

環境に優しく防災に強い！港湾構造物における リサイクル骨材の適用促進への挑戦

千葉 大輝

近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 設計担当

(〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7番30号)

港湾構造物では波浪に対する構造物の安定性の確保は当然のことながら、環境負荷低減の観点からリサイクル骨材の利用促進が望まれている。その中で、銅スラグ細骨材（CUS）は高密度の特徴を有する。港湾構造物の場合、自重を増すことで波浪に抵抗することができる高密度コンクリートの方が望ましい場合があり、近年強大化している台風等への対策の一助と考えられる。一方で近畿地方はかねてより天然骨材の不足が問題視されている。これらの背景を受け、港湾空港技術研究所と連携し、2017年（平成29年度）から4年をかけてCUSを多量に用いた高密度コンクリートの港湾構造物への適用性について検討した。

キーワード 港湾構造物，リサイクル骨材，銅スラグ細骨材

1. はじめに

本研究は、港湾・海岸におけるコスト削減、天然資源に替わる再生材料利用や環境への配慮のために、近畿地方整備局管内の港湾・海岸整備において、リサイクル骨材を用いたコンクリートの港湾・海岸構造物への適用性に関する検討を行うことを目的としている。

現在、近畿地方整備局管内の港湾・海岸整備では、リサイクル骨材を用いたコンクリートはほとんど使用されていない。コストが高い、性能や使用するメリットが不明確等が主な理由である。リサイクル骨材は全国で種々なものがあるが、本研究では、近畿地方で入手が容易な産業副産物である銅スラグ細骨材（CUS）¹⁾²⁾を主たる検討対象とし、港湾・海岸構造物におけるリサイクル骨材を用いたコンクリートの適用性に関し、以下の2項目について検討する。

（1）リサイクル骨材を用いたコンクリートの港湾・海岸構造物への適用性の検討

- ① 2017年（平成29年度）に無筋コンクリートブロック試験体を製作し、海水シャワーを用いた暴露試験を行いコアを採取し、調査（強度確認、塩化物イオン浸透抵抗性確認、内部組織の劣化状態の確認等）を行う。
- ② 2019年（令和元年度）に無筋コンクリート円柱試験体を製作し、海水循環干満帯水槽を用いて暴露試験を行い調査（強度確認、塩化物イオン浸透抵抗

性確認、内部組織の劣化状態の確認等）を行う。

（2）リサイクル骨材を用いたコンクリートによる実構造物の安定性の検討

リサイクル骨材の使用によるコンクリートの比重の増加が、防波堤等の断面に及ぼす影響について試算する。

2. 銅スラグ細骨材

(1) 概要（近畿地方での最近の動向）

銅スラグ（図-1）は、銅製錬の際に銅精鉱を処理する溶錬炉で発生するスラグである。現在は、国内4製錬所（小名浜製錬所、玉野製錬所、東予工場、佐賀関製錬所）で製造されている。銅スラグは、密度が大きく粒度は砂と同等であり、水硬性もほとんどない。このような特徴からコンクリート用骨材、本土工中詰材、地盤改良工（サンドコンパクションパイル工法）などの地盤材料、アスファルト混合物用骨材などの舗装工材料として利用されている。



図-1 銅スラグ細骨材

コンクリート用細骨材としては既に JIS 化されている。また、最近では、近畿地方では利用普及に向けた動きがあり、日本コンクリート工学会近畿支部において、2016年から「銅スラグ細骨材の土木用コンクリートへの適用に関する研究専門委員会」が設置されている。近畿管内においては以下の3つの生コンプラントにおいて、「銅スラグ細骨材 (CUS2.5: 東予工場製)」を常備しているとのことである。

- ・ワールド (株) (大阪府茨木市宮島3丁目3番27号)
- ・大開産業 (株) (兵庫県小野市大開町100番地)
- ・大弘平和共同プラント (和歌山市湊1342-4)

(2) 銅スラグ細骨材を用いた示方配合

銅スラグ細骨材を用いた示方配合を表-1に示す。鉄筋コンクリート想定的小型ケーソン試験体はW/Cを50%とし、普通細骨材と普通粗骨材を用いたN-N_50.0と、普通細骨材をCUSに容積比25%置換したCUS25-N_50.0とした。無筋コンクリート想定のパラペット試験体はW/Cを60%とし、普通細骨材をCUSに容積比25%及び100%置換したCUS25-N_60.0及びCUS100-N_60.0とした。表中の単位体積重量(kg/m³)について、小型ケーソン試験体の方では、N-N_50.0に比べてCUS25-N_50.0は約3.0%増加しており、パラペット試験体ではCUS25-N_60.0に比べてCUS100-N_60.0は約11.2%増加している。以上のことから、高密度の銅スラグ細骨材を多く用いるほどコンクリートの単位体積重量は普通細骨材を用いるよりも大きくなることが明らかである。

3. 環境安全品質

(1) 溶出量試験値

環境安全品質基準²⁾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-2に示す。全ての項目について基準値未満又は定量限界未満であった。

表-1 銅スラグ細骨材を用いた示方配合

試験体	記号	水セメント比	細骨材率	単位量(kg/m ³)								単位体積重量(kg/m ³)
				工業用水 W	高炉B種 C	海砂 S1	砕砂 S2	CUS2.5 S3	砕石150φ G1	砕石2010φ G2		
小型ケーソン	N-N_50.0	50%	43.4	170	340	374	377	0	445	546	2252	
	CUS25-N_50.0	50%	43.4	170	340	282	284	252	445	546	2319	
パラペット	CUS25-N_60.0	60%	44.7	172	287	297	299	266	445	546	2312	
	CUS100-N_60.0	60%	51.0	170	283	0	0	1236	398	484	2571	

表-2 銅スラグの溶出量試験結果の一例 (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	(一般用途)	(港湾用途)
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	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.05	≦0.15
ひ素	<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

表-3 銅スラグの含有量試験結果の一例 (mg/kg)

製造所区分	A	B	C	D	E	基準値 (一般用途)
骨材種類	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	(一般用途)
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

(2) 含有量試験値

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必要がある。

4. 長期耐久性の検討

港湾構造物の長期耐久性において、最も重要なのは塩害に対する抵抗性である。塩害とは鉄筋腐食により鉄筋欠損及びコンクリートのひび割れ・剥離を指す劣化現象である。本研究では、2017年(平成29年度)及び2019年(令和元年度)に製作した試験体を調査し、高密度スラグ骨材を用いたコンクリートの塩分浸透抵抗性の調査を行った。

(1) 長期暴露試験

ブロック試験体を、港湾空港技術研究所の海水シャワー暴露場に設置した。海水シャワー暴露場とは、屋外



図-2 海水シャワー場（飛沫帯を模擬）

に設置された、飛沫帯を模擬する試験施設である。その外観写真を図-2に示す。ポンプにより久里浜湾（神奈川県横須賀市）より採取した実海水を用い、3時間の試験体への散水と、9時間の乾燥を1日に2回繰り返す環境である。

本研究では、2017年（平成29年度）に製作した海水シャワー暴露場に2.6年間暴露した「ブロック（300*800*高さ600mm）」から鉛直方向にコアを採取し、塩化物イオン濃度及び圧縮強度等の調査を実施した。

(2) 塩化物イオン濃度分布

a) 塩化物イオン濃度分布（見かけの拡散係数Dap）

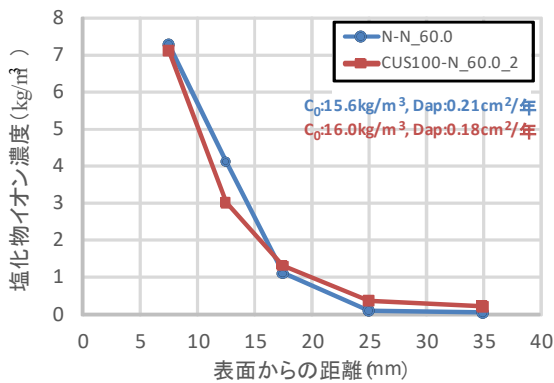


図-3 平成29年度ブロック試験体の塩化物イオン濃度分布

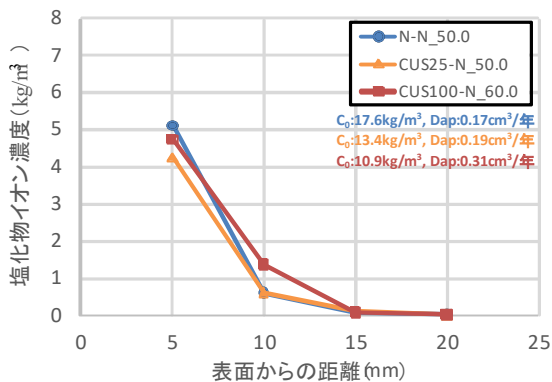


図-4 令和元年度コアの塩化物イオン濃度分布

2017年（平成29年度）に製作したブロック試験体から採取したコアから得られた塩化物イオン濃度分布を図-3に示す。また、2019年（令和元年度）に製作した小型ケーソン及びパラペット試験体から採取したコアから得られた塩化物イオン濃度分布を図4に示す。

図-3は、暴露2.6年目における塩化物イオン濃度分布である。塩化物イオンの浸透深さは、N-N_60.0及びCUS100-N_60.0は17.5mm程度まで認められた。また見かけの拡散係数 D_{ap} （以下、 D_{ap} ）は、N-N_60.0, CUS100-N_60.0の順に0.21cm²/年、0.18cm²/年となり、高炉セメントB種による優れた塩分浸透抵抗性と、CUSの使用による塩分浸透抵抗性の向上が見られた。ただし、後者はブリーディングによる実質的なW/Cの低下が原因である可能性があり、CUSが直接の原因となるかは不明である。

図4は、暴露0.67年目の塩化物イオン濃度分布である。塩化物イオン浸透深さはどの配合も深度15mmのスライス（12.5~17.5mm）が微増していることから、少なくとも12.5mmまでは浸透していたものと考えられる。 D_{ap} は、N-N_50, CUS25-N_50, CUS100-N_60の順に0.17cm²/年、0.19cm²/年、0.31cm²/年となった。N-N_50及びCUS25_50の比較から、銅スラグを25%程度の使用は初期段階における D_{ap} に大きな影響を与えないと考えられた。CUS100-N_60はW/Cが他の2配合と異なるため比較はできないが、暴露0.67年目での D_{ap} が0.31cm²/年という数値は非常に低く問題ない数値であることから、CUSを100%使用した場合でも問題がないと考えられた。

図-5は、図-3および図-4から得られた D_{ap} と、「港湾施設の技術上の基準・同解説⁵⁾（以下、港湾基準）」

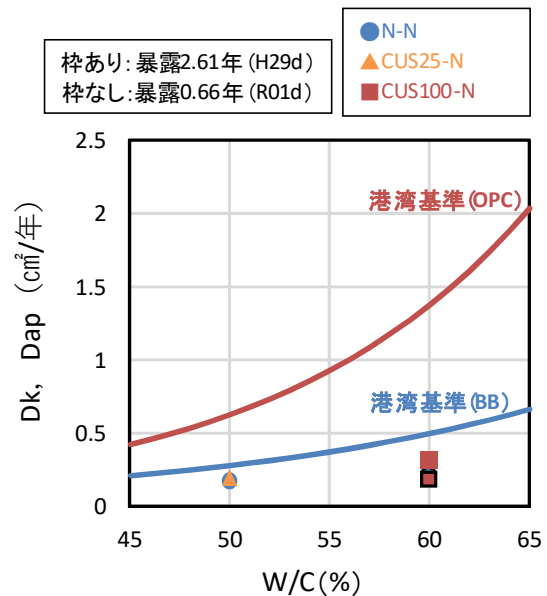


図-5 W/CとDkおよびDapとの関係

に記載されている塩化物イオン拡散係数の特性値 D_k (鉄筋腐食開始時期の予測に用いられる) との比較を行ったものである。以下に OPC (普通ポルトランドセメント) の場合の式を(1a), BB (高炉セメント B 種) の場合の式を(1b)と示す。図-5 では, それぞれを港湾基準 (OPC), 港湾基準 (BB) と記載する。

$$\log_{10} D_k = 3.4(W/C) - 1.9 \quad (1a)$$

$$\log_{10} D_k = 2.5(W/C) - 1.8 \quad (1b)$$

図-5 より, D_{ap} は港湾基準 (BB) 以下であることが確認できた。港湾基準 (BB) は普通コンクリートの D_{ap} を数多く収集し, それらから最も誤差が少なくなるように算出されたものである。したがって, 高密度スラグ骨材を用いた場合においても, 塩化物イオン濃度浸透抵抗性については, 普通コンクリートと同程度であると考えられた。

b) 中性化深さ

暴露2.6年における中性化深さを表-4に示す。中性化深さはN-N_60.0が0.67mm, CUS100-N_60.0_2が0.50mmであった。このことから, 中性化に対する抵抗性については, 高密度スラグ骨材を多量に用いても, 普通コンクリートと同等程度の性能を有していると考えられた。

(3) 圧縮強度

2017年 (平成29年度) ブロック試験体から採取したコアの圧縮強度の結果を図-6に示す。W/Cは同一ではあるものの, CUS100-N_60.0がN-N_60.0よりも高い傾向を示した。これは, ブリーディング量の違いにより, CUS100-N_60.0の実質的なW/Cが60%よりも小さくなっている可能性が挙げられる。ただし, 実質的なW/Cは不明ではあるが, 強度の増進がN-N_60.0より大きく, 少なくとも普通コンクリートと同等以上の性能を有していると考えられる。

表-4 中性化深さ

	平均
N-N_60	0.67mm
CUS100-N-60_2	0.50mm

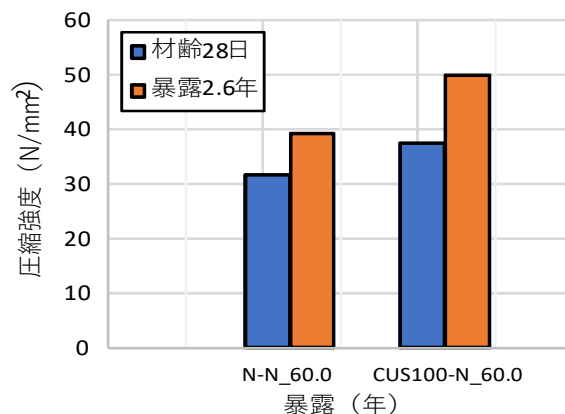


図-6 圧縮強度

(4) 長期耐久性のまとめ

塩化物イオン浸透抵抗性に関して, 高密度スラグ骨材を多量に用いたコンクリート (以下, 高密度リサイクルコンクリート) は, 普通コンクリートと同程度の D_{ap} を示した。

圧縮強度については, 暴露2.6年において, 高密度リサイクルコンクリートは, 普通コンクリートよりも高い圧縮強度となる傾向を示した。これは, 高密度スラグ骨材を用いた場合にはブリーディング量が多くなるため, 実質的なW/Cが低下したことが原因である可能性もある。ただし, 強度の増進は普通コンクリートより大きく, 圧縮強度については普通コンクリートと少なくとも同等程度の性能を有していると考えられる。

5. 安定性の検討

前章の各種試験により, 高密度リサイクルコンクリートは, フレッシュ性状を管理することができれば, 使用に問題ない可能性が示された。したがって, 次の段階の検討として, 高密度リサイクルコンクリートを使用した場合に, 実構造物の安定性等に及ぼす影響について把握しておく必要がある。

そこで, 防波堤断面の一部にCUSを適用することで, 安定性に及ぼす影響を, 簡易な検討により確認した。

(1) 対象断面

設計の対象断面は, A 港の現断面 (図-7) とした。高密度リサイクルコンクリートを使用する部分には, 上部工及び遊水室直下の隔室内の中詰材 (図-7 中赤点線囲み) を選定し, 両方を高密度リサイクルコンクリートに変更したケースを検討する。

(2) 検討内容

検討項目は、滑動、転倒、基礎の支持力、円弧滑りの4項目とした。

(3) 検討結果

ここでは、パラペット天端を増加させた際の影響（設

計波高を増加させた際の影響）を検討した。安全率の計算結果を表-5に示す。

中詰材および上部工を高密度リサイクルコンクリートに変更した場合、重量が増加した結果、必要なマウンド幅が狭くなり、パラペットの天端を現状+1.0mまで引き上げることができる計算結果となった。

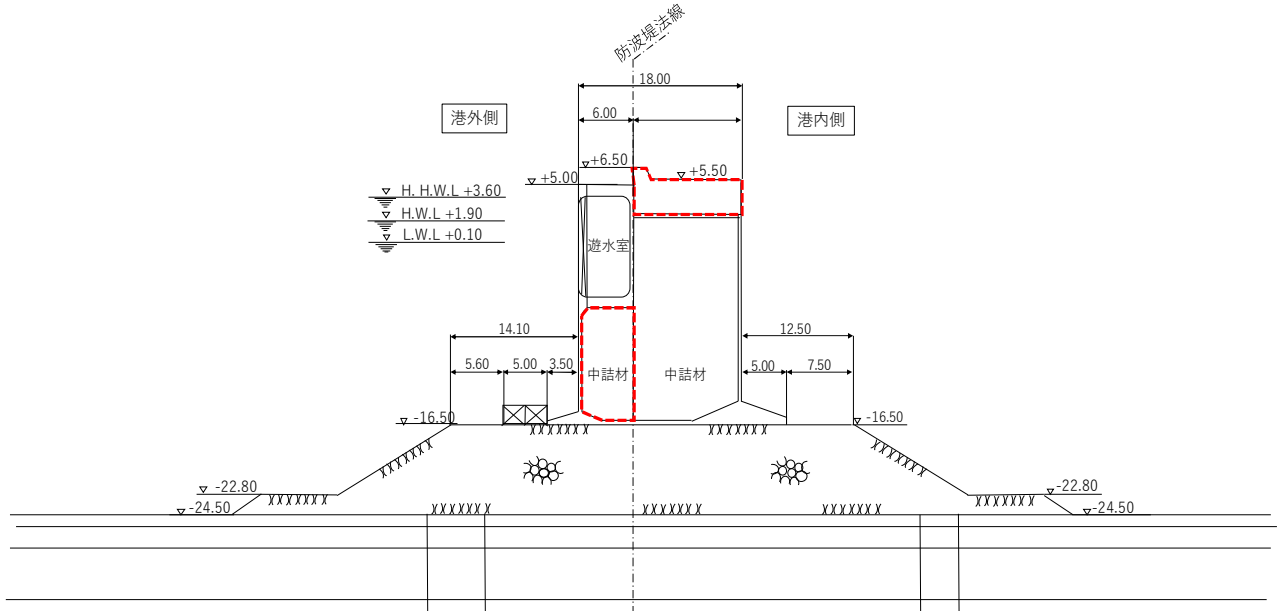


図-7 設計対象断面（赤：上部工，遊水室直下の隔壁内の中詰材）

表-5 安定性の検討結果

天端高	パラペット天端高 D.L.+6.50m	パラペット天端高 D.L.+7.00m	パラペット天端高 D.L.+7.50m	パラペット天端高 D.L.+8.00m
標準断面図				
滑動	1.373 > 1.2・・・OK	1.361 > 1.2・・・OK	1.350 > 1.2・・・OK	1.342 > 1.2・・・OK
転倒	2.255 > 1.2・・・OK	2.213 > 1.2・・・OK	2.175 > 1.2・・・OK	2.142 > 1.2・・・OK
基礎の支持力 マウンド幅 変更なし(7.50m)	1.034 > 1.0・・・OK	1.021 > 1.0・・・OK	1.008 > 1.0・・・OK	0.997 < 1.0・・・NG
基礎の支持力 マウンド幅変更あり	必要マウンド幅5.5m 1.010 > 1.0・・・OK	必要マウンド幅6.5m 1.009 > 1.0・・・OK	現況マウンド幅7.5mの条件では滑動及び転倒は安全率を満たしているが、基礎の支持力が安全率を満たしていない。基礎の支持力を満足させるにはマウンド幅が8.5m必要となる。	
評価	マウンド幅が5.5mの時点で滑動、転倒、基礎の支持力が安全率を満たしている。	マウンド幅が6.5mの時点で滑動、転倒、基礎の支持力が安全率を満たしている。		

6. おわりに

本研究は2017年（平成29年度）から2021年（令和2年度）において、一連を港湾空港技術研究所に委託していたものである。

港湾・海岸におけるコスト縮減，天然資源に替わる再生材料利用や環境への配慮のために，高比重である銅スラグを骨材とした高密度コンクリートの適用性について検討した。

結果としては，港湾・海岸構造物において高密度コンクリートは少なくとも普通コンクリートと同等以上の性能を有していると考えられる。また，実構造物の安定性に及ぼす影響についてはパラペットの天端を現状+1.0mまで引き上げることができる計算結果となった。

以上の事から，波浪に対する構造物の安定性が向上し，

パラペット天端高を増加させた場合でも安定性を保持することができるため，現況の天端を嵩上げし越波量を減少させることによって構造物の粘り強い化につながると思われる。

今後，港湾空港技術研究所資料及び各種マニュアル類への成果の反映と，各種暴露試験体の試験継続を予定している。

参考文献

- 1) 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，コンクリートライブラリー147，2016.
- 2) 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（改訂）2018.
- 3) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル 2015.
- 4) 山路徹：海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性能照査手法に関する研究，港湾空港技術研究所資料No.1232，2011.
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 2018.