

論文 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

鍵本 広之^{*1}・安田 幸弘^{*2}・野中 陽介^{*3}

要旨：銅スラグはガラス質で角張っている, 吸水率が小さい等, コンクリート材料とする場合は多少問題があるが, これを多量の石炭灰を混合し配合面で解決を図った。モルタルの耐久性は骨材最大寸法 20mm のコンクリートと比較し遜色なく環境安全性も満足する。また, 消波ブロックを試作し護岸水際部, 陸上部に設置し1年2か月間状況観察したが, 台風や冬季波浪による破損や欠けもなく, 海藻の付着・生育は20年を経過したブロックと比較し遜色ない。モルタルの単位容積質量は 2.7 t/m^3 程度と一般的なコンクリートの2割程度増となり, 海藻類や藻類の付着状況が活発なのは石炭灰を多量に混合した結果と考えられた。

キーワード：銅スラグ, 石炭灰, 重量モルタル, 初期性状, 耐久性, 消波ブロック, 生物付着性

1. はじめに

海洋構造物の外周には波圧, 越波量, 反射波等を低減させるため消波ブロックが配置されるが, 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その所要重量, 設置勾配が決定される。消波ブロックの製造には主にレディーミクストコンクリートを用いるが, 同じ容積の消波ブロックでも安定性を高めることができるよう, 単位重量を大きくする目的で銅スラグを細骨材として用いることを考えた。

銅スラグを細骨材として使用したコンクリートはこれまで種々の報告^(例えば1)がなされているが, 銅スラグは密度は大きいものの吸水率が小さい, また単粒度であることがデメリットとされる。

極力重量を大きくするためには粗骨材もスラグとしたところであるが粗骨材相当の銅スラグはないことから, 粗骨材を用いないモルタルで消波ブロックを製造する事を考えた。材料は銅スラグ細骨材, セメント, 石炭灰と海水で製造したモルタルとし, 今回前記のデメリットを多量の石炭灰を添加するという配合上の工夫で対応した。

まず施工面及び強度面を考慮した配合試験を実施し実際の使用に耐える性状に配合調整するとともに, その耐久性について室内試験で評価した。また, その後 5.0t 型の消波ブロックを製造し, 海中部, 護岸水際部および陸上部に設置した後1年2か月経過後の状況をみた。

2. 配合選定とその初期性状と耐久性

2.1 使用材料, 配合条件

銅スラグ細骨材に石炭灰を多量使用したモルタル(以下, 「銅スラグモルタル」)の配合試験には, 細骨材として銅スラグ, フライアッシュ, 普通ポルトランドセメン

ト, 海水を使用した。銅スラグは密度の大きいスラグで既に JIS 化され一般素材として流通しており, 各種用途に応じて製造元で粒度調整がなされ出荷されている。今回使用したのは粒度調整していない, 炉から産出したままの未調整スラグである。一般的な消波ブロックの製造には呼び強度 21 のレディーミクストコンクリートを用いているが, 銅スラグモルタルに対しては脱型および転置に必要な初期材齢強度のみを求めることとした。

銅スラグモルタルに求める品質条件は, 単位容積質量 2.6 t/m^3 以上, スランプ値 $10 \pm 2 \text{ cm}$, $\sigma_3 = 3.5 \text{ N/mm}^2$ (材齢 3 日の圧縮強度, 以下, 他材齢も同様に表記), $\sigma_4 = 4.2 \text{ N/mm}^2$ とした。また消波ブロックの設置を検討している地域は凍害危険区域にないことから空気量管理は不要²⁾とした。使用材料とその品質を表-1 に示す。

2.2 銅スラグモルタルの配合選定

(1) 所要強度を満足する W/C の選定

フライアッシュ置換率を 60%とし, W/C を 100, 125, 150%に変化させた銅スラグモルタルを製造し温度 10°C , 20°C の2養生条件にて養生したのち圧縮強度の変化を見た。この時, モルタルの単位容積質量は 2.6 t/m^3 以上, フロー値を 200mm 程度となるよう銅スラグ混合量を調整した。試験の結果, 脱型, 転置に必要な圧縮強度 $\sigma_3 = 3.5 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_4 = 4.2 \text{ N/mm}^2$ を満足する W/C は 146% (養生温度 10°C , 材齢 4 日の強度条件) となった。

表-1 使用材料

材料	産地, 密度など
フライアッシュ	竹原火力発電所産 JIS II 種灰, 密度 2.23 g/cm^3
銅スラグ	密度 3.58 g/cm^3 , 吸水率 0.23%, 粗粒率 3.73, 微粒分量 0.2%
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm^3
海水	玄界灘の天然海水, 密度 1.03 g/cm^3

※ 銅スラグは粒度未調整のスラグである。

*1 電源開発(株) 若松総合事業所 所長代理 博士(工学) (正会員)

*2 (株) 開発設計コンサルタント 設備保全技術開発センター 所長代理 (正会員)

*3 (株) セイア プラントカンパニー 工事部 環境エンジニアリング課 課長

(2) モルタルの単位容積質量とブリーディングを調整した配合選定

粒子形状が悪く吸水率の小さい銅スラグをコンクリート材料として使用するときの欠点の一つに、ブリーディングの増大があげられる。この欠点を改善するためフライアッシュの添加量を増やして対処することとしたが、一方でモルタルの単位容積質量が低下することとなるため以下の手順で両者のバランスを見ることとした。

まずフライアッシュ置換率 70%, W/C=146%としてスランプ値が 10cm となる配合の単位水量を求めた結果 225kg/m³ となった。これより、フライアッシュ置換率 60%, 単位水量 225kg/m³ のもとで W/C=146%を減少させたモルタル試験 (W/C=146%以下であれば、所要強度は満足するとの考え) を実施し、モルタルの単位容積質量とコンシステンシーの変化をみた。

図-1, 2 は単位ペースト量とスランプ値, 単位ペースト量とモルタルの単位容積質量, ブリーディング量の関係を示した図であるが, 単位ペースト量が少ないとスラグの目立つ荒々しいモルタルに, 多いと粘性の高いモルタルになる。またブリーディング量は単位ペースト量が増加するにつれて減少するが, これは多量に混合した石炭灰の粉体としての効果大きい。単位ペースト量が増加すればモルタルの単位容積質量も減少するが, ブリーディング量が 0.5cm³/cm² 以下 (日本建築学会高耐久鉄筋コンクリート品質目標: 常用 0.5cm³/cm² 以下を準用) となる単位ペースト量は 490L/m³ 程度となり, この時モルタルの単位容積質量は 2.6~2.7t/m³ 程度を確保できるこ

表-2 試験配合

配合	W/C (%)	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	単位ペースト量 (L)	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)
					C	F	Cu	S+G	W		
1	81.5	32.6	60	490	276	414	1,769	—	225	2.0	2.68
2	112.0	33.6	70		201	468	1,771	—			2.66
3	174.0	34.7	80		130	519	1,772	—			2.65
普通	62.6	50.0	20	270	254	64	—	1,802	159	4.5	2.28

※C (セメント), F (フライアッシュ), Cu (銅スラグ), W (配合1~3は海水, 「普通」は水道水)
※普通コンクリートは骨材として砕石 (G), 陸砂 (S) を使用, 練混ぜ水は水道水。s/a=46.2%

表-3 銅スラグモルタルの初期性状

配合	W/C (%)	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	スランプ値 (cm)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	始発時間 (時間:分)	終結時間 (時間:分)
1	81.5	32.6	60	9.0	0.48	4:46	7:16
2	112.0	33.6	70	8.5	0.43	5:35	8:46
3	174.0	34.7	80	12.0	0.38	5:59	11:26
普通	62.6	50.0	20	12.0	0.10	6:13	8:34

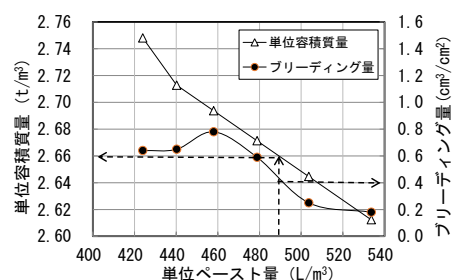


図-2 単位ペースト量とブリーディング、単位容積質量の関係

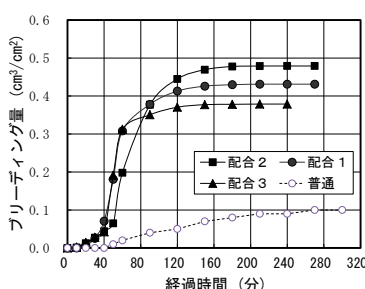


図-3 ブリーディング試験結果

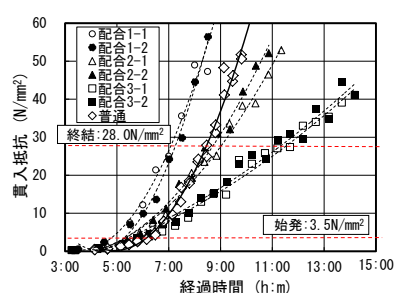


図-4 凝結時間試験結果

とから, 単位ペースト量 490L/m³ を指標とし配合設計することとした。

フライアッシュ置換率 60%で配合条件を満足する配合を表-2 に示す。また比較用としてフライアッシュ置換率を 70%, 80%とした場合の配合を示すが, これらは単位水量を 225kg/m³, 単位ペースト量 490L/m³ とすることで練混ぜ直後のスランプ値が同程度となるものとの考えにより配合設定したものである。

2.3 銅スラグモルタルの初期性状と耐久性

(1) 銅スラグモルタルの初期性状と発熱特性

表-2 に示した各配合の練混ぜ直後のスランプ値はおおむね目標とする値に収まった。またブリーディング及び凝結時間試験結果を表-3, 図-3, 4 に示す。

図表中には, フライアッシュ置換率 20%, 骨材として碎石, 陸砂を使用した粗骨材最大寸法 20mm のコンクリート (以下, 「普通コンクリート」。図表中では「普通」) の初期性状も比較として併記した。普通コンクリートのブリーディングは, 打込み後約 1 時間から緩やかに増加し 5 時間程度で収束するのに対し, 銅スラグモルタルでは打込み後 30 分程度から急激に増加し, 2 時間程度で収束する。最終のブリーディング量は 0.38~0.48 cm³/cm² と普通コンクリートに比べ 3 倍程度多い結果であるものの, 建築学会高耐久性鉄筋コンクリート品質目標 (常用 0.5cm³/cm²) を下回っている。ブリーディング量が多くなる要因としては, 単位水量が多いこと, また銅スラグ細骨材がガラス質で表面が滑らかであること等に起因している。また, 配合 1, 2, 3 の材齢の伴う標準養生条件 (温度 20℃, 相対湿度 95%以上) における圧縮強度の変化を図-5 に示す。いずれの配合においても, 脱型強度 ($\sigma_3=3.5\text{N/mm}^2$), 転置強度 ($\sigma_4=4.2\text{N/mm}^2$) を満足す

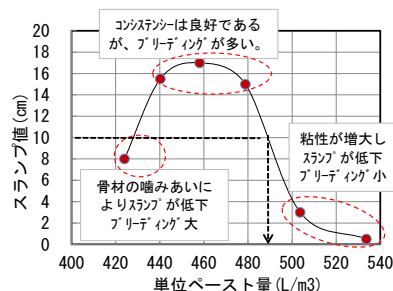


図-1 単位ペースト量とスランプ値の関係

るが、配合 3 については材齢 28 日強度が 11.2 N/mm^2 とやや低めの圧縮強度となっている。次に配合 2 と普通コンクリートの断熱温度上昇試験結果を図-6 に示す。試験は練上がり温度 20°C の条件下で JCI-SQA3 コンクリートの断熱温度上昇試験(案)に準じて実施した。銅スラグモルタルは試験開始後 2 日までの温度上昇量が大きく、その後の上昇量は緩やかであり計測 14 日目における終局断熱温度上昇量は 32.9°C であった。

銅スラグモルタルは総粉体量が多いにも係らず普通コンクリートの終局断熱温度上昇量と比較し低いのは、銅スラグモルタル中のフライアッシュの多くは初期の発熱に影響を与えないことによる。このことは、フライアッシュ置換率 20% の普通コンクリートと等価評価をするため、配合 2 の見かけの単位結合材量を置換率 20% と仮定し計算で求めた結果 251kg/m^3 となるが、これと普通コンクリートの単位結合材料 318 kg/m^3 との比がそれぞれの終局断熱温度上昇量の比とほぼ同じとなることから理解できる。

(2) 銅スラグモルタルの耐久性

表-2 に示す銅スラグモルタル配合に対して、一般的な耐久性能について試験した。確認した耐久性能は乾燥収縮特性、アルカリシリカ反応性、促進中性化である。なお、消波ブロックの設置を考えているのは北九州市沿岸部であるため凍害危険区域にないことから凍結融解試験は実施しなかったものの、フライアッシュの空気連行性を間接的に評価するための指標であるメチレンブルー吸着量³⁾(以下、「MB 吸着量」)を測定した。銅スラグに含まれる微粒分(0.150mm 以下)の MB 吸着量は 0.55mg/g 、銅スラグを 0.150mm 以下に微粉碎した試料の MB 吸着量は 0.27 mg/g であり、JIS II 種灰における標準的な MB 吸着量の値 0.40 mg/g 程度と比較してもほぼ同様

な値であった。

a. 乾燥収縮

乾燥収縮試験は JIS A 1129-3:2010「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法、ダイヤルゲージ方法」附属書 A に準拠して実施した。標準養生 7 日後に基長を計測した後、温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の室内に保管後 1 週、2 週、4 週、8 週、13 週、6 ヶ月で長さ変化を測定した。試験結果を図-7 に示す。図中には表-2 に示した普通コンクリートのデータも併記するが、銅スラグモルタルの収縮量は普通コンクリートに比べ 10~30% 程度大きい値を示し、試験材齢 182 日においても未だ若干収縮が継続している。しかしながら単位水量や単位ペースト量が多いにも拘わらず収縮量は小さいといえる。

b. アルカリシリカ反応性

銅スラグ骨材のアルカリシリカ反応性を JIS A 1145, JIS A 1146 に規定される化学法、モルタルバー法に従い試験した。化学法の試験の結果、アルカリ濃度減少量 $R_c=40\text{mmol/L}$ 、溶解シリカ量 $S_c=39\text{mmol/L}$ となり無害の判定(図-8)となるものの、化学法の判定図上の境界に位置した。したがってモルタルバー法における判定試験も実施した結果、材齢 182 日における膨張量は 0.007% となり無害と判定された。

c. 促進中性化

中性化に対する抵抗性を評価するため促進中性化試験を実施した。100mm×100mm×400mm 角柱供試体を作製後、材齢 28 日まで標準養生を実施の後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室に 28 日間保管した。その後温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5 \pm 0.2\%$ の促進条件下で促進中性化状態に置き、促進材齢 7、28、56、91 日にて中性化深さを測定した。

試験結果を図-9、10 に示すが、フライアッシュ置換

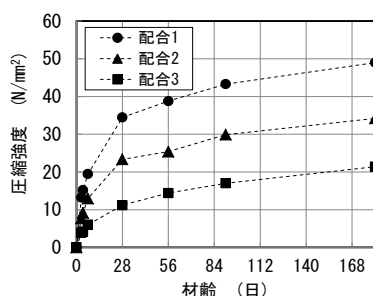


図-5 材齢に伴う圧縮強度の変化

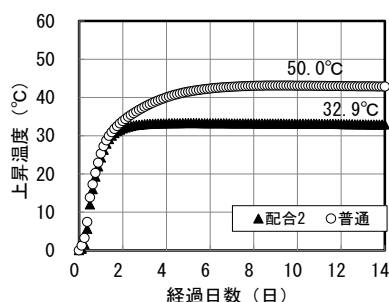


図-6 断熱温度上昇試験結果

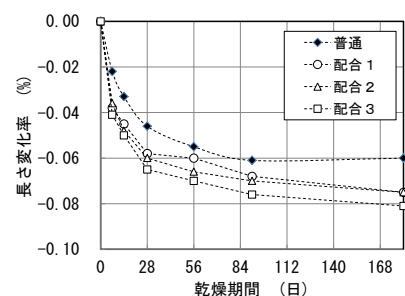


図-7 乾燥収縮試験結果

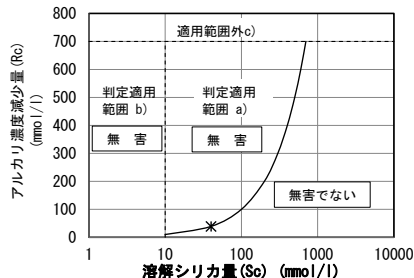


図-8 アルカリシリカ反応 (化学法)

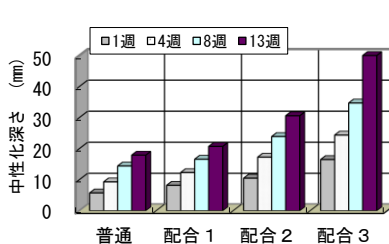


図-9 促進材齢に伴う中性化深さの変化

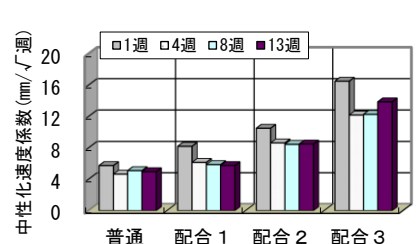


図-10 促進材齢に伴う中性化深さ係数の変化

率が増加するにつれ各材齢における中性化深さは増加し、置換率 80%になると中性化の進行度合いは大きくなる。これは他の配合と比較し圧縮強度が小さいことが原因の一つと考えられるが、置換率が 70%程度までは一般的なコンクリートと比べても遜色ないものと考えられる。

（3）銅スラグモルタルの分離抵抗性

密度の大きい銅スラグを細骨材として使用することから、過剰締固め時の材料分離程度の評価を行った。評価試験には縦 50cm×横 100cm×高さ 50cm の角柱型枠を準備し、そこに銅スラグモルタルを打設し棒状バイブレータ（φ60mm）を用いて 5 分間継続して過剰に締固めを行った。1 か月を経て銅スラグモルタルが十分硬化したのちに中央部をコンクリートカッターで切断し切断面の観察を行った結果、断面に点在する銅スラグの粒子分布は均一であった（写真－1）。これを数値的に評価するために、切断面のうち上面（打設面）側、下面側から 5cm 位置に引いたラインと交差する 1mm 以上の銅スラグの個数を計測したところ、上面側ラインで 210 個/m、下面側ラインで 214 個/m となった。このことから、銅スラグの分離、沈降は殆ど見られないことがわかる。これは石炭灰を多量使用しているためモルタルの粘性が高くなった効果によるものと考えられる。

2.4 銅スラグモルタルの環境影響について

銅スラグは既に JIS 化され一般素材として流通しており、溶出基準をクリアしているものが出荷されているものの、念のため銅スラグ、石炭灰、銅スラグモルタル（表－3 のうち配合 2）に対して溶出試験を実施した。溶出試験は環告 46 号法、およびタンクリーチング法（JIS K 0058-1 スラグ類の化学物質試験方法―第 1 部：溶出量試験方法の 5.（利用有姿による試験））に準拠して実施した。銅スラグモルタルは供試体作製後材齢 7 日の封かん養生ののち、それぞれの方法に従い試験に供した。分析項目は六価クロム、砒素、ふっ素、ほう素、セレンの 5 種類である。試験結果を表－4 に示すが、石炭灰単体において六価クロム、砒素、ほう素で土壤の汚染に係る環

境基準値を満足しないものの、銅スラグ単体、および銅スラグモルタルにおいては、環告 46 号法、タンクリーチング法の両手法において溶出基準値以下の結果となり、環境に対する安全性は確保されているといえる。セメントによって固化することにより、素材単体では溶出基準をクリアしないものについても溶出抑制されていることがわかる。

3. 銅スラグモルタルによる消波ブロックの試作

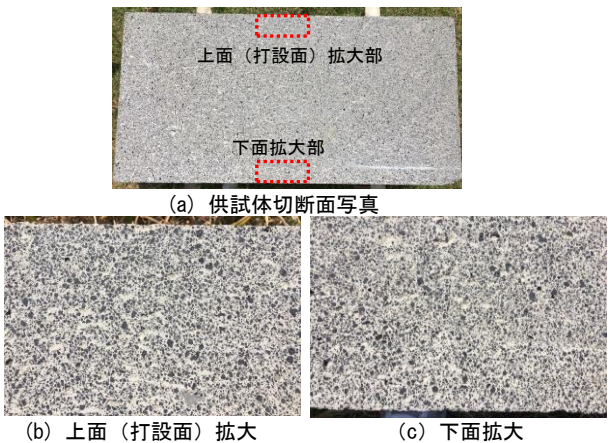
呼び強度 21 のレディーミクストコンクリートと銅スラグモルタルを用い 5.0t 型消波ブロック（以下、前者を「レミコンブロック」、後者を「銅スラグブロック」）を製造し、両者を陸上部、海中部、護岸水際部に沈設した。

3.1 銅スラグモルタルの製造

使用した石炭灰は処分場に埋め立てるために運搬された石炭灰（松浦火力発電所産、表乾密度 2.28g/cm³、含水率 18.5%、以下「湿灰」）である。本来埋め立てられるものであるが、廃掃法上の「自ら利用」の扱いで製造材料として使用した。また練混ぜ水、セメントは表－1 に示したものと同一である。

湿灰は JIS II 種品ではないことから事前に行った室内試験で得られた配合のままでは性状が変化すると考えられるため、フライアッシュ置換率 70%を固定し表－2 に示した配合 2 から W/C が大きく変化しないよう配慮しスランプ値が 10cm 程度となるよう配合調整を実施した（表－5）。

表－5 に示したブロック配合の銅スラグモルタルを、アジテータ車やバックホウ、ベルトコンベア等で構成した簡易製造設備⁴⁾で製造した。銅スラグモルタルの材齢に伴う圧縮強度（標準養生条件）の変化を図－11 に示す。図には配合 2 の室内試験時のデータも併記するが、ブロック試作のために湿灰を用いて製造した銅スラグモルタルの圧縮強度は事前実施した室内試験での圧縮強度と同等であった。



写真－1 過剰締固めを行った供試体の切断面写真

表－4 溶出試験結果

試料名	分析結果				
	六価クロム	砒素	ふっ素	ほう素	セレン
石炭灰	0.08	0.056	0.58	4.4	0.002
銅スラグ	<0.005	0.001	<0.08	<0.1	<0.001
銅スラグモルタル	0.042 (<0.005)	<0.001 (<0.001)	0.19 (0.15)	<0.1 (<0.1)	<0.001 (<0.001)
土壤の汚染に係る環境基準 (mg/L)	0.05以下	0.01以下	0.8以下	1以下	0.01以下

※ 銅スラグモルタル欄の上段数字は環告示46号法の結果を、下段括弧内の数字はタンクリーチング法の結果を示す。

表－5 銅スラグブロックの配合

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 (t/m ³)
				C	F	Cu	W		
配合 2	33.6	112	70	201	468	1,771	225	2.0	2.68
BL配合	31.7	106		208	486	1,736	220		2.65

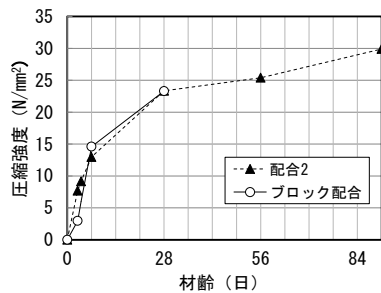


図-11 銅スラグモルタルの圧縮強度の変化

3.2 消波ブロックの製作と陸上部、海中部、護岸水際部への設置

簡易製造設備で製造した銅スラグモルタルで 5.0t 型消波ブロックを製造した。締固めは直径 60mm の棒状バイブレータを用いて行った。

一般的なコンクリートと比較し海水を用いていることから打設作業時に早期に固まる傾向が見られたが、この傾向は図-4 の凝結時間試験結果にも表れている。

また打設終了時のブリーディングについては表面仕上げに影響を与えるような極端なものではなく、このことは脱型後のブロック表面の仕上がり状態からも評価できる（写真-2）。打設後 3 日で脱型し 4 日で転置を行い材齢 28 日を待ってトラックに積み込み搬出し起重機船に積み込んだのも海底部、護岸水際部に沈設した。

3.3 沈設後 1 年 2 か月経過後の銅スラグブロックの状況

(1) 護岸水際部に設置した消波ブロックの状況

平成 27 年 10 月末に沈設後、玄界灘の冬の波浪を経て 8 か月、1 年 2 か月経過した消波ブロックの状況を写真-3

に示す。波の影響が大きい護岸水際部に沈設された 5.0t 型消波ブロックは、冬季波浪によっても移動することもなく沈設当初の場所に鎮座し、ブロックに欠けや破損は見られなかった。また、8 か月経過時点でブロック表面には若干のフジツボの付着と約 20 年経過した消波ブロック（写真中、「銅スラグブロック」と示した以外のブロック）と遜色ない程度の海藻の付着が見られた。また、さらに時間経過した 1 年 2 か月後には、時間経過とともに海藻が成長していることがわかる。

フライアッシュを用いたコンクリートは海藻類の付着・成長が良い⁵⁾といわれるが、8 か月程度の時間経過においても銅スラグモルタルで製作した消波ブロックにもこの効果が表れている。

(2) 陸上部に設置した消波ブロックの状況

消波ブロックを設置した護岸から約 2km の陸上部にレミコンブロックと銅スラグブロックを並べて設置した。設置から 8 か月程度経過した時点までは両者のブロック表面に大きな違いはなかったが、1 年 2 か月を経過した時点では銅スラグモルタルブロックの表面が黒っぽく明度が低くなっていた。表面を詳細に観察するとレミコンブロックにはない緑色の藻類が発生していることがわかる（写真-4）。コンクリート表面は、例えば乾燥収縮ひび割れの発生、ペーストの剥げ落ちなど時間経過につれて劣化していくが、設置したブロック表面には乾燥による収縮ひび割れを含め目立った劣化は生じておらず、単に明度の低下と藻のようなものが発生しているのみである。



写真-2 製造直後のレミコンブロックと銅スラグブロック



写真-4 ブロック表面の藻類（1 年 2 か月後の状態）



(a) 設置直後



(b) 8 か月経過時点



(c) 1 年 2 か月経過時点

写真-3 ブロック沈設後の生物付着状況変化

長い時間経過の中でブロック表面に塵が付着した後、藻類が発生し塵や雨水から栄養分を得て増殖し、乾燥後に死滅した藻類を栄養源としてカビ類が発生。さらにこれが繰り返されコンクリート表面が汚れていくという汚染機構が既往文献⁶⁾に示されているが、全く同条件に暴露された2種のブロックの表面汚染程度が異なる原因としては、材料、配合の違いによるものと考えられる。

4. 結論

単位容積質量の増加を目的に、銅スラグを細骨材とし石炭灰を多量使用したモルタル配合試験を実施し、その初期性状、発熱特性、耐久性、溶出特性を評価したのち、実物大の消波ブロックを製造した。また、製造したブロックを海中、護岸水際部および陸上部に沈設し、8か月後、1年2か月後の状況を観察した。今回実施した一連の検討で得られた結果は以下の通りである。

- ① 粒度未調整の銅スラグのみを細骨材としても、石炭灰の多量混合によりブリーディング低減と分離抵抗性を確保できる。またモルタルの単位容積質量は 2.7 t/m^3 程度となった。
- ② 練混ぜ水として海水を用いることで凝結時間は早くなるが、打設に大きな影響はなかった。
- ③ 銅スラグモルタルの終局断熱温度上昇量は、フライアッシュ置換率20%のセメントで製造した一般的なコンクリートの終局断熱温度上昇量の6割程度と低い。
- ④ 銅スラグモルタルの乾燥収縮と中性化はフライアッシュ置換率の増加に従い大きくなるものの、置換率が70%程度であれば一般的なコンクリートと比べても遜色ない。また、銅スラグはJIS化学法、モルタルバー法による試験で無害と判定された。
- ⑤ 銅スラグモルタルは土壤汚染に係る環境基準を満足し環境安全性について問題ない。
- ⑥ 護岸水際部に沈設したブロックは8か月程度で十分な海藻の付着が見られた。さらに時間経過とともに海藻が成長している。
- ⑦ 陸上部に設置したブロックでも、1年2か月を経過した時点では銅スラグモルタルブロックの表面が黒っぽく明度が低くなっていた。また、表面にはレミコンブロックにはない緑色の藻類が発生していた。

- ⑧ 水際に設置したブロックへの海藻の付着・成長が良いこと、陸上部に設置したブロックへの藻類発生との差異は、フライアッシュの添加による影響であると推定される。

一連の検討の結果、銅スラグを細骨材とし石炭灰を多量使用したモルタルは、一般的なコンクリートと比較しても遜色なく利用できること、また、海中設置した場合多くの生物付着が見られた。今回の検討結果から、銅スラグモルタルを利用しブロックの重量を増大させることで、ブロックの寸法ランクを下げる、設置勾配を大きくする（設置個数を減らせる）などの効果が期待できる。

また、重量コンクリートとしては単位容積質量の低い部類（ 2.7 t/m^3 程度）となるが、一般的なコンクリート（ 2.3 t/m^3 ）と比較し放射線遮蔽の効果は増大するものと考えられる。東日本大震災により除染廃棄物の処理が問題となっているが、特殊な材料を用いることなく放射線遮蔽効果を少しでも向上できる材料としての利用も考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺純一、田村裕美、藤井隆史、綾野克紀：銅スラグのコンクリート用材料への有効利用に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.32, No.1, pp.1535-1540, 2010.7
- 2) 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
- 3) 石炭灰ハンドブック：日本フライアッシュ協会、I-23, 2015.11
- 4) 西田勝裕、野中陽介、鍵本広之：簡易設備による石炭灰モルタル製造と砂防堤の構築工事、電力土木誌、p82-87, 2016.7
- 5) 槇島修、大城武、諸喜田茂充、田中斉：藻類等の繁殖増進効果を有するコンクリートに関する研究、土木学会第57回年次学術講演会、pp.929-930, 2002.9
- 6) 仕入豊和ほか：コンクリート壁面の汚れ、セメント・コンクリート、No.461, pp.22-33, 1985.7