

論文 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および凍結融解抵抗性に関する実験的研究

渡邊 貴郁*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・左部 晃司*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、圧縮強度の若干の低下、凍結融解抵抗性の低下が確認された。そのため、凍結融解抵抗性向上策としてフレッシュ空気量を増加させた配合またはブリーディング率を低減させ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：石炭ガス化複合発電, 石炭ガス化溶融スラグ, 細骨材, 凍結融解抵抗性

1. はじめに

我が国の電力供給割合構成は、東日本大震災以前は原子力発電の利用拡大が推進されていたが、震災の影響により火力発電の割合が増加した。現在の国内発電電力量のうち約32.3%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。

また、我が国の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良質な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。このような背景から、ほかの各種スラグと同様に石炭ガス化溶融スラグをコンクリート用骨材として活用することは、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。また、石炭ガス化溶融スラグ細骨材を用いたモルタルに関する既往の研究では、同細骨材を用いることにより流動性の向上、圧縮強度の若干

の低下等が確認されている³⁾。

本研究は、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。

2. 産地の異なる石炭ガス化溶融スラグ細骨材の諸特性⁴⁾

本研究で使用した石炭ガス化溶融スラグは、2017年3月にA県で生成されたもの(記号:ASg)と、2017年7月にB県で生成されたもの(記号:BSg)の2種類とした。図-1にASgおよびBSgの顕微鏡写真を示す。表-1にASg、BSgおよびScの骨材試験結果、図-2にふるい分けによる骨材の粒度分布を示す。

既往の研究より2種類の石炭ガス化溶融スラグ細骨材および比較用に用いた砂岩系砕砂(記号:Sc)について以下の知見が得られている。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、コンクリート用細骨材として適度な粒形・粒度であるといえる。これらにより、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。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、骨材強度指標値測定試験⁵⁾および破砕値試験⁶⁾を行った。ここでの骨材強度指標値とは、圧縮力に対す

*1 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 (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

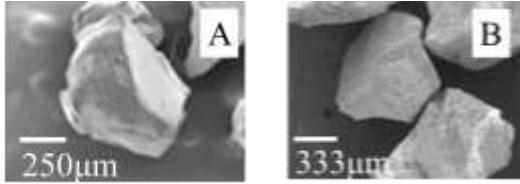


図-1 ASg (A) および BSg (B)

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

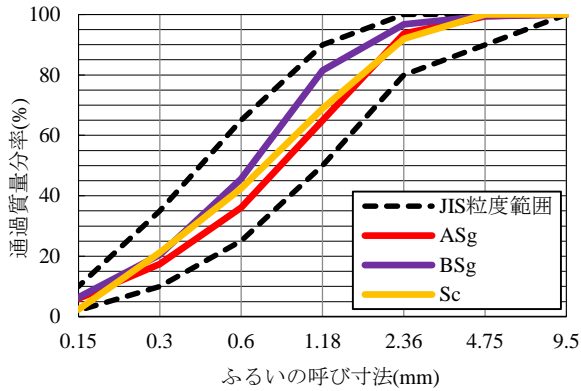


図-2 粒度分布

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要図を図-3に示す。

本研究では石炭ガス化溶融スラグ細骨材および砕砂について骨材強度指標値測定試験を行った。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 を内径 33mm、高さ 88mm の鋼製容器に詰め、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重 P(kN)を加えながらレーザ変位計で変位 d(mm)を読み取り、最大 90kN まで荷重を加えた。測定値から図-3 に示す荷重—変位曲線を描き、その曲線のうち比例変化を示す黒直線の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。

$$\begin{aligned} \text{骨材強度指標値 } I(\text{kN/mm}) \\ = \text{荷重} \triangleq P(\text{kN}) / \text{変位} \triangleq d(\text{mm}) \end{aligned} \quad (1)$$

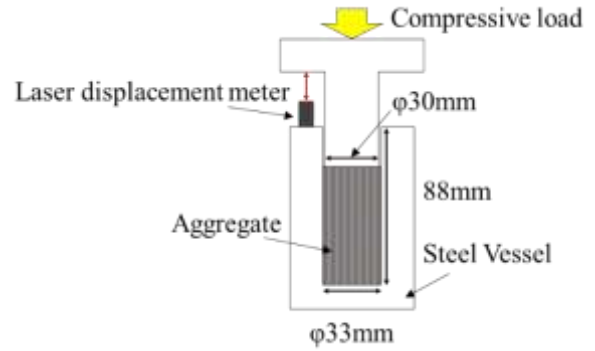


図-3 骨材強度指標値試験概要図

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(kN/mm)	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

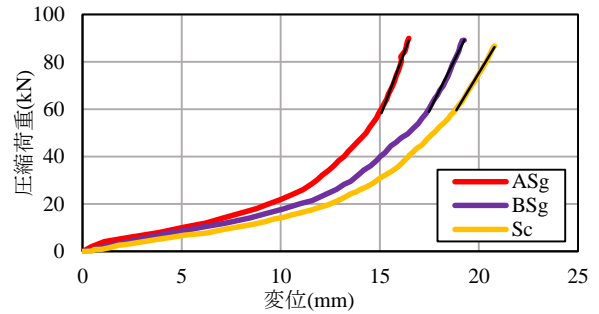


図-4 圧縮荷重と変位の関係

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)

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。これより Sc に比べ ASg および BSg の骨材強度指標値が大きいことから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たことが認められた。

表-3 各検討および対策における計画配合および各種試験結果

	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)	ブリーディング率 (%)	耐久性指数
		W	C	Sc	L	Sg	G	SP	AE	DF					
基本配合	ASg	100	170	340	0	853	944	0.75	0.8	0.05	11.0	3.5	28	10.55	26.8
		50	179	358	411	417	924		0.8		11.0	4.5	28	8.02	
		0	178	356	824	0	926		0.05		12.0	4.0	21	7.30	86.3
	BSg	100	174	348	0	971	935		2.4		11.5	3.9	27	9.24	13.7
		50	180	360	410	478	921		1.4		12.0	4.7	27	6.97	
		0	178	356	824	0	926		0.05		12.0	4.0	21	7.30	86.3
[対策1]	目標空気量(%)														
	ASg	7.5	166	332		861	953	0.75	1.7	0.05	11.5	7.4	24		55.4
		6.0	170	340		853	944		1.5		11.5	5.7	25		12.8
		4.5	170	340		853	944		0.8		11.0	3.5	28		26.8
	BSg	7.5	169	338		983	947		2.2		13.0	7.7	28		93.1
		6.0	171	342		978	942		1.4		10.5	5.5	27		69.7
4.5		174	348		971	935	2.4		11.5		3.9	27		13.7	
[対策2]	BL 低減割合														
	ASg	BL1	170	340	0	853	944	0.75	0.8	0.05	11.0	3.5	28	10.55	26.8
		BL1/2	157	314	27	867	967		1.2		10.5	4.6	30	4.64	36.3
		BL1/4	163	326	56	842	938		1.9		12.0	5.2	31	2.87	77.3
	BSg	BL1	174	348	0	921	887		2.4		11.5	3.9	27	9.24	13.7
		BL1/2	169	338	29	962	927		3.0		10.5	4.1	18	4.37	12.3
BL1/3		165	330	57	967	932	1.4		10.5		5.0	18	3.12	29.1	
	BL1/4	175	350	90	971	935	2.1	13.0	4.5	24	2.04	66.2			
[対策3]	微粒分量(Sg×%)														
	ASg	6.2	170	340		853	944	0.75	0.8	0.05	11.0	3.5	28	10.55	26.8
		10	175	350		843	933		1.6		10.5	5.1	27	7.30	50.2
		13	173	346		974	973		1.8		13.0	4.5	26	7.28	55.7
	BSg	4.7	174	348		971	935		2.4		11.5	3.9	27	9.24	13.7
		10	170	340		981	944		1.8		11.5	4.3	22	5.29	86.3
13		172	344		976	940	1.9		11.0		4.7	22	5.11	86.3	

※Sg/S(%) : 石炭ガス化溶融スラグ細骨材体積比

3. 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A県産石炭ガス化溶融スラグ細骨材(記号:ASg)、B県産石炭ガス化溶融スラグ細骨材(記号:BSg)、砂岩系砕砂(記号:Sc)、粗骨材として砂岩系砕石(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)、混和剤としてポリカルボン酸系 AE 減水剤(記号:SP)およびアルキルエーテル型陰イオン界面活性剤(記号:AE)、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)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2章の骨材試験で使用したものと同一ロットの試料である。

3.2 配合条件および練混ぜ方法

計画配合を表-3の基本配合に示す。配合条件は水セメント比(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SP添加率を求め、置換率0、50%ではSP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。また、消泡剤はエントラップトエアを除去する目的で試験練りにより定めた最低使用量添加した。

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、各材料の保管場所および練混ぜは空調設備のない屋内にて実施した。

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)、圧縮強度試験(JIS A 1108)、凍結融解試験(JIS A 1148、各Sg置換率0%、100%のみ、寸法100×100×400mm、前養生は材齢28日まで20°C水中養生)とした。

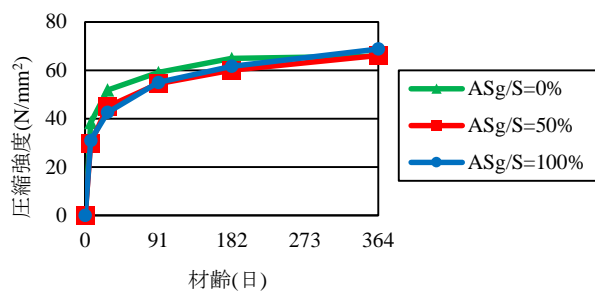


図-5 圧縮強度試験結果 (ASg)

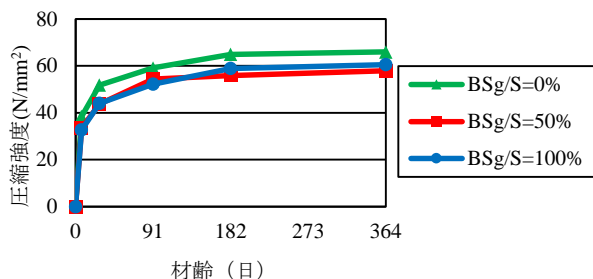


図-6 圧縮強度試験結果 (BSg)

3.4 試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-3の基本配合に示す。試験結果より、各 Sg 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。これは各 Sg の表面は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、各 Sg 置換率の増加に伴い AE 添加率が増加する傾向にあった。これらの結果より、各 Sg の使用によりコンクリートの流動性は向上すると考えられる。圧縮強度試験結果を図-5 および図-6 に示す。結果より、各 Sg 混和コンクリートの圧縮強度は、無混和コンクリートに比べ若干の低下が確認された。これは、各 Sg の破砕値が大きいことから、各 Sg 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硬化後の粗骨材下面の空隙が増大し、粗骨材とセメントペーストとの界面の結合が弱くなることも一因と考えられる。凍結融解試験結果を図-7 に示す。各 Sg 混和コンクリートは 90~150 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空隙が多く生じ、硬化組織が粗くなったためと考えられる。また、各 Sg 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ブリーディングの低減などの改善が必要となる。

4. 石炭ガス化溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性向上の検討

4.1 検討方法

本章では Sg 混和コンクリートの凍結融解抵抗性改善

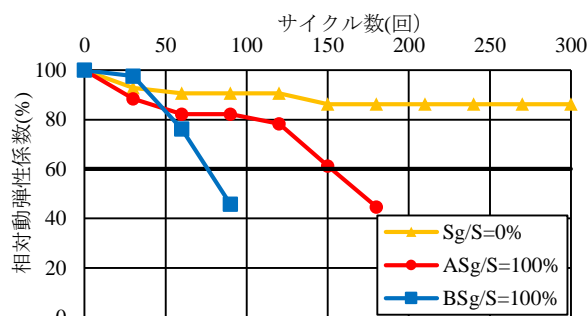


図-7 凍結融解試験結果

のため、[対策1] 空気量の増加とブリーディング率の低減の2つの方法で実験および検討を行った。なお、ブリーディング率の低減方法として[対策2] 石灰石微粉末の混和と[対策3] 石炭ガス化溶融スラグ細骨材の微粒分量を増加させる方法について実験および検討を行った。銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの既往の研究において黒岩ら⁹⁾は、微粒分量が13%までは、微粒分量の増加に伴いコンクリートのブリーディング量が減少したとしている。そこで本研究では、[対策3]において石炭ガス化溶融スラグ細骨材の微粒分量が10%および13%となるように粒度調整してブリーディング率の低減を図った。

4.2 使用材料

[対策1]の使用材料は3章と同様とした。[対策2]は3章の使用材料に加え、石灰石微粉末(記号:L, 密度:2.72g/cm³, 比表面積:4110cm²/g, CaCO₃含有率(質量比):97.1%)を使用した。[対策3]は、結合材および細骨材、粗骨材, AE 減水剤, 消泡剤においては3章と同様とした。IGCC は石炭火力発電であるため、石炭ガス化溶融スラグ細骨材の微粒分の中に未燃カーボンが含まれている場合があると考えられる。未燃カーボンはフライアッシュ中にも含まれており、AE 剤を吸着し空気連行性を低下させる性質を持つ。そのため、[対策3]では未燃カーボン量の影響を受けにくいフライアッシュ用の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を主成分とする AE 剤を用いた。

4.3 配合条件および練混ぜ方法

計画配合を表-3にそれぞれ示す。W/C を50%とし、ASg および BSg を Sc に対して全量体積置換した。目標フレッシュ性状は、3章と同様のスランブ 12.0±1.5cm, 空気量 4.5±1.5%とした。SP 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 剤添加率を変化させた。[対策1]は空気量を 6.0±0.5%および 7.5±0.5%の2水準を追加した。

[対策2]は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, 1/3(BSgのみ)および1/4に低減されるように石灰石微粉末をセメントの一

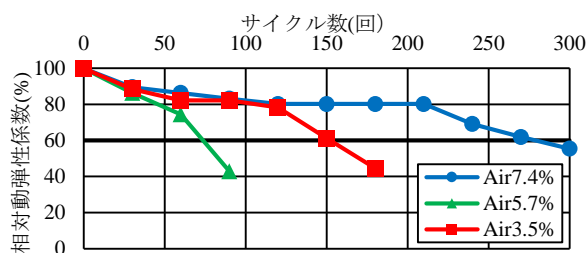


図-8 凍結融解試験結果(空気量増加配合, ASg)

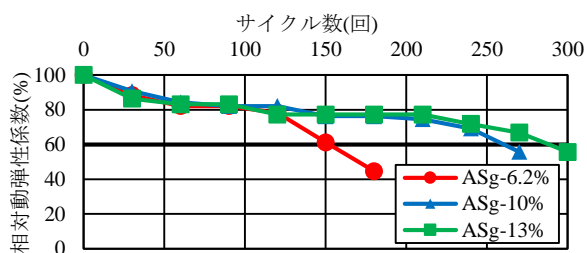


図-12 凍結融解試験結果(微粒分量増加配合, ASg)

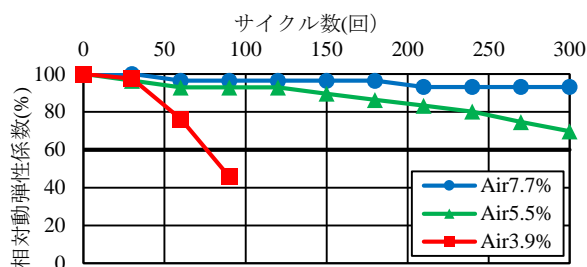


図-9 凍結融解試験結果(空気量増加配合, BSg)

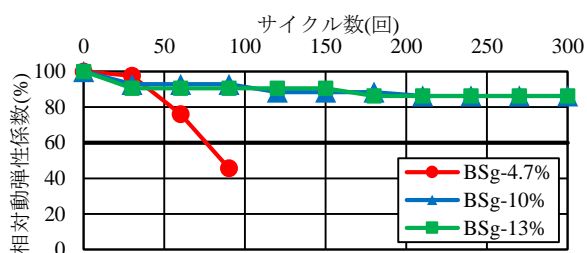


図-13 凍結融解試験結果(微粒分量増加配合, BSg)

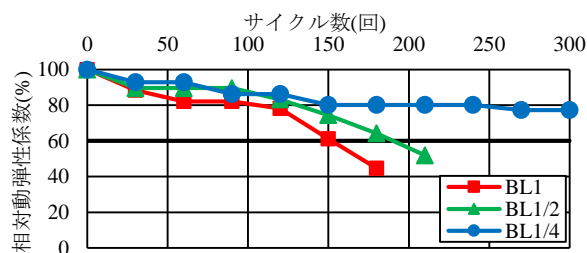


図-10 凍結融解試験結果(石灰石微粉末配合, ASg)

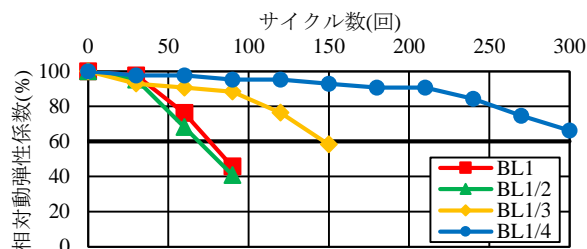


図-11 凍結融解試験結果(石灰石微粉末配合, BSg)

部と置換して微粉末の割合を高めることで調整し、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とし、ブリーディング率を1/2, 1/3(BSgのみ)および1/4に低減した配合をそれぞれBL1/2, BL1/3およびBL1/4とした。練混ぜ方法は3章と同様とした。

〔対策3〕はブリーディング率を低減させるために細骨材の粒度分布を変化させ、各Sg細骨材の0.075mm未満の割合を増すために、各Sgをハンマーミルで粉碎し、0.075mmを通過する粒子を加えることで、細骨材中の0.075mm未満が10%および13%になるように調整を行い微粒分量未調整の配合と比較した。微粒分量調整前のASgの微粒分量は6.2%、BSgの微粒分量は4.7%である。練混ぜ方法は3章と同様とした。

4.4 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, [対策2] および [対策3] のみ)、凍結融解試験(JIS A 1148, 寸法 100×100×400mm, 前養生は材齢 28 日まで 20℃水中養生)とした。

4.5 試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-3 にそれぞれ示す。各Sgにおける対策毎の凍結融解試験結果を図-8, 図-9, 図-10, 図-11, 図-12 および図-13 に示す。

〔対策1〕において、図-8 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図-9 より 60%以上を維持した。2 種類のスラグに違いが生じた要因は所定の空気量を得るために BSg は ASg と比較し、より多くの AE 剤を必要としたため、空気量に対するエントレインドエアの割合が多くなったためと考えられる。

〔対策2〕において、ASg および BSg 混和コンクリートに対し、石灰石微粉末添加によるブリーディング率を低減させたコンクリートの凍結融解抵抗性において図-10 より ASg 混和コンクリートはブリーディング率を 1/4 まで低減させることにより改善する傾向が確認された。図-11 より BSg 混和コンクリートにおいても、ブリーディング率を 1/4 まで低減させることにより改善する傾向が確認された。いずれの配合においても、300 サイクル終了時で試験体の相対動弾性係数が 60%を上回る結果となった。これは、ブリーディングの低減により、硬化初期におけるコンクリート内部の自由水の移動が少なくなり、硬化ペースト中および骨材表面とセメントペーストの界面との間の空隙が減少したためと思われる。

る。また、連行した微細空気泡の合一が防げられ、連行空気泡が微細なまま多く保持されたためであると考えられる。ブリーディング率抑制割合が 1/2 ではこれらの効果が低く改善が不十分であったと考えられる。BSg 使用コンクリートは 300 サイクル終了時の相対動弾性係数が 66%を示したことより、ASg 使用コンクリートに比べ BSg 使用コンクリートは石灰石微粉末の添加による対策では不十分である可能性があると思われる。

〔対策 3〕において、ASg 使用コンクリートにおいては、微粒分量の増加によりブリーディング率を約 7%程度まで低減することが可能となった。BSg 使用コンクリートでは、約 5%程度まで低減することが可能となった。また、ASg 使用コンクリートと BSg 使用コンクリートを比較すると、微粒分量を同量としても ASg 使用コンクリートの方がブリーディング率は大きくなった。この原因は、2 章の吸水率試験結果より、BSg に比べ ASg の吸水率が小さいためと思われる。また、各スラグ混和コンクリートにおいて微粒分量を 10%から 13%まで増加させてもブリーディング率は同程度という結果だった。これは、ASg および BSg 自体の骨材表面が平滑であるため、保水力の向上に対して限界があるのではないかと推察される。また、凍結融解抵抗性において図-12 より ASg 使用コンクリートは微粒分量の増加に伴い凍結融解抵抗性の向上は確認できたが不十分であった。図-13 より BSg 使用コンクリートは微粒分量が 10%および 13%の配合において 300 サイクル終了時で相対動弾性係数が 86%程度まで改善することが確認できた。2 種類のスラグの違いが生じた要因は微粒分量増加によるブリーディング率の低減効果の違いであると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

凍結融解試験では ASg および BSg 混和コンクリートにおいてスラグ無混和コンクリートと比較し早期のサイクルで相対動弾性係数が低下した。フレッシュ時の連行空気量を増加させる方法では ASg においては凍結融解抵抗性の向上は確認できたが不十分であった。BSg においては凍結融解抵抗性の向上が確認できた。石灰石微粉末を混和させる方法では ASg においてはブリーディング率を 3%程度まで低減することにより凍結融解抵抗性が向上し、BSg においてはブリーディング率を 2%程度まで低減させることにより凍結融解抵抗性の向上が確認できた。微粒分量を増加させる方法では ASg においては凍結融解抵抗性の向上は確認できたが不十分であった。BSg においては微粒分量を 10%程度まで増加させ

ることにより凍結融解抵抗性の向上が確認できた。

以上より Sg の種類により対策方法が異なるが、空気量の増加、ブリーディング率の低減により凍結融解抵抗性の向上が確認できた。

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。

本研究論文作成にあたり、同研究室に所属していた山中友仁氏(現 鹿島建設)、小林亮太郎氏(現 ドーピー建設工業)には数多くの実験をともにを行い、多くの助言を頂き、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省エネルギー庁, エネルギー白書 2019, 第 2 部第 1 章国内エネルギー動向, p.156
https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/whitepaper2019pdf_2_1.pdf
(閲覧日: 2020 年 1 月 3 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)」
<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201306igcc/index.html>
(閲覧日: 2020 年 1 月 3 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) 小林亮太郎, 藤原浩巳, 丸岡正知, 渡邊貴郁: 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, Vol.41, No.1, pp.2015-2020, 2019.7
- 5) 田中敏嗣, 下山善秀, 藤原浩巳: 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
- 6) 黒岩 義仁, 高尾 昇, 佐々木 憲明: 銅スラグ細骨材の微粒分量および実積率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.43-48, 2013