

(48) GFRP部材の締付けトルクに関する実験的検討

中村 一史¹・橋本 国太郎²・古賀 崇³・久保 圭吾⁴

¹正会員 東京都立大学大学院 准教授 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院 准教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

³日本エフ・アール・ピー株式会社 技術部 (〒869-0413 熊本県宇土市花園町 1736)

E-mail: koga@nihonfrp.co.jp

⁴正会員 宮地エンジニアリング株式会社 技術本部 技術開発部 関西技術開発グループ
(〒550-0001 大阪市西区土佐堀 1 丁目 4 番 11 号)

E-mail: kubo.keigo@miyajie-eng.co.jp

GFRP部材の連結は、一般に普通ボルトによるせん断支圧接合による。GFRPは、鋼に比べて特に厚さ方向の弾性係数は小さいことから、ボルトの締付けトルクは小さく設定される。それらの値は経験的な側面があり、メーカーにより異なる。そこで、本検討では、成形方法、厚さ、繊維の配向方向が異なる、6種類のGFRP板を対象に、ステンレスボルト（SUS304 M16）を用いて、締付けトルクの試験施工を実施した。検討では、最大200N・mまでトルクを与え、ボルト軸力、トルク係数を計測した。さらに、ボルトの締結に伴う限界状態を明らかにするため、座金面に圧縮力を作用させる圧縮試験、JISに準拠した横せん断試験を行った。それらの結果、GFRP部材の種類に関係なくトルク係数は一定であること、また、圧縮試験、横せん断試験よりGFRP部材の面圧は高く、ステンレスボルトの限界まで締付けても破壊は生じないことがわかった。

Key Words: GFRP members, tightening torque line, torque coefficient, compressive test, transverse shear test

1. はじめに

FRP部材の主な接合方法は、ボルトによるせん断支圧接合である。これに関する標準的な設計手法は設計指針等¹⁾⁴⁾で示されているものの、ボルトの締付けトルクに関しては、具体的な施工例や推奨される値を示した研究事例は少なく、メーカー独自で規定しているのが現状である。今後、FRP部材を用いた構造物の普及に向けて、適切なボルト締付けトルクの推奨値を示す必要がある。また、ボルトの締付けに伴うボルト軸力により、締結された部材同士の摩擦力が増大することで、ボルト孔のクリアランス（遊間）による初期すべりや縁端部のせん断破壊を抑制する効果も期待できる。

それらの背景を踏まえ、土木学会複合構造委員会に設置された「FRP複合構造の設計・維持管理に関する調査研究小委員会（西崎到委員長）」では、WG活動の一環として、機械接合のボルト接合について、実施工におけ

る締付けトルク値の調査を行い、FRP同士のボルトによるせん断ボルト接合を想定した実験により、トルク値とその限界状態および評価方法を検討して、推奨される締付けトルク値の提示を試みている⁵⁾。本報告は、それらの検討結果⁵⁾を再構成して、主に実験的な検討について、詳しく取りまとめたものである。

本報告は、FRP構造物のせん断支圧接合部を想定し、FRP板の適切な締付けトルク、トルクの限界値、ボルト軸力に伴うFRP板の限界状態を把握することを目的として、①ボルトの締付けによるトルク試験、②ボルト軸力の導入に伴う破壊を検討するための圧縮試験、③JISに準拠した材料試験による、ボルト締付けに伴う破壊の簡便な評価の適用性に関する検討を行ったものである。接合対象はFRP-FRPとし、ステンレスボルト（SUS304, M16）によるせん断接合とした。

なお、国内のFRP構造物の製作メーカー等を対象としたヒアリング調査⁵⁾として実施されたステンレスボルト

の締付けトルクの実績調査結果によれば、SUS304、M16 ボルトで35~74N・mであった。

そこで、トルク係数は、式(1)で示される、締付けトルク、軸力、ねじの呼び径の関係⁹⁾より求める。

$$T_f = K_f F_f d \quad (1)$$

ここに、 K_f :トルク係数、 F_f :軸力、 d :ボルトの呼び径である。

締付けトルクと軸力の関係⁹⁾は式(2)で与えられる。

$$F_f = 2T_f / \{d_p(1.15\mu_s + \tan\beta) + d_w\mu_w\} \quad (2)$$

ただし、適用条件として、ねじ呼び径 d は8~16mmのメートル並目ねじおよびメートル細目ねじを対象とし、平均的に $\beta=2.5^\circ$ 、 $\mu_s=\mu_w=0.15$ 、 $d_p=0.92d$ 、 $d_w=(d_{w1}+d_{w2})/2$ が成り立つ場合、 $K_f=0.213$ となる。ここに、 β :ねじのリード角度、 μ_s :ねじ面の摩擦係数、 μ_w :座金の摩擦係数、

2. 対象としたFRPと接合材料

(1) GFRP板と材料特性

FRPの種類はGFRPとし、ガラス繊維の配向方向(一方向材、二方向材、多軸材、チョップドストランドマット:CSM)、成形方法(引抜成形:PL、ハンドレイアップ成形:HL、VaRTM成形)を組み合わせた、6種類を対象とした。なお、GFRP板の厚さは、M16ステンレスボルトによる構造部材の接合を想定するため、10mmを標準として検討した。表-1に、GFRP板の種類と実験シリーズを示す。表-2に、GFRP板の材料諸元を示す。

(2) ステンレスボルトとトルク係数

トルク試験、圧縮試験には、ステンレスボルトセット(SUS304、M16×90mm)を用いた。表-3に、ステンレスボルトの材料諸元を示す。なお、トルク係数は普通ボルトであるため規定されていない。

表-3 ステンレスボルトセットの材料諸元

項目	単位	値
呼び	—	M16
材質	—	SUS304
降伏応力	N/mm ²	266
引張強度	N/mm ²	569
首下長さ	mm	90
座金外径	mm	31.5
座金内径	mm	17
座金厚さ	mm	2.5

表-1 GFRP板の種類と実験シリーズ

シリーズ	成形法	繊維配向	厚さ (mm)	トルク試験 (φ18)	圧縮試験 (φ18)	圧縮試験 (φ20)	横せん断試験 (0°)	横せん断試験 (90°)
FA	PL	一方向材	10	FAT18 [3]	FAC18 [3]	FAC20 [3]	FASL [5]	FAST [5]
FB	HL	CSM	10	FBT18 [3]	FBC18 [1]	FBC20 [3]	FBS [5]	—
FC	VaRTM	多軸材	10	FCT18 [3]	FCC18 [3]	FCC20 [3]	FCSL [5]	FCST [5]
FD	PL	一方向材	13	FDT18 [3]	FDC18 [3]	FDC20 [3]	FDSL [3]	FDST [3]
FE	PL	一方向材	6	FET18 [3]	FEC18 [3]	FEC20 [3]	FESL [3]	FES [3]
FF	HL	二方向材	10	FFT18 [3]	FFC18 [3]	FFC20 [3]	FFS [5]	—

※ [] 内の数字は試験片数を示す。

表-2 GFRP板の材料諸元

項目	方向	単位	FA	FB	FC	FD	FE	FF
引張強さ	0	N/mm ²	453	97.6	520	355	420	240
	90	N/mm ²	-	-	209	-	-	
引張弾性率	0	kN/mm ²	43.3	9.6	-	24	32	23
	90	kN/mm ²	-	-	-	-	-	
ポアソン比 (引張)	0	-	0.30	0.34	-	-	-	0.18
	90	-	-	-	-	-	-	
圧縮強さ	0	N/mm ²	508	244	366	-	577	270
	90	N/mm ²	-	-	196	-	-	
圧縮弾性率	0	kN/mm ²	43.0	9.8	-	-	-	-
	90	kN/mm ²	-	-	-	-	-	
ポアソン比 (圧縮)	0	-	0.30	-	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	-	-	
曲げ強さ	0	N/mm ²	666	156	660	-	-	-
	90	N/mm ²	-	-	345	-	-	
曲げ弾性率	0	kN/mm ²	36.8	9.0	22.6	-	-	-
	90	kN/mm ²	-	-	17.4	-	-	
せん断強さ	0	N/mm ²	-	-	179	-	-	50
	90	N/mm ²	-	-	108	-	-	
横せん断強さ	0	N/mm ²	147	98.5	-	-	-	-
	90	N/mm ²	-	-	-	-	-	

※FBは、同じ繊維構成、樹脂で、板厚が5mmのFRP板の物性値である。

d_p : ボルトの有効径, dw_1 : 座金の直径, dw_2 : 座金の内径である。

なお, 上記の式は, JIS 規格のボルト・ナット・平座金を使用した場合である。また, FRP 部材の締め付け用として使用されることのある大形平座金などを用いる場合は合致しない。また, 実際の締め付けには上記の式に加えて, 締め付け方法 (工具種類) により変化する締め付け係数 Q , 潤滑状態 (摩擦係数の値 (μ_s, μ_w) の変化) を考慮する必要がある。ちなみに, 後述するトルク試験において, トルクの作用限界 ($200\text{N}\cdot\text{m}$) では, ボルトに導入される軸力は, 式 (2) より 58.7kN となり, ボルト軸部は降伏すること (降伏耐力: 41.8kN) が予想される。

3. 実験方法

(1) トルク試験

図-1に, トルク試験のセットアップ図を示す。トルク試験は, 試験片の中心に直径 18mm の孔を明けた2枚のFRP板 ($100\text{mm}\times 100\text{mm}\times t$: 厚さ mm) を M16 ステンレスボルトで接合し, トルクレンチを用いてステンレスボルトを締め付ける方法とした。計測項目は, 締め付けトルク

(トルク計: 東京測器研究所製 LTA-200NA), ボルト軸力 (ロードセル: 東京測器研究所製 KCG-200KNA) である。

ボルト軸力は, 図-1(a), (c)に示すように, ボルト頭部側の軸部にロードセルを通して計測を行った。ボルトの締め付けは, 図-2に示すように, ボルト頭部にソケットを接続し, そのソケットを万力で固定した状態で, ナット側にトルクレンチを接続して行った。トルクは, トルク計の最大容量である $200\text{N}\cdot\text{m}$ まで与えた。



図-2 ボルトの締め付けの状況 (試験片: FAT18-3)

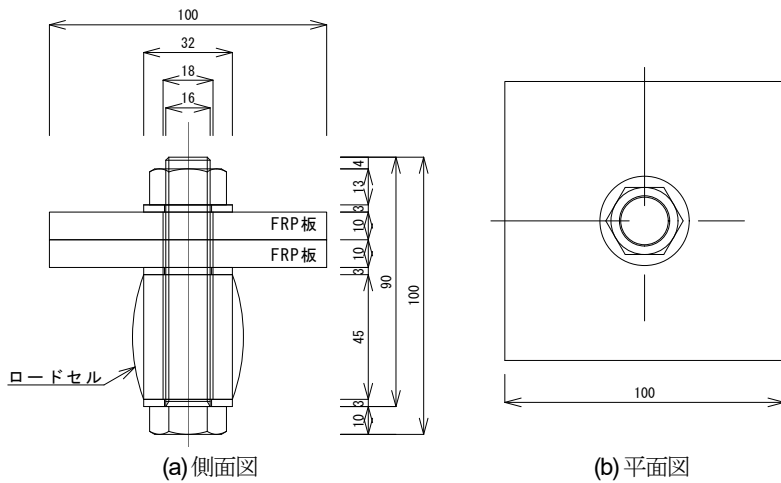


図-1 トルク試験のセットアップ図と試験片の一例



(c) 試験片 (FFT18-3) の一例

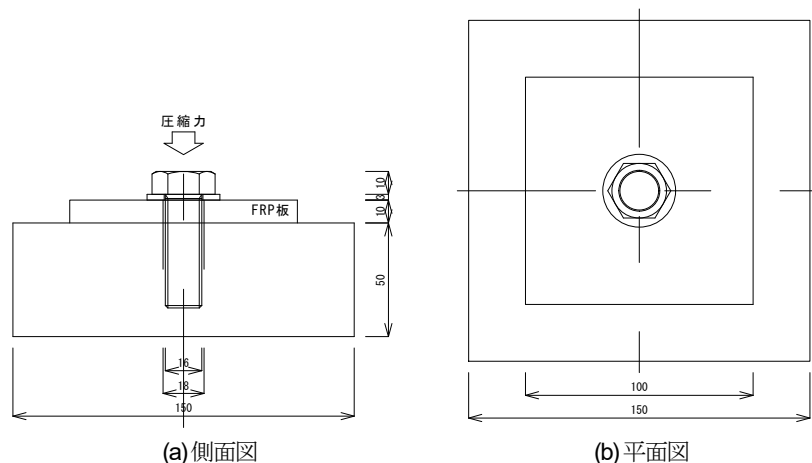


図-3 圧縮試験のセットアップ図



(c) 試験片 (FCC20-2) の一例

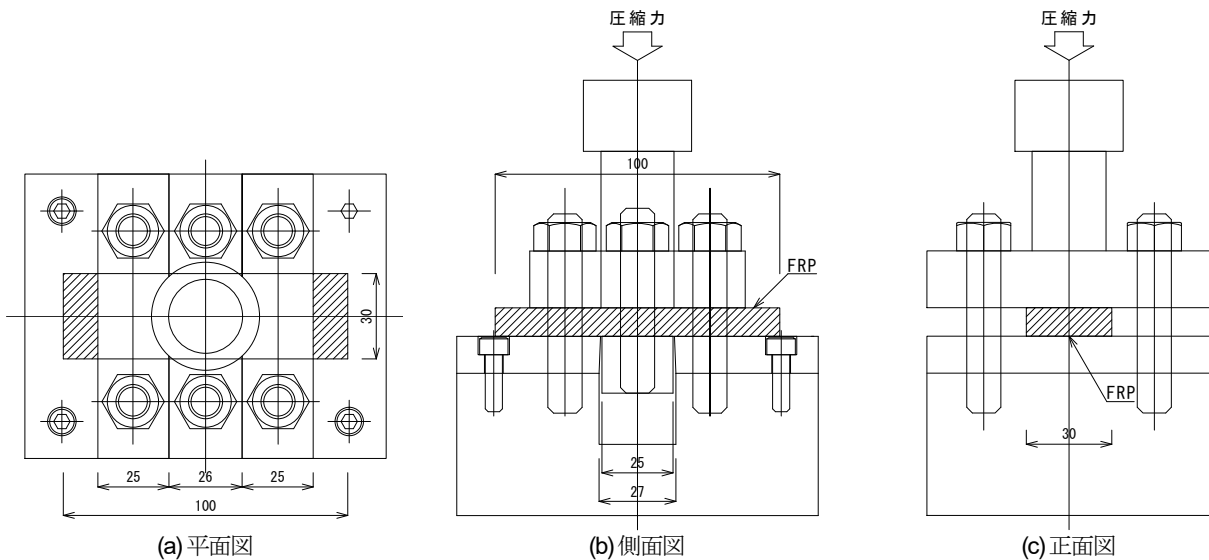


図4 横せん断試験⁷⁾のセットアップ図

(2) 圧縮試験

図-3に、圧縮試験のセットアップ図を示す。圧縮試験は、中心に直径18mm、20mmの円孔を明けた1枚のFRP板(100mm×100mm×t:厚さmm)を、直径18mmの円孔を有する鋼製治具に設置し、ステンレスボルトを挿入して、ボルト頭部から圧縮力を与える実験である。計測項目は、圧縮力(試験機ロードセル)、ストローク(試験機上下圧盤の相対変位)である。M16に対する標準的な孔径(18mm)に対して、拡大孔(20mm)も対象とし、より厳しい条件として、拡大孔に対してボルトが最も偏心した状態で設置された場合を想定して圧縮試験を実施した。なお、標準的な孔径18mmでは、ボルトは試験体の中心に設置して実験を行った。試験には、耐圧試験機(前川製作所、容量:2000kN)を用いた。荷重は変位制御で実施し、荷重速度は1mm/minとした。

(3) 横せん断試験⁷⁾

図-4に、横せん断試験のセットアップ図を示す。横せん断試験は、JIS K 7058⁷⁾に準拠して実施した。試験には、最大荷重100kN以下の試験体では精密万能試験機(島津製作所、容量:100kN)を、100kN以上では万能試験機(島津製作所、容量:2000kN)を用いた。荷重は変位制御で実施し、荷重速度は0.5mm/minとした。なお、繊維の配向に依存しない、CSM(FBシリーズ)、二方向材(FFシリーズ)以外では、0°、90°方向に切り出した2種類の試験片を用意した。

4. 実験結果と考察

(1) トルク試験による検討結果

トルク試験結果の一例として、図-5に、FFTシリーズ

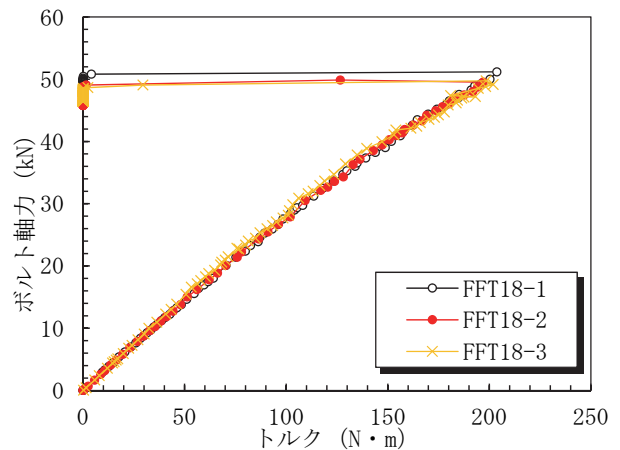


図-5 FFTシリーズにおけるトルクとボルト軸力の関係

におけるトルクとボルト軸力の関係を示す。図中に示した3体の結果より、ばらつきが小さいこと、トルク計の計測限界である、200N・mまでトルクを作用させた範囲では、ほぼ線形的に軸力が導入されることがわかる。これらの傾向は、全ての試験体でほぼ同じであった。

そこで、実用的なトルク値の範囲として0~90N・mにおけるボルト軸力の関係から、式(1)より、トルク係数を算定した。それらの結果を表-4に示す。図-6に、全シリーズに厚さとトルク係数の関係を示す。

これらの図表より、FRPの材料、厚さに関係なく、トルク係数は0.21~0.25の範囲に収まっていること、それらの平均値は0.230であり、安定していることがわかる。トルクを200N・mまで作用させる中で、座金、ボルトの共回りもほとんど見られなかったことから、式(1)、(2)より計算された、標準的なトルク係数の値(0.213)をそのまま適用できることが確かめられた。

また、200N・mまでのトルクを作用させた範囲では、全ての試験片で、FRP板に割れなどの破壊は生じなかった。ステンレスボルトM16の標準的なトルクは、

110N・mであり、FRP同士のボルト接合において、標準的なトルクを超えた場合でも、本検討で実施した範囲においては、FRPの破壊が生じないといえた。ただし、ボルトに過大なトルクを作用させると、ステンレスボルトの降伏応力を超えることから、必要以上のトルクは避けるべきである。

(2) 圧縮試験による検討結果

圧縮試験結果の一例として、荷重とストロークの関係について、**図-7**にFACシリーズ、**図-8**にFCCシリーズをそれぞれ示す。まず、**図中**に示した3体の結果より、最大荷重に至るまでの挙動はばらつきが小さいことがわかる。ばらつきが小さい傾向は、全ての試験体で同様であった。**図-7**のFACシリーズは、引抜成形による一方向材であり、最大荷重までの非線形性が小さいこと、**図-8**のFCCシリーズは、VaRTM成形による多軸材であり、最大荷重付近で荷重を保ちながら変位が増大する傾向があることがわかる。後述するように、一方向材では、織

表4 トルク係数の比較

シリーズ	成形法	試験片名	厚さ (mm)		トルク係数		平均
			公称値	実測値	値	平均	
FA	PL	FAT18-1	10	10.11	0.236	0.239	
		FAT18-2		10.12	0.251		
		FAT18-3		10.10	0.230		
FB	HL	FBT18-1	10	10.07	0.234	0.224	
		FBT18-2		10.08	0.223		
		FBT18-3		10.09	0.216		
FC	VaRTM	FCT18-1	10	10.07	0.246	0.236	
		FCT18-2		10.08	0.215		
		FCT18-3		10.10	0.247		
FD	PL	FDT18-1	13	13.70	0.235	0.232	
		FDT18-2		13.68	0.227		
		FDT18-3		13.68	0.236		
FE	PL	FET18-1	6	6.19	0.237	0.233	
		FET18-2		6.17	0.238		
		FET18-3		6.18	0.224		
FF	HL	FFT18-1	10	10.14	0.220	0.216	
		FFT18-2		10.14	0.219		
		FFT18-3		10.15	0.210		

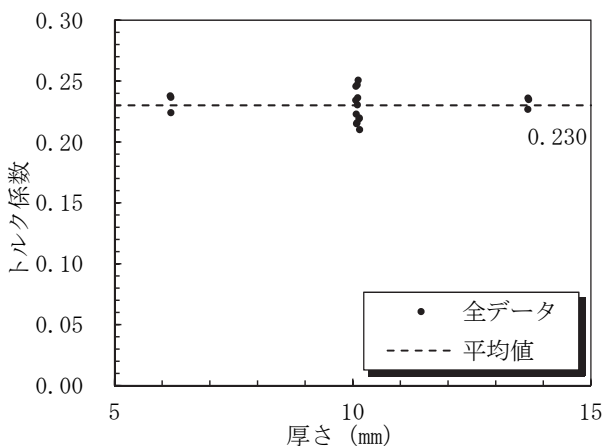


図-6 全シリーズにおけるFRP板の厚さとトルク係数の関係

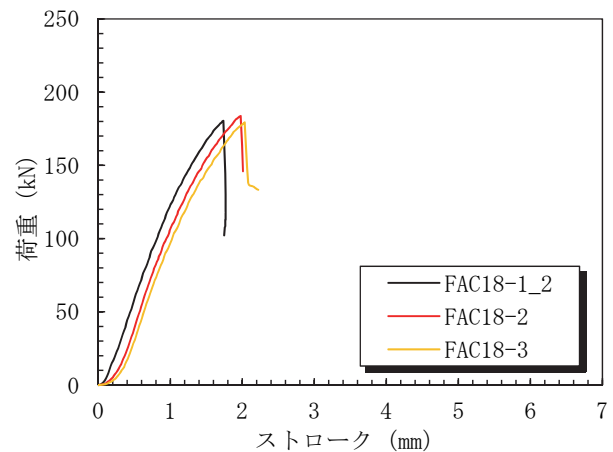
維方向に割れが生じたことから、繊維の配向に依存すると推察された。さらに、**両図**より、最大荷重のばらつきは、孔径18mmでは小さく、孔径20mmでは大きいこと、最大荷重の大きさは、孔径20mmでは、孔径18mmより小さくなるのがわかる。

図-9に、全てのシリーズの荷重とストロークの関係を、**表-5**に、全てのシリーズにおける最大荷重の比較をそれぞれ示す。**図**より、FDC、FECシリーズは、一方向材であり、FDCの厚さは6mmで、最大荷重が最も小さいこと、FECの厚さは13mmで、最大荷重が最も大きいことから、厚さも最大荷重に影響することがわかる。

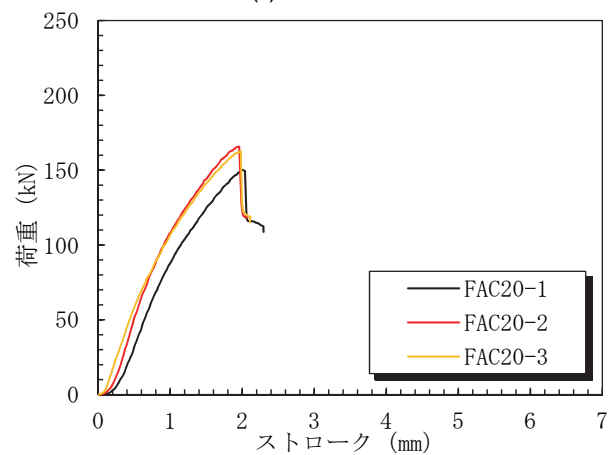
表より、座金が押し込まれてFRPが破壊するときの最大荷重は150kN以上であり、ステンレスボルトの降伏耐力(41.8kN)、引張耐力(89.3kN)を大きく超えることがわかる。したがって、前述したように、トルクの標準値を超えてもFRPが破壊する可能性は小さいといえた。

また、繊維の配向別では、一方向材(FA)に比べて、二方向材(FF)、多軸材(FC)では、最大荷重が高いこと、変動係数も小さいことがわかる。

さらに、**表-5**に示した、孔径の相違による強度を比較した強度比(孔径18mmの最大荷重に対する孔径20mm



(a) 孔径18mm



(b) 孔径20mm

図-7 FACシリーズにおける荷重とストロークの関係

の最大荷重の比) からは、孔径を大きくすること (拡大孔) で、孔径 18mm の最大荷重と比べて 10~15% 低下することがわかる。拡大孔のケースにおいても、最大荷重は高いレベルにあることから、ボルトの締付け時に直接的な影響はほとんどないと考えられるが、多列ボルトに

おいて均等にせん断力が伝達しなくなる可能性があるため、ボルトの偏心には留意する必要がある。

最後に、圧縮試験における典型的な破壊形式を図-10 に示す。一方向材では、図-10 (a) のように、繊維方向も割れが生じた。CSM では、図-10 (b) のように、完全に 2

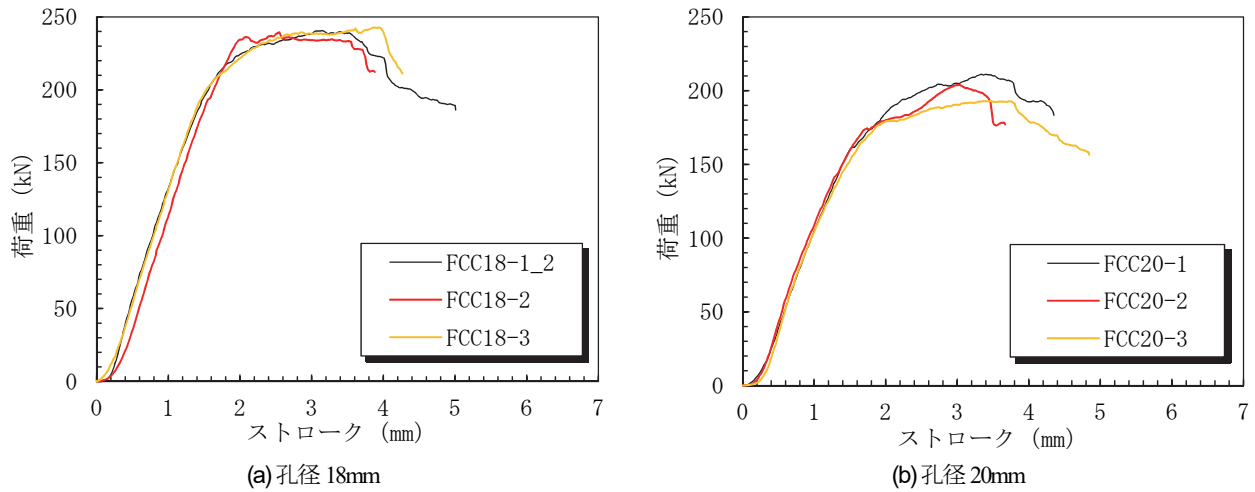


図-8 FCCシリーズにおける荷重とストロークの関係

表-5 全シリーズにおける圧縮試験の最大荷重の比較

シリーズ	成形法	繊維の配向	厚さ (mm)	試験条件	試験片名	最大荷重 (kN)	平均値 (kN)	標準偏差 (kN)	変動係数 (-)	強度比 (-)
FA	PL	一方向材	10	圧縮試験 (φ18)	FAC18-1_2	180.6	181.5	1.9	0.011	0.88
					FAC18-2	184.2				
					FAC18-3	179.8				
				圧縮試験 (φ20)	FAC20-1	150.4	159.7	6.7	0.042	
					FAC20-2	166.0				
					FAC20-3	162.8				
FB	HL	CSM	10	圧縮試験 (φ18)	FBC18-1_2	181.8	182.3	6.9	0.038	0.85
					FBC18-2	191.0				
					FBC18-3	174.2				
				圧縮試験 (φ20)	FBC20-1	154.6	154.6	-	-	
					FBC20-2	-				
					FBC20-3	-				
FC	VaRTM	多軸材	10	圧縮試験 (φ18)	FCC18-1_2	241.0	241.4	1.3	0.006	0.84
					FCC18-2	240.0				
					FCC18-3	243.2				
				圧縮試験 (φ20)	FCC20-1	211.4	203.0	7.5	0.037	
					FCC20-2	204.4				
					FCC20-3	193.2				
FD	PL	一方向材	13	圧縮試験 (φ18)	FDC18-1_2	241.6	244.3	1.9	0.008	0.83
					FDC18-2	245.6				
					FDC18-3	245.6				
				圧縮試験 (φ20)	FDC20-1	206.8	203.2	5.2	0.026	
					FDC20-2	207.0				
					FDC20-3	195.8				
FE	PL	一方向材	6	圧縮試験 (φ18)	FEC18-1_2	190.2	184.8	4.5	0.024	0.89
					FEC18-2	185.0				
					FEC18-3	179.2				
				圧縮試験 (φ20)	FEC20-1	162.8	164.9	1.9	0.012	
					FEC20-2	164.4				
					FEC20-3	167.4				
FF	HL	二方向材	10	圧縮試験 (φ18)	FFC18-1_2	227.6	220.0	6.0	0.027	0.91
					FFC18-2	212.8				
					FFC18-3	219.6				
				圧縮試験 (φ20)	FFC20-1	195.6	199.6	3.3	0.016	
					FFC20-2	203.6				
					FFC20-3	199.6				

つ割れ、脆性的に破断した。二方向材、多軸材では、図-10(c)のように、割れなどは生じずに、座金が大きく変形するとともに、ボルト頭部がFRP板に陥没する破壊であった。なお、同図は、ボルトの孔径が20mmのケースであるが、斜めに陥没していることがわかる。

(3) 横せん断試験⁷⁾による検討結果

横せん断試験結果の一部として、図-11に、FAシリーズ（引抜成形による一方向材）におけるせん断応力とス

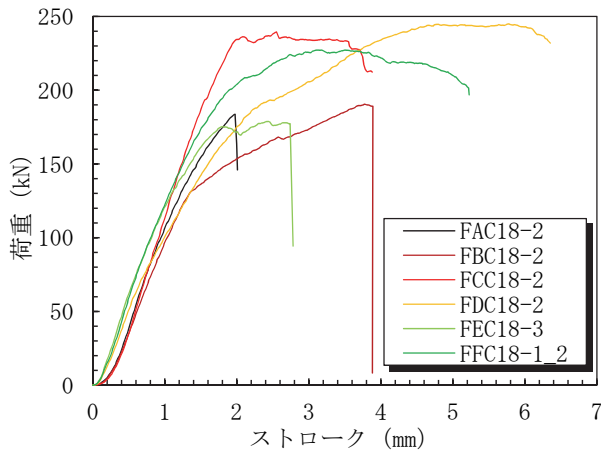


図-9 全シリーズにおける荷重とストロークの関係

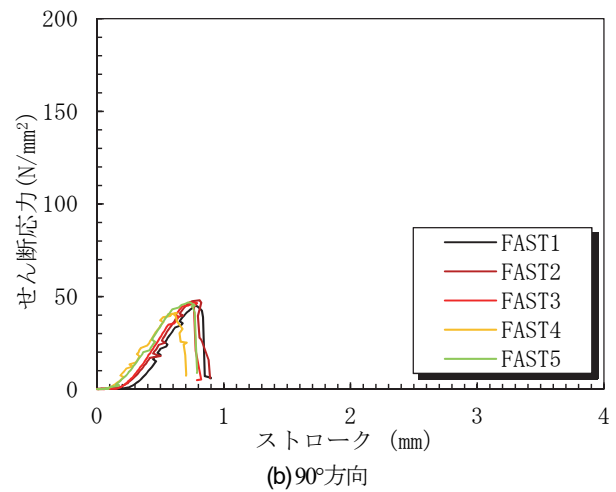
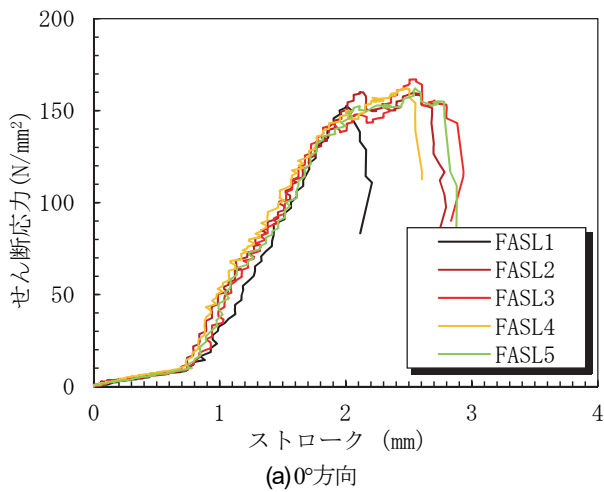
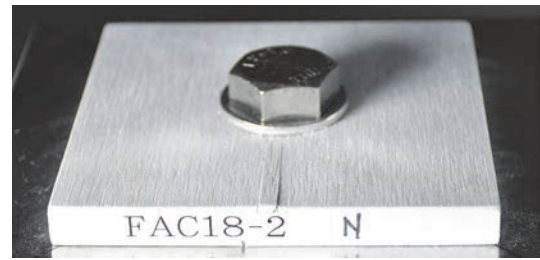
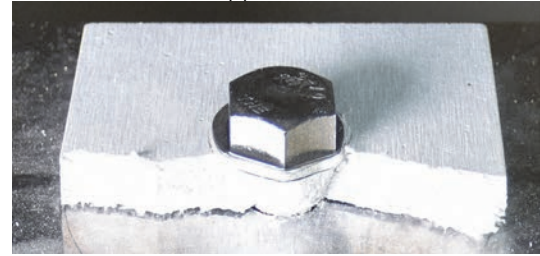


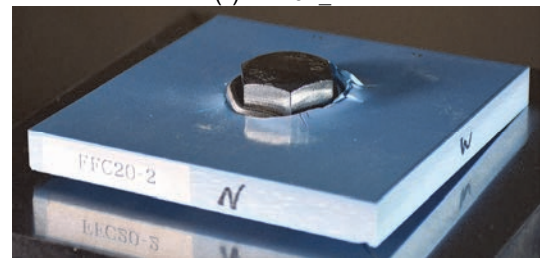
図-11 FASL, FASTシリーズにおけるせん断応力とストロークの関係



(a)FAC18-2



(b)FBC18-1.2



(c)FFC20-2

図-10 圧縮試験における破壊形式

表-6 全シリーズにおける横せん断試験の最大荷重、せん断強度の比較

シリーズ	試験片名	繊維の配向	成形法	厚さ (mm)	方向 (°)	最大荷重 (kN)			せん断強度 (N/mm ²)		
						平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
FA	FASL	一方向	PL	10	0	97.20	2.83	0.029	160.76	4.67	0.029
	FAST		PL	10	90	27.53	1.48	0.054	45.58	2.46	0.054
FB	FBS	CSM	HL	10	-	56.09	1.56	0.028	92.69	2.79	0.030
FC	FCSL	多軸	VaRTM	10	0	112.26	4.59	0.041	186.80	7.51	0.040
	FCST		VaRTM	10	90	74.96	2.78	0.037	123.27	4.62	0.037
FD	FDSL	一方向	PL	13	0	110.87	2.22	0.020	135.60	1.96	0.014
	FDST		PL	13	90	64.84	1.10	0.017	79.11	1.63	0.021
FE	FESL	一方向	PL	6	0	66.01	0.27	0.004	177.18	1.17	0.007
	FEST		PL	6	90	27.72	0.95	0.034	74.57	2.65	0.036
FF	FFS	二方向	HL	10	-	80.57	0.63	0.008	132.99	1.12	0.008

トロークの関係を示す。図より、初期の荷重（せん断応力）が作用するまで、試験片への接触にばらつきがあることから初期ストロークが生じるものの、5体でばらつきは少ないこと、最大荷重付近で非線形挙動となることがわかる。0°方向でせん断応力が大きく、90°方向で小さいことがわかる。これは、ガラス繊維の配向に依存するもので、高い異方性が強度特性に影響しているといえる。

表-6に、全シリーズにおける横せん断試験の最大荷重、せん断強度の比較を示す。表より、異方性が顕著な一方向材（FA, FD, FE）では、0°方向に対して、90°方向のせん断強度が半分以下となることがわかる。なお、変動係数は、全体として小さく、安定していた。

(4) ボルト座金による支圧強度と横せん断試験によるせん断強度の比較

ボルト座金による圧縮試験による結果との比較を行うため、圧縮試験の最大荷重を座金の外径に対する支圧強度として評価することで、横せん断試験結果と比較を行う。支圧強度 σ_s は、次式によって算定した。

$$\sigma_s = \frac{P_{\max}}{\pi \cdot d_{w1} \cdot t} \quad (4)$$

ここに、 σ_s ：支圧強度（N/mm²）、 P_{\max} ：圧縮試験の最大荷重（N）、 d_{w1} ：座金の直径（mm）、ここでは31.5mmとした。 t ：試験片の厚さ（mm）である。

また、横せん断試験結果について、0°、90°方向のせん断強度が異なる場合には、単純に両者の平均値として評価した。

図-12に、座金外径に対する支圧強度と横せん断強度の平均値の関係を示す。

図より、座金外径に対する支圧強度は、横せん断試験によるせん断強度に比べて高いことがわかる。これは、

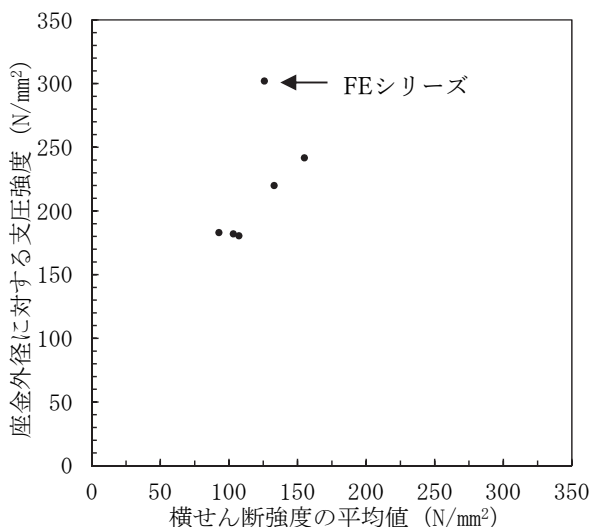


図-12 座金外径に対する支圧強度と横せん断強度の平均値の関係

座金は円形であるのに対し、横せん断試験の治具は直方体であることから、FRP との接触する形状に依存するものと考えられた。また、FE シリーズ以外では、概ね線形関係が得られることがわかる。FE シリーズは、厚さが6mmであり、全試験片の中で最も薄い材料であることから、外れたものと考えられた。これらのことから、座金に対する支圧強度は、横せん断試験結果の平均値で評価すれば、安全側に評価できることが示唆された。

5. まとめ

本報告では、FRP 部材のボルト締付トルクに関する実績調査を踏まえて、試験施工を行うとともに、FRP の締付に伴う力学特性を実験的に検討した。それらの結果、以下のことがいえた。

- (1) 試験施工の結果、M16 ステンレスボルトの場合、締付トルクは、一般的なボルトの上限値 110N・m まで締付けてもトルクとボルト軸力はほぼ線形関係を示し、FRP に破壊は生じないことがわかった。
- (2) トルク係数は、FRP の種類によらず、使用するステンレスボルトの機械的性質で決定され、試験施工で実施した範囲（M16 ステンレスボルト）では、0.230 であるといえた。
- (3) ボルトの締付けにより FRP の破壊を想定した圧縮試験の結果からは、FRP が破壊に到るまでの荷重はかなり高いこと、FRP の異方性により、横せん断試験によるせん断強度は大きく異なるが、0°、90°方向のせん断強度の平均値を用いれば、安全側に評価ができることが示唆された。

実績調査の結果⁹⁾、締付トルクは FRP メーカーによって異なるものの、実験結果と比較すれば、かなり安全側に設定されている（SUS304, M16 ボルトで 35~74N・m）といえた。

また、本検討では、ボルトの呼び径は1種類であることから、他のボルトに対しても同様の調査が必要である。また、横せん断試験の試験片形状は単純な短冊であるが、ボルトの座金とは形状が異なり、支圧強度は形状による影響があると考えられる。したがって、座金による支圧強度を簡便に評価するためには、それらの形状を考慮した試験法によって評価するのがよいと考えられる。標準的な試験方法としては、例えば、プラスチックの打抜きによるせん断試験方法（JIS K 7214）⁸⁾などが候補として考えられる。

謝辞：本検討は、土木学会複合構造委員会に設置された「FRP 複合構造の設計・維持管理に関する調査研究小委員会（西崎到 委員長）」の WG 活動の一環として実施

された。実験にあたり、FRP メーカーより試験片の提供を受けた。また、委員より貴重な意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994.
- 2) Clarke, J.L. (ed.): Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, E & FN Spon, 1996.
- 3) 複合構造委員会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 04，土木学会，2011.
- 4) 土木学会複合構造委員会：複合構造標準示方書 2014 年制定，2015.
- 5) 複合構造委員会：FRP 複合構造の設計・維持管理に関する最新の調査報告，複合構造レポート 20，2023.
- 6) 日本機械学会：機械工学便覧 β4 機械要素・トライボロジー，2005.
- 7) 日本規格協会：ガラス繊維強化プラスチックの横せん断試験方法，JIS K 7058，1995.
- 8) 日本規格協会：プラスチックの打抜きによるせん断試験方法，JIS K 7214，1985.

(Received August 25, 2023)

EXPERIMENTAL STUDY ON TIGHTENING TORQUE OF GFRP MEMBERS

Hitoshi NAKAMURA, Kunitaro HASHIMOTO, Takashi KOGA and Keigo KUBO

GFRP members are generally connected by shear bearing joints using steel bolts. Since the elastic modulus of GFRP is lower than that of steel, especially in the thickness direction, the tightening torques of the bolts are set low. These values are empirical and vary among manufacturers. Therefore, in this study, the tightening torque was examined using stainless steel bolts (SUS304 M16) for six types of GFRP plates with different forming methods, thicknesses, and fiber orientation directions. Torque was applied up to a maximum of 200 Nm, and the bolt axial force and torque coefficient were measured. In addition, a compressive test in which a compressive force was applied on the washer surface and a transverse shear test based on JIS were conducted to clarify the limit states associated with the fastening of the bolts. The results showed that the torque coefficient was constant regardless of the type of GFRP members, and the results of the compression test and transverse shear test showed that the surface pressure of the GFRP member was high and that fracture did not occur even when the stainless steel bolts were tightened to their limit.