

# 袋型根固材を用いた着床式洋上風力発電設備の洗掘対策工に関する実験的研究

高橋 武志\*・鈴木 高二朗\*\*・関谷 勇太\*\*\*・青田 徹\*\*\*\*・小林 航\*\*\*\*\*・鈴木 英樹\*\*\*・錦織 和紀郎\*\*\*\*・松田 節男\*\*\*\*・久保田 真一\*\*\*\*・土橋 和敬\*\*\*\*\*・下迫 健一郎\*\*\*\*\*・田所 篤博\*\*\*\*\*・福永 勇介\*\*\*\*\*・迫 大介\*\*\*\*\*・野村 大輔\*\*\*\*\*

## 要 旨

着床式洋上風力発電施設の基礎では、波浪や流れの作用によって洗掘が進行する。洗掘の進行は基礎の安定性の低下や通信ケーブル及びその防護管の変状等を引き起こすため、洗掘対策工を設ける必要がある。洋上風力発電が普及している欧州では石材を敷設する対策工法が発展してきたが、敷設する過程で石材が流出するなどの課題を抱えていた。そのため、国内では、洋上風力発電設備の洗掘対策工への袋型根固材の適用を目指した研究が進んできた。袋型根固材とは、合成繊維を使用した網袋の中に石材を充填したものであり、石材の敷設よりも施工性に優れている。

本研究の目的は、袋型根固材を用いた着床式洋上風力発電設備の洗掘対策工の設計手法を確立するため、袋型根固材を用いた洗掘対策工が発揮する洗掘抑制性能を多面的に評価することである。本研究では、大きく分けて3つの水理模型実験を実施した。まず、固定床実験によって袋型根固材の耐波浪・耐流れ安定性を検証し、袋型根固材の所要質量の推定方法を提案した。次に、移動床実験によって袋型根固材の敷設範囲・構造を検証し、最適な敷設範囲・構造の推定方法を提案した。最後に、より縮尺が大きい移動床実験によって袋型根固材及びフィルター層の洗掘抑制効果について検証し、フィルター層の諸元や設置範囲の推定方法、袋型根固材の沈下量の推定方法を提案した。以上の提案に基づき、袋型根固材を用いた着床式洋上風力発電設備の洗掘対策工の設計手法を取り纏めた。

**キーワード：**洋上風力発電設備，モノパイル，洗掘対策工，袋型根固材

- 
- \* 前 沿岸水工研究領域 耐波研究グループ 依頼研修員 (パシフィックコンサルタンツ株式会社)
  - \*\* 沿岸水工研究領域長
  - \*\*\* ナカダ産業株式会社
  - \*\*\*\* 株式会社 不動テトラ
  - \*\*\*\*\* 前田工織株式会社
  - \*\*\*\*\* 一般財団法人沿岸技術研究センター
  - \*\*\*\*\* 前 同上
- 〒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：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail: suzuki\_k@p.mpat.go.jp

## Experimental study on scour protection using rock bags for fixed offshore wind facilities

**Takeshi TAKAHASHI\* · Kojiro SUZUKI\*\* · Yuta SEKIYA\*\*\* · Totu AOTA\*\*\*\* · Wataru KOBAYASHI\*\*\*\*\* · Hideki SUZUKI\*\*\* · Wakiro NISHIGORI\*\*\*\* · Setuo MATUDA\*\*\*\* · Shinichi KUBOTA\*\*\*\* · Kazunori TSUCHIHASHI\*\*\*\*\* · Kenichiro SHIMOSAKO\*\*\*\*\* · Atsuhiko TADOKORO\*\*\*\*\* · Yusuke HUKUNAGA\*\*\*\*\* · Daisuke SAKO\*\*\*\*\* · Daisuke NOMURA\*\*\*\*\***

### Synopsis

In the foundation of fixed offshore wind turbine, scouring occurs due to waves and currents. Scouring can cause a decrease in the stability of the foundation and damage to the protective pipes, making it necessary to install countermeasures. In Europe, where offshore wind power generation is widespread, scour protection of stones has been developed for this purpose. However, this protection has issues such as the stones washing out during the installation process. In Japan, various researches have been conducted on the application of rock bags in offshore wind power facilities. Rock bags are made by filling a synthetic fiber net bag with stones and have better workability than the scour protection of stones.

The purpose of this study was to establish a design method for scour protection using rock bags for fixed offshore wind turbines and to evaluate the effect of scour protection from multiple perspectives. Three hydraulic model experiments were conducted in this study. Firstly, the wave and current stability of rock bags were verified through a fixed bed experiment, and a method for estimating the required amount of these materials was proposed. Secondly, the installation range and structure of the rock bags were verified through a moving bed experiment, and a method for estimating the optimal installation range and structure was proposed. Finally, a larger-scale moving bed experiment was conducted to verify the scour protection effect of the rock bags and filter layer. A method for estimating the filter layer properties and installation range and the amount of settlement of the rock bags was proposed based on the results of this experiment. Based on these proposals, a design method for scour protection using rock bags for fixed offshore wind turbines was compiled.

**Key Words:** offshore wind power facilities, monopile, scour protection, rock bags

- 
- \* Reserch Trainee, Formerly Maritime Structures Group, Coastal Hydraulic Engineering Department(Pacific Consultants,Co.,Ltd.)
  - \*\* Director of Coastal Hydraulic Engineering Department
  - \*\*\* NAKADA Insutrial Co.,Ltd.
  - \*\*\*\* Fudo Tetra Corporation
  - \*\*\*\*\* MAEDAKOSEN Co., Ltd.,
  - \*\*\*\*\* Coastal Development Institute of Technology
  - \*\*\*\*\* Former Coastal Development Institute of Technology  
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan      Port and Airport Research Institute  
Phone : +81-46-844-5043      Fax : +81-46-842-7846      E-mail : suzuki\_k@p.mpat.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	6
2. 水理模型実験 .....	7
2.1 実験の概要 .....	7
2.2 模型縮尺と相似則 .....	7
2.3 安定実験 .....	9
2.4 洗掘実験A .....	12
2.5 洗掘実験B .....	14
3. 袋型根固材の耐波浪・流れ安定性 .....	21
4. 袋型根固材の敷設範囲および敷設構造 .....	22
4.1 袋型根固材の敷設範囲 .....	22
4.2 袋型根固材の敷設構造 .....	22
5. 袋型根固材及びフィルター層の洗掘抑制機能 .....	24
5.1 無対策条件との最大洗掘深の比較 .....	24
5.2 袋型根固材およびフィルター材の機能 .....	25
5.3 袋型根固材及びフィルター材の機能の定量的評価手法の検討 .....	30
5.4 フィルター層の諸元・設置範囲の推定方法 .....	34
5.5 袋型根固材の沈下量の推定方法 .....	35
6. 袋型根固材を用いた洗掘対策工法の提案 .....	38
7. 終わりに .....	40
謝辞 .....	40
参考文献 .....	40

## 1. はじめに

近年、国内では洋上風力発電の導入を図る取り組みが活発化している。第6次エネルギー基本計画<sup>1)</sup>(令和3年10月)では、国内の洋上風力発電による総発電量を、2030年度までに10GWとすることを目標としており、今後も導入が拡大する見込みである。

洋上風力発電設備の既往施設の中で、最も多い構造形式はモノパイル式である。洋上風力発電設備は着床式、浮体式、セイリング式の3種類に分類され、着床式はさらに重力式、モノパイル式、ジャケット式に分類される。着床式は水深が浅い海域に適用される。WindEuropeの報告<sup>2)</sup>によると、洋上風力の既往施設(2017年時点)にはモノパイル式が最も多く採用されている(81.7%)。

しかし、モノパイル式(及び着床式一般)の欠点として、基礎部が洗掘を受けることが挙げられる。波浪・潮流などの外力がモノパイルの基礎部に作用することで洗掘が生じてしまい、洋上風力発電設備の基礎の安定性の低下や通信ケーブル及びその防護管の変状等をもたらす可能性がある。モノパイル周辺の洗掘のメカニズムについては、様々な研究で指摘されており、その定量的な評価も進んでいる。モノパイル際の最大洗掘量を推定する式が提案されてきた(Sumer et al. 1992, Sumer and Fredsøe 2002 など)。

洋上風力発電が普及している欧州では、モノパイルの基礎に石材を敷設する洗掘対策工が普及してきた。アーマー層とフィルター層の2層を設けることが多く、粒径の小さいフィルター層が底質の流出を抑制しつつ、粒径の大きいアーマー層がフィルター層の流出を抑制する。

しかし、石材の敷設は、施工性・経済性に課題がある。石材をモノパイル周囲に撒くようにして施工するが、設置位置の水深が深い場合に、撒いた石材の多くが流出してしまう。また、アーマー層に使用される石材は、安定性が確保できる程度に粒径が大きい必要があり、石材の潤沢な産地がない場合には遠方からの輸送費が発生する。

近年、国内では洋上風力発電設備の洗掘対策工への袋型根固材の適用を目指した研究が進みつつある。袋型根固材とは、合成繊維を使用した網袋の中に石材を充填したものである(写真-1.1)。中詰め材として一般的に用いられるものは、粒径50mm～200mm程度の砕石であるが、現地発生の玉石やコンクリート塊を用いることもある。袋型根固材の特徴は、海上からの投下によって敷設できるため、施工性に優れていることである。また、袋型根固材は高い可撓性を持つため、不規則な海底面とも馴染みが良い点も挙げられる。



写真-1.1 袋型根固材 (8t 型) の例

日本で初めて袋型根固材が用いられた事例は、1990年代頃の明石海峡大橋(日本、兵庫県)である。明石海峡大橋は、強潮流下の海上橋であり、施工直後にフィルター層が流出してしまうことを解決するために袋型根固材が開発された(高澤ら(1988)、北川ら(1991))。従来、袋型根固材は橋梁基礎部の洗掘を防ぐために用いられていたが、秋山ら(2001)は耐波安定性にも優れていることを示した。また、下迫ら(2004)は、袋型根固材による混成堤のマウンド被覆材の設計手法の確立を目的として、袋型根固材の耐波安定性と耐久性を検証している。

近年では、洋上風力発電設備を対象とした袋型根固材による洗掘対策工の設計方法を確立すべく、国内で様々な検証がなされている。稲垣ら(2020)は袋型根固工が洗掘抑制効果を発揮すること、また、稲垣ら(2021)は袋型根固材の設置範囲が $3D_p$ ( $D_p$ はモノパイル直径)程度あれば高い洗掘抑制効果を発揮することを示している。これらの研究においては、袋型根固材の底部にフィルター層を併用しているが、稲垣ら(2022)は袋型根固材が幾何学的開放フィルターとして機能する点に着目し、フィルター層を併用しない方法を検証している。片山ら(2021)もフィルター層を設けない方法で、袋型根固材の設置範囲は片側 $1.5D_p$ 程度(モノパイル中心から半径 $2D_p$ 程度)必要であることを示している。青木ら(2022)は、波浪だけでなく、波浪かつ流れを作用下の袋型根固材の洗掘抑制効果を検証している。

しかし、袋型根固材を用いた洋上風力発電設備風力の洗掘対策工の設計工法を体系的に構築するためには検証が不足している。袋型根固材を用いた洗掘対策工の破壊要因は、主に図-1.1に示す3つが考えられる。①「外力に伴う袋型根固材の移動(捲れ・滑動・飛散など)」を防ぐためには、袋型根固材の耐波浪・流れ安定性を評価する手法が確立される必要があるものの、洋上風力発電設備を対象として広範な条件下で袋型根固材の安定性を検証した研究はない。また、②「砂の吸出し、フィルター層の流出」や③「外縁部洗掘に伴う袋型根固材の滑動」を防ぐ

ため、複数の先行研究が、袋型根固材の敷設範囲や敷設構造について検証してきた。しかし、先行研究によって見解が異なるため、先行研究同士を比較した上で、最適な設計方法を確立する必要がある。また、小規模実験では現地に相似した砂の挙動の再現は難しく、大規模実験で袋型根固材やフィルター層の洗掘抑制効果を再評価し、フィルター層の必要性について再検証する必要がある。

上記のような背景を踏まえ、本研究は、袋型根固材を用いた着床式洋上風力発電設備基礎の洗掘対策工の設計手法の確立を目的とし、袋型根固材の耐波浪・流れの安定性、最適な敷設構造、洗掘抑制効果などについて検証すべく、大きく分けて3つの水理模型実験を行ったものである。

2章では、3つの研究で実施した水理模型実験の条件やその結果を整理する。3章では、青田ら(2023)の実験結果を踏まえ、袋型根固材の耐波浪・流れの安定性について検証し、袋型根固材の耐波浪所要質量算定式を提案する。4章では、関谷ら(2022)の実験結果及び先行研究との比較を踏まえ、袋型根固材の敷設範囲や敷設構造について検証し、敷設範囲の推定式や敷設構造の考え方について提案する。5章では、小林ら(2022)の大規模実験の結果を踏まえ、袋型根固材およびフィルター層の洗掘抑制効果について検証する。検証結果より、フィルター層の諸元や設置範囲の推定方法、袋型根固材の沈下量の推定方法を提案する。6章では、3~5章の考察を踏まえて、着床式洋上風力発電設備における袋型根固材による洗掘対策工の設計工法を提案する。

## 2. 水理模型実験

### 2.1 実験の概要

本研究では、表-2.1 に示す条件で3つの実験を実施した。まず、安定実験では、固定床に袋型根固材を設置し、袋型根固材の耐波浪・流れ安定性について検証する。次に、洗掘実験Aでは、移動床に袋型根固材を設置して、袋型根固材の洗掘抑制効果、敷設範囲、敷設構造などを評価する。洗掘実験Bでは、洗掘実験Aよりも縮尺がより大きい水路で、袋型根固材の洗掘抑制効果、縮尺効果、フィルター層併用の必要性などについて検証する。

### 2.2 模型縮尺と相似則

3つの実験の模型縮尺は、安定実験と洗掘実験Aを1/60、洗掘実験Bを1/9とした。

3つの実験はそれぞれ模型縮尺が異なるため、それぞれの実験で同じ現象を再現するためには、互いの条件に相似則が成立する必要がある。想定する現地の諸元を基準

とし、各々の模型縮尺で相似則が成立するよう、袋型根固材の諸元、自然条件、底質の粒径などを調整している。

#### (1) 袋型根固材

3つの実験では、一部特記する場合を除いて、全て8t型(現地縮尺)の袋型根固材を想定している。写真-1.1は、実物の8t型の袋型根固材の写真である。現地における大きさは、直径約3m程度×高さ1m程度であり、中詰め材の直径は50~300mm程度である。実験で用いた袋型根固材は、模型縮尺に合わせて小型化したものを使用した。

#### (2) フルード相似則

自然条件(水深、波浪諸元、流れ諸元)は、フルード相似則が成立するように定めた。実物に対して長さ縮尺が $\lambda$ とすると、表-2.2のような関係にある。

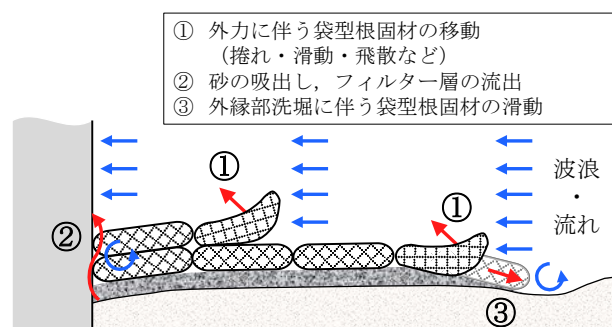


図-1.1 洗掘対策工の破壊原因

表-2.1 3つの実験の概要

	記号	安定実験	洗掘実験A	洗掘実験B
実験目的	—	耐波・流れ安定性	最適な敷設範囲・構造	袋型根固材及びフィルター層の洗掘抑制機能
実験水路	—	幅4 m× 長さ45 m	幅1.2 m× 長さ55 m	幅3.5 m× 長さ184 m
模型縮尺	—	1/60	1/60	1/9
モノパイル径*	$D$	6.12 m	6 m	6 m
地盤	—	固定床	移動床	移動床
中央粒径*	$d_{50}$	—	0.6 mm	0.2, 0.6 mm
袋型根固材*	—	8t型	8t型	8t型
敷設範囲・構造	—	1種	6種	3種
フィルター層	—	無し	無し, 有り(1種)	無し, 有り(3種)
水深*	$h$	15, 20, 33 m	20 m	20 m
波浪	—	不規則波		
スペクトル形式	—	修正Bretschneider-光易型		
波高*	$H_{1/3}$	3~15 m	9.6 m	9.6 m
周期*	$T_{1/3}$	10~20 s	15 s	15 s
作用波数	—	1,000 波	5,000 波	1,500~ 3,000 波
流れ	—	波・流れ共存	波浪単独	波・流れ共存
流速*	$v$	0.0, 1.0, 1.5, 2.0 m/s	0.0 m/s	0.0, 1.4 m/s

\*: 現地想定量

表-2.2 フルード相似則の一覧

物理量	縮尺	数値例 1	数値例 2
モノパイル径 $D_p$	$\lambda$	1/9	1/60
水深 $h$	$\lambda$	1/9	1/60
波高 $H$	$\lambda$	1/9	1/60
周期 $T$	$\lambda^{1/2}$	1/3	1/7.7
流速 $v$	$\lambda^{1/2}$	1/3	1/7.7
袋型根固材直径	$\lambda$	1/9	1/60
中詰め材直径	$\lambda$	1/9	1/60

(3) 浮遊漂砂の相似則

海底が洗掘を受けるとき、転動あるいは躍動しながら移動する掃流漂砂や、水の流れや渦に巻き込まれて移動する浮遊漂砂など、様々な形態で砂は移動する。より現地に近い漂砂を再現するためには、再現したい漂砂形態に対して相似則が成立するように実験条件を調整する必要がある。

本研究では、浮遊漂砂の相似則を基準として、洗掘実験 A, B の砂の粒径を調整する。浮遊漂砂の相似則の求め方は鈴木ら (2002) の方法を用いる。以下に詳細を記載する。

浮遊漂砂とは巻き上がった砂が水の流れに従って移動する現象であり、現地の浮遊漂砂を再現するためには、現地と模型とで砂粒子の沈降速度と水平流速の比を等しくする必要がある。この水平流速  $u$  と沈降速度  $w_s$  の比は、以下のような式で表される。

$$\left(\frac{u}{w_s}\right)_p = \left(\frac{u}{w_s}\right)_m \quad (2.1)$$

ここで、下付き添え字  $p$  は現地、 $m$  は模型量であることを示す。微小振幅波理論では水平流速は  $H/T$  に比例するため、式(2.1)を書き直すと式(2.2)のような関係となる。

$$\left(\frac{H}{w_s T}\right)_p = \left(\frac{H}{w_s T}\right)_m \quad (2.2)$$

$H/w_s T$  は Dean 数と呼ばれる、現地と模型の Dean 数の比を取ると、式(2.3)のような関係にある。

$$\frac{\left(\frac{H}{w_s T}\right)_p}{\left(\frac{H}{w_s T}\right)_m} = \frac{(H)_p}{(H)_m} \cdot \frac{(T)_m}{(T)_p} \cdot \frac{(w_s)_m}{(w_s)_p} = 1 \quad (2.3)$$

波高および周期はフルード相似則に従うとすると、式(2.4)のように書き直せる。

$$\frac{(H)_p}{(H)_m} \cdot \frac{(T)_m}{(T)_p} \cdot \frac{(w_s)_m}{(w_s)_p} = \lambda^{-1} \cdot \lambda^{0.5} \cdot \frac{(w_s)_m}{(w_s)_p} = 1 \quad (2.4)$$

$$\frac{(w_s)_m}{(w_s)_p} = \lambda^{0.5}$$

つまり、浮遊漂砂の相似則とは、現地と模型とで Dean 数が等しくなることであり、沈降速度がフルード則に従うことでもあると捉え直すことができる。沈降速度  $w_s$  は一般に粒子の終端速度で定義され、例えば Rubey (1933) は式(2.5)のように表せるとした (図-2.1)。

$$w_s = \sqrt{(s_r - 1)gd} \left[ \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{(s_r - 1)gd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{(s_r - 1)gd^3}} \right] \quad (2.5)$$

ここで、 $d$  は粒径 (cm)、 $g$  は重力加速度 (980.665 cm/s<sup>2</sup>)、 $s_r$  は底質の水中比重 ( $\rho_s/\rho=2.65$ )、 $\nu$  は水の動粘性係数 (0.010 cm<sup>2</sup>/s) である。

式(2.4)の相似則を満足するためには、模型縮尺が小さいほど、模型の砂の中央粒径を小さくする必要がある。現地では、砂の中央粒径が 0.1mm 程度であることが多い。 $(d_{50})_p=0.1\text{mm}$  とし、洗掘実験 A, B の模型縮尺を考えると、式(2.4)を満足する模型の中央粒径  $(d_{50})_m$  はシルトの範囲 (0.005 mm~0.074 mm) に含まれるほど小さくなる。地盤特性が変容してしまうため、洗掘実験 B の模型縮尺であっても  $(d_{50})_p=0.1\text{mm}$  を再現することは困難である。

洗掘実験 A, B に用いた砂の中央粒径は、現地で中央粒径が 0.2mm または 0.6mm である砂と、浮遊漂砂の相似則を満足するように設定した。図-2.1 には、例として、 $(d_{50})_p=0.2\text{mm}$  を想定し、模型縮尺の粒径を浮遊漂砂の相似則 (式(2.4)) に従って決定するための手順を示している。特に断りがなければ、「現地換算の粒径」とは、「模型縮尺の砂の中央粒径と浮遊漂砂の相似則を満足する現地縮尺の砂の中央粒径」という意味で用いる。

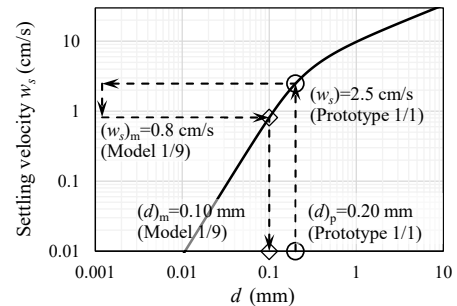


図-2.1 砂の沈降速度の推定図

表-2.3 実験条件 (安定実験)

ケース名	実験水路	模型縮尺	モノパイル	地盤	袋型根固材 <sup>※</sup>		水深 <sup>※</sup>	波浪 (不規則波)			流れ
			径 <sup>※</sup>	中央粒径 <sup>※</sup>	敷設構造	フィルター層		波高 <sup>※</sup>	周期 <sup>※</sup>	作用波数	流速 <sup>※</sup>
—	—	—	$D$	$d_{50}$	—	—	$h$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	—	$v$
—	幅4 m× 長さ45 m	1/60	6m	固定床	円形1層4列2層2列	—	15,20,33 m	3~15 m	10~20 s	1,000 波	1.0,1.5, 2.0 m/s
			12 m		円形1層8列2層4列						

※: 現地想定量

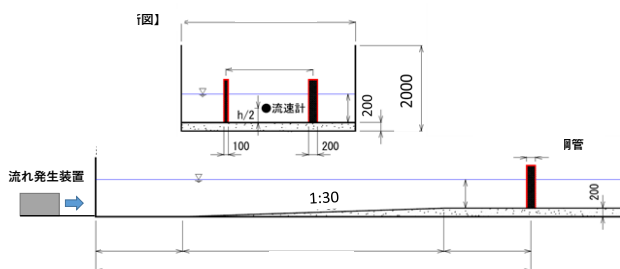


図-2.2 実験水路断面 (安定実験, 単位は mm)



写真-2.1 実験水路の様子 (安定実験)

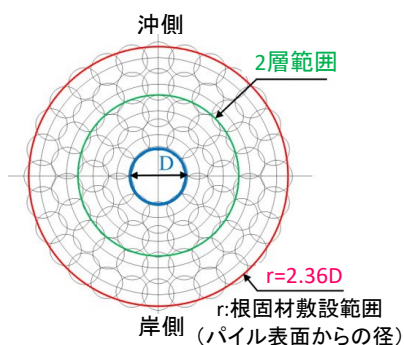


図-2.3 袋型根固材の敷設構造条件 (モノパイル径  $D=6m$ )

## 2.3 安定実験

### (1) 実験目的

本章では、安定実験によって、袋型根固材の安定性に

いて検証する。本章の記載内容は青田ら(2023)から引用しており、詳細は青田ら(2023)を確認されたい。

安定実験の実験ケースの一覧を、表-2.3に示す。安定実験は、袋型根固材の敷設構造条件は少ないものの、幅広い外力条件で実験している。外力条件には、波浪だけでなく、流れ共存場も含まれる。広範な外力条件下で袋型根固材の安定性を検証し、所要質量算定法を提案することを目的とする。

### (2) 実験条件

図-2.2に水路の断面図、写真-2.1に写真を示す。水路は長さ45m、幅4mの平面水槽であり、模型縮尺は1/60である。実験縮尺のモノパイル径は直径5,10cmの2種類である。平面水槽に2つのモノパイルを設置し、同時に2条件で実験を行う。袋型根固材は、洗掘実験Aと同じく、直径4.5cm、37g前後となる(中詰め材粒径は2.0~5.0mm)。網材などが異なる3種類の袋型根固材を用いたが、袋型根固材の種類の違いは大きな影響を与えなかった。なお、水路底面は固定床である。

袋型根固材の敷設構造条件を、図-2.3に示す。質量8tの袋型根固材をモノパイルの周囲に並べ、径6m(12m)のモノパイルに対して、同心円状に4列(8列)を配置する。また、2層目は2列(4列)を配置する。袋型根固材は8t型3種類とし、形状や大きさや特に繊維製の袋材の縛り方に若干の違いがある。袋内の石材の動揺を抑制するため、何れもロープなどで拘束する構造としている。

外力は、表-2.3に示す諸元で、波(不規則波)ならびに流れを作用させる。スペクトル形式は、修正Bretschneider-光易型スペクトルである。作用波数は、1,000波である。流れは軸流ポンプで再現し、水深の1/2の地点で測定する。

実験の手順としては、水深、波の周期、流れの流速を固定しつつ、波高を順次高くする。1つの条件に対して、波高を3~5種類程度を造波し、袋型根固材が被災する限界の波高(安定限界波高)を検証する。

袋型根固材の挙動の一例を写真-2.2に示す。袋型根固材は、捲れや飛散などの移動が生じた。捲れとは、水平方向に対して移動はないものの、鉛直方向に対して袋型根

固材の高さの半分程度以上の移動が生じた現象を指す。押し波の時には岸向きに捲れ、引き波時には冲向きに捲れた（流れと順方向）。冲向きに捲れたケースと岸向きに捲れたケースがほぼ半々であった。

部位ごとに見ると、袋型根固材の移動の多くは1層目の外縁部あるいは2層目のモノパイル側面において生じた。その他にも、2層目の沖側や岸側、水槽横断方向（波向き直角方向）の袋型根固材同士の重なり箇所の弱い箇所においても生じた。移動が生じる箇所や移動形態は必ずしも偏っていなかった。

捲れや飛散などの移動が生じた場合、移動が生じた袋型根固材を被害が発生したものとして計上した。一旦生じた捲れが実験中に元に戻ることもあったけれども、その場合も被害が発生したものとして計上した。

1層目の外縁部では袋型根固材の滑動が見られた。しかし、実験の平坦な固定床と、現地では海底面では、形状が異なるだけでなく、実験には縮尺効果が働くため底面摩擦係数も異なる。そのため、実験では現地の底面摩擦を必ずしも再現できていない可能性がある。従って、底面摩擦の再現性に依存する1層目の外縁部における滑動は、被害として計上しなかった。

(3) 実験結果

a) 全体的な被害発生傾向

表-2.4は、各ケースにおいて、被害が生じた波高ランクを塗りつぶしたものである。表中1個と記したケースは不安定となった袋型根固材が1個であり、他は複数の袋型根固材が不安定となった。また、1つの周期の条件で3段になっているケースは3種類の袋型根固材で実施したケースである。表より、全体的な被害発生傾向として以下の事項が確認できる。

- ・ 3種類の袋型根固材の安定性の差異は少ない。
- ・ 水深15mのケースは造波限界波高が小さいため、水深20mおよび33mの方が厳しい条件となっている。
- ・ 水深20mの方が33mに比べて安定性が低下する。
- ・ 周期が長いほど安定性が低下する。
- ・ モノパイル径が安定性に及ぼす影響は小さい。
- ・ 流れの流速が1.5 m/s以下の場合、流速が安定性に及ぼす影響は少なく、流れの有無に依らずほぼ同一の波高ランクで被害が生じている。
- ・ 流速2.0 m/sの条件では安定性の低下が認められる。



写真-2.2 袋型根固材の挙動の例  
( $h=33$  m,  $T_{1/3}=16$  s,  $D=6$  m,  $v=1.5$  m/s)

表-2.4 全体的な被害発生傾向

水深 h (m)	流速 v (m/s)	周期 $T_{1/3}$ (s)	パイル径 D=6m			パイル径 D=12m		
			波高3	波高4	波高5	波高3	波高4	波高5
33	0.0	10s						
		13s						
		16s						
		20s					1個	
	1.0	10s						
		13s						
		16s						
		20s		1個		1個	1個	
	1.5	10s						
		13s						
		16s						
		20s				1個		
2.0	10s						1個	
	13s							
	16s			1個				
	20s	1個			1個	1個		
20	0.0	10s						
		13s						1個
		16s			1個		1個	1個
		20s		1個		1個	1個	
	1.0	10s						
		13s						
		16s						
		20s				1個	1個	1個
	1.5	10s						
		13s						
		16s						
		20s						
2.0	10s							
	13s							
	16s			1個				
	20s	1個			1個			
15	0.0	10s						
		13s						
		16s						
		20s						



なお、流れの流速が安定性に及ぼす影響が大きい要因として、順方向の流れ共存場における波高の低下が挙げられる。図-2.4 に波単独で発生させた場合の波高と波と流れが共存した場合の波高の関係を示す。この図は、同一信号で発生させたときの波高の測定値の関係を示している。この傾向は、流れの流速が速いほど顕著である。これは波と流れが共存する場合に生じることが指摘されており（例えば水谷ら（2005））、そのような現象が水路内においても再現されたものと考えられる。

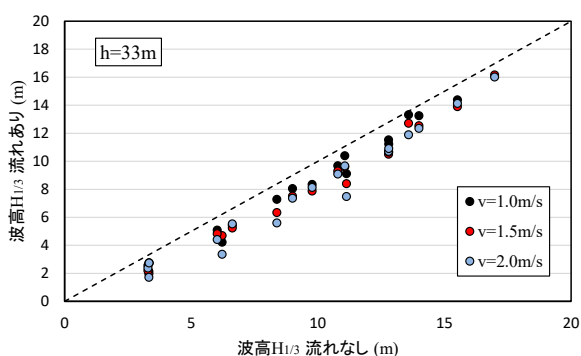


図-2.4 流れとの共存による波高の低下

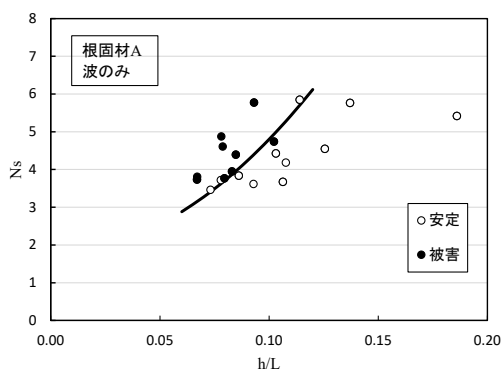


図-2.5 水深波長比  $h/L$  と安定数  $N_s$  の関係（波のみ）

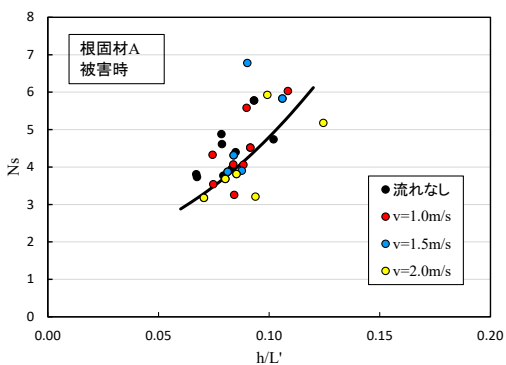


図-2.6 水深波長比  $h/L'$  と安定数  $N_s$  の関係

#### b) 袋型根固材の所要質量の検討

一般に防波堤のマウンド被覆材の所要質量は、安定数  $N_s$  を用いたハドソン式(式(2.6))で算定される(例えば、日本港湾協会(2018))。

$$M = \frac{H_{1/3}^3 \rho_r}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (2.6)$$

ここで、 $H_{1/3}$ ：有義波高、 $\rho_r$ ：袋型根固材の密度、 $S_r$ ：袋型根固材の海水に対する比重である。

図-2.5 は、波浪単独作用時の被害結果を、実験条件より定まる安定数  $N_s$  と水深波長比  $h/L$  を整理し、マーカーの色を「安定」または「被害」に分類したものである。前述のように、水深  $h$  が浅く周期が長いほど袋型根固材の安定性が低下する傾向が見られたことから、水深波長比  $h/L$  と式(2.6)に測定した波高  $H_{1/3}$  を代入して求めた安定数  $N_s$  の関係を整理した。ここで、波長  $L$  は微小振幅波理論より求めた水深  $h$  における波長である。実線は、安定・被害の境界線を示す。図-2.5 より、水深波長比  $h/L$  が大きいほど安定し、被害の境界となる安定数  $N_s$  は大きくなる傾向にあることがわかる。

図-2.6 は、図-2.5 と同様の整理を波・流れ作用時の結果に行ったものである（被害発生データのみ表示）。ここで、波と流れが共存する場合、波高の低下だけでなく波長  $L$  が長くなる。そこで、流れがない場合の波速 ( $=L/T_{1/3}$ ) と流れの流速  $v$  の和が流れのある条件での波速  $C$  と仮定し、それに周期  $T_{1/3}$  を乗じた値を流れと共存する場合の波長  $L'$  とした。図より、流れの流速  $v=2.0\text{ m/s}$  の一部データを除いて流れの流速に依らず図-2.5 と同様の傾向が確認できる。

表-2.5 実験条件 (洗掘実験 A)

ケース名	実験水路	模型縮尺	モノパイル 径*	地盤 中央粒径*	袋型根固材**		水深*	波浪 (不規則波)			流れ 流速*
					敷設構造	フィルター層		波高*	周期*	作用波数	
—	—	—	$D$	$d_{50}$	—	—	$h$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	—	$v$
CASE-1	幅1.2 m× 長さ55 m	1/60	6 m	0.6 mm	—	—	20 m	9.6 m	15 s	5,000 波	—
CASE-2***					—	—					
CASE-3					円形1層5列	—					
CASE-4					円形1層5列	—					
CASE-5					六角形1層5列	—					
CASE-6					円形1層4列	有					
CASE-7					円形1層4列2層1列	—					
CASE-8					円形1層4列2層2列	—					

※: 現地想定量 ※※: 例外的に, 規則波で造波

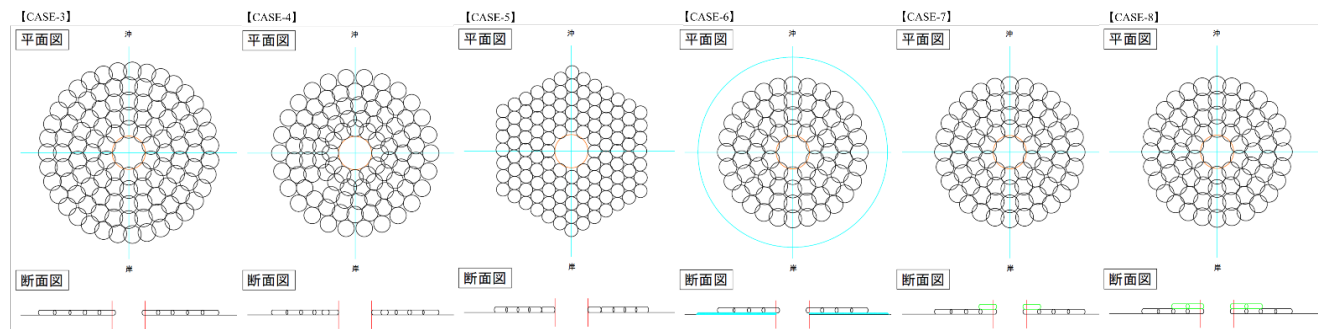


図-2.7 袋型根固材の敷設構造条件 (洗掘実験 A)

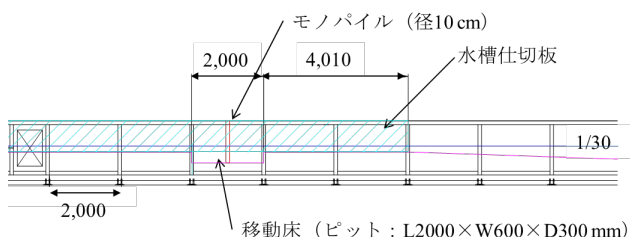


図-2.8 実験水路断面図 (洗掘実験 A)

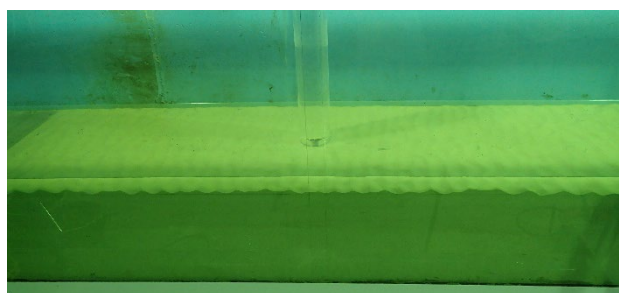


写真-2.3 実験水路の様子 (洗掘実験 A)

## 2.4 洗掘実験 A

### (1) 実験目的

本章では, 洗掘実験 A によって, 袋型根固材の敷設範囲・構造について検証する. 本章の記載内容は関谷ら (2022) から引用しており, 詳細は関谷ら (2022) を確認されたい.

洗掘実験 A の実験ケースの一覧を図-2.7 に示す. 洗掘

実験 A は, 対象とする外力は少ないものの袋型根固材の敷設範囲・構造の条件が多い. 各ケースを比較することで, 最適な敷設範囲・構造を検証することを目的とする.

### (2) 実験条件

図-2.8 に水路の断面図, 写真-2.3 に水路内の移動床とモノパイル模型の設置状況を示す. 水路は長さ 55m, 高さ 1.5m であり, 模型縮尺は 1/60 である. 実験縮尺のモノパイル径は直径 10cm, 袋型根固材は直径 4.5cm, 37g 前後となる (中詰め材粒径は 2.0~5.0mm).

外力は, 表-2.5 に示す諸元で, 不規則波浪を作用させる. スペクトル形式は, 修正 Bretschneider-光型型スペクトルである. 作用波数は, 5,000 波である.

底質は, 東北珪砂 8 号 (中央粒径  $d_{50}=0.11$  mm) とする. 前章に記載した鈴木ら (2002) の提案する沈降速度のフルード則に従うと, 底質の中央粒径は, 現地縮尺で 0.6 mm にあたる.

図-2.7 は袋型根固材の敷設構造条件の一覧であり, それぞれの敷設構造条件を選んだ理由を説明する. まず, 無対策条件における洗掘量を測定するため, CASE-1 (および CASE-2) を実施する. 次に, 袋型根固材の適切な敷設範囲や敷設形状を検証するため, CASE-3~5 を実施する. 次に, フィルター層の洗掘抑制効果を検証するため, CASE-6 を実施する. 最後に, モノパイル際を 2 層に増やした洗掘抑制効果を検証するため, CASE-7, 8 を実施する.

CASE-3 と CASE-4 では、袋型根固め材を円形 1 層 5 列配置で敷設する。CASE-4 は、CASE-3 と比べて 5 列目の模型数量が少なく、4 列目と同数とする。CASE-5 は、モノパイルの周囲に六角形 1 層 5 列配置で敷設する。CASE-4, 5 は、CASE-3 と比べて袋型根固材同士の重なりが少なく、隙間が空いている。

CASE-6 で設置したフィルター層には、東北珪砂 4 号(中央粒径  $d_{50}=0.8 \text{ mm}$ ) を 5 mm 厚で設置する。フィルター層の被覆範囲は半径  $2.36D_p$  とする。なお、CASE-3, 4, 5 と比べて、袋型根固材の敷設範囲を 1 列減らしている。

CASE-7, 8 は、袋型根固材を 2 層に敷設しており、その敷設範囲は CASE-7 が 1 列、8 が 2 列である。

### (3) 実験結果

まず、実験後のモノパイルおよび敷設範囲周辺の地形変化の様子を説明する。地形変化量は、波作用前後でレーザー測量を行い、それぞれの測量データの差分とする。

図-2.9 は、無対策条件 CASE-1 において波浪が作用した後の地形変化図である。図-2.9 が示すように、モノパイル周辺で、長軸がモノパイルの側面側に広がる楕円形の洗掘孔が生じた。洗掘孔の範囲の半径は、現地換算で約 9.0 m (約  $1.5D_p$ ) である。

図-2.10 は、袋型根固材対策条件 CASE-3 における地形変化図である。CASE-1 とは異なり、モノパイル周辺の地形変化は、モノパイル際を除き、むしろ堆積する傾向にあった。このことから、袋型根固材が洗掘抑制効果を発揮したと言える。その一方、袋型根固材の敷設範囲の外縁部では、CASE-1 よりも洗掘深が大きい。外縁部では、袋型根固材が洗掘に追従して外側に移動した。また、袋型根固材が移動して空いた隙間がさらに洗掘された。

図-2.11 は、フィルター層を併用した袋型根固材対策条件 CASE-6 の地形変化図である。モノパイル周辺の地形変化は、CASE-3 と同程度である。また、CASE-6 では、袋型根固材よりもフィルター層の敷設範囲を広くしたものの、フィルター層が波浪によって飛散し、袋型根固材の外縁部の洗掘は十分に抑えることができなかった。また、アクリル製のモノパイル内から撮影した様子から、袋型根固材底部でもフィルター層が移動したことも確認された。

次に、袋型根固材の敷設範囲内で最も洗掘が大きく、モノパイル基礎の安定性に最も強く影響する、モノパイル際における最大洗掘深を比較する。図-2.12 は、モノパイル際における最大洗掘深を示す。総じて、袋型根固材を敷設した CASE-3 以降は、CASE-1 と比べて最大洗掘深が大きく抑制された。最大洗掘深が最も小さいのは、フィルター層を併用した CASE-6 であり、最大洗掘深は現地換算で

0.15 m である。フィルター層を併用していなくても、袋型根固材を 2 層 2 列とした CASE-8 も CASE-6 と同程度の最大洗掘深であり、高い洗掘抑制効果を発揮した。同じく 2 層目を設けた CASE-7 では、2 層目を 1 列としたために袋型根固材が移動し、洗掘抑制効果がやや低下した。

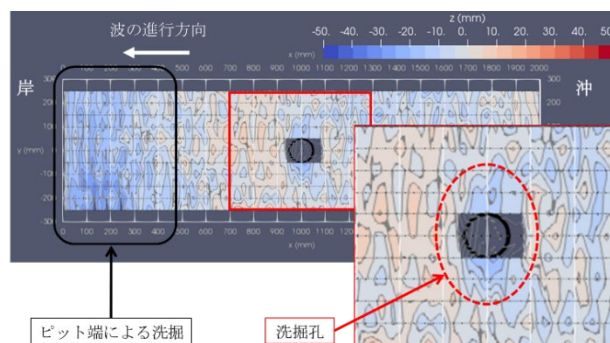


図-2.9 地形変化図 (CASE-1)

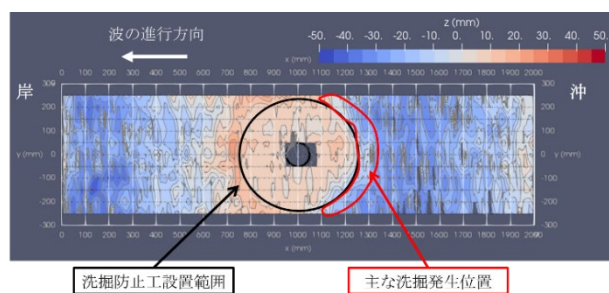


図-2.10 地形変化図 (CASE-3)

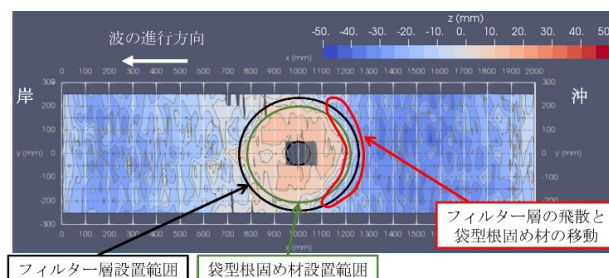


図-2.11 地形変化図 (CASE-6)

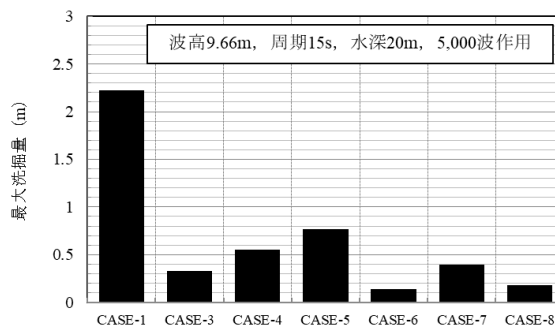


図-2.12 モノパイル際における最大洗掘深の比較

## 2.5 洗掘実験 B

### (1) 実験目的

本章では、洗掘実験 B によって、袋型根固材の洗掘抑制効果や縮尺効果について検証する。本章の記載内容は小林ら (2022) から引用しており、詳細は小林ら (2022) を確認されたい。

洗掘実験 B の実験ケースの一覧を、表-2.6、図-2.13 に示す。洗掘実験 B は、洗掘実験 A よりも袋型根固材の敷設構造条件は少ないけれども、外力として波浪かつ流れを作用させた実験を行っている。敷設構造は、洗掘実験 A で最適として提案された円形 1 層 4 列 2 層 2 列を主に適用する。また、より粒径が小さく、現地に近い底質条件 (中央粒径  $d_{50}=0.2$  mm) で実験を行っており、より現地に近い現象が再現できる。洗掘実験 B は、より現地に近い条件で袋型根固材の洗掘抑制効果と、フィルター層の必要性を再評価する。

### (2) 実験条件

図-2.14 に水路の断面図を示す。水路は長さ 184 m、幅 3.5 m であり、模型縮尺は 1/9 である。実験縮尺のモノパイル径は直径 70cm、袋型根固材は直径 4.5cm、37g 前後となる (中詰め材粒径は 2.0~5.0mm)。移動床と同じ標高で、モノパイルの正面と側面に、圧力計を設置している。

外力は、表-2.6 に示す諸元で、不規則波浪を作用させる。スペクトル形式は、修正 Bretschneider-光易型スペクトルである。作用波数は、1,500~3,000 波である。流速  $U=0.46$  m/s の流れを作用させた条件も実験した。

底質には、フラタリーサンド (中央粒径  $d_{50}=0.19$  mm) 及び 8 号珪砂 (中央粒径  $d_{50}=0.09$  mm) の 2 種類を使用した。この粒径は、前者は洗掘実験 A (中央粒径  $d_{50}=0.6$  mm)、後者は現地 (中央粒径  $d_{50}=0.2$  mm) と沈降速度が相似するように決定した。

CASE-1, 3 は洗掘実験 A と同一条件であり、洗掘実験 A の結果と比較することで、砂の洗掘深及び袋型根固材の洗掘抑制効果に縮尺効果が及ぼす影響を評価する。

CASE-5 では、敷設構造の違いによる影響を検証した。被覆範囲の半分は模型 B を使用した円形配置、残りの半分は模型 C を使用した袋型根固材同士を相互に重ねない六角形配置で敷設した。

CASE-6 以降は、洗掘深が大きくなるモノパイル際において、フィルター層の必要性を検証する実験を行った。モノパイル際にのみ着目するため、袋型根固材で地盤を全面被覆し、モノパイル際から 60cm の範囲の底質を 8 号珪砂に変更した。CASE-6 では、基本的には現地質量 8t 相当の袋型根固材を用い、袋型根固材のサイズと洗掘深の関

係を調べる目的で、現地質量 2t 型の模型をモノパイル際の半周にのみ円形 1 層 2 列で敷設した。

CASE-7, 8 では袋型根固材の底部にフィルター層を設けた。CASE-7 では 8 号珪砂と同じ範囲に、7 号砕石とクラッシュラン C-20 を 5cm 厚で半分ずつ設置した (フィルター層 A)。このとき、両者とも中央粒径  $d_{50}=4$ mm であるが、前者は単粒度、後者は混粒度である。洗掘実験 A では、フィルター層が袋型根固材の底部で移動することが確認されているため CASE-8 では袋型根固材の底部に、フィルター層として 7 号砕石を中詰め材とした袋型根固材を円形 1 層 3 列で敷設した (フィルター層 B)。

### (3) 実験結果

#### a) 無対策条件における洗掘深

図-2.15 に無対策条件の実験後の状況と洗掘深図を示す。洗掘深図に示した星の位置は最大洗掘深となった地点である。図-2.16 にはモノパイル際の最大洗掘深の比較を示す。

波のみ作用させた CASE-1 では、沿岸方向 (波の進行方向と垂直) に広がる楕円形ですり鉢状の洗掘孔が生じ、モノパイル際が最も洗掘深が大きくなった。最大洗掘深は現地換算で約 2.0m だった。波及び流れを作用させた CASE-2 では、洗掘範囲が岸側に向かって大きくなっており、その洗掘範囲はおおよそ半径  $1.5D_p$  だった。最大洗掘深は現地換算で約 3.6m であり、CASE-1 の最大洗掘深の約 1.8 倍となった。

図-2.17 は、モノパイルからの距離別に各ケースの洗掘深分布を示す。モノパイル際の洗掘深は CASE-1 と 2 でやや傾向が異なり、CASE-1 は全方向 ( $\theta=-180\sim 180^\circ$ ) でと同程度の洗掘深である一方、CASE-2 はモノパイル前面 ( $\theta=-90\sim 90^\circ$ ) で比較的洗掘深が大きい。モノパイルから離れた位置の洗掘深も傾向が異なり、CASE-1 はモノパイル直径  $2D_p$  を超えると逆に堆積傾向である一方、CASE-2 はいずれの位置でも洗掘傾向にあった。

表-2.6 実験条件 (洗掘実験 B)

実験水路	実験水路	模型縮尺	モノパイプ	地盤	袋型根固材 <sup>**</sup>		水深 <sup>**</sup>	波浪 (不規則波)			流れ	
			径 <sup>**</sup>	中央粒径 <sup>**</sup>	敷設構造	フィルター層		波高 <sup>**</sup>	周期 <sup>**</sup>	作用波数	流速 <sup>**</sup>	
—	—	—	$D$	$d_{50}$	—	—	$h$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	—	$v$	
CASE-1	幅1.2 m× 長さ55 m	1/9	6 m	0.6 mm	円形1層4列2層2列	—	20 m	9.6 m	15 s	1,500~ 3,000 波	1.4 m/s	
CASE-2					円形1層4列2層2列							
CASE-3					円形1層4列2層2列							
CASE-4					円形1層4列2層2列							
CASE-5					円形・六角形 1層4列2層2列							
CASE-6					2層2列							
CASE-7					2層2列							フィルター層A
CASE-8					2層2列							フィルター層B

※: 現地想定量

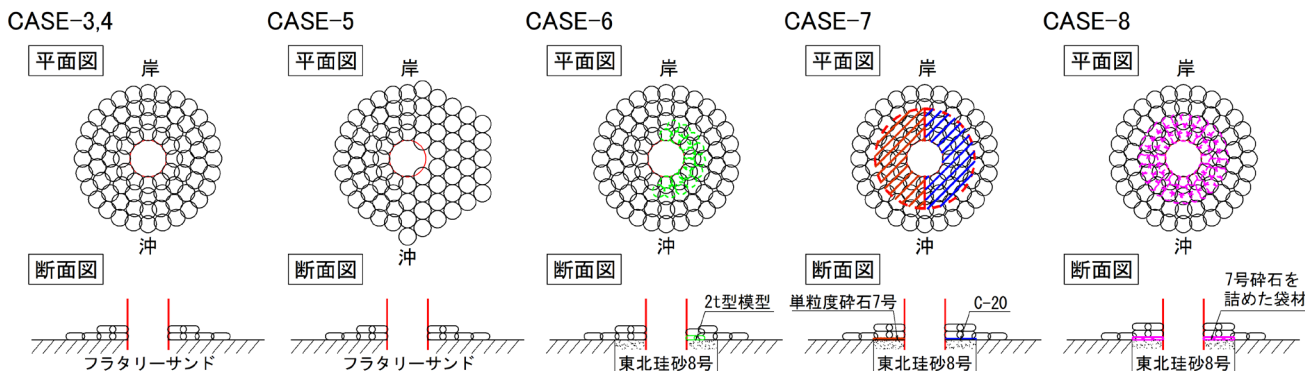


図-2.13 袋型根固材の敷設構造条件 (洗掘実験 B)

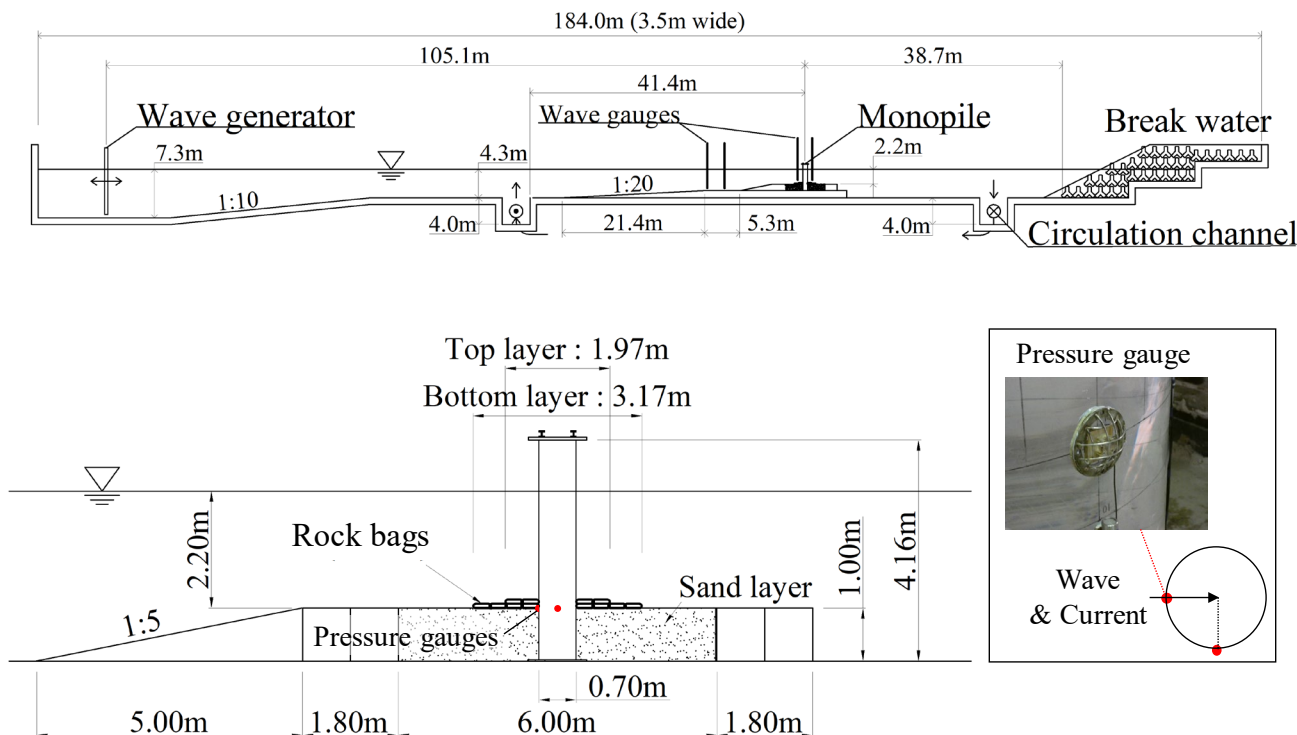


図-2.14 実験水路断面図 (洗掘実験 B)

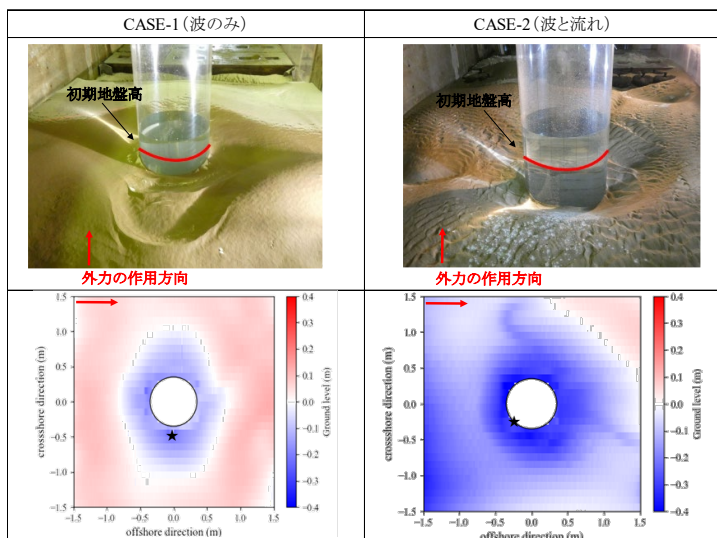


図-2.15 無対策条件の造波後の状況と地盤変化図

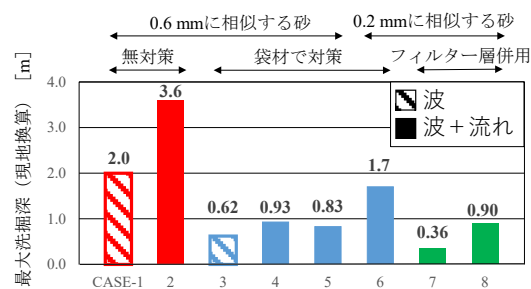


図-2.16 各ケースにおけるモノパイル際の最大洗掘深

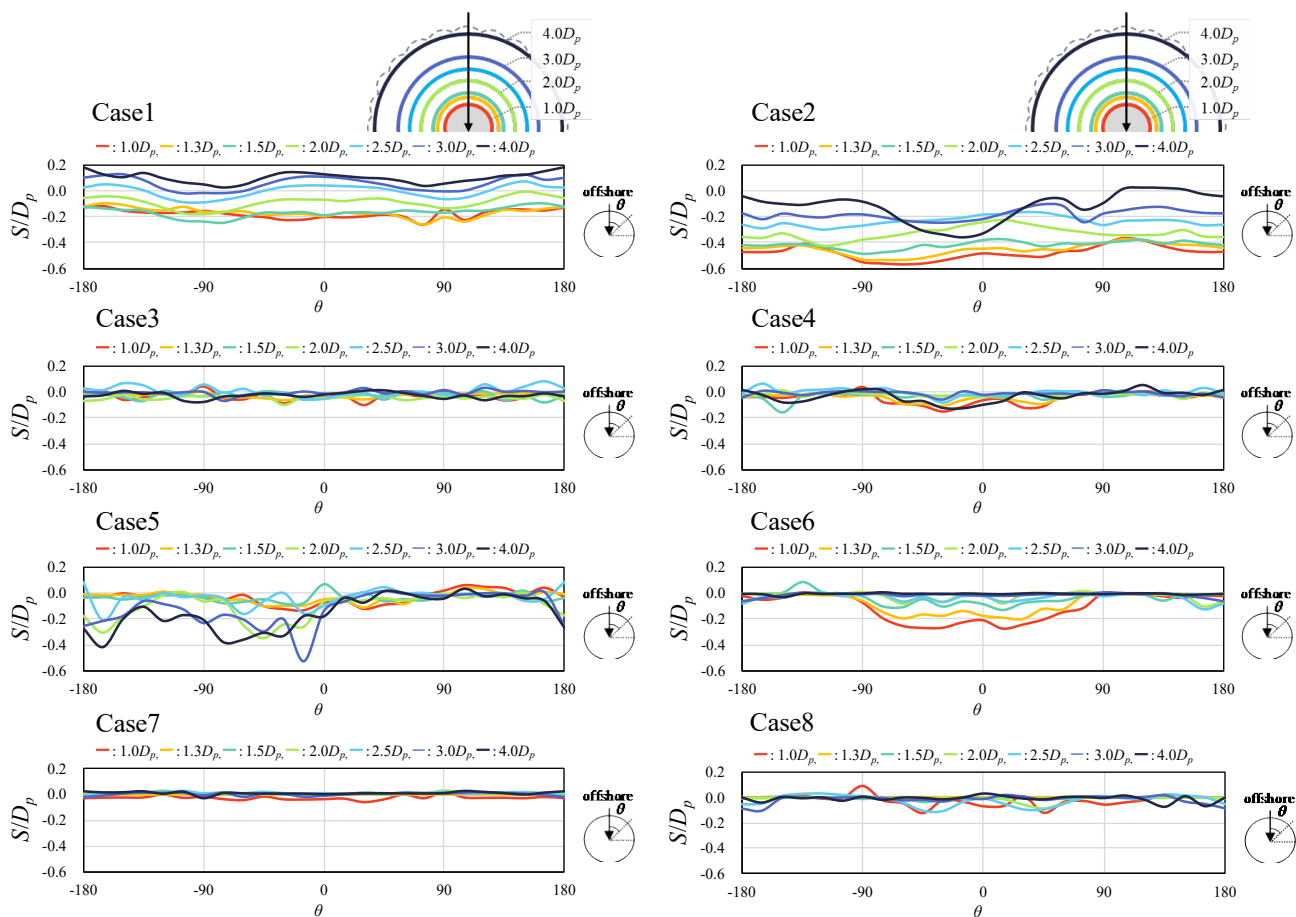


図-2.17 モノパイルからの距離別を示す実験終了後の洗掘深分布

b) 袋型根固材による対策条件の洗掘深

図-2.18 に対策条件の実験後の状況と洗掘深図を示す。波のみ作用させた CASE-3、波及び流れを作用させた CASE-4 のいずれも、波や流れで袋型根固材が散乱したり移動したりする状態は見られなかった。但し、CASE-4 では、沖側に設置した袋型根固材に若干の移動が見られたが、これは沖側にある移動床と固定床の境界で発達した洗掘が袋型根固材設置付近まで進行したためである。

図-2.16 より、CASE-3、4 のいずれも、袋型根固材を設置した範囲の洗掘は抑えられ、モノパイル際の最大洗掘深は現地換算で約 0.62m 及び約 0.93m だった。無対策条件と比較すると、約 1/3 倍、約 1/4 倍であり、洗掘深が大きく低減された。

図-2.17 より、CASE-3、4 は、モノパイル際が最も洗掘深が大きく、モノパイルから離れた位置ほど洗掘深が小さくなる傾向にあった。CASE-3 は、モノパイルの真正面 ( $\theta=0^\circ$  付近) では比較的洗掘深が小さく、 $\theta=-45^\circ \sim -30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 45^\circ$  付近で最も洗掘深が大きくなる。また、モノパイル際 ( $\theta=\pm 90^\circ$  付近) では砂が堆積傾向にあった。CASE-4 は、CASE-3 の傾向と類似しているものの、モノパイル前面 ( $\theta=-90^\circ \sim 90^\circ$ ) の全体の洗掘深が大きい。モノパイル際 ( $\theta=\pm 90^\circ$  付近) では砂が堆積傾向にあることも類似している。

写真-2.4 は、CASE-4 終了後に袋型根固材を撤去した砂

地盤の写真であり、モノパイルから離れた位置では、袋型根固材によって洗掘が抑制されたことが確認できる。但し、袋型根固材の空隙の形状と一致するように砂が溜まっていることから、袋型根固材底部もしくは空隙内で砂が移動していたことが推測される。

写真-2.5 は、CASE-4 の終了後に袋型根固材を撤去した砂地盤の写真とモノパイル内から  $360^\circ$  カメラで撮影した写真である。モノパイルより離れた位置 (写真-2.4) とは異なり、モノパイル前面 ( $\theta=-90^\circ \sim 90^\circ$ ) における砂地盤は大きく洗掘を受け、袋型根固材が沈下していることが確認できる。

ここまでは洗掘実験 A で最適と提案した敷設条件である CASE-3、4 の実験結果であり、次に敷設条件を変更した CASE-5 の実験結果について述べる。CASE-5 は、沿岸方向に半分ずつ円形配置と六角形配置で敷設した。実験結果より、六角形配置では袋型根固材が移動し、それにより生じた隙間で大きく洗掘した。外縁部の袋型根固材は、外縁部で発達する洗掘に合わせてしなやかに形状が変化した。円形配置で袋型根固材が重なりあっている場合には摩擦によって袋型根固材は移動しなかったものの、重なっていない六角形配置では移動してしまったと考えられる。洗掘を抑制する上で、袋型根固材を重ねることが重要であることは関谷ら(2022)も指摘している。

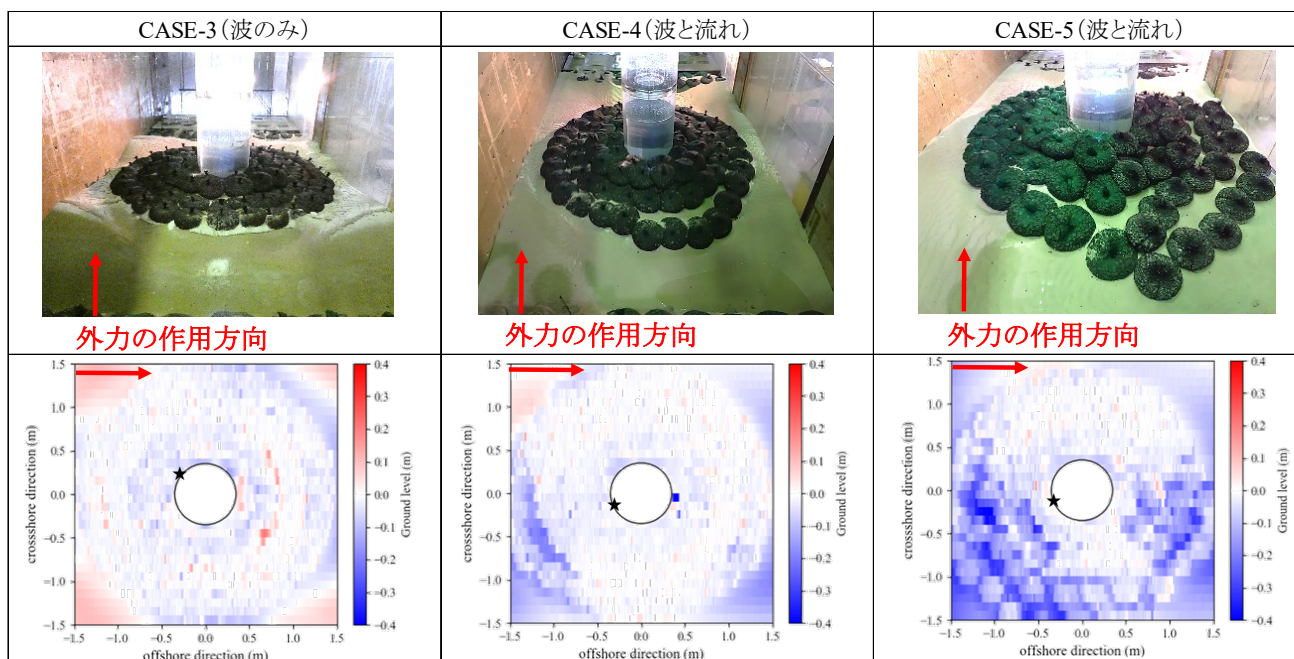


図-2.18 対策条件の造波後の状況と地盤変化図 (単位 : m)



写真-2.4 CASE-4 終了後に袋型根固材を撤去した写真

c) フィルター層併用による対策条件の洗掘深

CASE-6 以降は、モノパイル際におけるフィルター層の必要性を検証する実験を行った。CASE-6 以降は、底質の中央粒径を現地換算で0.2mmと相似するように決定した。

写真-2.6 は、CASE-6～8 の実験後にモノパイルの内部から砂地盤の様子を撮影したものである。砂地盤に直接袋型根固材を設置した CASE-6 は、袋型根固材が大きく沈下していることが確認できる。一方、砂地盤に直接碎石を敷設した CASE-7 では、袋型根固材の沈下を十分に抑えている。碎石を袋詰めにしたものをフィルター層として用いた CASE-8 では、CASE-7 に比べると袋型根固材が沈下した。

まず、袋型根固材のみで対策した CASE-6 の最大洗掘深は現地換算で約 1.7m となり、類似条件の CASE-4, 5 の約 2 倍となった。洗掘深が大きくなった原因は、より粒径の小さい砂を用いたためである。なお、CASE-6 では、モノパイル際に半周のみ 2t 型の袋型根固材を敷設していたが、洗掘抑制効果は向上しなかった。

次に、フィルター層を直接底質上に設置した CASE-7 は、

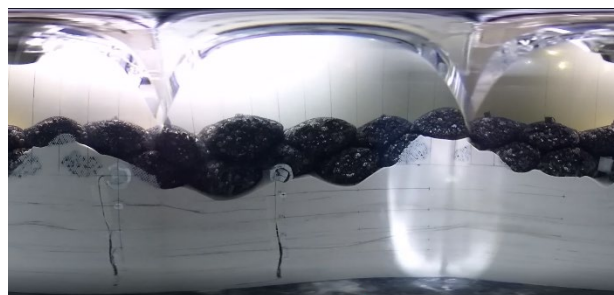


写真-2.5 CASE-4 終了後のモノパイル内からの撮影写真

CASE-6 より洗掘深が十分小さくなり、最大洗掘深は現地換算で約 0.36m (約 1/5 倍) だった。CASE-7 のフィルター層には、中央粒径が同じ混粒度碎石と単粒度碎石を用いている。写真-2.6 より混粒度碎石の方がフィルター層を砂が通過していることが確認できるものの、いずれもほとんど沈下していない。

写真-2.7 は、CASE-7 の実験後に袋型根固材を取り除いたフィルター層を撮影したものである。モノパイル内部からみると (写真-2.6)、特に単粒度碎石には袋型根固材の空隙内で移動する様子がみられたものの、フィルター層は実験後にも袋型根固材の底部に残留していた。フィルター層が移動するのは、袋型根固材の空隙内であり、直上部に袋型根固材がある場合にはあまり移動しなかったと考えられる。

最後に、7号碎石を袋詰めにしたものをフィルター層として用いた CASE-8 では、CASE-6 と比較すると洗掘深は約 1/2 倍になったものの、CASE-7 と比較すると洗掘深は大きくなった。このことから、フィルター材の洗掘抑制効果は、直接底質上に設置した方が高いと言える。

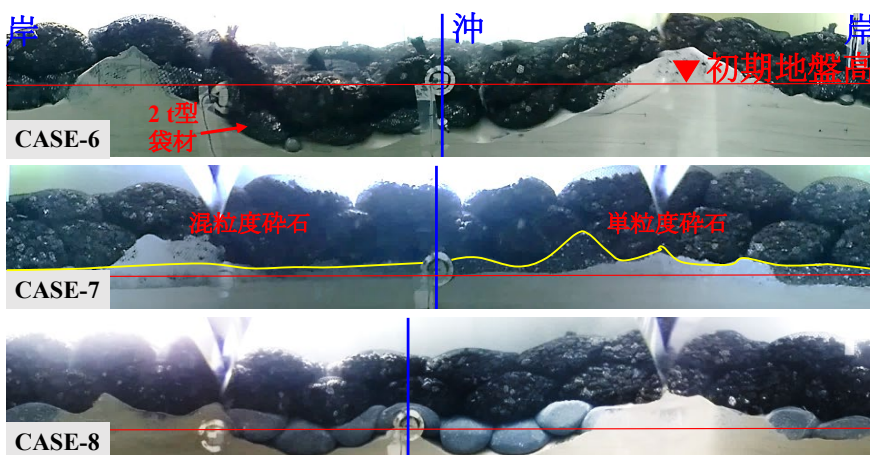


写真-2.6 CASE-6～8 におけるパイル内からの撮影写真



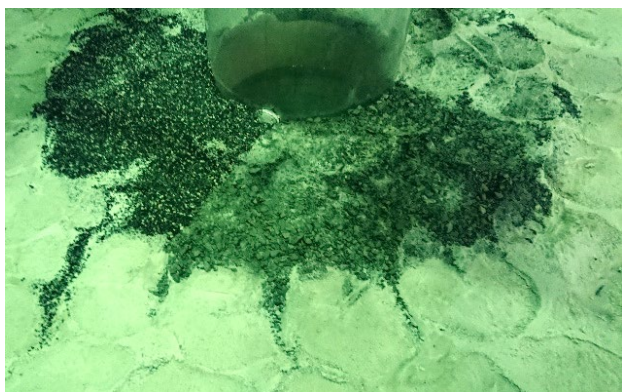


写真-2.7 CASE-7における実験後のフィルター層の様子

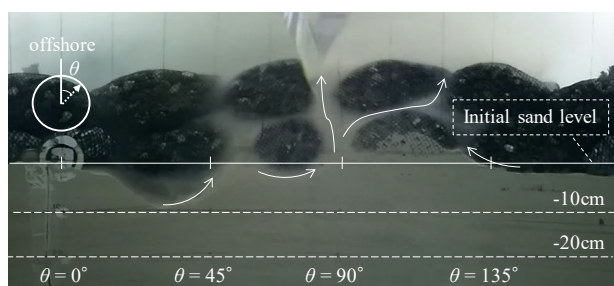


写真-2.8 CASE-3 実験中のモノパイル内からの撮影写真  
(上: 洗掘発達状態, 下: 洗掘平衡状態)

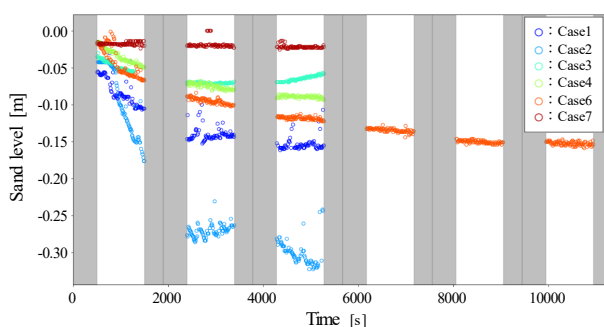


図-2.19 砂地盤の標高の時間変化 ( $\theta=30^\circ$ )

d) モノパイル際における洗掘深の時間変化

本項では、モノパイル内部から  $360^\circ$  カメラで撮影した映像を基に、モノパイル周辺の洗掘の発生状況や袋型根固材内部の砂の運動を考察する。また、モノパイル際に生

じる洗掘深を時系列で測定する。

写真-2.8 は、CASE-3 の実験中に、モノパイル内部から  $360^\circ$  カメラで撮影した袋型根固材と砂地盤の様子である。洗掘が発達している時間帯 (上図) は、モノパイル正面 ( $\theta=0\sim 90^\circ$ ) の袋型根固材下部の空隙内を沖方向に砂が移動し、モノパイル際 ( $\theta=90^\circ$ ) 付近の袋型根固材の空隙から外に吸い出されている。洗掘が発達するにつれ、 $\theta=30\sim 45^\circ$  付近で袋型根固材下部の洗掘深が最も大きくなり、 $\theta=90\sim 135^\circ$  付近は砂が堆積した状態になる。十分に時間が経過すると、モノパイル際付近の袋型根固材の空隙が砂でふさがり、砂の吸い出しが止まり、袋型根固材の沈下が落ち着く。袋型根固材の沈下が止まった後でも、洗掘量が大きいモノパイル前面においては、砂は移動しているものの、モノパイル際付近の出口が砂でふさがっているため、袋型根固材の下部の空隙内で前後するのみである。

洗掘対策工内部で洗掘された土砂が  $\theta=90^\circ$  付近に堆積することは Nielsen et al. (2015) でも指摘されている。 $\theta=\pm 90^\circ$  付近では、洗掘対策工の上部の流速差が最も大きく、洗掘対策工の上下面に流速差が生じる。それにより、洗掘対策工の上下に動水勾配が発生し、鉛直方向に砂が吸い上げられる。これによって、 $\theta=90^\circ$  付近に砂が集積すると説明できる。

次に、洗掘深の時間発展の様子を、モノパイル内から撮影した映像を画像解析して検証する。図-2.19 は、 $\theta=30^\circ$  の箇所を対象に、色相の変位が大きい箇所を砂地盤の境界として定義して、砂地盤の標高の時系列を追跡したものである。特に Case1, 2 において、プロットにばらつきがあるのは、砂が舞い上がることによって境界が曖昧になるためである。なお、外力は 500 波  $\times$  3 群 (Case6 のみ 6 群) ずつに分けて作用させており、撮影も分割して行っている。カメラの撮影を開始してから造波を開始することや、カメラの撮影時間に上限があることから、実験中の全時間で撮影ができておらず、不連続となっている。撮影ができなかった時間帯を灰色で示している。また、 $360^\circ$  カメラの画像の歪みは、パイル内に書いた 10cm 毎のグリッド線を基に補正を行った。

図-2.19 より、砂地盤にフラタリーサンドを使用した Case1~4 をみると、波浪を作用させた Case1, 3 は実験終了時には概ね砂地盤の標高が平衡に至っているものの、波浪かつ流れを作用させた Case2, 4 は完全には平衡に至っていない。また、Case6 は、砂地盤に 8 号珪砂を使用したこと、波浪かつ流れを作用させたことから、平衡に至るまで時間が掛かっている。Case7 は、フィルター層を用いているため、ほとんど地盤は変化していない。

図-2.20 は、Case1~6 に対して、 $\theta=-180\sim 0^\circ$  の範囲で  $15^\circ$  間隔で砂地盤の標高の変化を評価したものである。無対策条件で波浪、波浪かつ流れを作用させた Case1, 2 は、時間経過とともに  $\theta=-180\sim 0^\circ$  の全体が洗掘される。しかし、袋型根固材による対策条件で波浪を作用させた Case3 は、 $\theta=-60\sim -0^\circ$  の範囲では砂が洗掘されるものの、 $\theta=-120\sim -60^\circ$  の範囲では砂が堆積する。流れを作用させた Case4 は、洗掘される範囲が広がり、堆積する範囲がやや後方 ( $\theta=-150\sim -90^\circ$ ) に移動する。その傾向は、砂を 8 号珪砂とした Case6 では更に顕著である。

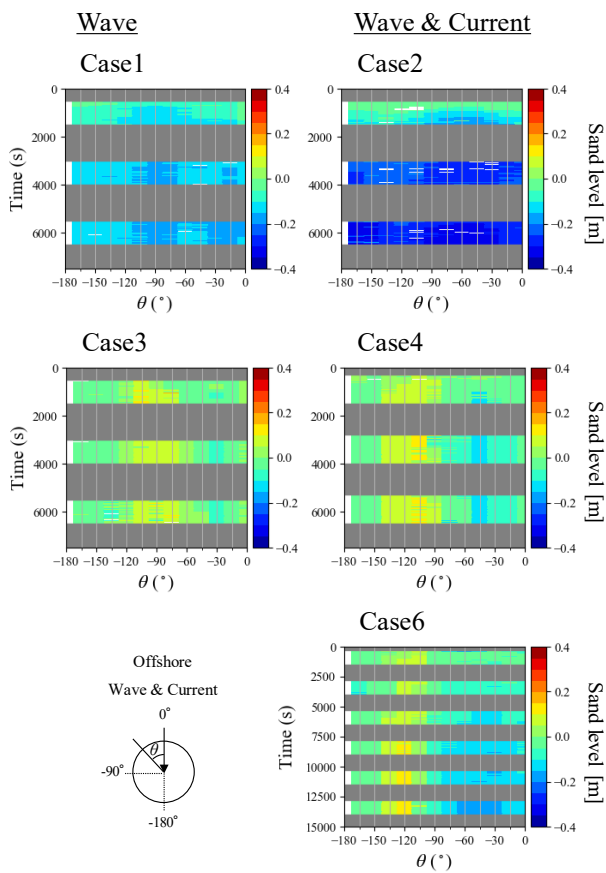


図-2.20 砂地盤の標高の時間変化( $\theta=-180^\circ \sim 0^\circ$ )

### 3. 袋型根固材の耐波浪・流れ安定性

安定実験 A の結果を基に、袋型根固材の耐波浪・流れ安定性を評価するとともに、袋型根固材の所要質量の推定方法を提案する。

図-3.1 は、実験条件より定まる安定数  $N_s$  と水深波長比  $h/L$  を整理し、マーカーの色を「安定」または「被害」に分類したものである。図-3.1 より、 $h/L$  が大きいほど、袋型根固材に被害が生じる境界の  $N_s$  が大きくなる傾向がある。境界曲線は、以下の式で表される。

$$N_s = 300 \left( \frac{h}{L} \right)^2 + 1.8 \quad (3.1)$$

図-3.1 の境界曲線は、モノパイル径  $D$  や流速  $v$  の区別なく作成している (但し、 $v \leq 1.5$  m/s)。モノパイル径  $D$  や流速  $v$  が異なっても、この境界の位置は概ね同じである。流速の違いが影響しないのは、前章で述べたような、順方向の流れの共存場における波高の低下が原因と考えられる。

設計に当たっては、設計条件より定まる安定数  $N_s$  と境界曲線を比較し、袋型根固材の所要質量を算出すればよい。式(3.2)に改めてハドソン式を記載する。

$$M = \frac{H_{1/3}^3 \rho_r}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (3.2)$$

ここで、 $H_{1/3}$  : 有義波高、 $\rho_r$  : 袋型根固材の密度、 $S_r$  : 袋型根固材の海水に対する比重である。実験条件及び式(3.1)より、境界曲線上の安定数  $N_s$  を求め、式(3.2)のハドソン式より所要質量  $M$  を求めることができる。

$N_s$  値が水深波長比の二乗に比例するのは、ハドソン式と、CERC の式<sup>21)</sup>の関係より説明することができる。CERC の式は、潮流等による洗掘を防止するための捨石質量を求めるために提案された式であり、所要質量  $M$  が流速  $U$  の 6 乗に比例する形の式である (式(3.3))。

$$M = \frac{\pi \rho U^6}{48 g^3 y^6 (S - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (3.3)$$

ここで、 $M$ : 捨石等の安定質量 (t)、 $\rho$ : 捨石等の密度 (t/m<sup>3</sup>)、 $U$ : 捨石等の上面における水の流れの速度 (m/s)、 $g$ : 重力加速度、 $y$ : イスバッシュの定数、 $S$ : 捨石等の水に対する比重、 $\theta$ : 水路床の軸方向の斜面の勾配である。CERC の式は、所要質量は流速の 6 乗に比例している。

微小振幅波理論に従うと、底面流速は以下のように求めることができる。

$$U = \frac{H_{1/3} \omega}{2} \frac{1}{\sinh kh} \quad (3.4)$$

$kh$  が十分小さいとき、 $\sinh kh$  は以下のようにテイラー展開することができる。

$$\sinh kh = kh + \frac{1}{3!} (kh)^3 + \dots \approx kh \quad (3.5)$$

式(3.2)～(3.5)の関係を整理すると、以下の比例式が得られる。

$$\text{ハドソン式:} \quad M \propto N_s^{-3} \quad (3.6)$$

$$\text{CERC の式:} \quad M \propto (kh)^{-6} \propto (h/L)^{-6}$$

式(3.6)より、 $N_s \propto (h/L)^2$  の関係が得られる。

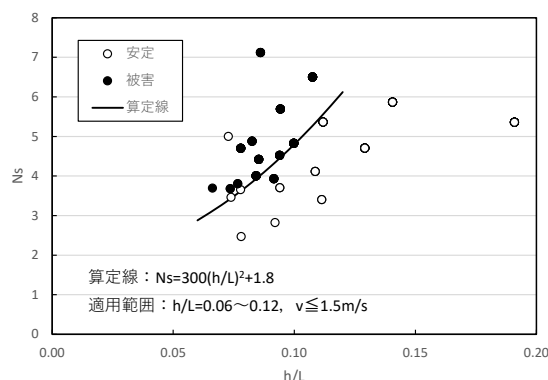


図-3.1 水深波長比と安定数  $N_s$  の関係

## 4. 袋型根固材の敷設範囲および敷設構造

### 4.1 袋型根固材の敷設範囲

関谷ら(2022)は,袋型根固材の敷設範囲を4または5列で実験し,最終的には1列少ない4列を最適な敷設範囲とした.この敷設範囲の設定根拠を整理し,先行研究と加えて考察する.

関谷らは,最初に袋型根固材の敷設範囲を5列と設定するために,2つの式を用いた.まず1つ目は,Sumer et al.(1992)による,無対策条件下で生じる最大洗掘深の推定式(4.1)である.

$$\frac{S}{D_p} = 1.3(1 - e^{-0.03(KC-6)}) \quad KC > 6 \quad (4.1)$$

式(4.1)は, $KC \rightarrow \infty$ のときに $S=1.3D_p$ となる.2つ目の式は,DNVGL-ST0126<sup>23)</sup>による,無対策条件における洗掘の発生範囲を推定するための式(4.2)である.

$$r = \frac{D_p}{2} + \frac{S}{\tan\phi} \quad (4.2)$$

関谷らは,最大洗掘深 $S=1.3D_p$ ,安息角 $\phi=35^\circ$ として算出される半径 $2.36D_p$ (直径約 $4.7D_p$ )を被覆範囲とした.以上から分かるように,式(4.1), (4.2)を用いて推定しうる最大の洗掘範囲が直径約 $4.7D_p$ であり,関谷らのモノパイル径や袋型根固材の大きさの条件では5列に相当する.

関谷らは,実験結果を踏まえ,袋型根固材の設置範囲を縮小し,4列を最適としている.袋型根固材4列は直径 $3.7D_p$ に相当し,無対策条件CASE-1における洗掘範囲は直径約 $3D_p$ である.したがって,敷設範囲を4列としても,無対策条件における洗掘範囲を上回り,十分に防護することができたのであろう.袋型根固材の敷設範囲が5列であるCASE-3と,4列であるCASE-7を比べても,袋型根固材の外縁部の洗掘深は同程度であり,敷設範囲が狭いことによる外縁部の洗掘深への影響は確認されなかった.

袋型根固材の敷設範囲を決定する上で,関谷らと同じく式(4.1), (4.2)を用いる方法は一般に適用できるものの,敷設範囲を過小評価しないように注意が必要である.例えば,式(4.2)を用いるとすると,関谷らの $KC$ 数条件は7程度であるので,最大洗掘深 $S$ は $0.1D_p$ 未満となる.関谷らが実験より得た無対策条件の最大洗掘深は $0.37D_p$ であり,最大洗掘深を過小評価してしまう.また,関谷らの最大洗掘深の実験値を用いたとしても,式(4.2)から求

められる洗掘範囲は直径約 $2.1D_p$ であり,実験より得られた洗掘範囲(直径約 $3D_p$ )を過小評価してしまう.関谷らが最終的に敷設範囲を4列(直径 $3.7D_p$ )としたのは,無対策条件の洗掘深(直径約 $3D_p$ )を踏まえたためである.

他の先行研究も,実験結果を踏まえ,袋型根固材の設置範囲を直径 $3D_p \sim 4D_p$ 程度が良いとするものが多い.稲垣ら(2021)は,袋型根固材の設置範囲が直径 $3D_p \sim 5D_p$ の範囲に袋型根固材を設置した条件で水理模型実験を行い,袋型根固材よりも広い範囲にフィルター層を敷設した上で,直径 $3D_p$ 程度あれば高い洗掘抑制効果を発揮している.また,片山ら(2021)は,片側 $1.5D_p$ 程度(モノパイルを含めて直径 $4D_p$ )が必要としている.

また,洗掘対策工の外縁部洗掘に対する袋型根固材の安定性は十分に明らかになっていないことにも留意したい.稲垣ら(2021)は,袋型根固材が滑らかに馴染むことで外縁部洗掘を軽減している様子が見られたとしている.洗掘実験Bにおいても袋型根固材同士を重ねた条件では同様の様子が確認されたものの,重ねていない条件では外縁部の袋型根固材が滑り,広がった空隙で洗掘が発達した.外縁部洗掘に対する袋型根固材の安定性は十分に明らかになっていないため,敷設範囲が過小となることは避けることが望ましい.

以上より,袋型根固材の敷設範囲を推定するには,式(4.1), (4.2)を用いることができるが,敷設範囲を過小評価しないように注意する必要がある.特に式(4.1)は $KC$ 数が小さい範囲で洗掘深を過小評価する可能性があり,5.5節に記載する無対策条件における洗掘深の推定式を用いると良いだろう.また,共通して直径約 $3D_p \sim 4D_p$ を必要範囲とする研究が多いため,袋型根固材の敷設範囲は最低でも $3D_p$ 以上とした方が安全であろう.式(4.1), (4.2)より得られる最大敷設範囲は $4.7D_p$ であるので,条件に応じて $3D_p \sim 4.7D_p$ で調節できる.可能であれば,水理模型実験によって適切な範囲を検証することが望ましい.

### 4.2 袋型根固材の敷設構造

関谷らは,袋型根固材の敷設構造として,最終的には円形1層4列2層2列(写真-4.1)を最適とした.1層目の袋型根固材の列数は,前節の敷設範囲で考察した通りである.この敷設構造の設定根拠を整理し,先行研究や実際の設計の場面を踏まえて考察する.

まず,関谷らは1層目の敷設形状をCASE-3,4,5の3種類で検証し,袋型根固材の重なりや空隙の大きさが重要であるとした.CASE-3,4,5は,円形,六角形,5列目の袋型根固材の設定数などの違いがある.図-2.12に示されるように,モノパイル際の最大洗掘深はCASE-3,4,5の順に

大きかった。これは、袋型根固材同士の重なりが少なく空隙が大きい条件の順番である。参考に、実験における袋型根固材の重なり程度（ラップ率）を記載する。袋型根固材の増減によってモノパイル際のラップ率は大きく変動するため、外縁部から2列のラップ率を示す。ラップ率は、半径方向に14～18%、円周方向に7～18%であった。

次に、関谷らは2層目の敷設列数をCASE-7, 8の2種類検証し、2層目2列を最適とした。2層目を1列としたCASE-7では、実験途中で2層目の袋型根固材が移動してしまった。2層目の袋型根固材が移動して空いた隙間から吸出しが生じたため、最大洗掘深は1層しか設けていないCASE-3と同程度に留まった。2層目を2列としたCASE-8では、袋型根固材が安定したことにより最大洗掘深を良く抑制した。

稲垣ら<sup>9~11)</sup>も同様に、袋型根固材を2層とする敷設構造を対象としているものの、関谷らの敷設構造と2点の違いがある。まず1点目に、稲垣らは1層目を六角形に、2層目を円形にしている。2点目に、稲垣らは2層目を円形1列としている点である。また、モノパイル際から半列分の離隔をとって設置している。

ここで、実際の設計の場面を想定し、袋型根固材の敷設構造の設定方法を考察したい。

まず、2層目の列数は、袋型根固材の安定性の観点から、想定する外力が大きい場合には列数を2列以上とすることが良いだろう。筆者の計算によると、モノパイル位置における水深波高比  $h/L$  は、関谷らが約0.10、稲垣らが約0.08である。つまり、関谷らの方が袋型根固材は移動しやすい条件であり、袋型根固材が移動したと考えられる。

次に、2層目の設置位置は、袋型根固材の洗掘抑制効果の観点ではモノパイル際に設置することが望ましいものの、施工面に課題が残る。実際のモノパイル式の洋上風力発電設備は、モノパイル際に通信ケーブルやその防護管が存在している。つまり、モノパイル際に袋型根固材を設置できないことも考えられる。

以上の考察を整理する。まず、関谷らは、袋型根固材の敷設構造として円形1層4列2層2列を提案した。袋型根固材は相互に重なり空隙が小さい方が洗掘抑制効果は高かった。2層目の設置列数、設置位置は研究によって立場が分かれるけれども、実際の設計外力を踏まえ、外的安定性を確保したい場合には2層目を2列以上とすることが望ましい。また、2層目はモノパイル際に設置した方が洗掘抑制効果を発揮するけれども、施工性に課題が残る。2層目の敷設位置をモノパイル際から離れた場合、洗掘が発達することが懸念される。そのような場合には、フィルター層を併用する方法もある。詳細は、次章で考察する。

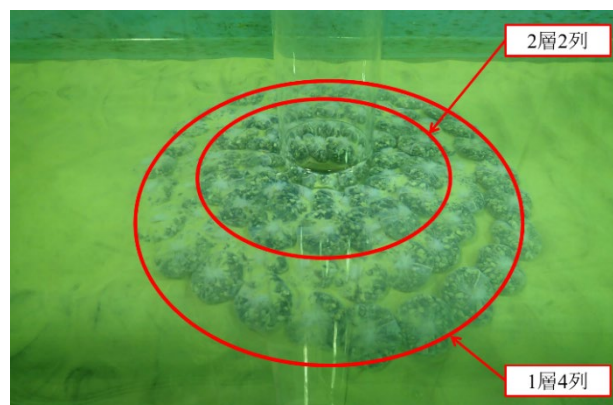


写真-4.1 袋型根固材の最適な敷設構造

表-4.1 洗掘抑制効果の比較 (袋型根固材のみ)

実験名	縮尺	モノパイル	地盤	袋型根固材 <sup>**</sup>		水深 <sup>**</sup>	波浪(不規則波)			流れ	洗掘抑制効果
		径 <sup>*</sup>	中央粒径 <sup>*</sup>	敷設構造	フィルター層		波高 <sup>*</sup>	周期 <sup>*</sup>	作用波数	流速 <sup>*</sup>	最大洗掘深の比
—	—	$D$	$d_{50}$	—	—	$h$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	—	$v$	$f=S_{with}/S_{without}$
洗掘実験A	1/60	6 m	0.6 mm	円形1層4列2層2列など	—	20 m	9.6 m	15 s	5,000 波	—	0.09~0.35
洗掘実験B	1/9	6 m	0.6 mm	円形1層4列2層2列	—	20 m	9.6 m	15 s	1,500 波	—	0.31
		6 m	0.6 mm	円形1層4列2層2列	—	20 m	9.6 m	15 s	1,500 波	1.4 m/s	0.26
		6 m	0.2 mm	2層2列	—	20 m	9.6 m	15 s	3,000 波	1.4 m/s	0.47 <sup>**</sup>

※：現地想定量 ※※： $S_{without}$ は $d_{50}=0.6$ (mm) (現地想定量),  $S_{with}$ は0.2(mm)の条件における最大洗掘深を用いて計算。

表-4.2 洗掘抑制効果の比較 (袋型根固材とフィルター層の併用)

実験名	縮尺	モノパイル	地盤	袋型根固材 <sup>**</sup>		水深 <sup>**</sup>	波浪(不規則波)			流れ	洗掘抑制効果
		径 <sup>*</sup>	中央粒径 <sup>*</sup>	敷設構造	フィルター層		波高 <sup>*</sup>	周期 <sup>*</sup>	作用波数	流速 <sup>*</sup>	最大洗掘深の比
—	—	$D$	$d_{50}$	—	—	$h$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	—	$v$	$f=S_{with}/S_{without}$
洗掘実験A	1/60	6 m	0.6 mm	円形1層4列	有	20 m	9.6 m	15 s	5,000 波	—	0.05
洗掘実験B	1/9	6 m	0.2 mm	2層2列	有：直接	20 m	9.6 m	15 s	1,500 波	1.4 m/s	0.10 <sup>**</sup>
		6 m	0.2 mm	2層2列	有：袋詰め	20 m	9.6 m	15 s	3,000 波	1.4 m/s	0.25 <sup>**</sup>

※：現地想定量 ※※： $S_{without}$ は $d_{50}=0.6$ (mm) (現地想定量),  $S_{with}$ は0.2(mm)の条件における最大洗掘深を用いて計算。

## 5. 袋型根固材及びフィルター層の洗掘抑制機能

### 5.1 無対策条件との最大洗掘深の比較

#### (1) 袋型根固材のみによる対策条件

表-4.1は、洗掘実験A, Bにおける無対策条件と袋型根固材による対策条件のモノパイル際の最大洗掘深を比較したものである。無対策条件と袋型根固材による対策条件のモノパイル際の最大洗掘深をそれぞれ  $S_{without}$  と  $S_{with}$  とし、 $f=S_{with}/S_{without}$  の比を洗掘抑制効果の指標とする。なお、いずれもフィルター層は併用していない。

まず、洗掘実験AとBが同じ条件であるときの洗掘抑制効果を比較する。外力は波浪のみであり、地盤条件、水深条件、波浪条件の現地換算量は共通である。洗掘実験Aは、複数の構造形式条件で実験しており、袋型根固材を円形1層4列2層2列に配置した条件が最も  $f$  が小さい。構造形式条件が異なると、 $f$  は0.09~0.35程度で変動するため、洗掘抑制効果が  $f$  に与える影響は大きい。洗掘実験Aでは、袋型根固材を円形1層4列2層2列に配置した条件で  $f$  が0.1以下である。しかし、洗掘実験Bでは洗掘実験Aと同じ外力条件ではあるものの  $f$  が0.3程度であり、洗掘実験Aと比べると洗掘抑制効果が低い。これは、縮尺効果が働いたものと考えられる。洗掘実験Bの方が現地の現象をより再現しているとする、 $f$  は0.3程度であったと考えた方がよいだろう。

次に、洗掘実験Bにおいて波浪かつ流れが作用する条件の洗掘抑制効果を比較する。波浪のみの場合も、波浪か

つ流れの場合も、いずれも  $f$  は0.3程度である。但し、 $S_{with}$  を絶対量で比較すると、波浪かつ流れの場合の方が大きい。

最後に、洗掘実験Bにおいて底質の粒径を変更した条件の洗掘抑制効果を比較する。外力は、波浪かつ流れを作用させた条件である。底質の中央粒径  $d_{50}$  が0.6mm(現地換算量)の場合には  $f$  は0.3程度である一方、0.2mmの場合には  $f$  は0.5程度となる。但し、残念ながら無対策の  $d_{50}=0.2$ mm の条件で実験できなかったため、 $S_{without}$  には  $d_{50}=0.6$ mm の条件の実験値を用いている。そのため、無対策の  $d_{50}=0.2$ mm の条件で実験したとすると  $S_{without}$  がさらに大きくなり、 $f$  が0.5よりも小さい可能性はある。

実験数が多くないものの、 $f$  は0.3~0.5程度となる条件が多かった。 $f$  の大小は、袋型根固材の構造条件や底質条件の影響を受けると考えられる。

#### (2) 袋型根固材とフィルター層の併用条件

表-4.2は、洗掘実験A, Bにおける無対策条件と、袋型根固材とフィルター層を併用した対策条件のモノパイル際の最大洗掘深を比較したものである。前章と同様に、無対策条件と対策条件のモノパイル際の最大洗掘深の比  $f=S_{with}/S_{without}$  を洗掘抑制効果の指標とする。

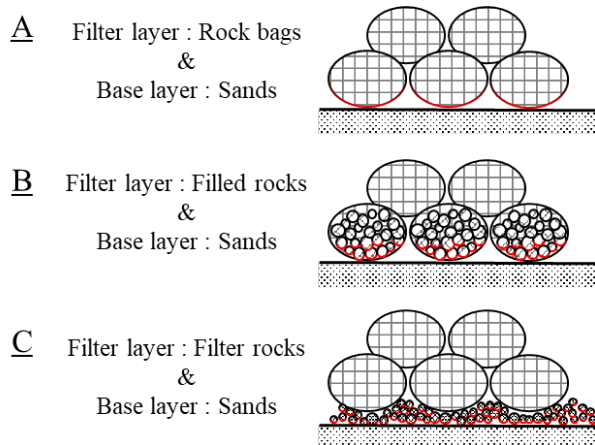
まず、洗掘実験Aの洗掘抑制効果を評価する。外力は波浪のみであり、袋型根固材は円形1層4列に配置している。このときの  $f$  は0.05となる。但し、フィルター層は、袋型根固材の外縁部では飛散し、モノパイル際では袋型根固材の底面で移動することが確認された。フィルター

層併用による洗掘抑制効果は高いものの、安定性が懸念される。

次に、洗掘実験 B の洗掘抑制効果を評価する。外力は波浪かつ流れであり、袋型根固材は 2 層 2 列に配置している。まず、フィルター層を砂地盤に直接設置した場合、 $f$  は 0.10 であり、高い洗掘抑制効果を発揮した。次に、フィルター材を袋に詰めて配置した場合、フィルター材は移動しないものの、 $f$  は 0.25 であり、洗掘抑制効果は低下した。フィルター材を袋に詰めたことで、袋同士に空隙が生じ、砂の吸出しが生じたものと考えられる。

以上の洗掘実験 A, B の結果を踏まえると、袋型根固材に加えて、フィルター層を直接底質上に設置すると、袋型根固材の構造条件や底質条件に依らず、洗掘抑制効果が大幅に向上すると言える。ただし、フィルター材の安定性という観点では、1 層配置よりも 2 層配置の方が、安定性は高かった。また、単粒度碎石よりも混粒度碎石の方が、安定性は高かった。

### Protection for sands



### Protection for filter rocks

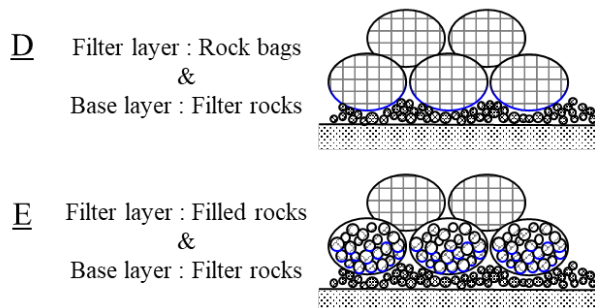


図-5.1 袋型根固材およびフィルター材の働き

## 5.2 袋型根固材及びフィルター材の機能

### (1) 袋型根固材及びフィルター材の機能の概説

袋型根固材またはフィルター層で構成された洗掘対策工を考えたとき、それぞれにはどのような機能が求められるだろうか。

例えば、一般的な石材の敷設による洗掘対策工は、通常アーマー層とフィルター層の 2 層から成り、それぞれに求められる機能が異なる。

フィルター層は、幾何学的遮蔽フィルター (geometrically close filter) と幾何学的開放フィルター (geometrically open filter) の二つに分類することができ、それぞれに求められる機能が異なる。前者は、底質の初動を幾何学的に遮蔽するほど粒径が小さいフィルター層を指す。後者は、多少の底質の移動を許容しつつも外部に損失しないようにすることを期待したフィルター層を指す。

アーマー層は、フィルター層よりも粒径が大きく、洗掘対策工の外的安定性を満足する機能を持つ。なお、洗掘対策工が多少沈下することを許容できるのであれば、アーマー層のみで洗掘対策工を構成することもある。フィルター層よりも粒径が大きい分、アーマー層の空隙から砂が吸い出されるものの、外力が砂地盤に直接作用することを防ぐことで洗掘を弱め、洗掘対策工周辺からの埋め戻りによって洗掘深はいずれ平衡に至る。

図-5.1 は、袋型根固材またはフィルター層が担う機能を 5 つに分類した概念図である。Type A~C は砂地盤を底層と考え、砂が損失することを防ぐように働く。Type D, E は、フィルター材を底層と考え、フィルター材が損失することを防ぐように働く。

Type A は、砂地盤に直接敷設した袋型根固材である。当然、袋型根固材は径が大きいため、フィルター層として機能せずに空隙から吸出しが発生する。アーマー層のみによる洗掘対策工と同様に、袋型根固材は沈下しつつもいずれ平衡に至る。

Type B は、砂地盤と接している袋型根固材の中詰め材である。袋型根固材の中詰め材は、幾何学的遮蔽フィルターと見なすほどではないが、一般の洋上風力発電設備のフィルター層の石材と同程度の粒径である。外力によっては、幾何学的開放フィルターとして機能する可能性がある。

Type C は、袋型根固材と併用し、砂地盤の上層に敷設したフィルター材である。一般の洋上風力発電設備のフィルター層の石材と同様の機能が期待される。一般に、幾何学的遮蔽フィルターとして機能するためには、フィルター層の粒径を非常に小さくする必要がある。そのため、

設計外力に応じて砂の損失を防ぐことができる幾何学的開放フィルターとして機能するように諸元を決定する方が現実的である。

Type Dは、フィルター層の上層にある袋型根固材である。一般の洋上風力発電設備のアーマー層の石材と同様の機能が期待される。袋型根固材の直径は大きいので、空隙でフィルター層は移動しうるけれども、フィルター層の粒径によっては移動を抑えることができる可能性がある。

Type Eは、フィルター層と接している袋型根固材の中詰め材である。袋型根固材の中詰め材は、一般の洋上風力発電設備のフィルター層の石材と同程度の粒径であり、フィルター層とも粒径が近い。そのため、袋型根固材の底部では、フィルター層が移動しにくいと考えられる。

5.2節では、袋型根固材及びフィルター材の機能を上記の5つに分類し、それぞれの機能を定量的に評価する手法について、先行研究と比較しながら考察したい。参考にした先行研究は、DNV-RP-0618<sup>24)</sup>に記載されたものである。DNV-RP-0618には、フィルター材の基準(5.5 Filter criteria)とアーマー層の沈下(5.6 Winnowing)の項目がある。

(2) 砂地盤・袋型根固材・フィルター材諸元の整理

図-5.2は、洗掘実験Bで用いた砂地盤、フィルター材、袋型根固材の中詰め材の粒径加積曲線である。砂は2種類使用したが、浮遊漂砂相似則で中央粒径が現地換算0.2mmに該当する8号珪砂(Quartz)を主に考察に使用する。

袋型根固材の諸元を整理する。袋型根固材は、陸上設置時は円筒形状となり、直径35.5cm、高さ11.1cmとなる。現地換算量で直径3.2m、高さ1.0mである。袋型根固材の中詰め材の中央粒径は14.1mmであり、現地換算量で0.13mとなる。袋型根固材の網目は0.05m程度の大きさであり、中詰め材の粒径は0.05m程度より大きい。

袋型根固材とフィルター層を併用した場合、フィルター材には単粒度碎石(Filter rocks(a))と混粒度碎石(Filter rocks(b))の2種類を用いた。中央粒径は両者とも同じく3.5mmであり、現地換算で0.03mである。

Esteban et al. (2019)によると、既存の洋上風力発電設備の洗掘対策工のアーマー層に用いられる石材の中央粒径は0.15~0.40m、フィルター層に用いられる石材の中央粒径は0.05~0.20m程度である。袋型根固材自身は、通常のアーマー材よりも圧倒的に大きい。袋型根固材の中詰め材は、通常のフィルター材と同程度の粒径である。

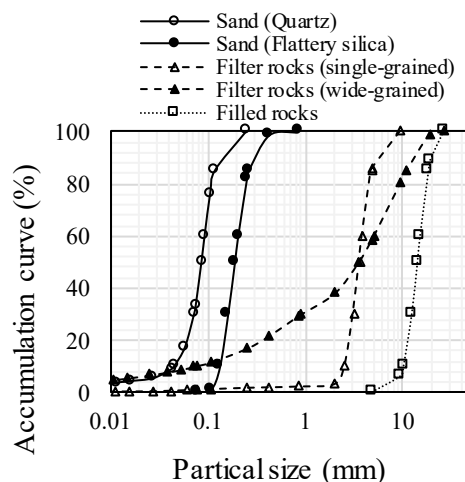


図-5.2 洗掘実験Bの粒径加積曲線

(3) 幾何学的遮蔽フィルター

CIRIA (2007)は粒状フィルターの粒径と、底層とフィルター層の粒径が、以下のような関係にあるときに、幾何学的遮蔽フィルターとして機能するとした。

$$\frac{d_{15f}}{d_{85b}} \leq 5 \tag{5.1}$$

$$\frac{d_{15f}}{d_{15b}} > 5 \tag{5.2}$$

$$\frac{d_{60f}}{d_{10f}} \leq 10 \tag{5.3}$$

ここで、添え字のb及びfはそれぞれ地盤層及びフィルター層に該当していることを示す。また、10, 15, 60, 85などの数字は、各数字%以下の粒径の粒子が存在していることを示す。式(5.1)は地盤層の安定条件、式(5.2)は透過条件、式(5.3)は内部安定条件を示す。DNV-RP-0618では、式(5.3)の規定はなく、式(5.2)の右辺は1.0としている。いずれの基準でも、式(5.1)の安定条件は共通している。

表-5.1は、洗掘実験BにおけるType B~EがCIRIA, DNV-RP-0618の幾何学的遮蔽フィルターに適合するかを検証したものである。以降、TypeB~Eに分けて記載する。

まず、砂地盤に対する袋型根固材の中詰め材(TypeB)の粒径の比を評価する。式(5.1)~(5.3)の条件の内、式(5.1)の安定条件が最も厳しく、中詰め材の粒径 $d_{15f}$ は十分に小さくない。袋型根固材の中詰め材の粒径は袋型根固材の網材の目よりも大きい必要があり、袋型根固材の中詰め材の粒径を幾何学的遮蔽フィルターとなるまで小さくすることは現実的でない。

次に、砂地盤に対するフィルター材(TypeC)の粒径の



比を評価する。式(5.1)の安定条件を示す  $d_{15f}/d_{85b}$  は単粒度砕石で22程度、混粒度砕石で6程度となり、いずれも安定条件を満足しない。また、混粒度砕石は、式(5.3)の内部安定条件  $d_{60f}/d_{10f}$  が74程度となる。DNV-RP-0618の基準に式(5.3)の記載はないものの、CIRIAの基準に従えば混粒度砕石も幾何学的遮蔽フィルターの条件を満足しない。従って、フィルター材を幾何学的遮蔽フィルターとなるように設計するためには、安定・内部安定条件が非常に厳しく、現実的でないだろう。

次に、袋型根固材自身を1つの石材と見なし、フィルター材に対する袋型根固材 (Type D) の径の比を評価する。袋型根固材自身の大きさは、代表値として袋型根固材の直径 (35.5cm) として採用した。袋型根固材の大きさとフィルター材の粒径の比を評価すると、単粒度砕石、混粒度砕石のいずれも、式(5.1)の安定条件を満足しないことが確認できる。これは、袋型根固材同士の空隙でフィルター材が移動し得ることを示している。

最後に、フィルター材に対する中詰め材 (TypeE) の径の比を評価する。単粒度砕石、混粒度砕石のいずれも、式(5.1)~(5.3)の安定条件を満足することが確認できる。したがって、中詰め材はフィルター材に対して幾何学的遮蔽フィルターとして機能し、袋型根固材の中詰め材が接している箇所ではフィルター材はほぼ移動しないと考えられる。

以上から、砂地盤に対して袋型根固材の中詰め材やフ

ィルター層が幾何学的遮蔽フィルターとして機能することは難しいものの、袋型根固材の中詰め材はフィルター材の幾何学的遮蔽フィルターとしては機能しており、フィルター材が安定して存在できたと評価することができる。

実際に、洗掘実験BのCASE-7では、フィルター層が移動したのは袋型根固材の空隙内であり、直上部に袋型根固材がある箇所ではあまり移動していないことが確認された。(写真-2.6, 写真-2.7)。これは、袋型根固材の中詰め材がフィルター材に対して幾何学的遮蔽フィルターとして機能したためと考えられる。

(4) 幾何学的開放フィルター

a) 流れが作用する平面床上のフィルター層

Hoffmans (2012) は、流れが作用するモノパイルの無い平面床上の単一フィルター層を対象に、フィルター層表面から弱められながらも底層まで浸透したせん断力と、砂地盤の移動限界応力を比較することで、幾何学的開放フィルターに必要な厚さと粒径の関係を、以下のような関係式で記述した。

$$\frac{D_f}{d_{50f}} = \alpha_d \ln \left( \frac{d_{50f} \Delta_f \psi_{c,f} (1 - \gamma V_f)}{d_{30b} \Delta_b \psi_{c,b} (1 - \gamma V_b)} \right) \quad (5.4)$$

表-5.1 袋型根固材とフィルター材諸元の幾何学的遮蔽フィルター条件の適用性

Protection Type	洗掘実験B			洗掘実験B		洗掘実験B		CUR(2010), DNV-RP- 0618
	CASE-6	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	
	Type B	Type C	Type C	Type D	Type D	Type E	Type E	
Material	Sands,Quartz	Sands,Quartz	Sands,Quartz	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	-
Base layer $d_{15b}$ (mm)	0.06	0.06	0.06	2.67	0.74	2.67	0.74	-
$d_{50b}$ (mm)	0.09	0.09	0.09	3.57	3.54	3.57	3.54	-
$d_{85b}$ (mm)	0.12	0.12	0.12	4.73	11.0	4.73	11.0	-
Material	Filled rocks	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	Rock bags	Rock bags	Filled rocks	Filled rocks	-
Filter layer $d_{10f}$ (mm)	10.1	2.53	0.07	355	355	10.1	10.1	-
$d_{15f}$ (mm)	10.7	2.67	0.74	355	355	10.7	10.7	-
$d_{50f}$ (mm)	14.1	3.57	3.54	355	355	14.1	14.1	-
$d_{60f}$ (mm)	15.0	3.82	5.05	355	355	15.0	15.0	-
$d_{85f}$ (mm)	18.4	4.73	11.0	355	355	18.4	18.4	-
Stability : $d_{15f}/d_{85b}$	88.8	22.3	6.1	75.1	32.3	2.3	1.0	≤5
Permeability : $d_{15f}/d_{15b}$	177.5	44.5	12.3	133.0	482.5	4.0	14.5	>1
Int. stability : $d_{60f}/d_{10f}$	1.5	1.5	73.7	1.0	1.0	1.5	1.5	≤10

$D_f$ はフィルター層の厚さ、 $d_{50f}$ はフィルター層の中央粒径である。変数の下付き添え字は、 $b$ が底層、 $f$ がフィルター層の諸元であることを示している。 $A$ は比重、 $\psi_c$ は限界シールズ数、 $V$ は偏差係数 ( $V_f=1-d_{15f}/d_{50f}, V_b=1-d_{15b}/d_{50b}$ ) である。また、 $\alpha_d$ 、 $\gamma$ は経験定数であり、Hoffmansはそれぞれ 1.5, 0.625 としている。但し、van de Sande et al. (2014)は式(5.4)の  $\alpha_d=1.5$  が過大であるととし、 $\alpha_d$ を 0.82 (設計上安全側) または  $\alpha_d=0.69$  (90%信頼閾値) に見直したが、本研究では DNV-RP-0618 が設計上安全側としている  $\alpha_d=2$  を用いることとする。

表-5.2は、洗掘実験BにおけるType B~EがHoffmansの式を基準とする幾何学的開放フィルターに適合するかを検証したものである。洗掘実験Bでは流れのみを外力とする実験はおこなっていないものの、Hoffmansの式は外力に依存せず底層とフィルター層の諸元で決まるため、洗掘実験Bの諸元を基にフィルター層の所要厚を算出し、洗掘実験Bの層厚と比較した。

本実験に用いた袋型根固材の中詰め材の諸元を基に、袋型根固材の必要厚を式(5.4)より求める。計算に使用した諸元を表-5.2に示す。限界シールズ数  $\psi_{c,f}$ 、 $\psi_{c,b}$ には様々な算出方法があり、本研究では Soulby and Whitehouse(1997)の式(5.5)を用いた。

$$\psi_c = \frac{0.30}{1+1.2D^*} + 0.055 \left[ 1 - e^{-0.020D^*} \right], \quad D^* = \left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} d \quad (5.5)$$

まず、砂地盤に対して袋型根固材の中詰め材 (TypeB) が幾何学的開放フィルターとなるための必要厚  $D_f$  は、 $D_f=0.13m$  となる。洗掘実験Bに用いた袋型根固材の1層の高さは 0.11m であり、モノパイル付近は二層に重なっている。つまり、特にモノパイル付近の袋型根固材はHoffmansの必要厚と同等またはそれ以上となる。次に、砂地盤に対するフィルター材 (TypeC) を評価する。式(5.4)で求めた必要厚  $D_f$  が実際の層厚よりも小さい。

従って、流れが作用する場合に、フィルター材だけでなく、複数層に重ねた袋型根固材の中詰め材が、砂地盤に対する幾何学的開放フィルターとして機能する可能性があることが示された。稲垣ら<sup>13)</sup>も、モノパイル付近に設置した袋型根固材による洗掘対策工の洗掘抑制効果を実験によって検証し、波浪を作用させる条件ではあったが、袋型根固材の高さがHoffmansの必要厚を超えており洗掘が抑制できるとした。

但し、Hoffmansが想定しているのは、モノパイルの無い平面床上の単一フィルター層であることに注意が必要である。平面床ではなくモノパイルが存在すると、モノパイル前面で馬蹄形渦が発生し、洗掘に大きな影響を及ぼす。Nielsen and Petersen(2018)は、構造物の影響を加味していないHoffmansの式は、モノパイル周辺の砂の安定性には適用できないとしている。必要厚の定量性については議論が分かれつつも、袋型根固材の中詰め材であつ

表-5.2 Hoffmans(2012)より求めた必要厚

Protection Type	洗掘実験B			洗掘実験B		洗掘実験B		Hoffmans
	CASE-6	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	
Material	Type B	Type C	Type C	Type D	Type D	Type E	Type E	-
Base layer	Sands,Quartz	Sands,Quartz	Sands,Quartz	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	-
$d_{15b}$ (mm)	0.06	0.06	0.06	2.67	0.74	2.67	0.74	-
$d_{50b}$ (mm)	0.09	0.09	0.09	3.57	3.54	3.57	3.54	-
$\psi_{c,b}$	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	-
Filter layer	Filled rocks	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	Rock bags	Rock bags	Filled rocks	Filled rocks	-
$d_{15f}$ (mm)	10.7	2.67	0.74	355	355	10.7	10.7	-
$d_{50f}$ (mm)	14.1	3.57	3.54	355	355	14.1	14.1	-
$\psi_{c,f}$	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	-
thickness (m)	0.22	0.05	0.05	0.11	0.11	0.11	0.11	-
$d_{50f}/d_{50b}$	156.7	39.7	39.3	99.4	100.3	3.9	4.0	-
$A_f/A_b$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
$\psi_{c,f}/\psi_{c,b}$	0.7	0.6	0.6	1.1	1.1	1.1	1.1	-
$(1-\gamma V_f)/(1-\gamma V_b)$	0.9	0.9	1.5	0.7	0.4	1.0	0.6	-
$\alpha_d$	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-
$D_f$ (m)	0.13	0.02	0.03	3.10	2.76	0.04	0.03	< thickness

でも十分な層厚であれば流れによるせん断力を弱め、砂が移動しにくくなるように機能する可能性はあるだろう。

しかし、袋型根固材の中詰め材が幾何学的開放フィルターとして機能する可能性があるとしても、袋型根固材同士の空隙がある以上、砂の吸出しは発生する。袋型根固材の層厚を確保したとしても、袋型根固材を砂地盤に直接敷設している以上は、袋型根固材は沈下するだろう。袋型根固材の沈下を許容できないのであれば、フィルター層と併用することが望ましい。

次に、フィルター材に対する袋型根固材(TypeD)の必要厚は、袋型根固材の長さよりも非常に大きい ( $D_f=0.6\sim 0.7m$ )、また、フィルター材に対する中詰め材 (TypeE) の必要厚は、袋型根固材の長さよりも十分小さい ( $D_f=0.03\sim 0.04m$ )。従って、流れのせん断力を弱めることで、袋型根固材の空隙ではフィルター材が移動する可能性があるものの、中詰め材が接している部分では移動しにくい可能性がある。この場合も、Hoffmans がモノパイルを考慮していないことには注意する必要があるものの、フィルター材に対する中詰め材は幾何学的遮蔽フィルターとしても機能しており (表-5.1)、流れが作用したとしても安定していることは想像に難くない。

a) 波浪および流れが作用するモノパイル周辺のフィルター層

前項では外力として流れのみを対象に考えたが、日本近海は波浪も大きい。日本近海の波浪は、太平洋側では外洋からのうねりや台風による高波、日本海側では冬季風

浪などで特徴付けられる。波浪に伴う水面変動は、透水構造物によっても低減できない圧力勾配力を生じさせる。

Nielsen and Petersen(2018)は、模型実験と既往研究の結果を基に、流れのみ、波浪のみ、波浪かつ流れが作用する場合のモノパイル周辺のフィルター材底部の砂の移動限界を、式(5.6)に示す移動限界指標  $\Omega_{cr}$ ,  $\Omega_{cr,m}$  で整理した。

$$\text{流れ;} \quad \Omega_{cr} = \frac{V_{cr}^2}{g(s-1)d_{50}} \frac{D_c}{D_p} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \text{波浪;} \quad \Omega_{cr,m} &= \frac{u_{m,cr}^2}{g(s-1)d_{50}} \frac{D_c}{D_p} \\ u_{m,cr} &= \frac{\pi H_{cr}}{T} \frac{1}{\sinh(kh)} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\text{波浪・流れ;} \quad \Omega_{cr,m} = \frac{(V_{cr} + u_{m,cr})^2}{g(s-1)d_{50}} \frac{D_c}{D_p} \quad (5.8)$$

ここで、 $D_c$ は石の粒径 (Nielsen and Petersen は中央粒径を用いている)、 $D_p$ はパイル径、 $d_{50}$ は砂の中央粒径である。また、 $V_{cr}$ ,  $u_{m,cr}$ は、それぞれフィルター材底部の砂が移動を開始する流れの流速と波浪の底面流速である。波浪の底面流速  $u_{m,cr}$ は、微小振幅波理論に従い、砂が移動を開始した波高  $H_{cr}$ 、周期  $T$ 、水深  $h$ 、波数  $k$ に基づき計算した。 $\Omega_{cr}$ ,  $\Omega_{cr,m}$ は、砂の移動限界に従来用いられてきたシールド数とは異なり、モノパイル径に対する石材の大きさの比  $D_c/D_p$ が含まれていることが特徴である。導出の詳細は、Nielsen et al. (2011)などを参考にされたい。

表-5.3 Nielsen and Petersen(2018)より求めた移動限界指標

	洗掘実験B			洗掘実験B		洗掘実験B		Nielsen and Petersen 2018	
	CASE-6	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7	CASE-7		
Protection Type	Type B	Type C	Type C	Type D	Type D	Type E	Type E	-	
Base layer	Material Sands, Quartz	Sands, Quartz	Sands, Quartz	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	-	
	$d_{50b}$ (mm)	0.09	0.09	0.09	3.57	3.54	3.57	3.54	-
Filter layer	Material Filled rocks	Filter rocks (a) ,single-grained	Filter rocks (b) ,wide-grained	Rock bags	Rock bags	Filled rocks	Filled rocks	-	
	$d_{50f}$ (mm)	14.1	3.57	3.54	355	355	14.1	14.1	-
	$t_{sp}$ (m)	0.11	0.05	0.05	0.11	0.11	0.11	0.11	-
	$V$ (m/s)	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	-
	$u_m$ (m/s)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	-
	$T$ (s)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	-
	$D_p$ (m)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	-
	$KC$	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	-
	$t_{sp}/d_{50b}$	1222	556	556	31	31	31	31	-
	$\Omega_m$	29.50	7.47	7.41	18.73	18.89	0.74	0.75	$< \Omega_{cr,m}$

Nielsen and Petersen (2018) は、移動限界指標  $\Omega_{cr}$ ,  $\Omega_{cr,m}$  と必要厚  $t_{sp}/d_{50}$  の関係を図で整理しており、詳細は論文を確認されたい。波浪かつ流れ (A), 流れのみ (B), 波浪のみ (C~E) の外力別に、自身の実験と先行研究の結果を整理している。移動限界指標  $\Omega_{cr}$ ,  $\Omega_{cr,m}$  が大きいほど、必要厚  $t_{sp}/d_{50}$  も大きい。移動限界指標  $\Omega_{cr}$ ,  $\Omega_{cr,m}$  は関数化されていないため、Nielsen and Petersen の整理した図を基に幾何学的開放フィルターの評価を行う。設計条件から求められる移動指標  $\Omega$ ,  $\Omega_m$  とフィルター層厚  $t_{sp}/d_{50}$  を比較し、移動限界である実線よりも下部にあれば、幾何学的開放フィルターと見なしてよい。

表-5.3 は、洗掘実験 B で波浪かつ流れを作用させた CASE-7 の条件を基に算出した移動指標  $\Omega_m$  である。まず、砂地盤に対して袋型根固材の中詰め材 (TypeB) やフィルター材 (TypeC) の条件で計算した移動指標  $\Omega_m$  と、所要厚  $t_{sp}/d_{50}$  は、いずれも Nielsen and Petersen の移動限界曲線の範囲から外れており、評価できない。 $\Omega_m$  や  $t_{sp}/d_{50}$  が大きくなる要因は、外力や粒径が想定よりも大きすぎることで考えられる。

次に、フィルター層に対する袋型根固材 (TypeD), 中詰め材 (TypeE) の条件で計算した移動指標  $\Omega_m$  と、所要厚  $t_{sp}/d_{50}$  を比較すると、袋型根固材は Nielsen and Petersen の移動限界曲線よりも上部にあり、中詰め材は下部にある。よって、袋型根固材は幾何学的開放フィルターとして機能しないものの、中詰め材は機能する可能性がある。実際の洗掘実験 B の結果と類似しており、実験結果ではフィルター材は袋型根固材の空隙で移動し、中詰め材と接している箇所ではあまり移動しなかった。

Nielsen and Petersen の移動限界指標は、波浪のみ、流れのみ、波浪かつ流れの外力 3 条件に適用できる点で優れており、洗掘実験 B の実験結果を部分的に説明することができた。しかし、日本近海の波浪条件や実際のフィルター材条件では対象範囲外となる可能性があり、設計に汎用的に活用できるとは言えない。また、移動限界指標  $\Omega_{cr}$ ,  $\Omega_{cr,m}$  が関数化されておらず、厳密な比較が難しい。

### 5.3 袋型根固材及びフィルター材の機能の定量的評価 手法の検討

前節では、先行研究に基づいて袋型根固材及びフィルター材の機能を評価したが、特に波浪が作用する場合に評価手法が十分でない。Nielsen and Petersen の移動限界指標は、適用できる範囲が限定されていることや関数化されていないことから、汎用的な設計指標とすることに懸念がある。

5.3 節では、De Graauw et al. (1984) が提案した式に

よって袋型根固材及びフィルター材の機能を定量的に評価する手法を検証する。

#### (1) De Graauw らの移動限界曲線

De Graauw らは、次元管水路の実験で、砂地盤上に敷設されたフィルター層に定常流が作用した場合の砂の安定性を検証し、式(5.9)及び(5.10)の砂の限界動水勾配を提案した。

$$I_c = \left[ \frac{0.06}{n_F^3 d_{15F}^{\frac{4}{3}}} + \frac{n_F^{\frac{5}{3}} d_{15F}^{\frac{1}{3}}}{1000 d_{50B}^{\frac{5}{3}}} \right] u_{*c}^2 \quad (5.9)$$

$$u_{*c} = 1.3 d_B^{0.57} + 8.3 * 10^{-8} d_B^{-1.2} \quad (5.10)$$

ここで、フィルター層内部の動水勾配  $I_c$ 、碎石の 15% 通過粒径  $d_{15F}$ 、空隙率  $n_F$ 、砂の中央粒径  $d_{50B}$  である。De Graauw らは、流れが定常流または振動流、あるいはフィルター層に対して直角または平行である条件で限界動水勾配を算出している。しかし、フィルター層に平行な振動流を作用させた場合、締固めによってほとんど周期に依存しなくなり、定常な流れと限界動水勾配が一致するとしている。実験で対象とした底層の粒径は 0.13~62mm であり、対象となる粒径の範囲が広い。

鈴木ら (2002) は、消波ブロック被覆堤のマウンド部に生じる砂の吸出しを、De Graauw らの限界動水勾配の推定式を用いて説明した。消波ブロック被覆堤のマウンド内では、波浪の作用によって動水勾配が生じる。マウンド内の動水勾配がある閾値を超えると、砂の吸出しが発生する。

本研究でも、鈴木らと同じく De Graauw らの限界動水勾配の推定式を用い、洗掘実験 B のフィルター層からの砂の流出を説明しよう。なお、以降の議論は、フィルター層が静的に安定して存在している状態である場合に成立するものであり、洗掘実験 A のようにフィルター層が転動・流出してしまった場合には成立しないことに注意する。

#### (2) 実験結果の解析

まず、洗掘実験 B において、モノパイル際に設置した間隙水圧計で測定した圧力を基に、モノパイル周辺における動水勾配を算出する。モノパイル際で圧力を計測したのは、沖側正対位置 ( $\theta=0^\circ$ ) と、岸沖方向垂直位置 ( $\theta=90^\circ$ ) の 2 点である。まず、動水勾配を観測点の水頭の差分と各観測点との設置間隔  $\Delta x$  を用いて式(5.11)のように定義する。

$$I = -\frac{H_{\theta=90^\circ} - H_{\theta=0^\circ}}{\Delta x} \quad (5.11)$$

$$H = \frac{p}{\rho g} \quad (5.12)$$

各間隙水圧計における水頭は式(5.12)のように表され、 $p$ は観測圧力である。間隙水圧計は両方とも初期の砂地盤と同じ標高に設置されている。図-5.3に、Case1の代表時間の $\theta=0^\circ$ 及び $\theta=-90^\circ$ で観測された圧力と算出した動水勾配 $i$ の代表時間帯の時系列を示す。動水勾配は全体として正の方向、すなわち沖から岸に向かう方向に生じている。

実験結果より整理した動水勾配を、表-5.4に示す。Case1~4ではすべて不規則波を入射しており、水位変動に従って動水勾配も不規則的な挙動を示す。従って、動水勾配の時系列をゼロアップクロス法によって波別解析を行い、代表値として、最大値( $I_{max}$ )、上位1/20( $I_{1/20}$ )、1/10( $I_{1/10}$ )、1/3( $I_{1/3}$ )及び全波の平均値( $I_m$ )を算定して整理した。モノパイル際における動水勾配 $I_{1/3}$ は、袋型根固材の有無によらず、いずれのケースにおいても0.2程度である。外力が波浪のみの場合よりも流れと共存させた場合の方が動水勾配が小さいのは、青田ら(2023)が考察したとおり、波浪と流れを順方向に作用させているためと考えられる。

表-5.4に、動水勾配とともに袋型根固材及びフィルター材の諸元を整理する。TypeB, Cは、底層を砂地盤として上層を袋型根固材の中詰め材及びフィルター材としたものである。このとき、袋型根固材の中詰め材及びフィルター材の空隙率 $n_f$ は0.5とする。TypeD, Eは、底層をフィルター材(単粒度砕石, Filter rocks(a)と混粒度砕石, Filter rocks(b)の2種類)として上層を袋型根固材自身と中詰め材にしたものである。底層の諸元(下付き文字b)を単粒度・混粒度砕石の諸元に読み替える。

なお、フィルター材を底層とした場合は、式(5.9)の底層の粒径を、中央粒径 $d_{50b}$ ではなく85%粒径 $d_{85b}$ を用いることとした。De Graauwらは論文内で「粒度分布が広い底質条件では、底質は85%粒径で特徴付けた方がよいかもしれない」と指摘している。また、CIRIAの安定条件(式(5.1))も、底質の粒径に85%粒径を用いている通り、底質の安定条件を評価する際に底質の代表値を85%粒径とすることは、他の先行研究でも行われている。また、洗掘実験Bの結果より、単粒度・混粒度砕石の中央粒径 $d_{50b}$ はほとんど同じであるものの、実験の様子から混粒度砕石の安定性の方が明らかに高かった。中央粒径 $d_{50b}$ が同じ場合、式(5.9)に適用しても両者に違いは生まれない。しかし、含

有率が小さいながらも、粒径の大きい石が含まれている混粒度砕石の安定性が高い方が自然である。

袋型根固材自身の大きさは、代表値として袋型根固材の直径(35.5cm)を採用した。また、袋型根固材の空隙は、円筒と接する直方体を仮定したときの四隅の体積率とした( $n_f=0.2$ )。なお、中詰め材も空隙を持つが、袋型根固材自身を1つの石材として考える際には中詰め材の空隙を含めない。

### (3) 実験結果から得られる考察

図-5.4、図-5.5に、De Graauwらの移動限界式との関係をプロットする。図-5.4の左図は、底層をフラタリーサンドとしたTypeB、右図は底層を8号珪砂としたTypeBである。実線は式(5.9)から得られる曲線(移動限界曲線と呼称する)である。この移動限界曲線よりも上部にプロットされた場合、De Graauwらが想定した閾値よりも動水勾配が大きいことを示し、砂の移動が生じると評価できる。また、図-5.5の左図は底層を単粒度・混粒度砕石として上層を袋型根固材自身としたTypeDと、右図は上層を中詰め材としたTypeEである。

まず、図-5.4の左図より、砂地盤(フラタリーサンド)に対する中詰め材(TypeB)は、Case3,4のいずれも移動限界曲線よりも上部にある。また、図-5.4の右図より、砂地盤(8号珪砂)に対する中詰め材(TypeB)も移動限界曲線よりも上部にある。これは、中詰め材の底部では砂が移動しうることを示しており、実験結果と整合している。

次に、図-5.4の右図より、砂地盤に対するフィルター材(TypeC)は、移動限界曲線よりも下部にある。洗掘実験Bの結果では、フィルター層を設けた場合にモノパイル際の洗掘が非常に小さかったため、実験結果を良く説明する。なお、混粒度砕石は15%粒径が小さいため、動水勾配最大値でも移動限界曲線を超えることはない。一方、単粒度砕石は最大値でみると移動限界曲線を超えるものの、上位1/3平均値でみると超えていない。実験結果では、単粒度・混粒度砕石のいずれもほとんど沈下が見られなかったことを踏まえると、不規則波においてフィルター材の機能を評価する際には、上位1/3平均値の動水勾配を用いればよいだろう。

次に、図-5.5の左図より、フィルター材に対する袋型根固材自身(TypeD)は、混粒度砕石の場合は移動限界曲線の下方にあり、単粒度砕石は上方にある。実験結果より、特に単粒度砕石は袋型根固材の空隙内で移動していたため、実験結果と整合している。

最後に、図-5.5の右図より、フィルター材に対する中

詰め材 (TypeE) は、移動限界曲線よりも下部にある。これは、袋型根固材の空隙ではフィルター材が移動するものの、中詰め材の底部ではフィルター材が安定することを示しており、実験結果と整合している。

以上の考察より、De Graauw らの移動限界曲線を用いた幾何学的開放フィルターの評価は、実験結果を良く説明することが確認できた。本来、De Graauw らは次元管流水路で振動流の作用するフィルター層を対象とした研究であるものの、本実験のようにモノパイル周囲の動水勾配が定量できる場合には、モノパイルの洗掘対策工にも適用することができるだろう。また、前述の Nielsen and

Petersen の移動限界指標では適用範囲外となる条件においても説明することができた。De Graauw の方が移動限界曲線が関数化されている分、汎用性が高いだろう。

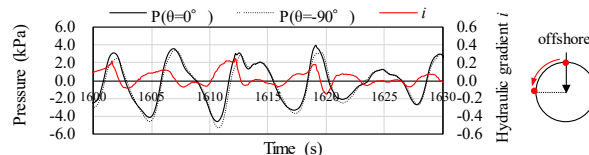


図-5.3 Case1 代表時間の水圧と動水勾配の時系列

表-5.4 De Graauw らの移動限界式の整理に使用した諸元

Case	External Force <sup>**</sup>	Hydraulic gradient					Protection Type	Base layer		Filter layer			
		$i_{max}$	$i_{1/20}$	$i_{1/10}$	$i_{1/3}$	$i_m$		Material	$d_{50b}$ (mm)	Material	$d_{15f}$ (mm)	$n_f$	$n d_{15f}/d_{50b}$
1	W	0.62	0.46	0.38	0.24	0.14	-	Sand (Flattery silica)	0.19	-	-	-	-
3	W	0.55	0.39	0.34	0.25	0.15	Type B	Sand (Flattery silica)	0.19	Filled rocks	9.5	0.5	25.0
4	W & C	0.44	0.28	0.24	0.18	0.11	Type B	Sand (Flattery silica)	0.19	Filled rocks	9.5	0.5	25.0
6	W & C	0.48	0.32	0.28	0.19	0.11	Type B	Sand (Quartz)	0.09	Filled rocks	9.5	0.5	52.8
7	W & C	0.78	0.36	0.30	0.21	0.12	Type B	Sand (Quartz)	0.09	Filled rocks	9.5	0.5	52.8
7	W & C	0.78	0.36	0.30	0.21	0.12	Type C	Sand (Quartz)	0.09	Filter rocks(a) (single-grained)	2.7	0.5	15.0
7	W & C	0.78	0.36	0.30	0.21	0.12	Type C	Sand (Quartz)	0.09	Filter rocks(b) (wide-grained)	0.2	0.5	1.1
Case	External Force <sup>**</sup>	Hydraulic gradient					Protection Type	Base layer		Filter layer			
		$i_{max}$	$i_{1/20}$	$i_{1/10}$	$i_{1/3}$	$i_m$		Material	$d_{85b}$ (mm)	Material	$d_{15f}$ (mm)	$n_f$	$n d_{15f}/d_{85b}$
7	W & C	0.78	0.36	0.30	0.21	0.12	Type D	Filter rocks(a) (single-grained)	4.7	Rock bags	355	0.2	15.1
7	W & C	0.78	0.36	0.30	0.21	0.12	Type D	Filter rocks(b) (wide-grained)	11	Rock bags	355	0.2	6.5
7	W & C	0.78	0.36	0.30	0.21	0.12	Type E	Filter rocks(a) (single-grained)	4.7	Filled rocks	11	0.5	1.2
7	W & C	0.78	0.36	0.30	0.21	0.12	Type E	Filter rocks(b) (wide-grained)	11	Filled rocks	11	0.5	0.5

\*\*"W"; Wave, "W & C"; Wave & Current

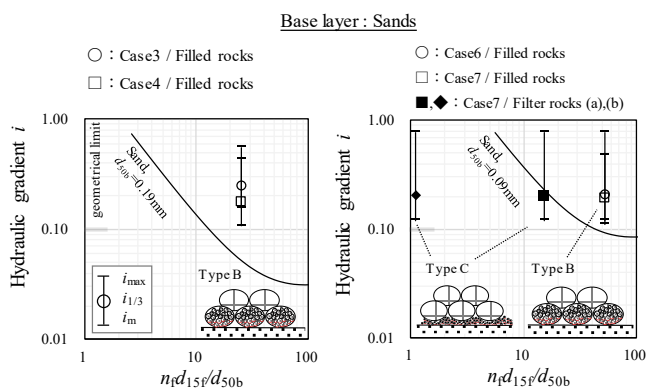


図-5.4 各ケースの動水勾配と移動限界曲線の関係 (底層が砂地盤の場合)

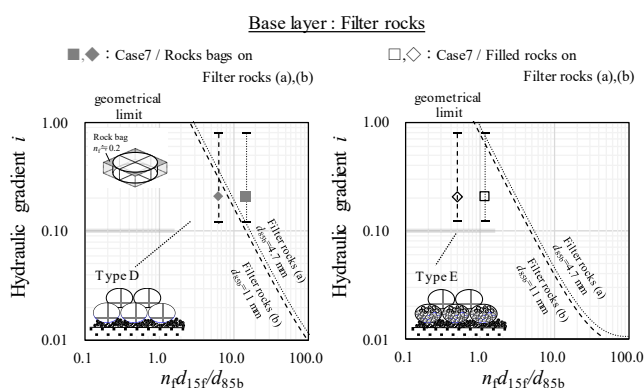


図-5.5 各ケースの動水勾配と移動限界曲線の関係 (底層がフィルター材の場合)

## (4) モノパイル周辺の動水勾配の算出

モノパイル周辺の動水勾配を、線形速度ポテンシャルを用いて算出する。MacCamy and Fuchs (1954) は、波浪場において円筒周りに生じる線形速度ポテンシャルを定式化している。MacCamy and Fuchs の線形速度ポテンシャルの導出過程は省略するが、ベルヌーイの式を満たすような条件下（非圧縮、非回転、非粘性）において、進行波の速度ポテンシャルと、パイル周りに生じる回折波の速度ポテンシャルを、円柱周りや無限遠における境界条件を満たすように重ね合わせた解を求めた。具体的に、線形速度ポテンシャル  $\Phi$  は、式(5.13)で表すことができる。

$$\Phi(r, \theta, z, t) = -\frac{igA}{\omega} e^{-i\omega t} \frac{\cosh(kz)}{\cosh(kh)} \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \frac{J_m(kr)H'_m(ka) - J'_m(ka)H_m(kr)}{H'_m(ka)} e^{im\theta} \quad (5.13)$$

このとき、 $A$  は振幅 ( $H/2$ )、 $\omega$  ( $2\pi/T$ ) は各周波数、 $k$  は波数 ( $2\pi/L$ )、 $h$  は水深、 $a$  はパイル半径である。また、 $J_m$ 、 $H_m$  は、ベッセル関数、ハンケル関数である。なお、このポテンシャル関数の表現方法は、Chatjigeorgiou (2018) より引用しているものの、MacCamy and Fuchs の式と同値である。

速度ポテンシャルと流速の関係は以下の通りである。

$$u_r(r, \theta, z, t) = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad (5.14)$$

$$u_\theta(r, \theta, z, t) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \quad (5.15)$$

式(5.14)、(5.15)は、半径方向、動径方向の流速である。ある地点の底面流速  $U$  を求めるためには、

$$|U| = \sqrt{u_r^2(r, \theta, 0, t) + u_\theta^2(r, \theta, 0, t)}$$

を計算すればよい。但し、MacCamy and Fuchs は無限遠に広がる平らな底面を仮定しており、実験のように洗掘対策工は想定していないことに注意されたい。

底面流速  $U$  は  $(r, \theta, t)$  の3変数関数であるが、時間方向に対して最大値をとった  $U_{max}(r, \theta)$  を考える。 $U_{max}$  のうち、定数項を  $U_0$ 、 $(r, \theta)$  に依存する項を  $U^*(r, \theta)$  として以下のように書き直すことができる。

$$U_{max} = U_0 U^*(r, \theta), \quad U_0 = \frac{kgA}{\omega \cosh(kh)} \quad (5.16)$$

式(5.14)～(5.16)を基に、 $U^*(r, \theta)$  を求めた計算例を図-5.6に示す。下図は  $U^*(r, \theta)$  の分布図であり、上図はパイルからの距離ごとで  $\theta$  方向の最大値を算出したものである。下図から、モノパイルより十分離れている位置の  $U^*$  は一様であるものの、モノパイル付近の縮流の影響により、 $U^*$  はモノパイル際の岸沖方向で最小、沿岸方向（岸沖方向に対して直角方向）で最大となることが確認できる。また、上図より、モノパイル付近の流速の増大は、直径  $2D_p \sim 3D_p$  の範囲まで発生する。

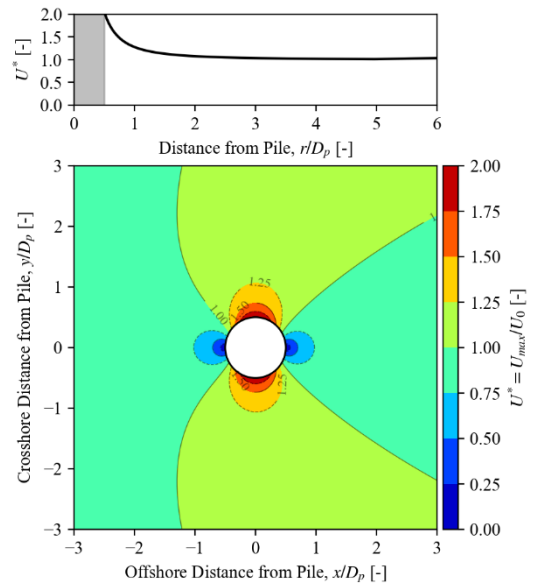


図-5.6 無次元化した最大底面流速  $U^*(r, \theta)$  分布図  
( $H=5\text{m}$ ,  $T=15\text{s}$ ,  $h=20\text{m}$ ,  $D_p=6\text{m}$ )

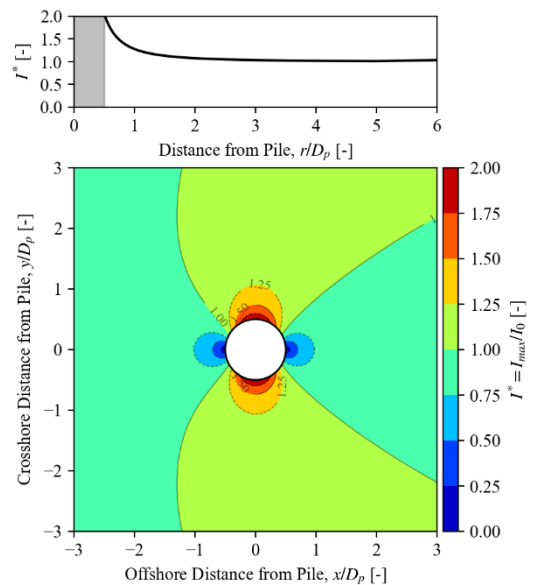


図-5.7 最大底面動水勾配  $I^*(r, \theta)$  分布図  
( $H=5\text{m}$ ,  $T=15\text{s}$ ,  $h=20\text{m}$ ,  $D_p=6\text{m}$ )

次に、底面流速と同じく、底面動水勾配を算出したい。そのためには、まず速度ポテンシャルを用いて、圧力を表現する必要がある。非定常ベルヌーイ式は、速度ポテンシャル  $\Phi$  を用いて、以下の式で表される。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}U^2 + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (5.17)$$

底面圧力 ( $z=0$ ) は、式(5.16)のように表される。

$$p(r, \theta, 0, t) = \rho \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}U^2 \right) \quad (5.18)$$

流速の2次の項が無視できるとすると、底面圧力は、

$$p(r, \theta, 0, t) \sim \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -i\rho\omega\Phi(r, \theta, 0, t) \quad (5.19)$$

と表せる。動水勾配  $I$  は、式(5.20)、(5.21)で表される。

$$I_r = -\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{i\omega}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad (5.20)$$

$$I_\theta = -\frac{1}{\rho g r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{i\omega}{g r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \quad (5.21)$$

式(5.20)、(5.21)は、半径方向、動径方向の動水勾配である。ある地点の底面動水勾配  $I$  を求めるためには、

$$|I| = \sqrt{I_r^2(r, \theta, 0, t) + I_\theta^2(r, \theta, 0, t)}$$

を計算すればよい。

流速と同じように、底面動水勾配の時間方向の最大値  $I_{max}$  は、定数項を  $I_0$  と ( $r, \theta$ ) に依存する項を  $I^*$  とし、以下のように書き直すことができる。

$$I_r = -\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{i\omega}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad (5.22)$$

$$I_{max} = I_0 I^*, I_0 = kA \cosh(kh) \quad (5.23)$$

式(5.22)～(5.23)を基に、 $I^*(r, \theta)$ を求めた計算例を図-5.7に示す。下図は  $I^*(r, \theta)$ の分布図であり、上図はパイラからの距離ごとで  $\theta$  方向の最大値を算出したものである。流速の場合と同じく、直径  $2 \sim 3D_p$  の範囲まで動水勾配が増大することが確認できる。

今回の洗掘実験 B の実験条件 ( $H_{1/3}=1.07\text{m}$  ( $A=0.54\text{m}$ ),  $T_{1/3}=5.0\text{s}$ ,  $h=2.2\text{m}$ ) を基に計算した底面最大動水勾配  $I_{max}$  はモノパイラ際で0.26となる。この値は、表-5.4に示す

$I_{1/3}$ と同程度である。

速度ポテンシャルによる解析値と実験値が同程度となることは重要な示唆がある。MacCamy and Fuchs の速度ポテンシャルは無限遠に広がる平らな底面を仮定しており、実験のように洗掘対策工の設置は想定していない。それにも関わらず、解析解から洗掘対策工のような透水構造物内部の動水勾配を概ね推定することができるということは、波浪による水面変動によって生じる底面圧力は透水構造物によっても低減されず、洗掘対策工の底部で動水勾配が生じることを意味している。

#### 5.4 フィルター層の諸元・設置範囲の推定方法

まず、砂地盤に対して袋型根固材の中詰め材をフィルター層として機能させること (TypeB) は非常に難しい。中詰め材を幾何学的遮蔽フィルターとすることは現実的でなく (5.2(2)項)、幾何学的開放フィルターとすることも同様流が作用する場合は可能であるかもしれないものの、波浪が作用する場合は粒径を非常に小さくする必要がある (5.2(3)項)。袋型根固材の網材の目よりも粒径を小さくすることはできないので、現実的でない。

従って、袋型根固材を砂地盤に直接設置する際には、袋型根固材が多少沈下することを許容する必要がある (TypeA)。袋型根固材の沈下量の推定方法を5.5節で議論する。

次に、袋型根固材の底部にフィルター層を設ける場合、フィルター層を幾何学的遮蔽フィルターとするためには、非常に粒径を小さくする必要がある (5.2(2)項)。従って、設計外力を応じて幾何学的開放フィルターとして機能するように粒径を定めれば良いだろう。

フィルター材を幾何学的開放フィルターとして機能させるためには、二つの観点を踏まえて検討することが望ましい。

1つ目は、砂の安定性の観点である。底層の砂地盤の中央粒径  $d_{50b}$  を与条件として、De Graauw らの移動限界式を算出し、フィルター層の所要15%粒径  $d_{15f}$  を求める。その際、モノパイラ周辺に生じる外力 (動水勾配) が既知である必要がある。以下の手順で動水勾配を求めることができる。①設計外力を決定する。②式(5.23)に基づいて定数項  $I_0$  を計算する。③図-5.7に基づいてフィルター層敷設範囲における  $I^*$  を推定する。設計上安全側とするのであれば、 $I^*=2.0$  とする。④  $I_0 \times I^*$  より、底面動水勾配を算出する。このとき、砂地盤の粒径分布が広い場合には、中央粒径ではなく85%粒径  $d_{85b}$  を用いるとよい。

なお、図-5.7より、モノパイラよりも離れた位置では動水勾配が小さくなることから、フィルター層を併用し



ないことも可能性としては考えられる。しかし、モノパイル際から十分に離れても動水勾配は高々半分程度にしかならないため、袋型根固材の中詰め材のみで砂の安定性を確保することは難しいだろう。

2つ目は、フィルター材の安定性の観点である。フィルター材の安定性を満足するためには、袋型根固材やその中詰め材の大きさを調整するよりも、フィルター材の粒径を調整する方が良いだろう。袋型根固材及び中詰め材は、製品によってある程度規格が決まっていると考えられるためである。

まず、袋型根固材の中詰め材の15%粒径  $d_{15f}$  を与条件として、フィルター材の所要中央粒径  $d_{50b}$  (または  $d_{85b}$ ) を求める。この条件を満足する場合、袋型根固材の中詰め材が接する箇所では、フィルター材は安定すると考えられる。なお、与条件として必要な動水勾配は、Mac Camy and Fuchs の式や図-5.7 を参考として、設計外力に応じて計算するとよい。

次に、袋型根固材自身の大きさ  $d_f$  を与条件とし、フィルター材の所要中央粒径  $d_{50b}$  (または  $d_{85b}$ ) を求める。洗掘実験 B では、袋型根固材を2層に敷設していたためにフィルター層が外部流出することはなかったものの、洗掘実験 A では、袋型根固材を1層に敷設したために外部に流出してしまった。モノパイル周辺の袋型根固材が1層であるなど、袋型根固材の外部にフィルター層が流出する恐れがある場合には、袋型根固材自身の大きさを粒径としてフィルター材の安定性を検証すると良いだろう。

## 5.5 袋型根固材の沈下量の推定方法

5.1 節の整理より、袋型根固材による対策条件は、無対策条件と比較して最大洗掘深が0.3~0.5割程度であった。洋上風力発電設備の基礎の安定性等に影響しない範囲の多少の洗掘を許容することで、洗掘対策工を袋型根固材のみとすることは可能だろう。

本項では、袋型根固材のみで洗掘対策工とした場合の沈下量を推定する方法について考察する。本研究で実施した実験数も限られ、体系的な袋型根固材の沈下量の推定式を求めることは非常に難しい。まず、袋型根固材に関わらず、石材による洗掘対策工の先行研究の結果を参考にしつつ、実験結果を踏まえることで、袋型根固材の沈下量の可能な限り妥当性のある推定方法を考察したい。

### (1) 沈下の要因の整理

#### a) 外力の影響 (平坦床)

平坦床を対象にアーマー層の沈下量を検証した先行研究によると、基本的にシーلز数が大きいほど、沈下量が

大きい傾向にある。Sumer et al. (2001) は、アーマー層に流れを作用させると、アーマー層の石材の空隙で発生する渦の巻き込み (entrainment) により、シーلز数が大きいほど、アーマー層の沈下量がやや増加するとした。Dixen et al. (2008) は、アーマー層に波浪を作用させると、同じ KC 数帯の比較では、シーلز数が大きいほどアーマー層の沈下量が増加するとした。

#### b) 洗掘対策工の敷設範囲の影響

モノパイル式の周囲に設けた洗掘対策工の場合、洗掘対策工の敷設範囲も沈下量に影響を及ぼす。Nielsen et al. (2015) は、波浪を作用させた場合に、単純に KC 数が大きくなるほど沈下量は大きくならなかった。フィルター層を設けていない洗掘対策工の沈下量は、洗掘対策工の空隙からの砂の流出と、洗掘対策工の外部からの砂の供給のバランスで決まる。洗掘対策工の敷設範囲に対して波長が大きいほど、洗掘対策工の周囲の砂の移動範囲が増えるため、より広域から砂が供給されるようになる。その逆に、洗掘対策工の敷設範囲に対して波長が小さいほど、洗掘対策工の周期の砂の移動範囲が限られ、供給量が小さくなる。KC 数が小さいほど波長が短く、砂の供給量が少なくなるため、供給量より流出量が上回り、沈下が促進されることになったと指摘している。

#### c) 洗掘対策工厚の影響

De Sonneville et al. (2014) や Nielsen et al. (2011) など、平坦床にモノパイルを設けて流れのみを作用させた実験においては、アーマー層が厚いほど沈下量が小さくなる傾向にあり、直感と一致している。しかし、Nielsen et al. (2015) で波および流れを作用させた実験においては、アーマー層が1層のときが最も沈下量が小さく、複数層とした場合には沈下量がむしろ大きくなる結果が得られた。この原因は、特にモノパイル際では袋型根固材の上部と底部で流速差が大きくなりやすく、揚圧力が生じたためと指摘している。

#### d) 砂の粒径の影響

表-4.1 より、洗掘実験 B において砂の粒径が異なる条件の実験結果を比較すると、砂の粒径が小さい方が袋型根固材の沈下量が大きかった。表-4.1 より、無対策条件と袋型根固材による対策条件のモノパイル際の最大洗掘深の比  $f = S_{with} / S_{without}$  は、外力条件が波浪のみの場合、模型縮尺や現地換算砂径によって違いはみられるものの、 $f$  の値は高々0.35である。外力が波浪且つ流れの場合、現地換算砂径が0.6mmのときの  $f$  の値は、外力が波浪のみの場

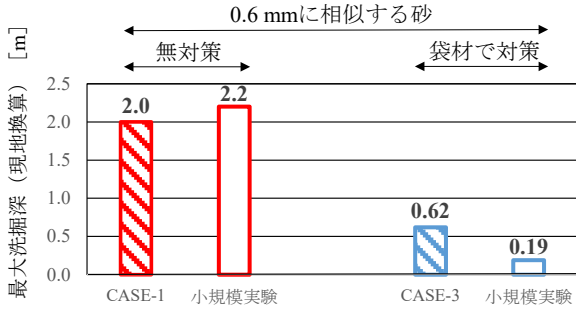


図-5.8 洗掘実験 A, B の最大洗掘深の比較

合と同程度であるが、0.2mm のときの  $f$  の値は 0.47 となる。

但し、洗掘実験 A と洗掘実験 B で浮遊漂砂の相似則が成り立つ条件を比較しても、より現地縮尺に近い洗掘実験 B の方が袋型根固材の沈下量は大きかった。図-5.8 に、洗掘実験 A と洗掘実験 B のモノパイル際の最大洗掘深を示す。無対策条件では、洗掘実験 A と洗掘実験 B を比較

すると、最大洗掘深は両者で概ね一致した。しかし、対策条件では、洗掘実験 A と洗掘実験 B を比較すると、洗掘実験 B の最大洗掘深の方が約 3 倍大きい。対策条件で洗掘深に違いが生じた原因は、袋型根固材底部の砂の挙動や、洗掘対策工の遮蔽効果に対して、縮尺効果が発現したためと考えられる。

以上から、袋型根固材の沈下量に及ぼす砂の粒径の影響を定量的に評価することには課題がある。一般に、水理模型実験で現実に近い漂砂の形態を再現しようとするためには、厳しい相似則を満足する必要がある。掃流漂砂の相似則は現地とシールズ数を同じとすることで満足されるものの、一般に浮遊漂砂の相似則よりも厳しい条件となる。洗掘実験 B は先行研究と比べると大きい模型縮尺であるけれども、それでもシールズ数は現地よりも小さい。

## (2) 袋型根固材の沈下量の推定方法

洗掘実験結果を踏まえ、無対策条件の最大洗掘深  $S_{without}$  を用いて、袋型根固材のみで洗掘対策工を構成した場合の最大沈下量  $S_{with}$  を推定する式を検討する。

$$S_{with} = fS_{without} \quad (5.24)$$

$$f = A \left( \frac{d_{50B}}{d_{50B}^*} - 1 \right) + B, \quad A = -0.1, B = 0.5 \quad (5.25)$$

$$0.2[\text{mm}] \leq d_{50B} \leq 0.6[\text{mm}]$$

$d_{50B}$  [mm] は現地底質の中央粒径であり、 $d_{50B}^*(=0.2$  [mm]) は

基準とする砂径である。 $f$  は経験的に得た洗掘深の低減率であり、 $d_{50B}=0.2$  [mm] のとき  $f=0.5$ 、0.6 [mm] のとき  $f=0.3$  となる。つまり、底質の粒径が小さいほど  $S_{with}$  が大きく ( $f$  が大きく)、逆もまた然りである。 $f$  の値は、洗掘実験 B の実験結果に基づいて設定している。実験結果を踏まえ、現地粒径が小さくなるほど  $S_{with}$  が大きくなるような係数  $A, B$  を設定した。

袋型根固材の沈下量  $S_{with}$  を求めるためには、無対策条件  $S_{without}$  を求める必要がある。まず、外力が波浪のみの場合、モノパイル付近の最大洗掘深を推定する式は Sumer et al. (1992) の推定式がよく知られ、KC 数 ( $KC=U_m T/D_p$ ) が 6 以上の場合に以下の関係式が成立する。

$$\frac{S_{without}}{D_p} = \frac{S_c}{D_p} \left[ 1 - \exp(-A(KC - B)) \right], \quad A = 0.03, B = 6 \quad (5.26)$$

ここで、 $S_c/D_p$  は定数 ( $S_c/D_p=1.3$ )、 $U_m$  は波浪による底面流速 (海底から  $D_p/2$  の位置の流速)、 $T$  は波浪周期、 $D_p$  はモノパイル直径である。図-5.9 は、上式をグラフにしたものであるが、 $KC \rightarrow \infty$  では  $S_{without}/D_p \rightarrow S_c/D_p$  に漸近し、KC 数が 6 以下の場合、馬蹄形渦 (horseshoe vortex) が発達しないため洗掘深は低下する。

KC 数が 6 以下でも、洗掘は発生し得る。まず、KC が 2 未満の条件を考える。KC 数が小さくなるほど、波長に対するモノパイル直径の比 ( $D_p/L$ , Sumer and Fredsøe (2001a) に倣い回折係数と呼ぶ) が大きくなり、回折の影響を受け易い。Isaacson (1979) は、回折係数が 0.2 より大きい場合、回折の影響が重要となるとした。Sumer and Fredsøe (2001a) は、回折の影響を強く受ける条件では、1 周期平均がゼロにならない定常流れ (steady streaming) がパイル周りに発生し、定常流れによって洗掘が発生することを指摘している。KC 数が 2 未満で  $D_p/L=0.08$  及び 0.15 の条件下の実験結果を比べると  $D_p/L=0.15$  の方が洗掘深は大きいことから、回折係数が大きい程洗掘深は増加すると言えるが、それ以上回折係数が増加しても洗掘深が増加する傾向は見られなかった。

次に、 $2 < KC < 6$  の範囲を考える。Sumer and Fredsøe (2001a) は、 $2 < KC < 6$  の範囲は遷移状態としているが、国内の最近の先行研究 (緒方ら (2018), 稲垣ら (2021) など) を同図にプロットして比較すると、馬蹄形渦領域と定常流れ領域は連続的に接続しているように見える。

本研究で実施した実験 (関谷ら (2021), 小林ら (2022)) は、上述の KC 数と洗掘深の関係をまとめた図-5.9 のグラフと比べると、洗掘深がやや大きい。要因は明確ではない

が、洗掘実験 B は既往の実験よりも縮尺が大きく、砂に働く縮尺効果の影響を小さくすることができた（すなわち、より現地の砂に近い状態を再現することができた）ためと考察している。Sumer et al. (1992)等の既往の研究を基に洗掘深を推定すると、袋型根固材の沈下量を過小評価する可能性があるため、図-5.9 に包絡線を提案する。包絡線の推定式を式(5.27)に示す。従来の推定式と比較すると、推定結果が設計上安全側（洗掘深が大きくなる側）となる。

$$\frac{S_{without}}{D_p} = \frac{S_c}{D_p} [1 - \exp(-A(KC - B))], A = 0.05, B = 0.2 \quad (5.27)$$

なお、片山ら (2021) の実験結果は、式(5.27)の包絡線よりも上部にプロットされる。片山らは、最大洗掘深の粒径依存性を検証し、粒径が小さい条件では最大洗掘深が既往の推定式よりも大きい結果を得た。本研究で提案する包絡線は粒径に依存していないため、改善の余地はある。但し、袋型根固材の沈下量の推定式 (式(5.24)) が粒径に依存しており、無対策条件の洗掘深と袋型根固材の沈下量の粒径依存性を切り分けて考えることは難しく、包絡線は粒径に依存させないこととした。

次に、外力が波浪且つ流れである場合、モノパイル付近の最大洗掘深を推定する式は Sumer and Fredsøe (2001b) が知られ、 $4 \leq KC \leq 26$  で以下の関係式が成立するとしている。

$$\begin{aligned} \frac{S_{without}}{D_p} &= \frac{S_c}{D_p} [1 - \exp(-A(KC - B))] \\ A &= 0.03 + 3 / 4U_{cw}^{2.6} \\ B &= 6 \exp(-4.7U_{cw}) \\ U_{cw} &= \frac{U_c}{U_c + U_m} \end{aligned} \quad (5.28)$$

$U_c$  は流れによる底面流速 [m/s] であり、 $U_{cw}$  は波浪且つ流れの共存下における流れの底面流速の割合を示すパラメータであり、 $U_{cw} \rightarrow 0$  のときは波浪のみ、 $U_{cw} \rightarrow 1$  のときはほぼ流れのみが存在する条件となる。式(5.28)をグラフにすると図-5.10 のようになる。

波浪のみの場合と同じく、本研究の実験値は、図-5.10 のグラフと比較して洗掘深が大きかった。そこで、波浪のみの場合と同じく包絡線を提示する。包絡線は、式(5.28)を以下のように修正したものである。従来の推定式と比較すると、推定結果が設計上安全側（洗掘深が大きくなる

側）となる。

$$\begin{aligned} A &= 0.03 + 3 / 4U_{cw}^{2.6} \\ B &= 6 \exp(-4.7U_{cw}) \end{aligned} \quad (5.29)$$

なお、袋型根固材の沈下量には、外力、敷設範囲、対策工厚、砂の粒径などの様々な要因が影響し、定量的な推定式を確立するには検証が不足している。式(5.24)は、 $S_{without}$  が外力 (KC 数) に依存し、 $f$  が砂の粒径に依存しているものの、洗掘対策工の敷設範囲や対策工厚の影響は反映することができていない。また、参考にした洗掘実験 B の実験数は限られている。今後、検証が重ねられる中で、推定式の妥当性を検証し、推定式を更新していくことが望まれる。

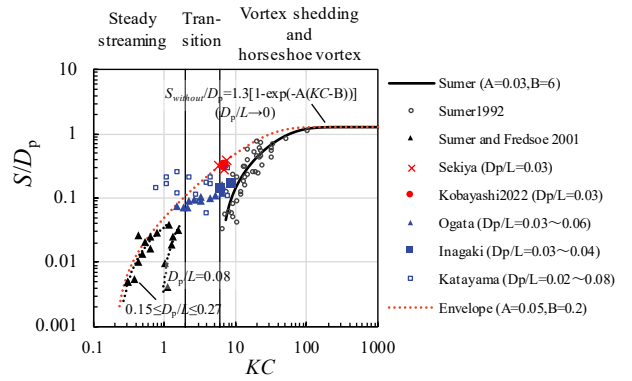


図-5.9 波浪によるモノパイル周りの最大洗掘深 (Sumer and Fredsøe (2001a) に加筆)

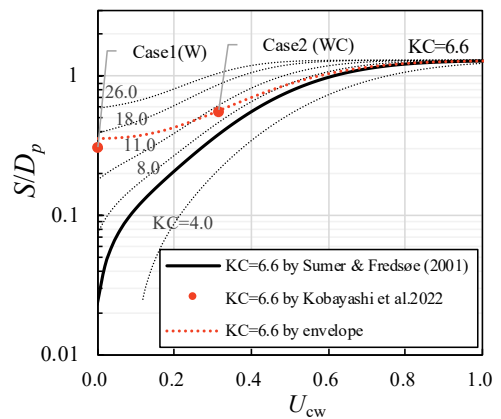


図-5.10 波浪及び波によるモノパイル周りの最大洗掘深 (Sumer and Fredsøe (2001b) に加筆)

## 6. 袋型根固材を用いた洗掘対策工法の提案

本章では袋型根固材を用いた洗掘対策工法（以降、本工法）を設計する方法を提案する。

図-6.1 は、袋型根固材を用いた洗掘対策工の例である。袋型根固材とフィルター層を併用した場合であり、袋型根固材の沈下量に応じて袋型根固材のみを用いた洗掘対策工とすることもできる。

図-6.2 に設計フローを示す。

まず、当該設備の設計条件を決定する。設計条件として、当該海域の自然条件、地盤条件、構造物条件を設定する。自然条件としては、波浪、潮流、潮位が挙げられる。地盤条件としては、海底地形・水深、底質が挙げられる。構造物条件としては、モノパイルの直径などが挙げられる。

断面諸元として、袋型根固材の仕様、袋型根固材の敷設範囲・敷設構造、フィルター層の構造諸元を仮定する。袋型根固材の仕様とは、袋型根固材の製品に応じた網材の編み方、中詰め材の諸元、袋体の形状、寸法、強度、耐候性、耐摩耗性、環境適合性などの性能についてである。袋型根固材の敷設範囲は、4.1 節に記載する方法で推定することができる。敷設構造については、4.2 節に記載した構造を参考にすることができる。フィルター層の構造諸元については、既往の設計事例を参考にしつつ、フィルター材の粒径や敷設範囲を決定する。フィルター材の敷設範囲は、袋型根固材の底部全体を覆う範囲とすることが望ましい。

作用の評価として、当該海域の自然条件を踏まえ、設計に使用する波浪、潮流、潮位外力を決定する。

上記のように断面諸元を仮決定し、設計外力を基に性能照査を行う。照査項目として、袋型根固材の安定性、沈下量、フィルター層の安定性、波浪による液状化が挙げられる。

袋型根固材の安定性の照査では、3 章を参考に、袋型根固材の所要質量を照査する。図-3.1 に、水深波長比と安定数の与条件と安定限界曲線を比較し、安定限界曲線の下方にプロットされるようであれば、袋型根固材は安定すると評価できる。

袋型根固材の沈下量の照査では、5.5 節を参考に、袋型

根固材のみを用いた対策工法としたときの袋型根固材の沈下量を照査する。沈下量が、基礎の安定性や海底送電線へ影響を与えない程度と評価される場合には、袋型根固材のみを用いた対策工法を選択できる。影響を与えると評価される場合には、フィルター層を併用する対策工法を選択する。

袋型根固材とフィルター層を併用した場合に、フィルター層の安定性を照査する。5.4 節を参考に、砂地盤、フィルター材の安定性を評価する。フィルター層を幾何学的開放フィルターとして扱う場合、De Graauw らの移動限界曲線との比較によって、砂の安定性を満足するフィルター材の所要粒径  $d_{15f}$  を評価できる。また、フィルター材を底層として、袋型根固材自体の大きさや中詰め材の粒径に基づいて、安定性を満足するフィルター材の所要粒径  $d_{50b}$ 、 $d_{85b}$  を評価できる。

本報告では割愛するが、波浪に対する液状化の照査を行った後、断面諸元を決定する。その後、施工及び維持管理方法を検討して、設計が終了する。

なお、本研究で対象とした断面条件は、実際の洋上風力発電設備とは異なり、モノパイル周囲の海底送電線などがない。つまり、本研究で実施した実験は、施工性、維持管理性、経済性など、実際の設計で考慮すべき制約条件を十分に反映できたものではない。本研究で提案する設計工法は、あくまで普遍的な断面で成立するものであり、実際の設計は個別の設計条件を踏まえて最適な断面が検討されるものとなるだろう。

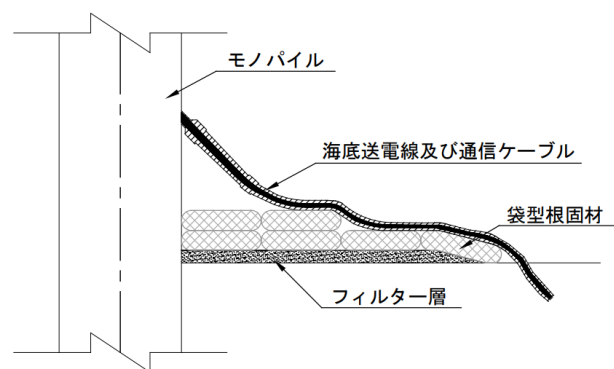


図-6.1 袋型根固材を用いた洗掘対策工の例

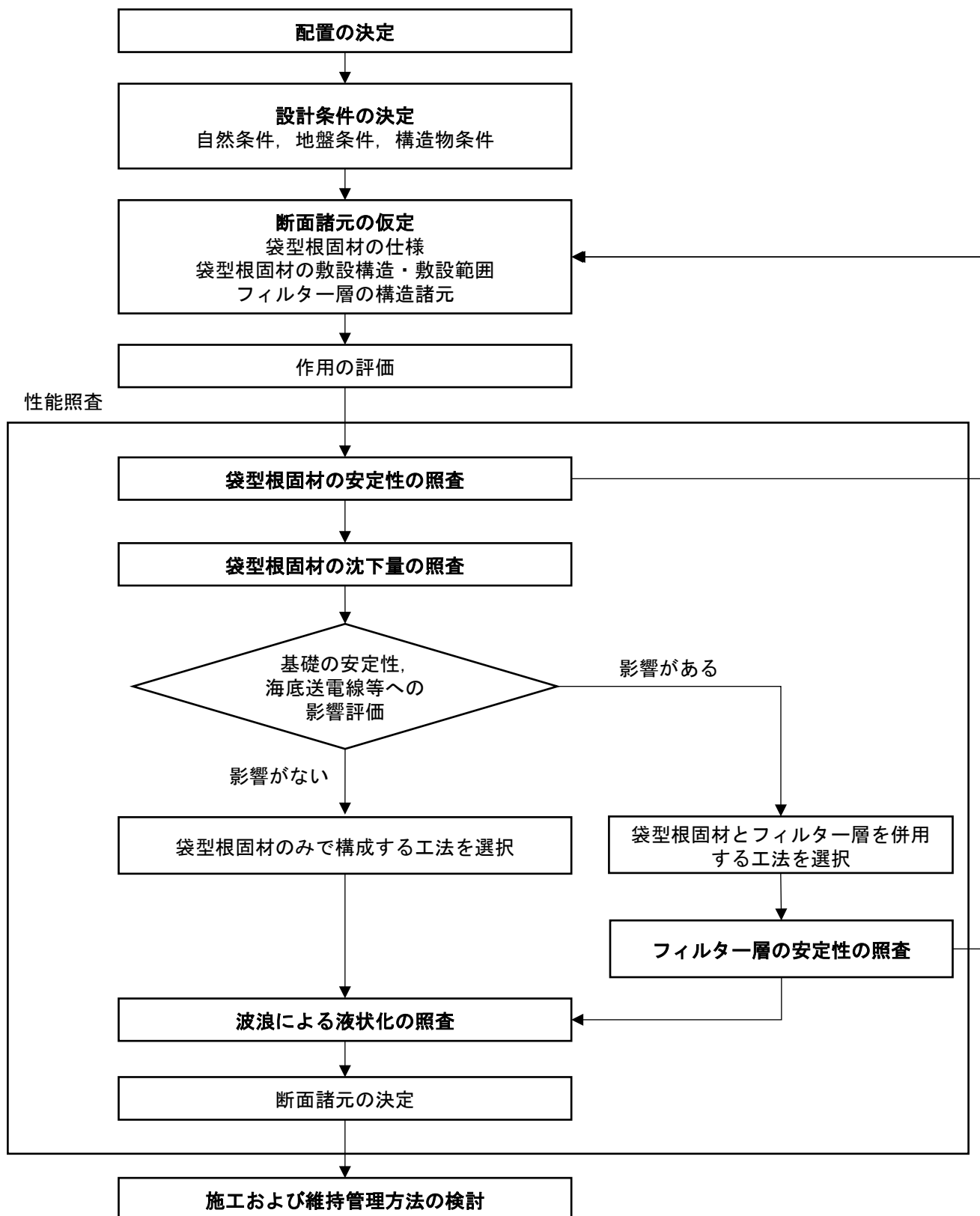


図-6.2 設計フロー

## 7. 終わりに

本研究では、大きく分けて3つの水理模型実験を実施し、袋型根固材を用いた着床式洋上風力発電設備の洗掘対策工の、耐波浪・流れ安定性、敷設範囲・構造、洗掘抑制効果について検証した。以下に主要な結論を示す。

- ① 固定床実験により袋型根固材の耐波浪・流れ安定性を検証し、袋型根固材の所要質量の推定方法を提案した。
- ② 敷設範囲は、式(4.1)、(4.2)によって推定できる。但し、外縁部洗掘に対する袋型根固材の安定性が明らかになっていない以上、最低 $3D_p \sim 4D_p$ 程度は設けた方がよい。
- ③ 敷設構造は、袋型根固材を2層目とし、安定性を高めるために2層目は2列以上とする方法を提案する。但し、モノパイル際の施工性には課題が残る。
- ④ 波浪が作用する場合、袋型根固材自身及び中詰め材がフィルター層として機能することは難しく、袋型根固材を砂地盤に直接設置する際には、袋型根固材が多少沈下することを許容する必要がある。参考とした実験数が少なく課題は多いものの、実験結果から袋型根固材がある場合の洗掘深の推定式を提案した。袋型根固材の沈下を許容することが難しい場合には、フィルター層を併用することが望ましい。
- ⑤ 袋型根固材とフィルター層を併用する条件において、De Graauwらの式は洗掘実験Bの砂の安定性やフィルター材の安定性を良く説明する。
- ⑥ フィルター材の諸元はDe Graauwらの式を用いて推定することができ、砂の安定性の観点から15%粒径、フィルター材の安定性の観点から中央粒径（粒径分布が広い場合には85%粒径）の所要値を推定できる。その際、モノパイル際の動水勾配は、Mac Camy and Fuchsの式から求めることができる。
- ⑦ 以上の提案に基づき、袋型根固材を用いた着床式洋上風力発電設備の洗掘対策工の設計手法を取り纏めた。

(2023年4月25日受付)

## 謝辞

本研究は、(一財)沿岸技術研究センター及び「洋上風力発電設備洗掘対策工法研究会」(構成員：ナカダ産業株式会社、株式会社不動テトラ、前田工織株式会社)との共同研究として実施した。関係各位に対して、心からの謝意

を表する。

## 参考文献

- 1) 経済産業省：第6次エネルギー基本計画，2022年，  
[http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/haneda/haneda/more/f\\_402\\_01.html](http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/haneda/haneda/more/f_402_01.html)
- 2) WindEurope: Offshore Wind in Europe. Key Trends and Statistics 2017; Research Report; Iván Pineda WindEurope:Brussels, Belgium, 2018.
- 3) B.M.Sumer, J.Fredsøe, and N. Christiansen : Scour around vertical pile in Waves, Journal of Waterway Port and Ocean Engineering, Vol.117, No.1, pp.15-31, 1992.
- 4) Sumer, B.M. and Fredsøe, J.: The mechanics of scour in the marine environment. Advanced series on ocean engineering. World Scientific, River Edge, N.J., pp.536, 2002.
- 5) 高澤勤，鈴木幹啓，阿部明弘：強潮流下における大型構造物用の洗掘防止材料に関する研究，海洋開発論文集，4巻，1988，pp.129-134.
- 6) 北川信，伊藤進一郎，土谷政治，今井貫爾：強潮流下における大規模橋梁基礎の洗掘対策工に関する研究，土木学会論文集，No.438，1991年，pp.61-70.
- 7) 秋山真吾・池谷毅・今藤久夫・高橋忍・石川芳：フィルターユニットで被覆した緩傾斜護岸の耐波安定性，海洋開発論文集，第17巻，2001年，pp.405-410.
- 8) 下迫健一郎，久保田真一，松本朗，半沢稔，篠村幸廣，尾池宣佳，池谷毅，秋山真吾：袋型根固め材を用いた混成堤マウンド被覆材の耐波安定性と耐久性，港湾技術研究所報告，第43巻，第1号，2004年，pp.49-83.
- 9) 稲垣聡，新原雄二，岩前伸幸，鈴木一輝：フィルターユニットによる洋上風力モノパイル基礎の洗掘対策工水理実験，土木学会全国大会第75回年次学術講演会，2020年，p.II-158.
- 10) 稲垣聡，新原雄二，鈴木一輝，岩前伸幸：フィルターユニットによる洋上風力発電基礎の洗掘対策工とその設置範囲の実験的検討，海洋開発論文集，Vol.77，No.2，2021年，pp.I\_361-I\_366.
- 11) 稲垣聡，鈴木一輝，岩前伸幸，藤井愛弓：中詰め粒径を調整したフィルターユニットによる洋上風力発電基礎の洗掘対策工，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.78，No.2，2022年，pp.I\_631-I\_636.
- 12) 片山裕之，青木健太，鶴飼亮行，三浦成久：波浪によるモノパイル基礎局所洗掘および対策工効果の実験的検討，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.77，No.2，2021年，pp.I\_553-I\_558.

- 13) 青木健太, 谷上可野, 片山裕之, 三浦成久, 鈴木崇之 : 波・流れによるモノパイル基礎局所洗掘および対策工効果の実験的検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.78, No.2, 2022年, pp.I\_475-I\_480.
- 14) 青田徹, 錦織和紀郎, 土橋和敬, 小林航, 関谷勇太, 鈴木英樹, 鈴木高二朗, 下迫健一郎 : 洋上風力発電設備における洗掘防止用袋型根固材の波と流れに対する安定性の検討, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.79, No.2, 2023年 (印刷中)
- 15) 関谷勇太, 鈴木英樹, 青田徹, 久保田真一, 土橋和敬, 小林航, 鈴木高二朗, 下迫健一郎 : 袋型根固め材による洋上風力発電設備の洗掘抑制効果と敷設構造に関する水理模型実験, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.78, No.2, 2022年, pp.I\_907-I\_912.
- 16) 小林航, 関谷勇太, 鈴木英樹, 青田徹, 松田節男, 高橋武志, 下迫健一郎, 鈴木高二朗 : 袋型根固め材による洋上風力発電設備の洗掘抑制効果と模型の縮尺効果に関する大規模水理模型実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.78巻, No.2, 2022年, pp.I\_709-I\_714.
- 17) 鈴木高二朗, 高橋重雄, 高野忠志, 下迫健一郎 : 砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について—現地調査と大規模実験—, pp.84-85, 港湾空港技術研究所報告, 第41巻, 第1号, 2002年, pp.51-89.
- 18) Rubey, William Walden: Settling velocity of gravel, sand, and silt particles, American journal of science, Vol.5, No.148, 1933, pp.325-338.
- 19) 水谷法美, 李光浩, 小松克弘, 許東秀 : 波と流れの相互作用に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol.21, 2005年, pp.307-312.
- 20) 日本港湾協会 (編) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), 2018年, p.238.
- 21) U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol.II, pp.7-215, 1977.
- 22) Nielsen, A.W., Thomas Probst, Petersen, T.U., Sumer, B.M. : Sinking of armour layer around a vertical cylinder exposed to waves and current, Coastal Engineering, Vol.100, pp.58-66, 2015.
- 23) DNVGL-ST-0126 : Support Structures for Wind Turbines, Appendix D, Edition July 2018.
- 24) DNVGL-RP-0618 : Rock scour protection for monopiles, Edition September 2022.
- 25) M.D.Esteban, J.S.Lopez-gutierrez, V.Negro, and L.Santz: Riprap scour protection for monopiles in offshore wind farms, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.7, No.12, 2019.
- 26) CIRIA, CUR, CETMEF : The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, London : CIRIA, 2007.
- 27) Hoffmans, G.: The influence of turbulence on soil erosion, Eburon Uitgeverij BV, 2012., pp.260
- 28) van de Sande S., Uijtewaal W.S.J., Verheij H. : Validation and optimization of a design formula for stable geometrically open filter structures, ICCE, 2014, 2.
- 29) Soulsby, R.L., Whitehouse, R. J. S. : Threshold of sediment motion in coastal environments., In: Pacific Coasts and Ports'97: Proceedings of the 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harbour Conference; Vol.1, 1997, pp.145-150.
- 30) Nielsen, A.W and Petersen, T.U: Onset of Motion of Sediment underneath Scour Protection around a Monopile, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.6, No.3, 100, 2018.
- 31) Nielsen, A.W., Sumer, B.M., Fredsøe, J., Christensen, E.D.: Sinking of armour layer around a cylinder exposed to a current., Proceedings of the ICE-Maritime Engineering, ICE, vol.164(4), 2011, pp.159-172
- 32) De Graauw, A., T.van der Meulen, M.van der Does de Bye : Design Criteria for Granular Filters, Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 1984, pp.80-96.
- 33) R. McCamy and R. Fuchs: Wave forces on piles: a diffraction theory. Tech. Memo No. 69, U.S. Army Corps of Engrs, 1954.
- 34) Chatjigeorgiou, Ioannis K.: Water wave trapping in a long array of bottomless circular cylinders. Wave Motion, 83, 2018, pp.25-48.
- 35) Sumer, B. Mutlu; Cokgor, Sevet; Fredsøe, Jørgen. : Suction removal of sediment from between armor blocks, Journal of hydraulic engineering, Vol.127, No.4, 2001, pp.293-306.
- 36) Dixen, M., Hatipoglu, F., Sumer, B.M. and Fredsøe: Wave boundary layer over a stone-covered bed, Coastal Engineering, Vol.55, No.1, 2008, pp.1-20.
- 37) De Sonnevill, B. , Joustra, R. and Verheij, H. : Winnowing at circular piers under currents. Conference proceedings 7th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, 2014, p.203.
- 38) Isaacson, M. de.: Wave-induced forces in the diffraction regime., Editor TL Shaw, University of Bristol, England, Pitman Publishing Ltd., 1979.
- 39) Sumer, B. Mutlu, and Jørgen Fredsøe.: Wave scour around

a large vertical circular cylinder., Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, Vol.127, No.3, 2001a, pp.125-134

- 40) 緒方ゆり, 増子雅洋, 藤井直樹, 阿部光信, Dilan RATHNAYAKA, Sachini PATHIRANA, 田島芳満: 洋上風力発電におけるモノパイル基部まわりの洗掘に関する実験的研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), 74巻, 2号, 2018年, pp.I\_820-I\_825.
- 41) Sumer, B. M., and Fredsøe, J.: Scour around pile in combined waves and current, Journal of hydraulic engineering, Vol.127, No.5, 2001b, pp.403-411.