus/Standard user's manual, 2022
2) 関本ら: 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, Vol.79, No.14, 2023.
3) 土木学会：複合構造レポート 20 FRP 複合構造の設計・維持管理に関する最新の調査報告, 2023