

論文 連続繊維シートとコンクリートの付着特性が補修補強部材の力学特性に及ぼす影響

横田 稔^{*1}・下村 匠^{*2}・上原子 晶久^{*3}・丸山 久一^{*4}

要旨：連続繊維シートとコンクリートの付着特性が、補修補強部材の力学特性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室的に作り出し、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。

キーワード：連続繊維シート, 接着樹脂, 不陸修正材, 付着特性, 界面剥離破壊エネルギー

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に関して、これまで、数値解析による検討¹⁾、部材実験による検討³⁾などいくつかの研究例がある。しかし、付着試験により実測された付着特性と、達成される部材の力学性能との関係を、実験・理論の両面から検討した研究は少ない。そこで本研究では、コンクリートの表面処理を行わないことと不陸修正材(パテ)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室的に作り出し、界面の付着特性がシート

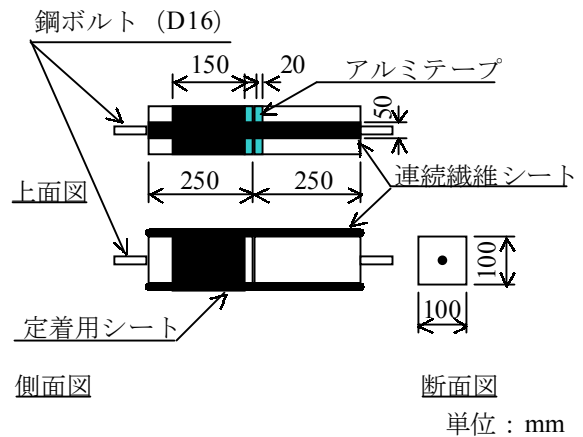


図-1 試験体の形状・寸法

補強部材の曲げ性状に及ぼす影響について、実験的検討を加えるとともに、実験結果と計算結果の比較を行った。

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

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 *2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 工博 (正会員)
 *3 弘前大学助手 理工学部地球環境学科 工博 (正会員)
 *4 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 Ph.D. (正会員)

表-1 試験体の種類

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

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

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)、ディスクサンダーによる表面処理を行う標準試験体 (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最大付着応力および最大相対変位が低下することは、著者らの既往の研究⁴⁾において確認している。パテを用いたのは、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。まず鋼製型枠を用いてコンクリートブロックを作製した。ブロックの断面中心には、引張力を試験体に伝達するために、中央で切断された鋼ボルト (直径 16mm) を埋設している。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 つに分割した。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した。ただし、表面処理無の試験体 (SB-1) にはこの工程を行わなかった。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した。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

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⁴⁾。

$$\begin{aligned} \delta(x_n) &= \int_0^x \varepsilon_f(x) dx \\ &\cong \frac{\Delta x}{2} (\varepsilon_f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_f(x_i) + \varepsilon_f(x_n)) \end{aligned} \quad (1)$$

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分布の勾配より求める⁴⁾。

$$\begin{aligned} \tau(x_n) &= t_f \cdot E_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \\ &\cong \frac{1}{2} \cdot t_f \cdot E_f \left(\frac{\varepsilon_f(x_{n+1}) - \varepsilon_f(x_{n-1}))}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

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化することにより、平均的な付着特性を得ることができる。付着応力-相対変位関係のモデルとして、既往の著者らの研究⁴⁾に基づき、この曲線の特徴をよく表す 2 直線の弾性-軟化

一剥離型モデル (図-2) を採用した。モデル化の手順は既往の研究⁴⁾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 は最大相対変位、 τ_y は最大付着応力である。

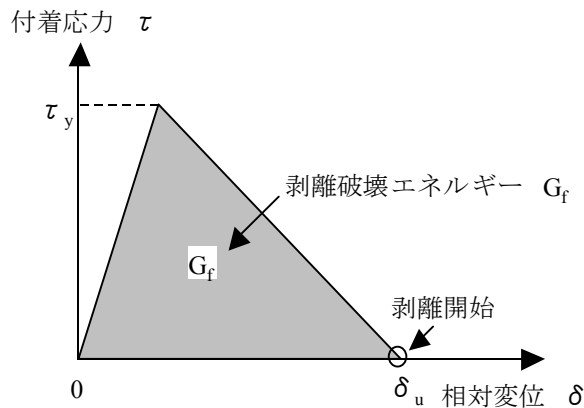


図-2 付着応力と相対変位の関係

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分布の積分値である⁴⁾。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。

剥離進行過程の複数の载荷ステップにおけるシートのひずみ分布の測定結果より導出した、2直線モデルによる付着応力-相対変位関係を図-4 に、界面剥離破壊エネルギーを図-5 にそれぞれ示す。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

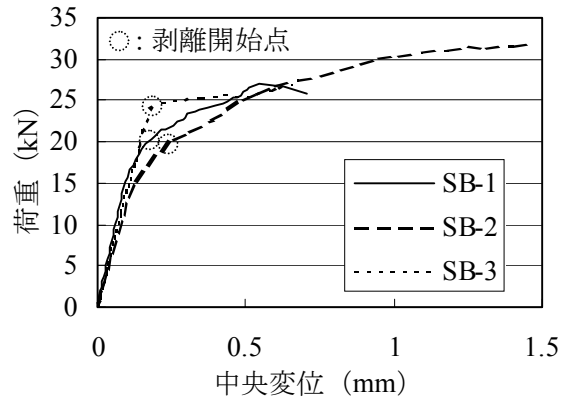


図-3 荷重-中央変位関係

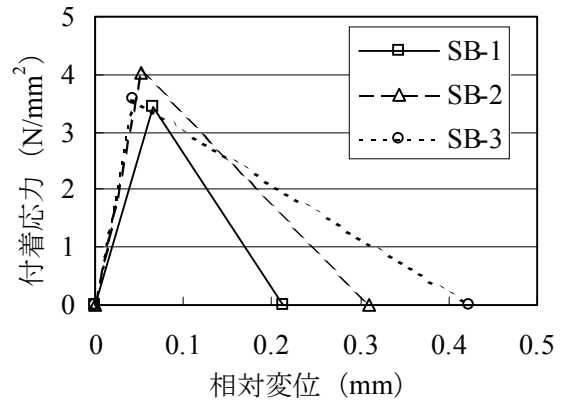


図-4 付着応力-相対変位関係

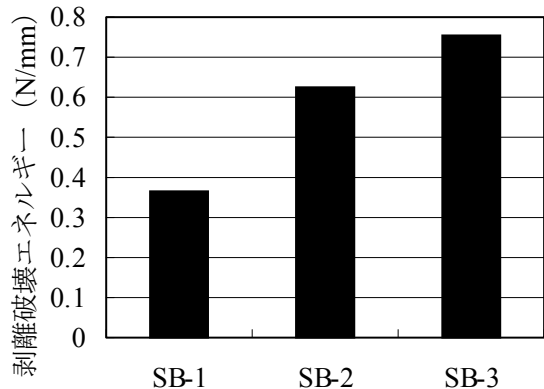


図-5 界面剥離破壊エネルギー

付着応力の違いが小さいため、最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)。

図-4 の付着応力-相対変位関係における最大相対変位、および図-5 の界面剥離破壊エネルギーは SB-2 の方が SB-1 より大きかったが、図-3 の剥離開始荷重では、両者の差は見られなかった。この理由は、剥離開始時だけでなく剥離開始以降の複数の载荷ステップのひずみ分

布のデータから、平均的に同定される付着特性を求めているからである。理想的な剥離過程を仮定した場合、剥離開始以降、荷重はほぼ一定となると考えられるが、実験では SB-1, SB-2 ともに剥離開始後も荷重が増大している。SB-2 の方が最終的に高い荷重となったため、大きな界面剥離破壊エネルギーが同定された。なお、剥離進行中に荷重が増大する理由は、シートの付着・剥離現象、境界条件などが、必ずしもモデルで表現しているような理想的な状態ではないことを示していると考えている。

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⁾。図-6 は、この方法により、図-7 のシート補強はりの曲げ耐力を算定した結果である。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。

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。供試体の共通諸元を表-3に、実験水準を表-4に、形状・寸法を図-7にそれぞれ示す。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、鉄筋比を小さくしている。シートの物性値、接着面の処理方法、シートの接着方法は一軸引張付着試験と同様である。

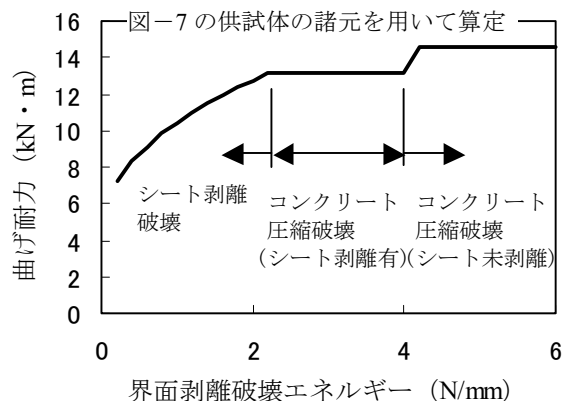


図-6 曲げ耐力の算定²⁾の1例

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
コンクリートの弾性係数	GPa	34.2
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	78.0

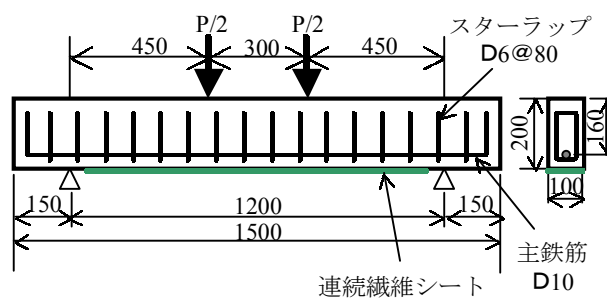


図-7 供試体の形状・寸法

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 _r (N/m)	曲げ耐力 (kN)		供試体数
				実験値	計算値	
SF-1	無	無	0.36	40.0	38.7	1
SF-2	有	無	0.62	48.8	49.3	1
SF-3	有	有	0.75	42.8	53.4	1

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。

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、ひび割れ間隔を100mmとして算出した。曲げ耐力の計算値は、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。

曲げ耐力の計算値と実験値を比較すると、SF-1とSF-2は計算値と実験値が近く、SF-3は計算値に比べて実験値が約2割小さかった。

(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。曲げ耐力は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に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いた。SF-1およびSF-2では供試体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剥離が進展して終局に至った。これに対して、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、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ようであった。SF-3はシートが端部まで剥離した後、斜めひび割れが進展して終局となった。

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。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）があった。界面剥離破壊エネルギーが大きい供試体において斜めひび割れが発生したことから、シートとコンクリートの付

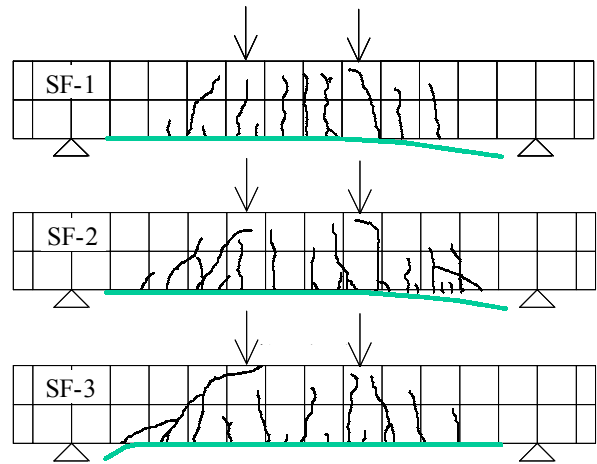


図-8 ひび割れおよびシート剥離状況（終局時）

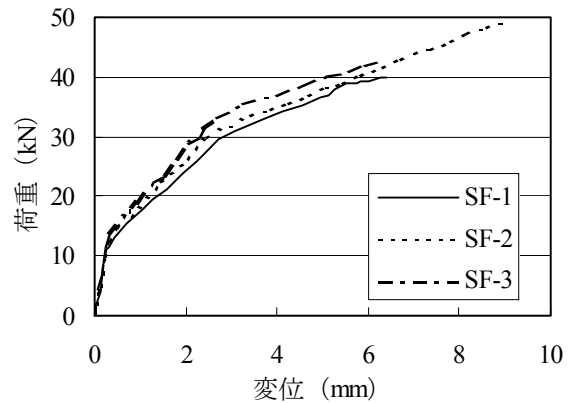


図-9 荷重－変位関係

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と考えられる。

SF-3の曲げ耐力が界面剥離破壊エネルギーより計算される値よりも小さかった理由を、観察された破壊性状の違いから次のように考察する。界面の剥離破壊エネルギーの大きいSF-3では、剥離が開始しにくいので、斜めひび割れが発生し、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するという、他の供試体と異なる破壊プロセスを辿った。この場合、斜めひび割れの発生にともない、シートの剥離が急激に進展するので、安定して剥離が進行した場合よりも最大荷重が小さくなったと考えられる。耐力算定式では、このような詳細な破壊性状の違いまでは考慮されない。

(4) シートのひずみ分布

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。

破壊性状がほぼ同じである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。中央から端部に向かって安定してシートの剥離が進展するモードの場合、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が進展しにくくなる効果が現れることがわかる。

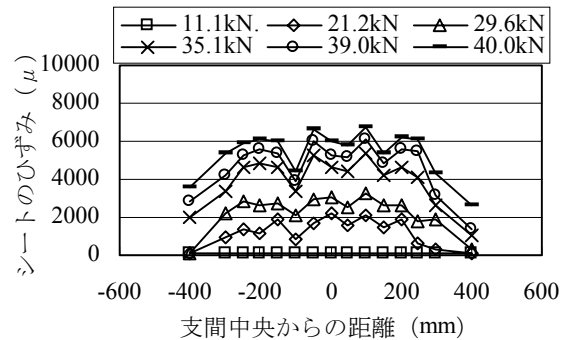
4. まとめ

連続繊維シートとコンクリートの界面の付着特性を実験室的に変化させ、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い、付着特性が部材の力学性状に及ぼす影響を検討した結果、以下の知見を得た。

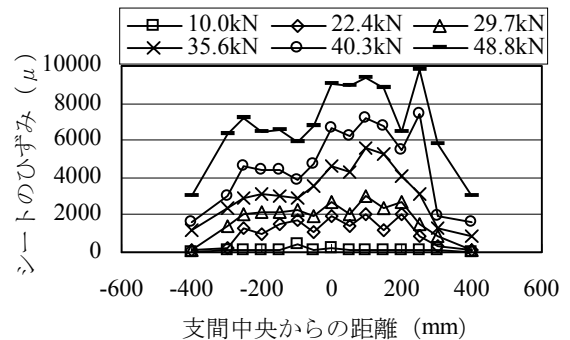
- (1) シート接着前のコンクリートの表面処理を行わないことと、シートとコンクリートの間にパテを塗布することにより、界面の付着特性の異なる状態を実験室的に作り出すことができた。
- (2) 剥離破壊モードの場合、計算上、界面剥離破壊エネルギーの増大により部材の曲げ耐力が向上する。しかし、本研究で行った実験では、界面剥離破壊エネルギーを増大させると、部材の破壊性状も変化したために、計算に応じた曲げ耐力の向上効果は確認できなかった。
- (3) しかし、終局に至る以前の部材の曲げ剛性に着目して比較した場合、界面剥離破壊エネルギーの増大に応じて向上する効果が確認できた。
- (4) シートが安定して剥離する破壊モードの場合、界面剥離破壊エネルギーが大きいほど剥離が進展しにくくなる効果が確認できた。

参考文献

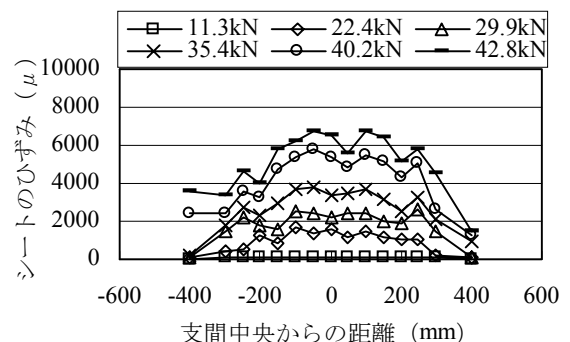
- 1) 新保学幸, 下村 匠, 丸山久一, 上原子晶久: 連続繊維シート補強部材のせん断耐力



(a) SF-1



(b) SF-2



(c) SF-3

図-10 シートのひずみ分布

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, 2000.6.

- 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) 前田敏也, 小牧秀之, 坪内賢太郎, 村上かおり: 緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.817-822, 2001.7.
- 4) 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.