洋上風力モノパイル基礎洗掘実験における最大洗掘深に与える実験条件の分析

片山　裕之[1]・梅村　凜[2]・三浦　成久[3]

[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: rin.umemura@mail.penta-ocean.co.jp
[3]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

Sumerら(1992,2001a)の無次元最大洗掘深の研究を援用し，最近、洋上風力モノパイル基礎局所洗掘の研究が多く行われている．Sumerらによると最大洗掘深はKC数や波流れ無次元流速U_{cw}によって表されるが，内在する実験条件，特に底質粒径，実験縮尺，モノパイル径などの影響も実際にはあると考えられる．

そこで，前述のSumerらの他，最近の洋上風力を対象とした洗掘実験に関する国内外の論文をレビューした．実験は，実験縮尺1/9～1/130，底質粒径0.06～0.58 mm，モノパイル径1～130 cmと広範囲の条件で行われており，波・流れによる無次元最大洗掘深は，Sumerら(2001a)がKC数との相関を示しているが，多くの実験で無次元最大洗掘深が大きい範囲でSumerら(2001a)のKC数が過大評価となる可能性が示唆された．

Key Words : *local scour, KC number, Monopile, nondimensional scour depth*

1. はじめに

2020年12月に経済産業省から洋上風力産業ビジョン（第1次）[注1)]が出された前後から，先ずは着床式洋上風力発電の検討が盛んに行われるようになってきた．着床式洋上風力発電のモノパイル式では基礎の局所洗掘も対策が必要であり，洗掘のメカニズムから対策工の効果確認の研究が多く行われてきている．モノパイル基礎の研究では，最大洗掘深とその発生場所から，石材を中詰め材とした袋型根固材や，吸出し防止を期待する石材によるフィルター材による対策工が標準的に検討されている．最大洗掘深については，Sumerら[1)2)3)]が模型実験結果から整理した無次元最大洗掘深の研究成果を援用するものが多い．Sumerら[1)2)]は，波による最大洗掘深はKC数との関係を整理し，波流れ共存場の最大洗掘深については波と流れによる底面流速をパラメータにした無次元流速U_{cw}を用いて整理しており，最近の研究成果もこれに準じた整理が多い．しかしながら，各研究者により実験条件（実験縮尺，波流れの条件，底質粒径，モノパイル径など）が異なることから，実際にはKC数や無次元流速U_{cw}に内在するこれら実験条件の影響も考えられる．

本研究では，Sumerら[1)2)3)]の研究の他，最近の着床式洋上風力モノパイル基礎を対象とした局所洗掘の検討を行っている国内外の論文を収集・レビューし，実験条件などを整理した．同時に，Sumerら[1)2)3)]によって整理された無次元最大洗掘深について，最近の研究成果や，最近のモノパイル径の大口径化の流れも鑑みて，広範囲の条件に適用可能な新たな整理を試みた．

2. 既往の洗掘実験のレビュー

(1) モノパイル基礎の研究レビューのために収集した既往の研究一覧

Sumerら[1)2)3)]の研究成果に加え，最近の着床式洋上風力モノパイル基礎の洗掘に関する研究成果を収集し，レビューを行った．収集した研究成果は，国内14件，国外7件の合計21件である（**表-1**）．以下に，最近の各研究成果の内容等について整理した．なお，表中の諸元は，実験条件としての比較を念頭に，全て実験室スケールの値で統一して記載している．また，最大洗掘深S_{max}をモノパイル径D_Pで除した無次元最大洗掘深S_{max}/D_Pを表すパラメタとなるKC数や無次元流速U_{cw}について，論文中に数値の記載のないものは，微小振幅波理論から算出される

底面流速U_wを用いて，次式から求めている．

$$KC = \frac{U_w \cdot T}{D_P} \quad (1)$$

$$U_{cw} = \frac{U_c}{U_c + U_w} \quad (2)$$

ここで，T：波の周期，U_c：流れによる一様流速である．

a) 緒方ら(2018)[4]

2次元断面水槽において，実験縮尺1/25の移動床モノパイル基礎洗掘実験を行っている．水深40 cm，波高8 cm・16 cm，周期2.0～2.8 sの規則波を2時間造波（2500～3600波），モノパイル径16 cmと23 cm，底質中央粒径d_{50}＝0.2 mmと0.5 mm（移動床4 m×0.6 m×0.2 m）の条件で11ケースの波による洗掘実験（KC数＝1～7）を行い，Sumerら[1]より低KC数の範囲でも無次元最大洗掘深S_{max}/D_P=0.1程度の洗掘が生じる結果を示している．

b) 片山ら(2021)[5]

平面造波水槽内に2 m×2 m×0.25 mの移動床を2セット設置した洗掘実験を行っている．実験縮尺は1/35，水深57 cm，波高11.1～22.9 cm，周期1.4～2.0 sの規則波を2.5時間造波（4500～6400波），モノパイル径10, 13, 18, 20, 28.6 cm，d_{50}=0.1 mmと0.4 mmの条件で24ケースの波による洗掘実験（KC数＝0.8～7.8）を実施し，無次元最大洗掘深を整理している．また袋型根固材による対策工も確認し，モノパイル中心から2.0D_Pの範囲の敷設を推奨している．

c) 青木ら(2022)[6]

2次元断面水槽において波流れの洗掘実験を実施している．実験縮尺1/35，水深45 cm，波高19.1 cm，周期2.0 sの規則波を4時間造波（7200波），流れは断面一様流速で8.7 cm/s, 17.4 cm/s, 26.1 cm/sの3ケースとし，モノパイル径10 cm，底質中央粒径d_{50}＝0.1 mm（移動床4 m×0.6 m×0.23 m）の条件で12ケースの波流れによる洗掘実験（KC数＝5.5）を行い，波流れ場の無次元最大洗掘深について整理をしている．また片山ら[5]と同様，袋型根固材による洗掘対策の検討も行っている．

d) 有川ら(2020)[7]

天津水運研究所の大型2次元断面水槽において実験縮尺1/13の波流れの洗掘実験を実施している．水深215 cm，波高82 cm，周期3.88 sの規則波を12時間造波（11000波），流れは断面一様流速で38 cm/s, 56 cm/sの2ケース，モノパイル径50 cm，底質中央粒径d_{50}＝0.1 mmの条件で6ケースの波流れによる洗掘実験（KC数＝7.8）を行い，波流れ場の無次元最大洗掘深について整理をしている．また石材による洗掘対策の検討4ケースも含まれている．

e) 陳ら(2021)[8]

洗掘実験の相似則の確認のため，有川らの実験との対照実験として縮尺1/130の小規模実験と，縮尺1/65の中規模実験を行っている．小規模実験は波流れの実験で，水深21.5 cm，波高8.2 cm，周期1.23 s，流れは14 cm/sで8ケース（うち対策工有が6ケース）実施している．中規模実験は流れのみ（流速17 cm/s）で4ケース（うち対策工3ケース）実施している．

f) 稲垣ら(2021)[9]

2次元断面水槽において波による洗掘実験を実施している．実験縮尺は1/30，水深，有義波高，有義波周期は組合せで（33 cm, 17 cm, 2.5 s）(50 cm, 24 cm, 3.0 s)の2ケース（KC数＝6.0と8.2），モノパイル径18 cm，底質中央粒径d_{50}＝0.1 mm（移動床4 m×2 m）に対して，無対策1ケースと，袋型根固材の対策工の敷設範囲を変えた3ケースの計4ケース実施している．

g) 稲垣ら(2022)[10]

稲垣ら[9]と同じ施設を用いて，袋型根固材の洗掘対策の実験のみを実施している．実験縮尺1/30，水深50 cm，有義波高26 cm，有義波周期2.9 s，モノパイル径24 cm，底質中央粒径d_{50}=0.15 mm，の条件に対して，袋型根固材の中にフィルター材用の石材を入れた対策工を敷設範囲を変えて3ケース実施している．

h) 小林ら(2022)[11]

実験縮尺1/9の波・流れによる大規模実験を2次元断面水槽で実施している．水深220 cm，波高107 cm，周期5 sの規則波と，流れは流速46 cm/sを最大3000波作用させている．モノパイル径は70 cm，底質は中央粒径d_{50}=0.19 mm（フラタリーサンド）と0.09 mm（東北8号硅砂）（移動床6 m×3.5 m×1 m）の2種類を用い無対策2ケース，袋詰根固材の対策工6ケースの計8ケース実施している．

i) 関谷ら(2022)[12]

2次元断面水槽において波のみの洗掘実験を実施している．実験縮尺1/60，水深33.3 cm，有義波高13.0, 14.6, 16.1 cm，有義波周期1.94 s（KC＝6.0～7.5）の不規則波を最大5000波作用させている．モノパイル径は10 cm，底質中央粒径d_{50}=0.11 mm（移動床2 m×0.6 m×0.3 m）の条件で，無対策2ケース，袋詰根固材の洗掘対策工6ケースの計8ケースを実施している．

j) 青田ら(2023)[13]

2次元断面水槽において，波・流れの条件で，洗掘対策の袋詰根固材の耐波浪安定実験を固定床で実施している．実験縮尺1/60，水深15, 20, 33 cm，有義波高3.0～17.0 cm，有義波周期1.94 s（KC＝1.3～17.2）の不規則波を最大5000波作用させている．流れは13, 19, 26 cm/s，モノパイル径は10, 20 cmの条件で36ケース実施している．

k) 坪川ら(2023)[14]

2次元断面水槽において，流れのみの洗掘実験を実施している．実験縮尺1/60，水深15 cm，流れは1.01, 1.32, 1.47, 1.70, 2.40 m/sの5ケース，モノパイル径は9 cm，底質

中央粒径d_{50}=0.13 mmの条件で，無対策2ケース，対策工6ケースの計8ケースを実施している．なお，洗掘対策工は環状袋型の根固材を採用している．

l) 本田ら(2023)[15]

2次元断面水槽において波のみの洗掘実験を実施している．実験縮尺1/50，水深40 cm，有義波高19.2 cm，有義波周期1.8 s（KC＝4.4）規則波を最大4000波作用させている．モノパイル径は16 cm，底質中央粒径はd_{50}=0.2 mmの8号珪砂と0.064 mmの珪砂粉を，質量比1:1で混合して使用している（移動床2 m×0.8 m×0.25 m）．実験は無対策1ケース，袋詰根固材および円盤型の洗掘対策工5ケースの計6ケースを実施している．

m) 金澤ら(2023)[16]

2次元断面水槽において波のみの洗掘実験を実施している．実験縮尺1/50，水深20 cm，有義波高14.6 cm，有義波周期1.95 s（KC＝9.3）の不規則波を対策工の安定限界波高から段階的に波高を高くして最大3000波作用させている．モノパイル径は10 cm，底質中央粒径はd_{50}=0.16 mmである．実験は無対策1ケース，石炭灰混合人工石材を用いた袋詰根固材による対策工，モノパイル無しで上記対策工の安定性を確認する計3ケースを実施している．

n) Rudolph et al.(2006)[17]

幅14 m×延長30 mの造波水路の側方から流れを起こせる施設で波・流れ実験を実施している．波高は9.6～20.9 cm，周期は1.29～2.03 s，流れは8～34 cm/sの範囲で，直径8 cmと12 cmのモノパイルに対して，波と流れが直交するケースと、交差角が60度のケースを実施している．底質中央粒径はd_{50}=0.13 mm，KC数の範囲としては1.5～10.2となっており，無次元流速U_{cw}と無次元最大洗掘深S_{max}/D_Pの関係について，Sumerら[2]がKC=4～26までの関係を示していたものにKC=1の関係を提案している．

o) Yasser, E. Mostafa(2011)[18]

2次元造波・還流水槽を用いて洗掘実験を行っている．水深15 cmと20 cm，波高10 cmと12 cm，周期1.3～1.8 s，流れの流速は波と反対からの流速で16.7 cm/sと25 cm/sである．底質中央粒径はd_{50}=0.5 mm，モノパイル径は7.6 cmの条件において，モノパイルが1本の場合から，2本の場合，3本の場合の実験を行っている．

p) Qi WenGange et al.(2014)[19]

2次元造波・還流水槽を用いて洗掘実験を行っている．水深50 cm，波高2.6～15.2 cm，周期1.4, 1.8, 2.0 s，流れの流速は波と同じ向き（順流）の場合は15～107 cm/s，波と反対の向き（反流）の場合は11～27 cm/sである．底質中央粒径はd_{50}=0.38 mm，モノパイル径は8 cmと20 cmの条件において，順流条件を21ケース，反流条件を7ケースの計28ケースを実施している．

q) Junhan, L. et al.(2021)[20]

2次元の流れと地盤の相互干渉が確認できる水路での洗掘実験である．水深は30 cmと40 cm，波高は6 cmと8 cm，周期は1 s，流れは22.5 cm/sと25 cm/sの条件で行われている．モノパイル径は4 cm，底質中央粒径はd_{50}=0.22 mm，流れのみを3ケース，波と流れを3ケース，計6ケース実施している．

(2) 収集した既往の洗掘実験条件

収集したSumerら[1)2)3)]を含む最近の洗掘実験の実施条件から，実際に実施されている実験条件を整理すると以下のようになる．

a) 実験縮尺

実験縮尺については，記載があるのは国内の研究例のみであり，収集した海外の洗掘実験では縮尺の明記がなかった．国内の研究例14ケースに限ると，実験縮尺は1/9～1/130までの範囲があり，縮尺1/30程度（5件）と縮尺1/50～1/60程度（7件）の2つが多くなっている．

b) 水深

水深については，15～220 cmと幅があるが，多くは40～50 cm程度（21ケース中の15ケースが該当）となっていた．水深に関しては造波・還流水槽の高さが1 m程度のものが多いと考えられる．

c) 波浪条件

波浪条件については，波高については2.5～107 cmまでと幅があり，多くは10～20 cm程度である．また周期については，範囲としては1～5 s程度，多くのケースは1～2 s程度であった．

d) 流れの条件

流れについては，収集した21ケースのうち12ケースで実施されている．流速は3～240 cm/sと幅が広い．多くのケースは10～30 cm/s程度の流速を採用している．なお，海外の事例では波と流れに交差角を設けるケース（反流や直交流など）が多くみられた．

e) 底質中央粒径d_{50}

底質中央粒径d_{50}については，最小が0.06 mm，最大が0.58 mmであり，多くのケースは0.1～0.2 mmであった．

f) モノパイル径

モノパイル径は1～153 cmと幅が広い．各造波・還流施設で起こせる波浪や流速に大きな幅を持たせられないことが多いと考えられ，KC数などを広範囲で再現するためにはモノパイル模型のサイズを工夫することが多いと考えられる．多くのケースは10～20 cm程度の径のモノパイル模型を採用している．また，国内事例では，モノパイル周辺の洗掘状況を確認するため，モノパイル模型を透明とし，内部にカメラを設置して観察する例が多くなっている．

g) KC数

KC数については，最小が0.5程度，最大はSumerら[1)]の広範囲なKC数を再現した実験を除くと26である．最近

表-1　収集した洗掘に関する既往の研究

検討者	実験縮尺	水深	波高	周期	流れ	造波波数（時間） （流れのみは造流時間）	KC数	U_{cw}	底質粒径	モノパイル径
緒方ら(2018)	1/25	40cm	8, 16cm	2.0･2.4･2.8s	—	1800～2600波（1～2時間）	1～7	—	0.2mm, 0.5mm	16, 23cm
片山ら(2021)	1/35	57cm	11.1, 17.1, 22.9cm	1.4, 1.7, 2.0s	—	4500波（2.5時間）	0.8～7.8	—	0.1mm, 0.4mm	20.0, 28.6, 10.0, 13.0, 18.0cm
青木ら(2022)	1/35	45cm	19.1cm	2.0s	26.1, 17.4, 8.7cm/s	7200波（4時間）	7.5	0.2～0.4	0.1mm	10cm
梅村ら(2025)	1/60	45cm	5, 7, 10cm	1.03, 1.29, 1.52s	13cm/s	7200波（4時間）	1.9～10.5	0.31～0.72	0.06mm	10cm
有川ら(2020)	1/13	215cm	82cm	3.88s	38, 56cm/s	11100波（12時間）	5.5	0.35	0.15mm	50cm
陳ら(2021)	1/65	43cm	—	—	17cm/s	(2時間)	—	1	0.106mm	10cm
	1/130	21.5cm	8.2cm	1.23s	14cm/s	3000波（1時間）	5.5	0	0.075mm	5cm
稲垣ら(2021)	1/30	33,50cm	17, 24cm	2.5, 3.0s	—	1200～1440波（1時間）	6.0, 8.2	—	0.07-0.1mm	18cm
稲垣ら（2022)	1/30	50cm	26cm	2.9s	—	3000波（2.5時間）	6.4	—	0.15mm	24cm
小林ら(2022)	1/9	220cm	1.07m	5.0s	46cm/s	1500, 2000, 3000波	7.1	0.32	0.09, 0.19mm	70cm
関谷ら(2022)	1/60	33.3,16.7cm	13.0, 14.6, 16.1cm	1.94s	—	5000波（2.7時間）	6.0～7.5	—	0.11mm	10cm
青田ら(2023)	1/60	25,33,55cm	5 - 28cm	1.3 - 2.6s	13, 20, 26cm/s	1000波	6.0～7.5	0.28～0.57	固定床	10, 20cm
坪川ら(2023)	1/60	15cm	—	—	1.01, 1.32, 1.47, 1.70, 2.40m/s	(4時間)	—	1	0.13mm	9cm
本田ら(2023)	1/50	40cm	19.2cm	1.8s	—	4000波（2時間）	4.43	—	0.2mmと0.064mmを 質量比1:1で混合	16cm
金澤ら(2024)	1/50	20cm	14.6cm	1.95s	—	3000波(1.6時間) 安定限界波高から段階的に作用	9.3	—	0.16mm	10cm
Sumer et al.(1992)	—	40cm	断面平均流速で11.2～37.8cm/s		—	—	4.9～102	—	0.18, 0.58mm	1, 2, 3, 5cm
	—	40cm	断面平均流速で23.1～53.3cm/s		—	—	4.4～24.0	—	0.18mm	10, 20cm
	—	40cm	—	—	47.1cm/s	—	1285～	1	0.36mm	5, 11cm
Sumer et al.(2001a)	—	40cm	軌道流速で 15.7, 23.1, 24.2cm	3.3s	順流：8.3 ～ 39.0cm/s	—	4, 8, 26	0～1.0	0.2mm	3, 9cm
	—	40cm	軌道流速で17.7cm	3.3s	直交：3.0 ～ 60.0cm/s	—	10.7, 18	0～0.77	0.2mm	3.2, 5.5cm
Sumer et al.(2001b)	—	40cm	2.5～12.0cm	2.0, 3.5s	—	—	0.3～1.4	—	0.2mm	54, 100, 153cm
Rudolph et al.(2006)	—	40, 50cm	12.1～20.9cm	1.29～2.02s	60度：8～38cm/s	—	2.6～10.2	0.3～1.0	0.13mm	8cm
	—	40, 50cm	9.6～16.6cm	1.33～2.03s	直交：11～34cm/s	—	1.5～5.5	0.4～1.0		12cm
Yasser E. Mostafa et al.(2011)	—	15, 20cm	10, 12cm	1.3～1.8s	反流：17～25cm/s	6000波（3時間）	6～10	0.35～0.41	0.5mm	7.6cm
QI WenGang et al.(2014)	—	50cm	2.6～14.5cm	1.4, 1.8, 2.0s	順流：15, 20, 22, 23, 26, 34, 107cm/s	—	0.48～3.03	0.52～1	0.38mm	8, 20cm
	—		8.2～15.2cm		反流：11, 18, 20, 21, 22, 23, 27cm/s	—	0.98～3.65	0.43～0.69		8, 20cm
Junhan Li et al.(2021)	—	30, 40cm	6, 8cm	1s	22.5, 25.0cm/s	7200波（2時間）	1.7～2.5	0.7～1	0.22mm	4cm

土木学会論文集, Vol.81, No.17, 25-17022, 2025.

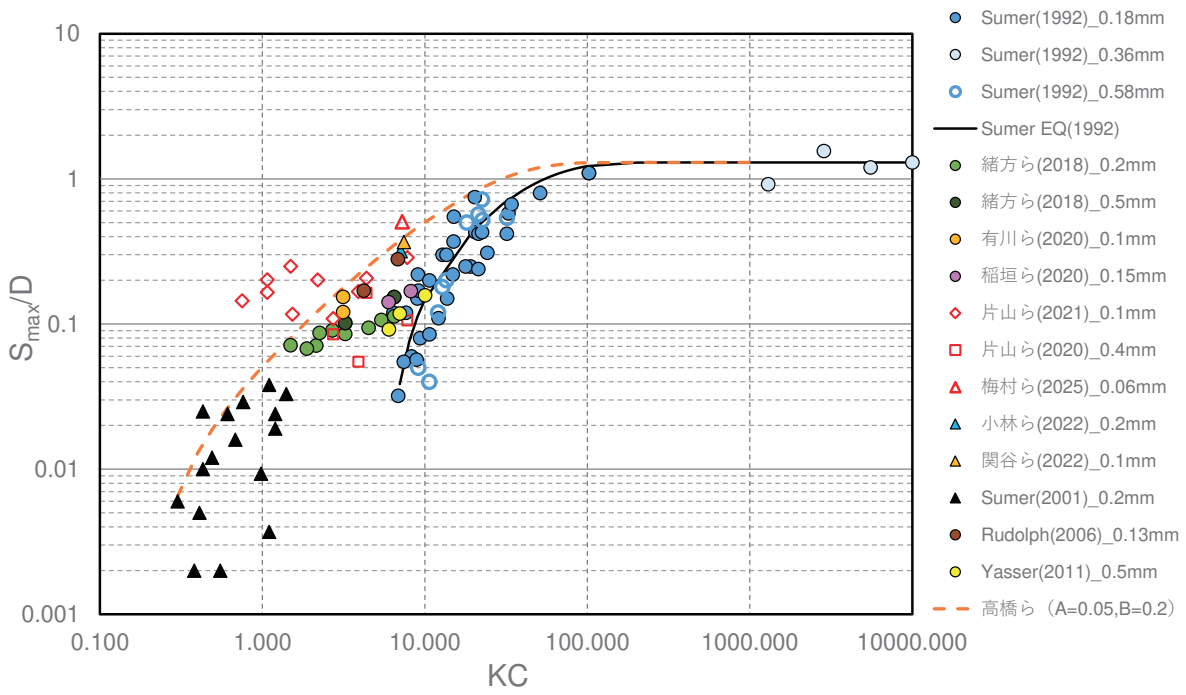


図-1　収集した波による無次元最大洗掘深 S_{max}/D_P と KC 数に関するデータ

の洗掘研究をみると，初期の頃はSumerら[1]の無次元最大洗掘深の図を参照したKC数が6前後のケースが多かった．しかし最近では，モノパイルの大口径化に伴う低KC数の実験が増えてきているように見える。洋上風力海域を想定すると，流速1～3 m/s，周期8～16 s，モノパイル径6～12 m程度と考えられ，KC数は0.5～14程度となり，**図-1**に示すデータはその範囲を包含している．

h)　**無次元流速U_{cw}**

波・流れあるいは流れのみの実験を行うケースが少ないが，実施されている範囲では流れのみを除くと0～0.7程度の範囲のデータが収集されている．洋上風力海域を想定するとU_w=1～3 m/s，U_c=0～3 m/s程度の範囲となりU_{cw}は0～0.7程度となり，収集データの範囲と一致する．

i)　**造波時間**

造波時間については造波波数で2000～11000波までの範囲で，平均は4500波程度、最も多いのは3000波である．

3.　収集した洗掘実験データについて

ここでは，今回収集した洗掘実験の事例から，①波による無次元洗掘深S_{max}/D_P，②波・流れ実験による無次元最大洗掘深S_{max}/D_P, について整理を行った．

(1)　波による無次元最大洗掘深の整理

Sumerら[1]に倣い，収集した既往研究結果のうち，波のみによる無次元最大洗掘深S_{max}/D_Pのデータを収集し，KC数との関係として整理した（**図-1**）．ここではSumerら[1,2]の実験データおよびSumerら[1]の提案式（式(3)）の他に，国内，国外の8つの研究によるデータを同時に示した．

$$S_{\max}/D_P = 1 - exp(-0.03(\mathrm{KC} - 6)) \qquad (3)$$

この図には，高橋ら[22]によりSumerら[1]の式(3)を改良した式(4)も橙点線で示してある．

$$S_{\max}/D_P = 1 - exp(-0.05(\mathrm{KC} - 0.2)) \qquad (4)$$

全体的には，高橋ら[22]の提案式は既往の研究の包絡線を示している．一部，片山ら[5]の底質粒径0.1 mmの実験データが包絡線の上に分布するが，波浪条件が厳しく侵食性波浪の実験であったため，移動床全体で侵食が見られ，初期砂面との差分から抽出した最大洗掘深にも侵食による地形変化分も含まれていた可能性もある．ただし，図の凡例中に各ケースで使用している底質中央粒径も記載しているが，全体に俯瞰すると，0.18～0.2 mm（Sumerら[1]の青丸，Sumerら[2]，緒方ら[4]）のケースが高橋ら[22]の線のやや下側に分布し，0.1 mmのケース（有川ら[7]，片山ら[5]の赤菱形，関谷ら[12]，Rudolphら[17]）は高橋ら[22]の線上か上側に分布しているようにも見える．Sumerら[1]の0.36 mmやYasser[18]の0.5 mmのケースは高橋ら[22]の線よりかなり下に分布する．無次元最大洗掘深に対する粒径依存性については，片山ら[5]が指摘はしているものの少ないケースからの考察であったが，**図-1**からはばらつきはあるものの，底質粒径の小さい実験結果の方が，同じKC数に対して無次元最大洗掘深が大きくなっているよ

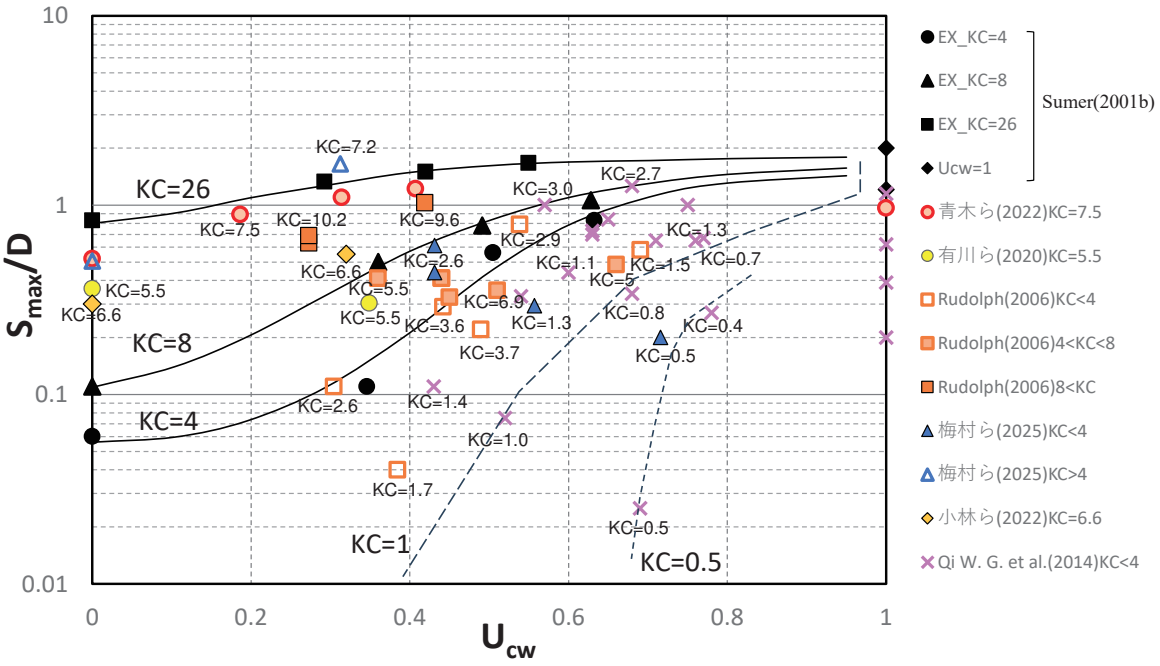


図-2　収集した波・流れによる無次元最大洗掘深 S_{max}/D_P と無次元流速 U_{cw} に関するデータ

うにも解釈できる．この点については，更にデータを収集した検討が必要不可欠であるが，洗掘のような現象を把握するための移動床実験では，使用する底質粒径によってその程度が異なる可能性があることを念頭に，使用底質材を検討する必要があると思われる．

(2)　波・流れによる無次元最大洗掘深の整理

次に，収集した既往研究結果のうち，波・流れによる無次元最大洗掘深S_{max}/D_Pのデータを収集し，無次元流速U_{cw}との関係として整理した（**図-2**）．ここではSumerら[2]による実験データのうち波と流れが同じ向きのデータ（KC＝4, 8, 26）およびそれらから引いている提案線（図中の黒線）の他に，国内，国外の6つの研究によるデータを同時に示した．なお，図中の収集したデータには，可能な範囲でそのデータのKC数も記載している．

この図からは，Sumerら[2]の検討以降、低KC数に対する実験データが増えており，SumerらのKC＝4の線より下側に分布するデータが多く収集された．この結果をみると，KC=4の線の近くには近いKC数のデータが分布しているように見える．またKC<4のデータから概ねKC=1.0とKC=0.5に相当すると思われる線を黒点線で追加した．Rudolphら[17]も自身の実験データからKC=1.0の線を提案しているが，ほぼ同じ線を示しており，またRudolphら[17]にデータを追加していることから，信頼性は高くなったと考えられる．また同時に，SumerらのKC＝26の線については，収集したデータではKC＝7~10程度が分布している．Sumerら[2]は，一連の実験の中でKC=26を再現するために，KC=4と8と比べてモノパイルの径を1/3とした実験を行って評価している．無次元パラメタとしてのKC数としては26となるが，実際には実験においてモノパイル径と外力の関係から，最大洗掘深が大きめの結果となっている可能性が考えられる．

今回の収集したデータからは，Sumerら[2]の結果に低KC数の分布を追加し，また高KC数については見直しの必要性が示唆される．また，**図-1**のように，波・流れの洗掘実験にも粒径の影響は少なからず含まれることも考えられ，更にデータを収集した整理が必要と考えられる．

4.　終わりに

最近，検討が増えている着床式洋上風力モノパイル基礎の洗掘に関する実験などの研究成果を収集し，その実験条件などを整理するとともに，多くの研究者が参考とするSumerら[1][2][3]の研究成果と併せて整理を行った．その結果，以下のことが確認された．

- 波による洗掘実験結果は，無次元最大洗掘深とKC数の関係において，高橋ら[22]の提案式が包絡線として適当であることを支持し，最大洗掘深には実験で使用される底質粒径の依存が示唆された．
- 波・流れの洗掘実験結果からは，Sumerら[2]の結果に低KC数の分布を追加することができたとともに，高KC数については見直しの必要性が示唆された．

謝辞：本検討に当たっては，港湾空港技術研究所の鈴木高二朗特別研究主幹および横浜国立大学の鈴木崇之教授との議論が有益であった．ここに記して謝意を表する．

NOTES

注1) 洋上風力産業ビジョン(第 1 次), 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会, 令和 2 年 12 月 15 日. https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001382705.pdf, Accessed on: May. 14. 2025.

REFERENCES

1) Sumer, B. M., Fredsøe, J. and Christiansen, N. : Scour around vertical pile in waves, *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering,* ASCE, 118(1), pp.15-31, 1992.
2) Sumer, B. M. and Fredsøe, J. : Scour around pile in combuned waves and current, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 127, No. 5, pp.403-411, 2001.
3) Sumer, B. M. and Fredsøe, J. : Wave scour around a large vertical circular cylinder, *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering,* ASCE, 127(3), pp.125-134, 2001.
4) 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. [Ogata, Y., Mashiko, M., Fujii, N., Abe, M., Rathnayaka, D., Pathirana, S. and Tajima, Y. : Experimental study on scour around mono-pile foundation for offshore wind power, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3* (*Ocean Engineering*), Vol. 74, Issue 2, pp. I_820-I_825, 2018.]
5) 片山裕之, 青木健太, 鵜飼亮行, 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, I_553-I_558, 2021. [Katayama, H., Aoki, K., Ukai, A. and Miura, N. : Experimental study on local scouring of moopile foundation by waves and effect of countermeasure, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 77, Issue 2, pp. I_553-I_558, 2021.]
6) 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, I_475-I_480, 2022. [Aoki, K., Yagami, K., Katayama, H., Miura, N. and Suzuki, T. : Experimental study of local scour around moopile foundation coused by waves and currents and the effectiveness of countermeasure, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 78, Issue 2, pp. I_475-I_480, 2022.]
7) 有川太郎, 陳暁悦, Songgui CHEN, Hanbao CHEN, 浜地克也, 松本幸久, 徳永正吾, 渡部真史, 巌駿 : 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. [Arikawa, T., Chen, X., Chen, S., Chen, H., Hamachi, K., Matsumoto, Y., Tokunaga, S., Watanabe, M. and Gen, H. : Experimental study of local scour at the base of a monopile offshore wind generator, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 76, Issue 2, pp. I_535-I_540, 2020.]
8) 陳暁悦, 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. [Chen, S., Enomoto, Y., Watanabe, M., Hamachi, K., Ishigaki, T. and Arikawa, T. : Machanizm of local scour prevention around monopile offshore wind turbine, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 77, Issue 2, pp. I_559-I_564, 2021.]
9) 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. [Inagaki, S., Niihara, Y., Suzuki, K. and Iwamae, N. : Hydraulic model test on stability and installation area of scour protection for offshore wind turbine foundation using filter units, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 77, Issue 2, pp. I_361-I_366, 2021.]
10) 稲垣聡, 鈴木一輝, 岩前伸幸, 藤井愛弓 : 中詰材粒形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防止工, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.78, No.2, pp.I_631-I_636, 2022. [Inagaki, S., Suzuki, K., Iwamae, N. and Fujii, A. : Scour protection of offshore wind turbine foundation using filter unit with adjusted filling material particle size , *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 78, Issue 2, pp. I_631-I_636, 2022.]
11) 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, 鈴木高二郎 : 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), Vol.78, No.2, I_709-I_914, 2022. [Kobayashi, W., Sekiya, Y., Suzuki, H., Aota, T., Matuda, S., Takahashi, T., Shimosako, K. and Suzuki, K. : Hydraulic model experiment on scour prevention effect and laying structure of offshore wind power facilities by foot protection bag, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Ocean Engineering*), Vol. 78, Issue 2, pp. I_907-I_912, 2022.]
12) 関谷勇太, 鈴木英樹, 青田徹, 久保田真一, 土橋和敬, 小林航, 鈴木高二郎, 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防止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, I_907-I_912, 2022. [Sekiya, Y., Suzuki, H., Aota, T., Kubota, S., Tsuchihashi, K., Kobayashi, W., Suzuki, K. and Shimosako, K. : Hydraulic model experiment on scour prevention effect and laying structure of offshore wind power facilities by foot protection bag, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3* (*Ocean Engineering*), Vol. 78, Issue 2, pp. I_907-I_912, 2022.]
13) 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, Vol.79, No.18, 23-18062, 2023. [Aota, T., Nishigori, Y., Tsuchihashi, K., Kobayashi, W., Sekiya, Y., Suzuki, H., Suzuki, K. and Shimosako, K. : A study of stability against waves and currents of foot protection bag for offshore wind power facilities, *Japanese Journal of JSCE,* Vol. 79, Issue.18, 23-18062, 2023.]
14) 坪川晃太朗, 三澤弘季, 中本詩瑶, 谷和夫, 池谷毅 : 環状袋型根固め材によるモノパイル基礎周辺の洗掘防止性能に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.79, Issue.17, 23-17173, 2023. [Tsubokawa, K.,

Misawa, H., Nakamoto, S., Tani, K. and Ikeya, T. : Experimental study on scour prevention performance of annular filter unit placed around monopile foundation, *Japanese Journal of JSCE*, Vol. 79, Issue.17, 23-17173, 2023.]

15) 本田隆英, 織田幸伸：着床式洋上風力発電基礎の局所洗掘と対策案に関する実験的検討, 土木学会論文集, Vol.79, Issue.18, 23-18154, 2023. [Honda, T. and Oda, Y. : Experimental study on local scour and countermeasure around pile foundation of offshore windfarm, *Japanese Journal of JSCE*, Vol. 79, Issue.18, 23-18154, 2023.]
16) 金澤剛, 神田泰成, 増田和輝, 竹中寛, 岡田由紀彦, 辻光俊：石炭灰混合人工石材を用いた袋型根固材の洗掘防止工適用に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.80, Issue.18, 24-18085, 2024. [Kanazawa, T., Kanda, T., Masuda, K., Takenaka, H., Okada, Y. and Tsuji, M. : Hydraulic model experiment on stability and scour prevention effect of foot protection bag using coal ash mixed artificial stone, *Japanese Journal of JSCE*, Vol. 80, Issue.18, 24-18085, 2024.]
17) Rudolph, D. and Bos, Klaas J. : Scour around a monopile under combined wave-current conditions and low KC-numbers, Proc. 3rd International Conf. on Scour and Erosion(ICSE-3), Amsterdam, pp.582-588, 2006.
18) Yasser, E. M. : Scour around single pile and pile groups subjected to waves and currents, International Journal of Engineering Science and Technology(IJEST), Vol.3, No.11, pp.8160-8178, 2011.
19) Qi, W. G. and Gao, F. : Equilibrium scour depth at offshore monopile foundation in combined waves and current, Science China Tech. Sci., Vol.57, No.5, pp.1030-1039, 2014.
20) Junhan, L., Bin Z., Chao, S., Xiaoli, F. and Weichao, Li. : Experimental study on local depth around monopile foundation in combined waves and current, Sustainability, 13, 13614, 2021.
21) 梅村凜, 大西左海, 片山裕之, 三浦成久, 鈴木崇之：細粒砂を用いた波・流れによるモノパイル基礎局所洗掘対策の袋型根固材の安定性，土木学会論文集, Vo.81，2025(印刷中). [Umemura, R., Onishi, S., Katayama, H., Miura, N. and Suzuki, T. : Stability of rock bag as a countermeasure for local scour of monpile foundations using fine sand, *Japanese Journal of JSCE*, Vol. 81, 2025 (printing)]
22) 高橋武志, 鈴木高二郎, 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：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，港湾空港技術研究所報告, 第 62 号第 3 号，pp.50-89, 2023. [Takahashi, T., Suzuki, K., Sekiya, Y., Aota, T., Kobayashi, W., Suzuki, H., Nishigori, W., Matuda, S., Kubota, S., Tsuchihashi, K., Shimosako, K., Tadokoro, A., Hukunaga, Y., Sako, D. and Nomura, D. : Experimental study on sucour protection using rock bags for fixed offshore wind facilities, *Report of the port and airport research institute*, Vol. 62, No.3, pp.50-89, 2023]

(Received March 17, 2025)
(Accepted July 22, 2025)

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL CONDITIONS AFFECTING MAXIMUM SCOUR DEPTH IN OFFSHORE WIND TURBINE MONOPILE FOUNDATION SCOUR EXPERIMENTS

Hiroyuki KATAYAMA, Rin UMEMURA and Naruhisa MIURA

A number of studies on offshore wind monopile foundation local scour have recently been carried out in support of the work of Sumer et al. (1992, 2001a) on dimensionless maximum scour depths. According to Sumer et al. (1992, 2001a) the maximum scour depth is expressed by the KC number and the wave flow non-dimensional velocity U_{CW}, but it is considered that the intrinsic experimental conditions, in particular the bottom grain size, experimental scale and monopile diameter, also have an influence in practice.

Therefore, a review was made of recent national and international papers on scour experiments on offshore wind turbines, including the aforementioned Sumer et al. Experiments were conducted under a wide range of conditions, with experimental scales from 1/9 to 1/130, sediment grain sizes from 0.06 to 0.58 mm and monopile diameters from 1 to 130 cm, and although Sumer et al. (2001a) showed that the maximum non-dimensional scour depth due to wave and flow was correlated with the KC number, in many experiments the maximum non-dimensional scour depth was in the large range Sumer et al. (2001a) suggested that the KC number may be overestimated.