

論文 ビーライト・ゲーレンナイト系クリンカ骨材を用いたモルタルの各種性状とコンクリートの自己治癒性能に関する研究

川戸 陸也*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・林 建佑*4

要旨: 通常のクリンカより多量の廃棄物を原料に使用したビーライト・ゲーレンナイト系クリンカの細骨材としての適用を試みた。その結果、砕砂を用いた場合と比較し圧縮強度の増加、乾燥収縮の低減、中性化抵抗性の向上が確認された。また、自己治癒性能の評価を行なったところ、縦振動の一次共鳴振動数を用いることである程度評価が可能であり、同クリンカを用いる事で自己治癒性能を付与できることが分かった。しかし、実際に圧縮強度にまで影響を与えるのは修復されてから2週間程度までに生成される物質によるものが大きな要因となると考えられた。

キーワード: クリンカ、ビーライト・ゲーレンナイト系クリンカ骨材、細骨材、自己治癒

1. はじめに

2016年度のわが国におけるセメントの生産量は前年度比100.1%となり3年ぶりに増加した。しかしながら、この結果は輸出によるものが大きくセメントの国内需要は前年度比97.9%となり3年連続で前年を下回る結果となった。また、セメントの国内需要は1990年度の86,286千tをピークに年々減少する傾向にある。2016年度は41,777千tとなりピーク時の半分以下の水準となっている。生産においても同様に1996年度の99,267千tをピークに2016年度では59,271千tとなりピーク時の6割ほどにまで縮小している¹⁾。

一方で、わが国では1年間に約575,000千tもの廃棄物が発生し、うち約261,000千tが循環利用されている²⁾。セメント業界では約29,000千tの廃棄物を受け入れている。これは全体の約11%に相当する。セメント1t製造に対する廃棄物・副産物の使用量は1990年頃には約25%ほどであったが2016年度には約47%にまで上昇している³⁾。これは一重にセメント製造会社の努力によるものであるが、2010年度あたりから頭打ちになっている。

廃棄物の循環利用を推進している一方でセメントの需要が減少している現状でのセメント・コンクリート業界での廃棄物の新たな利用方法の一つとして、本研究ではセメント製造過程における中間製品であるクリンカの製造において普通ポルトランドセメント用クリンカ(NCL)より多くの廃棄物・副産物を使用したビーライト・ゲーレンナイト系クリンカ(GCL)⁴⁾に着目しセメント用途以外の可能性を検討することで、セメントの需要が減少している中でセメント・コンクリート業界における廃棄物・副産物の新たな利用法の提言を目標としている。

本研究ではビーライト・ゲーレンナイト系クリンカ細骨材(GCLS)を用いたモルタルおよびコンクリートの諸性状を把握するとともにその水硬性を活かした自己治癒性能の評価を行なうこととした。

2. GCLを用いたモルタルの基本性状

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%, 粒径判定実績率:80%)およびクリンカ細骨材(記号:GCLS, 絶乾密度:3.16g/cm³, F.M.:2.91, 吸水率:1.10%, 粒径判定実績率:67%), 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の化学組成および構成鉱物を表-1に示す。また、表には比較のためNCLの一例を付記する。化学組成はXRF検量線法により、構成鉱物の含有率はXRD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(C₂S)およびゲーレンナイト(C₂AS)である。なお、ここでゲーレンナイトとしている鉱物は、実際はゲーレンナイトとオケルマナイトの連続固溶体であるメリライトと称したほうが正しいものの、リートベルト解析においてゲーレンナイトとして定量したためゲーレンナイトとした。

クリンカ細骨材(以下、GCLSとする)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。

*1 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻准教授 工博 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社中央研究所 第1研究部セメント化学チーム 修士(理工) (正会員)

表-1 GCL および NCL の化学組成および構成鉱物

種別	化学組成 (%)											鉱物組成 (Rv.%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ Oeq	TiO ₂	P ₂ O ₅	C ₃ S	C ₂ S	C ₂ AS	C ₃ A	C ₄ AF	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	-

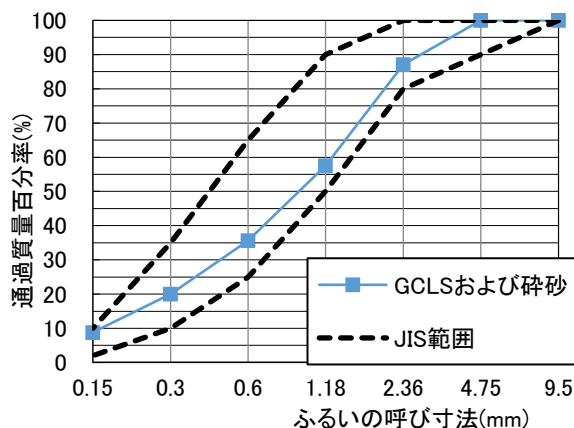


図-1 細骨材粒度分布

表-2 モルタルの配合条件

配合名	W/C	GCLS/S*	単用量 (kg/m ³)			
	(%)		(%)	W	C	S
GCLS0%	55	0	267	485	1464	0
GCLS25%		25			1098	442
GCLS50%		50			732	883
GCLS75%		75			366	1325
GCLS100%		100			0	1766

*GCLS/S: 細骨材に対するクリンカ細骨材の体積置換率

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。なお、圧縮強度試験においては空気量の目標値を 4.0±1.5%とした。

練混ぜには公称容量 10L のオムニミキサを使用し、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 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 に準拠した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JSCE-G 505 に準拠した。GCLS は先に述べたようにビーライト(C₂S)が主成分であり、既往の研究によるとビーライト(C₂S)は養生温度が高くなることにより高い強度発現性を示す傾向が示唆されている^{例え}。そのため本研究では、養生を 20°C60%Rh 養生、20°C

表-3 モルタルのフレッシュ性状

配合名	15 打フロー値 (mm)	空気量 (%)	SP (%)	DF (%)
GCLS0%	135	0.9	0.7	0.5
GCLS25%	155	1.2	0.9	0.5
GCLS50%	160	2.1	1.1	0.5
GCLS75%	155	1.1	1.2	0.7
GCLS100%	155	0.6	1.3	0.8

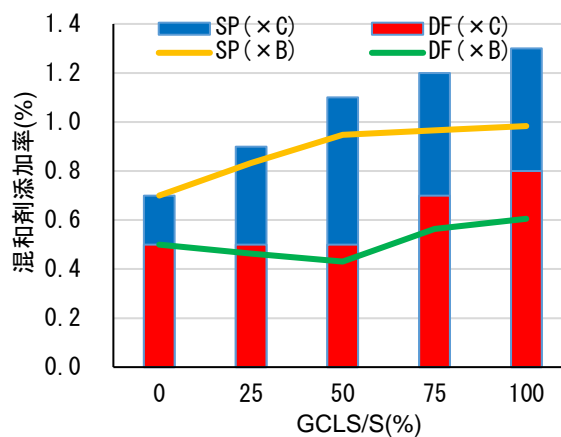


図-2 混和剤の添加率

水中養生、20°C80%Rh 養生、40°C80%Rh 養生、60°C水中養生の条件で行い、GCLS を混和したモルタルの温度依存性を評価した。圧縮強度試験は、それぞれ材齢 7、28 日の時点で行った。

(3) 乾燥収縮試験

JIS A 1129-3 に準拠した。

(4) 促進中性化試験

JIS A 1153 に準拠した。

2.3 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験の結果を表-3 に示す。GCLS を混和することで空気の巻き込み量が増加したため DF を添加することで目標空気量に調整し、目標とする 15 打フロー値および空気量となった。クリンカ骨材を用いる場合 0.15mm 以下を結合材とみなすことがある⁶⁾。図-2 に混和剤の添加率をセメントに対する割合(×C)および結合材(セメント+0.15mm 以下の GCLS)に対する割合(×B)で示す。図より、結合材比で見ると SP および DF の添加率は大幅に変化しない結果となった。

表-4 圧縮試験供試体のフレッシュ性状

配合名	15 打フロー値 (mm)	空気量 (%)	SP (%)	DF (%)
GCLS0%	175	2.6	1.0	0.0
GCLS25%	135	2.5	0.0	0.0
GCLS50%	135	3.9	0.5	0.5
GCLS75%	120	3.3	0.7	0.9
GCLS100%	120	3.2	1.0	1.2

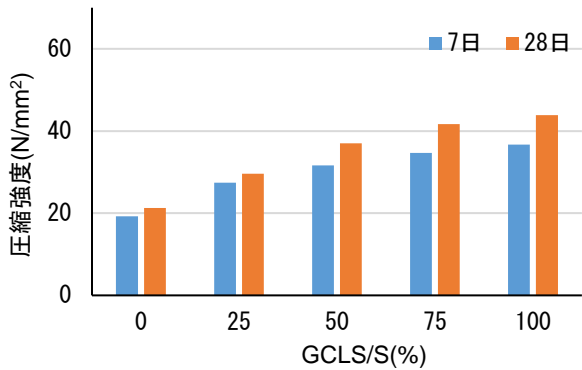


図-3 モルタルの圧縮強度 (20°C60%Rh 養生)

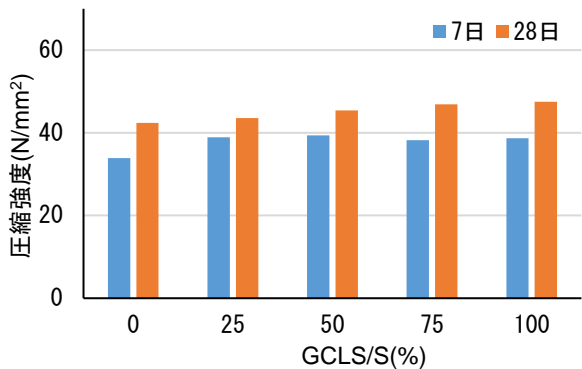


図-4 モルタルの圧縮強度 (20°C水中養生)

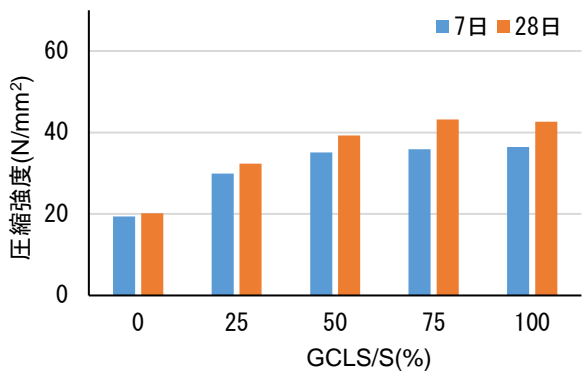


図-5 モルタルの圧縮強度 (20°C80%Rh 養生)

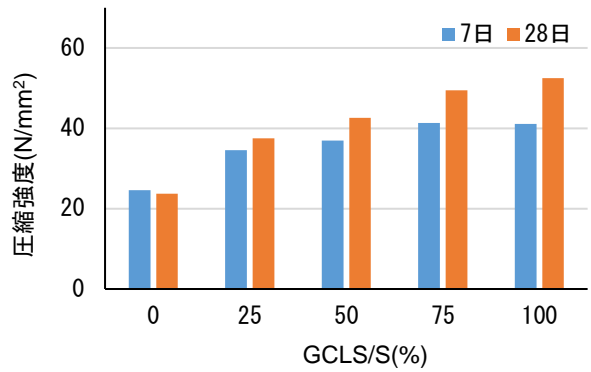


図-6 モルタルの圧縮強度 (40°C80%Rh 養生)

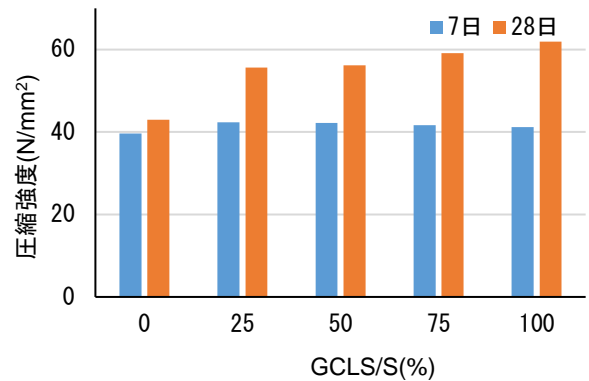


図-7 モルタルの圧縮強度 (60°C水中養生)

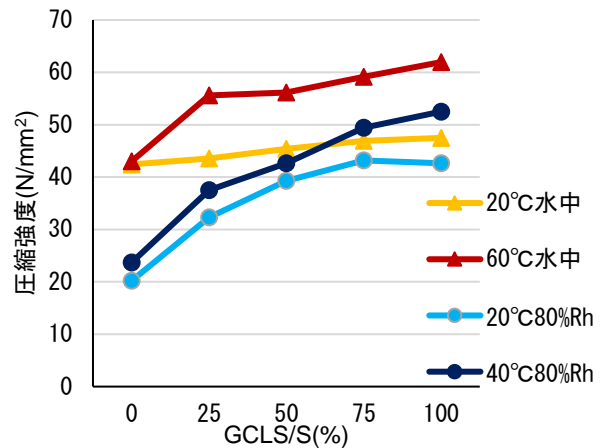


図-8 材齢 28 日における養生温度による圧縮強度の違い

また、GCLS50%配合において空気量 2.1%と最も高い値となったが、結合材に対する DF 量が少ないためこのような結果となったと考えられる。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験に用いたモルタルのフレッシュ性状を表-4、圧縮強度試験の結果を養生条件別に、図-3 から図-7 に示す。

図より、すべての養生条件において、GCLS の置換率の増大に伴い圧縮強度は増加傾向を示した。これは、GCLS

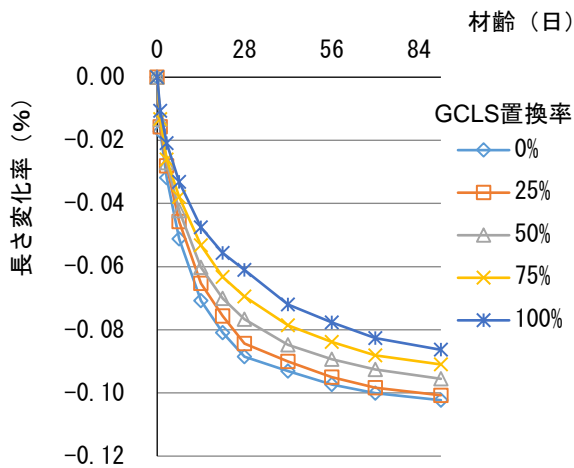


図-9 乾燥収縮試験の結果

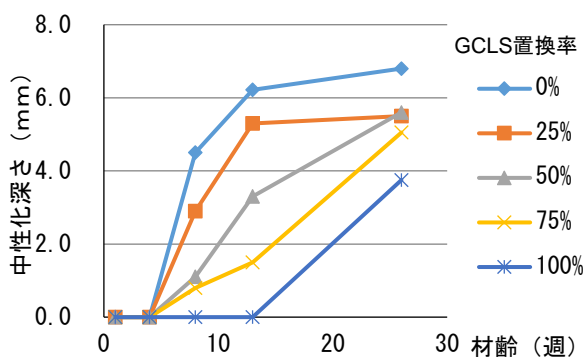


図-10 促進中性化試験の結果

の微粒分の中に含まれるセメント相当の粒径を有する粒子は水和反応を生じるため、みかけの水セメント比が低くなり硬化体組織の緻密化に寄与したためと考えられる。また、GCLSの表面が反応し、セメントペーストとの界面の付着が砕砂より良くなるため置換量の増大に伴い砕砂界面に生じる欠陥部が少なくなったことが圧縮強度の増加につながったものと考えられる。

図-8に各養生条件における材齢28日の圧縮強度を示す。図より、水中養生の場合は20℃から60℃、80%Rh養生の場合では20℃から40℃と温度が上がることで強度が向上しており、この傾向はGCLSを多く含む水準で顕著であった。これは、GCLSの主成分であるビーライト(C₂S)の反応性が、ビーライト系セメントの場合⁵⁾と同様に、常温時と比較した高温時に向上するためであると考えられた。

(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の結果を図-9に示す。図より、GCLSの置換率増大に伴い乾燥収縮は低減することがわかった。これは、圧縮強度試験の結果と同様、GCLSの微粒分による緻密化およびGCLS表面の水和反応による密実化に起因するものと考えられる。また、GCLS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

表-5 コンクリートの配合条件

配合名	W/C	GCLS/S	単位量 (kg/m ³)				
	(%)	(%)	W	C	S	GCLS	G
GCLS0%	55	0	165	300	859	0	972
GCLS50%		50			429	516	
GCLS100%		100			0	1032	

原因と考えられる。

(4) 促進中性化試験

促進中性化試験の結果を図-10に示す。図より、GCLS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、GCLS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)を生成したこと、GCLSとセメントペースト界面の付着が良くなり、硬化体の組織が緻密化し炭酸ガスが内部に入りにくくなったためと考えられる。また、GCLS混和によるアルカリ供給源の増加も影響していると考えられる。

3. GCL混和コンクリートの自己治癒性能の評価

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、細骨材、練混ぜ水、混和剤については、2.1節と同様とした。ここでは、粗骨材として硬質砂岩系砕石2005(記号:G、密度:2.64g/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。フレッシュ性状の目標値は、空気量1%以下とした。配合条件を表-5に示す。

練混ぜには公称容量55Lのパン形一軸強制練りミキサーを使用した。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を混合した練混ぜ水を投入し1分練り混ぜた後DFを投入し30秒間練り混ぜ排出した。

3.2 試験項目

(1) フレッシュ性状試験

スランブ試験はJIS A 1101に準拠した。また、空気量試験はJIS A 1128に準拠した。

(2) 圧縮強度試験

JIS A 1108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) 自己治癒性能試験

既往の研究⁷⁾では、円柱供試体に模擬ひび割れを作製し通水試験を行なうことで自己治癒性能の評価を行っていた。しかし、この方法では同配合においても供試体ごとのばらつきが大きく自己治癒性能の評価にまでは至らなかった。

そこで、本研究ではJIS A 1132の圧縮強度試験用供試

表-5 コンクリートのフレッシュ性状

配合名	空気量 (%)	スランプ (cm)	SP (%)	DF (%)
GCLS0%	0.75	8.5	1.5	3.0
GCLS50%	0.60	11.0	2.0	3.0
GCLS100%	0.80	2.0	3.0	3.5

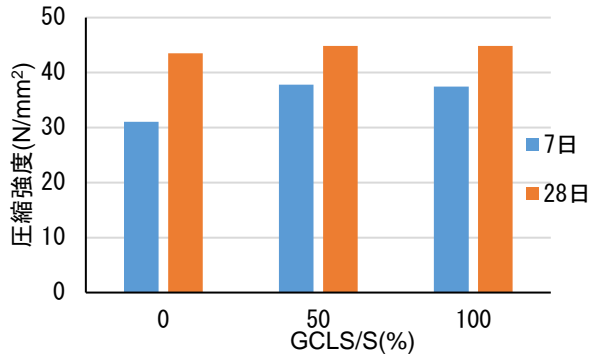


図-11 圧縮強度試験の結果

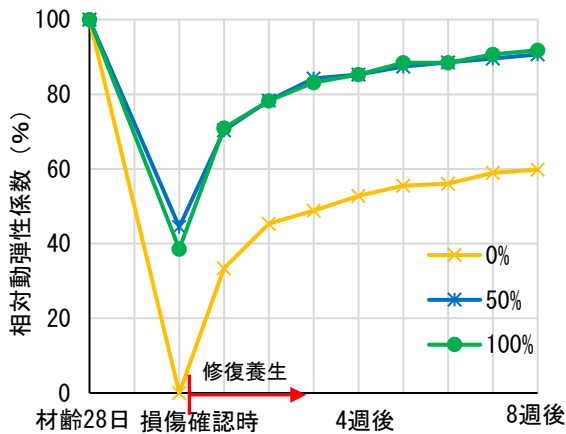


図-12 自己治癒性能試験(レベル I)の結果

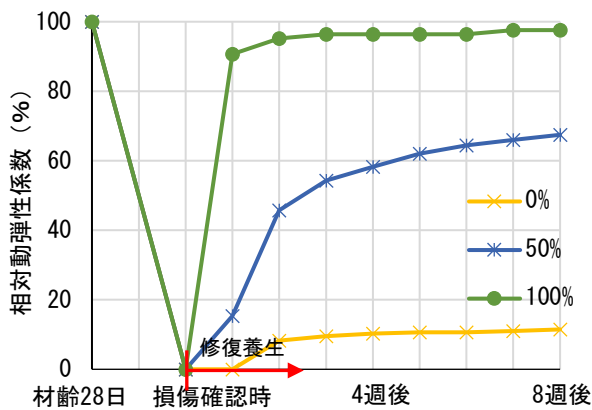


図-13 自己治癒性能試験(レベル II)の結果

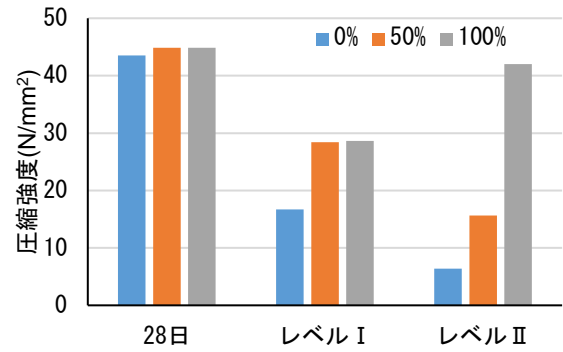


図-14 修復養生 8 週後の圧縮強度試験の結果

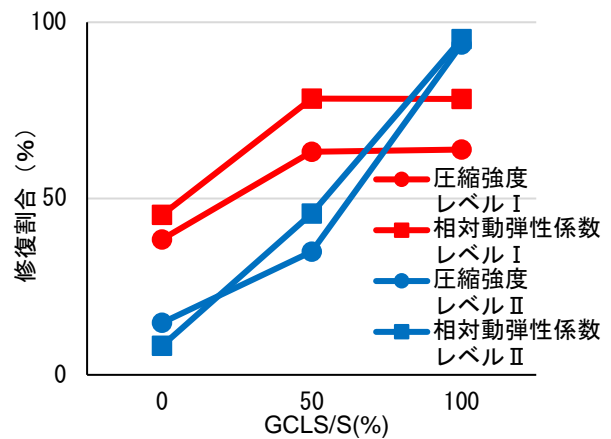


図-15 圧縮強度と修復養生 2 週目の相対動弾性係数の関係

体に準拠し直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を各 3 本作製し、材齢 28 日まで 20°C 水中養生を行い、その後凍結融解作用を与え内部組織にダメージを与え、再び 20°C 水中で修復養生を行い 1 週ごとにその縦振動の一次共鳴振動数を測定し相対動弾性係数を求めた。凍結融解作用を与えてダメージを受けたことを確認した日を 0 日目とし、修復養生を行い、8 週後までの縦振動の一次共鳴振動数を測定した後、速やかに圧縮強度を測定した。

また、事前実験において凍結融解作用を与えた場合のダメージレベルに配合毎にばらつきが出ることを確認されたため同サイクル数(30 サイクル)によるダメージ(レベル I)と、全ての配合において縦振動の一次共鳴振動数が測定不可となるレベルまでの凍結融解作用を繰り返して与えたダメージ(レベル II)の 2 パターンにおいて試験を行うこととした。

3.3 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状試験

フレッシュ性状の結果を表-6 に示す。SP と DF を添加することで空気量の目標値を得ることができた。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-11 に示す。図より、モルタルの水中養生の結果と同様に、砕砂を GCLS で置換する

ことによりわずかに圧縮強度が増加した。これは、GCLSに含まれる微粒分によって見かけの水結合材比が低下し、緻密化されたことや、GCLS表面にて水和反応を生じ密実になったためと考えられる。

(3) 自己治癒性能試験

自己治癒性能試験(レベルⅠ)の結果を図-12、自己治癒性能試験(レベルⅡ)の結果を図-13、修復養生8週後の圧縮強度試験の結果を図-14、圧縮強度と修復養生2週目の相対動弾性係数の関係を図-15に示す。図は材齢28日の時点の動弾性係数を100%とし凍結融解作用を与え終了日から1週ごとに測定した結果を修復養生8週目までをまとめた。

図-12 および図-13 より、修復養生を行なうと初期に相対動弾性係数は大きく変化し、その後緩やかに収束する結果となった。ここで認められた相対動弾性係数の回復は、修復養生により凍結融解作用によりダメージを受けた硬化体組織内に水が浸入し未水和の部分が反応した結果だと考えられる。そのためダメージの大きいレベルⅡの方が水道が多いので比較的すぐに修復したと考える。

次に、レベルⅠとⅡにおいてGCLS0%配合はともに損傷確認時の縦振動の一次共振振動数が測定不可(0)となったが、8週後の相対動弾性係数がレベルⅠでは凍結融解試験前の60%近くまで回復しているのに対し、レベルⅡでは10%ほどに留まる結果となった。これは、破壊確認時の相対動弾性係数が、数値上ではどちらも0%であるが実際にはレベルⅡのほうがより大きなダメージを受けていたものと推測される。

また、GCLS100%配合ではレベルⅠ・Ⅱともに修復養生8週目に90%ほど相対動弾性係数が回復しているが、修復養生後の圧縮強度試験結果では、大きな開きが確認された。そこで、図-15の20℃水中養生28日の圧縮強度を基準に修復養生2週目の相対動弾性係数との関係に着目したところ明確な相関関係が見出せた。相関係数はレベルⅠ・Ⅱいずれにおいても0.9以上となった。このことから圧縮強度に対しては修復開始から2週間程度までに生成されるものが強度回復における主因子となると推測される。

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、圧縮強度の増加、乾燥収縮の低減、中性化抵抗性の向上が確認できた。これは、GCLS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、GCLS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考えた。

また、圧縮強度においては高温度で養生することにより、GCLSを置換した場合に大きな強度発現性が確認された。これは、GCLSの主成分であるビーライト(C₂S)の反応は温度依存性が高いことに起因すると考えられる。

自己治癒性能においては相対動弾性係数を用いることで判別は可能であった。ただし、修復養生8週後の圧縮強度に影響を与えるのは修復養生開始後2週間程度までに生成された物質によるものが大きいと考えられる。以上より、廃棄物の利用方法の一つとしてGCLSは自己治癒性能が期待され新規建造物の長寿命化および維持管理の点から、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を有している結論付ける。

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。

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、根本雅俊氏(当時:宇都宮大学)、高橋洋基氏(当時:宇都宮大学)、伊藤駿之介氏に尽力いただきました。末筆ながら厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会 HP :
<http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc5.html>
- 2) 環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書:第2部 各分野の施策等に関する報告, p.173
- 3) 一般社団法人セメント協会 HP :
<http://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html>
- 4) 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
- 5) 田中敏嗣, 丸岡正知, 竹内良, 富田六郎: ビーライトセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現に及ぼす温度履歴の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.237-242, 1996
- 6) 宮本慎太郎ほか: 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, No.1, pp.169-175, 2015
- 7) 川戸陸也, 藤原浩巳, 丸岡正知, 林建佑: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.55-60, 2017