

論文

[1135] シリカフュームを用いた炭素繊維補強モルタルの特性

正会員 ○小泉 徹 (石川工業高等専門学校)

正会員 榎場重正 (石川工業高等専門学校)

高桑信一 (石川工業高等専門学校)

1. まえがき

各種繊維をセメントコンクリート中に混入し、その特性を改良しようとする試みが続けられている。炭素繊維は、ポリプロピレンやポリエチレンなどの合成繊維に対し、高い弾性係数や引張強度を持つことやアルカリに対し不活性であることより、その有効な利用が期待されている。

しかし、炭素繊維はコンクリート中においてフロックを形成しやすく、繊維の分散が重要な問題となっている。我々は細骨材の一部として粒度の細かな骨材を使用し、そのモルタル分が繊維のフロック中に入りこむことにより、繊維を分散させようとした。その結果、繊維のフロック化を防ぎ、引張強度、曲げ強度、曲げタフネスなどの改善効果のあることを既に報告した。¹⁾ この粒度の細かな骨材を使用した場合、モルタル分が繊維のフロック中に入りこむに必要な流動性を持たせるために使用水量が増大し、その影響が大きく懸念された。

種々の微粉末を使用して、炭素繊維を分散させようとする研究がいくつか行われているが、その一つにシリカフュームがある。^{2), 3)} シリカフュームを使用した炭素繊維補強モルタルでは一般にセメント砂比が通常のモルタルよりも小さく、0.5程度のものである。

本研究は、このシリカフュームを使用した炭素繊維補強モルタルについて、セメント砂比を通常のモルタル程度まで大きくして行われた二、三の実験結果を述べようとするものである。

2. 使用材料、配合、実験方法

使用したセメントは市販の普通ポルトランドセメントであり、細骨材は石川県手取川産川砂

表1 炭素繊維モルタル示方配合 (シリーズI)

炭素繊維 混入率 (%)	W/ (C+Si)	S/ (C+Si)	単位量 (kg/m ³)					
			セメント	シリカ	水	細骨材	混和剤	炭素繊維
0	0.55	0.50	674	203	483	438	20.2	0
1			667	201	478	433	20.0	16.50
2			661	199	473	429	19.8	33.00
3			655	197	469	425	19.6	49.50
0	0.55	1.00	572	172	409	745	22.3	0
1			566	170	405	737	22.1	16.50
2			560	168	401	729	21.8	33.00
3			554	167	397	722	21.6	49.50
0	0.55	2.00	439	132	314	1143	17.1	0
1			434	131	311	1131	16.9	16.50
2			430	129	308	1119	16.8	33.00
3			425	128	304	1107	16.6	49.50

(比重 2.56、FM 3.02) である。シリカフュームは比重 2.20、比表面積 18~22 m²/g、SiO₂含有量94%のもので、炭素繊維はK社製(比重 1.65、直径 18 μm、弾性係数 30 GPa、引張強度 590 MPa)のものである。

配合は繊維混入率を 0、1.0、2.0、3.0 vol% とし、シリカフューム(Si)とセメント(C)の比率 Si/C を 0.3、W/(C+Si)を 0.55 と一定とし、細骨材量 S を S/(C+Si) を 0.5、1.0、2.0 として決定したものをシリーズⅠとする。繊維混入率を 0、0.5、1.0、1.5 vol%、単位セメント量を 450kg/m³ と一定とし、W/(C+Si)を 0.55、Si/Cを 0、0.1、0.2、0.3として決定されたものをシリーズⅡとする。決定されたそれぞれの配合を表 1 および 2 に示す。

シリーズⅠは回転数 60 rpm のモルタルミキサーに所定の材料を一括投入し、2分間の練り混ぜの後フロー試験を行い、所定の突き数で4×4×16cmの供試体を作製した。28日間水中養生後、JIS R5201「セメントの強さ試験」によって、曲げ強度、圧縮強度を調べた。シリーズⅡは強制混合ミキサーにセメント、シリカフューム、炭素繊維を投入し、30秒間空練りの後、所定の水量を加え、3分間の練り混ぜを行った。排出後、φ10×20cm、10×10×40cmの供試体を棒状バイブレーターで締め固めて作製した。28日間水中養生後、圧縮強度試験と曲げ強度試験を行った。曲げ強度試験ではJCI-SF4「繊維補強コンクリートの曲げ強度試験及び曲げタフネス試験方法」に従い、曲げタフネスを求めた。JCI-SF4では曲げ試験における荷重点でのたわみ速度を規定しているが、本研究で用いられた試験機では、たわみ速度を規定値内に制御できず、試験機のクロスヘッドの変位速度が毎分 0.2 mm として試験を行った。またタフネスはたわみ 2 mm までで求められているが、ここでは使用した試験機の性能上、たわみ 1 mm までで評価した。

また、シリーズⅡでは14日間水中養生した繊維混入率 1%のものに対して、凍結融解抵抗性試

表 2 炭素繊維モルタル示方配合(シリーズⅡ)

炭素繊維 混入率 (%)	Si / C (%)	W / (C+Si)	単位量 (kg / m ³)					
			セメント	シリカ	水	細骨材	混和剤	炭素繊維
0	30	0.55	450	135	320	1116	18	0
0.5						1103		8.25
1.0						1091		16.50
1.5						1078		24.75
0	20	0.55	450	90	297	1216	18	0
0.5						1203		8.25
1.0						1190		16.50
1.5						1178		24.75
0	10	0.55	450	45	272	1344	18	0
0.5						1331		8.25
1.0						1318		16.50
1.5						1306		24.75
0	0	0.55	450	0	248	1457	18	0
0.5						1444		8.25
1.0						1431		16.50
1.5						1418		24.70

験を行い、その耐久性にも検討を加えている。

使用した繊維の繊維長はシリーズⅠでは10 mm 25 mm の2種類、シリーズⅡでは25 mm のみである。また、本研究で用いた炭素繊維はコンクリートが十分ワーカブルでなければその効果が期待できず、このためシリーズⅠではセメント重量の3%の高性能減水剤（F社製、空気非連行性）を、シリーズⅡでは、耐久性を検討すること考え、ポリプロピレンを主成分とするポリマー系混和剤とAE減水剤をそれぞれセメント重量の3%、1%使用した。

3. 実験結果および考察

(1) シリーズⅠ

図1～2にフロー試験の結果を示す。図よりフロー値は、 $S/(C+Si)$ が0.5、1.0において繊維混入率0%でオーバーフローに近いものが、繊維の混入により指数関数的に減少し、繊維混入率3%では140～160の値となった。 $S/(C+Si)$ 2.0では他と比較してフロー値が全体に低く、繊維混入率1%において150程度と流動性が悪くなっている。繊維長の違いによる影響はほとんど見られなかった。

図3～4に曲げ強度試験の結果を示す。図より繊維長10 mmの繊維混入率1%において曲げ強度は混入率0%とあまり変わらなかったが、混入率2%で20～30%の強度増加を示した。しかし、混入率3%では $S/(C+Si)$ 1.0と2.0において強度の低下を示した。これに対し $S/(C+Si)$ が0.5においては、わずかながらも強度を増加させた。繊維混入率が大きい場合、繊維のフロックを解消し補強効果を高めるためには、多くのシリカフュームなどの微粉末を必要とするようである。

繊維長25 mmの場合は $S/(C+Si)$ が2.0においても、繊維混入率が大きくなると曲げ強度が増加を示し、とくに $S/(C+Si)$ 0.5では最大45%増と大きな補強効果を示した。

繊維混入率3%において繊維長10 mmでは強度の低下が起こり、繊維長25 mmではその低下が見られていない。これは繊維長10 mmのものがフロックを形成しやすく、繊維の分散が十分でなく、繊維周辺に多くの空隙が存在するためと考えられる。

図5～6に圧縮強度試験の結果を示す。繊維長10 mmでは曲げ試験結果で述べたように繊維のフロックが解消されず、繊維周辺に多くの空隙をともなった状態となるため圧縮強度は繊維混入率の増加により減少を示す。

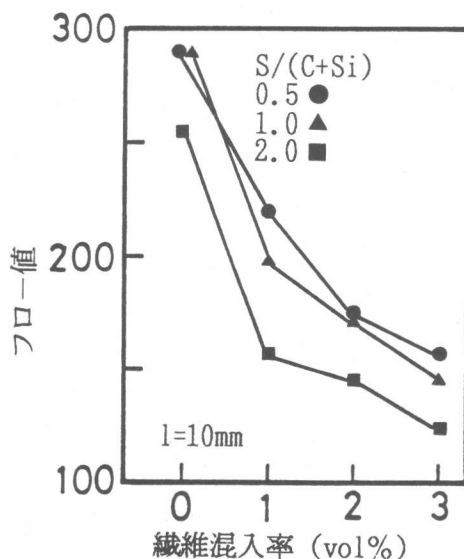


図1 繊維混入率とフロー値の関係

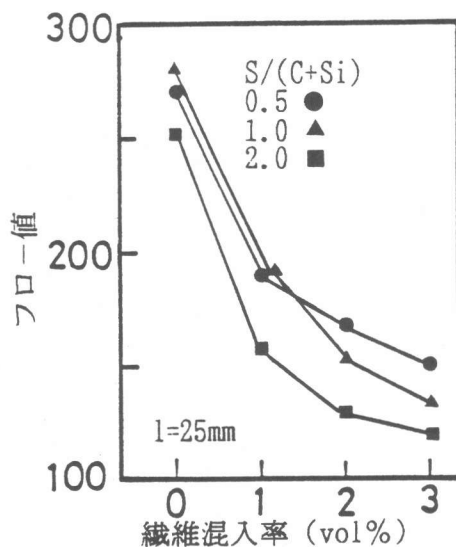


図2 繊維混入率とフロー値の関係

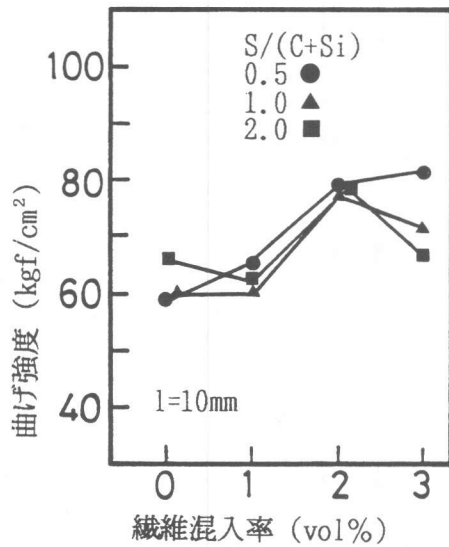


図3 繊維混入率と曲げ強度の関係

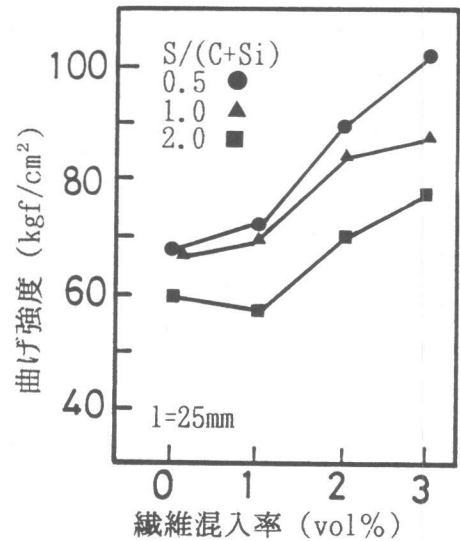


図4 繊維混入率と曲げ強度の関係

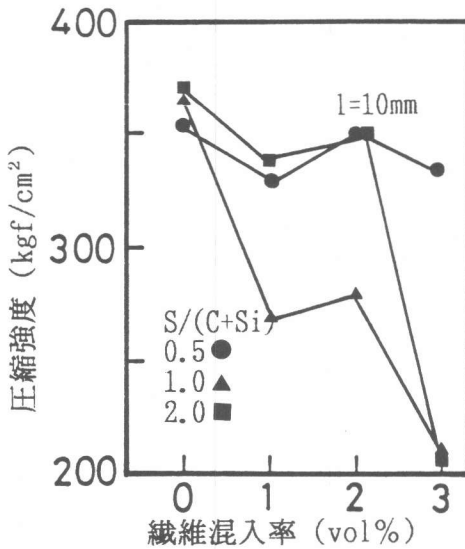


図5 繊維混入率と圧縮強度の関係

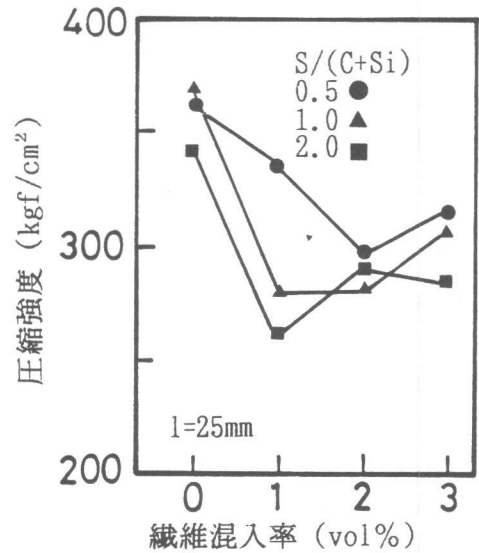


図6 繊維混入率と圧縮強度の関係

とくに繊維長10 mm の $S/(C+Si)$ 1.0 と 2.0 では繊維混入率 3% で大きな強度低下を示した。繊維長25 mm では繊維混入率の増加により、強度の低下を示すものの10 mm のような極端な低下は見られなかった。

以上より炭素繊維補強モルタルにおいてはシリカフュームの混入量が大きいことは繊維の分散に有効と考えられるが、細骨材量が多くなるとその効果はあまり期待できないようである。

(2) シリーズII

図7にフロー試験の結果を示す。図よりフロー値はシリカフュームとセメントの比 Si/C により大きく異なる。 Si/C 0.30、0.20、0.10 で繊維混入率 0% においてフロー値が約 180 である

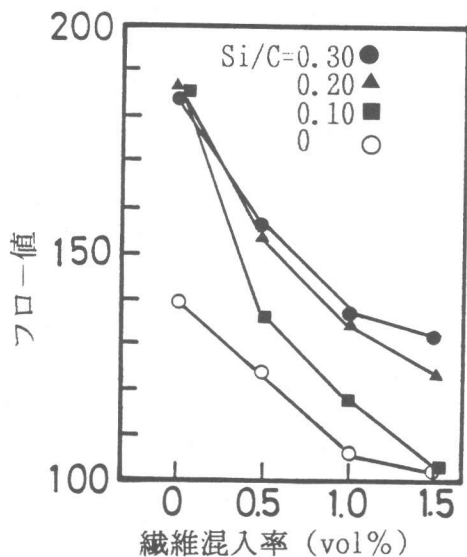


図7 繊維混入率とフロー値の関係

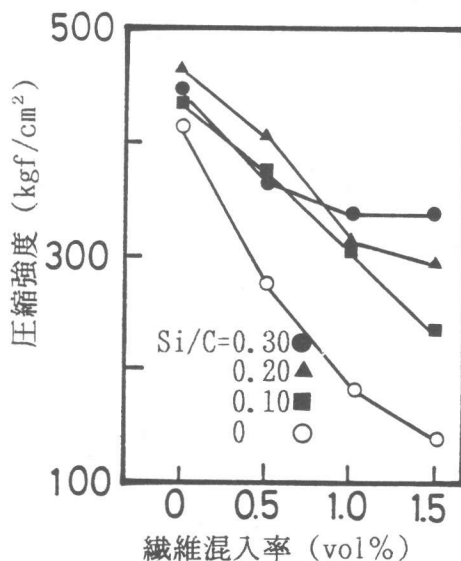


図8 繊維混入率と圧縮強度の関係

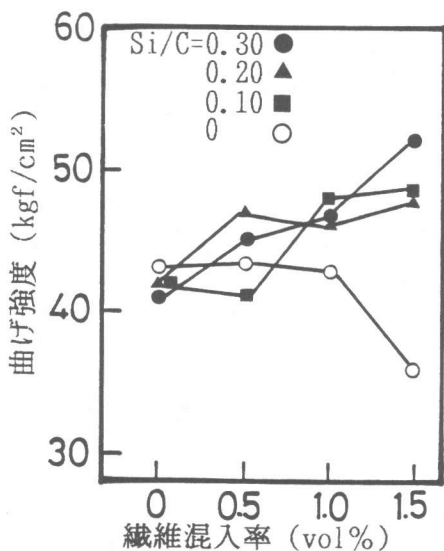


図9 繊維混入率と曲げ強度の関係

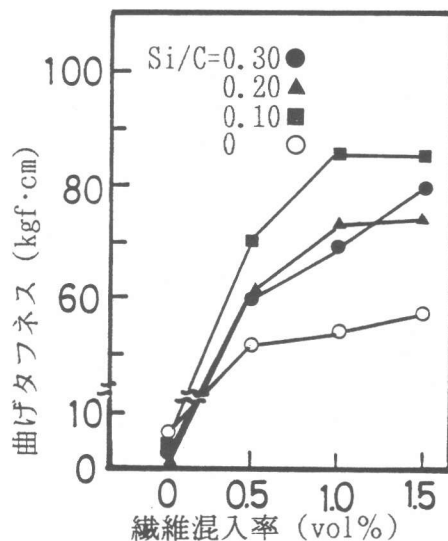


図10 繊維混入率と曲げタフネスの関係

のに対し、Si/C 0では140となった。繊維混入率の増加によりフロー値は指数関数的に減少を示すが、Si/C 0.30と0.20ではSi/C 0.10や0よりもその低下は小さい。図7のフロー値が図2に示されたフロー値よりも小さいのは、シリーズIとシリーズIIの配合の違いと使用した混和剤の影響が含まれると考えられる。

図8に圧縮強度試験の結果を示す。繊維混入率0%ではシリカフュームの影響により高い圧縮強度を示したが、繊維混入率の増加により強度は大きく低下した。とくにSi/C 0の場合は他に比べてその低下が著しい。繊維混入率の増加による強度の低下はシリーズIと同様の原因にて引き起こされると考えられる。

図9に曲げ強度試験の結果を示す。Si/C 0では曲げ強度は繊維混入率 1.5%において低下を示し、それ以外の混入率ではプレーンモルタルと同程度の強度であった。

Si/C 0.30、0.20、0.10ではそれぞれに大きな差はなく、混入率の増加により最大30%程度の強度の増加が見られた。シリーズIとシリーズIIの曲げ強度に差が見られるのは $W/(C+Si)$ が0.55と同じであっても配合、曲げ試験方法の違いや供試体の寸法 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ による一層あたりの締め固め厚の相違により生ずると考えられる。

図10に曲げ試験より求められた曲げタフネスを示す。図のプレーンモルタルのタフネスは、荷重～たわみ線図において最大荷重到達後、急激にたわみが進行し、使用した試験機ではその速度を制御できないので、最大荷重までのたわみで評価したものである。図より曲げタフネスは繊維混入率の増加により大きな値を示すが、Si/C 0とSi/C 0.30、0.20、0.10ではその値に差が見られシリカフューム混入の効果がうかがえる。しかし、Si/C 0.10のものが他よりも大きなタフネスを示しているが、この理由は明らかではない。

図11に繊維混入率1%のモルタルに対する凍結融解試験の結果を示す。凍結融解に対する抵抗性は、試験開始時の動弾性係数と各サイクルでの動弾性係数の比すなわち相対動弾性係数で表している。図よりシリカフュームの混入量が凍結融解抵抗性に及ぼす影響は大きく、混入量の小さいSi/C 0.10と0では300サイクル以前に、供試体の破壊を生じた。図中Fの記号で示されたものは同一供試体のうち一本以上がそのサイクル以後破壊したことを表す。

4. まとめ

炭素繊維はコンクリート中においてブロックを形成しやすく、その補強効果を表すためには流動性のよいコンクリートとして繊維のブロック化を防ぐとともに、十分な締め固めを行いコンクリート中に有害な空隙を存在させないことが必要である。

本研究ではシリカフュームを用いた炭素繊維補強モルタルについてその特性を調べた。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) シリカフュームによる炭素繊維の分散はセメント、シリカに対する細骨材量が多くなるとその効果が少なくなる。
- (2) シリカフュームを用いたモルタルでは適当なシリカフューム量、細骨材量であれば、曲げ強度、曲げタフネスの増加が期待できる。
- (3) シリカフュームの混入は炭素繊維補強モルタルの凍結融解抵抗性の改善に有効である。

〔参考文献〕

- 1) 小泉 徹、棚場重正、高桑信一：炭素繊維補強コンクリートの練り混ぜと強度特性 コンクリート工学年次論文報告集 10-2 1988 P641～P646。
- 2) 瀬口健夫、堀田久則、戸祭邦之、野口隆一、西垣太郎、上床 実：炭素繊維補強シリカフューム混和モルタルの基礎的研究 日本建築学会大会学術講演梗概集A 1987 P43～44。
- 3) 古川 茂、宮本正雄、辻 幸和：短炭素繊維で補強したモルタルの力学的性状 セメント技術年報 41 昭和62年 P455～458。

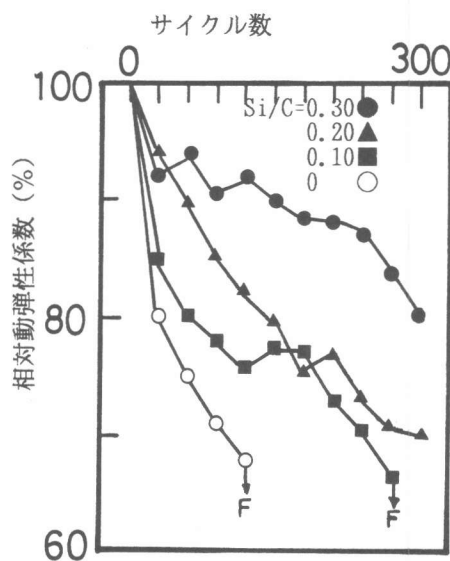


図11 凍結融解試験