

洋上風力発電基地港湾整備における港湾工事の 課題解決事例について

今泉 孔佑

関東地方整備局 鹿島港湾・空港整備事務所 第三建設管理官室

(〒314-0021 茨城県鹿嶋市栗生2254)

現在2050年カーボンニュートラルの実現に向け、再生可能エネルギーが注目される中、洋上風力発電の設置に利用される基地港湾の整備が全国で進められている。その一つである鹿島港における基地港湾の整備事業では、岸壁整備を新技術である疑似重力式（地盤を固化処理する工法）を用いて実施した。しかし地盤改良杭の高止まりが発生し、設計深度までの地盤改良が不能となった。そこで高圧噴射攪拌にて未改良部を打ち継ぎ造成することで所定の地耐力確保に成功した。

本稿では、前例が少ない疑似重力式の岸壁整備における地盤改良工事で発生した課題の解決事例を報告する。

キーワード 基地港湾、疑似重力式、地盤改良工事、高止まり

1. はじめに

近年、我が国ではカーボンニュートラルが重要な課題として位置づけられ、持続可能な社会資本の整備が全国で進められている。鹿島港湾においても、再生可能エネルギーの普及の一つである洋上風力発電の導入促進に向けた取り組みを行っている。

洋上風力発電とは海上に風車を設置し発電を行うことであり、陸上風力発電に比べて輸送・設置の制約が少ないことから欧州を中心に導入が拡大している。日本においても普及促進に向けた整備が行われており、鹿島港沖では約680haを対象に、大型の風車19基を設置し年間約16万kW（7万世帯分の年間消費量に相当）を行うプロジェクトが計画されている。そして本稿で紹介する海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾（以下基地港湾という）は洋上風力発電の整備事業の一環である。

基地港湾とは洋上風力発電設備の設置及び維持管理に利用される港湾のことであり、現在（令和6年1月時点）全国で5港が基地港湾に指定されている。

自身が現場管理を担当する鹿島港も基地港湾に指定されており、令和6年からの供用開始に向け工事が進められている。

本稿では基地港湾の整備に際し行った地盤改良工事の概要と施工中発生した課題について示すとともに、課題解決の成果を報告する。

2. 工事概要

(1) 概要

図-1は本港で行った地盤改良工事の概況である。風車

部材を取り扱うタワー載荷部側と軽量な部材を取り扱うタワー非載荷部側に分けられ、タワー載荷部側は巨大な資機材の荷重が作用することから、通常の岸壁が約20kN/m²程度であるのに対し約200kN/m²と通常の港湾施設の約10倍の地耐力を必要とする。

本稿では施工中に課題が発生したタワー載荷部側の地盤改良工事について報告する。



図-1 概況図

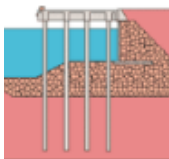
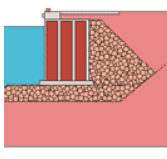
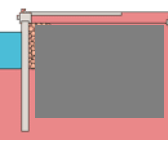
(2) 設計

表1は工法の比較検討結果である。前述のとおり200kN/m²の地耐力を有することが可能な以下3つが候補として選定され、費用、施工期間、品質全てにおいて疑似重力式が優れた。

また栈橋式は強大な荷重に対応するため大口径の杭を支持層へ30～40m根入れする必要があるものの対応する施工機が日本にあまりないこと、重力式はケーソンの底面反力が高いため、底版厚を通常よりも厚くする必要があり製作・運搬時に必要喫水が確保できない恐れがあることなど施工が困難であった。

対して疑似重力式は新技術のため前例が少ないものの、地盤改良機の調達に問題が無いこと、主に陸上工事となるため海象の影響を受けにくいことなどが優れていた。

表-1 工法比較検討結果

	栈橋式	重力式	疑似重力式
概要	栈橋を設ける 	ケーソンを設置 	矢板を打設し背後を地盤改良 
費用	3728 百 万 円 ×	2360 百 万 円 ×	2260 百万円 ○
期間	2 年 0 ヶ 月 ×	2年0ヶ月 ×	1年11ヶ月 ○
品質	問題なし ○	底面反力が高い ×	問題なし ○

(3) 施工計画

a) 疑似重力式について

本工事で採用した疑似重力式とは、打設した矢板の陸側背後を土砂で埋立て後に固化処理工法により地盤改良し、所要の強度や形状を有した固化改良体を形成することで、重力式構造物相当の本体工とする構造形式である（図-2）。

コンクリートの塊を形成するため、自重によって地震や土圧などの外力に対して抵抗するのが特徴である。

b) 地盤改良概要

地盤改良工事はスラリー攪拌（地盤中にセメント系固化材を攪拌翼で円柱状に混合する工法）にて改良し、地盤の支持層（DL-14.6m）まで改良を行うこととした。

Ds層（硬質地盤）を一部地盤改良する必要があるため硬質地盤対応の地盤改良工法を選定する必要があったが施工性に問題はなかった。

3. 改良杭の高止まりについて

(1) 高止まりの発生

本工事において発生した予期せぬ課題が、改良杭の高止まり（所定の改良深度に満たない）である。

設計深度DL-14.6mに対し、DL-8.2～-13.1mの範囲において地盤改良機のロッドが挿入出来ず、計画662本のうち146本において高止まりが発生した。そこで調査ボーリングを実施したところ高止まりの原因は地中の転石であることが分かった。

(2) 未改良部が発生することによる危険性

岸壁の安定性を検討するに当たり、滑動、転倒、端趾圧（堤体工の端部に作用する単位面積当たりの合力）の照査を原設計において行った（図-3）。表-2はその結果である。外部安定の照査では L1 地震時の滑動が最も厳しく、内部安定の照査では L1地震時の端趾圧が最も厳しい。

これは計画下端まで改良した際の数値である。未改良部ができることにより抵抗値が減少し、安全率1を上回る可能性があることから、仮に高止まりで深さを未改良とした際の危険性は高い。

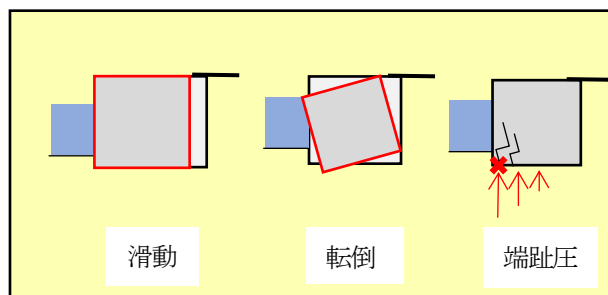


図-3 破壊図

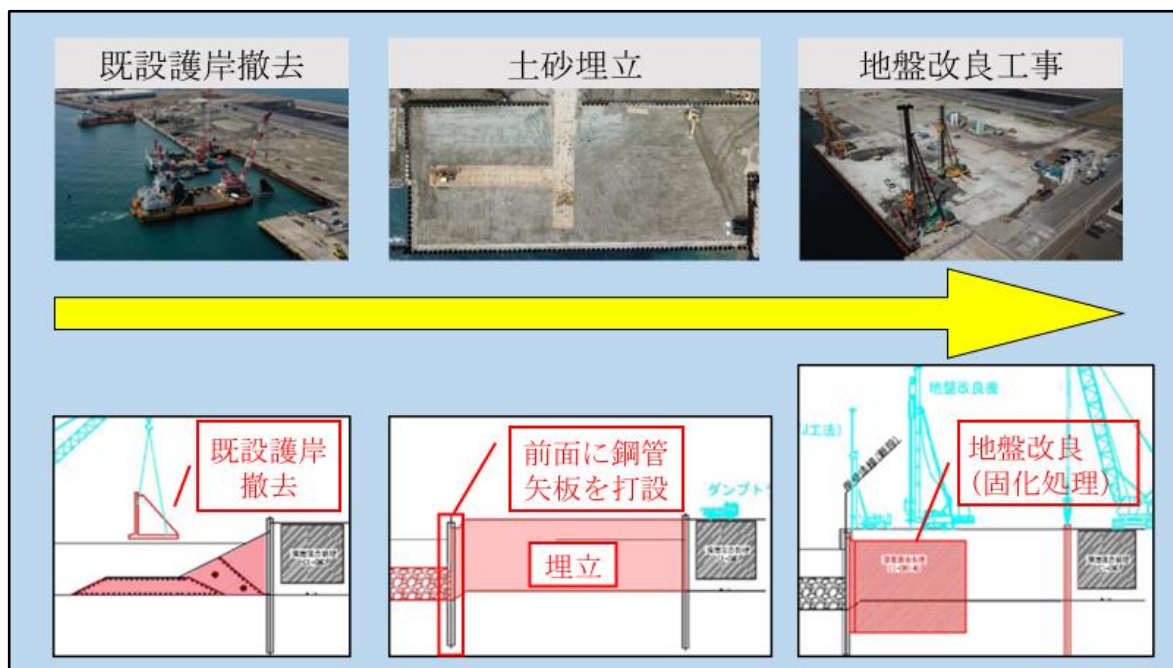


図-2 疑似重力式地盤改良工事の流れ

表-2 安定照査結果（原設計）

照査項目			
外部安定	永続状態	滑動	$0.543 \leq 1.000$
		転倒	$0.198 \leq 1.000$
	地震時	滑動	$0.912 \leq 1.000$
		転倒	$0.453 \leq 1.000$
	暴風時	滑動	$0.369 \leq 1.000$
		転倒	$0.167 \leq 1.000$
内部安定	永続状態	端趾圧	$0.525 \leq 1.000$
	地震時	端趾圧	$0.976 \leq 1.000$
	暴風時	端趾圧	$0.643 \leq 1.000$

(3) 施工法の検討

未改良部の施工にあたり、工法の検討を行った。

表-3は施工法についての比較である。案①は高止まり以深を高圧噴射攪拌（高圧で固化材を噴射し改良）にて打ち継ぎ造成する工法で、案②は先行削孔し全深度を改良する工法である。費用、施工期間、品質全てが良好な案①を採用した。

品質について、疑似重力式は地盤を一体化させ一つのブロックのようにする工法であることから、先行して行った改良体と付着させる必要がある（図-6）。しかし案②では改良体単体の品質には問題がないものの先行削孔により既設改良体と付着が出来ないことを問題視した。

表-3 施工法比較

	① 未改良部を高圧噴射攪拌	② 全深度を先行削孔しスラリー攪拌
施工手順	1. スラリー攪拌にて改良体を造成 2. 高止まり改良体の中止部を先行削孔 3. 先行削孔箇所にもッドをいれ、高圧噴射攪拌にて所定深度まで改良	1. 全深度を削孔機で先行削孔 2. 撤去部を残土で埋め戻し 3. スラリー攪拌にて施工
費用	291百万円 ○	296百万円 ×
期間	機材調達：1ヶ月 先行削孔：2本/日 高圧噴射：4本/日 ○	機材調達：4ヶ月 先行削孔：2本/日 スラリー攪拌：2本/日 ×
品質	未改良部のみの高圧噴射による改良のため、先行改良体との付着は問題ない。 ○	改良域全面の障害物を全て破碎できるため、改良体単体の品質は問題ないが、後施工のスラリー攪拌工法では先行改良体への付着ができない。 ×

①高圧噴射

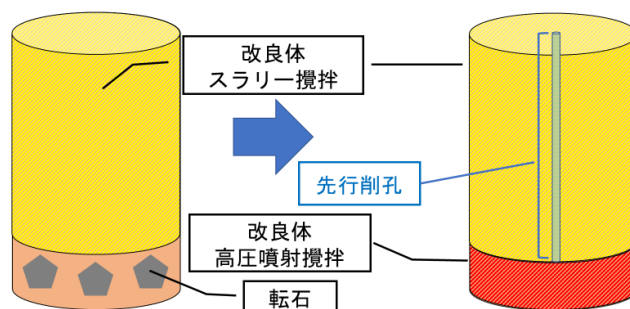


図-4 未改良部を高圧噴射攪拌

②先行削孔

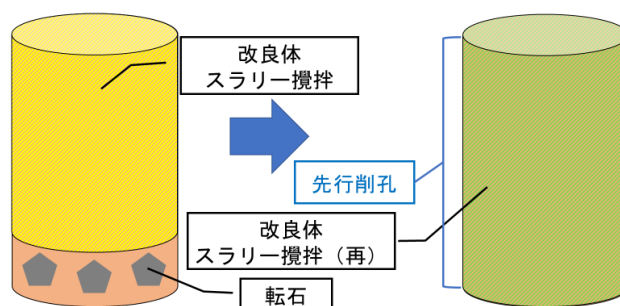


図-5 全深度を先行削孔



図-6 改良体出来型

(4) 調査ボーリング計画

改良杭の品質確認のためのボーリングは、本施工前の試験施工ボーリングと、本施工後の事後調査ボーリングを行った。以下確認項目である。

- 所定深度までの改良
- スラリー攪拌部と高圧噴射攪拌部の一体化
- 転石が改良体に取り込まれ一体化している
- 強度（強度発現までに時間を要することから事後調査ボーリングのみ実施）

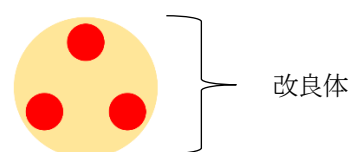


図-7 ボーリングコア採取箇所（3箇所）

4. 高止まり対応の結果

(1) 改良結果

a) 調査法

改良結果の確認については、エリアごとに改良体を選定して事後ボーリング調査を実施し、コア採取による目視での一体化の確認、一軸圧縮強度試験による強度の照査を行った。

b) 調査結果

コアの目視検査では所定の深度まで改良されていることを確認した（図-8）。また高圧噴射部に石材がくすみ込まれ改良体と一体化していることを確認した。（図-9）

図-10は高止まり対応を行った箇所の一軸圧縮強度試験結果である。高止まり以深を含め、全ての深度で所定の圧縮強度を得た。



図-8 ボーリングコア

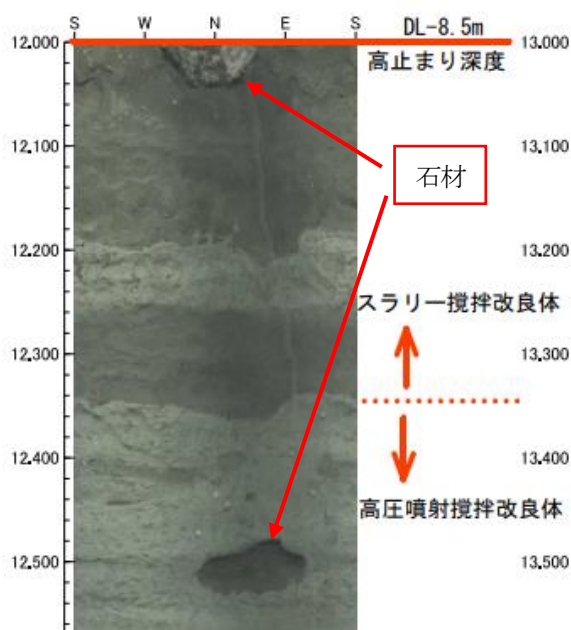


図-9 改良杭コア画像

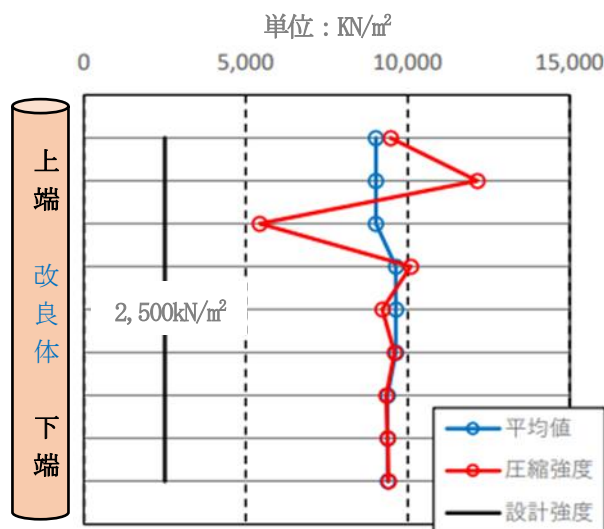


図-10 一軸圧縮強度試験結果

(2) 高止まり対応の成果

高止まり対応を通して得られた成果を以下に示す。

a) 疑似重力式工法における高止まり時の対応法

疑似重力式を用いた岸壁整備は事例が少ないことから、地中の転石を原因とした高止まり時の対応法について確立されていなかった。改良体の一体化を重視した対応法は、今後同様の事例が発生した際に活用が期待できる。

b) 今後の基地港湾整備事業への活用

現在カーボンニュートラルに向け洋上風力発電が注目されており、基地港湾の整備は全国で進められている。岸壁整備に当たり疑似重力式を用いた地盤改良工事今後も予測されることから、設計・計画段階での地中障害物を原因とした高止まり対応法の確立が期待できる。

5. おわりに

現在、基地港湾の整備は全国で進められているものの基地港湾が改正港湾法により指定されたのは令和2年であることから整備事例が少ない。また疑似重力式を用いた岸壁整備についても最新の技術であることから前例が少ない。よって本稿で紹介した事例は今後の基地港湾整備にとって大変希少な事例になったと思われる。

本稿で紹介した高止まり対応については、今後同様の工事を行う際に参考になると思われる。原因と推測される石材混入防止対策や高止まりを予期した設計・工法の検討が今後必要になるだろう。

今後も全国で基地港湾の整備は行われる予定だ。安心・安全な基地港湾を、計画通り整備できるよう疑似重力式工法の更なる改善が求められる。