

洋上風力発電施設建設における SEP 船レグ貫入時の周辺構造物影響評価に関する研究

石狩湾新港洋上風力発電所建設プロジェクトマネージャ

瀬谷 和彦

清水建設(株)

正会員 根尾 景次郎

清水建設(株)

正会員 前田 裕一

清水建設(株)

正会員 ○田中 颯馬

1. 目的

グリーン成長戦略の実現に向けて、多数の洋上風力事業計画が進められている。この洋上風力建設の要となる施工用船舶 SEP 船は、**写真-1** のように海底面にレグを立てて船体を海面上にジャッキアップさせることで波浪の影響を受けることなく作業が可能となる。しかし、レグ貫入による岸壁などの周辺構造物への影響が懸念されており、事業化に伴い周辺影響評価が求められている。そこで、遠心載荷模型実験にてレグ貫入による周辺影響を定量的に計測し、FEM 解析で再現することで周辺影響の定量評価手法の構築を試みた。

この定量評価手法を用いて、石狩湾新港洋上風力発電施設の洋上施工における岸壁への事前影響検討を実施した。本案件では 2,500t 吊り SEP 船が風車部材の積込みのために、**図-1** のように岸壁から 29m 離れた地点にて船体をジャッキアップする。施工時には変位計や傾斜計により動態観測を行い、その評価について報告する。

2. 遠心載荷模型実験

石狩湾新港内地盤と同様に中間層に軟弱粘性土層が一定以上の層厚で堆積する地盤をモデルとして、周辺影響解析の妥当性検証のための遠心載荷模型実験を実施した。

(1) 実験手法

検証対象のスパッドカン面積が 160m^2 と非常に大きいため、国内最大級の土木研究所の遠心載荷装置 (**写真-2**) を選定した。載荷 G は装置の最大積載容量から 75G と設定し、スパッドカンの模型は、**写真-3** のように同一平面積の円錐形状に単純化して 1/75 縮尺で製作した。

スパッドカン貫入による周辺影響を計測するため、**図-2** の通りにアルミ杭および地盤の変形を計測するための標点を設置する。地表面の変状計測はレーザー式沈下計を土層上に設置する。アルミ杭には、ひずみ計を設置して杭の断面力を時系列的に計測する。所定の荷重（想定されるプレロード荷重）まで載荷し、スパッドカンの沈下が完了後に引抜、その後の地盤状態を標点および沈下計によって確認する。



写真-1 風車部材の積込み

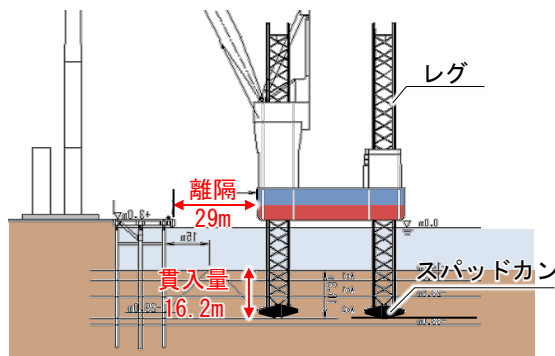


図-1 岸壁前面でのジャッキアップ



写真-2 土木研究所の遠心載荷装置

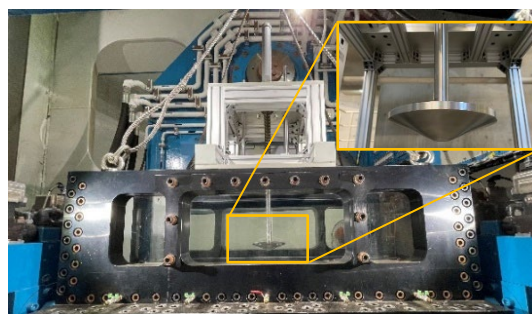


写真-3 スパッドカン貫入装置

キーワード 洋上風車, レグ貫入, 岸壁影響検討, 遠心載荷模型実験, 動態観測

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設(株) 土木技術本部 E-mail:f.tanaka@shimz.co.jp

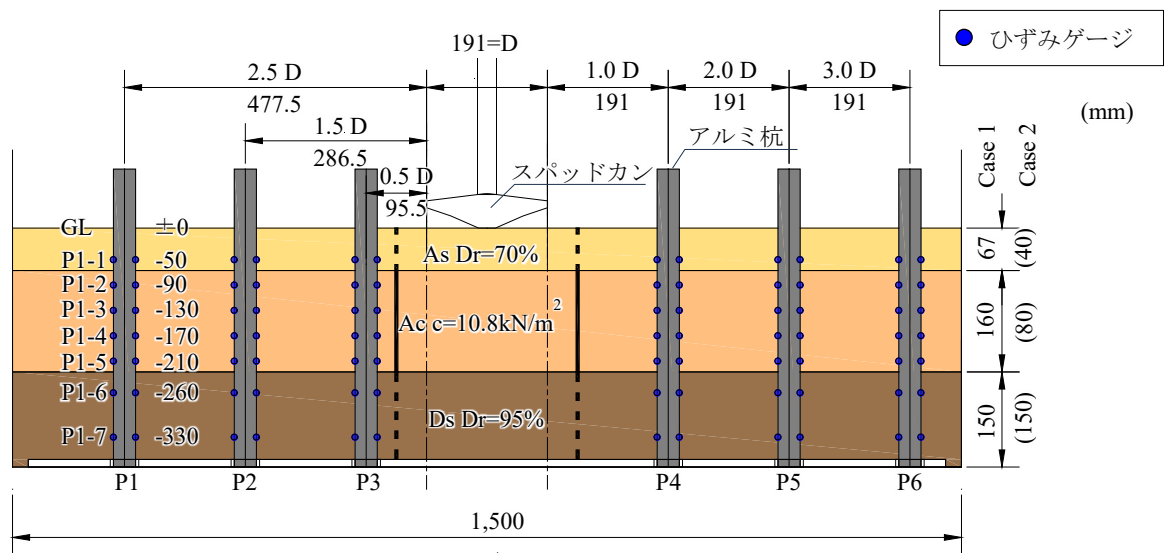


図-2 土層及び計測機器

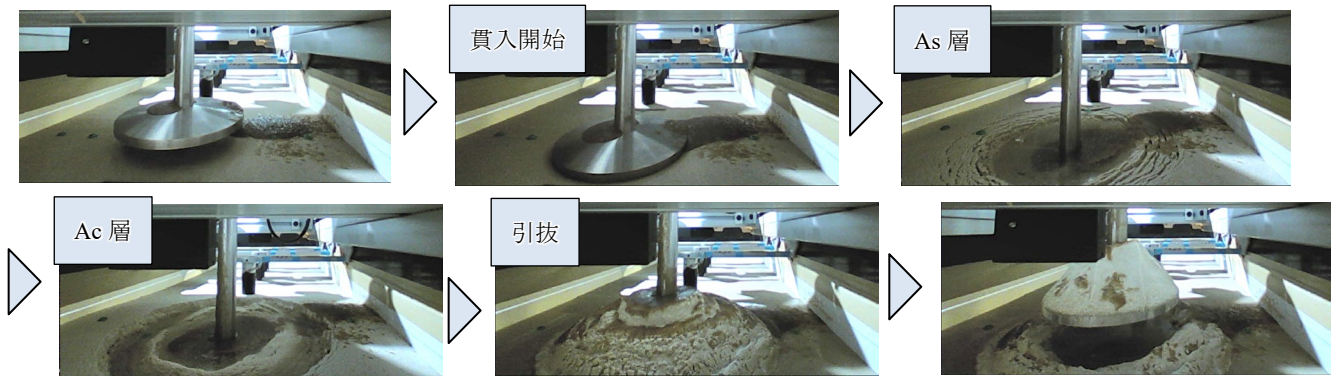


写真-4 ケース 1 における実験フロー

(2) 実験結果

ケース 1 におけるスパッドカン引抜後の土層断面を写真-5 に示す．変形評価のために事前に設置したマーカーにより，Ac 層下端で側方押し出し，表層で収縮が生じたことが示された．

図-3(a) はスパッドカン先端深さの時系列を示す．貫入深さはケース 1 で 186mm，ケース 2 で 106mm であった．サンドプラグ厚さは As 層厚の 60～80% であった．図-3(b)，(c) は観測杭 (P4) における曲げモーメントの時系列を示す．ケース 1 では，As 層貫入時 (360s, G.L.-43mm) で曲げモーメントが最大値 (M) に達し，その後 Ac 層への貫入で減少，引抜開始 (1,400s, G.L.-186mm) 後さらに減少した．ケース 2 では，As 層貫入後に減少し，最大貫入深さ (G.L.-106mm) で M に達した．

周辺効果の最大発生タイミングの違いは粘土層の厚さによるものである．ケース 1 のように粘土層が厚い場合，粘土層貫入時の引き込みが大きく，表層砂層貫入時に M が発生したと考えられる．なお，引抜後もピークの約 20～30% の残留曲げモーメントが残存した．

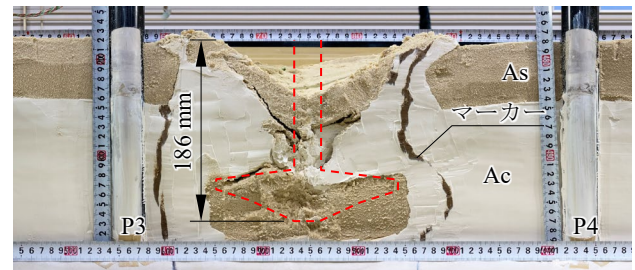


写真-5 ケース 1 における引抜後の土層断面

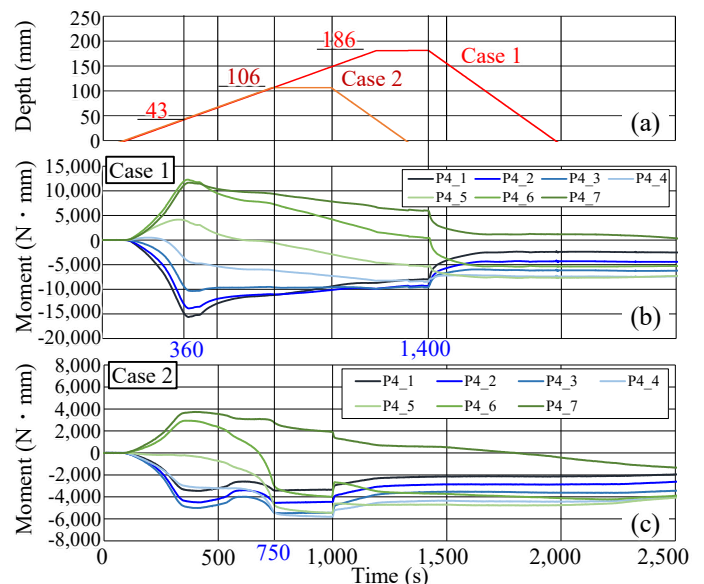


図-3 P4 における曲げモーメントの計測結果

3. 遠心载荷模型実験の再現解析

レグ貫入時の周辺地盤挙動を安全側に把握する解析手法を提案し、「2. 遠心载荷模型実験」で記述した実験結果を再現解析（シミュレーション）することにより、本解析手法の妥当性を検証した。

(1) 解析手法

解析モデルは、図-4 に示す 3 次元の弾塑性 FEM（Midas-GTS）を用いた。スパッドカン中心線を対称面とする 1/2 対称形モデルである。実験模型と同じ寸法の地盤サイズとして、杭は梁要素、スパッドカンはソリッド要素でモデル化した。鉛直方向の加速度を遠心実験と同じ 75G として初期応力を与えている。スパッドカンの設置深度毎の各モデルで 13.3mm（実寸法 1m）の強制変位を与え、この結果を重ね合わせてトータルの挙動として評価した。

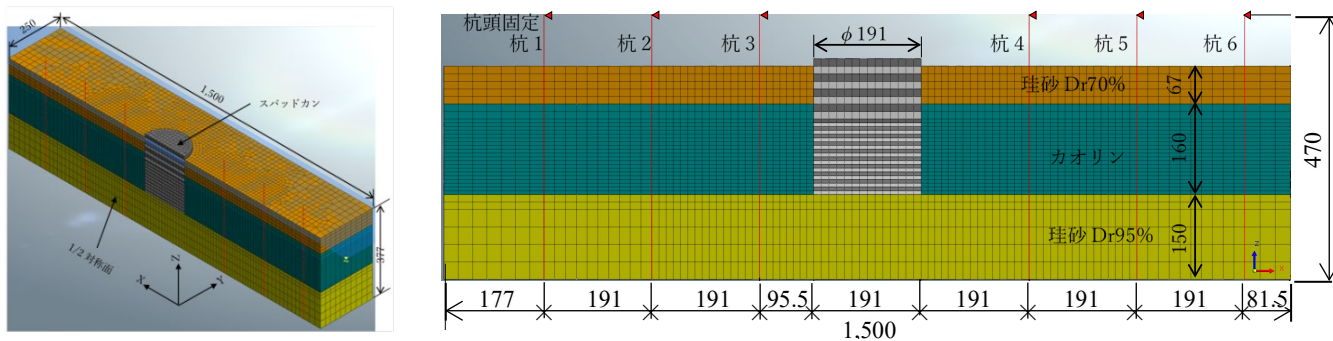


図-4 解析モデル（左：鳥瞰図，右：断面図）

(2) 解析結果

スパッドカン貫入による周辺地盤の変形状況として、押込み深度 0～13.3mm における変位コンター図（変形倍率×5）を図-5 に示す。

解析によって得られた各杭の最大曲げモーメントと実験結果を比較したグラフを図-6 に示す。解析値は実験値より全体的に大きい値となったが、スパッドカンからの離隔を 1.5D 以上確保すると、最大曲げモーメントの解析結果は実験結果と概ね一致した。

この結果から、曲げモーメントに関しては、1.5D より大きな離隔であれば、解析によって 10～30%程度安全側の値が得られると判断できた。

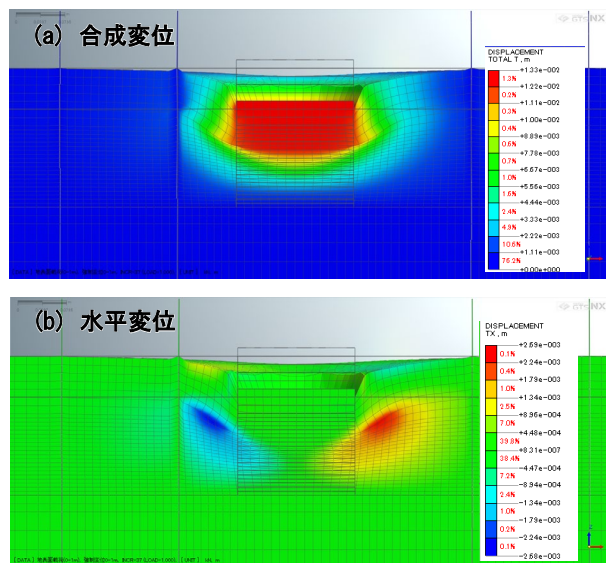


図-5 深度 0～13.3mm の変位コンター（変形倍率×5）

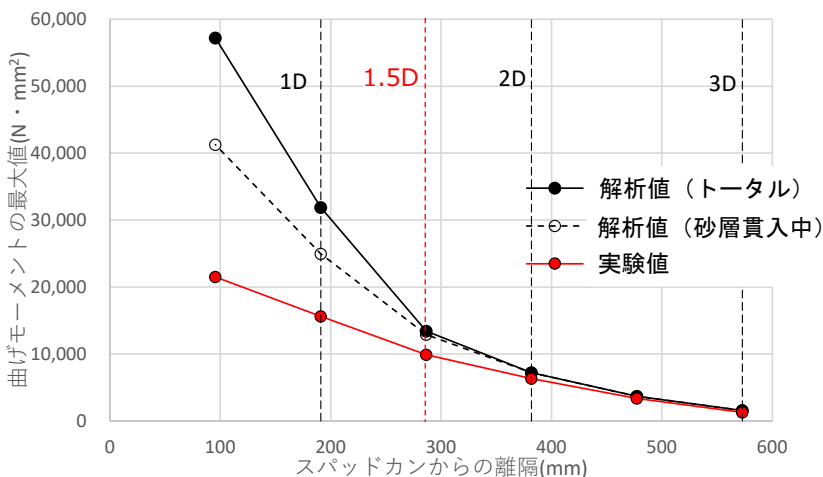


図-6 最大曲げモーメントとスパッドカン離隔の関係

4. 石狩湾新港洋上風力発電施設における岸壁構造の事前影響検討

石狩湾新港西地区-14m 岸壁前面にて、風車部材の積込みのために船体をジャッキアップする。極限支持力検討よりスパッドカン貫入量は 16.2m と想定し、岸壁からの離隔は施工制約上 29m(約 2D)と設定した。ここで、「3. 遠心載荷模型実験の再現解析」で提案した解析手法を適用し、岸壁構造への影響検討を実施した。

(1) 検討ケース

ケース 1 として、図-7(a)に示すようなレグ貫入時の岸壁影響を検討した。SEP 船が岸壁前面でジャッキアップしてタワー積出し作業中に、地震もしくは暴風が作用した時の岸壁への影響を解析によって算出し、元設計の常時発生断面力と足し合せを行うことで構造の健全性評価を実施した。検討には、岸壁背面地盤上に設置されたタワースタンドを考慮し、上載荷重として解析に反映させた。

ケース 2 として、図-7(b)に示すような施工完了後（タワースタンド撤去、レグ引抜後）の岸壁影響を検討した。ケース 1 にて算出した岸壁変位が施工完了後も 100%残留すると仮定し、元設計の地震時発生断面力と足し合せを行うことで、岸壁構造の健全性評価を実施した。検討には、将来的に岸壁上に設置されるコンテナクレーンによる地震時荷重も考慮した。

(2) 解析手法

元設計の発生断面力との合力としての評価が容易であることから、2次元平面ひずみ解析モデルを採用した。一方、奥行き方向における地盤変位の拘束により過大評価が懸念されたため、軸対象モデルにより3次元的な奥行きを考慮した場合の変位量を確認し、算出した低減率を用いて照査を実施した。また、スパッドカン下 1m を表層砂 (As1) の物性にするすることで共下がり表現、貫入後のスパッドカン上部空洞を強度低下させた弾性体に変更することでバックフィリングを表現した。

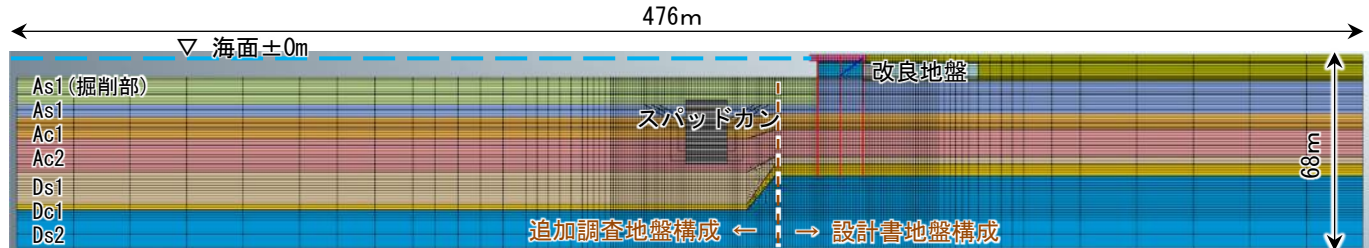


図-8 解析モデル（平面ひずみ解析モデル）

(3) 解析結果

ケース 1 において、岸壁頭部の水平変位は図-9 に示す通り 8.2mm となった。また、発生応力度の安全率 ($\sigma/\sigma_a + \sigma_b/\sigma_{ba}$)は許容値の 5 割以下となった。ケース 2 において、発生応力度は許容値以内となり、安全側に残留変位を考慮した場合においても、地震時の岸壁性能は確保されると判断できた。

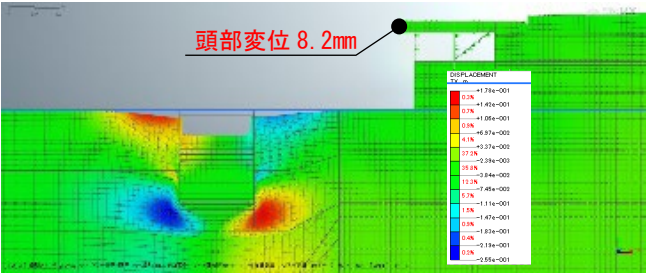


図-9 ケース 1 における水平変位コンター

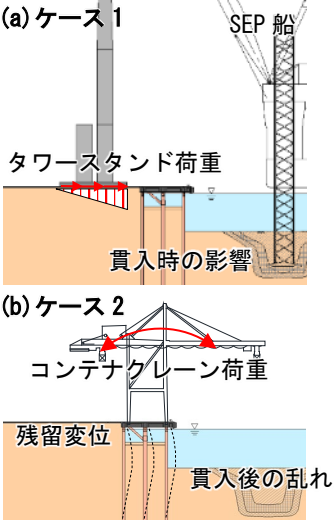


図-7 検討ケースの概念図

表-1 モデルの概要

解析領域	476m×68m（総要素数：11,435）
モデル	ソリッド要素：地盤，スパッドカン
	梁要素：鋼管矢板，鋼管杭，ストラット
	ジョイント要素：スパッドカン周囲
境界条件	底面：（水平）固定，（鉛直）固定
	側面：（水平）固定，（鉛直）ローラー

表-2 各ケースの発生応力と判定

検討ケース	発生応力度の安全率	判定
ケース 1 施工時	海側鋼管矢板：0.467	○
	鋼管杭：0.359	
	陸側鋼管矢板：0.415	
ケース 2 施工後	海側鋼管矢板：0.764	○
	鋼管杭：0.991	
	陸側鋼管矢板：0.851	

5. 石狩湾新港洋上風力発電施設における岸壁の施工時動態観測

(1) 岸壁前面におけるレグ貫入

風車部材の積込み時における SEP 船右舷側（岸壁側）のスパッドカン貫入量は 14m～17m であった。これは、事前に実施した極限支持力検討結果の 16.2m と概ね合致した。また、計 8 回の繰返し貫入による貫入量の増加は確認されなかった。

(2) 岸壁頭部の変位計による動態観測

岸壁頭部の動態観測位置を図-10、岸壁変位量の観測結果を表-3 に示す。変位量が計測点の中で最大である P1 における計測結果を図-11 に示す。岸壁変位量とレグ貫入との明確な相関はなく、各計測値ともに継続的に増加し、9 月上旬時点では海側に 3～6mm（初期値 2mm 除く）の変位量となった。ここで、5 月から 8 月にかけて月平均気温は表-4 に示す通り 12.9℃上昇しており、これによる熱膨張変位量は式(1)より 3mm と推算される。加えて、日気温変動に追従し 2mm の岸壁変動が生じた。以上より、本観測期間に生じた岸壁頭部の変位は温度変化の影響によるものと推定される。

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T = 10 \times 10^{-6} \times 20,000 \times 12.9 = 2.6\text{mm} \approx 3.0\text{mm} \quad (1)$$

ここで、 ΔL は熱膨張変位(mm)、 α はコンクリートの線膨張係数(1/K)、 L_0 は部材の初期長さ(mm)、 ΔT は温度変化量(K)である。

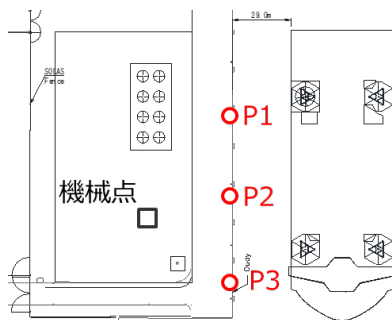


図-10 動態観測位置

表-3 動態観測結果

計測点	岸壁変位 (海側+)
P1	+5～8mm 初期値 2mm
P2	+4～6mm 初期値 2mm
P3	+2～3mm 初期値 1mm

表-4 気温変化（気象庁ホームページより）

気温 (°C)	5 月	6 月	7 月	8 月
月平均	13.8	19.3	23.8	26.7
日最高	19.2	24.2	27.8	30.9
日最低	9.4	15.2	20.7	23.7

月平均気温が 12.9℃上昇
8 月の日気温差は 7.2℃

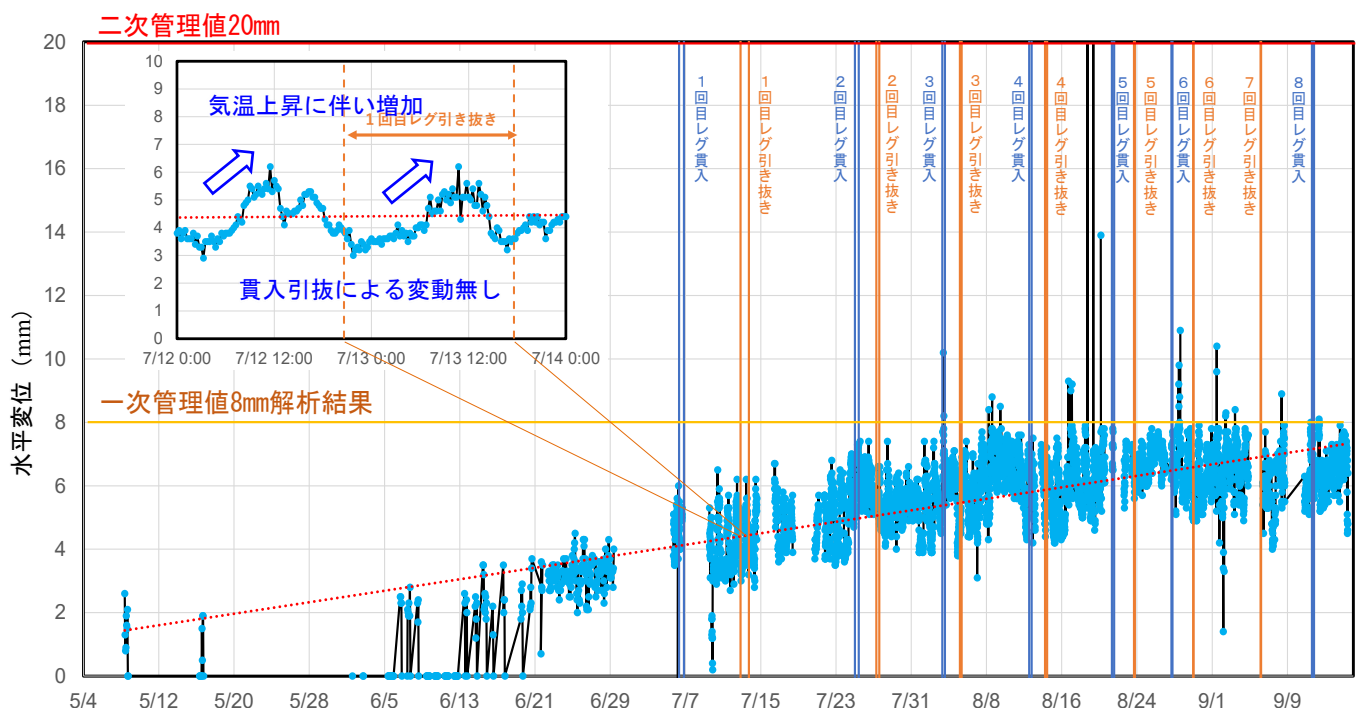


図-11 P1 における水平変位時系列

(3) 岸壁水中部の傾斜計による動態観測

岸壁頭部の傾斜計設置位置を図-12、計測結果を図-13に示す。レグ貫入によって、1mm 程度の海側への変位が生じているが、引抜時に陸側へ変位が戻っていることが確認された。傾斜計 No.1 の頭部水平変位の時系列変化を図-14に示す。レグ貫入・引抜によって、1mm 程度の変動があるが8回目の貫入まで確認しても変位が累積される傾向は無く、レグ貫入による岸壁影響は非常に微小かつ弾性範囲内であると考えられる。

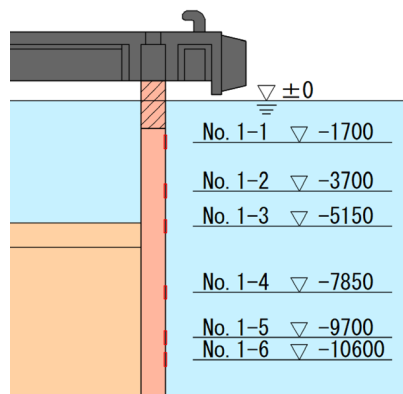


図-12 傾斜計の設置位置

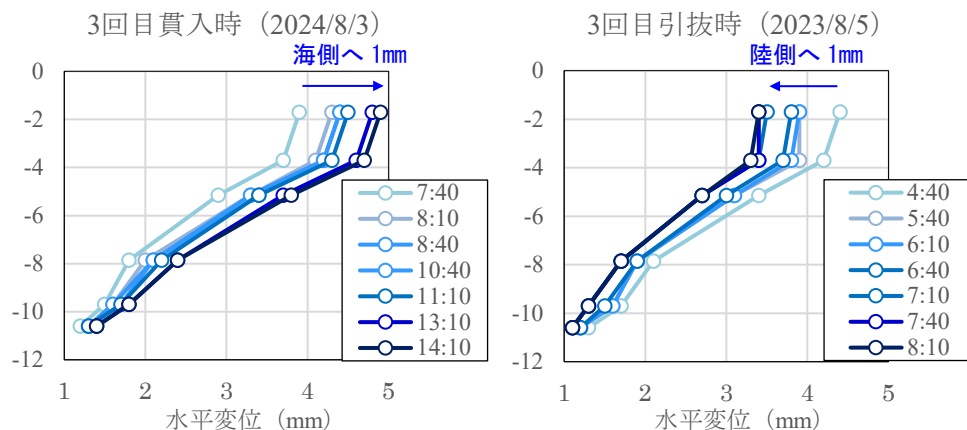


図-13 傾斜計 No. 1 における水平変位 (左：貫入時、右：引抜時)

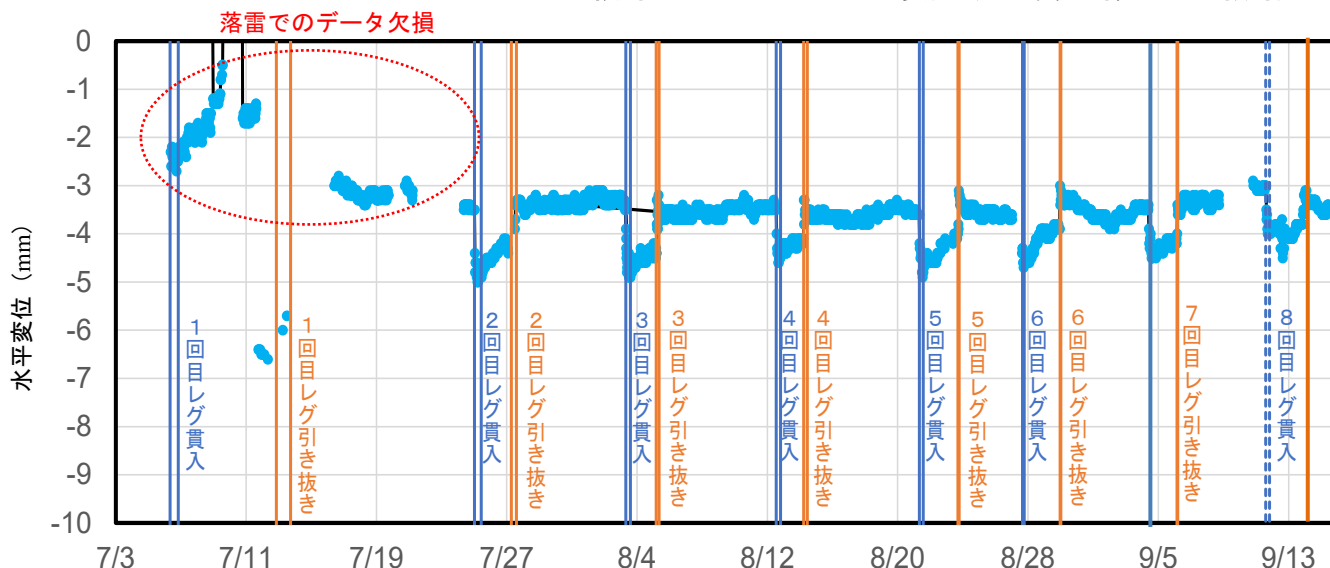


図-14 No1-1 における水平変位時系列

6. まとめ

SEP 船のレグ貫入による周辺影響を評価するために、遠心载荷模型実験にて周辺影響を計測し、FEM 解析にて再現を試みた。結果として、離隔距離が 1.5D 以上確保されていれば、概ね実験結果が解析によって再現できることが確認された。この定量評価手法を用いて、石狩湾新港洋上風力発電施設の洋上施工における岸壁影響評価を実施した。ここで、岸壁との離隔距離は 2D 程度であり、本評価手法の適用範囲内である。検討の結果、岸壁頭部における変位量が 8.2mm となり、また応力度も許容値内に収まった。また、実施工時において変位計と傾斜計による動態観測を行った。観測の結果、3~6mm の岸壁変位量が確認されたが、温度変化によるものと推察された。また、計 8 回の繰返し貫入による変位の累積は確認されず、レグ貫入による岸壁影響は非常に微小かつ弾性範囲内に収まったと考えられる。

今回の実績により、大深度のスパッドカン貫入時における周辺構造物への影響検討および実現象が明確となった。今後の案件においても同様の課題が想定されるため、本解析手法の影響予測精度のさらなる向上を図ることにより、洋上風力発電事業のさらなる拡大への貢献を目指す。