

モノパイル式洋上風力発電設備の基礎周辺地盤における 局所洗掘に関する実験的検討

Experimental Study on Local Scouring in Ground around the Foundation of a Monopile Offshore Wind Turbine

19N3100025H 陳 暁悦 (海岸・港湾研究室)
Syaoyue CHEN/Coastal Engineering Lab

Key Words : monopile, local scour, large hydraulic experiment, numerical simulation, scour protection

1. 研究背景

洋上風力発電設備の支持構造物の構造形式の一つであるモノパイル式構造は、基礎地盤の局所洗掘により、風車全体系の固有振動数が変化し、発電設備の機能を損なう可能性がある。そのため、洗掘を防止することは非常に重要となる。円柱周りの洗掘に関するメカニズムならびに対策の検討については、Petersenら¹⁾や、Chenら²⁾、Sumerら³⁾などがあり、洗掘深、洗掘範囲に影響する要因は、円柱周りの局所的な流速、底面せん断力の増加と関係する最大洗掘深と指摘され、重要なパラメータとしてKC数などが挙げられているが、有効な洗掘防止工に関する定量的な評価方法はまだ見当たらない。一方で、波や流れによる洗掘は複数の相似則が絡む事象であり、模型実験を行う際縮尺影響を受ける。そこで本研究は、有川ら⁴⁾の1/13スケール大規模実験に対し、1/65・1/130の2種類のスケールで実験を行い、今後の海上円柱構造物の設計時および関連実験を行う際、相似則について大事なパラメータを確認することを目的とする。さらに数値計算を用いて最大洗掘深及びその発生地点と海象条件の関係、洗掘防止工の有効性について検討することを目的とした。

2. 模型実験

(1) 相似則について

有川ら⁴⁾の1/13スケールの大規模実験に模して、本実験で使用された地盤材料などの条件を設定し、表-1に示す。砂地盤の粒径は山野ら⁵⁾に倣い、式(1)により沈降速度を求め、式(2)により沈降速度を相似させて選定した。

$$w_0 = \sqrt{sgd_N} \left(0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$S_* = \frac{d_n}{4\nu} \sqrt{sgd_N} \quad (1)$$

$$\frac{w_{0m}}{w_{0p}} = (l_m/l_p)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 s : 砂の水中比重、 g : 重力加速度、 d_N : 名目粒径 (= $d/0.9$, d : 底質粒径)、 ν : 動粘性係数、

w_0 : 沈降速度、 l : 代表長、 m : 模型、 p : 原型。

洗掘防止工(図-1)は、フィルター層とアーマー層の2層構造となる。フィルター層の碎石は砂地盤と同じく、式(1~2)により、沈降速度の相似から粒径を選定した。アーマー層は、フィルター層より荒い粒径の碎石を使用し、現地施工時に使用されているアーマー層の重量と相似させ、使用量を定める。

表-1 地盤材料条件

	有川ら ⁴⁾ の大規模実験	中規模実験	小規模実験
スケール	1/13	1/65	1/130
円柱直径	500 mm	100 mm	50 mm
砂地盤中央粒径	0.15 mm	0.125 mm	0.025 mm
フィルター層代表粒径	10 mm	7 mm	3 mm
アーマー層代表粒径	20 mm	16 mm	7 mm
アーマー層重量 (1.75Dの場合)	94670 g	94.67 g	757.4 g

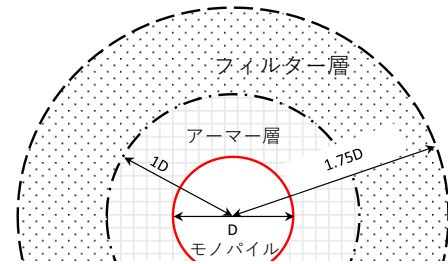


図-1 洗掘防止工 (1.75Dの場合)

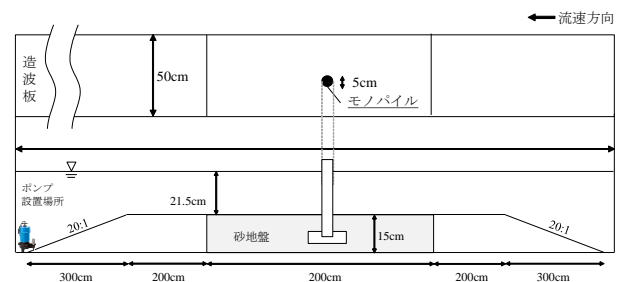


図-2 小規模実験(1/130スケール)断面図

(2) 小規模実験 (1/130スケール)

水路断面図を図-2に示し、実験海象条件を表-2に示す。流れのみ作用する4ケースと、波浪のみ作用する4ケースの実験を行った。実験時間は、地盤変形が平衡状態になるまでに必要とされる1時間とする。

洗掘防止工設置無しのcase1,2の実験前後砂地盤変形量を図-4に示す。ここで、洗掘深は実験開始時の地盤高を0とする時の変化量であり、侵食を負とし、堆積を正とする。洗掘防止工設置無しの条件では、流れのみ作用したcase1では最大洗掘深およそ3.5cmであり、円柱の右側で計測された。波浪のみ作用したcase2では、砂地盤全体的に洗掘を受けたが、最大洗掘深は1.8cmとなる。洗掘防止工設置有りのケースは、フィルター層の落石により洗掘深の提言が見られた。また、各ケースの結果からは、洗掘防止工による大幅な洗掘の低減効果が確認できる。また、洗掘防止工の範囲が狭いほど、洗掘深が小さくなるが、洗掘範囲も狭くなる傾向が見られる。

(3) 中規模実験 (1/65スケール)

水路断面は小規模実験と同様に設定し、図-3に示す。海象条件などの諸条件を表-3に示す。実験時間は2時間とする。

ここで、流れを作用した洗掘防止工設置無しのcase1の実験前後砂地盤変形量を図-4に示す。Case1では、小規模実験の同条件ケースとほぼ同様な馬蹄型の洗掘痕が見られ、最大洗掘深が5.6 cmとなる。最大洗掘深が測られた場所は、小規模実験とほぼ一致する。洗掘防止工設置有りのケースでも、小規模実験の結果との一致が見られる。

(4) 既往実験との比較

上記の洗掘防止工設置無しの実験(図-4)の最大洗掘深及びその最大洗掘深の発生場所は、有川ら⁴⁾の大規模実験とはともに一致している。ここで、本実験で採用し

た相似則と、相似させたパラメータの妥当性が確認できる。

さらに、図-5に、既往実験結果に基づくKC数及び最大洗掘深の関係を示し、本実験結果と比較する。ここ

表-2 小規模実験(1/130スケール)諸条件

case	海象条件				洗掘防止工 サイズ
	水位	波高	周期	流速	
1	21.5 cm	-	-	0.12 m/s	なし
2		8.2 cm	1.23 s	-	なし
3		-	-	0.12 m/s	1.25D(0.75D)
4		8.2 cm	1.23 s	-	1.25D(0.75D)
5		-	-	0.12 m/s	1.75D(1D)
6		8.2 cm	1.23 s	-	1.75D(1D)
7		-	-	0.12 m/s	2.25D(1.5D)
8		8.2 cm	1.23 s	-	2.25D(1.5D)

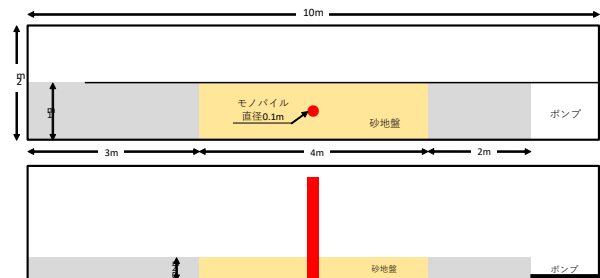


図-3 中規模実験(1/65スケール)断面図

表-3 中規模実験(1/65スケール)諸条件

case	海象条件		洗掘防止工 サイズ	ほか
	水位	流速		
1	43 cm	0.17 m/s	なし	
2		0.17 m/s	1.25D(0.75D)	
3		0.17 m/s	1.75D(1D)	
4		0.17 m/s	2.25D(1.5D)	
5		0.17 m/s	なし	PIV 流速計による 断面流速の計測

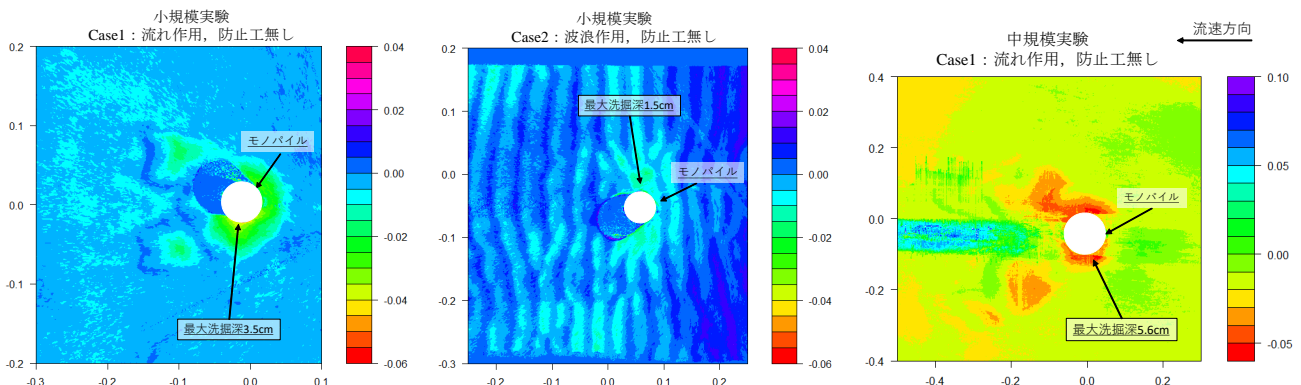


図-4 主要ケースの実験前後砂地盤変形量

で、 $KC = UT/D$ 、 U は流速、 T は周期、 D はモノパイル直径であり、 S は最大洗掘深である。Sumerら³⁾による実験式も図-5に示す。Sumerら³⁾の実験式は、 $KC < 6$ の小さい波に適用できないが、本実験の結果から見ると、 $KC < 6$ の場合は、洗掘深は比較的に横ばいの傾向があり、緒方ら⁹⁾の実験と比較的に一致している。一方で、流れ場の場合は、十分時間をかけて平衡状態まで実験を行えば、最大洗掘深はほとんど流速と関係なく、 $S/D = 1$ 近くになっていることがわかり、周期が十分長い場合、洗掘深の変化は流速と関係なく、平衡状態に達すると考えられる。

(5) PIV流速計による流速の測定

本実験は、PIV流速計を使用し、円柱中心からのxz方向縦断面と底面の流速分布を計測した。実験断面図を図-6に示す。中規模実験と同じ実験地形において、底面から5cm離れてレーザーを照射しシート光が得られ、水路底面からハイスピードカメラを用いて撮影することにより測定を行った。ハイスピードカメラの撮影時間間隔 dt は600 μ sであり、解析解像度は32 \times 32画素とした。

同時に設置した三次元電磁流速計による流速結果を図-7に示し、PIV流速計による断面・底面平均流速をそれぞれ図-8、図-9に示す。モノパイルを通過後、流速はほぼ安定し、ここで示していない縦断面のPIV流速計による測定結果から、水路内一様流になっていることが確認できる。底面では、円柱から離れた場所は、流速が一様になっているが、円柱前面(図-9の赤い枠内)のみ流速に乱れが見られた。円柱前面で渦の発生があると考えられる。

3. 数値計算

(1) 計算手法

本研究はさらに、Building-Cube法を用いるCADMAS-BCM⁷⁾のモデルにより小規模実験を対象として数値計算を行い、水路内の流況を再現した。Building-Cube法は、計算領域をcubeと呼ばれるサブ領域に分割し、それぞれのcube内を格子分割して数値計算をおこなう手法である。本研究では、マルチルートによる三次元Building-Cube法を適用している。三次元の場合は八分木構造によりroot-cubeを入れ格子状に細分化して階層的に格子解像度を上げる。

(2) 計算結果

ここでは、主要ケースの32~43秒の3周期分の間での底面流速を平均したものを用いて、z方向の渦度分布を図-10に示す。円柱付近での渦の発生が確認できる。流れを作用したcase1は、PIVの測定結果と同様に円柱背面

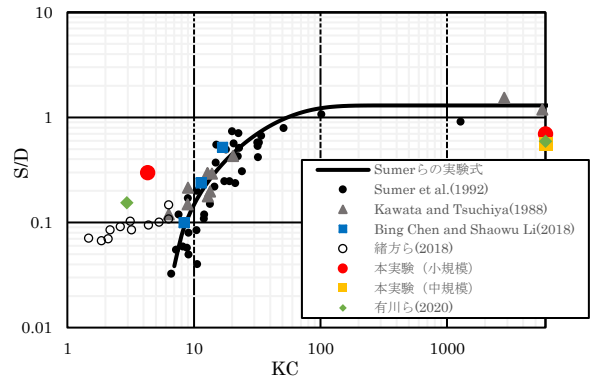


図-5 KC数と最大洗掘深の関係

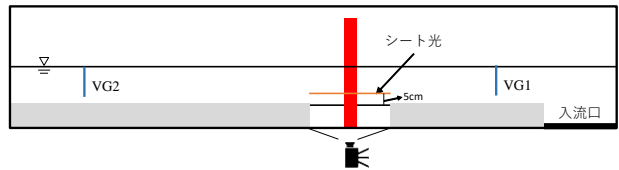


図-6 PIV流速計使用実験の断面図

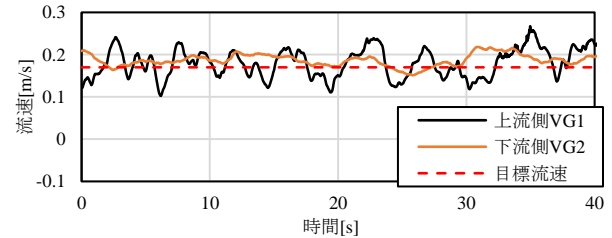


図-7 三次元流速計による流速時系列結果

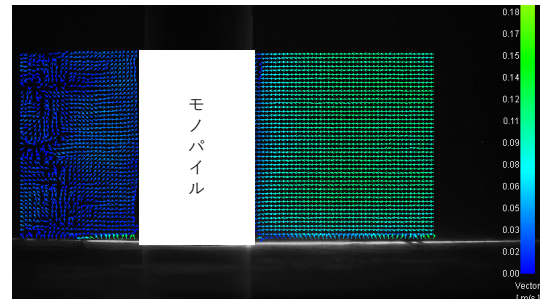


図-8 PIV流速計により測定された断面平均流速

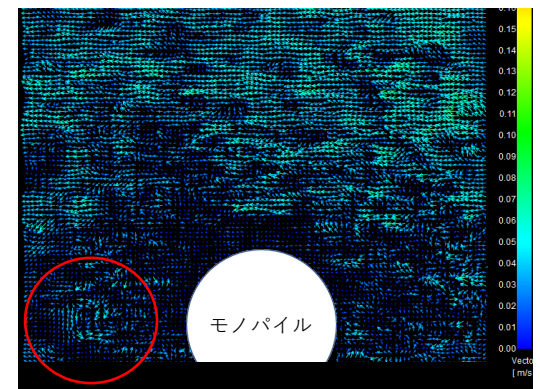


図-9 PIV流速計により測定された底面平均流速

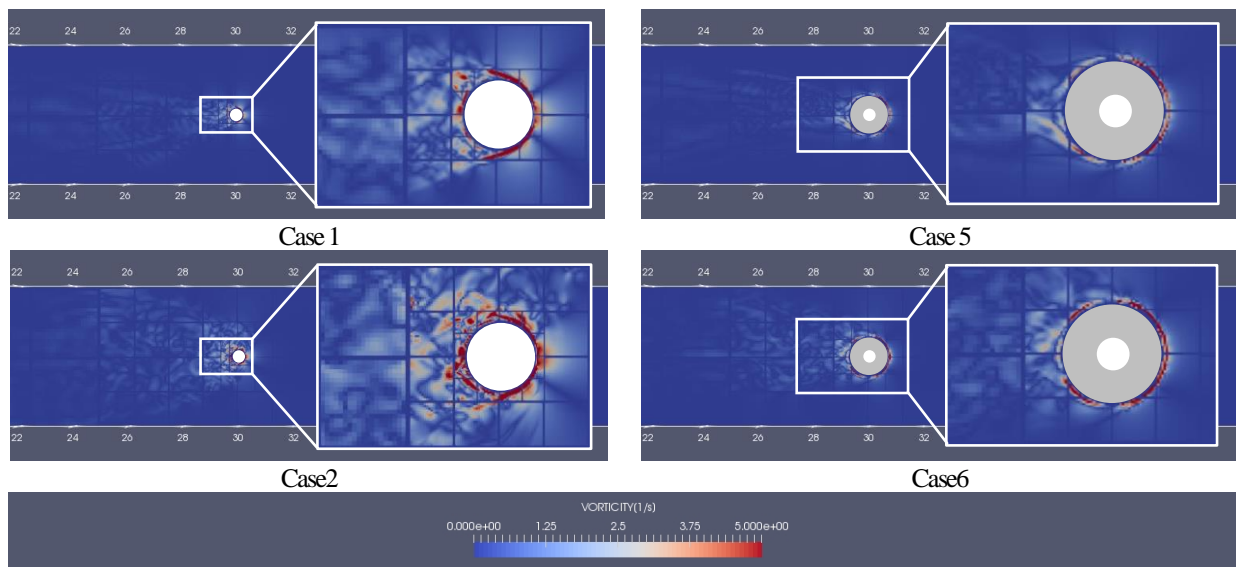


図-10 32-43秒の3周期分の中の平均流速によるz方向渦度

で左右対称の渦が発生していることが分かり、各実験で見られた馬蹄型の洗掘痕の形と一致する。また、Case 5, 6のような局所的な洗掘が生じている事例では、渦度が大きくなっている地点と洗掘が生じている洗掘防止工前面の地点が概ね一致している。洗掘深と渦の発生に関係性があると考えられる。

4. 結論

本実験は、有川ら⁴⁾の大規模実験と同条件で1/130スケールの小規模実験と、1/65スケールの中規模実験を行った結果、最大洗掘深のオーダーがほぼ一致し、洗掘痕の形状も比較的に一致した。砂地盤及び洗掘防止工に使用される地盤材料において、沈降速度の相似と実験の再現性との関係が確認できた。

また、3次元計算とPIV流速計の計測結果を比較することにより、数値計算の再現性が確認できた。3次元数値計算では、モノパイル周辺の流況を良好に再現することができ、局所流速や渦度との関係からモノパイル周辺の洗掘が生じていることを明らかにした。洗掘防止工を設置することでモノパイル周辺の洗掘を大幅に低減させることができることを明らかにした。

参考文献

- 1) Thor Ugelvig Petersen, B. Mutlu Sumer, Jørgen Fredsøe, Tim C Raaijmakers, Jan-Joost Schouten: Edge scour at scour protections around piles in the marine environment — Laboratory and field investigation, Coastal Engineering 106 42-72, 2015.
- 2) Bing Chen, Shaowu Li: Experimental Study of Local Scour around a Vertical Cylinder under Wave-Only and Combined Wave-Current Conditions in a Large-Scale Flume, American Society of Civil Engineers, 10.1061/(ASCE)HY.1943-

- 7900.0001502, 2018.
- 3) B. Mutlu Sumer, Jørgen Fredsøe, Niels Christiansen: Scour around vertical pile in waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Volume 118 Issue 1, 1992.
- 4) 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, 敵駿: 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, 76 巻 2 号, p.I_535-I_540, 2020.
- 5) 山野貴司, 藤原隆一, 野村浩二, 白木孝一: 有脚式構造物の脚部局所洗掘に対する平面的特性とその対策工の効果, 土木学会論文集 B2, 69 巻 2 号, p.I_591-I_595, 2013.
- 6) 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, 74 巻 2 号, p.I_820-I_825, 2018.
- 7) Taro Arkawa, Songgui CHEN and Hanbao CHEN: Development of liquid-gas 3D numerical wave tank Base on Building Cube Methodology, now submitted
- 8) 有川太郎, 山田文則, 秋山実: 3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 第 52 回海岸工学講演会論文集, pp.46-50, 2005.