

論文

[1186] 短繊維補強高流動モルタルのレオロジー性状

畑義行^{*1}・築地光雄^{*2}・竹内好雄^{*3}・森博嗣^{*4}

1. まえがき

短繊維補強コンクリートの中で、プレミックス法によるガラス繊維補強コンクリート（GRC）は、マトリックスであるモルタルにガラス繊維を混入した複合材料であり、繊維の添加量を適切に選択すれば高い曲げ剛性・靱性ととも、薄肉・軽量化を可能とし、マトリックスの短所を補った材料である。しかし、GRCは数種の比重の異なる材料の複合系であるため、“流動性”、“分離抵抗性”といった施工性に関わる性質が悪くなる欠点があり、この点に関する材料配合面からの改善が課題となる。コンクリートの施工性に関しては、主に骨材に砂利、砂を使用した普通コンクリートを対象とした高流動コンクリートの研究 [1] が盛んに行われ、実用化に至っているが、繊維補強コンクリートを対象とした研究例は少なく、配合、製造条件と流動性、分離抵抗性の関係については、スランプ試験、フロー試験などの結果が報告されているのみである [2] [3]。

本研究は、プレミックスGRCの配合面からの施工性向上を目指し、その評価手法としてレオロジー定数を取り入れ、GRCのレオロジー性状と流動特性に及ぼす各種配合材料の影響を実験的に検証したものである。

2. 実験概要

本実験では各種配合材料を変えた時のGRCの流動性、分離抵抗性について表-1の項目と、硬化後基材の特性として曲げ強度の測定を行った。

2. 1 実験方法

2. 1. 1 球引き上げ試験

図-1に示す装置で、試料中の鋼球を荷重 P_n で引き上げた時の引き上げ速度 V_n を測定した。 P_n 、 V_n よりモルタル、およびGRCを理想的なビンガムモデルと仮定し、レオロジー定数（降伏値、塑性粘度）を求めた [4]。

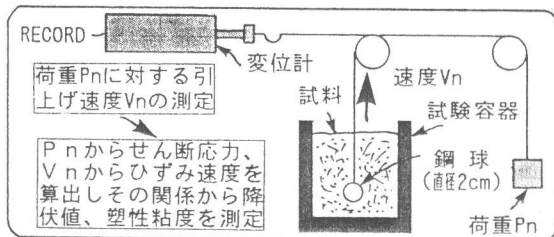


図-1 球引き上げ試験

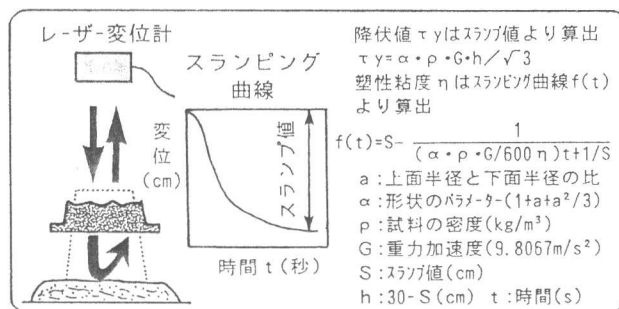


図-2 スランプ試験

- *1 積水ハウス（株）技術本部材料研究室（正会員）
- *2 積水ハウス（株）技術本部材料研究室課長、（正会員）
- *3 日本電気硝子（株）ARG開発室
- *4 名古屋大学工学部建築学科助教授、工博（正会員）

2. 1. 2 スランプ試験

図-2に示すようなJIS A 1101に規定されるスランプコーンとレーザー変位計からなる装置を使用し、スランピング挙動とスランプフロー値を測定するとともに、その測定値より降伏値、塑性粘度を算出した[5]。

2. 1. 3 充填性試験[1]

図-3に示す試験容器の片側にGRCを流し込み、一定高さ充填後ゲートを開け、反対側に流れ静止した時点の高さから充填性を評価した。

また両側のGRC中のガラス繊維の重量割合を洗出し法で求め、その比率を分離抵抗度として、充填時のモルタルとガラス繊維の分離抵抗性を評価した。

2. 1. 4 曲げ強度試験

曲げ強度の試験体サイズは幅5cm×長さ27.5cm×厚さ1.5cmとし、打設後40℃・8時間の蒸気養生を施した後、材令14日強度を測定した。試験方法は日本GRC工業会の曲げ試験方法に従い、厚さ・スパン比=15、載荷速度2mm/分とした。

2. 2 実験要因と使用材料

実験では表-2の基本配合を用い、モルタルのレオロジー性状、およびガラス繊維の種類・長さを変える目的で表-3の実験要因を設定した。使用材料の種類は表-4に示す。

2. 3 実験条件

試料の製作、および試験は20℃の実験室で行い、試料の混練にはオムニミキサー(30リットル)を使用した。セメント・けい砂・分離低減材を10秒、水・混和剤を投入し2分、最後にガラス繊維を投入し20秒混練した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 コンシステンシー試験結果

3. 1. 1 モルタルの評価

(1) けい砂粒度の影響

図-4より明らかなように、けい砂粒度が細くなるほど、降伏値、塑性粘度は増大する。これは配合モルタル中の粒子の総表面積の増加による吸着水の増加、また粒子間の摩擦抵抗の増加による。

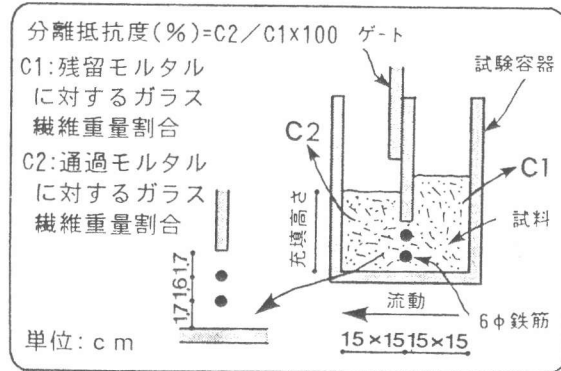


図-3 充填性試験

表-2 実験基本配合

GRCセメント	C
けい砂	C×75%
水	C×40%
減水剤	C×3%
AE剤	C×0.015%
遅延剤	C×0.6%
耐アルカリガラス繊維	モルタル×2%

表-3 実験要因と水準

実験要因	配合因子	水準			
		5号	6号	7号	
モルタルのレオロジー性状	①けい砂粒度	粗い 細かい			
	②分離低減材添加量*1	0	0.45%	0.9%	1.35%
ガラス繊維の種類・長さ	③ガラス繊維種類	集束剤種類		アクリル系(A) 酢酸ビニル系(V)	
	③ガラス繊維種類	集束剤量*2		1.0% 1.5% 2.0%	
	*3	単繊維径		13.5μ 18μ	
	④ガラス繊維長さ	13mm 19mm 25mm			

*1:セメントに対する重量割合(外割り)

*2:ガラス繊維中の集束剤の重量割合(内割り)

*3:以後表中ガラス繊維のうち次の2種類をP、Qと略す

種類	集束剤 *4 種類	集束剤量	単繊維径
P	アクリル系(A)	2.0%	18μ
Q	酢酸ビニル系(V)	2.0%	13.5μ

*4:集束剤とはガラス繊維フィラメントを束ねてストランドとするためのバインダー

表-4 使用材料

材料名	種類(主成分)
セメント	GRCセメント
けい砂	平均粒径(mm):0.96(5号), 0.51(6号), 0.26(7号)
高性能減水剤	高縮合トリアジン系化合物
AE剤	変性アルキルアミドカルボキシル系界面活性剤
分離低減材	ポリアクリルアミド系増粘材

(2) 分離低減材の影響

図-5より明らかなように、分離低減材の添加によって、降伏値、塑性粘度は大きくなる傾向にある。降伏値が添加量0.9%程度で頭打ちとなるのに対して、塑性粘度は添加量0.9%以上でも増大している。

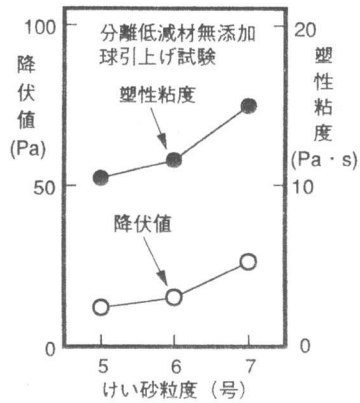


図-4 けい砂粒度とレオロジー定数の関係

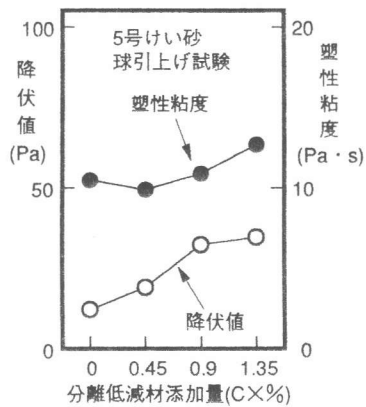


図-5 分離低減材とレオロジー定数の関係

3. 1. 2 GRCの評価

(1) けい砂粒度の影響

①流動性への効果

図-6によれば、けい砂粒度が細くなるほど、球引上げ試験・スランプ試験より求めたGRCの降伏値は大きくなる。GRCの降伏値は、粒度が細かいほどモルタルに比較して大きくなるが、これは混練時の粒子と繊維の摩擦により繊維の解繊が進むためと考えられる。スランプ値より算出した降伏値は球引上げ試験より求めた降伏値に比較して大きい値をとるが、これはスランプ試験時の広がりをもった円錐台の形状において底面に上部の自重が均等に分散するといった算出時の計算仮定が成り立たないためである[5]。また図-7より、降伏値が大きくなることにより、けい砂粒度が細かいほどGRCは流動・変形しにくくなり、スランプ値、スランプフロー値、充填高さがいずれも小さくなることわかる。この傾向は6号けい砂と7号けい砂の間で特に顕著である。

②分離抵抗性への効果

図-8より明らかなように、GRCの塑性粘度は、5号けい砂と6号けい砂の間では変わらないが、7号けい砂で大きくなり、流動速度は遅くなる。スランプ試験より算出した塑性粘度は球引上げ試験より求めた塑性粘度に比較して小さい値をとるが、これは、図-6に示したとおり降伏値が大きく算出されるためである。分離抵抗性は5号と6号の間では変わらないと判断できる。

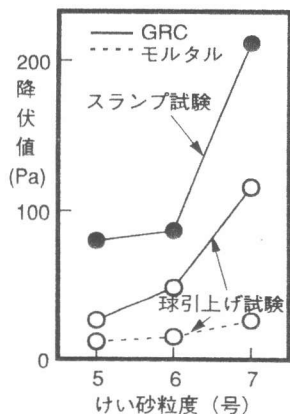


図-6 けい砂粒度と降伏値の関係*1

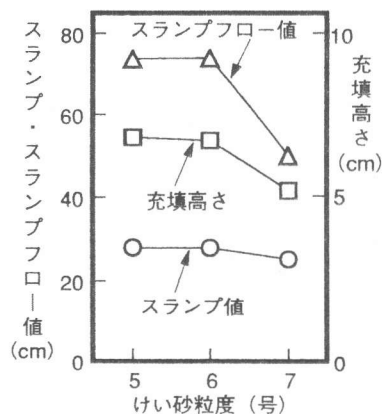


図-7 けい砂粒度と流動性の関係*1

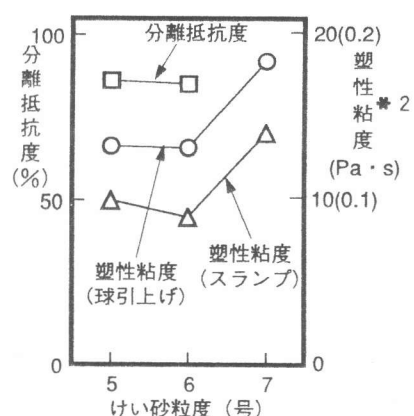


図-8 けい砂粒度と分離抵抗性の関係*1

*1:

分離低減材	無添加
ガラス繊維	種類 P, 19mm

*2: 座標軸 () 数値はスランプ試験より算出した塑性粘度

(2) 分離低減材の影響

①流動性への効果

図-9によれば、分離低減材の添加によりGRCの降伏値は大きくなり、添加量0.9%以上でその効果はほぼ一定となる。また、図-10に示すように、降伏値の増大によってスランプ値、スランプフロー値は低下するが、モルタルとガラス繊維の分離の影響を受ける充填高さはほぼ一定となる。これは、図-11に示すとおり、分離低減材の添加量が多くなるほどモルタルの粘性が増すことで分離抵抗性が向上し、充填性試験容器のゲート付近のガラス繊維だまりがなくなるためと考えられる。

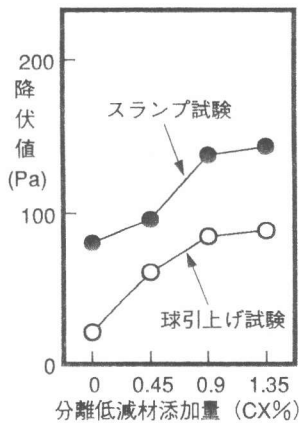


図-9 分離低減材と降伏値の関係*1

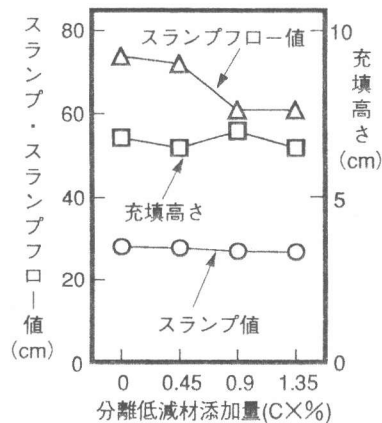


図-10 分離低減材と流動性*1

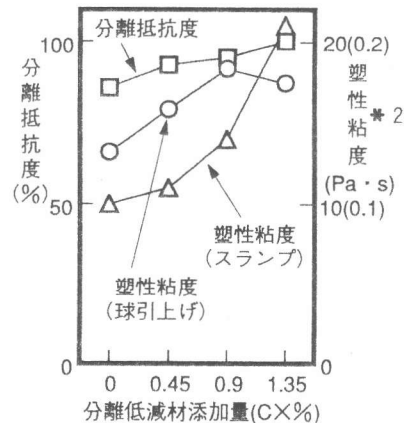


図-11 分離低減材と分離抵抗性*1

*1:

けい砂粒度	5号
ガラス繊維	種類P, 19mm

*2: 座標軸 () 数値はスランプ試験より算出した塑性粘度

②分離抵抗性への効果

図-11によれば、分離低減材を添加することによって、GRCの塑性粘度は大きくなり流動速度は遅くなる。また、図-12より明らかなように、けい砂粒度を細かくするか、分離低減材を添加することでモルタルの粘性は増加するが、分離抵抗性には後者の方が大きく影響する。

(3) ガラス繊維種類・長さの影響

①流動性への効果

繊維長さ19mmでガラス繊維の種類を変えた時の流動性の測定結果を表-5に示す。ガラス繊維を集束する集束剤の量が多いほど、また集束剤の種類としてAを用いた方が、繊維の集束力は強く混練により解繊しにくいいため、降伏値は小さく、スランプ値、スランプフロー値は大きくなる。また単繊維径が太い方が単位重量当りの繊維本数は少なくなり、流動性は良好となる傾向がある。

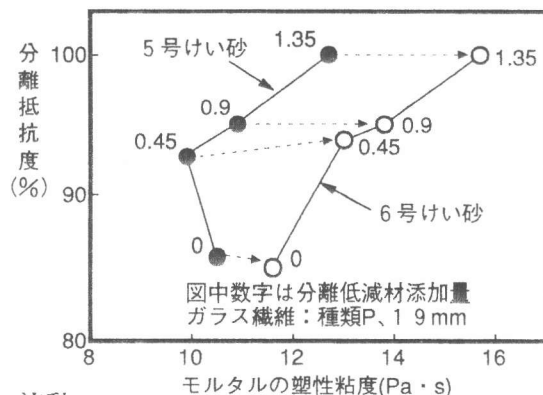


図-12 モルタルの塑性粘度と分離抵抗性の関係

表-6に示すようにガラス繊維長に対しては、繊維長が長くなるに従い、繊維どうしのからみあいが生じ、GRCの降伏値は大きくなり、スランプ値、スラン

プフロー値、充填高さは小さくなる。またこの傾向は、13mmと19mmの間に比較して、19mmと25mmの間に顕著となる。球引上げ試験より求めた降伏値とスランプ値の関係を図-13に示す。文献[5]よりGRCの比重 $\rho=2.0$ 、スランプ試験時の上面と下面の比 $a=1/6$ と仮定すると、降伏値 τ_y とスランプ値 S の関係は

$$S = 30 - (\tau_y / 45.1)$$

となり図-13中の1点鎖線で示される。実験結果よりGRCの降伏値が大きくなるほどスランプ値は低下するが、ガラス繊維長さが長いほど、(図中実線で結んだ3点の左から13mm、19mm、25mm)特にガラス繊維種類Qの25mmが、降伏値の増大によるスランプ値の減少量が大きくなる。これらは、表-7に示すとおり、分離抵抗度が小さくモルタルとガラス繊維が分離を起こすため、スランプ試験時の変形・流動に影響しているものと考えられる。

②分離抵抗性への効果

表-7に示すように、ガラス繊維種類としては集束力が強く、単繊維径が太く単位重量あたりの繊維本数が少ないPの方が塑性粘度は小さく、流動速度は速くなるとともに、ゲート付近における繊維だまりが少なくなり、分離抵抗度は大きくなる。ガラス繊維長が長くなるほど、GRCの塑性粘度は大きくなり、流動速度は遅くなる。また、モルタルとガラス繊維は分離し易くなり、分離抵抗度は小さくなる。

表-5 ガラス繊維種類と流動性の関係*1

単繊維径	集束剤種類	集束剤量(%)								
		1.0			1.5			2.0		
		降伏値(Pa)	スランプ値(cm)	スランプフロー値(cm)	降伏値(Pa)	スランプ値(cm)	スランプフロー値(cm)	降伏値(Pa)	スランプ値(cm)	スランプフロー値(cm)
13.5 μ	A	488	15.4	28.7	394	21.7	34.8	226	23.4	41.5
	V	469	17.5	30.3	400	20.8	32.5	252	24.4	43.0
18 μ	A	468	18.4	32.0	150	25.7	47.0	104	26.7	57.0
	V	479	17.6	29.8	160	24.0	42.2	167	26.1	51.3

降伏値は球引上げ試験により求めた数値

表-6 ガラス繊維長さと流動性の関係*2

ガラス繊維種類	ガラス繊維長さ	降伏値(Pa)	スランプ値(cm)	スランプフロー値(cm)	充填高さ(cm)
P	13mm	19.5	28.1	78.0	8.0
	19mm	26.6	28.1	73.8	6.8
	25mm	36.1	27.3	65.7	4.1

降伏値は球引上げ試験より求めた数値

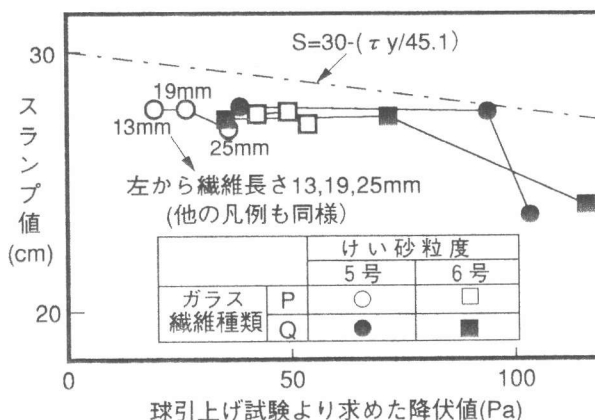


図-13 降伏値とスランプ値の関係

表-7 ガラス繊維種類・長さと分離抵抗性の関係*2

ガラス繊維種類	ガラス繊維長さ	塑性粘度(Pa・s)	分離抵抗度(%)
P	13mm	10.4	100
	19mm	13.2	86
	25mm	13.2	71
Q	13mm	13.4	
	19mm	13.2	77
	25mm	16.1	

塑性粘度は球引上げ試験より求めた数値

*1: けい砂粒度 5号
分離低減材 Cx0.9%

*2: けい砂粒度 5号
分離低減材 無添加

3.2 曲げ強度試験結果

曲げ強度の測定結果を図-14に示す。曲げ強度は、ガラス繊維長さの影響を受け、繊維長さ13mmでは、繊維長さ19mm・25mmに比較して、曲げ強度は小さくなる。その他の配合要因であるけい砂粒度、分離低減材、ガラス繊維種類などの影響は特にない。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) GRCの配合条件として、けい砂粒度の粗い5号、分離低減材の無添加、またガラス繊維は集束力が強く解繊しにくい集束剤で集束し単位重量当りの繊維本数が少なく繊維長が短いもの、などが降伏値は小さく流動性は良好となる。

2) モルタルの塑性粘度は、けい砂粒度が細かいほど、また分離低減材の添加により増大するが、GRC中のモルタルとガラス繊維の分離抵抗度には後者の方が大きく寄与する。ガラス繊維は集束力が強く解繊しにくい種類で単位重量当りの繊維本数が少なく繊維長が短い方が分離抵抗度は優れ、充填高さは増大する。またガラス繊維種類・長さを変えることでGRCの塑性粘度を増大することができるが、その場合はモルタルとガラス繊維の分離抵抗度は低下する。

3) GRCのスランプ値・スランプフロー値・充填高さは、降伏値の影響以外に、モルタルとガラス繊維の分離の影響を受ける。特に分離低減材の添加により降伏値が増大しても、モルタルとガラス繊維が分離しにくくなり充填性は向上する。

4) ガラス繊維はその集束剤量が多い程、またアクリル系の集束剤を用いた場合の方が解繊しにくいいため、GRCの流動性、分離抵抗性は良好となる。

5) ガラス繊維長さを短くすることは流動性向上には効果的であるが、同一条件下におけるGRCの曲げ強度は、繊維長さが短い13mmでは19mm、25mmに比較して小さくなる。

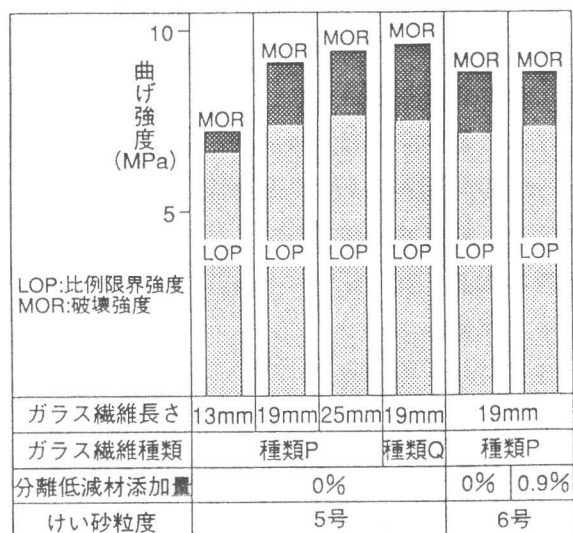


図-14 曲げ強度測定結果

参考文献

- 1) 例えば 新藤竹文・松岡康訓・S.Tangtermsirikul・坂本淳：超流動コンクリートの基礎物性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13-1、pp.179～184、1991
- 2) 三瀬貞・眞嶋光保・出口智一：ガラス繊維補強コンクリートの流動性に及ぼす各種要因の影響について、セメント技術年報、No.35、pp.506～509、1981
- 3) 堀口邦宏・横田博・鈴木忠彦・若宮隆：高流動プレミックスGRCに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15-1、pp.963～968、1993
- 4) 森博嗣・谷川恭雄：フレッシュコンクリートの各種コンシステンシー試験方法に関するレオロジー的考察、日本建築学会構造系論文報告集、No.337、pp.16～26、1987
- 5) 谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・小村理恵：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的考察、コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集、pp.43～48、1992