

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

Constant-Amplitude Cyclic-Loading Test of Flexural Strengthened RC Columns Having
Stepped-Rebar Arrangement with AFRP Sheet

岸 徳光*, 三上 浩**, 竹田俊明***, 栗橋祐介****, 澤田純之*****

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Toshiaki TAKEDA, Yusuke KURIHASHI and Sumiyuki SAWADA

*フェロー会員 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**フェロー会員 博(工) 三井建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

***工修 北海道開発局部長 建設部 (〒060-8511 札幌市北区北 8 条西 2 丁目第 1 合同庁舎)

****正会員 博(工) 北海道開発土木研究所研究員 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

*****学生会員 修(工) 室蘭工業大学博士後期課程 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In this study, in order to investigate the bonding behavior of AFRP sheet and load-carrying capacity of flexural strengthened RC piers having stepped-rebar arrangement with AFRP sheet, monotonic-loading and constant-amplitude cyclic-loading tests were conducted. The results obtained from this study are: 1) from the constant-amplitude cyclic-loading test, it was made sure to keep AFRP sheet from debonding under an amplitude which is less than that of 90 % of the maximum loading capacity; and 2) sheet debonding was developed due to peeling action of the concrete blocks formed in the cover concrete near stepped-rebar arrangement.

Key Words : RC column, AFRP sheet, flexural strengthening, stepped-rebar arrangement, constant-amplitude cyclic-loading

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、鉄道・道路橋脚等の既設 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。これまで、構造物の補強工事には RC 増し厚工法や鋼板接着工法が多く用いられてきた。しかしながら、これらの工法には、補強材の重量が大きいために施工性に劣ること、補強を施すことにより構造物の重量が増すこと、鋼板を使用する場合には腐食が懸念されること、等の問題が残されている。このような状況下、近年では軽量で施工性、耐食性に優れる連続繊維シート(以後、FRP シートと呼ぶ)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。これに伴い、各研究機関では FRP シートを用いた合理的な RC 構造物の補強設計手法の確立を目的とした実験研究が実施され、土木学会よりその成果を取りまとめた補強設計指針¹⁾が発表されている。しかしながら、段落し部を有する単一 RC 柱を対象とした FRP シートの曲げ補強問題に関する検討は未だ少なく、FRP シートの曲げ耐力向上効果やその剥離性状が明らかにされていないのが現状である。

著者等は、これまで FRP シートを用いて曲げ補強した段落し部を有する RC 柱の水平単調載荷実験を実施し、FRP シートの曲げ補強効果やシートの剥離性状に関する検討を行ってきた²⁾。その結果、1) シート補強

量が少ないほど段落し部における角折れやせん断ずれが発生しやすく、断面分割法による計算結果と実験結果が対応しなくなる傾向にあること、2) RC 柱に接着した FRP シートの剥離は、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やせん断ずれの拡大によって生じることを明らかにしている。しかしながら、これらの結果は柱を一方方向に載荷する単調載荷実験によって得られたものであり、繰り返し載荷時における柱の耐荷性能やシートの剥離性状に関しては検討されていない。

そこで、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、FRP シートで曲げ補強した RC 柱の水平単調載荷および一定の変位振幅により正負方向の繰り返し載荷を行う定変位繰り返し載荷(以後、繰り返し載荷と呼ぶ)実験を行い、段落し部近傍におけるシートの剥離進展状況やそれに伴う RC 柱の耐荷性能の変化を詳細に検討した。

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、単調載荷試験体および設定変位振幅を

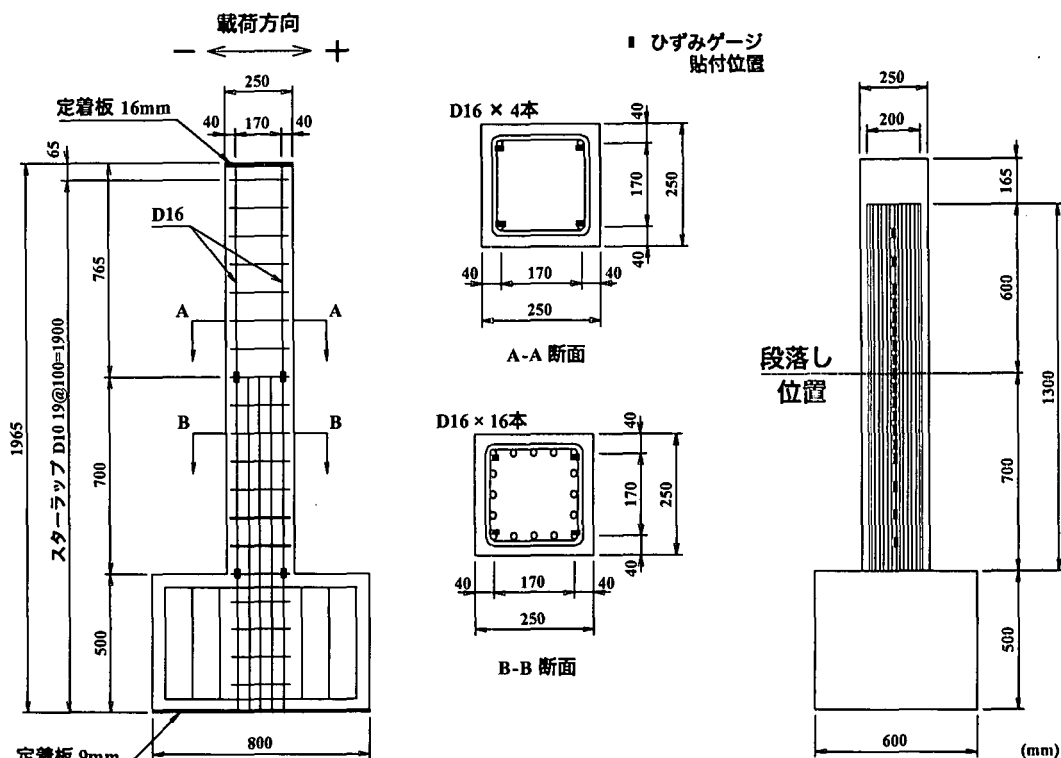


図-1 試験体の概要

表-1 試験体の一覧

試験体名	载荷方法	設定変位振幅
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

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の場合をMとし、繰り返し载荷の場合には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。なお、本実験では変位振幅を降伏変位 δ_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の断面寸法は25 cm × 25 cmでフーチングからの柱高さは146.5 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、スターラップにはD10(SD295A)を10 cm間隔で配筋した。FRPシートには、繊維目付量(単位面積当たりの質量)が415 g/m²のアミド繊維製FRPシート(以後、AFRPシートと呼ぶ)を用いている。また、AFRPシートは、試験体基部から高さ130 cmの範囲に幅20 cmで圧縮および引張力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

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

さ1~2 mm)を施している。

本実験の測定項目は、水平荷重、水平変位および主鉄筋とシート各点のひずみである。主鉄筋には段落し部および基部にひずみゲージを貼付している。シート各点のひずみゲージは、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。また、水平変位に関しては、载荷点および段落し部より上・下方向に20 cm間隔で測定している。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結果399.1 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

実験は、電動スクリージャッキ式の水平繰り返し载荷装置を用いて行った。ジャッキの先端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、柱が変形した状態においても常に水平力が作用する構造となっている。なお、载荷位置は基部からの高さが165.5 cm(柱部天端より19 cm)のピン結合部である。本実験では、段落し部近傍における曲げ補強シートの剥離進展状況に着目していることから、上部工死荷重を模

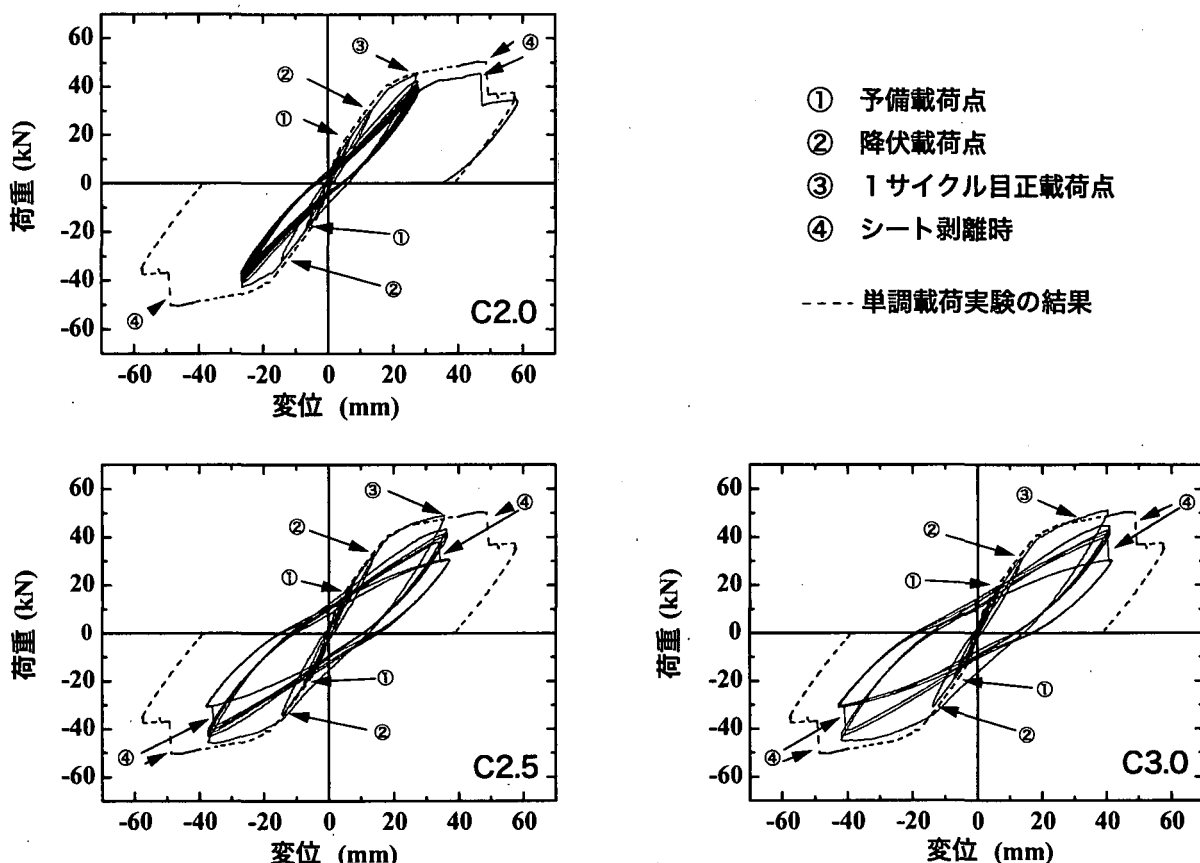


図-2 荷重-変位関係

擬するための軸力は導入しないこととした。

単調載荷実験の場合は、柱を一方方向(正方向)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($\epsilon_y = 1938 \mu$)の1/4, 1/2に達するまでそれぞれ正負方向に載荷(以後、予備載荷と呼ぶ)を行い、その後降伏変位 δ_y を決定する載荷(以後、降伏載荷と呼ぶ)を行っている。なお、本実験に用いた試験体は、主鉄筋の降伏が補強後も段落し部で先行するように設計しているため、降伏変位 δ_y は段落し部主鉄筋降伏時の載荷点変位となっている。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。また、繰返し載荷実験は、最大繰返し回数を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)を下回るまで行った。なお、20サイクル目終了時点でシートの全面剥離が見られない場合には、繰返し載荷実験終了後に単調載荷実験を行っている。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

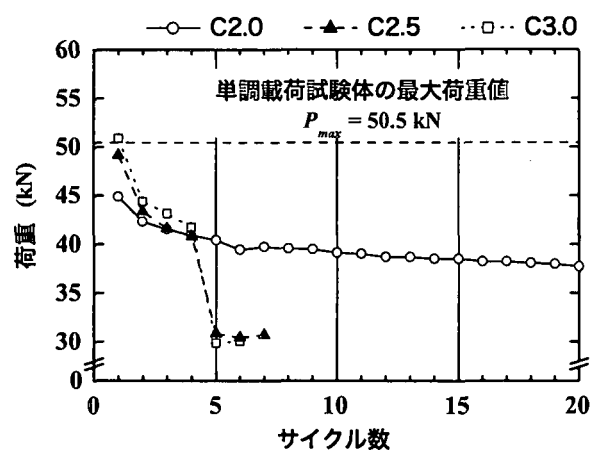
図-2には、繰返し載荷試験体の荷重-変位関係を単調載荷試験体の結果と比較して示している。なお、繰返し載荷試験体の荷重-変位関係は、予備載荷から実

験終了時までの全結果について示している。また、単調載荷試験体の結果は、繰返し載荷試験体の負載荷時の結果と比較するために、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、C2.0試験体は、繰返し載荷20サイクル目終了後においても全面的なシートの剥離や顕著な荷重低下が見られなかったため、繰返し載荷実験終了後、単調載荷実験を行っている。

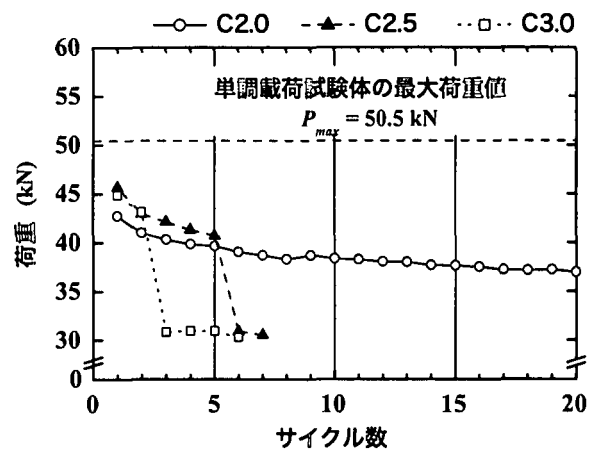
図より、いずれの繰返し載荷試験体も、予備載荷点(①)、降伏載荷点(②)および1サイクル目正載荷点(③)までの荷重-変位関係は、単調載荷の結果と比較的よく対応していることが分かる。

正載荷終了後の負載荷時における荷重-変位曲線は、原点を通過せずに荷重の絶対値が増大し、変位が-15 mm程度に到達した時点で再び単調載荷の結果にすりついていく。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、各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。なお、この荷重低下は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試験体の場合には、2サイクル目以降におけるサイクル数の増加に伴う荷重の低下が小さく、各サイクルでほぼ同様の荷重-変位曲線を示している。一方、20サイクル目終了後における単調載荷の結果とM試験



(a) 正載荷時



(b) 負載荷時

図-3 サイクル数と荷重の関係

表-3 各試験体の実験結果の一覧

試験体名	降伏荷重 P_k (kN)	降伏変位 δ_y (mm)	最大荷重 (kN)	最大荷重比	シート剥離時のサイクル数*
M	33.2	13.4	50.5	1.00	-
C2.0	30.3	13.2	45.1	0.89	剥離せず
C2.5	33.0	13.8	49.2	0.97	5 サイクル, 6 サイクル
C3.0	31.3	13.9	51.2	1.02	5 サイクル, 3 サイクル

*: 正載荷時, 負載荷時

体の結果を比較すると、最大荷重値は C2.0 試験体の場合が M 試験体の場合よりも小さく示されているものの、シート剥離時の変位はほぼ同程度であることが分かる。このことから、C2.0 試験体の場合には、繰り返し載荷を受けることにより、段落し部が損傷を受けて曲げ剛性が多少低下するものの、シートの付着は保持されており、載荷履歴を受けない場合と同程度の変形能を有していることが明らかになった。一方、C2.5, C3.0 試験体の場合には、2 サイクル目以降におけるサイクル数の増加に伴って荷重が徐々に低下し、最終的にはシートの全面的な剥離により急激な荷重低下を生じている。

図-3 には、繰り返し載荷試験体に関するサイクル数と各変位振幅時の荷重との関係を、(a) 正載荷時および (b) 負載荷時に分離して示している。また、図中には単調載荷試験体の最大荷重値 P_{max} も示している。図-3 (a) より、1 サイクル目の荷重は、設定変位振幅の大きい試験体ほど大きくなる傾向にあることが分かる。特に、C2.5, C3.0 試験体の場合には P_{max} と同程度の荷重レベルを示している。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 程度急激に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ことが分かる。一方、C2.5, C3.0 試験体の場合には、2 サイクル目において荷重が 7 kN 程度低下し、C2.0 試験体とほぼ同じ荷重値に達している。その後、4 サイクル目までは C2.0 試験体の結果にすりつく形で

若干の荷重低下を示し、5 サイクル目の載荷途中でシートが全面的に剥離して荷重が急激に低下した。

一方、図-3 (b) より負載荷時の結果を見ると、いずれの試験体においても 1 サイクル目の荷重値は正載荷時のそれよりも小さな値を示していることが分かる。2 サイクル目以降において、C2.0 試験体の場合には、正載荷時の結果と同様サイクル数の増加に伴う荷重の低下が小さく、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。また、C2.5, C3.0 試験体においても正載荷時の結果と同様の性状を示し、C2.0 試験体の結果にすりつく形で荷重が低下した後、シートの全面的な剥離により終局に至っている。なお、C2.5 および C3.0 試験体は、それぞれ 6 および 3 サイクル目載荷時にシートが全面的に剥離して終局に至っている。

表-3 には、各試験体の降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y 、最大荷重、M 試験体の最大荷重 P_{max} に対する各試験体の最大荷重の割合 (以後、最大荷重比と呼ぶ) およびシート剥離時のサイクル数の一覧を示している。表より、繰り返し載荷試験体の場合には設定変位振幅の大きい試験体ほど最大荷重が大きくなる示されていることが分かる。また、これらの試験体の最大荷重比を見ると、20 サイクル目終了時においてもシート剥離が生じない C2.0 試験体の最大荷重比は 0.9 程度、3 ~ 6 サイクル目載荷時にシートが剥離した C2.5, C3.0 試験体のそれはともに 1.0 と同程度となっている。従って、定変位繰り返し載荷を受ける FRP シート曲げ補強 RC 柱は、1) 補強後

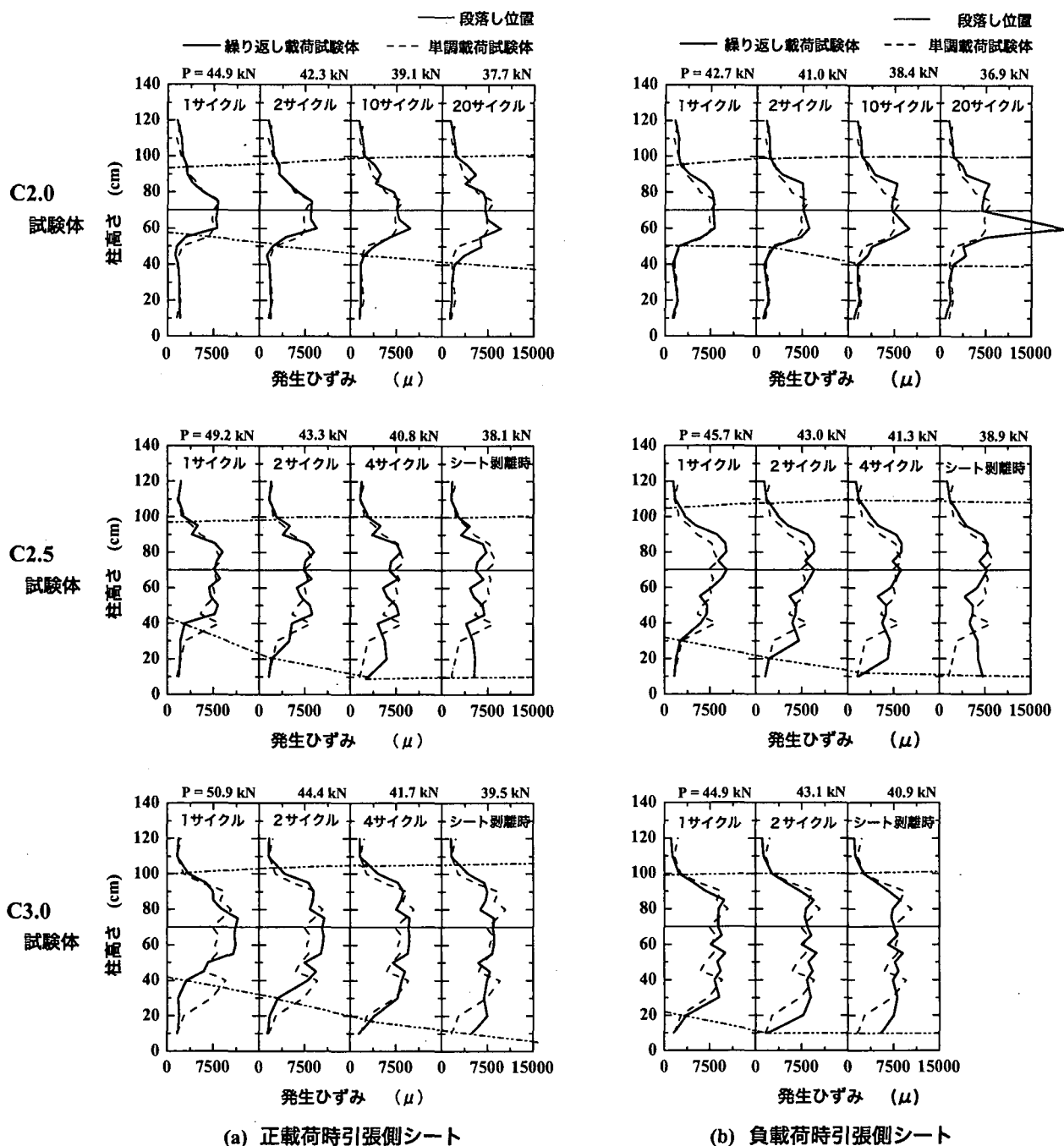


図-4 引張力作用面における AFRP シートのひずみ分布

の RC 柱の有する最大耐力 P_{max} の 90 % 程度の荷重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} と同程度の荷重履歴を受ける場合には比較的早期にシートの全面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各変位振幅時における引張力作用面の AFRP シートの軸方向ひずみ分布を示している。ここでは、(a) 正載荷時における引張側シートのひずみ分布、(b) 負載荷時における引張側シートのひずみ分布、について示している。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 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。また、各試験体の設定変位振幅と同一変位時における単調載荷試験体の結果を破線で示している。なお、図の上側には各サイクルでの荷重値を併せて示している。

図-4 (a) の正載荷時における結果より、各試験体の 1 サイクル目の結果を比較すると、設定変位振幅が大きい場合ほど大ひずみ発生領域も拡大する傾向にあることが分かる。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特に下側で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分かる。

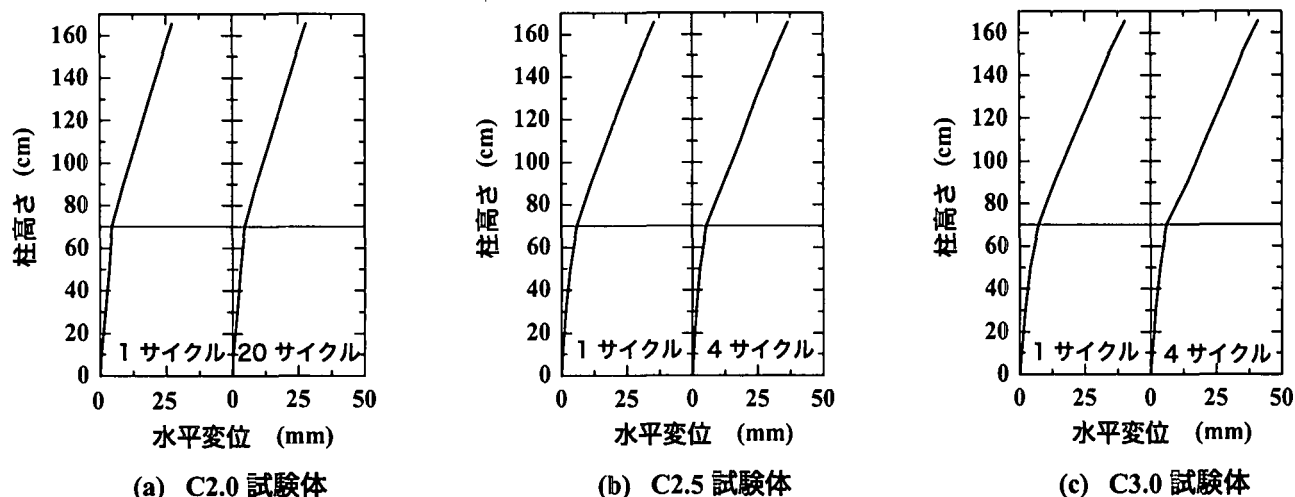


図-5 繰り返し載荷試験体の水平変位分布性状

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大きく進展し、荷重も1割以上低下していることが分かる。この荷重低下は、シートの部分剥離に伴ってシートひずみが平均化され、シートの曲げ補強効果が低減されたことによるものと考えられる。4サイクル目には、C2.5、C3.0の両試験体ともに剥離領域が単調載荷の場合よりも拡大し、シートが全面的な剥離に至る直前にあることが分かる。

図-4 (b) の負荷荷時における結果より、1サイクル目においていずれの試験体もシートの部分剥離領域が正載荷時よりも大きく進展し、それに対応して荷重も低下していることが分かる。これは、負荷荷時引張側の段落し部近傍におけるシートが1サイクル目正載荷時に曲げ圧縮力を受け、この部分のシート接着部のコンクリートが損傷したことによるものと推察される。なお、実験では1サイクル目正載荷時において圧縮側の段落し部近傍のシートに2,500～3,500 μ 程度の圧縮ひずみが発生していることを確認している。2サイクル目以降では、正載荷時と同様、曲げ補強シートの部分剥離領域の拡大に伴い段落し部近傍のひずみが均等化され、荷重が徐々に低下していることが分かる。

以上より、正負交番載荷におけるシートの剥離領域の拡大には、引張力作用時に発生するコンクリートブロックのピーリング作用のみならず、圧縮力作用時に段落し部近傍に作用する圧縮力も影響を及ぼしている可能性のあることが明らかになった。なお、この傾向は最大荷重比(表-3 参照)が1.0に近いC2.5、C3.0 試験体で顕著であった。

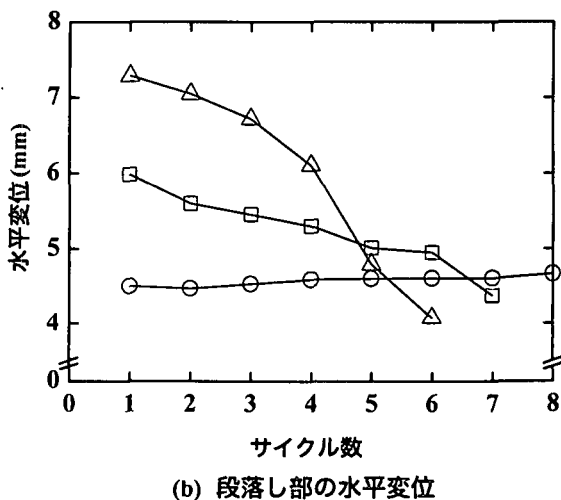
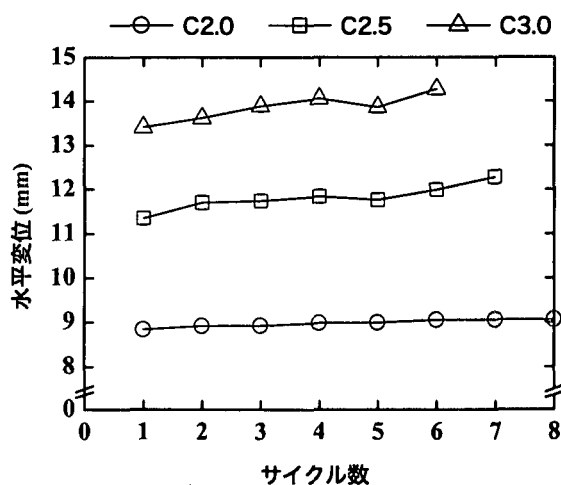


図-6 サイクル数と水平変位の関係

3.3 変位分布性状

図-5 には、各繰り返し載荷試験体の正載荷時における柱高さ方向の水平変位分布を示している。なお、図中にはC2.0 試験体に関しては1および20サイクル目の結果を、C2.5、C3.0 試験体に関しては1および4サイク

ル目の結果を示している。図より、1サイクル目においていずれの試験体も段落し部近傍に明確な角折れが生じていることが分かる。また、C2.0 試験体の場合には、1サイクル目と20サイクル目終了後の角折れの性状はほぼ同様である。一方、C2.5、C3.0 試験体の場合には、

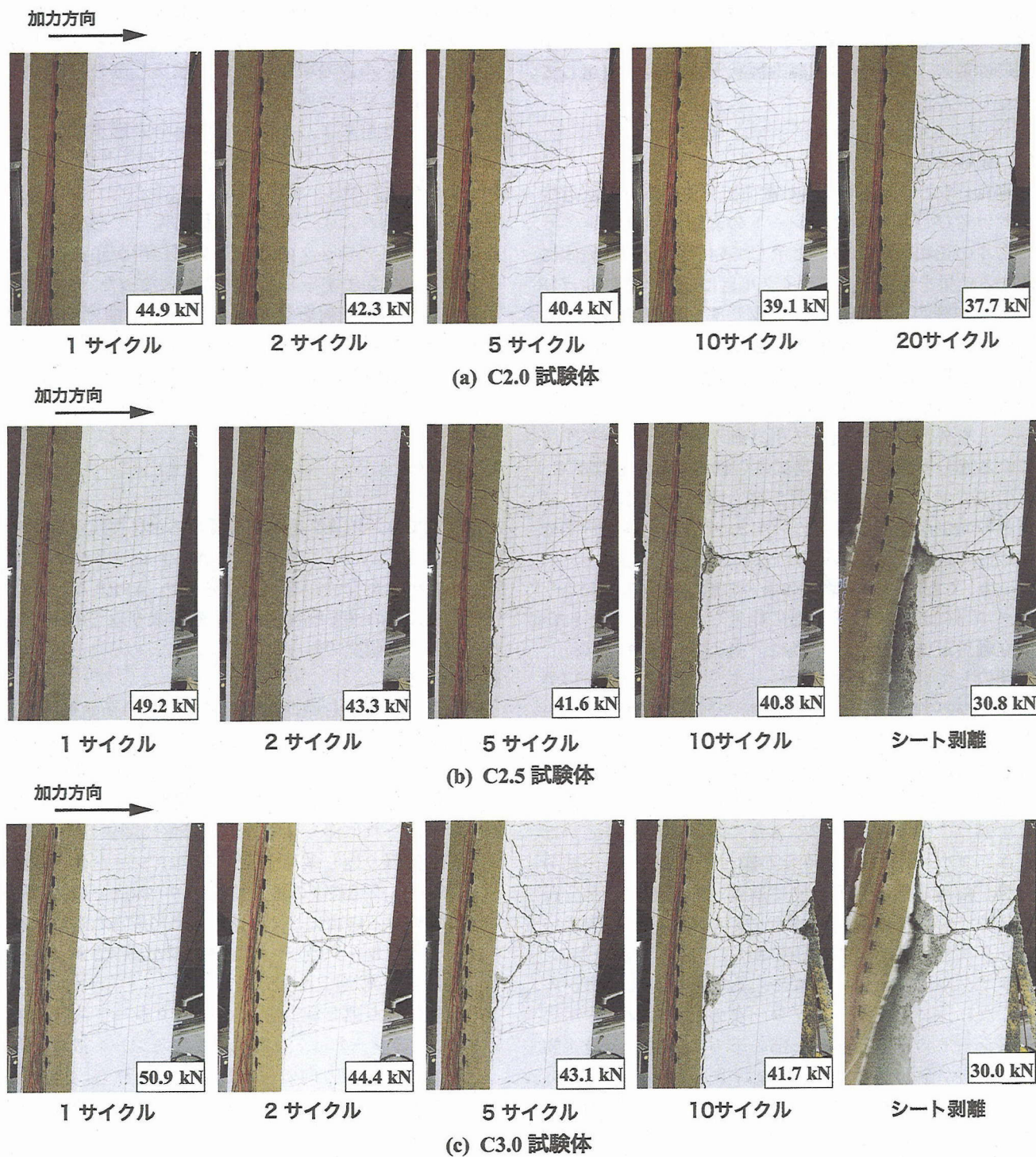


写真-1 段落し部近傍におけるシートの剥離進展状況

シート剥離直前の4サイクル目においてより顕著に角折れが生じていることが分かる。

図-6には、繰り返し載荷試験体の段落し部近傍における角折れ性状を詳細に検討するため、段落し部および段落し部より上方20 cm位置における水平変位の推移状況を各サイクルの正載荷時について示している。図-6(a)より、C2.5、C3.0試験体において、サイクル数の増加に伴う水平変位量の増加が若干見られるもののいずれの試験体もその変位量に大きな変動は見られ

ないことが分かる。一方、図-6(b)を見ると、C2.0試験体の段落し部における水平変位量はサイクル数の増加にかかわらずほぼ一定であるのに対し、C2.5、C3.0試験体の場合は1サイクル目で最大変位を示した後、2サイクル目以降において徐々に減少している。この傾向は特にC3.0試験体の場合において最も顕著である。このように、C2.5、C3.0試験体の場合には、サイクル数の増加に伴い段落し部とその上方20 cm位置の水平変位量の差が拡大していることが分かる。従って、設定変位

振幅の大きい場合ほど、サイクル数の増加に対応して段落し部近傍で角折れが顕著となっており、このような傾向には前述のシートの剥離進展状況が密接に関連しているものと推察される。

3.4 破壊性状

写真-1には、各繰返し載荷試験体の段落し部近傍におけるひび割れおよびシートの剥離進展状況を各サイクルの正載荷時について示している。C2.0 試験体に関する結果を見ると、1 サイクル目には柱全体に曲げひび割れが等間隔に発生し、段落し部に曲げひび割れの開口が見られる。2 サイクル目には曲げひび割れの他、斜めひび割れの発生も確認できる。また、段落し部では引張縁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見受けられる。しかしながら、その後のサイクルでは段落し部上側において斜めひび割れの発生が見られるものの、20 サイクル終了時までその他の著しい変化は見られない。

一方、C2.5, C3.0 試験体の場合の結果を見ると、1 サイクル目において段落し部に発生した曲げひび割れが中立軸付近まで進行した後に、斜めひび割れに移行して開口していることが分かる。また、段落し部周辺では曲げひび割れと斜めひび割れが交差してコンクリートブロックが形成され、ピーリング作用によるシートの部分剥離の発生が見受けられる。2 サイクル目には、1 サイクル目に発生したひび割れが大きく開口し、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分かる。特に、C3.0 試験体の場合において、比較的大きいコンクリートブロックが形成されていることが分かる。2 サイクル以降では、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、最終的にシートが全面剥離して急激な荷重低下を示している。これより、C2.5, C3.0 試験体のシートは、1) 引張力作用面では、段落し部近傍に形成されるコンクリートブロックのピーリング作用によってシートの部分剥離が進行する、2) 圧縮力作用面では前述のように段落し部のコンクリートに2,500～3,500 μ 程度の圧縮ひずみが発生し、コンクリートが損傷する、3) これらの作用を交互に受けることによりシートの剥離領域が下方に拡大し、結果として全面的な剥離に至るものと考えられる。なお、シート剥離時における段落し部の損傷は、C3.0 試験体の場合においてより顕著である。

以上より、C2.0 試験体では、サイクル数の増加に伴うひび割れの進展や開口が顕在化せず、ブロック化したコンクリートのピーリング作用によるシートの剥離は

最終サイクルまで局所的であり、全面剥離に至らないことが明らかとなった。一方、C2.5, C3.0 試験体の場合には、サイクル数の増加に伴って段落し部の損傷も進行し、段落し部に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によってシートの部分剥離が進展し全面的な剥離に至ることが明らかとなった。このように、シートの全面剥離は、段落し部近傍に発生した曲げおよび斜めひび割れによる損傷の進行に伴って形成されるコンクリートブロックのピーリング作用が顕在化することによって発生することが明らかとなった。従って、定変位繰返し載荷を受ける FRP シート曲げ補強 RC 柱のシートの剥離は、シートの接着界面における面内方向の付着性能の低下よりも、上述のピーリング作用による剥離作用が主要因であるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、正負交番載荷を受ける 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 RC 柱の耐荷性状を検討するため、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) 定変位繰返し載荷における RC 柱の荷重低下は、段落し部近傍の引張側に形成されるコンクリートブロックのピーリング作用と圧縮側コンクリートの圧壊によって、シートの部分剥離領域が拡大することや、それに伴うひずみの均等化に関係している。
- 2) 定変位繰返し載荷を受ける FRP シート曲げ補強 RC 柱は、補強後の最大耐力の 90 % 以下の載荷履歴を受ける場合には、段落し部に形成されるコンクリートブロックのピーリング作用が抑制され、シートは全面剥離に至らない。
- 3) 定変位繰返し載荷を受ける FRP シート曲げ補強 RC 柱のシートは、交番載荷によるシート接着界面における面内方向の付着性能低下よりも段落し部近傍に形成されるコンクリートブロックのピーリング作用によって全面剥離に至る。

参考文献

- 1) 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設計指針，コンクリートライブラリー 101，2000。
- 2) 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。

(2002 年 4 月 19 日受付)