

論文 コンクリートの付着性状に及ぼす各種要因の影響

栗田守朗*¹・塩屋俊幸*²・吉武謙二*³・田中博一*⁴

要旨: 短鋼繊維を混入したモルタルやコンクリートと鉄筋との付着強度に及ぼす影響を把握する目的で、圧縮強度、鉄筋径などを要因として Pull-Out 試験を実施した。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。(1) 圧縮強度は鋼繊維混入率の増加による顕著な影響は受けないが、曲げ強度は鋼繊維混入率の増加にともないほぼ直線的に増加する。(2) 付着強度は圧縮強度の増加にともない直線的に増加する。一方、鉄筋径が大きくなると付着強度は減少する傾向があり、その傾向は圧縮強度が 80 N/mm² を超えるような領域において認められる。

キーワード: 短鋼繊維, モルタル, コンクリート, 圧縮強度, 曲げ強度, 付着強度

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC と呼ぶ）は、コンクリートの持つもろさを改善し、じん性を著しく高めた複合材料であり、各種構造物や補修・補強などに利用されている¹⁾。鋼繊維の混入率としては 0.5 ～ 1.5 vol% の範囲である。また、SFRC の特性を利用し、鉄筋コンクリート柱部材の補強材として用いることを目的として設計指針（案）が作成されている²⁾。

一方、SFRC の高性能化を図る研究・開発が進められている。一つは流動性や充填性に着目し、施工性を向上させる目的で高流動コンクリートを指向したものであり、他方は鋼繊維の混入率を著しく高めたり、更に、超高強度とすることにより硬化コンクリートの性能を著しく向上させることを指向したものである。

前者の例としては、ECL（Extruded Concrete Lining）工法の一次覆工コンクリートに適用されている³⁾。また、後者の一つに CRC（Compact Reinforced Composite）がある。CRC は、鋼繊維の混入率を最大 12 vol% と大幅に高めるとともに、100 N/mm² を超える圧縮強度を有する鋼

繊維補強モルタルである⁴⁾。後者の材料は、一般に高価であり作業性に制約が多いことなどから構造物に部分的に使用することが効果的であると考えられている。

筆者らは、上記のような従来の SFRC の性能を改善した CRC についてその基本的な性状を把握する目的で各種試験を実施している^{5), 6)}。本文は、高流動 SFRC および CRC について、鉄筋との付着強度に及ぼす影響を把握するために、圧縮強度、鉄筋径、鋼繊維の有無、鋼繊維混入率を要因として付着強度試験（Pull-Out 試験）を実施した結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 実験の組合せ

実験の要因と水準および試験の組合せを表 1 および表 2 にそれぞれ示す。

なお、表中の NC, SFRC, CRC は以下を示す。

・NC: 圧縮強度が 30 N/mm² 程度の普通コンクリート、スランブ 12 cm を目標とした。

・SFRC: 圧縮強度が 70 N/mm² 程度の高流動鋼繊維補強コンクリート、スランブフロー 65 cm 程度

*1 清水建設（株） 技術研究所 土木研究開発部 主任研究員 工修（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所 構造研究開発部 主任研究員 工博（正会員）

*3 清水建設（株） 技術研究所 構造研究開発部 工修（正会員）

*4 清水建設（株） 技術研究所 土木研究開発部 工修（正会員）

を目標とした。

・CRC：圧縮強度が130N/mm²，180N/mm²程度の超高強度鋼繊維補強モルタル

2.2 使用材料

NC，SFRCおよびCRCに使用した材料を表－3に示す。付着試験に供した鉄筋は、SD490の鉄筋を焼き入れし、高強度としたものを用いた。また、付着試験用試験体製作に際しては、補強用としてφ9の螺旋鉄筋を用いた。使用した鉄筋の引張試験結果を表－4に示す。

なお、練混ぜ水は水道水を用いた。

2.3 配合

試験に供した各配合を表－5および表－6に示す。表中の配合を示す記号は次の通りである。例えば、SFRC-1は、コンクリートの種類がSFRCで、鋼繊維混入率が1 vol%であることを、CRC130-2は、コンクリートの種類がCRCで、目標圧縮強度130N/mm²，鋼繊維混入率が2 vol%であることを示す。

2.4 製造

試験に供したコンクリートは、55℃の強制二軸練りミキサを用いて製造した。

2.5 試験項目

(1) フレッシュ性状

表－1 要因と水準

Factors	levels		
	NC	SFRC	CRC
Target strength (N/mm ²)	30	70	130, 180
Re-bar	D19, D32, D51		
Vf (vol%)*1	0	0, 0.5, 1	0, 1, 2, 3, 6

*1：鋼繊維混入率を示す。

表－2 実験の組合せ

Type of concrete	Re-bar		
	D19	D32	D51
NC	0	0	0
SFRC	1	0, 0.5, 1	1
CRC-130	0, 3	0, 1, 2, 3, 6	0, 3
CRC-180	3	0, 3	3

表中の数値は鋼繊維混入率を示す。

表－3 使用材料

種類	使用材料	
NC	セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.15g/cm ³
	細骨材	浜岡産陸砂 表乾密度 2.72g/cm ³ ，吸水率1.84%， 粗粒率2.81
	粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石 MS20mm，表乾密度 2.66g/cm ³ ，吸水率0.60%，粗 粒率6.75
	混和剤	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体を主成分とするAE減水剤，7メチルグルコン酸系陰イオン界面活性剤を主成分とする空気量調整剤
SFRC	セメント	早強ポルトランドセメント 密度3.14g/cm ³
	細骨材	浜岡産陸砂 表乾密度 2.72g/cm ³ ，吸水率1.84%，粗 粒率2.81
	粗骨材	我朗産石灰碎石 MS20mm， 表乾密度2.70g/cm ³ ，吸水率 0.54%，粗粒率6.54
	混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤，セルローズ系増粘剤
	鋼繊維	両端フック付結束型 φ0.6mm×l 30mm
CRC	結合材	DSPセメント 密度2.90g/cm ³
	細骨材	浜岡産陸砂 表乾密度 2.72g/cm ³ ，吸水率1.77%， 粗粒率3.04
		ボーキサイト砂 荒目（2-4mm）：表乾密度 3.79g/cm ³ ，吸水率1.38%， 粗粒率4.73
		細目（0-1mm）：表乾密度 3.45g/cm ³ ，吸水率4.04%， 粗粒率1.88
	鋼繊維	straight steel fiber φ0.4mm×l 12mm

表－4 鉄筋の試験結果

	Yield point or 0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)
D19	526	726
D19/hardening	1060	—*1
D32	536	697
D32/hardening	825	1160
D51	504	680
D51/hardening	544	730
φ9	331	450

*1：把持装置がすべったため計測ができず。

- ・スランプ：JIS A 1101 による。
- ・スランプフロー：JSCE-F 503 による。
- ・空気量：JIS A 1128 による。
- ・単位容積質量：空気量試験で用いた試料を用いて JIS A 1116 に準じて測定する。
- ・温度：棒状温度計による。

(2) 硬化性状

- ・圧縮強度：JIS A 1118 による。
- ・曲げ強度・曲げタフネス：JSCE-G 552 による。
- ・ヤング係数：JSCE-G 502 による。
- ・付着強度試験：付着強度試験に供した試験体は、直径 250mm 高さ 300mm の円柱とし、付着試験における付着長は 3ϕ （鉄筋の公称直径 ϕ の 3 倍）とした。これは、筆者らが既に実施している試験方法⁶⁾と同条件で行うこととしたことによる。付着強度試験は 2MN のアムスラー型試験機にて行い、荷重と自由端すべり量を測定した。付着強度試験の概要を図-1 に示す。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

NC および SFRC の練混ぜ直後のスランプ、スランプフローはそれぞれ目標とする値を満足していた。

鋼繊維混入率 (Vf) とスランプフローとの関係を図-2 に示す。

CRC および SFRC とともに、スランプフローは Vf の増加にともないほぼ直線的に減少しており、Vf の流動性に及ぼす影響が大きいことを示

表-6 NC, SFRC の配合

	NC	SFRC-0	SFRC-0.5	SFRC-1
Target Compressive strength (N/mm ²)	30	70		
W/B	0.55	0.38	0.38	0.38
s/a (%)	42.7	65.0	65.0	65.0
Vf (vol%)	0	0	0.5	1.0
W (kg/m ³)	168	190	190	190
C (kg/m ³)	304	400	400	400
F (kg/m ³)	-	100	100	100
S (kg/m ³)	802	1102	1088	1074
G (kg/m ³)	1052	573	573	573
Steel fiber (kg/m ³)	0	0	39.3	78.5
Ad1(Cx%)	0.25	-	-	-
Ad2	1A	-	-	-
Ad3((C+F)x%)	-	2.2	2.4	2.4
Ad4 (g/m ³)	-	1050	900	900

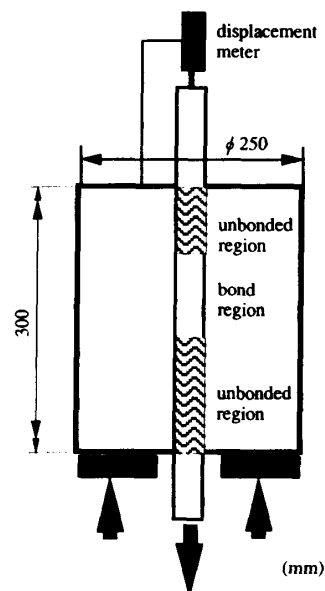


図-1 付着強度試験体

表-5 CRC の配合

Mix.	CRC130-0	CRC130-1	CRC130-2	CRC130-3	CRC130-6	CRC180-0	CRC180-3
Target Compressive strength (N/mm ²)	130					180	
W/B	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.187	0.187
S/B	1.44	1.41	1.38	1.35	1.26	1.80	1.68
Vf (vol%)	0	1	2	3	6	0	3
W (kg/m ³)	160	160	160	160	160	176	176
B (kg/m ³)	940	940	940	940	940	940	940
S (kg/m ³)	1349	1322	1294	1268	1186	1689	1581
Steel fiber (kg/m ³)	0	78.5	157	234	471	0	234
note	land sand	land sand	land sand	land sand	land sand	bauxite	bauxite

している。試験に供した配合 (CRC, SFRC) はそれぞれペースト量が一定であるため、 V_f が増加すると鋼繊維に拘束されるペースト量が増え、流動性に寄与するペースト量が減少し、さらに、鋼繊維同志の機械的な絡み合いが生じ易くなることにより流動性が低下するものと考えられる。

3.2 硬化性状

(1) 圧縮・曲げ特性

鋼繊維混入率 (V_f) と圧縮強度、曲げ強度との関係を図-3および図-4に示す。CRC130の配合で材齢28日の圧縮強度は約130N/mm²、CRC180の配合では約200N/mm²得られており、一方、SFRCは70~80N/mm²、NCは約40N/mm²であり当初の目標とした圧縮強度が得られた。

鋼繊維混入率と圧縮強度の関係から、 V_f の増加にかかわらず圧縮強度には差異は認められなかった。CRCの場合は、Bache⁷⁾によれば、鋼繊維混入率の増加 (最大12vol%まで混入) にともない圧縮強度は増加すると報告されているが、本実験の範囲である6vol%まででは、顕著な影響は認められなかった。

曲げ強度は、CRCおよびSFRCともに V_f の増加にともない増加しており、鋼繊維を混入したことにより曲げ強度の改善効果が現れている。CRC130の曲げ強度は、 V_f が0vol%の場合約10N/mm²に対して、6vol%では約20N/mm²であり、約2倍の曲げ強度を有している。また、同一鋼繊維混入率の場合、CRC180の曲げ強度はCRC130のそれと比較すると1.3~1.8倍となっている。これは圧縮強度の増加に伴いCRCそのものの曲げ強度が増加したことによるものと考えられる。

SFRCの場合も同様な傾向であり、 $V_f=1\text{vol}\%$ の曲げ強度は11N/mm²程度で、0vol%のその約1.5倍であった。

鋼繊維が無混入の場合 ($V_f=0\text{vol}\%$) における圧縮強度と曲げ強度の関係を図-5に示す。曲げ強度は圧縮強度の増加にともない増加し、圧縮強度の2/3乗にはほぼ比例するようである。

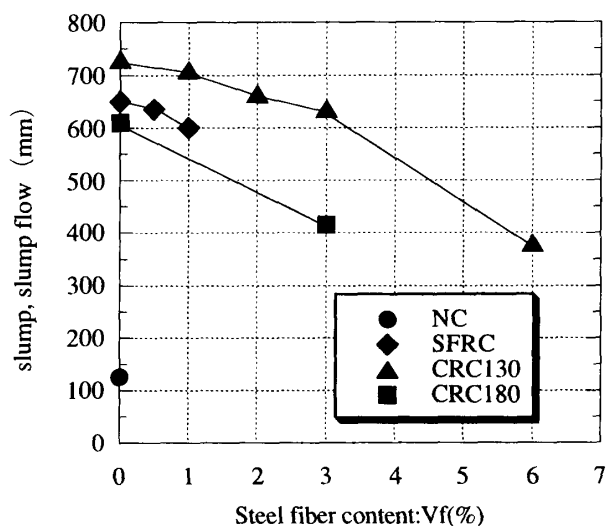


図-2 鋼繊維混入率とスランプ、スランプフローとの関係

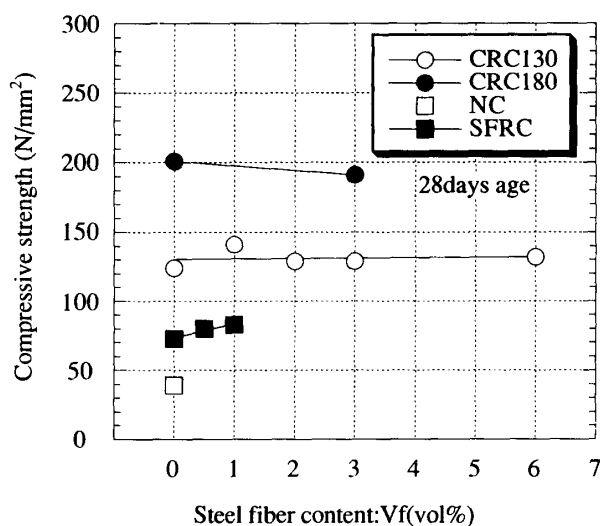


図-3 鋼繊維混入率と圧縮強度との関係

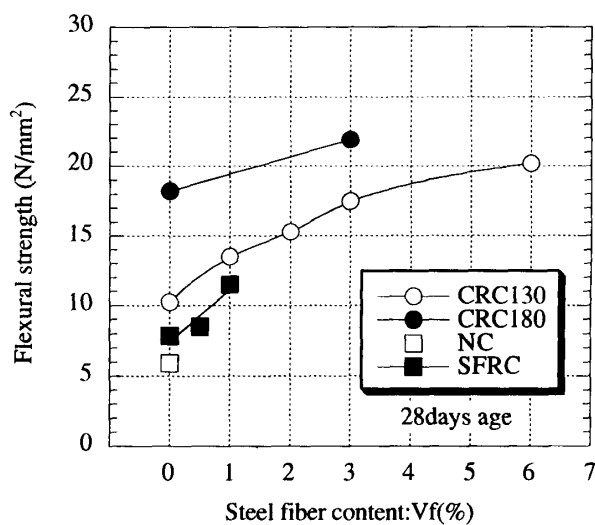


図-4 鋼繊維混入率と曲げ強度との関係

(2) 付着強度特性

付着強度は、最大荷重 P を鉄筋の公称表面積（公称周長×付着長さ）で除した最大付着応力度をいい、以下の式（1）により算出した。なお、図－7、図－8に示した以外の場合は試験体は割裂せず鉄筋が引き抜けた。

$$f_{bo} = P / (\varnothing \times L_b) \quad (1)$$

ただし、 f_{bo} ：付着強度（ N/mm^2 ），

\varnothing ：公称周長（mm），

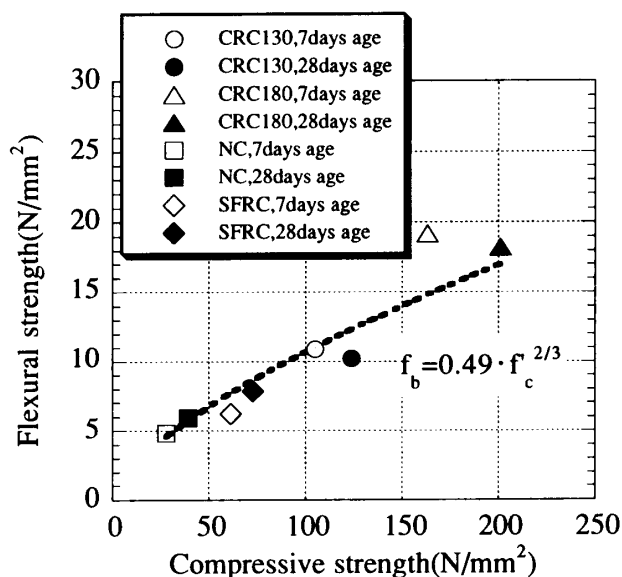
L_b ：付着長さ（mm）

鉄筋の種類D32における鋼繊維混入率と付着強度との関係をCRC130およびSFRCについて図－6に示す。付着強度は鋼繊維混入率の増加にともない若干増加する傾向も認められるが、顕著な傾向は認められなかった。

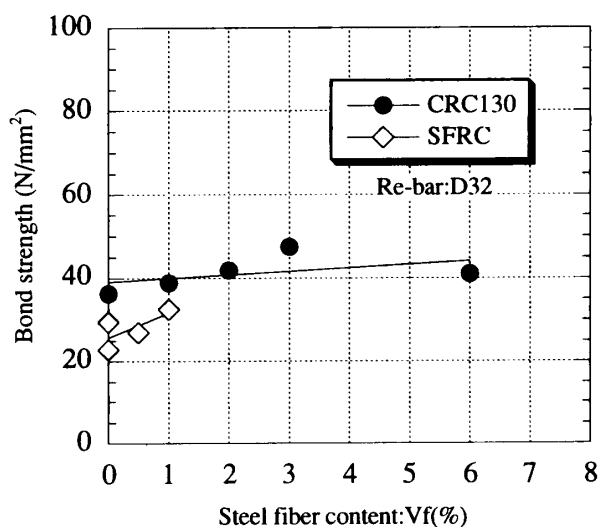
付着強度に及ぼす鉄筋径の影響について鋼繊維混入の有無に分けて図－7および図－8に示す。鋼繊維無混入の場合（図－7）は、圧縮強度が 130N/mm^2 程度の場合（CRC130）は、付着強度は鉄筋径が大きくなるにしたがい減少している。一方、圧縮強度が 40N/mm^2 程度の場合（NC）には、付着強度は鉄筋径にかかわらずほぼ一定の値であった。

鋼繊維を混入した場合（図－8）は、圧縮強度が 130N/mm^2 程度、 200N/mm^2 程度の場合では、付着強度は鉄筋径が大きくなるにしたがい減少しており、鋼繊維を混入しない場合と同様な結果であった。一方、圧縮強度約 80N/mm^2 程度のSFRC（ $V_f=1\text{vol}\%$ ）では、鉄筋径が大きくなるにしたがい付着強度が小さくなる傾向は認められるものの顕著には現れていない。

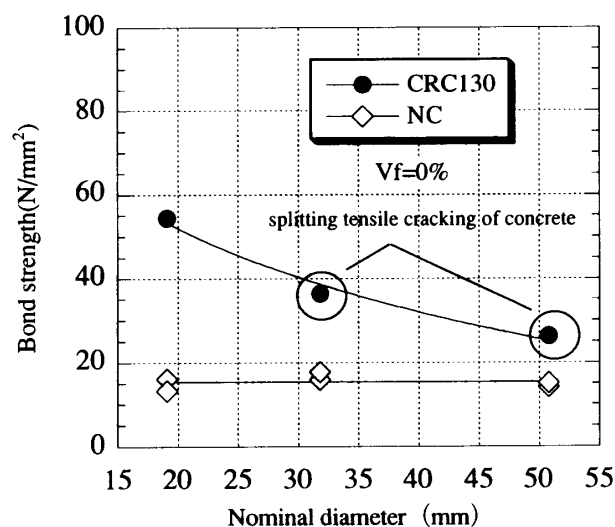
圧縮強度と付着強度の関係を鉄筋径ごとに鋼繊維の混入の有無にかかわらず図－9に示す。付着強度は圧縮強度の増加にともない増加している。同一圧縮強度においては鉄筋径が小さいほうが付着強度は大きくなり、付着強度の寸法効果が認められるようである。この傾向は、圧縮強度が 80N/mm^2 程度までは顕著ではないが、それを超える強度の領域において認められるようである。付着強度の寸法効果については神野



図－5 圧縮強度と曲げ強度の関係（ $V_f=0\text{vol}\%$ ）



図－6 鋼繊維混入率と付着強度との関係



図－7 鉄筋径と付着強度との関係（ $V_f=0\text{vol}\%$ ）

ら⁷⁾によって指摘されているが、各種要因に関して更に検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

高流動SFRCやCRCについて、鉄筋との付着強度に及ぼす影響を把握する目的で、圧縮強度、鉄筋径、鋼繊維混入率などを要因として付着強度試験（Pull-Out 試験）を実施した。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

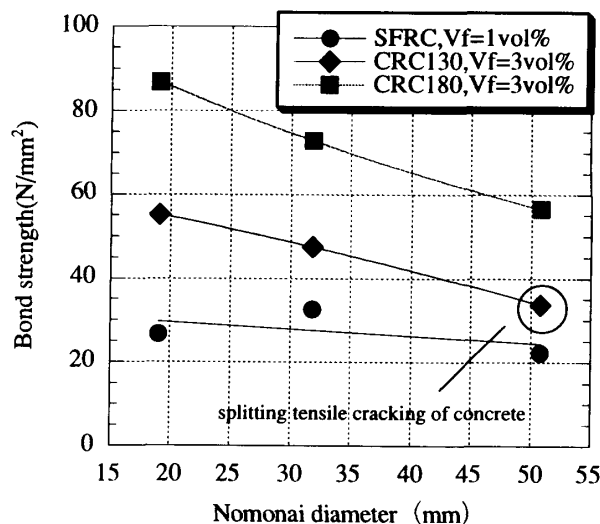
(1) フレッシュ性状は鋼繊維の混入率に大きな影響を受け、鋼繊維混入率が大きくなるにしたがい流動性は低下する。

(2) 圧縮強度は鋼繊維混入率の増加により大きな影響を受けないが、曲げ強度は鋼繊維混入率の増加にともない直線的に増加する。また、鋼繊維を混入しない配合では、圧縮強度が40～200 N/mm²の範囲において、曲げ強度は圧縮強度の2/3 乗に比例するようである。

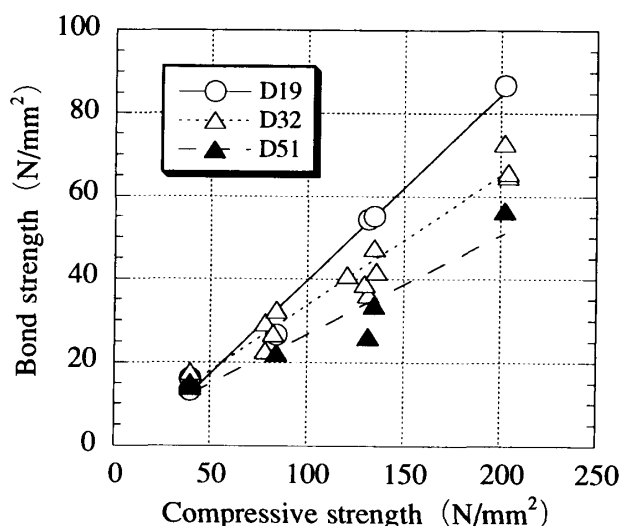
(3) 付着強度は、圧縮強度の増加にともないほぼ直線的に増加する。同一圧縮強度では、付着強度は鉄筋径が大きくなるにしたがい減少する傾向がある。その傾向は圧縮強度が80 N/mm²を超えるような領域において認められるようである。

参考文献

- 1) (社)鋼材倶楽部・SFRC構造設計施工研究会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル（トンネル編），技報堂出版，1995
- 2) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー 97，1999.11
- 3) 原田俊作，渋谷都男，栗田守朗：鋼繊維を混入した高流動コンクリートを用いたECL工法，土木技術，pp.52-58，1996.12
- 4) Bache, H.H. : Concrete and Concrete Technology in a broad Perspective, CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, 1995



図－8 鉄筋径と付着強度との関係
(鋼繊維混入条件)



図－9 圧縮強度と付着強度との関係

- 5) 塩屋俊幸，栗田守朗，別所友宏，辻 秀夫：鋼繊維補強高強度モルタル、H形鋼を用いたプレキャストコンクリート継手，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19-2，pp.1305-1310，1997
- 6) 栗田守朗，塩屋俊幸，林 秀彦，吉武謙二：鋼繊維補強高強度モルタルの諸性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 2，pp.307-312，2000
- 7) 神野靖夫，藤井 栄，森田司郎：割裂を伴う付着特性の寸法効果に関する研究，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.747-748，1986.8