

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

片山 裕之¹・青木 健太²・鵜飼 亮行³・三浦 成久⁴

¹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)

²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:kenta.aoki@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: akiyuki.ukai@mail.penta-ocean.co.jp

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

着床式洋上風力発電では、モノパイル基礎の長期安定性の観点から洗掘対策が要求されており、橋脚洗掘対策等の知見からモノパイル径Dの片幅2倍の範囲に対策を施すことが推奨されている。しかしながら、水深20m超の大水深での施工負荷は大きく、適切な対策工範囲を把握することは重要である。

本研究では、移動床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範囲について検討を行ったものである。

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

1. はじめに

着床式洋上風力発電では、モノパイル基礎の長期安定性の観点から洗掘対策が要求されている。橋脚洗掘対策等の知見¹⁾²⁾からは、最大洗掘深 S_{max} はモノパイル径Dに対してKC数をパラメータとして最大で1.3Dとなることが知られている。また洗掘対策は全方位に渡り片幅2Dの範囲に施すことが推奨されている。欧州の先行事例では、フィルター層の上に石材による洗掘対策工を片幅3.5D~4.5Dと比較的広い範囲に敷設している例も見られる⁴⁾。また国内では、モノパイル基礎の洗掘対策工として袋詰めされた石材(袋型根固材)を利用した検討例が見られ、水理実験により洗掘範囲や洗掘深の検討が行われている⁵⁾⁶⁾。

しかしながら、水深20 m超の大水深での施工負荷は大きく、適切な対策工範囲を把握することは施設の長期安定性の観点、経済性の観点などからも重要である。また従来の橋脚洗掘対策では一方向流れを対象としているが、洋上風力のような外洋では多方向性もあり、また大水深海域では支配外力である底面波動流速も低減し、洗掘範囲や最大洗掘深も小さくなる可能性もある。

また2次元数値解析モデルによる局所洗掘評価を試みた例⁸⁾⁹⁾では、モノパイル基部付近の3次元性の高い外力

場の評価が十分ではなく、3次元モデル¹⁰⁾¹¹⁾による検討が望ましいが、洗掘が長時間にわたる現象であることを考えると、現状では数値解析による定量的な洗掘量評価は実務的には難しいと考えられる。従って、洗掘深さや洗掘範囲、さらに対策工敷設範囲について検討を行うためには、負荷の大きい移動床模型実験が必要不可欠となる。特に大水深を対象とした洗掘実験は未だ実施例も多くはなく、未解明な部分が残されていると考えられる。

本研究では、大水深における着床式洋上浮力発電のモノパイル基礎を対象として、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の必要範囲について検討を行ったものである。

2. 水理模型実験の概要

平面造波水槽(幅30 m×奥行20 m×深さ1.5 m)を用いて、大水深におけるモノパイル基礎を想定した移動床実験を実施した(図-1)。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(KC数で0.8~7.8)とし、粒径0.1 mm(8号硅砂)と0.4 mm(6号硅砂)の底質を使用し、Dean Numberを考慮し縮尺1/35とした。なお、実験条件では、底質粒径0.1 mmのケースでシールズ数が0.19~0.46、

表-1 実験条件一覧

ケース名	波浪条件	底質 中央粒径	モノパイル 径D	袋型根固材	
				Type	敷設範囲
Case1	A	22.9cm 2.0s	20cm	-	-
	B				
Case2	A	17.1cm 1.7s	20cm	-	-
	B				
Case3	A	22.9cm 2.0s	20cm	A	1.5D
	B				
Case4	A	22.9cm 2.0s	20cm	B	-
	B				
Case5	A	17.1cm 1.7s	20cm	A	1.0D
	B				
Case6	A	17.1cm 1.7s	20cm	A+B	1.5D
	B				
Case7	A	22.9cm 2.0s	20cm	-	-
	B				
Case8	A	22.9cm 2.0s	20cm	A	1.5D
	B				
Case9	A	17.1cm 1.7s	10cm	-	-
	B				
Case10	A	11.1cm 1.4s	13cm	-	-
	B				
Case11	A	11.1cm 1.4s	18cm	-	-
	B				
Case12	A	$H_{1/3}=19.5\text{cm}$ $T_{1/3}=1.6\text{s}$	20cm	-	-
	B				
			28.6cm		

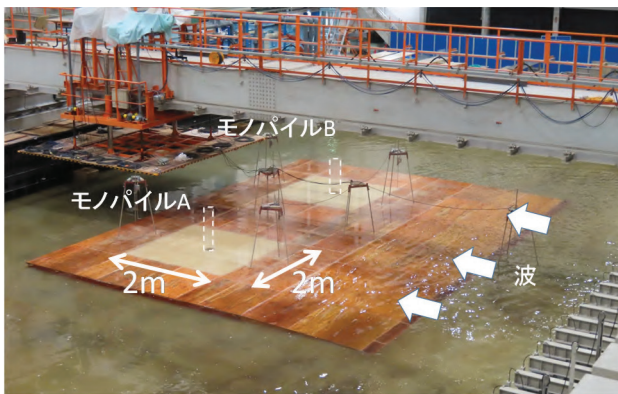
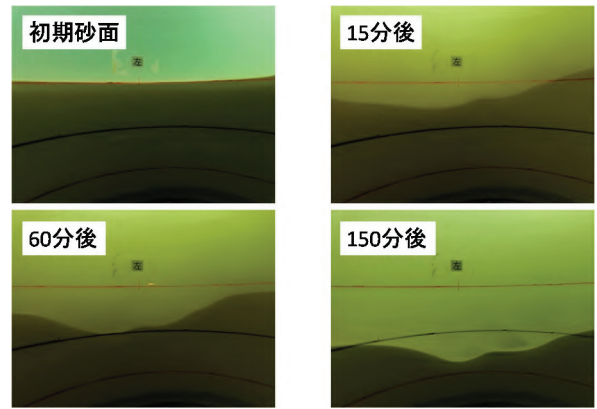


図-1 実験設備概要

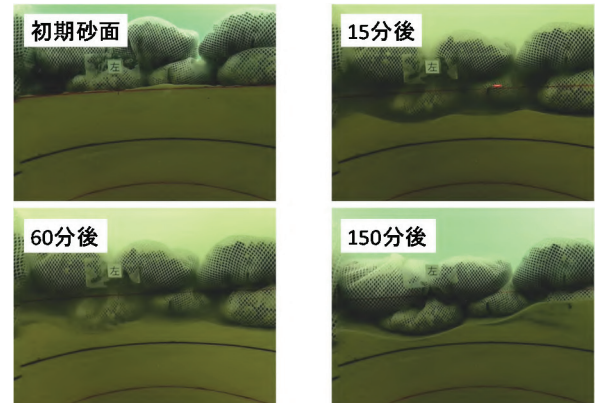
砂粒子の沈降速度 w_f と底面流速 u の比 $u/w_f=34$ となり底質移動形態は浮遊移動となる。

平面水槽内中央部に幅 2 m×奥行 2 m×深さ 0.25 m の移動床を 2 セット用意し、それぞれの中央に透明アクリル製のモノパイル模型を設置した。移動床部の水深を 57 cm とし、波浪、底質、モノパイル径、洗掘対策工条件を変えて全 24 ケースを実施した (表-1)。なお Case12 のみ不規則波を作用させた。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、洗掘対策工無しのモノパイル周辺の底面流速を、固定床として 3 次元流速計で測定した。造波前と造波終了後の海底面地形はレーザープロファイラー (Keyence 社製) により 1 mm ピッチで計測するとともに、モノパイル模型中に設置した 360 度カメラ (GoPro HERO9) によりモノパイル際の洗掘状況を経時的に観察した (図-2)。

洗掘対策工は袋型根固材を用いた (図-3)。サイズは現地換算で 8 t 型とし、中詰石材の大きさを 2 種類 (A :



(1) 基本ケース (対策工無)



(2) 基本ケース (対策工有)

図-2 内部カメラによる洗掘進行状況

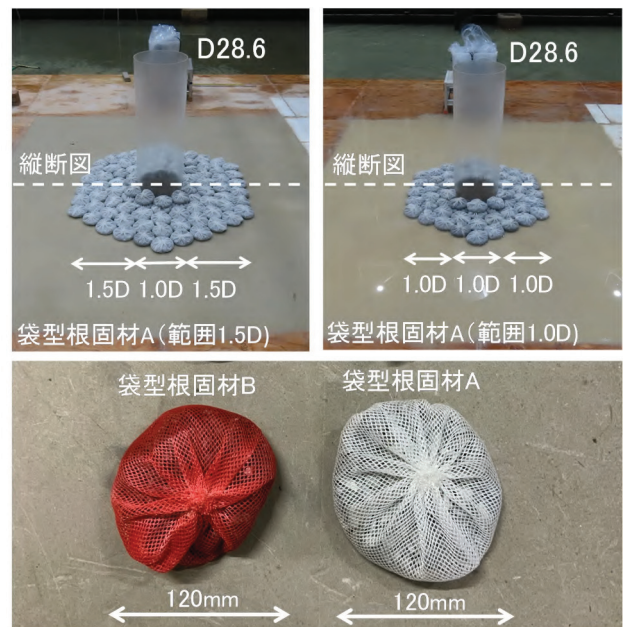


図-3 洗掘対策工と敷設状況例

石材径 5~13 mm, 袋型根固材 B : 石材径 2.5~5 mm) に変えたものを用意した。対策工の敷設範囲は、各ケースのモノパイル径 D に対して、全方位に片幅 1.5D と 1.0D の 2 ケースとした。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。

3. 洗掘実験結果

(1) モノパイル際の局所洗掘状況と造波時間の関係

局所洗掘は、洗掘領域からの流出土砂量 Q_{s0} と流入土砂量 Q_{si} のアンバランスから生じる現象で、 $Q_{s0}=Q_{si}$ となるように洗掘深形状が変化していく。 Q_{s0} と Q_{si} の関係から局所洗掘は、静的平衡($Q_{s0}>Q_{si}\div 0$)と動的平衡($Q_{s0}\cong Q_{si}>0$)の領域に分類される。静的平衡状態では最終洗掘深に達するまで長時間を要するが、動的平衡状態では短時間に平衡洗掘深に達する¹²⁾。本実験のような波浪場における洗掘では動的平衡状態を確認することになるが、流入土砂量 Q_{si} が継続される必要がある。

先行して造波による洗掘状況の変化を内部カメラ画像により確認し、モノパイルの前背面と両側面の時間あたりの局所洗掘量の時間変化を整理した(図-4)。その結果、今回の実験条件では洗掘量の大きな変化は概ね造波

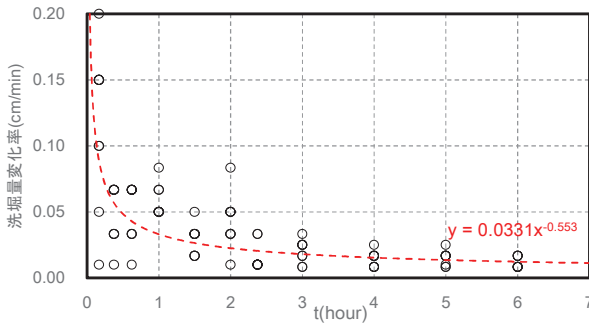


図-4 造波時間と局所洗掘変化量の関係

開始から2時間程度までで生じており、それ以降は全体に洗掘量の時間変化が小さくなる傾向が見られた。造波時間を長くすると移動床部に対する流入土砂量や流出土砂量の影響も考えられ、これらを考慮し2時間半(実スケールで約15時間)を造波時間として採用した(図-4)。

(2) モノパイル際の局所洗掘状況

代表ケースにおける侵食堆積図を図-5に示した。実験は侵食性波浪条件のため移動床全範囲で侵食が見られたため、モノパイル無しの平均侵食量との差分として局所洗掘量を評価した。なお洗掘対策工有のケースは、撤去後に測量を行った。本実験では、局所洗掘は全てのケースでモノパイル基部の側面側に生じており、モノパイル基部の前背面側には堆積が見られた。内部カメラ画像から、モノパイル側面で増大した振動流速が底質を岸側と沖側に動かす様子が確認された。なお、平面水槽中央部に高さ0.25 mの移動床模型を設置したため、両端部の段差地形により波の屈折が生じ、非対称な侵食地形が生じていた。ただし本検討で着目する局所洗掘には影響しないと判断した。以降の整理は、局所洗掘が大きいモノパイル径中心沿岸方向の断面図を用いた。

a) モノパイル径による違い

モノパイル径中心を通る沿岸および岸沖方向の断面図を、各モノパイル径($D=10\text{ cm}, 20\text{ cm}, 28.6\text{ cm}$) 3ケースのうち、同じ波浪条件(波高22.9 cm, 周期2.0 s)、同じ底質粒径(0.1 mm)の結果を、対応する洗掘対策工(対策工A, 敷設範囲1.5D)の結果と併せて示した(図-6)。

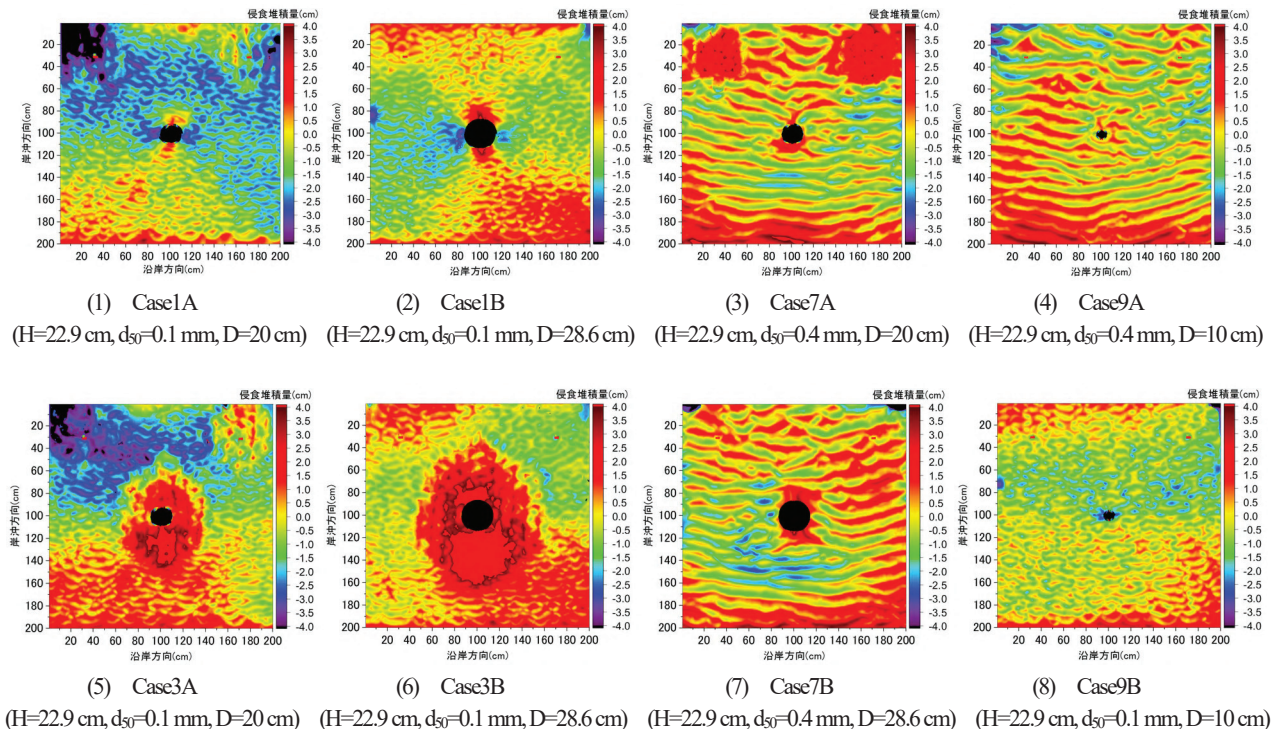
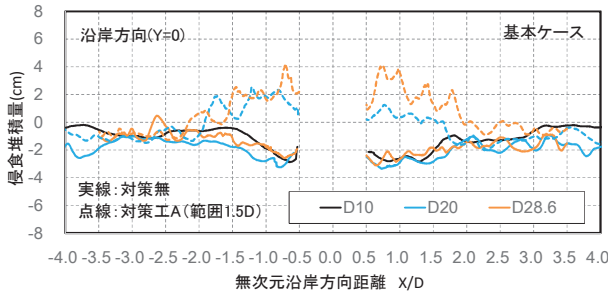
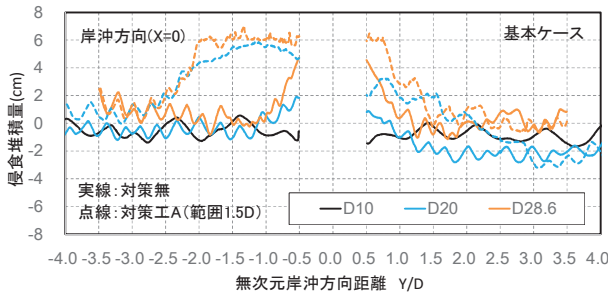


図-5 代表ケースの侵食堆積分布図



(1) 沿岸方向断面図



(2) 岸沖方向断面図

図-6 モノパイル径による地形変化の比較

横軸はモノパイル中心からの距離を各モノパイル径で無次元化している。またモノパイル径 $D=10\text{ cm}$ のケースは対策工無のみである。なお、 X は沖からモノパイルをみて右側を正、 Y はモノパイルから沖側を正とする。

結果をみると、洗掘対策工無し(実線)の場合、どのケースもモノパイル基部側面側に最大洗掘深 3 cm 程度の局所洗掘が見られるが、モノパイル基部の前背面では $D=10\text{ cm}$ を除き堆積が見られ、モノパイル径が太いほど堆積も大きい傾向が見られる。また洗掘範囲はいずれのケースもモノパイル基部から肩幅 $1D$ 程度の範囲であった。洗掘対策工有(点線)の場合は、いずれも側面側、前背面側とも堆積が見られ、対策工の効果が確認された。

また、対策工無のケースのモノパイル基部局所洗掘勾配は、モノパイル径 D で無次元化された沿岸方向距離に対して、3ケースとも同程度の勾配となっている。静的な安息角は底質粒径に依存するが、洗掘範囲を規定する底面流速増大範囲がモノパイル径 D に影響される可能性を示していると考えられる。

b) 洗掘対策工(敷設範囲, 中詰材)

次に、洗掘対策工の敷設範囲による違いをみるために、洗掘対策工Aを設置したケースの敷設範囲 $1.0D$ と $1.5D$ のケースについて、モノパイル径中心を通る沿岸方向断面図を示した(図-7)。この結果からは、洗掘対策工Aは、敷設範囲を $1.0D$ とした場合より $1.5D$ としたケースの方が大きな堆積が見られた。対策工無の場合の洗掘範囲が $1.0D$ 程度であることから、洗掘範囲よりやや余裕のある $1.5D$ の範囲に対策工を敷設した方が効果が高いことが確認された。

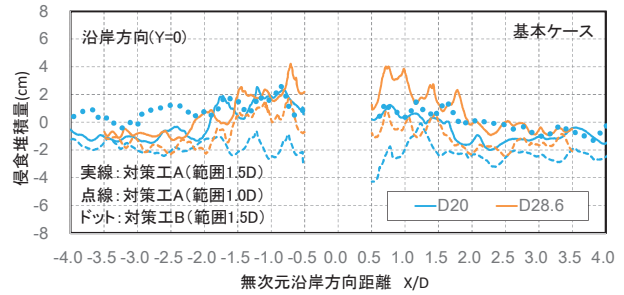


図-7 洗掘対策工敷設範囲による地形変化の比較

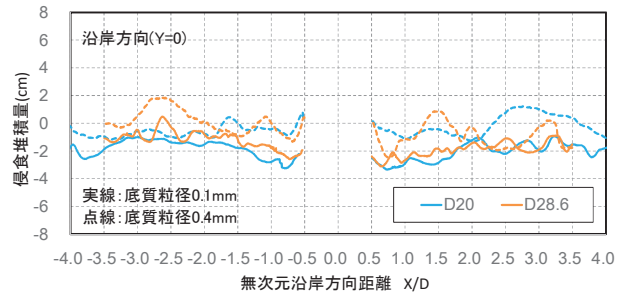


図-8 底質粒径による地形変化の比較

中詰材のサイズについては、モノパイル径 $D20$ について対策工Aと対策工B(どちらも敷設範囲 $1.5D$)を比べると、モノパイル基部付近の状況はほぼ同じであり顕著な違いまでは見られなかった。

なお、ケースによっては対策工敷設範囲の外縁部前面で洗掘が生じ、端部の対策工が若干外側に落ち込む様子も散見されたが、大きな変位には至らなかった。また、対策工を施したケースでも、モノパイル基部際において局所洗掘が生じたケースも見られた。ただし、部分的に洗掘が生じていたことから、僅かな対策工設置状況の違いによるものと考えられる。モノパイル基部際への対策工設置には十分配慮が必要であると考えられる。

c) 底質粒径による違い

底質粒径による違いを把握するために、底質粒径の異なるケース(0.1 mm と 0.4 mm)で、同じ波浪条件(波高 22.9 cm , 周期 2.0 s)、モノパイル径 $D=20\text{ cm}$ と $D=28.6\text{ cm}$ のケースの沿岸方向の地形変化を示した(図-8)。後述するSumerら¹⁾によって提案されている KC 数と最大洗掘深の関係では、平衡状態における最大洗掘深には底質粒径の影響は考慮されていない。実験ケースとしては少ないが、実験結果からは僅かであるが底質径 0.1 mm に比べ 0.4 mm のケースの方がモノパイル基部側面の洗掘が減弱していると考えられる。実験結果が十分平衡状態に達していることの確認も必要であるが、漂砂量則において限界掃流力が粒径に依存するように、局所洗掘現象においても粒径依存性が示唆される結果となった。

d) 規則波と不規則波による違い

洗掘現象に対する規則波と不規則波の違いについては、

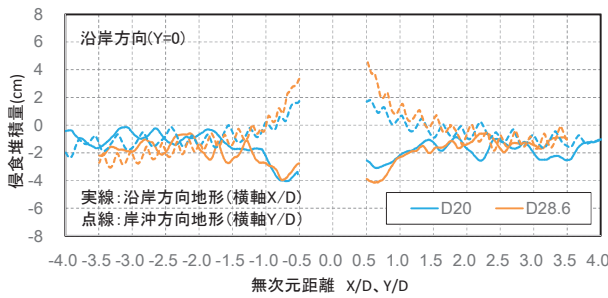


図-9 不規則波のケースの地形変化

不規則波の方が外力が平滑化されるため、洗掘程度も緩和される可能性はある。既往の大型海洋構造物の洗掘実験においては、波高条件が同じではないが全体の侵食堆積パターンは規則波と不規則波ではほぼ同じであった⁹⁾。また円筒構造物周辺の不規則波と規則波による洗掘実験では、 $H_{1/3}$ または $H_{1/10}$ に基づくKC数を用いることで、規則波の無次元最大洗掘深とKC数の関係が概ね利用可能とされている¹⁴⁾。

本検討では不規則波ケースは2ケースの実施であるが、洗掘状況は規則波と同様、洗掘発生範囲はモノパイル基部側面側の局所的であり、モノパイル基部前背面側で堆積が見られる傾向も同じであった(図-9)。最大洗掘深は波浪条件の絶対値によって異なるが、モノパイル基部の洗掘傾向は規則波実験でも把握できると考えられる。

(3) 底面流速の検討

洗掘が生じたモノパイル基部の底面流速を把握するため、固定床条件における底面流速(底面から25 mm)を測定した。測定は3次元流速計(kenek社製)を用いたが、センサープローブ(φ13 mm)による影響は考えられる。計測はモノパイル前面から側面までの5カ所(P1~P5地点)と、モノパイルによる影響のない位置(P0地点)とした。各モノパイル径別に、各計測位置の岸向最大流速と、モノパイルによる影響のない位置P0地点の流速との比を整理した(図-10)。なお、支配的な岸向水平流速のみ示してある。モノパイル基部側方のP1地点では1.6~1.8倍となり、P2とP5地点およびモノパイルから1.0D離れたP3地点でも1.2倍程度となった。モノパイル前面のP4地点はモノパイル自身の遮蔽効果により0.4~0.6倍に低減していた。

底面流速については、数値波動水路(CADMAS-SURF/3D)¹⁴⁾による現地スケールの解析も実施した(図-11)。なお、解析結果においても支配的となる岸向水平流速について整理した。モノパイル基部側面際で微小振幅波理論の約2倍の底面流速となり、計測した底面流速の方が若干小さい結果となった。解析による流速の鉛直分布は、水面近くを除く水面下でモノパイル径Dが小さいほど大きくなっているが、計算格子サイズが共通の

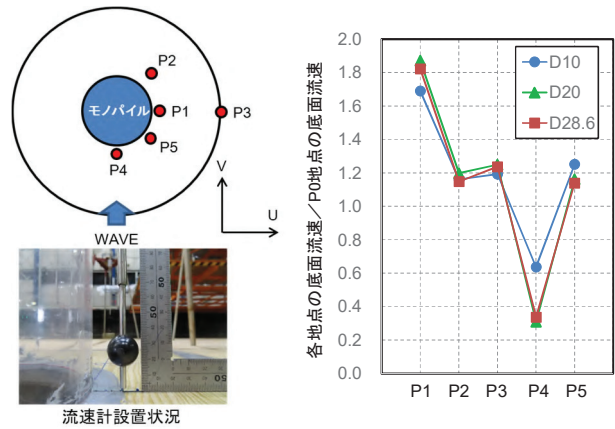


図-10 底面流速の計測結果 (H=22.9 cm, T=2.0 s)

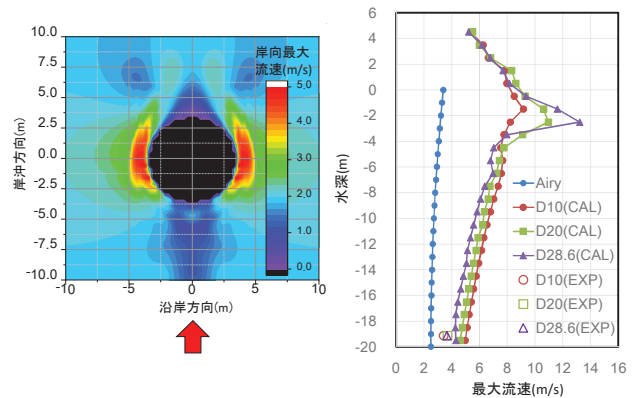


図-11 数値波動水路による底面流速分布
(分布図はモノパイル径D20, 波浪条件: Case1)

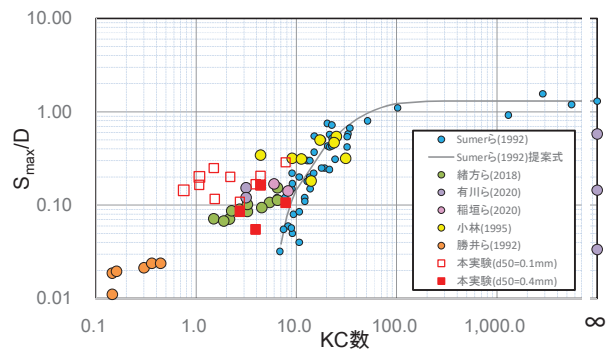


図-12 無次元最大洗掘深 S_{max}/D とKC数との関係

ため、モノパイル形状の再現精度などの影響も考えられ、今後確認が必要である。

平面的な流速増大範囲については、実験で局所洗掘が生じた範囲とほぼ一致する傾向が見られ、洗掘範囲の推定には3次元の数値解析結果が有効であると考えられる。

(4) 最大洗掘深の整理

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 を整理した(図-12)。図中には、既往の洗掘実験の結果¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾も示してある。着床式洋上風力発電のモノパイル基礎は、大水深、大口径となるためKC

数の小さい領域の洗掘現象となるが、既往の無次元最大洗掘深の提案式¹⁾(式1)で洗掘が生じないとされているKC<6の範囲においても洗掘が生じており、既往の結果を支持する結果となった。

$$S_{max}/D = 1.3\{1 - \exp[-0.03(KC - 6)]\} \dots KC \geq 6 \quad (1)$$

また底質粒径0.4 mmのケースの結果を見ると、ばらつきはあるものの、同じKC数の条件で底質粒径0.1 mmより無次元最大洗掘深が小さくなる傾向が見られる。前述の局所洗掘状況に加えて、KC数と S_{max}/D の関係への粒径依存の可能性も示唆された。

5. 終りに

着床式洋上風力発電のモノパイル基礎を対象に、波浪による局所洗掘および袋型根固材による洗掘対策工について移動床実験による検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・大水深条件ではモノパイル側面際で局所洗掘が生じた。
- ・袋型根固材による洗掘対策の効果を確認した。対策工の敷設範囲は片幅1.5D程度必要である。
- ・モノパイル周辺の底面流速について、固定床における測定値と数値波動水路の計算値から確認した。その結果、モノパイル側面際底面周辺の流速増大範囲と局所洗掘発生範囲は一致する傾向が見られた。
- ・局所洗掘はKC<6の範囲でも生じることを確認した。また無次元最大洗掘深 S_{max}/D は、KC数だけでなく底質粒径にも依存する可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Sumer, B. M., Fredsoe, J., Christiansen, N.: Scour Around Vertical Pile in Waves, *Journal of Waterway Port and Ocean Engineering*, Vol.117, No.1, pp.15-31, 1992.
- 2) CIRIA: Manual on Scour at Bridges and Other Hydraulic Structure, CIRIA C551, pp.160-161, 2002.

- 3) Dept. of Transport and Main Roads, Queensland Gov.: Bridge Scour Manual, p.74, 2013.
- 4) Esteban, M. D., Lopez-Gutierrez, J, Negro, V., and Sanz, L.: Riprap Scour Protection for Monopiles in Offshore Wind Farms, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 440, 2019.
- 5) 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.
- 6) 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防止工水理実験, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, II-158.
- 7) 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.
- 8) 齊藤栄一, 佐藤慎司, 柴山知也: 波動場における大口徑円柱周辺の局所洗掘に関する研究, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, pp.392-396, 1988.
- 9) 勝井秀博, 東江隆夫: 大型海洋構造物周辺の洗掘深に関する定量評価, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.491-495, 1992.
- 10) 榎田真也, 由比政年, 石田啓: 直立円柱周辺の3次元流体場および局所洗掘の数値解析, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.756-760, 2006.
- 11) Quezada, M., Tamburrino, A., Nino, Y.: Numerical Study of the Hydrodynamics of Waves and Currents and Their Effects in Pier Scouring, *Water*, 11(11), 2256, 2019.
- 12) 中川博次, 鈴木幸一: 橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究, 京大防災研究所年報, 第17号 B, pp.725-751, 1974.
- 13) Umeda, S.: Scour process around monopoles during various phases of sea storms, *Journal of Coastal Research, Special Issue No.65*, pp.1599-1604, 2013.
- 14) (一財)沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水路の研究・開発, 沿岸技術ライブラリー No.39, 2010.
- 15) 小林智尚: 波動場直立円柱まわりの局所洗掘と流れに関する研究, 東京大学学位論文, 1995.

(Received March 17, 2021)

(Accepted July 22, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY ON LOCAL SCOURING OF MONOPILE FOUNDATION BY WAVES AND EFFECT OF COUNTERMEASURE

Hiroyuki KATAYAMA, Kenta AOKI, Akiyuki UKAI and Naruhisa MIURA

In order to ensure the long-term stability of the monopile foundations, scouring measures are required for an anchored offshore wind farm. It is recommended that the scouring measures should be applied to the area twice the width of the monopile diameter D . However, the construction load in water depths exceeding 20 m is large. However, it is important to understand the appropriate range of the countermeasure because of the large construction load in the water depth of over 20m.

In this study, localized scouring at the base of the monopile and scouring countermeasures using rock bags were investigated by moving bed experiments.