独立行政法人土木研究所 正会員 木嶋 健 旭硝子マテックス(株) 渡邉哲也

1.はじめに

FRP を橋梁等の構造材料へ適用する場合には, FRP の接合を考慮する必要がある.FRP の接合形式としては接着接合やボルト接合が考えられるが,ここでは構造材料として一般的な鋼材で多用されているボルト接合について検討を行うこととした.一般に,ボルト接合強度は圧縮強度やせん断強度に支配されるが, FRP と鋼材とでは 圧縮破壊やせん断破壊のメカニズムが異なると考えられる.そのため,ボルト接合の静的強度特性あるいは疲労 強度特性も鋼材とは異なったものになると想定される.本稿では, FRP ボルト接合の疲労強度特性について実験 的に検討した結果を報告する.

2.試験概要

FRP ボルト接合の疲労強度特性を検討するにあたっては,基 本的な特性を把握する観点から、ダブルラップボルト接合を対 象とした. 接合試験は ASTM D 953 に準拠するものとし, 図1 に示すように,両端に単孔を空けた FRP 試験体をボルトおよび 添接板により両側から引張した FRP 試験体としては CF/GFRP 積層板および GFRP 積層板の2種類を使用した. FRP 試験体の 諸元は表1に示す通りである.積層構成は,CF/GFRP積層板に ついては, CSM(コンティニュアス・ストランドマット)/クロス/UD(ト ウ)/クロス/CSM の 5 層構成, GFRP 積層板については, CSM /±45°/クロス/±45°/クロス/UD(ロービング)/クロス/±45°/クロス /±45°/CSM の 11 層構成である. CF/GFRP 積層板としては,構 成積層の体積繊維含有率が異なる3種類の試験体を使用した. 試験体全体の体積繊維含有率は全て 52%であり, 各構成積層の 体積繊維含有率を表2に示す.樹脂には耐候性に優れたビニル エステル樹脂を用いた、なお、ボルト、添接板および引張板は、 鋼材 SS400 を用いて製作した .ボルトの規格は ,CF/GFRP 積層 板については M5 ボルト, GFRP 積層板については M16 ボルト (F10T)である.ボルト軸力を加える場合には,ボルトナット と添接板との間にワッシャーを挿入した.また,添接板および 引張板の厚さは試験体と同じである.

疲労試験は荷重制御で行い,最小荷重をほぼ0とした片振りの引張試験とした.疲労強度は,変位制限値10mmを超過するまでの載荷回数を用いて評価した.周波数は,CF/GFRP積層板



図1 FRP ボルト接合の疲労試験方法

表1 試験体の諸元(単位:mm)

				-	
	長さ	幅	厚さ	縁端距離	孔径
	(1)	(w)	(t)	(e)	(
CF/GFRP	130	25	3.2	25 (5¢)	5.2
GFRP	250	102	27	63 (3¢)	21

表2 構成積層の体積繊維含有率

```構成積層 試験体 ``		CSM	±45°	クロス	UD
CF/GFRP	No.1	8.3%	-	10.4%	33.3%
	No.2	8.3%	-	20.8%	22.9%
	No.3	8.3%	-	31.2%	12.5%
GFRP		1.6%	9.4%	2.1%	39.0%

については 5Hz, GFRP 積層板については 6Hz である.また,試験ケースは,ボルト軸力0のケース(CF/GFRP 積層板および GFRP 積層板)およびボルト軸力115kN のケース(GFRP 積層板)の2ケースとした.

## 3.試験結果

疲労試験の結果を表3および表4に示す.表3はCF/GFRP積層板に対する結果,表4はGFRP積層板に対する結果である.表3および表4には,疲労試験の結果の他に静的最大荷重および破壊モードも併記している.表3および4によると,破壊モードと疲労試験の結果との間に一定の関係が見られる.破壊モードが圧壊の場合には,荷重振幅と静的最大荷重の比が0.5以上で疲労破壊が生じているが,それ以下では疲労破壊が生じていない.

キーワード: FRP,ボルト接合,ダブルラップ,疲労強度,破壊モード 連絡先: 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6(Tel:029-879-6763, Fax:029-879-6733)

一方,破壊モードがせん断破壊の場合には,荷重 振幅と静的最大荷重の比が 0.5 以上でも疲労破壊 が生じていない 破壊モードについては 圧壊は, ボルト孔近傍における CSM 層とクロス層の面外 方向へのせん断破壊を伴った圧縮破壊により生じ ると考えられる.また,せん断破壊は,FRP全体 の2面せん断破壊により生じると考えられる. FRP の圧縮破壊は,載荷方向の繊維と樹脂との界 面強度に大きく影響を受けるとされている.樹脂 は疲労劣化が大きく見られる材料であるため,圧 縮強度も疲労により低下すると考えられる 実際, FRPの圧縮強度は,引張強度に比べて,疲労によ り大きく低下するという報告がされている.一方, 2 面せん断破壊はクロス層のせん断強度に大きく 依存する.クロス層のせん断強度はガラス繊維の せん断強度に支配されるため, 脆性的な破壊傾向 を示すと考えられる. 脆性破壊する材料は疲労強 度の低下が見られないことから, 脆性的な破壊傾 向を示すクロス層の2面せん断破壊については, 疲労強度の低下が圧壊ほど大きく現れないと考え られる.

図2は,破壊モードが圧壊である試験体につい て,荷重振幅と静的最大荷重の比と破壊回数ある いは載荷回数との関係をグラフ化したものである. 載荷回数は対数で表示している.図2を見ると, 疲労破壊した試験体については,荷重振幅と静的 最大荷重の比は,対数表示した載荷回数とほぼ線 形関係にあることが分かる.CF/GFRP 積層板 No.1~No.3 について回帰直線を求めると,重決定 係数 R²は 0.86~0.99 の範囲にあり,いずれも適合 度が極めて高い.また,図2を見ても分かるよう

表3 疲労試験結果(CF/GFRP)

試験体	最大荷重	荷重振幅	載荷回数		破壞
(静的最大荷重)	(kN)	静的最大荷重			モード
No.1 (7.8kN)	3.12	0.4	破壊せず	(4,217,000以上)	
	3.9	0.5	破壊	(887,300)	
	4.68	0.6	破壊	(81,336)	圧壊
	5.46	0.7	破壊	(5,900)	
	5.46	0.7	破壊	(9,100)	
No.2 (8.62kN)	4.31	0.5	破壊	(650,800)	
	6.03	0.7	破壊	(2,100)	圧壊
	6.03	0.7	破壊	(17,700)	
No.3 (8.67kN)	3.9	0.45	破壊せず	(4,790,000以上)	
	4.33	0.5	破壊	(717,600)	口墙
	5.2	0.6	破壊	(22,992)	山城
	6.07	0.7	破壊	(6,800)	

ボルト軸力	最大荷重	荷重振幅	載荷向数	破壊		
(静的最大荷重)	(kN)	静的最大荷重		モード		
	27.0	0.35	破壊せず (3,120,000以上)			
0kN	36.0	0.47	破壊せず (4,000,000 以上)			
(74.7kN)	41.0	0.54	破壊 (1,430,000)	上坛		
	52.0	0.68	破壊 (159,000)			
	31.0	0.21	破壊せず (2,000,000以上)			
115kN	41.0	0.28	破壊せず (2,295,000 以上)	せん断		
(141.4kN)	61.0	0.42	破壊せず (2,000,000 以上)	破壊		
	121.0	0.85	破壊せず (2,000,000 以上)			

表4 疲労試驗結果(GFRP)



図2 圧壊する試験体の疲労試験結果

に,各々の回帰直線はほぼ一致している.これは,No.1~No.3 に対する疲労劣化のメカニズムがほぼ同じであるこ とを示唆している.疲労強度の低下には,CSM 層やクロス層における繊維と樹脂の界面劣化が影響するが,圧壊 積層(CSM 層およびクロス層)においては,載荷ひずみにより生じる厚さ方向の応力状態が No.1~No.3 の間でほ ぼ同じであると考えられる.さらに,疲労劣化の速度が荷重振幅と静的最大荷重の比に大きく依存することを考慮 すると,疲労劣化のメカニズムは No.1~No.3 の間で大きな差がないと判断される.一方,GFRP 積層板の疲労強度 は,CF/GFRP 積層板に比べて全般的に大きくなる傾向にある.圧壊積層にはCSM 層やクロス層の他に±45°層が含 まれ,せん断強度が CF/GFRP 積層板よりも大きい.しかし,載荷ひずみにより生じる厚さ方向の応力状態が CF/GFRP 積層板とほぼ同じであることから,疲労劣化のメカニズムも CF/GFRP 積層板と大きな差はないと考えら れる.また,疲労限度については,CF/GFRP 積層板および GFRP 積層板の荷重振幅と静的最大荷重の比が共に0.5 以下であり,載荷回数にも差があまり見られない結果となっている.CF/GFRP 積層板と GFRP 積層板の間で,疲労 劣化のメカニズムに差があるのか否かについては,GFRP 積層板のデータ数が少ないこともあり,今後さらに詳細 な検討が必要である.

## 参考文献

1)木嶋他, FRP ボルト接合における軸力の効果に関する実験的検討,第59回土木学会年次学術講演会,2004.9

2) S. Suresh, 岸本喜久雄監訳, 材料の疲労破壊, pp.193-212, pp.403-426, 培風館, 2005.3