第Ⅰ部門　鋼連結板によって高力ボルト摩擦接合された GFRP 板のすべりおよび終局挙動

神戸大学大学院　学生会員　○藤井　祐貴
神戸大学都市安全研究センター　正会員　橋本　国太郎
長岡技術科学大学大学院　正会員　林　厳

1. はじめに

ガラス繊維強化プラスチック（以下，GFRP）は，軽量かつ耐食性に優れた性質や，他の強化繊維に比べ安価であることから，土木構造物にも適用され始めている．一方，道路橋などの大きな構造物に使用する際の問題の一つとして，信頼性の高い接合方法の確立が挙げられる．実構造物への適用においては接合部の規模に応じたボルト列数や，作用荷重に応じたボルト径の選定が不可欠となるが，これらのボルト配置が継手のすべり挙動や終局挙動に与える影響を検討した例は少ない．そこで本研究では，ボルトの列数およびボルト径をパラメータとした継手の引張試験を行った．

2. 実験概要

本研究では，列数とボルト径の違いを比較するため，以下の**表-1** および**図-1** に示す 3 ケースの試験体を各 5 体ずつ用意した．Case1 を基準とし，Case2 は列数の変化，Case3 はボルト径の変化による影響を観察する．母板にはハンドレイアップ成形法によって製作された表面を無処理とした GFRP 板，連結板には表面にブラスト処理を施した鋼板（SS400）を用いた．**表-2** にクーポン試験によって得られた GFRP 材の機械的性質を示している．継手の引張試験は，①ボルトのキャリブレーション，②実験供試体の組立て（ボルトの締め付け），③引張力の載荷という手順で行った．載荷実験では，**図-2** に示すように実験供試体を万能試験機に設置して，引張力を与えた．

表-1　実験ケース

ケース	ボルト	列数	総設計軸力(kN)
Case1	M12	2列	114
Case2	M12	6列	342
Case3	M20	2列	330

表-2　材料特性

GFRP			6mm	18mm
引張弾性率	0°	(kN/mm²)	22.6	24.9
	90°		22.7	23.8
引張強度	0°	(N/mm²)	313.0	240.9
	90°		352.5	248.5
面内せん断弾性率		(kN/mm²)	11.9	11.6
面内せん断強度		(N/mm²)	51.1	57.9

表-3　引張試験結果

供試体		すべり荷重(kN)	最大荷重(kN)	すべり係数	摩擦係数
Case1	1	98.7	98.7	0.485	0.528
	2	97.4	97.4	0.476	0.506
	3	95.4	95.4	0.460	0.499
	4	99.8	99.8	0.511	0.538
	5	101.2	101.2	0.511	0.534
	平均	98.5	98.5	0.489	0.521
Case2	1	367.5	402.7	0.529	0.555
	2	352.0	386.5	0.512	0.565
	3	371.8	390.9	0.535	0.548
	4	343.9	402.1	0.508	0.539
	5	352.3	409.4	0.529	0.545
	平均	357.5	398.3	0.523	0.550
Case3	1	377.2	377.2	0.601	0.651
	2	382.9	382.9	0.587	0.622
	3	389.0	389.0	0.609	0.649
	4	395.3	395.3	0.620	0.662
	5	388.6	390.9	0.632	0.659
	平均	386.6	387.0	0.609	0.648

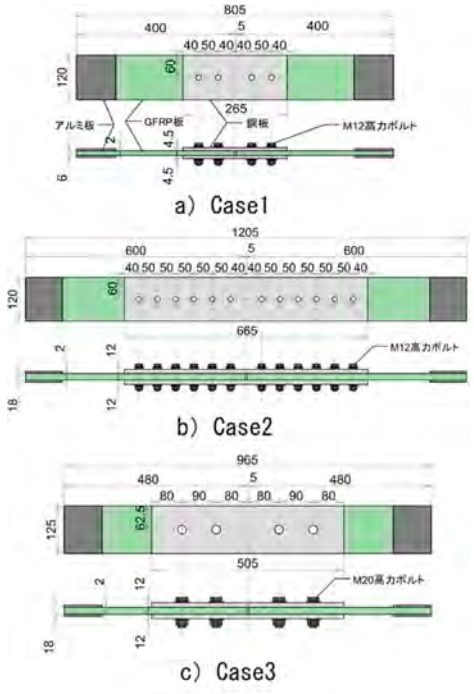


図-1　供試体図面



図-2　載荷試験状況

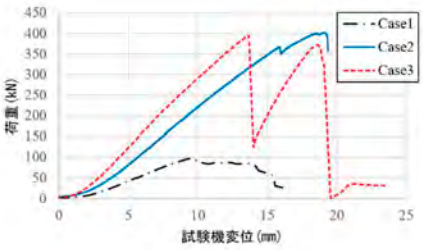


図-3　荷重-試験機変位関係

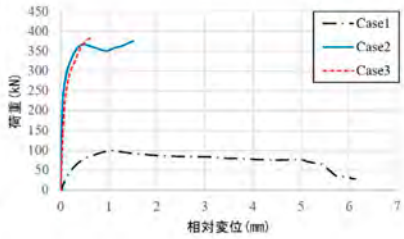


図-4　荷重-相対変位関係

Yuki FUJII, Kunitarou HASHIMOTO,Gen HAYASHI
263t129t@stu.kobe-u.ac.jp

3. 実験結果・考察

引張試験結果を表-3 に，各ケース代表的な挙動を示した試験体の荷重-試験機変位関係を図-3 に，荷重-相対変位関係を図-4 に示す．図-5 にはすべり側 GFRP 板の破壊状況を示している．図-3 より，すべりが発生するまでの区間は線形的に荷重が増加している．

Case1 は，すべりが発生し支圧状態に移行後，85kN 付近で荷重を維持したまま，図-5a）のように母板の端抜け破断が進行しつつ最終的に引張破壊という形式となった．これはすべり発生後に，設計せん断耐力を大幅に上回る荷重がボルト孔に作用し，母板の端抜けが誘発されたことで，端抜けによる損傷によりボルト孔周辺の応力集中が増大し，本来の引張耐力よりも著しく低い荷重レベルにおいて引張モードを併発する複合破壊に至ったと考えられる．



a）Case1



b）Case2



c）Case3

図-5　供試体の破壊状況（すべり側 GFRP 板）

Case2 は，すべり発生時に一時的な荷重低下をした後，再び荷重が増大し，400kN 付近で図-5b）のように引張破壊するという形式となった．これは，ボルト列数が 6 列と多いため，すべりが発生した際に一番外側のボルトが支圧状態に移行した後も，内側のボルトで荷重を支えたことにより大きな荷重低下を防ぐことになったと考えられる．Case3 は 370kN 付近ですべりが発生し大きな荷重低下が生じている．その後荷重が上昇したものの，すべり荷重を上回ることなく図-5c）のように引張破壊に至った．これは，設計すべり荷重を大幅に上回った荷重ですべりが発生したため，すべり時の衝撃が大きく，ボルト孔周辺に不可逆的な損傷が発生し引張耐力が低下したためと考えられる．

次にすべり係数の値について着目する．全ケース道路橋示方書の規定値 0.40 を上回る値となった．Case1 と Case2 の比較より，平均値はそれぞれ 0.489 と 0.523 であり，ボルト列数を多くした Case2 のほうが高い値を示した．一般にボルト列数が増加するとボルトごとの荷重分担が不均一になるため，すべり係数は低下あるいは同等に留まる傾向にあるが，今回は逆の傾向が得られた．要因としては板厚が Case1 では 6mm，Case2 では 18mm と差があり，高弾性の GFRP 材では，締め付けた際の面外変形は板厚の薄い Case1 のほうが大きくなり，接触面積が減少したためと考えられる．Case1 と Case3 の比較より，平均値はそれぞれ 0.489 と 0.609 であり，ボルト径を拡大した Case3 のほうが著しく大きな値を示した．これは，先ほど述べた板厚増大の効果に加え，導入軸力の増加に伴う接触圧増大の効果が影響したと考えられる．本試験の表面処理は，連結板の鋼板にのみブラスト処理を施し，母板の GFRP 板は無処理としているため，鋼板の突起が比較的柔らかい GFRP 板の表面に食い込む現象が生じ，その食い込みの強さは導入軸力に依存する．よって，Case2 と比べても継手全体の耐力は同等であるにも関わらず，ボルト一本当たりの軸力が 3 倍程度になる Case3 のほうが高いすべり係数となっている．

4. 結論

本研究では，GFRP 板と鋼板の摩擦接合の引張試験によって以下の知見を得た．

1） 全ケースで規定値 0.40 を上回るすべり係数が得られ，特に M20 を用いて導入軸力を高めたケースでは 0.60 に近い高いすべり係数を示した．

2） 各ケースの破壊モードについて，基本ケース（Case1）では，せん断（端抜け）による損傷を起点とし，引張破壊を併発する複合的な破壊形式となった．多列化した場合（Case2），接合部端部（外側ボルト）への応力集中が継手全体の耐力低下をもたらし，引張破壊に至った．ボルト径を拡大したケース（Case3）では，すべり時の大きな衝撃により，GFRP 母材が不可逆的な損傷を受け，耐力が低下したことによる引張破壊となった．

参考文献

1） 関本将貴，林厳，山口隆司，久保圭吾，酒井圭一，青木海：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 A1，Vol.69，pp.1035–1044，土木学会，2023.

2） 橋本国太郎，杉浦邦征：高力ボルト摩擦接合された GFRP 部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的考察，土木学会，構造工学論文集，Vol.58A，pp935-945，2012.3.