

# 論文 石炭ガス化炉スラグ軽量細骨材を用いたコンクリートの基礎物性

蔵重 勲<sup>\*1</sup>・山本 武志<sup>\*2</sup>・市川 和芳<sup>\*3</sup>・森 浩文<sup>\*4</sup>

**要旨:**石炭ガス化複合発電プロセスで副産される石炭ガス化炉スラグの加熱発泡性を利用し、コンクリート用軽量細骨材として付加価値を高めた形での有効利用方策について検討した。本論文は、石炭ガス化炉スラグ軽量細骨材の他に、普通細骨材および市販人工軽量細骨材をそれぞれ用いたコンクリートのフレッシュ性状、強度特性、耐久性に関する比較実験結果をまとめたものであり、市販人工軽量細骨材と同等以上の性状が得られることを示し、石炭ガス化炉スラグ軽量細骨材としての有効利用の可能性を見出した。

**キーワード:**石炭ガス化複合発電, 石炭ガス化炉スラグ, 有効利用, 人工軽量細骨材

## 1. はじめに

### 1.1 石炭ガス化複合発電とは

資源の乏しい我が国において世界的に埋蔵量豊富な石炭エネルギーの活用は不可欠である。また、CO<sub>2</sub> 排出量削減等の環境対策の観点から、石炭火力発電プラントには更なる高効率化が求められている。その要求に応える次世代の石炭火力発電方式として、石炭ガス化複合発電

(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle) の検討・実証が我が国で精力的に進められている<sup>1)~3)</sup>。従来の石炭火力発電は、微粉炭の燃焼熱により高圧水蒸気を発生させて、タービンを回転し発電する方式である。これに対し、IGCC は微粉炭を高温高压の石炭ガス化炉内で一般に酸素や空気を混合して、一酸化炭素や水素などにガス化し、その燃焼によってガスタービンを、またその燃焼熱によって発生した高圧水蒸気により蒸気タービンを回転させて効率的に発電するものである(図-1)。

IGCC は、高効率発電による資源の有効利用やCO<sub>2</sub>・SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub>・煤塵等の排出量低減、適用可能炭種の拡大といった特長があり、微粉炭火力

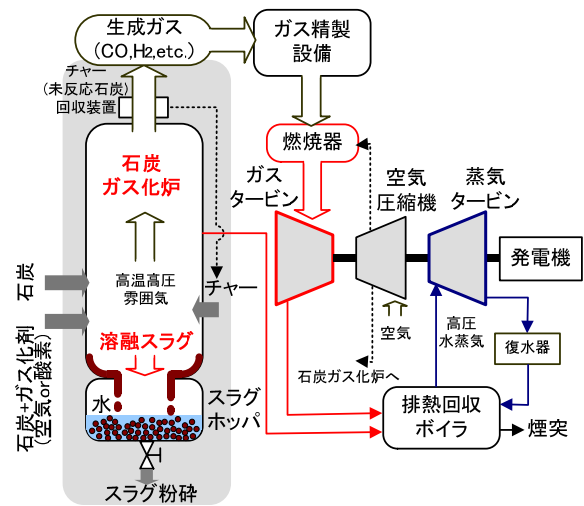


図-1 IGCC プラントおよび石炭ガス化炉の一例

発電で排出されるフライアッシュ等の石炭灰は発生せず、石炭ガス化炉より溶融スラグ(写真-1)が排出されることも大きな特徴である。

### 1.2 石炭ガス化炉スラグ軽量細骨材について

溶融スラグ(以下 CGS と略記: Coal Gasifier Slag)は水冷により写真-1のような状態で排出され、セメント製造における粘土代替材やコンクリート用混和材・細骨材としての利用が既に検討されている<sup>4)~6)</sup>。

CGS は、石炭種類に依存するその化学成分に

\*1 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター 工博(正会員)

\*2 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター 工修(正会員)

\*3 (財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所 燃料改質工学領域 工博(非会員)

\*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 (非会員)

もよるが、石炭ガス化炉の高温高圧下で内部に包含された成分が、常圧下で再加熱されることにより発泡するといった特性を持っている<sup>7),8)</sup>。そのため、CGSは発泡剤等を用いずに簡易なプロセスで高性能な軽量骨材を製造できる可能性を有している。本研究はこの特性に着目し、CGSをコンクリート用人工軽量細骨材に加工し、付加価値を高めた形で有効利用する一方策を検討したものである。軽量細骨材としての有効利用性を評価するため、フレッシュ性状、強度特性、耐久性に関して、普通細骨材および市販人工軽量細骨材を使用したコンクリートと性能比較を実施した。その結果、いくつかの課題を明らかにするとともに、比較した市販人工軽量細骨材を使用したコンクリートと同等の性状が得られることを確認して、CGS軽量細骨材としての有効利用の可能性を見出した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

比較対象となる各種細骨材をそれぞれ使用したコンクリートを作製するため、表-1に示す材料を用いた。なお、今回の実験では細骨材種

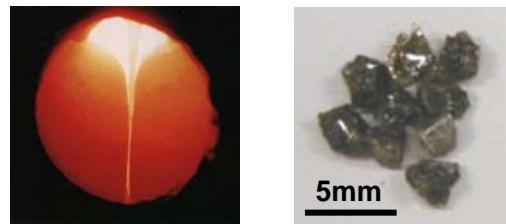


写真-1 溶融スラグ排出状況(電中研試験炉)と水冷・粉碎後の石炭ガス化炉スラグの例

類が強度、耐久性に与える影響を単純に比較するため、普通粗骨材を使用したコンクリートを作製した。CGS軽量細骨材は、試験プラントより排出されたCGSを約1000℃のキルン内で滞留時間約5~7分の条件で加熱し、発泡軽量化させて得た(写真-2)。通常、CGS軽量細骨材は球状に近いものが多く、今回加工して得たものの表乾密度は1.46g/cm<sup>3</sup>と低いにもかかわらず、市販人工軽量細骨材と同程度の吸水率を示した。

一方、図-2に示すとおり、CGS軽量細骨材は0.6mm以下の微粒分の割合が若干低く、JIS A 5308に定める標準粒度分布を満足しなかった。そのため、質量割合でCGSに6号珪砂(密度2.60g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.37%)および7号珪砂(密度2.61g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.42%)を7:2:1の割合で混合して使用した。

表-1 使用材料の代表的な物性値

種 類 :略号	密度(g/cm <sup>3</sup> )*	吸水率(%)	粗粒率	備 考	
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	—	—	比表面積 3120cm <sup>2</sup> /g
細骨材	普通細骨材:N	2.63	1.9	2.90	富士川産陸砂
	市販人工軽量細骨材:A	1.84	9.8	2.74	膨張頁岩焼成加工品
	CGS 軽量細骨材:G	1.46	10.0	2.97	珪砂混合により粒度調整し使用
粗骨材	砕 石	2.70	0.7	6.83	両神産砕石
混和剤	AE 剤:AE	1.03	—	—	空気量調整用
	高性能 AE 減水剤:SP	1.05	—	—	スランプ調整として一部配合に使用

\*骨材については表乾密度。軽量細骨材の密度、吸水率測定はJISA1134「構造用軽量細骨材の密度及び吸水率試験方法」に従った。



写真-2 使用細骨材の外観比較(左:普通細骨材,中:市販人工軽量細骨材,右:CGS 軽量細骨材)

## 2.2 コンクリートの配合および比較試験項目

スランプ 18±2cm, 空気量 5.5±0.5%を目標に, W/C=40, 55%のコンクリート配合を試験練りによって定め, 各種試験を実施した。なお, 軽量細骨材は湿潤状態となるように 24 時間以上吸水させ, 表面水量を補正し使用した。また, 一般的には AE 減水剤が用いられる配合であるが, 本実験では減水効果等の相違の影響を除外するため, AE 剤を単独使用することとした。

強度試験では, 材齢 28, 91 日における圧縮強度, 静弾性係数, 割裂引張強度を測定し, 耐久性試験は, 促進中性化試験, モルタルバー法によるアルカリ骨材反応性判定試験, ならびに凍結融解試験を実施した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュ性状

表-2 に目標のスランプおよび空気量を満足した各種細骨材使用コンクリートの配合を示す。水セメント比が 40, 55%のいずれの配合でも, 通常範囲の単位水量および細骨材率で CGS 軽量細骨材を使用して良好なコンクリートが作製できることを明らかにした。しかし, 目標空気

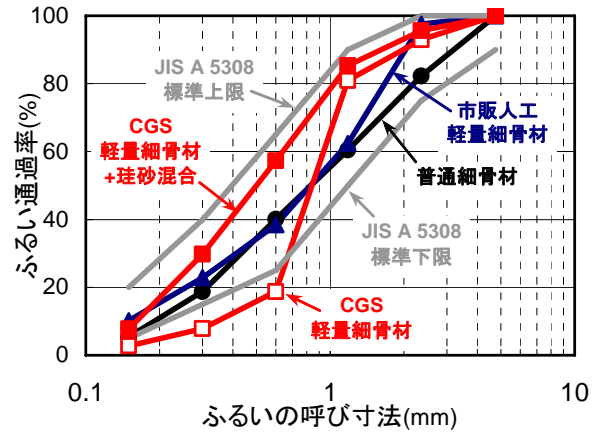


図-2 細骨材の粒度分布

量を得るための AE 剤添加量が増加する傾向を示した。この点については, 3.3(3)で詳述する。ブリーディング量は, CGS 軽量細骨材を用いたコンクリートで若干多くなったが, 問題ない範囲であった。また, フレッシュコンクリートの単位容積質量は, 普通細骨材コンクリートに対して約 15%低減可能で, 軽量粗骨材との併用で更なる効果が期待できる。写真-3 は各種細骨材を使用した硬化コンクリートの断面であるが, 内部に多数の気泡が存在し低密度である CGS 軽量細骨材も, 他の細骨材と同様に偏りなく分布していることが分かる。

表-2 コンクリートの配合とフレッシュ性状

略号	細骨材種類	W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	s/a (%)	AE <sup>*1</sup> (xC%)	SP (xC%)	スランプ (cm)	空気量 <sup>*2</sup> (%)	ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )
N40	普通細骨材	40	160	48	0.2	0.7	20.0	5.1	0.03	2325
N55		55	187	48	0.7	—	18.0	5.4	0.20	2266
A40	市販人工 軽量細骨材	40	176	50	0.5	—	19.0	5.9	0.05	2052
A55		55	166	52	0.7	—	17.5	6.0	0.17	2019
G40	CGS	40	179	48	2.1	—	18.0	5.5	0.10	1986
G55	軽量細骨材	55	170	52	3.0	—	18.5	5.3	0.22	1942

\*1: AE 剤添加率は原液 100 倍希釈溶液換算 \*2: 軽量細骨材使用コンクリートは JIS A 1118-1997(容積方法)によって測定

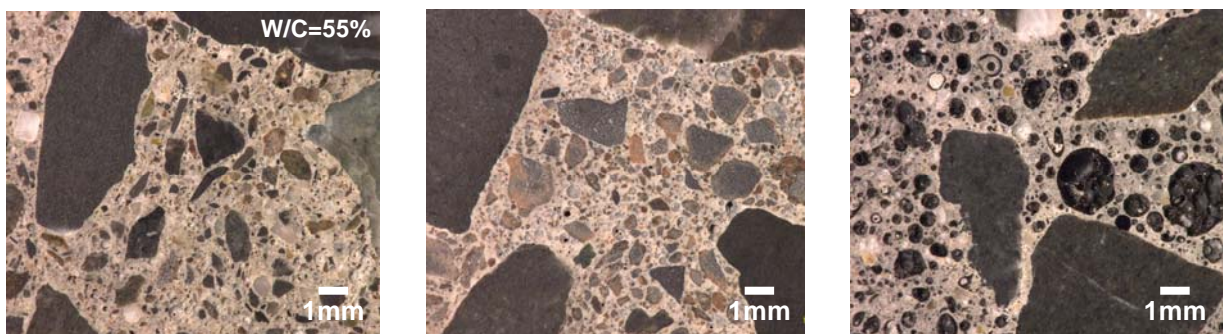


写真-3 硬化コンクリートの断面比較(左:普通細骨材,中:市販人工軽量細骨材,右:CGS 軽量細骨材)

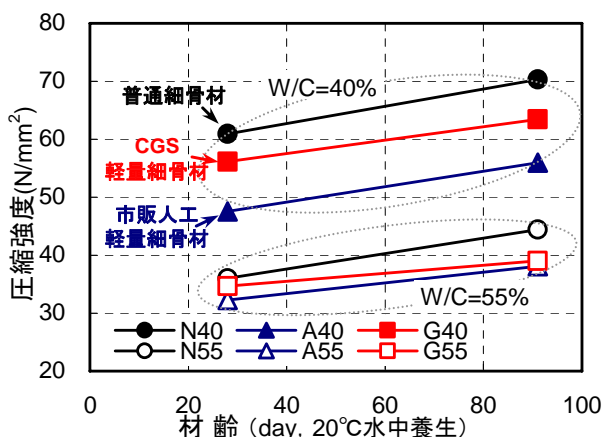


図-3 圧縮強度の比較

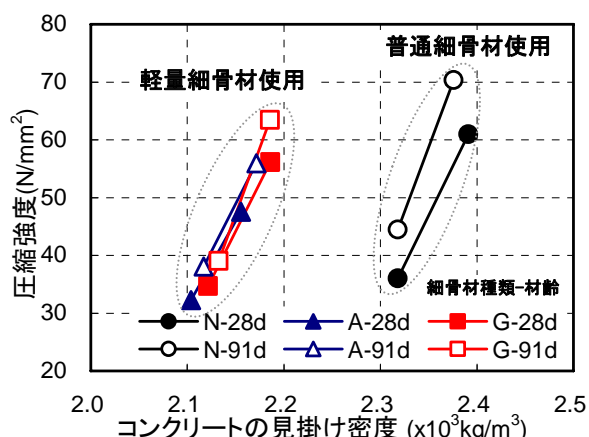


図-4 コンクリート密度と圧縮強度の関係

### 3.2 強度特性

図-3 に材齢と圧縮強度の関係を示す。CGS 軽量細骨材を用いた場合、市販人工軽量細骨材使用コンクリートより大きな圧縮強度を示した。これは、CGS 軽量細骨材への珪砂混合による軽量細骨材容積の相違が影響しているものと考えられるが、図-4 のようにコンクリート密度との関係で比較すると、市販人工軽量細骨材使用コンクリートと同程度の密度で同等の圧縮強度を示していることが分かる。図-5 に水銀圧入式ポロシメータで測定したモルタル部の空隙率と圧縮強度の関係を示す。空隙率が小さいほど圧縮強度は高くなるが、CGS 軽量細骨材コンクリートは市販人工軽量細骨材コンクリートと同程度の空隙率で、同等以上の圧縮強度を示している。これは、同一 W/C でセメントペースト部の空隙率が同等であると見なすと、写真-3 で示したように CGS 軽量細骨材に内在する気泡群が、コンクリートの圧縮強度に対して悪影響を及ぼしていないことを示すものと考えられる。

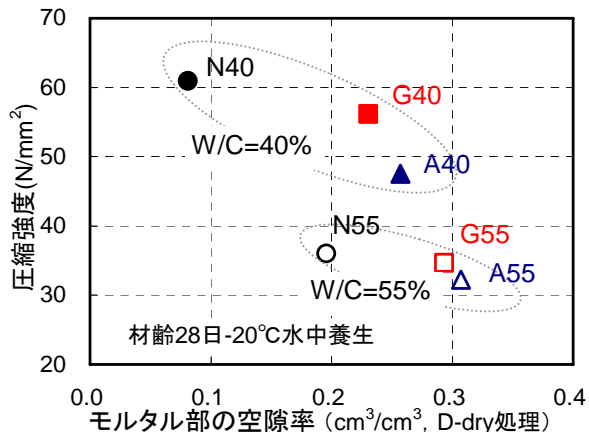


図-5 モルタル部空隙率と圧縮強度の関係

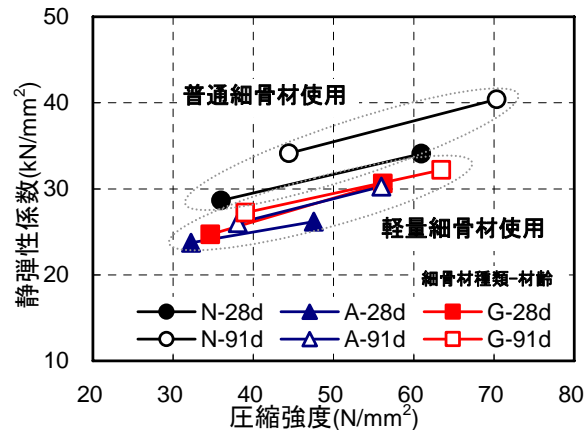


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-6 は圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである。普通細骨材コンクリートに比べ CGS 軽量細骨材を使用すると静弾性係数は若干小さくなるが、市販人工軽量細骨材と同程度であり、実用上問題ないものと考えられる。また、図-7 に示すように引張強度に対しても市販人工軽量細骨材と同等以上の結果が得られた。以上、今回得た強度特性に関する結果は、軽量コンクリートに関する既往のデータと範囲、傾向が概ね一致するものであった<sup>8)</sup>。

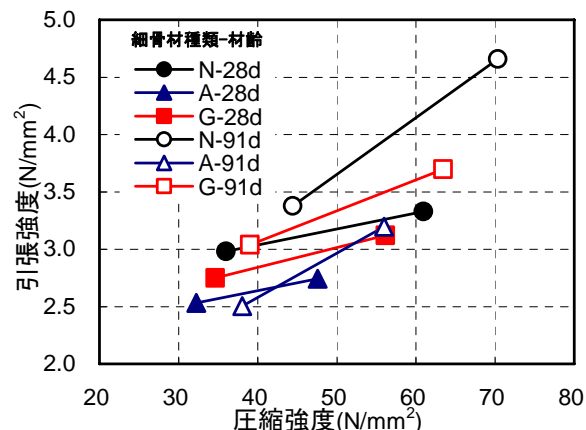


図-7 圧縮強度と引張強度の関係

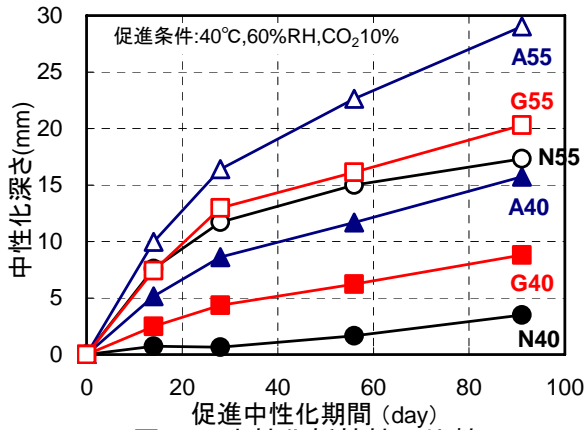


図-8 中性化抵抗性の比較

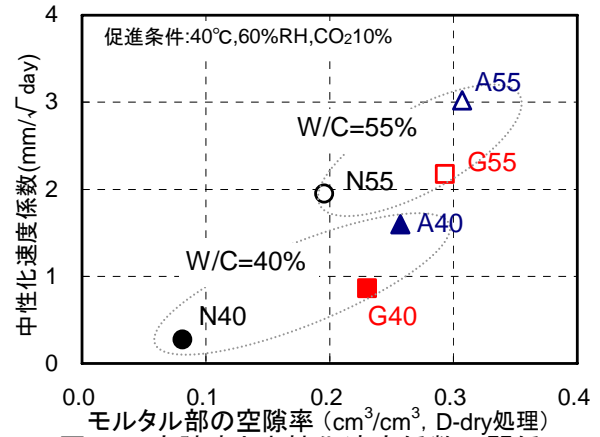


図-9 空隙率と中性化速度係数の関係

### 3.3 耐久性

#### (1) 中性化抵抗性

図-8は40°C、60%RH、CO<sub>2</sub>濃度10%の条件で行った促進中性化試験の結果である。強度特性と同様に、CGS 軽量細骨材コンクリートは普通細骨材コンクリートには劣るものの、市販人工軽量細骨材を使用した場合に比べて良好な中性化抵抗性を示した。中性化はセメントの種類や量による水和物相組成の影響も受けるが、図-9で水セメント比ごとに空隙率との関係で整理してみると、CGS 軽量細骨材コンクリートは市販人工軽量細骨材コンクリートと同程度の空隙率ながら、中性化速度係数は小さい値を示した。圧縮強度と同様に、CGS 軽量細骨材の内在気泡が中性化に対して悪影響を及ぼしていないものと考えられる。

#### (2) アルカリ骨材反応性

図-10は軽量骨材には適用されない方法ではあるが、参考としてJIS A 1146（モルタルバー法）によって、市販人工軽量細骨材とCGS 軽量細骨材のアルカリ骨材反応性を評価したものである。どちらの細骨材も1000μを下回る膨張率を示し“無害”と判定された。

#### (3) 耐凍害性

JIS A 1148-2001(A 法)に従って実施した凍結融解試験の結果を図-11、12に示す。CGS 軽量細骨材コンクリートは初期の凍結融解サイクルから相対動弾性係数が低下し、質量減少率が增加する傾向を示し、耐凍害性が劣る結果となった。この原因を特定するために硬化コンクリ

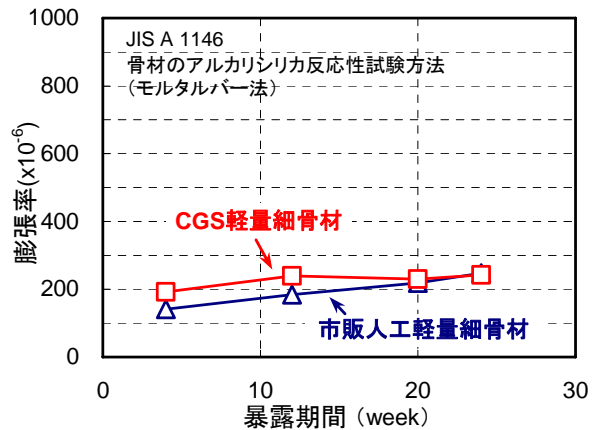


図-10 アルカリ骨材反応性の比較

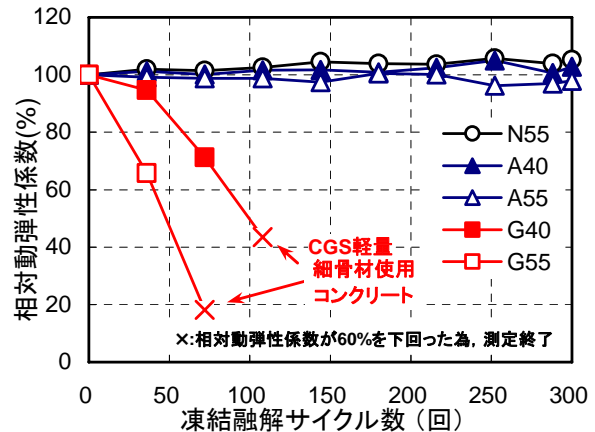


図-11 相対動弾性係数の経時変化

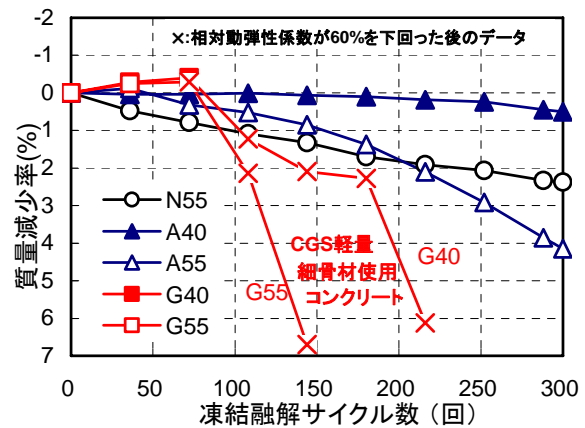


図-12 質量減少率の経時変化

ートの気泡組織分析を行った結果（図-13），硬化後の CGS 軽量細骨材コンクリートでは，フレッシュ時に連行された空気泡がほぼ消失しており，凍結融解作用に有効な 200~250 $\mu$ m の気泡間隔係数が得られていないことが分かった。これより，凍結融解抵抗性の低下は，CGS 軽量細骨材の吸水率等の影響因子も考えられるが，CGS 軽量細骨材の使用による気泡組織変化の影響が大きいものと判断できる。図-14 は，気泡組織変化の原因を探るため，AE 剤溶液に細骨材を加え攪拌した際の TOC（全有機炭素）濃度変化を測定し，細骨材への AE 剤吸着量を比較した結果である。CGS 軽量細骨材は AE 剤吸着量が多く，その量も経時的に増加することが分かった。未燃炭素を多量に含んだフライアッシュでは，空気量の経時変化が多い場合があり，それに対応した AE 剤も開発されている<sup>9)</sup>。CGS 軽量細骨材を耐凍害性の必要な地域で使用するには，適切な AE 剤の選定等の対策が必要となるとともに，AE 剤吸着メカニズムの解明ならびに製造・加工段階での解決が求められる。

#### 4. まとめ

石炭ガス化炉スラグの有効利用の一方策として，軽量細骨材としてのコンクリートへの高付加価値化利用を検討した。強度特性や中性化抵抗性，アルカリ骨材反応性は市販人工軽量細骨材を使用した場合と同等以上の結果が得られ，有効利用の可能性を見出すことが出来た。今後は更なる性能調査を進めるとともに，今回明らかとなった課題の解決に取り組んでいく。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり電源開発（株）より石炭ガス化炉スラグを御提供頂き，同社技術開発センター山下洋様，石川嘉崇様には研究の推進に関してご議論に加わって頂きました。また，本研究に関する多くのコンクリート実験は，東京大学生産技術研究所魚本・岸・加藤研究室のご協力を得て実施することができ，気泡間隔係数測定や AE 剤吸着試験に関してはエヌエムビー（株）杉山知巳様，（株）八洋コンサルタント浅野研一様よりご助言を頂きました。ここに記しまして，深く謝意を表します。

#### 参考文献

1)石炭ガス化複合発電の実現に向けて—実証機開発の支援と将来への研究展開—，電中研レビュー，電力中央研

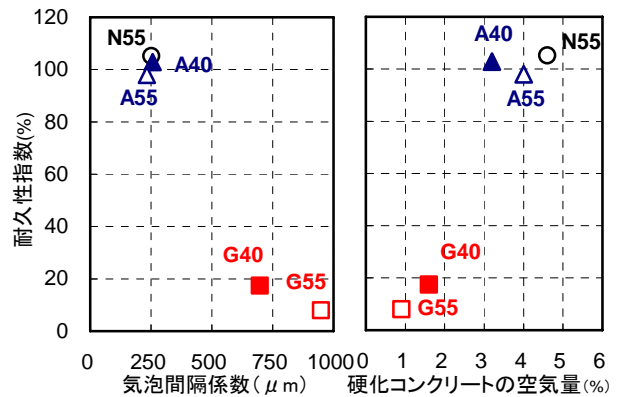


図-13 気泡組織と耐久性指数の関係

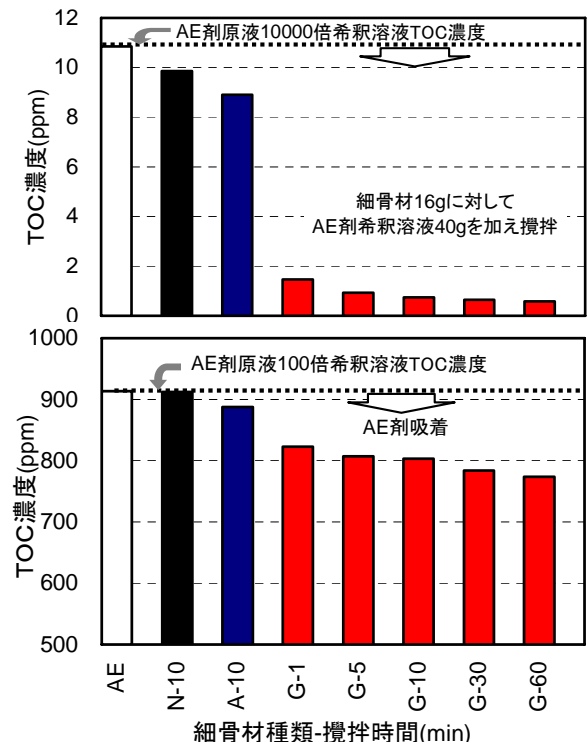


図-14 細骨材への AE 剤吸着量測定結果

究所，No.44，2001

- 2)小橋武志：EAGLE 技術開発の現状，CCT Journal, Vol.14, pp.12-16，石炭利用総合センター，2005
- 3)日本のクリーン・コール・テクノロジー—石炭利用分野における技術革新を目指して，NEDO-CCUJ, pp.27-28, 2004
- 4)高橋毅，小谷田一男：ガス化スラグ灰の有効利用法に関する調査，電力中央研究所調査報告，W88047，1988
- 5)市川和芳他：ガス化スラグのコンクリート材料への適用性評価—その 1 コンクリート用混和材としての検討—，電力中央研究所研究報告，W92047，1992
- 6)金津努他：石炭ガス化スラグのセメント・コンクリート分野への適用性評価，電力中央研究所総合報告，U30，1996
- 7)市川和芳他：石炭ガス化スラグ有効利用に向けた発泡化技術の開発—軽量骨材用品質安定組成基準と発泡性影響因子—，電力中央研究所研究報告，W03040，2004
- 8)笠井芳夫編：軽量コンクリート，pp.73-84，2002
- 9)浅野研一，木村貞雄，村山守，中川脩：フライアッシュコンクリート用空気量調整剤 AE-775 について，日曹マスタービルダーズ研究所報，No.6, pp.52-57，1983