

論文 FRP シート曲げ補強 RC 梁のシート必要接着長算定に関する実験的研究

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

要旨：本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の効率的なシートの必要接着長算定法を確立することを目的として、FRP シート曲げ補強時に曲げ圧壊型で終局に至る RC 梁において、斜めひび割れ発生荷重が曲げ耐力よりも大きい場合に着目し、シートの必要接着長算定に関する実験的検討を行った。その結果、このような場合に対しても、斜めひび割れ発生荷重が曲げ耐力よりも小さい場合に対して提案されている既存の算定式を用いることにより、安全側で評価可能であることが明らかになった。

キーワード：RC 梁, FRP シート, 曲げ補強, 必要接着長

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐震・耐荷性能の向上を目的として、施工性に優れている連続繊維シート (以後、FRP シート) 接着工法を用いた補強工事が盛んに行われている。著者らは、これまで FRP シート接着による RC 梁の曲げ補強効果やシートの剥離挙動に関する検討を種々の載荷実験により実施してきた¹⁾。その結果、1) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、断面分割法に基づいて算出した計算終局荷重および変位に到達する前にシートが剥離して終局に至る剥離破壊型と、計算終局変位到達後、上縁コンクリートの圧壊を伴ってシートが剥離し終局に至る曲げ圧壊型に分類されること、2) シートの剥離は、曲げひび割れと斜めひび割れの交叉によってかぶり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によって発生すること、等を明らかにしている。

さらに、著者らは曲げ圧壊型を示す RC 梁を対象として、上縁コンクリートの圧壊を想定した計算耐力と同程度の曲げ補強効果を保証するために必要な定着部を考慮したシート接着長

(以後、必要接着長) に着目した検討を行っている²⁾。その結果、曲げ補強部のシートの必要接着長は終局時の主鉄筋降伏領域 L_{yu} を基本長さとし、その両端に定着部接着長 αD (α : シート定着部接着長係数, D : 梁高) を加えるとする考え方 (図-1 参照) に基づいたシートの必要接着長の算定法を提案し、その妥当性を明らかにしている。しかしながら、その評価法は計算終局時までにはシート剥離の要因となる斜めひび割れが発生する場合を対象としたものであり、計算終局時までには斜めひび割れが発生しない場合に対する妥当性は示されていない。また、本評価法に基づくと、シートの必要接着長は曲げ耐力に対する斜めひび割れ発生荷重が小さいほど小さく評価されることとなる (図-2 参照)。このような場合には、断面の抵抗曲げモーメントの分布が軸方向に段落的となり、シート端部近傍に曲げひび割れが発生し、かつ軸方向鉄筋に沿う割裂ひび割れとの交叉によってかぶりコンクリートと共にシート端部からの剥離破壊が発生する可能性もある。

このような観点より、本研究では FRP シー

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

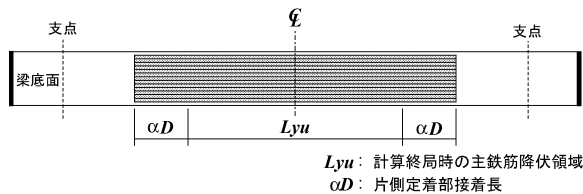
*3 三井住友建設(株) 室長 技術研究所土木構造研究室 博(工) (正会員)

*4 (独)北海道開発土木研究所 研究員 材料研究室 博(工) (正会員)

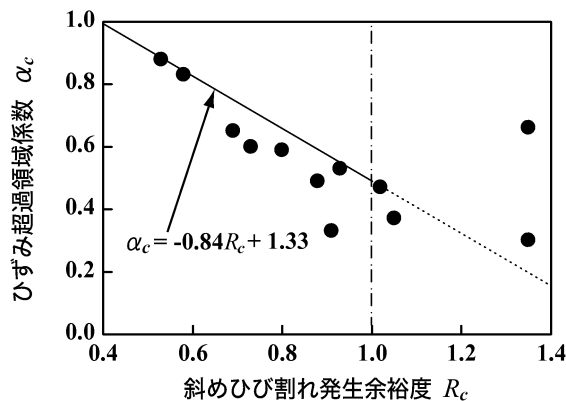
表－１ 試験体の一覧

試験体名	断面 形状 タイプ	梁高 D (mm)	シート 目付量 (g/m^2)	せん断 スパン比 a/d	主鉄筋 降伏領域 L_{yu} (mm)	必要定着部 接着長 $\alpha_c D$	定着部 接着長 αD	斜めひび割れ 発生余裕度 $R_c (= V_c^{*1} / P_u^{*2})$
A1-6.9-0.16D	A	250	415	6.9	476	$0.45D$	$0.16D$	1.05
A1-6.9-0.56D							$0.56D$	
A2-6.9-0.02D			200		340	$0.28D$	$0.02D$	1.25
A2-6.9-0.42D							$0.42D$	
B1-9.5-0.35D	B	150	415	9.5	333	$0.21D$	$0.35D$	1.33
B1-9.5-0.94D ^{*3}					268	$0.24D$	$0.94D$	1.30
B1-8.6-0.30D				8.6	301	$0.30D$	$0.30D$	1.23
B1-8.6-0.70D							$0.70D$	
B1-7.7-0.24D				7.7	269	$0.39D$	$0.24D$	1.12
B1-7.7-0.64D							$0.64D$	

*1：文献 3) を用いて算出，*2：断面分割法を用いて算出，*3：文献 4) より抜粋



図－１ シート補強概要図

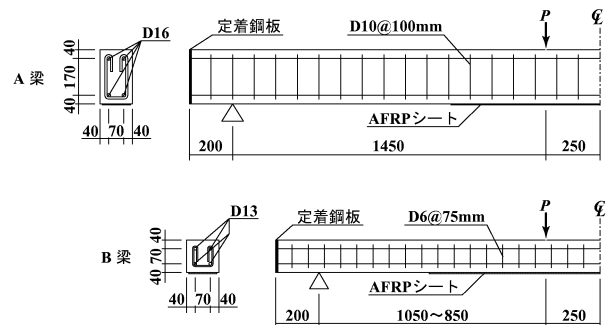


図－２ 既往の実験結果²⁾

ト曲げ補強 RC 梁の汎用的なシート接着長算定法を確立することを目的として、曲げ耐力に対する斜めひび割れ発生荷重が小さい RC 梁を対象として、シートの必要接着長に関する実験的検討を行った。

2. シート接着長の設定

ここでは、本研究のシート接着長の設定方法



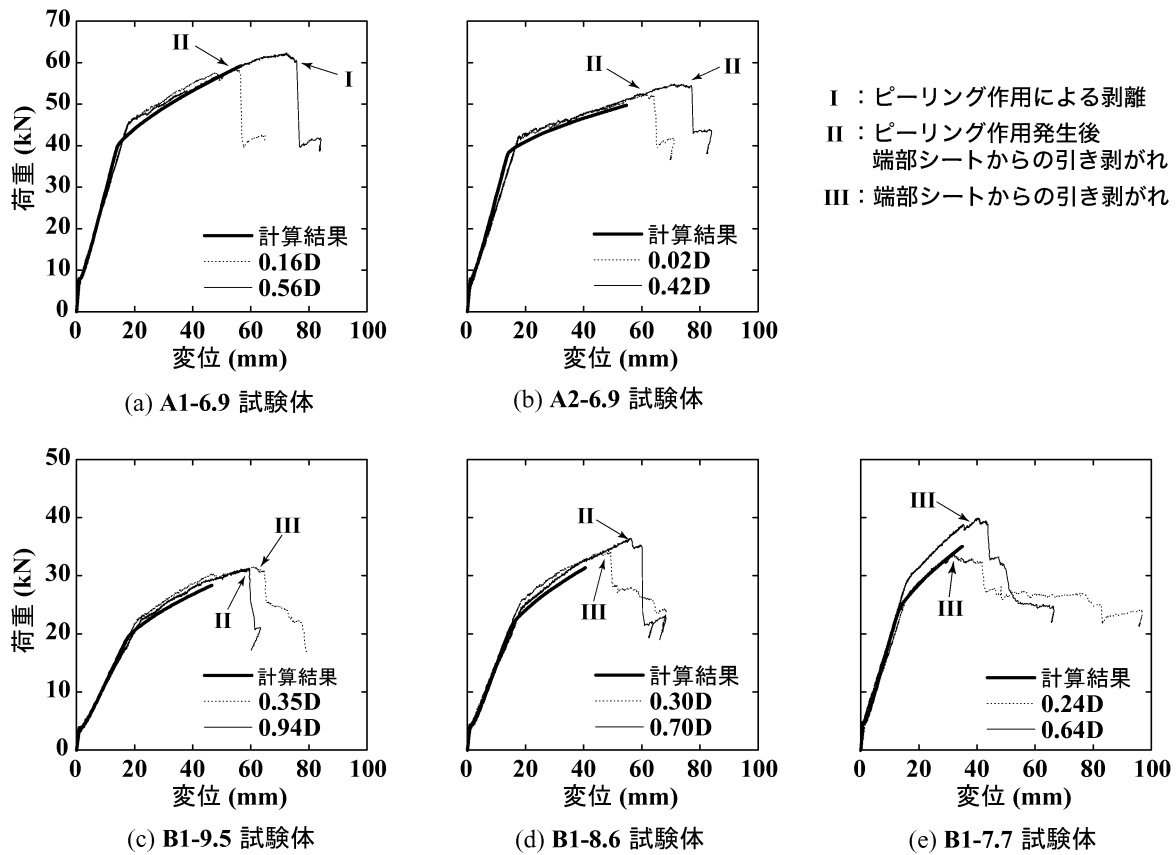
図－３ 配筋概要図

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	131	2.48	1.89
200	0.138			

について述べる。図－１には、シートの補強概要を示している。また、図－２には、曲げ補強シートを全面接着した場合の計算終局時において、シートのひずみ値が計算結果を超過する領域を $\alpha_c D$ (α_c ：ひずみ超過領域係数) とした時の α_c を縦軸に取り、斜めひび割れ発生余裕度 R_c ($= V_c / P_u$, V_c ：計算斜めひび割れ発生荷重³⁾, P_u ：計算曲げ耐力) を横軸に取って整理した既往の実験結果²⁾を示している。文献 2) では、実験結果の上限値を結んで得られる直線式

$$\alpha_c = -0.84R_c + 1.33 \quad (1)$$



図－4 荷重－変位関係

を，シートの定着部接着長 αD の α として適用可能であることを示している。すなわち，

$$\alpha = \alpha_c \quad R_c < 1.0 \quad (2)$$

である。

本研究では， $R_c > 1.0$ の場合にも上式を基本にして定着部接着長を設定し，実験を行うこととする。すなわち，シート接着端部からの剥離現象が発生することも想定し，断面設計時の設定定着部接着長を $(\alpha_c \pm 0.2) D$ とした。

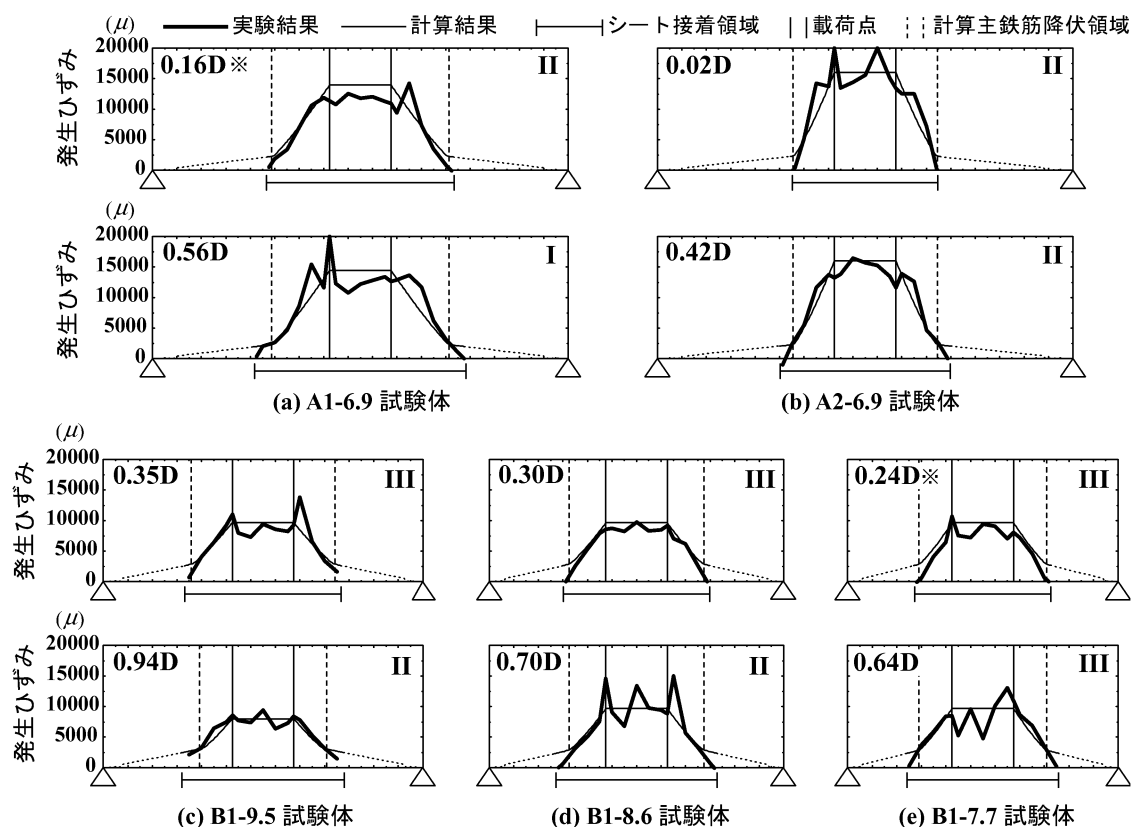
3. 実験概要

表－1 には，本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体の断面形状（梁幅 × 梁高）は 2 種類あり，それぞれ 150×250 (A 梁)， 150×150 mm (B 梁) となっている。A 梁ではシート目付量を 2 種類に変化させ，B 梁ではせん断スパン比を 3 種類に変化させて検討を行っている。なお，表中の B1-9.5-0.94D 試験体は文献 4) の実験結果を用いている。試験体名の第 1 項目は断面形状を示し，それに付随する数値はシー

ト目付量の指標 (1：415 g/m²，2：200 g/m²) を示している。第 2 項目はせん断スパン比，第 3 項目は定着部接着長 αD を示している。なお，表中の接着長は実験時のコンクリート強度を用いて再評価したものである。

表中の主鉄筋降伏領域 L_{yu} は，計算終局時の値であり，断面分割法によって算出し片側等せん断力区間の値として示している。なお， R_c はいずれの試験体においても 1.05～1.33 と 1.0 以上であり，計算終局時まで斜めひび割れが発生しない設計となっている。

図－3 には，本実験に用いた複鉄筋矩形 RC 梁の配筋概要図を示している。軸方向鉄筋は，A 梁に D16 (SD345)，B 梁に D13 (SD345) をそれぞれ 4 本用いた。それらの鉄筋の降伏強度は，引張試験結果より D16 で $f_y = 365$ MPa，D13 で $f_y = 362$ MPa である。ただし，B1-9.5-0.94D の場合は $f_y = 386$ MPa であった。また，純スパン長は A 梁で 3,400 mm，B 梁で 2,200～2,600 mm である。なお，荷重点間隔は全て 500 mm



図－5 計算終局時のシートのひずみ分布 (ただし、※付梁は実験最大荷重時の結果)

としている。曲げ補強シートは既往の文献 1) と同様の処理を施した後に、幅 130 mm で所定の範囲 (表－1 参照) に一層接着している。なお、シート上には検長 10 mm の箔ひずみゲージを梁中央部より 100 mm 間隔、荷重点直下およびシートの接着端部に貼付けている。本実験では補強材料にアラミド繊維製 FRP シート (以後、AFRP シート) を用いている。なお、表－2 には、AFRP シートの公称の力学的特性値を示している。実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度 f'_c は A, B 梁とも 33.7 MPa である。ただし、B1-9.5-0.94D 試験体に関しては打設時期が異なることより 23.9 MPa となっている。

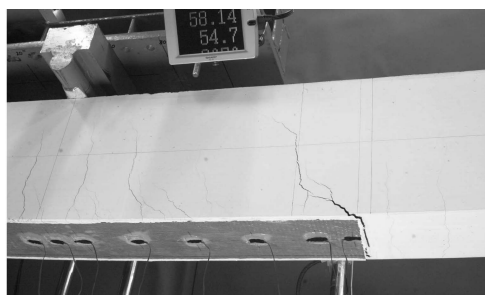
4. 実験結果

4.1 荷重－変位関係

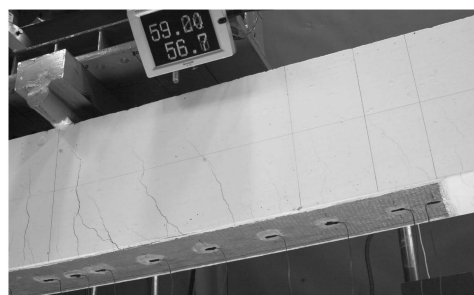
図－4 には、各 RC 梁の荷重－変位関係に関する実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は断面分割法を用いて上縁コンクリートの終局圧縮ひずみ ($\epsilon_{cu} = 3,500 \mu$) まで

シートが完全付着しているものと仮定し算出している。本研究では、FRP シートを全面接着した場合の計算終局耐力と同程度以上の耐力を保証することを基本としていることより、図中の計算結果はシートを全面接着した場合の結果を示している。なお、図中の I, II および III は終局時の破壊性状を示している。ここで、I は荷重点近傍下縁部のかぶりコンクリートのピーリング作用によってシートが剥離し終局に至る場合、II は I と同様にかぶりコンクリートのピーリング作用による剥離開始後、シート端部に曲げひび割れが発生し、かつ軸方向鉄筋に沿う割裂ひび割れと交叉してかぶりコンクリートと共にシート剥離が顕在化して終局に至る場合 (図中では、単に端部シートからの引き剥がれと記述)、III は I のような剥離作用が発生せずに、II のシート端部かぶりコンクリートと共にシートが剥離して終局に至る場合である。

図より、A1-6.9-0.16D および B1-7.7-0.24D 試験体を除く全ての試験体の場合には、計算結果

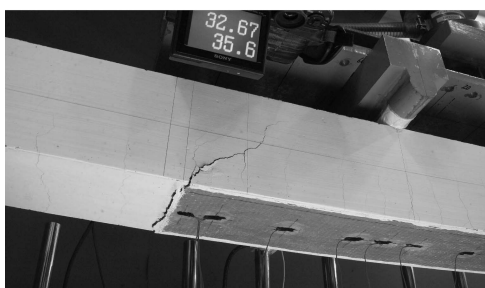


0.16D 試験体 (II)

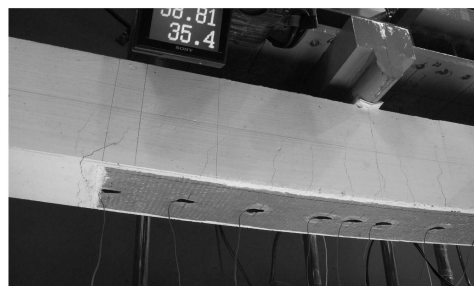


0.56D 試験体 (I)

(a) A1-6.9 試験体



0.24D 試験体 (III)



0.64D 試験体 (III)

(b) B1-7.7 試験体

写真-1 計算終局時におけるひび割れ進展状況

と同様の分布を示すか計算結果よりも大きな分布性状を示し、計算終局点到達後に終局に至っている。これは、計算終局時まで曲げ補強シートの定着が確保されていることを示しており、シート接着長さが設計的に十分であることを意味している。一方、A1-6.9-0.16D および B1-7.7-0.24D 試験体は、計算終局耐力に到達する前に終局に至っていることが分かる。これは、シートの定着部接着長が不足したことにより計算終局点到達前に終局に至っていることを意味している。

4.2 AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状

図-5 には、各試験体の計算終局変位時における実験結果のひずみ分布を計算結果と比較して示している。なお、計算終局点に到達する前に終局に至った A1-6.9-0.16D および B1-7.7-0.24D 試験体は、最大荷重時の実験結果を計算結果と比較して示している。図中の I, II および III は、前述した実験終局時の破壊性状を示している。図より、A 梁では、いずれの試験体においても主鉄筋降伏領域において、実験結果が計算結果よりも大きい領域が見られる。これは、載

荷点近傍下縁かぶり部コンクリートのピーリング作用が顕在化し、シートの部分剥離が発生していることによるものと考えられる。なお、A1-6.9-0.16D 試験体では等曲げ区間において実験結果が計算結果よりも小さく示されている。これは、シート接着長が不足していることよりシート端部で段落し的な破壊形式となり、シートの補強効果が十分に発揮されない状態で終局に至ったことによるものと推察される。

B 梁では、B1-7.7-0.24D 試験体を除く 5 試験体の等せん断力区間におけるひずみ分布は、いずれも計算結果と類似の分布性状を示している。これより、シートの補強効果が十分発揮され計算終局耐力を保持していることが分かる。一方、B1-7.7-0.24D 試験体の場合には、等曲げおよび等せん断力区間におけるひずみ分布が、計算結果のそれよりも小さく示されている。これは、前述の A1-6.9-0.16D 試験体と同様、シートの接着長が不足していることにより断面の抵抗曲げモーメント分布が段落し的なためにシート端部の曲げひび割れが顕在化し、かつ軸方向鉄筋に沿う割裂ひび割れとの交叉によって

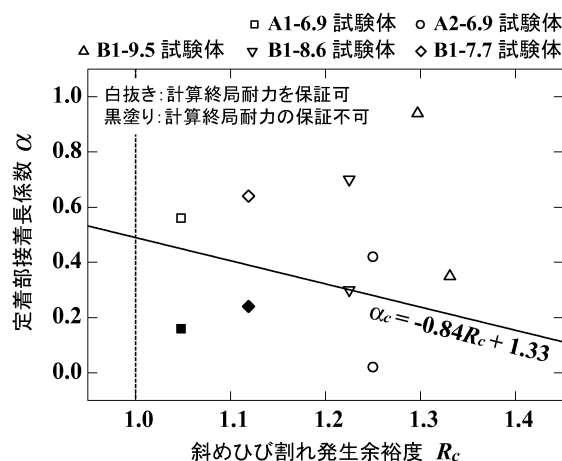


図-6 $\alpha - R_c$ 関係

かぶりコンクリートと共にシートが剥離する傾向を示すためと考えられる。

4.3 計算終局時のシート接着端部の状況

写真-1には、計算終局時におけるシート接着端部のひび割れの進展状況を示している。ここでは、定着部接着長が短い場合に計算終局点に到達せずに終局に至る A1-6.9 試験体および B1-7.7 試験体の結果のみを示している。

写真より、定着部接着長が短い場合には、断面の抵抗曲げモーメント分布が段落式的になるためにシート端部の曲げひび割れが顕在化し、かぶりコンクリートと共にシートが剥離する傾向にあることを確認できる。一方、定着部接着長が長い場合にはこの種のひび割れが生じていないことが分かる。

5. シートの必要接着長に関する検討

図-6には、本実験に用いた試験体に関する定着部接着長係数 α と斜めひび割れ発生余裕度 R_c との関係を示している。図中には、既往の研究²⁾より得られたひずみ超過領域係数 α_c の算定式も実線で示している。図中の白抜きの記号は計算終局耐力を保証可能な試験体、黒塗りの記号は早期にシートが剥離し計算終局耐力を保証不可となる試験体を示している。図より、提案式の上側に示される試験体はいずれも計算終局耐力を保証していることが分かる。

以上より、 $R_c > 1.0$ を示す試験体においても、既存提案式の α_c を α としてシート必要接着長

の評価が可能であることが明らかとなった。

6. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の効率的なシートの必要接着長算定法を確立することを目的として、斜めひび割れ発生荷重が曲げ耐力よりも大きい場合 ($R_c > 1.0$, R_c : 斜めひび割れ発生余裕度) に限定して静載荷実験を行った。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) FRP シート曲げ補強 RC 梁は、シートの必要接着長を $R_c > 1.0$ の場合においても提案式より算出されるひずみ超過領域係数 α_c を考慮して $L_{yu} + 2\alpha_c D$ とすることにより計算終局耐力を確保できる。
- 2) 定着部接着長係数 α を過小に設定する場合には、シート端部に発生する曲げひび割れが開口しかつ軸方向鉄筋に沿う割裂ひび割れと交叉してかぶりコンクリートと共にシートが剥離し、早期に終局に至ることが確認された。

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
- 3) Okamura, H., Higai, T.: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, *Proceedings of JSCE*, No.300, pp.131-141, Aug.1980
- 4) 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に及ぼす梁高の影響, 土木学会北海道支部, 論文報告集, 第 58 号, pp.768-771, 2002.1