

論文

[1134] 鋼繊維-セメントマトリックス界面領域の破壊靱性に影響を及ぼす2、3の要因

正会員○五十嵐心一（金沢大学土木建設工学科）

正会員 川村 満紀（金沢大学土木建設工学科）

1. まえがき

繊維補強セメント系複合材料の靱性の大部分はマトリックスのひびわれ発生後の繊維の引き抜き過程の吸収エネルギーによりもたらされる。繊維の引き抜き過程は、初めに繊維の弾性付着の破壊（脱付着）を生じ、その後、脱付着界面には摩擦力が引き抜けに抵抗しながら脱付着が進行していく[1]。したがって摩擦力は繊維の引き抜き過程において重要な役割を果たすと考えられるが、通常の繊維引き抜き試験にて評価指標として用いられる平均付着強度においては、弾性付着と摩擦抵抗は区別できない。一方、Stang & Shah [2] らにより提案された破壊力学手法に基づく繊維の付着特性評価法は、脱付着界面に作用する摩擦力も考慮できるように拡張され[3]、比較的簡便に付着破壊に関する破壊靱性を求めることが可能になっている[4]。繊維の付着特性は繊維-マトリックス界面領域の組織と密接に関連することは従来より指摘されてきたことであるが、この界面領域の組織と界面領域の破壊靱性を関連づけて検討した例は少ないようである。

本研究はシリカフュームの混入、水セメント比の変化および細骨材の混入が鋼繊維-セメントマトリックス界面領域の破壊靱性に及ぼす影響を明かにすることを目的としたものであり、さらに、この破壊靱性と界面領域の微小硬度分布との関連について検討するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびマトリックスの配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、細骨材には豊浦標準砂を用いた。使用した鋼繊維は直径が0.5mmのストレート繊維である。シリカフュームはセメントの一部と置換して用いた。マトリックスとして使用したセメントペーストおよびモルタルの配合を表1に示す。

表1 セメントペーストおよびモルタルの配合

水セメント比	シリカフューム置換率 (%)	マトリックス	高性能減水剤 (wt% cement)
0.55	0	ペースト	0
0.35	0	ペースト	0
0.25	0	ペースト	2.4
0.55	10	ペースト	0.6
0.55	20	ペースト	0.6
0.55	0	モルタル	0
0.55	10	モルタル	0.6

モルタルの結合材：砂 = 1:1.5

2.2 実験方法

(1) 鋼繊維引き抜き試験

鋼繊維引き抜き試験に用いた供試体を図-1に示す。内径0.5mmのシリコンチューブを鋼繊維に装着してセメントペーストまたはモルタルを打設した。供試体脱型時にこのシリコンチューブを注意深く引き抜くことにより鋼繊維-マトリックス界面に切欠きを導入した後、20°Cの水中で養生を行った。繊維の埋め込み長さは30mmであり、切欠き長さは5、10および15mmと変化させた。引き抜き試験は材令14および28日に行い（図-2）、荷重-変位曲線を記録した。得られた荷重-変位曲線のコンプライアンスの変化から（図-3）、次式によって限界エネルギー解放率（ G_{IIc} ）を求めた[2]。

$$G_{IIc} = \frac{P_b^2}{2\pi D} \frac{dC(a)}{da} \quad (1)$$

$$P_b = P_{tmax} - \pi D l_f \tau_f \quad (2)$$

ここに、 P_{tmax} : 最大引き抜き荷重 D : 繊維直径 l_f : 埋め込み長さ
 τ_f : 摩擦応力 C : コンプライアンス a : 切欠き長さ

脱付着界面には一定の摩擦応力 τ_f が作用すると仮定し、図-3に示すように、最大引き抜き荷重到達直後の荷重-変位曲線下の面積から τ_f を求めた。また、最大引き抜き荷重から平均付着強度も求めた。

(2) 微小硬度試験

図-4に示すように、繊維の引き抜き試験と同配合のセメントペースト中に9本の鋼繊維を埋め込み水中養生を行った。所定材令にて薄板を切り出し、ダイヤモンドスラリーを用いてその表面を研磨した。研磨面において繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度(ビッカース硬度)を超微小硬度計を用いて測定した。

(3) 切欠きはりの曲げ試験

マトリックス自体の破壊靱性を求めるために、切欠きはりの3点曲げ試験を行った。供試体寸法は $40 \times 40 \times 300\text{mm}$ であり、スパンは 240mm とした。試験はRILEM[5]の方法を参考に行い、破壊エネルギー(G_F)と限界エネルギー解放率(G_{Ic})を求めた。

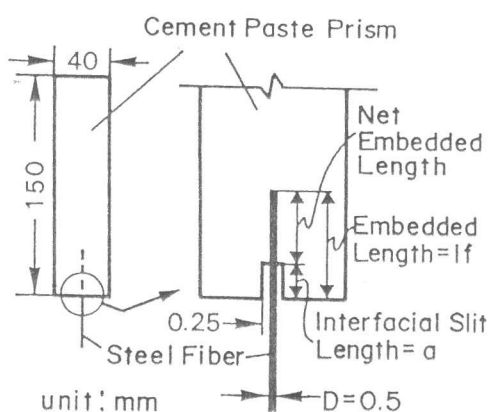


図-1 引き抜き試験用供試体

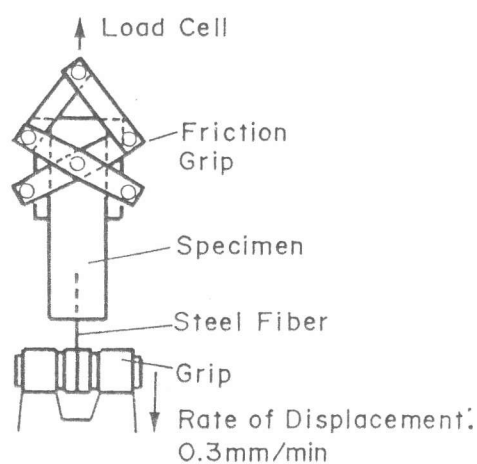


図-2 引き抜き試験載荷方法

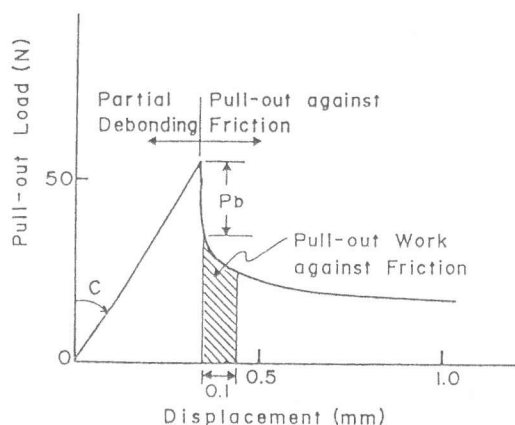


図-3 引き抜き荷重-変位曲線

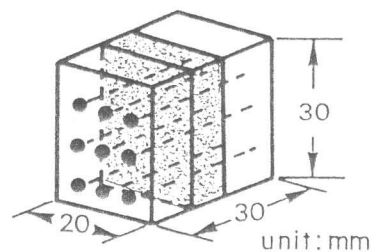


図-4 微小硬度測定用供試体

3. 結果

3.1 マトリックスの破壊靱性

表-2にマトリックスの G_F および G_{Ic} の値を示す。シリカフューム混入供試体の G_F および G_{Ic} は、シリカフューム無混入供試体のそれらに比べて小さく、シリカフュームの混入はマトリックス自体の靱性を低下させることがわかる。

3.2 シリカフュームの混入が鋼繊維-セメントペースト界面領域の限界エネルギー解放率に及ぼす影響

図-5にシリカフューム混入の有無による界面領域の G_{IIc} の相違を示す。シリカフュームの混入により G_{IIc} は低下しているが、置換率10%では材令14日から28日の間に G_{IIc} は増大し、無混入との差は小さくなっている。しかし、シリカフューム置換率20%の場合は、材令14日では置換率10%と同程度の G_{IIc} を示すが、材令28日においては切欠き5mmの場合には G_{IIc} は増大が認められるものの、切欠き10mm以上では G_{IIc} は低下しており、シリカフューム無混入の場合に比較して G_{IIc} はかなり小さい。これらの結果より、比較的多量にシリカフュームを混入すると界面領域の破壊靱性は低下することがわかる。

3.3 水セメント比が鋼繊維-セメントペースト界面領域の限界エネルギー解放率に及ぼす影響

図-6はセメントペーストマトリックスの水セメント比の変化にともなう界面領域の G_{IIc} の変化を示したものである。水セメント比の低下にともない G_{IIc} は増大しており、特に、水セメント比が25%の場合は、水セメント比55%の約2倍の G_{IIc} 値にまで増大している。

表2 マトリックスの破壊靱性

水セメント比	シリカフューム 置換率 (%)		G_F (N/m)	G_{IC} (N/m)
0.55	0	ペースト	-	1.86
0.55	10	ペースト	-	1.16
0.55	20	ペースト	-	0.63
0.55	0	モルタル	45.5	5.99
0.55	10	モルタル	33.1	4.08

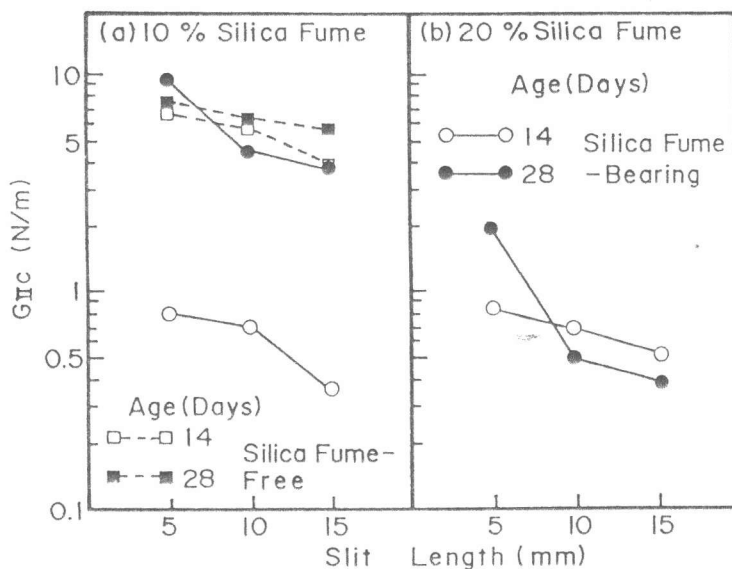


図-5 シリカフューム混入セメントペーストにおける界面領域の限界エネルギー解放率

3.4 鋼繊維-モルタルマトリックス界面領域の限界エネルギー解放率

図-7はマトリックスをモルタルにした場合の G_{IIc} をセメントペーストの場合と比較して示したものである。シリカフューム無混入の場合は、界面領域の G_{IIc} はモルタルマトリックスの方がセメントペーストマトリックスの場合よりも大きな値を示す。しかし、シリカフュームを混入した場合は、モルタルマトリックス中の界面領域の G_{IIc} はセメントペーストのそれと比べてかなり小さい値を示している。すなわち、セメントペーストマトリックス中では、シリカフュームの混入による界面

領域の G_{IIC} 値の低下は大きくはないのに対して、モルタルマトリックスの場合は、シリカフュームの混入により界面領域の G_{IIC} は著しく低下するといえる。

3.5 鋼繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布

図-8は鋼繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布を示したものであるシリカフュームの混入により界面領域全体の微小硬度は増大し、特にシリカフューム置換率 20%においてその増大は顕著である。また、水セメント比が 55%の場合と 35%の場合を比較すると、水セメント比の低減によって、繊維の影響を受けないと考えられる領域 (bulk セメントペースト) のみならず界面領域の微小硬度も増大する。さらに、水セメント比の低減は鋼繊維近傍に形成される多孔質と考えられる領域の厚さも減少させることがわかる。このようなシリカフュームの混入や水セメント比の低減によりもたらされる微小硬度の増大は、その領域において緻密な組織が形成されていることを示す。しかし、このような緻密な界面領域をもつ低水セメント比 ($W/C=0.35$) の場合においても、ブリージングやセメント粒子の充填不足により形成されると考えられる bulk セメントペースト相より多孔質な領域が、実界面から数 $10\mu\text{m}$ 離れた範囲に存在する [6]。

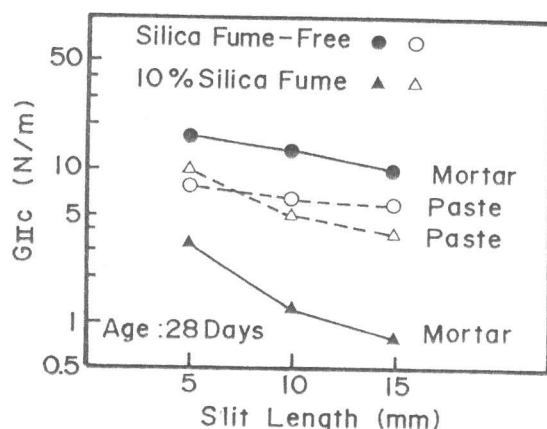


図-6 モルタル中の界面領域の限界エネルギー解放率

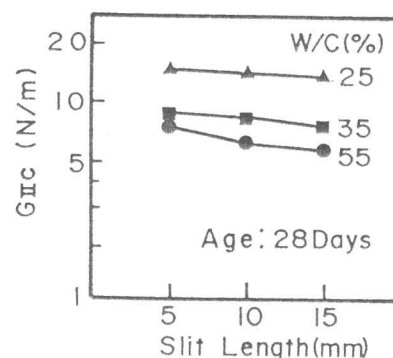


図-7 水セメント比の変化にともなう限界エネルギー解放率の変化

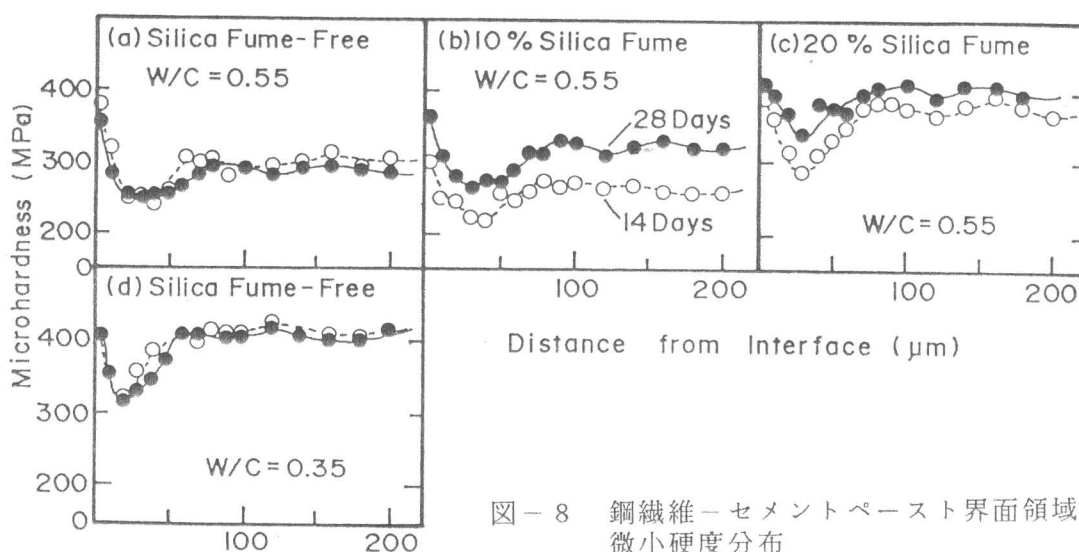


図-8 鋼繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布

4. 考察

4.1 鋼繊維-セメントペースト界面領域のひびわれ進展

繊維補強セメントにおける繊維近傍のひびわれ進展機構については、2、3の研究者によって検討されてきた。Bentur らは [6] マトリックスひびわれが繊維軸に対して垂直な方向から繊維に向かっ

て進行してくる場合、脱付着は繊維-マトリックス実界面から離れた多孔質領域にて生ずることを走査型電子顕微鏡下での観察により明らかにしている。一方、Mandel[7]らはポリマーの混入により多孔質な領域の強度を増大させることにより、引き抜き試験における限界エネルギー解放率が増大することを示しており、この結果は繊維の引き抜き試験においても、脱付着は実界面から離れたところで生じることを意味する。したがって、繊維近傍に形成される多孔質領域の強度を増大させれば繊維の付着特性は改善されると考えられる。よって、図-8に示したように、水セメント比の低減やシリカフュームの混入により緻密な界面領域が形成され、界面領域の破壊靱性は増大すると期待される。しかし、水セメント比の低減により界面領域の破壊靱性は増大したが、シリカフュームの混入によって逆に破壊靱性は低下している(図-5)。この結果はシリカフュームの混入により界面領域は緻密化されるが、その微視的構造はシリカフュームを混入することなく水セメント比の低減により形成される緻密な界面領域のものとは異なることを示唆している。

界面領域における破壊挙動はその領域内の細孔組織と関連すると考えられる。一般に水セメント比の低減によって全細孔量は低減し、細孔径も減少する。したがって、水セメント比の低減による界面領域の破壊靱性の増大はこのような細孔組織の変化によると考えられる。さらに、低水セメント比のセメントペースト中に存在する $Ca(OH)_2$ の結晶および未水和セメント粒子もひびわれの進展を拘束し[9]、その結果、破壊靱性が増大すると考えられる。

一方、シリカフュームを混入した場合は、全細孔量は同水セメント比の普通セメントペーストのそれと同程度であるが、細孔径の分布は異なる[10]。シリカフュームの混入により界面付近への $Ca(OH)_2$ の析出が著しく減少すると同時に、シリカフュームの反応の進行にともない界面組織はより均質な構造となる[8]。Feldman[11]は、シリカフュームの混入により $97 \times 10^3 nm \sim 0.175 \times 10^3 nm$ の範囲の径の細孔量がシリカフューム無混入の場合よりも増大することを示し、これは $Ca(OH)_2$ 結晶とシリカフュームの反応のためであるとしている。したがって、シリカフュームの混入により界面領域の破壊靱性が低下するのは、ひびわれ進展を妨げる役割を果たす $Ca(OH)_2$ 結晶粒の減少とボゾラン反応による比較的粗い径の細孔量の増大に起因すると考えられる。

表-3に示すようにシリカフュームを混入することにより摩擦応力 τ_f は増大しており、この増大は界面組織自身の強度の増大と関連するものであろう。よって、シリカフュームの混入により界面ひびわれは $Ca(OH)_2$ 結晶粒や未水和セメント粒子の少ない均質な界面領域を容易に進行しうが、強い摩擦抵抗により繊維の引き抜きに対する抵抗は増大する。

表 3 平均付着強度 τ_{mean} と摩擦応力 τ_f (材令 28 日)

水セメント比	シリカフューム 置換率 (%)	強度 (MPa)	切欠き長さ (mm)		
			5	10	15
0.55	0	τ_{mean}	1.55	1.67	2.04
		τ_f	0.95	1.03	1.20
0.35	0	τ_{mean}	1.65	1.70	1.79
		τ_f	0.58	0.70	0.70
0.25	0	τ_{mean}	2.70	2.71	3.14
		τ_f	2.23	2.12	2.37
0.55	10	τ_{mean}	1.71	1.98	2.51
		τ_f	1.05	1.50	1.68
0.55	20	τ_{mean}	1.97	1.96	2.75
		τ_f	1.67	1.73	2.57
0.55(モルタル)	0	τ_{mean}	1.26	1.41	1.78
		τ_f	0.78	0.84	1.22
0.55(モルタル)	10	τ_{mean}	2.09	2.48	2.97
		τ_f	2.03	2.16	2.44

4.2 鋼繊維-モルタル界面領域のひびわれの進展

シリカフューム無混入の場合、マトリックスをモルタルにすることによって界面領域の破壊靱性はセメントペーストのそれよりも大きくなるが(図-7)、平均付着強度および摩擦応力は若干低下する(表-3)。一方、シリカフューム混入モルタルマトリックスの場合の破壊靱性はシリカフューム混入ペーストのそれよりも小さい値を示すが、平均付着強度および摩擦応力は増大する。これはシリカフューム混入モルタル中の界面領域に存在する砂粒子がひびわれの進展を十分に妨げることができないことを示している。これより、砂粒子界面に沿うひびわれ進展に要するエネルギーがセメントペースト相中を進行する場合よりも低いことが考えられ、これは、Feldman[11]が示したように、砂粒子の周囲の界面において比較的粗い径の細孔が形成されるためであると考えられる。

5. まとめ

- (1) シリカフュームの混入および水セメント比の低減によって、鋼繊維-セメントマトリックス界面領域は緻密化する。しかし、シリカフュームの混入により界面領域の破壊靱性は増大しない。
- (2) 水セメント比の低減により界面領域の破壊靱性が増大するのは、界面領域における全細孔量の減少のためと考えられる。
- (3) シリカフュームの混入により界面領域の破壊靱性が低下するのは、ひびわれの進展を妨げる $Ca(OH)_2$ 結晶粒の減少と、ポゾラン反応によって粗い径の細孔が増大することに関連すると考えられる。
- (4) 界面領域における砂粒子の存在は界面領域の破壊靱性に影響を及ぼすが、シリカフュームを混入した場合は、砂粒子の周囲の界面付近に粗い径の細孔が形成されるために、破壊靱性の低下をもたらすと考えられる。

参考文献

- [1] Lawrence, P., Some theoretical considerations of fiber pull-out from an elastic matrix, J. Mat. Sci., 7, 1-6, 1972.
- [2] Stang, H. and Shah, S.P., Failure of fiber reinforced composites by pull-out fracture, J. Mat. Sci., 21, 953-957, 1986.
- [3] Morrison, J.K., Shah, S.P. and Jenq, Y-S., Analysis of fiber debonding and pull-out in composites, J. Eng. Mech., ASCE, 114, 277-294, 1988.
- [4] Kawamura, M. and Igarashi, S., Fracture toughness for the steel fiber-cement paste interfacial zone (in the course of preparation), 1991.
- [5] RILEM Draft Recommendation (50 FMC), Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, Materials and Structures, 18, 285-290, 1985.
- [6] Bentur, A., Diamond, S. and Mindess, S., The microstructure of the steel-cement interface, J. Mat. Sci., 20, 3610-3620, 1985.
- [7] Mandel, J.A., Wei, S. and Said, S., Studies of the properties of the fiber-matrix interface in steel fiber reinforced mortar, ACI Mat. J., 84, 101-109, 1987.
- [8] Bentur, A. and Cohen, M.D., Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars, J. Am. Ceram. Soc, 70 [10], 738-743, 1987.
- [9] Mindess, S., Fracture toughness testing of cement and concrete, Fracture Mechanics of Concrete (eds. A. Carpinteri and A. R. Ingraffea), Martinus Nijhoff Publishers, 67-110, 1984.
- [10] Cheng-Yi, H. and Feldman, R.F., Influence of silica fume on the microstructural development in cement mortars, Cem. Conc. Res., 15, 285-294, 1985.
- [11] Feldman, R.F., The effect of sand/cement ratio and silica fume on the microstructure of mortars, Cem. Conc. Res., 16, 31-39, 1986.