

## 論文 炭素繊維シートの付着せん断強度に関する研究

土谷 逸郎\*<sup>1</sup>・松井 繁之\*<sup>2</sup>・小林 朗\*<sup>3</sup>・真鍋 隆\*<sup>4</sup>

**要旨**：炭素繊維シートの付着性能を調べる方法として、中央にスリットを有する供試体を用いた曲げ梁形式の試験機を開発した。これを用いてコンクリートの圧縮強度をパラメータとして実施した静的載荷試験の結果から、新型試験機の検証と付着せん断強度の算出を試みた。その結果、シートの表面ひずみより求められた付着せん断強度に2種類の傾向が見られ、そのうち、比較的安定性の高い値として、平均値 3.41MPa、下限値 2.11MPaを得た。また、今回の試験では、コンクリート強度による付着せん断強度への有意な影響は見られなかった。

**キーワード**：付着せん断強度、炭素繊維シート、付着強度試験

## 1. はじめに

炭素繊維シート（以下、シート）は鋼の10倍以上の引張強度を持ち、近年、床版や橋脚などの、耐荷力・耐久性不足が生じたRC部材の補強に用いられている。松井らの研究<sup>1)</sup>においてもシートで下面補強した床版について輪荷重走行試験を多数行い、耐久性の向上効果を評価してきた。しかし、シートとコンクリートの付着強度に関する情報は不十分であり、現段階で設計を行うことは難しいとされている。その一因として、部材での付着挙動を明らかにするための標準的な試験方法が未だ確立されていないことが挙げられる<sup>2)</sup>。

過去、松井らが行った輪荷重走行試験機によるシート補強床版の疲労載荷実験<sup>1)</sup>からも、次の2つの問題点が挙げられる。①シートの重ね貼り施工時、上から貼り足すシートの溶剤が下層の樹脂に悪影響を及ぼした疑いがある。②同じ材料諸元のシートでも、接着剤の違いによって補強効果に差がある。これら施工上の問題点を調査するために再度、輪荷重走行試験を行うのは時間と労力がかかる。また、構造実験である輪荷重走行試験では、シートの付着特性というマイクロのメカニズムを把握することは難しい。そこで本研究では、シートの付着問題の基礎的資料を得るための実験として、静的試験と疲労試験の両方が可能な新型試験

機を提案し、まず始めに、試験機の検証とシート-コンクリート間の付着性状の把握を目的に、静的試験を行った。本論文では静的試験の結果を報告しシートの付着性状について考察する。

## 2. 試験概要

## 2.1 試験機の開発

付着試験では直方体供試体による単純引張試験が理想であり、試験方法も簡便であるために付着強度を算定する基礎実験として幅広く行われているが、①載荷時に偏心しやすく、4つある付着面（1対の2面に剥離防止のせん断補強シートを巻き、偏心の影響を低下させる方法もあり、この場合は2つ）に均等に引張力が伝達しにくい<sup>2)</sup>、②実部材に見られる、曲げ引張りによる剥離を再現できない<sup>2)</sup>、③疲労載荷が困難である、という3つの問題点が考えられる。本研究では、これらを解消する目的で梁の曲げ形式を導入して、新型試験機を提案する。ただし、試験体全体をコンクリート梁で作成した場合、破壊はシートの剥離だけではなく、コンクリート梁上縁部の圧壊、下縁部での曲げせん断破壊が生じるなど、コンクリート梁自身の破壊と複合するため、純粋な付着強度を算定する上で障害が生じるものと思われる。そこで、図-1のような新

\*1 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

\*2 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

\*3 日鉄コンポジット(株) トウシート部 技術グループリーダー 工修 (正会員)

\*4 (株)ケミカル工事 エンジニアリング部 次長

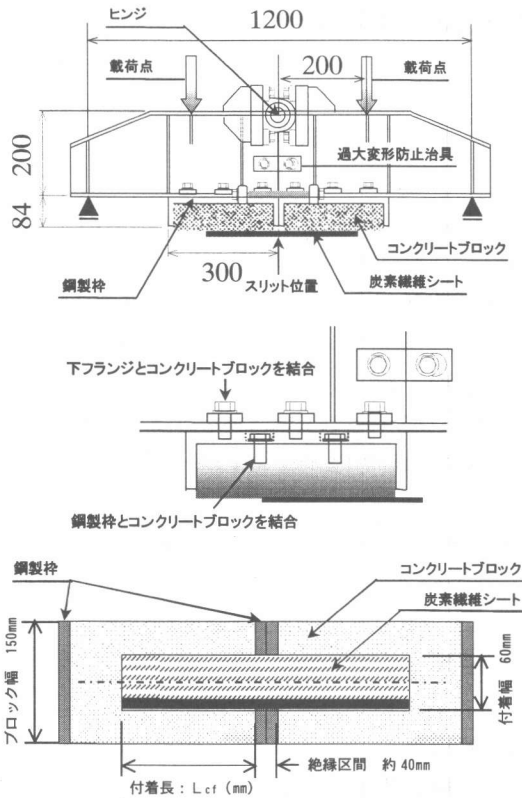


図-1 新型試験機の概要 上: 装置全体 (単位: mm)

中: 接合部詳細 下: 試験機下面から見たシート貼付部

型試験機を開発した。この試験機は中央部で左右二つに分かれたH型鋼梁を基本としており、その頂部をヒンジ結合している。シートを貼り付けたコンクリートブロック (内部に D6 のメッシュ筋を配置) は、まず鋼製枠内に収められ、これと片側4本、計8本のボルトで結合する。その後、片側6本、計12本のボルトによって試験機の下フランジに固定する。梁のスパンは1200mm、シート貼り付け位置での梁の高さはH型钢とコンクリートブロックを合わせて284mmとなる。荷重は治具を用いてシート付着領域を跨ぐように行うので、シート貼り付け部は等モーメント区間になり、薄いシートには純引張力が作用する。そのため、本載荷方法によって曲げ荷重を与えることにより、シートの純付着せん断強度を求めることができる。なお、シートはスリットを含めた鋼製枠の内側フランジ部分の約40mm間の付着を切って貼付した。軸直角方向の付着幅は一律60mmとした。

## 2.2 既往の研究成果の概説

既往の単純引張型の供試体による付着せん断試験より、シートの付着せん断強度には次のような影響パラメータが抽出される<sup>3)</sup>。① 接着剤の弾性係数、② 接着界面の粗度、③ シートの引張剛性、④ コンクリートの圧縮強度。

ここで、既往の研究データを整理して、各パラメータ内における影響の傾向を見てみることにする。ただし、シートの付着せん断強度の算定は3.2で示すように、シート表面のひずみゲージによって求める方法が一般的ではあるが、標準的な算出法は規定されておらず評価方法は論文毎に様々であった。そこで、相対的な比較指標として、シートが剥離する際の供試体に作用する最大荷重をシートの貼付幅で除した、単位幅あたり引張荷重:  $P_w$  (kN/cm) を用いて各パラメータ内での比較を試みた。ここで、付着せん断強度:  $\tau_y$  は有効付着長:  $l_e$  が既知の場合、 $\tau_y = P_w / l_e$  であり、 $P_w$  を用いた比較は  $l_e$  が一定である、という仮定が成立しているものとしている。

①をパラメータとした比較では、図-2に示すように、低剛性で高靱性の接着剤の方が  $P_w$  を大きくすることが分かる。次に②の比較を図-3に見ると、ドライアイスブラスト、ディスクサンダー、高圧水洗の順で  $P_w$  は大きくなっている。一方で、実際の表面の粗さは、ディスクサンダー、高圧水洗、ドライアイスブラストの順で大きく、コンクリート表面が粗いだけでは  $P_w$  は大きくならず、過剰な表面仕上げが付着界面に与える可能性が考えられる。最後に、③の影響度を図-4で見る。ここでは、シートの剛性を式 (1) から評価する<sup>7)</sup>。

$$G = E_{cf} \cdot t_{cf} \quad (1)$$

ここに、 $G$ : シートの引張剛性 (GPa・mm)、 $E_{cf}$ : シートの弾性係数 (GPa)、 $t_{cf}$ : シートの全厚 (mm) (1層の厚さ)×(層数)。図-4より、シートの引張剛性の増加に伴い、 $P_w$  も増加する傾向にあることが分かる。

このように各パラメータ内で傾向は判断できるが、総合的にパラメータの影響度を判定することは難しい。しかし、シートの付着性状が付着物・接着層・付着対象の3要素により決定されることは確実で、④も付着性状に影響を与えらると思われるが、図-5のようにデータが少なく、また、傾向も読み取れない。

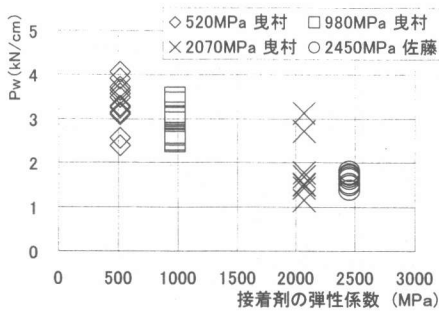


図-2 接着剤の弾性係数と $P_w$ との関係<sup>4)</sup>

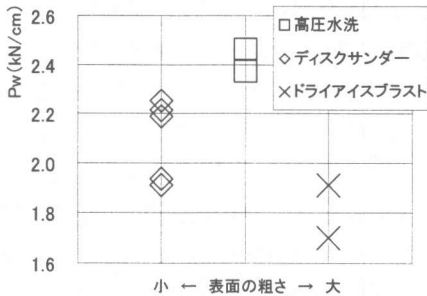


図-3 接着界面の状況と $P_w$ との関係<sup>6)</sup>

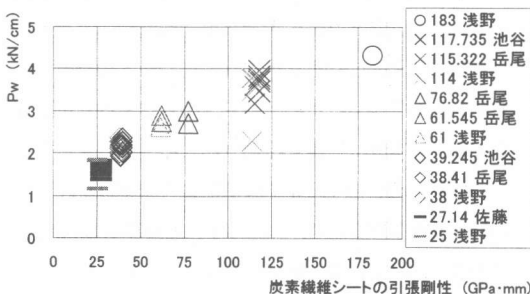


図-4 シートの引張剛性と $P_w$ との関係<sup>7)</sup>

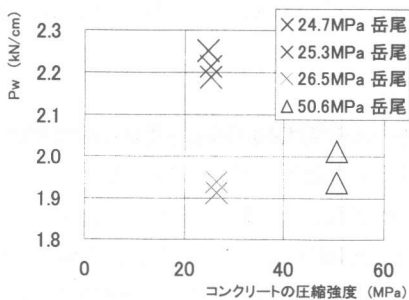


図-5 コンクリートの圧縮強度と $P_w$ との関係<sup>9)</sup>

表-1 供試体のパラメータと各材料の諸元

W/C	炭素繊維シートの諸元				コンクリートの諸元		付着長 (mm)
	弾性係数 (GPa)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
63-15	230	3400	0.167	300	26.3	35.8	150
63-20							200
75-15					24.2	29.1	150
75-20							200

### 2.3 実験供試体と実験方法

以上のことから、本研究では表-1のように静的実験の供試体パラメータをコンクリートの圧縮強度とし、水セメント比63及び75%の2種類のコンクリートブロックを作成して試験を行い、シートの表面ひずみから、付着せん断強度の分布を観察した。また付着長による付着せん断強度への影響を調べる目的で、各供試体とも150と200mm、2種類の付着長の供試体を各2体、計4体について試験を行った。シートの諸元も表-1に示す。

荷重は載荷能力20tの油圧ジャッキ付きフレームを用いて、静的に行う。載荷速度はシート剥離時に表面のひずみ分布の遷移を測定するために、50N/sec以下とした。測定対象は、シートの表面ひずみと、梁中央部でのH型鋼とコンクリートブロックそれぞれの水平相対変位(開き)である。なお、シートの表面ひずみは分布を正確に捉えるために、軸方向において、貼付したシートの幅方向の中心線上で、絶縁区間を除き20mmピッチでひずみゲージを貼付した。ただし、一部供試体では10mmピッチで観測を行った。

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 新型試験機の検討

本試験機で注意すべきことは、試験中にシートに剥離荷重や面外曲げ作用を作用させないことである。当初、H型鋼と試験片を取り付けるボルトが片側4本であったため、試験片ブロックが滑り、左右コンクリートブロック間で鉛直方向の変位差を生じた。そのため、図-1に示したように6本のボルトに変更した。左右のブロック表面の段差を無くするため、シートを貼る作業時には特殊な治具で拘束し、表面をグラインダー等で調整した。改良後の試験機で曲げ荷重を与えた場合、左右のコンクリートブロック同士の開き量とH型鋼下フランジ同士の開き量の差分を測定したが、最大荷重時で表-2に示すように最大0.4mm程度であり、固定ボルトが有効に働いていることを確認できた。

本実験方法によるシートに生じる引張力は図-6に示す機構で求められる。ここで、この機構による計算引張力 $T$ とシート表面に貼付したひずみゲージ

表-2 各供試体の試験結果

	$P_{max}$ (kN)	$T_{max}$ (kN)	$P_{max}/P_{75-15a}$	変位差(mm)
63-15a	15.553	11.390	1.153	0.366
63-15b	14.239	10.464	1.056	0.324
63-20a	13.484	9.933	1.000	0.170
63-20b	15.612	11.431	1.158	0.284
75-15a	13.553	9.981	1.005	0.320
75-15b	14.239	10.464	1.056	0.067
75-20a	14.426	10.596	1.070	-0.200
75-20b	15.799	11.562	1.172	0.213

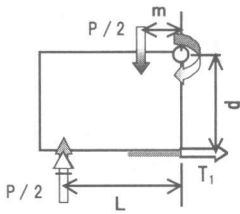


図-6 モーメントの釣り合い

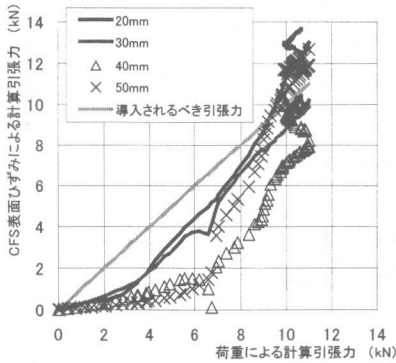


図-7 計算引張力の比較 (63-20b)

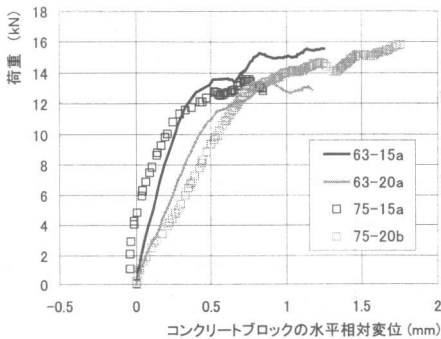


図-8 荷重-水平相対変位関係

による計測ひずみから求めた実測引張力  $T'$  とを比較した結果を示す。

荷重による計算引張力  $T$  は、上側のヒンジ周りのモーメントの釣り合いより式 (2) で与えられる<sup>9)</sup>。

$$T_1 \cdot d = \frac{P_{max}}{2} \cdot L - \frac{P_{max}}{2} \cdot m, \quad T_2 = (\omega/d) \cdot \left( \frac{L^2}{2} - \frac{s^2}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 $T_1$ : 載荷荷重によりシートに作用する引張力、 $T_2$ : 試験機の自重によりシートに作用する引張力、 $\omega$ : 単位長さあたりの自重、 $s$ : 支点から試験体端部までの長さ。実際にシートに作用する引張力  $T$  は  $T=T_1+T_2$  となる。

図-7に結果を示す。計算引張力  $T$  は中央部の直線となるが、シートの表面ひずみより求められた  $T'$  は付着の影響を受けて直線分布とならない。 $T'$  の実測値は、絶縁区間を除いた、軸方向の中心位置から 20mm ~ 50mm の区間で 10mm おきに貼付したひずみゲージによって採取されたものである。 $T'$  はシートの剥離が中央部から広がって行くにつれて、接着による拘束がなくなり、計算値に一致するようになる。後述するように、付着せん断強度の算定は初期の付着切れが起こってから求められるので、実測の  $T'$  と計算引張力  $T$  とはほぼ一致していると判断してよいと判断される。

これらのことから、新型試験機において大きな面外力の発生はなく、付着強度の算定結果に悪影響は生じていないと思われる。

### 3.2 荷重-水平相対変位関係と付着せん断破壊状況

図-8 に示す荷重とコンクリートブロックの水平相対変位関係を見ると、コンクリートの圧縮強度とシートの付着長には関係なく、全供試体でほぼ同様の曲線を示していることが分かる。また、剥離が開始したと思われる塑性区間では大きな荷重変動はなく、全ての供試体で同条件下剥離現象が進行したことが分かる。

図-9に試験後のシート側剥離面の写真を示す。これを見ると、剥離面上のほとんどがコンクリート粒子で覆われており、破壊は接着剤層のせん断すべり破壊ではなく、コンクリート表面でのコンクリートのせん断破壊と剥離によるものと推定できる。ただし、今

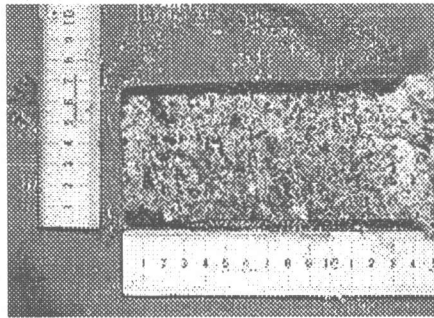


図-9 (b) シート側での剥離面の様子 (63-15a)

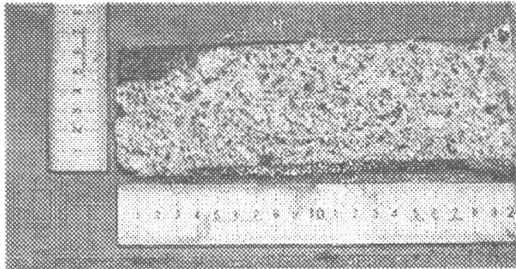


図-9 (b) シート側での剥離面の様子 (75-20a)

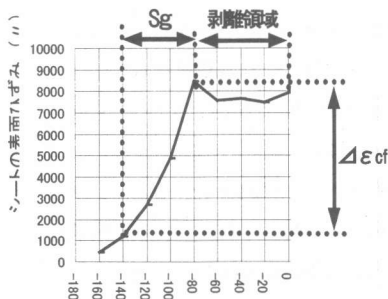


図-10 せん断付着強度の導出

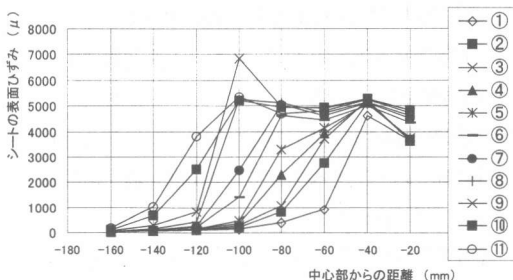


図-11 シート表面ひずみの軸方向分布の遷移 (63-15a)

今回の実験の範囲のコンクリート強度の場合のみであり、コンクリート強度が極端に大きくなった場合やシートの強度が非常に小さい場合には異なった破壊形式になる可能性がある。

### 3.3 シートの付着せん断強度の評価

付着せん断強度の算定は、シートの表面ひずみの分布より、次のように行う<sup>2)</sup>。最大荷重の90%に荷重が達した後のひずみ分布において、図-10のように、ひずみが増大している中央部の平坦な区間を剥離領域と考え、その両端部の線形ひずみ増加区間  $S_g$  を付着せん断強度の分布する有効付着長<sup>2)</sup>と仮定し、ひずみ増分  $\Delta \epsilon_{cf}$  から軸方向力を計算して、この力と同一区間で均等に分布する付着せん断力が釣り合うと考え、式(3)により、付着せん断強度  $\tau_y$  が求められる。ここに、 $E_{cf}$ :シートの弾性係数、 $A_{cf}$ :シートの断面積、 $S_g$ :シート表面のひずみゲージの貼り付け間隔。

$$\tau_y = E_{cf} \cdot \Delta \epsilon_{cf} \cdot A_{cf} / S_g / b \quad (3)$$

この方法で求めた  $\tau_y$  を表-3に示す。また、ひずみ遷移を示したグラフを図-11に示す。

まず、このグラフ全体を見ると、荷重により剥離が進行するにつれ、ひずみ増分の勾配がスリット中央部から次第に外側へと移行していることが読み取れる。既往の研究においても、このように、荷重と同時に付着領域が部分的に外側へと遷移し、剥離区間が進行していくことが明らかにされている。<sup>2)</sup>

次に、遷移していくひずみ増分の勾配に着目する。これを見ると、①→②→③…と順次、移行するに従って、ひずみ増分の勾配の緩急が繰り返していることが分かる。ここから付着せん断強度  $\tau_y$  を求めると、表-3のように、①・③では、ほぼ5MPa以上を示すのに対し、②では4MPa前後となり、値の大きさから2つのグループに分けることができる。これは、①・③のように、評価区間をひずみゲージによる一観測区間で取れる場合の付着せん断強度  $\tau_y$  と、②のように、2つの区間で直線分布すると判断して求める付着せん断強度  $\tau_y'$  である。

最終的に、このようなグラフを用いた手順で求められた  $\tau_y$  と  $\tau_y'$  それぞれについて各供試体で平均値を取り、付着長毎に整理したグラフを図-12に、その値と全体の平均値を表-4に示す。これを見ると、 $\tau_y$  の値はバラツキが大きい、 $\tau_y'$  は付着長に関係なく、

表-3 せん断付着強度の算出結果 (63-15a)

	P (kN)	Sg (mm)	$\tau_y$ (MPa)	$\tau_y'$ (MPa)
①	14.11	20	7.10	
②	15.24	40		4.14
③	15.17	20	5.09	
④	15.17	40		3.44
⑤	15.11	20	5.41	
⑥	14.93	20	6.14	
⑦	14.98	40		4.62
⑧	15.05	20	9.30	
⑨	15.17	20	11.58	
⑩	15.48	40		4.36
⑪	15.55	20	5.36	
Ave.			7.14	4.14

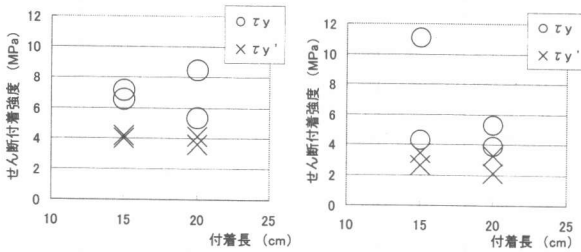


図-12 各供試体におけるせん断付着強度の平均値

表-4 各供試体におけるせん断付着強度の平均値と全体の平均値

(左: 63 シリーズ供試体 右: 75 シリーズ供試体)

	$\tau_y$ (Mpa)	$\tau_y'$ (Mpa)		$\tau_y$ (Mpa)	$\tau_y'$ (Mpa)
63-15a	7.14	4.14	75-15a	4.31	2.60
63-15b	6.58	4.00	75-15b	11.08	3.44
63-20a	5.33	3.59	75-20a	5.27	3.26
63-20b	8.49	4.11	75-20b	3.91	2.11
Ave	6.88	3.96	Ave	6.14	2.85

約 3~4MPa 前後の値に収束していることが分かる。設計の観点から、安定した強度、および、安全側の強度である  $\tau_y'$  を求める付着せん断強度とすることが望ましいと判断してよいであろう。コンクリートの配合の違い(強度の違いに相当)が図-12で見られる。それぞれ  $\tau_y'$  の平均値である 3.96Mpa および 2.85Mpa を付着せん断強度と結論づけたい。既往の研究では、シートの表面ひずみから、付着せん断強度が 2~5MPa と算出されており<sup>2)</sup>、今回の値はこの範囲に入っている。

現在、W/C=50 のシリーズ(圧縮強度 50.6N/mm<sup>2</sup>)の実験を準備中であり、これらの試験結果が得られればコンクリート強度と付着せん断強度との関係も得られると期待している。

#### 4. 結論

本試験により、得られた結論は次に示す通りである。

- 新型試験機による付着試験では、付着強度の算定に悪影響のある変形が発生せず、安定した試験データが得られた。
- シートの表面ひずみより求められた付着せん断強度には 2 種類の傾向が見られ、強度の低い方の平均値を設計上で考える付着せん断強度と提案したい。その強度は W/C によって変動している。
- 付着せん断強度とシートの付着長さの間には相関は無かった。

#### 参考文献

- 1) 例えば、板野次雅、松井繁之:炭素繊維シートによる床版補強に関する研究、平成 10 年度土木学会年次学術講演会、I-59-1, 1998.10
- 2) 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(II)、日本コンクリート工学協会、P D7-9, pp10-11, pp66-68, 1998.5
- 3) 松下博通ほか:炭素繊維接着工法のシート剥離耐力向上方法に関する一考察、pp II 69- II 75
- 4) 佐藤裕一ほか:CFRP シートとコンクリートの付着挙動(その 1)、日本建築学会構造系論文集、pp75-pp82, 1999.10
- 5) 曳村俊貴ほか:CFRP による RC 床版の上面補強設計について、pp II 119- II 124
- 6) 岳尾弘洋ほか:CFRP 接着工法におけるシートの付着特性、コンクリート工学年次論文報告集、pp1599-1604, 1997
- 7) 浅野靖幸ほか:一軸引張力を受けるシートの付着特性について、土木学会北海道支部 論文報告書、第 52 号、pp680-683
- 8) 池谷純一ほか:シートとコンクリートの付着性状、日本建築学会大会学術講演概要集 関東 pp397-398, 1997.9
- 9) 大谷俊浩ほか:コンクリート補強用の炭素繊維シートの付着剥離試験、pp675-pp676, 日本建築学会学術講演梗概集、1996.9