

ハイブリッドFRP部材の接合方法の合理化と 高耐久性化に関する検討

濱崎 景太¹・中村 一史²・瀬戸内 秀規³・柳沼 謙一⁴

¹正会員 首都高速道路株式会社 神奈川管理局 保全設計第一課
(〒221-0044 神奈川県横浜市神奈川区東神奈川1-3-4)

²正会員 首都大学東京 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 琉球大学 准教授 農学部 地域農業工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

⁴正会員 株式会社ジェイテック 企画部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町3-12-3)

繊維強化プラスチック (FRP) は、耐食性に優れた材料であるが、接合材料には、鋼材が用いられており、耐久性の面で課題が残されている。接合材料にもFRPを適用すれば、FRPの耐食性を最大限に活用することが可能となるものの、その強度が小さく、ボルト本数が増えるなど、効率的な接合方法とはいえない。そこで、鋼接合材料に腐食劣化が生じた場合には、その取替えを可能とし、取替え作業中には、死荷重に対して、FRP添接板との接着接合で対応する接合方法を提案する。本研究では、その有用性を検証するために、ハイブリッドFRPからなる母材、添接板を対象に、クーボン試験片による継手の引張試験および屋外大気暴露試験を行って、継手の強度特性、耐久性について検討を行った。

Key Words : hybrid FRP composite member, adhesive, high strength bolt, durability

1. はじめに

FRPは、従来の建設材料である、鋼やコンクリートに比べて耐食性の面で優れているため、より厳しい環境下における構造物に適用することが可能である¹⁾。例えば、高い耐食性が求められる沿岸部などの歩道橋²⁾に適用されている。ただし、土木構造物では、製作、架設等の制約から、構造部材を現場で接合する場合が多く、それらの接合部においても構造部材と同等の耐食性が求められる。FRP部材の接合材料には、鋼材の中でも耐食性の高いステンレス製のボルトや添接板が用いられているものの、FRPに比べると耐食性に劣るため、構造的にも弱点となる、接合部の耐久性に課題がある³⁾。

一方、FRP部材の接合方法は、せん断支圧接合が基本となるが、FRPのせん断支圧強度が小さいため、ボルト本数が増大し、効率のよい継手形式とはいえない。これに対して、鋼部材の接合方法として、一般に用いられている、高力ボルトによる摩擦接合⁴⁾のFRP部材への適用性については、まだ開発段階⁵⁾ではあるものの、効率の高い接合方法として期待されている。摩擦接合では、所

定のボルト軸力が保持されることが重要となる。FRP添接板は、耐食性に優れたものの、直接、ボルトで締付けた場合、FRPの局所的な破壊や、FRPのクリープ変形による軸力の低下が懸念される。これまでの成果によれば、ボルト軸力によるFRPへの応力集中を緩和させるために、剛性が高い鋼添接板を用いれば、摩擦接合も十分に適用可能であることが示されている⁶⁾。したがって、鋼接合材料の耐久性の課題が解決されれば、より合理的な接合方法になると考えられる。

著者らは、先行研究として、炭素繊維とガラス繊維を組み合わせた、ハイブリッドFRP (HFRPとよぶ) の部材同士の接合方法について、実験的な検討を行っている。HFRP部材の接合に、鋼添接板を接着接合し、さらに、高力ボルトで締付けた場合、接合強度が向上すること、また、接着接合のみの場合であっても、十分な接合強度を有していることが確かめられている⁷⁾。これらのことから、FRP添接板と鋼添接板を組み合わせることで、合理的なFRP部材の接合が可能になると考えられる。鋼接合材料が腐食によって劣化した場合には、例えば、それらの取替えを前提とした設計とし、鋼接合材料の取替え

作業中には、死荷重に対して、一時的に、FRP添接板の接着接合で対応する接合方法が考えられる。

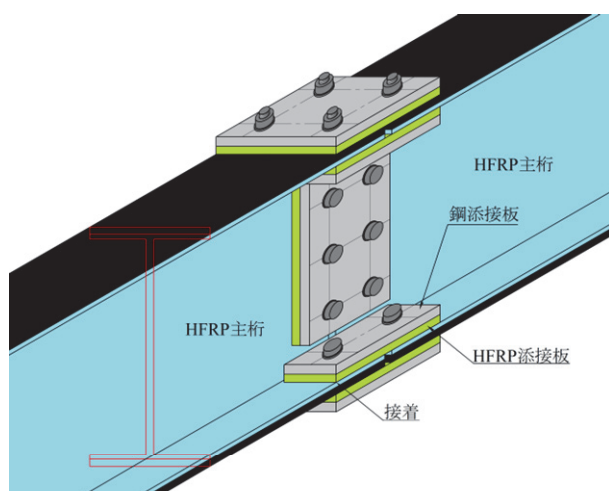
そこで本研究では、鋼接合材料の取替えを前提とした、HFRP部材の接合方法を開発することを目的として、対象とする桁の接合部を、クーポン試験片を用いた継手でモデル化し、実験的な検討を行った。まず、接合部の静的強度を把握するために、接合方法とボルト列数をパラメータとして、継手の引張試験を行った。さらに、実際の環境条件での耐久性を検討するために、屋外大気暴露試験を実施した。

2. 接合材料の取替えを前提した接合方法の提案

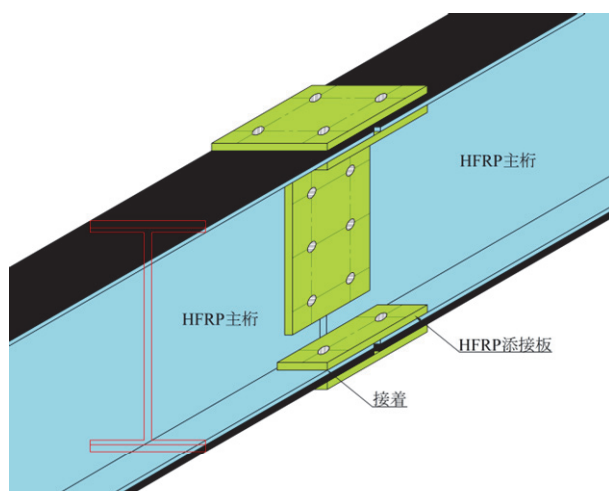
図-1に、鋼添接材料（鋼添接板、高力ボルト）を取替えることができ、維持管理性の高い接合方法の概念図を示す。その基本的な考え方は、以下の通りである。

①FRP部材（母材）は、HFRP添接板で接着接合され、鋼接合材料の取替え時には、死荷重の作用を分担する。

FRP材料同士の接着接合部は、腐食による劣化がない



(a) 供用時



(b) 鋼接合材料の取替え時

図-1 鋼接合材料の取替えを前提とした接合方法

ため、耐久性の高い接合方法となる。

②接着接合されたHFRP添接板の両外側に、鋼添接板を設置して、高力ボルト接合する。鋼添接板とHFRP添接板の間は、接着接合しない。供用時は、この状態で使用され、活荷重等の後荷重に対して、安全性の高い接合方法となる。

3. 引張試験によるHFRP継手強度の検討

(1) 試験片の設計と実験方法

実験に用いた試験片は、供用時、取替え時の接合方法に加え、比較のための接合方法を含む、以下のA～Dの4つのタイプとした。

タイプA : 鋼添接板を接着接合し、さらに、高力ボルトで締結した併用接合（比較検討用）

タイプB : HFRP添接板を接着接合し、さらに、鋼添接板を両外側から当てて、高力ボルト接合した併用接合（提案方法の供用時）

タイプC : HFRP添接板を接着した接合（提案方法の取替え時）

タイプD : 鋼母材を鋼添接板と高力ボルトで接合した、通常の摩擦接合（比較検討用）

実験パラメータは、接合方法に加えて、ボルト列数とした。ボルト列数は、1, 2, 3列とした。図-2に、ボルト列数を1列とした場合の試験片図を示す。

母材は、引抜成形されたHFRP桁のフランジ部から切出したHFRP板、添接板は、RTM成形されたHFRP板および鋼板（SS400）である。各接合面はブラスト処理された。HFRP板では、ガラスビーズ（#40）を、また、鋼板では、スチールグリッド（#240）を研削材に用いた。

また、試験片の寸法の制約から、ボルトはM16を選択することとし、ボルトの配置は、ボルトの直径（ $D=16\text{mm}$ ）に対して、FRPの縁端距離（ $3D$ 以上）、外縁距離（ $2D$ 以上）、長手方向のボルト間距離（ $5D$ 以上）を考慮して、設計した⁹⁾。なお、鋼材の縁端距離は、推奨されているFRPの縁端距離よりも、実際には短いですが、比較検討のために、FRPの縁端距離に統一して、設計を行っている。

母材と添接板の接着接合には、全て2液性常温硬化型エポキシ樹脂接着剤（シーカデュア30）を用いている。養生の温度と時間は、約 40°C 、24時間とした。その後、規格値と同等の強度が得られるように、室温での養生期間を1週間以上とした。接着層の厚さは、直径 0.4mm のガラスビーズを接着層に入れることで約 0.4mm となるように管理した。

ボルトには、摩擦接合用高力ボルト（FIOT M16）を使用した。ボルト孔の直径は 18mm である。また、FRP母材および接着剤のクリープ変形によるボルト軸力の低

下が懸念されることから、高力ボルトへの軸力導入は、全ての試験片で、実験の開始直前とした。高力ボルト（M16）については、設計軸力（106kN）に対して、10%増し締めを考慮した目標値（117kN）を、トルクレレンチを用いて導入した。

表-1に、実験に用いた材料およびボルトの材料物性値を、また、表-2に、実験シリーズをそれぞれ示す。

実験には、万能試験機（容量1,000kN）を用い、変位制御による引張試験を行った。载荷速度は2.5mm/min（一定）であり、継手部が破壊し、荷重の増加が確認できなくなるまで载荷を行った。HFRP板（母材）の突合

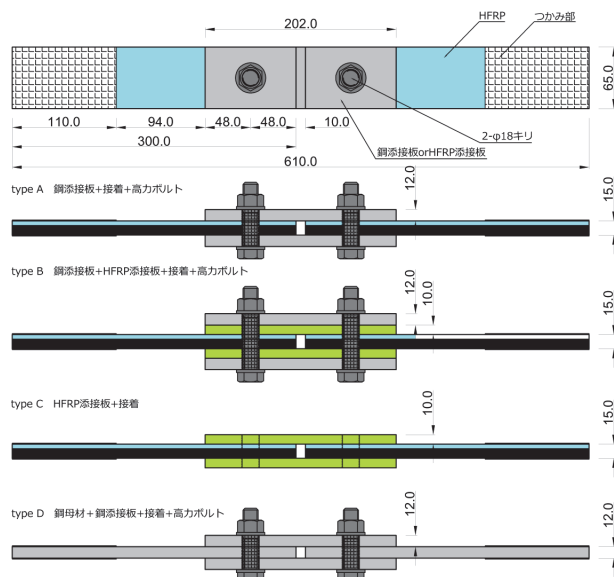


図-2 試験片図（ボルト列数1列）

表-1 材料物性値

HFRP 母材 (HFRP 板, 厚さ 15mm)	弾性係数 (GPa)	44.2
	引張強度 (MPa)	832.5
鋼添接板 (SS400, 厚さ 12mm)	弾性係数 (GPa)	189.0
	引張強度 (MPa)	462.7
	降伏強度 (MPa)	328.5
摩擦接合用高力ボルト (F10TM16×70, 95mm)	耐力 (MPa)	1034
	引張強度 (MPa)	1076
エポキシ樹脂接着剤 (シーカデュア 30)	弾性係数 (GPa)	6.4
	引張強度 (MPa)	32

表-2 引張試験の実験シリーズ

接合タイプ	試験片名	接合方法	ボルト列数 (列)
タイプ A	A1	接着併用	1
	A2		2
	A3		3
タイプ B	B1	接着併用	1
	B2		2
	B3		3
タイプ C	C1	接着接合	1
	C2		2
	C3		3
タイプ D	D1-1	摩擦接合	1
	D1-2		1

せ部および接着した添接板の端部には、クリップゲージを設置し、それらの部位の相対変位を測定した。さらに、HFRP板（母材）、鋼添接板およびHFRP添接板の表面、側面には、1軸のひずみゲージ（ゲージ長3mm）を設置し、軸方向のひずみを測定した。図-3に、ボルトを3列とした試験片のセットアップ状況を示す。

(2) 継手の破壊形態と破断位置

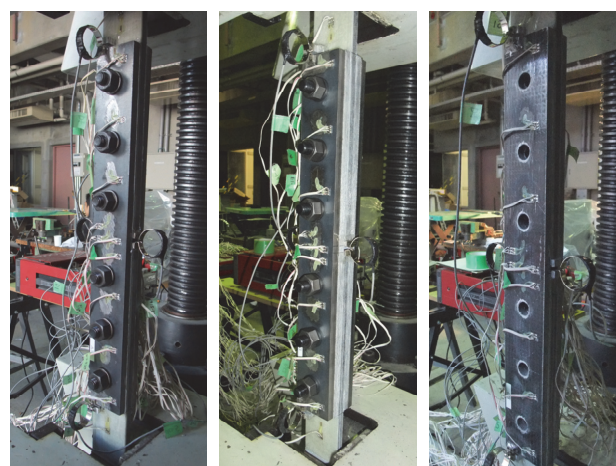
表-3、図-4に、各試験片の破壊形態と破断位置およびそれらの破壊状況をそれぞれ示す。接着接合した試験片（タイプA, B, C）では、最初の破壊音と同時に接着剤の破壊が生じたと考えられ、接着剤のはく離の状況は、例えば、A1では界面はく離、A2では層間はく離など、試験片ごとに種々の特徴がみられた。破断位置については、ボルト列数が1列および2列の場合は、概ね突合せ部付近のボルト軸部と円孔壁の支圧によるHFRP母材の縁端で破壊すること、また、ボルト列数が3列の場合は3列目のボルト孔付近のHFRP母材の純断面で引張破壊となることがわかった。破壊に至る挙動については、次の荷重と変位の関係の中で詳しく考察する。

(3) 荷重と変位の関係

図-5に、タイプA～Dにおける荷重と変位の関係を示す。変位は、上下チャック間の相対変位である。なお、本研究では、突合わせ部から最も遠いボルトを1列目としている。

a) タイプA

全てのボルト列数の試験片において、初めの破壊まで荷重と相対変位の関係は線形挙動を示していることがわかる。HFRP母材と添接板との間でのすべりは発生していないため、突合せ部の相対変位は、図を略したが、ほとんど生じていなかった。これは、ボルトの締め付けによる摩擦力に加え、接着剤によりすべりが抑制されている



(a) A3 (b) B3 (c) C3

図-3 試験片のセットアップ状況

ためである。A1では227kN、A2では415kN、A3では430kNで、最初の破壊が発生し、この時、接着剤の一部が破壊したと考えられる。接着剤の破壊後も、再び荷重は増加する。これは、ボルトの軸部が母材の円孔内壁にあたり、支圧状態となるためと考えられる。表-3に示したように、最終的な破断位置は、母材の1列目もしくは2列目であり、破壊形態は、縁端の支圧・せん断破壊あるいは、純断面の引張破壊であった。なお、破壊が進行し

ながら荷重が低下しており、縁端では、ほとんどがせん断破壊の形態になったと考えられる。

b) タイプB

タイプAと同様に、初めの接着剤の破壊まで荷重と相対変位の関係はほぼ線形挙動を示すことがわかる。B3では、初めの破壊が発生した後、ボルト軸部からHFRP母板が支圧を受けることなく、428kNで、純断面の引張破壊となった。破壊位置は、HFRP母材のボルト1列目で

表-3 各試験片の破壊形態と破断位置

試験片名	接着剤のはく離形態 (破壊位置)	ボルト周辺での母材の破壊形態 (破断位置)	
		GFRP 側	CFRP 側
A1	界面はく離 (鋼添接板)	純断面引張破壊 (1列目)	縁端支圧・せん断破壊 (1列目)
A2	層間はく離 (HFRP 母材)	縁端支圧・せん断破壊 (1列目)	縁端支圧・せん断破壊 (1列目), 純断面引張破壊 (2列目)
A3	界面はく離 (鋼添接板)	純断面引張破壊 (1列目)	純断面引張破壊 (1列目)
B1	界面はく離 (HFRP 添接板)	縁端支圧・せん断破壊 (1列目)	縁端支圧・せん断破壊 (1列目)
B2	層間はく離 (HFRP 添接板)	縁端支圧・せん断破壊 (1列目)	縁端支圧・せん断破壊 (1列目)
B3	層間はく離 (HFRP 母材)	純断面引張破壊 (1列目)	純断面引張破壊 (1列目)
C1	層間はく離 (HFRP 母材)	—	—
C2	層間はく離 (HFRP 母材)	—	—
C3	層間はく離 (HFRP 母材)	—	—
DI-1	—	純断面引張破壊, 縁端せん断破壊 (1列目)	
DI-2	—	縁端せん断破壊 (1列目)	

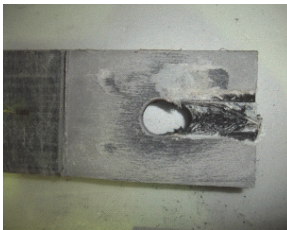
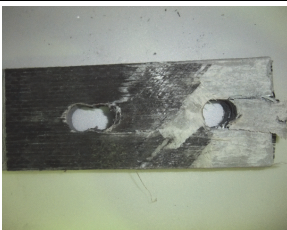
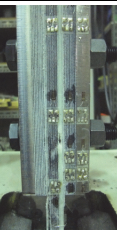
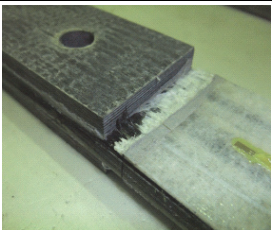
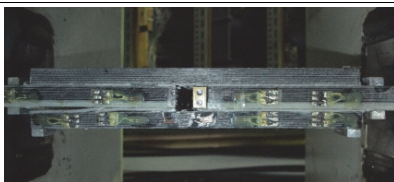
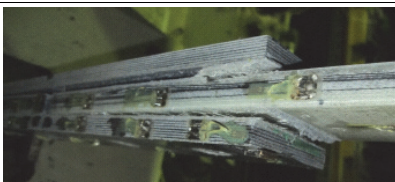
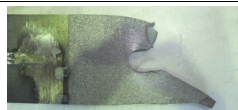
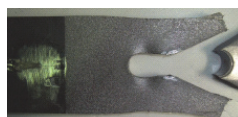
タイプ	ボルト列数 (ボルト列数相当の接着長さ)					
	1 列		2 列		3 列	
A						
B						
C						
D			—		—	
						

図-4 各試験片の破壊の状況

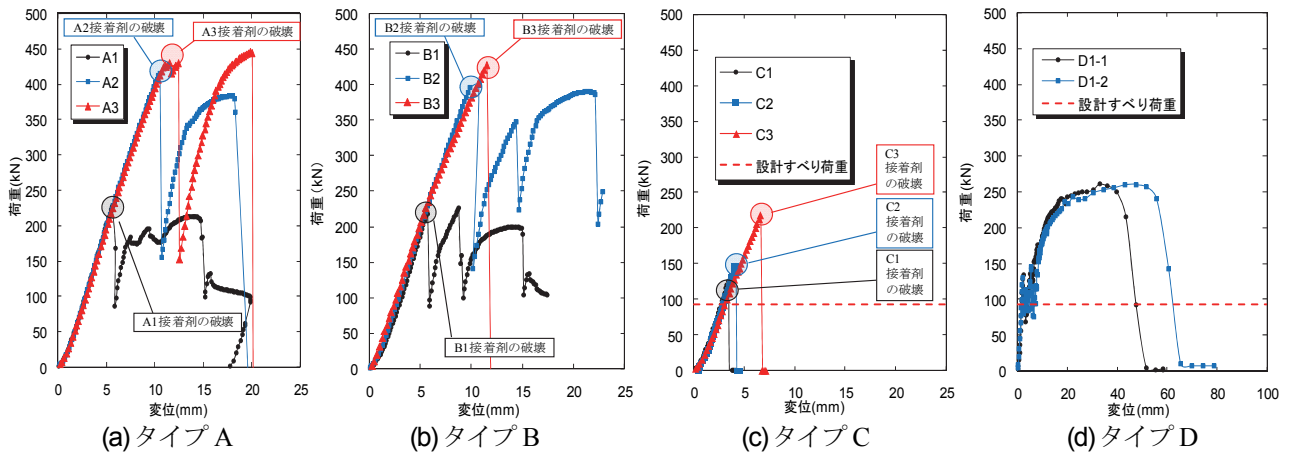


図-5 各接合タイプにおける荷重と変位の関係

ある。B1, B2の最大荷重は、それぞれ218kN, 399kNであり、タイプAの同じボルト列数の試験片 (A1, A2) とほぼ同等の荷重で最初の接着剤の破壊が発生し、その後の挙動、破壊形態についてもA1, A2と同様であった。

c) タイプC

接着接合の試験片であり、接着のはく離が最大荷重となった。その大きさは、接着長さが長くなるほど、若干増加するが、タイプA, Bと比べ小さくなった。1列相当の接着長さでは、一般的な摩擦接合における設計すべり荷重 (タイプDの1列の設計すべり荷重相当) をクリアしていることが確かめられる。

d) タイプD

D1-1, D1-2ともに、130kN付近で、荷重が一旦停滞し、グラフの傾きが緩やかに変化する点が見られる。この時、鋼母材と鋼添接板との間にすべりが発生したと考えられる。この時の荷重をすべり荷重と定義した。すべり荷重は、すべり係数を0.4として計算した場合の設計すべり荷重を上回っていた。すべり発生後は、タイプA, タイプBと同様に、ボルト軸部が円孔内壁にあたり、支圧状態となるため、その後も荷重が増加し、両者ともに約260kNで破壊した。両試験体の導入軸力、表面粗さは、同一仕様である。最大荷重、すべり荷重は、ほぼ同じであり、荷重と相対変位の関係もほぼ同様であったが、表-3、図-4に示したように、破壊形態に若干の相違がみられた。

(4) 添接板、母材における荷重の伝達特性

図-6に、A3における鋼添接板の応力分布を示す。また、図-7、図-8に、B3における鋼添接板およびHFRP添接板の応力分布をそれぞれ示す。これらの図は、各部位の応力を突合せ部からの距離として示されている。また、各部位の応力は、ひずみゲージで計測された軸方向ひずみの値に、各部位の弾性係数を乗じて算定されている。図-6より、A3では、突合わせ部で鋼添接板の応力が降伏強度に達していることがわかる。これに対して、B3で

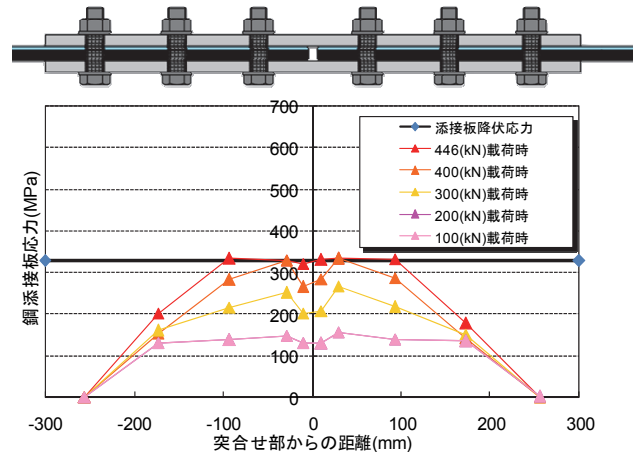


図-6 鋼添接板の応力分布 (A3)

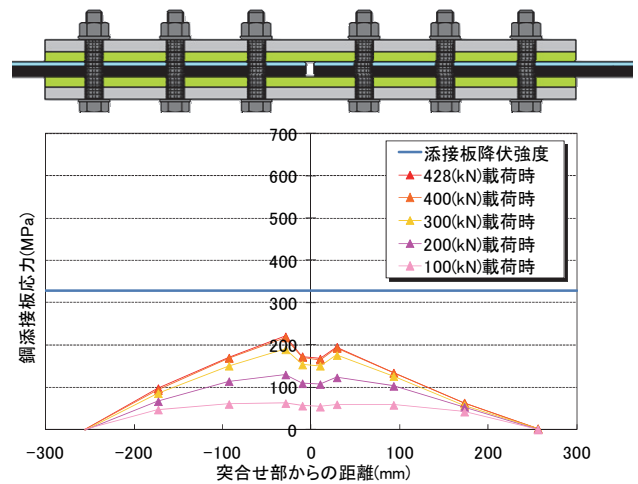


図-7 鋼添接板の応力分布 (B3)

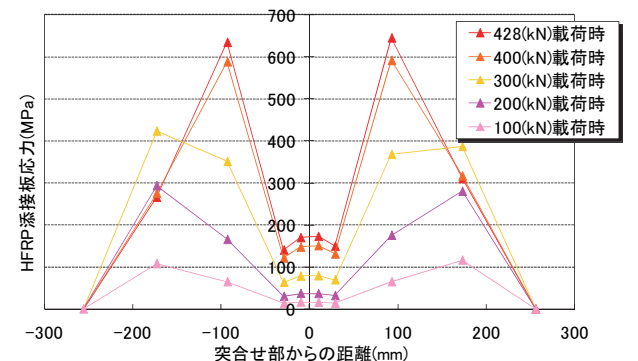


図-8 HFRP 添接板の応力分布 (B3)

は、図-7より、鋼添接板の応力は小さく、降伏強度以下であること、また、図-8より、HFRP添接板が、大きな応力を負担していることがわかる。したがって、タイプBの接合方法では、主に、HFRP添接板が荷重を分担しているといえた。

また、図-9に、B3におけるHFRP母材の軸方向力分布を示す。これは、HFRP母材の側面に設置されたひずみゲージにより計測されたひずみの値に、弾性係数、断面積を乗じて、母材の軸方向力を算定している。図より、最大荷重時（428kN）には、1列目のボルト孔付近のHFRP母材の軸方向力は、HFRP母材の孔引きを考慮したHFRP母材の純断面の破断荷重相当（548kN）となることからわかる。本実験の最大荷重は428kNであり、差異が生じている。これは、ボルト軸部から受ける支圧力による応力集中が加わり、HFRP母材のひずみが増大し、引張と支圧の複合破壊により、純断面の引張強度に達したためであると考えられた。これらのことから、3列以上の継手強度は、HFRP部材の引張強度が支配的となる場合もあることが確認された。

(5) ボルト列数と最大荷重の関係

表-4に、継手の引張試験結果のまとめを、図-10に、すべり荷重・最大荷重とボルト列数の関係をそれぞれ示す。まず、最大荷重は、ボルトに導入する軸力が同一の場合、ボルト列数が増えるにしたがって増加することがわかる。しかし、タイプA、Bにおいて、ボルト列数に比例して最大荷重が増加していないこと、また、ボルト列数が2列から3列に増えた際の最大荷重の増加量は小さいことがわかる。これは、前述の通り、接着接合を併用した場合、はじめに接着接合部の破壊が生じ、それが最大荷重となるためである。したがって、接着接合部の破断時の荷重が、継手の耐力となることがわかる。

一方、タイプCでは、ボルト列数に相当する接着長さが長くなると、最大荷重が大きくなることがわかる。タイプA、Bについても最大荷重が増加していることから、接着を併用した接合についても、接着長さが長くなるこ

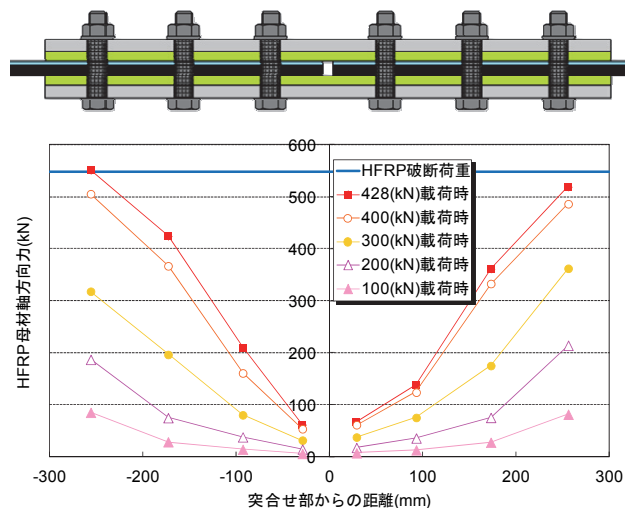


図-9 HFRP 母材の軸方向力分布 (B3)

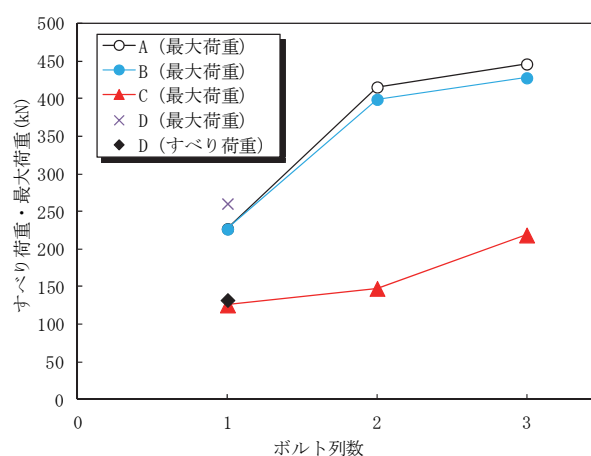


図-10 すべり荷重・最大荷重とボルト列数の関係

とによって、最大荷重が増加したものと考えられた。

さらに、比較用に、鋼材で作製したタイプDの試験片では、すべり荷重は約132kNであり、最大荷重は260kNであった。同一のボルト列数を有するタイプA、タイプBの試験片では、すべりは発生せず、最大荷重227kNであり、一般的な高力ボルト摩擦接合継手（タイプD）に比べて、若干、最大荷重は低下したものの、十分な強度を有していることが確かめられた。

表-4 継手の張試験結果のまとめ

試験片名	接合方法	導入軸力 N_e (kN)	添接板の 降伏の有無	はく離荷重 (kN)	すべり荷重 (kN)	すべり係数	最大荷重 (kN)
A1	ボルト・接 着併用接合	117	無	227	—	—	227
A2		117	有	415	—	—	415
A3		117	有	430	—	—	446
B1		117	無	218	—	—	227
B2		117	無	399	—	—	399
B3		117	無	428	—	—	428
C1	接着接合	—	—	126	—	—	126
C2		—	—	148	—	—	148
C3		—	—	219	—	—	219
DI-1	摩擦接合	117	無	—	134	0.59	261
DI-2		117	無	—	130	0.56	260

3. 屋外大気暴露試験による継手耐久性の評価

(1) 設置場所と実験条件

第2章で検討した4つの接合方法について、気候区分⁹⁾の異なる、国内の3つの地域を対象に、屋外大気暴露試験を実施し、長期的な継手の耐久性の評価を行うこととした。

タイプA～Dの継手試験片（ボルト列数：1列）を、前章と同様の手順で作製した。対象とする地域は、沖縄県（南西諸島気候区）、新潟県（日本海側気候区）、東京都（太平洋側気候区）の3つである。それぞれの設置場所は、琉球大学（千原キャンパス）構内、新潟県柏崎市内で海岸線から約20mの位置、首都大学東京（南大沢キャンパス）構内の3箇所である。図-11に、東京における試験片の設置状況を示す。

沖縄、新潟の2箇所には、タイプA～Dを各1体ずつ、それぞれで合計4体を、また、東京では、タイプA～Cを各3体ずつ、タイプDを1体で、合計10体を設置した。

全ての試験片で、劣化を生じやすくするために、表面には、塗装等の表面保護を施していない。暴露試験の開始時期は、全ての試験片、地域でほぼ同じであり、2012年11月である。なお、暴露期間は、5年間で予定しており、これらの試験片については、今後、引張試験を行う予定である。表-5に、暴露試験片の実験シリーズを示す。

(2) 暴露試験の経過状況と考察

図-12に、3つの地域に設置した暴露試験片の初期状態、設置から約1ヶ月、約5ヶ月、約14ヶ月経過後の状態について、それぞれ比較して示す。なお、新潟の試験片については、設置から1ヶ月以降は、計測データが得られていない。

図より、試験片の表面については、HFRP部材では、はく離、割れや、変色等の変化は全く見られないこと、鋼板や高力ボルトには多くの錆が発生していることがわかる。特に、高温多雨の影響を受ける沖縄、飛来塩分の影響を受ける新潟の試験片では、東京の試験片と比べ、

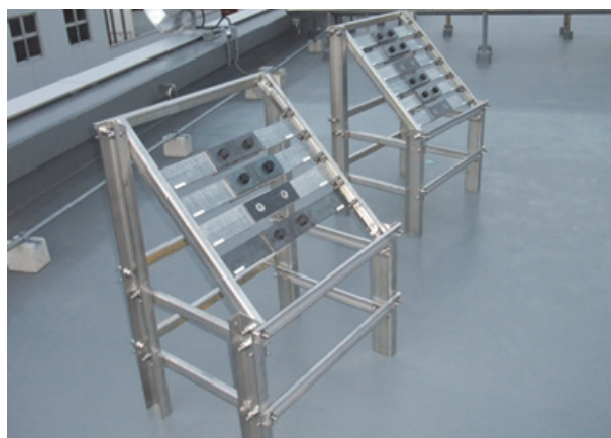


図-11 東京における試験片の設置状況

表-5 屋外大気暴露試験の実験シリーズ

タイプ	試験片名	日本の気候区分	設置場所	導入軸力 N_e (kN)
A	A-O1	南西諸島気候区	沖縄（琉球大学）	117
B	B-O1			117
C	C-O1			—
D	D-O1			117
A	A-N1	日本海側気候区	新潟（日本海沿岸部）	117
B	B-N1			117
C	C-N1			—
D	D-N1			117
A	A-T1	太平洋側気候区	東京（首都大学東京）	117
B	B-T1			117
C	C-T1			—
D	D-T1			117
A	A-T2			117
B	B-T2			117
C	C-T2			—
A	A-T3			117
B	B-T3			117
C	C-T3			—

発錆が著しいことがわかる。この2つの地域では、鋼材、ボルトの全面に、腐食が進行しており、設置から約1ヶ月の段階では、沖縄の試験片よりも、新潟の試験片の方がより錆の進行状況が進んでいることが確かめられた。これは、飛来塩分による塩化物イオン量が影響していると考えられる。

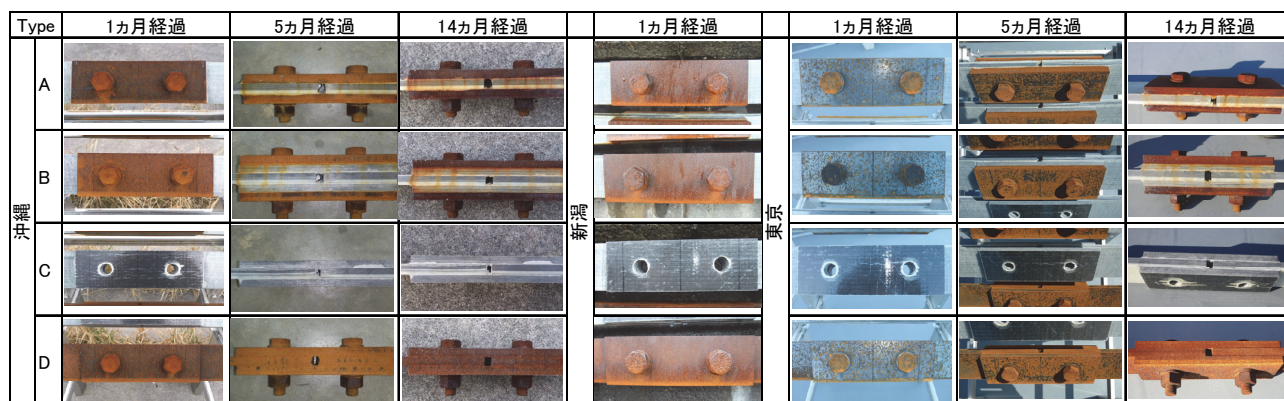


図-12 屋外大気暴露試験における試験片の外観変化

一方、東京に設置した試験片では、暴露開始後、1ヶ月経過時の発錆の状況としては、沖縄、新潟の試験片と比較すると、斑点状の錆が全体的に広がっている状況であり、鋼材の表面には、発錆していない箇所も比較的多いことがわかる。また、試験片の側面には、全体的な発錆が見られたが、直射日光が当たらない、裏面では、ほとんど錆が発生していなかった。暴露開始後、5ヶ月経過時には、鋼材の表面全体に発錆が見られ、14ヶ月経過時には、沖縄の試験片と同程度の赤錆状態となった。

図-13に、暴露試験における試験片の重量の変化を示す。これは、暴露試験の開始前に、試験片の重量を計測し、初期状態からの重量の変化を示したものである。

図より、鋼材を使用している試験片（タイプA, B, D）では、時間の経過とともに重量が増加していることがわかる。これは、鋼材の発錆によって重量が増加したものであり、東京の試験片に比べて、沖縄の試験片の方が、重量の増加が大きいことから、高温多雨の湿潤気候により、発錆が促進されているといえる。さらに、東京の試験片では、14ヶ月の期間で一定の傾きで重量の増加が進展しているのに対して、沖縄の試験片では、5ヶ月までに重量が急激に増加し、5～14ヶ月の間ではその増加が緩やかになることがわかる。これは、全面に錆が進行して、飽和状態となっていることなどが考えられる。今後も計測を継続し、新潟の試験片とも比較する予定である。

一方、鋼材を使用していない、HFRP添接板の接着接合の試験片（タイプC）では、若干ではあるが重量の減少がみられた。これは、試験片の重量に比べて非常に小さな変動であり、今後の経過観察も必要であるが、FRP表面の樹脂が、紫外線等の影響を受けて劣化し、重量が減少したことなどが一因として考えられる。試験片表面のより詳細な観察を行って、繊維の露出状況および接着接合部の経時変化について、検討を行う予定である。

5. まとめ

本研究では、鋼接合材料の取替えを前提とした、FRP部材の接合方法を開発することを目的として、対象とするハイブリッドFRP桁の接合部を、クーボン試験片を用いた継手でモデル化し、引張試験および屋外大気暴露試験を実施した。それらの結果からは次のことがいえた。

- (1) 継手の引張試験では、全ての接合方法で、ボルト列数の増加にともない、最大荷重が増加するものの、接着接合を併用した場合には、接着接合部の破壊で、最大荷重が決定されること、また、最大荷重の大きさは、ボルト列数に相当する接着長さに比例しないことがわかった。
- (2) 鋼接合材料の取替えを想定した継手（タイプB）で

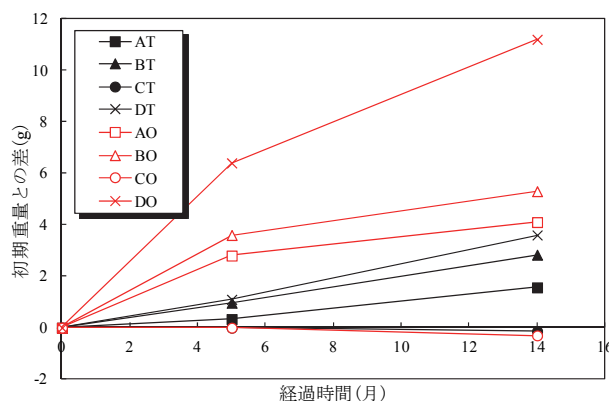


図-13 沖縄、東京に設置された試験片の重量変動

は、鋼添接板を接着して、高力ボルトで接合した継手（タイプA）と同等の性能を有すること、また、接着接合の継手（タイプC）では、高力ボルト摩擦接合を1列とした継手（タイプD）と同程度のすべり耐力が得られることがわかった。

- (3) 継手の屋外大気暴露試験では、14ヶ月経過した時点で、設置した全ての箇所、鋼部材の表面に錆の進行が見られたものの、接着接合のみの継手（タイプC）では、はく離、割れ、変色など、外観の変化はほとんどないことがわかった。

以上のことから、接合部の静的設計の観点からは、使用するボルトの種類、列数は限定されるものの、高力ボルト（F10T M16）を1列配置とする場合には、提案する接合方法は、十分に実現可能であるといえた。

今後は、暴露試験を継続して、FRP部材表面の紫外線劣化による樹脂の損傷、炭素繊維とボルト軸部との異種金属腐食（ガルバニック腐食）など、外観の目視調査のみでは、劣化を評価するのが困難な部位を含めて、より詳細な検討を行う予定である。

謝辞：本研究の一部は、経済産業省の「戦略的基礎技術高度化支援事業」の一環として行われたものである。委員各位より、試験材料を提供いただくとともに、貴重な意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：FRP 橋梁－技術とその展望－，構造工学シリーズ 14，2004。
- 2) 土木学会複合構造委員会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 04，土木学会，2011。
- 3) 睦好宏史：ハイブリッド FRP 桁の開発と歩道橋への適用事例，橋梁と基礎，pp.101-104，2012。
- 4) 複合構造委員会編：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，複合構造レポート 09，土木学会，2013。
- 5) 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，
- 6) 片野洋輔，中村一史，前田研一，睦好宏史，松井孝

- 洋, 鈴川研二, 吉田一, 柳沼謙一: 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実験的研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, CS2-012, pp.23-24, 2010.
- 7) 濱崎景太, 片野洋輔, 前田研一, 中村一史, 柳沼謙一, 松井孝洋: 高力ボルトと接着剤を用いたハイブリッド FRP 部材の接合方法に関する実験的研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集, CS-033, pp.65-66, 2011.
- 8) L.C.Bank: Composites for Construction, Structural Design with FRP Materials, John Wiley & Sons, 2006.
- 9) 日本規格協会: JIS Z 2381, 大気暴露試験方法通則, pp.3-25, 2001.

CONNECTION METHOD OF HYBRID FRP MEMBERS HAVING HIGH-PERFORMANCE AND HIGH DURABILITY

Keita HAMASAKI, Hitoshi NAKAMURA, Hideki SETOUCHI
and Kenichi YAGINUMA

In this study, the connection method of the hybrid FRP members having high-performance and high durability is proposed for FRP composite girders. The concept of the structural design is the application of the replaceable steel materials for joints, for example, the steel splice plates and high strength bolts. In order to verify the proposed connection method, the tensile tests and outdoor weathering tests were conducted using the coupon specimens of four kinds of joints.