

# 和歌山下津港海岸の津波対策事業における被覆材への人工石活用について

清水 恭平

近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 海岸課 (〒640-8404 和歌山県和歌山市湊葉種畑の坪1334)

本稿は和歌山下津港海岸で実施している海岸保全施設整備事業における、護岸の被覆材への人工石活用事例について述べたものである。人工石とは産業副産物である鉄鋼スラグを原料とするリサイクル資材であり、近年海洋工事を主として利用事例が増加している。近畿地方整備局港湾空港部では和歌山下津港海岸での活用が初めてであり、実際に活用することによって材料調達から施工の各段階における天然石と人工石の相違点等について確認することができた。

キーワード リサイクル, 鉄鋼スラグ, 人工石, 海岸工事, 護岸, 被覆材

## 1. 工事におけるリサイクル資材活用の促進

我が国では主要な資源の大部分を輸入に依存しているとともに、経済の発展に伴い各種副産物の発生量も極めて多く、リサイクルの一層の推進が望まれている。

このような社会的状況の中で、主に臨海部に位置する高炉一貫製鉄所や石炭火力発電所から大量に鉄鋼スラグや石炭灰等の建設資材となりうる産業副産物が排出されており、再資源化といった有効活用の促進が必要とされている。また、海岸工事を含む港湾・空港等工事では埋立用材や構造物等の建設資材として山土や砂・石材等の天然資源を大量に消費しており天然資源の保護や持続可能な社会構築の観点からも、建設副産物及び産業副産物等を積極的に活用し、天然資源の消費抑制、環境負荷の低減、建設コストの低減を図ることが望まれている。

こうした背景を踏まえ、国土交通省港湾局・航空局では平成13年より「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」<sup>1)</sup>を策定・改訂し、海岸工事を含む港湾・空港等工事における各種副産物の再資源化、再生利用の促進を図ってきたところである。ガイドラインの策定より浚渫土砂の再利用やスラグ等のコンクリート骨材への使用など一定の成果をあげているが、上述した理由によりさらなる各種副産物の有効活用が必要である。

本稿は、各種副産物の有効活用促進のために近年活用され始めている人工石について、より一層の活用を進めるため、和歌山下津港海岸における被覆材への人工石活用事例を挙げ、その有用性や留意すべき事項等について述べたものである。

## 2. 和歌山下津港における海岸工事

和歌山県北部の和歌山市から海南市にかけて位置する和歌山下津港海岸においては、背後地域に行政・防災中核機能や主要交通施設に加え、世界的シェアを誇る高付加価値製品の製造企業群が集積している。しかしながら当該地区には今後30年以内に70～80%の確率で南海トラフで発生する地震に伴う津波の襲来が予測されており、津波来襲時にはきわめて甚大な被害の発生が危惧されている。

このため近畿地方整備局和歌山港湾事務所では当該地区の護岸や防波堤の補強・嵩上げ、津波防波堤及び水門を設置し、津波浸水被害の軽減を図る海岸保全施設整備事業(図-1)を実施している。



図-1 和歌山下津港海岸における海岸保全施設整備事業

### 3. 人工石について

#### (1) 材料

人工石は以降に示す材料により作られる鉄鋼スラグ水和固化体を所定の大きさに破碎したものである。

##### a) 高炉スラグ微粉末

「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」で扱われている産業副産物等には石炭灰、貝殻、破碎瓦の他に各種スラグ（鉄鋼スラグ、非鉄スラグ、エコスラグ）がある。スラグとは鉄、ニッケル、クロムなどの鉱物を乾式精錬する際に生じた目的成分以外の溶融物質のことである。高炉スラグは鉄鋼製造工程で生じるスラグであり、高炉内に鉄鉱石、コークス、石灰石などの原料を装入し熱風を送ることにより鉄鉱石が還元され、溶銑及び溶融スラグを比重差（溶銑：7，溶融スラグ：2.6～2.7）によって分離、回収したものである。溶銑1tに対し約300kgの高炉スラグが発生し、冷却方法により高炉徐冷スラグと高炉水砕スラグの2種類に分類される。

鉄鋼スラグ水和固化体の原料である高炉スラグ微粉末は高炉水砕スラグを粉砕したものであり、日本国内では年間約2,400万t発生（平成30年時点）している。鉄鋼スラグ水和固化体の製造において、高炉スラグ微粉末は刺激材の存在下で水和反応により硬化し、各材料を強固に結び付け強度を発現させる主要な役割を持つ。

##### b) 製鋼スラグ

製鋼スラグは鉄鋼から不要な成分を除去し、靱性・加工性のある鋼にする製鋼過程で生じるスラグであり、日本国内では年間約1,400万t発生（平成30年時点）している。

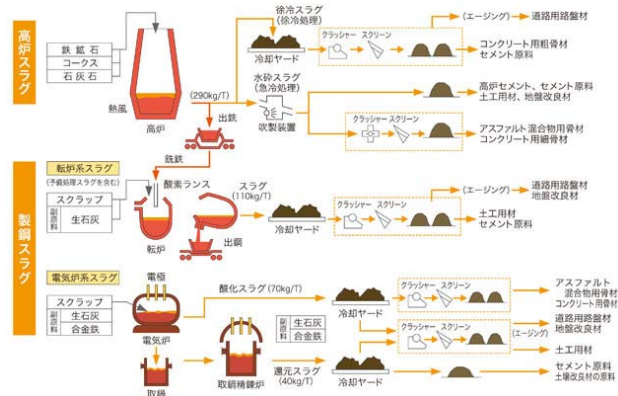


図2 鉄鋼スラグ製造フロー



図3 製鋼スラグ（左）、高炉スラグ微粉末（右）

製鋼スラグは鉄鋼スラグ水和固化体のうち質量比で通常60%以上を占め、高炉スラグ微粉末に対する刺激材、フライアッシュのポズラン反応のカルシウム供給源、骨材としての役割を持つ。

##### c) その他の材料

鉄鋼スラグ水和固化体の製造には必要に応じて、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末の他に、アルカリ刺激材（消石灰、各種セメント等）、微粉炭燃焼ボイラで発生するフライアッシュ、細骨材相当の高炉水砕スラグ、混和剤等を添加する。このうちフライアッシュは長期強度の増進やアルカリ性の低減を図る役割を持つ。

#### (2) 人工石の製造方法

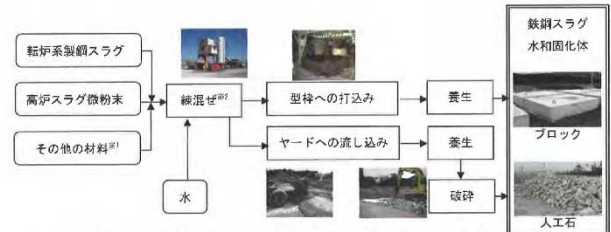
鉄鋼スラグ水和固化体は先に述べた材料（製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、必要に応じてその他の材料）と水を混練し、ヤードへ流し込み、固化させ養生する。また所定の大きさに加工する際は、コンクリート破碎機などの重機等を用いて所定の大きさに加工する。

##### a) 混練

製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、水等の材料を混練し、アジテータ車等に積み込み、固化用のヤードまで運搬する。なお、各種材料の混練については、コンクリートを製造する過程と全く同様の設備（コンクリートプラント）を使用することができる。

##### b) 固化、条切り、養生

固化用ヤードに流し込んだのち、固化・養生を行う。



※1 必要に応じて、アルカリ刺激材、フライアッシュ、高炉水砕スラグ（細骨材）、湿和剤を使用  
※2 生コンクリート製造設備使用

図4 人工石製造フロー



図5 人工石製作状況（条切り）

なお、型枠を用いない場合は、所定の大きさに破碎されるように固化中に条切りを行う場合がある。図-5に示している条切りは鉄板により行っている。

c) 破碎

養生後、コンクリート破碎機などにより粗破碎し、所定の大きさに加工する。破碎方法によって、粒径300mm程度以下に調整した砂礫状の石材と粒径100~1,000mm程度に調整した割ぐり石状の石材の製造が可能である。

(3) 人工石の性質

a) 適用範囲

人工石は主に準硬石相当の天然石材（砂岩ざり及び割ぐり石）及びセメントコンクリートの代替材として、海洋工事においては非液状化埋立柱材、裏込め石及び傾斜護岸埋立柱材、藻場材、被覆材、消波ブロックなどに適用されている。

b) 特徴

鉄鋼副産物を用いて製造されるため、天然資源の保護につながることや、破碎方法により種々の形状や粒度を有する石材製造が可能であることから幅広い利用が期待できる。また天然石に比べ、海藻等の生物付着性が優れていることも人工石製造者による試験施工で確認されている。



図-6 人工石

表-1 人工石の品質の範囲

品質項目	指標		品質の範囲
物理的性質	粒度	D <sub>50</sub> mm	砂礫状 1.0以上
		均等係数 U <sub>c</sub> =(D <sub>60</sub> /D <sub>30</sub> )	砂礫状 5~45
	粒度の範囲	割ぐり石状	1.3~3 <sup>*1</sup>
		砂礫状	0~300mm
		割ぐり石状 ブロック状	5~2,000kg/個 <sup>*2</sup> (寸法の目安 100~1000mm)
	絶対密度(g/cm <sup>3</sup> )	JIS A 1110	1.8~2.7
	吸水率(%)	JIS A 1110	5~20
	母材の圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) 28日強度(標準養生)	JIS A 1108	9.8~35
力学的性質	せん断抵抗角(°)	JGS 0541	U <sub>c</sub> ≥5で35°以上
	二次圧縮係数(%)	砂礫状	準硬石の天然石材と同等以下
環境適合性	スレーキング率(%)	砂礫状	準硬石の天然石材と同等以下
	pH(JGS 0211 海水溶媒 固液比1:10)		9.0以下
	生物付着性(付着藻類・ペントスの種類数・付着質量)	砂礫状	天然石材と同等
	有害物質の溶出・含有		海洋汚染防止法水底土砂基準または土壌環境基準の基準値以下
膨張	膨張 JIS A 5015 (水中落下試料 80°C10日)	砂礫状	膨張しないこと (JIS A 5015 80°C水浸膨張試験10日 で0.2%以下)
	鉄鋼スラグ水固和固化体技術 マニュアル付属書2	割ぐり石状 ブロック状	有害なひび割れなし

\*1: φ≥35° を目標とする場合には、粒度調整により U<sub>c</sub>≥5の製造が可能  
\*2: 製造寸法については、別途製法所に確認要

4. 和歌山下津港海岸における人工石活用

(1) 概要

和歌山港湾事務所においては令和元年度及び令和2年度に船尾南護岸の被覆材として人工石を採用した。以降に採用に至るまでの検討内容及び施工により確認できた事項について述べる。

(2) 護岸構造

船尾南護岸の構造形式は図-8に示すように鋼管矢板に上部工を打設し、前面に基礎捨石及び被覆材を投入する構造である。本構造は和歌山下津港海岸の護岸の中で標準的な構造形式の一つである。

(3) 設計検討

被覆材として人工石を活用するにあたり、以下に述べる項目について確認及び検討を行った。

a) 内部摩擦角の確認

人工石の活用にあたり、天然石と同等の内部摩擦角が確保されるか検討を実施した。「低拘束圧条件下におけるロック材料強度に関する研究」<sup>2)</sup>によると、ロック材の強度評価は低拘束圧域においては三軸圧縮試験における最も低拘束圧の条件でのφ<sub>0</sub>を与えるという強度設定方法を適用することが可能であると提案されている。よって、人工石の製造者が実施した三軸圧縮試験により均等係数U<sub>c</sub>≤2でも低拘束圧下であれば、内部摩擦角φ<sub>0</sub>は天然石と同等の40°以上期待できることを確認している。



図-7 船尾南護岸位置図

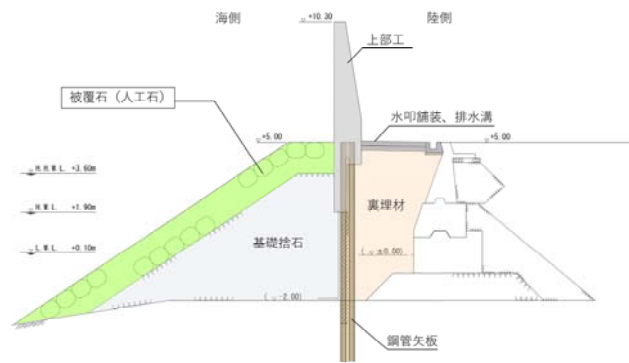


図-8 護岸標準断面図



図-9 人工石据付状況



図-10 人工石据付完了状況

#### b) 単位体積重量の確保

被覆材としての単位体積重量は従来の天然石の施工と同様に間詰をしっかりと行い、空隙が少なくなるように施工すれば設計上必要な単位体積重量は確保できる。

#### c) 津波流速に対する安定性の確認

当該護岸の設計において天然石を用いた場合の被覆材の所要質量は水理模型実験により天然石1,000kg/個以上である。当該護岸に使用する人工石の密度は2.45～2.5t/m<sup>3</sup>であることを考慮し、人工石を用いた場合の当該護岸の被覆材の所要質量をイスバッシュ式より求めると、1.115t～1.023tの質量が必要となる。よって人工石1個あたりの質量が1.2tとなる形状で製造すれば天然石と同等の安定性が確保できる。なお和歌山下津港海岸において、護岸の被覆材は1層積が標準であるが、当該護岸断面を想定した水理模型実験を行ったところ平均以上の津波流速により被覆材が部分的に飛散する可能性があることが確認されたことから、安全性確保のため被覆材は2層積として設計されている。

#### (4) 施工時の留意点

人工石の調達について、天然石と異なり、強度発現までの養生期間を含む製作期間が必要であり、船尾南護岸の工事においては現場搬入までに約2カ月程度期間を要した。天然石とは異なり人工石は養生を含めた期間を要する必要があることに留意する必要がある。積込及び運搬においては、天然石と概ね同様の施工性であったが、天然石と比較し割れが生じやすく、割れ方によっては所定の重量を満足しない恐れもあることから、グラブ等の作業機械による扱い時には割れが生じないように留意する必要がある。また、据付においては、破碎時にある程度成形されていることから据付しやすく、被覆材間の空隙を少なくすることができるため、被覆材間に詰める間詰石も天然石の施工と比べ少なくすることができた。しかしながら形状が整っているがゆえに、法尻や法肩などの異形部については形状の適する人工石が限られることに留意する必要がある。

### 5. 課題

人工石を活用した結果、調達から運搬までに強度発現のための期間を見込む必要があること、天然石と比較し割れが生じやすく割れ方によっては所定の重量を満足しない恐れがあること、据付については天然石より据付しやすく使用する間詰石も少量であることが確認できた。

また、和歌山下津港海岸は人工石の製造者が近傍である条件下であるため、他の港湾等工事で人工石を同様に活用するには運搬も含めた経済比較の検討が必要である。

### 6. まとめ

天然資源の消費抑制や持続可能な社会構築の実現のため日常生活から公共工事まで幅広くリサイクル資源の活用の促進が求められている。そうした社会状況下において、海岸及び港湾工事においても今後より一層のリサイクル資源の活用が求められるものと予想される。

本稿で述べた和歌山下津港海岸における被覆材への人工石活用事例は海岸及び港湾工事における人工石活用の有効性を確認する基礎資料になると考える。

#### 文献

- 1) 国土交通省 港湾局, 航空局: 港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン(平成30年4月)
- 2) 土木研究所水工研究グループ ダム構造研究チーム: 低拘束圧条件下におけるロック材料強度に関する研究(平成20年)
- 3) 財団法人 沿岸技術研究センター: 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル(平成20年2月)
- 4) 財団法人 沿岸技術研究センター: 鉄鋼スラグ水和固化体の性質および活用事例について(平成13年)
- 5) 鉄鋼スラグ協会 HP (<https://www.slg.jp/>)