

鋼板接着で補強した GFRP 板の 高力ボルト接合に関する実験的検討

小野寺 諒¹・中村 一史²・小林 拳祐³・花村 光一⁴・新倉 利之⁵

¹学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 博士前期課程 1 年
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: onodera-ryo2@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 准教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

³株式会社 IHI インフラ建設 橋梁事業部 鋼保全技術部 (〒135-0016 東京都江東区東陽 7-1-1)

E-mail: kobayashi0523@ihi-g.com

⁴株式会社栗本鐵工所 コンポジットプロジェクト室 技術部 (〒527-0108 滋賀県東近江市小八木町 1)

E-mail: k_hanamura@kurimoto.co.jp

⁵パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3-22)

E-mail: toshiyuki.niikura@os.pacific.co.jp

GFRP板の継手耐力は、GFRPの支圧強度、せん断強度に依存し、それらの強度は鋼に比べて相対的に小さいことから、GFRPの継手耐力も小さくなり、GFRP板と鋼板の継手における設計上の課題となっている。そこで、GFRP板と鋼板の接合部の継手耐力を向上させる方法として、鋼板接着で補強されたGFRP板の鋼添接板による接合方法を考案し、高力ボルトを用いた支圧接合・摩擦接合を、ボルト列数(1, 2列)をパラメータとして実験的に検討した。その結果、鋼板をGFRP板に接着することで、先行するGFRP板の支圧破壊を防止でき、継手耐力を増加させることが可能であること、鋼板接着で補強されたGFRP板の継手の最大荷重は、鋼板とGFRP板の接着接合部のはく離が支配的であり、ボルト列数には依存しないことがわかった。

Key Words: GFRP plate joint, high strength bolted connection, steel plate bonding

1. はじめに

ガラス繊維強化プラスチック(以下、GFRP)部材の接合方法は、一般に、ボルトを用いたせん断支圧接合¹⁾が適用され、その継手耐力は、GFRPの支圧強度、せん断強度に依存する。それらの材料強度が小さい場合や、接合部の作用力が大きい場合、ボルト本数が増えることがある。また、鋼板同士の高力ボルト摩擦接合と比べて、縁端距離、側縁距離、ボルト間距離を確保する必要がある²⁾。土木構造物にGFRP部材の適用を進める上では、より合理的なGFRP部材の接合方法が求められている。

FRP板の接合方法に、高力ボルト摩擦接合の適用を検討した事例³⁾では、添接板に鋼板を用い、適切な表面処理を施せば、鋼部材と同様に摩擦接合が適用できることが示されている。一方、ボルト軸力の導入によりFRP板にクリープ変形が生じ、ボルト軸力が時間とともに低下するリラクセーションが課題となる。その場合、ボ

ルトの増し締めやFRP板のクリープ変形を予め与えることなどで、設計ボルト軸力を確保する試みも検討³⁾され、FRP部材の高力ボルト接合に関する基礎データも蓄積されつつある。

さらに、GFRP板のボルト接合部に予めガラス繊維シートを接着して補強することで、継手耐力を向上させる方法⁴⁾が検討されている。GFRP部材は孔明けによって接合部が弱部となることから、接合部に限定した部分的なガラス繊維シート接着による補強は、合理的な方法であるといえる。

本研究は、より合理的かつ効果的なGFRP板の接合方法の開発を目指したもので、GFRP板に予め鋼板(以下、補強鋼板)を接着することでGFRP板を補強するとともに、鋼添接板と補強用鋼板は、高力ボルトによる摩擦接合もしくは支圧接合とし、普通ボルトに比べて、継手耐力の向上と現場での施工性の効率化を図ることを目的として、実験的、解析的な検討を行った。

2. 鋼板接着による GFRP 継手補強の概念

図-1 に、鋼板接着による GFRP 継手補強の概念図を示す。GFRP 板の接合部となる両面に、補強鋼板をエポキシ樹脂接着剤で接合することで、GFRP 板の孔周辺が補強され、支圧破壊の先行が抑制される。さらに、GFRP 板に接着された補強鋼板は、鋼添接板と高力ボルトによる

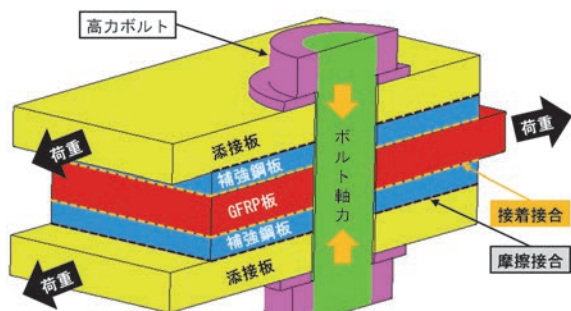


図-1 鋼板接着による GFRP 継手補強の概念図

る摩擦接合もしくは支圧接合されることで、継手耐力の向上を図るものである。本研究では、摩擦接合、支圧接合には、それぞれトルシア形高力ボルト (M22 S10T)、支圧接合用高力ボルト (M22 B10T) を適用して検討を行った。摩擦接合とすることができれば、通常の鋼部材のボルト呼びに 2.5mm を加えた孔径で、トルシア形高力ボルトの適用が可能となり、現場での施工性の向上が期待できる。なお、この接合方法では、GFRP 板と補強鋼板の接着接合部の継手耐力の評価が重要となるため、はく離挙動にも着目して検討を行った。

3. 継手試験体と検討方法

(1) 試験体と検討パラメータ

図-2 に、試験体の概要図を示す。接合対象となる母材

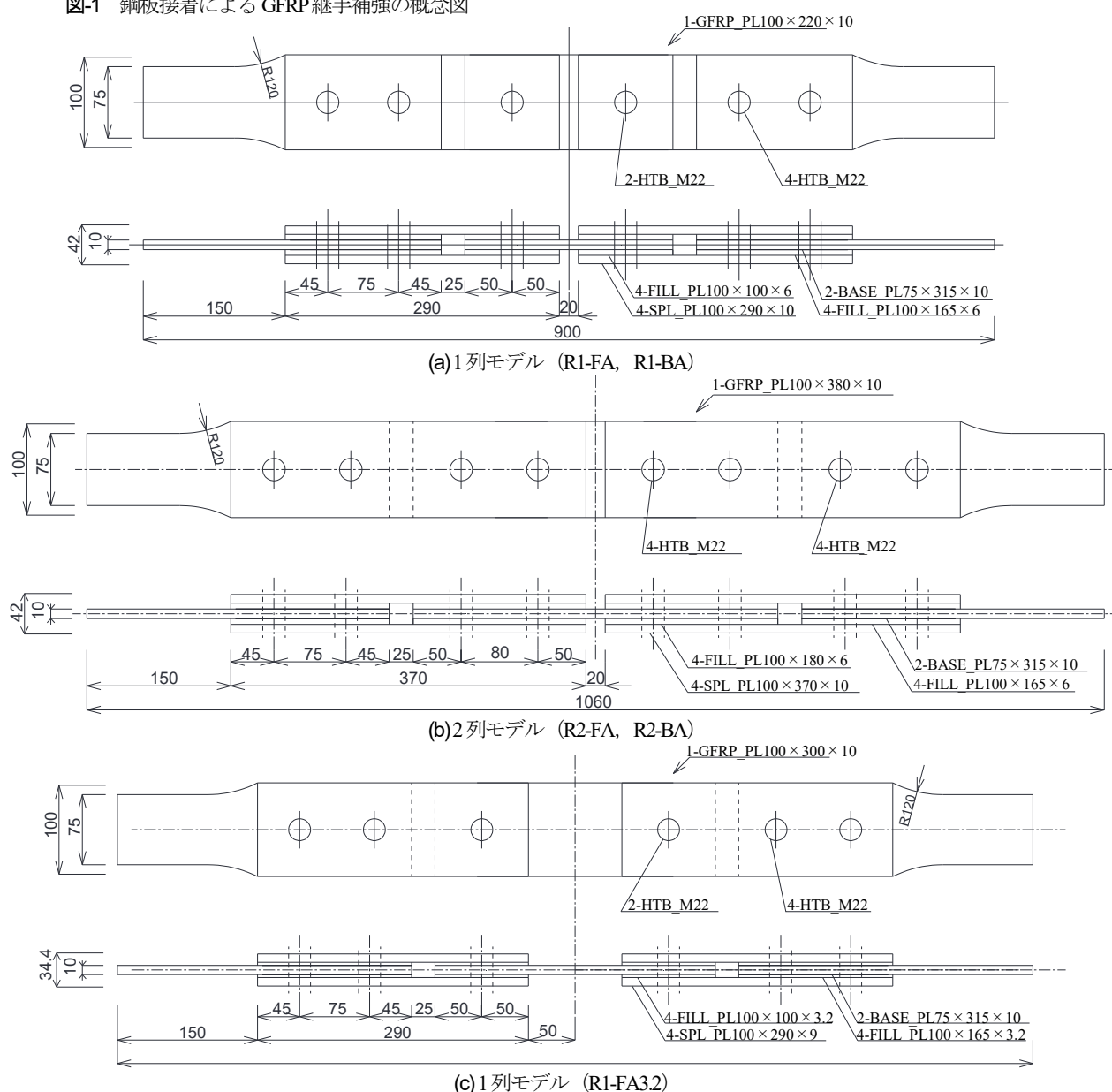


図-2 GFRP 継手試験体の概要図

には、引抜成形された GFRP 板（幅 100×厚さ 10mm）を用いた。GFRP 板に接着される補強鋼板（SS400 材）は、厚さの異なる 2 種類（厚さ：6mm, 3.2mm）を検討した。添接板は鋼製（SS400）とし、厚さ 10mm とした。

高力ボルト接合のボルト数は 1 列、2 列とし、列数に対してそれぞれトルシア形高力ボルト（M22 S10T）、支圧接合用高力ボルト（M22 B10T）を用いて、摩擦接合、支圧接合の継手耐力を検討した。さらに、GFRP の支圧接合としての継手耐力を把握するため、補強鋼板なしで、GFRP 板を添接板で、支圧接合用高力ボルト（M22 B10T）を用いて支圧接合した試験体も対象とした。

なお、GFRP 板の継手試験を行う場合、GFRP 板を試験機で直接つかむと、つかみ部から破壊が先行することがある。そこで、GFRP 板の両端を鋼板と接合することとし、試験機でつかむ側は、鋼板（SS400）とした。鋼板は、試験機のつかみ幅の制約から、幅を 100mm から 75mm に変化させた形状とし、補強鋼板（GFRP 板の補強鋼板と同一）をフィラープレートとして適用した。鋼板同士の全ての接合面には、無機ジंकリッチペイントが塗布（75 μ m）され、摩擦接合の仕様とした。

表-1 に、GFRP 板、エポキシ樹脂接着剤の材料物性値を、表-2 に、実験シリーズをそれぞれ示す。接合方法、ボルト本数、補強板の有無・厚さをパラメータとして、

表-1 GFRP 板、エポキシ樹脂接着剤の材料物性値

(a) GFRP 板（引抜成形材）

項目	記号	単位	値
弾性係数	E_{11}	N/mm ²	30,000
	E_{22}	N/mm ²	15,000
	E_{33}	N/mm ²	3,000
せん断弾性係数	G_{12}	N/mm ²	6,000
	G_{23}	N/mm ²	4,000
	G_{31}	N/mm ²	4,000
ポアソン比	ν_{12}	—	0.30
	ν_{23}	—	0.05
	ν_{31}	—	0.05
引張強度(σ_u)	σ_u	N/mm ²	350
せん断強度	τ_u	N/mm ²	108

(b) エポキシ樹脂接着剤（E258R）

項目	記号	単位	値
弾性係数	E_a	N/mm ²	3,400
ポアソン比	ν_a	—	0.38
引張せん断接着強さ	τ_a	N/mm ²	25

表-2 実験シリーズと試験体名

試験体名	接合方法	ボルト本数	補強鋼板の厚さ (mm)	試験数
R1-NB	支圧	1	なし	3
R1-FA	摩擦	1	6.0	3
R1-BA	支圧	1	6.0	3
R2-FA	摩擦	2	6.0	3
R2-BA	支圧	2	6.0	3
R1-FA3.2	摩擦	1	3.2	3

6 シリーズ設定し、各シリーズで 3 体の試験体を用意した。

(2) 試験体の作製方法

はじめに、接着面にブラスト処理（摩擦接合面には無機ジंकリッチペイントを塗布した状態）した補強鋼板をアセトンで脱脂洗浄した後、エポキシ樹脂接着剤（E258R）を用いて、GFRP 板の両面に接着した。接着後、約 40℃で 24 時間以上、加温養生した。接着厚さは少量のガラスビーズ（直径 0.4mm）を用いて厚さを管理した。養生中は試験体はずれないように仮ボルトで固定した。硬化後、仮ボルトを取り外し、孔壁に残ったエポキシ樹脂接着剤をグラインダーで切削し、除去した。

高力ボルト接合では、孔径は、GFRP 板、鋼板ともに、トルシア形高力ボルト（M22 S10T）では 24.5mm、支圧接合用高力ボルト（M22 B10T）では 23.5mm とした。ボルト締めは、設計ボルト軸力の 10%増しとし、シャーレンチを用いて 225kN の軸力を導入した。なお、支圧接合用高力ボルト（M22 B10T）では、ボルト軸力の導入前に打ち込みを行い、トルシア形高力ボルト（M22 S10T）と同じ軸力を導入した。試験体の引張試験は、ボルト軸力の導入後、1 週間以内に実施した。

(3) 実験方法とセットアップ

接着接合部の初期はく離を把握するためにひずみゲ

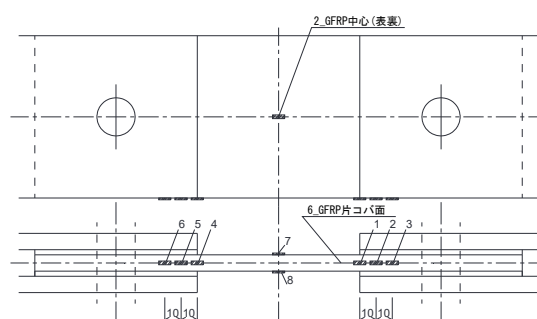


図-3 ひずみゲージの設置位置



写真-1 セットアップの状況

ジを設置した。図-3に、ひずみゲージの設置位置を示す。
実験では、アムスラー型万能試験機（容量：1000kN）を使用した。制御方式は変位制御とし、載荷速度を2.5mm/minとした。写真-1に、セットアップ状況を示す。

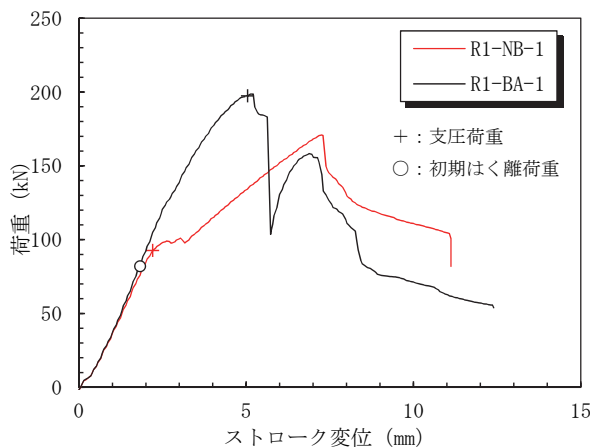
(4) 解析モデルと解析方法

接着接合部の荷重伝達、はく離を検討するために、汎用有限要素解析プログラム Marc/Mentat 2019 を用いて、FEM 解析を行った。解析モデルは、要素寸法 2.5mm を基本としたソリッド要素で作成し、対称条件を用いて 1/4 モデルとした（図-1）。接着接合（図-1）では、部材間を線形ばねでモデル化し、表-1 (b) に示されたエポキシ樹脂接着剤の材料物性値を用いて、ばねによる効果は、ペナルティ係数（弾性係数を接着厚さで除した値）を設定することで考慮した。摩擦接合（図-1）では、接触条件にて、摩擦係数 0.4 を考慮した。解析に用いた材料物性値は、表-1 に示した通りである。

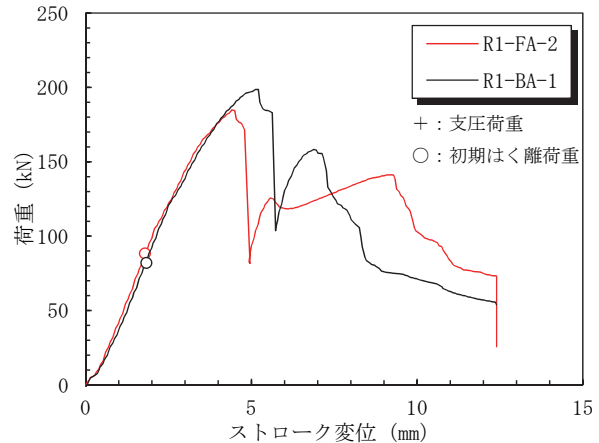
さらに、ボルト軸力は、ボルト軸部に相当する要素に、線膨張係数を考慮して、熱応力解析にて設計ボルト軸力の 10% 増しのボルト軸力を導入した。

表-3 各実験シリーズにおける破壊荷重と破壊形式

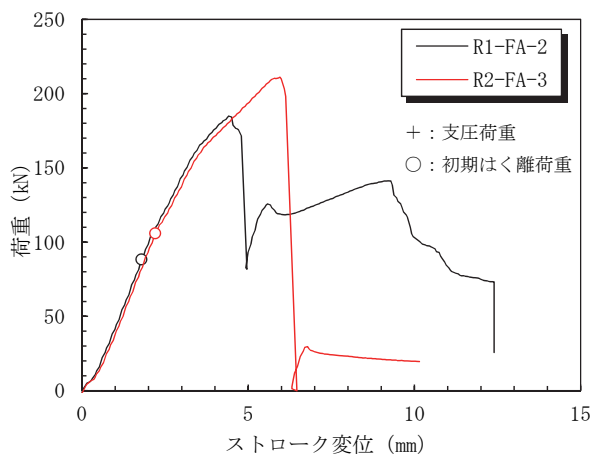
試験体名	最大荷重 P_{max} (kN)	支圧荷重 P_b (kN)	初期はく離荷重 P_{b0} (kN)	破壊形式
R1-NB-1	171.3	95.4	—	せん断破壊
R1-NB-2	167.4	102.9	—	せん断破壊
R1-NB-3	171.4	104.2	—	せん断破壊
平均値	170.0	100.8	—	
R1-BA-1	199.0	199.0	85.3	支圧破壊
R1-BA-2	195.4	—	97.5	接着破壊
R1-BA-3	177.5	177.5	96.5	支圧破壊
平均値	190.6	188.2	93.1	
R1-FA-1	184.4	—	108.4	接着破壊
R1-FA-2	185.4	—	91.7	接着破壊
R1-FA-3	188.2	—	99.9	接着破壊
平均値	186.0	—	100.0	
R2-BA-1	223.4	—	123.6	純断面引張破壊
R2-BA-2	209.9	—	125.4	純断面引張破壊
R2-BA-3	218.3	—	132.2	純断面引張破壊
平均値	217.2	—	127.1	
R2-FA-1	219.7	—	121.3	純断面引張破壊
R2-FA-2	218.0	—	116.2	純断面引張破壊
R2-FA-3	211.3	—	108.3	純断面引張破壊
平均値	216.3	—	115.3	
R1-FA3.2-1	182.8	—	123.1	接着破壊
R1-FA3.2-2	180.8	—	110.9	接着破壊
R1-FA3.2-3	182.7	—	113.5	接着破壊
平均値	182.1	—	115.8	



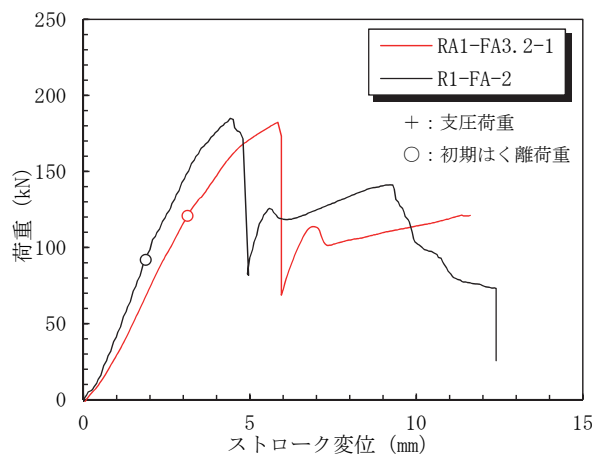
(a) 補強鋼板の有無による比較



(b) 支圧接合と摩擦接合による比較



(c) ボルト列数による比較



(d) 補強鋼板の厚さによる比較

図4 荷重とストローク変位の関係

4. 検討結果と考察

実験結果の一部として、表-3に、各実験シリーズにおける破壊荷重と破壊形式を示す。表には、各試験体の最大荷重、支圧荷重、初期はく離荷重、破壊形式、および各シリーズにおける平均値（3体）を示している。支圧荷重は、ストローク変位における挙動より、初期はく離荷重、はく離荷重は、ひずみゲージの値の変化より特定したものである。以下、各パラメータに対して比較して考察する。

(1) 補強鋼板の有無による比較

支圧破壊に対する補強鋼板の効果を確認するため、補強板の有無（R1-BA、R1-NB）による比較を行う。図-4 (a)に、荷重とストローク変位の関係を示す。図中には、破壊のイベントを併記する。試験体ごとのばらつきは小さかったため、各シリーズで1体を比較して示す。

図-4 (a)、表-3 より、補強鋼板のない R1-NB では、早い段階で GFRP 板の支圧破壊が発生することから、継手耐力は GFRP の材料強度に支配的であることがわかる。

一方、補強鋼板を接着した R1-BA では、鋼板が支圧ボルトからの支圧力を受けることから、支圧破壊は、ほぼ最大荷重で発生し、支圧荷重が増加することがわかった。したがって、GFRP 板に接着した補強鋼板は、GFRP の継手耐力の向上に有効であるといえた。

(2) 支圧接合と摩擦接合の比較

ボルト本数 1 列における支圧接合（R1-BA）と摩擦接合（R1-FA）を比較する。図-4 (b)、表-3 より、支圧接合の R1-BA では、摩擦接合の R1-FA と比べて、初期はく離荷重は若干小さかったが、支圧荷重は最大荷重に近いこと、また、その最大荷重は、摩擦接合の R1-FA より若干向上することがわかる。両者の破壊形式は、支圧破壊と接着破壊で異なるが、荷重－変位関係はほぼ同じであり、それらの差異はわずかであるといえた。施工性を考慮すれば、摩擦接合が有利であると考えられる。なお、ボルト数 2 列における支圧接合（R2-BA）と摩擦接合（R2-FA）については、図の比較を略したが、同様の傾向であり、破壊形式は両者ともに純断面引張破壊であった。破壊形式については次節で考察する。

(3) ボルト列数の影響

まず、摩擦接合において、ボルト本数（R1-FA、R2-FA）の影響を考察する。図-4 (c)、表-3 より、ボルト本数が 1 列から 2 列に増えることで、初期はく離荷重、最大荷重は大きくなるが、最大荷重はボルト列数に比例しないことがわかる。

写真-2 に、ボルト本数が 2 本の摩擦接合（R2-FA）,

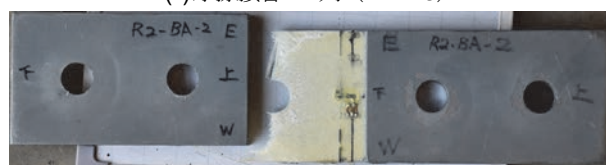
支圧接合（R2-BA）の破壊状況を示す。写真より、どちらもボルト孔を起点とする純断面引張破壊（材料破壊）で終局となっていることから、2 列以上では、接合方法に関係なく、GFRP の材料強度が支配的になることがわかった。したがって、継手耐力は、ボルト列数に比例しないといえた。

(4) 補強鋼板の接着接合部に生じる応力の解析的検討

以上の検討結果から、GFRP 板と補強鋼板における接着接合部の初期はく離は、接合方法、ボルト本数によら



(a) 摩擦接合：2列 (R2-FA-3)



(b) 支圧接合：2列 (R2-BA-2)

写真-2 ボルト列数2本の試験体の破壊状況

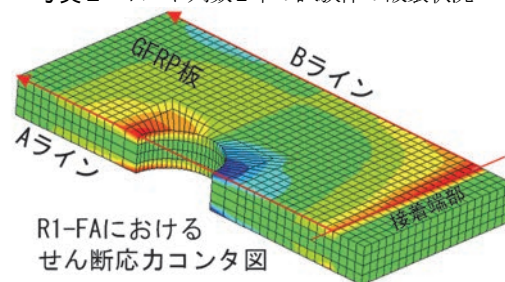
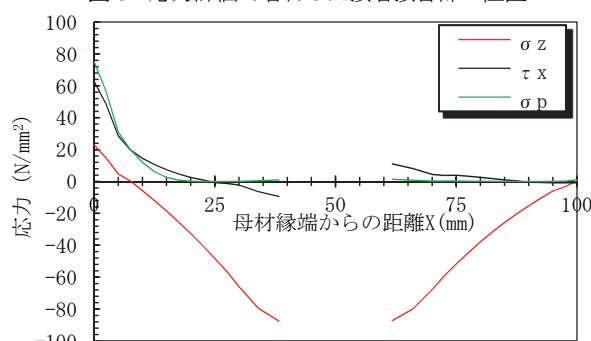
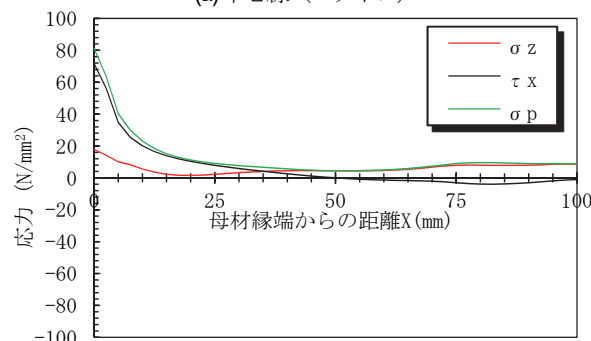


図-5 応力評価で着目した接着接合部の位置



(a) 中心線 (Aライン)



(b) 側線 (Bライン)

図-6 R1-FAにおける接着接合部の応力分布図

ず、100kN 程度であること、初期はく離荷重は、荷重－ストローク変位の関係からは判別が困難であり、初期はく離荷重が生じたとしても最大荷重までは十分に余裕があることがわかった。しかしながら、耐久性などを考慮すれば、初期はく離は接着接合部では、望ましくないため、接着接合からのはく離荷重の評価が重要であるといえる。

そこで本節では、補強鋼板の厚さ、長さが接着接合部の応力特性に及ぼす影響を FEM 解析にて検討を行った。解析では、初期はく離荷重に相当する 100kN の引張荷重を作用させる。図-5 に、着目した接着接合部を示す。板幅に対する中心線 (A ライン) と側線 (B ライン) である。一例として、図-6 に、摩擦接合、1 列モデル (R1-FA) におけるせん断応力 τ_x 、垂直応力 σ_z 、主応力 σ_p の分布図を示す。図より、中心線のボルト周辺では、 $\sigma_x = -80 \text{ N/mm}^2$ 程度の圧縮応力が作用すること、中心線、側線で、主応力が生じる箇所は、ともに GFRP の母材縁端であることがわかる。このケースでは、側線の端部で、主応力 σ_p が最大となり、その値は 81.1 N/mm^2 (限界値 (B)) であった。文献 6) によれば、この接着剤のはく離時の最大主応力は 110 N/mm^2 であり、概ね妥当な値であるといえた。

次に、補強鋼板の適切な厚さを検討するために、実験で用いた、厚さ 6mm に対して、3.2mm、10mm、12mm を

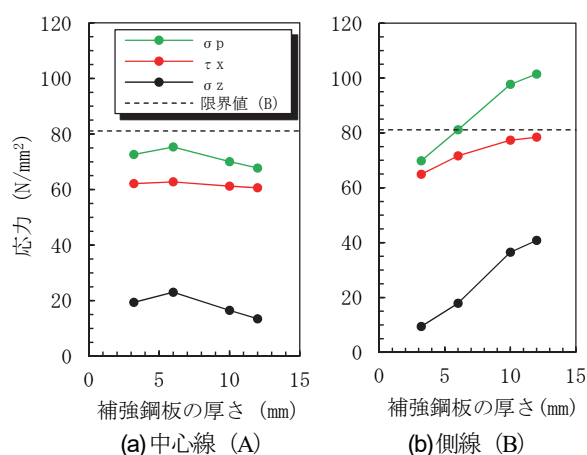


図-7 補強鋼板の厚さと接着接合部の縁端部に生じる応力の関係

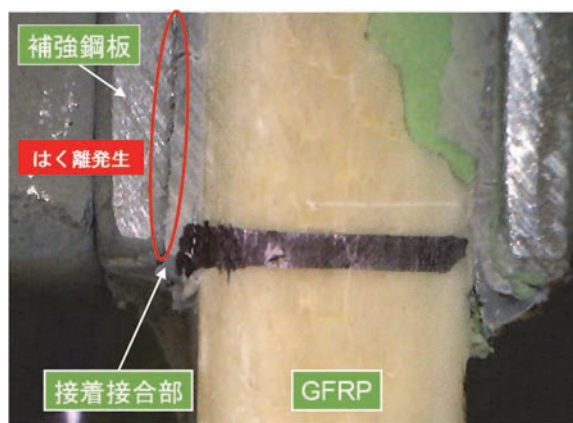


写真-3 初期はく離の発生状況 (R1-FA3.2-2)

加えて FEM 解析を行った。図-7 に、補強鋼板の厚さと縁端部に生じる応力の関係図を、中心線 (A ライン) と側線 (B ライン) 別にそれぞれ示す。図より、実験で用いた補強鋼板の厚さ 6mm では、初期はく離は、側線側の限界値 (B) でクリティカルとなっていたが、厚さを 3.2mm とすることで、さらに主応力を小さくすることができると、また、厚さを 3.2mm とすることで、はく離の限界値は中心線側に移行するものの、厚さ 6mm より改善されることがわかった。次節では、補強鋼板の厚さ 3.2mm の実験結果について考察する。

(5) 補強鋼板の厚さの比較

本節では、補強鋼板の厚さ (R1-FA3.2, R1-FA) の比較を行う。図-4 (d)、表-3 より、補強鋼板を 6mm から 3.2mm に薄くした場合、最大荷重に至るまでのストローク変位が若干大きくなるものの、初期はく離荷重、最大荷重はほぼ同じであることがわかった。

さらに、R1-FA3.2 のシリーズでは、引張試験中に、マイクロ스코プを用いて、接着端部からのはく離進展を継手側面から観察した。写真-3 に、試験体 R1-FA3.2-2 における初期はく離の発生状況を示す。写真より、はく離は補強鋼板側に近い接着層で生じていることがわかる。さらに、目視により観察された初期はく離荷重を推定したところ、試験体 R1-FA3.2 では、No.1 は推定できなかったが、No.2, 3 は、それぞれ 86.8kN、90.7kN であり、表-3 に示したひずみゲージから推定した初期はく離荷重の平均値 115.8kN より下回ることがわかった。初期はく離荷重の精緻な推定については今後の課題であるが、目視観察に基づく初期はく離荷重は約 85kN であるといえた。

5. まとめ

本研究では、より合理的な GFRP 板の接合方法を開発することを目的として、鋼板接着で補強した GFRP 板の高力ボルト接合に関する検討を行った。得られた成果をまとめると以下の通りである。

- (1) GFRP 板の接合部の両面に鋼板を接着接合することで補強した場合、鋼板が GFRP 板の支圧力を分担することから、継手耐力が向上することがわかった。
- (2) GFRP 板に接着された補強鋼板を添接板で高力ボルトを用いて接合した場合、支圧接合、摩擦接合、いずれの方法でも継手挙動、継手耐力はほぼ同じであった。施工性を考慮すれば、摩擦接合が望ましいといえた。
- (3) ボルト本数を 1 列から 2 列へ増やすことで、初期はく離荷重、継手耐力は増加するが、破壊形式は、接合方法に関係なく、純断面引張破壊 (材料破壊) で

あることから、継手耐力はボルト本数に比例しなかった。

- (4) 補強鋼板と GFRP 板との接着接合の（端部）における初期はく離が継手の設計で支配的となること、補強鋼板の厚さ 3.2mm とした場合、初期はく離荷重は約 85kN となることが確かめられた。

なお、初期はく離荷重の精緻な予測やそれを考慮した設計法の構築、さらにはクリープ変形に伴うボルト軸力の低下に関しては、今後の課題としたい。

謝辞：本研究は、株式会社 IHI インフラ建設、株式会社栗本鐵工所、パシフィックコンサルタンツ株式会社、東京都立大学による共同研究として実施された。検討にあたり、松井繁之大阪大学名誉教授には、貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Clarke, J. L.: Structural Design of Polymer Composites - EUROCOMP Design Code and Handbook-, E&FN SPON, 1996.
- 2) 複合構造委員会 FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会：複合構造レポート 09, FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 土木学会, 2013.
- 3) 岩崎初美, 松井孝洋, 小林拳祐, 中村一史：ハイブリッド FRP 部材と鋼部材の高力ボルト接合に関する強度特性, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.768-778, 2018.3
- 4) Phan Viet Nhut, Tran Quang Duc, Yukihiro Matsumoto: Effects of glass fiber sheets on the strengthening of GFRP bolted connections with various geometric parameters, JSCE, Proc. of the 14th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, pp.12-1-12-8, 2021.11
- 5) Tran Quang Duc, Phan Viet Nhut and Yukihiro Matsumoto: Study on using glass fiber sheet for improvement pultruded GFRP multi-bolted connections, JSCE, Proc. of the 14th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, pp.13-1-13-8, 2021.11
- 6) 複合構造委員会編：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09, 土木学会, 2018.7

(Received August 26, 2022)

EXPERIMENTAL STUDY ON HIGH-STRENGTH BOLTED JOINTS OF GFRP PLATES BY ADHESIVELY BONDED STEEL PLATES

Ryo ONODERA, Hitoshi NAKAMURA, Kensuke KOBAYASHI, Koichi HANAMURA and Toshiyuki NIIKURA

The joint strength of GFRP plates depends on the bearing strength and shear strength of GFRP materials. Since these strengths are relatively small compared to steel, the joint strength of GFRP plates is also small, which is a structural design issue. Therefore, as a method to improve the joint strength between GFRP and steel plates, a method of joining GFRP plates reinforced by bonded steel plates with steel joint plates was devised. The number of bolt rows (one or two) was experimentally investigated as a parameter. As a result, it was confirmed that the proposed method is effective and that by bonding a steel plate to a GFRP plate, it is possible to prevent the prior bearing stress failure in GFRP plates and increase the joint strength. It was also found that the initial debonding of the adhesive joint between GFRP and steel plates is dominant for the joint strength, and it does not depend on the number of bolt rows.