

連続繊維シートとコンクリートの付着強さの算定

出雲 健司¹・佐伯 昇²・大沼 博志³

¹正会員 工博 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フェロー員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

³フェロー員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

アラミド繊維シート、カーボン繊維シートとコンクリートの付着挙動ならびに付着強さを解明するために、最も簡単な一軸引張応力下での実験および非線形有限要素解析を行い、連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式の構築を行っている。実験のパラメータは、繊維の種類、コンクリートの強度、シートの付着長と幅を設定し、供試体の破壊パターンはコンクリートの表面数mmから剥離する破壊が最も付着機能として良好と考え、このパターンを取り扱っている。実験と解析の結果、付着強さがコンクリートの強度に依存すること、付着長はある一定以上に越えると付着強さはそれ以上大きくならず、ある有効付着長が存在すること、実験の結果より、シート幅はある一定以下なると付着強さに比例せず、単位幅当たりの付着強さが大きくなることなどを明らかにしている。

Key Words : *aramid fiber sheet, carbon fiber sheet, bond strength between fiber sheets and concrete, effective bond length, concrete strength, non-linear finite element methods*

1. はじめに

社会基盤を形成する上で、重要な役割を果たしているコンクリート構造物の劣化や損傷が近年見受けられるようになってきている。これらに対処するために、既存のコンクリート構造物を補強する工法として、連続繊維シートを用いる工法が注目を集めている。この工法は比較的簡便で、同じような鋼板を用いた工法に比べて死荷重に対する影響が少ないなどの利点がある。しかし、連続繊維シートとコンクリートの付着が複雑であり、筆者らの既報の研究^{1), 2), 3)}や既往の研究^{4), 5), 6), 7), 8), 9)}でも数多くの研究などがなされているが、シートの応力伝達など不明な点が多く、連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式が確立されているとは言えない。

既往の研究^{4), 9)}は数多くの実験がなされており、ある一定以上のシートの付着長になると、連続繊維シートとコンクリートの付着強さがほぼ一定になる傾向を示しているが式の構築には至っていない。既往の研究⁶⁾は本研究でも使用しているシートの付着長が付着強さに有効的に働く付着長、すなわち、有効付着長を考慮し、連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式を構築している。しかし、付着破壊がコンクリートの表層部より発生しているため、本研究ではコンクリートの強度に関する項、

特に低強度の場合の検討を行い、その項を考慮している。

本研究では最も簡単な一軸引張応力下で連続繊維シートとコンクリートの付着挙動と付着強さの実験と有限要素解析により検討を行い、最終的には連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式の構築を行っている。なお、本研究では特にことわりがない場合、全て一層貼りについて述べている。

2. 実験概要

(1) 使用材料

本研究で使用した炭素繊維シート（以下、CFS）とアラミド繊維シート（以下、AFS）の物性値を表-1に示す。また、この物性値は「JIS K 7073」に準拠して試験を行った値である。シートの厚さは目付量/単位体積重量より算定した一方当たりの理論値である。使用した連続繊維シートはB96, B97, B98の3シリーズに分かれており、各シリーズごとにCFSとAFSの2種類がある。B96, B97シリーズのシートはCFS, AFS共に縦糸と横糸がそれぞれ1:1の割合で繊維が入っている2方向連続繊維シートである。2方向シートを使用したの

表-1 シート物性値

シリーズ	B96		B97		B98	
	シートの種類	CFS96	AFS96	CFS97	AFS97	CFS98
全目付量 (縦:横) (g/m ²)	400 (200:200)	400 (200:200)	600 (300:300)	470 (235:235)	300	248
比重	1.79	1.39	1.80	1.39	1.80	1.39
厚さ(mm)	0.112	0.144	0.167	0.169	0.167	0.178
引張強度(N/mm ²)	3879	2493	3115	2134	4049	2865
引張弾性率(kN/mm ²)	242	86	222	73	247	75
破断伸度(%)	2.1	3.1	1.6	3.3	1.6	3.5

表-2 接着剤の規格値

試験項目	試験方法	規格値
比重	JIS K 7112	1.16
圧縮降伏強度(N/mm ²)	JIS K 7208	75
圧縮弾性係数(N/mm ²)	JIS K 7208	2100
曲げ強度(N/mm ²)	JIS K 7203	65
引張強度(N/mm ²)	JIS K 7113	45
引張せん断強度(N/mm ²)	JIS K 6850	15

表-3 コンクリートの物性値

シリーズ	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
B96	12.3	1.3	14700
	25.3	2.1	22800
	44.8	2.9	27100
B97	22.9	1.7	22600
	31.9	2.5	24500
	44.4	2.8	28000
B98	39.8	2.7	28600

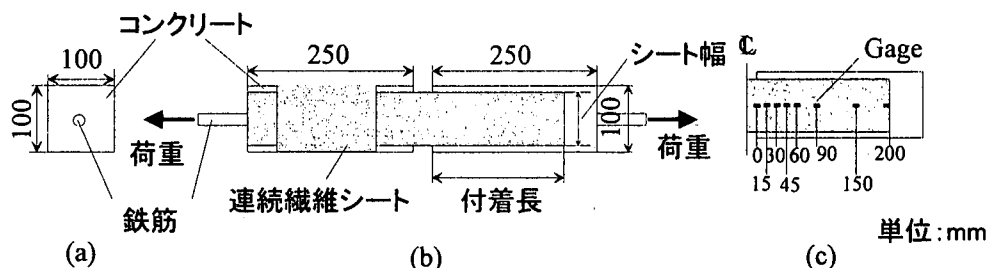


図-1 供試体の概略図とゲージの位置

は桁のウェブにシートを接着し、横糸はせん断補強筋として、縦糸は軸方向にプレストレスを導入することを想定しているためである。また、B98シリーズではCFS、AFS共に一方のみ繊維が入っている一方連続繊維シートである。

使用したプライマーと接着剤は共にエポキシ系の樹脂である。接着剤の規格値を表-2に示す。

各シリーズのコンクリートの物性値を表-3に示す。B96、B97シリーズでは3種類の強度のコンクリートを、B98シリーズでは1種類の強度のコンクリートを使用した。また、コンクリートの引張強度は割裂試験より算定している。

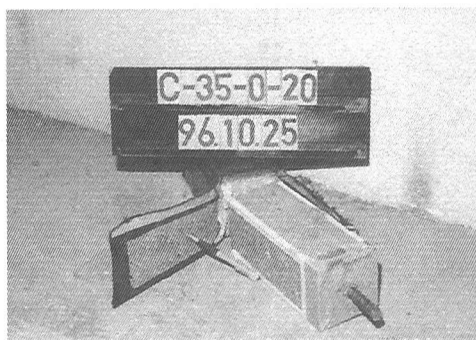
(2) 供試体の形状

使用した供試体の概要を図-1に示す。シートの接着法はまずコンクリートの接着面をディスクサンダーで削って剥離剤などを除去した後にプライマーを塗布して約一

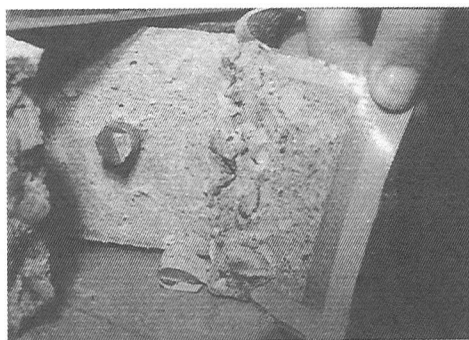
日養生を行った。その後、エポキシ系の接着剤を使用して、シートを接着し、一週間養生した後に実験を行った。シートは全てコンクリート部材の両面に一枚ずつ接着した。なお、シートの剥離を安定に起こさせるために未定着区間を設けている。

実験は、図-1(a)、(b)に示されるように、埋め込まれた鉄筋を引張ることによってシートに引張力を与えて行った。なお、鉄筋は中央部分で切断されており、鉄筋による分担はなくしている。片側でのみ破壊するように一方を定着端としてシートを端まで接着し、さらにその上からシートを巻いて補強し、この部位からの破壊をなくした。また、ひずみゲージの位置を図-1(c)に示す。載荷は変位制御で行い、載荷速度を0.5mm/minとした。

試験条件は、表-1に示すとおりシートの種類が6種類、コンクリートの圧縮強度が表-3の通りのものを使用し、シートの付着長が50、100、150、200mmの4段階、シートの幅は40、80、160mmの3段階とした。



(a)CFS96, 強度 2.9N/mm^2 , シート幅 80mm
付着長 50mm



(b)AFS96, 引張強度 1.3N/mm^2 , シート幅 80mm
付着長 200mm

図-2 一軸引張試験供試体の破壊状況

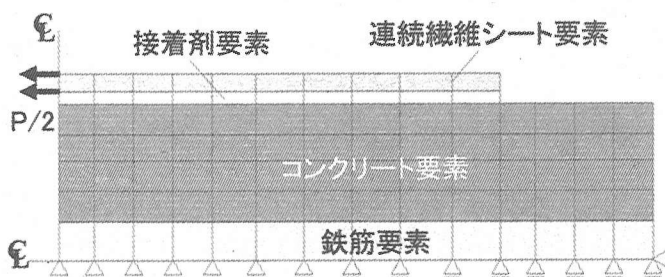


図-3 付着の一軸引張試験のメッシュ分割概要図

3. 実験結果

(1) 破壊パターン

図-2に、一軸引張による付着試験の供試体破壊状況を示す。この図はいずれも代表的なもので、シートの種類、コンクリートの圧縮強度、シートの幅、付着長が違う供試体の破壊状況の写真である。本研究では、破壊パターンがこれらに示されるように、シートの種類の違い、コンクリートの引張強度の違い、シートの幅、付着長の違いにかかわらず、コンクリートの表面が数mmとれる状態でシートが剥離して破壊に至ったものを最も付着機能として良好と考えている。その理由を以下に示す。

本試験による破壊パターンとして、以下の破壊パターンが考えられる。

- 1) 鉄筋とコンクリートの付着破壊
 - 2) コンクリート表面からのシートの剥離破壊
 - 3) コンクリートと接着剤の界面からシートの剥離破壊
 - 4) 接着剤の破壊
 - 5) 接着剤と連続繊維シートの界面からのシートの剥離破壊
 - 6) 連続繊維シートの破断による破壊
- 1)の破壊は本研究の趣旨から外れ、3), 5)は接着不良などが考えられ、4), 6)は補強材が先に破壊してしまう

ので、補強材としては不適切な選定と考えられる。したがって、2)の破壊が最も付着機能として有効であると考えられるので、本研究ではこの破壊パターンのみ扱うこととした。

(2) 付着挙動のシュミレーション

a) 解析概要

ここでは、シートのひずみ分布を有限要素解析でシュミレーションすることを目的としている。

解析供試体は供試体の対称性を考えて、図-1(b)に示す供試体の右側の上半分を解析対象とした。また、解析供試体を図-3に示すように、要素分割してモデル化した。解析方法は材料の非線形性を考慮し、外力としては連続繊維シートの剥離現象を表現するために、強制変位を与えた。要素は全て等方性材料で、図に示されるように、コンクリート要素と連続繊維シート要素の間に接着剤の要素を設けた。接着剤要素の厚さは既往の研究⁹⁾を参考に 0.1mm とした。また、接着剤要素、連続繊維シートはそれぞれのシートの物性値を使用して、完全弾性体として扱った。本解析はコンクリートの表面で破壊するため、鉄筋要素も完全弾性体として扱っている。また、連続繊維シート要素と接着剤要素、接着剤要素とコンクリート要素およびコンクリート要素と鉄筋要素のそれぞれの界面は一体で挙動するとして解析を行った。

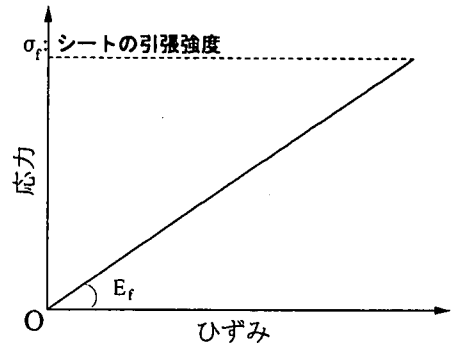
各材料は図-4に示される引張応力-ひずみ関係を使用し、それぞれの材料の物性値を使用した。なお、接着剤要素のポアソン比を0.4とした。

図-4(c)に示されるように、シートがコンクリートの表面で剥離するのを表現するために、シート剥離時のコンクリートのひずみをコンクリートの付着限界ひずみ $\epsilon_{p,c}$ と定義した。そのひずみに達したときにシートが剥離し、応力を受け持たないとした。供試体の破壊の判定は連続繊維シートが接着されているコンクリートの要素が全て付着限界ひずみに達した時点とした。また、この時のコンクリートの応力-ひずみ関係はコンクリートの単体ではなく、連続繊維シートが接着されているときのコンクリートの応力-ひずみ関係である。ただし、コンクリートの付着限界ひずみ $\epsilon_{p,c}$ を実験的に求めるのが難しいので、実験で測定が容易なシートのひずみからシートが剥離するときのひずみ、つまり、シートの付着限界ひずみ $\epsilon_{p,f}$ を算出し、シートがそのひずみに達したときに、コンクリートのひずみが付着限界ひずみ $\epsilon_{p,c}$ に達したと推定した。その推定方法を以下に示す。

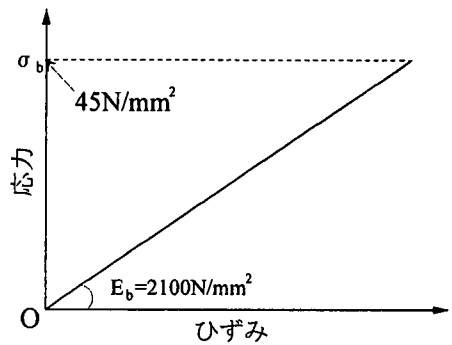
図-5に、縦軸にシートのひずみ、横軸に図-1(c)に示されるひずみゲージの位置をとり、各荷重ごとのシートのひずみ分布を示す。この図は代表例で、そのほかの供試体もほぼ同様な分布傾向を示している。

ゲージ位置のプラス方向に応力が伝達しているので、シートとコンクリートの付着が局部的に見ても様な付着力を持ち得るならば、ゲージ位置のプラス方向にひずみが減少されていく筈である。しかし、図-5に示される荷重42kNの時などの場合、ゲージ位置で見て大きな値にあるゲージがゲージ位置0の時の値より大きくなるような形になっているところがある。コンクリート中の骨材が不均一に配置されているなどの理由により、局部的に見て必ずしもコンクリートと連続繊維シートの付着力は一定になり得ない。これは、局部的に見てコンクリートの端部表面が一様な付着挙動、変形挙動をしないことによるものと、コンクリート端部で部分的に付着切れが生じたことなどによるものと考えられる。

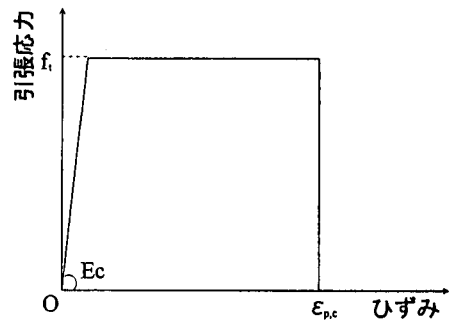
図-6に図-5に対応するように表記したひずみ分布の概略図を示す。供試体に変位制御で荷重を与えていくと、図に示される矢印のようにシートのひずみ分布が(1) 載荷の初期状態→(2) 最大荷重直前の状態→(3) 終局直前の状態へと移行していく。(2)→(3)に移行する時、図に示されるようにシートが剥離する領域が現れ、シートのひずみがそれ以上高くない。そのときのシートのひずみを付着限界ひずみ $\epsilon_{p,f}$ と定義した。また、付着限界ひずみ以上にひずみが高くないのはシートが剥離した領域は荷重を受け持たなくなったためと思われる、荷重を



(a) 連続繊維シート

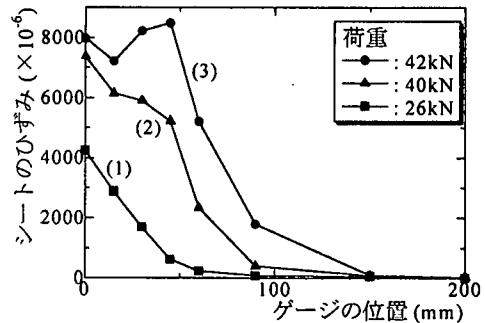


(b) 接着剤



(c) 連続繊維シートを接着した場合のコンクリート

図-4 各材料の応力-ひずみ関係



AFS98, 引張強度2.7N/mm², シート幅160mm
付着長200mm

図-5 シートのひずみ分布 (実験値)

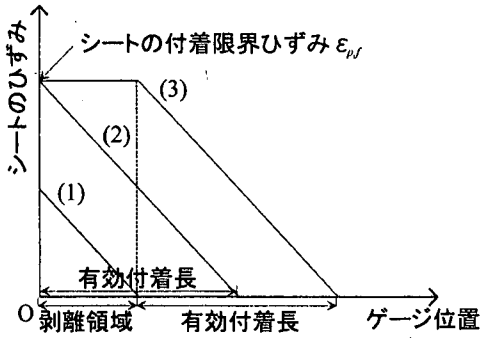


図-6 シートのひずみ分布の概略図

受け持つ領域、つまり、有効付着長がひずみのゲージ位置で見てプラス方向にシフトすると思われる。

図-6のようにシートの付着限界ひずみ ϵ_{pf} を定義すると、実験結果よりAFS、CFSごとに異なると思われる。付着限界ひずみを縦軸に、コンクリートの引張強度を横軸に、プロットした点を直線回帰したグラフを図-7に示す。なお、この図は剥離領域がはっきりと確認できる付着長が200mm以上の供試体のみプロットしている。また、シートの付着限界ひずみの算定式を次式に示す。

$$\epsilon_{pf} = (b_1 \cdot f_t + b_2) \times 10^{-6} \quad (1)$$

ここで、 b_1 : AFSの時、1390 CFSの時、1230

b_2 : AFSの時、2730 CFSの時、824

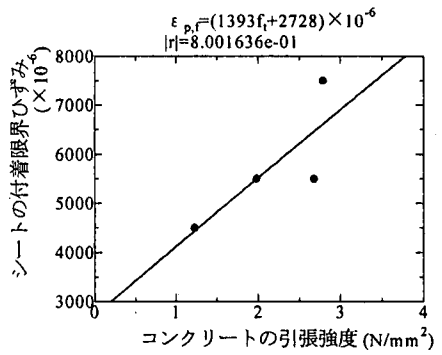
f_t : コンクリートの引張強度(N/mm²)

なお、解析は実験供試体に沿って表-1に示されるシートの種類、表-3に示されるコンクリートの引張強度、シートの付着長は50, 100, 150, 200mm、幅は40, 80, 160mmと変化させて行った。

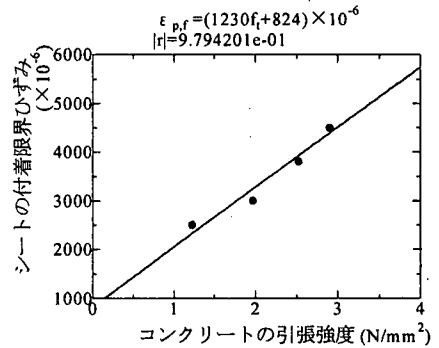
b) シートのひずみ分布の実験結果と解析結果の比較

荷重ごとにプロットした実験で得られたひずみゲージ位置でのシートのひずみに解析で得られたシートのひずみを重ねたものを図-8に示す。これらの図はいずれも代表的なもので、これらに示されるようにシートの幅が80mm以上の解析値によって実験値がほぼ評価できている。シート幅40mmでは実験値が解析値より、高くなっている。これは後述するが、シート幅80mm以下の供試体では単位幅あたりで比較すると、幅が狭くなるほど単位幅当たりの付着強さが大きくなるために評価できていないと思われる。

また、この解析により、コンクリートの表面数mmからのシートの剥離破壊がほぼ再現できた。ただし、シート

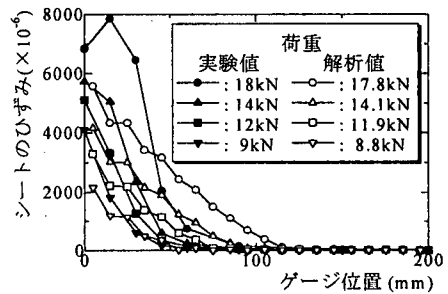


(a) AFS

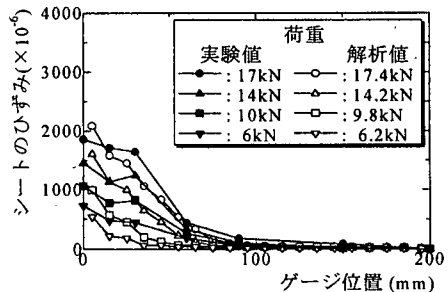


(b) CFS

図-7 シートごとの限界付着ひずみ

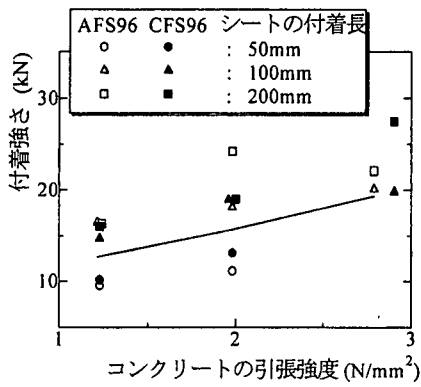


(a) AFS96, シートの付着長200mm, 幅80mm
コンクリートの圧縮強度25.3N/mm², 引張強度2.1N/mm²

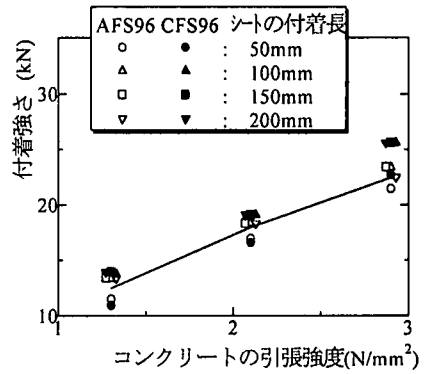


(b) CFS97, シートの付着長200mm, 幅80mm
コンクリートの圧縮強度31.9N/mm², 引張強度2.5N/mm²

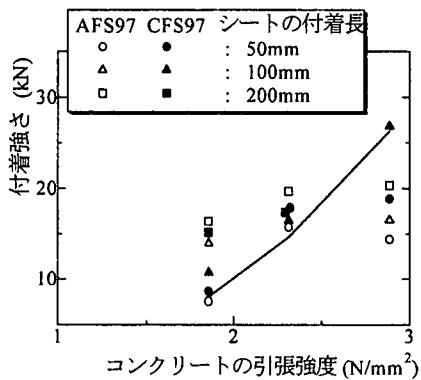
図-8 荷重ごとのゲージ位置のシートのひずみ



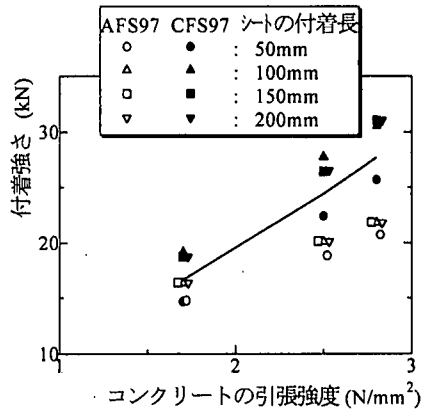
(a) B96



(a) B96



(b) B97



(b) B97

図-9 付着強さとコンクリートの圧縮強度の関係 (実験値)

図-10 付着強さとコンクリートの引張強度の関係 (解析値)

が付着限界ひずみを越えた時点、図-8(a)でいうならば、荷重が18kNの時点で、実験値ではシートのひずみが急に高くなっており、この解析ではそれを評価することができなかった。

この理由として考えられるのは次の通りである。シートが剥離するとき、骨材の影響や局部的に見て付着強さのばらつきなどがあるために、ゲージ位置のプラス方向に一樣に剥離するというわけでないと思われる。よって、シートの部分的な剥離により、シートが剥離していない部分に応力集中があるのではないかと考えられる。

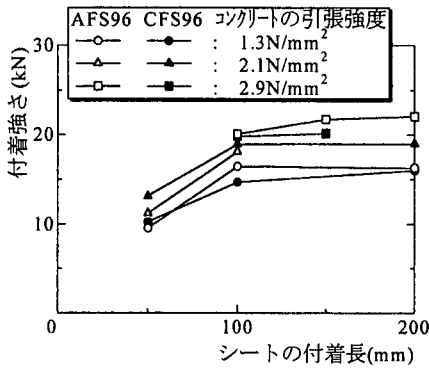
(3) 連続繊維シートとコンクリートの付着強さとコンクリートの引張強度の関係

図-9に各シートごとに連続繊維シートとコンクリートの付着強さとコンクリートの引張強度の関係を示す。この図に示されるように、シートの種類に関わらず、コンクリートの引張強度が高いほど、付着強さが高いという傾向を示した。

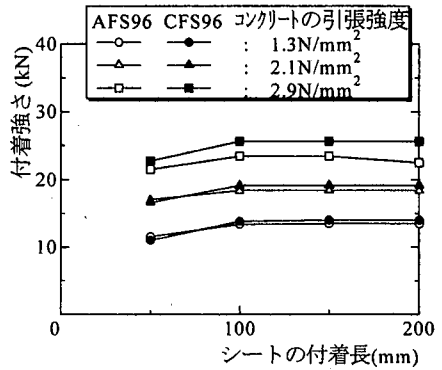
図-10に解析で得られた最大荷重とコンクリートの引張強度の関係を示したものを示す。これらの図に示されるように、実験値の時と同様に、シートに関わらず、コンクリートの引張強度が高いほど、付着強さが高くなる傾向が示され、実験値と同様にコンクリートの引張強度が高いほど付着強さが高くなる。

(4) 連続繊維シートとコンクリートの付着強さとシートの付着長の関係

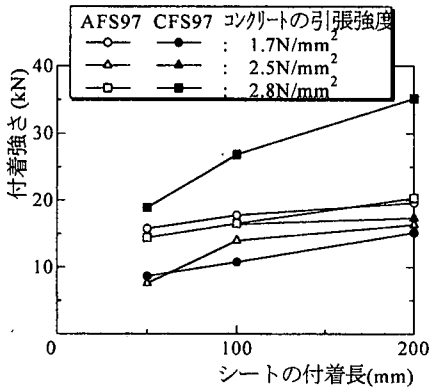
図-11に連続繊維シートとコンクリートの付着強さとシートの付着長の関係を示す。この図に示されるように、付着長が長いほど比例して付着強さが高くなるというわけではなく、多少ばらつきがあるものの、付着長が100mm以上の場合、ほぼ付着強さは一定になる傾向を示している。したがって、付着強さに寄与する有効的なシートの付着長、つまり、有効付着長が存在するものと思われる。



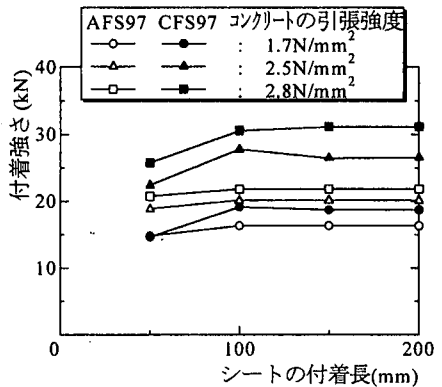
(a) B96



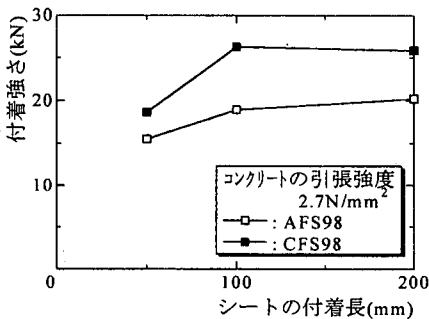
(a) B96



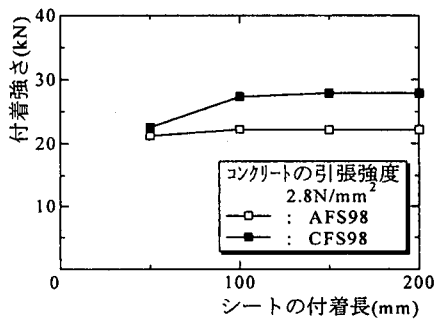
(b) B97



(b) B97



(c) B98



(c) B98

図-11 付着強さとシートの付着長 (実験値)

図-12 付着強さと付着長の関係 (解析値)

図-12に解析で得られた付着強さと付着長の関係を示す。実験と同様に、解析でもシートの種類に関わらず、付着長100mmを境に付着強さが横這いになり、付着強さに寄与する有効的な付着長はほぼこの程度と思われる。

(5) 連続繊維シートとコンクリートの付着強さとシートの幅の関係

図-13に連続繊維シートとコンクリートの付着強さとシートの幅の関係と図-14に単位幅当たりの付着強さとシートの幅の関係を示す。図-13に示されるように、シートの種類に関わらず、シートの幅が40mmと80mmにおいては付着強さとシートの幅の間に必ずしも比例関係が成り立っているとは言えない。また、図-14に示される

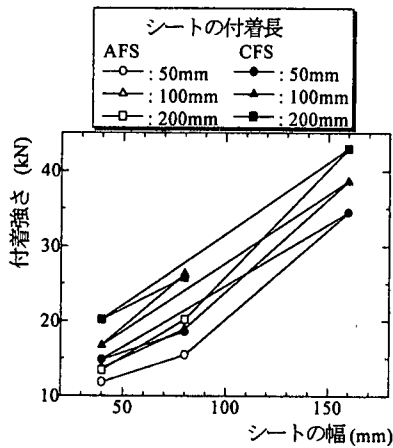


図-13 付着強さとシート幅の関係 (実験値)

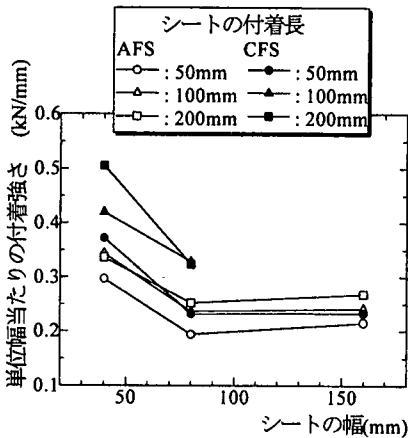


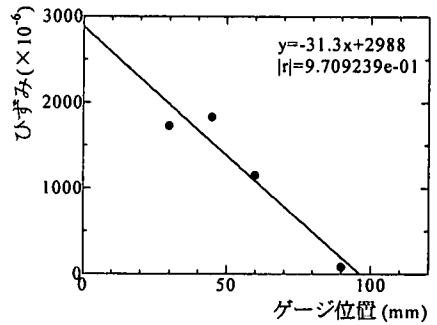
図-14 単位幅当たりの付着強さとシートの幅の関係 (実験値)

ように、幅で付着強さを除した場合、40mmの供試体の方が高い値を示している。また、80mmと160mmの供試体を比較した場合、シートの種類に関わらず、ほぼ一定の値を示しており、80mmと160mmの供試体間では付着強さとシートの幅の間に比例関係がほぼ成り立っていると思われる。

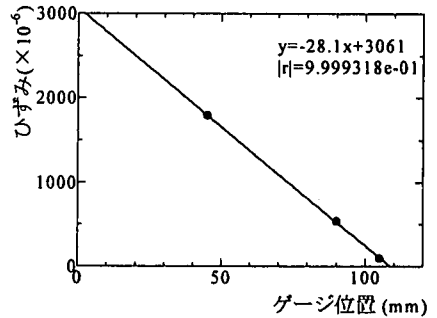
(6) 連続繊維シートの有効付着長の検討

図-5, 6に示した有効付着長の考えを基に、各供試体ごとに終局直前時のひずみをプロットし、最小二乗法で回帰することにより有効付着長を算定した代表的なグラフを図-15に示す。また、剥離領域があり、有効付着長がシフトした場合、剥離領域を除いて、有効付着長を算定している。このように算定した結果を図-16に示す。

この図に示されるように、シートの種類には関係なく、各供試体の有効付着長のばらつきもあまりなく、平



(a) AFS97, シートの付着長200mm, 幅80mm
コンクリートの圧縮強度31.9N/mm², 引張強度2.5N/mm²



(b) AFS98, シートの付着長200mm, 幅160mm
コンクリートの圧縮強度36.4N/mm², 引張強度2.5N/mm²

図-15 有効付着長の算定

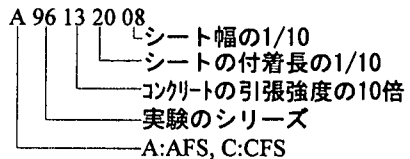
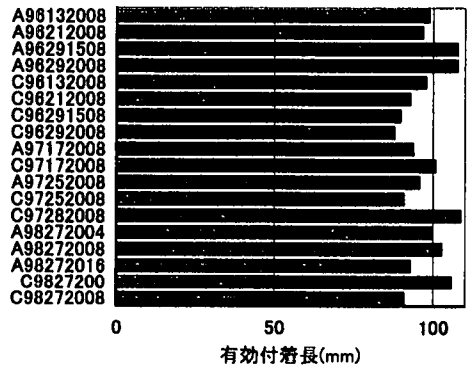


図-16 各供試体の有効付着長 (実験値)

均値が97.9mmとなった。したがって、一軸引張試験におけるシートの有効付着長はほぼ100mmとしていいと思われる。

4. 連続繊維シートとコンクリートの付着強さ算定式の構築

(1) 付着強さ算定式の構築手順の概要

連続繊維シートとコンクリートの付着強さ B_{cal} は次式(2)によって表される。

$$B_{cal} = \varepsilon_f \cdot E_f \cdot b_f \cdot t_f \quad (2)$$

ここで、 ε_f ：シートの終局ひずみ

E_f ：シートの弾性係数(kN/mm²)

b_f ：シートの幅(mm)→幅により補正

t_f ：シートの全厚さ(mm)

ここで、付着強さ B_{cal} は図-9、10に示されるようにコンクリートの強度の影響を受け、図-11、12に示されるように付着長によって変化し、図-15、16に示されるようにシートが付着強さに有効的に寄与する付着長が存在するのではないと思われる。また、図-13、14に示されるように、シートの幅によって付着強さを補正する必要があると思われる。

以上のことにより、本研究では図-17に示す手順で付着強さ算定式の構築を行った。まず、コンクリートの圧縮強度、シートの種類、幅が同一条件の場合、図-9、10で示されている有効付着長以上、つまり、本研究ではシートの付着長が100mm以上の供試体の付着強さは一定とした。次に、シートの終局ひずみ ε_f とコンクリートの圧縮強度の関係を検討した。この時、その他の影響をなくすために、有効付着長以上で、幅が一定の供試体のみで検討を行っており、この時の条件下で一旦付着強さを算定した。この時の付着強さを基に、有効付着長以下の検討、幅の検討を行って、連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式を構築した。なお、図-13に示されるように、シートの繊維種類によって付着限界ひずみが異なり、シートの剥離するひずみ、限界付着ひずみが違うことを考慮して、繊維別に付着強さの算定式を構築することとした。

(2) 連続繊維シートの終局時のひずみとコンクリートの圧縮強度の関係

図-17に示される手順に従い、連続繊維シートとコンクリートの引張強度を導き出すために、有効付着長 L_e 以上、すなわち、付着長が100mm以上の供試体の ε_f と $f_c^{2/3}$ の関係を図-18に示す。ここで、 ε_f は図-1(c)に示されるゲージ位置0mmのひずみ、すなわち荷重をシートのみで分担している部分の終局時のひずみであり、次式(3)で表される。

シートの終局ひずみと
コンクリートの引張強度の関係
(有効付着長以上の、幅一定の供試体)

有効付着長以下の付着長の検討

幅の影響の検討

連続繊維シートとコンクリートの
付着強さ式の構築

図-17 連続繊維シートとコンクリートの付着強さ算定式の構築法

$$\varepsilon_f = B_{exp} / (E_f \cdot b_f \cdot t_f) \quad (3)$$

ここで、 B_{exp} ：実験時の付着強さ(kN)

E_f ：シートの引張弾性係数(kN/mm²)

b_f ：シートの幅(mm)

t_f ：シートの厚さ(mm)

また、 f_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)である。この理由は既存の構造物においてコンクリートの引張強度よりコンクリートの圧縮強度の方を推定するのが一般的と考えており、また、引張強度と圧縮強度は相関関係があるので、本研究では圧縮強度の2/3乗とした。

図-18に示されるように、付着長が有効付着長 L_e の供試体の場合、 ε_f と $f_c^{2/3}$ は最小二乗法によって次式に回帰される。

$$\varepsilon_{f,cal} = (260f_c^{2/3} + 6870) \times 10^{-6} \quad (\text{AFS}) \quad (4a)$$

$$\varepsilon_{f,cal} = (290f_c^{2/3} + 1150) \times 10^{-6} \quad (\text{CFS}) \quad (4b)$$

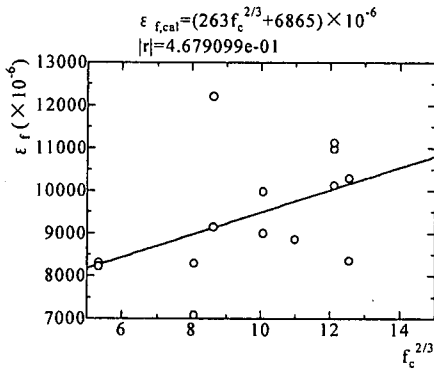
上式の終局ひずみの式を使って、付着長 l_f が有効付着長 L_e 以上で、シート幅80mm時の付着強さ B_{cal} を式で表すと、次式のようになる。

$$B_{cal} = (a_1 \cdot f_c^{2/3} + a_2) \cdot l_f \cdot E_f \cdot b_f \cdot t_f \times 10^{-6} \quad (5)$$

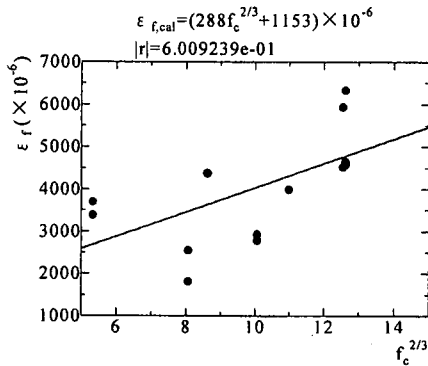
ただし、 $l_f \geq L_e$ の時、 $l_f = L_e$ を代入

a_1 ：AFSは2.6、CFSは2.9

a_2 ：AFSは68.7、CFSは11.5



(a) AFS



(b) CFS

図-18 ϵ_f と $f_c^{2/3}$ の関係

(3) 有効付着長以下の検討

各供試体の単位付着長当たりの付着強さ $b_{l=x,exp}$ と単位付着長当たりの付着長が100mmの付着強さ $b_{l=100,exp}$ の比と付着長の関係を図-19に示す。この図に示されるように、付着長0-100mmの範囲において、付着強さは付着長に比例しないと思われる。したがって、係数によって付着強さを増減せざるを得ず、そのための係数を回帰すると、次の式ようになる。

$$b_{l=x,exp}/b_{l=100,exp} = 3.11 - 0.0420l_f + 0.000209l_f^2 \quad (6)$$

したがって、シート幅80mmの時の連続繊維シートとコンクリートの付着力強さの式は次のようになる。

$$B_{cal} = (a_1 \cdot f_c^{2/3} + a_2) \cdot L_f \cdot E_f \cdot b_f \cdot t_f \times 10^{-6} \quad (7)$$

ただし、 $L_f : l_f \geq L_e$ の時、 $L_f = L_e$

$l_f < L_e$ の時、 $L_f = a(l_f)$

$$a(l_f) = l_f \cdot (3.11 - 0.0420l_f + 2.09l_f^2 \times 10^{-4})$$

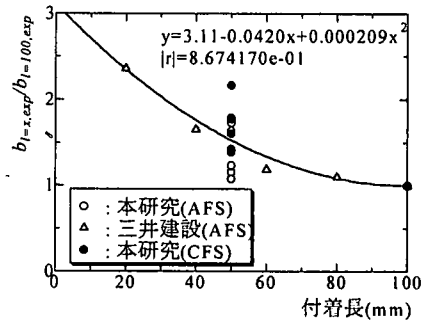


図-19 付着強さ比と付着長の関係

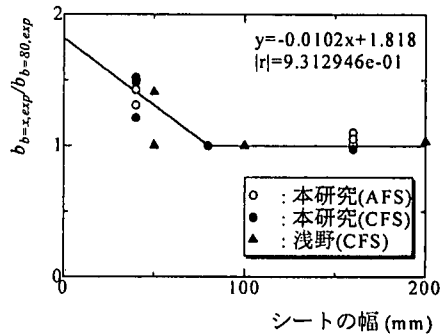


図-20 付着強さ比とシートの幅の関係

(4) シートの幅の検討

式(4a), (4b)に基づいて、コンクリートの強度を一定条件に補正した後、各供試体の単位幅当たりの付着強さ $b_{b=x,exp}$ とシート幅80mmの単位幅当たりの付着強さ $b_{b=80,exp}$ との比とシート幅の関係を図-20に示す。この図に示されるように、シート幅80mmを基準点とすると、シート幅0-80mmの範囲は次のように回帰され、シート幅が80mm以上の時、シート幅と付着強さが比例関係にある。この図では既往の研究⁵⁾をプロットしているが、式(8)の回帰式を導き出すには使用してはいない。しかし、この図に示されるように、本研究のデータとほぼ同様な傾向を示していると言える。

$$b_{b=x,exp}/b_{b=80,exp} = 1.818 - 0.0102 \cdot b_f \quad (8)$$

以上のことをまとめると、付着強さの簡易算定式は、それぞれのシートごとに次式にて表される。

$$B_{cal} = (a_1 \cdot f_c^{2/3} + a_2) \cdot L_f \cdot E_f \cdot B_f \cdot t_f \times 10^{-6} \quad (9)$$

ただし、 $B_f : b_f \geq 80$ の時、 $B_f = b_f$

$b_f < 80$ の時、 $B_f = \beta(b_f) \cdot b_f$

$$\beta(b_f) = 1.818 - 0.0102 \cdot b_f$$

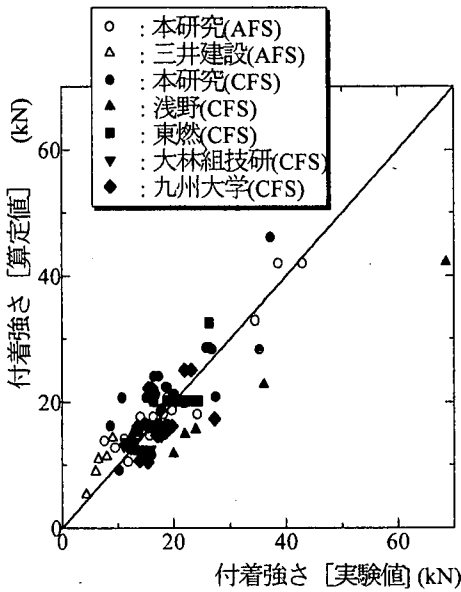


図-21 付着強さの算定値と実験値の関係

(5) 実験値と算定値の比較

図-21に式(9)で算定した付着強さの算定値と実験値の関係を示す。この図には本研究と簡易算定式の構築に使用した既往の研究⁷⁾のデータだけではなく、式の構築に使用しなかった既往の研究^{1), 5), 6), 8), 9)}も付け加えている。この図に示されるように、実験値を算定値でおおむね評価できていることから、剥離破壊がコンクリートの表面の数mmで起こった供試体については、式(9)でコンクリート部材に接着した連続繊維シートの付着力の算定が可能と思われる。

コンクリートとシートの付着破壊がコンクリートの表層部で起こる場合、コンクリートの強度に依存するが、シートからの応力伝達を受けてコンクリート面が破壊するので、シートの物性値がそれぞれ上の二つの式に入ってくる。また、この式の適用範囲としては、連続繊維シートが一層貼りのもので、付着破壊モードがコンクリートの表層部からのシートの剥離によるものと、今回算定に使用したシートの引張弾性係数、CFSの場合は $222\text{--}373\text{kN/mm}^2$ 、AFSの場合は $73\text{--}109\text{kN/mm}^2$ を大きく外れない範囲であれば、適用が可能と思われる。

5. まとめ

本研究で、以下の知見が得られた。

1) 実験結果と有限要素解析の結果より、コンクリートの強度が高いほど、連続繊維シートとコンクリートの付着強さが高いという傾向がある。

2) 実験結果と有限要素解析の結果より、シートの付着長に比例して、連続繊維シートとコンクリートの付着強さが高くなる。むしろ、連続繊維シートとコンクリートの付着強さに寄与する有効的なシートの付着長、つまり、有効付着長が存在するものと思われ、シートの付着長が有効付着長以上になると、付着強さが一定となると思われる。

3) シートの種類、付着長、コンクリートの強度が同一条件では、シートの幅がある一定以下になると、シートの幅に比例して付着強さが高くなり、単位幅当たりで比較すると、ある一定以下の供試体はある一定以上に比べて大きくなるのが実験によって示された。

4) 連続繊維シートがコンクリートの表面数mmから剥離するときのひずみを付着限界ひずみと定義し、実験値により算定した。その結果、AFSとCFSごとに付着限界ひずみが異なり、本研究で提案した式によって算定が可能である。

5) 本研究で提案したコンクリートの応力-ひずみ関係により有限要素解析を行うと、実験の破壊パターンと同じコンクリートの表面からシートが剥離する破壊パターンを再現できた。また、解析により実験のシートのひずみ分布をほぼ評価できた。

6) 本研究で構築した連続繊維シートとコンクリートの付着強さ式により、実験値をほぼ評価できた。

謝辞: 本研究に際し、ご助力を得たショーボンド建設(株)の江口和雄氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 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, コンクリート工学論文集第9巻第2号, pp. 1-7, 1998.
- 2) 出雲健司, 佐伯昇, 堀口敬, 志村和紀: 連続繊維シートの付着強度と挙動について, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 846-847, 1998.
- 3) 深尾昌弘, 出雲健司, 佐伯昇, 堀口敬: コンクリートと連続繊維シートの付着強さ, 土木学会北海道支部論文報告集第5号, pp. 536-541, 1999.
- 4) 東燃(株): 炭素繊維シートとコンクリートの定着強度試験, 1995.
- 5) 浅野靖幸: 炭素繊維シートとコンクリートとの付着特性に関する研究, 北海道大学修士論文, 1998.
- 6) 松下博道, 岳尾弘洋, 鶴田浩章: 炭素繊維接着工法の炭素繊維シート剥離耐力向上方法に対する一考察, コンクリート構造物の補強設計に関するシンポジウム, コンクリート技術シリーズ28, 土木学会, pp. II69-76, 1998.
- 7) 三井建設(株): FITS工法技術資料
- 8) (株)大林組技術研究所: シート状CFRPとコンクリートの付着強度

- 9) 岳尾弘洋, 松下博通, 牧角龍憲, 長島玄太郎 : CFRP
P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第19巻第2号,
pp. 1599-1604, 1997.

(1999. 5. 12 受付)

ESTIMATING BOND STRENGTH BETWEEN FIBER SHEETS AND CONCRETE

Kenji IZUMO, Noboru SAEKI and Hiroshi OHNUMA

We investigate bond behaviour between fiber sheets and concrete by the experiments and non-linear finite element method. Moreover, we estimate bond strength between fiber sheets and concrete. In these experiments, we investigated the bond strength by the influence of the different types of sheets, the different compressive strengths of concrete, the different bond lengths of sheet and the different bond widths of sheet. We discuss only the failure due to sheet peeling from concrete surface because we think this failure pattern is the best bond function. In the results of these experiments and these analysis, the bond strength between fiber sheets and concrete depends on the compressive strength of concrete. The effective bond length exists because the bond strength becomes constant over a certain value of the bond length. In the results of these experiments, the bond strength is not proportional to the width of the fiber sheet below a certain value of the width of the fiber sheets. The lower the width of the fiber sheets below a certain value is, the higher the bond strength per unit width is.