

論文 側面接着シートの繊維強化方向を変化させた FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に関する数値解析

山田 真司^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・張 広鋒^{*4}

要旨：本研究では、側面接着された RC 梁の耐荷性状に関する合理的かつ汎用性の高い解析手法の確立を目的に、側面接着シートの繊維強化方向を変化させた全 4 体の RC 梁に対して 3 次元弾塑性数値解析を行い、実験結果と比較することにより解析手法の妥当性検討を試みた。その結果、1) 提案の解析手法を用いることにより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、側面接着シートの繊維強化方向を梁軸方向または 2 方向として接着することにより、曲げ補強シートに対する剥離抑制効果が期待できること、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, 側面接着, 耐荷性状, 繊維強化方向, 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。このような破壊形式で終局に至る場合には、剥離が早期に発生し補強設計曲げ耐力を確保できない場合もある。著者ら¹⁾はシートを単に側面に接着することにより、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して設計耐力を確保する手法を提案し、その抑制効果を実験的に検討してきた。

本研究では、側面接着シートの繊維強化方向を 3 種類に変化させたアラミド繊維 (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確立することを目的として、著者ら²⁾が過去に提案した解析手法に基づき、側面接着シートの繊維強化方向の異なる

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、側面接着シートの繊維強化方向を変化させた全 4 体の矩形 RC 梁である。試験体名の第 1 項目は側面貼りを示す S と側面接着高さ h_s (mm) (ただし、S0 は曲げ補強のみの場合) を、第 2 項目は側面接着シー

表-1 試験体の一覧

試験体名	梁高 h (mm)	側面接着シート		
		接着高さ h_s (mm)	目付量 (g/m^2)	繊維強化 方向
S0	250	-	-	-
S125-v		125	415	梁高さ方向
S125-h				梁軸方向
S125-vh				2 方向

*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 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 工学部建設システム工学科 助手 博(工) (正会員)

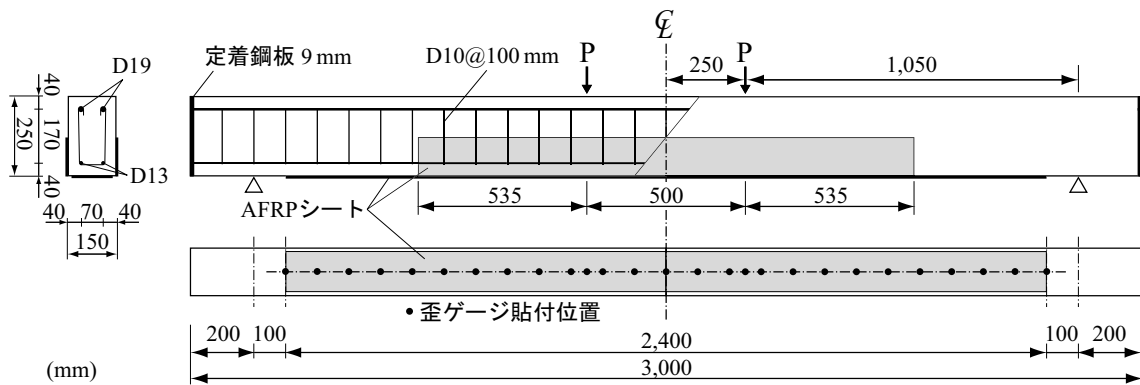


図-1 試験体の概要図の一例 (S125-vh 試験体)

トの繊維強化方向 (v: 梁高さ方向, h: 梁軸方向, vh: その両方向である 2 方向) 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, 荷重点位置およびシートの補強概要を S125-vh 試験体を例に示している。試験体は, いずれも上端鉄筋に 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 2,600 mm である。全ての試験体において, 底面には目付量 830 g/m², 幅 130 mm の AFRP シートを梁中央部から左右にそれぞれ 1,200 mm の範囲に 1 層貼り付けている。また, 側面には目付量 415 g/m² のシート 1 層を, 等せん断力区間における断面分割法に基づいた計算終局時の主鉄筋降伏領域に相当する長さ 535 mm および等曲げ区間の範囲に接着している。なお, 側面接着シートの繊維強化方向は梁高さ方向, 梁軸方向およびその両方向である 2 方向の 3 種類としている。また, 実験では荷重制御により荷重を行っている。表-2 および表-3 には, それぞれ実験時に実施したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果の一覧を示している。また, 表-4 には, AFRP シートの力学的特性値の公称値を一覧にして示している。

3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

図-2(a) 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。解

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 ν_c
26.1	2.08	26.0	0.2

表-3 鉄筋の力学的特性一覧

鉄筋径	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D19	394.2	206	0.3
D13	385.7		

表-4 AFRP シートの力学的特性 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	引張強度 σ_f (GPa)	弾性係数 E_f (GPa)	破断歪 (%)
415	0.286	2.06	118	1.75
830	0.572			

析モデルは, RC 梁の対称性を考慮して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。また, S125-v/h/vh 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は S0 試験体と同様である。側面接着シートは図中の灰色部に配置しているが, S125-vh 試験体の場合には底面補強シートと同様に, 8 節

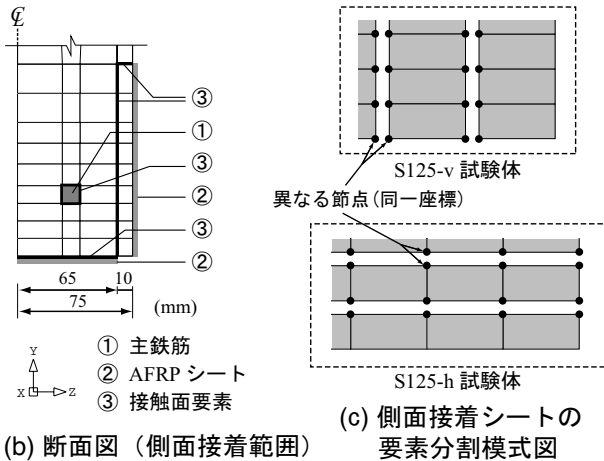
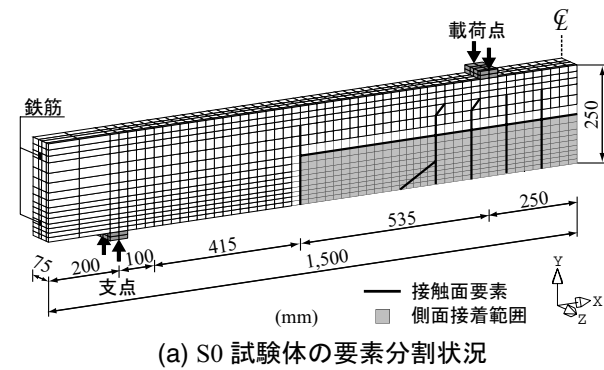


図-2 要素分割図の一例

点固体要素を用いてモデル化している。一方、S125-v/h 試験体の場合に関しては、繊維強化方向による異方性を表現するために、図-2 (c) のように v, h の場合でそれぞれ隣り合う水平方向、鉛直方向の要素間に座標値を等しくする 2 重節点を配置し、シートを短冊状の不連続体とすることで、異方材料と見なすことができるようにモデル化している。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

コンクリートの材料構成則は、圧縮側に関しては、材料試験結果から得られた圧縮強度 f'_c を用いて、圧縮歪 0.35 % 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、0.35 % 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、ひび割れ開口歪は CEB-FIP のコードに従い、破

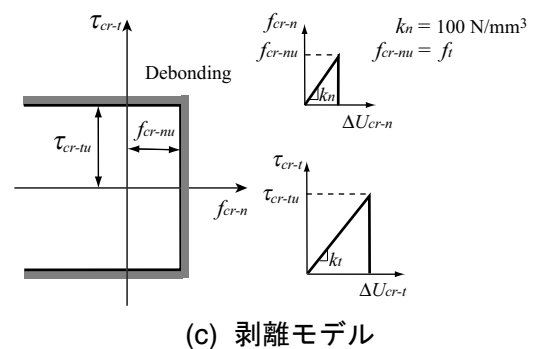
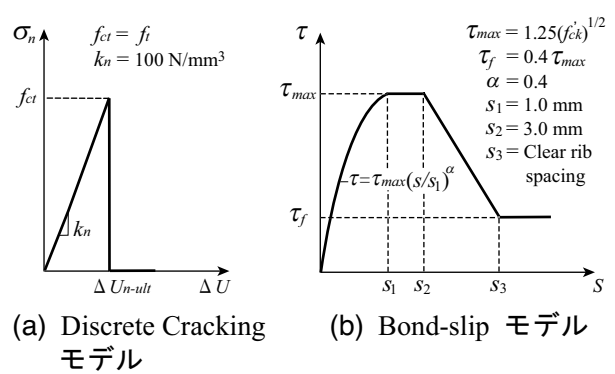


図-3 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

壊エネルギーを用いて定義している。上下端鉄筋およびスターラップ要素には、弾性係数 E_s の 1 % とする塑性硬化係数 H' を考慮した弾塑性体モデルを適用した。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、引張強度に達した時点で破断したと見なされるモデルを適用している。なお、実験時には全方向 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接着シートも簡略化して等方材料と仮定している。

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-3 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、底面に

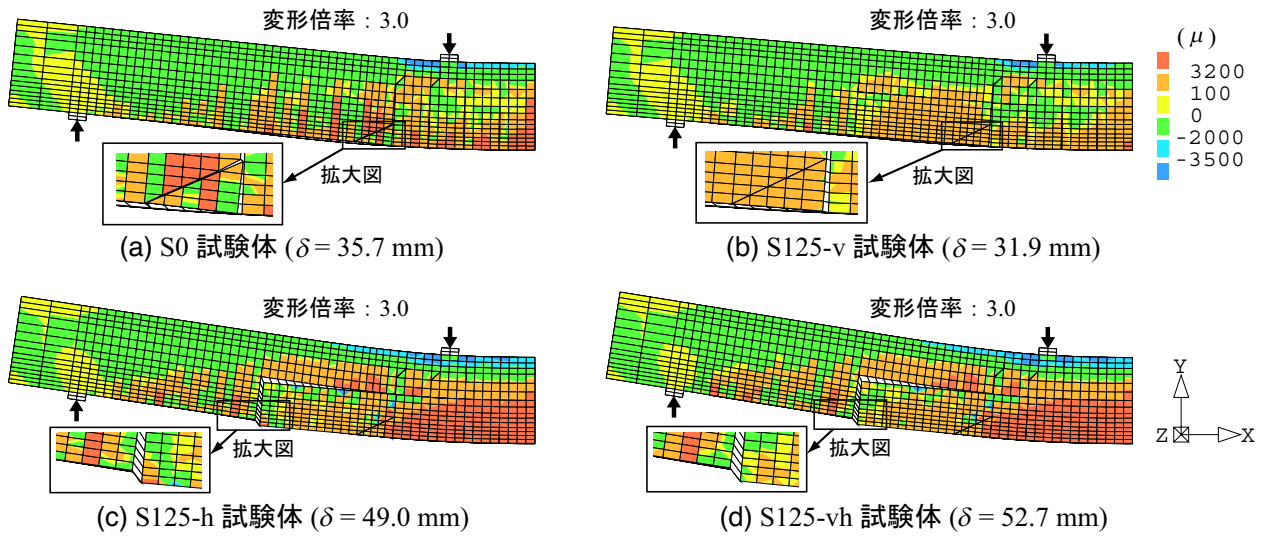


図-4 梁軸方向歪分布および変形図

貼り付けている曲げ補強シートの剥離を再現するため、著者らが提案した剥離モデルを用いている²⁾。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連成作用を無視し、法線方向およびせん断方向の剥離基準を簡易に次のように定義している。

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

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

ここで、 f_{cr-n} 、 τ_{cr-ts} 、 τ_{cr-tt} は、それぞれ付着界面の法線方向引張応力、軸方向および断面方向のせん断応力であり、 f_{cr-nu} 、 τ_{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、 τ_{cr-tu} は文献3)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。

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

接触面要素の配置に関しては、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に入れて主ひび割れ分布のみをモデル化することとし、図-2(a)に示すように配置した。一方、側面接着シートを有する3試験体に関しては、便宜的にS0試験体と同様の接触面要素を配置した。なお、側面接着シートの剥離を再現するために、図-2(b)に示すような離散ひび割れを配置している。

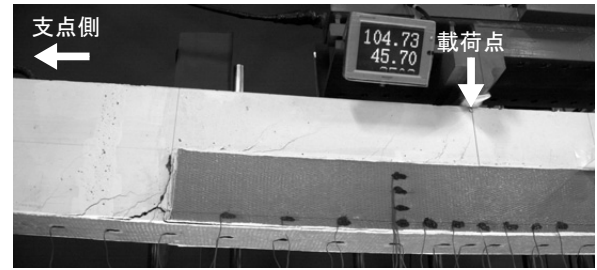


写真-1 剥離直前の側面接着シートの状況 (S125-vh 試験体)

4. 数値解析結果および考察

4.1 梁軸方向ひび割れ分布

図-4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軸方向歪コンター図をその時点におけるスパン中央変位と併せて示している。ここで、S125-v/h/vh試験体の結果は、側面接着シートを取り除いたコンクリート表面における歪分布図を示している。なお、歪コンターレベルにおいて、100、3,200 μの引張歪は、それぞれひび割れ発生歪、ひび割れ開口歪の概略値となっている。

図-4(a)に示しているS0試験体の解析結果を見ると、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S125-v試験体に関しては、側面接着

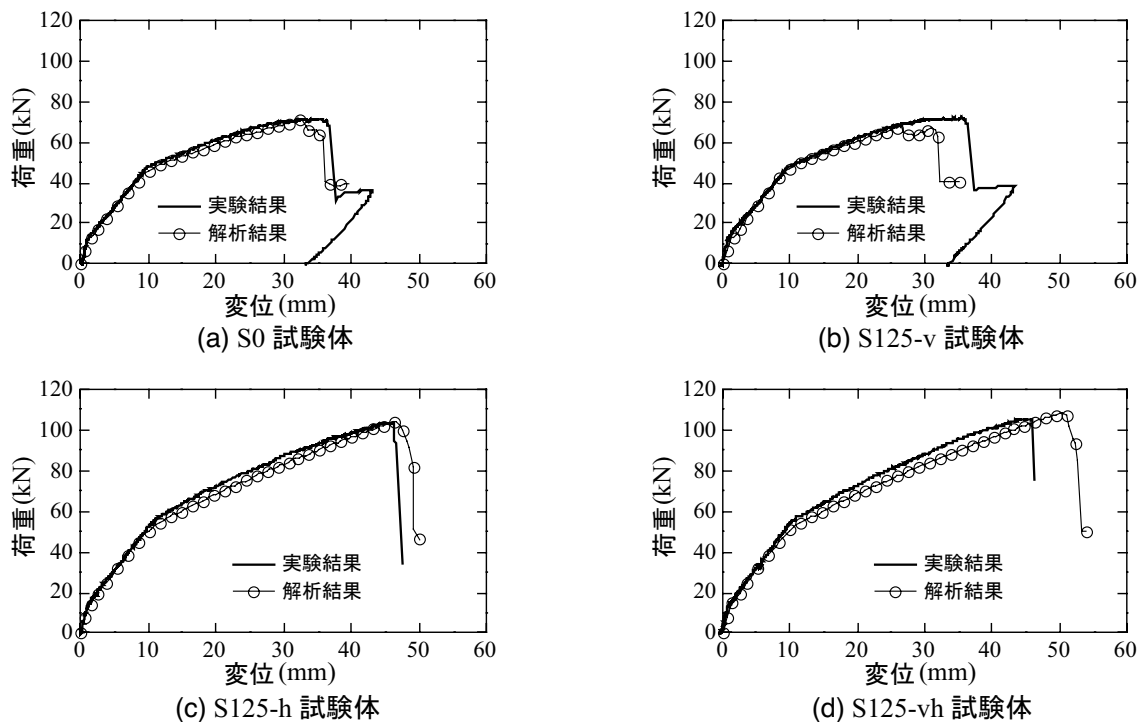


図-5 荷重-変位関係

シートの剥離は見られない。しかしながら、曲げひび割れの開口によって、側面接着シートが離散ひび割れとして仮定した斜めひび割れと交叉する曲げひび割れに沿って分断され、その部分がせん断力の作用によって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。また、実験では曲げひび割れの開口により側面接着シートの織糸が梁高さ方向に切断されている様子を確認していることから、解析結果は実験結果とほぼ同様の挙動を再現しているものと考えられる。

図-4(c), (d) に示されている S125-h および S125-vh 試験体に関する結果より、側面接着シート端部において、側面シート接着範囲のかぶりコンクリートの剥離が確認できる。なお、写真-1 に示すように、実験結果において、両試験体とも側面接着シートは曲げ補強シートの全面剥離の直前にかぶりコンクリートを伴って剥離していることから、解析結果は実験結果の側面接着シートによる補強効果を大略再現しているものと考えられる。

一方、解析結果により得られた終局原因に関

表-5 各試験体の最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} の一覧

試験体名	実験結果		解析結果	
	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)
S0	71.7	34.9	70.8	32.7
S125-v	72.3	35.3	67.7	26.5
S125-h	103.8	46.2	104.5	46.7
S125-vh	105.6	45.1	108.8	50.5

しては、S0 試験体は斜めひび割れの開口に伴うピーリング作用による曲げ補強シートの全面剥離、S125-v 試験体は斜めひび割れと交叉する曲げひび割れが開口しその部分がせん断力によって下方に押し出されることに起因するピーリング作用による曲げ補強シートの全面剥離、S125-h および S125-vh 試験体に関しては側面接着シートが側面かぶりコンクリートを伴う剥離後の曲げ補強シートの全面剥離、として評価されている。また、実験時における各試験体も、解析結果の破壊形式とほぼ同様の挙動を示していることから、解析結果は実験結果の破壊挙動を大略再現しているものと推察される。

4.2 荷重－変位関係

図－5には各試験体の荷重－変位関係に関する解析結果と実験結果の比較、表－5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 δ_{max} の一覧を示している。

図－5(a)のS0試験体に関する比較図より、解析結果は変位33mm付近までは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、曲げ補強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S125-v試験体に関する比較図に着目すると、解析結果は最大荷重および最大荷重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、解析結果では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、シート剥離が早期に発生したためと推察される。しかしながら、前述のように実験と解析の両結果での破壊挙動が同様であることから、解析結果は実験結果と大略対応しているものと考えられる。

(c)図のS125-h試験体に関する解析結果は、載荷初期から曲げ補強シートの全面剥離によって終局に至るまで実験結果とほぼ一致している。また、(d)図のS125-vh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小さく、最大荷重時変位が実験結果よりも大きな値を示しているものの、S125-h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、S125-v試験体の場合には、最大荷重や最大荷重時変位がS0試験体とほぼ同程度となっていることから、本研究の範囲内においては、梁高さ方向に繊維強化したFRPシートを側面接着する場合の剥離抑制効果は実験的にも数値解析的にも小さいことが明らかとなった。また、S125-hおよびS125-vh試験体に関しては、S0試験体よりも最大荷重や最大荷重時変位が向上し

ており、側面接着による曲げ補強シートに対する剥離抑制効果が確認できることから、解析結果は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、側面接着シートの繊維強化方向を変化させた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、側面接着シートの繊維強化方向の異なる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、以下のとおりである。

- (1) 本研究で提案した解析手法を用いることにより、側面接着シートの繊維強化方向にかかわらず、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ものと考えられる。
- (2) 本研究の範囲内では、側面接着シートの繊維強化方向を梁軸方向または2方向として接着することにより、曲げ補強シートに対する十分な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となった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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*, V.93, No.2, pp.208-217, 1996.