

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

Experimental study on strength of GFRP and steel plates connection using adhesively-bonded and bolted joint

小林憲治*, 日野伸一**, 山口浩平***, 大本透****

Kenji Kobayashi, Shinichi Hino, Kohei Yamaguchi, Toru Ohmoto

*修(工), 九州大学大学院, 工学府都市環境システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

**工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

***博(工), 九州大学大学院助教, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

****九州大学大学院, 工学府都市環境システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) is expected as a new structural material due to the lightness and corrosion resistance. The connection with the GFRP member or another member is necessary and indispensable. However, the research on the connections between GFRP material and other materials has been hardly done. In this research, it was carried out the tensile test of the connections between GFRP and steel plates. It was clarified that strength characteristic, failure mechanism and effect by reduction of axial force in high strength bolt. Also, it was indicated applicability of high strength friction grip bolted joint.

Key Words: GFRP, High strength friction grip bolted joint, Slip factor

キーワード: GFRP, 高力ボルト摩擦接合, すべり係数

1. はじめに

軽量, 耐久性等の特徴を有する GFRP 引抜き成形材は新たな土木構造材料として期待されている。これまで合成床版の GFRP グレーチング¹⁾や, GFRP 桁増設による床版補強²⁾, 歩道橋の主部材³⁾などとしての幾つかの施工実績があるものの, 未だ汎用的な指針等の整備は進んでいない。特に, 構造物として必須となる部材同士の接合については, 研究事例^{4), 5), 6)}も少なく今後の研究が待たれるところである。

GFRP 部材接合は, 接着接合と機械接合に大別されるが, 現時点では両者を併用する形での接合が多く用いられている。これは, 樹脂接着剤の強い接着強度を活かすものの, ボルト, リベットなどによる機械接合を併用することにより, 信頼性の高い接合強度を得るためである。

一般に, 接合は被着材の表面状態にその接合強度を左右されるが, GFRP の表面状態をパラメータとして行った実験は少なく, また接着接合, 機械接合, 両者併用接合の接合方法による強度特性や耐荷メカニズムの相違も十分に解明されておらず, 設計指針の整備を図るため

には試験データの十分な蓄積が必要であり, 表面状態や接合方法による影響を検討するための実験の必要性は高い。

さらに木嶋ら⁷⁾によって, GFRP 引抜き成形材を高力ボルトで締付けた際のボルト軸力残存率は時間の経過とともに減少し, その残存率は GFRP 引抜き成形材の板厚に影響を受けることが報告されている。鋼材に比べ柔らかい材料である GFRP の場合, リラクゼーションによるボルト軸力低下が接合強度へ及ぼす影響についても明らかにする必要がある。

そこで本研究では, まず GFRP 引抜き成形材の表面処理として, サンドブラスト処理した場合の GFRP 板の表面粗さの検証を行った。その上で, GFRP 板の表面処理の有無と接合方法をパラメータとした GFRP・鋼接合部の引張試験を行い, その強度特性や耐荷メカニズムについて検討した。試験では, 接合面の表面状態は未処理とサンドブラストによる表面処理の 2 種類とし, 接合方法は接着接合, 高力ボルト摩擦接合, 接着と高力ボルト摩擦の併用接合の 3 種類を試験パラメータとした。

さらに, 高力ボルト摩擦接合の供試体についてはボル

ト軸力を計測して軸力残存率の経時変化を明らかにし、リラクゼーションによる高力ボルト軸力の低下が、接合強度に及ぼす影響についても検討した。

2. GFRP 板表面処理の検討

2.1 GFRP 板表面処理の概要

図-1 および表-1 に本研究で用いた GFRP 引抜き成形材を示す。板厚は 14mm で、CSM (コンティニュアスストランドマット)、バイアスクロス、ロービングクロス、ロービング、ロービングクロス、バイアスクロス、CSM の 7 層の積層構成で、繊維体積含有率は 48% である。表層の CSM 層はガラス繊維をランダムに積み重ねて積層したシート状の層である。バイアスクロス層はガラスロービングを±45° に格子状に織り、ロービングクロス層は 0°, 90° に織った層である。中心部のロービング層はガラス繊維を引抜き方向に揃えた層で、このロービング層により引抜き方向の強度特性が決定される。

接着接合は、被着材の表面状態にその接合強度を大きく依存する。また、高力ボルトを用いた鋼部材の摩擦接合の場合も、接合面の表面状態は接合強度に大きく影響を及ぼす。鋼部材接合については、既往研究^{8), 9)} や設計指針^{10), 11), 12)} 等で表面状態 (表面粗さ) が定義されており、適切な表面粗さを得るための処置方法や表面粗さの基準が明記されている。算術平均粗さ (Ra) 5~10μm 以上、十点平均粗さ (Rz) 60μm 以上が、すべり係数 0.4 を確保するための表面粗さとされている。しかし、GFRP 材については表面粗さと接合強度の関係や、接合に適切な表面状態については未解明な点が多い。

そこで、GFRP 板をサンドブラストで表面処理した場合の表面性状について検討するため、ブラスト処理の施工時間をパラメータとして、表面粗さを計測するとともに、GFRP 板表面の状態を観察した。

2.2 サンドブラスト処理による表面粗さの評価

図-2 にブラスト検証用の GFRP 板を示す。図に示すように、長さ 200mm、幅 50mm、板厚 14mm の GFRP 板 1 枚の表裏にそれぞれの 3 マス (表裏合わせて 6 マス: 1 マス 50mm×50mm) のブラストエリアを設定し、1 枚につき 6 つのブラストパターンを設定した。設定したブラストパターンは、(1) 未処理、(2) ブラスト 10 秒、(3) ブラスト 20 秒、(4) ブラスト 30 秒、(5) ブラスト 40 秒、(6) ブラスト 60 秒の 6 つである。この GFRP 板を 3 枚準備し、それぞれに同様のサンドブラスト処理を行った。

GFRP 板に施したサンドブラスト処理の施工条件を表-2 に示す。サンドブラストに使用したブラストメディアは、鋼材の錆除去等に用いられる汎用的なアルミナサンド (#60) である。ブラストの空気圧は 0.5MPa、吹付け角度は約 90°、ブラストノズルから GFRP 板までの距

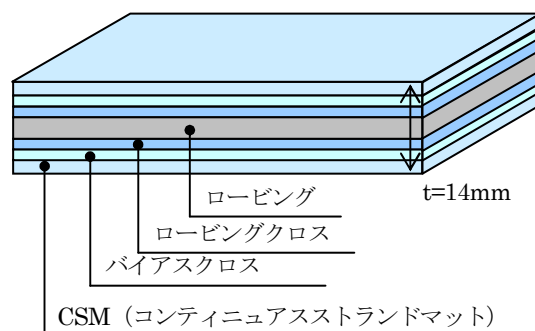


図-1 GFRP 引抜き成形材

表-1 GFRP 引抜き成形材材料特性

引抜き方向	引張強度 (MPa)	250
	引張弾性率 (GPa)	24
	圧縮強度 (MPa)	430
	圧縮弾性率 (GPa)	30
引抜き 直角方向	引張強度 (MPa)	90
	引張弾性率 (GPa)	11
	圧縮強度 (MPa)	95
	圧縮弾性率 (GPa)	20
45° 方向	引張強度 (MPa)	45
	引張弾性率 (GPa)	4
積層構成	7層: CSM/バイアスクロス/ ロービングクロス/ロービング/ ロービングクロス/バイアスクロス/CSM	
繊維体積含有率 (%)		48
板厚 (mm)		14

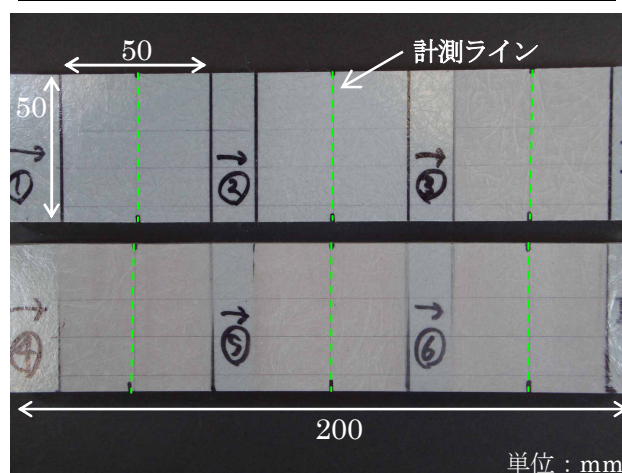


図-2 ブラスト検証用 GFRP 板

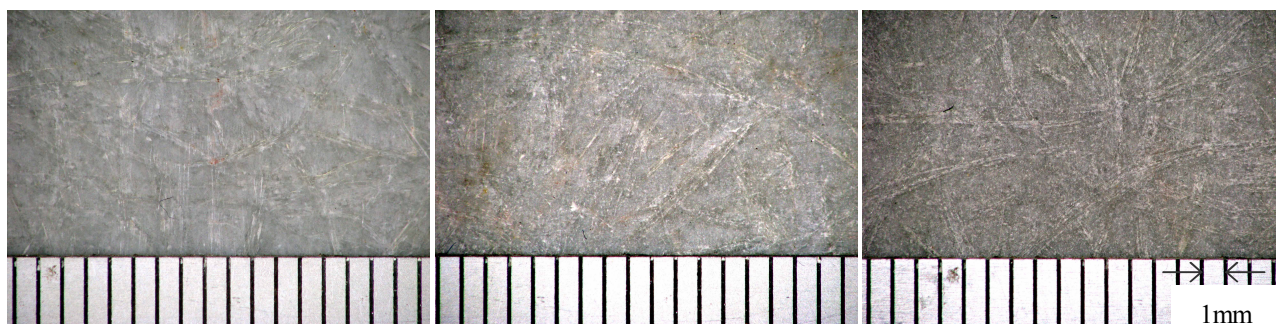
表-2 サンドブラスト施工条件

ブラスト処理	エアーブラスト (手動)
研削材	アルミナサンド (#60)
空気圧	0.5MPa
吹付け角度	90°
吹付け距離	50mm
吹付け範囲	50×50mm (1マス)

離は 50mm である。サンドブラスト処理後、触針式表面粗さ計を用いて、算術平均粗さ (Ra) および十点平均粗さ (Rz) を計測した。計測位置は図-2 中に破線で示すブラストエリアの中心線である。

表-3 表面粗さ計測結果

	算術平均粗さ(Ra)						十点平均粗さ(Rz)					
	0s	10s	20s	30s	40s	60s	0s	10s	20s	30s	40s	60s
平均値(μm)	2.8	4.3	5.8	8.0	10.3	12.9	13.1	31.8	39.4	47.5	55.7	68.3
保証値(μm)	0.7	1.4	2.5	4.5	6.9	8.8	4.8	11.9	24.5	31.8	46.3	54.9
標準偏差	0.7	1.0	1.1	1.2	1.1	1.4	2.8	6.6	5.0	5.2	3.1	4.5



(a) 未処理

(b) ブラスト 30 秒

(c) ブラスト 60 秒

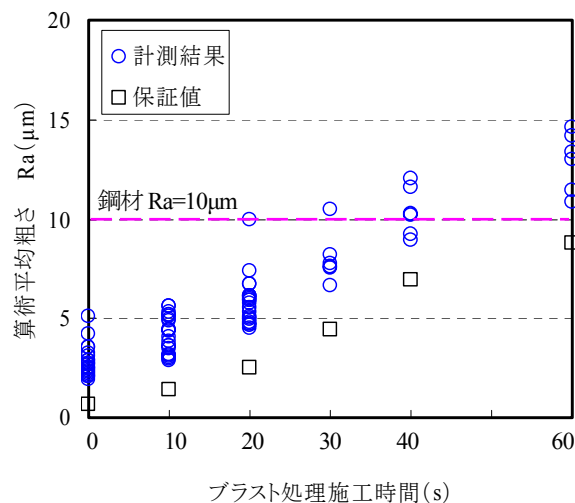
図-3 GFRP 表面

2.3 表面粗さの計測結果

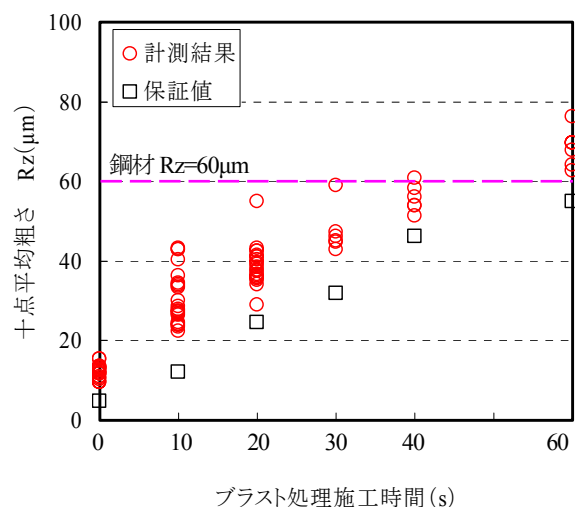
表-3 に GFRP 板の表面粗さ計測結果を示す。ブラスト処理の施工上のばらつきを考慮し、表面粗さの平均値から標準偏差の 3 倍を引いた値を保証値とした。図-3 に未処理、ブラスト 30 秒および 60 秒後の GFRP 板の表面をマクロレンズで撮影した画像を示す。同図および目視観察より、ブラスト処理施工時間の増加とともに、GFRP 板表層の CSM 層の樹脂マトリックスが研磨材により削られ、ガラス繊維が浮き出してきたことが確認できる。またガラス繊維も削られた形跡があり、過度のブラスト処理は GFRP 板表層を損傷させる可能性も考えられる。

図-4 に算術平均粗さ (Ra)、十点平均粗さ (Rz) とブラスト処理施工時間関係と鋼部材の基準を併記したものを示す。図より、算術平均粗さ (Ra)、十点平均粗さ (Rz) はブラストの時間とともに増加することが概ね確認できる。また、鋼部材の接合面表面粗さの基準である算術平均粗さ (Ra) $10\mu\text{m}$ 以上、十点平均粗さ (Rz) $60\mu\text{m}$ 以上を確保するには、概ね 60 秒前後のブラスト処理施工時間が必要であることがわかる。ただし、ブラスト処理施工時間の増加は母材強度に影響を及ぼす可能性も考えられるため、今後ブラスト処理施工時間および表面粗さと材料強度の関係について、明らかにする必要がある。

本試験においては検討段階として、表面粗さの保証値が算術平均粗さ (Ra) で $5\mu\text{m}$ 程度、十点平均粗さ (Rz) で $30\mu\text{m}$ 程度 (いずれも鋼部材の表面粗さ基準の約半分程度) となることを目標とし、ブラスト処理の施工時間を 30 秒間とした。



(a) 算術平均粗さ



(b) 十点平均粗さ

図-4 Ra, Rz-ブラスト処理施工時間関係

3. 接合部試験概要

3.1 供試体

表－4 に供試体種類、表－5 に樹脂接着剤の材料特性値、図－5 に供試体概略図をそれぞれ示す。GFRP 板は表－1 に示すものを使用した¹³⁾。添接鋼板は SS400 とし、スチールグリッド (粒径 0.7mm) でブラスト処理を行い、算術平均粗さ (Ra) 10μm 程度、十点平均粗さ (Rz) 45μm 程度とした。

試験パラメータは、GFRP 板の接合面の表面状態について未処理とサンドブラストによる表面処理の 2 種類、接合方法については接着接合、高力ボルト摩擦接合、接着と高力ボルト摩擦の併用接合の 3 種類とした。

GFRP 板と添接鋼板を 2 液混合常温硬化型エポキシ樹脂接着剤のみで接着接合した供試体を Ad (Adhesive) タイプとした。GFRP 板と添接鋼板にボルト孔をあけ、高力ボルトで摩擦接合した供試体を Bo (Bolt) タイプとした。また、接着剤と高力ボルトを併用して接合した供試体を Co (Combination) タイプとした。

供試体は、日本建築学会 高力ボルト接合設計施工指針¹⁴⁾ の標準試験片 (SS400-F10T-M12) に準拠し、GFRP 板を添接鋼板で挟み、ダブルラップ形式で接合したものである。鋼部材の標準すべり試験の場合、すべり耐力と降伏耐力の比 β は式 (1) で与えられ、0.65 程度となるように設計される。

$$\beta = \frac{\mu \cdot m \cdot n \cdot N}{(W - d) \cdot t \cdot \sigma_y} \quad (1)$$

ここに、 β : すべり耐力と降伏耐力の比、 μ : すべり係数 (0.4)、 m : 摩擦面数、 n : ボルト本数、 N : ボルト軸力 (N)、 W : 板幅 (mm)、 d : 孔径 (mm)、 t : 板厚 (mm)、 σ_y : 鋼板の降伏強度 (N/mm²)

GFRP は降伏点のない弾性材料であるため、式 (1) における降伏強度に代え、引抜き方向の引張強度を用いて算出した場合、本供試体のすべり耐力と引張耐力の比 β は 0.71 である。

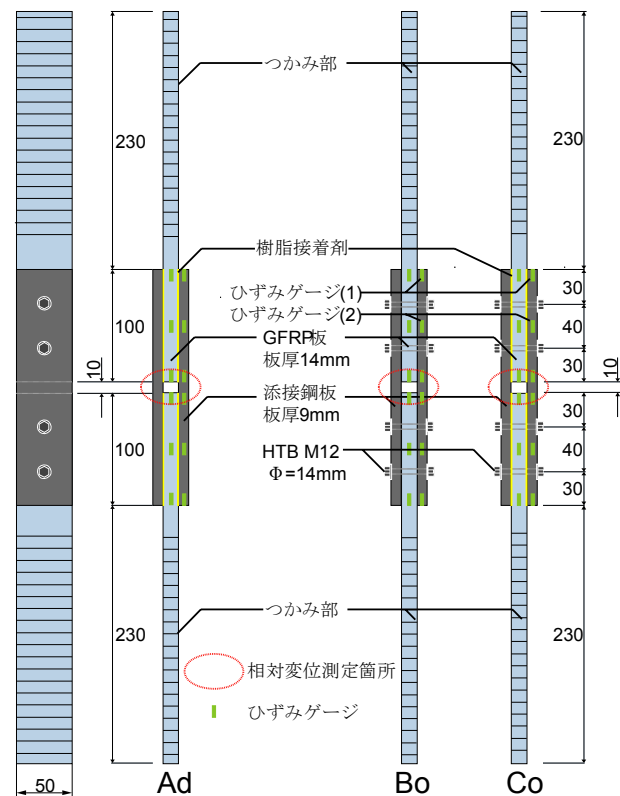
試験手順を図－6 に示す。Ad タイプは樹脂接着剤 (主剤と硬化剤を質量比 1:1 で混合) を添接鋼板に塗布後、GFRP 板と添接鋼板を接着させ、万力で固定して養生した。Bo タイプは、GFRP 板および添接鋼板に孔径 14mm のボルト孔を開け、高力ボルト M12 の設計ボルト軸力 55.8kN をプリセット型のトルクレンチを用いて導入した。Co タイプは、Bo タイプと同様のボルト孔を開けた後、樹脂接着剤を添接鋼板に塗布し、高力ボルトで設計ボルト軸力を導入した。なお、供試体は各タイプ 5 体ずつとした。全ての供試体は室温 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室にて養生し、シリーズ A は供試体作成後 7 日経過後に引張試験を行った。シリーズ B は Bo タイプについてのみ、図－7 に示すように、組立後 GFRP 板の中心に軸力計測用のひずみゲージが位置するようにゲージを埋め込んだ高力ボルトを用いて、ボルト軸力の経時変

表－4 供試体種類

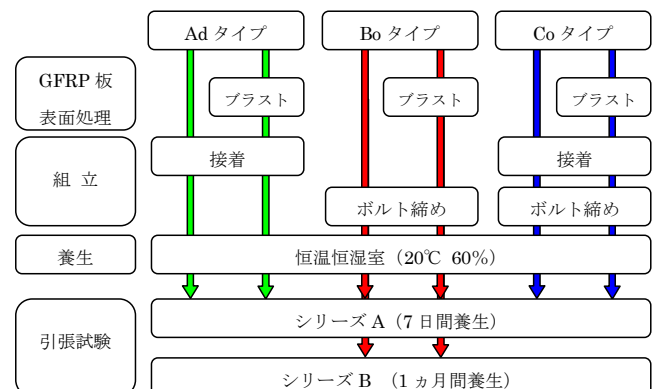
タイプ	接合方法	導入軸力 (kN)	GFRP 板表面	供試体数	
				シリーズ A 7日間養生	シリーズ B 1ヶ月間養生
Ad	接着	-	未処理	5	-
			ブラスト	5	-
Bo	高力ボルト摩擦	55.8	未処理	5	5
			ブラスト	5	5
Co	併用 (接着+摩擦)	55.8	未処理	5	-
			ブラスト	5	-

表－5 樹脂接着剤の材料特性値

引張せん断強度 (MPa)	鋼材同士	17.5
	GFRP 同士	3.9



図－5 供試体概略図



図－6 試験手順

化を計測し、1ヶ月経過後に引張試験を行った。

試験結果は、4.1～4.5 でシリーズ A について、4.6 で両シリーズについて纏めている。

3.2 試験方法および計測項目

図-8 に供試体の設置状況を示す。供試体の GFRP 板のつかみ部を万能載荷試験機（最大 1000kN）の上下チャックで挟み、荷重制御し載荷速度を 1kN/sec として漸増引張試験を行った。

計測項目は荷重、GFRP 板および添接鋼板のひずみ、GFRP 板間の相対変位である。図-5 中に GFRP 板と添接鋼板のひずみ計測箇所と相対変位計測箇所を示している。GFRP 板と添接鋼板のひずみは、ひずみゲージにより、GFRP 板間の相対変位はクリップ型変位計によって計測した。

4. 試験結果

4.1 破壊挙動（シリーズ A）

試験結果を表-6 および図-9 に示す。表-6 には各タイプのすべり荷重、最大荷重の試験結果から得られる標準偏差を示している。また、図-9 は各タイプの平均値を示し、GFRP 板の引張強度公称値から算出した母材耐力に対する比率を合わせて示している。大きな音とともに GFRP 板同士の相対変位が急増し、GFRP 板と添接鋼板間に明瞭にすべりが観察されたときの荷重をすべり荷重とし、供試体が破壊に至り荷重が増加しなくなった荷重を最大荷重とする。これらの結果より最大荷重は Ad タイプがもっとも小さく、Bo、Co タイプは概ね等しい。また、すべり荷重についても Bo、Co タイプに大きな差は見られない。しかし、Co タイプの標準偏差が Bo タイプに比べ大きく、試験結果がばらつく傾向が確認できる。

Ad タイプのブラスト未処理は 11.9kN、ブラスト処理は 35.8kN で接着剤の付着が切れて脆性的に破壊に至った。図-10 (a) に Ad タイプの破壊状況を示す。また図-10 (b) に示すように、ブラスト未処理の GFRP 板には接着剤がほとんど付着していないのに対し、ブラスト処理の GFRP 板には接着剤が付着しているのがわかる。これは、GFRP 板へのブラスト処理により接着力が向上していることを示している。また、最大荷重から算出した樹脂接着剤の引張せん断強度は、ブラスト未処理の場合、5 体の平均で 1.2MPa となり表-6 に示す GFRP 同士の樹脂接着剤引張せん断強度の約 31%であるのに対し、ブラスト処理の場合、同じく 5 体の平均で 3.6MPa となり、約 92%と大きく向上している。これらより、ブラスト処理が最大荷重の向上に大きく影響すると考えられる。

Bo タイプは、ブラスト未処理は 124kN、ブラスト処理は 132kN でそれぞれ GFRP 板同士の相対変位が急増し、GFRP 板と添接鋼板の間で明瞭なすべりが観察された。

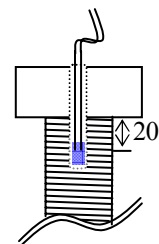


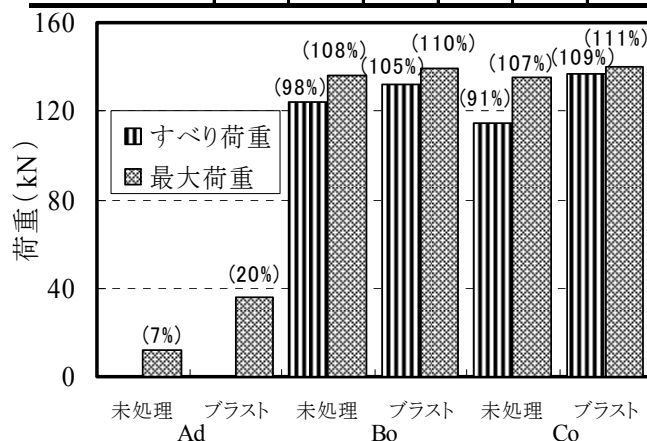
図-7 ひずみゲージ埋め込みボルト



図-8 供試体設置状況

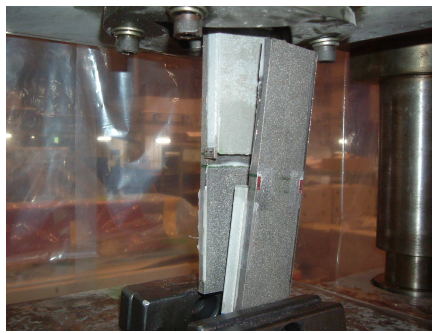
表-6 試験結果（シリーズ A）

	No.	Ad		Bo		Co	
		未処理	ブラスト	未処理	ブラスト	未処理	ブラスト
すべり荷重 (kN)	1	-	-	124	131	120	136
	2	-	-	127	133	116	142
	3	-	-	126	134	109	138
	4	-	-	123	132	128	131
	5	-	-	120	132	102	136
	平均	-	-	124	132	115	137
標準偏差 (すべり荷重)		-	-	2.58	0.83	9.23	4.16
すべり係数	平均	-	-	0.55	0.59	0.52	0.61
最大荷重 (kN)	1	10.5	35.1	139	139	131	136
	2	12.0	33.9	138	142	135	142
	3	13.2	37.5	132	134	142	142
	4	11.6	37.3	138	142	137	137
	5	12.3	35.4	132	141	131	142
	平均	11.9	35.8	136	139	135	140
標準偏差 (最大荷重)		0.97	1.54	3.28	3.38	4.21	3.52



() 内は、GFRP 板の母材耐力に対する比率

図-9 すべり荷重および最大荷重



(a) 破壊状況



(a) 破壊状況



(a) 破壊状況



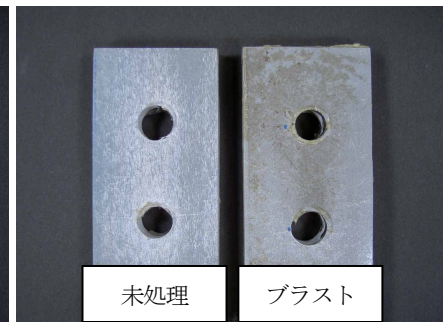
(b) GFRP 接着面

図-10 Ad タイプ



(b) GFRP 接合面

図-11 Bo タイプ



(b) GFRP 接合面

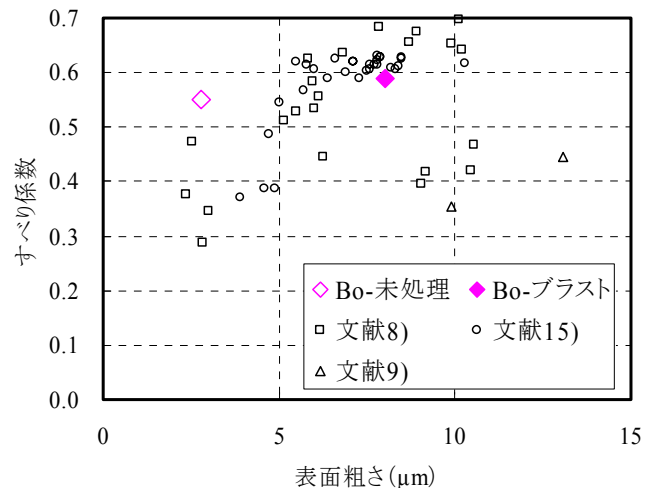
図-12 Co タイプ

すべり発生後、支圧状態となって再び荷重が増加した後、ブラスト未処理は 136kN、ブラスト処理は 139kN で GFRP 板母材が層間剥離して破壊に至った。図-11 (a) に Bo タイプの破壊状況を示す。図より、つかみ部側の第一ボルト付近で GFRP 板が層間剥離して表層の CSM 層が破断し、中央ロービング層が層間剥離して破壊に至っていることがわかる。また図-11 (b) に破壊後の GFRP 板表面を示す。図より、ブラスト処理は、ブラスト未処理に比べ GFRP 板表面に広く痕が残っている。これより、ブラスト処理により GFRP 板の表面の粗度が高くなり、摩擦力が向上したと考えられる。

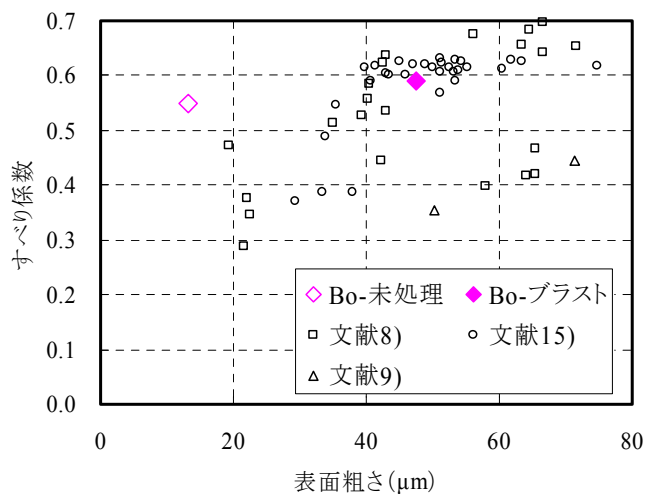
Co タイプは、ブラスト未処理は 12kN 付近から接着剤の剥離音が発生し始めたが、その後 115kN で GFRP 板同士の相対変位が急増し、すべりが発生した。すべり発生後、支圧状態となり再び荷重が増加し 135kN で GFRP 板母材が層間剥離して破壊に至った。一方、ブラスト処理は接着剤の剥離音は発生せず、137kN ですべりが発生し、その後 140kN で GFRP 板母材が層間剥離して破壊に至った。図-12 (a) に Co タイプの破壊状況を示す。また図-12 (b) に示すように、ブラスト未処理に対しブラスト処理の GFRP 板には接着剤の付着が確認できる。

4.2 すべり係数 (シリーズ A)

Bo, Co タイプのすべり荷重は、ブラスト未処理は Bo タイプが Co タイプの 1.1 倍、ブラスト処理は殆ど等しい。このことより、高力ボルト摩擦接合下において樹脂接着剤の有無はすべり荷重への影響が小さいと言える。また、Bo, Co タイプのブラスト処理の有無



(a) 算術平均粗さ Ra



(b) 十点平均粗さ Rz

図-13 すべり係数と表面粗さ関係 (シリーズ A)

による違いは、Bo ではブラスト処理は未処理に比べすべり荷重が 1.1 倍に、Co タイプでは 1.2 倍になった。このことより、ブラスト処理の有無もすべり荷重への影響が小さいと言える。

すべり係数は、式 (2) により実験で得られたすべり荷重から算出した値である。すべり係数は Bo タイプで 0.55～0.59、Co タイプで 0.52～0.61 程度であった。

$$\mu = \frac{P}{m \cdot n \cdot N} \quad (2)$$

ここに、 μ : すべり係数、 P : すべり荷重 (N)、 m : 摩擦面数、 n : ボルト本数、 N : ボルト軸力 (N)

図-13 に表面粗さとすべり係数の関係を示す。図中には、鋼部材高力ボルト摩擦接合の既往研究の結果^{8), 9), 15)}も合わせて示している。鋼部材の場合、接合面の表面粗さの増加に伴いすべり係数が増加する傾向が確認できるが、本試験の場合、GFRP 板へのブラスト処理により表面を粗くしても、すべり係数に顕著な変化は確認できない。前述のように、鋼部材の場合は $Ra=5\sim 10\mu m$ 、 $Rz=60\mu m$ 以上がすべり係数 0.4 以上を確保するための粗さとされているが、GFRP の場合は鋼部材と同様の基準までブラスト処理を行わなくても実用上問題のない十分なすべり係数が確保できると言える。

4.3 最大荷重 (シリーズ A)

図-9 に示すように最大荷重は、Ad タイプと比較して、Bo、Co タイプの方が大きい。また、Bo、Co タイプの最大荷重はブラスト処理の有無に関わらずほぼ等しい。これらより、接合に高力ボルト摩擦接合を用いた場合、接着剤の有無やブラスト処理による最大荷重の差異は小さい。これは、すべり発生後にボルトがボルト孔壁に接して支圧状態となり、GFRP 板が引張破壊したため、その最大荷重は GFRP 板の母材強度が支配しており、ブラスト処理の有無による影響を受けないためである。最大荷重は平均値から約 5% の範囲内のばらつきで、本試験に使用した GFRP の他方向の材料強度試験結果においても同等程度のばらつきが報告されている。

一方、Ad タイプのブラスト処理は、未処理と比較して最大荷重が 3 倍程度となった。これより、接着剤のみを用いて接合する場合、ブラスト処理により接着力が向上すると言える。

4.4 GFRP 板同士の相対変位の比較 (シリーズ A)

図-14 に荷重-相対変位関係 (5 体中代表 1 体のデータ) を示す。同図より、Co タイプは Ad、Bo タイプと比べ相対変位が小さくすべり剛性が高いことが確認できる。また全供試体タイプにおいて未処理に比べブラスト処理の方がややすべり剛性が高いことが確認できる。

Co タイプが、他のタイプに比してすべり剛性が高いのは、接着接合と高力ボルト摩擦接合を併用したためと考

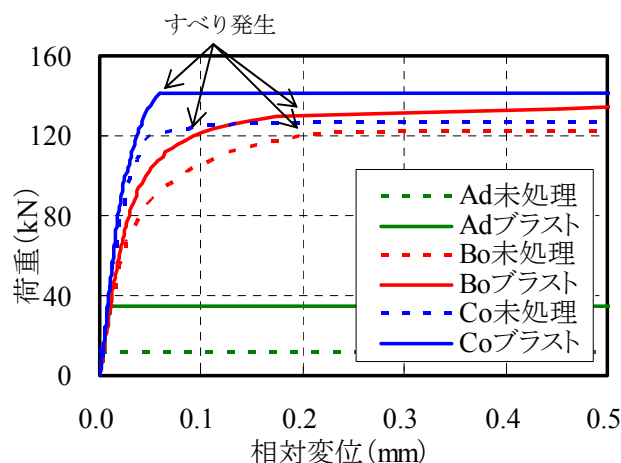


図-14 荷重-相対変位関係 (シリーズ A)

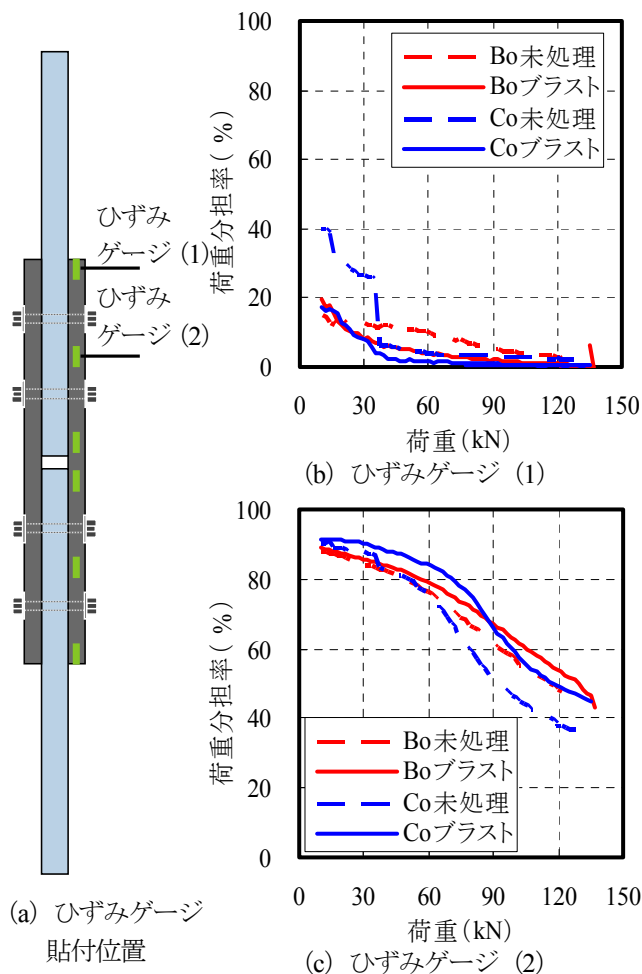


図-15 添接鋼板の荷重分担率 (シリーズ A)

えられる。すなわち、接着剤のみの Ad タイプや、ボルトのみの Bo タイプに比べ、Co タイプは、高力ボルトで締め付けることによって接着剤の接着効果が向上したためと推測される。

4.5 耐荷メカニズム (シリーズ A)

図-15 (a) にひずみゲージの添接鋼板への貼付位置を、また図に示す添接鋼板 (1)、(2) 位置のひずみ値から算出した Bo タイプと Co タイプの添接鋼板荷重分担率 (5

体中代表1体のデータを(b), (c)に示す。荷重分担率は、任意の荷重時におけるGFRP板と添接鋼板のひずみから発生応力を算出し、応力分布を板幅方向に一定と仮定した上で、断面積を乗じて求めたGFRP板と添接鋼板の荷重の和に対するそれぞれの荷重の比率である。なお、ひずみ値が安定した10kNからの値を記載している。図より添接鋼板縁端の(1)に比べ、ボルト間の(2)では添接鋼板の荷重分担率が顕著に増加している。これは、GFRP板に加えられた引張力が、つかみ部側の第一ボルトにより添接鋼板へ伝達されていることを示唆している。

ひずみゲージ(1)の位置では、15~40kN付近で未処理のCoタイプの分担率が急激に減少していることがわかる。これに対しBoタイプは緩やかに分担率が減少していることから、この付近で接着剤の付着切れが生じていると推測される。ブラスト処理のCoタイプの挙動が未処理と異なるのは、ブラスト処理により急激な付着切れが発生しなかったためと考えられる。

ひずみゲージ(2)の位置では、60~90kN付近で未処理、ブラストともにCoタイプの添接鋼板の荷重分担率がBoタイプに比べ急減しており、この付近で徐々に接着剤の付着が切れたと推測される。よってこの荷重レベル以上では、Bo、Coタイプの耐荷機構は同様であり、摩擦接合のみで荷重に抵抗するものと考えられる。ただし、実験データが少ないため、今後さらに検討する必要がある。

4.6 ボルト軸力低減がすべり係数へ及ぼす影響 (Boタイプ両シリーズ)

シリーズAでは、GFRP・鋼接合部の短期的挙動について検討した。シリーズBでは、接合面のなじみやGFRP板のクリープによる高力ボルト軸力の減少が接合強度へ及ぼす影響について、Boタイプについてのみ検証した。なお、表-4に示すようにGFRP板の表面処理は未処理とサンドブラストによる表面処理の2種類とした。

木嶋らは、GFRP引抜き成形材を鋼板で挟み高力ボルトで締付けた場合の軸力残存率について、GFRP板の板厚をパラメータとして比較し、軸力残存率とGFRP板厚には相関関係があることや、締め直しを実施した場合、軸力の低下が初期に比べ緩やかになることを明らかにしている⁷⁾。これによると、GFRP板厚12mmの場合、1年間経過時点で軸力残存率は80%程度、同じく16mmの場合70%程度に漸近するとされている。図-16に高力ボルトの軸力残存率-経過時間関係を示す。なお、図中には未処理およびブラスト処理それぞれ5体のボルト軸力残存率の平均値を示している。本試験のGFRP板厚14mmでは、軸力残存率が1ヶ月経過時点で概ね87%となっており、木嶋らの試験結果のGFRP板厚12mmと同程度の残存率となっている。鋼部材接合の場合、ボルト軸力残存率は時間の経過によって80%程度に漸近するとされるものの、その環境によっては60~70%にまで低下するとされている¹⁶⁾。本試験においては、1ヶ月経過

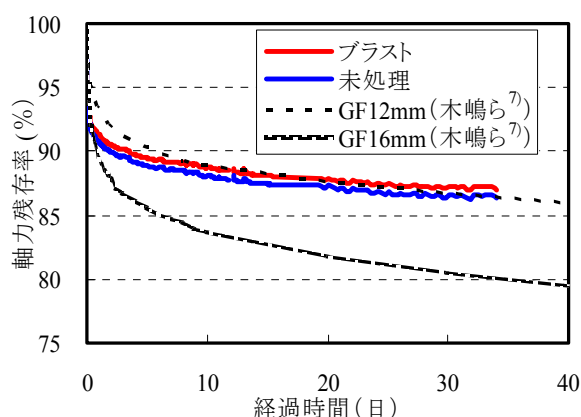


図-16 軸力残存率-経過時間関係

表-7 試験結果 (Boタイプ両シリーズ)

	No.	シリーズA		シリーズB	
		未処理	ブラスト	未処理	ブラスト
すべり荷重 (kN)	1	124	131	120	116
	2	127	133	124	124
	3	126	134	125	132
	4	123	132	122	132
	5	120	132	126	127
	平均	124	132	126	126
標準偏差 (すべり荷重)		2.58	0.83	4.76	5.93
すべり係数	平均	0.55	0.59	0.54	0.54
摩擦係数	平均	0.63	0.66	0.64	0.65
最大荷重 (kN)	1	139	139	141	127
	2	138	142	141	142
	3	132	134	140	132
	4	138	142	141	138
	5	132	141	142	134
	平均	136	139	142	134
標準偏差 (最大荷重)		3.28	3.38	1.11	5.08

時点で87%程度に漸近していることが確認されたが、木嶋らの結果から今後も軸力残存率が低下すると考えられる。また、GFRP板にブラスト処理を行なった場合の軸力残存率は、未処理に比べばらつきが小さい結果となった。これは、GFRP成形時に形成された樹脂層の肉厚部(樹脂溜まり)がブラスト処理により削られ、GFRP板表面がより平滑になったためと考えられる。ただし、GFRP材の軸力残存率については特に研究事例が少ないため、今後も長期計測を継続する予定である。

表-7および1ヶ月経過時点で実施したシリーズBのBoタイプの引張試験の結果を、7日経過時点のシリーズA結果と合わせて示す。図-17は、各タイプの平均値を示している。また、図-18にすべり・摩擦係数-軸力残存率関係を示す。すべり荷重および最大荷重ともに1ヶ

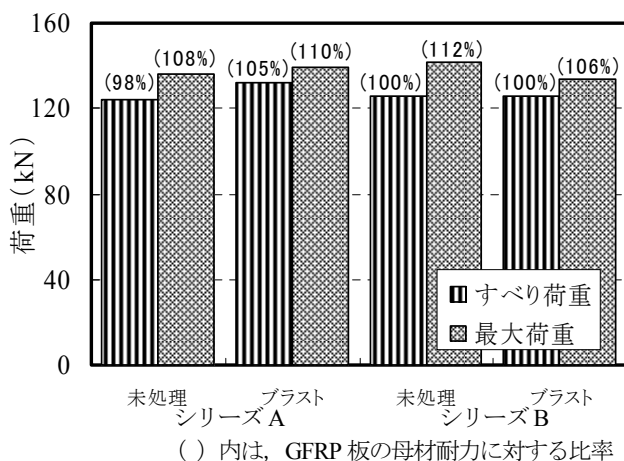


図-17 すべり荷重および最大荷重

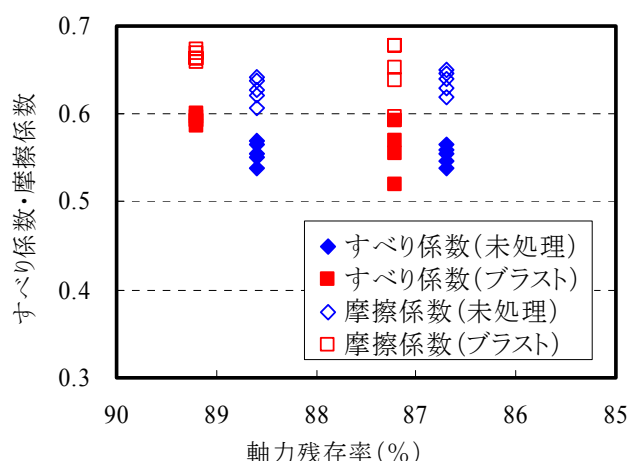


図-18 すべり・摩擦係数-軸力残存率関係

月経過時点での変化はほとんど見られない。そのため、式 (2) によりすべり荷重から算出したすべり係数も概ね等しい。鋼部材接合の場合、ボルト軸力は経年低下するものの接合面の凝着作用等によりすべり係数は低下しない¹²⁾とされている。本試験結果も同様に、供試体組立時の初期導入軸力に対し、1ヶ月経過時には高力ボルトの軸力が未処理は86.7%に、ブラスト処理は87.2%に低下したにも関わらず、すべり係数の低下は確認されなかった。

よって、GFRP・鋼の接合に高力ボルト摩擦接合を適用する場合、本試験の範囲内では軸力残存率の低下に関わらず、すべり係数は低下せず、実用上十分なすべり係数を保持していることが明らかになった。なお、シリーズBの試験については今後も引き続き継続し、さらに軸力残存率が低下した場合について十分な検討を行う必要がある。

5. まとめ

本研究では、GFRP 引抜き成形材と鋼材の接合部について、その強度特性や耐荷メカニズムについて明らかにすることを目的として、GFRP 板の表面粗さや接合方法をパラメータとした接合部の引張試験を行った。また、高力ボルト軸力低下が接合強度に及ぼす影響についても検討した。

本試験で得られた成果を以下に示す。

- (1) 破壊形式は、Ad タイプは樹脂接着剤の付着切れによる破壊、Bo, Co タイプはすべり発生後に高力ボルトが GFRP 孔壁に接して支圧状態となり、GFRP 板母材の層間剥離による破壊であった。
- (2) 最大荷重は Ad タイプが著しく小さく、Bo, Co タイプは同等程度である。すべり荷重も Bo, Co タイプは概ね等しい。
- (3) GFRP 板の表面粗さ (Ra, Rz) を増加させても、すべり係数に顕著な変化はなく、GFRP 板は鋼部材

と同等の基準までブラスト処理を行わなくても十分なすべり係数が期待できる。

- (4) GFRP 板にブラスト処理を行なうことにより、Ad タイプで最大荷重が約3倍程度向上したものの、Bo, Co タイプでは大きな差異は確認されなかった。
- (5) 計測された相対変位から、Ad, Bo タイプに比べ Co タイプのすべり剛性が高く、接着剤とボルトを併用することによって接合効率の向上が期待できる。また、全タイプにおいてブラスト処理によりすべり剛性が高くなる傾向が確認された。
- (6) 軸力導入後 1ヶ月経過時点で、高力ボルトの軸力残存率は低下するものの、すべり荷重は減少せず、実用上十分なすべり係数を保持していることが明らかになった。

以上より、本試験の範囲内では GFRP 引抜き成形材と鋼材の接合部について、GFRP の表面処理の有無に関わらず、鋼部材と同様の高力ボルトによる摩擦接合で、0.54 以上のすべり係数を保持していることが確認された。また、高力ボルトの軸力残存率が 87%程度に低下しても、すべり係数は減少せずに実用上問題のない接合強度を保持していることが明らかになった。

今後は、実設計に向けた疲労特性についての検討や、拡大孔や多列配置等の構造詳細に関する検討が必要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、AGC マテックス株式会社より材料を提供して頂いた。九州大学大学院の貝沼重信准教授および株式会社東京鉄骨橋梁の細見直史氏には、多大なご助言とご協力を頂いた。ここに記して、謝意の意を表する。

参考文献

- (1) 松井繁之, 石崎茂, 久保圭吾: FRP 永久型枠を用いた RC 床版の静的強度・疲労耐久性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1413-1424, 1994.3.

- 2) Basem ABDULLAH, Shinichi HINO, Kenji KOBAYASHI : STRENGTHENING OF STEEL I-GIRDER BRIDGE WITH DETERIORATED RC SLAB BY PULTRUDED GFRP I-GIRDERS, The 3rd International Conference on Durability & Field Applications of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, pp.311-320, 2007.5.
- 3) 張惟敦, 鎌田敬治, 佐伯彰一, 山城和男 : FRP 製歩道橋の機械的接合部に関する実験的評価, 石川島播磨技報 橋梁特集号, pp.69-72, 2001.
- 4) 永田拓也, 皆田理, 石丸勝, 勝野壽男, 林耕四郎 : GFRP 材料を用いた高力ボルト摩擦接合の力学的挙動, 土木学会中国支部第 55 回研究発表会発表概要集, I-29, pp.57-58, 2003.
- 5) Basem ABDULLAH, Takahiro KITAMURA, Shinichi HINO, Toshiaki OHTA, Hisao KATSUNO : Ultimate Capacity of Bonded-Bolted GFRP Connection in GFRP Members, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, I-A59, pp.118-119, 2000.9.
- 6) 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖 : 連続引抜成形 FRP 形材の重ね継手接合部の引張力による破壊メカニズム, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, I-A205, pp.410-411, 2000.9.
- 7) 木嶋健, 勝野壽男, 小林憲治, 日野伸一, 西崎至 : FRP ボルト接合における軸力の経時変化に関する実験的検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, CS10-004, pp.449-450, 2006.9.
- 8) 加村隆志, 北後寿 : 高力ボルト摩擦接合の接合面粗さがすべり耐力へ及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 485 号, pp.127-134, 1996.7.
- 9) 南邦明, 森猛, 杉谷隆夫 : 摩擦面の状態が高力ボルト継手のすべり耐力に及ぼす影響, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-587, pp.1171-1172, 2004.9.
- 10) 田島二郎 : 高力ボルト摩擦接合概説, 技報堂, 1966.
- 11) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2002.
- 12) 土木学会鋼構造委員会 : 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針 (案), 鋼構造シリーズ 15, 2006.12.
- 13) 小林憲治, 大本透, 日野伸一, 山口浩平, 青木卓也 : 接着剤およびボルト接合を用いた GFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, CS02-042, pp.131-132, 2008.9.
- 14) 日本建築学会 : 高力ボルト接合設計施工指針, 1973.
- 15) 辻岡静雄 : ショットブラスト摩擦面を有する高力ボルト接合のすべり荷重と履歴特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 471 号, pp.173-179, 1995.5.
- 16) 石原靖弘, 小林剛, 狩野正人, 亀井正博, 谷平勉 : 経年による軸力低下とばらつきが高力ボルト摩擦接合の終局耐力に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.763, IV-63, pp.33-42, 2004.6.

(2008 年 9 月 18 日受付)