

# 定変位繰り返し载荷を受けるRC柱の段落し部に接着した曲げ補強シートの剥離性状に関する実験的研究

Experimental study on debonding behavior of FRPs for flexural strengthening stepped-rebar area of RC column under constant-amplitude cyclic-loading

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
三井住友建設(株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	学生員	澤田純之	(Sumiyuki Sawada)
構研エンジニアリング(株)	正 員	鈴木健太郎	(Kentaro Suzuki)
室蘭工業大学	○学生員	森本 勤	(Tutomu Morimoto)

## 1. はじめに

平成7年に発生した阪神・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・耐食性に優れた連続繊維シート(以後、FRPシート)接着工法が数多く採用されるようになってきた。著者等は、これまでRC柱の段落し部にFRPシートを用いて曲げ補強することを想定し、FRPシート曲げ補強RC柱の水平単調载荷および繰り返し载荷実験を実施してきた<sup>1),2)</sup>。その結果、RC柱に接着した曲げ補強シートは、段落し部近傍の引張縁かぶり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剥がすピーリング作用によって部分剥離が発生し、その領域が拡大することにより全面剥離に至ることが明らかになっている。しかしながら、これらの研究成果は、上部工等の死荷重を模擬した軸力を付加しない状態で得られたものである。実橋脚に即した性能を評価するためには軸力を考慮した場合の剥離挙動に関する検討を行うことが肝要と考えられる。

このような観点より、本研究では、長期的な維持管理を考慮に入れたFRPシート接着による既設RC構造物の合理的な曲げ補強設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、軸力を付加した場合のFRPシート曲げ補強RC柱に関する水平単調载荷および定変位繰り返し

繰り返し载荷実験を行い、曲げ補強シートの剥離進展状況やそれに伴うRC柱の耐荷性状の検討を行った。なお、検討は文献<sup>2)</sup>における軸力を付加しないRC柱の結果と比較することにより行っている。

## 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、载荷方法2種類、設定変位振幅3種類および軸力の有無を組み合わせた全8体である。表中、試験体名の第1項目は载荷方法(M:単調载荷、C:繰り返し载荷)を示しており、付随する数値は設定変位振幅

表-1 試験体一覧

試験体名	载荷方法	設定変位振幅	軸力
M-N	単調载荷	-	無
C2.0-N	定変位 繰り返し载荷	2.0 $\delta_y$	
C2.5-N		2.5 $\delta_y$	
C3.0-N		3.0 $\delta_y$	
M-AX	単調载荷	-	有 (2.5 MPa)
C2.0-AX	定変位 繰り返し载荷	2.0 $\delta_y$	
C2.5-AX		2.5 $\delta_y$	
C3.0-AX		3.0 $\delta_y$	

$\delta_y$ : 各試験体の降伏変位

表-2 AFRPシートの材料特性値

繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	0.286	2.06	118	1.75

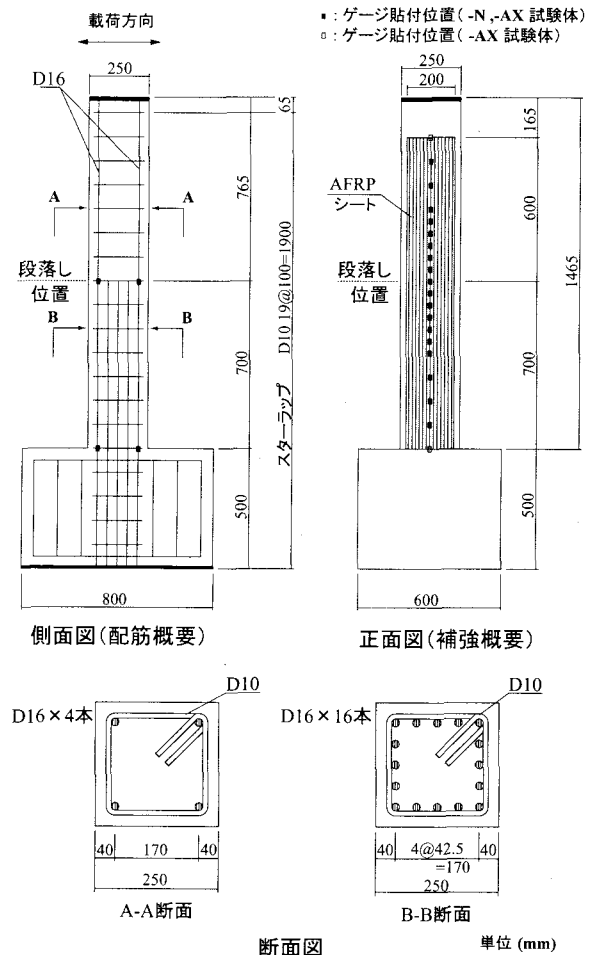


図-1 試験体の概要

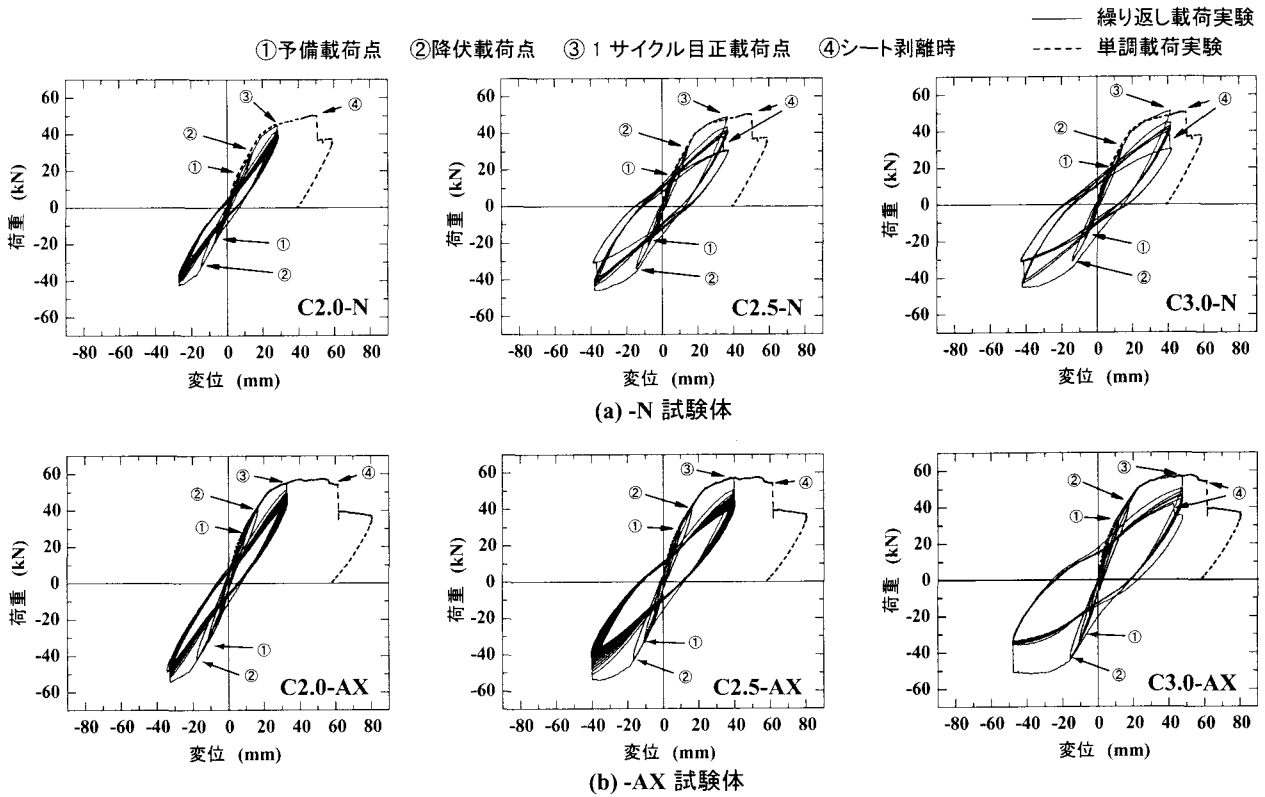


図-2 荷重-変位関係

表-3 実験結果一覧

試験体名	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	サイクル数* (シート剥離時)
M-N	33.2	13.4	-
C2.0-N	30.3	13.2	剥離せず
C2.5-N	33.0	13.8	5サイクル
C3.0-N	31.3	13.9	5サイクル
M-AX	42.8	16.3	-
C2.0-AX	40.5	16.3	剥離せず
C2.5-AX	40.0	15.9	剥離せず
C3.0-AX	42.5	15.8	7サイクル

\*: 正載荷時

(降伏変位  $\delta_y$  の倍数)を示している。第2項目は軸力の有無 (N: 軸力無し, AX: 軸力有り)を示している。なお、本実験では変位振幅を降伏変位  $\delta_y$  の2.0, 2.5, 3.0倍と設定している。

図-1には、試験体の形状寸法、配筋およびFRPシートの接着状況を示している。本実験に用いた試験体は断面寸法  $25 \times 25$  cm、柱部の高さが146.5 cmである。なお、加力位置は基部より165.5 cmの位置である。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、段落し部で終局に至るように断面設計を行っている。そのため、段落し位置を基部より70 cm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、帯鉄筋にはD10 (SD295A)を10 cm間隔で配筋した。曲げ補強シートには、アラミド繊維製FRPシート(以後、AFRPシート)を用い、試験体基部から高さ130 cmの範囲に幅20 cmで圧縮および引張り作用面の両面に接着している。なお、

シート接着範囲には付着性能の向上に有効であるショットブラスト処理(処理深さ1~2 mm)を施している。

本実験の測定項目は、水平荷重、載荷点変位および主鉄筋とシートに貼付したひずみゲージによるひずみである。シートのゲージは、シートの中心線上に段落し部より上・下方向に30 cmの範囲までは5 cm間隔で、その外側の範囲には10 cm間隔で貼付している。-N試験体、-AX試験体の、実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度はそれぞれ27.9, 28.4 MPaであり、主鉄筋の降伏強度は399.1, 365.4 MPaであった。表-2には、本実験に用いた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)に加力し、シートが剥離するまで載荷を行った。繰り返し載荷実験の場合には、繰り返し載荷を行う前に主鉄筋ひずみが降伏ひずみの1/4, 1/2に達するまでの載荷(以後、予備載荷)および降伏変位  $\delta_y$  を決定する載荷(以後、降伏載荷)を行い、その後設定変位振幅で正負方向に定変位繰り返し載荷を行った。また、繰り返し載荷実験は、最大繰り返し回数を20サイクルとし、設定変位振幅時の荷重が主鉄筋降伏時の荷重(以後、降伏荷重  $P_y$ )を下回るまでを行った。なお、本実験の軸力は、2.5 MPa (156 kN)である。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重-変位関係

図-2には、繰り返し載荷試験体の荷重-変位関係を単調載荷試験体の結果と比較して示している。なお、繰り返し載荷試験体の荷重-変位関係は、予備載荷から実験終了時までの全結果について示している。図中の①~④の数字はそれぞれ予備載荷点、降伏載荷点、1サイ

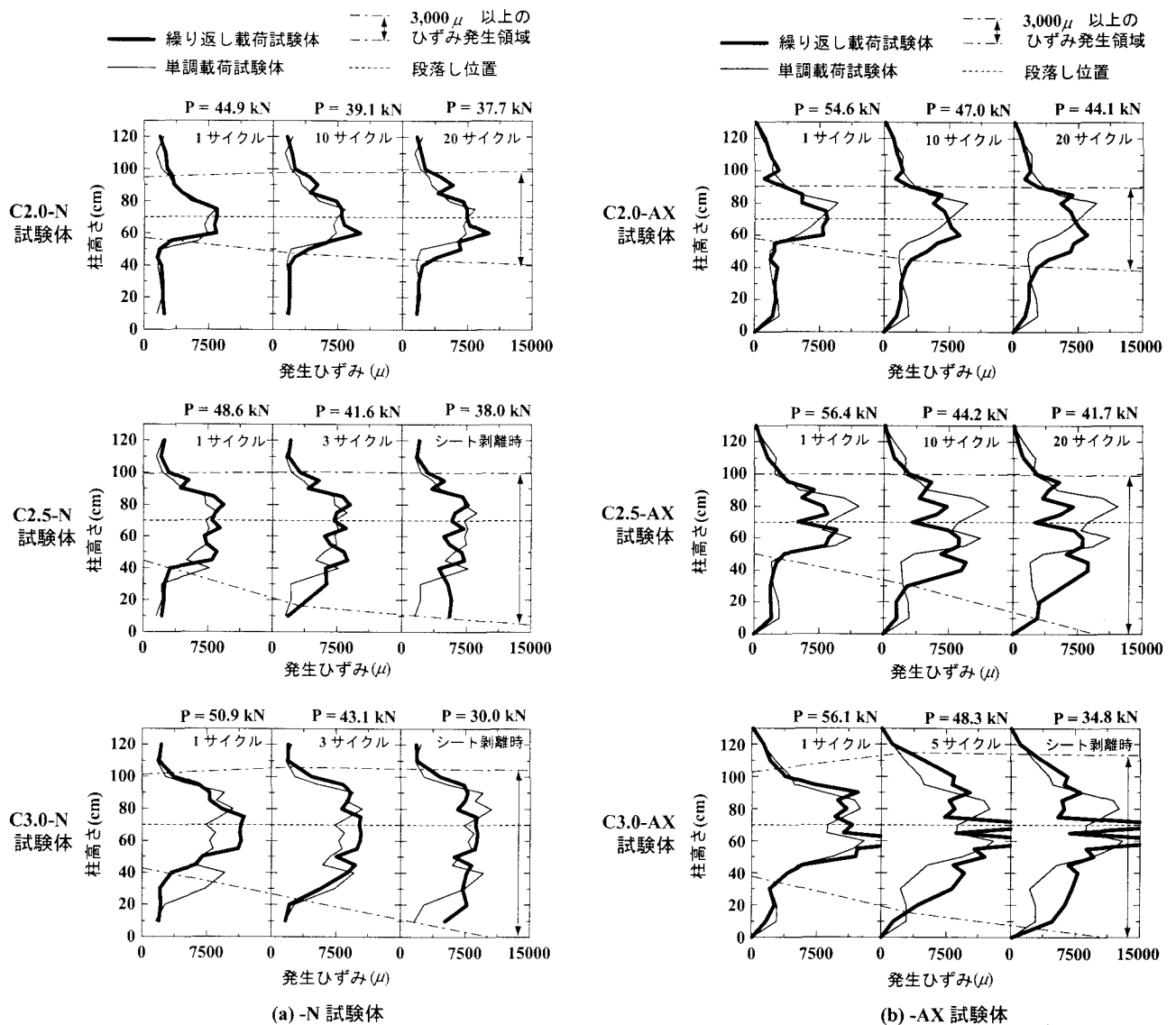


図-3 引張力作用面における曲げ補強シートのひずみ分布性状（正載荷時）

クル目正載荷の設定変位振幅点およびシート剥離時を示している。なお、表-3には降伏荷重、降伏変位およびシート剥離時のサイクル数を一覧にして示している。

図より、いずれの繰返し載荷試験体も、予備荷点(①)、降伏荷点(②)および1サイクル目正載荷点(③)までの荷重-変位関係は、単調載荷の結果と比較的よく一致していることが分かる。しかしながら2サイクル目以降では、いずれの試験体も剛性勾配が1サイクル目よりも低下し、その後サイクル数の増加とともに各変位振幅時の荷重が減少している。

表-3よりシート剥離時のサイクル数を見ると、変位振幅 $2.0\delta_y$ 時では-N、-AX試験体ともに、実験終了時までシートの全面剥離に至っていない。しかしながら、変位振幅 $2.5\delta_y$ 以上では、-N試験体で5サイクル目で全面剥離したのに対し、-AX試験体では実験終了時まで全面剥離していない。また、 $3.0\delta_y$ 時では-N試験体で5サイクル目、-AX試験体で7サイクル目に全面剥離している。以上のことより、変位振幅が $2.0\delta_y$ 時では全面剥離に至らないこと、また変位振幅 $2.5\delta_y$ 以上の場合には軸力を付加することによりシートの剥離進展が遅延すること、

が明らかになった。これは、軸力が作用することでシートに作用する引張力が軽減されるためと考えられる。

### 3.2 AFRPシートのひずみ分布性状

図-3には、繰返し載荷試験体の定変位振幅時における引張力作用面の曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布を、同一変位時の単調載荷のそれと比較して示している。図中には、サイクル数の増加に伴うシートの部分剥離進展の目安として、 $3,000\mu$ 程度の比較的大きなひずみの発生領域を各サイクル毎に結んでいる。なお、図の上方には各サイクルでの荷重値を併せて示している。

図より、いずれの試験体も1サイクル目の大ひずみ発生領域は、試験体によりその程度は異なるもののサイクル数の増加とともに拡大していることが分かる。また、荷重値も1サイクル目に最大荷重を示した後、徐々に低下している。これは、基部のひび割れの進展による劣化の進行と、段落し部のひび割れの進展に伴って形成されるコンクリートブロックの押し出しによるピーリング作用で部分剥離が進行し、ひずみが均等化されることによるものと考えられる。

また、大ひずみ発生領域は、いずれの試験体も上方へ

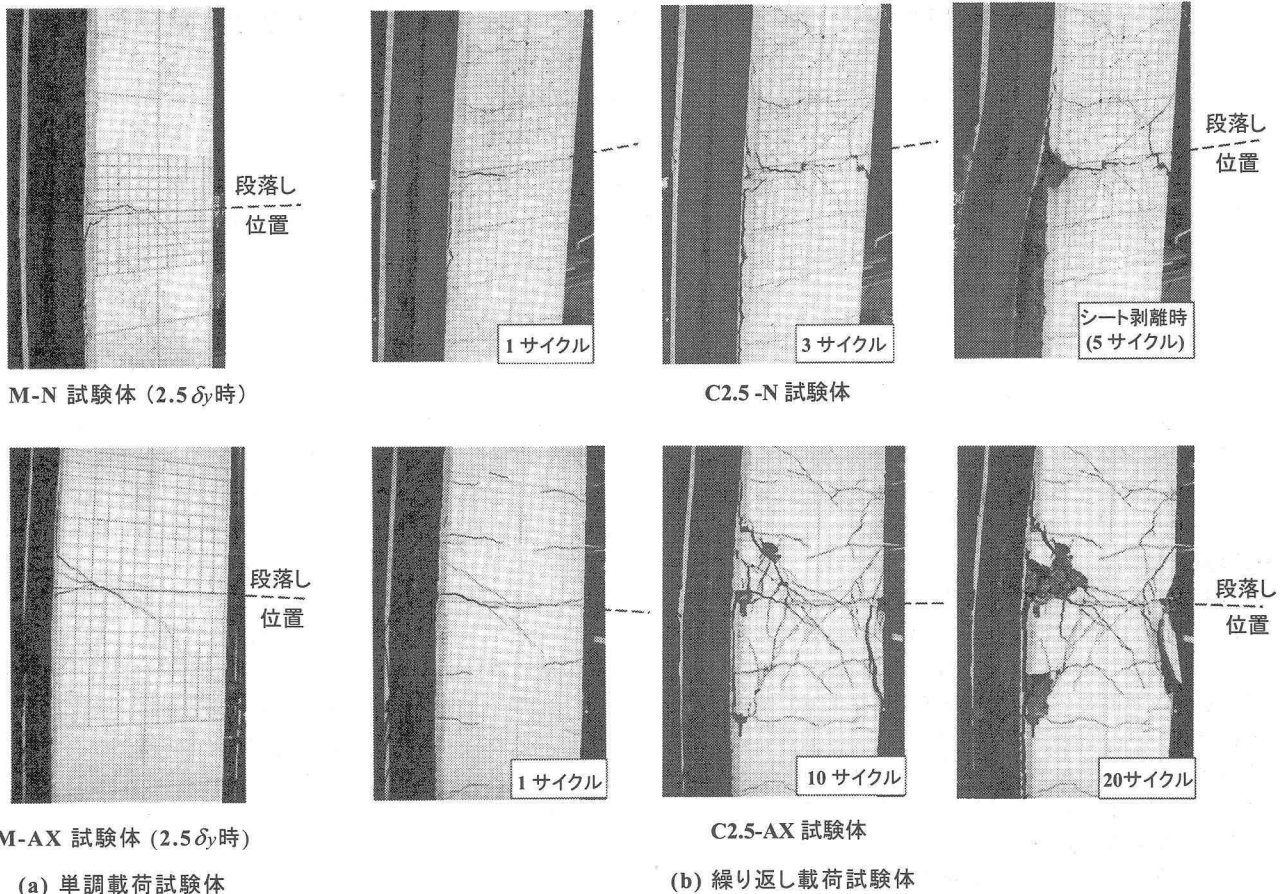


写真-1 シートの剥離進展状況（加力方向は右）

はほとんど進行せず、下方への拡大が顕著であることが分かる。このように、繰り返し荷重時には、段落し部で発生したピーリング作用による部分剥離はサイクル数の増加とともに下方へ進展することが明らかとなった。

### 3.3 シートの剥離挙動

写真-1には、軸力の有無で剥離性状が大きく異なったC2.5試験体に着目し、段落し部におけるひび割れ進展状況を示している。(a)図には各C2.5試験体の変位振幅時と同一変位時の単調荷重試験体の状況、(b)図には各変位振幅時における正荷重時の繰り返し荷重試験体の状況を示している。

(b)図の3サイクル目以降の写真を見ると、いずれも段落し部に水平な曲げひび割れが進展し、さらにこの曲げひび割れを中心とした斜めひび割れの発生により、くさび状のコンクリートブロックが形成されていることがわかる。このような状況下、(a)図の単調荷重試験体の場合には、くさび状のコンクリートブロックのピーリング作用により、M-N試験体は下方に、M-AX試験体では上方にシートの剥離が進展している。これに対して、繰り返し荷重の場合には、いずれの場合も段落し部より下方のシートが剥離している。これは、繰り返し荷重を受ける際には剥離したコンクリートの小塊が段落し下方の部分剥離したシートとコンクリートの中に蓄積され、引張側に転じた際に、その蓄積物がこのような働きをしシートの剥離を助長するためと考えられる。なお、軸力が作用した方がくさび状のコンクリートが拡大する傾向にあるが、これは軸力(付加モーメント)によって、圧

縮領域が広範囲に塑性化するためと推察される。

### 4. まとめ

本研究では、繰り返し荷重を受けるRC柱の段落し部に接着した曲げ補強シートの剥離性状やRC柱の耐荷性状を検討することを目的として、軸力の有無に着目してRC柱の水平単調荷重および定変位繰り返し荷重実験を行った。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 定変位繰り返し荷重時におけるRC柱の荷重低下は、段落し部近傍の引張側に形成されるくさび状のコンクリートブロックのピーリング作用により、シートの部分剥離が進展するためである。
- 2)  $2\delta_y$ 程度の繰り返し荷重ではシートは剥離しにくいですが、それ以上の変位振幅では剥離する傾向にある。なお、軸力の作用はシートの剥離進展を遅延させる。

### 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.01 / pp.799-804, 2001
- 2) 岸徳光, 三上浩, 竹田俊明, 栗橋祐介, 澤田純之: AFRPシートで曲げ補強した段落し部を有するRC柱の定変位繰り返し荷重実験, 応用力学論文集, Vol.5, pp.911-918, 2002.