

論文 段落し部をAFRPシートで曲げ補強したRC柱の定変位繰り返し 載荷実験

澤田 純之^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・藤田 学^{*4}

要旨：本研究では、AFRPシートで曲げ補強した段落し部を有するRC柱の耐荷性状に関する検討を行うことを目的に、AFRPシート曲げ補強RC柱の定変位繰り返し載荷実験を実施した。本実験では変位振幅を3種類設定して繰り返し載荷実験を行い、変位振幅の大きさや作用軸力の影響等に関する検討を行った。その結果、1) 変位振幅が $2\delta_y$ (δ_y : 主鉄筋降伏時変位) 以下の場合には、シートは剥離しないこと、2) 荷重低下は、段落し部近傍におけるシートの部分剥離の進展によること、3) 軸力を作用させることによりシートの部分剥離の進展が遅延すること、等が明らかになった。

キーワード：RC橋脚、段落し、曲げ補強シート、ピーリング作用、剥離性状

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。著者等は、これまでRC柱の段落し部に連続繊維(FRP)シートを接着して曲げ補強することを想定し、FRPシート曲げ補強RC柱の水平単調載荷および定変位繰り返し載荷実験を実施してきた^{1),2)}。その結果、1) RC柱の段落し部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剥離することを確認しており、土木学会より発行されている補強指針³⁾に示されている一面せん断的な剥離現象を想定した設計法やモーメントシフトを仮定した設計法がシート剥離の実挙動に即したものではないことを明らかにしている。また、定変位繰り返しを受ける場合においてもピーリング作用に起因するシートの剥離により終局に至ることを確認している。

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、比較的小規模の地震動を考慮したFRPシート接着工法に関する既設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、FRPシート曲げ補強RC柱に関する水平単調載荷および定変位繰り返し載荷実験を行い、変位振幅の大きさや作用軸力の有無による曲げ補強シートの剥離進展状況やそれに伴うRC柱の耐荷挙動への影響に関する検討を行った。

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、載荷方法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

*1 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 三井住友建設(株)技術研究所 土木研究開発部長 博(工) (正会員)

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | 荷重方法 | 設定変位振幅 | 軸力 |
|--------|---------------|----------------|----------------|
| M-N | 単調荷重 | - | 無 |
| C2.0-N | 定変位 繰り返し荷重 | 2.0 δ_y | |
| C2.5-N | | 2.5 δ_y | |
| C3.0-N | | 3.0 δ_y | |
| M-A | 単調荷重 | - | 有 (2.5 MPa) |
| C2.0-A | 定変位 繰り返し荷重 | 2.0 δ_y | |
| C2.5-A | | 2.5 δ_y | |
| C3.0-A | | 3.0 δ_y | |

δ_y : 各試験体の降伏変位

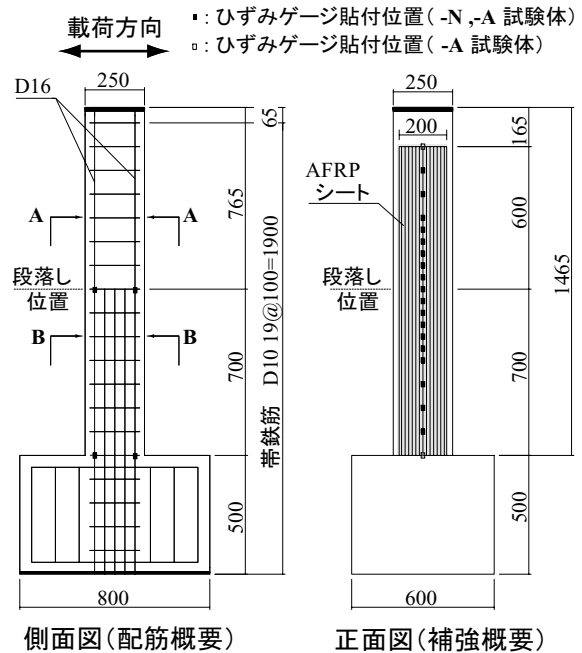
表-2 AFRP シートの材料特性値

| 繊維目付量 (g/m ²) | 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 |

は荷重方法 (M: 単調荷重, C: 繰り返し荷重) を示しており, 付随する数値は設定変位振幅 (降伏変位 δ_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, A: 軸力有り) を示している。なお, 本実験では変位振幅を 2 δ_y , 2.5 δ_y , 3 δ_y と設定している。

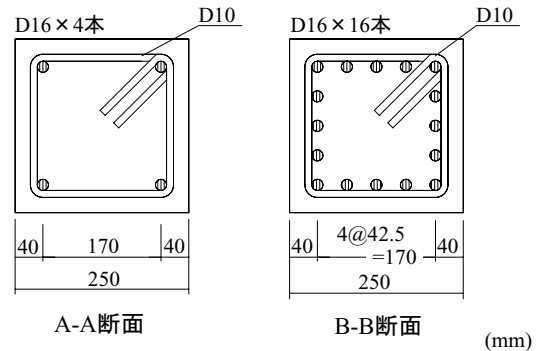
図-1には, 試験体の形状寸法, 配筋および AFRP シートの接着状況を示している。本実験に用いた試験体は断面寸法 25 × 25 cm, 柱部の高さが 146.5 cm である。なお, 加力位置は基部より 165.5 cm の位置である。本実験では, 段落し部におけるシートの曲げ付着特性に着目しているため, 段落し部の圧壊で終局に至るように断面設計を行っている。そのため, 段落し位置を基部より 70 cm の位置に設定し, その位置で主鉄筋を 16 本から 4 本に減少させている。主鉄筋には D16 (SD345) を用い, 帯鉄筋には D10 (SD295A) を 10 cm 間隔で配筋した。

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



側面図 (配筋概要)

正面図 (補強概要)



断面図

図-1 試験体の概要

から高さ 130 cm の範囲に幅 20 cm で圧縮および引張力作用面の両面に接着している。シートには, 段落し部の剥離性状を詳細に検討するため, 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 間隔でひずみゲージを貼付している。なお, シート接着領域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, 荷重点変位および主鉄筋とシートのひずみである。-N 試験体, -A 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, 365 MPa であった。表-2には, 本実験に用いた AFRP シート

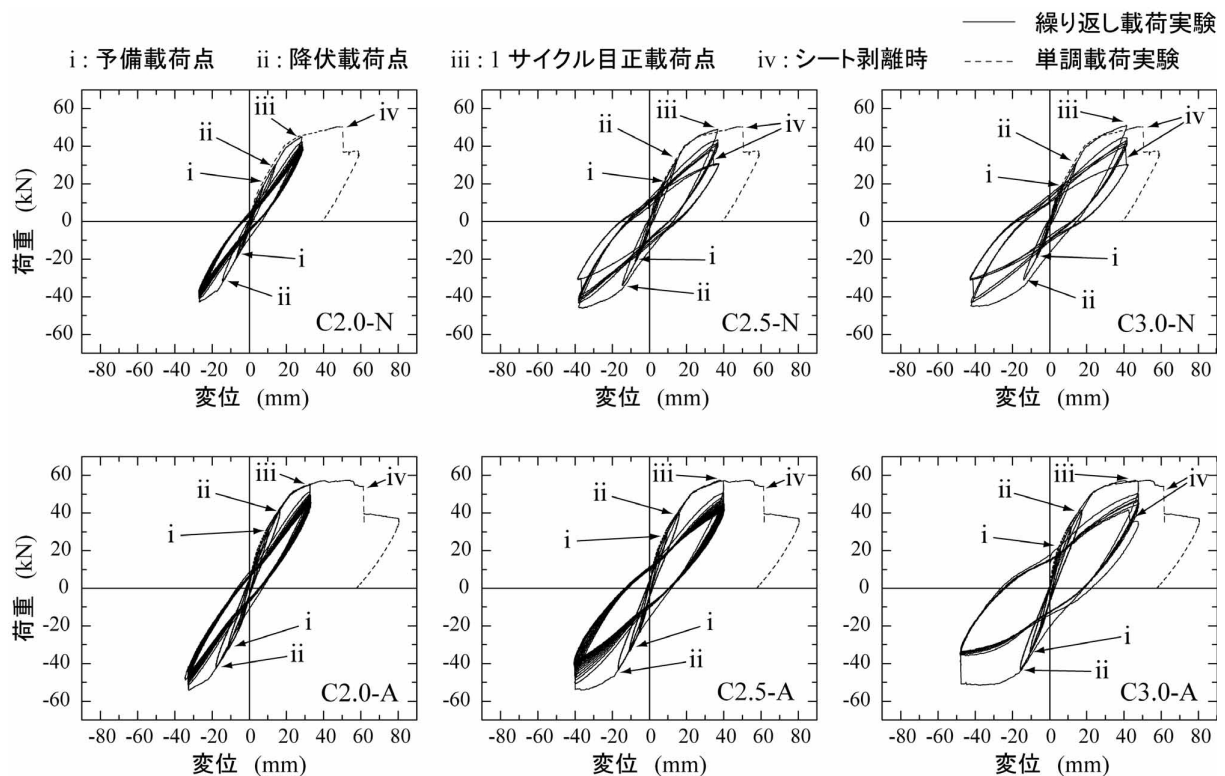


図-2 荷重-変位関係

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。繰返し載荷実験の場合には、繰返し載荷を行う前に段落し部の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 δ_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返し載荷を行った。なお、各試験体の降伏変位は、段落し部主鉄筋の降伏により決定されている。また、繰返し載荷実験は、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)を下回るか、下回らない場合には最大繰返し回数を20サイクルまでとして実験を行った。なお、本実験の軸応力(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、繰返し載荷試験体の荷重-変

表-3 実験結果一覧

| 試験体名 | 降伏荷重 P_y (kN) | 降伏変位 δ_y (mm) | シート剥離 サイクル数* |
|--------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| 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-A | 42.8 | 16.3 | - |
| C2.0-A | 40.5 | 16.3 | 剥離せず |
| C2.5-A | 40.0 | 15.9 | 剥離せず |
| C3.0-A | 42.5 | 15.8 | 7 サイクル |

*: 正載荷時

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i~ivは、それぞれ予備載荷点(i)、降伏載荷点(ii)、1サイクル目正載荷の設定変位振幅点(iii)およびシート剥離時(iv)を示している。なお、表-3には降伏荷重、降伏変位および正載荷時におけるシート剥離時のサイクル数を一覧にして示している。

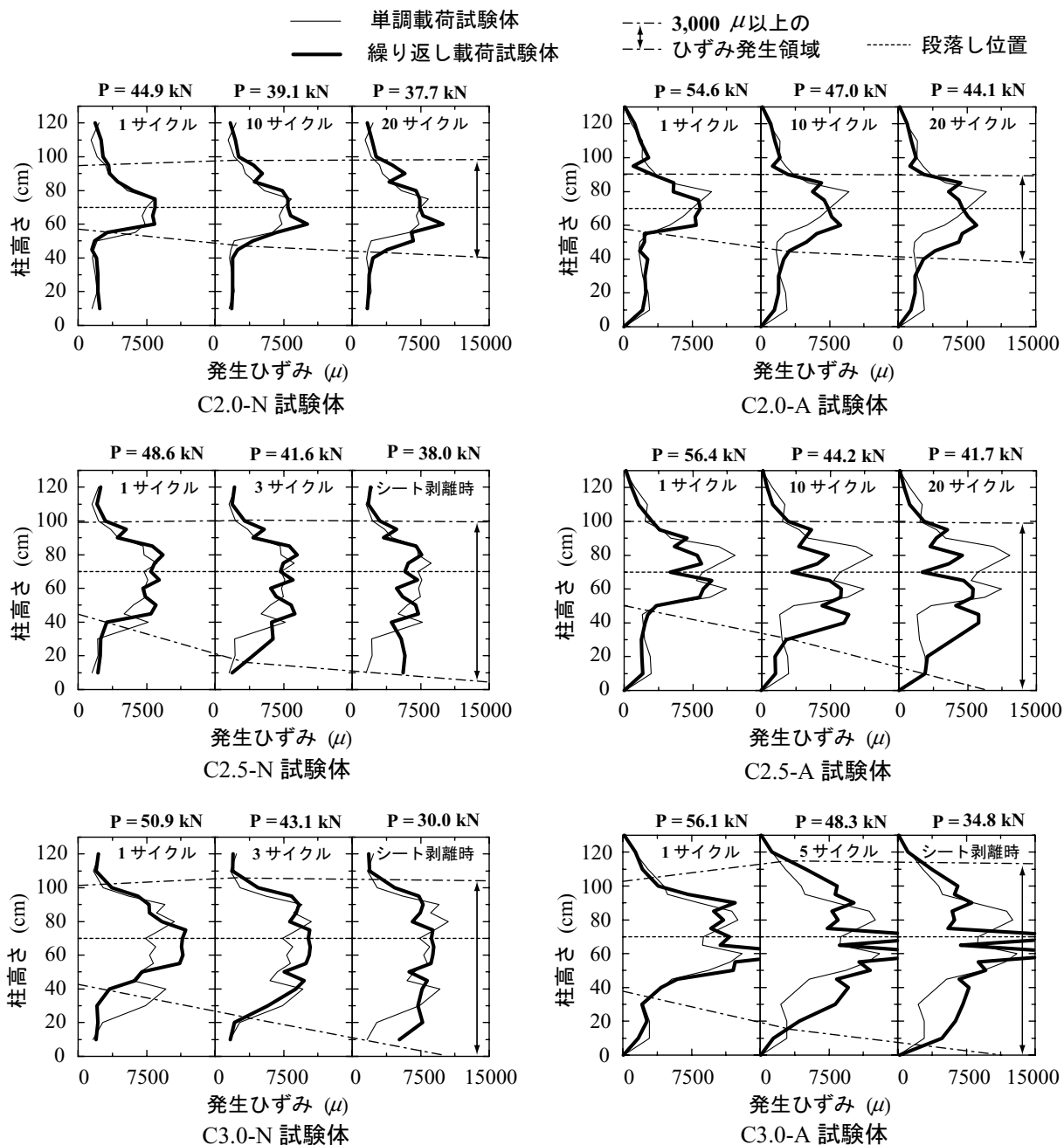
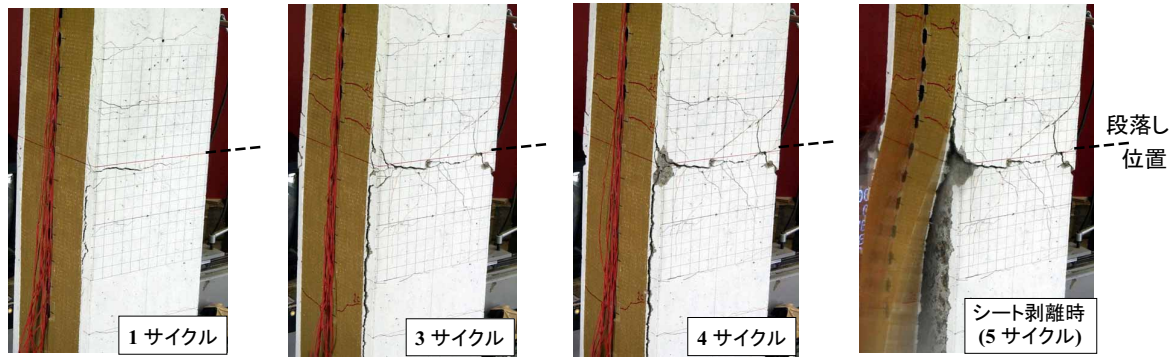


図-3 引張力作用面における曲げ補強シートのひずみ分布性状（正載荷時）

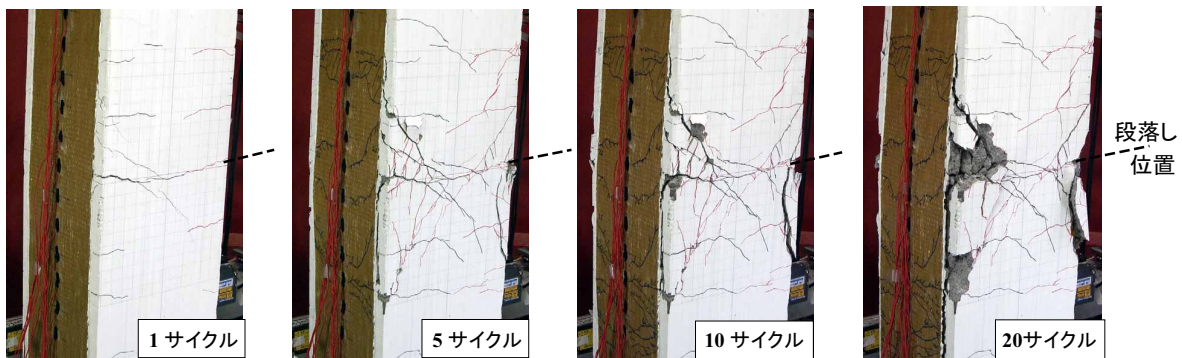
図より、いずれの繰り返し載荷試験体も、予備載荷点 (i)、降伏載荷点 (ii) および 1 サイクル目正載荷点 (iii) までの荷重-変位関係は、単調載荷の結果と比較的よく一致していることが分かる。しかしながら、2 サイクル目に入ると、剛性勾配が 1 サイクル目よりも低下し、設定変位振幅時の荷重はサイクル数の増加とともに減少している。これは、繰り返し載荷を受けることによって、段落し部近傍にひび割れが発生するとともに損傷が蓄積されてシートの剥離範囲が

拡大したためと考えられる。なお、C2.5/C3.0-N 試験体は 5 サイクル目、C3.0-A 試験体は 7 サイクル目でそれぞれシートの全面剥離により急激な荷重低下を示している。

ここで、表-3 の実験結果一覧を用いて、シート剥離時のサイクル数を変位振幅ごとに比較する。C2.0-N, C2.0-A 試験体の場合は、実験終了時までシートが全面剥離に至っていない。しかしながら、変位振幅が $2.5 \delta_y$ 以上では、C2.5-N 試験体で 5 サイクル目で全面剥離したのに対し、



(a) C2.5-N 試験体



(b) C2.5-A 試験体

写真-1 C2.5-N/A 試験体のシート剥離進展状況（加力方向は右）

C2.5-A 試験体では実験終了時まで全面剥離を生じていない。また、C3.0-N 試験体で5サイクル目、C3.0-A 試験体で7サイクル目に全面剥離に至っている。以上より、変位振幅が $2.5 \delta_y$ 以上の場合には軸力を付加することによりシート剥離の進展が遅延していることが分かる。これは、軸力が作用する場合には、繰り返し载荷に伴い段落し部の損傷が著しくなるため、段落し部主鉄筋の抜け出しが抑制され、シートの分担引張力が低減されることによるものと考えられる。

3.2 AFRP シートのひずみ分布性状

図-3には、繰り返し载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、同一変位時の単調载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を実験時の剥離状況も考慮して $3,000 \mu$ とし、それよりも大きなひずみの発生領域を各サイクルごとに結んでいる。なお、図の上方には各サ

イクルでの载荷荷重値を併せて示している。

図より、いずれの繰り返し载荷試験体も1サイクル目の大ひずみ発生領域は、試験体によって程度は異なるものの、段落し部を中心とした三角形状もしくは台形状を示していることが分かる。その後、サイクル数の増加とともに大ひずみ発生領域は拡大し、シート剥離時(C2.5/C3.0-N, C3.0-A)には基部付近まで拡大している。また、载荷荷重値に着目するとサイクル数を重ねるごとに徐々に低下していることが分かる。これは、後述する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により部分剥離が進行し、シートの補強効果が低減す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、いずれの試験体も段落し部上方の主鉄筋降伏領域程度までは進行するものの、それ以上はほとんど進展せず、下方への拡大が顕著であることが分かる。この

ように、繰り返し載荷時には、段落し部で発生したピーリング作用による部分剥離が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-N/A 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。写真には、各変位振幅時の段落し部近傍引張力作用面におけるひび割れおよびシート剥離進展状況を示している。

写真-1(a)より、軸力が作用していない C2.5-N 試験体の場合には、1 サイクル目に段落し部近傍に曲げおよび斜めひび割れが発生し、くさび状のコンクリートブロックが形成され、その端部より部分剥離も確認できる。また、3 サイクル目以降では、繰り返し回数の増加とともにコンクリートブロックの押し出し作用により段落し部より下方に部分剥離が進展し、5 サイクル目途中でシート剥離に至っている。

一方、写真-1(b)より、軸力が作用している C2.5-A 試験体の場合には、1 サイクル目には曲げひび割れが高さ方向にほぼ等間隔に発生している。しかしながら、シート剥離の要因となるコンクリートブロックの形成は見られない。5 サイクル目では段落し部を中心とした斜めひび割れが発生し、比較的大きなくさび状のコンクリートブロックが形成されている。その後、サイクル数の増加とともに段落し部の損傷が顕在化し、部分剥離領域も段落し部より下方に進展していることが分かる。

以上のことより、繰り返し載荷の場合には、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、繰り返し載荷を受ける場合には、損傷により剥落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間に蓄積され、引張側に転じた際にその蓄積物がこのような働きをしてシートの剥離を助長するためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、小規模地震を考慮した FRP シート接着工法に関する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に、変位振幅の大きさや軸力の有無をパラメータに取った段落し部を AFRP シートで曲げ補強した RC 柱を対象とする定変位水平繰り返し載荷実験を実施した。なお、変位振幅は主鉄筋降伏時の載荷点変位 δ_y を基準にして3種類に変化させている。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) 定変位繰り返し載荷時における 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し、シートの曲げ補強効果が低減するためである。
- 2) 本実験の範囲内では、変位振幅が $2\delta_y$ 以内であれば、軸力の有無にかかわらず繰り返し載荷によるシート剥離は生じない。
- 3) 軸力が作用する場合には、繰り返し載荷に伴い段落し部の損傷が著しくなり、段落し部主鉄筋の抜け出しが抑制されるため、シートの作用引張力が低減され剥離が遅延される。

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載荷実験, 応用力学論文集, Vol.5, pp.911-918, 2002.
- 3) 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.