

◇論文◇

細骨材に石炭ガス化スラグ骨材を用いた
モルタルの基本的物性

Fundamental Properties of Mortar Using Coal Gasification
Slag Fine Aggregate

安田 瑛 紀*, 岸 良 竜**,
河 野 克 哉***

YASUDA, Eiki*; KISHIRA, Ryo**;
KONO, Katsuya***

要 旨

エネルギー効率に優れる新しい発電方式である石炭ガス化複合発電では, 産業副産物として石炭ガス化スラグ骨材 (CGS 骨材) が発生する. CGS 骨材はスラグ骨材のひとつとして 2020 年に JIS 制定されたものの, コンクリートの長期的な物性に与える影響については未だ不明な点も多い. そこで, CGS 骨材を細骨材として用いたモルタルを作製し, 材齢 1 年間までの物性変化を評価した. CGS 骨材を用いることでモルタルの乾燥収縮は減少するとともにヤング率が向上し, CGS 骨材の密度が高いことから, CGS 骨材の持つ高い剛性による影響と考えられた. また, W/C 比が比較的小さく水中養生を行った場合には, 圧縮強度が長期的に増進するとともに, 硬化体の細孔容積量が大きく減少していた. 硬化後の顕微観察の結果から, 細骨材の表面に反応物の層が形成されていることがわかり, CGS 骨材のポゾラン反応によって緻密な硬化体を形成したことが示唆された.

キーワード: 石炭ガス化スラグ骨材, スラグ骨材, 細骨材, ポゾラン材, 乾燥収縮,
圧縮強度, 顕微観察

* 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 セメント化学チーム

Cement Chemistry Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory

** 中央研究所 研究開発推進部 高機能コンクリートチーム

Multi Function Concrete Team, Research & Development Promotion Department, Central Research Laboratory

*** ギソンセメント

Nghi Son Cement Corporation

ABSTRACT

Integrated coal gasification combined cycle is a new power generation system with excellent energy efficiency. The system generates coal gasification slag, CGS, as an industrial byproduct, and the aggregate using CGS was included in the category of slag aggregate for concrete in the Japan Industrial Standards (JIS) in 2020. However, many are left unknown in terms of its influence on the long term properties of cementitious materials. In this study, mortar was prepared using CGS aggregate as fine aggregate, and changes in physical properties were evaluated over the course of one year. The use of CGS aggregate resulted in reduced drying shrinkage of mortar and increased Young's modulus, which was attributed to the high rigidity of CGS aggregate whose density was higher than that of natural sand. It was also found that, with a smaller water cement ratio and sufficient curing in water, the mortar had a significantly decreased volume of voids and developed a higher compressive strength over the long term period. Furthermore, microscopic observation revealed that a layer of reactants was formed on the surface of the CGS aggregate particles, indicating that the dense matrix was formed due to the pozzolanic reaction of CGS aggregate.

Keywords : *Coal gasification slag aggregate, Slag aggregate, Fine aggregate, Pozzolan, Drying shrinkage, Compressive strength, Microscopic observation*

1. はじめに

エネルギー効率に優れる新しい発電方式として「石炭ガス化複合発電（: Integrated coal Gasification Combined Cycle, 以下, IGCC 発電）」の実用化が進められている。従来の石炭火力発電では微粉炭を直接燃焼するのに対し, IGCC 発電では, 微粉炭を高温高压の石炭ガス炉内で酸素や空気を混合して, 一酸化炭素や水素などにガス化する。このガスの燃焼によってガスタービンを, あるいはその燃焼熱によって発生した高压水蒸気により蒸気タービンを回転させて発電することで, 従来の微粉焚きによる石炭火力発電よりも 15%ほど発電効率が向上する¹⁾。

ガス化炉の内部において微粉炭の成分は高温熔融して炉底に流下し, 急冷水砕されることで石炭熔融スラグ (CGS : Coal Gasification Slag) を生じる。このスラグを湿式磨砕により粒度を整えることで, 産業副産物として「石炭ガス化スラグ骨材 (以下, CGS 骨材)」が得られる。CGS 骨材は 2020 年にコンクリート用スラグ骨材のひとつとして JIS A 5011-5²⁾ に制定された, 比較的新しいスラグ骨材である。湿式磨砕により細かい粒径の物が大部分となるため,

粗骨材には利用できず, 細骨材として JIS 制定されている。

CGS 骨材を用いたコンクリートについては, 単位水量を低減できる一方でブリーディング量が多くなること³⁾⁴⁾などが知られている。強度特性に関しては, 他種の細骨材を使用した場合とくらべて高くなる事例³⁾と, 反対に低下するケース⁵⁾⁶⁾のいずれも報告されている。また, コンクリートの耐凍害性⁷⁾や長期強度⁸⁾が向上するという報告もあり, 耐久性に寄与する材料であるとも期待されている。CGS 骨材は原料石炭に由来して SiO_2 と Al_2O_3 を豊富に含むことから, これらの長期物性の改善は CGS 骨材のポゾラン反応によるものと考えられている。しかしながら, これまでの報告ではコンクリート中の細孔容積量の減少や遮塩性の向上といった試験結果から帰納的に反応機構を推察しており, 実際に CGS 骨材の反応を確認した例は認められない。

以上に述べたように, CGS 骨材は細骨材として十分に利用可能な品質を有するものの, コンクリートに及ぼす影響については未だ不明な点も多い。したがって本報では, CGS 骨材を用いたモルタルに対し, 材齢 1 年間までの物性変化を評価した。試験は山砂を使用した場合と比較する形で行い, フレッシュ性

状，各種強度，収縮および細孔径分布を測定した．また，硬化後のモルタル中において骨材とペースト界面の顕微観察を行うことで，CGS 骨材のポゾラン反応によって硬化体が緻密化する可能性を示した．

2. 実験方法

2.1 実験ケース

Table 1 に示すように，強度レベルならびに細骨材の種類が異なる全 4 水準のモルタルを作製した．強度レベルとして水セメント比 (W/C) を 50 ならびに 30% とすることで調整した．比較用の細骨材としては山砂を用意し，細骨材の絶対容積は 400L/m³ に固定した．

2.2 材料ならびに配合

本検討に用いた材料は **Table 2** に示すとおりである．練混ぜ水として上水道 (W) を，セメントとして普通ポルトランドセメント (C) を，細骨材として山砂 (S_L) と CGS 骨材 (S_C) をそれぞれ用意した．化学混和剤には AE 減水剤 (AE)，高性能 AE 減水剤 (SP) および消泡剤 (DF) を用意し，AE は W/C=50% の水準

で，SP は W/C=30% の水準でそれぞれ使用した．

モルタルの配合表は **Table 1** に示したとおりであり，細骨材の絶対容積と W/C からそれぞれの材料の単位量を決定した．

2.3 CGS 骨材の物理的・化学的特徴

それぞれの細骨材に対する骨材試験の結果を **Table 3** に示す．CGS 骨材は高い密度と低い吸水率を有しており，骨材粒子に含まれる空隙は少ないと考えられる．山砂よりも実積率は高い一方で微粒分量は多く，湿式磨砕による粒度の調整が影響しているものと推察される．

また，蛍光 X 線分析により測定した骨材の化学組成は **Table 4** に示すとおりである．山砂は約 75% の大部分が SiO₂ であるのにくらべて，CGS 骨材は原料石炭に由来して構成元素の種類が多い．主要成分は SiO₂ と Al₂O₃ であるが，このほかにも CaO や MgO のなどの含有率が山砂よりも高い．Na₂O の含有率も高くアルカリを多く含んでおり，JIS²⁾ ではアルカリシリカ反応 (以下，ASR) への反応性を確認することを規定している．なお，最近の研究によれば，ASR 反応性を有する粗骨材と CGS 骨材を併用する場合に，CGS

Table 1 Mix proportion of mortar
(モルタルの配合表)

No.	Name	Fine aggregate	W/C (%)	s* (L/m ³)	Unit Weight (kg/m ³)				Water reducing agent
					W	C	S _L	S _C	
1	L-50	Land Sand	50	400	343	686	1028	-	AE
2	C-50	CGS	50	400	343	686	-	1116	AE
4	L-30	Land Sand	30	400	273	908	1028	-	SP
5	C-30	CGS	30	400	273	908	-	1116	SP

*s: Unite volume of fine aggregate

Table 2 Materials of mortar
(モルタルの材料)

Material	Type	Symbol	Characteristics
Water	-	W	Tap water
Cement	Ordinary Portland Cement	C	Density: 3.16g/cm ³ , Specific surface area: 3,120cm ² /g
Fine aggregate	Land sand	S _L	As mentioned in Table 3
	CGS aggregate	S _C	
Chemical admixture	AE Water reducing agent	AE	Lignin based type
	High performance AE water reducing agent	SP	Polycarboxylic Acid Based
	Deforming agent	DF	Polyalklene glycol type

骨材からのアルカリ溶出によって ASR による膨張が早期に誘発される可能性が指摘されている⁹⁾。

2.4 試験体の作製方法

練混ぜには容量 10L のホバートミキサを使用し、練混ぜ直後のモルタルを所定の型枠へ打ち込んだ。

養生方法として水中養生ならびに気中養生の 2 条件を設定し、試験項目に応じてそれぞれ実施した。いずれの養生方法の場合にも材齢 1 日で脱型し、その後、材齢 28 日まで水中養生 (20℃) を行った。水中養生を行う場合は所定の材齢まで水中養生を継続し、気中養生を行う場合には材齢 28 日以降は気中環境 (20℃, 60% R. H.) に静置することで乾燥させた。本検討においては、水中ならびに気中養生を行った試験体に対して、養生期間が同一になった時点で各種試験を行った。そのため、試験時の材齢は水中養生と気中養生で異なり、28 日の差があることを注記する。例えば、気中養生を 364 日行った試験体は、気中養生以前に 28 日間の水中養生を行ったので、試験時の材齢は 396 (=364+28) 日である。

2.5 測定項目および試験方法

練混ぜ直後のモルタルを用いて、JIS R 5201 に準拠して落下振動のないフローを、容量 500mL のモルタルエアメーターにより空気量をそれぞれ測定した。目標フローは W/C=50%では 220±20mm, W/C=30%では 275±20mm をそれぞれ目安とし、目標空気量は 2.5%

以下として、化学混和剤の添加量にて調整した。さらに、JSCE-F 532 に準拠して練混ぜから 20 時間後のブリーディング率を測定した。

モルタルの力学的特性として、圧縮強度とヤング係数を寸法 φ50×100mm の円柱試験体を用いて、曲げ強度を寸法 40×40×160mm の角柱試験体を用いてそれぞれ測定した。所定の材齢において試験を行い、強度の経時変化を養生条件毎に調べた。

硬化後の空隙構造を評価するため、水中養生 28 日ならびに 364 日において、水銀圧入式ポロシティメータにより細孔径分布を測定した。測定試料は、寸法 φ50×100mm 試験体の長手方向中心から 5mm 角の試料を取り出し、これを 7 日間 D 乾燥¹⁰⁾させたものを用いた。

細骨材界面の状態を観察する目的で、水中養生を 364 日行ったモルタルから試料を採取し、二次電子像 (以下, SEM) ならびに反射電子像 (以下, BSE) による観察をそれぞれ行った。また、SEM に付属する EDS (エネルギー分散型 X 線分光法) を用いて線分析を行うことで各元素の量を定性評価した。EDS の対象元素は O, Na, Mg, Al, Si, Ca の 6 種とした。

Table 3 Physical properties of fine aggregate
(細骨材の物性値)

Item	Test method	Unit	Value	
			Land Sand	CGS aggregate
Fine Modulus	JIS A 1102	-	2.63	2.62
Density in saturated surface-dry condition	JIS A 1109	g/cm ³	2.57	2.79
Density in oven-dry condition		g/cm ³	2.52	2.78
Absorption		%	1.98	0.35
Mass of unit volume	JIS A 1104	kg/L	1.74	2.03
Solid content		%	66.7	73.2
Content of particles finer than 75μm sieve	JIS A 1103	%	1.30	4.19

Table 4 Chemical composition of aggregate (Unit: Mass%)
(細骨材の化学組成 (単位: 質量%))

Aggregate	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl	Ba
CGS aggregate	0.29	34.9	21.7	5.95	19.3	3.76	0.28	8.84	0.63	1.71	0.29	0.06	0.017	1.56
Land sand	1.97	75.8	12.4	2.87	0.43	0.86	0.10	2.69	2.34	0.35	0.05	0.04	0.002	0.045

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ性状を **Table 5** に示す。流動性については、減水剤量をわずかに調整することで所要のフローが得られ、CGS 骨材を用いることによる影響は小さい。空気量については、化学混和剤の添加量がほとんど同じであるにもかかわらず、山砂よりも CGS 骨材を使用した方が低下する傾向となった。フライアッシュを用いた場合にみられるように¹¹⁾、CGS 骨材に含まれる炭素分が影響した可能性が考えられる。ブリーディング率は CGS 骨材を用いることで増加し、既往の報告⁴⁾と同様に骨材の粒形や粒度による影響と考えられる。

Table 5 Fresh properties of mortar
(フレッシュ性状試験の結果)

No.	Name	Dosage (C×%)		Flow (mm)	Air (%)	Bleeding ratio (%)
		AE/SP	DF			
1	L-50	0.2	0.002	227	1.9	2.5
2	C-50	0.2	0.002	239	0.6	4.2
3	L-30	1.0	0.002	254	1.7	1.4
4	C-30	0.9	0.002	256	1.4	2.5

3.2 乾燥収縮

気中養生において測定した長さ変化率を **Fig. 1** に示す。なお、長さ変化率の値は負(－)を収縮、正(＋)を膨張と定義する。乾燥収縮量は W/C が 30% の場合より 50% の方が大きく、W/C が高いほど水量は多くなるからである。骨材の種類による影響としては、山砂よりも CGS 骨材を使用した方が収縮量は

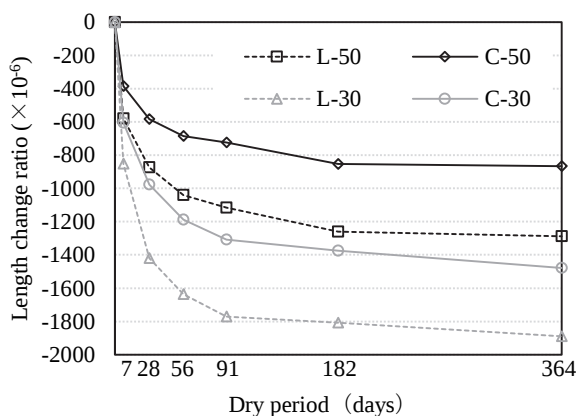


Fig. 1 Change in length of mortar
(モルタルの長さ変化率の経時変化)

小さく、既往の報告³⁾と一致する傾向である。乾燥期間 364 日における長さ変化率をくらべると、CGS 骨材を用いることで、W/C が 50% の場合は 25% ほど、W/C が 30% においては 35% ほどの低減効果がそれぞれみられた。CGS 骨材によって乾燥収縮量が小さくなる理由としては、骨材自身の剛性が高いために、細骨材が収縮変形を拘束する効果が大きいことや、吸水率が低いために骨材粒子が含む水量が少ないことなどによると考える。

3.3 強度特性

(1) 圧縮強度

水中養生または気中養生における圧縮強度の履歴を **Fig. 2, 3** にそれぞれ示す。気中養生を行った場合は、山砂を使用した方が全ての材齢を通じて圧縮強

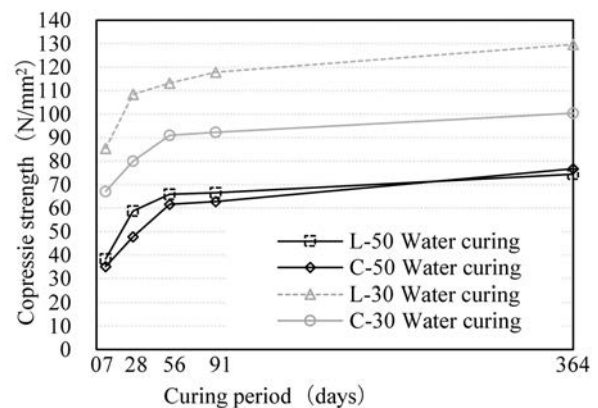
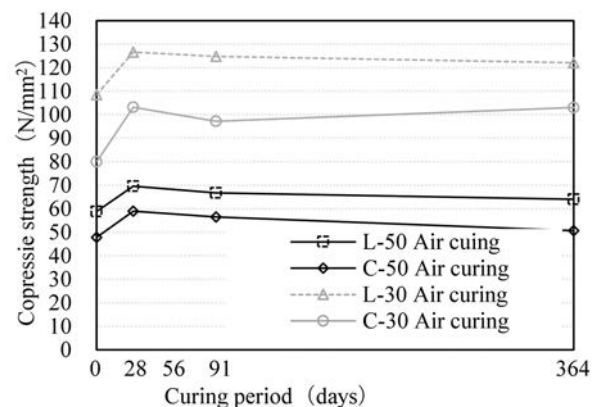


Fig. 2 Change in compressive strength of mortar cured in water
(水中養生を行った場合の圧縮強度)



(b) W/C 30% (水セメント比 30%)

Fig. 3 Change in compressive strength of mortar cured in air after 28 days water curing
(水中養生 28 日の後に気中養生を行った場合の圧縮強度)

度は高い。その一方で水中養生の場合には、CGS 骨材を使用した方が長期にわたって圧縮強度が増進しており、特に W/C が 50% の場合に顕著である。最終的には、W/C=50% において水中養生 364 日時点の圧縮強度は、CGS 骨材を使用した方が高くなった。

ここで、気中養生 364 日においてはヤング係数の測定を行ったため、圧縮強度と併せて **Table 6** に示す。これによると、圧縮強度は上述のとおり CGS 骨材を使用した方が低いにもかかわらず、ヤング係数に関しては、CGS 骨材は川砂と同等以上になっている。モルタルのヤング係数は、セメントペーストと骨材のそれぞれのヤング係数と体積比率に依存すると考えられるから¹²⁾、この結果は CGS 骨材自身のヤング係数が高いことを示唆している。また、骨材の密度が高い点や、乾燥収縮量が CGS 骨材を用いた場合に減少したこととも合致する。

Table 6 Mechanical properties of mortar after 365 days of air curing
(気中養生 365 日における強度特性)

No.	Name	Compressive strength (N/mm ²)	Young's modulus (kN/mm ²)
1	M-50	62.3	15.2
2	C-50	52.7	15.2
3	M-30	123	27.1
4	C-30	101	30.8

(2) 曲げ強度

養生条件毎の曲げ強度は **Fig. 4, 5** にそれぞれ示すとおりである。水中養生の場合は、いずれの W/C においても、CGS 骨材を使用した場合の曲げ強度は山砂の場合と同等かそれ以上となった。しかしながら気中養生を行った場合には、乾燥期間に伴って曲げ強度が低下し、CGS 骨材を使用した場合に顕著である。その結果、乾燥期間 364 日時点においては、いずれの W/C でも CGS 骨材を使用した方が曲げ強度は低くなった。CGS 骨材を用いると、長期的に乾燥を受ける場合に曲げ強度は低下するものと考えられる。この理由としては、前述したように乾燥収縮を剛性の高い CGS 骨材が拘束すると、反力として試験体中に引張応力が生じていた可能性¹³⁾などが考えられる。

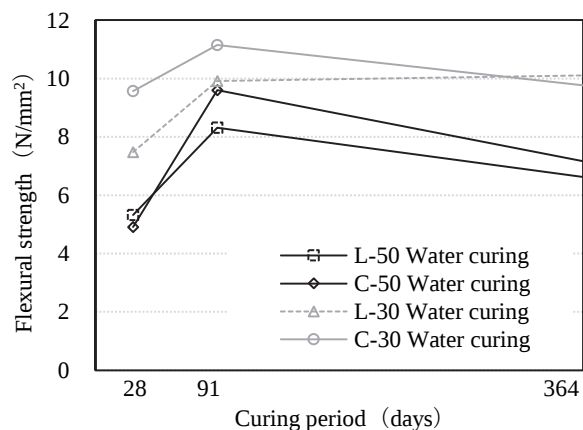


Fig. 4 Change in Flexural strength of mortar cured in water
(水中養生を行った場合の曲げ強度)

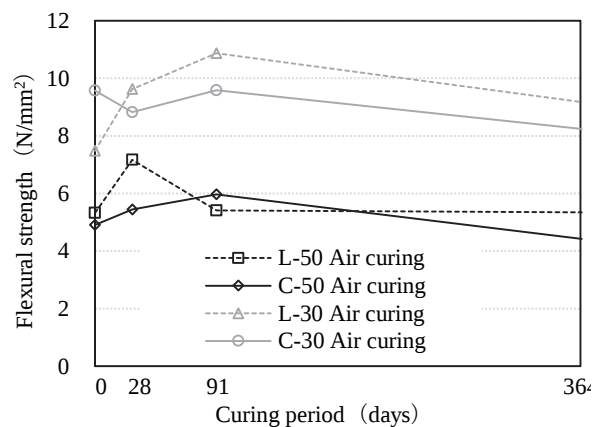


Fig. 5 Change in Flexural strength of mortar cured in air after 28 days water curing
(水中養生 28 日の後に気中養生を行った場合の曲げ強度)

3.4 空隙構造ならびに硬化組織の観察

細孔径分布の測定結果は **Fig. 6** に示すように、いずれの W/C でも水中養生を継続することで硬化体中の細孔容積が減少した。反応物の生成によって、空隙が充填されたことを示唆している。W/C が 50% の場合は、CGS 骨材を使用した方が細孔容積の減少は著しい。水中養生 28 日と 364 日における積算細孔容積の減少率を算出すると、山砂を使用した L-50 では 27% の減少だったのに対して、CGS 骨材を使用した C-50 では 47% 減少している。その一方で W/C=30% において骨材種類による影響は小さく、いずれの場合でも 20% 程度の減少に留まっている。以上の結果より、CGS 骨材を用いて水中養生を行う場合には空隙量が長期的に減少し、W/C が高い方が顕著であることが示された。この傾向は圧縮強度の増進とも一致しているため、次節で行う顕微観察によってメカニズムを考察する。

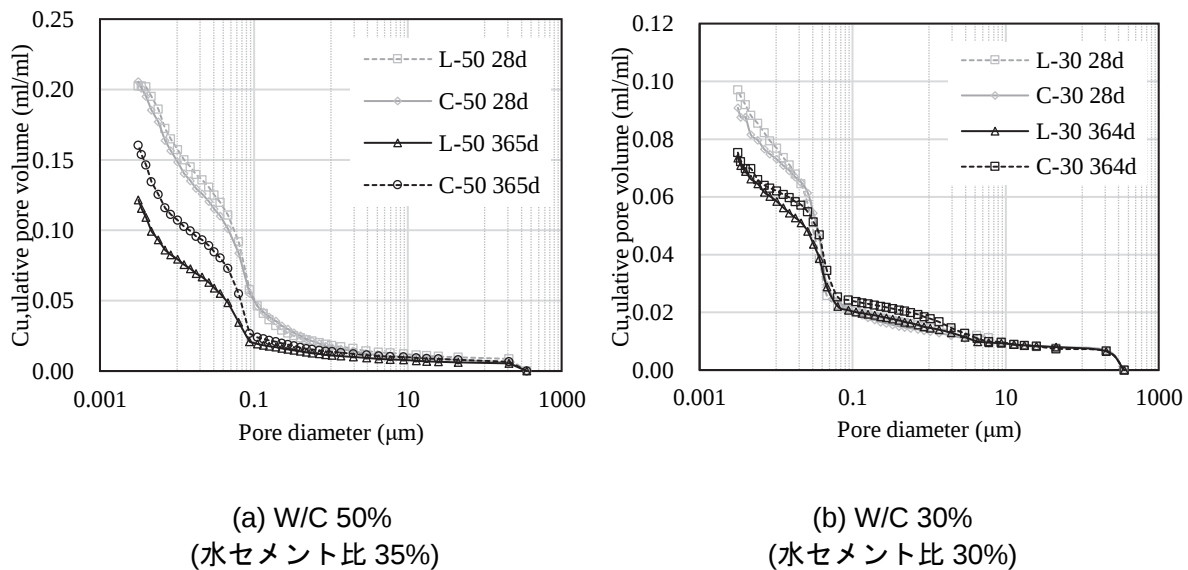


Fig. 6 Pore size distribution of mortar
(モルタルの細孔径分布)

3.5 顕微観察による CGS 骨材の反応メカニズムの考察

水中養生 364 日において取得した SEM 画像を Fig. 7 に示す. CGS 骨材を使用した C-50 と C-30 において, 骨材粒子とセメントペーストとの界面に, 反応生成物と考えられる層状の物質が確認され, 図中の白矢印で示している. また, この層は W/C が高い C-50 の方が厚くなっている. 山砂粒子の周辺ではこのような物質は確認されず, セメントペーストとの間に空隙が認められた.

つづいて, BSE の観察結果を Fig. 8 に示す. CGS 骨材の外周部は骨材粒子の色調よりも暗く観察され, 密度差が生じている. また, SEM と同様に, 図中に白矢印で示すように, 反応生成物と考えられる層状の物質が認められた.

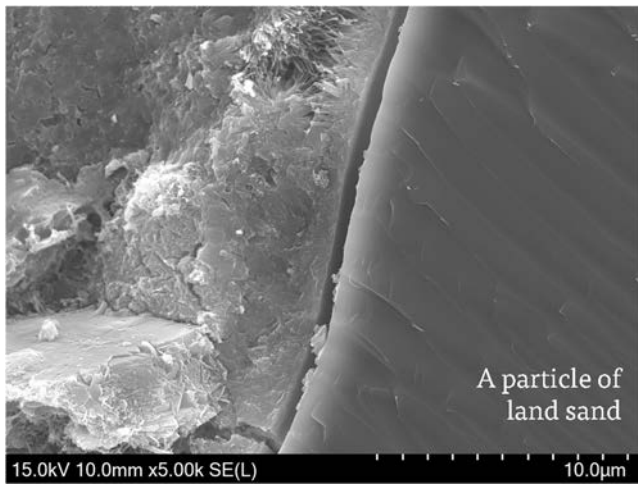
さらに, EDS の分析結果を Fig. 9 に示す. 各図の上段は骨材周囲の BSE 画像であり, 下段は線分析(対象元素: Si, Ca, Mg)の結果である. 上段図に示した線は線分析の実施範囲であり, 下段図の EDS 試験結果の横軸に対応している. なお, 線分析の範囲は骨材界面を中心として $35\mu\text{m}$ 以内の区間とした. また, 下段図には骨材界面から $5\mu\text{m}$ 以内の区間を骨材近傍部として破線で示している.

EDS 観察の結果によれば, 山砂を使用した場合には, 骨材部では Si が認められ, そのほかの元素はほとんど認められない. セメントペースト部では Ca, Si が認められ, セメントとその水和物の成分に対応していると考えられる. 骨材近傍ではこれらの元素ピークが一様に減少または増加している.

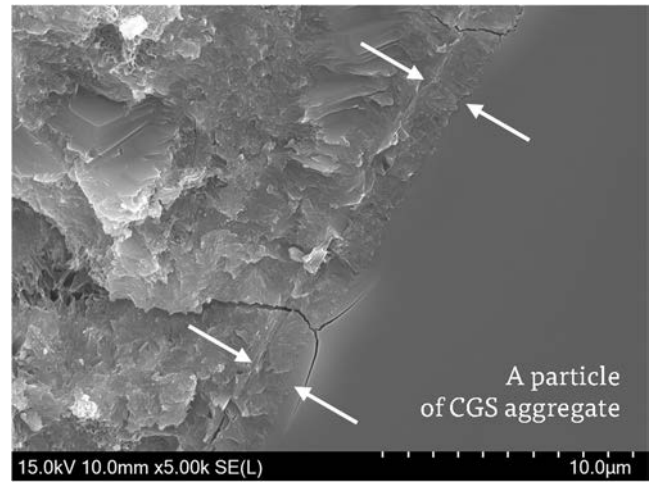
CGS 骨材を使用した場合には, 骨材部では対象としたすべての元素 (Si, Ca, Mg) のピークが認められ, Table 4 に示した化学組成から予想されたように, 山砂よりも多様な元素を有していることがわかる.

C-50 においては, 骨材界面周辺においてのみ Si の減少と Mg の増加が認められ, この区間において Mg を含む生成物が得られたと考えられる. Si については, 骨材部とセメントペースト部のいずれと比較しても減少していることから, Si を含む生成物が骨材界面近傍で局所的に少なくなっていると考えられる. Ca については骨材部からセメントペースト部にかけて単調に増加しており, 上述した山砂を使用した場合の元素変化と近い傾向である. セメントペースト部については山砂を使用した場合に近い傾向であり, 骨材界面から離れると骨材種類の影響は当然小さくなる.

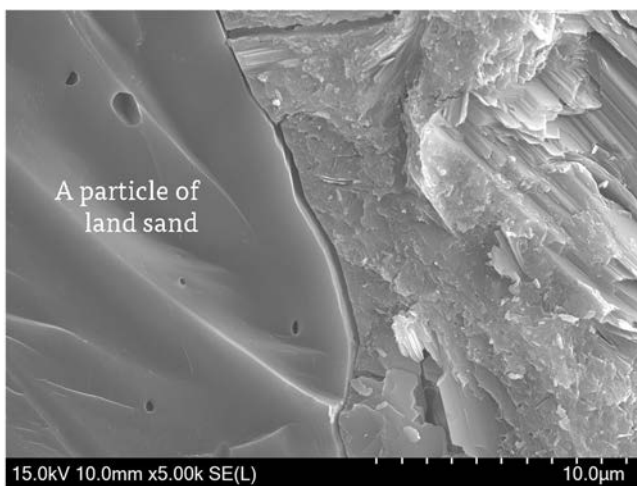
以上に述べた観察結果より, CGS 骨材がモルタル中で反応しており, CGS 骨材粒子の界面では反応層とみられる生成物の存在や, この領域に特徴的な元素として Mg の増加を確認した. これは CGS 骨材のポゾラン活性によると考えられ, 水中養生における圧縮強度の増加や空隙の緻密化に寄与したものと推察する. W/C が高いほど CGS 骨材の反応は著しく, これには配合中に含まれる水量の影響に加えて, W/C が低い場合は硬化体が緻密であるために外部からの水の浸入が妨げられることによるものと考えられる.



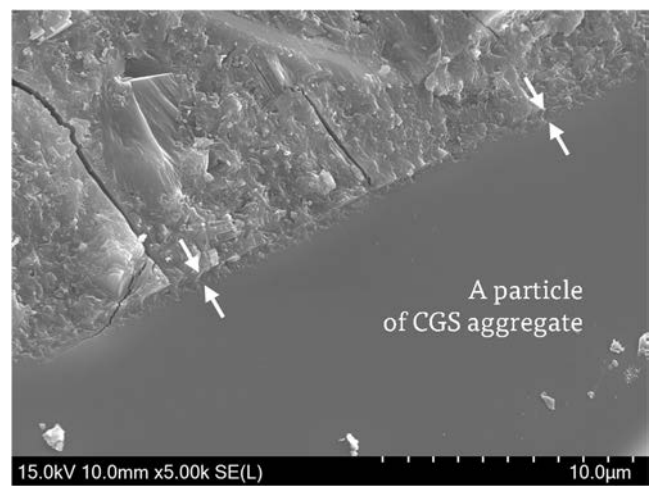
(a) L-50



(b) C-50

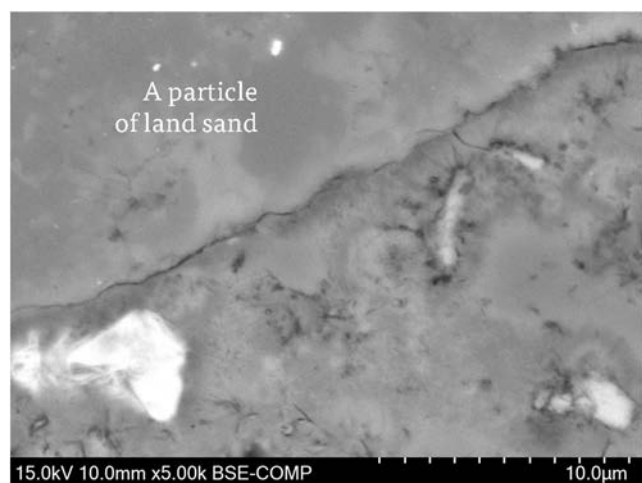


(c) L-30

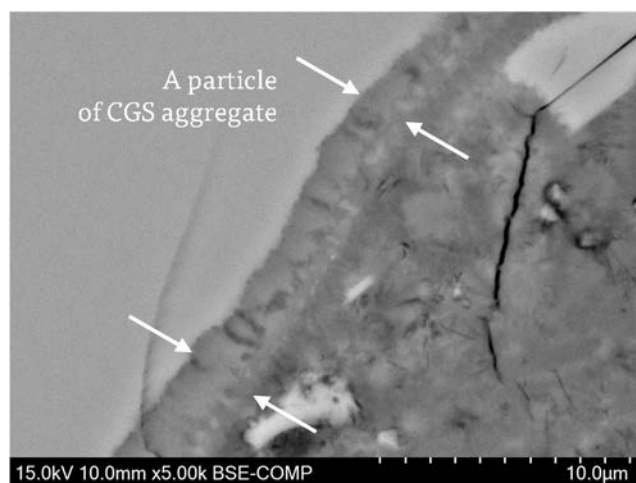


(d) C-30

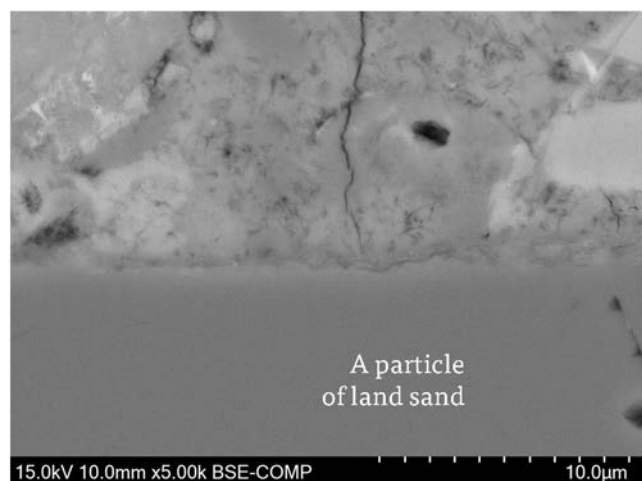
Fig. 7 SEM image of boundary between aggregate particle and cement paste
(骨材粒子とセメントペースト境界面のSEM観察像)



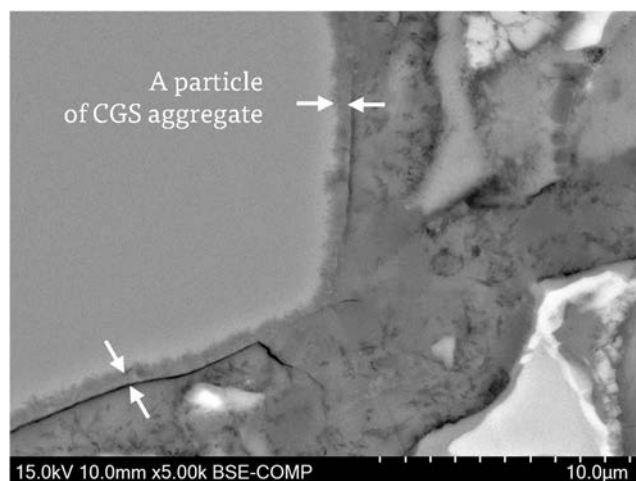
(a) L-50



(b) C-50



(c) L-30



(d) C-30

Fig. 8 BSE image of boundary between aggregate particle and cement paste
(骨材粒子とセメントペースト境界面の反射電子像)

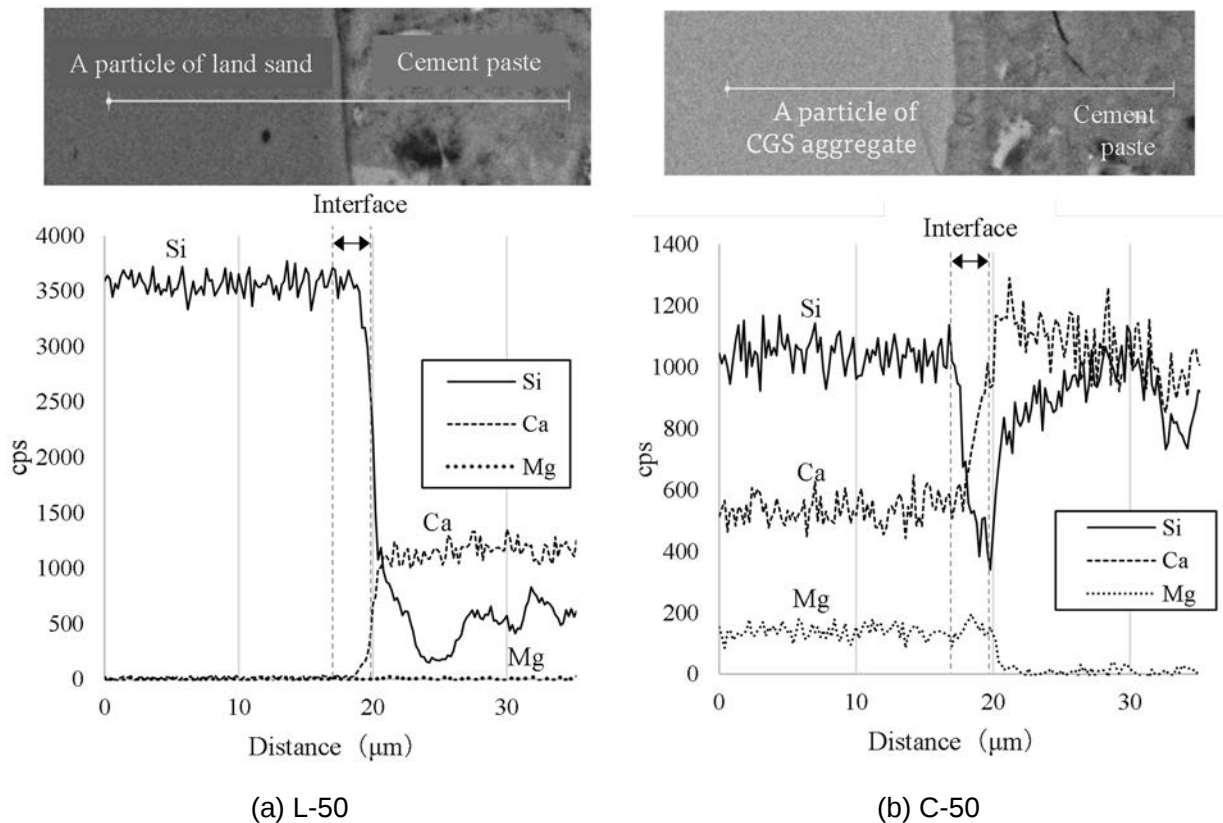


Fig. 9 BSE image and EDS spectroscopy
(骨材粒子の近傍における反射電子像と EDS 分析結果)

4. ま と め

石炭ガス化スラグ骨材 (CGS 骨材) を使用したモルタルに対して材齢 364 日時点までの評価を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) CGS 骨材を用いることによるフレッシュ性状への影響は小さく、空気量がわずかに減少する程度であった。
- (2) CGS 骨材の使用によって、モルタルの乾燥収縮量は減少し、ヤング率は向上した。CGS 骨材の高い剛性によって、モルタルの変形が抑制されたものと考えられた。
- (3) 水セメント比が高く水中養生を継続した場合には、CGS 骨材を用いた配合において、圧縮強度の増加と細孔容積量の減少が顕著であった。
- (4) 水中養生 364 日後に行った顕微観察の結果より、CGS 骨材のポゾラン活性と考えられる骨材自身が反応した層が認められた。

参 考 文 献

- 1) 三菱重工. 石炭ガス化複合発電プラント (IGCC). <https://power.mhi.com/jp/products/igcc>, (accessed 2024-03-17).
- 2) JIS A 5011-5 : 2020. コンクリート用スラグ骨材 一第 5 部 : 石炭ガス化スラグ骨材.
- 3) 北辻政文. 石炭ガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集. 2006, 28(1), p. 71-76.
- 4) 石川嘉崇, 古川雄太, 阿部 道彦ほか. 石炭溶融スラグ細骨材のコンクリート用細骨材としての有用性についての検討, コンクリート工学年次論文集. 2009, 31(1), p. 127-132.
- 5) 堀口 至, 白井敦士, 渡邊 勝ほか. 石炭ガス化溶融スラグを用いたコンクリートに関する基礎的研究. セメント・コンクリート論文集. 2012, 66, p. 615-621.

- 6) 山中友仁, 藤原浩已, 丸岡正知ほか. 石炭ガス化溶融スラグ細骨材の適応性に関する実験的研究. セメント・コンクリート論文集. 2017, 71, p. 603-609.
- 7) 小林亮太郎, 藤原浩已, 丸岡正知ほか. 石炭ガス化溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの諸性状および凍結融解抵抗性に関する実験的研究. コンクリート工学年次論文集(CD-ROM). 2019, 41, e1331.
- 8) 宮村優希, 岩波光保, 中山一秀. 石炭ガス化スラグを用いたコンクリートの強度特性および海洋環境下における耐久性に関する検討. セメント・コンクリート論文集. 2020, 74, p. 207-214.
- 9) 五十嵐 豪, 川端雄一郎, 松浦忠孝ほか. アルカリ含有量の高い石炭ガス化スラグ細骨材のアルカリシリカ反応への影響に関する基礎的検討. セメント・コンクリート論文集. 2022, 76, p. 238-244.
- 10) L. E. Copeland, J. C. Hayes. Determination of Non-Evaporable Water in Hardened Portland Cement Paste. ASTM Bulletin. 1953, (194), p. 70-74.
- 11) 内川 浩, 宇智田俊一郎, 小川賢治. フライアッシュのキャラクターと各種混和剤の吸着特性. セメント技術年報. 1982, 36, p. 53-56.
- 12) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭ほか. コンクリートのヤング係数の推定式. コンクリート工学年次論文報告集. 1999, 21(2), p. 601-606.
- 13) 田澤栄一, 宮澤伸吾. セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響. 土木学会論文集. 1994, (502), p. 43-52.