

[5] 超速硬セメントを用いた鋼繊維補強コンクリートの力学的特性について

正会員 ○ 峰 松 敏 和 (住友セメント中央研究所)

銀 山 功 (住友セメント中央研究所)

1. まえがき

超速硬セメントは、極く早期に強度を発現し、長期まで安定して強度が増大するため、緊急工事、寒中工事および吹付け工事等にしばしば利用されている。また、鋼繊維補強コンクリートは、鋼繊維によって、その諸特性が大きく改善されることから、現在、NATM工法によるトンネル工事を中心として各方面に適用されている。

一方、これらを同時に用いたコンクリート、すなわち、超速硬セメントを硬化体とした鋼繊維補強コンクリート（以下JSFRCと呼ぶ）は、両者の特性を兼ねそなえており、橋梁ジョイント部の補修工事や高架橋の吹付けによる補修工事等への利用実績もある。しかしながら、このJSFRCの有する特性を系統的に検討した報文は非常に少なく、明らかにしなければならない問題点が多数ある。著者らは、その手始めとして配合設計方法についてはすでに明らかにした¹⁾が、本報告では、圧縮強度、曲げ強度および曲げ変形特性を取り上げ、普通ポルトランドセメントを用いた鋼繊維補強コンクリート（以下SFRCと呼ぶ）と比較検討し、さらに、繊維とマトリックスとの付着性状とこれらの関係について検討を加えたので、ここに報告する。

2. 実験の概要

実験は、表-1に示すような試験項目について、セメント種類、材令、繊維混入率および繊維の強度を実験因子として検討した。実験方法は、コンクリートの混練に100ℓの強制練りミキサーを用い、繊維の添加はマトリックス混練中に繊維を分散して添加する方法を用いた。圧縮供試体は $\phi 10 \times 20$ cm、曲げ供試体は $10 \times 10 \times 40$ cmを用い、供試体作製および試験方法はJISおよびJCI規

表-1 試験項目及び実験因子

種類	試験項目	実験因子			
		セメント	材令	繊維混入率	繊維
コンクリート	圧縮強度	超速硬セメント	3時間, 6時間 1日, 3日	0 条	0.5×0.5×30 mm
	曲げ強度	普通ポルトランドセメント	7日, 28日 (JSFRC)	1.0 条	引張強度 A: 74.6 B: 136.2 (kg/mm ²)
	曲げ荷重-変形曲線 換算曲げ強度	普通ポルトランドセメント	1日, 3日 7日, 28日 (SFRC) 普通モルタル	1.5 条	
モルタル	付着強度 付着荷重-変形曲線 付着タフネス面積 圧縮強度(vf=0%) 曲げ強度(vf=0%)		1日, 3日 7日, 28日 (SFRC) 普通モルタル	—	

準案に基づいて実施した。また、鋼繊維とモルタルマトリックスとの付着性状は、文献²⁾を参考として、ブリケット供試体にうめ込み深さ10 mmの鋼繊維を4本うめ込み、変位制御型の試験機を用いて測定した。なお、モルタルの圧縮および曲げ強度は、 $4 \times 4 \times 16$ cmの供試体を用いて、JISに準じて実施した。表-2は、本実験に用いた使用材料の一覧表である。また、コンクリートの配合は、水セメント比を40%、スランブを 8 ± 1 cmとし、モルタルの場合を水セメント比40%、フロー値 210 ± 10 とし、文献^{1) 3)}を参考として全て試練りを行い配合を決定した。なお、超速硬セメントには高性能減水剤をセメント量に対し2wt%、凝結遅延剤をセメント量に対し0.2wt%用い、普通セメントには、高性能減水剤のみセメント量に対して2wt%用いた。実験は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室内で行い、配合を表-3に示す。

表-2 使用材料

セメント	超速硬セメント	普通ポルトランドセメント	$\rho = 3.04$ $\rho = 3.15$
細骨材	川砂 (鬼怒川産)		$\rho = 2.57$ FM=2.7.1
粗骨材	砕石 (茨城厚岩産)		$\rho = 2.66$ FM=6.6.8 Gmax=2.0mm
鋼 鉄 維	A: $0.5 \times 0.5 \times 30$ mm B: $0.5 \times 0.5 \times 30$ mm	波型せん断, 引張強度=7.46 kg/mm ² 波型せん断, 引張強度=13.62 kg/mm ²	
高性能減水剤	ポリアリールスルホン塩系		
凝結遅延剤	超速硬セメント用凝結遅延剤		
モルタル用細骨材	普通産標準砂		

表-3 コンクリート及びモルタルの配合

種 類	W/C (%)	目標 スランブ 又は フロー 値 (%)	繊維 混入率 vf (%)	細骨 材率 s/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)							実 測 値		
					W	C	S	G	減水剤 (C×2%)	遅延剤 (C×0.2%)	SF	スランブ (cm)	空気量 (%)	
コン ク リ ー ト	4 0	8±1 (cm)	JSFRC	0	4.0	15.4	38.5	7.38	11.45	7.7	0.77	0	7.7	2.2
				1.0	5.3	17.7	44.3	9.11	8.36	8.9	0.89	7.85	7.8	2.5
				1.5	5.8	18.6	46.5	9.65	7.23	9.3	0.93	11.8	7.9	2.7
			SFRC	0	4.0	15.0	37.5	7.53	11.69	7.5	—	0	8.2	1.6
				1.0	5.3	17.0	42.5	9.35	8.58	8.5	—	7.85	8.1	2.0
				1.5	6.3	18.2	45.5	10.69	6.50	9.1	—	11.8	8.2	2.3
モル タル	標準 普通	210 ±10	—	—	30.9	77.2	11.57	—	15.4	1.54	—	20.5	—	
—	—	—	—	—	30.2	75.6	12.10	—	15.1	—	—	21.2	—	

3. 試験結果と考察

3・1 JSFRCおよびSFRCの圧縮、曲げ強度および曲げ変形性状

JSFRCおよびSFRCの圧縮強度と材令との関係を、繊維の強度別に比較したのが図-1である。

この図より、JSFRCは早期圧縮強度が大きく、材令の長期化に伴って増大すること、JSFRCとSFRCのいずれも繊維混入率および繊維の強度によってほとんど影響されないことなどが明らかである。また、本実験においては、材令28日でJSFRCとSFRCの圧縮強度がほぼ同一であるため、JSFRCの強度増大傾向は、SFRCよりなめらかになっている。すなわち、JSFRCおよびSFRCの圧縮強度は、セメントの種類によって大きく異なり、繊維による影響は小さいと言える。

図-2は、図-1と同様に曲げ強度と材令との関係を示したもので、この図より、曲げ強度は、セメントの種類および繊維混入率による強度の違いが明確に認められ、繊維混入率の大きいものほど、また、SFRCよりJSFRCの方が高い曲げ強度となっている。一方、繊維強度による違いは、JSFRCの長期材令において繊維強度の大きい方が若干高い強度となっている程度である。また、これらの増加傾向は、JSFRCとSFRCで若干異なり、SFRCは、材令が長くなるに従って強度の増加量が小さくなっているが、JSFRCではこの傾向が認められない。

図-3は、これらの圧縮強度と曲げ強度との関係を示したものである。この図より、JSFRCとSFRCの曲げ-圧縮強度性状が大きく異なっていることがわかる。すなわち、SFRCは普通コンクリートの場合と同様に、圧縮強度の大きなものほど圧縮強度に対する曲げ強度の割合が小さくなっている。一方、JSFRCにおいては、この傾向がSFRCほど明確でなく、どちらかと言えば増加の傾向にある。これは、超速硬セメントが繊維の有無にかかわらず曲げ強度に対して効果的な材料であるためと考えられる。この理由としては、JSFRCの破断面の観察の結果、粗骨材の破断並びに引張強度の小さい繊維の場合に繊維の破断が認められることから、超速硬セメントの付着特性に基づくものと考えられる。

図-4は、曲げ強度試験時の荷重変形曲線の一例を材令1日および7日で示し、JSFRCとSFRCとを比較したものである。この図より、JSFRCおよびSFRCのいずれも、引張強度の小さい繊維を用いたものは、引張強度の高い繊維を用いた場合より荷重の低下が大きい。特に、JSFRCにおいてこの傾向は、より顕著である。これは、曲げ強度の場合と同様に、JSFRCのタフネスも繊維とマトリックスとの付着特性と密接な関係を有しているためと思われる。

このような傾向を明確にするため、JCI規準案に示されているタフネス面積から求める換算曲げ強度を求め、曲げ強度との関係を示したものが図-5である。この図より、換算曲げ強度は、JSFRCとSFRC

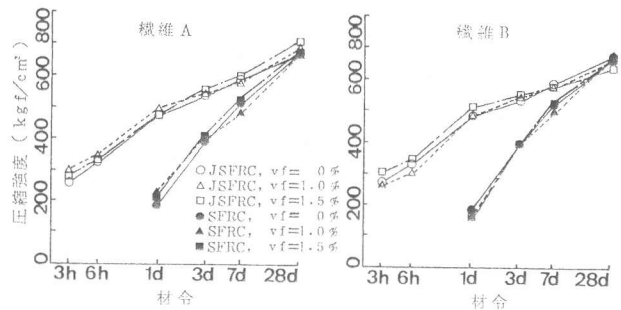


図-1 圧縮強度と材令との関係

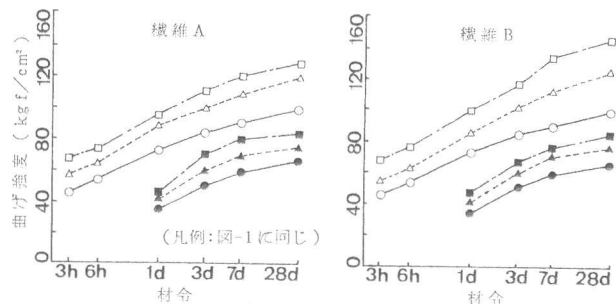


図-2 曲げ強度と材令との関係

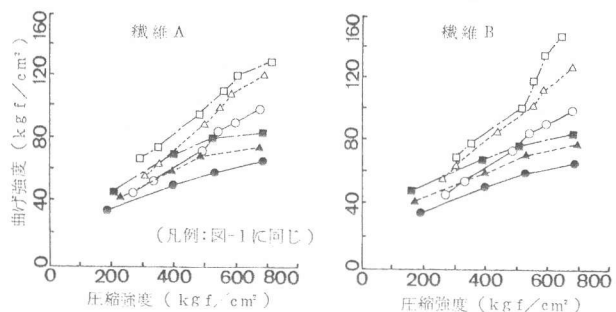


図-3 圧縮強度と曲げ強度との関係

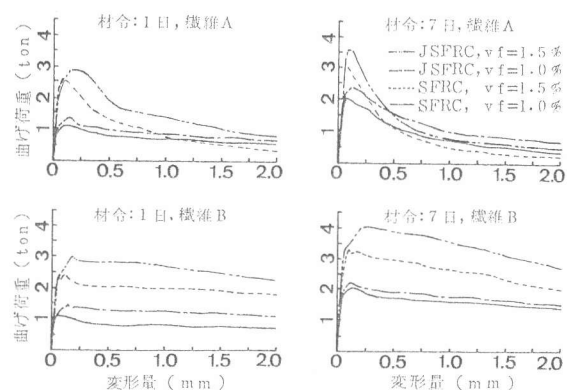


図-4 曲げ荷重-変形曲線の一例

の相方とも、セメント種類の違いによる差はあまり明確でなく、繊維強度の違いによりその傾向が大きく異なっている。すなわち、換算曲げ強度は、おおむね曲げ強度の増加に伴って増大する傾向にある。しかし、引張強度の小さい繊維を用いた場合は、材令の進行に伴って曲げ強度が増大すると換算曲げ強度もある程度まで増大するようであるが、材令が進み曲げ強度がさらに大きくなると、逆に低下する傾向が認められる。一方、引張強度の大きい繊維を用いたものは、JSFRC、SFRCの相方とも曲げ強度の増加とともに換算曲げ強度も増大する傾向にあり、換算曲げ強度は繊維混入率の大きいものほど大きくなっている。

3・2 繊維とマトリックスとの付着特性並びに曲げ性状との関係

繊維とマトリックスとの付着強度と同一配合のマトリックス（モルタル）の圧縮および曲げ強度との関係を示したものが図-6である。この図より、繊維とマトリックスとの付着強度は、引張強度の小さい繊維と超速硬セメントとの組み合わせで、材令の進んだ部分（高い圧縮または曲げ強度）をのぞいて、いずれも圧縮および曲げ強度の増加に伴って増大している。また、繊維強度の大きい繊維の方がいずれの場合でも付着強度は大きく、超速硬セメントにおいてその傾向はより顕著である。さらに、セメントの違いによる付着強度の差はかなり大きく、超速硬セメントは非常にすぐれた付着性を有しており、特に、引張強度の大きい繊維においては、同一強度（圧縮または曲げ強度）で比較した場合、普通セメントの2倍以上の付着強度を有している。

超速硬セメントと繊維との付着強度において、繊維強度の小さい繊維は、大きい繊維と比較してかなり小さく、材令が進行してもほとんど増大しない原因は、繊維の強度がマトリックスとの付着強度よりも小さく、繊維が破断

するためと考えられる。そこで、付着強度と付着試験における繊維の破断率との関係を示すと図-7となる。この図より、超速硬セメント、普通セメントのいずれも比較的類似した傾向を示し、引張強度の小さい繊維の場合は、付着強度が大きくなるに従って繊維の破断率が増大し、10kgf/cm本程度から破断が始まり、20kgf/cm本程度で全て破断する。一方、引張強度の大きい繊維の場合は、繊維の破断はほとんど認められず、高い付着強度（30kgf/cm本以上）で若干破断する程度である。引張強度の小さい繊維はその強度が74.6kgf/mm²で、本実験で繊維が破断したときの付着強度を繊維の単位面積に換算すると、74kgf/cm・mm²で両者はほぼ等しくなっている。また、引張強度の大きい繊維は、その強度が136.2kgf/mm²で、本実験における最も大きい付着強度を換算すると、131kgf/cm・mm²となる。すなわち、図-6で明らかなように、繊維の引張強度の大小とマトリックスとの付着強度は、超速硬セメントの場合により顕著にその影響が現れ、超速硬セメントは、繊維との付着が良いため、引張強度の小さい繊維では繊維が破断する。そのため、鋼繊維による補強効果をより有効に活用するためには、引張強度の大きい繊維を用いた方が、よりJSFRCの特性を発揮するものと考えられる。

図-8は、繊維とマトリックスとの付着強度と3・1で取り上げた曲げ強度および換算曲げ強度との関係を示したものである。この図では、曲げ強度および換算曲げ強度と付着強度との関係を完全に把握すること

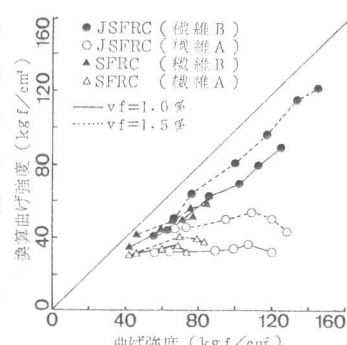


図-5 換算曲げ強度と曲げ強度との関係

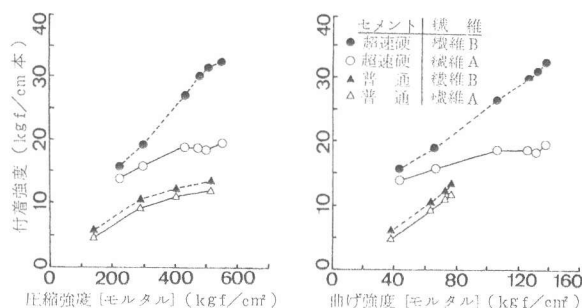


図-6 付着強度とモルタル強度との関係

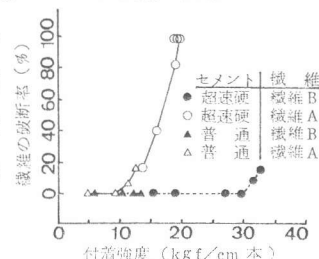


図-7 付着強度と繊維の破断率との関係

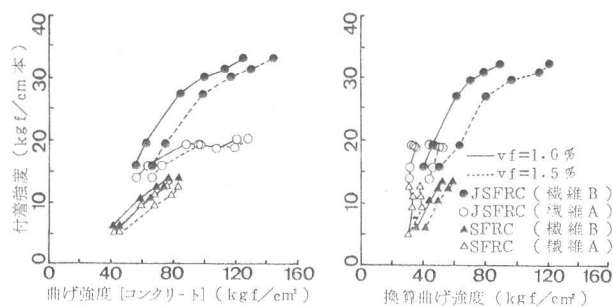


図-8 付着強度と曲げ強度および換算曲げ強度との関係

はできないが、全体的な傾向として、曲げ強度においては、付着試験で繊維が全て破断した場合を除き、付着強度の増加に伴って曲げ強度も大きくなっている。一方換算曲げ強度の場合、引張強度の大きい繊維においては付着強度の増加に伴って増大し、引張強度の小さい繊維の場合にはほとんど関係が認められない。また、3・1の図-2および図-3において、引張強度の小さい繊維を用いたJSFRCで材令の進んだものの強度が、引張強度の大きい繊維を用いたものより小さいこと並びに曲げ荷重-変形曲線が急激に低下することなどは、付着特性（特に繊維の破断）が曲げ性状との間に密接な関係を有しているためと考えられる。

図-9は、繊維とマトリックスとの付着試験における荷重-変形曲線の一例を材令1日および7日で示したものである。また、図-10はこの時の荷重-変形曲線の面積を変形量3mmまで求め（タフネス面積と呼ぶ）付着強度との関係を示したものである。図-9において、繊維の破断状況が明確に認められ、さらに引張強度の大きい繊維と超速硬セメントとの付着荷重-変形曲線が非常にすぐれていることが明らかである。また、図-10において、付着タフネス面積は、付着強度の大きいものほど付着タフネス面積も大きくなる傾向にあるが、繊維の引張強度が小さく、繊維が破断した場合には、付着タフネス面積は急激に低下し、繊維の破断と密接な関係を有していることがわかる。

一方、図-11は、付着タフネス面積と換算曲げ強度との関係を示したもので、この図より、繊維の破断がない場合には、付着タフネス面積の増加に伴って換算曲げ強度も増加する傾向が認められるが、その傾向は、セメントの種類や繊維の品質によって異なると考えられ、本実験の範囲においては明確な関連性を把握することはできない。

4. まとめ

- (1) JSFRCは、セメントの早期強度発現性とSFRCの力学的特性をかねそなえた材料である。
- (2) JSFRCの圧縮強度特性は、超速硬セメントによる早期強度発現性および材令の長期化に伴う強度の増大は認められるが、繊維による補強効果は、SFRCの場合と同様ほとんど認められない。
- (3) JSFRCの曲げ強度特性は、早期強度発現性および繊維による補強効果が明確で、さらに、同一水セメント比ではSFRCより非常にすぐれている。また、圧縮強度と曲げ強度との関係は、SFRCよりJSFRCの方が圧縮強度に対する曲げ強度の割合が大きく、曲げ部材としてより効果的な材料である。
- (4) 繊維の強さの違いによる影響は、強度性状におよぼす影響は小さく、タフネス（換算曲げ強度）において非常に大きい。これは繊維とマトリックスとの付着性状に起因している。
- (5) 超速硬セメントと繊維との付着強度は非常に大きく、引張強度の小さい繊維は繊維が破断する場合があるため、JSFRCにおいては、引張強度の大きい繊維を用いる方がより効果的である。
- (6) 繊維の付着特性とJSFRCおよびSFRCの曲げ特性との間には、密接な関係があると考えられるが、本実験の範囲においては明確な関連性を把握することはできない。

参考文献

- 1) 峰松, 銀山, 佐々木, 橋本: 超速硬セメントを用いた鋼繊維補強コンクリートの配合設計方法に関する検討, セメント技術年報, 1982年
- 2) 迫, 小林, 西村: 鋼繊維の付着特性と鋼繊維補強コンクリートの曲げ性状との関係について, 土木学会第35回年次講演会講演要録, 1980年
- 3) 小林一輔: 繊維補強コンクリート 特性と応用, オーム社, 1981年

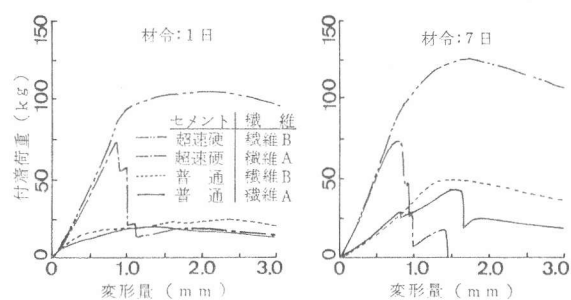


図-9 付着荷重-変形曲線の一例

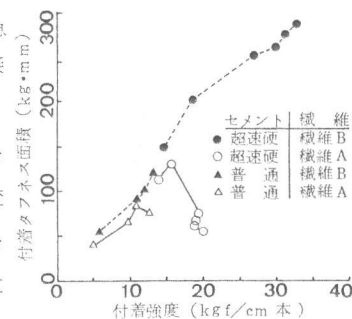


図-10 付着タフネス面積と付着強度との関係

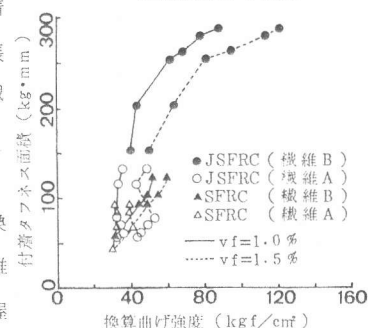


図-11 付着タフネス面積と換算曲げ強度との関係