

論文 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*¹・松崎育弘*²・園部泰寿*³・中村洋行*¹

要旨:本論文は、連続繊維シートとコンクリート界面の付着挙動、付着強度の評価法について報告するものである。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躯体であり、両端に引張力を加える構造である。変動要因は、炭素繊維シートの積層枚数(1枚~3枚)と定着長さ(30,60,100,200,300mm)である。実験によって、付着強度はシート引張剛性の増加とともに上昇するが、定着長さ100mm程度以上で頭打ちとなる結果が得られた。既往の研究結果に本実験のデータを加えて検討を行い、導出された付着強度に関する提案式は、実験結果を概ね評価ができることが明らかにされている。

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

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貼付けのみで補強する工法について提案し、すでにそのRC柱の構造性能と工法の有効性について報告を行って来ている。¹⁾²⁾しかし、力学的抵抗機構には不明な点も多いため、その解明が急がれているのが現状である。

本研究では、この抵抗機構を解明することを目的としており、まず、シートとコンクリート間の付着挙動の把握が最重要項目と考え、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ことにした。また付着強度の評価にあたっては既往の文献も含め検討することとした。

2. 実験概要

表-1に供試体および実験結果一覧、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)が設けられている。また鋼材とシートとの関連性を取入れるため断面中心には、丸鋼Φ6(端部:180°フック型)が1本配置されている。供試体の上下面にノッチ位置を跨いでその両端に、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。シート貼付けは、コンクリートの表面研磨、プライマ

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)	$\sum t \cdot E_f^{*2}$ (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)	2.3 × 10 ⁵ (公称値)	1	38409	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	38409	60	15.1	18.7	定着治具部分の割裂破壊
4	CF-3-60* ¹			3	115228	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	38409	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	38409	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	38409	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	76819		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	115228		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: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」

* 1 東急建設(株)技術研究所 建築研究室 工修(正会員)

* 2 東京理科大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

* 3 足利工業大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

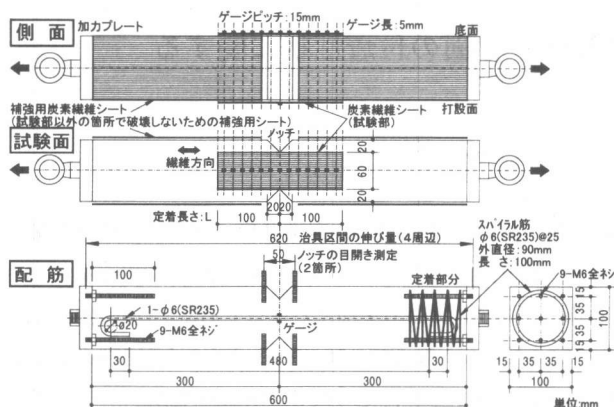


図-1 供試体の一例(CF-1-100)

塗布, エポキシ樹脂によるシート接着の順序で実施された。供試体両端の加力プレートは、9-M6 (長さ 100mm) 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。この定着部分の割裂に対処するためにスパイラル筋が配置され、さらに一部の供試体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が施されている (図-1 参照)。変動要因は、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。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, ノッチ位置の鋼材ひずみ, シートひずみについて行われた。シートひずみの測定ゲージ長さは 5mm であり, ゲージ間隔は 10mm (シート定着長: 60mm 以下の試験体), 15mm (シート定着長: 100mm 以上の試験体) である。

3. 実験結果

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、ノッチ部の割裂ひび割れにより終局に至った。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が発生し、ついで定着された繊維シート部分を横切らないひび割れ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)

表-2 材料特性(コンクリート)

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 $\times 10^4(N/mm^2)$
21早強	34.6	2.43	2.48

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)	ヤング係数 $\times 10^5(N/mm^2)$
φ6(SR235)	370	482	2.02

表-4 材料特性(炭素繊維シート)

目付量 (g/m^2)	厚さ (mm)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング係数 $\times 10^5(N/mm^2)$
300	0.167	3480	2.42

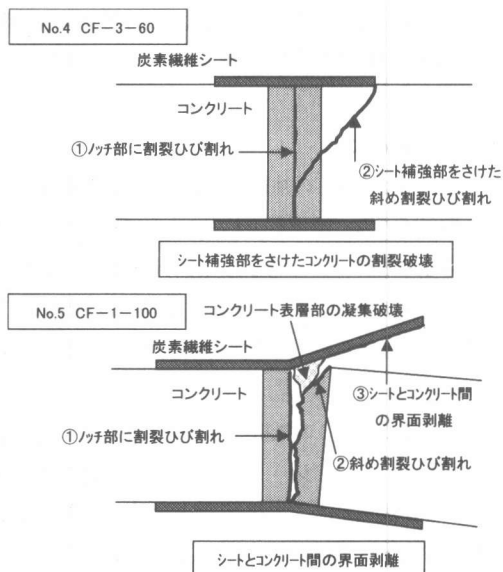


図-2 破壊性状の一例

の破壊過程は、ノッチ部に割裂ひび割れが発生し、ついで材軸に対して約 45° の斜め割裂ひび割れが発生した。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すると終局に至った。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 は、ノッチ部の割裂ひび割れ以外に定着先端部分 (加力プレートから約 10cm 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で、No.7 はその部分で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に引張カー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し、一気にノッチ部が口開く性状を示した。シート定着長：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る。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た。また積層枚数を1枚と共通とし、定着長：100, 200, 300mm と変化させた供試体の変形状は、定着長さ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を低下させ、ほぼ RC 供試体と同様な性状であった。シート定着長：60mm 以下の供試体の性状は、定着長：100mm 以上の供試体とはほぼ同様な経路をたどるが、シートが剥離する以前に、定着された繊維シート部分を横切らないひび割れが発生し、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。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。同様に定着長さ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層と共通とし、定着長さを変動させた場合の供試体（●、○印）は、定着長：100mm で耐力の頭打ちがみられた。

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。これより定着長さを共通とし、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広範囲でシートが効いていることがわかる。このことより積層枚数の増加により付着強度が上昇した理由は、積層枚数の増加によりシートの効く領域が広がるためと考えられる。

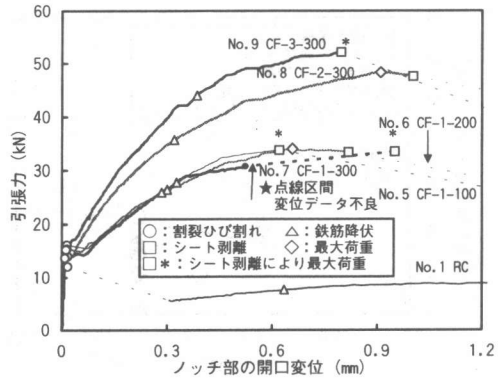


図-3 引張カーノッチ部の開口変位関係

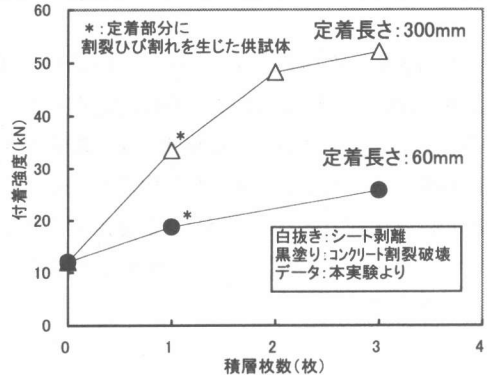


図-4 付着強度-積層枚数関係

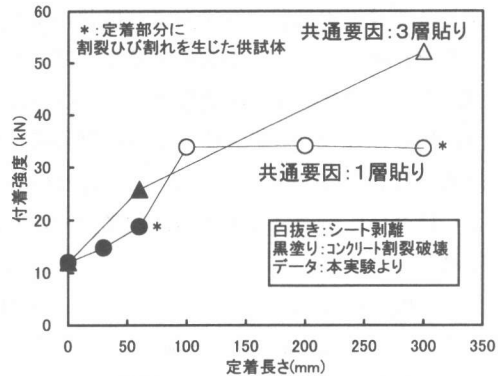


図-5 付着強度-定着長さ関係

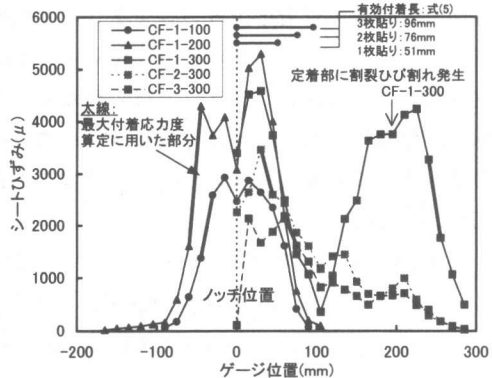


図-6 付着強度時のシートひずみ分布

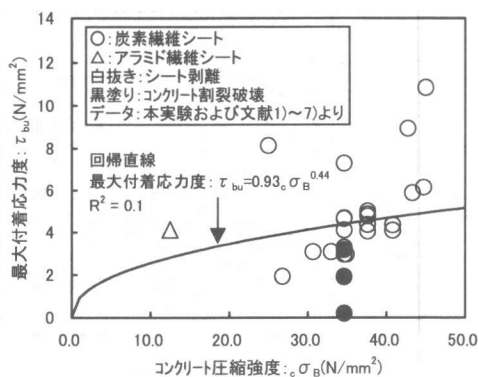


図-7 最大付着応力度-コンクリート圧縮強度関係^{3)~9)}

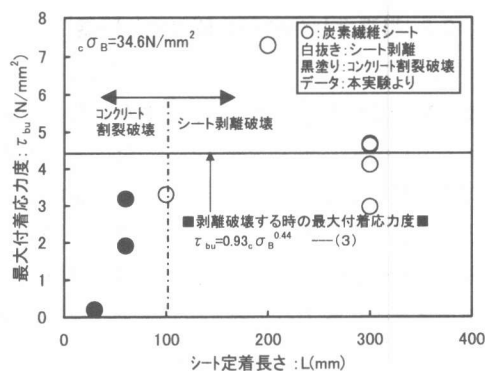


図-8 最大付着応力度-シート定着長さ関係

一方、積層枚数を1枚と共通とし定着長:100, 200, 300mm と変化させた場合、定着長さによらず、シートが効いている範囲、ひずみ分布はほぼ同様であった。定着長さを変化させても付着強度がほぼ同様であった原因は、定着長さによらず、シートの効く範囲とひずみ分布がほぼ同様であったためと考えられる。

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} は式(1)により評価し、最大付着応力度 τ_{bu} および実際に付着力を分担している付着領域 L_e (有効付着長さ) についての検討をすすめ、定量化することとする。

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

ここに b : シート幅

4.1 最大付着応力度(τ_{bu})の評価

図-7に最大付着応力度-コンクリート強度関係を示す。プロットされた最大付着応力度は本実験および文献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付近時のものである。また最大付着応力度 τ_{bu} は以下の式(2)により評価した。

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

ここに、 $\Delta \epsilon_f$: x 区間のひずみ増分

x : $\Delta \epsilon_f$ の区間 (=ひずみゲージのピッチ)

本実験における最大付着応力度算出のためのひ

ずみ増分区間は、図-6のひずみ分布の太線で示した部分である。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実験と同様な手法で最大付着応力度を算出した。

剥離破壊を示した供試体は、シートにコンクリート表層部が付着し、コンクリートの部位で破壊が生じていること。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は増加することをすでに報告している。以上の2点から最大付着応力度 τ_{bu} とコンクリート強度との関係について検討を加えてみた。

図より、最大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。そこでそれら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。以下に回帰より得られた式を示し、図中にあわせて示しておく。

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

次に、定着長さの影響をみるため図-8に本実験で得られたデータの最大付着応力度-シート定着長さ関係を示す。参考のため式(3)より得られた最大付着応力度計算値も図中に示しておく。これより本試験の場合、シートの剥離破壊(○印)は、定着長さ100mm以上で生じ、その最大付着応力度は、定着長さの違いによらず、ほぼ式(3)付近に分布している。

以上より、剥離破壊を示す時の最大付着応力度を式(3)で定式化することにした。

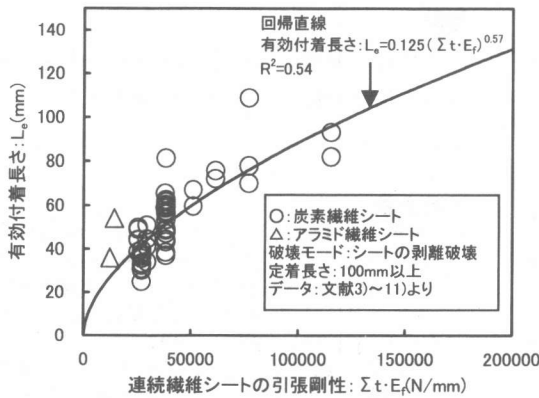


図-9 有効付着長さ-連続繊維シートの引張剛性関係^{3)~11)}

4.2 有効付着長さ(L_e)の評価

図-9 に有効付着長さ-連続繊維シートの引張剛性 (Σt・E_f) 関係を示す。縦軸の有効付着長さは以下の式(4)により算出した。

$$e L_e = e P_{bu} / (\tau_{bu} \cdot b) \quad (4)$$

ここに、e L_e : 有効付着長さ実験値

e P_{bu} : 付着強度実験値

τ_{bu} : 式(3)による最大付着応力度

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された供試体は、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。これは、シ-

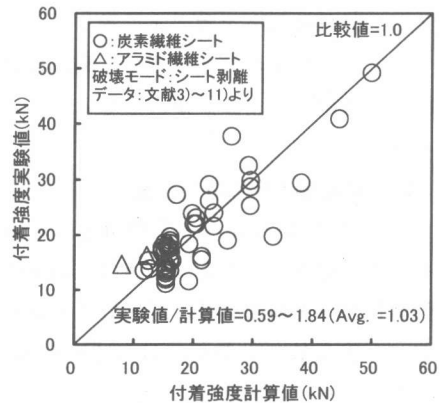


図-10 付着強度の実験値

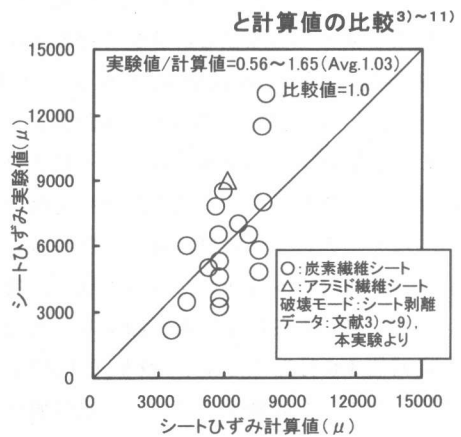


図-11 シート最大ひずみの

実験値と計算値の比較^{3)~9)}

トのひずみ分布で、積層枚数を増やす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、これらを定量的に評価するため最小二乗法による回帰を行った。その結果、下式(5)を得た。

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

それらをあわせて同図中に示しておく。また、図-6中に式(5)より求めた1, 2, 3枚貼り供試

表-5 シートが剥離破壊する時の付着強度推定式

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

$$\text{最大付着応力度: } \tau_{bu} = 0.93 \cdot \sigma_B^{0.44} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ ----- 剥離破壊}$$

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

ただし、L < L_e の場合、L = L_e 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)

体の有効付着長さを参考まで示しておく。

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が表-5 にまとめて示されている。

4.3 実験値と計算値の比較

図-10 に付着強度の実験値と計算値の比較を示す。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、比較値(=実験値/計算値)は 0.59~1.84 (平均 1.03) であった。

図-11 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がプロットされている。また既往の文献から抽出したデータについては、付着強度時もしくはその付近のひずみ分布図から読み取った最大ひずみがプロットされている。図より、実験値は、比較値 1.0 付近に分布し、概ね式(6)でシートの最大ひずみを評価できている。比較値(=実験値/計算値)は、0.56~1.65 (平均 1.03) であった。

4. まとめ

- 1) 付着強度は、シートの引張剛性の増加とともに上昇する。しかし、引張剛性をそろえシート定着長さを変化させた場合の付着強度は、定着長さ 100(mm)程度で頭打ちとなる傾向がみられた。
- 2) 付着強度時に効果を発揮しているシートひずみの領域は、引張剛性の増加とともに、広がり、ひずみの集中は緩和される傾向にある。
- 3) シートが剥離破壊する時の付着強度推定式を提案し、概ね本提案式により、その付着強度および付着強度時のシート最大ひずみを推定できることを示した。

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, 松崎育弘, 園部泰寿, 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.225~230, 1997
- 2) 磯雅人, 松崎育弘, 園部泰寿, 渡邊征行: 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.21, No.3, pp.1429~1434, 1999
- 3) 浅野靖幸, 佐藤靖彦, 上田多門, 小野定: 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, Yasuhiko Sato, Tamon Ueda, Yoshio Kakuta: A study on bond mechanism of carbon fiber sheet, FRPRCS 3, Vol.1, pp.279~286, Oct.1997
- 5) 岳尾弘洋, 松下博通, 牧角龍憲, 長島玄太郎: 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, 小島克朗: 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, 佐伯昇, 志村和紀: アラミドおよび炭素連続繊維シートの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, No.2, pp.1~7, 1998.7
- 8) 岳尾弘洋, 松下博通, 矢原輝政, 佐川康貴: 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, 下村匠, 丸山久一: 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, 上田多門, 小林朗: 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, Tadashi KANAI, Sayan SIRIMONTREE: 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