

補強量を変化させた AFRP 板水中巻付け補強した
コンクリート円柱の圧縮載荷実験

Uni-axial loading test of concrete cylinders reinforced winding with submerged AFRP plate varying strengthening volume

室蘭工業大学大学院 博士前期課程 ○ 学生員 河本 幸子 (Sachiko Kawamoto)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学大学院 正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
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、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。

著者らはこのような課題を解決するため、仮締切工事を必要としない水中接着補強工法を提案し、その実用化に向けて検討を行ってきた。この工法は、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する工法である。

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¹⁾。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、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を明らかにしている。しかしながら、柱部材に巻付けて補強する場合における拘束効果については未だ検証さ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、水中硬化型接着樹脂

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	0.268	2.06	118	1.75

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。

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 項目は施工・養生環境 (W: 水中, A: 気中) を、第 2 項目は繊維目付量 (単位: g/m²) を、第 3 項目は AFRP 板幅 (単位: mm) を、第 4 項目は AFRP 板の継手長 (単位: 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。

$$\rho_{AF} = \frac{4 n_p t_{AF}}{d_{AF}} \tag{1}$$

ここに、 n_p : AFRP 板の層数、 t_{AF} : AFRP 板 1 層当たりの厚さ、 d_{AF} : AFRP 板の有効長 (=コンクリート円柱の直径)、である。

図-1には、試験体の形状寸法および補強概要を示している。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 点を設定した。

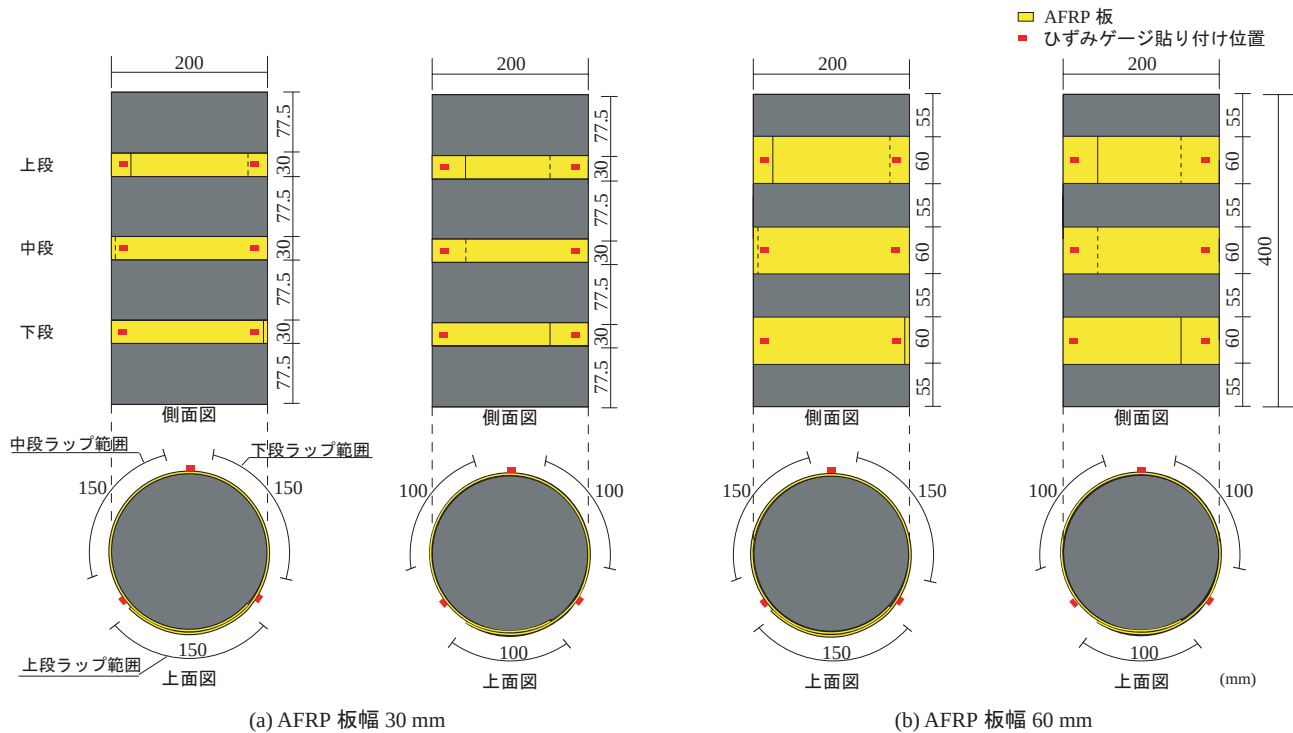
表-2には、AFRP 板の力学的特性値の一覧を示している。水中巻付け補強は、予め水没させた円柱に対し水中硬化型接着樹脂と AFRP 板を用いて行った。AFRP 板は、AFRP シートを汎用の含浸接着樹脂で硬化したものである。また、円柱試験体の AFRP 板の接着面にはサンダー処理を行った。

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

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	8.96
W-280-60-10			60		17.4
W-280-30-15			30	15	8.96
W-280-60-15			60		17.4
A-280-30-15	気中		30		8.96
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	気中		30		12.9
A-415-60-15			60		25.7



図－１ 試験体概要

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



写真－１ 試験体の設置状況

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 種混合型の液状のものをを用いている。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」²⁾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 2.0 MPa 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 (1.5 MPa) 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 10 cm 程度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 15 cm 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 4 mm 程度に成形する。
- 2) 気中で AFRP 板を所定の位置に配置し、その上に成形したパテ状接着樹脂を敷き並べて一体化させる。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施工した。また、気中接着補強は AFRP 板を汎用の含浸接着樹脂を用いて行った。

載荷実験は、容量 2,000 kN 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 AFRP 板各点の周方向ひずみである。写真－１には、実験状況を示している。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。

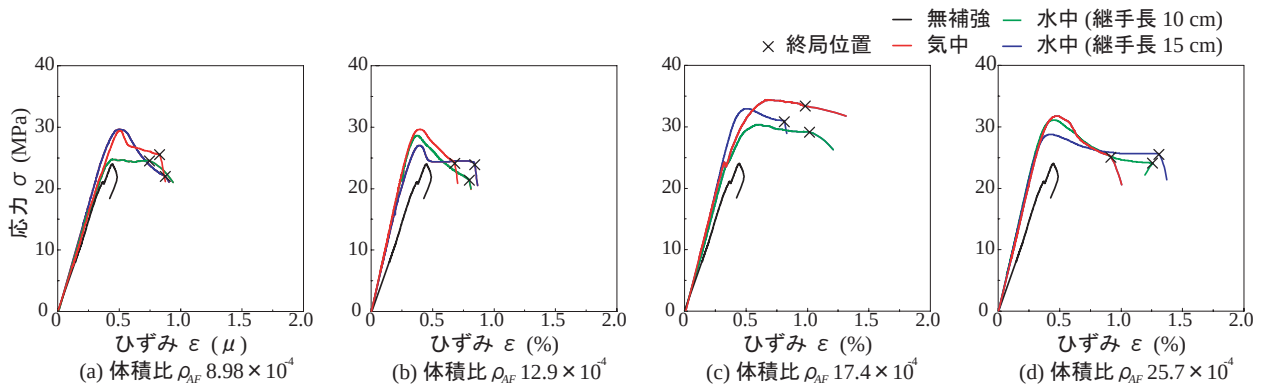
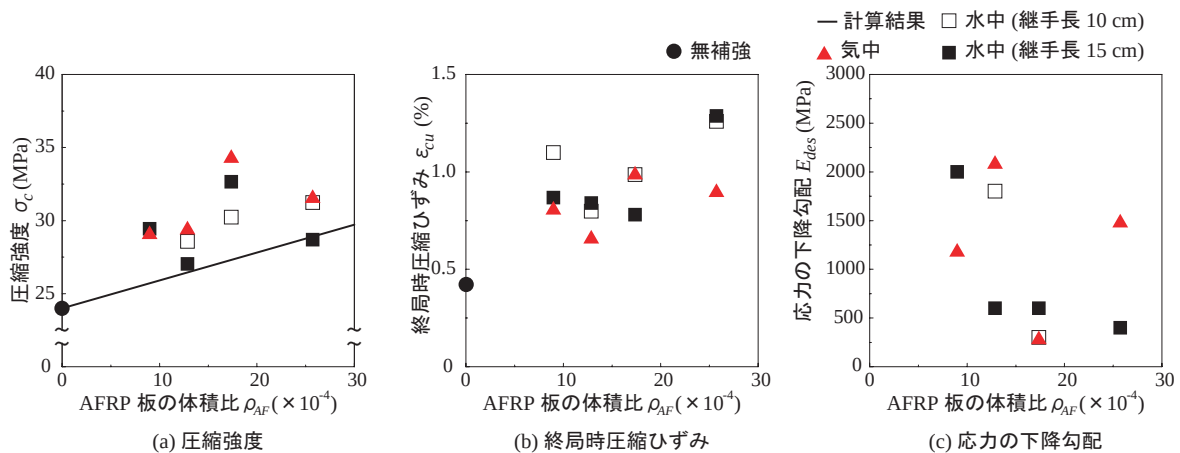


図-2 応力-ひずみ関係の比較

図-3 各種物理量の体積比 ρ_{AF} の比較

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。表-4には参考のために、実験結果および計算結果における最大荷重および圧縮強度を示している。

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} が大きいほど最大荷重後、終局に至るまでの応力の低下が緩やかであることが分かる。また、同じ体積比であれば、気中、水中ともに同じような挙動を示していることが分かる。また、継手長の違いにおいても大きな差異は見られない。なお、ほぼ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荷力および靱性能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。

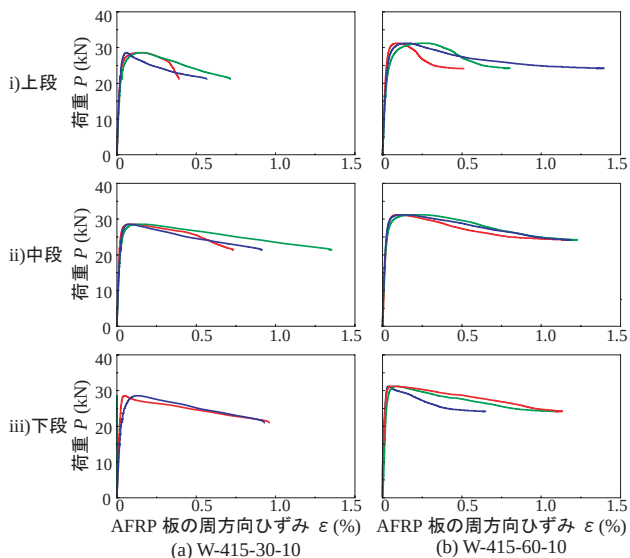
図-3には、各試験体の圧縮強度、終局時の圧縮ひずみ、および最大荷重後の下降勾配の実験値を体積比を横軸にとって整理した。なお、圧縮強度に関する計算結果は、アラミド補強研究会「アラミド繊維シートによる鉄筋コン

表-4 計算結果および実験結果の一覧

試験体名	計算結果		実験結果	
	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (MPa)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (MPa)
N	741	24.0	740	24.0
W-280-30-10	804	25.7	773	24.7
W-280-60-10	852	27.3	943	30.2
W-280-30-15	808	25.7	925	29.4
W-280-60-15	850	27.3	1018	32.7
A-280-30-15	809	25.8	914	29.2
A-280-60-15	859	27.5	1069	34.4
W-415-30-10	826	26.5	890	28.6
W-415-60-10	902	28.9	975	31.2
W-415-30-15	825	26.5	842	27.0
W-415-60-15	903	28.9	896	28.7
A-415-30-15	817	26.5	910	29.5
A-415-60-15	899	28.9	986	31.8

クリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案)」³⁾に準拠しAFRP補強材を帯鉄筋に換算する方法で算出している。

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、気中接着よりも水中接着の方が、多少圧縮強度 σ_c が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。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



図－4 AFRP 板の周方向ひずみ分布性状の一例

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。

図－3(c)には、各試験体の応力の下降勾配 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。これは前述の図－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。

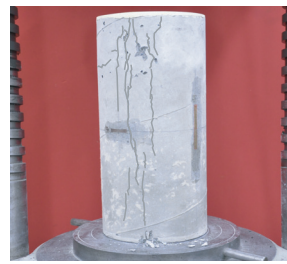
以上のことから、コンクリート円柱を水中巻付け補強することにより、コンクリート円柱の耐荷力および靱性能向上効果は大きく改善されることが分かる。また、それらの効果は気中巻付け補強の場合と比較して遜色ないことが明らかになった。

3.2 AFRP 板の周方向ひずみ分布性状

図－4には、各試験体の AFRP 板の周方向ひずみ分布の一例を示している。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わかる。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るため、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。

3.3 破壊性状

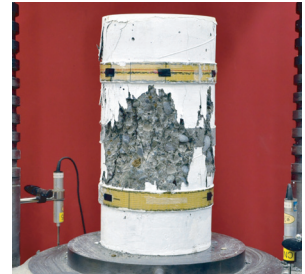
写真－2には、無補強および補強試験体の破壊性状の一例を示している。写真より、無補強の場合にはポアソン効果によって横方向に開口するひび割れが卓越していることが分かる。一方、AFRP 板を用いた場合には、最大応力到達後緩やかに応力が低下する過程において無補強区間に多数のひび割れが発生し、その後 AFRP 板の破断により終局に至っている。そのため補強試験体は施工・養



(a) 無補強試験体



(b) W-280-30-15 終局直前



(c) W-280-30-15 終局後

写真－2 試験体の破壊性状の一例

生環境や継手長によらず、著しい破壊状況を示している。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。

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載荷試験を行った。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できる。
- 4) 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。

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 梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, pp. 1327-1332, 2010.
- 2) 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.
- 3) 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.