

論文 AFRP 板水中巻付け補強によるコンクリート円柱の耐荷性能向上効果

河本 幸子^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・三上 浩^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、水中硬化型接着樹脂と AFRP 板を用いた水中 RC 構造物の水中接着補強工法を確立することを目的に、AFRP 板を水中硬化型接着樹脂を用いて水中巻付け補強したコンクリート円柱の圧縮載荷実験を行った。その結果、1) AFRP 板水中巻付け補強により、コンクリート円柱の耐荷性能を気中接着の場合とほぼ同程度まで向上可能であること、2) いずれの補強試験体も AFRP 板の破断により終局に至っており、継手部分の付着性能は十分確保されていること、3) AFRP 板の体積比を大きくすると、コンクリート円柱の耐荷性能が向上する傾向が認められること、などが明らかになった。

キーワード: コンクリート円柱, AFRP 板, 水中巻付け補強

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。また、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。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、膨大なコストが必要となることから、河川橋脚の補強工事は限定的にしか行われていないのが現状である。これまでの研究では、芦野ら¹⁾が水中適用型エポキシ樹脂を用いて格子状に成形した炭素繊維 (以後、CFRP グリッド) を接着する補強工法を提案している。しかしながら、この提案工法の場合には CFRP グリッドが格子状であるため、耐震補強のように大きな補強量に対応することは容易ではない。

一方、著者らはアラミド繊維シート (以後、AFRP シート) にエポキシ系接着樹脂を含浸硬化して製作した、アラミド繊維板 (以後、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提案している。著者らの提案工法の場合には、補強材が面状であるため、積層化等により耐震補強レベルの補強量にも比較的容易に対応可能であるものと考えられる。

これまで、提案の水中接着補強工法の補強効果や AFRP 板の付着性状を検討することを目的に、本工法で曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行っている²⁾。その結果、水中接着補強による RC 梁の曲げ耐力向上効果は従来の気中接着工法の場合に比べて多少小さいものの、接着界面の処理方法を工夫することにより設計計算値とほぼ同程度まで耐荷性能の向上が期待できることが明らかになっている。しかしながら、柱部材に巻付けて補強する場合における横拘束効果については未だ検証されていないの

表-1 試験体一覧

試験体名	施工・養生環境	目付量 (g/m ²)	補強材幅 (mm)	継手長 (cm)	体積比 ρ_{AF} ($\times 10^{-4}$)	
N	気中	-	-	-	0	
W-280-30-10	水中	280	30	10	8.69	
W-280-60-10			60		17.4	
W-280-30-15			30	15	8.69	
W-280-60-15			60		17.4	
A-280-30-15	30		8.69			
A-280-60-15	60		17.4			
W-415-30-10	水中		415	30	10	12.9
W-415-60-10				60		25.7
W-415-30-15		30		15	12.9	
W-415-60-15		60			25.7	
A-415-30-15	30	12.9				
A-415-60-15	60	25.7				

が現状である。

このような背景より、本研究では、水中硬化型接着樹脂と AFRP 板を用いた水中 RC 構造物の水中接着補強工法を確立することを目的に、水中で巻付け補強したコンクリート円柱の圧縮載荷実験を行った。また、比較のために AFRP 板を気中接着する場合についても検討した。

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。本実験に用いた試験体は、無補強試験体および AFRP 板接着時の施工・養生環境や AFRP 板の目付量、幅および継手長を変化させた全 13 体である。試験体名の第 1 項目

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 副センター長 博(工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

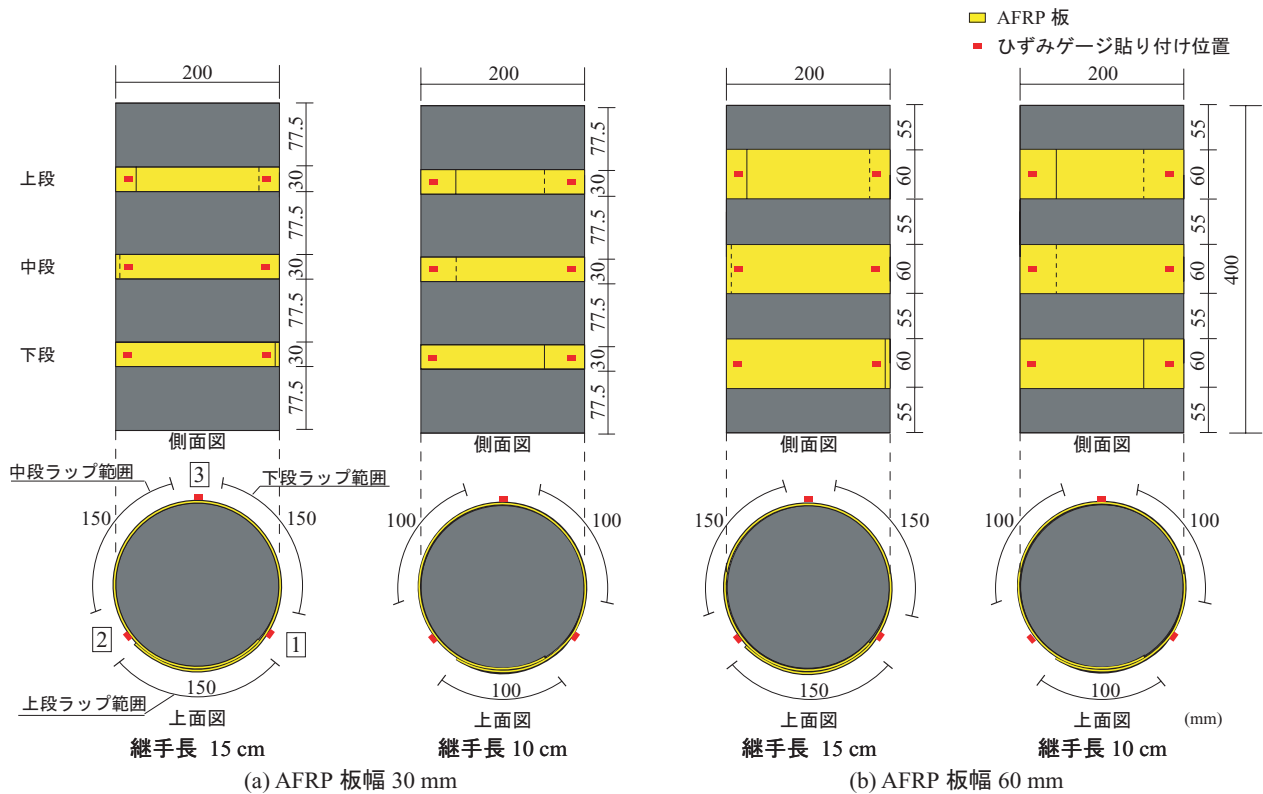


図-1 試験体の形状および補強概要

表-2 AFRP 板の力学的特性値 (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 (%)
280	392	0.193	2.06	118	1.75
415	588	0.286	2.06	118	1.75

は施工・養生環境 (W:水中, A:気中) を, 第2項目は繊維目付量 (g/m²) を, 第3項目は AFRP 板幅 (mm) を, 第4項目は AFRP 板の継手長 (cm) を表している。なお, 表中の体積比 ρ_{AF} は, コンクリート円柱に対する AFRP 板の体積比であり, 式 (1) により算出している。

$$\rho_{AF} = \frac{4 h_{AF} t_{AF}}{d_{AF} H_c} \quad (1)$$

ここに, h_{AF} : AFRP 板の総幅 (mm), t_{AF} : AFRP 板1層当たりの厚さ (mm), d_{AF} : AFRP 板の有効長 (=コンクリート円柱の直径) (mm), H_c :コンクリート円柱の高さ (mm) である。また, コンクリートの圧縮強度は 24 N/mm², 弾性係数は 25 kN/mm² である。

表-2には, AFRP 板の力学的特性値の一覧を示している。水中巻付け補強は, 予め水没させたコンクリート円柱に対して水中硬化型接着樹脂と AFRP 板を用いて行った。AFRP 板は, AFRP シートを汎用の含浸接着樹脂で硬化したものである。また, 円柱試験体の AFRP 板の接着面はサンダー処理を行った。なお, 気中接着の場合には, AFRP 板を汎用の含浸接着樹脂を用いて接着している。

図-1には, 試験体の形状寸法および補強概要を示し

表-3 水中硬化型接着樹脂の力学的特性値 (公称値)

樹脂の種類	材料特性	物性値 (MPa)	測定方法
パテ状 接着樹脂	圧縮強度	53.0	JIS K - 6911
	曲げ強度	32.4	JIS K - 6911
	引張強度	15.0	JIS K - 6911
液体状 接着樹脂	圧縮強度	40.0	JIS K - 6911
	曲げ強度	35.0	JIS K - 6911

ている。試験体は, 直径 200 mm, 高さ 400 mm のコンクリート円柱である。巻付け補強位置は, コンクリート円柱の高さ方向の4等分点とした。なお, AFRP 板の周方向継手位置は, 上・中・下段でそれぞれ異なるように配置した。AFRP 板の周方向ひずみ測定位置は, 継手部を避ける形で等間隔に3点と設定した。

2.2 水中硬化型接着樹脂の力学的特性および接着性能

本実験では, AFRP 板の水中接着には2種類の水中硬化型接着樹脂を用いている。すなわち, コンクリートと AFRP 板の接着領域には2種混合型のパテ状のものを, AFRP 板と AFRP 板の継手領域には2種混合型の液状の

表-4 実験結果および計算結果の一覧

試験体名	実験結果		計算結果		荷重比 (P_{ye}/P_{yc})	破壊形式	破断位置 (数字は破断部近傍のゲージ番号)		
	最大荷重 P_{ye} (kN)	圧縮強度 σ_{ye} (MPa)	最大荷重 P_{yc} (kN)	圧縮強度 σ_{yc} (MPa)			上段	中段	下段
	N	741	24.0	740			24.0	1.001	圧壊
W-280-30-10	773	24.7	771	24.7	1.003	AFRP 板の破断	-	3	3
W-280-60-10	943	30.2	789	25.3	1.195		-	2	1
W-280-30-15	925	29.4	775	24.7	1.194		-	継手近傍	-
W-280-60-15	1018	32.7	789	25.3	1.290		-	継手近傍	-
A-280-30-15	914	29.2	771	24.7	1.185		1	3	1
A-280-60-15	1069	34.4	793	25.4	1.348		3	継手近傍	2
W-415-30-10	890	28.6	779	25.0	1.142		-	継手近傍	-
W-415-60-10	975	31.2	809	25.9	1.205		3	1	1
W-415-30-15	842	27.0	781	25.0	1.078		-	1	-
W-415-60-15	896	28.7	809	25.9	1.108		3	-	-
A-415-30-15	910	29.5	772	25.0	1.179		-	3	-
A-415-60-15	986	31.8	809	25.9	1.219		3	継手近傍	1

ものを用いている。表-3には、これら接着樹脂の力学的特性値の一覧を示している。なお、パテ状接着樹脂を用いる場合におけるコンクリートとAFRP板の接着性能は、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」³⁾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、試験は母材コンクリートの引張破壊で終了し、接着強度の平均値は2.0MPaであった。この値は、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(1.5MPa)を上回っている。従って、本実験に用いた水中硬化型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。

また、液体状接着樹脂については、継手長を10cm以上とすることにより、AFRP板の引張耐力を上回る付着力を確保できることを確認している。ただし、本実験では、コンクリート円柱への巻付け補強に関する事例が少ないため、継手長15cmについても検討を行った。

2.3 補強方法および実験方法

円柱の水中接着補強は、大型の水槽を用いて円柱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) パテ状接着樹脂を混合し、厚さ4mm程度に成形する。
- 2) 気中でAFRP板と成形したパテ状接着樹脂を一体化させる。継手部分には液体状接着樹脂を塗布する。
- 3) 水槽内に設置された円柱の接着面に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。

なお、圧着は、専用の圧着装置を用いて行った。

写真-1に実験状況を示している。載荷実験は、容量2,000kNの圧縮試験機により行った。本実験の測定項目は、載荷荷重、試験装置の鉛直変位(以後、変位)および

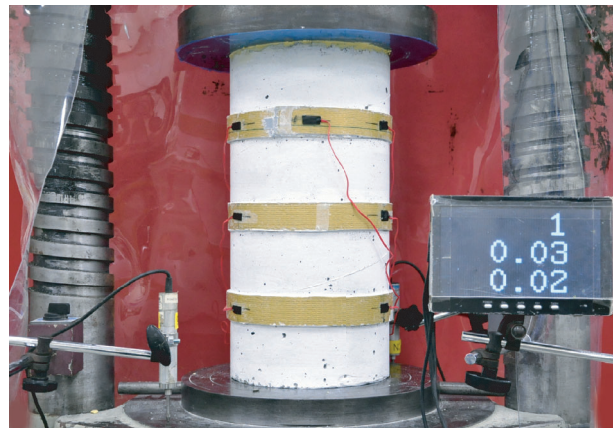


写真-1 試験体の設置状況

AFRP板各点の周方向ひずみである。また、実験時にはコンクリート円柱のひび割れやAFRP板の剥離および破断状況を撮影し、実験終了後には破壊性状を撮影した。

3. 実験結果と考察

3.1 応力-ひずみ関係

図-2には、各試験体の圧縮応力-圧縮ひずみ関係(以後、応力-ひずみ関係)を、補強材の体積比 ρ_{AF} ごとに比較して示している。また、無補強試験体の実験結果も併せて示している。なお、応力-ひずみ関係に関する計算結果は、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)」⁴⁾に準拠し、最大応力まではAFRP補強材を弾性係数比で帯鉄筋に換算した場合の計算式を使用し、最大応力から終局まではAFRP補強材を引張強度比で帯鉄筋に換算した場合の計算式を使用している。表-4には参考のために、実験結果における最大荷重および圧縮強度、計算結果における最大荷重および圧縮強度、破壊形式および

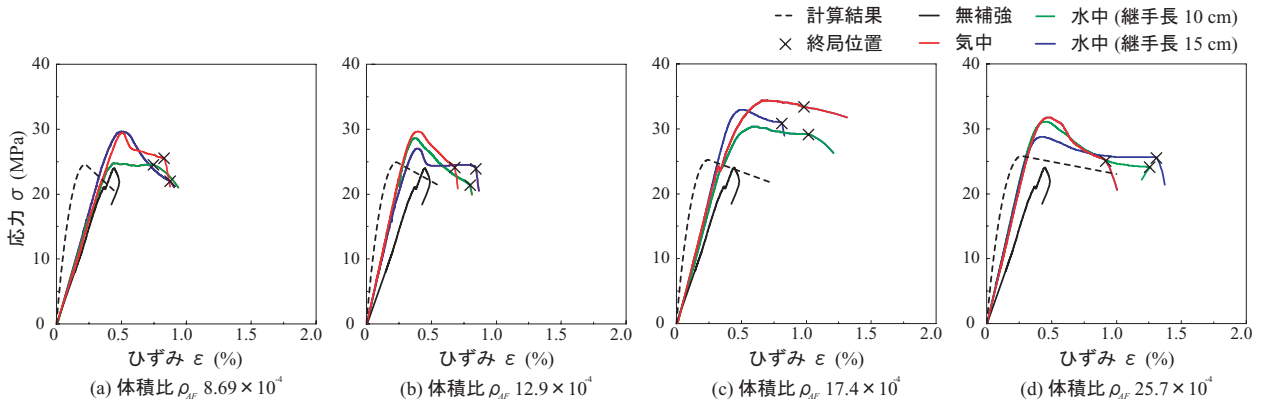


図-2 応力-ひずみ関係の比較

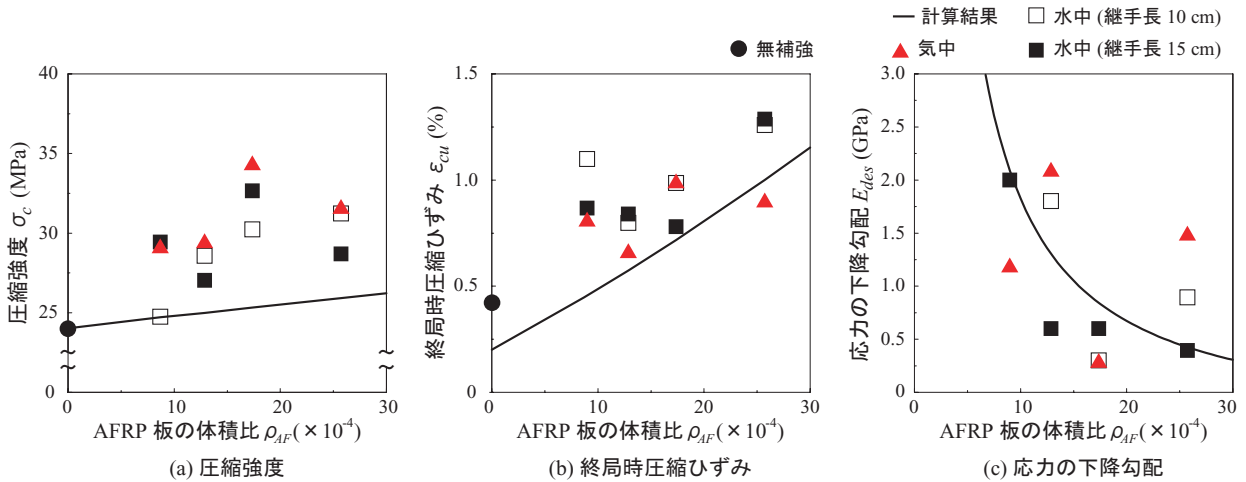


図-3 各種物理量の体積比 ρ_{AF} の比較

AFRP 板の破断位置を示している。破断位置における 1・2・3 は、図-1 に示したひずみゲージ貼付位置である。

実験結果と計算結果を比較すると、すべての試験体において、最大荷重が計算結果を上回っていることから、十分に補強がなされたことが分かる。図より、無補強の場合には、応力 $\sigma = 24$ MPa 程度までほぼ線形に荷重が増加した後、急激に低下していることが分かる。一方、補強試験体の場合には、施工・養生環境や AFRP 板幅および継手長によらず $\sigma = 24$ MPa 以降も荷重が増加し、かつ最大荷重到達後は無補強の場合よりも緩やかに荷重が低下している。また、AFRP 板の体積比 ρ_{AF} が大きくなると最大荷重到達後から終局に至るまでの応力の低下が緩やかになる傾向にあることが分かる。

また、同じ体積比であれば、気中、水中とともに同じような挙動を示していることが分かる。同様に、継手長の違いによる大きな差異は見られない。なお、すべてのケースにおいて、最終的には AFRP 板の破断により終局に至っている。

以上のことより、提案の水中巻付け補強によりコンクリート円柱の耐力および靱性を気中巻付け補強の場

合と同程度まで向上可能であることが明らかとなった。

3.2 各物理量と体積比の関係

図-3 には、各試験体の圧縮強度、終局時の圧縮ひずみおよび最大荷重後の下降勾配の実験値を体積比を横軸にとって整理した。なお、圧縮強度に関する計算結果は、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)」⁴⁾に準拠し、AFRP 補強材を弾性係数比で帯鉄筋に換算する方法で算出している。また、最大荷重後の下降勾配は、図-2 における最大荷重時と終局時の点を結んだ直線の勾配のことである。

図-3(a) より、いずれのケースにおいても AFRP 板の体積比 ρ_{AF} の増加に伴って圧縮強度 σ_c が増大する傾向にあることが分かる。また、圧縮強度 σ_c は、気中接着よりも水中接着の方が、多少小さくなる傾向にあることが分かる。ただし、いずれの試験体も計算値と同程度以上の圧縮強度 σ_c を有している。

図-3(b) には、終局時圧縮ひずみ ϵ_{cu} と体積比 ρ_{AF} との関係を示している。図より、終局時圧縮ひずみ ϵ_{cu} は、施工・養生環境や継手長によらず、AFRP 板の体積比 ρ_{AF} の

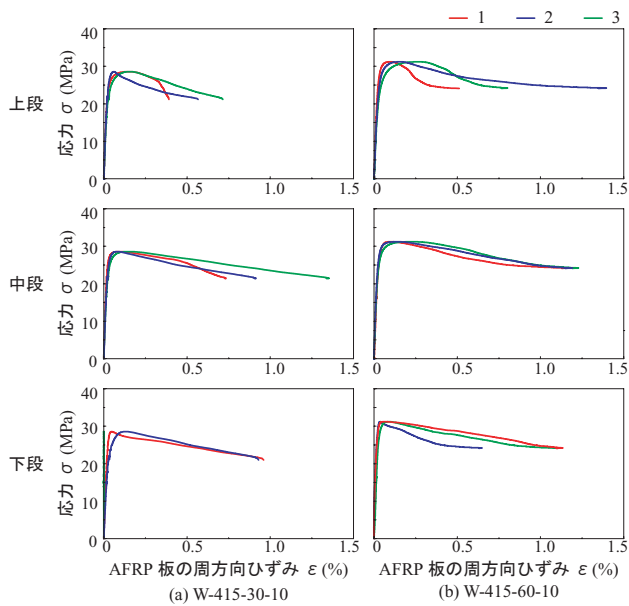


図-4 AFRP 板の周方向ひずみ分布性状の一例

増加に伴って増大する傾向にあることが分かる。従って水中接着する場合においても、気中接着の場合と同程度の靱性能向上効果が期待できるものと考えられる。また、これらの実験結果を計算結果と比較すると、A-415-60-15 試験体において実験結果が計算結果を下回る結果となった。本実験では幅 30 もしくは 60 mm の AFRP 板を帯状に巻付けて補強しているため（図-1 参照）、終局時には無補強部分においてひび割れが大きく開口し、著しく損傷することを確認している（写真-2 参照）。そのため、ひび割れ開口部近傍の AFRP 板に局所的に大きなひずみが発生して AFRP 板が破断し、計算結果よりも小さな終局時圧縮ひずみで終局に至ったものと推察される。また、今回使用したコンクリート円柱に帯鉄筋や軸方向鉄筋が配置されていないことも、計算結果より小さなひずみで終局に至ったことに関連するものと考えられる。

図-3(c)には、各試験体における応力の下降勾配 E_{des} と体積比 ρ_{AF} の関係を示している。図より、施工・養生環境や継手長によらず、体積比 ρ_{AF} の増加に伴って、下降勾配 E_{des} が低下する傾向にあることが分かる。これは前述した図-3(b)の場合と同様に、体積比 ρ_{AF} の増加によってコンクリート円柱の靱性能が向上していることを示している。

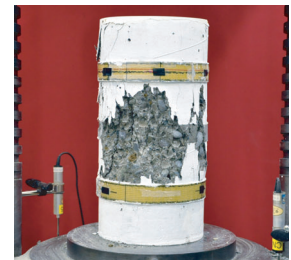
図-3(c)の実験結果と計算結果を比較すると、実験結果が計算結果を上回るケースが見受けられるが、これは無補強区間において圧縮ひずみが大きくなることや、無補強区間に発生したひび割れが AFRP 板の破断を助長することなどが要因であるものと推察される。なお、W-280-30-10 試験体においては、図-2(a)からも分かるように無補強の圧縮強度と同程度の応力レベルで圧縮ひずみが増大していることから、部分剥離やすべり等を生じている可能



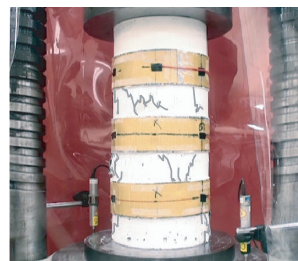
(a) 無補強試験体



(b) W-280-30-15 終局直前



(c) W-280-30-15 終局後



(d) W-280-60-10 終局直前



(e) W-280-60-10 終局後

写真-2 試験体の破壊性状の一例

性があるものと考えられる。そのため、ここでは検討から除外することとした。

以上のことから、コンクリート円柱を水中巻付け補強することにより、コンクリート円柱の耐荷力および靱性能向上効果は大きく改善されることが分かる。また、それらの効果は気中巻付け補強の場合と比較して遜色ないことが明らかになった。

3.3 AFRP 板の周方向ひずみ分布性状

図-4には、各試験体における AFRP 板の周方向ひずみ分布の一例を示している。AFRP 板のひずみ測定位置は、図-1 に示したように 1・2・3 の 3 か所であるため、必ずしも破断位置のものではない。図より、AFRP 板の周方向ひずみは最大荷重到達後、急激に増加していることが分かる。これは AFRP 板の横拘束効果は、コンクリート円柱の弾性域はもちろんのこと、塑性域において、より顕著に発揮され、無補強時に見られた急激な応力低下が抑制されたことを示しているものと考えられる。

3.4 破壊性状

写真-2には、無補強および補強試験体の破壊性状の一例を示している。写真より、無補強の場合にはポアソン効果によって横方向に開口するひび割れが卓越していることが分かる。一方、AFRP 板を用いた場合には、最大応力到達後緩やかに応力が低下する過程において無補強区間

に多数のひび割れが発生し、その後 AFRP 板の破断により終局に至っている。このことから、AFRP 板は、最大圧縮応力到達後、多数のひび割れが発生する状況下においても、効率的に横拘束効果を発揮していることが分かる。

また、(c) W-280-30-15 終局後と (e) W-280-60-10 終局後を比べると、最大荷重には大差がないものの (e) W-280-60-10 終局後の方が著しい破壊状況を示している。これは、補強量が増大すると、横方向に開口するひび割れに対する拘束効果が大きくなるため、損傷が試験体内部に蓄積されたためと考えられる。このような性状は他の補強試験体においても同様に見られた。これらのことから、補強量を大きくすることで、コンクリート円柱の圧縮性能を最大限に発揮できることが分かる。

4. まとめ

本研究では、水中硬化型接着樹脂と AFRP 板を用いた水中 RC 構造物の水中接着補強工法を確立することを目的に、AFRP 板を水中硬化型接着樹脂を用いて水中巻付け補強したコンクリート円柱の圧縮荷重試験を行った。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) AFRP 板水中巻付け補強により、コンクリート円柱の耐荷性能を気中接着の場合とほぼ同程度まで向上可能である。
- 2) いずれの補強試験体も AFRP 板の破断により終局に

至っており、継手部分の付着性能は十分確保されている。

- 3) 水中巻付け補強した円柱の実測圧縮強度は、アラミド補強研究会の設計指針に基づいて安全側に評価可能である。
- 4) AFRP 板の体積比を大きくすることにより、コンクリート円柱の耐荷性能は向上する傾向にある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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梁の補強工法設計・施工要領(案), 1998.