

論文

[1187] 短鋼繊維高混入モルタルの諸性状

林 秀彦^{*1}・橋 大介^{*2}・金子 佳生^{*3}・稲田 泰夫^{*4}

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと記す)は、その特性を活かして吹付けコンクリート、トンネルライニング、舗装のオーバーレイ等に使用されている。従来用いられてきた鋼繊維は長さ $l=30\text{mm}$ 程度で断面積は $0.1\sim 0.4\text{mm}^2$ のものが主流であり、繊維混入率は3%以下のものが大半を占めている。これは、主に市販されている鋼繊維の寸法がほぼこの範囲にあること、繊維混入率に関して言えば、練混ぜ、打込み、締固め等の作業時に所要のワーカビリティを確保する観点から上限が決められていると考えられる。言い換えれば、ワーカビリティ、鋼繊維の分散、配向など所定の性能を確保した上で鋼繊維混入率を上げることが可能ならば、SFRCの力学的性状を要求性能に応じて制御でき、適用範囲は格段に広がるといえる。

本研究では、高強度、高じん性を有する新しい複合材料の開発を目的としたLi,V.C教授との共同研究¹⁾の一環として、直径が $\phi=0.15\text{mm}$ および $\phi=0.22\text{mm}$ で長さが共に $l=6\text{mm}$ の2種類の短鋼繊維を用い、容積比で0~12%と高い割合で混入したモルタルの基本的な力学的性状を実験的に検討した。SFRC等、強度の他にじん性も問題となるような部材の力学的性状を把握する場合の有効な手法としては、破壊力学等の分野からのアプローチが行われ、破壊性状や強度の寸法依存性についての検討に成果をあげている²⁾。本報告はそうした詳細な検討の前段として、まず、その鋼繊維補強モルタルの特性を簡便かつ一般的な方法で評価するために、圧縮強度および曲げタフネスに注目して行った実験の結果をまとめたものである。実験の要因としては、短鋼繊維の形状および寸法、短鋼繊維の混入率、短鋼繊維を混入するベースとなるプレーンモルタルの種類³⁾の3要因を取りあげた。

2. 短鋼繊維適用の可能性

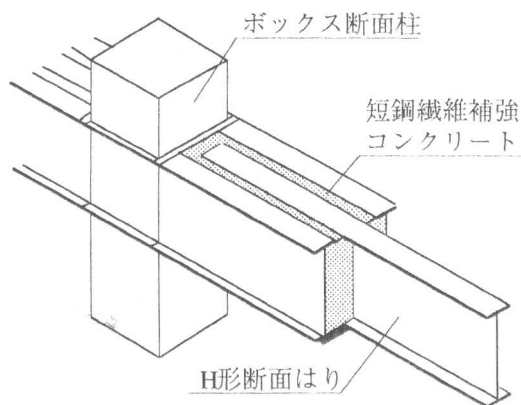
短鋼繊維を高い割合で混入したSFRCの適用可能性について考えてみる。まず、こうしたSFRCの特徴として、高強度、卓越したタフネス、高いせん断強度などが上げられる。一方、コストやハンドリングから考えると、構造物のその特徴を発揮できる部位に選択的に適用することが有用と考えられる。このような条件をふまえると、図—1に示すU型ブラケット接合部、図—2に示すプレキャスト柱はり接合部のシアーキー、高強度柱はり接合部、薄肉断面のプレキャスト部材、耐震構造物の塑性ヒンジとなるべき箇所などへの適用が有力視される。また、繊維の種類、混入量等を変化させることにより、セグメント形式の部材や合成はり等の複合メンバーへの適用も考えられ、今後、広範な用途が見出されるものと考えられる。

*1 清水建設(株) 技術研究所構造技術研究部研究員、工修(正会員)

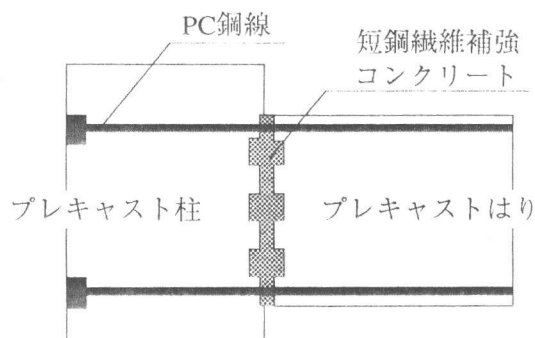
*2 清水建設(株) 技術研究所構造技術研究部主任研究員、工修(正会員)

*3 清水建設(株) 設計本部構造設計部、Ph.D(正会員)

*4 清水建設(株) 技術研究所構造技術研究部部長、工博(正会員)



図一 U型ブラケット接合部



図二 プレキャスト柱はり接合部

3. 実験概要

3. 1 使用材料および調合

セメントは普通ポルトランドセメントおよびASTM III型(早強)をベースとした特殊セメントの2種類を、細骨材は石英片岩砕砂、石英系細骨材およびアルミナ系細骨材の3種類を用いた。混和材は外国産のシリカフェーム(粉末タイプ:undensified)とした。混和剤はナフタリン系の高性能減水剤である。短鋼繊維は $\phi 0.15 \times 6.0$ mmのカットワイヤ(a)と $\phi 0.22$ (換算直径) $\times 6.0$ mmのメルトエクストラクションファイバー(b)の2種類とした。使用材料の一覧を表一に示す。

調合は短鋼繊維を混入するベースとなるプレーンモルタルの基本調合を3種類(それぞれ、I、II、IIIとする)、短鋼繊維の混入率(容積比)を0, 3, 6, 9, 12%の5水準、短鋼繊維の種類(それぞれ、a, bとする)を2種類とし、以上3要因を適宜組み合わせ表二に示す13調合とした。

3. 2 モルタルの練混ぜおよび供試体作製

練混ぜは二軸強制練りミキサーを用いて、プレーンモルタルの練混ぜを10分間行った後、フロー試験を行いプレーンモルタルのワーカビリティを確認し、短鋼繊維を投入してさらに5分間練り混ぜた。供試体は圧縮強度試験用の $\phi 10 \times 20$ cm円柱供試体と、曲げ強度および曲げタフネス試験用の $10 \times 10 \times 40$ cmはり供試体の2種類とし、各調合とも3体ずつ作製した。打込みは突き棒で突いた後に振動締固めを行い、養生方法は標準養生とした。

3. 3 試験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて200tfアムスラー型試験機を用いて行った。材齢は7日および28日である。また、材齢28日試験時にヤング係数試験およびポアソン比の試験を併せて行った。

(2) 曲げ強度および曲げタフネス試験

曲げ強度および曲げタフネス試験は、繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準のJCI-SF「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」³⁾に従って、50tfアムスラー型試験機を用いて三等分点載荷法により行った。

4. 実験結果および考察

4. 1 練混ぜおよび打込み状況

練混ぜおよび打込み状況は以下に示すとおりになった。

短鋼繊維混入率 V_f (以下 V_f と記す) $=3\%$ (容積比)では、繊維が分散しないで塊になった状態

表-1 使用材料一覧

使用材料	記号及び適用	種類	諸物性
セメント	I, II に使用	ASTM III型(早強)をベースとした特殊セメント	比重=3.10, 比表面積 (Blaine)=4460 cm ² /g
	III に使用	普通ポルトランドセメント	比重=3.16, 比表面積 (Blaine) = 3260 cm ² /g
混和材		シリカフェーム	比重=2.21, 比表面積(BET)=20.8 m ² /g, SiO ₂ 量 = 90.6%
細骨材	I に使用	石英系細骨材	絶乾比重 = 2.63, 吸水率 = 1.60%, 粗粒率 = 2.57
	II に使用	アルミナ系細骨材	絶乾比重 = 3.30, 吸水率 = 0.80%, 粗粒率 = 2.36
	III に使用	石英片岩砕砂	絶乾比重 = 2.57, 吸水率 = 0.91%, 粗粒率 = 2.75
混和剤		高性能減水剤	ナフタリン系
短鋼繊維	a	カットワイヤ(ストレート)	φ0.15mm×6.0mm, アスペクト比:40.0
	b	マルチエクストラクション(ストレート)	φ0.22mm(換算直径)×6.0mm, アスペクト比:27.3

表-2 モルタルの調合条件

調合名	鋼繊維の種類	鋼繊維混入率 V _f (%)	プレーンモルタルの種類	水結合材比 W/CB(%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	シリカフェーム SiF	細骨材 S	混和剤 Ad	鋼繊維 SF
①	—	0	I	22.0	217	822	164	987	23.1	0
②	a	2.8	I	21.9	210	799	160	959	22.5	218
③	a	5.6	I	22.0	206	781	156	937	18.6	440
④	a	8.2	I	24.0	213	739	148	887	17.7	644
⑤	b	9.0	I	22.0	197	747	150	897	17.9	708
⑥	b	12.0	I	22.0	190	721	144	866	17.2	943
⑦	—	0	II	18.0	201	930	186	1116	22.3	0
⑧	a	5.8	II	18.0	190	879	176	1055	21.1	458
⑨	—	0	III	20.0	190	788	161	1140	20.9	0
⑩	a	2.9	III	20.0	184	763	156	1103	18.4	231
⑪	a	5.9	III	20.0	178	739	151	1069	16.0	463
⑫	a	8.8	III	20.0	172	714	146	1032	18.9	692
⑬	b	5.9	III	20.0	178	737	151	1066	17.8	461

表-3 試験結果一覧

調合名	プレーンモルタルのφ(mm)	鋼繊維混入率 V _f (%)	単位容積質量 (t/m ³)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		曲げ強度 (kgf/cm ²)	曲げタフネス (kgf·cm)	換算曲げ強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)	ポアソン比
				1週	4週					
①	125	0	2.29	932	1268	68	—	—	3.34	0.21
②	—	2.8	2.42	988	1255	183	989	148	3.50	0.21
③	129	5.6	2.61	1087	1332	225	1157	170	3.58	0.21
④	135	8.2	2.76	1344	1628	338	1887	282	3.53	0.23
⑤	300以上	9.0	2.74	1044	1223	173	423	63	3.75	0.22
⑥	—	12.0	2.94	1263	1452	227	547	82	3.98	0.21
⑦	254	0	2.53	986	1358	74	—	—	3.77	0.24
⑧	—	5.8	2.88	1054	1508	306	1238	183	4.23	0.24
⑨	206	0	2.34	829	1171	76	—	—	3.14	0.21
⑩	211	2.9	2.47	838	1188	180	735	111	3.20	0.21
⑪	189	5.9	2.67	1049	1392	249	921	138	3.61	0.22
⑫	—	8.8	2.80	1246	1660	352	1535	228	3.70	0.22
⑬	—	5.9	2.67	902	1200	193	462	68	3.63	0.21

— : 試験せず

である、いわゆるファイバーボールの形成は認められず、打込み、締固めがプレーンモルタルと比較してもさほど低下することなく容易であり、密実なモルタルを製造することができた。

V_fが6%以上になると、短鋼繊維の種類によってフレッシュモルタルの性状が大幅に変化した。すなわち、短鋼繊維 a を用いた場合、V_f=6%ではプレーンモルタルのフロー値が小さいこともあり

(表-3 参照)、施工性がかなり低下するようであった。さらに $V_f=9, 12\%$ と大きくなるとファイバーボールが形成され、 $V_f=12\%$ では振動台式バイブレータを用いてもモルタルが型枠内に均等にいきわたらず供試体の成型ができなかった。一方、短鋼繊維 b を用いた場合、 $V_f=9, 12\%$ としても振動締固めにより供試体の成型が可能であった。この繊維の種類による差は主に短鋼繊維の形状およびアスペクト比の相違に起因すると考えられる。したがって、密実な短鋼繊維モルタルを製造する場合、短鋼繊維の種類によって最大混入率が変わり、本実験で使用したプレーンモルタルの場合、短鋼繊維 a では $V_f=6\%$ 程度、短鋼繊維 b では $V_f=9, 12\%$ 程度までであれば打込みが可能なワーカビリティを確保できるようであった。

短鋼繊維補強モルタルの供試体単位容積質量に注目すると(表-3 参照)、単位容積質量と V_f はよく対応をしており、短鋼繊維が高混入された場合においても振動締固めにより密実なモルタルを打込むことができるといえる。

4. 2 圧縮強度

図-3 に材齢28日における圧縮強度試験結果を示す。短鋼繊維 a を $V_f=8\%$ 以上混入した調合④⑫で 1600kgf/cm^2 以上の圧縮強度を得た。調合⑫の場合、プレーンモルタル⑨に対し4割程度強度が増加したことになる。この強度増加を詳しく見るために、各調合の材齢28日圧縮強度をベースとなるプレーンモルタルの圧縮強度で除した圧縮強度比を図-4 に示す。短鋼繊維 a を用いた一連の調合では、 $V_f=6\%$ 以上とすると $V_f=0\%$ の場合に対し明らかな圧縮強度の増加が見られる。 $V_f=9\%$ のとき、 $V_f=0\%$ に対し30~40%の強度増加となった。また、短鋼繊維 b を用いた調合の場合、 $V_f=12\%$ の混入率で圧縮強度は増加している。この繊維の種類による差は前述したように、主に短鋼繊維の形状およびアスペクト比の相違に起因すると思われる。2種類の短鋼繊維は繊維長さ $l=6\text{mm}$ と等しいが、直径は短鋼繊維 a の $\phi 0.15\text{mm}$ に対し、短鋼繊維 b は $\phi 0.22\text{mm}$ であり、短鋼繊維 a のアスペクト比:40.0に対し短鋼繊維 b は27.3である。同じ V_f で短鋼繊維を混入した場合、短鋼繊維 a の本数は短鋼

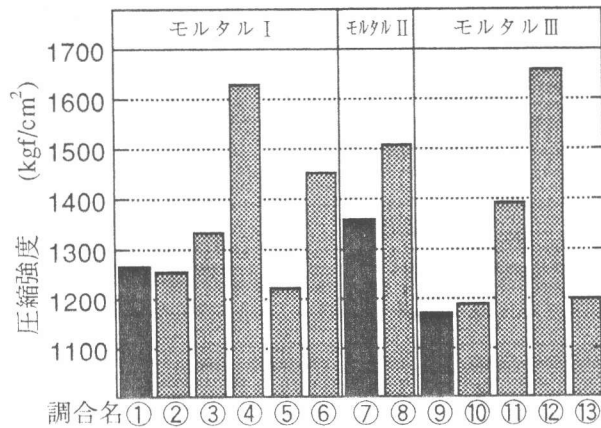


図-3 28日圧縮強度

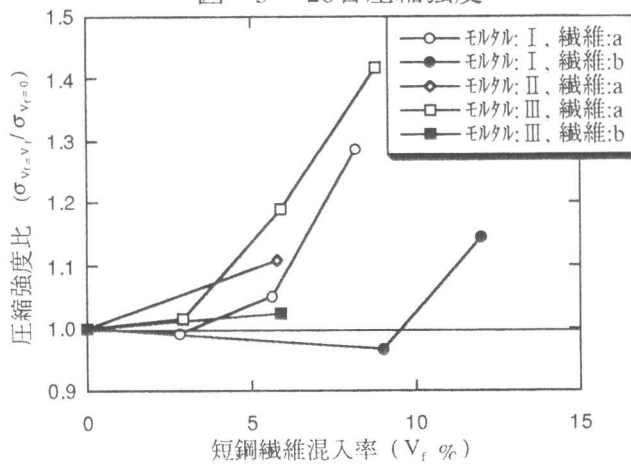


図-4 圧縮強度比

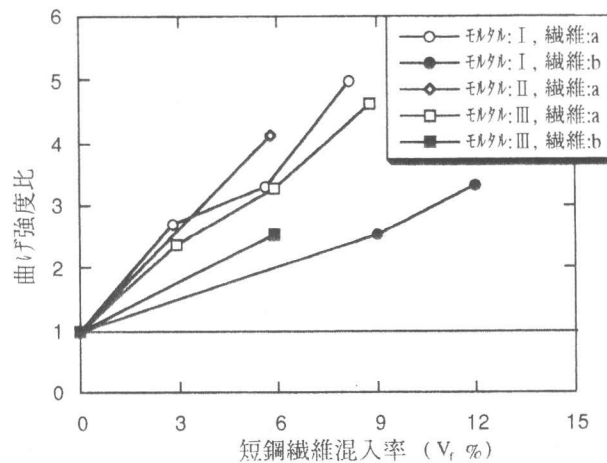


図-5 曲げ強度比

繊維 b の約 2.15 倍で、モルタル内の繊維間隔は短鋼繊維 a の方が狭くなる。結果として、短鋼繊維 a のモルタルマトリックスのひびわれを拘束する能力が短鋼繊維 b に比べ高くなっているといえ、圧縮強度の増加に違いが生じたと考えられる。

$V_f=3\%$ 以下の領域で圧縮強度の増加が見られないのは、繊維長さが $l=6\text{mm}$ と短いため、圧縮強度の増加に寄与するモルタルマトリックスを拘束する効果が低いためと考えられる。

ヤング係数は V_f の増加に伴って大きくなる傾向を示している。ポアソン比については各調査に大きな差はない。

4. 3 曲げ強度および曲げタフネス

表-3 に曲げ強度、曲げタフネスおよび換算曲げ強度試験結果を示す。調合④で曲げ強度 338kgf/cm^2 、曲げタフネス $1887\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 、換算曲げ強度 282kgf/cm^2 を得た。これは、通常の鋼繊維を $V_f=2\%$ 程度混入した SFRC に比較して 2~3 倍以上の高いタフネスである。

図-5 にプレーンモルタルの曲げ強度に対する各 V_f の曲げ強度の比を示す。曲げ強度比は V_f の増加に伴って比例的に増加している。その増加率は短鋼繊維の形状、寸法に支配され、プレーンモルタルの種類による影響は少ないと考えられる。

図-6、図-7 に短鋼繊維 a を用いた場合の荷重-たわみ曲線を示す。 V_f の増加とともにじん性は大きく改善されている。図-6 に示したプレーンモルタル I、短鋼繊維 a の組合せでは、最大荷重時のたわみ量が 1mm 程度かそれ以上あり、図-7 に示したプレーンモルタル III との組合せの 0.5mm 程度と比較して大きい。また、プレーンモルタル I との組合せの方がプレーンモルタル III との組合せに比較して軟化剛性が小さい。本実験では、短鋼繊維のひびわれ拘束力はモルタルと短鋼繊維の付着が切れ、短鋼繊維が抜け出すことにより解放されるので、プレーンモルタル I と短鋼繊維 a の付着強さがプレーンモルタル III を用いた場合よりも強いこ

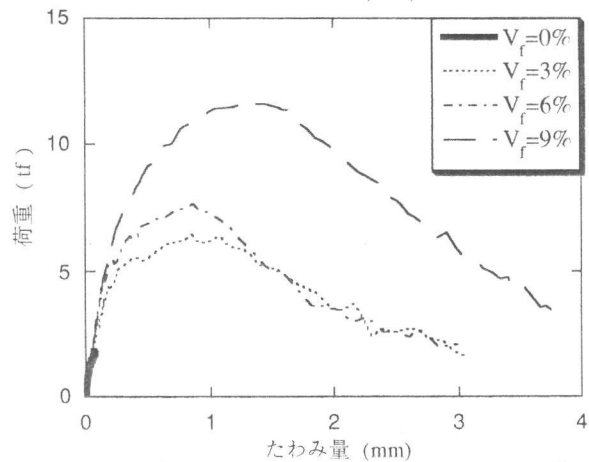
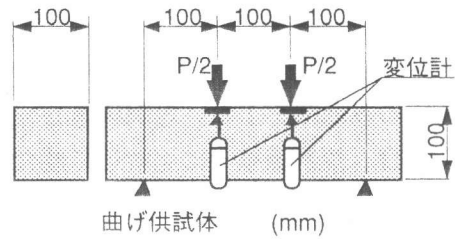


図-6 繊維量を変化させた場合の荷重-たわみ曲線 (モルタル：I、繊維：a)

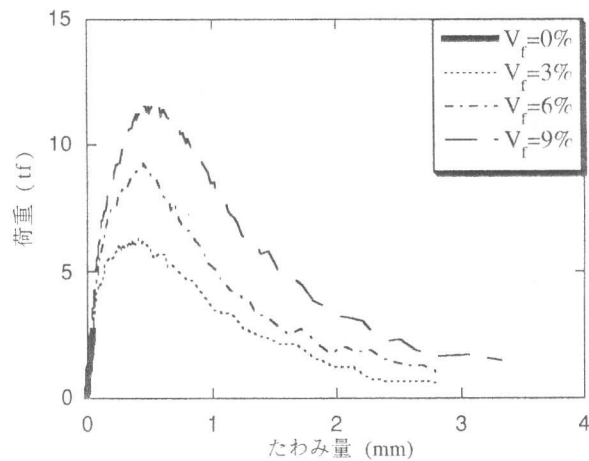


図-7 繊維量を変化させた場合の荷重-たわみ曲線 (モルタル：III、繊維：a)

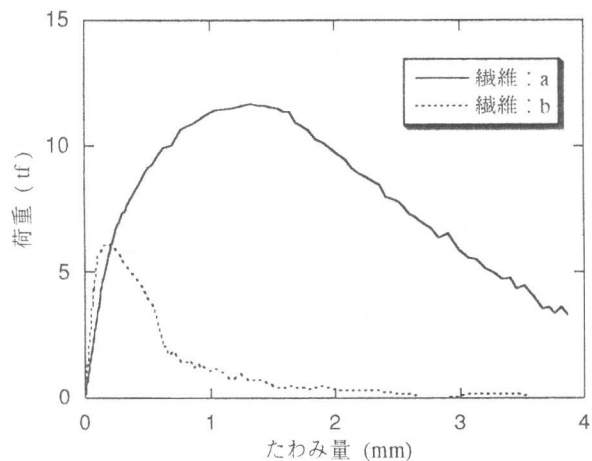


図-8 繊維の種類を変えた場合の荷重-たわみ曲線 (モルタル：I、 $V_f=9\%$)

とが考えられる。

図-8に短鋼繊維の種類を変えた場合の荷重-たわみ曲線を示す。短鋼繊維bを用いた場合、短鋼繊維aに比較して最大荷重、じん性ともかなり低い結果となった。これは、同じ V_f であっても両繊維の寸法の違いから本数にして約2倍、総表面積にして約1.5倍、短鋼繊維aの方が大きく、繊維間隔が小さくなることから、短鋼繊維aを用いた場合に曲げ強度、じん性がともに高くなったと考えられる。

図-9に換算曲げ強度を示す。短鋼繊維aを用いた場合、換算曲げ強度の増加率

はプレーンモルタルの種類によらず同様の傾向を示している。また、 $V_f=6\sim9\%$ の間で換算曲げ強度の増加率が大きくなり、短鋼繊維によるじん性の改善効果が高くなる点が存在する。

5. まとめ

本研究では高強度、高じん性を必要とする部材への適用をふまえ、直径が $\phi=0.15\text{mm}$ および $\phi=0.22\text{mm}$ で長さが $l=6\text{mm}$ の2種類の短鋼繊維を用い、容積比で0~12%と高い割合で混入したモルタルの基本的な力学的性状を実験的に検討し以下の知見を得た。

- 1) 短鋼繊維を3~9%と高い割合で混入したモルタルでも、ワーカビリティは低下するものの、振動締固めを行なうことにより密実なモルタルを打込むことができる。
- 2) 圧縮強度で 1600kgf/cm^2 以上、曲げタフネスで $1800\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 以上、換算曲げ強度で 200kgf/cm^2 以上の強度、じん性ともに優れた品質を得ることができる。
- 3) $\phi 0.15\times 6.0\text{mm}$ (アスペクト比 : 40.0) の短鋼繊維を用いた場合の力学的性状の改善は著しく、ひびわれ制御能力も高い。

今後の課題として、今回実験の対象としていない力学的性状の把握、特に破壊性状を含めた解析的検討を行う必要がある。また、短鋼繊維を高い割合で混入したコンクリートの力学的性状をさらに効果的に改善するためには、モルタルの付着性状の改善が特に役立つと思われる。

参考文献

- 1) Li, V.C., A.E. Naaman, J.K. Wight, D.K. Mishra, J.M. LaFave, H.C. Wu and Y. Inada : On the Shear Behavior of Engineered Cementitious Composites, Submitted for publication in the *J.of Advanced Cement Based Materials*, 1993
- 2) 例えば、六郷恵哲・内田裕市・加藤英徳・小柳洽 : 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状と引張軟化曲線、土木学会論文集、No.460/V-18, pp.57~64, 1993.2
- 3) 繊維補強コンクリート研究委員会 : 繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準、日本コンクリート工学協会、JCI-SF、1984

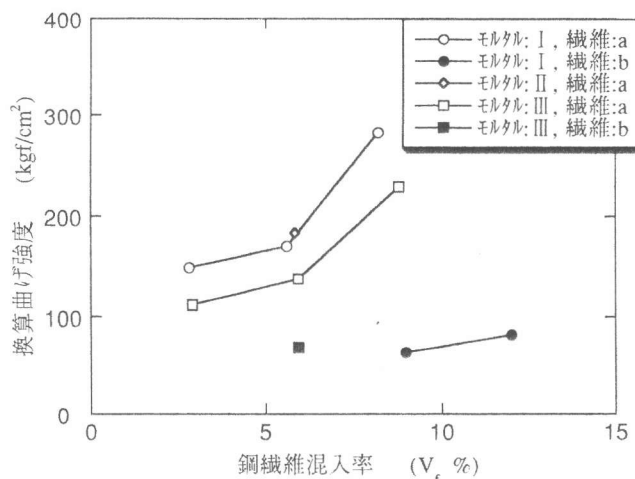


図-9 換算曲げ強度