

# 2022年度成果報告会

## 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 (岩地盤におけるジャケット基礎用杭設計 最適手法の確立及び施工技術実証)

ジャパン・リニューアブル・エナジー(株)

Fugro Australia Marine Pty Ltd

2023年2月3日

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2021年12月

終了(予定): 2023年3月

## 2. 最終目標

岩地盤におけるジャケット基礎の杭設計における最適手法の確立により、従来技術(重力式基礎)比、20%以上の資本費削減を目指す。

実現には杭基礎の**杭長と杭径の最適化**が重要で、開発に当たっては欧州の最新知見を取り込んだ杭設計、杭の載荷試験等を行い杭設計手法の適用性検証を行う。

## 3. 成果・進捗概要

### ① 杭設計のための重要パラメータである「岩の変形係数」と「掘削孔壁の粗度」の測定手法の開発

- 先行する欧州事例の調査結果を踏まえて適切な調査手法を選定し陸上試験地にて実際の杭の掘削孔で実証試験を行い、実効性及び国内への適用性について検証した。

### ② 杭設計手法の有効性検証のための杭載荷試験の実証

- 杭の軸方向抵抗力に関して、単純引っ張り、繰り返し載荷試験を陸上試験地にて実施し、今回想定した設計手法が適用できる現地データを取得した。

# 事業概要

## 3. 成果・進捗概要

- ③ 岩盤におけるジャケット基礎杭の設計手法の妥当性と経済合理性の検証
  - ・ 今後、欧州と日本の地盤特性が異なる可能性がある中で欧州の杭設計手法の想定モデル通りの試験結果が得られるかの検証する。
  
- ④ 現地試験仕様の再検証/最適化
  - ・ 今後、①～③の想定する設計手法・周面摩擦力(地盤特性)・掘削・杭建込工法の確実な実施し、見直す。

# 背景と目的

## ●背景

- 政府の2050年のカーボンニュートラル宣言に伴い、2040年までに3,000万～4,500万kWの洋上風力発電の案件形成が目標として掲げられている。
- その目標達成には着床式洋上風力の大量導入が必要であり、国内ポテンシャル海域に一定比率分布する岩地盤への導入促進のための低コスト化技術の確立が不可欠である。
- 杭の打設が困難な硬岩盤サイトにて、従来岩地盤への重力式基礎の適用性が高いとされてきた一方で、欧州では岩地盤に対し杭式ジャケット基礎にて設計認証取得事例があり、当該欧州の知見を活用し、国内事業への適用性を実証することで他形式に比べてコスト低減が期待できる。

## ●目的

本実証事業では、陸上での杭の載荷試験等を通して、岩地盤への杭式ジャケット基礎の適用に当たって重要な課題である杭設計手法の妥当性検証並びに杭設計の最適化を実現することを目的とする。

# 開発目標とその効果

## ● 開発目標

杭の打設が困難な岩地盤サイトにおける着床式洋上風力発電事業の資本費(発電設備導入のためのEPC費用および撤去費)について、従来技術(重力式基礎)に比して**20%以上削減**することを目標とする。

実現には杭基礎の**杭長と杭径の最適化**が重要で、開発に当たっては欧州の最新知見を取り込んだ杭設計、杭の載荷試験等を行い杭設計手法の適用性検証を行う。

## ● 効果

- 着床式洋上風力発電のポテンシャルにおいて岩地盤サイトは2割程度存在するため、当該技術の導入により国内における洋上風力発電事業の適地が最大2割程度拡大する可能性がある。
- 本実証事業で想定しているジャケット基礎は、モノパイル基礎と異なり現時点で国内に製造工場等のサプライチェーンが存在し、日本国への経済波及効果が大きいと期待できる。

# 開発項目の整理

## 【ジャケット基礎杭設計手法の整理】

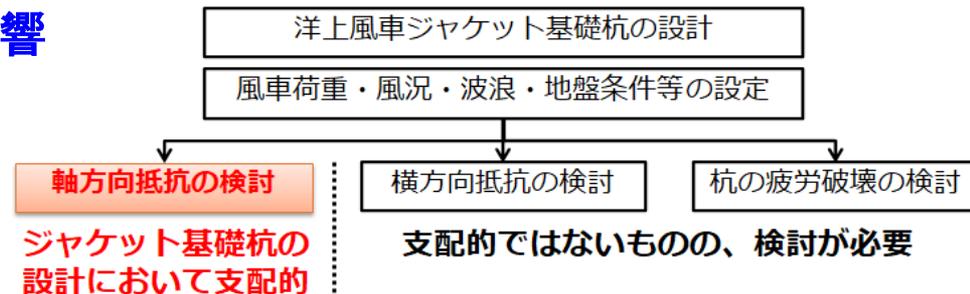
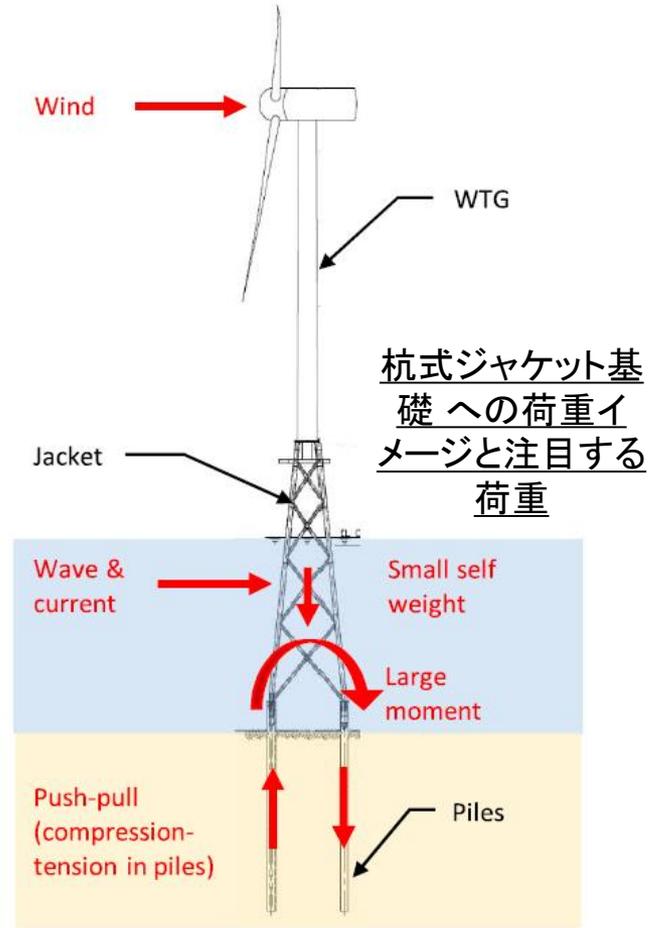
- コストインパクトの大きい杭基礎の杭長と杭径の合理化が重要



- 杭長の大きな決定要因の1つが、岩盤と杭を付着させるためのグラウトと岩地盤の間の周面摩擦度であり、周面摩擦度に大きなインパクトを与えるパラメーターは次の通り整理ができた。この結果を踏まえ下記の4つのパラメーターを漏れなく試験できるよう事業内容を策定した。

- A) 岩盤の変形係数 ( $E_m$ )
- B) 掘削した孔壁の平均粗度 ( $\Delta r$ )
- C) 掘削した孔の直径 ( $D$ ) が周面摩擦に影響を与える度合 (杭径効果)
- D) 繰り返しによる劣化の低減係数

- この結果を踏まえ下記の4つのパラメーターを漏れなく試験できるよう事業内容を策定した。



# 開発項目 と事業フロー

洋上風力発電事業候補海域

設計

施工検討

陸上試験

適地選定・地元調整

地質調査

その他現地調査

概略設計 / 概略施工検討

基礎形式 + 概略施工検討の決定

設計手法の整理

粗度・変形係数算出手法  
 載荷試験手法案の策定

試験地候補の抽出

ボーリング調査・室内試験

試験地の選定

掘削・杭建込手法の検討

② 載荷試験の実施  
 (掘削・杭建込含む)

本事業の実施対象

①～④

① 変形係数・粗度計測  
 手法の実証

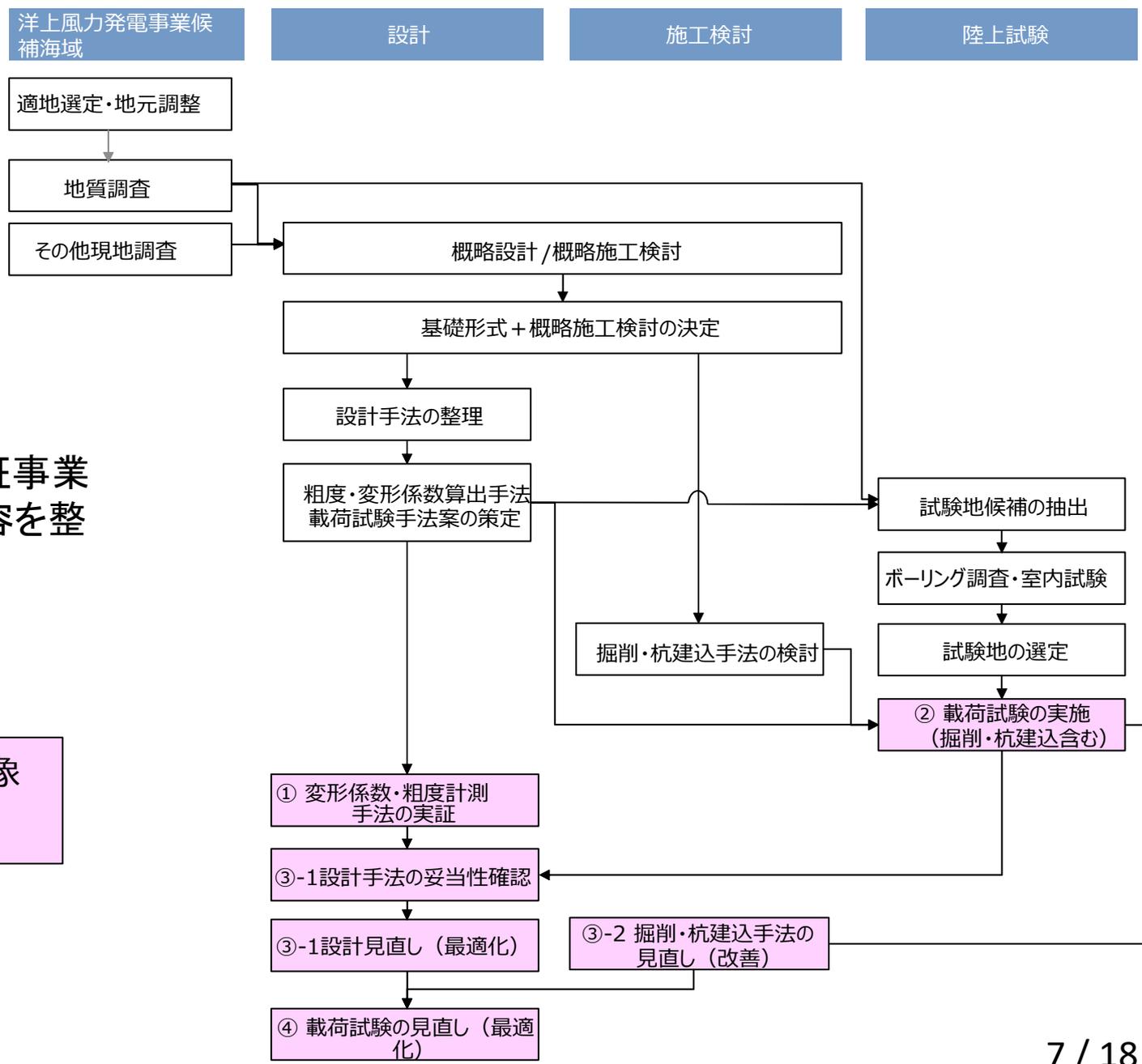
③-1 設計手法の妥当性確認

③-1 設計見直し (最適化)

④ 載荷試験の見直し (最適化)

③-2 掘削・杭建込手法の  
 見直し (改善)

右の図表は、本実証事業  
 で実施する事業内容を整理したフロー図



# 実施工程

開始 : 2021年12月

終了(予定): 2023年3月

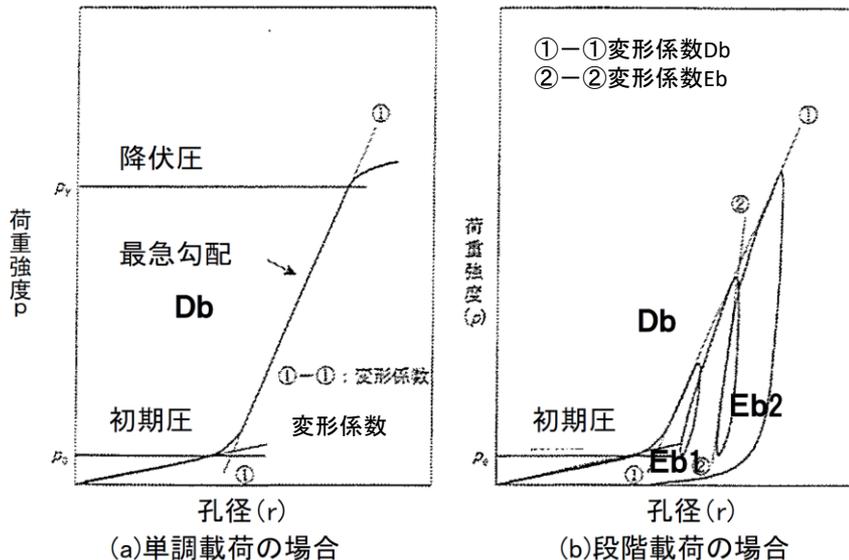
※スケジュールの遅延により、2022年度は①、②の一部の実施となった。

		2021年度						2022年度								
		4Q				1Q		2Q			3Q			4Q		
		12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
<b>陸上試験地における掘削・載荷試験の実証</b>	実施対象															
変形係数算出に必要な原位置試験	①															
杭・機材調達期間	①、②															
試験地の造成	②															
掘削・杭現場溶接・杭建て込み	①															
載荷試験	②															
計測結果の取りまとめ	②															
撤去工	②															
<b>試験結果を踏まえたコストダウン効果の検証と今後の検討課題の整理</b>																
試験結果の設計パラメーターへの変換	③															
試験結果を踏まえた杭設計と施工計画の策定	③															
コスト削減効果の検証	③															
更なる最適化、低コスト化に向けた開発課題の整理	④															

# 実施対象①: 変形係数・粗度計測手法の実証

## A. 岩盤の変形係数 ( $E_m$ )

- 国内・海外の設計手法・基準などから、複数の算出手法が候補として存在するため、それぞれの手法に対して机上検討のみならず、必要に応じて陸上試験地での現地試験を行い、適切な変形係数の算出方法について整理を行った。



図\_ 孔内水平載荷試験による変形係数の算出方法のイメージ



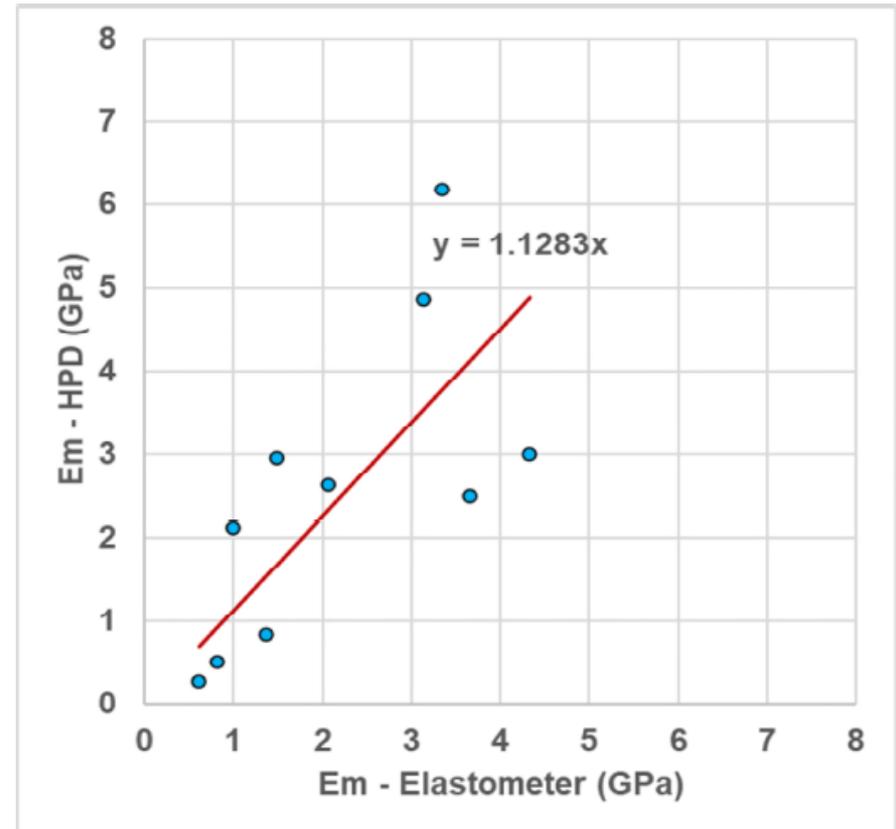
図\_HP D(左)とエラストメーター(右)の写真

# 実施対象①: 変形係数・粗度計測手法の実証

## A. 岩盤の変形係数 ( $E_m$ )

### エラストメーターとHPDの岩盤の変形係数 $E_m$ の比較

- エラストメーターとHPDの各測定箇所および各測定深度での岩盤の変形係数  $E_m$  の比較を右図に示す。試験地全体としては  $E_m$  の値のばらつきは大きいですが、同じ測定箇所・測定深度同士で2つの方法による  $E_m$  を比較すると近い値をとっていると言える。



図\_ エラストメーターとHPDの変形係数  $E_m$  比較

# 実施対象①: 変形係数・粗度計測手法の実証

## B.掘削した孔壁の平均粗度( $\Delta r$ )

- 今回想定する大口径の掘削での粗度計測の国内事例が見つからない。先行する欧州事例の調査結果を踏まえて適切な調査手法を選定し、陸上試験地にて試験杭の掘削孔で実証試験を行い、実効性及び国内への適用性について検証した。



写真\_くし型ゲージ動作確認

精密型取りゲージ(くし型ゲージ)を利用。コンクリート片でくし型ゲージの測定動作を事前確認した。型取り後の記録・計測は、デジタル画像処理を実施した。

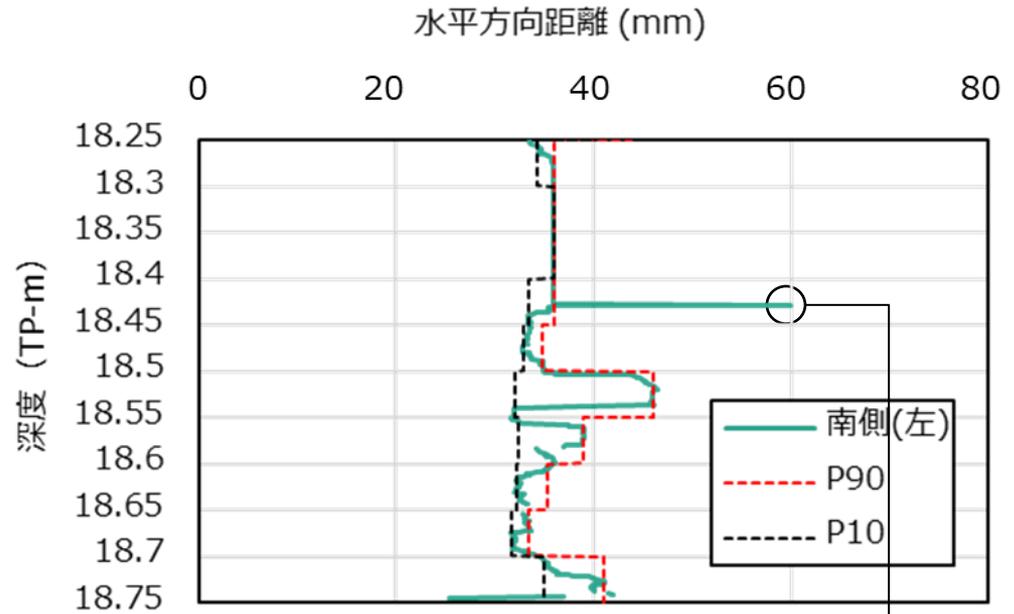


写真\_くし型ゲージ動作確認(接写) 11 / 18

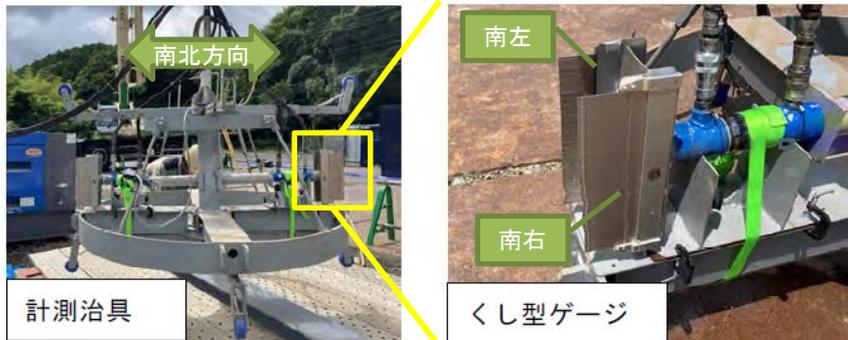
# 実施対象①: 変形係数・粗度計測手法の実証

## B. 掘削した孔壁の平均粗度 ( $\Delta r$ )

- くし型ゲージ計測区間を、セグメントに分割し、そのセグメント長さを3種類設定して評価した。
- 各セグメント内で、計測4地点(南左、南右、北左、北右)それぞれについて、くし突出長読み取り値の90パーセンタイル、10パーセンタイルを求め、その差の4地点平均値をそのセグメントの平均粗度とした。



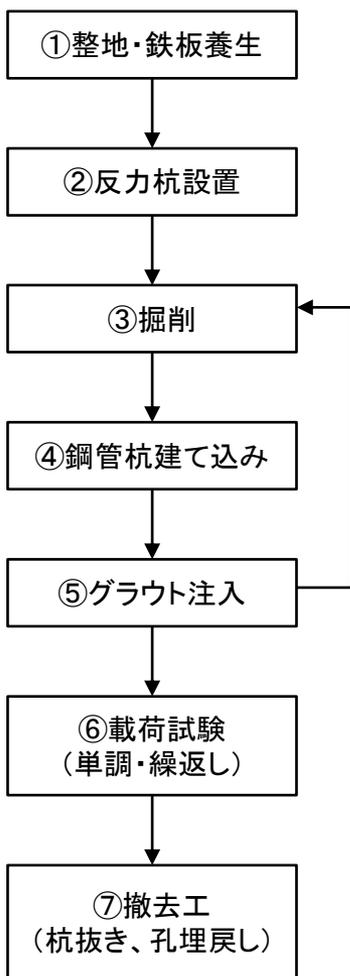
図\_ 水平方向粗度計測結果



このような特異点を省くために、区間データの大小順に並べてその10%と90%の値を取るパーセンタイル方法を採用した。

## 実施対象②: 載荷試験の実施(掘削・杭建込含む)

- 現地の整備(整地)後、地盤の掘削、試験杭の建込、グラウト打設、杭の引抜を実施した。
- 現在、全試験箇所にて杭の設置(中杭まで)が完了した。
- 試験準備完了後、上杭を溶接し、杭の引抜載荷試験を実施した。



①整地状況



②反力杭打設状況



③地盤掘削準備状況  
(ケーシング打設状況)



③地盤掘削状況



④試験杭の建て込み状況



⑥引抜載荷試験状況

## 実施対象②: 載荷試験の実施(掘削・杭建込含む)

### 杭設計手法の有効性検証のための杭載荷試験の実証

- 単調引抜き試験(3本、異なる杭径で各1本)
  - 荷重を単調に増加させ、杭が破壊(岩盤とグラウトの周面摩擦が切れ変位が急増)する時点の荷重(極限引抜き抵抗力)を計測する。
  - 杭径を変えて試験を行い、杭径と極限引抜き抵抗力との関係を検証する。
- 軸方向繰返し引張り試験(4本)
  - 様々な荷重強度・振幅の条件下で繰返し載荷を行う。繰返し載荷の下では、極限引抜き抵抗力が単調引抜きに比べてどの程度低下(劣化)するのかを把握する。

表 杭載荷試験の内容と目的

N O	試験内容	杭径	目的
1	単調 引張 (計3ケース)	小	・軸方向摩擦力設計に関し、杭の設計手法の適合性を評価する。 ・洋上杭施工に資する情報収集
2		中	
3		大	
4	繰返し 引張(1-way) (計4ケース)	大	・繰返し荷重による岩盤の劣化による低減係数を設定するために、繰返し荷重により安定性図を作成し、軸方向抵抗力の劣化の度合を評価する。
5			
6			
7			

## 実施対象②: 載荷試験の実施(掘削・杭建込含む)

前述の単調載荷試験、繰返し載荷試験の結果により、下記C,Dを評価する。

### C. 杭径効果

周面摩擦力と杭径の逆相関を、3つの異なる杭径に対して行う単調引張試験を通じて検証実施する。

### D. 繰返しによる劣化の低減係数

杭の載荷試験によってこれら重要パラメーターのデータの取得、妥当性の検証を行う。

- 杭設置から載荷試験装置による杭への載荷を実行する段階で杭・グラウト・地盤において想定外の挙動等が生じず、目的の観測データを取得して載荷試験が完了できることを実証する。
- 陸上試験地にて大口径の掘削および杭建込(グラウト充填)を行う中で、掘削・杭建込・グラウト充填手法・掘削機材パフォーマンス等を検証し、想定した岩地盤におけるジャケット基礎杭の設計手法の妥当性を確認する。

## 実施対象(③、④)

前述の単調載荷試験、繰返し載荷試験後に、③、④を実施する。

### ③岩盤におけるジャケット基礎杭の設計手法の妥当性と経済合理性の検証

#### ③-1: 設計手法の妥当性確認、設計見直し(最適化)

①、②で実施した陸上試験地での試験及びその後のデータ整理結果を活用し、設計手法の妥当性を検証する。当該結果を活用し、岩地盤における洋上風車の基礎杭の設計を実施する。

#### ③-2: 掘削・杭建込み手法の直し(改善)

③-1の結果をもとに岩盤掘削と杭建込の施工計画の最適化を図る。  
以上を踏まえて資本費を再算出し、岩地盤における従来技術(重力式基礎)と比較した場合の低コスト化のインパクトを検証する。

### ④現地試験仕様の再検証/最適化

①～③を通して得られた課題を整理し、想定していた設計手法・周面摩擦力(地盤特性)・掘削・杭建込工法の最適化を図り、より確実にコスト効率よく実施できる杭の載荷試験手法の仕様(含む掘削手法、杭、グラウトの仕様)等について再設定を行う。

# まとめ

## ① 変形係数と掘削孔壁の粗度の測定手法の開発

### ➤ 変形係数 $E_m$ について

- エラストメーターとHPDによる岩盤の変形係数 $E_m$ について比較を行った結果、同じ測定箇所・測定深度同士で2つの方法は近い値が得られた。

### ➤ 平均粗度 $\Delta_r$ について

- 大口径の掘削孔壁面の粗度の計測方法を開発し、本事業を通して実証を行った結果、くし形ゲージが有用だった。
- 試験杭にくし形ゲージを挿入し、孔壁粗度を実測した。3種類のセグメント長さの下限・上限値として、10パーセンタイル、90パーセンタイルを採用し、その差を $\Delta_r$ とした。

## ② 杭設計手法の有効性検証のための杭載荷試験の実証

- 試験杭の極限引抜抵抗応力度を欧州の最新知見による手法で推定した結果と試験による得られた結果と比較して検証を行った。
- 試験杭の極限引抜抵抗応力を確認後、杭を完全に引き出して状態を確認した。固化グラウトの剥離が確認されたが、引抜き試験時あるいは撤去引抜き時に発生したのかは不明である。

# 今後の研究課題

- ① 変杭設計のための重要パラメータである「岩の変形係数」と「掘削孔壁の粗度」の測定手法の開発
  - ・ 今回は試験杭近くのボーリング位置での室内試験結果を用いて変形係数を評価したが、試験原位置(or原位置にみなし)のボーリング調査が必要である。
  - ・ 平均粗度のセグメント長さの設定については引き続き検討する。
- ② 杭設計手法の有効性検証のための杭載荷試験の実証
  - ・ 掘削完了から打設までに孔壁崩壊が発生する可能性があるため、グラウト打設直前の堆積物の状況を確認する。
  - ・ グラウトの硬化品質に悪影響を及ぼす可能性のあるスライム層の除去を徹底する。
- ③ 岩盤におけるジャケット基礎杭の設計手法の妥当性と経済合理性の検証
  - ・ 欧州と日本の地盤特性が異なる可能性がある中で欧州の杭設計手法の想定モデル通りの試験結果が得られるかの検証が必要となる。
- ④ 現地試験仕様の再検証/最適化
  - ・ ①～③の想定する設計手法・周面摩擦力(地盤特性)・掘削・杭建込工法の確実な実施と見直しをする。