

AFRP 板と鋼板のせん断付着力に関する実験的研究

Experimental study on improvement of shear-bonding capacity between AFRP plate and steel plate

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
三井住友建設（株）
室蘭工業大学大学院
釧路工業高等専門学校

○ 学生会員 小崎 大樹 (Daiki Kosaki)
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国では、鋼構造物の高齢化が維持管理上の問題となっており、近年では、従来の鋼板あて板補強の他、連続繊維 (FRP) シート接着工法が提案され、一部で実用化されている。FRP シート接着工法において、最も多く用いられている材料は炭素繊維製シート（以後、CFRP シート）である。これは、CFRP シートの引張強度が鋼材と比較して非常に高く、かつ軽量であるため、重機などが不要で施工が容易であるためである。しかしながら、CFRP シートは伸び性能が低く、脆性的であるため、変形量が大い場所や耐震補強に使用する際には細心の注意が必要である。

そこで、著者らは有機繊維特有のしなやかさを有しているアラミド繊維製シート（以後、AFRP シート）に着目した。AFRP シートは、高強度・高弾性率で優れた寸法安定性を有しており、かつ伸び性能が高く、しなやかで凹凸部の追従性に優れているため、耐震補強はもちろんのこと、腐食劣化部の補修にも適した材料である。

しかしながら、CFRP シートと鋼板の付着に関する研究^{1),2)}は諸研究機関において行われているものの、AFRP シートと鋼板の付着に関する研究は、前者と比較すると極めて少ないのが現状である。そのため、本研究では、AFRP シートと鋼板との付着性能およびその向上方法を検討することを目的に、AFRP シートをエポキシ系接着樹脂を用いて含浸・硬化させてプレキャスト化した補強材（以後、AFRP 板）とブラスト処理の有無およびその処理深さを変化させた鋼板のせん断付着試験を行うこととした。また、せん断付着試験結果を参考にして、定着部に鋼板を用いた AFRP 板緊張接着工法への適用性検討を RC（鉄筋コンクリート）梁を対象に実施した。

表-1 せん断付着試験試験体一覧

試験体名	表面処理	備考
N-1	なし	-
N-2		-
N-3-S		片面接着
BL-1	浅いブラスト	-
BL-2		-
BH-1		-
BH-2	深いブラスト	-
BH-3		-
BH-4-S		片面接着

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、本研究に用いた試験体の一覧を示している。表中、試験体名の第1項目は、鋼板表面の処理の有無を示しており、N はブラスト処理を施していないケース、B はブラスト処理を施したケースを示している。B に付随する英文字はブラスト処理深さ（L：浅いブラスト、H：深いブラスト）を示している。第2項目は、同一試験体の場合の通し番号、第3項目の S は片側のみの接着であることを示している。

図-1 には、本実験で用いた試験体の概要を示している。AFRP 板には、保証耐力 1,176 kN/m のものを用い、その平面寸法は 30 × 880 mm とした。AFRP 板は鋼板の片面もしくは両面に接着し、その接着範囲は 30 × 300 mm とした。なお、AFRP 板の製作（硬化・整形）および AFRP 板の接着には汎用のエポキシ系含浸接着樹脂を用いた。鋼板には、厚さ 4.5 mm の SS400 材を用い、その平面寸法は 125 × 410 mm とした。万能試験機に設置する際のつかみ部の長さは 100 mm とした。なお、AFRP 板側のつかみ部においては、AFRP 板と鋼板が平行になるように厚さ 4.5 mm の SS400 材を配置している。図-2 には、軸方向ひずみの測定位置を示している。用いたひずみゲージの検長や測定間隔は実験ケースにより異なるが、それぞれ 2 ～

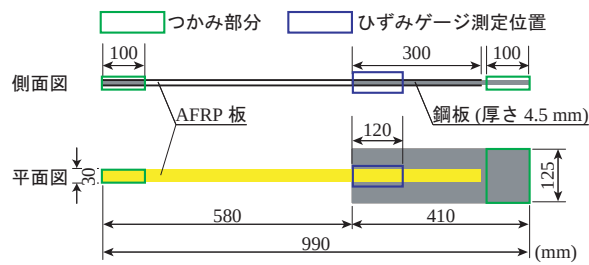


図-1 せん断付着試験用試験体概要図

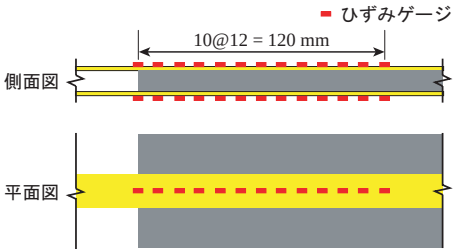


図-2 ひずみゲージ測定位置の一例



写真-1 実験状況

表-2 AFRP板の力学的特性値(公称値)

目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75

表-3 接着樹脂の力学的特性値(公称値)

項目	曲げ強度	圧縮強度	引張せん断強度
物性値	40 MPa	35 MPa	10 MPa
試験方法	JIS K-6911	JIS K-6911	JIS K-6850

表-4 研磨材化学成分

	化学成分(%)						
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	その他
BL	33.3	34.7	4.5	19.8	6.6	0.8	0.3
BH	45~55	30~36	2~7	3~6	0~1	-	-

10 mm および 10 ~ 25 mm である。

表-2 および 表-3 には、それぞれ AFRP 板と接着樹脂の力学的特性値を示している。また、表-4 および 図-3 には、各ブラスト処理に用いた研磨材の化学成分および粒径加積曲線を示している。ブラスト処理は、これらの研磨材を圧縮空気を用いて鋼板に垂直に打ちつける方法で実施した。

2.2 せん断付着試験の概要

写真-1 には、せん断付着試験の実験状況を示している。本実験は、容量 1,000 kN の万能試験機を用いて、毎秒 0.1 kN 程度の载荷速度で実施した。

測定項目は、引張荷重および AFRP 板の軸方向ひずみである。これらのデータは、デジタルメモリレコーダを用いて、サンプリング周期 10 Hz で一括収録している。また、実験時には、AFRP 板の剥離および破断状況を連続的に撮影し、実験終了後には、AFRP 板の破壊状況を観察し、撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1 最大引張荷重

図-4 には、各試験体の最大引張荷重を表面処理方法ご

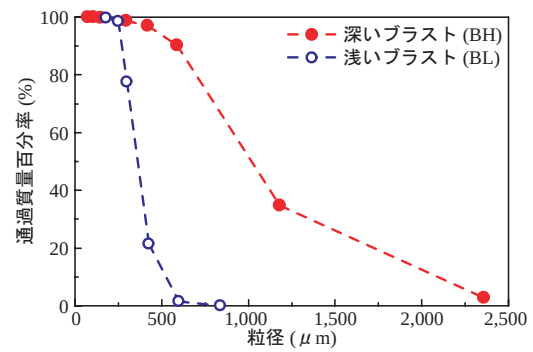


図-3 研磨材の粒径加積曲線

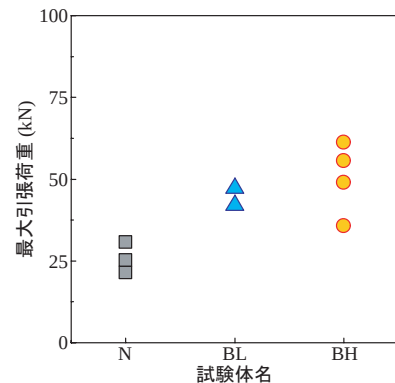


図-4 最大引張荷重

表-5 せん断付着試験結果一覧

試験体名	最大引張力(kN)	AFRP板の破壊性状
N-1	21.5	剥離
N-2	30.7	剥離
N-3-S	25.2	剥離
BL-1	47.2	剥離
BL-2	42.0	剥離
BH-1	61.2	破断
BH-2	35.7	剥離
BH-3	48.9	剥離
BH-4-S	55.6	破断

とに整理して示している。また、表-5 には、参考のため各試験体の最大引張力および AFRP 板の破壊性状を示している。なお、片面接着の N-3-S、B-4-S 試験体は、他の試験体との比較を容易にするため、便宜的にその値を2倍にして示している。図より、最大引張荷重は、表面処理なし(N)、浅いブラスト処理(BL)、深いブラスト処理(BH)の順に大きくなる傾向にあることが分かる。また、表より、BH-1 および BH-4-S 試験体は、AFRP 板の破断により終局に至っている。

これらのことから、鋼板表面にブラスト処理を施すことにより、AFRP 板との付着性能が向上することや、その効果はブラスト処理深さが深い場合ほど大きいことが明らかになった。

3.2 接着界面の破壊性状

写真-2 には、実験終了後の鋼板表面における接着界面の状況の一例を表面処理方法の異なる N-1、BL-1 および BH-1 試験体について示している。写真より、表面処理を施していない N-1 試験体の場合には、AFRP 板は含浸

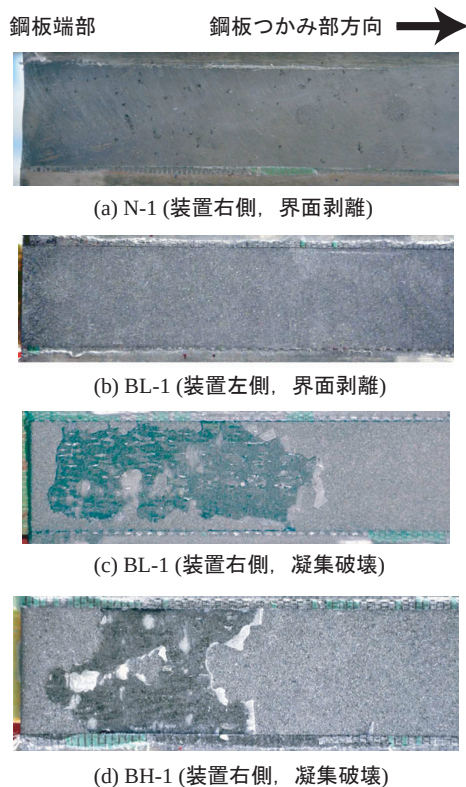


写真-2 実験終了後における鋼板表面の状態

接着樹脂とともに鋼板から完全に剥離していることが分かる。また、このような状況は、浅いブラスト処理を施した BL-1 試験体（写真-2(b)）においても同様に見られた。深いブラスト処理を施した BH-1 試験体の場合には、鋼板表面に含浸接着樹脂が部分的に残留している。このような状況は、BL-1 試験体（写真-2(c)）においても同様であった。これは、AFRP 板と鋼板との界面における含浸接着樹脂が凝集破壊したことによるものである。

3.3 AFRP 板のひずみ分布性状

図-5 には、各荷重時における AFRP 板のひずみ分布性状の一例を N-1, BL-1 および BH-1 試験体について示している。なお、これらの試験体はいずれも鋼板の両面に AFRP 板を接着していることより、両面の結果について示している。また、太線は各試験体の最大引張荷重におけるひずみ分布を示している。

図より、いずれの場合においても引張荷重の増大に伴って鋼板端部の発生ひずみが大きくなる傾向にあることが分かる。また、発生ひずみの値は、深いブラスト処理を施した BH-1 試験体の場合で最も大きい。一方、鋼板端部から 125 mm 程度の位置では、いずれの場合においてもひずみがほとんど発生していない。ここで、鋼板端部から 125 mm の位置までの範囲において付着力が発揮されているものと仮定し、両端のひずみ差 $\Delta \varepsilon$ から付着応力 τ を式 (1) により試算した。

$$\tau = \frac{\Delta \varepsilon \times E \times t}{l} \quad (1)$$

ここに、 τ : せん断応力、 $\Delta \varepsilon$: 鋼板端部から 125 mm 間におけるひずみ差、 E : AFRP 板の弾性係数、 t : AFRP 板の

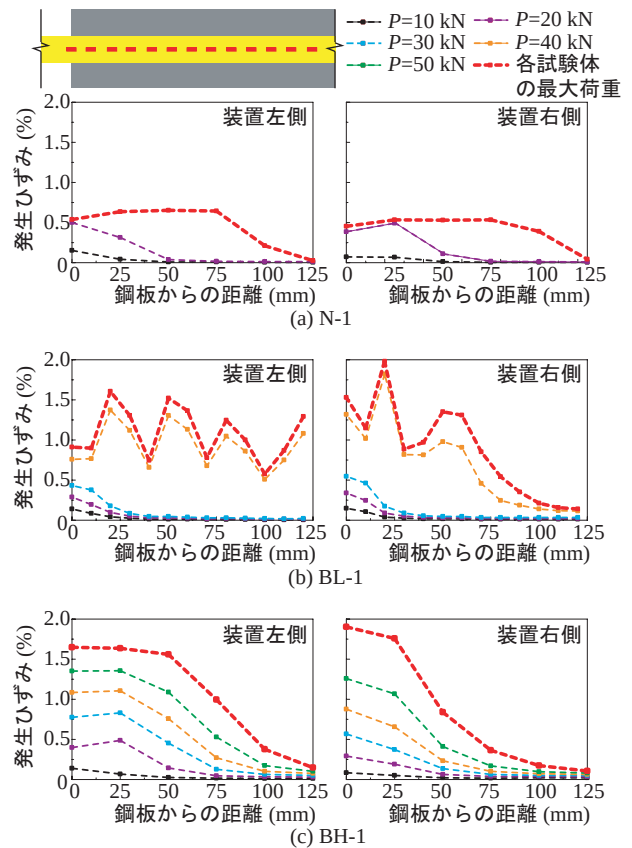


図-5 せん断付着試験における各荷重時のひずみ分布

厚さ、 l : 有効付着長 (= 125 mm) である。計算の結果、せん断応力 τ は、N-1, BL-1, BH-1 試験体（いずれも装置右側）においてそれぞれ 2.2, 7.5, 9.7 MPa となる。従って、鋼板にブラスト処理を施すことにより、AFRP 板との付着性能が向上していることが分かる。

また、表-3 に示したように接着樹脂の引張せん断強度が 10 MPa 程度であることから、 τ が大きい BL/BH-1 試験体において接着樹脂の凝集破壊を生じる傾向が強く現れるものと推察される。

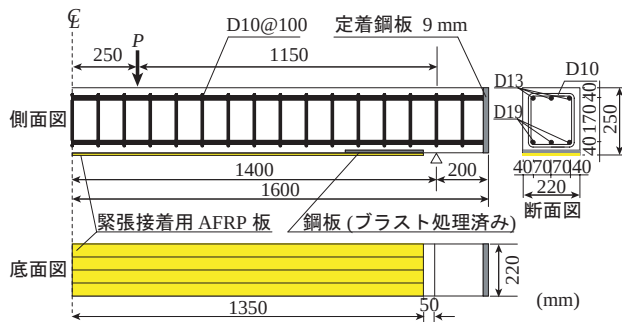
4. ブラスト処理による付着性能向上効果の適用例

前章までの検討では、鋼板にブラスト処理を施すことにより、AFRP 板との付着性能を向上可能であることを明らかにした。本章では、この効果の適用例として AFRP 板緊張接着工法により RC 梁を曲げ補強する場合において、定着部にブラスト処理を施した鋼板を用いる場合について述べる。

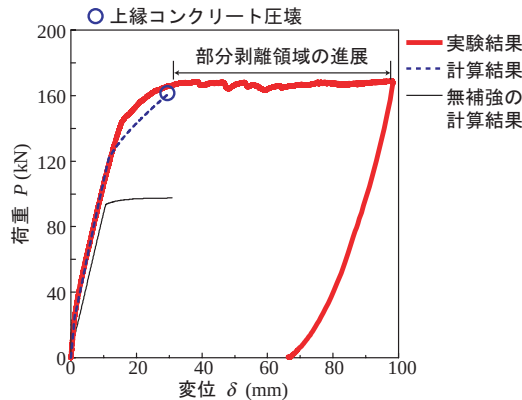
4.1 実験概要

図-6 には、試験体の形状寸法および補強概要を示している。用いた試験体は、断面寸法 220 × 250 mm、純スパン長 2.8 m の複鉄筋 RC 梁であり、梁下面の支点部近傍には、緊張接着用 AFRP 板を定着させるための鋼板が埋設されている。なお、鋼板の表面には、ブラスト処理を施している。

緊張接着用 AFRP 板の接着は、1) AFRP 板を接着するコンクリート表面にブラスト処理を施した後、プライマーを塗布し、2) AFRP 板に、所定の緊張力を与えた状態で RC 梁



図－6 試験体概要図



図－7 荷重－変位関係

表－6 使用材料の特性値一覧

項目	単位	特性値
コンクリート圧縮強度	MPa	34.4
軸方向鉄筋の降伏強度	MPa	349
AFRP 板の保証耐力	kN/m	1,176
AFRP 板の引張強度	GPa	2.06
AFRP 板の弾性係数	GPa	118
AFRP 板の導入緊張率*	%	17.5

*: AFRP 板の保証耐力に対する導入緊張力の割合

に接着して7日間程度養生した後、3) AFRP 板に与えた緊張力を解放して、RC 梁にプレストレスを導入する形で実施した。この際に、両端部の AFRP 板と鋼板の界面には大きな付着せん断応力が発生するが、剥離などの大きな変状は見られず、両者の付着は十分に確保されていることを確認している。

表－6には、使用材料の特性値を一覧にして示している。測定項目は、载荷荷重およびスパン中央点変位（以後、変位）である。また、実験時には、RC 梁のひび割れや AFRP 板の剥離状況を連続的に撮影している。

4.2 実験結果

図－7には、载荷荷重と変位に関する実験結果を計算結果と比較して示している。また、無補強の場合の計算結果も示している。計算結果は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に準拠して、コンクリートと AFRP 板の完全付着を仮定して断面分割法により算出した。



写真－3 終局時近傍におけるひび割れ性状

図より、前述の AFRP 板緊張接着工法により、RC 梁の曲げ耐力を大幅に向上可能であることが分かる。また、実験結果は、計算終局時まで計算結果とよく対応していることから、AFRP 板は、鋼板とほぼ完全に付着しているものと推察される。

写真－3には、終局時近傍におけるひび割れ性状を示している。実験では、RC 梁の上縁コンクリート圧壊後、ピーリング作用による AFRP 板の部分剥離が発生し、その後、変形量の増大に伴って部分剥離範囲が载荷点近傍から支点部近傍まで進展した。しかしながら、写真に示しているように鋼板埋設部分において、AFRP 板の部分剥離の進展が抑制された。また、実験終了後、緊張接着用 AFRP 板は鋼板と強固に接着されていることを確認している。このことより、鋼板にブラスト処理を施すことにより、AFRP 板に緊張力が導入されている場合においても十分な定着性能を期待できることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、AFRP 板と鋼板への付着性能に及ぼすブラスト処理の影響を検討することを目的に、ブラスト処理の有無やその処理深さを変化させた鋼板と AFRP 板の付着せん断試験を行った。また、ブラスト処理による付着性能向上効果の適用例として、ブラスト処理済み鋼板を埋設した RC 梁に対して、AFRP 板緊張接着工法を適用する場合について示した。

その結果、鋼板にブラスト処理を施すことにより AFRP 板との付着性能が向上することや、その効果は処理深さが深いほど大きいことが明らかになった。また、AFRP 板緊張接着工法により RC 梁を曲げ補強する場合において、ブラスト処理を施した鋼板を定着部に埋設することで、緊張接着用 AFRP 板の定着を十分に確保できることが明らかになった。

参考文献

- 姜 威, 中村一史, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: CFRP 板と鋼板の接着特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.14, 2006.
- 山田 稔, 尾崎 潤, 石井光浩, 長嶋文雄: 炭素繊維補強材の接着強度とモデル化に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol.14, 2006.
- 澤田純之, 岸 徳光, 三上 浩, 藤田 学: AFRP シート緊張接着による RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.1543-1548, 2008.
- 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2007.