

カルシア人工石の発現強度に対する製鋼スラグと高炉スラグ微粉末の影響

五洋建設（株） 正会員 ○川口 洋介，正会員 田中 裕一，正会員 安藤 満
北海道開発局 函館開発建設部 工藤 博文，佐々木 実歩

1.目的

カルシア人工石は、浚渫土、転炉系製鋼スラグ、結合材(高炉セメントや高炉スラグ微粉末)等を混練し硬化後に破碎した石材代替品である。カルシア人工石は天然材と比較して求められるサイズ、重量の石材を製造でき、藻礁、漁礁、裏込石、被覆石等に使用することができる¹⁾。また、コンクリートブロックと比較して CO₂ 排出量が少ない材料を使用しているため、カーボンニュートラルの観点から今後の活用が期待されている。

函館港西防波堤背後盛土の被覆石の代用として検討されているカルシア人工石について、浚渫土 vol 50%で高炉スラグ微粉末と高炉セメント B 種を用いて試験施工を実施したが、図-1 のように高炉セメントを用いたケース B はσ7で目標強度を達成したが、高炉スラグ微粉末を用いたケース A は、製造後強度発現が小さく、型枠脱型も困難な状況で、封緘湿潤養生約1ヶ月後に破碎した。破碎後は低温下で無養生であったが、カルシア人工石投入にあたり、一軸圧縮試験を行ったところ、強度が増進していたことが確認された。高炉スラグ微粉末を使用した人工石の知見は少なく、今後、カルシア人工石を製造する際には、高炉スラグ微粉末の種類、養生期間、方法など検討が必要である。本論文では、函館港-10m 泊地浚渫工事において、室内配合試験を行い、カルシア人工石試験施工の再現と、初期強度および長期間養生における強度発現への影響を確認した。



写真-1 カルシア人工石

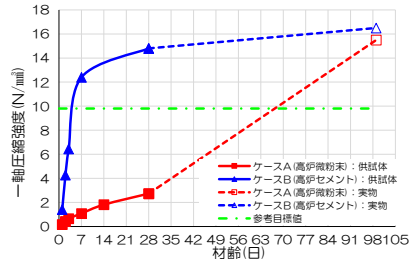


図-1 カルシア人工石試験施工結果

2.試験材料および方法

使用した浚渫土と製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、高炉セメント B 種の材料性状を表-1～表-4 に示す。浚渫土は函館港で採取し、含水比 150%に調整したものを使用した。浚渫土混合率は vol 50%とし、製鋼スラグ（最大粒径 25mm 以下）、高炉セメント B 種あるいは高炉スラグ微粉末を粉体と水の重量比である強度指数 1.5 となる所定の比率で混合した。製鋼スラグは A～E を使用し、A～C はエージング材、D～E は非エージング材である。高炉スラグ微粉末は G, H, J はセッコウが添加されており、G は比表面積が 6,000cm²/g である。また、製鋼スラグに着目した試験では高炉スラグ微粉末 F, 高炉微粉末に着目した試験では製鋼スラグ A を使用し、混合後はプラスチックモールド (Φ100mm×H200mm) に充填し、屋外の屋根付きの箇所 (平均 11.3℃) にて湿潤養生を行った。

表-1 浚渫土の性状

試験項目	試験値	試験方法
湿潤密度 (g/cm ³)	1.496	JIS A 1225
土粒子密度 (g/cm ³)	2.602	JIS A 1202
自然含水比 (%)	86.0	JIS A 1203
細粒分含有率 (%)	88.7	JIS A 1204
液性限界 (%)	72.6	JIS A 1205
強熱減量 (%)	6.0	JIS A 1226

表-2 製鋼スラグの性状

試験項目	製鋼スラグ				
	A	B	C	D	E
表乾密度 (g/cm ³)	3.36	3.09	-	2.84	2.80
f-CaO (%)	0.7	3.9	0.6	7.5	12.5
pH※1 (-)	11.7	12.5	12.9	12.4	12.5

※1 pH は JIS K 0058-1 : 溶出量試験方法にて測定

表-3 高炉スラグ微粉末の性状

試験項目	JIS A 6206規定 (4000)	JIS A 6206規定 (6000)	F (4000)	G (6000)	H (4000)	I (4000)	J (4000)
比表面積 cm ² /g	3500以上 5000未満	5000以上 7000未満	3850	6050	4340	4500	4780
三酸化硫黄 %	4.0以下	4.0以下	0.00	3.40	2.06	0.00	1.72

3.試験結果

試験施工および室内配合試験の配合条件と試験結果を表-5 に示す。カルシア人工石の発現強度は強度指数と相関が高いとされている²⁾。

圧縮試験の目標強度は準硬石相当の 9.8N/mm² とした。

表-4 高炉セメントの性状

試験項目	JIS A 5211規定	測定結果
比表面積 cm ² /g	3000以上	3760
化学成分 %	三酸化硫黄 4.0以下	2.05

キーワード 浚渫土、人工石、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、高炉セメント、配合試験

連絡先 〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8 五洋建設株式会社 環境事業部 TEL03-3817-7521

表-5 配合条件および軸圧縮試験結果

試験	case	条件			配合 (1m当たり)					試験結果										備考
		製鋼 スラグ	粉体	注1) 強度指数	浚渫土	高炉 スラグ微粉末 BP	高炉 セメント BB	製鋼 スラグ SS	合計	含水比	スランプ	圧縮強度 (N/mm ²)								
					2.62g/cm ³ (kg)	2.91g/cm ³ (kg)	3.05g/cm ³ (kg)	表-2参照 (kg)	(kg)	(%)	(cm)	σ7	σ14	σ28	σ91	σ180	σ365			
試験施工	A	A	F	1.0	680	408	0	1209	2297	137.7	12.5	1.1	1.8	2.7	15.5	海中投入		図-1		
	B		セメント	1.5	680	0	395	1245	2320	137.7	7.0	12.4	16.3	14.8	16.5					
室内配合	1	A	F	1.5	680	612	0	973	2265	144.6	5.3	0.0547	0.0567	0.0971	13.3	16.0	31.8	図-2～図-4		
	2	B			680	612	0	878	2170	155.7	2.0	1.96	5.64	8.28	10.4	18.2	11.3			
	3	C			680	612	0	834	2126	152.2	3.1	2.05	3.73	7.37	14.9	23.0	14.9			
	4	D			680	612	0	823	2115	145.4	1.6	3.65	6.13	7.57	8.45	8.92	9.72			
	5	E			680	612	0	811	2103	141.3	2.1	1.04	6.59	9.52	11.1	10.3	12.5			
	6	A	G		680	612	0	973	2265	144.3	0.8	0.893	3.27	6.32	17.1	29.3	39.9	図-3		
	7		H		680	612	0	973	2265	150.1	5.2	0.339	0.542	1.48	14.6	31.8	34.3			
	8		I		680	612	0	973	2265	140.6	3.2	×	0.0879	0.51	1.94	14.3	22.0			
	9		J		680	612	0	973	2265	140.8	6.0	×	0.0402	0.0424	2.65	17.4	17.2			
	10		セメント		680	0	395	1245	2320	156.9	18.4	1.26	3.17	7.81	14.1	19.1	22.5		図-4	

注1) 強度指数：(BP+1.55BB)／W
注2) σ91以降は1供試体のみ試験を行っており、強度にばらつきがある

強度の経時変化を図-2～図-4に示す。case1は試験施工と同一の製鋼スラグAと高炉スラグ微粉末Fを使用してカルシア人工石を作製したが、試験施工のケースAと同様に初期強度の発現が遅く、約3か月後に強度発現が増進した。製鋼スラグに着目した試験では、エージング材のcase2～3、非エージング材のcase4～5は初期から強度を発現していたが、case4のみσ365で目標強度まで強度が増進しなかった。

高炉スラグ微粉末の比表面積と三酸化硫黄は初期強度の発現に影響を与えているとされており³⁾、高炉スラグ微粉末を用いた試験では、比表面積6,000cm²/gのcase6、三酸化硫黄が多く含まれているcase7では初期段階から強度を増進していたが、最終的には全てのケースで目標強度を達成した。

高炉セメントB種を用いたcase10は厳冬期の2月に作製し、10月に製造したケースBよりも強度発現が遅れ、目標強度達成にはσ45前後を要した。また、case1と比較して約1ヶ月早く目標強度を達成しており、今後、カルシア人工石の製造にあたって、養生箇所の確保によって使用する材料を検討する必要がある。

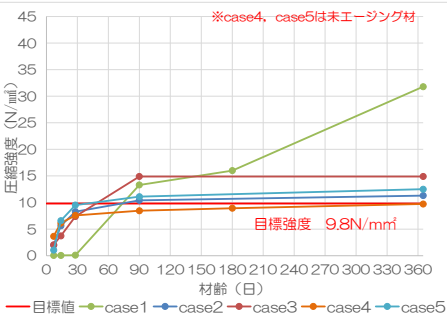


図-2 材齢と圧縮強度
(製鋼スラグ)

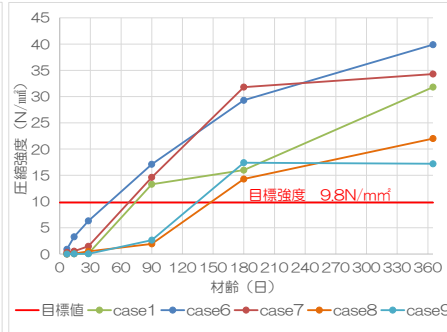


図-3 材齢と圧縮強度
(高炉スラグ微粉末)

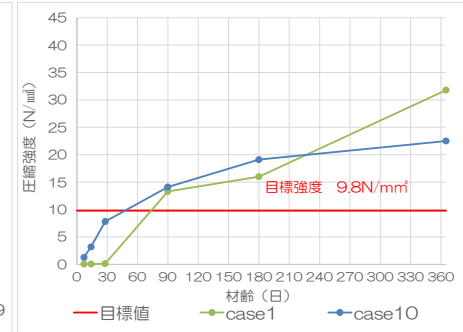


図-4 材齢と圧縮強度
(高炉セメントB種)

4.まとめ

- ・室内配合試験においても試験施工で製造したケースAのカルシア人工石と同様の強度発現を再現できた。
- ・初期強度発現が最も遅かったcase1は製鋼スラグに含まれるf-CaO、pHが最も低かった。
- ・高炉スラグ微粉末の比表面積の大きさと、三酸化硫黄により初期強度発現増進に差が見られたが、σ365ではすべてのケースで目標強度を達成した。
- ・高炉セメントB種の発現強度は気温に依存しており、厳冬期の2月に作製したcase10は10月に製造したケースBと比較して、強度の発現が遅れたが、σ91では同程度となった。

参考文献

1) カルシア改質土研究会：カルシア人工石・カルシアブロック利用技術マニュアル，2017。
2) 辻匠・田中裕一・中川雅夫・野中宗一郎・長尾喬平・赤司有三・木曾英滋・田崎智晶：浚渫土人工石の材料特性と製造技術，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol71，No.2，pp.1173-1178，2015。
3) 土木学会，高炉スラグ微粉末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 151，pp.108，pp.115-116，2018。