

可塑性グラウト材を用いた岸壁背後の裏込石の固結による 既設重力式岸壁の耐震性向上に関する設計方法の検討

並木 達也*・林 洋介**・西森 忍 ***・青木亮介****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 参与

*** 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 調査課 課長

**** 前 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 調査課 係長

四国地方整備局管内の既設の岸壁においては、「高度経済成長時代に施工された既存岸壁を活用した耐震補強」, 「改良設計を実施する際に, 設計震度<照査用震度となる場合の既存岸壁を活用した耐震補強」及び「既存岸壁を活用した耐震強化岸壁整備」のような施設改良事案を想定し本研究を開始した. 既設重力式岸壁の耐震性向上についてはグラウンドアンカー工法等があるが, 地盤条件や維持管理上の課題がある. 本検討では, 可塑性グラウト材を用いて岸壁背後の裏込石を固結させることで, 既存の重力式岸壁の耐震性を向上させる工法に関する設計方法等を検討した.

キーワード : 裏込石, 固化改良, 可塑性グラウト, FLIP, 遠心模型実験

1. はじめに

ここで提案する工法は耐震補強のため可塑性グラウトを用いて, 裏込石を固化改良することで, 地震時の滑動抵抗を増加させる工法である (図-1のグレー着色部分が裏込石の固化改良体). 検討対象施設は, 図-1に示す重力式岸壁であり, 設計震度 $K_h=0.12$ の通常岸壁である. 本工法は, 港湾空港技術研究所に委託した模型実験により本工法を適用することで現況よりも耐震性能の向上が図れることが確認されているものの, 設計方法等は確立されていない. ここでは本工法の設計方法について検討することを目的とし, ケーソンの裏込石を可塑性グラウトで固化改良した場合の地震時の変形挙動等を検討した.

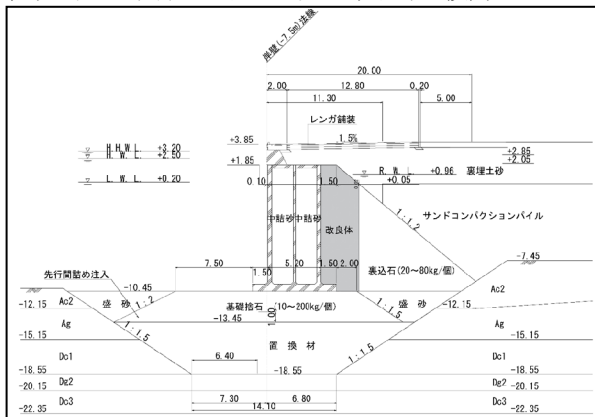


図-1 四国の既存重力式岸壁 標準断面図

2. 関連資料の収集・整理

本工法は可塑性グラウトを用いて裏込石を固化改良する点が特徴的である. 可塑性グラウトは, セメント, 水, 可塑性材からなるセメント懸濁液で, 作用圧が加わらない自重のみでは形状を保持し, 注入圧等が加えられると容易に変形する粘性を持つ材料であり, トンネ

ルの空洞充填に多く用いられている. この可塑性グラウトを裏込石の空隙に充填し, 改良体を施工する. 本工法の設計・施工方法の検討を行うため, 下記の資料を収集・整理した.

- (a) 類似する改良工法設計事例
- (b) 可塑性グラウトと類似する改良工法の類似点, 相違点の整理
- (c) 他の改良工法設計法の可塑性グラウトへの適用可能性の評価

本工法は, 現地における適用事例が存在しない. しかし, 近年開発が進められている重力式係船岸の増深工法²⁾は本工法と同様に石材に可塑性グラウトを注入することでマウンドの一部を固化させる工法であり, 類似する点も多い. また, 岸壁背後の裏埋土については液状化対策や浚渫土砂の有効利用を目的に改良土工法のマニュアル^{8), 9), 10), 11), 12), 13)}が沿岸技術研究センターより発行されている. 本検討では, これらの資料を参考に耐震性向上メカニズムを明らかにするとともに, 地震応答解析時のパラメータ設定方法や安定性照査手法を検討した.

3. 裏込石部の固結工法の概要と特徴

3.1 設計方法の基本的考え方

可塑性グラウトによる裏込固化耐震性向上メカニズムのイメージを図-2に示す.

既往報告書³⁾においては「固化体の有無に関わらず, 裏込めおよび背後地盤の変形モードは一定であった. 設計時に従来通りの主働破壊を想定した検討が適用できると考えられる.」と記載されており, 裏込石部固結による設計は, 基本的に「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁵⁾における重力式係船岸の設計方法に準じることが可能と考えられる. 図-2に示すように本工法の耐震性向上メカニズムは, 「改良体による見かけの堤体

幅拡幅による摩擦係数増加効果」であると考えられる。

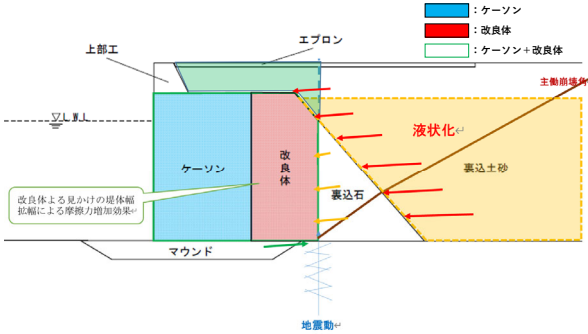


図-2 裏込固化耐震性向上メカニズムのイメージ図

3.2 模型実験の再現解析

(1) 模型実験結果の概要

本工法に関しては、高松港湾空港技術調査事務所が港湾空港技術研究所に委託研究として実施した既往の研究成果^{1), 3), 4), 6)}では、既存重力式岸壁を対象に港湾空港技術研究所の遠心模型実験装置を用いて地震動作用時(M6.5直下型地震)における水平変位、鉛直変位や背後の裏込石部分のひずみの発生状況等が明らかになっている。検討対象地区で想定されるM6.5直下型地震シナリオ波の岸壁法線直角方向成分を再現するよう作成されている。

改良体の形状(幅と高さ)とケーソンの水平変位量の削減効果の関係が示されている(図-3, 図-4参照)。改良体の幅がケーソン高さの3割の改良では未改良と比べて水平変位量が40%に低減し、ケーソン高さの7割の改良では未改良と比べて水平変位量が30%に低減している。

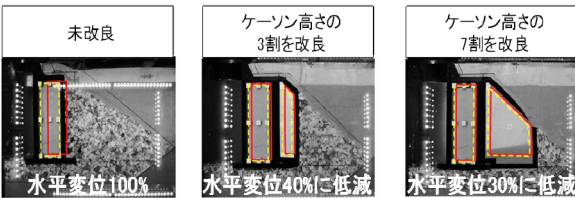


図-3 改良体の幅による効果を示す模型実験結果⁷⁾

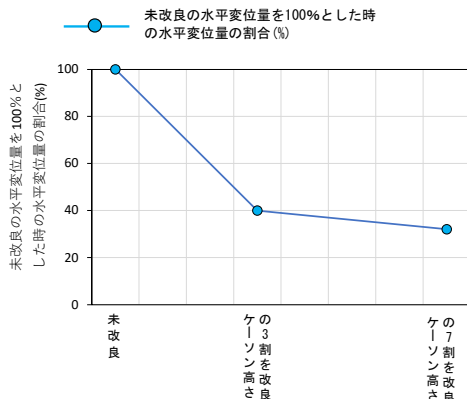
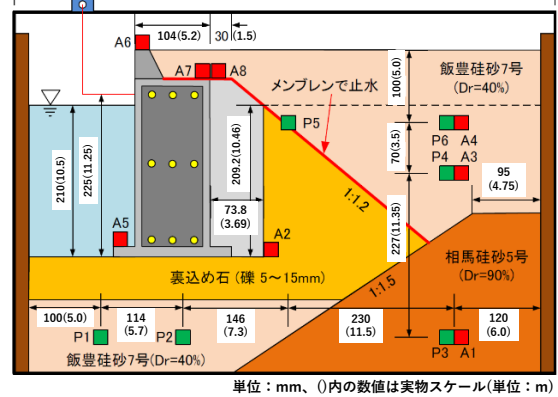


図-4 改良体の幅による効果と設計震度の関係

(2) 模型実験の再現解析

本検討ではFLIP ROSE ver. 7.4.3⁵⁾を用いて上記の模型実験結果を再現することで、FLIPに用いるパラメータの設定方法を検討し、その後のレベル2地震動における耐震性能照査の検討に反映させることとした。

再現解析を実施したケースは、平成31年の遠心模型実験の改良体が一軸圧縮強度(638.8kPa)のケースを基に設定した⁶⁾。その断面を図-5に示す。改良体周辺のジョイント要素の配置と摩擦係数の値を対象としたパラメトリックスタディにより模型実験結果の再現性の検証を行った。なお、解析は模型スケールで実施し、解析結果を実物スケール(50倍)に換算した。図-6に改良体のジョイント要素の設定状況(赤枠内)を示す。ジョイント要素のパラメータは、表-1に示す通りであり、ジョイント要素の設定位置は、改良体側面(黄色)、改良体上面・底面(緑色)、ケーソン底面(橙色)、ケーソン背面(白色)である。ジョイント配置ケースは、改良体周辺に設定したCase1と地表面まで伸ばしたCase2の2ケースを設定している。模型実験の水平変位は、実物スケールに換算して水平変位:0.16m(模型実験の回転角は不明)で、一方、Case1の水平変位:0.22m, 回転角:0.43°, Case2の水平変位:0.23m, 回転角:0.43°となり、ある程度の再現性を確認した。なお、図-12に示すようにケーソンの地震時変位を水平変位と回転角に分離して求めている。



- : 間隙水圧計
- : 巻き込み式変位計
- : 加速度計
- : ターゲット

図-5 再現解析に用いた模型実験断面図⁶⁾

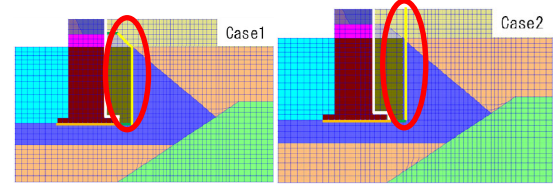


図-6 再現解析のジョイント要素の位置図

表-1 ジョイント要素のパラメータ

ジョイント位置	法線方向剛性 K_n (kPa/m)	接線方向剛性 K_s (kPa/m)	粘着力 c_j (kPa)	摩擦角 ϕ_j (度)
改良体側面	1.0×10^6	1.0×10^6	0	15
改良体上面・底面	1.0×10^6	1.0×10^6	0	31
ケーソン底面	1.0×10^6	1.0×10^6	0	31
ケーソン背面	1.0×10^6	1.0×10^6	0	15

図-7に模型実験での最大せん断ひずみ発生状況と、図-8にFLIPによる再現解析結果を示す。図-7の模型実験でのせん断ひずみは、ハイスピードカメラで撮影した実験前後の画像をデジタル画像相関法により解析し算出された結果で、赤い点線枠にせん断ひずみが発生していることが分かる。一方、FLIP解析結果の両ケース(図-8の赤い点線枠内)でも、模型実験結果と同位置にせん断

ひずみが発生しており、裏込部の挙動が再現できている。ただし、図-8 の Case 1 では、橙色枠内の赤い格子部分でせん断ひずみが局所的に大きく発生していることが確認できた。これは、回転による改良体の右肩部の海側への変位（図では左下方向の変位）によって、改良体と背後の裏埋め土との間に相対変位が発生していることを示すもので、Case1 のジョイント設置位置の角となる部分でジョイント要素の相対変位が小さくなり、周辺の要素でせん断ひずみが大きくなったと考えられる。実際には改良体と裏込め石の境界は結合していないので、境界での相対変位が発生しやすくなるよう Case 2 に示すように地表面までジョイント要素を設定することが望ましいと判断された。

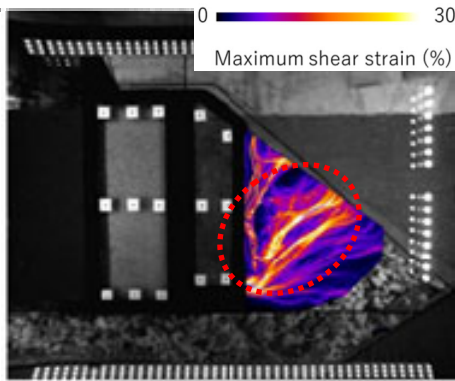


図-7 模型実験での最大せん断ひずみ発生状況⁶⁾

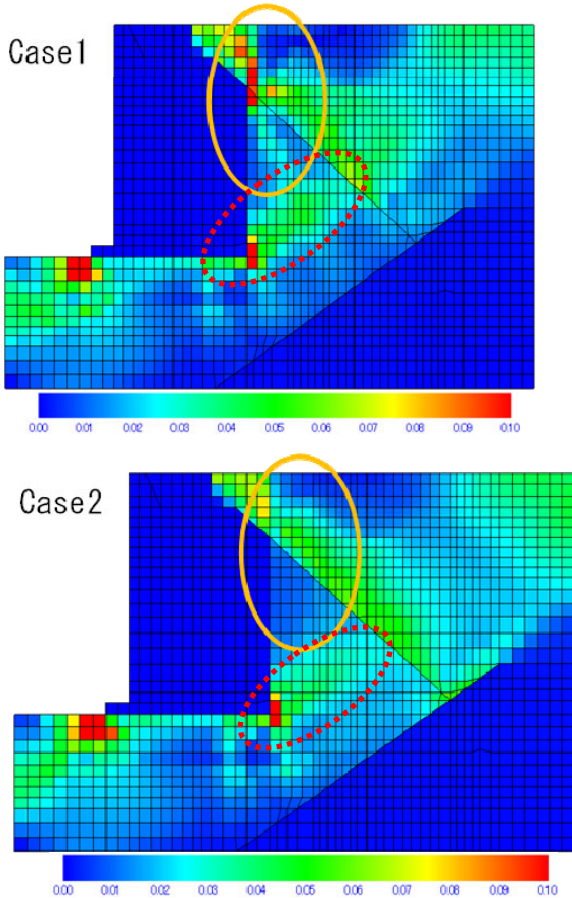


図-8 最大せん断ひずみ分布図(再現解析) (単位は×100%)

3.3 偶発状態(レベル2地震時)の地盤応答解析

上記の検討結果に基づき、図-1 に示す岸壁を対象に、FLIP により偶発状態(レベル2地震時)について、本工法の改良効果を検討した。図-9に解析モデルの1例を示す。また、入力地震動として図-10に示すレベル2地震動を用いた。なお、実現場の解析に入力した地震動は、M6.5直下型地震動の地震動時刻歴波形を使い再現解析を実施した。

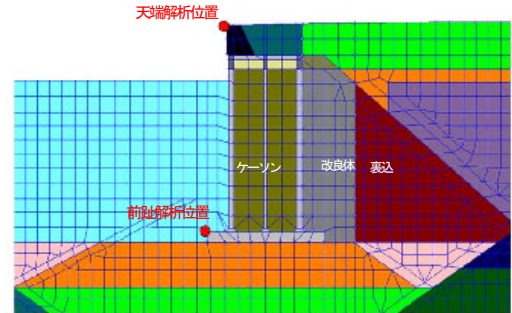


図-9 レベル2地震動の解析モデル(1例)

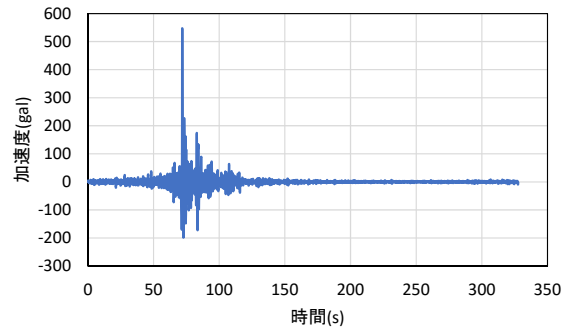


図-10 実現場の解析に入力した地震動(M6.5直下型地震動)

改良体の幅は、壁高Hに対して、 $0.3H \cdot 0.5H \cdot 0.7H$ の3ケースとした。FLIP 解析の結果、改良体の厚さを拡幅することで、現況施設よりも岸壁天端の残留水平変位が減少しており、改良効果が確認できる。(図-11 参照)

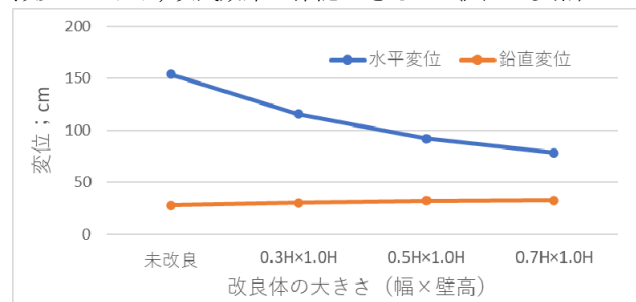


図-11 岸壁天端の残留変位

次に、岸壁天端の残留水平変位の減少効果について、水平変位と回転による水平変位に分けて検証した。そのイメージを図-12 に示す。

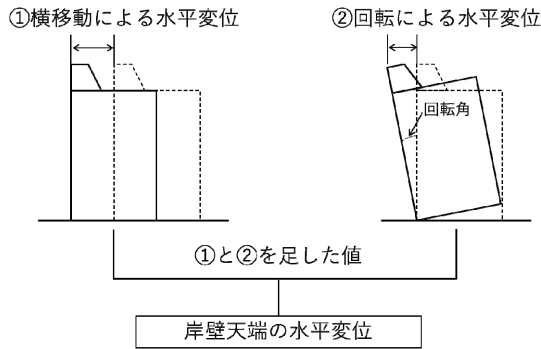


図-12 岸壁天端の水平変位のイメージ

図-13に天端の残留水平変位の特性を、横移動（前趾の水平変位）と回転（回転による水平変位）に分けて分析した結果を示す（図中グラフの横軸は改良体の大きさ（改良体の壁高Hに対する改良幅0.3~0.7H）を示している）。天端の残留水平変位の減少は、前趾の水平変位の減少と回転成分の水平変位の減少によるが、回転成分の減少効果が大きいことが認められる。解析結果より得られた改良メカニズムとしては、当初想定された摩擦力増加効果ではなく、回転成分が減少し、岸壁天端の残留水平変位の抑制効果が考えられる。

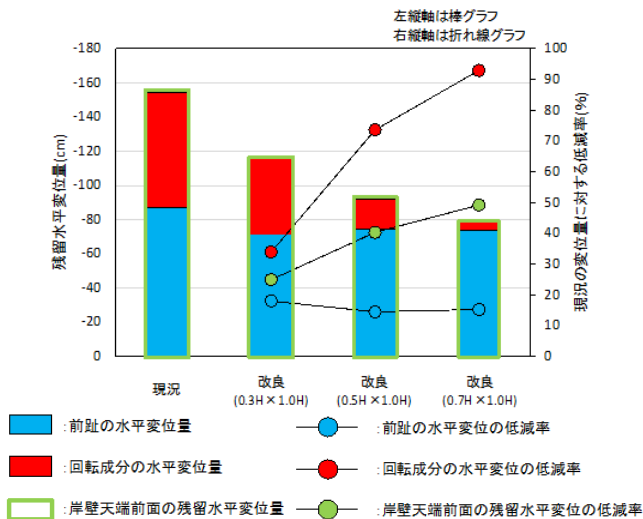


図-13 岸壁天端の変位の特性

3.4 内部安定について

改良体の内部安定については、港湾空港技術研究所資料²⁾を参考に改良体の設計基準強度を検討した。改良体の最大せん断応力を算定し、その算定結果から改良体に必要となる設計基準強度を求めた。フーチング周辺の改良体のせん断応力を確認した。改良体の必要強度の算定式については、下記の式を用いる。

$$\text{必要強度の算定式: } q_u \geq 2 \cdot \tau \cdot F$$

ここで τ : せん断応力, F : 材料の安全率 (偶発状態: 2) である。FLIP 解析により得られた最大せん断応力を代入することにより、 q_u を求めた。

図-14にFLIP解析によるせん断応力分布図を示す。最大せん断応力は、偶発状態で0.28MPaとなった。

上記の式にこれを代入すると、偶発状態で $q_u \geq 2 \times 0.28 \times 2.0 = 1.12 \text{ MPa}$ となり、改良体の必要強度としては、1.12MPa以上の設計基準強度が必要となる。

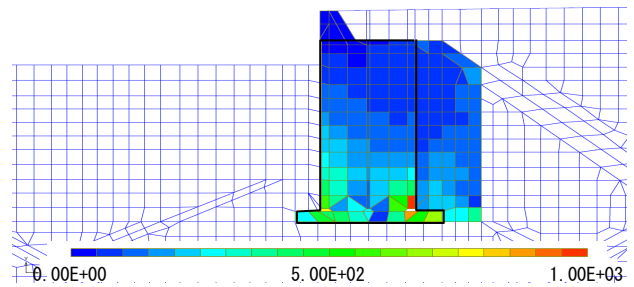


図-14 FLIP解析によるせん断応力分布図

3.5 安定性の照査

本工法を適用する場合と適用しない場合において、現行基準に基づいて変動状態（レベル1地震時）の安定性照査の検討を行った。その際、本工法を適用する場合にはケーソンと改良体が一体的に挙動することを前提としている。なお、現況照査の結果、支持力がNGとなっている要因については、旧基準で設計震度 $K_h = 0.10$ だったものを現行基準に基づき $K_h = 0.12$ に見直したためである。

検討の結果（表-2）は、各検討項目で現況断面よりも耐震性向上が期待できるものであった。

表-2 レベル1地震動に対する安定性照査結果

検討項目	現況		改良(0.3H x 1.0H)		
	H.W.L	L.W.L	H.W.L	L.W.L	
滑動	0.841 ≤ 1.0 OK	0.913 ≤ 1.0 OK	0.706 ≤ 1.0 OK	0.754 ≤ 1.0 OK	
転倒	0.653 ≤ 1.0 OK	0.707 ≤ 1.0 OK	0.451 ≤ 1.0 OK	0.479 ≤ 1.0 OK	
端趾圧 (kN/m ²)	p ₁	406.229	499.588	304.574	345.697
	p ₂	0	0	20.126	5.030
支持力	0.940 ≤ 1.0 OK	1.068 > 1.0 NG	0.723 ≤ 1.0 OK	0.810 ≤ 1.0 OK	

また、改良体の外部安定性を確認するため、レベル1地震動に対する安定性照査を実施した。改良体の幅を改良体の壁高Hに対して0.3H, 0.4H, 0.5H, 0.6Hの4ケース設定し照査した。潮位は最も厳しい条件として、変動状態の潮位条件:L.W.Lで検討した。改良体底面と捨石の静止摩擦係数 (μ) は0.6と0.8の2ケースで検討した。

図-15に安定性照査モデル、図-16 ($\mu = 0.6$ の場合)に解析結果を示す。図-16に示すように、改良体の壁高Hに対して改良体の幅が半分 (0.5H) を超えると、ほぼ安定性が確保できることが分かる。

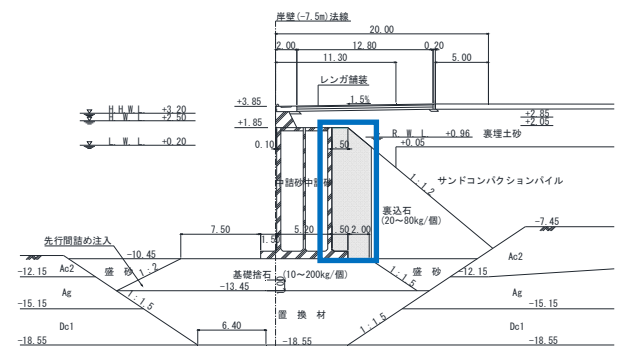


図-15 解析モデル (青色枠内が改良体)

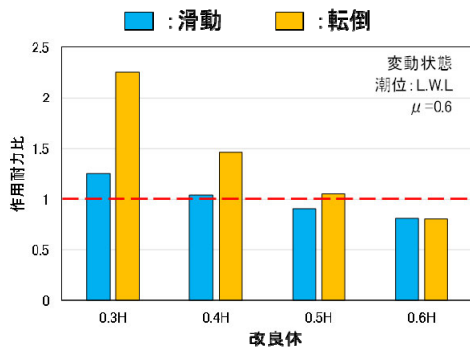


図-16 改良体を対象とした安定性照査結果

- 11) 沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル(2010年版), 2010
- 12) 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, 2017
- 13) 沿岸技術研究センター：港湾・空港における深層混合処理工法技術マニュアル(改訂版), 2018

4. おわりに

今回、可塑性グラウト材を用いて岸壁背後の裏込石を固結させることで、既存の重力式岸壁の耐震性を向上させる工法に関する設計方法等を検討した。本報告では、転倒モードが卓越する重力式岸壁の耐震性向上に関するメカニズムや効果を実験およびFLIPで確認した。別途、現地施工検討も実施している。今後は、他港への適用性拡大のため、本検討とは異なる設計諸元を有する断面を対象として同様の検討を行い、設計に必要なパラメータ等の設計条件の体系化の検討が必要と考えている。

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2年度 管内技術課題検討業務」の成果の一部をまとめたものである。

本検討の作業における正確性の確保と検討内容の充実を図るため、港湾空港技術研究所及び国土技術政策総合研究所、日本埋立浚渫協会の有識者から貴重なご意見、ご指導を頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高野 大樹, 高橋 英紀, 小泉 勝彦: 重力式岸壁の裏込め固化による地震時安定性の向上に関する遠心模型実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 74 巻 2 号 p. I_850-I_855, 2018
- 2) 水谷 崇亮, 森川 嘉之ら: 重力式係船岸の新しい増深工法の開発, 港湾空港技術研究所資料 No. 1277, 2013
- 3) 港湾空港技術研究所: 高知港三里地区岸壁(-12m)滑動対策遠心模型実験 報告書, 2017
- 4) 港湾空港技術研究所: 既存岸壁耐震・耐津波対策工法検討業務 報告書, 2018
- 5) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018
- 6) 港湾空港技術研究所: 既存岸壁耐震・耐津波対策工法検討業務 報告書, 2019
- 7) 日本埋立浚渫協会, 港湾空港技術研究所: 重力式係船岸の増深工法に関する施工の手引き(案), 2016
- 8) 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), 2008
- 9) 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(改訂版), 2008
- 10) 沿岸技術研究センター: 事前混合処理工法技術マニュアル(改訂版), 2008