

# 論文 AFRP シート曲げ補強 RC 梁のアンカーボルトを用いた剥離抑制法に関する実験的研究

鈴木 健太郎\*1・三上 浩\*2・岸 徳光\*3・澤田 純之\*4

**要旨：**本研究では、FRPシート補強RC版のシートの簡易な剥離抑制法として、アンカーボルトを下面より埋込み、ピーリング作用の発生要因である下縁かぶり部の斜めひび割れの開口を抑制し、下端筋のダウエル作用に抵抗させる方法に着目して、実験的検討を実施した。本実験ではアンカーボルト埋込みによる剥離抑制効果の検討を目的に、アンカーボルト径および配列数をパラメータとし、全7体のRC梁試験体を用いて静的4点曲げ載荷実験を実施した。その結果、FRPシート曲げ補強RC梁のシート剥離抑制法としてアンカーボルトを埋込む方法は有効であることが明らかとなった。

**キーワード：**RC梁, AFRPシート, 曲げ補強, 剥離抑制, アンカーボルト

## 1. はじめに

連続繊維 (FRP) シートで鉄筋コンクリート (RC) 梁を曲げ補強した場合、曲げ補強シートの剥離により終局に至ることから、耐荷性能を向上させるためには、曲げ補強シートの剥離を抑制することが重要であると考えられる。既往の研究<sup>1)</sup>より、1) FRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式は、断面分割法に基づく計算結果の最大荷重および最大荷重時変位よりも小さな状態でシート剥離を生じ終局に至る剥離破壊型と、計算結果の最大荷重および最大荷重時変位を確保した後に上縁コンクリートの圧壊を伴ってシート剥離を生じ終局に至る曲げ圧壊型に分類されること、2) 曲げ補強シートの剥離は等せん断力区間の主鉄筋降伏領域下縁かぶり部に発生する斜めひび割れおよび下端筋のダウエル作用によってピーリング作用が顕在化して生じることが明らかになっている。

また、剥離抑制法として主鉄筋降伏領域内にFRPシートをU字巻き付けする方法や側面のみシート接着する方法を提案し、その剥離抑制効果を確認している<sup>2)</sup>。しかしながら、RC版

構造物の場合には、上記の剥離抑制法を採用することはできない。

このような観点より本研究では、FRPシート補強RC版のシート剥離を抑制する簡易な方法として、斜めひび割れの発生およびダウエル作

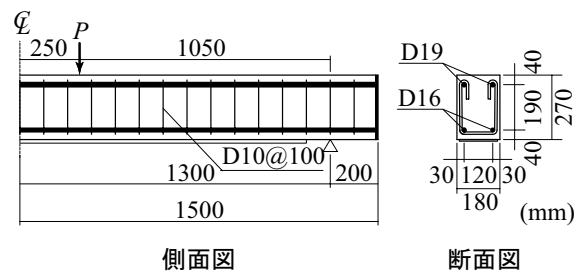


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

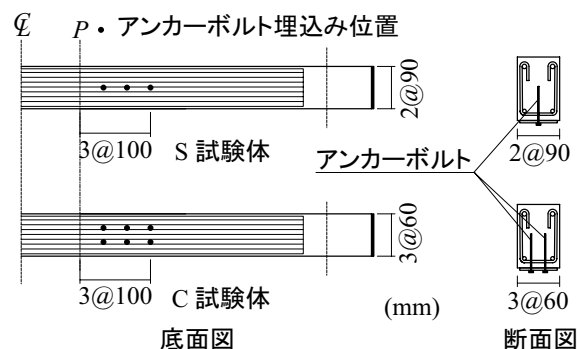


図-2 曲げ補強シートの補強概要およびアンカーボルト埋込み位置

\*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 修(工) (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 室蘭工業大学 建設システム工学科教授 工博 (正会員)  
 \*4 室蘭工業大学 建設システム工学科 研究員 博(工) (正会員)

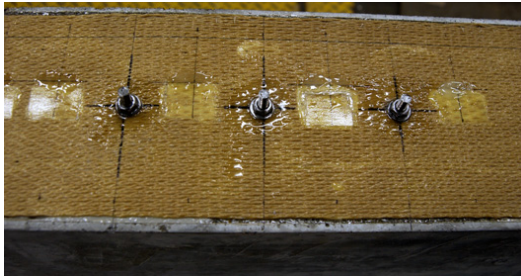


写真-1 アンカーボルトの埋込み状況

用に抵抗させるためシート補強後にアンカーボルトを下面から埋込む方法を提案し、その剥離抑制効果に関する検討を実施した。本研究では、アンカーボルトのみの効果に着目することとし、主鉄筋降伏領域内にアンカーボルトを埋込み、その径および配列数を変化させたFRPシート曲げ補強RC梁試験体を用いて静的4点曲げ載荷実験を実施した。

## 2. 試験体概要

図-1には、本実験に用いた試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体はいずれも梁幅×梁高が18×27cm、上・下端鉄筋にそれぞれD19, D16を2本ずつ用いた複鉄筋矩形RC梁である。試験体の純スパン長は2.6m、載荷点間隔は50cmであり、せん断スパン比は4.6である。また、スターラップにはD10を用い梁中央より10cm間隔で配筋している。なお、本試験体はFRPシート曲げ補強時に上縁コンクリートの圧壊前にシートが剥離する剥離破壊型<sup>1)</sup>となるように設計されている。なお、主鉄筋の降伏強度は378.6MPa、コンクリートの圧縮強度は23.7MPaであった。

図-2には、曲げ補強シートの補強概要およびアンカーボルトの埋込み状況を示している。曲げ補強シートには、目付量830g/m<sup>2</sup>(1,200kN/m)の一方向アラミド繊維製FRP(AFRP)シートを用い、幅16cmで梁中央より両支点の10cm手前まで接着した。なお、シートの接着面には付着性能の向上に有効なショットブラスト処理(処理深さ1~2mm)を施している。

写真-1には、アンカーボルトの埋込み状況

表-1 試験体一覧

試験体名	曲げ補強シート	アンカーボルト		
		配列数	種類	埋込み深さ
N	830 g/m <sup>2</sup> (1,200 kN/m)	-	-	-
S8		1列	M8	70 mm
S10			M10	80 mm
S12			M12	100 mm
C8		2列	M8	70 mm
C10			M10	80 mm
C12			M12	100 mm

表-2 AFRPシートの力学的特性値

目付量 g/m <sup>2</sup>	厚さ mm	弾性係数 GPa	引張強度 GPa	破断ひずみ %
830	0.572	118	2.06	1.75

を示している。アンカーボルト埋込みは、曲げ補強シートを接着し、その硬化後に所定の位置に削孔を行い、Mネジボルトをアンカー筋として埋込み、樹脂系接着剤にて一体化をはかった。なお、アンカーボルト施工後において試験体に損傷が生じていないことを確認している。アンカーボルトの埋込み位置は、シート剥離の要因となる斜めひび割れが等せん断力区間の計算主鉄筋降伏領域内(本実験では45.8cm)に発生することより、載荷点から支点方向へ10/20/30cmの位置とし、その位置に1列ないし2列埋込むこととした。なお、ナットはワッシャーを介して人力で締め付けている。埋込み深さは下端筋の位置からアンカーボルト毎に設定されている規格値(最適埋込み深さ)を確保することとした。

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、アンカーボルトの径を3種類、配列を2種類とし、アンカーボルトを埋込まない試験体を含めた全7体である。試験体名は、アンカーボルトの列数を示す英文字(N:無し, S:1列, C:2列)、およびアンカーボルト径を示す数字の組み合わせにより示している。なお、表-2にはAFRPシートの力学的特性値を示している。

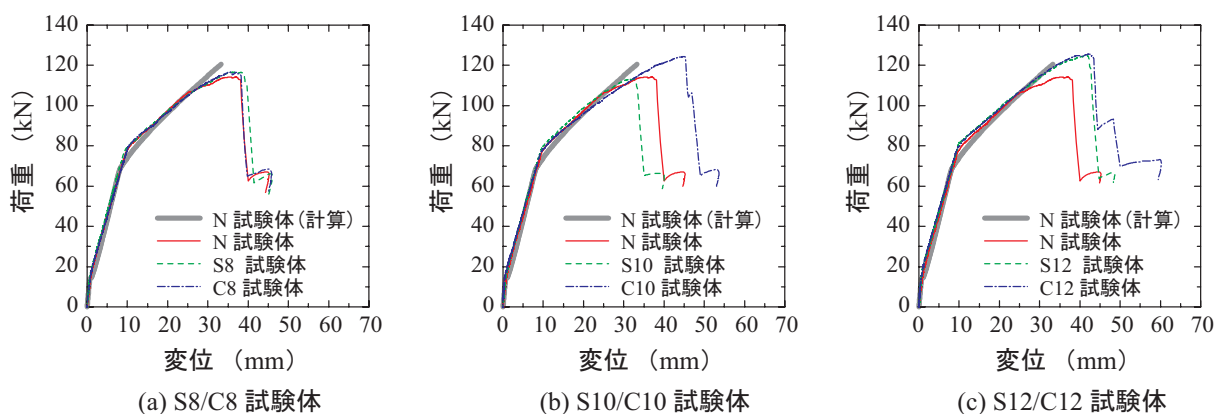


図-3 荷重-変位関係

表-3 実験および計算結果一覧

試験体名	主鉄筋降伏時		最大荷重時		耐力比*	変位比*	破壊形式(終局時の状況)
	荷重(kN)	変位(mm)	荷重(kN)	変位(mm)			
N(計算)	68.0	8.1	120.6	33.3	-	-	(上縁コンクリートの圧壊)
N(実験)	77.7	9.8	114.4	36.9	0.95	1.11	剥離破壊型(シート剥離)
S8	79.0	9.7	116.7	36.1	0.97	1.08	剥離破壊型(シート剥離)
S10	80.2	9.9	113.2	32.3	0.94	0.97	剥離破壊型(シート剥離)
S12	81.6	10.0	125.1	41.4	1.04	1.24	曲げ圧壊型(シート剥離)
C8	80.1	10.3	116.7	35.6	0.97	1.07	剥離破壊型(シート剥離)
C10	76.8	9.4	124.5	44.8	1.03	1.35	曲げ圧壊型(シート破断)
C12	79.4	9.7	125.7	42.1	1.04	1.26	曲げ圧壊型(シート剥離)

\*: 各試験体の最大荷重時の実測値をN試験体の計算値で除した値

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

図-3には、本実験より得られた荷重-変位関係をアンカーボルト径毎に比較して示している。なお、図中にはN試験体の計算および実験結果も併せて示している。ここで、計算結果は、RC梁の各構成材料に関する応力-ひずみ関係をコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に準拠して設定し、平面保持を仮定した断面分割法により、上縁コンクリートの圧壊ひずみ(-3,500 $\mu$ )まで完全付着しているものとして算出している。表-3には、図-3より得られる実験および計算結果の一覧を示している。表には、主鉄筋降伏時、最大荷重時における荷重、変位その他、各試験体の最大荷重時の値をN試験体の計算値で除した耐力比、変位比および破壊形式を併せて一覧にして示している。表中、破壊形式は耐力比および変位比ともに1.0以上の場合を曲げ圧壊型とし、

その他の場合は剥離破壊型とした。なお、S/C試験体でシート剥離した試験体はいずれもボルト埋込み部近傍のシートが繊維に沿って縦割れし、全面剥離に至っている。

図-3より、N試験体の実験結果を計算結果と比較すると、実験結果の降伏点は計算結果よりも若干大きいものの、主鉄筋降伏後の勾配は計算結果よりも小さく、終局時には計算耐力を下回った状態でシート剥離に至っている。このことから本試験体は剥離破壊型を示していることが分かる。

図-3(a)より、アンカーボルト径の最も小さいS8/C8試験体は、初期勾配から降伏点、シート剥離に至るまでN試験体とほぼ同様の性状を示し、両試験体ともに剥離破壊型を示していることが分かる。図-3(b)より、S10試験体はN試験体の最大荷重および最大荷重時変位を下回った状態でシート剥離により終局に至ってい

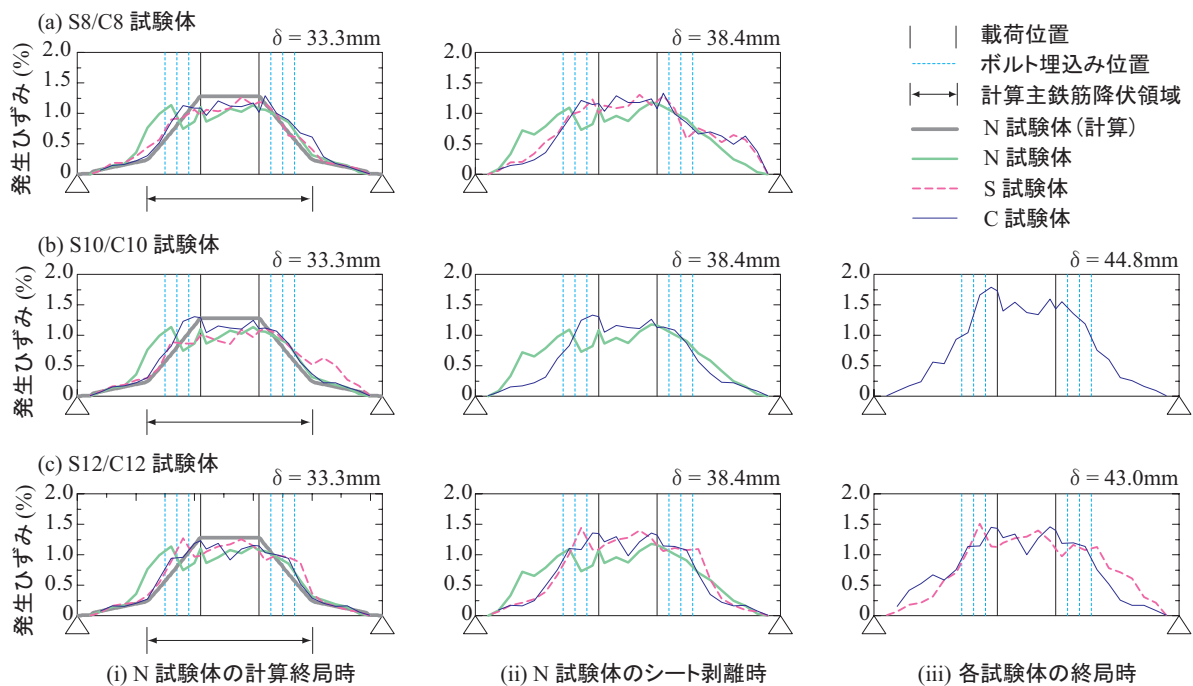


図-4 ひずみ分布性状

ることが分かる。一方、C10 試験体は N 試験体の実験および計算耐力を上回った状態でシート破断により終局に至っており、曲げ圧壊型を示している。

図-3(c)より、アンカーボルト径が最も大きい S12/C12 試験体は、いずれも同様の荷重-変位関係を示し、N 試験体の計算結果を超えた後にシート剥離にて終局に至る曲げ圧壊型を示している。

以上より、FRP シート曲げ補強 RC 梁の下面よりアンカーボルトを埋込むことにより、曲げ補強シートの剥離抑制が可能であることが明らかとなった。なお、アンカーボルトによるシート剥離抑制効果は、アンカーボルトの径が大きいほど高く、1 列配置よりも 2 列配置とした場合に効果が大きい傾向にある。ただし、S12/C12 試験体では類似な性状を示していることより、アンカーボルトによる補強効果には上限があるものと推察される。また、アンカーボルトを埋込むことによりシートの断面積が欠損することから、過度のアンカーボルトの埋込みには留意する必要がある。

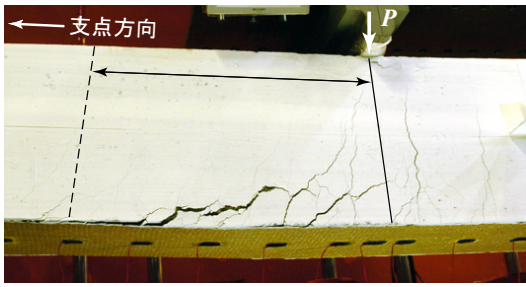
### 3.2 シートの軸方向ひずみ分布性状

図-4には、各変位時におけるシートのひず

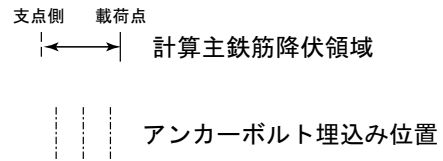
み分布性状を、アンカーボルト径毎に比較して示している。図には、(i) N 試験体の計算終局時 ( $\delta = 33.3 \text{ mm}$ )、(ii) N 試験体のシート剥離時 ( $\delta = 38.4 \text{ mm}$ ) および (iii) C10, S12/C12 試験体それぞれの終局時 ( $\delta = 44.8, 43.0 \text{ mm}$  程度) におけるひずみ分布を示している。また、計算結果の主鉄筋降伏領域も併せて示している。

(i) N 試験体の計算終局時の結果より、N 試験体は等せん断力区間内の主鉄筋降伏領域において、計算結果と比較して大きなひずみが発生していることが分かる。これより、ピーリング作用が顕在化してシートの部分剥離が発生していると推察される。一方、アンカーボルト埋込み試験体では、S10 試験体を除き計算結果と比較的良好に対応していることから、シートの剥離抑制効果が発揮されているものと考えられる。ここで、S10 試験体では主鉄筋降伏領域よりも支点側において N 試験体と同様に計算結果を超える大きなひずみが支点近傍まで進展していることから、シート剥離直前の状態にあるものと考えられる。

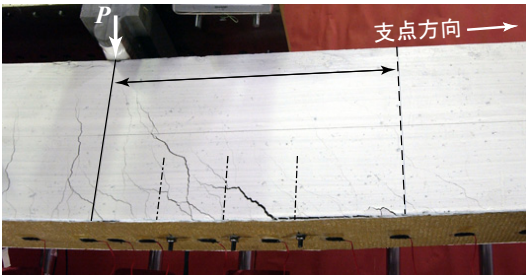
(ii) N 試験体のシート剥離時の結果より、N 試験体ではひずみの均等化が支点近傍まで見られることから、曲げ補強シートは全面剥離直前の



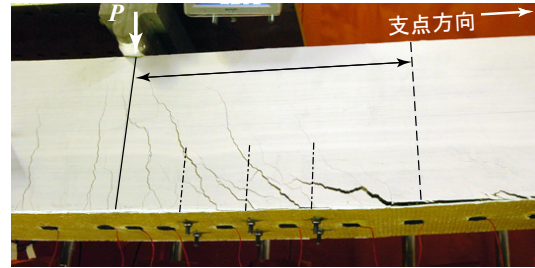
(a) N 試験体 (剥離破壊型)



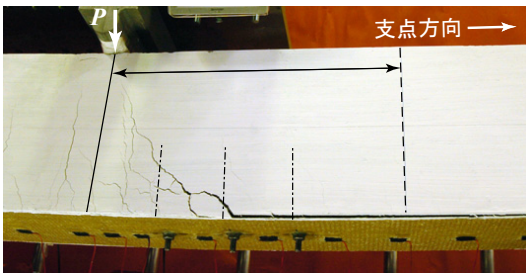
※ C10 試験体のみシート破断, 他はシート剥離



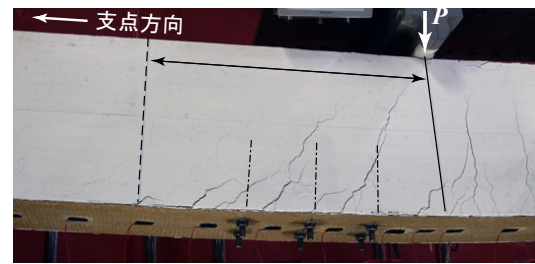
(b) S8 試験体 (剥離破壊型)



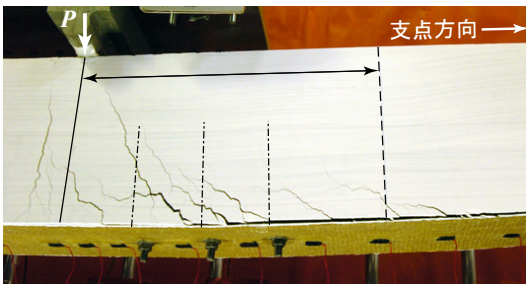
(c) C8 試験体 (剥離破壊型)



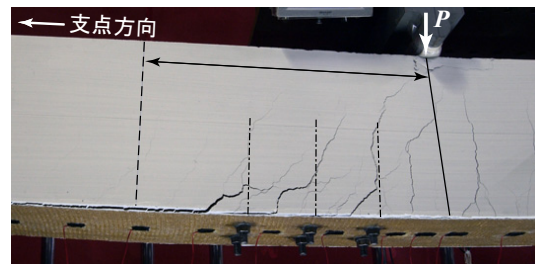
(d) S10 試験体 (剥離破壊型)



(e) C10 試験体※ (曲げ圧壊型)



(f) S12 試験体 (曲げ圧壊型)



(g) C12 試験体 (曲げ圧壊型)

## 写真-2 終局直前におけるひび割れ分布状況

状態であることが分かる。また、S8/C8 試験体も N 試験体と同様の性状を示しており、剥離抑制効果が出現していないことが分かる。一方、C10 試験体および S12/C12 試験体では、いずれも荷重点からアンカーボルト埋込み位置の範囲内で 1.2% 程度のひずみが発生しているものの、その外側では急激に小さくなっていることから、アンカーボルトによりシートの部分剥離が抑制され、シートの定着が確保されていることが分かる。

(iii) 各試験体の終局時の結果より、C10 試験体は左側荷重点に最も近いアンカーボルト近傍で 1.7% 程度のひずみが発生しており、最終的にシート破断により終局に至っている。すなわち、この試験体はアンカーボルトのシート剥離抑制効果により、シートの破断ひずみまで耐荷性能が確保されたものと考えられる。S12/C12 試験体では、終局直前においてアンカーボルト埋込み位置よりも支点側に大きなひずみ発生領域が認められることから、ピーリング作用によ

るシートの部分剥離が進行し全面剥離に至ったことがうかがわれる。

以上より、アンカーボルトを埋込むことによるシート剥離の抑制効果をシートのひずみ分布性状を基に確認することができた。

### 3.3 終局直前におけるひび割れ分布状況

写真-2には、各試験体のシート剥離あるいは破断直前のひび割れ分布状況を示している。なお、写真はシート剥離あるいは破断した支点側の荷点近傍梁下縁かぶり部を中心に撮影したものである。

(a) 図より、N 試験体では荷点から支点方向約 35 cm までの範囲内において下縁かぶり部の斜めひび割れおよび鉄筋に沿った割裂ひび割れの発生が確認出来る。また、斜めひび割れ先端よりシートの部分剥離が進展している。このことより、曲げ補強のみの試験体は既往の研究<sup>1)</sup>と同様な剥離メカニズムにより終局に至っていることが分かる。

剥離破壊型を示した (b), (c), (d) 図の S8/C8, S10 試験体では、いずれも主鉄筋降伏領域内のかぶりコンクリートに斜めひび割れが発生し、ピーリング作用が顕在化していることが分かる。詳細に見ると、梁下縁には 1 本の斜めひび割れのみが大きく開口し、その先端からシート剥離が進展していることより、局所的に開口幅が拡大したことが要因と考えられる。

曲げ圧壊型を示した (e) 図の C10 試験体では、ひずみ分布性状からも分かるように終局時においてもシートの部分剥離が確認されず、最終的にシート破断により終局に至っている。(f), (g) 図の、S12/C12 試験体に関しては、ピーリング作用による部分剥離は確認できるものの、斜めひび割れが主鉄筋降伏領域全体に分散して発生し、開口幅も剥離破壊した試験体に比べて小さくなる傾向にある。このアンカーボルトによる効果により、剥離が抑制され曲げ圧壊型を示したものと推察される。

以上のことより、本実験の範囲内では、アンカーボルトによる曲げ補強シートの剥離抑制効

果は、下縁かぶり部における斜めひび割れの分散および開口幅の縮減により発揮されることが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究では、FRP シート補強 RC 版のシート剥離を抑制する簡易な方法として、アンカーボルトをシート補強後に下面から埋込む方法を提案し、その剥離抑制効果を RC 梁試験体を用いて実験的に検討した。実験は、埋込むアンカーボルトの径および埋込み配列数を変化させた FRP シート曲げ補強 RC 梁試験体を用いて静的 4 点曲げ荷重にて実施した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると以下の通りである。

- (1) FRP シート曲げ補強 RC 梁の主鉄筋降伏領域内の下面より適切な深さでアンカーボルトを埋込むことにより、曲げ補強シートの剥離抑制が可能である。
- (2) 剥離抑制効果は、アンカーボルトの径が大きいくほど、配列数が多いほど高い。しかしながら、その抑制効果には上限があると推察される。
- (3) アンカーボルトによる剥離抑制効果は、主に下縁かぶり部に発生する斜めひび割れの分散および開口幅の縮減によって発揮される。

## 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.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介, 澤田純之: 側面接着法による剥離破壊型 FRP シート曲げ補強 RC 梁の剥離制御に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1049-1057, 2005.3
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書【構造的な性能照査編】, 土木学会, 2002.