

論文 側面接着法を用いた剥離破壊型 FRP シート曲げ補強 RC 梁の剥離制御に関する実験的研究

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、計算終局点到達前にシート剥離により終局に至る剥離破壊型 FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象として、梁側面に FRP シートを接着してシート剥離を抑制する側面接着法の合理的な設計法確立に資するための実験を行った。本研究では、特に側面接着シートの目付量と補強範囲に着目して検討を行っている。検討の結果、合理的な側面接着シートの目付量は曲げ補強シートの 1/3 程度以上であり、補強範囲は側面接着シートの軸剛性を考慮した計算終局時の主鉄筋降伏領域であること、等が明らかとなった。

キーワード：FRP シート、ピーリング作用、側面接着法、剥離抑制

1. はじめに

近年、連続繊維シート (以後、FRP シート) を用いた土木構造物の補修・補強工事が多く施工されるようになり、諸研究機関で様々な実験・解析が行われている。著者らも、FRP シートを梁部材の引張側底面に接着する曲げ補強を想定し、FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する様々な研究¹⁾を実施してきた。その結果、1) 曲げ補強シートの剥離は、載荷点近傍の下縁かぶり部に発生する斜めひび割れの開口に起因するピーリング作用によって発生すること、2) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、コンクリート標準示方書²⁾に基づいた断面分割法による計算において、コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみ ($3,500 \mu$) に至った時点 (以後、計算終局点) においても曲げ補強シートの定着が確保されている曲げ圧壊型と、計算終局点に到達する前にシート剥離によって終局に至る剥離破壊型の 2 種類に分類され、その破壊形式の予測も可能であること、等を明らかにしている。

剥離破壊型と判定される場合、計算終局耐力を保証するためには曲げ補強シートの剥離を抑制する必要がある。このことから、著者等は

FRP シートを梁側面に接着してピーリング作用の要因である下縁かぶり部に発生する斜めひび割れの発生・開口を抑制し、シート剥離の発生を遅延させる工法 (以後、側面接着法) を提案³⁾している。側面接着法を用いて計算終局時まで曲げ補強シートの剥離を抑制するためには、1) 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すること、2) 側面接着シートの接着長さは梁軸方向に計算終局時の主鉄筋降伏領域とすること、3) 接着高さは梁下縁から梁高さ方向に梁高の 1/2 程度の範囲に接着すること、

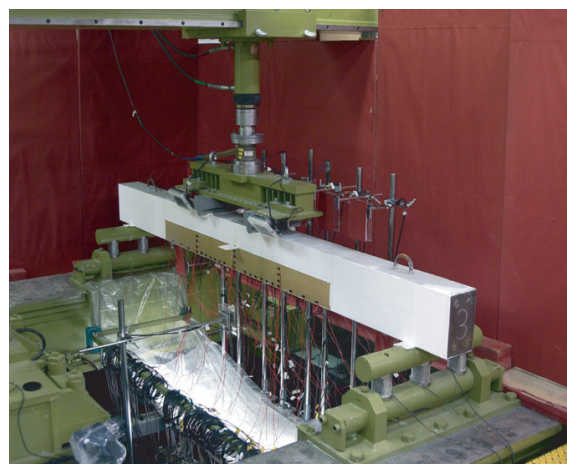


写真-1 実験状況

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 博士研究員 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 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 博(工) (正会員)

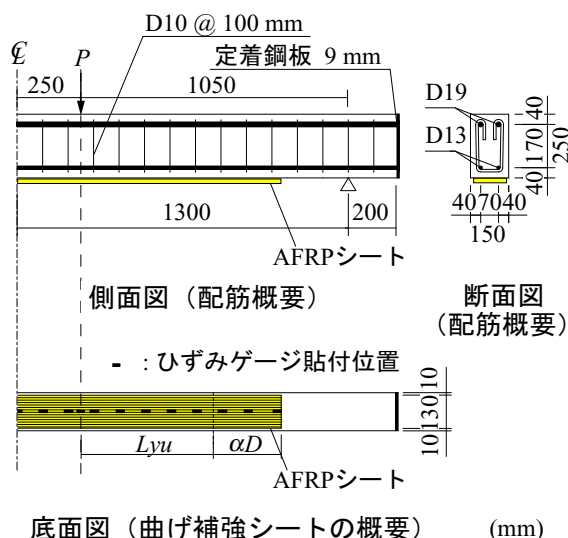


図-1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

により可能となることを明らかにしている。一方、曲げ圧壊型で終局に至る FRP シート曲げ補強 RC 梁の曲げ補強範囲は、片側等せん断力区間のシート長さを計算終局時の主鉄筋降伏領域 L_{yu} に定着長 αD (α : 定着部接着長係数, D : 梁高) を加えた長さ (以後, 必要接着長) とすることで計算耐力を保証可能であること³⁾を明らかにしている。しかしながら、側面接着シートの必要目付量およびその目付量に対応する適切な補強範囲は未だ明らかになっていない。

このような観点から、本研究では、側面接着法を適用して剥離破壊型で終局に至る FRP シート曲げ補強 RC 梁のシート剥離を抑制する場合において、適切な目付量およびシート接着領域を決定することを目的に、実験的に検討を行った。なお、曲げ補強シートの接着範囲は、前述した曲げ圧壊型で終局に至る場合の必要接着長としている。写真-1 には本実験の状況を示している。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

図-1 には、本実験に用いた RC 梁の形状寸法、配筋状況および曲げ補強シートの補強概要を示している。RC 梁は断面寸法 (梁幅 $\times$ 梁高) 150×250 mm, 上端および下端鉄筋にそれぞれ D19, D13 を 2 本ずつ配筋した複鉄筋矩形 RC 梁

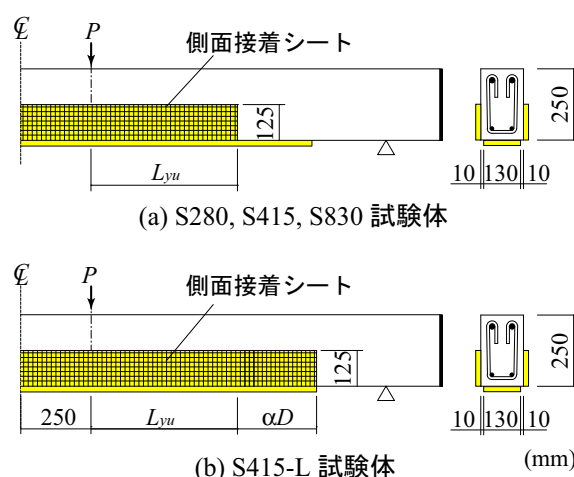


図-2 側面接着シートの補強概要

表-1 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
280	0.193	2.06	118	1.75
415	0.286			
830	0.572			

である。なお上端鉄筋に D19 を用いたのは、上縁コンクリートの圧壊がシート剥離に先行して生じ、梁が曲げ圧壊型で終局に至るのを防ぐためである。純スパン長はいずれの試験体も 2,600 mm であり、載荷点間隔を 500 mm とし、せん断スパン比を 5.0 としている。

曲げ補強シートには、目付量 830 g/m² (保証耐力 1,176 kN/m), 幅 130 mm のアラミド繊維製 FRP (以後, AFRP) シートを 1 層用いることとした。曲げ補強シート上には、図-1 に示すように、ひずみゲージをスパン中央部から両支点方向に 100 mm 間隔および載荷点直下とシート端部に貼り付けている。なお、曲げ補強シートの補強範囲は、いずれの試験体も既往の研究で提案した必要接着長算定式³⁾により算出した長さとしている。以下に、必要接着長算定式を示す。

$$L_{req} = L_{yu} + \alpha D \quad (1)$$

$$L_{yu} = a (1 - M_y/M_u) \quad (\text{mm})$$

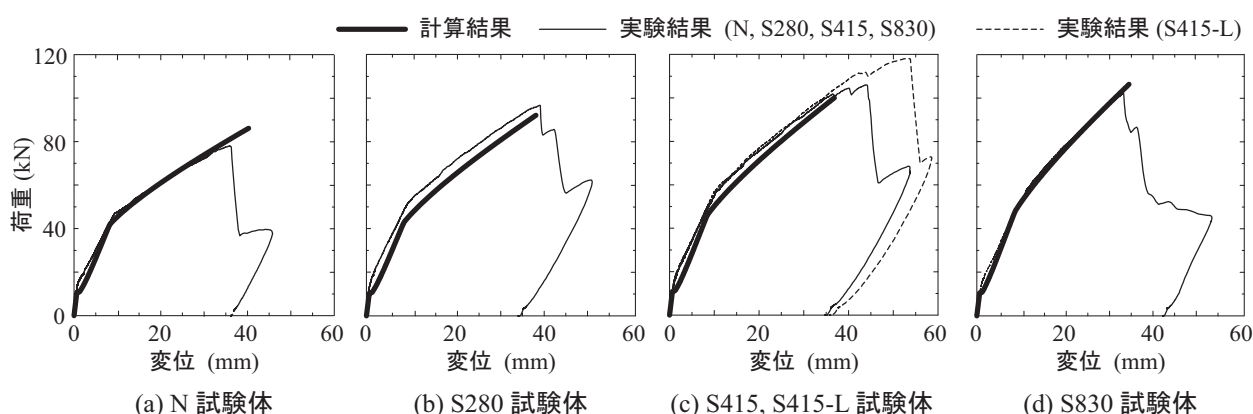
$$\alpha = -0.84R_c + 1.33$$

$$R_c = V_c/P_{uc}$$

表－２ 試験体の一覧

試験 体名	L_{yu} (cm)	曲げ補強シート		側面接着シート		
		シート目付量 (g/m ²)	補強範囲	シート目付量 (g/m ²)	接着高さ	接着長さ
N	53.5	830	$L_{yu} + \alpha D$	-	-	-
S280	55.9			280 / 280	梁高の 1/2	L_{yu}
S415	57.5			415 / 415		L_{yu}
S415-L				830 / 830		$L_{yu} + \alpha D$
S830	57.0					L_{yu}

L_{yu} : 計算終局時の主鉄筋降伏領域



図－３ 荷重－変位関係

ここに、 L_{req} : 必要接着長、 L_{yu} : 主鉄筋降伏領域、 D : 梁高、 a : セン断スパン長、 M_y : 計算降伏曲げモーメント、 M_u : 計算終局曲げモーメント、 α : 定着部接着長係数、 R_c : 斜めひび割れ発生余裕度、 V_c : 計算斜めひび割れ発生荷重、 P_{uc} : 計算終局荷重である。

本試験体では、 $L_{yu} = 53.5 \sim 57.0$ (cm)、 $\alpha = 0.80 \sim 0.92$ 、 $D = 25$ (cm) であることから、 $L_{req} = 73.5 \sim 79.9$ (cm) となっている。

図－２には、側面接着シートの補強概要を示している。側面接着シートの接着高さは梁高の1/2に統一している。また、側面接着シートの接着範囲は、側面接着シートの軸剛性も考慮に入れた断面分割法による計算終局時の主鉄筋降伏領域または必要接着長としている。なお、側面接着シートは梁の両側面に接着し、一方向シートを縦・横に直交して２枚貼り付けている。

表－２には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。表中、試験体名は側面接着シートの有無 (N: 無し, S: 有り) を示しており、Sに

付随する数値は側面接着シートの目付量を示している。試験体名の第二項目の -L は側面接着シートを曲げ補強シートの補強範囲 (必要接着長) まで延長して接着した試験体を示している。

実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度は 28.5 MPa、主鉄筋の降伏強度は D13 で 375 MPa であった。表－１には、本実験に用いた AFRP シートの力学的特性値一覧を示している。

３. 実験結果および考察

３.１ 荷重－変位関係

図－３には、各試験体の荷重－変位関係を側面接着シートの目付量ごとに計算結果と比較して示している。図中の計算結果は、平面保持を仮定した断面分割法により、上縁コンクリートが圧壊ひずみ (3,500 μ) に達するまでを示している。また、本計算結果では梁の両側面に接着した側面接着シートの曲げ補強効果も考慮して算出している。なお、表－３には、図－３より得られる降伏時および最大荷重時 (終局時) の荷重、

表－３ 実験および計算結果の一覧

試験 体名	計算結果				実験結果				破壊形式
	降伏時		終局時		降伏時		最大荷重時		
	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	
	P_{yc} (kN)	δ_{yc} (mm)	P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)	P_{ye} (kN)	δ_{ye} (mm)	P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)	
N	42.3	8.4	86.2	40.2	46.9	9.1	78.2	35.7	剥離破壊型
S280	44.9	8.4	95.8	37.8	44.9	8.4	100.8	38.7	曲げ圧壊型
S415	45.6	8.4	100.0	36.8	57.2	10.5	106.1	44.2	曲げ圧壊型
S415-L					56.3	9.8	118.3	53.2	曲げ圧壊型
S830	50.6	8.7	110.6	34.1	60.2	11.1	106.8	32.9	シート引き剥がれ

変位および破壊形式を一覧にして示している。

(a) 図より、N 試験体では実験および計算結果の剛性勾配が荷重初期から主鉄筋降伏後まではほぼ対応していることが分かる。また、終局時には、計算終局荷重および変位を下回った状態で急激な荷重低下が見られることから、曲げ補強シートの剥離によって終局に至ったことがうかがわれる。

(b), (c), (d) 図より、側面接着シートを主鉄筋降伏領域内に接着した S280, S415, S830 試験体の計算荷重－変位関係は、N 試験体と同様に荷重初期から終局時まで実験結果と概ね対応していることが分かる。また、表－３の降伏荷重および最大荷重の計算値に着目すると、側面接着シートの目付量の増加に伴い各荷重が増加傾向にあることが分かる。しかしながら、実験結果では S280, S415 試験体は計算終局点を超えた状態で曲げ補強シートの剥離によって終局に至っているものの、S830 試験体では計算終局点到達前に急激な荷重低下を伴って終局に至っている。ここで、S830 試験体が計算終局耐力を下回ったのは、後述するように側面接着シートにより曲げ耐力が増大し、曲げ補強シート接着端部が段落し状態になったことにより、接着端近傍部の主鉄筋が降伏して曲げ補強シートが引き剥がされたことによるものと考えられる。

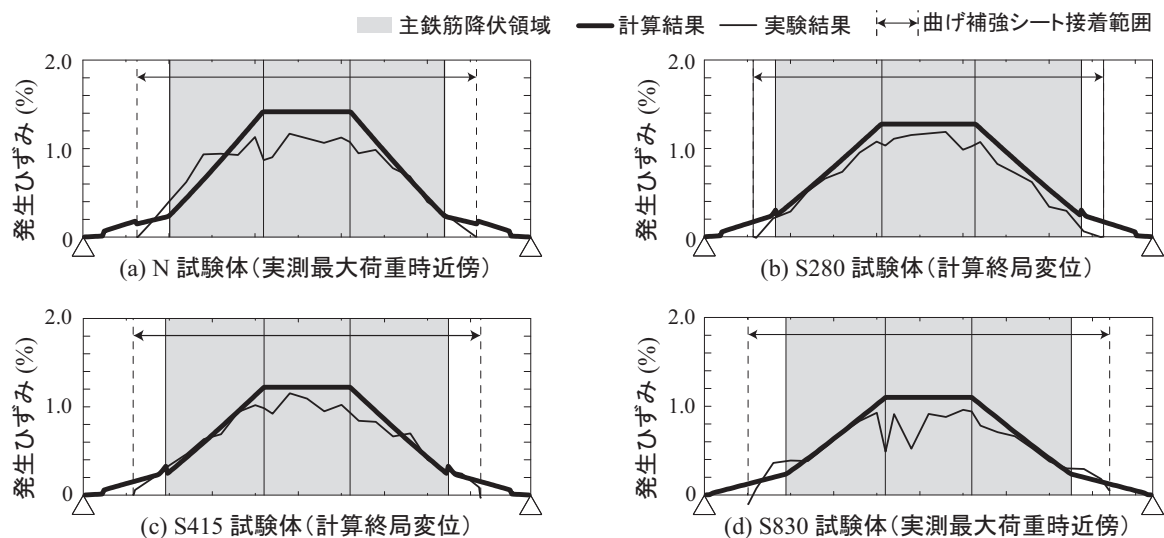
また、(c) 図より、側面接着範囲を曲げ補強シートと同様に必要接着長にまで延長した S415-L 試験体は S415 試験体とほぼ一致した荷重－変位関係を示し、最終的には S415 試験体以上の

耐荷性能を有していることが分かる。

以上のことより、本研究の範囲内では側面接着シートの目付量が曲げ補強シートの目付量の 1/3 程度以上の場合、側面接着シートの補強範囲を側面接着シート補強後の断面分割法を用いた計算終局時の主鉄筋降伏領域とすることにより、計算終局耐力を保証可能であることが明らかとなった。また、側面接着補強をする場合の曲げ補強シートの補強範囲は、必要接着長とすることで十分であることが明らかになった。なお、側面接着シートの目付量が曲げ補強シートと同程度に大きい場合には、曲げ補強シート接着端近傍部における断面抵抗曲げモーメントの軸方向分布が段落し的な状態となることに留意する必要がある。

3.2 終局時近傍における曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状

図－４、図－５には、各試験体の終局時近傍における曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布を同一変位時の計算結果と比較して示している。図－４には側面接着範囲を主鉄筋降伏領域とした場合の結果を、図－５には側面接着シートの目付量が曲げ補強シートと等しいが、側面接着範囲が異なる S415, S415-L 試験体の結果を比較して示している。なお、計算結果は断面分割法を援用して算出した結果であることより、実測ひずみが計算ひずみを超える領域はシート剥離範囲と判断した。図には、計算終局点到達後に終局に至った S280, S415, S415-L 試験体は計算終局変位を、計算終局点到達前に終局に至っ

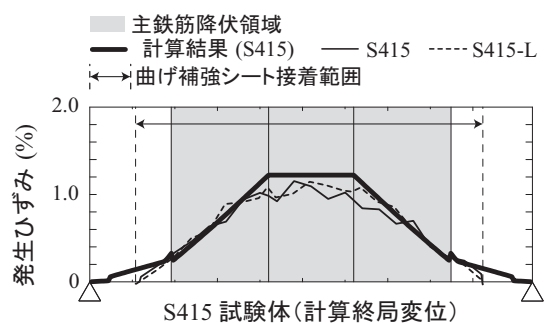


図－４ 終局時近傍における曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状 (目付量の比較)

た N, S830 試験体は実測最大荷重時近傍の値を示している。

図－4(a) より N 試験体は、左側等せん断力区間の主鉄筋降伏領域内で計算値を上回るひずみが発生していることが分かる。このことから、斜めひび割れに起因するピーリング作用によって曲げ補強シートの部分剥離が顕在化していることが分かる。図－4(b) (c) より、S280, S415 試験体の計算終局変位における発生ひずみは、計算値とほぼ同程度の値および性状を示している。これより、計算終局時においてもシートの定着が十分確保されていることが分かる。一方、図－4(d) より S830 試験体に関する結果を見ると、左側シート接着端部に負のひずみ値が見られる。これは、シート接着端近傍部における断面抵抗曲げモーメントの軸方向分布が段落し状になり、シート接着端部の主鉄筋が降伏してひび割れが開口し、曲げ補強シートがかぶりコンクリートを伴って引き剥がされ、応力が急変したためと推察される。

図－5 より、S415, S415-L 試験体の計算終局変位時のひずみ分布を見ると、いずれの試験体も同様なひずみ分布性状を示し、計算結果ともよく対応していることが分かる。これより、側面接着シートの補強範囲を曲げ圧壊型の場合における必要接着長とすることで耐力の増加は認められるものの、計算結果を満足するためには



図－５ ひずみ分布性状 (補強範囲の比較)

主鉄筋降伏領域のみで十分であることが明らかとなった。

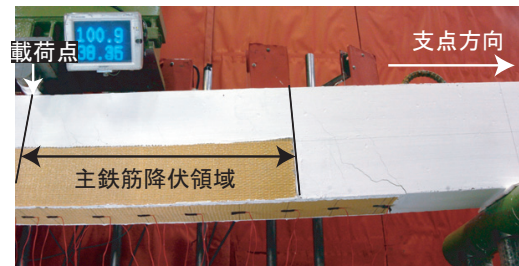
3.3 終局時近傍におけるひび割れ性状

写真－2 には、各試験体の終局時近傍における等せん断力区間のひび割れ分布性状を示している。写真には、図－4 と同様に計算終局時到達前に終局に至った N, S830 試験体は実測最大荷重時近傍、計算終局耐力を満足した S280, S415 試験体は計算終局変位と同一変位時の状態を示している。なお、いずれの試験体もシート剥離側の状況を示している。

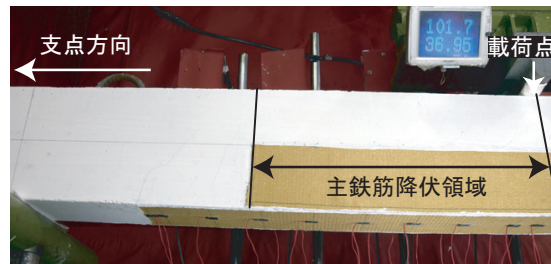
写真－2 (a) より N 試験体は、載荷点近傍の下縁かぶり部に斜めひび割れが発生し、ピーリング作用による曲げ補強シートの剥離進展が見受けられる。一方、写真－2 (b), (c) より S280, S415 試験体では曲げ補強シートの接着端近傍部に若干の曲げひび割れの発生が見られるものの、曲げ補強シートの剥離は認められない。写



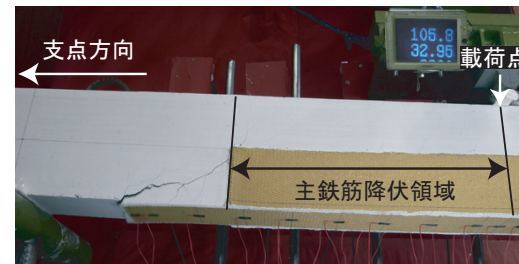
(a) N 試験体 (実測最大荷重時近傍)



(b) S280 試験体 (計算終局変位)



(c) S415 試験体 (計算終局変位)



(d) S830 試験体 (実測最大荷重時近傍)

写真－２ 終局時近傍におけるひび割れ性状

真－2 (d) より S830 試験体の実測最大荷重時近傍では、曲げ補強シート接着端部に斜めひび割れおよび主鉄筋に沿う割裂ひび割れが見られる。これは、前述したように曲げ補強シート接着端近傍部の断面抵抗曲げモーメントが軸方向に段落し状に分布することによるもので、シート接着端近傍部の主鉄筋が降伏したためと考えられる。

以上のことより、側面接着シートの目付量が曲げ補強シートと同程度に大きい場合には、曲げ補強シート接着端近傍部の断面抵抗曲げモーメントの軸方向分布が段落し状となり破壊に至る可能性のあることに留意する必要がある。

4. まとめ

本研究では、剥離破壊型 FRP シート曲げ補強 RC 梁を側面接着法を用いて曲げ圧壊型と同程度の耐荷性状を示すまでシートの剥離を抑制するための合理的な補強設計法の確立を目的に、側面接着シートの目付量や補強範囲および曲げ補強シートの補強範囲に着目して、実験的に検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

(1) 側面接着法によって、剥離破壊型 FRP シート曲げ補強 RC 梁が曲げ圧壊型の耐荷性状を示すまでシートの剥離を抑制するためには、側面接着シートの目付量を曲げ補強シートの

1/3 程度以上とし、側面接着シートの補強範囲を側面接着シートの軸剛性を考慮した計算終局時における主鉄筋降伏領域とすることで十分である。

(2) 側面接着法により曲げ圧壊型と同程度の耐力までシート剥離を抑制するためには、曲げ補強シートの補強範囲を必要接着長とすることが必要である。ただし、側面接着シートの目付量が大きい場合には、曲げ補強シート接着端近傍部で断面抵抗曲げモーメントの軸方向分布が段落し状となり破壊する可能性のあることに留意する必要がある。

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, 2001.8.
- 2) コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 構造性能照査編, 土木学会, 2002.
- 3) 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.