

着床式洋上風力発電基礎の局所洗掘と対策案に関する検討

本田 隆英*¹・織田 幸伸*¹

Keywords : offshore windfarm, scour countermeasure, hydraulic experiment, numerical simulation

洋上風力, 洗掘対策工, 水理実験, 数値解析

1. はじめに

近年, 着床式洋上風力施設の建設が進められているが, 洗掘(波・流れの作用により構造物周辺の土砂が流出する現象)の対策として袋型根固材(Foot Protection Bag, 以下「PB」と呼ぶ)の敷設が一般的である(図-1参照¹⁾)。PBの設置数はモノパイル1基に対して100個を超えることも多く, これらの吊降し・敷設作業には多大な時間が必要となる。そこで本研究では, 洗掘対策施工の工期短縮が期待できる円盤型構造の対策工を提案し, その効果を確認するための水理模型実験を実施した。

2. 洗掘対策工

着床式洋上風力発電基礎の洗掘対策は地盤被覆型, 流況制御型, 地盤改良型の3つに大別される²⁾。地盤被覆型は石材等で基礎周辺地盤を被覆する対策で, 前述の通りPBが使用されるケースが多く, その敷設範囲に関する検討は多数報告されている(例えば³⁾⁴⁾)。流況制御型は, 基礎あるいはその周辺に板材などの小規模な構造物を配置し, 洗掘の要因となる局所渦の抑制あるいは接近流の流向制御により, 洗掘を抑制するものである。

小規模な構造物の配置は, PB敷設と比べて工期・コストの観点で有利である。地盤改良型は基礎の施工に先立ち, 地盤改良工事が必要となるため, 工期の延長が見込まれる。本研究では, 洗掘対策施工の工期短縮の観点から, PBに代わる洗掘対策工として流況制御型対策工に着目した。

本研究で対象とした対策工ケースを図-2に示す。図-2(a)の対策工Aは, 対策工の下部に $0.2D$ (D :基礎杭径)および中央に $0.1D$ の隙間を設け, 対策工下部から



図-1 袋型根固材による着床式洋上風力施設の洗掘対策¹⁾

Fig.1 Scour countermeasure of offshore wind turbine foundation using foot protection bag

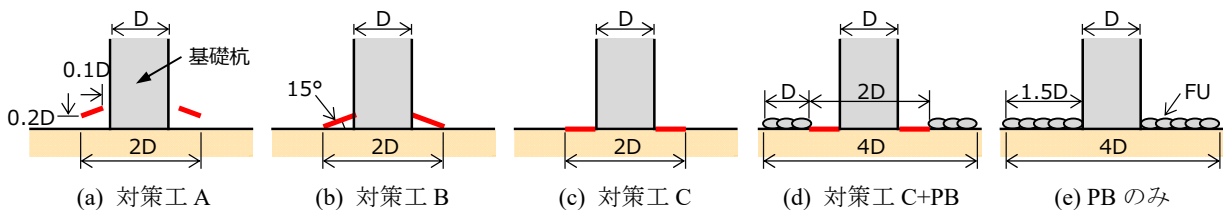


図-2 洗掘対策工ケース

Fig.2 Cases of scour countermeasure

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

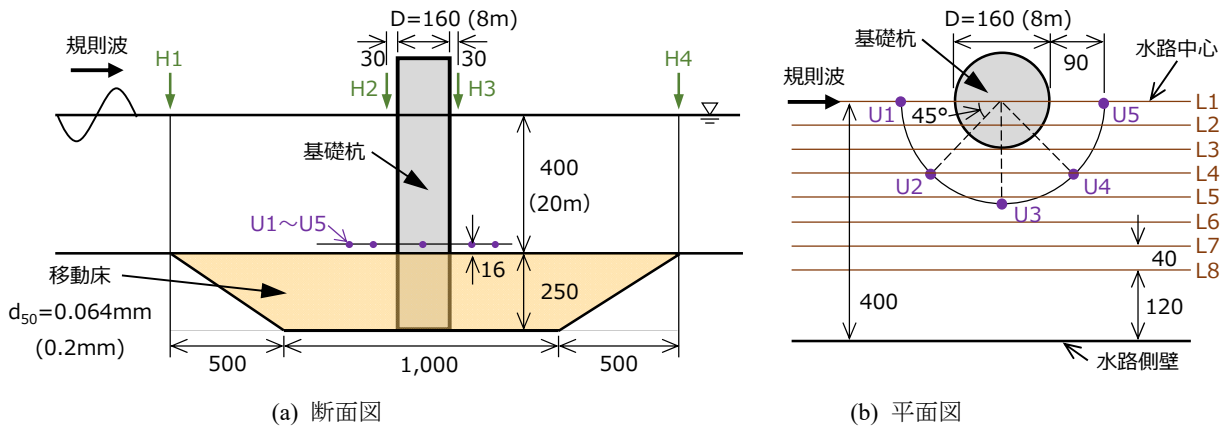


図-3 実験概要図 (単位: mm, かつこ内は現地換算値)

Fig.3 Schematic view of experiment

流入した水塊を対策工上部へ上昇させて排水することで、局所洗掘の要因のひとつである基礎杭に沿って発生する下降渦を抑制する狙いで設定した形状である。次に図-2 (b)の対策工 B は、対策工周辺に隙間は設けず基礎杭および地盤に隣接させることで、基礎杭の周辺地盤を直接遮蔽して洗掘を防止するものである。地盤と接地する対策工 B の下端で二次的な局所洗掘すなわち局所渦の発生を防止するため、ここで接近流が極力鉛直上向き方向に流下することを期待し、円盤に 15° の傾斜を設けた。図-2 (c)の対策工 C は対策工 B に対して傾斜角を設けず、地盤に直接設置された円盤構造である。対策工 A~C の直径は、いずれも杭径 D の 2 倍とした。図-2 (d)は、従来型の PB 対策工のうち、内側の 2D 範囲を対策工 C に置き換えたケースである。図-2 (e)は比較ケースとして、従来型の PB のみによる洗掘対策工を全幅 4D に配置したケースである。

3. 水理実験

3.1 実験方法

実験縮尺は 1/50 とし、実験には大成建設(株)技術センターの二次元水槽(長さ 47.0 m, 幅 0.8 m, 高さ 1.6 m)を使用した。実験概要図を図-3 に示す。直径 $D = 8$ m の基礎杭の周辺に移動床を配置し、水深 20 m の条件で暴浪時を想定した設計波相当の規則波(波高 9.6 m, 周期 12.7 s)を作用させた。移動床は、模型値で長さ 2.0 m, 杭径 D の 1.5 倍以上の深さ 0.25 m を確保し、水路の全幅に設置した。現地で中央粒径 0.2 mm の砂を想定し、Dean Number⁵⁾による砂沈降速度の相似則を考慮して、移動床には珪砂 8 号と珪砂粉 A3 を質量比 1:1 で混合した中央粒形 0.064 mm の底質を使用した。洗掘対策工は前出の図-2 に示す 5 ケースとし、対策工

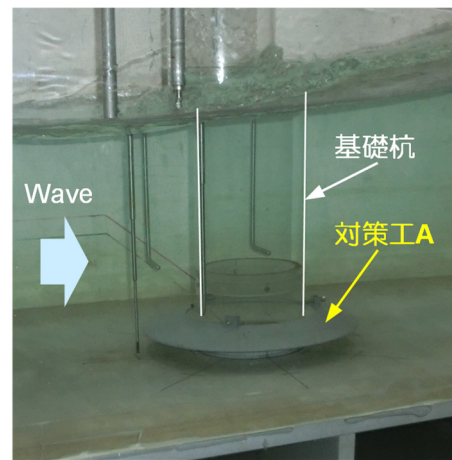


写真-1 固定床実験状況(対策工 A)

Photo.1 Fixed-bed experiment (Countermeasure A)

A~C は基礎杭に固定し、波による地形変化によって設置高さは変わらないものとした。なお、対策工 A~C の模型は塩化ビニルを用いて作製した。対策工 PB については現地で 8 t 型を想定し、本実験では直径 2 ~ 5 mm (現地 100 ~ 250 mm) の砕石を用い、1 基あたりの PB 模型の直径は 70 mm (現地 3.5 m) 程度とした。

移動床の作製は、底質砂の敷き均しおよび突き固めを厚さ 50 mm ごとに行い、移動床天端まで注水後、表面を水平に整地した。注水により移動床表面に沈下が生じた場合は、底質砂を追加投入し再整地した。その後、移動床表面が乱れないように留意しながら、二次元水槽内に所定の水深まで注水し、造波を行った。波作用時間は 4,000 波相当の 2 時間とした。

移動床区間および基礎杭の前後で、容量式波高計により水位を計測した(図-3 の H1~H4)。移動床実験に先立ち、固定床実験を実施し(写真-1)、固定床実験では波高計測に加え、対策工の設置を考慮し、基礎杭から離隔距離 90 mm で片側円周方向に 5 点の流速を電磁

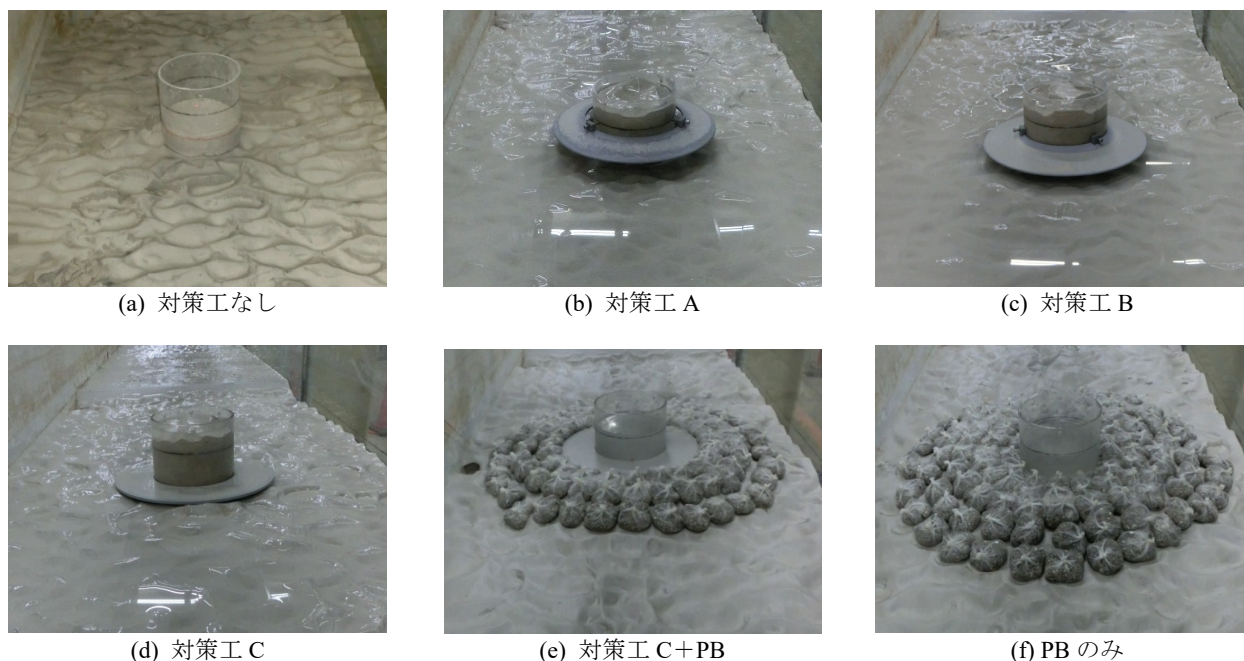


写真-2 波作用後の状況
Photo.2 Bathymetry after wave action

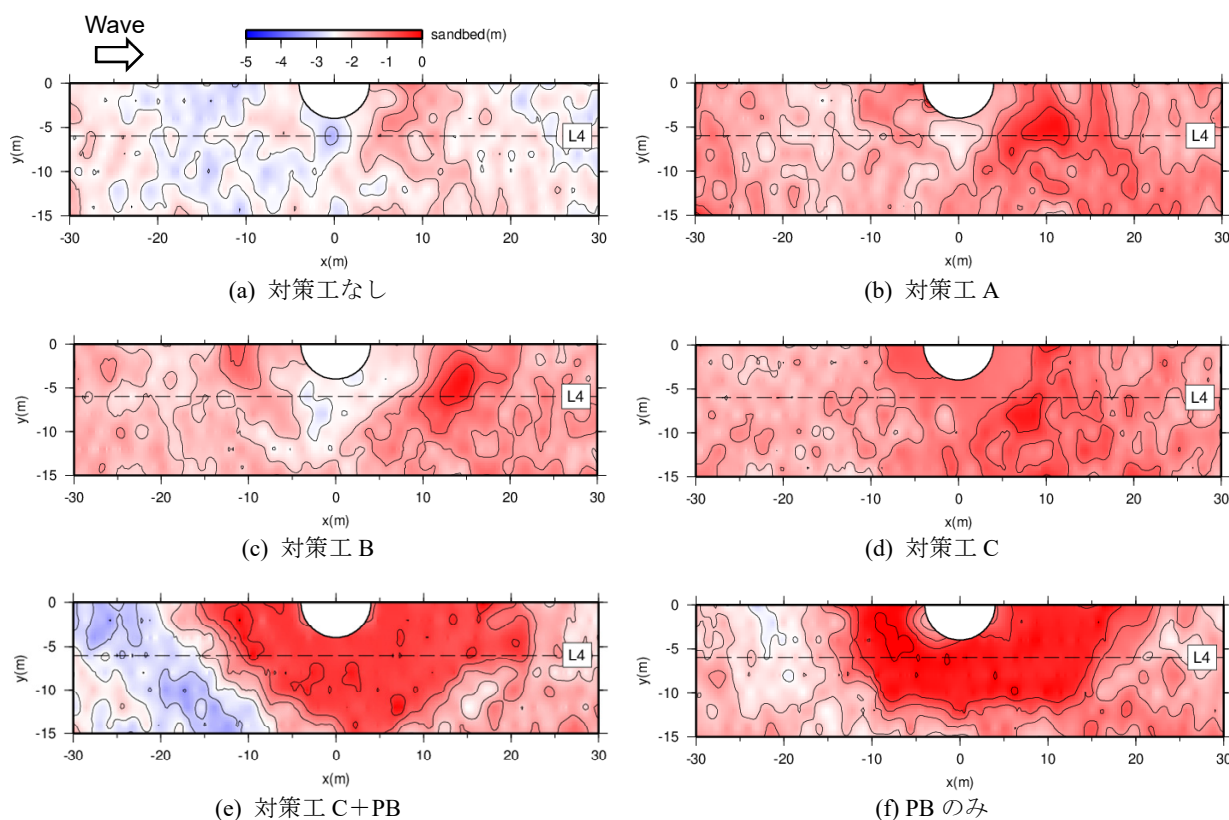


図-4 波作用後の地形変化量
Fig.4 Bathymetry change after wave action

流速計により計測した (図-3 の U1~U5)。波高および流速の計測サンプリング間隔は 0.002 s とした。波作用後に排水した後、対策工および PB を撤去し、杭中心から片側 2D の範囲を 40 mm ごとに 8 測線でレーザー変

位計により海底地形を計測した (図-3 の L1~L8)。

3.2 実験結果

以降の実験結果については、現地換算値で示す。各ケースにおける波作用後の洗掘状況を写真-2 に示す。

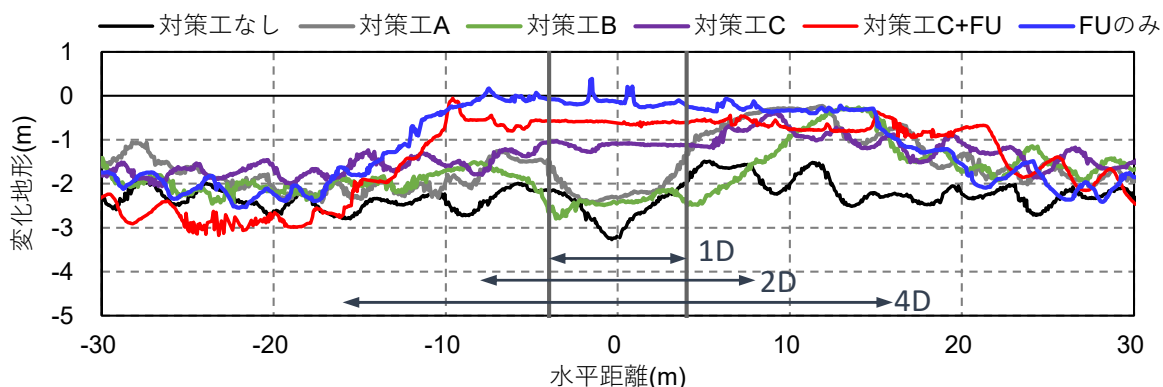


図-5 波作用後地形の比較 (L4 測線)
Fig.5 Comparison of bathymetry change in L4 line

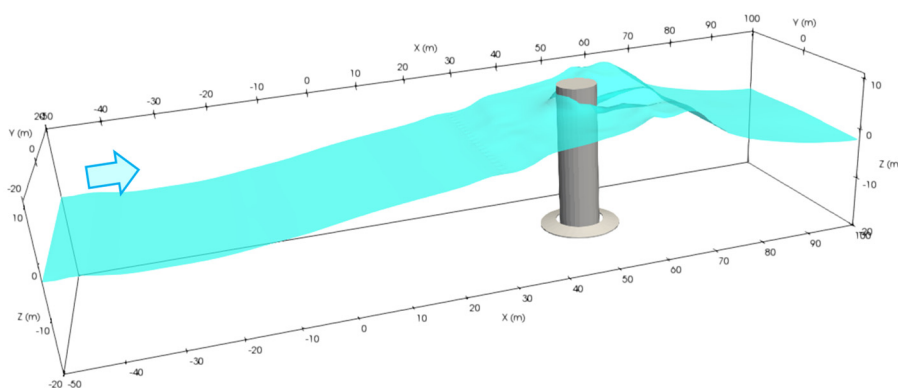


図-6 解析概要図
Fig.6 Schematic view of numerical simulation

すべてのケースで移動床区間全体に侵食が発生しており、これに局所洗掘が重なった地形変化が得られている。なお、移動床区間全体の侵食については、波条件が設計波相当の侵食性波浪であったために生じたと考えられ、対策工なしケースの場合でこの地盤低下は平均 2.35 m であった。PB を使用した写真-2 (e), (f) では、いずれのケースにおいても PB の飛び出しは見られず、周辺の地盤低下に伴い外周側の PB の沈下が確認できるものの、基礎杭に近い内側の PB については初期の設置高をおおむね維持できている様子が確認できる。

波作用後に対策工および PB を撤去した後の地形変化コンターを図-4 に示す。同図より、対策工なしケースに対し、対策工 A~C の設置により移動床区間全体の地盤低下は抑制されている傾向が見られる。図-4 (e), (f) の PB を用いたケースでは、基礎杭を支持する杭周辺の地盤範囲で洗掘の抑制が確認できる。図-4 (a)~(c) では、杭側方で最大侵食深が発生しており、この傾向は既往報告^(例えば 3)と整合している。

侵食が顕著であった測線 L4 に着目し、全ケースの変化地形を図-5 に示す。対策工なしのケースでは、杭側

方で最大約 3.3 m の侵食が発生した。対策工 A, B では、最大侵食深は抑制されたものの、杭周りで 2.5 m 程度の侵食が発生した。対策工 C では、杭周りの侵食は 1.0 m 程度にまで抑制された。対策工 A, B については対策工に 15° の傾斜を設けたものの対策工下端で渦が発生・発達したため、洗掘抑制には至らなかったと考えられる。対策工 A~C のうちもっとも洗掘抑制効果の高い対策工 C と PB を併用したケースは、PB のみによる従来工法と同等の洗掘抑制効果を確認できた。なお、対策工 C+PB ケースは杭周辺で 0.5 m 程度の吸出しが見られたが、今回は洗掘対策工の効果比較を目的としたため、対策工と移動床の間にフィルター層を設けておらず、実適用にあたってはフィルター層を設置することで吸出しは抑制されると考えられる。

4. 数値解析

4.1 解析方法

移動床実験において対策工単体で有意な洗掘抑制効果が得られなかった要因について、固定床条件の実験

再現解析により検討した。解析は、VOF 法による三次元流体解析ツール OpenFOAM (v2006) の interFOAM ソルバーを用い、現地スケールにて実施した。解析概要図を図-6 に示す。解析領域は、移動床区間 100 m (模型値 2.0 m) の沖側に 50 m の波浪伝播区間を設け、水路方向は $x = -50 \sim 100$ m とした。水路横断方向は $y = -20 \sim 20$ m の全幅 40 m とし、水路幅 0.8 m (模型値) と同じとした。沖側境界 $x = -50$ m では造波機能を用いて、実験の波浪条件に基づき、波高 10.0 m, 周期 13.0 s の規則波を与えた。解析領域の側壁、底面、上面は壁境界を、岸側位置 $x = 100$ m では透過境界を設定した。解析格子間隔は $dx = dy = dz = 2.0$ m を基本とし、基礎杭周辺の 40 m 区間 ($x = 30 \sim 70$ m) は $dx = dy = dz = 1.0$ m に細かく設定した。さらに対策工を設置したケースでは、対策工 A と基礎杭との隙間 $0.1D$ を最低 3 分割確保できるように、対策工近傍を 0.25 m まで細分化した。解析時間間隔の最大クーラン数は 1.0 とした。なお、今回の解析では乱流モデルは考慮していない。

実験の再現解析は、図-2 (a)~(d) の対策工なしおよび対策工 A~C ケースを対象とした。対策工なしおよび対策工 A のケースについては、地形変化の発生前を想定し固定床条件で解析を実施した。対策工 B, C のケースについては、波作用に伴い地盤が低下し、対策工下部

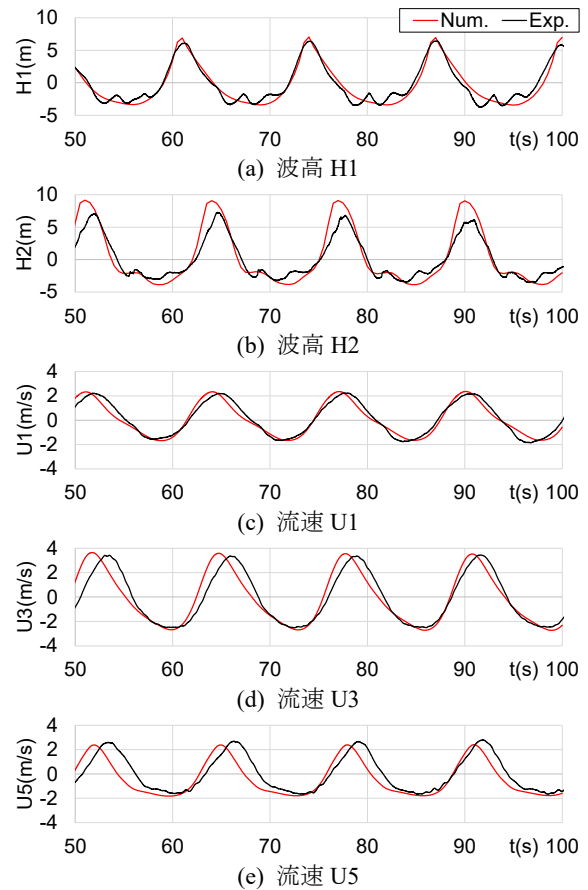


図-7 波高および流速の再現解析結果 (対策工 A)
Fig.7 Comparison of numerical results with experimental results in terms of wave height and bottom velocity

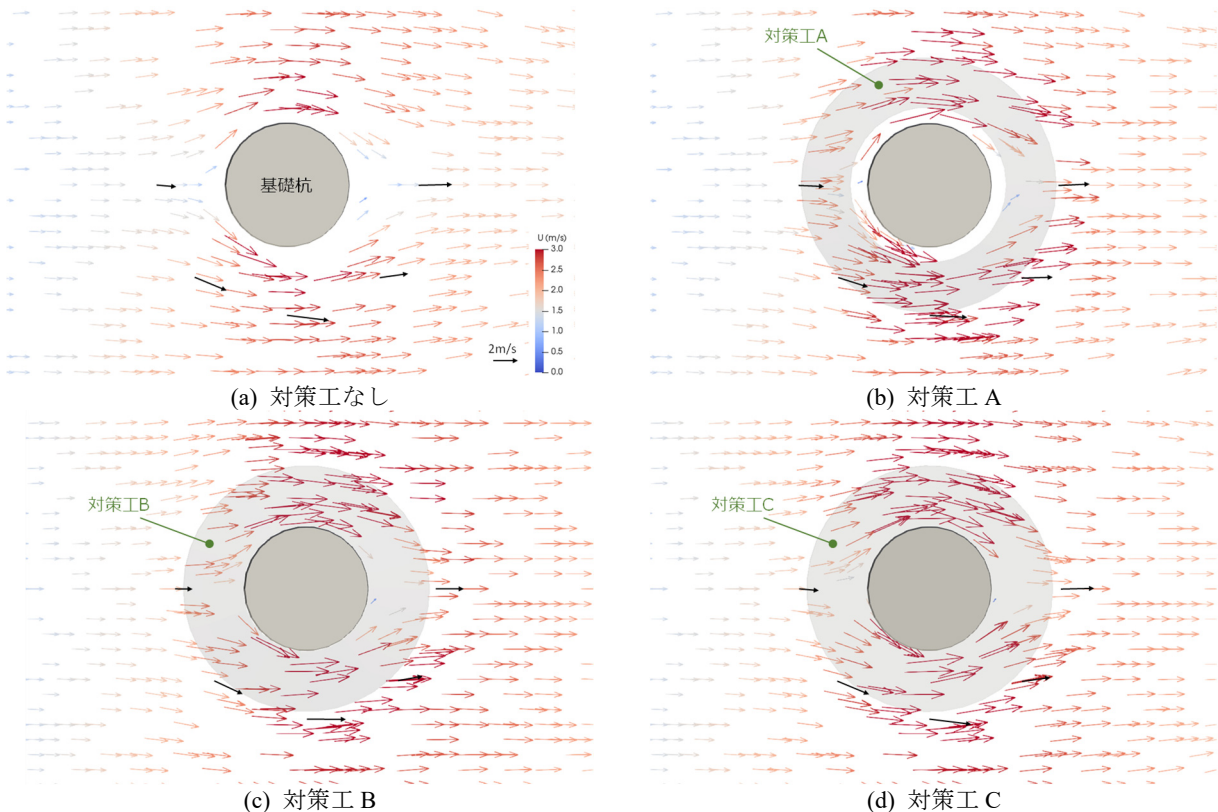


図-8 再現解析で得られた底面近傍の流速分布 ($t = 78.0$ s)
Fig.8 Numerical results of velocity distribution near the bed

に流れが通過する状況を想定し、対策工 A と水路床の間隙 $0.2D$ に合わせ、移動床区間の水路床を一律で $0.2D$ 低下させた固定床条件で解析を実施した。

4.2 解析結果

対策工 A を設置したケースについて、波高 H1, H2 および流速 U1, U3, U5 の時系列結果を固定床実験の計測結果と合わせて図-7 に示す。なお、流速 U1~U5 については、流下方向の x 成分を示す。同図より、移動床始点での水位 H1 は周期・振幅ともに良好に再現できている。基礎杭前面の水位 H2 では、波の打上げが実験よりやや過大に算出されているが、これを除けば実験結果をおおむね良好に再現している。流速 U1~U5 については、H2 での波の打上げ過大に伴い位相の先行および非線形性がやや過大に現れているが、周期・振幅の再現性は良好である。以上から、OpenFOAM により対策工周辺の流況をおおむね再現できていることを確認した。

次に、波が基礎杭を通過する際 ($t=78.0$ s) における底面近傍 (水路底面から $0.1D$ 上方) の水平流速ベクトルを図-8 に示す。同図には、固定床実験で得られた流速結果 U1~U5 を黒矢印で追加している。解析結果は実験で得られた対策工近傍における流速の大きさ、向きをおおむね再現できていることが確認できる。図-8 の流速分布より、いずれのケースについても杭側方で流れの加速が確認され、杭側方で最大侵食深が発生した実験結果と整合する結果が得られた。対策工 A~C では、対策工下面と水路床の間に流れが集中し、対策工なしに比べて杭側方でより加速しており、2. で想定した流況制御が達成されず、洗掘の抑制には至らなかったと考えられる。

5. 結論

着床式洋上風力基礎において洗掘対策施工の工期短縮が期待できる円盤型構造の対策工を提案し、その効果を確認するための水理模型実験を実施した。円盤型対策工単体では十分な洗掘抑制効果は得られなかったが、円盤型対策工と袋型根固材を併用することで、袋型根固材のみによる従来対策工法と同等の洗掘防止効果を得られることが確認できた。また OpenFOAM を用いて固定床条件で実験再現解析を実施した結果、対策工周辺で流れの加速が確認され、このため対策工単体で十分な洗掘防止効果が得られなかったと推察された。

参考文献

- 1) 前田工織 (株) HP : 着床式洋上風力発電施設の洗掘防止, <https://www.maedakosen.jp/feature/12324/>, (参照 2023-07-11) .
- 2) Tang, Z., Melville, B., Singhal, N., Shamseldin, A., Zheng, J., Guan, D. and Cheng, L.: Countermeasures for local scour at offshore wind turbine monopile foundations: A review, *Water Science and Engineering*, Vol. 15, Issue 1, pp. 15-28, 2022.
- 3) 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防止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)*, 78 巻 2 号, pp. I_709-I_714, 2022.
- 4) 陳 曉悦, 榎本容太, 渡部真史, 浜地克也, 石垣 匠, 有川太郎: モノパイル式洋上風力発電設備の基礎地盤における局所洗掘とその防止に関する研究, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 77 巻 2 号, pp. I_559-I_564, 2021.
- 5) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, *Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone*, pp. 208-214, 1973.