

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

青木 健太¹・谷上 可野²・片山 裕之³・三浦 成久⁴・鈴木 崇之⁵

¹正会員 五洋建設株式会社 九州支店 (〒890-0072 鹿児島県鹿児島市新栄町31-14-2F)

E-mail:kenta.aoki@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 九州支店 (〒857-1176 長崎県佐世保市崎辺町地先)

E-mail:kano.yagami@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:hiroyuki.katayama@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

⁴正会員 五洋建設株式会社 洋上風力事業本部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:naruhisa.miura@mail.penta-ocean.co.jp

⁵正会員 横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院 都市イノベーション部門

(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:suzuki-t@ynu.ac.jp

水深20 m超となる大水深での着床式洋上風力モノパイル基礎は、長期安定性の観点から洗掘対策が要求されている。著者らは、波のみを外力とした移動床模型実験によりモノパイル基部の局所洗掘と袋型根固材を用いた洗掘対策工敷設範囲の検討を行った。しかし、洋上風力推進海域の海流は表層において約1.0m/sあることが確認され、また既往の研究により波と流れの同時作用の場合には、波だけの場合より局所洗掘深が増加する報告もなされている。このように安定性の検討には波のみならず流れの影響も考慮することが必須である。そこで本研究では、波と流れによるモノパイル基部局所洗掘および袋型根固材を用いた洗掘対策工効果検証を目的とした移動床模型実験を実施し、袋型根固材による洗掘対策工が波と流れに対しても効果があることを確認した。

Key Words : local scour, monopile, waves, current, movable bed experiment, rock bag

1. はじめに

海岸・海洋に設置される柱状の構造物が抱える問題の一つとして、その構造物の周辺に発生する局所洗掘が挙げられる。局所洗掘は、構造物の安定性に大きな影響を及ぼすため、発生機構の解明や対策が求められている。水深20 mを超える大水深での着床式洋上風力モノパイル基礎においても、長期安定性の観点から洗掘対策が要求されている。しかしながら、モノパイル基部の局所洗掘を実測することは難しく、現象解明や対策工検討のため、多くの水理模型実験が行われている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。著者ら⁶⁾は、波のみを外力とした移動床模型実験によりモノパイル基部の局所洗掘と、袋型根固材を用いた洗掘対策工敷設範囲の検討を行った。その結果、大水深条件ではモノパイル側面際で局所洗掘が生じること、また袋型根固材による洗掘対策の効果を確認し、洗掘対策工の敷設範囲は、片幅1.5D程度必要であることを確認した。

しかし、洋上風力推進海域では、表層において1.0 m/s

程度の海流があることが確認された。また、波と流れの同時作用による洗掘の検討も行われており、波だけの場合より局所洗掘深が増加するとされている⁷⁾。

このようにモノパイル基礎の長期安定性の検討には、波のみならず流れの影響も考慮することが必要である。そこで本研究では、大水深における着床式洋上風力発電のモノパイル基礎を対象として、波と流れによるモノパイル基部局所洗掘および袋型根固材を用いた洗掘対策工効果の検証を目的とした移動床模型実験を実施した。

2. 水理模型実験の概要

(1) 海流条件の設定

本実験では、波に加え海流による流れを模擬した実験を行うが、実際の海域での流れの観測データは少ないため、JCOPE2M再解析データ（1993～2019年：27年間）⁸⁾を用い、日本海側の着床式洋上風力が検討されている海

域を代表的地点として海流条件を調べた(図-1)。図中には、各地点における最大海流と平均海流を示した。これより、最大海流は最大でも1.0 m/s (2 knot) 程度であることが確認できた。実験では、現地スケールで2 knotを中心に、1~3 knotを流れの条件として設定した。

(2) 実験概要

波と流れによる基礎部の洗掘を検討するため、幅0.6 mの2次元造波・還流水路においてDean Numberを考慮した縮尺1/35の規則波による移動床模型実験を実施した(図-2)。水路中に、延長4 m×奥行0.6 m×深さ0.23 mの移動床を設置し、その中央に直径D=10 cmの透明アクリル製モノパイル模型を設置した。水槽幅B=60cmは6Dとなる。なお、先行事例ではB/Dは2.6~11.1¹⁾²⁾³⁾となっている。また、陸上構造物に作用する津波力の検討における実験水路幅の影響を検討してB/Dは4.0以上必要であるとした研究成果⁹⁾もあり、本実験のB/D=6は十分とは言えないが水路壁の影響は少ないと考えている。移動床部分の水深は0.45 m(一様水深)とした。

実験は波のみ、流れ(26.1 cm/s)のみ、波と流れ(8.7 cm/s, 17.4 cm/s, 26.1 cm/s)を同時に作用させる3パターンを用意し、洗掘対策工条件を変化させた計12ケースを実施した(表-1)。なお、波のみ(Case1)、波と流れ(Case3~Case5)については、モノパイル無しの条件も実施した。波浪条件は日本海側の年最大波クラスを想定した規則波で、KC数は7.5である。洗掘対策工は袋型根

固材を使用し、現地換算で8t型とした。洗掘対策工の敷設範囲は、モノパイル側面から全方位に肩幅 1.0D と肩幅 1.5D の2ケースとした(図-3)。なお、洗掘対策工はモノパイル際の1列のみ2層、それ以外は1層とした。底質は粒径 0.1 mm (8号硅砂)を使用した。洗掘対策工の下部(底質の表面)に設置するフィルター層は、敷設範囲を肩幅0.5Dと肩幅1.5Dの2ケースとし、粒径1.0mmの石材を7mm厚で敷設した。

造波中は、7台の波高計により入射波、移動床部とモノパイル前背面の波浪を計測し、また、2台の2成分電磁流速計によりモノパイル前背面の岸沖流速を計測した(図-2)。モノパイル周辺については、洗掘対策工無し

表-1 実験条件一覧

ケース名	波高	周期	断面平均流速	底質中央粒径	モノパイル径D	袋型根固材敷設範囲	フィルター層敷設範囲
Case1	19.1cm	2.0s	-	0.1mm	10cm	-	-
Case2	-	-	26.1cm/s	0.1mm	10cm	-	-
Case3	19.1cm	2.0s	26.1cm/s	0.1mm	10cm	-	-
Case4	19.1cm	2.0s	17.4cm/s	0.1mm	10cm	-	-
Case5	19.2cm	2.1s	8.7cm/s	0.1mm	10cm	-	-
Case6	19.1cm	2.0s	-	0.1mm	10cm	1.0D	-
Case7	19.1cm	2.0s	-	0.1mm	10cm	1.5D	-
Case8	19.1cm	2.0s	26.1cm/s	0.1mm	10cm	1.0D	-
Case9	19.1cm	2.0s	26.1cm/s	0.1mm	10cm	1.5D	0.5D
Case10	19.1cm	2.0s	17.4cm/s	0.1mm	10cm	1.5D	-
Case11	19.1cm	2.0s	17.4cm/s	0.1mm	10cm	1.5D	-
Case12	19.1cm	2.0s	17.4cm/s	0.1mm </td <td>10cm</td> <td>1.5D</td> <td>1.5D</td>	10cm	1.5D	1.5D

注) Case10は、袋型根固材を全て連結

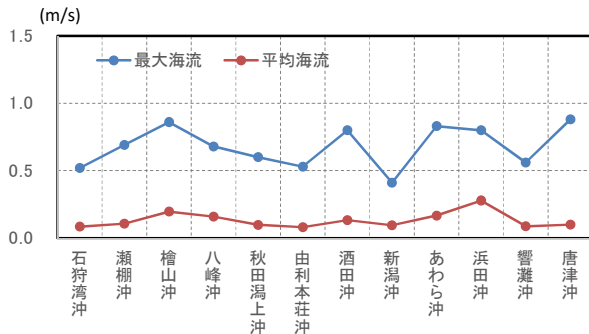
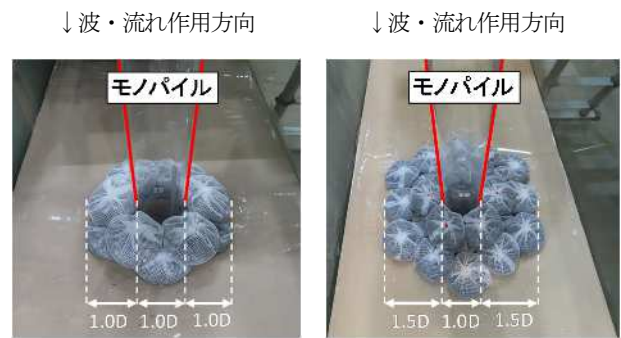


図-1 JCOPE2Mによる日本海沿岸の最大海流・平均海流(1993~2019年:27年間)



(a)敷設範囲 1.0D (b)敷設範囲 1.5D

図-3 洗掘対策工(袋型根固材)の敷設状況

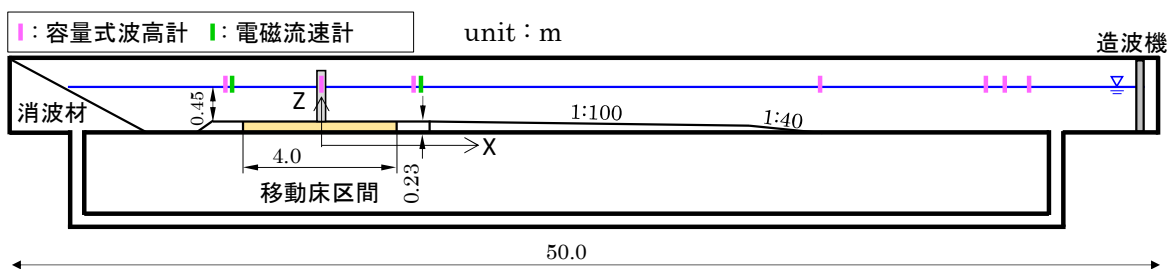


図-2 2次元造波・還流水槽における実験概要図

の固定床とした状態での底面流速を3次元流速計で測定した。地形変化はレーザープロファイラー (Keyence 社製) にて 1 mm ピッチで計測し、モノパイル模型内部に設置した 360 度カメラ (GoPro HERO9) によりモノパイル際の洗掘状況についても経時的に観察した。なお洗掘対策工を敷設したケースは、対策工を取り除いてから砂面計測を実施した。

3. 実験結果

(1) 予備実験による造波状況

予備実験として波と流れ (26.1 cm/s) を作用させ、モノパイル近傍の洗掘状況をモノパイル模型内部に設置した 360 度カメラにより確認した。波のみの実験では地形変化が平衡するまでの造波時間として 2 時間半としたが、流れを同時に作用させると局所洗掘現象は造波 4 時間程度まで継続していたため、造波時間は 4 時間として本実験の各ケースを実施した。

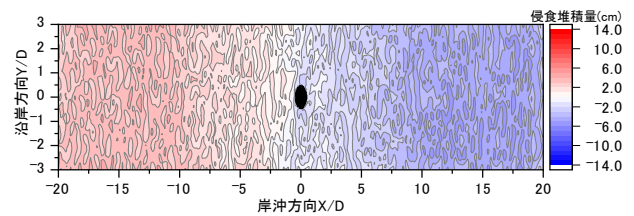
また予備実験において、造波時間が長時間に及ぶため、モノパイル岸側の移動床端部で洗掘が生じたことと、流れを加えたケースで移動床から岸側に流出した砂が還流装置を通して沖側から水槽内に循環する現象が生じていることが確認されたが、モノパイル近傍の洗掘に与える影響は少ないと判断し、実験を継続した。

(2) 侵食堆積図によるモノパイル際の局所洗掘状況

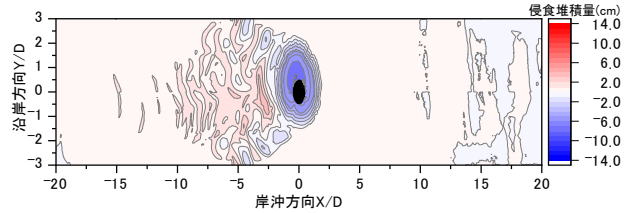
実験結果のうち、Case1 (波のみ)、Case2 (流れのみ)、Case3~Case5 (波と流れ) における移動床全範囲の初期砂面からの侵食堆積図を図4に示す。図中の X 軸と Y 軸は、モノパイル中心からの距離を、モノパイル径 D で無次元化して表記している。

波のみの Case1 では、全体に波浪による沖側の侵食、岸側の堆積傾向が見られ、洗掘はモノパイル近傍側面のみで発生した。流れのみの Case2 では、モノパイル全周にて波のみの場合より大きな洗掘が生じたが、沖側では砂の移動がほとんど見られず、岸側ではモノパイル背面で生じる渦の影響と見られる堆積形状が見られた。波と流れ (Case3~Case5) の場合は、波のみよりも大きな地形変化が生じた。8.7 cm/s と 17.4 cm/s のケースではモノパイル近傍の洗掘に加え、モノパイルに近い沖側範囲で侵食傾向、岸側範囲で堆積傾向が見られたが、26.4 cm/s になると全体に侵食傾向となり、流れが速くなるに従い全体の地形変化が大きくなった。

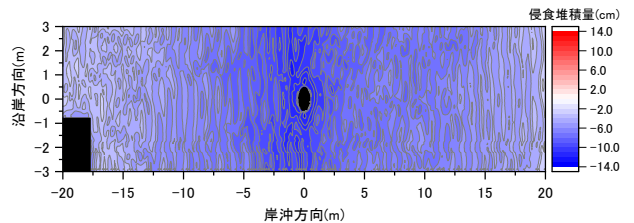
次に、全ケースのモノパイル周辺を拡大した侵食堆積図を図5に示す。図中、点線で示したモノパイル中心からの同心円 (径 1.5D, 1.0D, 0.5D) は、袋型根固材あるいはフィルター材を用いたケースについて、その敷設範



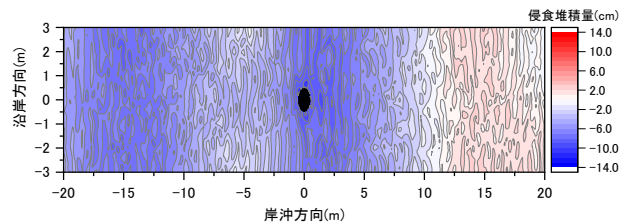
(1) Case1 (波のみ)



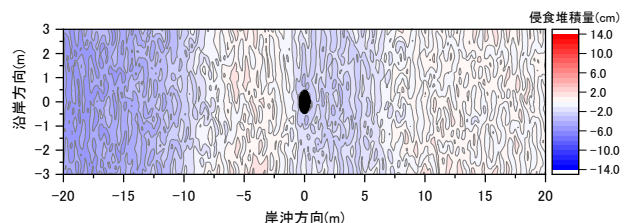
(2) Case2 (流れのみ ; 26.1 cm/s)



(3) Case3 (波と流れ ; 26.1 cm/s)



(4) Case4 (波と流れ ; 17.4 cm/s)



(5) Case5 (波と流れ ; 8.7 cm/s)

図4 洗掘対策工無の侵食堆積図 (移動床全範囲, 右が沖)

囲を示したものである。

図より、波のみのケースではモノパイル側方で洗掘が生じているのに対して、流れが加わるとモノパイル全周で顕著な洗掘が見られること、また、流れが速くなるほど、洗掘深が大きくなることが確認された。

波のみの場合に洗掘対策工を敷設した Case6, Case7 の結果から、洗掘対策工の敷設範囲が肩幅 1.0D, 肩幅 1.5D とともに敷設範囲で大きな洗掘は生じていない。ただし本実験条件では肩幅 1.0D は袋詰根固材が 1 列となるため端部で洗掘が生じた場合に不安定になる可能性が高く、2 列となる 1.5D の方がより安全な敷設範囲と考えられる。

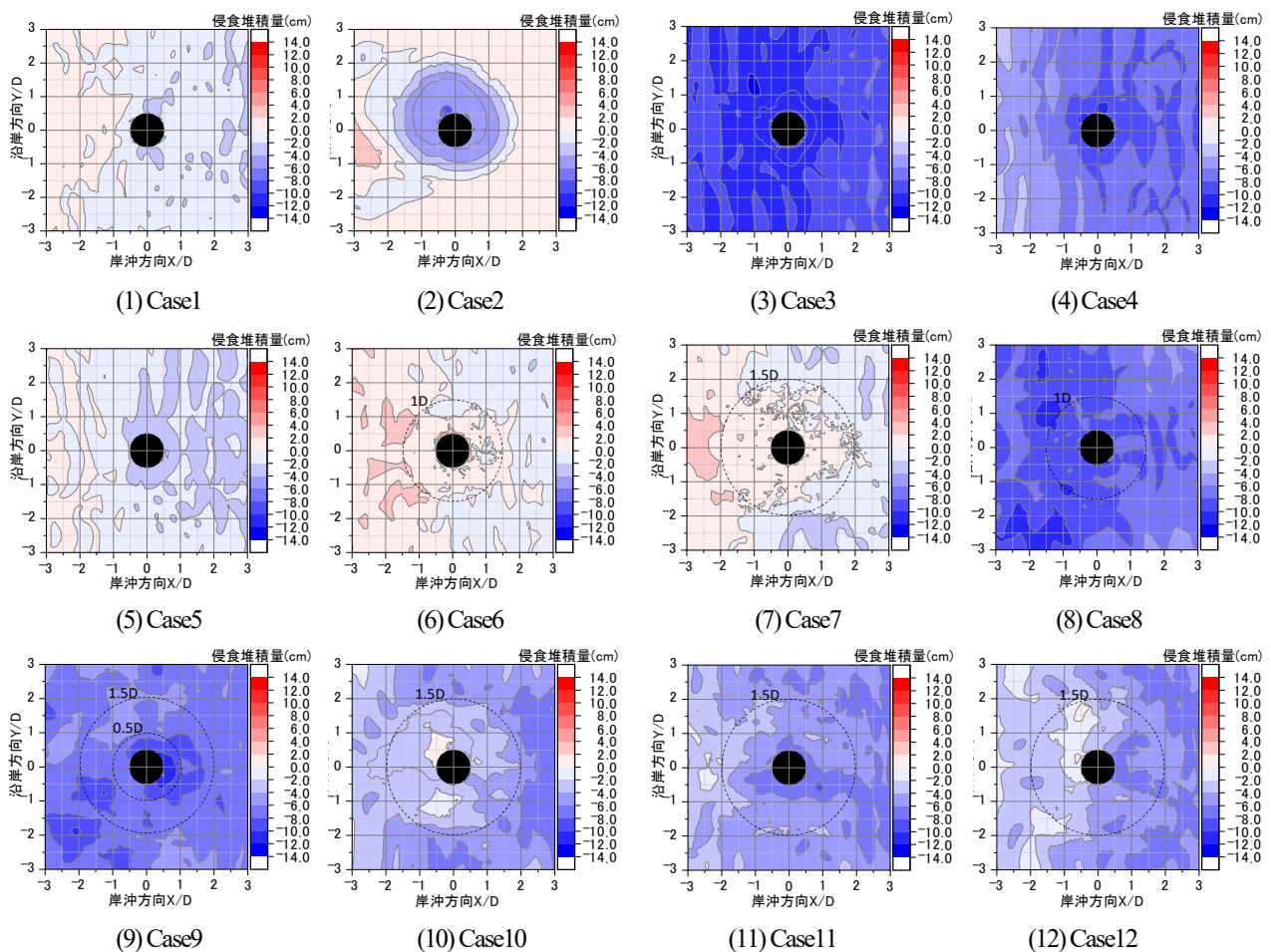


図-5 モノパイル付近の侵食堆積図 (右が沖)

次に波と流れ (17.4 cm/s) のケースで、対策工無しの場合 (Case4)、袋型根固材の対策工 1.5D を連結し、一体化した場合 (Case10)、Case10 の対策工を連結しない場合 (Case11)、Case11 にフィルター材を 1.5D の範囲に敷設した場合 (Case12) の状況から、安定した形状となる連結させた対策工が洗掘対策効果が一番高く、また袋型根固材のみの対策よりフィルター材を敷設の方が洗掘が数 cm 程度低減している。しかしながら、フィルター材は造波後は大半が流出 (図-6) しており、長期安定性の観点では Case11 と Case12 は洗掘対策としては同等と考えるべきと思われる。

(3) 縦断地形変化による洗掘状況の確認

a) 流れによる違い

波のみ、流れのみ、波と流れ (8.7 cm/s, 14.7 cm/s, 26.1 cm/s) を同時に作用させた場合のモノパイル中心を通る岸沖方向の縦断断面図を図-7に示す。波のみの場合は、図-5で確認したようにモノパイル側面で洗掘が生じているため岸沖縦断図からはその様子が確認できない。

一方、流れのみの場合はモノパイル際の肩幅1.5D程度の範囲で顕著な洗掘が生じているが、それより離れると地形変化が見られなくなる。また波と流れを作用させた

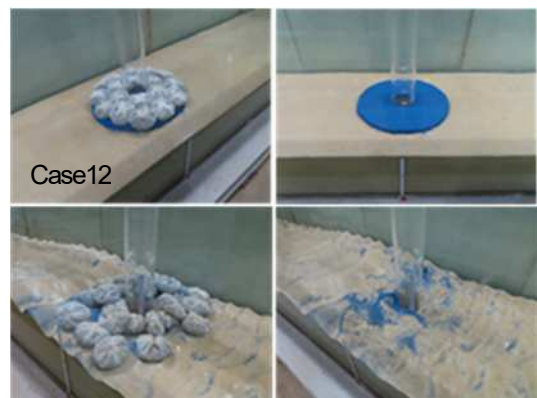


図-6 フィルター材の様子 (上段：造波前，下段：造波後)

場合は、モノパイル設置に起因すると考えられる地形変化が広範囲で生じており、モノパイルの沖側でその範囲がやや広いように見える。なお、流れが速いほど地形変化の範囲が広がることが確認された。

b) 洗掘対策工有無による違い

波のみを作用させた場合の岸沖方向縦断断面図を、図-8に示す。モノパイル有無で全体の侵食傾向に違いは見られず、地形変化に与えるモノパイルの影響がモノパイル側面のみであることがわかる。また洗掘対策工を敷設することにより、敷設部分は沖側においても初期砂

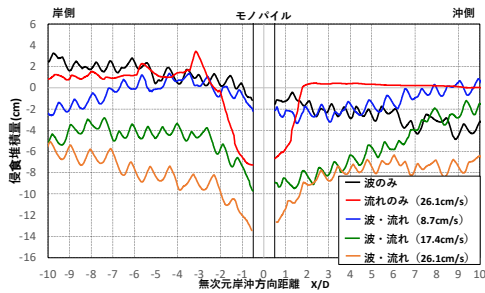


図-7 縦断方向断面図 (洗掘対策工なし)

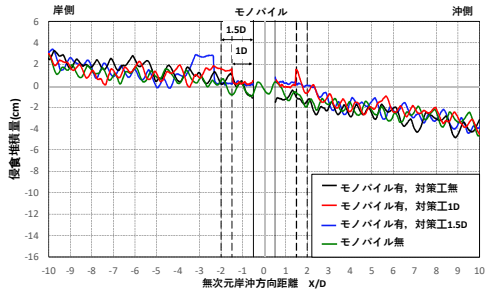


図-8 縦断方向断面図 (波のみ)

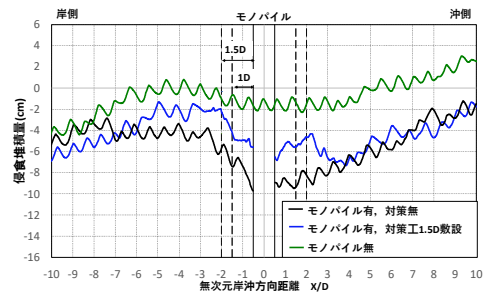


図-9 縦断方向断面図 (波・流れ17.4cm/s)

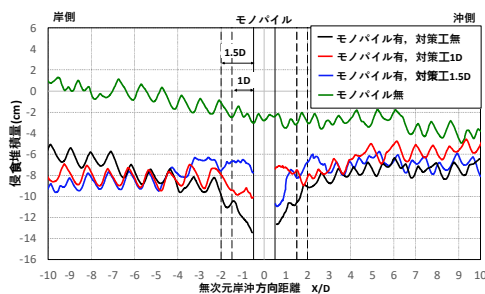


図-10 縦断方向断面図 (波・流れ26.1cm/s)

面とほぼ変わらず、洗掘防止効果を確認できた。

波と流れ (17.4 cm/s, 26.1 cm/s) を同時に作用させた場合の岸沖方向縦断図を図-9, 図-10 に示す。図-9 に示す流れが 17.4 cm/s のケースでは、モノパイルが無い状態ではモノパイル設置位置付近で 2 cm 程度の侵食が生じ、モノパイルを設置するとモノパイル際で初期砂面から 10 cm 程度の洗掘が生じた。洗掘対策工を敷設すると、対策工無しの場合よりも洗掘が 4 cm 程度緩和された。

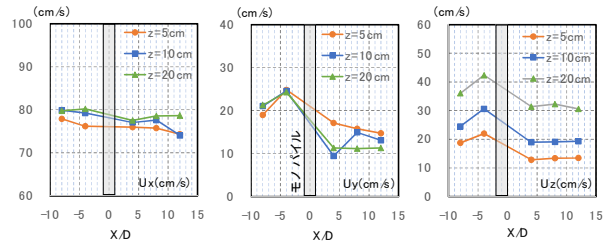


図-11 流速測定結果 (波・流れ17.4cm/s)

図-10 に示す流れが 26.1 cm/s ケースでは、モノパイル無しの設置位置周辺の侵食は同程度であるが、モノパイルを設置するとモノパイル際で初期砂面から 13 cm 程の洗掘が生じ、洗掘対策工を設置すると、対策工無しの場合から 2~3 cm 程度洗掘が緩和された。

今回の実験では現地スケールで1~3 knotの流れが24時間継続する条件のため、実際の海域よりは厳しい条件となっていると考えられる。そのため局所洗掘より広範囲の地形変化が顕著であったが、モノパイル基礎の安定性上問題となる近傍の局所洗掘は、本実験条件においては流れがある場合でも袋型根固材による対策工敷設により、敷設しない場合に比べて20~40%程度侵食が緩和されることがわかった。

(4) 底面流速の検討

水槽の中心線上、固定床において、モノパイルから沖側に正としモノパイル径Dで無次元化した座標でX/D=12, 8, 4, -4, -8の位置、底面からZ/D=0.5, 1, 2の計15地点の流速を、波と流れ (17.4 cm/s) のケースにおいて3次元流速計を用いて測定した (図-11)。図中のUxは岸沖方向、Uyは沿岸方向、Uzは鉛直方向で、各流速振幅を示した。波のみではモノパイル際でのみ流速の増幅が見られたが⁹⁾、流れが加わるとUxはモノパイルの沖側、岸側で大きな変化はないが、Uy, Uzはモノパイル岸側で大きくなる傾向が見られた。これは、モノパイルにより生じる渦の効果と考えられ、より背面側で影響が大きくなり、定性的には流れのみ (Case2) のモノパイル背面側の地形変化と対応していると考えられる。

(5) 無次元最大洗掘深とU_{cw}の整理

Sumer ら⁷⁾と同様に波と流れが共存する場合の最大洗掘深の整理を行った。ここで、本実験ではモノパイルが無い状態でも移動床広範囲にわたり地形変化が生じていたため、モノパイル無しの造波後の地形との差分を洗掘と定義し、モノパイル周辺の最大洗掘深を整理した。

図-12に各ケースの最大洗掘深S_{max}をモノパイル径Dで無次元化したS_{max}/Dと、底面での波の軌道流速振幅U_wと鉛直断面平均流速U_cで定義されるU_{cw} (=U_c/(U_w+U_c))との関係を示した。既往の知見と同様、U_{cw}が増加するほ

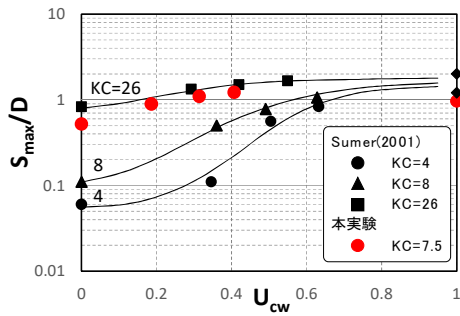


図-12 無次元最大洗掘深 S_{max}/D と U_{cw} の整理

ど S_{max}/D の値も増加する傾向が見られた。KC数の差異が見られるのは、Sumerらの実験は底質、流速などほぼ同程度の条件であるが、KC=4と8の実験のモノパイル径は9 cmに対してKC=26の実験のみ3 cmと細く、流れに対するモノパイルの影響が同じ径の実験より小さいと考えられる。洋上風力モノパイル基礎は大口径となるため、波のみでなく流れも加えた最大洗掘深の検討が必要である。

4. 終わりに

着床式洋上風力モノパイル基礎を対象に、波のみ、波と流れを作用させた場合のモノパイル周辺の局所洗掘と、袋型根固材による洗掘対策工の効果について移動床模型実験による検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ・波のみを作用させた場合はモノパイル側面でのみ局所洗掘が発生したが、流れも同時に作用させた場合にはモノパイル全周囲で局所洗掘が生じ、流れが速くなるとその範囲が拡大し、最大洗掘深も増加する。
- ・波と流れを作用させた場合でも、袋型根固材による洗掘対策効果により洗掘深が緩和されることを確認した。

参考文献

- 1) 緒方ゆり, 増子雅洋, 藤井直樹, 阿部光信, Dilan Rathnayaka, Sachini Pathirana, 田島義満: 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), Vol.74, No.2, pp.I_820-I_825, 2018.
- 2) 有川太郎, 陳曉悦, Songgui CHEN, Hanbao CHEN, 浜地克也, 松本幸久, 徳永正吾, 渡部真史, 巖駿: モノパイル式洋上風力発電機の基部における局所洗掘に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.I_535-I_540, 2020.
- 3) 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), Vol.77, No.2, pp.I_559-I_564, 2021.
- 4) 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防止工とその設置範囲の実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.77, No.2, pp.I_361-I_366, 2021.
- 5) 平石哲也, 橋口萌乃: 波・流れ中における洗掘防止ユニットの安定性に関する実験, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会, C118, 2021.
- 6) 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, pp.553-558, 2021.
- 7) Sumer, B. M., and J. Fredsøe: Scour around a pile in combined waves and current, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp.403-411, 2001.
- 8) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr* 65, pp.737-756, 2009.
- 9) 池谷毅, 岩田善裕, 奥田泰雄, 喜々津 仁密, 石原晃彦, 長谷川巖, 橋本純, 小島大典: 水理模型実験における陸上構造物に作用する津波力に及ぼす実験水路幅の影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_901-I_906, 2017.

(Received March 17, 2022)

(Accepted July 21, 2022)

EXPERIMENTAL STUDY OF LOCAL SCOUR AROUND MONOPILE FOUNDATIONS CAUSED BY WAVES AND CURRENTS AND THE EFFECTIVENESS OF COUNTERMEASURE

Kenta AOKI, Kano YAGAMI, Hiroyuki KATAYAMA,
Naruhisa MIURA and Takayuki SUZUKI

Scour countermeasures are required for long-term stability of offshore wind turbine monopile foundations where the water depths exceed 20 m. The authors conducted the model experiments of local scour around monopile foundations and the extent of scour protection using rock-bag under waves. However, the ocean current in the offshore wind power promotion area is approximately 1 m/s at the surface. Thus, it is essential to consider not only the effects of waves but also those of currents when examining stability.

In this study, model experiments were conducted to verify the effectiveness of scour countermeasures using rock-bags against local scour around monopile foundations caused by waves and currents. The results indicated that the scour was mitigated by the countermeasures, and confirmed that the scour countermeasures using rock-bags are effective against waves and currents.