

論文 各種スラグ骨材を用いたハイボリュームフライアッシュ重量コンクリートに関する実験的研究

前田 凌*1・山田 悠二*2・横井 克則*3・近藤 拓也*4

要旨: 消波ブロックへの適用を視野に、銅スラグ細骨材、マンガンスラグ粗骨材を全量使用し、フライアッシュを多量混和した重量コンクリートの施工性能、強度特性、乾燥収縮特性を検討した。その結果、普通ポルトランドセメントとフライアッシュ、スラグ骨材を組み合わせることでブリーディング量は $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下に抑えられた。また、振動下での変形性はスラグ骨材使用により向上した。強度特性は、スラグ骨材使用によって長期強度が増進する可能性が示され、乾燥収縮量はスラグ骨材使用によって大きく低減した。

キーワード: 重量コンクリート, スラグ骨材, フライアッシュ, 施工性能, 強度特性, 乾燥収縮特性

1. はじめに

高知県では南海トラフ巨大地震によって、日本最大規模の津波の到来が予測されるため、港湾部における津波対策の一環として消波ブロックが増設されている。また、耐波安定性を得るためには単位容積質量の寄与が大きいことから、消波ブロックの重量化が効果的である。従来の消波ブロックでは大型であっても、大きな波が来た際には転倒することもあり、今後予想される大津波に対する耐波安定性が十分でないことも考えられる。そのため、密度の大きい材料を使用した重量コンクリートを用いて消波ブロックの重量化を図ることで、大規模な津波に対しても十分な耐波安定性を確保する必要がある。

四国では、銅やマンガン合金の製錬時に排出されるスラグを粒度調整し、コンクリート用骨材とした銅スラグ細骨材（以下、CUS と称す）およびマンガンスラグ骨材といった密度の大きい骨材が供給されている。したがって、これらのスラグ骨材の利用により重量なコンクリートを製造・供給しやすい環境にある。

しかしながら、スラグ骨材はその密度やガラス質な表面を持つことから、使用によりブリーディングの増大が懸念される¹⁾。ブリーディング抑制には、フライアッシュ（以下、FA と称す）の混和が効果的であり、四国では良質なフライアッシュが供給されている。また FA の混和は、ワーカビリティを損なうことなく単位水量の減少が可能と考えられ、単位水量の低下はコンクリートの重量化にも寄与する。また、このように骨材や粉体として産業副産物由来の材料を多く使用することは資源循環型社会の形成にも寄与する。

以上を踏まえ本研究では、四国で供給される各種副産物由来のコンクリート材料を有効利用した重量コンクリ

ートの開発を目的に、細骨材として CUS および粗骨材としてマンガンスラグ粗骨材（以下、MNG と称す）を全量使用し、さらにフライアッシュを多量に混和した重量コンクリートの施工性能、強度特性および乾燥収縮特性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。セメントは、普通ポルトラ

表-1 使用材料

材料	物性など
普通ポルトランドセメント (OPC)	密度: $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
	比表面積: $3320\text{cm}^2/\text{g}$
	強熱減量: 2.58%
高炉セメント B種 (BB)	密度: $3.04\text{g}/\text{cm}^3$
	比表面積: $3820\text{cm}^2/\text{g}$
	強熱減量: 1.76%
硬質砂岩砕砂 (S)	表乾密度: $2.58\text{g}/\text{cm}^3$
	吸水率: 1.67%
	粗粒率: 2.98, 実積率: 63.4%
銅スラグ細骨材 (CUS)	表乾密度: $3.50\text{g}/\text{cm}^3$
	吸水率: 0.25%
	粗粒率: 2.72, 実積率: 62.9%
硬質砂岩砕石 (G)	表乾密度: $2.63\text{g}/\text{cm}^3$
	吸水率: 0.86%
	粗粒率: 6.65, 実積率: 60.2%
マンガンスラグ粗骨材 (MNG)	表乾密度: $2.80\text{g}/\text{cm}^3$
	吸水率: 1.26%
	粗粒率: 6.56, 実積率: 57.3%
フライアッシュ II種 (FA)	密度: $2.30\text{g}/\text{cm}^3$
	比表面積: $3260\text{cm}^2/\text{g}$
	強熱減量: 2.2%
AE減水剤 (Ad1)	リグニンスルホン酸系
高性能AE減水剤 (Ad2)	ポリカルボン酸エーテル系

*1 高知工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻 (学生会員)

*2 立命館大学 理学部 環境都市工学科 特任助教 博 (工) (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 博 (工) (正会員)

*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授 博 (工) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

配合シリーズ	スラグ骨材	セメント	配合名	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)										混和剤		単位容積質量 (kg/m ³)	SL. (cm)	Air (%)	C. T. (°C)
							W	OPC	BB	FA	S	CUS	G	MNG	Ad1	Ad2						
シリーズ1	無	BB	BB60-70	60	47	50	150	-	250	70	912	-	930	-	0.4	-	2312	3.5	0.8	19		
			BB60S-70							100	1238	-	990	2698			8.0	3.0	19			
			BB60S-100							150	1215	-	972	2687			12.5	3.0	21			
			BB60S-150							150	1177	-	942	2669			13.5	2.0	23			
シリーズ2	無	BB	BB60	60	37	50	140	-	233	888	-	905	-	0.4	-	2316	8.5	3.0	22			
			BB55	55	35				255	879	-	896	-			0.8	2320	7.5	3.0	21		
			BB60S	60	37				233	1204	-	963	0.4			2690	9.0	3.0	23			
			BB55S	55	35				255	1192	-	953	0.4			2690	8.0	3.0	24			
	有	OPC		OPC60S	60	37	50	140	-	233	-	-	-	-	0.6	-	2700	7.0	3.0	23		
				OPC55S	55	35				255	-	-	-	-			0.6	2700	8.5	4.0	23	

ンドセメント、高炉セメント B 種を使用した。細骨材には、高知県高知市産の硬質砂岩砕砂および香川県直島町産 CUS (CUS2.5) を使用した。粗骨材には、高知県高知市産の硬質砂岩砕石および徳島県阿南市産 MNG を使用した。混和材には、フライアッシュ II 種を使用した。

MNG の表面 (写真-1) はガラス質で、また徐冷時に混入したと思われる気泡痕が見られる。細骨材の場合の吸水率は 1% 未満とされるが²⁾、粗骨材として使用する場合には硬質砂岩砕砂よりも若干吸水率が小さい程度であり、これは表面の気泡痕の影響と思われる。また、マンガンスラグを細骨材として全量使用した場合には、一般的な砕砂を使用した普通コンクリートとフレッシュ性状および強度特性において、同等であるとされる²⁾。銅スラグ細骨材については JIS A 5011-3 として規格化され、また土木学会より施工指針¹⁾が発表されている。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合シリーズ 1 では、高炉セメント B 種を用いて、W/C を 60% に統一し、スラグ骨材の有無とフライアッシュの単位量の異なる配合でブリーディング性状への影響について検討を行った。それによって得られた結果から配合シリーズ 2 の配合設計を行って、配合シリーズ 2 のコンクリートで各種検討を行った。配合シリーズ 2 では、W/C を 60% および 55% の 2 水準とし、単位水量は 140kg/m³ とした。また、フライアッシュは、多量使用を前提としているため、従来の内割および外割による配合設計ではなく、単位量として配合設計に組み込むこととした。目標スランプについては、シリーズ 1 では特に値を設けず、シリーズ 2 では 8.0±1.0cm とした。また空気量については、フライアッシュを多量に使用するため AE 剤によって空気量を調整することが難しいことと、高知湾での利用を想定しており、高知湾では凍結融解作用を受けにくいと思われるため NonAE コンクリートとした。

2.3 試験方法

(1) スランプ試験および空気量試験

スランプ試験を JIS A 1101、空気量試験を JIS A 1128 に準拠して実施した。



写真-1 マンガンスラグ粗骨材

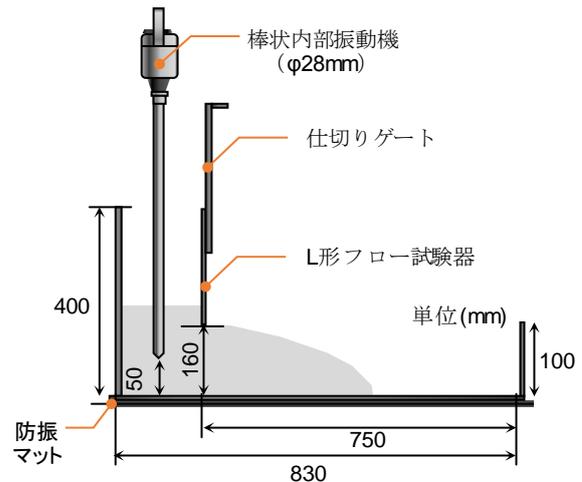


図-1 加振 L フロー試験装置の概要

(2) 棒状内部振動機を用いた L フロー試験

L 形容器 (JSCE-F514)、棒状内部振動機 (φ 28mm) を用いて実施した³⁾。試験の概要を図-1 に示す。試験手順としては、まず、L 形容器を防振マットの上へ水平となるよう設置した。仕切りゲートを挿入した後、試料を 3 層に分けて詰めた。このとき、1 層ごとに突き棒にて 5 回突いた。試料を詰めた後は、上面を均し、停止した状態の棒状内部振動機を試料投入側の中央に、底面からの高さが 50mm となるように挿入した。仕切りゲートを上げて加振を行った。このとき、振動を与えてもコンクリートが流動しなくなるまで継続して加振した。コンクリートの流動が停止したときのフローを測定し、これを流動停止フローとした。

(3) ブリーディング試験

ブリーディング試験を JIS A 1123 に準拠して実施した。

(4) 圧縮強度試験および単位容積質量の算出

圧縮強度試験を JIS A 1108 に準拠して実施した。また、圧縮強度試験前の円柱供試体の直径、高さ、質量から単位容積質量を算出した。供試体は所定の材齢まで水中養生 (20±2℃) を行った。

(5) 共鳴振動による動弾性係数試験

共鳴法による動弾性係数試験を JIS A 1127 に準拠して実施した。供試体には、圧縮強度試験を行う前の円柱供試体 (φ 100mm, 高さ 200mm) を用いた。また供試体は、水中養生を行った後に打設面の研磨を行い、試験に供した。

(6) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は JIS A 1129-2 に準拠して、コンタクトゲージ法により実施した。供試体は角柱 (100×100×400mm) とし、材齢 28 日まで水中養生を行った後、恒温恒湿室 (20±2℃, 60±2%) で所定の測定材齢まで気中に静置させた。長さの測定にはホイットモア式の測定器を使用した。コンタクトチップは、供試体の打設面を上にしたときに側面となる 2 面に貼付した。貼付箇所は 1 側面に対し、基長が 100mm となるように側面中央から左右に水平方向へ離れた 2 箇所ずつとした。1 供試体に対し測定した 4 つのデータの平均を長さとし、収縮量を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 施工性能に関する検討

(1) ブリーディング特性

図-2 に配合シリーズ 1 におけるブリーディング量と時間の関係を示す。なお本試験では、FA 混和によるブリーディングの抑制効果の確認が目的であるため、最終までには行わず 3 時間で終了とした。スラグ骨材を使用していない BB60-70 ではブリーディング量が 0.3cm³/cm² 程度であるのに対し、スラグ骨材を使用した配合では、0.8 cm³/cm² 以上であり、2 倍以上大きくなった。FA 混和による影響を見ると、70kg/m³ 混和したものと 100kg/m³ 混和したものでそれほど差がないのに対し、150 kg/m³ 混和した場合はブリーディング量が低減した。これより、FA 混和によるブリーディングの抑制を図るためには、150 kg/m³ 以上混和する必要があることがわかった。

上記の検討を踏まえ、配合修正を行った配合シリーズ 2 で試験を行った結果が図-3 である。また、図-3 はブリーディングが発生しなくなるまで試験を行った結果である。OPC55S と OPC60S では、スラグ骨材を使用していない BB55 および BB60 と比べてブリーディングの発生時間は長いが、最終ブリーディング量はいずれも

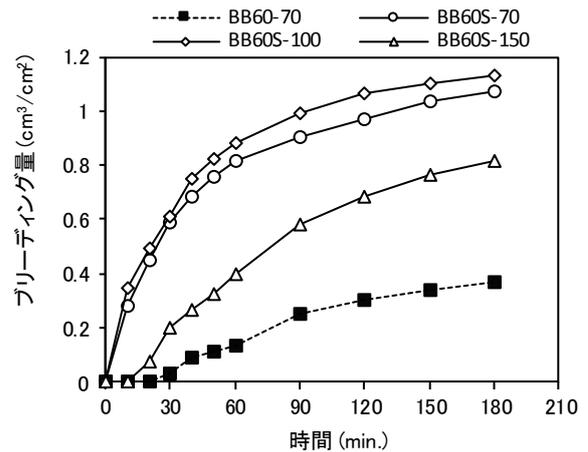


図-2 ブリーディング量と時間の関係 (その 1)

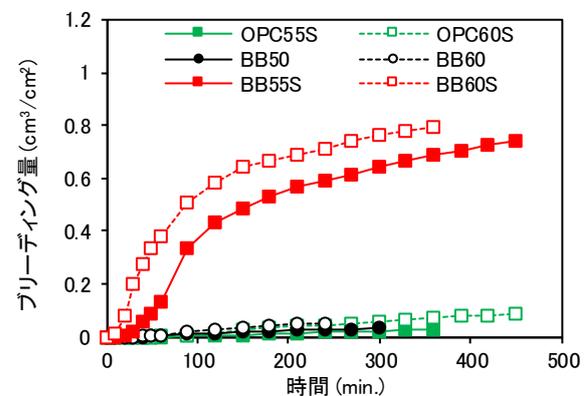


図-3 ブリーディング量と時間の関係 (その 2)

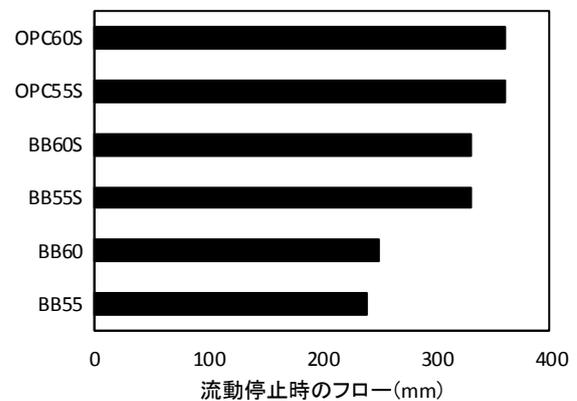


図-4 加振 L フロー試験での流動停止フロー

0.1cm³/cm² 以下と同程度であり、BB とスラグ骨材を組み合わせた場合よりも大幅に低減した。これより、スラグ骨材を細・粗骨材に全量使用しても、セメント種類によってはブリーディング量を小さく抑えることができることがわかった。

(2) 振動下における変形性

図-4 に流動停止フローを示す。いずれの配合もスランプはほぼ同じであるにも関わらず、スラグ骨材を使用した場合、普通骨材のみを使用した配合よりも流動停止フローは大きくなった。これは、スラグ骨材の使用によ

ってコンクリートの密度（単位容積質量）が大きくなることで、コンクリートの変形時に作用する慣性力が大きくなったためと考えられる。

また、セメント種類による影響では、OPC を用いた場合、BB を用いた場合に比べてフローは大きい値を示した。これは、OPC の方が高炉スラグ微粉末を含む BB よりも粒子全体の粒形が平均的に丸いことなどから、加振により流動しやすくなったためではないかと推察される。

3.2 硬化コンクリートに関する検討

(1) 強度特性

図-5 に圧縮強度試験の結果を示す。BB を使用した配合でスラグ骨材の有無による影響を比較すると、全材齢でスラグ骨材を使用していない BB60, BB55 の方が大きい強度を示した。特に、28 日強度において、スラグ骨材の有無による強度差が顕著になったが、91 日強度においてはその差が小さくなった。スラグ骨材の使用による強度低下への影響としては、表面がガラス質であり、セメントペーストやモルタルとの付着が小さくなった⁴⁾ことや、MNG の表面がポーラスであるため骨材界面が疎になったこと、ブリーディングの増大などの材料分離の影響⁵⁾によってコンクリートの空隙構造が粗大になったことなどが影響したと推察される。

スラグ骨材と OPC を使用した配合では、BB を使用した場合よりも全材齢で強度が大きくなった。また、BB60, BB55 と OPC60S, OPC55S を比較すると、W/C が同じ場合、材齢 7 日では OPC を使用した配合の方が強度は大きくなったが、材齢 28 日においては大きな差はなかった。しかし、材齢 91 日では OPC を使用した配合の強度が大きくなった。

強度増進率を図-6 に示す。なお、強度増進率は式(1)により求めた。

$$\text{強度増進率}(\%) = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここに、 σ_1 : 7~28 日または 28~91 日の増進量 (N/mm²)、 σ_2 : 7 日または 28 日強度 (N/mm²) である。

上述したとおり、BB60S, BB55S の圧縮強度は他の配合と比べて小さかったが、強度増進率においては、材齢 28~91 日にかけて大きくなっており、長期強度が顕著に伸びていることが確認された。BB や FA の使用に伴う、潜在水硬性およびポズラン反応による長期強度の増進は一般的に知られているが、BB60, BB55 と BB60S, BB55S を比較すると、スラグ骨材を使用した方が材齢 28~91 日にかけての強度増進が大きくなった。したがって、スラグ骨材の使用が長期強度の増進に影響していることがわかる。CUS の使用によって骨材界面に反応層が生成されることが報告されており⁶⁾、このような化学的な要因により長期強度に影響した可能性が考えられるが、詳細に

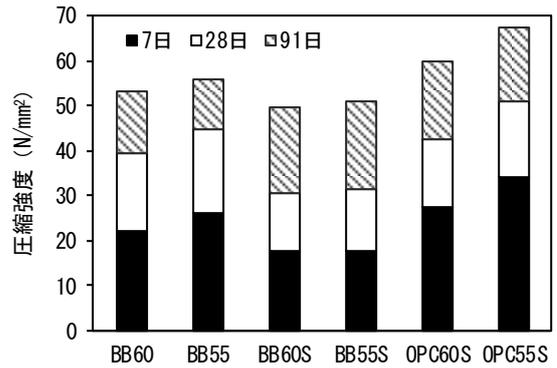


図-5 圧縮強度

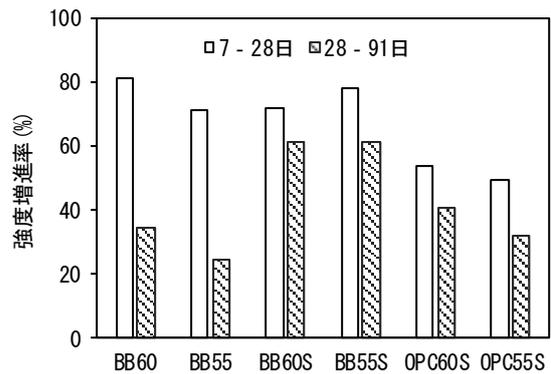


図-6 強度増進率

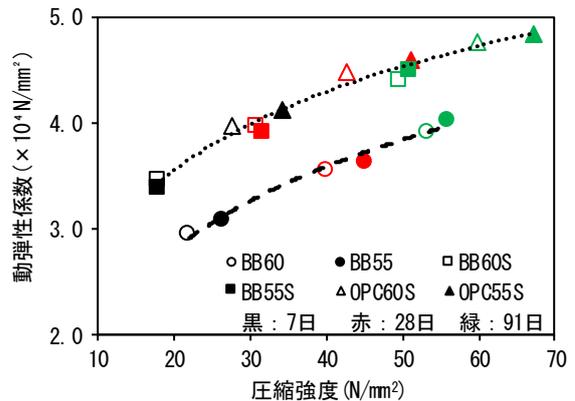


図-7 動弾性係数と圧縮強度の関係

については今後の課題としたい。

また、BB60S, BB55S に対して OPC60S, OPC55S の方が長期強度は大きいものの、材齢 28~91 日にかけての強度増進は BB60S, BB55S の方が大きくなった。これは、BB の使用に伴う潜在水硬性の影響が考えられる。

(2) 動弾性係数

図-7 に動弾性係数と圧縮強度の関係を示す。スラグ骨材の有無で近似曲線を比較すると、圧縮強度の大小関係に関わらず、スラグ骨材を使用した配合では普通骨材を使用した配合よりも、動弾性係数は 1.2 倍程度大きくなる傾向にあった。これはスラグ骨材を用いたコンクリートの単位容積質量（密度）が大きいことやスラグ骨材が硬質であることから、弾性波の伝播速度が速くなったためであると考えられる。

(3) 単位容積質量

図-8 に算出した単位容積質量を示す。CUS と MNG を全量使用した BB60S, BB55S, OPC60S, OPC55S では、単位容積質量が約 2.7t/m³ とスラグ骨材を使用していない BB60, BB55 と比べて単位容積質量が大きいことがわかる。これは材齢に関わらず安定しており、一般に重量コンクリートとされる 2.5t/m³ に対しても十分に大きいことがわかる。

(4) 乾燥収縮特性

図-9 に乾燥収縮量と材齢の関係を示す。スラグ骨材を使用していない BB60, BB55 では材齢 126 日における収縮量が約 800μ であるのに対して、スラグ骨材を使用した BB60S, BB55S, OPC60S, OPC55S では収縮量を約 300μ に抑えることができた。既往の研究でも、CUS またはマンガンスラグ細骨材を使用した場合、収縮量は小さくなることが報告されている⁷⁾。本実験においても、マンガンスラグを粗骨材として使用している点では異なるが、収縮量は CUS, MNG の双方の影響によって抑えることができたと考えられる。また、材齢 91 日までは特に、セメントや骨材の種類によらず、W/C60%のものよりも W/C55%の方が僅かに収縮量は大きい傾向にあった。これは、W/C60%の方が骨材量は多いため、骨材による収縮の拘束が強くなった影響が大きいのではないかと考えられる。なお、材齢 126 日の収縮量は同程度となった。

スラグ骨材の使用により収縮量が低減した要因としては、コンクリート中の骨材の吸水率が低下することで水の逸散が減少したこと⁸⁾や、弾性係数の増大に伴って収縮に対する拘束力が大きくなったことが考えられる。

各材齢における動弾性係数と収縮量の関係を図-10 に示す。普通骨材を用いた BB60, BB55 においては動弾性係数がスラグ骨材を用いた場合と比べて小さく、収縮量は大きくなった。また、BB を用いた配合では動弾性係数はスラグ骨材の使用により、スラグ骨材を用いた配合間では、使用セメントによらず収縮量はほぼ同じであるにも関わらず、動弾性係数に最大で約 0.8×10⁴N/mm² の差が見られた。既往の研究において動弾性係数が小さいものほど収縮量は大きくなる傾向があることが確認されているが⁹⁾、本実験においても同様の結果が得られた。また、BB を用いた配合でスラグ骨材の有無で比較すると、材齢が経つにつれて動弾性係数の差は小さくなるが収縮量の差は大きくなった。また、スラグ骨材を使用した配合で比較すると、セメントに BB を用いた場合よりも OPC を用いた場合の方が動弾性係数は大きい、材齢が経つにつれて OPC 用いた場合の方が収縮は大きくなる傾向にあった。そのため、動弾性係数の増大が収縮量に及ぼす影響は、材齢初期で表れることが考えられる。

吸水率と収縮量の関係について検討するため、コンク

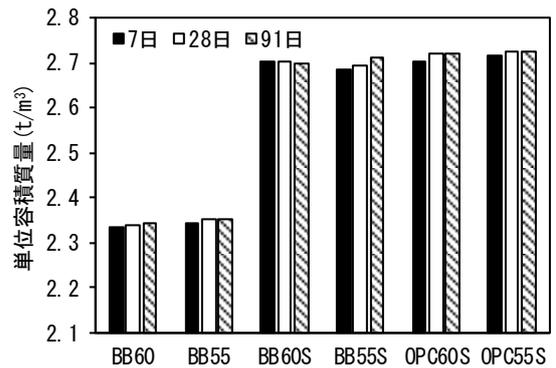


図-8 単位容積質量

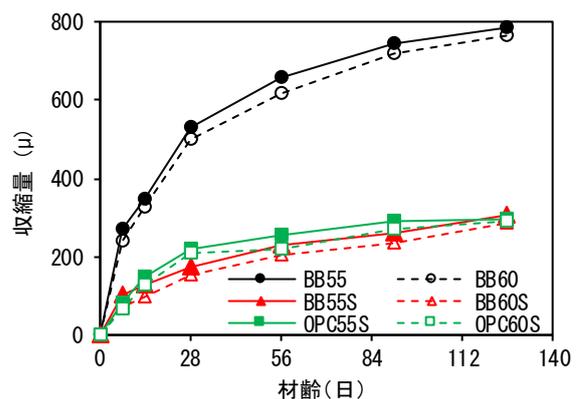


図-9 乾燥収縮量と材齢の関係

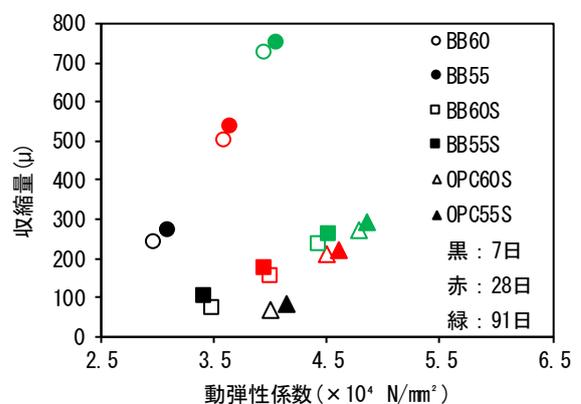


図-10 動弾性係数と収縮量の関係

リート中の細・粗骨材の容積を考慮して算出した、コンクリート中の全骨材の平均吸水率を式(4)より算出した。

$$\text{平均吸水率(\%)} = \frac{(W_S \times V_S) + (W_G \times V_G)}{V} \quad (4)$$

ここに、 W_S 、 W_G ：細骨材と粗骨材の吸水率、 V_S ：細骨材容積、 V_G ：粗骨材容積、 V ：全容積である。

図-11 に骨材の平均吸水率と収縮量の関係を示す。平均吸水率 0.6~0.8%の間でデータが不足しているため、今後データを蓄積し継続して検討する必要があるが、硬質砂岩碎石・砕砂を用いた配合と比べてスラグ骨材を使用した配合の平均吸水率は半分以下であり、収縮量も半分以下となった。

これらより、本実験の範囲ではスラグ骨材の使用によ

る収縮量の低減は、コンクリート中に含まれる骨材の吸水率が低下することで水の逸散が減少することの影響が大きい。初期材齢においては動弾性係数の増大による拘束力の増大も表れたと考えられる。今後もデータの蓄積を行い継続的に検討していく予定である。

4. まとめ

本研究では、消波ブロックへの適用を想定して、スラグ骨材を細・粗骨材として全量使用し、さらにフライアッシュを多量使用したコンクリートの諸特性について検討を行った。以下に本研究の範囲で得られた知見を示す。

(1) 単位フライアッシュ量を 150kg/m^3 以上とすることで、ブリーディングの低減が見られた。また、普通ポルトランドセメントとフライアッシュを使用した場合、スラグ骨材を細・粗骨材に全量使用しても、ブリーディング量は小さかった。

(2) 振動下での流動停止フローは、スラグ骨材の使用によって大きくなり、変形性は向上した。これは、コンクリートの密度が大きくなることで変形時に作用する慣性力が大きくなったことが影響したと考えられる。

(3) 高炉セメント B 種を使用した場合、スラグ骨材の使用により、硬質砂岩砕石・砕砂のみを用いた場合よりも強度は小さいが、長期的な強度増進率は大きかった。普通ポルトランドセメントとスラグ骨材を使用した配合では、高炉セメント B 種と硬質砂岩砕石・砕砂を用いた配合と同等以上の強度となった。

(4) 使用セメントに関わらずスラグ骨材を使用した場合、収縮量は硬質砂岩砕石・砕砂を用いた場合の半分以下に抑制できた。

消波ブロックは隅角部を多く有する複雑な形状をしており、充填不足が生じやすいと考えられるが、十分に重量を確保するためにも密実な施工が求められる。本配合条件では、スラグ骨材を全量使用しても、ブリーディングを抑制し、また、良好な振動締固めが可能と考えられる。また、乾燥収縮特性についても良好であった。耐久性に関する検討は継続して行っており、今後、報告することを予定している。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本鉱業協会および新日本電工(株)より試料および寄附金をご提供頂いた。また、実験を行うにあたり、本学の卒研生である細木真花氏(現(株)JFEシビル)、大西祐未氏(現国土交通省四国地方整備局)をはじめとする本科生・専攻科生にご協力頂いた。なお、本研究はJSPS 科研費 JP17K06526 の助成を受けたものです。ここに付記し、深謝いたします。

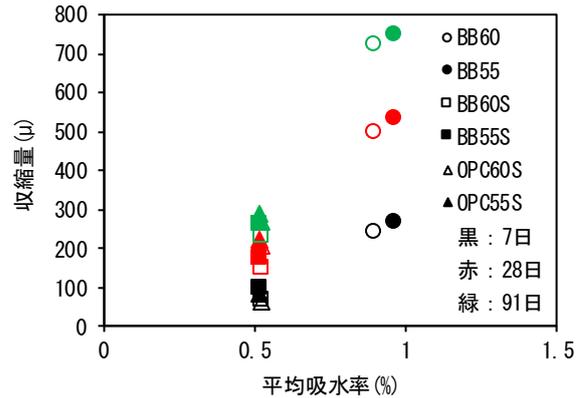


図-11 平均吸水率と収縮量の関係

参考文献

- 1) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針，コンクリートライブラリー，147，2016.7
- 2) 川崎巧貴，水越睦視，中義信，山内守：シリコマンガンスラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎的性状，四国支部技術研究発表会講演概要集，Vol.21，pp.241-242，2015.5
- 3) 山田悠二，岡友貴，橋本親典，渡辺健：非鉄スラグ細骨材コンクリートの間隔通過性に影響を与える要因に関する一考察，土木学会第71回年次学術講演会公演概要集，pp.641-642，2016.9
- 4) 大河芳賢，堺孝司：銅スラグおよびフライアッシュを細骨材として用いたコンクリートのフレッシュ・硬化特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.125-130，2011
- 5) 福上大貴，水越睦視：銅スラグ細骨材を多量に用いたフライアッシュⅡ種併用コンクリートの基礎的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1774-1779，2014
- 6) 原品武，今本啓一，清原千鶴，真野孝次：非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮抑制効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.421-426，2017.7
- 7) 河合慶有，氏家勲，水越睦視：銅・マンガンスラグ細骨材およびフライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性，材料，Vol.66，No.8，pp.615-620，Aug.2017
- 8) 笹田宏紀，橋本親典，渡辺健，香川浩司：低吸水性細骨材の混合使用によるコンクリートの乾燥収縮抑制対策に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.406-411，2012
- 9) 片平博，渡辺博志：骨材がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響の簡易推定法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.97-102，2009.6