

3.11 フライアッシュ

3.11.1 製造・供給

フライアッシュは、石炭の燃焼によって得られるが、石炭の種類やボイラでの燃焼状態等によって JIS フライアッシュ（以下、JIS 灰という）と JIS 規格外フライアッシュ（以下、非 JIS 灰という）が製造される。

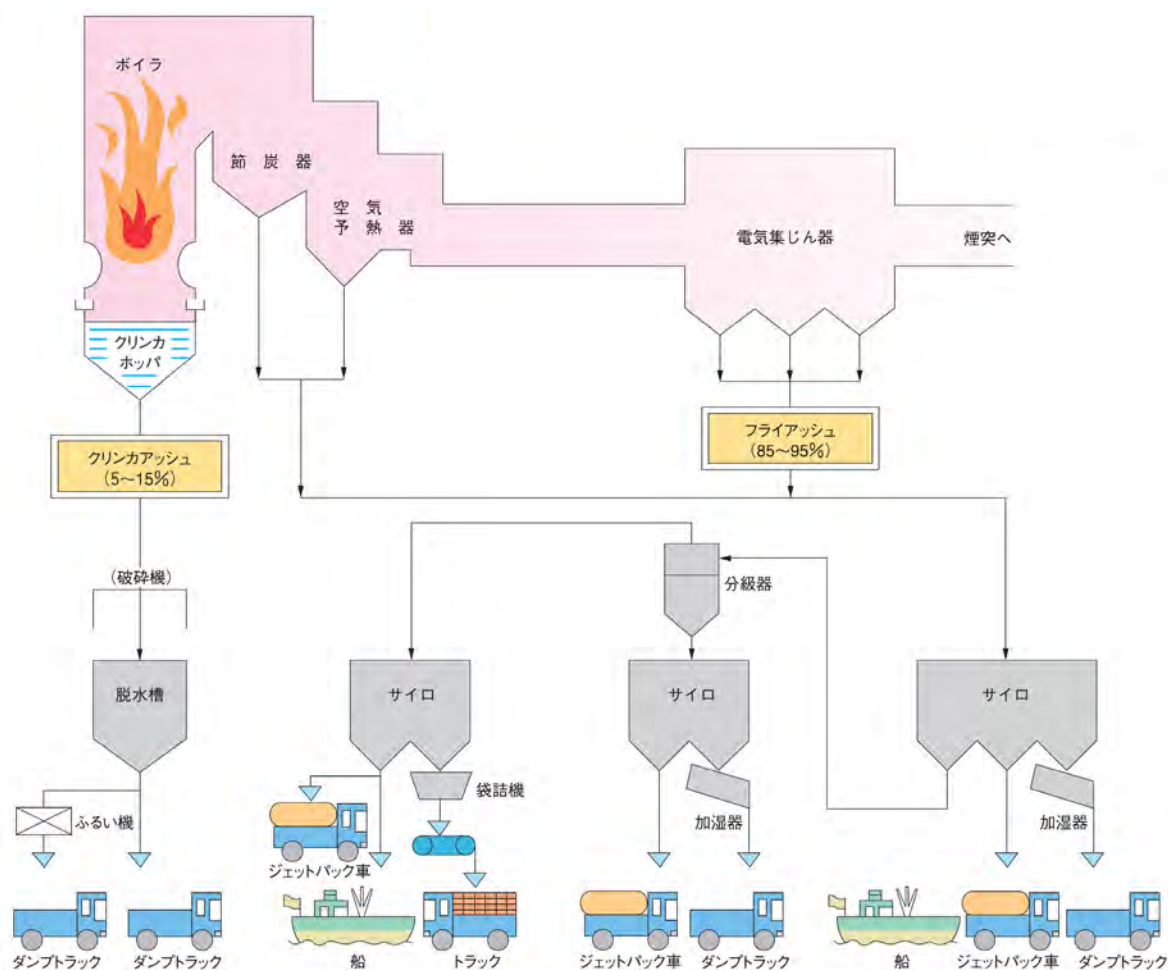
（解説）

(1) 製造方法

石炭火力発電所では、微粉碎した石炭を微粉炭燃焼ボイラ内で燃焼させ、そのエネルギーを電気に変えているが、この燃焼により熔融状態になった灰の粒子は、高温の燃焼ガス中を浮遊し、ボイラ出口で温度が低下することにもない、球形微細粒子となって電気集じん器に捕集される。これを一般にフライアッシュと呼ぶ。

このフライアッシュは、サイロに乾燥状態で貯蔵され、用途に応じて更に調合または分級器で粒度調整等を行い、製品別サイロに貯蔵される。

製造フローを図 3.11.1 に示す。



出典) 日本フライアッシュ協会 HP より作成

図 3.11.1 フライアッシュ製造フロー

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

① コンクリート用フライアッシュ

陸上輸送：全国の石炭火力発電所及び中継サイロ周辺

海上輸送：制限なし

2) 石炭火力発電所の立地場所



出典) 日本フライアッシュ協会 HP より作成

図 3.11.2 石炭火力発電所の立地場所 (日本フライアッシュ協会関係)

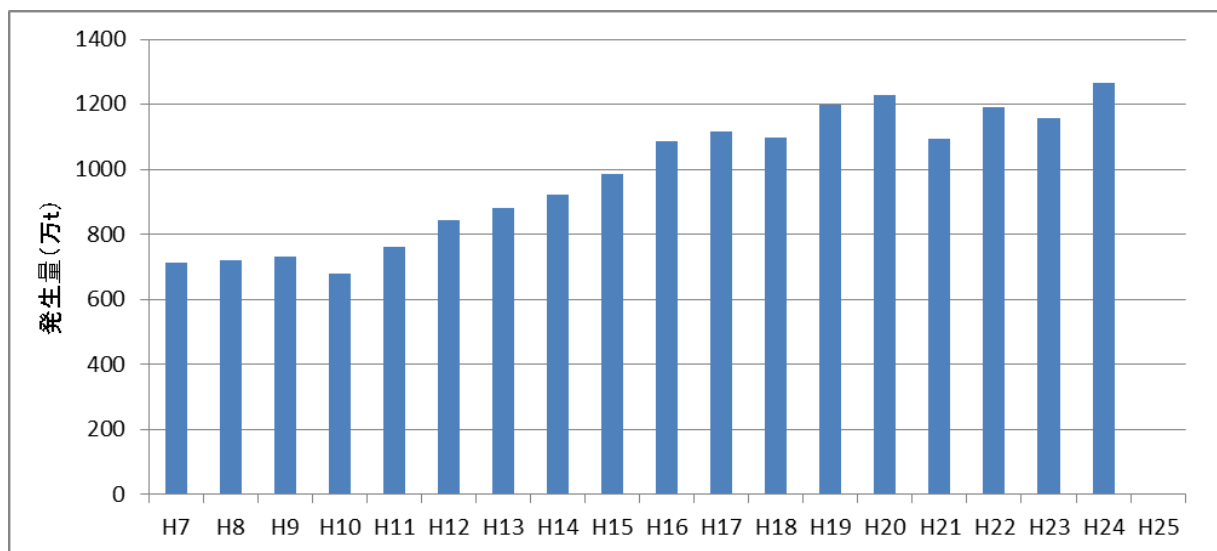
3) 生産量

① JIS 灰: 約 40 万 t / 年 (I 種~IV 種合計) (平成 25 年度利用実績)

② 非 JIS 灰: 約 820 万 t / 年 (平成 25 年度利用実績)

(セメント原料用: 約 580 万 t / 年、各種用途用: 約 240 万 t / 年)

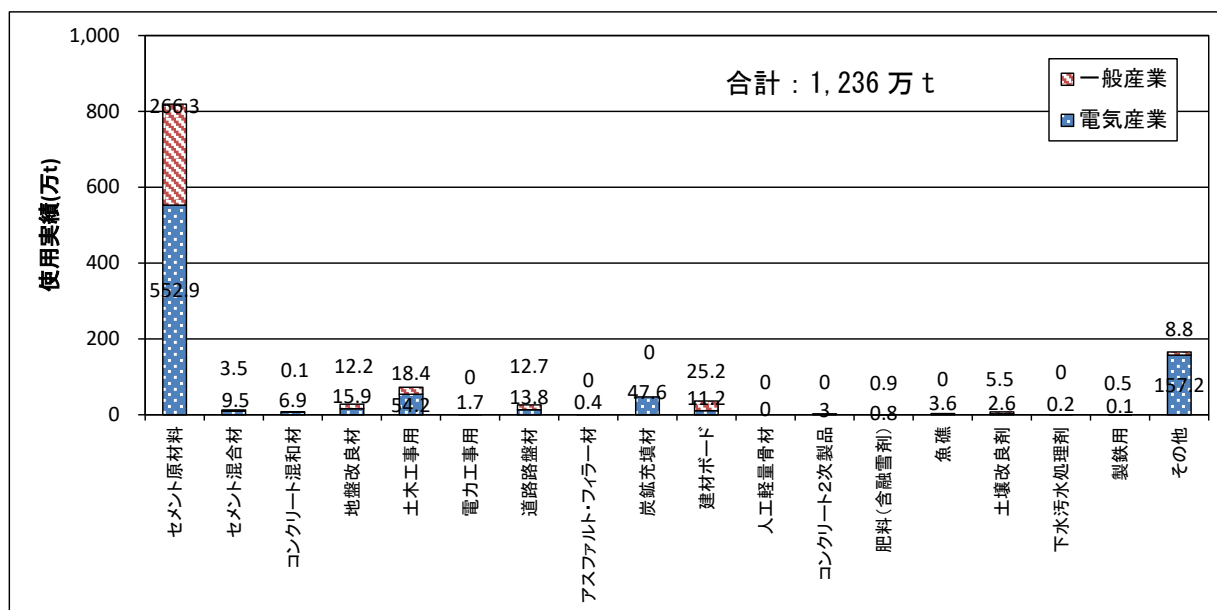
4) 発生量の推移



出典) 石炭灰全国実態調査報告書 (平成 24 年度実績) ((一社) 石炭エネルギーセンター) より作成

図 3.11.3 発生量の推移 (石炭灰)

5) 用途別使用量



出典) 石炭灰全国実態調査報告書 (平成 24 年度実績) ((一社) 石炭エネルギーセンター) より作成

図 3.11.4 用途別使用量 (平成 24 年度実績 石炭灰)

3.11.2 品質

JIS 灰については、JIS A 6201 に基づき、品質管理を実施し、品質保持されている。非 JIS 灰については、JIS 規格項目以外の性状は把握されていない。

(解説)

(1) JIS 灰

JIS 灰は、利用目的に応じ、表 3.11.1 に示すとおり、フライアッシュ I 種から IV 種に等級化されている。その品質区分は表 3.11.3 に示すとおり、JIS A 6201 に規定されている。

フライアッシュは球形の微細粒子である。その大部分は灰白色であるが、未燃炭素が増えるにしたがって黒味を帯び、鉄分が多いと赤味を帯びる傾向がある。また、石炭火力発電所の設備によって燃焼状態が異なることや、石炭の種類によってフライアッシュの品質が変化するが、分級器やブレンディングサイロ等を活用することで品質の安定化を図っており、一般には受渡当事者間によって確認された品質範囲内で製造される。

JIS 灰は、発電所毎にフライアッシュ品質に対応して、JIS A 6201 に基づき、一定のスペックとなるよう品質管理を実施し品質保持されている。

表 3.11.1 コンクリート用フライアッシュ(JIS A 6201)の用途・性能等

種 別	用 途 ・ 性 能 等
フライアッシュ I 種	混入することにより、特にコンクリートの高強度、流動性付与、アルカリシリカ反応抑制に効果があるもの。 また、初期強度発現性も無混入の場合と遜色ないもの。
フライアッシュ II 種	標準的なフライアッシュで、混入することにより、特にコンクリートの水和発熱抑制、長期強度の改善効果があるもの。また、コンクリートへの流動性付与、アルカリシリカ反応抑制について、無混入の場合と比較して十分に効果が発揮されるもの。
フライアッシュ III 種	混入することにより、特にコンクリートの水和発熱抑制、アルカリシリカ反応抑制、長期強度の改善に、II 種と同等の効果があるもの。ただし、練混ぜ時に、コンクリートの流動性、空気連行性に関して配慮が必要。
フライアッシュ IV 種	水和発熱抑制に対し II 種と同等の効果があり、アルカリシリカ反応抑制も期待できるもの。強度発現の点で低強度コンクリート、工場製品等に使用可能なもので、鉄筋コンクリート用の普通コンクリートに適用する場合には、事前に強度の発現を確認して使用するもの。

コンクリート混和材として広く利用されているのは、II 種の規定を満足するフライアッシュである。II 種品を製造する全国 16 発電所の平成 23 年度から 25 年度における各品質項目の 3 ヶ年平均値は以下のような範囲にあった。

表 3.11.2 JISフライアッシュ（Ⅱ種）の品質状況

項目		発電所間の品質平均値の範囲
二酸化けい素含有量	%	56～65
湿分	%	0.05～0.19
強熱減量	%	1.3～3.9
密度	g/cm ³	2.17～2.38
粉末度	45 μm ふるい残分 %	1～14
	比表面積 cm ² /g	3,400～5,000
フロー値比	%	101～113
活性度指数	材齢 28 日 %	83～95
	材齢 91 日 %	96～107

出典) 日本フライアッシュ協会調査データより

表 3.11.3 コンクリート用フライアッシュ (JIS A 6201)

項目		フライアッシュ Ⅰ種	フライアッシュ Ⅱ種	フライアッシュ Ⅲ種	フライアッシュ Ⅳ種
二酸化けい素含有量 ^{a)}	%	45.0 以上			
湿分	%	1.0 以下			
強熱減量 ^{b)}	%	3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度	g/cm ³	1.95 以上			
粉末度 ^{c)}	網ふるい方法 (45 μm ふるい残分) %	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	ブレン方法 (比表面積) cm ² /g	5 000 以上	2 500 以上	2 500 以上	1 500 以上
フロー値比	%	105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 %	材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

注 ^{a)} 二酸化けい素含有量は、溶解質量分析方法又は蛍光 X 線分析方法による。
^{b)} 強熱減量に代えて、未燃炭素含有率の測定を **JIS M 8819** 又は **JIS R 1603** に規定する方法で行い、その結果に対し、強熱減量の規定値を適用してもよい。
^{c)} 粉末度は、網ふるい方法又はブレン方法による。ただし、網ふるい方法による場合は、ブレン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

出典) JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」

1) 物理・力学的性質

① 密度

フライアッシュの密度は、前述の測定例では概ね 2.2~2.4 (g/cm³) の範囲である。JIS A 6201 では 1.95(g/cm³) 以上と規定されている。また、細かい粒子ほど密度が大きくなる傾向がある。

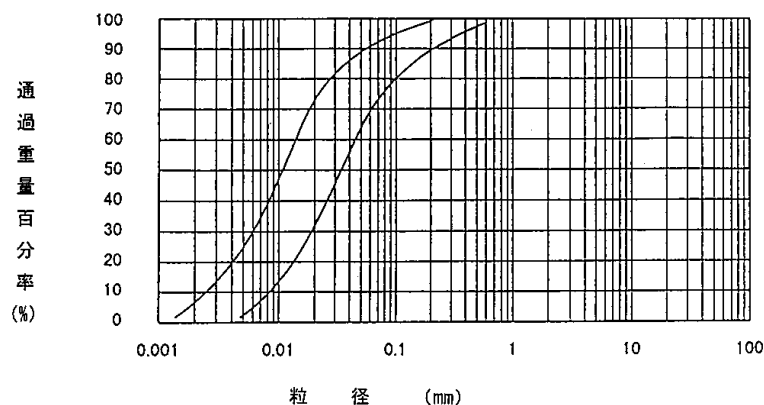
② 粉末度

JIS 灰は主にコンクリート混和材として利用されるが、粉末度は製品強度を支配する一つの重要な指標となる。JIS A 6201 では、45μm ふるい残分（網ふるい方法）と比表面積（ブレン法）が規定されている。

③ 粒度

フライアッシュは微細粒子であるが、一般的な JIS 灰の粒度分布は細粒分（0.075mm）以下の粒経が 5~9 割を占める。

粒度試験結果の例を、図 3.11.5 に示す。



出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

図 3.11.5 フライアッシュ粒度分布例

④ フロー値比

フロー値比はフライアッシュの流動性付与効果を示す指標で、基準モルタル（※1）のフロー値に対する試験モルタル（※2）のフロー値の割合によって得られる。

フロー値比は粉末度と強熱減量の影響を強く受けるとされ、強熱減量が小さく粉末度が高いほどフロー値比が大きくなる傾向にあり、JIS A 6201 では種類毎に規定されている。

（※1）基準モルタル JIS A 6201 において、普通ポルトランドセメントを用いて作成したモルタルのこと。モルタルの配合は（普通ポルトランドセメント 450g+標準砂 1,350g+水 225ml）である。

（※2）試験モルタル JIS A 6201 において、試験モルタルで用いる普通ポルトランドセメント重量の 25%をフライアッシュに置換して作成したモルタルのこと。基準モルタルと対比することでフライアッシュ品質の指標となる。モルタルの配合は（普通ポルトランドセメント 337.5g+フライアッシュ 112.5g+標準砂 1,350g+水 225ml）である。

⑤ 活性度指数

活性度指数はフライアッシュのポズラン反応を評価する指標として JIS A 6201 に規定されており、基準モルタルの圧縮強度に対する試験モルタルの圧縮強度の割合によって得られる。

活性度指数は粉末度の影響を強く受けるとされ、粉末度が高いほど活性度指数が大きくなる傾向にあり、JIS A 6201 では種類毎に、材齢 28 日、91 日において規定されている。

2) 化学的性質

① 化学組成

表 3.11.4 にフライアッシュの化学成分分析結果の一例を示す。

フライアッシュの化学組成は一般に、二酸化けい素 (SiO₂) と酸化アルミニウム (Al₂O₃) が主成分である。その他は、酸化鉄 (Fe₂O₃)、酸化マグネシウム (MgO)、酸化カルシウム (CaO) 等の酸化物が含まれる。

JIS A 6201 では二酸化けい素が 45.0%以上と規定されている。また、湿分も規定されており、フライアッシュはそれ自体が水分ゼロの乾燥状態であるが、機械的に付着する水分について 1.0%以下とされている。

表 3.11.4 フライアッシュの化学組成例 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
フライアッシュ	40.1~74.4	15.7~35.2	1.4~17.5	0.2~7.4	0.3~10.1

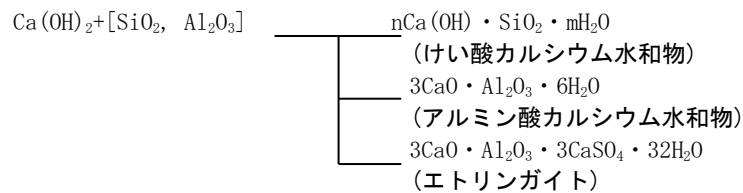
出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

② ポズラン反応

フライアッシュは人工ポズランの代表的なもので、コンクリート用混和材として、防水性付与、化学抵抗性の増大、水和熱の低減、長期強度の向上などに寄与している。

ポズランとは、天然または人工のけい酸質の微粉末混和材のことで、シリカ質あるいはシリカ (SiO₂) とアルミナ (Al₂O₃) を主成分とし、一般にフライアッシュ自体は水で練っても硬化する性質はない。しかし、水の存在下でセメントの水和の際に生成する水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) と常温で反応して不溶性の物質を生成し、徐々に硬化する性質を示す。これをポズラン反応というが、高炉水砕スラグの性質である潜在水硬性とは似て非なるものである。

なお、ポズラン反応は、次のように表される。



③ 強熱減量

フライアッシュは微粉炭の燃焼灰であるため、未燃炭素を含有した粒子である。強熱減量はこの未燃炭素量の比率を示す指標として JIS A 6201 に規定されている。一般に、フライアッシュを用いたフレッシュコンクリートにおいて、所要の空気量を得るための化学混和剤（AE 剤や高性能 AE 減水剤など）量は、フライアッシュの強熱減量が大きいほど多くなる傾向が示されている。

また、化学混和剤の調整の目安を与える指標として、メチレンブルー吸着量が知られている。

※セメント JIS (JIS R 5201) 規格の強熱減量は、セメントの風化の程度を示す指標として規定されているが、上記のとおり、フライアッシュの強熱減量とは意味合いが異なる。

④ pH

フライアッシュの pH は一般に高く、環境庁告示の方法で得た検液の pH は 10～12 であるが、発電所によっては一部に中性から酸性の場合もある。

⑤ 微量成分の溶出

フライアッシュ中の微量成分含有量及び溶出濃度の測定例を表 3.11.5、表 3.11.6 に示す。フライアッシュに含まれる微量成分含有量は、ほう素、鉛、ひ素及びセレンが比較的多い。また、溶出濃度はほう素、六価クロム、ヒ素及びセレンが比較的高い値となり、一方で六価クロムは普通ポルトランドセメントに比べて低い溶出濃度となっている。

表 3.11.5 フライアッシュ中の微量成分含有量 (単位:mg/kg)

成分	範囲	平均値 (対象試料数)
ほう素 (B)	23～1330	428.3 (36 試料)
六価クロム (Cr ⁶⁺)	0.05 以下～83	2.21 (63 試料)
ひ素 (As)	0.01 以下～91	15.0 (99 試料)
セレン (Se)	0.5 以下～54	8.13 (97 試料)
カドミウム (Cd)	0.03 以下～8.86	1.41 (84 試料)
水銀 (Hg)	0.001 以下～1.46	0.17 (84 試料)
鉛 (Pb)	2.78～210	53.1 (75 試料)
クロム (Cr)	28～160	78.5 (38 試料)

[注] 定量下限未満は定量下限値を測定値として平均値を算出した (文献¹⁷⁾ 除く)。

※文献 17 は細田信道：微粉炭燃焼灰の基礎特性の分類とその評価，石炭灰有効利用シンポジウム講演集，(財)石炭利用総合センター・(財)エネルギー総合工学研究所，1998 年
出典) コンクリートライブラリー132号 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術、p. 17 (土木学会編)

表 3.11.6 フライアッシュの環告 46 号法溶出濃度 (単位:mg/l)

成分	範囲	平均値 (対象試料数)
ほう素 (B)	0.2～25	14.6 (12 試料)
六価クロム (Cr ⁶⁺)	0.01 以下～0.29	0.054 (95 試料)
ひ素 (As)	0.005 以下～0.17	0.023 (95 試料)
セレン (Se)	0.005 以下～0.51	0.037 (51 試料)
カドミウム (Cd)	0.001 以下～0.01	0.002 (91 試料)
水銀 (Hg)	0.001 以下	0.001 (95 試料)
鉛 (Pb)	0.001 以下～0.28	0.017 (95 試料)

[注] 定量下限未満は定量下限値を測定値として平均値を算出した (文献¹⁷⁾ を除く)。

※文献 17 は細田信道：微粉炭燃焼灰の基礎特性の分類とその評価，石炭灰有効利用シンポジウム講演集，(財)石炭利用総合センター・(財)エネルギー総合工学研究所，1998 年
出典) コンクリートライブラリー132号 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術、p. 17 (土木学会編)

(2) 非 JIS 灰

石炭火力発電所は発電することが目的であることから、石炭灰の品質を考慮した燃焼は一般的に行なわれず、燃焼効率や環境保全、設備保全を重点とした燃焼となる。

フライアッシュの品質は、石炭銘柄の選択や混合方法、微粉炭の粒度管理、ボイラでの燃焼管理等によって大きく変化する。非 JIS 灰の性状については、採取判定に必要な最低限の JIS 規格項目以外の試験は行われないため、その性状は把握されていない。

3.11.3 加工・改良技術

フライアッシュの加工・改良技術として、以下のものが挙げられる。

- ・ FA サンド

細骨材とフライアッシュを事前に混合したコンクリート用材料で、通常の細骨材と同様の要領でコンクリート製造設備に供給、貯蔵、計量することができ、通常の細骨材と同様の取り扱いでコンクリートを製造できる。

- ・ CfFA (Carbon-free Fly Ash 高品質フライアッシュ)

フライアッシュ原粉を再焼成し、強熱減量を 1%以下に低減した後、粉碎分級したフライアッシュである。これによりコンクリートの空気量を安定的に確保しやすくなるとされている。

- ・ FA スラリー (フライアッシュスラリー)

コンクリート製造時に、フライアッシュ粒子の分散性をより高めるため、事前にフライアッシュと一部の練り混ぜ水と混合するものである。これを具体化する技術として、安定化処理石炭灰スラリー (CCAS) 技術が開発されている。CCAS は、浮遊選鉱によりフライアッシュの未燃分を除去し、強熱減量値を低下させるとともにスラリー化を実現する技術である。

3.11.4 適用用途

(1) 概要

JIS 規格が規定されているフライアッシュ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フライアッシュ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、フライアッシュ (JIS 灰、非 JIS 灰) 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 3.11.7、表 3.11.8 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 3.11.7 フライアッシュ（JIS 灰）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	◎	B	a	1) 2) 3) 8)
② コンクリート用粗骨材	-	-	-	
③ 混和材	◎	A	b	4) 5) 6)
④ パーチメント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	○+	B	b	7)
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ファイバー材	◎ (Asファイバー材)	A	b	1) 9)
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	-	-	-	
⑱ その他	-	-	-	

出典)

- 1) 石炭灰ハンドブック 平成27年度版（日本フライアッシュ協会、平成27年11月）
- 2) フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案）（土木学会四国支部、平成15年度）
- 3) 九州地区における土木コンクリート構造物設計・施工指針（案）（国土交通省九州地方整備局、平成25年7月）
- 4) JISA6201「コンクリート用フライアッシュ」（平成20年3月改正）
- 5) フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）（土木学会、平成11年9月）
- 6) 転圧コンクリート舗装の性能向上に及ぼす分級フライアッシュの混入効果（港湾技術研究所報告、平成6年12月）
- 7) FGC深層混合処理工法技術マニュアル-フライアッシュを用いた軟弱地盤改良工法-（（財）沿岸技術研究センター、平成14年12月）
- 8) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン（改訂版）（（財）石炭エネルギーセンター、平成29年2月）
- 9) 舗装施工便覧（日本道路協会、平成18年）

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 3.11.8 (1) フライアッシュ（非 JIS 灰）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	◎	B	<ul style="list-style-type: none"> ●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・1) フライアッシュ粗粉（フライアッシュ原粉を一度だけ分級し、粒度の粗い方のフライアッシュ）を細骨材として使用することで通常のコンクリートと同等以上のフレッシュ性状、硬化性状、および耐久性を得ることができ、低品位なフライアッシュであってもコンクリート細骨材として大量使用することができる可能性が見出されたとされている。【査読有り】 ・4) 細骨材の一部に石炭灰原粉を代替利用する新素材コンクリートの二次製品（消波ブロック、方塊、被覆ブロック等）への適用について記載。 	<ul style="list-style-type: none"> ●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・トンネル工事（国交省） 	1) 4)
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	△	D	<ul style="list-style-type: none"> ●用途として利用可能であるが、課題等も挙げられている。 ・査読なしの研究論文等（講演資料等）に限られている。 【主な内容】 ・2) JIS規格外の石炭灰がコンクリート用混和材料並びに高流動コンクリート用粉体材料として適用可能かどうかの検討。 ・コンクリートの圧縮強度及び乾燥収縮ひずみ、フレッシュ性状及び硬化性状はJIS灰を使用したものと同程度の性能を有することが確認。【査読無し】 	●利用実績はあるが、限定される。	2)
④ ハ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 サントコンバクションパイル材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし	
⑥ 深層混合処理固化材	○+	B	<ul style="list-style-type: none"> ●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・3) 安定材であるセメントに、新たにフライアッシュと石こうを適当な配合比率で加えることによる固結工法と改良土の物理的・力学的性質、設計、施工、環境影響等について記載。 ・4) CDM-FGC材を用いた深層混合処理杭の改良体は、低強度の山留め改良躯体が構築可能。土留め壁・底盤・低強度基礎地盤改良の目的で適用されるメリットがある。 	●利用実績はあるが、限定される。	3) 4)
⑦ 捨石	-	-	●用途対象外	●利用実績なし	
⑧ 中詰材	△	D	<ul style="list-style-type: none"> ●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。	
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	○+	C	<ul style="list-style-type: none"> ●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・5) 根固・消波ブロックへの適用について記載。 	●利用実績が多い、または汎用性が高い。	5)
⑩ 裏込材	◎	B	<ul style="list-style-type: none"> ●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・6) フライアッシュとセメントの混合材料を構造物の裏込めに利用する際の設計、配合、施工、調査・設計・施工について記載。 ・4) 石炭灰混合材料（破砕材、造粒材、スラリー）の裏込め材料への適用について記載。 ・構造物の背面に裏込め材料として適用する石炭灰混合材料は軽量の固化体となるため、一般土砂による埋立工法に比べ埋立地盤の沈下抑制に寄与するメリットがある。 	●利用実績が多い、または汎用性が高い。	4) 6)

出典)

- 1) 各種リサイクル材料のコンクリートへの有効活用に関する研究（コンクリート工学年次論文集、平成21年）
- 2) 非JIS石炭灰のコンクリート用材料としての有効利用に関する研究（日本建築学会九州支部研究報告、平成14年3月）
- 3) FGC深層混合処理工法技術マニュアル-フライアッシュを用いた軟弱地盤改良工法-（(財)沿岸技術研究センター、平成14年12月）
- 4) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン（改訂版）（(一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月）
- 5) FSコンクリート利用手引書（(株)沿岸環境開発資源利用センター、平成10年11月）
- 6) フライアッシュを護岸の裏込めに利用するための手引書(案)（(財)沿岸技術研究センター、平成8年3月）
- 7) フライアッシュを軟弱地盤の表層処理に利用するための手引書(案)（(財)沿岸技術研究センター、平成7年3月）
- 8) フライアッシュを路盤・路床に利用するための手引書(案)（(財)沿岸技術研究センター、平成7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 3.11.8 (2) フライアッシュ（非 JIS 灰）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	
⑪ 裏埋材	○ ⁺	B	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・岸壁建設工事（国交省）
⑫ 盛土材、覆土材、載荷盛土材	◎	B	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・浚渫土砂処分場建設工事（国交省） ・港湾緑化工事（管理者）
⑬ 埋立材	△	B	-	●利用実績なし
⑭ 路床盛土材	○ ⁺	B	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・空港拡張工事（国交省） ・ターミナル埋立工事（その他機関）
⑮ 路盤材	○ ⁺	B	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・ターミナル埋立工事（その他機関）
⑯ As舗装骨材、Asフィルター材	-	-	-	●利用実績なし
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	-	-	-	●利用実績なし
⑱ その他	-	-	-	●利用実績なし

出典)

- 1) 各種リサイクル材料のコンクリートへの有効活用に関する研究（コンクリート工学年次論文集、平成21年）
- 2) 非JIS石炭灰のコンクリート用材料としての有効利用に関する研究（日本建築学会九州支部研究報告、平成14年3月）
- 3) FGC深層混合処理工法技術マニュアル-フライアッシュを用いた軟弱地盤改良工法-（(財)沿岸技術研究センター、平成14年12月）
- 4) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン（改訂版）（(一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月）
- 5) FSコンクリート利用手引書（(株)沿岸環境開発資源利用センター、平成10年11月）
- 6) フライアッシュを護岸の裏込めに利用するための手引書(案)（(財)沿岸技術研究センター、平成8年3月）
- 7) フライアッシュを軟弱地盤の表層処理に利用するための手引書(案)（(財)沿岸技術研究センター、平成7年3月）
- 8) フライアッシュを路盤・路床に利用するための手引書(案)（(財)沿岸技術研究センター、平成7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。

(2) コンクリート用細骨材

フライアッシュは粉末状の非常に細かい粒子で構成されるため、細骨材と同様に扱うことは困難である。しかし、砕砂などの細骨材の一部をフライアッシュで置換することによりワーカビリティの改善に効果があることが確認されている。

土木学会「**コンクリート標準示方書**」や「**フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)**」では、細骨材置換利用については記述されていないが、国土交通省九州地方整備局の「**九州地区における土木コンクリート構造物設計・施工指針(案)**」では、「**JIS A 6201**のⅠ種からⅣ種のいずれかに適合するフライアッシュを用い、細骨材置換率の上限を20%とし、コンクリートに要求される性能を満足するように試験によって定める必要がある。」と規定している。また、土木学会四国支部の「**フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案)**」では、**JIS A 6201**のⅡ種またはⅣ種のいずれかに適合するフライアッシュを用いることとし、容積置換率については10~15%を推奨している。さらに、(一財)石炭エネルギーセンターの「**港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)**」では、細骨材の一部に石炭灰原粉を代替利用する「**新素材コンクリート**」が消波ブロック、方塊、被覆ブロック等の二次製品に適用されており、適切な配合調整により、施工性やコンクリートの品質の向上が期待できるとされている。

利用実績については、JIS 灰については道路工事等、非 JIS 灰についてはトンネルへの吹付コンクリート材料等がある。

この利用方法では、結合材はセメントのみと考えるので、強度は水セメント比で管理することとなる。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・セメントの一部をフライアッシュに置換する場合と同様に、コンクリートの流動性改善に効果的で単位水量の低減につながる。
- ・セメント置換せず、細骨材置換のみ行う場合、初期から長期にわたりコンクリートの強度が置換をしないコンクリートに対して同等以上を期待できる。

適用に当たっての留意事項としては、以下が挙げられる。

- ・置換率が高すぎるとセメントと合わせた粉体量が多くなり粘性が高くなるため、ポンプ圧送性など施工性が低下する恐れがあるので、この点を考慮の上置換率を選定する必要がある。
- ・フライアッシュ中の未燃炭素の影響で AE 剤が吸着され AE 剤の使用量が増加する場合がある。
- ・細骨材置換のみを行う場合、通常、価格は細骨材よりフライアッシュの方が高いため、材料コストは上昇する。

(3) 混和材

フライアッシュは、コンクリート用の混和材として **JIS A 6201** に規定されている。また、「**フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)**」(土木学会)にてフライアッシュを混和材として用いるコンクリート施工についての一般の標準が示されているので参考とできる。なお、この指針に示されていない事項は、**土木学会コンクリート標準示方書**による。

フライアッシュをコンクリートに用いる場合は、その使用目的が十分に達成されるよう考慮して、

I種、II種、III種、及びIV種の中からその種類を選定し、結合材中に占めるフライアッシュの質量の割合が10～30%（I種では40%まで）の範囲内で、適切な値を定める。なお、非JIS灰を用いる場合は、品質のばらつきが大きいことを考慮し、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。

フライアッシュの種類及び置換率の選定にあたっては、フライアッシュの特性を十分に理解して、使用するコンクリートの要求性能に応じたフライアッシュの種類及び置換率を定めることが重要である。フライアッシュの種類によってコンクリートの流動性、強度発現性、水和熱による温度上昇等に及ぼす影響が異なるので、要求性能に応じたフライアッシュの種類を決定する。また、置換率の決定にあたっては、フライアッシュの種類により、フライアッシュの使用効果を十分に発揮させるための置換率の範囲が異なるので、適切な置換率を試験や実験により確認することが大切である。

フライアッシュは、コンクリートまたはモルタルに混合することで、「流動性の改善及び単位水量の減少」、「水和熱の減少」、「長期強度の増進」、「乾燥収縮の減少」、「水密性及び耐久性の向上」、「アルカリ骨材反応の抑制」などの効果を持つことが、多くの調査や研究によって明らかにされ、従来からコンクリートの混和材及びフライアッシュセメントの混合材として幅広く利用されている。

フライアッシュ利用時は、セメント置換が基本となることから、セメントのみの単価に比べて安価となる。一方で、新たな貯蔵サイロ等の設備が必要になることや、フライアッシュ製造拠点から距離が遠くなることによりコスト増となる場合があるが、フライアッシュ製造拠点に近い場合や、距離が遠い場合でもフライアッシュ使用量が多い工事等ではコストメリットが生じる。

【既存工事における検討事項】

- ・過去の工事及び室内配合試験により、所定の強度を確認した。（ターミナル整備事業）

(4) 深層混合処理固化材

深層混合処理工法とは、フライアッシュ、石膏、セメントの3種材料の混合スラリーを用いた地盤改良工法で、通常のセメント系地盤改良工法では不可能な低強度の地盤改良が可能である。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・安定材としてハイボリュームのフライアッシュをセメントに加えることにより、同一のセメント添加量でも地盤と混合する総スラリー量を増やすことができ、低強度から高強度まで広範囲の強度の地盤改良が可能である。低強度の均一改良地盤の造成が可能になると、山留鋼矢板等を直接改良地盤に打設する事が可能となり、仮設工事等を補助工法を併用せずに経済的に施工できる。
- ・目標強度がコンクリートに比べてはるかに低く、混合する土の物性がばらつきをもっていることを考慮すると、コンクリート混和材として使用するフライアッシュの品質と比べて、種類やばらつきに影響されずに広範囲な品質のフライアッシュが使用可能となり有利な配合管理ができる。

適用に当たっての留意事項としては、以下が挙げられる。

- ・石膏を用いた場合はエトリンガイト（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ）を生成する。このエトリ

ンガイトは混合後極めて早期に生成されるため、初期強度も高くなるが、多量なエトリンガイトの生成は体積膨張により強度を低下させるので、注意を要する。

(5) 被覆石、根固・消波ブロック

被覆石、根固・消波ブロックには、非 JIS 灰を用いることができる。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・フライアッシュのポゾラン反応により、緻密な構造体となり、長期強度の増進及び耐摩耗性に効果があり、ライフサイクルコストの低減が期待できる。

適用に当たっての留意事項としては、以下が挙げられる。

- ・フライアッシュの混和量が多い場合は、粘性が高まるため、表面仕上げが多少し難いことから配合設計で考慮する必要がある。
- ・非 JIS 灰を用いることから、JIS 灰に比べ、品質の変動が考えられるため、品質変動を考慮した配合設計が望まれる。
- ・基本的には、セメントと混合した場合は、重金属等の溶出は防止されるが、一定のロット毎での重金属溶出管理を行う事が必要である。

(6) 裏込材

裏込材には、非 JIS 灰を用いることができる。

フライアッシュ、セメント、水を混合・スラリー化し、裏込材等に用いる場合、流動性などのフレッシュ性状や強度特性などに関して必要な品質が得られることを事前に確認の上、配合を決定する。

天然土砂などに比較して軽量であり、流動性が高いことなどが特徴であるが、コンクリートと同様に用途ごとの要求品質を満足できることを事前の試験により確認しておく必要がある。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・土砂等に比較して軽量でさらに固化するため構造物に対する土圧（常時）の低減が図れる。
- ・流動性に優れ、ポンプ打設が容易である。
- ・材料分離抵抗性に優れ水中打設が可能である。
- ・材齢 3 日のコーン貫入抵抗値 1, 200kN/m² 以上が可能であり、早期にダンプ走行も可能なトラフィカビリティを確保できる。

適用に当たっての留意事項としては、以下が挙げられる。

- ・環境安全性については、炭種や配合の影響を受けるので事前の確認を要する。
- ・品質のばらつきがスラリー性状に及ぼす影響度合いを事前確認しておくことが望ましい。

適用に当たっては、巻末に示す参考文献 16)～17)を参考とすることができる。

なお、スラリー化利用の他、一部の固化体破砕の裏込材としての利用実績がある。

(7) 裏埋材

裏埋材には、非 JIS 灰を用いることができる。

基本的に裏込材と同様の利用区分と考えられるので、前項のスラリーのような形態、または後述するフライアッシュ固化体破砕材の形態で利用される。前者ではポンプ打設、後者ではガット船やダンプトラックによる投入となる。

軽量であることから構造物に対する土圧（常時）の軽減、軟弱地盤の沈下抑制などが期待できる。一方、複数ある製造技術ごとに環境安全性の確認がなされているが、利用時には安全性を確認することが必要である。

(8) 盛土材、覆土材、載荷盛土材（フライアッシュを用いた気泡混合軽量土）

盛土材、覆土材、載荷盛土材には、非 JIS 灰を用いることができる。

フライアッシュを用いた気泡混合軽量土（以下、FA 気泡混合軽量土という）は、暫定配合を元に軽量性、強度、流動性などの要求品質を満足するように配合を選定する。

気泡混合軽量土に関しては、「FCB 工法設計・施工要領」（東日本・中日本・西日本高速道路株）（以下、FCB 要領）が参考となる。標準的な材料である、砂、セメント、起泡剤、水の中で砂をフライアッシュに置き換え、セメント量を減じることにより、配合によるコストを低減した上で、軽量かつ流動性に優れた気泡混合軽量土を製造できる。

FCB 要領に記載の暫定配合表に準じて暫定配合が準備されているが、物件ごとに試験練で要求品質を満足する配合を選定する必要がある。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・セメントを減量できる。
- ・粒子形状が球形の石炭灰を用いることで、流動性が向上しポンプ圧送を容易にする。

適用に当たっての留意事項としては、以下が挙げられる。

- ・FA 気泡混合軽量土の場合、プラントには FA 用サイロが必要となることなどから、配合によっては通常の気泡混合軽量土に比較してコスト低減にならないケースもある。
- ・通常の気泡混合軽量土同様、水浸下での施工や降雨などによる消泡の恐れがある場合、品質低下を招くので注意を要する。

(9) 路床盛土材

路床盛土材には、非 JIS 灰を用いることができる。

路床に関しては、現状のままで路床とできない場合、現地盤上に盛土して築造する方法、現状路床土とセメントなどの安定材を混合して路床を築造する方法、さらに現状路床土を除去し良質材料に置換える方法が採られる。

安定処理工法には、セメントにフライアッシュを混合した安定材が使用されることがある。また盛土や置換え工法の良質土として後述するフライアッシュ固化体破砕材や石炭灰造粒物が用いられることもある。

天然の材料と同様に扱うことが可能であり、軽量であることから、作業性が高いこと、地盤沈下抑制などの利点がある。

(10) 路盤材

路盤材には、非 JIS 灰を用いることができる。

道路路盤は下層路盤と上層路盤に区分されるが、フライアッシュを用いた混合材、固化体破砕材などが適用されるのは主として下層路盤である。

複数ある材料技術ごとに目安の品質が確認されているが、個別の事案ごとに発注者の要求品質を満足することを事前に確認する必要がある。

路床盛土材利用と同様、軽量であることから、路床・路体への荷重が軽減されるとともに作業性の向上が期待できる。

(11) アスファルトフィラー材

アスファルトフィラー材は、アスファルト混合物の空隙を充填し、アスファルト混合物の安定性や耐久性を向上させる目的で使用される。アスファルトフィラー材には一般に石灰石粉が広く用いられているが、フライアッシュもアスファルトフィラー材として認められており、舗装工事で用いる転圧敷均し法により施工することが可能である。アスファルトフィラー材には、JIS 灰を用いることを標準とする。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・一般的に使用されている石灰石粉とフライアッシュの品質を比較しても同等の性能である。
- ・フライアッシュのフィラー材としての使用については、「**舗装施工便覧**」（日本道路協会）では一定の規格に適合すればその使用が認められている。

(12) 今後の検討を要する用途

1) 中詰材

フライアッシュにセメントなどを添加し、水と混合してスラリー化し、構造物に利用するもので、河川築堤基礎の止水壁、道路盛土基礎の杭、防波堤ケーソン中詰などが実用化されている。非 JIS 灰を用いることができる。

適用に当たっての利点としては、以下が挙げられる。

- ・フライアッシュを用いる事で流動性が向上し、作業性の向上が図れる。
- ・水中部での使用の場合は、充填性に優れている。
- ・セメントとフライアッシュ及び水の配合量で強度等の固化条件の選択が可能である。
- ・近隣に火力発電所がある場合は、コスト的に安価な資材として活用可能である。

適用に当たっての留意事項としては、以下が挙げられる。

- ・非 JIS 灰を用いるため、JIS 灰に比べ、品質の変動が考えられるため、品質変動を考慮した配

合設計が望まれる。

- ・基本的には、セメントと混合した場合は、重金属等の溶出は防止されるが、一定のロット毎での重金属溶出管理を行う必要がある。

2) 埋立材

後述するフライアッシュ固化体破砕材を埋立てに用いる場合、非 JIS 灰を用いることができ、また、天然材料と同様の方法を用いることができる。

適用の利点としては、以下が挙げられる。

- ・粒度範囲は 5～40mm で液状化しない。
- ・水中部においても使用可能で、地盤沈下の抑制につながる。

適用に当たっての留意事項としては、以下が挙げられる。

- ・非 JIS 灰を用いるため、品質の変動・ばらつきが大きい。

3.11.5 関連法令

フライアッシュ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。

3.11.6 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)

フライアッシュ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。

3.12 クリンカアッシュ

3.12.1 製造・供給

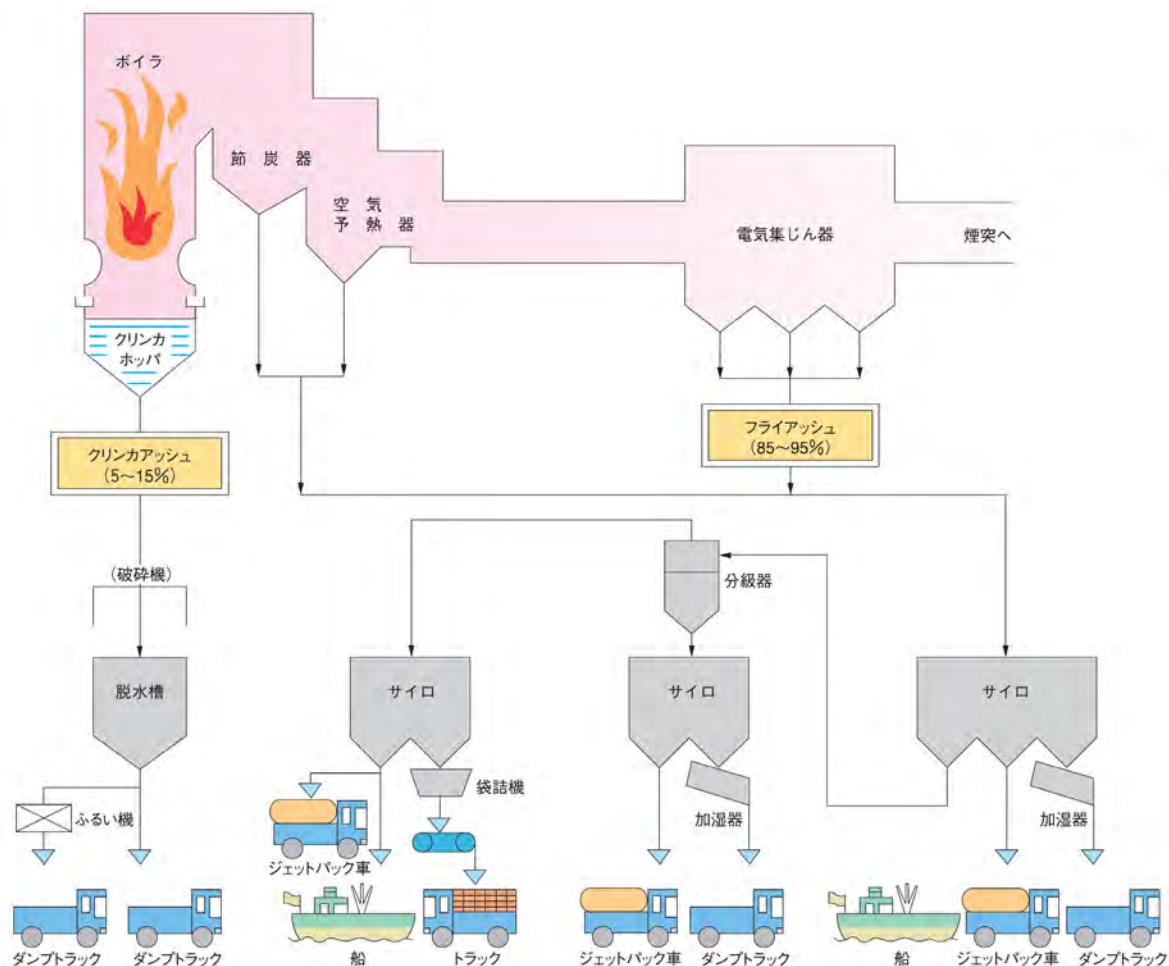
クリンカアッシュは、ボイラ底部の水槽に落下した塊状石炭灰を、破砕機で破砕し、粒度を調整して製造される。

(解説)

(1) 製造方法

石炭火力発電所で石炭を微粉炭ボイラで燃焼させ、その燃焼により発生した石炭灰がボイラ炉内で溶融し、炉壁に付着したものが水張りした炉底に落下し急冷される。この塊をクラッシャーで粉砕し、粒度を調整して製造されるものをクリンカアッシュと呼ぶ。このクリンカアッシュは、その後水で貯槽に圧送され、脱水してクリンカヤードに貯蔵される。

製造フローを図 3.12.1 に示す。



出典) 日本フライアッシュ協会 HP より作成

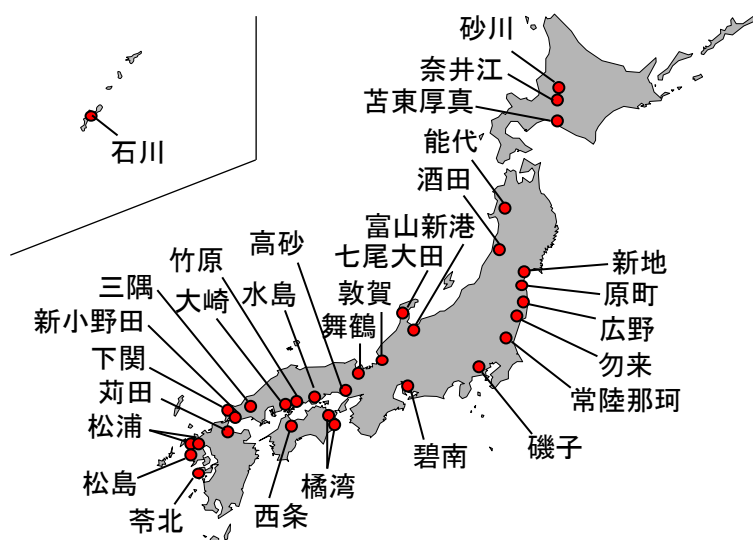
図 3.12.1 クリンカアッシュ製造フロー

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

石炭火力発電所周辺での利用が輸送コスト面で有利

2) 石炭火力発電所の立地場所



出典) 日本フライアッシュ協会 HP より作成

図 3.12.2 石炭火力発電所の立地場所 (日本フライアッシュ協会関係)

3) 生産量

クリンカアッシュ : 約 80 万 t / 年 (平成 25 年度利用実績)

3.12.2 品質

クリンカアッシュの主成分は、フライアッシュと同様、一般土壌と同じで大半は二酸化けい素と酸化アルミニウムであり、外見上も砂と類似している。また、大きな比表面積を持つ。

(解説)

(1) 物理的特性

1) 浸水膨張率

クリンカアッシュの粒度は粗粒砂(FM=3.5~4.0)程度で、含水量は普通の砂に比べて高く、比重は2.1~2.3と普通の砂より小さい。浸水膨張率(浸水状態で水分の吸収により粒径の膨張する比率)は、0.012~0.036%で鉄鋼スラグ協会規格3.0%より極めて小さい。

2) 透水性

クリンカアッシュの透水係数は砂と同程度であり、真砂土に比べると大きく、しかも真砂土では締め固めた場合に透水係数が10分の1以下になるのに対して、クリンカアッシュの場合にはほとんど変化しない。

表 3.12.1 クリンカの透水係数試験例

乾燥密度 g/cm ³	透水係数 cm/s
1.23	3.2×10^{-2}
1.20	3.4×10^{-2}
1.14	3.2×10^{-2}

出典) 石炭灰ハンドブック 平成27年度版(日本フライアッシュ協会、平成27年11月)

3) 比表面積

クリンカアッシュを電子顕微鏡で観察すると、その表面に多数の細孔があり、真砂土の比表面積0.94m²/gに比べてクリンカアッシュの比表面積は4~5倍程度大きい。

表 3.12.2 クリンカアッシュの比表面積と細孔容積試験例

土壌の種類	粒子径 mm	比表面積 m ² /g	細孔容積 cc/g
クリンカアッシュ	1	3.76	0.158
	2~3	4.54	0.148
花崗岩	—	0.21	—
真砂土	—	0.94	—

出典) 石炭灰ハンドブック 平成27年度版(日本フライアッシュ協会、平成27年11月)

4) 水分保有特性

クリンカアッシュは一般土壌と比べて易効水(土壌中の水分うち植物に効率良く利用できる水分)の水分保有率が高く、耕地の土壌として適しているといえる。

表 3.12.3 クリンカと一般土壌の易効水含水量試験例

	クリンカ (密詰め)	クリンカ (粗詰め)	真砂土	粗砂
易効水含水量(%)	9.4	5.8	4.0	2.0~3.0

出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

5) 締固め特性

クリンカアッシュは、砂とは対照的に最適含水比が高く、最大乾燥密度が低くて空隙率の高い締固め特性を持っている。このため、踏圧に対する抵抗性が強くなり固い土壌になりにくい。

表 3.12.4 クリンカの締固め試験例

	搬入含水比 (%)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)
クリンカA	16.2	28.2	1.29
クリンカB	17.4	27.2	1.29
クリンカC	18.5	30.4	1.21

出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

3.12.3 適用用途

(1) 概要

クリンカアッシュをリサイクル材として利用する場合は、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、クリンカアッシュを各用途に利用する場合の評価を行った結果を表 3.12.5 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 3.12.5(1) クリンカアッシュの適用用途

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	△	D	b	1) 2) 3)
② コンクリート用粗骨材	-	-	-	
③ 混和材	-	-	-	
④ パーカールドレン及びサントマット材	△	D	a	4)
⑤ サントコンパクションハイル材	○+	B	b	5) 9)
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	-	
⑦ 捨石	-	-	-	
⑧ 中詰材	△	D	-	
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	-	-	-	
⑩ 裏込材	○	C	b	6)

出典)

- 1) 石炭灰を骨材及び混和材として使用したコンクリートに関する研究(クリンカアッシュを細骨材として使用したコンクリートの諸性状)(日本建築学会大会学術講演梗概集、平成11年9月)
- 2) クリンカアッシュを細骨材として用いたコンクリートの基礎的性状(日本建築学会九州支部研究報告、平成11年3月)
- 3) 石炭灰ハンドブック 平成27年度版(日本フライアッシュ協会、平成27年11月)
- 4) サントドレン工法へのクリンカアッシュの適用(土木学会第60回年次学術講演会、平成17年9月)
- 5) 石炭灰を中詰め材料に利用したコンパクションハイル工法の試験工事(土木学会第54回年次学術講演会、平成11年9月)
- 6) クリンカアッシュの材料特性と適用性の検討(地盤工学ジャーナル、平成19年)
- 7) 石炭灰(クリンカアッシュ)の道路盛土材への利用技術の開発について～国土交通省東北地方整備局が本格活用の方針～(東北電力資料)(<http://www.tohoku-epco.co.jp/whats/news/2003/30729a.htm>、平成15年7月)
- 8) 平成25年度 浚渫土砂の有効活用による海域環境改善方策検討調査報告書
- 9) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2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 3.12.5 (2) クリンカアッシュの適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典		
		品質性能	利用実績			
⑪ 裏埋材	○	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 ・裏込材の技術資料、利用実績等を基に、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】 ・埋立護岸築造工事（管理者）		
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】 ・6)軽量で、静的せん断応力、コン指数、CBR、透水係数が大きいことから軽量盛土材料、基礎材料、排水材料、路盤材料などに適用することが可能。 ・軟弱地盤上の盛土材料に適用した場合の検討を行った結果、クリンカアッシュの有効性を確認。 ・7)クリンカアッシュと不良土を混合し、道路の盛土材として利用することを目的に、道路盛土材としての利用可能な基準を満たすか確認した結果、クリンカアッシュの混合割合が高いほど短期間で土質が改良され、道路の盛土材として利用可能となる結果が得られた。 ・9)クリンカアッシュ単体または高含水土との混合物の盛土材への適用について記載。	a ●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、管理者） ・避雷器設置工事（その他機関）	6) 7) 9)	
⑬ 埋立柱材	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・9)クリンカアッシュと高含水土の混合物の埋立柱材への適用について記載。	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、その他機関） ・造成工事（管理者） ・滑走路移設工事（管理者、その他機関） ・発電所灰捨場関係工事（その他機関）	9)	
⑭ 路床盛土材	○+	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・3)路床材の遮断層材及び凍上抑制層材として、砂の代替にクリンカアッシュの適用が認められている。	a ●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・バイパス改良工事（国交省） ・空港道路新設（国交省） ・駐車場整備工事（管理者） ・道路拡幅工事（改良舗装工事）（管理者）	3)	
⑮ 路盤材	○	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・クリンカアッシュの建設資材としての技術開発は道路用としてのものが確立されており、下層路盤材料として舗装設計施工指針、舗装施工便覧に規定。 ・3)下層路盤材料に「砂」の利用を認めており、クリンカアッシュも同等の位置づけ。 ・クリンカアッシュを下層路盤材料として使用する場合には、修正CBRについて規定の品質を満足することの確認が必要。	b ●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・舗装工事（国交省、管理者） ・管理用道路（管理者） ・火力発電所舗装工（その他機関）	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	△ (覆砂)	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。 ・査読なしの研究論文等（講演資料等）に限られている。 【主な内容】 ・8)室内実験の結果、浚渫土砂（北九州港）との混合土について、リンの溶出抑制効果が認められ、アサリの潜砂行動への影響なしとされている。	b ●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・実証実験（国交省等）	8)	
⑱ その他	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	

出典)

- 1) 石炭灰を骨材及び混和材として使用したコンクリートに関する研究(クリンカアッシュを細骨材として使用したコンクリートの諸性状)(日本建築学会大会学術講演梗概集、平成11年9月)
- 2) クリンカアッシュを細骨材として用いたコンクリートの基礎的性状(日本建築学会九州支部研究報告、平成11年3月)
- 3) 石炭灰ハンドブック 平成27年度版(日本フライアッシュ協会、平成27年11月)
- 4) フォトドレーン工法へのクリンカアッシュの適用(土木学会第60回年次学術講演会、平成17年9月)
- 5) 石炭灰を中詰め材料に利用したコンパクションパイル工法の試験工事(土木学会第54回年次学術講演会、平成11年9月)
- 6) クリンカアッシュの材料特性と適用性の検討(地盤工学ジャーナル、平成19年)
- 7) 石炭灰(クリンカアッシュ)の道路盛土材への利用技術の開発について～国土交通省東北地方整備局が本格活用の方針～(東北電力資料)(<http://www.tohoku-epco.co.jp/whats/news/2003/30729a.htm>、平成15年7月)
- 8) 平成25年度 浚渫土砂の有効活用による海域環境改善方策検討調査報告書
- 9) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2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) サンドコンパクションパイル材

クリンカアッシュをサンドコンパクションパイル材に用いる場合は、砂杭と同様の設計方法を用いることができる。(一財)石炭エネルギーセンターの「**港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)**」において、クリンカアッシュ単味の用途として、サンドコンパクションパイル材が示されており、参照することができる。

破碎しやすい特性を持つため、留意が必要である。また、クリンカアッシュは角張った形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。

(3) 裏込材、裏埋材、盛土材、覆土材、路床盛土材

クリンカアッシュを裏込材、裏埋材、盛土材、覆土材、路床盛土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。(一財)石炭エネルギーセンターの「**港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)**」によると、クリンカアッシュは、軽量で高いせん断強度と透水性を有しており、単独で盛土材としても多数活用されている。また、クリンカアッシュによる改質土の用途として盛土材が示されており、高含水土とおよそ5対5の割合で混合することで、高い土質改良効果を発揮するとされている。

クリンカアッシュは天然砂に比べ軽量で透水性がよいことから、載荷重・土圧(常時)の軽減が期待できる。

一方で、クリンカアッシュは発電所内で製造される製品であるため、同じ発電所内で製造されたクリンカアッシュの性質のばらつきは小さいが、発電所が異なる場合はクリンカアッシュ間に品質のばらつきが見られることがある。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、溶出水の対策を検討する必要がある。

(4) 埋立材

クリンカアッシュを埋立材に用いる場合は、天然砂と同様の設計方法を用いることができる。

クリンカアッシュは天然砂に比べ軽量のため、載荷重の軽減が期待できる。(一財)石炭エネルギーセンターの「**港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)**」では、クリンカアッシュによる改質土の用途として埋立材が示されており、高含水土とおよそ5対5の割合で混合することで、高い土質改良効果を発揮するとされている。

一方で、クリンカアッシュは発電所内で製造される製品であるため、同じ発電所内で製造されたクリンカアッシュの性質のばらつきは小さいが、発電所が異なる場合はクリンカアッシュ間に品質のばらつきが見られることがある。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、溶出水の中和等の対策を検討する必要がある。

(5) 路盤材（下層路盤材）

舗装施工便覧は、下層路盤材料に「砂」の利用を認めており、クリンカアッシュも同等の位置付けとなっている。

クリンカアッシュを下層路盤材料として使用する場合には表 3.12.6 に示す品質を満足していることを確認する。

表 3.12.6 路盤材料の品質規格

材料名	修正 C B R (%)
粒度調整碎石	80以上
クラッシュラン	20以上

出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

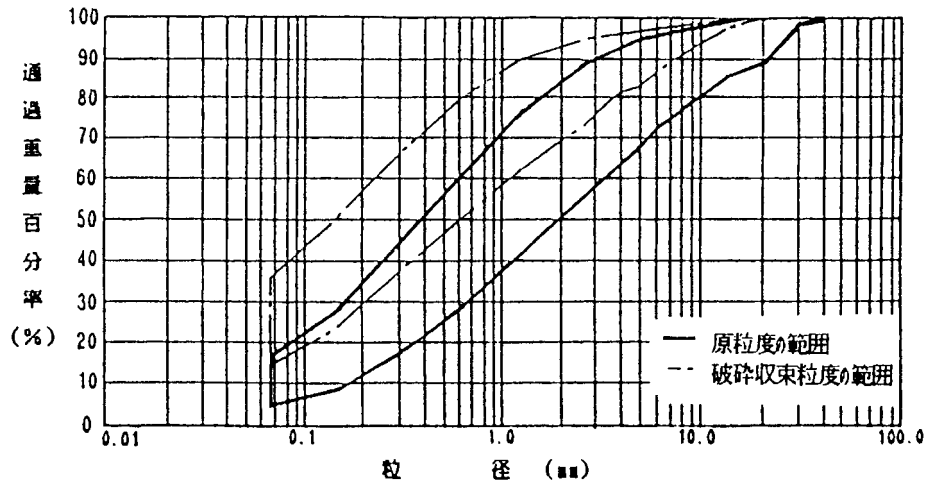
1) 材料特性

クリンカアッシュの粒度は粗粒砂程度であり、原粒度と路盤として載荷後の破碎収束粒度（転圧後粒度を意味する）の関係を表 3.12.7、図 3.12.3 に示す。

表 3.12.7 原粒度と破碎収束粒度

産 地	項 目 ふるい目 (mm)	粒 度 (%)										
		40	30	20	13	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.074
No.1 発電所	原 粒 度	100	99.0	89.4	85.0	68.8	58.9	43.5	30.1	22.3	15.9	10.6
	破碎収束粒度			100	99.2	85.3	74.6	65.6	54.3	41.4	30.2	22.1
No.2 発電所	原 粒 度			100	97.4	75.1	67.1	57.4	44.1	23.3	13.5	7.0
	破碎収束粒度			100	98.8	82.5	76.3	70.4	61.2	46.5	31.8	20.2
No.3 発電所	原 粒 度			100	99.3	94.9	89.0	76.0	60.5	44.6	27.9	15.9
	破碎収束粒度			100	99.4	96.8	94.6	89.5	79.6	66.5	51.0	35.2
No.4 発電所	原 粒 度		100	96.5	94.4	84.7	78.0	65.2	50.2	35.0	18.7	8.2
	破碎収束粒度			100	97.6	89.2	83.5	77.0	68.6	57.0	41.5	24.3
No.5 発電所	原 粒 度	100	99.7	96.2	92.5	67.2	54.6	39.9	27.5	17.2	8.5	4.0
	破碎収束粒度			100	97.3	84.6	72.9	61.0	49.3	37.0	23.8	13.9

出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)



出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

図 3.12.3 クリンカアッシュの原粒度と破碎収束粒度の関係

原粒度と破碎収束粒度とは、かなり変化するが修正 CBR の値はほとんど変わらない。最適含水比は細粒化により 5～10%減少し、密度はわずかに増大する。

比重は 2.1～2.3 であり普通の砂より軽い。

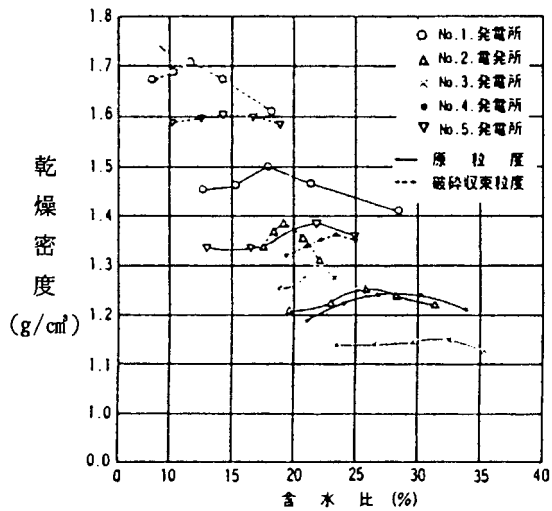
クリンカアッシュの浸水膨張率は 0.012～0.036%で、鉄鋼スラグ協会規格 3.0%に較べて極めて小さく膨張性の少ない材料である。

2) 土質力学的性状

土質力学的性状のうち最適含水比は 18%～32%であり、最大乾燥密度は 1.15～1.50g/cm³で全般的に小さい。

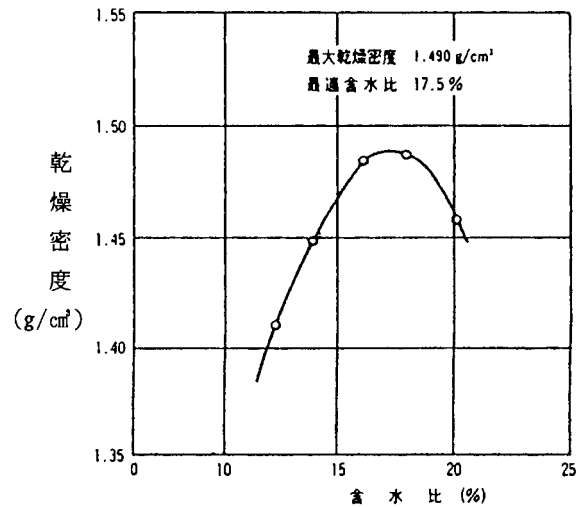
修正 CBR 値は 39～89 であり、普通の砂より大きい値を示している。これは粒度が粗粒砂程度であり、形状が碎石状であるためとみられている。

クリンカアッシュの突固め曲線の例を図 3.12.4 に示す。



出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

図 3.12.4(1) クリンカアッシュの突固め曲線例(1)



出典) 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版 (日本フライアッシュ協会、平成 27 年 11 月)

図 3.12.4(2) クリンカアッシュの突固め曲線例(2)

(6) 今後の検討を要する用途

1) コンクリート用細骨材

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クリンカアッシュ細骨材を混合して使用されている場合が多い。

クリンカアッシュ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。

- ・クリンカアッシュ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。
- ・クリンカアッシュ細骨材を用いたコンクリートでは、クリンカアッシュ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。

クリンカアッシュを細骨材の一部代替として用いた場合、軽量コンクリートブロック等では代替率 50%までは強度に影響は見られない等の試験結果が得られているが、今後さらに細骨材代替利用の試験データを蓄積し、各種の骨材への利用拡大が望まれるとされている¹⁾。

【参考文献】

1) 日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック（平成 27 年度版）

2) パーチカルドレーン及びサンドマット材

クリンカアッシュは、粒状材料としてパーチカルドレーン及びサンドマットへの利用ができる。サンドマットの場合、クリンカアッシュは天然砂に比べ軽量のため、载荷重の軽減が期待できる。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。

3) 中詰材

クリンカアッシュを二重鋼管矢板や二重鋼矢板の中詰材に用いる場合は、天然砂と同様の設計方法を用いることができる。

クリンカアッシュは天然砂に比べ軽量であり、産地により異なるものの概ね（一般の土質が有する）30度以上のせん断抵抗角を有する。

用途としての利用可能性はあるが、適用技術に係る情報が十分集積されていないことから、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

4) 覆砂材

クリンカアッシュを覆砂材に用いる場合は、天然砂と同様の設計方法を用いることができる。

クリンカアッシュ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、クリンカアッシュは発電所内で製造される製品であるため、同じ発電所内で製造されたクリンカアッシュの性質のばらつきは小さいが、発電所が異なる場合はクリンカアッシュ間に品質のばらつきが見られることがある。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、溶出水の中和等の対策を検討する必要がある。

3.12.4 関連法令

クリンカアッシュ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。

3.12.5 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）

クリンカアッシュ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。

3.13 石炭灰二次製品

3.13.1 製造・供給

フライアッシュ固化体は、改良盛土材等として製造されている。また、碎石の代替材料としてフライアッシュ固化体破砕材が開発されており、主に道路用の碎石として製造されている。

石炭灰造粒物は、石炭火力発電所で発生するフライアッシュにセメント等を添加して粒状・固化したものである。

原料の石炭灰には、石炭火力発電所で発生する新生灰のほか、事業者所有の貯炭場等で湿潤化されたエージング灰も利用される。

(解説)

(1) 製造方法

1) フライアッシュ固化体

① フライアッシュ固化体（改良盛土材）

フライアッシュ固化体（改良盛土材）は、石炭灰（原粉）・高炉セメント・水・石膏を専用プラント（ミキサー）で混練りし、ダンプトラックで現場まで運搬、層状に敷き均し、天端面から面的に加振することにより、層状練混物を一気に流体化させ締め固める工法である。



項目	仕様
敷地面積	8,500m ²
ミキサー形式	2.5m ³ 、2軸強制練りタイプ
製造能力	60m ³ /hr
フライアッシュサイロ	200t×3基
セメントサイロ	50t×1基
石膏ヤード	約25t
水槽	攪拌水槽、工業用水槽、海水槽

図 3.13.1 プラント全景と設備仕様



図 3.13.2 施工（締め固め）状況

② フライアッシュ固化体破砕材

フライアッシュ固化体破砕材は、石炭火力発電所から発生した石炭灰にセメント（普通または高炉セメント）と水を添加混合・固化後に破砕・粒度調整した人工碎石である。岸壁の裏込め材料として再度粒度調整を行った製品も製造されている。

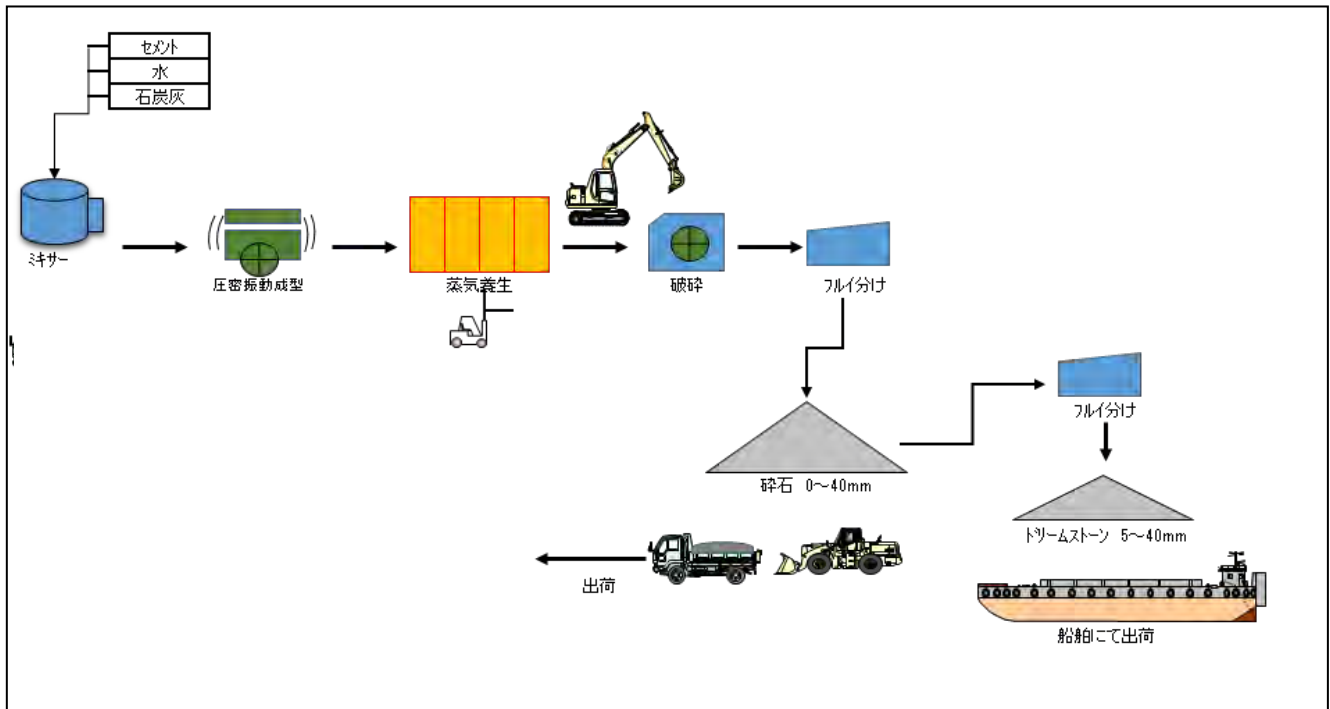


図 3.13.3 プラントの製造フロー（例）



フィールド試験場所（構内、レベル測定）



施工状況

図 3.13.4 施工状況

2) 石炭灰造粒物

石炭灰造粒物は、転動造粒方式により製造される。基本配合として、石炭灰に対し、セメント 10～15%、水量 20～25%を添加している。

粒径は出荷時に分級・選別により粒度調整するが、製品規格の標準は 40 mm以下のものである。



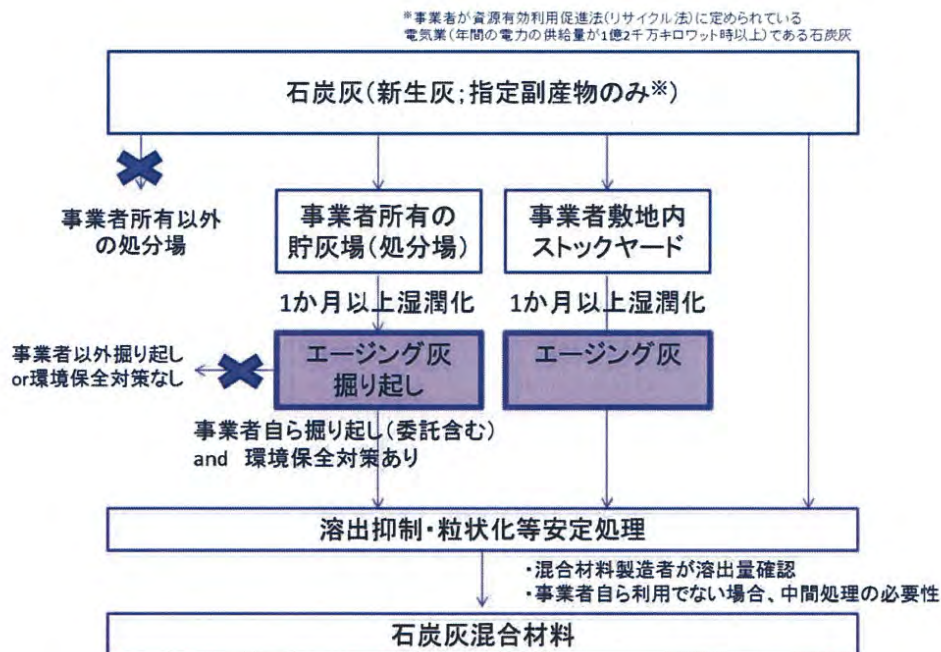
図 3.13.5 石炭灰造粒物仮置場

(2) エージング灰について

火力発電所から副成された新生灰のうち、湿潤化させ、おおむね1ヶ月以上置かれた石炭灰を「エージング灰」と呼び、新生灰と同様、石炭灰混合材料（固化体、造粒物等）として利用することができる。

エージング灰は、事業所所有の貯炭場（処分場）または事業所敷地内のストックヤードにおいて、湿潤状態で静置される。品質が安定しており、かつ大量の資材を短期間に必要とするスポット需要に対応できる等の特徴を持つ。

エージング灰を用いた混合材料の利用にあたっては、「石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（エージング灰（既成灰）編）」（（一財）石炭エネルギーセンター）を参照することができる。



出典) 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（エージング灰（既成灰）編）（一財）石炭エネルギーセンター）

図 3.13.6 エージング灰の利用イメージ

(3) 供給・利用の状況

1) 供給地域

① フライアッシュ固化体（改良盛土材）（製品名：アッシュクリート Type II）

陸上輸送：熊本県天草市、苓北町周辺

運搬時間 1 時間程度の範囲内が目安。

平成 25 年には、福島県の相馬共同火力(株)新地発電所の石炭灰を利用するプラントが設置され、試験施工を経て公共工事での利用が開始された。

海上輸送：実績なし

② フライアッシュ固化体破碎材

陸上輸送：山形県酒田市、鶴岡市他周辺町村（製品名：FRC 碎石、ドリームストーン）

苫小牧周辺及び札幌市などの工場周辺 100km 圏内（製品名：フライクリーン）

海上輸送：福島県小名浜港、青森県大湊への運搬実績あり。（製品名：ドリームストーン）

実績なし（製品名：フライクリーン）

③ 石炭灰造粒物

陸上輸送：石炭灰造粒物製造所（発電所）周辺

海上輸送：実績なし

2) 事業所の立地場所

石炭灰二次製品の製造所（代表例）の立地場所を図 3.13.7 に示す。

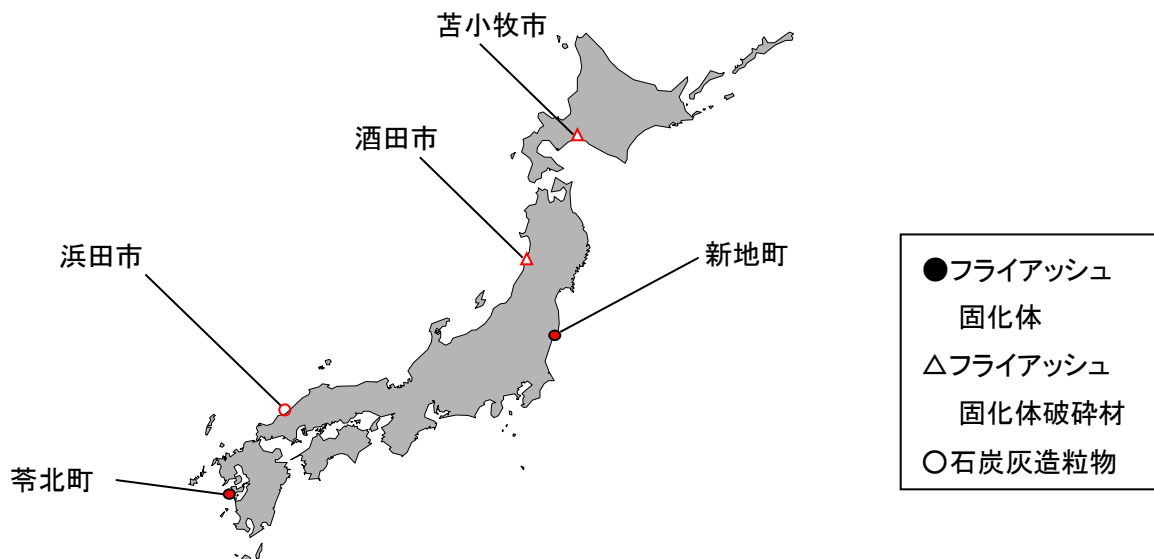


図 3.13.7 石炭灰二次製品の製造所（代表例）の立地場所

3) 製造量

①フライアッシュ固化体：約 78,000m³/年（製品名：アッシュクリート TypeⅡ）（平成 25 年度実績）

②フライアッシュ固化体破砕材

約 5 万 t/年（製品名：FRC 砕石、ドリームストーン）（製造能力）

※年度別製造量は表 3.13.1 のとおり

約 10 万 t/年（製品名：フライクリーン）（石炭灰処理量の平成 25 年度実績）

③石炭灰造粒物：6 万 m³/年、200m³/日（製品名：Hi ビーズ製造能力）

表 3.13.1 フライアッシュ固化体破砕材の製造量（製品名：FRC 砕石、ドリームストーン）

年度別	製造量(t)	出荷量(m ³)		合計出荷量(m ³)
		FRC 砕石 (0~40mm)	ドリームストーン (5~40mm)	
平成 23 年 度	7,423	4,683		4,683
平成 24 年 度	46,713	32,220		32,220
平成 25 年 度	50,921	36,084	10,306	46,390
平成 26 年 度	45,857	31,249	330	31,579
合 計	150,914	104,236	10,636	114,872

*平成 26 年度は 2 月末現在の数量

4) 用途別使用量

①フライアッシュ固化体破砕材：表 3.13.2 のとおり

②石炭灰造粒物：表 3.13.3 のとおり

表 3.13.2 フライアッシュ固化体破砕材の用途別使用量（製品名：FRC 砕石、ドリームストーン）

平成 23～26 年度 合計 114,872m³

材料名	用途	使用数量(m ³)	全出荷量に対する割合(%)	摘要
FRC 砕石	路盤材	98,422	85.7%	
	路床盛土材	3,870	3.4%	
	盛土材(路体盛土)	1,944	1.7%	
ドリームストーン	裏込め・裏埋材	10,636	9.2%	
合計		114,872	100.0%	

表 3.13.3 石炭灰造粒物の用途別使用量（製品名：Hi ビーズ）

地盤改良材

No	発注機関	施工時期	施工場所	概略数量(単位:m ³)	備考
1	国土交通省中国地方整備局	平成 14 年	小野田港	7,000	SCP
2	山陽小野田市	平成 15 年	刈屋漁港	11,000	SCP
3	広島県	平成 14～15 年	大竹地区	76,000	SD, SM
4	山口県	平成 16～18 年	徳山下松港	81,000	SM
5	国土交通省中国地方整備局	平成 17～18 年	元安川	3,000	SM
6	中国四国防衛局	平成 19～20 年	岩国基地	43,000	SCP(液状化対策)
7	中国四国防衛局	平成 20～21 年	岩国基地	60,000	SD
8	国土交通省中国地方整備局	平成 23 年	尾道市	700	SCP(低置換)

SCP：サンドコンパクション工法材，SD：サンドドレーン材，SM：サンドマット材

環境修復材

No	発注機関	施工時期	施工場所	概略数量(単位:m ³)	備考
1	国土交通省中国地方整備局 (出雲河川事務所)	平成 17 年～継続	中海 (島根県・鳥取県)	210,000	環境修復
2	山口県	平成 18～20 年	埴生沖，小野田沖	37,000	水産事業
3	島根県	平成 22～23 年	安来港	14,000	環境修復
4	国土交通省中国地方整備局 (広島港湾事務所)	平成 22 年	広島湾(海田)	9,400	環境修復
5	国土交通省中国地方整備局 (太田川河川事務所)	平成 20 年	広島市内(一級河川)	100	河川浄化
6	広島大学・国土交通省中国 地方整備局・広島県・福山 市・中国電力グループ 共同 研究	平成 23 年	福山港	5,500	環境修復
7	広島県	平成 23 年～継続	京橋川(広島市内)	2,700	環境修復
8	広島高速道路公社	平成 23 年	本川(広島市内)	590	環境修復
9	国土交通省中国地方整備局 (太田川河川事務所)	平成 22～24 年	天満川(広島市内)	435	環境修復
10	松江市	平成 25 年	松江城 堀川	実証試験	水質浄化
11	広島県	平成 26 年	福山港	10,000	環境修復
12	熊本県	平成 26 年	熊本県百貫港	1,200	水産資源回復

3.13.2 品質

フライアッシュ固化体は、路盤材、コンクリート再生骨材等の品質規格に基づき製造されている。
石炭灰造粒物の外観は砂粒状であり、粒子密度は天然砂よりもやや小さくばらつきがある。

(解説)

(1) フライアッシュ固化体

1) 物理・力学的性質

- 単位体積重量：約 1.7t/m³
- 透水係数：10⁻⁷～10⁻⁸cm/s
- 配合によるが、N 値 5 程度から 28 日強度で 5N/mm² 以上の強度レベルも可能である。

2) 化学的性質

表 3.13.4 配合例

単位：kg/m³

石炭灰	セメント	石膏	水
1,250	10～100	25	350

(2) フライアッシュ固化体破砕材

1) 物理・力学的性質

① 製品名：FRC 砕石

- 粒度範囲：0～40mm
- 最大乾燥密度：1.183g/cm³
- 最適含水比：39.4%
- 修正 CBR：81.0%
- 単位体積重量：13.1 kN/m³ (標準締固め時)
- 設計 CBR：84.0%
- 透水係数：1.8×10⁻²cm/s
- 一軸圧縮強さ：20～22N/mm² (材齢 28 日)

② 製品名：FRC 砕石ドリームストーン

- 粒度範囲：5～40mm
- 最大乾燥密度：1.104g/cm³
- 最適含水比：33.8%
- 修正 CBR：50.9%
- 単位体積重量：11.6 kN/m³ (標準締固め時)
- 設計 CBR：46.5%
- 透水係数：5.2×10⁻⁰ cm/s
- 一軸圧縮強さ：20～22N/mm² (材齢 28 日)

表 3.13.5 粒度の基準

骨材のふるい分け試験 JIS A 1102

粒径(mm)	所要範囲(%) ^{※1}	試験結果(%) ^{※2}
53	100	100.0
37.5	95 ～ 100	98.2
19	50 ～ 80	70.7
4.75	15 ～ 40	28.2
2.36	5 ～ 25	16.0

※1 国土交通省東北地方整備局土木工事共通仕様書 第2編材料編 第2章2-2-3-3アスファルト舗装用骨材 1. 砕石・再生砕石及び鉄鋼スラグの粒度

※2 平成27年度の骨材試験結果

表 3.13.6 フライアッシュ固化体破砕材の再生砕石としての品質規格

試験名称	試験方法	規格値 ^{※1}	試験結果 ^{※2}	摘要
骨材のスリヘリ減量試験	JIS A 1121	50%以下	31.3%	試料粒径は JIS A5001 5.4 の規定による
土の液性・塑性限界試験	JIS A 1205 1206	6 以下	NP	0.42mm フリ通過分の PI 測定
修正 CBR 試験	JIS A 1211	30%以上	81.0%	

※1 国土交通省東北地方整備局土木工事共通仕様書 第3編土木工事共通編 第2章一般施工 8. 下層路盤の材料規格

※2 平成27年度の骨材試験結果(FRC 砕石 0~40mm)

③ 製品名：フライクリーン

北海道開発局及び北海道におけるコンクリート再生骨材の品質規格に基づき製造されている。

○粒度：40~0 mm、○粗粒率：6.20、○密度：1.82kg/L、○吸水率：23.43%、

○最適含水比：22.7%、○最大乾燥密度：1.287g/cm³、

○修正 CBR：128.3%、(参考) ○凍上率：9.1%

2) 化学的性質

① 製品名：FRC 砕石

溶出試験の結果例を表 3.13.7 に示す。安全環境基準は規定されていないが、道路の路盤材としての利用が多いことから環境省告示第46号を基準値としている。また、生活環境保全に関する環境基準として、環境省告示第59号付表6ふっ素及びほう素についても試験対象としている。いずれの項目についても基準値を下回っている。

表 3.13.7 フライアッシュ固化体破碎材の溶出試験結果例

FRC 碎石 溶出試験結果

(H27. 2. 20 のデータ)

番号	分析の対象	単位	基準値	試験値	定量下限値	分析方法
1	カドミウムまたは化合物	mg/L	0.01 以下	0.003 未満	0.003	JIS K 0102-55.2
2	シアン化合物	mg/L	不検出	(不検出)	0.1	JIS K 0102-38.1, 2, 38.3
3	有機リン化合物	mg/L	不検出	(不検出)	0.1	S49 環告第 64 号付表 1
4	鉛または化合物	mg/L	0.01 以下	0.005 未満	0.005	JIS K 0102-54.2
5	六価クロム化合物	mg/L	0.05 以下	0.01 未満	0.01	JIS K 0102-65.2, 1
6	砒素または化合物	mg/L	0.01 以下	0.005 未満	0.005	JIS K 0102-61.2
7	水銀またはその化合物	mg/L	0.0005 以下	0.0005 未満	0.0005	S46 環告第 59 号付表 1
8	アルキル水銀化合物	mg/L	不検出	(不検出)	0.0005	S46 環告第 59 号付表 2
9	PCB	mg/L	不検出	(不検出)	0.0005	S46 環告第 59 号付表 3
*	銅	mg/L	—	—	—	S47 総理府令第 66 号
10	ジクロロメタン	mg/L	0.02 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
11	四塩化炭素	mg/L	0.002 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
12	1,2-ジクロロエタン	mg/L	0.004 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
13	1,1-ジクロロエチレン	mg/L	0.02 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2 H26.3 改定
14	シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	0.04 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
15	1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	1 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
16	1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	0.006 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
17	トリクロロエチレン	mg/L	0.03 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
18	テトラクロロエチレン	mg/L	0.01 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
19	1,3-ジクロロプロペン	mg/L	0.002 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
20	チウラム	mg/L	0.006 以下	0.001 未満	0.001	S46 環告第 59 号付表 4
21	シマジン	mg/L	0.003 以下	0.001 未満	0.001	S46 環告第 59 号付表 5-1
22	チオベンソカルブ	mg/L	0.02 以下	0.001 未満	0.001	S46 環告第 59 号付表 5-1
23	ベンゼン	mg/L	0.01 以下	0.0005 未満	0.0005	JIS K 0125-5.2
24	セレンまたは化合物	mg/L	0.01 以下	0.005 未満	0.005	JIS K 0125-67.2
25	ふっ素化合物	mg/L	0.8 以下	0.1 未満	0.1	S46 環告第 59 号付表 6
26	ほう素	mg/L	1 以下	0.1 未満	0.1	JIS K 0102-47.3

*銅については農用地に限るため試験対象外とする。

*定量下限値を下回るものは不検出とする。

② 製品名：フライクリーン

北海道開発局及び北海道におけるコンクリート再生骨材の品質規格に基づき製造されている。

表 3.13.8 配合

単位：kg/m³

石炭灰	セメント	水
600～650	150～162	150～200

(3) 石炭灰造粒物

石炭灰造粒物の外観は、砂粒状であり、粒子密度は天然砂よりもやや小さくばらつきがある(2.1～2.6g/cm³)。これはセメント・水を添加し造粒することにより空隙を多く含むためであり、吸水率はやや高い。

表 3.13.9 石炭灰造粒物の品質規格

品質項目	単位	試験方法	規格値	備考
土粒子の密度	g/cm ³	JIS-A-1202	2.1~2.4	沖積粘土2.5~2.75, 砂質土2.6~2.8, 水砕スラグ ² 2.6~2.9
乾燥密度	g/cm ³	JIS-A-1225	0.8~1.1	沖積粘土0.5~1.4, 砂質土1.2~1.8, 水砕スラグ ² 0.8~1.1
湿潤密度	g/cm ³	JIS-A-1225	1.0~1.4	沖積粘土1.2~1.6, 砂質土1.6~2.0, 水砕スラグ ² 0.9~1.3
含水比	%	JIS-A-1203	15~35	
粒度(ふるい)	%	JIS-A-1204	粒度加積曲線参照	
透水試験 (40mm以下製品対象)	m/s	JIS-A-1218	1.04 × 10 ⁻² m/s (0Ec) 4.99 × 10 ⁻⁷ m/s (6Ec)	
最適含水比	%	JIS-A-1210	40~50 (5mm以下) 20~30 (40mm以下)	
吸水率	%	JIS-A-1110 JIS-A-1109	15~25	水砕スラグ ² 0.5~3.0
三軸圧縮強度(内部摩擦角) (40mm以下製品対象)	度	JGS 0524	35以上 (0Ec) 45以上 (6Ec)	礫質土35°, 砂質土30°, 水砕スラグ ² 35°
圧潰強度	MPa	JIS-Z-8841	1.2以上	
重金属の溶出試験	—	海洋汚染基準 (昭和48.2.17 総令6)	基準値以下	陸上利用の場合は「土壌の汚染に係る環境基準」を満足すること

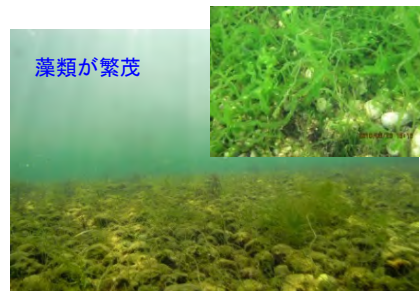
注) 湿潤密度, 乾燥密度は最大乾燥密度(最適含水比)の90%密度に突き回めた値である。

環境修復材料としては、以下の特徴により、海域での好気条件が創造しやすく、特に閉鎖性環境で問題となっている貧酸素に対し、高い改善効果が得られる。結果的に底生生物相の改善に繋がっている。

- ・砂よりも軽く、ヘドロ上への覆砂においても、減り込み量が少ない。
- ・粒そのものは、容積の40%の微細な空隙を保有している。
- ・高い硫化水素吸着能力を有する。
- ・覆砂を施した石炭灰造粒物表面は光の届く範囲で、短期間に珪藻被膜される。
- ・覆砂間隙中に浮泥が堆積しても弱アルカリ環境下を維持しているため、嫌気状態になりにくく、ヘドロ化しない。
- ・底質から溶出する富栄養化物質 (N, P) の吸着・抑制効果がある。



石炭灰造粒物外観



石炭灰造粒物覆砂後

図 3.13.8 石炭灰造粒物の外観、使用例

1) 物理・力学的性質

① 単位体積重量

湿潤単位体積重量は $1.0\text{g/cm}^3 \sim 1.4\text{g/cm}^3$ であり、天然砂よりも軽い。

② 粒度

粒度は出荷時に分級・選別を行い調整して出荷しており、概ね $0 \sim 40\text{mm}$ に調整している。

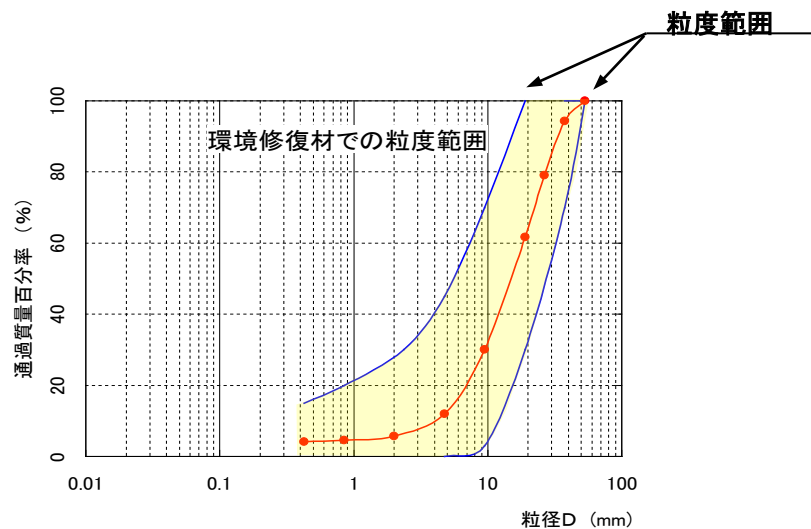


図 3.13.9 石炭灰造粒物の粒径加積曲線

③ 透水性

透水性は、砂と同等の性能が得られる。

④ せん断抵抗角

せん断抵抗角 (ϕ) は、 45° 以上と天然材料に比べ大きな値であり、海砂と同様な改良効果であることを確認している。

2) 化学的性質

① 微量成分の溶出

利用用途（陸上、海域）に応じて、「土壌の汚染に係る環境基準」、「海洋汚染基準」を満足することを確認している。

② 環境安全品質

石炭灰造粒物は石炭灰を製品加工したものであることから、納入に際しては使用場所の所轄環境行政（保健所等）と事前に報告・協議を行い、商品として取扱う事の妥当性を確認することとしている。

(4) エージング灰を用いた石炭灰混合材料

石炭灰混合材料の原料にエージング灰を用いた場合、新生灰を用いた場合と比較して、製造された石炭灰混合材料は以下の特徴を持つことが報告されている。

- ・乾燥密度は $0.9\sim 1.1\text{g/cm}^3$ 程度で、新生灰を用いた石炭灰混合材料よりもやや軽い。
- ・28日養生後の一軸圧縮強さは、セメント添加率が低い(2~5%)と新生灰よりも低くなる傾向がみられるが、15~18%ではほぼ同等。
- ・新生灰よりも低いセメント添加率で土壌環境基準に適合させることができる。

(5) 補足事項

フライアッシュ固化体、フライアッシュ固化体破砕材及び石炭灰造粒物の代表例についての状況は、上述のとおりであるが、実用化している他の二次製品、混合材料等も含めて、基本物性の概要を表 3.13.10 に示す。

表 3.13.10(1) 石炭灰二次製品及びその他混合材料の基本物性一覧

混合材料種別	土砂代替材			
技術の種類	破砕材 (頑丈土破砕材)	破砕材 (J-アッシュ)	造粒材 (Hiビーズ)	造粒材 (ゼットサンド)
主原料	石炭灰+セメント+水 +スラグ、石膏	石炭灰+砕石 +セメント+水	石炭灰+セメント +ペントナイト+水	石炭灰+セメント +水+添加材
物性	○粒度 細粒分混じりの土質材料 ○土粒子密度 2.3~2.4g/cm ³ ○最大乾燥密度 1.25g/cm ³ 以下 ○強熱減量 10% ○透水係数 1×10 ⁻⁵ ~1×10 ⁻⁴ cm/s	○最大粒径 必要に応じて ○湿潤密度 1.603~1.635g/cm ³ ○最大乾燥密度 1.192~1.198g/cm ³ ○最適含水比 33.9~36.8% ○透水係数 1×10 ⁻⁷ ~1×10 ⁻⁵ cm/s	○平均粒径 7.5mm ○形状 ほぼ球状 ○粒の湿潤密度 1.747g/cm ³ ○自然含水比 11.6% ○吸水率 16.4% ○スレーキング率 0.21% ○透水係数 1.34×10 ⁻³ cm/s(6Ec)	○粒度分布は砂質土と同等 ○最大粒径 4~50mm ○平均粒径 0.3~2mm ○礫分含有率 15~50% ○細粒分含有率 30%以下 ○粒子密度 2.4g/cm ³ 以下 ○透水係数 1×10 ⁻⁴ cm/s以上
強度特性	○せん断抵抗角 30°以上 ○修正CBR 40%以上 ○圧縮強さ(材齢28日) 300~800kN/m ² ○液状化抵抗比 R _{0.20} ≒0.3	○内部摩擦角 31.1~34.5° ○90%修正CBR 31.7% ○粘着力 30.6~76.5kN/m ² ○コーン指数 14,989~18,357kN/m ²	○内部摩擦角 47.6°(6Ec) (参考) ・圧潰強度(粒子強度) (7日)1,069kN/m ² (28日)1,606kN/m ²	○内部摩擦角 35°以上 ○95%修正CBR 20%以上 (参考) ・粘着力 約48kN/m ² ・圧縮強度(粒子強度) 118~164kN/m ² ・コーン指数(粒子強度) 4,130~8,260kN/m ²
施工性	○圧縮性: 透水性があり埋立てと同時に沈下が収束する。 ○トラフィカビリティー: 陸上部のコーン指数は1,200N/m ² 以上。 ○粉塵: 粉塵の発生は少ない。	○通常の施工手順および建設機械で施工が可能。 ○テールアルメ工法背面埋戻し材にも利用可能。	○SCP(高置換)材として十分適用可能な材料である。 ○SCP材として使用する場合の設計値と管理値を提案している。	○通常の施工手順および建設機械で施工が可能。 ○粉塵量の発生が少ない。 ○締め固めた後の長期強度は過大ではなく、容易に掘削が可能。
用途	盛土材、埋立柱材	盛土材、路体材、路床材	盛土材、地盤改良材(SCP)	盛土材、埋立柱材
証明他	技術審査証明取得済	-	NETIS登録済(SKK-120002-A)	技術審査証明取得済
その他	○開発者 沖縄電力(株)、日本国土開発(株) ○出典 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書第06003号 石炭灰を有効利用した埋立て材料「頑丈土破砕材」、財団法人 沿岸技術研究センター、2006.11ほか	○開発者 常磐共同火力(株)、日本国土開発(株) ○出典 震災復興資材としてのJ-アッシュの活用、2013年石炭灰有効利用シンポジウム講演集、(一財)石炭エネルギーセンター、2013.11	○開発者 中国電力(株) ○出典 Hiビーズによる環境改善効果について、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集(VII-314)、2003.9	○開発者 宇部興産(株)、大成建設(株)、電源開発(株) ○出典 建設技術審査証明報告書 土木系材料・製品・技術(建技審証 第0410号)石炭灰を用いた人工地盤材料「ゼットサンド」、(財)土木研究センター、2004.11

(注) なお、表中の値は各々の記載資料より転載した。

出典) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版) ((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月)

表 3.13.10(2) 石炭灰二次製品及びその他混合材料の基本物性一覧

混合材料種別	土砂代替材			
技術の種類	造粒材 (灰テックピース)	造粒材 (フライ・クリーン)	塑性材 (アッシュクリートType II)	塑性材 (ソマッシュ)
主原料	石炭灰+セメント+水	石炭灰+セメント+水	石炭灰+セメント+石膏+水	石炭灰+セメント+助材+水
物性	○粒度 礫質土 ○粒子の乾燥密度 1.3~1.6g/cm ³ ○細粒分含有率 15%未満 ○透水係数 1×10^{-4} ~ 1×10^{-2} cm/s程度	○粗粒率 6.18 ○密度 1.82g/cm ³ ○最大乾燥密度 1.277g/cm ³ ○吸水率 23.12% ○最適含水比 23.1%	○外観 振動締固めで造成する固化地盤 ○単位容積質量 1.6~1.8g/cm ³ ○透水係数 $1 \sim 9 \times 10^{-5}$ cm/s	○湿潤密度 1.6~1.9g/cm ³ ○最適含水比 20~25% ○透水係数 1×10^{-8} cm/s以下
強度特性	○せん断抵抗角 35°程度以上 ○修正CBR 20%以上 ○圧縮強さ(材齢90日) 1,000kN/m ² 程度以下 ○粘着力 50kN/m ² 以上(参考) ・コーン指数(材齢90日) 15,000kN/m ² 程度以下	○修正CBR 134.5%(参考) ・凍上率 13.2%(判定:合格)	○現場CBR 200%程度 ○圧縮強度(材齢28日) 5,000kN/m ² 以上 ○静弾性係数 4~6GPa程度	○圧縮強度(材齢28日) 4,000~8,000kN/m ²
施工性	○通常の土質材料と同様の施工性を有する。	○軽く、水に浮かず、物理的強度もあり、化学的に安定した材料であることから、構造物に作用する土圧や荷重の軽減、軟弱地盤などにおける盛土材、裏込め材としての適用性が高い。	○プラントで練り混ぜた材料を、専用機器により現地で振動締固めを行う。	○最適含水比になるように自走式土質改良機やプラントで混合した後、ブルドーザーで敷均し、コンパインドローラ等で締固めを行う。
用途	盛土材、埋立材	下層路盤材、凍上抑制剤、基礎砂利	盛土材、埋立材	盛土材、埋立材
証明他	技術審査証明取得済	NETIS登録済(HK-100018-A)	建材試験センター 環境主張建設資材の適合証明書(第CCG0003-4(2)号)省資源型1級、環境保全型1級	NETIS登録済(TH-150002-A)
その他	○開発者 四国電力(株) ○出典 建設技術審査証明報告書 土木系材料・製品・技術(建技審証 第0414号)石炭灰を利用した粒状地盤材料「灰テックピース」、(財)土木研究センター、2009.11更新	○開発者 越智建設(株)、北海道電力(株) ○出典 越智建設(株)ホームページ	○開発者 (株)安藤・間 ○出典 石炭灰リサイクル建設資材の盛土造成工事への有効利用、地盤工学会九州支部、地盤環境および防災における地域資源の活用に関するシンポジウム発表論文集、2010.1	○開発者 (株)大林組、相馬環境サービス(株) ○出典 石炭灰を活用した復興工事への取組み—石炭灰を活用した防潮堤盛土実証試験一、土木施工Vol.54、No.9、2013

(注) なお、表中の値は各々の記載資料より転載した。

出典) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版) ((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月)

表 3.13.10(3) 石炭灰二次製品及びその他混合材料の基本物性一覧

混合材料種別	スラリー材	クリンカアッシュ	
技術の種類	スラリー材 (FCスラリー)	クリンカアッシュ混合物 (クリンカ混合土)	クリンカアッシュ単体 (ライトサンド)
主原料	石炭灰+セメント+水	第4種建設発生土、泥土 +クリンカアッシュ	クリンカアッシュ
物性	<ul style="list-style-type: none"> ○粒度 礫分0%、砂分5%程度、シルト分80%程度、粘土分15%程度 ○土粒子密度 2.2g/cm³程度 ○湿潤密度 1.6g/cm³程度 ○乾燥密度 1.2g/cm³程度 	<ul style="list-style-type: none"> ○建設発生土とクリンカアッシュの混合比5:5の場合、所定の強度(qc=400kN/m²)を確保。なお、以下の値は混合比5:5のもの ○単位容積質量 1.6g/cm³ ○含水比 40%程度 ○透水係数 9×10⁻⁶cm/s 	<ul style="list-style-type: none"> ○礫分を10~70%程度、砂分を30~70%程度含み礫質土あるいは砂質土に分類される ○湿潤単位容積質量 1.4g/cm³程度 ○最適含水比 15~60% ○透水係数 8.8×10⁻³~7.2×10⁻¹cm/s
強度特性	<ul style="list-style-type: none"> ○一軸圧縮強さ 1,000kN/m²以上(材齢28日) ○コーン貫入抵抗 1,200kN/m²以上(材齢3日) 	<ul style="list-style-type: none"> ○内部摩擦角 13° ○CBR 1.1~1.7% ○コーン指数 550~610kN/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ○内部摩擦角 35°以上 ○CBR 20以上 ○コーン指数 1,200kN/m²以上
施工性	<ul style="list-style-type: none"> ○流動性に優れポンプ打設が容易(水中打設可能) ○トラフィカビリティ：陸上部のコーン貫入抵抗は1,200kN/m²以上(材齢3日) 	<ul style="list-style-type: none"> ○適正な含水調整で水中不分離性能を発揮させ、埋戻しや裏込め撤きだし施工で汚濁低減が可能となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ○軽量で、高いせん断強度と透水性を有しており、構造物の合理的な設計に寄与できる。
用途	裏込め材、充填材	盛土材、埋立柱材	盛土材、地盤改良材(SCP)
証明他	-	-	NETIS登録済(CG-120029-A)
その他	<ul style="list-style-type: none"> ○開発者 九州電力㈱ ○出典 九州電力㈱ホームページ他 	<ul style="list-style-type: none"> ○開発者 国土交通省 東北地方整備局、東北電力㈱ ○出典 道路盛土における石炭灰と建設発生土利用ガイドライン(案)(クリンカアッシュ編)、国土交通省東北地方整備局、2003.3 	<ul style="list-style-type: none"> ○開発者 中国電力㈱ ○出典 クリンカアッシュの有効利用状況について、2013年石炭灰有効利用シンポジウム講演集、(一財)石炭エネルギーセンター、2013.11

(注) なお、表中の値は各々の記載資料より転載した。

出典) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版) ((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月)

3.13.3 適用用途

(1) 概要

フライアッシュ固化体及び石炭灰造粒物を利用する場合は、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、石炭灰二次製品（フライアッシュ固化体及び石炭灰造粒物）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 3.13.11、表 3.13.12 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 3.13.11 石炭灰二次製品（フライアッシュ固化体）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 ベーチャ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	○	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・1) FSG 固化体は、石炭灰および石膏に鉄鋼業からの高炉スラグ微粉末を加水して練り混ぜることで圧縮強度が40～60N/mm ² のコンクリート並の強度を発現する固化体であり、FSG 固化体はブロックに用いられている。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・防波堤根固工事、被覆工事（国交省）	1)
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)3) 石炭灰混合材料（破砕材）の裏込め材料への適用について記載。 ・構造物の背面に裏込め材料として適用する石炭灰混合材料は軽量の固化体となるため、一般土砂による埋立工法に比べ埋立地盤の沈下抑制に寄与するメリットがある。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・ふ頭岸壁外（災害復旧）工事（国交省） ・ふ頭護岸（災害復旧）築造工事（国交省） ・護岸整備土木その他工事（その他機関）	2) 3)
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。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・ふ頭岸壁外（災害復旧）工事（国交省） ・護岸整備土木その他工事（その他機関）	
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】 ・2)3) 石炭灰混合材料（破砕材）の盛土材料への適用について記載。 ・4) 路床、路体（盛土）、土地造成などに適用した場合、軽量で強度が大きいことから、盛土時の沈下量減少や盛土の安定性が高く、基礎地盤改良の低減が図れるとされている。	-	●利用実績なし	2) 3) 4)
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) 石炭灰混合材料（破砕材）の埋立材料への適用について記載。 ・構造物の背面に適用する埋立材料として石炭灰混合材料は、軽量の固化体であるため、一般土砂による埋立工法に比べ埋立地盤の沈下抑制に寄与するとともに、構造物に対し背面土圧を軽減する。	-	●利用実績なし	2)
⑭ 路床盛土材	◎	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・2)3) 石炭灰混合材料（破砕材）の道路路床盛土材料への適用について記載。 ・4) 路床、路体（盛土）、土地造成などに適用した場合、軽量で強度が大きいことから、盛土時の沈下量減少や盛土の安定性が高く、基礎地盤改良の低減が図れるとされている。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・臨港連絡橋道路（国交省） ・道路改良舗装工事（国交省） ・県道改良工事（管理者）	2) 3) 4)
⑮ 路盤材	◎	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・2) 石炭灰混合材料（破砕材）の下層路盤への適用について記載。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・道路改良舗装工事（国交省） ・船着場舗装修理（管理者）	2)
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) 石炭灰有効利用技術について-循環型社会を目指して- 報告書(社)土木学会、平成15年9月)
- 2) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月)
- 3) 建設技術審査証明報告書 石炭灰を利用した人工地盤材料「頑丈土破砕材」(財団法人土木研究センター、平成23年2月内容変更)
- 4) 「頑丈土破砕材(石炭灰を利用した人工地盤材料)」建設技術審査証明((財)土木研究センター、平成21年)

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 3.13.12(1) 石炭灰二次製品（石炭灰造粒物）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パントマット材	○	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・1) 海砂の代替材としてパントドレンの中詰め砂材としての利用を記載。 ・2) 大型土槽を用いた目詰まり試験から、石炭灰造粒物はドレン材として十分に適用可能であることを確認。【査読無し】 ・3) パントドレン工法について、設計・施工ともに天然の材料と同様の粒状材料として扱うことができるとされている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・地盤改良工事（国交省、管理者）
⑤ パントコンパクションパイル材	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 海砂と同等の締固め効果及び施工性が期待。 ・3) パントコンパクションパイル工法について、設計・施工ともに天然の材料と同様の粒状材料として扱うことができるとされている。 ・4) 護岸工事等へ十分採用できること、SCP専用船を使用した施工性は海砂と同等以上であることを確認。【査読無し】 ・8) 石炭灰混合材料（造粒材）のパントコンパクションパイル材への適用について記載。	●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） ・地盤改良工事（国交省、管理者）
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	△	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・6) 一般の砂質土および礫質土と同等の強度特性・透水係数・締固め特性を有しており、軽量で、スレーキングによる影響は小さいことを確認。 ・裏込め材など、通常の砂質土、礫質土系の地盤材料と同等の設計・施工を行うことが可能。 ・7) 裏込めや埋戻しに利用した場合、通常の砂質土や礫質土と同等の強度特性を有し、軽量であることから土圧を低減できる利点がある。 ・8) 石炭灰混合材料（造粒材）の裏込め材料への適用について記載。 ・構造物の背面に裏込め材料として適用する石炭灰混合材料は軽量となるため、一般土砂による埋立工法に比べ埋立地盤の沈下抑制に寄与するメリットがある。	●利用実績なし

出典)

- 1) 石炭灰有効利用技術について-循環型社会を目指して- 報告書(社)土木学会、平成15年9月)
- 2) 石炭灰造粒物のSD材料への適用性評価のための目詰まり試験(土木学会第57回年次学術講演会、平成14年9月)
- 3) 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、平成26年3月)
- 4) 石炭灰造粒物の海上SCP打設試験における改良特性(その1, 2, 3)(土木学会第56回年次学術講演会、平成13年10月)
- 5) フライッシュを主原料とした粒状材料の開発とその特性(地盤工学ジャーナル、平成19年)
- 6) 「灰パックピース(石炭灰を利用した粒状地盤材料)」建設技術審査証明((財)土木研究センター、平成21年)
- 7) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月)
- 8) 造粒化した石炭灰の地盤材料への適用性(土木学会第56回年次学術講演会、平成13年10月)
- 9) 「石炭灰造粒物(Hiピース)による海域環境の改善技術」(環境省、平成22年度環境技術実証事業)
- 10) 石炭灰造粒物による底質改善手法の手引き(広島港湾空港技術調査事務所、平成25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 3.13.12(2) 石炭灰二次製品（石炭灰造粒物）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	
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。 ●利用マニュアル等が整備されている。	b ●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・護岸（災害復旧）築造工事（国交省）	
⑫	盛土材、覆土材、載荷盛土材	◎	B ●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・6) 一般の砂質土および礫質土と同等の強度特性・透水係数・締固め特性を有しており、軽量であり、スレニクによる影響は小さいことを確認。盛土材など、通常の砂質土、礫質土系の地盤材料と同等の設計・施工を行うことが可能。 ・7) 盛土に利用した場合、軽量であることから基礎地盤への影響（特に沈下）が少なくなる利点がある。 ・8) 石炭灰混合材料（造粒材）の盛土材料への適用について記載。 ・9) 盛土材料および凍上抑制層材料として使用できる材料。【査読無し】	a ●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・高潮堤防工事（国交省） ・ふ頭部擁壁工事（国交省） ・港湾整備工事（管理者）	5) 6) 7) 8)
⑬	埋立材	△	B ●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・8) 石炭灰混合材料（造粒材）の埋立材料への適用について記載。 ・構造物の背面に適用する埋立材料として石炭灰混合材料は、軽量化固体化であるため、一般土砂による埋立法に比べ埋立地盤の沈下抑制に寄与するとともに、構造物に対し背面土圧を軽減する。	- ●利用実績なし	7)
⑭	路床盛土材	△	C ●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・7) 土地造成、路床・路体などの適用について、通常の土質材料と同等に利用することができる。	- ●利用実績なし	6)
⑮	路盤材	-	- ●用途対象外	- ●利用実績なし	
⑯	As舗装骨材、As717-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	◎ (覆砂)	B ●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・3) 砂の代替材として覆砂材へ用いることができることとされている。 ・10) 石炭灰造粒物を水質・底質改善材として、従来材料（天然砂）にある物理的効果に加えて化学的な効果を期待できる技術として、海底覆土、覆砂の実証実験が行われ、硫化物イオンの溶出抑制効果等を確認。 ・11) 底質改善材として海底に散布する際の事前調査、施工計画、モニタリング等の手引きが整備されている。	a ●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・覆砂工事（国交省、管理者） ・海域環境創造事業（管理者） ・窪地環境修復事業（その他機関）	3) 9) 10)
⑱	その他	-	- ●用途対象外	- ●利用実績なし	

出典)

- 1) 石炭灰有効利用技術について-循環型社会を目指して- 報告書(社)土木学会、平成15年9月)
- 2) 石炭灰造粒物のSD材料への適用性評価のための目詰まり試験(土木学会第57回年次学術講演会、平成14年9月)
- 3) 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、平成26年3月)
- 4) 石炭灰造粒物の海上SCP打設試験における改良特性(その1, 2, 3)(土木学会第56回年次学術講演会、平成13年10月)
- 5) フライッシュを主原料とした粒状材料の開発とその特性(地盤工学ジャーナル、平成19年)
- 6) 「灰パックビーズ(石炭灰を利用した粒状地盤材料)」建設技術審査証明((財)土木研究センター、平成21年)
- 7) 港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)((一財)石炭エネルギーセンター、平成29年2月)
- 8) 造粒化した石炭灰の地盤材料への適用性(土木学会第56回年次学術講演会、平成13年10月)
- 9) 「石炭灰造粒物(Hi ビーズ)による海域環境の改善技術」(環境省、平成22年度環境技術実証事業)
- 10) 石炭灰造粒物による底質改善手法の手引き(広島港湾空港技術調査事務所、平成25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。

(2) バーチカルドレーン及びサンドマット材、サンドコンパクションパイル材（石炭灰造粒物）

石炭灰造粒物は、サンドコンパクションパイル工法、サンドドレーン工法において、設計・施工ともに天然の材料と同様の粒状材料として扱うことができる。（一財）石炭エネルギーセンターの「**港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン（改訂版）**」において、石炭灰造粒物の用途としてサンドコンパクションパイル材が示されている。

なお、サンドドレーン材等のように排水機能を要求される場合には、細粒分含有率を 15%未満に抑えておく必要がある。



図 3.13.10 SCP 施工状況

(3) 被覆石、根固・消波ブロック（フライアッシュ固化体・固化体破砕材）

港湾エリアで利用されるブロックについては、既述のフライアッシュ固化体・固化体破砕材と異なり、通常のコンクリートと同様の硬化体である。

材料構成の異なる複数の製造方法の取り組みがなされ、いずれもフライアッシュの特徴を活かした耐久性の高いブロック製造を可能としている。代表的な方法として、セメントを減らし、普通骨材に代えて鉄鋼スラグ骨材を用いる方法や、骨材を使用せず、セメントとフライアッシュのみ使用する場合などがある。

(4) 裏込材（フライアッシュ固化体・固化体破砕材）、裏埋材

フライアッシュ固化体を裏込材に利用する場合、締め固め後は時間の経過とともに徐々に強固かつ安定な路盤・地盤へと変化する。そのため、層内の液状化や地盤沈下などによる変状の懸念もない。

フライアッシュ固化体破砕材を裏込材、裏埋材に利用する場合、設計・施工は天然材料（割石、切込砂利、玉石）と同様の方法を用いることができる。粒度範囲は 5~40mm で液状化しない（**港湾の施設の技術上の基準・同解説**:液状化の可能性のある粒度範囲参照）。また、水中部においても施工可能で天然材料に比較して軽量である。

石炭灰造粒物は 10N/mm^2 程度の供試体強度（石炭灰造粒物円柱テストピースの強度試験）、 1.6N/mm^2 程度の圧潰強度（粒子強度）を有し、護岸・岸壁背面等の裏埋材として、設計・施工とも天然の材料と同様に扱うことができる。通常天然材料に比べ単位体積重量が軽いことから、護岸・岸壁背後等の土圧（常時）軽減策として、活用できる。

(5) 盛土材、覆土材、載荷盛土材（石炭灰造粒物）

盛土材、覆土材、載荷盛土材として、設計・施工とも天然の材料と同様に扱うことができる。

盛土材、覆土材の適用では、通常天然材料に比べ単位体積重量が小さいことから、基礎地盤への影響（沈下）が少なくなり、荷重低減策として活用できる。

載荷盛土材の適用では、通常天然材料に比べて単位体積重量が小さいことから、載荷荷重が小さくなるため、盛土が高くなる・載荷期間が長くなる等留意が必要である。

(6) 路床盛土材（フライアッシュ固化体・固化体破砕材）

フライアッシュ固化体を路床盛土材として利用する場合、締め固め後は時間の経過とともに徐々に強固かつ安定な路盤・地盤へと変化する。そのため、層内の液状化や地盤沈下などによる変状の懸念もない。

フライアッシュ固化体破砕材は、道路用の下層路盤材としての品質規格を満足しており、十分な強度を持つ材料である。また、天然砂と比較すると液状化しにくく施工性がよく、締め固め密度も大きい。

(7) 路盤材（フライアッシュ固化体・固化体破砕材）

フライアッシュ固化体を路盤材として利用する場合、締め固め後は時間の経過とともに徐々に強固かつ安定な路盤・地盤へと変化する。そのため、層内の液状化や地盤沈下などによる変状の懸念もない。

フライアッシュ固化体破砕材は、専用プラントで製造されているため、品質にばらつきが少なく安定した材料であり、下層路盤材としての品質をすべて満足している。

(8) 覆砂材（石炭灰造粒物）

環境修復材として、ヘドロ化した底泥に散布・挿入・混合することで、生物が生息しやすい環境に改善することができ、水質・底質環境改善を目的とした工事に適用できる。

石炭灰造粒物による栄養塩、硫化物イオンの溶出抑制効果を考慮し、覆砂箇所の底質環境に応じ覆砂厚（設計厚）の設定ができる。また、石炭灰造粒物層の好気的な環境保全効果により造粒物表層への新生堆積物はヘドロ化しないことから、環境改善効果が継続され、生物相の回復が維持される。さらに、従来の砂と比較し2割程度軽量であり、機能維持の追加施工をする場合においても、減り込み量が少なくすむ。

なお、覆砂後に良好な浸透場を形成するため、石炭灰造粒物の細粒分は極力減らしておく必要がある。



図 3.13.11 覆砂工事施工状況

【既存工事における検討事項】

- ・施工時において、石炭灰造粒物の散布によって海底泥の巻き上がりや材料分離が生じ、濁度が一時的に上昇することが懸念されたため、散布口付近に汚濁防止膜を設置し、濁度監視を行った。（護岸安定化等工事）
- ・環境改善効果把握のための底質調査において、石炭灰造粒物は砂礫質を呈するため、必要となる被覆層内のコアを不攪乱状態で採取することが困難であることから、試験施工前に不攪乱試料採取のためのアクリルコアを設置した。（護岸安定化等工事）
- ・環境改善効果把握のための水質調査において、水質は移流等で変動が激しく瞬間値での評価が困難であることから、海底に連続観測機器を設置し、水質の連続観測を行った。（護岸安定化等工事）

(9) 今後の検討を要する用途

1) 裏込材（石炭灰造粒物）

裏込材へ通常の土工材料と同様に利用することができるが、利用実績はない。石炭灰造粒物は海上運搬での供給が想定されている。

2) 盛土材、覆土材（フライアッシュ固化体・固化体破碎材）

フライアッシュ固化体を盛土材、覆土材として利用する場合、締め固め後は時間の経過とともに徐々に強固かつ安定な路盤・地盤へと変化する。そのため、層内の液状化や地盤沈下などによる変状の懸念もない。一方、強度によっては、再掘削に大きな労力を要することから、その可能性のある盛土材、覆土材については、強度面を考慮した十分な検討が必要である。

フライアッシュ固化体破碎材を盛土材として利用する場合、天然材料および建設発生土と同様の方法を用いることができる。下層路盤材料としての品質規格を満足しており、盛土材として利用はできるが、覆土材としての利用実績はない。

3) 載荷盛土材（フライアッシュ固化体）

フライアッシュ固化体を載荷盛土材として利用する場合、強度によっては、再掘削に大きな労力を要することから、強度面を考慮した十分な検討が必要である。なお、フライアッシュ固化体破砕材は軽量なため、載荷盛土材として適さない。

4) 埋立材

フライアッシュ固化体破砕材を埋立材として利用する場合、天然材料と同様の方法を用いることができる。下層路盤材料としての品質規格を満足しており、通常の埋立材と同様に利用できるが利用実績はない。

石炭灰造粒物を埋立材として利用する場合、埋立材へ通常の土工材料と同様に利用することができるが、利用実績はない。

5) 路床盛土材（石炭灰造粒物）

土地造成、路床・路体などへ通常の土工材料と同等に利用することができるが、利用実績はない。石炭灰造粒物は海上運搬での供給であり、陸上（山間部など岸壁から離れた場所）で使用する場合はコスト面から標準材料に劣る。

3.13.4 関連法令

フライアッシュ固化体及び石炭灰造粒物は産業副産物であるフライアッシュを使用しているため、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。

3.13.5 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）

フライアッシュ固化体及び石炭灰造粒物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、フライアッシュ固化体は、再利用時（掘削時）には、強度によっては破砕・小割が必要である。フライアッシュ固化体破砕材は、バックホウなどの重機による再掘削が可能であり、容易に小礫化・砂状化できることから再利用しやすい。フライアッシュ固化体及び石炭灰造粒物は、再利用時（掘削時）には微小粒子の発生があるので、環境安全性について留意が必要である。

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。

3.14 銅スラグ

3.14.1 製造・供給

銅スラグは、銅製錬において銅精鉱を溶錬炉で処理する際に副生する溶融したスラグを水砕により固化、粒状化させたものである。

(解説)

(1) 製造方法

銅スラグの製造工程を図 3.14.1 に示す。溶錬炉内に銅精鉱などの銅原料と珪石などの副原料を酸素富化空気とともに炉内に装入すると、銅精鉱は酸化されて銅を主成分とする溶融状態のマットと、鉄 (FeO)、シリカ (SiO₂) を主成分とする溶融状態のスラグとなる。これを比重差によって分離し、上層にある溶融状態のスラグを水砕により固化、粒状化させ、その後用途に合わせ、破碎・粒度調整を経て製造されたものが銅スラグである。

溶錬炉の型式は連続製銅炉、反射炉、自溶炉とあるが、溶錬炉で生成する溶融スラグに大きな違いはなく、溶融スラグの処理設備も国内 5 製錬所間に大きな違いはないため、銅スラグの品質に差異はない。

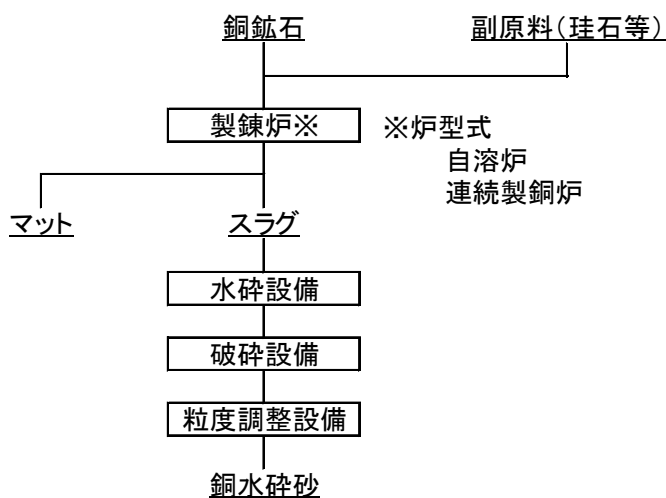


図 3.14.1 銅スラグの製造工程

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

東北、関東、中部、近畿、中国、四国、九州

2) 事業所の立地場所



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月) より作成

図 3.14.2 銅スラグ製造所 (銅精錬所) の立地場所

3) 生産量

銅スラグ : 約 250,000t/月 (平成 16~25 年平均、販売実績ベース)

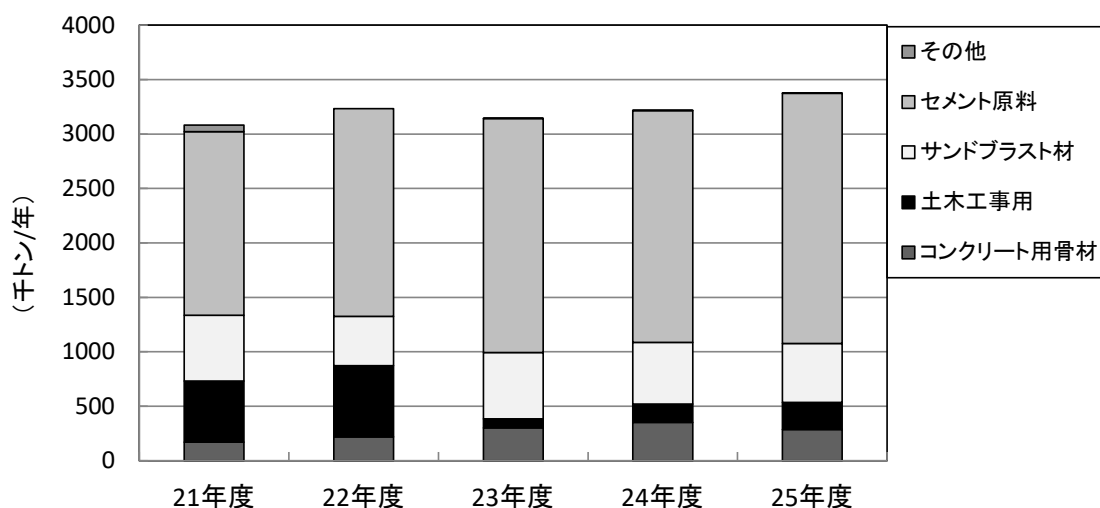


図 3.14.3 銅スラグの販売実績の推移

3.14.2 品質

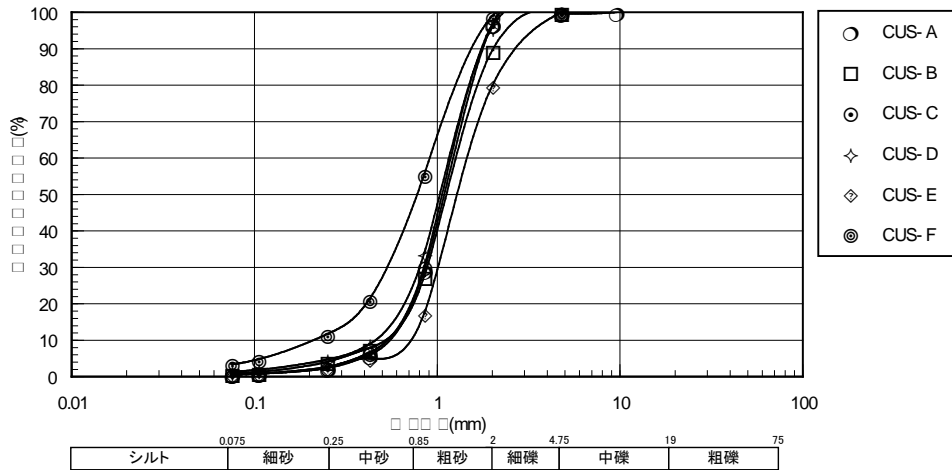
(1) 物理的性質

- 1) 銅スラグ（水砕品）は単粒度の砂状であり、粒径 0.1mm 以下の細粒をほとんど含まない。
- 2) 銅スラグの土粒子密度は 3.5～3.6g/cm³ であり、一般的な砂（2.7g/cm³）に比べ大きい。
- 3) 銅スラグを水中投入した際の堆積後の飽和単位体積重量は、概ね水砕品は 23.5kN/m³ であり、加工品は 25.0kN/m³ である。
- 4) 銅スラグの膨張・収縮性は認められない。
- 5) 銅スラグの水硬性は認められない。

(解説)

1) 粒度

国内 5 製錬所の銅スラグの粒度分布の一例を図 3.14.4 に示す。CUS-A～CUS-E は、水砕処理した後、粒度調整を施していないもので、以後“水砕品”と呼ぶ。CUS-F は、水砕処理した後、粒度調整を施したもので、以後“加工品”と呼ぶ。水砕品（CUS-A～CUS-E）は、製錬所によるばらつきが非常に小さい。



出典) 港湾空港工事における非鉄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9月）

図 3.14.4 国内 5 製錬所の銅スラグの粒度分布の一例

代表的な粒径と均等係数の一例を表 3.14.1 に示す。水砕品（CUS-A～CUS-E）は、均等係数が 2.0～2.4 と単粒度である。加工品（CUS-F）の均等係数は、水砕品（CUS-A～CUS-E）より高く 4 以上となっている。

表 3.14.1 国内 5 製錬所の銅スラグの粒径と均等係数の一例

名称	スラグ種	60%粒径 D_{60} (mm)	平均粒径 D_{50} (mm)	10%粒径 D_{10} (mm)	均等係数 U_c
CUS-A	水砕品 CUS5-0.3	1.21	1.13	0.56	2.16
CUS-B		1.26	1.11	0.54	2.33
CUS-C		1.18	1.10	0.56	2.09
CUS-D		1.15	1.07	0.48	2.40
CUS-E		1.53	1.33	0.75	2.04
CUS-F	加工品 CUS2.5	0.91	0.79	0.21	4.36

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月）

2) 土粒子密度

国内5製錬所の銅スラグの土粒子密度、最大・最小密度試験の一例を表3.14.2に示す。銅スラグの土粒子密度は3.5~3.6g/cm³であり、一般的な砂(2.7g/cm³)に比べ30%程度大きい。また銅スラグの最小乾燥密度は1.6~1.9g/cm³であり、最大乾燥密度は1.9~2.5g/cm³である。

表 3.14.2 銅スラグの土粒子密度、最大・最小密度試験の一例

名称	スラグ種	土粒子密度 (g/cm ³)	最少乾燥密度 (ρ_{dmin}) (g/cm ³)	最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) (g/cm ³)
CUS-A	水砕品 CUS5-0.3	3.551	1.68	2.04
CUS-B		3.606	1.74	2.16
CUS-C		3.641	1.77	2.15
CUS-D		3.548	1.72	2.16
CUS-E		3.539	1.62	1.94
CUS-F	加工品 CUS2.5	3.626	1.91	2.46

出典) 港湾空港工事における非鉄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9月)

3) 単位体積重量

ケーソン等の本体工への中詰材の投入を模擬した銅スラグを用いた水中落下実験を実施し、相対密度は40~87%であり、その時の飽和単位体積重量 γ_{sat} の試算を行ったところ、飽和単位体積重量 γ_{sat} の範囲は、水砕品(CUS-A~E)で22.6~24.1kN/m³(平均23.5kN/m³)、加工品(CUS-F)で24.6~25.0kN/m³(平均24.8kN/m³)であった。なお、試算に必要な物性値は表3.14.2の値を用いた(水の密度は海水密度1.03g/cm³とした)。

なお、現在、中詰材の飽和単位体積重量の品質管理方法としては、水を張った容器に中詰材を投入し、その際の単位体積重量を測定する方法(軽装法と一般的に呼ばれる)で行われている場合が多い。

4) 膨張性

銅スラグは、鉄(FeO)とシリカ(SiO₂)を主成分とする高温で熔融状態のスラグが水砕により急冷凝固されたものであり、ガラス質から構成されている。そのため、膨張の原因となりやすいCaOやMgOが単独で存在しないので膨張性が認められない。

5) 水硬性

膨張性がない理由と同様に、銅スラグはCaOやMgOが単独で存在しないので、水和反応が起こらず水硬性が認められない。

(2) 力学的性質

- 1) 銅スラグの透水係数はDr60%の状態では 1×10^{-4} cm/s 以上であり、突き固めにより透水係数は3割程度低下する。突き固めによる粒子破碎の程度は低い。
- 2) 水砕品のせん断抵抗角 ϕ_d は 34° 程度である。一方、加工品のせん断抵抗角 ϕ_d は 38° 程度である。

(解説)

1) 透水性

国内5製錬所の銅スラグの透水試験結果の一例を表 3.14.3 に示す。透水係数は、水砕品 (CUS-A ~ CUS-E) が $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ cm/s 程度であり、加工品 (CUS-F) が $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ cm/s 程度である。

表 3.14.3 国内5製錬所の銅スラグの透水試験結果の一例

名称	スラグ種	透水係数 k (cm/s)	10%粒径 D_{10} (mm)	試験時の ρ_d (g/cm ³) (Dr60%)
CUS-A	水砕品 CUS5-0.3	3.65×10^{-3}	0.56	1.88
CUS-B		3.49×10^{-3}	0.54	1.97
CUS-C		3.70×10^{-3}	0.56	1.98
CUS-D		2.02×10^{-3}	0.48	1.96
CUS-E		3.31×10^{-3}	0.75	1.80
CUS-F	加工品 CUS2.5	1.62×10^{-4}	0.21	2.21

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

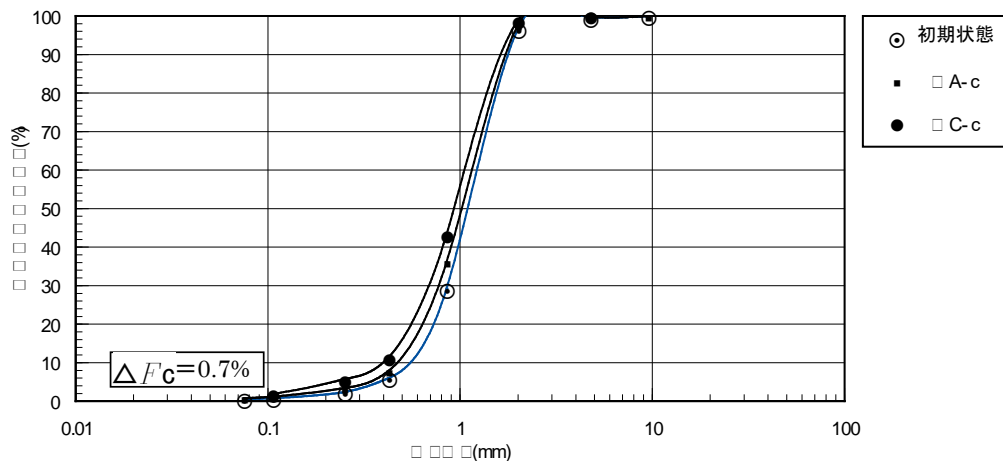
突き固めた銅スラグの透水試験結果及び突き固め透水試験前後の粒度変化の一例を表 3.14.4 及び図 3.14.5 に示す。突き固めた銅スラグの透水係数は、 $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ cm/s 程度であり、突き固めにより透水係数は3割程度低下する。突き固め前後の粒度分布から、破碎の程度は低いことが分かる。

表 3.14.4 突き固めた銅スラグ (CUS-A) の透水試験結果の一例

名称	透水係数 (cm/s)		透水係数の 低下率(%)
	A-c 法	C-c 法	
CUS-A	1.57×10^{-3}	1.06×10^{-3}	32.5%

* 透水係数の低下率 = $(K_{Ac} - K_{Cc}) / K_{Ac} * 100$

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.14.5 突き固め透水試験前後の粒度変化 (CUS-A)

2) せん断抵抗角

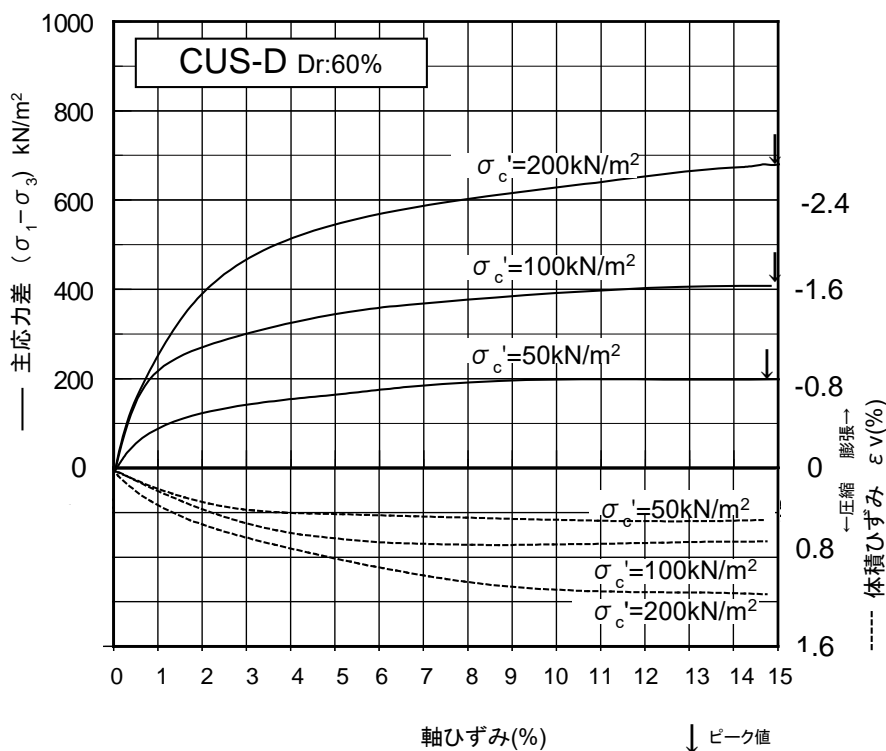
国内 5 製錬所の銅スラグの三軸圧縮試験 (CD 法)のせん断抵抗角 ϕ_d の一例を表 3.14.5 に示す。試験結果では、水砕品のせん断抵抗角 ϕ_d は $33^\circ \sim 35^\circ$ 程度 (平均 34.2°) であった。一方、加工品 (CUS-F) のせん断抵抗角 ϕ_d は 37.7° であった。

表 3.14.5 銅スラグの三軸圧縮試験 (CD 法)のせん断抵抗角 ϕ_d の一例

名称	スラグ種	$\Delta r=40\%$ ϕ_d ($^\circ$)	$\Delta r=60\%$ ϕ_d ($^\circ$)	$\Delta r=80\%$ ϕ_d ($^\circ$)
CUS-A	水砕品 CUS5-0.3	33.3	34.9	35.3
CUS-B			34.0	
CUS-C			34.3	
CUS-D			35.2	
CUS-E			32.6	
CUS-F	加工品 CUS2.5		37.7	

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

銅スラグ (水砕品)の応力-ひずみの関係を図 3.14.6 に示す。ピークの主応力差の発生位置が明確でなく、軸ひずみ 15%のときに生じていること、せん断中の体積ひずみがすべて圧縮側であることの 2 点が特徴的である。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.14.6 銅スラグの三軸圧縮試験 (CD 法)の応力ひずみの関係

(3) 化学的性質

銅スラグは鉄 (FeO)、シリカ (SiO₂) を主成分とし、その他に石灰 (CaO)、アルミナ (Al₂O₃) などを含有している。

(解説)

1) 化学成分

銅スラグの成分の範囲を表 3.14.6 に示す。また、国内 5 製錬所の銅スラグ成分の平成 22 年度実績値の一例を表 3.14.7 に示す。銅溶錬炉に装入する銅精鉱及び珪石の混合割合は、製錬条件の維持のため事前の調合により非常に安定していることから、副生する銅スラグの成分値も、ばらつきがなく安定している。

表 3.14.6 銅スラグの成分の範囲

化学成分	範囲
FeO	41～54%
SiO ₂	29～37%
CaO	1～8%
Al ₂ O ₃	2～6%

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

表 3.14.7 国内 5 製錬所の銅スラグ成分の平成 22 年度実績値の一例

製造所区分	測定値	JIS A 5011-3(コンクリート用スラグ骨材-銅スラグ骨材)規定成分				
		JIS 規定化学成分 (%)				塩化物量 (mg/L)
		酸化カルシウム (CaO)	全硫黄 (S)	三硫化硫黄 (SO ₃)	全鉄 (FeO)	
製造所 A (直島製錬所)	平均値	6.40	0.47	0.14	48.9	0.002
	最大	6.75	0.56	0.25	49.7	0.002
	最小	5.80	0.40	0.10	48.2	0.002
	標準偏差	0.86	0.04	0.04	0.57	0.000
製造所 B (小名浜製錬所)	平均値	4.93	0.56	-	44.27	0.006
	最大	5.89	0.66	-	47.5	0.013
	最小	3.98	0.50	-	41.8	0.002
	標準偏差	0.46	0.05	-	1.82	0.003
製造所 C (佐賀関製錬所)	平均値	2.4	0.55	0.11	49.2	<0.001
	最大	3.16	0.67	0.23	51.7	<0.001
	最小	1.45	0.46	0.04	47.4	<0.001
	標準偏差	0.55	0.066	0.054	1.11	-
製造所 D (玉野製錬所)	平均値	3.30	0.44	0.053	48.9	0.005
	最大	4.00	0.56	0.09	52.1	0.014
	最小	2.90	0.38	0.03	46.6	0.005
	標準偏差	0.31	0.053	0.017	1.3	0.004
製造所 E (東予工場)	平均値	1.54	0.28	0.003	49.1	0.001
	最大	2.16	0.47	0.16	51.1	0.004
	最小	0.88	0.05	0.003	47.1	<0.001
	標準偏差	0.34	0.10	0.02	0.84	0.001
JIS A 5011-3 規格値		≤12.0	≤2.0	≤0.5	≤70.0	≤0.03

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

銅スラグは、顕微鏡観察、X線回折及び示差熱分析の結果から、その大部分がガラス質と判定されている。鉄分は、珪酸塩鉱物（主に $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ファイアライト）が主であり、ほかに磁鉄鉱（ Fe_3O_4 ）及びヘマタイト（ Fe_2O_3 ）が微小な粒子として少量存在している。硫黄分は、輝銅鉱（ Cu_2S ）様の鉱物やはん銅鉱（ Cu_5FeS_4 ）様の鉱物として存在するが、その量は少ない。これらの鉄分及び硫黄分をはじめとする諸成分のほとんどがスラグのガラス中に安定した状態で存在しており、外部への溶出やセメントペーストとの反応はこれまで認められていない。また、銅スラグの塩基度（ CaO/SiO_2 ）は鉄鋼スラグに比べて著しく低いいため、鉄鋼スラグのような水硬性はない。

2) pH

溶出液の pH に関する、銅スラグのシリアルバッチ試験結果の一例を表 3.14.8 に示す。

pH の値は弱アルカリ性を示し、試験を繰り返したことによる pH の変化は認められなかった。

表 3.14.8 銅スラグの海水でのシリアルバッチ試験結果の一例

製造所区分	B		C		E		E	
出荷有姿	CUS5-0.3		CUS2.5		CUS2.5		CUS1.2	
溶媒：海水	pH	EC(mS/m)	pH	EC(mS/m)	pH	EC(mS/m)	pH	EC(mS/m)
1 回目	8.1	4880	8.2	4960	8.1	4790	8.1	4940
2 回目	8.1	4780	8.2	4820	8.2	4790	8.1	4840
3 回目	7.9	4710	8.0	4770	8.0	4850	8.0	4730
4 回目	8.0	4800	8.1	4830	8.0	4890	8.0	4770
5 回目	8.0	4850	8.1	4850	8.1	4940	8.1	4900
6 回目	8.0	4920	8.1	5000	8.0	4940	8.1	5060

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月

銅スラグの pH については、岩国港で実施された地盤改良（サンドコンパクションパイル工法）試験施工において、周辺海域の調査を行っている。その結果は表 3.14.9 に示すとおりであり、一般海水の pH と同等の値を示している。

表 3.14.9 地盤改良現地調査結果

測定 No	pH		
	最小	最大	平均
No. 1	7.9	8.2	7.9
No. 2	7.7	8.2	8.0
No. 3	8.0	8.1	8.1
No. 4	8.1	8.3	8.2
No. 5	8.0	8.3	8.2

出典) 国土交通省中国地方整備局宇部港湾工事事務所における試験施工データ

3) 環境安全品質

① 溶出量

銅スラグに関して、環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-1 による溶出量試験を行った結果の一例を表 3.14.10 に示す。全ての項目について、基準値未満または定量限界未満であった。

表 3.14.10 銅スラグの溶出量試験結果の一例

単位：mg/L

製造所区分	A	B	C	D	E	基準値 (一般用途)	基準値 (港湾用途)
骨材種類	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3		
カドミウム	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	≦0.003	≦0.009
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
六価クロム	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	≦0.05	≦0.15
ヒ素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	≦0.0005	≦0.0015
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
ほう素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦1.0	≦20
ふっ素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦0.8	≦15

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

銅スラグを構成する主成分は、酸化鉄、酸化珪素、酸化カルシウム、酸化アルミニウムであるが、原料である銅精鉱に由来する重金属類(鉛、カドミウム、ヒ素など)を微量に含有する。一方、有機化合物の含有は皆無である。

なお、銅スラグの使用に際しては有害物質の溶出について、使用を予定している事業所に詳細を確認し、必要に応じて試験を行うことが推奨される。

② 含有量

銅スラグの含有量試験結果の一例を表 3.14.11 に示す。六価クロム、水銀、ほう素、ふっ素は定量限界未満であった。一方、ひ素と鉛は、一般用途における基準値より高くなっていた。

以上のことから、一般用途として使用する場合は、他材料との混合利用が前提となる。一方、含有量に関する基準が適用されない港湾用途においてはそのまま使用することができる。ただし、含有量に関する基準値の 10 倍未満であることを確認されたものを使用する。

表 3.14.11 銅スラグの含有量試験結果の一例

単位 mg/kg

製造所区分	A	B	C	D	E	基準値 (一般用)
骨材種類	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	
カドミウム	34	< 15	< 15	< 15	< 15	≦ 150
鉛	630	940	230	200	440	≦ 150
六価クロム	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25	≦ 250
ひ素	270	50	390	250	230	≦ 150
水銀	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	≦ 15
セレン	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	≦ 150
ほう素	< 400	< 400	< 400	< 400	< 400	≦ 4,000
ふっ素	< 400	< 400	< 400	< 400	< 400	≦ 4,000

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

③ 留意事項

銅スラグの原料である銅精鉱は、年々、主成分である銅の品位が低下し、一方で、重金属類などの不純物の品位が上昇傾向にある。

従って、銅スラグの使用にあたり、有害物質の溶出による周辺環境への影響を、銅スラグの製造者に適宜確認し、工事施工場所周辺への環境影響を確実に抑えることが必要である。

3.14.3 適用用途

(1) 概要

JIS規格が規定されている銅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銅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、銅スラグを各用途に利用する場合の評価を行った結果を表3.14.12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 3.14.12 銅スラグの適用用途

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	◎	A	<p>●既に当該用途を想定した品質基準が設けられている。</p> <p>【主な内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1)コンクリート用骨材(細骨材)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)コンクリート用細骨材として使用する際の設計施工指針として、品質、環境安全性、性能照査、材料の設計値、配合設計、製造、施工、品質管理および検査などについて記載。 ・6)JIS A 5011-3に適合した銅スラグ骨材について、消波ブロック等の無筋コンクリートだけでなく、構造用の鉄筋コンクリートにも適用し、特に、非鉄スラグの密度が大きい特徴を生かしたケーソン本体等の構造用の重量コンクリートにも適用することができる 	<p>●利用実績が多い、または汎用性が高い。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・道路擁壁部本体築造工事(国交省) ・防波堤消波ブロック製作据付工事(国交省) ・防波堤被覆、根固、根固外工事(国交省) ・護岸被覆及び根固工事(国交省) 	1) 2) 6)	
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 パーチメントレン及びサントマット材	-	-	●用途対象外	b	<p>●利用実績はあるが、限定される。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・岸壁等築造工事(国交省) ・埋立護岸工事(管理者) 	
⑤ サントコンパクションバインダ材	○+	B	<p>●利用マニュアル案等が整備されている。</p> <p>【主な内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・6)銅スラグの地盤改良工への適用が挙げられ、銅スラグの物理的特性値等を踏まえた適用性が評価されている。 ・3)～5)に示す研究等適用事例に基づき、標準材料と同等または利用実績や実証実験などで確認され、利用可能性は高い。【査読無し】 	b	<p>●利用実績はあるが、限定される。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地盤改良工事(国交省) ・岸壁築造工事(国交省) 	3) 4) 5) 6)
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	◎	B	<p>●利用マニュアル案等が整備されている。</p> <p>【主な内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・6)銅スラグの本体工中詰材への適用が挙げられ、銅スラグの物理的特性値等を踏まえた適用性が評価されている。 ・現行指針においては、研究等適用事例に基づき、標準材料と同等または利用実績や実証実験などで確認され、利用可能性は高い。 	a	<p>●利用実績が多い、または汎用性が高い。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国際物流ターミナル整備事業(国交省) ・岸壁築造工事(国交省) ・防波堤築造工事(国交省) 	6)
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	○+	B	<p>●利用マニュアル案等が整備されている。</p> <p>【主な内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・6)JIS A 5011-3に適合した銅スラグ骨材について、消波ブロック等の無筋コンクリートに適用するとされている。 	b	<p>●利用実績はあるが、限定される。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・護岸整備工事(管理者) ・消波ブロック工事(その他機関) 	6)
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	b	<p>●利用実績はあるが、限定される。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・埋立築堤工事(その他機関) ・空港土木工事(その他機関) 	
⑬ 埋立柱	-	-	●用途対象外	-	●利用実績なし	
⑭ 路床盛土材	-	-	●用途対象外	b	<p>●利用実績はあるが、限定される。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・道路沈埋トンネル工事(国交省) 	
⑮ 路盤材	-	-	●用途対象外	b	<p>●利用実績はあるが、限定される。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ふ頭岸壁外(災害復旧)工事(国交省) ・舗装工事(その他機関) 	
⑯ As舗装骨材、Asフィラー材	○+	B	<p>●利用マニュアル案等が整備されている。</p> <p>【主な内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・6)表・基層用加熱アスファルト混合物用として、天然砂との混合物(舗装用銅スラグスクリーニングス)について、マニュアルに粒度等が規定されている。 	b	<p>●利用実績はあるが、限定される。</p> <p>【主な工事】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・舗装試験(その他機関) ・エコ工法推進モデル事業(管理者) 	6)
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) JISA5011-3「コンクリート用スラグ骨材-第3部：銅スラグ骨材」(平成28年4月改正)
- 2) 銅スラグ細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28年7月)
- 3) 銅スラグ(CUS)の基本物性試験報告書：三菱マテリアル(株)
- 4) 銅水砕スラグを用いたSCP改良地盤の支持力について(第30回地盤工学発表会、平成7年)
- 5) 銅水砕スラグを用いたSCP工法の試験施工(土木学会論文集、No574、1997、9)
- 6) 港湾空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル(平成27年9月、(一財)沿岸技術研究センター)

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

銅スラグ細骨材は、コンクリート用の細骨材としてJIS化され、土木学会「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針（以下、設計施工指針）」に銅スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計及び施工についての標準が示されている。また、重量コンクリート用細骨材として、平成26年3月にはNETISに登録されている（登録番号：SKK-130002-A）。

銅スラグ細骨材の密度は、一般の天然産骨材に比べて大きい。砂や砕砂の30%程度を銅スラグ細骨材で置換する場合、コンクリートの性状や品質は通常のコンクリートと大差ない。一方、銅スラグ細骨材の密度が大きいことを利用した単位容積質量の大きいコンクリートは、港湾構造物では有利になる場合が多い。しかし、微粒分の少ない銅スラグ細骨材を使用したコンクリートの場合、ブリーディング量が増加する傾向にあり、コンクリートのワーカビリティや耐久性の観点から、これを抑制する必要がある。

設計に当たっては、土木学会「コンクリート標準示方書」、「設計施工指針」が参考になる。また、銅スラグ細骨材及び銅スラグ細骨材を使用したコンクリートの品質、工法等について参考とできる文献を巻末の参考文献1)～13)に示す。

(3) サンドコンパクションパイル材

銅スラグをサンドコンパクションパイル工法に適用する際には、必要な性能が得られるかを設計時に検討する必要がある。この際、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の、第4編施設編 第2章 4.地盤改良 4.9 サンドコンパクションパイル工法（砂質土地盤を対象とする場合）及び4.10 サンドコンパクションパイル工法（粘性土地盤を対象とする場合）を参照することができる。

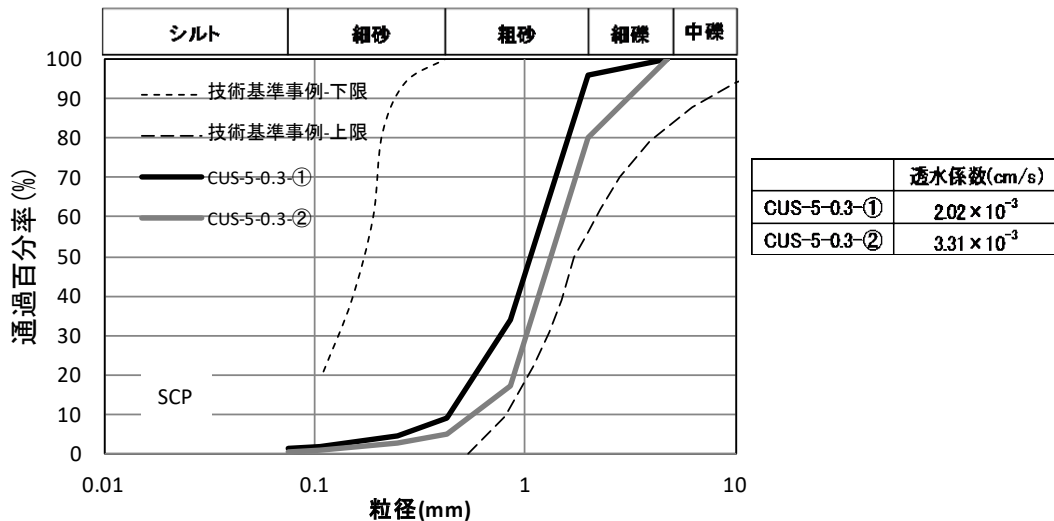
銅スラグは天然の砂と同程度のせん断強度を有することが確認されている。また、透水性は、いずれも $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度であり、潜在水硬性がないことから固結による透水係数の低下も生じにくい。

以下、実施工で得られた結果を中心に、材料の特性値について述べる。

a) 粒度

図 3.14.7 に SCP 材として用いられた粒度分布の既往事例（「港湾の施設の技術上の基準・同解説」）との比較を示す。銅スラグは、比較的均等な粒径分布を有するものがほとんどである。この特徴を踏まえて検討を行う必要がある。

沖積粘性土地盤における試験施工において、SCP 後で杭部 2ヶ所の深度から採取した試料の粒度分布を調査し、施工前との比較を行っている。施工前に比べ、施工後のいずれの深度においても若干の細粒化が見られた。ただし、この際の改良効果について N 値を調べたところ、十分な改良効果が得られている。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.14.7 SCP 材に用いられた粒度分布の既往事例との比較

b) 透水性

銅スラグの透水係数は、粒度によって異なる。図 3.14.7 中に透水係数の値を示しているが、いずれも 10^{-3}cm/s 程度であり、透水性が良いと判断される値であった。また、銅スラグには水硬性がないため透水性が経時的に低下することもない。

c) せん断強度

銅スラグは、粒子形状が角張っているため高いせん断抵抗角が得られる。沖積粘性土地盤における試験施工の結果では、銅スラグは天然の砂と同程度のせん断抵抗角が得られ、粒子破砕が生じた試料を用いた試験でもせん断特性が大きく変化することはないとされている。また、水硬性を持たないため、せん断特性についての経時的な変化もない。

水砕品で $\phi_d=34^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ の場合)、加工品で $\phi_d=38^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ の場合) の値を有しており、SCP 材として用いるには十分な値を有していると考えられる。

地盤改良工の環境安全品質の評価の際には、溶出経路を考慮した上で検査方法 (試験項目、環境、安全品質基準) を設定する必要がある。

(4) 中詰材

1) 共通事項

銅スラグの中詰材としての適用については、既に多数の利用実績がある。銅スラグを中詰材に用いる構造物の設計は、材料の特性をよく把握した上で、天然の材料との違いに注意しながら「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に示される天然の砂や砂利を対象とした方法によって行う。必要な性能が得られているかを照査する際には、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」の、第 4 編施設編 第 2 章 1.2 ケーソン 第 5 章 2.7 二重矢板式係船岸 2.9 根入れを有するセル式係船岸、

2.10 置きセル式係船岸などを参照することができる。

銅スラグには、天然の砂に比べ単位体積重量が大きく、せん断抵抗角は同程度という特徴がある。また、水硬性のような特有の性質もないため、中詰材としてその特性を有効に活用するならば、天然の砂を用いた場合よりも経済的な設計をすることが期待できる。

以下、材料の特性値について述べる。

a) 土粒子密度及び単位体積重量

銅スラグ粒子は密度が大きいため、天然の砂よりも大きな単位体積重量を示す。水砕品で、概ね 23.5 kN/m^3 の値を有している。なお、粒度分布の影響も大きく受ける。粒度が良いと、単位体積重量が大きくなる。このため、加工品では概ね 25.0 kN/m^3 となる。

利用に際しては、実際に使用する銅スラグの性質をよく把握して適切な値を設定する必要がある。

b) せん断強度

水砕品で $\phi_d=34^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ の場合)、加工品で $\phi_d=38^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ の場合) を有しており、本土工中詰材として用いるには十分な値を有していると考えられる。

本土工中詰材の環境安全品質の評価の際には、試験項目は溶出量、環境安全品質基準は港湾用途としてよい。

2) ケーソン中詰材として利用する場合の設計

ケーソンは重力式構造物であるため、中詰材には銅スラグのように重量の大きな材料を用いた方が、設計上有利になる場合が多い。銅スラグを既設の防波堤に使用すれば、設計波高が大きくなり、新設の防波堤に使用すれば、ケーソン幅が狭くなり経済的になることが確認された。ただし、重量が大きい分、内部土圧も大きくなる。この内部土圧の計算は、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に準じて行う。

3) セル及び二重矢板式構造物の中詰材として利用する場合の設計

銅スラグをセル及び二重矢板式構造物の中詰材として利用する場合には、重量の大きな材料を用いると、せん断変形に対する安定性と重力式壁体としての安定性が高くなり有利となる場合が多い。但し、中詰重量が大きい分セルや矢板の張力は大きくなる。

また、せん断抵抗角の大きな材料を用いた場合にも、せん断変形に対する抵抗モーメントを高めることになり、経済的な設計を得ることができる場合が多い。

内部土圧の計算は、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に準じて行う。

(5) 根固・消波ブロック

銅スラグをコンクリート用細骨材として利用する場合、根固・消波ブロックに利用することができる。なお、銅スラグを利用した被覆石の製造は行われていない。

(6) アスファルト舗装骨材

舗装用銅スラグは、表・基層のアスファルト混合物やコンクリートの骨材として使用される。コンクリート舗装は、「舗装設計施工指針」「舗装設計便覧」「舗装施工便覧」「フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」「港湾・空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル」等を参考にするとよい。

舗装用銅スラグの密度は、一般の天然砂や碎石の値（約2.7g/cm³）に比べて1.3倍程度大きい。このことから、アスファルト混合物の配合設計では容積配合を行うものとし、施工では締固め時の基準密度などに十分留意する必要がある。

銅スラグは、単味では環境安全基準を満たさない場合があるので、銅スラグ単味での使用を規制している。しかし、通常の天然砂と混合すれば十分に基準を満たすことができる。この場合、表 3.14.13 に示すように表層・基層の加熱アスファルト混合物、及び上層路盤の加熱アスファルト安定処理材の銅スラグスクリーニングスとして使用する。

表 3.14.13 舗装用銅スラグスクリーニングスの主な用途

種類	呼び名	主な用途
銅スラグスクリーニングス	FC-2.5	表層・基層用加熱アスファルト混合物

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月）

3.14.4 関連法令

銅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。

3.14.5 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)

銅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。

銅スラグ骨材をコンクリート、アスファルト混合材用の骨材に使用する場合は、利用模擬試料で環境安全性を評価している。再利用に際しても同様の対応が必要である。廃棄する場合は、環境安全性を評価しての対応が必要である。

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。

3.15 フェロニッケルスラグ

3.15.1 製造・供給

フェロニッケルスラグは、フェロニッケル製錬の際にロータリーキルンまたは電気炉で発生する半溶融あるいは溶融したスラグを冷却し、破碎・粒度調整を行ったものであり、現在は、3 製造所で製造されている。

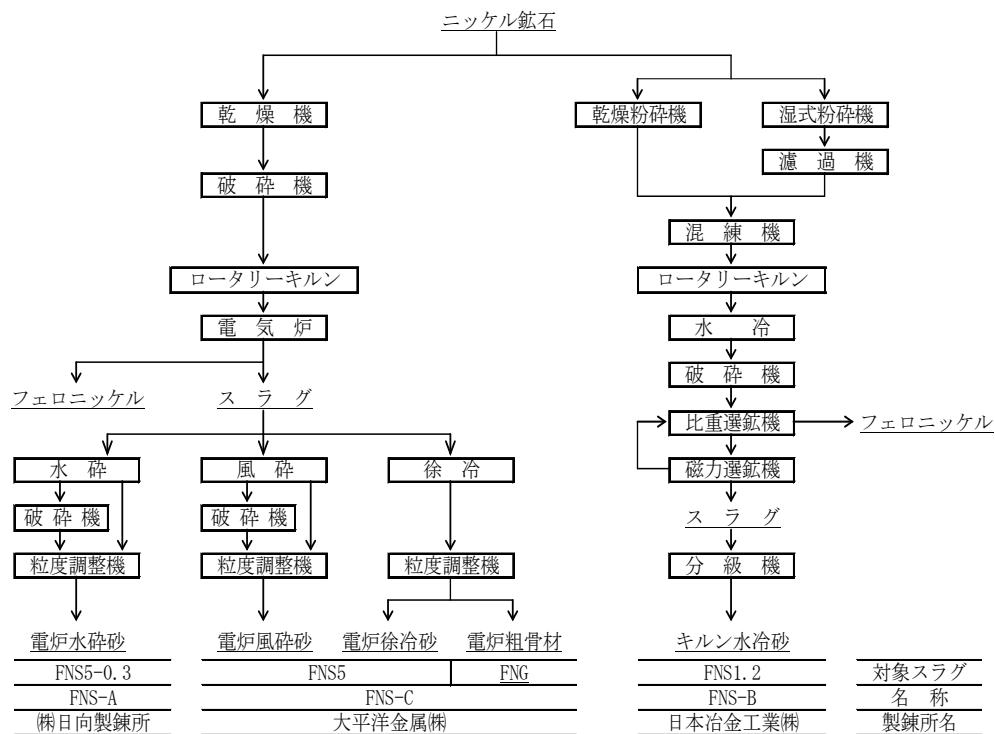
(解説)

(1) 製造方法

フェロニッケルスラグの製造工程を図 3.15.1 に示す。フェロニッケルスラグは、フェロニッケル製錬法の違いにより、半溶融あるいは溶融状態のスラグを主に3種類の冷却法により冷却することから、スラグ形状は異なり、また、破碎法も各製造所にて異なることから、フェロニッケルスラグの性質にはそれぞれの特徴がある。

ロータリーキルンからは、半溶融のスラグを水で急冷したロータリーキルン水砕スラグが製造されている。ロータリーキルンで半溶融状態のスラグを水で急冷した後に破碎し、それらの破碎物からフェロニッケルを選別・回収した後のフェロニッケルスラグを沈降分級により粒度調整して製品化される。

電気炉からは、溶融したスラグを加圧空気による急冷、スラグピットにおける徐冷及び水冷の3種類の冷却工程によりフェロニッケルスラグが製造されている。電気炉で溶融状態のスラグを加圧空気による急冷したスラグは丸みを帯びた球状、スラグピットで徐冷したスラグは塊状、水砕したスラグは粒状を呈しており、破碎及び粒度調整して製品化される。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.1 フェロニッケルスラグ製造工程

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

東北、関東、中部、近畿、中国、四国、九州

2) 事業所の立地場所



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月) より作成

図 3.15.2 フェロニッケルスラグ製造所(フェロニッケル精錬所)の立地場所

3) 生産量

フェロニッケルスラグ : 約 250,000t/月

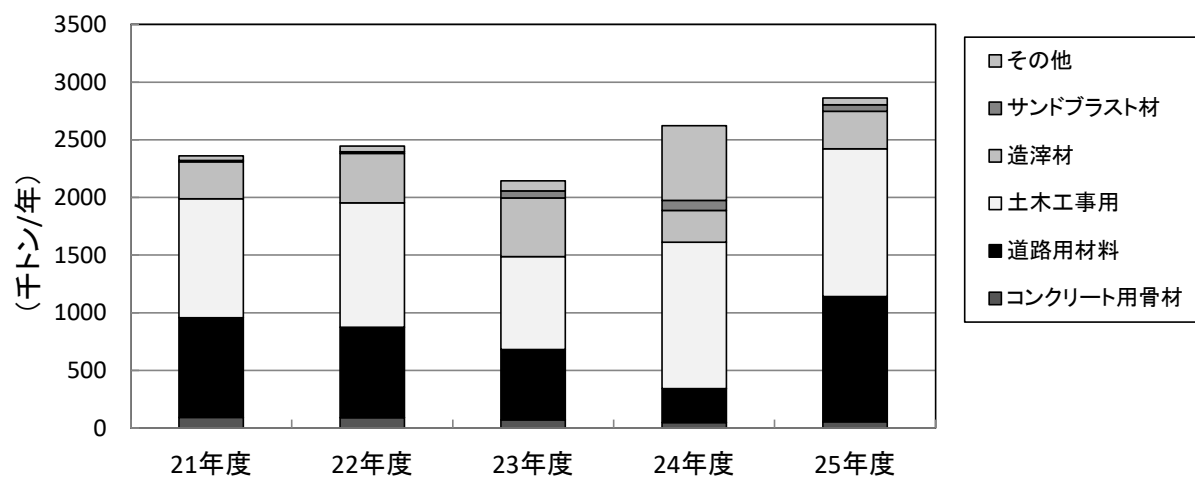


図 3.15.3 フェロニッケルスラグの販売実績の推移

3.15.2 品質

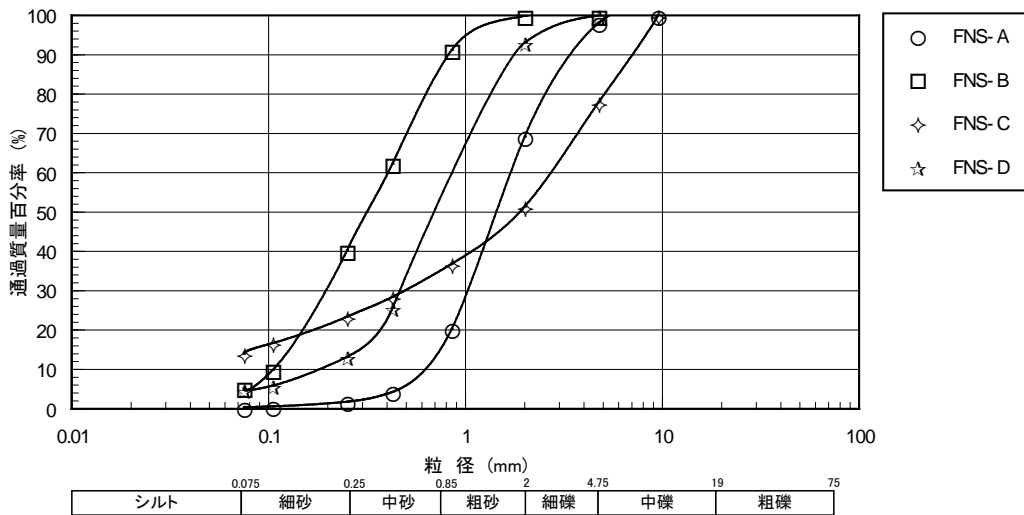
(1) 物理的性質

- 1) 粒度は、水砕スラグ及び風砕スラグは 5mm 以下で比較的単粒度であるが、破碎した徐冷スラグの粒度範囲は 10mm から 0.1mm まで広い傾向にある。
- 2) 土粒子密度は 3.0~3.2g/cm³ であり、一般的な砂 (2.7g/cm³) に比べ大きい。
- 3) フェロニッケルスラグを水中投入した際の堆積後の飽和単位体積重量は、概ね水砕品で 20.5kN/m³、加工品で 23.5kN/m³ である。

(解説)

1) 粒度

フェロニッケルスラグの代表的な粒度試験の一例を図 3.15.4 に示す。粒度は、製造所あるいは冷却法及び破碎法により異なる。FNS-A (水砕スラグ)、FNS-B (水冷スラグ) 及び FNS-C (風砕スラグ) は 5mm 以下で比較的単粒度であるが、破碎した FNS-C (徐冷スラグ) の粒度範囲は 10mm から 0.1mm まで広い傾向にある。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.4 フェロニッケルスラグの粒度試験例

代表的な粒径と均等係数の一例を表 3.15.1 に示す。

表 3.15.1 フェロニッケルスラグの粒径と均等係数の一例

名称	対象スラグ	60%粒径 D ₆₀ (mm)	平均粒径 D ₅₀ (mm)	10%粒径 D ₁₀ (mm)	均等係数 U _C
FNS-A	FNS5-0.3	1.69	1.39	0.64	2.64
FNS-B	FNS1.2	0.40	0.33	0.11	3.64
FNS-C	風砕 FNS5	0.92	0.77	0.20	4.60
	徐冷 FNS5	2.77	1.94	0.042*	66 以上

*推定値

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

2) 土粒子密度

フェロニッケルスラグの土粒子密度、最大・最小密度試験（測定例）を表 3.15.2 に示す。フェロニッケルスラグの土粒子密度は $3.0\sim 3.2\text{g/cm}^3$ であり、一般的な砂 (2.7g/cm^3) に比べ 14%程度大きい。またフェロニッケルスラグの最小乾燥密度は水砕品で $1.41\sim 1.49\text{g/cm}^3$ 、加工品で 1.73g/cm^3 であり、最大乾燥密度は水砕品で $1.71\sim 1.91\text{g/cm}^3$ 、加工品で 2.32g/cm^3 である。

表 3.15.2 フェロニッケルスラグの土粒子密度、最大・最小密度試験結果の一例

名称	対象スラグ	土粒子密度 (g/cm^3)	最小密度 (ρ_{dmin}) (g/cm^3)	最大密度 (ρ_{dmax}) (g/cm^3)	Dr60%乾燥密度 (ρ_d) (g/cm^3)
FNS-A	FNS5-0.3	2.984	1.41	1.71	1.58
FNS-B	FNS1.2	3.107	1.49	1.91	1.72
FNS-C	風砕 FNS5	3.128	1.66	2.05	1.87
	徐冷 FNS5	3.193	1.73	2.32	2.04

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

3) 飽和単位体積重量

ケーソン等の本体工への中詰材の投入を模擬したフェロニッケルスラグを用いた水中落下実験を実施し、相対密度は水砕品で 49~56%、加工品で 53~68%であることが確認されている。この範囲における飽和単位体積重量 γ_{sat} の試算の結果、水砕品で $20.2\sim 21.0\text{kN/m}^3$ (平均 20.6kN/m^3) 程度、加工品で $23.1\sim 23.8\text{kN/m}^3$ (平均 23.4kN/m^3) 程度となった。

なお、現在、中詰材の飽和単位体積重量の品質管理方法としては、水を張った容器に中詰材を投入し、その際の単位体積重量を測定する方法（軽装法と一般的に呼ばれる）で行われている場合が多い。

(2) 力学的性質

- 1) 透水係数は、Dr60%の状態では $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度である。
- 2) 水砕品のせん断抵抗角 ϕ_d は 32° 程度である。一方、加工品のせん断抵抗角 ϕ_d は 37° 程度である。
- 3) フェロニッケルスラグの締固め特性は、フェロニッケルスラグの種類（冷却法及び粒度）により異なる特性を示す。
- 4) フェロニッケルスラグの膨張・収縮性は認められていない。
- 5) フェロニッケルスラグの水硬性は認められていない。

(解説)

1) 透水性

フェロニッケルスラグの透水試験結果(例)を表 3.15.3 に示す。透水係数は、Dr60%の状態では $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であった。この透水係数の差異は粒度分布の範囲及び細粒分量(0.075mm以下)の影響による。

表 3.15.3 フェロニッケルスラグの透水試験結果の一例

名称	対象スラグ	透水係数 k(cm/s)	10%粒径 D ₁₀ (mm)	試験時の ρ _d (g/cm ³) (Dr60%)
FNS-A	FNS5-0.3	5.08×10 ⁻³	0.64	1.58
FNS-B	FNS1.2	1.62×10 ⁻⁴	0.11	1.77
FNS-C	風砕 FNS5	2.19×10 ⁻⁴	0.20	1.87
	徐冷 FNS5	2.04×10 ⁻⁵	0.042*	2.04

*推定値

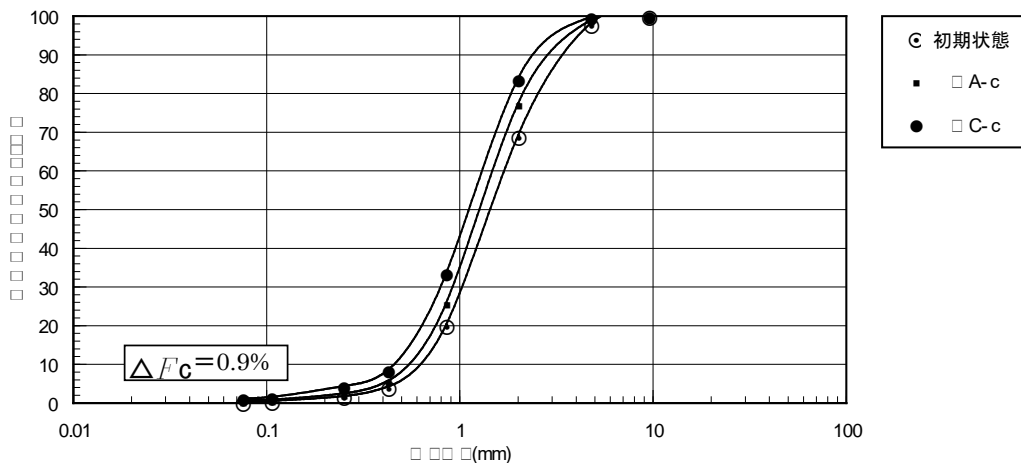
出典) 港湾空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 27 年 9 月)

突固めたフェロニッケルスラグの透水試験結果、突固め透水試験前後の粒度変化を表 3.15.4、図 3.15.5 に示す。突き固めたフェロニッケルスラグの透水係数は、FNS-A (水砕スラグ) が 1~2×10⁻³cm/s、FNS-C (風砕スラグ) が 2~6×10⁻⁵cm/s であり、突き固めにより透水係数は 4~6 割程度低下する。突き固め前後の粒度分布から、破碎の程度は低いことが分かる。

表 3.15.4 突固めたフェロニッケルスラグの透水試験結果の一例

名称	対象スラグ	透水係数(cm/s)		透水係数の 低下率(%)
		A-c 法	C-c 法	
FNS-A	FNS5-0.3	1.46×10 ⁻³	8.68×10 ⁻⁴	40.5
FNS-C	風砕 FNS5	5.83×10 ⁻⁵	2.16×10 ⁻⁵	63.0

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.5 FNS-A (水砕スラグ) の突固め透水試験前後の粒度変化

2) せん断抵抗角

フェロニッケルスラグの三軸圧縮試験 (CD 法) のせん断抵抗角 φ_d (例) を表 3.15.5 に示す。試験結果では、水砕処理後、粒度調製加工を施していない FNS-A (水砕スラグ) のせん断抵抗角 φ_d は 30

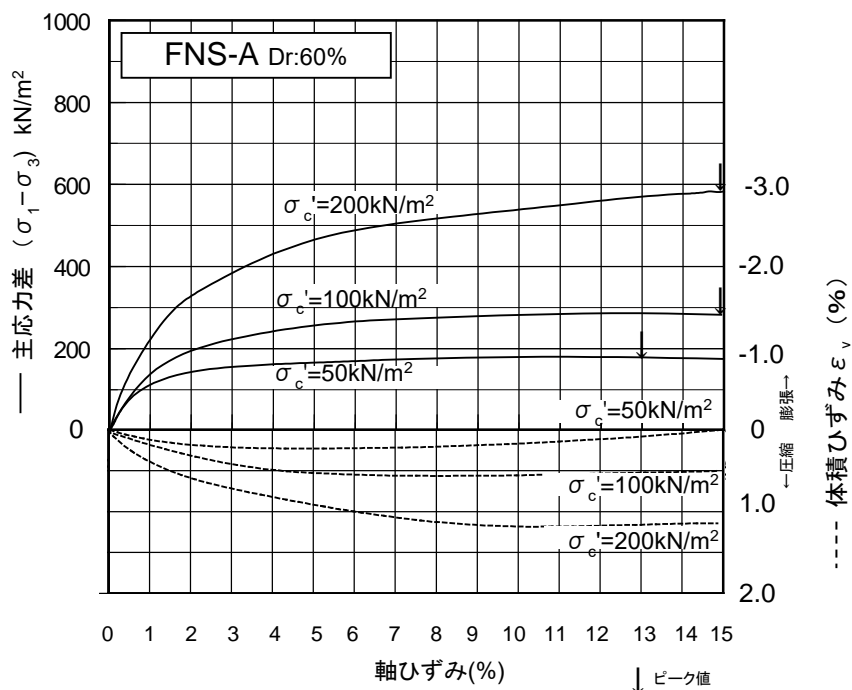
～33° 程度 (Dr=60%で 32.2°) であった。一方、水冷、風砕あるいは徐冷処理後、粒度調製加工を施した FNS-B (水冷スラグ)、FNS-C (風砕・徐冷スラグ) のせん断抵抗角 ϕ_d は 37° ～39° 程度 (Dr=60% で平均 37.8°) であった。

表 3.15.5 フェロニッケルスラグの三軸圧縮試験 (CD 法) のせん断抵抗角 ϕ_d の一例

名称	対象スラグ	Dr=40% ϕ_d (°)	Dr=60% ϕ_d (°)	Dr=80% ϕ_d (°)
FNS-A	FNS5-0.3	30.4	32.2	32.5
FNS-B	FNS1.2	—	36.9	—
FNS-C	風砕 FNS5	—	38.5	39.0
	徐冷 FNS5	—	38.0	—

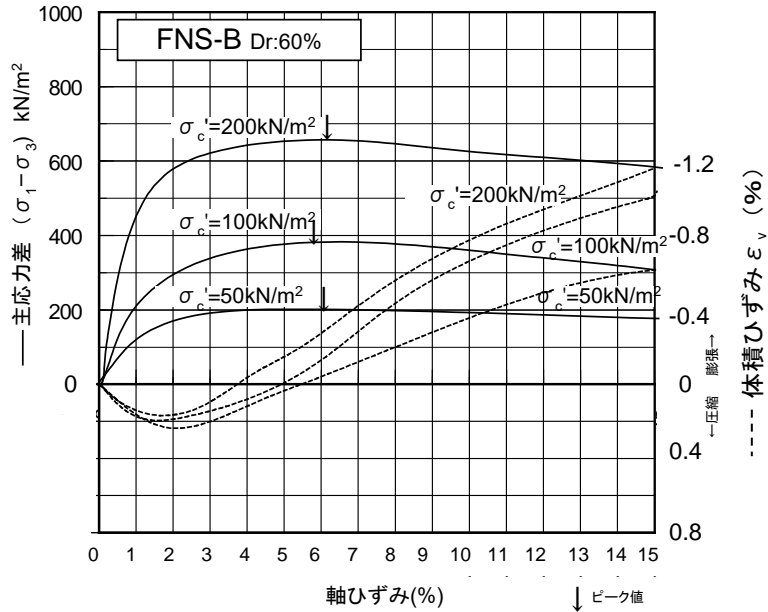
出典) 港湾空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル (一財) 沿岸技術研究センター、平成 27 年 9 月)

水砕処理後、粒度調製加工を施していない FNS-A (水砕スラグ) の応力ひずみの関係を図 3.15.6 に示す。ピークの主応力差の発生位置が明確でなく、軸ひずみ 15% のときに生じていること、せん断中の体積ひずみが全て圧縮側であることの 2 点が特徴的である。次に水冷処理後、粒度調製加工を施した FNS-B (水冷スラグ) の応力ひずみの関係を図 3.15.7 に示す。主応力差のピーク値が明確であり、せん断中に正のダイレイタンスが生じ、体積ひずみが膨張側に移行している。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.6 FNS-A (水砕スラグ) の三軸圧縮試験 (CD 法) の応力ひずみの関係



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

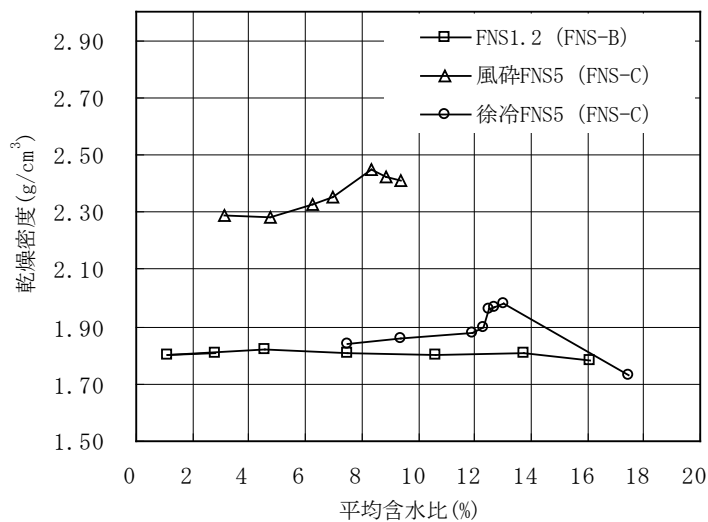
図 3.15.7 FNS-B (水冷スラグ) の三軸圧縮試験 (CD 法) の応力ひずみの関係

3) 締固め特性

フェロニッケルスラグの突固めによる土の締固め試験例及び修正 CBR 試験例を図 3.15.8、図 3.15.9、図 3.15.10 に示す。

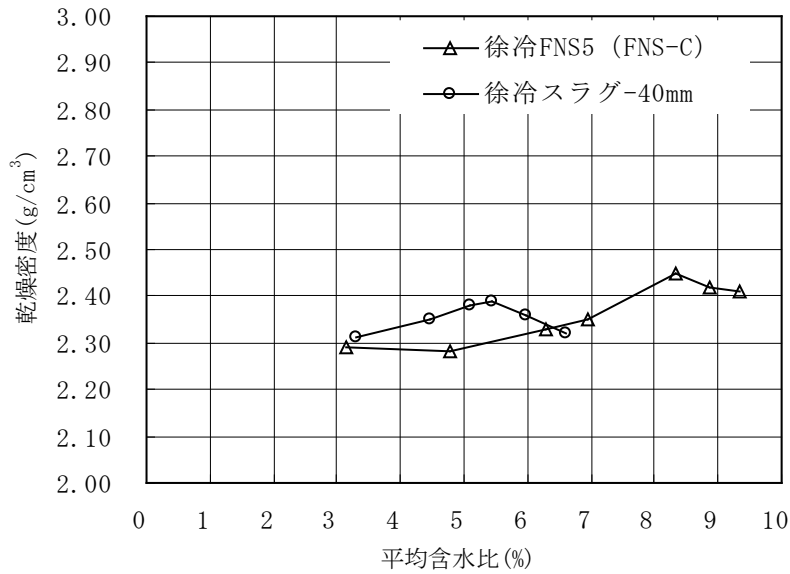
FNS-B (水冷スラグ) の締固め度 (A-c) は、含水比の影響をほとんど受けないが、FNS-C (徐冷スラグ) の締固め度 (E-c) 及び FNS-C (風砕スラグ) の締固め度 (A-b) は、含水比の影響を受け、最適含水比も粒度により異なる。

試験例に述べた修正 CBR 試験値は比較的高い値を示しており、盛土関連への用途が広くとれる。また、FNS-B (水砕スラグ) の修正 CBR 値は 33.8%であった。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.8 フェロニッケルスラグの突固めによる土の締固め試験例



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.9 フェロニッケルスラグの突固めによる土の締固め試験例

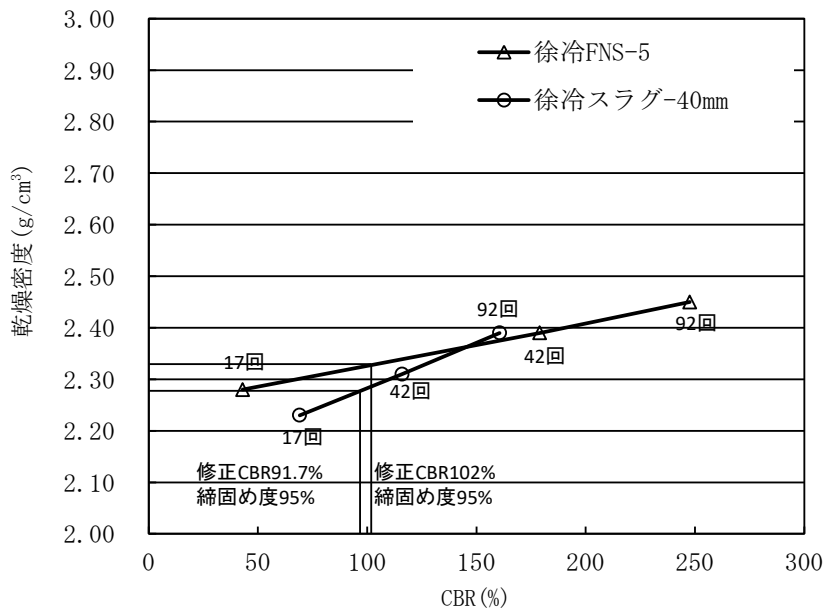


図 3.15.10 修正 CBR 試験例

4) 膨張性

膨張性がないことは、フェロニッケルスラグがエンスタタイト ($MgSiO_3$) やフォルステライト ($2MgSiO_4$) などの鉱物やガラス質から構成されており、膨張の原因となりやすい CaO や MgO が単独で存在しないためと考えられる。

5) 水硬性

膨張性がない理由と同様に、フェロニッケルスラグは CaO 及び MgO が単独で存在しないため、水和反応が起こらず水硬性が認められない。

(3) 化学的性質

フェロニッケルスラグの主な成分は、珪砂(SiO₂)、マグネシア(MgO)が主成分で、鉄(FeO)、酸化カルシウム(CaO)を少量含む。

(解説)

1) 化学成分

フェロニッケルスラグは、ニッケル鉱石(酸化鉱)を原料として、フェロニッケル製錬時に副産物として製造されるものである。フェロニッケルスラグの成分分析例をスラグ品種毎に示すが、各スラグの成分は似通っている。その他、Cr化合物及びAl₂O₃を含有している。

なお、徐冷及び急冷のいずれの場合も主な鉱物組成は安定した結晶構造である。

表 3.15.6 国内3製錬所のフェロニッケルスラグ化学成分の平成22年実績値の一例

単位：%

名称	対象スラグ	測定値	CaO	MgO	S	FeO	M.Fe	SiO ₂	Ni
FNS-A	FNS5-0.3	平均値	0.57	32.8	0.03	7.08	0.17	53.0	0.06
		最大	0.79	33.5	0.04	8.45	0.23	53.6	0.07
		最小	0.43	31.4	0.02	6.62	0.14	52.6	0.05
		標準偏差	0.11	0.64	0.00	0.50	0.03	0.26	0.01
FNS-B	FNS1.2	平均値	4.41	28.3	0.06	6.29	0.83	55.2	0.25
		最大	5.23	29.1	0.07	8.40	0.99	56.8	0.34
		最小	3.44	27.6	0.05	5.41	0.63	54.5	0.22
		標準偏差	0.68	0.44	0.00	0.91	0.11	0.61	0.03
FNS-C	風砕 FNS5 徐冷 FNS5	平均値	2.18	34.0	0.04	6.70	0.24	52.5	0.05
		最大	2.59	35.1	0.05	7.65	0.34	53.6	0.06
		最小	1.89	33.1	0.03	5.67	0.17	51.9	0.04
		標準偏差	0.24	0.46	0.01	0.54	0.05	0.48	0.01
JIS A 5011-2 規格値			≤15.0	≤40.0	≤0.5	≤13.0	≤1.0	—	—

出典) 港湾空港工事における非鉄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9月)

2) 環境安全品質

① 溶出量

フェロニッケルスラグに関して、環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-1による溶出量試験を行った結果の一例を表 3.15.7 に示す。すべて一般用途及び港湾用途の基準値未満または定量限界未満であった。

表 3.15.7 フェロニッケルスラグの溶出量試験結果一例

単位：mg/L

名称	FNS-A	FNS-B	FNS-C		基準値 (一般用途)	基準値 (港湾用途)
			風砕 FNS-5	徐冷 FNS-5		
対象スラグ	FNS-5-0.3	FNS-1.2				
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.003	≦0.009
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
六価クロム	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	≦0.05	≦0.15
ひ素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	≦0.0005	≦0.0015
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
ほう素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦1.0	≦20
ふっ素	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	≦0.8	≦15

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

② 含有量

フェロニッケルスラグに関して、環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-2 に基づく含有量試験値の一例を表 3.15.8 に示す。すべて基準値未満、定量限界未満であった。

表 3.15.8 フェロニッケルスラグの含有量試験結果の一例

単位：mg/kg

名称	FNS-A	FNS-B	FNS-C		基準値 (一般用途)
			風砕 FNS5	徐冷 FNS5	
対象スラグ	FNS5-0.3	FNS1.2			
カドミウム	<15	<15	<15	<15	≦150
鉛	<15	<15	<15	<15	≦150
六価クロム	<25	<25	<25	<25	≦250
ひ素	<15	<15	<15	<15	≦150
水銀	<1	<1	<1	<1	≦15
セレン	<15	<15	<15	<15	≦150
ほう素	<400	<400	<400	<400	≦4,000
ふっ素	<400	<400	<400	<400	≦4,000

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

③ 海洋生物への影響

フェロニッケルスラグ細骨材の細骨材混合率を変化させたコンクリート試料を宮崎県延岡湾赤水町漁港、京都府宮津湾内の護岸に固定して付着生物の着床を観察した結果、海洋生物への影響は認められないことが確認された。

京都府宮津湾内での海洋曝露試験結果について以下に示す。試験は、フェロニッケルスラグ (FNS-B) を骨材に用いてコンクリート付着板を作成し、海水中に浸漬させ、付着生物 (動物・植物) の着床状

況の比較から、海洋生物への影響程度を確認した。

表 3.15.9 に付着板の配合比を示す。

表 3.15.9 付着板の配合比

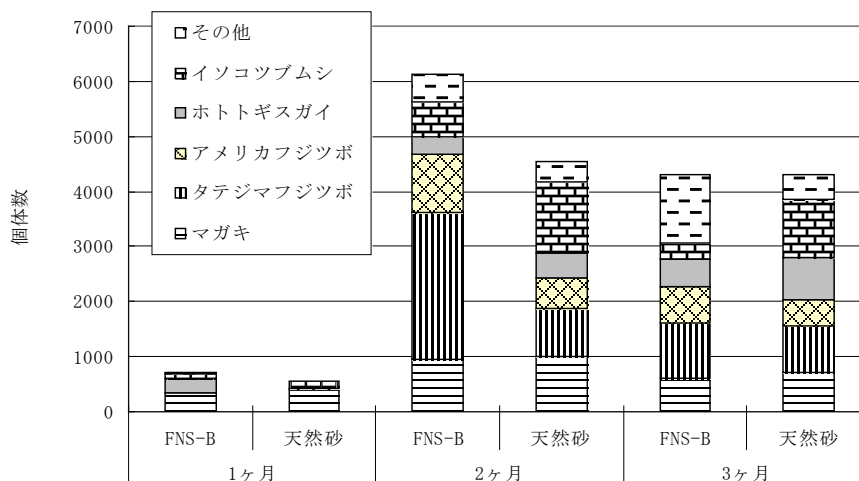
	FNS-B	天然砂
川砂	42	84
FNS-B	42	0
普通セメント	16	16

付着板の寸法：縦 34 cm×幅 21 cm×厚み 5 cm

表面積：表面（粗面）714 cm²、裏面（滑面）714 cm²、側面（4面）550 cm² 合計 1,978 cm²

出典）港湾空港工事における非鉄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 9 月）

図 3.15.11 に 1 ヶ月毎の付着生物の個体数の推移を示す。



出典）港湾空港工事における非鉄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 9 月）

図 3.15.11 1 ヶ月毎の付着生物の個体数の推移

3.15.3 加工・改良技術

(1) 概要

工事事業者がフェロニッケルスラグを加工・改良（他の材料との混合を含む）し、使用する場合、その用途において必要な品質を満足するように行い、加工・改良後の材料は、必要な品質が満足されていることを試験等により確認する必要がある。また、加工・改良において、フェロニッケルスラグと他材料を混合する場合、他材料は、環境安全品質における一般用途あるいは港湾用途の環境安全品質基準を満足する必要がある。

(2) 加工・改良方法

工事事業者がフェロニッケルスラグを加工・改良する場合、使用用途における規格あるいは基準等に従い、定められた品質規格あるいは品質基準等を満足するように行う。

3.15.4 適用用途

(1) 概要

JIS規格が規定されているフェロニッケル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フェロニッケル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、フェロニッケルスラグを各用途に利用する場合の評価を行った結果を表 3.15.10 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 3.15.10(1) フェロニッケルスラグの適用用途

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	◎	A	a	1) 2) 3) 4)
② コンクリート用粗骨材	◎	A	b	1) 2) 4) 5)
③ 混和材	-	-	-	
④ パーチクルドレーン及びサンドマット材	○+	B	b	4)
⑤ サンドコンパクションバインダ材	○+	B	b	4) 6)
⑥ 深層混合処理固化材	-	-	-	
⑦ 捨石	-	-	-	
⑧ 中詰材	◎	B	a	4)
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	○+	B	b	4)
⑩ 裏込材	△	B	-	4)

出典)

- 1) JISA5011-2「コンクリート用スラグ骨材-第2部：フェロニッケルスラグ骨材」（平成28年4月改正）
- 2) フェロニッケル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28年7月）
- 3) フェロニッケルスラグ細骨材の高強度コンクリートへの適用性に関する基礎的検討（日本建設学会大会学術講演便覧集、平成9年9月）
- 4) 港湾空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル（平成27年9月、（一財）沿岸技術研究センター）
- 5) フェロニッケルスラグを粗骨材として用いたコンクリートの基礎的性質（コンクリート工学論文集 第21巻第3号 2010年9月）
- 6) 電気炉産フェロニッケル水砕スラグ砂を用いたSCP現地試験（第39回地盤工学研究発表会、平成16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 3.15.10(2) フェロニッケルスラグの適用用途

用途	総合評価	評価の根拠		出典	
		品質性能	利用実績		
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】 ・4)当該用途への利用を想定した技術マニュアルが整備されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・ふ頭盛土工事（管理者） ・駐車場整備（管理者）	4)
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】 ・4)当該用途への利用を想定した技術マニュアルが整備されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・造成工事（管理者、その他機関）	4)
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】 ・4)当該用途への利用を想定した技術マニュアルが整備されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・埋立造成工事（管理者） ・ふ頭埋立造成工事（国交省）	4)
⑭ 路床盛土材	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・4)構築路床に利用するクラッシュランフェロニッケルスラグの粒度等がマニュアルに規定されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・国道、バイパス、道路工事（国交省）	4)
⑮ 路盤材	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・4)フェロニッケルスラグの舗装工への適用が挙げられ、粒度調整フェロニッケルスラグ及びクラッシュランフェロニッケルスラグとして、粒度や品質規格、品質管理等が記載されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・道路工事（国交省、管理者）	4)
⑯ As舗装骨材、Asファイバー材	○+ (As舗装骨材)	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・4)フェロニッケルスラグの舗装工への適用が挙げられ、単粒度フェロニッケルスラグ及びフェロニッケルスラッグスクリーニングスとして、粒度や品質規格、品質管理等が記載されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・道路舗装工事（管理者） ・舗装試験施工（その他機関）	4)
⑰ 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等	○+	B	●利用マニュアル等が整備されている。 【主な内容】 ・4)覆砂材・人工砂浜等への利用を想定した技術マニュアルが整備されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・環境復元材としての検証事業（その他機関）	4)
⑱ その他	-	-	●用途対象外	●利用実績なし	

出典)

- 1) JISA5011-2 「コンクリート用スラグ骨材-第2部：フェロニッケルスラグ骨材」（平成28年4月改正）
- 2) フェロニッケル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28年7月）
- 3) フェロニッケルスラグ骨材の高強度コンクリートへの適用性に関する基礎的検討（日本建設学会大会学術講演便覧集、平成9年9月）
- 4) 港湾空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル（平成27年9月、（一財）沿岸技術研究センター）
- 5) フェロニッケルスラグを粗骨材として用いたコンクリートの基礎的性質（コンクリート工学論文集 第21巻第3号 2010年9月）
- 6) 電気炉産フェロニッケル水砕スラッグ砂を用いたSCP現地試験（第39回地盤工学研究発表会、平成16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。

(2) コンクリート用細骨材

フェロニッケルスラグ細骨材は、コンクリート用の細骨材としてJIS化され、土木学会「フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針」にフェロニッケルスラグ細骨材を用いるコンクリートの設計及び施工についての標準が示されている。

フェロニッケルスラグ細骨材の物理・化学的性質におけるJIS規格値（JIS A 5011-2）を表 3.15.11 に示す。

表 3.15.11 フェロニッケルスラグ細骨材の物理・化学的性質（JIS A 5011-2）

項目		規定値
化学成分	酸化カルシウム (CaO として)	% 15.0 以下
	酸化マグネシウム (MgO として)	% 40.0 以下
	全硫黄 (S として)	% 0.5 以下
	全鉄 (FeO として)	% 13.0 以下
	金属鉄 (Fe として)	% 1.0 以下
絶乾密度	g/cm ³	2.7 以下
吸水率	%	3.0 以下
単位容積質量	kg/l	1.50 以上

出典) JIS A 5011-2「コンクリート用スラグ骨材—第2部：フェロニッケルスラグ骨材」

粗粒率³は、製造業者と購入者が協議によって定めた値と比べ、±0.20以上変化しないようにする必要がある。

コンクリートの品質上、フェロニッケルスラグ細骨材の粒度範囲を調整することが望ましい場合、異種骨材を混合することができる。その場合、砂から供給される0.15mm以下の微粒分は10%以下、砕砂等から供給される0.15mm以下の微粒分は15%以下である必要がある。なお、微粒分量は購入者の了解を条件に0.15mm以下を15%まで認めることができる。

また、フェロニッケルスラグ細骨材は、JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）で区分評価する。

適用に当たっての利点は、以下が挙げられる。

- ・フェロニッケルスラグ細骨材の密度は、約 2.9～3.0g/cm³ であり、天然の細骨材より重いことから、港湾用途における消波ブロック等の重量コンクリートの細骨材に適している。
- ・フェロニッケルスラグ細骨材の JIS 規格 JIS A 5011-2 と JIS A 5308 附属書 A と比較すると、塩化物量の規定が削除されている。フェロニッケルスラグの場合、冷却水として海水を使用しないため、塩化物が混入されることはない。そのため、塩化物量が規定より若干高い天然の細骨材を使用する場合、フェロニッケルスラグ細骨材を塩化物量に関する希釈材として使用することもできる。

³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

- ・フェロニッケルスラグ細骨材の環境安全品質の評価は、一般用途における環境安全品質基準にて行い、溶出量及び含有量において、ほぼ、定量未満の結果であり、一般用途における環境安全品質基準を十分に満足している。

フェロニッケルスラグ細骨材は、組成や製造時の冷却条件等によって顕著なアルカリシリカ反応性を示すものがあるが、B区分と評価された細骨材でも、細骨材の混合率の制限及び高炉セメントB種を使用することでアルカリシリカ反応抑制対策を実施することができることが確認されている。なお、アルカリシリカ反応抑制対策を行う場合、その効果を試験等で確認することが必要となる。

(3) コンクリート用粗骨材

フェロニッケルスラグ粗骨材は、コンクリート用の粗骨材としてJIS化され、土木学会「フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針」にフェロニッケルスラグ粗骨材を用いるコンクリートの設計及び施工についての標準が示されている。

フェロニッケルスラグ粗骨材の物理・化学的性質におけるJIS規格値（JIS A 5011-2）を表 3.15.11 に示す。

表 3.15.12 フェロニッケルスラグ粗骨材の物理・化学的性質（JIS A 5011-2）

項目		規定値
化学成分	酸化カルシウム (CaO として)	% 15.0 以下
	酸化マグネシウム (MgO として)	% 40.0 以下
	全硫黄 (S として)	% 0.5 以下
	全鉄 (FeO として)	% 13.0 以下
	金属鉄 (Fe として)	% 1.0 以下
絶乾密度		g/cm ³ 2.7 以下
吸水率		% 3.0 以下
単位容積質量		kg/l 1.50 以上

出典) JIS A 5011-2 「コンクリート用スラグ骨材—第2部：フェロニッケルスラグ骨材」

粗粒率は、製造業者と購入者が協議によって定めた値と比べ、±0.30以上変化しないようにする必要がある。

コンクリートの品質上、フェロニッケルスラグ粗骨材の粒度範囲を調整することが望ましい場合、異種骨材を混合することができるが、フェロニッケルスラグ粗骨材と混合する異種骨材は、JIS A 5308 附属書 A に準じて、混合前の各骨材の品質が、粒度と塩化物量を除いて、絶乾密度、吸水率等のそれぞれの規定に適合する必要がある。特に、アルカリシリカ反応性による区分については、混合前の骨材でアルカリシリカ反応性試験によって、その反応性を確認する必要がある。

適用に当たっての利点は、以下が挙げられる。

- ・フェロニッケルスラグ粗骨材の密度は、約 3.0g/cm³ であり、天然の粗骨材より重いことから、

港湾用途における消波ブロック等の重量コンクリートの粗骨材に適している。

- ・フェロニッケルスラグ粗骨材の環境安全品質の評価は、一般用途における環境安全品質基準にて行い、溶出量及び含有量において、ほぼ、定量未満の結果であり、一般用途における環境安全品質基準を十分に満足している。

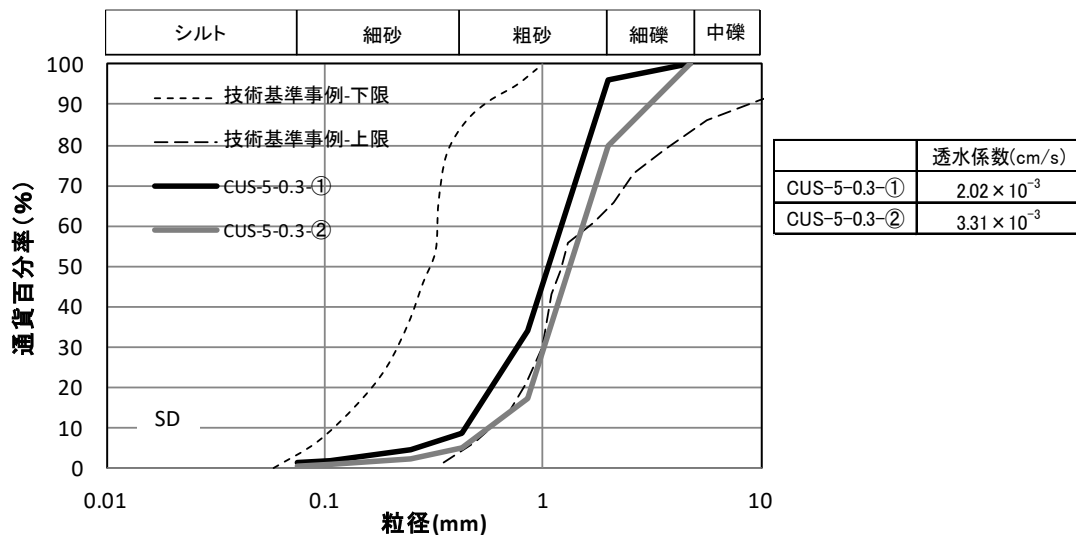
フェロニッケルスラグ粗骨材は、組成や製造時の冷却条件等によって顕著なアルカリシリカ反応性を示すものがあるが、B区分と評価された細骨材でも、高炉セメントB種を使用することでアルカリシリカ反応抑制対策を実施することができることが確認されている。なお、アルカリシリカ反応抑制対策を行う場合、その効果を試験等で確認することが必要となる。

(4) バーチカルドレーン及びサンドマット材

サンドドレーン工法を適用する場合、必要な性能が得られているかを照査する際、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」の第4編施設編 第2章 4. 地盤改良 4.4 バーチカルドレーン工法を参照することができる。

ドレーンパイプ及びサンドマットの特徴については、所要の排水機能を有することが要求される。ドレーンパイプに用いられる砂は透水性が良く、しかも粘土粒子による目詰まりが生じないような粒度の良いものとすべきである。これまでの施工で用いられた砂の粒度の例を、**図 3.15.12**に示す。なお、近年、これらより多少細粒分が多い砂が用いられている事例もある。人工地盤材料を用いる場合にあっても、この粒度の範囲の地盤材料を用いることが望ましいと考えられる。

設計においては実際に利用するフェロニッケルスラグの性質をよく把握して、適切な設計定数を用いて設計を行うことが肝要である。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.12 サンドドレーン材に用いられた粒度分布の既往事例との比較

サンドドレーンに求められる性能は「透水性が良いこと」「目詰まりが生じないように粒度が良いこと」である。粒度分布と透水係数の関係については、粒度分布に関して、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」にサンドドレーンの実施工に用いられた多数の粒度分布が示されている。**図 3.15.12**

はその上限付近のものと下限付近のものと、フェロニッケルスラグの粒度を比較したものである。また、凡例中には透水係数の値も示した。粒度が比較的粗くかつ均等な FNS5-0.3 については微粒分がほとんど無く、透水係数も 10^{-3} cm/s のオーダーであり、ドレーン材として適していると判断される。FNS-1.2 については、既往の施工性の下限に比べ、微粒分は同程度、粗い粒度は若干多めであった。結果として、透水係数は 10^{-4} cm/s のオーダーであった。

このように、フェロニッケルスラグは製造工程、製造後の加工の仕方の違いによって、粒度分布や透水係数が異なるため、適用の際には事前にどのような性質の材料が決定しておく必要がある。なお、フェロニッケルスラグには水硬性がないため透水性が経時的に低下することはない。

地盤改良工（サンドドレーン材）の環境安全品質の評価の際には、溶出経路を考慮した上で検査方法（試験項目、環境安全品質基準）を設定する必要がある。これは、ドレーン排水を通過した雨水等による影響が考えられるためである。サンドドレーンへの適用を検討する際には、実際に使用する材料の溶出特性を把握した上で、周辺環境に対して十分に配慮する必要がある。

(5) サンドコンパクションパイル材

フェロニッケルスラグをサンドコンパクションパイルに適用する際には、必要な性能が得られるかを設計時に検討する必要がある。この際、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の、第4編施設編 第2章 4.地盤改良 4.9 サンドコンパクションパイル工法（砂質土地盤を対象とする場合）及び 4.10 サンドコンパクションパイル工法（粘性土地盤を対象とする場合）を参照することができる。

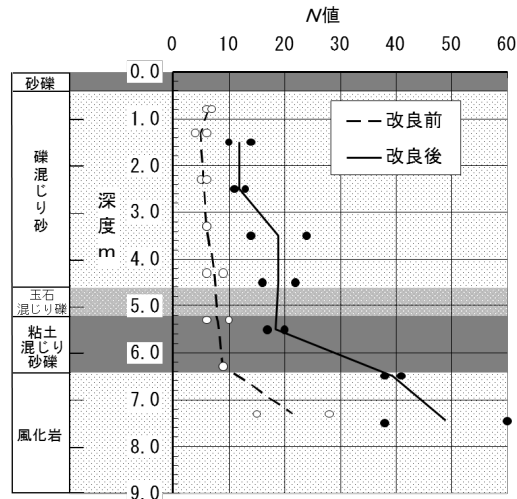
フェロニッケルスラグをサンドコンパクションパイルに使用する場合の設計に用いる特性値については、既往の調査結果等に基づいて適切に設定する必要がある。以下に、既往の調査結果例を示す。

a) 事例①：液状化が懸念される埋立地での事例¹⁾

対象地盤の構成は、地上から埋立土（分布：表層～深度 4.6m、土質：礫混じり砂、N 値：5～9、細粒分含有率 15～34%）、沖積砂・礫質土（分布：深度 4.6～6.4m、土質：玉石及び粘土混じりの砂礫、N 値：5～10、細粒分含有率：11～42%）、岩盤（分布：深度 6.4m 以深、土質：風化岩、N 値：31～60 以上）からなる。

本工事の地盤改良は、低振動・低騒音の静的 SCP 工法で、フェロニッケルスラグ杭は、1.8m の正方配置、杭径 700mm で、改良率は 11.9%となる。SCP 打設 1 サイクルあたりの時間は、一般的に使用される改良材と比較しても同程度かそれよりも短時間であった。施工中はバケットホッパー内で砂の付着が確認されたが、ケーシングパイプからの砂の排出は良好であった。

改良前後の杭間の N 値を図 3.15.13 に示す。N 値は、表層下 2.5m までは改良前 7 程度に対し、改良後 10～14 程度となり、表層部においても改良効果が得られた。また、深度方向に対して増加していることが分かり、深度 5m 前後の玉石・粘土混じり砂礫層でも改良前 6～10 程度に対し、改良後は 16～41 まで N 値の増加が確認された。



出典) フェロニッケルスラグを用いた静的締固め工法による液状化対策工事の改良効果、第43回地盤工学会研究発表会論文集、pp. 553-554、平成20年

図 3.15.13 地盤構成と改良前後の杭間 N 値

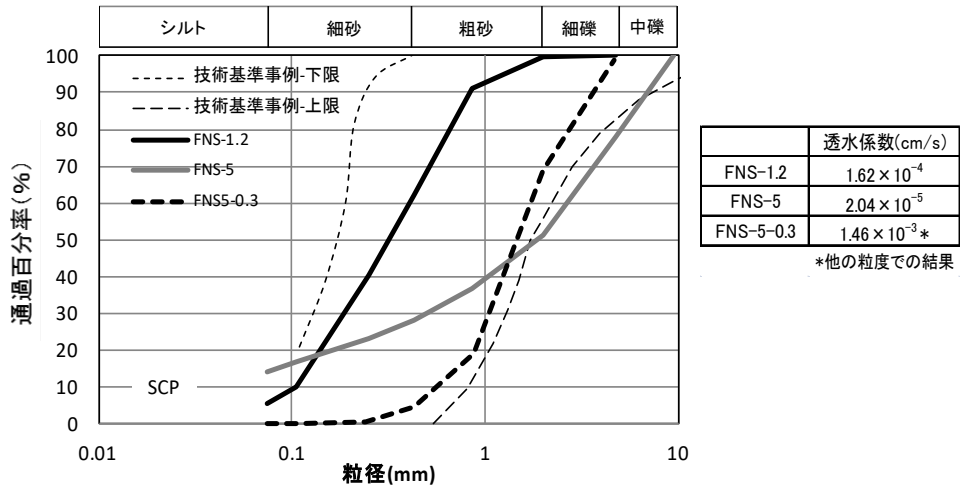
b) 事例②：河川築堤工事前の地盤改良工事

対象地は、東日本地震で被災した河川護岸の復旧工事に伴う SCP 工法による地盤改良工である。施工に使用する SCP 材は、フェロニッケルスラグ（風砕）単味と、フェロニッケルスラグ（徐冷）と天然砂を 2：1 の割合で混合した砂とされた。SCP 杭径：700mm、ピッチ：1.5m で改良率は 17%となる。目標液状化安全率（FL）は 1.1 以上、対象地周辺に貴重なトンボの生息地があるため、環境影響の少ない材料が求められた。施工後の杭間 N 値の増加が確認でき、液状化安全率以上となっており、改良効果が確認できた。また、環境影響に対しては、使用したフェロニッケルスラグの土壌溶出量・含有量試験の結果、土壌汚染対策法で定める土壌溶出量基準、含有量基準を満足する結果であったことから、環境影響も極めて少ないものとなった。

以下に、実施工で得られた結果を中心に述べる。

a) 粒度

フェロニッケルスラグは、製造方法の違いにより粒度分布が異なる。図 3.15.14 に SCP 材に用いられた粒度分布の既往事例（「港湾の施設の技術上の基準・同解説」）との比較を示す。比較的均等な粒径分布を有するもの（FNS-B、FNS-A）と、不均等な粒径分布を有し、かつ細粒分を比較的多く含むもの（FNS-C）がある。この特徴を踏まえて検討を行う必要がある。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.14 SCP 材に用いられた粒度分布の既往事例との比較

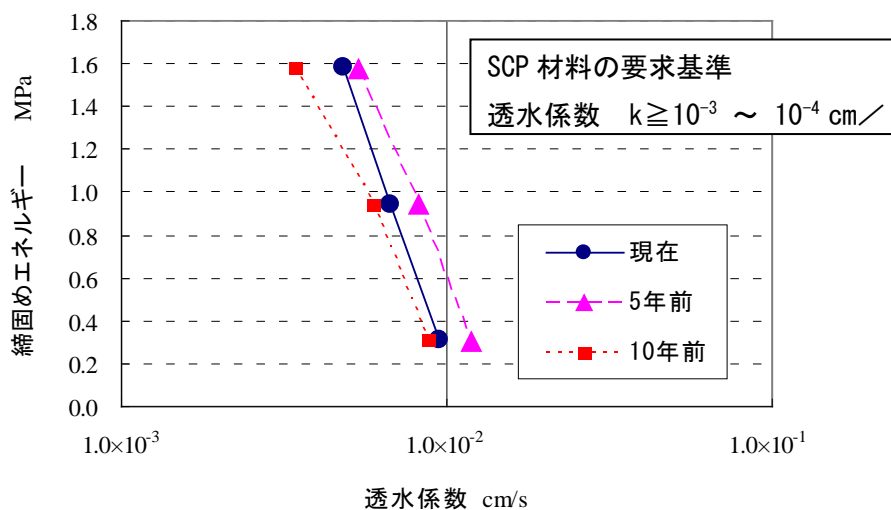
b) 透水性

フェロニッケルスラグの透水係数は、粒度によって異なる。また、フェロニッケルスラグには水硬性がないため透水性が経時的に低下することもない。

製造後 5 年、10 年を経過した FNS-B を用いて、突固めエネルギーを変化させたときの透水試験の結果²⁾を図 3.15.15 に示す。エネルギーの増加とともに透水係数は減少する傾向にあるが、何れも $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ の範囲の値であった。かつ経年による変化も見られなかった。

c) せん断強度

表 3.15.13 に 2 深度において不攪乱試料を採取し、三軸 CD 試験を実施した結果を示す。深度方向に相対密度の増加が確認され、せん断抵抗角 ϕ_d も $37 \sim 39^\circ$ 程度と高い値を示している。



出典) SCP 材料としてのフェロニッケルスラグの経年変化、第 35 回地盤工学会研究発表会論文集、pp.753-754、平成 12 年

図 3.15.15 フェロニッケルスラグの経年変化

表 3.15.13 2 深度における砂杭の特性

深度	1.8m	3.4m
相対密度	74%	94%
せん断抵抗角	37.3°	39.2°

出典) フェロニッケルスラグを用いた静的締固め工法による液状化対策工事の改良効果、第43回地盤工学会研究発表会論文集、pp.553-554、平成20年

地盤改良工の環境安全品質の評価の際には、溶出経路を考慮した上で検査方法（試験項目、環境安全品質基準）を設定する必要がある。

【参考文献】

- 1) 安田智弘、田中国弘、阪下勝啓、富永清太：フェロニッケルスラグを用いた静的締固め工法による液状化対策工事の改良効果、第43回地盤工学会研究発表会論文集、pp.553-554、平成20年
- 2) 能登屋雅之、中澤重一、尾浪正晴、山口直也：SCP材料としてのフェロニッケルスラグの経年変化、第35回地盤工学会研究発表会論文集、pp.753-754、平成20年

(6) 中詰材

1) 共通事項

本工に中詰材が用いられる構造物には、ケーソン、鋼板セルなどがある。これらの対象構造物全体として、所要の性能を確保する必要がある。必要な性能が得られているかを照査する際に、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」の、第4編施設編 第2章 1.2 ケーソン、第5章 2.7 二重矢板式係船岸 2.9 根入れを有するセル式係船、2.10 置きセル式係船岸などを参照することができる。

フェロニッケルスラグは、密度が大きく、膨張や水硬性等の性質の変化が無いことから中詰材として適しており、これまでにケーソン中詰材として多数の実績がある。

フェロニッケルスラグを中詰材に用いる構造物の設計は、材料の特性をよく把握した上で、天然の材料との違いに注意しながら「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に示される天然の砂や砂利を対象とした方法によって行う。

以下、材料の特性値について述べる。

a) 土粒子密度及び単位体積重量

フェロニッケルスラグ粒子は密度が大きいため、天然砂よりも大きな単位体積重量を示す。飽和単位体積重量 γ_{sat} は水砕品で 20.3kN/m³ 程度、加工品で 21.0~23.8kN/m³ 程度の値が得られている。なお、粒度分布の影響も大きく受ける。粒度が良い FNS-5 の方が、密に詰まるため、単位体積重量が大きくなる。

利用に際しては、実際に使用するフェロニッケルスラグの性質をよく把握して適切な値を設定する必要がある。

b) せん断強度

せん断強度は、フェロニッケルスラグ水砕品で $\phi_d=32^\circ$ 程度 (Dr=60%の場合)、加工品で $\phi_d=37^\circ$ 程度 (Dr=60%の場合) の値を有している。本工中詰材として用いるには十分な値を有していると考えられ

る。

本體工中詰材の環境安全品質の評価の際には、試験項目は溶出量、環境安全品質基準は港湾用途としてよい。

2) ケーソン中詰材として利用する場合の設計

フェロニッケルスラグをケーソン中詰材として利用する場合、重力式構造物であるため、重量の大きな材料を用いた方が、経済的な設計を得ることができる場合が多い。ただし、重量が大きい分、内部土圧も大きくなる。この内部土圧の計算は、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に準じて行う。

3) セル及び二重矢板式構造物の中詰材として利用する場合の設計

フェロニッケルスラグをセル及び二重矢板式構造物の中詰材として利用する場合には、重量の大きな材料を用いた方が、せん断変形に対する安定性が重力式壁体としての安定性が高くなり有利となる場合が多い。但し、中詰重量が大きい分、セルや矢板の張力は大きくなる。

また、せん断抵抗角の大きな材料を用いた場合にも、せん断変形に対する抵抗モーメントを高めることになり、経済的な設計を得ることができる場合が多い。

内部土圧の計算は、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に準じて行う。

(7) 根固・消波ブロック

フェロニッケルスラグをコンクリート用細骨材・粗骨材として利用する場合、根固・消波ブロックに利用することができる。なお、フェロニッケルスラグを利用した被覆石の製造は行われていない。

(8) 裏埋材

要求される事項は、裏込材と同様である。

裏埋材の再利用は想定されず、溶出経路は海水または地下水の2種類が想定される。また、フェロニッケルスラグ単味または他材料と混合して利用される。上記に基づき、環境安全形式検査は次による。

- ・試験項目及び試験方法：非鉄スラグ試料または他材料と混合したものを試料とし、JIS K 0058-1の5.による溶出試験を実施する。
- ・環境安全品質基準：溶出経路に基づき港湾用途溶出量基準または一般用途溶出量基準の何れかを適用する。

(9) 盛土材、覆土材、載荷盛土材

フェロニッケルスラグは、密度が大きく、膨張や水硬性等の性質の変化が無いという特徴を有する。フェロニッケルスラグを盛土・覆土に用いる構造物の設計は、材料の特性をよく把握した上で、天然の材料との違いに注意しながら「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に示される天然の砂や砂利を対象

とした方法によって行う。

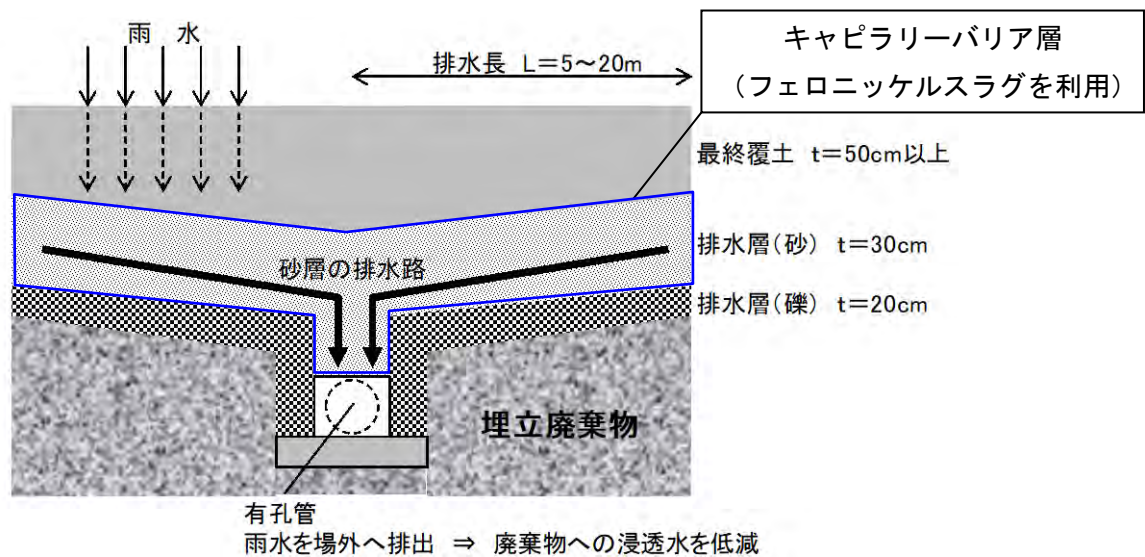
以下参考として、フェロニッケルスラグが覆土として利用された事例を示す。

・雨水浸透抑制型覆土（キャピラリーバリア）としての利用事例

主に廃棄物の埋立地内に浸透した水が汚染水となり周辺環境を汚染させる懸念がある。この問題を防止するためには汚染水の排出量を低減させることが必要である。そのための一つの工法に雨水浸透抑制型覆土（キャピラリーバリア）と呼ばれる多層覆土構造がある。図 3.15.16 に模式図を示す。多層覆土とは上層に砂層と下層に礫層の多層を形成し、砂層の境界面に生じる毛管現象により保水されながら流下して集中排水される特徴を持つ。

多層覆土上表面に形成されるキャピラリーバリア層と呼ばれる微粒層に求められる性質は、細粒層に対し透水性能が良好であり、かつ保水能力が良好である性質を持つ砂であり、経年変化による過圧密による間隙詰まりの少ない砂である。

フェロニッケルスラグ（水砕スラグ）において、粒度分布が通過質量百分率で粒径0.15mmを10～30%、粒径0.3mmを25～60%、粒径0.6mmを60～90%、粒径1.2mmを85～100%に粒度調整されたものがキャピラリーバリア層として利用されている。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.15.16 雨水浸透抑制型覆土（キャピラリーバリア）の多層覆土構造図

利用に際しては、実際に使用するフェロニッケルスラグの性質をよく把握して適切な値を設定する必要がある。以下に、盛土・覆土に主に求められる特徴を簡単に述べる。

a) 土粒子密度及び単位体積重量

フェロニッケルスラグ粒子は密度が大きいため、天然の砂よりも大きな単位体積重量を示す。飽和単位体積重量 γ_{sat} は概ね水砕品で 20.5kN/m^3 程度、加工品で 23.5kN/m^3 程度の値を有している。なお、粒度分布の影響も大きく受ける。粒度が良い FNS-5 の方が、密に詰まるため、単位体積重量が大きくなる。

b) せん断強度

せん断強度は、フェロニッケルスラグ水砕品で $\phi_d=32^\circ$ 程度 (Dr=60%の場合)、加工品で $\phi_d=37^\circ$ 程度 (Dr=60%の場合)の値を有している。裏込材として用いるには十分な値を有していると考えられる。

盛土・覆土の環境安全品質の評価の際には、試験項目は溶出量及び含有量、環境安全品質基準は一般用途とする。ただし、盛土が覆土等で十分に覆われる場合は、溶出経路に基づき港湾用途溶出量基準または一般用途溶出量基準のいずれかを適用する。

(10) 埋立材

埋立材が用いられる構造物には、重力式係船岸、矢板式係船岸などがある。これらの対象構造物全体として、所要の性能を確保する必要がある。必要な性能が得られているかを照査する際に、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」の、**第4編施設編 第5章 2.2 重力式係船岸、第5章 2.3 矢板式係船岸**などを参照することができる。

フェロニッケルスラグは、密度が大きく、膨張や水硬性等の性質の変化が無いという特徴を有する。フェロニッケルスラグを裏埋工・埋立材に用いる構造物の設計は、材料の特性をよく把握した上で、天然の材料との違いに注意しながら「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に示される天然の砂や砂利を対象とした方法によって行う。

以下、材料の特性値について述べる。

a) 土粒子密度及び単位体積重量

フェロニッケルスラグ粒子は密度が大きいため、天然の砂よりも大きな単位体積重量を示す。飽和単位体積重量 γ_{sat} は概ね水砕品で 20.5kN/m^3 程度、加工品で 23.5kN/m^3 程度の値を有している。なお、粒度分布の影響も大きく受ける。粒度が良いFNS-5の方が、密に詰まるため、単位体積重量が大きくなる。

b) せん断強度

フェロニッケルスラグの種類では、水砕品で $\phi_d=32^\circ$ 程度 (Dr=60%の場合)、加工品で $\phi_d=37^\circ$ 程度 (Dr=60%の場合)の値を有している。埋立材として用いるには十分な値を有していると考えられる。

c) 環境安全品質

埋立材の環境安全品質の評価の際には、試験項目は溶出量及び含有量、環境安全品質基準は一般用途とする。

i) 長期間供用された埋立材における環境安全品質

以下に参考として、フェロニッケルスラグを使用した埋立地における、環境安全品質に関する調査結果を紹介する。調査を行った埋立地は、フェロニッケルスラグを約 $57,000\text{m}^3$ 使用し、施工後約16年経過した場所で、現在、公園として運用されている場所を調査地とした。調査は深さ約5mのボーリングにより、フェロニッケルの埋立土を採取し、長期間経過した後の環境安全品質(溶出量及び含有量)に関する

分析を行った。また、ボーリング孔から地下水を採取し、土壌からの溶出量を調査した。埋立土のスラグ2試料について、溶出量・含有量試験を行った。土壌分析結果の一覧を表 3.15.14 に示す。両試料とも、分析対象項目については定量下限値未満であり、土壌汚染対策法で定める土壌溶出量基準、含有量基準を満足する結果であった。

表 3.15.14 土壌分析結果一覧

項目	検体名称		定量下限値	基準*	単位	
	深度 1.30m	深度 3.00m				
土壌溶出量	カドミウム	0.001 未満	0.001 未満	0.001	0.003 以下	mg/L
	鉛	0.005 未満	0.005 未満	0.005	0.01 以下	mg/L
	六価クロム	0.02 未満	0.02 未満	0.02	0.05 以下	mg/L
	ひ素	0.002 未満	0.002 未満	0.002	0.01 以下	mg/L
	総水銀	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005	0.0005 以下	mg/L
	セレン	0.002 未満	0.002 未満	0.002	0.01 以下	mg/L
	ふっ素	0.1 未満	0.1 未満	0.1	0.8 以下	mg/L
	ほう素	0.1 未満	0.1 未満	0.1	1 以下	mg/L
土壌含有量	カドミウム	5 未満	5 未満	5	150 以下	mg/kg
	鉛	5 未満	5 未満	5	150 以下	mg/kg
	六価クロム	5 未満	5 未満	5	250 以下	mg/kg
	ひ素	5 未満	5 未満	5	150 以下	mg/kg
	総水銀	0.02 未満	0.02 未満	0.02	15 以下	mg/kg
	セレン	5 未満	5 未満	5	150 以下	mg/kg
	ふっ素	100 未満	100 未満	100	4000 以下	mg/kg
	ほう素	5 未満	5 未満	5	4000 以下	mg/kg

*基準：土壌溶出量基準、土壌含有量基準

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

ii) フェロニッケルスラグを使用した埋立地における地下水の水質

ボーリング孔から採取した地下水の水質を分析した。なお、比較対象として対象地前面の海域より海水を採取し分析した。地下水分析は地下水環境基準に該当する 8 項目 (カドミウム、鉛、六価クロム、ひ素、総水銀、セレン、ふっ素、ほう素) について行った。計量の方法は、環境省告示第 17 号 (平成 15 年) である。

水質分析結果の一覧を表 3.15.15 に示す。分析結果の特徴は以下のとおりであり、特段の問題がないことが確認された。

- ・地下水、海水ともにふっ素とほう素が定量された。
- ・地下水で定量されたふっ素とほう素は、地下水基準を満足するものであった。
- ・海水のふっ素は地下水と同程度であるが、ほう素は地下水の 8~9 倍であった。これは、海水の一般的な値はふっ素 1.3mg/L、ほう素 4.5mg/L 程度であり、海水起因 (汽水域) と考えられる。

表 3.15.15 水質分析結果一覧

分析項目	検体名称		定量下限値	基準*	単位
	埋立地 地下水	海水			
カドミウム	0.001 未満	0.001 未満	0.001	0.003 以下	mg/L
鉛	0.005 未満	0.005 未満	0.005	0.01 以下	mg/L
六価クロム	0.02 未満	0.02 未満	0.02	0.05 以下	mg/L
ひ素	0.002 未満	0.002 未満	0.002	0.01 以下	mg/L
総水銀	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005	0.0005 以下	mg/L
セレン	0.002 未満	0.002 未満	0.002	0.01 以下	mg/L
ふっ素	0.4	0.5	0.1	0.8 以下	mg/L
ほう素	0.3	2.6	0.1	1 以下	mg/L

*基準：地下水基準

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

(11) 路床盛土材

路床盛土は、それより上部に施工される路盤や表・基層の施工基盤となることから、所定の荷重支持力と均一で平坦な表面が求められる。路床盛土材としてのフェロニッケルスラグは、クラッシュランフェロニッケルスラグが用いられ、粒度は主に 5mm 以下であり、その要求性能は、道路用砕石の通常のクラッシュランに準ずる。

フェロニッケルスラグ路床盛土材は、密度が大きく、膨張や水硬性等の性質の変化が無く、路床盛土材として加工されることにより、締固め性がよいという特性を有する。フェロニッケルスラグはCaO及びMgOが単独で存在しないことから、水和反応が起こらず水硬性が認められない。フェロニッケルスラグ路床盛土材の修正CBR試験値は、締固め度95%において、90%程度と高い値を示す。また、フェロニッケルスラグの凍上試験において、凍上様式1(道路土工排水工指針)において、凍上率0%となっている。

また、フェロニッケルスラグの路床材用途における環境安全品質の評価は、一般用途における環境安全品質基準にて行い、溶出量及び含有量において、ほぼ、定量未満の結果であり、一般用途における環境安全品質基準を十分に満足している。

フェロニッケルスラグ路床盛土材は、締固め性がよいという特性を有しているが、天然の砕石と同様の管理が必要である。なお、最大乾燥密度における最適含水比は、7~9%程度である。

(12) 路盤材

路盤材用フェロニッケルスラグの種類と粒度は、表 3.15.16及び表 3.15.17に示すとおりである。これらの品質は、JIS A 5001及び「舗装設計施工指針」の規定に準じている。

表 3.15.16 路盤材用フェロニッケルスラグの種類と主な用途

種 類	呼び名	主な用途
クラッシュラン フェロニッケルスラグ	CN40	下層路盤用
	CN20	

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

表 3.15.17 路盤材用フェロニッケルスラグの粒度

種類	呼び名	粒度 範囲 (mm)	ふるいを通すものの質量百分率%									
			JIS Z 8801-1 に規定する金属製鋼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
クワシヤテン フェロニッケルス ラグ	CN40	40~0	100	95~100	—	—	50~80	—	15~40	5~25	—	—
	CN20	20~0	—	—	—	100	95~100	60~90	20~50	10~35	—	—

フェロニッケルスラグ路盤材は、密度が大きく、膨張や水硬性等の性質の変化が無く、路盤材として加工されることにより、締固め性がよいという特性を有する。フェロニッケルスラグはCaO及びMgOが単独で存在しないことから、水和反応が起こらず水硬性が認められない。フェロニッケルスラグ路盤材の修正CBR試験値は、締固め度95%において、100%程度と高い値を示す。また、フェロニッケルスラグの最大水浸膨張比は、0.05%程度であり、低い値を示す（参考：土木工事共通仕様書（案）（国土交通省）上層路盤の品質規格 水浸膨張比1.5%以下）。

また、フェロニッケルスラグの路盤材用途における環境安全品質の評価は、一般用途における環境安全品質基準にて行い、溶出量及び含有量において、ほぼ、定量未満の結果であり、一般用途における環境安全品質基準を十分に満足している。

フェロニッケルスラグ路盤材は、締固め性がよいという特性を有しているが、天然の砕石と同様の管理が必要である。なお、最大乾燥密度における最適含水比は、5%程度である。

(13) アスファルト舗装骨材

舗装用フェロニッケルスラグ（表・基層）の種類と粒度は、表 3.15.18 及び表 3.15.19 に示すとおりである。

表 3.15.18 舗装用フェロニッケルスラグの種類と主な用途（表・基層）

種 類	呼び名	主な用途
単粒度フェロニッケルスラグ	SN5	表・基層用加熱アスファルト混合物用
フェロニッケルスラグスクリーニングス	FN2.5	

表 3.15.19 舗装用フェロニッケルスラグの粒度 (表・基層)

種類	呼び名	ふるいを通すものの質量百分率%						
		JIS Z 8801-1 に規定する金属製鋼ふるいの公称目開き						
		26.5mm	19mm	13.2mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm	75μm
単粒度フェロニッケルスラグ	SN5	—	—	100	85~100	0~25	0~5	—
フェロニッケルスラグスクリーニングス	FN2.5	—	—	—	100	85~100	—	0~20 (0~10)

()内は、望ましい粒度範囲

表 3.15.20 舗装用フェロニッケルスラグの品質規格 (表・基層)

項目	単粒度フェロニッケルスラグ	フェロニッケルスラグスクリーニングス
表乾密度 (g/cm ³)	2.45 以上	2.45 以上
吸水率 (%)	3.0 以上	3.0 以下
すり減り減量 (%) (表層・基層)	30 以下 ^{注1)}	—

注1) : 表層、基層用砕石のすり減り試験は、粒径 13.2~4.75mm のものについて実施する。

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

フェロニッケルスラグをアスファルト舗装骨材に用いた場合、わだち掘れ性が向上し、ひび割れ率が低減する効果が得られている。このため、通常配合の舗装と比較して舗装路の長寿命化が図れる。

(14) 藻場、浅場・干潟造成材、覆砂材、人工砂浜等

フェロニッケルスラグを覆砂材・人工砂浜等に用いる構造物の設計は、材料の特性をよく把握した上で、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」及び「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」に示される方法によって行うこととする。また、「海の自然再生ハンドブック」を参考とすることができる。

フェロニッケルスラグを覆砂材に利用する場合、天然砂による覆砂と同様に、在来地盤を覆砂することにより、底生生物が増加することが期待される。また、フェロニッケルスラグから溶出する鉄が、生物に有害な硫化水素と反応することで、硫化水素を不活性化し、通常の覆砂よりも底生生物の生息環境の改善効果が高くなることが期待される。さらに、鉄がリンと反応・不活性化することで、通常の覆砂よりも栄養塩の抑制効果が高くなることが期待される。

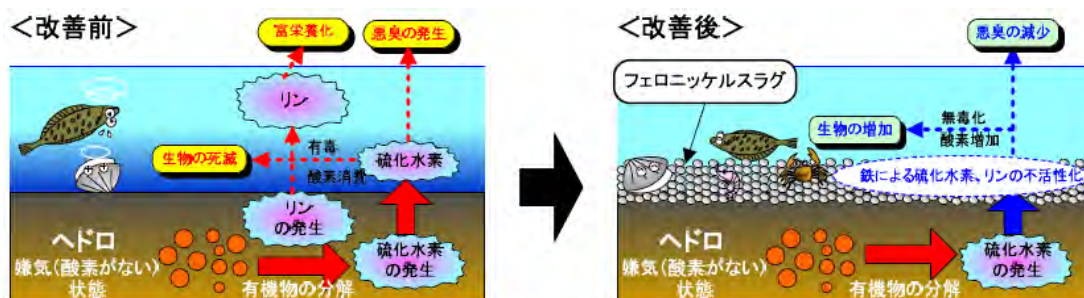


図 3.15.17 フェロニッケルスラグの深場の覆砂材としての活用により期待される効果

(15) 今後の検討を要する用途

1) 裏込材

フェロニッケルスラグを裏込材に用いる構造物の設計は、材料の特性をよく把握した上で、天然の材料との違いに注意しながら「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に示される天然の砂や砂利を対象とした方法によって行う。

また、フェロニッケルスラグには、細粒分も含まれており、通常の天然の砂や砂利の場合と同様に、ケーソンの隙間からの流出を防止する対策が求められる。

裏込工が用いられる構造物には、重力式係船岸、矢板式係船岸などがある。これらの対象構造物全体として、所要の性能を確保する必要がある。必要な性能が得られているかを照査する際に、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」の、**第4編施設編 第5章 2.2 重力式係船岸、第5章 2.3 矢板式係船岸**などを参照することができる。

裏込工に主に求められる特徴のみを簡単に述べる。利用に際しては、実際に使用するフェロニッケルスラグの性質をよく把握して適切な値を設定する必要がある。

a) 土粒子密度及び単位体積重量

フェロニッケルスラグ粒子は密度が大きいため、天然の砂よりも大きな単位体積重量を示す。概ね水砕品で 20.5kN/m^3 程度、加工品で 23.5kN/m^3 程度の値を有している。なお、粒度分布の影響も大きく受ける。粒度が良い FNS-C の方が、密に詰まるため、単位体積重量が大きくなる。

b) せん断強度

フェロニッケルスラグの種類では、水砕品で $\phi_d=32^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ の場合)、加工品で $\phi_d=37^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ の場合) の値を有している。裏込材として用いるには十分な値を有していると考えられる。

裏込工の再利用は想定されず、溶出経路は海水または地下水の2種類が想定される。また、フェロニッケルスラグ単味または他材料と混合して利用される。上記に基づき、環境安全形式検査は次による。

- ・試験項目及び試験方法：非鉄スラグ試料または他材料と混合したものを試料とし、**JIS K 0058-1 の5**による溶出試験を実施する。
- ・環境安全品質基準：溶出経路に基づき港湾用途溶出量基準または一般用途溶出量基準の何れかを適用する。

3. 15. 5 関連法令

フェロニッケル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。

3.15.6 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)

フェロニッケル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。

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。

3.16 亜鉛スラグ

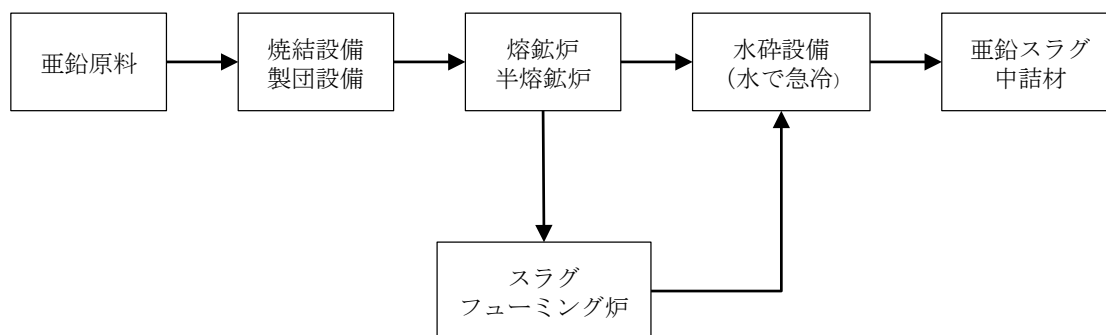
3.16.1 製造・供給

亜鉛スラグは、亜鉛を製錬する過程の中で原料中の鉄分と珪石分が結合した熔融スラグを、高圧水により冷却し、砂状に水砕したものである。性状はガラス質で、黒色を呈している。

(解説)

(1) 製造方法

亜鉛スラグは、乾式の亜鉛製錬設備である亜鉛熔鋳炉（ISP炉）、亜鉛半熔鋳炉（MF炉）によって亜鉛原料から亜鉛もしくは粗酸化亜鉛を製造する際に生成された熔融スラグを、水急冷により水砕産物とする方法で生産されている¹⁾²⁾。工場によっては熔鋳炉、半熔鋳炉から産出した熔融スラグをスラグフューミング炉へ導入し、還元剤をスラグ中に吹き込むことによってスラグ中の亜鉛などの金属成分を揮発・回収して、スラグの品質を改善している³⁾⁴⁾。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.16.1 亜鉛スラグの生成過程

国内では亜鉛熔鋳炉（ISP炉）と亜鉛半熔鋳炉（MF炉）が亜鉛スラグを産出している。表 3.16.1に国内の2工場を示す。

表 3.16.1 乾式亜鉛製錬所

	炉の種類	製造所	亜鉛スラグ生産量
1	熔鋳炉 (ISP 炉) + スラグフューミング炉	八戸製錬(株)八戸製錬所 青森県八戸市大字河原木	85 千トン/年
2	半熔鋳炉 (MF 炉)	三池製錬(株)熔錬工場 福岡県大牟田市新開町	75 千トン/年

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

【参考文献】

- 1) 吾妻伸一：八戸製錬所における亜鉛・鉛製錬、Journal of MMIJ Vol.123 (No.12)、pp.661-665、平成 19 年
- 2) 野田眞治：MF 炉増処理に向けた諸改善、Journal of MMIJ Vol.123 (No.12)、pp.730-733、平成 19 年
- 3) T. Sekiguti and S. Azuma：Slag fuming at Hachinohe Smelter、The Metallurgical Society of CIM、

pp. 299-311、平成 10 年

- 4) 榎本 潮：八戸製錬所のスラグ処理改善について、Autumn Symposium of MMIJ/D5-4、pp. 311-313、2003

(2) 供給・利用の状況

1) 供給地域

東北、九州

2) 事業所の立地場所



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月) より作成

図 3. 16. 2 亜鉛スラグ製造所 (亜鉛精錬所) の立地場所

3) 生産量

亜鉛スラグ：約 16,700t/月

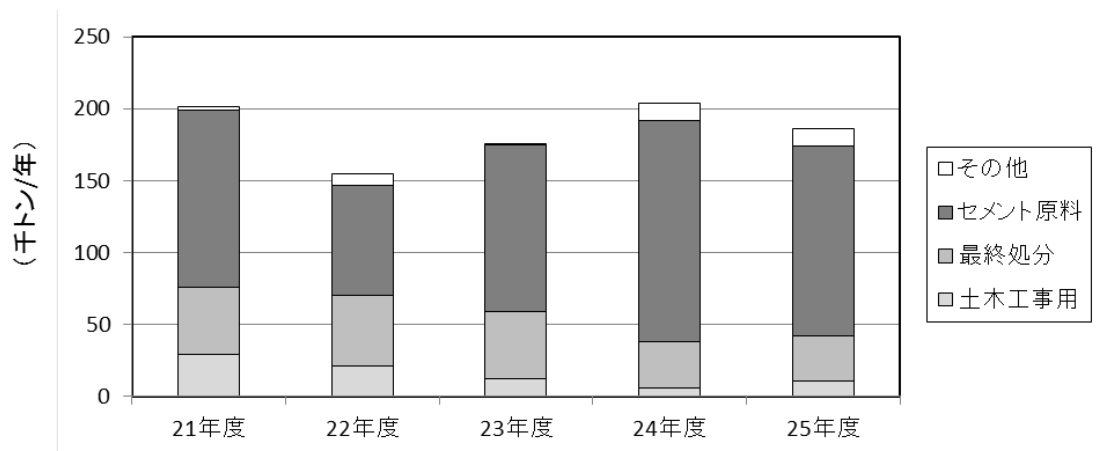


図 3. 16. 3 亜鉛スラグの使用量の推移

3.16.2 品質

(1) 物理的性質

- 1) 亜鉛スラグの粒径はほぼ 5mm 以下の砂状であり、粒径 0.1mm 以下の細粒をほとんど含まない。
- 2) 亜鉛スラグの土粒子密度は $3.6\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であり、一般的な砂 ($2.7\text{g}/\text{cm}^3$) に比べ大きい。
- 3) 亜鉛スラグを水中投入した際の堆積後の飽和単位体積重量は、概ね $23.5\text{kN}/\text{m}^3$ である。

(解説)

1) 粒度

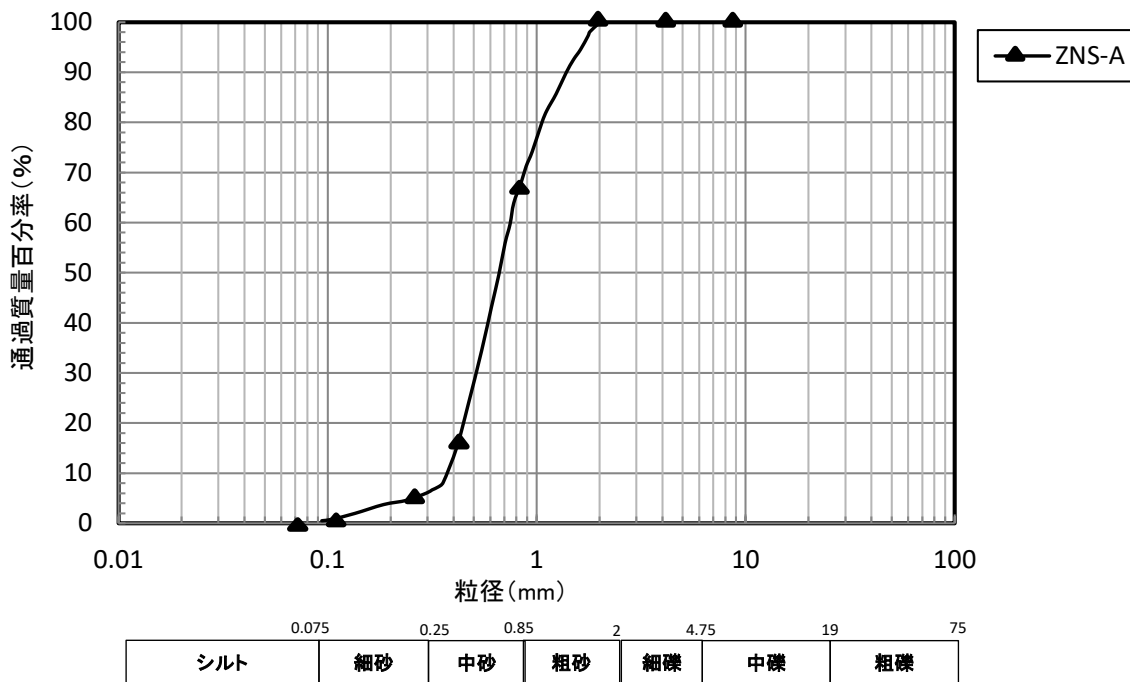
亜鉛スラグの粒度分布（測定例）を図 3.16.4 に示す。

亜鉛スラグの代表的な粒径と均等係数の一例を表 3.16.2 に示す。均等係数が 2 と単粒度である。

表 3.16.2 亜鉛スラグの粒径と均等係数の一例

名称	60%粒径 $D_{60}(\text{mm})$	平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	10%粒径 $D_{10}(\text{mm})$	均等係数 U_c
ZNS-A	0.77	0.68	0.38	2.08

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.16.4 亜鉛スラグの粒度分布 (測定例)

2) 土粒子密度

亜鉛スラグの土粒子密度、最大・最小密度試験の一例を表 3.16.3 に示す。

亜鉛スラグの土粒子密度は $3.6\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であり、一般的な砂 ($2.7\text{g}/\text{cm}^3$) に比べ重い。

表 3.16.3 亜鉛スラグの土粒子密度、最大・最小密度試験の一例

名称	対象スラグ	土粒子密度 (g/cm ³)	最少乾燥密度 (ρ_{dmin}) (g/cm ³)	最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) (g/cm ³)
ZNS-A	FNS-5-0.3	3.622	1.77	2.18

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

3) 飽和単位体積重量

ケーソン等の本土工への中詰材の投入を模擬した亜鉛スラグを用いた水中落下実験を実施し、相対密度は 48~71%であることが確認されている。この範囲における飽和単位体積重量 γ_{sat} の試算の結果、23.1~23.9kN/m³ (平均23.5kN/m³) 程度となった。

なお、試算に必要な物性値は表 3.16.3の値を用いた (水の密度は海水密度1.03g/cm³とした)。

なお、現在、中詰材の飽和単位体積重量の品質管理方法としては、水を張った容器に中詰材を投入し、その際の単位体積重量を測定する方法 (軽装法と一般的に呼ばれる) で行われている場合が多い。

(2) 力学的性質

- 1) 亜鉛スラグの透水係数は相対密度 D_r が 60%の状態 で 1×10^{-3} cm/s 程度である。突き固めにより透水係数は 4 割程度低下する。
- 2) 突き固めによる破碎の程度は低い。
- 3) 亜鉛スラグのせん断抵抗角 ϕ_d は、32° 程度である。

(解説)

1) 透水性

亜鉛スラグの透水試験結果の一例を表 3.16.4に示す。透水係数は $D_r60\%$ の状態で 1×10^{-3} cm/s程度である。

表 3.16.4 亜鉛スラグの透水試験結果の一例

名称	透水係数 k (cm/s)	10%粒径 D_{10} (mm)	試験時の ρ_d (g/cm ³) ($D_r60\%$)
ZNS-A	1.09×10^{-3}	0.38	1.99

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

突き固めた亜鉛スラグの透水試験結果を表 3.16.5に示す。突き固めた亜鉛スラグの透水係数は、 8×10^{-4} cm/s程度であり、突き固めにより透水係数は4割程度低下する。

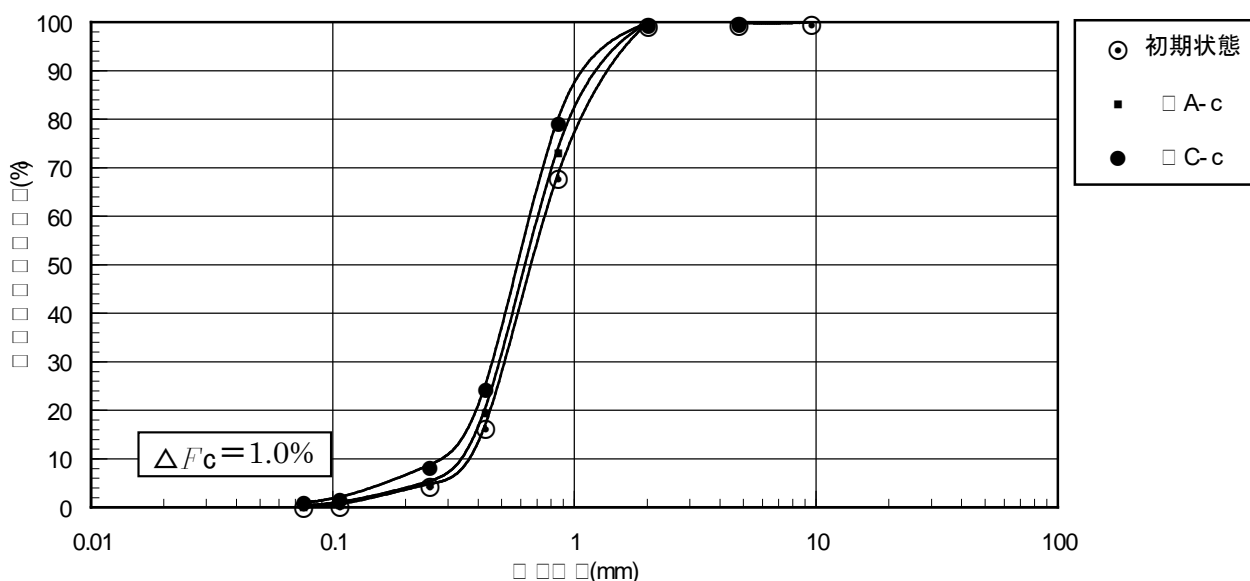
表 3.16.5 突き固めた亜鉛スラグの透水試験結果の一例

名称	k (cm/s) A-c 法	k (cm/s) C-c 法	透水係数の 低下率 (%)
ZNS-A	8.40×10^{-4}	4.85×10^{-4}	42.3%

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

2) 突き固めによる破碎

突き固め透水試験前後の粒度変化を図 3.16.5 に示す。突き固め前後の粒度分布から、破碎の程度は低いことが分かる。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.16.5 突き固め透水試験前後の粒度変化 (ZNS-A)

3) せん断抵抗角

亜鉛スラグの三軸圧縮試験 (CD 法) のせん断抵抗角 ϕ_d の一例を表 3.16.6 に示す。

亜鉛スラグのせん断抵抗角 ϕ_d は $32^\circ \sim 33^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ で 32.3°) である。

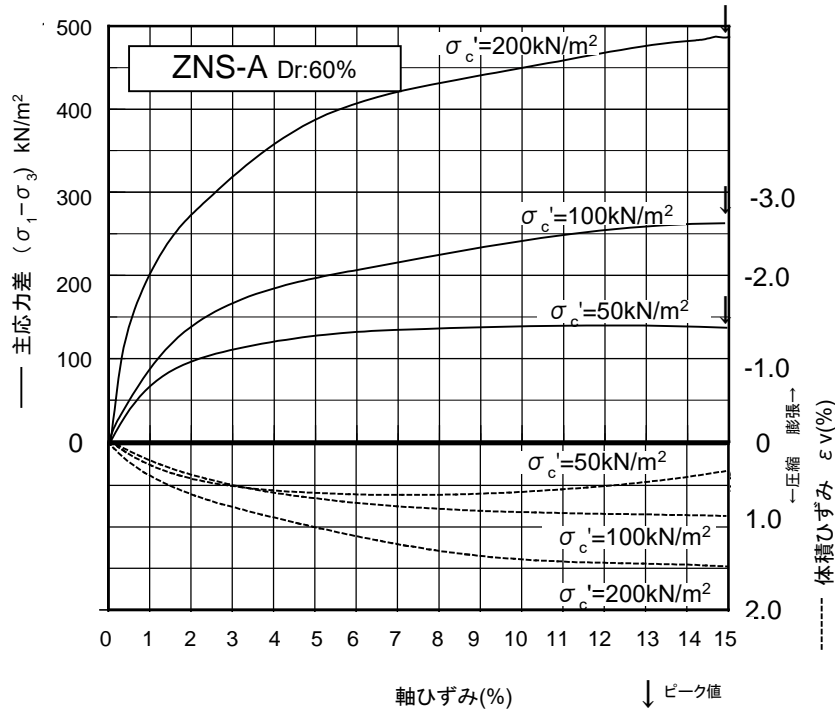
表 3.16.6 亜鉛スラグの三軸圧縮試験 (CD 法) のせん断抵抗角 ϕ_d の一例

	スラグ種	$D_r=40\%$	$D_r=60\%$	$D_r=80\%$
		$\phi_d (^\circ)$	$\phi_d (^\circ)$	$\phi_d (^\circ)$
ZNS-A	水砕品	32.0	32.3	33.4

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

亜鉛スラグの応力ひずみの関係を図 3.16.6 に示す。

ピークの主応力差の発生位置が明確でなく、軸ひずみ 15% のときに生じていること、せん断中の体積ひずみがすべて圧縮側であることが特徴的である。



出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

図 3.16.6 亜鉛スラグの三軸圧縮試験 (CD 法) の応力ひずみの関係

(3) 化学的性質

亜鉛スラグは、酸化鉄 (FeO)、珪酸 (SiO₂)、酸化カルシウム (CaO)、酸化アルミニウム (Al₂O₃) が主成分をなしている。

(解説)

1) 化学成分

亜鉛スラグの化学成分の一例を表 3.16.7 に示す。

表 3.16.7 亜鉛スラグの化学成分分析の一例

化学成分	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Zn	Cu
分析値 (%)	31.30	7.20	21.30	10.20	17.90	2.10	3.40	0.75

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

2) 環境安全品質

① 溶出量

亜鉛スラグに関して、環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-1 による溶出量試験を行った結果の一例を表 3.16.8 に示す。全て港湾用途の基準値未満であった。

表 3.16.8 亜鉛スラグの溶出量試験結果の一例

分析対象	カドミウム	鉛	六価クロム	ひ素	水銀	セレン	ふっ素	ほう素
溶出量(mg/L)	<0.001	<0.005	<0.01	0.02	<0.0005	<0.005	0.20	<0.1
環境安全品質基準 (港湾用途)(mg/L)	≦0.009	≦0.03	≦0.15	≦0.03	≦0.0015	≦0.03	≦15	≦20

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

② 含有量

亜鉛スラグに関して、環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-2に基づく含有量試験値の一例を表 3.16.9に示す。カドミウム、六価クロム、水銀、ほう素、ふっ素は定量限界未満であった。一方、ひ素と鉛は、一般用途における基準値より高くなっていた。

以上のことから、一般用途として使用する場合は、他材料との混合利用が前提となる。一方、含有量に関する基準が適用されない港湾用途においてはそのまま使用することができる。ただし、含有量に関する基準値の10倍未満であることを確認する必要がある。

表 3.16.9 亜鉛スラグの含有量試験結果の一例

分析対象	カドミウム	鉛	六価クロム	ひ素	水銀	セレン	ほう素	ふっ素
含有量(mg/kg)	<1	150	<1	550	<0.1	<1	840	360
基準値(mg/kg)	≦150	≦150	≦250	≦150	≦15	≦150	≦4000	≦4000

出典) 港湾空港工事における非鉄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 9 月)

3.16.3 適用用途

(1) 概要

亜鉛スラグをリサイクル材として利用する場合は、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、亜鉛スラグを各用途に利用する場合の評価を行った結果を表 3.16.10 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 3.16.10 亜鉛スラグの適用用途

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 パーチメント・レンジ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	◎	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1) 亜鉛スラグの本体工中詰材への適用が挙げられ、亜鉛スラグの物理的特性値等を踏まえた適用性が評価されている。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・防波堤整備事業（国交省） ・漁港整備工事（管理者）	1)
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 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) 港湾空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル(平成27年9月、(一財)沿岸技術研究センター)

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) 中詰材

1) 共通事項

本体工に中詰材が用いられる構造物には、ケーソン、鋼板セルなどがある。これらの対象構造物全体として、所要の性能を確保する必要がある。必要な性能が得られているかを照査する際に、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」の第4編施設編 第2章 1.2 ケーソン、第5章 2.7 二重矢板式係船岸、2.9 根入れを有するセル式係船岸、2.10 置きセル式係船岸などを参照することができる。

亜鉛スラグには、天然の砂に比べ単位体積重量が大きく、せん断抵抗角は同程度という特徴がある。また、水硬性のような特有の性質もないため、中詰材としてその特性を有効に活用するならば、天然の砂を用いた場合よりも経済的な設計をすることが期待できる。

上述のように、亜鉛スラグは中詰材として適しており、ケーソン中詰材として、既に多数の利用実績がある。

亜鉛スラグを中詰材に用いる構造物の設計は、材料の特性をよく把握した上で、天然の材料との違いに注意しながら「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に示される天然の砂や砂利を対象とした方法によって行う。

以下、材料の特性値について述べる。

a) 土粒子密度及び単位体積重量

亜鉛スラグ粒子は密度が大きいため、天然の砂よりも大きな単位体積重量を示す。概ね水砕品で 23.5kN/m^3 程度の値を有している。

利用に際しては、実際に使用する亜鉛スラグの性質をよく把握して適切な値を設定する必要がある。

b) せん断強度

$\phi_d=32^\circ$ 程度 ($D_r=60\%$ の場合) の値を有している。本体工中詰材として用いるには十分な値を有していると考えられる。

本体工中詰材の環境安全品質の評価の際には、試験項目は溶出量、環境安全品質基準は港湾用途としてよい。

2) ケーソン中詰材として利用する場合の設計

亜鉛スラグをケーソン中詰材として利用する場合、重力式構造物であるため、重量の大きな材料を用いた方が、経済的な設計を得ることができる場合が多い。ただし、重量が大きい分、内部土圧も大きくなる。この内部土圧の計算は、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に準じて行う。

亜鉛スラグをケーソン中詰材として利用する場合、これらのことを踏まえて、実際に使用する材料の性質をよく把握し、適切に使用する必要がある。

3) セル及び二重矢板式構造物の中詰材として利用する場合の設計

亜鉛スラグをセル及び二重矢板式構造物の中詰材として利用する場合には、重量の大きな材料を用いた方が、せん断変形に対する安定性が重力式壁体としての安定性が高くなり有利となる場合が多い。但し、中詰重量が大きい分セルや矢板の張力は大きくなる。

また、せん断抵抗角の大きな材料を用いた場合にも、せん断変形に対する抵抗モーメントを高めることになり、経済的な設計を得ることができる場合が多い。

内部土圧の計算は、「**港湾の施設の技術上の基準・同解説**」に準じて行う。

亜鉛スラグをケーソン中詰材として利用する場合、これらのことを踏まえて、実際に使用する材料の性質をよく把握し、適切に使用する必要がある。

3.16.4 関係法令

亜鉛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。

3.16.5 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)

亜鉛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。

亜鉛スラグは、ひ素と鉛の含有量が土壌基準より高い値となっている。そのため、用途は港湾用途に限定される。通常再利用は想定されないが、もし再利用する場合は港湾用途に限定される。また、廃棄する場合は廃棄物処理法に対応した処理が必要である。

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。

3.17 貝殻

3.17.1 製造・供給

貝殻（カキ殻、ホタテ殻）は、主に破碎後、建設資材として供給されている。

（解説）

(1) 製造方法

1) カキ殻

カキ殻は、カキ養殖により発生したカキ殻を主に破碎した後、建設資材として利用されている。水質浄化材料としては、カキ殻をそのままの状態でも活用することも可能である。

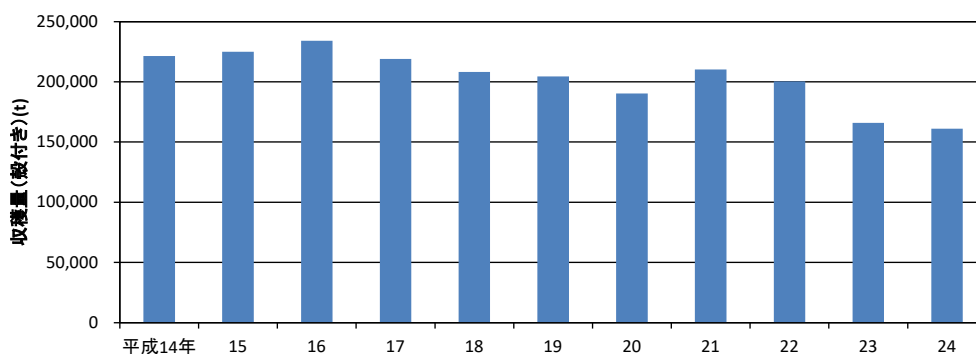
2) ホタテ殻

ホタテ殻については、ホタテの加工過程において原貝の洗浄、及びボイル加工処理を施した後に脱殻した貝殻を原材料とし、コンクリート用細骨材の標準粒度を満足する状態に破碎したものを「シェルサンド」として製造されている。

(2) 供給・利用の状況

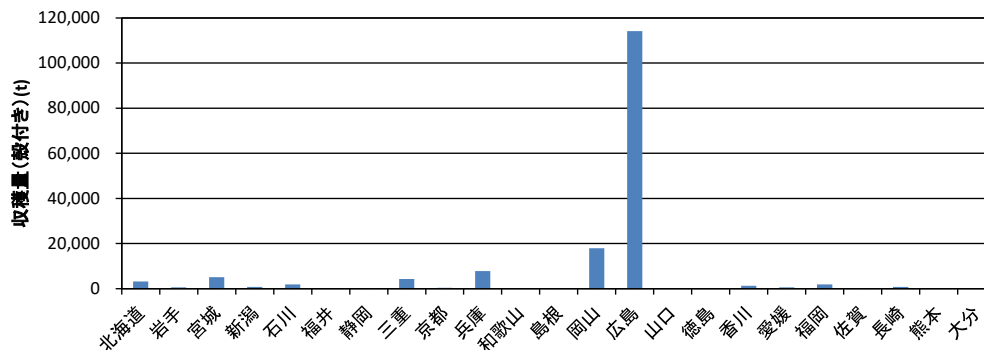
1) カキ殻

カキ殻は、広島県等のカキ収穫量の多い地域で大量に発生することになる。従来は飼料・肥料への活用が主な処分法であったが、近年は建設資材としての有効利用も図られている。



出典) 平成 24 年度漁業・養殖業生産統計

図 3.17.1 カキ収穫量の推移



注) 収穫量がゼロまたは秘匿値である都道府県を除く。

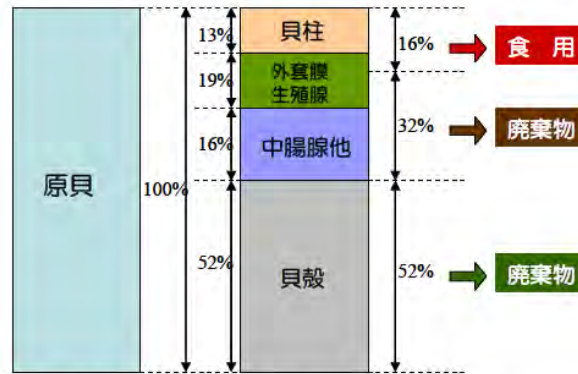
出典) 平成 24 年度漁業・養殖業生産統計

図 3.17.2 都道府県別カキ収穫量（平成 24 年）

2) ホタテ殻

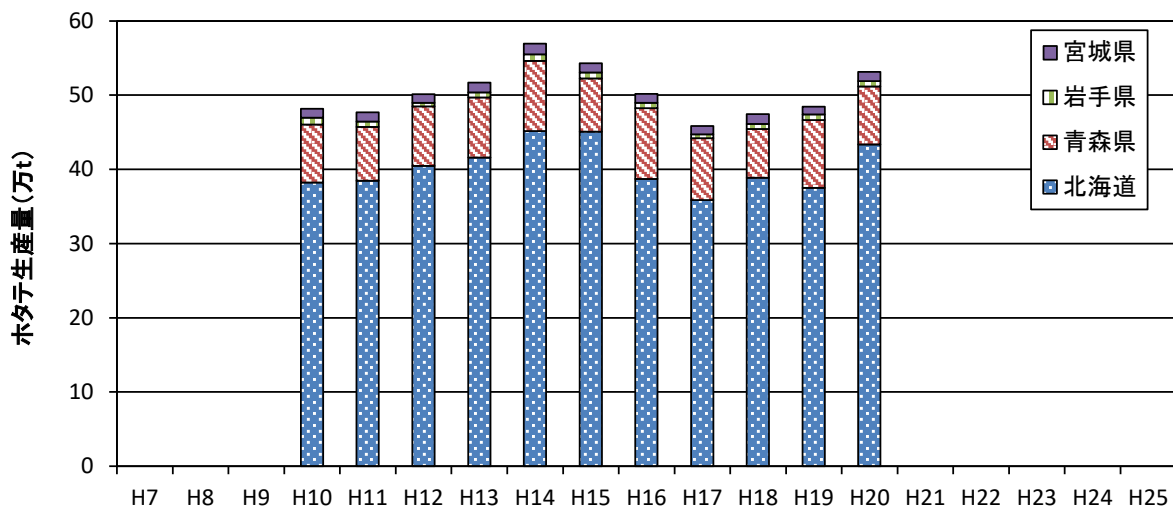
ホタテ貝の平成 20 年度における全国の生産量は約 53 万 t であり、その生産地域のほとんどは北海道沿岸と青森県陸奥湾に限られている。

ホタテ重量の約 50%が貝殻と考えられることから、ホタテ貝殻の年間生産量は約 27 万 t と推測される。



出典) 港湾構造物へのシェルコンクリート適用ガイドライン (案) (平成 21 年 3 月、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所)

図 3.17.3 ホタテの構成区分 (数字は重量比)



出典) 平成 10~17 年度：港湾構造物へのシェルコンクリート適用ガイドライン (案) (平成 21 年 3 月、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所)

平成 18~20 年度：平成 21 年度 青森港シェルコンクリート消波ブロック製作基礎調査報告書 (平成 22 年 3 月、日本国土開発株式会社)

図 3.17.4 ホタテ生産量の推移

3.17.2 品質

粉碎した貝殻（カキ殻、ホタテ殻）の品質について、室内試験等で把握されている。

（解説）

(1) カキ殻

1) 物理・力学的性質

カキ殻、カキ殻と砂の混合材、及び砂の室内土質試験結果の例を表 3.17.1 及び図 3.17.5 に示す。これらの結果より、カキ殻の特徴として以下のものが挙げられる。

- ・せん断抵抗角は砂と同程度かそれより大きい。
- ・比重及び粒子密度は砂より小さい。
- ・透水性は一般的な砂に比べて大きい。
- ・CBR は一般的な砂と同程度である。
- ・破碎されたカキ殻の粒度分布は、砂と同じ分布型である。

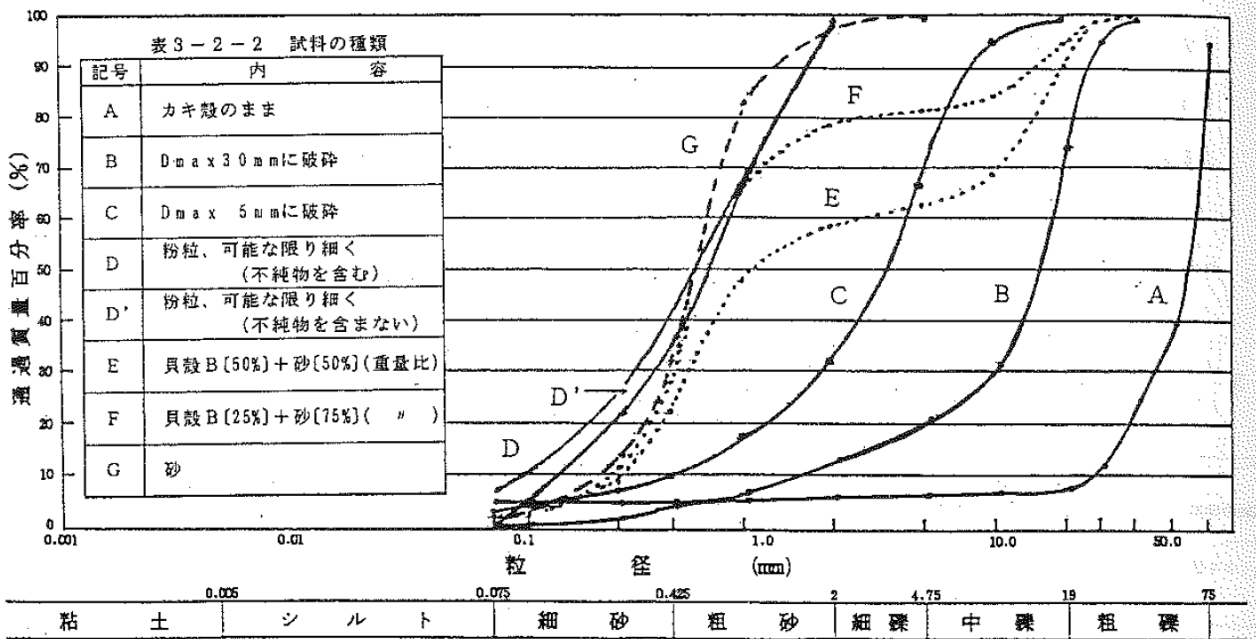
表 3.17.1 カキ殻の室内試験結果（例）

試験の種類 試料の種類	含水比 含水比 %	比 重				最大密度及び最小密度 乾燥密度 g/cm ³		粒度分析試験 50%粒径 mm	改良型1面せん断 内部摩擦角(度)
		土粒子の密度 g/cm ³							
A: カキ殻のまま	33.9	1.737				0.251	0.182	5.9	27~36
B: Dmax 30mmに破碎	27.6	粗粒 1.976	中 2.032	細粒 2.600	2.174	0.617	0.447	1.3	25~55
C: Dmax 5mmに破碎	45.7	2.609				0.730	0.546	3.1	42~57
D: 粉粒、可能な限り細かく (不純物を含む)	12.0	2.629				-	-	0.49	-
D: 粉粒、可能な限り細かく (不純物を含まない)	26.8	2.662				-	-	0.57	-
E: 貝殻B[50%]+砂[50%] (重量比)	19.0	2.420				1.092	0.889	0.95	38~56
F: 貝殻B[25%]+砂[75%] (重量比)	15.8	2.543				1.364	1.078	0.59	35~55
G: 砂	12.4	2.666				1.606	1.278	0.50	38~62(44)

試験の種類 試料の種類	圧縮 指数	透 水 透水係数 cm/s	修 正 C B R			
			締 固 め		締固め度 90% 修正CBR %	締固め度 95% 修正CBR %
			最適含水比 %	最大乾燥密度 g/cm ³		
B: Dmax 30mmに破碎	0.770	3.18×10 ⁰	34.5	1.130	14.8	16.5
C: Dmax 5mmに破碎	0.460	8.07×10 ⁻¹	30.5	1.307	16.2	20.8

注) Dmax は、最大粒径を表す。

出典) 西塚登: SCP 工法におけるカキ殻の活用について、第 11 回港湾技術報告会報告概要集、(財)沿岸開発技術研究センター、平成 6 年



注) D_{max} は、最大粒径を表す。

出典) 西塚登：SCP 工法におけるカキ殻の活用について、第 11 回港湾技術報告会報告概要集、(財)沿岸開発技術研究センター、平成 6 年

図 3.17.5 カキ殻の粒度分布 (例)

2) 化学的性質

カキ殻は炭酸カルシウムを主成分とし、数%の有機物等を含む¹⁾。

(2) ホタテ殻

1) 物理・力学的性質

サンドドレーン材として、ホタテ殻を 75mm 以下に粉砕し、ホタテ殻混合材の特性を比較したものを表 3.17.2 に示す。この結果より、ホタテ殻の特徴として以下のものが挙げられる。

- ・密度は砂と同程度である。
- ・乾燥密度及び単位容積質量は砂より小さい。
- ・粒子が大きいため、透水性は砂より大きい。

表 3.17.2 ホタテ殻の室内試験結果（例）

	試料番号 (深 さ)	購入砂 ホタテ殻:砂 0 : 100	混合材料① ホタテ殻:砂 30 : 70	混合材料② ホタテ殻:砂 50 : 50	混合材料③ ホタテ殻:砂 70 : 30	ホタテ殻 ホタテ殻:砂 100 : 0
	一 般	湿潤密度 ρ_t g/cm ³				
乾燥密度 ρ_d g/cm ³						
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.672	2.676	2.680	2.684	2.709
自然含水比 W_n %		8.6	6.6	5.4	4.4	2.6
間 隙 比 e						
飽 和 度 S_r %						
粒 度	礫 分 2~75mm %	39	50	61	66	92.6
	砂 分 75 μ m~2mm %	53	44	34	29	7.2
	シルト分 5~75 μ m %	4	6	5	5	0.2
	粘土分 5 μ m 未満 %	4				
	均 等 係 数 U_c	15.2	17.5	18.3	25.4	3.4
	曲 率 係 数 U_c'	2.1	1.9	1.9	1.9	1.4
	最 大 粒 径 mm	9.5	26.5	26.5	37.5	37.5
分 類	分 類 名	粘性土混じり礫質砂	粘性土まじり砂質礫	粘性土まじり砂質礫	粒径幅の広い砂質礫	分級された砂まじり礫
	分 類 記 号	(SG-Cs)	(GS-Cs)	(GS-Cs)	(GWS)	(GP-S)
最大最小	最大乾燥密度 g/cm ³	1.457	1.398	1.451	1.412	1.291
	最小乾燥密度 g/cm ³	1.164	1.086	1.153	1.130	0.987
透 水	試験方法	定水位法	定水位法	定水位法	定水位法	定水位法
	透水係数 k cm/s	Dr=40%	2.18×10^{-1}	2.67×10^{-1}	1.74×10^{-1}	2.60×10^{-1}
		Dr=60%	1.02×10^{-1}	2.53×10^{-1}	1.10×10^{-1}	1.82×10^{-1}
		Dr=80%	9.76×10^{-2}	1.40×10^{-1}	7.73×10^{-2}	1.73×10^{-1}
単位容積 質量試験	湿潤単位容積質量 kg/L	1.25	1.20	1.14	1.06	0.90
	含 水 比 %	8.3	6.3	5.3	4.1	2.8
	乾燥単位容積質量 kg/L	1.15	1.13	1.08	1.02	0.88

2) 化学的性質

① 主成分

ホタテ殻の主成分は炭酸カルシウムである。なお、炭酸カルシウムは結晶構造の違いによりカルサイト、アラゴナイト、及びバテライトに分類されるが、破砕されたホタテ殻は、コンクリート用石灰石微粉末の主成分と同じく、カルサイトである。

② 有機不純物及び塩化物量

ホタテの加工過程において、原貝の洗浄、及びボイル加工処理を経ていないホタテ貝殻を用いる場合は、有機不純物及び塩化物量について要求性能を満足することを確認する必要がある。

3.17.3 加工・改良技術

ホタテ殻をシェルコンクリートとして利用するための加工・改良技術については、「港湾構造物へのシェルコンクリート適用ガイドライン（案）」を参照することができる。

（解説）

「港湾構造物へのシェルコンクリート適用ガイドライン（案）」（平成 21 年 3 月、仙台港湾空港技術調査事務所）において、コンクリート用細骨材の標準粒度を満足する状態に破砕したホタテ殻（シェルサンド）を細骨材の一部に置換して製造するコンクリート（シェルコンクリート）について、製造方法、耐久性、港湾構造物での適用性等が示されているので、参照されたい。

3.17.4 適用用途

(1) 概要

貝殻をリサイクル材として利用する場合は、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、貝殻（カキ殻、ホタテ殻）を各用途に利用する場合の評価を行った結果を表 3.17.3、表 3.17.4 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 3.17.3 貝殻（カキ殻）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	△ (砂混合)	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.3-17-12) 【主な内容】 ・1)各種骨材実験等を実施し、蚌貝殻およびカキ殻のコンクリート用細骨材としての適性について検討。カキ殻設置換率15～45%では、粒度分布、密度、吸水率ともに基準を満たした。 ・2)細骨材の利用として多量に用いることにより粗骨材と同様にコンクリート強度が低下する恐れがあることを指摘。	●利用実績なし	1) 2)
② コンクリート用粗骨材	×	E	●現段階では利用が難しいと考えられるもの。 【主な内容】 ・2)牡蠣殻を粗骨材として用いたポラスコンクリート(Oy-PoC)の圧縮強度は砕石ポラスコンクリートよりも低く、透水性は牡蠣殻骨材の異方性の影響がみられ、植生基盤への適用は可能。 ・粗骨材として用いるには牡蠣殻全体の強度が砕石と比較して小さすぎるため、コンクリート強度低下の恐れが懸念。	●利用実績なし	2)
③ 混和材	-	-	●用途対象外	●利用実績なし	
④ ハッチカ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	△ (砂混合)	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。 ・査読なしの研究論文等（講演資料等）に限られている。 ・3)～5)に示す引用文献の精度に不確実性がある。【査読無し】	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・防波堤基礎(改良)工事(国交省)	3) 4) 5)
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	○ (浅場・干潟、覆砂)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・6)カキ殻が持つ様々な機能や有効性に着目し、優れた底質改良材として実用化することを目的とした研究の成果として、底質改良材としての効果などが立証されたことや、カキ殻堆積個所においてゴカイ類の生息密度が周辺海域に比べて格段に高いことなどが明らかにされている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・護岸改良工事(国交省)	6)
⑱ その他	○ (水質浄化材料)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・7)環境浄化への利用を目的とした研究開発が行われている。 ・8)横浜港内日本丸ドックの赤潮が発生しない原因として、大量のカキによる水質浄化が起因している。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・水質浄化実験(管理者)	7) 8)

出典)

- 1) 他産業リサイクル材料の利用技術に関する研究(土木研究所、平成18年3月)
- 2) 牡蠣殻を骨材として利用したポラスコンクリートの植栽能力に関する研究(科学研究費補助金研究成果報告書、平成21年6月)
- 3) カキ殻混り砂の工学的特性について：橋立他第28回土質工学研究発表会、1992
- 4) カキ殻混り砂の特性とサントコンパクションパイルへの適用：第29回土質工学研究発表会、1994
- 5) SCP工法におけるカキ殻の活用について：西塚 第11回港湾技術報告会報告概要集、1994
- 6) 水産系副産物(貝殻)の漁場造成事業への活用(水産工学、平成20年)
- 7) 廃棄牡蠣殻の環境浄化への活性化研究(岩手県環境保健研究センター年報 第4号 平成16年度(2004))
- 8) 日本丸ドックにおけるカキによる水質浄化(横浜市環境科学研究所報 第32号 2008)

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 3.17.4 貝殻（ホタテ殻）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	○+ (砂混合)	B	●利用マニュアル案等が整備されている。 【主な内容】 ・1)2) 細粉砕したホタテ貝殻を山砂と混合して細骨材としたコンクリートについて、その基本的性質や適用性等の検討が行われ、適度な粒度に調整すること、コンクリート用細骨材として適用可能な粒度分布を得ること、普通コンクリートと遜色のない強度を得られることを確認。 ・2) ホタテ貝殻を細骨材の一部に置換したコンクリートを港湾構造物へ適用する際のガイドライン（案）が整備されている。なお、置換率の増加に伴いコンクリートのワーカビリティが低下することが報告されており、施工性を重視して置換率の上限率は50%に規定されている。	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・ケーン根固ブロック製作（国交省）	1) 2)	
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 パーカルトレーン及びサンドマット材	○ (砂混合)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 ・標準材料と同等、または利用実績や実証実験などで確認され利用可能性の高いものと評価。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・地盤改良工法検討調査（国交省）	
⑤ サンドコンパクション材	○ (砂混合)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 ・標準材料と同等、または利用実績や実証実験などで確認され利用可能性の高いものと評価。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・サンドコンパクション材工法検討調査（国交省）	
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	△ (砂混合)	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。	a	●利用実績が多い、または汎用性が高い。 【主な工事】 ・漁港建設工事（国交省）	
⑨ 被覆石、根固・消波ブロック	△ (砂混合)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・3)4)5) ホタテ貝殻を細骨材として利用したシェルコンクリートを消波ブロックに適用する場合の適用性、施工時の留意点等について記載されている。また実証試験により、適用性に問題が無いことが確認されている。	-	●利用実績なし	3) 4) 5)
⑩ 裏込材	△ (砂混合)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・6) 破砕したホタテ貝殻を混合した砂について、内部摩擦角を中心に検討した結果、ホタテ貝殻を混合した砂を裏込材へ適用できることを確認。	-	●利用実績なし	6)
⑪ 裏埋材	△ (砂混合)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・裏込材の技術資料、利用実績等を基に、利用検討が可能と考えられる。	-	●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	△	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】 ・港湾建設工事（国交省）	
⑯ As舗装骨材、Asフィラー材	○ (As舗装骨材、石粉混合)	C	●標準材料に準ずる性能を有する。 【主な内容】 ・7) ホタテ入りアスファルト混合物は、マッシュ試験やホイール試験などの全ての規格を満足することができ、耐流動性、すりへり抵抗性、凍結融解に対する耐久性を有することを確認。	b	●利用実績はあるが、限定される。 【主な工事】 ・道路試験施工（国交省）	7)
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) ホタテ貝殻のコンクリート用細骨材への活用(仙台湾空港技術調査事務所、平成18年)
 2) 港湾構造物へのシェルコンクリート適用ガイドライン(案)(平成21年3月、仙台湾空港技術調査事務所)
 3) 平成21年度 青森港シェルコンクリート消波ブロック製作基礎調査報告書(日本国土開発株式会社)
 4) 平成22年度 青森港シェルコンクリート消波ブロック活用分析調査報告書(日本国土開発株式会社)
 5) 平成21年度補正(実施設計調査費)青森港沖館地区環境配慮型港内反射波対策実証実験報告書(国土交通省東北地方整備局青森港湾事務所)
 6) 水産系副産物(貝殻)の裏込材への有効利用に関する基礎的研究-ホタテ貝殻を混合した砂の内部摩擦角-(海洋開発論文集、平成16年6月)
 7) ホタテ貝殻粉末のアスファルト舗装材としての適用性(北海道開発土木研究所月報、No598 2003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。

(2) コンクリート用細骨材

1) ホタテ殻

細骨材のホタテ殻への置換率の増加に伴いコンクリートのワーカビリティが低下することが報告されており、「**港湾構造物へのシェルコンクリート適用ガイドライン（案）改訂版**」では、置換率の上限率は50%に規定されている。したがって、砂を混合して利用し、利用するコンクリートの性能に応じて、適切に置換率を設定する必要がある。

また、ホタテ殻を港湾構造物に利用する場合は、「**港湾構造物へのシェルコンクリート適用ガイドライン（案）改訂版**」に、ホタテ殻を利用したコンクリートの製造方法、耐久性、港湾構造物での適用性等についての記載があるため、参考とされたい。

港湾構造物以外へのホタテ殻の利用については、利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、関連論文や利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【既存工事における検討事項】

- ・室内試験により、ホタテ貝殻（シェルサンド）及びシェルコンクリートの物理・力学的性質を確認した。（技術開発実証工事）

(3) バーチカルドレーン及びサンドマット材

1) ホタテ殻

ホタテ殻のサンドドレーン材への適用検討については、ホタテ殻を最大粒径 75mm 以下に破碎した材料をホタテ殻と砂の混合比を 3 : 7 の割合（重量比）で混合し、一連の室内試験を経て試験施工が実施されている。この結果、主に以下の結果が得られている¹⁾²⁾。

- ・ホタテ貝殻の破碎においては、生産性と最大粒径の管理が課題となり、これらの克服のためコンクリート破碎機及び振動ふるいを使用する破碎方法とした。
- ・室内試験結果から、透水性などの特性は、砂及び砂と破碎したホタテ貝殻の混合材料では同程度であった。
- ・粒径加積曲線の適用範囲を満足するホタテ貝殻と砂の混合率は 3 : 7（重量比）となった。
- ・沈下傾向等の改良効果の比較確認までは至っていないが、打設後の調査ボーリング結果では、施工時の振動による材料の粒子破壊（細粒化）も認められず、透水性においても室内試験と顕著な差はない。

これらの結果を参考とし、バーチカルドレーン及びサンドマット材としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には要求性能を満たすことを確認する必要がある。

利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 西塚登：ホタテ貝殻を農業資材として利用するための調査について、農業土木北海道、第 23 号、平成 12 年

- 2) 西塚登：港湾における廃棄物埋立地の地盤環境に関する研究の動向、港湾技術振興会（講演会講演概要）、平成 12 年

(4) サンドコンパクションパイル材

1) ホタテ殻

ホタテ殻のサンドコンパクションパイル材への適用検討については、ホタテ殻を最大粒径 75mm 以下に破碎した材料をホタテ殻と砂の混合比を 1:2 の割合（体積比）で混合し、一連の室内試験を経て試験施工が実施されている。この結果、主に以下の結果が得られている¹⁾²⁾。

- ・破碎したホタテ貝殻は、砂とブレンドすることにより粒度分布の範囲を満足する結果となり砂と同等な評価が得られた。
- ・改良効果については、杭間・杭芯での調査結果により設計目標N値を満足し、かつ本施工での事後調査結果と比較し、ほぼ同等の改良効果が得られていることが確認でき、SCP 中詰材料としての適用が可能である。
- ・ケーシング内におけるブレンド材の体積変化率 R_v' は砂に比べ約 10%程度大きくなり、砂を使用した場合と同等の効果を得るためには、砂の使用量に対し 10%程度の割増しを考える必要がある。

これらの結果を参考とし、サンドコンパクションパイル材としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には要求性能を満たすことを確認する必要がある。

利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【既存工事における検討事項】

- ・室内試験及び試験施工により、物理的性質（粒子密度、粒度分布、最大最小密度、含水比）・力学的性質（透水、一面せん断、締固め、修正 CBR、N 値）について確認した。（防波堤基礎工事）

【参考文献】

- 1) 西塚登：ホタテ貝殻を農業資材として利用するための調査について、農業土木北海道、第 23 号、平成 12 年
- 2) 西塚登：港湾における廃棄物埋立地の地盤環境に関する研究の動向、港湾技術振興会（講演会講演概要）、平成 12 年

(5) アスファルト舗装骨材

1) ホタテ殻

ホタテ殻を混合したアスファルト混合物は、マーシャル試験やホイール試験などの全ての規格を満足することができ、耐流動性、すりへり抵抗性、凍結融解に対する耐久性を有することを確認されたとする研究成果がある¹⁾。また、道路試験施工への利用実績がある。

これらの研究成果及び利用実績を基に、アスファルト舗装骨材としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には要求性能を満たすことを確認する必要がある。

利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、研究成果、利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) ホタテ貝殻粉末のアスファルト舗装材としての適用性、北海道開発土木研究所月報、No. 598、平成15年3月

(6) 浅場・干潟造成、覆砂材

1) カキ殻

カキ殻を底質改良材として実用化することを目的とした研究の成果として、底質改良材としての効果などが立証されるとともに、ゴカイ類の生息密度が周辺海域に比べて格段に高いことなどが明らかにされている¹⁾。また、護岸改良工事への利用実績がある。

これらの研究成果や利用実績を基に、浅場・干潟造成材、覆砂材等としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には要求性能を満たすことを確認する必要がある。

利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【既存工事における検討事項】

- ・カキ殻を人工漁礁構造物として利用する場合、環境改善効果把握のためのモニタリングとして、水質、底質、底生生物、付着生物、プランクトン、卵・稚仔及び魚介類調査を実施した。（護岸改良工事）

【参考文献】

- 1) 鳥井正也：水産系副産物（貝殻）の漁場造成事業への活用、水産工学、平成20年

(7) その他（水質浄化材）

1) カキ殻

カキ殻を水質浄化材としての利用を目的とした研究開発が行われている¹⁾。また、水質浄化実験の実績がある。

これらの研究成果や利用実績を基に、水質浄化材としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には要求性能を満たすことを確認する必要がある。

水質浄化材として利用する場合、港湾施設への新たな機能付加を期待することができる利点がある。一方で、利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 岩手県環境保健研究センター：廃棄牡蠣殻の環境浄化への活性化研究、岩手県環境保健研究センター年報、第4号、平成16年度

(8) 今後の検討を要する用途

1) コンクリート用細骨材

① カキ殻

細骨材として多量に用いた場合、コンクリート強度が低下する恐れがあることが指摘されている¹⁾。骨材実験の結果、カキ殻置換率15～45%において、粒度分布、密度、吸水率が基準を満たした事例がある²⁾。したがって、カキ殻をコンクリート用細骨材に用いる場合は、砂を混合して利用し、利用するコンクリートの性能に応じて、適切に置換率を設定する必要がある。

利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、関連論文や利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 牡蠣殻を骨材として利用したポーラスコンクリートの植栽能力に関する研究、科学研究費補助金研究成果報告書、平成21年6月
- 2) (独)土木研究所：他産業リサイクル材料の利用技術に関する研究、平成18年3月

2) サンドコンパクションパイル材

① カキ殻

工学的特性等に関する研究が実施されている状況である¹⁾²⁾³⁾。

利用に当たってのマニュアル類は整備されていないことから、利用実績等を参照し、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 橋立洋一、福田定吉、奥村樹郎、小林正直：カキ殻混り砂の工学的特性について、第28回土質工学会発表会、平成4年
- 2) 橋立洋一、福田定吉、奥村樹郎、小林正直：カキ殻混り砂の特性とサンドコンパクションパイルへの適用、第29回土質工学会発表会、平成6年
- 3) 西塚登：SCP工法におけるカキ殻の活用について、第11回港湾技術報告会報告概要集、平成6年

3) 中詰材

① ホタテ殻

漁港建設工事における実績があるが、利用に当たってのマニュアル類は整備されていない状況である。したがって、利用実績、研究成果等を参考とし、中詰材としての利用可能性について検討すると

ともに、利用する場合には、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【既存工事における検討事項】

- ・湿潤飽和単位容積質量試験を行った結果、設計上の規格値(18.1kN/m³)を満たしていなかったため、混合する中詰砂の見直しを行った。(漁港建設工事)
- ・縮小モデルによる室内試験沈下結果では、初期沈下はホタテ貝殻が砂の沈下を大きく上回り、時間経過とともに沈下量が同様となる結果であった。初期沈下対策として50mm程度の余盛が必要と判断された。(漁港建設工事)
- ・関係自治体より、陸上に堆積した場合の景観や臭いについて懸念があったが、海上輸送し、そのまま海上投入することにより対応した。(漁港建設工事)

4) 被覆石、根固・消波ブロック

① ホタテ殻

ホタテ殻を細骨材として利用したシェルコンクリートの消波ブロックへの適用については、適用性や施工時の留意点等について検討するとともに、実証試験の実施により、適用性に問題がないことを確認された実績¹⁾²⁾³⁾がある。これらの利用実績を参考とし、被覆石、根固・消波ブロックとしての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 日本国土開発株式会社：平成 21 年度青森港シェルコンクリート消波ブロック製作基礎調査報告書
- 2) 日本国土開発株式会社：平成 22 年度青森港シェルコンクリート消波ブロック活用分析調査報告書
- 3) 国土交通省東北地方整備局青森港湾事務所：平成 21 年度補正（実施設計調査費）青森港沖館地区環境配慮型港内反射波対策実証実験報告書

5) 裏込材

① ホタテ殻

破碎したホタテ貝殻を混合した砂について、せん断抵抗角を中心に検討した結果、裏込材へ適用できることが確認された研究成果¹⁾がある。

これらの情報を参考とし、裏込材としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 水産系副産物(貝殻)の裏込材への有効利用に関する基礎的研究-ホタテ貝殻を混合した砂の内部摩擦角-、海洋開発論文集、平成 16 年 6 月

6) 裏埋材

① ホタテ殻

利用実績はみられないものの、裏込材へ適用できることが確認された研究成果¹⁾があることから、要求性能の面から、裏埋材としての利用も可能と考えられる。

これらの情報を参考とし、裏埋材としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【参考文献】

- 1) 水産系副産物(貝殻)の裏込材への有効利用に関する基礎的研究-ホタテ貝殻を混合した砂の内部摩擦角-、海洋開発論文集、平成16年6月

7) 路盤材

① ホタテ殻

港湾建設工事において、ホタテ殻を路盤材に利用した実績がある。これらの利用実績等を基に、路盤材としての利用可能性について検討するとともに、利用する場合には、必要に応じて室内試験や試験施工等により要求性能を満足することを確認することが望ましい。

【既存工事における検討事項】

- ・室内試験により物理・力学的性質（粒度、含水比、最大乾燥密度、修正CBR）が要求性能を満足していることを確認した。（防波堤外一連工事）
- ・材料に粉末状のものが混在しており、また若干の異臭を放っていたため、運搬中の飛散防止及び異臭対策としてシート等で確実に覆うこととした。（防波堤外一連工事）

3.17.5 関連法令

貝殻（カキ殻、ホタテ殻）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。

3.17.6 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）

貝殻（カキ殻、ホタテ殻）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、使用したり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。