

FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性能に及ぼす補強量の影響

Effects of plate volume on load-carrying capacity of flexural reinforced RC beam with submerged FRP plate

三上 浩*, 栗橋祐介**, 小室雅人***, 岸 徳光****

Hiroshi Mikami, Yusuke Kurihashi, Masato Komuro, and Norimitsu Kishi

*博(工), 三井住友建設(株) 上席研究員, 技術開発センター (〒 270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

hiroshimikami@smcon.co.jp

**博(工), 室蘭工業大学大学院講師, 社会基盤ユニット 暮らし環境系領域 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博(工), 室蘭工業大学大学院准教授, 社会基盤ユニット 暮らし環境系領域 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

****工博, 釧路工業高等専門学校校長 (〒 084-0916 釧路市大楽毛西 2 丁目 32-1)

In this study, in order to investigate the effects of plate volume on load-carrying capacity and debonding behavior of the reinforced RC beams with submerged FRP plate, the static four-point loading tests were conducted taking material properties and mass of FRP plate as variables. Bonding capacity of the adhesive was also investigated comparing with the experimental results for RC beams reinforced with the same adhesive under the dry condition. From this study, the following results were obtained: 1) flexural load-carrying capacity of the RC beams can be improved by increasing plate volume with limitation; 2) plate debonding may be restrained by applying FRP plate with high Young's modulus and/or increasing axial stiffness of the plate; 3) FRP plate was debonded due to the peeling action of the tip of the diagonal shear cracks irrespective of treatment with/without sand coating and material properties of the FRP plate.

Key Words : *submerged FRP plate bonding method, flexural reinforcing, RC beam, reinforcing volume, debonding behavior*

キーワード : FRP 板水中接着工法, 曲げ補強, RC 梁, 補強量, 剥離挙動

1. はじめに

近年, 既設鉄筋コンクリート (RC) 橋脚を対象に, 耐震設計法の改定に伴う補強工事が盛んに行われている。その補強工法の 1 つとして連続繊維シート (以後, FRP シート) 接着工法が数多く採用されている。一方, 耐震補強を必要とする構造物には当然のことながら河川橋脚も含まれている。しかしながら, 河川橋脚の場合には, 橋脚基部周辺の仮締切工事を行い, 施工部を乾燥状態にするのが一般的である。そのため, 陸上での補強工事と比較してコストが高むことから, その補強工事は陸上に比べて遅れているのが現状である。従って, 水中施工が可能な工法の開発が期待されている。

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, AFPR シート) にエポキシ系樹脂を含ま硬化させた AFPR 板を水中接着樹脂 (以後, 水中接着樹脂もしくは接着樹脂) を用いて接着補強する工法を開発した。

なお, 類似の研究目的で, 芦野ら^{1)~3)}や根本ら^{4),5)}は炭素繊維 (以後, CFRP) を格子状に成形した CFRP グリッドを水中適用型エポキシ樹脂を用いて接着する補強工法を提案している。しかしながら, これらの補強法の場合には, 補強材が格子状であるため格子間隔によっては面状に比べて補強材厚さを数倍に厚くする必要があり, 一方, 本研究で提案している補強法の場合には, 補強材が面状であるため補強材厚さを最低限に抑制でき, 補強材の積層化によって任意の補強量に調整することも容易である。また, 面状の AFPR 板を使用することから, 水中施工時における補強材のよれも問題とはならない。

著者らの既往の研究では, 本工法における AFPR 板の接着性能やその補強効果を検討することを目的に, RC 梁に関する静載荷実験を行っている⁶⁾。その結果, 1) FRP 板に砂付き処理を施すことによって, 板と接着樹脂との接着性能が向上すること⁷⁾, 2) FRP 板の引張剛性を大きくしてその発生ひずみを低減することで, 板の剥離を抑制することができること⁸⁾, などを明ら

表-1 試験体一覧

試験体名	施工・養生環境	補強材の種類	繊維目付量 (g/m ²)	砂付き処理の有無	コンクリート圧縮強度 (MPa)	軸方向鉄筋の降伏強度 (MPa)
N	-	-	-	-	39.4	392
W-A1	水中	AFRP 板	280	無	28.0	395
W-A1-S					28.0	392
A-A1-S	気中			有	38.6	377
W-A2-S	水中			560	36.5	378
W-A3-S			830	36.5	378	
W-C-S			CFRP 板	300	29.2	395

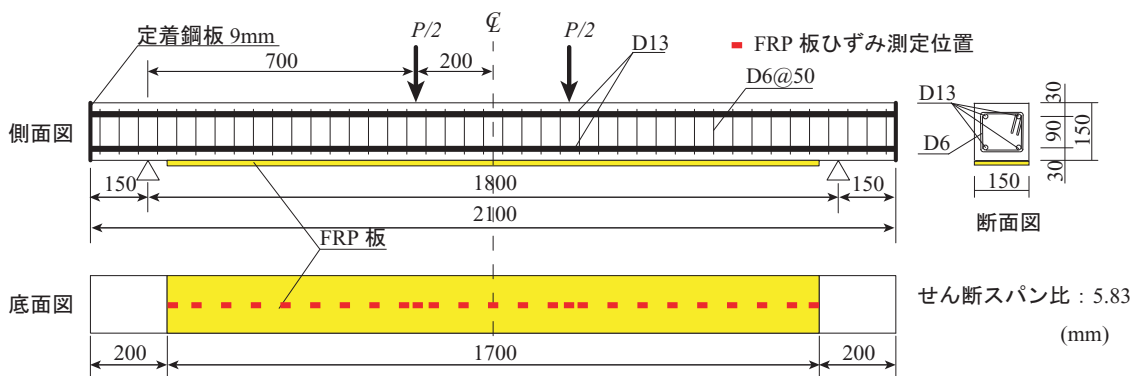


図-1 試験体の形状寸法と配筋および補強概要

かにしている。

しかしながら、FRP 板の補強量が RC 梁の耐荷性能に及ぼす影響については未だ検討されていない。FRP 板の補強量を増加させることにより、RC 梁の耐荷性能の向上が期待できるものの、設計計算値を下回る荷重レベルで FRP 板が剥離して終局に至ることも想定される。従って、FRP 板水中接着補強工法を適用した RC 梁の合理的な設計手法を確立するためには、補強量を変化させた場合の耐荷性能を検討することは信頼性を向上させる観点から極めて重要であるものと判断される。

このような背景より、本研究では FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動や FRP 板の剥離性状に及ぼす補強量の影響を検討することを目的に、FRP 補強材の種類や目付量を変化させた RC 梁の 4 点曲げ荷重実験を行った。

また、接着樹脂の FRP 板およびコンクリート表面との付着特性を検討するため、著者らが過去に実施した FRP 板への砂付き処理の有無に関する実験結果⁷⁾を基に、接着界面に関する追加検討を行うとともに、同じ接着樹脂を用いて FRP 板を気中にて接着した場合の性状についても検討を行っている。

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。試験体名の内、第 1 項目は施工・養生環境 (A : 気中, W : 水中)、第 2 項目は補強材の種類 (A : AFRP 板, C : CFRP 板) を表しており、付随する数字は補強材の繊維目付量 (1 : 280 g/m², 2 : 560 g/m², 3 : 830 g/m²) を表している。なお、W-A2-S 試験体に用いた AFRP 板は目付量 280 g/m² の AFRP シートを 2 枚積層して製作している。第 3 項目は FRP 板の表面処理の有無 (S : 砂付き処理有り) を示している。なお、各 RC 梁の荷重実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 28.0 ~ 39.4 MPa であり、軸方向鉄筋の材料試験による降伏強度は 377 ~ 395 MPa であった。また、施工・養生環境によらず、FRP 板の接着には後述する水中接着樹脂を用いている。

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。本実験に用いた試験体は、断面寸法 150 × 150 mm、純スパン長 1.8 m の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には D13 (SD345) を 2 本ずつ配置している。スターラップには D6 (SD345) を用い 50 mm 間隔で配置している。梁の下面には AFRP 板、もしくは CFRP 板を接着している。FRP 板の幅は 150 mm であり、梁軸方向の補強範囲はスパン中央部から両支点の 50 mm 手前までとしている。また、コンクリートの水中における接着界面処理方法として、サンドブラストや水中ウオータージェット工法⁹⁾などがあり、気中と同程度の処理深さの場合には気中以上の接着強度が得られることが確認されている。ただし、水中での施工は容易でないことから、本研究では処理

表-2 FRP シートの力学的特性値 (公称値)

FRP シートの種類	目付量 (g/m ²)	保証引張耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	引張剛性 (kN/mm)	破断ひずみ (%)
AFRP	280	392	0.193	2.06	118	22.8	1.75
	560	784	0.386			45.6	
	830	1176	0.572			67.5	
CFRP	300	400	0.163	2.45	436	71.1	0.56

表-3 接着樹脂の力学的特性値

接着樹脂の施工・養生環境	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	伸び率 (%)
水中	74.4	33.1	16.4	1.63	1.0
気中	80.2	48.3	16.6	2.37	0.7

深さが水中ブラスト処理と同程度以上になるように深さ 1mm 程度のバキュームブラスト処理を気中にて行った。

表-2 には、使用した FRP シートの力学的特性値の一覧を示している。本研究では、補強材の引張耐力や引張剛性が耐荷性状に及ぼす影響に着目して検討するため、それらが極力同程度になるように補強材を選定した。また、実験値と設計計算値との対応に着目して考察することから、公称値である材料特性値を用いることとした。なお、CFRP シートには中弾性炭素繊維シートを用いた。これは、既往の研究から、接着樹脂の伸び性能が AFRP 板の伸び性能に比べて低いことが剥離破壊を先行させ、AFRP 板の性能を有効に活用できない要因になっていると推察され、接着樹脂と FRP 板の伸び性能に着目した検討が必要であると考えたためである。そのため、本研究では接着樹脂の伸び率よりも破断ひずみが小さい中弾性炭素繊維シートを選定し、剥離破壊しないで補強材の性能が最大限に発揮できるかを検討することとした。

目付量が 280 g/m² の AFRP シートと中弾性 CFRP シートの保証引張耐力は同等であるが、引張剛性は CFRP シートが 3 倍以上大きい。また、目付量が 830 g/m² の AFRP シートの保証引張耐力は中弾性 CFRP シートの 3 倍程度大きい。引張剛性は両者でほぼ同じである。なお、各種 FRP シートに樹脂を含浸・硬化させた FRP 板の全重量に占める繊維材料の重量比率は 29～36% 程度である。

2.2 接着樹脂の力学的特性および接着性能

本研究に用いた接着樹脂は、2 種混合型のエポキシ系接着樹脂であり、主剤、硬化剤ともに粘土状である。本粘土状樹脂は、コンクリート製プールの断面修復材などとして使用実績の多い材料であり、一般に不陸修

正材として使用されているパテ状樹脂よりもさらに粘度が高い。そのため、水流のあるところでも樹脂材料の溶出が抑制される。なお、文献 5) で使用されている高流動エポキシ樹脂は水と樹脂材料を置換する必要があるが、本樹脂材料は置換作業が不要であり、そのまま水中で接着剤として使用できる特徴がある。表-3 には、接着樹脂の力学的特性値の一覧を示している。接着樹脂の施工・養生環境における「水中」および「気中」は、接着樹脂を水中で使用した場合と気中で使用した場合を示している。また、接着樹脂の水中施工・養生時における接着強度は、市販のコンクリート板に AFRP 板を水中接着して確認した。接着強度は土木学会「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」¹⁰⁾における「連続繊維シートとコンクリートの接着試験方法 (案)」に準拠して評価した。その結果、4 体の試験体は全て母材コンクリートの引張破壊に至り、破壊時の接着強度の平均値は 2.6 MPa であることを確認している。これらの値は、既設コンクリートの補修・補強用接着材料に関する一般的な照査値 (1.5 MPa) を上回っている。従って、本実験に用いた水中接着樹脂は接着材料としての性能を満足しているものと言える。

本研究で使用した樹脂は、気中でも水中でも適用可能な樹脂であり、ここでは樹脂材料を統一して直接比較することを主眼としたため同じ樹脂を用いた。ただし、接着樹脂は同一であるものの施工・養生環境によって表-3 に示すように力学的特性値が多少異なっている。これは、接着樹脂の硬化過程において、水中では水分を多少なりとも接着剤が取り込み、気中に比べて軟化することが要因と推察される。また、伸び率が水中に比べて気中で小さいため、伸び性能の高い AFRP 板の伸びに追従できず、樹脂にひび割れが入りやすいことが耐荷性能に影響を及ぼすことが考えられる。なお、気中接着補強も施工・養生環境が異なるのみで、養生時温度は室温の 20 度程度、養生期間は樹脂材料の硬化が完了する 1 週間程度であり、ともに水中接着補強の場合と同程度である。

2.3 接着方法および実験方法

RC 梁の水中接着補強は、大型の水槽を用いて RC

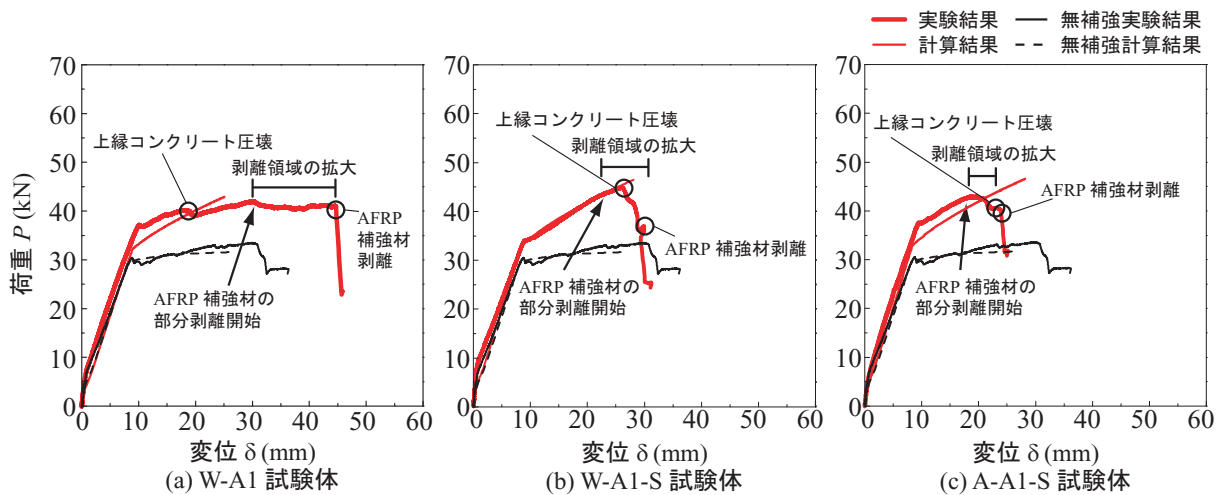


図-2 接着条件を変化せさせた試験体の荷重-変位関係

表-4 接着条件を変化せさせた試験体の実験結果および計算結果一覧

試験体名	主鉄筋降伏荷重			最大荷重			破壊形式
	計算値	実測値	荷重比	計算値	実測値	荷重比	
	P_{yc} (kN)	P_{ye} (kN)	P_{ye}/P_{yc}	P_{uc} (kN)	P_{ue} (kN)	P_{ue}/P_{uc}	
N	29.7	29.3	0.99	31.7	33.6	1.06	-
W-A1	32.2	36.9	1.15	42.9	42.0	0.98	上縁コンクリート圧壊後 AFRP 板剥離
W-A1-S	33.0	33.9	1.03	46.5	44.9	0.97	
A-A1-S	32.9	37.6	1.14	46.6	42.9	0.92	

梁を水没させた状態で行った。

水中接着補強における施工手順は以下の通りである。

- 1) 接着樹脂の主剤と硬化剤を混合し、厚さ 4 mm 程度の板状に成形する。
- 2) 気中で FRP 板を所定の位置に配置し、その上に成形した接着樹脂を敷き並べて一体化させる。
- 3) 水槽内に設置された RC 梁の接着面に 2) を配置し圧着する。
- 4) 圧着した状態で 5 日間程度水中養生する。

圧着は、厚鋼板を試験体に敷設し、トルクによって鋼板を加力することで接着樹脂の厚さが 3 mm 程度になるように施工した。なお、実験終了後には、接着樹脂がブラスト処理面に十分に充填されていることを確認している。

水中接着補強試験体は、水中養生後気中に引き上げてひずみゲージなどを貼り付けた後、同日中に実験装置にセットして載荷実験を行っている。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。本実験の測定項目は、荷重、スパン中央点変位 (以後、変位) および FRP 板各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC 梁のひび割れやシートの剥離状

況を連続的に撮影し、実験終了後には RC 梁のひび割れを撮影した。

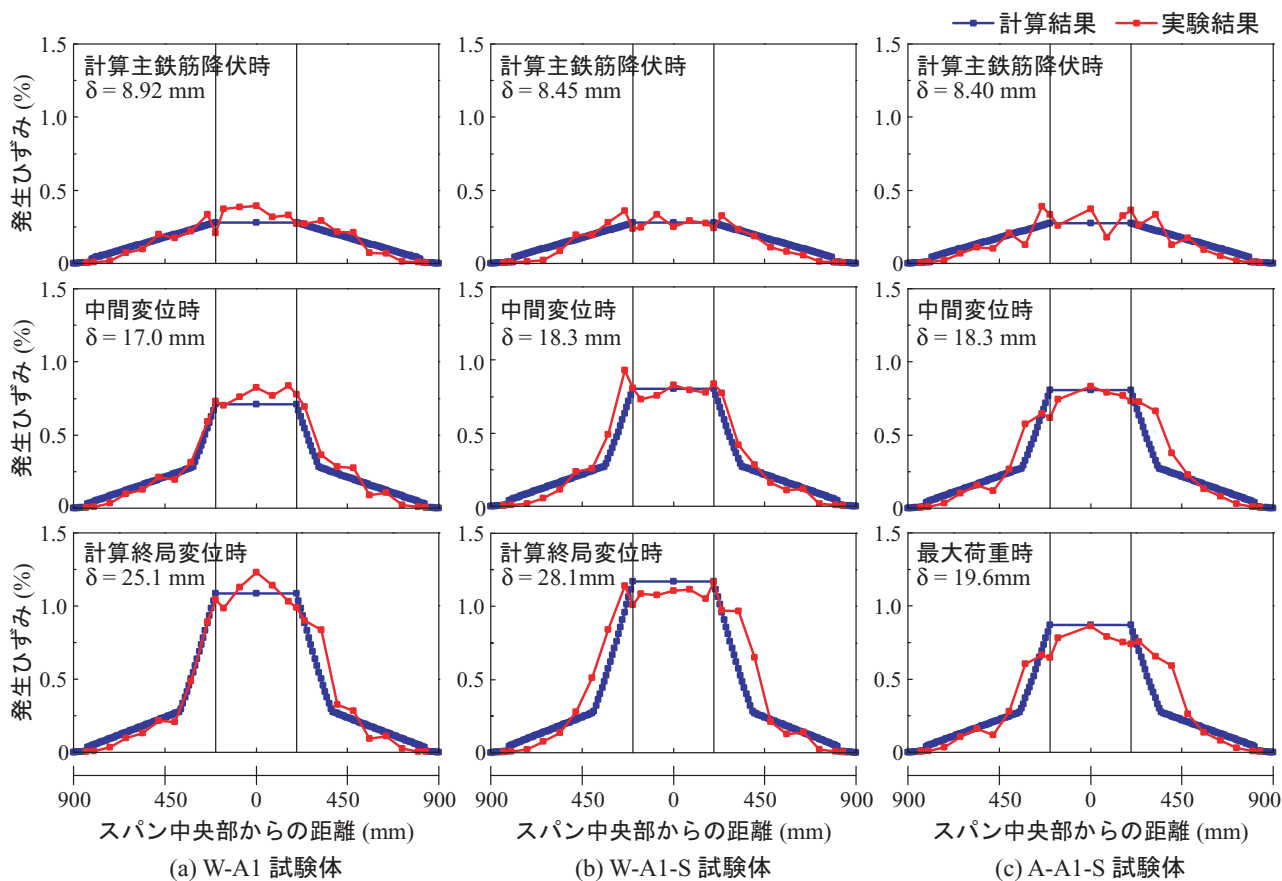
3. 実験結果

3.1 各種条件下における接着樹脂の性能に関する検討

本節では、水中接着樹脂と FRP 板やコンクリート表面との付着性能に及ぼす接着界面処理や施工・養生環境の影響を検討するため、表-1 中の W-A1, W-A1-S および A-A1-S 試験体の耐荷性状や破壊性状を比較検討する。

(1) 荷重-変位関係

図-2 には、各試験体の荷重-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。また、比較のために無補強の N 試験体に関する計算結果および実験結果も併せて示している。計算結果は、コンクリート標準示方書¹¹⁾に準拠して、AFRP 板の完全付着を仮定した断面分割法により算出したものである。なお、計算には接着樹脂の厚さや力学的性能は考慮していない。これは、試験体によって実験結果と計算結果の対応に差異が大きく、必ずしも接着樹脂を考慮した計算値が実験値と良好に対応するわけではないためである。また、接着樹脂は粘土状であり、コンクリートや



図－3 各試験体のひずみ分布性状

モルタルのように材料試験を実施できる形に試験体を成形すること自体が困難であることから、接着樹脂の計算のためのモデル化は今後の検討課題としたい。表－4には参考のために、主鉄筋降伏時および最大荷重時における実験および計算結果を一覧にして示している。なお、実測の降伏荷重は、主鉄筋のひずみを計測していないことから、荷重－変位関係の剛性勾配変化点の荷重として評価している。

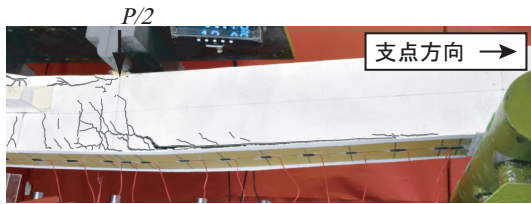
図より、各補強試験体の計算結果は、無補強の場合と異なり主鉄筋降伏後も荷重が増加していることが分かる。計算ではいずれの試験体も上縁コンクリートの圧壊により終局に至っていることを確認している。

W-A1 試験体の実験結果を見ると、計算主鉄筋降伏時までは計算結果と良く対応していることが分かる。主鉄筋降伏荷重の実測値は計算値よりも多少大きい。これは、計算時に無視した接着樹脂層の剛性による影響であるものと推察される。また、主鉄筋降伏後において、実験結果は、変位 $\delta = 18 \text{ mm}$ 程度で上縁コンクリートの圧壊に伴い剛性勾配が低下し、その後 AFRP 板の部分剥離および剥離領域の拡大が顕在化し、最終的には AFRP 板の全面剥離により荷重が急激に低下した。なお、実測耐力は計算耐力を若干下回っている。

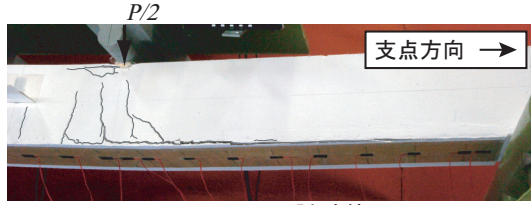
一方、AFRP 板に砂付き処理を施した W-A1-S 試験体の実験結果は、主鉄筋降伏から上縁コンクリートの

圧壊により荷重が低下するまで、計算結果と良く対応していることが分かる。実験時には、計算終局変位近傍で上縁コンクリートが圧壊し、その後 AFRP 板の部分剥離および剥離領域の拡大が顕在化して、最終的には変位 $\delta = 30 \text{ mm}$ で AFRP 板の全面剥離に至っている。この結果より、AFRP 板表面に砂付き処理を施すことにより、AFRP 板と接着樹脂との付着性能が改善され、AFRP 板とコンクリートの完全付着を仮定した計算結果と同等の曲げ補強効果を発揮できることが明らかになった。なお、最大荷重時の荷重比は W-A1-S 試験体の方が W-A1 試験体よりも多少小さいが、これは W-A1 試験体の実測降伏荷重が計算値よりもかなり大きいことが影響したためである。このように、計算値と実測値の乖離は主として主鉄筋降伏荷重の大きさに出現する。計算では、コンクリートの軟化が主鉄筋降伏荷重に及ぼす影響の大きいことが知られているが、今後はずれの生じる樹脂層の界面や樹脂の軟化性状をも考慮した計算法を検討する必要があるものと考えられる。

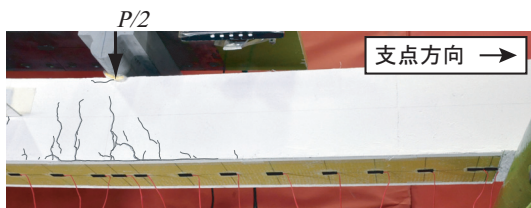
A-A1-S 試験体の実験結果は、降伏荷重時までは計算結果と良く対応しており、実測降伏荷重は計算値を多少上回っている。しかしながら、主鉄筋降伏後における実測最大荷重および実測最大荷重時変位は計算値を下回っている。実験時には、上縁コンクリートの圧



(a) W-A1 試験体



(b) W-A1-S 試験体



(c) A-A1-S 試験体

写真-1 各試験体終局直前のひび割れ性状

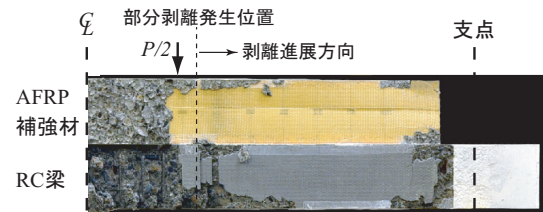
壊に伴って荷重が低下し、やがて AFRP 板が剥離したことを確認している。なお、本試験体のコンクリート強度は他の試験体に比べて 10 MPa 程度大きいことから、他の試験体と同等のコンクリート強度の場合、より早期に圧壊が生じた可能性がある。

以上の結果を整理すると、1) AFRP 板の接着面に砂付き処理を施すことにより AFRP 板の付着性能が向上し、RC 梁の耐荷性能は計算値とほぼ同等にまで増大する、また、2) 提案の水中接着工法と同じ接着樹脂を用い、気中で AFRP 板を接着した場合の補強効果は、水中で接着した場合よりも多少小さい。これには、気中で接着樹脂の伸び性能が水中よりも多少劣ることが影響しているものと考えられる。

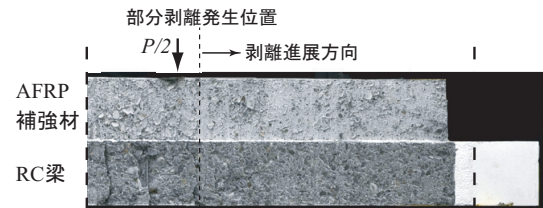
(2) AFRP 板のひずみ分布性状

図-3 には、主鉄筋降伏時、中間変位時および終局変位時における AFRP 板の軸方向ひずみ分布の実験結果を計算結果と比較して示している。ここで、中間変位とは、計算主鉄筋降伏時と計算終局時の中間の変位である。また、計算結果は AFRP 板とコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法の結果に基づいて算出したものである。なお、A-A1-S 試験体については、実験結果が計算終局変位に至っていないため、計算終局変位時ではなく、最大荷重時のひずみ分布性状を表している。

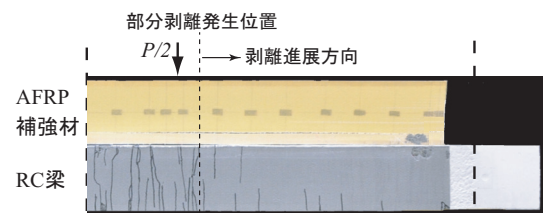
図より、W-A1 および W-A1-S 試験体の実験結果を比較すると、両試験体ともに計算終局変位時まで実験結果が計算結果と比較的良好に対応していることが分かる。なお、W-A1 試験体の場合には、等曲げ区間において、実験結果が計算結果を上回る傾向にあることが



(a) W-A1 試験体



(b) W-A1-S 試験体



(c) A-A1-S 試験体

写真-2 実験終了後における接着界面の状況

分かる。これは、この領域において接着樹脂に多数のひび割れが発生していることより、その影響によるものと考えられる。また、終局変位時には右側の荷点近傍の等せん断力区間において、実験結果が計算結果をわずかに上回っている。これは、後述するように、AFRP 板の剥離が右側の荷点近傍から発生していることに対応している。

一方、砂付き処理を施した W-A1-S 試験体は、計算終局変位時において両側の等せん断力区間の荷点近傍において実験結果が計算結果を上回っており、かつ等曲げ区間において実験結果が計算結果を下回ることが分かる。これは、荷点近傍において AFRP 板の部分剥離が発生していることを暗示している。

A-A1-S 試験体の場合には、計算主鉄筋降伏時において実測ひずみの分布が大きくばらついている。これは、等曲げ区間の接着樹脂に多数のひび割れが発生したことによるものと推察される。また、中間変位時では等曲げ区間の実測ひずみが計算ひずみを下回るとともに、等せん断力区間および荷点近傍で実測ひずみが計算ひずみを大きく上回っている。なお、この性状は最大荷重時により顕著に示されている。これは、AFRP 板の剥離が両支點側に進展していることを示すものと考えられる。

このように A-A1-S 試験体の AFRP 板の全面剥離が計算終局変位 ($\delta = 28.2 \text{ mm}$) に到達する前に発生していることから、本実験においては気中接着した場合の接着樹脂の付着性能は水中接着した場合よりも劣って

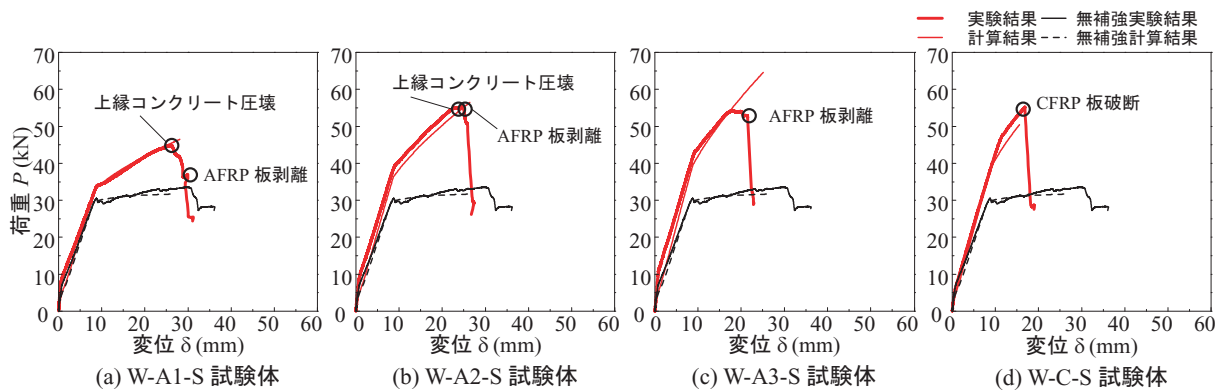


図-4 補強材の力学特性が異なる試験体の荷重-変位関係

いることが明らかになった。これは、表-3 に示したように気中接着した場合の方が接着樹脂の伸び率が3割程度小さく、後述するように接着樹脂に多数の曲げひび割れが発生したことが影響しているものと推察される。

(3) ひび割れ性状

写真-1 には、各試験体の終局直前における梁側面のひび割れおよび AFRP 板の剥離性状を示している。いずれの試験体でも、等曲げ区間では上縁コンクリートの圧壊が見られ、また等せん断力区間の下縁かぶりコンクリート部では斜めひび割れ先端部が AFRP 板を下方に押し出して引き剥がすピーリング作用により AFRP 板に部分剥離を生じていることが分かる。

A-A1-S 試験体の場合は W-A1、W-A1-S 試験体よりもピーリング作用に起因する斜めひび割れの本数が少ない。これは、A-A1-S 試験体の場合には斜めひび割れ発生後、ピーリング作用による AFRP 板の剥離が急速に進展して全面剥離に至ったためと考えられる。

写真-2 には、実験終了後における接着界面の状況を示している。W-A1 試験体の場合には、AFRP 板は接着樹脂との界面で剥離しているのに対し、W-A1-S 試験体の場合には接着樹脂とコンクリートの界面で剥離している。なお、接着樹脂の表面にはコンクリートが付着している。このことから、AFRP 板表面に砂付き処理を施すことにより、接着樹脂との付着性能が向上していることが分かる。

A-A1-S 試験体の場合には、AFRP 板は全面に渡って接着樹脂との界面で剥離している。このことより、気中接着時における AFRP 板の接着樹脂との付着性能は水中接着時よりも低いことが窺われる。また、等曲げ区間の接着樹脂には多数のひび割れが発生していることより、接着樹脂の伸び率が小さいことによるひび割れの発生が AFRP 板の剥離を助長しているものと推察される。

以上の結果より、本実験に用いた水中接着樹脂の付着性能は水中施工時において低下する傾向は認められ

ず、十分に発揮されていることが明らかになった。

3.2 RC 梁の耐荷性状に及ぼす FRP 板の力学特性の影響

本節では、RC 梁の曲げ耐力向上効果に及ぼす FRP 補強材の補強量や力学特性の影響について検討するため、W-A1/A2/A3/C-S 試験体の実験結果に基づいて検討する。なお、これらの試験体に用いた FRP 板は、前節の結果をふまえて砂付き処理を施すこととした。

(1) 荷重-変位関係

図-4 には、各補強試験体の実験結果を計算結果と比較して示している。また、無補強試験体の実験および計算結果も併せて示している。計算結果は、前節と同様に断面分割法により算出している。表-5 には参考のために、主鉄筋降伏時および最大荷重時における各試験体の実験結果および計算結果を一覧にして示している。

図-4 (a), (b) より、W-A1/A2-S 試験体の場合には、実験結果と計算結果が良く対応していることが分かる。ただし、上縁コンクリートの圧壊は計算終局変位時近傍で発生しているが、計算値よりも若干小さな荷重および変位レベルで発生している。W-A1-S 試験体の場合は、上縁コンクリートの圧壊直後に AFRP 板の部分剥離が顕在化して変位の増大に伴い剥離領域が拡大し、最終的には全面剥離に至った。一方、W-A2-S 試験体の場合には、AFRP 板の部分剥離が顕在化し、ひび割れが水平方向へ進展した後に上縁コンクリートの圧壊が生じ、圧壊直後に AFRP 板の剥離により終局に至った。

図-4 (c) より、W-A3-S 試験体の実験結果は、主鉄筋降伏時までは計算結果と良く対応し、それ以降も変位の増大に伴って荷重が増加していることが分かる。しかしながら、計算最大荷重よりも小さな荷重レベルで終局に至っている。実験では、上縁コンクリートの圧壊は見られず、下縁かぶりコンクリートに生じた斜めひび割れがブロック化し、FRP 板を下方に押し下げ

表-5 補強材の力学特性が異なる試験体の実験結果および計算結果一覧

試験体名	主鉄筋降伏荷重			最大荷重			破壊形式
	計算値	実測値	荷重比	計算値	実測値	荷重比	
	P_{yc} (kN)	P_{ye} (kN)	P_{ye}/P_{yc}	P_{uc} (kN)	P_{ue} (kN)	P_{ue}/P_{uc}	
N	29.7	29.3	0.99	31.7	33.6	1.06	-
W-A1-S	33.0	33.9	1.03	46.5	44.9	0.97	上縁コンクリート圧壊後 AFRP 板剥離
W-A2-S	36.3	39.9	1.10	56.5	55.3	0.98	
W-A3-S	39.6	42.8	1.08	64.6	54.3	0.83	AFRP 板剥離
W-C-S	39.6	47.5	1.20	50.5	55.2	1.09	CFRP 板破断

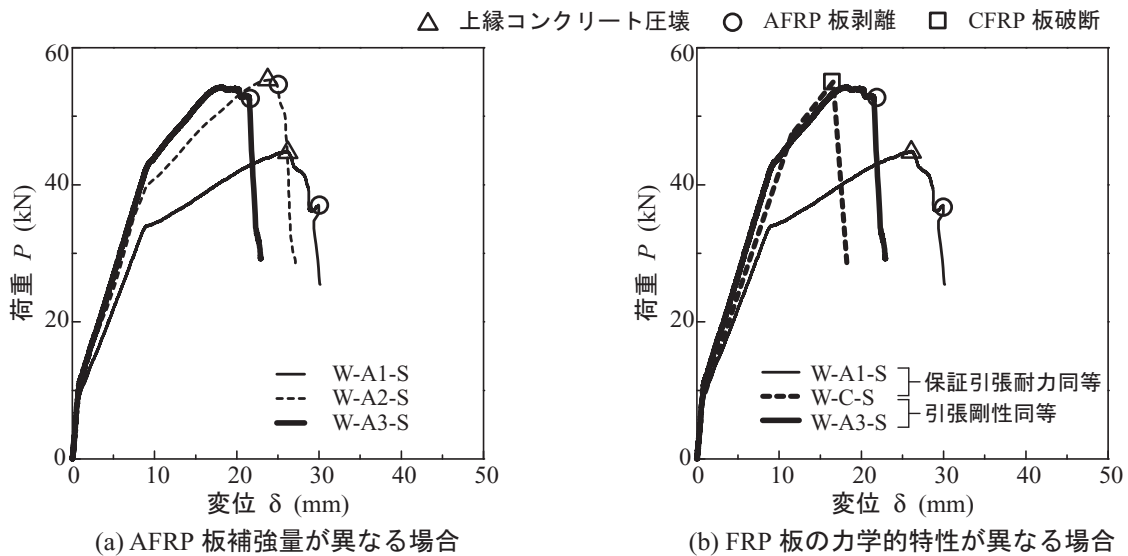


図-5 各試験体の荷重-変位関係の比較

るピーリング作用による AFRP 板の剥離により終局に至っている。

図-4 (d) より、W-C-S 試験体の場合には、計算結果よりも多少高い荷重で降伏していることが分かる。その後、実験結果は計算結果よりも若干高い荷重レベルで推移し、最終的に計算結果を多少上回る荷重で CFRP 板の破断により終局に至っている。

以上のことから、実測の主鉄筋降伏荷重は樹脂層を考慮しない計算結果に比べて 1.03 倍から 1.2 倍程度大きいものの、主鉄筋降伏時までは実験結果と計算結果が大略対応していることが明らかになった。また、W-A3-S 試験体を除く 3 試験体の実験結果は計算終局時まで概ね計算結果と対応していることから、FRP 板はコンクリート表面と完全付着に近い状態にあるものと考えられる。一方、W-A3-S 試験体の場合には、計算結果を下回る荷重で終局に至っていることより、計算値が危険側の評価を与えていることが分かる。

図-5 には、各試験体の実験結果の荷重-変位関係を補強量および力学的特性の異なる場合について比較

して示している。

図-5 (a) には、AFRP 板補強量が異なる試験体の実験結果を示している。図より、補強量の増大に伴って主鉄筋降伏荷重や主鉄筋降伏後の剛性勾配が大きくなっていることが分かる。しかしながら、いずれの試験体も AFRP 板の剥離により終局に至り、その最大荷重は 55 kN 程度で頭打ちとなっている。また、補強量が最も大きい W-A3-S 試験体の最大荷重は、W-A2-S 試験体と同程度となっている。このように W-A3-S 試験体の場合には、AFRP 板の剥離により荷重が低下していることから、AFRP 板水中接着曲げ補強工法の実用化のためには AFRP 板の剥離を考慮した設計法を確立する必要があるものと考えられる。なお、AFRP 板の剥離には部材断面や載荷状況、補強量なども関連することから、後述する破壊形式予測式を基に剥離破壊が先行しないように補強することが合理的と考える。

図-5 (b) には、W-A1/A3-S 試験体の AFRP 板とそれぞれ保証引張耐力および剛性がほぼ対応する CFRP 板を用いた W-C-S 試験体の実験結果を、上記の 2 試

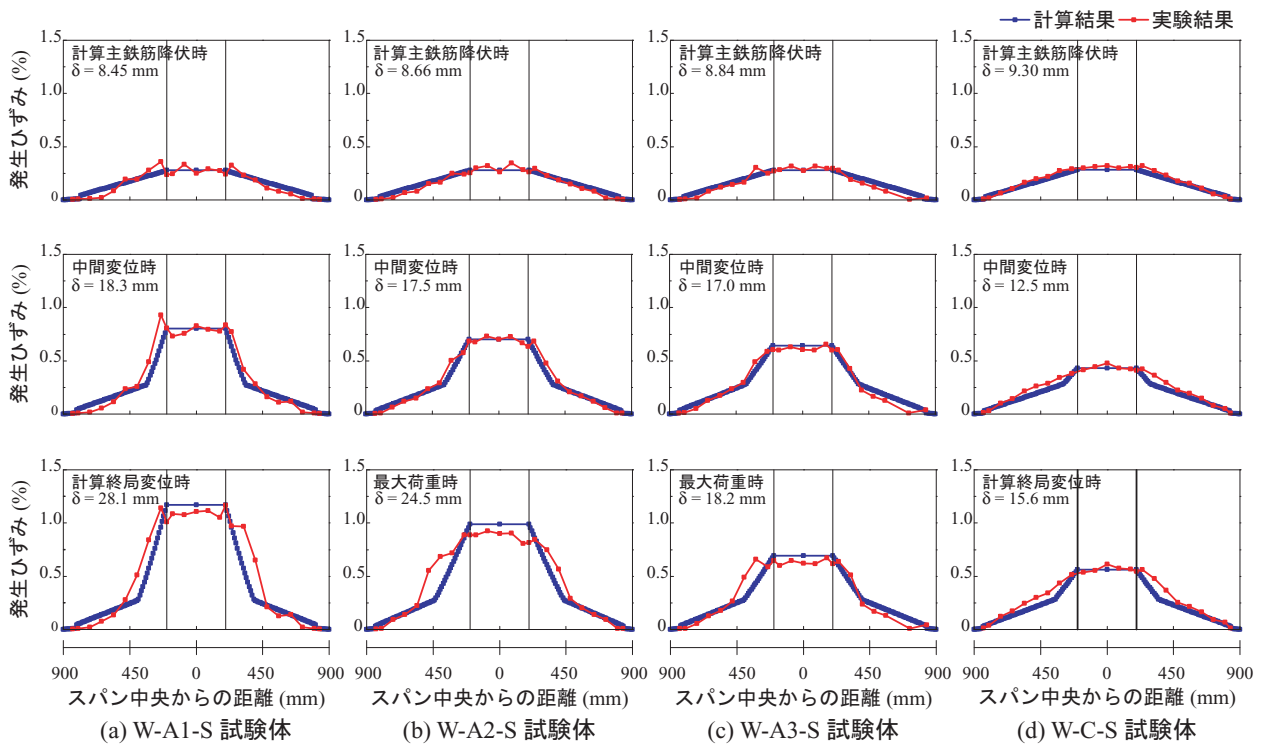


図-6 各試験体のひずみ分布性状

験体と比較する形で整理している。図より、FRP 板の保証引張耐力が同程度の W-A1-S 試験体と W-C-S 試験体を比較すると、主鉄筋降伏荷重、主鉄筋降伏後の剛性勾配および最大荷重が大きく異なることが分かる。これは両試験体に用いた FRP 板の保証引張耐力が同等であるものの、引張剛性が大きく異なるため、同一変位時における FRP 板の補強効果 (作用引張力) が異なることによるものと判断される。すなわち、保証引張耐力が同等な場合、引張剛性が大きなものほど補強効果が早期に現れ、主鉄筋降伏荷重や最大荷重が増大するのに対して、引張剛性が小さい場合には降伏荷重や最大荷重が小さくなるものの変形性能が増大して破壊形式が上縁の圧縮破壊となりやすいことを示している。

一方、引張剛性が同程度の W-A3-S 試験体と W-C-S 試験体の結果を比較すると、最大荷重時までほぼ対応していることが分かる。ただし、破壊性状は異なり、それぞれ AFRP 板の剥離と CFRP 板の破断により終局に至っている。これは、両試験体に用いた FRP 板の保証引張耐力が異なることによるもので、W-A3-S 試験体では補強材の引張耐力が大きいため剥離破壊が先行したのに対して、引張耐力が小さい W-C-S 試験体では、CFRP 板が引張性能を十分に発揮して破断破壊したものと考えられる。なお、W-A3-S 試験体のコンクリート強度は W-C-S 試験体に比べて 7 MPa 程度大きいものの、圧壊を想定した計算最大荷重に比べて大幅に小さな荷重で剥離破壊が先行していることから、

コンクリート強度が破壊形式に及ぼす影響はなかったものと考えられる。

(2) ひずみ分布性状

図-6 には、各試験体の実測軸方向ひずみ分布を、計算主鉄筋降伏時、計算終局変位時および中間変位時について計算結果と比較して示している。計算結果は前述の荷重-変位関係の場合と同様に、FRP 板とコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法により算定したものである。なお、W-A2/A3-S 試験体に関しては、実験結果が計算終局変位に至っていないため、計算終局変位時ではなく最大荷重時のひずみ分布性状を表している。

図より、W-A1-S 試験体の場合には、前述のとおり計算終局変位時まで実測ひずみは計算ひずみと概ね対応している。これに対し、目付量の大きい W-A2/A3-S 試験体の場合には、それぞれ中間変位時までは実測ひずみが計算ひずみと対応しているものの、それ以降では、等曲げ区間の実測ひずみが計算ひずみを下回り、等せん断力区間の荷点近傍において実測ひずみが計算ひずみを大きく上回っている。これは、AFRP 板の繊維目付量が大きい場合には、より小さな荷重および変位レベルで AFRP 板の部分剥離が発生、進展し、終局に至ることを暗示している。

W-C-S 試験体の場合には、W-A1-S 試験体の場合と同様、計算終局変位時まで実測ひずみが計算ひずみと概ね対応している。これは、W-C-S 試験体に用いた CFRP 板の破断ひずみが接着樹脂の伸び率よりも小さ

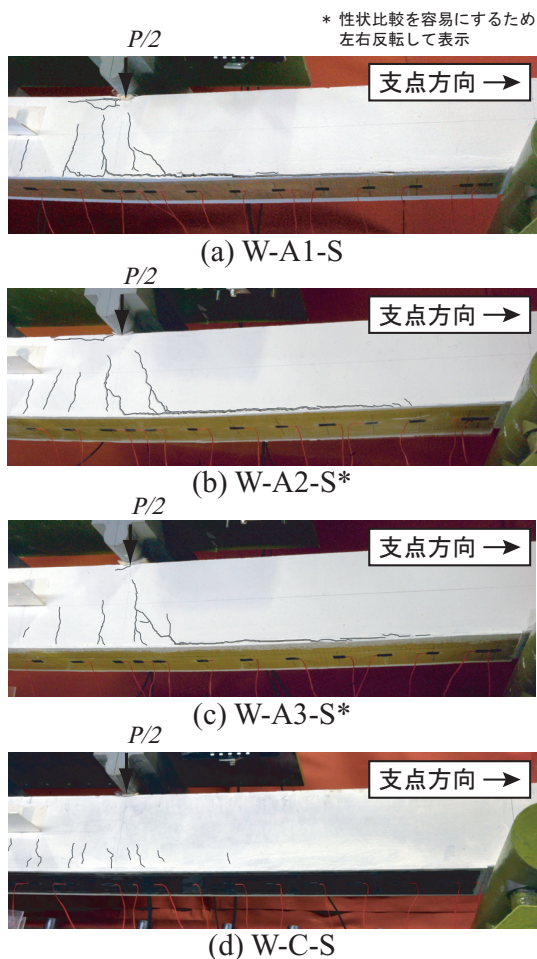


写真-3 各試験体の終局直前のひび割れ性状

いため、水中接着樹脂が損傷する前に CFRP 板が破断したことによるものと考えられる。

このように、本実験に用いた CFRP 板は引張剛性が高く、かつ終局ひずみが小さいため計算耐力に到達するまで剥離することなく破断に至った。これは CFRP 板の破断ひずみ ($5,600 \mu$) が水中接着樹脂の引張ひずみ ($10,000 \mu$) よりも十分に小さいことによるものと考えられる。

一方、CFRP 板と引張剛性が同程度の AFRP 板を用いる場合 (W-A3-S) には、RC 梁の曲げ補強効果は CFRP 板を用いる場合とほぼ同等であるものの AFRP 板の破断ひずみが $17,500 \mu$ と大きいため、剥離破壊が先行して実測最大荷重が計算耐力を下回ったものと推察される。

(3) ひび割れ性状

写真-3 には、各試験体の終局直前におけるひび割れ性状を示している。写真より、AFRP 板で補強した試験体の場合には、荷重点近傍の下縁かぶりコンクリート部に斜めひび割れが発生し、それによるピーリング作用によって、AFRP 板が部分剥離していることが分かる。なお、本実験では、AFRP 板の剥離は、コンクリートと接着樹脂もしくは接着樹脂と AFRP 板の

界面において発生していることを確認している。

また、AFRP 板で補強した試験体を比較すると、補強量が多くなるにつれて試験体上部まで進展するひび割れが少なくなっていることが分かる。これは、補強量が多くなるに従い梁のたわみが減少することより、ひび割れの発生および進展も抑制されるためと推察される。

W-C-S 試験体の場合には、等曲げ区間において微小な曲げひび割れが多数みられるものの、その損傷は極めて軽微である。これは、CFRP 板の引張剛性が大きいことにより、終局時における梁のたわみ量や FRP 板の発生ひずみが小さくなることによるものである。

4. FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測式の適用性

前章までの検討結果、FRP 板水中接着曲げ補強を施すことにより RC 梁の曲げ耐力を向上可能であることが明らかになった。ただし、補強量によっては断面分割法による計算結果よりも小さな荷重で FRP 板が剥離に至るケースも見られた。FRP 板を用いた気中曲げ補強に関する著者らの既往の研究^{12),13)}では、計算結果よりも小さな荷重レベルで補強材が剥離して終局に至る破壊形式を「剥離破壊型」と呼び、計算結果と同程度かそれ以上の荷重レベルで上縁コンクリートが圧壊して終局に至る破壊形式を「曲げ破壊型」と呼ぶこととしている。また、実験結果に基づき、両破壊形式の予測式を式 (1), (2) のように提案している。

$$\text{曲げ圧壊型 } M_y/M_u \geq 0.70 \quad (1)$$

$$\text{剥離破壊型 } M_y/M_u < 0.70 \quad (2)$$

ここに、 M_y : 計算主鉄筋降伏曲げモーメント、 M_u : 計算終局曲げモーメントである。ここでは、上述の破壊形式予測式の FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁への適用性について検討する。

表-6 には、各試験体の計算主鉄筋降伏曲げモーメント M_y 、計算終局曲げモーメント M_u 、計算曲げモーメント比 M_y/M_u 、予想される破壊形式、および実験結果における破壊形式の一覧を示している。ここでは、接着界面処理方法および施工・養生環境が同一である W-A1/A2/A3/C-S 試験体について整理した。なお、上縁コンクリート圧壊前に FRP 板が破断する場合には「破断型」と記している。

表より、W-A2-S 試験体を除き、実験結果による破壊形式は予想される破壊形式と対応していることが分かる。また、W-A2-S 試験体の場合には、剥離破壊型と予想されているのに対し実験結果では曲げ圧壊型となっていることから、破壊形式予測式は安全側の評価を与えているものと判断される。

表-6 各補強試験体の計算曲げモーメント比および破壊形式の一覧

試験体名	M_y (kNm)	M_u (kNm)	M_y/M_u	予想される 破壊形式	実験結果による 破壊形式
W-A1-S	11.5	16.3	0.71	曲げ圧壊型	曲げ圧壊型
W-A2-S	12.7	19.8	0.64	剥離破壊型	曲げ圧壊型
W-A3-S	13.9	22.6	0.61	剥離破壊型	剥離破壊型
W-C-S	13.9	17.7	0.78	破断型	破断型

以上のことより、本実験の範囲内においては、気中 FRP シート曲げ補強 RC 梁に対する破壊形式予測式は、FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁に対しても概ね適用可能であるものと考えられる。これは、RC 梁がピーリング作用によって FRP 板が剥離し終局に至ること等破壊のメカニズムが気中の RC 梁と類似していることによるものと判断される。ただし、上記の結果は限定された実験結果によるものであり、実験データのさらなる蓄積が必要であることは勿論である。また、本研究では施工・養生完了後、速やかに載荷実験を行い、短期における耐荷性能を検討した。今後は、長期の耐荷性能に着目した検討も必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動や FRP 板の剥離性状に及ぼす補強量の影響を検討することを目的に、FRP 補強材の種類や目付量を変化させた RC 梁の 4 点曲げ載荷実験を行った。また、接着樹脂の特性を検討するため、著者らが過去に実施した FRP 板への砂付き処理の有無に関する実験結果を基に、同接着樹脂を用いた気中 RC 梁に関する実験も実施した。本実験により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 砂付き処理を施した AFRP 板を用いて RC 梁を水中接着曲げ補強することにより、RC 梁の曲げ耐力向上効果は改善可能である。
- (2) AFRP 板の補強量を多くすることにより、RC 梁の曲げ耐力は向上するものの、剥離破壊が先行しやすくなるためその向上効果には上限がある。
- (3) 水中接着曲げ補強試験体の破壊形式は、接着樹脂の伸び性能と補強材の引張耐力や引張剛性の関係によって変化する。
- (4) FRP 板への砂付き処理の有無や補強材の種類によって剥離を生じる界面が異なってくるものの、FRP 板の剥離はいずれの場合もピーリング作用によって発生する。
- (5) 気中 FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測式は、水中接着補強の場合にも本実験の範囲内で

は概ね適用可能である。

謝辞

本論文の取りまとめにあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の河本幸子さんを始めとする学生諸君に多大なるご支援を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 芦野孝行, 川瀬義行, 呉 智深, 岩下健太郎: 水中適応型 FRP グリッド接着補強工法の補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1123-1128, 2001.7
- 2) 芦野孝行, 川瀬義行, 呉 智深, 上原 陽: 水中適用型 FRP グリッド接着工法のせん断補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1555-1560, 2002.6
- 3) 芦野孝行, 呉 智深, 根本正幸, 中島広三: 水中適用型 FRP グリッド接着補強工法の圧縮補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1879-1884, 2003.7
- 4) 根本正幸, 川瀬義行, 呉 智深, 岩下健太郎: 水中適用型高流動エポキシ樹脂により接着した CFRP グリッドの付着性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1633-1638, 2008.7
- 5) 根本正幸, 坂本宏司, 呉 智深, 岩下健太郎: 水中適用型エポキシ樹脂により接着した CFRP グリッドの付着性能に及ぼす補強量の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1459-1464, 2009.6
- 6) 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介: 水中接着樹脂と AFRP 版を用いて水中補強した RC 梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1327-1332, 2010.6
- 7) 池下雄哉, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP 版を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁の耐荷性状に及ぼす補強材表面処理の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1303-1308, 2011.6
- 8) 鹿嶋辰紀, 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介: FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性能に及ぼす FRP

補強材の引張剛性と接着樹脂の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1327-1332, 2012.6

- 9) 小原 孝之, 鈴木 顕彰, 船橋 正治, 三島 徹也: 水中施工における鉛直打継目の付着強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1095-1100, 2002.6
- 10) 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, 2000.6
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土

木学会, 2007.

- 12) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.8
- 13) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp. 91-109, 2002.8

(2013 年 9 月 25 日受付)