

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21014

研究課題名(和文)脱炭素社会構築への貢献を目的とした焼成工程を省略したセメントの開発

研究課題名(英文)Development of construction materials that eliminates the burning process to contribute to building a decarbonized society

研究代表者

宮本 慎太郎(Miyamoto, Shintaro)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60709723

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、高炉スラグ微粉末を結合材としてセメントクリンカー(CL)細骨材を用いた固化体(CG固化体)の開発を目的として、CG固化体のフレッシュ性状と硬化後の圧縮強度、寸法安定性について検討した。その結果、フレッシュ性状については、CL細骨材の粒度分布と細骨材結合材比を調整することで流動性と材料分離抵抗性を制御できることを示した。硬化後の圧縮強度については、CG固化体の圧縮強度は強さ試験用モルタルと比較して材齢初期の強度発現性は小さかったが材齢28日以降は上回った。また、寸法安定性は収縮が大きかったが、二水セッコウと石灰石微粉末を添加することでCG固化体の乾燥収縮を低減できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のアルカリ活性材料は寸法安定性に問題があり、さらには可使時間が短く実用化するためには解決する必要がある課題を有していた。本研究で開発した材料はアルカリ活性材料と同様に高炉スラグ微粉末を主結合材として使用しているにもかかわらず、一般的なモルタルと同程度の可使時間を有しており、さらにはアルカリ溶液を使用しないという点において安全に使用することができるものである。さらには、混合材としてgypsumと石灰石微粉末を使用することで寸法安定性を向上させることができたことから、アルカリ活性材料の実用化の一助となると考えている。

研究成果の概要(英文):In this study, the fresh properties, compressive strength and shrinkage stability of alkali activate material with cement clinker (CL) fine aggregate (CG hardened product) was investigated. The results showed that the Liquidity and material separation resistance of the fresh properties could be controlled by adjusting the particle size distribution of the CL fine aggregate and the fine aggregate-binder ratio. The compressive strength of the CG hardened product was higher than that of the reference mortar after 28 days of age, although the compressive strength of the CG hardened product was lower than that of the reference mortar used for the strength test in the early stage of age. In addition, the CG hardened product was also affected by shrinkage, but it was shown that the addition of gypsum and limestone powder to CG hardened product reduced the shrinkage of it.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：アルカリ活性材料 収縮低減 副産物利用

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

セメント産業では廃棄物・副産物を受入れることで最終処分場の延命化に貢献しているが、セメント生産量は減少傾向にあり、廃棄物・副産物の受入れ量を増加するのは困難である<sup>1)</sup>。また、コンクリート用骨材に使用される天然骨材資源の枯渇なども課題として挙げられる。以上の背景より、セメントクリンカー (CL) の骨材としての利用が検討されている。既往の研究では、CL 細骨材として使用することで、圧縮強度の増加や塩化物イオン実行拡散係数の低減など、耐力・耐久性の向上に寄与することが報告されている<sup>2)</sup>。さらには、フライアッシュをセメントに対して 60 % 置換した配合においても石灰石微粉末を使用したモルタル以上の圧縮強度を発現することも報告されている<sup>3)</sup>。他方で、近年はコンクリートの代替材料としてアルカリ活性材料 (AAM) の研究が進められている。AAM はフライアッシュなどに強アルカリ溶液を刺激剤として添加することで固化するが、強アルカリ溶液の使用には危険を伴うことや急激に固化するため可使用時間が短いなどの課題が挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では CL 細骨材からのアルカリ金属の自己供給を期待してアルカリ刺激剤を使用しない CL 細骨材と高炉スラグ微粉末 (GGBS) を組み合わせた AAM (CG 固化体) の開発を着想した。本研究では CG 固化体のフレッシュ性状や硬化後の圧縮強度と寸法安定性を評価した。加えて、GGBS の使用は多くの場合、固化過程において大きな収縮が起こることが知られているため、本研究では二水セッコウ (gypsum) と石灰石微粉末 (LSP) を混合材として添加することで収縮を抑制することを試みた。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 4 項目について検討した。

- (1) 仮配合の選定試験
- (2) フレッシュ性状
- (3) 硬化後の基礎物性
- (4) Gypsum と LSP の添加による寸法安定性の向上

まず、(1)ではモルタルフロー試験を実施して打込みが可能な流動性を確保できる配合の選定を行った。次に、(2)ではブリーディング試験と凝結試験を実施して硬化前のワーカビリティと材料分離抵抗性を十分に確保できるかを観察した。そして(3)では圧縮強度試験を行って十分な強度が確保できるかを観察した。また、本研究では高炉スラグ微粉末を主結合材として使用しているため、乾燥・自己収縮の影響を考慮して長さ変化試験を実施し、寸法安定性についても観察した。さらに(4)では、本研究で開発した CG 固化体に対して gypsum と LSP を混合材として添加することで寸法安定性の向上を試みた。

使用材料については、結合材として GGBS (密度: 2.91 g/cm<sup>3</sup>) を、細骨材として CL 骨材 (絶乾密度: 2.72 g/cm<sup>3</sup>) を、それぞれ使用した。

CL 骨材はブリーディングの調整を目的として、JISA 5005 に記載される粒度分布に基づき から まで 6 段階に調整し、 から にかけて細粒分の多い粒度分布とした。

CL 骨材は絶乾状態で使用し、CL の吸水率に基づいて練混ぜ水量を補正した。表-1 に CG 固化体の示方配合を示す。ここで、水準

表-1 示方配合表

配合	W/B	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	(内吸水量)	GGBS	CL
CL/GGBS 2.25-	0.54	306	7	552	1273
CL/GGBS 2.10-		316	7	572	1230
CL/GGBS 1.95-		327	6	593	1184
CL/GGBS 2.15-		313	7	565	1245

の表記は「CL/GGBS (細骨材結合材比) CL/GGBS の値-CL 骨材の粒度分布」を意味する。例として、CL/GGBS 2.25- は、CL/GGBS が 2.25 で、粗粒分の多い の粒度分布を採用した配合となる。また、寸法安定性の向上に関する検討では、CL/GGBS 1.95- の配合を基準として、GGBS の 10 wt% を gypsum と LSP でそれぞれ質量置換し、水準の表記は「G (gypsum) 置換率-L (LSP) 置換率」とした。例として、gypsum と LSP を 5 % ずつ置換した場合は G5-L5 とした。

本研究では、JIS R 5201 に準拠して材料を練り混ぜた。CG 固化体のフレッシュ性状の検討では、ブリーディング試験は JSCE-F 522 のポリエチレン袋方法に準拠し、凝結試験は JIS A 1147 に準拠して実施した。固化後の試験は、練混ぜ後の CG 固化体を内寸法 40 × 40 × 160 mm の三連鋼製型枠に打ち込み、24 ± 2 時間後に脱型し 20 °C に設定した恒温室内で水中養生を施した。養生期間は最大で 182 日とした。圧縮強度は、所定の材齢で JIS R 5201 で規定される強さ試験に準拠して測定した。寸法安定性は、JIS 1129-1 に記載される長さ変化試験のコンパレータ法に準拠して測定した。なお、長さ変化試験では脱型後の供試体を 7 日間水中養生した後、JIS B 7920 に記載される飽和塩法を用いて R.H.59 % で管理することで乾燥収縮試験とした。管理中の供試体は、所定の材齢ごとに長さを測定し、材齢 7 日における長さを基長として乾燥収縮率を算出した。

#### 4. 研究成果

図-1 に CG 固化体の凝結試験の結果を示す。凝結試験では、貫入抵抗値が 3.5 N/mm<sup>2</sup> から 28 N/mm<sup>2</sup> までの時間を凝結時間としている。凝結時間は、OPC モルタル、CL/GGBS 2.15-、1.95-、2.25- の順に長く、それぞれ約 2.75、3.50、4.00、4.75 時間となった。基本的にコンクリートは練混ぜ後 90 分以内に打込むが、ジオポリマーをはじめとするアルカリ活性材料は可使用時間の確保が困難であることが大きな課題となる。AAM の特性を踏まえると、本研究で開発した CG 固化体は結合材が従来の AAM と同様に GGBS であるが、凝結時間は従来の AAM よりも OPC モルタルと類似した挙動を示した。

次に、CL/GGBS 1.95- と CL/GGBS 2.15- を比較すると、CL/GGBS が大きくなると凝結時間が短くなり、OPC モルタルに挙動が近付いた。次に、CL/GGBS 2.25- と CL/GGBS 2.15- を比較すると、粒度分布が から細粒分の多い になることで CL/GGBS が小さいにも関わらず凝結時間が短くなった。以上の結果に基づくと、CL/GGBS と CL 細骨材の細粒分を調整することで凝結時間をコントロールできることがわかった。

図-2 に CG 固化体の材齢 182 日までの圧縮強度試験の推移を示す。なお、図中の黒線は標準偏差より算出した 2 (約 95%) の範囲を示している。

材齢 1 日の CG 固化体の圧縮強度はどの水準も 1 N/mm<sup>2</sup> 前後と非常に小さく、脱型は可能であったが脆かった。CG 固化体の初期強度の発現は、CL 細骨材からリリースされるセメント成分による水和物の生成が主な要因であると考えられた。ここで、CL 細骨材はセメントと比較して比表面積が小さいため溶解速度が遅い。さらには、CL 細骨材もセメントと同様に表面を母材として水和物が核成長するため、CG 固化体は OPC モルタルと比較して水和物の核成長が緩慢になったと考えられた。しかしながら、材齢 28 日以降はいずれの水準も OPC モルタルよりも圧縮強度が高かった。

図-3 に CG 固化体に gypsum と LSP を添加した配合の乾燥収縮率の推移を示す。基準の配合とした CL/GGBS 1.95- と比較すると、gypsum と LSP を添加することで乾燥収縮を抑制することが可能であり、材齢 91 日時点ではいずれの水準も OPC モルタルよりも収縮率が小さいことが確認できた。材齢 21 日にかけて、gypsum の添加率が高いほど収縮率が小さく、G10-L0 は膨張側であるため、gypsum の添加によるエトリンガイト (Ett) の形成で収縮が抑制できていると考えられた。また、G6-L4 では、Mc の形成により材齢 21 日以降の収縮は抑制されていると考えられた。

本研究では、高炉スラグ微粉末と CL 細骨材、水を使用した配合 (CG 固化体) のフレッシュ性状および強度発現性、寸法安定性について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) CG 固化体は OPC モルタルと同程度の可使用時間を有し、CL/GGBS と粒度分布を調整することで凝結時間のコントロールが可能である。
- 2) CG 固化体は長期材齢 にかけて、OPC モルタルと同等以上の圧縮強度を発現することが確認できた。
- 3) CG 固化体は、二水セッコウと石灰石微粉末を添加することで十分な強度発現性を有しながら、乾燥収縮の抑制効果も確認できた。

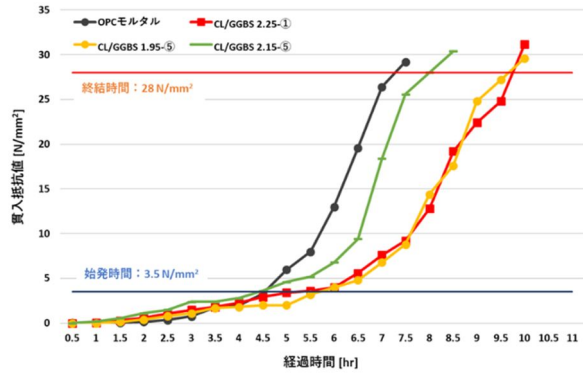


図-1 凝結試験結果

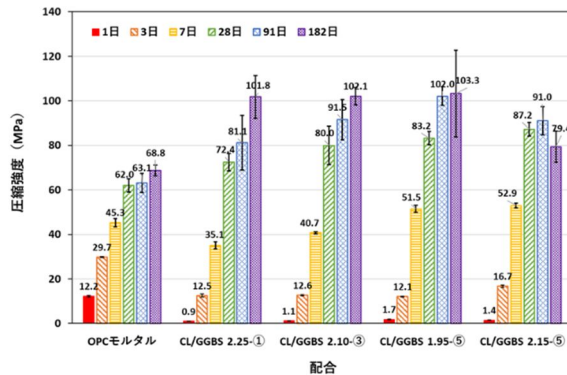


図-2 CG 固化体の圧縮強度の推移 (MPa)

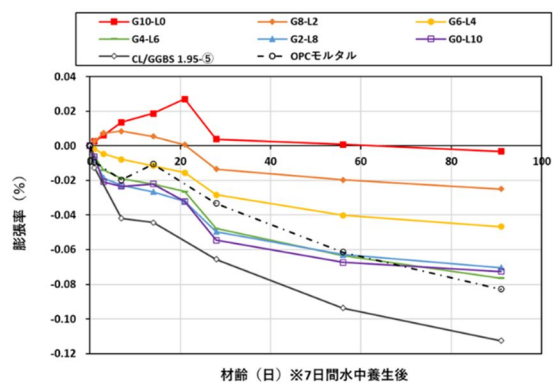


図-3 CG 固化体に gypsum と LSP を添加した配合の膨張率の推移 (%)

以上のように CG 固化体はフレッシュ性状から硬化後の基礎物性，寸法安定性において OPC モルタルと同等以上の性能を有するため，新材料としての実用可能性を十分に有していると考えられた。

#### 参考文献

- 1) セメント協会：セメントハンドブック 2021 年度版，2021
- 2) 宮本ら：細骨材として使用したセメントクリンカーがモルタルの物性に及ぼす影響，セメントコンクリート論文集，vol.69，pp.169-175，2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安田遼介, 宮本慎太郎, 皆川浩, 久田真
2. 発表標題 脱炭素化社会への貢献を目指したセメントを使用しない結合材に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会東北支部令和3年度技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川守田祥吾, 高野伶, 宮本慎太郎, 皆川浩, 久田真, 林建佑
2. 発表標題 高炉スラグ微粉末とセメントクリンカーを使用した固化体の基礎的研究
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会 第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 組成物およびその製造方法ならびにセメントの製造方法	発明者 林建佑, 兵頭彦次, 久田真, 皆川浩, 宮 本慎太郎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2023-053289	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------