

I 鉄鋼スラグ製品の市場・需要分野

1 セメント

コンクリート構造物の耐久性を向上

鉄鋼スラグ製品は現在、その特性を活かし、各方面で利用されているが、その最大の需要分野はセメントである。鉄鋼スラグ製品の約50%、高炉スラグだけで見ると約70%がセメント原料に使われている。

高炉セメントを使用したコンクリートは、普通セメントを



高炉セメントは、セメント輸送専用車や袋詰めして出荷

使用したものに比べて長期強度が大きい特長を持っており、多方面の用途に使われている。さらに優れた性質として、アルカリ骨材反応の抑制効果、海水や化学物質に対する耐久性が高い、塩素イオンによる鉄筋の腐食が少ない、発熱速度が小さい、環境への負荷が少ない、などが挙げられる。

高炉セメントはこれらの性質が高く評価され、護岸やダムなどの海洋・河川構造物、道路・鉄道構造物、各種土木、建築基礎、地盤改良工事などに使われており、国土交通省・農林水産省の直轄土木工事では、セメント・生コンとして90%以上の使用実績がある。これはグリーン購入法の特定期調達品目への指定、公共工事仕様書への記載などが大きな要因となっている。

また、最近では、建築工事での使用も増加している。杭や基礎、地中梁、連続壁などは、一般に部材断面が大きいこと、コンクリートの養生期間が取りやすいこと、かぶり厚さが比較的大きいことから、高炉セメントの使用が適している。東京都建築物環境計画書制度や各自治体で実施されているCASBEE(※)では、大型の建築工事

高炉セメントが使用された構造物

小山ダム(茨城県)



明石海峡大橋



※ CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency、建築物総合環境性能評価システム)：2001年、国土交通省の主導のもとに、(一財)住宅・建築SDGs推進センター内に設置された委員会で開発された、省エネルギー、省資源など環境負荷削減に加え、室内の快適性、景観など環境品質・性能の向上も含めた、建築物の環境性能を総合的に評価するシステム。

への高炉セメントの使用が推奨されている。東京都では同制度が2002年度から始まり、これまでに対象となる特定建築物の30%に高炉セメントが採用された。

CO₂の発生量を低減

日本のセメント産業は、温室効果ガスの総排出量の約4%に相当するCO₂を排出している。この殆どは、セメントの中間製品であるクリンカを製造する過程で、

石灰石を焼成することにより発生する。高炉セメントは、普通セメントに高炉スラグ微粉末を多量に混合させるため、クリンカの構成比を大幅に引き下げることによって、CO₂が削減できる。

政府は地球温暖化対策として、高炉セメントを拡大するため、経済産業省が「混合セメントの普及拡大方策」を検討するとともに、2021年10月に閣議決定された「2030年度温室効果ガス削減目標」の計画「混合セメントの利用拡大」が施策の一つに織り込まれている。

高炉セメントによるCO₂削減効果 (年間推計値との比較)

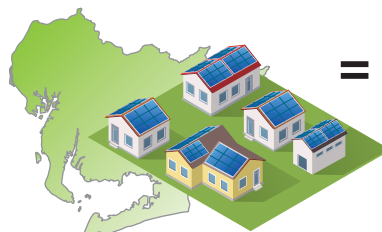
高炉セメントの生産による年間CO₂削減量 = 360万トン

- 秋田県内の森林(84万ha)によるCO₂吸収量



= 342万トン

- 愛知県内の戸建住宅(156万戸)に太陽光発電を設置した場合のCO₂削減量



= 359万トン

新国立競技場 (2019年)



東京都庁舎 (1990年)



2 コンクリート用骨材

高炉スラグ骨材と電気炉酸化スラグ骨材

鉄鋼スラグから製造されるコンクリート用骨材としては、高炉スラグ骨材と電気炉酸化スラグ骨材があり、それぞれに粗骨材と細骨材がある。溶融状態の高炉スラグを徐冷し、粒度調整したものが高炉スラグ粗骨材、水で急冷した水砕スラグを粒度調整したものが高炉スラグ細骨材である。電気炉酸化スラグ骨材は電気炉から取り出された溶融スラグを徐冷または水や空気などで急冷し、粒度調整して造られた骨材である。

高炉スラグ骨材は、1977年に粗骨材、1981年に細骨材のJISが制定され、さらに日本建築学会や土木学会の各種指針に織り込まれ、主要なコンクリート骨材の一つとして広く使用されている。電気炉酸化スラグ骨材も2003年にJISが制定され、利用が進みつつある。

鉄鋼スラグ骨材の特徴

鉄鋼スラグ骨材は適切な品質管理のもとで製造された工業製品であり、コンクリートの耐久性に影響を及ぼす有機不純物や粘土、貝殻などを含まないこと、品質のばらつきが少ないことなどの優位な特徴がある。

これらに加えて、最近高炉スラグ細骨材にはコン

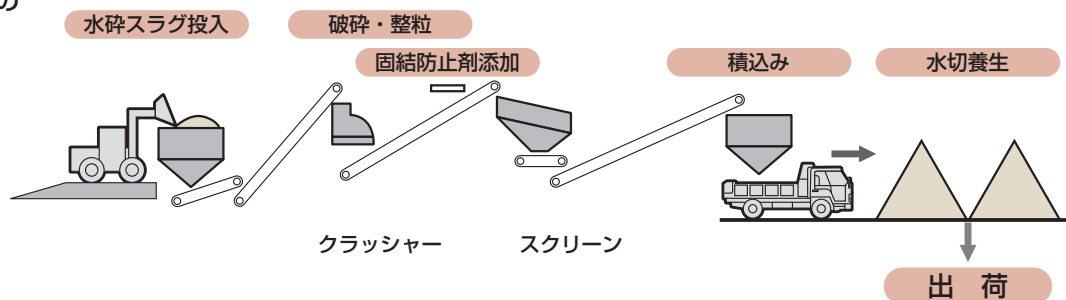
クリートの乾燥収縮を抑制する効果、耐硫酸性や凍結融解抵抗性を向上させる効果があることが注目されている。適切な配合、施工と組み合わせることによりコンクリートの耐久性向上への寄与が期待される。電気炉酸化スラグ骨材は、絶乾密度が約3.6g/cm³と他の骨材に比べて高いという特長を生かし、放射線遮蔽用コンクリートや重量コンクリートにも適用されている。

両骨材のJISには、2013年の改正で環境に対する安全性の観点から溶出量と含有量の規定が導入され、より安心して使用できるコンクリート用資材として認知されている。

天然骨材の代替材として環境保全に貢献

2006年の瀬戸内海における海砂採取全面禁止や中国産砂の禁輸による海外砂の輸入減少を契機に、天然骨材枯渇への対応という社会的ニーズが高まり、鉄鋼スラグ骨材の販売量は大幅に増えた。高炉スラグ骨材は2002年度、電気炉酸化スラグ骨材は2005年度にグリーン購入法に基づく特定調達品目に指定されており、天然資源の開発抑制による環境保全や天然資源採掘時の使用エネルギー及びそれに伴い発生するCO₂削減に貢献する環境資材として高く評価されている。

高炉スラグ細骨材の製造フロー例



細骨材と粗骨材



高炉スラグ細骨材



高炉スラグ粗骨材



電気炉酸化スラグ細骨材



電気炉酸化スラグ粗骨材

適用例



神戸港メリケンパークで敷き詰められたインターロッキングブロック（高炉スラグ細骨材）



広島港護岸工事のプレキャストブロック（高炉スラグ細骨材）



消波ブロック（電気炉酸化スラグ骨材）

鉄鋼スラグ骨材の特徴

- 有機不純物、粘土、貝殻などを含まない、均一な化学成分の工業製品である。
- 天然砂利や碎石の代わりとして使用することで貴重な天然資源の保全に貢献する。

3 道路

優れた耐久性と経済性

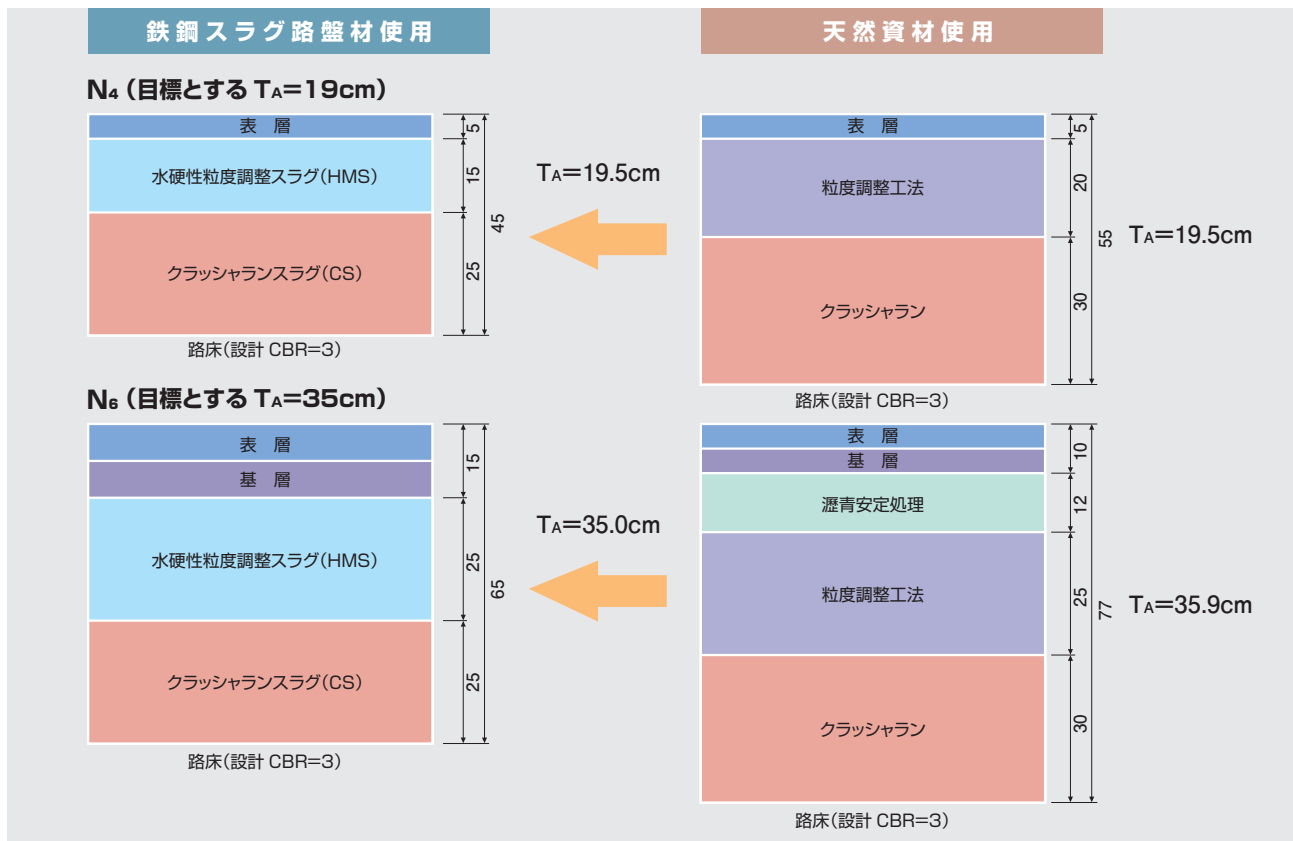
道路用鉄鋼スラグは、高炉スラグおよび製鋼スラグを破碎・整粒し舗装用素材として製造するもので、それぞれを単体または混合して製造する路盤材や、製鋼スラグから製造するアスファルト混合物用骨材として使用されている。

鉄鋼スラグの道路用材料への活用は、1960年代から研究が開始され、エージング技術、粒度構成など

の重要な技術が開発された。その結果、設計施工指針が作成され、アスファルト舗装要綱に組み込まれた。さらに1979年にはJISが制定され、環境安全面での品質基準を取り入れる等、数回の改正を経て現在のJIS A 5015に至っている。

代表的な鉄鋼スラグ路盤材である水硬性粒度調整スラグ「HMS-25(※)」は、長期にわたって硬化するため、その特長を活かした利用により、一般の碎石(粒度調整碎石)よりも断面を薄くすることができる。また、施工直後の交通解放が可能、作業中に雨が降

鉄鋼スラグ路盤材と天然資材との比較



※ HMS-25: 鉄鋼スラグを 0~25mm に粒度調整した上層路盤材。

り出した場合にも路盤の締め固め作業が通行可能など、良好な施工性も高く評価されている。製鋼スラグは、路盤材としての利用の他、硬質かつ耐摩耗性に優れていることからアスファルト混合物の骨材としても使用されている。

2002年度には鉄鋼スラグ混入路盤材と鉄鋼スラグ混入アスファルト混合物が、グリーン購入法における特定調達品目に指定されており、環境保全に資する材料としても広く認知されている。

黄色水・膨張崩壊対策は エージングで解決

高炉スラグには少量の硫黄が含まれている。硫黄は水と接触すると黄色に変色したり、温泉臭がすることがあるが、この現象を防止するため、破碎後に空気と硫黄を反応させ安定したチオ硫酸イオンや硫酸イオンに酸化させたり、炭酸ガスで中性化し黄色水の色や臭気を消失させるエージングを行っている。エージングは、破碎・ふるい分けした製造直後品を安定するまでヤードに積み付ける方法で実施されている。

製鋼スラグもまたエージングを行っている。製鋼原料（銑鉄、スクラップ）の精錬に用いる生石灰は、十分に溶解されないと不安定なままスラグ中に残存する場合がある。この溶解不十分な生石灰は遊離石灰と呼ばれ、水と反応すると体積が膨張するため、アスファルトが下から押されて破壊される花咲き現象（ポップアウト）を起こす場合がある。この現象を防止するため、エージングによって事前に遊離石灰を水分と反応させて消石灰に変え、体積を安定させている。エージングには蒸気または高圧蒸気の高温と水を利用して反応を促進する方法や破碎後安定化するまでヤードに積み付ける方法がある。

膨張安定性評価の指標である水浸膨張比の規格値は、平成27年の「鉄鋼スラグ路盤設計施工指針」発刊時に検討し、規格値を1.5%から1.0%に厳格化した。

施工例



鉄鋼スラグ混入路盤材

使用例



東九州自動車道（NEXCO 西日本提供）



東九州自動車道（NEXCO 西日本提供）

4 土木・港湾

天然砂より軽量

土工用水砕スラグは、護岸の裏込め、軟弱地盤対策用の覆土、路床、盛土などに利用されている。

砂状の水砕スラグは、天然砂と比べて軽量、せん断抵抗角が大きいといった物理的、力学的特性を有する。さらに、経時的に水和して固結する水硬性を有しており、地震時の液状化に対する抵抗性が大きくなる。護岸の裏込め、裏埋め材料として水砕スラグを用いると、軽いことと、せん断抵抗角が大きいことが効果的に作用して、前面の矢板などに働く主働土圧を大幅に減少させ、矢板の断面を小さくすることができる。

また、完全に固結すれば地震時に液状化しなくなるため、液状化対策が不要となる。軟弱地盤の覆土による改良に水砕スラグを用いた場合、軽いこと、水の影響を受けないこと、トラフィカビリティーに優れることから、軟弱層の側方流動の危険性や圧密沈下量も減少する。

土工用水砕スラグの特徴

- 天然砂と比べて軽量
(湿潤単位体積重量11~16 kN/m³)
- せん断抵抗角35°以上、設計CBR20~30%で、天然砂以上の強度を有する
- 水硬性により長期強度や耐久性が向上
- 固結していない場合の透水係数10⁻²~10⁻⁴ m/sであり、良質な砂と同等以上

水砕スラグで造成した路床は、軟弱地盤に適した軽い路体で、交通荷重に対して大きな変形を起こさず、十分な支持強度を有する。また水硬性の発現により、繰り返し交通荷重の作用の下でも浸透水による強度低下を起こさないなどの特長があり、経済性、施工性はもちろんのこと、道路構造物としての耐久性にも優れている。

水砕スラグで盛土をする場合は軽量であること、せん断抵抗角が大きいことから、軟弱地盤上の盛土工事においては、設計上有利となる場合がある。

裏込め材の軽量化でコスト縮減 —名古屋港飛鳥ふ頭南地区岸壁—

2005年に共用開始された名古屋港飛鳥ふ頭南側コンテナターミナルは、水深16mの耐震強化岸壁であり、1万TEU(*)超のコンテナ船の接岸も可能な国内最大級のものである。

この岸壁の裏埋め材を砕石などから水砕スラグに設計を見直すことで、前面の鋼管矢板や控え杭の断面を小さくすることができ、工事コストを大幅に縮減(国土交通省名古屋港湾事務所公表値:約18%縮減)した。

超軟弱地盤の沈下対策 —北九州空港—

2000~2002年にかけて、北九州空港の軟弱地盤改良工事で約150万tの高炉水砕スラグが使われた。北九州空港は周防灘の沖合約3kmに建設され、北九州港や荻田港などの航路整備で発生する浚渫土を埋め立てに活用したため、超軟弱地盤の沈下対策が求められた。浚渫土は自然状態のままでは強固な地盤になるまでに、相当長期間かかる

* TEU: コンテナ船の積載能力を示す単位。1 TEUで20フィートコンテナ1個分に相当。

と言われている。超軟弱地盤を早期に強固な地盤にするため、空港建設ではサンドマットを施工し、ペーパードレイン工法による地盤改良が行われた。高炉水砕スラグは、天然材に比べて軽量であるため、埋立地の沈下量を低減させることが評価され、サンドマット材の一部に採用された。工事は新門司沖の第一工区で海砂層 90cm 厚の上に高炉水砕スラグ 60cm 厚(約 55 万 m³)、第二工区で海砂層 90cm 厚の上に高炉水砕スラグ 90cm 厚(約 65 万 m³)が敷設された。

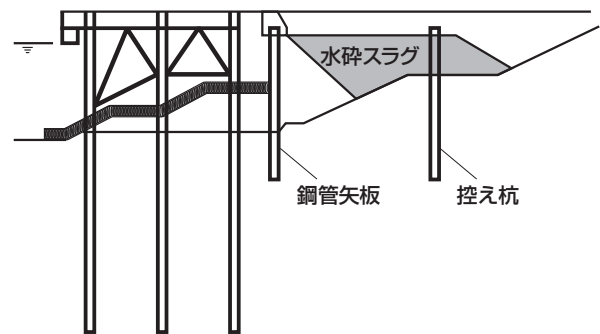
北九州空港



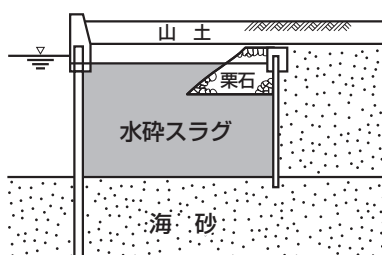
名古屋港飛島ふ頭



名古屋港飛島ふ頭南地区岸壁



裏込め鋼矢板タイプとケーソンタイプ



5 地盤改良

周辺海域への影響を実証

鉄鋼スラグ協会は、1993年度から(財)沿岸技術研究センターと共同で製鋼スラグの港湾工用材料としての適用技術の研究に着手し、2000年に『港湾工用製鋼スラグ利用手引書』を作成、2015年2月には、(財)沿岸技術研究センターより『港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル』が発刊されている。

この研究では、物理特性だけでなく、神戸ポートアイランドで陸上サンドコンパクションパイル(SCP)、広島港で海上SCPの試験工事を行い、海域に与える影響も調査した。SCPとは、軟弱地盤中に締め固めた砂の杭を打ち込むことで地盤の強度を上げる地盤改良工法である。地盤改良用製鋼スラグは、天然の砂に比べて単位体積質量とせん断抵抗角が大きいという土質工学的特性を活かし、地盤改良工事の工費低減を可能とすることがわかった。

また、製鋼スラグの適用による海域への環境影響については、製鋼スラグからの溶出水のpHは通常高い値を示すものの、SCP中詰材として利用した場合にはケーシングパイプ中に封じ込められて施工され、海水と直接接触することがほとんどないため周辺海域のpHの上昇はほとんどないことが確認されている。

SCP材料に天然砂の代替として製鋼スラグが利用可能と評価されたことで、各地の港湾で利用された(P44表参照)。特に、瀬戸内海などでは、自然保護の観点から海砂採取を禁止する自治体が増えたこともあり、SCP中詰材として地盤改良用製鋼スラグは急速に普及することとなった。

広島県の大竹港東栄地区の多目的国際ターミナル岸壁(-11m)の整備では、重力式護岸下の沖積粘土層約20m厚の地盤改良において、製鋼スラグを中詰材としたSCP工法(改良率70%)が採用された。その結果、約5%のコスト削減が図られるとともに、周辺海域への環境影響を考慮し、工事期間中は環境監視、使用材料については海洋汚染防止法に基づく溶出試験を行い、全て基準値をクリアしていることが確認できた。

液状化対策としての利用

—名古屋港鍋田ふ頭岸壁—

陸上におけるSCP工法での利用事例として、2009年名古屋港鍋田ふ頭岸壁(-12m)地盤改良工事に採用された。従来の天然砂を用いた場合と同等の施工性で材料費が安価であることから、全体で約10%のコスト改善に寄与した。(国交省中部地方整備局 資料「公共事業コスト構造改善プログラム」【施策名：Ⅱ計画・設計・施工の最適化【2】施工の見直し施策11】) 使用材料の変更によるコスト改善 より)

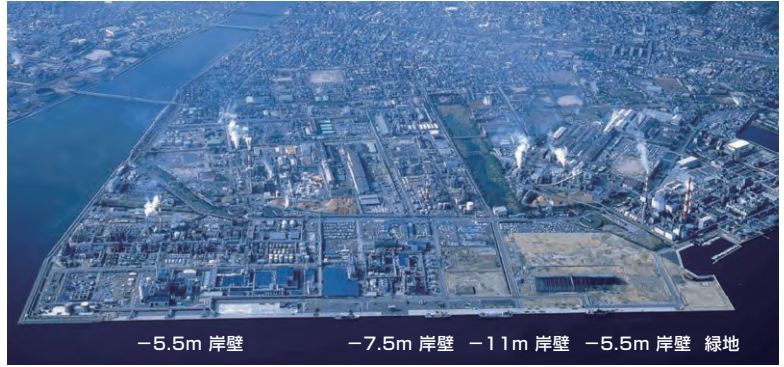
地盤改良用製鋼スラグの特徴

- 形状は稜角に富み、表面は粗で、天然の碎石や砂に類似
- 粒子密度は $3.2 \sim 3.7 \text{ g/cm}^3$ と天然石材と比べて大きく、単位体積質量も湿潤重量(含水比5%)で $19 \sim 26 \text{ kN/m}^3$ 、水中で $14 \sim 16 \text{ kN/m}^3$ と重い
- せん断抵抗角 40° 以上

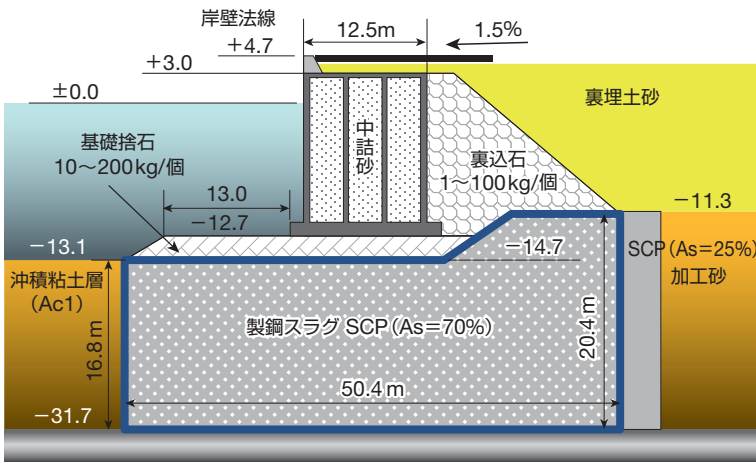
広島県大竹港東栄地区 多目的国際ターミナル岸壁 (-11m) 整備



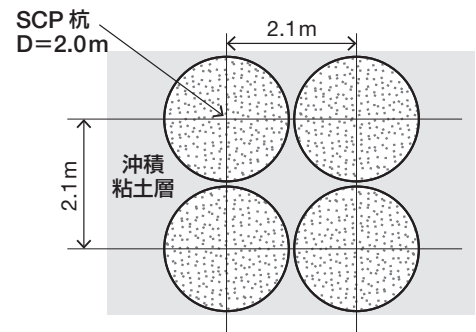
海上SCP施工状況



大竹港東栄地区岸壁全景 (広島湾再生プロジェクトHP)



大竹港東栄地区岸壁断面

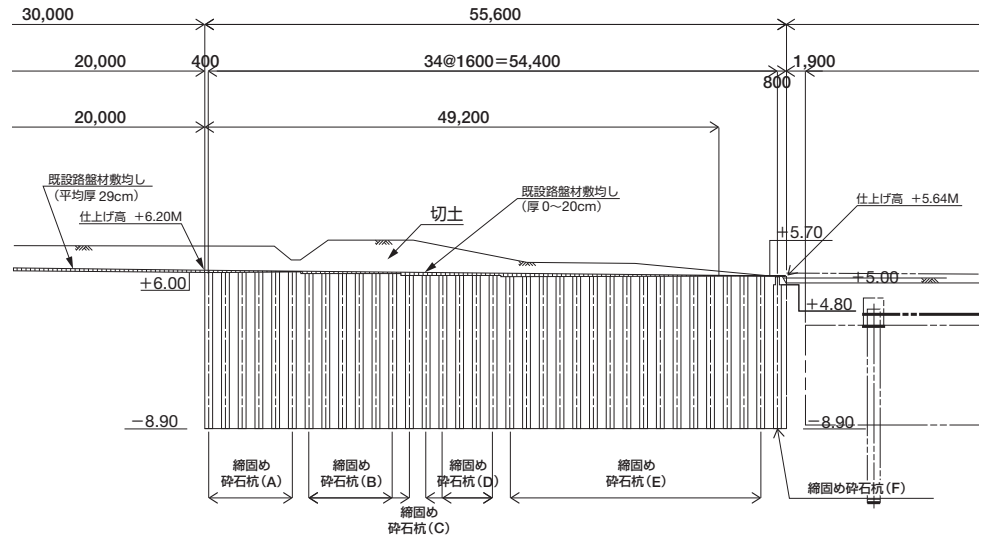


SCP平面配置

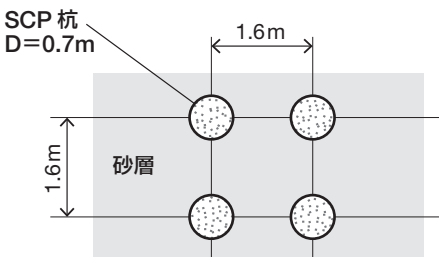
名古屋港鍋田ふ頭岸壁 (-12m) 地盤改良工事



陸上SCP施工状況



製鋼スラグSCP施工断面の一例



鍋田埠頭SCP配置図

6

肥料

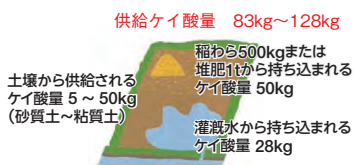
鉄鋼スラグを原料とする肥料は農林水産省が定める「肥料の品質の確保等に関する法律」に規格が定められている。主な規格は「鉍さいけい酸質肥料」「副産石灰肥料」「鉍さいりん酸肥料」「副産肥料」などである。鉄鋼スラグの内、高炉スラグは肥料成分である酸化カルシウム(CaO)、ケイ酸(SiO₂)、苦土(MgO)

を含有、製鋼スラグは酸化カルシウム、ケイ酸、苦土の他に、酸化鉄(FeO)、酸化マンガン(MnO)、リン酸(P₂O₅)などを含有する。

高炉スラグを原料とする肥料は主に稲作に、製鋼スラグを原料とする肥料は稲作の他に畑作、牧草用として幅広く利用されている。

●ケイ酸の必要量

(10aあたり)



差引不足ケイ酸全量 28kg~73kg



稲作への効果(高炉スラグ肥料、製鋼スラグ肥料)

鉄鋼スラグ肥料の施用

ケイ酸の効果

- ① 葉の受光態勢が向上、光合成が促進します。
- ② 茎を丈夫にし、倒伏を防止します。
- ③ 葉身や茎が硬くなり、いもち病菌やニカメイチュウの侵入を抑制します。
- ④ ケイ素が表皮のクチクラ層の下に集積し、クチクラ蒸散を抑制することで、高温時でも気孔蒸散が維持され稲体温度の上昇を抑えます。
- ⑤ 根の酸化力の促進による根の活力を向上させます。

アルカリ分の効果

- 土壌のpHを上昇させます。
- pH改良により生稲わらの分解を促進します。
- 作物の生育に適したpHを維持します。

鉄・マンガンの効果(製鋼スラグ肥料)

- 異常還元抑制により根腐れを防止します。

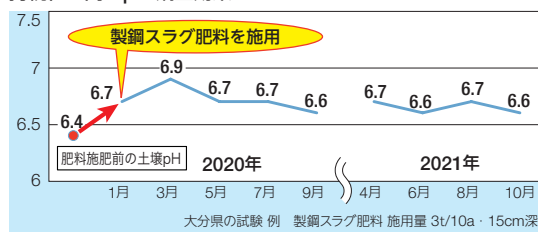
水稻の登熟期間の高温障害等による産米の品質・収量低下が顕著です。スラグ肥料をはじめとする土づくり肥料の重要性が今、見直されています。

畑作への効果(製鋼スラグ肥料)

根こぶ病、ホモプシス根腐れ病、フザリウム病害などは、土壌中の病原菌が根に感染して地上部を枯らす土壌病害の典型です。これらの病原菌は酸性土壌を好むことから、アルカリ分を土壌に施用して、pHを7.0~7.5に改良することで発病を抑制できます。但し、pHを高め過ぎるとマンガン、ホウ素などの微量元素欠乏症が出やすくなります。

製鋼スラグ肥料には、土壌のpHを改善・持続させることが出来るアルカリ分の他に、鉄・マグネシウム・マンガン・ホウ素などのミネラル分が含まれており、農作物を元気にします。

持続性の高いpH 矯正効果



ハクサイへのスラグ肥料の効果

スラグ区はpH5.7の圃場に製鋼スラグ肥料を投入し、pH7.5に調整。

● 根こぶ病多区 (発病株率 65%)

根こぶ病

● 製鋼スラグ肥料施用区 (発病株率 0%)

大分県農林水産研究指導センターの試験圃場の結果
製鋼スラグ肥料 施用量 28t/10a・20cm深

※施用量については、散布地の土壌、及び施用する製鋼スラグ肥料に関するpH緩衝曲線を作成するなど、農業指導員等にご相談して決定下さい。

製鋼スラグ肥料は、畑に鉄分、マグネシウム、マンガンなどのミネラル分を供給すると共に、pHの向上、維持に貢献します。

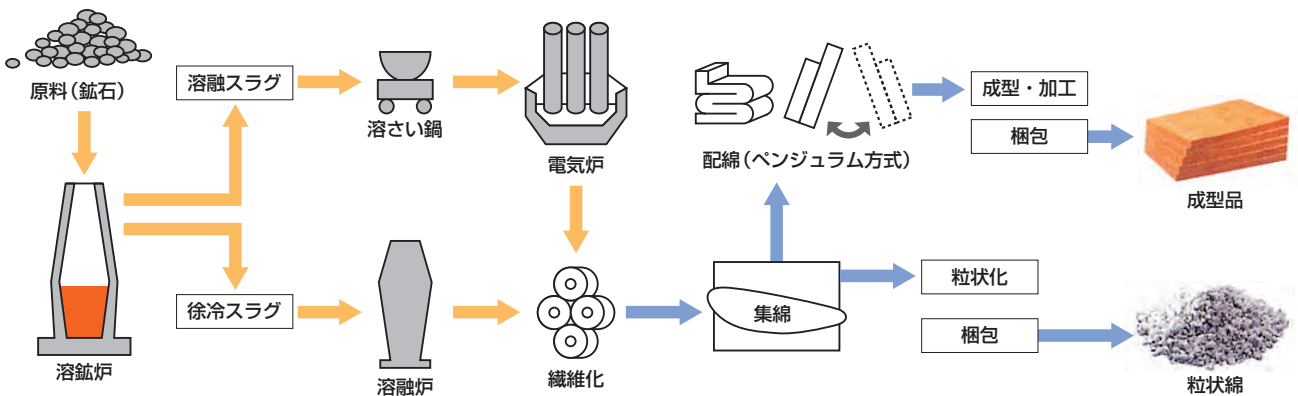
7

ロックウール

高炉スラグなどの原料をキュポラや電気炉で高温で再熔融し、吹き飛ばして繊維状にする。繊維状にしたロックウールは集綿室で集綿され、用途に応じて解繊・粒状化して「粒状綿」に、バインダーを添加

して硬化炉で固めて、一定の密度・厚さに調整して、ボード状、住宅用のマット状などの「成型品」に加工し、製品にする。

製造フロー図



ロックウールと断面図



ロックウール適用例

