論文　連続繊維シートの付着性状に及ぼす母材表層の影響

上原子　晶久[*1]・下村　匠[*2]・丸山　久一[*3]

要旨：連続繊維シートと接着母材の組合せを変えた一軸引張試験を行い，その実験結果より得られた剥離性状や界面破壊エネルギーに基づいて，シートと母材とのシステムにおける構成要素の強度が界面破壊エネルギーに及ぼす影響について検討した。その結果，行った実験の範囲では，微視的な構成要素の強度や破壊特性は，巨視的な界面破壊エネルギーに影響することを示した。

キーワード：母材，連続繊維シート，構成要素，界面，強度，界面破壊エネルギー

1.　はじめに

連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離性状に関しては，多くの検討が行われており，シートの剥離破壊は，シートと接着母材との界面が破壊することによって起こる[1)]。シートの界面剥離性状を代表する指標は界面破壊エネルギーであり，シートや接着樹脂，及び母材などの材料の組合せで界面破壊エネルギーが変化することが知られている[2)など]。

本研究では以上について検討するため，連続繊維シート（炭素・アラミド）と母材（コンクリート・鋼板）の組合せを変えた一軸引張付着試験の結果に基づいて，シートと母材の組合せ，並びにシートと母材の微視的な構成要素の強度が界面破壊エネルギーに及ぼす影響について考察する。

表－１　試験水準と試験結果一覧

試験体名	繊維種類	母材種類	圧縮強度 (N/mm^2)
CC-1	炭素	コンクリート	45.8
CC-2	炭素	コンクリート	45.8
CC-3	炭素	コンクリート	36.3
SC-1	炭素	鋼板	－
SC-2	炭素	鋼板	－
SC-3	炭素	鋼板	－
CA-1	アラミド	コンクリート	32.4
CA-2	アラミド	コンクリート	33.3
CA-3	アラミド	コンクリート	33.3
SA-1	アラミド	鋼板	－
SA-2	アラミド	鋼板	－
SA-3	アラミド	鋼板	－

表－２　シートの物性値

繊維種類	厚さ (mm)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
炭素	0.111	3320	270
アラミド	0.169	2850	83

2.　一軸引張付着試験と付着特性の定量化

試験水準，及び試験結果の一覧を**表－１**に示した。一軸引張付着試験に使用した連続繊維シートは炭素繊維，アラミド繊維の２種類である。試験体は，母材とシートの組合せごとに３体づつ作製した。連続繊維シートの物性値を**表－２**に示した。以下に，接着母材ごとに付着試験の概要を示す。また，付着特性を定量化するための界面破壊エネルギーの導出方法についても併せて示す。

2.1　コンクリートとシートの一軸引張付着試験

本研究における接着母材にコンクリートを適用した場合の一軸引張試験結果については，西田ら[3)]，及び横田[4)]が実施した試験結果を参照したものである。これらの試験は，標準的な試験方法[1)]に

*1　弘前大学助手　理工学部地球環境学科　工博　（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　長岡技術科学大学教授　工学部環境・建設系　Ph.D.　（正会員）

従って行われている。試験体の形状・寸法を**図－１**に示す。試験体は，幅 50mm の連続繊維シートを断面寸法 100mm×100mm×500mm のコンクリートブロックの両側面に接着して作製する。コンクリートブロックの表面はあらかじめディスクサンダーでケレンが施されている。シートの接着は，コンクリートの表面にプライマーを塗布した後に一定時間養生を行い，その上にエポキシ樹脂を用いてシートを接着した。

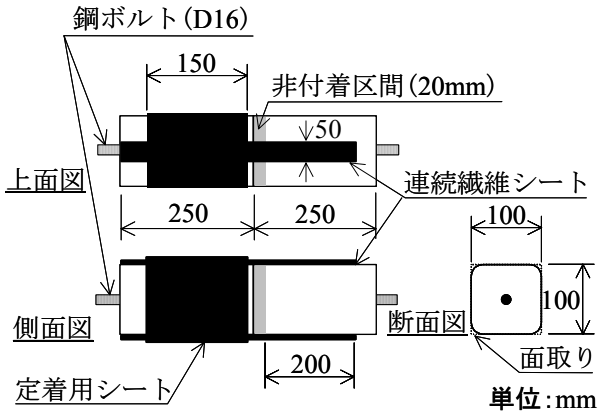
試験体において，片側半スパンを試験区間とした。試験区間と対称のブロックでのシートの剥離を防ぐため周方向にシートを巻き立てた。試験体への載荷は，コンクリートブロック内に埋め込んだ鋼ボルト(直径 12mm)を介して行われる。なお，コンクリートブロック，及び鋼ボルトは試験体の中央で切断されており，引張力のほとんどが連続繊維シートだけに伝達される様になっている。

試験体への載荷は，載荷速度 0.05mm/min を目標に変位制御で実施した。また，試験区間における連続繊維シートの表面に検長 5mm のひずみゲージを 20mm 間隔で貼付して，この区間におけるシートのひずみを計測した。

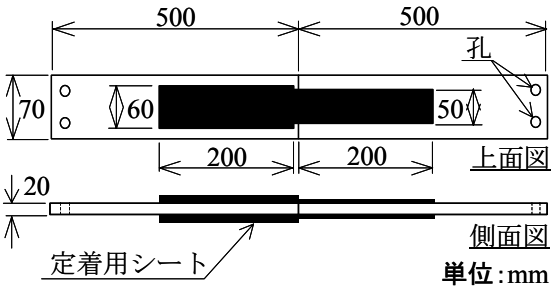
2.2　鋼板とシートの一軸引張付着試験

図－２に試験体の形状・寸法を示した。母材となる鋼板(SS400)一枚当りの断面寸法は 22mm×70mm×500mm であり，これを２枚つき合わせたものに幅 50mm の連続繊維シートを接着して試験体を作製した。シートの接着方法については，母材をコンクリートにした場合とほぼ同様である。なお，鋼板表面の不動体皮膜はシート接着前にディスクサンダーで削除した。また，試験区間と対称の側では，幅 60mm，長さ 200mm の連続繊維シートを最初に接着した幅 50mm のシートの上に重ねて貼ることにより，この区間のシート剥離を防いだ。

載荷では，試験体の両端部に相当する鋼板に開けた孔へ直径 12mm の丸鋼を通して，この部分を試験機のクロスヘッドに引っ掛けて，試験体に引張力を負担させた。載荷速度は，0.05mm/min を目標にした。また，試験区間には検長 5mm のひずみゲージを 25mm 間隔で貼付してこの区間のシートひずみを計測した。



図－１　接着母材をコンクリートとした場合の試験体の形状・寸法



図－２　接着母材を鋼板とした場合の試験体の形状・寸法

2.3　付着応力ーすべり関係のモデル化と界面破壊エネルギー

一軸引張付着試験より得られた連続繊維シートのひずみ分布より局所的な付着応力とすべりとの関係を導出する方法を以下に示す。なお，方法の詳細は別報[5)]に譲り，本稿では概略について述べる。

まず，シートと接着母材間の付着応力$\tau(x_n)$はシートのひずみ分布を数値的に微分することにより求める。

$$\tau(x_n) = t_f \cdot E_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \approx \frac{1}{2} t_f \cdot E_f \left(\frac{\varepsilon_f(x_{n+1}) - \varepsilon_f(x_{n-1})}{\Delta x} \right) \tag{1}$$

ここに，t_f はシートの厚さ，E_f はシートの弾性係数，$\varepsilon_f(x_{n-1})$，$\varepsilon_f(x_{n-1})$は測定位置 x_n のシートひずみ，Δx はひずみゲージの貼付間隔である。シートと母

材間のすべり $S(x_n)$は，シート端部から該当点までのシートひずみを数値的に積分することにより求める。

$$S(x_n)=\int_0^{x_n}\varepsilon_f(x)dx \approx \frac{\Delta x}{2}\left(\varepsilon_f(x_0)+2\sum_{i=1}^{n-1}\varepsilon_f(x_i)+\varepsilon_f(x_n)\right) \quad (2)$$

各荷重ステップにおけるシートのひずみ分布について，以上の方法で付着応力とすべりの関係を求める。シートの剥離が進展している段階のすべてのひずみ分布について，この作業を行えば複数の付着応力ーすべり曲線が得られる。これらを平均化して，**図－３**に示した様な弾性ー軟化ー剥離型の付着応力ーすべり関係が得られる。

界面破壊エネルギーG_fは，局所的な付着特性を表わす物性値であり，**図－３**に示した付着応力ーすべり曲線で囲まれた面積として定義される。

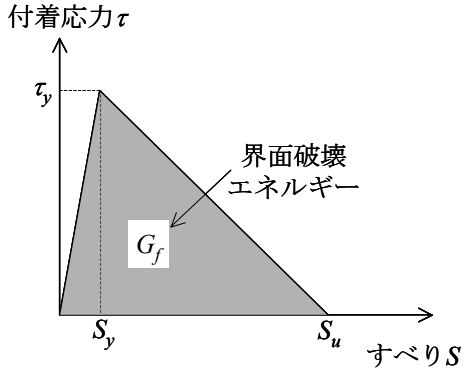
$$G_f=\frac{1}{2}\tau_y\cdot S_u \quad (3)$$

ここに，τ_yは最大付着応力，S_uは最大すべりである。

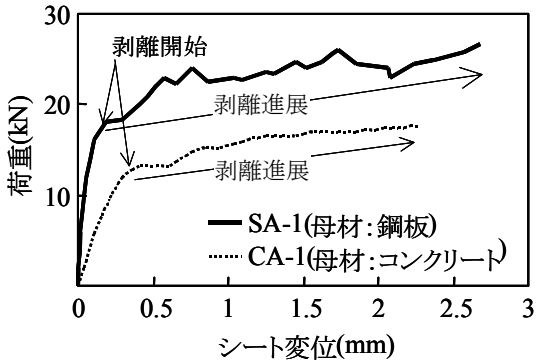
2.4　実験結果

図－４は，荷重とシート変位との関係の一例を示したものである。シート変位は試験体中央におけるシートひずみ分布の積分値である。シート剥離の進展過程をそれぞれ比較すると，シートと鋼板の組合せでは，荷重が大きく変化しているのに対して，コンクリートとの組合せでは，荷重の大きな変化は見られない。これは，鋼板に接着した場合には，シート剥離の進展が，コンクリートに接着した場合と比較して不安定になるためと考えられる。

表－３に試験結果の一覧として，各試験体について付着応力ーすべり関係の材料パラメータ，および界面破壊エネルギーを同定した結果を示す。炭素繊維シート接着の場合には，母材との組合せによらず付着応力ーすべり関係の材料パラメータや界面破壊エネルギーに大きな差は見られない。しかしながら，アラミド繊維シート接着の場合には，母材との組合せによって付着応力τ_yとすべり



図－３　付着応力とすべりの関係



図－４　荷重ーシート変位関係の一例（アラミド繊維シート）

S_u，及び界面破壊エネルギーに大きな差が見られる。この原因については，次章で検討する。

3.　界面破壊エネルギーに及ぼす構成要素の影響

3.1　界面破壊エネルギーの比較

図－５は，シートと母材の組合せごとの界面破壊エネルギーを比較した結果である。なお，**図－５**における界面破壊エネルギーは，各試験水準３体の試験結果の平均値である。この図より，本実験結果の範囲で以下のことが言える。まず，炭素繊維シート接着の場合には，組み合わせる母材によらず界面破壊エネルギーはあまり変化しない。一方，アラミド繊維シート接着の場合には，鋼板との組合せにおいて界面破壊エネルギーが大きく増加する結果が得られた。以上をコンクリートと組合せた場合と比較すると，界面破壊エネルギーは約５倍増加しており，アラミド繊維と鋼板との組合せだけにおいて界面破壊エネルギーが増加す

表－３　実験結果

試験体名	母材種類	シート種類	最大荷重 (kN)	τ–S関係の材料パラメータ S_y (mm)	τ_y (N/mm^2)	S_u (mm)	界面破壊エネルギー (N/mm)	破壊した構成要素
CC-1	コンクリート	炭素	21.0	0.075	5.01	0.359	0.90	III, IV
CC-2	コンクリート	炭素	21.5	0.056	4.61	0.378	0.87	III, IV
CC-3	コンクリート	炭素	22.5	0.053	4.30	0.340	0.73	III, IV
SC-1	鋼板	炭素	23.5	0.072	4.83	0.380	0.92	III
SC-2	鋼板	炭素	29.6	0.100	5.58	0.220	0.61	III
SC-3	鋼板	炭素	22.0	0.049	3.57	0.160	0.29	III
CA-1	コンクリート	アラミド	17.7	0.063	2.80	0.454	0.64	III, IV
CA-2	コンクリート	アラミド	14.4	0.068	2.57	0.410	0.53	III, IV
CA-3	コンクリート	アラミド	17.3	0.059	2.41	0.598	0.72	III, IV
SA-1	鋼板	アラミド	27.2	0.086	8.38	0.440	1.84	II, III
SA-2	鋼板	アラミド	34.9	0.160	12.10	0.730	4.42	II, III
SA-3	鋼板	アラミド	35.6	0.140	11.20	0.710	3.98	II, III

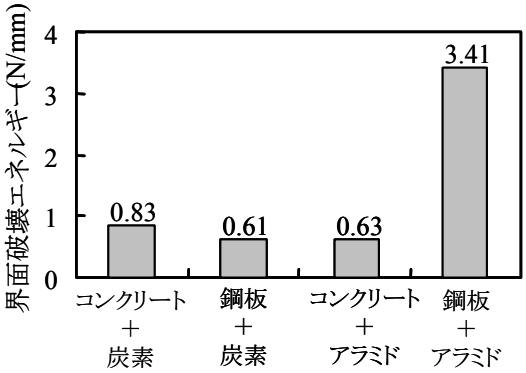
る結果となった。

3.2　母材を鋼板とした場合の剥離破壊性状

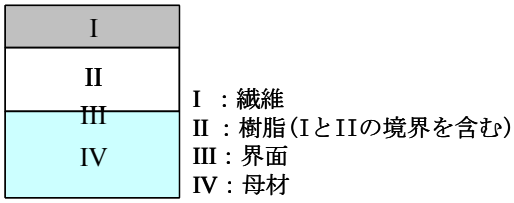
母材を鋼板とした一軸引張付着試験における剥離破壊後のシート裏面を**写真－１**に示した。**写真－１**において，上側はアラミド繊維シート，下側は炭素繊維シートである。アラミド繊維シートの場合には，樹脂が部分的に剥がれていること，及び樹脂にひび割れが発生していることから，樹脂の層や樹脂と鋼板との界面で剥離破壊が生じていると言える。一方，炭素繊維シートの場合には，アラミド繊維シートの剥離破壊で見られたような樹脂の破壊は見られない。よって，炭素繊維シートの剥離破壊は，樹脂と鋼板との界面だけで生じているものと考えられる。

3.3　システムにおける構成要素の強度

前節までの実験結果に基づいて，シート－母材システムの微視的な構成要素の強度が界面破壊エネルギーに及ぼす影響について検討を試みる。**図－６**は既往の研究を参考に，シート，接着樹脂，母材からなるシステムの構成要素を表わしたものである[6)]。このシステムにおいて，繊維と樹脂との界面は樹脂に含まれるものと仮定する。これは，樹脂の層だけが破壊してシートの剥離が生じることは現実には起こり難いと考えたこと，繊維と樹脂との界面を樹脂に含ませた方が，構成要素の強度を合理的に比較できると判断したことによる。各構成要素の強度の説明を**表－４**に示した。



図－５　シートと母材の組合せごとの界面破壊エネルギーの比較



図－６　シート－母材システムの構成要素

表－４　システムにおける各構成要素の強度

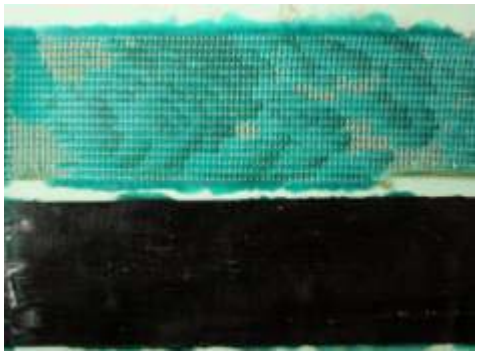
構成要素	強度*
繊維(I)	f_I^A：アラミド，f_I^C：炭素
樹脂(II)	f_{II}^A：アラミド，f_{II}^C：炭素
界面(III)	f_{III}^{As}：アラミド＋鋼板 f_{III}^{Ac}：アラミド＋コンクリート f_{III}^{Cs}：炭素＋鋼板 f_{III}^{Cc}：炭素＋コンクリート
母材(IV)	f_{IV}^s：鋼板，f_{IV}^c：コンクリート

*：強度を表わす記号で上付きの添え字は，
A:アラミド繊維，C:炭素繊維
s:鋼板，c:コンクリート，をそれぞれ表わす

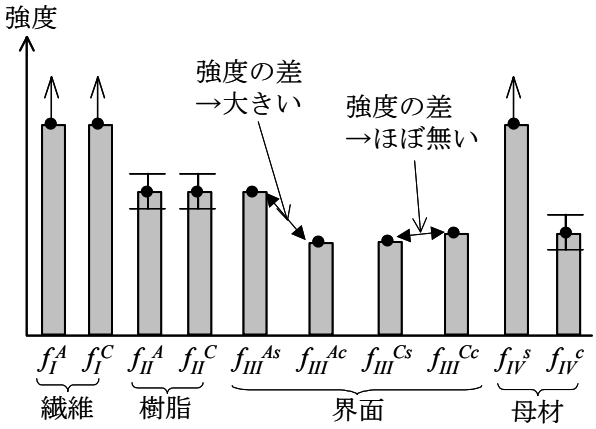
ここでいう強度とは，材料の引張強度，せん断強度などの様に，厳密な定義に基づくものではなく，構成要素の破壊荷重の大きさを代表する指標である。なお，樹脂(II)は樹脂と繊維の界面を含むので，樹脂(II)の強度f_{II}^{A}，f_{II}^{C}は繊維の影響を受けると考える。界面(III)の強度 f_{III}^{As}，f_{III}^{Cs}，f_{III}^{Ac}，f_{III}^{Cc} は，本実験結果に基づき，繊維と母材の影響を受けると仮定する。

実験結果より，破壊した構成要素について検討する。**写真－１**に示した実験結果より，アラミド繊維と鋼板との組合せでは樹脂(II)と界面(III)が，炭素繊維と鋼板との組合せでは界面(III)だけが破壊して剥離破壊を生じると考えられる。一方，シートとコンクリートとの組合せでは繊維の種類によらず，界面(III)と母材(IV)の表層が破壊することにより，シートの剥離破壊が生じることが既往の研究より明らかにされている[2), 3)]。本実験結果における各試験体で破壊した構成要素の一覧を**表－３**に示した。

ここで，各構成要素の強度について，その大小関係を比較する。**表－３**に示した破壊要素，並びに**図－５**に示したシートと母材の組合せによる界面破壊エネルギーの大小比較より，各構成要素における強度の大小関係を推測すると**図－７**の様になる。まず，繊維(I)の強度 f_{I}^{A}，f_{I}^{C} については，実験結果では繊維が破壊していなかったので，他の要素の強度よりも大きいと考えられる。また，鋼板の母材強度 f_{IV}^{s} も以上と同様である。次に，樹脂(II)の強度f_{II}^{A}，f_{II}^{C}であるが，アラミド繊維シートと鋼板との組合せで一部，樹脂(II)と界面(III) の破壊が混在していたが，他の組合せでは樹脂の破壊が見られなかったことから，繊維の種類によらずアラミド繊維と鋼板の組合せにおける界面強度f_{III}^{As}とほぼ同等であると考えられる。さらに，界面(III)の強度 f_{III}^{As}，f_{III}^{Cs}，f_{III}^{Ac}，f_{III}^{Cc} だが，**図－５**に示した界面破壊エネルギーの大小関係より，アラミド繊維と鋼板の組合せの界面強度 f_{III}^{As} が，それらの中で一番大きく，その他の界面強度は，ほぼ同等と考えられる。界面破壊エネルギーの大小比較より，コンクリートを母材(IV)とした場合の強度f_{IV}^{c}は界面強度f_{III}^{Ac}, f_{III}^{Cc}らと同等であると言える。



写真－１　母材を鋼板とした付着試験における剥離破壊後のシート裏面（上側：アラミド繊維シート，下側：炭素繊維シート）



図－７　構成要素における強度の大小関係

図－７に示した構成要素の強度比較において，アラミド繊維，及び炭素繊維シートと鋼板の組合せによる界面強度 f_{III}^{As}，f_{III}^{Cs} に大きな差が生じる原因を検討するため，**写真－２**にシートと鋼板の組合せによる付着試験後のシート裏面の走査型電子顕微鏡(SEM)像を示す。この像より，炭素繊維シート(**写真－２(a)**)では，シート裏面，すなわちシートと鋼板との界面に気泡が存在していることがわかる。しかし，アラミド繊維シート(**写真－２(b)**)では，界面に気泡は見られず，一部の樹脂が破壊している。これより，アラミド繊維シートと鋼板の組合せでは，界面に気泡が生じなかったことにより界面強度が相対的に増加したと推測される。このような界面強度は，界面破壊エネルギー

に影響を及ぼすことが考えられ，その結果，アラミド繊維シートと鋼板の組合せで界面破壊エネルギーは相対的に増加したものと解釈している。ただし，気泡の存在については普遍的な傾向ではなく，脱包が不十分であるために生じる施工上の欠陥である可能性は否定できない。よって，界面強度に関する影響因子の詳細については，今後の研究で明らかにしたいと考えている。

以上より，微視的な界面強度や構成要素の破壊特性は，巨視的な界面破壊エネルギーに影響を及ぼすことが，本研究の範囲で明らかになった。

4. まとめ

母材と連続繊維シートの組合せを変えた一軸引張付着試験の試験結果より，シート－母材システムにおける各構成要素の強度が界面破壊エネルギーに及ぼす影響ついて検討した。本研究の範囲で以下の結論が得られた。

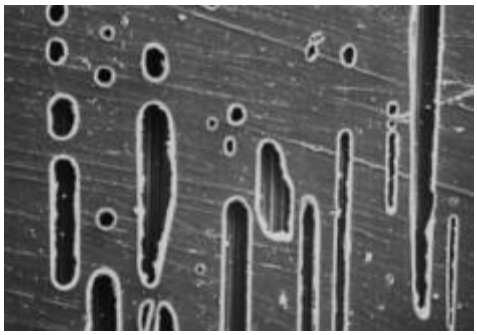
(1) アラミド繊維シートと鋼板との組合せでは，界面破壊エネルギーが相対的に大きく増加することを示した。

(2) 実際の破壊要素の観察や，実験より導出した界面破壊エネルギーより，各構成要素の強度について大小比較を行った。その結果，樹脂と鋼板の界面強度は，アラミド繊維シートを接着した方が，炭素繊維シートを接着した場合よりも大きくなることを示した。

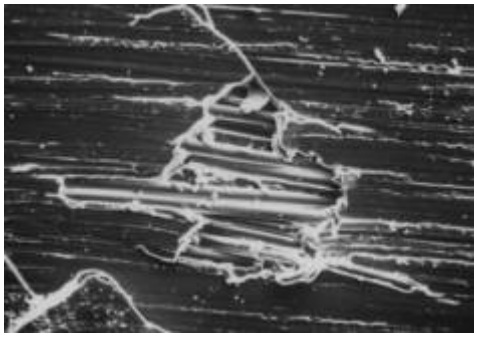
(3) 界面強度がシートと母材の組合せで異なる原因は，界面に存在する気泡などの影響が大きいことを示した。ただし，気泡の有無に関しては，施工上の欠陥の可能性があるため，今後の研究で界面強度の実体を明らかにしたい。

(4) 微視的な界面強度は，巨視的な界面破壊エネルギーに影響することを示した。

本研究で使用した連続繊維シートは，帝人株式会社，三菱化学産資株式会社に提供して頂いた。また，SEM 像の撮影に関して弘前大学理工学部柴　正敏教授に多大なご支援を頂いた。ここに記して深謝する次第である。



(a)　炭素繊維シート



(b)　アラミド繊維シート

写真－２　鋼板を母材とした付着試験後の連続繊維シートの裏面の走査型電子顕微鏡(SEM)像（倍率100倍）

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：連続繊維コンクリート研究委員会報告書(II)，1998.

2) 吉澤弘之，呉　智深，袁　鴻，金久保利之：連続繊維シートとコンクリートの付着挙動に関する研究，土木学会論文集，No.662／V-49，pp.105-119，2000.

3) 西田浩之，上原子晶久，下村　匠，丸山久一：連続繊維シートとコンクリートとの付着性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1507-1512，1999.

4) 横田　稔：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，長岡技術科学大学修士論文，2002.

5) 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.

6) 佐川康貴，松下博通，岳尾弘洋：炭素繊維シート接着工法における付着性状および剥離耐力向上方法に関する研究，土木学会論文集，No.669／V-50，pp.71-83，2001.