

技術資料 2

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

近年の環境問題の高まりや、廃棄物の処理問題などで産業廃棄物の再利用が盛んに行われている。フライアッシュやスラグなどがコンクリートに大量に使用されており、その研究論文も多く出されている。

ガラス繊維補強コンクリート（GRC）は、その軽量性や造形性の良さから建築材料として広く使用されている。しかしながら、GRCへの廃棄物利用に関連した研究は少なく、最近では廃棄物から製造された軽量骨材を使用したGRCに関する研究¹⁾、²⁾が見られる程度で、コンクリートで一般的なスラグやフライアッシュといったような材料に関する研究はほとんど見られない。

そこで本研究は、コンクリート用混和材として広く使用されているリサイクル材料を中心に、それらをGRCへ添加した場合の基本物性を調査した。

2. 試験方法

2.1 使用材料

リサイクル材料として取り上げたのは、表1に示すセメント、混和材及び骨材で、それぞれの諸物性と化学組成を表2～表6に示す。エコセメントはJIS R 5214に適合する普通エコセメントを使用した。フライアッシュはJIS A 6201のII種に適合するものを使用した。スラグはJIS A 6206の高炉スラグ微粉末4000と8000に適合するものを使用した。銅スラグはJIS A 5011-3に適合する2.5mm銅スラグを使用した。

上記材料のほかに、普通ポルトランドセメント（C）、珪砂5号（S、0.3～1.2mm）、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤（R）および耐アルカリ性ガラス繊維（F、長さ19mm）を使用した。

表1 使用材料とその主原料

使用材料名	主原料
エコセメント (EC)	ごみ焼却灰
フライアッシュ (FA)	石炭灰
シリカヒューム (SF)	フェロシリコン
スラグ4000 (SL4)	高炉スラグ
スラグ8000 (SL8)	高炉スラグ
銅水砕スラグ (CS)	銅熔融スラグ

表2 エコセメントの諸物性と化学組成

密度	比表面積 (cm ² /g)	Cl ⁻	Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
3.17	4300	0.048	1.33	17.8	7.2	4.1	61.1	1.8	3.9	0.3

表3 フライアッシュの諸物性と化学組成

密度	比表面積 (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO
2.2	3780	57	31	4	2	1

表4 シリカヒュームの諸物性と化学組成

密度	比表面積 (cm ² /g)	平均粒径 (μm)	SiO ₂
2.2	200000	0.15	96

表5 スラグの諸物性と化学組成

グレード	密度	比表面積 (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
4000	2.9	4190	34	15	42	6
8000		7650				

表6 銅スラグの諸物性と化学組成

密度	粒径	吸水率 (%)	CaO	FeO	SiO ₂	S
3.5	2.5mm 以下	0.5	1	48	34	1

2.2 混練

30リットルのオムニミキサーで混練を行った。高性能A E減水剤を添加した水、骨材、混和材、セメントの順でミキサーに投入して高速で60秒混練後、最後にガラス繊維を投入し高速で15秒混練した。

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（空気室圧力方法）により混練直後のガラス繊維を含んだGRCモルタルの空気量を測定した。生比重はGRCモルタルの、気乾比重は曲げ試験体の体積と質量から求めた。

2.4 曲げ試験

日本GRC工業会の定める以下の条件で曲げ試験を行った。

寸法=275×50×15mm, 曲げスパン=225mm, 载荷=2mm/分の中央集中载荷, 材令=12週, 繰り返し数=5

2.5 温水浸漬促進試験

材令12週より70℃の温水に試験体を10日間浸漬することにより、促進試験を行った。浸漬後、2.4と同じ条件で曲げ試験を行い、耐久性を評価した。

2.6 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、一定期間ごとに約4ヶ月まで長さを測定し、基長からの乾燥収縮率を測定した。

3. 結果および考察

3.1 まだ固まらないGRCの特性と気乾比重

ガラス繊維を添加したGRCモルタルを用いてJIS R 5201セメントの物理試験方法のフロー試験を行い、そのフロー値が160±15mmになるように高性能A E減水剤の量を調整した。

表7～9にまだ固まらないGRCの特性と気乾比重を示す。表中の生 ρ は混練直後のGRCモルタルの生比重を、エアは同モルタルの空気量を、気 ρ はGRCの気乾比重を示す。

表7 まだ固まらないGRCの特性と気乾比重 (E C, F A, S F)

	1	2	3	4	5	6	7
C	100		80	60	40	100	100
E C		100					
S	100	100	100	100	100	100	100
F A			20	40	60		
S F						10	20
R	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	1.3
水	32	32	32	32	32	32	32
F	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.3	7.6
生 ρ	2.08	2.09	2.07	2.07	2.07	2.12	2.15
エア	8.0	9.4	7.4	6.4	4.5	6.4	5.6
気 ρ	2.03	2.11	2.01	1.98	1.95	2.03	2.05

表8 まだ固まらないGRCの特性と気乾比重 (S L)

	8	9	10	11	12	13	14
C	100	80	60	40	80	60	40
S	100	100	100	100	100	100	100
SL4		20	40	60			
SL8					20	40	60
R	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
水	32	32	32	32	32	32	32
F	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
生 ρ	2.06	2.11	2.10	2.06	2.12	2.14	2.10
エア	8.0	8.2	8.4	8.4	8.4	7.6	6.5
気 ρ	2.00	2.07	2.03	2.03	2.06	2.04	2.06

表9 まだ固まらないGRCの特性と気乾比重 (C S, S F+S L)

	15	16	17	18	19	20	21
C	100	100	100	100	100	100	50
S	100	80	60	40	20		100
C S		20	40	60	80	100	
SL4							50
S F							10
R	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.7
水	32	32	32	32	32	32	32
F	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.3
生 ρ	2.06	2.14	2.25	2.29	2.38	2.44	2.12
エア	9.4	8.7	7.0	5.8	4.5	3.5	7.0
気 ρ	2.01	2.11	2.19	2.29	2.32	2.41	2.04

エコセメントを使用した場合、比重が若干高くなる傾向が見られたが、ほかの特性はほぼ同じであった。

フライアッシュで置換した場合、生比重に変化は見られなかった。フライアッシュは普通セメントと比較すると比重が低く、置換するほど比重が低くなるはずであるが、未燃焼カーボンの影響で空気量が低下していることと相殺されて生比重に変化が見られなかったと思われる。一方、乾燥が進んだ後の気乾比重は置換率に比例して下がっている。空気量が減少していてなお比重が下がっていることから、その気乾比重の低減効果はかなり大きいと思われる。

シリカヒュームを添加する場合、同じ流動性を得るために高性能A E減水剤を多く添加する必要があった。高性能A E減水剤を増やしても空気量は減少した。シリカヒュームの比表面積はセメントや他の混和材と比較して圧倒的に大きく、添加率が低いにもかかわらず、空気量に対して大きな影響を与えたものと思われる。

スラグを使用した場合、少ない高性能A E減水剤で同じ流動性を得られており、流動性を向上させる効果があると思われる。また、比表面積が大きなスラグを多く使用したほうが空気量が減少している。

粉体の粉末度が高いほど、フライアッシュを使用するほど空気が入りにくくなる傾向にあるといわれているが3) 4)、今回の結果はそれと同じ傾向を示した。

銅スラグの珪砂との置換により、比重が高くなっているが、明らかに珪砂と銅スラグの比重の差によるものである。また、同じ流動性を得るための高性能AE減水剤量は、銅スラグ置換とともに少なくなっており、その影響で空気量も減少している。これは、銅スラグの低い吸水率によるものと思われる。

3.2 曲げ特性

各GRCの曲げ特性を図1～3に示す。

エコセメントを使用したGRCは若干曲げ強度が低く弾性率が高いという結果であったが、あまり大きな差は見られなかった。

フライアッシュで置換するにつれ、曲げ強度、曲げ弾性率ともに減少する傾向が見られた。置換率が60%まで上がると、曲げ強度が置換前の値の半分程度にまで低下した。これらのことは、コンクリートなどでよく知られているフライアッシュで置換した時に初期強度が発現しにくいという特性によるものと思われる。特に曲げ弾性率が低いことは、マトリックスの強度発現が不十分であったことを裏付けるものである。今回は、蒸気養生などの初期養生を行っていないが、初期に強度発現を促すような養生を行えば、ある程度は改善されるものと思われる。

シリカヒュームの添加により、一部のGRCに曲げ強度の下がっているものが見受けられたが明確な傾向は見られなかった。

スラグで置換することにより、全体的に曲げ強度の低下が見られた。これは、スラグの持つ初期強度発現を遅くするという特性によるものと思われる。置換率による明確な傾向は見られなかったが、スラグ8000の方がスラグ4000と比較して全体的に高い曲げ強度と弾性率を示した。このことは、スラグのポゾラン反応が比表面積の増加によって改良したことによると思われる。

銅スラグを珪砂と20%置換することで、曲げ強度が20%以上低下した。曲げ強度を比重で割った値(比強度)で比較すると、比重の増加もあるため25%以上の低下率となった。更に銅スラグの置換率を上げると反対に曲げ強度は上昇に転じ、置換率が80%を超えると置換前の曲げ強度を超えたが、比強度で比較すると置換前の値に達しなかった。比重が増加しても曲げ弾性率が増加する傾向は見られなかったことから、今回のような配合設計においては、銅スラグを使用してもマトリックス強度は変わらないと思われる。そのため、置換率が上がるに従い曲げ強度が上昇したことは、比重が上がることでガラス繊維の体積含有率が上がったためと思われる。繊維補強コンクリートの検討においては、体積含有率を一定にすることが一般的であるが、本検討においては質量含有率を一定に行った。

今回の検討において、高性能AE減水剤の量を調整することで全ての流動性の調整を行った。このことは水セメント比の曲げ特性に対する影響を排除する事となったが、単位水量が減ったときの効果は確認できなかった。銅スラグ使用の場合、置換していない場合の0.6%から0.1%まで高性能AE減水剤の量を減らしており、かなり大幅な調整となった。仮に流動性の調整を水セメント比の調整で行えば、もっと大幅に曲げ特性が変わったものと思われる。特に曲げ弾性率や後で述べる乾燥収縮率においてその効果が著しいと思われる。

シリカヒュームとスラグを併用した場合は、曲げ強度、曲げ弾性率ともに変化が見られなかった。

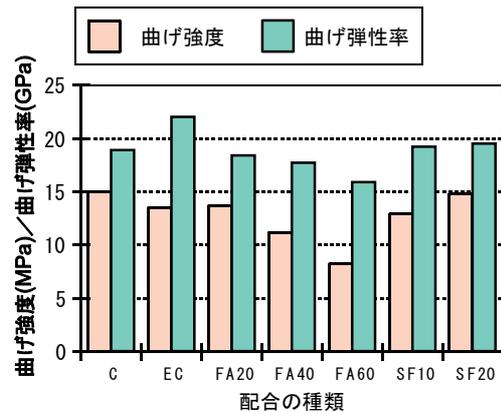


図1 曲げ特性 (E C, F A, S F)

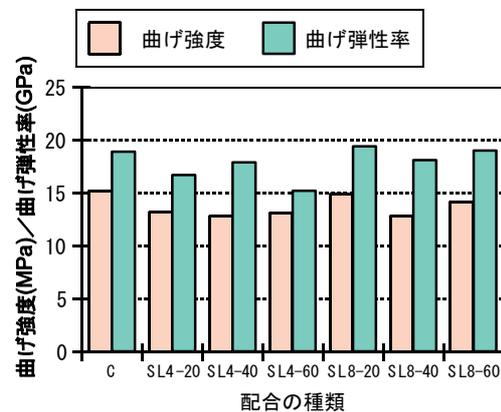


図2 曲げ特性 (S L)

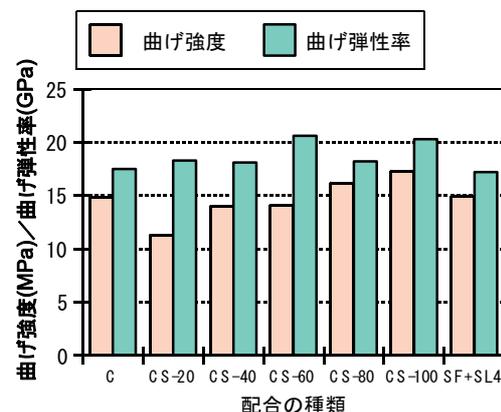


図3 曲げ特性 (C S, S F + S L)

3.3 耐久性

図4～図6に材令12週と70℃の温水に10日間浸漬した後の曲げ強度を示す。

エコセメントを使用したGRCの温水浸漬後の曲げ強度は、基本配合と比較して大きな差が見られなかった。

フライアッシュで置換するにつれ、温水浸漬後の曲げ強度が高くなる傾向であり、置換率40%以上では材令強度以上になった。これはコンクリートと同様にフライアッシュの持つポゾラン反応による効果と思われる。

シリカヒュームを添加するにつれ、温水浸漬後の曲げ強度が下がるという結果であったが、基本配合より高い曲げ強度を示した。

スラグで置換することにより、温水浸漬後の曲げ強度は基本配合より高くなった。これは、スラグのポゾラン反応によるものと思われる。置換率による明確な傾向は見られなかったが、材令での結果と同様に比表面積の大きなスラグ8000の方がスラグ4000と比較して全体的に高い曲げ強度を示した。銅スラグで置換しても、温水浸漬後の曲げ強度は基本配合と大差なく、置換率による明確な傾向も見られなかった。

シリカヒュームとスラグを併用した場合は、温水浸漬後の曲げ強度が基本配合より高く、材令強度との差が見られなかった。これはシリカヒュームとスラグのポゾラン反応によるものと思われる。

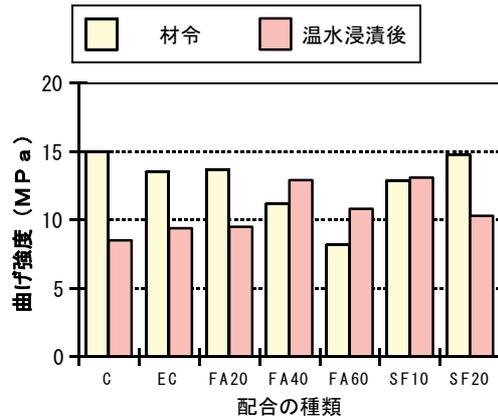


図4 温水浸漬後の曲げ特性 (EC, FA, SF)

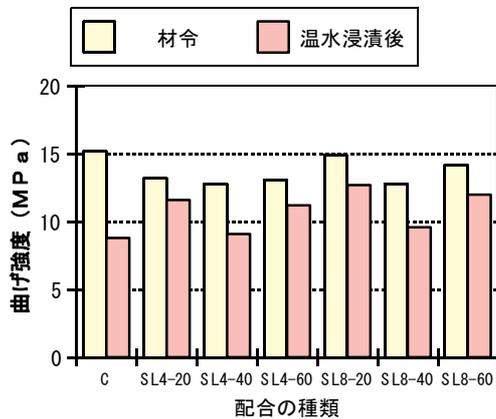


図5 温水浸漬後の曲げ特性 (SL)

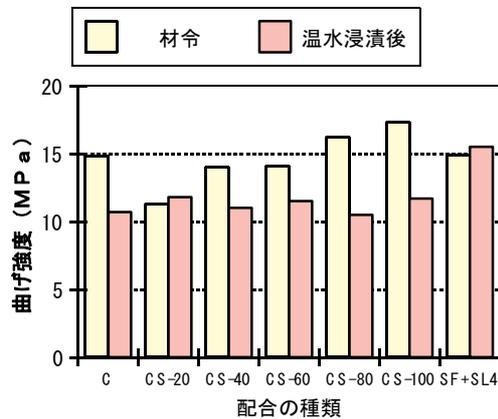


図6 温水浸漬後の曲げ特性 (CS, SF+SL)

3.4 乾燥収縮率

図7～図12に乾燥収縮率を示す。

エコセメントを使用した場合も普通セメントと同じ乾燥収縮率を示した。

フライアッシュで置換したものは、コンクリートの場合と同様に、その置換率に従って乾燥収縮率が小さくなった。

シリカヒュームを添加したものは若干収縮が大きくなる程度で、大きな変化は見られなかった。

スラグ4000を使用したものはその置換率に従って、乾燥収縮率が小さくなった。8000の場合も小さくなる傾向は見られたが、その効果は4000の場合よりも小さかった。

銅スラグを使用したものは、一部で収縮が大きくなっているものが見られたが、明確な傾向も見られず、あまり影響はないと思われる。

シリカヒュームとスラグを併用した場合でも、乾燥収縮率が小さくなった。ほぼスラグ単独の効果と思われる。

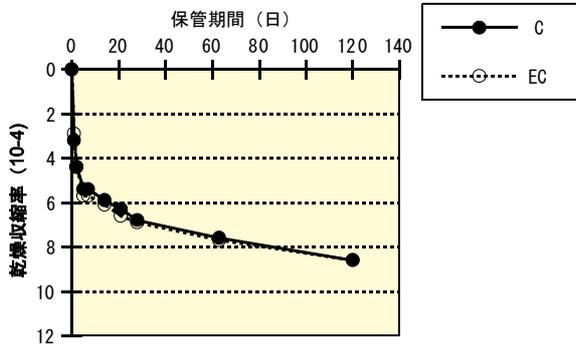


図7 エコセメントを使用した場合の乾燥収縮率

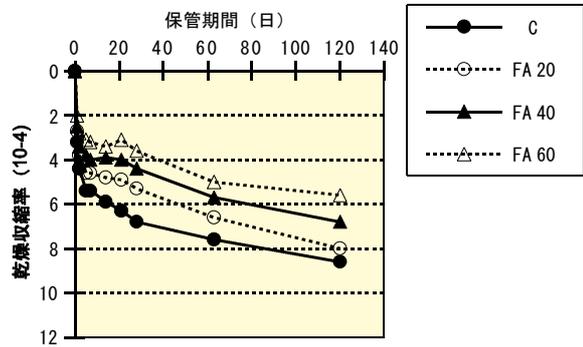


図8 フライアッシュで置換した場合の乾燥収縮率

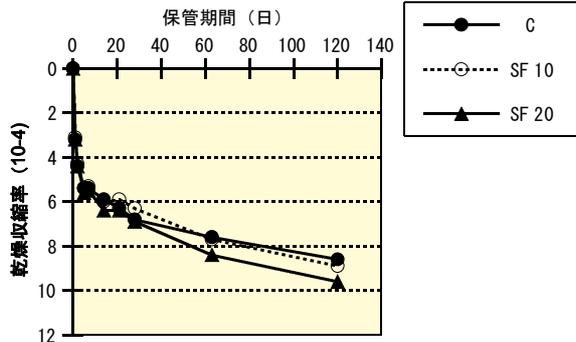


図9 シリカヒュームを添加した場合の乾燥収縮率

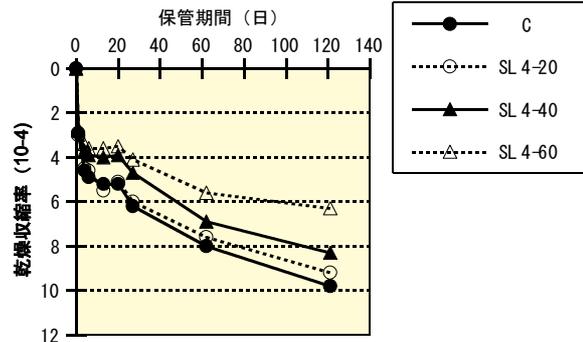


図10 スラグ4000で置換した場合の乾燥収縮

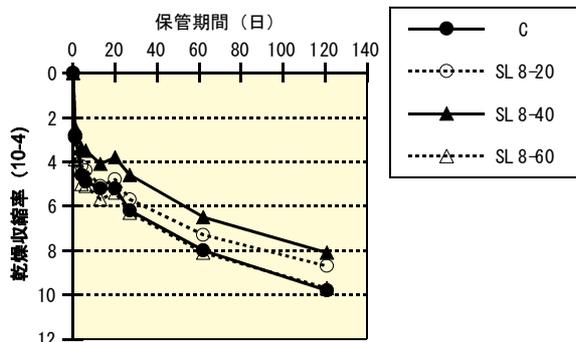


図11 スラグ8000を使用した場合の乾燥収縮率

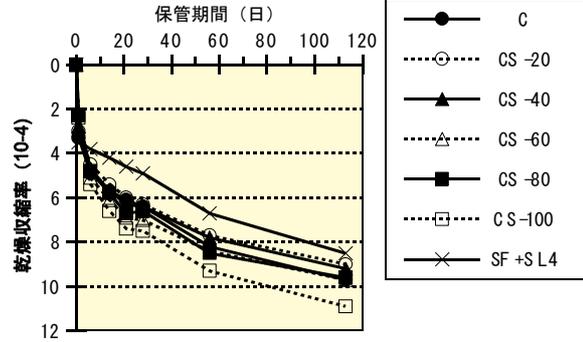


図12 銅スラグを使用した場合の乾燥収縮率

4. まとめ

- (1) エコセメントを使用したGRCは普通ポルトランドセメントを使用したGRCとほぼ同じ特性を示した。
- (2) フライアッシュで置換すると、空気量が減少すること、初期強度が小さくなること、耐久性が向上すること、乾燥収縮率が小さくなることわかった。
- (3) スラグで置換すると、流動性が向上すること、初期強度が若干低くなること、耐久性が向上すること、乾燥収縮率が小さくなることわかった。
- (4) 銅スラグを使用した場合、その流動性に大きな影響を与え、その調整方法により曲げ特性や乾燥収縮率が大幅に変わると思われる。
- (5) シリカヒュームとスラグを併用した場合、基本配合と比較して同等の初期強度と高い耐久性を得られることがわかった。

参考文献

- 1) 竹内好雄「プレミックス法で作られたガラス繊維補強コンクリートの凍結融解性能」 日本建築学会近畿支部研究報告集第43号2002年
- 2) 竹内好雄「軽量プレミックスGRC」 日本GRC工業会第13回GRCシンポジウム講演要旨集2001年3月PP.79-89
- 3) コンクリート便覧 技報堂出版
- 4) フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針(案) 第一版 日本建築学会