

AFRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の静的耐荷性状に及ぼす水中接着樹脂の影響

Influence of adhesive resin on static load carrying capacity of RC beam strengthened with AFRP plate underwater

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 大場 啓汰 (Keita Ohba)
室蘭工業大学大学院 正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、耐震設計法の改定によって既設鉄筋コンクリート (RC) 橋脚を対象とした補強工事が盛んに行われている。また、地震の巨大化や発生頻度の増加に伴い、耐震補強工事が急速に進められている。最近では、耐震補強工法の1つとして連続繊維シート接着工法が数多く採用されている。ここで、河川橋脚等の水中構造物の場合には、施工部を乾燥状態にするために構造物周辺の仮締切工事を行うことが通例である。このため、この種の構造物の耐震補強工事は陸上での補強工事に比較して膨大なコストを要することより、未だ限定的にしか実施されていないのが現状である。そのため、仮締切工事が不要な安価で効率的な工法の開発が喫緊の課題となっている。

著者らはこのことに着目し、予めアラミド繊維シート (以後、AFRP シート) にエポキシ系樹脂を含浸硬化した AFRP 板を水中硬化型接着樹脂を用いて接着補強する工法を考案し、検討を行ってきた。

既往の研究では、提案の工法を用いて曲げ補強やせん断補強した RC 梁に関する静載荷実験を行い、気中接着と同程度まで耐力を向上可能であることを明らかにしている^{1), 2)}。しかしながら、水中での施工が可能な接着樹脂の種類を変化させた場合に関する補強効果の検討は未だ行われていないのが現状である。

このような背景より、本研究では接着樹脂の種類を変化させて水中接着曲げ補強した場合の補強効果の検討を目的に、AFRP 板を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。

試験体数は、無補強試験体に加え、施工・養生環境および水中接着に用いる樹脂を変化させた試験体の全4体である。試験体名の内、第1項目は施工・養生環境 (N: 無補強, A: 気中, W: 水中) を示し、第2項目の数字は AFRP シートの繊維目付量 (単位: g/m^2) を示している。また、第3項

目の英字は水中硬化型接着樹脂の種類 (A: 水中硬化型 A, B: 水中硬化型 B) を示している。

図-1には、試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。試験体は断面寸法 $150 \times 250 \text{ mm}$ 、スパン長 $2,600 \text{ mm}$ の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には D16(SD345) を2本ずつ配置している。また、スターラップには D10(SD345) を用い、 100 mm 間隔で配置している。AFRP シートによる曲げ補強には表-2に示す保証耐力 588 kN/m の AFRP シートおよび AFRP 板を接着している。

2.2 補強材の RC 梁への接着方法および実験方法

気中接着補強は、あらかじめ梁底面のシート接着部にプライマー処理を施した後に、汎用のエポキシ系接着樹脂を梁底面に塗布し、事前含浸した AFRP シートを接着することで実施した。水中接着補強は、気中で AFRP 板と水中硬化型接着樹脂を一体化させ、大型水槽内に設置した RC 梁の所定の位置に配置し、圧着した状態で5日間程度水中養生する工程で実施した。なお、接着部のコンクリート表面にはショットブラスト処理 (処理深さ 1 mm 程度) を施し、AFRP 板の接着面には、5号珪砂による砂付処理を施している。水中接着は、接着樹脂の可使時間 (30 分程度) 内に接着作業を完了し、樹脂の厚さは圧着後 3 mm 程度になるように施工した。

載荷実験は、RC 梁を単純支持状態で設置し、容量 200 kN の油圧ジャッキを用いて4点曲げ載荷試験法により行った。水中接着補強した RC 梁の載荷実験は、十分な水中養生を行った後に試験体を水槽から引き揚げ、直ちに行うこととしている。本実験の測定項目は、荷重、スパン中央部の変位 (以後、変位)、および AFRP シート各点の軸方向ひずみ (以後、ひずみ) である。また、実験時には RC 梁のひび割れを連続的に撮影し、実験終了時には破壊状況を撮影している。

2.3 接着樹脂の性能比較

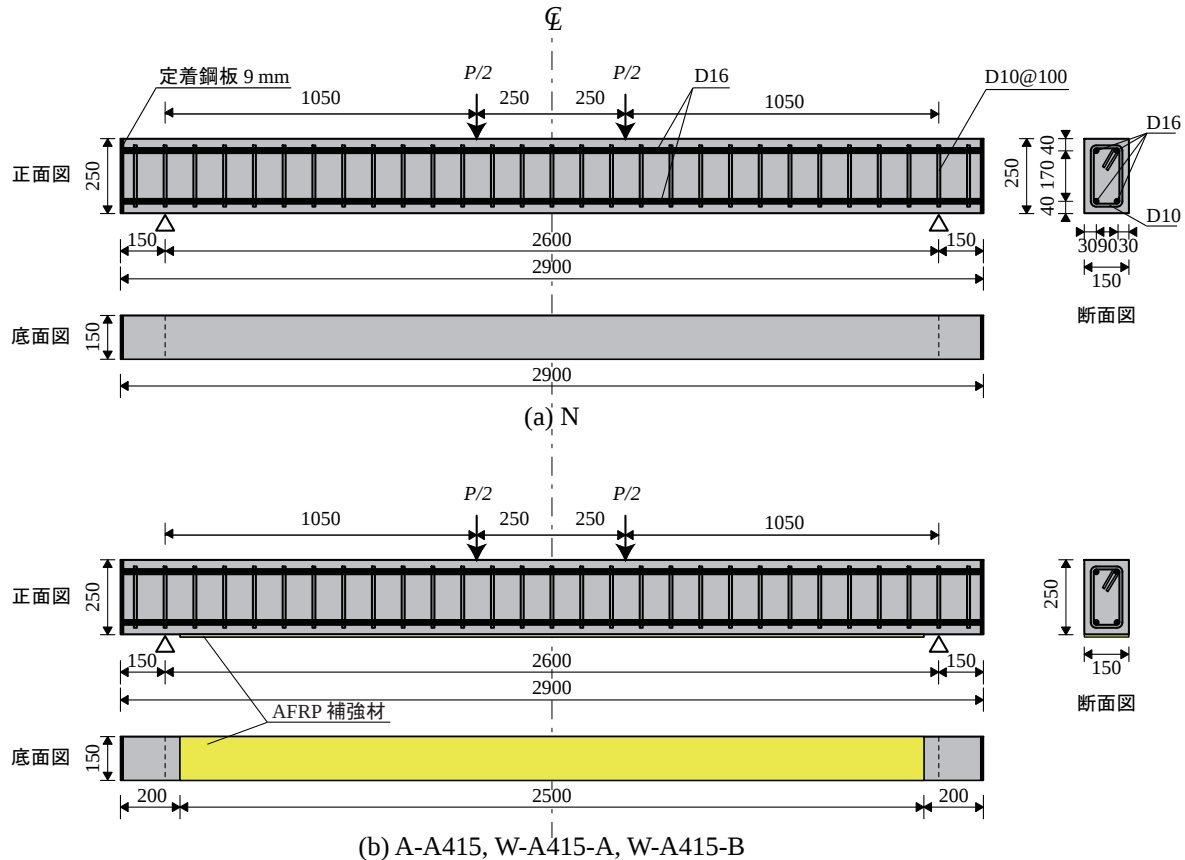
表-3、表-4には、水中硬化型接着樹脂の性状を一覧にして示した。本研究に用いた水中硬化型接着樹脂は2種類であり、いずれも2種混合型のエポキシ系接着樹脂である。本研究では水中での接着に用いた水中硬化型接着樹脂の圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験に用いる供試体は JIS K 7181 に準拠し、直径 $\phi = 25 \text{ mm}$ 、高さ $H = 50 \text{ mm}$ の円柱供試体を作製した。

表-1 試験体一覧

試験 体名	施工・ 養生環境	繊維目付量 (g/m ²)	接着樹脂	計算曲げ 耐力 P_u (kN)
N	気中	-	-	55.3
A-A415		415	汎用エポキシ系	84.8
W-A415-A	水中硬化型 A			
W-A415-B	水中		水中硬化型 B	

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m^2)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75



図－１ 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

表－３ 水中硬化型接着樹脂 A

項目	主剤	硬化剤	混合物
主成分	変成エポキシ樹脂	変成ポリアミドアミン	
外観	白色パテ状	暗灰色パテ状	灰色パテ状
混合比	主剤：硬化剤＝１：１		
可使時間	30分(25℃)		
初期硬化	約2時間(25℃)		

表－４ 水中硬化型接着樹脂 B

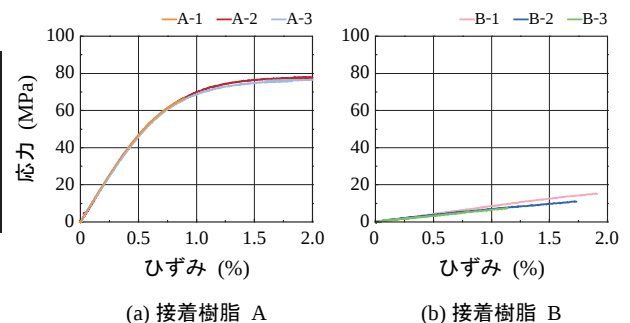
項目	主剤	硬化剤	混合物
主成分	エポキシ樹脂	ポリアミドアミン	
外観	灰白色パテ状	暗緑色パテ状	灰色パテ状
混合比	主剤：硬化剤＝１：１		
可使時間	30 ± 10分(23℃, 500g, 水を付けて混合)		
初期硬化	約12時間(20℃)		

円柱供試体はφ25の塩ビパイプを50mmの長さに切断し、既定の水分量となるよう水を加えて練り混ぜた水中硬化型接着樹脂を充填することにより、各水中硬化型接着樹脂につき3体ずつ作製した。供試体の圧縮試験は圧縮試験機を用いて行った。圧縮試験の測定項目としては圧縮試験機のロードセルにて圧縮強度を、供試体側面に貼り付けたひずみゲージにて縦ひずみを測定した。載荷試験後には応力－ひずみ関係より弾性係数を算出し、水中硬化型接着樹脂の性能比較を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 接着樹脂の圧縮強度試験結果

図－２には水中硬化型接着樹脂の圧縮強度試験にて計測



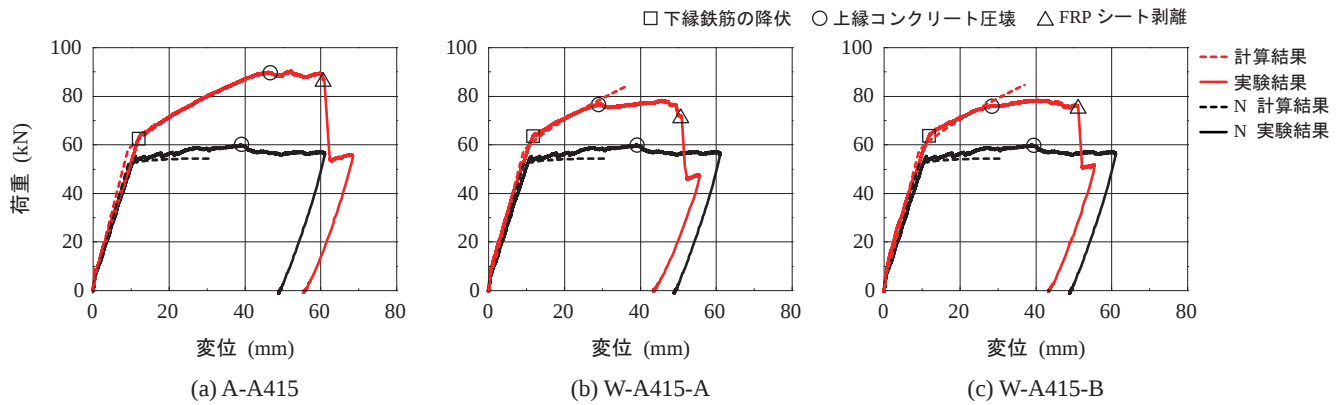
図－２ 各供試体の応力－ひずみ関係

した応力－ひずみ関係を示している。水中硬化型接着樹脂 A と水中硬化型接着樹脂 B を比べると初期勾配が大きく異なっている。これより、材料の弾性係数には大きな違いがあると分かる。表－５には水中硬化型接着樹脂の圧縮強度および弾性係数を一覧にして示している。水中硬化型接着樹脂 A は弾性係数の平均値が9.84 GPa 程度であるのに対し、水中硬化型接着樹脂 B は0.68 GPa 程度となっており、圧縮強度よりも弾性係数に大きな違いがあることが分かった。

3.2 RC 梁試験体の荷重－変位関係

図－３には、RC 梁試験体の荷重－変位関係に関する実験結果および計算結果を示している。計算結果は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾に準拠して断面分割法により算出したものである。

図より、N 試験体は荷重が55 kN 程度まで増加した後に主鉄筋が降伏し、変位が増加している。一方、気中および水中で補強した試験体を見ると鉄筋が降伏した後も変位と共に荷重が増加していることが分かる。各試験体ごとに



図－3 RC 梁試験体の荷重－変位関係の実験および計算結果の比較

表－5 水中硬化型接着樹脂の圧縮強度，弾性係数

樹脂の種類	供試体 番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
水中硬化型 A	1	79.8	10.3
	2	78.1	9.64
	3	77.8	9.61
	平均値	78.6	9.84
水中硬化型 B	1	47.6	0.77
	2	42.7	0.63
	3	40.5	0.63
	平均値	43.6	0.68

計算結果と実験結果を比較すると、A-A415 試験体は計算結果と同様の性状を示しており、主鉄筋降伏後の剛性勾配も概ね一致している。また、計算結果の上縁コンクリート圧壊後も荷重が増加し、90kN 程度に到達した後にシートの剥離によって終局を迎えている。W-A415-A 試験体および W-A415-B 試験体では、主鉄筋降伏後の剛性勾配は計算結果と概ね一致していることが分かる。しかし、両試験体とも計算結果を下回る荷重で上縁コンクリートが圧壊し、変位が 50mm 程度でシートの剥離が発生し終局を迎えている。これは、水中に梁を浸漬することによりコンクリートの圧縮強度が低下し、早期に圧壊が発生していることによるものと考えられる。尾上らの研究では、湿潤時のコンクリートの圧縮強度は乾燥時よりも約 10～20% 程度低下することを明らかにしており⁴⁾、施工・養生環境が水中であること、補強前に試験体を長時間水没させていること、水中から試験体を取り出して 1 日程度以内に載荷試験を実施していることから、試験体が湿潤状態にあり早期に圧壊が発生したものと考えられる。

3.3 ひび割れ性状

写真－1には、AFRP シート補強した各試験体の剥離直前のひび割れ性状を示している。各試験体ごとに見ると、A-A415 試験体は載荷点近傍から発生したせん断ひび割れが梁底面にすりつくように進展し、ピーリング作用を引き起こすことでシートが押し出されシートの剥離につながっている。W-A415-A 試験体は 2 本程度の斜めひび割れがピーリング作用を引き起こし、シート剥離が発生していることが分かる。W-A415-B 試験体も W-A415-A 試験体と同様のひび割れ性状を示し、3 本程度の斜めひび割れがピーリング作用を引き起こしている。以上より、水中接着した両試

荷重 87.0 kN, 変位 60.7 mm 時



(a) A-A415

荷重 71.2 kN, 変位 50.8 mm 時

※左右を反転して表示



(b) W-A415-A

荷重 75.3kN, 変位 51.0 mm 時



(c) W-A415-B

写真－1 剥離直前のひび割れ性状

験体の剥離直前のひび割れ性状から見た耐荷性状は、ほぼ同様であるものと考えられる。

3.4 ひずみ分布性状

図－4には AFRP シートのひずみ分布性状を断面分割法による計算結果の各変位時ごとに、実験結果と計算結果を比較して示している。ここで、中間変位時とは降伏変位時と終局変位時の中間の変位時のことである。

実験結果と計算結果を比較すると、計算降伏変位時にはどの試験体も両者はほぼ一致している。計算中間変位時および計算終局変位時にはどの試験体も計算結果より低い値を示している。これは、圧壊が発生した時点で計算は終了するが実験では圧壊が早期に発生していることや載荷点外にもひび割れが発生していることが原因の一つと考えられる。

各試験体ごとにひずみ分布を比較すると、どの試験体も大きな差は見られないが、W-A415-B 試験体の計算中間変位時および計算終局変位時を見ると計算結果よりもひずみの分布範囲が広がっている。これは、W-A415-B 試験体の

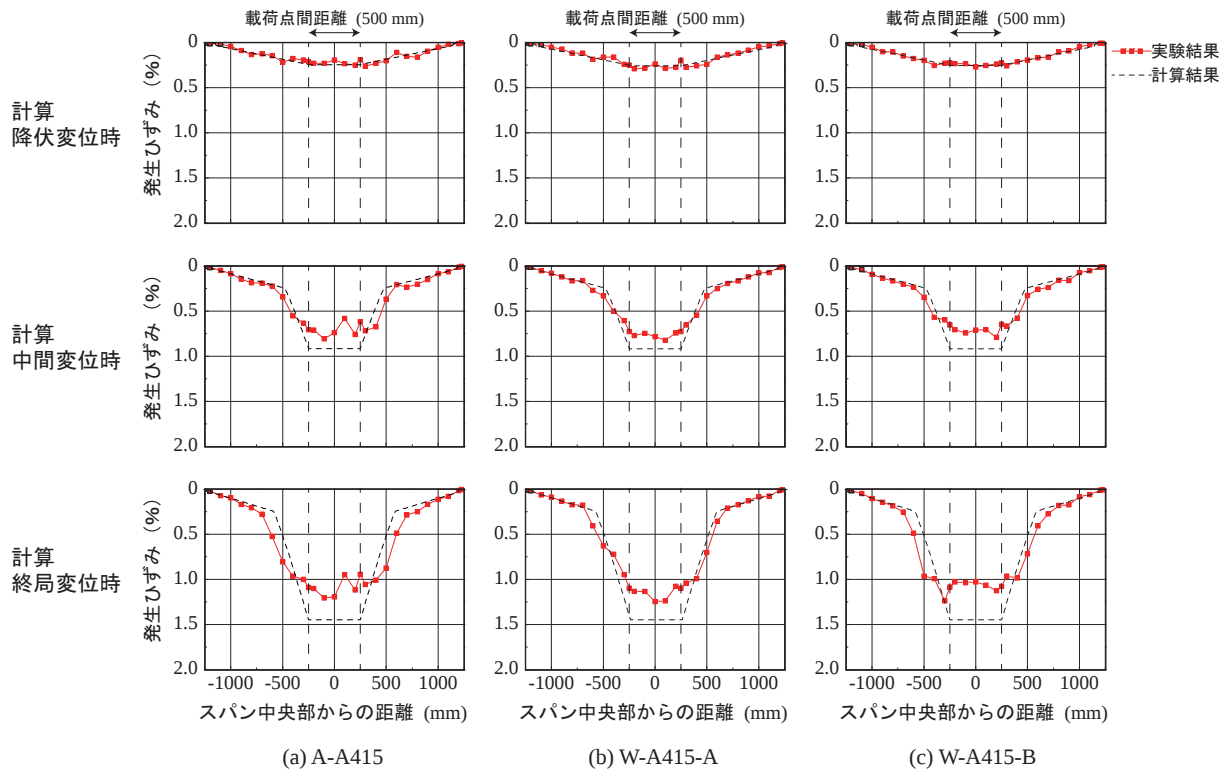


図-4 各変位時におけるAFRPシートのひずみ分布

接着に用いた水中硬化型接着樹脂Bの弾性係数が低いことより、シートと梁底面の間でひずみの均一化が発生し、分布範囲が広がったものと推察される。これは、弾性係数が比較的近い汎用のエポキシ樹脂を用いたA-A415試験体とW-A415-B試験体のひずみの分布範囲が類似していることからもうかがわれる。

4. まとめ

本研究では水中硬化型接着樹脂を変化させた場合における耐荷性状の検討を目的として、水中硬化型接着樹脂とAFRP板を用いて水中接着曲げ補強したRC梁に対して静荷重実験を行った。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 水中硬化型接着樹脂の圧縮強度試験の結果、水中硬化型接着樹脂Aおよび水中硬化型接着樹脂Bには弾性係数に10倍以上の大きな差異が認められた。
- 2) 補強した試験体の曲げ荷重試験の結果、水中に長期間浸漬し、水中で施工・養生した試験体は圧縮強度が低下し、圧壊が早期に発生する可能性がある。
- 3) 物性の異なる水中硬化型接着樹脂を接着に使用した場合でもRC梁の耐荷性状に大きな差はない。

今後の検討項目

本研究の結果より、コンクリートを浸漬することで圧縮強度が下がることが予想される。そのため、今後は養生環境を気中と水中で変化した円柱供試体を作製し圧縮強度を比較する、またはN試験体を水没させた状態で荷重実験を行い比較・検討を行うことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介: 水中硬化型接着樹脂とAFRP版を用いて水中補強したRC梁の静荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.1327-1332, 2010.
- 2) 杉本成司, 栗橋祐介, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP帯で水中接着せん断補強したRC梁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.1183-1188, 2014.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2012.
- 4) 尾上幸造, 松下博通: 液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度低下に関するエネルギー的考察, 土木学会論文集E, Vol.64 No.4, 515-525, 2008. 10.
- 5) アラミド補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案), 1998.
- 6) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000.