

論文 銅スラグ細骨材を大量に使用した高比重モルタルの室内試験による各種特性に関する検討

秋山 哲治*1・鈴木 克実*2・岩永 豊司*3・岩波 光保*4

要旨：防波堤の根固・被覆ブロック等の安定性は、比重が大きいほど有利なため、高比重な材料は粘り強い構造に資すると考える。これまで筆者らは、密度 3.5g/cm^3 程度の銅スラグ細骨材と、一般の粗骨材とを併用した高比重コンクリートの研究を行ってきたが、単位容積質量 2.5t/m^3 程度の確保が限界であった。そこで、従来の高比重コンクリートよりも重く、ペースト以外の骨材が占める容積を銅スラグ細骨材 100%で置換した単位容積質量 2.7t/m^3 程度を目標とした高比重モルタルの配合を検討した。室内試験では、フレッシュ性状やブリーディング特性のほか、強度特性、収縮特性、および断熱温度特性などの各種特性について検討した。

キーワード：高比重モルタル、銅スラグ細骨材、港湾構造物、根固・被覆ブロック、粘り強さ

1. はじめに

港湾コンクリート構造物では、東日本大震災以降に、“粘り強い構造”の考え方が公表され、設計波を越える津波による被害をできるだけ抑えるよう、構造的および材料的な観点から様々なアプローチがなされている。防波堤の耐津波設計ガイドライン¹⁾では、図-1に示すように、防波堤に作用した巨大な水平力に加え、防波堤の天端を越流した津波が防波堤背後で強い流れとなり、基礎マウンドや海底地盤を洗掘して防波堤の安定性を低下させたと考えられている。このような津波に対して、防波堤が変形しつつも倒壊しない“粘り強さ”を付与する方法としては、例えば、防波堤ケーソン背後の腹付工の嵩上げや根固・被覆ブロックの設置などが対策例として示されている。港湾基準²⁾での被覆ブロックの所要重量算定式では、材料の単位容積質量が大きいとその安定性が向上するため、同ブロックの重量を普通コンクリート（以降、普通コンと称す）よりも大きくできれば、越流による洗掘に対して安全性が向上すると考えられる。

一方、コンクリート材料供給の観点では、良質な天然骨材の枯渇化は慢性的に続いている社会問題であり、産業副産物を積極的に活用することは復興事業の加速にも役立つと期待されている。本研究で用いた銅スラグ細骨材も産業副産物の一つであり、コンクリート用材料として利用が拡大されるよう、文献³⁾等が整備されている。

そこで本研究では、細骨材のみを高比重な材料に置き換えた、従来の単位容積質量 2.5t/m^3 程度の高比重コンクリート^{4),5)}よりも約 10%重い（普通コンと比べて約 20%重い）材料として、高比重モルタルの配合を検討した。室内試験では、フレッシュ性状やブリーディング特性の

ほか、強度特性、収縮特性および断熱温度特性など、各種特性について検討した。検討した配合は、材料構成のうちペーストを除く骨材が占める容積を銅スラグ細骨材 100%で置き換えており、単位容積質量としては 2.7t/m^3 程度以上を目標としている。また、産業副産物としての銅スラグ細骨材を大量に使用した建設材料の開発を目指したものである。以下に、室内試験によって把握した、高比重モルタルの各種特性に関する検討結果を示す。

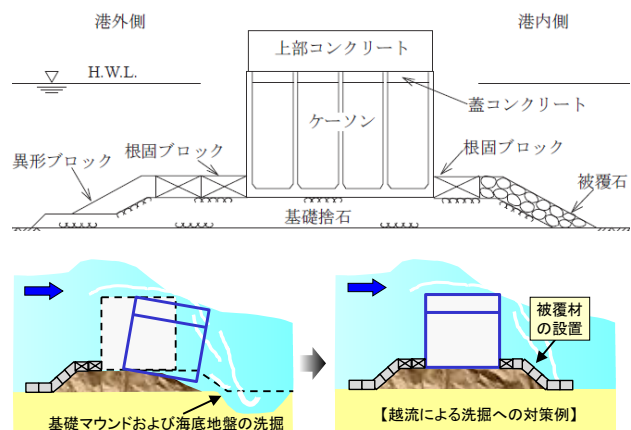


図-1 洗掘に対する粘り強い構造としての対策例

2. 高比重モルタルの配合検討

2.1 検討ケースと配合設計の方向性

表-1 に検討ケースを示す。これらの配合は表-2 に示す配合設計の方向性に基づき、試行を積み重ねて検討した結果である⁶⁾。

ここで、表-2 配合設計の方向性について概説する。

1)フレッシュ性状の確保について、ブリーディング増加

*1 若築建設(株) 技術部 技術研究所 コンクリート・構造グループリーダー 工修 (正会員)

*2 新菱商事(株) 磐城工場 課長

*3 BASF ジャパン(株) 機能性材料統括本部 建設化学品事業部 シニアマネージャー (正会員)

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 室内試験で検討した配合ケース

検討 ケース	W/C [%]	W/(C+F) [%]	空気量 [%]	ペースト容積 [L/m ³]	単位量 [kg/m ³]				混和剤	
					セメント C	石粉 F	水 W	銅スラグ CUS	SP [C×%]	Ad [C×%]
1	65%	39%	2.0%	405	331	217	215	2013	0.60	0.120
2	60%	39%	2.0%	405	359	193	215	2013	0.55	0.120
3	55%	39%	2.0%	405	391	164	215	2013	0.60	0.120

C: 高炉セメントB種(密度3.04g/cm³, 比表面積3,840cm²/g), F: 石粉(石灰石微粉末, 密度2.68g/cm³, 比表面積6,028cm²/g)

CUS: 銅スラグ細骨材2.5mm(密度3.49g/cm³, 吸水率0.3%, FM2.35), SP: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系), Ad: 空気量調整剤

による材料分離を防ぐため、混和材として石灰石微粉末を用い、コンシステンシーを良好に経時保持するため、混和剤として高性能 AE 減水剤を用いた。2)単位容積質量の目標は、2.7t/m³程度以上とした。図-2 に示す銅スラグ細骨材(図では CUS と称す)の粒度分布の例から判るとおり、CUS5-0.3³⁾ は CUS2.5³⁾ と比べて、骨材の小粒の割合が少ないことによって天然砂が必要となり、単位容積質量 2.6t/m³ 程度とすることが限界であった。一方、CUS2.5 を用いると天然砂を用いずに所要の性能を満足でき、単位容積質量 2.7t/m³ 程度を確保できた。3)ブリーディング抑制に対して、石灰石微粉末を用い、単位水量を低減する観点から高性能 AE 減水剤を使用した。4)水セメント比は、港湾基準²⁾ に示す無筋コンクリートの最大水セメント比を参考に 60~65%以下とした。5)強度特性の確保は、根固・被覆ブロックでの一般的な強度特性値 18N/mm² 以上²⁾ を目安とした。本研究で取り扱う材料はモルタルであるが、摩耗に対して普通コンと同等のすりへり抵抗性を確保することを目指した。6)水和熱の抑制について、事前に温度応力解析を行い、無対策において有害な温度ひび割れの発生が少ないと推測される 380kg/m³ 程度を単位セメント量の上限目安とした。

2.2 練混ぜと室内試験の項目

(1) 練混ぜ方法

練混ぜは、まず、セメントと石灰石微粉末および銅スラグで空練り 10s を行い、次に混和剤と水を投入して本練り 60s で行った。フレッシュ試験のタイミングは、本練り終了後 5 分経過時点とした。

(2) 室内試験の項目

表-3 に、室内試験の項目および準拠した JIS 規格等を示す。また、各項目の品質目安の目標値設定について、試験項目の補足と併せて以下に概説する。なお、実施工での品質管理の項目は、ミンスランプ、単位容積質量、ブリーディング、および圧縮強度を想定している。

モルタルフローとミンスランプは、適度なコンシステンシーを有し、型枠への打設時に材料分離しないことを目安⁷⁾ として設定した。両試験を行ったのは、現場試験ではミンスランプを想定したことによる。単位容積質量は、良好なフレッシュ性状を満足する範囲内で、できる限り重くする方針で 2.7t/m³ 以上とした。試験は、エアメータへ振動機を用いて試料を 2 層詰めして測定し、設計

表-2 高比重モルタルの配合設計の方向性

着眼点	配合設計の方向性
1) フレッシュ性状の確保	混和材(剤)の使用
2) 単位容積質量の確保	銅スラグ細骨材を出来るだけ多く使用
3) ブリーディング抑制	混和材(剤)の使用
4) 水セメント比の遵守	W/C=60~65%以下
5) 強度特性の確保	水セメント比の低減
6) 水和熱の抑制	単位セメント量の低減

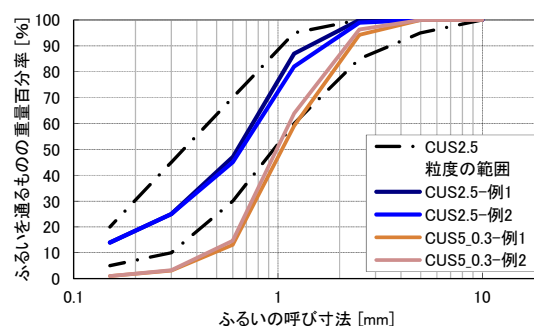


図-2 銅スラグ細骨材の粒度分布

表-3 室内試験の項目

項目	品質目安	準拠等
モルタルフロー	140~195mm程度	JIS R 5201
ミンスランプ	3~10cm程度	JIS A 1171
単位容積質量	2.7t/m ³ 以上	JIS A 1116
ブリーディング	0.5~0.6cm ³ /cm ² 以下	JIS A 1123
圧縮強度	18N/mm ² 以上	JIS A 1108
静弾性係数	(圧縮強度に準じる)	JIS A 1149
引張強度	(同上)	JIS A 1113
曲げ強度	(同上)	JIS A 1106
乾燥収縮ひずみ	(性能に影響ないこと)	JIS A 1129
自己収縮ひずみ	(同上)	JCI法
断熱温度上昇	(同上)	JCI-SQA3
すりへり試験	(同上)	ASTM C 418

※空気量は、設計値と比較するために測定。

値と比較するため空気量も併せて測定した。ブリーディングは、強度や耐凍害性に悪影響がないとされる 0.5~0.6cm³/cm² 以下⁴⁾ に設定した。圧縮強度は、2.1 に示すとおり港湾基準に示される一般的な強度特性を目安とした。静弾性係数、引張強度、および曲げ強度は、圧縮強度に相当する性能を有するかを評価した。乾燥収縮、自己収縮、および断熱温度上昇は、施工時の初期ひび割れに対する照査に必要な情報を得るために行った。自己収縮ひずみは、JCI「超流動コンクリート研究委員会報告書 II」に示す試験法に準拠した。すりへり試験は、2.1 に示す耐摩耗性を評価するために行い、ブラスト砂の噴射

表－4 室内フレッシュ試験の結果（左：試験の結果，右：ミニスランブとモルタルフロー試験の状況写真）

検討 ケース	W/C [%]	室内フレッシュ試験の結果						ケース1 W/C=65%		ケース2 W/C=60%		ケース3 W/C=55%	
		ミニスランブ [cm]	モルタルフロー [mm]	空気量 [%]	温度 [°C]	単位容積質量 [t/m ³]	ブリーディング [cm ³ /cm ²]	ミニスランブ	モルタルフロー	ミニスランブ	モルタルフロー	ミニスランブ	モルタルフロー
1	65%	6.0	143	3.3	13.0	2.702	0.26						
2	60%	5.9	159	3.6	8.0	2.701	0.48						
3	55%	8.0	167	3.0	9.0	2.706	0.45						

により測定したすりへり減量を用い，標準水中養生 200×200×50mm の平板供試体で材齢 28 日に実施した。

3. 高比重モルタルの試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表－4 に，室内フレッシュ試験の結果，および試験の状況写真を併せて示す。

ミニスランブとモルタルフローは，3 ケースとも品質目安をクリアしており，目視においても形状のくずれ等は確認されなかった。また，フロー板上の試料周囲には水みちも確認されず，材料分離も見受けられなかったため，良好なコンシステンシーを有していたと考える。混和材として用いた石灰石微粉末や，単位水量を減じるために用いた高性能 AE 減水剤が，良好なフレッシュ性状の確保に効果的であったものとする。

空気量は 3.0～3.6% となり，設計値 2.0% に対して若干大きくなる傾向を示した。また，単位容積質量は 2.701～2.706t/m³ であった。これらの事柄を踏まえると，銅スラグ細骨材が，天然の細骨材と比べて角張った形状を有することで，練混ぜ時に空気を巻き込む傾向があると推測された。しかし，この性質に対しては，採用した空気量調整剤を用いることで，目標とする 2.7t/m³ 程度以上を満足できると判断した。

ブリーディングについて，検討した 3 水準の配合では，0.26～0.48cm³/cm² となり，ブリーディングの品質目安である 0.5～0.6cm³/cm² 以下を満足した。混和材として石灰石微粉末を採用したことや，セメント量が少ない配合においても水粉体比 W/(C+F) を一定として石灰石微粉末により粉体量を確保したこと，また高性能 AE 減水剤を使用して単位水量を低減できた効果が，ブリーディングを抑制できたことに寄与していると考えられる。W/C が最も大きいケース 1 において，他の 2 ケースと比べて，ブリーディング量が最も少ない結果となったのは，モルタルの温度も影響していると推測する。

3.2 SP 添加量・骨材の表面水率とミニスランブの関係

高比重モルタルの配合について，SP 添加量と骨材の表面水率の設定など，表－5 に示す変動要因に対して，ミニスランブの変動量を確認した。

図－3 に，基本配合に対して，表－5 の変動要因-1 として，SP 添加量を±0.15% 変動させた場合，および骨材

の表面水率を単位水量に換算して±10kg/m³ 変動させた場合のミニスランブの結果を示す。

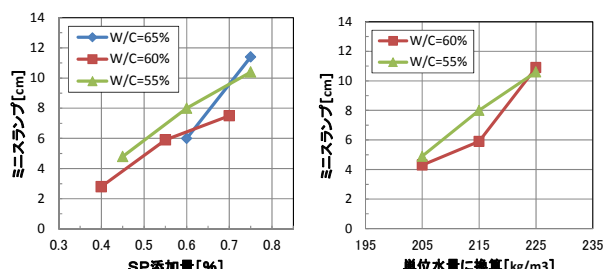
同図より，変動要因-1 として SP 添加量を増減させると，検討を行った 3 配合ともに，ミニスランブが概ね同じ傾向で増減する相関性を有していた。この変化量は，SP 添加量を 0.15% 変動させると，ミニスランブで約 3cm 程度変動することを確認した。一方，変動要因-2 として単位水量を増減させると，検討した 2 配合ともに，ミニスランブが同様に増減する傾向を示した。この変化量は，単位水量を 10kg/m³ 変動させると，ミニスランブで約 3cm 程度変動することを確認した。

以上より，SP 添加量・骨材の表面水率とミニスランブの両者には相関性があることを確認した。また，ミニスランブとモルタルフローは相関性⁷⁾を有することから，上記の変動要因とモルタルフローについても，同様な傾向を有すると考える。すなわち，これらの変動量を予め把握しておくことにより，実機においても所定の品質範囲に，フレッシュ性状を制御できると推測する。

表－5 変動要因の検討ケース

検討 ケース	W/C [%]	変動要因-1		変動要因-2	
		SP 添加量 [Q × %]	備考	表面水率設定 [単位水量換算]	備考
1	65%	0.60	基本配合：表-1	-	
		0.75	+0.15%	-	
2	60%	0.40	-0.15%	205	-10kg/m ³
		0.55	基本配合：表-1	215	基本配合：表-1
		0.70	+0.15%	225	+10kg/m ³
		0.45	-0.15%	205	-10kg/m ³
3	55%	0.60	基本配合：表-1	215	基本配合：表-1
		0.75	+0.15%	225	+10kg/m ³

注) SP 添加量は混和剤のみ変動。表面水率設定は単位水量変動分を銅スラグで置換。



図－3 SP 添加量・骨材の表面水率とミニスランブの関係

3.3 流動性を増加させた場合のブリーディング特性

図－4 に，ケース 2 とケース 3 について，SP 添加量，および骨材の表面水率の設定として単位水量を増加させ

た場合での、ブリーディング量の経時変化を示す。

SP 添加量を+0.15%増加させた場合のブリーディング量 (cm^3/cm^2) は、ケース 2 が 0.39、ケース 3 が 0.31 となり、両ケースともに表-5 に示す基本配合（ケース 2 で 0.48、ケース 3 で 0.45）と比べてブリーディング量は低下した。一方、骨材の表面水率の設定として単位水量に換算して+10kg/m³とした場合は、ケース 2 で 0.66、ケース 3 で 0.80 となり、両ケースともに基本配合と比べてブリーディング量は増加した。これらの値は、品質目安の目標とした 0.5~0.6 cm^3/cm^2 を超える結果となった。

以上より、実機練りミキサーの設定値補正でモルタルのコンシステンシーを調整する場合は、見かけ上は同様なミニスランプであっても、調整した項目が、SP 添加量に因るものか、あるいは骨材の表面水率の設定に因るものかにより、ブリーディング特性は異なる様相を呈する可能性が示唆された。検討した配合は、銅スラグ細骨材の単位量が 2,000kg/m³ 以上で多いことを鑑みると、配合調整時に骨材の表面水率の設定を見誤ると、ブリーディング増加に繋がるのが懸念される。このため、実施工では、定期的に銅スラグ細骨材の表面水率の変動チェックなど、出荷中の品質管理も重要になると考える。

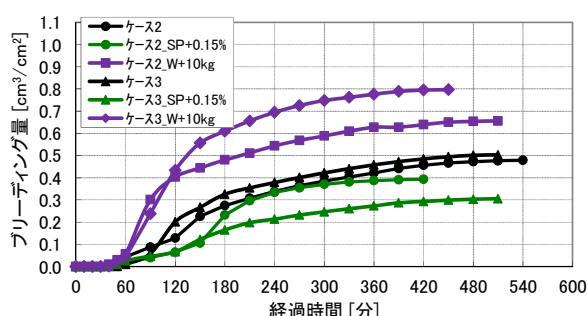


図-4 流動性を増加させた場合のブリーディング特性

3.4 強度特性および静弾性係数

表-6 に、圧縮強度、静弾性係数、引張強度および曲げ強度の結果を示す。

圧縮強度は、ケース 2 で他ケースと比べて若干小さい値を示したが、材齢 28 日の全ケースで 30N/mm² 以上となり、品質目安 18N/mm² 以上を満足した。静弾性係数は、材齢 28 日の全ケースで 30kN/mm² 以上の値を示した。

引張強度は、材齢 7 日で 1.9~2.2N/mm²、材齢 28 日で

表-6 強度特性および静弾性係数

検討 ケース	W/C [%]	圧縮強度 [N/mm ²]		静弾性係数 [kN/mm ²]		引張強度 [N/mm ²]		曲げ強度 [N/mm ²]
		7日	28日	7日	28日	7日	28日	28日
1	65%	19.2	38.2	24.5	34.9	1.9 [10%]	3.1 [8%]	5.6 [15%]
2	60%	17.5	33.3	23.4	31.6	2.1 [12%]	3.6 [11%]	5.5 [16%]
3	55%	23.0	40.2	27.1	37.2	2.2 [9%]	3.5 [9%]	6.0 [15%]

※引張・曲げ強度の下段 [] 内は、圧縮強度に対する比率。

3.1~3.6N/mm² となり、圧縮強度の 10%程度であった。

曲げ強度は、材齢 28 日で 5.5~6.0N/mm² となり、圧縮強度の約 15%であった。圧縮強度に対する引張・曲げの各強度比率は、コンクリートと同等又は若干小さかったが、上記の圧縮強度であれば品質上問題ないと考える。

3.5 乾燥収縮特性

図-5 に、材齢 6 カ月迄の長さ変化率と質量変化率の結果を示す。試験は、表-1 に示すケース 2 およびケース 3、比較用として普通コン（18-8-20BB、単位セメント量 241kg/m³）の計 3 ケースで行った。

長さ変化率は、高比重モルタルは材齢 6 ヶ月でケース 2 で 667 μ 、ケース 3 で 671 μ となり、両ケースとも概ね同じであった。普通コンのケースは 724 μ で、高比重モルタルと比べて 55 μ 程度大きくなった。一方、質量変化率は、高比重モルタルはケース 2 で 1.64%、ケース 3 で 1.38% となり、セメント量が少ないケース 2 が若干大きくなった。普通コンのケースは 2.76% であり、高比重モルタルと比べて 2 倍程度大きい値を示した。

高比重モルタルの長さ変化率は、本実験の範囲内では貧配合の普通コンと概ね同等と考えられ、粉体量が多いモルタル材料にも関わらず長さ変化率が大きくなかったのは、質量減少率が比較的小さかったことが寄与したと推察される。普通コンと比較して、高比重モルタルでは配合上は単位水量も多くなっているものの、質量減少率が小さい値であった理由は、銅スラグ細骨材の吸水率が小さいことが起因⁸⁾ していると考えられる。

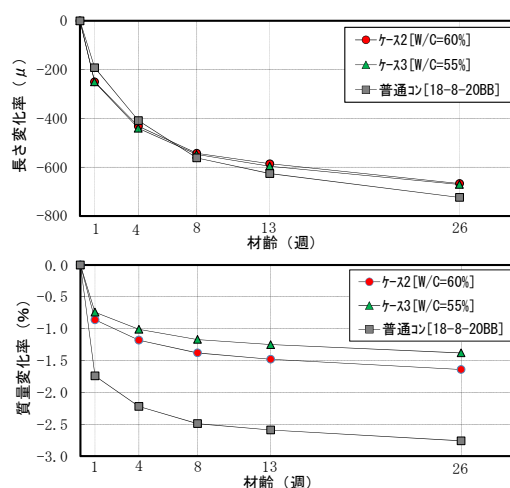


図-5 長さ変化率と質量変化率の結果

3.6 自己収縮ひずみ

図-6 に、材齢 28 日迄の自己収縮ひずみの結果を示す。前節と同様に高比重モルタルはケース 2 およびケース 3、比較用の普通コン（18-8-20BB）の計 3 ケースである。

自己収縮ひずみは、材齢 28 日でケース 2 は 238 μ 、ケース 3 は 272 μ となり、セメント量が多いケース 3 の方が約

14%大きくなった。一方、普通コンは 57μ であり、高比重モルタルと比べて小さい値であった。ケース2とケース3の単位セメント量の差は 32kg/m^3 で、自己収縮ひずみの差は 34μ である。ここで、自己収縮ひずみが単位セメント量だけに依存すると仮定し、高比重モルタルにて普通コンと同じ単位セメント量 241kg/m^3 とすると、自己収縮ひずみは 112μ ($=272-160\mu$ 。ケース3と普通コンの単位セメント量の差 150kg/m^3 に相当する自己収縮ひずみの差を 160μ と仮定)と試算され、この値と普通コン 57μ との差は石灰石微粉末等が影響していると考えられる。以上を踏まえると、単位セメント量とペースト容積は、高比重モルタル $359\sim 391\text{kg/m}^3$ と 405L/m^3 、普通コン 241kg/m^3 と 238L/m^3 であり、これらの単位量が自己収縮に影響していると推測する。なお、高比重モルタルの自己収縮ひずみは、普通コンと比べて大きいが、根固・被覆ブロックの施工では、ブロック1個の製作は通常1回の打設で行われるため、温度ひび割れへの影響は小さいと考える。

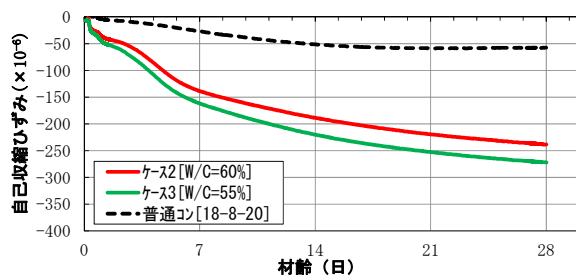


図-6 自己収縮ひずみの結果

3.7 断熱温度上昇特性

図-7に、高比重モルタルのケース2およびケース3について断熱温度上昇試験の結果を示す。試験は、高比重モルタルのケース2とケース3で行った。

コンクリート標準示方書では、断熱温度上昇特性として式(1)が示されている。高比重モルタルの圧縮強度も、水セメント比に支配され、セメントの水和熱に依存することを勘案し、下式に準じて考察を行った。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma(t-t_0)^S}) \quad (1)$$

$Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

γ, S : 温度上昇速度に関する定数, パラメータ

t, t_0 : 材齢 (日), 温度上昇の原点 (日)

終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は、ケース2で 53.8°C 、ケース3で 56.9°C となり、単位セメント量が 32kg/m^3 多いケース3の方が 3.1°C 大きくなった。式(1)では、温度上昇量や定数等を算出する際に、単位セメント量を用いた関数が提案されている。例えば、高炉セメントB種では、単位セメント量が約 10kg/m^3 で、断熱温度上昇量が 1°C 程度の差と

なるが、本試験結果においても概ね同じ傾向であった。

表-7に、試験結果を用いて算定した近似式での定数を示す。ここで、式(1)を用いて近似したのは、断熱温度上昇試験での温度の測定結果において、水和発熱による温度上昇のタイミングが、練混ぜ直後から少し遅延する傾向がみられたことに因る。

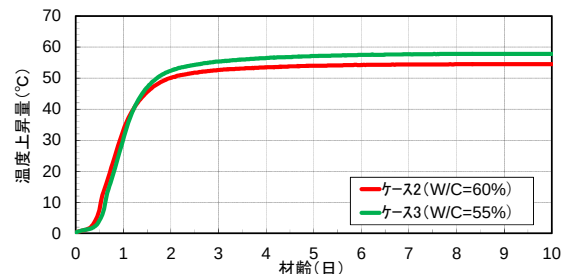


図-7 断熱温度上昇試験の結果

表-7 断熱温度上昇試験により近似した定数等

項目	Q_{∞}	γ	S	t_0
ケース2 [W/C=60%]	53.8	1.40	1.25	0.30
ケース3 [W/C=55%]	56.9	1.30	1.25	0.35

3.8 すりへり抵抗性

検討した高比重モルタルは、海水中にある根固・被覆ブロック等への適用を想定しており、激しい波浪の影響を受ける箇所と耐凍害性が必要な箇所に対しては、適用外として位置づけている。一方、海水中の基礎マウンド付近は、水深によっては少なからず波浪や漂砂による侵食(摩耗)を受けると考える。以上を踏まえ、本節では、検討した高比重モルタルの配合に対して、サンドブラストによるすりへり抵抗性を確認した結果を示す。

図-8に、高比重モルタルのケース1~3でのすりへり試験の結果を示す。同図では、各配合について圧縮強度に対するすりへり係数を整理し、高比重モルタルの比較用として普通コン(圧縮強度 $18\sim 40\text{N/mm}^2$ 程度)の試験結果も併せて示す。

高比重モルタルの圧縮強度とすりへり係数 (cm^3/cm^2) は、ケース1は 38.2N/mm^2 で 0.19 、ケース2は 33.3N/mm^2 で 0.25 、ケース3は 40.2N/mm^2 で 0.15 であった。一方、普通コンは圧縮強度 $18\sim 40\text{N/mm}^2$ の3水準でのすりへり係数の範囲は、 18.0N/mm^2 で 0.19 から、 39.5N/mm^2 で 0.14 の範囲に分布した。圧縮強度とすりへり係数の関係を直線近似すると、高比重モルタルは圧縮強度 35N/mm^2 程度以下になると、すりへり係数が 0.25 程度以上となり、普通コン 18N/mm^2 程度のすりへり抵抗性と同等程度になると推測された。一方、圧縮強度 40N/mm^2 程度では、高比重モルタルと普通コンは同等のすりへり抵抗性を有した。高比重モルタルの室内試験による、これまでの試験練りの圧縮強度は 35N/mm^2 程度以上を確保できており、検討した配合は十分なすりへり抵抗性を有すると考える。

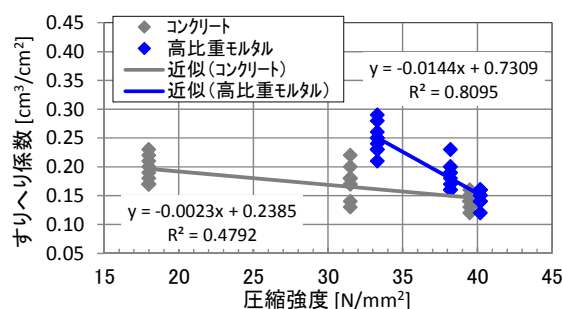


図-8 すりへり試験の結果

4. まとめ

銅スラグ細骨材を大量に使用した高比重モルタルのフレッシュ性状、強度特性、収縮特性および断熱温度特性など、室内試験で把握した結果を以下に取り纏める。

- (1) フレッシュ性状について、練混ぜでは、銅スラグ細骨材の特性上、空気を巻き込む傾向があった。このため、単位容積質量を確保する観点から、所定の空気量調整剤を使用する必要があった。ブリーディング特性は、基本配合では悪影響とはならない特性を示したが、骨材の表面水率の設定値により配合調整を行う場合は、ブリーディングが増加する場合があることを確認した。フレッシュ時のコンシステンシーの経時保持性能は、混和剤として高性能 AE 減水剤を用いることで、良好な性状を確保できた。
- (2) 配合を調整する上での変動要因とミンスランプの関係について、SP 添加量・骨材の表面水率の設定値とミンスランプの変動量とは相関性を有していた。基本配合に対して SP 添加量 $\pm 0.15\%$ でミンスランプは約 $\pm 3\text{cm}$ 、骨材の表面水率の設定値を単位水量換算で $\pm 10\text{kg/m}^3$ でミンスランプは約 $\pm 3\text{cm}$ 変動した。
- (3) 強度特性について、検討した配合では、圧縮強度と静弾性係数は普通コン 18N/mm²以上に相当する値を有した。引張強度と曲げ強度は、コンクリートと同等もしくは若干小さかったが、必要十分な強度特性を有していた。
- (4) 乾燥収縮および自己収縮特性について、乾燥収縮は、普通コンと同程度であり、質量減少率は普通コンより小さくなった。この理由は、銅スラグ細骨材の吸水率が影響していると考ええる。一方、自己収縮は、普通コンに対して 4 倍程度の値を示した。これは、単位セメント量とペースト容積が影響していると考ええる。
- (5) 断熱温度上昇特性は、高比重モルタルにおいても W/C と単位セメント量によって支配され、その特性は普通コンと同様な傾向を有すると考える。
- (6) すりへり抵抗性について、コンクリートと比べると、強度が小さくなる範囲では、同一強度でのすりへり

抵抗性は劣る傾向を示した。なお、検討した配合では、適用対象コンクリート部材と同程度のすりへり抵抗性を有することを確認した。

銅スラグ細骨材 100%高比重モルタルは、従来の高比重コンクリートよりも低コストで製造でき、産業副産物のリサイクル向上にも寄与するものである。すなわち、環境負荷を小さくできる低炭素製品であり、その面からも社会のニーズに応えている材料として位置づけられる。また、本研究で検討した高比重モルタルは、高性能 AE 減水剤の使用によって優れた流動性を確保できるため、ケーソン壁面損傷による中詰材流出に対する充填材などにも応用できる可能性がある。今後は、実機試験練りによる品質目安の策定を行い、さらに実物大モデルの結果を踏まえ、施工性の良否、計測施工による温度ひび割れの可能性について考察を行いたいと考える。

謝辞：本研究に際し、検討方針や試験項目の選定など、港湾空港技術研究所 山路徹氏にご指導を頂いた。また、試験にご協力を頂いた関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，2015.9
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻，2007.4
- 3) (公社)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
- 4) 秋山哲治，森晴夫，本田友之，小澤良一：ポンプ圧送性に配慮した貧配合としての高比重コンクリートの配合選定と実施工，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1321-1326，2013.7
- 5) 森晴夫，鳥畑孝志，松本伸郎，本田友之：銅スラグ細骨材を大量に混入したコンクリートの鉄筋コンクリートへの適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1843-1848，2009.7
- 6) 秋山哲治，藤村貢，小澤良一，鈴木克実：港湾構造物の根固め・被覆ブロック等への適用を目的とした高比重モルタルの室内試験，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-351，pp.701-702，2016.9
- 7) 秋山哲治，藤村貢，鈴木克実，岩永豊司：銅スラグ細骨材を用いた高比重モルタルの品質目安としてのミンスランプ管理値の検討，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-352，pp.703-704，2016.9
- 8) 芝卓思，横井克則，三岩敬孝，宮崎健治：建設汚泥固化物と銅スラグを細骨材に一部置換したコンクリートの諸性状，土木学会第 70 回年次学術講演会，V-480，pp.959-960，2015.9