

# 論文 FRP 連続繊維で補強された RC 部材の付着割裂強度

松野 一成<sup>\*1</sup>・角 徹三<sup>\*2</sup>

要旨：近年，様々な種類あるいは形態のFRP連続繊維がRC構造物の耐震補強に用いられており，設計法も確立されつつあるが，プレート型のFRP連続繊維で補強されたRC部材の付着性能に関しては明らかにされていないため，24体の簡易型試験体を用いた付着試験を行なった。その結果，プレートを貼付することでシート補強と同等の強度増大が期待できることが明らかとなった。また，付着ひびわれパターンを考慮した上，著者ら提案式を用いることでプレートで補強されたRC部材の付着割裂強度を算定できることが明らかとなった。

キーワード：FRP連続繊維，付着割裂強度，炭素繊維プレート，ガラス繊維プレート

## 1. はじめに

著者等は一貫してFRP連続繊維シート巻き付けによるRC部材の付着割裂破壊抑止効果についての検討を行っており，その成果として連続繊維シート補強による付着割裂強度増大分の算定式を提案するに至った<sup>1)</sup>。さらに，現実の柱・はりにはせん断力で評価すべきであり，強度(応力度表記)では実設計には適応できないため，付着割裂強度からRC部材の付着割裂破壊時のせん断力を算定することが重要との認識から，付着割裂強度から付着せん断耐力を算定する手法を提案し，有用性の高いものであることを確認した<sup>2)</sup>。その後，FRP連続繊維にはシート形態だけでなく，RC部材に貼付するという点で施工が容易なプレート型に成型されたものもあるため，簡易型付着試験を実施し文献[1]の提案式をプレート型にも適応可能な形態に修正した<sup>3)</sup>。しかし，その修正式の検証は，プレート補強比が1.25%に限定された実験結果のみでの検証であったため，不十分であった。また，補強比と同様に弾性係数も修正式中の大きな要因であるため検証する必要があると考えられる。

そこで本研究では，簡易型付着試験法を用い，プレートの種類，補強比を実験変数としたプレート型FRP連続繊維で補強されたRC部材の付

着割裂強度上昇効果の検討を行なうとともに，著者等の提案式のプレート型FRP連続繊維補強への適応可能性について検証を実験的に行なうことを目的とした。

## 2. 実験計画

実験は2期に分けて行い，1シリーズはFRP連続繊維の弾性係数に注目し，2シリーズは補強比を実験変数にした実験とした。

### 2.1 試験体(共通部)

表-1に試験体一覧を実験結果とあわせて示し，図-1に試験体図代表例を示す。試験区間の断面はすべて80mm×250mmとし，全長400mm，付着長さ200mm，側面かぶり40mmとした。主筋には，付着割裂破壊に先行しての曲げ降伏を生じさせないため，D19の高強度異形鉄筋を用いた。図-2に載荷装置の概略を示す。試験鉄筋にセ

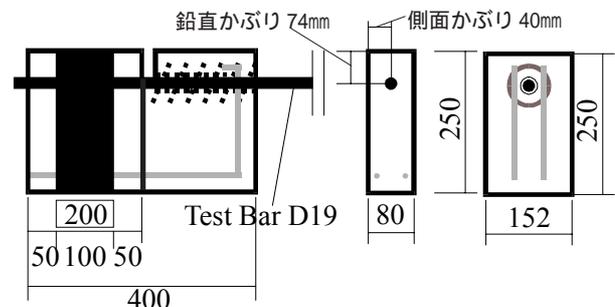


図-1 試験体図

\*1 呉工業高等専門学校 建築学科 助教授 博士(工学)(正会員)

\*2 日本福祉大学 情報社会科学部 生活環境情報学科 教授 工学博士(正会員)

表 - 1 試験体一覧および実験結果の概要

試験体名	試験区間断面 (mm)	付着長さ (mm)	鉛直かぶり (mm)	連続繊維プレート		目標コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリート実強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大引張力 (kN)	最大引張力時のすべり (mm)	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )					
				補強比 (%)	繊維種類*1					実験値		計算値*2			
										付着強度	平均値	プレート増分	$\tau_{fm}$	$\tau_{wf}$	$\tau_{bu}$
1	No.1	80	200	40	0	24	30.20	53.65	0.210	4.47	4.47	□	2.43	0	2.43
	No.2							53.65	0.234	4.47					
	No.3							66.86	0.258	5.57					
	No.4				59.86			0.252	4.99						
	No.5				51.42			0.106	4.29						
	No.6				47.92			0.276	3.99						
	No.7			57	0			□	74.83	0.672	6.24	6.08		1.94	
	No.8								71.00	1.096	5.92				
	No.9								50.63	0.214	4.22				
	No.10			74	0			□	48.56	0.52	4.05	4.13		□	
	No.11								84.85	0.494	7.07				
	No.12								69.09	0.42	5.76				
No.13	57.79	0.202	4.82												
No.14	48.08	0.278	4.01												
No.15	60.66	0.516	5.05												
2	No.16	250	200	74	0	24	29.39	88.20	0.438	7.35	7.58	2.95	2.40	1.51	3.91
	No.17							89.15	0.582	7.43					
	No.18							95.36	0.622	7.95					
	No.19							90.43	0.906	7.54					
	No.20							90.59	0.646	7.55					
	No.21							114.63	0.786	9.55					
	No.22							106.67	1.396	8.89					
	No.23							130.07	0.922	10.84					
	No.24							112.08	0.542	9.34					

\*1: G: ガラス繊維, C: 炭素繊維 \*2:  $\tau_{u.exp}$ : 試験区間の平均付着応力度,  $\tau_{fm}$ : 藤井・森田式<sup>4)</sup>による付着割裂強度,  $\tau_{wf}$ : シートによる付着割裂強度増分<sup>1)</sup>,  $\tau_{bu} = \tau_{fm} + \tau_{wf}$

インターホールジャッキを装着し、直接荷重を行った。荷重に際しての偏心圧縮応力による曲げ引張破壊を防ぐため、D10の普通強度異形鉄筋を配し曲げ補強を行った。試験体をスリットにより付着領域（試験区間）と非付着領域に分け、荷重による反力が試験区間に影響を与えないよう留意した。非付着領域には鋼管を配し、コンクリートと鉄筋間の付着を完全に断ち切った。非付着領域内でのコンクリートの破壊が先行するのを防ぐため、6普通強度鉄筋によりスパイラル補強を施した。非付着領域は荷重反力を負担するため、断面を152mm × 250mmに拡張した。また、断面の寸法と試験筋の配置決定には、以下に示す藤井・森田式<sup>4)</sup>に従えばサイドスプリット型の付着割裂破壊が先行するよう留意されている。

$$\tau_{fm} = \tau_{co} + \tau_{st} \quad (1)$$

$$\tau_{co} = (0.117 \cdot b_i + 0.163) \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (2)$$

$$\tau_{st} = \left( 9.51 \frac{p_{st} \cdot b}{N \cdot d_b} \right) \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (3)$$

但し、 $b_i = b / (N \cdot d_b) - 1.0$ ,  $p_{st}$ : 横補強筋比,  $b$ : 部材幅,  $N$ : 主筋本数,  $d_b$ : 主筋径,  $\sigma_B$ : コンクリート強度。また、FRP連続繊維プレート補強による付着強度増分は以下の提案式<sup>3)</sup>で算出した。

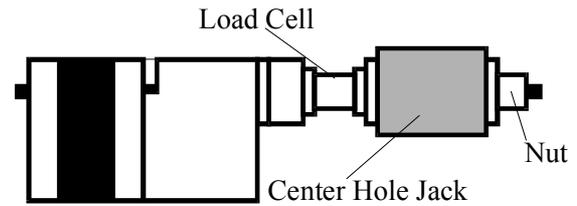


図 - 2 荷重装置

$$\tau_{wf} = 3 \cdot \left( \frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \cdot \sqrt{p_{wf}} \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (4)$$

但し、 $p_{wf}$ : 連続繊維シート補強比,  $E_{wf}$ : 連続繊維シートの弾性率 (N/mm<sup>2</sup>),  $E_0 = 2.30 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>。

## 2.2 使用材料の性質

### (1) コンクリート

連続繊維シートは既存のRC構造物を補修するために用いるので、コンクリート強度は既存の建物に近い24N/mm<sup>2</sup>を目標とした。表 - 2にコンクリートの調合を、表 - 3にコンクリートの力学的性質を示す。骨材の最大粒径は20mmとした。

### (2) 鉄筋

試験鉄筋として、D19の高強度異形鉄筋（ネジ式鉄筋）を、補強用にD10の普通強度異形鉄筋を用いた。表 - 4に使用鉄筋の機械的性質を示す。

### (3) FRP連続繊維

プレート型FRP連続繊維には、ガラス繊維と炭素繊維を使用した。表 - 5に機械的性質を示す。

表 - 2 コンクリート調合表

W/C (%)	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	AE 減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )
54.0	378	204	870	785	0.945

表 - 3 コンクリートの力学的性質

	1シリーズ		2シリーズ	
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	29.07	2.03 × 10 <sup>4</sup>	29.11	2.59 × 10 <sup>4</sup>
2	30.93	1.87 × 10 <sup>4</sup>	29.70	2.48 × 10 <sup>4</sup>
3	30.60	1.95 × 10 <sup>4</sup>	29.36	2.70 × 10 <sup>4</sup>
Ave.	30.20	1.95 × 10 <sup>4</sup>	29.39	2.59 × 10 <sup>4</sup>

表 - 4 鉄筋の機械的性質

種類	最大強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D 19 (主筋)	840	720	2.00 × 10 <sup>5</sup>
D 10 (補強筋)	525	368	1.79 × 10 <sup>5</sup>

表 - 5 FRP 連続繊維プレートの機械的性質

	ガラス繊維プレート	炭素繊維プレート
繊維目付 (gr/m <sup>2</sup> )	1,732	1,200
設計厚さ (mm)	1.51	1.0
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	442	2400
引張弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	0.60 × 10 <sup>5</sup>	1.56 × 10 <sup>5</sup>

### 2.3 実験変数

1シリーズの実験変数は、ガラス繊維プレート型のFRP連続繊維補強の有無 ( $p_{wf}=0, 1.89\%$ , 補強形態は図 - 3 b)と同様であるが、プレート幅は100mmである。)と鉛直かぶり(40, 57, 74mm)とし、プレートの補強比は、図 - 3 d)に示す断面の面積比とし(5)式で算出した。

$$p_{wf} = \frac{\sum A_{wf}}{A_c} \quad (5)$$

但し、 $A_{wf}$ : 1枚のプレートの断面積(cm<sup>2</sup>)、 $A_c$ : A-A' 断面の断面積(cm<sup>2</sup>)。

2シリーズのプレート補強は(4)式の成立過程の実験で使用した炭素繊維とし、補強比の影響を検証するために、補強比を  $p_{wf}=0 \sim 1.875\%$  の4種類を変数とした(図 - 3 a) ~ c)参照)。両シ

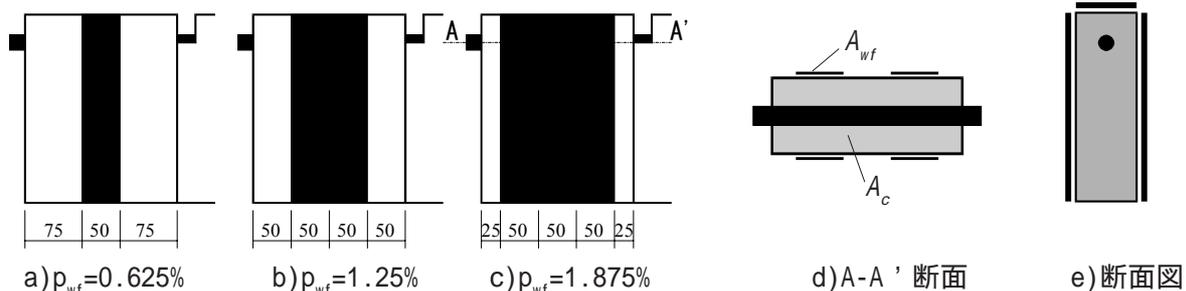


図 - 3 FRP 連続繊維補強形態

リーズともプレート補強は図 - 3 e)に示すとおり主筋を3方向から拘束する形態とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 実験結果の概要

表 - 1 に実験結果の概要を示す。表中の付着強度は実験時の最大引張力を試験区間200mmの試験鉄筋の表面積で除した平均付着応力度で表した。付着強度をみると、ガラス・炭素繊維の両プレートとも付着に対しての補強効果が得られる結果となったが、いずれの試験体も計算値を大きく上回る付着強度が得られた。これは藤井・森田式で与えられるプレート無しの段階で強度差が生じていることに起因していると思われる。

プレートによる増大分について実験値と計算値を比較すると、1シリーズでは鉛直かぶり40mmのみ実験値が計算値を下回るが、かぶり厚さが確保できれば補強効果も増大し、実験値と計算値のある程度の一致がみられる。これに対し2シリーズにおいては、補強比の増大に伴い付着強度も増大し、実験値が計算値を大幅に上回る安全側の算定となった。特に補強比が大きくなるにつれてその差異は大きくなった。

また、プレートの有無により破壊形態に大きな差異が生じた。プレート無補強の試験体は、概ね想定通りのサイドスプリット型の付着割裂破壊を呈した。これに対しプレートで補強した試験体は、若干の例外を除き主筋に沿って側面に載荷端側から付着ひびわれが生じ、ひびわれがプレートにより拘束されると拘束力の劣る方向にひびわれが進行し破壊に至った。この場合の拘束力の劣る箇所は側面のプレートと上部プ

レート境界であった。プレート補強した試験体の代表的な破壊例を写真 - 1, 2 に示す。これらと異なる破壊形態を示したのが写真 - 3, 4 に示すNo.11とNo.12のガラス繊維で補強されたかぶり厚さ74mmの試験体であった。引抜力の増大に伴い主筋に沿った付着ひびわれが発生するまでは他の試験体と同様の傾向を示したが、その付着ひびわれが進行することはなく、コンクリートと主筋のふしとの境界での破壊により主筋が拔出し、かぶり部コンクリートが割裂することなく最終破壊に至った。

### 3.2 付着応力度 - 主筋すべり量関係

図 - 5 ~ 7 に無次元化した試験区間の平均付着応力度と主筋すべり量関係を示す。シリーズ間でコンクリート強度が異なるため、両者の直接比較を行なうために付着応力度をコンクリート強度の平方根で除し、無次元化を行なった。

図 - 5, 6 は各シリーズの代表的な履歴曲線を示したものであり、ガラス・炭素繊維プレート補強の有無で比較すると、両シリーズともプレート補強により、強度面での補強効果は顕著に現れている。それに加え、付着強度に達するまでのすべり量も増大し、変形能力も格段に向上していることがわかる。図 - 6 においてNo.20, No.22の履歴曲線を見ると、無補強あるいは補強比の小さい試験体にみられた付着強度に達した直後の急激な耐力低下が、ある程度のすべり量まで付着強度に近い応力度を維持したまますべりのみ進行していく傾向がみられる。このことから強度面のみでなく、靱性能の面でも補強効果が得られたと思われる。この傾向がより顕著



写真 - 1 破壊状況断面 (No.23)



写真 - 2 破壊状況上面 (No.23)



写真 - 3 破壊状況断面 (No.11)



写真 - 4 破壊状況上面 (No.11)

にみられたのはNo.11, No.12であり、No.11の履歴曲線を示している図 - 7 をみると、比較のために加えた炭素繊維シートで補強された試験体 ( $p_{wf}=0.42\%$ , プレートとシートの幅は同等) の最大耐力以降の履歴曲線と比較しても遜色はなく、変形性能・靱性能の面でシート巻込み補強と同等の補強効果が得られた。これらのことから、かぶり厚さを十分にとり、プレートの接着面積を確保した上で補強比を増大させれば、コンクリート面にプレートを貼付するだけの補強において、RC 構造物にせん断力の増大に伴っての付着割裂破壊による脆性的な破壊を生じさせないという観点から、変形能力を確保する靱性能の面でも耐震補強効果が期待できるといえる。

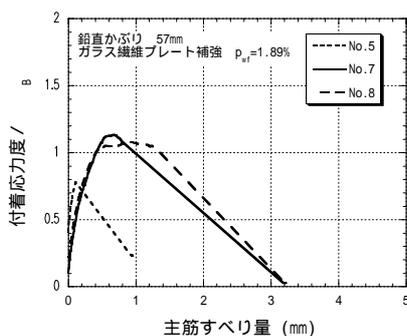


図 - 5 付着応力度 - すべり関係 (1シリーズ)

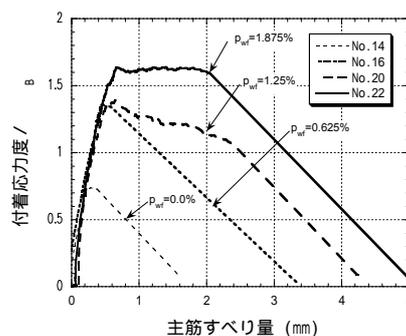


図 - 6 付着応力度 - すべり関係 (2シリーズ)

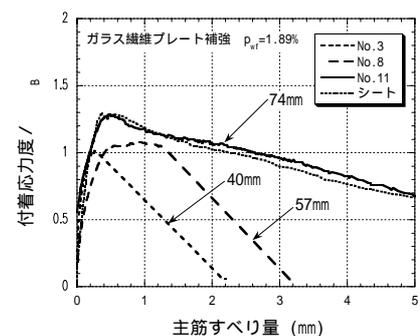


図 - 7 付着応力度 - すべり関係 (かぶり厚さによる比較)

### 3.3 付着応力度 -

#### プレートひずみ関係

図 - 8, 9 に付着応力度とプレートひずみの関係を示す。No. 23 はすべての試験体の中で最大の付着強度を示したもので、試験区間を幅 50mm の炭素繊維プレートを片側 3 枚で補強されており、実験結果は載荷端側、中央、自由端側の一对の平均値を示している。No. 11 は実験結果の概要で述べたかぶり部が割裂しなかったもので、幅 100mm のガラス繊維プレート一対で補強された試験体であるため、実験結果は 1 本で表されている。これらを見ると付着機構を保持するために、プレートが機能していることがわかる。

図 - 8 をみると、載荷端側のプレートのひずみがはじめに上昇し、その後中央、自由端側のプレートの順でひずみが増している。これは 3.1 節で述べたように、載荷端側から発生した付着ひびわれが、徐々に自由端側へ進行していく様相を捉えたといえる。ただし、ひずみは最大でも約 900  $\mu$  程度、応力では 140N/mm<sup>2</sup> 程度で、プレートの性能を十分に発揮しているとはいえない結果であった。また、付着強度以降の曲線の表示がわずかであるのは、脆性的な破壊により実験が終了したためである。これに対し No. 23 は主筋が拔出して最終破壊に至ったため、付着強度以降ある程度の強度を維持できた様相が図 - 9 からみてとれ、主筋が拔出していく間もプレートがひびわれを拘束していることが明らかである。最大ひずみは 2300  $\mu$  程度であり、応力は炭素繊維プレートとほぼ同じ 140N/mm<sup>2</sup> 程度であった。このことからプレートが付着機構の保持に寄与できる応力は 140N/mm<sup>2</sup> 前後ではないかと思われる。

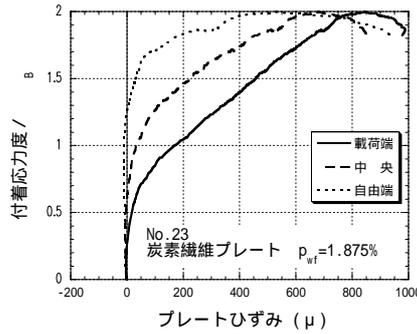


図 - 8 付着応力度 - プレートひずみ関係

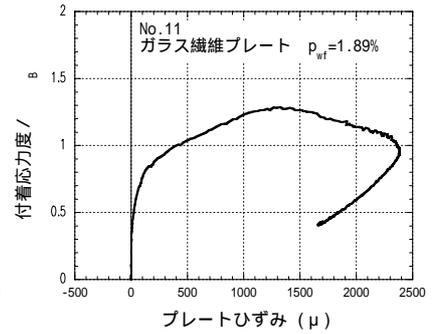


図 - 9 付着応力度 - プレートひずみ関係

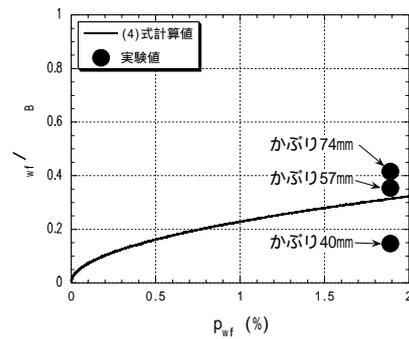


図 - 10 プレートによる付着強度増分 (1 シリーズ)

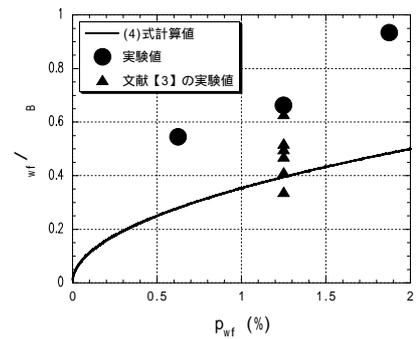


図 - 11 プレートによる付着強度増分 (2 シリーズ)

### 4. FRP 連続繊維補強に対応した

#### RC 部材の付着割裂強度算定

図 - 10, 11 にプレートによる付着強度の増分の実験値と計算値の比較をシリーズごとに示す。図 - 11 には比較のために文献[3]の実験結果も加えている。

図 - 10 をみると、かぶり厚さ 40mm で実験値が計算値を若干下回るが、かぶり厚を十分にとり、割裂するかぶり部コンクリートにプレートの接着面積が確保でき補強効果が発揮された場合であれば、本実験に関して(4)式でプレートによる付着強度の増分を評価することは十分可能と考えられる。これにより FRP 補強材の弾性係数が変化しても (4) 式の適応可能性は高いものと判断できる。

図 - 11 をみると、実験値が計算値を大きく上回ってはいるが、プレート補強比の増大にもない付着強度増分の増大も計算値と類似して増大しており、その様相は捉えていると判断できる。また、文献[3]の実験結果も加えて判断すると、信頼性が十分であるとはいえないが、プ

レートの弾性係数あるいは補強比が変化しても、強度増分の下限値を推定するという点で(4)式は適応可能であると思われる。

付着強度算定には付着ひびわれパターンが大きく関係している。藤井・森田式<sup>4)</sup>の場合ひびわれパターンを係数 $b_i$ で評価しており、本研究で対象としているサイドスプリット型の場合は(6)式で表される。

$$b_i = \frac{b - N \cdot d_b}{N \cdot d_b} \quad (6)$$

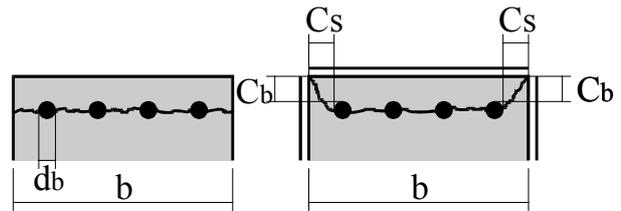
但し、 $b$ :部材幅、 $N$ :主筋本数、 $d_b$ :主筋径。この場合の部材幅を付着ひびわれの全長( $b'$ )と考えると図-12に示すように、プレート補強された場合の付着ひびわれ全長は(7)式となる。

$$b' = b - 2 \cdot C_s + 2 \cdot \sqrt{C_s^2 + C_b^2} \quad (7)$$

但し、 $C_s$ :側面かぶり、 $C_b$ :鉛直かぶり(両者とも鉄筋の縁からコンクリート表面までをかぶり厚とする)。簡略化のため、 $C_s = C_b$ と置き整理し、これを(6)式の付着ひびわれ全長である $b$ と置き換えると、付着ひびわれパターン係数 $b_i$ は(8)式で表すことができる。

$$b_i = \frac{b + 0.82 \cdot C_s - N \cdot d_b}{N \cdot d_b} \quad (8)$$

(8)式を用いることでひびわれパターンの変化に対応できると考えられる。しかし本研究で用いた試験体のように80mmと部材幅の小さいものでは、 $b_i$ の値が(6)式では3.21(試験鉄筋は19mmではあるが側面かぶり30mmで算出)、(8)式では4.51となり、数値に40%程度の差が生じ影響は大きい。部材幅が大きくなる実部材のひびわれ全長に与える影響は小さいと思われる。部材幅400mm、4-D25、側面かぶり30mmのものを例にとると、 $b_i$ の値が(6)式では3.00、(8)式では3.21となり差はわずか8%である。また、(8)式の方が $b_i$ 係数を大きく与えることとなり(6)式での算定が付着割裂強度の算定において安全側であることを考慮すると、算定の簡略化のために(6)式を用いることがプレート補強されたRC部材の付着強度の算出には望ましいと考えられる。



a)サイドスプリット b)プレート補強した場合  
図-12 付着ひびわれパターン

## 5. まとめ

本実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) 十分な鉛直かぶりが確保できれば強度面だけでなく、変形性能を向上させる靱性能の面でも耐震補強に対する効果が期待できる。
- 2) プレートの弾性係数、補強比が変化しても、増大する付着強度増分の下限値を推定する上で、提案式は適応可能と思われる。
- 3) プレートで補強することで付着ひびわれパターンが変化するが、強度算定に関しては考慮しない方が望ましいと考えられる。

## 謝辞

フクイファイバーテック株式会社にはガラス繊維プレートを、東レ株式会社には炭素繊維プレートを提供いただいた。また、三菱化学産資株式会社には接着剤を提供いただいた。ここに記し、深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 松野一成・河野進・角徹三：連続繊維シートによるRC部材の付着割裂強度増大効果 - 第1報 付着強度式の提案 - ，日本建築学会構造系論文集，第548号，95-100，2001
- 2) 松野一成・角徹三：連続繊維シートによるRC部材の付着割裂強度増大効果 - 第2報 部材実験による付着強度式の検証 - ，日本建築学会構造系論文集，第556号，117-122，2002
- 3) 松野一成・角徹三：プレート型に成型したFRP連続繊維を用いたRC部材の付着割裂強度，日本コンクリート工学年次論文集，第28巻，第2号，709-714，2006
- 4) 藤井栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究，日本建築学会論文報告集，第319号，pp.47-55，1982