

ガラス繊維補強コンクリートのコンシステンシー と力学的特性について

CONSISTENCY AND MECHANICAL PROPERTIES ON GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE

岡田 清*・三瀬 貞**・真嶋光保***・出口智一****
By Kiyoshi OKADA, Tadashi MISE, Mitsuyasu MASHIMA
and Tomokazu IDEGUCHI

1. 緒 言

セメントコンクリートでは高圧縮強度を有する反面、引張強度・曲げ強度・タフネス・耐衝撃性・ひびわれ抵抗性などが劣る。これらに対する材料面からの補強方法の1つとして、コンクリート中に短繊維をランダムに分散混合する。いわゆる繊維補強コンクリートがあり、近年注目を集めている¹⁾。

補強材として用いられる繊維には、鋼・ガラス・炭素・石綿・高分子などが挙げられる。これらのうち鋼繊維を用いて補強したコンクリートに関しては基礎的な物性研究から、実用的な設計施工や試験施工を含めて幅広い研究が行われており、配合設計に関する提案もなされている²⁾。施工例も試験的なものを中心に、舗装・橋床版・トンネルライニングなどに報告³⁾がみられる。

一方、ガラス繊維補強に関する研究は、英国建築研究所 (Building Research Establishment) を中心に進められ、Pilkington Brother Ltd. における耐アルカリガラス繊維の開発および市販により、実用化に向けて大きく前進した⁴⁾。しかし、ガラス繊維により補強されるセメント系複合材料の使用は、これまで主として比較的薄肉断面の工場製品である建築壁材や捨型枠などの非構造部材が対象とされてきた。通常このようなガラス繊維補強材料は粗骨材を含んでおらず、ガラス繊維補強セメントとよばれており、ダイレクトスプレー法やスプレーサクシオン法などの吹き付けを主体とした工法により製造されている^{5), 6)}。

ガラス繊維はアルカリ環境下での耐久性に問題を残し

ているものの、強度・伸び能力(変形能)・海水に対する耐久性などがすぐれており、コンクリート補強材としてこれらの特徴を有効に活用できる可能性を有している。この場合、土木構造物では、断面が厚いため施工は通常のコンクリートと同様重力成形法、すなわち、フレッシュ状態のコンクリートを自重および加振による流動化とを利用して打設する方法が最も容易かつ迅速である。このため、あらかじめガラス繊維を他の材料とともに練り混ぜておくプレミックス工法による打設が最も有利なものと考えられる。また経済性や乾燥収縮・クリープなどの経時変化に関する性質を考えると粗骨材を用いることが必要となる。

プレミックス工法によるガラス繊維補強コンクリートの配合・ワーカビリティおよび硬化コンクリートの力学的性質に関する研究はきわめて少ない。H.A. Marsh & L.L. Clarke⁷⁾ は繊維量 2%vl までのガラス繊維補強コンクリートについて、12.7~50.8 mm の範囲で4種の繊維長を用いてスランプと強度を測定し、繊維量の増加とともにスランプは極端に低下したものの、曲げ強度が飛躍的に増大したと、一方繊維長に関しては明確な傾向はつかめないとしながらも、38.1 mm のとき最良の補強効果を得たこと、などを報告している。さらに、この中でフレッシュコンクリートのコンシステンシーについても述べており、ガラス繊維補強コンクリートではその中のガラス繊維がかなりの量の自由水を吸収するためスランプは大きく低下するが、吸着水は練りませず・打設・締固めなど振動を伴う場合には有効に作用すると推論している。したがって、スランプをワーカビリティの指標とするよりは振動を用いた方法によることを推奨している。また、J. Takagi⁸⁾ は繊維量を最大 1%wt まで混入したモルタルおよびコンクリートの強度試験から、直接引張・割裂引張・曲げの各強度は繊維量の増加とともに増大するが、圧縮強度は混入量が 1%wt に達する

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

**** 正会員 工修 大阪市水道局(元・大阪市立大学院生)

と低下したとしている。これらの報告は、主として繊維混入量に着目したものであり、他の配合要因に関しては明らかでない。本論文では、繊維混入量以外の配合要因にも着目しコンシステンシーおよび力学的性質など主として強度面での補強効果の検討を行い、ガラス繊維補強コンクリートをプレミックス工法によって施工する場合の配合設計上の基礎的資料を得ることを目的とした。

2. 実験

(1) 実験計画

複合材料の構成要素は、マトリックス相 (matrix) および分散相 (dispersion) に分けて考えることが一般的であるが⁹⁾、繊維補強コンクリートではコンクリートをマトリックス、繊維をディスパージョンとみなすことができる。マトリックス要素の要因としては、骨材最大寸法・水セメント比・単位水量・単位セメント量・細骨材率など、またディスパージョンの要因としては、繊維の種類・繊維長・繊維混入率などが挙げられる。

繊維補強コンクリートはこのような各要素とそれぞれの要因の組合せにより多様な配合が考えられる。しかし、本実験は、マトリックスの要因として水セメント比・細骨材率を、またディスパージョンの要因として繊維長・繊維混入率を取り上げた。

繊維長は、市販の 24 mm を中心に 12~50 mm とし、繊維の最大混入量の目標値は 1%vl 程度、スランブは施工可能な範囲として 1~25 cm の範囲に入るよう予定して予備実験を行い、これらの条件を満たすためには単位セメント量としては 500 kg/m³ 程度必要となることが判明した。また、水セメント比は 0.45 を最小とし、0.70 までの範囲とした。骨材最大寸法はこれを大きくすると繊維分散の均一性に影響を与えたと考えられたため、15 mm のみとした。表-1 に本実験で扱った各要因と水準について示す。さらにコンシステンシーを改善する試みとして、高性能減水剤の効果を実験シリーズ IV において調べた。

(2) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材としては大阪高槻産砕石 (比重 2.68, 粗粒率 6.37, 吸水率 0.83%, 最大寸法 15 mm)、細骨材としては大阪泉南沖の海砂 (比重 2.58, 粗粒率 2.67, 吸水率 2.02%, 塩分含有量 0.009%) を用いた。またガラス繊維は市販の耐アルカリガラス繊維であるが、その物理的性質を表-2 に示す。

なお、ガラス繊維の比重・吸水率を測定するにあた

表-1 実験計画

区分	単 セメント 量 (kg/m ³)	水セメン ト 比	細骨材率	繊維長 (mm)	繊維混入 率 (%vl)
シリーズ I	500	0.45	0.60	24	0
		0.50			0.2
		0.55			0.6
		0.60			1.0
		0.65			
シリーズ II	500	0.55	0.40	24	0
			0.50		0.2
			0.60		0.6
			0.70		1.0
			0.80		
シリーズ III	500	0.55	0.60	12	0
				25	0.2
				37	0.6
				50	1.0
シリーズ IV	500	0.55	0.60	24	0, 1.0
	450				
	400				
	400	0.50	0.60	24	0, 1.0

表-2 ガラス繊維の物理的性質

項 目	公 称 値
ファイバーモノフィラメント径	12.5 μm
1ストランドのフィラメント数	204 本
引 張 強 度	200 kgf/mm ² (19.6 GPa)
弾 性 係 数	7 000~7 500 kgf/mm ² (68.6~73.5 GPa)
比 重 (表 乾 状 態)*	2.67
吸 水 率*	4.77%

* 著者らの測定によるもの

り、骨材と同様表乾状態にする必要があるが、これはガラス繊維を 24 時間以上浸水し、遠心脱水したものを表乾状態とすることとした。比重は、このようにして作製した表乾試料を用い、容量 50 ml のゲーリュサック型比重瓶を用い水置換法により測定した。比重瓶内の気泡の除去は減圧法による。

また、高性能減水剤はナフタリンスルホン酸塩系のものを用いた。

(3) 実験概要

実験項目は、まだ固まらないコンクリートについてはスランブ値・空気量・VB 値を、硬化コンクリートについては基本的な力学的性質としての圧縮・曲げ・引張それぞれの強度を測定した。これらの試験法は VB 値の測定を除き JIS に準拠した。

VB 値を測定する VB 試験は、土木学会規準の「振動台式コンシステンシー試験方法」(舗装コンクリート用)と似ているが、細部において若干異なっており、コーンの形状は上端内径 10 cm, 下端内径 20 cm, 高さ 30 cm であり、テーブル振動機の振動数 3 000~3 500 rpm, 振幅 1~5 mm, 加速度 3~4g となっている。試験時に

はガイド棒付きの透明円板をコンクリート上面に置き加振する。

VB 試験はコンクリートを加振することにより、流動の度合を調べるものであるが、この試験はコンシステンシーの低いコンクリートの測定に向いているとされている¹⁰⁾。前に述べたように、繊維補強コンクリートでは、繊維の混入によってコンシステンシーの大幅な低下が予想されるため本試験を行うこととした。

コンクリートの練りませ方法およびその検討については後に詳述する。供試体の作成には押当て型の外部振動機およびテーブルパイプレーターを用い材料分離を起こさない程度に締固めた。これは、繊維補強コンクリートでは棒状パイプレーターを用いて強度試験用などの断面の小さな供試体を打設締固めると、挿入箇所が局部的に繊維不足 (fiber poor) となったり、繊維の異常な配向を引き起こす結果となり、均一性に悪影響を及ぼすと考えられたためである。

作成した供試体は、打設 1~2 日後に脱型し材令 28 日を経るまで標準養生 (20±3°C, 水中) を施し、強度試験に供した。

圧縮試験では φ10×20 cm の円柱供試体を用いた。曲げ試験は 10×10×40 cm の角柱供試体を 3 等分 2 点載荷により、引張試験は φ15×15 cm の円柱供試体を割裂載荷により行った。繊維補強コンクリートの引張強度試験として割裂試験を採用したのは、① 取扱いが簡単で試験値の精度が高く、今後も間接引張試験としては割裂試験にまさる方法は期待し難いこと、② ACI 544 委員会においても繊維補強コンクリートの引張強度として割裂引張強度を用いていること¹¹⁾、③ 繊維補強コンクリートの強化理論の一つである繊維間隔説が割裂試験結果に基づいたものであること¹²⁾、などによる。

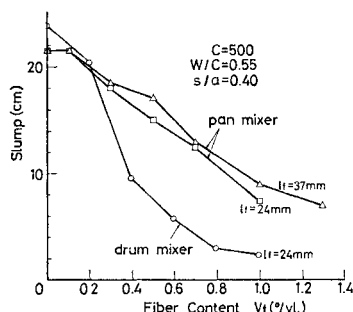
3. 実験結果と考察

(1) フレッシュコンクリートに関する検討

a) 練りませ方法の検討

本実験に用いたガラス繊維は φ12.5 μm のモノフィラメントを 204 本集め、収束剤によるコーティングを施し、所定の長さで切断したチョップドストランドである。しかしストランドは外力により比較的容易にフィラメントに分離・解繊するほか、ガラス繊維のせん断耐力が弱く切断されやすいという性質を有している。

プレミックス工法により繊維補強コンクリートを打設する場合、細・粗骨材、セメント、水、繊維などの材料を同時に練りませしておくことになるが、繊維の解繊・切断の進行は練りませ中に受けるエネルギーの量と練りま



図一 重力ミキサと強制練ミキサによるスランプの相違

ぜ方法により大きく異なる。したがって、練りませ方式の相違や練りませ時間の長短によって、繊維補強コンクリートの特性も大きく異なることが予想される。

図一は重力式および強制練ミキサを用いて練りませた同配合の繊維補強コンクリートのスランプ値の相違を示したものである。これによると、強制練ミキサを用いると重力式のものよりスランプ値は大きい。これは、前者の方が繊維の解繊・切断作用が大きく、流動性に差が生じたものと考えられる。写真一2, 3 は、それぞれ強制練、重力式のミキサを用い、同配合のコンクリートを同順序で材料を投入し、同時間 (ドライミックス 1 分およびウェットミックス 3 分) 練りませた後にコンクリート中から洗い出した繊維の様子である。わずかではあるが写真一2, すなわち強制練ミキサにより練りませた後の繊維の方が解繊作用を大きく受けていることが認められる。また写真一4, 5, 6 は重力式ミキサを用い、1 分間のドライミックス後、さらにウェットミックスを 6 分、9 分、12 分続けた後のガラス繊維の様子であるが、練りませ時間の増加による解繊・切断の進行が明らかに認められる。また、参考のため練りませを受けないヴァージン繊維を写真一1 に示した。

以上の結果から、本実験では解繊・切断のより少ない重力式ミキサを用い、できる限り短時間に練りませを完了することとした。すなわち、練りませ時間はドライミックス 1 分間の後、ウェットミックス 3 分とし繊維のミキサへの投入はウェットミックス開始 1 分後に始め、その後の 1 分以内に完了させることとした。

b) 単位水量および繊維混入量の影響について

図二は、ガラス繊維補強コンクリート (C=500 kg/m³ 一定) のスランプに及ぼす単位水量の影響について示したものである。図二から、単位水量の増加とともにスランプが増加するが、その増加率は繊維量の増加とともに小さくなることが示されている。一方、図三に VB 値の測定結果を示す。これをみれば、繊維量が増加した場合においても単位水量によるコンシステンシーの差を明確に表わしており、ガラス繊維補強コンクリート

のコンシステンシーの測定には、前記 Marsh の推論⁷⁾のように VB 試験はスランプ試験より有利であることが再認識された。

また、図-2 中 (以下 図-4, 7, 10 も同じ) $V_f=0\%$ および $V_f=0.2\%$ の一部ではスランプ値が 25 cm を越えており、打設・締固め後コンクリートに材料分離を引き起こしている可能性があるため点線で示した。

c) 細骨材率の影響について

ガラス繊維補強コンクリートの細骨材率の変化によるスランプ値の変化を図-4 に、VB 値の変化を図-5 に

示す。ここでは、普通コンクリート、すなわち $V_f=0\%$ のコンクリートのスランプ値はきわめて高いため細骨材率が変化しても実測スランプ値には大きな変化として現われなかった。また $V_f=0\%$ および $V_f=0.2\%$ の一部の VB 値は 0 であり、VB 試験ではコンシステンシーを測定できなかった。

通常、普通コンクリートや鋼繊維補強コンクリートでは細骨材率の変化に対しスランプ値はピーク値を有し、これを最適細骨材率¹³⁾と称している。

これに対して、ガラス繊維補強コンクリートのスラン

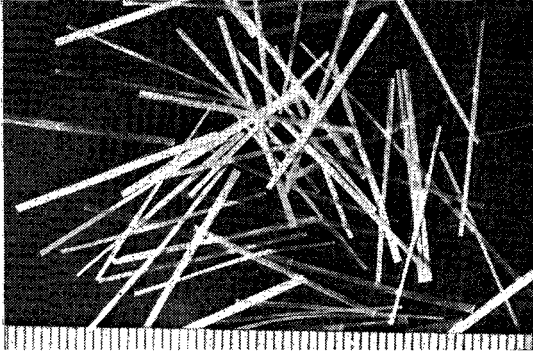


写真-1 バージン繊維

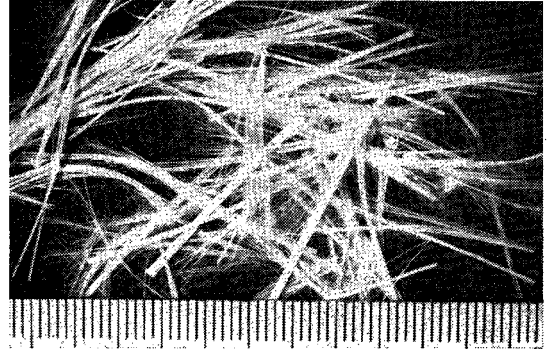


写真-4 重力式ミキサ (ドライミックス1分,
ウェットミックス6分)

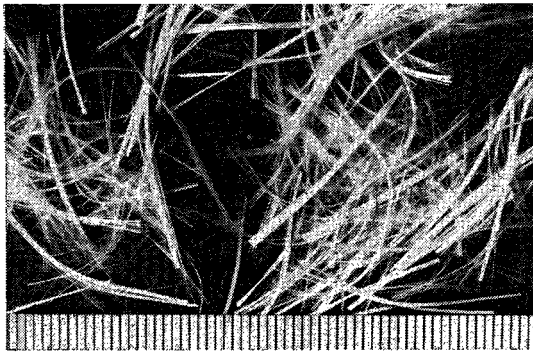


写真-2 強制練ミキサ (ドライミックス1分,
ウェットミックス3分)

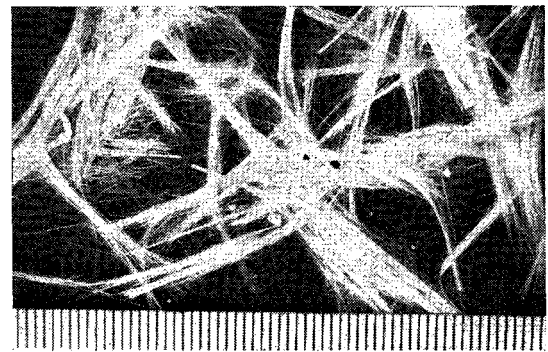


写真-5 重力式ミキサ (ドライミックス1分,
ウェットミックス9分)

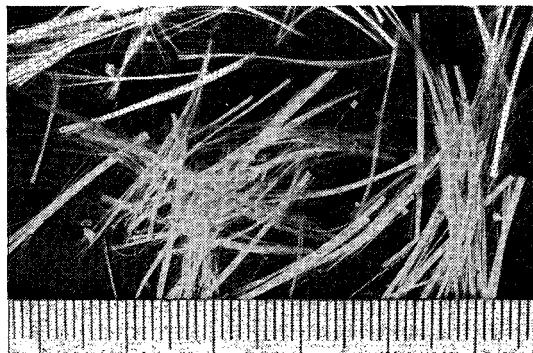


写真-3 重力式ミキサ (ドライミックス1分,
ウェットミックス3分)

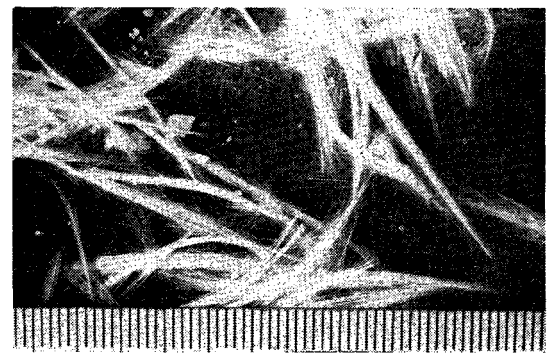


写真-6 重力式ミキサ (ドライミックス1分,
ウェットミックス12分)

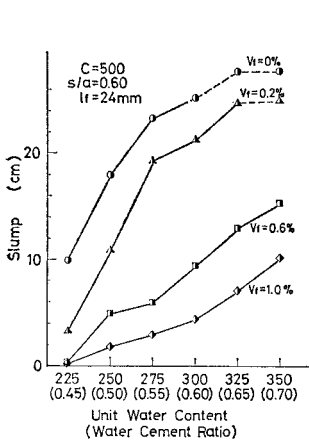


図-2 単位水量の変化によるスランプの変化

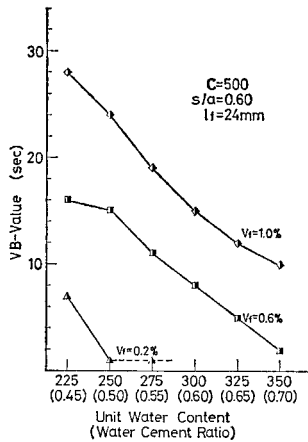


図-3 単位水量の変化によるVB値の変化

ρ値は細骨材率の変化に対し、スランプ値の変化はきわめて鈍感であり、スランプにピーク値は認め難く、その影響は小さいものと考えられる。一方、VB値は細骨材率の増加とともに減少する傾向がある。特に細骨材率が0.4から0.5に増大したとき、VB値の減少は大きくコンシステンシーあるいはワーカビリティの特性がこの点で大きく変化することが明白に伺える。

繊維補強コンクリートにおけるコンシステンシーの低下は表面積効果およびかさばり効果によるとされているが、ガラス繊維混入による骨材表面積の増加を試算したところ表-

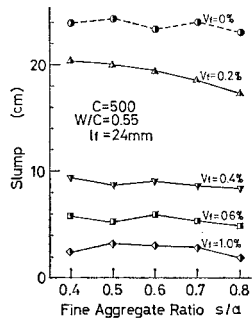


図-4 細骨材率の変化によるスランプの変化

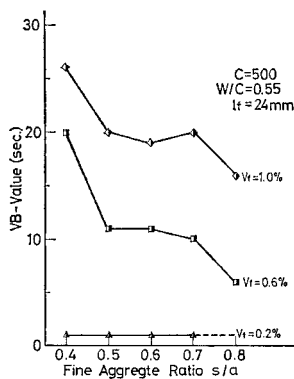


図-5 細骨材率の変化によるVB値の変化

3の結果を得た。ここで用いた骨材表面積の計算法は、ある範囲の半径の間に存在する球形粒子群の比表面積の算定に対し Loudon が示した方法である¹⁴⁾。またガラス繊維の表面積の算定に用いた諸定数は Oakley & Proctor¹⁵⁾ の測定したストランド断面積 0.0735 mm²、周長 2.83 mm を採用した。これらによって計算した比表面積は、粗骨材 0.725 m²/l、細骨材 13.1 m²/l、ガラ

ス繊維 38.5 m²/l である。各構成材料の比表面積を比較するとガラス繊維は細骨材の3倍、粗骨材の50倍程度の比表面積を有している。しかし、実際には繊維の混入による表面積の増加よりむしろ表-4に示すように細骨材率の変化による表面積の増加の方が大きい。これは、ガラス繊維は大きな比表面積を有するものの混入量が少ないため全体としての表面積の増加は小さいに比し、細骨材率のように変動幅の大きいものは結果的に表面積増減にも大きく寄与するためである。しかし、先に述べたように、コンシステンシーの影響面からみると繊維混入率の要素は大きく、細骨材率のそれは小さい。このことは、ガラス繊維補強コンクリートにおけるコンシステンシーの低下は、単純に表面積効果から論ずることはできず、他に繊維相互のからまり効果やガラス繊維とモルタルあるいはセメントペースト間の界面における摩擦効果などについても考慮する必要があることを示唆するものである。

d) 繊維長の影響について

不連続繊維を用い補強される複合材料の力学的特性を論ずる際には、繊維の直径 (d) と長さ (l) の比で表わされるアスペクト比 (l/d) が、重要な意味をもつ。ガラ

表-3 骨材の表面積 (1) (繊維量の変化による)

水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	繊維量 Vf (%)	表面積 (m ² /m ³)			
			粗骨材	細骨材	繊維	計
0.55	0.60	0	158	4 297	0	4 455
		0.2	158	4 270	77	4 505
		0.4	157	4 258	154	4 569
		0.6	157	4 244	231	4 632
		0.8	156	4 231	308	4 695
		1.0	155	4 218	385	4 758

表-4 骨材の表面積 (2) (細骨材率の変化による)

水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	表面積 (m ² /m ³)		
		粗骨材	細骨材	計
0.55	0.40	238	2 859	3 097
	0.50	198	3 576	3 774
	0.60	158	4 297	4 455
	0.70	120	5 004	5 124
	0.80	70	5 725	5 804
	1.00	0	7 152	7 152

表-5 骨材の表面積 (3) (水セメント比の変化による)

水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	表面積 (m ² /m ³)		
		粗骨材	細骨材	計
0.45	0.60	173	4 690	4 763
0.50		166	4 480	4 646
0.55		158	4 297	4 455
0.60		152	4 087	4 239
0.65		143	3 904	4 047
0.70		136	3 707	3 843

表-6 ガラス繊維のアスペクト比

繊維長	12 mm	24 mm	37 mm	50 mm
実質部に対するアスペクト比*	65	129	194	269
ストランドに対するアスペクト比**	39	78	121	163

* A 実質部=φ13 μm×204 本=0.0270 mm²

** A ストランド=0.0735 mm²

*** $d=2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$ として計算

繊維のアスペクト比は、モノフィラメントの径に対してではなく、ストランドの長さや径の比として表わすことが合理的であると考えられる。しかし、ストランド中には、空隙や収束剤が含まれているため、その断面積は一定ではない。したがって、ストランドの換算径も一定しないことになり、ガラス繊維については

厳密な意味でのアスペクト比の定義は難しい。

図-6 に繊維長を変えた場合のスランプ値を示す。また、表-6 は用いたガラス繊維のアスペクト比を示している。図-6 から、繊維が長くなれば、わずかではあるがスランプは低下すること、また繊維が多くなるほどこの傾向が顕著となることが伺える。

(2) 硬化コンクリートに関する検討

a) 水セメント比および繊維混入量の影響について

i) 圧縮強度

圧縮強度と水セメント比あるいはセメント水比の関係を図-7 に示す。図によると、繊維量の増加につれて強度の低下が認められる。また、繊維量0.2%の場合に変

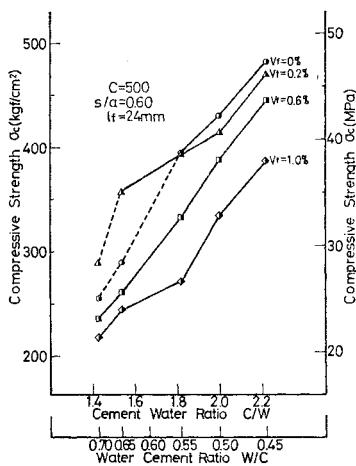


図-7 C/W(W/C) の変化による圧縮強度の変化

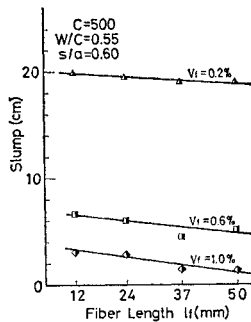


図-6 スランプに及ぼすガラス繊維長の効果

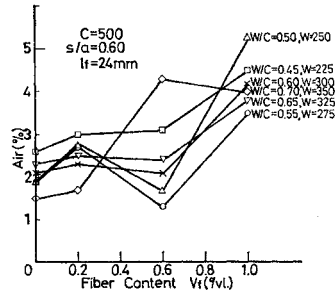


図-8 ガラス繊維混入によるまだ固まらないコンクリートの空気量

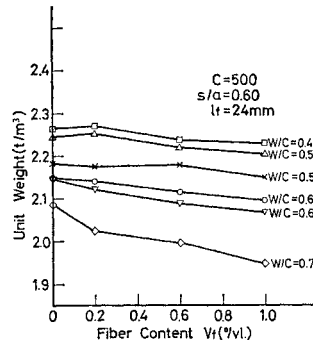


図-9 ガラス繊維混入による硬化コンクリートの単位容積重量の変化

動はあるが圧縮強度とセメント水比の関係はほぼ直線関係にあり、ガラス繊維補強コンクリートでもセメント水比説を準用することができる。ただし、強度を推定する場合は繊維混入率をパラメーターとして強度低下を考慮する必要がある。

一般に、コンクリート中に空気が含まれると圧縮強度が低下するといわれており、強度低下は空気量1%につき5%程度であるとされている¹⁹⁾。図-8 に振動締固め後の実測空気量を、さらに図-9 に硬化コンクリートの単位容積重量を示す。それらによると、空気量についてはばらつきが大きいですが、繊維量の増加とともに若干大きくなる傾向があり、これに伴って単位容積重量は若干減少している。

本実験によると、普通コンクリートに対する繊維補強コンクリートの圧縮強度の低下率は、水セメント比によって異なるが20~40%にも及んでおり、空気量の増加あるいは単位容積重量の減少から推定されるものより、圧縮強度の低下ははるかに大きいものといえる。この理由についてはさらに詳細な研究を必要とするが、一要因として繊維の混入に伴い巻き込まれた空気が、いわゆるエントラップドエアの範ちゅうより大きな気泡(欠陥)としてコンクリート中に存在し、応力の集中などにより強度が低下したことが考えられる。

なお、圧縮強度は W/C が 0.55 以上では繊維量 0.2

% の場合にピーク値を示しているが、このような傾向は、繊維量によって異なるが、繊維混入量 1%wt までについて $W/C=0.74$ のガラス繊維補強コンクリートの圧縮強度を調べた J. Takagi⁸⁾ の実験でも示されている。

ii) 引張強度

次に、引張強度に関する水セメント比および繊維混入量の影響を図-10 に示す。図-10 によると引張強度は水セメント比の減少、また繊維混入量の増加とともに増加し、引張強度に関しては明らかに繊維による補強効果が認められる。すなわち、繊維の混入は、気泡混入による内部欠陥の増加と、ひびわれなどの破損の進展を抑制する二面効果があると考えられるが、引張応力下では後者の補強効果が卓越するものと考えられる。また、図-10 に示す繊維混入量をパラメーターとした引張強度とセメント水比との関係がほぼ平行にあることから明らかなように、繊維補強コンクリートの引張強度には、マトリックスの引張強度に繊維量相応の補強効果が加算的に寄与しているということが出来る。

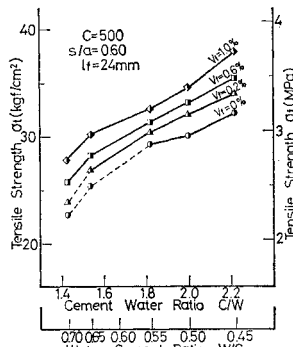


図-10 C/W(W/C) の変化による引張強度の変化

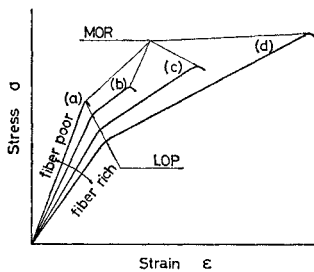


図-11 曲げ試験における応力-ひずみ関係の模式図

iii) 曲げ強度

図-11 は普通コンクリートおよび繊維補強コンクリートが曲げを受けた場合の応力-ひずみ関係を模式的に示したものである。普通コンクリートでは応力とひずみの関係はほぼ線形であり、最大耐力に達したときにひびわれが発生し、その後急激に耐力を失

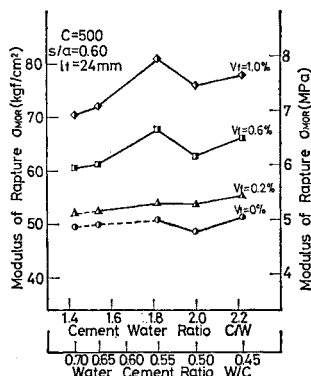


図-12 C/W(W/C) の変化による曲げ破壊係数の変化

い破壊に至る (図中 (a))。しかし繊維補強コンクリートでは普通コンクリートと同程度もしくはそれをわずかに上回るひずみで屈曲点を有しそれ以降は耐力の増加に比べひずみの増加が卓越する (図中 (b), (c), (d))。この屈曲点以下の応力では繰り返し载荷によってもそれほど大きな残留ひずみを生じないため、屈曲点は比例限界 (L.O.P., Limit of Proportion) とみなすことができ、この点を越えるとマトリックスに微細なひびわれが発生しているものと考えられる。繊維補強コンクリートでは、さらに载荷を続けると、ひずみ・耐力ともに増加を示した後に破壊に至るが、応力-ひずみ関係が非線形となるため最大耐力から弾性計算により得られた曲げ強度を曲げ破壊係数 M.O.R. (Modulus of Rapture) と称することとする。

図-12 はこのような定義によるガラス繊維補強コンクリートの曲げ破壊係数 (σ_{MOR}) を調べたものである。この図からわかるように、繊維混入量の増加とともに曲げ破壊係数には著しい補強効果の増大があり、たとえば繊維量 1%vl の混入により普通コンクリートと比べ 80% 程度の強度増加が認められる。しかし、水セメント比が小さくなれば強度もわずかに増加する傾向にあるが、圧縮や引張強度におけるほど明確ではない。

b) 細骨材率の影響

図-13 は細骨材率の変化による圧縮強度の変化を示したものである。繊維量が多くなると圧縮強度が低下することは細骨材率が変化しても同様である。最大圧縮強度を与える細骨材率が存在するが、本実験結果によるとこの値は通常のコンクリートよりかなり大きくなる傾向が認められる。

引張強度は $s/a=0.4\sim 0.8$ の範囲内では細骨材率が大きくなるほど増大する。また細骨材率をパラメーターとした実験シリーズ II においても繊維による補強効果はマトリックスの引張強度に加算的に寄与していることが図-14 より明らかである。

曲げ破壊係数 (σ_{MOR}) と細骨材率に関するシリーズ II の実験結果を図-15 に示すが、水セメント比をパラ

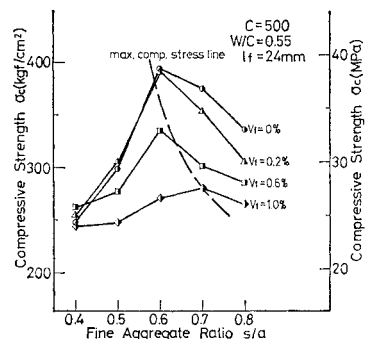


図-13 細骨材率の変化による圧縮強度の変化

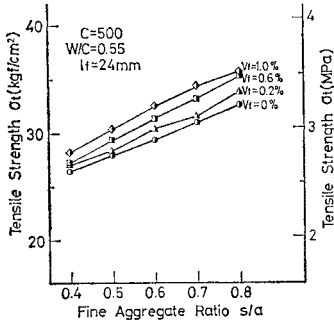


図-14 細骨材率の変化による引張強度の変化

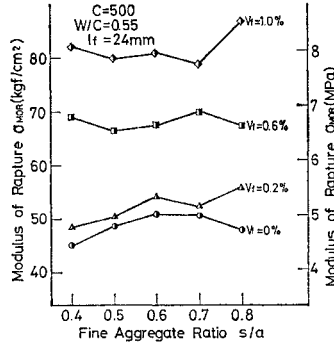


図-15 細骨材率の変化による曲げ破壊係数

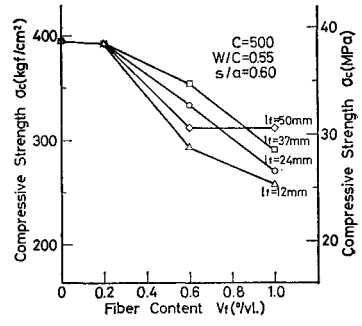


図-16 繊維長の圧縮強度に与える影響

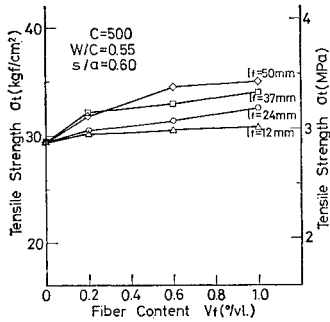


図-17 繊維長の引張強度に与える影響

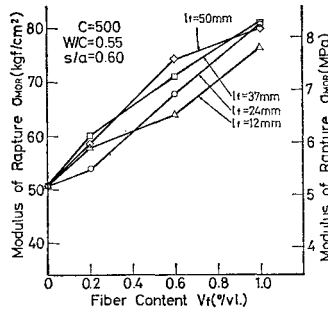


図-18 繊維長の曲げ破壊係数に与える影響

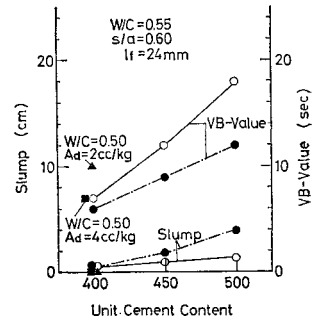


図-19 ガラス繊維補強コンクリートのコンシステンシーに対する高性能減水剤の効果

メーターとしたシリーズⅠの実験結果と同様、曲げ破壊係数への、配合因子による影響は小さく、繊維量が大きな要因となっている。

e) 繊維長の影響について

繊維長と圧縮・引張・曲げ強度との関係をそれぞれ図-16, 17, 18 に示す。ばらつきはあるが全体として、繊維が長いほど、圧縮強度の低下は小さく、逆に引張強度・曲げ強度の増加は大きいといえる。また繊維補強コンクリートの曲げおよび引張における破壊面では、ほとんどの繊維は破断しており、引き抜けた繊維はきわめて少なかった。

(3) 高性能減水剤の効果について

コンクリートの配合設計は、設計基準強度を基本にし、コンシステンシーを考慮して決定される。いま、ガラス繊維補強コンクリートに関して、曲げ破壊係数 70 kg/cm²、スランプ 5 cm という配合条件を設定すると、使用材料は本実験のものと同じとすれば、本研究結果によると一例として $s/a=0.60$, $W/C=0.60$, $V_f=0.8\%$ という配合が得られる。しかし、この場合、所要単位セメント量 500 kg/m³ に対して、単位水量が 300 kg/m³ となり、著しく単位水量の多い配合となっている。このような配合は、ブリージングや材料分離さらに乾燥収縮などの著しい増大を招くおそれも多いため、実用化にあ

たっては高性能減水剤などを適切に用いて単位セメント量・単位水量の低減をはかることが必要となろう。この点を実験シリーズⅣとして検討することとした。

シリーズⅣの実験では $W/C=0.55$, $s/a=0.60$ と一定とし、単位セメント量を実験要因として変化させた。また、繊維混入量は 0%v.l および 1%v.l の 2 種とし、高性能減水剤の添加量はセメント 1 kg につき 2 cc を標準とした。

ガラス繊維補強コンクリートの練りまぜ方法は、実験シリーズⅠ～Ⅲと同一であるが、高性能減水剤は練りまぜ完了 15 秒前に回転中のミキサ内のコンクリートへふりかけ添加した。

図-19 は、単位セメント量とスランプ値および VB 値の関係を示したものである。図-19 中、実線は高性能減水剤を添加しないもの、一点鎖線は添加したものである。ガラス繊維補強コンクリートにおいても、高性能減水剤の添加によりスランプの増大、VB 値の減少をはかることが可能であって、コンシステンシーを改善し得ることは明らかである。

高性能減水剤の使用の有無に関係なく W/C が一定の場合、単位セメント量の減少すなわちセメントペースト量が減少するとスランプは低下するが、VB 値も減少し振動締固め時の流動性が增大することが示される。細骨

材率の変化によるコンシステンシーを調べた実験シリーズIIにおいても、これと同様の傾向が認められたが、実験シリーズIVでは、さらに顕著である。この理由として、スランプはコンクリートの塑性降伏値を測定しているのに対し、VB値は振動による流動化という動的な特性値を測定しているため、などが考えられる。

ガラス繊維補強コンクリートでは、ガラス繊維の均一な分散や、材料分離を防止するという点からは、振動成形時の流動性が特に重要であり、スランプ値でコンシステンシーを表わすと普通コンクリートと異なった特性を表わすことになり、VB値によって表わす方が適当であると考えられる。

本実験結果によると、セメント量が 400 kg/m^3 となると高性能減水剤使用の有無によるスランプ値・VB値の差はほとんど認められなくなっている。さらに、高性能減水剤の効果を確認するため、ガラス繊維補強コンクリートのセメント量を 400 kg/m^3 とした場合に対して、 s/a は同一 (0.60) とし、水セメント比を 0.50 に下げ、高性能減水剤の使用量をセメント 1 kg 当たり 4 cc と 2 倍にしたところ、スランプ値は 0 となったが、VB値を 3 秒減少することができた。すなわち、これはセメント量 400 kg/m^3 、 $W/C=0.55$ のガラス繊維補強コンクリートの VB 値とほぼ同程度であって、VB 値は高性能減水剤の添加量とも密接に関連していることが伺える。

4. 結 論

ガラス繊維補強コンクリートは将来性のある新しいタイプの複合材料であるが、系統的な実験研究例も少なく、その基本的な諸特性については明らかでない点が多い。本論文はガラス繊維補強コンクリートの配合設計上の基礎的資料を得るために、一連の実験的研究を行ったものである。

本研究では耐アルカリガラス繊維を用いたが、セメントコンクリート中でのアルカリ環境の中では長期的な耐久性や靱性が低下するなどの報告¹⁷⁾もあり、今後検討を要する点も残されている。しかし、本研究の成果は、ガラス繊維をはじめストランド状の他の繊維、たとえば、炭素繊維や合成繊維などを用いた繊維補強コンクリートの配合設計にも参考となるものと考えられる。本研究の範囲内で得られた結論をまとめると、以下のとおりである。

(1) ガラス繊維補強コンクリートは、練りませ時に受けるエネルギーが高いほど繊維の解繊・切断が進行するため、均一な練りませが可能な範囲内でできるだけ短時間かつ衝撃の少ない方法で練りませる必要がある。

(2) ガラス繊維補強コンクリートではごく少量のガ

ラス繊維の混入によってもスランプが著しく低下する。

(3) ガラス繊維補強コンクリートにおいてもセメント量が一定であれば単位水量の変化に対しスランプはほぼ線形的に変化する。

(4) ガラス繊維補強コンクリートでは、スランプ値に与える細骨材率の影響はきわめて小さいのに対し、VB値は細骨材率 0.4 から 0.5 の範囲で著しく変化する。

(5) ガラス繊維補強コンクリートでは、繊維量が増加すると圧縮強度が低下することが確認された。この強度低下は気泡の混入が一因すると推定されたが、空気量 1% に対して強度が 5% 程度低下するとされている普通コンクリートの場合よりかなり大きい。

(6) ガラス繊維補強により、引張応力下では顕著な補強効果が認められたが、繊維による強度の増加量はマトリックス効果に加算的である。

(7) 曲げを受ける繊維補強コンクリートの補強効果は引張を受ける場合よりさらに著しい。しかし、曲げ強度そのものは繊維混入率以外の配合要因の影響をあまり受けない。

(8) ガラス繊維長が 12~50 mm の範囲内では繊維が長くなるとコンシステンシーはわずかに低下する。また引張強度・曲げ強度に関しては繊維長が長くなると補強効果もわずかに大きくなるようである。

(9) ガラス繊維補強コンクリートでは、 W/C を一定として単位セメント量を減少させるとスランプ値は低下する。しかし、これと同時に VB 値も減少するためその振動成形におけるワーカビリティは向上するものと考えられる。

(10) ガラス繊維補強コンクリートに対する高性能減水剤の添加効果は、スランプ値にはほとんどみられないが、VB 値の減少にはかなり有効である。

本研究では、ガラス繊維補強コンクリートの配合設計上での基礎的資料を得ることを大きな目的としたため、力学的な面は強度を中心に取扱った。先に述べたように、ガラス繊維混入が曲げ強度の改善に大きな効果を有しており、本研究の結果をもとにして適正配合を設計し曲げ強度に主点を置いた構造利用をはかることが有効であるとえられる。

なお、力学的な面では曲げ靱性がきわめて大きいこともすでに確認されており¹⁸⁾、靱性を利用することが合理的かつ有効的であることはいうまでもなく、今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 河野 清：繊維補強コンクリートについて，材料，Vol. 26, No. 290, pp. 1061~1071, 1977-11.
- 2) 小林一輔・岡村雄樹：所要のコンシステンシーを得るた

- めの鋼繊維補強コンクリートの配合設計法，土木学会論文報告集，No. 296，pp. 111～119，1980-4.
- 3) 日本トンネル技術協会：スチールファイバーコンクリートに関する調査研究報告書，1980.3.
 - 4) Majumdar, A.J. and J.R. Ryder : Glass-Fiber Reinforcement of Cement Products, Glass Technology, Vol. 9, pp. 78～84, 1968.
 - 5) 三島清敬：耐アルカリガラス繊維並びにガラス繊維補強セメントの製造，コンクリート工学，Vol. 15, No. 3, pp. 22～25.
 - 6) 入江正教：ガラス繊維補強セメントの特性と応用，コンクリート工学，Vol. 15, No. 3, pp. 26～30, 1977-3.
 - 7) Marsh, H.N., Jr. and L.L. Clarke, Jr. : Glass Fiber Reinforced Cement Base Materials, ACI SP-44, pp. 247～264, 1974.
 - 8) Takagi, J. : Some Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, pp. 93～111, 1974.
 - 9) 林 毅 編：複合材料工学，日科技連，p. 3, 1971.
 - 10) Komloš, K. : Testing of Fiber Reinforced Concretes in their Fresh States, RILEM symposium 1978, pp. 45～56, 1978.
 - 11) ACI Committee 544 : State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, Concrete International Design & Construction, Vol. 4, No. 5, pp. 9～27, 1982.5.
 - 12) Romualdi, J.E. and J.A. Mandel : Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Length of Wire Reinforcement, Jour. of ACI, Proc. Vol. 61, No. 6, pp. 657～671, 1964.6.
 - 13) たとえば，日本道路公団：土木工事施工要領，pp. 4～29, 1978.4.
 - 14) Loudon, A.G. : The Computation of Permeability from Simple Soil Test, Geotechnique, Vol. 3, pp. 165～183, 1952 and 1953.
 - 15) Oakley, D.R. and B.A. Proctor : Tensile Stress-Strain behavior of Glass Fiber Reinforced Cement Composites, Fiber-reinforced Cement and Concrete, Rilem Symposium, pp. 347～359, 1975.
 - 16) たとえば，岡田 清・六車 照 編：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，p. 623, 1981.
 - 17) BRE : Properties of GRC—ten years results, BRE information IP 36/79, 1979.11.
 - 18) たとえば，真嶋光保・三瀬 貞：ガラス繊維補強コンクリートと普通コンクリートとの合成構造の靱性，第38回土木学会年講概要集V部門，pp. 353～354, 1983.9.

(1983.1.20・受付)