

論文 段差のついたコンクリート表面における連続繊維シートの付着性状

金久保 利之^{*1}・八十島 章^{*2}・谷垣 正治^{*3}

要旨：連続繊維シートとコンクリートのせん断－剥離複合付着特性を検討する上での基礎的資料を得ることを目的として、試験体中央部に段差を設けた二面せん断型付着試験体による付着実験を行った。実験因子は段差レベル、繊維種類およびシート厚である。実験の結果、本試験体を用いることによって、剥離付着が支配的な性状からせん断付着が支配的な性状に移行していく、せん断－剥離複合付着性状を確認することができた。付着強度は段差レベルの違いによる差が顕著であり、シートの剥離角度で表現される付着強度算定法を提案した。この方法による計算値は、おおむね実験結果を表現できた。

キーワード：繊維シート、剥離付着、せん断付着、剥離角度、付着強度、付着長

1. はじめに

コンクリート構造物の連続繊維シート（以下、シート）による貼付補強においては、シートとコンクリート間の付着特性が重要な因子となる場合がある。この場合、多くは「せん断付着特性」が支配的となるが、押抜きせん断のように直接的にシート面外に荷重が作用する場合や、部材中のせん断ひび割れ近傍等では「剥離付着特性」の影響が考えられる¹⁾。破壊力学では「せん断付着特性」を Mode II、「剥離付着特性」を Mode I として扱っているが、部材レベルの巨視的な特性においては、両者が混在してシートの付着特性に影響を与えていると考えられる。

シートとコンクリートの「剥離付着特性」に関する研究は、呉らの研究²⁾や三井らの研究³⁾に見られるが、実験技術上困難なこともあり、「せん断付着特性」に関する研究と比較して大幅に少ない。また、巨視的に見て、両者の特性が混在する場合に着目した研究はほとんどない。本報では、「せん断付着特性」実験の際に用いられる二面せん断型付着試験体を用いて容易に実験ができる加力方法を採用し、せん断－剥離複合付着特性を検討する上での基礎的資料を得る

ことを目的として、加力実験を行った。「せん断付着特性」も微視的に見れば Mode I のコンクリートの破壊であるといえるが、本報では実験結果を巨視的にとらえることに重点を置き、主として部材特性を支配するであろう付着強度に関して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

基本となる試験体は、「せん断付着特性」実験の際に用いられる二面せん断型付着試験体で、100×100×600mm のコンクリートブロックにシートを貼付したものである。コンクリートブロック中央部にあらかじめ切欠きを設け、シート貼付後ハンマーにて初亀裂を導入し、試験体中央部においてはシートのみが引張力を負担する。

試験体を図-1に示す。せん断－剥離複合付着特性を検討する目的で、試験体中央部に「段差」を設け、段差レベルを主要変動因子とした。段差の程度は軸方向区間 30mm に対して、30, 15, 10, 5mm と設定した。軸方向に対するシート貼付角度 θ_{mi} は、 $\tan\theta_{mi}$ でそれぞれ 1.00 (45°), 0.50 (27°), 0.33 (18°), 0.17 (10°) である。

*1 筑波大学 大学院システム情報工学研究科助教授 博士 (工学) (正会員)

*2 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 修士 (工学) (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究所建築研究開発部室長 工博 (正会員)

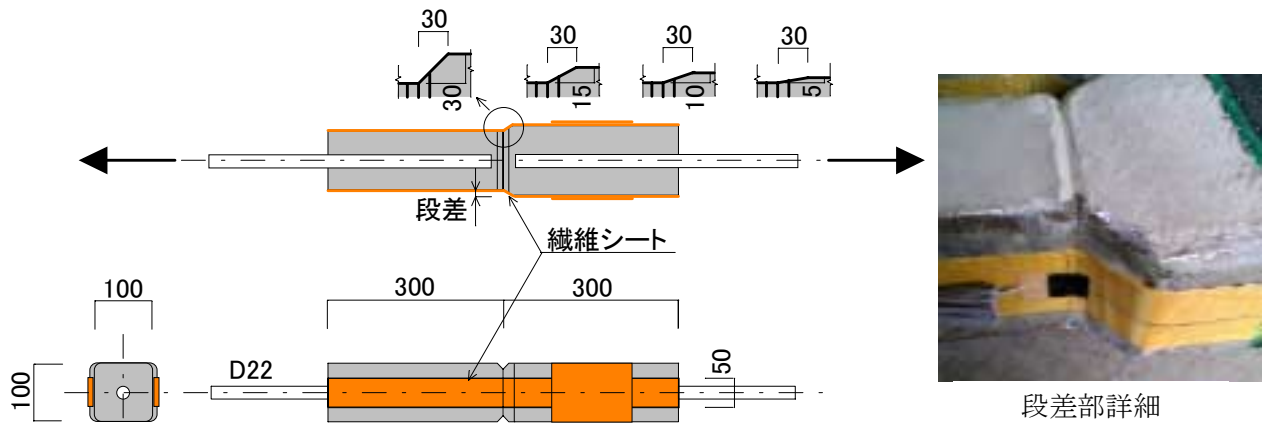


図-1 試験体

表-1 試験体一覧

シリーズ	試験体名	コンクリート	繊維シート*				段差レベル	
			繊維種類	シート種類	設計厚 (mm)	弾性係数 (GPa)	段差 (mm)	角度 $\tan \theta_{ini}$
1	A106-30	圧縮強度 20.6MPa 割裂強度 2.26MPa	アラミド1	60 トンクラス	0.415	118	30	1.00
	120 トンクラス			15			0.50	
	A112-30		アラミド2	60 トンクラス	0.350		30	1.00
	A112-15			炭素			目付量 300g/m ²	15
	A206-15	2.26MPa	炭素	目付量 300g/m ²	0.167	230	15	0.50
	C300-15						15	0.50
2	A106-10	圧縮強度 37.3MPa 割裂強度 2.74MPa	アラミド1	60 トンクラス	0.415	118	10	0.33
	A106-05						5	0.17
	A206-05		アラミド2				0.350	78

* シートの物性値は公称値，プライマー，パテ，含浸樹脂にはエポキシ樹脂を使用

試験体の一覧を表-1に示す。その他の変動因子は、繊維種類(アラミド1, アラミド2, 炭素), シート厚およびコンクリート強度である。コンクリートの加力時材令における圧縮強度は、シリーズ1 およびシリーズ2 試験体で、それぞれ20.6MPa, 37.3MPaであった。なお、シート貼付幅はすべて50mmである。また、段差上部(図-1中、右側)のコンクリートブロックに貼付したシートには直交方向にシートを増貼りし、シートの剥離を抑制した。同一の変動因子で各3体ずつ、計27体の加力を行った。

2.2 加力・計測方法

加力は変位制御万能試験機を用いて、単調に引張荷重を行った。変位計測は、試験体中央部のひび割れ開口幅を、電気式変位計を用いて行った。同一変動因子各3体のうちの1体には、シート片面に15mm間隔で歪ゲージを貼付し、

シートの歪計測を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊経過および最大荷重

各試験体とも、引張荷重の小さいうちからシートの剥離が試験体中央部から進行し、ひび割れ幅が拡大した。特に段差レベルの大きい試験体(30mm)では、引張荷重がほぼ一定のまま剥



図-2 破壊後の状況 (A106-15)

表-2 実験結果一覧

試験体	繊維シート			段差 (mm)	剥離付着 強度*1 (N/mm)	最大引張 荷重 (kN)	付着 強度*2 (N/mm)	付着強度 計算値*3 (N/mm)	実験値 / 計算値
	種類	設計厚 (mm)	弾性係数 (GPa)						
A106-30	アラミド 1	0.415	118	30	18.1	9.75	97.5	304	0.32
A106-15				15	34.5	16.66	166.6		0.55
A112-30		0.830		30	21.4	10.37	103.7	430	0.24
A112-15				15	39.3	17.39	173.9		0.40
A206-15	アラミド 2	0.350	78	15	32.0	16.26	162.6	227	0.72
C300-15	炭素	0.167	230	15	21.7	14.88	148.8	269	0.55
A106-10	アラミド 1	0.415	118	10	-	14.34	143.4	321	0.45
A106-05				5	-	21.43	214.3		0.67
A206-05	アラミド 2	0.350	78	5	-	17.40	174.0	240	0.73

*1：荷重が変化せずひび割れ幅が増大する区間の、単位幅の荷重の平均値 *2：単位幅の荷重の最大値
*3：段差がない場合の付着強度の計算値（単位幅） 注：実験値は3体の試験体の平均値

離が進行し、ひび割れ幅が5mm程度まで拡大した。その後引張荷重が増大し始め、最大荷重に達すると同時にシート全面が剥離した。

破壊後の状況例を図-2に示す。右側が試験体中央部（段差側）で、中央部ではコンクリート表面（樹脂界面）での剥離が進行し、端部に進むにしたがってせん断付着破壊時によく観察されるコンクリート表層内部での破壊に移行していく様子が見られる。

実験結果の一覧を、表-2に示す。剥離付着強度は後述する。付着強度の実験値は、引張荷重の最大値を全シート幅（50mm×2面）で除し、単位幅あたりの荷重として示した。付着強度は段差レベルの違いの影響が顕著で、例えばアラミド1の試験体間で比較すると、段差レベルが小さくなるほど付着強度が大きくなる傾向が伺える。ただし、A106-10試験体の強度がA106-15試験体の強度より低下した理由は不明である。

各試験体の付着強度を、段差がない場合の付着強度と比較するために、以下に示すせん断付着強度式⁴⁾を用いた計算値と比較した。

$$l_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot s_e}{k_e}} \quad (1)$$

$l_b \geq l_e$ のとき、

$$P_{max} = k_e \cdot \tau_{b,max} \cdot b_f \cdot l_e \quad (2)$$

$l_b < l_e$ のとき、

$$P_{max} = k \cdot \tau_{b,max} \cdot b_f \cdot l_e \quad (3)$$

$$k = \frac{1 - k_e}{2} \cdot \cos\left(\frac{l_b}{l_e} \pi\right) + \frac{1 + k_e}{2} \quad (4)$$

ここで、

l_e : 有効付着長

λ_f : シート付着指標 $= t_f \cdot E_f / \tau_{b,max}$

s_e : 有効付着域のすべり量 $= 0.354\text{mm}$

k_e : 有効付着長時の応力係数 $= 0.428$

l_b : 付着長

P_{max} : 付着強度

$\tau_{b,max}$: 局所最大付着応力 $= 3.5\sigma_B^{0.19}$

b_f : シート幅

k : 応力係数

t_f : シート厚

E_f : シート弾性係数

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

本強度式は、付着長が有効付着長より大きい場合と小さい場合とで適用式が異なり、本試験体の付着長300mmをそのまま用いて計算すると、付着長が有効付着長より大きい場合に当てはまる。実験値と計算値を比較すると、段差レベルが30mmで実験値は計算値の30%程度、15mmで40~70%程度である。

3.2 荷重-ひび割れ幅関係および歪分布

A106-30, A106-15, A106-05 試験体の引張荷重-ひび割れ幅関係およびシートの歪分布を、図-3に示す。引張荷重-ひび割れ幅関係は同一因子3体の試験体の結果を、歪分布はその中の歪ゲージを貼付した試験体の結果を示している。

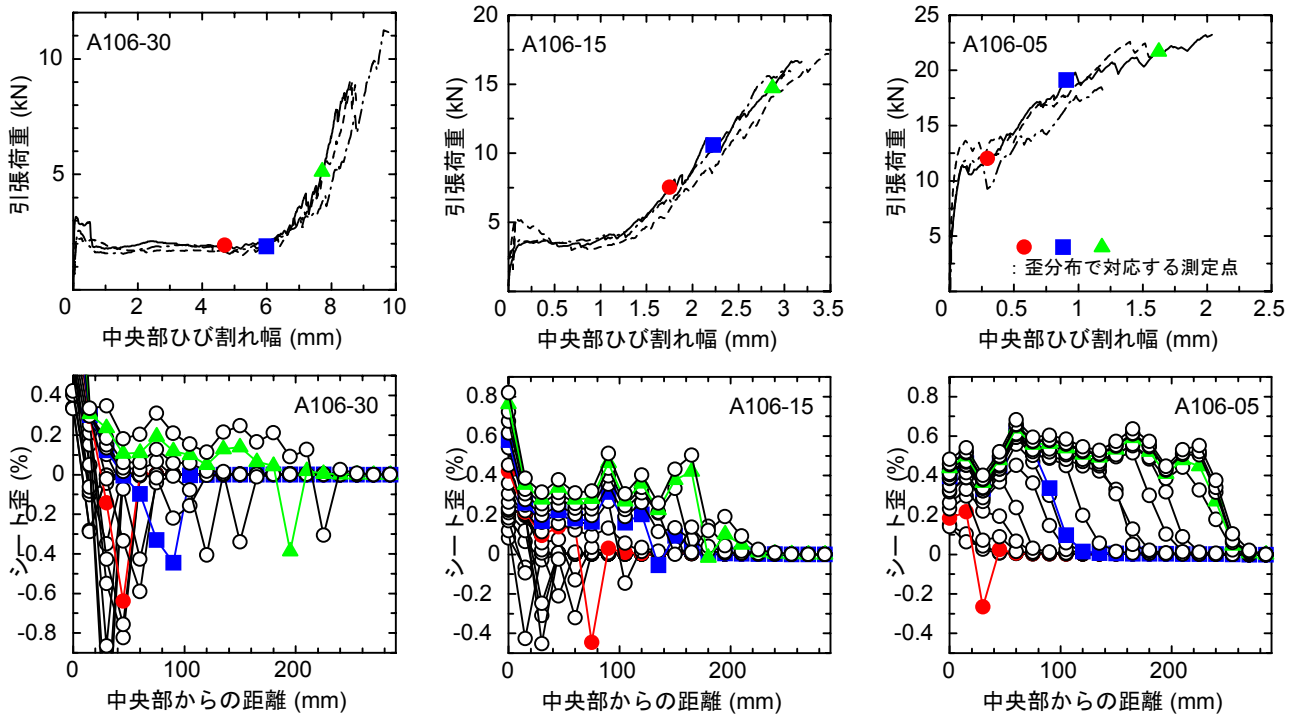


図-3 引張荷重－ひび割れ幅関係およびシート歪分布

図中の●, ■, ▲のプロット点は、引張荷重－ひび割れ幅関係における同プロット測定点での歪分布を示している。

A106-30, A106-15 試験体（段差レベルそれぞれ 30mm, 15mm）の引張荷重－ひび割れ幅関係は特徴的で、引張荷重がほぼ一定値を示しひび割れ幅のみが増大する区間が観察される。この区間は前節で述べた、コンクリート表面（樹脂界面）での剥離が進行する領域と対応している。この区間の荷重を剥離付着特性が支配的な領域と見て、剥離付着強度と定義した。具体的には、段差レベル 30mm の試験体ではひび割れ幅 1mm～3mm の区間の荷重値の平均値、15mm の試験体では 0.5mm～1mm の区間の平均値として算出した。また、歪分布では圧縮歪が多く観察される。これは、剥離が丁度進行している箇所では樹脂含浸したシートに曲げ変形が作用し、歪ゲージを貼付したシート表面が圧縮になった場合に見られるものと考えられる。すなわち、試験体中央部から圧縮歪が見られる箇所まではシートが剥離していると考えられる。

一方、A106-05 試験体（段差レベル 5mm）の

引張荷重－ひび割れ幅関係や歪分布を見ると、段差レベルが小さいほどせん断付着特性時に見られる現象と近づいている様子が伺える。なお、これらの試験体では荷重が一定の領域を特定することが困難なため、剥離付着強度は算出していない。

4. せん断－剥離複合付着強度

4.1 段差レベル・シート剛性の影響

せん断付着特性は、シートの剛性（シート厚×弾性係数）に強い影響を受け、特に有効付着長の大小により付着強度が変化する⁴⁾。せん断－剥離複合付着強度においても同様のことが考えられる。

剥離付着強度および付着強度とシート剛性の関係を、図-4 に示す。両強度において顕著に差が見られる因子は段差レベルで、同一シート間で比較すると、段差レベル 30mm の試験体の強度は 15mm の試験体の 50～60%程度である。一方、同一段差レベルの試験体間でシート剛性の影響を見ると、同一繊維種類のシート間では、若干ではあるが剛性が大きいほど付着強度も大

きい傾向がある。せん断-剥離複合付着強度においても、ある程度はシート剛性が影響するようである。

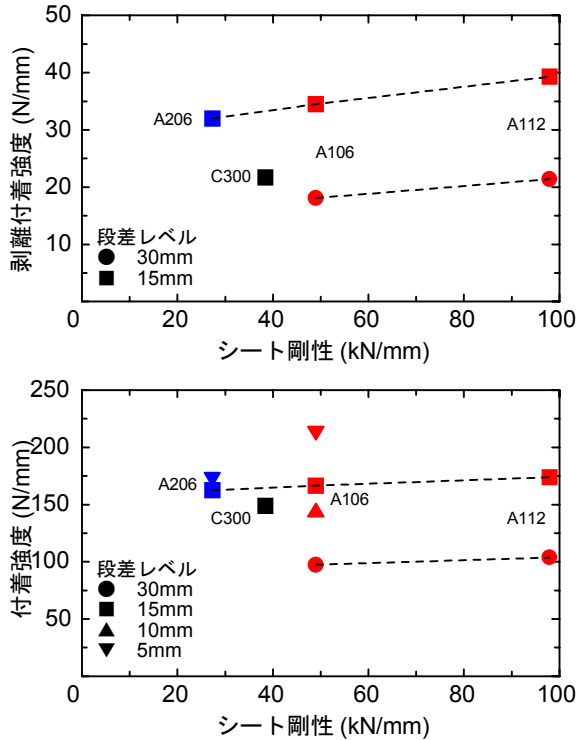


図-4 付着強度とシート剛性の関係

4.2 剥離角度と付着荷重

3章で述べたように、剥離が進行することによってシートが引張力を受ける角度が小さくなり、シートの付着性状が、剥離付着型からせん断付着型に移行していき、付着荷重が増大していくと考えられる。

図-5に示すように、歪分布で最小の歪値(圧縮歪)が測定された場所を剥離箇所とし、試験体中央部から剥離箇所までの長さをシート剥離領域とする。シート剥離領域ではシートが直線状になると仮定して、段差レベルとシート剥離長(l_p)からなる角度を剥離角度(θ_p)と定義する。剥離角度によって、剥離付着型とせん断付着型の付着性状の割合が変化すると考える。剥離角度が 90° であれば「剥離付着特性」、 0° であれば「せん断付着特性」となる。なお、本報で指す付着荷重とは、シート引張力の試験体軸方向成分力である。

剥離角度と付着荷重の関係を、図-6に示す。剥離付着強度もシート剛性の影響を若干受けるようであるので、その影響を考慮し、前述のせん断付着強度計算値(付着長は300mmとして計算)で除して基準化した。また、段差レベル10mmおよび5mmの試験体では、歪分布における最小歪箇所の特が困難であったので(せん断付着特性が支配的で、明確な圧縮歪発生点が特定しにくい)省いた。図より、段差レベルやシート種類の違いに関わらず、剥離角度と付着荷重にほぼ同様な反比例の関係が見られ、最小二乗法により図中に示す関係を得た。初期の段差レベルには関係なく、シート剥離は同様な過程を経て発生し、剥離が進行すると一気に全体剥離が生じると考えられる。

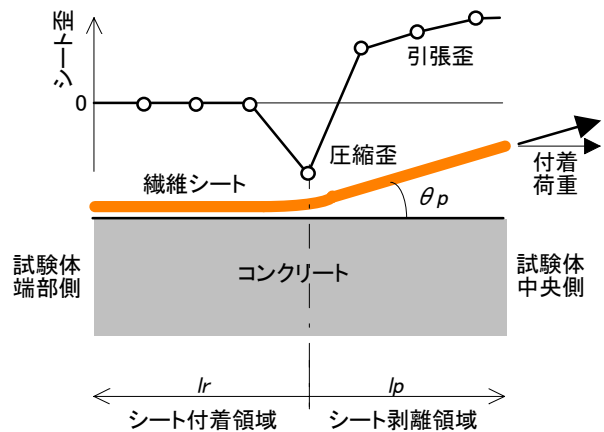


図-5 剥離角度の定義

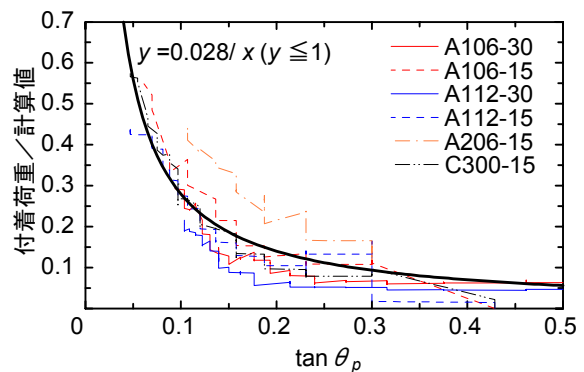


図-6 剥離角度と付着荷重の関係

4.3 本試験体の付着強度

図-6より、段差レベルが15mmの試験体では、最終的に剥離角度が $\tan\theta_p=0.06$ 程度に達してお

り、このときのシート剥離長 (l_p) は 250mm 程度になる。本試験体の場合、付着長が 300mm であるので、このときのシート付着領域は 50mm となり、せん断付着特性における有効付着長を下回ることになる。せん断付着強度 (荷重値) は、付着長が有効付着長より小さい場合、付着長の減少にともなって小さくなる⁴⁾。本試験体の場合、剥離が進行してシート付着領域が減少し、付着荷重がせん断付着強度に達したときに一気に全体剥離に至ったと考えられる。

以上の検討より本試験体の付着強度は、剥離角度で表される付着荷重値と、剥離角度から求まるシート付着長により算出されるせん断付着強度の交点を求めることによって、おおよそ求めることができると考えられる。せん断付着強度の計算値に、前述の計算式を用い、上記の方法による付着強度の導出を、A10630 および A10615 試験体について行った例を、横軸に剥離角度、縦軸に付着荷重をプロットして、図-7 に示す。A10630 試験体では交点の y 値が 0.27、A10615 試験体では 0.51 となり、表-2 に示される比較値とほぼ一致している。

段差レベル 30mm, 15mm の試験体の付着強度を、実験結果と比較して表-3 に示す。本方法による付着強度の導出は、おおむね実験結果と適合している。

5. まとめ

- 1) 段差を設けた二面せん断型付着試験体を用いることによって、せん断-剥離複合付着性状を確認できた。
- 2) この場合の付着強度は、段差レベルの違いによる差が顕著であった。
- 3) シートの剥離角度で表現される付着強度算定法を提案した。この方法による計算値は、おおむね実験結果を表現できた。

謝辞

本研究は、アラミド補強研究会建築委員会で

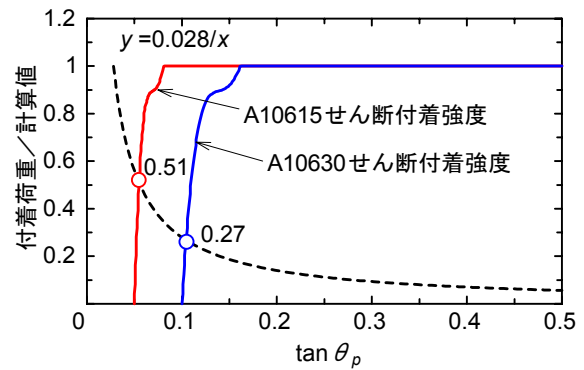


図-7 付着強度の導出方法

表-3 付着強度導出方法の適合性

試験体	せん断付着強度計算値 (N/mm)	実験値/計算値		比較値
		実験による値	4.3の導出法	
A106-30	304	0.32	0.27	1.20
A106-15		0.55	0.51	1.08
A112-30	430	0.24	0.26	0.92
A112-15		0.40	0.49	0.82
A206-15	227	0.72	0.52	1.37
C300-15	269	0.55	0.51	1.07

の研究活動の一環として実施されたものである。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書，pp.4-7，2003.7
- 2) 呉 智深ほか：連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究，土木学会論文集，No.662，V-49，pp.45-58，2000.11
- 3) 三井雅一，福澤公夫，車田 亮：FRPシート・コンクリート間のはく離付着特性，材料，第50巻，第11号，pp.1276-1281，2001
- 4) 金久保利之，古田智基，福山 洋：等価付着ストレスブロックによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式，コンクリート工学論文集，第12巻，第3号，pp.27-37，2001.9