

連続繊維シートとコンクリートの付着特性に関する研究

コンクリート研究室 横田 稔
指導教官 下村 匠
丸山久一

要旨：連続繊維シートとコンクリートの付着特性の変化が、部材の補強効果に及ぼす影響について検討した。コンクリートの表面処理を行わないことと不陸修正材を用いることによりシートとコンクリートの界面の付着特性が異なる状態を実験的に作り出した。シート補強鉄筋コンクリートはり供試体の曲げ試験により、界面の付着特性が部材の曲げ性状に及ぼす影響について検討した。

1. はじめに

炭素繊維、アラミド繊維の連続繊維シートにより補修補強したコンクリート部材の力学性能には、シートの引張強度や弾性係数などシートの物性だけでなく、シートとコンクリート間の付着・剥離に関する性質が影響する¹⁾。土木学会により編纂された「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」(2000年)では、界面剥離破壊エネルギーや付着構成則の概念が導入され、シートとコンクリート界面の特性を積極的に評価し、部材の耐力を算定する方法が採り入れられた²⁾。

シートとコンクリート界面の付着特性が部材の力学性能に及ぼす影響は、理論的検討がいくつか行われているが、実験的に検証した例は少ない。理論の検証という点だけでなく、接着樹脂の材料開発の観点からも、実験により確認しておくことが望ましい。本研究は、その端緒として行ったものである。まず、不陸修正材(パテ)を利用して、連続繊維シートとコンクリートの付着特性が大きく変化した状態を実験的に作り出すことを試みる。そして、付着特性がシート補強部材の力学性能に及ぼす影響を、はり供試体の曲げ性状により検討する。

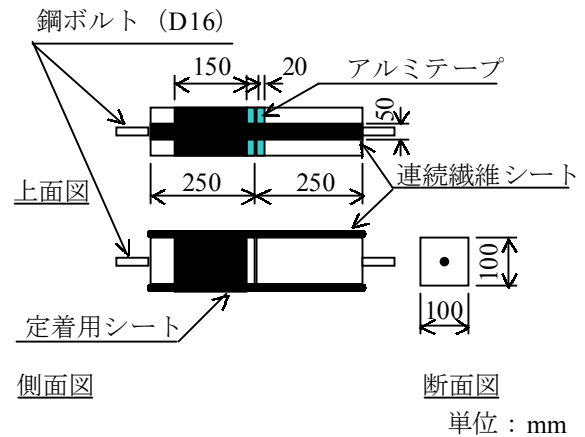


図-1 試験体の形状・寸法

2. 一軸引張付着試験による付着特性の定量化

2.1 実験概要

連続繊維シートとコンクリートの付着特性は一軸引張付着試験により定量化した。図-1に試験体の形状・寸法を示す。表-1に試験体の種類を示す。付着特性を変化させるために、シート接着前のコンクリート表面の処理を行わない試験体 (SB-1)、標準的な処理を行う試験体 (SB-2) およびシートとコンクリートの間にパテを塗布した試験体 (SB-3) の計3種類の試験を行った。コンクリートの表面処理を行わないと付着能力が低下することは、著者らの既往の研究³⁾において確認している。パテを用いた

表－1 試験体の種類

試験体名	表面処理の有無	パテの有無
SB-1	無	無
SB-2	有	無
SB-3	有	有

表－2 連続繊維シートの物性値

繊維種類	厚さ (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
アラミド	0.504	2350	78

のは、シートとコンクリートの間の樹脂層の厚みを増すことで、変形能力を増大させ、剥離までの吸収エネルギーが増加した状態を試験的に作り出すことを意図したためである。連続繊維シートはアラミド繊維シートを用いた。表－2にシートの物性値を示す。

試験体は以下の手順で作製した。

- 鋼製型枠を用いてコンクリートブロックを作製する。ブロックの中心には引張力を試験体に伝達するための鋼ボルト（直径16mm）を埋設する。鋼ボルトは試験体中央で切断されている。
- コンクリート硬化後にカッターによりコンクリートブロックを2つに分割する。
- 打設後4週間経過した後に、コンクリートブロック表面のレイタンス層をディスクサンダーにより除去し、さらに隅角部の面取りを行って、プライマーを塗布して下地処理を施す。ただし、表面処理無の試験体（SB-1）にはこの工程を行わない。
- プライマーの触手乾燥後、接着樹脂を用いて連続繊維シートをコンクリートブロック表面に接着する。パテを塗布する試験体（SB-3）にはシート接着前に、パテを所定の厚さ（0.2mm）に塗布した。この厚さは、アルミテープ（1層厚さ0.05mm）をシート接着面の縁に貼り、アルミテープの厚さに合わせてパテを盛ることで調節した。

試験区間は、試験体の中央から片側半スパンとし、定着側には幅150mmの連続繊維シートを

周方向に巻き立て剥離を防止した。

試験体への载荷は、変位制御（0.05mm/min）で行った。荷重および両側連続繊維シートのひずみ分布を測定した。シートのひずみは検長5mmのひずみゲージを用いて測定し、測定間隔は20mmとした。

2.2 付着応力と相対変位関係の算出

連続繊維シートとコンクリートとの付着特性を評価するために、一軸引張付着試験の結果得られるシートのひずみ分布から、シートとコンクリート間の相対変位と付着応力の関係を算出する。相対変位は連続繊維シートの端部から該当点までのひずみ分布を積分することにより求める³⁾。

$$\delta(x_n) = \int_0^x \varepsilon_f(x) dx \quad (1)$$

$$\cong \frac{\Delta x}{2} (\varepsilon_f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_f(x_i) + \varepsilon_f(x_n))$$

ここに、 Δx はひずみゲージの貼付間隔、 $\varepsilon_f(x_n)$ はシートひずみの測定位置 x_n でのシートひずみである。付着応力はシートの応力の勾配より求める³⁾。

$$\tau(x_n) = t_f \cdot E_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (2)$$

$$\cong \frac{1}{2} \cdot t_f \cdot E_f \left(\frac{\varepsilon_f(x_{n+1}) - \varepsilon_f(x_{n-1}))}{\Delta x} \right)$$

ここに、 t_f は連続繊維シートの厚さ、 E_f は連続繊維シートの弾性係数である。

2.3 付着応力と相対変位関係のモデル化

前節の方法により、1つの荷重ステップにおけるひずみ分布より、1本の付着応力と相対変位関係を表す曲線が得られる。剥離が進展中の複数の荷重ステップのデータより得られた曲線を平均することにより、平均的な付着特性を得ることができる。既往の著者らの研究³⁾に基づき、付着応力－相対変位関係の平均化の方法として、この曲線の特徴をよく表す2直線の弾性－軟化－剥離型モデル（図－2）を採用した。モデル化の手順は既往の研究³⁾に従った。

2.4 界面剥離破壊エネルギーの算出

界面剥離破壊エネルギーは、シートとコンクリートの界面の接着状況を一元的に表す物性値である。剥離破壊エネルギーは付着応力-相対変位曲線で囲まれた面積に相当するので、本研究で用いた弾性-軟化-剥離型モデルでは、以下の式で求められる (図-2)。

$$G_f = \frac{1}{2} \delta_u \cdot \tau_y \quad (3)$$

ここに、 G_f は界面剥離破壊エネルギー、 δ_u は相対変位の最大値、 τ_y は付着応力の最大値である。

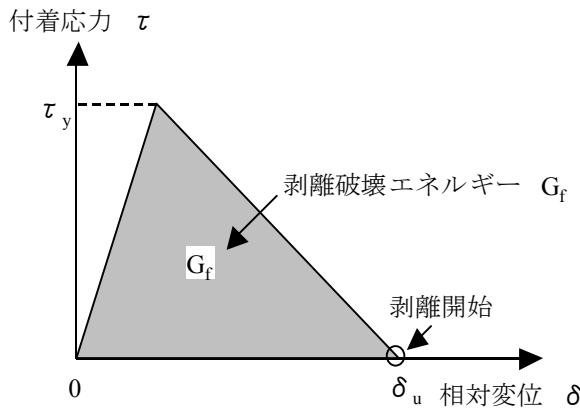


図-2 付着応力と相対変位の関係

2.5 実験結果

図-3 に荷重-中央変位関係の実験結果を示す。中央変位はシートのひずみの積分値である。図-4 に2直線モデルを用いて平均化した付着応力-相対変位関係を、図-5 に付着応力-相対変位関係の結果より算出した界面剥離破壊エネルギーの結果をそれぞれ示す。

剥離開始荷重 (図-3 の荷重-中央変位関係が折れ曲がる点) は、パテを塗布した SB-3 が最も大きくなり、最大荷重は標準試験体の SB-2 が最も大きくなった。図-4 の付着応力-相対変位関係によると、最大付着応力は試験体間の差は小さく、最大相対変位に違いが現れた。最大相対変位は予想どおりにパテを用いた SB-3 が最も大きくなり、次いで SB-2, SB-1 の順となった。最大付着応力の違いが小さいため、最

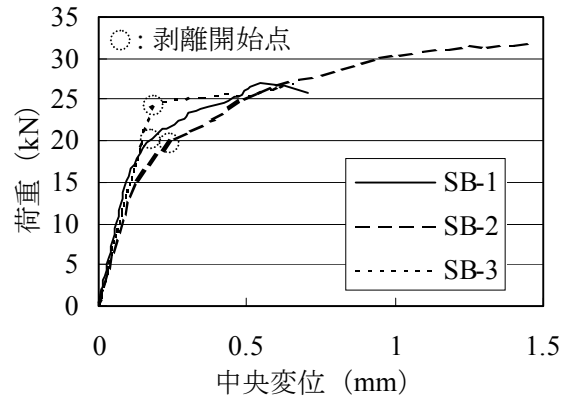


図-3 荷重-中央変位関係

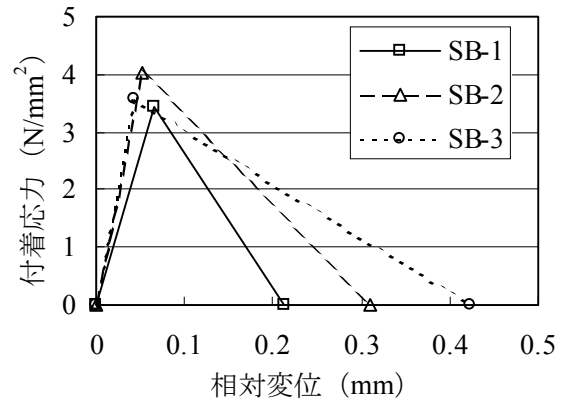


図-4 付着応力-相対変位関係

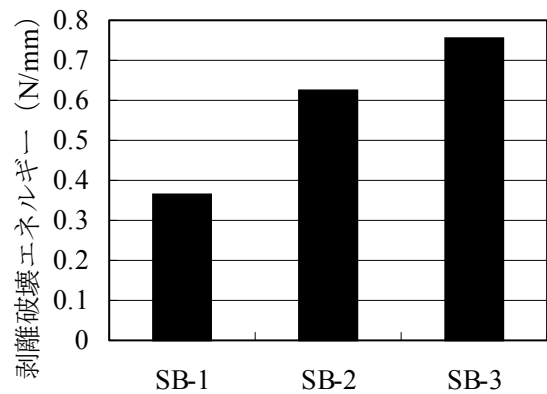


図-5 界面剥離破壊エネルギー

大相対変位の比がほぼ界面剥離破壊エネルギーの比となっている (図-5)。

以上より、シート接着前のコンクリートの表面処理を行わないことと、シートとコンクリート間にパテを塗布することにより、界面の付着特性 (すなわち付着応力-相対変位関係および界面剥離破壊エネルギー) の異なる状態を実験的に作り出すことに成功したと判断できる。

3. シート補強部材の曲げ試験

3.1 界面剥離破壊エネルギーと曲げ耐力の関係の算定結果

土木学会指針では、シート補強部材の曲げ耐力算定法として、界面剥離破壊エネルギーを用いた方法を採用している²⁾。この方法により曲げ耐力を算定した例を示すと、**図-6**のようになり、シート補強鉄筋コンクリートはりの部材の破壊モードがシート剥離破壊の場合には、界面剥離破壊エネルギーの増大により耐力が増大することがわかる。前章に述べた実験では、3種類の接着界面の界面剥離破壊エネルギーは、0.36, 0.62, 0.75N/mmであった。**図-6**によると、この範囲では破壊モードがシート剥離破壊モードとなり、剥離破壊エネルギーに応じて、曲げ耐力が有意な変化をすることが予想される。

そこで、前章の界面処理を施したシート補強鉄筋コンクリートはり供試体の曲げ試験を行い、実際にそのような補強効果の向上が見られるか検証した。

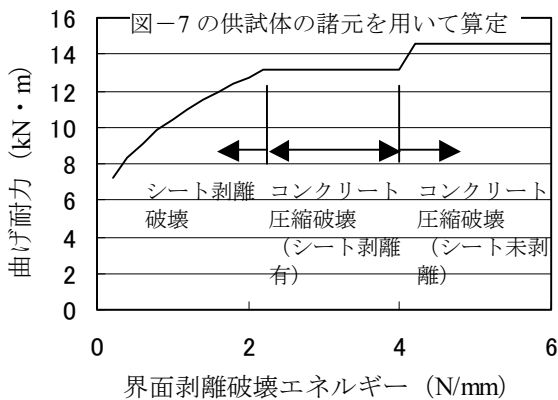


図-6 曲げ耐力の算定²⁾の1例

3.2 実験概要

はり供試体は全3体であり、シート接着面の処理方法以外は共通である。供試体は、破壊モードがシートの剥離破壊となるように、シートの補強量を大きくし、鉄筋比を小さくした。供試体の共通諸元を表-3に、形状・寸法を**図-7**にそれぞれ示す。シートの物性値、シート接着面の処理方法、シートの接着方法は一軸引張付

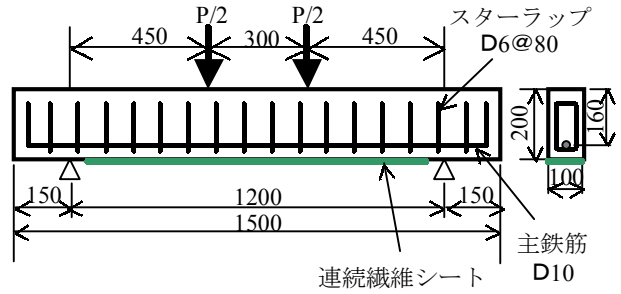


図-7 供試体の形状・寸法

表-3 供試体の諸元

項目	単位	
鉄筋比	%	0.46
主鉄筋降伏強度	MPa	367
コンクリートの圧縮強度	MPa	32.0
シートの厚さ	mm	0.504
シートの引張強度	MPa	2350
シートの弾性係数	GPa	78

表-4 実験水準および実験結果

供試体名	表面処理の有無	パテの有無	G_f (N/mm)	曲げ耐力 (kN)	
				実験値	計算値
SF-1	無	無	0.36	40.0	36.0
SF-2	有	無	0.62	48.8	40.9
SF-3	有	有	0.75	42.8	42.9

着試験と同様である。

載荷方法は静的単調載荷とし、2kN 間隔で荷重、変位（はり中央のたわみ）およびシートのひずみ分布を測定した。

各供試体の実験パラメータを、曲げ耐力（最大荷重）の実験結果とともに**表-4**に示す。

3.3 実験結果

(1) 曲げ耐力

曲げ耐力（最大荷重）の実験結果および計算結果を表-4に示す。計算は土木学会の補修補強指針²⁾に示された方法に従い、ひび割れ幅を150mmとして算出した。計算値では、界面剥離破壊エネルギーの最も大きいSF-3が最も大きくなった。

曲げ耐力の実験値は、標準的な表面処理を行ったSF-2が最も大きくなり、次にパテを用いた

SF-3, 最も小さかったのが表面処理を行わない SF-1 であった。界面剥離破壊エネルギーの大きな SF-3 において, 曲げ耐力の増大効果が得られなかった。SF-3 はシートの端部に近い場所から斜めひび割れが発生し (図-8), このひび割れに誘発されて, シートの剥離が端部まで進展した。このように, 破壊モードがシートの剥離破壊の場合はひび割れの発生と同時にシートの剥離が一気に進展して破壊に至ることがある。この場合, 安定して剥離が進行した場合よりも, 最大荷重は小さくなると考えられる。

一方, SF-1 は SF-2 に比べ約 18%最大荷重が小さくなった。SF-1 はシート中央から徐々に剥離していった。界面剥離破壊エネルギーが小さいために剥離しやすく, ひび割れの発生に左右されることなく, 剥離が進展したと考えられる。

曲げ耐力の計算値と実験値を比較すると, SF-3 はほぼ同程度であるが, SF-1 および SF-2 は実験値が計算値を上回っている。

(2) 荷重-変位関係

荷重-変位 (はり中央のたわみ) 関係を図-9 に示す。最大荷重は, ひび割れの発生や急激なシートの剥離の進展など, 偶発性の高い事象の影響を受けるため, 界面剥離破壊エネルギーの大きさの順序どおりとならなかったが, 終局に至る前の曲げ剛性の大きさは, 界面剥離破壊エネルギーの大きさと対応する結果が得られた。すなわち, SF-3 の剛性が最も高い。

(3) 破壊性状

各供試体の終局状態におけるひび割れ状況を図-8 に示す。いずれの供試体も最終的にはコンクリートの表層部を薄く引き剥がすような連続繊維シートの剥離により終局に至った。しかし剥離の進展状況は異なっており, SF-1 および SF-2 では中央付近のひび割れより剥離が開始し徐々にシート端部まで至ったのに対し, SF-3 はシート端部近傍のせん断ひび割れの発生により端部が剥がれ破壊に至った。

曲げひび割れはいずれの供試体においても 50~100mm 間隔で発生した。せん断ひび割れ

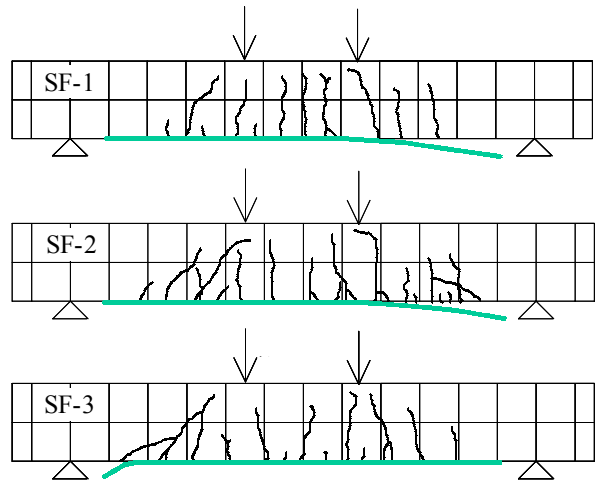


図-8 ひび割れおよびシート剥離状況 (終局時)

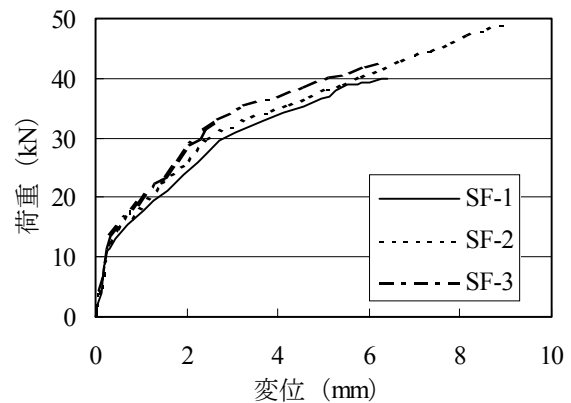


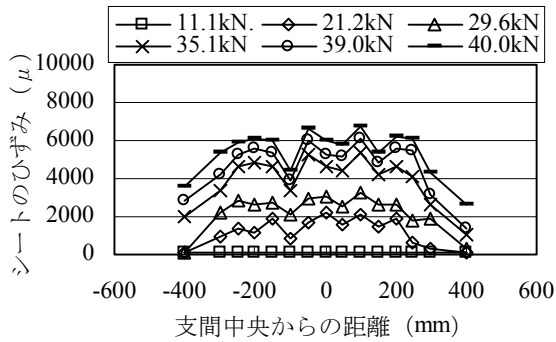
図-9 荷重-変位関係

(斜めひび割れ) は, 発生した供試体 (SF-2, SF-3) と発生しなかった供試体 (SF-1) があつた。界面剥離破壊エネルギーが大きい供試体においてせん断ひび割れが発生したことを考えると, シートとコンクリートの付着性状の違いにより, コンクリートの応力状態が変化したためであるといえる。

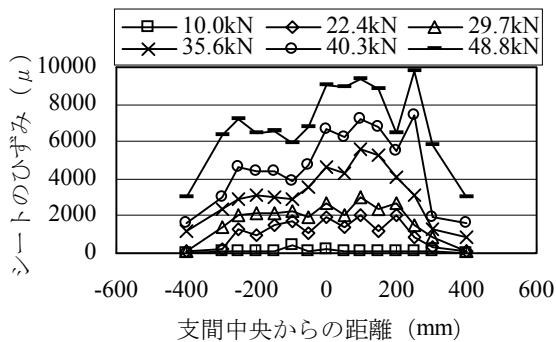
(4) ひずみ分布

図-10 に各荷重段階におけるシートのひずみ分布を示す。最大荷重の最も大きい SF-2 がひずみの最大値も大きくなっている。

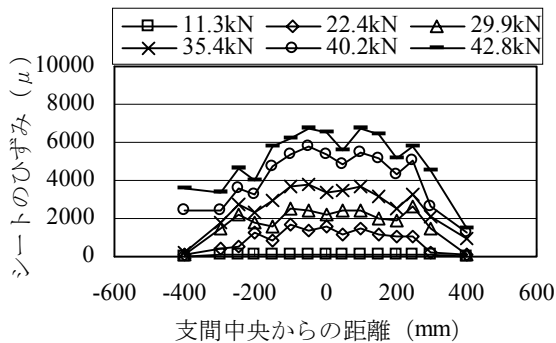
破壊形態がほぼ同じである SF-1 と SF-2 を比較すると, SF-1 の方が明らかに小さいひずみでシートの剥離破壊に至っている。このことより, 中央から端部に向かって安定してシートが剥離していく破壊形態の場合, シートとコンクリート界面の剥離破壊エネルギーが大きいほど剥離



(a) SF-1



(b) SF-2



(c) SF-3

図-10 シートのひずみ分布

が起こりにくくなる効果が現れることがわかる。

4. まとめ

連続繊維シート接着表面の処理状態を変化させることにより、シートとコンクリートとの付着特性を実験的に変化させ、一軸引張付着試験とシート補強鉄筋コンクリート供試体の曲げ試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) シート接着前のコンクリートの表面処理を行わないことと、シートとコンクリートの間にパテを塗布することにより、界面の付着特性の異なる状態を実験的に作り出

せた。

- (2) 剥離破壊モードの場合、計算上、界面剥離破壊エネルギーの増大により部材の曲げ耐力が向上する。しかし、本研究で行った実験では、界面剥離破壊エネルギーを増大させると、シートの剥離プロセスも変化したために、計算に応じた曲げ耐力の向上効果は確認できなかった。
- (3) しかし、破壊以前の部材の曲げ剛性を指標にして比較した場合、界面剥離破壊エネルギーの増大に応じて向上する効果が確認できた。
- (4) シートが安定して剥離する破壊形態の場合、界面剥離破壊エネルギーが大きいほど剥離が起こりにくくなる効果が現れることがわかる。

参考文献

- 1) 新保学幸, 下村 匠, 丸山久一, 上原子晶久: 連続繊維シート補強部材のせん断耐力に関する感度解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.313-318, 2000.7.
- 2) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー第101号, 2000.7.
- 3) 上原子晶久, 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, 1999.11.