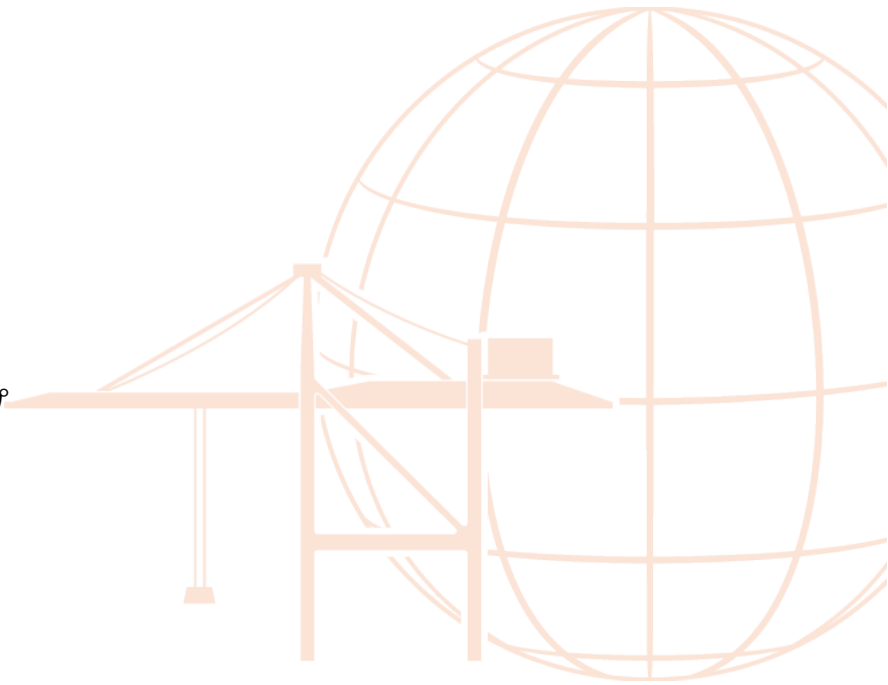


鈰滓の地盤材料としての循環利用に向けて

松村 聡

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所
港湾空港技術研究所 地盤研究領域 基礎工グループ





鉋さいと鉋滓

鉋さい：廃棄物の処理及び清掃に関する法律 第二条第四項第一号 産業廃棄物
同 施行令 第二条第八号 鉋さい

⇒ 金属を精錬する際などに発生する副産物（鉄鋼スラグ，非鉄金属スラグなど）
スラグとも呼ばれる

鉋滓：埋立などの地盤材料に再利用されるスラグ，スラグ混じり土（廃棄物ではない）
特に，港湾・空港の地盤には鉄鋼スラグ（高炉スラグ，製鋼スラグなど）が多い

鉄鋼スラグ協会（2021年調べ）によれば，生産量3500万トン程度，道路用25%，セメント52%，
その他（土木資材：骨材，地盤改良，埋立等，再利用）として利活用されている。



スラグ発生土の再利用による期待と課題

港湾施設の地盤材料として産業副産物のスラグが使用され、のちに当該施設を改良や撤去する際に掘削土砂として回収される例が近年散見される。

回収されたスラグの材料特性（力学特性、環境安全品質等）を適切に評価できれば、地盤材料等として再利用することが可能となる。

スラグ発生土の地盤材料としての循環利用が実現すれば、環境負荷を抑えながら効率的な港湾施設の整備に資するものと期待される。

横浜港本牧地区の例

既存の裏込め、路盤等から回収されたスラグ発生土の活用を積極的に実施、検討している。



(京浜港湾事務所HPより：横浜港国際海上CT再編整備事業)



スラグ発生土を再利用する際の地盤工学的課題：潜在水硬性

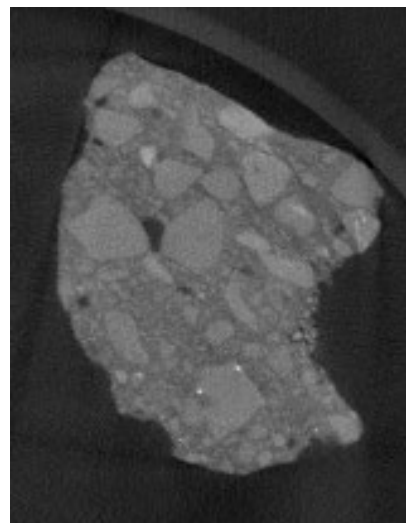
裏込材等として利用される高炉スラグや製鋼スラグ等の鉄鋼スラグは、水と反応して固結する。

課題1：スラグ発生土とスラグ新材では、その材料特性が異なる。

課題2：撤去・再利用するにあたり、解砕や粒度調整等の作業が必要となる。

※「スラグ新材の初めて利用」とも「一般土砂の再利用」とも異なるスラグ発生土特有の課題。

※「R5港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」でも明確な記載がない。



スラグ発生土：水硬性粒度調整スラグの例

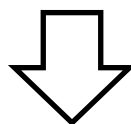


スラグの地盤材料としての循環利用に関する研究

今後、更新時期を迎える施設がさらに増加し、スラグ発生土の取り扱いが問題となる。

コストや環境負荷等の観点から良質な自然地盤材料の調達もさらに難しくなる。

スラグ発生土の地盤材料としての循環利用の考え方、設計・施工上の留意点等を整理しておくことは重要である。



本研究では、スラグ発生土の循環利用の可否の評価や促進を目的として・・・

スラグ発生土の土質特性の把握：スラグ発生土（模擬土）の作製と各種土質特性の調査，スラグ新材と比較分析，整理する。

スラグ発生土の循環利用による環境負荷低減効果：仮想的な建設事業を設定し，スラグ発生土の再利用の有無が事業に伴うCO₂排出量に及ぼす影響を評価する。

これらの成果を踏まえて、スラグ発生土の循環利用の考え方、設計・施工上の留意点等について「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」、技術基準等への反映をめざす。

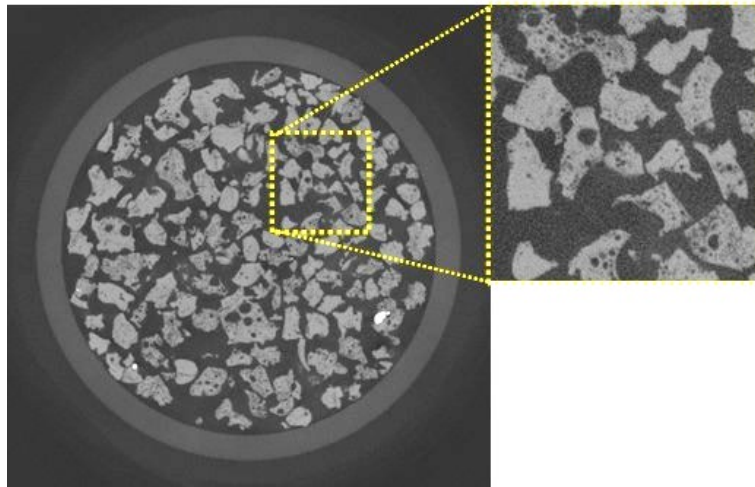
スラグ発生土の土質特性の把握



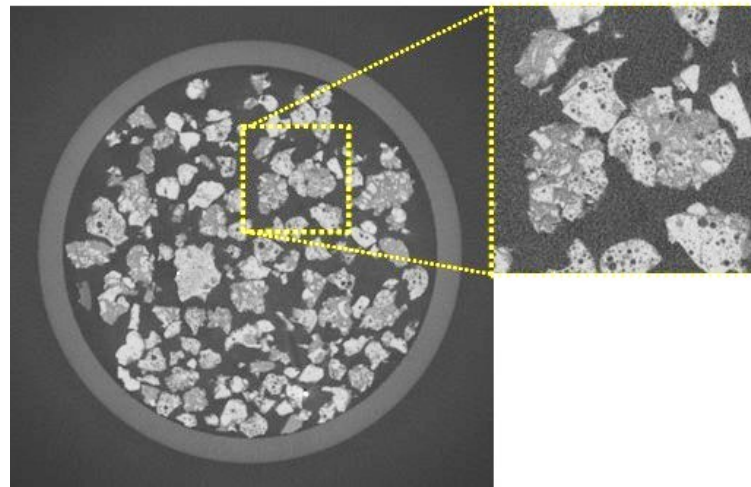
スラグ発生土（模擬土）の作製と各種土質試験

堆積，養生・固化，撤去，解砕過程といったスラグ発生土が辿る施工・供用過程を模擬したスラグ発生土（高炉水砕スラグ，製鋼スラグ）を作製し，各種土質試験を実施した。

高炉水砕スラグの例：新材の粒子はいびつな形状や内部空隙をもち，スラグ発生土の粒子は母材粒子が団粒化した粒子構造をもつ。スラグ発生土では，粒子自体が脆弱で粒子破砕により力学性能が低下することも懸念されることから，その基本的な土質特性を調べ，スラグ新材との違いを整理する。



a) 新材



b) 再利用材

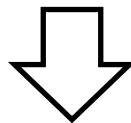
高炉水砕スラグ（粒径5mm程度）の例



スラグ発生土（模擬土）の作製と各種土質試験

本研究では、スラグ発生土（模擬土）とスラグ新材それぞれに以下の試験を実施した。

- －物理試験（粒度試験，土粒子密度試験，最大・最小密度試験）：次発表
- －力学試験（粒状体の圧密排水三軸圧縮試験，液状化試験）：次発表
- －大型繰返し単純せん断試験
- －再固化特性を調べるための一軸圧縮試験，溶出試験（Ca, Si）
- －CT画像解析による3次元粒子形状分析



おおよその傾向として・・・

スラグ発生土の力学性能が，スラグ新材より著しく劣ることはない（むしろ向上するものも）．
スラグ発生土も再び水中堆積させれば，再固化するポテンシャルをもつ．

※実際のスラグ発生土が必要な力学性能を有するか確認するための試験は現場毎に当面必要であるものの，地盤材料としての活用は期待できる．

※再利用により再固化することが考えられるが，設計上固化強度を期待できるほどではないが，再固化することによる設計・施工上の懸念事項には注意を要する．



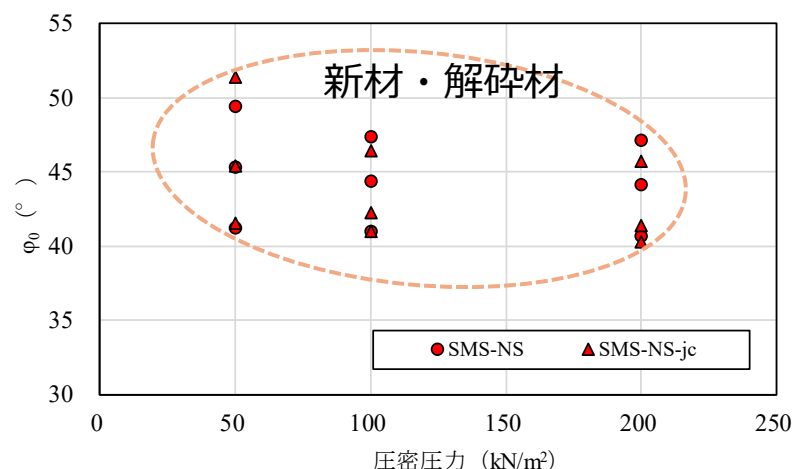
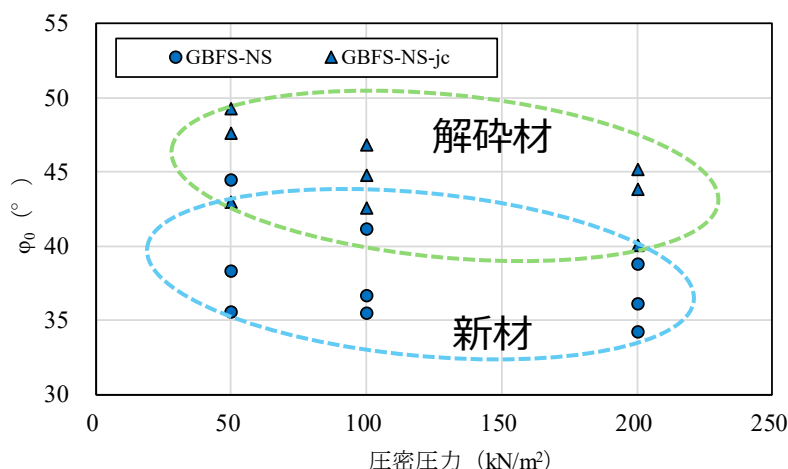
力学特性：圧密排水三軸圧縮試験の結果まとめ

圧密圧力と ϕ_0 (※) の関係より ※土の摩擦角 (≡摩擦力の大きさ) を表し、土の強度指標の一つ
いずれの試料でも、圧密圧力の増加により ϕ_0 が減少する傾向があり、一般的な礫材の三軸挙動
(低拘束圧ではインターロッキングの影響、拘束圧の増加に伴い粒子破砕が発生) に近い。

GBFS-NSでは解砕材において ϕ_0 が大きい傾向がみられる。

SMS-NSでは新材と解砕材で逆転するところもあるが、全体的に同程度の ϕ_0 とみなせる。

⇒いずれの試料の ϕ_0 も、解砕材が新材より強度が低いという明確な傾向はみられなかった。



凡例中-jc : ジョークラッシャによる解砕材

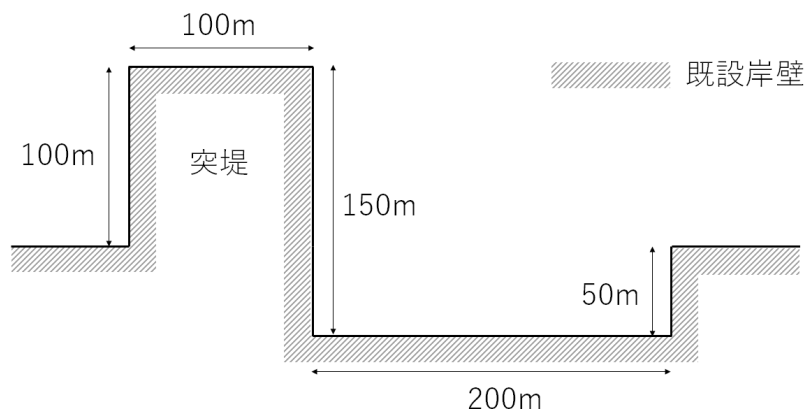


事業概要

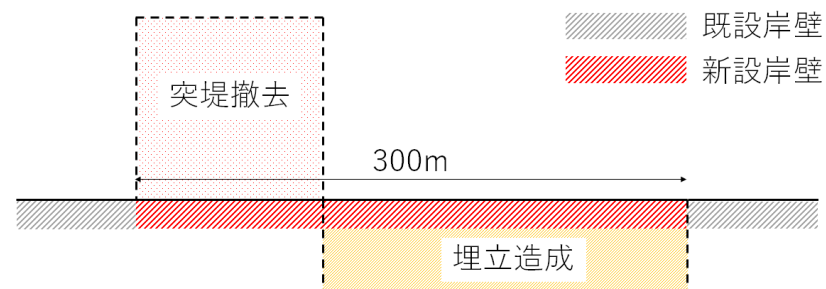
既設岸壁の突堤部分100×100 mを撤去し，隣接する岸壁前面50×200 mを埋立造成する．

撤去される突堤の付け根と埋立造成される法線を結ぶ直線状に増深された新設岸壁300 mを整備する．

※横浜港本牧BC突堤撤去・CD岸壁整備事業を参考．ただし，スケール，構造形式等詳細は異なる．



a) 現況



b) 施設改良後

A diagram of a crane system. A horizontal beam is supported by a vertical post on the left and a diagonal cable on the right. A weight is suspended from the beam by a vertical cable. The weight is labeled 'W'.

10

スラグ発生土の循環利用による環境負荷低減効果

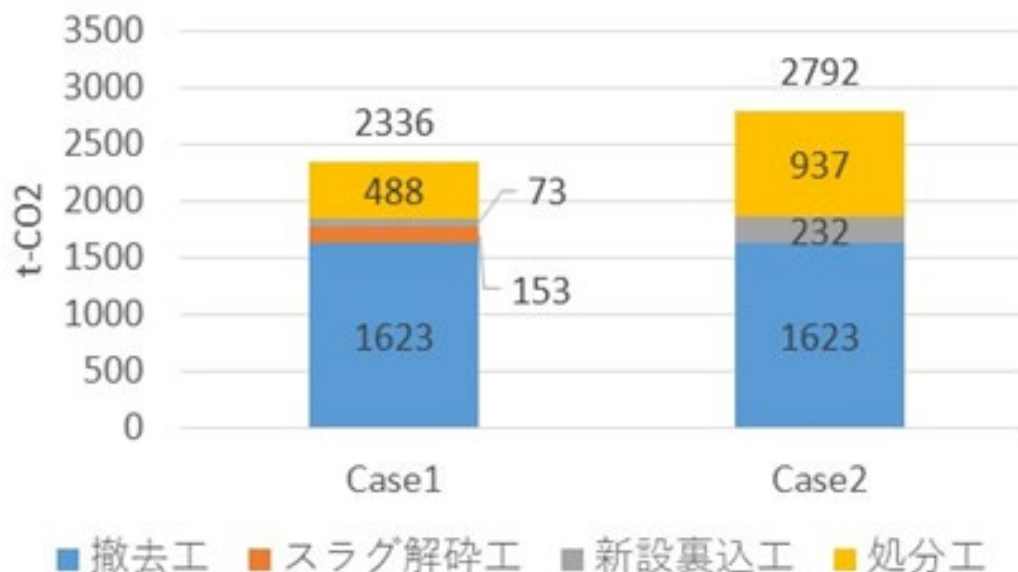


工種別CO₂排出量の比較

全体のCO₂排出量を比較すると、Case 1（スラグ発生土の再利用あり）が、Case 2（再利用なし）より、約16%のCO₂排出量削減される。

Case 1&2で共通して発生する撤去工のCO₂排出量が最も多く（全体の50 %超）、続いて処分工。スラグ解砕工や新設裏込め工のCO₂排出量は相対的に小さく、全体の10%未満。一方、処分工の割合が高いため、解砕工が発生する場合でも再利用によるCO₂排出量の削減効果が有意に現れる。

※海洋開発シンポジウム2025で詳細を発表済み。





まとめ

スラグ発生土を再利用する近年の事例を踏まえて、スラグ特有の潜在水硬性に着目し、スラグ発生土（模擬土）の土質特性評価やスラグ発生土の再利用による環境負荷低減効果の試算等に取り組んできた。これらの成果を踏まえて、今後リサイクルガイドライン改訂や関連技術の標準化に向けて取り組んでいく予定である。

今後の展望

港湾でのスラグ発生土の循環利用に向けて、今後さらに議論や研究が必要な事項・・・

- ・スラグ発生土の地盤材料としての循環利用の考え方
- ・スラグ発生土は、産業副産物か建設副産物か？
- ・スラグ発生土に対する環境安全の考え方
- ・調達方法：循環資材利用のモチベーションが現在はコストのみ、環境性能の評価軸は？
- ・スラグ発生土の土質特性の把握（力学性能のほか、乾湿繰返しや凍結融解等耐環境性能も）



関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所から委託された「鉱滓の地盤材料としての循環利用に関する検討（2022年～2024年）」の研究成果です。

京浜港湾事務所には貴重な現場情報等の提供を頂きました。

日本港湾コンサルタント山下氏（元港空研依頼研修員）、日本埋立浚渫協会技術部会の皆様には、環境負荷低減効果の検討にあたり多大なご協力を頂きました。

末筆ながら記して謝意を表します。

ご清聴ありがとうございました

松村 聡

（国研）海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

地盤研究領域 基礎工研究グループ

matsumura-s@p.mpat.go.jp