

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 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.59 No.3 Dec 2020

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 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
工代 健太・佐々 真志・梁 順普・高田 康平・鈴木 高二朗…………… 1
2. 干潟及び砂浜における沿岸底生生態-地盤環境動態の統合評価予測技術の開発と適用
梁 順普・佐々 真志・工代 健太・高田 康平……………21

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

工代 健太*・佐々 真志**・梁 順普***・高田 康平****・鈴木 高二朗*****

要 旨

港湾施設における吸い出し抑止対策に資することを目的に、様々な地盤及び水理外力下における吸い出し・空洞形成・陥没の一連の進行過程について実大スケールの大型吸い出し可視化実験により検討した。粒径が細かくサクシオンが相対的に高い地盤では幅広の空洞が形成され、陥没範囲が広がるなど、裏埋砂の粒度によって異なるサクシオンの高さが空洞の形状及び陥没の範囲に影響することを示した。また、水位変動の繰り返し作用による吸い出しの進行過程に水理外力の作用方向が大きく影響することを示した。さらに、水位上昇に伴う地盤内のサクシオンの低下が空洞の陥没において本質的な役割を果たしていることを明らかにした。

吸い出しによる空洞陥没を地表面の変位観測により予知する手法の検討を目的に、地盤内の空洞の位置及び規模と地表面変位の大きさ及び範囲の関係性を明らかにした。すなわち、サクシオンが異なる裏埋砂ごとに、空洞の最大幅と深さの比 (B/L) と地表面変位の最大値 (d_{max}) の間には、地盤高や水位変動幅によらず密接な相関関係があることを示した。

二層構造のフィルター材による吸い出し抑止法についての系統的な検討を行い、一連の要素試験と大型可視化実験の結果を基にフィルター材の適切な粒度条件について明らかにした。具体的には、均等係数が 3.0 以上のフィルター材を中央粒径比 (フィルター材の中央粒径 D_{F50} / 砂の中央粒径 D_{S50}) 20 以下で設置した場合、裏埋砂の粒度に拘わらず吸い出しを十分に抑止しうることを示した。また本研究結果に基づき、吸い出し抑止のためのフィルター材の設計指針を提示した。

キーワード：吸い出し，空洞，陥没，サクシオン，フィルター材，均等係数

* 地盤研究領域・動土質研究グループ・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

***** 海洋研究領域・耐波研究グループ長

〒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-ke@p.mpat.go.jp

Processes of internal erosion, cavity formation and collapse under various soil and hydraulic conditions with their countermeasure using geotechnical filter

Kenta KUDAI*
Shinji SASSA**
Soonbo YANG***
Kouhei TAKADA****
Kojiro SUZUKI*****

Synopsis

A series of processes of internal erosion, cavity formation and its collapse was investigated under various soil and hydraulic conditions by prototype-scale experiments. It was clarified that the formation of the cavity, the timing and the scale of its collapse are influenced by a height of suction varying with particle size distribution of sand. For instance, the scale of cavity collapse tended to be large if suction was relatively high. The type of hydraulic force was also shown to affect the process of internal erosion. The cavity collapse was found to be caused by decrease in suction in association with water level rise.

The relationship between dimensions of the cavity and ground surface displacement was also studied based on the experimental results to gain fundamental knowledge for the prediction of cavity growth and collapse. The results demonstrate that the maximum ground surface displacement (d_{\max}) is correlated with a ratio of cavity width (B) to its depth (L) regardless of the ground height and water level fluctuation range. The correlation equation between B/L and d_{\max} was obtained for each sand with different suction.

This research systematically studied two-layer filter as a countermeasure against the internal erosion. Appropriate particle size distribution of the geotechnical filter was obtained based on the results of a series of element tests and the prototype-scale experiments. Namely, it was found that the geotechnical filter keeps sufficient deterrent effect irrespective of particle size distribution of sand if the uniformity coefficient of the geotechnical filter is larger than or equal to 3.0 and the medium particle diameter ratio (Medium particle size (Filter)/ Medium particle size (Sand)) is less than or equal to 20. Based on the experimental results, this report shows a criterion for the design of the geotechnical filter for the prevention of internal erosion, cavity formation and collapse.

Key Words: internal erosion, cavity, collapse, suction, geotechnical filter, uniformity coefficient

* 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
***** Head of Maritime Structures Group, Coastal and Ocean 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-ke@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	1
1. 序論	4
2. 大型吸い出し可視化試験装置の概要	5
2.1 装置の諸元	5
2.2 3種類の水理外力の再現方法	6
3. 地盤特性が空洞形成・陥没機序へ及ぼす影響	6
3.1 実験概要	6
3.2 実験結果及び考察	7
4. 水理外力特性が空洞形成・陥没機序へ及ぼす影響	8
4.1 実験概要	8
4.2 実験結果及び考察	8
5. 地表面変位と空洞形成陥没過程の関係性	10
5.1 実験概要と方法	10
5.2 実験結果及び考察	10
6. フィルター材による吸い出し抑止法	12
6.1 二層構造のフィルター層による吸い出し抑止法の概念	12
6.2 フィルター材の吸い出し抑止効果に関する系統的な要素試験	13
6.3 水理外力下におけるフィルター材の吸い出し抑止効果に関する検証実験	16
6.4 二層構造のフィルター層の設計指針	17
7. 結論	17
あとがき	18
謝辞	18
参考文献	18

1. 序論

護岸や岸壁などの港湾施設において、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、地盤内で発達した空洞が陥没する水地盤災害（以下吸い出し災害）が頻繁に発生し、全国的な問題となっている。兵庫県明石市の大蔵海岸で2001年に発生した同災害の調査では陥没に至る空洞の形成には地盤内のサクシジョンの発達に関係していることが示されている¹²⁾。また、サクシジョンが地盤の力学的挙動に影響を及ぼすことが既往研究³⁾により示されている。サクシジョンの高さは砂の粒度に依存する⁴⁾ことから、地盤条件が吸い出しの進行過程に影響することが考えられる。一方で水理外力特性が吸い出し災害への影響を検討した既往研究には以下のものがある。例えば高橋ら⁵⁾は波が繰り返し作用するケーソン護岸を模した水理模型実験を行い、吸い出し災害の一連の過程を再現し、越波等による裏埋砂の冠水や波圧変動による裏埋砂のボイリングが吸い出しを促進することを示した。中村ら⁶⁾及びHurら⁸⁾は護岸の水理模型実験により、吸い出しの程度と地盤に作用する波動特性の関係性を分析し、アーセル数や波形勾配が大きいほど、吸い出しが生じやすいことを示した。以上のように地盤内に作用する水理外力の違いが吸い出し災害の進行過程に影響を及ぼすことを示唆する知見が示されている。しかし、地盤及び水理外力条件が吸い出し・空洞形成・陥没の一連の過程に及ぼす影響については十分な検討がなされていない。

上述を背景として、本研究では大蔵海岸の陥没事故のような舗装のない水地盤災害としての空洞形成・陥没を対象とし、大型吸い出し可視化実験によりその一連の過程を実物大スケールで再現した。そして、地盤及び水理外力条件と吸い出し災害の進行機序の関係性について検討した。地盤条件の影響については、粒度が異なる海砂を用いた実験結果より空洞の形状や陥没のタイミング・範囲を比較することで検討した。水理外力の影響については、特に港湾の地盤に波や潮汐変動により作用方向が異なる水理外力が繰り返し作用していることに着目し、一次的な水位変動と一方向から一定の周期で入射する波の2種類の水理外力下で実験を行った。そして空洞の形状の変化や画像解析により可視化した砂粒子の動き、さらには地盤内の間隙水圧やサクシジョンの経時的な変動を比較し、水理外力特性の違いが吸い出しの進行過程や陥没のタイミングに及ぼす影響について考察した。

地盤内で空洞が発達すると陥没の予兆として地表面にひずみが生じることが考えられる。地表面変位観測により、

ひずみの範囲の広さや大きさから空洞の発達状況を把握することができれば、陥没の発生個所や規模を予知し、吸い出し災害を事前に防ぐことが可能になると考えられる。以上を踏まえ同実験結果を基に地表面のひずみの範囲や大きさと地盤内の空洞の位置や深さの関係性について検討した。

裏込石と裏埋砂の間に中間的な粒度を有するフィルター材を設置することで、フィルター材の目詰まり効果により吸い出しを抑止する手法がある⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。吸い出し抑止のためのフィルター材は①裏埋砂の目詰まり機能、②捨石に対する安定性、③防砂シートの損傷リスクの低減の3つの機能を満たす必要がある⁹⁾¹⁰⁾。この際、二層構造のフィルター層が有効であることの知見が既往研究により得られている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。また近年、波・流れなどの水の外力作用による吸い出しのみならず、地震作用による吸い出し・陥没発生の重要性が報告されている⁹⁾。本報告では、港湾施設の吸い出し対策として、臨海部で想定される多様な動的な外力下で吸い出し・空洞・陥没の発生を抑止しうるフィルター材の設計指針を提示する。

吸い出し抑止のフィルターの適切な粒度については、主にダム、グラベルドレーンなどの分野で古くから研究がなされ、数々の国際基準が検討されてきた¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。また、フィルター材は海底地盤の洗掘抑止のためにも用いられ、これらの基準が適用されてきた。しかし、裏埋砂の吸い出し抑止のための粒度基準については未だ十分な検討がなされていない。ダムの吸い出しが堤内外の水頭差による浸透流に起因するのに対し、港湾施設の裏埋砂の吸い出しは潮汐や波による周期や作用方向が異なる様々な水理外力によって生じる。また、港湾施設には地震動や交通荷重も作用する。したがって、裏埋砂の吸い出し抑止のためのフィルター材は多様な動的な外力下で目詰まり効果を発揮する必要がある。そこで本研究では二層構造のフィルター層について吸い出し抑止に十分な目詰まり効果を発揮するフィルター材の粒度条件を系統的に検討するため、フィルター材および裏埋砂の均等係数や中央粒径比を変化させた要素試験を行った。さらに大型吸い出し可視化実験を行い、要素試験の結果に基づく粒度条件を満たすフィルター材の吸い出し抑止効果について、高波浪時を想定した水位変動を含む3種類の水理外力下において検証した。

本報告の次章以降の章構成について説明する。2章では大型吸い出し可視化試験装置の概要について説明する。3章及び4章ではそれぞれ地盤条件と水理外力条件が吸い出し・空洞形成・陥没過程に及ぼす影響を実験的に検討する。5章では地表面変位と空洞のスケールとの関係性について説明する。6章では二層構造のフィルター材による吸

い出し抑止法の実用性に関する体系的な検討を通じて、その設計指針を提示する。7章に結論を記す。

2. 大型吸い出し可視化試験装置の概要

2.1 装置の諸元

図-2.1 に示す大型吸い出し可視化試験装置¹⁵⁾を用いた。装置の大きさは、高さ280cm、幅350cm、奥行き40cmで

ある。高さ80cmの位置に設けられた架台の上側に土層を作成する。架台の中央部には幅8cmまで開閉可能なスリット（以下吸い出し口）を設けており、任意の幅で吸い出しを発生させることが可能である。架台の下側は吸い出された裏埋砂を貯める部分（以下、下側水槽）である。また、土層の左右両側には地盤内の水位を調節するための水槽（以下側面水槽）が設けられている。装置本体の左右に設置した昇降装置の水槽はそれぞれパイプ1、パイプ2によ

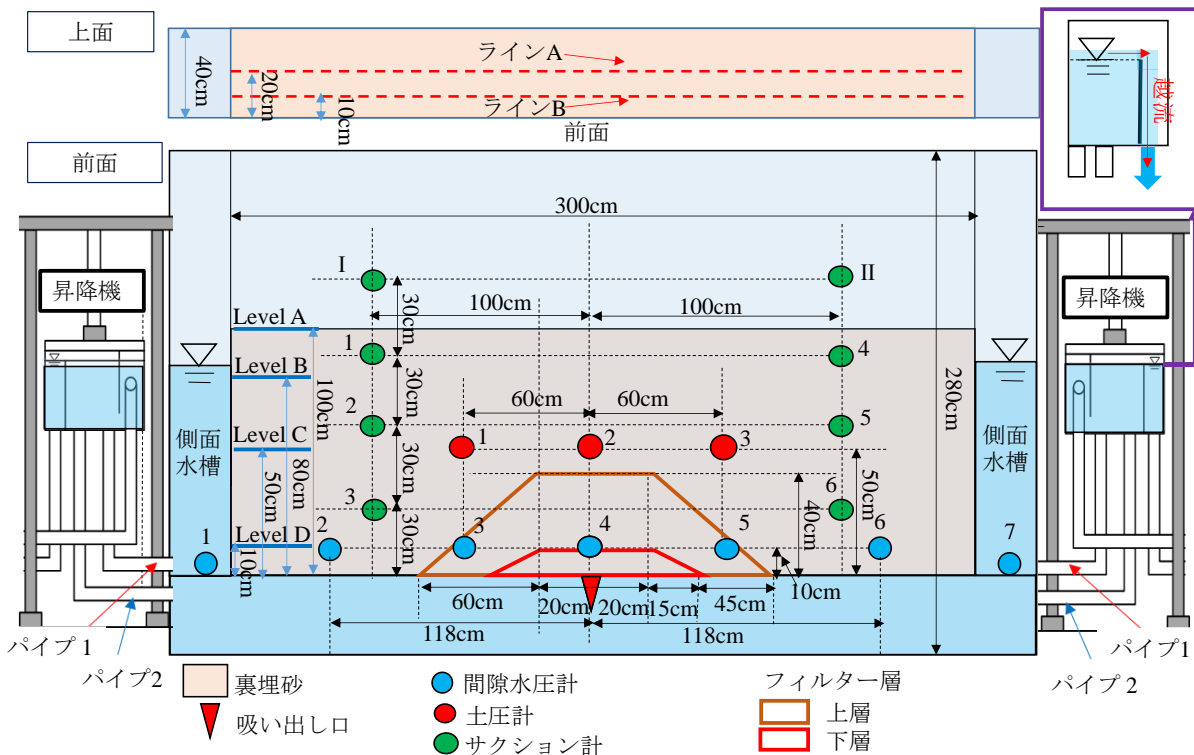
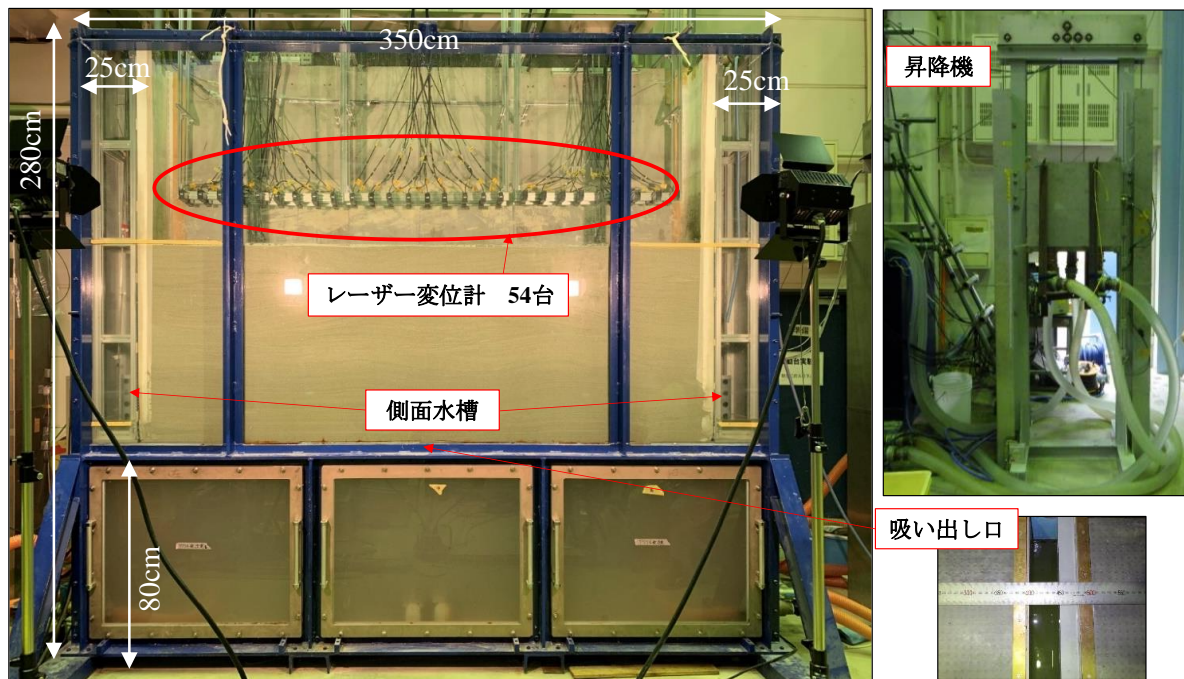


図-2.1 大型吸い出し可視化試験装置の写真及び概略

り装置本体の側面水槽と下側水槽に接続されており、昇降装置の動作により大型吸い出し可視化試験装置内の水位変動をコントロールする仕組みになっている。昇降装置内の水槽の水位は水タンクからポンプで汲み上げた水を絶えず越流させることで一定に保っている。パイプ 1、パイプ 2 はバルブにより開閉が選択できるようになっており、水理外力の大きさや作用方向を変化させることができる。土槽前面はガラス製となっているため、様々な水理外力下において吸い出しに伴う地盤内の空洞の発達・陥没の進行過程を観察することができる。

地盤上面には計 54 台のレーザー変位計(キーエンス製、型番 IL-600、分解能 0.05mm)を奥行方向に 2 列、横方向に 10cm ごとに設置しており、空洞形成に伴う地表面変位分布を多点同時観測することが可能である。レーザー変位計の適正距離が 20cm から 1m であることを考慮し、変位計の鉛直方向の位置を地表面から 20cm 上側とした。また、間隙水圧やサクシオンなど吸い出し災害に関する各物理量の空間的な分布を経時的に観測するため、図-2.1 に示す位置に各計測器を設置した。間隙水圧計は地盤内の水位変動の空間的な分布を詳細に捉えることができるよう

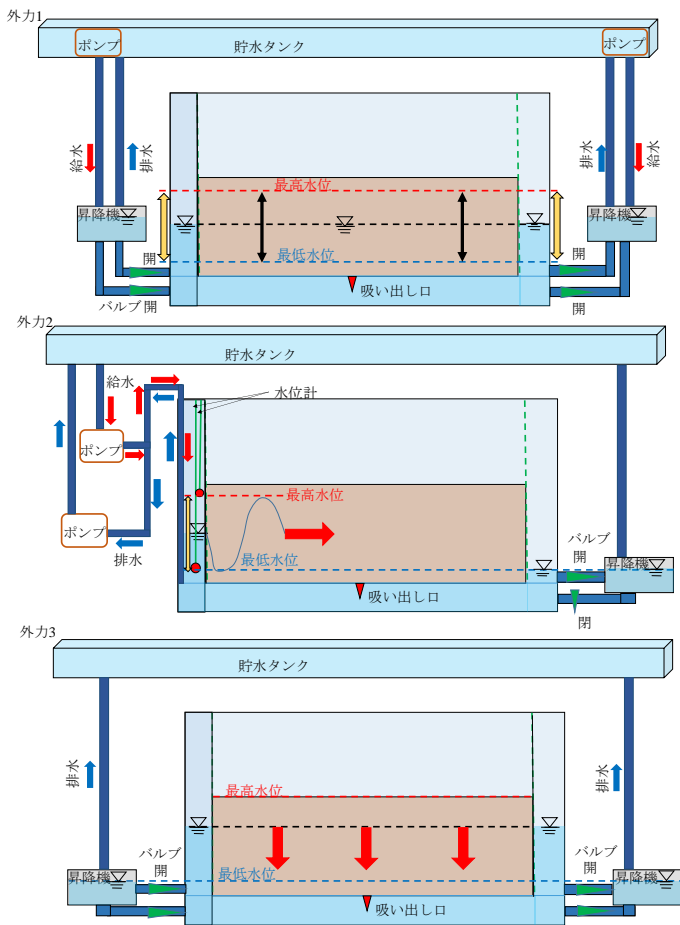


図-2.2 3 種類の水位外力の再現方法についての概略図

に地盤中の横断方向に 5 点配置した。また、側面水槽の水位変動を記録するため、左右の側面水槽の底部に 1 点ずつ間隙水圧計を設置した。土圧計は空洞が発達する吸い出し口近傍の地盤の土圧変化を捉えるため、吸い出し口の直上を中心に横断方向に 3 点配置した。空洞近傍のサクシオンの分布を左右両側から計測することができるように、吸い出し口から左右 1m 離れた位置にサクシオン計を高さ 30cm ごとに設置した。

2.2 3 種類の水理外力の再現方法

図-2.2 に示す 3 種類の外力を大型吸い出し可視化試験装置により再現した。各外力の概要と再現方法についてこの図を用いて説明する。外力 1 は潮汐波や周期が数分から数十分の長周期波または津波などによる水平方向に一定の一次元的な水位変動である。装置に接続するパイプをすべて開いた状態で左右の昇降機を同じ速度で上下させ、地盤内の水位を一次元的に変動させた。外力 2 は風波やうねり及び周期が数十秒の長周期波の入射波を再現したものである。給水及び排水用の 2 台のラインポンプにより、左側側面水槽の水位を一定の周期で規則的に変動させた。外力 3 は急激な引き波による水位低下を再現したものである。再現方法は以下のとおりである。まず、地盤下端より 1 m 上に水位を保った状態で全てのパイプを閉じた。次に昇降機内の水位を地盤下端から 10 cm の位置まで下げて土層と昇降機の水槽との初期水頭差を 90 cm に保った。この状態ですべてのパイプを開き、土層内の水をパイプ 1 及びパイプ 2 を通じて自然流下させた。

3. 地盤特性が空洞形成・陥没機序へ及ぼす影響

3.1 実験概要

2 章で説明した大型吸い出し可視化試験装置よりも簡易的な実験装置(土層の寸法:高さ 100 cm,幅 400 cm,奥行き 30 cm)を用いて、地盤条件の違いによる空洞形成・陥没過程への影響について検討した。表-3.1 に実験ケースを示す。実験用砂には粒径の異なる 2 種類の海砂を用いた。図-3.1 に海砂の粒径加積曲線と物性を示す。前島産海砂は糸満産海砂と比較して粒径及び均等係数が大きいことが分かる。外力は両ケースとも一次元的な水位変動

表-3.1 裏埋砂を変化させた大型吸い出し可視化
実験概要

ケース	外力の種類	水理外力条件		地盤条件	
		振幅(cm)	昇降機の種類 (cm/min)	砂	地盤高 (m)
Case3-1	外力1	90 (Level A)*	5	前島産海砂	1.0
Case3-2	外力1	90 (Level A)	5	糸満産海砂	1.0

*(): 最高水位 図-2.1 参照

(外力1)を負荷した。昇降機は速度は5cm/minに設定した。砂地盤は高さが1mとなるように水中落下法で作成した。初期水位を地盤下端より20cm上方に調整した後、地盤内に配置されたサクシオン計の値が一定になったことを確認した。図-3.2に初期のサクシオンの分布図を示す。2種類の砂でサクシオン分布が大きく異なることが分かる。地下水位からの距離が大きいほど、サクシオンの値の差が広がり、地下水位から70cm上方では前島産海砂では約1.7kPa、糸満産海砂ではほぼ倍の約3.5kPaであることが分かる。次に地盤下端中央に位置する幅5cmのスリットを開放することで吸い出しを発生させた。吸い出しが一旦終息し、空洞の初期形成が完了したことを確認後、地表面が陥没するまで水位変動を負荷した。

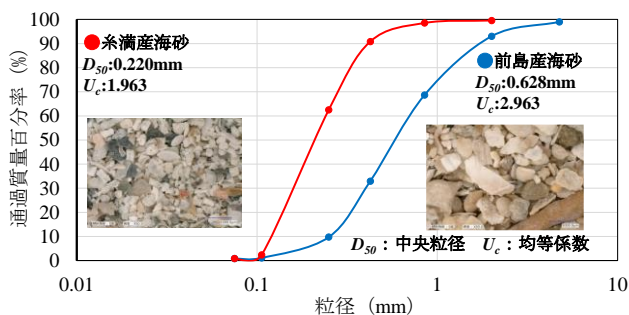


図-3.1 海砂の粒径加積曲線及び物性

3.2 実験結果及び考察

図-3.3に空洞の初期形成完了時(水位上昇前)と陥没後の地盤前面の写真を示す。また空洞の初期形成完了時の写真には地盤側面からの撮影画像を元に、DIC (Digital Image Correlation)による解析で得た地盤変位量もベクトルにより表記している。初期形成完了時の写真の比較からサクシオンが低い前島産海砂では、空洞の最大幅が約0.5mと比較的狭いのにに対し、サクシオンが高い糸満産海砂では幅の広い空洞が形成されていることが分かる。地盤の最大変位量は糸満産が0.8mmであるのに対し、前島産では約5mmとなっており、サクシオンが相対的に小さい砂の方が大きい地盤変位量が観測された。その一方で、幅

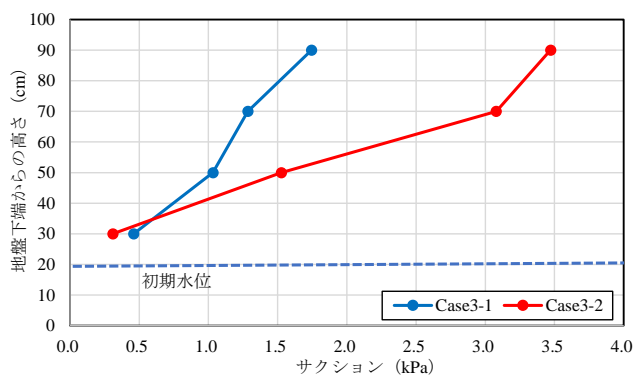


図-3.2 初期のサクシオンの分布図

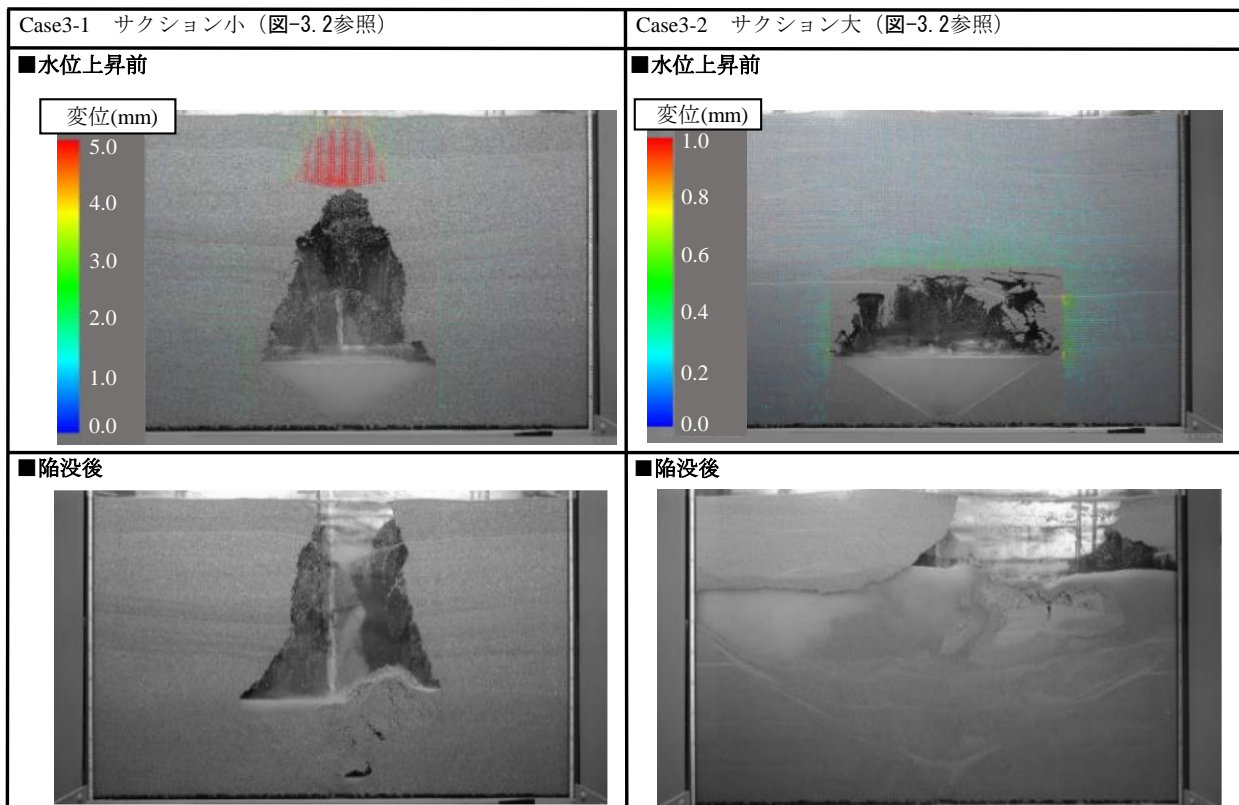


図-3.3 サクシオンと空洞形成・陥没過程の関係性を示す実験結果

の広い空洞が形成されている糸満産海砂の方が変位の見られる範囲が広いことが分かる。以上からサクシジョンの高さが空洞の形状や空洞近傍の地盤の挙動に影響を及ぼすことが明らかになった。次に水位変動時における地盤の挙動を比較すると、前島産海砂では水位上昇開始直後に陥没が見られたのに対し、糸満産海砂では水位上昇とともに空洞の幅が約 1.5m 程度まで広がり、水位上昇開始の約 10 分後に比較的広範囲で空洞の陥没が発生した。サクシジョンは空洞の保持力として作用し、サクシジョンが高い地盤では空洞がある程度発達した段階で陥没が発生するため、陥没に至るまでの時間が長い一方で陥没の規模が比較的大きいことが示された。以上から地盤内に働くサクシジョンが一定の水理外力下における陥没のタイミングと規模にも大きく影響することを明らかにした。

4. 水理外力特性が空洞形成・陥没機序へ及ぼす影響

4.1 実験概要

繰り返し作用する図-2.2 に示す水理外力特性の違いが吸い出しの進行過程に及ぼす影響について検討するため、各種水理外力の下で吸い出し可視化実験を行った。実験ケースを表-4.1 に示す。空洞の発達過程を長時間にわたって観測し水理外力特性の影響を詳細に検討するため、前章で用いた 2 種類の砂のうちサクシジョンが比較的高い糸満産海砂を用いた。土層は高さが 1m となるように水中落下法により作成した。本実験では 2 章で説明した 3 種類の水理外力の内、外力 1、外力 2 を再現した。詳細な外力条件は表-4.1 に示すとおりである。各水理外力の最大水位は地盤下端から 1m とした。また、水理外力の繰り返し作用による空洞の拡大を再現するため、外力 1 では昇降機の手速度を前章の実験より速い約 80cm/min に設定した。初期水位を土層下部から 0.1m に設定し、地盤中にサクシジョンが働く状態を再現した。実験開始とともに吸い出し口を幅 3cm 分開き、空洞の初期形成が完了した時点で各水理外力を負荷した。地盤前面の空洞の形状、DIC (Digital Image Correlation) による解析で得られた土粒子の動き、各計測器で測定した間隙水圧、土圧及びサクシジョンの経時的な変動を踏まえ、各外力の作用と吸い出し・空洞形成・陥没の進

表-4.1 水理外力を変化させた大型吸い出し可視化実験概要

ケース	水理外力条件				地盤条件	
	外力の種類	振幅(cm)	昇降機の手速度 (cm/min)	周期 (s)	砂	地盤高 (m)
Case4-1	外力1	90 (Level A)	80	—	前島産海砂	1.0
Case4-2	外力2	90 (Level A)	—	40	前島産海砂	1.0

*(): 最高水位 図-2.1 参照

行過程の関係性について検討した。

4.2 実験結果及び考察

図-4.1 に各位置の間隙水圧、土圧及びサクシジョンの実験開始からの経時変化を示している。Case4-1、Case4-2 でそれぞれ 7~8kPa、2~3kPa 程度の間隙水圧の周期的な変動幅が見られる。図-4.2 に時刻ごとの空洞の写真と DIC により求めた土粒子の速度ベクトルの分布図を示す。各時点の写真から水理外力の繰り返し作用に伴い、吸い出しにより空洞が発達し、陥没に至る過程が再現できていることが分かる。図-4.2 の外力 1 の 240 秒後と 320 秒後の速度ベクトルの向きから、水平方向に一律な水位変動では水位

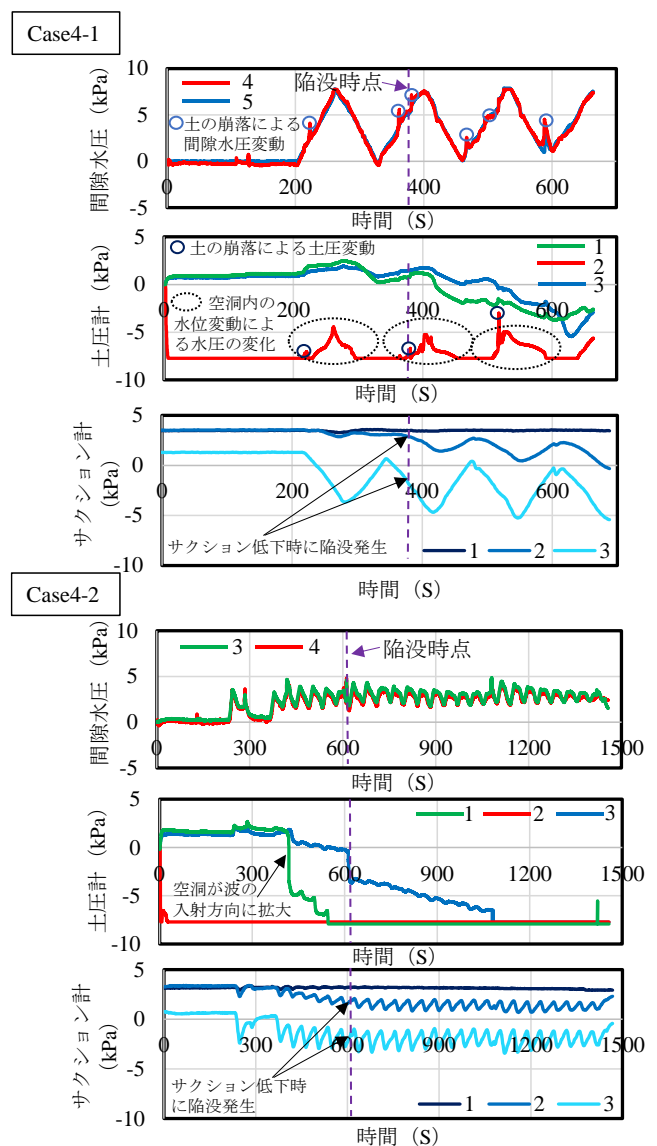


図-4.1 間隙水圧・土圧・サクシジョンの計測結果 (数字は計測器番号 位置は図-2.1)

上昇に伴って削られた地盤が水位低下時に吸い出されることで空洞が左右両側に発達していることが分かる。外力 2 では波を入射した左側 (図中に赤点線で囲んだ部分) の速度ベクトルが大きく、空洞が吸い出し口から左方に比較

的大きく拡大していることが分かる。図-4.1 に示す本ケースの土圧計の測定結果を見ると波の入射側にある ch.1 の土圧が反対側の ch.3 の土圧よりも先に低下していることから空洞の拡大が波の入射境界側により早く生じてい

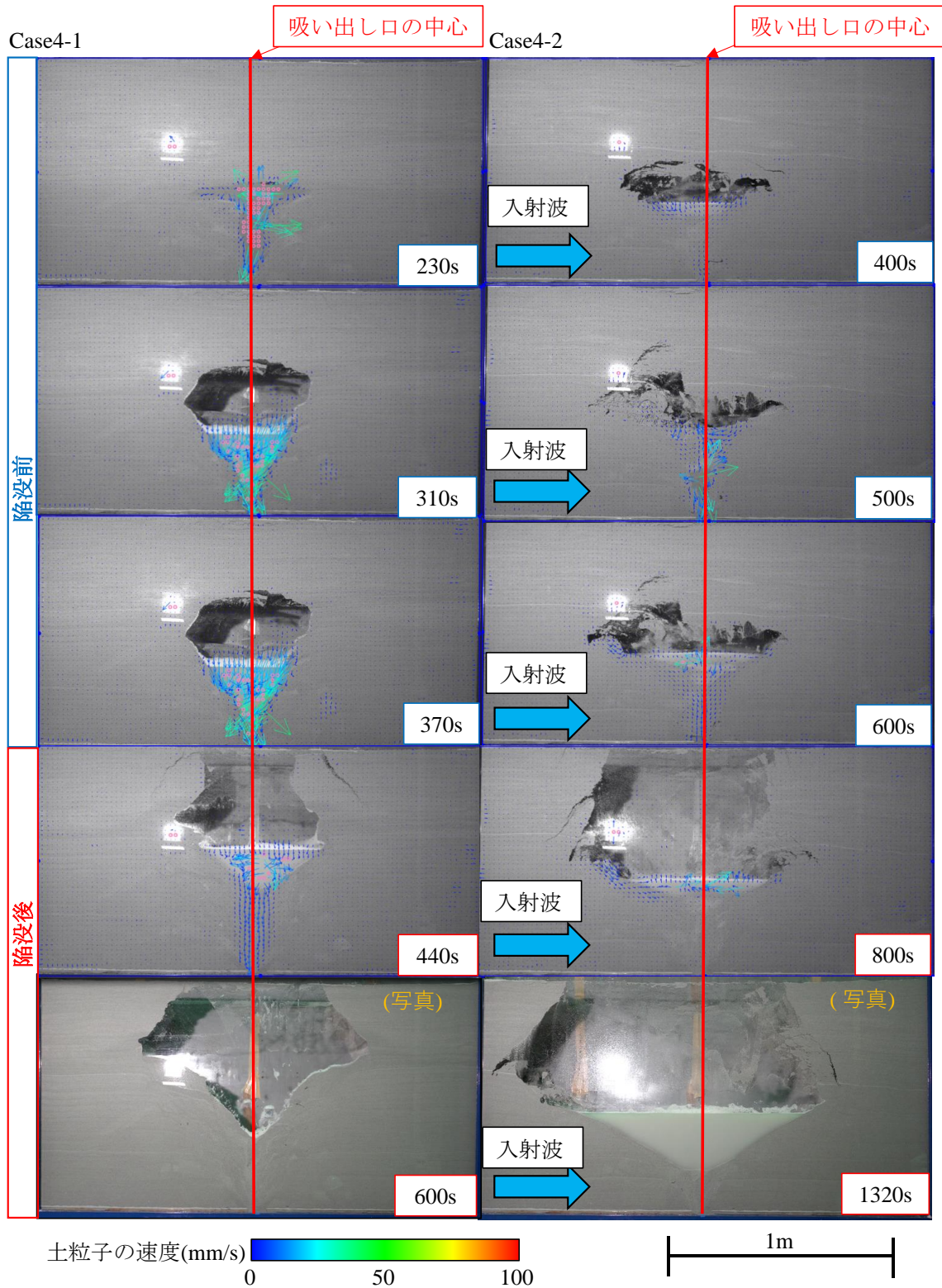


図-4.2 水位変動のタイプと空洞形成・陥没過程の関係性を示す実験結果

ることが分かる。入射波が地盤中を伝播する際、圧力変動が入射境界からの距離に対して指数関数的に減少することが既往研究¹⁹⁾により示されていることから、水位変動の大きさの空間的な変化が空洞の形状に反映されていることが考えられる。以上から水理外力の作用方向が空洞の形成過程や形状に影響することが明らかになった。図-4.1に空洞が陥没した時点を紫色の点線で示している。陥没発生時点では外力1、外力2の双方とも地盤内のサクシオンが低下していることが分かる。特にch.2サクシオン計の結果から空洞近傍の地盤下端から60cm上の位置においても、2ケースとも水位の上昇に伴う地盤内への水の浸透により、サクシオンが実験開始時と比べて低下しており、空洞の陥没に影響したと考えられる。図-4.2の各ケースの最終時点の空洞の写真を比較すると、Case4-1では陥没した穴の形が吸い出し口に対してほぼ左右対称であるのに対し、Case4-2では波の入射境界側（吸い出し口に対して左側）が大きく削られていることが分かる。以上から水理外力の作用方向が陥没後の地盤状態にも影響することが分かった。特にCase4-2の結果からうねりや風波などによる入射波の影響が卓越する場合には、吸い出し発生箇所から汀線側に空洞が拡大し、陥没が生じる可能性が示唆された。

5. 地表面変位と空洞形成陥没過程の関係性

5.1 実験概要と方法

吸い出しによる空洞陥没を地表面の変位観測により予知する手法を検討することを目的に、地盤内の空洞の位置及び規模と地表面変位の大きさ及び範囲の関係性について前章と同様の大型吸い出し可視化実験により検討した。表-5.1に示すとおり4ケースの実験を行った。3章では空洞の大きさや形状などの吸い出しによる空洞形成・陥没過程には、不飽和地盤に働くサクシオンが大きく影響することが示された。そこで、地表面変位と空洞の状態の関係性に対するサクシオンの影響を比較するため、Case5-1～Case5-3は粒径が小さくサクシオンが比較的大きい糸満産海砂、Case5-4は粒径が大きくサクシオンが小さい前島産海砂を裏埋砂に用いた。また、水理外力については空洞のスケールと地表面変位の分布の関係性をより簡便に検討するため、前章の検討で吸い出し口に対して左右対称な空洞が生じた外力1を負荷した。地下水位の深さ及び水位変動幅や吸い出し口の地表面からの深さが空洞及び地表面変位の発達に影響することが考えられることを踏まえ、表-5.1に示すとおりケースごとに水位変動幅及び地盤高を変化させた。レーザー変位計は水面下の地表面変位を測定

することが不可能であるため、最大水位は全ケースとも地表面下に設定した。なお、地盤作成方法、初期水位及び吸い出し口の開口幅等の実験条件は前章と同じである。本実験結果を基に装置前面のビデオ画像から求めた空洞の深さ及び大きさとレーザー変位計で計測した地盤下端部の変位を経時的に比較し、両者の関係性を検討した。

5.2 実験結果及び考察

図-5.1に各ケースについて、吸い出し口を開いた時点を実験開始時とし、各位置の間隙水圧、土圧、サクシオンの経時的な変動を示す。各ケースとも間隙水圧の繰り返し変動が空間的に一律に再現できていることが分かる。また、糸満産（Case5-1、Case5-2、Case5-3）と前島産（Case5-4）の地表面から10cmの深さ（ch.1及びch.4）の初期のサクシオンの値を比較するとそれぞれ約3.5kPa、約1.9kPaであり、3章で示した結果と整合していることが分かる。図-5.2に空洞及び地盤変位が拡大した代表的な時点において、地盤内で発達した空洞の写真と地表面変位分布を重ねて示す。なおラインA（地盤中央ライン）とラインB（地盤前面から10cm奥のライン）の地表面変位を比較した結果、ラインAの変位の方が全体的に大きい値となっていることが分かった。以上からラインBの結果は側面摩擦の影響を受けていることが考えられ、図-5.2中の地表面分布はラインA上で計測された結果を示している。各時刻の写真中に左側に空洞についての情報〔最大幅B、深さの最小値Lc、空洞左端の深さLl、空洞右端の深さLr、空洞の深さL（Lc、Ll、Lrの平均値）〕を示し、右側に地表面変位についての情報〔地表面変位の幅Ba、最大変位量dmax〕を示す。Bは空洞の側方両端（図-5.2の青点）の水平距離である。また、レーザー変位計の精度が分解能の10倍程度であることを考慮し、Baは0.5mm以上の変位が見られた範囲の幅と定義している。なお、変位の空間分布は鉛直方向のスケールを拡大して示している。図-5.2から空洞の発達に伴い、地表面変位が発生・発達する範囲が広がり、ひずみの大きさも増加していることが分かる。また、全ケースとも空洞の直上に地表面変位が発達することが分かる。空洞が発達した時点のBとBaの比較から、地盤高1.5mのCase5-2ではBaがBよりも小さいのに対して、地盤高1mの他の3ケースではBaがBよりも大きく、

表-5.1 地表面変位の検討についての試験ケース

ケース	水理外力条件			地盤条件	
	外力の種類	振幅(cm)	昇降機の種類 (cm/min)	砂	地盤高 (m)
Case5-1	外力1	40 (Level C)	50	糸満産	1.0
Case5-2	外力1	40 (Level C)	50	糸満産	1.5
Case5-3	外力1	70 (Level B)	50	糸満産	1.0
Case5-4	外力1	40 (Level C)	50	前島産	1.0

*(): 最高水位 図-2.1参照

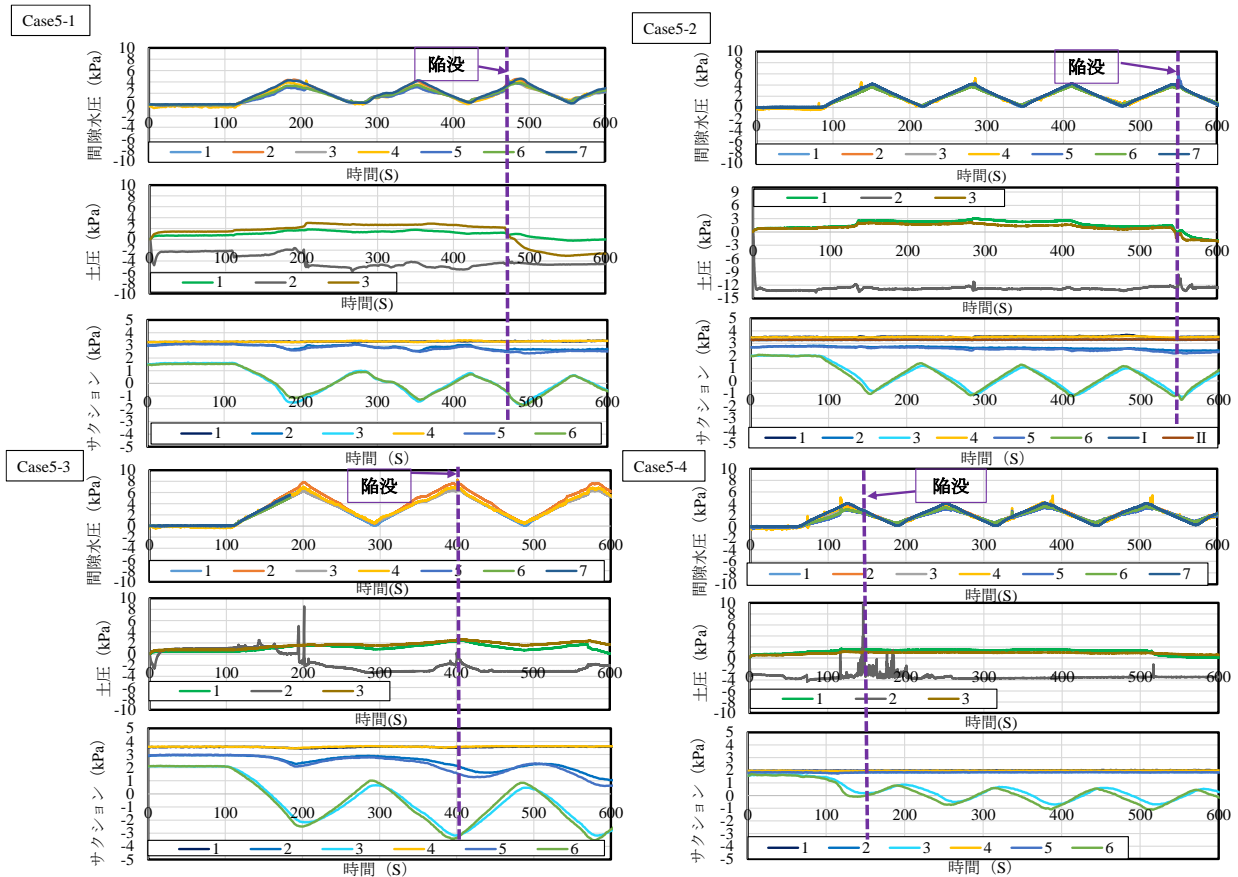


図-5.1 間隙水圧・土圧・サクシヨンの経時的変動と陥没のタイミングとの関係性 (数字は計測器番号 位置は図-2.1)

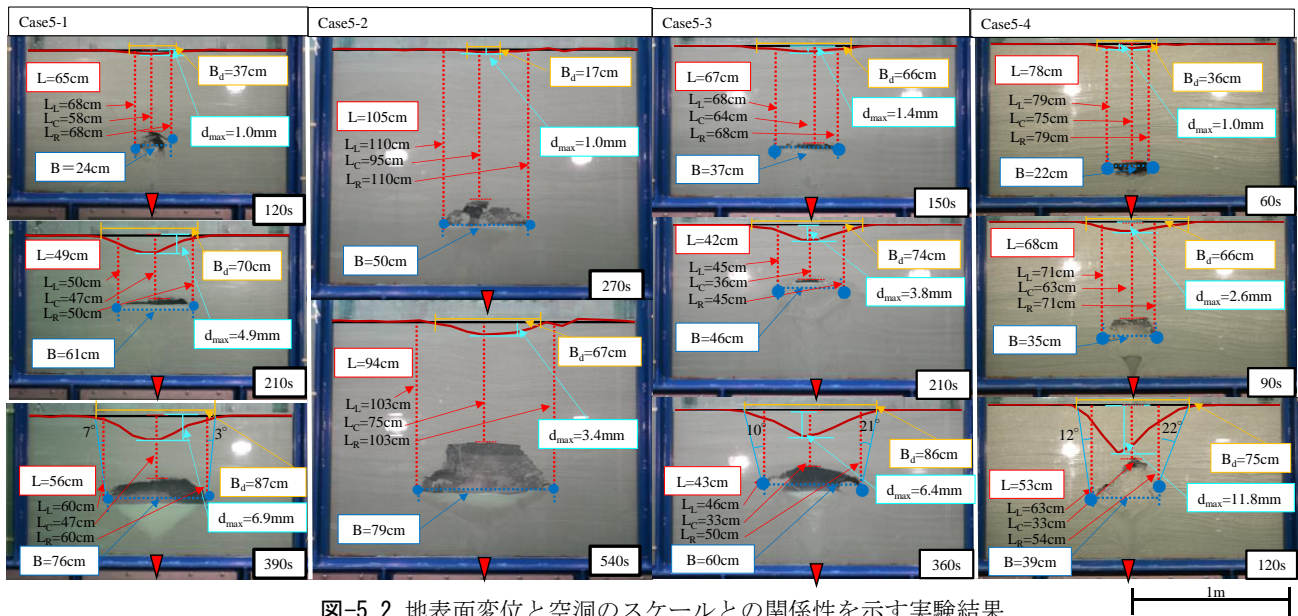


図-5.2 地表面変位と空洞のスケールとの関係性を示す実験結果

地盤高によって空洞が地表面変位に及ぼす影響範囲が変化することが分かる。地盤高 1m の 3 ケースについて、3 枚目の写真中に空洞の側方両端と地表面変位の両端を結ぶ直線が鉛直方向となす角度を示す。ここから空洞が発達した時点では地表面変位の範囲の端から鉛直下方向に対して 20° 程度以下の角度で内側に向かう範囲内に空洞が

存在することが分かる。さらに、地表面変位の最大値 d_{max} が吸い出し口のほぼ直上でみられ、地表面変位分布から空洞の平面的な位置を推測できると考えられる。

各ケースの時刻ごとの結果から、 d_{max} と空洞の状態を比較すると空洞の幅 B が大きく、空洞の深さ L が浅いほど d_{max} が大きいことが分かる。例えば、Case5-3 では 210s か

ら 360s にかけて、B の増大により d_{max} が 2.6mm ほど増加していることが分かる。一方で Case5-1 (390s) と Case5-2 (540s) を比較すると、B はほぼ同じであるが、地盤高が低い Case5-1 (390s) の方が空洞の天井の深さが浅く d_{max} が大きいことが分かる。さらに Case2 の 270 秒後の結果から、地表面下 1m に幅 50cm 程度の空洞が形成された場合でも、地表面変位は 1mm 以下に留まり現地では検出が難しいことが分かる。ここで陥没に至る過程で d_{max} が大きく変化した各時刻について B/L と d_{max} の関係をプロットした結果を図-5.3 に示す。サクシオンが異なる砂ごとに地盤高及び水位変動幅によらず d_{max} と B/L に高い相関があること分かる。サクシオンが低い前島産の海砂では B/L が小さい段階で大きな変位が現れ陥没に至っており、サクシオンの違いによる地盤の空洞の保持力の差が d_{max} と B/L の相関関係に影響していることが分かる。図-5.1 に陥没の時点を示す紫の破線で示す。全ケースとも水位が上昇しサクシオンが低下したタイミングで陥没が発生していることが分かり、前章で得られた結果とも整合していることが分かる。また、図-5.3 から空洞のスケールと陥没時点の関係性に着目すると、本実験では B/L が 1.0 に近づくと水位上昇によりサクシオンが低下した際に陥没のリスクが高まる傾向が見られる。図-5.4 に陥没直後の各ケースの地盤上面の写真を示す。全ケースとも陥没した穴の幅は図-5.2 の最終時点の写真の B_d より小さいことが分かる。以上から大蔵海岸などの養浜砂の人工海岸においては地表面変位から空洞陥没のタイミングや規模を予測しうることを示唆された。舗装の影響については、今後の更なる検討が必要である。

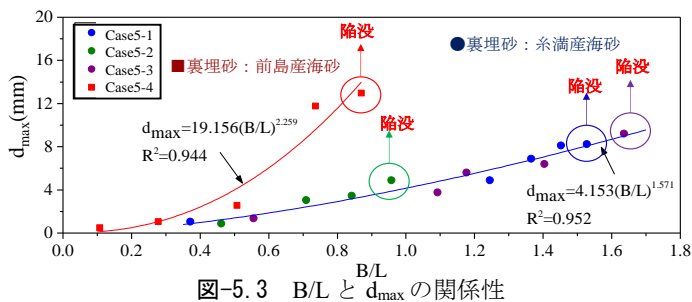


図-5.3 B/L と d_{max} の関係性

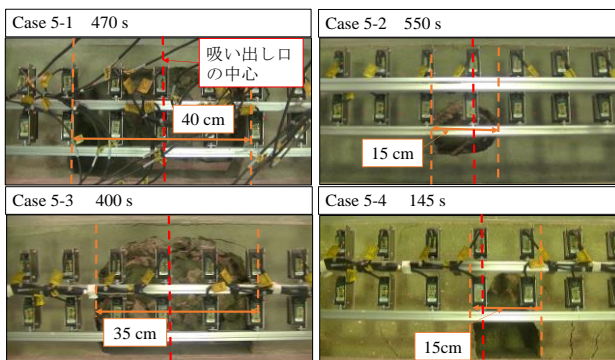


図-5.4 初期陥没時の天端の写真

6. フィルター材による吸い出し抑止法

6.1 二層構造のフィルター層による吸い出し抑止法の概念

1. 序論に記したとおり、吸い出し抑止のためのフィルター材は①裏埋砂の目詰まり機能、②捨石に対する安定性、③防砂シートの損傷リスクの低減の 3 つの機能を満たす必要がある⁹⁾¹⁰⁾。既往の系統的な研究⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾により、水面変動、地震荷重、交通荷重などの動的外力下で、二層構造の砕石からなるフィルター層が十分な力学的安定性及び吸い出し抑止効果を発揮することが実証されている。図-6.1 に二層構造のフィルター層の概念図を示す。上層のフィルター層は裏埋砂を間隙中に目詰まりさせることにより、吸い出しを抑止させるためのものである。一方で下層は捨石に対して安定性を保つためのものであり、上層のフィルター材と捨石の中間的な粒度のフィルターを用いる。従来の構造(図-6.1 参照)のように捨石の上に防砂シートを直接敷設する場合と比較して、防砂シートの損傷リスクが大幅に低減されることが既往研究により示されている⁹⁾。また、フィルター材は変形追随性を有し、地震動や交通荷重などの動的外力に対しても柔軟に適応しつつ、持続的に目詰まり効果を発揮することが可能である。

本章では以下のとおり主に上層のフィルター材の適切な粒度条件を体系的に検討し、二層のフィルター層の設計指針を提示する。二層のフィルター材の設計上の余裕を考慮した場合、裏埋砂との中央粒径比(フィルター材の中央粒径 D_{F50} /裏埋砂の中央粒径 D_{S50})が大きい条件下で、吸い出しを抑止できる粒度の砕石が上層のフィルター材に適する。また、ダムへの吸い出しや海底砂の洗堀の抑止を対象としたフィルター材に関する既往研究¹⁴⁾¹⁵⁾ではフィルター材や砂の均等係数の違いにより、同じ中央粒径比の下でも吸い出し抑止効果が大きく異なることが示されている。以上を踏まえ、本研究ではフィルター材と砂の均等係数を変化させた系統的な要素試験により、フィルター材の適切な粒度条件を求め、既往の国際基準¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾に照らしてその有効性を検討する。さらに、大型吸い出し可視化実

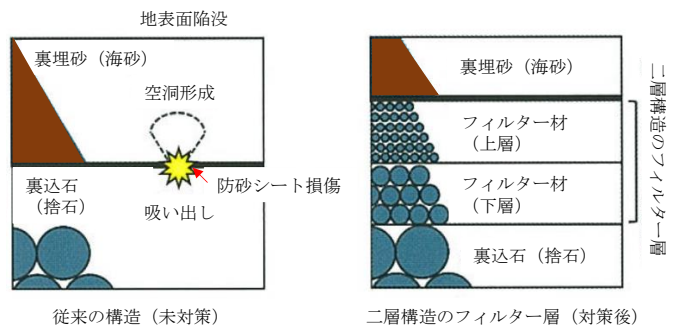


図-6.1 二層構造のフィルター層の概念図

験により、様々な水理外力下において適切な粒度のフィルター材の吸い出し抑止効果について検証を行う。最後に検討結果を基に二層のフィルター層の設計指針を提示する。

6.2 フィルター材の吸い出し抑止効果に関する系統的な要素試験

(1) 試験の概要

小型振動台による目詰まり試験を裏埋砂の均等係数（砂の60%粒径 D_{s60} / 砂の10%粒径 D_{s10} ）を変化させた条件下で下記のとおり行った。当該要素試験装置の概略図を図-6.2に示す。試験装置は円筒型容器、受け皿、振動台で構成される。

要素試験に用いた砂の粒径加積曲線と概要をそれぞれ図-6.3（実線）、表-6.1に示す。上層試料は裏埋砂の均等係数と種類により3グループに分類した。グループAは均等係数が3.0未満の飯豊珪砂である。グループBは均等係数が3.0以上の飯豊珪砂の混合砂である。飯豊珪砂は粒度ごとに4号（粒径の大きい順に4号、5号、6号、7号）に分類される。グループAの砂は1種類または2種類の飯豊珪砂を異なる比率で混合させることにより作成した。一方でグループBの砂は3種類もしくは4種類の飯豊珪砂を表-6.1に示す配合率で混合することにより作成した。

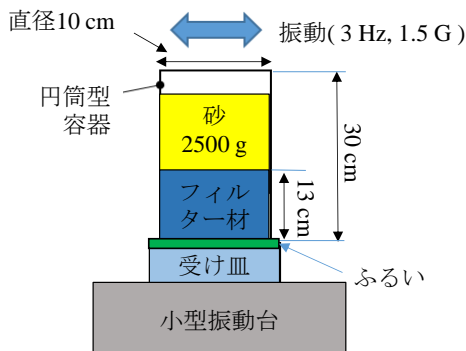


図-6.2 要素試験装置の概略図

フィルター材との中央粒径比を細かく変化させるため、各グループとも中央粒径が段階的に異なる多種類の混合砂を用いた。なおグループBのB-1-a、B-1-b及びB-2-a、B-2-bについては、それぞれ各号の珪砂の配合率は同じであるが、使用した珪砂のロットの違いにより粒度が異なるものである。グループCは前章までの実験で用いた前島産海砂（C-1）と糸満産海砂（C-2）であり、砂粒子の形状や貝殻の有無が吸い出しに及ぼす影響を検討するためのものである。飯豊珪砂の砂粒子が丸みを帯びているのに対して、これらの海砂の砂粒子は比較的いびつな形状であり、貝殻も含む。本試験に用いたフィルター材の粒径加積曲線と概要をそれぞれ図-6.4（実線）、表-6.2に示す。フィルター材についても均等係数（フィルター材の60%粒径 D_{F60} / フィルター材の10%粒径 D_{F10} ）についてグループ分けを行った。グループIは均等係数が3.0未満のフィルター材である。グループIIは均等係数が3.0以上のものである。材料は白碎石、緑色碎石、岩ずりの3種類を用いた。粒度

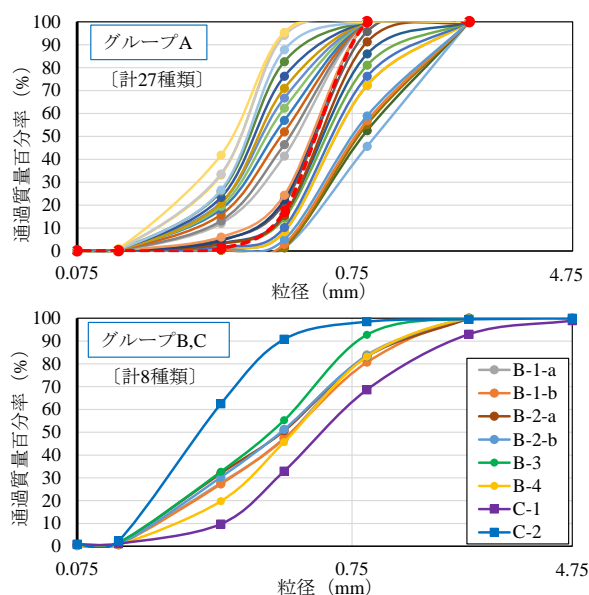


図-6.3 実験用砂の粒径加積曲線

表-6.1 実験用砂の分類及び概要

グループ	砂	中央粒径(mm)	均等係数	飯豊珪砂の配合率(グループA, グループB) (%)			
				4号	5号	6号	7号
A	27種類 (飯豊珪砂)	0.277-0.9412	1.6-2.6	1種類もしくは2種類の混合砂 (配合率は段階的に変化)			
A	飯豊珪砂5号*	0.593	1.860	0	100	0	0
B	B-1-a (飯豊珪砂)	0.459	3.724	50	5	25	20
B	B-1-b (飯豊珪砂)	0.458	3.754	50	5	25	20
B	B-2-a (飯豊珪砂)	0.418	3.736	50	0	25	25
B	B-2-b (飯豊珪砂)	0.414	3.568	50	0	25	25
B	B-3 (飯豊珪砂)	0.384	3.297	25	25	25	25
B	B-4 (飯豊珪砂)	0.473	3.321	40	25	25	10
C	C-1 (前島産海砂)	0.629	2.963				
C	C-2 (糸満産海砂)	0.220	1.963				

* 吸い出し抑止効果検証のための大型吸い出し可視化試験用の砂

の範囲は現場の捨石と裏埋砂の粒度を考慮し、グループ I では 5-13mm, 5-20mm, 5-40mm の 3 パターン、グループ II では 2.5-13mm, 2.5-20mm, 2.5-40mm の 3 パターンとした。このうち 2.5-20mm, 2.5-40mm については裏埋砂との中央粒径比を細かく変化させるため、中央粒径が異なる数種類のフィルター材を用いた。

試験は以下の手順で行った。まず、高さ 13cm のフィルター材を投入した。次に砂を高さが十数 cm となるように

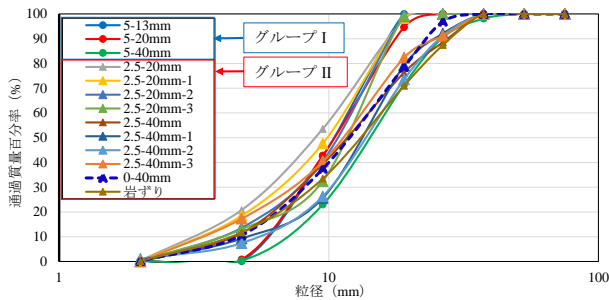


図-6.4 実験用フィルターの粒径加積曲線

表-6.2 実験用フィルターの分類及び概要

フィルター材	グループ	中央粒径 (mm)	均等係数
緑色砕石 (5-13mm)	I	10.743	2.117
白砕石 (5-20mm)	I	10.812	2.187
白砕石 (5-40mm)	I	14.799	2.475
白砕石 (2.5-20mm)	II	8.982	3.286
白砕石 (2.5-20mm-1)	II	9.936	3.392
白砕石 (2.5-20mm-2)	II	11.026	3.149
白砕石 (2.5-20mm-3)	II	11.600	3.266
白砕石 (2.5-40mm)	II	12.239	3.369
白砕石 (2.5-40mm-1)	II	12.239	3.145
白砕石 (2.5-40mm-2)	II	14.263	3.013
白砕石 (2.5-40mm-3)	II	11.672	3.882
白砕石 (0-40mm) *	II	12.402	3.208
岩ずり	II	13.691	3.740

* 吸い出し抑止のための大型吸い出し可視化試験用の砂

2500g 分投入した。2016 年の熊本地震では地震動による地盤の吸い出し及び陥没の事例があることを踏まえ、レベル 1 地震動 (震度 5 弱) に相当する加速度約 0.15G, 振動数 3Hz の振動を負荷した。振動の継続時間は実際の地震動よりも十分に長い 10 分間とした。加振後にフィルター材を通過し受け皿にたまった砂の重量を計測し、投入した砂の重量 2500g に対する百分率の値 (以下通過率) から各条件におけるフィルター材の目詰まり効果を評価した。試験は上述の上層試料と下層試料の組み合わせを変化させ、合計で 100 ケース以上実施した。

(2) 実験結果及び考察

図-6.5 に要素試験の結果をフィルター材のグループごとに示す。中央粒径比 (横軸) と通過率 (縦軸) の関係を砂のグループごとに色分けしてプロットしている。全体的に均等係数が小さいグループ A (青) の砂の方が均等係数が大きいグループ B (緑) の砂や貝殻まじりのグループ C (赤) の砂よりも吸い出されやすいことが分かる。例えば、5-20mm の砕石の結果ではグループ A の砂は中央粒径比 20 未満の場合においても通過率が 20% 近くまで達するケースが見られる一方で均等係数が大きいグループ B の砂では中央粒径比約 30 のケースでも通過率が 5% 前後となっている。また、グループ C の結果を見ると C-2 (糸満産海砂) の均等係数は 1.963 でありグループ A の砂とほぼ同程度であるが、通過率は全体的に低く抑えられている。海砂に含まれる貝殻や比較的いびつな粒の形状が吸い出し抑止効果を高めていることが考えられる。したがって、均等係数が小さく丸みを帯びた砂が吸い出しの影響を受けやすいことが分かる。

グループ A の結果からフィルター材の均等係数ごとに吸い出し限界を検討する。均等係数が 3 未満のグループ

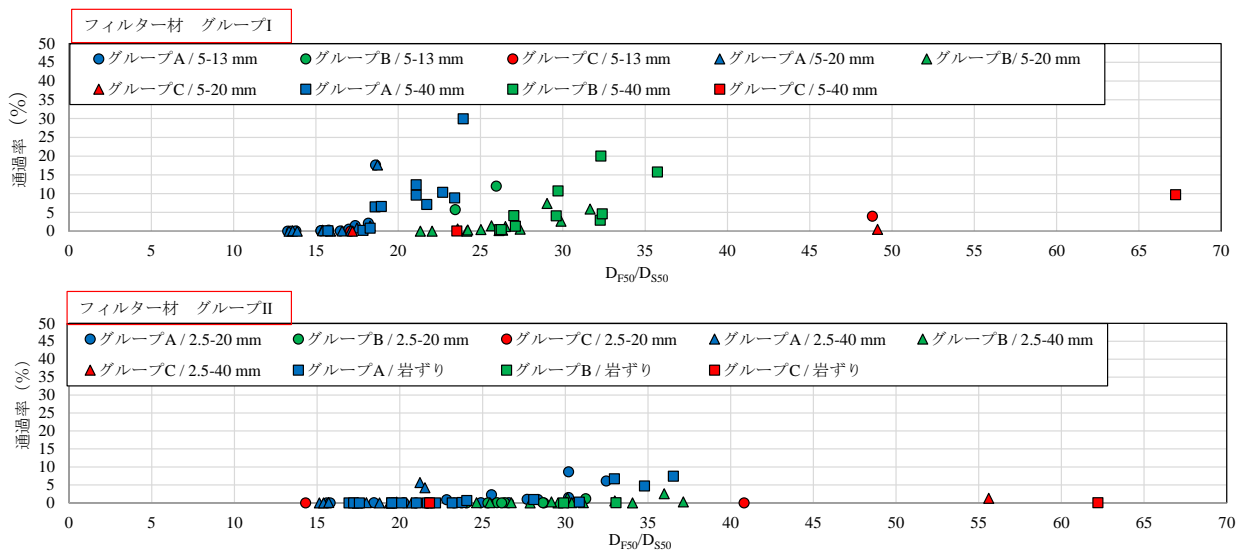


図-6.5 要素試験結果 (中央粒径比と通過率の相関図)

I の碎石では中央粒径比 17~18 を境に通過率が一気に大きく上昇している。一方で均等係数が 3 を超えるグループ II では中央粒径比 20 以下では通過率は実質的に 0% であり吸い出しが生じていないことが分かる。以上から、均等係数 3.0 以上のフィルター材がより高い中央粒径比まで吸い出し抑止効果を維持できることが分かる。

次にグループ II のフィルター材を用いた結果から裏埋砂の均等係数が吸い出し限界となる中央粒径比に及ぼす影響について検討する。上述の実験結果より、均等係数が 3.0 以上のフィルター材ではすべての砂に対して中央粒径比 20 以下で吸い出しが抑止されると考えられる。一方で均等係数が 3.0 以上のグループ B の結果では中央粒径比 25 程度まで通過率が実質的に 0 であり吸い出しが抑止されていることが分かる。以上から裏埋砂の均等係数が大きい場合には中央粒径比を引き上げ余裕のある設計を行うことができると考えられる。

(3) フィルター材の国際基準との比較

表-6.3 にフィルター材に関する既往の国際基準を示す。これらの既往の基準はダムへの吸い出しや海底地盤の洗堀を防止するためのフィルター基準である。港湾における裏埋砂の吸い出し抑止のためのフィルター材には 1. 序論で記したとおり様々な動的外力下における吸い出し抑止機能を安定的に発揮することが要求される。以上を踏まえ、本研究で得られた知見と既往の国際基準との比較を行う。

表-6.3 に示す国際基準の中には中央粒径比 (D_{F50}/D_{S50}) の他にフィルター材の 15% 粒径と砂の 85% 粒径の比 (D_{F15}/D_{S85}) が用いられているものがある¹³⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。国際基準との整合性を確認するため、要素試験結果を D_{F15}/D_{S85} で整理した結果を図-6.6 に示す。フィルター材の粒度によらず $D_{F15}/D_{S85} \leq 4-5$ で通過率がほぼ 0 となっており、港

湾施設の海底砂洗堀抑止のための既往の国際基準¹⁶⁾とも高い整合性があることが分かる。また、グループ I とグループ II のフィルター材の結果を比較すると同じ D_{F15}/D_{S85} に対する通過率がグループ II のフィルター材を用いた場合の方が低い傾向が見られる。特にグループ I のフィルター材では $D_{F15}/D_{S85} \leq 5$ の場合でも通過率が 5% を上回るケースがあるのに対して、グループ II のフィルター材では同粒度条件下で通過率が実質的に 0 となっていることが分かる。以上から均等係数が 3 以上のフィルター材は D_{F15}/D_{S85} を基に比較した場合でも高い吸い出し抑止能力があることが分かる。

Cistin と Ziems ら¹⁴⁾¹⁵⁾が作成したフィルター材と砂の均等係数と吸い出し限界の中央粒径比の関係図においても、

表-6.3 フィルター材設計に関する国際基準

敷設目的	基準
ダムの浸透流による内部洗堀の防止	<ul style="list-style-type: none"> • U.S. Bureau of Reclamation (1998) $D_{F15}/D_{S85} \leq 5, 5 \leq D_{F15}/D_{S15}$ • Cistin and Ziem(1968) <p>U_{cF}: フィルター材の均等係数 U_{cS}: 砂の均等係数</p>
港湾施設の波や浸透流の作用による海底砂洗堀の抑止	<ul style="list-style-type: none"> • The U.S. Army Corps of Engineers (1995) $D_{F15}/D_{S85} \leq 4 \text{ to } 5, D_{F15}/D_{S15} \geq 4 \text{ to } 5$ • Cistin and Ziem(1968) → 上図

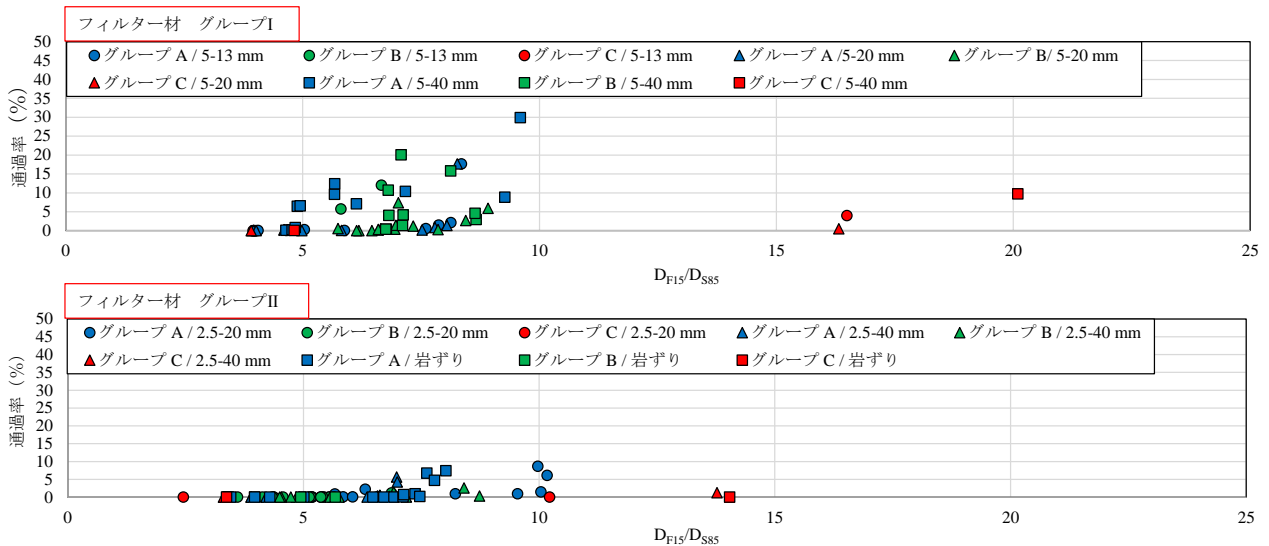


図-6.6 要素試験結果 (D_{F15}/D_{S85} と通過率の相関図)

本研究で検討したフィルター材と砂の均等係数の範囲ではそれらが高いほど吸い出し限界が高くなっており、要素試験の結果と整合している。しかし、この関係図では、フィルター材の均等係数が3程度の場合、均等係数が3.0以下のダム の堤体砂に対する吸い出し限界の中央粒径比は10から15程度となっている。これは要素試験結果から得られた中央粒径比よりも小さい。この国際基準と要素試験結果との差異は対象とする水理外力の大きさが異なるためであると考えられる。具体的には表-6.3中の関係図はダムの吸い出し抑止を主な目的としており、動水勾配が9まで対応できるように作成されている¹⁴⁾¹⁵⁾。その一方で護岸・岸壁の背後に作用する動水勾配は現実的な波浪・潮位条件を考慮すると最大でも2程度である(高波浪時を想定した水理外力下での吸い出し抑止効果の検証結果については次節で説明する)。

DF15/DS15に関する基準はフィルター層内の透水性を確保することを目的としている。特にダムにフィルター材を適用する場合にはダム内外の水頭差による浸透流を通す必要があり、透水性に関する基準が重要であると考えられる。一方、裏埋砂の吸い出し抑止には高い透水性は必要なく、むしろ透水性の低いフィルター材の方がフィルター層を通じて地盤に伝達する水理外力の低減効果が大きいいため、吸い出し抑止に有効であると考えられる。

6.3 水理外力下におけるフィルター材の吸い出し抑止効果に関する検証実験

(1) 実験概要

前章の検討結果を踏まえ均等係数が3.0以上のフィルター材を中央粒径比20程度で設置した場合、水理外力の連

表-6.4 吸い出し抑止検証実験の水理外力の概要

外力の種類	振幅 (cm)	初期水位	昇降機速度(cm/min)	周期(s)	載荷回数(回)	継続時間 (分)
外力1	90 (Level A)*	Level A	80	—	10	—
外力2	90 (Level A)	Level C	—	40	—	10
外力3	90 (Level C)	Level A	—	—	10	—

*(): 最高水位 図-2.1参照

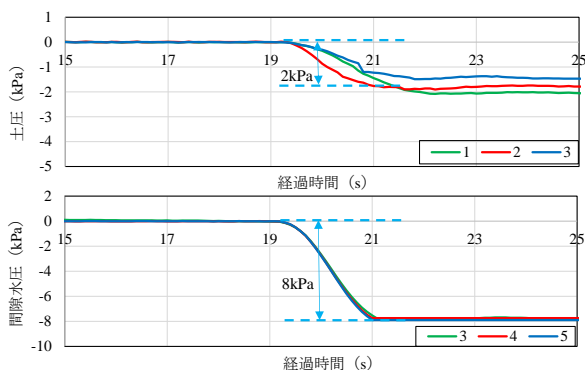


図-6.7 外力3による土圧及び間隙水圧変動
(数字は計測器番号 位置は図-2.1)

続作用下においても吸い出しを抑止できることを検証するため、以下の通り実験を行った。大型吸い出し可視化試験装置に0-40mm(均等係数3.208)に粒度調整したフィルター材(物性および粒度分布は表-6.2, 図-6.4の青色点線)を上層部(位置は図-2.1)に敷設した。下層部(位置は図-2.1)には40-100mmのフィルター材を敷設した。吸い出し口の幅は5cmとした。要素試験で得られた知見を踏まえ、吸い出しが生じやすい厳しい条件下でフィルター材の効果を検証するため裏埋砂にはグループAに分類される飯豊珪砂5号(物性および粒度分布は表-6.1, 図-6.3の赤色点線)を用いた。1層目のフィルター材と裏埋砂の中央粒径比は均等係数が3以上の要素試験結果を踏まえ、約20(20.9)に設定した。表-6.4に示す条件で3種類の水理外力を連続的に負荷した。

(2) フィルター材近傍の水理外力の再現

外力3の引き波1回分のch.2の土圧とch.4の水圧変動を図-6.7に示す。ch.2の土圧は2秒間で約2kPa変動していることが分かる。この時点での地表面変位は見られなかったことと引き波後の水位上昇時に土圧の値が元の値に戻ったことから、実質的に間隙水圧の変動分と考えることができる。ケーソン背面の地盤内の間隙水圧変動の観測記録には、有義波高6.78mの高波浪時に福井港で計測された結果²⁰⁾があるが、この現地観測記録と比較しても大きな間隙水圧変動がフィルター材天端近傍の地盤に加わっていることが分かる。さらに上層と下層のフィルター材の境界に位置するch.4で得られた間隙水圧の測定結果から、水位低下開始後の2秒間で8kPaの間隙水圧変動が起こっていることが分かる。土圧計(ch.2)との最大水圧差は6kPaとなり、2地点間の距離(0.4m)を考慮するとフィルター材と裏埋砂の境界付近で最大動水勾配が1.5となっていることが分かる。これは上述の福井港の観測結果について、高波浪時の堤内外の間隙水圧の観測記録とケーソン幅から推定される動水勾配の値(約0.25)よりも大きい。間隙水圧の時間的変動及びフィルター材近傍の動水勾配の比較から、外力3では高波浪時を想定した強い水理外力が地盤内に再現できていることが分かる。

(3) 実験結果及び考察

図-6.8に3種類の外力を加える前後の地盤前面の写真を示す。ここから地盤内に空洞形成は見られず、フィルター材内部の砂の分布も外力を負荷する前とほぼ変わらないことが分かる。図-6.9に各外力による地盤天端の変位の空間分布を示す。この図から3種類の外力ともフィルター材の上に位置する2番~8番の側点で変位がほぼ0で

あることが分かる。以上から比較的厳しい水理外力が連続的に作用した場合においても均等係数 3.0 以上のフィルター材を中央粒径比 20 で設置した場合、どのような粒度の砂に対しても吸い出しが抑止されることが実証された。なお、フィルター材と裏埋砂の均等係数ともに 3.0 以上の場合には、中央粒径比が 25 以下で吸い出しが抑止できることが同様の検証実験により示されている¹²⁾。

6.4 二層構造のフィルター層の設計指針

6.2, 6.3 に記した知見に基づき得られたフィルター材の設計指針を表-6.5 に示す。フィルター材には一定以上の配合、具体的には均等係数 3.0 以上の砕石または岩ずりを用いることが重要である。例えば C40 砕石は粒度の幅が広く、上層のフィルター材に適すると考えられる。裏埋砂との中央粒径比が 20 以下で任意の裏埋砂に対して吸い出

しを十分に抑止することができる。また、裏埋砂の均等係数が 3 以上の場合には中央粒径比を 25 まで引き上げることが可能である。本報告に記した要素試験ではフィルター層厚が 13cm の条件下においても、十分な吸い出し抑止効果が示されていることから、上層のフィルター層厚を 30cm 以上に保った場合、吸い出しに対して十分な安全性を確保するとともに、フィルター材の天端付近で吸い出しを抑止できると考えられる。下層のフィルター材については、表-6.5 に示すとおり上層のフィルター材の最大粒径と近接するフィルター材を用いることで力学的安定性も確保されることが分かっている¹⁰⁾。

7. 結論

本研究では地盤条件及び水理外力条件を変化させた大型吸い出し可視化実験により、吸い出しを現地スケールで再現し、地盤内に働くサクシジョンの高さや水位変動のタイプが一連の空洞形成・陥没過程に及ぼす影響を明らかにした。また、地表面変位から空洞の陥没を予知する技術の開発に向け、空洞のスケールと地表面変位の関係性について上述の大型吸い出し可視化実験の各種計測結果を基に示した。さらに、フィルター材による吸い出し抑止法とその設計指針について、二層構造のフィルター

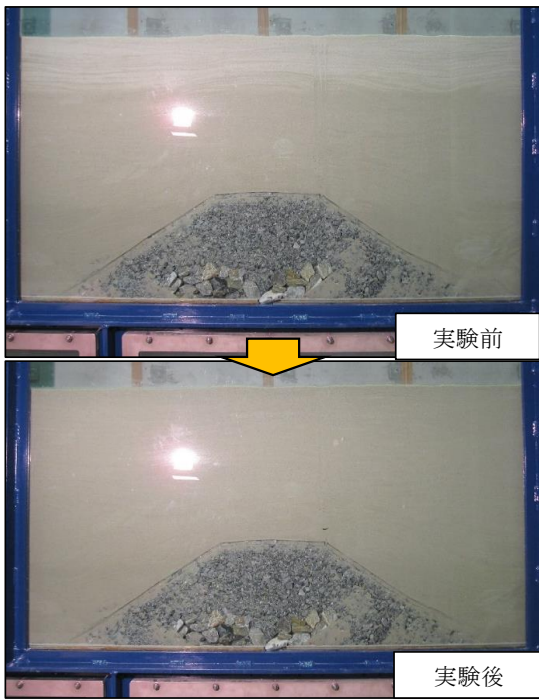


図-6.8 水理外力負荷前後の地盤前面の写真

表-6.5 二層構造のフィルター層の設計指針

フィルター層	材料	粒度基準等
上層	・砕石 ・岩ずり	粒度基準 $3 \leq U_{CF}, D_{F50}/D_{S50} \leq 20$ ($3 \leq U_{CS}, 3 \leq U_{CS}, D_{F50}/D_{S50} \leq 25$) 粒度の範囲の例 0-40mm (ex C40 砕石) D_{F50} : フィルター材の中央粒径 D_{S50} : 砂の中央粒径 U_{CF} : フィルター材の均等係数 U_{CS} : 砂の均等係数
下層	・砕石 ・岩ずり	上層の粒度範囲に対する粒度選定の例 上層 0-40mm → 下層 40-70mm (上層の最大粒径と近接)

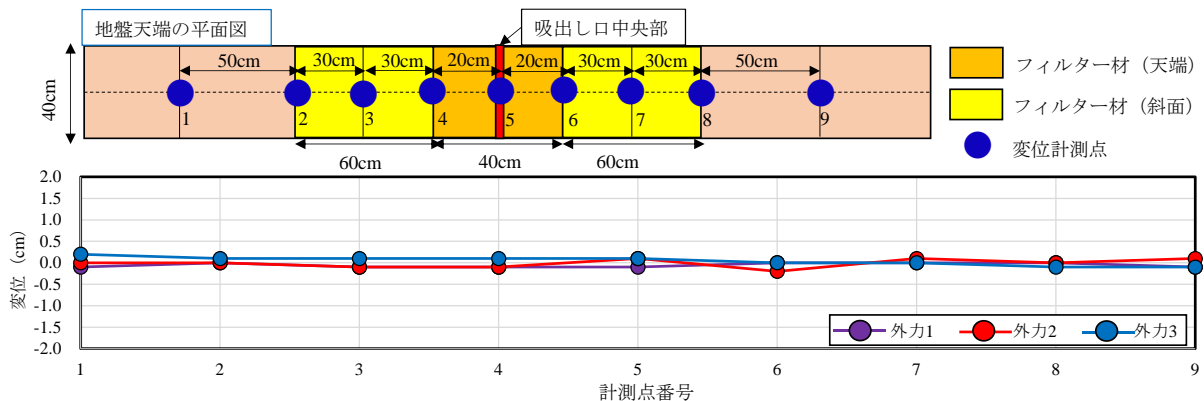


図-6.9 各水理外力による地表面変位の分布図

層の実用性に関する系統的な要素試験と一連の大型吸出し可視化実験により検討した。主要な知見は以下の通りまとめられる。

- 1) 地盤内に働くサクシジョンの大きさが空洞形成・陥没過程に影響する。サクシジョンは空洞保持力として作用するため、サクシジョンが高い地盤では幅広い空洞が比較的長い時間をかけて形成される。そのため、サクシジョンが高い条件下では陥没のタイミングが遅い一方で陥没の規模が拡大する。
- 2) 水理外力の作用方向が吸い出しによる空洞の形成・陥没過程に影響する。水平方向に一次的な水位変動では吸い出し口に対して左右対称に空洞が拡大するが、一方向から波を入射させたケースでは波が作用する方向に空洞が拡大する。風波やうねりの影響が卓越する護岸背後の地盤では吸い出し口の汀線側で比較的広く陥没する可能性がある。
- 3) 地下水位の上昇に伴う地盤内のサクシジョンの低下が空洞の陥没において重要な役割を果たしている。
- 4) 空洞がある程度発達した段階では空洞の直上に地表面変位が現れる。また、サクシジョンが異なる裏埋砂ごとに地盤内の空洞の規模や深さと地表面変位の間に密接な相関関係があり、本実験で用いた海砂について空洞の B/L と地表面最大変位量 d_{max} の相関式を得た。さらに、この空洞と地表面変位の相関式は地盤高や水位変動幅によらず成り立つことを示した。
- 5) 均等係数が高いフィルター材ほど吸い出し抑止効果が高く、均等係数 (D_{F60}/D_{F10}) が 3.0 以上のフィルター材を中央粒径比 (D_{F50}/D_{S50}) 20 以下で設置した場合、裏埋砂の粒度に拘わらず比較的強い水理外力下においても十分な吸い出し抑止効果を発揮する。

上述の結論の内、4)の空洞発達と地表面変位の関係性に関する知見は、人工海浜等に直接適用しうるものの、舗装などの影響については今後の課題といえる。一方、1)～3)の吸い出し・空洞形成・陥没メカニズム並びに5)のフィルター材による吸い出し抑止法に関する知見は、舗装の有無に関わらず有効である。以上より本研究では今後の港湾施設における吸い出し抑止対策にとって重要な知見が得られた。

あとがき

本報告では、地盤及び水理外力特性の双方を考慮した吸い出し・空洞形成・陥没メカニズムを明らかにし、フィルター材による吸い出し抑止法の有効性及び設計指針を示した。この際、波・流れなどの水の外力作用による吸い出しのみならず、地震作用による吸い出し・陥没発生が顕在化しており、多様な動的外力下で吸い出しを安定的に抑止

することが重要である。すなわち、液状化対策などで共通して用いられてきた固化材料では、動的外力及び変形下でクラックや亀裂が生じる懸念があるため、吸い出し対策には変形追従性が肝要となる。本報告で提示した二層構造のフィルター層は上述の変形追従性と共に吸い出し抑止機能を満足しており、港湾施設の吸い出し対策として幅広い活用が期待される。

謝辞 本研究の遂行にあたり、国土交通省港湾局及び内閣府沖縄総合事務局のご協力を得ている。また、本報告に記載した実験の実施において、元港湾空港技術研究所動土質研究グループ研究官の小林孝彰氏及び元港湾空港技術研究所動土質研究グループ研究員の渡辺啓太氏並びに後藤翔矢氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

(2020年11月2日受付)

参考文献

- 1) 土木学会海岸工学委員会(2002): 大蔵海岸陥没事故調査委員会報告書
- 2) Sassa, S., Li, F. and Sekiguchi, H. (2005): Response of saturated/unsaturated gravelly sand to tidal fluctuations, *Geotechnical Special publication*, No.143, American Society of Civil Engineers, pp.174-186.
- 3) Sassa, S., Watabe, Y. (2007): Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, *Journal of Geophysical Research*, 112(F1) F01003. <https://doi.org/10.1029/2006JF000575>.
- 4) Bear, J. (1979): *Hydraulic of groundwater*, New York, NY: McGraw-Hill.
- 5) 高橋重雄, 鈴木高二朗, 徳淵克正, 下迫健一郎, 善功企(1996): 防波護岸の吸い出し災害のメカニズムに関する水理模型実験, 海岸工学論文集, 43 巻, pp.666-670.
- 6) 中村友昭, 許東秀, 水谷法美(2006): 捨石護岸背後の埋立土砂の吸い出し機構, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.150-162.
- 7) Nakamura, T., Hur, D. S., Mizutani, N. (2008): Mechanism of Backfilling Sand Discharge from a Gap under Vertical Revetment, *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 134(3), pp. 178 -186.
- 8) Hur, D. S., Nakamura, T., Mizutani, N. (2007): Sand suction mechanism in artificial beach composed of rubble mound breakwater and reclaimed sand sea, *Ocean engineering*, 34, pp.1104-1119.

- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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, Vol.75, No.2, pp.I_937-I_942.
- 12) 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.
- 13) U.S. Bureau of Reclamation(1998): Design of Small Dams
- 14) Cistin, J. (1968): Konstrukce a stavba filtru systpanych hrazi. VVHU Brno
- 15) Ziems, J. (1968): Ein Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. Dissertation TU Dresden
- 16) U.S. Army Corps of Engineers(1995): Design of Coastal Revetments, Seawall, and Bulkheads
- 17) Fannin, J. (2008): Karl Terzaghi: from theory to practice in Geotechnical filter design, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3), American Society of Civil Engineers, pp.267-276.
- 18) Indraratna, B., Raut, A. K., Khabbaz, H. (2007): Constriction-based retention criterion for granular filter design, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(3), American Society of Civil Engineers, pp.266-276.
- 19) Shigemura, T., Yokonuma, M., Hayashi, K. and Fujima, K. (1998): Propagation property of dynamic pressure through reclaimed sand behind caisson-type seawalls, *Ports '98. ASCE*, New York, pp.571-580.
- 20) 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 編, pp.36-39.

港湾空港技術研究所報告 第59巻 第3号

2020. 12

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. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2020) 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。

CONTENTS

1. Processes of internal erosion, cavity formation and collapse under various soil and hydraulic conditions with their countermeasure using geotechnical filter
Kenta KUDAI • Shinji SASSA • Soonbo YANG • Kouhei TAKADA • Kojiro SUZUKI..... 1
2. Development and application of integrated platform for predicting and evaluating coastal benthic ecology-geoenvironmental dynamics
Soonbo YANG • Shinji SASSA • Kenta KUDAI • Kouhei TAKADA.....21