

3.7 高炉スラグ

3.7.1 製造・供給

高炉スラグは、冷却方法の違いにより、高炉徐冷スラグ、高炉水砕スラグに分類される。また、用途に応じコンクリート用細骨材、コンクリート用粗骨材、高炉スラグ微粉末、土工用水砕スラグ、道路用鉄鋼スラグが製品として製造されている。

(解説)

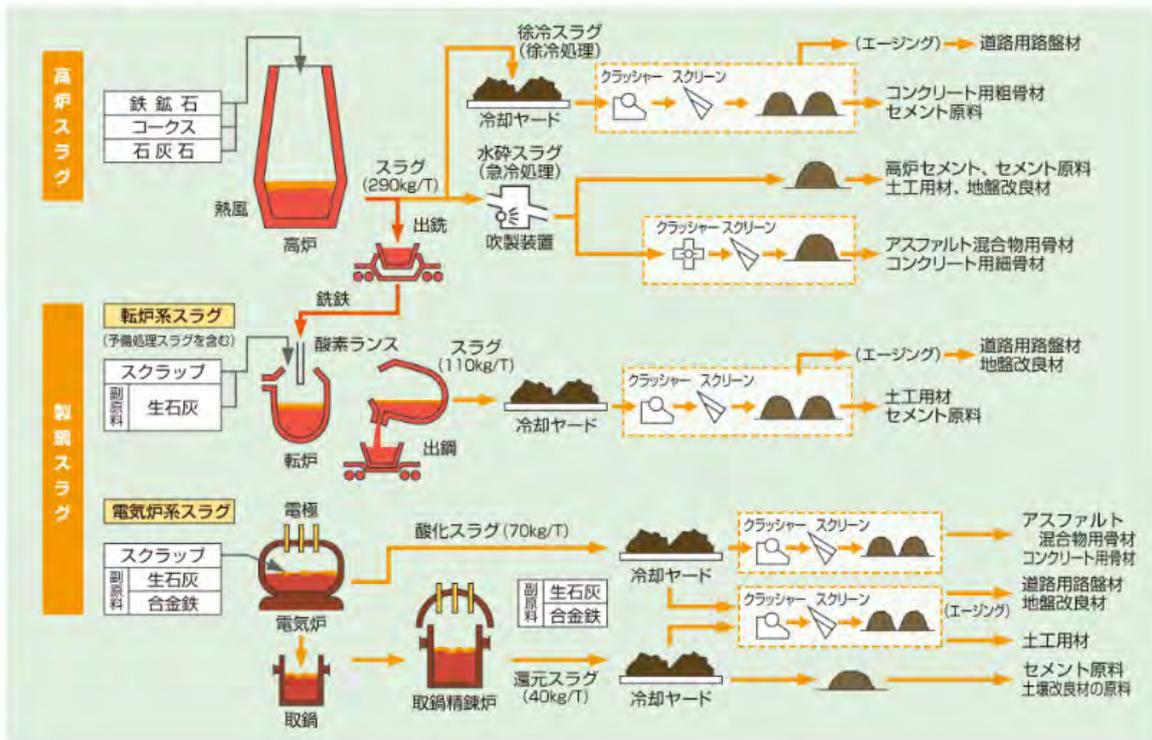
(1) 製造方法

1) 高炉スラグの生成

高炉スラグは鉄鋼製造工程で発生する。高炉内に鉄鉱石、コークス、石灰石などの原料を装入し熱風を送ると、鉄鉱石は還元されて、溶銑及び熔融スラグとなつていずれも炉底に溜まる。これを比重差（溶銑：7、熔融スラグ：2.6～2.7）によって分離、回収したものが高炉スラグであり、溶銑1tに対し約300kgのスラグが発生する。

高炉スラグは、冷却方法によって、高炉徐冷スラグ、高炉水砕スラグの2種類に分類される。製造フローを図3.7.1に、組成例を表3.7.1に示す。

鉄鋼スラグ製品の製造フロー



出典) 環境資材 鉄鋼スラグ (鉄鋼スラグ協会)

図 3.7.1 鉄鋼スラグ製品の製造フロー

表 3.7.1 鉄鋼スラグの組成例

鉄鋼スラグの組成例

(単位: %)

種類 成分	高炉スラグ	転炉系スラグ	電気炉系スラグ		安山岩	普通セメント
			酸化スラグ	還元スラグ		
CaO	41.7	45.8	22.8	55.1	5.8	64.2
SiO ₂	33.8	11.0	12.1	18.8	59.6	22.0
T-Fe	0.4	17.4	29.5	0.3	3.1	3.0
MgO	7.4	6.5	4.8	7.3	2.8	1.5
Al ₂ O ₃	13.4	1.9	6.8	16.5	17.3	5.5
S	0.8	0.06	0.2	0.4	—	2.0
P ₂ O ₅	<0.1	1.7	0.3	0.1	—	—
MnO	0.3	5.3	7.9	1.0	0.2	—

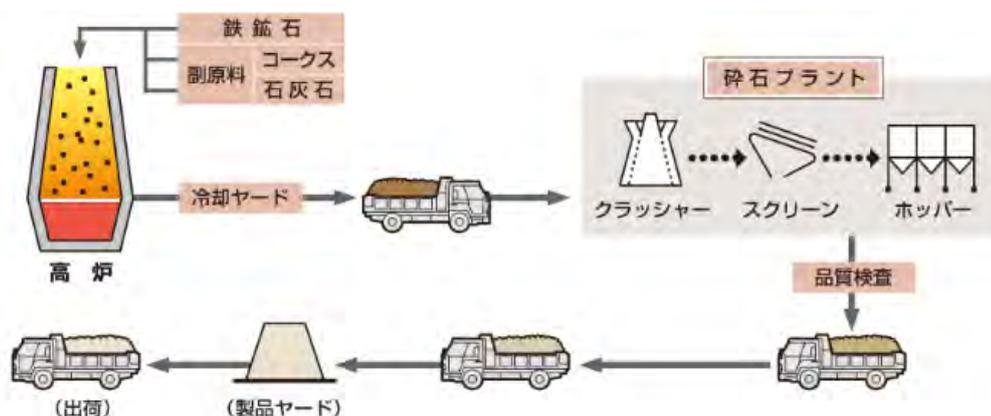
出典) 環境資材 鉄鋼スラグ (鉄鋼スラグ協会)

2) 高炉スラグ製品の製造

① 高炉徐冷スラグ

高炉で生成された熔融スラグをドライピットあるいは畑と呼ばれる冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水によって冷却すると、結晶質の岩石状のスラグとなる。

これを、破碎・ふるい分けをすることによって、コンクリート用や路盤用等の製品として利用される。図 3.7.2 に高炉徐冷スラグの製造工程例を示す。

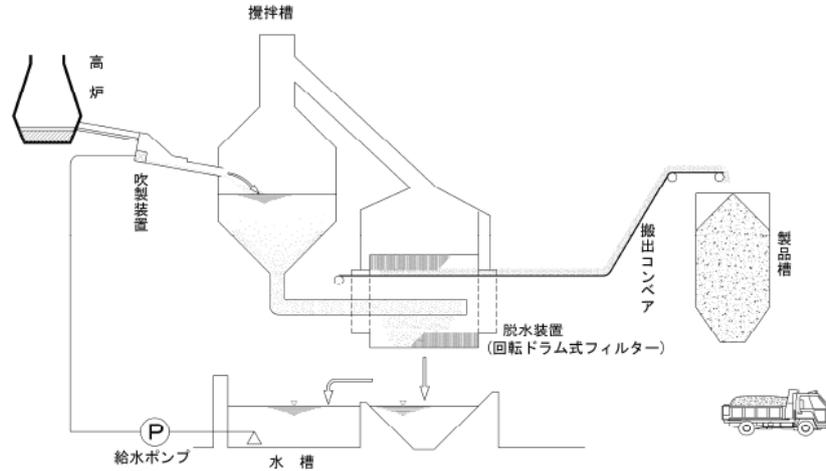


出典) 環境資材 鉄鋼スラグ (鉄鋼スラグ協会)

図 3.7.2 高炉徐冷スラグの製造工程

② 高炉水砕スラグ

高炉水砕スラグの製造は、通常、図 3.7.3 に示すように熔融スラグの流下時点で吹製装置から高圧水を噴射させると、スラグが急冷され砂状になる。水と混ざってスラリー化した高炉水砕スラグをポンプで脱水槽に送り、固液分離を行い、分離されたスラグが搬出される。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル (財) 沿岸技術研究センター)

図 3.7.3 高炉水砕スラグの製造工程

③ 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、図 3.7.4 に示すように高炉水砕スラグを堅型ローラーミルまたはボールミルによる粉砕により製造される。図 3.7.4 に示す工程で製造された高炉水砕スラグは約 10%の水分を含んでおり、高炉スラグ微粉末をボールミルで製造する場合は、粉砕機の前工程で乾燥工程が必要となる。一方、堅型ローラーミルは熱風発生機が組み合わされており、乾燥と粉砕は同時に行われる。

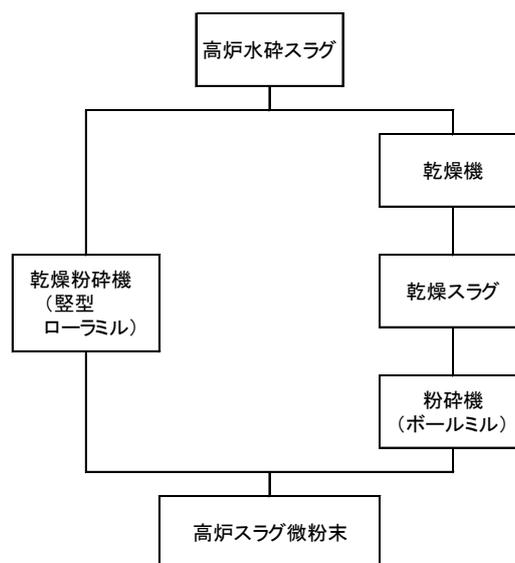


図 3.7.4 高炉スラグ微粉末の製造工程

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

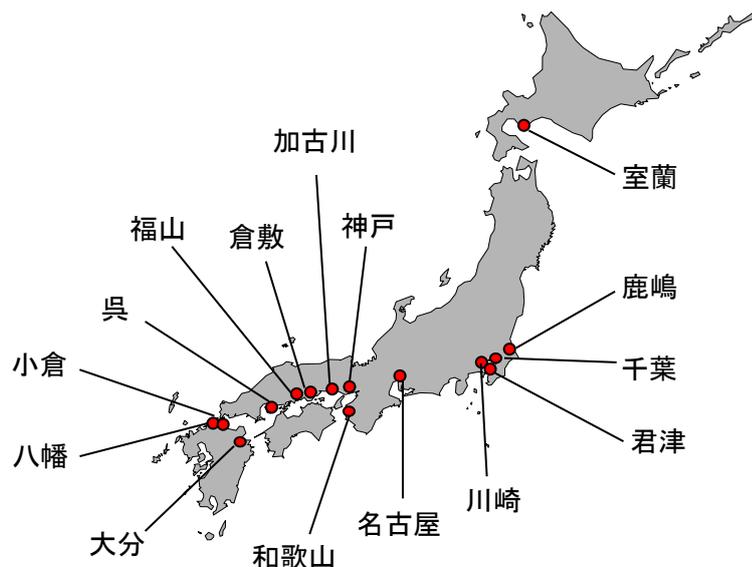
陸上輸送：製造所（製鉄所）周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

海上輸送：全国

海上輸送＋陸上輸送：全国の港周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

2) 製造所（製鉄所）の立地場所

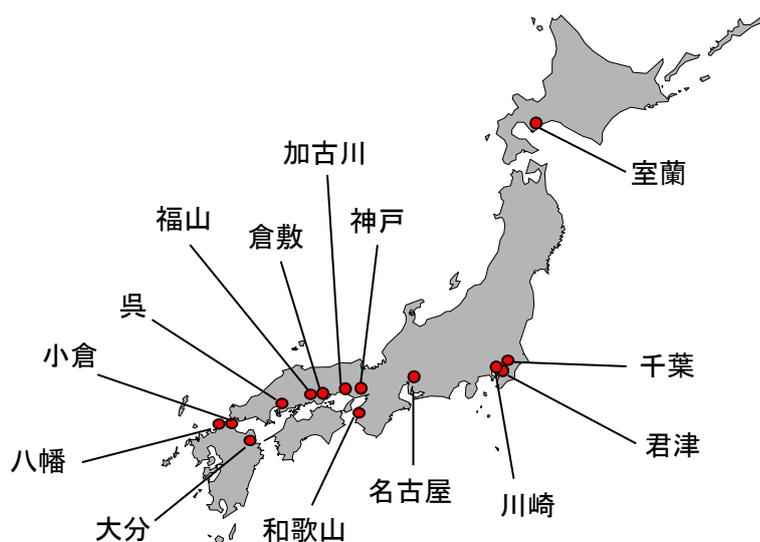
① 土工用水砕スラグ



出典) 港湾工事推奨用リサイクル製品便覧（平成 25 年度版）（リサイクルポータル推進協議会）より作成

図 3.7.5 土工用水砕スラグ製造所（製鉄所）の立地場所

② コンクリート用細骨材



出典) 港湾工事推奨用リサイクル製品便覧（平成 25 年度版）（リサイクルポータル推進協議会）より作成

図 3.7.6 コンクリート用細骨材製造所（製鉄所）の立地場所

③ コンクリート用粗骨材



出典) 港湾工事推奨用リサイクル製品便覧 (平成 25 年度版) (リサイクルポータル推進協議会) より作成

図 3.7.7 コンクリート用粗骨材製造所 (製鉄所) の立地場所

④ 高炉スラグ微粉末

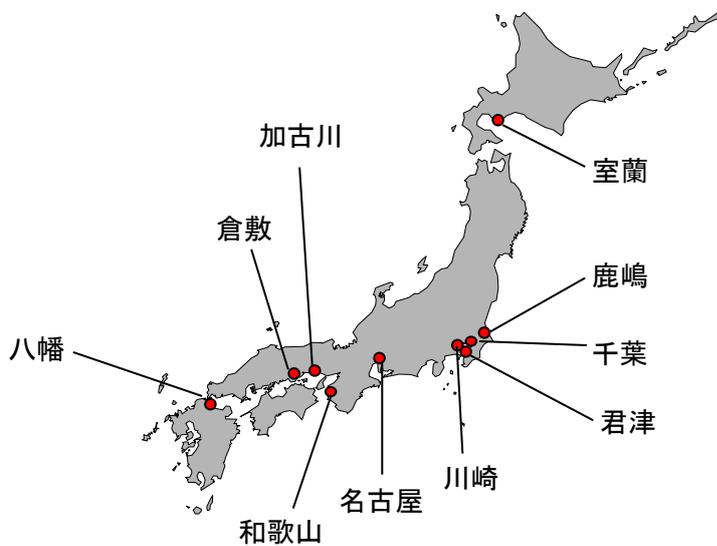


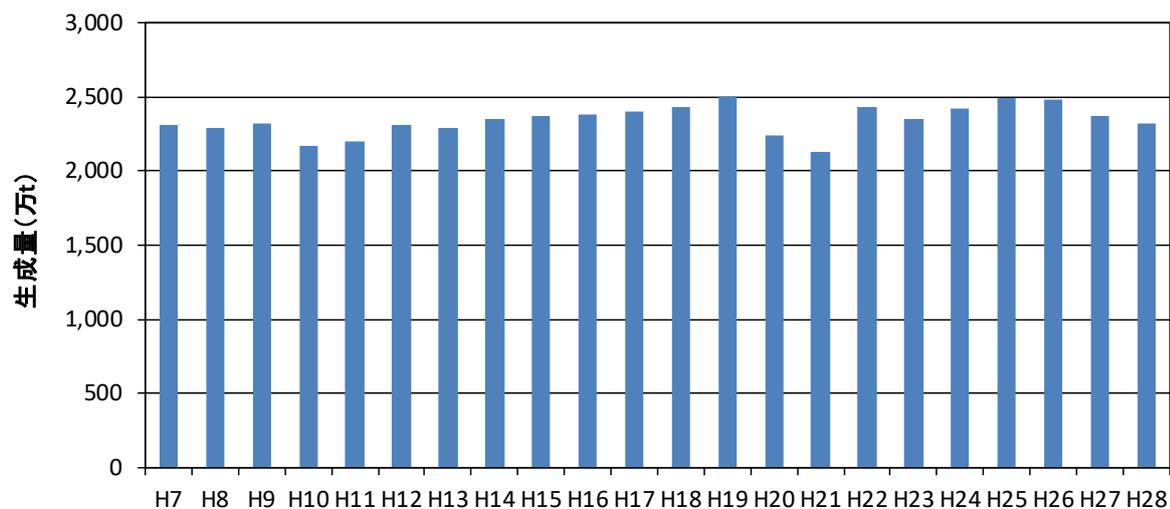
図 3.7.8 高炉スラグ微粉末工場の立地場所

3) 生産量（平成 25 年度実績）

- ①土工用水砕スラグ：29 万 t/月
- ②コンクリート用細骨材：18 万 t/月
- ③コンクリート用粗骨材：2 万 t/月
- ④高炉スラグ微粉末：35 万 t/月

※生産量：乾重量または湿重量ベース（事業所が用途毎に選択）

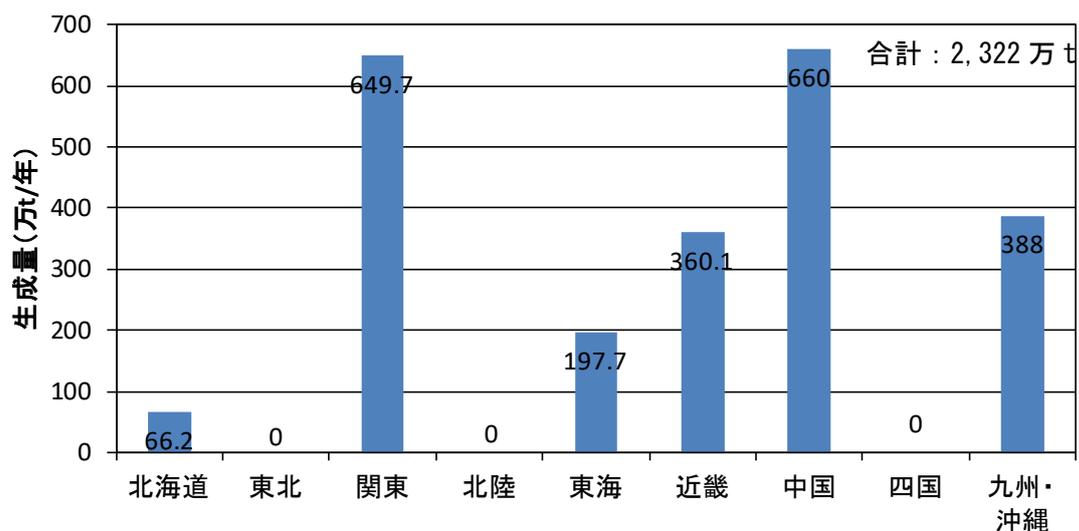
4) 生産量の推移



出典）鉄鋼スラグ統計年報（平成 28 年度実績）（平成 29 年 7 月、鉄鋼スラグ協会）より作成

※生成量：乾重量ベース。土工用水砕スラグ、コンクリート用細・粗骨材、高炉スラグ微粉末以外の用途を含む。

図 3.7.9 生成量の推移（高炉スラグ）

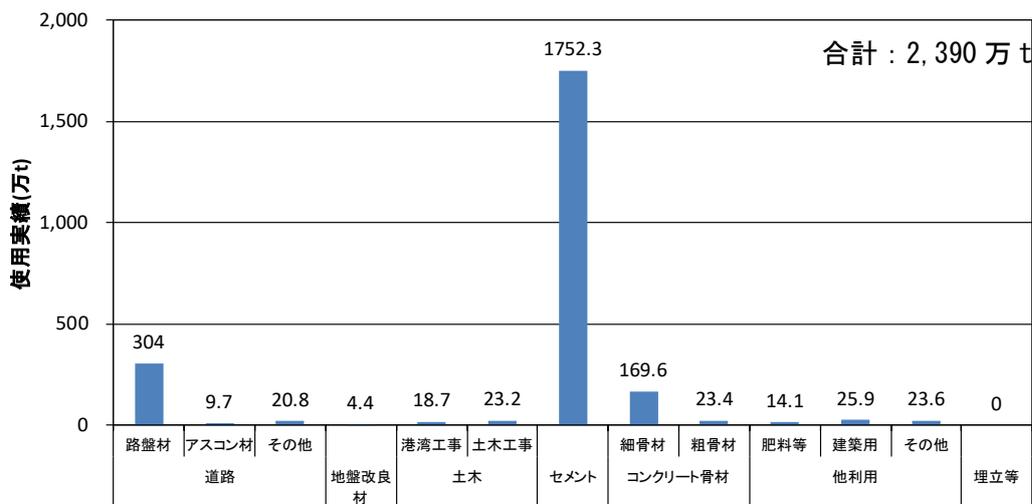


出典）鉄鋼スラグ統計年報（平成 28 年度実績）（平成 29 年 7 月、鉄鋼スラグ協会）より作成

※生成量：乾重量ベース。土工用水砕スラグ、コンクリート用細・粗骨材、高炉スラグ微粉末以外の用途を含む。

図 3.7.10 地方別生成量（平成 28 年度実績、高炉スラグ）

5) 用途別使用量



出典) 鉄鋼スラグ統計年報(平成28年度実績)(平成29年7月、鉄鋼スラグ協会)より作成

図 3.7.11 用途別使用量(平成28年度実績、高炉スラグ)

3.7.2 品質

コンクリート用スラグ骨材(高炉スラグ粗骨材、高炉スラグ細骨材)、高炉スラグ微粉末は、JIS規格が規定されている。

土工用水砕スラグは、「港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル(平成19年2月、沿岸技術研究センター)」に品質が記載されている。

(解説)

(1) コンクリート用スラグ骨材

コンクリート用高炉スラグ骨材には、高炉スラグ粗骨材と高炉スラグ細骨材がある。前者が熔融状態の高炉スラグを徐冷することにより製造される高炉徐冷スラグを、後者は熔融状態の高炉スラグを急冷することにより製造される高炉水砕スラグを原料としている。

両者ともコンクリートに有害となる塩化物、ごみ、どろ、粘土塊、有機不純物を含んでおらず、化学的に安定しアルカリシリカ反応を生ずる恐れのない骨材である。

1) 物理・力学的性質

高炉水砕スラグは熔融状態の高炉スラグを高圧の水で急冷して製造されるため、ガラス質の砂状であり、形状も凹凸が大きく角張った形状をしている。このため、高炉スラグ細骨材は、高炉水砕スラグを原料として軽破碎により粒形を整え、更に粒度調整などの加工を施し製造される。

高炉スラグ粗骨材は高炉徐冷スラグを破碎して粒度を調整し製造される。

外観は、表面は粗面、気孔があり、角張っている。粒子密度は天然砕石よりもやや小さく(絶乾密度: 2.2~2.6g/cm³)、空隙を多く含み吸水率はやや高い。高炉徐冷スラグは、化学成分については事業所間で大きな違いはないが、熔融状態のスラグを冷却ヤードなどに放流する際の層厚や散水などによる冷却方法が異なるため、事業所間で密度や吸水率などの物理特性はやや異なる。

コンクリート用高炉スラグ骨材 JIS A 5011-1 では、高炉スラグ粗骨材・細骨材の種類・品質を次のように規定している。

① 粒度による区分

高炉スラグ粗骨材は粒度により、表 3.7.2 に示す 6 種類に区分される。これらのうち一般的に流通しているのは、高炉スラグ粗骨材 2005 である。

表 3.7.2 粒度による区分

区分	粒の大きさの範囲 mm	記号
高炉スラグ粗骨材 4005	40～ 5	BFG40-5
高炉スラグ粗骨材 4020	40～20	BFG40-20
高炉スラグ粗骨材 2505	25～ 5	BFG25-5
高炉スラグ粗骨材 2005	20～ 5	BFG20-5
高炉スラグ粗骨材 2015	20～15	BFG20-15
高炉スラグ粗骨材 1505	15～ 5	BFG15-5

出典) JIS A 5011-1 「コンクリート用スラグ骨材—第 1 部：高炉スラグ骨材」

高炉スラグ細骨材は粒度により、表 3.7.3 に示す 4 種類に区分される。

表 3.7.3 粒度による区分

区分	粒の大きさの範囲 mm	記号
5 mm高炉スラグ細骨材	5 以下	BFS5
2.5mm高炉スラグ細骨材	2.5以下	BFS2.5
1.2mm高炉スラグ細骨材	1.2以下	BFS1.2
5~0.3mm高炉スラグ細骨材	5~0.3	BFS5-0.3

出典) JIS A 5011-1 「コンクリート用スラグ骨材—第 1 部：高炉スラグ骨材」

② 化学成分及び物理的性質

高炉スラグ粗骨材の化学成分及び物理的性質の規格を表 3.7.4 に示す。

表 3.7.4 化学成分及び物理的性質の規格

項目		高炉スラグ粗骨材	
		L	N
化学成分	酸化カルシウム (CaO として) %	45.0 以下	
	全硫黄 (S として) %	2.0 以下	
	三酸化硫黄 (SO ₃ として) %	0.5 以下	
	全鉄 (FeO として) %	3.0 以下	
絶乾密度	g/cm ³	2.2 以上	2.4 以上
吸水率	%	6.0 以下	4.0 以下
単位容積質量	kg/L	1.25 以上	1.35 以上

出典) JIS A 5011-1 「コンクリート用スラグ骨材—第 1 部：高炉スラグ骨材」

高炉スラグ細骨材の化学成分及び物理的性質の規格を表 3.7.5 に示す。

表 3.7.5 化学成分及び物理的性質の規格

項目		高炉スラグ細骨材
化学成分	酸化カルシウム (CaO として) %	45.0 以下
	全硫黄 (S として) %	2.0 以下
	三酸化硫黄 (SO ₃ として) %	0.5 以下
	全鉄 (FeO として) %	3.0 以下
絶乾密度	g/cm ³	2.5 以上
吸水率	%	3.0 以下
単位容積質量	kg/L	1.45 以上

出典) JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材—第1部：高炉スラグ骨材」

③ 粒度

高炉スラグ粗骨材の粒度を表 3.7.6 に示す。

表 3.7.6 高炉スラグ粗骨材の粒度

単位 %

区分	ふるいを通るものの質量分率						
	ふるいの呼び寸法 ^{a)} mm						
	50	40	25	20	15	10	5
高炉スラグ粗骨材 4005	100	95~100	—	35~ 70	—	10~30	0~ 5
高炉スラグ粗骨材 4020	100	90~100	20~ 55	0~ 15	—	0~ 5	—
高炉スラグ粗骨材 2505	—	100	95~100	—	30~ 70	—	0~10
高炉スラグ粗骨材 2005	—	—	100	90~100	—	20~55	0~10
高炉スラグ粗骨材 2015	—	—	100	90~100	—	0~10	0~ 5
高炉スラグ粗骨材 1505	—	—	—	100	90~100	40~70	0~15

注^{a)} ふるいの呼び寸法は、それぞれ JIS Z 8801-1 に規定するふるいの公称目開き 53 mm, 37.5 mm, 26.5 mm, 19 mm, 16 mm, 9.5 mm 及び 4.75 mm である。

出典) JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材—第1部：高炉スラグ骨材」

また、粗粒率¹⁾と微粒分量については、次のように規定されている。

粗粒率：製造業者と購入者が協議によって定めた粗粒率に対して±0.30 の範囲のものでなければならない。

微粒分量：1)微粒分量は、2)に定める許容差の範囲内でばらつきが生じても 5.0%を超えないように、製造業者と購入者が協議によって定める。

2)微粒分量の許容差は、1)で定めた協議値に対して±1.0%とする。

¹⁾粗粒率：80 mm, 40 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2.5 mm, 1.2 mm, 0.6 mm, 0.3 mm, 及び 0.15 mm の網ふるいの一組を用いて、ふるい分けを行った場合、各ふるいを通らない全部の試料の百分率の和を 100 で除した値であり、無次元で表される

高炉スラグ細骨材の粒度を表 3.7.7 に示す。

表 3.7.7 高炉スラグ細骨材の粒度

単位 %

区分	ふるいを通るものの質量分率						
	ふるいの呼び寸法 ^{a)} mm						
	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
5 mm 高炉スラグ細骨材	100	90~100	80~100	50~ 90	25~65	10~35	2~15
2.5 mm 高炉スラグ細骨材	100	95~100	85~100	60~ 95	30~70	10~45	2~20
1.2 mm 高炉スラグ細骨材	—	100	95~100	80~100	35~80	15~50	2~20
5~0.3 mm 高炉スラグ細骨材	100	95~100	65~100	10~ 70	0~40	0~15	0~10
注^{a)} ふるいの呼び寸法は、それぞれ JIS Z 8801-1 に規定するふるいの公称目開き 9.5 mm, 4.75 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 600 μ m, 300 μ m 及び 150 μ m である。							

出典) JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材—第1部：高炉スラグ骨材」

また粗粒率と微粒分量については、次のように規定されている。

粗粒率：製造業者と購入者が協議によって定めた粗粒率に対して、±0.20 の範囲のものでなければならない。

微粒分量：1) 微粒分量は、2) に定める許容差の範囲内であればつきが生じても 7.0% を超えないように、製造業者と購入者が協議によって定める。

2) 微粒分量の許容差は、1) で定めた協議値に対して±2.0% とする。

④ 高気温時における貯蔵の安定性

高炉スラグ細骨材の原料である高炉水砕スラグには水硬性があり、高気温時に貯蔵中に固結する場合がある。このため、高気温時の貯蔵による安定性は、受渡当事者間の協定によって確認すると定められている。最近では、優れた固結防止剤が開発され、貯蔵中の固結トラブルは軽減されている。

2) 化学的性質

① 環境安全品質基準

JIS A 5011-1 では、高炉スラグ骨材の環境安全品質基準として、骨材を用いるコンクリート構造物などの用途に応じて、次の 2 種類の基準を規定している。これら環境安全品質に係る分析試験の結果は、製造事業者が発行する試験成績表により確認することができる。

環境安全品質基準（一般用途）を表 3.7.8 に示す。基準値には土壤汚染対策法の溶出量基準（土壤環境基準と同じ）、含有量基準と同じ数値が適用されている。

表 3.7.8 環境安全品質基準（一般用途）

項目	溶出量 mg/L	含有量 ^{a)} mg/kg
カドミウム	0.01 以下※	150 以下
鉛	0.01 以下	150 以下
六価クロム	0.05 以下	250 以下
ひ素	0.01 以下	150 以下
水銀	0.0005 以下	15 以下
セレン	0.01 以下	150 以下
ふっ素	0.8 以下	4000 以下
ほう素	1 以下	4000 以下
注 ^{a)} ここでいう含有量とは、同語が一般的に意味する“全含有量”とは異なることに注意を要する。		

※カドミウムについては、平成 23 年 10 月より地下水の水質汚濁に係る環境基準が 0.003mg/L 以下に改正されたため、留意が必要である。

出典) JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材-第1部：高炉スラグ骨材」

環境安全品質基準（港湾用途）を表 3.7.9 に示す。なお、港湾用途に使用される場合であっても再利用を予定する場合は、一般用途として取り扱うこととされている。

表 3.7.9 環境安全品質基準（港湾用途）

項目	溶出量 mg/L
カドミウム	0.03 以下※
鉛	0.03 以下
六価クロム	0.15 以下
ひ素	0.03 以下
水銀	0.0015 以下
セレン	0.03 以下
ふっ素	15 以下
ほう素	20 以下

※カドミウムについては、平成 23 年 10 月より公共用水域の水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準が 0.003mg/L 以下に改正されたため、留意が必要である。

出典) JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材-第1部：高炉スラグ骨材」

表 3.7.10 に国内各社の高炉スラグ細骨材の化学物質の溶出量及び含有量の測定実績を示す。すべての項目が一般用途に適用される基準を満足しており、有害物質による環境への影響はないものと考えて良い。

表 3.7.10 高炉スラグ細骨材の化学物質の溶出量及び含有量

(平成 25 年 3 月～平成 26 年 2 月の鐵鋼スラグ協会会員会社試験結果)

項目	溶出量 (mg/L)			含有量 (mg/kg)		
	基準値 (一般用途)	試験結果の例		基準値 (一般用途)	試験結果の例	
		試料数	範囲 ^{a)}		試料数	範囲 ^{a)}
カドミウム	0.01 以下	24	<0.001	150 以下	23	<15
鉛	0.01 以下	49	<0.005	150 以下	48	<15
六価クロム	0.05 以下	49	<0.02	250 以下	48	<25
ひ素	0.01 以下	24	<0.005	150 以下	23	<15
水銀	0.0005 以下	24	<0.0005	15 以下	23	<1
セレン	0.01 以下	488	~0.002	150 以下	487	<15
ふっ素	0.8 以下	488	~0.8	4 000 以下	487	~1 400
ほう素	1 以下	488	<0.2	4 000 以下	487	<400

注^{a)} <は不検出（定量限界未満）、~は不検出のものがあることを示す。溶出量の分析方法は **JIS K 0058-1** に、含有量の分析方法は、**JIS K 0058-2** による。

(2) 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、前項の高炉水砕スラグを、乾燥及び粉砕して製造される。従来、わが国では、高炉スラグ微粉末は、高炉セメントの混合材に用いられてきたが、アメリカ・カナダ・イギリス・南アフリカ・台湾・韓国・シンガポール等では、コンクリート工場ではコンクリート用混和材としての利用が多い。

わが国においても高炉スラグ微粉末の使用については、土木学会では、昭和 61 年に土木学会基準「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格（案）」を制定し、昭和 63 年には「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（案）」を定め、JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）、学協会・官公庁等の仕様書に混和材料として規定されている。

高炉スラグ微粉末の品質は、JIS A 6206（コンクリート用高炉スラグ微粉末）に規定されている。

表 3.7.11 に品質規格値を示す。

表 3.7.11 コンクリート用高炉スラグ微粉末の品質

種類		品質規格			
		高炉スラグ 微粉末 3000	高炉スラグ 微粉末 4000	高炉スラグ 微粉末 6000	高炉スラグ 微粉末 8000
品質					
密度	g/cm ³	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比表面積	cm ² /g	2 750 以上	3 500 以上	5 000 以上	7 000 以上
		3 500 未満	5 000 未満	7 000 未満	10 000 未満
活性度 指数 %	材齢 7 日	—	55 以上	75 以上	95 以上
	材齢 28 日	60 以上	75 以上	95 以上	105 以上
	材齢 91 日	80 以上	95 以上	—	—
フロー値比		95 以上	95 以上	90 以上	85 以上
酸化マグネシウム	%	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下
三酸化硫黄	%	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下
強熱減量	%	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下
塩化物イオン	%	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下

出典) JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」

注 1) 塩基度 : 1.60 以上 塩基度は原料の高炉水砕スラグの化学成分から算出する。

$$\text{塩基度} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$$

2) 活性度指数の高炉スラグ微粉末置換率は 50% である。

(3) 土工用水砕スラグ

表 3.7.12 に土工用水砕スラグの品質特性を示す。水砕スラグは、水硬性など一部の性質を除けば一般の砂と同じ性状であるため、港湾や空港の工事に使用する場合、運搬、貯蔵、投入、敷均し、締固めなどにおいて、天然砂と同様に取扱える。ただし、水砕スラグは針状のものも含まれているため、取扱い時には手袋・防護メガネなどの着用が好ましい。

表 3.7.12 土工用水砕スラグの性質と品質特性^{1),2)}

項目		品質の範囲	特性値/標準値		
物理的性質	粒度分布	4.75 mm以下 細粒分(0.075mm以下)1~2%程度			
	土粒子密度(g/cm ³)	2.6~2.9	2.81		
	単位体積重量 (kN/m ³)	乾燥状態	9~14	—	
		湿潤状態	—	14.5	
		飽和状態	裏込め、埋立て等 サンドコンパクションパイル	17.5	
	18.5				
力学的性質	締固め特性	含水比にほとんど影響されない			
	透水性 (cm/s)	未固結の場合		$1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^{-2}$	
		固結の場合	裏込め、埋立て等	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$	
			サンドコンパクションパイル	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$	
	沈下特性	経時的沈下は無視できる			
	せん断特性	未固結の場合 $\phi_0(^{\circ})$	裏込め、埋立て等	37~38 (埋立深さ 20m 以下想定)	
			サンドコンパクションパイル	38 以上 35	
		固結の場合 $\phi_0(^{\circ})$	裏込め、埋立て等	未固結の場合 (37~38) +5 程度	
			サンドコンパクションパイル	45 以上	35
	固結の場合の粘着力 c_d (kN/m ²)	25 以上		原則未考慮	
液状化特性	固結した場合は液状化しない				
環境安全品質	溶出水の pH	アルカリ性を呈するが、水砕スラグ投入時における周辺海域の pH 上昇はほとんどない			
	有害物質の溶出	水底土砂判定基準値以下			

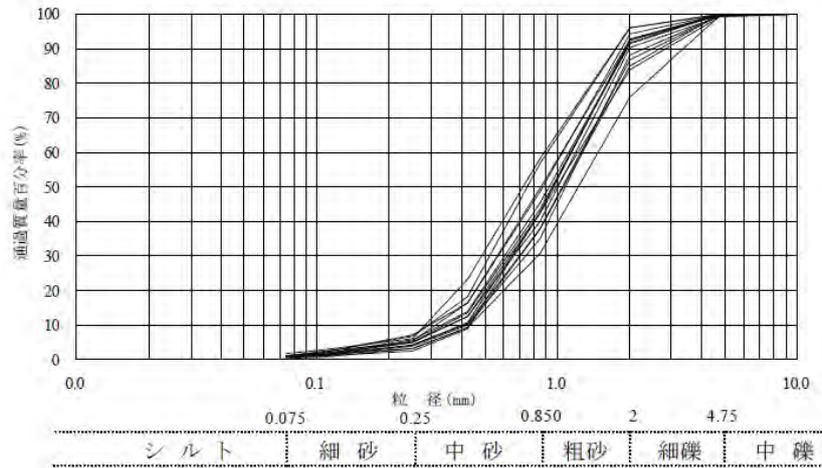
出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル (財)沿岸技術研究センター)

1) 物理・力学的性質

① 粒度

水砕スラグの粒度は、図 3.7.12 の範囲内にある。

水砕スラグの標準的な粒径は 4.75mm 以下であり、細粒分(0.075mm 以下)は 1~2%程度である。また、均等係数 U_c は概ね 2~4 であり、“分級された砂”または“分級された礫まじり砂”に分類される。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.12 土工用水砕スラグの粒度範囲

② 土粒子密度

水砕スラグの土粒子密度は 2.6~2.9g/cm³ である。

水砕スラグの土粒子密度は、製鉄所における溶銑温度の変化などにより、平成元年度当時と比べてやや増加している。全国の 14 製鉄所で製造された水砕スラグについて、JIS A 1202:2009 「土粒子の密度試験方法」によって土粒子密度を測定した結果、最小値は 2.63g/cm³、最大値は 2.82g/cm³、平均値は 2.73g/cm³ であった。

また、現地で採取した水砕スラグでは最小値は 2.65g/cm³、最大値は 2.88g/cm³、平均値は 2.81g/cm³ であった。水砕スラグの土粒子密度のばらつきは、主に製造条件(溶融スラグ温度、水温及び水压等)に起因しているため、同じ製鉄所内で製造された水砕スラグでのばらつきはこれよりも小さく、最大値と最小値の差は 0.1g/cm³ 以内であった。

表 3.7.13 土工用水砕スラグの土粒子密度

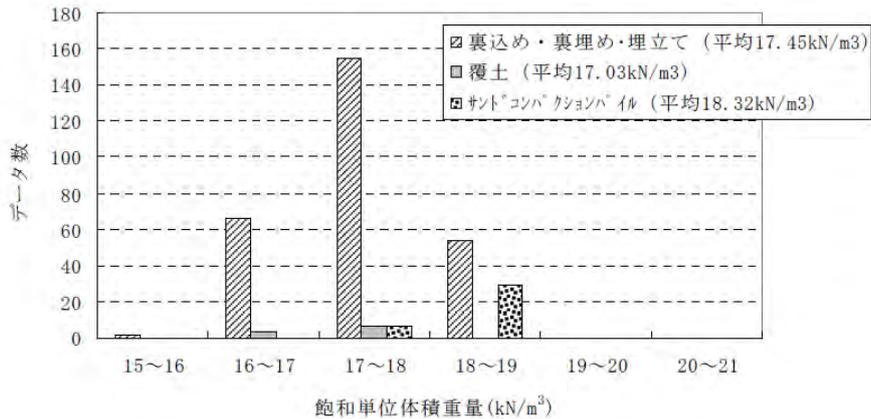
試料の採取場所		製鉄所	現地
土粒子 密度 (g/cm ³)	最小値	2.63	2.65
	最大値	2.82	2.88
	平均値	2.73	2.81

出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

③ 単位体積重量

裏込め、裏埋め、埋立て、覆土などに使用された水砕スラグの単位体積重量は、乾燥状態で 9～14kN/m³ であり、飽和状態で 16～19kN/m³ である。

図 3.7.13 に実施工現場より採取した水砕スラグの飽和単位体積重量を示す。裏込め、埋立てと覆土とは単位体積重量は同程度であるが、サンドコンパクションパイルに使用した場合は少し単位体積重量が大きくなることが確認されている。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.13 土工用水砕スラグの飽和単位体積重量のヒストグラム(用途別)

④ 水硬性

水砕スラグは水硬性を有し、時間の経過に伴い水和反応が進み固結する。その固結速度及び固結強度は、粒子の細粒化やアルカリ刺激剤の添加などにより変化させることが可能である。¹⁾⁻⁵⁾

・ガラス構造の化学的性質

水砕スラグは多量の水によって急冷されることで、結晶を生成する時間的余裕がないまま固結するためガラス構造となる。結晶体では原子が規則正しく配列しているが、ガラス構造では不規則な網目構造となり、結晶状態のような対照性及び周期性を有していない。そのため、ガラス構造は反応性が高く、水和反応によって経時的に固結する性質を有する。水砕スラグはセメントよりも固結強度(一軸圧縮強さ、粘着力)や固結速度が緩やかであるが、粒子の細粒化やアルカリ刺激剤の添加などにより固結の促進及び固結強度の増加が可能である。

・固結のメカニズム¹⁾

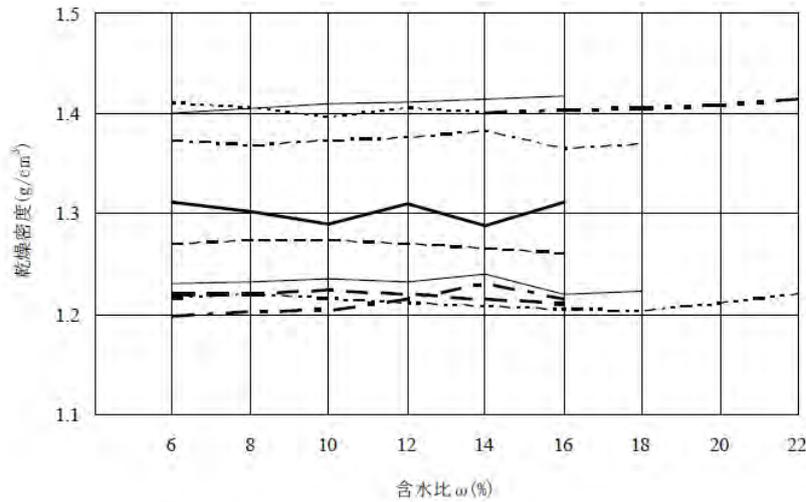
水砕スラグの固結は、以下の段階で進行する。

- I. 水と反応して、Ca、SiO₂、Al などがイオンとして間隙水中に溶出し、OH⁻(水酸基イオン)が生成する。
- II. 間隙水中のイオン濃度が上昇して水和物の飽和濃度に達し C-S-H(珪酸カルシウム水和物)や C-A-H(カルシウム-アルミネート水和物)などの水和物が粒子表面に析出する。
- III. 粒子表面に析出した水和物が、粒子の接触点で粒子同士を結合して固結する。

⑤ 締固め特性

水砕スラグの締固め度は、締固め時の含水比にほとんど影響されないことが確認されている。

図 3.7.14 は、全国の 10 製鉄所で製造された水砕スラグについて、JIS A 1210「突固めによる上の締固め試験」(ランマー質量 2.5kg、モールド内径 10cm、突固め回数 3、1 層当りの突固め回数 25/層、試料の準備及び使用方法:湿潤法及び非繰返し法)によって求められた含水比と乾燥密度との関係を示している。水砕スラグの違いによって乾燥密度には幅があるが、いずれの水砕スラグも最適含水比を見いだすことは困難であり、乾燥密度は含水比の影響を受けずほぼ一定値を示している。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.14 水砕スラグの突固めによる締固め試験結果

⑥ せん断強度特性

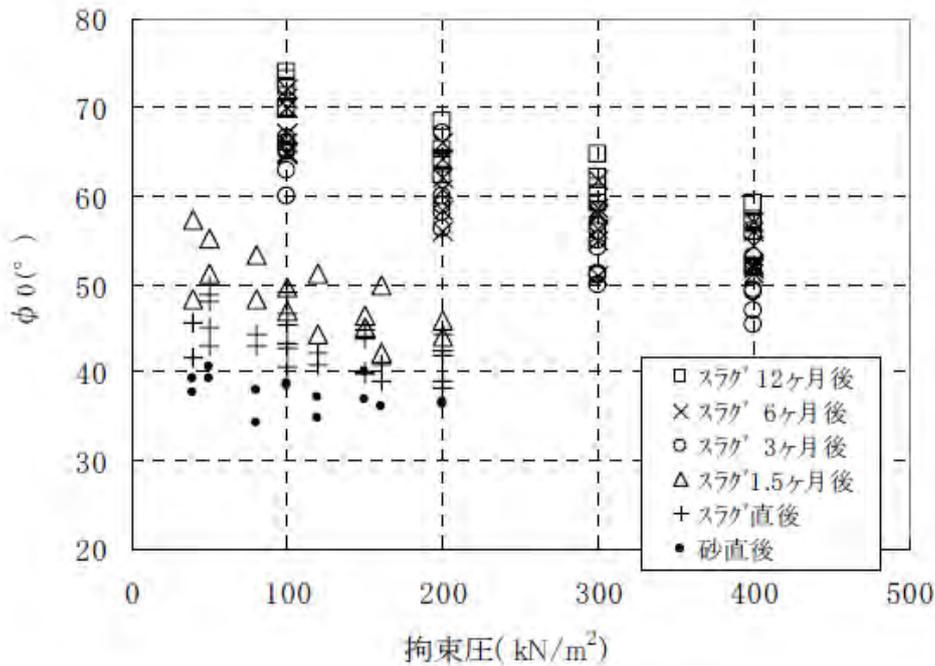
水砕スラグのせん断強度は、締固め状況と養生期間にて異なることが確認されている。

水砕スラグは、セメント改良上のように数日間で固結するわけではないが、長期間経過すると水和して固結する。固結に至るまでの期間にはばらつきがあるが、通常は施工後 2~3 年以上経過すると全体的に固結する。

また、サンドコンパクションパイプに適用された水砕スラグは、施工時に強く締固めるため固結し易く、非常に強固なものになる。図 3.7.15 に博多港での測定結果を示すが、せん断抵抗角 ϕ_0 は打設直後では 200kN/m² の拘束圧の条件で 38° であるが、経時的に増加し打設 3 ヶ月後以降では拘束圧が 100kN/m² の条件で 60°、400kN/m² の拘束圧の条件でも 45° 以上を示している。なお、ここでのせん断抵抗角 ϕ_0 は、最大強度時の ϕ_0 を求めたものであり、残留強度時のせん断抵抗角 ϕ_{d0res} とは異なることに注意する必要がある。

しかし、固結強度についての調査結果は少なく、また、沈下制御の観点からは固結の効果を無視することは安全側の仮定であるので、サンドコンパクションパイプに用いられた水砕スラグに関しては、現時点では従来通り ϕ 材として扱うものとしている。ただし、この場合沈下量が予測より小さくなることも考えられるので注意が必要である。⁶⁾⁷⁾

各用途のせん断抵抗角 ϕ 、粘着力 c は表 3.7.12 に示す。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.15 サンドコンパクションパイルに用いた水砕スラグのφ₀の経時変化

⑦ 透水性

水砕スラグの透水係数は、概ね表 3.7.14 の範囲である。

水砕スラグは細粒分が少ないため未固結状態では高い透水性を有するが、固結に伴い透水性は低下する傾向があるため、未固結状態と固結状態とで透水係数は区別されている。

特にサンドコンパクションパイルに適用された水砕スラグの場合、裏込め等に用いた場合よりも固結に伴う透水性の低下が大きく、博多港で行われた試験施工結果によると、打設直後には $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ であった透水係数が、打設 6 ヶ月後には $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ にまで低下していた。

表 3.7.14 水砕スラグの透水係数

固結状態	用途	
	裏込め, 埋立て等	サンドコンパクションパイル
未固結	$1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 注)	
固結	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

注)未固結状態でも固結途中のものは 10^{-3}cm/s のオーダーに低下する場合がある

出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

2) 化学的性質

①pH

水砕スラグの溶出水はアルカリ性を呈するが、アルカリ成分の初期溶出速度が小さいことと、海水成分による中和作用、緩衝作用及び海水による希釈効果により pH が低下するため、水砕スラグ投入時における周辺海域の pH の上昇はほとんどない。

水砕スラグの固結特性あるいは長期の固結に伴うせん断強度特性、透水性に関する研究調査事例を巻末の参考文献 10)～35)に示す。

② 環境安全品質

浚渫土砂については、海洋汚染防止法において、港湾・空港等の埋立工事に利用する場合の有害物質の基準として水底土砂判定基準が規定されている。この基準による水砕スラグの溶出試験結果を表 3.7.15 に示すが、溶出量はすべて基準値以下または定量限界以下である。

なお、利用の際には、実際に利用する材料が利用先に適用される基準を満足することを確認する必要がある。環境安全性の確保の考え方については、「1.4.2 環境安全の考え方」を参照のこと。

表 3.7.15 水砕スラグの溶出試験結果(海洋汚染防止法 水底土砂判定基準)

試験項目	単位	計量値	判定基準	定量限界	備考
アルキル水銀化合物	mg/l	不検出	検出されないこと	0.0005	・検定方法 海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行令第5条第1項に規定する埋立場所等に排出しようとする廃棄物に含まれる金属等の検定方法(昭48環告14)による。 ・判定基準 海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行令第5条第1項に規定する埋立場所等に排出しようとする金属などを含む廃棄物に係る判定基準を定める総理府令(昭48総令6)による ・不検出とは、定量限界を下回ること
水銀又はその化合物	mg/l	不検出	0.005 以下	0.0005	
カドミウム又はその化合物	mg/l	不検出	0.1 以下	0.001	
鉛又はその化合物	mg/l	不検出	0.1 以下	0.005	
有機りん又はその化合物	mg/l	不検出	1 以下	0.1	
六価クロム化合物	mg/l	不検出	0.5 以下	0.4	
砒素又はその化合物	mg/l	不検出	0.1 以下	0.005	
シアン化合物	mg/l	不検出	1 以下	0.1	
PCB	mg/l	不検出	0.003 以下	0.0005	
銅又はその化合物	mg/l	不検出	3 以下	0.005	
亜鉛又はその化合物	mg/l	不検出	5 以下	0.01	
ふっ化物	mg/l	0.26	15 以下	0.1	
トリクロロエチレン	mg/l	不検出	0.3 以下	0.002	
テトラクロロエチレン	mg/l	不検出	0.1 以下	0.0005	
ベリリウム又はその化合物	mg/l	不検出	2.5 以下	0.01	
クロム又はその化合物	mg/l	不検出	2 以下	0.04	
ニッケル又はその化合物	mg/l	不検出	1.2 以下	0.01	
バナジウム又はその化合物	mg/l	不検出	1.5 以下	0.1	
有機塩素化合物	mg/kg	不検出	40 以下	4	
ジクロロメタン	mg/l	不検出	0.2 以下	0.002	
四塩化炭素	mg/l	不検出	0.02 以下	0.0002	
1,2-ジクロロエタン	mg/l	不検出	0.04 以下	0.0004	
1,1-ジクロロエチレン	mg/l	不検出	0.2 以下	0.002	
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/l	不検出	0.4 以下	0.004	
1,1,1-トリクロロエタン	mg/l	不検出	3 以下	0.0005	
1,1,2-トリクロロエタン	mg/l	不検出	0.06 以下	0.0006	
1,3-ジクロロプロペン	mg/l	不検出	0.02 以下	0.0002	
チウラム	mg/l	不検出	0.06 以下	0.0005	
シマジン	mg/l	不検出	0.03 以下	0.0003	
チオペンカルブ	mg/l	不検出	0.2 以下	0.001	
ベンゼン	mg/l	不検出	0.1 以下	0.001	
セレン又はその化合物	mg/l	不検出	0.1 以下	0.002	
ダイオキシン類	pg-TEQ/l	0.001	10 以下	—	

出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財) 沿岸技術研究センター)

【参考文献】

- 1) 大門正樹、宋宗澤、西田明生、山口修、金昌殷：高炉水砕スラグの水和反応の液相分析による検討、石膏と石灰、No. 176、pp. 3-8、昭和 57 年
- 2) 青木茂樹、岡昭仁、荒井康夫：高炉水砕スラグの水和におよぼす刺激剤の作用、石膏と石灰、No. 181、pp. 22-28、昭和 57 年
- 3) 徳光直樹、石井誠人：高炉スラグ微粉末の水和反応、秋田高専研究紀要、No. 35、pp. 71-75、平成 12 年
- 4) 徳光直樹、嘉成明子、仲山智佳子：高炉スラグ微粉末の水和反応速度に及ぼす混合剤の影響、秋田高専紀要、No. 36、pp. 44-48、平成 13 年
- 5) 篠崎晴彦、松田博、坂井悦郎、小野幸一郎、鈴木操、中川雅夫：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用、土木学会論文集 C、Vol. 62、No. 4、pp. 858-869、平成 18 年
- 6) (社)地盤工学会：高炉水砕スラグ地盤工学的利用促進に関する調査研究委員会報告書、pp. 61-96、平成 22 年
- 7) 水野健太、土田孝：高炉水砕スラグを用いた低置換率 SCP 改良地盤の強度・変形特性、地盤工学ジャーナル、Vol. 3、No. 3、pp. 187-202、平成 20 年

3.7.3 適用用途

(1) 概要

JIS規格が規定されている高炉スラグをリサイクル材として利用する場合は、当該JIS規格に適合したものを利用するものとする。

JIS規格が規定されていない高炉スラグをリサイクル材として利用する場合は、用途において必要となる要求性能を満たす材料を利用するものとする。

(解説)

品質性能及び利用実績の両面から、高炉スラグ（コンクリート用高炉スラグ骨材、高炉スラグ微粉末、土工用水砕スラグ）を各用途に利用する場合の評価を行った結果をそれぞれ表 3.7.16～表 3.7.18 に示す。なお、利用に当たっての条件（用途、材料特性、加工・改良の必要性等）がある場合、評価の下に括弧書きで示している。

次項以降で、評価が「◎」「○+」「○」の用途について、適用方針、適用の利点及び留意事項等について記述する。

評価が「△」の用途は、利用可能性はあるが、既存資料からは判定できず今後の検討を要するものであり、「今後の検討を要する用途」として現状での技術的知見と今後の課題等について記述する。

表 3.7.16 高炉スラグ（コンクリート用高炉スラグ骨材）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典
		品質性能	利用実績	
① コンクリート用細骨材	◎ (水砕)	A	a	1) 2)
② コンクリート用粗骨材	◎ (徐冷)	A	b	1) 2)
③ 混和材	-	-	-	-
④ パーチカルドレン及びサンドマット材	-	-	-	-
⑤ サンドコンパクションパイル材	-	-	-	-
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	-	-
⑦ 捨石	-	-	-	-
⑧ 中詰材	-	-	-	-
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	-	-
⑩ 裏込材	-	-	-	-
⑪ 裏埋材	-	-	-	-
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	-	-	-	-
⑬ 埋立材	-	-	-	-
⑭ 路床盛土材	-	-	-	-
⑮ 路盤材	-	-	-	-
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	-	-
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	-	-	-	-
⑱ その他	-	-	-	-

出典)
1) JISA5011-1「コンクリート用スラグ骨材-第1部：高炉スラグ骨材」（平成25年3月改正）
2) 高炉スラグ骨材コンクリート施工指針（土木学会、平成5年7月）

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

表 3.7.17 高炉スラグ（高炉スラグ微粉末）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典
		品質性能	利用実績	
① コンクリート用細骨材	-	-	-	-
② コンクリート用粗骨材	-	-	-	-
③ 混和材	◎	A	a	1)
④ パーチカルドレン及びサンドマット材	-	-	-	-
⑤ サンドコンパクションパイル材	-	-	-	-
⑥ 深層混合処理固化材	△	D	b	-
⑦ 捨石	-	-	-	-
⑧ 中詰材	-	-	-	-
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	-	-
⑩ 裏込材	-	-	-	-
⑪ 裏埋材	-	-	-	-
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	-	-	-	-
⑬ 埋立材	-	-	-	-
⑭ 路床盛土材	-	-	-	-
⑮ 路盤材	-	-	-	-
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	-	-
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	-	-	-	-
⑱ その他	-	-	-	-

出典)
1) JISA6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」（平成25年3月改正）

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

表 3.7.18 高炉スラグ（土工用水砕スラグ）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典
		品質性能	利用実績	
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
③ 混和材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
④ パーチカルトレン及びサンドマット材	◎ (サンドマット)	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・地盤改良工事（国交省、管理者）
⑤ サンドコンパクションパイル材	○+ (粘性土であれば高置換)	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。水硬性を有する材料は高置換のSCPにのみ適用が可能であるため、当該材料は高置換のSCPに適用が可能。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・油槽所建設工事（その他機関） ・軽油タンク新設地盤改良工事（その他機関） ・学校移転工事（その他機関）
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
⑧ 中詰材	△	D	●用途として利用可能であるが、課題等も挙げられている。 ・マニュアル等や技術資料等で、用途の検討が行われたことは確認できないが、公共工事において利用実績があり、かつ利用面で汎用性が高いと考えられる。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・土砂処分場内護岸築造工事（国交省） ・防波堤築造工事（国交省） ・ケーソン中詰（国交省）
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
⑩ 裏込材	◎	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。 ・利用用途として護岸岸壁などの裏込めなどが挙げられている。	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・岸壁工事（国交省） ・裏込工事（国交省、管理者、その他）
⑪ 裏埋材	◎	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。 ・利用用途として裏埋めなどが挙げられている。	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・岸壁工事（国交省） ・国際ターミナル整備事業（国交省） ・岸壁耐震等工事（国交省）
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	◎ (盛土材、覆土材)	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。 ・利用用途として軟弱地盤の覆土、軽量盛土などが挙げられている。	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・土工工事（国交省） ・海岸高潮対策工事（管理者） ・空港用地土工工事（国交省） ・臨港道路護岸工事（国交省）
⑬ 埋立材	○+	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。 ・利用用途として埋立てなどが挙げられている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・海上埋立工事（管理者） ・埋立工事（国交省、管理者）
⑭ 路床盛土材	◎	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。 ・利用用途として軽量盛土などが挙げられている。	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・舗装工事（管理者） ・空港エプロン舗装工事（国交省） ・岸壁耐震等工事（国交省）
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
⑯ As舗装骨材、Asファイバー材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	○+ (藻場、浅場、覆砂)	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 土工用水砕スラグについての物理的・力学的特性、動的特性、設計法、施工（品質管理など）に関する事項を記載。 ・港湾工事へ適用した事例として、水砕スラグを用いた浅場や干潟造成試験や、覆砂への適用について記述。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・干潟造成試験（国交省）
⑱ その他	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし。

出典)

1) 港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル（(財)沿岸技術研究センター、平成19年12月）

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

(2) コンクリート用細骨材

高炉水砕スラグをコンクリート用細骨材として用いる場合は、JIS A 5011-1 に適合したものを利用する。その他、「高炉スラグ骨材コンクリート施工指針」（土木学会）、「高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」（日本建築学会）で高炉スラグ細骨材を用いるコンクリート構造物の施工についての標準が示されている。

高炉スラグ細骨材は、コンクリート用細骨材としてこれを単独で用いることもできるが、実際の使用では、山砂などの粒度調整や海砂の塩化物含有量の低減などを目的に、これらの天然産の普通細骨材に高炉スラグ細骨材を混合（以下「高炉スラグ混合細骨材」）して使用されていることが多い。また、普通細骨材と混合して使用することにより、高炉スラグ細骨材を単独で用いる場合に生じる単位水量の増大や、ブリーディング量の増加を避けることができる。

高炉スラグ混合細骨材における高炉スラグ細骨材の混合率は、普通細骨材の粒度分布または塩化物含有量によって変化するが、20～60%の範囲で混合するのが一般的である。

高炉スラグ細骨材の混合率がこの範囲内にある高炉スラグ混合細骨材を使用したコンクリートは、普通骨材を使用したコンクリートとほぼ同等の性質を有していると見なすことができる。高炉スラグ細骨材の混合率が60%を超える場合は、あらかじめ試験を行って、所要の品質を有するコンクリートが得られることを確かめる必要がある。

高炉スラグ細骨材は、ガラス質で潜在水硬性を有するので、気温が高い時期の貯蔵中に粒子間の固結を生じて塊状になる場合がある。現在は固結防止性能の高い薬剤が開発され、この固結によるトラブルは軽減されている。

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの特長としては次が挙げられる。

- 高炉スラグ細骨材自体がセメントのアルカリ刺激により水和反応を生じる性質を持っており、長期にわたり水和反応が継続するため、コンクリートの強度も長期にわたって増加する。

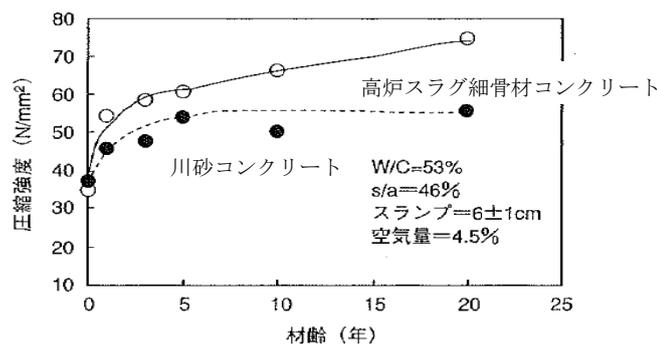
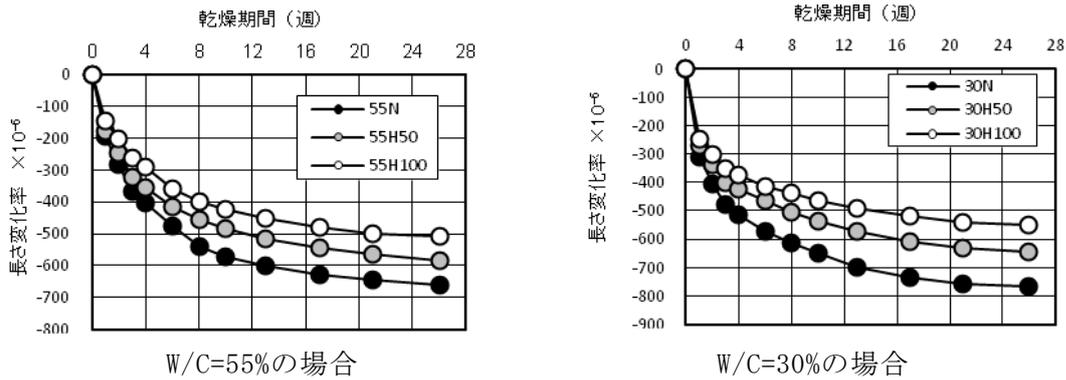


図1 圧縮強度の経時変化

図 3.7.16 圧縮強度の経時変化

- 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、高炉スラグ細骨材の混合率が大きいほど乾燥収縮率が小さくなり、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生の低減に効果がある。

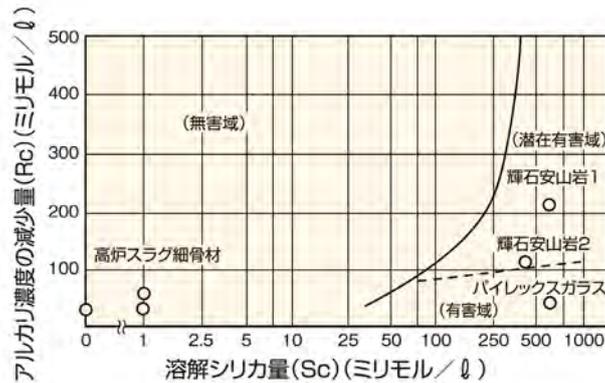


記号説明 (55)H(50): 左から W/C(%), 骨材種類(N:陸砂、H:BFS)、BFS 混合率(%)

出典) 高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針 (一社) 日本建築学会)

図 3.7.17 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮試験結果の一例

○高炉スラグ細骨材は化学的に安定な骨材であり、試験によってアルカリシリカ反応性を確認することなく“無害”な骨材とみなして取り扱うことができる。



出典) 鐵鋼スラグ協会実験データ

図 3.7.18 アルカリシリカ反応の有害判定区分

一方で、高炉スラグ細骨材はガラス質であることから、天然砂や砕砂に比べて保水性が低く、混合率を増加させるとブリーディングが増える傾向にある。これを考慮し、細骨材中の高炉スラグ細骨材の混合率は20~60%とすることが望ましい。高炉スラグ細骨材の混合率が50%程度までであれば、スランプ及び圧縮強度は一般のコンクリートとほぼ同様である。

(3) コンクリート用粗骨材

高炉徐冷スラグをコンクリート用の粗骨材として用いる場合は、JIS A 5011-1 に適合したものを利用する。その他、「高炉スラグ骨材コンクリート施工指針」（土木学会）で高炉スラグを用いるコンクリート構造物の施工についての標準が示されている。

ここでは、高炉徐冷スラグ粗骨材の基本的な品質とこれを用いたコンクリートの特記すべき事項を示し、詳細な事項については、同施工指針等を参考にされたい。

高炉スラグ粗骨材について、JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材—第1部：高炉スラグ骨材」では、表 3.7.19 に示すように、絶乾密度、吸水率及び単位容積質量の大きさにより L 及び N に区分している。区分 N の高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートは、強度発現が良好で耐久的なコンクリートをつくることができる。区分 L の高炉スラグ粗骨材は、耐久性を考慮する必要が無い場合や、設計基準強度が 21N/mm² 未満のコンクリートに使用することができる。高炉スラグ粗骨材を使用する場合は、所要のコンクリートが得られる区分のものが確保できるか確認することが大切である。

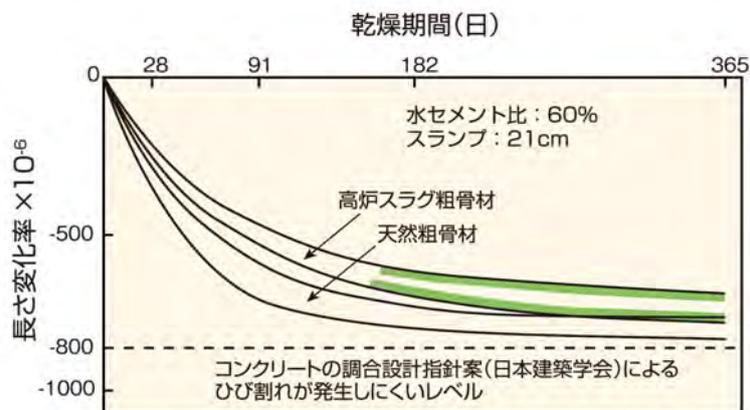
表 3.7.19 高炉スラグ粗骨材の区分

区分	絶乾密度 g/cm ³	吸水率 %	単位容積質量 kg/L
L	2.2以上	6.0以下	1.25以上
N	2.4以上	4.0以下	1.35以上

出典) JISA5011-1「コンクリート用スラグ骨材—第1部：高炉スラグ骨材」

高炉スラグ粗骨材を使用したコンクリートの特長としては次が挙げられる。

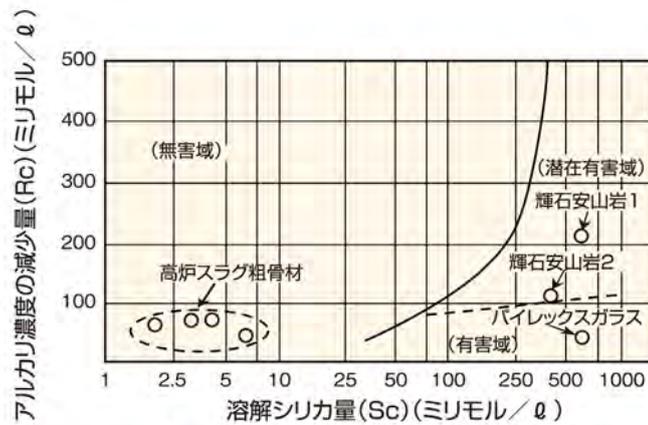
- 高炉スラグ粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮は、碎石等の普通粗骨材を使用したものと比較して低減される。



出典) 高炉スラグ碎石コンクリート施工指針案・同解説（日本建築学会）

図 3.7.19 コンクリートの乾燥収縮

○高炉スラグ粗骨材は溶解シリカ量が少なく、それ自体はアルカリシリカ反応を起こさない。



出典) 鉄鋼スラグ協会実験データ

図 3.7.20 アルカリシリカ反応の有害判定区分

一方で、高炉スラグ粗骨材は通常の砂利や碎石に比べて吸水率が大きい。したがって、高炉スラグ粗骨材を乾燥した状態で使用すると、コンクリートの練混ぜ、運搬あるいは打設中に高炉スラグ粗骨材が吸水することによって、コンクリートの品質が変化することも考えられるので、プレウェッティングによって吸水させておくことが重要である。

このため、貯蔵設備には排水設備の他、スプリンクラーなどの散水設備を設けることが望ましい。

(4) 混和材

高炉スラグ微粉末をコンクリート用混和材に用いる場合は、JIS A 6206 に適合したものを利用する。その他、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」（土木学会）にコンクリート構造物の施工についての標準が示されている。

ここでは、高炉スラグ微粉末の基本的な品質とこれを用いたコンクリートの特記すべき事項を示し、詳細な事項については、同施工指針等を参考にされたい。

高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートは、使用する高炉スラグ微粉末の種類と置換率に応じて、練混ぜ性状、フレッシュコンクリートの性状、水和・発熱性状、強度発現特性などが異なり、使用方法によって多様な性能を発揮することができる。JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」では、表 3.7.11 に示すように、比表面積により 4 種類の種別がある。種別毎の主な用途を表 3.7.20 に、また使用実績例を表 3.7.21 に示す。

次項で述べるように、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは塩化物イオンや酸素の浸透に対する抵抗性に優れる。表 3.7.21 に示す使用実績は、この長所を生かした海洋構造物が多い。表記のとおり、港湾・空港分野における高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの施工実績としては、中部国際空港がある¹⁾。

表 3.7.20 コンクリート用高炉スラグ微粉末の主な用途

種 別	主な用途
高炉スラグ微粉末 3000	低発熱用混和材
高炉スラグ微粉末 4000	最も多く使用される汎用品
高炉スラグ微粉末 6000	高強度・高流動性用混和材・耐酸性
高炉スラグ微粉末 8000	高強度用混和材・耐酸性、グラウト用混和材

表 3.7.21 高炉スラグ微粉末の使用実績例

構造物／製品	高炉スラグ微粉末の種類	セメント種類	スラグ置換率	使用実績
RCセグメント	4000	普通セメント	50%	東京湾横断道路 江戸川外郭放水路 首都高速中央環状新宿線 東京電力東京湾海底ガス管・他
ダム堤体	4000	中庸熱セメント	55%	関西電力長谷ダム
普通 コンクリート	4000	普通セメント	40%	中部国際空港（エプロン舗装・ 建築基礎・連絡橋・他）
高流動 コンクリート	6000	普通セメント	70%	神戸港沈埋函
PCコンクリート 橋梁桁等	6000	早強セメント	50%	国土交通省、NEXCO、他 約250橋梁
各種 コンクリート 製品	4000 6000	普通セメント 早強セメント	20～ 50%	ボックスカルバート、アーチカル バート、L型擁壁、コンクリート矢 板、パイル・ポール、ILB、空洞ブ ロック、C・C・BOX、道路用製品、 各種側溝、ます類・他

高炉スラグ微粉末を使用することによる主な利点は次のとおりである。

- ①水和熱による温度上昇の抑制
- ②アルカリシリカ反応の抑制
- ③硫酸塩や海水に対する化学抵抗性の向上
- ④塩化物イオンや酸素の浸透に対する抵抗性に優れているため、海洋雰囲気等の条件下における鉄筋を保護する性能の向上等の効果が期待される。
- ⑤二酸化炭素負荷の低減が図れる。

以上の“①～④”は、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの物性上の利点である。一方、“⑤”は、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートが温室効果ガス低減となる環境上の利点である。

高炉スラグ微粉末製造時に発生するCO₂量は約40kg/tで、ポルトランドセメントの約760kg/tに比べ著しく小さい²⁾。これらの数値を用いて、単位結合材量350kgのコンクリートについて結合材に起因する二酸化炭素排出量を試算した一例を表3.7.22に示す。

結合材に起因する二酸化炭素排出量は、スラグ置換率とほぼ同程度減少する。

表 3.7.22 高炉スラグ微粉末の置換率と結合材に起因する二酸化炭素排出量の一例

スラグ置換率		0%	20%	30%	40%	50%
ポルトランドセメント kg/m ³		350	280	245	210	175
高炉スラグ微粉末 kg/m ³		0	70	105	140	175
結合材からの CO ₂ 排出量 kg/m ³	セメント起因	266	213	186	160	133
	スラグ起因	0	2	3	4	4
	合計	266	215	189	164	137
	CO ₂ 削減率%	0	19	29	38	48

高炉スラグ微粉末の適用に当たって留意することは、初期養生を十分に行うことと、使用する目的に応じて高炉スラグ微粉末の種類とその置換率を選定することである。

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、ポルトランドセメント単味の場合に比べて湿潤養生期間を長くとる必要があり、これが十分でないと、高炉スラグ微粉末の使用により期待される効果が得られない。必要とされる湿潤養生日数の目安が「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」（土木学会）に示されている。また、コンクリート標準示方書には、高炉セメント B 種を使用する場合の施工の基本事項が示されている。これらの基本事項をコンクリート施工現場で遵守する取組が山口県で行われており、その結果、初期欠陥の少ないコンクリート構造物が建設されているという成果をあげていることが報告されているので、参照されたい。³⁾⁴⁾⁵⁾

高炉スラグ微粉末の種類と置換率の選定については、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」（土木学会）に使用目的に応じた高炉スラグ微粉末の種類と望ましい置換率の範囲が示されおり、過去の実績と併せてコンクリート配合設計の参考とし、試験練りによって適切に定められたい。

【参考文献】

- 1) 小林郁美：佳境を迎えた中部国際空港の建設、セメント・コンクリート、No. 681、pp. 10-17、平成 15 年 11 月
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー 125、「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」、平成 11 年 11 月
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 89、「混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会（333 委員会）No. 2、平成 22 年 5 月
- 4) 田村隆弘：コンクリートのひび割れ制御 コンクリート構造物のひび割れ制御から品質確保へ、コンクリートテクノ、Vol. 31、No. 4、平成 24 年 4 月
- 5) 稲津貴和子、田村隆弘、澤村修司：山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 33、No. 1、平成 23 年

(5) バーチカルドレーン材及びサンドマット材

水砕スラグは、粒状材料としてバーチカルドレーン及びサンドマットへの利用ができる。姫路港で採用されたサンドマットの一例を図 3.7.21 に示す。¹⁾²⁾

サンドマットの場合、水砕スラグは天然砂に比べ軽量のため、載荷重の軽減が期待できる。

一方で、天然の材料には見られない潜在水硬性を有し、アルカリ刺激のもとで経時的に固結する材料であるため、固結した状態が構造物に対して危険側になるような場合については、個々の条件を判断し十分な検討を行うことが必要である。特に、固結に伴う透水性の低下³⁾や、応力集中の影響には十分配慮する必要がある。また、ドレーン排水がアルカリ性を示すため、周辺環境への影響が懸念される場合には排水処理等も考慮する必要がある。

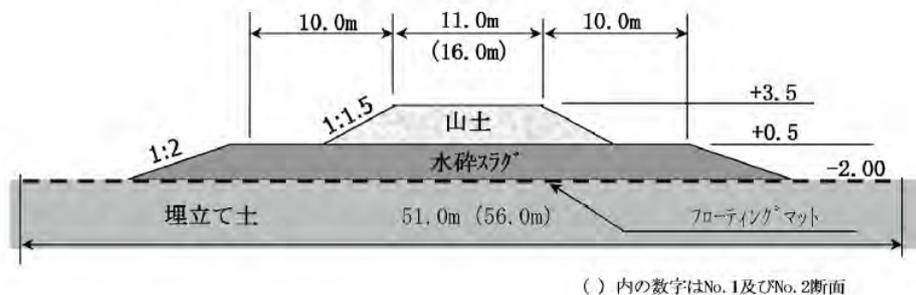
また、水砕スラグを土工用材料に適用するに当たっては、以下の留意事項が挙げられる。

①水硬性

水砕スラグを使用した地盤で掘削、杭や矢板の打設、バーチカルドレーンやサンドコンパクションパイルの打設などを行う場合、水砕スラグの固結に伴い掘削や杭打設の作業能率が低下することがある。したがって、このような場合には事前調査によって水砕スラグの固結状況を確認し、必要に応じて補助工法などの対策を施すことが望ましい。

②保管

大規模工事などで水砕スラグを一度に大量に搬入し野外で長期間保管しておく使用前に固結する可能性があるため、現場での使用計画を踏まえ適切な量を順次搬入して使用することが望ましい。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター) 及び文献 2)

図 3.7.21 姫路港須賀地区埋立地内サンドマット工

【参考文献】

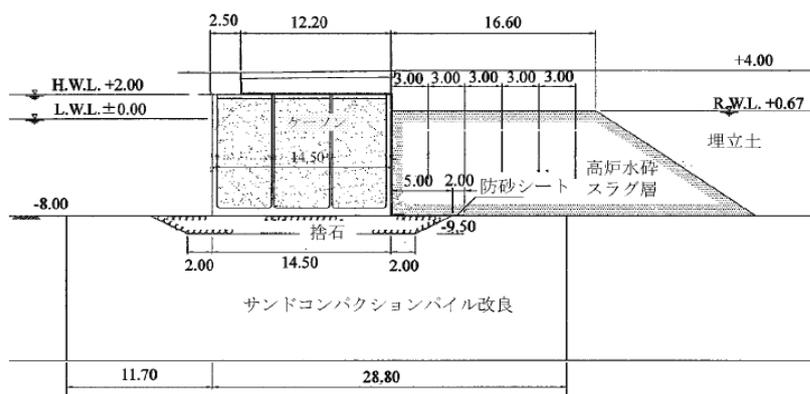
- 1) 杉本貴之、水谷崇亮、菊池喜昭：高炉水砕スラグのドレーン材としての適用性の検討のための基礎的実験、第7回地盤工学会関東支部発表会発表講演集、pp. 154-156、平成22年
- 2) 山本利繁、福原大輔、山崎友二、北森一郎、南部光広：埋立地における水砕スラグの地盤特性、第18回土質工学研究発表会、D-10、pp. 1585-1588、昭和58年

事例によると、水砕スラグは間隙水の移流の大きな箇所を除いて施工1年後には全体的に固結している事例が多い。固結に至るまでの期間を短くするには固結促進処理を行う必要がある。^{2)~10)}

また、水砕スラグは天然砂に比べ軽量のため、土圧の軽減が期待できる。^{11)~14)}

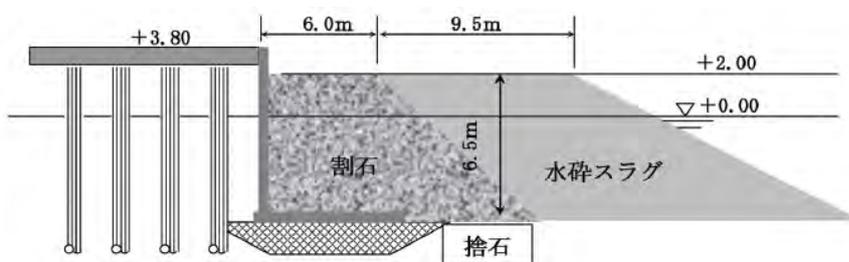
一方で、水砕スラグは工場製品であるため、同じ工場で製造された水砕スラグの性質のばらつきは小さいが、異なる工場で製造された水砕スラグ間には、性質にばらつきが見られる。特に重要な構造物への利用においては、事前に試験等を行って必要な材料特性等を確認することが望ましい。

また、アルカリ水の溶出が懸念される場合は、過去の対策例を参考にして対応策を検討する必要がある。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.23 横須賀久里浜岸壁裏込工



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.24 木更津港 I 期工事 (L型ブロック式護岸の裏埋め)

【参考文献】

- 1) 篠崎晴彦、松田博、白元珍：高炉水砕スラグの硬化に伴う繰り返しせん断強度特性の変化、土木学会論文集 C、Vol. 64、No. 1、pp. 175-180、平成 20 年
- 2) 菊池喜昭、岡祥司、水谷崇亮：高炉水砕スラグ硬化促進工法の現場適用性の検討、港湾空港技術研究所報告、Vol. 49、No. 2、pp. 21-46、平成 22 年
- 3) 菊池喜昭、水谷崇亮、岡祥司：港湾工事における高炉水砕スラグの実用的硬化促進工法の提案、第 9 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 339-344、平成 23 年
- 4) Kikuchi, Y. and Mizutani, T. : Application of a method to accelerate granulated blast furnace

slag solidification, Proc. of 18th Intl. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 3231-3234, 2013.

- 5) Kikuchi, Y., Mizutani, T., Oka, S., and Nakashima, K. : A method for accelerating the solidification of granulated blast furnace slag, Proc. of 2nd Intl. Conf. on Transportation Geotechnics, pp. 322-325, 2012.
- 6) Kikuchi, Y., Nakashima, K., and Mizutani, T. : Acceleration of solidification of granulated blast furnace slag, Proc. of 13th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, Part 1, pp. 431-434, 2007.
- 7) 菊池喜昭、岡祥司、水谷崇亮：裏込めに用いる高炉水砕スラグの硬化促進工法の現場適用性、第45回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 475-476、平成22年
- 8) 岡祥司、菊池喜昭、水谷崇亮、日高健寿、西村大司、日置幸司、木全啓介：高炉スラグ微粉末を混合した高炉水砕スラグの硬化に及ぼす水流と淡水化の影響、第64回土木学会年次学術講演会講演概要集、論文番号 III-235、平成21年
- 9) 岡祥司、菊池喜昭、水谷崇亮：地盤間隙水の塩分濃度の変化が高炉スラグ微粉末を混合した高炉水砕スラグの硬化に及ぼす影響、第6回地盤工学会関東支部発表会発表講演集、pp. 169-173、平成21年
- 10) 中島研司、菊池喜昭、水谷崇亮、村田智佳：高炉水砕スラグ微粉末を添加した高炉水砕スラグの硬化現象、第40回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 579-580、平成17年
- 11) 河野伊一郎、遠藤隆、二町宣洋、昆野功：水砕スラグ地盤の土圧実験、第40回昭和63年度土木学会中国四国支部研究発表会、pp. 296-297、昭和63年
- 12) 松永康男、竹内大輔、戸川准一、昆野功、山中量一：岸壁裏埋材に利用された軽量地盤材料としての高炉水砕スラグの特性、第52回土木学会年次学術講演会講演概要集、III-B327, pp. 654-655、平成9年
- 13) 宮島正吾、安達明宏、濱本晃一、戸川准一、遠山俊一、山中量一：岸壁裏埋材に利用された軽量地盤材料としての高炉水砕スラグの特性(第2報)、第53回土木学会年次学術講演会講演概要集、III-A112, pp. 222-223、平成10年
- 14) 白元珍、松田 博、篠崎晴彦、橋口大輔、近藤政彦、小島 磨：未硬化高炉水砕スラグの静的および地震時土圧、土木学会第60回年次学術講演会、3-071, pp. 141-142、平成17年

(8) 盛土材、覆土材、埋立材

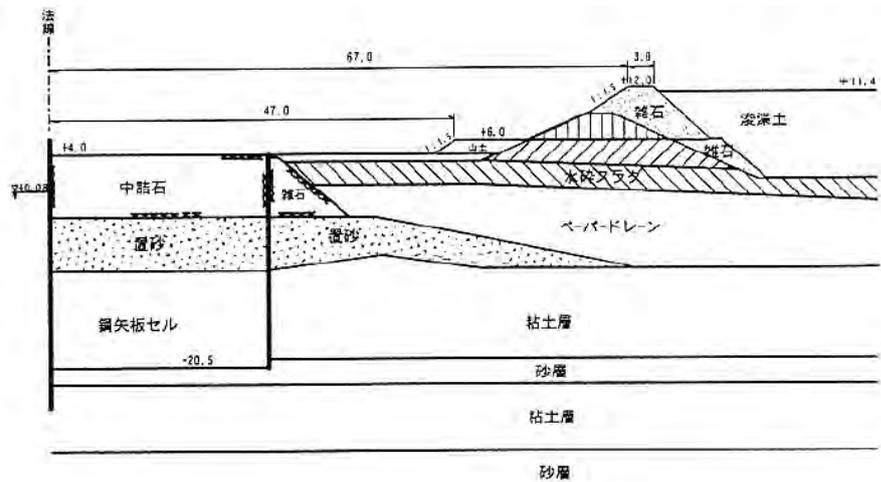
土工用水砕スラグを盛土材、覆土材、埋立材に用いる場合の設計は、天然砂と同様の方法を用いることができる。苅田港で採用された盛土材の一例を図 3.7.25 に、神戸港で採用された路床材の一例を図 3.7.26 に示す。

水砕スラグは水硬性を有しているため、完全に固結した水砕スラグは液状化しない。また、水砕スラグは天然砂に比べ軽量のため、載荷重の軽減が期待できる。¹⁾⁻³⁾

一方で、水砕スラグは工場製品であるため、同じ工場で製造された水砕スラグの性質のばらつきは小さいが、異なる工場で製造された水砕スラグ間には、性質にばらつきが見られる。特に重要な

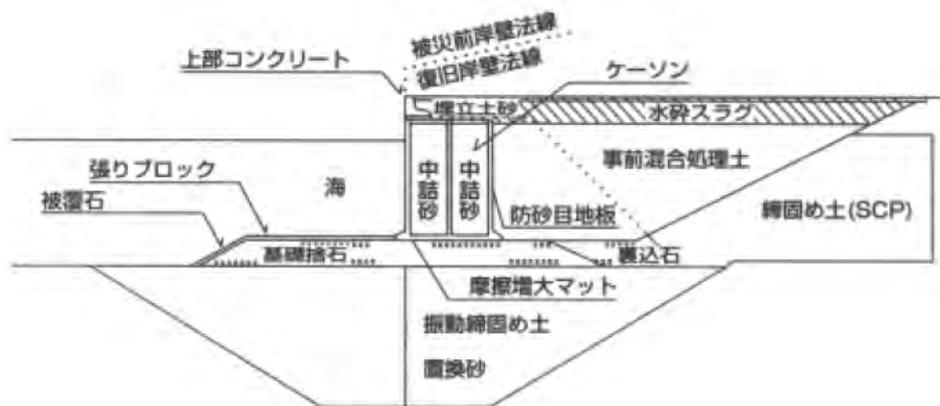
構造物への利用においては、事前に試験等を行って必要な材料特性等を確認することが望ましい。

また、アルカリ水の溶出が懸念される場合は、過去の対策例を参考にして対応策を検討する必要がある。



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.25 荻田港埋立地盛土



出典) 港湾・空港等における水砕スラグ利用技術マニュアル ((財)沿岸技術研究センター)

図 3.7.26 神戸港六甲アイランドRF-3岸壁裏込工(岸壁後背地の路床材)

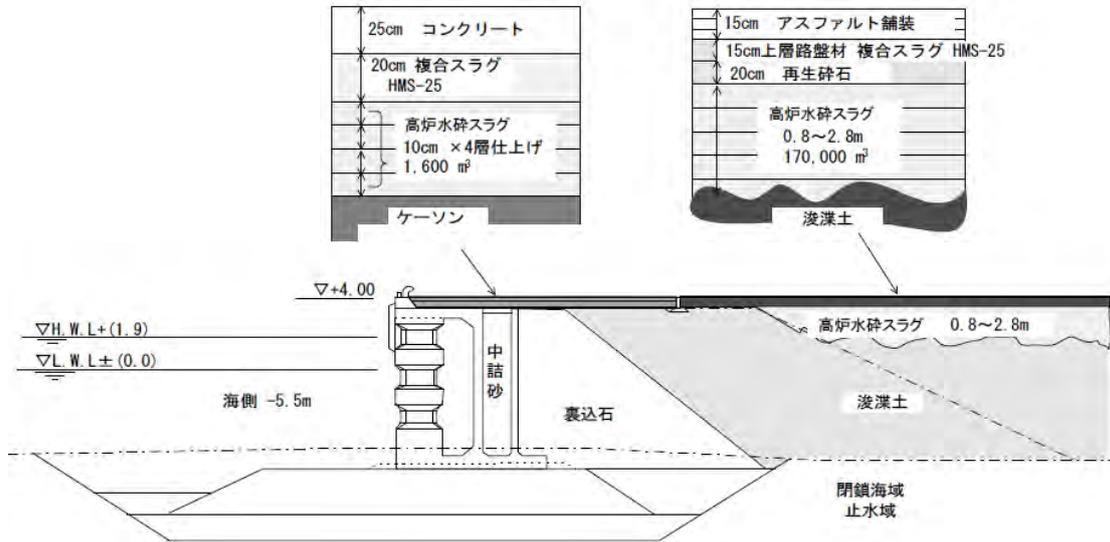
【参考文献】

- 1) 松永康男、竹内大輔、戸川准一、昆野功、山中量一：岸壁裏埋材に利用された軽量地盤材料としての高炉水砕スラグの特性、第 52 回土木学会年次学術講演会講演概要集、III-B327, pp. 654-655、平成 9 年
- 2) 宮島正吾、安達明宏、濱本晃一、戸川准一、遠山俊一、山中量一：岸壁裏埋材に利用された軽量地盤材料としての高炉水砕スラグの特性(第 2 報)、第 53 回土木学会年次学術講演会講演概要集、III-A112, pp. 222-223、平成 10 年
- 3) 例えば、松田博、石蔵良平、和田正博、来山尚義、白元珍、谷信幸：軽量盛土財として用いた高炉水砕スラグの特性の経年変化、地盤工学会ジャーナル、Vol. 7, No. 1, pp. 339-349、平成 24 年

(9) 路床盛土材

土工用水砕スラグは路床盛土材に利用することができる。

例えば、図 3.7.27 に示すように、浚渫土で埋め立てた軟弱地盤の覆土を高炉水砕スラグを用いて行い、水硬性の利用により、短期に強固な路床を造成した例がある。



出典) 港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針 参考資料(港湾・空港等リサイクル推進協議会)

図 3.7.27 和歌山下津港（南港）路床盛土材

(10) 浅場・干潟造成、覆砂材

土工用水砕スラグを浅場・干潟造成、覆砂材に利用する場合は、水砕スラグが固結することに留意し使用する必要がある。固結した場合、貝類等が生息できない場合があるため、天然砂にて覆土することが望ましい。

水質については、水砕スラグの設置初期のごく一時期において砂層内の pH、硫化物イオン濃度が若干高くなる傾向があったが、それ以降は天然材と同程度であった試験結果がある。

【既存工事における検討事項】

- ・物理・力学試験（圧縮強度、比重、吸水率、膨張）及び水質（pH）について、室内試験により確認を行った。（浅場潜堤築造工事）

(11) 今後の検討を要する用途

1) 深層混合処理固化材

高炉スラグ微粉末は、六価クロム低減や環境負荷低減を目的に、深層混合処理固化材への利用が検討されているが、高炉スラグ微粉末を深層混合処理固化材に利用する場合は、工法や地盤に適した材料・配合の選定が必要となる。

2) 中詰材

土工用水砕スラグを中詰材に利用する場合は、天然砂より軽く、また長期的に固結する特徴を有していることに留意し利用する必要がある。

【既存工事における検討事項】

- ・湿潤時の単位体積重量が規定以上であることを確認した。（防波堤築造工事、岸壁築造工事）

3.7.4 関連法令

廃棄物処理法や海洋汚染防止法等の法的な規制を受ける場合があるので留意する。

（解説）

高炉スラグは産業副産物等に該当する。産業副産物等の法令上の取り扱いについては、「1.4.2 環境安全の考え方」を参照のこと。

3.7.5 施工後の再利用・廃棄の考え方

施工後に再利用・廃棄を行う場合、発生する材料の種類に応じて検討を行うものとする。

（解説）

高炉スラグを材料として用いた箇所の改修・撤去等により生じた建設副産物を再びリサイクル材料として利用または廃棄する場合は、発生する材料の種類に応じて、本ガイドラインの該当箇所を参照し、検討を行う。

なお、高炉スラグ骨材については、JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材—第1部：高炉スラグ骨材」において、再利用・廃棄を含めライフサイクルの合理的に想定しうる範囲において、高炉スラグ骨材から影響を受ける土壌、地下水、海水などの環境媒体が、各々の環境基準などを満足できるように、高炉スラグ骨材が確保すべき品質（環境安全品質）を満足するための検査の実施が規定されている。

また、再利用・廃棄を検討する際に、使用したリサイクル材料の種類、品質及び量等の情報が重要となるため、これらの情報を維持管理計画等に記載しておくことを標準とする。

3.8 製鋼スラグ

3.8.1 製造・供給

製鋼スラグは、製鋼方法（炉）の種類により、転炉系スラグと電気炉系スラグに分類される。また、用途に応じ、コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材、土工用・地盤改良用製鋼スラグが製品として製造されている。

（解説）

(1) 製造方法

1) 製鋼スラグの生成

製鋼スラグは製鋼工程において発生し、その製鋼方法（炉）の種類により、転炉系スラグと電気炉系スラグに分類される。製造フローを図 3.8.1 に、組成例を表 3.8.1 に示す。

鉄鋼スラグ製品の製造フロー

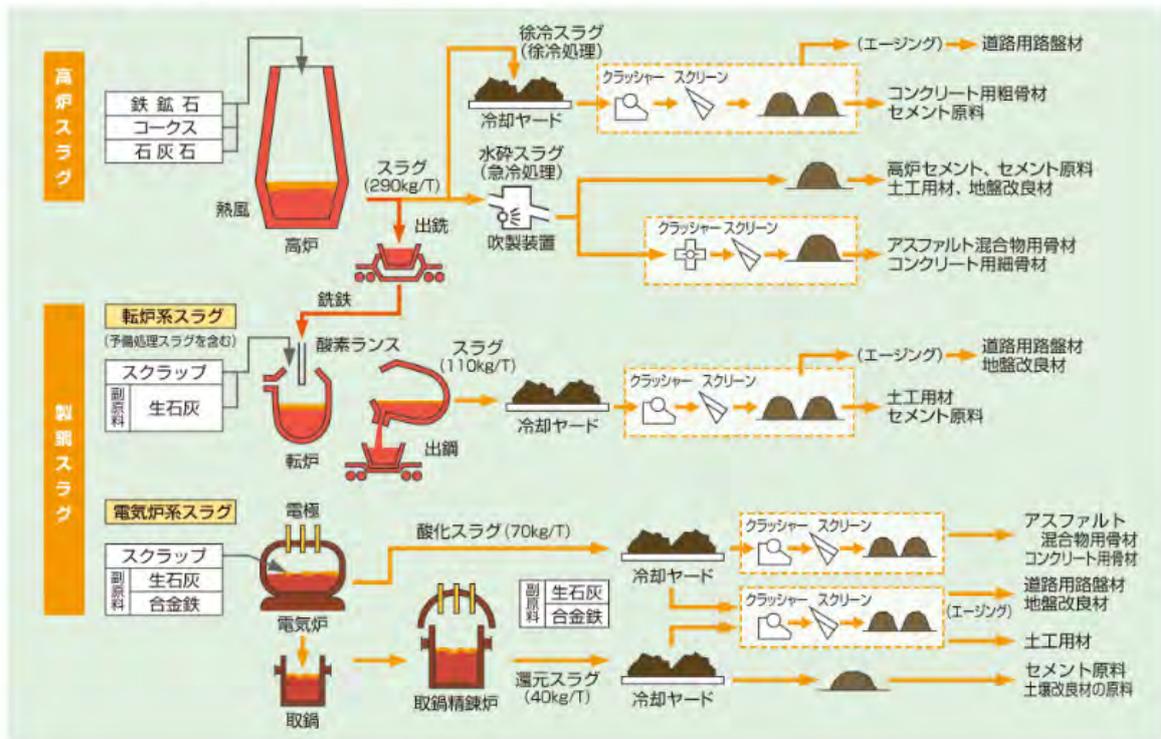


図 3.8.1 鉄鋼スラグの製造フロー

表 3.8.1 製鋼スラグの組成例

鉄鋼スラグの組成例

(単位：%)

種類 成分	高炉スラグ	転炉系スラグ	電気炉系スラグ		安山岩	普通セメント
			酸化スラグ	還元スラグ		
CaO	41.7	45.8	22.8	55.1	5.8	64.2
SiO ₂	33.8	11.0	12.1	18.8	59.6	22.0
T-Fe	0.4	17.4	29.5	0.3	3.1	3.0
MgO	7.4	6.5	4.8	7.3	2.8	1.5
Al ₂ O ₃	13.4	1.9	6.8	16.5	17.3	5.5
S	0.8	0.06	0.2	0.4	—	2.0
P ₂ O ₅	<0.1	1.7	0.3	0.1	—	—
MnO	0.3	5.3	7.9	1.0	0.2	—

① 転炉系スラグ

転炉系スラグは、主原料の銑鉄などを転炉などで鋼にする際に生成するスラグであり、転炉スラグ、予備処理スラグなどがある。

転炉スラグは、主原料の溶銑、鉄スクラップ及び副原料の生石灰 (CaO) などを転炉に装入し、高圧の酸素を吹き込み、激しい酸化反応によって溶銑中のけい素 (Si)、りん (P)、鉄 (Fe) の一部などが酸化され、生石灰 (CaO) と結合した酸化物である。溶鋼と熔融スラグは比重差によって分離され、転炉から排出される。転炉スラグが通常の天然砕石より重く硬質なのは、精錬過程で鉄 (Fe) の一部が酸化されスラグ中で化学的に結合しているためである。

予備処理スラグは、転炉精錬を効率的に行なうために転炉または別容器内の溶銑に生石灰 (CaO) などを投入し、けい素 (Si)、りん (P)、硫黄 (S) などを除去する予備処理工程で生成する生石灰 (CaO) と結合した酸化物である。

② 電気炉系スラグ

電気炉系スラグは、主原料の鉄スクラップなどを電気炉などで鋼にする際に生成するスラグであり、酸化スラグと還元スラグとがある。酸化スラグは、装入原料 (鉄スクラップなど) をアーク熱を熱源として熔融し、溶鋼中に酸素を吹き込み、鋼として不要な成分を酸化し、副原料として装入した生石灰 (CaO) と結合して生成する。その際酸化スラグは、鉄 (Fe) の一部が酸化されてスラグ中に入るために通常の天然砕石より重く、かつ、硬質になる。還元スラグは、酸化スラグの排出後に生石灰 (CaO) などを投入し、酸化物などの不要な成分と結合させる還元精錬によって生成する。その際発生する還元スラグには、塊状のものと粉状のものがある。

2) 製鋼スラグ製品の製造

① 冷却・固化工程

1,500℃以上の熔融状態にある製鋼スラグは、一般にスラグ運搬車で冷却ヤードに運搬され、空冷あるいは散水との組み合わせによって冷却・固化される。

② 粉碎・ふるい分け工程

冷却ヤードで冷却・固化された製鋼スラグは、ブルドーザなどで掘り起こされ、破碎・粉碎工程を経て所定の粒度に整粒される。また、製鋼スラグに含まれる金属鉄のうち、破碎・ふるい分け工程で分離したものは、磁選機により除去される。図 3.8.2 に転炉スラグの破碎・ふるい分け工程例を示す。

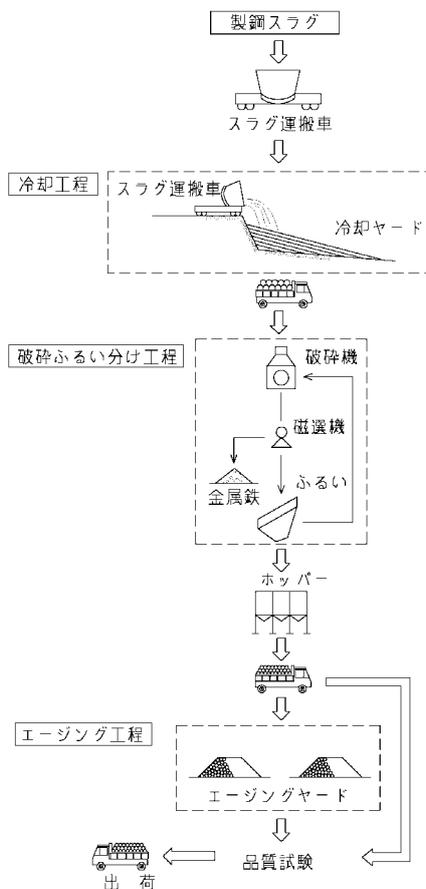


図 3.8.2 転炉スラグの破碎・ふるい分け工程例

③ エージング工程

製鋼スラグには膨張性があり、利用前に安定化する必要があることから、エージングと呼ばれる処理を行う。エージング処理には、屋外で数か月間養生をする大気エージング方式、高温蒸気を用いて短期間で安定化させる蒸気エージング方式、上記に加え耐圧容器を用いて高温・高圧状態でより短期間で安定化する加圧蒸気エージング方式があり、生成する製鋼スラグの特性や、使用される用途の要求性能に応じて使い分けられている。

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

陸上輸送：製鉄所・製造所周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

海上輸送：制限なし

海上輸送＋陸上輸送：全国の港周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

2) 事業所の立地場所

① コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材

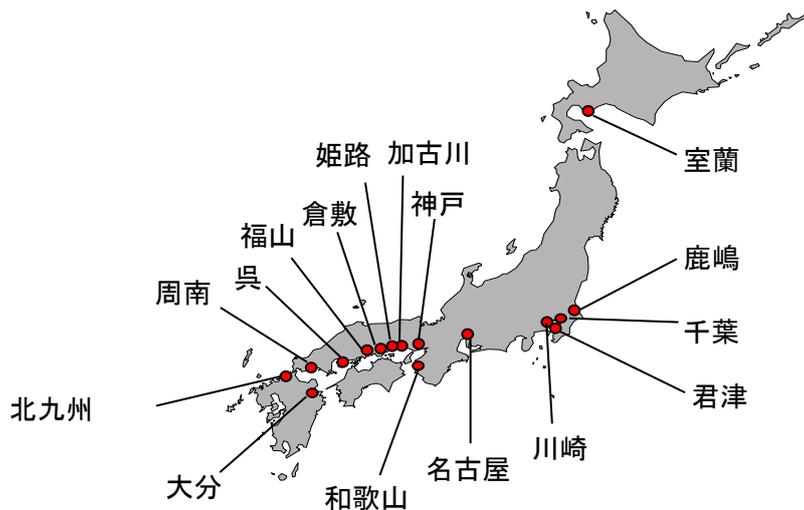


出典) 港湾工事推奨用リサイクル製品便覧（平成 25 年度版）（リサイクルポート推進協議会）より作成

図 3.8.3 コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材製造所（JIS 認定工場）の立地場所

② 土工用・地盤改良用製鋼スラグ

高炉スラグ・転炉スラグ製造事業所、電気炉スラグ製造事業所が全国にある



※本図では高炉スラグ・転炉スラグ製造事業所のみを示す

出典) 鉄鋼スラグ統計年報（平成 28 年度実績）（鉄鋼スラグ協会）より作成

図 3.8.4 土工用・地盤改良用製鋼スラグ製造所（高炉スラグ・転炉スラグ製造事業所）の立地場所

3) 生産量（平成25年度実績）

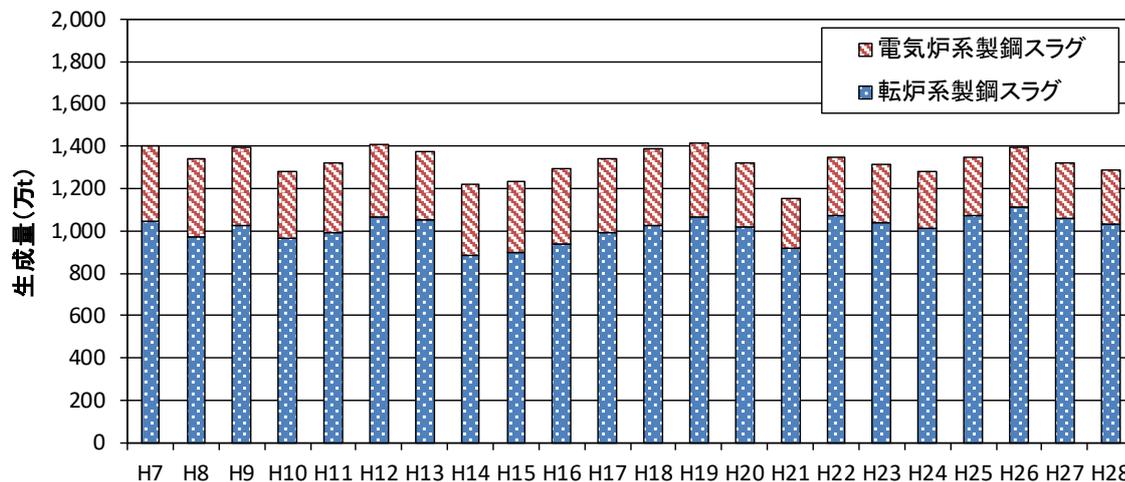
①電気炉酸化スラグ骨材：4千t/月

②地盤改良用製鋼スラグ：73千/月

③土工用製鋼スラグ：454千t/月

※生産量：乾重量または湿重量ベース（事業所が用途毎に選択）

4) 生産量の推移

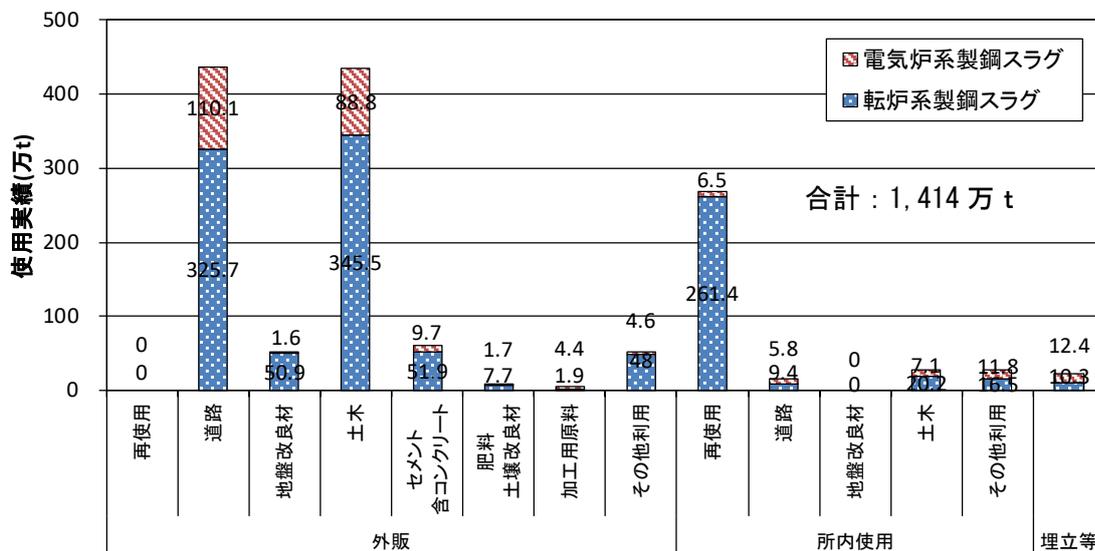


出典) 鉄鋼スラグ統計年報（平成28年度実績）（平成29年7月、鉄鋼スラグ協会）より作成

※生産量：乾重量ベース。電気炉酸化スラグ骨材、地盤改良用製鋼スラグ、土工用製鋼スラグ以外の用途を含む。

図 3.8.5 生産量の推移（製鋼スラグ）

5) 用途別使用量



出典) 鉄鋼スラグ統計年報（平成28年度実績）（平成29年7月、鉄鋼スラグ協会）より作成

図 3.8.6 用途別使用量（平成28年度実績、製鋼スラグ）

3.8.2 品質

コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材は、JIS 規格が規定されている。
土工用製鋼スラグ及び地盤改良用製鋼スラグは、「港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル（平成 27 年 2 月、沿岸技術研究センター）に品質が記載されている。

（解説）

(1) コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材

コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材には、電気炉酸化スラグ粗骨材と電気炉酸化スラグ細骨材がある。

コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材は、電気炉スラグのうち酸化スラグのみを取り出し、破碎・分級して製造される。熔融した酸化スラグを水や空気です急冷した細骨材も作られている。電気炉酸化スラグは膨張性がなく、物理的・化学的に安定しているため、コンクリート用骨材として適している。

表 3.8.2 電気炉酸化スラグ骨材の種類

種類	記号	摘要
電気炉酸化スラグ粗骨材	EFG	電気炉で溶鋼と同時に生成する熔融した酸化スラグを徐冷し、鉄分を除去 ^{*)} して粒度調整したもの
電気炉酸化スラグ細骨材	EFS	電気炉で溶鋼と同時に生成する熔融した酸化スラグを徐冷、または水や空気などによって急冷し、鉄分を除去 ^{*)} して粒度調整したもの

注 ^{*)} 徐冷したスラグから製造する粗骨材及び細骨材は、最終破碎工程の後、搬送用ベルトコンベアー面で、磁場強さ 600 ガウス以上によって、金属鉄粒を含むスラグを除去する。

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」

電気炉酸化スラグ骨材は、以下のような特性がある。

- ・密度が高く、すり減り抵抗性が大きい。
- ・コンクリートに有害となる粘土、有機物を含んでいない。
- ・熔融シリカ量が少ないため、アルカリシリカ反応性は認められない。
- ・製造工程で海水を用いないため、塩化物量(NaCl として 0.001~0.002%)と極めて微量である。
- ・粗骨材・細骨材のいずれも供給できる。

1) 物理・力学的性質

コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材 JIS A 5011-4 では、電気炉酸化スラグ粗骨材・細骨材の種類・品質を次のように規定している。

① 粒度による区分

電気炉酸化スラグ粗骨材は粒度により、表 3.8.3 に示す 4 種類に区分される。

表 3.8.3 粒度による区分

区分	粒の大きさの範囲 mm	記号
電気炉酸化スラグ粗骨材 4020	40～20	EFG40-20
電気炉酸化スラグ粗骨材 2005	20～ 5	EFG20-05
電気炉酸化スラグ粗骨材 2015	20～15	EFG20-15
電気炉酸化スラグ粗骨材 1505	15～ 5	EFG15-05

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第4部：電気炉酸化スラグ骨材」

電気炉酸化スラグ細骨材は粒度により、表 3.8.4 に示す4種類に区分される。

表 3.8.4 粒度による区分

区分	粒の大きさの範囲 mm	記号
5 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	5 以下	EFS5
2.5 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	2.5 以下	EFS2.5
1.2 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	1.2 以下	EFS1.2
5～0.3 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	5～0.3	EFS5-0.3

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第4部：電気炉酸化スラグ骨材」

② 化学成分及び物理的性質

電気炉酸化スラグ粗骨材の化学成分及び物理的性質の規格を表 3.8.5、表 3.8.6 に示す。

表 3.8.5 絶乾密度による区分

区分	絶乾密度 g/cm ³
N	3.1 以上 4.0 未満
H	4.0 以上 4.5 未満

*絶乾密度試験は JIS A 1110 による。

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第4部：電気炉酸化スラグ骨材」

表 3.8.6 化学成分及び物理的性質の規格

項目		電気炉酸化スラグ粗骨材	
		N	H
化学成分	酸化カルシウム (CaO として) %	40.0 以下	
	酸化マグネシウム (MgO) %	10.0 以下	
	全鉄 (FeO として) %	50.0 以下	
	塩基度 (CaO/SiO ₂ として)	2.0 以下	
絶乾密度	g/cm ³	3.1 以上 4.0 未満	4.0 以上 4.5 未満
吸水率	%	2.0 以下	
単位容積質量	kg/L	1.6 以上	2.0 以上

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第4部：電気炉酸化スラグ骨材」

電気炉酸化スラグ細骨材の化学成分及び物理的性質の規格を表 3.8.7、表 3.8.8 に示す。

表 3.8.7 絶乾密度による区分

区分	絶乾密度 g/cm ³
N	3.1 以上 4.0 未満
H	4.0 以上 4.5 未満

*絶乾密度試験は JIS A 1110 による。

出典) JIS A 5011-4 「コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」

表 3.8.8 化学成分及び物理的性質の規格

項目		電気炉酸化スラグ 細骨材	
		N	H
化学成分	酸化カルシウム (CaO として) %	40.0 以下	
	酸化マグネシウム (MgO) %	10.0 以下	
	全鉄 (FeO として) %	50.0 以下	
	塩基度 (CaO/SiO ₂ として)	2.0 以下	
絶乾密度	g/cm ³	3.1 以上 4.0 未満	4.0 以上 4.5 未満
吸水率	%	2.0 以下	
単位容積質量	kg/L	1.8 以上	2.2 以上

出典) JIS A 5011-4 「コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」

③ 粒度

電気炉酸化スラグ粗骨材の粒度を表 3.8.9 に示す。

表 3.8.9 電気炉酸化スラグ粗骨材の粒度

単位：%

区分	ふるいを通るものの質量分率						
	ふるいの呼び寸法 ^{a)} mm						
	50	40	25	20	15	10	5
電気炉酸化スラグ粗骨材 4020	100	90~100	20~55	0~15	—	0~5	—
電気炉酸化スラグ粗骨材 2005	—	—	100	90~100	—	20~55	0~10
電気炉酸化スラグ粗骨材 2015	—	—	100	90~100	—	0~10	0~5
電気炉酸化スラグ粗骨材 1505	—	—	—	100	90~100	40~70	0~15

注^{a)} ふるいの呼び寸法は、それぞれ JIS Z 8801-1 に規定するふるいの公称目開き 53 mm、37.5 mm、26.5 mm、19 mm、16 mm、9.5 mm 及び 4.75 mm である。

出典) JIS A 5011-4 「コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」

また、粗粒率²と微粒分量については、次のように規定されている。

²粗粒率：80 mm、40 mm、20 mm、10 mm、5 mm、2.5 mm、1.2 mm、0.6 mm、0.3 mm、及び 0.15 mm の網ふるいの一組を用いて、ふるい分けを行った場合、各ふるいを通らない全部の試料の百分率の和を 100 で除した値であり、無次元で表される

- ・粗粒率：製造業者と購入者が協議によって定めた粗粒率に対して±0.30の範囲である必要がある。
- ・微粒分量：1) 微粒分量は2) に定める許容差の範囲内ではばらつきが生じても5.0%を超えないように、製造業者と購入者が協議によって定める。
2) 微粒分量の許容差は、1) で定めた協議値に対して±1.0%とする。

電気炉酸化スラグ細骨材の粒度を表 3.8.10 に示す。

表 3.8.10 電気炉酸化スラグ細骨材の粒度

単位：%

区分	ふるいを通るものの質量分率						
	ふるいの呼び寸法 ^{a)} mm						
	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
5 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15
2.5 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	100	95~100	85~100	60~95	30~70	10~45	5~20
1.2 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	—	100	95~100	80~100	35~80	15~50	10~30
5~0.3 mm 電気炉酸化スラグ細骨材	100	95~100	45~100	10~70	0~40	0~15	0~10
注^{a)} ふるいの呼び寸法は、それぞれ JIS Z 8801-1 に規定するふるいの公称目開き 9.5 mm、4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、600 μm、300 μm 及び 150 μm である。							

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第4部：電気炉酸化スラグ骨材」

また粗粒率と微粒分量については、次のように規定されている。

- ・粗粒率：電気炉酸化スラグ細骨材の粗粒率は、製造業者と購入者が協議によって定めた粗粒率に対して±0.20の範囲である必要がある。
- ・微粒分量：1) 微粒分量は2) に定める許容差の範囲内ではばらつきが生じても7.0%を超えないように、製造業者と購入者が協議によって定める。
2) 微粒分量の許容差は、1) で定めた協議値に対して±2.0%とする。

*微粒分量の試験は、JISA1103 に従う

2) 化学的性質

①環境安全品質規準

JIS A 5011-4 では、電気炉酸化スラグ骨材の環境安全品質規準として、骨材を用いるコンクリート構造物などの用途に応じて、次の2種類の規準を規定している。これら環境安全品質に係る分析試験の結果は、製造事業者が発行する試験成績表により確認することができる。

環境安全品質基準（一般用途）を表 3.8.11 に示す。基準値には土壤汚染対策法の溶出量基準（土壤環境基準と同じ）、含有量基準と同じ数値が適用されている。

表 3.8.11 環境安全品質基準（一般用途）

項目	溶出量 mg/L	含有量 ^{a)} mg/kg
カドミウム	0.01 以下※	150 以下
鉛	0.01 以下	150 以下
六価クロム	0.05 以下	250 以下
ひ素	0.01 以下	150 以下
水銀	0.0005 以下	15 以下
セレン	0.01 以下	150 以下
ふっ素	0.8 以下	4000 以下
ほう素	1 以下	4000 以下
注 ^{a)} ここでいう含有量とは、同語が一般的に意味する“全含有量”とは異なることに注意を要する。		

※カドミウムについては、平成 23 年 10 月より地下水の水質汚濁に係る環境基準が 0.003mg/L 以下に改正されたため、留意が必要である。

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」

環境安全品質基準（港湾用途）を表 3.8.12 に示す。なお、港湾用途に使用される場合であっても再利用を予定する場合は、一般用途として取り扱うこととされている。

表 3.8.12 環境安全品質基準（港湾用途）

項目	溶出量 mg/L
カドミウム	0.03 以下※
鉛	0.03 以下
六価クロム	0.15 以下
ひ素	0.03 以下
水銀	0.0015 以下
セレン	0.03 以下
ふっ素	15 以下
ほう素	20 以下

※カドミウムについては、平成 23 年 10 月より公共用水域の水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準が 0.003mg/L 以下に改正されたため、留意が必要である。

出典) JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」

表 3.8.13 及び表 3.8.14 に電気炉酸化スラグ骨材の化学物質の溶出量及び含有量の測定実績を示す。すべての項目が一般用途に適用される基準を満足しており、有害物質による環境への影響はないものと考えて良い。

表 3.8.13 コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材の化学物質の溶出量（平成 20 年）

No.	溶出量 (mg/L)							
	カドミウム	鉛	六価クロム	ヒ素	水銀	セレン	フッ素	ほう素
基準値	≦0.01	≦0.01	≦0.05	≦0.01	≦0.0005	≦0.01	≦0.8	≦1
1	<0.001	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.1	<0.1
2	<0.001	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.1	<0.1
3	<0.001	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.1	<0.1
4	<0.001	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.1	<0.1
5	<0.001	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.1	0.1
6	<0.001	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	0.2	<0.1
7	<0.001	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.002	<0.1	<0.1
8	<0.001	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.002	<0.1	<0.1
9	<0.001	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.002	<0.1	<0.1
10	<0.001	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.002	<0.1	<0.1
11	<0.001	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.002	<0.1	0.2
12	<0.001	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.002	0.2	<0.1
13	<0.001	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.002	<0.1	<0.1

注記 No.1～6 までと 7～12 までは分析機関が異なるので、一部の元素の定量下限が異なっている。
 分析方法：JIS K 0058-1 の 5（利用有姿）

表 3.8.14 コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材の化学物質の含有量（平成 20 年）

No.	含有量(mg/kg)							
	カドミウム	鉛	六価クロム	ヒ素	水銀	セレン	フッ素	ほう素
基準値	≦150	≦150	≦250	≦150	≦15	≦150	≦4000	≦4000
1	<10	<10	<20	<10	<1	<10	160	<400
2	<10	<10	<20	<10	<1	<10	220	<400
3	<10	<10	<20	<10	<1	<10	220	<400
4	<10	<10	<20	<10	<1	<10	110	<400
5	<10	<10	<20	<10	<1	<10	290	<400
6	<10	<10	<20	<10	<1	<10	850	<400
7	<10	<10	<20	<10	<1	<10	100	<400
8	<10	<10	<20	<10	<1	<10	180	<400
9	<10	<10	<20	<10	<1	<10	170	<400
10	<10	<10	<20	<10	<1	<10	98	<400
11	<10	<10	<20	<10	<1	<10	180	<400
12	<10	<10	<20	<10	<1	<10	440	<400
13	<10	<10	<20	<10	<1	<10	510	<400

注記 分析方法：JIS K 0058-2

(2) 土工用・地盤改良用製鋼スラグ

1) 物理・力学的性質

① 粒度

製鋼スラグの粒度は、概ね表 3.8.15 に示す範囲である。

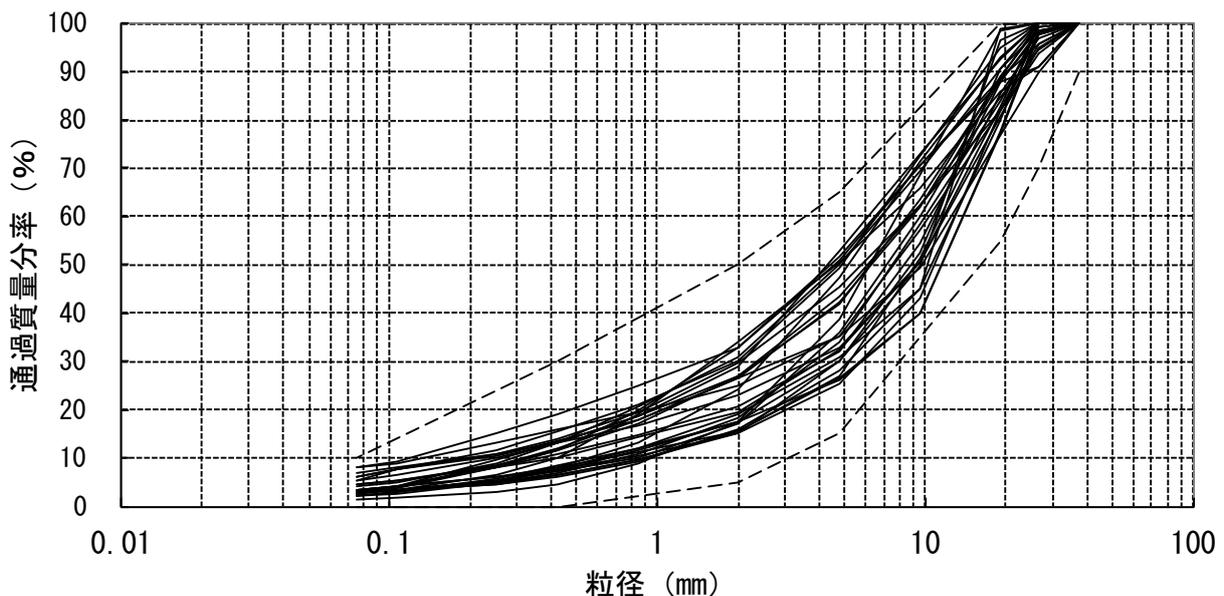
表 3.8.15 製鋼スラグの粒度

粒径 (mm)	37.5	26.5	19.0	4.75	2.00	0.425	0.075
通過質量分率 (%)	90~100	70~100	55~100	15~65	5~50	0~30	0~10

図 3.8.7 に全国 15 製造所の製鋼スラグの粒度の範囲を示す。

粒度試験結果では、均等係数 U_c は概ね 10.3~44.4、曲率係数 U_c' は 1.3~4.8、細粒分含有率（粒径 0.075mm 未満）は 10% 以下の範囲にあり、粒度分布は良い。

このように、製鋼スラグは粒度分布が良く、締固めしやすい材料であるため、サンドコンパクションパイルや盛土等に適した材料である。



出典) 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター)

図 3.8.7 製鋼スラグの粒度の範囲

② 土粒子密度

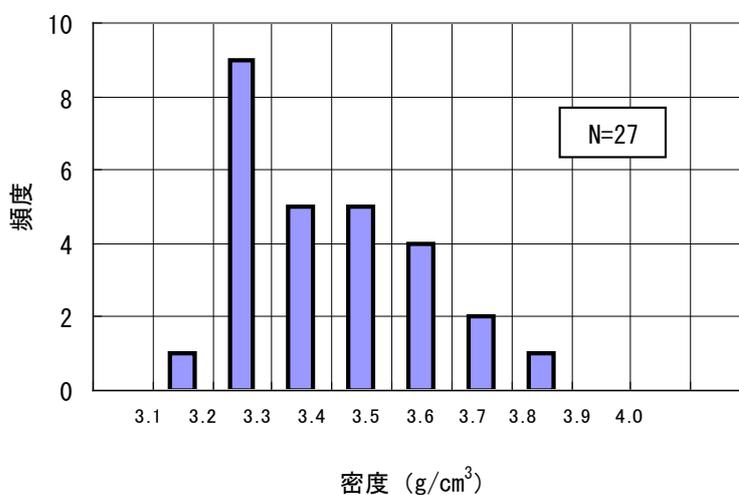
全国 15 製造所の製鋼スラグの、JIS A 1202 「土粒子の密度試験方法」（粒径 9.5mm 以上のものは JIS A 1110 「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」）による試験結果を表 3.8.16 及び図 3.8.8 に示す。製鋼スラグ粒子の密度は製造所や製造ロット等によって差があるが、概ねここで示した範囲の値を示している。

表 3.8.16 製鋼スラグ粒子の密度

粒径	密度 (g/cm ³)				試験方法
	最大値	最小値	平均	標準偏差	
9.5mm 以上	3.604	3.098	3.289	0.152	JIS A 1110
9.5mm 未満	3.831	3.261	3.473	0.143	JIS A 1202
有姿 (合成)	3.716	3.184	3.395	0.136	—

有姿 (合成) : 粒径9.5mm 以上及び9.5mm 未満の加重平均 (平成11年鐵鋼スラグ協会調査)

出典) 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル ((一財) 沿岸技術研究センター)



(平成11年鐵鋼スラグ協会調査)

出典) 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル ((一財) 沿岸技術研究センター)

図 3.8.8 製鋼スラグ粒子の密度 [有姿 (合成)]

③ 単位体積重量

製鋼スラグのような粒状材料では、締固めの程度によって密度が異なる。例えばサンドコンパクションパイルに用いる場合には、極めて密な状態となり密度は大きくなる。

「港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル」では、製鋼スラグの単位体積重量は、状態により異なり、概ね表 3.8.17 の範囲としている。

表 3.8.17 製鋼スラグの単位体積重量

		単位容積質量試験	最小密度・最大密度試験	
			ゆるい状態	密な状態
単位体積重量 (kN/m ³)	湿潤 (含水比 5%)	19~26	19~24	22~28

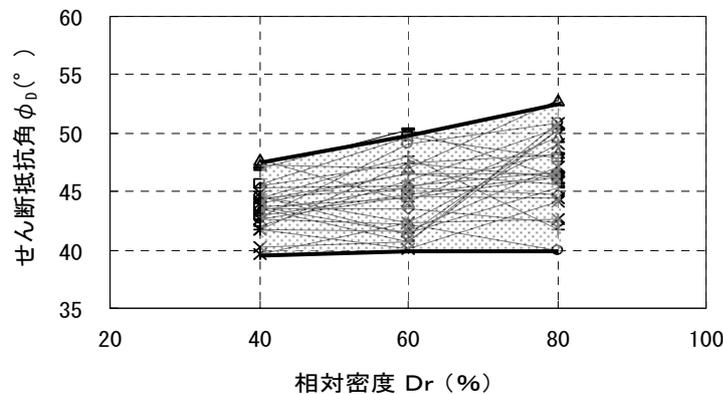
④ 水硬性

製鋼スラグは、化学成分がセメントと類似しており、エージングの有無にかかわらず水硬性があるが、その発現は一様ではない。

⑤ せん断強度特性

製鋼スラグ粒子は稜角に富むものが多く、粒度分布が良いため、大きなせん断抵抗角が得られる。「港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル」では、せん断抵抗角 ϕ_D は 40° 以上としている。

図 3.8.9 は、全国の 15 製造所で生成した製鋼スラグ(最大粒径 40mm)の、土の圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験結果である。一般の粒状材料と同様に、相対密度が小さいとせん断抵抗角 ϕ_D は小さくなる傾向を示しているが、最小値でもほぼ $\phi_D=40^\circ$ (ϕ_D : 三軸圧縮試験結果 (CD) によるせん断抵抗角) を示している。



出典) 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター)

図 3.8.9 相対密度とせん断抵抗角の関係

⑥ 膨張性

製鋼スラグは、遊離石灰を数パーセント含むため、水と反応し膨張する性質がある。

精錬時に加えられた石灰の一部が、未反応のまま製鋼スラグ中に存在する。この石灰は遊離石灰 (Free-CaO) と呼ばれ、下記の化学式で示される水和反応により膨張し、安定化する。



製鋼スラグの膨張量は、遊離石灰の量、大きさ、存在状態によって異なるが、一般に遊離石灰量が多いものほど大きくなる。

生成直後の製鋼スラグは遊離石灰を数パーセント含むが、屋外で養生すると雨水等により水和反応が生じて CaO (遊離石灰) が Ca(OH)₂ (消石灰) に変化して安定するため、その後の膨張量は減少する。このように水との反応により膨張を安定化させることをエージングといい、屋外で数ヶ月養生する方法を大気エージング、高温蒸気を用いて短期間に安定化させる方法を蒸気エージングという。上記に加え、耐圧容器を用いて高温、高圧状態で水和させ、より短期間で水和を完了させる方法 (加圧蒸気

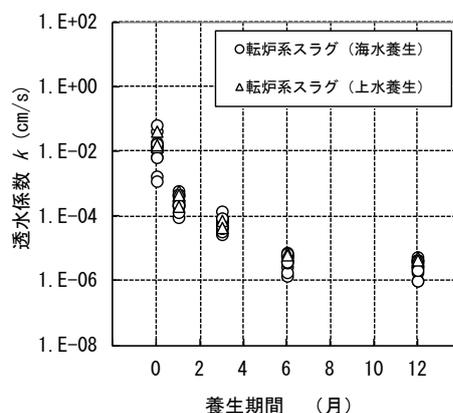
エージング) も実施されている。

⑦ 透水性

製鋼スラグの透水係数は経時的に低下する傾向がある。

透水係数 k の室内試験結果例を図 3.8.10 に示す。締固めた製鋼スラグの間隙中の水が交換できる状態で、水槽（海水及び上水）で養生（水槽内の海水及び上水は、1 カ月毎に交換）し、透水係数 k を測定した。当初 $k=10^{-1}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ であったものが、6 ヶ月の水中養生後に $k=10^{-5}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ にまで低下している。

その後、サンドコンパクションパイルの状況を再現するために実施された締固め製鋼スラグの間隙中の海水交換を制限した実験でも、当初 $k=10^{-1}\sim 10^{-2}\text{cm/s}$ であったものが、6 ヶ月(180 日)で $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ 、10 ヶ月(300 日)で 10^{-4}cm/s 付近まで低下した結果が示されている。海水交換を制限した場合、10 ヶ月(300 日)程度までは、透水係数が 10^{-4}cm/s 以上で、圧密促進に必要な透水性は確保できるものと考えられる¹⁾。



出典) 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター)

図 3.8.10 製鋼スラグの透水係数の変化 (海水養生及び上水養生)

【参考文献】

- 1) (一財) 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル、平成 27 年 1 月

2) 化学的性質

① pH

製鋼スラグの溶出水の pH は、通常高い値を示すが、海域で利用した場合には、海水成分による緩衝作用及び希釈等により、周辺海域の pH の上昇はほとんどない。

製鋼スラグの溶出水は、消石灰 (Ca(OH)_2) により、エージングの有無にかかわらず破碎コンクリート塊と同程度のアルカリ性を示す。製鋼スラグを海域で利用する場合には、海水に含まれるマグネシウムイオン、炭酸水素イオン等の緩衝作用により、溶出水の pH 上昇が抑制される¹⁾。また、大量の海水によっても希釈されるため、溶出水による周辺環境への影響はほとんどない。

一方、陸上における pH の挙動については、含有する石灰の影響で降雨等による水と反応すると溶出水の pH が高くなり、アルカリ性を示す。そのため、周辺に影響を与えないよう注意する必要がある。なお、消石灰による pH の高い水は、炭酸ガスにより容易に中和され、また周辺の土壌中を 30cm 程度通過することで土に吸着され、周辺に影響を与えることはほとんどないとされている²⁾。

② 環境安全品質

各用途の製鋼スラグの試験方法と環境安全品質基準を表 3.8.18、表 3.8.19 に示す。

製鋼スラグの環境安全品質については、「コンクリート用骨材または道路用等のスラグ類に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会総合報告書」の第 2 章「循環資材に共通の基本的考え方」、第 4 章「建設分野のあらゆる循環資材に共通の環境安全品質及びその検査方法の導入にむけて」の考え方にに基づき設定している。

環境安全品質基準設定項目については、第 2 章「循環資材に共通の基本的考え方」に従い、製鋼スラグは、製造工程において、1,300℃～1,600℃の高温で熔融されることから、VOC や農薬・PCB 等は本来混入されることがないが万が一混入されたとしてもスラグの製造工程で熱分解し、重金属等の中のシアンは分解・揮発してガス側に移行するため基準設定項目としないこととし、重金属等の中のカドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、水銀、セレン、ふっ素、ほう素の 8 項目を設定している。なお、平成 25 年 3 月に改訂された JIS A 5015 : 2013 「道路用鉄鋼スラグ」の環境安全品質基準においても、同じ考え方が採用されている。

環境安全品質基準値については、「コンクリート用骨材または道路用等のスラグ類に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会総合報告書」の第 4 章「建設分野のあらゆる循環資材に共通の環境安全品質及びその検査方法の導入にむけて」に従い、製鋼スラグが使用される周辺環境に応じて用途毎に溶出量基準・含有量基準を設定している。

表 3.8.18 製鋼スラグの環境安全品質基準と試験方法

用途	場所	試験項目	試験方法	環境安全品質基準
サンドコンパクション パイル工	海域	溶出	JISK0058-1 ^{※2}	港湾用途溶出量基準
	陸域 ^{※1}	溶出	環境省告示第18号	一般用途溶出量基準
		含有	環境省告示第19号	含有量基準
置換工 覆土工	海域	溶出	JISK0058-1 ^{※2}	港湾用途溶出量基準
	陸域	溶出	環境省告示第18号	一般用途溶出量基準
載荷盛土工		含有	環境省告示第19号	含有量基準

※1：杭頭部のドレーン部が、基礎工事等により掘削される可能性があることを想定

※2：JIS K 0058-1 5. 利用有姿による試験

表 3.8.19 環境安全品質基準

項目	港湾用途溶出量基準 (mg/L)	一般用途溶出量基準 (mg/L)	含有量基準 (mg/kg)
カドミウム	0.009以下※	0.003以下※	150以下
鉛	0.03以下	0.01以下	150以下
六価クロム	0.15以下	0.05以下	250以下
ひ素	0.03以下	0.01以下	150以下
水銀	0.0015以下	0.0005以下	15以下
セレン	0.03以下	0.01以下	150以下
ふっ素	15以下	0.8以下	4000以下
ほう素	20以下	1以下	4000以下

※平成 23 年 10 月より公共用水域の水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準及び地下水の水質汚濁に係る環境基準のカドミウムの基準値が 0.003mg/L 以下に改正されたことを受けた値である。

出典) 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル ((一財) 沿岸技術研究センター)

3) 海洋生物への影響

製鋼スラグが海洋生物に与える影響については、これまでに様々な安全性確認試験が行われているが、海洋生物に与える影響は見られていない。

【参考文献】

- 1) (一財)沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル、平成 27 年 1 月
- 2) (一財)土木研究センター：建設発生土利用技術マニュアル第 4 版、平成 25 年

3.8.3 適用用途

(1) 概要

JIS規格が規定されている製鋼スラグをリサイクル材として利用する場合は、当該JIS規格に適合したものを利用するものとする。

JIS規格が規定されていない製鋼スラグをリサイクル材として利用する場合は、用途において必要となる要求性能を満たす材料を利用するものとする。

(解説)

品質性能及び利用実績の両面から、製鋼スラグ（コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材、土工用・地盤改良用製鋼スラグ）を各用途に利用する場合の評価を行った結果をそれぞれ表3.8.20、表3.8.21に示す。なお、利用に当たっての条件（用途、材料特性、加工・改良の必要性等）がある場合、評価の下に括弧書きで示している。

次項以降で、評価が「◎」「○+」「○」の用途について、適用方針、適用の利点及び留意事項等について記述する。

評価が「△」の用途は、利用可能性はあるが、既存資料からは判定できず今後の検討を要するものであり、「今後の検討を要する用途」として現状での技術的知見と今後の課題等について記述する。

表 3.8.20 製鋼スラグ（コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典
		品質性能	利用実績	
① コンクリート用細骨材	◎	A	●既に当該用途を想定した品質基準が設けられている。 【主な内容】 ・1)コンクリート用骨材として用いるための適用範囲や品質、試験方法、検査方法、表示、報告等について、品質基準を規定。 ・2)コンクリート用骨材として使用する際の施工指針が記載。	1) 2)
② コンクリート用粗骨材	◎	A		
③ 混和材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
④ パーカルドレン及びサンドマット材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑤ サンドコンパクションパイル材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑧ 中詰材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑩ 裏込材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑪ 裏埋材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑬ 埋立材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	-	-	●用途対象外	●利用実績なし
⑱ その他	-	-	●用途対象外	●利用実績なし

出典)

1) JISA5011-4「コンクリート用スラグ骨材-第4部：電気炉酸化スラグ骨材」（平成25年3月改正）

2) 電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（土木学会、平成15年3月）

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容をとりまとめたものである。

表 3.8.21 製鋼スラグ（土工用・地盤改良用製鋼スラグ）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典		
		品質性能	利用実績			
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
③ 混和材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
④ パーティクルレイン及びサンドマット材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑤ サンドコンパクションパイル材	◎ (粘性土であれば高置換)	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 物理的特性、力学的特性、化学的特性、設計施工指針、満たすべき品質及び性能などに関する事項を記載。砂質土地盤の締め固めを目的とするものと粘性土地盤を改良するためのもののいずれにも製鋼スラグを用いて良いとされている。また、粘性土地盤を対象とする場合、原則として高置換率に用いるものとされている。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・岸壁築造工事（国交省） ・岸壁改築工事（国交省） ・地盤改良工事（国交省） ・ふ頭耐震工事（管理者）	1)
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑧ 中詰材	△ (安定化材)	D	●用途として利用可能であるが、課題等も挙げられている。 ・マニュアル等や技術資料等で用途として利用可能であるが、課題等も挙げられている。 (p.3-8-27) 【主な内容】 ・2) 転炉系製鋼スラグの化学的・物理的特性、用途、満たすべき品質、性能、モニタリング調査などに関する事項を記載。適用用途として、ケソン中詰材の用途への適用を記載。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・岸壁ケーソン製作その他工事（国交省）	2)
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑩ 裏込材	△	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 転炉系製鋼スラグの化学的・物理的特性、用途、満たすべき品質・性能、モニタリング調査などに関する事項を記載。 ・適用用途として、岸壁裏込め材の用途への適用を記載。	-	●利用実績なし	2)
⑪ 裏埋材	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 ・裏込材の利用マニュアル及び実績を基に、利用検討が可能と考えられる。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・航路整備事業（国交省）	
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 物理的特性、力学的特性、化学的特性、設計施工指針、満たすべき品質及び性能などに関する事項を記載。天然の砂や砂利と同様の粒状材料として、置換工、覆土工、載荷盛土工に用いることができるとされている。 ・2) 転炉系製鋼スラグの化学的・物理的特性、用途、満たすべき品質・性能、モニタリング調査などに関する事項を記載。 ・適用用途として、盛土材の用途への適用を記載。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・航路整備事業（国交省） ・ふ頭整備工事（管理者、その他機関） ・空港整備事業（その他機関）	1) 2)
⑬ 埋立柱	△	D	●用途として利用可能であるが、課題等も挙げられている。 ・マニュアル等や技術資料等で、用途の検討が行われたことは確認できないが、公共工事において利用実績があり、かつ利用面で汎用性が高いと考えられる。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・埋立柱工事（管理者）	
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑮ 路盤材	◎ (未舗装道路)	A	●既に当該用途を想定した品質基準が設けられている。 【主な内容】 ・2) 転炉系製鋼スラグの化学的・物理的特性、用途、満たすべき品質・性能、モニタリング調査などに関する事項を記載。製鋼スラグの適用用途として、路盤材の用途への適用を記載。 ・3) 未舗装道路及び整地に用いるための適用範囲や品質、試験方法、検査方法、表示、報告等について、品質基準を規定。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・滑走路建設工事（国交省） ・岸壁築造等工事（国交省）	2) 3)
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	○+ (浅場・干潟、覆砂)	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 4) 実証試験等において、藻場造成材、浅場造成（嵩上げ）材、覆砂材などへの適用を記載。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・築堤嵩上工事等（国交省） ・藻場造成実証実験（その他機関）	2) 4)
⑱ その他	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	

出典)

1) 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル（一財）沿岸技術研究センター、平成27年2月）

2) 転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き（（社）日本鉄鋼連盟、平成20年9月）

3) JSTM8001「土工用製鋼スラグ砕石」（一財）建材試験センター、平成28年3月）

4) 製鋼スラグを用いた藻場造成・水質改善技術（JFEスチール（株）、JFEシメント（株））：環境省ETV事業

注）表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

(2) コンクリート用細骨材・粗骨材

電気炉スラグは、コンクリート用の骨材として JIS 化され、「電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案）（土木学会）」、「電気炉酸化スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計・施工指針（案）（日本建築学会）」で電気炉酸化スラグ骨材を用いるコンクリート構造物の施工についての標準が示されている。

電気炉酸化スラグは、熔融酸化工程で生成される酸化スラグを徐冷あるいは急冷したものである。破碎工程や、磁力選別により鉄分を除去し、粒度調整したものが電気炉酸化スラグ骨材である。電気炉酸化スラグは、安定な鉱物組成からなり、含有シリカ分は少なく、組織の崩壊を発生させる恐れのある化学成分の含有は微量である。これを骨材として用いたコンクリートは、有害な化学反応やひび割れの発生はなく、コンクリート用骨材として利用することができる。

電気炉酸化スラグをコンクリート用骨材として使用する研究は、鐵鋼スラグ協会において平成 8 年から開始され、規格化が審議され、平成 15 年に JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」が制定された。製造工場の工程と管理状態が検査され、「JIS マーク表示認定工場」として認定された工場で製造されたものだけが、コンクリート用骨材として使用できる。

電気炉酸化スラグ骨材は副産資源の有効利用や環境負荷の低減の観点から、コンクリート用骨材として積極的な利用が望まれる。また、粒度分布が適当でない砂などの粒度調整用骨材として、天然骨材を補完する骨材資源として利用することができる。また、電気炉酸化スラグ骨材の製造工程で海水を使用しておらず塩化物含有量は極めて少ないので、塩化物量や粒度が基準から単独で使用できない海砂や山砂、砕砂などに、電気炉酸化スラグ細骨材を適当な割合で混合使用することにより、細骨材の品質を改善することができる。

粗骨材に砂利や碎石を用い、砂や砕砂の容積の 30%程度までの範囲で電気炉酸化スラグ細骨材を混合使用したコンクリートの単位容積質量の増加は、 100kg/m^3 以下であり、ブリーディングや凝結性などフレッシュコンクリートの品質や硬化コンクリートの品質も、通常のコンクリートと大差ないものとなる。したがって、この範囲の混合率では一般土木構造物に特別の配慮を必要とせず、普通コンクリートとして用いることができる。

電気炉酸化スラグ骨材の密度が大きいことを活かして、重量コンクリートを製造することができる。重量コンクリートの製造例を表 3.8.22 に示す。

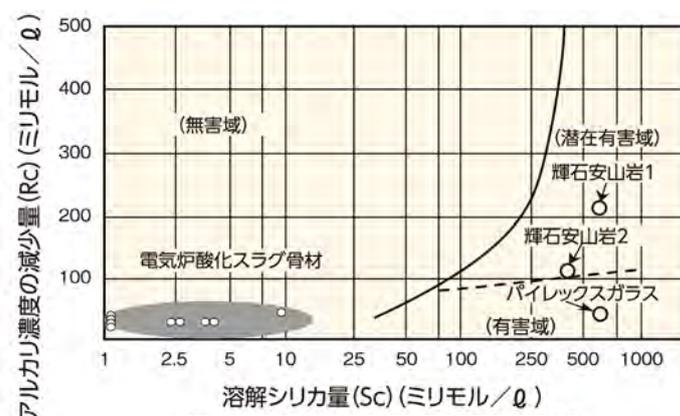
粗骨材または細骨材の全量に電気炉酸化スラグ骨材を用いた場合、コンクリートの重量は約 $2,650\text{kg/m}^3$ になる。このコンクリートは普通コンクリートに比較して単位容積質量が 15%程大きいため、消波ブロック・重力式擁壁・地下水の浮力対策等重量を要するコンクリートに使用することにより経済的効果が期待できる。

表 3.8.22 重量コンクリートの製造例

	スラグ骨材混合率		スランプ (cm)	W/C (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (28日) (N/mm ²)
	細骨材 (%)	粗骨材 (%)				
重量コンクリートⅠ	0	100	8	54.5	2650	30
重量コンクリートⅡ	42	0	8	47.0	2500	40
重量コンクリートⅢ	100	100	8	40.4	3000	45

コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材をコンクリート用細骨材・粗骨材に利用する場合、以下の利点がある。

- ①電気炉酸化スラグ骨材は、溶融シリカ量が少なく、それ自体はアルカリシリカ反応を起こさない。

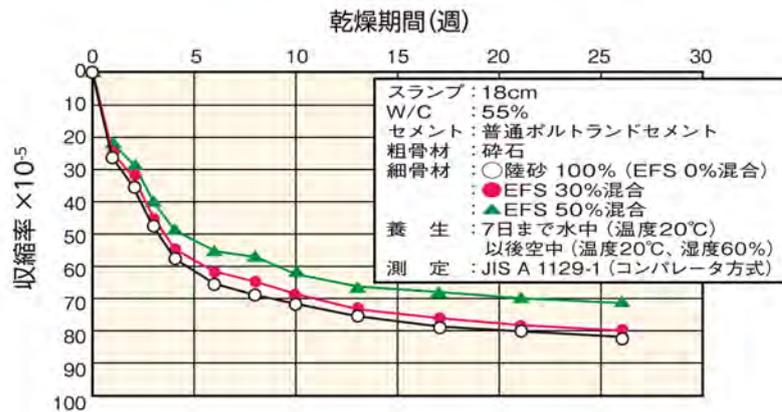


出典) 電気炉酸化スラグ利用研究準備委員会 実験データ

図 3.8.11 アルカリ骨材反応の有害判定区分

- ②乾燥収縮は、天然砂を使用したものと比較して同等か、もしくはやや小さい傾向にある。

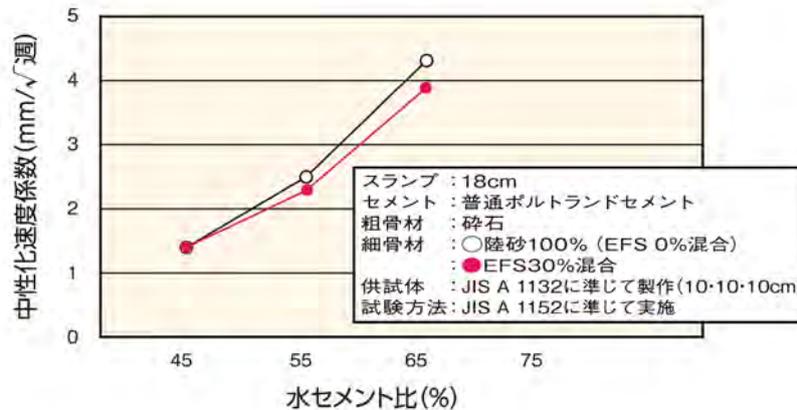
普通粗骨材を用いたコンクリートで、電気炉酸化スラグ細骨材混合率を変化させたときの乾燥収縮試験結果を図 3.8.12 に示す。混合率を大きくするほど、乾燥による長さ変化率が小さくなる傾向が認められる。電気炉酸化スラグ骨材の使用量を大きくするほど乾燥収縮量の減少傾向が現れるのは電気炉酸化スラグ骨材のヤング係数が大きいことによる収縮の拘束効果によるものと考えられる。



出典) 電気炉酸化スラグ骨材を用いた建築用コンクリートに関する委託調査研究報告書 ((一社) 日本建築学会)

図 3.8.12 乾燥収縮試験結果の例

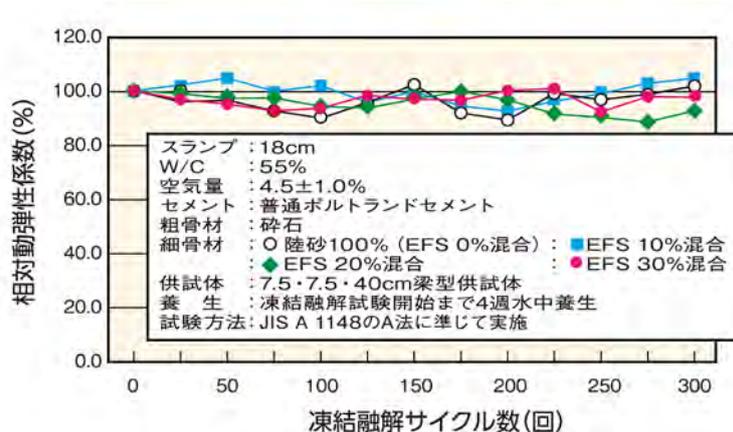
③普通ポルトランドセメントと天然砂を使用したコンクリートの促進中性化試験結果をグラフに示す。天然砂 100%のものと比較して電気炉酸化スラグ細骨材を 30%混合したものは、中性化速度係数がほぼ同じ値を示している。



出典) 電気炉酸化スラグ骨材を用いた建築用コンクリートに関する委託調査研究報告書 ((一社) 日本建築学会)

図 3.8.13 促進中性化試験結果の例

④電気炉酸化スラグ細骨材が 30%の範囲では、凍結融解 300 サイクルでも相対動弾性係数が 90% 以上を示しており、良質の砂を用いた場合とほぼ同等とみなすことができる。



出典) 電気炉酸化スラグ骨材を用いた建築用コンクリートに関する委託調査研究報告書 ((一社) 日本建築学会)

図 3.8.14 凍結融解サイクル回数と相対動弾性係数の測定例

電気炉酸化スラグ骨材の密度の大きいことを活かして重量コンクリートを製造する場合、次のような留意が必要である。

- ・粗骨材の全量に電気炉酸化スラグ骨材を使用する場合は、標準的な AE 減水剤を用いて通常のコンクリートと大差なく製造することができる。
- ・細骨材に電気炉酸化スラグ細骨材を使用しその混合率が例えば 40%と大きい場合は減水率の大きい AE 減水剤が必要になる。
- ・粗骨材・細骨材の全量に電気炉酸化スラグ骨材を使用する場合、単位容積質量を $3,000\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートの製造が可能になるが、単位水量やブリーディングの増加が生じ、ワーカビリティが低下するため、微粒分の増加や特殊な減水剤の使用等、適切な対策が必要である。

(3) サンドコンパクションパイル材

製鋼スラグのサンドコンパクションパイル材への利用については、平成 27 年に (一財) 沿岸技術研究センターから「港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル」が発行されており、各基準類の補足資料として参考にすることができる。

製鋼スラグは、粒状材料として砂地盤の締固め及び粘性土地盤の改良どちらの目的にも利用することができる。粒度分布が良く、締固めしやすい材料であり、砂よりせん断抵抗角と単位体積重量が大きいため、地盤改良の施工量を低減することができる。ただし、製鋼スラグには水硬性及び膨張性といった、天然の砂や砂利にはない特性を持つ材料であるため、これらについての長期的な変化を確認する必要がある。経時的に硬化すると透水係数が低下するため、粘性土地盤の改良を目的として利用する場合には、原則として高置換率改良での利用となる。

製鋼スラグの膨張性については、エージング処理等により抑えることが可能である。エージング以外の膨張量抑制方法としては、事例は少ないが、粒度調整 (細粒分を除くなど) や、ゆる詰め状態にするなどの方法が取られた事例がある¹⁾。

また、製鋼スラグの性状は、製造所間で差が見られるため、実際に使用するスラグの性質を把握し

表 3.8.23 使用材料による必要改良幅の違い(改良率 78.5%, 応力分担比=1)

項 目		SCP 材料		天然砂 $\gamma_t=18\text{kN/m}^3$ $\gamma' =10\text{kN/m}^3$ $\phi=35^\circ$	製鋼スラグ $\gamma_t=23\text{kN/m}^3$ $\gamma' =16\text{kN/m}^3$ $\phi=40^\circ$
		SCP 部の評価		$\phi=45^\circ$ の 一様な砂地盤	$\phi=45^\circ$ の 一様な砂地盤
偏心傾斜荷重 に対する検討 (ビショップ法)	耐力作用比	永続 状態		1.378	1.375
		L1 地震 変動 状態		1.030	1.005
円弧すべり の検討 (修正フェロクス法)	SCP 部の評価		SCP と粘性土 の複合地盤	SCP と粘性土 の複合地盤	
	計算に用いる ϕ 及び n		$\phi=35^\circ$ $n=1$	$\phi=40^\circ$ $n=1$	
	耐力作用比	永続 状態	1.005	1.127	
必要改良幅 (m)				24.5	20.5

【参考文献】

- 1) (一財)沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル、平成 27 年 1 月
- 2) (財)沿岸技術研究センター：港湾関連港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書「水硬性スラグコンパクションパイル材料「エコガイアストーン」第 10001 号」、pp.15-18、2010
- 3) 土質工学会：軟弱地盤対策工法、pp.121、1988

(4) 裏埋材

土工用・地盤改良用製鋼スラグを裏埋材に利用する場合は、天然材より単位体積重量が大きく、土圧が増加するため、安定計算上留意する必要がある。

また、水硬性も有しているため、硬化前と硬化後の地震時の挙動について検討する必要がある。

製鋼スラグの溶出水は、一般に pH が高いため、環境への影響を留意する必要がある。

(5) 盛土材、覆土材、載荷盛土材、路盤材（未舗装道路）

製鋼スラグの利用については、平成 27 年に（一財）沿岸技術研究センターから「港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル」が発行されているため、同マニュアルを各基準類の補足資料として参考にすることができる。

製鋼スラグの性状は、製造所間で差が見られるため、実際に使用するスラグの性質を把握しておくことが肝要である。そのために、必要であれば事前に試験等を行うことが望ましい。また、製鋼スラグの溶出水は、一般に pH が高いことから雨水等の排水に際して場合によっては中和処理等が必要と

なる。

製鋼スラグは、粒状材料として砂や砂利と同様に扱うことができ、天然の砂と比較して単位体積重量、せん断抵抗角が大きいという優れた特性がある。また、載荷盛土に利用した場合、その重さと締め固め特性を活用することによって、効果的な圧密促進が期待でき、盛土工事数を低減させることができる。載荷盛土としては、横浜港南本牧埠頭で高炉徐冷スラグと混合に利用した実績もある。

一方で、載荷盛土材として利用する場合、その重量、施工時の斜面の安定が問題となるので、製鋼スラグの単位体積重量、せん断特性等について十分理解する必要がある。また、製鋼スラグの溶出液は高 pH となるため、利用に際しては周辺環境に十分配慮する必要がある。

路盤材への適用については、「JSTM H 8001：土工用製鋼スラグ砕石」（（一財）建材試験センター）において、仮設道路を含む未舗装道路に使用する際の品質、試験方法、検査等について規定されている。「3.9.1 道路用鉄鋼スラグ」についても併せて参照されたい。

(6) 藻場・浅場造成材、覆砂材

製鋼スラグの藻場・浅場造成材、覆砂材としての利用については、平成 20 年に（社）日本鉄鋼連盟から「転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き」が発行されているため、参考にすることができる。

製鋼スラグは、粒度分布がよく、せん断抵抗角が大きいなどの物理特性や、富栄養化物質の吸着による底質浄化作用を有することから、経済性や環境面から天然土砂を利用するよりもメリットが生じる場合がある。

しかし、一般に、水と接触することで高 pH 水を溶出することが多いことから、その利用にあたっては、周辺の環境に悪影響を与えることのないように十分留意することが必要である。使用環境を見極めた上で、アルカリ溶出を低減するための加工や工事施工における工夫、周辺地盤によるアルカリ吸着能の活用等の対策を講じる必要がある。

藻場造成材は、海藻の付着基盤として海藻藻場の生育を促すことを目的として使用される。製鋼スラグは、一般的に藻類の生育に必要な二価鉄 (FeO) を多く含み、藻場造成材に利用することにより、藻類の生育を促進できる場合がある¹⁾。

浅場造成材は、海底の水深を浅くする土台を造成して、干潟や浅場を作ることを目的に使用される。製鋼スラグは、一般的にせん断抵抗角が大きい²⁾ことから、嵩上げ材としての十分な地形安定性が期待できる。

覆砂材は、富栄養化等により汚濁した底質表層を覆うことにより、底質からの栄養塩や硫化水素の溶出を抑制し、生物の生息環境を改善することを目的として使用するものである。製鋼スラグは底質間隙水中のリンや硫化物の濃度を減少させる性質を有していることから、富栄養化海域の底質に利用することにより、底質からの水質汚濁を抑制することが期待できる¹⁾。

一方で、製鋼スラグは、水と接触することで高 pH 水を溶出することから、周辺海水に影響を与えるような pH 上昇や白濁等が生じないように対策を講じる必要がある。製鋼スラグを物理的、化学的に加工し安定化処理を行うことにより、高 pH 水の溶出性を低下させることができる。安定化処理の方法としては、以下のような事例がある。

a) 粒度調整による方法

粒度を調整して、製鋼スラグの細粒分を取り除くことで pH の上昇を抑えることができる。海水との接触面積が小さくなり海水中での石灰の溶解が少なくなり、同時に海水中の OH⁻ の増加も少なくなるためである。

b) 炭酸化による方法

製鋼スラグをミキサにより攪拌しながら、CO₂ ガスを吸収させることにより、高 pH 溶出の原因となる f-CaO を安定的な CaCO₃ (炭酸カルシウム) に変化させることができる。炭酸固化体と異なり、処理後も粒状体である。

【参考文献】

- 1) (一財)沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル、平成 27 年 1 月
- 2) (社)日本鉄鋼連盟：転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き、平成 20 年 9 月

(7) 今後の検討を要する用途

1) 中詰材 (安定化材料)

製鋼スラグは、粒状材料として、ケーソン、セル、二重矢板式構造物などの中詰材としても利用が考えられる。これらの用途に利用した場合、単位体積重量が大きいいため安定計算上有利となる場合が多い。ただし、製鋼スラグには水と反応して膨張する性質があるため、スラグの膨張が外壁等に影響を与えないよう注意する必要がある。

製鋼スラグを中詰材として利用した場合、膨張による内部土圧の増加によって、構造物に二次応力が働く可能性がある。四日市港での鋼板セル中詰材としての実証試験では、影響は観察されなかったが、数十年といった期間での影響までは保証されていない。従って、今後は、製鋼スラグの持つ膨張性及び水硬性について、長期的な影響を把握することが重要である。

【既存工事における検討事項】

- ・浚渫土とスラグを混合して、単位体積重量を調整して中詰材とする場合、単位体積重量試験で確認した。(ケーソン製作その他工事)

2) 裏込材

製鋼スラグは、粒状材料として砂や砂利と同様に扱うことができ、天然の砂と比較して単位体積重量、せん断抵抗角が大きいという優れた特性がある。その特性を利用して、裏込材へ適用が可能である。一方で、その重量、施工時の斜面の安定が問題となるので、製鋼スラグの単位体積重量、せん断特性等について十分理解する必要がある。また、製鋼スラグの溶出水は高 pH となるため、利用に際しては周辺環境に十分配慮する必要がある。

3) 埋立材

土工用・地盤改良用製鋼スラグを埋立材に利用する場合は、天然材より単位体積重量が大きい点を留意する必要がある。また、製鋼スラグの溶出水は、一般に pH が高いため、環境への影響を留意する必要がある。

3.8.4 関連法令

製鋼スラグは産業副産物等に該当する。産業副産物等の法令上の取り扱いについては、「1.4.2 環境安全の考え方」を参照のこと。

3.8.5 施工後の再利用・廃棄の考え方

施工後に再利用・廃棄を行う場合、発生する材料の種類に応じて検討を行うものとする。
--

(解説)

製鋼スラグを材料として用いた箇所の改修・撤去等により生じた建設副産物を再びリサイクル材料として利用または廃棄する場合は、発生する材料の種類に応じて、本ガイドラインの該当箇所を参照し、検討を行う。

なお、コンクリート用電気炉酸化スラグ骨材については、JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材―第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」において、再利用・廃棄を含めライフサイクルの合理的に想定する範囲において、電気炉酸化スラグ骨材から影響を受ける土壌、地下水、海水などの環境媒体が、各々の環境基準などを満足できるように、電気炉酸化スラグ骨材が確保すべき品質（環境安全品質）を満足するための検査の実施が規定されている。

また、再利用・廃棄を検討する際に、使用したリサイクル材料の種類、品質及び量等の情報が重要となるため、これらの情報を維持管理計画等に記載しておくことを標準とする。

3.9 鉄鋼スラグ混合製品（道路用鉄鋼スラグ・水硬性スラグコンパクション材）

3.9.1 製造・供給

道路用鉄鋼スラグは、高炉スラグ及び製鋼スラグを素材とし、これらの単独または組み合わせて製造されている。

水硬性スラグコンパクション材は、軟弱粘性土地盤改良用の固結タイプと、軟弱砂質土地盤液状化対策用の摩擦タイプが製造されている。

（解説）

(1) 製造方法

1) 道路用鉄鋼スラグ

冷却した高炉徐冷スラグや製鋼スラグは、ブルドーザで掘り起し、破碎プラントへ運搬する。破碎プラントでは、所定の粒度に破碎すると同時に磁力による金属鉄除去を行う。

破碎した鉄鋼スラグはヤードに運び、高炉徐冷スラグは黄色水防止のため、製鋼スラグは f-CaO による膨張防止のためにエージングを行う。製鋼スラグの大気エージングの場合、転炉系スラグは 6 ヶ月以上、電気炉系スラグは 3 ヶ月以上のエージングを行う。現在、製鋼スラグのエージング期間を短縮するために、蒸気や加圧蒸気を使用する促進させエージング期間を短時間でを行う方法が一般的である。

エージングにより安定化した高炉徐冷スラグや製鋼スラグ単味で、必要に応じて高炉徐冷スラグ、転炉系スラグ、高炉水砕スラグを所定の割合で混合したり、粒度調整を行い路盤用鉄鋼スラグとなる。電気炉スラグの場合は、一般に電気炉スラグ単味で鉄鋼スラグ路盤材が製造されている。製造法の例を図 3.9.1 に示す。

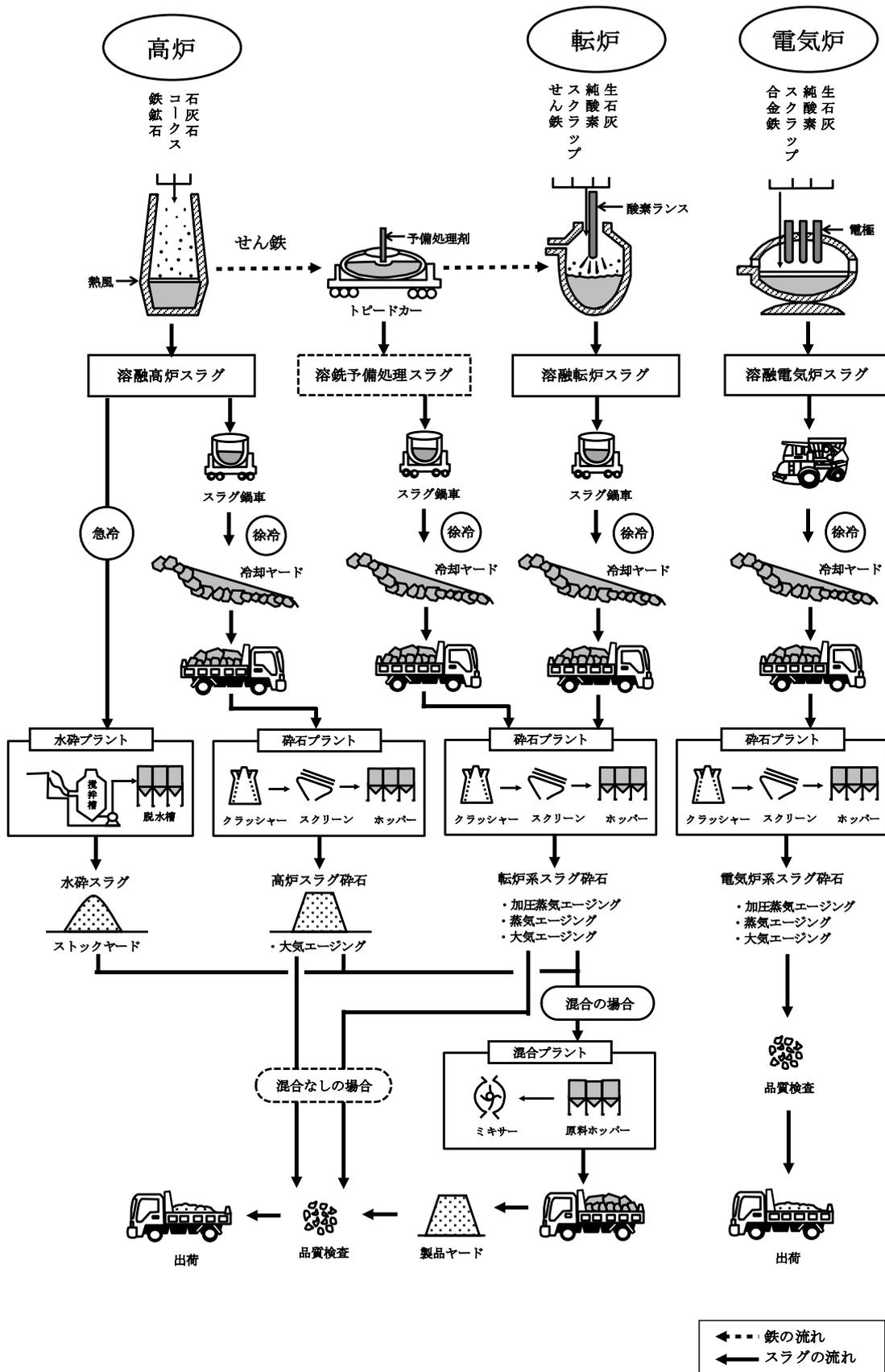


図 3.9.1 鉄鋼スラグ路盤材製造の例

2) 水硬性スラグコンパクション材

水硬性スラグコンパクション材は、平成 22 年に「(一財) 沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号」にて審査・評価されており、実績もある材料である。

① 固結タイプ（軟弱粘性土地盤改良用）

製鋼スラグに、高炉徐冷スラグまたは水砕スラグを質量混合比で 15%～50%の範囲で混合して製造される材料で、一軸圧縮強さ（材令 28 日）60kN/m²以上の固結性能を有する材料である。

固結に伴う粘着力成分の効果によりせん断抵抗の向上が期待できるため、設計用せん断抵抗角 42°以上（粘着力成分を加味した見掛けのせん断抵抗角）とすることができる。

② 摩擦タイプ（軟弱砂質土地盤液状化対策用）

製鋼スラグ単味または、製鋼スラグに高炉徐冷スラグもしくは水砕スラグを質量混合比で 50%以下の範囲で混合して製造される材料で、せん断抵抗角 35°以上の材料である。

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

陸上輸送：製造所（製鉄所）周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

海上輸送：全国

海上輸送＋陸上輸送：全国の港周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

2) 製造所（製鉄所）の立地場所

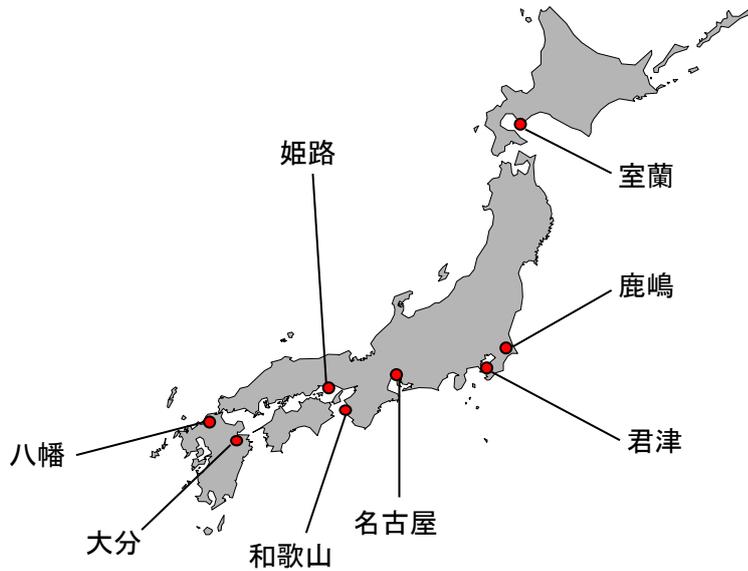
① 道路用鉄鋼スラグ



出典) 港湾工事推奨用リサイクル製品便覧（平成 25 年度版）（リサイクルポート推進協議会）より作成

図 3.9.2 道路用鉄鋼スラグ製造所（製鉄所）の立地場所

② 水硬性スラグコンパクション材



出典) 港湾工事推奨用リサイクル製品便覧(平成25年度版)(リサイクルポート推進協議会)より作成

図 3.9.3 水硬性スラグコンパクション材製造所(製鉄所)の立地場所

3) 生産量

- ①道路用鉄鋼スラグ：22万～28万 m³/月(平成20～24年度の出荷実績ベース)(高炉スラグ、製鋼スラグの合計)
- ②水硬性スラグコンパクション材：1～3万ト程度/月・製造所(出荷実績ベース)

3.9.2 品質

道路用鉄鋼スラグは、JIS規格が規定されている。

水硬性スラグコンパクション材は、(財)沿岸技術研究センターの港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第06001号にて品質が規定されている。

(解説)

(1) 道路用鉄鋼スラグ

1) 鉄鋼スラグ路盤材に使用される材料

道路用鉄鋼スラグは、道路の路盤材に使用され、JIS A 5015 に規格が定められており、これに適合するものを使用する。

2) JIS A 5015 で規定されている規格

① 種類及び呼び名

道路用鉄鋼スラグの種類、呼び名、及び用途を表 3.9.1 に示す。

表 3.9.1 種類と呼び名

種類	呼び名	用途 (参考)
水硬性粒度調整鉄鋼スラグ	HMS-25	上層路盤材
粒度調整鉄鋼スラグ	MS-25	上層路盤材
クラッシュラン鉄鋼スラグ	CS-40	下層路盤材
	CS-30	
	CS-20	
単粒度製鋼スラグ	SS-20	加熱アスファルト混合物用
	SS-13	
	SS-5	
クラッシュラン製鋼スラグ	CSS-30	瀝青安定処理 (加熱混合) 用

出典) JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」

② HMS、MS、CS の品質規格

表 3.9.2 に物理・化学的性質の規格を、表 3.9.3 に粒度の規格を示す。徐冷スラグから黄濁水が発生しないことを確認するための黄色判定や、製鋼スラグの膨張安定性を判定する水浸膨張比が規格に織り込まれている。

表 3.9.2 HMS、MS、CS の物理・化学的性質

項目	呼び名					備考
	HMS-25	MS-25	CS-40	CS-30	CS-20	
呈色判定	呈色なし					高炉徐冷スラグを用いた道路用鉄鋼スラグに適用する。
水浸膨張比 %	1.5 以下					製鋼スラグを用いた道路用鉄鋼スラグに適用する。
単位容積質量 kg/L	1.50 以上	—	—	—	—	
一軸圧縮強さ MPa	1.2 以上	—	—	—	—	
修正 CBR %	80 以上	80 以上	30 以上	30 以上	30 以上	舗装設計施工指針付表-8.1.38

注：修正 CBR は、受渡当事者間の協議によって品質を規定することができる。

出典) JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」

表 3.9.3 HMS、MS、CS の粒度

呼び名	粒度 範囲 mm	ふるいを通るものの質量分率 (%)									
		JIS Z 8801-1 に規定する金属製網ふるいの公称目開き									
		53 mm	37.5 mm	31.5 mm	26.5 mm	19 mm	13.2 mm	4.75 mm	2.36 mm	425 μm	75 μm
HMS-25	25~0	—	—	100	95~100	—	60~80	35~60	25~45	10~25	3~10
MS-25	25~0	—	—	100	95~100	—	55~85	30~65	20~50	10~30	2~10
CS-40	40~0	100	95~100	—	—	50~80	—	15~40	5~25	—	—
CS-30	30~0	—	100	95~100	—	55~85	—	15~45	5~30	—	—
CS-20	20~0	—	—	—	100	95~100	60~90	20~50	10~35	—	—

出典) JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」

③ SS、CSS の品質規格

表 3.9.4 に物理・化学的性質の規格を、表 3.9.5 に粒度の規格を示す。

表 3.9.4 SS、CSS の物理・化学的性質

項目	呼び名				
	SS-20	SS-13	SS-5	CSS-30	CSS-20
水浸膨張比 %	2.0 以下			2.0 以下	
表乾密度 g/cm ³	2.45 以上			—	
吸水率 %	3.0 以下			—	
すりへり減量 %	30 以下			50 以下	

出典) JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」

表 3.9.5 SS、CSS の粒度

呼び名	ふるいを通るものの質量分率							
	JIS Z 8801-1 に規定する金属製網ふるいの公称目開き							
	37.5 mm	31.5 mm	26.5 mm	19 mm	13.2 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
SS-20	—	—	100	85~100	0~15	—	—	—
SS-13	—	—	—	100	85~100	0~15	—	—
SS-5	—	—	—	—	100	85~100	0~25	0~5
CSS-30	100	95~100	—	55~85	—	15~45	5~30	—
CSS-20	—	—	100	95~100	60~90	20~50	10~35	—

出典) JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」

3) 環境安全品質

平成 25 年、JIS A 5015 に道路用鉄鋼スラグの環境安全品質基準が規定された。

表 3.9.6 に環境安全品質基準を、表 3.9.7 に調査結果を示すが、全数基準値以下である。

製造業者は、購入者から要求があった場合には、試験成績表を提出する必要があると定められている。

表 3.9.6 環境安全品質基準

項目	溶出量 (mg/L)	含有量 ^{a)} (mg/kg)
カドミウム	0.01 以下※	150以下
鉛	0.01 以下	150以下
六価クロム	0.05 以下	250以下
ひ素	0.01 以下	150以下
水銀	0.0005 以下	15以下
セレン	0.01 以下	150以下
ふっ素	0.8 以下	4 000以下
ほう素	1 以下	4 000以下

注^{a)} ここでいう含有量とは、同語が一般的に意味する“全含有量”とは異なることに注意を要する。

※カドミウムについては、平成 23 年 10 月より地下水の水質汚濁に係る環境基準が 0.003mg/L 以下に改正されたため、留意が必要である。

出典) JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」

表 3.9.7 道路用鉄鋼スラグの環境安全品質調査結果

化学物質	溶出量試験	含有量試験
カドミウム	全数基準値以下 (234/234)	全数基準値以下 (234/234)
鉛	全数基準値以下 (376/376)	全数基準値以下 (330/330)
六価クロム	全数基準値以下 (357/357)	全数基準値以下 (311/311)
ひ素	全数基準値以下 (234/234)	全数基準値以下 (234/234)
水銀	全数基準値以下 (234/234)	全数基準値以下 (200/200)
セレン	全数基準値以下 (376/376)	全数基準値以下 (330/330)
ふっ素	全数基準値以下 (382/382)	全数基準値以下 (330/330)
ほう素	全数基準値以下 (382/382)	全数基準値以下 (330/330)
注記 () 内は、基準値以下の試験体数/試験体全数		

(2) 水硬性スラグコンパクション材

表 3.9.8 に水硬性スラグコンパクション材の品質特性を示す。

表 3.9.8 水硬性スラグコンパクション材の性質と品質特性

項目		品質の範囲
物理的性質	粒度範囲	40 mm以下
	土粒子密度 (g/cm ³)	3.2~3.55
	湿潤単位体積重量 (kN/m ³)	22~26
力学的性質	固結タイプ：見掛けのせん断抵抗角 42° 以上 摩擦タイプ：せん断抵抗角 35° 以上	
膨張	80°C水浸膨張比	1.5%以下
呈色	呈色判定試験	合格
環境安全品質	土工用・地盤改良用製鋼スラグと同じ (3.8 参照)	

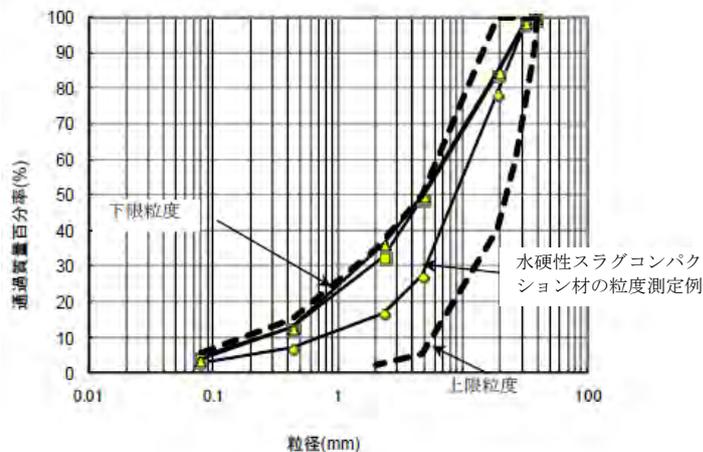
出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

以下に、品質の概要について記述する。

1) 物理・力学的性質

① 粒度

水硬性スラグコンパクション材の粒度は、図 3.9.4 の範囲内にある。



出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

図 3.9.4 水硬性スラグコンパクション材の粒度範囲と測定例

② 土粒子密度

固結タイプの土粒子密度は、 $3.2\sim 3.55\text{g/cm}^3$ である。なお、固結タイプの土粒子密度は、製造所が限定できる場合には、成績表により値を決めることができる。

摩擦タイプについては、 $3.2\sim 3.65\text{g/cm}^3$ である。

③ 単位体積重量

水硬性スラグコンパクション材の単位体積重量は、土粒子密度の場合と同様に製造所が限定できる場合には、成績表により値を決めることができる。なお、固結タイプについては、 $24.0\pm 2.0\text{kN/m}^3$ を標準としている。

④ せん断強度特性

固結タイプのせん断強度は摩擦成分(ϕ)と粘着力成分(c)の両方を併せ持つ $c-\phi$ 材としての特性を有する。なお、円弧すべり計算により安定性を評価する場合に用いるせん断強度定数は、粘着力 c の効果を考慮したみかけのせん断抵抗角 ϕ を用いることができ、 $\phi=42^\circ$ を標準としている。

⑤ 動的せん断強度特性

固結タイプの動的せん断強度特性を調べるために実施した土の繰返し非排水三軸試験結果より、従来の砂よりも高い動的せん断強度を有することが確認されている。

また、繰返しせん断に伴い、過剰間隙水圧が発生しゆるやかに上昇するが、液状化破壊しないことが確認されている。

⑥ 静的変形特性

固結タイプの変形特性を調べるために陸上打設した実杭の頭部で実施した平板載荷試験結果より、従来の砂杭よりも大きな剛性を有することが確認されている。

表 3.9.9 に示す試験結果より、固結タイプの沈下量は固結特性により砂杭に比べ約半分となり、剛性は地盤反力係数 K_{VE} 、弾性係数 E ともに約 2 倍になることが確認されている。

表 3.9.9 平板載荷試験結果（実杭の杭頭で実施）

	試験最大載荷圧力 (kN/m^2)	沈下量 (mm)	K_{VE} (MN/m^3)	E (MN/m^2)
砂杭	990.8	5.68	176.6	38.1
水硬性スラグコンパクション杭 (固結タイプ)	990.8	2.53	388.6	83.8

出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

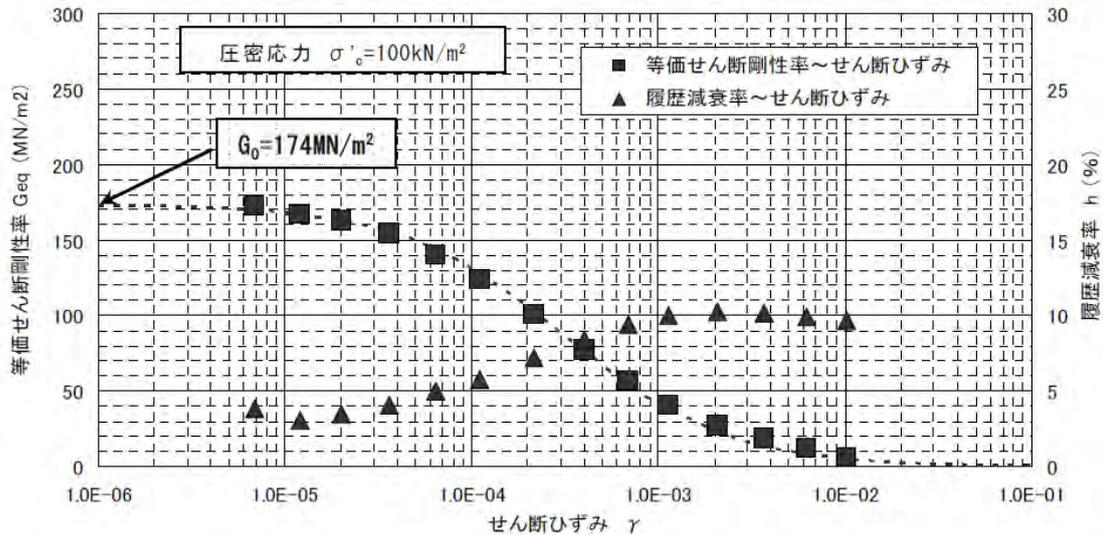
⑦ せん断剛性

固結タイプの変形特性を求めるために実施した、繰返し三軸試験による等価せん断剛性率 G_{cq} 及び履歴減衰率 h とせん断ひずみ振幅の関係を図 3.9.5 に示す。

一方、 $D_r=80\%$ と相対密度が比較的大きい砂の等価せん断剛性率の試験結果例を図 3.9.6 に示す。

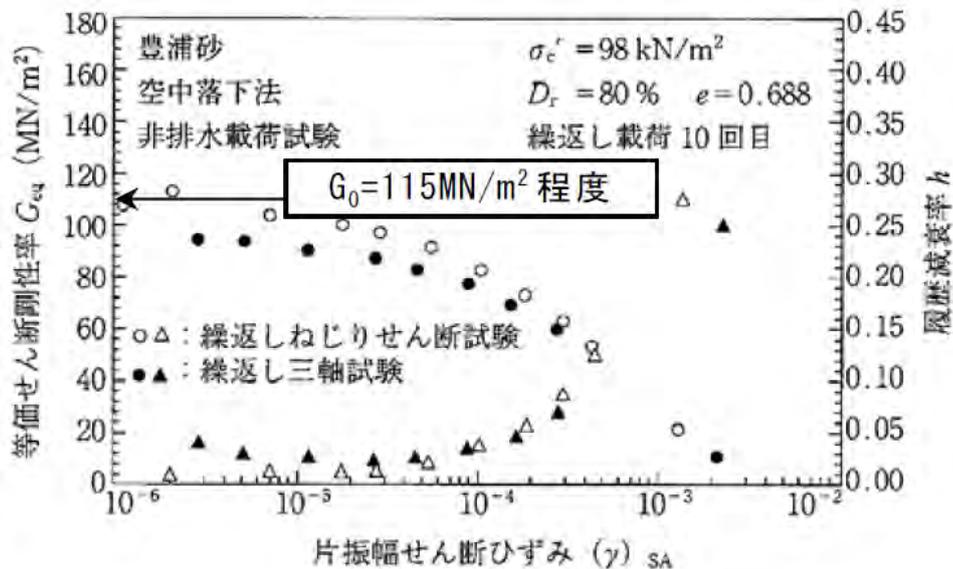
両者を比較して、固結タイプの初期せん断剛性率としては $G_0=174\text{MN/m}^2$ の値が得られており、砂の $G_0=115\text{MN/m}^2$ に対し大きな値を有することが確認されている。

図 3.9.7 は固結タイプの一軸圧縮強さと初期せん断剛性率 G_0 の関係を示したものである。これより一軸圧縮強さと初期せん断剛性率とは相関関係が認められている。



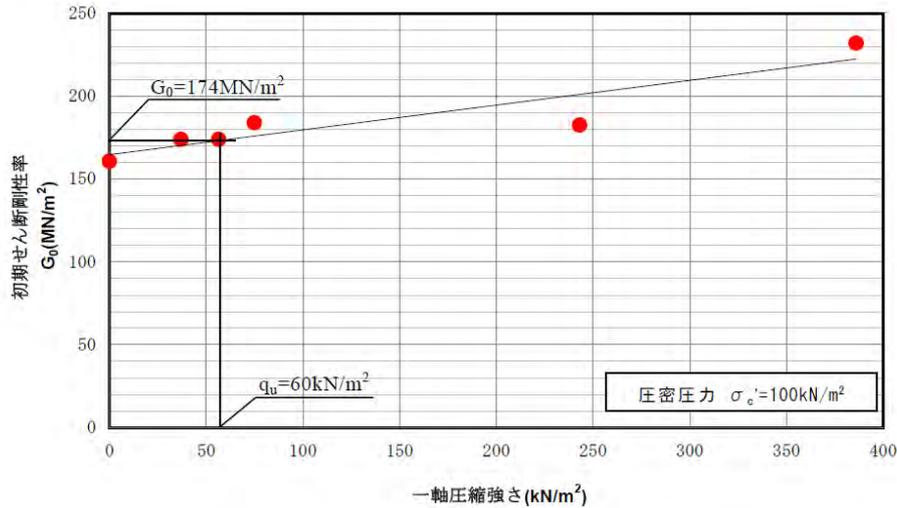
出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

図 3.9.5 等価せん断剛性率 G_{eq} とせん断ひずみ振幅の関係



出典) JGS 0543 土の変形特性を求めめるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法

図 3.9.6 砂の繰返し三軸試験及び繰返しねじりせん断試験結果の例



出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

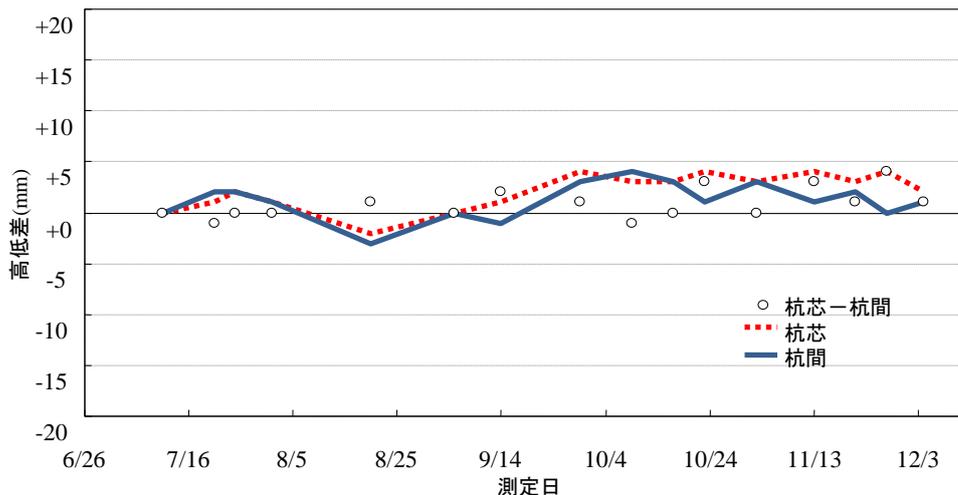
図 3.9.7 固結タイプの一軸圧縮強さと初期せん断剛性率の関係

⑧ 透水性

固結タイプは、水硬性の発現により経時的に透水性が低下するため、長期的な杭の透水性によるドレーン効果を期待する改良仕様には適用しないことが望ましい。

⑨ 膨張

水硬性スラグコンパクション材は膨張するが、水硬性スラグコンパクション材は 80℃水浸膨張比 (道路用鉄鋼スラグ : JIS A 5015) 1.5%以下で規定されている。また、陸上打設した実杭の頭部でレベル変化を測定した結果 (図 3.9.8) より、測定値は測定誤差範囲であり膨張影響は無いことが確認されている。



出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

図 3.9.8 実杭の杭頭変位測定結果

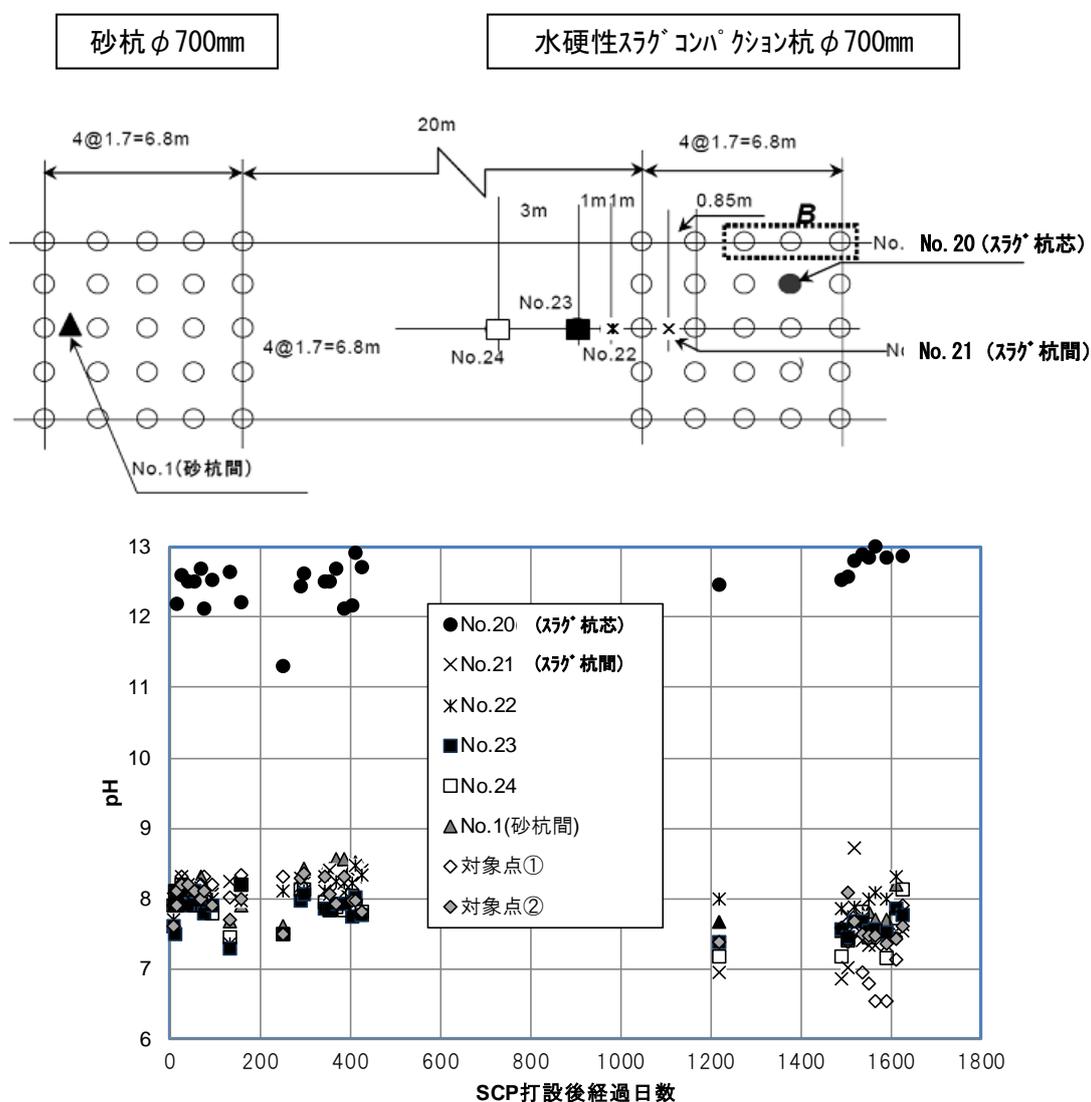
2) 化学的性質

① pH

水硬性スラグコンパクション材にて打設されたコンパクションからの溶出水は、破碎コンクリートやセメント安定処理土と同様にアルカリ性を示すが、海域及び陸域で利用する場合のいずれにおいても、周辺への影響はほとんどないことが確認されている。

海域では、海水による緩衝作用と希釈等により、pHの上昇がほとんどないことが pH 測定結果及び施工実績より確認されている。

また陸域では、土壌のアルカリ吸着作用により、pH 上昇は施工杭近傍のみに限定されることが試験杭での pH 測定結果（図 3.9.9）にて確認されており、また、実施工でも東京都品川地区にて実施した pH 測定にて同様の結果が得られている。¹⁾



出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

図 3.9.9 陸上試験杭での pH 測定結果 (平面配置図、pH 経時変化)

② 環境安全品質

水硬性スラグコンパクション材は、全て基準値以下であることが確認されている。

表 3.9.10 海洋汚染防止法水底上砂基準による溶出試験結果(環境庁告示第 14 号)

試験項目	単位	計量値	判定基準	定量限界	備考	
アルキル水銀化合物	mg/L	不検出	検出されないこと	0.005	・検定方法 海洋汚染・海上災害の防止に関する法律施行令第 5 条第 1 項に規定する埋立場所等に排出しようとする廃棄物に含まれる金属等の検定方法(昭 48 環告 14)による。	
水銀又はその化合物	mg/L	不検出	0.005 以下	0.0005		
カドミウム又はその化合物	mg/L	不検出	0.1 以下	0.01		
鉛又はその化合物	mg/L	不検出	0.1 以下	0.01		
有機りん又はその化合物	mg/L	不検出	1 以下	0.1		
六価クロム化合物	mg/L	不検出	0.5 以下	0.005		
砒素又はその化合物	mg/L	不検出	0.1 以下	0.01		
シアン化合物	mg/L	不検出	1 以下	0.1		
P C B	mg/L	不検出	0.003 以下	0.0005		
銅又はその化合物	mg/L	不検出	3 以下	0.05		
亜鉛又はその化合物	mg/L	不検出	5 以下	0.05		
ふっ化物	mg/L	2.2	15 以下	0.1		・判定基準 海洋汚染・海上災害の防止に関する法律施行令第 5 条第 1 項に規定する埋立場所等に排出しようとする金属などを含む廃棄物に係わる判定基準を定める総理府令(昭 48 総令 6)による。 ・不検出とは定量限界を下回ること。
トリクロロエチレン	mg/L	不検出	0.3 以下	0.001		
テトラクロロエチレン	mg/L	不検出	0.1 以下	0.001		
ベリリウム又はその化合物	mg/L	不検出	2.5 以下	0.01		
クロム又はその化合物	mg/L	不検出	2 以下	0.03		
ニッケル又はその化合物	mg/L	不検出	1.2 以下	0.05		
バナジウム又はその化合物	mg/L	不検出	1.5 以下	0.05		
有機塩素化合物	mg/kg	不検出	40 以下	2.5		
ジクロロメタン	mg/L	不検出	0.2 以下	0.001		
四塩化炭素	mg/L	不検出	0.02 以下	0.0002		
1,2-ジクロロエタン	mg/L	不検出	0.04 以下	0.0004		
1,1-ジクロロエチレン	mg/L	不検出	0.2 以下	0.001		
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	不検出	0.4 以下	0.001		
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	不検出	3 以下	0.001		
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	不検出	0.06 以下	0.0006		
1,3-ジクロロプロペン	mg/L	不検出	0.02 以下	0.0002		
チウラム	mg/L	不検出	0.06 以下	0.0006		
シマジン	mg/L	不検出	0.03 以下	0.0003		
チオペンカルブ	mg/L	不検出	0.2 以下	0.002		
ベンゼン	mg/L	不検出	0.1 以下	0.01		
セレン又はその化合物	mg/L	不検出	0.1 以下	0.002		
ダイオキシン類	pg-TEQ/g	0.009	10 以下	—		

出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成 22 年 12 月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

表 3.9.11 土壤環境基準による溶出/土壤汚染対策法含有量試験結果

土壤環境基準による溶出試験結果

試験項目	単位	計量値	判定基準	定量限界	備考
カドミウム及びその化合物	mg/L	不検出	0.01 以下	0.005	・環境基本法第16条第1項による土壤の汚染に係る環境上の条件 土壤の汚染に係る環境基準について（平3環告46）による。 ・不検出とは定量限界を下回ること。
六価クロム化合物	mg/L	不検出	0.05 以下	0.005	
シアン化合物	mg/L	不検出	1 以下	0.1	
アルキル水銀	mg/L	不検出	検出されないこと	0.0005	
水銀及びその化合物	mg/L	不検出	0.0005 以下	0.0005	
セレン及びその化合物	mg/L	不検出	0.01 以下	0.01	
鉛及びその化合物	mg/L	不検出	0.01 以下	0.005	
砒素及びその化合物	mg/L	不検出	0.01 以下	0.005	
ふっ素及びその化合物	mg/L	0.26～0.48	0.8 以下	0.1	
ほう素及びその化合物	mg/L	0.11	1 以下	0.002	

土壤環境基準による含有量試験結果

試験項目	単位	計量値	判定基準	定量限界	備考
カドミウム及びその化合物	mg/kg	不検出	150 以下	0.005	・環境基本法第16条第1項による土壤の汚染に係る環境上の条件 土壤の汚染に係る環境基準について（平3環告19）による。 ・不検出とは定量限界を下回ること。
六価クロム化合物	mg/kg	不検出	250 以下	0.005	
シアン化合物	mg/kg	不検出	50 以下	0.1	
アルキル水銀	mg/kg	不検出	15 以下	0.0005	
水銀及びその化合物	mg/kg	不検出	150 以下	0.0005	
セレン及びその化合物	mg/kg	不検出	150 以下	0.1	
鉛及びその化合物	mg/kg	不検出	150 以下	0.005	
砒素及びその化合物	mg/kg	不検出	150 以下	0.005	
ふっ素及びその化合物	mg/kg	1200～1400	4000 以下	0.1	
ほう素及びその化合物	mg/kg	87～92	4000 以下	0.002	

出典) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第06001号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン (平成22年12月内容変更、(財)沿岸技術研究センター)

【参考文献】

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第10001号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン、平成22年12月内容変更

3.9.3 適用用途

(1) 概要

JIS規格が規定されている用途に道路用鉄鋼スラグを利用する場合は、当該JIS規格に適合したものを利用するものとする。JIS規格が規定されていない用途に道路用鉄鋼スラグを利用する場合は、用途において必要となる要求性能を満たす材料を利用するものとする。

水硬性スラグコンパクション材を利用する場合は、関係する基準類に準拠し、用途において定まる要求性能を満たす材料を用いるものとする。

(解説)

品質性能及び利用実績の両面から、鉄鋼スラグ混合製品（道路用鉄鋼スラグ及び水硬性スラグコンパクション材）を各用途に利用する場合の評価を行った結果を、それぞれ表 3.9.12、表 3.9.13 に示す。なお、利用に当たっての条件（用途、材料特性、加工・改良の必要性等）がある場合、評価の下に括弧書きで示している。

次項以降で、評価が「◎」「○⁺」「○」の用途について、適用方針、適用の利点及び留意事項等について記述する。

評価が「△」の用途は、利用可能性はあるが、既存資料からは判定できず今後の検討を要するものであり、「今後の検討を要する用途」として現状での技術的知見と今後の課題等について記述する。

表 3.9.12 鉄鋼スラグ混合製品（道路用鉄鋼スラグ）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典		
		品質性能	利用実績			
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
③ 混和材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
④ ハーカドレン及びパッドマット材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑤ パッドコンパクションパイル材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑧ 中詰材	-	-	●用途対象外	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・防波堤築造工事（国交省）	
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑩ 裏込材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑪ 裏埋材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑬ 埋立材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑮ 路盤材	◎	A	●既に当該用途を想定した品質基準が設けられている。 【主な内容】 ・1)道路の路盤に使用する鉄鋼スラグ（高炉徐冷スラグ）に関して、適用範囲や品質、試験方法、検査、表示、報告等の品質基準を規定。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・岸壁築造工事（国交省） ・ケーンヤード補修工事（国交省） ・緑地造成工事（国交省） ・エプロン等改良工事（国交省）	1)
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	◎	A	●既に当該用途を想定した品質基準が設けられている。 【主な内容】 ・1)加熱アスファルト混合物に使用する鉄鋼スラグに関して、適用範囲や品質、試験方法等の品質基準を規定。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。（リサイクルポット推進協議会集計実績）	1)
⑰ 藪場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑱ その他	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	

出典)

1) JISA5015「道路用鉄鋼スラグ」（平成25年3月改正）

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

表 3.9.13 鉄鋼スラグ混合製品（水硬性スラグコンパクション材）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典		
		品質性能	利用実績			
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
③ 混和材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
④ ハーカドレン及びパッドマット材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑤ パッドコンパクションパイル材	◎	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1)砂地盤の締め固め効果は従来の砂杭の場合と同等であること、周辺環境への影響は従来の砂材と同等であること及び施工後の膨脹による地中変動は殆どないことなど評価要件を満足するものであることを確認。当該材料は水硬性を有するため、高置換のSCPにのみ適用が可能。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・液状化対策工事（国交省） ・岸壁改良整備工事（管理者） ・漁港整備工事（管理者）	1)
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑧ 中詰材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑩ 裏込材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑪ 裏埋材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑬ 埋立材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・岸壁（耐震改良）等改良工事（国交省）	
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑰ 藪場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑱ その他	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	

出典)

1) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第06001号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なパッドコンパクションパイル工法中詰材材料 エコアイストン(財)沿岸技術研究センター、平成22年12月内容変更)

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

(2) サンドコンパクションパイル材

サンドコンパクションパイル材には水硬性スラグコンパクション材を利用することができ、軟弱粘性土地盤改良用の固結タイプ及び軟弱砂質土地盤液状化対策用の摩擦タイプに分類される。

杭間粘土の設計上の考え方や、複合地盤の沈下量の考え方については、製鋼スラグ利用技術マニュアル（平成27年2月：一般財団法人 沿岸技術研究センター）を参照できる。

1) 固結タイプ（軟弱粘性土地盤改良用）

固結タイプは、原則として高置換率（置換率70%以上）に用いる。

水硬性スラグコンパクション材は、天然砂よりせん断抵抗角が大きい（ $35^{\circ} \Rightarrow 42^{\circ}$ 以上）ため、地盤改良の施工量を低減することができる。また、水硬性スラグコンパクション材は天然砂より動的な剛性が大きいため、地震時の残留変形抑制効果が期待できる。尚、常時の安定計算法は、天然砂を用いたサンドコンパクションパイルと同様の方法で設計することが可能である。具体的な安定計算法ならびに地震時の変形照査法については巻末に示す参考文献2)に示されており、これらの根拠となる基礎データは、巻末に示す文献3)～13)に示されている。

2) 摩擦タイプ（軟弱砂質土地盤液状化対策用）

摩擦タイプは、天然砂を用いたサンドコンパクションパイルと同等の締固め効果が確認されており、天然砂と同様の方法で設計することができる。¹⁾

図3.9.10に水硬性スラグコンパクション材の固結タイプを使用した場合の地盤改良の施工量低減イメージ図を示す。水硬性スラグコンパクション材を使用することで、天然砂を用いたサンドコンパクションパイルに比べ改良幅を2～4割低減することができる。

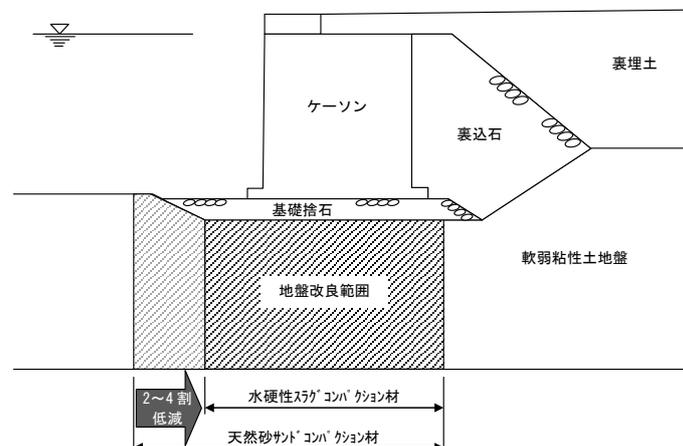


図 3.9.10 地盤改良の施工量低減イメージ図

陸域にて使用する場合は、土壌のアルカリ吸着作用により、pH上昇は施工杭近傍のみに限定されることがpH測定（図3.9.9）にて確認されており、多くの施工実績の中でも問題が生じていないが、地下水の流速が早い現場では、影響範囲が大きくなる可能性があるため、実地盤のアルカリ吸着能を考慮した適切なモデルにより長期的な影響範囲を把握するとともに、モニタリング等による確認を行うことが望ましい。

【参考文献】

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第10001号鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料 エコガイアストーン、平成22年12月内容変更

(3) 路盤材

下層路盤や上層路盤に使用される材料（路盤用鉄鋼スラグ）は、JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグとして規格に定められているので、これに適合するものを使用することができる。

路盤用鉄鋼スラグは、経済的でしかも力学的につり合いのとれた形にするために、下層路盤と上層路盤に分けられる。道路用鉄鋼スラグには、下層路盤にクラッシュラン鉄鋼スラグ(CS)、上層路盤に粒度調整鉄鋼スラグ(MS)、水硬性粒度調整鉄鋼スラグ(HMS)がある。

下層路盤や上層路盤を設計、施工等を行う場合、「鉄鋼スラグ路盤設計施工指針」等に示される方法と手順に準じて行う。これらの指針に記述していない一般事項については「舗装設計施工指針」、「舗装施工便覧」等の最新版を参照する。

路盤用鉄鋼スラグを適用する場合は、次の利点があげられる。

①スラグの水硬性について

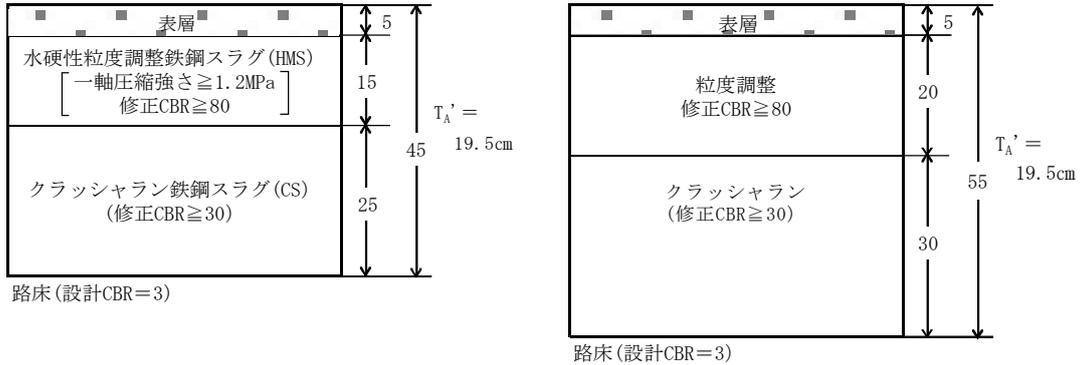
路盤用鉄鋼スラグの水硬性は、スラグが水と接触すると微量の石灰やシリカが溶け出し、スラグ表面に緻密な水和生成物を形成し、さらにアルカリ性の雰囲気のもとでは、水和物を形成し、これがスラグの粒子をつなぐ結合材となって、凝結硬化することによって起きる性質である。鉄鋼スラグを用いた路盤はこの性質があるため、施工後長期間に亘って路盤の支持力が増大する。

②水硬性を生かしたスラグ路盤材の経済性

代表的なスラグ路盤材である水硬性粒度調整スラグ(HMS-25)の等値換算係数は0.55と、粒度調整碎石の0.35に比べて高く評価されており、少ない材料で施工できる。

さらに、施工後も長期にわたって水硬性を発現するため、耐久性にも優れ、メンテナンスコストが低減する。

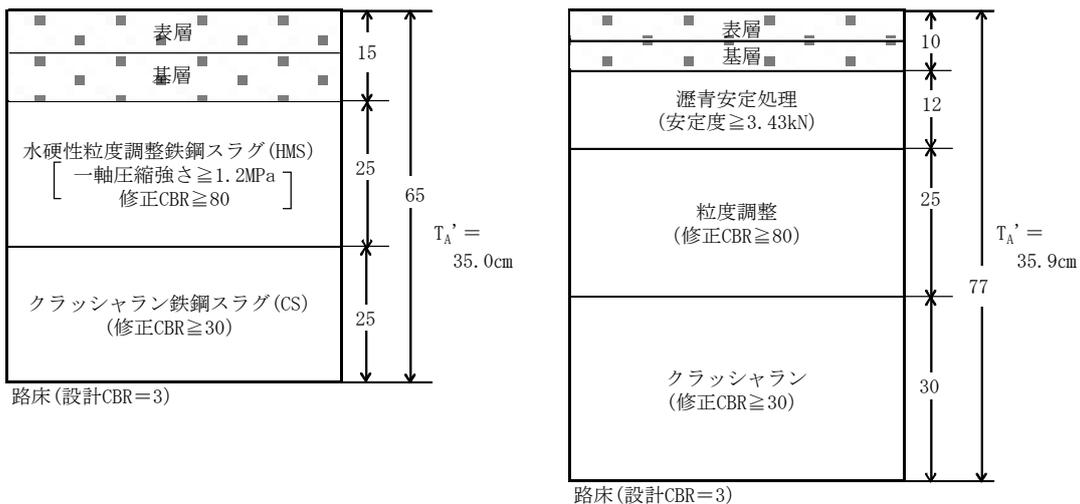
交通量区分N₄、信頼度90%、設計期間10年の例（目標とするT_A 19cm）



出典) 鉄鋼スラグ道路用材への利用 (鉄鋼スラグ協会)

図 3.9.11 HMS で施工した時の舗装厚削減の例(1)

交通量区分N₆、信頼度90%、設計期間10年の例（目標とするT_A 35cm）



出典) 鉄鋼スラグ道路用材への利用 (鉄鋼スラグ協会)

図 3.9.12 HMS で施工した時の舗装厚削減の例(2)

③その他の特性

- ・ 締め固め性状が良好で、施工直後の交通開放が可能
- ・ 含水比に対する鋭敏性がいので、作業中雨が降り出した場合にも、締め固め作業の続行が可能
- ・ 成分や粒度分布等、品質が均一な工業製品
- ・ 砕石等の路盤と同様な施工方法

また、適用に際して以下の点に留意する必要がある。

①使用にあたっては、あらかじめ品質を確認しておくことが重要である。

- ・高炉徐冷スラグを用いた路盤用鉄鋼スラグは、呈色判定試験を行い無色であることを確認する。
- ・製鋼スラグを用いた路盤用鉄鋼スラグには水浸膨張試験を行ない、JIS A 5015 の規格値以下であることを確認する。
- ・道路の出荷から、道路の施工時及び利用時だけでなく、その利用が終了し解体後の再利用または最終処分場を含めたライフサイクルにおいて環境安全品質を保証する環境安全品質基準を満足するかを確認する。

②路盤用鉄鋼スラグは、雨水や地下水が透過すると、カルシウム分によって透過水がアルカリ性を示すことがある。アルカリ性を有した透過水は、道路周辺の地下水、河川、及び農地などの水質や土壌に影響を与えることが懸念されるが、わが国のほとんどの土壌は酸性土壌であり、これらのアルカリ成分を吸着、中和する能力を有しているため、通常の場合は、問題となることは少ない。しかし、道路に近接して、農地、飲料用井戸、養魚池など特に水質が重視されるような施設がある場合は、その区間に十分な排水設備を設けるなど適切な処置を講じ、アルカリ性透過水に起因する問題が生じないようにする必要がある。

(4) アスファルト舗装骨材（加熱アスファルト混合物及び瀝青安定処理）

加熱アスファルト混合物に用いる製鋼スラグ（加熱アスファルト混合物用鉄鋼スラグ）は、JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグとして規格に定められているので、これに適合するものを使用することができる。

加熱アスファルト混合物に用いる鉄鋼スラグには製鋼スラグが使用され、単粒度製鋼スラグ（SS-20、SS-13、SS-5）や瀝青安定処理用にクラッシュラン製鋼スラグ（CSS-30、CSS-20）がある。

製鋼スラグを用いた加熱アスファルト混合物で設計、施工等を行う場合、「製鋼スラグを用いたアスファルト舗装設計施工指針」に示される方法と手順に準じて行う。これら指針に記述していない一般事項については「舗装設計施工指針」、「舗装施工便覧」等の最新版に従うものとする。

加熱アスファルト混合物用鉄鋼スラグを適用する場合は、天然骨材に比べて、硬質かつ耐摩耗性に優れている利点がある。

使用にあたっては、道路の出荷から、道路の施工時及び利用時だけでなく、その利用が終了し解体後の再利用または最終処分場を含めたライフサイクルにおいて、環境安全品質を保証する環境安全品質基準を満足するかをあらかじめ確認することが重要である。

3.9.4 関連法令

道路用鉄鋼スラグ及び水硬性スラグコンパクション材は産業副産物等に該当する。産業副産物等の法令上の取り扱いについては、「1.4.2 環境安全の考え方」を参照のこと。

3.9.5 施工後の再利用・廃棄の考え方

施工後に再利用・廃棄を行う場合、発生する材料の種類に応じて検討を行うものとする。

(解説)

道路用鉄鋼スラグ及び水硬性スラグコンパクション材を材料として用いた箇所の改修・撤去等により生じた建設副産物を再びリサイクル材料として利用または廃棄する場合は、発生する材料の種類に応じて、本ガイドラインの該当箇所を参照し、検討を行う。

なお、道路用鉄鋼スラグについては、JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」において、再利用・廃棄を含めライフサイクルの合理的に想定しうる範囲において、道路用鉄鋼スラグから影響を受ける土壌、地下水、海水などの環境媒体が、各々の環境基準などを満足できるように、道路用鉄鋼スラグが確保すべき品質（環境安全品質）を満足するための検査の実施が規定されている。

また、再利用・廃棄を検討する際に、使用したリサイクル材料の種類、品質及び量等の情報が重要となるため、これらの情報を維持管理計画等に記載しておくことを標準とする。

3.10 鉄鋼スラグ二次製品（固化体・その他）

3.10.1 製造・供給

鉄鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末等を混練、固化し製造される。

鉄鋼スラグ炭酸固化体は、粒状の製鋼スラグに強制的に二酸化炭素を吹込み、スラグ中の酸化カルシウムと反応させて炭酸カルシウムを生成させることにより製造される。

浚渫土改質材として、転炉にて鋼を製造する工程で生成する転炉系製鋼スラグを成分管理と粒度調整した材料が製造されている。

生物共生材として、「藻場造成用鉄分供給ユニット」が製造されている。

(解説)

(1) 製造方法

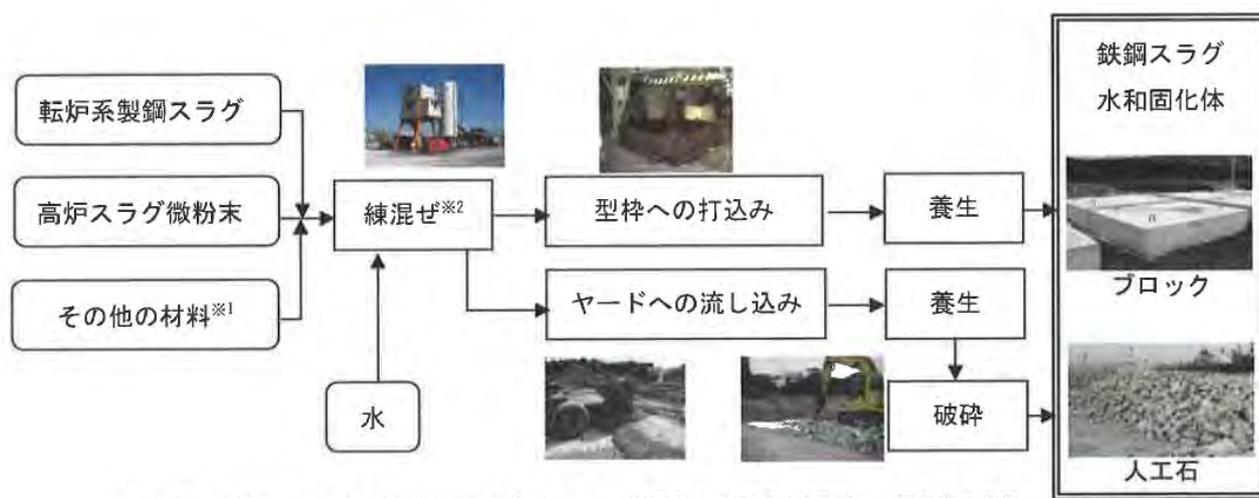
1) 鉄鋼スラグ水和固化体

鉄鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末及び水を必須材料とし、これらを練混ぜ、水和反応により固化（硬化）させたものである。必要に応じて、アルカリ刺激材（消石灰、各種セメント等）、フライアッシュ（微粉炭燃焼ボイラで発生する微粉灰）、細骨材相当の高炉水砕スラグ等を構成材料に加える。

鉄鋼スラグ水和固化体の製造方法を図 3.10.1 に示す。

鉄鋼スラグ水和固化体は、副産物を材料として利用し、コンクリートと同等な強度を得ることができる。

鉄鋼スラグ水和固化体の型枠への打込みまたはヤードへの流し込み後に、養生を経て、ブロック状としたり、コンクリート破砕機などにより粗破砕して製造する。これらを鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材という。破砕方法によって、粒径 300mm 程度以下に調整した砂礫状の石材と粒径 100～1,000mm 程度に調整した割ぐり石状の石材の製造が可能である。



※1 必要に応じて、アルカリ刺激材、フライアッシュ、高炉水砕スラグ（細骨材）、混和剤を使用

※2 生コンクリート製造設備使用

図 3.10.1 鉄鋼スラグ水和固化体の製造方法

2) 鉄鋼スラグ炭酸固化体

鉄鋼スラグ炭酸固化体は、粒状の製鋼スラグに強制的に二酸化炭素を吹込み、スラグ中の酸化カルシウムと反応させて炭酸カルシウムを生成させることにより製造される。スラグ粒子同士がこの炭酸カルシウムでネットワーク状に強固に結合して固化体を形成し、ブロック表面が炭酸カルシウムとなる。また、二酸化炭素が通じた開気孔が固化体の中に残るため、多孔質となる。

図 3.10.2 に鉄鋼スラグ炭酸固化体の製造装置を示す。気密性のある型枠の中に適量の水分を加えた原料の製鋼スラグを充填し、内部まで CO_2 が均一に拡散するように圧力を調整しながら成形体を作る。型枠の下部より CO_2 を含んだガスを吹込み、成形体全体を炭酸固化させる。その後、型枠を外して固化体を取り出し、鉄鋼スラグ炭酸固化体が完成する。

製鋼スラグ中の CaO は二酸化炭素 (CO_2) と反応して、化学的に安定な炭酸カルシウム (CaCO_3) を生成する。反応式は、 $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ である。コンクリートは、セメントの水和反応で固化するが、鉄鋼スラグ水和固化体の固化は炭酸化反応である。

鉄鋼スラグ炭酸固化体の製造時の原料である製鋼スラグは、型枠への自己充填が困難であるため、自己充填の必要性が少ない直方体形が製造上有利であり、品質も安定する。このため、鉄鋼スラグ炭酸固化体の形状は、直方体形のブロックまたはプレートを標準とする。

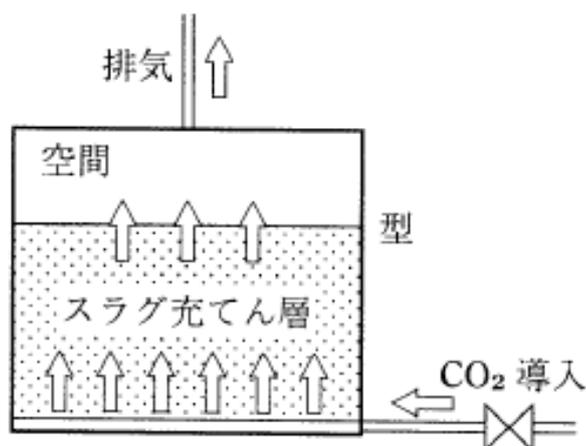


図 3.10.2 鉄鋼スラグ炭酸固化体製造概念図

3) 浚渫土改質材

浚渫土改質材の一つとして、転炉系製鋼スラグを成分管理と粒度調整した「カルシア改質材」が製造されている。カルシア改質材の製造方法については、その原料である転炉系製鋼スラグの製造方法を記した 3.8 製鋼スラグ 3.8.1 製造・供給を参照のこと。ただし、カルシア改質材では硬化特性を利用するためにエージング処理は行われていない。また、粒度は、図 3.10.4 のように調整されている。

4) 生物共生材

藻場造成用鉄分供給ユニットの各工程は、以下のとおりである。

①炭酸化処理工程

スラグヤードから転炉系製鋼スラグを運び炭酸化安定処理を施し、アルカリを低減させる。

②配合工程

炭酸化安定処理を施した転炉系製鋼スラグと、人工腐植土を容積比で転炉系製鋼スラグ 50%以上、人工腐植土 40%以上で混ぜ合わせる。

製造工程の詳細は図 3.10.3 に示すとおりである。



図 3.10.3 藻場造成用鉄分供給ユニットの製造工程

(2) 供給・利用の状況

1) 鉄鋼スラグ水和固化体、鉄鋼スラグ炭酸固化体

陸上輸送：製造所（製鉄所）周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

海上輸送：制限なし

海上輸送＋陸上輸送：全国の港周辺（内陸遠方地区は輸送費が高くなる）

2) 浚渫土改質材

浚渫土改質材の一つであるカルシア改質材の供給地域については、その原料である転炉系製鋼スラグの供給・利用の状況を記した 3.8 製鋼スラグ 3.8.1 製造・供給を参照のこと。

3.10.2 品質

鉄鋼スラグ水和固化体は、破碎し、準硬石相当の天然石材（砂岩ずり及び割ぐり石）及びセメントコンクリートの代替材として適用される。

鉄鋼スラグ炭酸固化体は、単位体積重量、圧縮強度ともに標準的なコンクリートと同等である。

浚渫土改質材の一つであるカルシア改質材の品質は、改質土を使用する用途に応じて、化学成分等、粒度、環境安全品質について適切に設定される。

生物共生材（藻場造成用鉄分供給ユニット）は、配合、溶出安全性、pH、鉄分溶出性の4項目の品質確認を行うことを規定している。また、生物安全性及び食品安全性についても確認がなされている。

（解説）

(1) 鉄鋼スラグ水和固化体

1) 適用範囲

鉄鋼スラグ水和固化体を破碎して製造した鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材は、準硬石相当の天然石材（砂岩ずり及び割ぐり石）及びセメントコンクリートの代替材として適用される。適用範囲を表 3.10.1 に示す。

表 3.10.1 鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材の適用範囲

人工石材の種類 粒径の範囲	砂礫状	割ぐり石状			ブロック状
	300mm 程度以下	100～1,000mm 程度			適宜
用途	非液状化埋立柱材 (中仕切堤含む)	裏込石及び 傾斜護岸材	藻場材	被覆石*1	消波ブロック
適用条件	砂岩ずり代替	準硬石相当 の割ぐり石 代替	—	主として内湾 の波浪が小さい ところに使用 する割ぐり 石代替	セメントコン クリート代替

*1：必要に応じて耐凍結融解性を確認

鉄鋼スラグ水和固化体には、以下の有用性がある。

- ・鉄鋼副産物を用いて製造されるため、天然資源の保護につながる。
- ・破碎方法を変えることにより種々の形状や粒度を有する石材製造が可能のため、幅広い利用が期待できる。

鉄鋼スラグ水和固化体の硬化メカニズムは、製鋼スラグに含まれている Ca^{2+} が溶出し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュに含まれている非晶質層の Si、Al などの元素との水和反応により、水和ゲルを生じて硬化するものであり、この反応を促進するために、消石灰などのアルカリ刺激材を添加する。

2) 材料の品質

鉄鋼スラグ水和固化体を構成する材料は、表 3.10.2 に示す品質を満足する。

表 3.10.2 鉄鋼スラグ水和固化体に用いる材料の品質

	材料名	品質基準
必須材料	製鋼スラグ	人工石材として必要な膨張安定性を満足すること。
	高炉スラグ微粉末	JIS A 6206 に適合したものを標準とする。
	水	上水道水、JSCE-B101 または JIS A 5308 付属書 9 に適合したものを標準とする。
必要に応じて使用する材料	高炉水砕スラグ (細骨材相当品)	JIS A 6206 の原材料に用いるもの、または JIS A 5011-1 に適合したものを標準とする。
	フライアッシュ	JIS A 6201 に適合したものの、または相当品を標準とする。
	アルカリ刺激材	「鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル改訂版、4.2.6 アルカリ刺激材」による。 (消石灰系：Ca(OH) ₂ または CaO を含んだ品質の確かめられたもの、セメント系：JIS R 5210、JIS R 5211 に適合したものを標準とする)
	混和剤	JIS A 6204 に適合したものを標準とする。

3) 人工石材の品質範囲

鉄鋼スラグ水和固化体製人工石の品質は、表 3.10.3 に示す品質範囲で提供される。

表 3.10.3 鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材の品質の範囲

品質項目	指標		品質の範囲	
物理的性質	粒度	D ₁₀ mm	砂礫状	1.0 以上
		均等係数	砂礫状	5~45
		U _c =(D ₆₀ /D ₁₀)	割ぐり石状	1.3~3 * ¹
		粒度の範囲	砂礫状	0~300mm
	割ぐり石状 ブロック状		5~2,000kg/個 * ² (寸法の目安 100~1000mm)	
	絶乾密度 (g/cm ³)	JIS A 1110	1.8~2.7	
	吸水率 (%)	JIS A 1110	5~20	
母材の圧縮強度 (N/mm ²) 28 日強度 (標準養生)	JIS A 1108	9.8~35		
力学的性質	せん断抵抗角 (°)	JGS 0541	U _c ≥ 5 で 35° 以上	
	二次圧縮係数 (%)	砂礫状	準硬石の天然石材と同等以下	
	スレーキング率 (%)	砂礫状	準硬石の天然石材と同等以下	
環境適合性	pH(JGS 0211 海水溶媒 固液比 1:10)		9.0 以下	
	生物付着性 (付着藻類・ベントスの種類数・付着質量)	砂礫状	天然石材と同等	
	有害物質の溶出・含有		海洋汚染防止法水底土砂基準または土壌環境基準の基準値以下	
膨張	膨張 JIS A 5015 (水中落下試料 80°C10 日)	砂礫状	膨張しないこと (JIS A 5015 80°C水浸膨張試験 10 日で 0.2%以下)	
	鉄鋼スラグ水和固化体技術 マニュアル付属書 2	割ぐり石状 ブロック状	有害なひび割れなし	

*1: φ ≥ 35° を目標とする場合には、粒度調整により U_c ≥ 5 の製造可能

*2: 製造寸法については、別途製鉄所に確認要

4) pH

鉄鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグが高炉スラグ微粉末ペーストに覆われるとともに、高 pH 溶出の原因となる f-CaO が高炉スラグ微粉末より溶出される SiO₂ (シリカ) や Al₂O₃ (アルミナ) 成分と反応し、C-S-H 水和物や C-A-H 水和物を生成して固化する過程で消費されるため、pH 溶出が低減される。

(2) 鉄鋼スラグ炭酸固化体

1) 基本物性

鉄鋼スラグ炭酸固化体の基本物性を表 3.10.4 に示す。単位体積重量、圧縮強度ともに標準的なコンクリートと同等である。

表 3.10.4 鉄鋼スラグ炭酸固化体とコンクリートの基本物性例

項目	鉄鋼スラグ炭酸固化体	コンクリート
気中単位体積重量(g/cm ³)	2.0~2.4*	2.3
水中単位体積重量(g/cm ³)	1.4~1.7	1.3
連続気孔率(%)	25~42	-
平均気孔径(mm)	0.05~0.5	-
比表面積(m ² /g)	4.5程度	-
圧縮強度(N/mm ²)	10~19	18~24以上

*連続気孔に水がない状態

2) 強度特性

鉄鋼スラグ炭酸固化体の圧縮強度は、一般的なポーラスコンクリートと同等である。また、圧縮強度、引張強度、曲げ強度の関係は、(引張強度) / (圧縮強度) は約 1/12、(曲げ強度) / (圧縮強度) は約 1/8 と標準的なコンクリートとほぼ同等である。

3) 耐久性

鉄鋼スラグ炭酸固化体は、コンクリートブロックと同様な耐久性を有する。実海域における沈設試験調査(6年程度経過)において、膨張による亀裂発生や脆化現象などの材料的な劣化は見られない。

4) 溶出

鉄鋼スラグ炭酸固化体から重金属などの有害物質は溶出しない。また、海水へのアルカリ影響はない。

(3) 浚渫土改質材

ここでは、改質材としてカルシア改質材について述べる。

1) カルシア改質材の品質

① 物理・力学的性質

a. 粒度

カルシア改質材の粒度範囲を図 3.10.4 に示す。

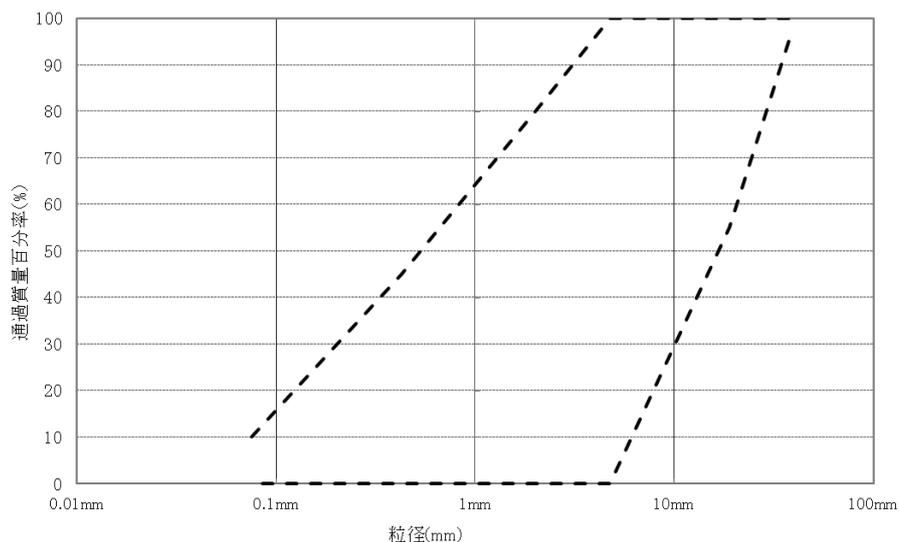


図 3.10.4 カルシア改質材の粒度範囲

土構造物としての強度を要求される用途にカルシア改質材による改質土を適用する場合には、過去の適用事例で所要の強度を満たしたカルシア改質材の粒度分布の範囲である表 3.10.5 の JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」の粒度範囲を満たすこととする。

なお、製造所によって、製造可能な最大粒径が異なるため、事前に確認が必要である。

表 3.10.5 カルシア改質材の粒度分布

呼び名	ふるいを通るものの質量百分率 (%)							
	JIS Z 8801 に規定する網ふるいの呼び寸法							
	53.0mm	37.5mm	31.5mm	26.5mm	19.0mm	13.2mm	4.75mm	2.36mm
CS-40	100	95~100	—	—	50~80	—	15~40	5~25
CS-30	—	100	95~100	—	55~85	—	15~45	5~30
CS-20	—	—	—	100	95~100	60~90	20~50	10~35

b. 密度

高炉メーカー4社よりサンプリングしたカルシア改質材の粒子密度は、製造所や製造ロットにより異なるが、鉄分を多く含むため天然砂（約 2.6g/cm³）よりも大きく概ね 2.9~3.4 g/cm³の範囲である。製造所によって、これらの物性値には違いがあるため、使用に当たっては事前に製造所に確認しておくのがよい。

② 化学的性質

a. 化学成分

カルシア改質材の主成分は、石灰(CaO)、二酸化珪素(SiO₂)、酸化鉄(Fe₂O₃)であり、化学成分がセメントと類似しておりアルカリ性を呈する。

固化材または安定材としての役割は、カルシア改質材に含まれるカルシウム分、特に遊離石灰(f-CaO)が果たしていると考えられるため、強度を期待する用途にカルシア改質材による改質土を適用する場合には、これらの含有量に留意する必要がある。

カルシア改質材に含まれる遊離石灰(f-CaO)と改質土の一軸圧縮強さの関係に関する知見として、以下が得られている。

- ・遊離石灰(f-CaO)量が1%以下では、強度発現がほとんどみられない。
- ・カルシア改質材による改質土の強度発現は、浚渫土の土質特性の影響を大きく受けるが、少なくとも $q_u=20\text{kN/m}^2$ 程度(≒ $q_c=200\text{kN/m}^2$:建設発生土の強度指標である第4種処理土相当)を確保するためには、遊離石灰(f-CaO)量が1%以上必要と考えられる。

カルシア改質材の原材料である転炉系製鋼スラグの中で、極端に硫化物が介在する恐れのあるスラグを適用外とするため、硫化物含有量(T-S)の規定値は1.0%以下としている。

b. 環境安全品質

「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」では、カルシア改質材の環境安全品質基準として、カルシア改質土の使用環境(人の立入りの可能性、再利用の可能性)に応じて、有害物質の溶出量及び含有量の基準を規定している。これら環境安全品質に係る分析試験の結果は、製造事業者が発行する試験成績書により確認することができる。

2) カルシア改質土の品質

① 物理・力学的性質

a. せん断強度（浚渫土の強度増進効果）

カルシア改質土の強度は、カルシア改質材の混合量、時間経過、含水量等に応じて変化する。カルシア改質土の一軸圧縮強さの一般値は、 $q_{u28}=50\sim400$ (kN/m²) であり、他の工法により製造された混合土（軽量混合処理土、管中混合固化処理土）と同程度である。また、一軸圧縮強さは時間の経過とともに増加する傾向がある。

一般的には、カルシア改質材の容積混合率は 10～40% であり、この混合範囲においては、基本的に粘性土地盤（c 材）として取り扱うことができる。

図 3.10.5、図 3.10.6 に大阪湾にて採取された浚渫土にカルシア改質材を混合して作製したカルシア改質土の強度発現特性を示す。

図 3.10.5 は、採取した浚渫土（液性限界 $W_L=105\%$ ）に加水調整を行い、浚渫土の含水比 $W/W_L=1.6$ 、 1.8 、 2.0 に対して、カルシア改質材 30% を混合したカルシア改質土の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示したものである。その結果、養生日数の経過とともに一軸圧縮強さが増加すること、浚渫土の含水比が高くなると、一軸圧縮強さは低下傾向を示すことがわかる。

図 3.10.6 は、カルシア改質材の混合割合とカルシア改質土の一軸圧縮強さの関係を示したものである（養生 28 日、図 3.10.5）とは異なる改質材の試験結果）。その結果、改質材の混合割合が多いほど、改良土の一軸圧縮強さが増加することがわかる。

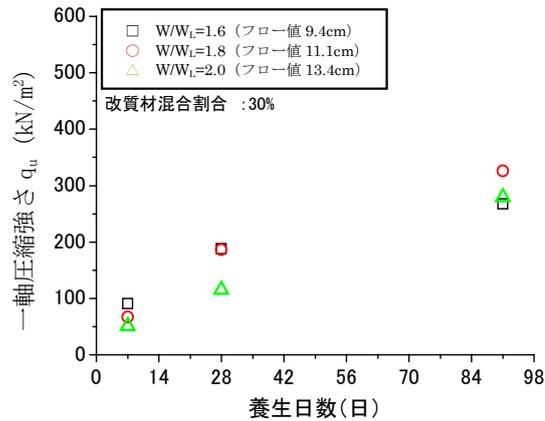


図 3.10.5 養生日数とカルシア改良土の一軸圧縮強さの関係の例

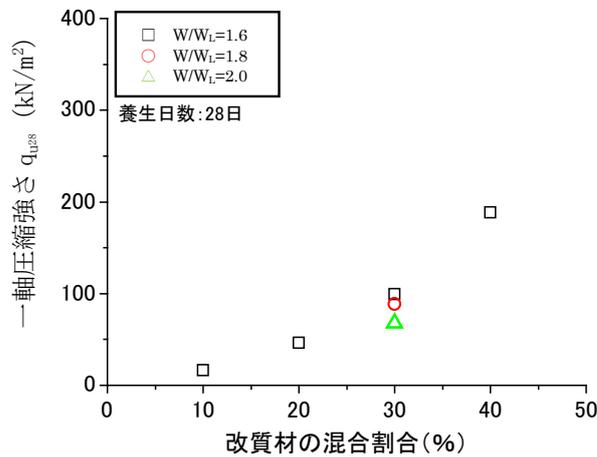


図 3.10.6 カルシア改良材の混合割合とカルシア改良土の一軸圧縮強さの関係の例

b. 単位体積重量

カルシア改良土の単位体積重量は、浚渫土の含水比、カルシア改良材の容積混合率等、配合によって変化する。カルシア改良土の単位体積重量の実測値は、図 3.10.7 に示すとおりである。浚渫土の単位体積重量に対し、カルシア改良材の粒子密度が概ね $25\sim 34\text{kN/m}^3$ と大きいことから、カルシア改良材の混合率が大きいほど単位体積重量は大きくなる。単位体積重量は、カルシア改良材の容積混合率 10% の場合 $14\sim 18$ (中央値 16) kN/m^3 、30% の場合 $17\sim 21$ (中央値 19) kN/m^3 の範囲にある。

カルシア改良材 4 サンプルの平均表乾密度 (31.9kN/m^3) と浚渫土 7 サンプルの平均湿潤密度 (13.7kN/m^3) を用いて計算したカルシア改良材による改良土の単位体積重量の推定値を、図 3.10.7 に合わせて示した。

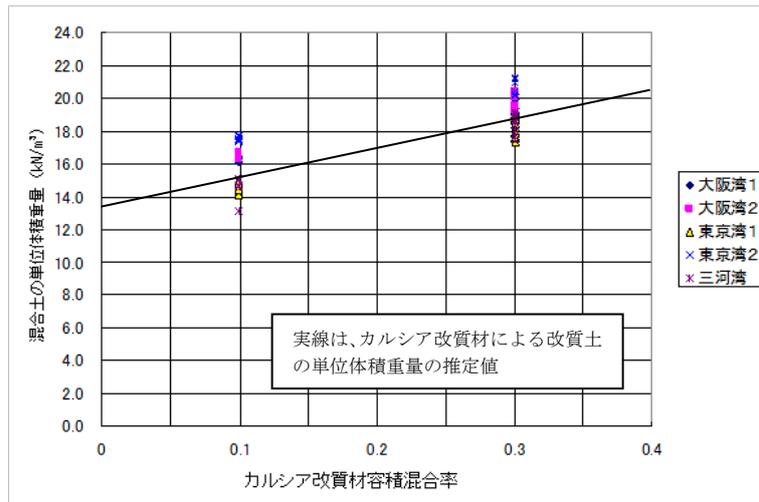
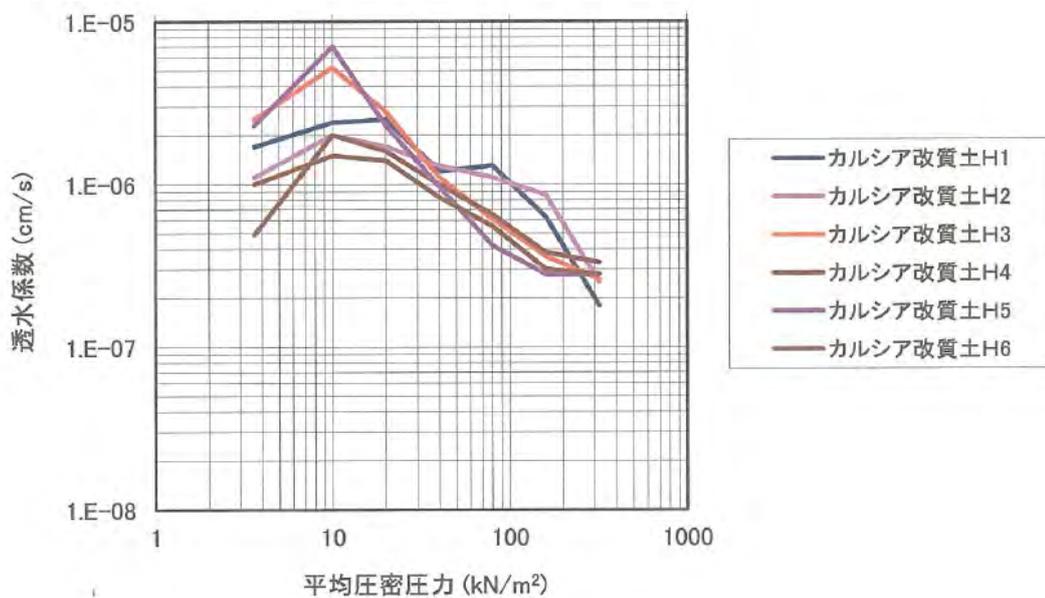


図 3.10.7 カルシウム改質土の単位体積重量の例

c. 透水係数

同じ港湾区域で採取された6種類の浚渫土を用いた圧密試験より得られたカルシウム改質土の透水係数の例を図 3.10.8 に示す。カルシウム改質土の透水係数は、 10^{-7} ~ 10^{-6} cm/s にあり、粘土~シルトの透水係数と同程度である。

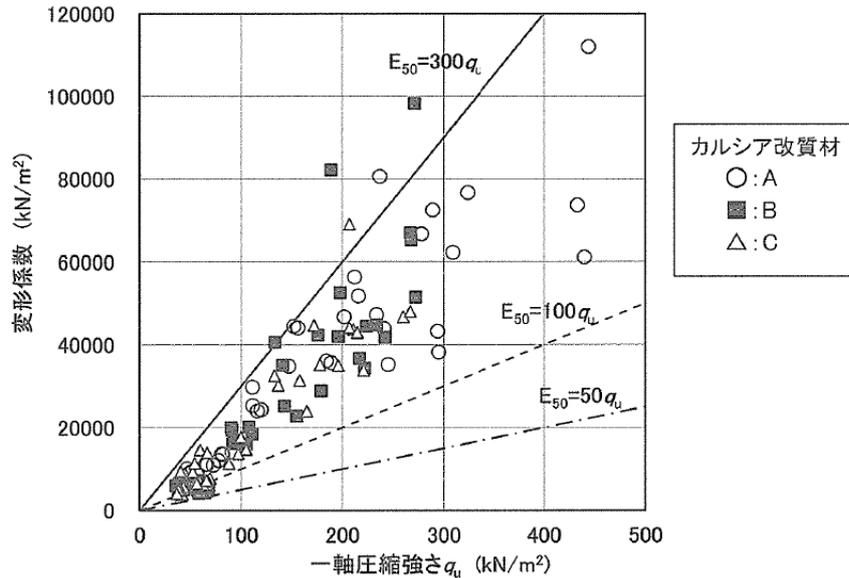


出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシウム改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

図 3.10.8 カルシウム改質土の透水係数の例

d. 変形係数

カルシア改質土の一軸圧縮強さと変形係数 E_{50} の関係の例は、図 3.10.9 に示すとおりである。同図より、概ね $E_{50}=(100\sim300)q_u$ の関係がみられ、他の工法により製造された混合土（軽量混合処理土、管中混合固化処理土）と同程度であることがわかる。

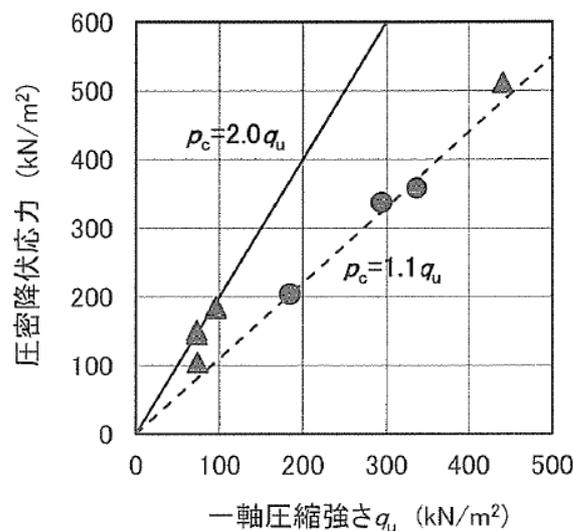


出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル（（一財）沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月）

図 3.10.9 カルシア改質土の一軸圧縮強さと変形係数の関係の例

e. 圧密降伏応力

カルシア改質土の一軸圧縮強さと圧密降伏応力の関係の例は、図 3.10.10 に示すとおりである。同図より、 $p_c=(1.1\sim2.0)q_u$ の関係がみられ、他の工法により製造された混合土（軽量混合処理土、管中混合固化処理土）と同程度であることがわかる。

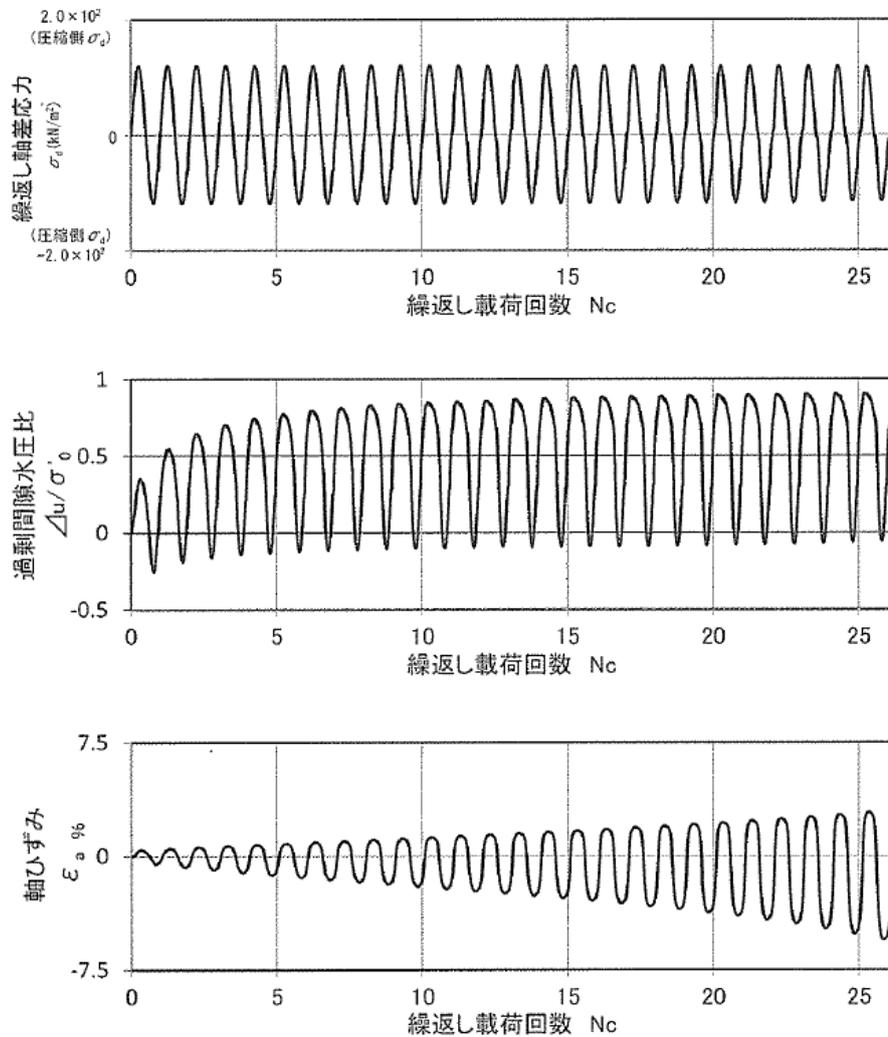


出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル（（一財）沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月）

図 3.10.10 カルシア改質土の一軸圧縮強さと圧密降伏応力の関係の例

f. 液状化特性

カルシア改質材の容積混合率 25%、一軸圧縮強さ 40kN/m^2 のカルシア改質土の繰返し三軸試験の結果は、図 3.10.11 に示すとおりである。カルシア改質土は、液状化しない薬液注入による安定処理土と同様の動的挙動を示していることから、カルシア改質土は液状化しない材料とみなすことができる。



出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

図 3.10.11 カルシア改質土の繰返し三軸試験結果の例

g. 水浸膨張性

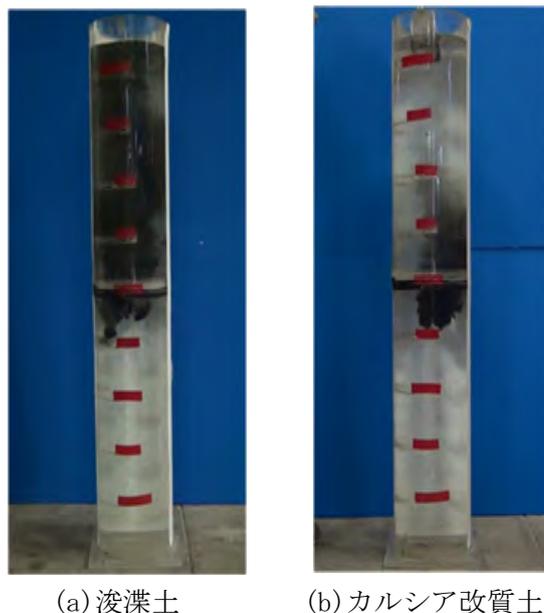
カルシア改質材は、水と反応して体積膨張する性質を有している。一方、カルシア改質土は、カルシア改質材単味と比較して、膨張量が大きく抑制される。

一般的な c 材 (カルシア改質材の容積混合率 30%以内) として利用する場合は、膨張性しない材料とみなすことができる。ただし、カルシア改質土が膨張することを特にさげなければいけない場合やカルシア改質材の混合率を 30%超とする場合は、カルシア改質土に膨張が生じないことを確認することが望ましい。

h. 濁りの抑制効果

軟弱な浚渫土はカルシア改質材を混合した直後に、カルシア改質材による吸水作用により強度（粘性）が増大する。これより、改良土は、混合直後の水中投入時においても、濁り発生が生じにくい。

図 3.10.12 に、カルシア改質土の水中落下時の汚濁抑制効果の確認試験結果を示す。実験は、内径 170mm、深さ 1m の円筒型水槽に海水を満たし、その水面上から、混合直後のカルシア改質土と浚渫土（比較材）をそれぞれ約 100cm³ 投入し、落下過程での濁りの発生状況を観察することにより行った。これより、カルシア改質土の汚濁抑制効果が確認できる。なお、本実験では、使用したカルシア改質土と浚渫土の投入時の流動性は、ほぼ同じシリンダーフロー値 13~14cm に調整した。



出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル（（一財）沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月）

図 3.10.12 カルシア改質土の水中落下時の汚濁抑制効果の確認試験

また、実海域での底開バージ投入実験において、浚渫土と比べた濁り発生量原単位が 3 割程度まで抑制されることが確認されている。

施工後の濁り発生の抑制効果については、造波が可能な海域環境シミュレータを用いた実験で、浚渫土単味に比べて濁りが抑制されることが確認されている。

② 化学的性質

a. pH

カルシア改質材を単独で海に投入した場合には、成分であるカルシウムの含有率によっては海水の pH を上昇させ、さらには海水中のマグネシウムと水酸基が反応して生成した水酸化マグネシウムが析出し、白濁を生じさせる場合がある。これに対して、カルシア改質土では、カルシア改質材単味に比べて pH が低減されること、白濁発生が抑制されることが確認されている。

カルシア改質土の pH、白濁試験結果の例を表 3.10.6 に示す。いずれのカルシア改質土においても、水質汚濁防止法の排水基準である pH9.0 を下回っていた。

表 3.10.6 pH・白濁試験結果

		カルシア改質土 a	カルシア改質土 b	カルシア改質土 c	カルシア改質土 d
pH 測定値	30 分後	8.3	8.3	8.3	8.3
	1 時間後	8.3	8.3	8.3	8.3
	2 時間後	8.2	8.2	8.3	8.3
	3 時間後	8.2	8.2	8.2	8.2
	最 大	8.3	8.3	8.3	8.3
白濁の確認		なし	なし	なし	なし

※人工海水の pH の初期値は 8.3 に調整した。

出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

b. 環境安全品質

「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」では、カルシア改質土の使用環境 (人の立入りの可能性、再利用の想定等) に応じて、「水底土砂に係る判定基準」、「土壤汚染対策法溶出量基準」、「土壤汚染対策法含有量基準」のうち、使用環境で求められる基準を環境への安全性に対する照査基準として規定している。表 3.10.7 は、カルシア改質土の溶出試験結果の例である。試験に用いたいずれのカルシア改質土についても、海洋汚染防止法の水底土砂に係る判定基準を下回る。また、浚渫土とカルシア改質材を混合することで溶出量が増大することも特に見られない。

表 3.10.7 改良土における有害物質溶出試験結果

測定の対象及び単位		測定結果				基準値
		改質土 A	改質土 B	改質土 C	改質土 D	
アルキル水銀化合物	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	未検出
水銀またはその化合物	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.005
カドミウムまたはその化合物	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.1
鉛またはその化合物	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.1
有機りん化合物	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<1
六価クロム化合物	mg/L	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.5
ひ素またはその化合物	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.1
シアン化合物	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<1
PCB(ポリ塩化ビフェニル)	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.003
有機塩素化合物	mg/kg	<4	<4	<4	<4	<40
銅またはその化合物	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<3
亜鉛またはその化合物	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<5
ふっ化物	mg/L	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<15
トリクロロエチレン	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.3
テトラクロロエチレン	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.1
ペリウムまたはその化合物	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<2.5
クロムまたはその化合物	mg/L	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<2
ニッケルまたはその化合物	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<1.2
バナジウムまたはその化合物	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<1.5
ジクロロメタン	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.2
四塩化炭素	mg/L	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.02
1,2-ジクロロエタン	mg/L	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.04
1,1-ジクロロエチレン	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.2
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.4
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<3
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.06
1,3-ジクロロプロペン	mg/L	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.02
チウラム	mg/L	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.06
シマジン	mg/L	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.03
チオベンカルブ	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.2
ベンゼン	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.1
セレンまたはその化合物	mg/L	<0.002	0.003	<0.002	<0.002	<0.1
ダイオキシン類	pg-TEQ/L	0.0017	0.0020	0.0017	0.0071	<10

※改質土 A, B, C, D は、大阪湾にて採取した浚渫土に、高炉メーカー各社のカルシア改質材を混合したものである。

c. 生物安全性

カルシア改質土を用いた海産生物の急性毒性試験について、魚類（ヒラメ、マダイ）、甲殻類（ヨシエビ、クルマエビ）、貝類（クロアワビ）を対象として、主として「魚介類水質環境基準検討調査総合報告書〔海産生物毒性試験指針〕」（水産庁、平成 12 年 3 月）及び「海産生物毒性試験指針」（水産庁、平成 22 年 3 月）に準拠して実施されている。この結果、いずれの生物種についても毒性は認められなかった。

また、海産生物の生体内への有害物質の蓄積量を把握するための蓄積性試験について、魚類（ヒラメ）、甲殻類（ヨシエビ）、貝類（クロアワビ）を対象として実施されている。この結果、いずれの生物種についても有害物質の特異的な蓄積は認められなかった。

表 3.10.8 生物試験結果の例

【急性毒性試験】

生物分類	生物種	試験時間	試験結果	出典
①魚類	ヒラメ	96 時間	試験終了後にも死亡はみられない	1)
	マダイ	96 時間	試験終了後にも死亡はみられない	2)
②甲殻類	ヨシエビ	96 時間	試験終了後にも死亡はみられない	1)
	クルマエビ	96 時間	試験終了後にも死亡はみられない	2)
③貝類	クロアワビ	96 時間	試験終了後にも死亡はみられない	1)
	クロアワビ	96 時間	試験終了後にも死亡はみられない	2)
④藻類	スサビノリ※	16 日間以上	試験区と対照区で生長及び金属元素組成に差は認められない	3)
⑤その他	魚類、貝類、ヒトデ等※	28 日間	試験区と対照区で全ての魚介類に死亡はみられず、差は認められない	3)

【蓄積性試験】

生物分類	生物種	試験時間	試験結果	出典
①魚類	ヒラメ	60 日間	特異的な蓄積は認められない	1)
	ヒラメ※	4 か月	代謝蓄積の影響は非常に小さいと考えられる	3)
②甲殻類	ヨシエビ	60 日間	特異的な蓄積は認められない	1)
③貝類	クロアワビ	60 日間	特異的な蓄積は認められない	1)
	タカニシ※	不明	特異的な蓄積は認められない	3)
	アワビ※	10 週間	鉄がアワビに取り込まれる可能性が考えられる その他の金属は特異的な蓄積は認められない	3)
	マガキ※	不明	特異的な蓄積は認められない	3)
④藻類	—	—	(既存結果なし)	
⑤その他	キタムラサキ ウニ※	不明	特異的な蓄積は認められない	3)

※ 転炉系製鋼スラグ単味での試験事例

出典 1) 中国地方整備局による生物試験結果

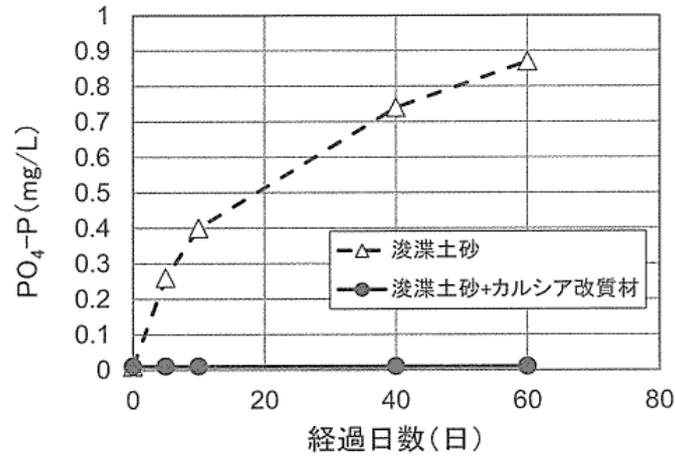
2) カルシア改質土研究会資料

3) 転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き (平成 20 年 9 月、社団法人 日本鉄鋼連盟)

d. 栄養塩等（リン、硫化物）の溶出抑制効果

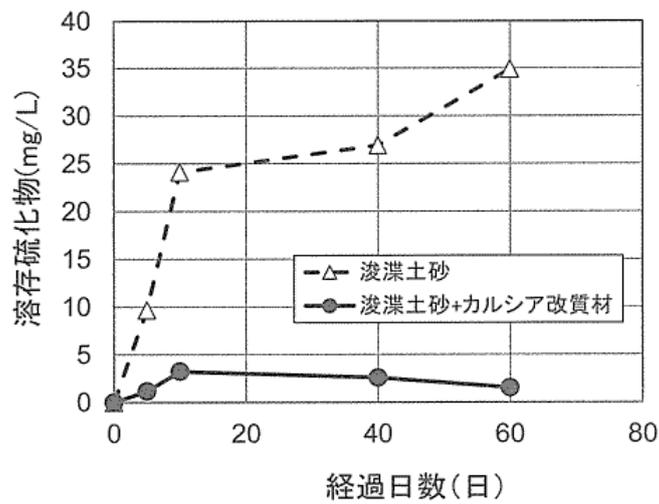
カルシア改質材には、鋼の製造過程において不要な成分であるリンや硫化物を除去するために投入した石灰が鉱物化せず、一部未反応の状態（遊離石灰）で存在している。この遊離石灰や固化作用により、浚渫土に含有されたリンや溶存硫化物等の富栄養化物質の溶出が抑制され、赤潮や青潮のもとになる富栄養化底質を改質・浄化する効果が期待できる。¹⁾

このリンや溶存硫化物の溶出抑制試験結果を図 3.10.13 に示す。実験は、浚渫土にカルシア改質材を容積混合率 50% で製造したカルシア改質土 100g をガラス瓶(容量 1 L)に入れた後に、人工海水 0.9L を入れて溶出実験用の試料とした。同様に浚渫土のみのケースも行なった。これらの溶出実験用の試料は、密閉、光遮断、室温下の条件で放置した。その後、所定の日数でそれぞれの上澄み液を採水し、リン酸態リンと溶存態硫化物を測定した。これらの試験結果より、カルシア改質材を混合したことによる硫化物やリンの溶出抑制効果が確認できる。



出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

図 3.10.13 リン酸態リンの溶出抑制試験結果



出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

図 3.10.14 溶存硫化物の溶出抑制試験結果

【参考文献】

- 1) 鉄鋼スラグ等の実海域適用に関する研究会：浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合材の海域利用のための技術マニュアル(案)、平成 29 年 3 月
- 2) (一財) 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル、平成 29 年 2 月

(4) 生物共生材

1) 物理・力学的性質

①配合

全国各地での使用事例で得られた溶存鉄濃度計測結果より、転炉系製鋼スラグと人工腐植土の配合比は、転炉系製鋼スラグが 50%以上、人工腐植土が 40%以上とされている。

②単位容積質量

上記の配合における単位容積質量は、概ね 2.1t/m³程度である。

2) 化学的性質

①pH

生物共生材の pH (海水溶媒、固液比 1:10) は、原料として用いる転炉系製鋼スラグの pH を炭酸化安定処理によって抑制していることから、水質汚濁防止法の排水基準で規定されている海域における水素イオン濃度である pH9.0 以下であり、海域への設置時にも海水の白濁が生じない。

②鉄分溶出性

藻場造成効果である鉄分溶出について溶出ポテンシャルを確保するため、これまでの全国各地の実験において実績のある製品の計測結果より、全重量に対して 0.3%以上の可溶性鉄分の含有があることが品質として定められている。

3) その他の性質

①溶出安全性

海域へ設置されるものであり、かつ、原料となる転炉系製鋼スラグは高温で処理をされるという観点から、海洋汚染防止法における水底土砂基準のうち、カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、水銀、セレン、フッ素の 7 項目に対して安全性の確認が行われている。

原料として使用する転炉系製鋼スラグは、JIS A 5032 で規定される「道路用溶融スラグ」以上の高温で処理されることから、有機物やダイオキシン類は「道路用溶融スラグ」と同様に分解され、成分中に含有することはない。「道路用溶融スラグ」は「溶融固化物」とも呼ばれ、1,200℃以上の高温条件において焼却灰が過熱・溶融され、冷却固化したもので、有機物は熱分解、ガス化、燃焼し、無機物がスラグ化したものである。したがって、転炉系製鋼スラグの重金属の溶出については、「道路用溶融スラグ」と同様にカドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、水銀、セレン、フッ素、ホウ素の 8 種類を確認すればよいこととなる。このうち、海水中に豊富に存在するホウ素は「水底土砂に係る判定基準」では規定されないことから、ホウ素を除く 7 項目について安全性を確認することとしている。

溶出試験結果の例を、表 3.10.8 に示す。

表 3.10.9 溶出試験結果の例

分析対象	単位	計量値結果	定量下限値	基準値
水銀またはその化合物	mg/L	不検出	0.0005	0.005
カドミウムまたはその化合物	mg/L	不検出	0.001	0.1
鉛またはその化合物	mg/L	不検出	0.005	0.1
六価クロム化合物	mg/L	不検出	0.02	0.5
ひ素またはその化合物	mg/L	不検出	0.005	0.1
ふっ化物	mg/L	0.4	0.1	15
セレンまたはその化合物	mg/L	不検出	0.002	0.1

②生物安全性及び食品安全性

以下に、生物安全性に関する試験結果の例（急性毒性試験結果の例）、及び食品安全性に関する試験結果の例を示す。

「魚介類水質環境基準検討調査総合報告書〔海産生物毒性試験指針〕水産庁 平成12年3月」に準拠し実施した。

試験原液は、JIS K 0058-1 スラグ類の化学物質試験方法—第1部：溶出試験方法に準じ、試験溶媒は濾過海水を使用し、試料と溶媒の重量体積比1:10とした。試験区は1試験区あたり10個体（クルマエビは20個体）の供試体を入れたものを試験原液濃度0%区、25%区、50%区、75%区、100%区の5つ設置し、24時間毎に試験液を入れ替えた。試験開始後は1時間後、3時間後、6時間後、24時間後、48時間後、72時間後、96時間後に累積斃死数と累積斃死率及び試験個体の観察を行った。試験結果を表 3.10.9 に示す。

表 3.10.10 生物安全性に関する試験結果の例

a) マダいの各試験時間における累積斃死数と累積斃死率

試験水濃度 (%)	開始時	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後	48 時間後	72 時間後	96 時間後
0 (対照区)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
25	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
50	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	1/10(10)
75	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
100	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)

注) 1. 左側の分母は供試体個数、分子は累積斃死数、右側の () 内には累積斃死率 (%) を各々示した。
2. 50%区における 96 時間後の斃死個体は両眼球欠損、腹部下面損傷のため個体間の闘争によると判断した。

b) クロアワビの各試験時間における累積斃死数と累積斃死率

試験水濃度 (%)	開始時	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後	48 時間後	72 時間後	96 時間後
0 (対照区)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
25	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
50	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
75	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
100	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)

注) 左側の分母は供試体個数、分子は累積斃死数、右側の () 内には累積斃死率 (%) を各々示した。

c) クルマエビの各試験時間における累積斃死数と累積斃死率

試験水濃度 (%)	開始時	1 時間後	3 時間後	6 時間後	24 時間後	48 時間後	72 時間後	96 時間後
0 (対照区)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
25	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
50	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
75	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)
100	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)	0/10(0)

注) 左側の分母は供試体個数、分子は累積斃死数、右側の () 内には累積斃死率 (%) を各々示した

d) ノリ芽の各試験時間における枚数

試験水濃度 (%)	ノリ芽枚数			
	24 時間後	48 時間後	72 時間後	96 時間後
0 対照区	753	407	504	796
25	588	297	415	756
50	682	432	511	588
100	560	926	625	771

注) 1. 表中のノリ芽枚数は試験糸 10cm あたりの値を示す。
2. 付着ノリ芽枚数のばらつきは、観察に供した試験糸をその後の観察に用いず毎回別の試験糸を観察したためであり、試験物質の影響によるものではない。

藻場造成用鉄分供給ユニット(6t)を設置した海域(北海道増毛町)に生息している海藻・生物に対して、食品としての安全性に問題が無いかを確認した事例を下に示す。

表 3.10.11 食品安全性に関する試験結果の例

分析項目	コンブ		ウニ		公的基準
	実験海域	対照海域	実験海域	対照海域	
鉄	31.9	163	5.2	9.6	—
ひ素(有機)	15	17	3.6	3.9	—
鉛	0.06	0.09	<0.05	<0.05	0.3mg/kg コーディックス委員会の基準値
カドミウム	0.04	0.06	<0.01	0.04	1.0mg/kg コーディックス委員会の基準値
総水銀	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.4ppm(うち、メチル水銀<0.3ppmのこと) 旧厚生省の「魚介類の水銀の暫定規制値」
セレン(μg/100g)	<5	<5	19	14	—
総クロム	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	—

3.10.3 加工・改良技術

- (1) 軟弱な浚渫土にカルシア改質材を混合し物理的、化学的性状を改質することによりカルシア改質土が製造される。
- (2) カルシア改質土は、連続式ミキサー混合、管中混合、バックホウ混合等の現在実用化されている工法を用いて製造することができる。

(解説)

(1)について

軟弱な浚渫土の改良は、カルシア改質材を混合することにより行われ、改良により形状安定性及び安全性が向上した浚渫土は、「環境省環境技術実証事業(ETV)」にて、環境負荷に配慮した干潟・浅場造成に適用可能な材料であると評価されている。

カルシア改質土の製造方法を図 3.10.15 に、改良土を構成する主な材料とその役割を表 3.10.11 に示す。



図 3.10.15 カルシア改質土のイメージ

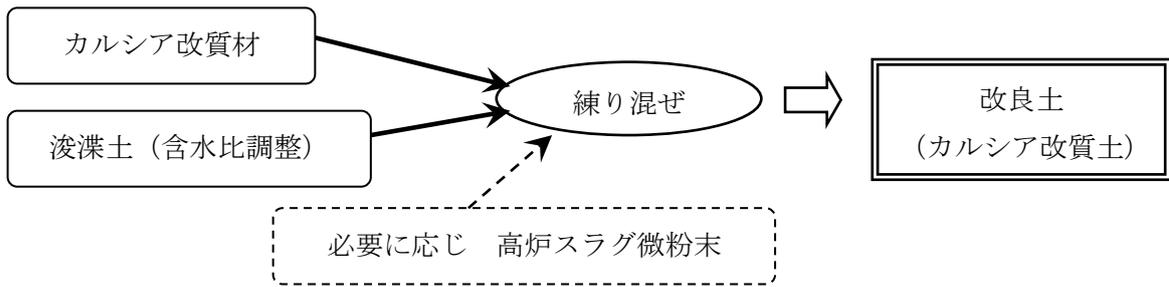


図 3.10.16 カルシア改質土の製造方法

表 3.10.12 主な材料の役割

材料の種類	作用 / 役割
カルシア改質材	浚渫土のシリカ分とカルシア改質材からの遊離石灰 (f-CaO) が水和固化して、カルシウムシリケート系水和物 (C-S-H) やカルシウムアルミネート系水和物 (AFm) が形成されて固化する。
浚渫土	
高炉スラグ微粉末	強度増進材として必要に応じて使用する。

なお、改良土の強度特性は、使用する材料や混合率、フロー値、材齢などにより大きく異なる。そのためカルシア改質土を用いて施工を行う場合は、必ず配合試験を実施して強度特性を把握する必要がある。

(2)について

カルシア改質土は、浚渫土とカルシア改質材の混合材料であり、混合プロセスにより製造される。

混合工法の選定にあたっては、施工規模や投入水深などの地理的条件、要求品質の他、浚渫土の状態（解泥や加水の必要性）や受入サイクルに対応する施工能力により、コストを考慮した最適な工法を選定する必要がある。

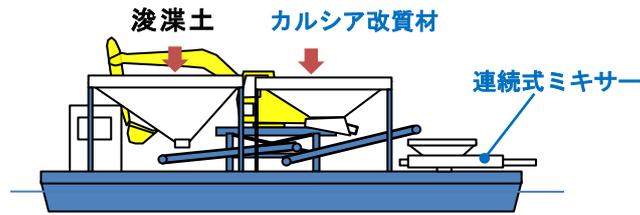
最も重要なことは、施工対象ごとに設定される要求品質を満足する改質土を製造することが可能な工法を選択することである。各工法の特徴と適用範囲を以下に示す。

a) 連続式ミキサー混合工法

連続式ミキサー混合工法とは、作業台船上で連続式ミキサーにて、浚渫土とカルシア改質材を混合する工法である。

専用船でなく台船上にプラントを艀装することができるため、各設備を調整することで小規模から大規模まで施工を行うことができる。

適用場所については、埋立や埋め戻しなどの他、潜堤や護岸の裏込めなど要求品質が高い場所においても適用することができる。



出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル ((一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

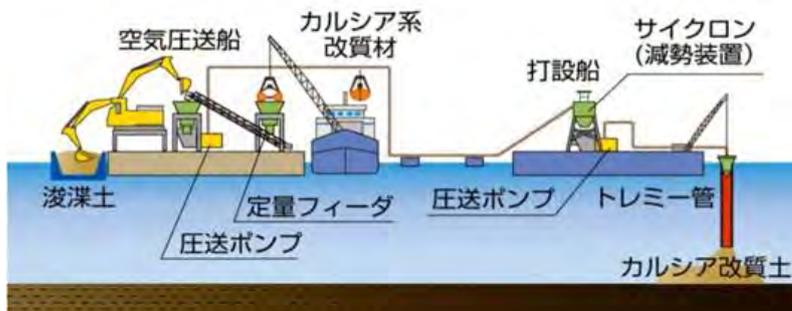
図 3.10.17 連続式ミキサー工法

b) 管中混合工法

管中混合工法は、空気圧送管内で発生するプラグ流による乱流効果を利用して、浚渫土とカルシア改質材を、圧送中に混合する工法である。

空気圧送船を用いることで、大規模施工に適した方法である。なお、浚渫土の含水比が低い場合には管の閉塞が生じるため、必要に応じて浚渫土の含水比調整を行う。カルシア改質材はベルトコンベアなどでの添加となり、空気圧送船にカルシア改質材供給用のベルコンを別途艀装するか、リクレーマ船や艀装台船などを使用する。

適用場所については、埋立や埋め戻しなどの他、潜堤や護岸の裏込めなど要求品質が高い場所においても適用することができる。



一般的なセメントを用いた管中混合工法では、セメントを固化材供給船からスラリー添加を行えるが、カルシア改質材の場合は、別途ベルトコンベアなどでの添加となり、リクレーマ船の使用や艀装台船などが必要となる。

出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル ((一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

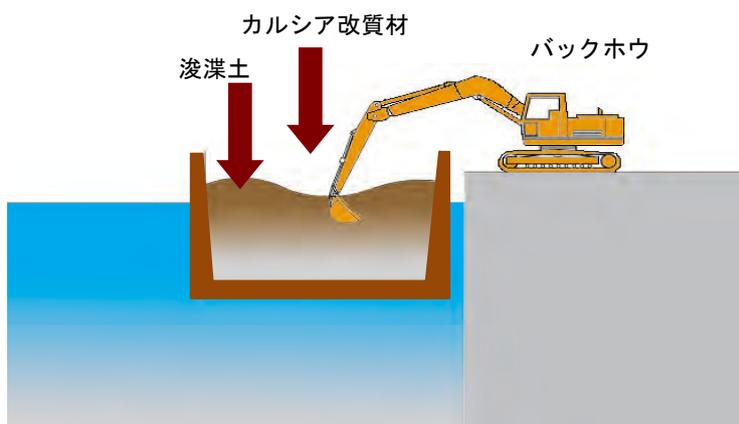
図 3.10.18 管中混合工法

c) バックホウ混合工法

バックホウ混合工法は、土運船内の浚渫土にカルシア改質材を投入して、バックホウにより混合する工法である。

土運船内における混合は、岸壁からバックホウにより行う場合と、バックホウを艀装した台船の舷側に着けて行う場合があるが、バックホウのバケットが泥倉底面まで届くように、施工条件や施工コストに配慮したバックホウを選定する。また、バックホウの規格によっては、攪拌用アタッチメントの装着により、混合精度を上げることができる。

適用場所については、深掘れ箇所埋め戻しや浅場・干潟、潜堤築造などに適用することができる。



出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

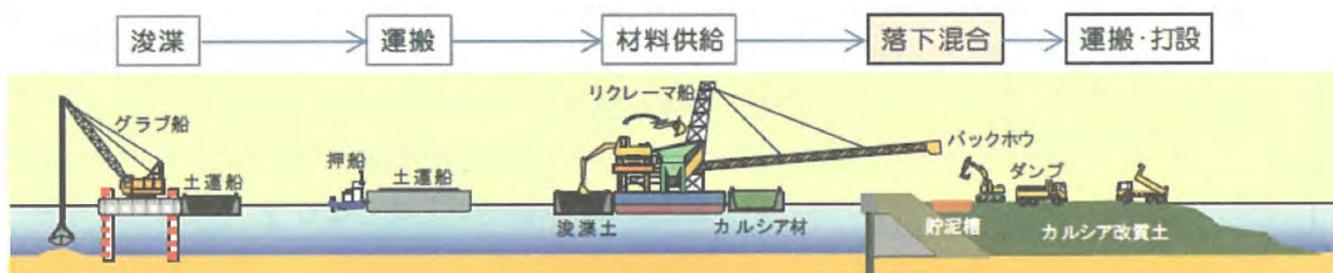
図 3.10.19 バックホウ混合工法

d) 落下混合工法

落下混合工法は、リクレーマ船のベルトコンベアの乗継ぎやスプレッドからの落下時の衝撃により、浚渫土とカルシア改質材を混合する工法である。

落下時の衝撃で混合するため、混合精度は、浚渫土の性状（硬軟など）に応じて落下高さや落下場所の工夫（斜板設置など）で調整する。落下混合工法では護岸の裏埋め部などに直接に落下させて法肩流下で打設する方法や、護岸背面部に落下させてダンプなどで運搬・打設する方法がある。

適用場所については、埋立や埋め戻しなどの大規模施工に適用することができる。



出典) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 29 年 2 月)

図 3.10.20 落下混合工法

3.10.4 適用用途

(1) 概要

鉄鋼スラグ水和固化体、鉄鋼スラグ炭酸固化体、浚渫土改質材及び生物共生材を利用する場合は、関係する基準類に準拠し、用途において定まる要求性能を満たす材料を用いるものとする。

(解説)

品質性能及び利用実績の両面から、鉄鋼スラグ二次製品（鉄鋼スラグ水和固化体、鉄鋼スラグ炭酸固化体、浚渫土改質材及び生物共生材）を各用途に利用する場合の評価を行った結果を、それぞれ表 3.10.12～表 3.10.15 に示す。なお、利用に当たっての条件（用途、材料特性、加工・改良の必要性等）がある場合、評価の下に括弧書きで示している。

次項以降で、評価が「◎」「○+」「○」の用途について、適用方針、適用の利点及び留意事項等について記述する。

評価が「△」の用途は、利用可能性はあるが、既存資料からは判定できず今後の検討を要するものであり、「今後の検討を要する用途」として現状での技術的知見と今後の課題等について記述する。

表 3.10.13 鉄鋼スラグ二次製品（鉄鋼スラグ水和固化体）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典	
		品質性能	利用実績		
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
③ 混和材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
④ パーカメントレン及びパントマット材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑤ パントコンパクションパイル材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑦ 捨石	○+	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 鉄鋼スラグ水和固化体に要求される性能の照査や、材料と配合、製造、検査、維持管理などに関する事項を記載。 ・利用用途として、異形ブロック、根固方塊、捨てブロック、上部工などの無筋コンクリート代替材および捨石などの石材代替材が挙げられている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・泊地等潜堤築造等工事（国交省） ・航路護岸他付帯等工事（国交省） ・基礎工事（管理者）	1)
⑧ 申請材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	◎	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 鉄鋼スラグ水和固化体に要求される性能の照査や、材料と配合、製造、検査、維持管理などに関する事項を記載。 ・利用用途として、異形ブロック、根固方塊、捨てブロック、上部工などの無筋コンクリート代替材および捨石などの石材代替材が挙げられている。	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・航路護岸他付帯等工事（国交省） ・護岸工事（管理者） ・根固工事（その他機関） ・被覆工事（国交省、その他機関） ・消波工事（その他機関）	1)
⑩ 裏込材	○+	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 100～1,000mm程度（割ぐり石状）の鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材について、準硬石相当の割ぐり石の代替として裏込石及び傾斜護岸材への使用が記載されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・護岸工事（管理者）	2)
⑪ 裏埋材	○+	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 ・裏埋材の利用マニュアル及び実績を基に、利用検討が可能と考えられる。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・護岸工事（国交省）	
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	△	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 天然石と同等の品質を有し、非液状化材料であること、海域で使用する場合において、周辺環境のpHへの影響がない、藻場・緩傾斜護岸に適用する場合において、天然石材と同等の生物付着性を有することを確認。準硬石相当の天然石材の代替材として盛土材（中仕切り堤含む）への適用が可能。	●利用実績なし	2)
⑬ 埋立材	○+	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 300mm程度以下（砂礫状）の鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材について、砂岩ずりの代替として非液状化埋立材（中仕切堤含む）への使用が記載されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・滑走路建設工事（国交省）	2)
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	◎ (浅場、藻場)	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 鉄鋼スラグ水和固化体に要求される性能の照査や、材料と配合、製造、検査、維持管理などに関する事項を記載。 ・海洋環境下における生物付着性に関する調査・評価を記載。	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・藻場ブロック工事（国交省、管理者） ・空港の浅場造成工事（国交省） ・浅場潜堤築造工事（国交省） ・藻場造成工事（管理者）	1)
⑱ その他	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし	

出典)

1) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル(改訂版)((財)沿岸技術研究センター、平成20年2月)

2) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第07001号鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材 ((財)沿岸技術研究センター、平成19年1月)

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

表 3.10.14 鉄鋼スラグ二次製品（鉄鋼スラグ炭酸固化体）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典		
		品質性能	利用実績			
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
③ 混和材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
④ パーカルドレン及びサントマット材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑤ サントコンパクションパイル材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑧ 中詰材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑩ 裏込材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑪ 裏埋材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑬ 埋立材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	○ ⁺ (藻場)	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 鉄鋼スラグ炭酸固化体の材料、水理特性、施工上の取り扱いについて記載。 ・海藻、サゴ着生基盤としての鉄鋼スラグ炭酸固化体の特性について、他の材料比較や生物着生機能に係わる特性が解説されている。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・藻場造成（管理者、その他機関） ・サンゴ造成（その他機関）	1)
⑱ その他	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	

出典)

1) 鉄鋼スラグ炭酸固化体利用マニュアル-藻場・サゴ礁の再生に向けて-(財)港湾空間高度化環境研究センター 藻場着生基盤技術研究会委員会、2004年3月)

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

表 3.10.15 鉄鋼スラグ二次製品（浚渫土改質材）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典
		品質性能	利用実績	
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
③ 混和材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
④ パーフルドレン及びパッドマット材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑤ パッドコンパクションパイル材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑧ 中詰材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑩ 裏込材	△	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・2) 港湾・空港工事等における土工用材（埋立材等）として活用可能とされ、材料の品質、土質特性、試験、性能照査、環境への安全性に対する照査、配合設計・配合試験、施工等について記載。 ・5) 岸壁裏込材への適用の可能性が示されている。	- ●利用実績なし
⑪ 裏埋材	△	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 適用用途として腹付け裏埋材が挙げられ、材料の品質、土質特性、試験、性能照査、環境への安全性に対する照査、配合設計・配合試験、施工等について記載。	- ●利用実績なし
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	△	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・2) 港湾・空港工事等における土工用材（埋立材等）として活用可能とされ、材料の品質、土質特性、試験、性能照査、環境への安全性に対する照査、配合設計・配合試験、施工等について記載。 ・5) 盛土材への適用の可能性が示されている。	- ●利用実績なし
⑬ 埋立材	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 適用用途として埋立材が挙げられ、材料の品質、土質特性、試験、性能照査、環境への安全性に対する照査、配合設計・配合試験、施工等について記載。 ・3) 管中混合工法による海面埋立工事を実施し、セメント固化処理土同様の手法で配合設計が可能であること、静的コーン貫入試験や表面波探査により造成地盤全体が目標強度を達成していること等が確認された。【査読有り】	- ●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・ふ頭航路泊地浚渫工事（国交省） ・埋立工事（国交省、その他機関）
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	○+ (藻場、浅場・干潟、覆砂)	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 適用用途として浅場・干潟基盤材、土留め潜堤材、腹付材、覆砂材、窪地埋戻し材が挙げられ、品質管理と要求性能、試験施工・本施工、留意事項等について記載。 ・2) 適用用途として浅場・干潟基盤材、土留め潜堤材、底質改善用覆砂材、浚渫窪地埋戻し材が挙げられ、材料の品質、土質特性、試験、性能照査、環境への安全性に対する照査、配合設計・配合試験、施工等について記載。 ・4) 製鋼スラグと改質土の混合材を用いた藻場造成・水質改善技術に係る実証実験が行われている。 ・5), 6) 藻場造成材、浅場造成(嵩上げ)材、覆砂材などへの適用が記載し、混合材に要求される性能とその照査方法を規定。	- ●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・海洋環境整備事業（国交省） ・藻場造成（その他機関） ・浅場造成（その他機関）
⑱ その他	-	-	●用途対象外	- ●利用実績なし

出典)

- 1) 浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合材の海域利用のための技術マニュアル(案) (鉄鋼スラグ等の実海域適用に関する研究会、平成29年3月)
- 2) 港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成29年2月)
- 3) カルシア改質土の管中混合工法による海面埋立 (土木学会論文集B3, Vol. 69, No. 2, p. I_952-I_957, 2013)
- 4) 製鋼スラグを用いた藻場造成・水質改善技術(JFEスチール(株)、JFEニッケル(株)): 環境省ETV事業(平成21年5月)
- 5) 転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き((社)日本鉄鋼連盟、平成20年9月)
- 6) 同上別冊: 転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法技術資料((社)日本鉄鋼連盟、平成20年9月)

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

表 3.10.16 鉄鋼スラグ二次製品（生物共生材）の適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典	
		品質性能	利用実績		
① コンクリート用細骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
② コンクリート用粗骨材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
③ 混和材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
④ パーチカルドレン及びサントマット材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑤ サントコンパクションパイル材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑧ 中詰材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑩ 裏込材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑪ 裏埋材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑬ 埋立材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	○ (藻場)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・1) 製造方法、使用方法、規格（配合、溶出安全性、pH、鉄分溶出性）及び検査方法等について記載。 ・2) 磯焼け対策（栄養塩の供給）の事例として、効果（海藻の現存量の推移、海水中の溶存酸鉄の濃度の推移等）について記載。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・海洋環境整備事業（国交省） ・防波堤整備事業（国交省）
⑱ その他	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし

出典)

1) 漁場造成・再生用資器材の技術審査・評価報告書 第22001号（ビバリーユニット）（平成22年7月、（社）全国水産技術者協会）

2) 改訂 磯焼け対策ガイドライン（平成27年3月、水産庁）

注) 表中の【主な内容】は、品質性能について出典資料に記載されている主な内容を取りまとめたものである。

(2) 捨石、被覆石・根固・消波ブロック、裏込材、埋立材（鉄鋼スラグ水和固化体）

鉄鋼スラグ水和固化体を破碎して製造した鉄鋼スラグ水和固化体製人工石は、港湾・空港用埋立材として粒径を 300mm 程度以下に調整した砂礫状のものや、捨石・被覆石・根固・消波ブロック、裏込材への利用として粒径を 100mm～1,000mm 以上とした割ぐり石状またはブロック状のものがある。

捨石、被覆石、裏込材、埋立材は、準硬石相当の天然石材代替材として利用できる。また、根固・消波ブロックは、セメントコンクリート代替材として利用できる。

適用に当たっては、以下の利点がある。

- ・準硬石相当の天然石材と同等の品質を有する。また、品質管理された工業製品のため、品質のばらつきが少ない。使用目的に応じて、大きさを任意に変えることもできる。
- ・高い密度を有するため、波浪安定性に優れる。
- ・10%通過粒径が大きいことで透水性が大きく、非液状化材料である。
- ・周辺海域の pH への影響がない。
- ・施工性に関しては、従来の石材、コンクリートブロックと同等であり、製造後の運搬や保管等も従来材と同等に扱うことができる。

利用に当たっては、利用者は、供給側と協議の上、使用目的に応じて必要な品質管理を行うこととする。また供給量について、事前に確認することとする。

(3) 裏埋材（鉄鋼スラグ水和固化体）

鉄鋼スラグ水和固化体製人工石を裏埋材に使用する場合は、天然材の代替として利用することができる。ただし、加工費用がかかるため、一般的には製鋼スラグ単味で利用するほうが有利である。

(4) 埋立材（浚渫土改質材）

「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」において、カルシア改質土の適用用途として、埋立材が挙げられている。

カルシア改質土を埋立材に使用した場合の特長を以下に示す。

- ・浚渫土のみの場合に比べて強度発現が早く圧密沈下も小さくなるため、ドレーン工や載荷盛土工が不要で埋立工期の短縮が可能である。
- ・特に早期に強度発現が必要となる護岸背面の裏埋部や非液状化層に部分的に適用することが効果的である。

詳細な事項については、「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」を参照することができる。また、巻末に示す参考文献 19)～25)を参考とすることができる。

(5) 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材

1) 鉄鋼スラグ水和固化体

鉄鋼スラグ水和固化体を破碎して製造した鉄鋼スラグ水和固化体製人工石の藻場、浅場への適用は、「鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル」を参考とすることができる。

「鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル」では、鉄鋼スラグ水和固化体製人工石を海洋環境下に暴露した際の付着生物は、質量、種類ともにコンクリートよりも多いとしている。また、試料表面の海水 pH は、鉄鋼スラグ水和固化体では暴露初期から対照区の海水と同じであるが、コンクリートでは暴露初期に高い結果が得られている。

付着生物が多い理由として、鉄鋼スラグ水和固化体は、主な材料である製鋼スラグ中に生物の生育に必須の元素である Fe、Si などを含むこと、また、アルカリ成分の溶出が小さいために生物育成を阻害しないことが挙げられる。よって、鉄鋼スラグ水和固化体製人工石は、藻場、浅場造成に優れた材料といえる。

適用に当たっては、以下の利点がある。

- ・炭酸カルシウムで被覆され、さらに多孔質であるため、生物付着性に優れる。
- ・施工性に関しては、従来の石材、コンクリートブロックと同等であり、製造後の運搬や保管等も従来材と同等に扱うことができる。

鉄鋼スラグ水和固化体の藻場、浅場への活用の優位性は示されているが、海域環境により実績と異なる可能性もあるため、長期的なモニタリング等で状況を把握することが望ましい。

2) 鉄鋼スラグ炭酸固化体

鉄鋼スラグ炭酸固化体の藻場造成への利用は、「鉄鋼スラグ炭酸固化体 利用マニュアル」を参考とすることができる。

「鉄鋼スラグ炭酸固化体 利用マニュアル」では、鉄鋼スラグ炭酸固化体の生物着生効果がコンクリートや天然岩礁に比べてどのような特性を持つかを検証するため、実海域での評価試験を実施している。これによれば、鉄鋼スラグ炭酸固化体はコンクリートと比較して同等以上の海藻・サンゴ着生が認められている。

鉄鋼スラグ炭酸固化体は、ブロック表面だけでなく、気孔内部まで海中で安定な炭酸カルシウムに被覆されている。この炭酸カルシウムは、貝殻やサンゴと同じ成分であるため、生物親和性が高い。さらに多孔質であるため、生物の付着に好ましい特性を有している。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・炭酸カルシウムで被覆され、さらに多孔質であるため、生物付着性に優れる。
- ・施工性に関しては、従来の石材、コンクリートブロックと同等であり、製造後の運搬や保管等も従来材と同等に扱うことができる。

鉄鋼スラグ炭酸固化体の藻場活用への優位性は示されているが、海域環境により実績と異なる可能性もあるため、長期的なモニタリング等で状況を把握することが望ましい。

3) 浚渫土改質材

「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」において、カルシア改質土の適用用途として、浅場・干潟基盤材、土留め潜堤材、覆砂材及び深掘れ箇所埋め戻し材が挙げられている。

カルシア改質土をこれらの用途に使用した場合の特長及び留意点を以下に示す。詳細な事項については、「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル」を参照することができる。

【浅場・干潟基盤材】

- ・経時的に硬化するため、波浪や沈下に対して安定なマウンド基盤の構築が可能である。
- ・打設時に法勾配を保持させることが可能なため、海中で傾斜地盤の造成が可能である（勾配は配合により異なる）。

【土留め潜堤材】

- ・配合と施工法によっては、カルシア改質土を土留め潜堤として活用することが可能であり、その場合は吸出し防止工の省略や地盤沈下の低減が可能である（波あたりの強い場所では、補助工として被覆石などが必要となる場合がある）。

【覆砂材】

- ・カルシア改質土は、富栄養化した底質を封じ込める目的の覆砂代替材としての活用が可能である。
- ・ただし、硬化するため海底生物がカルシア改質土内に潜ることはできないので生物生息場とする場合は、天然砂での覆砂の検討が必要である。

【深掘れ箇所埋め戻し材】

- ・青潮の発生箇所となっているような窪地の埋め戻し材として最適である（硫化物溶出抑制効果あり）。
- ・既に深掘れ箇所内へ浚渫土単独で埋め戻しを実施している場所においても、覆砂材と同様に表層の蓋材（埋めた浚渫土の封じ込め材）としてカルシア改質土を活用可能である。

【既存工事における検討事項】

- ・浚渫土とスラグを管中混合処理により混合投入する場合は、物理試験、有害物質等の試験の実施により材料の確認を行うとともに、環境改善効果のモニタリングとして、水質調査、底生物調査を実施した。（環境改善試験工事）

4) 生物共生材

藻場造成用鉄分供給ユニットは、汽水域、海水域における使用を前提に開発されたものである。使用方法は海水中で散逸せず、かつ海水へ鉄分が的確に供給されるように、透水性を有する袋または容器に藻場造成用鉄分供給ユニットを入れ、海に沈設あるいは埋設する。

具体的には原料を混合したものをヤシ繊維製の袋に入れ、海域との通水が有る汀線部地盤に埋設する方法や、藻場造成用鉄分供給ユニットを透水性の袋に入れて拡散を防止した上で、波浪に対する安定性を考慮して開口部を有する鋼製箱に充填して海水中に沈設する方法等がある。

また、使用する場合には、藻場造成用鉄分供給ユニットの周辺に海藻の着生基質となる岩礁やコンク

リートブロックまたは鉄鋼スラグ水和固化体製ブロック・人工石が存在することが必須であり、その際には基質と藻場造成用鉄分供給ユニットの距離をできるだけ近くする必要がある。

藻場造成用鉄分供給ユニットの特性について、現在得られている知見を示す。なお、詳細な事項については「漁場造成・再生用資器材の技術審査・評価報告書 第 22001 号 鉄分供給ユニット」を参考とすることができる。

① 期待される効果

藻場造成用鉄分供給ユニットは、従来森林の落ち葉等が発酵してできた腐植土中の腐植酸（フルボ酸、フミン酸等）が、土中の鉄分と結びついて腐植酸鉄（二価鉄イオン）となり、河川を通じて海へ供給されるという自然のサイクルを人工的に再現すること目的としている。

鉄分の含有量が豊富で、かつ持続的、安定的に鉄分を供給することができる転炉系製鋼スラグと、自然の草木を原料とし、安定的な腐植酸含有量を持つ人工腐植土を混合することで、転炉系製鋼スラグ中の鉄分を、人工腐植土中の腐植酸（フルボ酸、フミン酸）がキレート化して人工的に腐植酸鉄を作り出し、それを海域に設置することにより、安定的に溶存鉄を海中に供給することが可能となる。

② 腐植酸鉄供給能力について

藻場造成用鉄分供給ユニットからの腐植酸鉄溶出能力は、室内実験により明らかになっている。

実験は、転炉系製鋼スラグ、人工腐植土、または転炉系製鋼スラグと人工腐植土の混合品から人工海水に溶出した鉄分濃度の測定を行ったものである。鉄分溶出量の累積曲線を図 3.10.20 に示す。転炉系製鋼スラグのみでは溶出液量比 100 程度までの初期の鉄分溶出量が少なく、溶出液量比 300 で 38mg-Fe/kg に留まった。人工腐植土のみでは初期より鉄分溶出が生じ、溶出液量比 300 で転炉系製鋼スラグのみの場合の 2 倍以上に相当する 82mg-Fe/kg の鉄分溶出が観察された。これに対し、転炉系製鋼スラグと人工腐植土を混合した藻場造成用鉄分供給ユニットの場合は初期の鉄分溶出も人工腐植土単独なみに高く、溶出液量比 150 で 130mg-Fe/kg となり、混合により鉄分溶出が高まる結果が得られた。

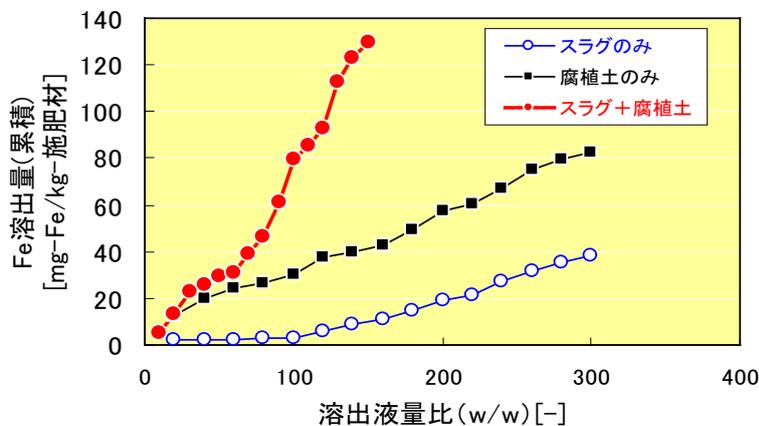


図 3.10.21 各材料の二価鉄溶出特性

③ コンプ藻場の復元効果について（実海域試験による確認）

藻場造成用鉄分供給ユニットにより、磯焼けした北海道日本海側の海域におけるコンブ藻場の復元が確認されている。

平成 16 年 10 月に、北海道増毛町舎熊海域の汀線部に藻場造成用鉄分供給ユニットを埋設した実験区 A、転炉系製鋼スラグのみを埋設した実験区 B、及び対照区が設置された。実験区設置から 8 ヶ月後の平成 17 年 6 月には、対照区の約 220 倍にのぼるコンブ生育が確認された。また、1 本あたりの湿重量も対照区の 7.5 倍となっていた。更に翌年の平成 18 年 6 月になると図 3.10.21 のような海藻着生分布となり、図 3.10.22 にあるように単位面積当たりのコンブの湿重量も 1 年目と比較して実験区 A で 30 倍以上となり、その影響は対照区にも及んだ。

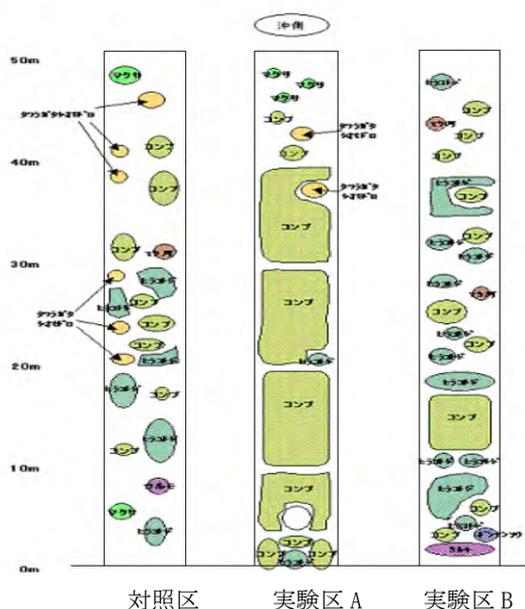


図 3.10.22 1 年 8 ヶ月経過後の各実験区の海藻着生状況

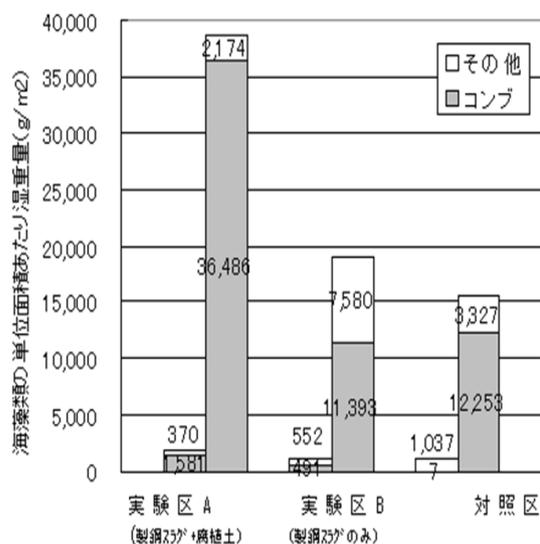


図 3.10.23 コドレート調査結果

(6) 今後の検討を要する用途

1) 裏込材（浚渫土改質材）

「**転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き**」において、岸壁裏込材等への適用の可能性が示されている。

岸壁の裏込材として製鋼スラグを適用する場合には、スラグの膨張による悪影響が生じることのないように、対策を講じる必要があるが、浚渫土と混合してカルシア改質土として使用することにより、製鋼スラグの膨張が圧密特性を有する浚渫土により吸収されて緩和することがわかっている。一般的なc材（カルシア改質材の容積混合率30%以内）として利用する場合は、膨張しない材料とみなすことができる。ただし、性状の確認できていない転炉系製鋼スラグをカルシア改質材に適用する場合や、カルシア改質材の混合率を30%超とする場合は、カルシア改質土に膨張が生じないことを確認することが望ましい。

2) 裏埋材（浚渫土改質材）

「**港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル**」において、カルシア改質土の適用用途として、腹付け裏埋材が挙げられている。特に、早期に強度発現が必要となる護岸背面への適用が効果的であり、適用により吸出し防止工の省略が可能となる。また、中仕切り堤の腹付材についても、適用用途として挙げられている。

3) 盛土材、覆土材、載荷盛土材

① 鉄鋼スラグ水和固化体

鉄鋼スラグ水和固化体製人工石は、天然材の代替として利用することができる。重量も配合に応じて製造することができるため、載荷盛土材など用途に対応した材料を準備することができる。

【既存工事における検討事項】

- ・室内試験により、基本材料である岩ズリの受入基準及び海洋汚染防止法の水底土砂判定基準を満足することを確認した。（滑走路建設外工事）
- ・製造先毎でリサイクル材料の品質が異なるため、材料搬入前の品質検査と施工中の品質管理により基準値を満足することを確認した。（滑走路建設外工事）

② 浚渫土改質材

「**転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き**」において、盛土材等への適用の可能性が示されている。カルシア改質土を適用した箇所に構造物等を施工する場合は、カルシア改質土の長期強度に留意する必要がある。

また、「**港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル**」において、カルシア改質土の適用用途として、堤防上部材（仮設道路材）が挙げられている。

3.10.5 関連法令

鉄鋼スラグ水和固化体、鉄鋼スラグ炭酸固化体、浚渫土改質材及び生物共生材は産業副産物等に該当する。産業副産物等の法令上の取り扱いについては、「1.4.2 環境安全の考え方」を参照のこと。

3.10.6 施工後の再利用・廃棄の考え方

施工後に再利用・廃棄を行う場合、発生する材料の種類に応じて検討を行うものとする。
--

(解説)

鉄鋼スラグ水和固化体、鉄鋼スラグ炭酸固化体、浚渫土改質材及び生物共生材を材料として用いた箇所の改修・撤去等により生じた建設副産物を再びリサイクル材料として利用または廃棄する場合は、発生する材料の種類に応じて、本ガイドラインの該当箇所を参照し、検討を行う。

また、再利用・廃棄を検討する際に、使用したリサイクル材料の種類、品質及び量等の情報が重要となるため、これらの情報を維持管理計画等に記載しておくことを標準とする。