

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

東北大学
東北大学
太平洋セメント(株)

学生会員 〇川守田 祥吾 高野 伶
正会員 宮本 慎太郎 皆川 浩 久田 真
正会員 林 建佑

1. はじめに

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¹⁾。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。近年、これらの社会的背景のもと、廃棄物・副産物を原料として多量に使用できるセメントクリンカー（CL）をコンクリート用骨材へ適用した検討がなされている。既報²⁾では、フライアッシュをセメントに対して 60 %置換し CL 細骨材を使用した配合のモルタルの方がセメントにフライアッシュを置換せず石灰石砕砂を使用した配合のモルタルと比較して圧縮強度発現性が優れていたことが報告されている。

この知見を受けて、本研究では近年注目されているアルカリ活性材料（AAM）に対して CL 細骨材を使用することを着想した。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時間が短いなどの課題が挙げられる。この点について CL 細骨材からのアルカリ金属イオンの自己供給が期待できる。以上の着想に基づいて、本研究では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）の開発を目指し、本稿では CG 固化体の硬化後の強度特性を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と水準および配合

CG 固化体には結合材として GGBS（密度：2.91 g/cm³）を、細骨材として CL 細骨材（絶乾密度：2.72 g/cm³）をそれぞれ使用した。また、比較用として普通ポルトランドセメントと標準砂を使用し、JIS R 5201 記載の水セメント比 0.5、細骨材セメント比 3.0 のセメント強さ試験

表－1 CG 固化体の配合

配合	W/B	単位量 (kg/m ³)			
		W	吸水率による補正 水量	GGBS	CL
CL/GGBS 2.25 – F.M. 3.33	0.54	306	7	552	1273
CL/GGBS 2.10 – F.M. 2.60		316	7	572	1230
CL/GGBS 1.95 – F.M. 1.95		327	6	593	1184
CL/GGBS 2.15 – F.M. 1.95		313	7	565	1245

用モルタル（Ref.）を作製した。CL 細骨材はブリーディングの調整を目的として粗粒率（F.M.）を 3 段階に変化させて使用した。CG 固化体は、モルタルフロー値が Ref.と比較して大きく損なわれず、かつブリーディング量も抑えられる範囲内で CL/GGBS（細骨材結合材比）と F.M.を調整した。また、CL 細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 固化体の配合を示す。ここで、水準の表記は「CL/GGBS CL/GGBS の値–F.M. CL 細骨材の F.M.の値」を意味する。例として、CL/GGBS 2.25–F.M. 3.33 は、CL/GGBS が 2.25 で CL 細骨材の F.M.が 3.33 の配合となる。

2.2 試験方法

(1) 圧縮強度試験

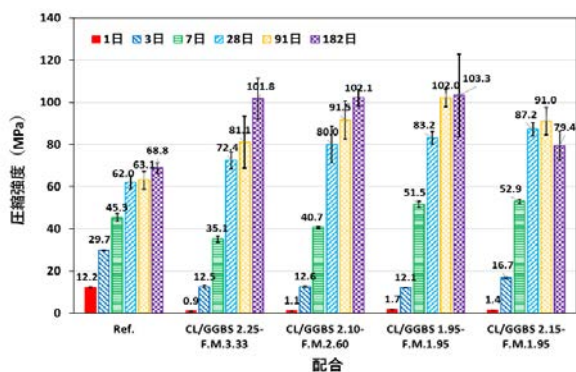
圧縮強度は JIS R 5201 に規定される強さ試験に準拠して材齢 1, 3, 7, 28, 91, 182 日において測定した。

(2) 粉末 X 線回折

(1)に記載した材齢に達した供試体は湿式のモルタルカッターを用いて約 5 mm 角の立方体にカットした。試料は真空脱気装置アスピレーターによる減圧環境下でアセトンに 15 分間浸漬させる作業を 2 度行うことで水和を停止させた。その後は 11 %R.H.に調湿したデシケータの中で 1 週間以上乾燥させ、ボールミルを用いて粒径 0.15 mm 以下に粉碎したものを測定用の試料とし

キーワード セメントクリンカー、高炉スラグ微粉末、アルカリ活性材料、圧縮強度、粉末 X 線回折

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科 TEL 022-795-7427



図－1 CG 固化体の圧縮強度の推移 (MPa)

た．測定条件は，X線光源：Cu-K α ，管電圧：40 kV，管電流：15 mA，走査範囲 (2 θ)：5～70°，ステップ幅：0.022°，スキャンスピード：6.5°/min とした．

3. 実験結果・考察

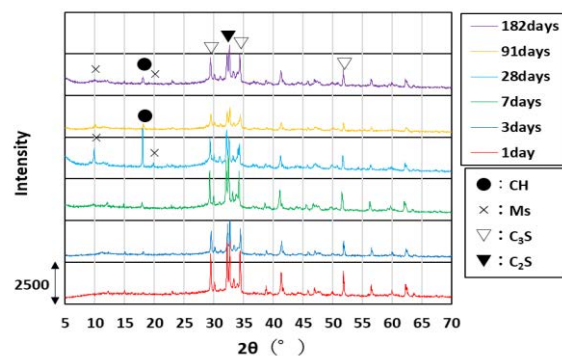
3.1 CG 固化体の強度特性

図－1にCG固化体の材齢182日までの圧縮強度の推移を示す．なお，図中の黒線は標準偏差より算出した2 σ (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/mm²前後と非常に低く，脱型は可能であったが脆かった．材齢28日以降は，CG固化体の圧縮強度は水準に依らず70 N/mm²以上となりRef.よりも圧縮強度が高くなった．しかしながら，材齢91日の時点で100 N/mm²以上の圧縮強度を示したCL/GGBS 1.95-F.M. 1.95の圧縮強度が材齢182日にかけて増進しなかったこと，および他の水準でも100 N/mm²程度で強度増進が停滞したことから，CL細骨材自体が100 N/mm²程度で破壊していることが強度増進の停滞の一因と考えられた．

3.2 CG 固化体の強度発現メカニズム

図－2にCL/GGBS 1.95-F.M. 1.95の材齢182日までのXRDチャートを示す．材齢3日まではポルトランドイト (CH) とモノサルフェート (Ms) の析出は認められず，材齢7日からCHとMsが析出し，材齢28日までCHとMsのピークが増加している．高炉スラグ微粉末はCLと比較してCaの含有量が少ないためCHの生成量は少ない．したがって，CHのピークが増進している材齢28日までに生成した水和物のCaの多くはCL細骨材からリリースされたセメント成分に由来するものと考えられ，これがCG固化体の初期強度の発現に大きく寄与していると考えられた．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



図－2 CL/GGBS 1.95-F.M. 1.95 のXRD チャート

が母材となり水和物の不均一核生成・核成長が起こると考えられるため，比表面積の小さいCL細骨材を使用したCG固化体はRef.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．したがって，CG固化体は材齢3日までは強度がほとんど発現せずに脆かったが，材齢28日にかけてCL由来の水和物が核成長することでCL細骨材の界面が緻密化したため強度が発現したと考えられた．さらに，材齢が進行して材齢91日以降では高炉スラグ微粉末に由来する2 θ =20～30°付近のブロードのハローが小さくなり，CHのピークも減少に転じたことから，CG固化体は材齢の経過に伴いGGBSの溶解が進み，細孔溶液のSiイオン濃度が高まることで非晶質であるC-S-Hの核成長が促されたと考えられた．

4. 結論

高炉スラグ微粉末とCL細骨材，水を使用した固化体 (CG固化体) について，CG固化体は材齢7日以降においてRef.と同等以上の圧縮強度を有することが確認できた．特に材齢28日以降における強度特性は良好であったため，CG固化体は新材料としての実用可能性を有すると考えられた．

謝辞：本研究はJSPS 科研費 (課題番号「JP20K21014」「JP19H02209」) の助成を受けて行われたものです．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会：セメントハンドブック 2022 年度版，2022
- 2) S.Miyamoto and D.Naruse, K.Hayashi, H.Minagawa, M.Hisada : Evaluating the strength development of mortar using clinker fine aggregate with a combination of fly ash and its inhibitory effects on alkali-silica reaction and delayed ettringite formation, Journal of Material Cycles and Waste Management, 2022