

CF/GFRP ボルト接合の強度特性に関する実験的検討

Experimental study on the strength properties of CF/GFRP bolted joints

木嶋 健*, 渡邊哲也**
Takeshi Kishima, Tetsuya Watanabe

* 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

** 旭硝子マテックス (〒229-1112 神奈川県相模原市宮下 1-2-27)

The paper presents the experimental study on the strength properties of three types of bolted joints, i.e., bearing-type bolted joint, friction-type bolted joint and bonded-bolted joint with clamping force. The strength of bearing-type bolted joint is determined by the interaction of failure mode, volume fraction of cloth layer and edge distance. Large volume fraction of cloth layer and long edge distance generally contribute to the increase of the strength. The failure mode of friction-type bolted joint is shear-out, leading to the strength determined by the sum of FRP shear strength and the friction force between the specimen and the attached plate. The failure mode of bonded-bolted joint with clamping force is bearing, resulting in the strength determined not only by the adhesive strength but also by the FRP compressive strength.

Key Words : CF/GFRP, Bearing-type bolted joint, Friction-type bolted joint, Bonded-bolted joint, Clamping force

1. はじめに

FRP を橋梁等の構造部材に適用する場合には、FRP 部材の接合を考慮する必要がある。FRP 部材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、ここでは橋梁部材を接合するという観点から、鋼橋で用いられているボルト接合について検討を行うこととした。FRP の材料強度は、引張強度については鋼材とほぼ同等であるが、圧縮強度やせん断強度については鋼材よりも低い。ボルト接合強度は圧縮強度やせん断強度に支配されるため、接合強度は鋼材に比べて低くなると考えられる。この様な点から、FRP 部材の接合には、支圧形式のボルト接合や鋼材で多用されている摩擦形式のボルト接合ではなく、接着を併用したボルト接合が多用されている。本論文では、鋼材のボルト接合形式と比較する観点から支圧形式ボルト接合や摩擦形式ボルト接合を、FRP 部材特有のボルト接合形式としてボルト軸力を有するボルト-接着併用接合を取り上げ、その強度特性について実験的に検討した結果を記述する。

2. 試験体

ボルト接合の強度を検討するに当たっては、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、Fig.1

に示すように、両端に単孔 ($\phi 5.2$) を空けた FRP 試験体を M5 ボルトおよび添接板により両側から引張した。FRP 試験体には Table.1 に示すような基材構成比の異なる 3 種類の CF/GFRP 積層板、添接板には鋼材 (SS400) を用いた。FRP 試験体の積層構成は、いずれもマット (ガラス・コンティニューアス・ストランド・マット (CSM)) / クロス (ガラス・ニットファブリック・クロス (KF)) / トウ (カーボン・トウ (Tow)) / クロス / マットの 5 層構成である。

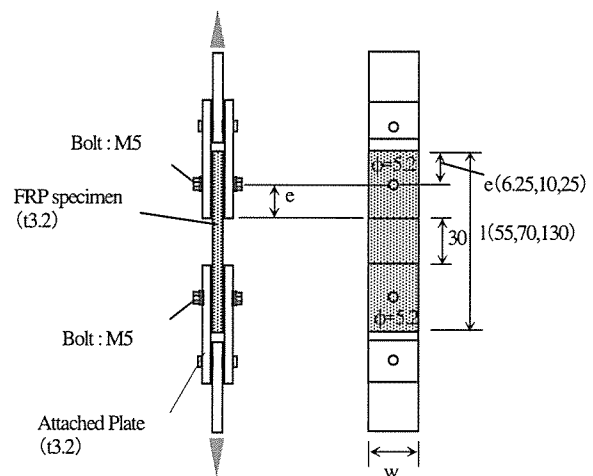


Fig.1 Double-lap bolted joint of CF/GFRP specimen

Table.1 Stacking sequence of CF/GFRP specimen

Sample 1		Sample 2		Sample 3	
Layer	V_f	Layer	V_f	Layer	V_f
CSM	4.16%	CSM	4.16%	CSM	4.16%
KF	5.2%	KF	10.4%	KF	15.6%
Tow	33.28%	Tow	22.88%	Tow	12.48%
KF	5.2%	KF	10.4%	KF	15.6%
CSM	4.16%	CSM	4.16%	CSM	4.16%

なお、マット層およびクロス層はガラス繊維で構成されているが、トウ層は炭素繊維で構成されている。樹脂には耐候性に優れたビニルエステル樹脂を用いた。FRP 試験体の形状については、厚さを 3.2mm、試験体幅とボルト径との比 (w/d) を 1.67, 2.5, 5 の 3 種類、縁端距離とボルト径の比 (e/d) を 1.25, 2, 5 の 3 種類とした。

3. 支圧形式ボルト接合

3.1 破壊モード

一般に、ボルト接合の破壊モードは、圧壊破壊、せん断破壊、引張破壊、引裂破壊の 4 種類に分類される。試験により得られた試験体の破壊状況を観察した結果、破壊モードは下記の 3 種類に集約できると判断された。

- ①圧壊破壊：円孔周辺の FRP に圧縮破壊が生じて最終破壊に至るケース
- ②せん断破壊：円孔から縁端部にかけて、FRP 試験体に 2 面せん断破壊が生じて最終破壊に至るケース
- ③引張－引裂破壊：円孔外部のマット層やクロス層が引張破壊し、その後、一方向層である CF 層とクロス

Table.2 Maximum load for bearing-type bolted joint

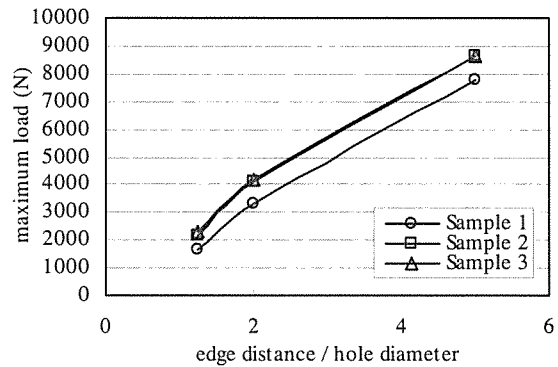
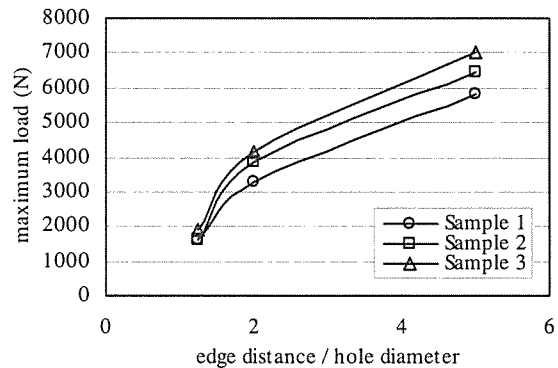
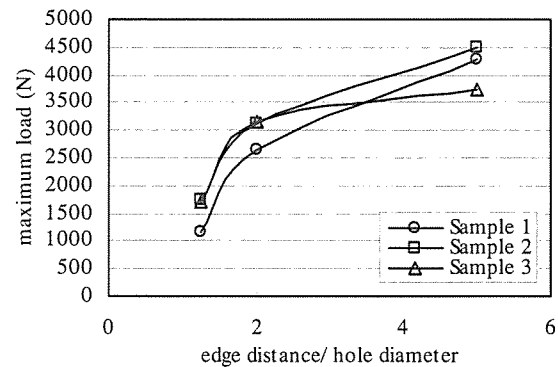
Sample	d/w	e/d	Maximum load (N)				Failure mode
			No.1	No.2	No.3	Ave.	
1	0.2	5	8,275	7,547	7,591	7,804	Bearing-shear-out
		2	3,212	3,171	3,538	3,307	Bearing-shear-out
		1.25	1,516	1,724	1,758	1,666	Shear-out
	0.4	5	5,415	6,182	5,885	5,827	Tension-cleavage
		2	3,181	3,513	3,104	3,266	Bearing-shear-out
		1.25	1,611	1,590	1,647	1,616	Shear-out
	0.6	5	4,418	4,120	4,255	4,264	Tension-cleavage
		2	2,591	2,680	2,664	2,645	Tension-cleavage
		1.25	1,180	1,091	1,225	1,165	Tension-cleavage
2	0.2	5	8,877	8,534	8,434	8,615	Bearing-shear-out
		2	4,072	4,079	4,257	4,136	Bearing-shear-out
		1.25	2,225	2,024	2,187	2,145	Shear-out
	0.4	5	6,664	5,929	6,743	6,445	Tension-cleavage
		2	3,622	4,040	3,852	3,838	Bearing-shear-out
		1.25	1,732	1,505	1,595	1,611	Shear-out
	0.6	5	4,654	4,154	4,636	4,481	Tension-cleavage
		2	2,801	3,327	3,226	3,118	Tension-cleavage
		1.25	1,614	1,801	1,774	1,730	Tension-cleavage
3	0.2	5	8,878	8,320	8,809	8,669	Bearing-shear-out
		2	4,080	4,283	4,238	4,200	Bearing-shear-out
		1.25	2,348	2,099	2,518	2,322	Shear-out
	0.4	5	7,232	6,412	7,498	7,047	Tension-cleavage
		2	3,893	4,163	4,365	4,140	Bearing-shear-out
		1.25	1,674	2,099	1,948	1,907	Shear-out
	0.6	5	3,709	4,056	3,456	3,740	Tension-cleavage
		2	3,165	2,837	3,484	3,162	Tension-cleavage
		1.25	1,625	1,857	1,670	1,717	Tension-cleavage

層の剥離ならびに一方向層の引裂が生じて最終破壊に至るケース

①は、一般に定義されている圧壊破壊と同様である。②は、マット層、クロス層および一方向層が円孔から 2 面せん断破壊するケースである。③は、円孔外側のマット層およびクロス層が引張破壊した後、一方向層のみが引裂破壊するケースである。実験結果を観察すると、②、③の破壊は単独で生じるが、①の破壊は、一般に②の破壊も伴って最終破壊に至っている。

3.2 試験結果

最大荷重に関する試験結果を Table.2 に示す。Table.2 には、破壊後の試験体から推定される破壊モードも併せて示している。また、Fig.2a~2c は、 $d/w=0.2\sim0.6$ の試験体に

Fig.2a Maximum load for bearing-type bolted joint with $d/w=0.2$ Fig.2b Maximum load for bearing-type bolted joint with $d/w=0.4$ Fig.2c Maximum load for bearing-type bolted joint with $d/w=0.6$

ついて最大荷重と縁端距離との関係を示したものである。なお、試験にあたっては、ボルトを手締めの状態としているが、便宜上、これをボルト軸力0と見なした。

(1) 破壊モード

$d/w=0.2$ の試験体では、破壊モードが圧壊—せん断破壊あるいはせん断破壊と推定される。 $d/w=0.4$ の試験体では、 $d/w=0.2$ の試験体で見られた圧壊—せん断破壊あるいはせん断破壊の他に引張—引裂破壊も推定されている。引張—引裂破壊は縁端距離が長い場合に見られ、円孔外側のマツト層・クロス層の引張強度が圧壊—せん断破壊およびせん断破壊の破壊強度よりも低くなった場合に生じると判断される。 $d/w=0.6$ の試験体では、破壊モードが引張—引裂破壊と推定される。引張—引裂破壊の場合には、引張破壊あるいは引裂破壊のどちらが卓越するかで最大荷重の傾向が異なる。円孔外側の引張破壊が卓越する場合には、クロス層含有率の増大に伴い最大荷重も高くなると考えられる。しかし、 e/d が大きくなり、引裂破壊が卓越する場合には、最大荷重はクロス層含有率の影響を受けないと考えられる。 $e/d=5$ の場合については、クロス層含有率と最大荷重との間に一定の関係が見られないことから、引裂破壊が卓越していると判断される。

(2) クロス層含有率の効果

$d/w=0.2$ の試験体については、縁端距離によらずクロス層含有率の高い試験体3で最大荷重が高くなる傾向にあるが、定量的な比例関係は確認できなかった。試験体1と試験体2および3との間には、クロス層含有率と最大荷重との間に明瞭な関係が確認されたが、試験体2と試験体3との間には明瞭な関係を確認することはできなかった。また、 $d/w=0.4$ の試験体については、破壊モードが e/d により異なっているが、 $d/w=0.2$ の試験体に比べてクロス層含有率と最大荷重との間に明瞭な関係を確認することができた。 $d/w=0.2$ の試験体では、圧壊破壊が最大荷重を支配する要因であったと考えられるが、 $d/w=0.4$ の試験体では、クロス層含有率の大小が最大荷重に直結するせん断破壊や引張破壊が最大荷重を支配する要因であったと考えられる。

(3) 縁端距離の効果

$d/w=0.2$ の試験体については、破壊モードが圧壊—せん断破壊あるいはせん断破壊であるが、クロス層含有率の大小によらず縁端距離が長い試験体で最大荷重も高くなる傾向が見られた。 $d/w=0.4$ の試験体については、破壊モードが e/d により異なるが、 $d/w=0.2$ の試験体と同様に、クロス層含有率の大小によらず縁端距離と共に最大荷重も高くなる傾向が見られた。但し、最大荷重の増分は $d/w=0.2$ ではほぼ一定であったのに対し、 $d/w=0.4$ では破壊モードの変化に伴う逓減が見られた。 $d/w=0.6$ の試験体については、破壊モードが引張—引裂破壊であるが、 $d/w=0.2$ や 0.4 の試験体と同様に縁端距離の長い試験体で最大荷重が高くなる傾向が見られた。但し、最大荷重の増分は試験体の種類によって異なっており、一定の傾向は見られなかった。

e/d が 1.25 から 2 へと変化したことに伴う最大荷重の増分は、引張破壊から引裂破壊へと破壊モードが移行したために生じたと考えられる。また、 e/d が 2 から 5 へと変化したことに伴う最大荷重の増分は、破壊モードが引張破壊ではなく、縁端距離と共に最大荷重が増大する引裂破壊であったために生じたと考えられる。

4. 摩擦形式ボルト接合

4.1 試験結果¹⁾

試験に当たっては、 $d/w=0.2$ および $e/d=5$ の試験体 1~3 を対象とした。試験方法は支圧形式ボルトの場合と同様に Fig.1 に示す方法に従い、ボルト軸力は 3 種類に変化させた。ボルト軸力を加えた試験体の最大荷重に関する結果を Table.3 に示す。また、ボルト軸力と最大荷重との関係を Fig.3 に示す。Fig.3 には、ボルト軸力が 0 (支圧形式ボルト接合のケース) の結果も併せて示している。Fig.3 を見ても分かるように、ボルト軸力の増加と共に最大荷重も増大している。但し、ボルト軸力と最大荷重との関係は非線形であり、特にボルト軸力が 0 から増大する場合において、最大荷重が著しく増大していることが分かる。

Table.3 Maximum load for friction-type bolted joint

torque sample	3N·m	6N·m	12N·m
1	9,683	10,252	11,327
2	10,472	11,458	11,875
3	11,439	12,350	13,683

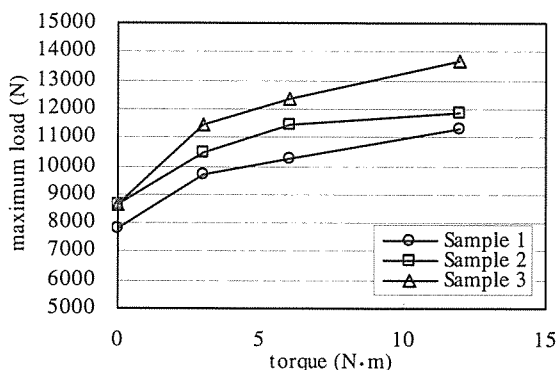


Fig.3 Maximum load for friction-type bolted joint

4.2 ボルト軸力の効果

破壊後の試験体の状況を Fig.4a~4b に示す。Fig.4a はボルト軸力 0 (ボルト軸力を加えない) の試験体に対する破壊状況を示したものであるが、これによると 2 種類の破壊形式が観察される。一つは、円孔周辺の FRP が面外方向に圧縮破壊する形式であり、もう一つは、円孔から縁端にかけて試験体がせん断破壊する形式である。Fig.4b はボルト軸力を加えた試験体に対する破壊状況を示したものである。これによると、円孔から縁端にかけての試験体のせん

断破壊が明瞭に観察されたが、円孔周辺の FRP が面外方向に圧縮破壊する破壊形式はボルト軸力 0 の試験体程には明瞭に観察されなかった。

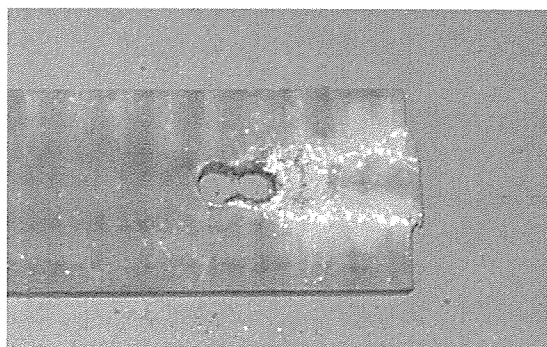


Fig.4a Failure of bolted joint without clamping force

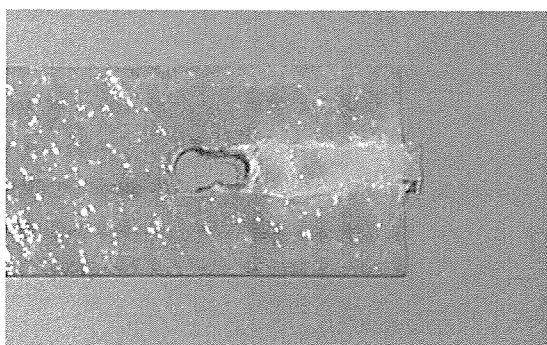


Fig.4b Failure of bolted joint with clamping force

Fig.5 は、引張荷重と試験機の変位との関係を示した荷重－変位線図を表している。Fig.5 を見ると、ボルト軸力を加えた試験体の荷重－変位線図は互いに類似した形状を示しているが、ボルト軸力 0 の試験体の荷重－変位線図とは大きく異なっていることが分かる。これは、ボルト軸力 0 の試験体の破壊モードとボルト軸力を加えた試験体の破壊モードとが異なっているためと判断される。ボルト軸力 0 の試験体では、荷重－変位線図が全体的に非線形に推移しており、最大荷重に達した後も変位の増大に伴う荷重の増減は見られない傾向にある。一方、ボルト軸力を加えた試験体では、荷重－変位線図が全体的に非線形に推移している点はボルト軸力 0 の試験体と同様であるが、最大荷重に達した後は変位の増大に伴って荷重が減少する傾向にある。破壊後の試験体の状況も考慮すると、ボルト軸力 0 の試験体では、初期においてボルト孔周辺の FRP に圧縮破壊が生じた後、圧縮破壊とせん断破壊が混然となって終局状態に至ったと判断される。一方、ボルト軸力を加えた試験体では、比較的初期の段階から荷重－変位線図がボルト軸力によって異なっていることから、試験体と添接板との摩擦力だけで最大荷重が達成されたのではなく、摩擦力と FRP の材料強度とで最大荷重が達成されたと判断される。ボルト軸力を加えた試験体では、試験体の面外変形が添接板により拘束されるため、試験体の圧縮強度は増

大する。その結果、試験体は圧壊破壊ではなくせん断破壊により終局に至ったと考えられる。以上より、ボルト軸力が 0 から増大した場合に最大荷重が著しく増大した理由は、破壊モードが圧壊破壊からせん断破壊へと変化したためと判断される。

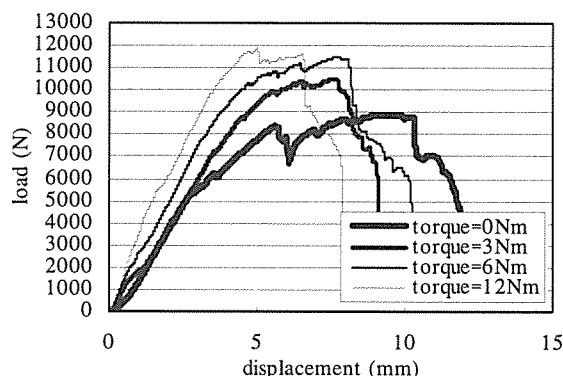


Fig.5 Load-displacement curve of friction-type bolted joint

4.3 摩擦効果

接合強度に及ぼすボルト軸力の効果は、面外変形の拘束に伴う試験体圧縮強度の増大効果、試験体と添接板の摩擦効果の 2 種類と考えられる。Fig.3 を見ると、ボルト軸力を加えた試験体については、ボルト軸力と最大荷重との関係はほぼ線形を保っている。4.2 で記述したように、ボルト軸力を加えた試験体の破壊モードは全てせん断破壊と判断され、最大荷重は試験体の 2 面せん断強度と試験体と添接板との摩擦力の和で決定される。試験体と添接板との摩擦力がクーロン法則に従うと仮定して、摩擦係数を最小二乗法により試算すると、Table.4 に示す通りになる。試験体により若干の相違はあるが、平均すると大体 0.1 程度となっている。添接板を鋼材としたダブルラップボルト接合に対して、試験体と添接板との摩擦係数が 0.13 と報告されている文献もあり、上記の結果は比較的妥当な数値と考えられる。

Table.4 Regression analysis of friction force against clamping force

Sample	a	b	R (multiple correlation coefficient)
1	0.091	9,146	1.0
2	0.072	10,263	0.913
3	0.123	10,773	0.997

$$F = aN + b$$

(F : friction force, N : clamping force = $1000 \times \text{torque}$)

Fig.5 を見ると、ボルト軸力を加えた試験体については、載荷過程の比較的初期の段階において荷重－変位線図がほぼ一致している。試験体と添接板とが滑動しないと仮定した場合には、ボルト軸力の大小に関わらず荷重－変位線図は一致する。Fig.5 より試験体と添接板との摩擦係数を試算すると、Table.4 で示した値とほぼ同じの 0.1 程度とな

っている。Table.4 で示した値は、試験体と添接板の滑動も考慮に入れた最大荷重で評価されているため、摩擦係数は動摩擦係数に相当すると考えられる。一方、Fig.5 の場合には、試験体と添接板とが滑動しないと仮定して評価しているため、摩擦係数は静摩擦係数に相当すると考えられる。以上を考慮すると、本試験体の摩擦係数については、試験体と添接板との滑動の有無に関わらず0.1 程度で問題ないと判断される。

5. ボルトー接着併用接合

5.1 試験結果

ボルトー接着併用接合は、試験体と添接板とをボルトならびに接着により接合したものである。試験に当たっては、 $d/w=0.2$ および $e/d=5$ の試験体 2 を対象とした。接着剤には、セメダイン社製の 2 液系エポキシ樹脂接着剤 EP-007 を用いた。また、接着は試験体表面をサンドペーパー (#240) により処理した後、試験体と添接板の接触面全体にわたって行った。本試験では、ボルトー接着併用接合の強度に及ぼすボルト軸力の効果を把握することを目的としているため、ボルト軸力を加えた試験体について実験を行った。試験方法は支圧形式ボルト接合の場合と同様に Fig.1 に示す方法に従い、ボルト軸力は摩擦形式ボルト接合の場合と同様に 3 種類に変化させた。ボルト軸力を加えた試験体の最大荷重に関する結果を Table.5 に示す。また、ボルト軸力と最大荷重との関係を Fig.6 に示す。

Table.5 Maximum load for bonded-bolted joint with clamping force

torque sample	3N·m	6N·m	12N·m
2	14,741	16,455	18,069

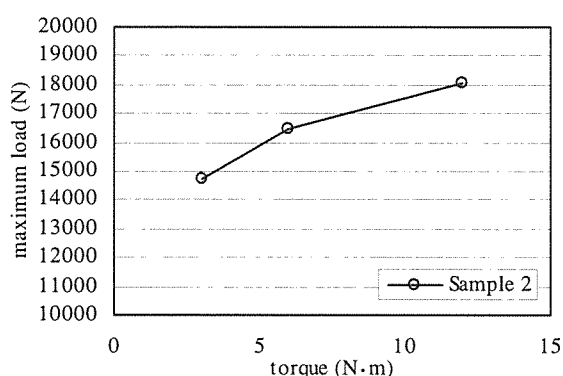


Fig.6 Maximum load for bonded-bolted joint with clamping force

5.2 ボルト軸力の効果²⁾

Fig.6 を見ると、本接合形式についても、摩擦形式ボルト接合と同様に、ボルト軸力の増加に伴って最大荷重が増大する傾向にある。最大荷重が接着接合により決定されると仮定した場合には、ボルト軸力の大小によらず最大荷重が一定になると考えられる。従って、本接合形式の最大荷

重は接着強度により決定されたのではないと判断される。一方、FRP の圧縮強度は、面外拘束を伴った場合に増大する。摩擦形式ボルト接合の最大荷重は、試験体の 2 面せん断強度と試験体と添接板との摩擦力の和で決定される。本接合形式の破壊モードがせん断破壊であると仮定した場合には、最大荷重は摩擦形式ボルト接合とほぼ同等になると考えられる。一方、試験体がボルト孔周辺の FRP の圧縮破壊により終局に至る場合には、最大荷重はボルト軸力の増加と共に増大すると考えられる。最大荷重が摩擦形式ボルト接合よりも高くなっていることや、ボルト軸力の増加と共に増大していることを考慮すると、本接合形式の破壊モードは圧壊破壊と判断される。これは、試験体の圧縮強度が低いために生じた現象と考えられる。

6. 結論

支圧形式ボルト接合、摩擦形式ボルト接合、および、ボルトー接着併用接合に関する試験により得られた結果は下記の通りである。

- 1) 支圧形式ボルト接合においては、破壊モード、クロス層含有率、縁端距離が相互に関連して強度を決定していると考えられた。一般的に、破壊モードが引張ー引裂ではない場合、クロス層含有率が高い場合、縁端距離が長い場合に、最大荷重が増大する傾向にある。
- 2) 摩擦形式ボルト接合においては、破壊モードが圧壊破壊ではなくせん断破壊であると考えられる。最大荷重は試験体の 2 面せん断強度とボルト軸力による摩擦力の和で決定される。また、ボルト軸力を 0 から増加させた場合に最大荷重が増大した理由は、破壊モードが圧壊破壊からせん断破壊へと移行したためと判断される。
- 3) ボルト軸力を加えたボルトー接着併用接合においては、最大荷重がボルト軸力の増加と伴って増大する傾向にある。試験体の圧縮強度は面外拘束を伴う場合に増大するため、破壊モードはせん断破壊ではなく圧壊破壊であると考えられる。

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) 木嶋, FRP ボルトー接着併用接合における軸力の効果に関する実験的検討, 第 60 回土木学会年次学術講演会, 2005.9