

AFRP シートを用いた RC 橋脚段落し部の曲げ補強法に関する実験的研究

An experimental study on flexural strengthening method with AFRPs for stepped rebar arrangement area of RC piers

岸 徳光*, 三上 浩**, 栗橋 祐介***, 澤田 純之****

Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami, Yusuke Kurihashi and Sumiyuki Sawada

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

**博 (工) 三井住友建設 (株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

***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)

****修 (工) 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In order to establish a rational flexural strengthening method with Aramid Fiber Reinforced Plastic sheet (AFRPs) for stepped rebar arrangement area of RC piers, lateral monotonic and cyclic loading tests were conducted emphasizing determination of the strengthening area. The experiments are composed of two series: 1) for determination of the upper strengthening area under fixing the bonding area of AFRPs in the lower area from the stepped rebar arrangement; and 2) for determination of the lower area under bonding AFRPs in appropriate area of the upper area. From this study, following results are obtained; 1) appropriate bonding length in upward and downward direction from the stepped rebar arrangement will be appropriately determined adding rebar yielded length and a half height of the cross section; and taking a height of the cross section, respectively; 2) if bonding length of AFRPs in the downward direction was insufficient, AFRPs will be early debonded due to edge peeling of AFRPs.

Key Words : RC pier, FRP sheet, required bonding length, stepped rebar arrangement**キーワード :** RC 柱, FRP シート, 必要接着長, 段落し

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、平成 8 年に道路橋示方書¹⁾ (以後、示方書) が改訂されている。それに伴い、鉄道・道路橋等の既設鉄筋コンクリート (以後、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、これらの工法は、前者の場合には補強を施すことにより構造物の重量が増し、耐震設計上不利となることや、補強材料の重量が大きく重機等を必要とするため施工性に劣ること、後者の場合には腐食が懸念されるため防錆加工が必要となること、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) 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。構造物の補強に用いられる FRP シート材料には、炭素繊維の他、しなやかで非導電性、非磁性のアラミド繊維シート (以後、AFRP シート) 等がある。特に、AFRP シートを用いる場合に限定して考えると、アラミド補強研究会では AFRP シートによる RC 橋脚の補強設計要領²⁾ (以後、要領) を発刊し、シート巻付けによるせん断補強設計法の他、曲げ補強設計法に関しても言及

し、曲げ補強量やシート接着長を規定している。しかしながら、要領に準拠して決定したシート接着長の妥当性を実験的に検討した事例は見あたらない。

このような観点より、本研究では、示方書に規定されている許容塑性率を確保することを前提に、AFRP シートを用いた RC 橋脚段落し部の曲げ補強問題に着目し、要領に規定されているシート接着長の妥当性の確認および効率的なシート接着長を決定することを目的として、シート接着長を変化させた AFRP シート曲げ補強 RC 橋脚に関する水平単調および交番載荷実験を行った。本研究では、これらの実験研究を効率的に行うために、段落し部より上側 (以後、単に上側) のシート接着長に関する検討 (シリーズ 1) と、段落し部より下側 (以後、単に下側) のシート接着長に関する検討 (シリーズ 2) に分けて実施している。

2. 実験の概要

2.1 試験体の概要

本研究では、第 1 章にも述べているように、2 つのシリーズに分けて実験を行っている。シリーズ 1 では、下側のシート接着長を要領に準拠した長さに固定し、上側のシート接着長をパラメータに取って検討を行っている。シリーズ 2 では、上側のシート接着長に

表-1 試験体の一覧

実験 シリーズ	試験体名	段落し 位置 (mm)	主鉄筋の 本数 (本)	シート 目付量 (g/m ²)	上側シート 接着長 (mm)	下側シート 接着長 (mm)	許容 塑性率 μ_a
1, 2	N-M/C	無し	16	無し	-	-	4.6
1	U0-M/C	720	上側：8 下側：16	無し	-	-	4.2
	U1-M/C			260 ($L_{yu} + 0.5D$)	380*		
	U2-M/C			385 ($L_{yu} + 1.0D$)			
	U3-M/C			520* ($L_{yu} + 1.5D$)			
2	L0-M/C	950	上側：6 下側：16	無し	-	-	4.6
	L1-M/C			200	285 ($L_{yu} + 0.5D$)	125 (0.5D)	
	L2-M/C					250 (1.0D)	
	L3-M/C					380* (1.5D)	

*：要領に準拠， L_{yu} ：主鉄筋降伏範囲， D ：断面高さ (250 mm)

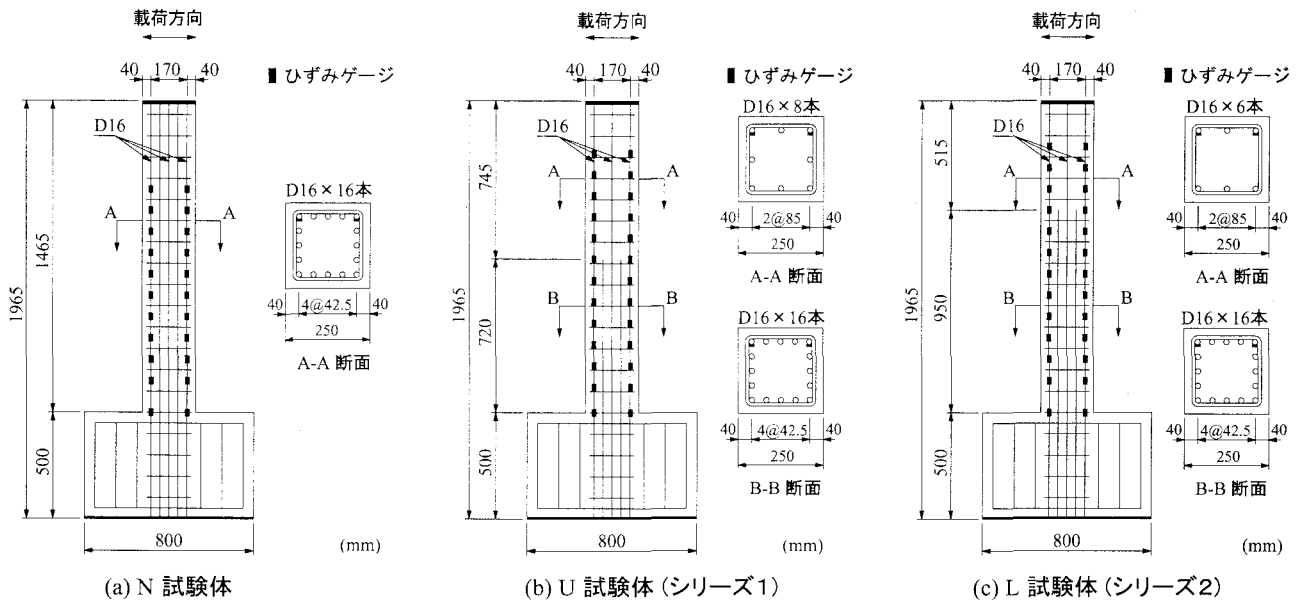


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況 (側面図および断面図)

シリーズ1で最も効率的である接着長を採用し、下側のシート接着長をパラメータに取った検討を行った。

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。本実験では段落しを施していない試験体を含め、合計18体のRC橋脚模型を用いた。表中、試験体名の第一項目は検討項目を示しており、上側のシート接着長を検討するシリーズ1をU、下側のシート接着長を検討するシリーズ2をLとしている。また、段落しを施していない試験体はNと示している。これらの英字に付随する数値は検討するシートの接着長を示しており、0, 1, 2, 3の順にシート接着長が長くなるように設定した。なお、数値の0は無補強試験体を示している。第二項目は載荷方法を示しており、Mは単調載荷実験、Cは交番載荷実験を意味している。なお、表中には示方書に基づいた許容塑性率も合わせて示している。

図-1には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体の断面寸法はいずれの場合も250×250 mm、フーチングからの柱の高さは1,465 mmである。軸方向鉄筋にはD16 (SD345) を使用し、帯鉄筋にはD10 (SD295A) を用いて基部より100 mm間隔で配筋している。本研究における軸方向鉄筋の段落し位置は、昭和55年以前の道路橋示方書³⁾ (以後、旧示方書) に準拠して設計されたRC橋脚の段落し部を想定しているため、鉄筋の定着長さを考慮した照査段落し位置ではなく、実段落し (以後、単に段落し) 位置の降伏曲げ耐力が基部の降伏曲げ耐力と同程度となるように設計している。そのため、シリーズ1では、基部より720 mmの位置で段落しを行い、軸方向鉄筋を16本から8本に減少させている。また、シリーズ2では、基部からの主鉄筋降伏領域の拡大がシートの剥離性状に影響

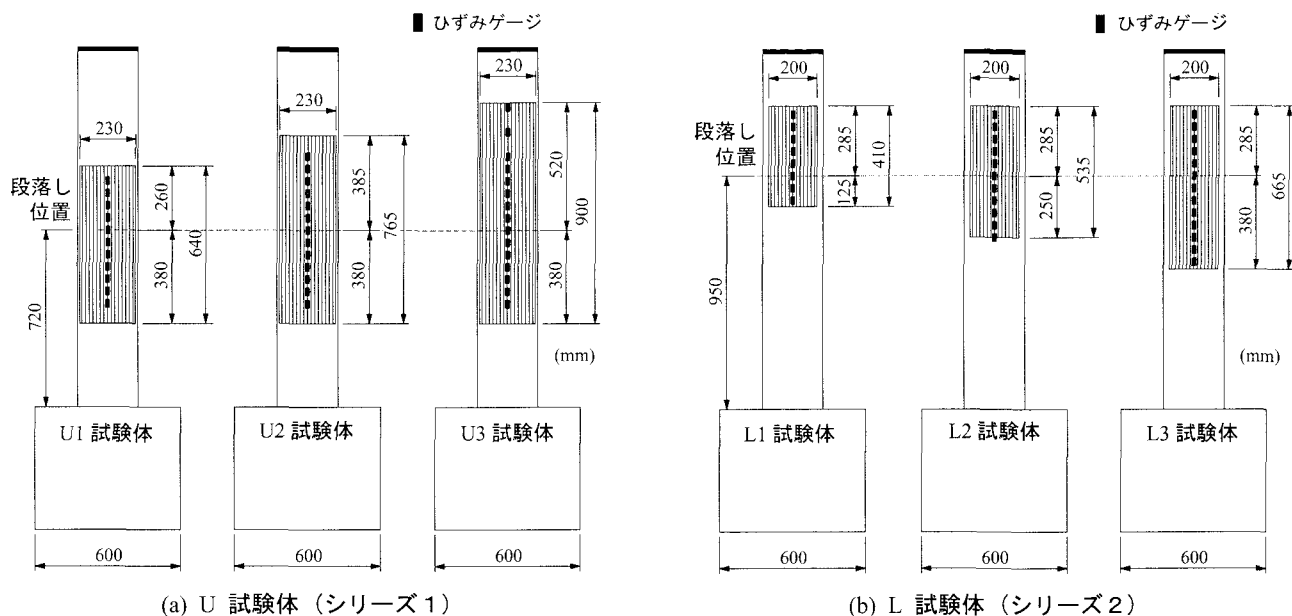


図-2 曲げ補強シートの補強概要 (正面図)

を与える可能性があるため、基部より 950 mm の位置で段落しを行い、その位置で軸方向鉄筋を 16 本から 6 本に減少させている。

2.2 補強概要

図-2 には、本実験に用いた試験体の補強概要を示している。本研究ではシート補強量を要領に準拠して決定することとした。要領では、段落し部の曲げ補強量を、照査段落し位置で基部降伏に対して 1.2 倍の安全率を有するよう算定することを規定している。従って、本研究では実段落し位置を照査段落し位置と仮定して、基部降伏荷重を 1.2 倍した際の段落し位置の作用モーメントと補強前の段落し断面抵抗曲げモーメントの差分を不足モーメントとして算出し、シート補強量を算定することとした。なお、シートの許容ひずみは要領に準拠して 1.0 % とした。そのため、本研究では目付量 200 g/m² の AFRP シートを用いることとし、シリーズ 1 で幅を 230 mm、シリーズ 2 では幅を 200 mm として一層だけ接着して補強することとした。また、シートの接着範囲は、いずれの場合に関してもより厳しい状態に対して検討することとし、照査段落しを考慮せずに実段落しからの接着長として設定している。

一方、既往の研究より、鉛直荷重を受ける RC 梁の曲げ補強問題では、等せん断力区間の主鉄筋降伏領域における下縁かぶりコンクリートのピーリング作用によってシート剥離が進行することが明らかになっている⁴⁾。このことから、本研究においても RC 梁と同様の現象による剥離を想定し、軸方向鉄筋の降伏領域をシートで補強し、その上・下方向に定着長を設けることとし、その定着長を 0.5 D 、1.0 D (D : 断面高さ 250 mm) とする場合の他、要領に従う定着長を設定した。

すなわち、シリーズ 1 では、下側のシート接着長を要領に準拠した長さに固定し、上側のシート接着長を 1) L1: $L_{yu} + 0.5 D$ 、2) L2: $L_{yu} + 1.0 D$ 、3) L3: 要領に準拠した長さ ($L_{yu} + 1.5 D$)、とした。 L_{yu} は、断面分割法に基づいて算出した断面力-曲率関係において、基部の圧縮側縁コンクリートが終局ひずみに達した時点の段落し部より上方の主鉄筋降伏領域の長さである。ここで、コンクリートの圧縮側終局ひずみはコンクリート標準示方書で規定されている 3,500 μ としている。なお、 L_{yu} はシリーズ 1 で 135 mm、シリーズ 2 で 160 mm である。

シリーズ 2 では、上側のシート接着長をシリーズ 1 の結果を参考に最も効率的であった $L_{yu} + 0.5 D$ に固定した。段落し部より下側の軸方向鉄筋は基本的に曲げ降伏に至らないことより、梁理論的には上側曲げ補強部に対する定着部として機能しているものと考えられる。また、段落し部を有する無補強 RC 橋脚の水平載荷実験結果より、段落し部に発生した曲げひび割れは断面中央部まで水平に進展し、そこからほぼ 45 度下方に進展することが明らかになっている⁵⁾。これらの結果を踏まえて、本研究では下側接着長として 1) U1: 0.5 D を基本に、2) U2: 1.0 D 、および 3) U3: 要領に準拠した長さ (1.5 D)、を設定した。なお、本実験ではシート接着範囲にショットブラスト処理 (処理深さ 1 ~ 2 mm) を施してシートの付着性能を向上させている。表-2、表-3 および 表-4 には、それぞれ実験に使用したコンクリート、鉄筋および AFRP シートの材料特性値を示している。

2.3 実験方法

本研究では、旧示方書に準拠した RC 橋脚を対象と

表-2 コンクリートの力学的特性値

試験体	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比 ν
シリーズ1	28.5	21.1	0.19
N-M シリーズ2の単調	32.5	27.8	0.19
N-C シリーズ2の交番	40.2	31.7	0.22

表-3 軸方向鉄筋の力学的特性値

試験体	呼び径	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
シリーズ1	D16	399	206
シリーズ2		365	

表-4 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

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	120	2.06	1.75

して、示方書に規定されている許容塑性率を確保するために段落し部を AFRP シートで曲げ補強する時の最小のシート接着長を決定することを目的としている。従って、本研究では単純な条件下でのシートの剥離特性や RC 橋脚の耐荷性状を把握するために、橋梁上部工の重量を模擬した軸力は導入しないこととした。実験は、単調荷重、交番荷重ともに電動スクリュージャッキを用いて変位制御方式で行った。荷重位置は基部からの高さが 1,655 mm (柱部天端より 190 mm) のピン結合部である。なお、写真-1 には、本実験の試験体設置状況を示している。

単調荷重実験は、柱を一方向 (正方向) に加力し、コンクリートの圧壊もしくはシート剥離により終局に至るまで行っている。交番荷重実験は、段落し部もしくは基部の主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点における荷重点変位を降伏変位 δ_y とし、その δ_y を基準にして $2\delta_y, 3\delta_y, \dots$ と振幅を漸増させて正負方向に繰り返し荷重することにより実施している。各変位振幅毎の繰り返し回数は、3 サイクルとした。また、荷重は 1 サイクル目の荷重が主鉄筋降伏時の荷重 P_y を下回るか軸方向鉄筋が破断するまでとしている。

本実験の測定項目は、荷重点における水平荷重、水平変位および主鉄筋とシート各点のひずみである。なお、主鉄筋には、図-1 に示すように段落し部より 100 mm 間隔および基部にひずみゲージを貼付している。また、シートには、図-2 に示すようにシートの中心線上に段落し部より上・下方向に 300 mm の範囲まで

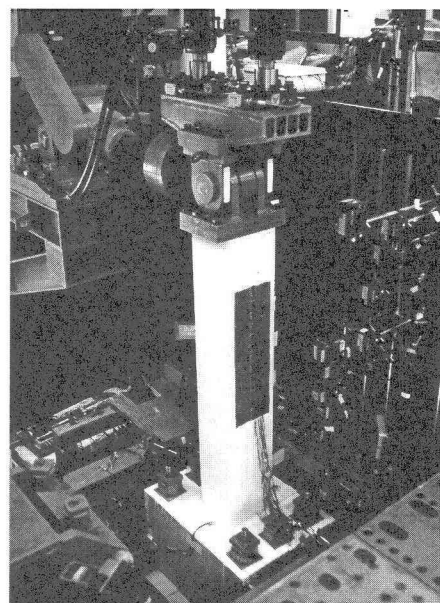


写真-1 試験体の設置状況

は 50 mm 間隔で、その外側の範囲には 100 mm 間隔でひずみゲージを貼付している。なお、ひび割れの進展状況を詳細に検討するため、デジタルビデオカメラを用いて連続的に撮影を行っている。

3. 実験結果及び考察

3.1 上側接着長に関する実験 (シリーズ1)

(1) 荷重-変位曲線

図-3 には、同一試験体の単調および交番荷重実験の荷重-変位曲線を比較して示している。図中には、断面分割法により算出した計算最大荷重値を破線で示しており、右下には交番荷重試験体の降伏荷重 P_y および降伏変位 δ_y を示している。なお、計算最大荷重値は、柱の基部断面のコンクリートが終局圧縮ひずみに達する時点の値である。

図より、最大荷重値に着目すると段落しおよびシート補強の有無にかかわらず、いずれの試験体も、計算最大荷重値を上回った後に終局に至っていることが分かる。これは、段落し部の曲げ耐力が基部のそれと同程度であるため、シートで曲げ補強することによって損傷が段落し部から基部に移行後も、耐力が大きく変わらないためである。

単調荷重の場合には U1/U2/U3-M 試験体の終局変位が、U0-M 試験体の場合よりも大きく示されている。これは、前者は基部コンクリート圧壊後に段落し部のシート剥離によって終局に至っているのに対して、後者は基部に塑性ヒンジが形成されて終局に至っているためである。

交番荷重実験の結果より、荷重-変位曲線で囲まれる吸収エネルギーを見ると、U0-C 試験体に比較して

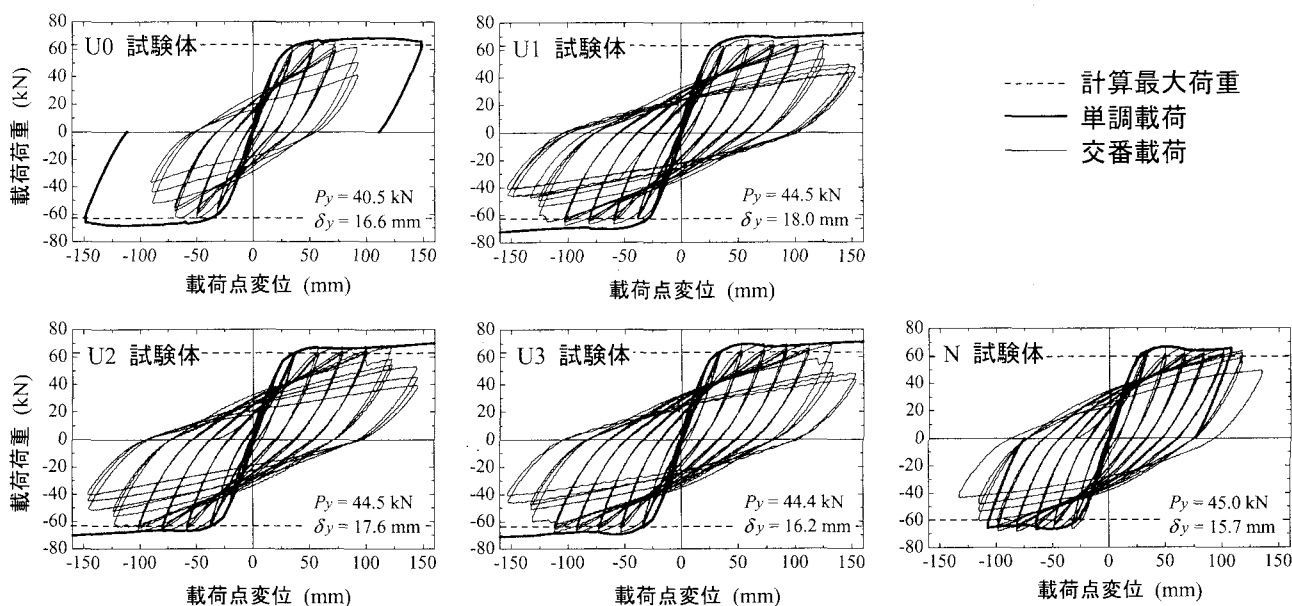


図-3 荷重-変位曲線(シリーズ1)

U1/U2/U3-C 試験体は約 2 倍の吸収エネルギーを示しており、N-C 試験体と同程度まで大きく示されていることが分かる。これは、U0-C 試験体の場合には、後述の破壊性状からも明らかなように、段落し部に損傷が集中しており終局に至るのに対し、U1/U2/U3-C 試験体の場合には曲げ補強により損傷が基部に移したため、段落し部の無い N-C 試験体と類似した破壊性状を示したことによるものと考えられる。

次に、荷重方法の違いに着目すると、曲げ補強した U1/U2/U3 試験体において、交番載荷の場合には単調載荷の場合と最大荷重が同程度であるものの、終局変位は大きく下回っている。これは、交番載荷の場合には、繰り返し載荷によって段落し近傍かぶりコンクリート部の劣化損傷によりシートの付着性能が著しく低下し、早期に剥離が進行することによるものと考えられる。

以上のことより、荷重方法にかかわらず段落し部を曲げ補強することにより破壊位置を段落し部から基部に移行させることができ、段落し部より下側の柱部においてもエネルギー吸収が効率的に行われるため、変形性能が段落し部の無い場合と同程度まで改善されるものと考えられる。

図-4 には、交番載荷実験における各変位振幅 1 サイクル目の載荷荷重と無次元変位振幅の関係を示している。横軸の無次元変位振幅は各振幅時の変位 δ を降伏変位 δ_y で除した値である。また、図中には示方書より得られる許容塑性率を破線で示している。

図より、いずれの試験体も許容塑性率を上回った後に荷重が低下しているものの、無補強試験体である U0-C 試験体は許容塑性率の到達直後に荷重が低下し無次元変位振幅が 6 程度で終局に至っている。一方、補強試験体はシート接着長が $L_{yu} + 0.5D$ と最も小さい

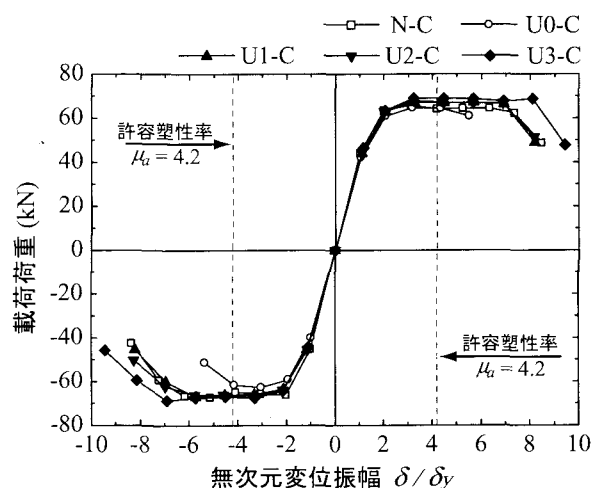


図-4 1 サイクル目における載荷荷重と無次元変位振幅の関係(シリーズ1)

場合を含めいずれも段落し部の無い N-C 試験体と同程度の靱性能が確保されていることが分かる。なお、U1/U2/U3-C 試験体の無次元変位振幅は 8 程度であり、許容塑性率 $\mu_a = 4.2$ を十分上回っている。

以上より、本実験の範囲内では、U1-C 試験体のように上側のシート接着長を $L_{yu} + 0.5D$ 程度とすることで示方書に基づいた許容塑性率以上の変形能を保証できることが明らかとなった。

(2) 破壊性状

写真-2 には、各単調載荷試験体の終局時における破壊性状を示している。無補強の U0-M 試験体では、引張側の段落し部において曲げひび割れが大きく開口している。また、圧縮側には段落し部より 100 mm 程度下方の位置でコンクリートが圧壊していることが確

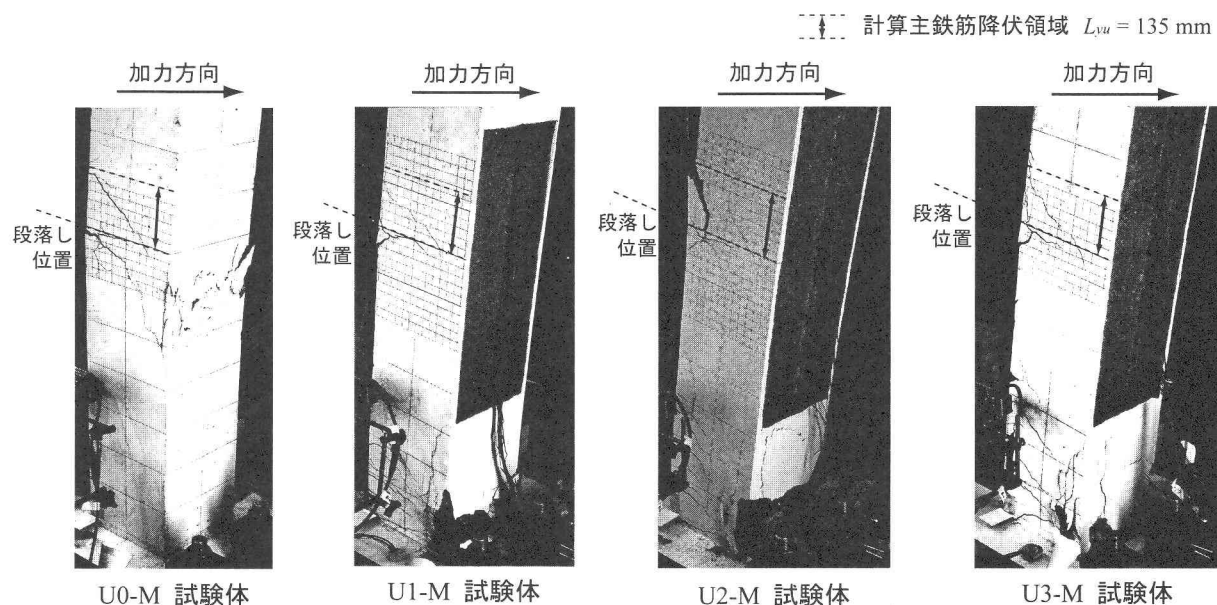


写真-2 単調載荷時の各試験体の破壊性状 (加力は右方向)

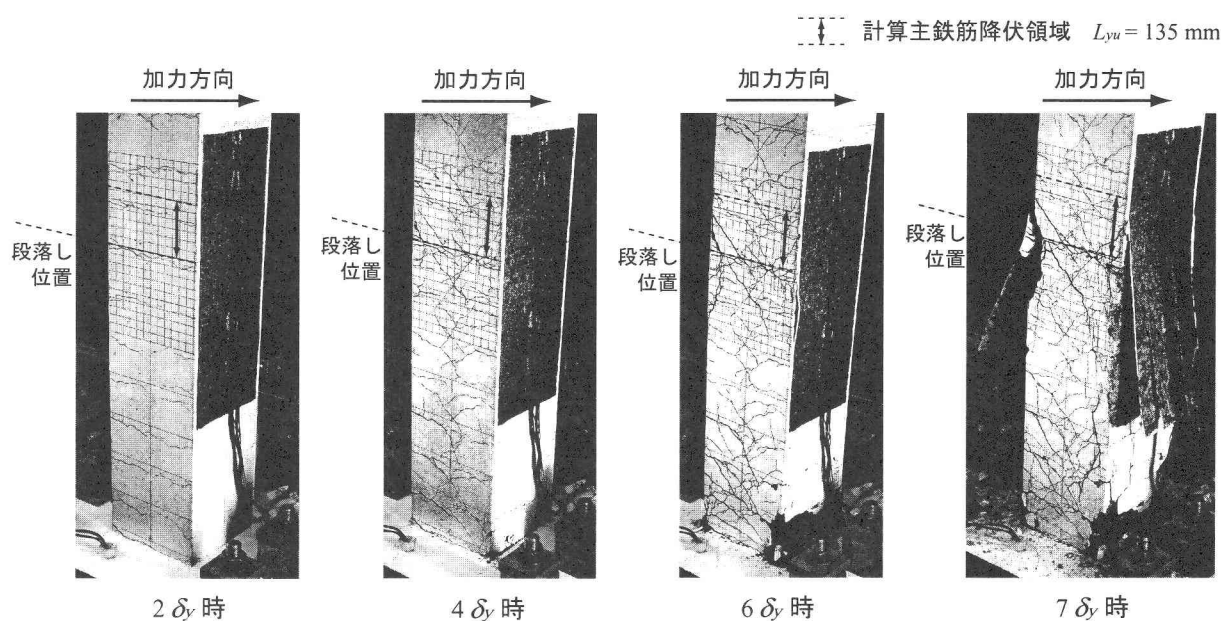


写真-3 交番載荷時の U1-C 試験体のひび割れ進展状況 (加力は右方向)

認できる。補強した3試験体はいずれも段落し部に曲げひび割れが発生し、その近傍のかぶり部に斜めひび割れが発生し、シート剥離の要因となるコンクリートブロックが形成されている。この発生範囲はいずれの試験体も段落し部より上方 100 mm 程度であり、本試験体の主鉄筋降伏範囲 $L_{yu} = 135 \text{ mm}$ よりも小さい。このことより、シート剥離の要因であるコンクリートブロックは主鉄筋降伏範囲で発生することが分かる。これは、既往の FRP シート曲げ補強 RC 梁のシート剥離性状と同様の傾向である⁴⁾。

写真-3 には、U1-C 試験体に関する交番載荷時のひび割れ進展状況を示している。写真より、変位振幅 2 δ_y 時にはほぼ等間隔に曲げひび割れのみが発生し、4

δ_y 時にはこれらの曲げひび割れが断面中立軸近傍で斜め下方に進展していることが分かる。また、引張縁では段落し近傍部のかぶりコンクリートに斜めひび割れが発生しブロック化していることから、ピーリング作用によるシートの部分剥離が生じているものと考えられる。

6 δ_y 時には、引張縁においてコンクリートブロックの形成およびピーリング作用によるシートの部分剥離がより顕在化し、圧縮縁では段落し部の約 100 mm 下方でシートがはらみ出して部分的に剥離していることが分かる。このように、交番載荷の場合には、曲げ引張力作用時に部分的に剥離したシートが曲げ圧縮力作用時にはらみ出すこととなる。また、はらみ出した部

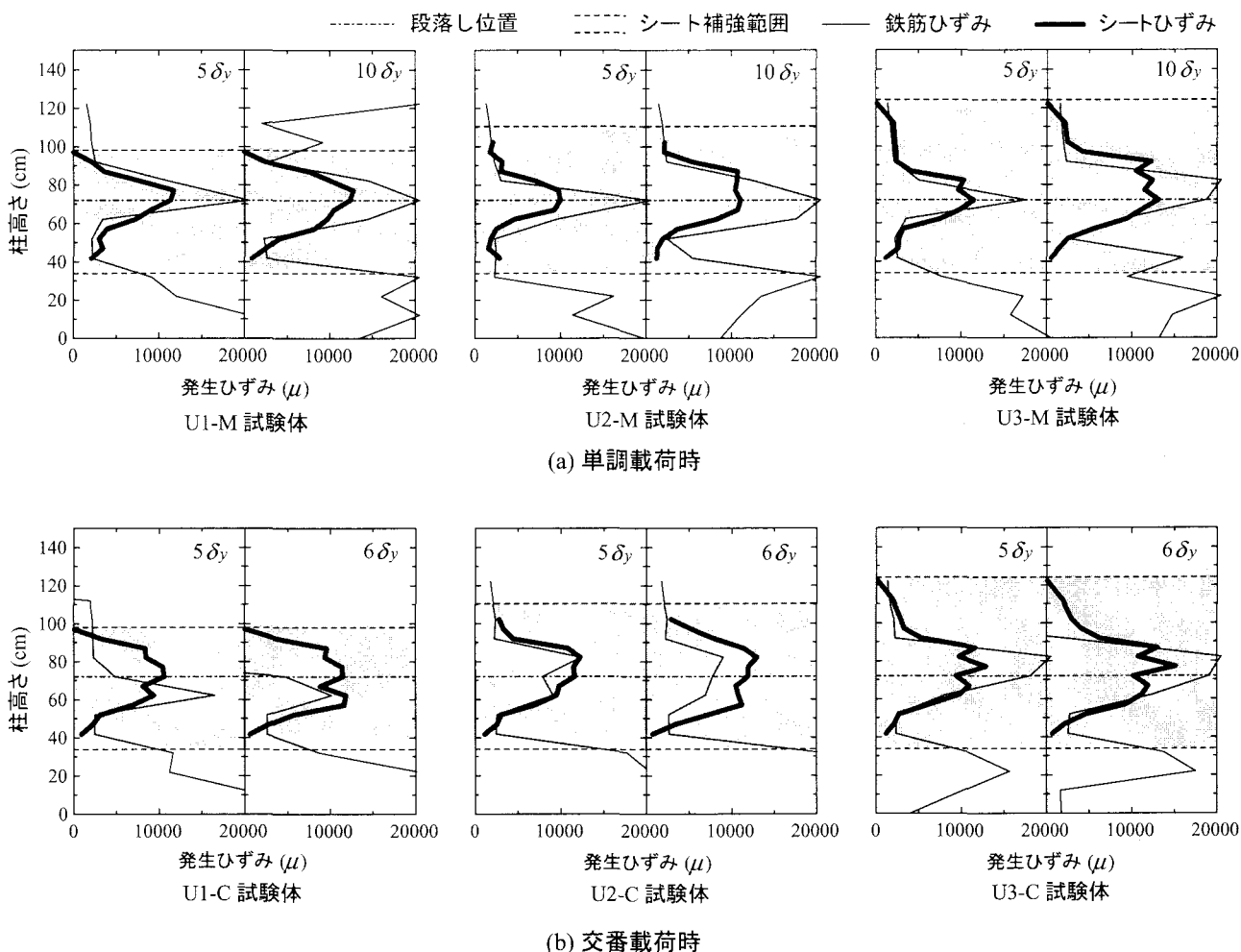


図-5 ひずみ分布性状(シリーズ1)

分にひび割れによって発生した小さなコンクリート粒子が蓄積され、このコンクリート粒子が曲げ引張時にてこの支点的な役目を果たすことよりシート剥離を促進させている。このようにして、変位振幅の増大とともにシート剥離が下方に進展して全面剥離に至ることが明らかとなった。なお、上記のように段落し部の下方でシートが剥離する性状は、他の交番載荷試験体でも同様であった。

(3) 主鉄筋およびシートの軸方向ひずみ分布性状

図-5には、各試験体のシートおよび軸方向鉄筋に関するひずみ分布を比較して示している。図中、単調載荷の場合に対しては、許容塑性率を超えた時点である $5\delta_y$ 時およびシート端部の定着が確認できる $10\delta_y$ 時、交番載荷の場合に対しては $5\delta_y$ 時およびシート剥離前の変位振幅時である $6\delta_y$ 時における結果を示している。

図-5(a)より、単調載荷試験体の $5\delta_y$ 時にはいずれの試験体も主鉄筋ひずみが段落し部近傍において大きく示されている。それに伴い、シートには主鉄筋の降伏範囲とほぼ対応した範囲で大きなひずみが発生しており、この範囲内でシートの補強効果が発揮されている

ことが分かる。また、 $10\delta_y$ 時においてもいずれの試験体においても段落し部から離れた領域では、シートの発生ひずみが小さいことより、いずれの試験体もシートの定着が十分に確保されているものと考えられる。

図-5(b)より、交番載荷の場合も、単調載荷の場合と同様の傾向が見られる。すなわち、シートに発生するひずみは段落し部近傍の主鉄筋ひずみが大きく示されている範囲では大きく、段落し部から離れた領域では小さく示されている。

以上のことより、シートの補強効果は主に段落し部近傍で効果的に発揮され、その上下周辺は補強部に対する定着領域として機能していることが明らかになった。本実験の範囲内では、上側のシート接着長はU1-C試験体の $L_{yu} + 0.5D$ で十分であることが分かる。また、定着の確保されている無次元変位振幅を許容塑性率で除した余裕度を算出すると、単調載荷時で2.4、交番載荷時で1.4程度である。

3.2 下側接着長に関する実験(シリーズ2)

(1) 荷重-変位曲線

図-6には、前節で得られた実験結果を用いて、段落

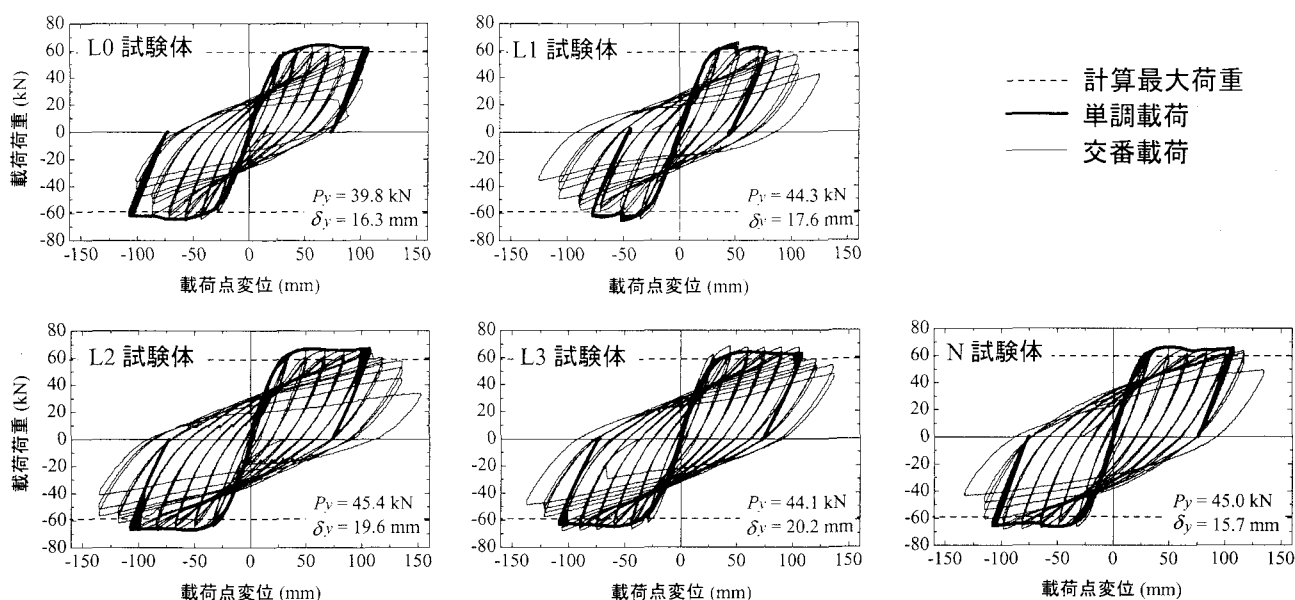


図-6 荷重-変位曲線(シリーズ2)

し部より上側のシート接着長を $L_{yu} + 0.5D$ とし、シートの下側接着長を種々変化させた試験体の単調および交番載荷実験の荷重-変位曲線を示している。図中には、シリーズ1と同様に断面分割法によって得られた計算最大荷重を破線で示し、交番載荷実験の降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y を右下に示している。

図より、実験の最大荷重値はシリーズ1と同様、いずれの試験体も計算最大荷重を上回った後に終局に至っており、シリーズ2においても基部のコンクリートの圧壊を想定した計算耐力を保証できることが分かる。ただし、L0-C 試験体の場合は段落し部の主鉄筋が基部よりも早期に降伏に至っている。

次に、荷重-変位曲線に囲まれる吸収エネルギーを比較すると、L0-C 試験体の交番載荷時の終局変位は段落しを施していない N-C 試験体に比較して小さく示されている。これは、シリーズ1の場合と同様に段落し部に損傷が集中したことによるものである。また、終局変位に着目すると、シート補強を行った試験体において、L1-C 試験体を除く L2/L3-C 試験体は、L0-C 試験体よりも大きく示されている。一方、L1-C 試験体は、他の補強試験体に比較して小さく示されており、補強前の L0-C 試験体よりも若干大きい程度である。これは、L1-C 試験体において基部にコンクリートの圧壊が生じる前の $3\delta_y$ 載荷途中でシート剥離が発生したため、無補強試験体と同様に段落し部に損傷が集中したことによるものと考えられる。これは、L1-C 試験体において段落し部より下方のシート接着長が不足していることによるものと考えられる。

図-7 には、シリーズ2の各変位振幅時1サイクル目の載荷荷重と無次元変位振幅の関係を示している。なお、横軸の無次元変位振幅は 図-4 と同様、変位振

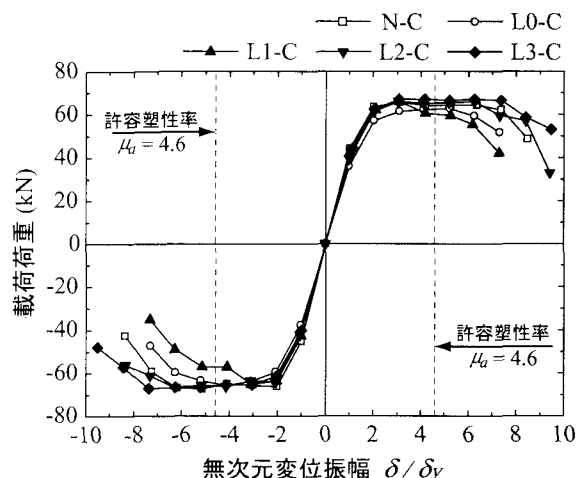


図-7 1 サイクル目における載荷荷重と無次元変位振幅の関係(シリーズ2)

幅を降伏変位で除した値である。

図より、本シリーズにおいてもシリーズ1と同様の考え方で補強設計を行っているため、補強の有無にかかわらず最大荷重はほぼ同程度の値を示していることが分かる。載荷荷重分布に着目すると、L1-C 試験体では許容塑性率に達する前に、L0-C 試験体よりも低減していることが分かる。これより、L1-C 試験体の場合には、載荷初期には L2/L3 試験体と同様に段落し部の耐力を基部よりも増強できる。しかしながら、段落し部より下方のシート接着長が不足していることより、早期にシート剥離が生じるため、許容塑性率に達する前に段落し部の損傷が先行し、L0-C 試験体と類似の耐荷性状を示しているものと考えられる。

以上より、本実験の範囲内では、段落し部より下側

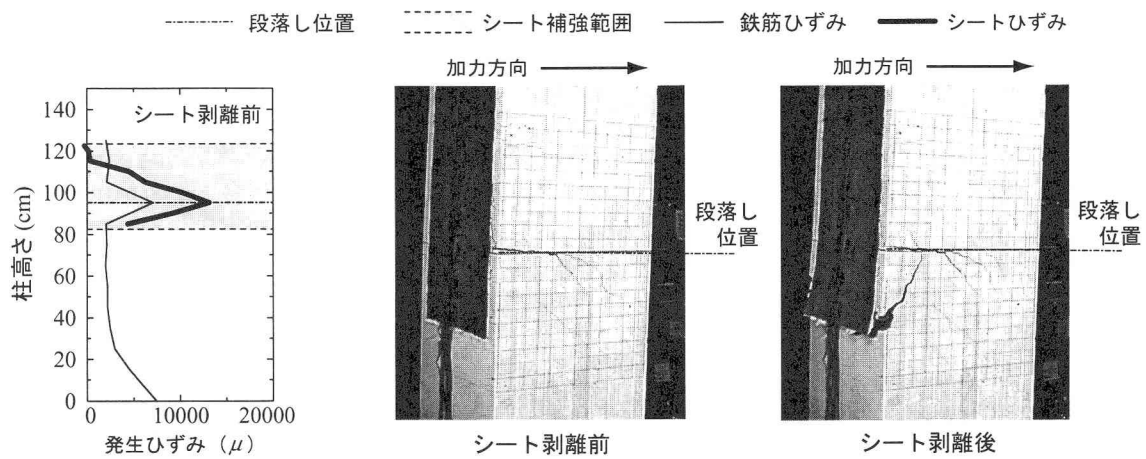
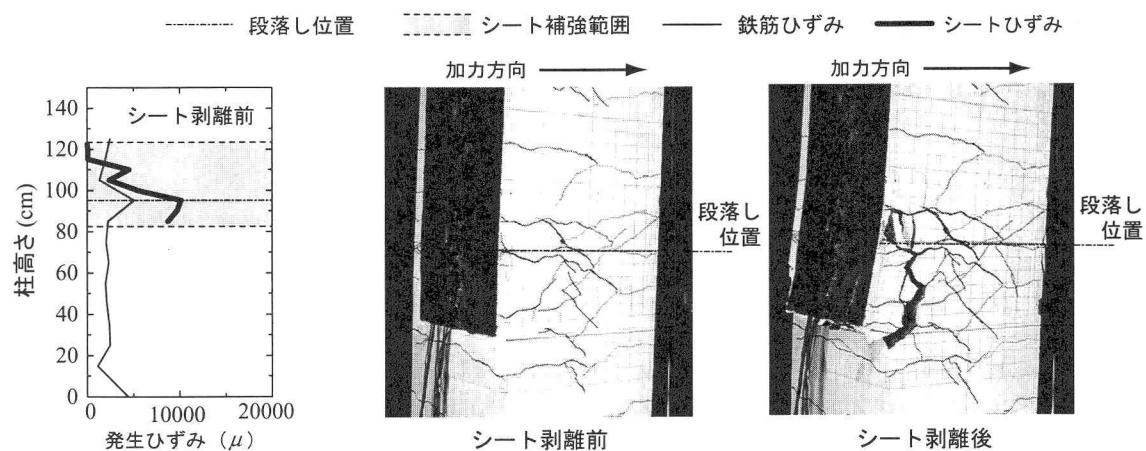
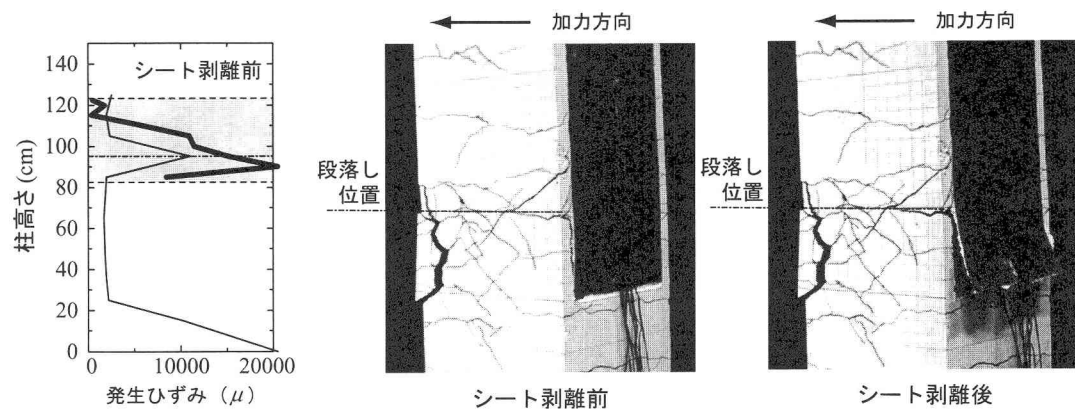


図-8 L1-M 試験体のシート剥離時の状況



(a) 正載荷時におけるシート剥離状況 ($3\delta_y$ 時)



(b) 負載荷時におけるシート剥離状況 ($3\delta_y$ 時)

図-9 L1-C 試験体のシート剥離時の状況

のシート接着長を L2-C 試験体のシート接着長である $1.0D$ 以上と設定することで基部の損傷を先行させ、許容塑性率以上の変形能を保證できることが明らかになった。

(2) L1 試験体のシート剥離性状

図-8, 9 には、早期にシート剥離が発生し十分な補強効果が得られていない L1-M, L1-C 試験体のシート

剥離性状を示している。それぞれの写真には、シート剥離前および剥離後の段落し近傍の状況を示しており、写真の左側にはシート剥離前における柱高さ方向の鉄筋およびシートのひずみ分布性状も示している。なお、図-9(a) 図には正載荷時、(b) 図には負載荷時におけるシート剥離状況を示している。

図-8 より、L1-M 試験体はシート剥離前において

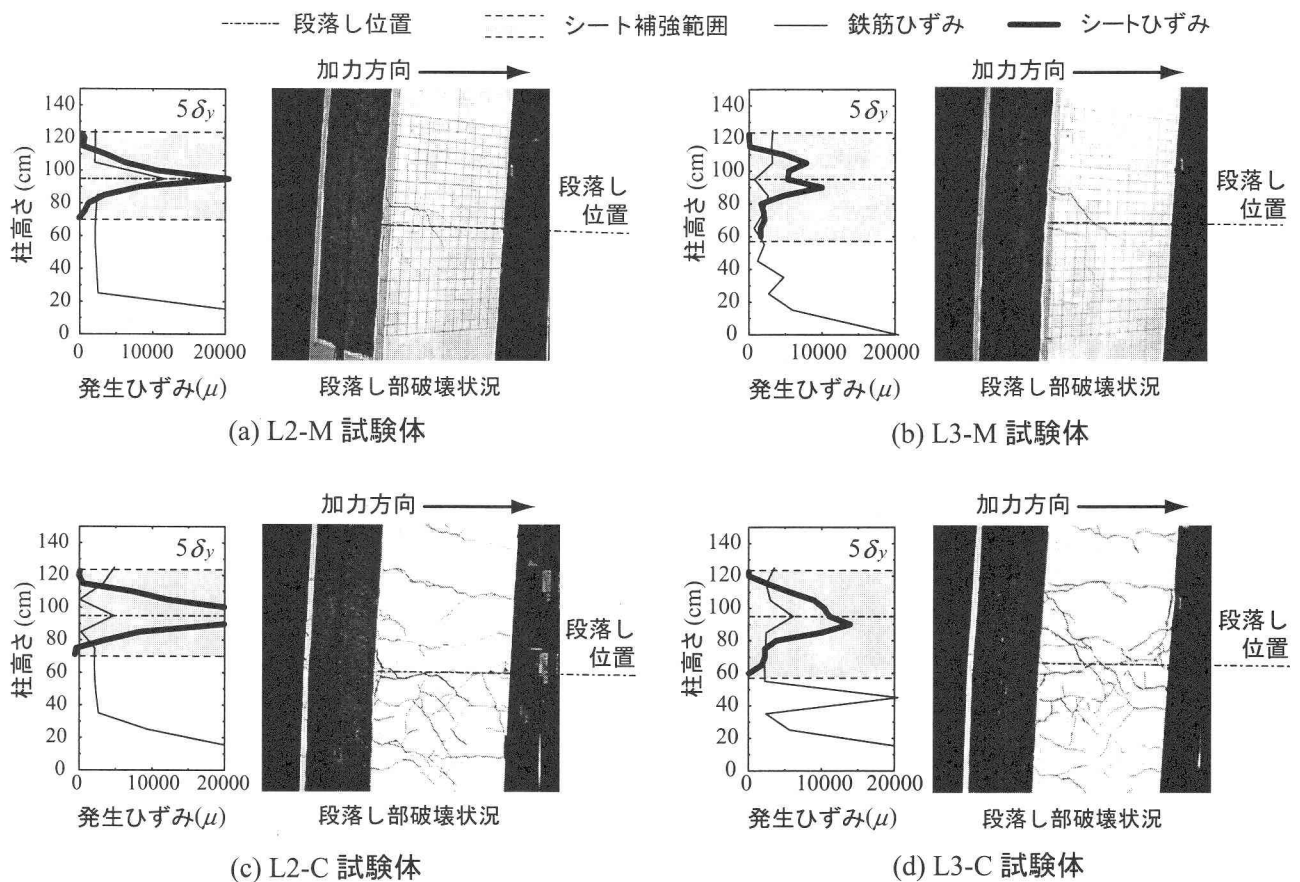


図-10 $5\delta_y$ 時におけるひずみ分布性状および段落し部の破壊性状 (シリーズ2)

も、段落し部に発生した曲げひび割れが断面中央部から斜めひび割れに移行している様子が確認されるのみである。シート剥離後を見ると、シートは段落し部より下側のかぶりコンクリートが付着した状態で端部ピーリングにより剥離している。また、ひずみ分布より、シートの下側端部ひずみが $4,000\mu$ 程度に達していることを確認できる。これは、1) 段落し部に曲げひび割れが発生しかつ引張側鉄筋が降伏に至り、段落し部より上方の躯体の変形が増大する角折れが進行する状況下で、2) 下側シート接着長が不足することによって断面の曲げ耐力分布がシート接着端部において段落し状態となり、3) シート接着端部に曲げひび割れが発生するとともに端部ピーリングによって、かぶりコンクリートが接着した状態で剥離に至ったものと推察される。

図-9(a)を見ると、L1-C 試験体の場合にはシート剥離前において段落し近傍で多くの曲げおよび斜めひび割れが確認されるが、斜めひび割れは断面の端部まで達していない。シート剥離後では、シート端部よりかぶりコンクリートを付着した状態で端部ピーリングにより剥離している。また、シート端部には約 $8,000\mu$ の比較的大きなひずみが発生している。

一方、図-9(b)の負方向引張側の状況より、シート剥離前の段落し部の上方には曲げひび割れと斜めひび

割れが結合して形成されたコンクリートブロックとそのピーリング作用によるシートの部分剥離(下方に進展)を確認できる。シート剥離後に段落し部より下方で全断面で剥離に至っていることが分かる。

(3) L2/L3 試験体のシート剥離性状

図-10には、十分な補強効果を発揮したL2/L3試験体の $5\delta_y$ 時におけるシート・軸方向鉄筋のひずみ分布および段落し部の破壊状況を示している。シートのひずみ分布より、いずれの試験体も段落し部を中心にシートのひずみが大きく示されており、この領域でシートの補強効果が発揮されていることが分かる。また、シート接着端部では上・下端ともにひずみレベルは小さいことより、これらの領域におけるシートの定着が十分であることがうかがえる。また、段落し部の破壊状況を見ると、単調載荷では、段落し部に発生した曲げひび割れの開口が確認できる程度である。交番載荷実験の場合は、段落し近傍のかぶりコンクリート部にコンクリートブロックが形成され、部分剥離が確認できるものの、シート剥離にまでは至っていない。このことより、L2/L3試験体の場合には許容塑性率よりも大きい変位振幅においても十分なシート接着長が確保されていることが分かる。

ここで、 $5\delta_y$ 時におけるシートひずみを詳細に検討すると、いずれの試験体も段落し部より下方150～200

mm までの領域でシートひずみが大きく示されていることより、この範囲内でシートが補強効果を発揮しているものと考えられる。このことは、下側接着長が $0.5D = 125 \text{ mm}$ である L1-M/C 試験体の場合に接着長が短く早期に剥離することと対応している。また、この範囲の外側がシートの定着長として機能することを考慮すると、下側接着長は L2-M/C 試験体で設定した $1.0D$ 以上の接着長が必要であるものと判断される。

以上のことより、下側のシート接着長は L2-M/C 試験体で設定した $1.0D$ 以上の接着長が必要であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、AFRP シートを用いた RC 橋脚段落し部の曲げ補強問題に着目し、段落し部よりも基部の損傷を先行させ、道路橋示方書で規定している許容塑性率を確保することを前提に最小シート接着長を決定することを目的に、段落し部より上側および下側のシート接着長を変化させた RC 柱の水平単調および交番載荷実験を実施した。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、以下の通りである。

- 1) 示方書に基づいた許容塑性率を保証できる段落し部より上側のシート接着長は、計算終局時の主鉄筋降伏長さ L_{yu} に $0.5D$ (D : 断面高さ) を加えた長さで十分である。
- 2) 段落し部より上側の曲げ補強シートは、RC 梁の場合と同様に主鉄筋降伏範囲内でシートの補強効果を発揮し、その外側の範囲はシートの定着領域として機能を果たしている。
- 3) 示方書に基づいた許容塑性率を保証できる段落し部より下側のシート接着長は、段落し部より 1.0

D 以上である。

- 4) 段落し部より下側のシート接着長が不足する場合には、シート端部のピーリングあるいは段落し部に形成されたコンクリートブロックの押し出し作用によるピーリングによって基部に損傷が移行する前にシートが早期に剥離し、段落し部の損傷が進行する。

謝辞：本研究を行うに当たり、室蘭工業大学建設システム工学科松岡健一教授に適切な御指導を戴いた。また、同大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室在学中の笠井和俊君および三浦 敬君をはじめとする大学院生に多大なる御支援を戴いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)，1996。
- 2) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領 (案)，1998。
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書・同解説 (昭和 42 年制定)，1967。
- 4) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，土木学会論文集，No.683/V-52, pp.47-64, 2001。
- 5) 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。

(2003 年 9 月 12 日受付)