

論文 段落とし部を有する RC 部材に接着した FRP シートの 曲げ付着性状

三上 浩*1・岸 徳光*2・竹田俊明*3・栗橋祐介*4

要旨:本研究では段落としを有する RC 部材における FRP シート曲げ補強法を確立することを目的として, RC 柱の段落とし部に接着した FRP シートの曲げ付着性状について実験的に検討を行った。本実験結果より, 1)補強後の RC 柱の耐力は, 曲げ補強に用いた FRP シートの目付量に影響を受けること, 2)シートに発生する歪分布性状は載荷荷重によって変化すること, 3)平均付着強度は段落とし近傍のピーリング現象(シートの引き剥がれ)によってシートが剥離するため, 段落としない部材よりも小さく評価されること, などが明らかになった。

キーワード: RC 柱, 段落とし, FRP シート, 曲げ補強, 平均付着強度

1. はじめに

近年, 阪神・淡路大震災を契機として地震防災の重要性が再認識されたことに伴い, 道路, 鉄道橋脚に代表される大規模インフラ施設の耐震補強工事が盛んに行われている。補強工法としては従来のコンクリート巻き立て工法や鋼板補強工法に加えて, 施工性, 耐食性に優れる繊維強化プラスチック(以下 FRP)シートを用いた補強工法も多く採用されている。著者らはこの補強工法に着目し, FRP シート巻き付けによる RC 部材のせん断補強効果や靱性能改善効果, FRP シートを部材軸方向に縦貼りすることによる曲げ補強効果¹⁾について様々な観点から検討を行ってきた。しかしながら, 曲げ補強を目的として RC 柱部材に接着した FRP シートの曲げ付着性状に関する定量的な検討は未だ不十分である。特に RC 橋脚などの段落とし部を曲げ補強する場合に着目した FRP シートの曲げ付着性状等を詳細に検討する必要がある。

このような観点から, 本研究では FRP シートを用いた段落としを有する RC 柱部材の合理的な曲げ補強法の確立を目的として, RC 柱段落とし部に接着した FRP シートの曲げ付着性状を実

験的に検討した。実験は, シートの目付量(単位面積あたりの質量)を変化させた試験体を用いて単調載荷および交番載荷で行い, 目付量と載荷方法がシートの曲げ付着性状に与える影響に着目して検討を行っている。また, 単調載荷実験ではシートの材料特性の影響も併せて検討している。

2. 実験の概要

2.1 試験体

表-1には本実験で用いた試験体の一覧を示している。試験体名の第一項目は貼り付けたシートの種類(N:無補強, A:アラミド繊維, 以下 AFRP, C:炭素繊維, 以下 CFRP)とシート目付量との組み合わせを表し, 第二項目は載荷方法(M:単調載荷, C:交番載荷)を表している。本実験では補強材として目付量の異なる 3 種類の AFRP シートを用い, 材料特性の影響を検討するために単調載荷実験にのみ CFRP シートを用いている。表-2には本実験で用いた FRP シートの力学的特性を示している。

図-1には試験体の形状寸法と配筋, FRP シートの貼り付け状況を示している。実験に用いた試験体の断面寸法は 25 × 25 cm で柱部の高さは

*1 三井建設(株)技術研究所 主席研究員 工博(正会員)

*2 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博(正会員)

*3 北海道開発局 札幌開発建設部 部長(非会員)

*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 建設工学専攻 工修(正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材	目付量 (g/m ²)	載荷方法
N-M	無補強	-	単調載荷
A200-M	AFRP	200	
A415-M		415	
A623-M		623	
C300-M	CFRP	300	
N-C	無補強	-	交番載荷
A200-C	AFRP	200	
A415-C		415	
A623-C		623	

表-2 FRP シートの力学的特性

シートの種類	目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)
AFRP	200	0.138	126.51	2.48
	415	0.286		
	623	0.429		
CFRP	300	0.167	230.46	4.07

150 cm である。本研究では段落とし部に接着した FRP シートの曲げ付着性状に着目していることより、段落としをフーチング上面から高さ 70 cm の位置に設定し、この位置で主筋を 16 本から 4 本に減少させ、FRP シート曲げ補強後も段落とし部で終局に至るように断面設計している。そのため、主筋には D16 (SD345) を用い、スターラップには D10 (SD295A) を 10 cm ピッチで配筋した。実験時におけるコンクリートの材令は 146 日、平均圧縮強度は 32.87 MPa、ポアソン比は 0.17 である。

本実験では試験体基部から高さ方向 130 cm の範囲に幅 20 cm の FRP シートを縦貼りしており、単調載荷実験では正方向の加力面に、交番載荷実験では正負方向の加力面に貼り付けている。なお、シートを接着するコンクリート面には FRP シートの付着性能の向上に有効であるブラスト処理 (処理深さ 2.1 mm) を施している。歪ゲージは段落とし部の鉄筋と FRP シートの中心線上に 10 cm 間隔および段落とし位置に貼り付けている。

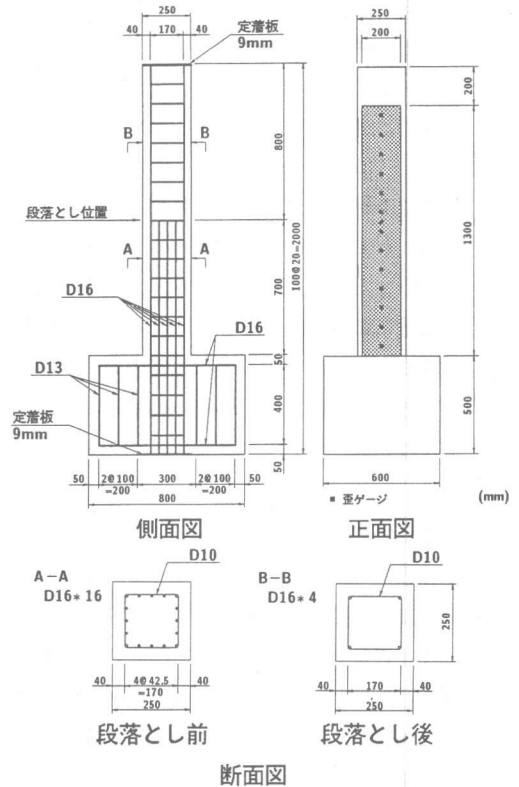


図-1 試験体の概要

2.2 実験方法

実験はジャッキ式水平繰り返し載荷装置を用いて行った。ジャッキは柱上部に取り付けた治具とジョイントを介してピン結合されており、柱が変形しても一様に水平力が作用する構造となっている。なお、加力位置は基部から 165.5 cm のピン結合部である。単調載荷実験では柱を正方向に加力してジャッキのストロークが限界に達するか、もしくは FRP シートが剥離するまで載荷を行った。交番載荷実験では試験体が補強後も段落とし部で終局に至るように設計されていることより、段落とし位置における主筋降伏時の載荷点変位 (降伏変位 δ_y) を決定した上で、 δ_y を基準にして $2\delta_y$, $3\delta_y$... と振幅を漸増させて正負方向に繰り返し載荷を行った。繰り返し回数は各振幅ごとに 3 回とし、各振幅正載荷時 1 回目の荷重が降伏変位時の荷重 (降伏荷重 P_y) を下回るか、FRP シートが剥離するまで交番載荷を行った。

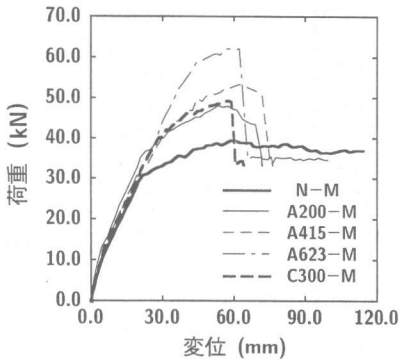


図-2 荷重-変位関係(単調載荷)

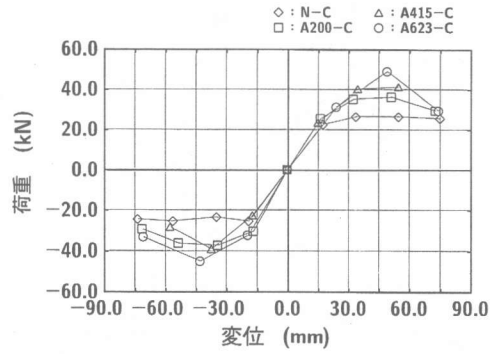


図-3 荷重-変位関係(交番載荷)

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-2に単調載荷試験体の荷重-変位関係を示す。FRPシート補強試験体の載荷荷重は、無補強試験体と異なり、主鉄筋が降伏し荷重の増加勾配が大きくなり変化した後も顕著に増大して最大荷重を示した後、シートが剝離して無補強の荷重-変位関係にすりついている。図-3に交番載荷試験体の荷重-変位関係の包絡線を示す。包絡線には各載荷振幅の正負1回目の荷重と変位を用いている。図より、無補強試験体 N-C の各振幅における荷重は $1\delta y$ 時と大差はないが、FRPシート補強試験体の場合は $1\delta y$ 以後も増加していることがわかる。また、シートの目付量の大きい試験体において各振幅時の荷重が大きく示されている。

表-3に本実験の結果を取りまとめた。表中のシート剝離時変位は、単調載荷実験ではシート剝離時の変位、交番載荷実験ではシート剝離時の変位振幅である。なお、交番載荷実験においてシートの剝離は表中の変位振幅到達前で生じているが値を切り上げて表記している。A623-M については荷重と変位の挙動は計測できたものの荷重の較正值が不確かなため () を付けた参考値とした。最大荷重は載荷方法に関わらずシートの目付量の増加とともに大きくなっている。なお、交番載荷実験の最大荷重と最大荷重時変位は、いずれの試験体でも単調載荷実験と比較して若干小さく示されている。

3.2 FRP シートの歪分布性状

図-4に単調載荷試験体の P_y , $0.9P_{max}$, P_{max}

表-3 実験結果の一覧

試験体名	主鉄筋降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (cm)	シート剝離時変位 (cm)
N-M	19.75	40.11	6.04	-
A200-M	23.15	48.05	5.59	6.76
A415-M	33.71	53.54	6.29	7.32
A623-M	(31.90)	(62.11)	6.25	6.26
C300-M	34.45	49.33	5.87	5.94
N-C	24.52	33.24	5.37	-
A200-C	26.48	39.52	5.13	(4 δy)
A415-C	26.48	44.42	5.20	(3 δy)
A623-C	31.38	50.41	4.83	(3 δy)

時におけるシートの歪分布を示す。0.9 P_{max} までの歪分布は、いずれの試験体も大略段落とし位置を頂点とした三角形分布を示している。 $P_y \sim 0.9P_{max}$ へと荷重が増加するにつれて段落とし位置の歪は大きく増加し、三角形分布の底辺に相当する歪の分布範囲も顕著に拡大している。一方、 $0.9P_{max} \sim P_{max}$ における段落とし位置の歪増分はいずれの試験体でも小さい。また、 P_{max} 時の歪分布は、目付量の少ない A200 は三角形を示しているものの、他は台形状を呈している。この時の歪の分布範囲は、段落とし上・下方に 50 ~ 60 cm にわたっている。

図-5に交番載荷試験体の P_{max} 時およびそれ以前の変位振幅における正載荷時の歪分布を示す。A200, A415 では単調載荷の $0.9P_{max}$ 時と同様に、 $2\delta y$ までは段落とし位置を頂点とする三角形分布を示している。しかし、 P_{max} においては台形状の歪分布を示し、大きな歪が発生する領域が段落

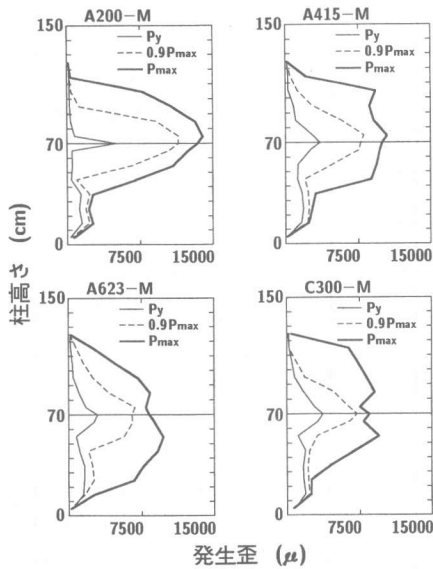


図-4 シートの歪分布(単調載荷)

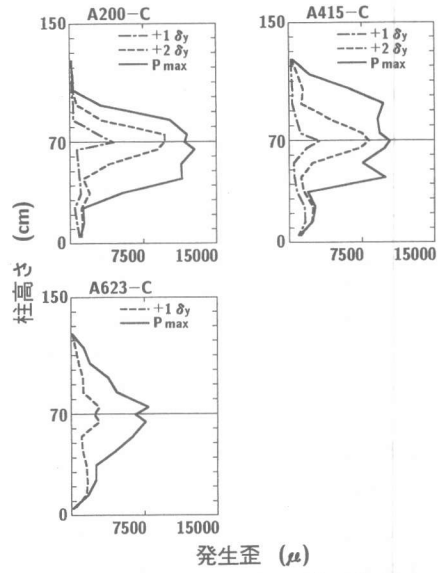


図-5 シートの歪分布(交番載荷)

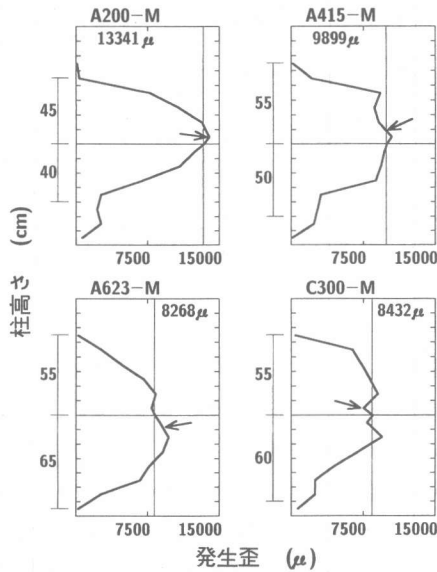


図-6 最大荷重時における
シートの歪分布(単調載荷)

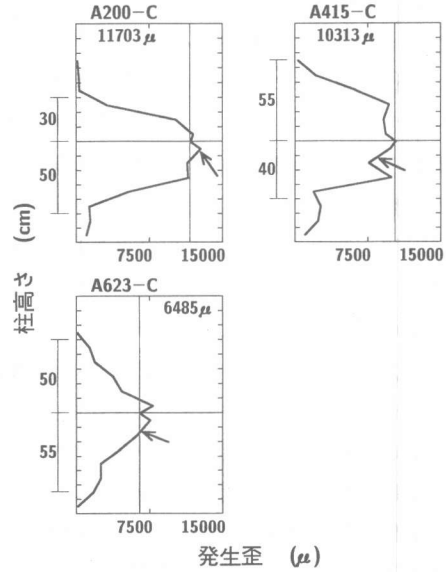


図-7 最大荷重時における
シートの歪分布(交番載荷)

としの上・下方に大きく拡大している。一方、A623はPmaxにおいても三角形分布を示している。Pmaxにおける大きな歪の発生領域は、目付量の少ないA200の段落とし上方で30cm程度と他に比べて小さい他は、段落とし上・下方に50cm程度であり、この範囲は単調載荷実験結果とほぼ同等である。

3.3 FRPシートの曲げ付着性状

図-6,7に単調載荷試験体および交番載荷試

験体の最大荷重時における実測のシートの歪分布を再掲する。また、実験時のひび割れなどの観察結果を基にして後述するピーリング(引き剥がれ)現象の起点となった位置を矢印で示している。なお、図中には付着強度を算定するために、段落とし部の歪および段落とし部から歪が基部もしくは柱上端部に向かって線形に低下すると仮定した場合の零歪位置までの距離(以下、付着抵抗長さ)を明記している。図より、シートの目付量が等

表-4 FRP シートの曲げ付着特性

試験体名	段落とし部歪 (μ)	発生引張力 (kN/cm)	平均付着抵抗長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)
A200-M	13341	2.33	42.5	0.55
A415-M	9899	3.58	52.5	0.68
A623-M	8268	4.49	60.0	0.75
C300-M	8432	3.25	57.5	0.57
A200-C	11703	2.04	40.0	0.51
A415-C	10313	3.73	47.5	0.79
A623-C	6485	3.52	52.5	0.67

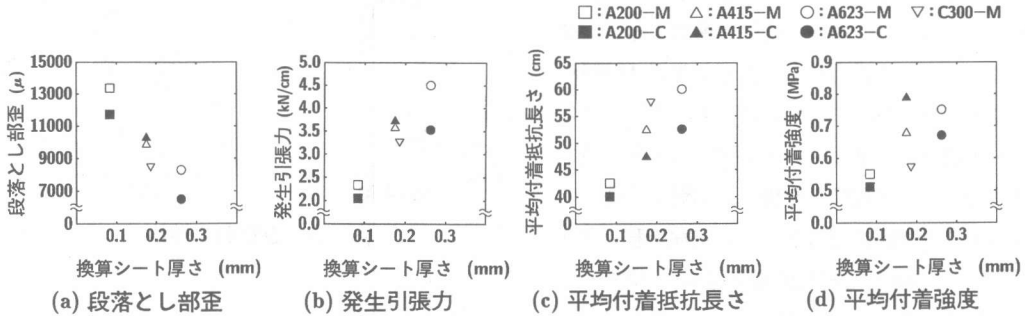


図-8 FRP シートの曲げ付着特性図

しい場合には A623 を除いて歪の分布性状は載荷方法に関わらずほぼ同様であることがわかる。なお、図中矢印で示したピーリング現象の起点は、いずれの試験体においても段落とし部の上方もしくは下方 10 cm 程度の位置であった。その後、荷重の増加とともにピーリングによる剝離範囲が拡大し、最大荷重時には図のような台形分布を示している。この傾向は、A623-C を除き目付量の多い場合ほど顕著である。

表-4 に図-6, 7 から求められるシートの曲げ付着特性を整理した。表中、発生引張力は段落とし部歪にシートの弾性係数とシート厚さを乗じたものであり、平均付着抵抗長さは段落とし上方と下方の付着抵抗長さの平均値である。また、平均付着強度は発生引張力を平均付着抵抗長さで除したものである。また、図-8 にはシートの曲げ付着特性と換算シート厚さとの関係を示している。換算シート厚さ (以下、シート厚さ) は鋼材との弾性係数比を考慮したシートの厚さである。なお、図中、単調載荷実験の結果は白抜き、交番載荷実験の結果は黒塗りの印で示している。

(a) 図より、段落とし部歪は実験方法に関わら

ずシート厚さの増加に対応して減少していることがわかる。なお、A415-M と引張軸剛性がほぼ同程度である C300-M の段落とし部歪は A415-M の 85 % 程度と小さい。(b) 図より、発生引張力は単調載荷ではシート厚さの増加に対応してほぼ線形に増加している。一方、交番載荷ではシート厚さが 0.1 ~ 0.2 mm の範囲ではシート厚さの増加に対応して増加しているが、約 0.3 mm と厚くなると発生引張力は若干小さくなっている。なお、A415-M に比べて C300-M の発生引張力は 90 % 程度であった。(c) 図より、平均付着抵抗長さは総じて単調載荷の場合が交番載荷の場合よりも大きい。また、載荷方法に依らずシート厚さの増加に対応して平均付着抵抗長さは増大している。C300-M の平均付着抵抗長さは A415-M よりも 1 割程度大きい。(d) 図より、平均付着強度は単調載荷ではシート厚さの増加に対応して増加しており、シート厚さが約 0.3 mm の場合は約 0.1 mm と比較して 1.4 倍程度の値を示している。一方、交番載荷では 0.2 ~ 0.3 mm とシート厚さが増加するとともに平均付着強度は低下している。なお、C300-M の方が A415-M よりも発生引張力が小さ

いため平均付着強度は小さくなっている。ここで、既存の文献²⁾では FRP シートの許容付着強度を 0.44 MPa と規定しているが、本実験結果からもこの規定値は安全側と考えられる。

3.4 破壊性状

図-9に A200-M および A200-C の実験終了後における破壊状況を示す。単調載荷した A200-M では段落とし位置から上・下方 10 ~ 15 cm の範囲に発生した曲げひびわれが斜めひびわれへと移行している。その後は変位の増加に伴い、加力面の段落とし位置近傍に発生した曲げひび割れおよび斜めひび割れの交叉により形成されたコンクリート塊が曲げ補強シートを押し出す形で引き剥がすピーリング現象が発生し、剥離が進展してシートの完全剥離に至った。この破壊過程は FRP シートで補強した両端単純支持 RC 梁の一点載荷実験³⁾の場合と極めて類似している。

一方、曲げ交番載荷した A200-C では正負加力面から発生した曲げひびわれが、断面中央部で交叉する様な形で斜めひびわれへと進展した。また、その後は単調載荷の場合と同様正負加力面の段落とし位置近傍のコンクリート塊がシートを押し出し引き剥がすピーリング現象が起り、最終的にシートが全面剥離している。なお、無補強試験体と FRP シート補強試験体の曲げひび割れ本数は、載荷方法やシートの目付量によらずほぼ同程度であった。両端単純支持 RC 梁などでは、シートを貼り付けることで曲げひびわれの分散効果が期待できるが、本実験の場合にはその効果が発揮される前に段落とし部においてピーリング現象が生じてシートが剥離したものと考えられる。そのため、文献³⁾における平均付着強度が 1.0 ~ 1.2 MPa であるのに対して低い値を示したものと考えられる。

4. まとめ

本実験では、段落としを有する RC 柱に FRP シートを縦貼りして 2 種類の載荷方法で実験を行い、FRP シートの曲げ付着性状を検討した。本実験の範囲内で明らかになったことを要約すると

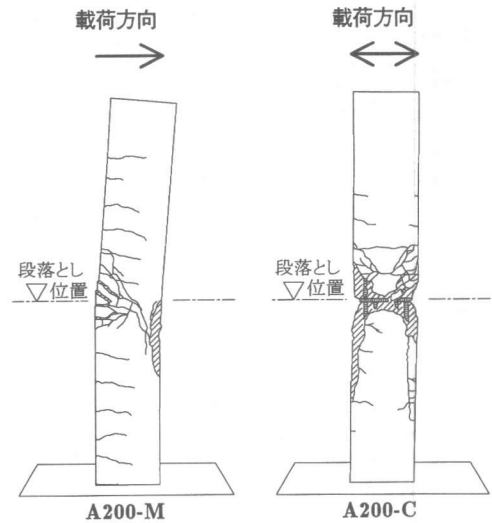


図-9 ひびわれ性状

以下のとおりである。

- (1) シート補強 RC 柱の耐力は載荷方法によらずシート目付量の増加に対応して増大するが、いずれもシートの剥離で破壊する。
- (2) シートの歪分布は低荷重時には段落としを頂点とする三角形形状を示し、剥離直前には台形状の分布に移行する。
- (3) 段落としを有する RC 柱に接着した FRP シートの平均付着強度は、段落とし部周辺のピーリング作用によって剥離が早期に進展するため、段落としの無い部材よりも小さくなる。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着性状に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.45A, pp.1399-1410, 1999.3.
- 2) 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), 1997.
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 池田憲二, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁の偏心載荷下における耐荷性状, 土木学会構造工学論文集, Vol.46A, pp.1175-1182, 2000.3.