

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1418 September 2024

吸い出しによる空洞・陥没の復旧及び再発防止対策としての
フィルター層の有効性と敷設方法

工代 健太, 佐々 真志, 梁 順普, 和田 優希

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	2
1. 序論	4
2. 吸い出しによる空洞陥没のフィルター層を用いた復旧手法の概要	4
3. 大型吸い出し可視化試験の概要	5
3.1 大型吸い出し可視化装置の諸元	5
3.2 大型吸い出し可視化試験の条件及びケース	5
4. 大型吸い出し可視化試験による吸い出し・空洞形成・陥没と復旧手法の適用	7
4.1 吸い出し・空洞形成・陥没の再現結果	7
4.2 空洞陥没復旧手法の適用とフィルター層敷設断面	8
5. 多様な水理外力下における陥没復旧後の吸い出し再発抑止検証	10
5.1 各種の水理外力の再現結果及び強度評価	10
5.2 多様な水理外力下の吸い出し再発抑止検証結果	10
6. 結論	12
あとがき	12
謝辞	13
参考文献	13

Effectiveness and Laying Method of Filter Layer as the Restoration and Recurrence Prevention Measure for Cavity Collapse Caused by Coastal Internal Erosion

Kenta KUDAI*

Shinji SASSA**

Soonbo YANG ***

Yuki WADA****

Synopsis

As a countermeasure against coastal internal erosion of ground behind seawalls and quay walls, a method using a two-layer filter, i.e. upper filter layer to prevent internal erosion of backfilling sands and lower filter layer with relatively large grain size to keep stability on backfilling stones, has been developed and put into practical use in the construction of new port facilities. Since the geotechnical filter is crushed stone, it is able to follow deformation under various dynamic external forces acting on the waterfront area such as earthquakes, waves, and currents, and can stably and continuously deter coastal internal erosion. Therefore, the geotechnical filter is considered to be effective not only in prevention of cavity collapses in newly constructed seawalls and quays, but also in the restoration for cavity collapse in existing coastal facilities.

The purpose of this study is to investigate the application of the above method to the restoration of the cavity collapse caused by coastal internal erosion. Two restoration methods were devised, depending on the depth of the location of washout, as follows. In the case of coastal internal erosion occurring deeper than the low-tide groundwater level, the two-layer filter is filled into the sinkhole due to the cavity collapse in the form of the lower filter layer being surrounded by an upper filter layer with appropriate layer thickness. On the other hand, in the case of coastal internal erosion occurring at a relatively shallow depth and when the ground around the location of washout is unsaturated during low tide, the two-layer filter is placed to cover the origin of the coastal internal erosion by excavating the residual backfilling sand in the sinkhole during the exposure period. Prototype-scale visualization tests demonstrated that the two-layer filter with appropriate grain sizes can prevent recurrence of coastal internal erosion even under strong hydrodynamic forcing in both restoration methods. This research shows effectiveness of the two-layer filter as the restoration and recurrence prevention measure for cavity collapse caused by coastal internal erosion.

Key Words: coastal internal erosion, cavity, collapse, two-layer filter, restoration method

* Senior Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

** Head of Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

*** Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

**** Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute

Phone: +81-46-844-5054 Fax: +81-46-844-4577 E-mail: kudai-k83ab@p.mpat.go.jp

吸い出しによる空洞・陥没の復旧及び再発防止対策としての フィルター層の有効性と敷設方法

工代 健太*・佐々 真志**・梁 順普***・和田 優希****

要 旨

護岸・岸壁背後の地盤の吸い出し抑止策として、裏込石と裏埋砂の間に、裏込石に対して安定性を保つ比較的大きい粒度の下層フィルターと裏埋砂の吸い出しを抑止する上層フィルターの二層フィルターを設ける手法を構築し、新設の港湾施設において実用化されている。フィルター材は砕石であるため、臨海部で生じる地震・波・流れ等の多様な動的外力下でも変形追随性を発揮し、吸い出しを安定的に抑止し続けることが可能である。したがって、フィルター材は、新設護岸・岸壁背後の吸い出しによる空洞陥没の抑止とともに、既設構造物の陥没被災後の復旧においても有効であると考えられる。

本研究では、二層フィルターを用いた吸い出しによる空洞陥没の復旧手法及び再発防止対策の確立を目的に以下の検討を実施した。吸い出しによる空洞陥没復旧への応用として、吸い出し口が低潮時地下水位より深い場合は、適切な層厚の上層フィルターが下層フィルターを覆う形で二層フィルターを陥没孔に投入する方法を、吸い出し口が浅く低潮時にその近傍の地盤が不飽和地盤となる場合は、その時間帯に陥没孔下側を掘削し、吸い出し口を塞ぐ形で二層フィルターを敷設する方法を考案した。さらに一連の大型吸い出し可視化試験の実施を通じて、双方の手法とも適切な粒度の二層フィルターは強い水理外力下で吸い出しの再発を抑止することを実証し、吸い出しによる空洞陥没復旧における二層フィルターの高い有効性を示した。

キーワード：吸い出し，空洞，陥没，二層フィルター，復旧方法

* 地盤研究領域・動土質研究グループ・主任研究官
** 地盤研究領域・動土質研究グループ長
*** 地盤研究領域・動土質研究グループ・専任研究員
**** 地盤研究領域・動土質研究グループ・研究員
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5054 Fax：046-844-4577 E-mail：kudai-k83ab@p.mpat.go.jp

1. 序論

護岸や岸壁などの港湾施設の背後地盤において、水理外力の継続的な作用により、防砂シートや防砂板の損傷などによる防砂機能の消失によって裏埋砂が吸い出され、それに伴う地盤内の空洞形成及び地盤の陥没(図-1.1)が頻繁に発生し、全国的な問題となっており、吸い出し災害対策の重要性が高まっている^{1)~6)}。

著者らは、護岸・岸壁などの新設の港湾施設における吸い出し抑止方法として、図-1.2に示すように裏込石と裏埋砂の間に裏込石に対して安定性を保つ比較的大きい粒度の下層フィルターと裏埋砂の吸い出しを抑止するための上層フィルターを組み合わせた二層フィルターを設ける手法について体系的に検討し、裏埋砂に対する砕石フィルターの吸い出し抑止指針を構築^{7)~14)}し、当設計法が新設の港湾施設において実用化¹⁵⁾されている。具体的には、通常の砕石フィルターでは、上層フィルターの均等係数 $U_{cF} \geq 3$ 、上層フィルターと裏埋砂との中央粒径比 $D_{F50}/D_{S50} \leq 20$ の条件下で吸い出しを抑止可能であり、令和4年4月施行の「港湾施設の技術上の基準・同解説」に反映されている。さらに裏埋砂が貝殻・サンゴ礫混じりの海砂の場合は、 $U_{cF} \geq 2.5$ 、 $D_{F50}/D_{S50} \leq 25$ の条件下で吸い出しを抑止可能であることが分かっている¹⁴⁾。

液状化対策等で用いられている固化材が吸い出し抑止に適用される場合がある。通常固化した材料は吸い出しを受けないが、薄い層の場合、動的外力や変形下で亀裂やクラックが生じ、砂が吸い出される可能性があり注意が必要である¹⁵⁾。すなわち、吸い出し抑止材は、臨海部で生じる地震・波・流れ等の多様な動的外力下で吸い出しを安定的に抑止する変形追随性のある材料を選定することが重要である¹⁵⁾。また、フィルター材は石材であるため、敷設後、海域に流出する問題がなく、臨海部で生じる多様な動的外力下で、吸い出しを安定的かつ継続的に抑止することができる。したがって、フィルター材は、新設護岸・岸壁背後の吸い出しによる空洞陥没の抑止とともに、既設構造物の陥没被災後の復旧においても有効であると考えられる。しかし、二層フィルターの吸い出しによる空洞



図-1.1 護岸岸壁背後地盤の陥没事例(右:石川県珠洲市飯田港(2024年撮影),左:新潟県(2017年撮影)⁵⁾)

陥没復旧への適用方法を検討した研究事例はない。

以上を踏まえ、本研究では、二層フィルターを用いた吸い出しによる空洞陥没の復旧手法の確立を目的に以下の検討を実施した。低潮時地下水位に対する吸い出し口の深さに応じて、二層フィルターを用いた空洞陥没の復旧手法を2通り検討した。その概要について2章で説明する。さらに、3章で説明する大型吸い出し可視化試験において各復旧手法を適用し、復旧後の多様な水理外力下における適切な粒度の上層フィルターの吸い出し再発の抑止性能及び下層フィルターと成す二層構造の安定性について詳細に検証した。復旧手法の適用と多様な水理外力下における検証結果はそれぞれ4章と5章で説明する。

2. 吸い出しによる空洞陥没のフィルター層を用いた復旧手法の概要

本研究で考案した復旧時の吸い出し抑止法の概要について図-2.1を用いて説明する。不飽和地盤の間隙にはサクションが働き、地盤を力学的に安定させることに鑑み、越波や雨水の浸透や地下水位の上昇により地盤中のサクションが低下する時間帯を避けるため、対象現場に越波・降雨の懸念がない好天候の低潮時に空洞陥没復旧を行うことを想定し、復旧手法の検討を行った。また、陥没孔に崩落した舗装版は事前に撤去することを前提に検討した。

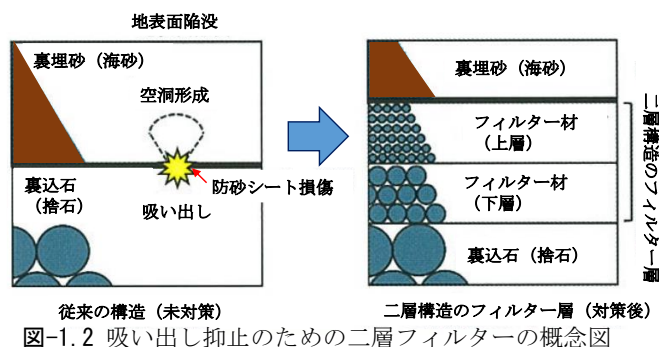


図-1.2 吸い出し抑止のための二層フィルターの概念図

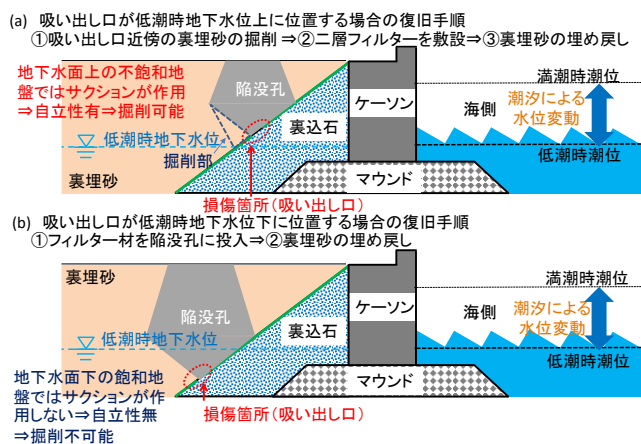


図-2.1 フィルター材による空洞陥没復旧の概要

吸い出し口が低潮時地下水位上に位置し、復旧作業中に吸い出し口以浅が常に不飽和地盤となる場合（図-2.1 (a)）は、空洞斜面の勾配の水平角が掘削により安息角以上となる条件下でもサクシジョンの作用により空洞斜面が自立すると考えられる。そこで、空洞斜面を掘削し、そのスペースを利用して吸い出し口に直接二層フィルターを敷設し、その上から裏埋砂で埋め戻す手法が有効と考えられる。

一方、吸い出し口が低潮時地下水位下に位置する、もしくは潮位変動により、復旧作業中に地下水位が吸い出し口のレベルよりも上昇する場合（図-2.1 (b)）は、吸い出し口近傍の地盤が飽和地盤となり、サクシジョンが働かないため、フィルター層敷設のための空洞下部の裏埋砂の掘削が困難である。この場合、二層フィルターを空洞内に充填する上で、下層フィルターを先ず吸い出し口に着底させる復旧手法をとる必要がある。この際、粒径が大きい下層フィルターが裏埋砂と接し、そこから吸い出しが再発することを防ぐため、下層フィルターを上層フィルターが取り巻く形で充填することが肝要である。

上記の各復旧手法の具体的な適用法は4章で詳述する。

3. 大型吸い出し可視化試験の概要

3.1 大型吸い出し可視化装置の諸元

大型吸い出し可視化装置の前面写真を図-3.1 に示す。

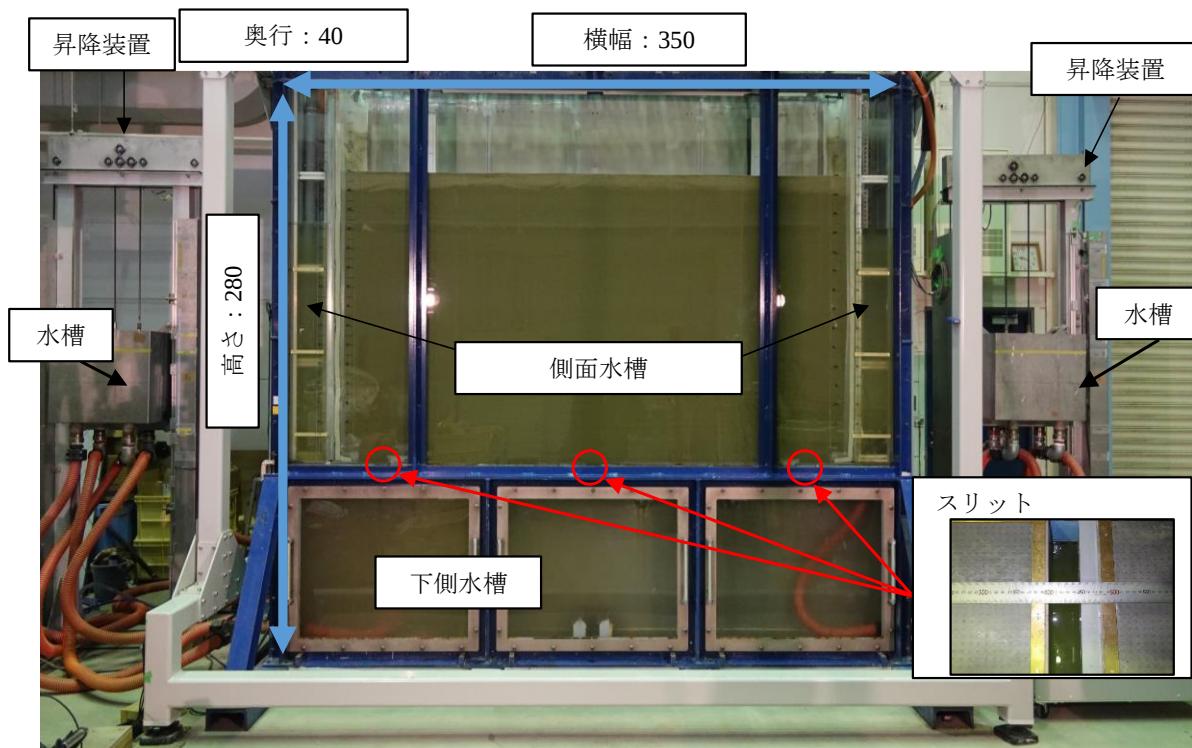


図-3.1 大型吸い出し可視化装置の写真（寸法の単位：cm）

当該装置の大きさは、高さ 2.8 m、幅 3.5 m、奥行き 0.4 m である。土槽の前面はガラス製になっており、吸い出しによる空洞形成・陥没過程を実大規模で観察することが可能である。土槽内部の架台には、吸い出し口として用いる最大 8 cm まで開放可能なスリットが3つ設けられており、任意の幅、地点で吸い出しを再現することが可能である。また、架台の下側には吸い出された裏埋砂を貯めるための高さ 80 cm の下側水槽があり、土層の左右両側には地盤内の水位を調節するために設けられた幅 25 cm の側面水槽がある。土槽と左右両側の側面水槽及び下側水槽との間は透過境界となっており、装置本体の左右に位置し側面・下側水槽と接続している2機の昇降装置の水槽を上下させることにより、土槽内の水位をコントロールし、地盤に様々な水理外力を作用させることができる仕組みとなっている。なお、昇降装置の水槽の上下動はモーターの動力により水槽に接続したチェーンを動かすことで行う。

3.2 大型吸い出し可視化試験の条件及びケース

前章で説明した大型吸い出し可視化装置を用いて、吸い出し・空洞形成・陥没の再現、二層フィルターによる復旧手法の適用、多様な水理外力下の吸い出し再発抑止効果の検証の順番で実大規模の吸い出し可視化試験を実施した。表-3.1 に示すように、復旧手法、裏埋砂及びフィ

表-3.1 大型吸い出し可視化試験のケース表

Case No.	試験材料 中央粒径比	掘削 復旧 時点	水理外力条件 ({}:吸い出し口の開閉及び幅)
1	裏埋砂：日光珪砂6号 上層フィルター：C-40 下層フィルター：白碎石 中央粒径比：20.5	無	吸い出し進行中 [空洞形成]一次元的水位変動(初期水位10 cm 水位変動幅：10-100 cm, 速さ：50 cm/min){開3cm} [陥没後]地下水位(55 cm){開3cm} [復旧作業時]地下水位(30 cm){閉} [着底時]一次元的水位変動(水位変動幅：10-100 cm){開3→6cm} [水理外力载荷]下記水理外力を上から順に载荷{開6cm} ・引き波(水位変動幅：100→10 cmの水位低下, 载荷回数：10回) ・一次元的水位変動(水位変動幅：10-100 cm, 速さ：50 cm/min, 载荷回数：10回) ・入射波(水位変動幅：15-100 cm, 周期：9.5s, 载荷回数：30波)
2	Case1と同様 中央粒径比：20.5	有	吸い出し完了後 [空洞形成]一次元的水位変動(初期水位10 cm, 水位変動幅：10-100 cm, 速さ：50 cm/min){開3cm} [陥没後]地下水位(30 cm){開3cm} [復旧作業時]地下水位(0 cm){開5cm} [水理外力载荷]Case1と同じ3種類の水理外力{開5cm}
3	裏埋砂：海砂 上・下層フィルター：岩ズリ 中央粒径比：26.7	有	吸い出し完了後 [空洞形成～陥没後]地下水位(55cm){開5cm} [復旧作業時]地下水位(20cm){開5cm} [水理外力载荷]下記水理外力を上から順に载荷 ・マウンド透過波1(水位変動幅:15-120 cm 地下水位:67.5 cm, 周期:10s, 载荷回数100波) ・マウンド透過波2(水位変動幅:15-150cm, 地下水位:82.5 cm, 周期:14s, 载荷回数100波){開5cm}
4	Case1と同様 中央粒径比：20.5	有	吸い出し完了後 [空洞形成～陥没後]地下水位(55cm){開5cm} [復旧作業時]地下水位(20cm){開5cm} [水理外力载荷]下記水理外力を上から順に载荷 ・マウンド透過波1(水位変動幅:15-120 cm 地下水位:67.5 cm, 周期:10s, 载荷回数100波) ・マウンド透過波2(水位変動幅:15-150cm, 地下水位:82.5 cm, 周期:14s, 载荷回数100波){開5cm}

ルター材の種類、水理外力を変化させた4ケースの試験を行った。

Case 1は、吸い出し口上に砂が残留している吸い出し完了前に掘削無しの手法(図-2.1 (b))で復旧する場合を、他3ケースは吸い出し完了後に掘削有りの手法(図-2.1 (a))で復旧する場合を各々想定したものである。

試験レイアウトについて説明する。図-3.2 に示す通り、間隙水圧計及び土圧計を装置背面から設置し、各値を経時的に測定した。地盤高については、本試験に使用可能な量に限りのある海砂を用いるCase 3のみ1.0 mとし、他ケースでは1.2 mに設定した。復旧後の吸い出し再発抑止検証において、マウンド透過波を作用させるCase 4では土層下端から15 cmより上の範囲で左側の側面水槽と土層の間に不透過版を設置した。当該ケースでは、土層左下の高さ20 cm、幅70 cmの範囲に、マウンド上の裏込石を模した0.5~6 kg(最小径：50~150 mm)の碎石を2段で敷き詰め、その上に防砂シートを模した不織布を敷設した。また、左側スリットを5 cm 分置き、その直上の不織布に幅5 cm 分の切れ目を入れ、防砂シートの破損による吸い出し口を再現した。他ケースについては中央の吸い出し口から吸い出しを発生させた。

試験材料について説明する。各ケースで用いた裏埋砂及びフィルター材(種類は表-3.1参照)の物性と粒径加積曲線を図-3.3に示す。前述の通り、二層フィルターを用いた吸い出し抑止法の系統的な研究結果では、上層のフィルターの均等係数3以上、裏埋砂との中央粒径比20以下の条件で通常の裏埋砂の吸い出しを抑止可能で、粒形がいびつな海砂に対しては、上層フィルターの均等係数を2.5に引き下げ、中央粒径比を25まで引き上げることが可能であることが分かっている。以上を踏まえ、吸い出し抑止の検証をより厳しい安全側の条件で行うため、表-3.1に示す通り各ケースの中央粒径比を上記の各裏埋砂に対する吸い出し限界値を若干上回る値に設定した。下層フ

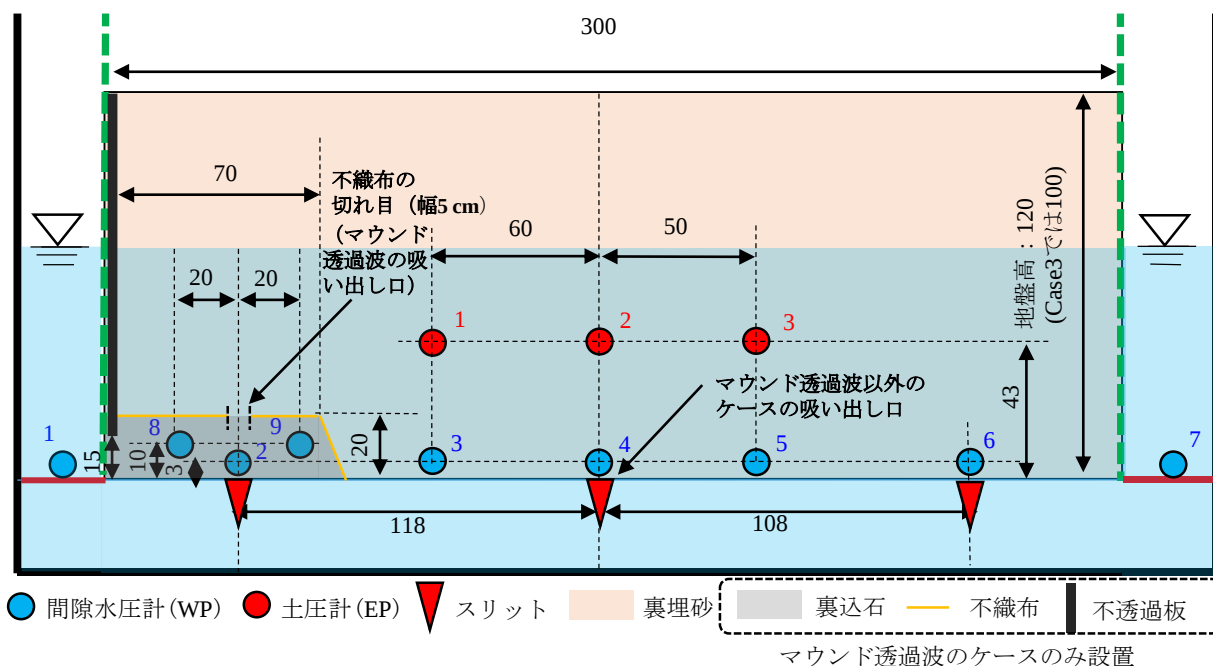


図-3.2 大型吸い出し可視化試験のレイアウト：復旧手法適用前(寸法の単位：cm)

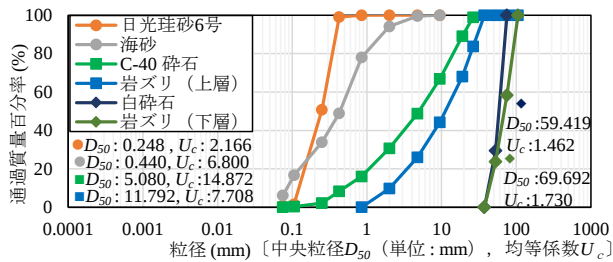


図-3.3 試験材料の粒形加積曲線及び物性

フィルターの粒度は、港湾工事において護岸のマウンド及び裏込石には直径100～1000 mmの碎石が使用される¹⁶⁾ことから、裏込石と上層フィルターとの粒度の連続性を考慮し、37.5 - 106 mmに設定した(図-3.3)。

本研究で再現した表-3.1中の4種類の水理外力とその再現方法を、図-3.4に示す。引き波は、土層内の水位よりも下に設けた昇降機の水槽への自然流下により再現した急激な水位低下である。一次元的な水位変動は、左右の昇降装置の上下動により再現した潮汐や長周期波による水平方向に一定の一次元的な水位変動を想定したものである。入射波は、風波やうねりを想定し、左側の側面水槽の水位をポンプにより十数秒の周期で変動させることにより、地盤内に入射させた波である。マウンド透過波は、不透過版で仕切った左側の側面水槽の水位を同様にポンプにより、十数秒周期で変動させ、土層左下のマウンド上の裏込石を通じて地盤に作用する透過波である。各外力について具体的な再現のタイミング、水位変動速度、波の周期、再現時間は表-3.1に示す通りである。

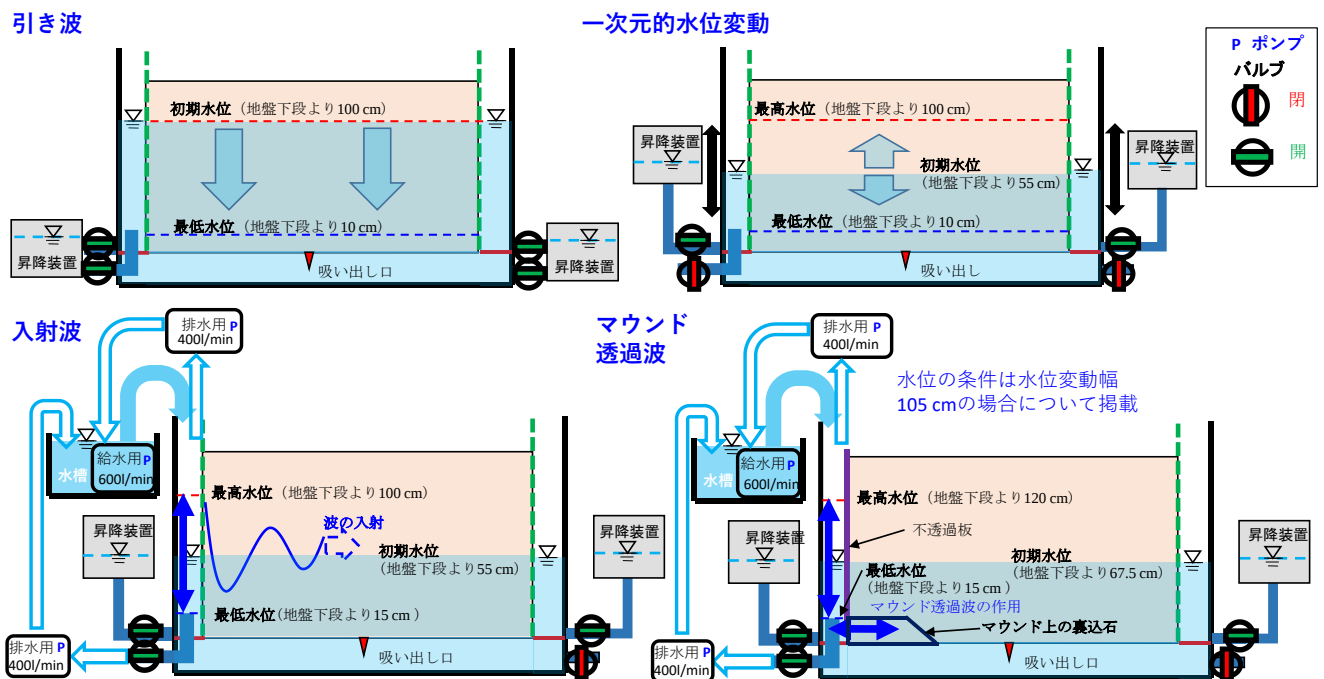


図-3.4 水理外力の再現方法

4. 大型吸い出し可視化試験による吸い出し・空洞形成・陥没と復旧手法の適用

4.1 吸い出し・空洞形成・陥没の再現結果

表-3.1に示すように、初期水位を土層下端から10 cmに設定し、空洞の初期形成を再現し、その後50 cm/minの速さの一次元的な水位上昇により空洞の発達・陥没を再現した。空洞形成陥没過程再現時の間隙水圧、土圧の経時的変動及び地盤前面の写真をCase 1を例に図-4.1に示す。試験開始60秒後の吸い出し口開放直後に、吸い出しが生じ空洞が初期形成されると共に、吸い出し口直上の土圧(EP2)が急激に減少している。又、空洞の左右に、空洞天端上の地盤荷重が作用することで同土圧(EP1, EP3)が上昇していることが分かる。地下水位10 cmの条件下で試験開始約700秒後に空洞の初期形成が完了し、地下水位上昇時に空洞陥没が生じた。その後、水位上昇に伴い、サクシオンが低下したことにより、左右の地盤の崩壊が進行し、空洞が拡大した。空洞陥没や空洞拡大時の左右の地盤の崩壊時には間隙水圧・土圧に不規則かつ急激な変動が見られることが分かる。本ケースでは吸い出し進行中の復旧を再現するため、吸い出し口上に裏埋砂が30 cmの深さで残留している時点で吸い出し口を閉じ、吸い出しを停止した。図-4.1の右下の写真に示す通り、幅約1.3 mの実大規模の陥没孔を再現した。

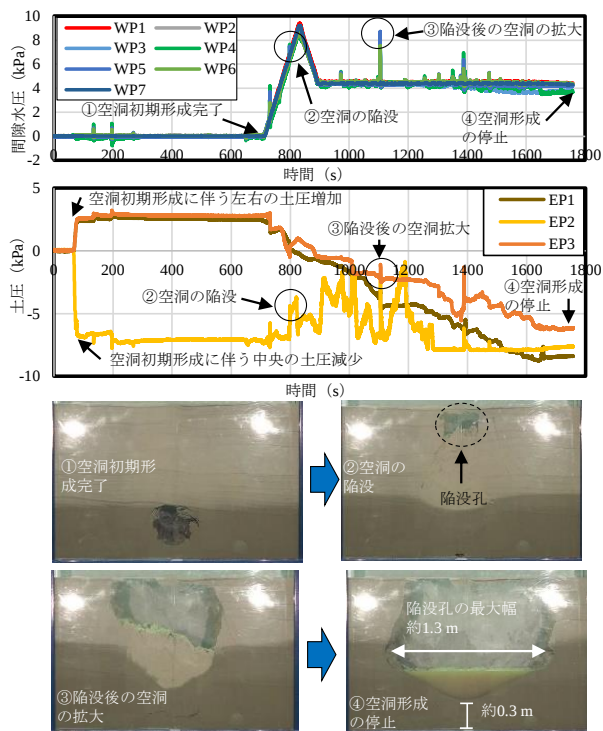


図-4.1 空洞形成・陥没過程の再現結果 (Case 1)

4.2 空洞陥没復旧手法の適用とフィルター層数設断面

本研究で考案した復旧方法の適用とフィルター層数設断面について、図-4.2の模式図を用いて具体的に説明する。上層フィルター層の吸い出し抑止性能に関する既往

研究^{11)~13)}では、新設現場での最小厚に相当する30 cmの半分程度の厚さで裏埋砂の吸い出しを抑止しうる粒度条件を検討している。以上を踏まえ、全ケースにおいて上層フィルターの最小層厚を15 cm分確保するようにフィルター層数設断面を検討した。一方で下層フィルターの層厚は、上層フィルターの安定性を保つために必要な15~20 cmに設定した。

Case1 (図-4.2 (a)) では前述の通り、吸い出し口の上にて30 cm深さで砂が残留している時点(を復旧開始時とした(i)。ここでは低潮時を想定し、地下水位を地盤下端から30 cmにまで低下させ、上層フィルター(緑色点線下側)、下層フィルター、上層フィルター(緑色点線上側)、裏埋砂の順で投入した(ii)。ここで緑色点線は下層フィルターの上面のレベルを示し、緑色点線上側の上層フィルターの層厚は上述の新設現場の最小厚と等しい30 cm¹¹⁾¹³⁾¹⁵⁾とした。また最初に層厚 15 cm分の上層フィルターを投入する目的は、図-4.2 (a) に赤色点線で示す通り、フィルター層の着底時に裏埋砂が下層フィルターと接する箇所から吸い出されることを抑止するためである。最後にフィルター層が着底時まで下方に移動する過程で地表面変位が生じた部分を裏埋砂で埋め戻した(iii)。本手法で実施を行う場合、空洞の規模から各フィルター材の重量を予め把握することが必要となる。

他3ケース (図-4.2 (b)) では空洞下側が水平面に対して安息角になり、吸い出しが止まった時点(i)から地下水

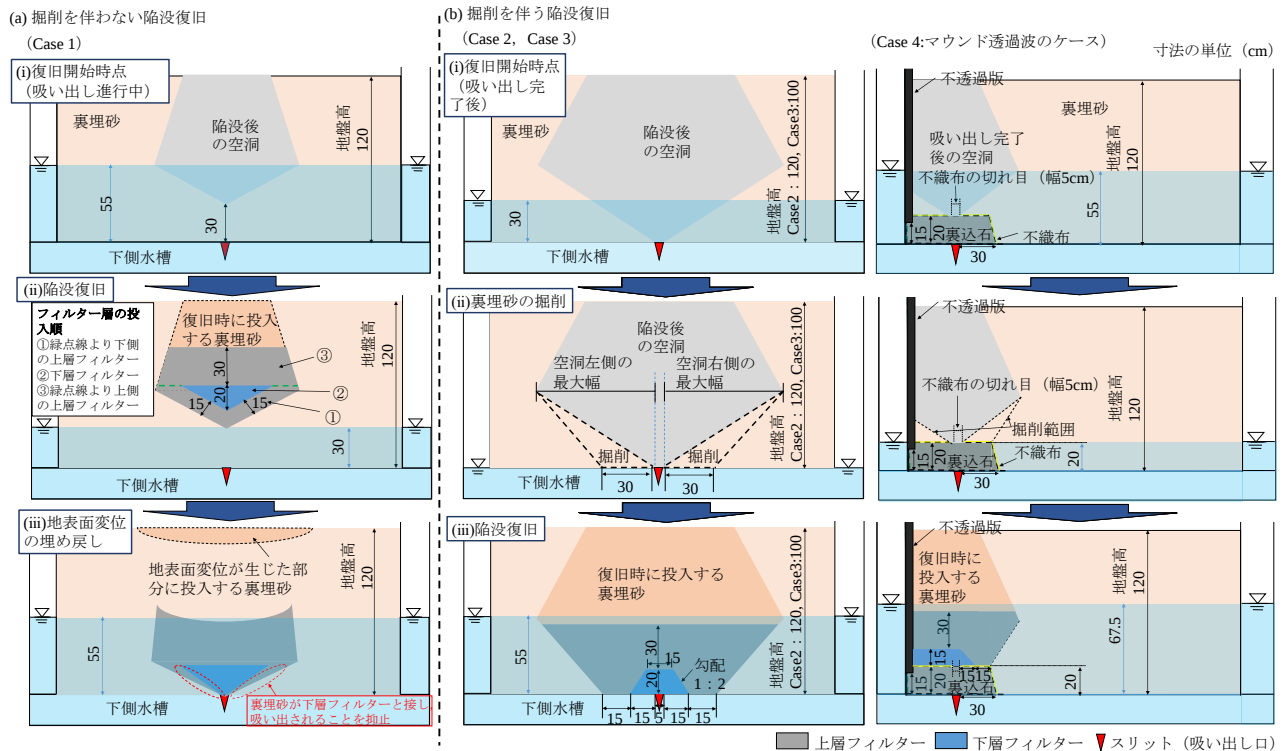


図-4.2 空洞陥没復旧の模式図

位が吸い出し口のレベルと等しい条件下で、復旧を開始した。地盤の安定性の保持の観点から、掘削量を最小限に抑え掘削後の空洞斜面が底面となす角度を小さくすることが望ましい。そこでCase 2, Case 3では図-4.2(b)の左列の(ii)に示す通り、地盤底部で上下フィルター層の最小厚として各15 cm分の幅を確保するため、空洞の左右端と土層下端の吸い出し口から水平距離が左右30 cmの点を結ぶ直線の内側(図-4.2(b)の点線部の範囲)に存在する砂を掘削した。なお、本実験では土層上から、スコップを用いて掘削を行った。次に下層フィルター、上層フィルターの敷設と裏埋砂の投入を行った(iii)。Case 4では、図-4.2(b)の右列に示すように左側の吸い出し口を用いて、本手法による復旧を半断面で適用した。実施工において、裏込石敷設境界の傾斜部で吸い出しが発生した場合は、吸い出し口から斜面に沿って30 cm下った地点のレベルが最大掘削深となり、このレベルと低潮時地下水位との関係から復旧手法の検討を行う必要がある。また、本手法は地下水面上で復旧を行うため、地上からのフィルター層の高さの測量により、出来形の把握が可能である。

図-4.2に掲げた二層フィルターによる復旧手法を図-4.3の空洞陥没復旧の諸過程の土層前面写真に示す通り適用した。図-4.3の「1.復旧前」から「3.復旧後」の写真はそれぞれ図-4.2の3つの段階の模式図に対応している。

Case 1 では、「2.フィルター層投入後」に図-4.2(a)で示した通り上層フィルターに覆われた形で空洞内に投入された下層フィルターが「3.復旧後」では吸い出し口部に着底している。表-3.1に示す通り復旧完了後に吸い出し口を開き、速度50 cm/minの一次元的水位変動を作用させた際に、二層フィルターが沈降し着底するまでの挙動をPIV画像解析した結果を図-4.4に示す。復旧作業後の吸い出し再開から30秒後には、二層フィルター下側の砂の吸い出しに伴い、下層フィルターと最初に投入した層厚15 cm分の上層フィルターが下方に移動し、吸い出し口付近に達した60秒後では、下層フィルター上側の層厚30 cm分の上層フィルターの沈降が見られる。フィルター層上側の裏埋砂も下方に移動しているが、上層フィルターの速度を下回っていることから、フィルター層の移動時にフィルター層を通じた投入砂の流出は生じていないことが分

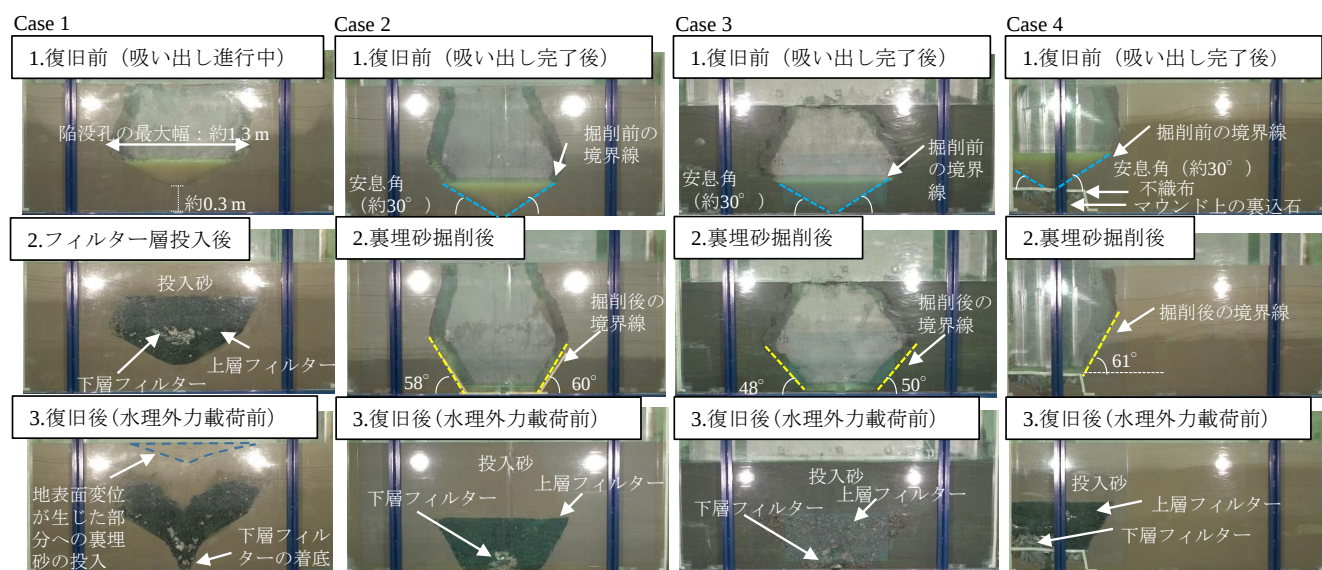


図-4.3 各ケースの空洞陥没復旧の諸過程の地盤前面写真

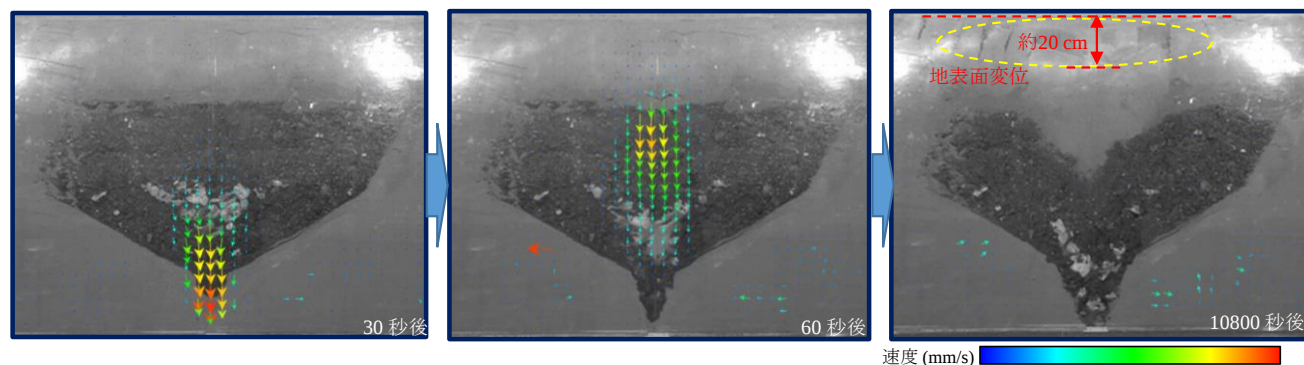


図-4.4 二層フィルターの着底までの挙動のPIV解析結果

かる。下層フィルターの吸い出し口部への着底後に上記の水理外力を継続的に載荷し、フィルター材の移動が完全に止まった10800秒後には、下層フィルターと裏埋砂との間に位置する上層フィルターが吸い出し口近傍の裏埋砂の流動を抑止していることが分かる。なお、この時点では、フィルター層の下方移動に伴い、最大約20 cmの地表変位(図-4.4)が生じている。図-4.3のCase1「3.復旧後」の写真から、この部分は裏埋砂の埋め戻し領域(当該写真の青点線部)に対応している。

他3ケースでは、図-4.3の「2.裏埋砂掘削後」において、掘削面が水平面となす角度は約50°~60°と砂の安息角(約30°)よりも大きい値であるにも拘わらず、サクシンの作用で周囲の地盤が安定的に自立している。また、「3.復旧後」の写真に示す通り、図-4.2(b)で示した通り、掘削により確保したスペースに二層フィルターの敷設と裏埋砂の投入により陥没復旧を実施した。

5. 多様な水理外力下における陥没復旧後の吸い出し再発抑止検証

5.1 各種の水理外力の再現結果及び強度評価

表-3.1の右列の「水理外力载荷」の箇所に記した条件(水位変動幅、速度、波高、周期、载荷回数)で各種水理外力を载荷した。その際、計測された間隙水圧変動をCase 1(引き波、一次元的水位変動、入射波)とCase 4(マウンド透過波)を例に図-5.1に示す。

引き波では、フィルター層の周辺において、約3秒間で間隙水圧が約7 kPa変動している(図-5.1(a))。ケーソン背面(陸側)の間隙水圧変動の観測記録として、有義波高4 mを超える高波浪時に福井県福井港で計測された結果¹⁷⁾や茨城県鹿島港外港地区で得られた結果⁶⁾があるが、これらと比較しても大きな水圧変動である。

一次元的な水位変動では、通常の潮汐による水位変動よりも早い約50 cm/minの水位変動が地盤内でも再現できていることが分かる(図-5.1(b))。

入射波において、波の周期は約9.5秒であり、風波・うねりの周期帯の中では長周期である。Hurら¹⁸⁾は波の特性が捨石護岸背後の埋立て土砂の吸い出し機構に及ぼす影響を実験的に検討し、波の周期が大きいほど捨石内での波高の減衰が小さく吸い出しの可能性が高まることを示している。以上から、本外力条件は入射波として厳しい外力条件であるといえる。

マウンド透過波において、波高が最大のマウンド透過波2では、裏込石内部(WP8, WP9)で約11~12 kPaの間隙水圧変動が見られる(図-5.1(e))。マウンド内での波

圧の減衰により、裏込石内でのマウンド透過波の間隙水圧変動は海側の間隙水圧変動の約70~80%になり¹⁾、70%まで減衰の場合、この間隙水圧変動は、気象庁が公開している沿岸波浪観測記録(6地点)の有義波高の年平均値¹⁹⁾よりも高い波高1.6~1.7 mのマウンド透過波が裏込石に及ぼす間隙水圧変動に相当している。

以上から、上述のいずれの外力も、現地で作用しうる強い外力を想定し再現したものといえる。

5.2 多様な水理外力下の吸い出し再発抑止検証結果

各水理外力载荷前後の地盤前面写真を基にPIV画像解析により得られた上述の各種水理外力载荷時の裏埋砂及びフィルター材の粒子の時間平均速度ベクトルを各ケースについて载荷外力ごとに図-5.2に示す。Case 1では引き波作用下において裏埋砂内に最大で0.3~0.35 mm/sの速度ベクトルが見られる。一方で上層フィルターとの境界近傍の裏埋砂及び上層フィルター内部で吸い出し口に向かう方向の速度ベクトルの大きさは全ケースで実質的にゼロであることが分かる。以上の結果から、復旧後の吸

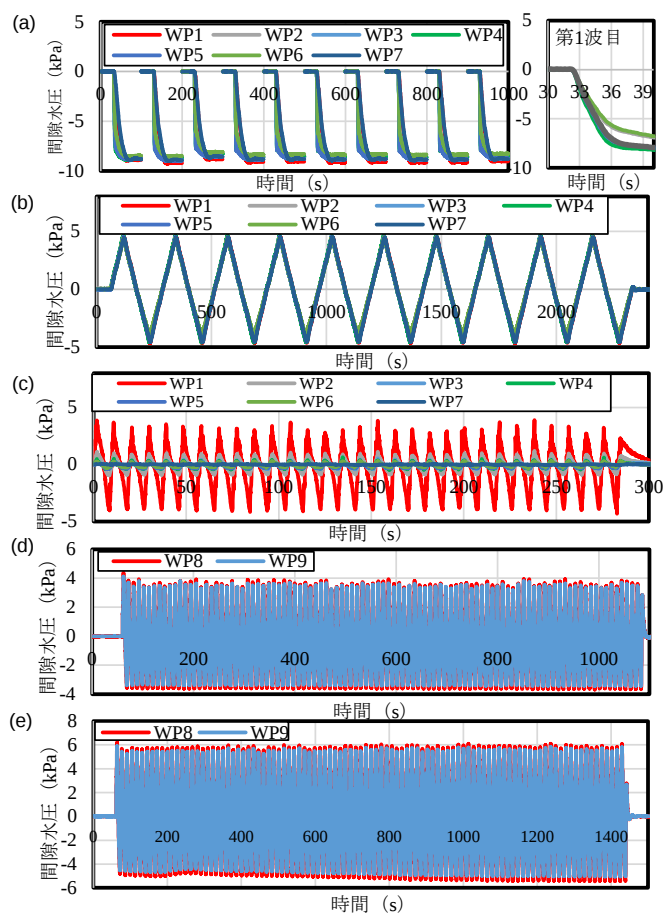


図-5.1 各水理外力再現時の間隙水圧の経時的な変動：(a) 引き波；(b) 一次元的水位変動；(c) 入射波；(d) マウンド透過波 1；(e) マウンド透過波 2

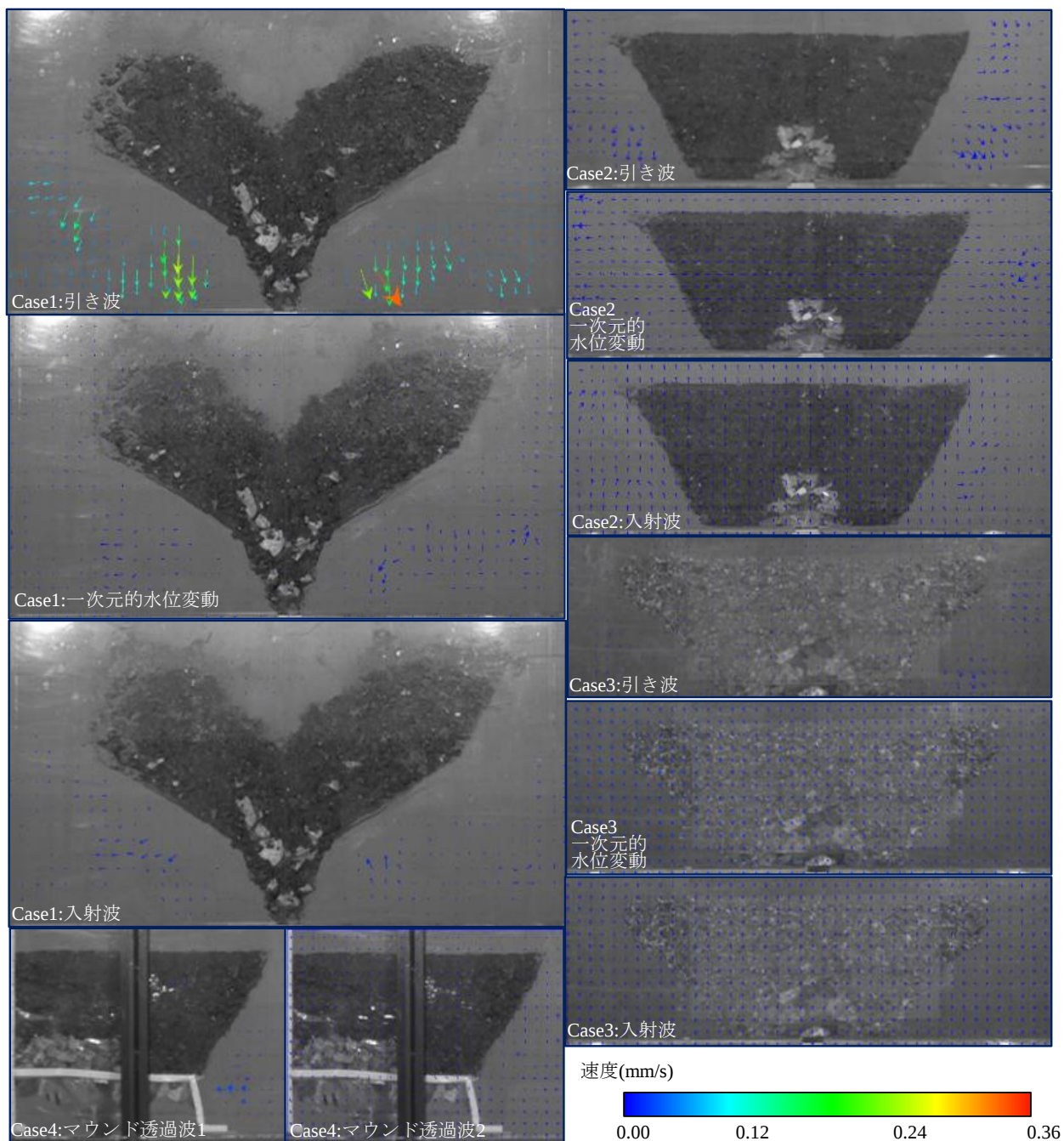


図-5.2 水理外力荷重時の二層フィルター近傍のPIV解析結果（引き波は1波目荷重時の結果）

い出しの再発は上層フィルターにより抑止され、上層フィルターの下層フィルター内への流入によるフィルターの二層構造の不安定化も生じていないことが分かる。また、図-5.1の間隙水圧変動では、図-4.1で空洞形成・発達段階で見られた急激かつ不規則な間隙水圧変動が見られない。図-5.3にCase 1, Case 2を例に水理外力荷重後の地表面変位の累積値を示す。最後の入射波の荷重後も

最大変位がCase 1で6 mm, Case 2で4 mmと小さい値に抑えられている。図-5.4に示す水理外力荷重前後での地盤前面の写真からも全ケースにおいて空洞形成・発達は見られない。以上から全ケースにおいて裏埋砂内の空洞形成、フィルター層の流動・不安定化、地表面変位は生じていないことが分かる。

以上の結果から、2通りの復旧手法において、適切な

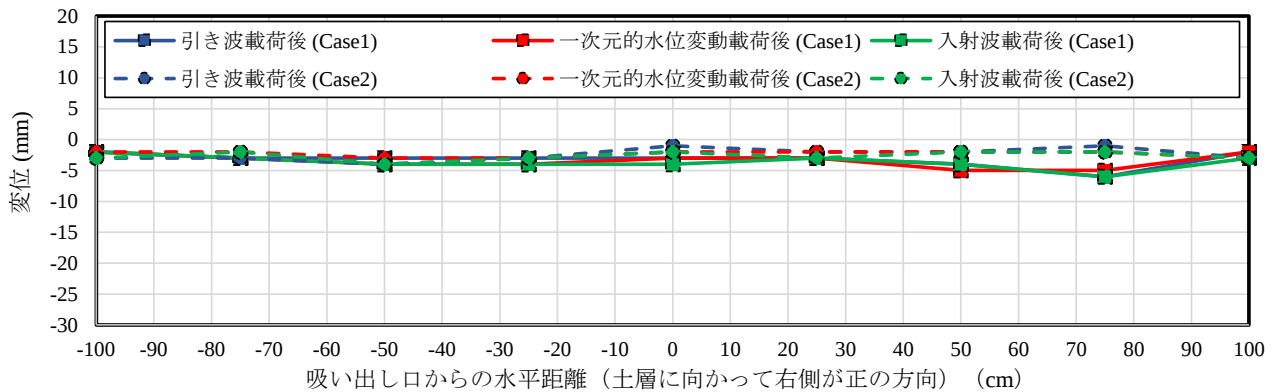


図-5.3 水理外力载荷時の地盤表面変位分布

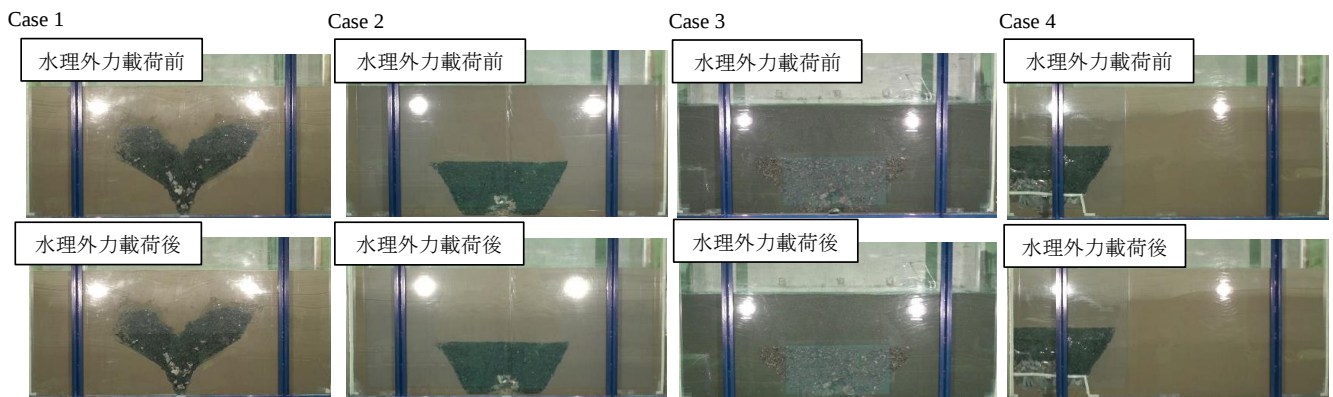


図-5.4 水理外力载荷前後の地盤前面写真（上：水理外力载荷前，下：水理外力载荷後）

粒度の二層フィルターを用いることで、現実的に強い水理外力の継続的作用下でも二層フィルターの安定性を保ちつつ、裏埋砂の吸い出しを復旧後、安定的に抑止しうることを示した。

6. 結論

本研究では、二層フィルターを用いた吸い出しによる空洞陥没の復旧手法について一連の大型吸い出し可視化試験の実施を通じて詳細に検討し、以下の知見を得た。

吸い出し口が低潮時地下水位より深い場合には空洞内に上層フィルターが下層フィルターを覆う形で二層フィルターを充填し、その上から裏埋砂を投入する方法により、下層フィルターが吸い出し口に着底した後、現実的に強い水理外力下で吸い出しの再発を安定的に抑止しうることを示した。但し、本手法は、下層フィルターの着底後に吸い出し抑止機能を発揮するため、それまでは空洞の発生・発達には抑制しつつも一定の地表面変位を許容する点に留意が必要である。

一方で、吸い出し口が低潮時地下水位より浅い場合は、

サクシオンによる空洞斜面の自立性を考慮し、低潮時に空洞下側の地盤を掘削し、二層フィルターを裏込石上に直接敷設する方法により、現実的に強い水理外力下においても直ちに効果を発揮し吸い出しの再発を安定的に抑止しうることを示した。復旧作業時には、掘削後の空洞斜面の水平面となす角度が 60° 程度までは、サクシオンの作用効果により周囲の地盤が自立するため、二層フィルターの敷設に問題がないことを示した。

下層フィルターの粒度範囲については、上層フィルターの最大粒径から裏込石の最小粒径程度の範囲に設定することで、上記双方の手法においてフィルターの二層構造が多様な水理外力下で安定的に保たれることを示した。

以上から、吸い出しによる空洞陥没復旧における二層フィルターの高い適用性が示された。今後、フィルター層を用いた空洞・陥没の復旧対策について、実施工への適用検討が進むことが期待される。

あとがき

本資料では、フィルター層を用いた吸い出しによる空洞陥没復旧手法及び再発防止対策として、吸い出し口の

低潮時の地下水位に対する位置の違いにより2通りのフィルター層敷設方法を考案し、一連の大型吸い出し可視化試験により現実的に強い多様な水理外力下で吸い出し再発防止効果を詳しく検証した。掘削を伴う手法では復旧後直ちに吸い出し再発防止効果を安定的に発揮する一方で、掘削を伴わない手法では下層フィルターの着底まで地表面変位が生じうる。以下では、この点と実施工上の留意点について補足する。

掘削なしの手法を吸い出し進行中の陥没孔に適用した場合、吸い出し口上の砂の深さが数十cm程度であれば、復旧後間もなく下層フィルターが吸い出し口に着底し、吸い出し抑止効果を発揮する。一方、吸い出し口上の砂の深さが数メートル規模の場合は下層フィルターの着底まで時間を要すると考えられるものの、フィルター材の敷設直後から、残留している砂の吸い出し過程でも空洞発生・陥没のリスクは抑制されることが重要である。なお、本資料の大型吸い出し可視化試験では、空洞の斜面に沿ってフィルター材を投入する断面で本手法を適用したが、現場によって実施工が困難な場合は、面一でのフィルター材投入を行った場合でも下層フィルターが裏埋砂と接しない形であれば同様の吸い出し再発防止効果を発揮すると思われる。

上記の通り、本資料で提示した復旧手法は、フィルター層の変形追従性により、多様な水理外力下で安定的に吸い出しの再発を防止可能であり、港湾施設の陥没復旧及び吸い出し再発防止対策として幅広い活用が期待される。

(2024年9月12日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、国土交通省港湾局のご協力を得ている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 鈴木高二朗, 徳淵克正, 岡村知光, 下迫健一郎, 善功企, 山崎浩之 (1995): 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, 第35巻, 2号, pp. 3-63.
- 2) 菅原吉浩, 山之内順, 上久保勝美, 山本泰司, 岩田真 (2011): 防波護岸における防砂シートの損傷条件と対策工に関する検討, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I_667-I_672.
- 3) 堀井一樹, 鈴木高二郎, 西野好生: 埋立前の護岸における防砂シートの耐久性に関する検証 (2018), 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 74, No. 2, pp. I_1117-I_1122.
- 4) 赤司有三, 根木貴史, 樋口晃, 春日井康夫, 片桐雅明, 谷山健二, 田中睦, 平松敏和 (2019): カルシア改質土の法面勾配制御技術, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I_893-I_898.
- 5) 佐々真志, 石坂修 (2021): 吸い出し・陥没抑止に向けたケーソン目地透過波低減法, 港湾空港技術研究所資料, No. 1393.
- 6) Sassa S. and Ishizaka, O. (2022): Net buffer method for suppressing internal erosion and collapse behind seawalls and quaywalls through caisson joint wave reduction, *Coastal Engineering*, Vol. 172, 104061.
- 7) 小林孝彰, 佐々真志, 鈴木高二朗, 渡辺啓太, 具志良太, 前里尚, 平野年洋 (2017): フィルター層による吸い出し防止と防砂シート損傷リスク低減効果に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 73, No. 2, pp. I_354-I_359.
- 8) 小林孝彰, 佐々真志, 梁順普, 後藤翔矢 (2018): 吸い出しと空洞形成及び陥没過程の可視化と防止対策としてのフィルター層の有効性, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 74, No. 2, pp. I_264-I_269.
- 9) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 後藤翔矢 (2019): 様々な水理外力下における地盤内の空洞形成・陥没の進行過程および吸い出し抑止法の研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_937-I_942.
- 10) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平 (2020): 地表面変位観測による地盤内の空洞陥没の予知および吸い出し抑止法の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I_859-I_864.
- 11) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平, 鈴木高二朗 (2020): 地盤及び水理外力の特性を考慮した吸い出し・空洞形成・陥没機構とフィルター材による抑止法の研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 59, No. 3, pp. 1-20.
- 12) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平 (2021): マウンド透過波による吸い出しの機序・影響範囲及びフィルター材を用いた抑止法の研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp. I_781-I_786.
- 13) Kudai, K., Sassa, S., Yang, S., and Takada, K. (2021): Influence of soil and hydraulic conditions on the processes of internal erosion, cavity formation and collapse behind coastal structures, *Coastal Engineering*, Vol 170, 104013.
- 14) 梁順普, 佐々真志, 工代健太, 村田一城, 小林千紘 (2022): 臨海部の多様な外力と砂の粒子形状を考慮した吸い出し・陥没抑止法の研究, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 78, No. 2, pp. I_121-I_126.

- 15) 国土交通省港湾局監修 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2022年部分改定.
- 16) 菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也 (2011) : 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 67, No. 4, pp. 474-487.
- 17) 高松恭文, 渡辺義, 石田道昭 (2007) : 福井港海岸(福井地区)離岸堤および護岸(改良)検討調査-ケーソン式護岸背後の吸出し現象に関する一考察, 新潟技調report / 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所, pp.36-39.
- 18) Hur, D.S., Nakamura, T. and Mizutani, N. (2007): Sand suction mechanism in artificial beach composed of rubble mound breakwater and reclaimed sand sea, *Ocean Engineering*, Vol 34, pp. 1104–1119.
- 19) 気象庁 : 沿岸波浪計統計値 ,
<https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/wave/stat/stat.php>

港湾空港技術研究所資料 No.1418

2024. 9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発 行 所 港 湾 空 港 技 術 研 究 所
横 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号
TEL. 046(844)5040 URL. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2024) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。