

炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究

佐藤靖彦¹・浅野靖幸²・上田多門³

¹正会員 博士(工学) 北海道大学大学院 助手 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 修士(工学) 清水建設(株) 土木本部 設計部 構造橋梁グループ
(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

³正会員 工博 北海道大学大学院 助教授 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

本論文は、コンクリートにエポキシ樹脂を用いて接着した炭素繊維シートの付着性状を実験的に明らかにし、その挙動および強度を予測できる手法を提示するものである。すなわち、炭素繊維シートの付着長、積層枚数、付着幅、を実験変数とした付着試験を行い、その付着機構を実験的に明らかにした。さらに、実験結果に基づき、炭素繊維シートの付着応力-すべり-ひずみ関係の構築を行った。また、付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた数値解析に基づき、炭素繊維シートの付着強度式を提案した。

Key Words : carbon fiber sheet, peeling, bond mechanism, bond-slip-strain relation, bond strength

1. 序論

連続繊維シートは、力学的特性に優れ、かつ、施工性にも優れた材料であり、既設コンクリート構造物の補強材料として広く社会に受け入れられている。

連続繊維シートは、一般に、樹脂によりコンクリート構造物に接着される。コンクリート構造物に接着された連続繊維シートに作用する引張力は、接着界面を通じてコンクリートに伝達されるものであり、連続繊維シートにより補強されたコンクリート構造物の力学性能は、コンクリートと連続繊維シートとの付着挙動に大きく影響されることとなる¹⁾。

近年、これまで蓄積した知見を集約し、各種の設計マニュアルが刊行されるまでに至った²⁾。それらマニュアルは、連続繊維シートの剥離を考慮しない完全付着を仮定したものであり、従来の鉄筋コンクリートの理論に基づいて記述されている。一方で、連続繊維シートの付着破壊を、許容される一つの破壊形式と考え、新しい設計方法を構築することの必要性が指摘されている³⁾。連続繊維シートにより補強された構造物の性能が要求されるレベルを満たしているのであれば、設計時において如何なる破壊形式も許容されるものと著者らは考えている。完全付着を仮定した設計法であっても、剥離を考慮する設

計法であっても、付着破壊が生じるかを否かを照査できる方法が必要となることは言うまでもない。しかしながら、未だ、合理的な剥離の評価方法は提案されていない。

本研究は、連続繊維シートの中で炭素繊維シート(以下「CFS」)を取り上げ、コンクリートにエポキシ樹脂を用いて接着した場合の付着機構を明らかにすることを目的に行ったものである。すなわち、付着長、積層数、付着幅、を実験変数とした炭素繊維シートの付着試験を行い、その付着機構を検討する(本論文の3章)。得られた付着機構に基づき、CFSの付着応力-すべり-ひずみ関係を構築する(4章)。さらに、本研究で構築した付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた数値解析に基づき、炭素繊維シートの付着強度式を提案する(5章)。本論文は、今後、部材レベルでの合理的な剥離の評価方法を構築する上で必要となる知見を取りまとめたものである。

CFSの付着強度はコンクリート表面の処理方法の影響を大きく受ける。本研究では、ディスクサンダーによる表面を研磨する標準的な方法によりCFSを接着した場合に限定して研究を行った。すなわち、本論文で示す付着強度式は、標準的な方法によりCFSを貼り付けた場合のみに適用できるものである。

2. 実験概要

(1) 使用材料

本研究に用いた CFS は、直径 5 から 8 μ m の PAN 系の炭素繊維シートを一方向に並べてシート状にしたものである。高強度タイプと高弾性タイプの 2 種類を使用した。Table 1 に力学的特性値を示す。

コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いており、粗骨材の最大寸法は、20mm とした。

(2) CFS の貼り付け方法

炭素繊維シートの付着性状に及ぼすコンクリート表面の状態の影響は大きいですが、本研究では、表面処理方法の影響は検討の対象外としている。本研究における CFS の接着は、コンクリート表面をディスクサンダーで処理する標準的な方法によった。なお、接着面は、骨材が現われるまでレイタンスおよびコンクリートがディスクサンダーにより除去された。コンクリートを打設し約 1 週間湿布養生を施した後、約 3 日間、気中に放置し、表面を研磨し、プライマー、接着樹脂を塗りつけた。CFS 接着後、1 週間気中で養生し、付着試験を行った。

(3) 実験供試体および試験方法

本研究では、4 種類の実験供試体を用意した (Fig.1 参照)。本研究の実験変数は、付着長、積層数、付着幅、であり、各実験変数と供試体の種類との関係が Table 2 に示されている。以下に各供試体の概要を示す。

a) Type-A 供試体 (Fig.1(a))

100mm \times 100mm の断面形状を持つ 2 つのコンクリートブロックの中央に鉄筋 (D16) を配置し、両端の鉄筋を引張ることにより CFS に付着力を作用させるものである。鉄筋は中央で切断されている。片側には CFS を巻き付け、必ず試験区間で付着破壊が起こるようにした。

本研究では、Type-A 供試体 (Fig.1(a)) を基本としているが、積層数が多い場合や、付着幅が広い場合には、CFS の付着強度が大きくなり、CFS の付着破壊が起きる前に、コンクリートが破壊する可能性が大きい。そのため、本研究では、Type-B、C および D 供試体を用意した。

b) Type-B 供試体 (Fig.1(b))

断面寸法が 250mm \times 500mm \times 200mm のコンクリートブロックの一面に CFS を貼り付け、CFS の荷重端側を鋼板で挟み、その鋼板を引張ることにより CFS に付着力を作用させる。

Table 1 Mechanical Properties of CFS

Type of CFS	t (mm)	ρ (g/m ²)	f_t (MPa)	E_{CFS} (GPa)	ϵ_u (%)
I	0.11	200	3479	230	1.5
II	0.165	300	2940	372	0.8

t : thickness of CFS ρ : fiber density
 f_t : tensile strength ϵ_u : ultimate strain
 E_{CFS} : Young's modulus

Table 2 Type of Specimens

Type of Specimen	Experimental parameters			Number of Specimens
	p_1	p_2	p_3	
A	○	○	○	13
B	-	○	-	3
C	-	○	○	3
D	-	-	○	1

p_1 : Influence on bond length of CFS

p_2 : Influence on amount of CFS

p_3 : Influence on bond width of CFS

c) Type-C 供試体 (Fig.1(c))

断面 250mm \times 200mm のコンクリートブロックを厚さ 20mm の鋼板により挟んでいる。鋼板は付着を切った 4 本の鋼棒により接合されている。両端の鋼板中央に接合した鋼棒を引張ることによりコンクリートブロックに接着した CFS に付着力を作用させる。

d) Type-D 供試体 (Fig.1(d))

断面 100mm \times 150mm の 2 つのコンクリートブロックの間に、2 本の油圧ジャッキを設置している。この油圧ジャッキにより CFS に一様な引張力を作用させる。

(4) 測定項目

測定項目は、CFS のひずみおよび付着破壊荷重である。ひずみゲージは、基本的に、検長 5mm のひずみゲージを 10mm 間隔で貼付している。ひずみゲージの貼付位置の一例を Fig.2 に示す。本実験で使用している骨材の最大寸法が 20mm であることを考えると、検長 30mm 程度以上のひずみゲージを使うことが望ましい。しかし、検長が長くなると、局所的に大きく変化する CFS の挙動を細かく測定できない。そこで、本研究では、5mm の検長のひずみゲージを用い、各地点のひずみは、隣り合う 2 点のひずみを加えた 3 点の平均値により表すこととした。これは、ひずみゲージ貼付位置近傍の 30mm 区間の平均ひずみを表すこととなる。

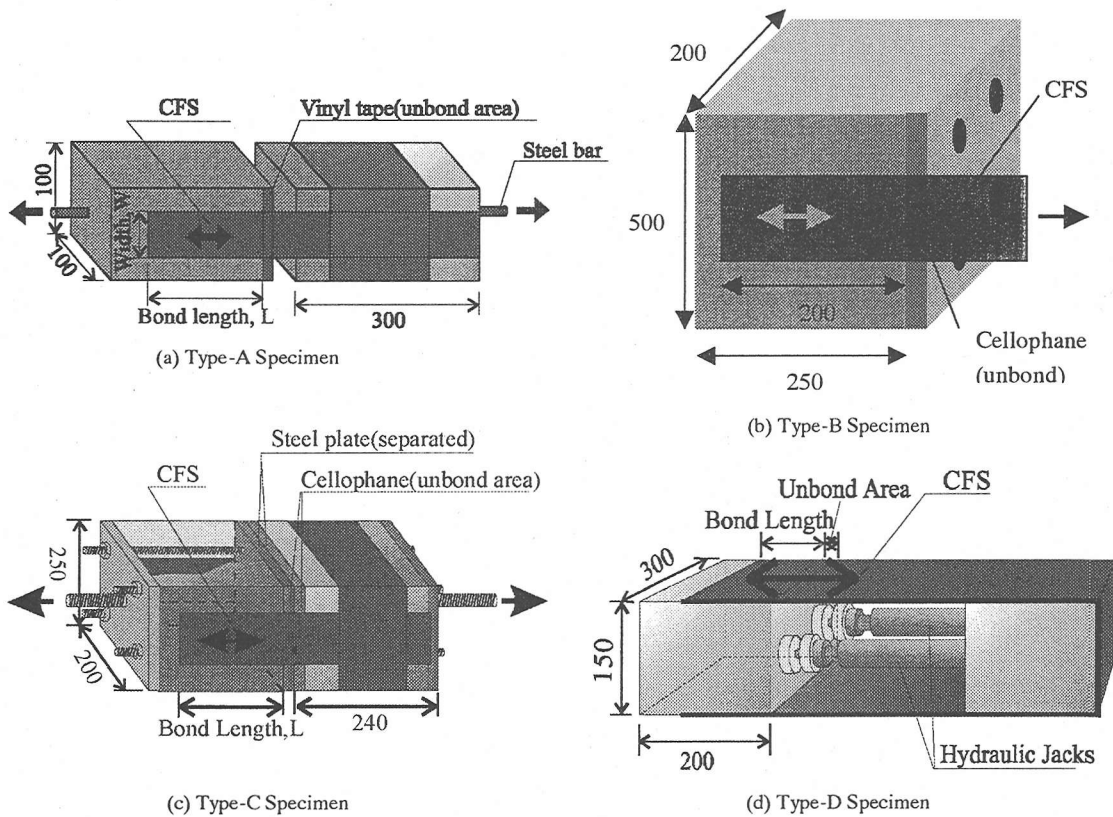


Fig.1 Experimental Specimens

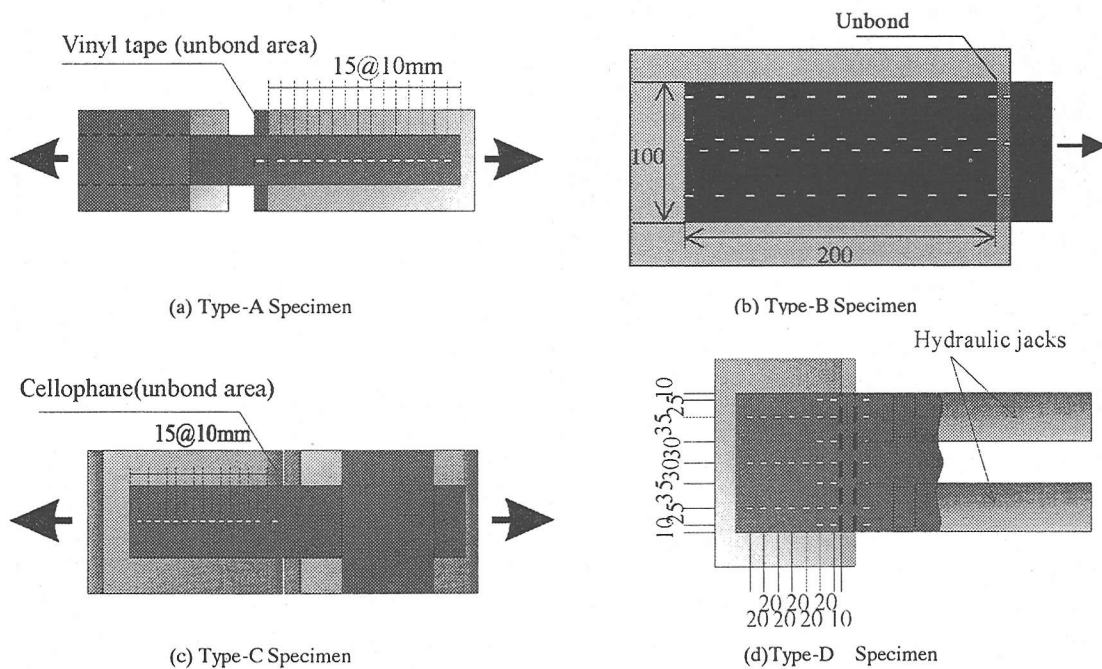


Fig.2 Arrangement of Strain Gages

Table 3 Experimental Results

Specimen	Type of CFS	Bond length (mm)	Stiffness (GPa·mm)	Width of CFS (mm)	Compressive Strength (MPa)	Ultimate Load (kN)	Failure Mode ^{*1}	
A	1	I	75	25	50	40.8	12.5	P
	2	I	150	25	50	40.8	18.4	P
	3	I	300	25	50	43.3	23.9	P
	4	I	75	50	50	42.4	20.0	CF
	5	I	150	25	50	42.4	14.6	B
	6	II	65	38	50	42.7	19.1	CF
	7	I	150	50	50	42.7	32.5	P
	8	I	700	25	50	39.8	22.0	P
	9	I	150	25	50	23.8	20.0	P
	10	I	150	25	10	23.8	4.8	B
	11	I	150	25	20	23.8	10.7	B
	12	I	150	76	20	24.7	18.5	P
	13	I	150	127	20	24.7	23.5	P
B	1	I	200	25	100	40.9	20.6	P
	2	I	200	76	100	45.9	38.0	P
	3	I	200	76	100	45.9	34.1	P
C	1	I	150	25	50	39.2	18.8	P
	2	I	150	25	100	39.2	37.2	P
	3	I	150	25	100	39.2	36.0	P
D	1	I	150	25	200	33.5	68.6	P

*1 P: Peeling of CFS B: Breakage of CFS CF: Concrete Failure

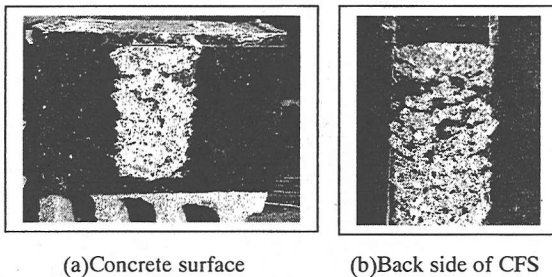


Photo 1 Failure Condition

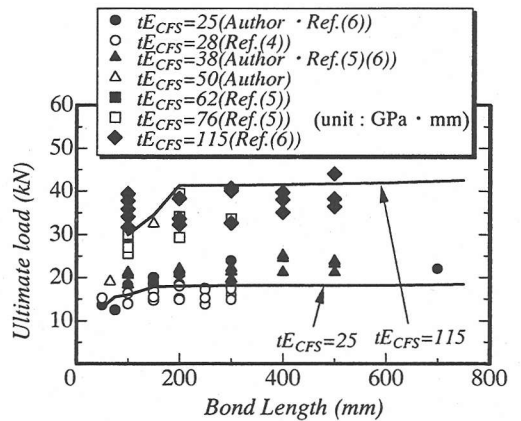


Fig.3 Relationships between Bond Strength and Bond Length

3. 実験結果および考察

(1) 概説

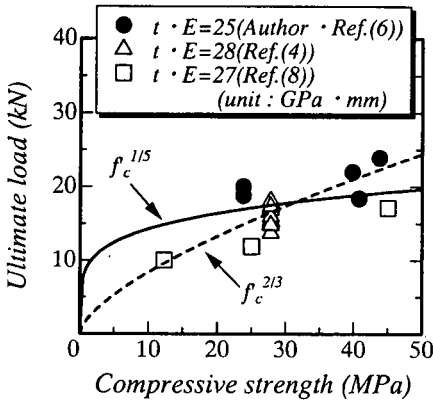
本実験結果を Table3 に示す。表中の破壊モード P は剥離破壊, CF はコンクリートの破壊, B は CFS の破断を示す。本実験供試体のほとんどがコンクリート表層の剥離破壊であった。供試体 B-1 の破壊性状を Photo 1 に示す。

本章では、付着長、積層数、付着幅が変わることにより、付着強度、ひずみ分布、付着応力分布にどのような差異が現われるのか考察する。

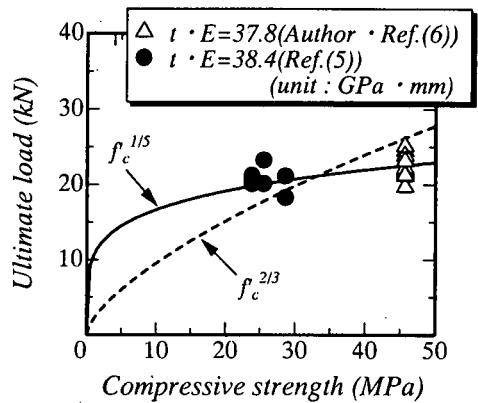
(2) 付着長および剛性の影響

a) 付着強度

Fig. 3 は、本実験結果とともに既往の実験結果^{4)~7)} に関して、付着強度と付着長との関係を CFS の単位幅当りの剛性 (CFS の弾性係数×厚さのことで以下では単に「剛性」と言う) 別に整理したものである。なお、ここで用いた既往の実験結果は、本実験の Type-A と同じ試験方法により行われた 1 方向炭素繊維



(a) $tE_{CFS}=25\sim 28\text{GPa}$



(b) $tE_{CFS}=38\text{GPa}$

Fig.4 Influence of Compressive Strength on Bond Strength

維シートに関するものである。また、後述するように CFS の幅が付着強度に大きな影響を及ぼすため、ここでは、付着幅が 40 から 100mm の結果のみ用いており、縦軸は 100mm に換算した荷重により表されている。付着長がほぼ 100 から 200mm 以上では、付着長が長くなっても付着強度は増加しない傾向にある。また、付着強度は、剛性が大きいものほど大きい傾向にある。

既往の研究⁸⁾において、付着強度はコンクリートの圧縮強度の 2/3 乗に比例することが報告されている。Fig.4 は、本実験および既往の実験結果^{4)~8)}における付着強度とコンクリート強度との関係を示すものである。Fig.4(a)は、CFS の剛性が 25 から 28GPa·mm の場合、Fig.4(b)は剛性が 38GPa·mm 程度の場合の関係を示す。なお、ここでは、付着長が 200mm 以上、付着幅が 40 から 100mm のデータのみ用いている。縦軸は 100mm に換算した荷重である。また、Fig.4(a)には 2 方向炭素繊維シートを用いた出雲ら⁸⁾の実験結果も示されている(図中の□)。図中の破線はコンクリート強度の 2/3 乗に比例するとして補間した結果を示すが、実験結果との対応が悪い。付着強度は破線よりも、より緩やかに大きくなる傾向にある。ここで用いた実験結果は、コンクリートの圧縮強度の 0.2 乗に比例するものであった(図中の実線)。本実験供試体のコンクリート強度は、付着幅の影響を検討する供試体以外はほぼ 40MPa と等しいので、各供試体間のコンクリート強度の違いによる付着挙動の差異は、非常に小さいとして考察を進めていくこととする。

Fig.5 は、付着長と平均付着強度(付着力を接着面積で除した値)との関係を示す。付着長が大きくなると平均付着強度が小さくなることが明らかである。この理由については、後で考察する。

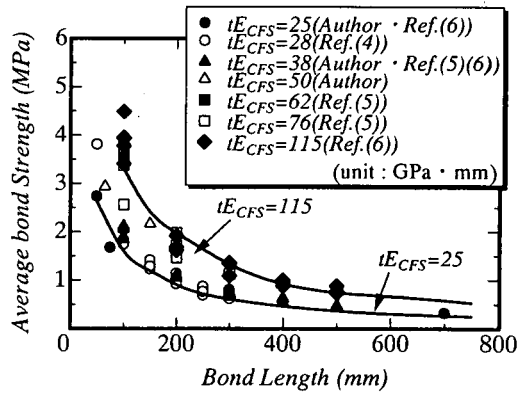
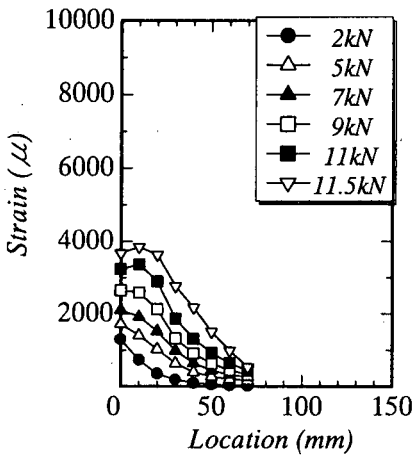


Fig.5 Relationships between Average Bond Strength and Bond Length

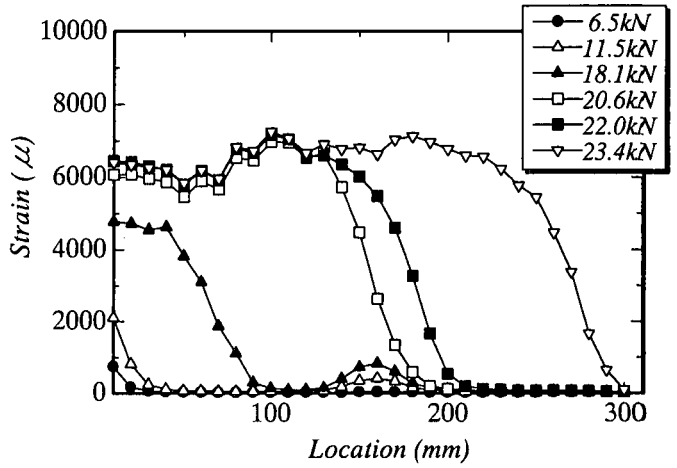
b) ひずみ分布

Fig.6 は、CFS のひずみ分布の一例を示す。Fig.6(a)は付着長が 75mm である供試体 A-1 の結果を、Fig.6(b)は付着長が 300mm で供試体 A-3 の結果を示す。まず、Fig.6(a)に着目する。作用荷重が 11kN までは、ひずみ分布は二次曲線を示し、11.5kN 時に、先端部から 20mm の間にひずみが一定の区間が存在し、先端部から 20mm 以降では、直線的なひずみ分布を示している。端部から 5mm の位置においてもひずみが発生しており、11.5kN 付近では、端部でのすべりが発生していた可能性がある。

続いて、Fig.6(b)に着目する。荷重が 11.5kN までは、概ね供試体 A-1 の性状と類似している。18.1kN 時には、引張端から 50mm までの位置のひずみが概ね一定で、50mm から 100mm の位置に直線的なひずみ分布が見られる。その後は、荷重が大きくなることなく、ひずみ一定の区間が広がり、ひずみ曲線がより奥へと移動していく。つまり、貼り付けた



(a)A-1



(b)A-3

Fig.6 Strain Distribution

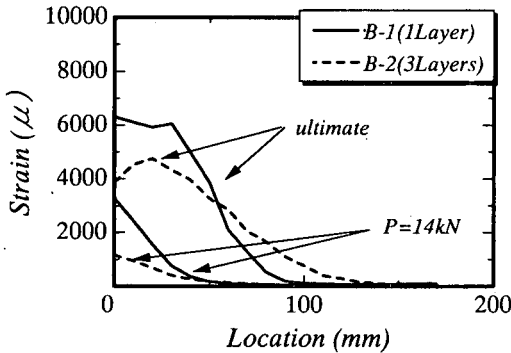


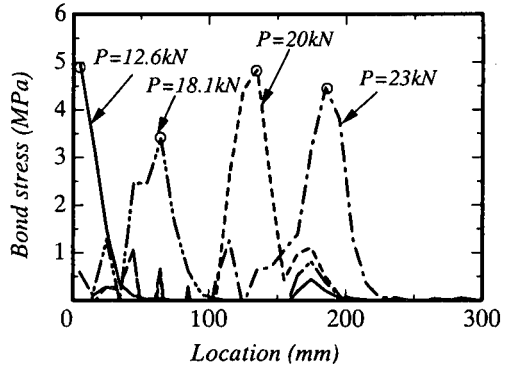
Fig.7 Strain Distribution

領域全体で抵抗するのではなく、ある一部の領域が付着抵抗領域であり、その領域が荷重を支えられなくなると、剥離が進展していくものと考えられる。よって、付着長を大きくしても、上述のプロセスを繰り返すだけであって、付着強度が大きくなることとなる。すなわち、付着強度を付着長で除した平均付着強度は、付着長が大きくなるとともに徐々に小さくなる (Fig.5 参照)。

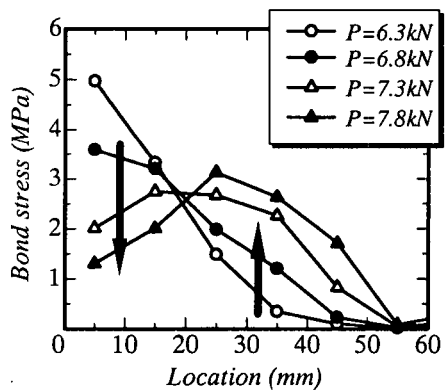
Fig.7 は、付着長および付着幅が等しく、剛性 (積層数) のみ異なる供試体 B-1 と B-2 のひずみ分布を比較したものである。同じ引張力時 (14kN) のひずみを比較すると、剛性が大きい方が小さくなっており、ひずみの勾配が小さい。終局時を比較すると、剛性が大きい方がひずみが小さく、ひずみが発生している領域、すなわち、付着応力の発生区間が長いことが明らかである。

c) 付着応力

Fig.8 に供試体 A-3 の付着応力分布を示す。付着長



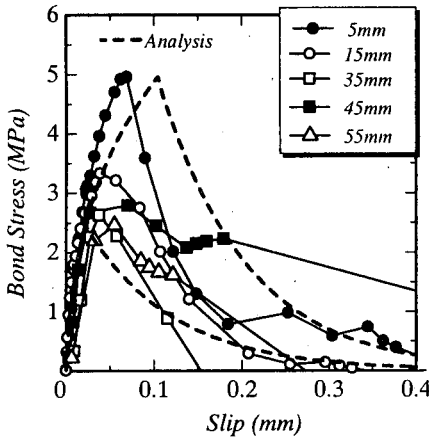
(a) Distribution between 0 and 300mm



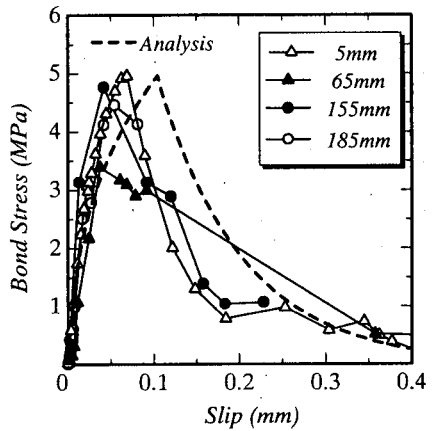
(b) Distribution between 0 and 60mm

Fig.8 Bond Stress Distribution

300mm 全体の付着応力分布の変化を示す。Fig.8(a) に、荷重の増加とともに、付着応力が分布する領域が奥へと移動していく様子が示されている。各荷重



(a) Points between 0 and 55mm



(b) Points having Maximum Bond Stress

Fig.9 Bond-Slip Curves (Specimen A-3)

段階における付着応力の最大値は概ね等しい。Fig.8(b)に荷重が 6.3kN から 7.8kN までの先端から 60mm の領域における付着応力分布を示す。先端から 20mm 区間の付着応力が低下し、30 から 60mm 区間の付着応力が増加する様子が示されている。Fig.9 は、Fig.8(b)に示した位置の付着応力とすべりとの関係を示す。コンクリートのひずみは CFS のひずみに比べ極めて小さいため、すべりは、各点の CFS のひずみを積分することにより求めた¹³⁾。また、付着応力は次式により求めた。

$$\tau = tE_{CFS} \frac{d\varepsilon_{CFS}}{dx} \quad (1)$$

ここで、 t は CFS の厚さ、 E_{CFS} は CFS のヤング係数、 $d\varepsilon_{CFS}/dx$ はひずみ分布曲線の傾きを表す。

付着応力 (τ) とすべり (s) との関係の初期勾配が位置によらず概ね等しい。しかし、付着応力の最大値は位置により大きく異なる (Fig.9(a))。すなわち、荷重端に最も近い 5mm の位置の最大付着応力は 5MPa 程度であり、その他の位置は概ねその半分である。また、どの位置においても、最大付着応力後に急激に付着応力がゼロに低下するのではなく、軟化域が存在する。

ここで、付着応力の低下は剥離が発生し始める (付着応力の最大値が剥離の開始点に対応) ことによるものであると考え、位置による最大応力の相違は以下のように説明することができる。すなわち、5mm の位置の接着されているコンクリート表面 (以下「接着層」) が最大付着応力に達し、CFS の剥離が発生し始めるが、接着層の破壊はある大きさを持つ

ため、隣接する位置の接着層に何らかの力学的なダメージを与える。本来、力学的なダメージを受けなければ、5mm と等しい最大付着応力を発揮できるものが、ダメージを受けることにより小さな値で破壊が発生し、剥離が奥へと伝播していく。この場合、そのダメージの度合いが奥へと伝播する間に徐々に小さくなり、最も大きな付着応力を有していた 5mm の位置からある程度離れた位置で、隣接する部分の剥離の影響がなくなる、もしくは、無視できるほど小さくなる。本実験では、5mm の位置で付着応力が低下した時点で、付着応力が発生していた 80mm までの範囲まで剥離の伝播が進行する傾向にあった。

上述の剥離が奥へと進展する荷重レベルにおける付着応力の変化と CFS のひずみ分布の変化との概念的な関係を Fig.10 に示す。はじめ、CFS のひずみ分布は 2 次放物線を形成しており、ひずみが発生している領域内 (L_b) で付着応力分布はほぼ直線になる (Fig.10(a))。最も付着応力が大きい先端部で最大付着応力 (τ_{max}) に達した後、応力が低下し始める。その後、領域 L_b 内の一部に付着応力が一定となる領域 (L_{b1}) が現われる。その領域のひずみ分布は直線で近似できる⁹⁾ (Fig.10(b))。その後、領域 L_{b1} 内の付着応力がほぼゼロとなり、領域 L_{b2} 内の付着応力は増加するものの、隣接する位置の接着層の破壊の影響を受け、付着応力は τ_{max} まで達することはない。付着応力が τ_{max} まで大きくなり得るのは、荷重端からある程度 (本実験では 80mm 程度) 離れた位置である。今、最大付着応力が等しい Step1 と Step3 (Fig.10 の(a)と(c)) を比較した場合、Step3 の方が L_b 内に存在する付着応力の分だけ、付着応力の積分値、つまり、作用引張力が大きくなる。付着強度を考えるに

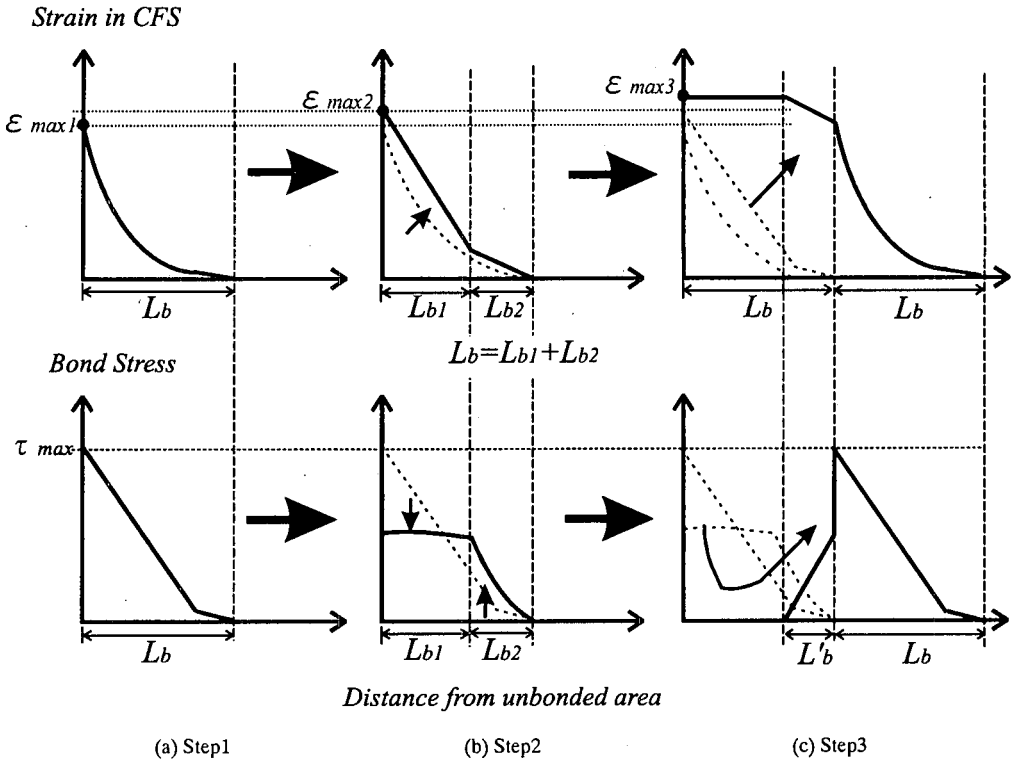


Fig.10 Schematic Relationships between Bond Stress and Strain in CFS

あたっては最大付着応力とともに軟化後の付着応力の大きさが重要であることとなる。

Fig.9(b)は、大きな付着応力が観察された位置 (Fig.8(a)の○印) の τ と s との関係を示す。最大付着応力は4MPaから5MPaであり、概ね等しい。

ここで、軟化域が存在する理由について考察を加える。接着層は、モルタル、骨材により構成されている。これらの分布はCFSの繊維方向および幅方向にランダムである。CFSの接着領域は、モルタルと接着している領域、骨材のみと接着している領域、の2つに分けられる。当然、それぞれで付着強度が異なるものと思われる。骨材のみに接着されている領域の付着強度は大きく、一方、モルタルのみに接着されている領域の付着強度は小さいものと思われる。つまり、任意の断面において、CFSがモルタル部に接着されている領域で剥離しても、骨材に接着されている領域では剥離していないという状況が起こり得るため、急激に付着応力が低下しないものと考えることができる。また、このことは、ひずみの測定に検長が短いゲージを用いた場合、隣接するひずみゲージのひずみ値が大きく異なる可能性を示す。本研究で得られた τ と s との関係は、各領域での τ と s を平均化したものと言え、付着破壊挙動を正確に説明するには、骨材の分布や各領域

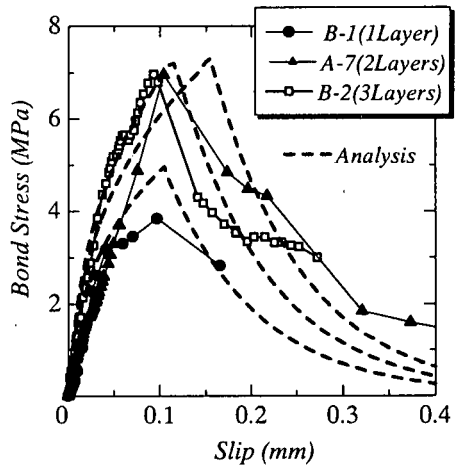
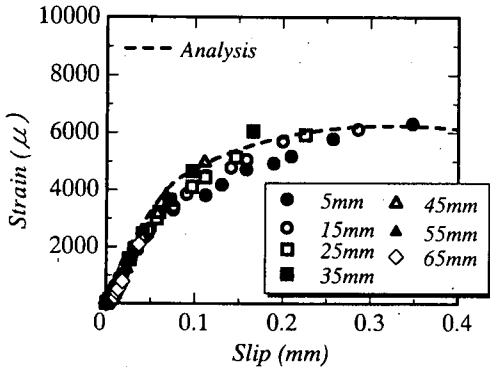


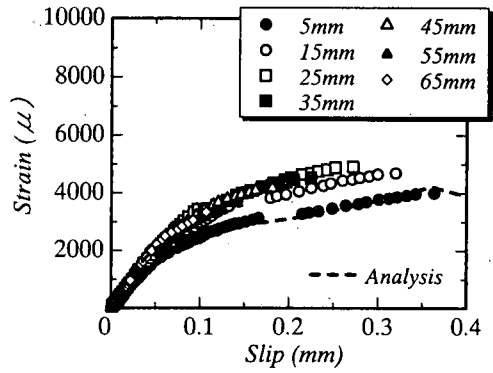
Fig.11 Comparison of Bond Stress - Slip Curves for Different Number of CFS Layers

の付着挙動の差異を考慮に入れて考える必要がある。

続いて、積層数が付着応力に及ぼす影響について考える。Fig.11に、CFSを1層貼りつけた供試体B-1、2層貼りつけたA-7、3層貼りつけたB-2の τ と s との関係を示す。供試体B-1とB-2は、荷重端から30mm付近までの付着応力が極端に小さかった。これはType-A供試体では見られなかった。Type-A



(a) B-1(1-Layer)



(b) B-2(3-Layer)

Fig.12 Strain – Slip Curves (3-Layer)

供試体は両引き試験, Type-B は片引き試験であり, 両者の試験方法が異なる. Type-B の試験方法では, セッティングの際に載荷端に面外方向の力が作用し, 接着層が試験前に既に損傷を受けて剥離しやすい状態になっていた可能性, また, 供試体が引張力方向と若干ずれて設置され, 引張力が斜めに作用し, 荷重端に近い位置でその影響が大きくなり, 付着強度が小さくなった可能性が考えられる. 本研究では, Type-B の先端部の付着応力が極端に小さかったのは, 上述のような理由によるものと考え, 供試体 A-7 は 5mm の位置, 供試体 B-1 と B-2 は 35mm の位置の結果を比較することとした. Fig.11 より CFS の積層数が増えるにつれ, τ - s 関係における傾きが大きくなる傾向にあると言える. また, CFS が 2 層の最大付着応力は 1 層の 1.7 倍程度, CFS が 3 層の付着応力は, 2 層と概ね等しい. つまり, CFS の積層数に比例して最大付着応力は大きくなる. 一方, 最大応力時のすべり量について観察してみると, 1 層の場合は, すべり量は 0.08mm 程度, 2 層および 3 層の場合は 0.1mm となっている.

Fig.12 は供試体 B-1, B-2 のすべりとひずみとの関係を示す. CFS の積層数 (剛性) が大きいほど, 同じすべりに対するひずみが小さくなることが明らかである.

鳥ら¹⁰⁾は, ヤング係数の異なる鉄筋とアルミニウムの付着特性を比較し, ヤング係数が小さいアルミニウムの方が同じすべり量に対するひずみが大きいため, アルミニウムの付着応力は鉄筋のそれより小さくなることを明らかにしている. CFS を接着した場合にも「ヤング係数」を「剛性」に置き換えて考えることにより説明できる. すなわち, CFS の剛性が小さいほど, 同じすべり量に対するひずみが大きくなるため, 付着応力は小さくなる.

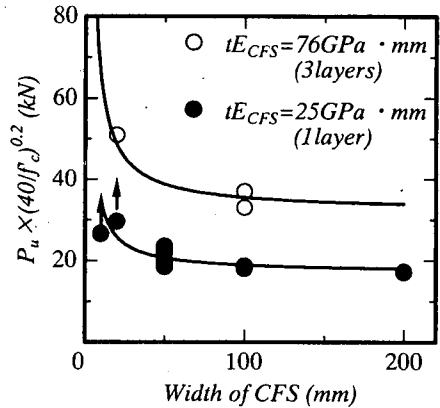


Fig.13 Influence of Width of CFS on Bond Strength

(3) 付着幅の影響

Fig.13 に CFS を 1 層および 3 層貼り付けた場合の付着強度と付着幅との関係を示す. 縦軸は幅 100mm に換算した荷重により表されている. 付着幅が 20mm 以下である供試体のコンクリートの圧縮強度は 24MPa 程度であり, 付着幅が 50mm 以上であるもの (平均で 40MPa) と大きく異なる. ここでは, 付着強度はコンクリート強度の 0.2 乗に比例する (Fig.4 参照) とし, コンクリートの圧縮強度が 40MPa である場合を基準に付着強度を補正した.

本実験では, 幅が 10mm である供試体 A-10 と 20mm である供試体 A-11 は, CFS が破断して破壊した. つまり, 付着の限界には達しておらず, 付着強度はこれ以上であると考えられる. CFS を 1 層貼り付けた場合, 付着幅が 50mm から 200mm までの付着強度は概ね等しいが, 付着幅が 20mm 以下では付着強度がそれより大きい. CFS を 3 層貼り付けた場合には, 20mm の場合の付着強度は, 100mm のそれよ

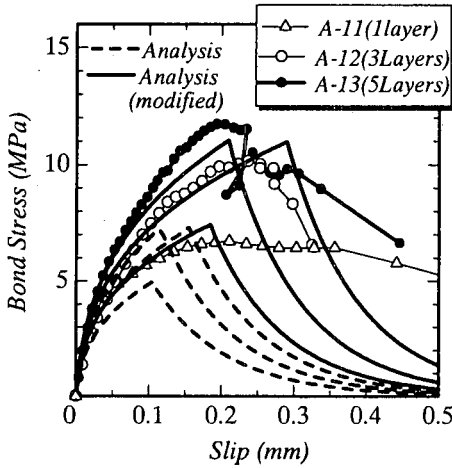


Fig.14 Influence of Width of CFS on Bond-Slip Relations

り 30%程度と大きい。

Fig.14 は、CFS の幅が 20mm で積層数が異なる供試体 A-11, A-12, A-13 の先端部での付着応力とすべりとの関係を示す。幅が 50mm と 100mm の場合と比較すると (Fig.11 参照), 付着応力の最大値が 1.5 倍程度となっていることが明らかである。なお, 先端から離れた位置では, 付着幅が 50mm や 100mm の場合と大きな差は認められなかった。

先に, 剥離状況を Photo1 に示した。接着層の剥離幅は, CFS の幅と一致するのではない。CFS は, CFS のまわりのモルタルをも部分的に破壊し剥離する。写真からは見て取れないが, CFS とコンクリートの境界に小さなひび割れも観察された。つまり, コンクリートの付着抵抗領域は, CFS の幅より若干広いものと思われる。特に, 付着応力が最も大きくなる先端部にその影響が大きく現れるものと思われる。

4. 付着応力-すべり-ひずみ関係の定式化

(1) 付着応力-すべり-ひずみ関係の定式化

ここで付着強度に大きな差異が認められなかった付着幅が 50 から 200mm の実験結果に基づき τ - s - ϵ 関係の定量化を行う。

先ほど述べたように, 付着応力は, すべりが大きいほど, ひずみが小さいほど大きくなる。付着応力-すべり関係の勾配は, CFS の剛性が大きくなるほど, すなわち, 同じすべりに対するひずみが小さいほど, より線形となる傾向にある (Fig.11 参照)。また, 付着強度はコンクリート強度の影響を受ける。そこで, 最大付着応力点までの付着応力-すべり-ひずみ関係は次式により表されると考える。

$$\frac{\tau}{f'_c{}^a} = \frac{f(s)}{g(\epsilon)} = \frac{\alpha s}{1 + \beta \epsilon} \quad (2)$$

ここに, f'_c はコンクリートの圧縮強度, $f(s)$ はすべりの影響を表す項, $g(\epsilon)$ はひずみの影響を表す項, である。 f'_c の指数部 a , $f(s)$ 中の係数 α および $g(\epsilon)$ 中の β は係数である。検討に用いた実験供試体のコンクリートの圧縮強度は 33.5MPa から 45.9MPa の範囲 (平均で 40MPa) であり, この範囲に対しては, コンクリート強度の差により, 付着応力-すべり-ひずみ関係に大きな違いが認められず, 係数 a を定量化することは難しい。そこで, 付着強度がコンクリートの圧縮強度の 0.2 乗に比例する結果 (Fig.4 参照) に基づき, 係数 a を 0.2 として考えることとした。係数 a を 0.2 として, 各供試体の破壊の起点となった位置に対する α および β を検討した結果, $\alpha=148$, $\beta=1000$ となった。

Fig.15 は, 剥離破壊の起点となった位置での最大付着応力と CFS の剛性との関係を示す。本研究では, 付着応力の最大値を次式により与えることとした。

$$\tau_{\max} = 9.1 \cdot f'_c{}^{0.2} \cdot E_{CFS} \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

$$(\tau_{\max} \leq 3.49 f'_c{}^{0.2} \text{ MPa})$$

なお, Fig.15 に実線で示す式(3)の計算値は, コンクリートの圧縮強度を 40MPa として求めたものである。

先に述べたように, 付着応力は位置により異なる (Fig.9(a)参照)。Fig.16 は, 付着応力の最大値とその発生位置との関係を示すものである。付着応力の最大値は, 破壊の起点となった位置から 30mm までほぼ直線的に低下し, その後は, 一定となる傾向にあった。そこで, 本研究では, 付着応力の最大値を次式により表すこととした。

$$\tau_{\max-i} = \tau_{\max} \left(1 - \frac{x}{60} \right) \quad (4)$$

$$(\tau_{\max-i} \geq 0.5 \tau_{\max})$$

ここに, $\tau_{\max-i}$ は各位置での付着応力の最大値 (MPa), τ_{\max} は剥離破壊の起点となる位置での最大付着応力 (MPa), x は剥離破壊の起点となる位置からの距離 (mm) である。式(4)は, 破壊の起点となる位置が式(3)により得られる最大付着応力に達した後, その位置から x mm 離れた位置で最も大きくなり得る付着応力を与えるものである。なお, 式(4)に示す付着強度は, 80mm の区間に適用するものである。すなわち,

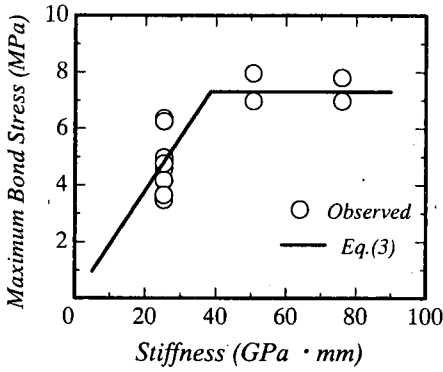


Fig.15 Relationships between Max. Bond Stress and Stiffness of CFS

付着長が 200mm である場合、付着応力の最大値 (式 (3)) は、0mm, 80mm, 160mm の位置で発生し、0 から 30mm, 80 から 110mm, 160 から 190mm の範囲で付着強度が直線的に低下し、30 から 80mm, 110 から 160mm, 190 から 200mm の範囲の付着強度は式 (3)により得られる最大値の 50%で一定となる (Fig.17 参照)。この仮定は、実験結果に基づいたものである。しかし、本研究では、CFS を 1 層貼り付けた場合のような剥離の伝播 (Fig.6(b), Fig.8(a)参照) を観察するに十分な付着長を有する CFS の剛性が大きい場合の付着試験は行っていない。今後、付着長を長くした CFS の剛性が大きな場合の実験を行い、この仮定の妥当性を確認する必要がある。なお、本論文で提案する付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた数値計算において、付着応力の最大値が一定となる区間の長さを、40 から 120mm まで変化させても、剥離耐力に差異は現われなかった。

次に軟化域の定式化を考える。軟化域のばらつきは大きく、剛性の影響、ひずみの影響は特に認められなかった。最終的に、軟化域の付着応力は次式により表すこととした。

$$\tau = \tau_{\max-i} \cdot e^{-10(s-s_0)} \quad (5)$$

ここに、 s はすべり (mm)、 s_0 は最大付着応力時のすべり (mm) である。

付着応力とすべりとの関係を表す Fig.9 と Fig.11 の破線、すべりとひずみとの関係を表す Fig.12 の破線は、式(1)から(5)を用いた計算結果を示す。実験値と概ね一致していることが明らかである。

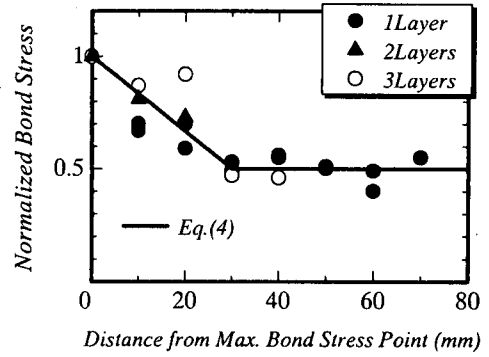


Fig.16 Reduction of Max. Bond Stress

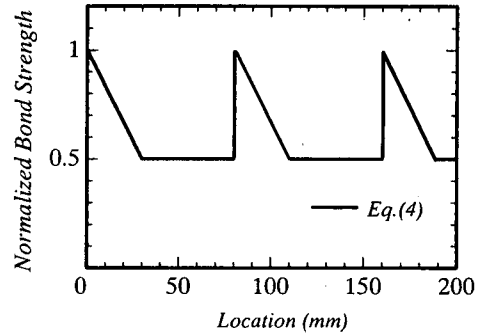


Fig.17 Bond Strength Distribution

(2)付着幅の影響の考慮

ここで幅が狭い場合について考える。付着幅が 20mm である場合の τ と s の関係を示す Fig.14 における破線は、式(1)から(5)を用いて計算した τ と s の関係を示すが、実験値は計算値より剛性が大きく、付着応力の最大値が 1.5 倍程度となっている。本実験結果に対しては、係数 α の値を 210、最大付着応力を式(3)の約 1.5 倍とすると実験値と計算値は概ね一致した (Fig.14 の実線)。しかし、軟化曲線が実験値と計算値で大きく異なる。定式化にあたってはさらなる実験結果の蓄積が必要である。

先に述べたように、コンクリートの付着抵抗領域は CFS の幅より若干広いものと思われる (3章(3))。付着幅の影響を考慮する簡単な方法として、付着応力-ひずみ-すべり関係は幅によらず同一とし、付着応力より付着力を求める際に、CFS そのものの幅ではなく、CFS の幅に CFS 両端のコンクリートの抵抗領域を考慮し、見かけ上、付着幅を大きくした幅 (以下「有効幅」)を用いる方法がある。この場合、微小要素の付着力は次式により表される。

$$\Delta P = \tau(b + 2\Delta b)\Delta x \quad (6)$$

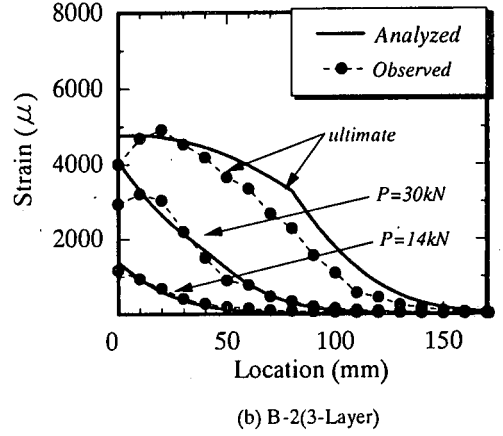
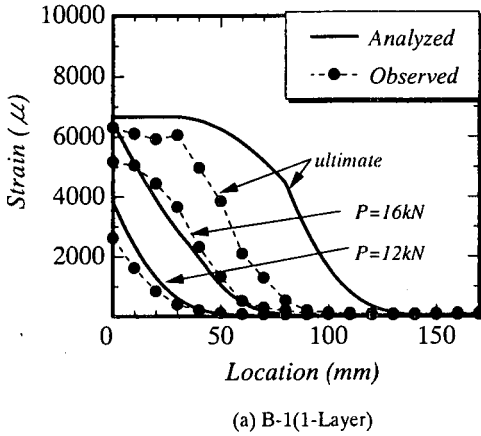


Fig.18 Comparison on Strain Distribution

ここに、 ΔP は微小要素の付着力、 τ は付着応力、 b はCFSの幅、 Δb はCFS近傍のコンクリートの付着抵抗幅(片側)、 Δx は微小要素の長さ、である。

本研究では、CFSの幅によらず Δb は一定であると仮定し、付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた数値計算より求めた付着強度と実験値が一致する Δb を求めた結果、3.7mmとなった(Fig.13中の実線)。この長さは、実験供試体に観察されたCFS側面のコンクリートの破壊領域の大きさ(5mm程度)に概ね一致している。

本論文では、本モデルを用いた数値解析において、全て $\Delta b=3.7\text{mm}$ として計算する。

(3)実験結果との比較

ここで、式(1)から式(5)を用いて計算した数値計算(付録参照)と、実験により得られた付着強度、ひずみ分布、との比較を行う。

a)付着強度の比較

先に示したFig.3中の実線は、本数値解析により求めた最大荷重を示すものである。解析値は、CFSの剛性が $25\text{GPa}\cdot\text{mm}$ 、 $115\text{GPa}\cdot\text{mm}$ である場合に関して示している。付着長が短い場合を除き、概ね実験結果の傾向を評価できていると言える。付着長が短い場合には、自由端でのすべりが大きいものと思われるが、本数値計算では、自由端ですべりが発生し、付着破壊する場合を考慮できない。このことが実験値との差を生んだものと考えられる。なお、剛性が $25\text{GPa}\cdot\text{mm}$ の場合は概ね150mmから、剛性が $115\text{GPa}\cdot\text{mm}$ の場合は概ね200mmから、それ以上付着長が長くなっても付着強度は大きくならなかった。

b)ひずみ分布の比較

Fig.18は実験供試体B-1とB-2のひずみ分布の実験値と計算値を比較したものである。供試体B-1に

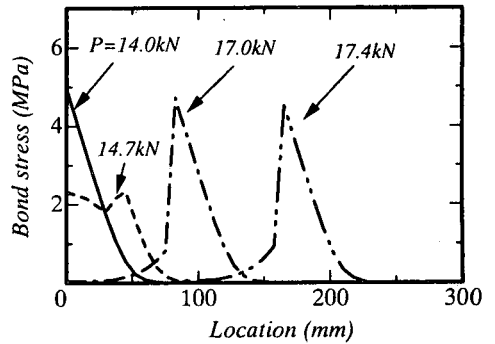


Fig.19 Bond stress distributions in analysis

関しては、荷重が約12kN、約16kNおよび終局直前のひずみ分布を、供試体B-2に関しては荷重が約14kN、約30kNおよび終局直前のひずみ分布を比較している。供試体B-1の終局直前に差異が認められるが、概ね実験値と計算値は一致している。本解析は、積層数が多いほど、最大荷重時のCFSのひずみが小さく、ひずみが発生している領域が長くなる傾向を表現できているのである。終局荷重は、供試体B-1とB-2の終局荷重が20.6kN、39.4kNであるのに対し、解析値は、17.4kN、40.0kNであり、ほぼ一致する結果が得られた。

c)付着応力分布の比較

Fig.19は供試体B-1の付着応力分布の計算値を示す。先に示した実験結果(Fig.8)、ならびに、実験結果に基づき描いた概念図(Fig.10)の傾向と良く一致している。すなわち、作用荷重の増加とともに付着応力の分布領域が奥へと進展していく性状を表現できている。

5. 付着強度式の構築

(1) 付着強度式の定式化

ここで付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた数値計算に基づき付着強度式の構築を行う。本研究では、付着長が極端に短くなく自由端でのすべりが無い場合、かつ、コンクリートの圧縮強度が45MPaより小さい場合を対象とする。

付着強度は、有効付着長 (L_e) と有効付着長内の付着応力 (τ) を用いて以下のように表される。

$$P_u = (b + 2\Delta b)L_e \int_0^{L_e} \tau dx \quad (7)$$

ここに、 P_u は最大耐力、 b は付着幅、 Δb はコンクリートの抵抗領域 (=3.7mm) である。

今、簡単のため、有効付着長内の付着応力の平均値を用いると式(7)は次式により表される。

$$P_u = (b + 2\Delta b)L_e \bar{\tau} \quad (8)$$

Fig.20 は、本数値解析より得られた平均付着応力と剛性との関係を示す。平均付着応力は剛性がほぼ40GPa・mmまで直線的に増加し、それ以降一定となっている。また、平均付着応力は、コンクリート圧縮強度の0.2乗に比例するものであった。平均付着応力は次式により表される。

For $tE_{CFS} \leq 38.4GPa \cdot mm$

$$\bar{\tau} = 2.68 \cdot f_c^{0.2} \cdot tE_{CFS} \times 10^{-5} \quad (9)$$

For $38.4GPa \cdot mm \leq tE_{CFS}$

$$\bar{\tau} = 1.03 f_c^{0.2} \quad (10)$$

Fig.21 は有効付着長と剛性との関係を示す。有効付着長は、コンクリート強度の大きさの影響を受けず、ほぼ剛性の0.4乗に比例するものであった。有効付着長は次式により表される。

$$L_e = 1.89(tE_{CFS})^{0.4} \quad (11)$$

最終的に付着強度は次式により表される。

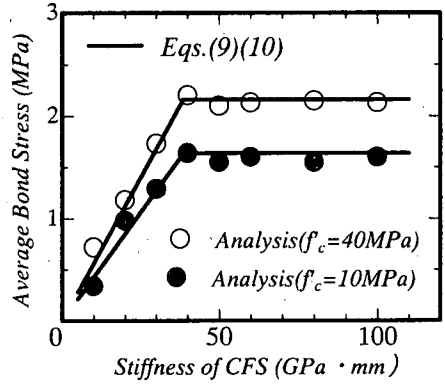


Fig.20 Relationships between Average Bond Stress and Stiffness of CFS

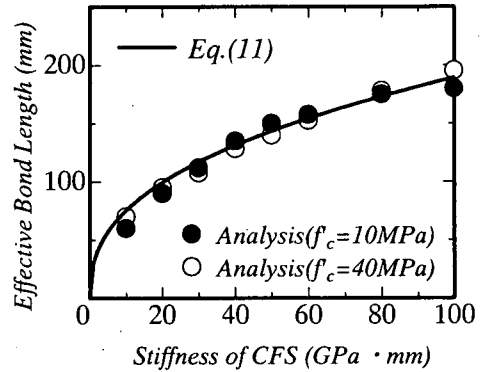


Fig.21 Relationships between Effective Bond Length and Stiffness of CFS

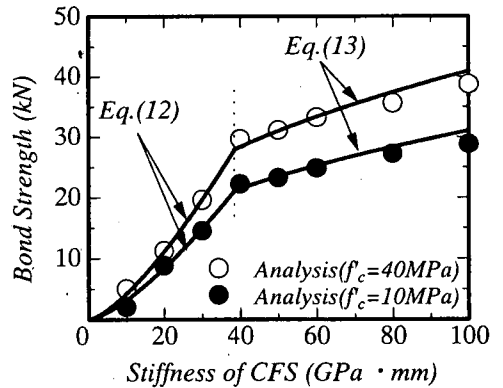
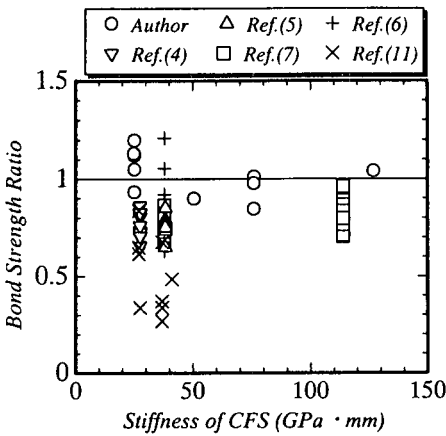
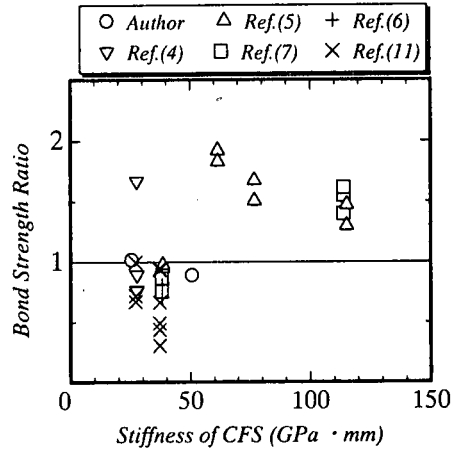


Fig.22 Relationships between Bond Strength and Stiffness of CFS

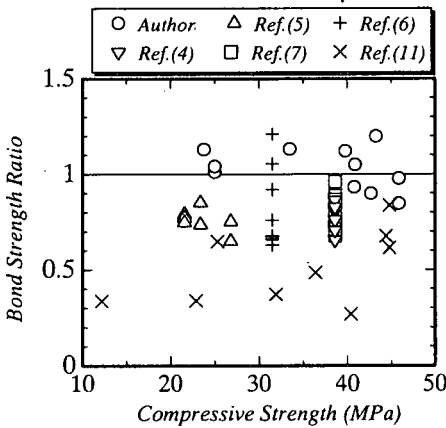


(a) For actual bond length greater than predicted effective bond length

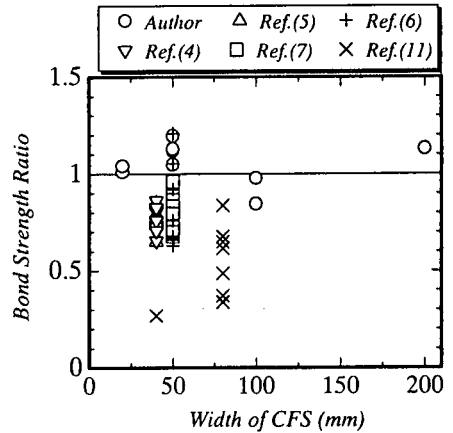


(b) For actual bond length less than predicted effective bond length

Fig.23 Relationships between Bond Strength Ratio and Stiffness of CFS



(a) Influence of compressive strength



(b) Influence of width of CFS

Fig.24 Influences of Concrete Compressive Strength and Width of CFS on Bond Strength Ratio

For $tE_{CFS} \leq 38.4GPa \cdot mm$

$$P_u = \bar{\tau} L_e (b + 2\Delta b) \quad (12)$$

$$= 5.06 f'_c{}^{0.2} (tE_{CFS})^{1.4} (b + 2\Delta b) \times 10^{-5}$$

For $38.4GPa \cdot mm \leq tE_{CFS}$

$$P_u = \bar{\tau} L_e (b + 2\Delta b) \quad (13)$$

$$= 1.95 f'_c{}^{0.2} (tE_{CFS})^{0.4} (b + 2\Delta b)$$

Fig.22 は、数値解析により得られた付着強度と式(12)と(13)により求めた付着強度との比較を示す。式

(12)と(13)により得られる付着強度は、数値解析結果と一致する。

(2)実験結果との比較

ここで、付着強度式の適用の妥当性の確認を既往の実験結果との比較により行う。用いた実験データは、本実験結果と3章で用いた文献4)から7)の結果、そして、文献11)に示される2方向炭素繊維シートへの付着試験結果である。Fig.23 に、実験により得られた付着強度と計算により得られた付着強度の比(以下「強度比」と)剛性との関係を示す。本提案式は、実際の付着長が有効付着長より長い場合に適用できる。実際の付着長が有効付着長の計算値(式(9))

より短い場合には、簡易的に、式(8)により求めた平均付着応力に実際の付着長と有効幅を掛けて求めたものである。

まず、付着長が計算により求めた有効付着長より長い場合に注目する。Fig.23(a)より、1方向炭素繊維シートの実験結果(図中の×印以外)に関しては、実験値と計算値は概ね一致していると言える。1方向炭素繊維シートに対する強度比の平均は0.85、2方向炭素繊維シートの実験データ¹¹⁾に対する強度比の平均は0.51であった。1方向炭素繊維シートに対する結果をもう少し詳しく見ると、著者らの実験結果とその他の実験結果とでは強度比が異なる。すなわち、著者の実験結果に対しては、強度比の平均が1.0であり、本付着強度式は実験結果を精度良く予測できている。しかし、他の実験結果に関しては強度比の平均が0.8であり、本付着強度式は若干危険側の評価を与える。この理由として、破壊モードの差異が考えられる。

岳尾ら⁹⁾は、2つの破壊形式が観察されたことを報告している。すなわち、一つは、コンクリート表層部の凝集破壊、もう一つは、含浸接着剤、プライマー間の界面破壊である。著者らの実験では、Photo1に示したようなコンクリート表面の破壊形式が観察されており、本実験結果と他の実験結果の破壊形式が異なっていた可能性がある。今後、コンクリート表面の処理状態および破壊形式の差異に着目した研究が必要である。また、2方向炭素繊維シートの付着強度が、1方向炭素繊維シートに比べ極端に小さい理由を本論文で説明することも難しく、今後の検討課題としたい。

続いて、付着長が計算により求めた有効付着長より短い場合に注目する。Fig.23(b)より、付着長が短い場合には、剛性が大きい場合、強度比が1.0より大きくなる傾向にあり、ここで用いた簡易的な方法により予測することには無理がある(1方向炭素繊維シートに対する強度比の平均は1.22、2方向炭素繊維シートに関する強度比の平均は0.69)。今後、付着長が短い場合の付着強度の評価方法を考える必要がある。

Fig.24は、付着長が計算により求めた有効付着長より長い場合における強度比とコンクリート強度との関係、および、強度比とCFSの幅との関係を示す。強度比に及ぼすコンクリート強度や幅の大きさの影響は見られない。すなわち、本付着強度式はCFSの幅およびコンクリート強度の影響を評価できる。

(3)付着強度式の適用方法

CFSによるコンクリートの補強方法は、部材の引

張力作用面に接着する曲げ補強、部材の側面に接着もしくは巻き付けるせん断補強に大別されるが、本付着強度式は、これら全てに適用できるものではない。すなわち、前者の場合のように、部材が変形することによりCFSに応力勾配が発生し、Fig.1のような付着試験とは応力状態が大きく異なる場合には、本付着強度式は適用できない。本付着強度式の適用は、後者のような場合に限定される。ただし、この場合も、貼りつけたCFSの自由を機械的に定着する場合や、CFSを巻き付ける場合には、機械的定着部や巻き付けた隅角部での境界条件が、Fig.1に示した試験方法とは異なるので、その影響を別途考慮する必要がある。本付着強度式のその他の使用方法として、Fig.1に示したような付着試験により得られた付着強度に工学的な評価を下す場合が考えられる。すなわち、Fig.1に示したような付着試験により、樹脂や補強材の選定、さらには、表面処理方法や施工時の環境条件が付着強度に及ぼす影響を確認する際に、本付着強度式は一つの基準値を与える。

今後、本付着強度式を用い、はり部材の側面に接着されたCFSの剥離耐力¹²⁾を求める手法を、報告したいと考えている。

6. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) CFSの付着強度は、剛性が大きいほど大きくなる。付着長を長くすると付着強度は増加するが、ある長さ以上になるとほぼ一定となる。これは、付着応力の発生域が付着長の増加とともに大きくなることによる。付着応力の発生域(有効付着長)はCFSの剛性が大きいほど長い。その長さは、CFSの剛性が25GPa・mmで100mm程度、CFSの剛性が115GPa・mmで200mm程度である。
- (2) 付着強度はCFSの幅の影響を受ける。影響の度合は、CFSの幅が狭いほど大きい。また、CFSの幅が狭いほど付着強度は大きくなる。
- (3) 付着強度は、コンクリート強度の増加とともに緩やかに大きくなるものであり、その値は、コンクリート圧縮強度の0.2乗に比例する。
- (4) 付着応力とすべりとの関係は、CFSの剛性の大きさにより異なる。すなわち、CFSの剛性が大きいほど同じすべりに対するひずみが小さくなり、付着応力が大きくなる。また、付着応力の最大値は、剛性が大きいほど大きくなるが、上限値が存在する。その値は、コンクリート強度が40MPa程度の場合、約7.4MPaであった。
- (5) 付着応力-すべり-ひずみ関係を、コンクリート強

度, CFS の幅を考慮して構築した. この付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた数値解析により, CFS の付着挙動をシミュレーションできることを明らかにした.

- (6) 数値解析に基づき構築した付着強度式は, コンクリートの圧縮強度, CFS の幅, CFS の剛性を考慮できるものであり, 適用範囲を満足し, かつ, コンクリートの表層が破壊する場合の実験結果を精度良く予測できる.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 北海道大学大学院教授 角田典史雄博士, ならびに, 日鉄コンポジット株式会社 小林朗氏に貴重なご助言を賜りました. さらに, 北海道大学学生 森脇涉君 (現 戸田建設株式会社), 逆井温子君 (現 旭化成ホームズ株式会社) に多大な助力を得ました. ここに謝意を表します. また, 本研究は, 文部省科学研究費 (奨励研究 (A): 課題番号 10750350) を受けて行ったものであります.

付録

本研究で構築した付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた計算の流れを以下に示す (Fig.A 参照).

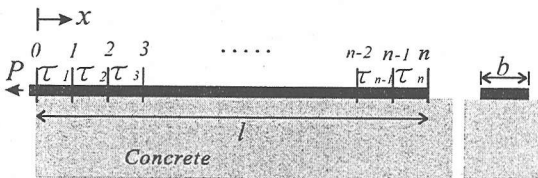


Fig. A Definition of variables

- (1) x_0 地点のすべり S_0 を与える.
- (2) x_0 地点のひずみ ε_0 を仮定する.
- (3) 区間 0-1 における付着応力 τ_1 を式(2)より求める.
- (4) 付着応力 τ_1 が, 式(3)により計算される最大値よりも大きければ, 式(5)により付着応力 τ_1 を再計算する.
- (5) x_1 地点のひずみ ε_1 を式(1)より求める.
- (6) x_1 地点のすべり S_1 を, すべり S_0 から区間 0-1 のひずみの積分値を差し引くことにより求める.
- (7) (5)(6)で求めた S_1 および ε_1 により区間 1-2 における付着応力 τ_2 を式(2)より求める. この場合, (4)において求めた区間 0-1 の付着応力 τ_1 が軟化域に達していれば, ここで求めた付着応力 τ_2 と式(4)により計算されるより最大値 (τ_{max-1})

と比較する. もし, 付着応力 τ_2 が τ_{max-1} よりも大きければ, 式(5)により付着応力 τ_2 を再計算する.

- (8) $x=80\text{mm}$ までの区間に対し, (5)から(7)に示した計算方法に従い各位置のすべり, ひずみ, 付着応力を求める. 定着長が $x=80\text{mm}$ より長い場合には, x が 80mm の倍数位置 ($160, 240, \dots$) に関しては, 式(3)により計算される最大値, その他の位置に関しては, 式(4)により計算される最大値との比較を行いながら, 上述の計算方法に従い, 各位置の付着応力, すべり, ひずみを求める.
- (9) $x=l$ の位置までの付着応力が求まったら, 各位置のひずみを積分し全すべり (S^*) を求める.
- (10) (1)で仮定したすべり S_0 と S^* を比較し, 一致していれば, (1)で仮定したすべりに微小すべりを加え, 次のステップへと進む. もし, 一致しない場合は, (2)に戻り再度ひずみを仮定し, $S=S^*$ となるまで計算を繰り返す.
- (11) 最終的に, $x=l$ 地点においてひずみが発生した時点で計算を終了させる. これは, 本研究で構築した付着応力-すべり-ひずみ関係が, 自由部でのすべりが発生する場合においてその適用性が確認されていないことによる. なお, 引張力 P は, 各地点の応力 $\tau_{i=1,n}$ を用い次式より計算される.

$$P = (b + 2\Delta b) \int_0^l \tau_i dx$$

ここで, $\Delta b=3.7$ である.

参考文献

- 1) Yasuhiko Sato, Tamon Ueda, Yoshio Kakuta and Sadamu Ono : Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber Sheet, Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, vol.1, pp.499-506, 1997.
- 2) 例えば, コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像, コンクリート技術シリーズ 28, 土木学会, 1998.
- 3) コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像, コンクリート技術シリーズ 28, 土木学会, pp.1-249-I-258, 1998.
- 4) 木村耕三, 小幡克朗, 大野了: 炭素繊維シートとコンクリートとの付着・定着性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.41B, pp.527-536, 1995.
- 5) 岳尾弘洋, 松下博道, 牧角龍憲, 長島玄太郎: CFS 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, 19 卷 2 号, pp.1599-1604, 1997.
- 6) 東燃(株): 炭素繊維シートとコンクリートの定着強度試験, 1994.
 - 7) 清水建設(株)技術研究所: PCボックスカルバート補強材/炭素繊維シートの付着強度試験, 1994.
 - 8) 出雲健司, 浅水俊博, 佐伯昇, 志村和紀: アラミドおよび炭素繊維シートの付着特性, コンクリート工学論文集, 第9巻, 第2号, pp.1-7, 1998.
 - 9) 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, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, 日本コンクリート工学協会北海道支部, pp.75-80, 1996.
 - 10) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートの埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.165-174, 1987.
 - 11) 出雲健司: 続繊維シートによる鉄筋コンクリート部材の補強に関する研究, 北海道大学博士論文, 1999.
 - 12) Yasuhiko Sato, Tamon Ueda and Yoshio Kakuta and T. Tanaka: Shear Reinforcing Effect of Carbon Fiber Sheet Attached to Side of Reinforced Concrete Beams, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Second International Conference, pp.621-628, 1996.
 - 13) 上原子昌久, 下村匠, 丸山久一, 西田浩之: 連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.197-208, 1999.

(1999.4.27 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON BOND MECHANISM OF CARBON FIBER SHEET

Yasuhiko SATO, Yasuyuki ASANO and Tamon UEDA

The aim of this study is to clarify the bond mechanism of Carbon Fiber Sheet (CFS) attached to concrete using epoxy resin and to propose the numerical methods which can simulate the bond behavior of CFS and its bond strength. A bond-slip-strain relation for CFS has been developed based on the bond characteristic which was clarified by means of experimental observation. A numerical method using the bond-slip-strain relation can simulate the actual bond behavior. This paper also reports that a bond strength equation developed by the numerical analysis can predict the experimental results with good accuracy.