

# 論文 側面補強を有する FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊挙動に関する数値解析

小室 雅人<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・張 広鋒<sup>\*4</sup>

**要旨：**側面補強を有する AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状や破壊挙動を適切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的として、側面補強高さの異なる 4 体の RC 梁に関する数値解析を行い、その妥当性を実験結果との比較により検証した。検討の結果、1) 提案の解析手法を用いることにより、側面補強高さにかかわらず実験結果の耐荷性状や破壊挙動を大略再現可能であること、2) 本研究の範囲内では、側面補強を施すことにより、曲げ補強のみの場合よりも耐荷性状を向上させることができ、曲げ補強シートの剥離抑制効果が期待できること、等を数値解析的に明らかにすることができた。

**キーワード：**RC 梁, FRP シート, 側面補強, 破壊挙動, 非線形解析

## 1. はじめに

連続繊維シート (以後, FRP シート) 曲げ補強 RC 梁は、鉛直荷重載荷時において、載荷点近傍等せん断力区間の下縁かぶり部に発生する曲げとせん断ひび割れの交叉によって形成されるコンクリートブロックがシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用の下にシート剥離が発生し、終局に至る場合のあることが実験的に明らかになっている<sup>1)</sup>。このような場合には、設計曲げ耐力を確保できない場合もある。著者ら<sup>2)</sup>は上述のコンクリートブロックの形成とピーリング作用の発生を抑制することを目的に、U 字状に巻き付け接着することなく、単に側面にシートを高さ方向に接着する手法を提案し、その効果を実験的に検討してきた。

本研究では、上述の側面補強を有するアラミド繊維 (AFRP) シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状や破壊挙動を適切に評価可能な解析手法を検討することを目的として、著者ら<sup>3)</sup>が過去に提案した解析手法に基づき、側面補強高さの異なる AFRP シート曲げ補強 RC 梁に関する 3 次元

弾塑性解析を試み、実験結果と比較することによりその妥当性について検討を行った。

## 2. 試験体概要

**表-1**には、解析対象とした試験体の一覧を示している。これらの試験体は、著者らが過去に行った実験の一部であり、側面補強シートの高さを変化させた全 4 体の矩形 RC 梁である。試験体名は側面補強を示す S と側面補強高さ  $h_s$  (mm) を用いて表している。

**図-1**には試験体の形状寸法、配筋状況、載荷点位置およびシートの補強概要を S90 試験体を

**表-1 試験体の一覧**

試験体名	梁高 $h$ (mm)	せん断 スパン比 $a/d$	側面補強シート	
			補強高さ $h_s$ (mm)	目付量 ( $g/m^2$ )
S0	250	6.9	-	-
S40			40	200
S90			90	
S120			120	

\*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助手 博(工) (正会員)

\*2 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)

\*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

\*4 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)

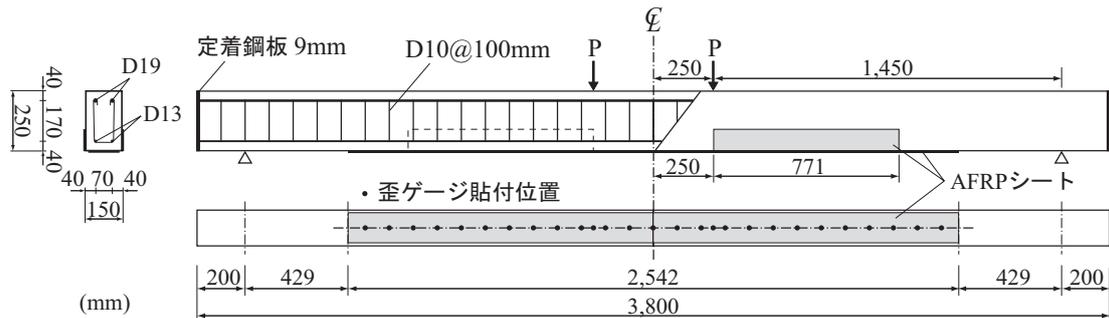


図-1 試験体の概要図の一例 (S90 試験体)

例に示している。試験体は、いずれも無補強時に RC 梁が曲げ引張破壊型となるように上端鉄筋に D19、下端鉄筋に D13、帯鉄筋に D10 を用いた複鉄筋矩形 RC 梁であり、断面寸法 (幅 × 高さ) は 150 × 250 mm、純スパン長 3,400 mm である。全ての試験体において、底面には目付量 415 g/m<sup>2</sup>、幅 130 mm の AFRP シートを梁中央部から左右にそれぞれ 1,271 mm の範囲に 2 層貼り付けている。シート上には、その補強効果や剥離挙動を精査するため、箔ひずみゲージを 100 mm 間隔および荷点直下に貼り付けている。また、側面には目付量 200 g/m<sup>2</sup> のシート 1 層を、断面分割法に基づいた計算終局時の等せん断力区間における主鉄筋降伏領域<sup>1)</sup>に相当する長さ 771 mm の範囲に、繊維方向を梁の高さ方向と等しくして接着している。表-2 には、実験時に実施したコンクリートの材料試験結果の一覧を示している。表-3 には、AFRP シートの力学的特性値の公称値を一覧に示している。

表-2 コンクリートの力学的特性一覧

圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
34.3	2.67	29.0	0.2

表-3 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ $t_f$ (mm)	引張強度 $\sigma_f$ (GPa)	弾性係数 $E_f$ (GPa)	破断ひずみ (%)
200	0.138	2.06	118	1.75
415	0.286			

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 解析モデル

図-2 には、要素分割図の一例として、S0 試験体に関する要素分割状況を示している。スパンおよび断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。コンクリート、鉄筋および AFRP シートは、8 節点あるいは 6 節点 3 次元固体要素を用いてモデル化している。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部においては節点の鉛直方向変位成分を拘束している。

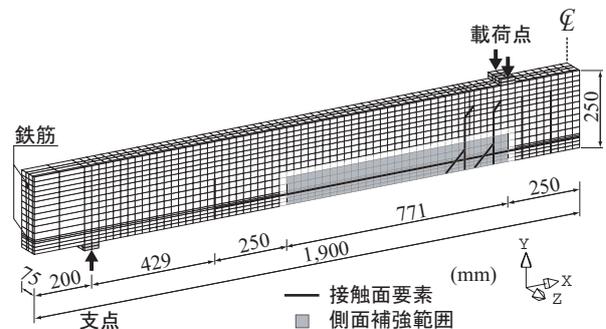


図-2 要素分割図の一例 (S0 試験体)

また、S40/90/120 試験体に関しては、コンクリート、鉄筋および底面補強シートの要素分割状況を S0 試験体と同様とし、側面補強シートを図中の灰色部にそれぞれ所定の高さまで配置している。なお、収束計算には一般に広く用いられている Newton-Raphson 法を採用している。

#### 3.2 材料構成則

図-3(a) にはコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、

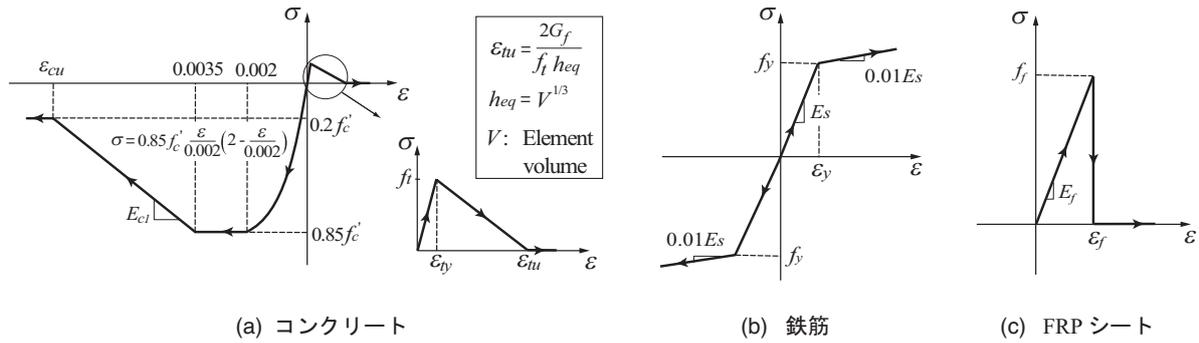


図-3 材料構成則

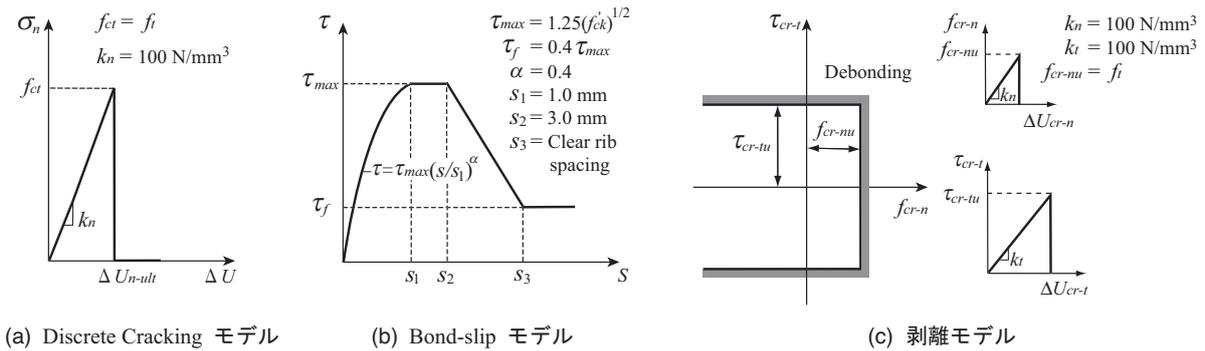


図-4 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

材料試験結果から得られた圧縮強度  $f'_c$  を用いて、圧縮ひずみ  $3,500 \mu$  までは土木学会コンクリート標準示方書に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$  以後は初期弾性係数の  $1/20$  の勾配で  $0.2 f'_c$  まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いている。一方、引張側に関しては、線形軟化モデルを適用し、ひび割れ開口ひずみ  $\epsilon_{tu}$  を CEB-FIP のコードに従い、破壊エネルギー  $G_f$  を用いて図示のように定義している。上下端鉄筋およびスターラップ要素には、(b) 図に示すような塑性硬化係数  $H'$  を考慮した弾塑性体モデルを適用した。ここでは、鉄筋の材料物性値として、降伏応力  $f_y = 362$  (MPa)、ポアソン比  $\nu_s = 0.3$ 、弾性係数  $E_s = 206$  (GPa) と設定した。降伏は von Mises の降伏条件に従うものとしている。FRP シートには、(c) 図に示すように引張強度に達した時点で破断し応力零まで除荷されるモデルを仮定している。なお、実際の RC 梁は全て一方向 FRP シートを用いて補強しているが、解析では曲げ補強シートのみならず側面貼りシートも簡略化して等方材料と仮定した。

### 3.3 接触面要素の配置および応力-相対変位関係

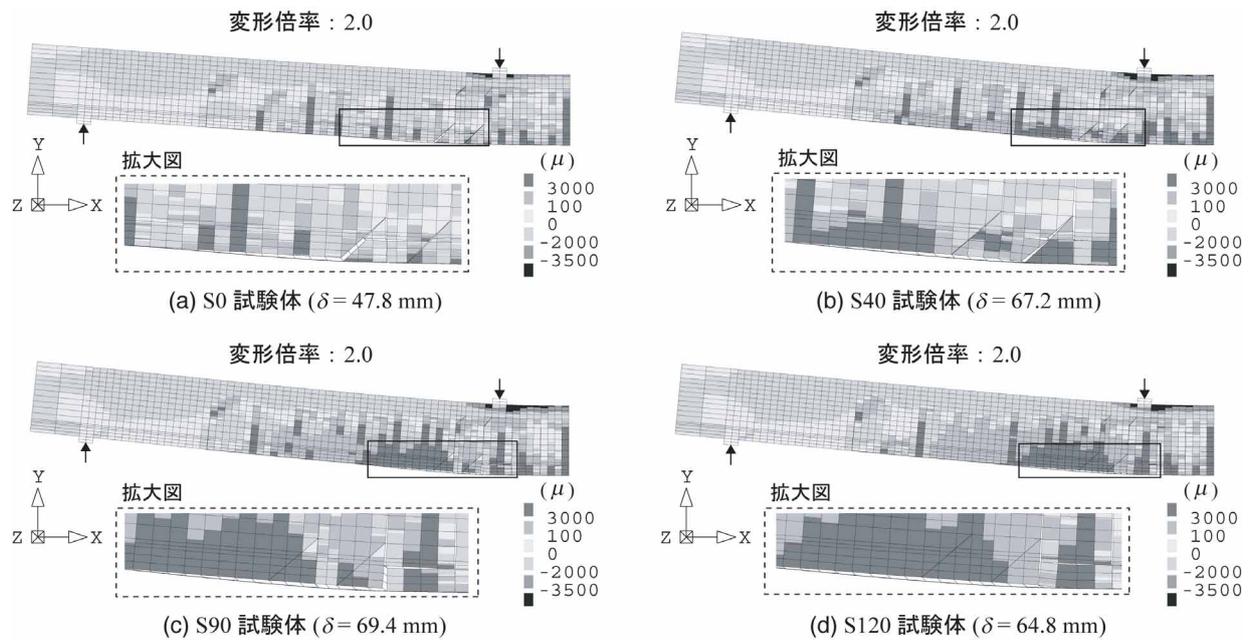
本数値解析では、図-4 に示すような、ひび割れの開口、主鉄筋のすべり、およびシートの剥離に関する 3 つの幾何学的不連続現象を接触面要素を用いてモデル化している。

Discrete Cracking モデルは接触面要素の法線方向の開口とその方向の引張応力との関係をモデル化している。限界応力値  $f_{ct}$  は、コンクリートの引張破壊強度  $f_t$  と等価であるものと設定した。Bond-slip モデルには CEB-FIP によるすべり-付着応力関係式を採用した。また、底面や側面に接着している曲げ補強シートや側面補強シートの剥離モデルには、著者らが提案した剥離モデルを用いている。このモデルでは、付着界面の法線方向引張応力と面内せん断応力間の相互作用を無視し、法線方向および面内せん断方向の剥離基準を簡易に次のように定義した。

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \quad (1)$$

$$\tau_{cr-t} = \sqrt{\tau_{cr-ts}^2 + \tau_{cr-tt}^2} > \tau_{cr-tu} \quad (2)$$

ここで、 $f_{cr-n}$ 、 $\tau_{cr-ts}$ 、 $\tau_{cr-tt}$  は、それぞれ付着界面の法線方向引張応力、軸方向および断面



図－5 梁側面におけるコンクリートの梁軸方向ひずみ分布および変形図

方向のせん断応力であり、 $f_{cr-nu}$ 、 $\tau_{cr-tu}$  はそれぞれ法線方向、せん断応力の限界応力である。なお、 $\tau_{cr-tu}$  は文献4)を参考にして、SI単位系の下に以下の式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92\sqrt{f_c'} \quad (3)$$

接触面の配置に関しては、実験終了後のS0試験体のひび割れ分布を参考に、解析モデルの簡略化も考慮して主ひび割れ分布のみをモデル化することとし、図-2に示すように配置した。また、側面補強シートを有する3試験体に関しては、便宜的にS0試験体と同様に接触面要素を配置し、さらに側面補強シートの剥離を再現するためにその側面補強シートとコンクリート間にも離散ひび割れを配置している。

#### 4. 数値解析結果および考察

##### 4.1 梁の破壊形式および軸方向ひび割れ分布

図-5には、各試験体に関する解析結果の全面剥離直前における離散ひび割れの開口を含む梁の変形状況およびコンクリートの梁軸(x軸)方向のひずみコンター図を示している。ここで、S40/90/120試験体の結果は、側面補強シート要素を取り除いたコンクリートのみに関する分布を示している。なお、ひずみのコンターレベル



写真－1 剥離直前の側面補強シートの状況 (S40 試験体)

において、100、3,000  $\mu$  の引張ひずみは、それぞれ図-3(a)に示すひび割れ発生ひずみ  $\epsilon_{ty}$ 、ひび割れ開口ひずみ  $\epsilon_{tu}$  と対応している。

一方、実験時における各試験体の破壊形式に関しては、S0試験体の場合には、等せん断力区間の荷重点近傍下縁かぶり部に発生した曲げと斜めひび割れの交叉によって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終局に至っている。一方、他の3試験体の場合には、等せん断力区間の荷重点近傍下縁に生じた曲げひび割れの影響により、側面補強シートの織糸が繊維方向に切断されてシートが鉛直方向にずれ、その部分が曲げ補強シートを押し下げるピーリング作用によって終局に至っているこ

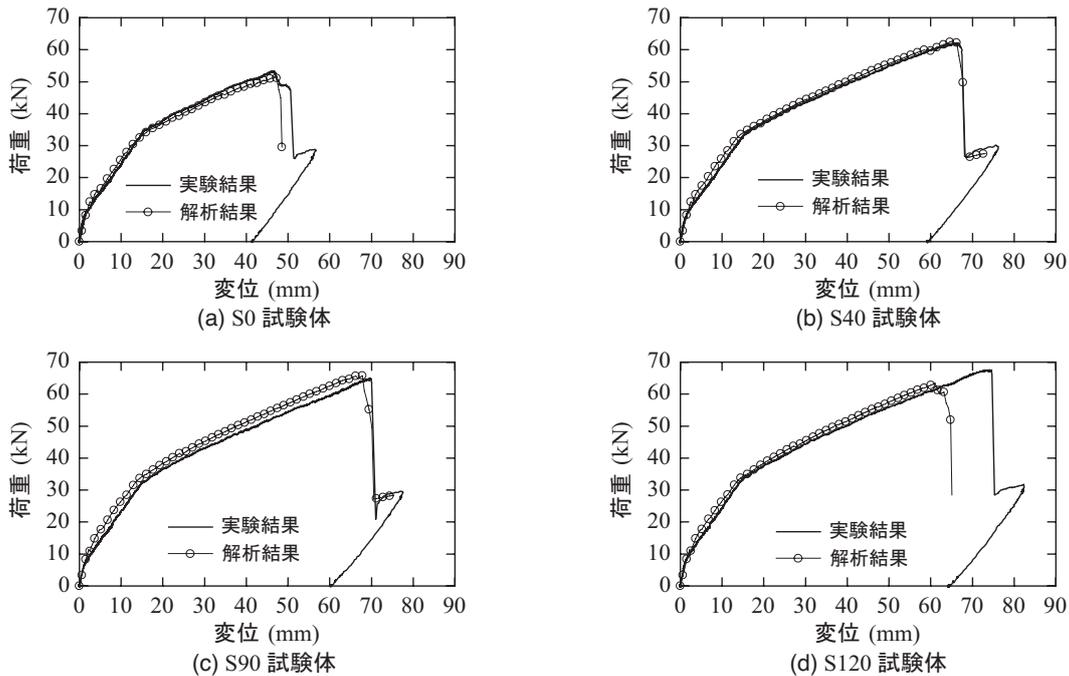


図-6 荷重-変位関係

とを確認している。

図-5(a) に示している S0 試験体の結果を見ると、斜めひび割れ先端部において、斜めひび割れに起因するピーリング作用によってシートの剥離が開始し、支点側に向かって進行している状況が分かる。(b) 図の S40 試験体に関しては、S0 試験体と同様に、斜めひび割れ先端部からピーリング作用によってシートの剥離が発生している様子が見られる。この場合には、S0 試験体の場合に比較して終局時の変位が大きいことから、側面補強シートによって剥離抑制効果が現れているものと考えられる。また、写真-1 には、S40 試験体の実験時におけるシート剥離直前のひび割れ状況を示している。写真より、斜めひび割れに起因するピーリング作用が確認できることから、解析結果は実験結果とほぼ同様の挙動を示しているものと考えられる。

図-5(c), (d) に示されている S90 および S120 試験体に関する結果より、載荷点近傍下縁かぶりコンクリート部には明瞭な斜めひび割れが発生せず、等せん断力区間の載荷点近傍における曲げの離散ひび割れのみが大きく開口し、せん断力の作用によってその部分が下方に押し出されることに伴うピーリング作用によって、シー

ト剥離が支点側に向かって進行していることが分かる。なお、実験結果においても斜めひび割れが開口していないことを確認していることから、解析結果は実験結果の側面補強シートの補強効果を大略再現しているものと考えられる。

#### 4.2 荷重-変位関係

図-6 には各試験体における荷重-変位関係に関する解析結果を実験結果と比較して示している。各数値解析は全て曲げ補強シートの全面剥離によって終了している。

図-6(a) の S0 試験体に関する比較図より、解析結果は変位 47 mm 付近まで実験結果とよく一致している。その後、荷重は急激に低下していることが分かる。これは、載荷点近傍下縁かぶりコンクリートのピーリング作用によって斜めひび割れ先端部からシートの剥離が発生し、シートの全面剥離によって荷重が急激に低下したものと推察される。

(b) 図の S40 試験体に関する解析結果は、載荷初期からシートの全面剥離によって終局に至るまで実験結果とよく一致していることが分かる。また、(c) 図の S90 試験体に関する比較図より、解析結果は剛性勾配が実験結果より若干大きく、終局時変位が実験結果をわずかに下回っ

表-4 各試験体の最大荷重  $P_{max}$  および  
最大荷重時変位  $\delta_{max}$  の一覧

試験体名	実験結果		解析結果	
	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)
S0	53.2	46.6	51.5	46.7
S40	62.1	66.3	62.7	65.2
S90	64.9	69.8	65.7	67.8
S120	67.6	74.1	63.4	61.1

ているものの、S40 試験体と同様に終局まで実験結果と大略対応していることが分かる。

一方、(d) 図の S120 試験体に関する比較図に着目すると、解析結果は変位 61 mm 付近まで実験結果とよく一致している。しかしながら、終局荷重および終局時変位ともに実験結果を下回った結果となっている。これは、実験時には一方向シートを梁高さ方向に貼り付けているために側面補強範囲内における曲げひび割れの発生が著しくは抑制されていないのに対して、数値解析ではシートを等方材料と仮定していること、および他の試験体と比較してシートの補強高さが高いことから、等せん断力区間におけるひび割れの分散が抑制され、実験結果以上に離散ひび割れ部にひび割れが集中し、ピーリングによるシート剥離が早期に発生したものと推察される。

表-4 には、各試験体の実験結果と解析結果の最大荷重  $P_{max}$  および最大荷重時変位  $\delta_{max}$  を一覧にして示している。表より、本実験範囲において、側面補強シート高さが高いほど最大荷重および最大荷重時変位が大きくなる傾向にあることが分かる。一方、数値解析結果では、S120 試験体に関しては、前述のように実験結果より早期にピーリングによるシート剥離が発生し小さい変位で終局に至ったものの、他の3試験体の場合には、実験結果と同様に側面補強シート高さが高いほど最大荷重および最大荷重時変位が大きくなる傾向があり、実験結果を大略再現しているものと判断される。

## 5. まとめ

本研究では、側面補強を有する AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状や破壊挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、側面補強高さの異なる AFRP シート曲げ補強 RC 梁を対象として数値解析を行い、実験結果と比較する形で検討を行った。本研究より得られた結果を整理すると、

- (1) 本研究で提案した解析手法を用いることにより、側面補強シートの補強高さにかかわらず、実験結果の荷重-変位関係およびシートの剥離挙動を大略再現可能である。
- (2) 本研究の範囲内では、側面補強を施すことにより、曲げ補強のみの場合よりも最大荷重や最大荷重時変位を向上させることができ、曲げ補強シートの剥離抑制効果が期待できることが数値解析的にも明らかになった。
- (3) しかしながら、より適切に実験結果を再現するためには、解析において FRP シートを異方材料として取り扱うべきであるものと考えられる。

## 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) 栗橋 祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 澤田 純之: FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離抑制法に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp. 1771-1776, 2003
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: FRP シート曲げ補強 RC 梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, No. 725/V-58, pp. 255-272, 2003
- 4) Chajes, M.J., Finch, W.W., Januszka T.F., and Thomson T.A.: Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.2, pp. 208-217, 1996