

論文 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

根本 雅俊*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・小早川 真*4

要旨: 近年, セメント産業では, セメントを製造する際に原料として多量の廃棄物を使用してきた。しかし, 廃棄物使用量が漸増しているに対し, セメントの需要は減少傾向にある。よって, 廃棄物を効果的に利用するため, セメントクリンカーの新たな活用を検討した。本研究では, クリンカーを細骨材として用いるモルタルおよびコンクリートの基本性状について調べた。結果, 普通細骨材のモルタルコンクリートと比べ, 圧縮強度は増加, 乾燥収縮および促進中性化は減少することがわかった。また, モルタルにおいて, 自己治癒性能について評価した。

キーワード: クリンカー, 細骨材, 硬化性状

1. はじめに

近年, セメント産業は, 多量の廃棄物を受け入れて, セメント製造に利用してきた。しかし, 日本で排出される廃棄物の量が漸増しているのに対し, セメント自体の需要は年々減少している。そのため, 今後セメントの需要が減少し続けても, 新規用途を模索する必要がある。例えば, 廃棄物を受け入れるために一定量のクリンカーを製造することが期待される。

本研究ではクリンカーの新しい利用法として, クリンカーを細骨材としたモルタルおよびコンクリートの基本性状を調べた。また, クリンカー骨材としての特徴的な硬化として, モルタルにおいては, ひび割れが発生した際に, ひび割れ断面に現れる新鮮なクリンカー面と水分との水和反応による生成物による, 自己治癒性能付与の可能性について, 実験的検討を行った。

2. クリンカー細骨材使用モルタルの基本性状および自己治癒性能

2.1 使用材料及び配合

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), 細骨材として川砂 (記号: S, 表乾密度: 2.62g/cm³, F.M.: 2.56, 吸水率: 1.72%) およびクリンカー細骨材 (記号:

GCL, 絶乾密度: 3.16g/cm³, F.M.: 2.56, 吸水率: 1.10%), 練混ぜ水として水道水 (記号: W) 混和材としてポリカルボン酸系高性能AE減水剤 (SP) および消泡剤 (記号: DF) を用いた。なお, クリンカー骨材は, 一般的な普通セメント用のクリンカー (NCL) に比べ, 約2倍の産業廃棄物を使用して製造したビーライトゲーレンナイト系クリンカー (GCL) を使用した。GCLは, 主な構成鉱物がビーライトであり, NCLと異なるビーライトの含有率が高い。また, GCLは, ビーライトの他にNCLとは違う構成鉱物であるゲーレンナイトおよびカルシウムアルミネートを構成鉱物とする。GCLおよびNCLの化学組成および構成鉱物を表-1に示す。鉱物含有率は, ボーグ式により求めた。クリンカー細骨材は, 併用する川砂の粒度と同様になるよう, またJIS A 5005に規定される範囲に収まるよう粒度調整を行った。実験に用いたクリンカー細骨材と川砂の粒度分布は同様である。細骨材の粒度分布を図-1に示す。クリンカー細骨材を写真-1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, コンクリート内部に含まれる空気の影響で通水量の減少が見られる¹⁾ため低い目標値に設定した。モルタルの配合条件を表-2に示す。練混ぜには公称容量 10L のオムニミキサーを使用した。

表-1 ビーライトゲーレンナイト系クリンカーの化学組成および構成鉱物

種別	化学組成 (%)														鉱物含有率 (%)					
	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 P ₅	MnO	Cl	C ₃ S	C ₂ S	C ₂ AS	C ₁₂ A ₇	C ₃ A	C ₄ AF	
GCL	28.2	7.51	3.42	56.0	1.34	0.93	0.45	0.58	0.83	0.41	0.89	0.11	0.05	0	70	21	5	0	0	
NCL	21.4	5.42	3.42	65.5	2.00	0.42	0.42	0.34	0.29	0.33	0.05	0.05	0.00	62	15	0	0	9	10	

*1 宇都宮大学 大学院工学部建設学科 (学生会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 工学部建設学科准教授 工博 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社 環境事業部 工博



写真-1 クリンカー細骨材

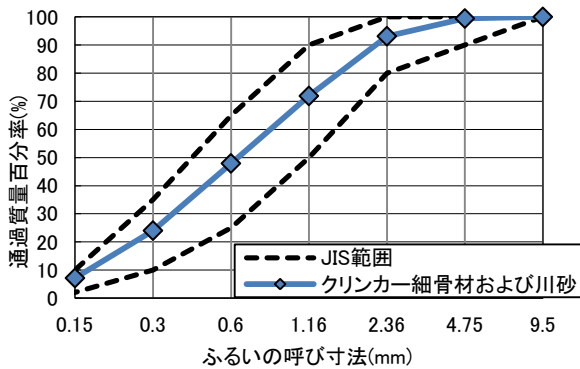


図-1 粒度分布

練混ぜ手順はセメント、細骨材を投入し空練りを 30 秒間行った。その後、あらかじめ高性能 AE 減水剤を混和した練混ぜ水を投入し 2 分間練り混ぜた後、消泡剤を投入し 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

JIS A 1108:2006 に準拠した。養生は 20°C 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

JIS A 1129-3:2010 に準拠した。

(4) 促進中性化試験

JIS A 1153:2003 に準拠した。

(5) 自己治癒性能試験

本研究において、自己治癒性能評価のため図-2 に示す供試体を作製し通水試験を行った。供試体作製の手順は脱型後に 20°C 水中で材齢 28 日まで養生した後、模擬的にひび割れを設けた。あらかじめ供試体側面に割裂を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た。劣化因子が侵入するひび割れは、0.2mm 以上のひび割れ幅であると考えられているため、模擬ひび割れは 0.3mm で作成をした。模擬ひび割れとして

表-2 モルタルの配合条件

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

*GCL/S: 細骨材におけるクリンカーの体積置換率

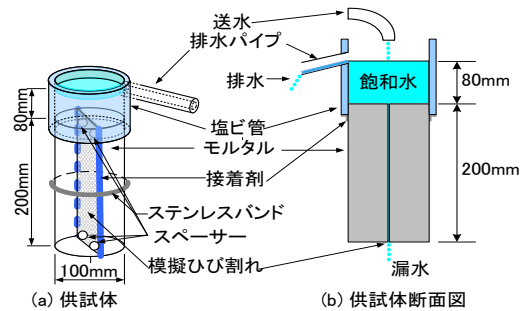


図-2 通水試験の供試体

0.3mmの隙間を設けるためのスペーサーとして、一辺5mmの正方形に裁断した厚さ0.3mmのテフロンシートを断面の上下端、左右の端から1cmの4隅に挟み、ステンレスバンドで結束し、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。供試体上部に内径100mmの塩ビ管を接着し、塩ビ管内に水頭差 80mm(水圧: 約 0.8kPa)一定となるよう水を滞留させ不要な水は排水するように排水パイプをつないだ。また、通水試験時に使用する水は 20°C の pH12.4 の水酸化カルシウム飽和水溶液 (以下飽和水) とした。本研究において自己治癒は Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- の平衡濃度に影響を受けひび割れ間の CaCO_3 の析出により生じると想定しており、ここではモルタル割裂面の Ca^{2+} が水中に散逸しないよう考慮したためである²⁾。

供試体より上部に設置したタンクからホースにより供試体上部へ飽和水を一定量供給し、通水試験を行った。通水量は 3 分間に供試体下面のひび割れから漏れ出る水量を計測し求めた。測定は供試体を割裂した日を 0 日目として 0, 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 91 日目に実施した。試験後の供試体は 20°C の飽和水中にて保存した。試験時のみ取り出し、測定後は再び飽和水中に戻すことで、自己治癒を促した。通水量減少率、想定ひび割れ幅から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。

$$\text{通水減少率(\%)} = \left(1 - \frac{\text{修復養生 } x \text{ 日の通水量(g)}}{\text{初期通水量(g)}} \right) \quad (1)$$

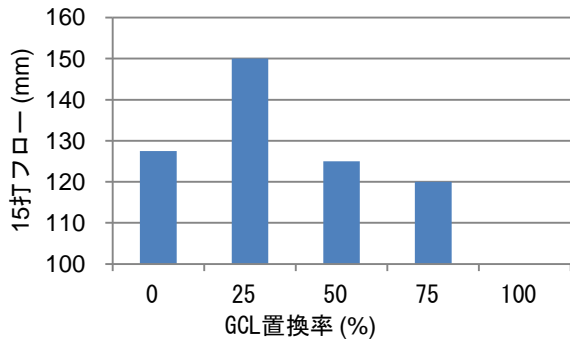


図-3 モルタルの15打フロー

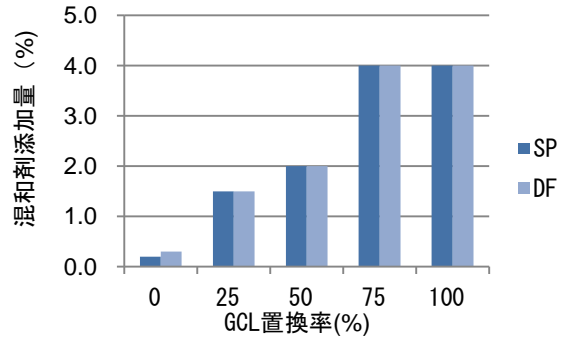


図-5 モルタルの混和剤添加量

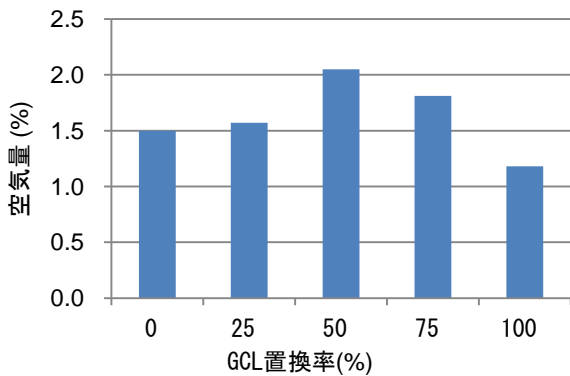


図-4 モルタルの空気量

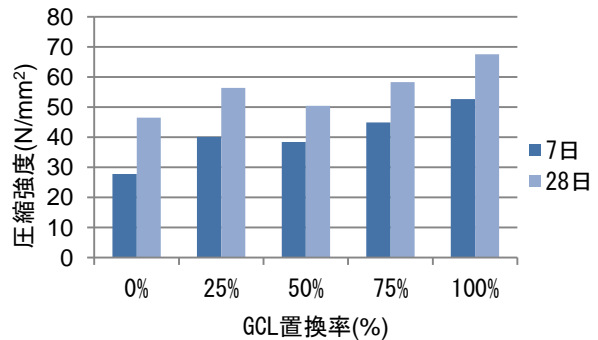


図-6 モルタルの圧縮強度

想定ひび割れ幅の算出には、既往の研究において提案されている式(2)を用いた³⁾。なお、ここでは供試体の模擬ひび割れ幅を0.3mmと仮定し、式(2)から補正係数を計算し算出した。

$$q_{\text{leak}} = \frac{C_w \times b \times \Delta P \times w^3}{12 \times \mu \times L} \quad (2)$$

q_{leak} はひび割れからの通水量 (mm^3/s)、 C_w はひび割れの凹凸を考慮した補正係数、 b はひび割れの長さ (m)、 ΔP は水圧差 (N/m^2)、 μ : 水の粘性係数 (Ns/m^2)、 L は水路長 (m)、 w はひび割れ幅 (mm)をそれぞれ示す。

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について、図-3にモルタルの15打フロー値、図-4にモルタルの空気量、図-5にモルタルに混和した高性能AE減水剤(SP)と消泡剤(DF)の添加率について、配合別にそれぞれ示す。GCL置換率の増加に伴い、目標とする15打フロー値を得るためには多くの混和剤を必要とすることがわかった。また、目標とする空気量に調整するためには、SP添加量の増大に伴い多量に連行される空気泡を除去するために多くの消泡剤を必要とした。

GCL置換率100%の配合において、メーカー推奨のSP添加率の上限となるC×4%を添加したものの、十分な流動性は得られなかった。これは、粒度構成は

GCLとSと同じであるが、形状の良い川砂Sを、砕砂である形状の悪いGCLで置換したことが主要因であると考えられる。これについては、目標値には達しなかったものの、空気量測定及び強度試験用供試体の作製のためテーブルバイブレータを用い加振締めを行った。

(2) 圧縮強度試験

図-6に圧縮試験結果を示す。図より、概ねGCL置換率の増大に伴い、圧縮強度は増加することが確認できた。これは、GCL表面においても水和反応が生じることから水和反応物の増加により硬化組織がより密実になったためと推察される。また、これに伴うGCL細骨材界面の性状改善のためと推察される。

(3) 乾燥収縮試験

図-7に乾燥収縮試験結果を示す。図より、GCLを混和することにより、乾燥収縮ひずみが小さくなることが確認できた。これは、GCLとペーストマトリックスとの付着が水和反応により改善したためと推察される。また、GCLの微粉は、セメント粒子に相当し、これが水と反応するため、見かけの水セメント比がわずかに減少したためと推察される。置換率25%では同条件で、試験を行った他の供試体と比較して乾燥収縮は最小となった。

(4) 促進中性化試験

図-8に促進中性化試験結果を示す。GCL置換率の増加に伴い、中性化が抑制されていることが確認できた。これは細骨材として使用したGCLの水和反応により

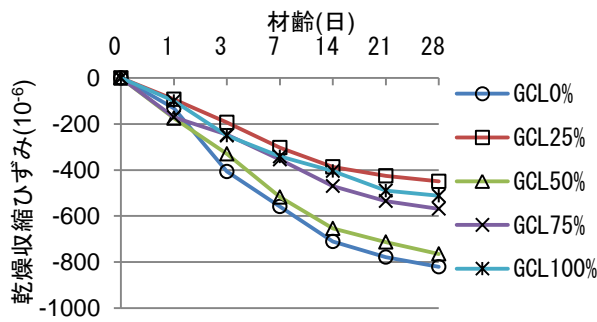


図-7 モルタルの乾燥収縮ひずみの変化

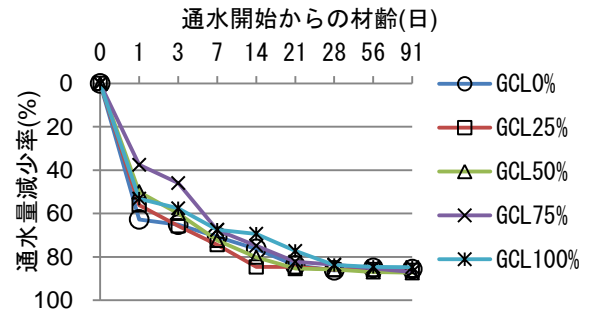


図-9 通水量減少率

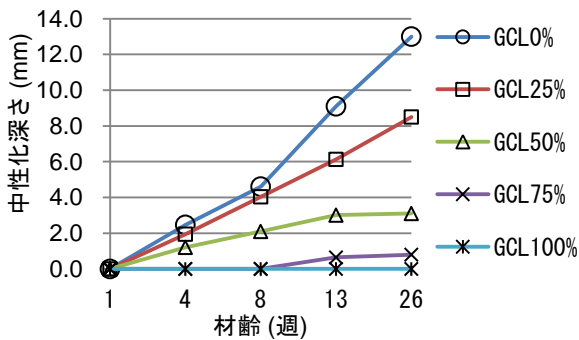


図-8 モルタルの促進中性化

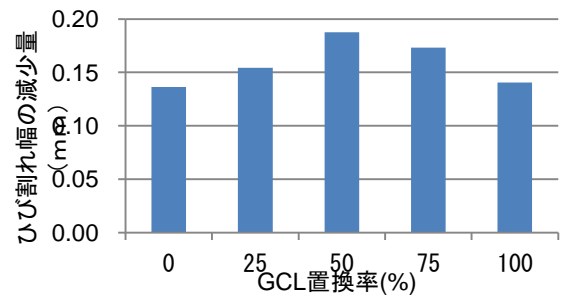


図-10 想定ひび割れ幅の減少量

C-S-H が析出し、pH を維持させたためと推察される。また、圧縮強度増加分、組織が緻密化し、CO₂ の浸透速度が抑制されたためと推察される。

(5) 自己治癒性能試験

a) 通水量減少率

図-9 は通水量減少率の変化を示す。図より、多少のばらつきはあるもののいずれの置換率においても通水開始から材齢 91 日において初期値に対して 15%程度まで減少することがわかった。これは、通水試験開始前の養生期間が 28 日間では、不十分であり残った未水和セメントによる自己治癒性能の影響が大きかったと推察される。水和が十分に進行した後に生じるひび割れを想定するためには、通水試験開始前の養生期間を延ばす必要があることがわかった。

b) 想定ひび割れ幅

図-10 に、通水量の変化を元に式(2)より求めた想定ひび割れ幅の初期値から材齢 91 日の減少量を示す。GCL の置換率が 0% の供試体において、ひび割れ幅が減少しているのは、ペースト部分のセメントの未水和部分による反応だと推察される。GCL の置換率 50% において、最もひび割れ幅が減少していることが確認できる。これは、GCL は、ビーライトを多く含むため反応が遅く置換率 50% 以上では生成物が顕著に現れなかったためと推察される。また、川砂周囲にできる遷移帯は、割裂後に接水すると容易に反応すると考えられる。よって、GCL の置換率の増加に伴い川砂周囲の遷移帯が減少し生成物量が

減少したと推察される。この 2 種類の現象が重なったため置換率 50% において、最もひび割れ幅が減少したと考えられる。GCL の日本コンクリート工学会が早急に補修を必要とするひび割れ幅を 0.20mm 以上と定めている⁴⁾。初期ひび割れ幅が 0.30mm 程度のひび割れは修復養生 91 日後に 0.2mm 以下となっていることから、早急に補修を必要とする対象から外れるまで、ひび割れ幅は小さくなっていることが確認できる。

3. クリンカー細骨材を用いたコンクリートの基本性状

3.1 使用材料と配合条件

使用材料は、結合材、練混ぜ水、高性能 AE 減水剤においては、2.1 節と同様である。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%）、粗骨材として碎石（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。

細骨材の粒度分布は砕砂と同様になるようクリンカー骨材の粒度を調整し用いた。細骨材の粒度分布を図-11 に示す。

目標フレッシュ性状は、スランプ 10±2cm、空気量 4.5±1.5% として実験を行った。配合条件を表-3 に示す。

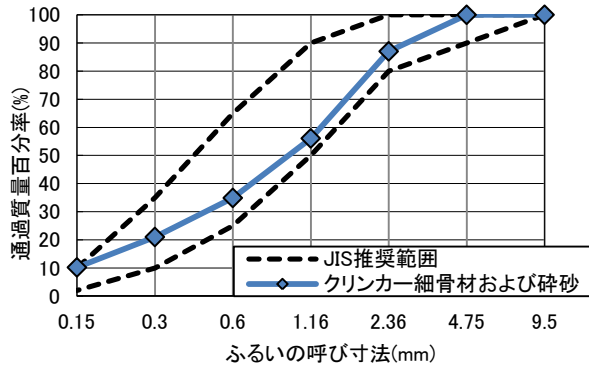


図-11 粒度分布

表-3 配合表

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

*GCL/S: 細骨材におけるクリンカーの置換率

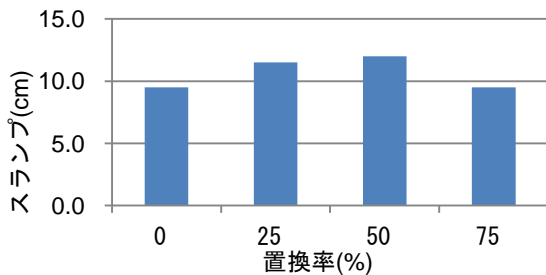


図-12 コンクリートのスランプ

練混ぜには公称容量55Lの一軸パン形強制練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秒間行った。その後、あらかじめ高性能AE減水剤とAE剤を混和した練混ぜ水を投入し90秒練混ぜ排出した。

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節と同様に行った。

(3) 静弾性係数試験

JIS A 1149:2010に準拠した。

(4) 乾燥収縮試験

2.2節と同様に行った。

3.3 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状試験

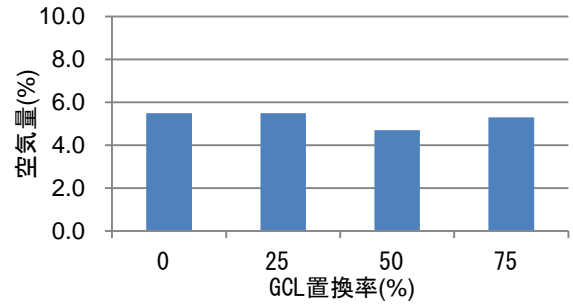


図-13 コンクリートの空気量

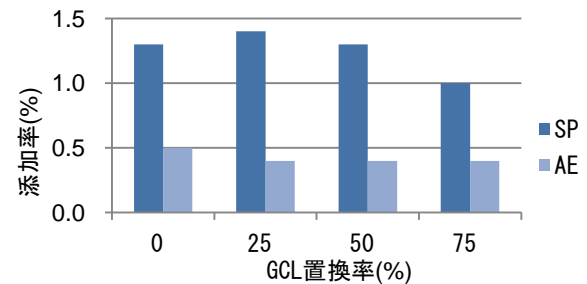


図-14 コンクリートの混和剤添加量

フレッシュ性状試験の結果について、図-12にコンクリートのスランプ、図-13にコンクリートの空気量、図-14にコンクリートに混和した高性能AE減水剤(SP)とAE剤(AE)の添加率について、配合別にそれぞれ示す。フレッシュ性状は混和剤の添加により目標範囲に収めることができた。添加量には大きな差が見られなかった。

(2) 圧縮強度試験

図-15に圧縮強度試験結果を示す。GCLの混和により、無混和と比べ、圧縮強度は増加することが確認できた。これは、モルタルでの検討と同様にGCL細骨材の水和反応およびGCL細骨材界面の性状改善のためと推察される。

(3) 静弾性係数試験

図-16に静弾性係数の試験結果を示す。GCLを混和することにより静弾性係数が増加することが確認できた。これは、GCLとペーストマトリックスとの付着性状の改善が見られたためと考えられる。図-17に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。式(3)は、静弾性係数を圧縮強度から推定する式である⁵⁾。

$$E = 21000 \times \left(\frac{\gamma}{23}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{20}} \quad (3)$$

γ はコンクリートの単位容積質量、 F_c は圧縮強度を示す。図より、静弾性係数の推定式より実験値が高いため静弾性において、GCLを入れたことによる悪影響はないと考えられる。

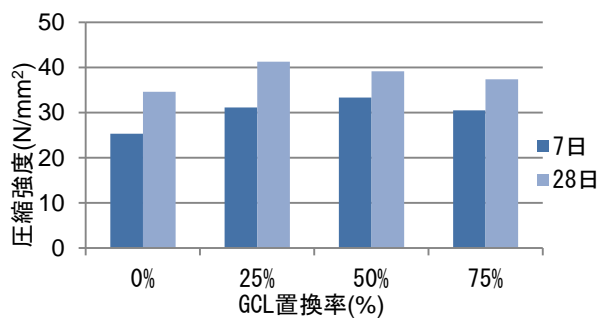


図-15 コンクリートの圧縮強度

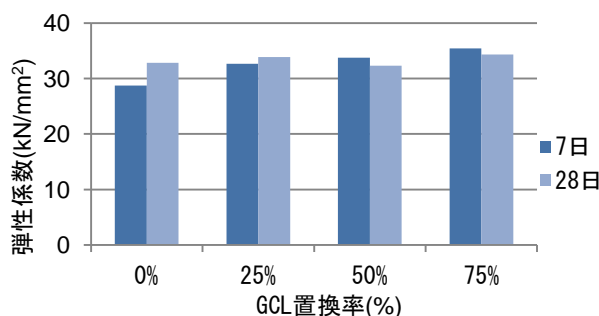


図-16 コンクリートの静弾性係数

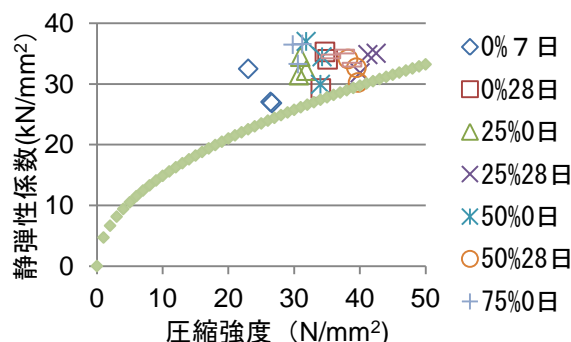


図-17 コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係

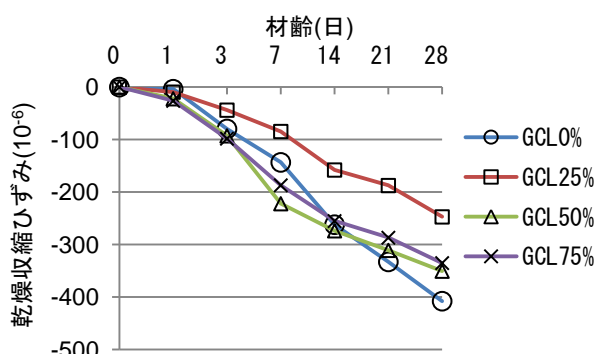


図-18 コンクリートの乾燥収縮ひずみの変化

(4) 乾燥収縮試験

図-18に乾燥収縮試験結果を示す。図より、GCLの混和により収縮ひずみは同程度もしくは減少することが確認できた。これは、モルタルでの検討と同様にGCLとペーストマトリックスとの付着が水和反応により増加したため、GCLの微粉は、セメント粒子に相当しこれが水と反応するため見かけの水セメント比がわずかに減少したためと推察される。また、置換率25%においては、モルタル時と同様に乾燥収縮が最も抑えられる結果になった。

4. まとめ

GCLを細骨材として混和することにより、圧縮強度および静弾性係数は増加、乾燥収縮ひずみおよび促進中性化深さは減少することが確認できた。よって、クリンカーを細骨材として使用することは有用であることが確認できた。乾燥収縮ひずみが抑えられることから置換率25%程度が実用性を想定すると、モルタルおよびコンクリートの性状改善に最も優れていると考えられる。

自己治癒性能について、事前養生を28日としたいずれの置換率においても通水量の減少について類似の傾向を示したことから、未水和のセメント粒子の影響が大きいと推察される。また、想定ひび割れ幅は、GCL細骨材を置換することにより減少し、最も自己治癒性能が見られたのは置換率50%である。

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、(株)デイシイ、BASFジャパン(株)、太平洋セメント(株)より種々の材料を提供頂きました。ここに銘記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本コンクリート工学協会セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会：セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会報告書、日本コンクリート工学協会、2009
- 3) 小日山喬、細田暁、栗田淑乃：コンクリートのひび割れ幅の制御方法と漏水速度低減効果の評価方法についての考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.1, pp.1440-1441, 2011
- 4) 大即信明、鎌田敏郎、今本啓一、長田光司：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-について、日本コンクリート工学会、2013
- 5) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、1958