

AFRP シート曲げ補強 RC 梁の効率的な剥離抑制法に関する実験的研究

Experimental study on rational debonding control for flexural strengthened RC beams with AFRPs

室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
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 澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)
室蘭工業大学 ○学生員 森本 勤 (Tutomu Morimoto)

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・補強工法が採用されるようになり、諸研究機関で様々な実験、検討が行われている。著者らも、FRPシートを梁部材の引張り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梁に関する様々な実験¹⁾を実施してきた。その結果、1) 曲げ補強シートの剥離は荷重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伴う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、断面分割法に基づいて算出した計算結果の最大荷重および最大荷重時変位到達前にシート剥離を生じ終局に至る剥離破壊型と、計算最大変位を上回り、上縁コンクリートが圧壊した後に計算最大荷重と同程度の荷重レベルで終局に至る曲げ圧壊型に分類されること、3) これらの破壊形式は、降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力の関係を基に予測可能であること¹⁾、等を明らかにしている。

剥離破壊型と判定される場合には、計算終局時まで曲げ補強シートの剥離を抑制する必要がある。FRPシートを用いた曲げ補強シートの剥離抑制方法として、曲げ補強シート接着後にU字形に巻き付ける方法があるが、下縁かぶり部のピーリング作用の要因である斜めひび割れの開口を抑制することを目的とする場合には、梁側面のみFRPシートを接着(以後、側面接着)することで、簡易に剥離抑制が可能であると考えられる。このような観点より、剥離破壊型と予測されるFRPシート曲げ補強RC梁の効率的な

シート剥離抑制法の確立を目的に、梁側面にFRPシートを接着したFRPシート曲げ補強RC梁の静荷重実験を実施した。なお本研究では、側面接着シートの繊維強化方向、側面接着高さおよび補強量に着目して検討を行っている。

2. 試験体の概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。本実験に用いた試験体は側面接着シートの補強量を2種類、繊維強化方向を3種類、接着高さを3種類とし、曲げ補強のみの試験体も含めた全19体のRC梁である。表中、試験体名の第1項目は、側面接着シートの補強量(N: 無補強, S1: 415 g/m², S2: 830 g/m²)を示し、第2項目は側面接着シートの繊維強化方向(-cr: 二方向, -h: 梁軸方向, -v: 梁高さ方向)と接着高さ(1: 8.7 cm, 2: 12.5 cm, 3: 19.8 cm)を組み合わせ示している。なお、二方向は一方シートを直交して2枚貼付けている。

図-1には、本実験に用いたRC梁の形状寸法および配

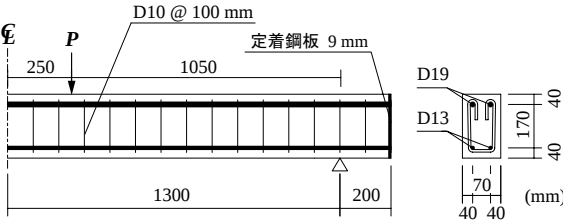


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体一覧

試験体名	曲げ補強 シート 補強量 (g/m ²)	側面接着シート			
		補強量 (g/m ²)	繊維 強化方向	接着高さ (cm)	接着 範囲
N		-	-	-	-
S1-cr1～3	830	415	二方向	-cr1, -h1, -v1 : 8.7 cm	等曲げ 区間 + L_{yu}
S1-h1～3			梁軸方向		
S1-v1～3			梁高さ方向		
S2-cr1～3		830	二方向	-cr2, -h2, -v2 : 12.5 cm	
S2-h1～3			梁軸方向		
S2-v1～3			梁高さ方向		
			-cr3, -h3, -v3 : 19.8 cm		

表-2 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 (%)
415	0.286	2.06	118	1.75
830	0.572			

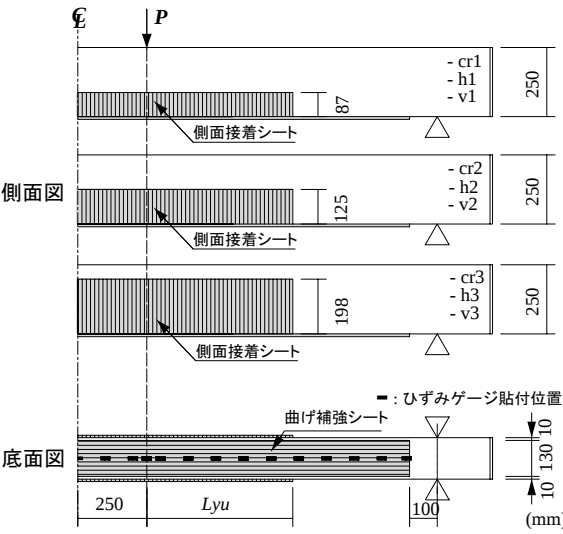


図-2 AFRPシートの補強概要

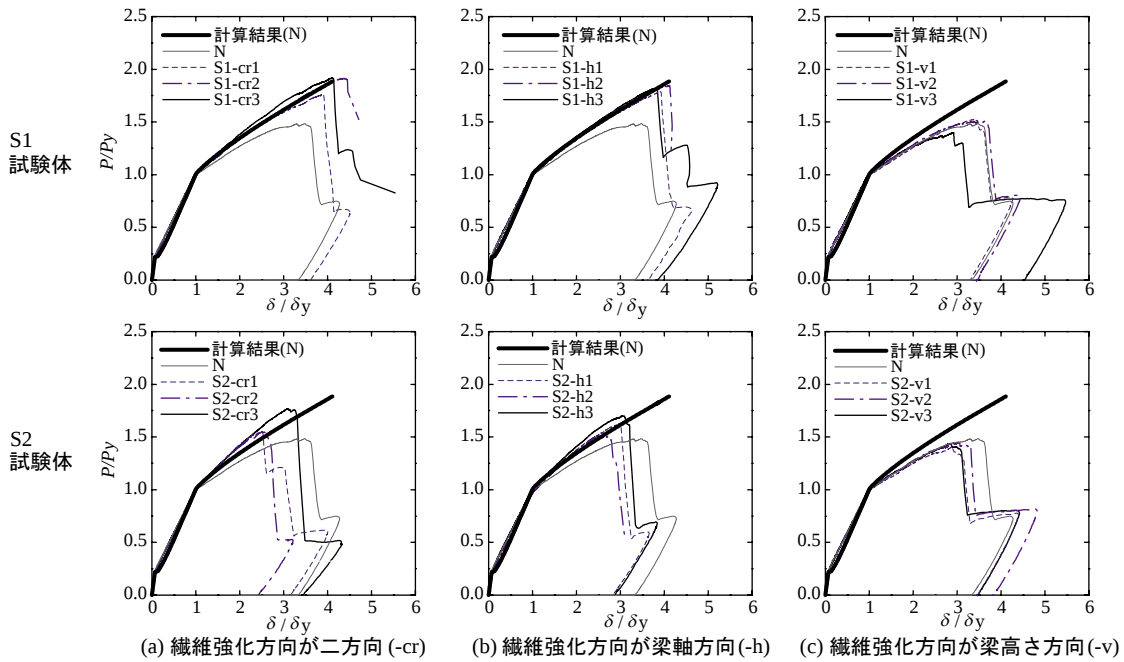


図-3 無次元荷重-変位関係

筋状況を示している。試験体は、断面寸法(梁幅×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避けるためである。純スパン長は、いずれの試験体も 2,600 mm とし、せん断スパン比を 5.0 としている。

図-2 には、本実験に用いた試験体の補強概要図を示している。曲げ補強シートには、目付量 830 g/m², 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。また、その接着範囲は梁中央から両支点の 100 mm 手前までとしている。なお、曲げ補強シート上には、図-2 に示されているように、ひずみゲージをスパン中央部から両支点側に 100 mm 間隔および載荷点直下に貼付けている。

側面接着シートの梁軸方向の接着範囲は、等せん断力区間における主鉄筋降伏領域 L_{yu} および等曲げ区間としている。また、側面接着シートの接着高さは 8.7 cm (限界接着高さ), 12.5 cm (梁高の半分) および 19.8 cm (計算終局時の中立軸高さ) としている。なお、限界接着高さは鉄筋の側面かぶりを考慮し、高さ方向のシートの定着が確保できると仮定した高さである。

実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度は 26.1 MPa, 主鉄筋の降伏強度は D13, D19 で 394, 386 MPa であった。また、表-2 には、本実験に用いた AFRP シートの材料特性値一覧を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 無次元荷重-変位関係

図-3 には、側面接着シートの繊維強化方向毎に無次元荷重-変位関係を計算結果と比較して示している。図中の実験および計算結果は、各試験体の主鉄筋降伏後における AFRP シートの曲げ補強効果を同一の尺度で比較検討する

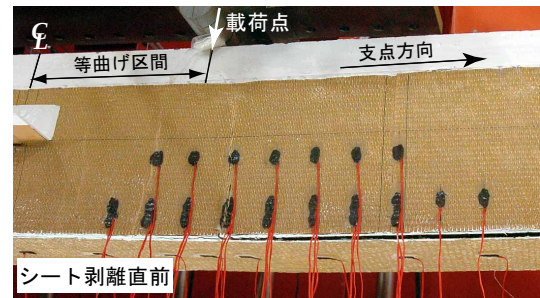
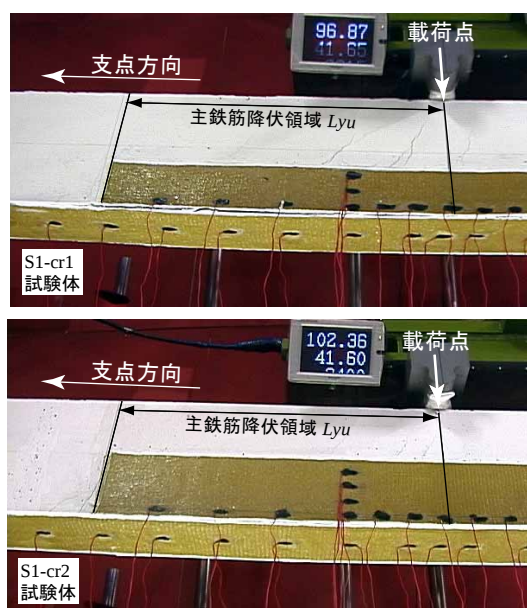


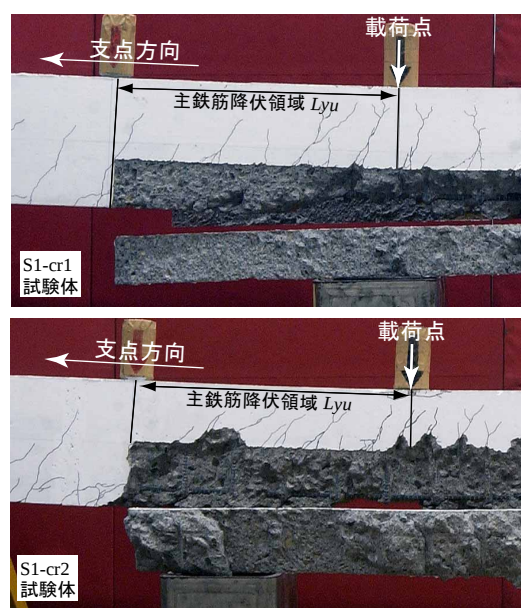
写真-1 側面接着シートの剥離性状 (S1-v3 試験体)

表-3 実験および計算結果の一覧

試験体名	降伏時				最大荷重時(無次元)			
	実験結果		計算結果		実験結果		計算結果	
	荷重 P_{ye} (kN)	変位 δ_{ye} (mm)	荷重 P_{yc} (kN)	変位 δ_{yc} (mm)	荷重 P_{ue}/P_{ye}	変位 δ_{ue}/δ_{ye}	荷重 P_{uc}/P_{yc}	変位 δ_{uc}/δ_{yc}
N	48.2	10.0	46.2	9.3	1.49	3.47	1.89	4.13
S1-cr1	55.2	10.7	50.4	9.5	1.76	3.88	1.97	3.76
S1-cr2	55.0	10.3	50.6	9.5	1.91	4.38	1.98	3.70
S1-cr3	57.9	11.2	51.2	9.6	1.92	4.12	1.96	3.62
S1-h1	54.2	10.4	50.4	9.5	1.79	3.90	1.97	3.76
S1-h2	56.1	11.2	50.6	9.5	1.85	4.12	1.98	3.70
S1-h3	57.7	10.7	51.2	9.6	1.82	3.83	1.96	3.62
S1-v1	49.5	9.9	46.2	9.3	1.52	3.37	1.89	4.13
S1-v2	47.7	9.7			1.51	3.66		
S1-v3	49.4	10.5			1.40	2.91		
S2-cr1	59.8	11.4	53.8	9.6	1.55	2.50	2.02	3.52
S2-cr2	63.1	11.3	55.6	9.8	1.55	2.50	1.98	3.34
S2-cr3	61.3	10.4	55.4	10.2	1.77	3.09	1.98	3.14
S2-h1	59.9	11.1	53.8	9.6	1.63	3.00	2.02	3.52
S2-h2	62.8	11.2	55.6	9.8	1.51	2.47	1.98	3.34
S2-h3	61.8	11.2	55.4	10.2	1.70	3.07	1.98	3.14
S2-v1	49.5	10.1	46.2	9.3	1.40	2.89	1.89	4.13
S2-v2	50.0	9.9			1.45	3.04		
S2-v3	50.0	10.2			1.44	2.83		



(a) シート剥離直前のひび割れ性状 (S1-cr 試験体)



(b) 実験終了後の破壊性状 (S1-cr 試験体)

写真-2 側面接着シートの接着高さの影響

ため、各々の降伏荷重 P_{ye} , P_{yc} , および降伏変位 δ_{ye} , δ_{yc} で除し、無次元化して整理している。なお、図中の計算結果は、図が煩雑になるのを防ぐため側面接着シートを貼付けていない N 試験体のみの結果を示している。なお、表-3 には、参考のため各試験体の降伏荷重 P_{ye} , P_{yc} , 降伏変位 δ_{ye} , δ_{yc} , 無次元最大荷重 P_{ue}/P_{ye} , P_{uc}/P_{yc} および無次元最大荷重時変位 δ_{ue}/δ_{ye} , δ_{uc}/δ_{yc} の実験結果および計算結果に関する一覧を示している。

図より、N 試験体は主鉄筋降伏後の第 2 勾配が低下して、計算終局荷重および変位に到達する前に急激な荷重低下を示して終局に至っていることから、剥離破壊型の性状を示していることが分かる。

これに対して、S1 試験体の側面接着試験体を見ると、繊維強化方向を二方向とした -cr 試験体および梁軸方向とした -h 試験体では、いずれの場合も N 試験体の終局時の荷重および変位を上回った後に終局に至っていることより剥離抑制効果が発揮されていることがわかる。一方、繊維強化方向が梁高さ方向の -v 試験体では N 試験体と同程度もしくはそれを下回る状態で曲げ補強シートが剥離し終局に至っている。これは、既往の研究と同様²⁾、写真-1 に示すように、曲げひび割れによって側面接着シートの非強化方向横糸が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たためと考えられる。

側面接着シート補強量が多い S2 試験体では、繊維強化方向が二方向の S2-cr 試験体および梁軸方向の S2-h 試験体で N 試験体よりも耐力は大きいものの、早期にシート剥離に至っている。一方、繊維強化方向が梁高さ方向の S2-v 試験体の終局荷重および変位は N 試験体に比較して小さい。このことより、側面接着シートの目付量が多い場合には、早期に曲げ補強シートの剥離が発生することが明らかになった。シートの接着高さは S1-cr, -h の結果より、梁高の 1/2 程度が合理的であり、ほぼ計算値に対応する補強

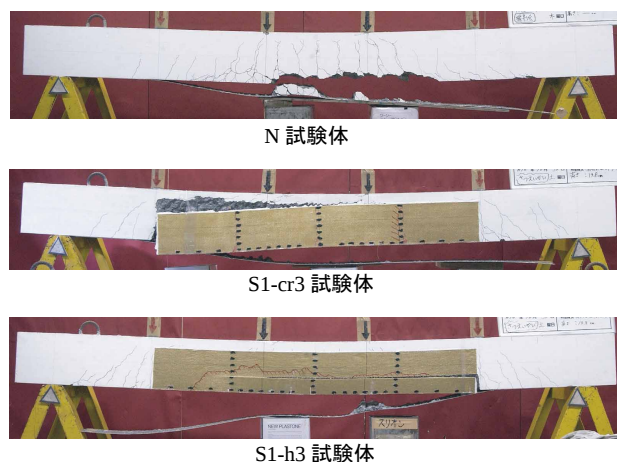


写真-3 実験終了後のひび割れ分布性状

効果が得られることがわかる。

以上のことより、側面接着により N 試験体の計算終局耐力を保証できる効率的な接着高さは、梁高の 1/2 程度であり、シートの繊維強化方向は二方向および梁軸方向である。なお、側面接着シートの補強量が多い場合には早期にシート剥離する傾向にあることから、今後は最適なシート補強量を検討する必要がある。

3.2 側面接着シートの接着高さの影響

写真-2 は、側面接着シートの接着高さを検討するため、シート接着高さのみが異なる S1-cr1/cr2 試験体のひび割れおよび破壊性状を示している。(a) には、S1-cr 試験体のシート剥離直前のひび割れ性状を示し、(b) には実験終了後の側面接着シートの剥離状況を示している。

(a) より、S1-cr1 試験体では載荷点近傍の側面接着シートの上側に曲げひび割れが数本発生しているのが確認される。また、そのひび割れ発生部の下縁ではピーリング作用による部分剥離が確認できる。一方、同一変位時の S1-cr2 試験体では、ひび割れはほとんど認められず、下縁部でのシートの部分剥離も認められない。

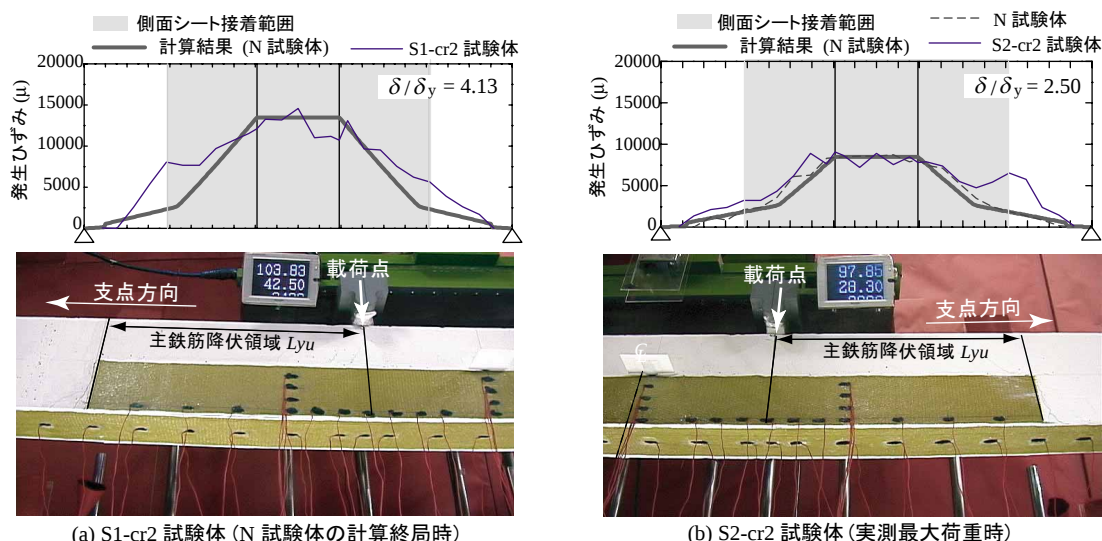


図-4 曲げ補強シートのひずみ分布性状およびひび割れ性状

(b)の側面接着シート剥離時の状況を見ると、S1-cr1試験体では載荷点近傍の下縁かぶり部でコンクリートが剥落しており、ピーリング作用が顕在化したことがわかる。しかしながら、側面接着シートの端部では、コンクリートの剥落は認められず、ピーリング作用に伴う引張力によって引き剥がされたと考えられる。一方、S1-cr2試験体では、載荷点近傍から側面接着シートの接着端部まで側面のかぶりコンクリートを伴って剥離していることが分かる。これは、側面接着シートの定着が確保され、十分な剥離抑制効果が発揮されたためと考えられる。このことより、側面接着シートの接着高さは梁高の1/2程度は必要であると考えられる。

3.3 側面接着シートの繊維強化方向の影響

写真-3には、側面接着シートの繊維強化方向の影響を検討するためN、S1-cr3、S1-h3試験体の実験終了後のひび割れ分布性状を示している。写真より、N試験体では載荷点近傍および等曲げ区間内において下縁かぶりコンクリートの剥落が確認される。これは、ピーリング作用によって下縁かぶりコンクリートが下方へ押し出されたためと考えられる。一方、側面接着したS1-cr3、S1-h3試験体では、S1-cr3試験体で側面接着シートが左側スパンで全体的に剥離しているのに対し、S1-h3試験体では下縁より10 cm程度の高さでシートが割裂して剥がれていることが分かる。また、剥がれた部分より上方ではシートが接着していることを確認している。このことより、繊維強化方向が梁軸方向の場合はピーリング作用による押し出し作用に対して梁高さ方向の場合よりも有効であるものの、二方向の場合ほど有効ではないことが明らかになった。

3.4 側面接着シートの補強量の影響

図-4には、側面接着シートの補強量の影響を検討するため、S1-cr2およびS2-cr2試験体の曲げ補強シートのひずみ分布および剥離進展状況の写真を示している。図には、計算結果を満足したS1-cr2試験体の場合はN試験体の計算終局時の状況を、計算終局到達前に剥離に至ったS2-cr2試験体の場合は実測最大荷重時の状況を示している。なお、S1-cr2試験体のひずみ分布にはN試験体より早期に剥離に至ったため、同一変位時のN試験体の実験結果も

示している。

図-4(a)の計算終局時におけるひずみ分布から、側面接着シートの補強範囲内で計算値を上回るひずみが発生しており、ピーリング作用による部分剥離が顕在化していることがわかる。しかしながら、曲げ補強シート接着端部ではひずみ値がゼロレベルであることから曲げ補強シートの定着は確保されていることが分かる。写真からも、載荷点近傍の下縁に若干の部分剥離が見られるものの未だ全面剥離には至っていないことがわかる。

一方、早期に曲げ補強シートが剥離したS2-cr2試験体の実測最大荷重時におけるひずみは、等曲げ区間では計算結果と同程度であるものの、等せん断力区間では計算結果およびN試験体の実測ひずみよりも大きい。また、側面接着シート範囲の外側には5,000μを超えるひずみの発生が確認できる。写真からは、側面接着シート端部に斜めひび割れの発生が確認される。このことより、側面接着シートの補強量が大きいため、側面接着シートの端部で段落的な挙動となり、早期にシート剥離したと考えられる。

以上のことより、側面接着シートには適切な補強量が存在することが明らかになった。

4. まとめ

本研究より明らかになったFRPシート曲げ補強RC梁の剥離抑制のための効率的な側面接着法は、繊維強化方向を二方向または梁軸方向とし、補強範囲を梁軸方向に主鉄筋降伏領域、梁高さ方向に梁高の1/2とした場合である。ただし、側面接着シートの目付量が多い場合には早期に剥離する傾向に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) 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