

論文 AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊性状に及ぼすシート接着長の影響

岸 徳光^{*1}・三上 浩^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・澤田 純之^{*4}

要旨：本研究では、AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離性状に及ぼすシート接着長の影響を検討することを目的として、シート接着長が異なる曲げ補強 RC 梁の静載荷実験を実施した。その結果、1) 定着部接着長と必要定着部接着長の比である定着部接着長割合が 0.46 以上 1.0 以下の場合には、載荷点と端部における複合ピーリングにより剥離するが、計算耐力および変位の 90 % 程度以上を確保できる曲げ圧壊型に分類される、2) 定着部接着長割合が 0.37 以下の場合には端部ピーリングが卓越し剥離破壊型となる、等が明らかになった。

キーワード：RC 梁, AFRP シート, 曲げ補強, シート接着長, ピーリング

1. はじめに

近年、連続繊維シート(以後、FRP シート)を用いた土木構造物の補修・補強工事が盛んになるのに伴い、FRP シート補強工法に関する様々な検討が諸研究機関で行われるようになってきた。著者らも、FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する様々な実験研究を実施している。その結果、シート接着長が十分に長い場合には、1) 曲げ補強シートの剥離は、曲げと斜めひび割れの発生によって載荷点近傍の下縁かぶり部に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って発生すること、2) 設計的な観点から分類した RC 梁の破壊形式は、断面分割法に基づいて算出した計算結果の最大荷重および最大荷重時変位到達前に終局に至る「剥離破壊型」と、計算最大変位を上回り、上縁コンクリートが圧壊した後に計算最大荷重と同程度の荷重レベルで終局に至る「曲げ圧壊型」に分類されること¹⁾、等を明らかにしている。

これらの破壊形式のうち、曲げ圧壊型を示す試験体は、シートを支点近傍部まで接着(以後、全面接着)する場合には、計算終局点到達後においてもシートの付着が十分確保され、梁が大

きく変形した後、最終的にシート剥離により終局に至る。このことは、RC 梁の曲げ圧壊型破壊を確保するための経済的なシート接着長が決定可能であることを意味している。

著者らは、この点に着目して静載荷実験に基づき、曲げ圧壊型破壊を確保するためのシートの必要接着長算定式を提案している²⁾。しかしながら、十分な接着長を確保した場合に曲げ圧壊型で終局に至る場合においても、シート接着長を変化させることにより、1) 前述のような載荷点近傍部からのピーリングによるシート剥離の他、2) シート接着端部からのピーリングによる下縁かぶり部を伴うシート剥離や、3) 1) と 2) が混在して全体に渡って一瞬にして生じるシート剥離(ここでは、これを複合ピーリングと呼ぶ)が想定される。特に、2), 3) の剥離モードの場合には計算終局耐力を確保できずに、曲げ圧壊型から剥離破壊型に移行する場合も考えられる。従って、RC 梁に関する合理的な FRP シート曲げ補強設計法を確立するためには、シートの接着長に対応したシート剥離現象を的確に把握しておくことが重要であるものと考えられる。

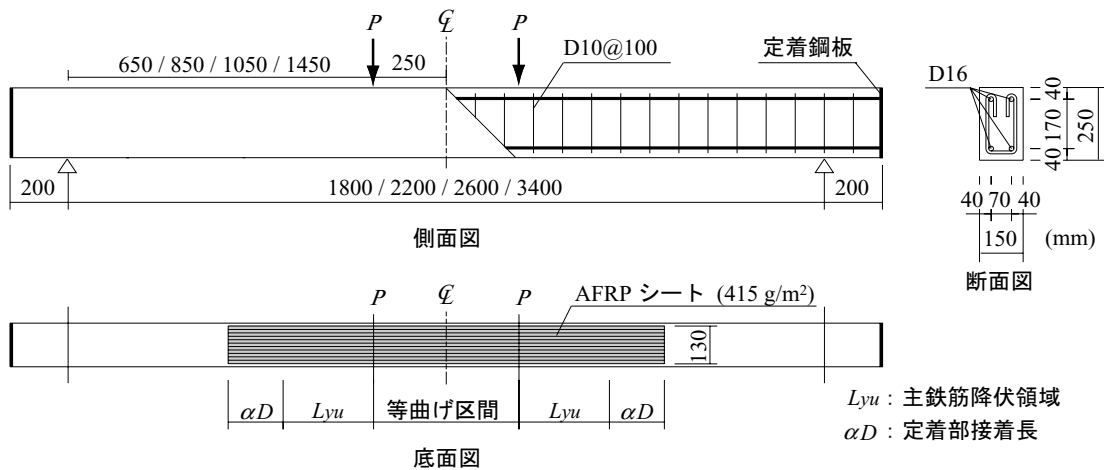
このような観点から、本研究では十分な接着

*1 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)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*3 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻 修(工) (正会員)



図－1 配筋状況および補強概要

長を有する場合に曲げ圧壊型で終局に至る RC 梁を対象に、シート接着長を変化させた場合のシート剥離に伴う RC 梁の破壊性状を精査することを目的として、同一断面でスパン長の異なる RC 梁を対象にシート接着長を変化させた AFRP シート曲げ補強 RC 梁の静载荷実験を行った。

2. 試験体の概要

図－1 には、本実験に用いた試験体の配筋状況および補強概要を示している。試験体の断面寸法は、梁幅 × 梁高が 15 × 25 cm、軸方向鉄筋に D16 (SD345) を上下端に 2 本ずつ配置した複鉄筋矩形 RC 梁である。なお、スターラップには D10 (SD345) を 100 mm 間隔で配置している。等曲げ区間はいずれの試験体においても 50 cm としている。せん断スパン長はせん断スパン比を 3.1 ～ 6.9 に変化させているため、それに対応して 0.65 ～ 1.45 m となっている。また、いずれの試験体もシートを全面接着した場合に曲げ圧壊型となるように設計している。シートの曲げ補強範囲は、既往の研究²⁾と同様に等曲げ区間、計算終局時における主鉄筋降伏領域 L_{yu} および定着部接着長 αD (α : 定着部接着長係数, D : 断面高さ)を加えた範囲としている。これは、既往の研究成果に基づき、 L_{yu} を主曲げ補強領域、 αD を主定着領域として考えたためである。曲げ補強シートには、目付量 415 g/m^2 のアラミド繊維製 FRP シート (以後、AFRP シート) を

表－1 試験体一覧

試験体名	せん断スパン比	主鉄筋降伏領域 L_{yu} (cm)	定着部接着長 αD
R3- αD	3.1	18.3	0.90D, 0.60D, 0.30D, 0.01D
R4- αD	4.0	24.0	0.80D, 0.50D, 0.34D, 0.04D
R5- αD	5.0	29.6	0.68D, 0.38D, 0.07D
R7- αD	6.9	40.9	0.47D, 0.31D, 0.14D

D : 断面高さ (25 cm)

表－2 AFRP シートの力学的特性

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

用い、所定の範囲に 1 層接着している。

表－1 には、本実験に用いた試験体一覧を示している。試験体数は、せん断スパン比の異なる 4 種類の試験体について、シート接着長を 3 もしくは 4 種類に変化させた全 14 体である。表中、試験体名の第 1 項目は英文字 R とせん断スパン比の概略値の組み合わせにより示し、第 2 項目はシートの定着部接着長 αD を示している。なお、実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度は 31.6 MPa、主鉄筋の降伏強度は 393 MPa であった。また、表－2 には、本実験に用いた AFRP シートの力学的特性値を示している。

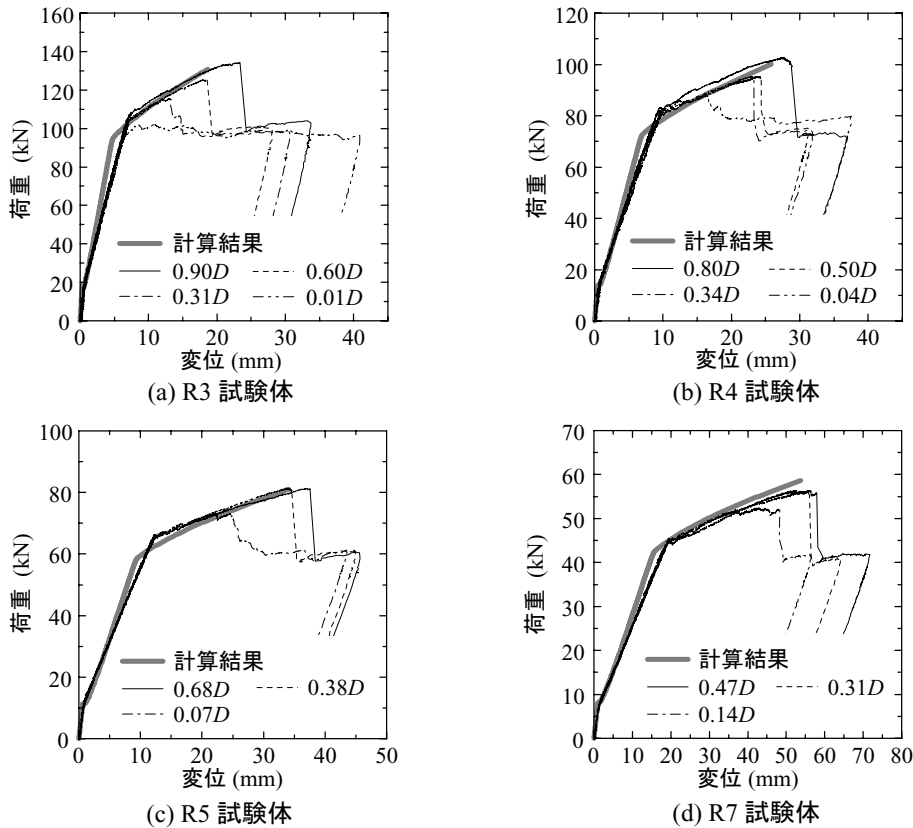


図-2 荷重-変位関係

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-2には、各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は既往の研究¹⁾と同様にコンクリート標準示方書に準拠した平面保持を仮定した断面分割法により算出したものであり、上縁コンクリートひずみが $3,500\mu$ に至った時点を終局としている。なお、図には定着部接着長の最も長い場合が目標とする曲げ補強の状態であるものとし、その時の計算結果のみを示している。

図より、いずれの試験体も初期勾配は計算結果よりも若干緩やかであるものの、降伏後の勾配はR3-0.01D試験体を除いて大略一致していることが分かる。なお、R3-0.01D試験体は、後述のように主鉄筋降伏前にシート端部より剥離が進展している。これはシート接着長が短いため、シートの曲げ補強効果がほとんど発揮されず、無補強の場合と同様の性状を示したことによるものと考えられる。各試験体の終局時における荷重と変位に着目すると、いずれの試験体

もシート接着長の増大とともに、最大荷重および最大荷重時変位が増加していることが分かる。これより、シート接着長はRC梁の耐荷性状に大きな影響を与えていることが分かる。

表-3には、各試験体の定着部接着長係数 α 、文献2)の提案式より得られる必要定着部接着長係数 α_c 、定着部接着長割合 α/α_c 、最大荷重、最大荷重時変位および破壊性状の一覧を示している。なお、破壊性状の記号は、後述の3.2節のシートの剥離性状に関する検討結果に基づいて判定したものである。

表より、 $\alpha/\alpha_c > 1.0$ の場合(表中、太字)は、実験結果の最大荷重 P_{ue} 、最大荷重時変位 δ_{ue} が計算結果の最大荷重 P_{uc} 、最大荷重時変位 δ_{uc} と同程度以上であることより、曲げ圧壊型を示して終局に至っていることが分かる。また、 $\alpha/\alpha_c < 1.0$ の場合においても、 $\alpha/\alpha_c \geq 0.46$ の場合には、ほぼ計算最大荷重 P_{uc} 、最大変位 δ_{uc} に近い値を示しており、図-2の荷重-変位関係からも、設計的には曲げ圧壊型に分類されるものと判断される。一方、 $\alpha/\alpha_c \leq 0.37$ の場合には、い

表-3 結果一覧

試験体名	定着部 接着長係数 α	必要定着部 接着長係数 α_c	定着部接着長 割合 α/α_c	最大荷重			最大荷重時変位			破壊 性状*
				実験結果 P_{ue} (i)	計算結果 P_{uc} (ii)	(i)/(ii)	実験結果 δ_{ue} (iii)	計算結果 δ_{uc} (iv)	(iii)/(iv)	
R3-0.90D	0.90	0.84	1.07	134.1	130.8	1.03	23.3	18.7	1.25	I
R3-0.60D	0.60		0.71	125.1	130.8	0.96	17.9	18.7	0.96	I
R3-0.31D	0.31		0.37	115.1	130.8	0.88	13.1	18.6	0.70	II
R3-0.01D	0.01		0.01	102.0	128.1	0.80	10.5	20.6	0.51	II
R4-0.80D	0.80	0.74	1.08	102.4	100.1	1.02	27.4	25.8	1.06	I
R4-0.50D	0.50		0.68	95.1	100.1	0.95	23.6	25.9	0.91	I
R4-0.34D	0.34		0.46	95.1	100.1	0.95	22.8	25.8	0.88	I
R4-0.04D	0.04		0.05	87.6	98.9	0.89	16.2	29.0	0.56	II
R5-0.68D	0.68	0.65	1.05	81.0	81.0	1.00	36.9	34.1	1.08	I
R5-0.38D	0.38		0.58	81.0	81.0	1.00	33.7	34.1	0.99	I
R5-0.07D	0.07		0.11	73.0	80.7	0.90	21.8	38.7	0.56	II
R7-0.47D	0.47	0.46	1.02	56.3	58.7	0.96	55.6	53.7	1.04	I
R7-0.31D	0.31		0.67	56.1	58.7	0.96	55.6	53.7	1.04	I
R7-0.14D	0.14		0.30	52.1	58.7	0.89	42.5	57.3	0.74	II

* I: 複合ピーリング, II: 端部ピーリング

ずれの場合もシート接着端部におけるピーリングによって終局に至っており、計算終局耐力や変位を保証できないことより、剥離破壊型に分類されるものと考えられる。

以上より、 $\alpha/\alpha_c > 1.0$ となるようにシート接着長を設定することで、確実に全面接着した曲げ圧壊型 RC 梁と同程度の耐力を確保できることが確認された。また、 $0.46 < \alpha/\alpha_c < 1.0$ においても設計的には曲げ圧壊型に分類されることが明らかとなった。

3.2 シート剥離性状

写真-1には、シートの剥離性状に及ぼすシート接着長の影響について検討するため、せん断スパン比 $a/d = 5.0$ で、シート接着長の異なる R5-0.68D/0.07D 試験体の結果を例にピーリング発生直前およびシート剥離後の状況を示している。

写真より、シート接着長の長い R5-0.68D 試験体の場合には、主鉄筋降伏領域およびシート端部のかぶりコンクリート部において、ピーリング作用の起因となる斜めひび割れが発生しコンクリートブロックが形成されていることが分かる(写真-1(a)中、載荷点近傍部の○印)。また、実験時には左側スパンのシートがかぶりコンク

リートを付着した状態で瞬間的に剥離したことを確認している。これらのことより、R5-0.68D 試験体は、主鉄筋降伏領域およびシート端部のピーリング(以後、複合ピーリング)により、シートが剥離しているものと考えられる。

一方、シート接着長の短い R5-0.07D 試験体の場合には、写真に示されているようにシート端部において曲げひび割れが開口し、そのひび割れが主鉄筋に沿う割裂ひび割れと連結して、端部ピーリングによりかぶりコンクリートを伴ってシートが剥離していることが分かる。これは、シート定着部接着長が短い場合には、シート接着端部において梁の断面耐力が急変し段落し状となるため、載荷荷重の増大とともにシート端部近傍には断面曲げ耐力以上の曲げモーメントが作用することとなり、シート端部近傍における曲げひび割れが大きく開口して、上方に進展し、さらに、これらのひび割れが主鉄筋に沿う割裂ひび割れと交叉することによりブロック化し(写真-1(b)中、○印)、ピーリング作用によってシートが下縁かぶりコンクリートを伴って剥離に至るためと考えられる。

以上のことより、シート接着長によって破壊性状が異なり、接着長がある程度以上の場合に

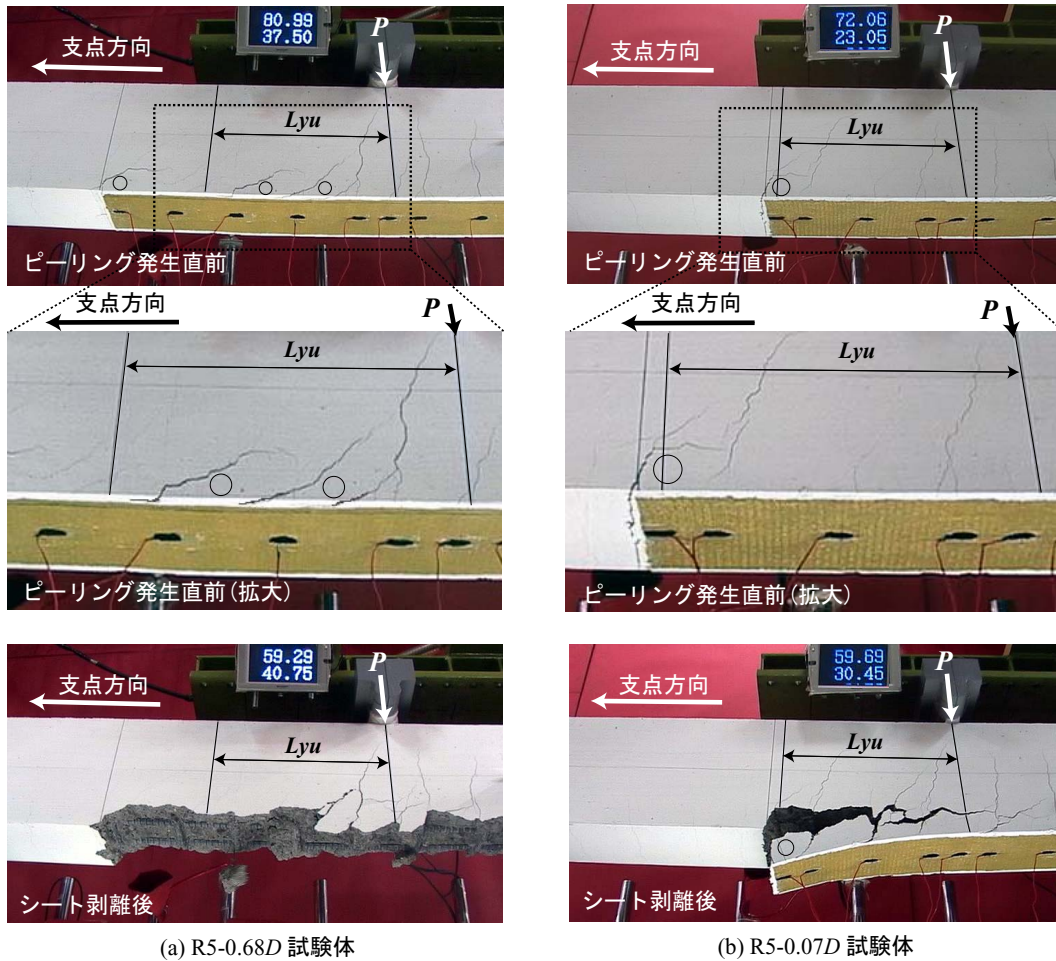


写真-1 端部接着長の違いによる剥離性状の比較

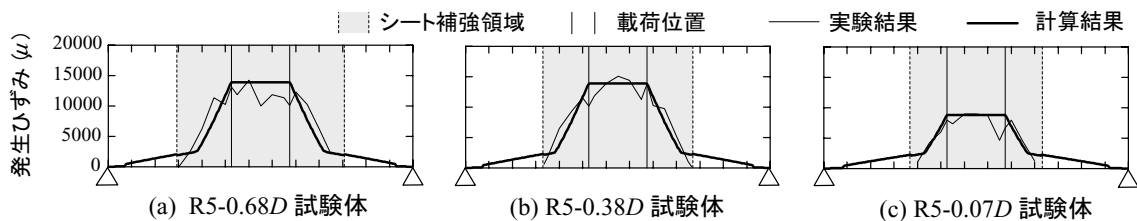


図-3 終局直前におけるひずみ分布性状 ($ald = 5.0$ の場合)

は主鉄筋降伏領域とシート端部における複合的なピーリング、短い場合にはシートの端部ピーリングによる剥離によって終局に至ることが明らかとなった。なお、このような傾向は、上述の表-3にも示されているように、せん断スパン比が異なる場合においても同様であった。

3.3 終局時におけるシートのひずみ分布性状

図-3には、シートのひずみ分布性状に及ぼすシート接着長の影響を検討するため、 $ald = 5.0$ の試験体を対象に、最大荷重時近傍のひずみ分布に関する実験結果を計算結果と比較して示している。なお、計算結果は断面分割法により算

出される曲げモーメント-下縁ひずみ関係に基づいて求めたものである。

図より、シート接着長の大きさにかかわらず、いずれの試験体も、等曲げ区間におけるひずみ分布の実験結果は計算結果とほぼ対応していることが分かる。一方、等せん断力区間におけるひずみ分布は、シート接着長の違いによって異なった性状を示している。すなわち、R5-0.68D/0.38D試験体の場合には、実験結果の等せん断力区間におけるひずみ分布は、計算結果よりも大きく示されている。これに対し、R5-0.07D試験体の場合には、実験および計算結果が良く対応

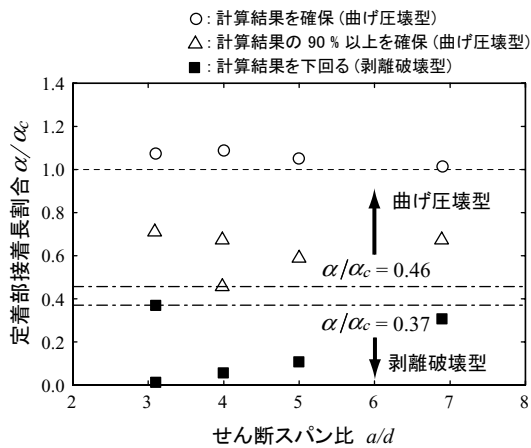


図-4 定着部接着長割合とせん断スパン比の関係

している。ただし、ひずみレベルは、全般的に R5-0.68D/0.38D 試験体よりも小さい。

これは、R5-0.68D/0.38D 試験体の場合には、主鉄筋降伏領域の荷点近傍下縁かぶり部 (写真-1(a) 中、荷点近傍部の○印) に発生するコンクリートブロックのピーリング作用により部分剥離が発生して、ひずみが局所的に増大したことによるものと考えられる。

一方、R5-0.07D 試験体の場合には、写真-1(b) からも明らかなように、荷点近傍下縁かぶり部には R5-0.68D/0.38D のような顕著なコンクリートブロックが形成されないためと考えられる。

3.4 定着部接着長割合とせん断スパン比の関係

前節までの検討より、シート接着長が短い場合ほど端部ピーリングにより終局に至る傾向が強く現れることが明らかになった。ここでは、各 AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシート接着長を表す無次元量としての定着部接着長割合 α/α_c に着目し、シートの剥離性状に及ぼす α/α_c 値の影響について検討することとする。

図-4 には、横軸にせん断スパン比 a/d を取って各試験体の α/α_c 値をプロットしている。図中、白抜き印は、曲げ圧壊型で荷点ピーリングあるいは複合ピーリング、中黒印は剥離破壊型で端部ピーリングにより終局に至っていることを示している。

図より、 α/α_c 値が小さい場合には剥離破壊型で端部ピーリングによりシート剥離を生じ、終

局に至る傾向にあり、その境界値は a/d にかかわらず $\alpha/\alpha_c = 0.4$ 程度であることが分かる。このことより、シートの剥離モードは、 α/α_c 値に強く依存していることが明らかになった。また、 $\alpha/\alpha_c > 1.0$ の場合には、曲げ圧壊型を示しており、 $0.46 < \alpha/\alpha_c < 1.0$ においても、計算耐力、変位の 90% 以上を確保できる曲げ圧壊型に分類されることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離性状に及ぼすシート接着長の影響を検討することを目的として、シート接着長の異なる曲げ補強 RC 梁の静荷重実験を実施した。本研究より得られた知見は以下の通りである。

- 1) 定着部接着長と必要定着部接着長の比を定着部接着長割合とすると、その値が 1.0 以上の場合には確実に曲げ圧壊型となる。
- 2) 定着部接着長割合が 0.46 以上 1.0 以下の場合には、荷点と端部における複合ピーリングにより剥離するが、計算耐力および変位の 90% 程度以上を確保する曲げ圧壊型に分類される。
- 3) せん断スパン長にかかわらず、定着部接着長割合が 0.37 以下の場合には端部ピーリングが卓越し剥離破壊型となる。

今後の検討には、繰り返しおよび疲労特性に関する検討および寸法効果に関する検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 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, 2001.8
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介, 澤田 純之: AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの必要接着長評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.987-997, 2002.3