

論文 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

松野 一成^{*1}・角 徹三^{*2}

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、シート補強の際の付着割裂強度算定式を修正し、プレート補強に適応させるための指標を見出すことができた。

キーワード：FRP 連続繊維，付着割裂強度，炭素繊維プレート

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¹⁾。さらに、現実の柱・はりで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確認した²⁾。

FRP 連続繊維にはシート形態だけでなくプレート型に成型されたものもあり、シート形態のものより施工が容易であるため、実用が求められその補強性能が検討されている。しかし、付着割裂強度に言及したものは少なく、設計手法も確立されているとはいいがたく、補強に用いることに対しての不安も少なくない。また、著者らが提案した強度式も FRP 連続繊維シートで補強された実験結果を基準としているため直接対応しているとはいえない。

そこで本研究では、簡易型付着試験法を用い、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、2期目の実験ではプレートの補強形態を変化させ、より補強効果が高いと思われる補強形態で実験を行った。

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 に荷重装置の概略を示す。試験鉄筋にセンターホールジャッキを装着し、直接荷重を行っ

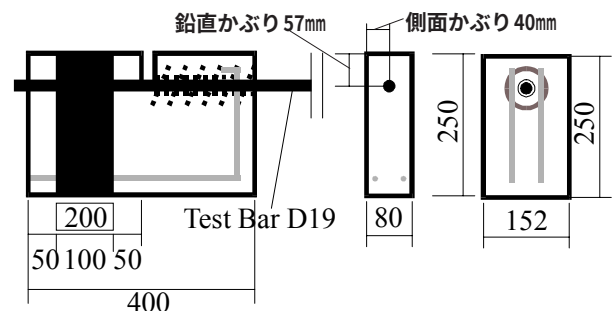


図-1 試験体図

*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 豊橋技術科学大学 建設工学系 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 ²)	コンク リート 実強度 (N/mm ²)	最大 引張力 (kN)	最大引張 力時の すべり (mm)	付着強度 (N/mm ²)											
					補強比 (%)	補強 形態*1					実験値			計算値*2								
											付着強度	平均値	シートに よる増分	τ _{fm}	τ _{wf}	τ _{bu}						
1	No.1	80	200	40	0	—	24	30.20	43.94	0.010	3.66	3.34	—	2.43	0	2.43						
	No.2					36.30			0.040	3.02												
	No.3				1.25	C			53.81	0.120	4.48						4.38	1.03	1.08	3.51		
	No.4					51.26			0.030	4.27												
	No.5			57	0	—			72.19	0.112	6.02	5.69	—		2.43	0	2.43					
	No.6					64.41			0.272	5.37												
	No.7				1.25	C			52.22*3	0.316*3	4.35*3							6.63	0.94	1.08	3.51	
	No.8					79.60			0.298	6.63												
	No.9			74	0	—			49.19	0.310	4.10	4.46	—			2.43	0	2.43				
	No.10					57.95			0.226	4.83												
	No.11				1.25	C			92.34	0.068	7.69								6.57	2.11	1.08	3.51
	No.12					65.43			0.098	5.45												
2	No.13	250	200	40	0	—	24	28.40	61.13	0.128	5.09	4.99	—	2.34			0	2.34				
	No.14					58.75			0.296	4.90												
	No.15				1.25	C			90.11	0.522	7.51								7.51	2.51	1.05	3.39
	No.16					81.67			0.436	6.81	6.81								1.81			
	No.17			57	0	—			48.56	0.480	4.05	4.37	—		2.34		0	2.34				
	No.18					56.36			0.428	4.70												
	No.19				1.25	C			92.81	0.730	7.73								7.73	3.36	1.05	3.39
	No.20					84.38			0.310	7.03	7.03								2.66			
	No.21			74	0	—			51.42	0.178	4.29	4.28	—			2.34	0	2.34				
	No.22					51.26			*4	4.27												
	No.23				1.25	C			77.69	1.064	6.47								6.47	2.20	1.05	3.39
	No.24					84.54			0.702	7.04	7.04								2.77			

*1: C: 中央集中補強, S: ストライプ状の補強 *2: $\tau_{u,exp}$: 試験区間の平均付着応力度, τ_{fm} : 藤井・森田式³⁾による付着割裂強度, τ_{wf} : シートによる付着割裂強度増分¹⁾, $\tau_{bu} = \tau_{fm} + \tau_{wf}$ *3: プレートの接着不足により考察から除外 *4: 計測できず

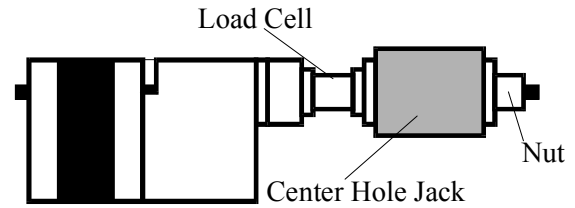
た。載荷に際しての偏心圧縮応力による曲げ引張破壊を防ぐため、D10の普通強度異形鉄筋を配し曲げ補強を行った。試験体をスリットにより付着領域（試験区間）と非付着領域に分け、載荷による反力が試験区間に影響を与えないよう留意した。非付着領域には鋼管を配し、コンクリートと鉄筋間の付着を完全に断ち切った。非付着領域内でのコンクリートの破壊が先行するのを防ぐため、 $\phi 6$ 普通強度鉄筋によりスパイラル補強を施した。非付着領域は載荷反力を負担するため、断面を152mm×250mmに拡張した。また、断面の寸法と試験筋の配置決定にあたっては、以下に示す藤井・森田式³⁾に従えばサイドスプリット型の付着割裂破壊が先行するよう留意されている。

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

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

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

但し、 $bi = bsi = b / (N \cdot d_b) - 1.0$, p_{st} : 横補強筋比, b : 部材幅, N : 主筋本数, d_b : 主筋径, σ_B : コンクリート強度。また、連続繊維シート補強による付着強度増分は以下の提案式¹⁾で算出した。



図－２ 載荷装置

$$\tau_{wf} = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{p_{wf}}{0.0035} - 1 \right) \right\} \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (4)$$

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/mm²), $E_0 = 2.30 \times 10^5$ N/mm²。

2.3 使用材料の性質

(1) コンクリート

連続繊維シートは現存の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現存の建物に近い24N/mm²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、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/m³)	水 (kg/m³)	細骨材 (kg/m³)	粗骨材 (kg/m³)	AE 減水剤 (kg/m³)
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/mm²)	弾性係数 (N/mm²)	圧縮強度 (N/mm²)	弾性係数 (N/mm²)
1	29.07	計測できず	28.78	2.39×10^4
2	30.93	2.03×10^4	28.94	2.23×10^4
3	30.60	1.87×10^4	27.49	2.07×10^4
Ave.	30.20	1.95×10^4	28.40	2.23×10^4

表－４ 鉄筋の機械的性質

種類	最大強度 (N/mm²)	降伏強度 (N/mm²)	弾性係数 (N/mm²)
D 19 (主筋)	840	720	2.00×10^5
D 10 (補強筋)	525	368	1.79×10^5

表－５ FRP 連続繊維プレートの力学的性質

	炭素繊維プレート
繊維目付 (gr/m²)	1,200
繊維比重	1.60
設計厚さ (mm)	1.0
引張強度 (N/mm²)	2400
引張弾性率 (N/mm²)	1.56×10^5

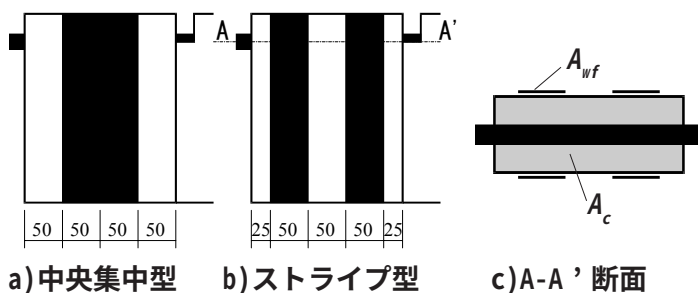
2.4 実験変数

1 シリーズの実験変数は、プレート型のFRP連続繊維補強の有無 ($p_{wf}=0, 1.25\%$) と鉛直かぶり (40, 57, 74mm) とし。プレートの補強比は、図－3 c) 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(cm²)、 A_c : A-A' 断面の断面積(cm²)。鉛直かぶりは、プレートの性能が発揮できる接着面積を検討することを目的に、割裂ひびわれの想定面を変化させるために実験変数とした。

2 シリーズのプレート補強は、1 シリーズの結果を受け図－4 のように貼付するプレートを



図－３ 補強形態（側面）

試験区間断面の両面だけでなく上面も加えた 3 面補強とした。なおプレートは、3 面ともすべてがそれぞれに独立してコンクリート面に貼付されている。これによりシート補強とほぼ同様の補強形態とした。また、幅 50mm のプレートを試験区間中央に集中させるのではなく、ストライプ状に補強することで、補強比は同じであるが、補強形態の異なる 2 タイプの試験体を作成した（図－3 参照）。鉛直かぶりについては、1 シリーズと同様とした。

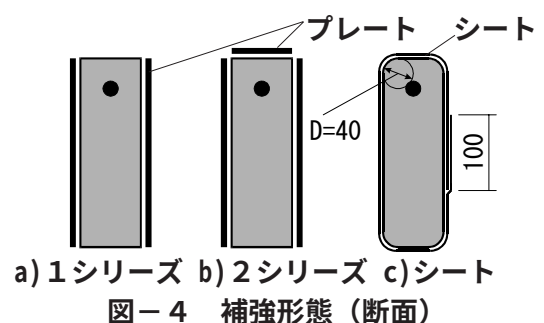
3. 実験結果

3.1 実験結果の概要

表－1 に実験結果の概要を示す。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が、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。プレート補強による付着強度の増分は(4)式で算出した。(4)式は適応範囲が $p_{wf}=0.35\%$ までであるため、プレートの補強比は1.25%であるが、0.35%の強度を採用し計算値とした。実験値と計算値を比較すると、1 シリーズではある程度の一致がみられるが、2 シリーズでは大きく安全側の算定となっている。このことから FRP 連続繊維シートによる補強効果を算出する(4)式を直接プレートに用いることは無理があると考えられる。また、図－4 に示すような補強形態の異なる 2 タイプの試験体には有意な差はみられなかった。

3.2 破壊性状

写真－1 にプレート無補強の試験体の破壊例を示す。プレート無補強の試験体は、鉛直かぶりが 40mm の試験体で縦ひびわれ（鉛直方向のひびわれ）により破壊に至ったものもあったが、概ね



図－４ 補強形態（断面）



写真-1 破壊状況 (No.10)



写真-2 破壊状況 (No.12)



写真-3 破壊状況上面 (No.12)

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サイドスプリット以外の破壊形態を示した。1シリーズのプレート補強した試験体の代表的な破壊例を写真-2, 3に、また、2シリーズのプレート補強した試験体の代表的な破壊例を写真-4, 5に示す。



写真-4 破壊状況 (No.20)



写真-5 破壊状況断面 (No.20)

1シリーズでは引き抜き力の増大に伴って、付着ひびわれが試験区間側面に生じたが、プレートがひびわれの進行を拘束した。それにより、かぶり部のコンクリートが剥離するサイドスプリット型の破壊ではなく、主筋に沿った縦ひびわれの幅が拡大し、かぶり部コンクリートを左右に押し開き、試験区間側面の両面に貼付したプレートが反り返る状態で破壊に至った。プレートで補強されていない面が割裂したため、この面を補強することで側面のプレートの性能がさらに発揮され、付着割裂強度が上昇するはずと考えられるため、2シリーズでは試験区間

上面にもプレートを貼付し、付着試験を行うこととした。その2シリーズでは、縦ひびわれの進行も拘束されたため、側面と上面のプレートの境界にむかってひびわれが進行し破壊に至った。

3.3 付着応力度-主筋すべり量関係

図-5～8に無次元化した付着応力度と主筋すべり量関係をシリーズおよび実験変数ごとに示す。シリーズ間でコンクリート強度が異なるので、直接比較を行なうためにコンクリート強度の平方根で除し、無次元化を行なった。

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が、変形性能に於ける向上は、2シリーズにおいてみられた。これが試

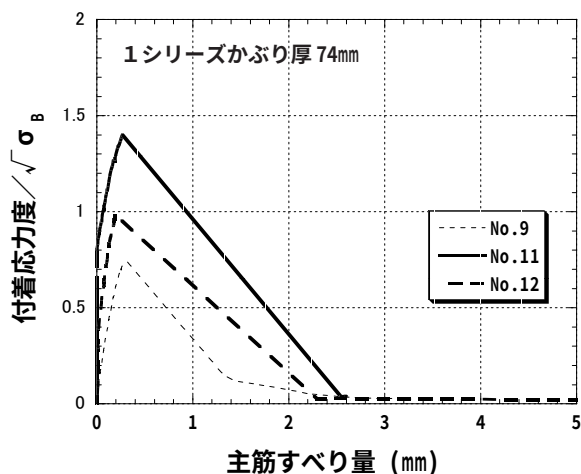


図-5 付着応力度-すべり関係

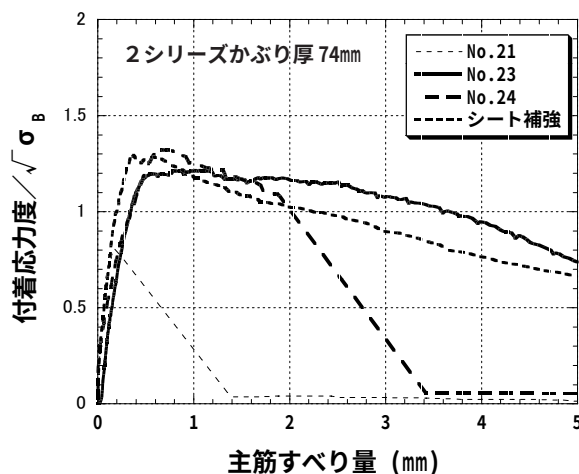


図-6 付着応力度-すべり関係

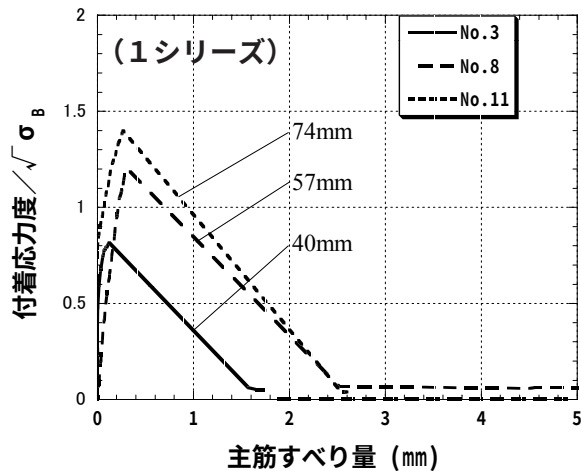


図-7 付着応力度-すべり関係

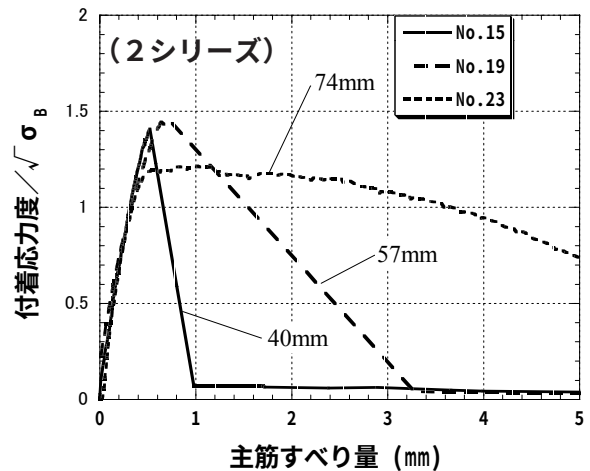


図-8 付着応力度-すべり関係

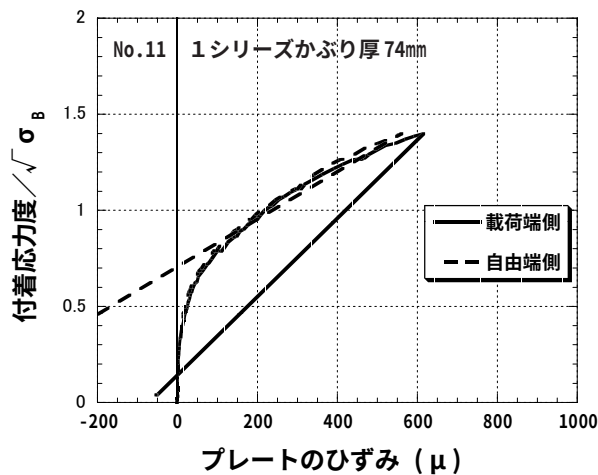


図-9 付着応力度-プレートひずみ関係

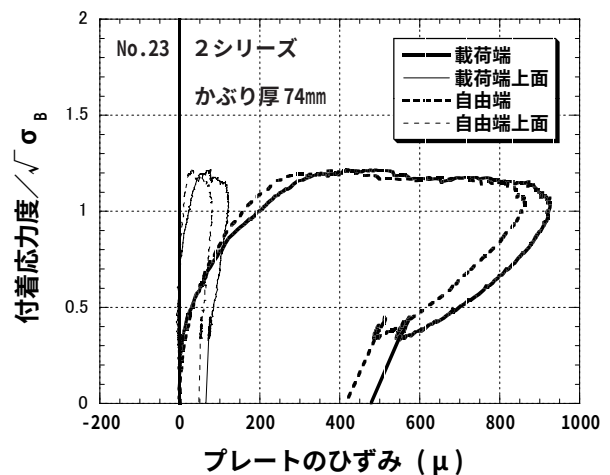


図-10 付着応力度-プレートひずみ関係

験区間側面のみでなく、上面にもプレート補強を施したことの効果であると考えられる。比較のために図中に加えたFRP連続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、変形性能の上でシート巻込み補強と同等の補強効果が得られた。

かぶり厚さにより比較すると、若干の例外はあるが、かぶり厚さの増大に伴って付着強度が上昇しているといえる。十分なかぶり厚さを確保し、サイドスプリット型付着割裂破壊で剥離すると想定されるかぶり部のコンクリートに十分なプレートの接着面積を確保できれば、FRP連続繊維プレート補強において靱性能の面でも耐震補強効果が期待できるといえる。

3.4 付着応力度-プレートひずみ関係

図-9, 10に付着応力度とプレートひずみ

の関係を示す。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。No.11は付着強度に達した瞬間にひずみが圧縮側に移行している。これは3.2節で述べた、縦ひびわれ幅の拡大によりかぶりコンクリートが左右に押し広げられ、プレートが反り返る状態で破壊に至った様相を捉えているといえる。これに対しNo.23では、付着強度以降もひずみが増加しており、上面のプレートも機能していることから、上面にプレートに効果がここからも分かる。しかし、ひずみは最大でも約900 μ 程度、応力では140N/mm²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。

4. FRP連続繊維シート補強に対応した

付着割裂強度算定式の検証

図-11, 12にプレートによる付着強度の

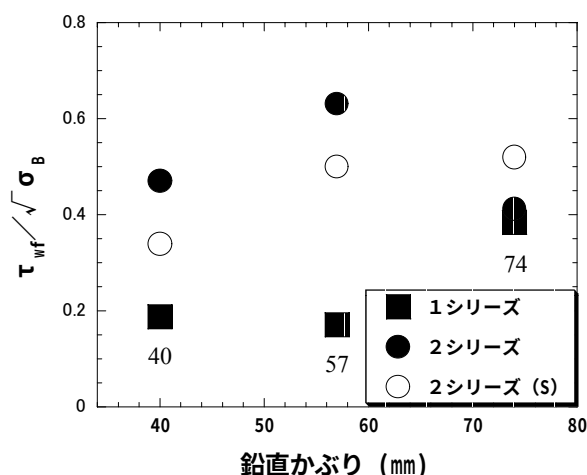


図-1.1 プレートによる付着強度増分
(鉛直かぶりとの関係)

増分を示す。図-1.1をみると、十分なかぶり厚さを確保し、プレートの接着面積が確保できると、シート補強のように主筋を巻込む形態での補強法ではなく、サイドスプリット型の付着割裂破壊の想定ひびわれ位置の両面のみの補強でも、かなりの付着強度増大が期待できると考えられる。図-1.2をみると、試験区間の上面にプレートを貼付すると、シート補強に対応した付着強度算定式では安全側に算定しすぎている。この現象はプレートとシートの厚さに起因するものと考えられる。シートの厚さは0.2mm程度であるため、プレートと同等の補強比とするためには何層にも重ねての補強が必要となる。シートを3層以上に重ね合わせても補強効果がみられなかったこと等を考慮し、補強比の上限を0.35%とした経緯から、シートとプレートの付着補強のメカニズムが同じであると仮定するならば、補強比の影響を修正することでプレート補強に対応できると考える。1シリーズでかぶり厚さ74mmであれば2シリーズの補強効果とほぼ同等の効果が得られたことを考慮し、かぶり厚さ74mmの結果を対象とし、補強比に上限を持たせないために、強度の増大が補強比の平方根に比例すると仮定して、以下のように暫定的な修正を行なった。

$$\tau_{wf} = 3 \cdot \left(\frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \cdot \sqrt{p_{wf}} \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (6)$$

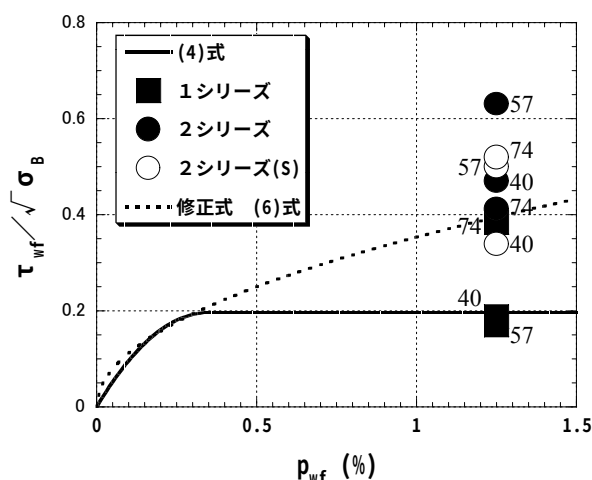


図-1.2 プレートによる付着強度増分
(計算値との比較)

(6)式の算定結果を図-1.2に加えたところ、補強比が1.25%に限定した実験結果のみであり、検証は不十分であるが、補強比に焦点をおき修正を行なうことでプレート補強による付着割裂強度の増大効果を定量的に評価することは可能と思われる。

5. まとめ

本実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) 付着ひびわれが想定される箇所にFRP連続繊維プレートを貼付することで、シート補強と同様に付着割裂強度が上昇した。
- 2) 十分な鉛直かぶりが確保できれば強度面だけでなく、靱性能の面でも耐震補強に対する効果が期待できる。
- 3) シート補強の場合の付着強度算定式をプレート補強に用いる場合に、プレートの厚さを考慮した補強比の算定法を確立する必要がある。

謝辞

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) 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