

論文 コンクリートガラを骨材とした環境負荷低減型硬化体の開発

石川 学^{*1}・石川 嘉崇^{*2}・安田 幸弘^{*3}

要旨：石炭火力発電所の設備更新工事の際に発生する多量のコンクリートガラを骨材とし、同発電所で副産されるフライアッシュおよび脱硫石膏と製鉄所から副産される高炉スラグ微粉末を主材料とした硬化体（三成分硬化体）の開発を行った。この三成分硬化体は、一般的なコンクリートとほぼ同等のフレッシュ性状と強度性状を確保できるとともに CO₂ 排出量を約 90%削減することが可能である。一方、反応生成物等の検討結果から、有効利用用途として、漁礁ブロック等の限定された用途が考えられることを確認した。

キーワード：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、石膏、コンクリートガラ、CO₂ 排出量削減

1. はじめに

資源の有効利用による CO₂ 排出量削減に向けて、ごく一般的な建設材料として用いられているコンクリートの代わりに、セメントの大部分をフライアッシュ・高炉スラグ微粉末・石膏・シリカフェームなどの産業副産物で置き換えた硬化体について研究がなされている。このような研究の一例として、魚本らによる高炉水砕スラグ・二水石膏の二成分を用いた硬化体や、今本らの研究によるフライアッシュ・高炉スラグ微粉末・廃石膏の三成分を用いた硬化体の研究が挙げられる^{1) 2)}。

電力事業では、石炭火力発電所の微粉炭燃焼と排煙脱硫工程によって、年間あたりフライアッシュが約 960 万トン、排煙脱硫石膏が約 200 万トン排出されている³⁾。これらの有効利用先の拡大のため、セメントの大部分を上記の産業副産物で置き換えた硬化体の開発とその利用は有効な手段であるといえる。

一方、既設石炭火力発電所の老朽化に伴う設備更新工事が盛んになってきており、その際発生する多量のコンクリートガラの有効利用が課題となっている。コンクリートガラの現状の用途は、路盤材としての利用がほとんどであるが、コンクリート用再生骨材としても活用されている。しかし、コンクリートガラを再生骨材として処理するには、十分な品質を確保するための手間やコストの面で問題が多い。このため、コンクリートガラを簡易的な処理のみでコンクリート用骨材として有効利用する手法が研究されている⁴⁾。

これらを背景として、本研究は、コンクリートガラを骨材とし、フライアッシュ・高炉スラグ微粉末・排煙脱硫石膏の三成分を主原料とした硬化体（以下、三成分硬化体という）の開発に取り組むことで、産業副産物とコンクリートガラの有効利用による環境負荷低減型硬化体の開発を行うことを目的とした。

2. 三成分硬化体の最適混合比率の選定

2.1. 概説

コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体の配合決定にあたり、フライアッシュ・高炉スラグ微粉末・排煙脱硫石膏の三成分を混合したペースト試料を作製して流動性と強度性状を評価し、強度発現性に優れるとともに十分な流動性を確保できる三成分の混合比率を選定した。

2.2. 使用材料

使用材料を表-1 に示す。セメントのアルカリ刺激によって高炉スラグ微粉末やフライアッシュの反応が促進されることを考慮し、セメントの微量添加の有無が流動性と強度性状に与える影響も併せて評価した。

表-1 使用材料

材料	種類, 品質
フライアッシュ (FA)	JIS II 種品 密度 2.31g/cm ³ , 比表面積 4000cm ² /g
高炉スラグ微粉末 (BS)	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 4220cm ² /g 石膏添加無
石膏 (G)	排煙脱硫石膏 密度 2.23g/cm ³
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³

2.3. 配合

三成分の混合比率を示したペースト配合を表-2 に示す。水粉体比 (W/ (FA+BS+G)) は一律 30%とした。三成分の配合は、混合比率を示す三角形散布図を網羅するよう決定した。また、セメント無添加の配合に加えて、(FA+BS+G) の単位量の 3%のセメントを外割で添加した配合を検討した。供試体は、材齢 28 日まで標準養生とした。供試体の脱型は材齢 7 日としたが、セメント無添加の配合の一部は材齢 7 日で脱型が困難であったため、材齢 14 日で脱型した。

*1 電源開発 (株) 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 (正会員)

*2 電源開発 (株) 茅ヶ崎研究所 上席研究員 工博 (正会員)

*3 (株) 開発設計コンサルタント 茅ヶ崎技術事業本部 設備保全技術部 部長代理 (正会員)

2.4. 試験概要

ペースト試料の流動性と強度性状を評価するため、フロー試験と圧縮強さ試験を実施した。フロー試験と圧縮強さ試験の実施の際は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した。圧縮強さ試験に用いる円柱供試体の寸法は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ とし、試験材齢は28日とした。

2.5. 試験結果

図-1にセメント無添加のフロー試験結果、図-2にセメント添加のフロー値試験結果を示す。石膏混合比率が高くなるほど、フロー値が上昇する傾向にあった。これは、本試験では石膏の比表面積は計測していないが、一般にフライアッシュや高炉スラグ微粉末と比較して、石膏の比表面積が小さいことに起因するものと推定される。また、セメント無添加とし石膏混合比率が10%以下の配合を除いて、フライアッシュ混合比率の増加に伴って、フロー値が低下する傾向にあった。これは、フライアッシュ混合比率の増加によって、総粉体体積が増加したためであると推察される。

図-3にセメント無添加の材齢28日の圧縮強度試験結果を示す。石膏混合比率が40%以上となると、材齢28日においても脱型が不可能な状態であった。これは、適量の石膏は、フライアッシュや高炉スラグ微粉末の反応を促進させるが、石膏混合比率を増加させると、自硬性のある高炉スラグ微粉末の混合比率が相対的に低下することが要因であると考えられる。また、高炉スラグ微粉末混合比率が50%以上、石膏混合比率が10~20%であれば、セメント無添加の場合でも、材齢28日において圧縮強度が40N/mm²程度となることが確認された。

図-4にセメント添加の材齢28日の圧縮強度試験結果を示す。図-3のセメント無添加の結果と比較すると、フライアッシュ混合比率が50%以上の場合では、セメント添加による圧縮強度の増進が顕著となる配合が多かった。また、石膏混合比率が40%以上の場合に、セメント添加により脱型可能な強度にまで圧縮強度が増進した。一方、高炉スラグ微粉末混合比率が40%以上の場合、セメント添加の有無によらず圧縮強度が同程度となる配合が多かった。

図-3、図-4の結果より、フライアッシュ混合比率10~50%、高炉スラグ微粉末混合比率30~80%、石膏混合比率10~20%の範囲において強度発現性に優れる結果であった。また、セメントの微量添加により、フライアッシュまたは石膏の混合比率が高い場合における強度増進が確認された。

3. 三成分硬化体の硬化メカニズムの検証

3.1. 概説

三成分硬化体の硬化メカニズムを把握するため、硬化

過程における生成物質の同定と組織構造の観察を実施した。

3.2. 使用材料・配合

使用材料を表-3に示す。三成分の混合比率は「FA：BS：G=50：30：20」とした。また、水粉体比(W/(FA+BS+G))は30%とした。試験に用いた配合のフロー値と材齢14、28、91日の圧縮強度を表-4に示す。フロー試験と圧縮強さ試験の実施の際は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した。圧縮強さ試験に用いる円柱供試体の寸法は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ とした。供試体は、脱型した材齢14日まで封緘養生とし、その後は試験実施まで20℃の飽和カルシウム溶液中で水中養生とした。

3.3. 試験概要

各材齢における生成物質の同定と組織構造の観察を目的とし、粉末X線回折と走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた反射電子像による水和組織の観察を実施した。

粉末X線回折には、圧縮強さ試験に用いた供試体の中央部より小片試料を用いた。小片試料をアセトンに浸漬させて水和反応を停止させた後、風乾させて微粉砕した測定試料を用いた。

反射電子像による水和組織の観察には、粉末X線回折と同様の小片試料を用いた。小片試料をアセトンに浸漬させて水和反応を停止させた後、風乾させてエポキシ樹

表-2 三成分の混合比率 (mass%)

No.	FA	BS	G	C	No.	FA	BS	G	C
1	48	48	4	0	16	50	30	20	3
2	50	50	0	0	17	70	10	20	3
3	63	31	6	0	18	50	10	40	3
4	67	33	0	0	19	30	30	40	3
5	77	15	8	0	20	10	80	10	0
6	83	17	0	0	21	10	20	70	0
7	48	48	4	3	22	10	50	40	0
8	63	31	6	3	23	30	10	60	0
9	77	15	8	3	24	30	61	9	0
10	10	80	10	3	25	30	50	20	0
11	10	20	70	3	26	50	30	20	0
12	10	50	40	3	27	70	10	20	0
13	30	10	60	3	28	50	10	40	0
14	30	61	9	3	29	30	30	40	0
15	30	50	20	3					

表-3 使用材料

材料	種類、品質
フライアッシュ (FA)	JIS II 種品 密度 2.31g/cm ³ 、比表面積 4000cm ² /g
高炉スラグ微粉末 (BS)	密度 2.91g/cm ³ 、比表面積 4220cm ² /g 石膏添加無
石膏 (G)	二水石膏 密度 2.34g/cm ³

表-4 フロー値・圧縮強度

フロー値 (mm)	圧縮強度(N/mm ²)		
	材齢 14 日	材齢 28 日	材齢 91 日
178	32.8	47.9	58.3

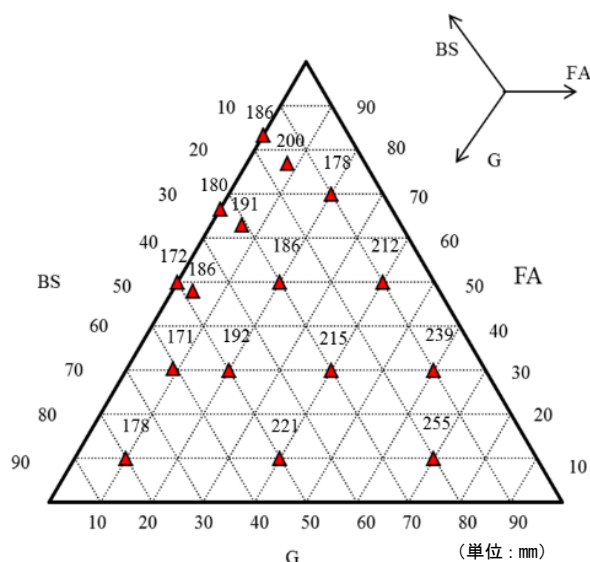


図-1 フロー試験（セメント無添加）

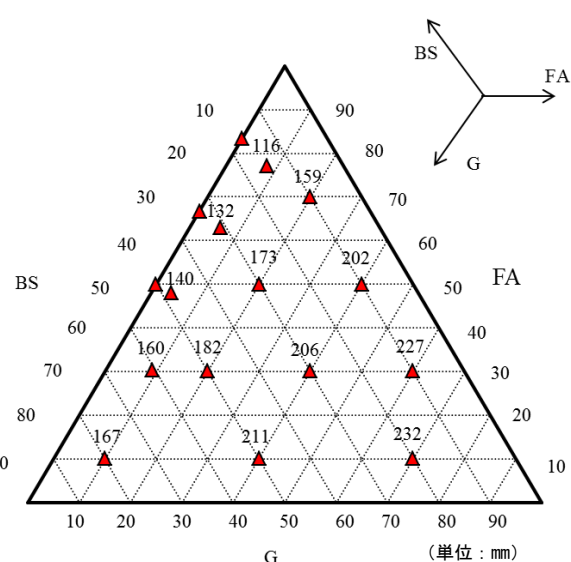


図-2 フロー試験（セメント添加）

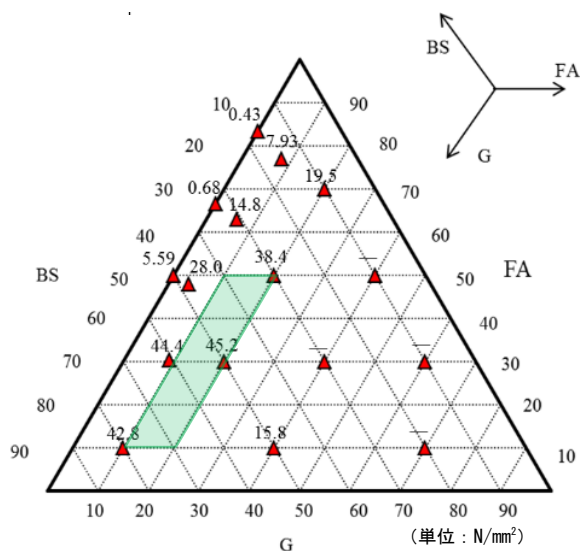


図-3 圧縮強度試験（セメント無添加）

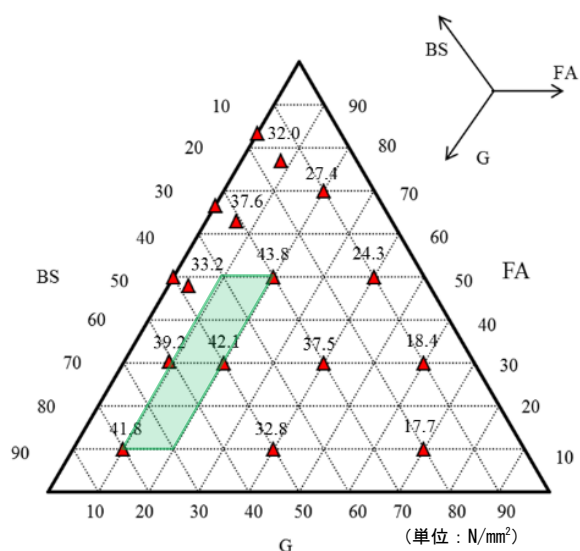


図-4 圧縮強度試験（セメント添加）

脂で被覆した。樹脂の硬化後に観察面を鏡面研磨し、観察面表面に炭素を蒸着し測定試料とした。

粉末X線回折と反射電子像による水和組織の観察は材齢 28 日と 91 日に実施した。

3.4. 試験結果

粉末 X 線回折により、材齢 28 日と 91 日ともに、フライアッシュ中に含まれる石英とムライト、使用材料である石膏に加えて、水和生成物であるエトリンガイトが検出された。

材齢 28 日と 91 日の反射電子像を図-5 に示す。いずれの材齢ともに、未反応で残存しているフライアッシュ、高炉スラグ微粉末が多く観察されており、これらの粒子の空隙をエトリンガイトと結晶形態が明確でない非晶質と推察される水和物で充填されていた。

材齢 28 日から 91 日にかけて水和組織に大きな変化は確認されず、三成分硬化体を構成する主要な水和生成物は、石膏に起因するエトリンガイトであると考えられる。

4. コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体の物性

4.1. 概説

強度発現性に優れる三成分の混合比率を基にして、コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体を作製し、強度性状、フレッシュ性状、乾燥収縮特性を評価した。

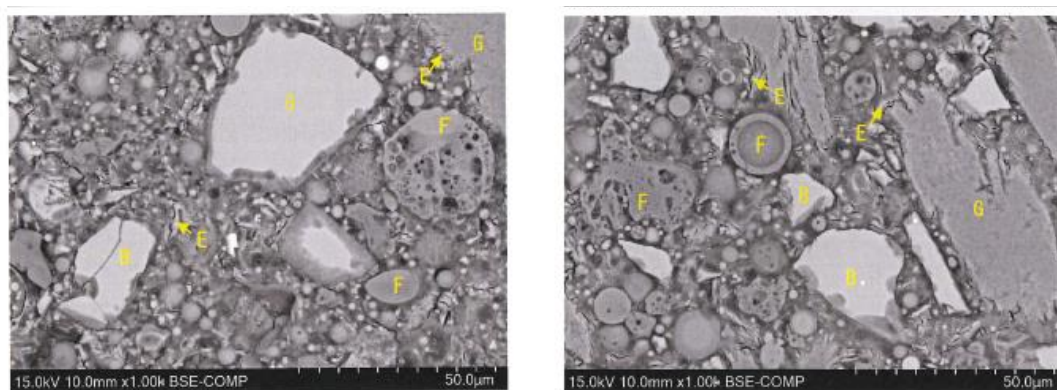
4.2. 使用材料

使用材料を表-5 に示す。コンクリートガラの骨材最大寸法 G_{max} は 40mm とし、粒径ごとの骨材の性状を表-6 に示す。化学混和剤は、三成分硬化体の流動性を確保するため、AE 減水剤を標準量添加した。

4.3. 配合

配合表を表-7 に示す。三成分硬化体の配合は、2. 三成分硬化体の最適配合の選定の試験結果を参考として、5 水準を設定した。単位水量は 195kg/m^3 、水粉体比 ($W/(FA+BS+G)$) は一律 39%とした。また、($FA+BS+G$) の単位量の 3%のセメントを外割で添加した。

スランブ試験 (JIS A 1101「コンクリートのスランブ試



(F：フライアッシュ，B：高炉スラグ微粉末，G：二水石膏，E：エトリンガイト)

図－5 反射電子像（左：材齢 28 日，右：材齢 91 日）

験方法」と空気量測定（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）」）の試験結果を表－7 に併記した。スランブは、9.0～18.0cm と多少のばらつきが確認された。この原因として、コンクリートガラ品質のばらつきが影響を与えているものと推察される。空気量は、0.9～1.9%であった。

4.4. 試験概要

(1) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠して実施した。ブリーディングの測定は、試験開始から 60 分までは 10 分ごと、その後はブリーディングが認められなくなるまで、30 分ごとに計測した。

(2) 凝結時間試験

凝結時間試験は、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠して実施した。貫入抵抗値が 3.5N/mm² となるまでの時間をコンクリートの始発時間、28.0N/mm² となるまでの時間をコンクリートの終結時間と定義している。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して実施した。圧縮強度試験に用いる円柱供試体の寸法はφ100×200mm とし、試験材齢は 7、28、91 日の 3 材齢とした。供試体は標準養生とし、材齢 7 日で脱型した。

(4) 長さ変化試験

長さ変化試験は、JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法－第 3 部：ダイヤルゲージ方法」

に準拠して実施した。長さ変化試験に用いる角柱供試体の寸法は 100×100×400mm とし、材齢 7 日まで標準養生を行った。試験材齢は 7、14、28、56、91、182 日の 6 材齢とした。

4.5. 試験結果

(1) ブリーディング試験

ブリーディング試験の結果を図－6 に示す。いずれの配合においても、ブリーディングは 180 分程度で収束し、0.10cm³/cm² 程度であった。一般に、コンクリートのブリーディング量は 0.30cm³/cm² 以下が良いとされており、コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体は、ブリーディング量が少ないと評価される⁵⁾。

表－5 使用材料

材料	種類，品質
フライアッシュ (FA)	JIS II 種品 密度 2.31g/cm ³ ，比表面積 4000cm ² /g
高炉スラグ微粉末 (BS)	密度 2.91g/cm ³ ，比表面積 4220cm ² /g 石膏添加無
石膏 (G)	排煙脱硫石膏 密度 2.23g/cm ³
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体

表－6 コンクリートガラの物性

粒径	粒度組成 (%)	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
40-20mm	28.2	2.40	6.55	5.49
20-5mm	45.3	2.39	7.22	
5mm 以下	26.5	2.20	13.94	

表－7 コンクリート配合表

配合	W/(FA+BS+G) (%)	単位量(kg/m ³)					s/a	C (kg/m ³)	AE 減水剤 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
		W	FA	BS	G	骨材					
A	39	195	300	150	50	1358	26.5	15.0	5.0	12.0	1.9
B		195	250	150	100	1357				18.0	1.6
C		195	250	200	50	1369				10.5	0.9
D		195	150	300	50	1390				9.0	0.9
E		195	150	250	100	1378				10.5	1.4

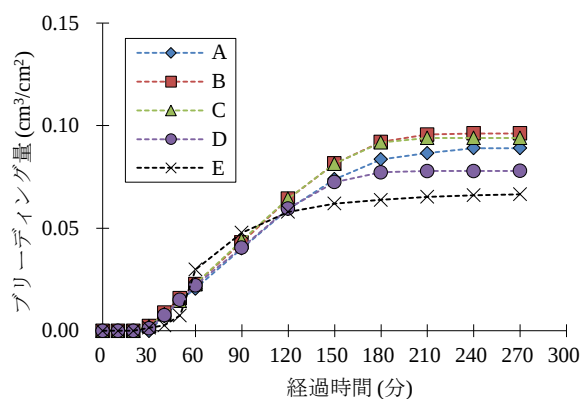


図-6 ブリーディング試験

(2) 凝結時間試験

凝結時間試験の結果を表-8に示す。表-8には、一般的なコンクリート(単位水量 163kg/m^3 、水セメント比55%、スランプ12cm相当のAEコンクリート)の凝結時間試験の結果を併記した⁶⁾。高炉スラグ微粉末の混合比率が50%以上である配合DとEは、その他の配合と比べて、始発時間と終結時間が短縮されており、一般的なコンクリートとほぼ同等の水準となることが確認された。コンクリートの凝結時間は、始発時間が5~7時間、終局時間が6~10時間程度が施工に適するとされており⁷⁾、配合DとEはその水準を満たすが、配合A~Cはその水準より遅延するため、利用にあたっては凝結時間の改善が必要であるといえる。

表-8 凝結時間試験

配合	始発時間(時:分)	終結時間(時:分)
コンクリート	6:15	8:25
A	7:39	12:00
B	7:11	11:18
C	7:15	11:07
D	5:42	8:30
E	6:15	9:38

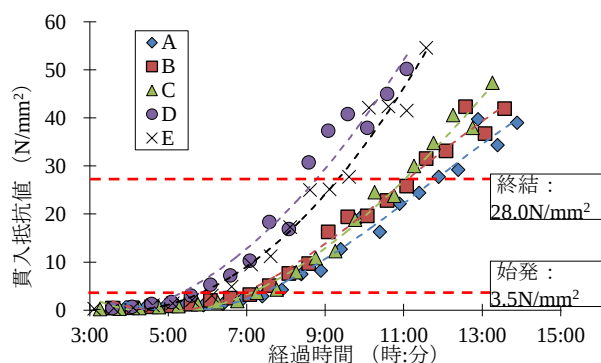


図-7 凝結時間試験

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-8に示す。いずれの配合においても材齢7日で 10N/mm^2 以上であった。材齢の経過

とともに強度は増進していき、材齢28日では、フライアッシュ混合比率が50%以上である配合A~Cで 15N/mm^2 程度、高炉スラグ微粉末混合比率が50%以上である配合DとEで 20N/mm^2 以上となることが確認された。材齢28日から91日にかけて、配合A~Cでは $2\sim 3\text{N/mm}^2$ の強度増進が確認されたが、配合DとEでは僅かであった。これは、フライアッシュの混合比率が高いため、ポズラン反応による長期強度増進の影響であると推察される。

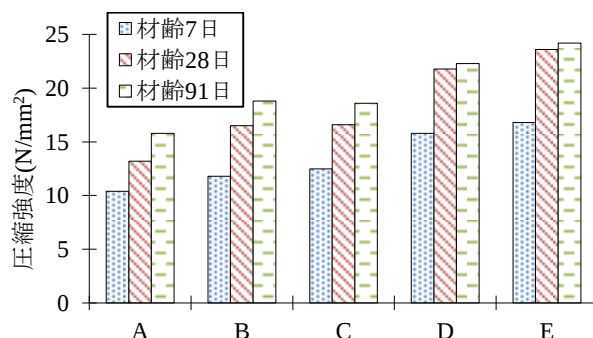


図-8 圧縮強度試験

(4) 長さ変化試験

長さ変化試験の結果を図-9に示す。図-9には、一般的なコンクリート(単位水量 163kg/m^3 、水セメント比55%、スランプ12cm相当のAEコンクリート)の長さ変化試験の結果を併記した⁶⁾。コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体の乾燥収縮は、材齢56日まではいずれの配合においても、一般的なコンクリートと比べて小さかった。一方、材齢91日以降では、一般的なコンクリートは、材齢91日までに大方進行し、その後の収縮が僅かであるのに対し、コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体では乾燥収縮の進行が継続しており、材齢182日では、いずれの配合においても一般的なコンクリートよりも乾燥収縮が大きくなった。

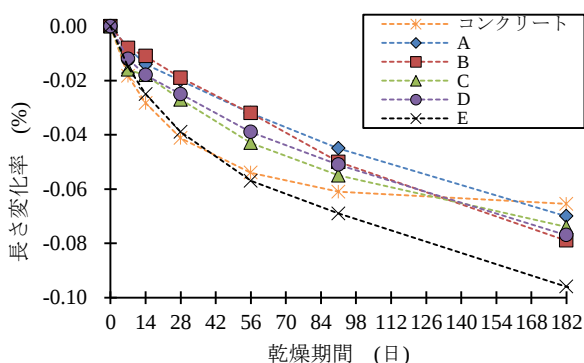


図-9 長さ変化試験

5. 環境負荷低減効果

コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体を建設材

料として用いた場合に，一般的なコンクリート（単位水量 163kg/m³，水セメント比 55%，スランプ 12cm 相当の AE コンクリート）と比較して，どの程度 CO₂ 排出量削減に寄与するかを試算することとした⁶⁾。CO₂ 排出量の試算には，表－9 に示す各材料の CO₂ 排出量原単位を用いた⁸⁾。石膏の CO₂ 排出量原単位は，石炭火力発電所の発電過程によってフライアッシュと同時に副産されるため，フライアッシュの CO₂ 排出量原単位と同様と仮定した。また，コンクリートガラは，Ⅲ種再生骨材の CO₂ 排出量原単位と同様と仮定した。

一般的なコンクリートおよびコンクリートガラを骨材とした三成分硬化体の 1m³あたりの CO₂ 排出量を表－10 に示す。コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体の CO₂ 排出量は，一般的なコンクリートの 11～12%程度であり，大幅に CO₂ 排出量を削減できることが示された。

表－9 CO₂ 排出量原単位

材料	CO ₂ 排出量原単位 (kg/t)
普通ポルトランドセメント	766.6
天然粗骨材	2.9
天然細骨材	3.7
フライアッシュ	19.6
高炉スラグ微粉末	26.5
石膏	19.6 (フライアッシュと同等と仮定)
コンクリートガラ	3.1 (Ⅲ種再生骨材と同等と仮定)

表－10 CO₂ 排出量

配合	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)
コンクリート	232.9
A	26.5
B	26.5
C	26.9
D	27.7
E	27.3

6.まとめ

コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体の開発を目的とし，三成分の最適配合の決定，硬化メカニズムの検証，諸物性の評価を実施した。得られた主要な成果は以下の通りである。

- (1) 三成分の混合比率は，強度発現性の観点から，フライアッシュ混合比率 10～50%，高炉スラグ微粉末混合比率 30～80%，石膏混合比率 10～20%の範囲に設定することが望ましい。また，セメントの微量添加により，フライアッシュまたは石膏の混合比率が高い場合における強度増進が確認された。
- (2) 三成分硬化体は硬化過程において，主な水和生成物

としてエトリンガイトを生成する。

- (3) コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体は，高炉スラグ微粉末の混合比率が 50%以上の配合に，材齢 28 日で 20N/mm²以上の強度となる。
- (4) コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体の CO₂ 排出量は，一般的なコンクリートの 11～12%程度であり，大幅に CO₂ 排出量を削減できる。

以上の検討結果より，コンクリートガラを骨材とした三成分硬化体は，フレッシュ性状と強度性状に関して，一般的なコンクリートの代替として使用できる可能性があるといえる。しかし，硬化過程における主要水和生成物がエトリンガイトであること，乾燥収縮が長期間に渡り継続的に進行していく傾向があることから，有効利用用途は，長期耐久性を要求されるコンクリート部材の代替としては難しいと想定される。そのため，高強度かつ高耐久を要求性能としない漁礁ブロック等に限定した構造物への適用が望ましいと考えられる。今後，硬化体の各種耐久性試験を実施して，大幅な環境負荷低減効果を活かした有効利用用途を見極めていく予定である。

参考文献

- 1) 魚本健人，小林一輔，星野富夫：高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの圧縮強度特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.1，pp.117-120，1979
- 2) 今本啓一，成田瞬，加藤栄，磯文夫：廃せっこうボード微粉末を刺激剤とした高炉スラグフライアッシュ混合セメントコンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.349-354，2008
- 3) 一般財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（平成 26 年度実績）
- 4) 近松竜一，榊原泰造，入矢桂史郎：コンクリート塊を用いた再生コンクリートに関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1521-1526，2004
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006
- 6) 宇部三菱セメント株式会社：技術資料
- 7) 公益社団法人 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2012
- 8) 公益社団法人 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.62，コンクリートの環境負荷効果(その 2)，2004