

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 梁の破壊挙動に関する数値解析

Numerical analysis of failure behavior of flexural reinforced RC beams combining with bonding FRPs on side-surface
— case varying reinforcing direction of side-surface FRPs —

室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学 学生員 張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 ○学生員 山田 真司 (Shinji Yamada)

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となっている。このような破壊形式で終局に至る場合には、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阻止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検討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ので報告する。

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: その両方向である二方向)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、載荷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150×250mm、純スパン長2,600mmである。全ての試験体において、底面には目付量830g/m²、幅130mmのAFRPシートを梁中央部から左右にそれぞれ1,200mmの範囲に1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、箔歪ゲージを100mm間隔および載荷点直下に貼り付けている。また、側面には目付量415g/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535mm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二方向の3種類とし

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				二方向

表-2 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性一覧

材料	圧縮 強度 f'_c (MPa)	引張 強度 f_t (MPa)	降伏 強度 f_y (MPa)	弾性 係数 E (GPa)	ポアソン 比 ν
コンクリート	26.1	2.08	-	26.0	0.2
鉄筋 (D19)	-	-	394.2	206	0.3
鉄筋 (D13)			385.7		

表-3 AFRP シートの力学的特性 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	厚さ t_f (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			

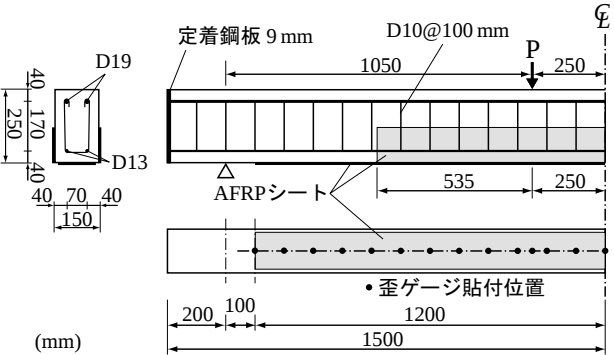


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況、載荷点位置およびシート補強概要図の一例 (S125-vh 試験体)

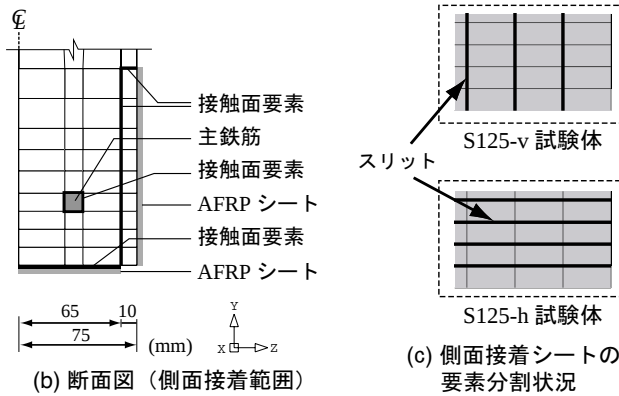
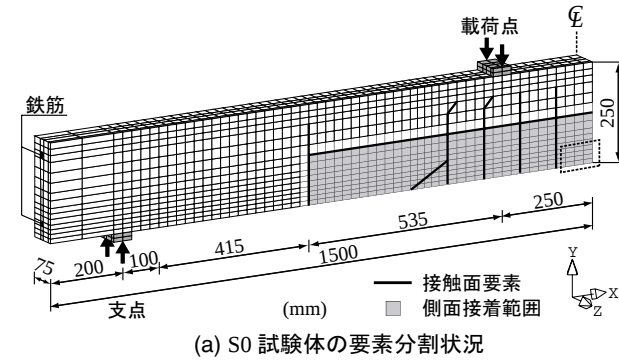


図-2 要素分割図の一例

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、鉄筋および AFRP シートの力学的特性値を一覧にして示している。

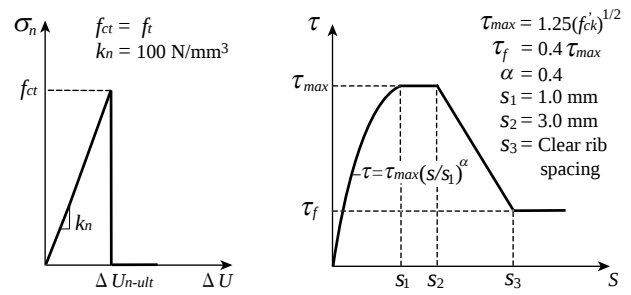
3. 数値解析概要

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状況は S0 試験体と同様であり、側面接着シートは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

コンクリートの材料構成則には、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 3,500 μ 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 μ 以後は初期弾性係数の 1/20 の勾配で 0.2 f'_c までは線形軟化モデルとした。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、塑性硬化係数 H'



(a) Discrete Cracking モデル

(b) Bond-slip モデル

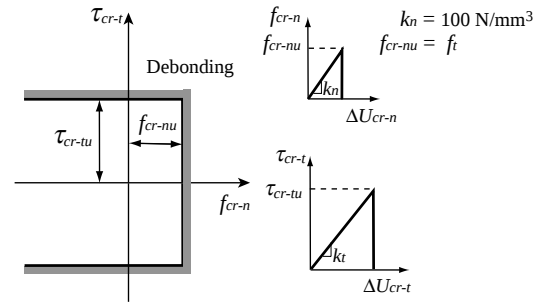


図-3 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

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接着シートも簡略化して等方材料と仮定し、S125-vh 試験体に関しては側面接着シートを連続体としている。一方、S125-v や S125-h 試験体の側面接着シートに関しては、図-2(c) に示すように、それぞれ梁高さ方向や梁軸方向に、要素分割に合わせたスリットを設けることで、擬似的に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。

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。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。

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

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

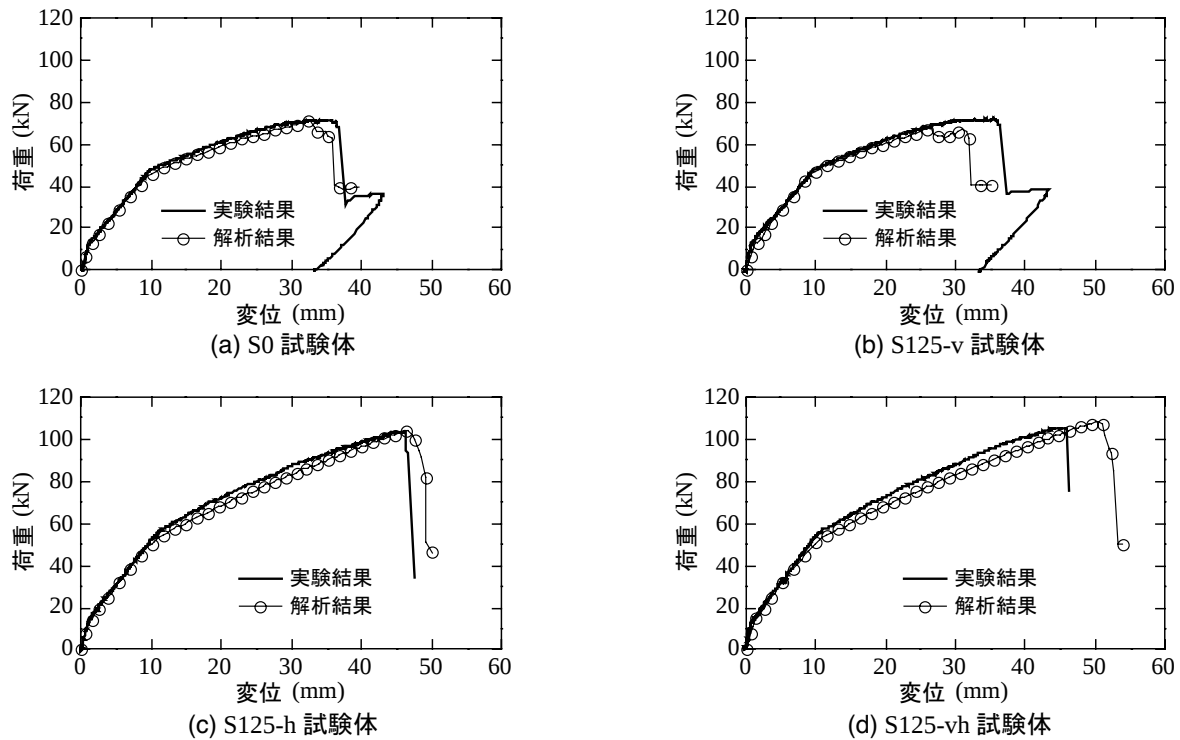


図-4 荷重-変位関係

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し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。

4. 数値解析結果および考察

4.1 荷重-変位関係

図-4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。各解析に関して、S0試験体は曲げ補強シートの全面剥離、S125-v試験体は側面接着シートがスリットに沿って分断した後に曲げ補強シートの全面剥離、S125-hおよびS125-vh試験体は側面接着シート端部が剥離し、その後、曲げ補強シートの全面剥離によって、それぞれ解析が終了している。

図-4(a)のS0試験体に関する比較図より、解析結果は変位33 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、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

表-4 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

察される。

一方、(b)図のS125-v試験体に関する比較図に着目すると、解析結果は変位27 mm付近まで実験結果とよく一致している。その後、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が、後述のように、実験と解析での破壊挙動がほぼ同様であり、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ことが分かる。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、終局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。

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 δ_{max} を一覧にして示している。表より、本実験範囲において、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いることから、曲げ補強シートに対する剥離抑制効果が確認できる。また、S125-v試験体の場合には、最

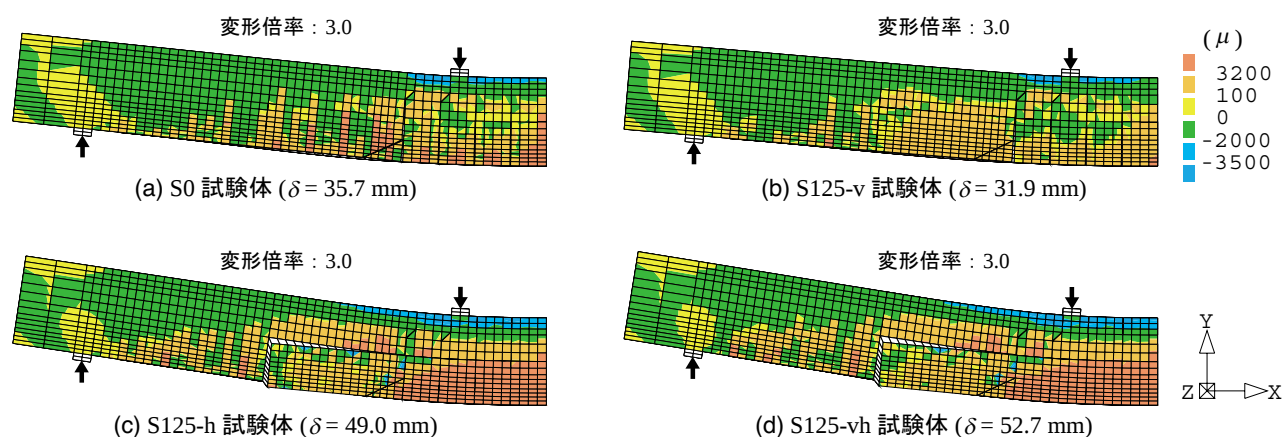
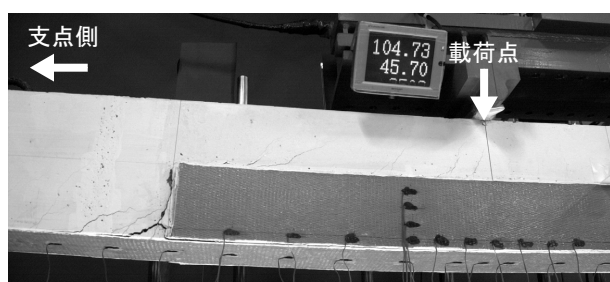


図-5 梁軸方向歪分布および変形図

写真-1 剥離直前の側面接着シートの状況
(S125-vh 試験体)

繊維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示しているものと考えられる。

図-5(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、実験結果において、両試験体とも写真-1 に示すように、曲げ補強シートの全面剥離の直前に側面接着シートの側面かぶりコンクリートを伴う剥離が確認できることから、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。

大荷重や最大荷重時変位は S0 試験体とほぼ同程度となっていることが分かる。一方、数値解析結果では、S125-v 試験体に関しては、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荷重および変位で終局に至っている。S125-h および S125-vh 試験体の場合には、実験結果と同様に、側面接着シートの繊維強化方向を梁軸方向または二方向として接着することにより、S0 試験体と比較して、最大荷重や最大荷重時変位が大きくなる傾向にあり、実験結果を大略再現しているものと判断される。

4.2 梁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軸方向歪コンター図を示している。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、ひび割れ開口歪と対応している。

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 S125-v 試験体に関しては、側面接着シートの剥離は見られず、曲げひび割れの開口により、側面接着シートが離散ひび割れ位置に設けたスリットに沿って梁高さ方向に分断され、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。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

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の検討を目的として、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、

- (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二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.