

論文

[1130] 新素材繊維—セメントペースト界面領域の組織と付着強度

正会員○五十嵐心一（金沢大学工学部）

正会員 川村 満紀（金沢大学工学部）

1. まえがき

繊維—セメントマトリックス界面領域の構造は繊維の表面の影響を受けないセメントペースト部分の構造とは異なることが指摘されており、この領域の構造は繊維の付着特性やひびわれの進行に影響を及ぼす¹⁾²⁾。一般に、このような界面領域の形成はセメントペーストのブリージングによって説明されている。しかし、界面領域の形成は、繊維の形状とその表面特性にも影響を受ける。また、養生条件や混和材の混入も界面領域の微視的構造に影響を及ぼすことが考えられる。最近、新素材繊維は高性能かつセメントマトリックス中においても安定であるため、セメントコンクリート補強用繊維としての利用が検討されている。これらの繊維を用いたセメント系複合材料がすぐれた力学的性能を発揮するためには、十分な付着強度を有することが肝要である。しかし、繊維—セメントペースト間の付着特性は繊維—セメントペースト間の界面領域の微視的構造と密接な関係を有すると考えられるにもかかわらず、種々の新素材繊維—セメントペースト界面領域の組織の特徴について検討した例はほとんどないようである。本研究は炭素繊維およびアラミド繊維—セメントペースト界面領域の組織の形成を微小硬度測定によって明らかにし、これらの界面領域の組織の特徴を従来から用いられている鋼繊維の場合と比較検討したものである。

2. 実験概要

表—1 使用繊維の物理的性質

(1) 使用材料

使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。PAN系炭素繊維、アラミド繊維および鋼繊維の物理的

	繊維断面	引張強度(kgf/mm ²)	弾性係数(kgf/mm ²)
炭素繊維	7 μm × 3000	370	24 × 10 ³
アラミド繊維	12 μm × 1000	310	7100
鋼繊維	φ 0.5mm	100 以上	—

性質を表—1に示す。使用したシリカフェームの比重および比表面積はそれぞれ2.33および24.2m²/gであり、SiO₂含有量は、86.53%である。

(2) 実験方法

本実験において使用したセメントペーストの配合を表—2に示す。

(a) 付着強度試験

表—2に示す各種セメントペーストに繊維を1本埋込み（埋込み長さは炭素繊維：20mm、アラミド繊維：15mm、鋼繊維：30mm）、次の2条件下にて養生を行った。

- (i) 20℃における水中養生
- (ii) 38℃, 100%R.H.における促進養生

所定材令において、繊維の引抜き試験を行い、最大引抜き荷重を埋込み繊維表面積で除すことによって平

表—2 セメントペーストの配合

W/C (%)	シリカフェーム置換率 (%)	高性能減水剤 (% / C)
55	0	0
	10	0.8
35	0	0
25	20	2.4

均付着強度を求めた。

(b)微小硬度試験

図-1に示すように繊維をセメントペースト中に埋込み、(a)と同様の条件下にて養生を行った。所定材令において、この直方供試体から埋込み繊維方向と直角方向に薄板を切り出し、薄板の表面をダイヤモンドスラリーを用いて研磨を行った。研磨面内に現れた1本の繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度(ピッカース硬度)を測定した。

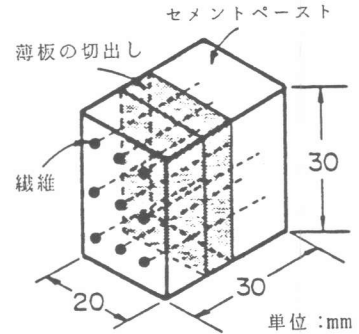


図-1 微小硬度測定用供試体

(c)SEM観察

水セメント比が0.55の普通セメントペースト円柱供試体(直径3cm,高さ5cm)の中央に繊維を1本埋込み、促進養生を行った。材令28日において供試体を圧裂により2つに分割して、繊維-セメントペースト界面領域のSEM観察を行った。

3. 実験結果

(1)付着強度

表-3に各種繊維の平均付着強度を示す。鋼繊維の場合、水セメント比を低下させても、付着強度にほとんど差はない。しかし、水セメント比を25%まで低下させ、シリカフェームを比較的少量に混入した場合において、付着強度は若干増大する。炭素繊維の付着強度は、鋼繊維に比べて大きな値を示しており、セメントペーストがストランド内に侵入することによるセメントペーストとの接触面積の増大も炭素繊維における良好な付着強度の一因と考えられる。一方、アラミド繊維に関しては、材令にともなう付着強度の増大は認められるものの、付着強度は他の繊維に比べて著しく低く、水セメント比の低下およびシリカフェームの混入による付着強度の増大はほとんど期待できないようである。

(2)各種繊維-普通セメントペースト界面領域の微小硬度分布

図-2, 図-3および図-4にそれぞれ20℃における水中養生および促進養生を行った水セメント比が0.55のセメントペースト中の鋼繊維-、炭素繊維-およびアラミド繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布の材令にともなう変化を示す。いずれの繊維の場合とも養生温度の相違による界面領域の微小硬度分布の差異は明確ではない。

鋼繊維を用いた場合、微小硬度は界面からの距離にともない距離約30μm付近まで低下して最も軟らかい領域に達し、その後約80μm付近まで増大し、それ以上の距離ではほぼ一定の微小硬度値を示す。

表-3 各種繊維の付着強度試験結果

繊維	W/C (%)	シリカフェーム置換率 (%)	養生温度 (°C)	付着強度 (kgf/cm ²)	
				14日	28日
鋼繊維	55	0	20	-	19.95
	55	10	20	-	19.03
	35	0	20	-	18.78
	25	20	20	-	23.91
炭素繊維	55	0	20	21.85	32.48
	55	0	38	20.53	43.13
	35	0	20	29.34	29.43
	35	0	38	32.33	49.86
アラミド繊維	55	0	20	1.23	2.43
	55	0	38	2.07	5.47
	55	10	20	4.24	6.46
	55	10	38	3.85	5.45
	35	0	20	2.51	4.08
	35	0	38	2.85	4.13
	25	20	20	3.69	7.09
	25	20	38	4.02	8.38

このような界面からの距離にともなう微小硬度の変化の傾向は、いずれの材令においても同様であるが、材令の進行にともない界面領域全体の微小硬度は増大する。しかし、繊維の表面の影響を受けないセメントペースト部分の微小硬度の増大に比べて、微小硬度の低い多孔質領域の微小硬度値の材令にともなう増大は小さいようである。炭素繊維を用いた場合、界面隣接部分から界面からの距離約 30 μm 付近まで微小硬度は距離とともに低下し、その後約 100 μm 付近まで微小硬度が距離とともに増大する傾向は鋼繊維の場合と同様である。しかし、炭素繊維-セメントペースト界面領域では、長期材令において界面から約 100 μm 付近の微小硬度が著しく増大し、繊維の表面の影響を受けないセメントペースト部分よりも高い値を示す。このように長期材令において界面からの距離約 100 μm 付近の微小硬度値が高くなる原因としては、セメントペースト打設時に炭素繊維ストランド内部に取り込まれた水分が供給されることにより、この付近のセメントの水和反応が長期にわたって継続する可能性はあるが、その詳細なメカニズムについてはさらに検討を要する。アラミド繊維を用いた場合は、界面からの距離にともなう微小硬度の変化は鋼繊維の場合と類似しているが、材令の進行に

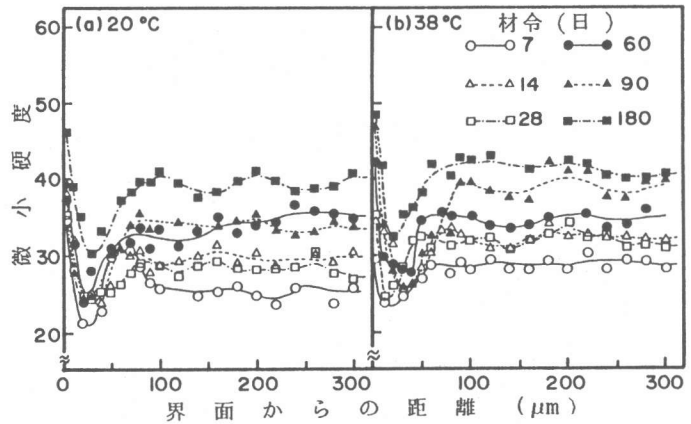


図-2 鋼繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布 (W/C=0.55)

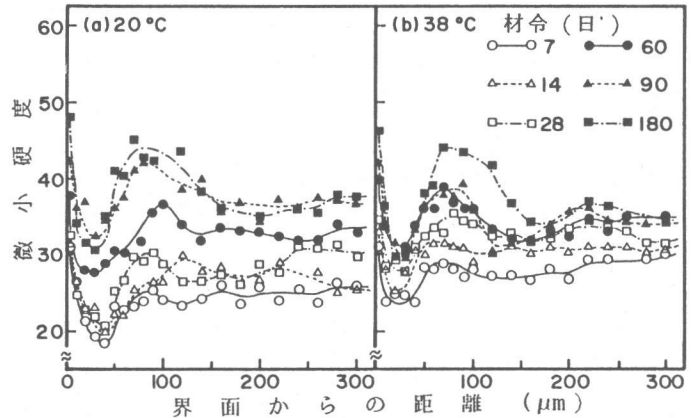


図-3 炭素繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布 (W/C=0.55)

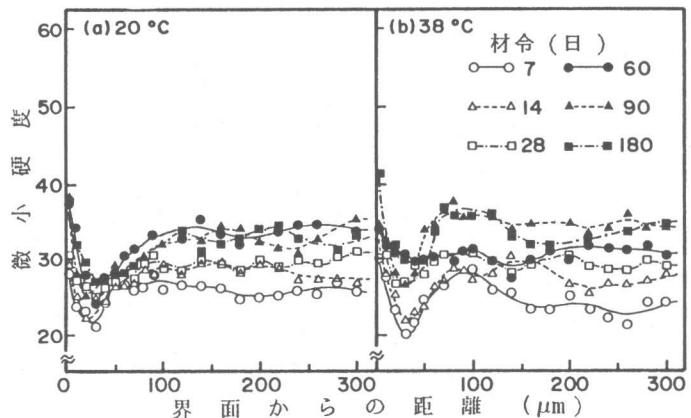


図-4 アラミド繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布 (W/C=0.55)

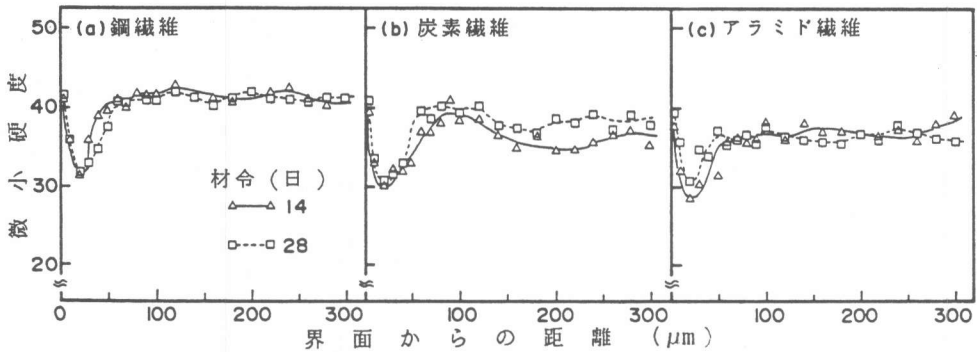


図-5 各繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布 ($W/C=0.35$, 水中養生)

ともなう界面領域全体の微小硬度の変化は小さい。以上の結果より、同一の水セメント比のセメントペーストを用いた場合、最小の微小硬度値を示す領域の界面領域からの距離はいずれの繊維であっても同様であるが、界面領域全体の微小硬度の変化の傾向は繊維の種類によって異なることがわかる。

(3) 水セメント比の低減が繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布に及ぼす影響

図-5は水中養生を行ったセメントペースト(水セメント比 $=0.35$)中の各繊維-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。図-5と $W/C=0.55$ のセメントペーストにおける微小硬度分布パターン(図-2,3および4)を比較すると、 $W/C=0.35$ においては、界面領域全体の微小硬度はいずれの場合も増大しており、水セメント比の低減によりセメントペーストが緻密になっていることがわかる。Weiら¹⁾はセメントペーストの水セメント比を低減させることにより、鋼繊維-セメントペースト界面領域に形成される境界水膜の厚さが減少し、また、界面領域に形成される遷移領域の強度は増大するとしている。図-5の結果より、鋼繊維およびアラミド繊維の場合は、界面領域の厚さは水セメント比の低減により明らかに減少していることがわかる。しかし、炭素繊維の場合は、底部域の最小微小硬度値は水セメント比の低減により明らかに増大するが、多孔性領域の厚さに大きな変化は認められない。

(4) 繊維-シリカフェーム混入セメントペースト界面領域の微小硬度分布

図-6は促進養生を行ったシリカフェーム混入セメントペースト($W/C=0.55$, シリカフェーム置換率 $=10\%$)中の界面領域の微小硬度分布を示したものである。一般に、セメントペーストにシリカフェームを混入すると、ブリージングが著しく低減する。一般に、置換率 10% のシリカフェームはセメントペーストのブリージング量を著しく低減するのに十分な量と考えられている³⁾。しかし、図-6の微小硬度分布より、シリカフェームペー

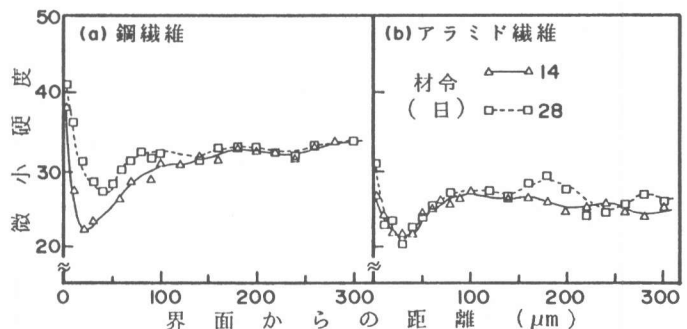


図-6 シリカフェーム混入セメントペースト中の界面領域の微小硬度分布 ($W/C=0.55$, 促進養生)

ストにおける界面領域の厚さは、普通セメントペーストの場合と比べて大きな相違は認められない。したがって、繊維-セメントペースト界面領域に形成される多孔性の領域は、セメントペーストの打設後のブリージング水により局部的に高い水セメント比となるために形成されるとは必ずしも言えない。よって、セメント

粒子による繊維表面近傍の充填の不足、また繊維の存在の界面付近のセメントの水和への影響等も繊維近傍における多孔質領域に関係する要因として考えねばならない。

図-7は20℃における水中養生を行ったシリカフューム混入ペースト(W/C=0.25,シリカフューム置換率=20%)中の界面領域の微小硬度分布を示したものである。鋼繊維の場合は、水セメント比=0.55および0.35の場合、およびシリカフューム置換率=10%の場合に比べて、界面領域の微小硬度分布曲線は上方へ移行し、界面領域全体の強度は増大している。一方、アラミド繊維の場合も界面領域全体の微小硬度は水セメント比の低減とシリカフュームの混入により増大するが、鋼繊維の場合に比べて界面領域全体の微小硬度値は低い。

4. 考察

以上の結果より、いずれの繊維-セメントペースト界面領域にも、界面隣接部分の微小硬度値の高い領域、微小硬度が著しく低い多孔性領域および微小硬度値がほぼ一定となる繊維の表面の影響を受けないセメントペースト領域が存在することは明らかである。しかし、同一のセメントペースト配合であってもその微小硬度の界面からの距離にともなう変化は異なり、特に炭素繊維と鋼繊維の場合とでは微小硬度分布が大きく異なり、炭素繊維-セメントペースト界面領域における微小硬度分布パターンは、界面から約100 μm 付近でピークが存在するという特徴を有する。一方、鋼繊維とアラミド繊維は互いに類似した微小硬度分布曲線を示すが、同一のセメントペーストの配合であっても、アラミド繊維の界面領域の微小硬度は低く、また付着強度も著しく低い。写真-1は促進養生を行った普通セメントペースト(W/C=0.55)中の鋼繊維およびアラミド繊維-セメントペースト界面領域を示したものである。両繊維とも、界面から約100 μm 付近までは反応生成物は疎であり、非常に多孔性の領域となっていることがわかる。写真-2は同じセメントペーストにおける鋼繊維およびアラミド繊維とセメントペースト間の接触面を示したものである。鋼繊維の場合は、接触面は緻密であり、鋼繊維とセメントペーストとの接触面積が大きい。アラミド繊維における接触面は非常に多孔性である。このように、同じセメントペーストマトリックスにおいても、アラミド繊維-セメントペースト界面隣接部分は、鋼繊維の場合に比べて多孔質であり、従って前述のように、アラミド繊維-セメントペースト界面における硬度値は、鋼繊維よりも小さくなるようである。付着強度と界面領域の組織との関連性を考える場合、付着破壊の生ずる位置を考える必要がある。繊維補強セメント中では、マトリックス中を進行してきたひびわれが繊維-セメントペースト界面領域の多孔質領域にて進行方向を変える擬脱着

(pseudo-debonding)を生じるようであるが²⁾、繊維の引抜き試験においては付着破壊は実界面にて生ずるようである⁴⁾。したがって、アラミド繊維の付着強度が著しく低いのは、アラミド

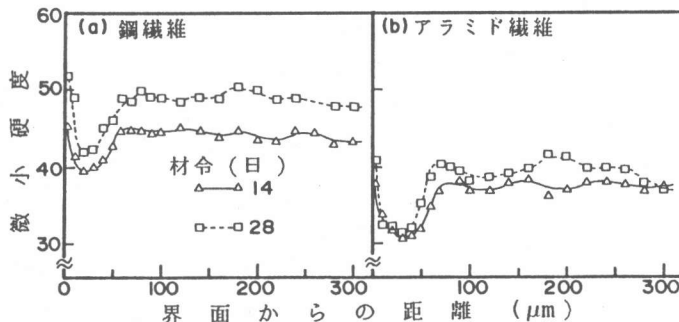


図-7 シリカフューム混入セメントペースト中の界面領域の微小硬度分布(W/C=0.25,水中養生)

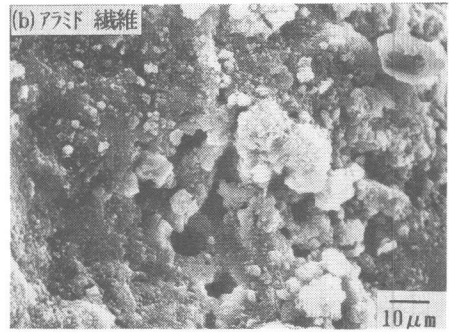
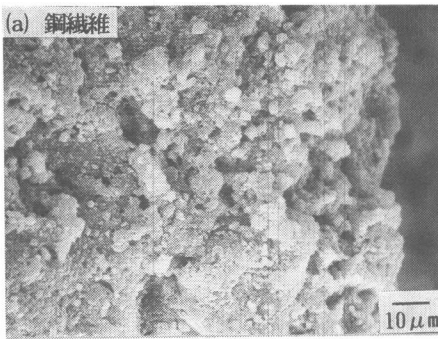


写真-1 鋼繊維およびアラミド繊維-セメントペースト界面領域の多孔質領域

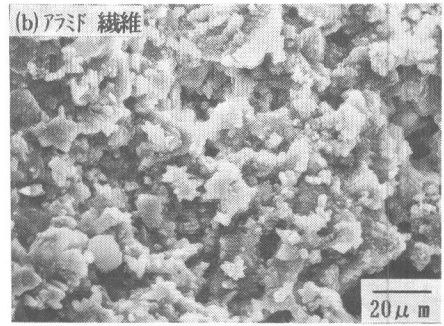
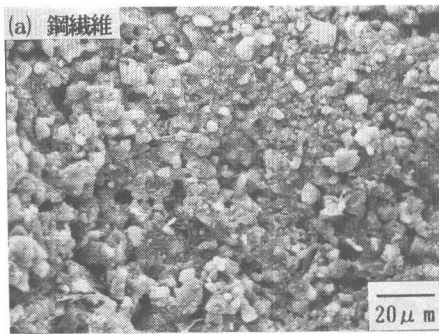


写真-2 鋼繊維およびアラミド繊維とセメントペーストの接触面

繊維と接触するセメントペーストが緻密ではないためと考えられる。

5. まとめ

本研究にて得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) アラミド繊維の付着強度は著しく低く、水セメント比の低減およびシリカフェームの混入によっても付着強度は改善されない。
- (2) 同一のセメントペーストマトリックスであっても、繊維-セメントペースト間の界面領域の微小硬度分布は用いる繊維によって異なる。
- (3) 水セメント比の低減は界面領域における多孔性領域の厚さの減少と強度の増大をもたらすが、平均付着強度との対応は明らかではない。
- (4) シリカフェーム置換率10%程度では、界面領域の組織には大きな変化は認められない。
- (5) アラミド繊維-セメントペースト界面領域の微小硬度分布パターンが鋼繊維の場合と類似しているにもかかわらず付着強度が低いのは、界面部分のセメントペーストの組織が緻密ではないためと考えられる。

参考文献

- 1) Wei, S., et al, ACI Journal, pp.597 ~ 605, 1986.
- 2) Bentur, A., et al, J. of Mat. Sci., 20, pp.3610 ~ 3620, 1985.
- 3) Malhotra, V.H., et al, Condensed Silica Fume, pp.117 ~ 126, CRC Press, 1987.
- 4) Bentur, A., et al, Proc. of Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, vol.2, pp.393 ~ 399, 1986.