

論文 連続繊維シートとコンクリートの付着挙動と付着強さ

出雲 健司*1・佐伯 昇*2・深尾 昌弘*3・堀口 敬*4

要旨：著者らは、連続繊維シートを角柱コンクリートに接着した供試体を一軸引張応力下でシートの種類、シートの付着長、コンクリートの圧縮強度を様々に変化させて実験を行い、連続繊維シートとコンクリートの付着挙動と付着強さを検討してきた。本研究では、その実験結果を有限要素解析で評価することを目的とした。解析の結果、コンクリートの応力-ひずみ関係を新たに提案し、それを使用することにより、コンクリートの表面数mmからシートが剥離する破壊パターンを再現でき、実験値の付着強さも有限要素解析によってほぼ評価できた。

キーワード：連続繊維シート, 付着挙動, 付着強さ, 有限要素解析

1. はじめに

近年、連続繊維シートを既存のコンクリート構造物に接着して補強する工法の研究が盛んに行われている。しかし、コンクリートの表面mmからシートの剥離が発生する場合、連続繊維シートとコンクリートの付着が複雑であり、これを明確化する必要がある。

本研究では、既報の研究[1],[2],[3]で行った最も簡単な一軸引張応力下での連続繊維シートとコンクリートの付着挙動と付着強さで得られた実験値を有限要素解析によって評価することを目的とした。

2. 実験概要

2. 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向当たりの理論値である。使用した連続繊維シートは96、97、98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。96、97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り、2方向シートを使用

表1 シート物性値

シリーズ	96		97		98	
シートの種類	CFS96	AFS96	CFS97	AFS97	CFS98	AFS98
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

*1 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*2 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

*4 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

したの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、98シリーズではCFS、AFS共に一方のみ繊維が入っている一方向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。

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

各シリーズのコンクリートの物性値を表3に示す。96、97シリーズでは3種類の強度のコンクリートを、98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、割裂試験よりコンクリートの引張強度を算定している。

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)
96	12.3	1.3	14700
	25.3	2.1	22800
	42.2	3.3	27700
97	22.9	1.7	22600
	31.9	2.5	24500
	44.4	2.8	28000
98	39.8	2.7	28600

2.2 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、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。

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。载荷は変位制御で行い、载荷速度を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、シートの付着長が50,100,150,200mmの4段階、コンクリートの圧縮強度が表3に示すとおりである。

2.3 破壊パターン

写真1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、写真1(a)はシートはCFS96を使用し、コンクリートの圧縮強度が45N/mm²、シートの付着長が200mm、写真1(b)はシートはAFS97を使

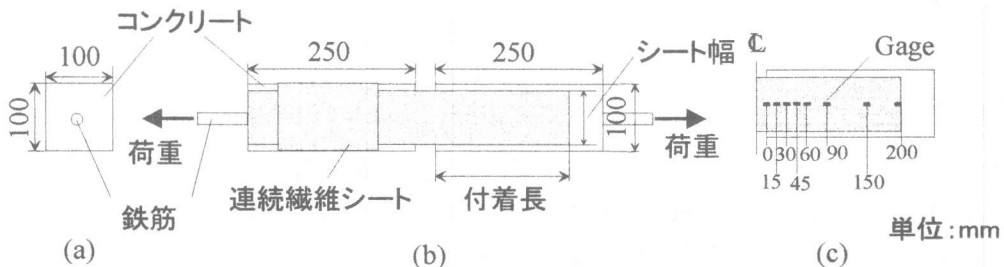
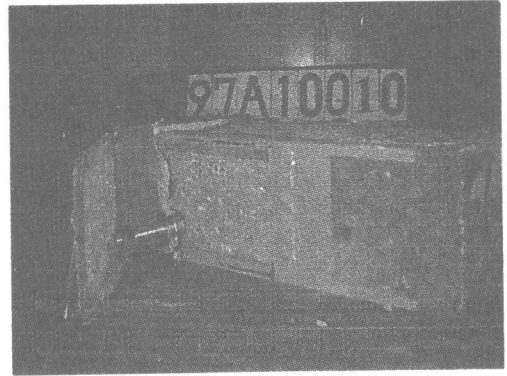
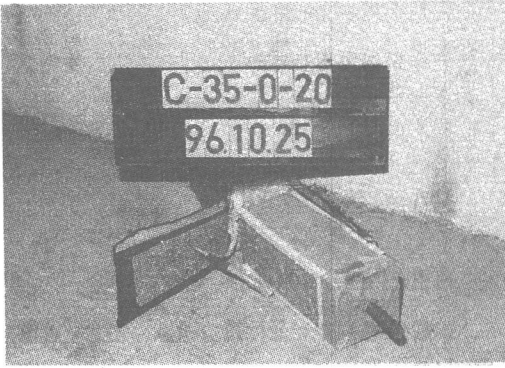


図1 供試体の概略図とゲージの位置



(a)CFS96, 圧縮強度 45N/mm^2 , 付着長 200mm (b)AFS97, 圧縮強度 22.9N/mm^2 , 付着長 100mm
写真1 一軸引張試験供試体の破壊状況

用し、コンクリートの圧縮強度が 22.9N/mm^2 、付着長 100mm の供試体の破壊状況の写真である。本研究では、破壊パターンが図2に示されるように、シートの種類の違い、コンクリートの圧縮強度の違い、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、この破壊パターンのみを扱うこととした。

3. 有限要素解析の概要

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2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と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[4]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い、コンクリートと鉄筋は一体として挙動するとして解析を行った。

各材料は図3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。また、シートがコンクリートの表面で剥離するコンクリートのひずみを付着限界ひずみ $\epsilon_{p,c}$ と定義した。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。

付着限界ひずみは実験値よりAFS, CFSごとに異なると思われる。また、図4に縦軸にシートのひずみ、横軸にひずみゲージ位置をとり、シートのひずみ分布を概略図を示す。供試

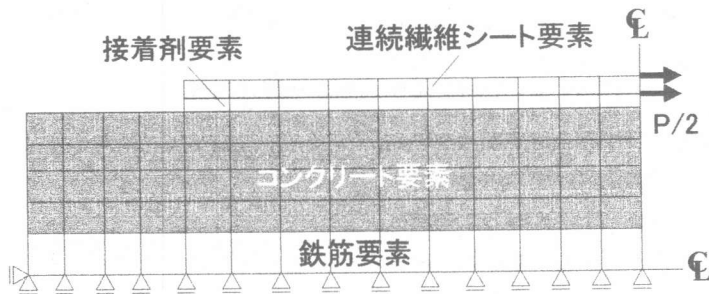
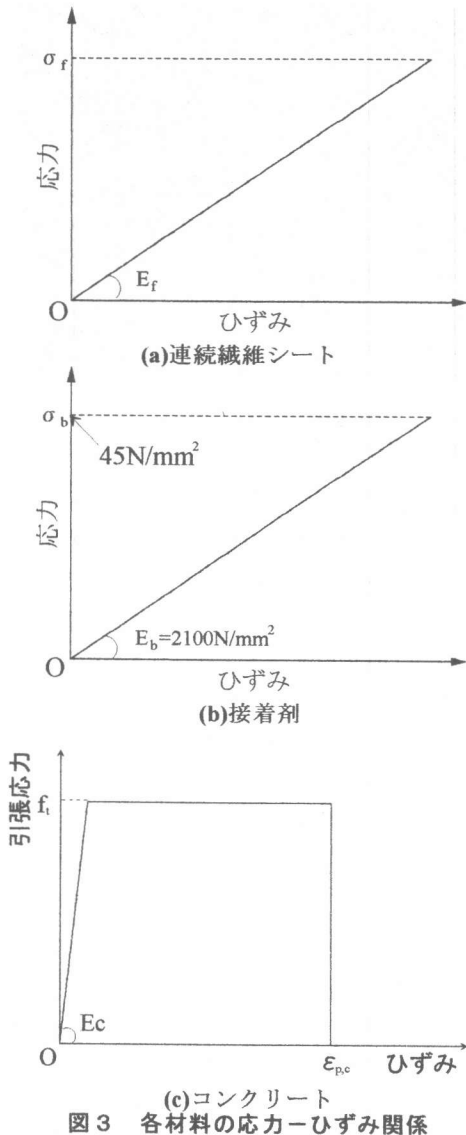
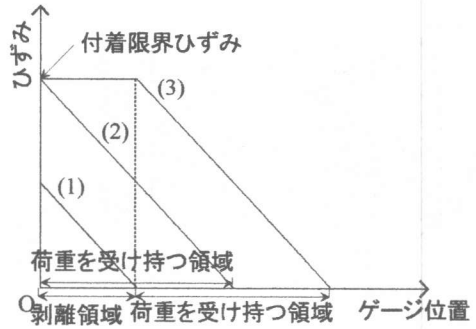


図2 付着の一軸引張試験のメッシュ分割概要図



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)→(2)→(3)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。そのときのひずみを付着限界ひずみと定義した。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、荷重を受け持つ領域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。



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5に示す。また、付着限界ひずみの算定式を次式に示す。

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

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)

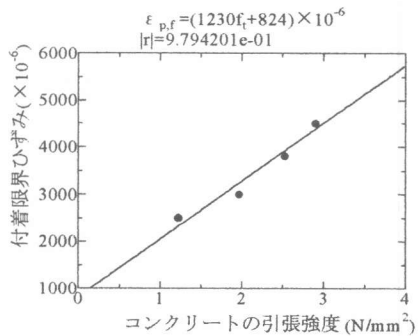
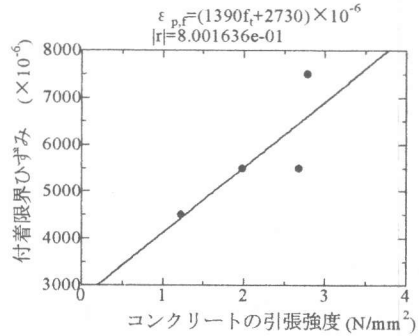
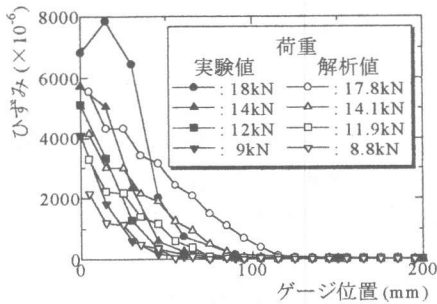


図5 シートごとの限界付着ひずみ

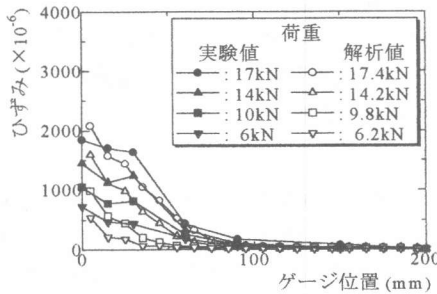
連続繊維シートのひずみが式(1)に達したとき、連続繊維シートがコンクリートの表面から剥離すると定義した。なお、解析は実験供試体に沿ってシートの種類、コンクリートの引張強度、シートの付着長を変化させて行った。

4. 解析結果の考察

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6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解析値によって実験値がほぼ評価できている。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再現できた。ただし、シートが付着限界ひずみを越えた時点、図6(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



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

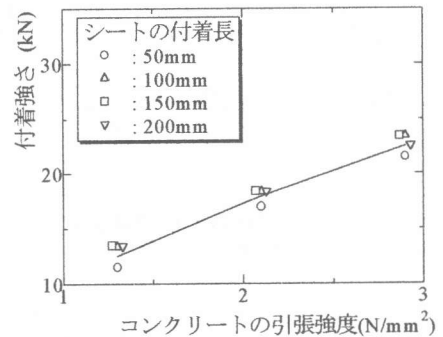


(b) CFS97, シートの付着長200mm
コンクリートの圧縮強度31.9N/mm²
引張強度2.5N/mm²

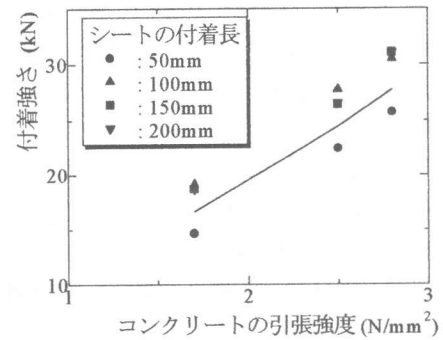
図6 荷重ごとのゲージ位置の
シートのひずみ

が急に高くなっている。これは、剥離により部分的な応力集中があったためと考えられ、この解析ではそれを評価することができなかった。

図7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[1]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強度が高いほど付着強さが高くなる。



(a) AFS96



(b) CFS97

図7 付着強さとコンクリートの引張強度の関係

図8に解析で得られた付着力と100mmの付着長さとの比と付着長の関係を示す。実験[1]と同様に、解析でもシートの種類に関わらず、付着長さ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。

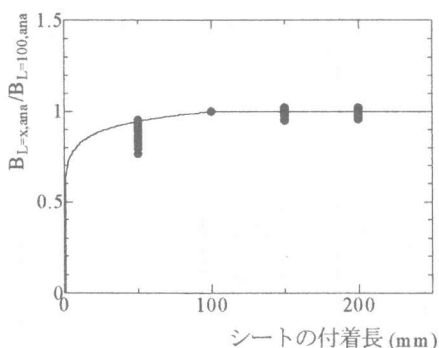


図8 解析で得られた付着強さ比と付着長の関係

図9に連続繊維シートとコンクリートの付着強さの実験値と解析値の関係を示す。この図に示されるように、有効付着長さ L_e 以上の場合はAFS、CFSに関わらず概ね実験値を評価できているが、有効付着長さ L_e 未満の場合はCFSは概ね実験値を評価できているが、AFSは解析値がやや実験値に比べて高い傾向を示していると思われる。

5. まとめ

(1) 本解析により、既報の実験と同様にコンクリートの引張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大きくなる傾向を示した。

(2) 本解析により、既報の実験と同様に有効付着長が存在することが示された。

(3) 本研究で提案したコンクリートの応力ひずみ関係を使用することにより、既往の実験と同様に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が再現でき、実験値をほぼ有限要素法で評価できた。

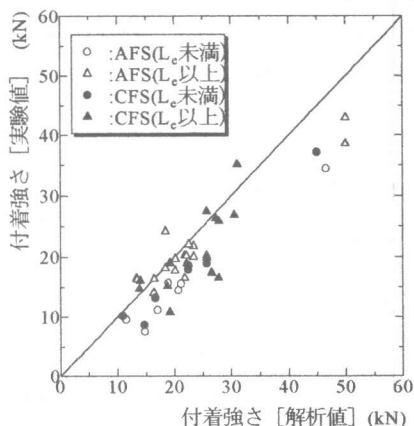


図9 付着強さの実験値と解析値の関係

【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55号, pp.536-541(1999)
- [4]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)