

論文 低水結合材比における石炭灰重量モルタルの練上がり性状に与えるペースト粘性の影響と品質管理

野崎 渉太*1・木下 茂*2・野中 陽介*3・鍵本 広之*4

要旨：ガラス質の銅スラグはブリーディング量の増大等を懸念して細骨材に対するスラグ混合率を 30%以下とするのが標準であるが、単位容積質量を最大化するため石炭灰を多量に添加することで銅スラグ細骨材を最大限に使用するという配合面での解決を図った。水結合材比を低減した配合では、ブリーディング量の抑制だけでなく、銅スラグ計量誤差が大きくなってもスランプ値の変動量は小さくなる、即ちスランプ値の品質安定性が向上した。このスランプ値の品質安定性に関して室内試験においてその特性を明らかにするとともに、実機プラントでの連続的な製造試験により銅スラグ計量誤差とスランプ値の安定性について評価した。

キーワード：重量コンクリート、石炭灰、銅スラグ、低水結合材比、計量誤差、ペースト粘性、低炭素性

1. はじめに

海洋構造物の外周には波圧、越波量、反射波等を低減するため消波ブロックが設置されるが、設置される消波ブロックは設計波、ブロックの種類、被害率を条件としたハドソン式を用いて所要重量、設置勾配が決定される。一般に消波ブロックの安定性を高めるためには、ブロック製造素材の単位容積質量を増大するのが良く、例えば重量骨材である銅スラグを用いるのも一つの手段である。しかし、一般的に銅スラグはガラス質であり保水性が悪く、粒度分布（特に微粒分量）によっては、ブリーディング量の増大が懸念され、これに対処するため細骨材に対する混合率は 30%（容積比）以下とされ¹⁾高密度化の壁となっている。

筆者らは更なる銅スラグ混合率の増大のため、さらに言えば細骨材の 100%を銅スラグとするための配合検討を行い室内試験・施工試験を重ねた結果、石炭灰を多量に添加し水結合材比を減少させることで、銅スラグ細骨材を最大限に使用するという配合面での解決策を見出した。筆者らが採用した配合によれば、化学混和剤を用いずブリーディング量の低減が図れること²⁾に加え、銅スラグ計量誤差が大きくなってもスランプ値の変動量は小さいという特性を持つ。

今回検討対象とした石炭灰重量モルタルは、銅スラグ細骨材、石炭灰、セメント、海水で構成され、単位容積質量を高めるために銅スラグを、性状調整のために石炭灰を多量に混合したモルタルである。銅スラグは銅の精錬工程で副産される酸化鉄を主成分としたスラグであり、その密度は 3.6 g/cm³ 程度と天然の砂（密度 2.7 g/cm³ 程度）と比較して大きい粗骨材相当品はない。また銅スラグは既に JIS 化され一般素材として流通しているが、

筆者らが使用する銅スラグは粒度調整されていない、炉から算出したままの未調整スラグである。石炭灰についても原粉・湿灰（非 JIS 品）を使用するとともに、練混ぜ水はセメント量の削減を期待して海水を使用している。

一般的な消波ブロックの製造には呼び強度 18 や 21 のレディーミクストコンクリート（以下、「レミコン」）が用いられる。レミコンはスランプ値 12cm±2.5cm、材齢 28 日の圧縮強度を管理するが、筆者らが石炭灰重量モルタルに求める品質はスランプ値 8cm 以上（施工できれば良い）、脱枠・転置のための圧縮強度 $\sigma_3=3.5 \text{ N/mm}^2$ を満足することとしている。また消波ブロックは海中に設置されることが殆どであり、凍害危険区域にない箇所においては空気量管理を不要³⁾とした。上記の考え方で配合設計を行っており、本稿では配合上の特性を室内試験で明らかにしたことから報告するとともに、室内試験結果を補足するため実機プラントによる製造試験を行い、品質安定性（銅スラグ計量誤差が大きくなってもスランプ値の変動量は小さい特性）に関する連続的なデータを取得し評価したことから、本結果について述べる。

2. 異なる水結合材比のペースト、モルタルのフロー値と粘性、スランプ値の変化

2.1 目的、概要、試験方法

筆者らが提案する石炭灰重量モルタルの水結合材比は 30～35%程度と低い²⁾ことが配合上の特徴である。このため、低水結合材比モルタルの配合特性がスランプ値に与える影響を確認するためにペーストのフロー値、粘性、モルタルのフロー値、粘性、スランプ値を水結合材比を変化させた配合で試験を行うことにより比較評価した。

ペースト、モルタルのフロー値は JIS R 5201:2015 「6.

*1 電源開発（株） 技術開発部 茅ヶ崎研究所（正会員）

*2 （株）シーテック 技術部

*3 （株）セイア 営業開発部

*4 電源開発（株） 技術開発部 茅ヶ崎研究所 所長 博士(工学)（正会員）

セメントの物理試験方法 12 フロー試験」に準拠し、15秒間に 15 回の落下運動を与える前に測定したフロー値である。また、粘性は JIS Z 8803:2011「液体の粘度測定方法」に準拠して測定した。

2.2 ペースト、モルタルのフロー値と粘性

(1) 異なる粉体を用いたペーストのフロー値と粘性

フライアッシュ原粉に加え、フライアッシュⅠ種、Ⅱ種、高炉スラグ微粉末、炭酸カルシウム粉末を用いてペーストを練混ぜ、フロー値と粘性を計測した。普通ポルトランドセメントに対し上記粉体を質量で70%置換した混合粉体を用い、水結合材比を25%～80%まで5%間隔を基本として12水準変化させた配合を用いて、ペーストを練混ぜ、試験に用いた。使用材料の物性を表-1に、レーザ回折粒度分布測定装置で各粉体の粒度分布を計測した結果を図-1に、フロー試験、粘度の試験結果を表-2、図-2(a)、(b)に示す。

試験の結果から、ペーストのフロー値は水結合材比が増加するにつれて大きく、粘度は小さくなることわかる。また、粉体粒度との関係で確認すると、粒子が細かいとフロー値は小さい傾向になり、粘度は粒子が細かいと大きい傾向になる。

石炭灰重量モルタルの水結合材比は30～35%程度であ

表-1 使用材料の物理的性質

材料	物理的性質
細骨材	銅スラグ；密度 3.66g/cm ³ ，FM3.54，吸水率 0.18%
粉 体	普通ポルトランドセメント（密度 3.25 g/cm ³ ） フライアッシュ原粉，Ⅰ種，Ⅱ種（密度 2.24,2.40,2.37 g/cm ³ ） 高炉スラグ微粉末（密度 2.91 g/cm ³ ） 炭酸カルシウム（密度 2.75 g/cm ³ ）

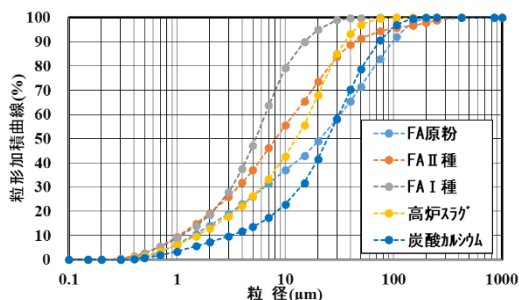


図-1 試験に使用した粉体の粒度分布

表-2 水粉体比毎のフロー値 (mm) 及び粘度 (Pa・s)

水粉体比 (%)	フロー値(mm)					粘度(Pa・s)				
	FA原粉	FAⅡ種	FAⅠ種	高炉スラグ	炭酸カルシウム	FA原粉	FAⅡ種	FAⅠ種	高炉スラグ	炭酸カルシウム
25.0	100	100	100	100	103	計測不可				5.98
30.0	104	106	103	107	116	4.55	7.24	7.96	6.59	4.13
32.5	112	112	106	114	142	4.17	6.06	7.71	6.45	3.51
35.0	119	129	108	111	164	3.81	5.52	7.38	5.56	3.25
37.5	144	157	111	117	192	3.57	5.20	6.99	5.30	2.90
40.0	172	178	119	125	230	3.02	4.61	6.28	5.12	2.69
45.0	216	208	144	175	258	2.54	3.83	5.45	4.15	2.08
50.0	257	261	179	218	325	2.27	2.65	4.30	3.52	1.31
55.0	305	328	218	279	350	1.60	1.66	3.29	2.92	0.98
60.0	325	360	266	320	395	1.08	1.27	2.38	2.27	0.46
70.0	390	400	330	365	440	0.57	0.63	1.24	1.23	0.31
80.0	420	428	390	405	460	0.29	0.35	0.56	0.72	0.19

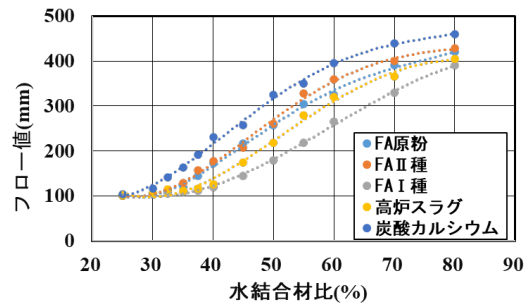


図-2(a) ペーストの水結合材比とフロー値の関係

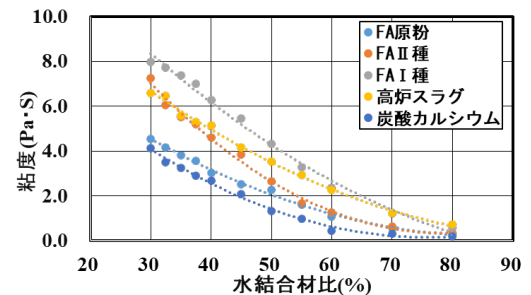


図-2(b) ペーストの水結合材比と粘度の関係

るが、この水結合材比の範囲におけるフライアッシュ原粉を使用した場合のペーストのフロー値と粘度は104～119mm、4.55～3.81Pa・sとなる。その他の粉体についても、水結合材比が30～35%の時のペーストのフロー値と粘度を整理した結果を図-3に示すが、フロー値は炭酸カルシウム粉末を除き、一般的にコンクリート混和材料として使用されるフライアッシュ、高炉スラグ微粉末は、フライアッシュ原粉のフロー値と概ね共通した数値範囲をとる。なお、フロー値105～110mmを共通範囲として、分布範囲が異なるのは粉体の粒度が影響していると考えられる。

一方、粘度はフロー値と異なり各粉体ごとに異なる数値範囲となるが、これはフロー値が静的状態の特性を示すのに対し、粘度は動的状態の特性を示すことが影響しているものと考えられる。

(2) 異なる粉体を用いたモルタルのフロー値と粘性

粉体をフライアッシュ原粉、Ⅱ種、細骨材を銅スラグとしたモルタルを練混ぜ、フロー値と粘性を計測した。

試験は、普通ポルトランドセメントに対し上記粉体を

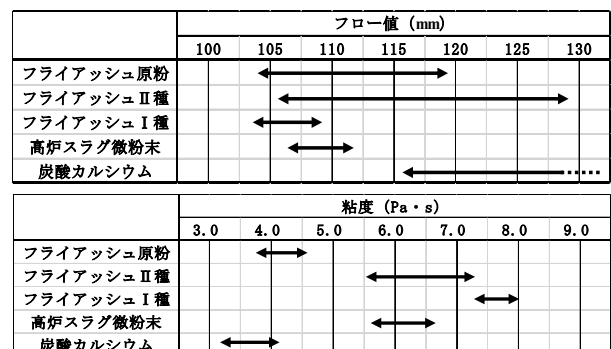


図-3 ペーストのフロー値と粘度の数値範囲

質量で70%置換した混合粉体を用い、水結合材比を35%、45%、55%の3ケース、銅スラグ添加量 1,700 kg/m³とした標準モルタルを練混ぜるとともに、銅スラグ添加量を±50、100 kg/m³と変化させた計5ケースのモルタルで実施した。ペーストとモルタルのフロー試験例を写真-1に示す。試験配合を表-3に、試験結果を図-4(a)、(b)に示す。モルタルの粘度について示した図-4(a)から、ペースト配合(性状)が同じ場合、銅スラグ添加量を標準配合量から最大±100 kg(約6%)増減させても、モルタル粘度は大きく変わらないことがわかる。これは、銅スラグ添加量 1,600~1,800 kg/m³の範囲においてモルタルの粘度はペーストの粘度に支配されていることを示している。

一方、モルタルのフロー値について示した図-4(b)から、水結合材比が35%の場合は銅スラグ添加量を標準配合量から±100 kg(標準量に対して約±6%)の範囲で増減させても、モルタルのフロー値は変化がなくほぼ一定の値をとるが、水結合材比が45%、55%の場合は銅スラグ添加量が-100 kgから+100 kgと増大するに従いフロー値が減少していき、その傾向は水結合材比の増大に伴い大きくなることがわかる。

上記傾向は、細骨材量が増加するにつれて細骨材の噛み合い等の影響が強くなり、フローの広がりが増制されるようになるためと解釈できる。一方で、水結合材比35%の場合にフロー値はほぼ一定を保っている。これは水結

表-3 フライアッシュ原粉を用いたときの試験配合

水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
	W	Fa	C	CuS
35	248	496	212	1,600
45	282	439	188	1,650
55	327	416	178	1,700
				1,750
				1,800

C(密度 3.16g/cm³)、Fa(密度 2.33g/cm³)、CuS(密度 3.62g/cm³)、W(密度 1.03g/cm³)

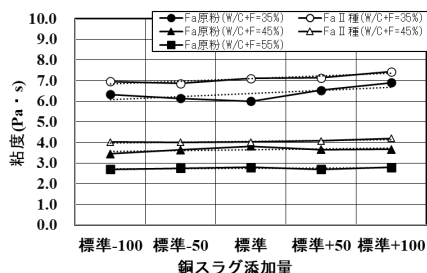


図-4(a) 銅スラグ細骨材添加量と粘度の関係

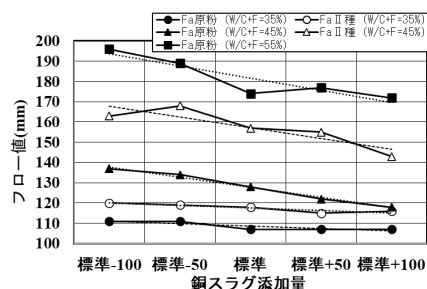


図-4(b) 銅スラグ添加量とフロー値の関係

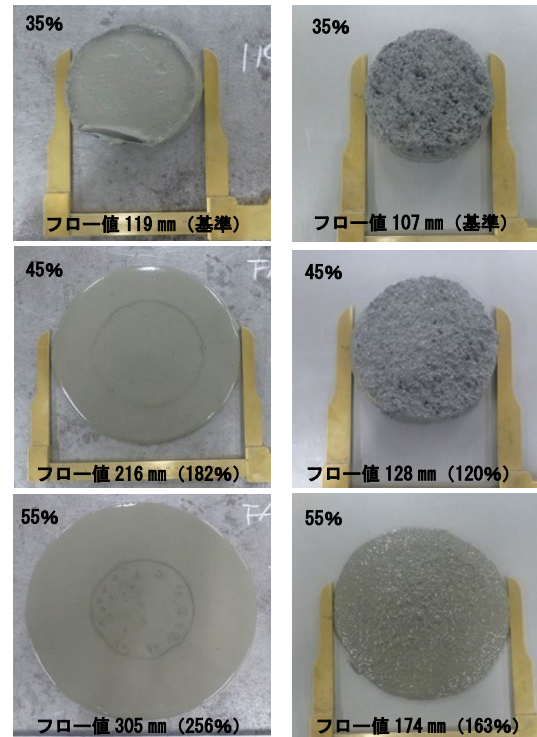


写真-1 石炭灰原粉を用いたペースト、モルタルのフロー試験(水結合材比 35%、45%、55%)

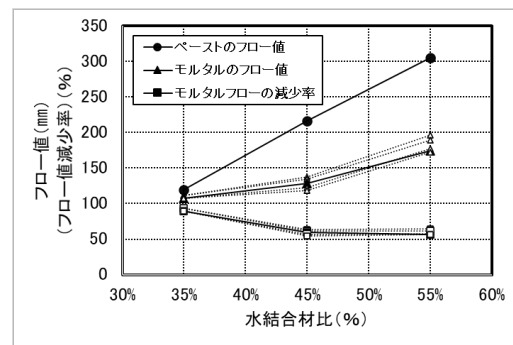


図-5 ペースト、モルタルのフロー値とモルタルフロー値のペーストフロー値に対する減少率

合材比が低いとペーストの粘性が高くなり、銅スラグの噛み合い摩擦の影響を緩和する、すなわちフロー値はペーストの粘性に支配されるようになると考えられる。

水結合材比に対するペースト、モルタルのフロー値とモルタルフロー値のペーストフロー値に対する減少率を示した図-5からもこの傾向が理解できる。図-5より、水結合材比35%ではペーストのフロー値と比較しモルタルのフロー値は若干低下(90~93%)するものの、水結合材比が45%、55%の場合はそれぞれ55~63%、56~64%と減少率は拡大する。水結合材比35%でペーストとモルタルのフロー値に大きな差がないのは、銅スラグ添加による重量増加に対してペーストの粘性が抵抗しペースト形状を保つが、水結合材比が45%を超えると上記の抵抗ができなくなりフローが広がるようになる。特に水結合材比45%と55%でフロー値減少率がほぼ同等なのは、銅

スラグ添加による重量増加に対し水結合材比が 45%を超えると、フロー値は銅スラグの影響を大きく受け、ペースト粘性による影響は殆どなくなることを示している。

2.3 石炭灰重量モルタルと銅スラグコンクリートのスラグ添加量を変化させたときのスランブ値の変化

「2.2 節」で示したモルタルのフロー値の安定性をコンクリートと比較・評価するための確認試験を行った。表－4 は細骨材の一部を銅スラグで置換したコンクリート、石炭灰重量モルタルの配合例であり、いずれもスランブ値は 12cm のものである。

表－4 に示すコンクリート、モルタルを練混ぜるとともに、銅スラグを標準配合量から ± 100 kg 増減させた配合のスランブ試験を実施した。スランブ試験結果を示す図－5 からわかるように、水結合材比が 54.1%のコンクリートの場合、銅スラグ添加量が標準配合量から ± 100 kg 増減するとスランブ値が $\pm 3 \sim 4$ cm と大きく変動するが、水結合材比が 32.2%の石炭灰重量モルタルの場合ではスランブ値の変動はほぼないことがわかる。

これは、図－4 (b)で示したペーストでの傾向がスランブ値においても表れていることに他ならない。今回示したデータは、重量骨材である銅スラグを用いた場合の結果であるが、フロー値やスランブ値に対する本性質はペーストの粘性による特性であることから、細骨材に他のスラグや天然骨材等を用いた場合においても同様の性質を示すものと考えられる。

3. 簡易製造プラントを用いた石炭灰重量モルタル製造試験による品質の安定性評価

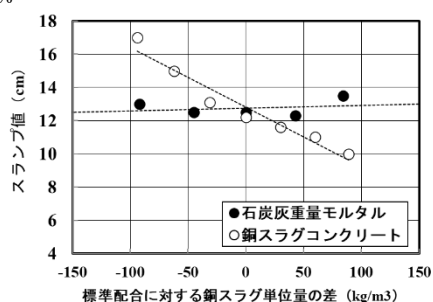
3.1 目的、概要、試験方法

2 章では石炭灰重量モルタルの配合上の特徴（フロー値やスランブ値の安定性）について室内試験により得ら

表－4 銅スラグを用いたコンクリートとモルタル配合 (kg/m³)

	W/(C+F)	C+Fa	W	S	CuS	G	Air
Con.	54.1%	338 ^{※1}	183	569	337	952	4.5
Mor.	32.2%	738 ^{※2}	238	—	1,650	—	2.0

C:普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)、Fa:フライアッシュ原粉 (密度 2.33g/cm³)、S:砕砂 (密度 2.61g/cm³)、CuS:銅スラグ* (密度 3.62g/cm³)、G:砕石 (密度 2.69g/cm³) なお、※1 は C のみ、※2 は Fa 置換率 70%



図－5 銅スラグコンクリートと石炭灰重量モルタルの銅スラグ添加量とスランブ値の関係

れた結果を示した。本章では、簡易製造プラントを用いて連続して石炭灰重量モルタルを製造することにより、上記の配合上の特徴を実施工により評価した結果を示す。

3.2 簡易製造プラントと計量装置、試験の概要

写真－2 に示す簡易製造プラントは、受入れホッパ・計量装置、水槽・計量装置、簡易セメントサイロ (計量機付き)、1.8 m³ 二軸強制練りミキサからなり、石炭灰、銅スラグの貯蔵設備はなく野積み保管する形式である。石炭灰、銅スラグは 0.7 m³ バックホウでホッパ・計量装置に投入され、配合数量を目標に計量した後ベルトコンベアでミキサに移送される。セメント、水はセメントサイロや水槽にて配合数量を正確に計量してミキサに投入され、その後 60 秒間混練りして排出されるという簡易な設備構成となっている。

設備簡素化の主要な要素の一つが「2 章」で示した石炭灰重量モルタルの配合上の特徴（フロー値やスランブ値の安定性）を基礎にした材料計量の簡略化にあるが、バックホウで材料（石炭灰、銅スラグ）投入する際の通常作業が材料計量精度に及ぼす影響とともに、それがモルタル性状に及ぼす影響を評価する必要がある。そこで材料計量については、ホッパ部にロードセルを設置することによりバックホウによる簡易な材料投入（計量）が材料計量精度に及ぼす影響、加えて製造された石炭灰重量モルタルのスランブ値のばらつき程度について評価することにした。また、練混ぜられたモルタルは隣接する試験室でスランブ値、空気量、単位容積質量、コンクリート温度、外気温の試験・計測を行い、圧縮強度試験供試体（材齢 2 日、7 日、28 日、56 日）の作成を行った。

3.3 石炭灰重量モルタル製造試験

製造試験は護岸補修工事のための 4m³ 消波ブロック製造工事にあわせて、2022 年 1 月 17 日から 2 月 28 日に実施した。10 個/日のブロック製造に対し、スランブ試験等は 3 回/日 (製造日毎に最初の 1, 2, 3 個目の最終バッチ) で行い、合計 72 回のデータ計測を行った。なお、材料計量は製造バッチ全てで行ったことから、データ数は 723 個である。

なお、製造試験に用いた材料、配合は表－5 の通りであり、石炭灰重量モルタルのスランブ性状例を写真－3 に示す。



写真－2 製造試験に用いた簡易製造プラント

3.4 石炭灰重量モルタルの品質管理結果

実施した試験の結果一覧を表-6 に示す。また、個々の項目についての結果, 評価の詳細は以下の通りである。

(1) 材料計量について

石炭灰、銅スラグのホッパへの材料投入は、0.7 m³ バックホウで行うため細かな計量調整はできないが、オペレータは1人に固定し、投入作業によるばらつきはないようにした。ホッパ部に設置したロードセルの計量指示値モニターをオペレータが確認しながら、1 バッチ内で複数回行う投入作業のうち、最後の投入時には一定程度の調整をしながら材料投入を行うものの、それなりの投入誤差が生じている。なお、石炭灰・銅スラグは野積みされており、材料は含水しているため1日のうち9:00 と

表-5 製造試験に用いた石炭灰重量モルタルの配合

W/(C+F)	W/C	F/(C+F)	単位量 (kg/m ³)				空気量	単位容積質量
(%)	(%)	(%)	C	Fa	CuS	W	(%)	(t/m ³)
34.4	107	68	217	461	1650	233	2.0	2.56

C (密度 3.15g/cm³), F (密度 2.22g/cm³), CuS (密度 3.45g/cm³), W(密度 1.03g/cm³)



写真-3 石炭灰重量モルタルのスランプ性状 (Sl 11 cm)

表-6 石炭灰重量モルタルの品質試験結果一覧

項目		データ数	平均値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数 (%)
性状試験 フレッシュ	スランプ (cm)	72	13.2	15.0	10.5		
	空気量 (%)	72	2.5	3.7	1.7		
	GT (°C)	72	15.0	22.0	9.6		
	外気温度 (°C)	72	9.4	15.0	4.0		
	単位容積質量 (t/m ³)	72	2.546	2.582	2.516		
圧縮試験 強度	材齢2日 (N/mm ²)	26	6.20	7.18	4.81	0.50	8.06
	材齢7日 (N/mm ²)	72	10.9	13.1	9.29	0.76	7.17
	材齢28日 (N/mm ²)	72	20.4	23.6	17.5	1.23	6.04
	材齢56日 (N/mm ²)	72	26.3	30.2	22.3	1.47	5.58
計量材料 差	海水 (%)	723	0.07	1.50	-1.41		
	セメント (%)	723	0.08	1.38	-0.92		
	石炭灰(湿灰) (%)	723	-0.57	9.39	-8.49		
	銅スラグ (%)	723	0.36	8.59	-5.21		

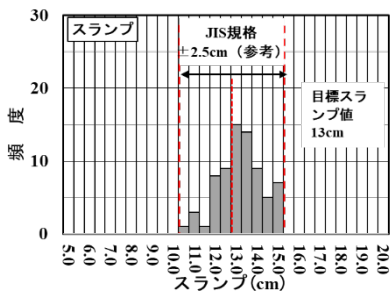


図-7 スランプ値のばらつき

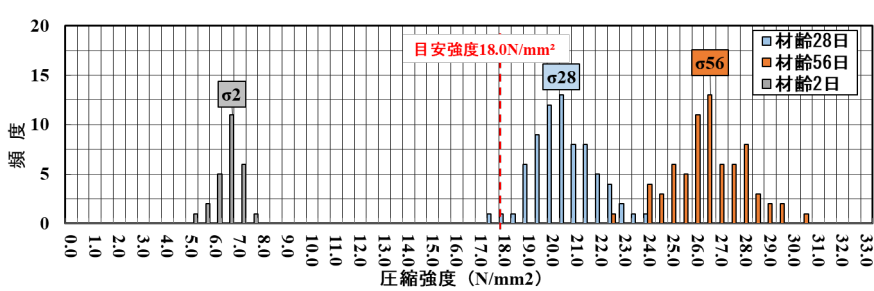


図-8 石炭灰重量モルタルの強度発現性

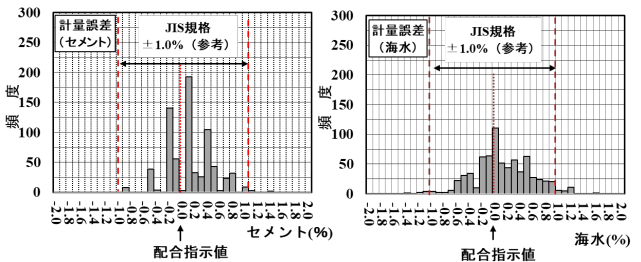


図-6(a) 材料計量値のばらつき(セメント, 海水)

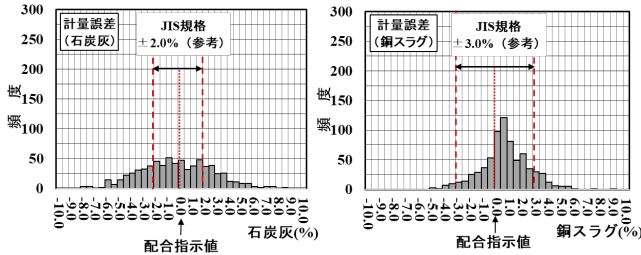


図-6(b) 材料計量値のばらつき(石炭灰, 銅スラグ)

13:00 に各材料の含水率測定を実施して、単位水量の補正を行った。

総計 723 パッチのモルタル製造での材料計量実績を表-6, 図-6(a), (b)に示すが汎用の簡易セメントサイロ、水の計量実績は JIS で規定する計量誤差範囲を参考にしても許容範囲に収まる。一方、バックホウ操作で行った銅スラグ、石炭灰の計量誤差は最大で 9%程度になり、JIS 許容範囲を大きく外れる場合があるため、バックホウによる投入作業での計量調整の限界が表れている。

(2) スランプ値、圧縮強度について

1 日に 3 回実施したスランプ試験、圧縮強度試験の 72 回のデータを整理した結果を図-7, 図-8 に示す。

図-7 から、全てのスランプ試験結果は JIS の許容範囲内に収まっていることがわかる。銅スラグや石炭灰の計量誤差が最大で 9%程度あったにも関わらず、モルタルのスランプ値が JIS 許容範囲内に収まったのは「2.3 節」で示した室内試験で示した計量誤差（モルタルの場合で標準計量値の±6%）より大きいものの、スランプ値の材料計量誤差に対する安定性を示している。本結果はモルタル中のペースト粘性の効果であり、石炭灰重量モルタルの配合上の特徴が室内試験だけでなく、連続製造試験でも確認されたといえる。

また、圧縮強度試験結果を表す図-8 から、初期強度

は 3.5 N/mm²を満足しているが，一般的な消波ブロックに求める材齢 28 日の圧縮強度 18 N/mm²を満足しない場合が多少あるものの，その後材齢を経ることで（例えば材齢 56 日）セメントや石炭灰による強度増進効果から 18 N/mm²を十分超えた強度が得られることがわかる。

表－6 には圧縮強度試験結果のばらつきを変動係数で示している。材齢 2 日，7 日，28 日，56 日における圧縮強度の変動係数はそれぞれ 8.06, 7.17, 6.04, 5.58 と初期材齢時が大きいものの，材齢を経るにつれ小さくなる。これは，初期材齢の圧縮強度が小さいことによる試験誤差等の影響が大きいためと考えられる。標準的な品質管理材齢として採用される材齢 28 日での変動係数は 6.04 であり，この数値は JIS A5308 に基づく配合強度設定の際に示されている割増係数の考え方を示す図（例えば 4）からもわかるように，適切に管理されたパッチャープラントでの品質管理（変動係数が 10%以下）と比較しても低い値であることがわかる。

以上より，銅スラグや石炭灰の計量誤差は JIS 許容範囲を大きく超えていたとしても，製造されたモルタルのスランブ値，圧縮強度の品質管理結果は JIS の規格を参考にすれば，適切な管理状態にあるとの結果であった。

4. 石炭灰重量モルタルの低炭素性

4.1 概要

石炭灰重量モルタルは単位容積質量を最大化するため重量骨材である銅スラグを大量に使用する事，またガラス質である銅スラグのモルタル性状への影響を緩和するために石炭灰を多量に使用する事を配合上の特徴としている。またその結果，材料の計量誤差に対するモルタル性状（ここではスランブ値）の安定性を兼ね備えた配合特性となることを示した。一方，石炭灰重量モルタルは産業副産物を多量使用したコンクリート代替素材であり，昨今の低炭素社会実現に向けたセメント・コンクリート分野での対策の一つである考えられる。

本章では，石炭灰重量モルタルの低炭素性について素材由来の CO₂ 発生量を試算し示す。

4.2 素材由来の CO₂ 発生量

材料はその製造過程で発生する CO₂（素材由来の CO₂ 原単位）⁵⁾が公表されており，コンクリート製造にかかわる材料の数値の一例を表－7 に示す。今回製造した石炭灰重量モルタルの配合は表－5 に示すとおりであるが，セメント種類を高炉セメント B 種に変更しても同等の品質であることを確認している。そこで，高炉セメント B 種とした際の素材由来 CO₂ 発生量を計算すると 1 m³当たり 99.5kg/m³ と一般的なコンクリートと比較して相当な低炭素となる。また，今回は厳冬期の製造であり，初期強度に余裕のある配合設計となっているため（図－8），

表－7 材料の CO₂ 排出原単位 (kg/t)

材 料	1t あたりの CO ₂ 排出量 (kg)
普通ポルトランドセメント	766.6
高炉セメント B 種	458.7
銅スラグ（未調整スラグ）	0
石炭灰（原粉）	0
粗骨材	3.7
細骨材	2.9

更なるセメント量の削減が可能である。

今回採用した石炭灰重量モルタルの品質に対する考え方（配合設計）は，脱炭素社会に向けたセメント・コンクリート分野の一方策を示しているといえる。

5. まとめ

本稿では，石炭灰重量モルタルの練上がり性状に与えるペースト粘性の影響と品質管理，低炭素性について述べた。今回実施した一連の検討で得られた成果は，以下の通りである。

- (1) 水結合材比 35%のモルタルの場合，フロー値，スランブ値はペーストの粘性が支配的になり，細骨材量の変化に対してもフロー値，スランブ値の変化量は小さいが，水結合材比が 45%を超えるとペースト粘性が低下するため，その変化量は大きくなった。
- (2) 室内試験の結果，水結合材比 35%程度の石炭灰重量モルタルは，細骨材の計量誤差が JIS 許容範囲を超えて±6%程度になっても，スランブ値は目標値±2.5 cm に収まった。
- (3) 上記性質を簡易製造プラントにより，連続製造して確認した結果，材料計量誤差が±9%程度であっても，スランブ値は目標値±2.5 cm に収まった。
- (4) 石炭灰重量モルタルの素材由来 CO₂ 発生量は 1m³ 当たり 99.5kg/m³ となり，低炭素素材となる。

なお，本報で示した品質に対する考え方と製造方法については特許出願済である。

参考文献

- 1) 公益社団法人 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，2016
- 2) 鍵本広之，安田幸弘，野中陽介：石炭灰を多量に混入した銅スラグモルタルの耐久性と水際部，陸上部に設置した消波ブロックの経年変化，コンクリート工学，Vol.39, No.1, pp.199-204, 2017.
- 3) 九州地区における土木コンクリート構造物設計・施工指針（案）：国土交通省九州地方整備局，p4-18,2014.4
- 4) 公益社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，2017
- 5) 公益社団法人 土木学会：コンクリートの環境負荷評価(その 2)，2007