

連続繊維シートとコンクリート界面の付着性状に関する実験的研究

磯 雅人*

要約: 本研究は、連続繊維シートにより袖壁付きRC柱を“簡易”かつ“低コスト”で耐震補強する工法の開発を目的としたものであり、すでにその構造性能については前回報告を行った。しかし、そのせん断抵抗機構ははまだ未解決であり、不明な点も多く残されているのが現状である。そこで本研究では、連続繊維シートによりせん断補強された袖壁付きRC柱のせん断抵抗機構を解明するため、連続繊維シートとコンクリート界面の付着試験を実施した。本報告では、その試験結果ならびに付着強度の評価方法について報告する。供試体は、炭素繊維シートを接着した断面100(mm)角、長さ600(mm)、中央にノッチを設けたコンクリート供試体であり、両端に引張力を加える構造である。実験の要因と水準は、炭素繊維シートの積層枚数(1~3枚)と定着長さ(30,60,100,200,300mm)である。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・付着強度はシート引張剛性の増加とともに増大する。
 - ・シートの引張剛性を共通にして、定着長さを変動させた場合、付着強度は定着長さ100mm程度以上で頭打ちとなる。
- さらに、付着強度推定式を導出し、本提案式で付着強度実験値を精度良く評価ができることを示す。

キーワード: 連続繊維シート, 付着強度, 剥離, 最大付着応力度, 引張剛性, 有効付着長さ

- 目次:**
- 1. はじめに
 - 2. 実験概要
 - 3. 実験結果
 - 4. 付着強度 (P_{bm}) の評価
 - 5. まとめ

1. はじめに

筆者らは、既存の袖壁付きRC柱に連続繊維シートをエポキシ樹脂により接着して補強する工法について提案を行ない、すでにその構造性能と工法の有効性について報告を行った。^{1) 2)}しかし、そのせん断抵抗機構には不明な点も多く、その解明が急がれているのが現状である。

ここでは、連続繊維シート補強された袖壁付きRC柱の破壊性状が、“シートの剥離”により最大耐力が決定^{1) 2)}していることから、そのせん断抵抗機構を解明するには、“シートとコンクリート間の付着挙動”の把握が最重要であるという視点から、本研究では、コンクリート表面に炭素繊維シートを接着

した供試体の両引き試験により、その挙動を明らかにすると同時に、付着強度の評価を行うことを目的とした。

2. 実験概要

表1に供試体一覧、図1に供試体の一例(CF-1-100)、表2~4に使用材料の力学的性質を示す。供試体の形状は、断面100mm角、長さ600mm、両側面の中央で材軸に直角にひび割れを誘発するためのノッチ(深さ:20mm)を設けている。また配筋される鉄筋とシートとの相互作用の影響を取入れるため断面中心には、丸鋼Φ6(端部:180°フック型)を1本配置した。供試体の上下面にノッチ位置を跨

表1 供試体および実験結果一覧

No.	試験体名	炭素繊維シート				実験結果			
		シート厚さ t(mm)	ヤング係数 $E_f(N/mm^2)$	積層枚数 n(枚)	$\sum t \cdot E_f^{*2}$ $\times 10^4(N/mm)$	定着長さ L(mm)	ノッチ部割裂強度 (kN)	付着強度 ^{*3} (kN)	破壊性状
1	RC						12.0	12.0	ノッチ部の割裂破壊
2	CF-1-30	0.167 目付量 300 (g/m^2)	2.30×10^5 (公称値)	1	3.84	30	14.8	14.8	シート補強部をさけたコンクリートの割裂破壊
3	CF-1-60			1	3.84	60	15.1	18.7	定着治具先端部分の割裂破壊
4	CF-3-60 ^{*1}			3	11.5	60	17.5	25.8	シート補強部をさけたコンクリートの割裂破壊
5	CF-1-100 ^{*1}			1	3.84	100	16.1	33.8	シートとコンクリート間の界面剥離
6	CF-1-200 ^{*1}			1	3.84	200	15.4	34.0	シートとコンクリート間の界面剥離
7	CF-1-300			1	3.84	300	13.9	33.5	定着治具部分でのシートとコンクリート間の界面剥離
8	CF-2-300 ^{*1}			2	7.68		13.6	48.2	シートとコンクリート間の界面剥離
9	CF-3-300 ^{*1}			3	11.5		15.2	52.1	シートとコンクリート間の界面剥離

■共通要因■

試験体断面:
B×D×L=100(mm)×100(mm)×600(mm)
コンクリートの配合:21-15-20-H
鉄筋:1-φ6(SR235)

■試験体名称■

CF-1-300 (1)試験対象
(1) (2) (3) RC:無補強 CF:炭素繊維補強
(2)シート積層枚数(枚)
(3)定着長さ(mm)

*1:側面にシート補強した試験体

*2: $\sum t \cdot E_f = n \cdot t \cdot E_f$

*3:付着強度—

「シート4接着面のうち1接着面が端部まで剥離した時点における載荷引張力」

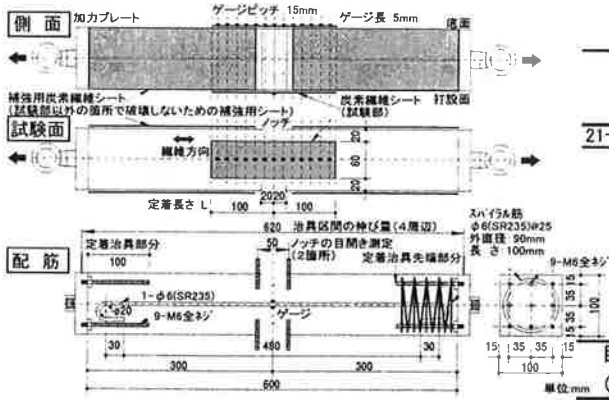


図1 供試体の一例 (CF-1-100)

いでその両側に、幅 60mm の炭素繊維シートが等しい定着長さをもって貼付されている。使用した炭素繊維シートは、PAN 系の炭素繊維シートであり、目付量は 300g/m²、シート厚さは 0.167mm である。シート貼付けは、コンクリートの表面研磨、プライマー塗布、エポキシ樹脂によるシート接着の順序で実施した。供試体両端の加力プレートは、M6 全ネジ 9 本（長さ：100mm、M6 は中央部にも配置）で供試体に定着され、張力がコンクリートに伝達できる機構となっている。また、この定着治具部分（加力プレートから 100mm の範囲）の割裂に対処するためにスパイラル筋を配置し、さらに一部の供試体（No. 4, No. 5, No. 6, No. 8, No. 9）では試験部分以外の破壊に対処するために、両側面に、ノッチ部分を除いてシートによる補強を施した（図 1 参照）。

実験の要因と水準は、炭素繊維シートの積層枚数（1～3 枚）、定着長さ（30, 60, 100, 200, 300mm）の 2 種類である。積層枚数による影響は、定着長 60mm と共通にして積層枚数を 0 枚、1 枚、3 枚と変動させた No.1, No.3, No.4 供試体により、さらに定着長 300mm と共通にして積層枚数を 0 枚、1 枚、2 枚、3 枚と変動させた No.1, No.7, No.8, No.9 供試体により確認する。一方、定着長さによる影響は、積層枚数を 1 枚と共通にして定着長を 0mm, 30mm, 60mm, 100mm, 200mm, 300mm と変動させた No.1, No.2, No.3, No.5, No.6, No.7 供試体により、さらに積層枚数を 3 枚と共通にして定着長を 0mm, 60mm, 300mm と変動させた No.1, No.4, No.9 供試体により確認する。供試体数は、比較用の RC 基準供試体も含め計 9 体である。測定は、引張力、ノッチ部分の開口変位、加力治具間の伸び量、ノッチ位置の鉄筋ひずみ、シートひずみについて行った。シートひずみの測定ゲージ長さは 5mm とし、ゲージ間隔は 10mm（シート定着長：60mm 以下の供試体）、15mm（シート定着長：100mm 以上の供試体）とした。引張力は、供試体の両端についている丸管を引張ることにより導入し、加力は、500kN アムスラー試験機により実施した。

表 2 材料特性（コンクリート）

配合	調合強度 F _c (N/mm ²)	圧縮強度 (封 緘) (N/mm ²)	割裂強度 (封 緘) (N/mm ²)	ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)
21-15-20-H	21	34.6	2.43	0.248

表 3 材料特性（鉄筋）

鉄筋の種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)
φ 6(SR235)	370	482	1830	2.02

表 4 材料特性（炭素繊維シート）

目付量 (g/m ²)	比重 (g/cm ³)	厚さ (mm)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 × 10 ⁶ (N/mm ²)
300	1.80	0.167	3480	0.242

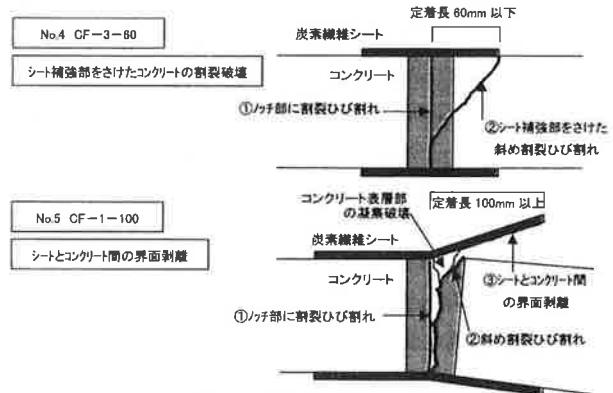


図 2 破壊性状の一例

3. 実験結果

表 1 に実験結果一覧を示す。

3.1 破壊性状

図 2 に破壊性状の一例を示す。RC 供試体（No.1）は、ノッチ部の割裂により終局に至り、その後は、ひび割れが徐々に口開いていく性状を示した。シート定着長：60mm 以下の供試体（No.2, 4）は、ノッチ部に割裂ひび割れ（①）が発生し、ついで定着された繊維シート部分をさけたひび割れ（②）により終局に至った。一方、シート定着長：100mm 以上の供試体（No.5, 6, 8, 9）の破壊過程は、まずノッチ部に割裂ひび割れ（①）、ついで材軸に対して約 45° の斜め割裂ひび割れ（②）の発生の順であった。その後、シートの定着部の剥離が中央部から両端に向かって進行、ノッチを中心とした 4 接着面のうち、一つの接着面が端部まで剥離（③）して終局に至った。剥離したシート裏面を試験後観察するとコンクリート表層部が付着しており、剥離はコンクリート表層部で生じていることが観察された。No.3 CF-1-60, No.7 CF-1-300 では、ノッチ部の割裂ひび割れ以外に定着治具先端部分（加力プレートから約 100mm の位置）にも割裂ひび割れが生じ、No.3 はその割裂ひび割れが大きく口開いて終局に至った。No.7 は、その割裂ひび割れを原因として、定着治具部分領域（加力プレートから 100mm の範囲）の試験部のシートが剥離し終局に至った。

3.2 引張力とノッチ部の開口変位関係

図3に引張力-ノッチ部の開口変位関係を示す。No. 1 RC 基準供試体は、割裂ひび割れの発生とともに急激に耐力が低下すると同時に、ノッチ部の開口変位が大きく伸展する性状を示した。その後は、鉄筋が引張力を負担し、徐々に開口変位が進む性状を示した。シート定着長が100mm以上の供試体は、ノッチ部の割裂ひび割れ発生により開口変位が伸展し始め、その後、開口変位の増加とともに耐力は上昇していくが、シートが剥離すると同時に急激に耐力が低下する性状を示した。割裂ひび割れ発生後の剛性は、積層枚数の増加とともに上昇する傾向が見られるものの、積層枚数を1枚と共通にして、定着長:100, 200, 300mmと変化した供試体の変形状は、定着長さの違いによらずほぼ同様であった。

また、図3に示していないNo.2 CF-1-30は、シート補強部をさけた斜め割裂ひび割れ発生とともに急激に耐力が低下し、ほぼRC供試体と同様な性状を示した。シート定着長が60mmの供試体は、定着長が100mm以上の供試体とほぼ同様な破壊過程をたどるが、シートが剥離する以前に、定着された繊維シート部分をさけたひび割れが発生し、それと同時に急激に耐力が低下する性状を示した。

3.3 付着強度

図4に付着強度-積層枚数関係、図5に付着強度-定着長さ関係を示す。黒塗り記号は、コンクリートの割裂破壊を示し、白抜きは、シートの剥離破壊を示している。

これより付着強度は、積層枚数の増加とともに上昇する傾向が見られる。同様に定着長を長くした場合にも、付着強度は概ね上昇する傾向が見られる。しかし、積層枚数を1層と共通にして、定着長を変化させた場合の供試体(●, ○印)の耐力は、定着長100mmで頭打ちがみられ、有効な定着長が存在することが確認された。

3.4 付着強度時のシートひずみ分布

図6に付着強度時のシートひずみ分布を示す。定着長が300mmと共通にして積層枚数による影響を見てみると、シートの積層枚数を増加させると、ひずみの集中は軽減され、シートが広範囲で効果を発揮していることがわかる。この現象は文献8)で示された理論、実験結果とも一致するものであり、本試験でも同様な性状が確認できた。これより図4で見られた積層枚数の増加による付着強度の上昇の理由は、積層枚数の増加により、ひずみの集中が軽減され、シートが広範囲で効果を発揮することが1つの要因として挙げられる。

一方、図6中で積層枚数を1層と共通にして定着長を100, 200, 300mmと変化した供試体では、シートの効く領域およびひずみ分布性状はほぼ同様であ

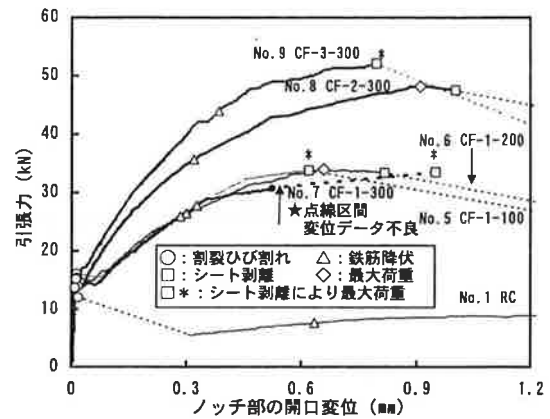


図3 引張力-ノッチ部の開口変位関係

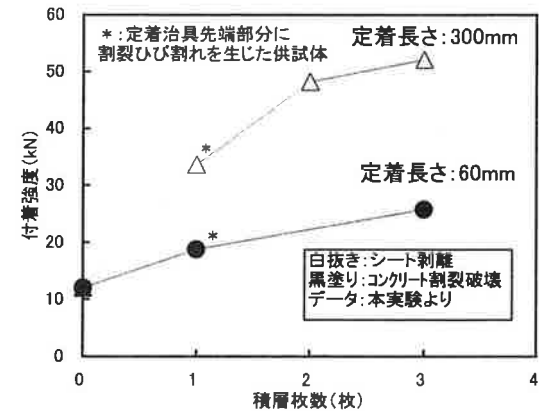


図4 付着強度-積層枚数関係

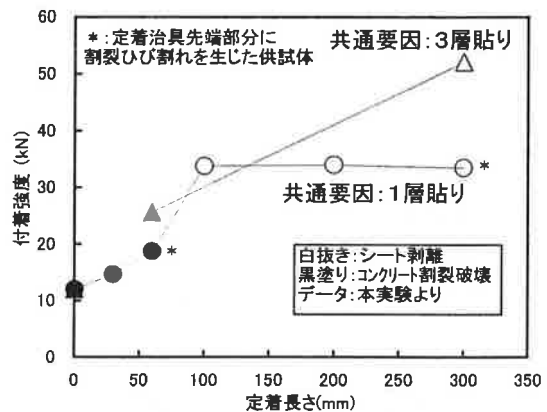


図5 付着強度-定着長さ関係

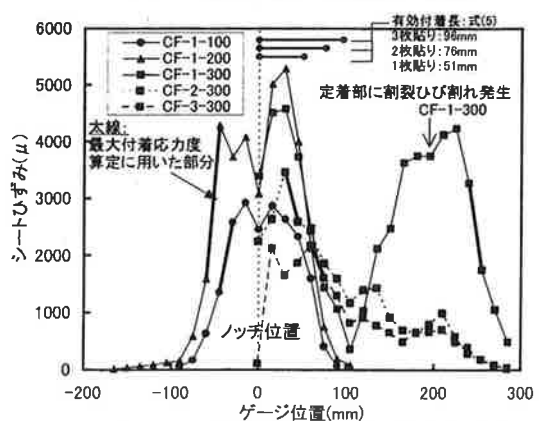


図6 付着強度時のシートひずみ分布

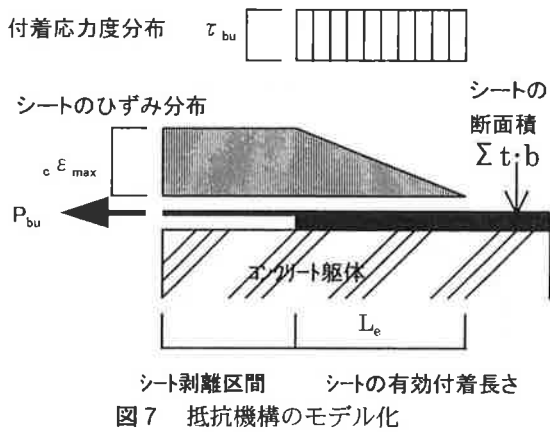


図7 抵抗機構のモデル化

った。図5で、積層枚数を1枚と共通にして定着長を100, 200, 300mmと変化させても付着強度はほぼ同様であったことを報告したが、これらは定着長さを変化させても内部抵抗機構(シートの効く領域、ひずみ分布性状)は、変化せず、ほぼ同様な性状を示すためと考えられる。

4. 付着強度(\$P_{bu}\$)の評価

ここでは、本試験データおよび既往の文献3)~11)のデータを利用し、シートが剥離破壊する時の付着強度の評価を試みる。付着強度\$P_{bu}\$の評価にあたっては、図7に示すようにシートの有効付着長さ:\$L_e\$の区間で、付着応力度:\$\tau_{bu}\$が等分布すると仮定した抵抗モデルを考え、式(1)により評価する。

$$P_{bu} = \tau_{bu} \cdot b \cdot L_e \quad (1)$$

ここに \$b\$:シート幅

以下に、付着応力度\$\tau_{bu}\$および実際に付着力を分担している付着領域\$L_e\$(以下、有効付着長さ)についての検討をすすめる、定量的に評価を行う。

4.1 付着応力度(\$\tau_{bu}\$)の評価

ここでは、式(1)中の付着応力度\$\tau_{bu}\$について評価する。試験後、剥離破壊したシートの裏面を観察すると、シート接着面にコンクリート表層部が付着し、コンクリートの表層部で破壊が生じていた。また文献7)では、コンクリート強度の上昇とともに付着強度が増加することを報告しており、付着強度に与えるコンクリート強度の影響を指摘している。以上の2点から、付着応力度\$\tau_{bu}\$は、コンクリート強度に大きく影響されるものと考え、コンクリート強度の関数で評価することにした。そこで、図8に付着応力度-コンクリート強度関係を示す。プロットされた付着応力度は本試験および文献3)~9)で得られたものであり、付着強度時もしくは付着強度近傍時で得られた最大の付着応力度である。ここに、付着応力度\$\tau_{bu}\$の評価は式(2)による。

$$\tau_{bu} = \Delta \epsilon_f \cdot E_f \cdot b \cdot \Sigma t / (b \cdot x) \quad (2)$$

ここに、\$\Delta \epsilon_f\$: \$x\$区間のひずみ増分

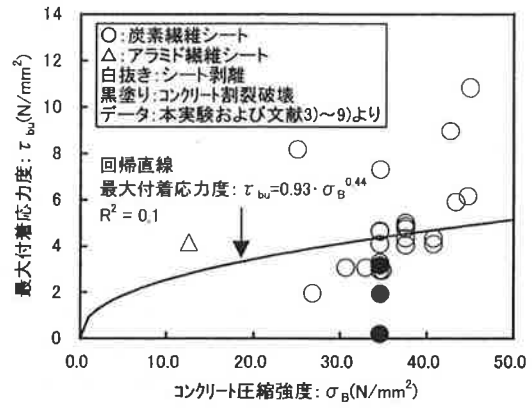


図8 付着応力度-コンクリート圧縮強度関係^{3)~9)}

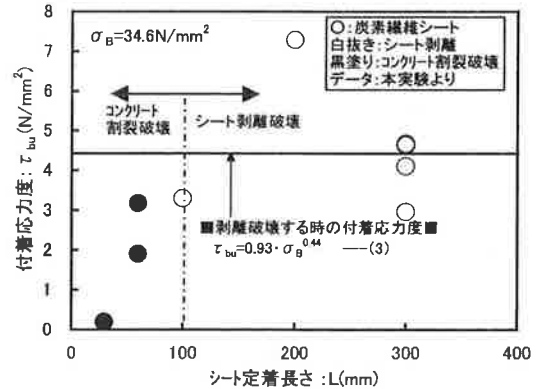


図9 付着応力度-シート定着長さ関係

\$E_f\$:シートヤング係数(実測値)

\$x\$: \$\Delta \epsilon_f\$の区間(=ひずみゲージの間隔)

本試験における付着応力度は、図6のひずみ分布の太線で示したひずみ勾配が最大の区間から算出した。なお、既往の文献についても、文献中のひずみ分布図より本試験と同様な手法で付着応力度を算出した。

これより、付着応力度はコンクリート強度の上昇とともに概ね増加する傾向にある。そこで両者の相関を評価するため、割裂破壊した供試体(●印)を除き、剥離破壊した供試体(○印)について最小二乗法による回帰を行った。式(3)は回帰により得られたもので、図8中にもあわせて示した。

$$\tau_{bu} = 0.93 \cdot \sigma_B^{0.44} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3)$$

次に、本試験で得られた付着応力度と式(3)との関係の詳細に見るため、図9に本試験より得られた付着応力度と式(3)との関係を示す。これより割裂破壊(●印)した供試体を除いて、シートの剥離破壊(○印)を示した供試体の付着応力度は、ばらつきは大きいものの、ほぼ式(3)を示す直線付近に分布し、概ね本推定式により評価できるものと考えられる。

4.2 有効付着長さ(\$L_e\$)の評価

ここでは、有効付着長さについて評価を行う。評価にあたり有効付着長さは、連続繊維シートの引張剛性(\$\Sigma t \cdot E_f\$)の増加とともに長くなるが、既往

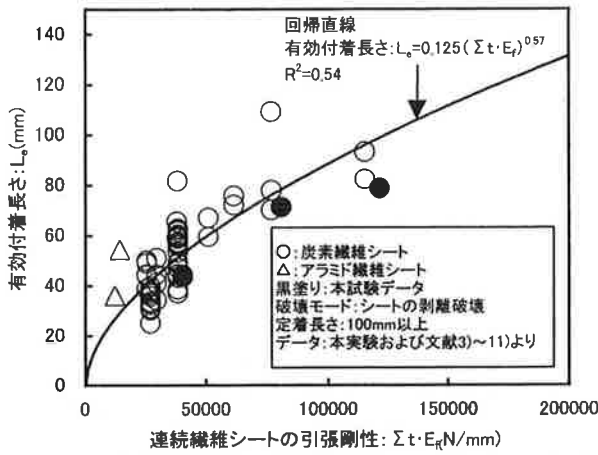


図 10 有効付着長さー連続繊維シートの引張剛性関係^{3)~11)}

の文献 12) より報告されている。以上のことから、既往の文献 3) ~11) の試験データを利用し、有効付着長さとシートの引張剛性との相関関係について調査・検討することにした。

図 10 に有効付着長さー連続繊維シートの引張剛性関係を示す。横軸の算出に使用する E_f は実測値を使用し、縦軸の有効付着長さは以下の式(4)により算出した。

$$eL_e = eP_{bu} / (\tau_{bu} \cdot b) \quad (4)$$

ここに、 eL_e : 有効付着長さ実験値

eP_{bu} : 付着強度実験値

τ_{bu} : 式(3)による付着応力度

有効付着長さの評価では、定着長さが 100mm 以上で、シートの剥離破壊により終局に至った供試体を検討対象とし、コンクリートの割裂破壊、シートの破断によって決定した供試体は、評価から除外することにした。つまり十分な付着能力を発揮する以前に終局に至っているため、有効付着長さの評価には不適切と考えたためである。同図より、シートの剥離破壊を示す供試体の有効付着長さは概ねシートの引張剛性の増加とともに上昇する傾向が見られた。この傾向は、シートのひずみ分布で積層枚数を増加させるとひずみの集中が緩和され、付着力を広範囲で負担する現象と一致するものである。そこで、関係因子の相関関係を定量的に評価するため最小二乗法による回帰分析を行った。式(5)は同分析より得られたもので、同図中にもあわせて示した。また参考のため図 6 中にも式(5)より求めた 1, 2, 3 枚貼り供試体の有効付着長さを示した。また、図 10

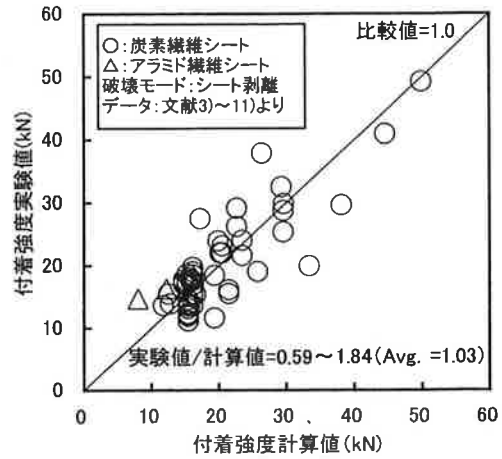


図 11 付着強度の実験値と計算値の比較^{3)~11)}

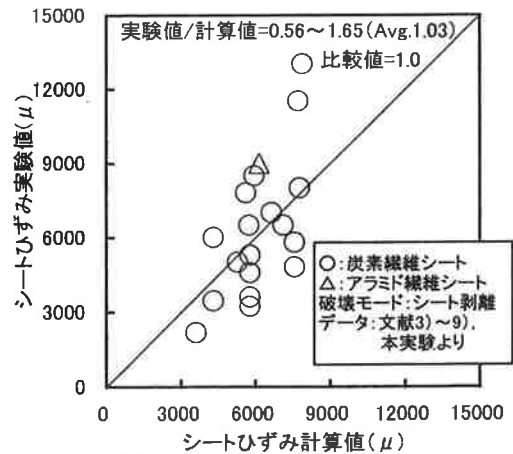


図 12 シート最大ひずみの実験値と計算値の比較^{3)~9)}

中に本試験のデータを●で示すが、これより本試験データは回帰曲線近傍に分布しており、概ね本提案式で評価できるものと思われる。なお、本試験の有効付着長さ実験値: eL_e は、表 1 中の付着強度実験値から鉄筋降伏耐力: 10.5(kN)を差し引いた数値を eP_{bu} に代入して算出した。

$$L_e = 0.125 (\Sigma t \cdot E_f)^{0.57} \quad (5)$$

以上、シートが剥離破壊する時の付着強度に関して導出された諸式を式(6)にまとめて示す。

4.3 付着強度推定式の検証

図 11 に付着強度の実験値と提案した式(6)による計算値との比較を示す。提案式による計算値は、剥離破壊した供試体の付着強度を概ね評価できており、

表 2 シートが剥離破壊する時の付着強度推定式

$$\text{付着強度推定式: } P_{bu} = \tau_{bu} \cdot b \cdot L_e = \varepsilon_{max} \cdot E_f \cdot \Sigma t \cdot b \quad (6)$$

最大付着応力度: $\tau_{bu} = 0.93 \cdot \sigma_B^{0.44}$ (N/mm²) ----- 剥離破壊

有効付着長さ: $L_e = 0.125 (\Sigma t \cdot E_f)^{0.57}$ (mm)

ただし、 $L_e > L$ の場合、 $L_e = L$ とする。

ここに、 L : シート定着長さ(mm) σ_B : コンクリート圧縮強度(N/mm²) b : シート幅(mm)

ε_{max} : シート最大ひずみ E_f : シートヤング係数(N/mm²) Σt : シートの積層厚さ(mm)

比較値 (=実験値/計算値) は 0.59~1.84 (平均 1.03) であった。

図 12 に剥離破壊を示した供試体のシート最大ひずみの実験値と計算値の比較を示す。計算値は、式(6)の関係式よりシート最大ひずみ ϵ_{max} を逆算して求めた。本試験より得られた実験値は、付着強度時のシート最大ひずみをプロットした。また既往の文献より抽出したデータは、付着強度時もしくはその近傍のひずみ分布図から読み取った最大ひずみをプロットした。同図より実験値は、比較値 (=実験値/計算値) 1.0 付近に分布しており、概ね式(6)によりシート最大ひずみを評価できるものと考えられる。比較値は、0.56~1.65 (平均 1.03) であった。

謝 辞

本研究で使用した炭素繊維シートおよび樹脂は、三菱化学(株)に提供して頂きました。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 磯雅人・中村洋行：炭素繊維シートによりせん断補強された袖壁付 RC 柱の構造性能に関する実験的研究，東急建設技術研究所報，No. 23, pp.137~142, 1997.9
- 2) 磯雅人・松崎育弘他：炭素繊維シートによりせん断補強された袖壁付 RC 柱の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.2, pp.225~230, 1997
- 3) 浅野靖幸・佐藤靖彦他：炭素繊維シートの付着特性について，土木・建築における複合構造物の実用化技術，複合構造研究委員会報告書，(社)日本コンクリート工学協会 北海道支部，pp.260~265, 1997.5
- 4) Toshiya Maeda・Yasuyuki Asano：A study on bond mechanism of carbon fiber sheet, FRPRCS 3, Vol.1, pp.279~286, Oct.1 997
- 5) 岳尾弘洋・松下博通他：CFRP 接着工法における炭素繊維シートの付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.2, pp.1599~1604, 1997
- 6) 佐藤裕一・木村耕三・小嶋克朗：CFRP シートとコンクリートの付着挙動(その1)，日本建築学会構造系論文集，No.500, pp.75~82, 1997.10
- 7) 出雲健司・浅水俊博他：アラミドおよび炭素連続繊維シートの付着特性，コンクリート工学論文集，第9巻，No.2, pp.1~7, 1998.7
- 8) 岳尾弘洋・松下博通他：CFRP 接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.1, pp.431~436, 1998
- 9) 西田浩之・上原子晶久他：連続繊維シートとコンクリートとの付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, pp.1507~1512, 1999.7
- 10) 浅野靖幸・佐藤靖彦他：炭素繊維シートの付着力向上に関する一考察，土木学会第52回年次学術講演会，pp.1004~1005, 1997.9
- 11) Bimal Babu ADHIKARY, Hiroshi MUTSUYOSHI：Shear Adhesion Behavior of Concrete-epoxy-steel and Concrete-epoxy-CFRP Interfaces, コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, pp.1543~1548, 1999.7
- 12) 佐藤靖彦，浅野靖幸，上田多門：炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究，土木学会論文集，No.648/V-47, pp.71~87, 2000.5

EXPERIMENTAL STUDY ON BOND BEHAVIOR BETWEEN CONTINUOUS FIBER SHEETS AND CONCRETE

M.Iso

The objectives of this research are to clarify bond behavior between carbon fiber sheets and concrete and to derive the formula to evaluate the bond strengths. In this study, nine R/C prisms bonded carbon fiber sheets were conducted. Number of sheet and bond length were taken as variables. From the results presented in this paper, the following conclusions can be drawn.

- 1) The bond strength increases with an increase in stiffness of carbon fiber sheet.
- 2) The bond strength is almost same for different lengths except for bond length of less than 100mm.
- 3) The equation for the bond strength is presented. Fairly good agreement between experimental and calculated results of the bond strengths is shown.