

柴山港の岸壁及び護岸における 裏埋砂の吸い出し防止対策について

松井 敦¹

¹近畿地方整備局 舞鶴港湾事務所 柴山港出張所（〒669-6431 兵庫県美方郡香美町香住区浦上75-2）

柴山港は兵庫県北部に位置し、冬季における日本海の厳しい海象条件に対し、沖合を通航する貨物船の緊急避難用の港として位置付けられ、防波堤と避難泊地の整備を行っている。防波堤の製作には同港内の掘込み式ドックと陸上ヤードを使用しているが、今般、ヤード内の複数箇所において、裏埋土砂の吸い出しが主因と考えられる空洞が確認され、ヤードの使用に支障が生じた。そこで、空洞への対策を目的として対応方針を検討した結果、セメント材を用いた地盤改良工法による対策工を実施したので、事例として報告する。

キーワード 柴山港，岸壁，吸い出し，地盤改良工法，維持管理

1. はじめに

兵庫県北部に位置する柴山港は、カニ等の水産資源が豊富な天然の良港である。また、近年においては、多様な地形・地質・風土と人々の暮らしが体験できる山陰海岸国立公園¹⁾として、京都府、兵庫県、鳥取県の民間団体や行政機関が連携³⁾し、ジオパーク活動を進めることによって、観光地としても脚光を浴びている。

柴山港が位置する日本海沿岸域は、北日本～西日本～九州を結ぶ重要な航路筋であり、航行船舶の多い海域である。一方、冬季は気象海象条件が非常に厳しい面もあり、柴山港は、突発的な荒天状況下において船舶が安全に避難する場所である“避難港⁴⁾”として位置付けられており、港内静穏度を確保するための防波堤や、船舶が港内で避難するための泊地の整備を行っている。図-1に柴山港の整備計画を示す。2015年現在、泊地の浚渫は完了し、防波堤の計画延長450mのうち、240mまで完了している。

柴山港の防波堤形状は、大水深かつ反射波を抑えて波浪を軽減することを前提とした、二重円筒という特殊なケーソン構造をしており、図-2に示すような掘込み式のドックを備えたヤードを使用して製作を行っている。

しかしながら、平成17年頃からヤード内の岸壁背後随所において、図-3に示すような陥没箇所が確認され、立入禁止措置により使用制限が必要な所も出てきた。近年、設置から年数が経過した岸壁や護岸等の港湾構造物背後において、同様の現象が全国でも報告⁵⁾されており、岸壁を安全かつ効率的に利用していくために、早期の対応が必要である。

本報告では、柴山港ヤード内に発生した陥没により形成された空洞について、発生原因の調査を行った後、その対応策として、岸壁及び護岸背後で起こる裏埋土砂の吸い出し現象に対して、再発を防ぐために、改良の必要性や適する工法等の検討を行った結果の報告を行う。



図-1 柴山港の整備計画



図-2 柴山港ケーソン製作ヤード



図-3 陥没発生箇所

2. 裏埋土砂の吸い出し

設置から年数が経過したケーソンやL型ブロック等の重力式構造物背後における埋立土砂地盤の局所的な陥没・沈下等による空洞の発生が報告⁵⁾されている。これらは放置すると事故につながる可能性があるが、実際に陥没が発生するまで気づきにくく、地中に形成されている空洞の規模も判別しにくい。

ここでは、空洞発生の一因と考えられる“吸い出し”と呼ばれる現象について、そのメカニズムから取り得る対策を考える。

(1) 吸い出しのメカニズム

構造物背後に空洞が発生する主原因の一つとして、構造物背後の埋立て土砂が海へ吸い出されることによって、地盤を形成する土砂が徐々に減少することが考えられる。

一般的な港湾構造物であるケーソンには、潮汐や波浪による押し波と引き波が交互に繰り返し作用することによって、背後の地盤から小さい粒径のものから順に吸い出されていく。通常はこれらを防ぐために、ケーソン間に目地板や裏込石背面に防砂シートを設置しているが、経年劣化や不等沈下によってその一部が破損した場合、図4に示すように、裏埋土砂が基礎捨石、あるいは堤体の目地間を通して吸い出され、局所的な陥没などが発生する⁶⁾。

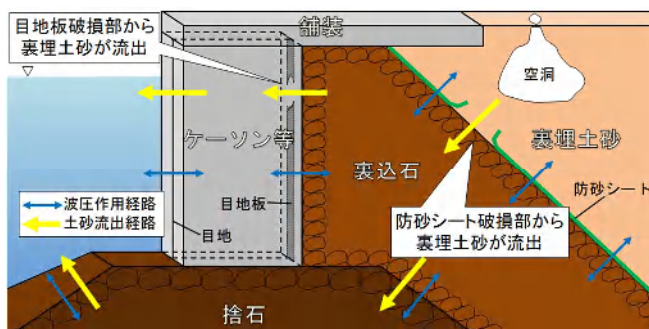


図4 吸い出し現象のイメージ

(2) 吸い出し防止対策

吸い出しを受けて空洞が発生した箇所において、単純に土砂を補充したとしても、一時的に空洞はなくなるが、時間が経てば再び吸い出しを受けて同じ箇所に空洞が発生する恐れがある。そのため、吸い出しの影響範囲を特定した後、土砂が再び流れ出さないような対策を行う必要がある。

具体的には、裏埋土砂を撤去した後、破れた防砂シートを取り替えてから埋め戻す方法、または、構造物背後の地盤改良を行うことにより、土砂が流出しない状態にする方法などが挙げられる。

3. 現場状況と課題

前章では吸い出し現象の一般論について記述したが、実際に対策を行うためには、現在の状況を十分に把握した上で、現場条件に合致した適切な方法を選択し、問題解決に臨む必要がある。

ここでは、柴山港ヤードで発生した空洞について詳細に調査を行った結果から、検討する必要が生じた課題について述べる。

(1) 柴山港ヤード状況調査

a) 目視調査

吸い出しが発生している箇所を特定するために、潜水調査による水中目視を行い、柴山港ヤードの岸壁構造物であるL型ブロックの目地部を確認した。その結果、図5上部に示す箇所で防砂目地板の破断が確認できた。

図面右側の目地板が3ヶ所破断していた場所の前面には、80cm程の土砂が堆積しており、防砂目地板の破断箇所から裏埋土砂が流出したと考えられる。

b) 詳細調査

次に、岸壁及び護岸背後において、レーダーによる超音波探査を行った後、反応があった場所に対して、ハンマードリル削孔（G.L.-1.0m以浅）と簡易貫入試験（G.L.-1.0m以深）を行い、空洞の有無と規模を確認した。図5下部に空洞が確認された位置を示す。

削孔によって確認できた護岸部（南側）と岸壁部（北側）の空洞のうち、護岸の一部には南北方向の幅が約2.0m、深さ約0.5mの空洞が、護岸直背後と岸壁法線から4m程離れた場所にある側溝の手前に存在していた。また、岸壁部については、最大で南北方向の幅が約10m、深さ約1.4mの縦穴ができており、周囲にも空洞が点在していた。これら岸壁背後の空洞は、目地板の破断が確認された場所から港の奥に向かって形成されていたため、吸い出しによる影響によるものと考えられる。

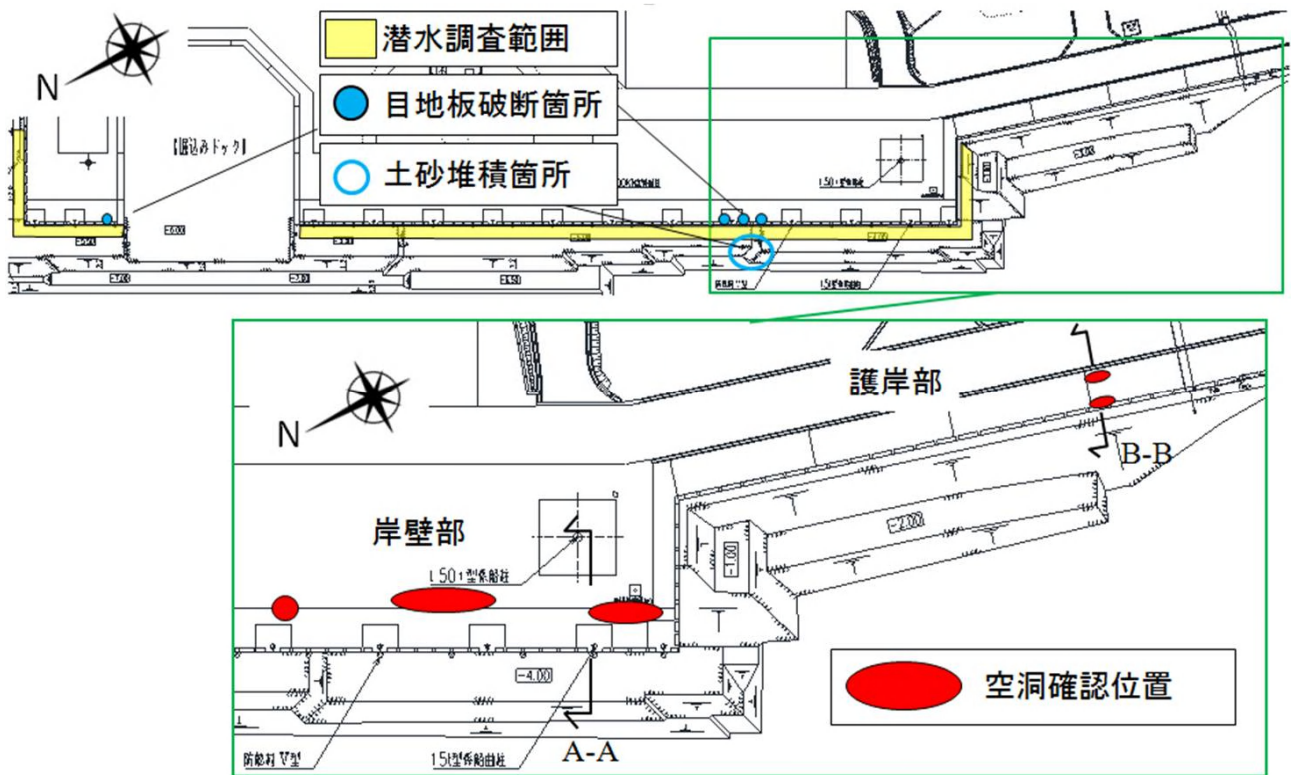


図-5 潜水調査による目視結果と削孔による空洞確認箇所

(2) 対策方針の検討

調査において空洞が確認できた北側の岸壁背後と南側護岸背後は、それぞれ断面構造が異なる。図-6に図-5中に示した位置の断面図を示す。

南側の護岸部については、波浪の影響は少なく、防砂シートの破損と潮位差による吸い出しが主原因であると考えられるため、防砂シートの設置と埋め戻しによって対応できると判断した。しかしながら、北側については、目地板はL型ブロック間の目地に沿うように配置されているが、破断箇所が構造の異なる物揚場と岸壁の中間部であり、原型復旧が難しいだけでなく、復旧しても再度同様の問題が発生する恐れがある。そのため、抜本的な改良による対策を行うこととした。

(3) 施工における課題

現在発生している空洞への対処と、吸い出しによる空洞発生を再び受けることを防ぐための抜本的対策を検討するに当たって、施工方法として満たすべき基準を以下に挙げる。

①既に発生している空洞への対応

→ 施工後にヤードを安全に使用できるようにすること。

②目地間からの吸い出し対応

→ 岸壁堤体間の目地を閉塞できること。あるいは、閉塞せずとも吸い出しを受けないようにすること。

③特徴的な構造体における対応

→ L型ブロック堤体の背後で使用できること。

④施工時の問題発覚等への対応

→ 現場条件の変更等にも柔軟に対応できること。

⑤コスト削減、手戻り防止

→ 施工性・経済性に優れていること。

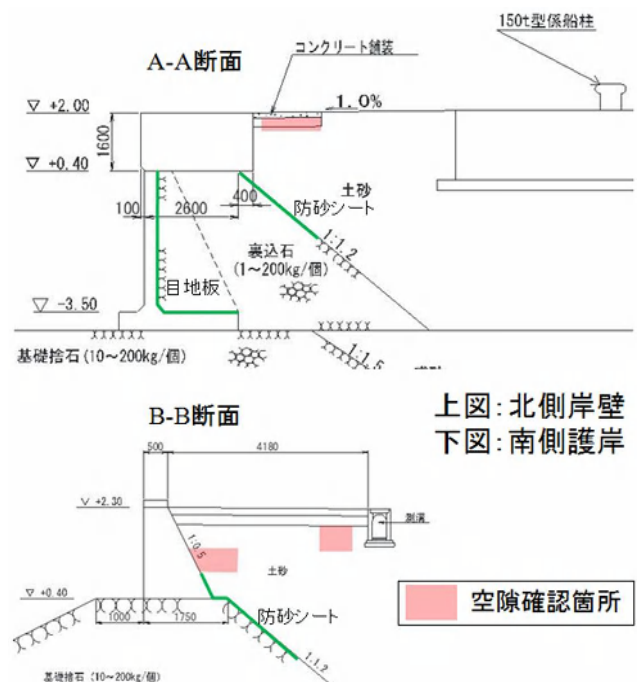


図-6 空洞発生箇所の代表断面図

4. 空洞・吸い出し防止対策の検討

(I) 対策方法の検討

柴山港ヤードの吸い出し対策工法については、前章で記述した課題を考慮した上で、施工条件に合う工法の検討を段階的に行った。

a) 第1次選定（施工工法）

最低限の吸い出し対策となりうる（課題①②③を満たす）工法として、裏埋土砂の流出を防ぐ防砂シート等を設置する工法と、裏埋土砂自体を流出しにくい固体に改良する工法について比較・検討を行った。

表-1に示すとおり、吸い出しに対して十分な効果が期待でき、耐久性に優れているため今後の維持管理が容易である地盤改良工法のうち、総合的に優れている機械攪

拌工法による地盤改良を採用した。

b) 第2次選定（地盤改良工法）

前節で選定した工法のうち、粉体噴射によるものと、スラリー攪拌による工法について比較・検討を行った。

表-2に示すとおり、円柱形の改良では難しい裏込石法面への確実な施工が可能であり、施工範囲の変更に対応可能であるため、課題④を満たしている中層混合系のスラリー攪拌工法を採用した。

c) 第3次選定（スラリー攪拌（中層混合）工法）

最後に、3種の中層混合系のスラリー攪拌工法について比較・検討を行った。

表-3に示すとおり、適用可能土質範囲が広く、攪拌翼が小型であるため、係船柱を撤去せずに施工が可能であり、かつ、エアーを使用しないため海洋汚濁の心配が少ないWILL工法を採用した。

表-1 施工工法の比較・検討

工法	第1案：防砂板取り付け工	第2案：薬液注入工	第3案：機械攪拌工法（地盤改良工法）	第4案：岸壁背面防砂シート設置工
工法概要	U型擁壁の目地部前面に防砂目地板を設置し、目地背面を水中モルタル等により充填	背面土砂部に薬液注入を行い、裏込め石層上部に沿って斜めに遮水層を構築	原位置土と改良材スラリーを均質に攪拌混合し、裏込め石層上部の土砂を全体的に改良	岸壁背面の土砂を一旦掘削した後、防砂シートを設置し、掘削土の埋戻しを実施
施工イメージ				
当現場におけるメリット・デメリット	・擁壁目地部から背面土砂の流出防止 ・防砂板背面目地部の劣化を抑制 ・裏埋土砂部の直接的な流出対策ではない ・漂流物の衝突等で防砂板が破損する恐れ ・防砂板の維持管理が必要	・土砂層下部からの吸出し防止効果 ・グラウト材の種類によっては恒久的な効果 ・目地板破損部分から薬液流出の恐れ ・注入箇所地盤が多少隆起する可能性	・土砂層全体の吸出し防止効果 ・改良土砂は地盤改良体であるため、半永久的な効果 ・土砂層の沈下・液状化の抑制効果 ・既に空洞が発生した箇所への充填可能 ・目地板破損から固化材スラリーの流出の恐れ	・一般的な対策であり、信頼性が高い ・既に空洞化が発生した箇所への充填、転石等を含む土砂である場合でも確実な効果 ・埋戻し後、地盤安定まで期間を要する ・掘削土が発生 ・シート破損により吸い出し再発の可能性
経済性	◎	×	○	○

表-2 地盤改良工法の比較・検討

工法	第1案：スラリー攪拌工（オーガー系）	第2案：粉体噴射攪拌工（DJM工法）	第3案：スラリー攪拌工（中層混合系）
工法概要	スラリー状の固化材を吐出しながら現位置土を機械的に攪拌混合し、円柱状の改良体を作成	粉体状の固化材をエアー併用で噴射しながら現位置土を機械的に攪拌混合し、円柱状の改良体を作成	リボンスクリュー型攪拌翼により、原位置土と改良材スラリーを均質に攪拌混合
施工イメージ			
当現場におけるメリット・デメリット	・地盤改良固化による、吸い出し防止効果 ・土砂層の沈下・液状化の抑制効果 ・円柱状改良であるため、裏込石への着底部に未改良部が残る可能性 ・対象土の玉石・捨石混入率が高い場合は、事前除去等が必要	・地盤改良固化による、吸い出し防止効果 ・土砂層の沈下・液状化の抑制効果 ・円柱状改良であるため、裏込石への着底部に未改良部が残る可能性 ・対象土の玉石・捨石混入率が高い場合は、事前除去等が必要	・地盤改良固化による、吸い出し防止効果 ・土砂層の沈下・液状化の抑制効果 ・縦型の連続改良であるため、裏込石への着底部を確実に改良可能 ・対象土の玉石・捨石混入率が高い場合は、事前除去等が必要

表-3 スラリー攪拌（中層混合）工法の比較・検討

工法	第1案：パワーブレンダー工法	第2案：ツイン・ブレードミキシング工法	第3案：WILL工法
工法概要	バックホウタイプベームマシンの先端に取り付けた攪拌翼の先端より、固化材スラリー・エアーを吐出しながら、現位置土と固化材スラリーを均質に攪拌混合	バックホウタイプベームマシンの先端に大径攪拌翼を鉛直方向に回転させるツイン・ブレード攪拌装置の先端部より、固化材スラリー・エアーを吐出し、改良対象土を強制攪拌混合	バックホウタイプベームマシンの先端に取り付けた特殊なリボンスクリュー型攪拌翼により、原位置土と固化材スラリーを均質に撚動攪拌混合する工法
適用土質の目安	粘性土・・・N値 10程度（施工実績N値=17） 砂質土・・・N値 20程度（施工実績N値=32）	粘性土・・・N≤5（Q≤50kN/m ² ） 砂質土・・・N≤15程度	粘性土・・・N<15 砂質土・砂礫・・・N<40
周囲への影響	・スラリー吐出時のエアーにより、地下水等を与える影響が比較的大きい ・振動・騒音は非常に小さい	・スラリー吐出時のエアーにより、地下水等を与える影響が比較的大きい ・振動・騒音は非常に小さい	・スラリーを低圧で吐出するため、周辺地盤に及ぼす影響小 ・振動・騒音は非常に小さい

(2)WILL工法

WILL工法⁷⁸⁾とは、バックホウタイプベースマシンの先端に取り付けた特殊な攪拌翼により、スラリー状の固化剤や改良材を注入しながら、原位置土と攪拌混合し改良体を形成する工法である。図-7に示すような2種類の攪拌翼を使い分けることにより、粘性土からN値30超の砂礫地盤にまで対応可能であり、品質の安定性と経済性を両立している。

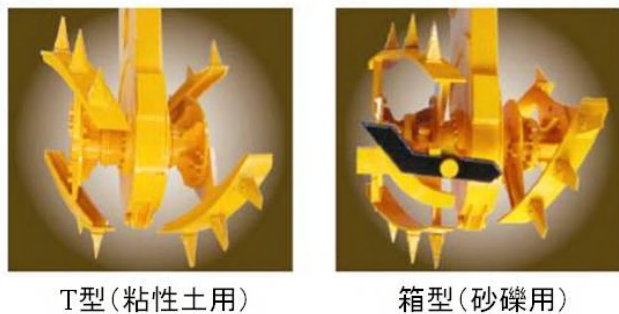


図-7 WILL工法で用いる攪拌翼形状

5. 施工

(1)施工方法

施工に先立ち、土質の把握と固化材配合量の確認のため、試料土の採取を行い、土質を判定した結果を表4に示す。改良前の土質は砂分が多かったため、攪拌翼はT型を使用することとした。

吸い出し対策としての土質改良指標は一軸圧縮強度と設定した。他港の実績報告⁹⁾¹⁰⁾を鑑み、一軸圧縮強度が45kN/m²以上あれば吸い出しの影響を受けないと判断し、今回は余裕をみて50kN/m²と設定した。なお、WILL工法において、現場強度(q_{uf})と室内強度(q_{ul})には $q_{uf}/q_{ul}=1/1.5\sim1/3$ の関係があると報告¹¹⁾されているため、室内目標強度は150 kN/m²とし、セメント配合量は70kg/m³となった。事前に行った室内配合試験の結果を表5に示す。セメント量70kg/m³においても推定強度で目標値はクリアしているが、安全策として、1週間強度で近似値が目標を満たす80kg/m³配合での施工とした。

表-4 改良前土質試験の結果

含水比 ω_n (%)	湿潤密度 P_t (g/cm ³)	粒度分布(%)			pH	強熱減量 Li (%)
		礫分	砂分	細粒分		
32.5	1.8	24.3	65.0	10.7	8.9	14.3

表-5 室内配合試験の結果

改良仕様	固化材	配合量 (kg/m ³)	圧縮強度 q_u (kN/m ²)	
			σ_7	σ_{28} (推定)
スラリー 揺動攪拌工	高炉 セメント B種	70	131	197
		120	226	339
		170	577	866

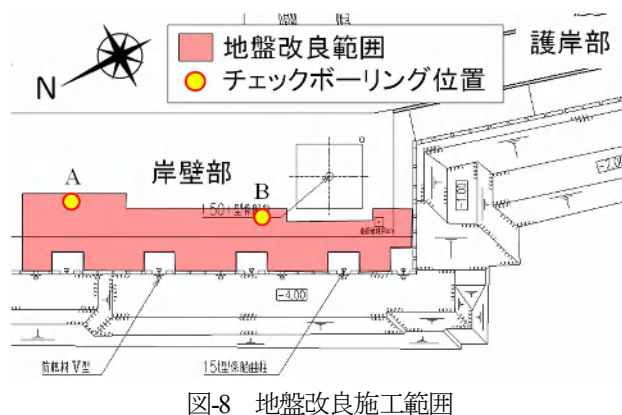


図-8 地盤改良施工範囲

地盤改良を行った範囲を図-8に示す。施工は事前調査によって設定した区割り範囲において、プラントにて作成したスラリーを吐出しながら区画の上下層全体を攪拌し、広範囲を均等に改良できるように配慮した。また、施工マシンの運転席に設置した管理システムにより、流量や回転数等をリアルタイムに監視しながら施工を行うことで、作業安定性の向上を図った。

図-5と図-6に見られるように、本工事の改良範囲においては、係船柱付近も施工範囲に含まれているため、施工は係船柱に影響を与えない位置取りで行った。また、施工時にセメント固化材が海に流出しないよう配慮し、万一の事態に備えて汚濁防止膜を設置した。

(2)施工結果

施工時と施工後の様子を図-9,10にそれぞれ示す。改良後の地盤には目立った隆起もなく、均一に改良ができた。改良前の地盤には大きめの石が多少混ざっていたため、除去してからの施工となったが、工程の遅延も発生しなかった。

図-8に示すA、Bの2地点においてチェックボーリングを行い、採取した供試体を図-11に示す。一軸圧縮試験の結果は、値が最も小さい所でも109 kN/m²であり、要求強度を満たしていた。



図-9 施工時(斜め施工)



図-10 施工後

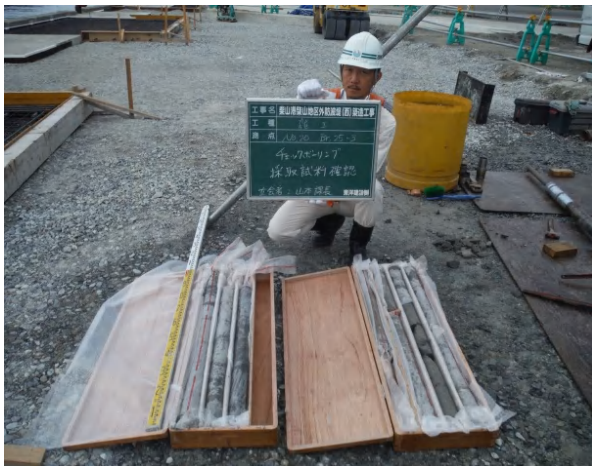


図-11 供試体採取状況

参考文献

- 1) 環境省HP：山陰海岸国立公園
(<https://www.env.go.jp/park/sanin>, 2015.5)
- 2) 先山徹 他：山陰海岸におけるジオパーク活動―大地と暮らしのかかわり―（地質学雑誌, 118, pp.1-20, 2012）
- 3) 山陰海岸ジオパーク推進協議会HP：山陰海岸ジオパーク（<http://sanin-geo.jp/modules/geopark/index.php/info/index001.html>, 2015.5）
- 4) 港湾法第一章第二条 9 項，港湾法施行令第一章第一条
- 5) 佐藤徹 他：港湾施設の空洞化調査に関する報告（土木学会論文集, 70(2), pp.552-557, 2014）
- 6) 高橋重雄 他：護岸の吸い出しに関する水理模型実験（港湾技術研究所報告, 35-2, pp.3-63, 1996）
- 7) 市坪天士 他：揺動攪拌方式による新しい中層混合処理工法（地盤工学会誌, 60(6), pp.24-27, 2012）
- 8) 市坪天士 他：幅広い土質に対応可能とした高性能管理システムを用いた中層混合処理工法―スラリー揺動攪拌工（WILL工法）（基礎工, 42(8), pp.28-31, 2014）
- 9) 林健太郎 他：溶液型薬液注入工法による既設護岸背後地盤の液状化および吸出し対策（土木学会論文集728, pp.17-25, 2003.3）
- 10) 奥田聡 他：福井港海岸護岸の吸出し及び液状化対策の実証試験による設計について
- 11) 市坪天士 他：中層混合処理工法における混合性能および掘削性能の向上（建設の施工企画, pp.26-30, 2010.2）

6. おわりに

本報告では、柴山港ヤード内岸壁・護岸の背後において、裏埋土砂の吸い出しに起因する空洞の発生に対して、中層混合系の地盤改良工法であるWILL工法を用いて対策を行った。

その結果、柴山港ヤードにおける施工では、法面への対応や係船柱周辺等複雑な構造の施工が可能であるという利点があり、安定して施工を行うことができた。また、副次的な効果として液状化対策にもなることもあり、当該現場においては、他の工法と比較して総合面で優れていた。今回の工事実績より、WILL工法による吸い出し対策は、他の港湾構造物にも適応可能な工法であることが示唆された。

今後、施設の老朽化が進行し、柴山港と同様の問題が他施設でも発生する可能性があるが、今回の工事の教訓を元に、目的に合わせた適切な仕様と品質、かつ経済面についても十分に考慮して、安全・安心を意識した工事に取り組んでいきたい。