GFRP 部材のボルト接合法に関する実験的研究

京都大学大学院　正会員　○橋本国太郎　　株式会社鴻池組　　山内　弘之
京都大学大学院　正会員　　杉浦　邦征　　株式会社ヒビ　正会員　日比　英輝

１．はじめに

現在，炭素繊維やガラス繊維を用いた強化繊維プラスチックを土木構造物へ適用する事例が増加しており，CFRP 板を用いたコンクリート部材や鋼部材の補強工法の開発や，GFRP 板による歩道橋の建設などが実際に行われている．このような状況の中，日本では，いまだに FRP 部材を道路橋などの大型の土木構造物の主要部材に適用した事例はない．この原因のとして，鋼材に比べ剛性が小さくたわみやすいということや，構造物が大きくなると，継手などの接合部分が必要となってくるが，現状では，大型の土木構造物に対する FRP 部材の接合方法が確立されていないことなどが挙げられる．このような接合方法に関する検討は，小林ら [1] による高力ボルト摩擦接合と接着剤の併用による検討など，いくつかの検討がなされている．また，日本で建設された FRP 製の歩道橋では，特殊な引張接合や支圧接合を使用しているのが現状である．本研究では，これらの背景を踏まえ，施工性も考慮した最適な接合方法を検討することを目的として，土木分野で多く使用されている高力ボルト摩擦接合，支圧接合，さらには施工性を改善した支圧接合法を提案し，それらの強度および施工性に関する評価を実験的に行った．

２．実験供試体

本研究で製作した実験供試体の一覧を**表-1** に，実験供試体の概要を**図-1** に示す．実験供試体は，文献 2）の標準試験体（片側ボルト配置：1 行 2 列，2 面摩擦）に準拠して製作した．実験供試体としては，摩擦接合シリーズ（F シリーズ）および支圧接合シリーズ（B シリーズ）の 2 シリーズを用意した．F シリーズでは，母板および連結板に GFRP を用いた F-GG 供試体, 母板に GFRP, 連結板にステンレス板を用いた F-GS 供試体, およびステンレス板のみのすべり係数を評価するための F-SS 供試体の 3 種類（3 体ずつ）を用意した．B シリーズでは，全ての供試体で，母板および連結板には GFRP 板を使用した．供試体の内訳は，通常の支圧接合供試体（B-N 供試体），摩擦接合の供試体の孔（φ22.5）とボルトとの隙間にエポキシ樹脂を注入し支圧状態とした B-I 供試体，および連結板のみ摩擦接合用の孔として，その隙間に特殊金属を挿入し支圧化させた B-S 供試体の 3 種類（1 体ずつ）を用意した．ただし，B-N 供試体では，土木分野で用いられる打込み式の支圧用高力ボルトは用いておらず，通常の摩擦接合用高力ボルトを用いた．また，耐食性を考慮すると，実際には亜鉛めっき高力ボルトもしくはステンレス製の高力ボルトを使う必要があるが, 本研究では耐食性の検討は行わないため，実験で使用したボルトは通常の F10T 高力ボルト（M20）である．実験に使用した GFRP 板の積層構成を**表-2** に，GFRP 板とステンレス板の機械的性質を**表-3** に示す．なお，GFRP 板はハンドレイアップによって製作した．F シリーズのステンレス板のすべり面は，ショットブラストによって粗さパラメータ Ra＝5.0 程度，GFRP 板のすべり面はサンドペーパーによって Ra＝0.5 程度の粗さとなるように施工した．

表-1　実験供試体一覧

供試体シリーズ	供試体名	母板	連結板	支圧方法
摩擦接合（Fシリーズ）	F-GG	GFRP	GFRP	-
	F-GS	GFRP	ステンレス板	-
	F-SS	ステンレス板	ステンレス板	-
支圧接合（Bシリーズ）	B-N	GFRP	GFRP	ボルトのみ
	B-I	GFRP	GFRP	ボルト+エポキシ樹脂
	B-S	GFRP	GFRP	ボルト+特殊金具

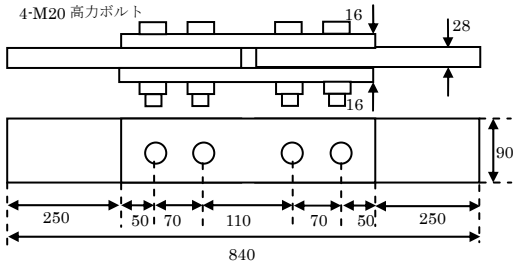

図-1　実験供試体の概要（寸法単位：mm）

キーワード　GFRP，高力ボルト摩擦接合，すべり係数，高力ボルト支圧接合，支圧強度
連絡先　　〒615-8540　京都市西京区京都大学桂　TEL：075-383-3162

表-2　GFRP 板の積層構成

ガラス繊維シートの種類	SFM	CSM	＃580	＃800	＃580	CSM	SFM
連結板(16mm)	1	1	1	20	1	1	1
母板(28mm)	1	1	1	40	1	1	1

表-3　実験に用いた材料の機械的性質

材料	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
GFRP	-	312.8	171.3
SUS316L	175.0	480.0	-

３．測定項目および実験方法

測定項目は，主に，荷重（すべり荷重および破断荷重），供試体の全体変位，母材連結板間の相対変位，母材連結板のひずみ，ボルトひずみである．実験手順としては，F シリーズでは，ボルトに M20 高力ボルトの標準軸力 182kN を導入したのち，12 時間後に載荷試験を行った．B シリーズでは，手締め程度の軸力を与えた後，載荷試験を行った．載荷試験は，供試体両端をつかみ，実験供試体が破断するまで引張力を与え続けた．

４．実験結果および考察

実験結果の一覧を**表-4** に示す．**表-4** より，F シリーズでは，F-GS 供試体ですべり係数 0.4 以上が確保できていることがわかる．また，すべり面の処理をほとんどしていない F-GG 供試体でも 0.4 近いすべり係数となっていることがわかる．しかし，F-SS 供試体では，ショットブラストによってある程度の粗さにもかかわらず，すべり係数が 0.2 とかなり小さい値となった．これらのことから，ステンレス材は鋼材に比べ，すべり係数が小さめに出る可能性があるが，逆に GFRP 材は，鋼材のすべり係数もしくはそれ以上のすべり係数を有していることがわかった．さらに，それらの材料を組み合わせることで，すべり係数は増加し，道路橋示方書で規定されている 0.4 を確保できることがわかった．異種材料を組み合わせることによるすべり係数増加の原因として考えられるのは，お互いの材料の硬さが違うことから，より硬い材料（ステンレス板）が柔らかい材料（GFRP 板）に食い込み，真実接触面積が増加したことが考えられる．

次に，B シリーズでは，最大強度はほぼ同じであり，また，剛性もほぼ同じであったことから，支圧方法を改良した B-S 供試体や B-I 供試体でも，十分に支圧化されていることがわかる．しかし，F シリーズに比べ最大強度が小さいことがわかる．これは，支圧されたことによってボルト孔に応力が集中したことが原因と考えられる．また，実験供試体の組立の際に，施工性を評価したが，F シリーズが，一番施工性が良く，B シリーズでは，B-I＞B-S＞B-N の順で施工性が良いという結果となった．全シリーズの評価を**表-4** 内に示す．**表-4** より，本研究の検討範囲内では，摩擦接合シリーズの F-GS 供試体が，最適な接合方法となることがわかる．

表-4　実験結果のまとめ

供試体シリーズ	供試体名	すべり強度 (kN)	すべり係数	最大強度 (kN)	強度評価	施工性評価	総合評価
摩擦接合 (Fシリーズ)	F-GG	217.2	0.396	329.6	△	○	△
	F-GS	308.4	0.449	357.5	○	○	○
	F-SS	152.2	0.215	-	-	-	-
支圧接合 (Bシリーズ)	B-N	-	-	293.0	△	×	×
	B-I	-	-	290.3	△	△	△
	B-S	-	-	302.2	△	△	△

*F シリーズの強度およびすべり係数は平均値

５．まとめ

本研究では，強度および施工性という面から，GFRP 部材の最適なボルト接合法に関する検討を実験的に行った．本研究より，摩擦接合とすることが施工性の面で優れており，また，強度という面から，連結板にはステンレス板を用いた摩擦接合とすることで，所定のすべり係数を確保でき，支圧接合に比べ，最大強度も大きいことから，連結板にステンレス板を用いた摩擦接合が最適な接合方法であることがわかった．今後の課題としては，摩擦接合では，各部材の摩擦面処理の定量的な評価方法の検討，支圧接合では，ボルト孔に発生する応力集中の影響の検討などが挙げられる．

参考文献 1）小林ら：接着剤および高力ボルトを用いた GFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.55A，p1140-1149，2009.3. 2）土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2006.12.