

定変位繰り返し载荷を受ける AFRP シート曲げ補強 RC 柱の
段落し部における曲げ付着特性

Flexural Bonding Property of AFRP sheet Bonded RC Column with Rebar Stepped Arrangement
under Constant-Amplitude Cyclic Loading

室蘭工業大学
三井建設(株)
室蘭工業大学
室蘭工業大学

正員
フェロー
学生員
○学生員

岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三上 浩 (Hiroshi Mikami)
栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)

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行われている。特に施工性、耐食性に優れる連続繊維シート（以下、FRP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段落し部を有するRC柱の水平単調载荷実験を実施し、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ってきた¹⁾。その結果、RC柱に接着したFRPシートの剝離は段落し部近傍のかぶりコンクリート部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て引き剝がすピーリング作用やせん断ずれの拡大によって生じることなどを明らかにしている。

本研究では、段落し部近傍におけるシートの剝離進展状況やそれに伴うRC柱の耐荷性能の変遷を検討するため、FRPシートで曲げ補強したRC柱の水平単調载荷および定変位繰り返し载荷(以後、単に繰り返し载荷)実験を行った。

2. 実験概要

2.1. 試験体の概要

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、単調载荷試験体および変位振幅を3種類に変化させた繰り返し载荷試験体の全4体である。表中、試験体名は単調载荷する場合をMとし、繰り返し载荷する場合はCと変位振幅(降伏変位 δ_y の倍数)の組合せによって表わしている。

図-1には、試験体の形状寸法および配筋、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25cm×25cmでフーチングからの柱高さは146.5cm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ているため、シート補強後も段落し部で終局に至るように断面設計を行なっている。そのため、段落し位置を基部より70cmの位置に設定し、その位置で主鉄筋を16本から4本に減少させている。主鉄筋にはD16(SD345)を用い、スターラップにはD10(SD295A)を10cm間隔で配筋した。本実験に用いたFRPシートはアラミド繊維製FRPシート(以後、AFRPシート)である。AFRPシートは、試験体基

表-1 試験体の一覧

試験体名	载荷方法	载荷変位
M	単調载荷	-
C2.0	定変位繰り返し载荷	2.0 δ_y
C2.5		2.5 δ_y
C3.0		3.0 δ_y

表-2 AFRP シートの力学的特性

繊維目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	0.286	2.48	131	1.89

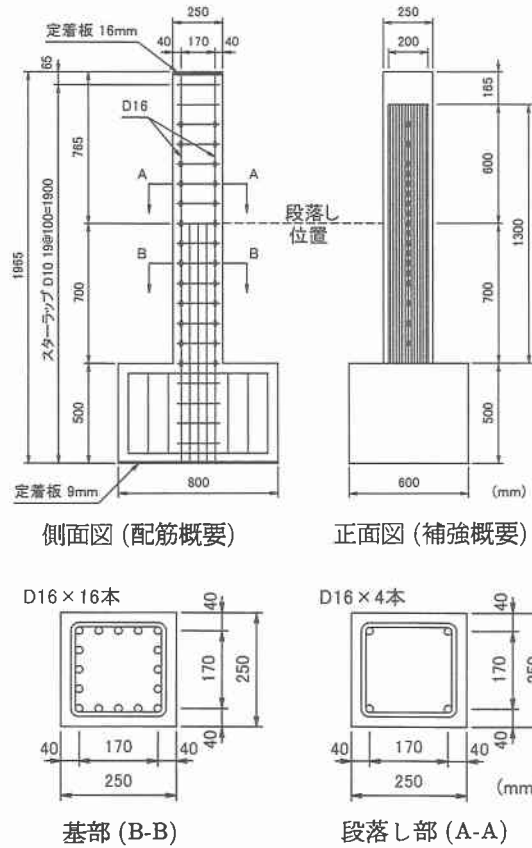
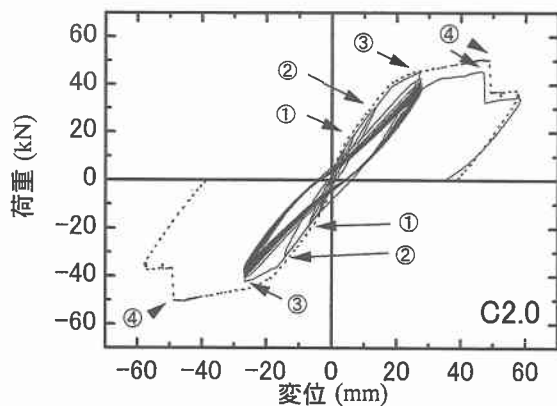


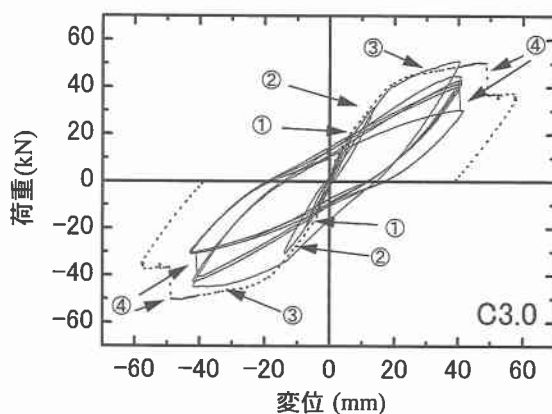
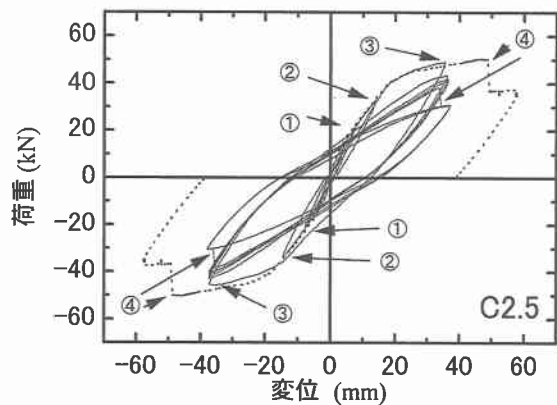
図-1 試験体の概要

部から高さ方向130cmの範囲に幅20cmで圧縮面、引張面の両面に貼り付けている。ひずみゲージは、FRPシートの中心線上に段落し部より上・下方向に30cmの範



- ①予備載荷
- ②降伏載荷
- ③繰返し載荷1サイクル目
- ④シート剥離

..... 単調載荷実験の結果



図－2 荷重－変位曲線

囲までは 5 cm 間隔で、その外側の範囲には 10 cm 間隔で貼り付けている。実験時におけるコンクリートの材令は 132 ～ 149 日、平均圧縮強度は 27.9 MPa であった。また、主鉄筋の降伏強度は引張試験より 399.1 MPa であった。表－2 には AFRP シートの材料特性値を一覧にして示している。

2.2. 実験方法

単調載荷実験の場合は、柱を一方向（正方向と呼ぶ）に加力し、シートが剥離した時点で実験を終了している。繰返し載荷実験の場合は、まず主鉄筋のひずみが降伏ひずみの 1/4、1/2 に達するまでそれぞれ正負方向の載荷（以後、予備載荷）を行い、その後降伏変位を決定する載荷（以後、降伏載荷）を行っている。本実験に用いた試験体は補強後も段落し部の主鉄筋の降伏が先行するように設計しているため、降伏変位 δ_y は段落し部の主鉄筋降伏時の水平変位となっている。各繰返し載荷試験体の変位振幅は δ_y を基準として 2.0、2.5、3.0 δ_y と設定し、正負方向に定変位の繰返し載荷を行った。実験の終了は最大変位時の荷重が主鉄筋降伏時の荷重（以後、降伏荷重）を下回るか、繰返し載荷回数 20 サイクルまでとしている。なお、20 サイクル終了時点で水平荷重が降伏荷重を下回らない場合は、さらに単調載荷を行い試験体を破壊に至らしめた。

3. 実験結果

3.1. 荷重－変位関係

図－2 には、繰返し載荷試験体の荷重－変位関係を

単調載荷試験体のそれと比較して示している。繰返し載荷試験体の荷重－変位関係には、予備載荷から実験終了時までの全結果を示している。また、C2.0 試験体は 20 サイクル終了時までにシートが剥離しなかったため、繰返し載荷終了後に単調載荷を実施している。なお、M 試験体の結果は、荷重および変位の符号を負とした場合についても示している。

図より、予備載荷 (①)、降伏載荷 (②) および繰返し載荷の 1 サイクル目 (③) までの荷重－変位関係は単調載荷の結果と比較的よく対応していることがわかる。しかしながら、繰返し載荷の 2 サイクル目に入ると剛性勾配が低下し、各変位振幅時の荷重が減少している。なお、荷重低下の傾向は C2.5、C3.0 試験体の場合が C2.0 試験体の場合よりも顕著である。C2.0 試験体は、2 サイクル目以降サイクル数の増加に伴う荷重低下は小さく 20 サイクル目終了時までシートの全面的な剥離は生じず、各サイクルでほぼ同様の荷重－変位曲線を示している。C2.5、C3.0 試験体は、2 サイクル目以降サイクル数の増加に伴い各変位振幅時の荷重が徐々に低下し、シートの剥離が生じている。なお、シートの剥離は、C2.5 試験体は正載荷 5 サイクル目および負載荷 6 サイクル目、C3.0 試験体は正載荷 5 サイクル目および負載荷 3 サイクル目、の載荷途中でいずれも段落し部下側で発生している。

図－3 には、繰返し載荷試験体のサイクル数と各変位振幅時の荷重との関係を正載荷の場合について示している。また、図には M 試験体の最大荷重値も示して

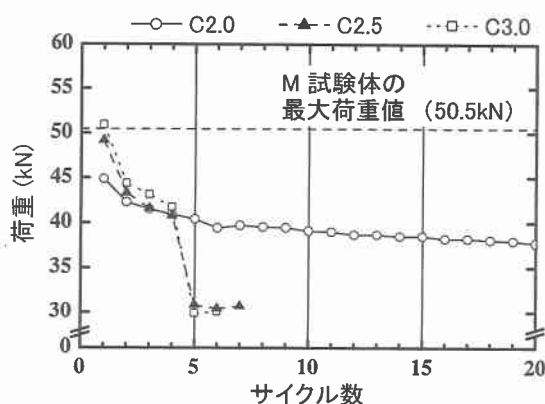


図-3 サイクル数と荷重の関係

いる。図より、1 サイクル目の荷重は変位振幅の大きい試験体ほど大きい傾向にあることがわかる。ここで、C2.0 試験体の荷重は M 試験体の最大荷重 P_{max} の 90 % 程度、C2.5、C3.0 試験体の荷重はともに P_{max} と同程度となっている。2 サイクル目以降の荷重の推移状況を見ると C2.0 試験体は、荷重が 2 サイクル目で 3 kN 程度低下するもののその後は緩やかに低下し、20 サイクル目においても P_{max} の 75 % 程度の耐力を維持している。

一方、C2.5、C3.0 試験体は 2 サイクル目で荷重が 7 kN 程度低下し、4 サイクル目までは C2.0 試験体の結果にすりつく形で若干の耐力低下を示し、その後、5 サイクル目以降ではシートの剥離により荷重が急激に低下して、過去に実施した無補強試験体¹⁾の荷重レベルにすりついている。

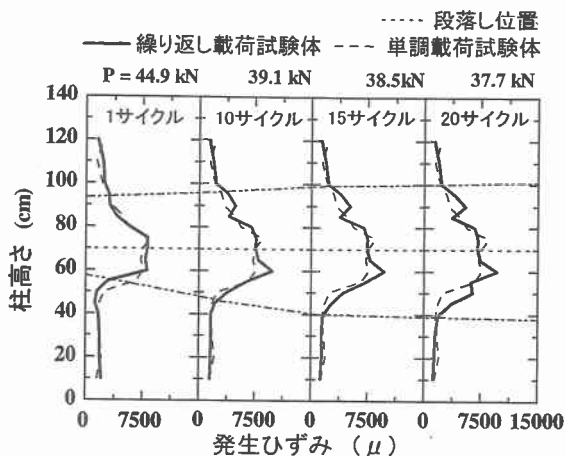
以上より、定変位振幅を受ける FRP シート曲げ補強 RC 柱は、1) 補強後の RC 柱の有する最大耐力 P_{max} の 90 % 程度の載荷履歴を受ける場合には、サイクル数の増大とともに耐力が若干低下するものの、シートの全面的な剥離は 20 サイクル終了時まで生じない。2) P_{max} と同程度の載荷履歴を受ける場合には数サイクル後にシートの剥離が生じ急激な耐力低下を示すことが明らかとなった。

3.2. AFRP シートのひずみ分布

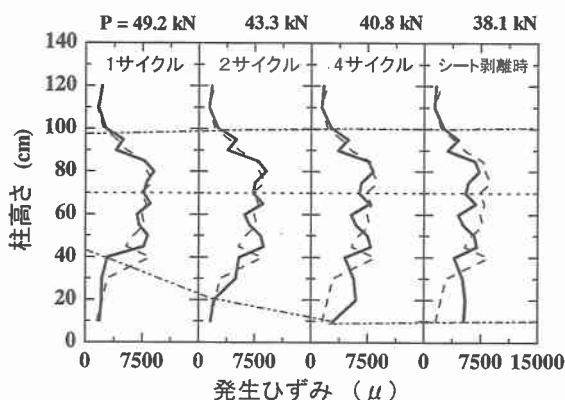
図-4 には、繰返し載荷試験体の正載荷時における引張力作用面の AFRP シートのひずみ分布の実験結果を各試験体の変位振幅と同一変位時における単調載荷実験の結果と比較して示している。また、サイクル数の増加に伴うシートの部分剥離の進展の目安として、3,000 μ 以上の比較的大きなひずみの発生領域を各サイクル毎に直線で結んで示している。

図より、1 サイクル目では変位振幅の大きさに関わらず、繰返し載荷の場合が単調載荷の場合よりも大きなひずみの分布範囲が小さく示されていることがわかる。これは繰返し載荷の場合は定変位振幅繰返し載荷実験の前に予備載荷や降伏載荷を実施しているため、損傷が段落し部に集中しやすい状態にあるためと考えられる。

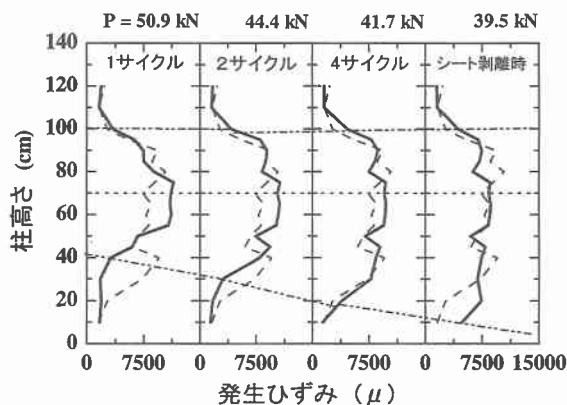
2 サイクル目以降の結果を見ると、C2.0 試験体はサイクル数の増加とともにシートの部分剥離領域が下側に



(a) C2.0 試験体



(b) C2.5 試験体



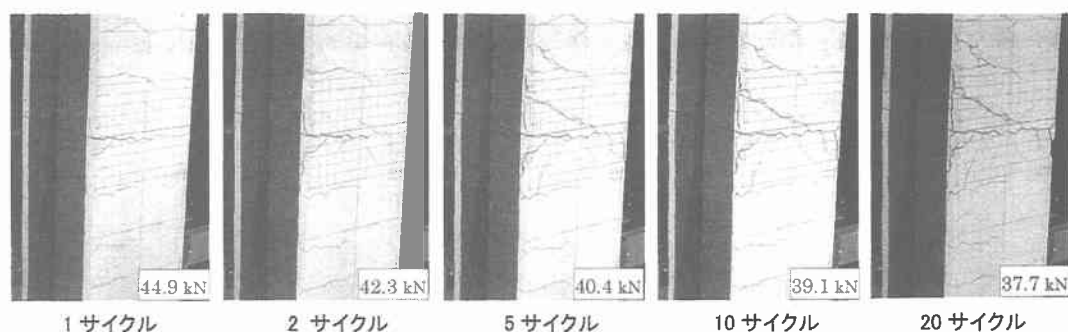
(c) C3.0 試験体

図-4 ひずみ分布性状

若干進展するものの、20 サイクル目においても全面的な剥離に至っていないことがわかる。これに対して、C2.5、C3.0 試験体は 1 サイクル目から 2 サイクル目にかけてシートの部分剥離領域が下側に急激に拡大し、荷重も低下していることがわかる。4 サイクル目には、その領域が柱基部（シートの接着端部）まで進展し、シートが全面的な剥離に至る直前であることがわかる。

以上より、サイクル数の増加に伴う荷重低下にはシートの部分剥離領域の拡大が密接に関連しており、特に C2.5、C3.0 試験体で顕著であることが明らかとなった。

(a) C2.0
試験体



(b) C3.0
試験体

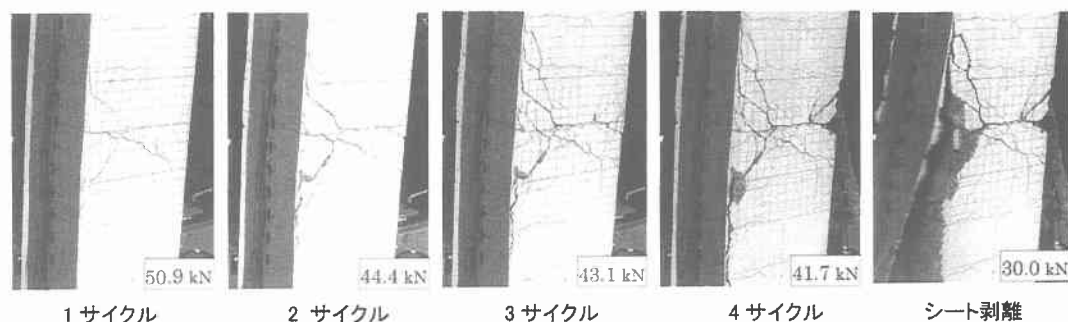


写真-1 段落し部近傍における破壊状況

3.3. 破壊性状

写真-1には、C2.0、C3.0 試験体の段落し部近傍のひびわれおよびシートの剥離進展状況を各サイクル毎に示している。C2.0 試験体の結果を見ると、1 サイクル目には段落し部に曲げひびわれの開口が見られ 2 サイクル目には曲げひびわれの他斜めひびわれも発生していることがわかる。特に、段落し部ではかぶりコンクリートがブロック化しこの部分がシートを外側に押し出して引き剥がすピーリング作用による部分剥離の発生が確認できる。その後のサイクルでは段落し部上側において斜めひびわれの発生が見られるもののその他の著しい変化は見られない。

一方、C3.0 試験体の結果を見ると、1 サイクル目では段落し部に発生した曲げひびわれが斜めひびわれに移行して開口していることがわかる。また、段落し部周辺では斜めひびわれの発生も見られ、この部分ではコンクリートブロックが形成されてピーリング作用によるシートの部分剥離が多少見られる。2 サイクル目には、1 サイクル目に発生したひびわれが大きく開口し、荷重も 1 割以上低下している。また、段落し部近傍におけるコンクリートのブロック化が顕在化し、シートの部分剥離が段落し部の上・下方向に進展していることがわかる。3 サイクル目以降では、さらに段落し部近傍の損傷が著しくなりコンクリートブロックのピーリング作用によるシートの剥離が段落し部の下方に進展し、最終的にシートが剥離して急激な荷重低下を示している。

このように、段落し部を有する RC 柱に接着した AFRP シートの剥離は、段落し部近傍のかぶりコンクリート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によって発生することが明らかになった。また、ピーリング作用によるシートの部分的な剥離の発生により同一変位時における荷重が大きく低下することが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、RC 柱段落し部の曲げ補強を目的として接着した AFRP シートの剥離性状やそれに伴う荷重低下を検討するため、AFRP シート曲げ補強 RC 柱の水平単調および定変位繰り返し載荷実験を行った。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) 定変位繰り返し載荷による RC 柱の荷重の低下は、段落し部に発生するシートの部分剥離と密接に関係している。
- 2) 定変位繰り返し載荷を受ける FRP シート曲げ補強 RC 柱は、補強後の RC 柱の有する最大耐力の 90 %程度の載荷履歴を受ける場合には、シートの全面的な剥離は生じない。
- 3) 定変位繰り返し載荷を受ける FRP シート曲げ補強 RC 柱のシートの剥離は、段落し部近傍のかぶりコンクリートの損傷により発生するコンクリートブロックの押し出し作用（ピーリング作用）が原因となり発生する。

参考文献

- 1) 中島規道，三上 浩，竹田俊明，岸 徳光：RC 柱の段落し部における FRP シートの曲げ付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23，No.1，pp.799-804，2001。