

論文 RC 柱の段落し部における FRP シートの曲げ付着特性

中島規道*1・三上 浩*2・竹田俊明*3・岸 徳光*4

要旨：段落し部を有する RC 柱に接着した FRP シートの曲げ付着特性を検討するため、シート補強量を変化させた曲げ補強 RC 柱の水平単調載荷実験を行った。検討の結果、RC 柱の耐荷性状やシートの付着特性には、段落し部近傍に形成されたコンクリートブロックがシートを押し出すピーリング作用や段落し部を境に発生するせん断ずれ量の増大が影響を与え、単純支持 RC 梁を FRP シートで曲げ補強した場合の破壊性状とは異なることが明らかとなった。

キーワード：RC 柱、段落し部、FRP シート、ピーリング作用、せん断ずれ

1. はじめに

近年、阪神・淡路大震災を教訓に地震防災の重要性が再認識される中で、鉄道・道路橋脚等の既存 RC 構造物を対象とした耐震補強工事が各地で盛んに行われている。特に施工性、耐食性に優れている連続繊維シート（以下、FRP シートまたは単にシート）を用いた接着工法が数多く採用されるようになってきた。著者等は、これまで FRP シートで曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を実施し、FRP シートの曲げ補強効果やシートの剝離性状に関する検討を行なっている^{例えは 1)}。その結果、両端単純支持 RC 梁に接着した FRP シートの剝離挙動は主鉄筋の降伏範囲の拡大とそれに関連して生じる下縁かぶりコンクリート部のひびわれ性状に大きく影響されることを明らかにしている。一方、単一 RC 柱のような片持ち梁状態の部材を FRP シートで曲げ補強した場合の研究例は少なく、特に既存 RC 橋脚等の段落し部を曲げ補強する場合を想定した FRP シートの曲げ補強効果や曲げ付着特性に関する検討は未だ十分とはいえない。

本研究では、FRP シートを用いた段落し部を有する RC 柱の合理的な曲げ補強設計手法を確立することを目的として、FRP シートで曲げ補強

した RC 柱の水平単調載荷実験を行なった。なお、本実験ではシート補強量の異なる試験体を用い、荷重-変位関係および柱高さ方向の変位分布の実測値と計算値の比較、主鉄筋および FRP シートの歪分布性状に着目し RC 柱の耐荷性状やシートの付着特性を検討している。

2. 実験概要

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、無補強試験体および FRP シートの補強量を3種類に変化させた曲げ補強試験体の全4体である。なお、本実験に用いた FRP シートは全てアラミド繊維製 FRP (以後、AFRP) シートである。表中、試験体名は貼り付けたシート材料の頭文字 A と繊維目付量の組合せによって表わしている。また、無補強試験体の場合は N としている。

図-1には、試験体の形状寸法と配筋および A FRP シートの接着状況を示している。実験に用いた試験体の断面寸法は 25 cm × 25 cm で、フーチングからの柱高さは 150 cm である。本実験では、段落し部におけるシートの曲げ付着特性に着目した検討を行うため、シート補強後も段落し部の主鉄筋の降伏が先行するように断面設計を行

*1 三井建設(株)東京土木支店 工修(正会員)

*2 三井建設(株)技術研究所主席研究員 工博(正会員)

*3 北海道開発局 部長 札幌開発建設部

*4 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)

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材	繊維目付量 (g/m^2)
N	-	-
A200	AFRP シート	200
A415		415
A830		830(415 × 2)

表-2 AFRP シートの力学的特性

繊維目付量 (g/m^2)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
200	0.138	1.31	2.48	1.89
415	0.286			

なっている。そのため、段落し部を基部より 70 cm の位置に設定し、その位置で軸方向筋を 16 本から 4 本に減少させている。軸方向筋には 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。AFRP シートは、試験体基部から柱高さ 130 cm までの範囲に幅 20 cm で圧縮および引張力作用面の両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の表面には、付着性能の向上に有効なブラスト処理を施している。

引張力作用面の FRP シート上および引張側軸方向筋 1 本には、それぞれ検長 10 mm, 1 mm の歪ゲージを段落し部より上・下方向に 10 cm 間隔で貼り付けている。また、柱高さ方向の変位分布を測定するため、段落し部より上・下方向に 20 cm 間隔でレーザ式変位計を設置している。本研究では、特に段落し近傍部の柱の変形状態に注目していることより、基部における軸方向筋の抜け出し量をレーザ式変位計によって測定し、実測の変位量から抜け出しの影響による変位量を差し引いた値を変位量として評価している。そのため、計算変位の算出には基部における軸方向筋の抜け出しを考慮していない。実験時のコンクリートの材令は 77 ~ 102 日、平均圧縮強度は 24.4 MPa であった。また、軸方向筋の降伏強度は引張試験より 380.4 MPa であった。表-2 には、本実験に用いた AFRP シートの引張試験結果に基づく力学的特性を示している。

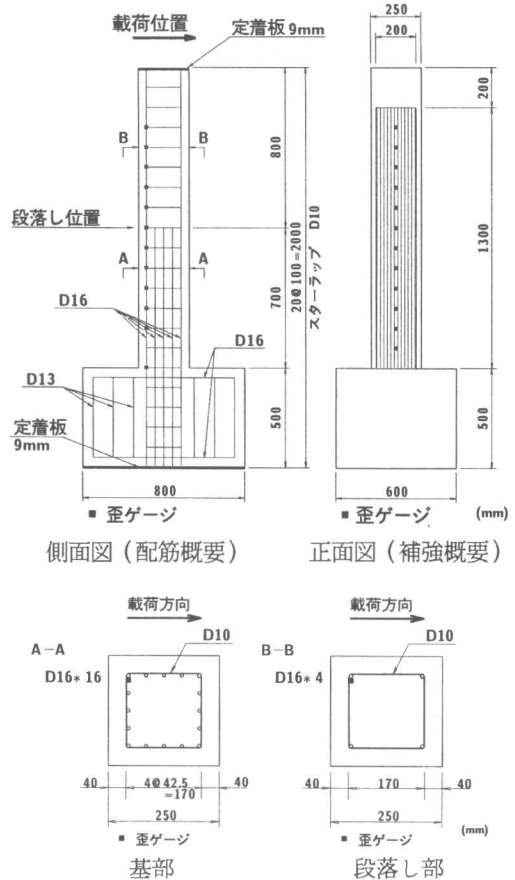


図-1 試験体の概要

3. 実験結果

3.1 荷重-変位曲線

図-2 には、各試験体における荷重-変位曲線の実験結果を計算結果と比較して示している。なお、荷重点変位の測定に不具合が生じた実験ケースがあったため、全実験ケースで柱頭部より 20 cm 下方の変位を用いている。計算は前述した各材料の特性値を用いて断面分割法により、圧縮縁コンクリート歪が終局圧縮歪である $3,500 \mu$ に至るまで行なっている。段落し部を有する RC 柱の曲げ設計は段落し位置が実際よりも軸方向筋の定着長分だけ低い位置 (照査段落し位置) にあるものとして実施するのが一般的であり、安全側であることが知られている。しかしながら、実挙動を正確に把握するためには実験値と計算値が整合

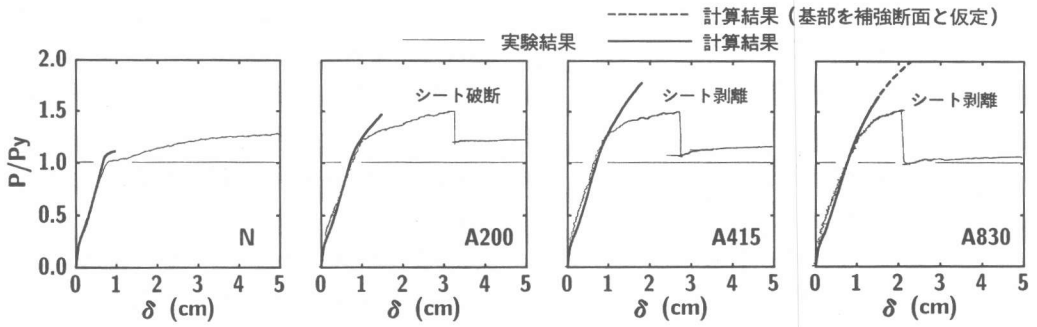


図-2 荷重-変位曲線の実験および計算結果

表-3 段落し部の主鉄筋降伏荷重の一覧

試験体名	実験値 P_{ye} (kN)	計算値 P_{yc} (kN)	P_{ye}/P_{yc}
N	29.2	27.9	1.05
A200	31.4	30.3	1.04
A415	32.2	31.8	1.01
A830	36.2	35.9	1.01

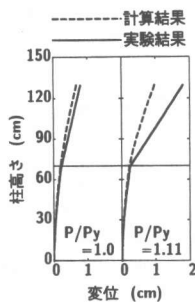
していることが重要であり、かつ無補強試験体の実験結果と実段落し位置を基に計算した結果が比較的良好に対応していたことから、本研究では照査段落し位置を考慮せずに計算することとした。本実験では AFRP シートをフーチング部に定着していないことより、計算の際には基部断面を無補強断面として取り扱っている。なお、実験では全ての RC 柱において段落し部の損傷により終局に至っているが、A830 試験体は計算上基部破壊となる。従って、実験と計算結果の破壊形式を対応させて検討するため、A830 試験体に関しては基部断面を補強断面と仮定して、段落し部破壊先行となる場合の計算結果についても示している。

本研究では、特に主鉄筋降伏後のシートの曲げ補強効果に着目して検討を行うこととし、実験および計算結果の荷重値はそれぞれの降伏荷重で無次元化している。表-3には、各試験体に関する段落し部における主鉄筋降伏荷重の実験および計算結果とそれらの比（以後、降伏荷重比）の一覧を示している。表より、降伏荷重は実験値および計算値ともに補強量の多い場合ほど大きいことより、多少なりとも降伏荷重に関するシートの補強効果を確認できる。また、降伏荷重比はいずれの

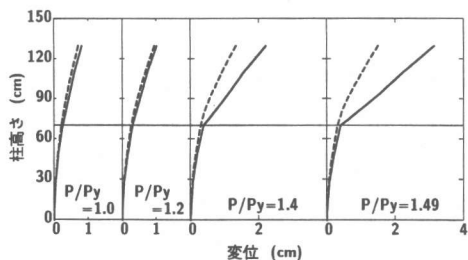
試験体も 1.0 程度であり、実段落し位置を用いた断面分割法による計算結果は主鉄筋降伏時までの実験結果を精度良く再現していることが分かる。

図-2より、AFRP シート補強した試験体は、無補強の場合と異なり、総じて段落し部の主鉄筋降伏後においても荷重がほぼ初期剛性を保った状態で増大していることが分かる。その後、剛性勾配が低下し、最終的にシートの剥離もしくは破断により終局に至っている。なお、実験結果は、計算結果と比較して早期に剛性勾配が大きく低下しており、計算上の仮定と異なった性状を示している。この勾配の低下は、後述するように主鉄筋降伏後の段落し部近傍の引張縁かぶり部に形成されたコンクリートブロックがシートを押し出して引き剥がすピーリング作用や、段落し部を境にしたせん断ずれの影響によるものと考えられる。

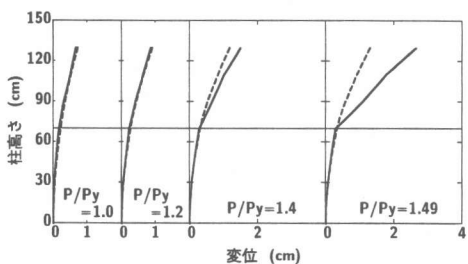
補強量の最も少ない A200 試験体の実測最大荷重は計算最大荷重を若干上回るものの、最大荷重時変位は実験値と計算値で大きく異なっている。また、A200 試験体はシート補強量が少ないためにシート破断で終局に至っている。A415 試験体の実測最大荷重は計算最大荷重を大きく下回り、シート剥離によって終局に至っている。一方、A830 試験体は計算的には基部の圧縮破壊で終局に至るが、実験では基部破壊に先行して段落し部におけるピーリング作用やせん断ずれ量の拡大にともなうシート剥離により終局に至っている。なお、実測最大荷重は、段落し部の破壊を想定した計算最大荷重を大幅に下回っている他、基部破壊を想定した場合よりも小さい。



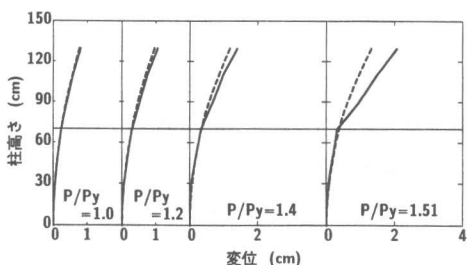
(a) N 試験体



(b) A200 試験体



(c) A415 試験体



(d) A830 試験体

図-3 各荷重段階における変位分布性状

3.2 変位分布性状

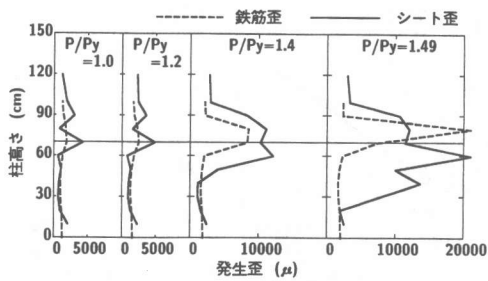
図-3には、柱高さ方向における変位分布の実験結果を、各荷重段階毎に断面分割法による計算結果と比較して示している。荷重段階は、無次元荷重 $P/P_y = 1.0, 1.2, 1.4$ およびシート破断時もしくはシート剝離時としている。なお、A200 試験体ではシート破断時の荷重が計算最大荷重より

も若干大きいものの大差がないため、計算最大荷重時の変位分布性状と比較している。また、無補強試験体については主鉄筋降伏時および計算最大荷重時についてのみ示している。

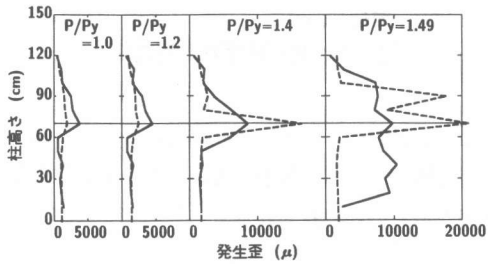
図より、N 試験体は主鉄筋降伏直後 ($P/P_y = 1.11$) に段落し部において角折れし、計算結果と異なる変位分布性状を示しているのに対して、A FRP シート補強した試験体は $P/P_y = 1.2$ の時点においても著しい角折れは見られず、計算結果と実験結果はほぼ対応していることが分かる。一方、 $P/P_y = 1.4$ からシート破断時もしくは剝離時にかけて、実験結果は段落し部を基点として徐々に角折れが進行し、計算結果と対応しなくなる傾向にある。また、この傾向は目付量の少ないシートを用いる場合ほど顕著である。これは、シートの目付量が少ないほど、1) 曲げ剛性が小さいために角折れしやすく、2) 引張縁かぶり部のコンクリートブロックによるシートの押し出し作用の影響を受けて、3) 結果としてピーリング作用による部分剝離が発生し、4) 同時にせん断ずれが生じやすくなるため、と考えられる。このように、シートの目付量が少ないほど相乗的に角折れやせん断ずれの程度が大きくなり、計算値に比べてより大きな変位を示すものと考えられる。

3.3 歪分布性状

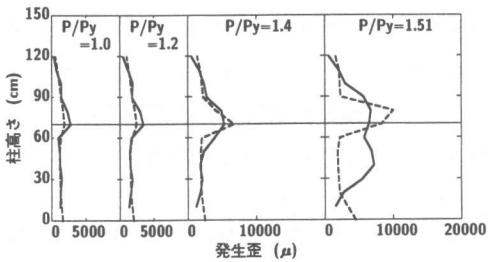
図-4には図-3と同様の荷重段階におけるシート補強試験体の主鉄筋および引張縁のシートの歪分布を示している。図より、いずれの試験体も $P/P_y = 1.0$ および 1.2 の時点において主鉄筋歪が顕著に増加する傾向は見られない。これらの歪分布から、RC 柱の段落し部を AFRP シートで曲げ補強した試験体は、無補強試験体に見られるような主鉄筋降伏直後の段落し部を基点とした角折れやそれに伴うひびわれの開口が抑制されていることが分かる。一方、 $P/P_y = 1.4$ の時点では段落し部の主鉄筋の歪が急激に増大し、それに伴いシートの歪も増大している。また、シートに発生する大きな歪の分布範囲が段落し部を基点として柱上下方向に拡大していることが確認できる。なお、この傾向は、A200 試験体の場合が、荷重が



(a) A200 試験体



(b) A415 試験体



(c) A830 試験体

図-4 各荷重段階における歪分布性状

小さいにも拘わらず最も顕著である。これは、前述したようにシートの目付量が少ない A200 試験体でピーリング作用やせん断ずれの影響が最も顕著に出現するためと考えられる。

A200 試験体のシート破断時における段落し部の主鉄筋歪は、段落し部より若干上方で最大値を示し、降伏範囲が段落し部近傍のみの狭い領域であることが分かる。一方、AFRP シートの歪は段落し部近傍で最大 20,000 μ を示し、シートが破断したことが伺われる。なお、シートが大きな歪を示す領域は段落し部より下方に分布している。

A415 試験体のシート剥離時の主鉄筋歪は、段落し部より若干上方で大きく A200 試験体よりも降伏領域が広がっている。なお、A415 試験体の主鉄筋歪が段落し部よりも若干上方で大きいこと

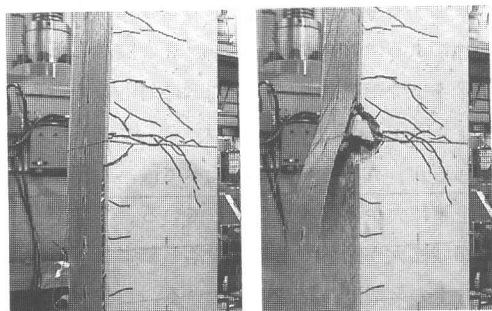
は、後述する写真-1に見られるように、斜めひびわれによるコンクリートブロックが段落し部より若干上方で形成されていることに対応している。一方、AFRP シートの歪は最大でも 10,000 μ 以下であるが、A200 試験体に比べて段落し部を中心に上下に大歪の領域が拡大している。特に下方への領域拡大が顕著であり、段落し部より下方でのシートの剝離破壊を暗示している。

A830 試験体のシート剥離時における段落し部の主鉄筋歪は、荷重が最も大きいにも拘わらず他試験体よりも小さく、一方で柱基部の主鉄筋歪は 4,500 μ 程度と他よりも大きい。これは、シート剥離時近傍において、試験体の破壊が段落し部から基部に移行しつつあったことを示している。一方、シート歪は最大でも 6,500 μ 程度であり、段落し部近傍における主鉄筋歪よりも小さい。なお、シートが大きな歪を示す領域は A415 試験体に比較して拡大していないが、この場合も段落し部より下方に拡大する傾向が見られる。これより、A830 試験体の場合も段落し部より下方においてシートの剝離破壊が発生したことが伺える。

著者等の既往の研究結果¹⁾より、FRP シートで曲げ補強した単純支持 RC 梁におけるシートの剝離現象は、主鉄筋の降伏領域の拡大と密接に関連していることが明らかとなっている。しかしながら、本実験結果では主鉄筋の降伏領域の拡大が顕著ではないことより、シートの剝離に影響を与える要因が他にあるものと考えられる。

3.4 破壊性状

写真-1は、A415 試験体の計算終局時近傍とシート剥離時のひびわれ、シートの剝離、柱の変形状況を示している。終局時近傍のひびわれ状況より、柱には曲げひびわれとともに断面中央部から斜めひびわれが進展しており、せん断ひびわれの発生も確認できる。また、シート剥離時の状況から、段落し部にコンクリートブロックが形成されピーリング作用によってシートの剝離が助長されている傾向を伺わせる。また、柱上部は、視覚的に段落し部を境にした右方向の角折れとせん断ずれを捉えることができる。このような状況を変



(a) 終局時近傍 (b) シート剥離時

写真-1 破壊状況 (A415 試験体)

位分布から考察することとする。

図-5には、A415 および A830 試験体のシート剥離時における柱の変位分布を再掲している。図中、0-①-②の曲線は計算変位分布であり、①'-③曲線は②点と実測変位分布の最上部(③点)を一致させ、①-②曲線に角折れによる線形な変位成分を加えて実測変位分布にすり付けたものである。これより、段落し部における折れ角は、①-②曲線の①点の接線勾配から、①'-③曲線の①'点の接線勾配を差し引くことより求まる。また、段落し部のせん断ずれは、段落し部の実測変位と①'のその差分として評価される。

このような変形性状やシート補強試験体の側面のひびわれおよび歪分布の検討結果から、段落し部を有する RC 柱に接着した FRP シートの剥離メカニズムは、下記のように推察される。すなわち、1) 段落し部に曲げひびわれが発生し、かぶりコンクリート部には角折れの進行とともに斜めひびわれが生じて、引張縁かぶり部にコンクリートブロックが形成される、2) シートがコンクリートブロックによって押し出されて部分的に剥離して角折れがさらに助長される、3) 角折れの進行とともに段落し部を境にして柱上方が水平方向にせん断ずれを起こす、4) 角折れやせん断ずれ量が大きくなり、段落し部より下方で広域的なピーリングが発生しシート剥離に至る、である。従って、段落し部を有する RC 柱に接着したシートの剥離は、段落し部を起点とした角折れやそれに伴って生じるピーリング作用およびせん断ずれ

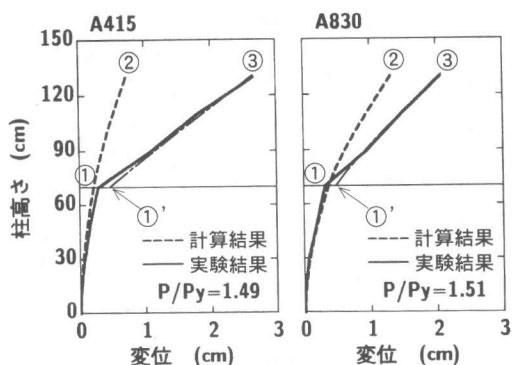


図-5 せん断ずれの模式図

の増大が複合的に影響しているものと考えられ、単純支持 RC 梁に接着したシートの剥離挙動とは異なるものと判断される。

4. まとめ

段落し部を有する RC 柱を FRP シートで曲げ補強した場合のシートの曲げ補強効果や剥離性状を、シート補強量を変化させた試験体を用いて検討した。本研究で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) FRP シートで曲げ補強した RC 柱の降伏荷重は実段落し位置を用いた断面分割法で精度良く算定できる。
- 2) シート補強量が小さいほど実測最大荷重と計算最大荷重は対応するが、終局変位は実験値と計算値で大きく異なる。
- 3) 段落し部を有する RC 柱に接着したシートの剥離は段落し部近傍に形成されるコンクリートブロックがシートを押し出し引き剥がすピーリング作用や、段落し部を境にしたせん断ずれ量の増大が複合的に影響して生じるものと考えられ、両端単純支持 RC 梁に接着したシートの剥離メカニズムとは異なる。

参考文献

- 1) 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-span方向向心載荷時における耐荷性状, 構造工学論文集, Vol.46A, pp. 1175-1182, 2000.