

耐震強化岸壁へのカルシア改質土 適応のための検討

高松港湾空港技術調査事務所 設計班 山崎 元貴

循環型社会経済システムの構築に当たっては、「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（平成 27 年 12 月改訂・統合）」が整備され、利用可能なリサイクル材の用途が拡大し、利用実績が増加しつつある。その中で、軟弱浚渫土に転炉系製鋼スラグ（カルシア）を混合した材料が実用化されてきており、その活用にあたっての体系的な知見を取りまとめた「カルシア改質土利用技術マニュアル」¹⁾も整備されている。東予港中央地区岸壁(-7.5m)（耐震）では裏埋材としてカルシア改質土を適用する計画がある。しかし、耐震強化岸壁の裏埋材としての使用は全国で初めての事例であり、レベル 2 地震動に対する照査を行うに際してのパラメータの設定をどのように設定するかという視点で検討を行ったので報告する。

キーワード カルシア改質土 耐震強化岸壁 浚渫土

1. はじめに

循環型社会経済システムの構築に当たって、港湾空港等整備におけるリサイクル材の適用範囲が拡大されている。瀬戸内海では軟弱な浚渫土の処理が問題になっていることを踏まえ、軟弱な浚渫土を有効活用できるリサイクル材（カルシア改質土）を適用することで、土捨場等への負担を減らすことができると考えている。今回は東予港中央地区岸壁(-7.5m)（耐震）の裏埋材として、図-1 に示す範囲に使用することを想定して検討を行った。

カルシア改質土は軟弱土固化処理工法の一つで、粘土・シルト分の多い軟弱な浚渫土と転炉系製鋼スラグであるカルシア改質材を混合し、浚渫土の物理的・化学的性状を改質した材料で、強度増進・濁り抑制・海域底質浄化などの効果を有している。

しかし、カルシア改質土は、使用する浚渫土の海域や場所、深度、浚渫工法によっては強度などの特性に大きな

影響を与えることや、耐震強化岸壁の裏埋材として使用する場合はレベル 2 地震動についての性能検討や液状化特性の確認をする必要があることから適応可能であるか検討が必要がある。このことから、土質試験を行い性能検討や液状化特性の確認を実施した。

2. カルシア改質土を耐震強化岸壁の裏埋材として使用するにあたっての課題

耐震強化岸壁のレベル 2 地震に対する照査は、動的地震応答解析によって求められた水平変位量、沈下量などを照査基準値と比較して行われる。しかしながら、動的地震応答解析に際してカルシア改質土のパラメータをどのように決定するかについては、標準的な手法が存在しない。図-2 に、カルシア改質土などの様々な様態の写真を示す。

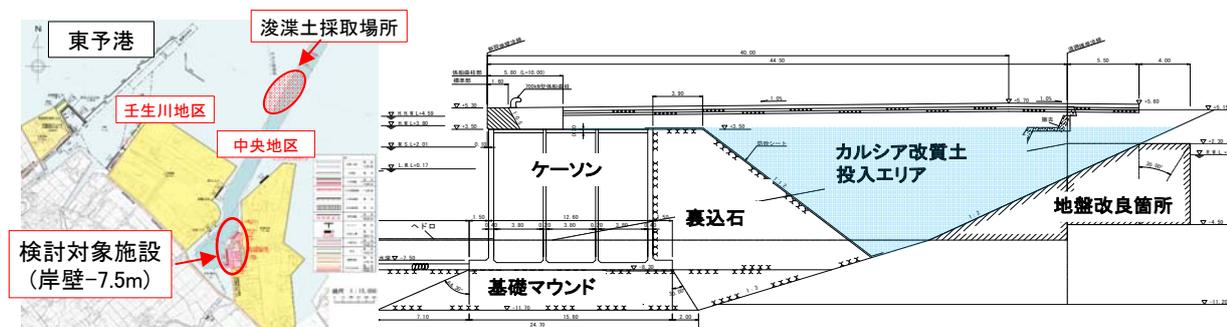


図-1 検討対象施設位置と断面図

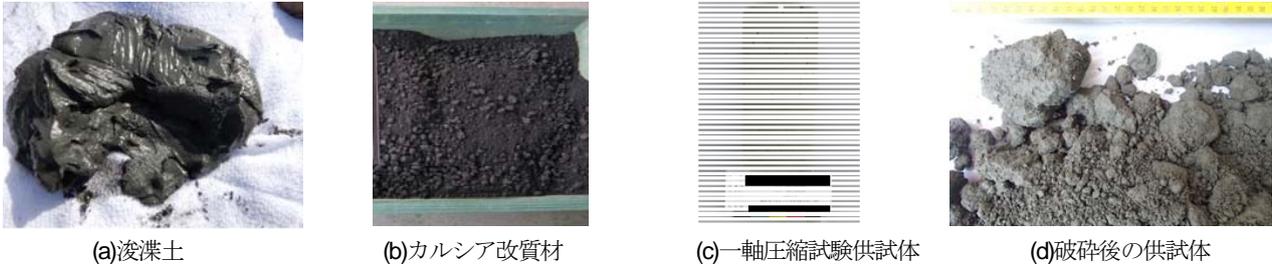


図-2 カルシア改質土の状況

カルシア改質土は図-2(a)の浚渫土に、(b)のカルシア改質材（調整した転炉系製鋼スラグ）を適量混合攪拌することで作成される。カルシア改質材の吸水作用とカルシア改質材中のカルシウムと浚渫土のシリカやアルミナが水和物を生成し、カルシア改質土は(c)に示すように自立した一軸圧縮試験ができるまでに固化される。固化したカルシア改質土を砕くと(d)に示すように粒状材のような外見を示す。このような特徴から、動的地震応答解析にあたっては、カルシア改質材をどのような材料として取り扱うのかが不明であり、その解決が課題であった。

3. カルシア改質土の土質試験結果と考察

(1)土質試験項目

カルシア改質土は浚渫土との混合物である。このため、浚渫土も含めて、カルシア改質材の土質試験を表-1の項目で実施した。カルシア改質土は、現地の浚渫土に対し、粒度調整したカルシア改質材を容積混合率(10%~40%)で混合したものを作成し、28日養生の後に試験を行った。

(2)土質試験結果

a)浚渫土

浚渫土は、表-2に示すとおり、細粒分（工学的分類としては粘土）が99%程度と多く、含水比は100%程度であった。

b)カルシア改質土

カルシア改質材の混合率が大きくなると、表-3に示すとおり、湿潤密度が大きくなり、含水比が小さくなる。混合後の含水比は29~68%と比較的高い。含水比は露天放置後も40%近くに保たれているようである。

図-3に示すように、カルシア改質材の容積混合率に対して一軸圧縮強度は、直線的に増加する傾向にある。一軸圧縮強度と軸差ひずみの両振幅5%が液状化であると想定した場合の液状化強度比 R_{L20} の関係もほぼ直線的である。このことから、カルシア改質土の動的な強度も一

軸圧縮強度で代替的に評価できる可能性があるものと考えられる。また、最も容積混合率の小さい10%の供試体の R_{L20} も0.4程度、20%以上では1.0以上であり、実質的には液状化しないものと考えられる。

図-4には、繰返三軸圧縮試験時における繰返し回数と軸ひずみの推移を示す。繰返しに伴って軸ひずみの増加が見られるが、急激なひずみを増加は引張り破壊時

表-1 土質試験一覧

土質試験名称		目的
浚渫土	物理試験	
	粒度試験	カルシア改質土の母材としての浚渫土の物性値を把握
	湿潤密度試験	
	含水比試験	
	液性限界-塑性限界	
力学試験		
長期圧密後の三軸試験	カルシア改質土の母材としての浚渫土の力学特性の把握	
カルシア改質土	物理試験	
	湿潤密度試験	変動状態(L1地震時)及び偶発状態(L2地震時)の性能検討
	含水比試験	湿練時の含水比と強度特性(圧縮強度)の関係を整理する
	フロー試験	施工性や環境への影響の評価に用いる
	力学試験	
	圧密試験	カルシア改質土の圧密特性の把握
	一軸圧縮試験	カルシア改質土の圧縮強度の把握
	三軸圧縮試験	カルシア改質土の地震前の強度の把握
	繰返し三軸試験(動的変形特性試験)	カルシア改質土の動的変形特性の把握
	繰返し三軸試験(液状化試験)(液状化試験後の排水量計測)	カルシア改質土の液状化特性の把握
繰返し三軸試験(液状化試験)後の三軸圧縮試験	カルシア改質土の地震後の強度の把握	

表-2 浚渫土の物理試験結果

資料名	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	湿潤密度 ρ (t/g/cm ³)	含水比 w(%)	細粒分 Fa(%)	液性限界 WL(%)	塑性限界 Wp(%)	塑性指数 Ip	工学的分類
浚渫土	1.472	2.783	101.1	99.1	74.5	30.3	44.2	粘土

表-3 カルシア改質土の物理試験結果

	湿潤密度 ρ (t/g/cm ³)	単位体積重量 γ (t(kN/m ³))	含水比 w(%)	フロー値 (mm)
容積混合率 10%	1.629	16.0	68.4	140.9
容積混合率 20%	1.808	17.7	49.8	140.6
容積混合率 30%	1.964	19.3	37.3	139.7
容積混合率 40%	2.128	20.9	29.1	132.9

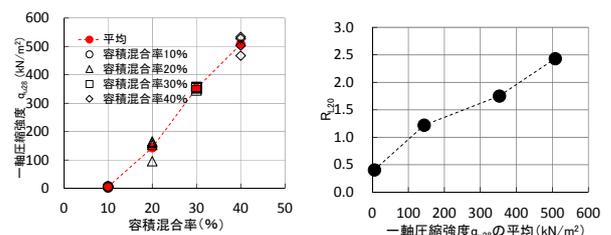


図-3 カルシア改質土の力学試験結果

を除いては見られない。このことから、カルシア改質材が液状化しない材料であることが確認できる。

図-5 には、動的変形特性試験によって求めたカルシア改質土のせん断ひずみとせん断弾性係数の低下率の関係を示す。図-5 を見ると、カルシア改質土もせん断ひずみの増加に伴ってせん断剛性の低下する材料であり、そのひずみ依存性は標準的な砂質土よりも粘性土に近いことがわかる。さらに粘性土よりもひずみ依存性が低く、粘性土よりも液状化強度が高いと判断できる。

カルシア改質材に対する地震の作用の影響を把握するため、繰返し三軸圧縮試験後にも三軸圧縮試験を実施し、液状化試験前の強度を比較を行った。その結果を図-6 に示す。図-6 より、カルシア改質材は、地震時の作用によって、強度低下を生じる材料ではないことがわかる。

風間・柳沢²⁾、原・天野ら³⁾は、まさ土や砂礫材料の液状化強度を式1で示される累積損失エネルギーで評価することを試みている。そこで、カルシア改質土の繰返し三軸試験における累積損失エネルギーを文献³⁾で示された砂礫とまさ土の累積損失エネルギーと比較すること

$$W(t) = \oint_f \tau(\gamma) d\gamma = \int_0^t \tau(t) \gamma'(t) dt \dots \dots \dots \text{式1}$$

τ : せん断応力
 γ : せん断ひずみ

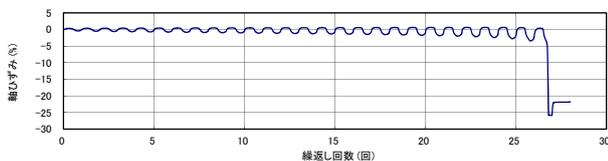


図-4 繰返し三軸試験における軸ひずみの一例

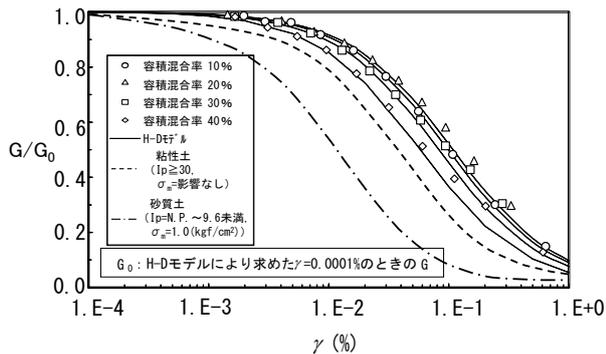


図-5 動的変形特性試験の結果⁵⁾

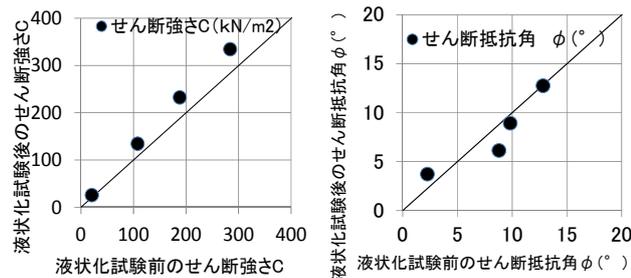


図-6 カルシア改質土の地震作用の前後の強度比較

とした。その結果を表-4 に示す。文献⁴⁾を見ると、ポートアイランドまさ土は液状化していなかったと考えられる。東灘まさ土の相対密度は、ポートアイランドまさ土と同程度である。表-4 より、カルシア改質土は、砂礫や(液状化しなかった)まさ土よりも累積損失エネルギーが大きい(地震のエネルギーを良く吸収する)材料であることがわかる。

(3)カルシア改質土の特徴

これまでの検討から、東予港の浚渫土を用いたカルシア改質土の特徴について、次のようにまとめることができる。

- ・カルシア改質土は液状化しないと考えられる。
- ・カルシア改質土は、せん断ひずみが大きくなるにしたがってせん断剛性が低下する。その程度は、一般的な粘土と同じ程度である。
- ・しかしながら、地震の作用後の強度は地震の前とほぼ同じである。
- ・カルシア改質土の累積損失エネルギーは、砂礫やまさ土よりも大きいものと考えられる。

4.レベル2地震動に対する性能照査

これまでの検討で、概ねカルシア改質土の特徴が把握できたことから、カルシア改質土を裏埋材に用いた場合の性能照査を行った。その結果を以下に示す。

(1)動的変形解析におけるカルシア改質土のパラメータの決定方針

- ・カルシア改質土は液状化しないものとし、液状化パラメータは設定しない。
- ・カルシア改質土のせん断弾性係数の低下のモデル化は粘性土と同様とし、動的変形特性試験より得られるひずみ依存性を考慮する。
- ・カルシア改質土は軟弱土固化工法の一つであり、一般的に軟弱土固化工法はせん断弾性係数の拘束圧依存性を考慮しないことから、せん断弾性係数の拘束圧依存性は考慮しない。

(2)入力地震

入力地震は、当該施設に最も影響のある中央構造線断層帯地震とした。

表-4 カルシア改質土の累積損失エネルギー

	カルシア改質土				大小関係	砂礫材料	まさ土 (ポートアイランド、東灘)	
	容積混合率10% qu=5.75kN/m ²	容積混合率20% qu=143.7kN/m ²	容積混合率30% qu=352.5kN/m ²	容積混合率40% qu=507.5kN/m ²				
正 規 化 累 積 損 失 エ ネ ル ギ ー	DA=2% 到達時	0.05~0.24	0.05~0.12	0.01~0.78	0.02~0.74	>	0.01~0.02	0.02~0.03
	DA=5% 到達時	0.03~0.61	0.29~0.39	0.06~2.49	0.13~2.27	>	0.03	0.04~0.07
	DA=10% 到達時	0.09~0.88	0.39~0.58	0.19~2.95	0.20~2.59	>	0.06~0.09	0.10~0.15

(3)解析ケース

・路床に対する性能検討

解析に先立ち、路床として必要な最小限必要なカルシア改質土の必要強度を検討し、港湾基準から路床設計支持力係数 50N/cm³ 以上を満足できる路床としての必要強度 70kN/m² 以上と設定した。

・解析ケース

参考文献¹⁾によるとカルシア改質土は長期的に強度特性が増加する。そのため、設定する強度は路床として最低限必要な 70kN/m² を基本とし、70, 100, 150, 300, 500 kN/m² に設定し地震応答解析を実施した。

(4)照査基準

照査基準となる岸壁の水平変位量は、港湾基準・同解説⁴⁾及び兵庫県南部地震における被災後の岸壁の利用実績から 100cm、とした。鉛直変位は緊急物資の荷役作業性確保のため 50cm と設定した。傾斜角を港湾基準⁴⁾より 3° を残留変形量の限界値と設定した。

(5)解析結果

解析結果を、表-5 に示す。解析メッシュは設計時のものと同じとしている。解析の結果、カルシア改質土の要求性能より定めた性能規定値を残留変形量、傾斜角ともに既設計と同程度であることが分かった。

なお、地震後に生じる背後の段差については、速やかに砕石等により修復し、使用性を確保するようにする。

(6)カルシア改質土の設計基準強度の設定

参考文献³⁾によると、カルシア改質土の強度はバラツキが大きいということを考慮し、カルシア改質土の設計基準強度は路床としての必要強度より余裕を持たせ、設計基準強度 $q_u=100\text{kN/m}^2$ と設定した。

以上のことを踏まえ、室内試験結果より 100kN/m² を満たすことができる最小容積混合率は 30%となった。

表-5 偶発状態(レベル2地震時)の安定性照査結果

裏埋材	一軸 圧縮強度 (kN/m ²)	残留変形量		傾斜角 (°)	段差量 躯体背後 (cm)
		水平 (cm)	鉛直 (cm)		
雑石 (既設計)	-	-59	-13	0.5	FLIP:55
カルシア 改質土	70	-63	-13	0.6	FLIP:22 排水沈下:17
	100	-61	-12	0.6	FLIP:25 排水沈下:13
	150	-63	-12	0.6	FLIP:29 排水沈下:6
	200	-64	-12	0.6	FLIP:31 排水沈下:6
	300	-64	-12	0.6	FLIP:31 排水沈下:5
	500	-64	-12	0.6	FLIP:28 排水沈下:5
性能規定値		<100cm	<50cm	<3°	-

6.まとめ

東予港における浚渫土、カルシア改質土の土質試験を実施し、カルシア改質土の物性を把握した。

その結果を踏まえ、東予港の耐震強化岸壁を対象として、裏埋材にカルシア改質土を使用した場合の耐震性能について検討した。その結果、設計時の裏込材として想定していた雑石に替えて、カルシア改質材を使用した場合であっても、レベル2地震に対する性能規定値を満足することがわかった。これにより、東予港の耐震強化岸壁においては、裏込材としてカルシア改質土を使用することができると判断された。さらに、東予港での使用に先立ち、カルシア改質材の最小容積混合率と設計基準強度を設定した。

ただし、他港への適用に当たっては、以下の点に留意する必要があると考えられる。

- ・浚渫土の物性とカルシア改質土の強度特性等の関係について把握することが望ましい。
- ・今回の検討では安全側として、軟弱土固化処理工法と同様に、せん断弾性係数の拘束圧依存性は無いものとした。今後適応するに当たっては、カルシア改質土のせん断弾性係数の拘束圧依存性を把握することが望ましい。
- ・施工方法の検討に必要な浚渫土の調整含水比とカルシア改質土の流動性や一軸圧縮強度との関係を把握することが望ましい。
- ・参考文献¹⁾にはカルシア改質土の長期(91日)強度については、28日強度の1.5~1.8倍程度になると示されており、強度を把握することが望ましい。
- ・以上の留意点を踏まえ、今後、浚渫土の物性の違い等によるカルシア改質土の強度特性、動的変形特性や液状化特性の変化を把握するためのモニタリングを実施することが望ましい。

参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター: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
- 2)風間基樹,柳澤栄司,増田昌昭:定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性,土と基礎,第46巻,第4号,pp.21-24,1998
- 3)原忠,天野真輔,国生剛治,大石富彦:三軸試験による砂礫材料の損失エネルギーの検討,土木学会代55回年次学術講演会,III-A86,2000
- 4)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説,平成19年7月
- 5) 沿岸技術研究センター:埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版),平成9年8月