

論文 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

小林 亮太郎*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・渡邊 貴郁*4

要旨：高効率発電の石炭ガス化複合発電（IGCC）の商業的利用を促進させるため、新たな産業廃棄物である石炭ガス化溶融スラグの有効活用を図ることを目的とし、石炭ガス化溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの諸性状について検討した。その結果、天然骨材を用いたコンクリートと比較して、流動性の向上、ブリーディング率の増加、圧縮強度の低下、乾燥収縮率の減少、中性化抵抗性の低下、凍結融解抵抗性の低下が確認された。そのため、空気量を増やした配合とブリーディング率を抑制した配合を検討した結果、凍結融解抵抗性の向上が確認された。

キーワード：IGCC、石炭ガス化溶融スラグ、細骨材

1. はじめに

我が国におけるコンクリート業界では、環境保全の観点から天然骨材の採取制限に伴うコンクリート用骨材の枯渇が問題となっており、代替骨材の利用研究および開発が行われている。また我が国の電力供給割合構成は、東日本大震災の影響により主体は原子力発電から火力発電へ移行し、現在の国内発電量のうち約 32%を石炭火力発電が占めている¹⁾。しかし、既存の石炭火力発電方法では、CO₂を大量に排出するため、CO₂削減対策が必要となる。これらのことから高効率である石炭ガス化複合発電（IGCC）の利用が推進されている。IGCC 技術とは、最初に石炭をガス化しそのガスを利用してガスタービンを動かして発電し、次にガスタービンの排熱を利用して蒸気をつくり、蒸気タービンを回して発電するという複合発電方式である。この発電方式は既存の石炭火力発電に対し、石炭消費量 20%の削減、発電効率 48~50%の実現可能性を示し、発電効率の向上により発電電力量あたりの SO_x, NO_x, ばいじんの排出量が低減できる²⁾。IGCC 技術では、ガス化炉で石炭中の灰分は溶融され、水中で急冷水砕し石炭ガス化溶融スラグとして排出される。IGCC 技術の利用拡大においてこの新たな産業廃棄物である石炭ガス化溶融スラグの有効利用方法の確立は不可欠となる。石炭ガス化溶融スラグをコンクリート用骨材として利用することは、大きく社会に貢献するものである。しかし、石炭ガス化溶融スラグ骨材は規格化には至っていない。石炭ガス化溶融スラグを細骨材としてモルタルに用いた既往の研究では、流動性の向上、圧縮強度の若干の低下、乾燥収縮の抑制が確認されている³⁾。

本研究では、石炭ガス化溶融スラグ骨材の規格化を目指し、石炭ガス化溶融スラグの細骨材としての特性および石炭ガス化溶融スラグを細骨材として用いた際のコンクリートの基本的諸性状の把握、問題点の検討を行うものである。なお、本研究で使用した石炭ガス化溶融スラグは、2017年3月に福島県 A 地区で生成されたものと、2017年7月に広島県 B 地区で生成されたものの 2種類とした。

2. 石炭ガス化溶融スラグ細骨材の基本的特性

2.1 使用材料

本研究では、砂岩系砕砂（記号 Sc）、福島県産石炭ガス化溶融スラグ細骨材（記号 ASg）、広島県産石炭ガス化溶融スラグ細骨材（記号 BSg）を用いた。図-1に ASg および BSg の画像をそれぞれ示す。

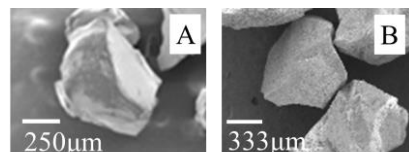


図-1 ASg (A) および BSg (B)

2.2 試験項目

試験項目は、ふるい分け試験(JIS A 1102)、密度および吸水率試験(JIS A 1109)、単位容積質量および実積率試験(JIS A 1104)、粒形判定実積率試験(JIS A 5005)、骨材強度指標値⁴⁾および破砕値試験を行った。骨材強度指標値および破砕値試験方法を記す。

*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 宇都宮大学 大学院地域創生科学研究科社会デザイン科学専攻

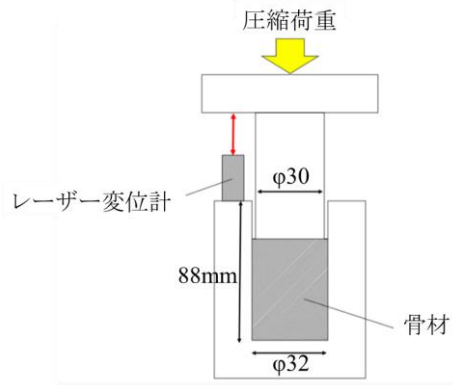


図-2 骨材強度指標値試験概略図

表-1 骨材試験結果

試験項目	試験値		
	ASg	BSg	Sc
表乾密度 (g/cm ³)	2.68	3.08	2.64
絶乾密度 (g/cm ³)	2.68	3.06	2.60
吸水率 (%)	0.14	0.70	1.33
単位容積質量 (kg/L)	1.85	2.05	1.75
実積率 (%)	68.6	66.9	67.3
粒形判定実積率 (%)	56.6	57.1	54.1
粗粒率	2.82	2.50	2.73

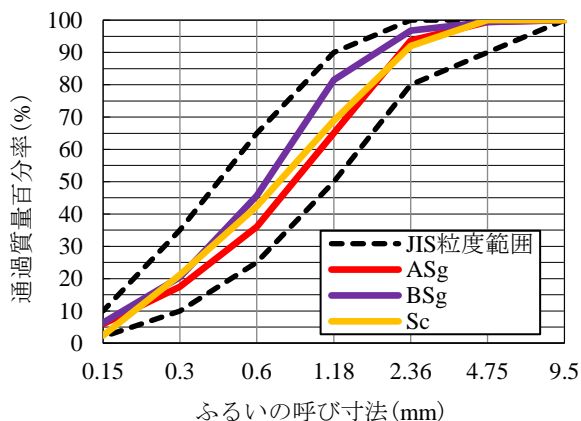


図-3 粒度分布

石炭ガス化溶融スラグ細骨材の強度および骨材としての弾性変形能力を簡易に把握するため、内径32mm、高さ88mmの鋼製容器を用いて石炭ガス化溶融スラグ細骨材および砕砂について以下に示す骨材強度指標値測定試験を行った⁴⁾。ここでの骨材強度指標値とは、圧縮力に対する変形抵抗性と定義し、骨材強度指標値が大きいほど変形抵抗性が高いことを示すこととした。骨材強度指標値試験の概略図を図-2に示す。また試験手順を以下に示す。

細骨材試料を絶乾状態とし、ふるいわけにより1.2~2.5mmの範囲の粒子を抽出し、この試料60gを鋼製容器に詰め、上面をストレートエッジでならす。その後鋼製の載荷用丸棒を挿入し、精密万能試験機により圧縮荷

表-2 骨材強度指標値および破砕値試験結果

	ASg	BSg	Sc
骨材強度指標値	22.1	16.9	13.9
0.30破砕値 (%)	30.2	27.6	21.7
0.15破砕値 (%)	16.7	15.1	13.0

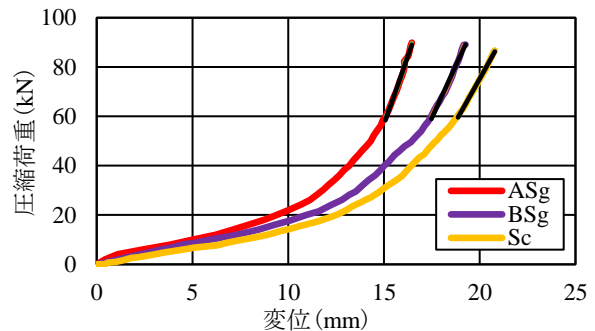


図-4 圧縮荷重と変位の関係

重P(kN)を加えながらレーザー変位計で変位d(mm)を読み取り、最大90kNまで荷重を加えた。測定値から荷重—変位曲線を描き、その比例変化を示す部分の傾きを骨材強度指標値I(kN/mm)とし以下の式(1)により求めた。

骨材強度指標値 I(kN/mm)

$$= \text{荷重} \angle P(\text{kN}) / \text{変位} \angle d(\text{mm}) \quad (1)$$

試験後の試料を0.30mmふるいおよび0.15mmふるいでふるい、それぞれのふるいの通過量から0.30破砕値(%)および0.15破砕値(%)を算出した。ここでの破砕値とは骨材試料の破壊の程度を表すものであり、破砕値が大きいほど骨材試料が破壊されていることを示す。それぞれの破砕値は以下の式(2)(3)により求めた。

$$0.30 \text{ 破砕値}(\%) = B_{0.30} / A \times 100 \quad (2)$$

$$0.15 \text{ 破砕値}(\%) = B_{0.15} / A \times 100 \quad (3)$$

ここに、A：破砕した試料質量(=60g)

B_{0.30}：0.30mmふるいを通過した試料質量(g)

B_{0.15}：0.15mmふるいを通過した試料質量(g)

2.3 骨材試験結果

表-1にASg、BSgおよびScの骨材試験結果、図-3にふるい分けによる骨材の粒度分布を示す。表-1の試験結果よりASgは表乾密度2.68g/cm³であり天然の普通骨材と同程度であることが確認された。一方、BSgは表乾密度3.08g/cm³と天然の普通骨材と比べ大きな値を示した。また、ASgおよびBSgの実積率はそれぞれ68.6%、66.9%、粒形判定実積率はそれぞれ56.6%、57.1%と比較的大きな値を示したことから、ASgおよびBSgは、適度な粒形・粒度であるといえる。これにより、比較的粒形が良く、骨材間の空隙が小さいと考えられるため、コンクリートのフレッシュ性状において、流動性の向上が期待できる。

表-3 配合条件

Sg種	W/C (%)	Sg/S※ (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加率 (C×%)		
			W	C	Sc	Sg	G	AS	AE	DF
ASg	50	100	170	340	0	853	944	0.75	0.80	0.05
		50	179	358	411	417	924		0.80	0.05
		0	178	356	824	0	926		0.05	0.05
BSg	50	100	174	348	0	971	935	0.75	2.40	0.05
		50	180	360	410	478	921		1.40	0.05
		0	178	356	824	0	926		0.05	0.05

※Sg/S(%): 石炭ガス化溶融スラグ細骨材容積比

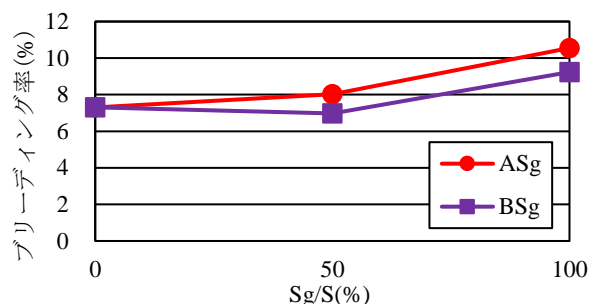


図-5 Sg 置換率とブリーディング率の関係

表-4 フレッシュ性状試験結果

Sg種	W/C (%)	Sg/S (%)	単位水量 W(kg)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	ブリーディング率 (%)	凝結時間試験	
								始発時間 (分)	終結時間 (分)
ASg	50	100	170	11.0	3.5	28	10.55	510	730
		50	179	11.0	4.5	28	8.02	-	-
		0	178	12.0	4.0	21	7.30	380	515
BSg	50	100	174	11.5	3.9	27	9.24	430	590
		50	180	12.0	4.7	27	6.97	-	-
		0	178	12.0	4.0	21	7.30	380	515

表-2 に骨材強度指標値および破砕値試験結果、図-4 に骨材強度指標値試験における荷重と変位の関係を示す。試験結果より Sc に比べ ASg および BSg の骨材強度指標値が大きいため外力による変形に対する抵抗性が高いことが認められた。また、各材料の破砕値試験結果から ASg および BSg は Sc に比べ脆性的な破壊を示しやすいことが認められた。

3. 産地の異なる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

3.1 使用材料

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)、細骨材として砂岩系砕砂(記号: Sc)、福島県産石炭ガス化溶融スラグ細骨材(記号 ASg)、広島県産石炭ガス化溶融スラグ細骨材(記号 BSg)、粗骨材として鹿沼産砕石(記号: G、表乾密度: 2.63 g/cm³、吸水率: 0.62%、最大寸法: 25mm)、練混ぜ水として宇都宮市水道水(記号: W)、混和剤として変性リグニンスルホン化合物とポリカルボン酸系化合物を主成分とする AE 減水剤(記号: AS) およびポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする消泡剤(記号: DF)、アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤(記号: AE)を用いた。なお、砂岩系砕砂、石炭ガス化溶融スラグ細骨材 2 種は前章の骨材試験で使用したものと同ロットの試料である。

3.2 配合条件・練混ぜ方法

配合条件を表-3 に示す。水セメント比(W/C)は 50%とし、ASg および BSg をそれぞれ Sc に対して 0%、50%、100%で体積置換した。目標フレッシュ性状は、スランブ 12.0±1.5cm、空気量 4.5±1.5%とした。また本研究での配

合は、Sc に対する ASg および BSg の置換率 100%においてフレッシュ性状の目標値を達成する AE 減水剤(AS)添加率を求め、置換率 0%、50%では AS 添加率を変えず、目標フレッシュが得られるように単位水量および AE 剤(AE)添加率を変化させ、ASg および BSg の置換率の違いによる流動性の変化について検討した。

練混ぜには公称容量 55L の一軸パン型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、粗骨材を投入し空練りを 30 秒間行い、その後、あらかじめ混和剤を混合した練混ぜ水を投入し、2 分間練り混ぜ排出した。材料分離が生じないように切り返してから各試験に供した。また、各材料の保管場所や練混ぜ環境においては空調設備のない屋内環境である。

3.3 試験項目

試験項目は、スランブ試験(JIS A 1101)、空気量試験(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)、ブリーディング試験(JIS A 1123)、凝結時間試験(JIS A 1147、置換率 0%、100%のみ)、圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149)、乾燥収縮試験(JIS A 1129)、促進中性化試験(JIS A 1153)、凍結融解試験(JIS A 1148、置換率 0%、100%のみ)とした。

3.4 試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-4 に、Sg 置換率とブリーディング率の関係を図-5 に示す。

試験結果より、ASg および BSg の置換率の増加に伴い単位水量は減少する傾向にあるが、同時にブリーディング率は増加した。理由は ASg および BSg の表面が平滑で吸水率が低いことが原因であると考えられる。また、置換率の増加に伴い AE 剤(AE)添加率が増加する傾向にあった。これらの結果より、コンクリートの流動性が向上したものと考えられる。

ASg および BSg の凝結時間試験結果を図-6 に示す。始発・終結時間ともに ASg および BSg 混和コンクリートの方が無混和コンクリートに比べ遅くなる結果となった。これは、ブリーディング率が大きく、収束するまでに時間を要したためと考えられる。

圧縮強度試験結果を図-7、図-8 に示す。結果より、ASg および BSg 混和コンクリートの圧縮強度は、無混和

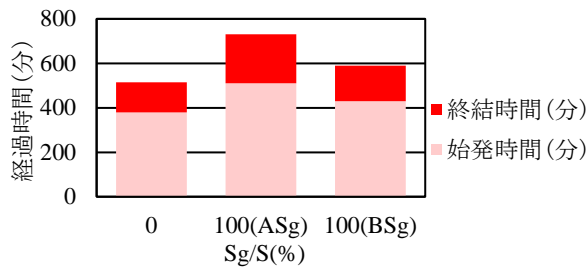


図-6 凝結時間試験結果

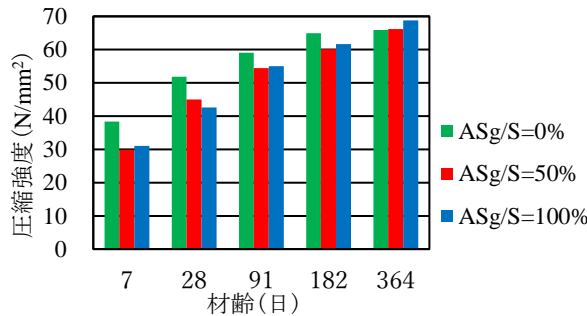


図-7 圧縮強度試験結果 (ASg)

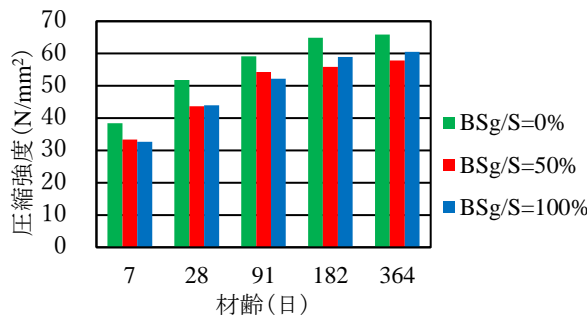


図-8 圧縮強度試験結果 (BSg)

コンクリートに比べ若干の低下が確認された。これは、破砕値が大きいことから、ASg および BSg 自体の終局強度が小さいためと考えられる。また、ブリーディング率の増加により粗骨材下面の微細空隙が増大し、粗骨材とセメントペーストとの界面の結合が弱くなり、そのため圧縮強度が低下したと考えられる。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-9、図-10に示す。結果より ASg および BSg 置換率の増加に伴い同一圧縮強度における静弾性係数も増加する傾向が認められた。これは、ASg および BSg の骨材強度指標値が大きく、低荷重における ASg および BSg の弾性係数が大きいいため変形抵抗性が大きくなるためと考えられる。

乾燥収縮試験結果を図-11、図-12に示す。ASg および BSg 置換率の増加に伴い無混和コンクリートに比べて、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向を示した。これは、骨材強度指標値が大きく変形抵抗性が大きいためだと考えられる。また、ASg および BSg 置換率の増加に伴い単位水量が減少傾向にあったためと考えられる。

促進中性化試験結果を図-13、図-14に示す。ASg および BSg 置換率が大きくなるほど中性化速度が増加する傾向を示した。これは、ブリーディング率が増加するとコンクリート中の硬化組織が粗くなり、CO₂がコンクリ

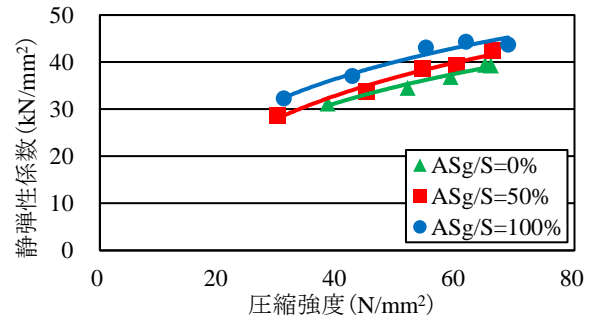


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係 (ASg)

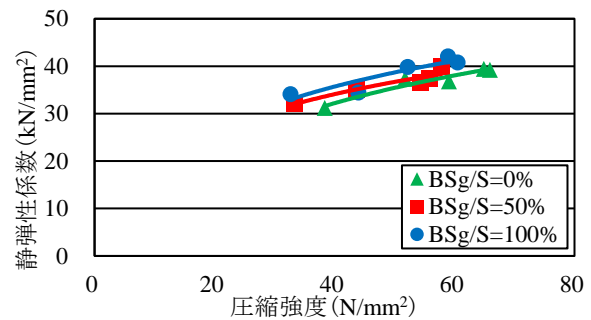


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係 (BSg)

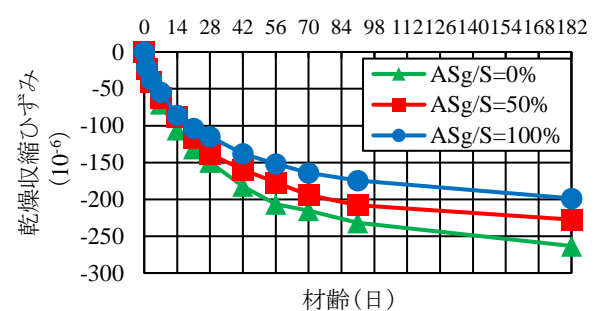


図-11 乾燥収縮試験結果 (ASg)

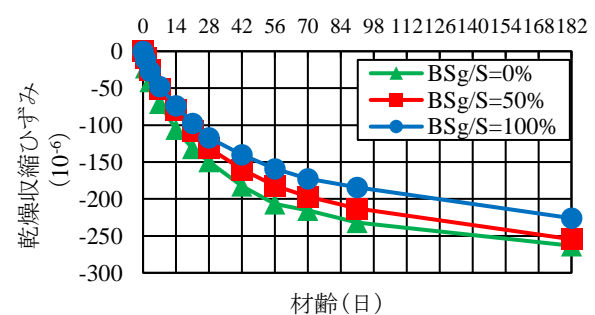


図-12 乾燥収縮試験結果 (BSg)

ート中により容易に入ることになったためと思われる。

凍結融解試験結果を図-15に示す。ASg および BSg 混和コンクリートは300サイクルで相対動弾性係数が60%を下回った。これは、ブリーディング率が大きいため骨材下にランジングゾーンができ、硬化組織が粗くなったためと考えられる。また、ASg および BSg の表面が平滑であるためセメントペーストと骨材との間の付着性が弱くなったことも原因として考えられる。したがって、耐凍害性を向上させるためには更なる検討を行う必要がある。

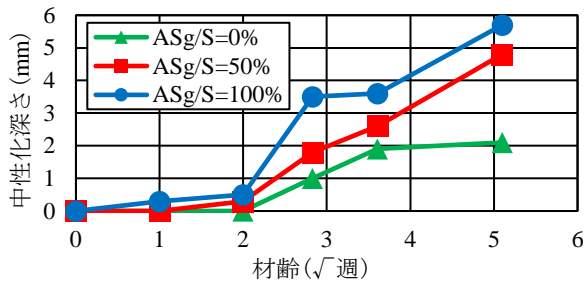


図-13 促進中性化試験結果 (ASg)

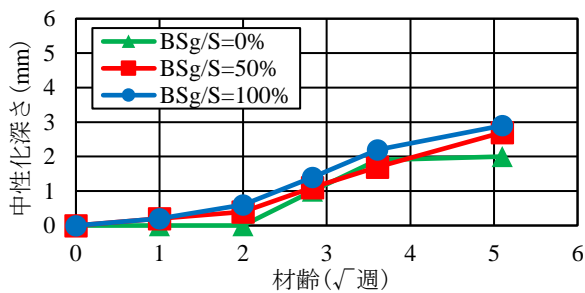


図-14 促進中性化試験結果 (BSg)

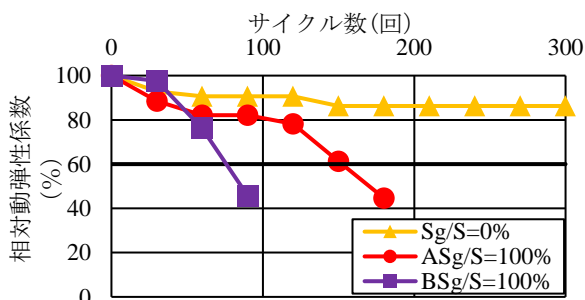


図-15 凍結融解試験結果

4. 産地の異なる石炭ガス化溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性向上に関する検討

4.1 検討方法

本章では、凍結融解抵抗性の向上を目的とし、フレッシュ空気量の増加と、ブリーディング率の抑制の2方法について実験および検討を行った。

4.2 フレッシュ空気量増加による検討

(1) 使用材料

使用材料は3章と同様とした。

(2) 配合条件・練混ぜ方法

配合条件を表-5に示す。水セメント比(W/C)を50%とし、ASgおよびBSgをそれぞれScに対して100%で体積置換した。目標フレッシュ性状は、スランブを3章と同様12.0±1.5cmとし、空気量を6.0±0.5%、7.5±0.5%の2水準とした。AE減水剤(AS)添加率を3章と同様とし、目標フレッシュが得られるように単位水量とAE剤(AE)を変化させた。練混ぜ方法は3章と同じとした。

表-5 空気量増加配合条件およびフレッシュ性状試験結果

Sg種	W/C (%)	Sg/S (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤添加率 (C×%)			スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			W	C	Sg	G	AS	AE	DF			
ASg	50	100	166	332	861	953	0.75	1.70	0.05	11.5	7.4	24
			170	340	853	944		1.50	0.05	11.5	5.7	25
			170	340	853	944		0.80	0.05	11.0	3.5	28
BSg	50	100	169	338	983	947	0.75	2.20	0.05	13.0	7.7	28
			171	342	978	942		1.40	0.05	10.5	5.5	27
			174	348	971	935		2.40	0.05	11.5	3.9	27

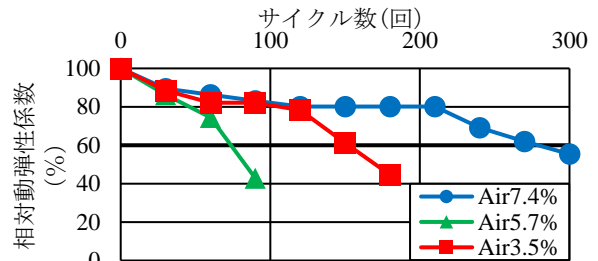


図-16 空気量増加凍結融解試験結果 (ASg)

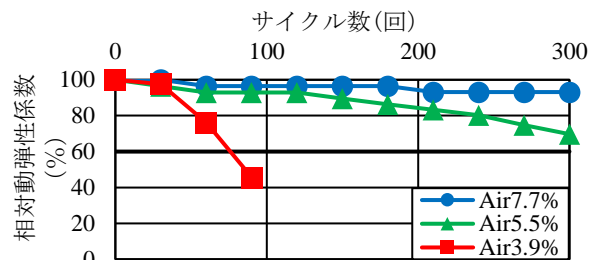


図-17 空気量増加凍結融解試験結果 (BSg)

(3) 試験項目

試験項目は、スランブ試験(JIS A 1101)、空気量試験(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)、凍結融解試験(JIS A 1148)とした。

(4) 試験結果

試験結果においては3章と比較した。フレッシュ性状試験結果を表-5に示す。凍結融解試験結果を図-16、図-17に示す。試験結果より、ASg混和コンクリートは300サイクルで相対動弾性係数が60%を下回った。一方、BSg混和コンクリートは60%以上を維持した。よって、BSg混和コンクリートはAE剤(AE)添加により空気量を増加させることによって、耐凍害性が向上されることが確認された。

4.3 ブリーディング率の抑制による検討

(1) 使用材料

使用材料は3章と同様とした。また、ブリーディング率を抑制するために石灰石微粉末(記号L)を混和した。ここでは4.2で凍結融解抵抗性が確認されなかったASg混和コンクリートのみの検討を行った。

表-6 ブリーディング率抑制配合条件

Sg種	W/C (%)	Sg/S (%)	配合名	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加率 (C×%)		
				W	C	L	Sg	G	AS	AE	DF
ASg	50	100	BL1	170	340	0	853	944	0.75	0.80	0.05
			BL1/2	157	314	27	867	967			
			BL1/4	163	326	56	842	938			

表-7 ブリーディング率抑制フレッシュ試験結果

Sg種	W/C (%)	Sg/S (%)	配合名	L添加率 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	ブリーディング率 (%)
ASg	50	100	BL1	0	11.0	3.5	28	10.55
			BL1/2	10	10.5	4.6	30	4.64
			BL1/4	20	12.0	5.2	31	2.87

(2) 配合条件・練混ぜ方法

配合条件を表-6に示す。水セメント比(W/C)を50%としASgをScに対して100%で体積置換した。目標フレッシュ性状は3章と同様とし、スランプを12.0±1.5cm、空気量を4.5±1.5%とした。AE減水剤(AS)添加率を3章と同様とし、目標フレッシュが得られるように単位水量とAE剤(AE)添加率を変化させた。ブリーディング率の目標値を3章における配合のブリーディング率(BL)から1/2および1/4に抑制されるように石灰石微粉末を混和し、耐凍害性の検討を行った。配合名は、3章における配合をBL1、1/2および1/4に抑制した配合をそれぞれBL1/2、BL1/4とした。練混ぜ方法は3章と同様とした。

(3) 試験項目

試験項目は、4.1と同様とした。

(4) 試験結果

試験結果においては3章と比較した。フレッシュ性状試験結果を表-7に示す。凍結融解試験結果を図-18に示す。試験結果より、ASg混和コンクリートはBL1/2は300サイクルで相対動弾性係数が60%を下回ったが、BL1/4は60%以上を示した。よって、ASg混和コンクリートではブリーディング率を抑制することで耐凍害性が向上できることが確認された。

5. まとめ

本研究から得られた成果を以下に示す。

フレッシュ性状試験からは流動性の向上が確認され、ブリーディング率の増加が確認された。凝結時間試験では、始発・終結時間ともに遅くなる結果となった。圧縮強度試験では若干の低下が確認された。静弾性係数試験では同一圧縮強度における静弾性係数が増加する傾向が認められた。乾燥収縮試験では乾燥収縮ひずみの低下が確認され、促進中性化試験では中性化速度が増加する傾向を示した。凍結融解試験ではASg混和コンクリートは

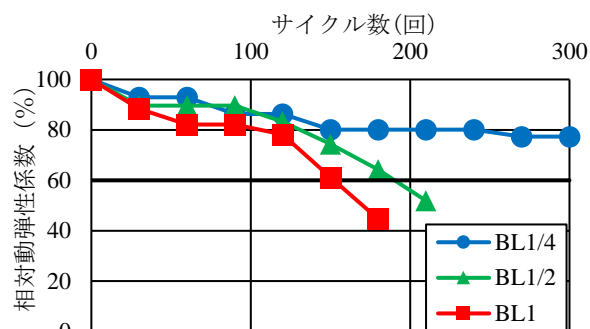


図-18 ブリーディング率抑制凍結融解試験結果 (ASg)

ブリーディング率を抑制することで耐凍害性が向上され、BSg混和コンクリートはAE剤(AE)添加により空気量を増加させることにより、耐凍害性が向上された。本研究においてASgとBSg混和コンクリートで中性化深さや凍結融解抵抗性に差異が生じた。この要因として製造された施設や石炭の品質の違いによりASgとBSgの品質の違いが生じたことが考えられる。品質の違いに対して規格化に向け今後検討する必要があると考えられる。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務により得られました。また、一般財団法人石炭エネルギーセンター(JCOAL)には石炭ガス化溶融スラグの提供と試験実施の機会・サポートを頂き、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁 エネルギー白書2018 第2部第1章国内エネルギー動向
http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf_2_1.pdf
(閲覧日：2018年12月26日)
- 2) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 実用化ドキュメント 石炭をガス化して高効率化を実現「石炭ガス化複合発電(IGCC)」
<http://www.nedo.go.jp/hyoukaku/articles/201306igcc/index.html>
(閲覧日：2018年12月26日)
- 3) Yamanaka, Y and Fujiwara, H and Maruoka, M
Experimental Study on Properties of Mortar Containing Molten Slag as Fine Aggregate, American Concrete Institute, Vol.326, pp49.1-49.10, Oct.2018
- 4) 田中敏嗣, 下山善秀, 藤原浩己: 軽量コンクリートの高強度化に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.352-357, 1989