論文 ビーライトゲーレナイト系クリンカーを骨材として用いたモルタル およびコンクリートの基本性状

川戸 陸也*1・藤原 浩已*2・丸岡 正知*3・林 建佑*4

要旨:日本におけるセメント産業は建設基礎資材を提供するだけでなく廃棄物・副産物を受け入れリサイク ルする役割を担っている。しかし、セメントの需要が減少傾向にある中、廃棄物の受け入れは増加している。 そこで、本研究では原料として廃棄物を多く使用したクリンカーの利用方法を模索し、クリンカーを細骨材 として用いた場合の基本性状について評価した。その結果、クリンカーを用いると砕砂のみの場合と比べて、 圧縮強度は増加し、乾燥収縮は低減し、中性化抵抗性は向上することがわかった。一方、自己治癒性能や、凍 結融解抵抗性に関しては、クリンカーを細骨材として使用することによる明確な影響は認められなかった。 キーワード:クリンカー、ビーライトゲーレナイト系クリンカー骨材、細骨材、自己治癒

1. はじめに

現在,日本の人口は年々減少傾向にあり,持続可能な 社会の構築という時代の要請がある。コンクリート構造 物の早期劣化の顕在化が社会問題になった一方で,従来 のスクラップ・アンド・ビルドに頼らない,持続可能な コンクリート構造物が強く求められている。

また,日本におけるセメント生産は1996年度の99,267 千 t をピークに減少傾向であるが、セメント会社各社の 努力により、セメント1 tを製造するために使用する廃 棄物・副産物の量は増加傾向を示している¹⁾。もし、セ メント業界が廃棄物・副産物を全く受け入れなくなると, 有効活用されていた廃棄物・副産物は最終処分場に集中 することとなり, 産業廃棄物の最終処分場の残余容量は 現状より約8年半短くなると予想されている1)。日本は 今後も循環型社会形成を推進していく必要がある。循環 型社会構築の担い手として, セメント業界は建設基礎資 材を提供する動脈産業としての役割だけでなく、様々な 廃棄物・副産物を受け入れてリサイクルする静脈産業と しての役割がますます期待されている。よって、廃棄物 を継続的、効果的に利用するため、セメントとしての用 途以外にセメントクリンカーの新たな活用方法を検討す る必要がある。クリンカーは、その製造過程で原料を高 温で焼成・造粒するため、比較的堅固であり、水と接す ればセメント同様に水和反応することが期待できる。

カーと比較してより多くの廃棄物を原料として使用した ビーライトゲーレナイト系クリンカー²⁾を細骨材として 用いたモルタルおよびコンクリートの基本性状について 検討するとともに,その水和反応性を生かした自己治癒 性の可能性について検討した。

ビーライトゲーレナイト系クリンカー骨材を用いた モルタルの基本性状および自己治癒性能の評価実験

2.1 使用材料および配合, 練混ぜ方法

本研究における使用材料は,結合材として普通ポルト ランドセメント(記号:C,密度:3.15g/cm³),細骨材と して砕砂(記号:S,表乾密度:2.62g/cm³, F.M.:2.91, 吸水率:1.48%)およびクリンカー細骨材(記号:GCL, 絶乾密度:3.16g/cm³, F.M.:2.91,吸水率:1.10%),練混 ぜ水として水道水(記号:W),混和剤としてポリカルボ ン酸系高性能 AE 減水剤(記号:SP)および消泡剤(記 号:DF)を用いた。

GCL および一般的な普通ポルトランドセメントクリ ンカー(NCL)の化学組成および構成鉱物を表-1に示 す。構成鉱物の含有率は、リートベルト法により求めた。 表のように、GCLの主な構成鉱物はNCLとは異なり、 ビーライト(表中 C₂S)およびゲーレナイト(表中 C₂AS)で ある。なお、ゲーレナイトとメリライトについては、こ れらが固溶体であり分離し定量することが困難であるた め、全てゲーレナイトであると仮定した。

そこで本研究では、普通ポルトランドセメントクリン

表-1ビーライトゲーレナイト系クリンカーおよび普通セメントクリンカーの化学組成および構成鉱物

11 DI	化学組成 (%)									鉱物組成 (Rv,%)							
性加	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO_3	Na ₂ O	K_2O	Na ₂ Oeq	TiO_2	P_2O_5	C ₃ S	C_2S	C ₂ AS	C ₃ A	C_4AF	MgFe ₂ O ₄
GCL	28.2	7.51	3.42	56.0	1.34	0.93	0.45	0.58	0.83	0.41	0.89	-	74.2	18.0	2.5	4.0	1.0
NCL	21.9	5.53	3.26	66.0	1.43	0.36	0.28	0.46	0.58	0.28	0.28	63.1	16.3	-	5.8	13.6	-
*1	1121 1212 1212 1212 1212 1213																



クリンカー細骨材は、併用する砕砂の粒度と同じにな るようにふるい分け、質量割合で混合し、粒度調整を行 った。細骨材の粒度分布を図-1 に示す。モルタルの配 合条件を表-2 に示す。目標フレッシュ性状は、15 打フ ロー150±30mm、空気量 2±1.5%とした。空気量は自己 治癒性能を評価する通水試験において、ひび割れ内部に 含まれる空気泡の空隙の影響で通水量の減少が見られる ³ため、低い目標値を設定した。

練混ぜには公称容量 10L のオムニミキサを使用した。 練混ぜ手順はセメント,細骨材を投入し空練りを 30 秒 行い,その後あらかじめ SP を混和した練混ぜ水を投入 し1分30秒練り混ぜた後,DFを投入し1 分間練り混ぜ 排出した。

2.2 試験項目

(1)フレッシュ性状試験

フロー試験は, JIS R 5201:1997 に準拠し 15 打フロー により評価した。また,空気量測定は, JIS A 1116:2005 に 準拠した。

(2) 圧縮強度試験

JISA1108:2006 に準拠した。養生は20℃水中養生とし、 材齢 7,28 日にて圧縮強度試験を行った。

(3)乾燥収縮試験

JISA1129-3:2010 に準拠した。

(4)促進中性化試験

JISA1153:2003 に準拠した。

(5) 自己治癒性能試験

本研究において,自己治癒性能を評価するために図-2 に示す供試体を作製した。既往の研究 4において未水 和セメントの存在が自己治癒性能に大きく影響すること が明らかとなったため,前養生を 60℃水中で 53 日間と することで未水和セメントの影響を最小限に留めること を試みた。供試体は,高さ 200mm,直径 100mmの円柱 の鋼製型枠を用いて作製した。練混ぜたモルタルを型枠 に詰め,24 時間後に脱型した。供試体は脱型後に 60℃水 中で材齢 53 日まで養生した後,模擬ひび割れを設ける ためあらかじめ供試体側面に設けた切り欠き部に三角形 鋼棒を当て,圧縮試験機を用い割裂し,縦横 5mm,厚さ

表-2 モルタルの配合条件

피스성	W/C	GCL/S*	単位量(kg/m ³)				
	(%)	(%)	W	С	S	GCL	
GCL0%		0		485	1464	0	
GCL25%	55	25	267		1098	442	
GCL50%		50			732	883	
GCL75%		75			366	1325	
GCL100%		100			0	1766	

*GCL/S:細骨材に対するクリンカーの体積置換率



図-2 自己治癒性能試験の供試体

0.3mm のテフロンシートを断面の上下端から 1cm 内側 の4隅に挟み,ステンレス製のクランプバンドで供試体 側面を円周方向に結束し,合成樹脂製接着剤を用いて側 面の溝から水が漏れださないように塞いだ。次に,通水 試験時において供試体上部に水を溜めるように上部に内 径 100mm の塩化ビニル管を接着した。最後に,一定水頭 となるようにするため,円柱供試体上端から 80mm (水 圧:約 0.0008N/mm²)の位置から余分な水を排出するパイ プを接続した。

試験は,供試体よりも上方に設置したタンクから供試体へ pH12.4 の水酸化カルシウム飽和水溶液(以下飽和水)を導き,供試体上部の塩化ビニル管内部に溜め,供 試体下部のひび割れから漏水するのを確認し,測定を開始した。1分間で供試体下面のひび割れから漏れ出る水量(通水量)を計測し,測定は供試体を割裂した日を基準とし0,1,3,7,14,21,28日目に実施した。測定後の供試体は20℃の飽和水中にて保存し,測定後に再び飽和水中に戻し,水和物の生成を促した。

測定開始時の通水量に対する修復養生後の通水量の 比を通水量割合と定義しその減少率により自己治癒性能 を評価した。通水減少率は式(1)を用いて算出した。

通水減少率(%) =
$$\left(1 - \frac{\delta(g \notin x \text{ HOM} \times \mathbb{I}(g))}{\eta(g)} \times 100\right) \times 100$$
 (1)



図-3 モルタルの15打フロー試験の結果

2.3 試験結果および考察

(1)フレッシュ性状試験

モルタルの 15 打フロー試験の結果を図-3, モルタルの 空気量を図-4, モルタルに混和した SP と DF の添加率 を図-5 にそれぞれ示す。図より, GCL の置換率の増加 に伴い SP と DF の添加率も増加させることで目標とす る 15 打フロー値および空気量となった。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-6に示す。図より,GCLの 置換率の増大に伴い圧縮強度はわずかに増加する傾向が 見て取れる。これは,GCLの微粒分中に含まれるセメン ト相当の粒子が水和反応し緻密化されたことや,粗粒な GCLの表面が反応し、セメントペーストとの界面の付着 が良くなったことによるものと推察される。

(3)乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の結果を図-7に示す。図より、GCLの 置換率増大に伴い乾燥収縮は低減することが見て取れる。 これは、圧縮強度試験の結果と同様、GCLの微粒分によ る緻密化および GCL の水和反応による密実化に起因す るものと推察される。また、GCL 自体の剛性により高弾 性体となり変形を拘束したことも今回の結果の要因と考 えられる。

(4)促進中性化試験

促進中性化試験の結果を図-8 に示す。図より,GCL の置換率の増加に伴い中性化が抑制されていることが見 て取れる。これは,GCLの微粒分が水和反応を生じカル シウムシリケート水和物(C-S-H)や水酸化カルシウム (Ca(OH)2)を生成し,組織が緻密化し炭酸ガスが内部に入 り辛くなったためと推察される。

(5) 自己治癒性能試験

自己治癒性能試験において未水和セメントによる通水 量の減少を出来るだけ抑えるため、20℃91日養生に相当 する積算温度が得られるよう、60℃39日養生を行った。 積算温度の計算は以下の式(2)を用いて算出した⁵⁾。



図-4 空気量試験の結果



図-5 SP および DF の添加率







$$M = \sum_{0}^{t} (\theta + 10) \times \Delta t \tag{2}$$

ここで, M:積算温度(°D・D) Δt:時間(日) θ:Δt日中の温度(°C)

また,供試体内のセメントの水和反応が概ね終了して いることを確認するため,60℃39日の圧縮強度とその2 週間後および6週間後の圧縮強度を比較した。これによ り,強度増加のないことを確認してから自己治癒性能の 評価試験を行った。圧縮強度試験の結果を図-9に示す。 図より,置換率0%のものを見ると60℃39日の圧縮強度 と比較し,60℃53日における圧縮強度の増加が認められ ないことが確認できる。このことから普通モルタル内部 のセメントの水和は十分に進んでいると想定し 60℃53 日の供試体で通水を開始した。なお,図-6と比較する と GCL を混和することで長期材齢における圧縮強度は 無混和のものと比べ大幅に伸びるため低熱セメントと同 様の傾向を持つことが期待できる。

通水量減少率の推移を図-10に示す。図より,多少の ばらつきはあるもののすべての配合で修復養生の初期段 階で大幅な通水量の減少が見て取れる。これは、未水和 のセメントを考慮し GCL の自己治癒性能の評価を試み たが、図-9中の GCL 置換配合の 60℃81日の圧縮強度 の結果が 60℃53日と比べ増加していないことから 60℃ 53日の時点ですでに GCL 自身の反応も概ね終了してい ると推察される。また、供試体作製時の割裂により生じ たクリンカー細骨材の割裂面の水和反応性能に期待した 試験であるが、その反応はごく僅かであるため、すべて の配合で通水量が同程度減少したと考えられる。

ビーライトゲーレナイト系クリンカー骨材を用いた コンクリートの基本性状

3.1 使用材料および配合,練混ぜ方法について

使用材料は,結合材,練混ぜ水,高性能 AE 減水剤に ついては,2.1 節と同様とした。ここでは,細骨材として 砕砂(記号:S,表乾密度:2.63g/cm³,F.M.:2.91,吸水 率:0.17%)およびクリンカー骨材(記号:GCL,絶乾密 度:3.16g/cm³,F.M.:2.91,吸水率:1.10%),粗骨材とし て砕石(記号:G,密度:2.64g/cm³),混和剤として,高 アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界 面活性剤の複合体である AE 剤(記号:AE,密度: 1.00g/cm³)を用いた。なお,細骨材は2.1節と同様の処 理を行い使用した。細骨材の粒度分布を図-11 に示す。 フレッシュ性状の目標値は,スランプ10±2cm,空気量 4.5±1.5%とした。配合条件を表-3 に示す。







図-9 圧縮試験の結果



練混ぜには公称容量 55L のパン形一軸強制練りミキ サを使用した。練混ぜ手順はセメント,細骨材および粗 骨材を投入し空練りを 30 秒間行い,その後あらかじめ SP と AE を混合した練混ぜ水を投入し 90 秒練混ぜ排出 した。



図-11 コンクリート試験時の細骨材粒度分布

表-3 コンクリートの配合条件

피스성	W/C	GCL/S	単位量(kg/m³)						
	(%)	(%)	W	С	S	GCL	G		
GCL0%		0	165	300	859	0	972		
GCL25%	55	25			644	258			
GCL50%		50			429	516			
GCL75%		75			215	774			
GCL100%		100			0	1032			

3.2 試験項目

(1)フレッシュ性状試験

スランプ試験は JIS A 1101:2005 に準拠した。また,空 気量試験は JIS A 1128:2005 に準拠した。

(2) 圧縮強度試験

2.2 節と同様とした。

(3) 乾燥収縮試験

2.2 節と同様とした。

(4) 凍結融解試験

JIS A 1148:2001 に準拠した。

3.3 試験結果および考察

(1)フレッシュ性状試験

スランプ試験の結果を図-12,空気量の測定結果を図 -13,目標スランプおよび空気量を得るために要した SP と AE の添加率を図-14 に示す。SP と AE を添加するこ とでスランプおよび空気量の目標値を得ることができた。 モルタルの場合とは異なり,GCL の置換率の違いによる SP と AE の添加率に大きな差は認められなかった。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-15 に示す。図より、すべて の配合において GCL に置換することで圧縮強度の増加 が見て取れる。これは、モルタルの場合と同様に GCL に 含まれる微粒分によって緻密化されたことや、GCL が水 和反応し密実になったためと推察される。ただし、コン クリートに混和する場合、置換率 100%であってもコン クリート中の3割程度であるためモルタルほどの顕著な 差は認められなかった。



図-12 スランプ試験の結果



1.6 1.4 混和剤添加率(%) 1.2 -SP (%) 1.0 AE (%) 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0 0 25 50 75 100 GCL/S(%)







(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の結果を図-16に示す。図より、すべての GCL 置換配合で乾燥収縮の低減の優位性が見て取れる。これは、モルタルの場合と同様、GCL の微粒分による緻密化および GCL の水和反応による密実化、およびGCL 自体の剛性により高弾性体となり変形を拘束したことに起因するものと推察される。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験の結果を図-17に示す。図より、すべて の配合において 300 サイクル到達時に相対弾性係数が 60%を上回っている。クリンカーを骨材として用いる場 合初期空隙は多いが水和が進むにつれて細粒径の空隙が 減少する報告^のが挙げられており、細孔径の空隙の減少 による凍結融解抵抗性の低下が懸念されたが、GCL に置 換した配合においても十分な凍結融解抵抗性を示すこと ができた。

4. まとめ

モルタルおよびコンクリートの細骨材として、多量の 廃棄物を原料に使用できるビーライトゲーレナイト系ク リンカーを用いることで、圧縮強度が増加し、乾燥収縮 ひずみが低減し、中性化抵抗性が向上することが確認で きた。これは、GCL に含まれる微粒分がセメントのよう に振る舞い見かけの水セメント比が低下したことや, GCLの表面で水和反応が起こり、組織が緻密化したこと によるものと推察した。また、凍結融解試験において普 通コンクリートと同程度の抵抗性が認められた。自己治 癒性能試験では、事前試験により得られた未水和セメン トの影響を考慮し養生日数を長くとったものの GCL そ のものの自己治癒性能を評価することはできなかった。 しかし、その過程で GCL を細骨材として混和した場合 の長期強度発現を示唆することができた。本研究で行っ たすべての試験において GCL を用いたコンクリートは 普通コンクリートと同等以上の性能を発揮することが確 認できた。よって、現状使用されている砕砂などの天然 資材を代替し得る次世代の骨材として十分な性能である と結論付ける。



謝辞

本研究は、平成 26 年度科学研究費補助金基盤研究 (C)(課題番号:26420435)の一部として実施したものであ る。また、太平洋セメント株式会社,株式会社デイシイ、 BASF ジャパン株式会社より種々の材料を提供頂きまし た。実験および論文執筆を行うに当たり、宇都宮大学 土 木材料研究室の根本雅俊氏、高橋洋基氏の助力を受けま した。ここに付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会 HP: http://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01 a.html
- D. Kurokawa, K. Honma, H. Hirao, and K.Fukuda, Quality design of belite-melilite clinker, Cement and Concrete Research, Vol.54, pp.126-132, 2013
- 生駒勇人、岸利治、酒井雄也:コンクリート中のひ び割れ通水量の初期急速抑制機構の解明、セメコン 論文集, Vol.68, No.5, pp.434-441, 2014
- 4) 根本雅俊,藤原浩巳,丸岡正知,小早川真:クリン カー骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの 基本性状,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.351-356, 2016
- 5) 社団法人 土木学会:コンクリート標準示方書 施 工編:施工標準,財団法人 日本規格協会,第12章 寒中コンクリートp.162,2012
- 6) 稲田晴香,宮本慎太郎,皆川浩,久田真:材齢1年 までのセメントクリンカー骨材を用いたモルタル の基礎物性,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016