

# 浚渫土の有効利用～ケーソン中詰材への活用～

犬飼 涼太

関東地方整備局 鹿島港湾・空港整備事務所 沿岸防災対策室  
(〒314-0021 茨城県鹿嶋市大字粟生 2254) .

鹿島港では、近年火力発電需要の増加により石炭などの輸入が増えていることから、岸壁の水深を-14mに増深するための浚渫を2016年より行ってきた。浚渫範囲の表層30cmに堆積する粘土質土砂の有効活用について検討した結果、鹿島港で年間4函の据付を行っている南防波堤のケーソン中詰材として使用することとした。粘土質土砂のみでは中詰材としての湿潤単位体積重量を確保することが困難であったため、カルシア改質材と混合しカルシア改質土として中詰材に使用することとした。カルシア改質土をケーソンの中詰材として使用することはカルシア改質土の利用方法として初めてであり、2019年6月下旬のケーソン据付に向けて施工中である。

キーワード 浚渫土, カルシア改質材, 有効利用, カルシア改質土, 防波堤, ケーソン

## 1. 概要

鹿島港は茨城県南部に位置する日本を代表する工業生産拠点である。内地を掘り込み形成された世界的にも珍しい掘り込み港湾であり、原材料や製品の海上輸送基地として重要な役割を担っている(写真-1)。また、2011年5月には「国際バルク戦略港湾(穀物)」に選定されている。外港地区(-14m)岸壁は2013年4月から水深13mの岸壁として暫定供用していたが、2018年6月に貯炭所が建設され、火力発電に使用する石炭の荷役が始まった。利用者からは石炭運搬に使用する55,000DWT級の貨物船が満載で入港可能な水深を早期に確保するように要望されていたため、2016年度から水深-13mから水深-14mに増深するための浚渫工事を行ってきた。

浚渫した土砂は鹿島灘の養浜に使用しているが、浚渫範囲で養浜に適さない粘土質土砂が表層に30cmほど堆積している箇所があったため、この粘土質土砂の利用方法を検討した。

また、太平洋に面している鹿島港は波の影響を受けやすく、港内の静穏度確保も急務であり、南防波堤のケーソン据付を年間4函(100m)行っている。このような背景の中、浚渫した粘土質土砂をケーソンの中詰材として有効活用できないか検討を行った。

検討にあたり、粘土質土砂の使用量、他の材料と併用または混合しての湿潤単位体積重量の確保等を検討した結果、粘土質土砂とカルシア改質材を混合しカルシア改質土としてケーソンの中詰材に活用することとした。



写真-1 鹿島港港形 (2019年2月撮影)

## 2. カルシア改質材の特徴

カルシア改質材(写真-2)とは、製鉄所にて鉄鉄から鋼を製造する過程で副産物として生成される転炉系製鋼スラグを原料とし成分管理と粒度調整を行った材料である。カルシア改質材は粘性土と混合することにより、カルシア改質材に含まれるカルシウム分と粘性土に含まれるシリカ分が水和反応を起こし、浚渫土の強度を高めることや赤潮や青潮の原因となるリン酸や硫化物の発生を抑制することから、これまでは港湾事業で発生する浚渫土と混合したカルシア改質土として埋立材等に利用されてきた。カルシア改質土の土質特性としてカルシア改質土の強度は容積混合率、養生期間、含水比などに応じて変化する。



写真-2 カルシア改質材

カルシア改質土におけるカルシア改質材の一般的な配合割合は10%~40%程度であり、基本的には粘性土地盤のc材として扱われる。またカルシア改質土の単位体積重量は浚渫土の含水比、カルシア改質材の容積混合率等により変化することがあげられる。

### 3. 試験施工の実施

外港地区で浚渫した粘土質土砂(以降、浚渫土)をケーソン中詰材として活用するにあたりまず求められたのが、湿潤単位体積重量の確保である。鹿島港南防波堤のケーソン中詰材に必要とされる湿潤単位体積重量は19.6kN/m<sup>3</sup>であるが、浚渫土は概ね14.0kN/m<sup>3</sup>であった。

次に求められる品質は内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ または一軸圧縮強度30kN/m<sup>2</sup>(吸着力C=15kN/m<sup>3</sup>)である。

以上を踏まえ、ケーソンの底盤、隔壁、側壁に影響を及ぼさない範囲で湿潤単位体積重量と一軸圧縮強度を確保するために必要なカルシア改質材の容積混合率の検討を行った。

カルシア改質土研究協会へのヒアリング及び<sup>1)</sup>「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル 平成29年2月」(一財) 沿岸技術研究センターによると今回の施工において湿潤単位体積重量及び一軸圧縮強度を確保できるカルシア改質材の容積混合率は35%~40%となる。

施工方法は揚土している土砂を使用するため、陸上にて鋼製水槽とバックホウを用いたバックホウ混合工法(写真-3)を採用した。ケーソンの中詰材としての施工を行うにあたり、カルシア改質土製作後に固化したものを解砕する必要があった。ケーソンの中詰の施工は各桝内が海水で満たされた状態で中詰材を投入していくため、水中投入となる。過去、解砕したカルシア改質土を水中投入した事例はないことから中詰材としての品質を確保



写真-3 鋼製水槽を使用したバックホウ混合工法

できる容積混合率を検討することとした。

まず上記、容積混合率の範囲にてケーソン中詰材としての品質を確保できるのか、また、解砕に適した養生期間を確認するため、試験を行った。

この試験結果を用い、実施工を想定した鋼製水槽とバックホウを用いた試験施工(混合-固化-解砕-水中投入)を行い湿潤単位体積重量、強度、施工性を確認した。

### 4. 試験施工の結果と課題

カルシア改質土を製作するには対象となる土の細粒分含有率が重要な要素となる。今回、対象とした浚渫土は細粒分含有率が25%~45%とばらつきがあった。細粒分含有率が低いと砂分が優勢となり、浚渫土とカルシア改質材の混合により生じる水和反応が弱くなり、固化後の品質に影響を与えることが考えられる。また、揚土された浚渫土は揚土後時間が経過し水が抜けて固化しているため、混合の施工性が低下することから加水する必要があった。加水後の浚渫土の湿潤密度は過去の事例からカルシア改質材の容積混合率35%~40%で湿潤単位体積重量19.6kN/m<sup>3</sup>を確保できる湿潤密度1.5g/cm<sup>3</sup>~1.7g/cm<sup>3</sup>とした。

上記から細粒分含有率25%と45%の浚渫土に対し、加水後の浚渫土の湿潤密度を1.5g/cm<sup>3</sup>と1.7g/cm<sup>3</sup>、カルシア改質材の混合率を35%と40%としてケース1~4のカルシア改質土の製作を行った。

解砕後の水中投入試験及び一軸圧縮試験の結果を表-1、表-2に示す。

表-1及び表-2より混合率35%では要求される湿潤単位体積重量19.6kN/m<sup>3</sup>(湿潤密度1.998g/cm<sup>3</sup>)、に対しケース1

の材令7日、ケース3の材令3日、一軸圧縮試験強度30kN/m<sup>2</sup>に対しケース3の材令3日において目標値を下回る結果が確認された。一方で、混合率40%(ケース2およびケース4)においては全てで目標値を上回る結果が得られた。

表-1 水中投入試験結果

ケース No.	浚渫土種類	浚渫土(加水後)		解砕・水中投入試験		
		湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	改質材混合率 (%)	材令	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
1	A 細粒分優勢 Fc45%	1.50	35	σ3	2.013	2.036
					2.059	
				σ7	1.970	1.990
					2.009	
				σ14	2.010	2.040
					2.070	
2	A 細粒分優勢 Fc45%	1.70	40	σ3	2.035	2.036
					2.037	
				σ7	2.029	2.038
					2.047	
				σ14	2.069	2.074
					2.078	
3	B 砂分優勢 Fc25%	1.50	35	σ3	1.935	1.958
					1.980	
				σ7	2.008	2.033
					2.057	
				σ14	2.033	2.046
					2.059	
4	B 砂分優勢 Fc25%	1.70	40	σ3	2.073	2.084
					2.095	
				σ7	2.106	2.122
					2.138	
				σ14	2.115	2.138
					2.161	

表-2 一軸圧縮試験結果

ケース	材令	一軸圧縮強さ		ケース	材令	一軸圧縮強さ			
		q <sub>u</sub>	目標値			q <sub>u</sub>	目標値		
1	σ3	66.7	69.5	3	σ3	24.1	24.7		
		68.8							
		73.0							
	σ7	110.8	111.0		σ7	56.9	60.8		
		118.0							
		104.3							
	σ14	162.7	165.6		σ14	121.8	114.8		
		167.8							
		166.2							
	2	σ3	147.7		158.2	4	σ3	227.6	231.4
			164.2						
			162.6						
σ7		352.4	363.7	σ7	320.5		326.4		
		359.9							
		378.9							
σ14		489.9	502.9	σ14	489.9		480.1		
		506.6							
		512.1							

次に、浚渫土の湿潤密度は1.5g/cm<sup>3</sup>においては混合しやすさがあったが、浚渫土の状態により、目標値を下回ることや砂分優勢の際に材料分離することが懸念された。また、湿潤密度1.7g/m<sup>3</sup>では混合中の抵抗が大きく混合時間の増加が懸念事項としてあげられた。

また、解砕されたカルシア改質土は再結合する傾向は

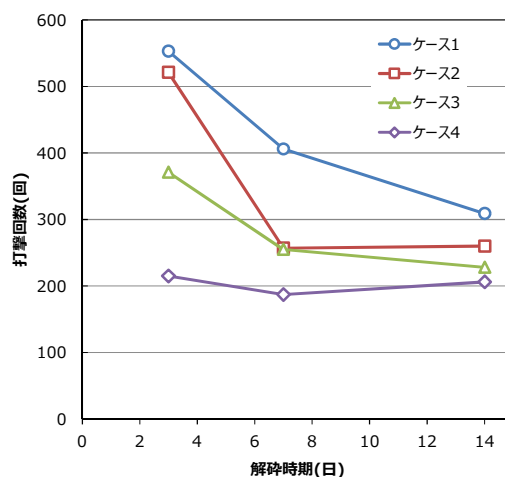


図-1 解砕試験結果

みられず、当初想定されていたc材としての性質ではなく、φ材としての性質を有するものと考えられた。

解砕時期としては養生3日、7日、14日での解砕試験を行った。解砕結果は図-1に示す。

ランマーによる打撃により解砕試験を行ったところ、3日では固化が進んでいない箇所があり解砕時期としては

不適当であると考えられる。7日では3日と比較し、打撃回数が大きく減少した。一方、14日では7日と比べ解砕し易さに変化がなかったことから解砕までの養生は7日以上とした。

上記試験結果より、当初の配合は浚渫土の湿潤密度1.6g/cm<sup>3</sup>、カルシア改質材の混合率は35%として実施工を想定した試験施工を行った。

実施工は図-2の施工フローで行われる。図-2の施工フローが1サイクルであり、1サイクル当たり18m<sup>3</sup>のカルシア改質土が製作できる。懸念事項等の確認のため、1サイクル1基での製作と鋼製水槽をケーソン枠に見立て中詰均しを想定した水中投入試験を行った。

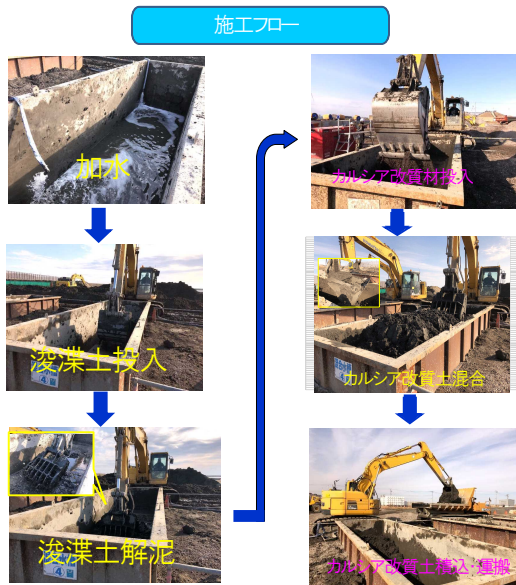


図-2 施工フロー

養生7日時点での湿潤単位体積重量の結果は表-3に示すとおり、平均で19.7kNm<sup>3</sup>と設計値以上を確保することができた。ただしケーソン4函分となる35,903m<sup>3</sup>を製作していく中では、現場の浚渫土の状態等により、ばらつきが生じる可能性があることから、湿潤単位体積重量が不足することが懸念された。

表-3 容積混合率35%における湿潤単位体積重量

【カルシア改質土解砕後 湿潤単位体積重量測定結果】				
	①	②	③	平均
容器容積(L)	9.981L			
重量(kg)	20.00 kg	20.02 kg	20.16 kg	19.7 kN/m <sup>3</sup>
湿潤単位体積重量(t/m <sup>3</sup> )	2.00 t/m <sup>3</sup>	2.01 t/m <sup>3</sup>	2.02 t/m <sup>3</sup>	
湿潤単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	19.6 kN/m <sup>3</sup>	19.7 kN/m <sup>3</sup>	19.8 kN/m <sup>3</sup>	

中詰均しを想定した水中投入試験では、写真-4の通り天端部が泥状化した。実際の中詰均しを想定し、泥状化したカルシア改質土の上に乾いたカルシア改質土を投入したが、状態は改善されず、均し作業を行うのは困難であった。これは解砕したカルシア改質土中の透水性の悪いシルト分が泥状化した水分を通さないことが原因と考えられる、均し作業を行うための重機のワーカビリティと安全性の確保、ケーソン隔壁保護の観点から天端には砕石等の材料を入れ充填する必要があった。

また、今回の試験施工は冬期であったことから、水和反応の速度が遅く、養生時の土厚が4mと厚かったため、内部まで反応しきれないことが考えられる。



写真-4 水中投入状況

こうした問題点を解決するため、カルシア改質材の容積混合率を40%にし、再度試験施工を行った。養生7日時点での湿潤単位体積重量は表-4に示すとおり、平均で20.7kNm<sup>3</sup>となり容積混合率混合率35%の平均19.7kNm<sup>3</sup>より余裕が得られた。これにより多少のばらつきがあっても設計値を満足できると考えられる。

カルシア改質材の容積混合率を40%にすることにより、反応速度も35%より早くなり、水中投入の際の泥状化も抑制傾向ではあったが、投入厚の表層約3%ほどの高さは泥状化した。ケーソン据付から蓋コンクリート打設までは連続静穏日5日の中で行わなければならないことからケーソンを被災させないための早急な中詰均し、蓋コン打設を行わなければならない。よって泥状化した部分については、従来のケーソン中詰材として使用されてきた湿潤単位体積重量19.6kNm<sup>3</sup>の高炉スラグを使用し充填することとした。

また、解砕したカルシア改質土は再結合の傾向が見られないことからφ材としての品質確認が必要であったため、容積混合率40%にて製作したカルシア改質土にて三軸圧縮試験を行い、中詰材としてのφ=30°を確認することができた。

表-4 容積混合率40%における湿潤単位体積重量

【カルシア改質土解砕後 湿潤単位体積重量測定結果】					
	①	②	③	平均	混合率35%(参考)
容器容積(L)	9.981L				
重量(kg)	20.96 kg	21.12 kg	21.08 kg	20.7 kN/m <sup>3</sup>	19.7 kN/m <sup>3</sup>
湿潤単位体積重量(t/m <sup>3</sup> )	2.10 t/m <sup>3</sup>	2.12 t/m <sup>3</sup>	2.11 t/m <sup>3</sup>		
湿潤単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	20.6 kN/m <sup>3</sup>	20.8 kN/m <sup>3</sup>	20.7 kN/m <sup>3</sup>		

カルシア改質材の容積混合率を40%にし、天端材を高炉スラグに置き換えることで設計・施工・工程の観点から南防波堤ケーソンの中詰材として使用することが可能と

なった。

現在、2019年6月下旬に予定されているケーソン据付に向け施工中であり、5月までにカルシア改質土全製作数量の2/3が完了している。

## 5. 考察

港湾工事の埋立材等に利用されてきたカルシア改質土については、従来は強度が求められ使用されてきたが、今回は湿潤単位体積重量を確保することを目的として試験を行った結果、解砕後も湿潤単位体積重量を確保することが確認され、ケーソンの中詰材として使用することが可能となった。

今後、港湾工事においては大水深岸壁の供用に向けた浚渫工事や岸壁の築造工事・改良工事等が行われていくことが考えられる。これらの工事においても浚渫土をカルシア改質土にすることにより、単位体積重量や強度等の品質を確保し、有効活用できるのではないかと考えられる。

中詰材への活用により、カルシア改質土を解砕し、水中投入するというカルシア改質土の新しい使用方法を検討することができた。今後の課題としては水中投入の際に見られた泥状化の抑制がある。泥状化を抑制することで使用用途は増えていくのではないかと考える。

今回夏期に行われるケーソンの据付に向け、冬期からカルシア改質土の製作を行ない、養生高さ約4mにカルシア改質土を盛土し養生してきた。このことから、反応が不十分であった箇所があったことが考えられる。これらの条件を見直すことにより、細部までより固化されたカルシア改質土が製作できる可能性がある。

鹿島港は太平洋に面した海象条件が厳しい港湾であるが毎年5月下旬から8月中旬に静穏日の出現日数が多くなり、この時期にケーソン据付が行われる。ケーソン据付後は据付たケーソンを被災させないために早急に蓋コン打設までを完了しなければならない。このため今回は泥状化した天端部は充填する方法を採用したが、泥状化した際、泥状化した部分の水分が抜けきるまでの期間を確保することや、泥状化した部分を取り除く作業が行えるのであれば、今回のような泥状化を解決するひとつの手段となるのではないだろうか。

カルシア改質材は日本全国で年間約1000万トン生成されているが、製鉄所の仮置場が不足しているため、有効活用することは鉄鋼業においても課題である。また、港湾工事等で発生する浚渫土の処分場所も不足しており、浚渫土の有効活用が課題である。これらの副産物同士を混合し、材料として使用することのできるカルシア改質

土は今後活用を検討される場面が増えてくるのではないかと考える。

今回、現場監督員の立場として浚渫工事からカルシア改質土を製作する防波堤の築造工事にたずさわった。浚渫された土砂の状態により製作されるカルシア改質土の品質にばらつきが生じる点や、新材料を製作し、必要とされる品質を確保するだけでなく、実際の施工に要求される施工性や施工条件を考慮し、施工を進めていくことに難しさを感じた。今後、新材料を使用する工事にたずさわられる機会があれば、該当する現場における現場条件、工程、施工性等への影響を考慮し、材料や施工方法等を選定できるよう努めていきたい。副産物同士のさらなる活用に向けて、今回の中詰材としての活用がマニュアル等の整備、新しい活用方法の検討の際に1つの事例になればと考えている。

## 参考文献

- 1) 「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル 平成29年2月」(一財) 沿岸技術研究センター