

**風力発電等技術研究開発/
洋上風力発電等技術研究開発/
洋上風力発電低コスト施工技術開発**

(着床式基礎における洗掘防止工の低コスト構造及び施工方法の技術開発)

発表：2026年7月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 原 知聡、幸正 一伯

*団体名（企業・大学名など） 東亜建設工業（株）

問い合わせ先 東亜建設工業（株） URL : <https://www.toa-const.co.jp/>

1. 概要

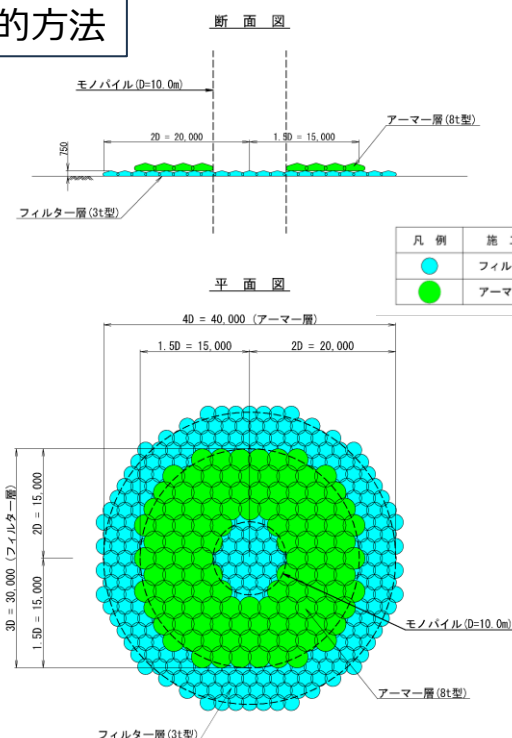
■ 背景

洋上風力発電設備の着床式基礎は、厳しい波浪や海流により周辺地盤が洗掘されるおそれがある。その対策である洗掘防止工は、袋型根固材を起重機船を使用し隙間なく設置することが標準的である。この標準的な方法は、施工数量が多く、所要日数を要するため建設工事の全体工程に影響するおそれがある。

■ 目的

本研究では、袋型根固材を大型化し、効率良く一括設置できる構造と施工方法、さらに水深の大きい場所での代替材として洗掘防止シートの適用性について検証し、実海域実験を行う。これにより先進的工法を確立し、工程短縮を図り低コスト化に資することを目的とする。

標準的方法



実施概要

袋型根固材の改良

洗掘防止シートの構造検討

施工方法の検討

実海域実験による検証

低コスト化

※サイト条件(水深、石材等)により選択も可

2. 研究スケジュール

■ 期間：2023年12月21日～2025年11月30日

実施項目	2023年度		2024年度				2025年度		
	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q
①袋型根固材の改良									
②袋型根固材の一括設置方法の検討									
③袋型根固材一括設置に関する実証実験									
④洗掘防止シートの構造検討									
⑤洗掘防止シートの設置方法の検討									
⑥洗掘防止シート設置に関する実証実験									
⑦洗掘防止構造検討委員会の開催									

①袋型根固材の改良

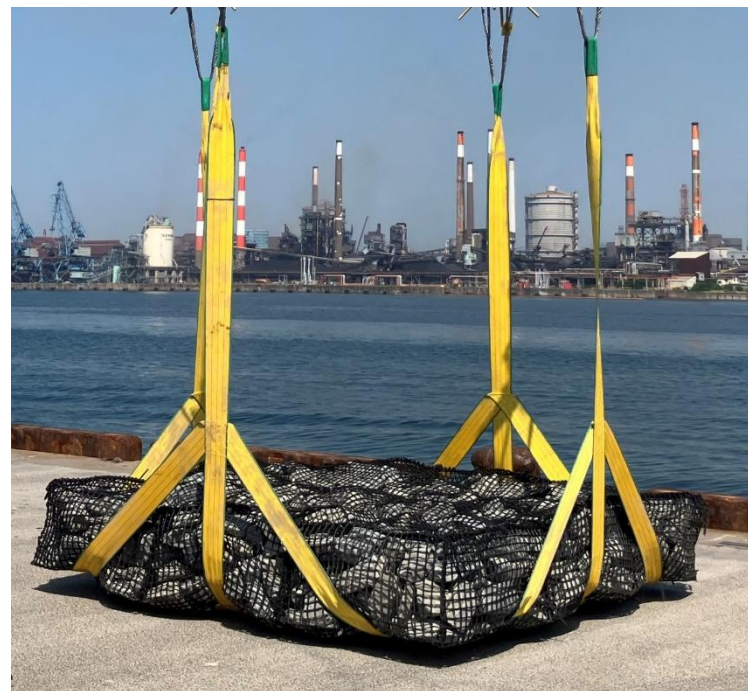
- ✓ 円形タイプ（20t）、矩形タイプ（6m×6m×0.5m）を製作して、吊上げ時の変状および根固材の設置時の隙間の計測を実施した。
 - 円形タイプでは、設置時の隙間は約30cm
 - 矩形タイプは吊上げ時の変形が大きかった
- ✓ 矩形タイプ吊上げ時の変形を抑制するために吊上げに使用するハンモックを改良した。
- ✓ 水理実験水槽で1/20模型実験により、円形タイプと矩形タイプの安定性を確認した。
 - 矩形タイプの方が安定性良好

②袋型根固材の一括設置方法の検討

- ✓ 陸上での製作方法・施工機械の配置を検討
- ✓ 矩形大型袋型根固材を16個同時に施工するための吊枠構造を検討
- ✓ 潜水土作業を無くすために自動玉外し装置の設計・導入
- ✓ 大型全旋回起重機船を用いた施工により16個同時設置可能

③袋型根固材一括設置に関する実証実験

- ✓ 茨城県鹿島港の港外にスケールダウンした矩形袋型根固材（3m×3m×0.5m）を2基隣接設置し、洗掘防止効果や劣化の有無を確認した。
- ✓ 2024年6月下旬設置、2025年5月下旬撤去



実海域実験で使用した矩形袋型根固材
（ B3m×L3m×H0.5m）

④洗掘防止シートの構造検討

- ✓ 洗掘防止シートとして、透水性シートを採用
- ✓ シート固定用の錘として、チェーンを採用し、チェーンの必要重量について検討
- ✓ 実海域実験でのチェーン配置を検討し、チェーン質量を替えた複数ケースにより検証
- ✓ 室内載荷試験により、シート打抜き実験を実施

⑤洗掘防止シートの設置方法の検討

- ✓ 実海域実験の結果を踏まえ、シート寸法とチェーン配置を考慮した本施工用の吊枠を設計
- ✓ 潜水土作業を無くすために自動玉外し装置の設計・導入
- ✓ モノパイル沿いには、吸出し防止材をモノパイル打設前に取付ける施工方法を立案
- ✓ 潜水土作業を無くすために自動玉外し装置の設計・導入
- ✓ 大型全旋回起重機船を用いた施工により16個同時設置可能

⑥洗掘防止シート設置に関する実証実験

- ✓ 茨城県鹿島港の港外にスケールダウンした鋼管杭 ($\phi 2.0\text{m}$)と洗掘防止シートを設置し、洗掘防止効果や劣化の有無を確認した。
- ✓ 2024年6月下旬設置、2025年5月下旬撤去

⑦洗掘防止構造検討委員会

- ✓ 3回実施



実海域実験で使用した洗掘防止シート
(6m×6m)

4. 実海域実験結果

4.1 実験概要

- 実際の波浪外力を受ける条件でモノパイル周りの洗掘現象を観測した事例は少ない。
- 本研究において局所洗掘現象の解明に資するデータ収集を行った。
- 洗掘防止シートは実海域での施工実績がないため、長期間にわたる設置により暴露試験を行い、実際の波・流れ共存場における耐波安定性（錘の所要質量）と洗掘防止効果を検証した。

■ 達成目標

- 実海域での長期観測により、実際の局所洗掘現象に関する知見を得る。
- 長期間の暴露試験を行うことで洗掘防止工の効果および耐波安定性について評価する。

■ 実験条件

観測期間：2024年7月12日～2025年5月13日（10ヶ月）

スケール：波浪条件（1/1スケール）に対し、モノパイル模型は1/5スケール

モノパイルの諸元：外径2 m，長さ24 m，根入れ長18 m，水底面からの突出長6 m

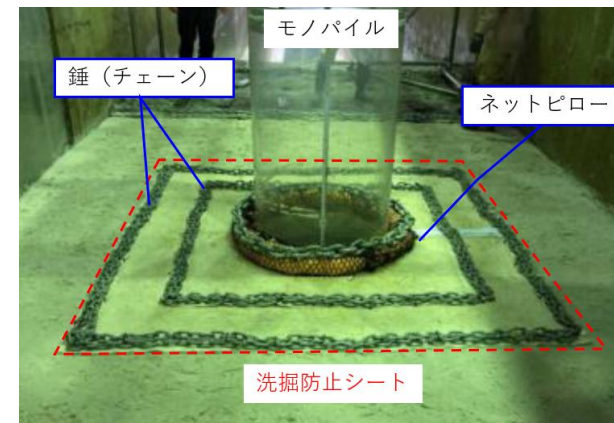
現地底質：中央粒径 0.17 mm

観測方法：

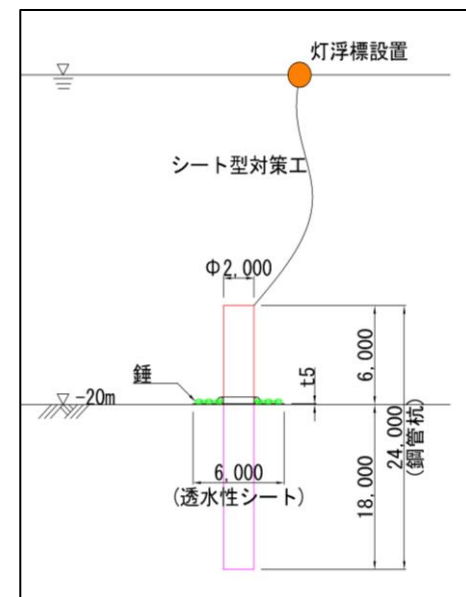
- ① 定期観測：ナローマルチビーム測量（観測期間中計6回），
ダイバーによる目視観察
- ② 定点観測：波高計（波高，周期，底面流速），
砂面計（杭近傍地盤高）

※ モノパイルに作用する波力は杭の縮尺スケールに対して大きくなる

※ 水域利用者への配慮から、水底面から6 m突出させた没水円柱とする



洗掘防止シートの構造

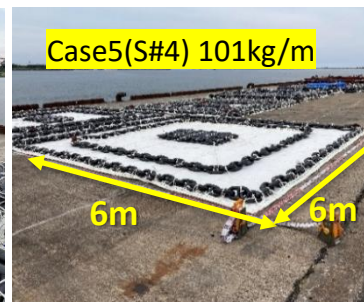
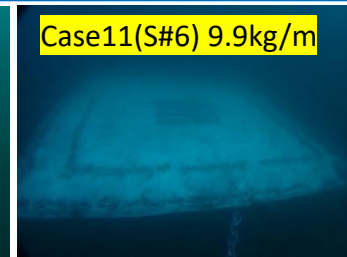
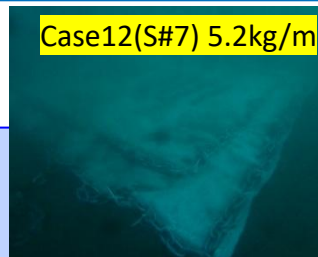
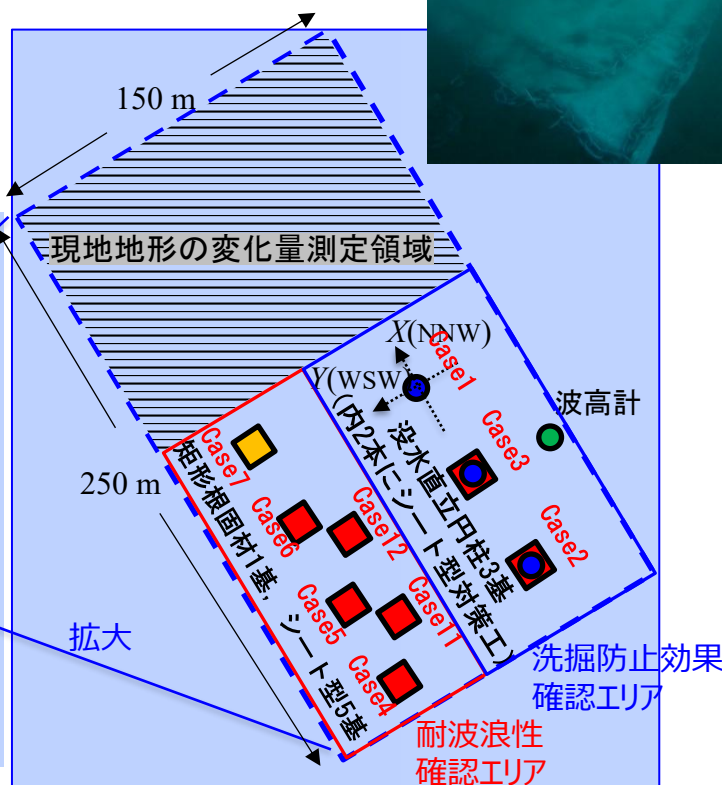


実験断面図

4. 実海域実験結果

■ 模型配置図

Case4 ~ 7 : 2024年6月下旬 設置
Case1 ~ 3 : 2024年7月上旬 設置
Case11,12 : 2024年12月下旬 追加設置



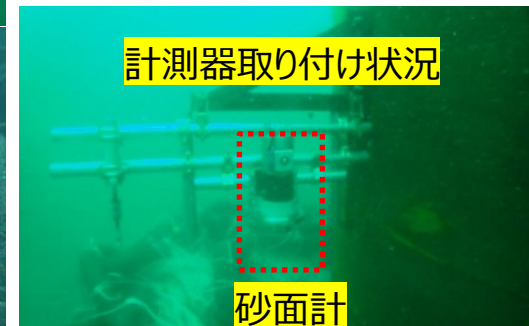
S : 洗掘防止シート
S+P : シート + 杭
M : 矩形袋型根固材
U : 袋型根固材単体
(シート飛散防止用)

4. 実海域実験結果

■ 実験状況



- チェーンの重みによって対策工が中央に寄ってしまう
- 設置後、洗掘防護範囲が狭まる問題
- 吊り方に課題



4. 実海域実験結果

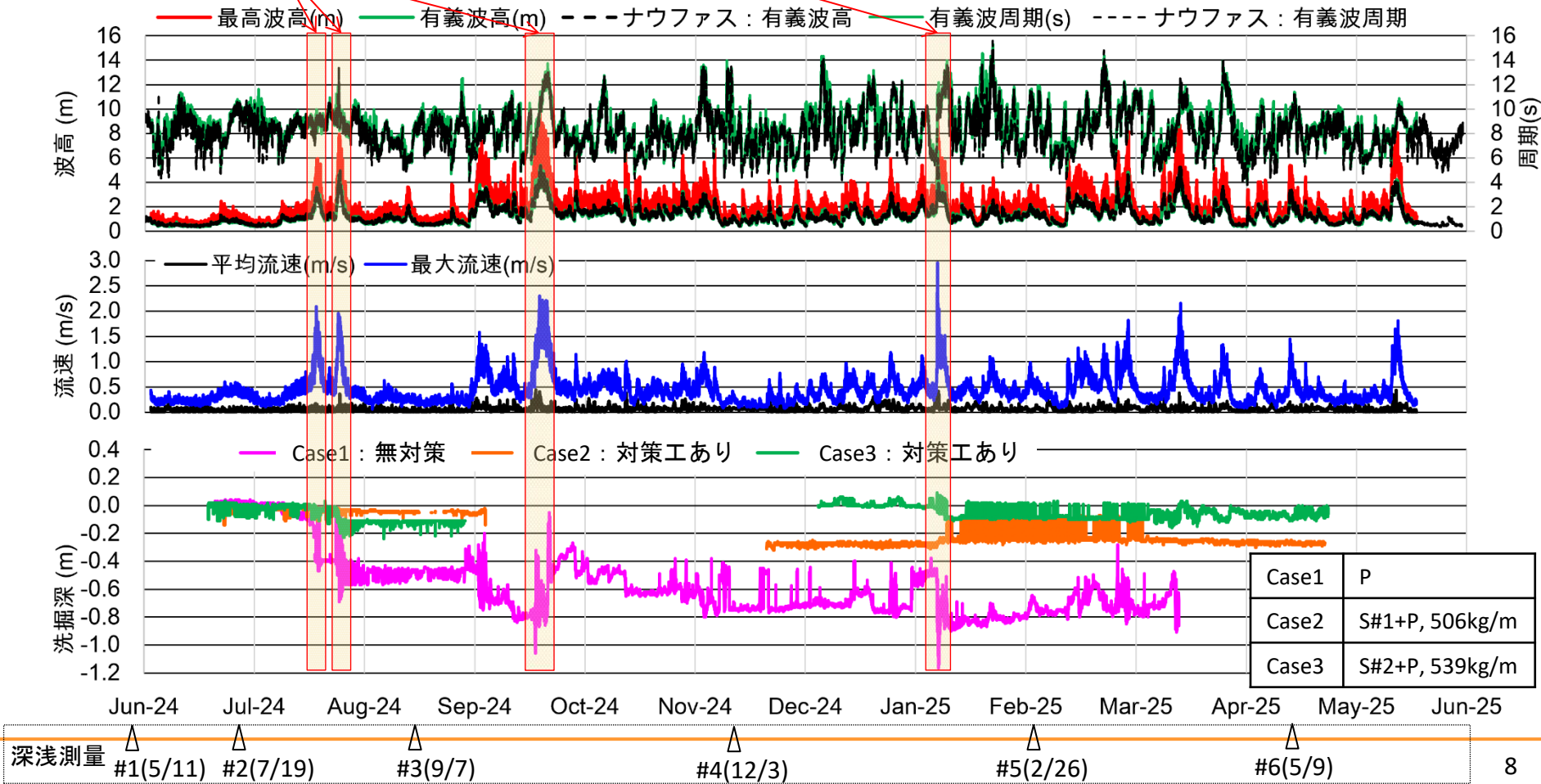
4.2 計測結果

■ 波高，底面流速，洗掘深の経時変化

24/8/10 台風5号
24/8/17 台風7号
24/10/10 台風19号

25/1/26
観測期間最大イベント，冬型低気圧の接近
 T_{max} : 11.2 s, H_{max} : 10.7 m, V_{max} : 2.95 m/s

観測最大諸元	単位	値	観測時刻
最高波高	m	10.7	2025/01/26 20:00
周期	s	11.2	"
有義波高	m	6.56	"
有義波周期	s	11.4	"
合成流速最大	m/s	2.95	2025/01/26 21:40
平均流速最大	m/s	0.44	2024/10/09 11:00
最大洗掘深	m	1.16	2025/01/27 7:00

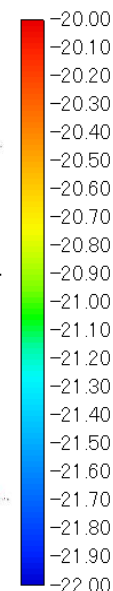
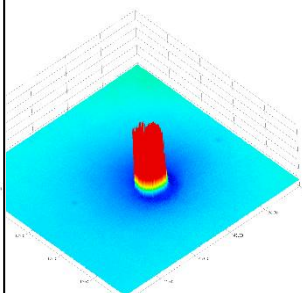
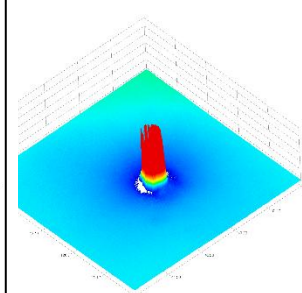
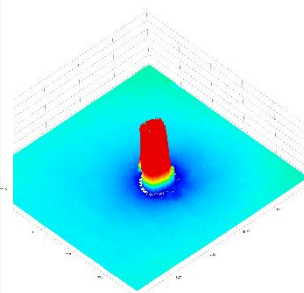
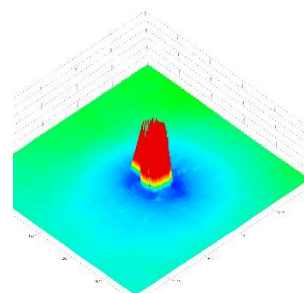
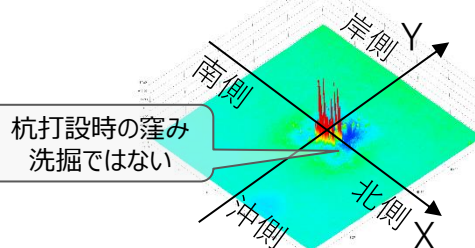


4. 実海域実験結果

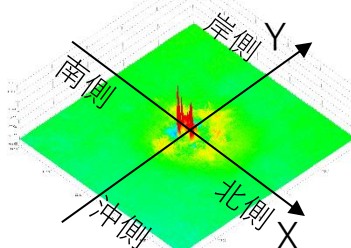
4.3 深浅測量結果

■ 鋼管杭周辺の地形データ（鳥観図）

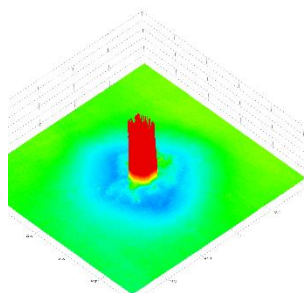
Case1(P)：シートなし



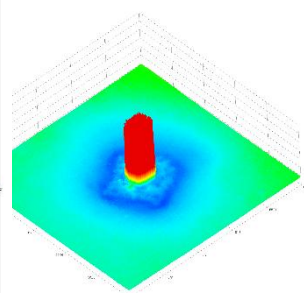
Case2(S#1+P)：シートあり



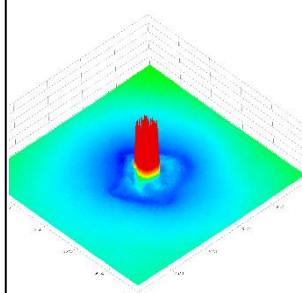
2024/07
設置直後



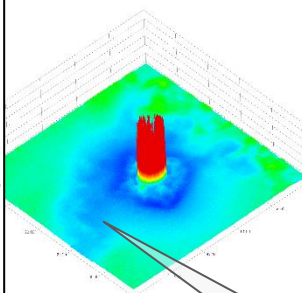
2024/09
台風通過後



2024/12
5か月経過後



2025/02
最大波浪観測後



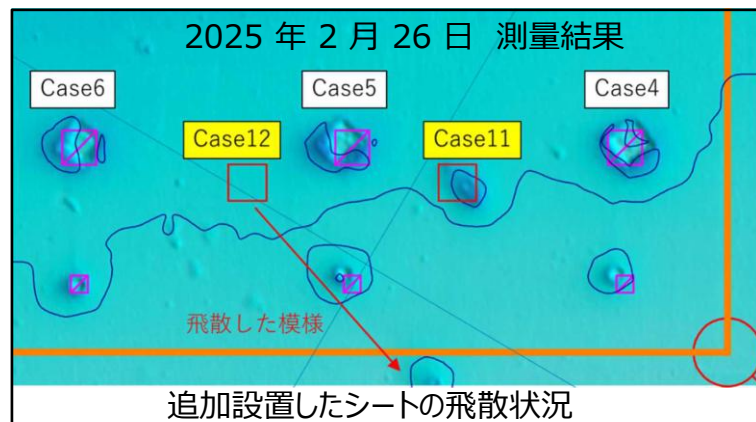
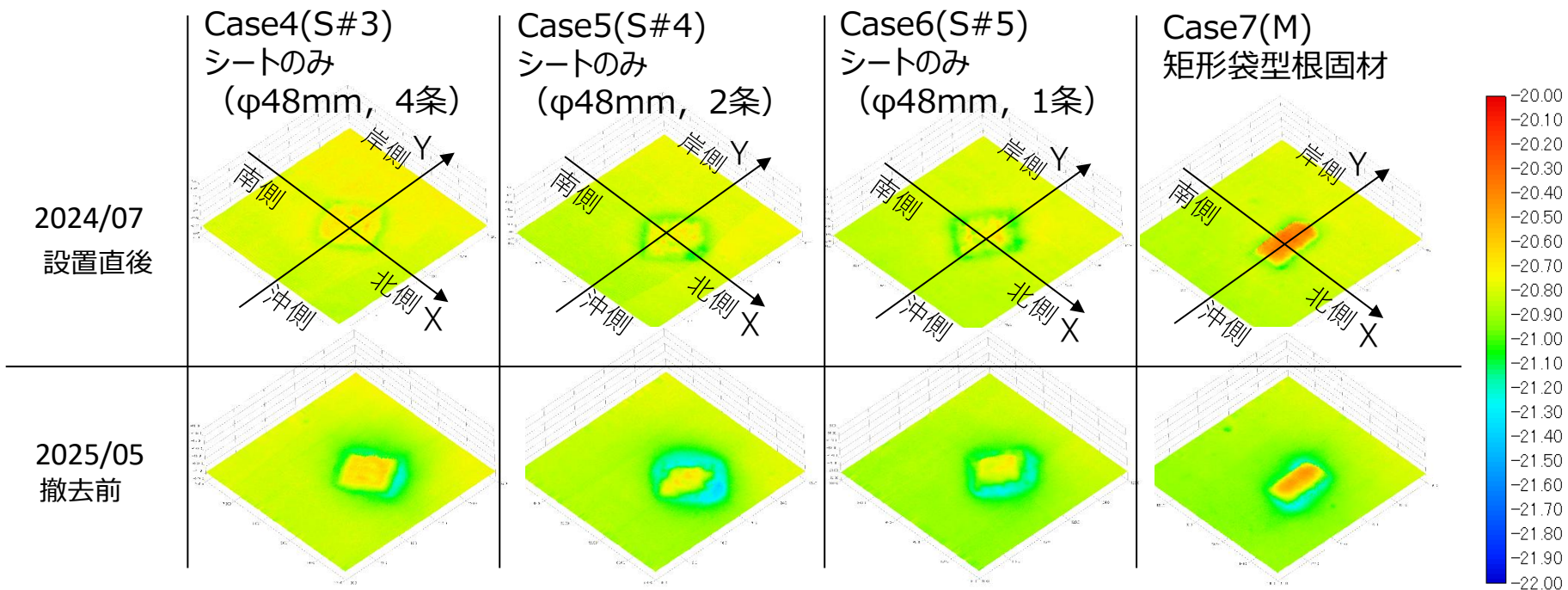
2025/05
撤去前

※走錨痕と思
われる不陸

Case1(P)：シートなし	Case2(S#1+P)：シートあり
- 杭周辺にすり鉢状の洗掘が確認できる - 鳥観図では洗掘形状に明確な方向性は見られない	- 杭近傍の洗掘は低減できている - シート周りに端部洗掘が見られる

4. 実海域実験結果

4.3 深浅測量結果 ■ シート型、矩形袋型根固材設置箇所周囲の地形データ



- シート周りに端部洗掘の進行を確認
- Case7の矩形袋型根固材について、端部洗掘の進行を確認
- Case4, 5, 6の、チェーンの本数を変えて質量を変化させた条件では、観測期間中の被災は確認されなかった
- 2024年12月25日に追加設置した錘重量を軽量化したシート(case12)について、2025年2月26日の測量にて飛散を確認
- Case11についてもシート形状が維持されていないことが確認された

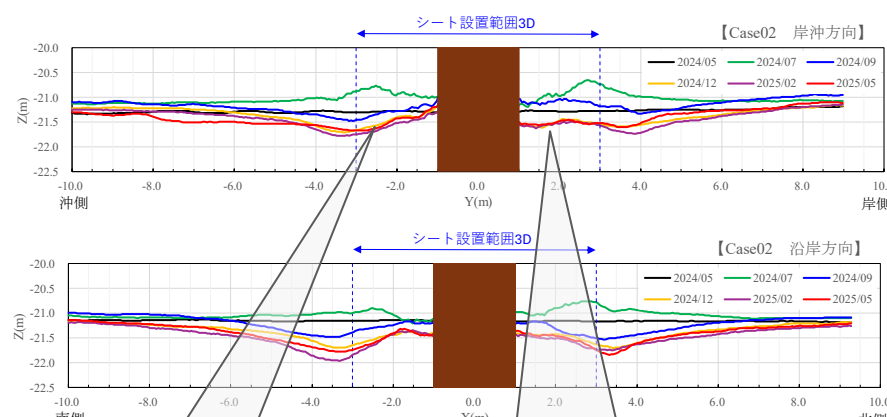
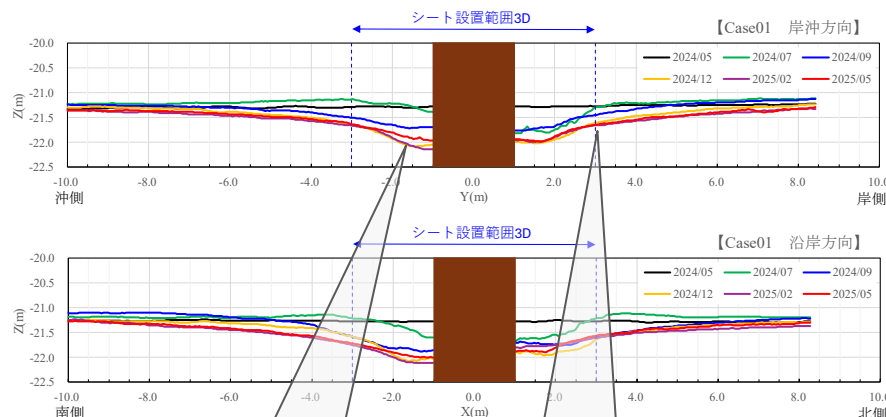
4. 実海域実験結果

4.3 深浅測量結果

■ 鋼管杭中央断面における地形変化

シートなし

シートあり



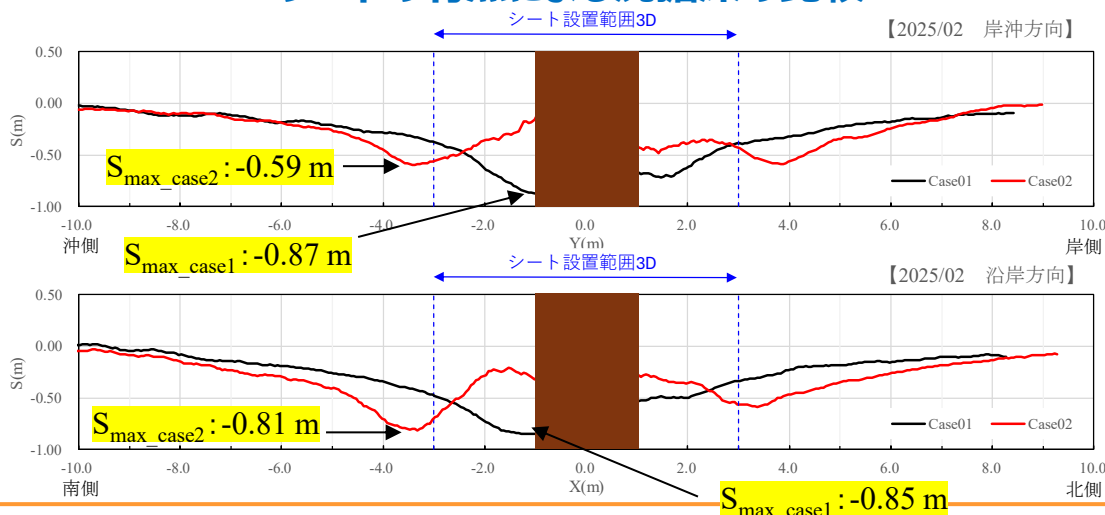
2025/2 洗掘深最大
2025/5 埋め戻りを確認

無対策時の洗掘範囲は
シート設置範囲より広い

2024/12以降、端部洗掘
影響が杭近傍まで到達

2024/12以降、杭近傍で沈下
端部洗掘影響によりシート下の砂が移動した可能性

■ シートの有無による洗掘深の比較

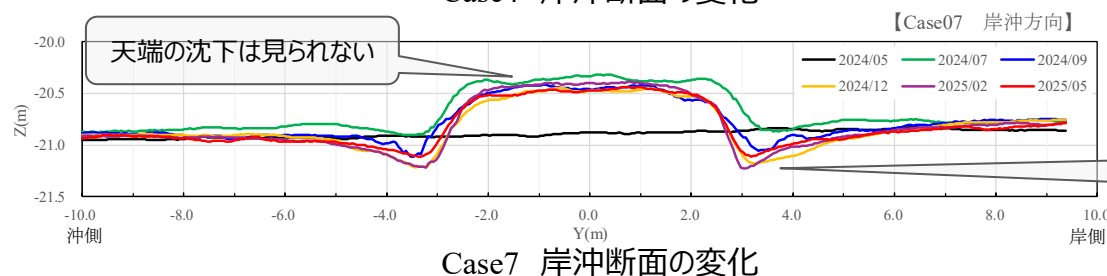
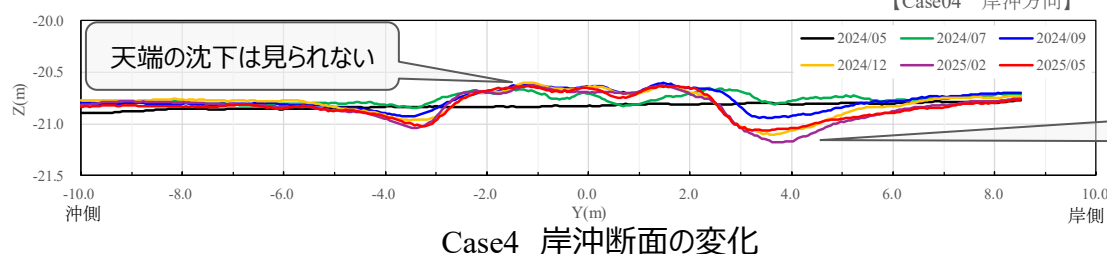
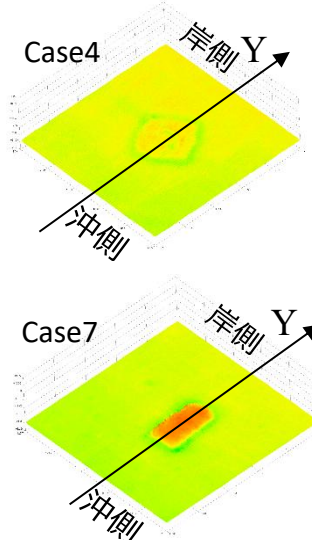


- 杭沖側で最大洗掘深を観測
- シート外側の端部洗掘深は、同じ位置でのシートなしの洗掘深よりも大きくなる
- 杭近傍にはシートによる洗掘防止効果が見られるが、端部洗掘の進行の影響が杭に達している
- シート有の場合、シートなしと比べて洗掘量は軽減できることを確認
- シート端部の洗掘影響が杭近傍まで達していることから、適切な敷設範囲の再検討および、端部洗掘の原因究明が今後の課題

4. 実海域実験結果

4.3 深浅測量結果

■ シートおよび矩形袋型根固材中央断面における地形変化



■ 深浅測量結果のまとめ

【洗掘防止シートの効果】

- シートなしのケースと比較して、鋼管杭周りの洗掘量を低減できることが確認された
- シートありのCase02について、2024年9月までは杭近傍の洗掘を防げていたが、以降は洗掘が進行して杭近傍も洗掘を受けた
- シートありのCase03ではシート設置範囲が明確に狭く、洗掘防止効果も限定的な結果となった

【洗掘防止シートありのケースの洗掘要因】

- 洗掘範囲がシート設置範囲の3Dよりも広がった（5～6D程度）
- シート吊上げ時の形状維持の課題により、シートの設置範囲が当初計画の3Dよりも狭かった
- シートの端部洗掘が大きく、その影響が杭近傍まで達した

【洗掘防止シートの安定性】

- チェーンの重量を変えた数種類のシートを設置したが、最も軽いチェーンでもシートは飛散することなく安定であった
- 追加でさらに軽量のチェーンを付けたシート（Case11, 12）を設置したところ、シートは飛散した

5. 実海域実験結果の分析

5.1 検討概要

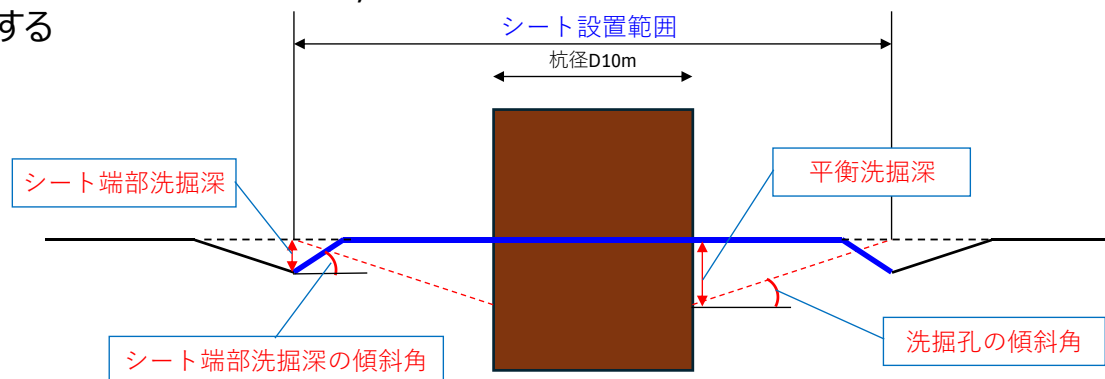
■ 目的

- 実規模のモノパイルに対する、洗掘防止シートの設置範囲、シート錘の所要質量を設定するための知見を得る

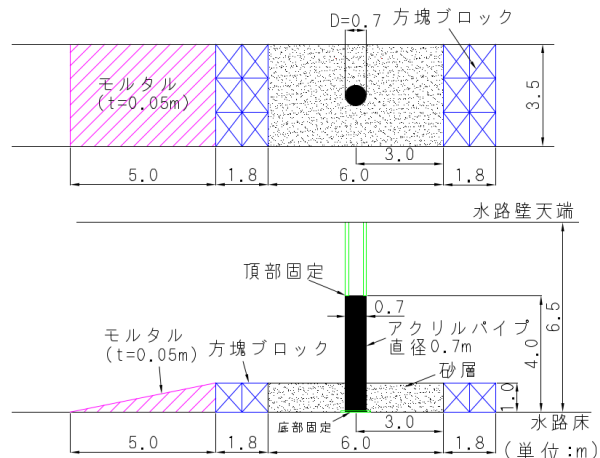
■ 検討方法

- 既往の水理模型実験、現地実験結果から以下の事項を確認し、実規模モノパイル（杭径10m）について洗掘深、洗掘範囲、シート錘の所要質量を推定する

- ✓ 既往の平衡洗掘深の適用性
- ✓ 洗掘孔の傾斜角
- ✓ シート端部洗掘深
- ✓ シート端部洗掘孔の傾斜角
- ✓ シート錘（チェーン）の滑動安定性



■ 水理模型実験概要



水理模型実験の概要（上：平面図，下：断面図）

水理模型実験（縮尺1/9）と実海域実験の条件比較

項目	水理模型実験	実海域実験
水深(m)	19.8 (2.2)	21.0
モノパイル径(m)	6.3 (0.7)	2.0
有義波高(m)	4.50 (0.5)	6.56
有義波周期(s)	15.0 (5.0)	11.38
波長(m)	196.6 (21.8)	145.5
波数	0.032	0.043
波による底面軌道流速(m/s)	1.39 (0.46)	1.75
KC数	3.3	9.9
流れによる底面流速(m/s)	1.41 (0.47)	0.14
KC数（流れ考慮）	6.7	10.7
底質粒径(mm)	0.4 (0.19)	0.17

※底質粒径は沈降速度の相似則を適用

5. 実海域実験結果の分析

5.2 既往の平衡洗掘深の適用性

■ 高橋ら(2023)の平衡洗掘深算定式

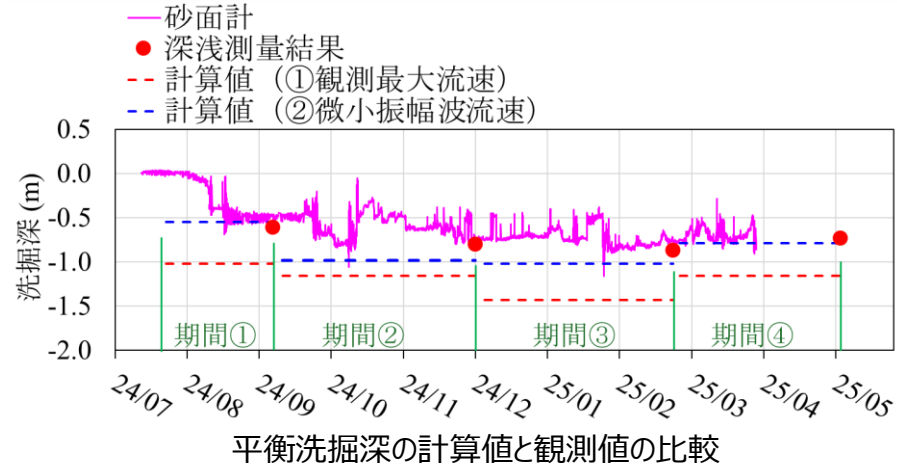
$$\frac{S}{D} = 1.3[1 - \exp(-A(KC - B))]$$

$$A = 0.05 + \frac{3}{4}U_{cw}^{2.6}$$

$$B = 0.2\exp(-4.7U_{cw})$$

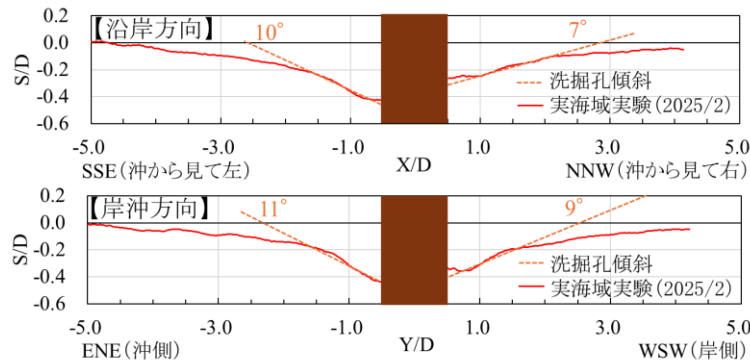
$$U_{cw} = \frac{U_c}{U_c + U_w}$$

$$KC = \frac{T U_w}{D}$$

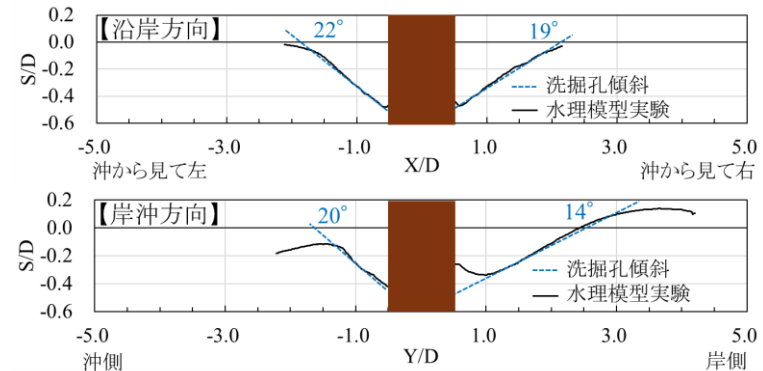


- 「①観測最大流速を用いた洗掘深の計算値」は砂面計、測量結果の観測値よりも大幅に大きい
- 「②有義波の底面流速（微小振幅波理論）を用いた洗掘深の計算値」は、測量結果よりもやや大きい傾向だが、概ね整合
- 平衡洗掘深の計算は、「波による流速 U_w 」に設計有義波に対する微小振幅波の底面流速を用いるのが適当であると考えられる

5.3 洗掘孔の傾斜角



現地観測の洗掘孔傾斜角

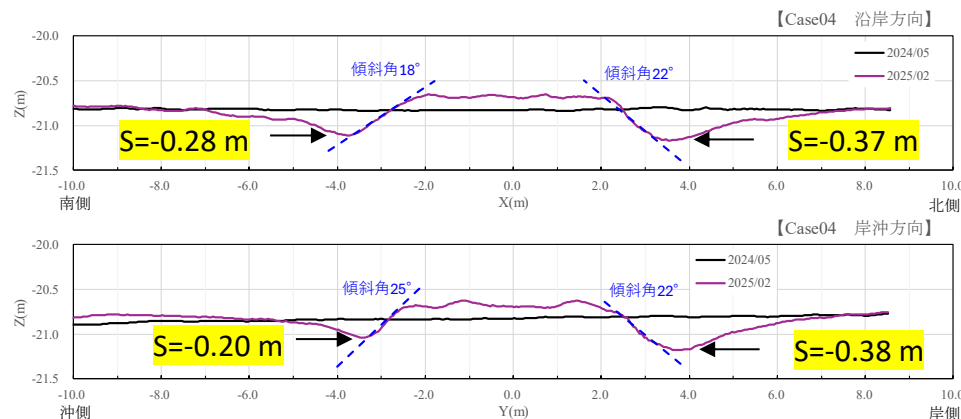


水理模型実験の洗掘孔傾斜角

- シートなし条件の洗掘孔傾斜角について、現地観測は平均10度、水理模型実験は平均19度
- 洗掘孔傾斜角は、現地実験の方が水理模型実験より大幅に小さい結果となった

5. 実海域実験結果の分析

5.4 シート端部洗掘深および傾斜角



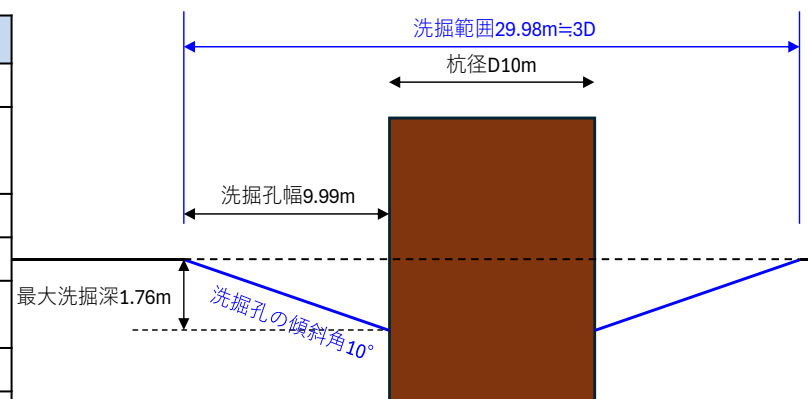
端部洗掘深および傾斜角の一例 (Case4 : 2025年2月測量結果)

- 耐波安定性を観測したシートのみ条件について、端部洗掘深は岸沖方向では沖側で小さい傾向がある一方で、沿岸方向では明確な違いは見られない
- 端部洗掘によるシート内側の傾斜角は、岸沖、沿岸方向で明確な傾向は見られない
- Case4, 5, 6で錘重量は異なるが、端部洗掘深、傾斜角に明確な傾向は見られない
- シート内側の傾斜角の平均は21度

5.5 実規模での洗掘防止シート設置範囲の照査

■ 検討条件

項目	値	備考
モノパイル径 D (m)	10	15MW級を想定
周期 $T_{1/3}$ (s)	12.4	鹿島沖50年確立波を適用
波高 $H_{1/3}$ (m)	7.18	
水深 h (m)	21	鹿島港沖現況地盤高に相当
波長 L (m)	161	
流れによる底面流速 U_c (m/s)	0.7	「日本海洋データセンター1°メッシュ海流統計データ」「windfarm技術認証に係る技術資料」参照
波による底面流速 U_w (m/s)	2.0	微小振幅波理論より算出
KC数	2.5	
予測洗掘深 S (m)	1.76	平衡洗掘深式により求めた洗掘深に対し、観測結果と一致するように定めた補正係数を考慮して推定
洗掘孔傾斜 (deg)	10	現地観測結果を考慮
洗掘範囲 (m)	30	



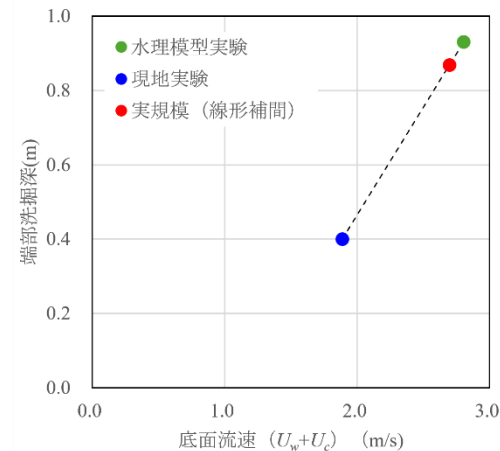
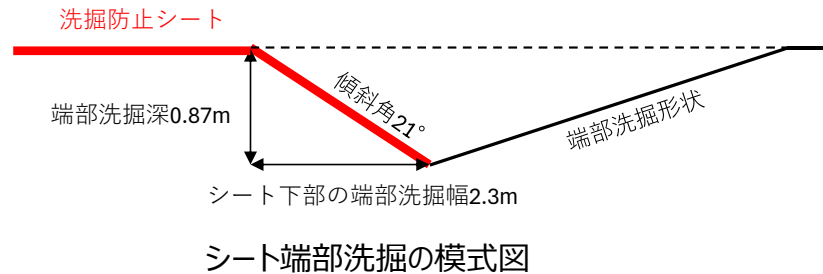
洗掘深と洗掘範囲の模式図 (実規模)

5. 実海域実験結果の分析

5.5 実規模での洗掘防止シート設置範囲の照査

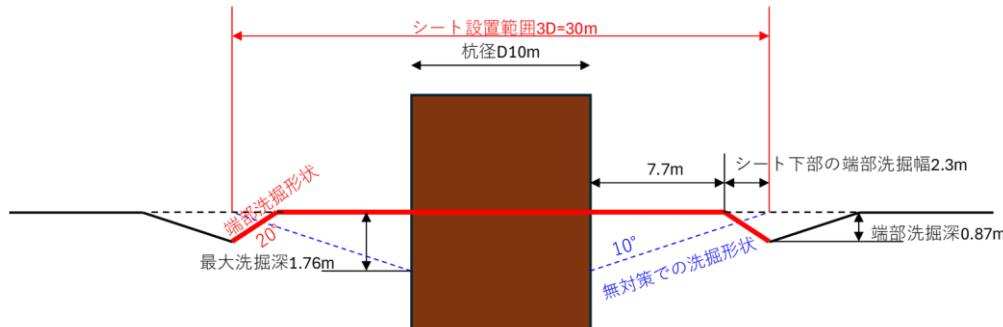
■ 端部洗掘深の推定

- シート端部の洗掘深は底面流速に比例して大きくなると考えられる
- 水理模型実験, 現地実験結果から線形補完により, 実規模の端部洗掘深は0.87mと推定
- 現地実験での端部洗掘の傾斜角 (21度) を用いてシート下部の端部洗掘幅を計算すると2.3mとなる



底面流速と端部洗掘深の関係

■ シート設置範囲



- 実規模でのシートの設置範囲3D (30m) に対して, シート下部の端部洗掘幅は2.3mと予想される
- 端部洗掘の影響は限定的

洗掘防止シートの設置模式図 (実規模)

5. 実海域実験結果の分析

5.6 シート錘の所要質量

ケース	チェーン径 (mm)	1箇所の チェーン本数	単位長さ当たり 質量 (kg/m)	滑動安全率 (計画当初) 揚力係数：1.2 補正係数：0.8	滑動安全率 (見直し後) 揚力係数：0 補正係数：1.0	実海域実験 耐波安定性
水理実験	10.5	1	2.4	1.12	1.14	
実海域実験						
Case2	152	1	506.0	1.53	1.46	○
Case3	111	2	539.3	2.07	2.13	○
Case4	48	4	201.8	1.11	1.85	○
Case5	48	2	100.9	0.55	0.92	○
Case6	48	1	50.5	0.28	0.46	○
Case11	22	1	9.9	0	0.21	×
Case12	16	1	5.2	0	0.15	×

※計画当初のCase11, 12において、揚力がチェーン重量を上回るため、滑動安全率が0となる

- 水理模型実験結果に基づき、水平波力（波＋流れ）に対して、錘（チェーン）の抗力・揚力に対し重量が上回る場合と下回る場合の条件を設定し、実海域実験ケースとして耐波安定性を検討した
- 飛散することを想定して設置した当初最軽量ケース（Case6）において飛散は確認されなかった
- 水理模型実験に基づく錘の所要質量推算是、実験結果と比較して過大評価となることを確認した
- 既往文献※¹より揚力係数は抗力係数に比べて十分小さいため無視して再計算したが、実験結果を十分に説明するには至らなかった
- シート端部の洗掘に伴う錘の沈下により、流体抵抗の低減および滑動抵抗の増加が生じた可能性が示唆される
- 当該効果の定量的評価は今後の課題である

※1 Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 8, 2017. 10

Greegowoon Kim, et al.: Hydrodynamic coefficients of a chain model by using the Morison equation

6. 研究成果

項目	① 矩形袋型根固材	② 洗掘防止シート
概要図	断面図 モノパイル (D=10.0m) 8 × 6,000 = 48,000 4 × 6,000 = 24,000 矩形型根固材 (30t) × 15個 (一括設置) 平面図 8 × 6,000 = 48,000 8 × 6,000 = 24,000 矩形型根固材 (30t) × 15個 (一括設置) モノパイル (D=10.0m) 矩形型根固材 (30t) × 15個 (一括設置)	断面図 モノパイル (D=10.0m) 30,000 (3D) 吸出し防止材 洗掘防止シート シート錠 (φ48mm チェーン × 6条) 平面図 30,000 (3D) 洗掘防止シート モノパイル (D=10.0m) 吸出し防止材 シート錠 (φ48mm チェーン × 6条)
施工コスト	費用: 標準案比85% 所要日数: 標準案比48% ● 両案とも施工日数は大幅に減り、特に海上施工日数の減少は建設工事全体の工程短縮に寄与できる ● NET工程でのコスト比較を示しているが、サイトごとの稼働率を考慮すると、更なるコストダウン効果となる可能性がある	費用: 標準案比57% 所要日数: 標準案比17%

※コスト比較は、1サイト30基の風車建設を想定し、1基当りの直接工事費のみで行った（サイトにより共通仮設費や稼働率が異なるため）

■ 今後の課題

- 洗掘防止シートの錘重量についての経済的な設計手法の確立
⇒チェーンの地盤への沈みこみによる流体抵抗の低下や滑動抵抗の増加といった影響を定量的な評価が今後必要となる
- 吸出し防止材の最適な構造（材料・寸法等）の選定
⇒吸出し防止材に付属する錘材料の仕様や吸出し防止材の最適な寸法について、今後検討が必要となる

■ 今後の展開

- 本研究開発結果を基に、特許取得や実用新案登録などを行い、実用化及び事業化を円滑に進める（2026年度）
- 洋上風力関連事業への本研究開発技術の適用を目指し各サイトの事業者・施工者へ技術営業を行う（2026年度以降）