

論文

[1132] 異形加工した FRP ロッドの付着特性

正会員 丸山武彦（日本コンクリート工業）

正会員○伊東幸雄（日本コンクリート工業）

西山啓伸（日本コンクリート工業）

1. はじめに

高強度で軽く耐食性に優れている繊維強化プラスチックの棒状体（FRPロッド）を、コンクリート用補強材として使用するためには、コンクリートとの付着性能が重要な問題である。FRPロッドの付着を改善するために提案されている異形加工の方法には、①組紐状あるいはより線状に編む方法、②格子状に積層する方法、③ロッド表面に繊維を巻きつける方法などがある。①はロッドの軸方向に対する凹凸部の角度が緩やかであるために付着強度が少し小さめになること¹⁾、②は格子の交差部で付着を取るために応力集中を起こしやすいこと²⁾、③は軸方向繊維と巻きつけ繊維の付着が問題であること³⁾など、それぞれ弱点を有すると思われる。したがって、FRPロッドを鉄筋あるいはPC鋼材の代替材として利用していくために、各種のロッドの付着特性に関するデータを十分に蓄積することが必要である。本研究はFRPロッドの付着性状に関する資料を得ることを目的として引き抜き試験を行い、各種の異形加工を施したFRPロッドの付着特性、巻きつける繊維の種類と巻きつけ方法を変えた場合の付着特性、およびコンクリート温度が上昇した場合の付着特性などについて報告するものである。

2. 実験方法

FRPロッドの付着に関する実験は3シリーズに分けて行い、実験（Ⅰ）では、ロッドを異形化する加工方法の相違による付着特性を検討し、実験（Ⅱ）では、ロッドの表面に繊維を巻きつけて異形ロッドを作る方法において、巻きつけ繊維の種類と巻きつけ方の相違による付着特性を検討し、実験（Ⅲ）では、コンクリート温度が上昇した場合の付着特性について検討した。

表一 異形加工の相違とFRPロッドの特徴
—実験（Ⅰ）—

異 形 の 加 工 方 法	
A	（丸ロッド法）ビニルエステル
B	（糸まき法）フィバーステール 4本より糸 径φ6mm 2条まき 一体成形 ビニルエステル
C	（縋釣法）平均径φ0.5mm アルミナ粒子

表-1 異形加工の相違とFRPロッドの特徴
—実験(I)—

	異形の加工方法
A	(丸ロッド法) ビニルエステル
B	(糸まき法) テトラ3007ニール 4本より糸 ピッチ6mm 2条まき 一体成形 ビニルエステル
C	(塗粒法) 平均粒径0.5mm アルミナ粒子 丸ロッドに付着 エポキシ
D	(繊維まき法) ポリエチレン繊維巻きつけ 約0.3mm 厚 一体成形 エポキシ
E	(帯まき法) 炭素12000 フラマトン 4本 帯状2条まき ピッチ25mm 一体成形
F	(より線法) D法の約1.9 素線7本より ピッチ60mm 一体成形 エポキシ

2.1 使用材料

①実験（Ⅰ） 異形加工方法が相違するFRPロッドは表-1および写真-1に示すように、丸棒状（A）に対し、太めのテトロン糸を交差状に巻いた糸巻き法（B）、砂状の粒子を付着させた塗粒法（C）、ポリエチレン繊維を一方方向に密に巻いた繊維まき法（D）、フィラメントヤーンを帯状の綾巻きにした帯巻き法（E）、および、7本よりにしたより線法（F）である。塗粒法を除くすべてのFRPロッドは半硬化の状態で異形加工を行ったもので、炭素繊維を主とし、ガラス繊維、アラミド繊維も使用した。また、比較のために異形PC鋼線、PC鋼より線、丸棒鋼も使用した。

②実験(Ⅱ) エポキシ樹脂を用いたプルルージョン法による炭素繊維FRPロッドのプリプレグに対し、巻きつけ

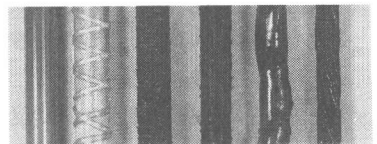


写真-1 実験(I)で用いたFRPロッドの例

繊維の種類（ビニロン糸、炭素繊維）、巻きつけ方（ら旋状、交差状）、巻きつけ繊維のよりの有無（より有、より無）等を要因とするFRPロッドを表－2に示す。

③実験（Ⅲ） 炭素繊維6Kフィラメントをら旋状に巻きつけた炭素繊維FRPロッドを使用した。

コンクリートの配合は最大寸法20mmの砕石を用い、スランプ 8 ± 2 cm、水セメント比67%、セメント量250Kg/m³であり、材令28日の圧縮強度は250～335kgf/cm²、平均277kgf/cm²であった。また、圧縮強度の影響を把握するために、610Kg/cm²のコンクリートも一部でを使用した。

2. 2 供試体および試験方法

引抜き試験の供試体は図－1に示すように、一辺10cmの無筋の立方体でFRPロッドの付着長さは8.0cm（約13D）とした。また、より線の場合は付着長18cmの供試体も使用した。供試体は脱型後材令28日まで標準養生を行ったあと、JIS「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着試験方法（案）」に準じて試験を行った。コンクリート温度の影響を調べる実験（Ⅲ）の場合は、材令28日の供試体を恒温槽に入れた後、所定温度で1および3時間の暴露を行い、引抜き試験中はリボンヒーターと断熱材を用いて温度の降下を防止した。

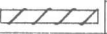
3. 実験結果および考察

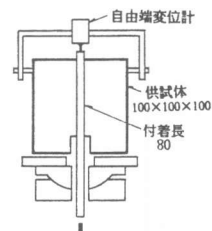
3. 1 異形加工の相違による付着性状（実験Ⅰ）

異形加工の方法が異なる各FRPロッドの付着強度（最大荷重を付着面積で除した値）、および付着応力と自由端のすべり量との関係を表－3および図－2に示す。異形加工を行わない丸ロッドの付着強度は、9Kg/cm²以下で丸棒鋼の12Kg/cm²よりも小さく、すべりが始まるとロッドは簡単に抜け出すことから付着力は期待しないのがよい。糸巻き法の付着強度は、カーボンおよびガラスロッド共に170Kg/cm²程度が得られており、異形鉄筋の割り裂き付着強度が130Kg/cm²⁴⁾以上であることを考慮するとほぼ同程度の付着力があると考えられるが、アラミド繊維は約115Kg/cm²でやや小さかった。糸巻き法は付着力の改善方法としては優れていると考えられるが、異形鉄筋の付着応力～すべり曲線⁴⁾に比較すると付着の初期段階および最大値が得られる時のすべり量が多いことが特長

である。また、ロッド繊維の種類によってすべり曲線が異なっており、弾性係数や繊維とマトリクスとのぬれ性の相違による影響などが考えられるが、本実験では明らかにできなかった。塗粒法の付着強度は全種類とも115Kg/cm²程度で付着性能としては優れていると思われるが、すべり量が、0.2mm未満の段階ですべてのロッドが突然抜け出した。この原因は、砂粒とロッドとの界

表－2 巻きつけ方法によるFRPロッド－実験（Ⅱ）－

FRP種類	巻きつけ繊維	巻きつけ方法記号	ピッチmm	燃り
炭素繊維ロッド φ6	ビニロン糸 3600フィラメント (V)	螺旋巻(VS)	6	有
			9	無
		交差巻(VD)	12	有
			12	無
	炭素繊維 6000フィラメント (C)	螺旋巻(CS)	6	有
			—	—
		交差巻(CD)	12	有
			12	無



図－1 試験方法

表－3 実験（Ⅰ）による引抜き試験の結果

種類	呼び径 (mm)	記号	最大値		
			荷重 (kg)	付着強度 (kg/cm ²)	すべり量 (mm)
A	ガラス 6.0	AG	134	9	0.23
	カーボン 6.0	AC	129	9	0.23
	アラミド 6.0	AA	35	2	0.52
B	ガラス 6.0	BG	2,550	169	0.59
	カーボン 6.0	BC	2,590	172	1.20
	アラミド 6.0	BA	1,747	116	0.68
C	ガラス 6.0	CG	1,813	120	0.20
	カーボン 6.0	CC	1,750	116	0.08
	アラミド 6.0	CA	1,697	115	0.07
D	繊維まきカーボン 6.0		1,210	80	0.23
E	帯まきカーボン 5.0		2,567	204	1.53
F	カーボンより線 5.0		625	50	0.23
G	異形PC鋼線 7.0		1,383	79	1.77
H	PC鋼より線 9.3		807	35	0.10
I	丸棒鋼 6.0		187	12	0.10

(1) 付着面積は(3.14)×(呼び径)×(付着長)として計算

(2) 3個の供試体の平均値

面で剥離を起こしたからであった。したがって、塗粒法を用いる場合の砂粒は、ロッド本体の樹脂マトリクスと一体化されていることが重要である。繊維まき法の付着強度は約80Kgf/cm²であり、図-2のようにすべり量が0.2mm以下の段階で付着曲線が波状を呈したのが特徴であり、引張り方向に交差する巻きつけ繊維がせん断で切れていることが考えられる。帯巻き法の場合は、FRPロッドとしてはじめてコンクリートの割裂によって破壊し、付着強度は200Kgf/cm²を超える好結果を得た。これは、帯状に巻きつけたフィラメント量が多いので、異形部のふしの高さが試験体中で最も高かったことによるものであろう。しかし、糸巻き法と比較すると初期のすべり量が大きめであり、異形部のふしが引張方向となす角度が緩いことが原因と考えられる。より線法の付着強度は予想より小さい約50Kgf/cm²であったが、よりのピッチが60mmで付着長の80mmとほぼ同じであることから、より線としての機能が十分に発揮出来なかったものと思われる。

異形FRPロッドのすべり曲線に示されるすべり量は、図-2に示されるように、異形鉄筋の場合よりも大きくなる。図-3は自由端のすべり量0.1mm時の付着応力度、および付着強度を示したものである。以上の結果から、直径10mm程度までの各種の異形FRPロッドの付着強度および付着応力～すべり曲線等の付着性状は、10cm立方供試体を用いた引抜き試験によって検討することができると思われる。

3.2 CFRPより線・PC鋼より線の付着性状

FRPロッドをプレストレストコンクリートの緊張材として使用する場合は実用性を考慮すると、緊張時の定着効率が十分であること、プレテンションとしての付着力が期待されること、太径の製造が可能であること、長尺であっても運搬保管が容易であること、等の性能が要求される。これらの要求を満たす可能性の

大きいロッドのひとつとして、炭素繊維を用いたより線（CFRPより線）が考えられる。そこで、CFRPより線（7本よりφ10.5）を使用し、供試体寸法10×10×20cm、付着長18cm、コンクリート強度は約300Kgf/cm²および約600Kgf/cm²として引抜き試験を行った結果を表-4、図-4に示す。比較のためにPC鋼より線φ10.8も使用した。コンクリート強度が約600Kgf/cm²の場合は、すべり量が増すに従って付着応力度も増加する傾向を示し、すべり量が0.05mm程度以後においてはCFRPより線の付着応力度の方がPC鋼より線の場合よりも大きくなる。たとえば、すべり量0.05mmおよび0.25mmの時のCFRPの付着応力

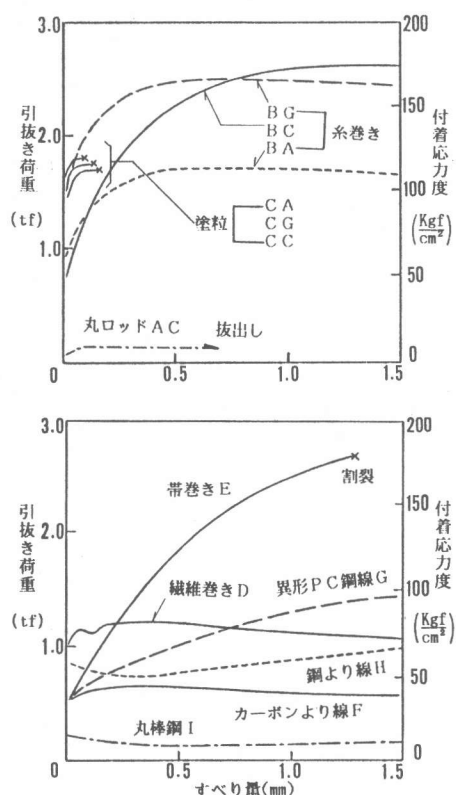


図-2 各種の異形加工方法によるFRPロッドの付着応力度とすべり量 実験(I)

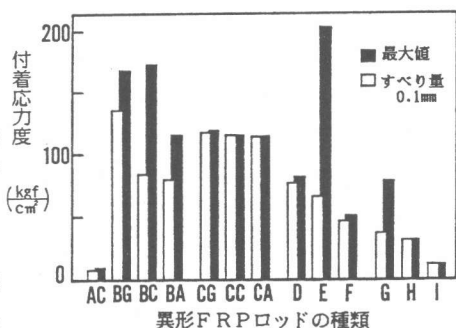


図-3 異形FRPロッドの付着応力度 実験(I)

度は58Kgf/cm² および69Kgf/cm² であるのに対し、P C鋼より線の場合はそれぞれ52Kgf/cm² および56Kgf/cm² であり、ほぼ10Kgf/cm² の差がある。圧縮強度が約300Kgf/cm² の場合もほぼ同様の傾向を示している。このような結果から、CFRPより線の付着力は同じサイズのP C鋼より線と同等以上の性能を有していると考えられる。

3. 3 巻きつけ方法の相違による付着性状 (実験Ⅱ)

異形FRPロッドにおいて、巻きつけ方法、繊維の種類、およびよりの有無に関して行った付着試験の結果を表-5に示す。ビニロン繊維を巻きつけた場合の付着強度は94~140Kgf/cm²の範囲であるが、巻きつけ方法の相違によって多少の差が見られた。付着強度が最も小さかったのは螺旋巻きのより無しであり、これは巻きつけピッチが他の6mm に対して9mm で大きく、ふしの高さが小さかったためである。また、ビニロン交差巻きのより有りの場合は100 Kgf/cm² で他のものより小さかった理由は、円形断面のビニロンより糸をロッド表面に接着する樹脂量が少なかったために、ロッドの引抜きに従ってより糸がロッド表面で転がる現象を起こしたからであると思われる。炭素繊維の巻きつけに関しては、フィラメントヤーンをロッドに巻き付ける際にそのまま巻きつけたより無しの場合と、1巻きの間に2回のよりを入れてふしの高さを高めた場合についての比較を行った。いずれの方法においても付着強度はほぼ同様に、約120Kgf/cm²であった。この理由は、巻きつけ繊維量が同じであり、付着破壊は巻きつけ繊維とロッド間の樹脂のせん断(すべり)であったことから、よりの有無によるふしの高さの効果が表われなかったものと考えられる。これらに対し、異形鉄筋の場合は186Kgf/cm²で非常に大きく、異形P C鋼棒の場合は予想に反して19Kgf/cm² で小さな値であった。図-5は、自由端のすべり量が0.3mm 以下の初期の付着応力度とすべり量の関係を示したものである。ビニロン繊維の螺旋巻きでより無し(V S無)、

および炭素繊維の交差巻きでより無し(C D無)の場合のすべり曲線は右側に傾いており、それぞれ、前述したようにピッチが大きいこと、および、ふしの高さが低いことが原因と思われる。その他の巻きつけ方法の場合のすべり曲線はほとんど同一であり、異形鉄筋の曲線と同様の傾向が示された。しかし、各すべり量における付着応力度は異形鉄筋に比較して小さく、たとえば、すべり量0.1mm 時では鉄筋の145Kgf/cm²に対して約1/2の70~80Kgf/cm² である。それでも、異形

表-4 CFRPより線、P C鋼より線の付着応力度

コンクリート強度 kgf/cm ²	より線の種類	下記すべり時の付着応力度 (kgf/cm ²)				
		0.01mm	0.05mm	0.10mm	0.25mm	0.50mm
610	CFRP	43	58	64	69	71
	P C鋼	50	52	53	56	60
282	CFRP	41	54	59	63	62
	P C鋼	44	45	45	45	46

※3個の実験値の平均

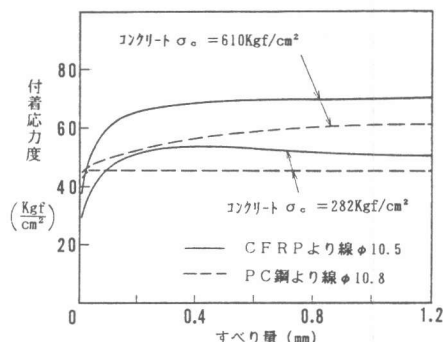


図-4 CFRPより線P C鋼より線の付着応力度～すべり量曲線

表-5 実験(Ⅱ)による引抜き試験の結果

巻きつけ繊維	巻きつけ方法	燃り	最大付着力時		
			荷重 (kg)	付着強度 (kgf/cm ²)	すべり量 (mm)
ビニロン (V)	螺旋巻 (V S)	有	2,023	134	0.73
		無	1,412	94	0.60
	交差巻 (V D)	有	1,509	100	0.45
		無	2,115	140	0.83
炭素 (C)	螺旋巻 (C S)	有	1,855	123	0.40
		無	—	—	—
	交差巻 (C D)	有	1,900	126	0.53
		無	1,782	119	2.15
異形鉄筋	D 6		1,486	186	0.67
異形P C鋼棒φ7.4			330	19	0.01

※3個の実験値の平均

PC鋼棒の約20Kgf/cm²よりは大きい結果であった。なお、FRPロッドの付着の初期から最終の抜け出しまでのすべり曲線は、実験(I)による図-2と全く同様の傾向であった。FRPロッドは、最大引抜き荷重が得られた後、すべり量1.0mm～1.5mmの間ですべりが急増する現象が見られた。試験後に供試体を切断してロッドのすべり状態を観察すると、ロッド表面と巻きつけ繊維の界面の樹脂との接着が切れていること、接着樹脂量が少ないことなどが分かった。したがって、巻きつけ型の異形FRPロッドの製作においては、巻きつけ繊維とロッド本体との界面の接着力やせん断抵抗を強固に保てる樹脂を選定すること、適切な塗布量を選択することが重要である。図-6は、引抜き試験における自由端のすべり量が0.1mm および0.2mm における付着応力度、および最大荷重時の付着強度を示したものである。

3. 4 付着性能の評価

異形FRPロッドの凸部は異形鉄筋のふしに相当するもので、大きさ、間隔、角度、固さ等は付着力を左右するものである。その構成要素は繊維と樹脂であり、弾性係数やせん断強さ等は鋼材に比較して劣ること、ふし製造時に半硬化の樹脂を用いるためにロッド軸とふしのなす角度が緩くなることなどの理由により、各付着応力度におけるすべり量は大きくなるものと考えられる。一方FRPロッドは、定着あるいは付着等の制約上比較的細径のものが多く、すべりは荷重が小さい段階から始まり、すべり量が0.1mm 以下の場合の測定値のバラツキは図-7に示すように大きい。そこで、すべり量が0.1mm あるいは0.2mm の時の付着応力度を用いる場合を示すと、図-3および図-6に見られるようにその性能を表わすことができると思われる。このように、FRPロッドの付着性能の評価においては、鉄筋の場合の0.002・D あるいは0.005・D (D直径)よりも大きなすべり量の時(たとえば0.1mm)の値を用いることにより判断の目安とすることができると思われる。

3. 5 温度の影響(実験Ⅲ)

FRPロッドはマトリクスとして樹脂を使用しているため、火災その他の原因によってコンクリートの温度が上昇した場合、樹脂の軟化によって付着強度が低下することが予想される。このような温度の影響を検討するために、コンクリート強度410Kgf/cm²の供試体を恒温槽に入れ時間当たり30℃の割合で昇温し、内部温度が40℃、70℃、100℃に達してから1時間および3時間の定温暴露を行い、ヒーターで保温しながら直ちに引抜き試験を実施した。図-8は、コンクリート温

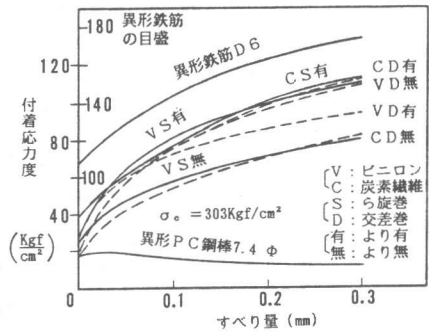


図-5 付着応力度～すべり量曲線
巻きつけ方法の相違 — 実験(Ⅱ) —

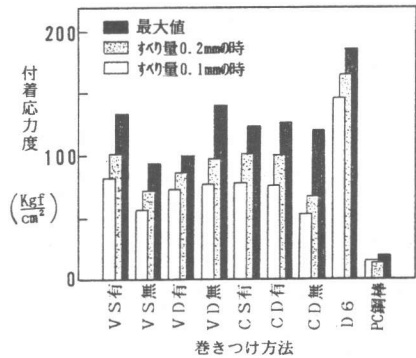


図-6 巻きつけ方法の相違による付着応力度
— 実験(Ⅱ) —

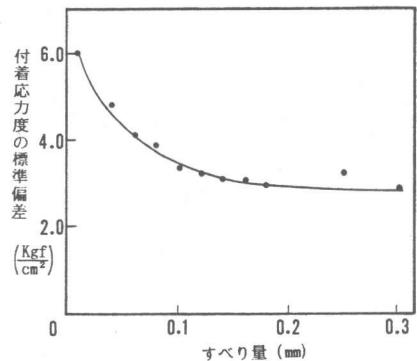


図-7 付着応力度のバラツキ

度と付着強度の関係を示す。高温時の付着破壊はすべてロッドの抜け出しで生じた。同図によると、各試験体間のバラツキは比較的大きいが、暴露時間の相違による影響は少ないと考えられ、コンクリート温度が上昇するにつれて付着強度が低下することは明らかである。すなわち、常温で平均 123Kgf/cm^2 であった付着強度は、 40°C で 90Kgf/cm^2 、 70°C で 85Kgf/cm^2 、 100°C で 56Kgf/cm^2 と低下し、 100°C の場合は常温時の約半分程度になる。付着破壊した供試体を切断してロッドを観察すると、ロッド本体と巻きつけ繊維との界面ですべていることが確認された。コンクリート強度は温度の上昇によって低下して 100°C では約 270Kgf/cm^2 であったが、ロッドの付着面の観察結果から強度の影響はないと考えられた。図-9は、コンクリート内部が高温になった場合の付着応力度とすべり量の関係を示す。温度が 100°C になるとすべり曲線は明らかに相違し、付着応力度が小さい段階からロッドはすべり始めている。また、 40°C および 70°C の場合の最大荷重時のすべり量は、常温時の場合よりも小さく $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ の範囲であった。以上のように、コンクリートの温度が高くなるとFRPロッドの付着特性も相当変ってくる。本実験で使用したロッドのマトリクスは熱硬化型エポキシ樹脂であるが、今後は耐熱性樹脂を用いた場合等の付着性に関する実験が必要である。

4. 結論

本実験で得られた結果をまとめると次のようである。

- (1) FRPロッドの付着試験は、 10cm 立方供試体を用いた引抜き試験方法で行うことができる。
- (2) 異形FRPロッドの自由端のすべり量は、異形鉄筋と比較して大きい。
- (3) 異形の加工方法が適切であれば、ロッドの付着強度は 100Kgf/cm^2 以上確保することができる。
- (4) より線加工方法によるFRPロッドの付着強度は、PC鋼より線と同等以上である。
- (5) 塗粒方法によるロッドへの砂粒の付着は、ロッド本体の樹脂と一体化することが必要である。
- (6) 繊維巻きつけ方法によるFRPロッドは、ロッド本体とまきつけ繊維との界面の樹脂の剥離によって付着切れ破壊するので、これを防止する工夫が必要である。
- (7) コンクリート温度が上昇すると、FRPロッドの付着強度は相当低下する（ 100°C の場合は常温の場合の約 $\frac{1}{2}$ ）ので、耐熱性が必要な場合には樹脂の材質の検討が必要である。

(参考文献)

- 1) 岡本、田村、松原、谷垣：アラミド繊維による組紐状棒材の基本的特性、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、1988
- 2) 小沢、関島、岡村：FRPで補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、1987
- 3) 丸山、伊東、西山：各種FRPロッドの付着特性、第43回土木学会年次学術講演会、昭和63年
- 4) 村田、河合：引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究、土木学会論文集、第348号、V-1、1984

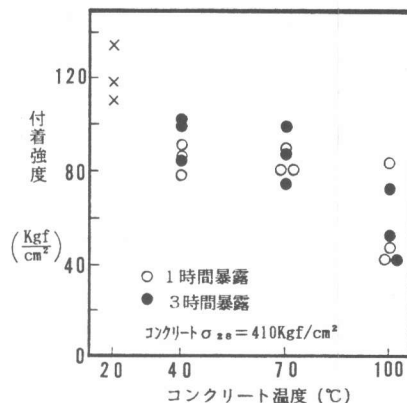


図-8 コンクリート温度とFRPロッドの付着強度 (巻きつけ型の異形加工方法)

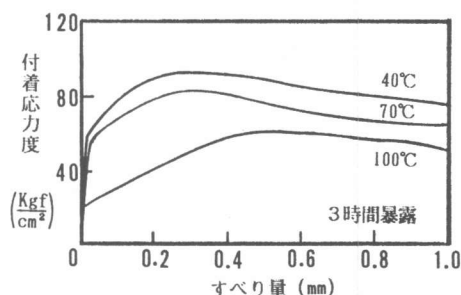


図-9 付着特性に及ぼす温度の影響