

技術資料

各種セメントを用いた GRC の特性

日本電気硝子株式会社 ガラス繊維事業部 技術部 西堀 真治

1. はじめに

ガラス繊維補強コンクリート（GRC）は、その軽量性、造形性の良さから建築材料として幅広く使用され、その配合についても様々な検討がなされてきた。

これまで混和材については、リサイクル材を中心に調査を行い、本シンポジウムで報告してきた^{1), 2)}が、セメントについては、普通ポルトランドセメント以外のセメントの研究例がほとんどなかった。

そこで、高ビーライト系セメントで高流動、高強度コンクリートに使用され、最近注目されている低熱ポルトランドセメント、マスコンクリートで使用されている中庸熱ポルトランドセメントとポゾラン物質である高炉スラグを混合した高炉セメントを GRC に使用した時の各特性について調査した。

2. 試験方法

2.1 使用材料

本研究で取り上げたセメントの諸物性と化学成分を表 1 に示す。また混和材として取り上げたスラグとシリカヒュームの諸物性と化学成分を表 2 と表 3 に示す。セメントは JIS R 5210 のポルトランドセメントと JIS R 5211 の高炉セメント B 種に、スラグは JIS A 6206 の高炉スラグ微粉末 4000 に適合するものを使用した。混和剤として使用した材料の主成分は、表 4 に示す。

上記の材料のほかに、珪砂 6 号（S、0.15～0.6mm）、耐アルカリ性ガラスロービング（GF、番手 2500g / 1000m）を使用した。

表 1 セメントの諸物性と化学成分

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	化学成分(wt%)				組成化合物(wt%)			
				MgO	SO ₃	Na ₂ O	Cl ⁻	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通ポルトランドセメント(NC)	3.16	3350	1.96	1.38	2.00	0.60	0.009	52	24	9	9
低熱ポルトランドセメント(LC)	3.22	3360	0.87	0.83	2.31	0.36	0.004	29	54	3	9
中庸熱ポルトランドセメント(MC)	3.21	3200	0.73	1.31	2.01	0.54	0.004	43	36	4	12
高炉セメントB種(BBC)	3.04	3820	1.72	3.24	1.92	0.52	0.005	---	---	---	---

表 2 スラグ(SL)の諸物性と化学成分

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量(%)	化学成分(wt%)			
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
2.91	4190	0.08	34	15	42	6

表 3 シリカヒューム(SF)の諸物性と化学成分

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	平均粒子径 (μm)	化学成分(wt%)	
			SiO ₂	Cl
2.2	200000	0.15	95.6	0.05

表 4 各混和剤とその主成分

使用材料名	主成分
高性能AE減水剤(R)	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE剤(AE)	変性ロジン酸化合物系
収縮低減剤(SR)	低級アルコールのアルキレンオキシド付加物

2.2 試験体の作成

混和剤を添加した水、骨材、混和材、セメントの順で 30 リットルのオムニミキサーに投入して、高速で 60 秒間混練することでモルタルを得た。

ダイレクトスプレー法により、31mm にカットしたロービングがモルタルに対して 5 質量%になるように調整して成形を行い、試験体を作製した。成形翌日に試験体を脱型し、温水浸漬試験或いは曲げ試験を実施するまで 20℃、60%RH の養生室に試験体を保管した。

2.3 比重と空気量

JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法により、混練直後のモルタルの空気量を測定した。モルタル生比重は、まだ固まらないモルタルそのものの体積と質量から求めた。

2.4 フロー値

モルタルのフロー値は、内径55mm×高さ50mmのフローコーンにモルタルを充填し、コーンを持ち上げた時に広がったモルタルの最大直径とそれに直交する直径を測定し、平均値を求めた。

2.5 曲げ試験

表5の条件で曲げ試験を行なった。

表5 曲げ試験条件

試験体寸法(mm)	曲げスパン(mm)	載荷速度(mm/分)	載荷方式	繰り返し数
250×50×10	200	5	中央集中載荷	6

2.6 温水浸漬促進試験

材令28日から70℃の温水に試験体を浸漬することにより、促進試験を行なった。浸漬後、2.5と同じ条件で曲げ試験を行い、耐久性を評価した。GRCの場合、70℃温水浸漬1日で東京の屋外暴露1年に相当するといわれている³⁾。

2.7 乾燥収縮率

JIS A 1129-2モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法-第2部：コンタクトゲージ方法に準じ、GRCの乾燥収縮率を測定した。試験体は250×50×10mmとし、基長を200mmとして測定を行なった。基長の測定は材令1日で行い、その後20℃,60%RHの条件室に保管し、一定期間ごとに90日まで長さを測定し、基長からの乾燥収縮率を測定した。

2.8 凍結融解試験

凍結融解試験方法は、JIS A 6204の付随書2に準じた水中凍結水中融解法を採用した。ただし耐久性評価は相対動弾性係数ではなく、各サイクルで曲げ試験を行い、曲げ弾性率の保持率と外観観察により評価を行なった。

- (1) 凍結融解試験方法：水中凍結水中融解法
(温度：-18℃～+5℃、1サイクル所要時間：約4時間、
サイクル数：300回)

- (2) 試験体寸法：200×45×10mm

- (3) 試験体投入方法

試験体は、材令28日まで20℃、60%RHの養生室で保管した。図1と図2のようにコンクリート角柱に試験体を貼り付け、温度管理用ダミーコンクリートと同じ寸法の100×100×400mmの試験体角柱を作製した。この角柱を試験体容器に入れ、凍結融解試験機に投入した。

- (4) 試験体の取り出し

100サイクルごとに試験体角柱を取り出し、所定の試験体を外し、20℃、60%RHの養生室で1週間保管し、曲げ試験を行なった。

- (5) 曲げ試験

材令28日と所定のサイクルを終了した試験体に対し、曲げスパン160mm、載荷速度2mm/分の中央集中載荷曲げ試験を行い、曲げ弾性率を測定した。なお試験体は、各5体を測定した。

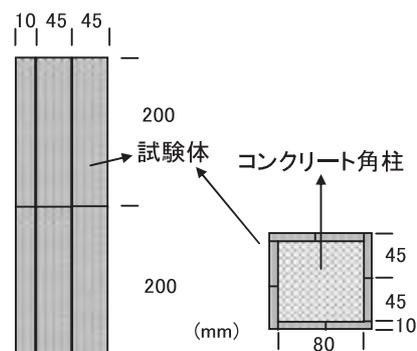


図1 試験体角柱
立面図

図2 試験体角柱
平面図

3. 結果および考察

実験は、3つのシリーズに分けて行った。シリーズ1ではセメントの種類がGRCの各特性に及ぼす影響を通常配合において検討を行い、シリーズ2では一昨年に検討を行ったスラグとシリカヒュームを使用したスラグ置換配合で同様の検討を行った。シリーズ2の結果からシリーズ3では、脱型強度、乾燥収縮率と凍結融解性能の改善を試みた。

3. 1 通常配合におけるセメントの影響 (シリーズ1 : S1)

3. 1. 1 GRC 配合とモルタルのフレッシュ特性 (S1)

表6 にシリーズ1のGRC 配合およびモルタルの特性を示す。表中のフローはモルタルのフロー値 (mm) を、生 ρ はモルタルの生比重を、エアはモルタルの空気量 (%) を示す。

ポルトランドセメントの中で最もフロー値が大きかったのは低熱セメントで、次いで中庸熱セメントが大きく、普通セメントは最も小さい値を示した。これは普通セメントと比較して中庸熱セメント、低熱セメントは、高性能 AE 減水剤などの混和剤を吸着しやすいアルミネート相が少ないため、混和剤への影響が少なく、高流動化したと思われる⁴⁾。

高炉セメントは混入されているスラグの影響でポルトランドセメントより大きなフロー値を示し、比重も小さくなった。

表6 GRC 配合とモルタルのフレッシュ特性 (S1)

No.	1	2	3	4
NC	100			
LC		100		
MC			100	
BBC				100
S	100	100	100	100
W	32	32	32	32
R	0.7	0.7	0.7	0.7
GF	5 質量% (対モルタル)			
フロー	158	173	165	185
生 ρ	2.14	2.13	2.15	2.06
エア	6.3	5.9	6.2	5.5

3. 1. 2 曲げ強度特性 (S1)

図3 と図4 に曲げ試験結果を示す。材令1日或いは28日における低熱セメントと高炉セメントの曲げ強度特性は、普通セメントより劣った。ただし材令1日の比例限界強度は約7MPaを示し、翌日脱型には問題なかった。中庸熱セメントは、普通セメントとほぼ同等の曲げ強度特性を示した。温水浸漬による促進養生後の強度特性は、全てのセメントで普通セメントと同様の傾向を示した。

ポルトランドセメント中のエアライトが少なく、ビーライトが多い中庸熱セメントや低熱セメントは、やはり初期強度特性が発現しにくく、特にエアライトが少ない低熱セメントは、材令1日の強度が大幅に低下する。しかし促進養生を行い、水和を進めることで、この強度差は見られなくなる。

高炉セメントはボゾラン物質であるスラグを混入しているため、初期強度は低いが、その後の促進養生により、この強度差は見られなくなる。

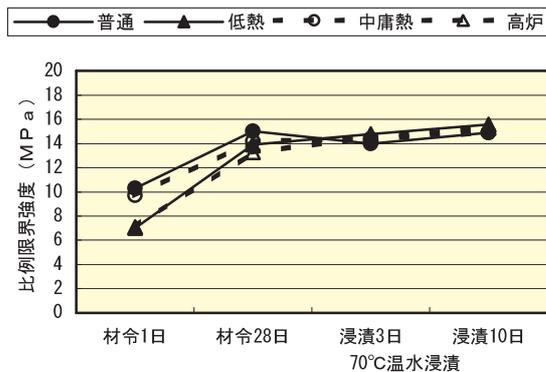


図3 セメントの種類と比例限界強度の関係 (S1)

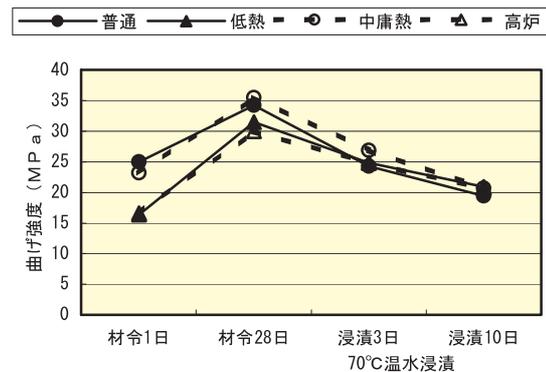


図4 セメントの種類と曲げ強度の関係 (S1)

3. 1. 3 乾燥収縮率 (S1)

図5 に乾燥収縮率の測定結果を示す。普通セメントと比較して、中庸熱セメントと高炉セメントの乾燥収縮率は小さくなる傾向を示し、低熱セメントが最も小さい乾燥収縮率を示した。

ポルトランドセメント中で乾燥収縮率に影響の大きいエアライトが少なく、影響の少ないビーライトが多い中庸熱セメントや低熱セメントの乾燥収縮率は小さくなる傾向を示した。また高炉セメントもボゾラン物質であるスラグが混入されているため、乾燥収縮率は小さくなった。

3. 1. 4 凍結融解性能 (S1)

図6 に凍結融解試験後の曲げ弾性率の保持率を示す。普通セメントと比較して、中庸熱セメント、高炉セメント、低熱セメントの順に曲げ弾性率保持率は小さくなる傾向を示し、凍結融解性能が悪化した。低熱セメントは、200サイクルからスケールが多発し、曲げ弾性率保持率が大きく低下した。

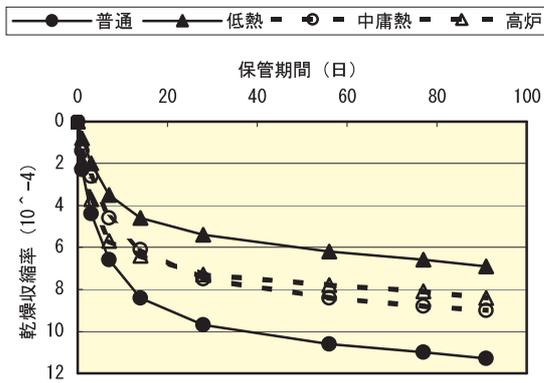


図5 セメントの種類と乾燥収縮率の関係(S1)

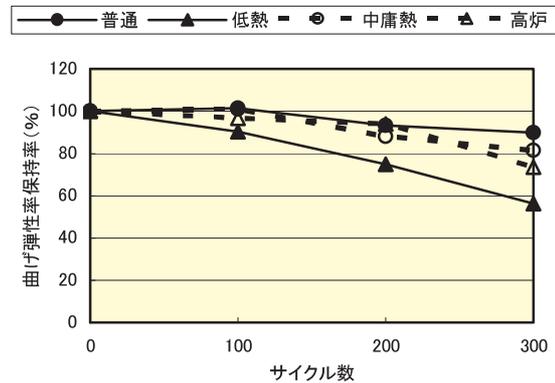


図6 セメントの種類と凍結融解性能の関係(S1)

3. 2 スラグ置換配合におけるセメントの影響 (シリーズ2 : S2)

3. 2. 1 GRC 配合とモルタルのフレッシュ特性 (S2)

表7にシリーズ2のGRC配合およびモルタルの特性を示す。シリーズ1の通常配合の結果と同様に、低熱セメントのフロー値が最も大きく、次いで中庸熱セメント、普通セメントの順にフロー値は小さくなった。

表7 GRC配合とモルタルのフレッシュ特性(S2)

No.	5	6	7
NC	30		
LC		30	
MC			30
SL	70	70	70
SF	10	10	10
S	100	100	100
W	32	32	32
R	0.7	0.7	0.7
GF	5質量%(対モルタル)		
フロー	168	186	175
生ρ	2.09	2.06	2.11
エア	5.1	5.6	5.3

3. 2. 2 曲げ強度特性 (S2)

図7と図8に曲げ試験結果を示す。シリーズ1の結果と同様に、低熱セメントの材令1日の強度特性が、著しく低下した。特に比例限界強度が3.4MPaであり、翌日脱型は困難であった。ポゾラン物質であるスラグを組み合わせた配合であるため、通常配合より更に初期強度特性が低下したと思われる。しかし促進養生後の強度特性は、全てのセメントで良好な耐久性を示した。

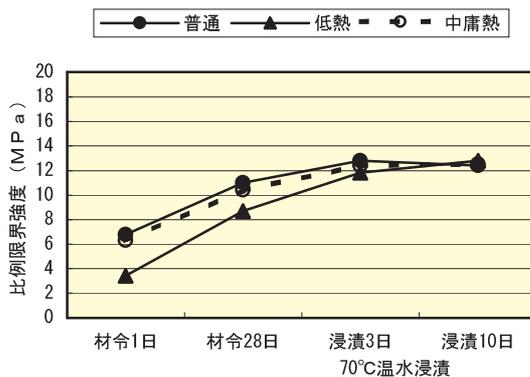


図7 セメントの種類と比例限界強度の関係(S2)

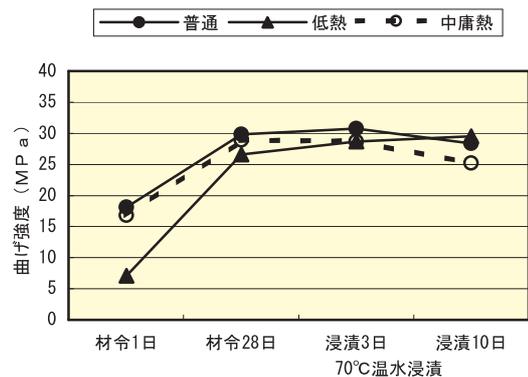


図8 セメントの種類と曲げ強度の関係(S2)

3. 2. 3 乾燥収縮率 (S2)

図9に乾燥収縮率の測定結果を示す。シリーズ1の結果と同様に、普通セメントと比較して、中庸熱セメント、低熱セメントの順に乾燥収縮率は小さくなる傾向を示した。セメントをスラグに置換することにより、普通セメントでは若干乾燥収縮率が小さくなる傾向を示したが、中庸熱セメントと低熱セメントでその効果は見られなかった。

3.2.4 凍結融解性能 (S2)

図10に凍結融解試験後の曲げ弾性率の保持率を示す。シリーズ1の結果と同様に、中庸熱セメント、低熱セメントの順に凍結融解性能は悪化した。中庸熱セメントと低熱セメントの曲げ弾性率保持率は100サイクルからスケーリングの多発とともに急激に低下し、シリーズ1よりも小さい値を示した。中庸熱セメントと低熱セメントの初期強度発現性が低いこと、ポゾラン物質であるスラグを組み合わせることにより、試験を行なう前にマトリクス内で十分な水和がなされず、組織が緻密化されていないことが凍結融解性能に影響を与えたものと思われる。

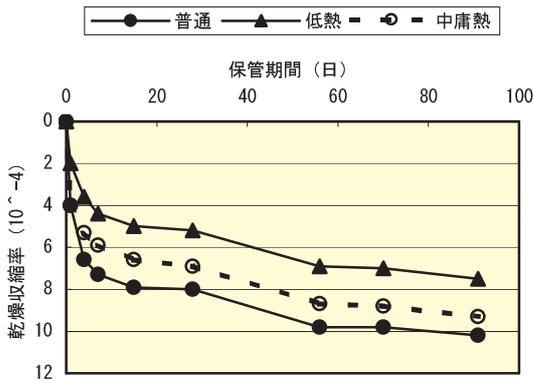


図9 セメントの種類と乾燥収縮率の関係 (S2)

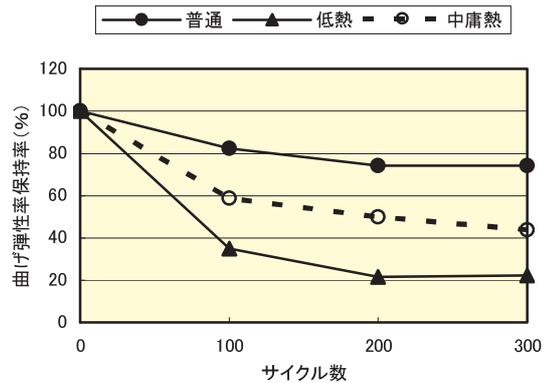


図10 セメントの種類と凍結融解性能の関係 (S2)

3.3 高ビーライト系セメントを使用した配合の改善 (シリーズ3 : S3)

高ビーライト系セメントである中庸熱セメントと低熱セメントをGRCに使用した場合、普通セメントと比較して優れた乾燥収縮率を示したが、初期強度特性と凍結融解性能が劣る結果となった。シリーズ3では、スラグとシリカヒュームを使用したスラグ置換配合で低熱セメントについて、この両特性の改善を検討した。

3.3.1 蒸気養生の検討 (S3)

材令1日の強度特性を向上させる目的で、No. 8の配合において成形を行い、その直後に40℃×8時間と60℃×12時間の条件で蒸気養生を行った。蒸気養生後、試験体は20℃、60% RHの養生室に保管した。

図11と図12に曲げ試験結果を示す。40℃×8時間の蒸気養生を行っても、初期強度特性に大きな変化は見られなかったが、60℃×12時間の蒸気養生を行ったところ、材令1日における強度特性の向上が見られた。その比例限界強度は7.2MPaを示し、翌日脱型は問題なく行なうことができた。しかし材令28日と促進養生後の強度は、いずれも蒸気養生を行なわなかった場合より小さい値になった。コンクリートと同様に、過度な温度による急速な水和反応の促進は水和生成物の拡散を阻害し、その後の水和反応を遅延するため、長期強度には不利になると思われる。このことから硬化初期段階での蒸気養生においても、長期強度も考慮した条件を検討する必要があると思われる⁵⁾。

乾燥収縮率と凍結融解性能は、蒸気養生を行なうことによる違いは見られなかった。

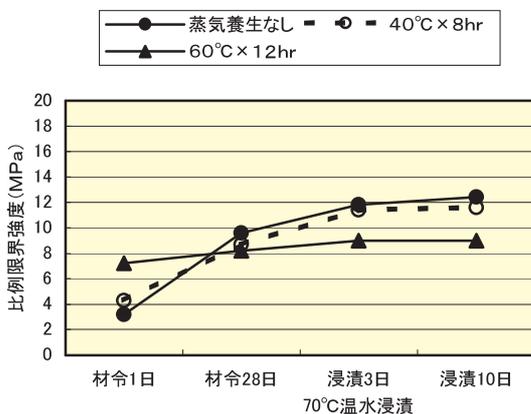


図11 養生条件と比例限界強度の関係 (S3)

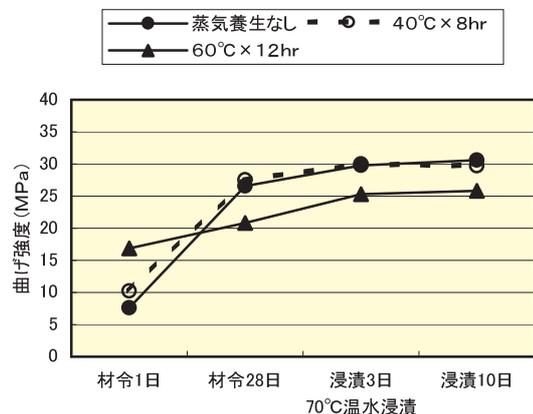


図12 養生条件と曲げ強度の関係 (S3)

3. 3. 2 AE剤と収縮低減剤の検討 (S3)

表8にAE剤と収縮低減剤を検討したGRC配合、モルタル特性と材令28日での曲げ試験の結果を示し、図13に乾燥収縮率、図14に凍結融解試験後の曲げ弾性率の保持率を示す。表中の強度は曲げ強度(MPa)を、弾性率は曲げ弾性率(GPa)を示す。

AE剤を添加することで、空気量が増加し、凍結融解性能は向上した。また収縮低減剤を添加することで、乾燥収縮率は小さくなった。しかしAE剤或いは収縮低減剤を導入することで、曲げ特性は若干低下する傾向を示した。

表8 GRC配合、モルタルのフレッシュ特性と曲げ試験結果(S3)

No.	8	9	10
LC	30	30	30
SL	70	70	70
SF	10	10	10
S	100	100	100
W	32	32	32
R	0.7	0.7	0.7
AE		0.05	0.05
SR			2.0
GF	5質量%(対モルタル)		
フロー	180	183	179
生ρ	2.10	2.04	2.02
エア	6.1	9.7	10.0
強度	26.6	25.1	24.3
弾性率	17.2	16.4	15.8

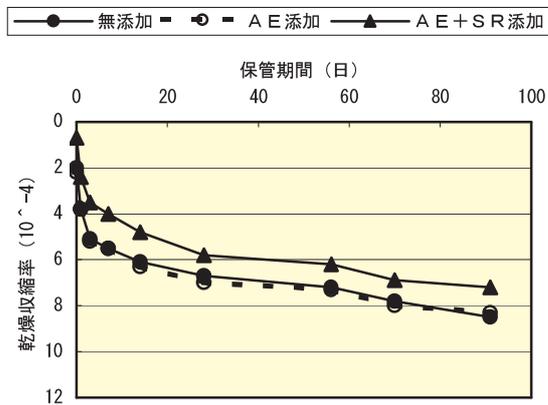


図13 収縮低減剤添加と乾燥収縮率の関係(S3)

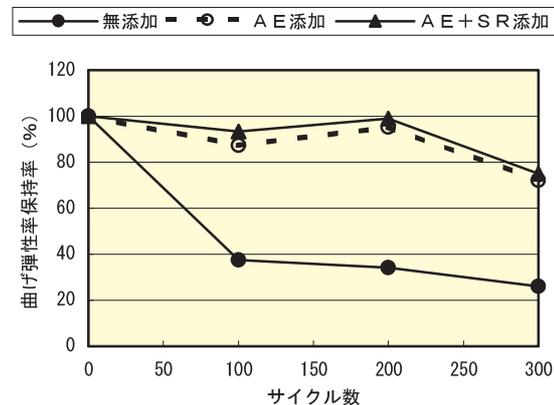


図14 AE剤添加と凍結融解性能の関係(S3)

4. まとめと今後

- (1) 低熱セメント、高炉セメント及び中庸熱セメントは、普通セメントと比較すると、脱型強度は低いがそれ以降の強度特性は同等であること、フレッシュモルタルの流動性はこの順で良く、乾燥収縮率はこの順で小さく、乾燥収縮率の小さいものほど凍結融解性能が劣ることがわかった。
- (2) 低熱セメント、高炉セメント及び中庸熱セメントを使用した場合の凍結融解性能の低下は、AE剤を添加することで改善できる。
- (3) 乾燥収縮を低減する効果に関し、低熱セメントを使用した時に得られる効果とスラグを添加して得られる効果の加性が成り立たず、 7×10^{-4} より小さな乾燥収縮率とはならなかった。
- (4) 低熱セメントを使用した場合においても、収縮低減剤を添加することでさらに乾燥収縮率は小さくなったが、 7×10^{-4} より小さな乾燥収縮率とはならなかった。
- (5) 低熱セメント及び中庸熱セメントを使用した場合の曲げ強度の耐久性は、普通セメントを使用した時と同様に、スラグで70%置換し、シリカヒュームを10%添加することで大幅に改善される。
- (6) ただし、この場合、脱型強度の低下が激しいため、蒸気養生等の初期養生は必要であるが、温度を含めた条件は十分検討する必要がある。

参考文献

- 1) 西堀真治 「リサイクル材料を用いたガラス繊維補強コンクリートの特性」日本GRC工業会第16回GRCシンポジウム講演要旨集 2004年7月, pp.19-24
- 2) 西堀真治 「リサイクル材料を用いたガラス繊維補強コンクリートの特性」日本GRC工業会第17回GRCシンポジウム講演要旨集 2005年7月, pp.25-30
- 3) Litherland, D.R., Oakley, D.R. and Proctor, B.A., The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites, Cement and Concrete research, volume11, pp.455-466, 1981
- 4) 低熱ポルトランドセメント技術資料 太平洋セメント株式会社編 2001年
- 5) ネピルのコンクリートの特性 技術堂出版