

カルシア改質土を用いた耐震強化岸壁の設計手法の提案

古澤 達也*・稲田 勉**・伊藤 春樹***・政岡 和宏****

* 前（一財）沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員
 **（一財）沿岸技術研究センター 調査部 調査役
 *** 国土交通省四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 沿岸防災対策官
 **** 国土交通省四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 建設管理官

東予港では、航路の浚渫工事で発生した浚渫土の有効活用が課題となっていたため、耐震強化岸壁の裏埋材として、浚渫土とカルシア改質材を混合したカルシア改質土が活用されている。カルシア改質土は潜堤等に利用されているが、耐震強化岸壁への利用は国内初である。本検討では、東予港での設計・施工（品質管理）の結果を受け、岸壁背後にカルシア改質土を用いたケースを対象とした安定性照査、地震応答解析を実施した。その結果、強度増加特性を有するカルシア改質土を段階的に施工することによりケーソン幅を更に小さくできる可能性が示された。以上より、ケーソン背後に裏込石を設置し、カルシア改質土を裏埋土とした場合と裏込石を用いない場合の設計フローを検討し、カルシア改質土を耐震強化岸壁に用いた場合の設計手法を提案した。

キーワード：耐震性強化岸壁、カルシア改質土、強度増加特性、設計フロー、段階的施工

1. はじめに

岸壁の裏埋材は、流通及び施工性から雑石が適用されることが多い。一方、循環型社会経済システムの構築に向け、利用可能なリサイクル材の岸壁の裏埋材への代替が拡大しつつある。しかし、拡大する裏埋材への適用について、港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下、港湾基準）¹⁾に則った動的解析を実施し、耐震性能を検証した事例は少ない。

東予港では複合一貫輸送ターミナル整備事業の一環として、貨物量の増加に伴う船舶の大型化に対応するとともに、大規模地震発生時の緊急物資等の輸送拠点を確保することを目的に、耐震強化岸壁（計画水深-7.5m）が整備されている。岸壁裏埋材にはリサイクル材の一つであるカルシア改質土を用い、耐震性の検証を実施したうえで、平成30年8月より供用している。

供用した耐震性強化岸壁の平面図と断面図を図-1と図-2に示す。

供用した耐震強化岸壁（計画水深7.5m）は、断面図に示すように、堤体の直背後には裏込材を配置し、その背後に裏埋材としてカルシア改質土を活用している。

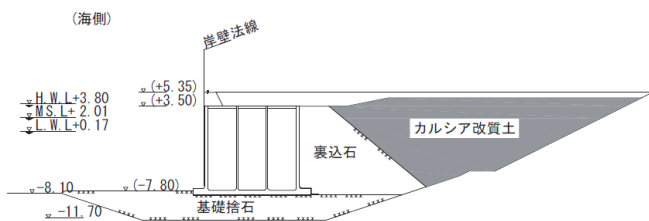


図-1 標準断面図



図-2 全体平面図(赤丸：対象岸壁)

表-1 耐震強化岸壁に求められる性能等

	耐震強化施設
	特定
	緊急物資対応
レベル2地震動の使用後に必要とされる機能	地震後、構造的な安定が保たれ、速やかに、船舶の利用、人の乗降及び緊急物資等の荷役を行うことが出来る
要求性能	地震後に必要な機能（本来の機能は不要）
許容される修復の程度	使用性 *この要求性能は、地震後に必要な機能（緊急物資輸送）に対するものであり、施設本来の機能に対するものとは異なる。 軽微な修復

2. カルシア改質土を用いた耐震強化岸壁の設計手法の検討

2.1 カルシア改質土の強度増加特性

(1) 東予港における強度増加特性

東予港の施工時に作成した供試体の一軸圧縮試験結果の材齢別のヒストグラムを図-3 に示す。施工後3カ月 (σ_{91}) と1年 (σ_{396}) では、倍近いせん断強度が確認され、明確な長期強度増加特性が見られる。

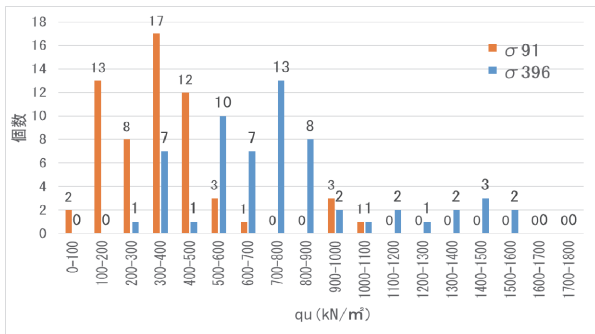


図-3 一軸圧縮試験結果のヒストグラム

カルシア改質土の利用に関するマニュアルとして、「カルシア改質土利用技術マニュアル」²⁾ (以下、技術マニュアル)がある。

技術マニュアルにおけるカルシア改質土の一軸圧縮強さの経時変化の例を図-4 に示す。浚渫土の含水比、カルシア改質材の容積混合率により異なるが、材齢84日と材齢28日の強度比は、平均で $qu_{84}/qu_{28} = 1.5 \sim 1.7$ となっており、カルシア改質土の一軸圧縮強さは、時間の経過とともに増加する傾向が確認できる。

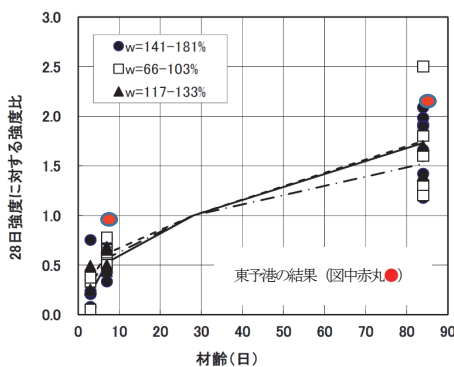


図-4 カルシア改質土強度発現特性の例²⁾ (一部加筆)

(2) 東予港における養生日数と一軸圧縮強度の相関

東予港での養生日数と一軸圧縮強度の相関式及び北海道大学での実験³⁾を参考に1日強度を 40 kN/m^2 に設定した。

2.2 設計手法の検討

技術マニュアルには、カルシア改質土の特徴、材料の品質、土質特性、試験、性能照査、環境への安全性に関する照査、配合設計・配合試験、施工に関する事項が記載されているが、ケーソン式岸壁の設計に用いる場合の記載は見当たらない。

今後、カルシア改質土の利用を促進するため、更に強度増加するカルシア改質土の特性を構造上の利点とするために東予港断面(図-5)の耐震性を確認するとともに、その結果を用いて、岸壁のケーソン直背後にカルシア改質土を用いるケースを対象とした設計手法を検討した。検討にあたっては、港湾基準、軽量混合処理土等の改良土のマニュアル^{4), 5), 6)}を参考とした。

2.3 設計手法の検討断面

検討は、図-5と図-6の2断面で行った。2つの断面の違いは、ケーソン直背後に裏込石を設置するか、裏込石は設置せず、直にカルシア改質土を裏埋土として施工していることである。

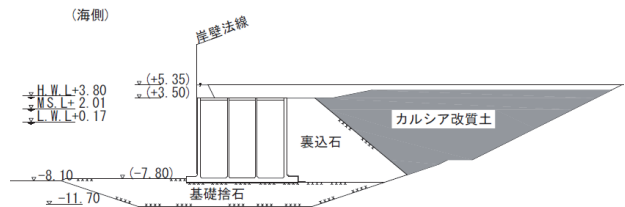


図-5 ケーソン直背後に裏込石を設置し、その裏埋土としてカルシア改質土を用いた断面

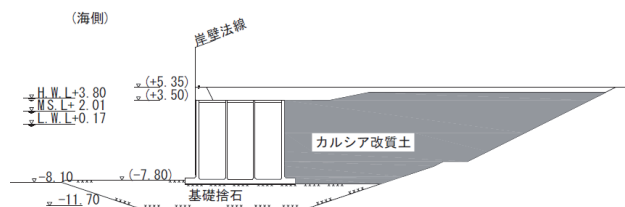


図-6 ケーソン直背後に裏込石を設置せず、直に裏埋土としてカルシア改質土を用いた断面

2.4 設計フローの考案

港湾基準や軽量混合処理土等の改良土のマニュアルを参考として、カルシア改質土を用いた耐震強化岸壁の設計フローを検討した。

(1) 全体の設計フロー

設計で検討する主な項目は下記である。

◇カルシア改質土の条件設定

(設計基準強度の設定、目標フロー値の設定)

◇浚渫土の事前調査、カルシア改質土の室内配合試験

◇基本断面の設定

◇カルシア改質土の条件設定 (強度、単位体積重量等)

◇カルシア改質土を含む地盤全体の検討

◇本体構造の性能照査

◇地盤の全体構造の決定

◇維持管理の検討

全体の設計フローを図-7に示す。

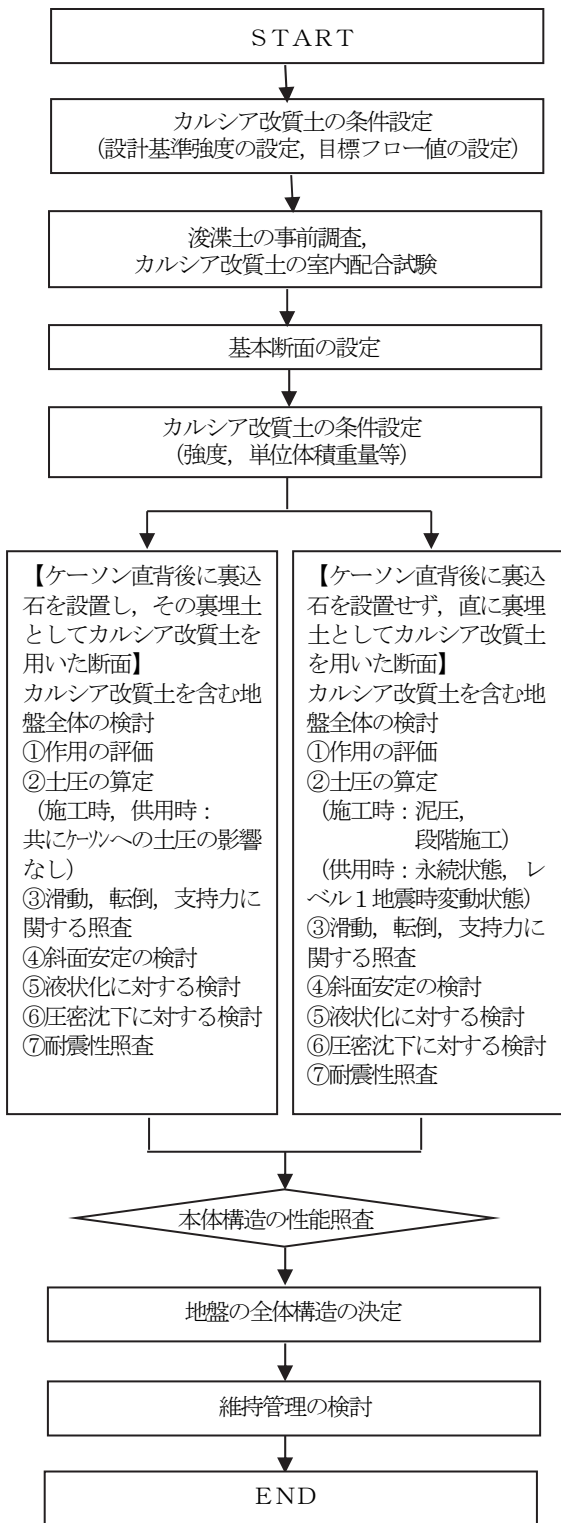


図-7 全体の設計フロー

(2) 室内配合試験

技術マニュアルに記載している内容と同様であり、ポイントを下記に示す。

- ・実際に使用する材料を用いて配合試験を実施する。
- ・カルシア改質材の容積混合率は、カルシア改質土容

積に対するカルシア改質材の実容積とする。

- ・カルシア改質土の流動性は、施工法を考慮する。

(3) 設計計算

①設計計算フロー

ケーソン直背後に裏込石を設置せず、直に裏埋土としてカルシア改質土を用いた断面に関する設計計算フローを図-8に示す。

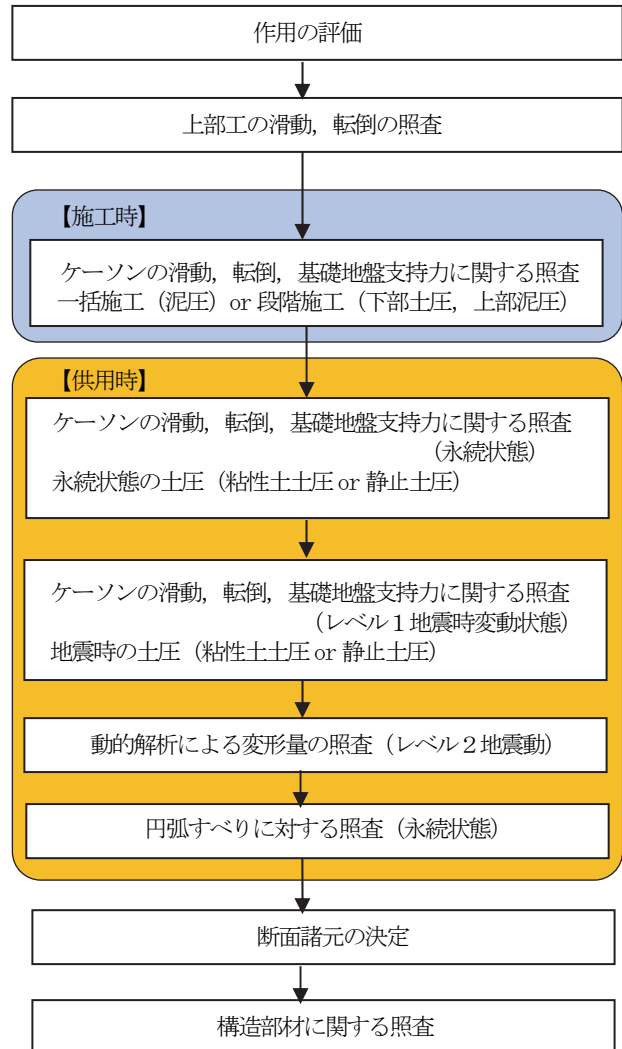


図-8 設計計算フロー

②静止土圧係数（永続状態・地震時）の考え方

永続状態の土圧、地震時土圧ともに、港湾基準や漁港・漁場の施設的设计参考図書 2015年版（以下、漁港参考図書）に準じた方法で土圧を算定する。

カルシア改質土の場合、時間の経過とともに強度が増加し、自立する事からケーソンに作用する土圧がゼロとなるような状態が想定される。

その場合、漁港参考図書では、永続状態、地震時変動状態ともに静止土圧は、静止土圧係数 $K_0=0.5$ を用いて算定することが示されている。しかし、改良土のマニュアルでは静止土圧係数として $K_0=0.1\sim 0.2$ が示されている。自立状態の改良土で $K_0=0.5$ を用いることはマニュアルに記載される K_0 圧密試験結果からも過大と考えられることから、今回の検討で

は、 $K_0=0.2$ を採用した。

③作用土圧（施工時・供用時）の考え方

カルシア改質土の強度発現特性を考慮し、施工時、供用時について検討する。作用土圧（施工時・供用時）の考え方を表-2に示す。

表-2 作用土圧（施工時・供用時）の考え方

作用土圧の考え方	
施工時	ケーソンの滑動、転倒、基礎支持力に関する照査を行う。 一括施工、段階施工の2ケース ・一括施工は泥圧、段階施工は（上側泥圧+下側土圧）を作用させる。 ・下側土圧は1日後の一軸圧縮強度とし、東予港での養生日数と一軸圧縮強度の相関式及び北海道大学での実験 ²⁾ を参考に $qu=40kN/m^2$ に設定する。
供用時	永続状態の土圧と地震時変動状態の土圧を作用させる。

3. カルシア改質土を用いた耐震強化岸壁の検討結果の紹介

考案した設計フローに基づいて、カルシア改質土を用いた耐震強化岸壁の検討を行った。その結果、強度増加特性を有するカルシア改質土を段階的に施工することにより、所要の堤体幅が狭くできることが可能であることを確認したので、その概要を以下に紹介する。

3.1 検討断面

検討は、設計フローで使用した2断面、ケーソン直背後に裏込石を設置し、その裏埋土としてカルシア改質土を用いた断面（図-5）及びケーソン直背後に裏込石を設置せず、直に裏埋土としてカルシア改質土を用いた断面（図-6）で行った。

3.2 静的検討

静的検討（ケーソンの滑動、転倒、基礎地盤支持力に関する照査）を行い、施工時、供用時における必要なケーソン幅の検討を行った。

その結果、施工時（泥圧）でのケーソン幅が6.0mと最小幅となったが、供用時の土圧で検討した結果、レベル1地震動のケーソン幅7.2mが適切と判断し、この値を採用断面とした。なお、供用時の常時については土圧が作用しないため検討は行っていない。

表-3 静的検討結果

施設状態	作用状態	カルシア改質土の一軸圧縮強度	上載荷重	ケーソン幅
供用時	レベル1地震時変動状態	$qu = 243.7 kN/m^2$ (試験値)	考慮	12.6 m
	一括施工	—	考慮せず	8.0 m
施工時	段階施工	$qu = 40 kN/m^2$	考慮せず	6.0 m
	永続状態	$qu = 200 kN/m^2$	考慮	—
供用時	レベル1地震時変動状態	$qu = 200 kN/m^2$		7.2 m

ケーソン直背後に裏込石を設置し、その裏埋土としてカルシア改質土を用いた断面のケーソン幅は裏込石の地震土圧係数より12.6mであるが、ケーソン直背後に裏込石を設置せず、直に裏埋土としてカルシア改質土を用いた断面のケーソン幅は7.2mで安定性を確保できることが分かった。

ケーソンに作用する泥圧は、カルシア改質土を段階的に施工することで低減可能となる。静的検討結果により、カルシア改質土を段階的に施工することにより、ケーソン幅の縮小に繋がることを確認した。

3.3 施工性

段階施工について施工の専門家にヒアリングしたところ、レッド等で高さ管理しながら施工することが可能であり、また、打ち継ぎについても地形に馴染んだ形で重なることから打ち継ぎ箇所での性状の不連続の問題も小さいとの回答があった。

3.4 地震応答解析

静的検討結果を踏まえて、前述した2断面について、地震応答解析（FLIP）を実施した。

(1) 地震応答解析のパラメータの設定

地震応答解析ではカルシア改質土と地山との接続箇所を適切に設定する必要がある。ここでは港湾基準に記載のジョイント要素を用いることとし、ジョイント要素のパラメータのうち、 ϕ は港湾空港技術研究所・日本製鉄・JFEスチール・日鉄日新製鋼のカルシア改質土と地山との摩擦実験結果⁷⁾により確認された地山側の摩擦係数を用い、 c は施工後の土質試験時の土質定数より設定した。ただし、カルシア改質土は c 材だが、捨石との境界では捨石の挙動が支配的になるため、摩擦係数の ϕ を用いた。

捨石との境界部については、捨石内部にカルシア改質土が浸透するが、地震時に接続面が切れることが考えられるため、通常の捨石の内部摩擦角 40° を採用し摩擦係数 0.8 と設定した。コンクリートとカルシア改質土の摩擦係数について、水平面境界部については、実験結果を参考に摩擦係数 0.8 とし、ケーソン背後における壁面摩擦についてはカルシア改質土が自立して接続面が切れる可能性があることから 0 とした。

粘性土との境界部については、地山側の粘着力を入力した。

(2) 静止土圧係数の設定の考え方

管中混合固化処理工法や軽量混合処理工法の技術マニュアルでは、FLIP のパラメータを設定する場合は、ポアソン比や体積弾性係数に静止土圧係数が反映されている。カルシア改質土においても、管中混合固化処理工法、軽量混合処理工法のマニュアルに準じ、FJIP のパラメータを設定する場合は、ポアソン比、体積弾性係数に静止土圧係数 $K_0=0.2$ を反映して設定した。

(3) 地震応答解析結果

2断面について行った地震応答解析を行い、残留変位、最大変位を算定した。その結果を表-4 に示す。

表-4 地震応答解析結果

	作用状態 ・地震動	カルシア改質土の軸圧縮強度	岸壁天端 残留変位量		岸壁天端 最大変位量	
			水平	鉛直	水平	鉛直
			裏込石有り断面	変動状態 L1 地震	qu = 243.7 kN/m ² (試験値)	-5 cm
ケーソン幅 12.6m	偶発状態 中央構造線断層帯 iyo02		-68 cm	-21 cm	-93 cm	-25 cm
裏込石無し断面	変動状態 L1 地震	qu = 200 kN/m ²	-6 cm	-1 cm	-9 cm	-1 cm
ケーソン幅 7.2m	偶発状態 中央構造線断層帯 iyo02		-63 cm	-11 cm	-100 cm	-17 cm

変動状態の残留変形量は 10cm 以内であり、岸壁の供用上の残留変形量の限界値（船舶接岸の安全性）20cm ~ 30cm 以下であることから問題ないことも分かった。

偶発状態の性能既定値を表-5 に示す。

表-5 偶発状態の性能既定値

性能既定値	残留変形量	
	水平	鉛直
	<100cm	<50cm
備考	耐震強化施設 (緊急物資対応)	水平変位の 1/2

偶発状態の残留変形量は水平、鉛直ともに、性能規

定値を満足していることが分かった。

4. おわりに

今回、東予港での設計・施工（品質管理）の結果を用いて、カルシア改質土を耐震強化岸壁に用いる場合の設計手法を検討した。その結果、耐震強化岸壁の裏埋材としてカルシア改質土を用いた場合の設計フローを考案するとともに、強度増加特性を有するカルシア改質土を段階的に施工することにより、所要の堤体幅が狭くできることを確認し、その設計手法を提案した。耐震強化岸壁のケーソン直背後の施工方法を工夫すれば、経済的な施設の整備が可能となるものと考えられる。

今後、今回の成果を実際の現場に適用し、条件によって変化するコスト縮減率や施工期間を含めた総合的な施工性をより詳細に確認することで、港湾施設におけるカルシア改質土の活用拡大となり、循環型社会経済システムの構築に寄与するものと考えられる。

謝辞

本稿は、四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所発注の「令和元年度 管内技術課題検討業務」の成果の一部を纏めたものである。

技術課題の検討を円滑に進めるため、有識者から意見等を聴取しつつ業務を遂行した。有識者の菅野高弘氏（港湾空港技術研究所 上級専任研究員）、水谷崇亮氏（港湾空港技術研究所 地盤研究領域 基礎工研究グループ長）、大矢陽介氏（港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ主任研究官）から貴重なご意見、ご指導をいただいた。また、日本港湾コンサルタントの山部道氏には、本稿全般に亘ってご助言をいただいた。併せて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2018。
- 2) 一般財団法人沿岸技術研究センター：カルシア改質土利用技術マニュアル、平成 29 年 2 月
- 3) 佐藤令菜・西村 聡・戸田賀奈子・佐藤 努・新井 悠：カルシア改質土の強度発現特性とせん断剛性測定による初期硬化挙動の評価、第 51 回地盤工学研究発表会、2016。
- 国土交通省港湾局：港湾施設・海岸保全施設の維持管理に関する最近の話題、2018。
- 4) 一般財団法人沿岸技術研究センター：事前混合固化処理工法技術マニュアル（改訂版）、平成 20 年 12 月
- 5) 一般財団法人沿岸技術研究センター：港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル（改訂版）、平成 20 年 7 月
- 6) 一般財団法人沿岸技術研究センター：管中混合固化処理工法技術マニュアル、平成 20 年 7 月
- 7) (国研) 海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所・日本製鉄㈱・JFE スチール㈱・日鉄日新製鋼㈱の 4 者による共同研究の成果、2020。

