

岩盤における洋上風力モノパイル式基礎の DDD 工法による施工に関する解析的検討

五洋建設（株） 正会員 ○三浦成久・松本正一郎・三好俊康 非会員 アティア アハメド

1. はじめに

日本では着床式洋上風力発電所の候補地が露岩域などの岩盤となっている場合もあり、岩盤における大口径杭基礎の施工方法が課題となっている。岩盤における大口径杭施工技術の一つに、岩盤の先行掘削技術であるドリリングと、油圧ハンマーによる打撃貫入工法を組み合わせた Drive-Drill-Drive 工法（以下、DDD 工法）があり、ヨーロッパなどでは、大口径のモノパイル式基礎などで DDD 工法による施工が実施されている。そのため、日本の着床式洋上風力発電設備基礎においても DDD 工法の導入が期待されている。しかしながら、砂質土を対象とした研究¹⁾はあるものの、ドリリングによる岩盤への打撃貫入性の変化の評価についての研究は十分に行われておらず、岩盤への適用性の検討には課題があった。そこで、本研究では、大口径のモノパイル式基礎を対象として、FEM 解析と波動理論に基づく杭打ち解析を組合せ、ドリリングによるモノパイルの打撃貫入性の変化について解析的に検討を行ったのでこれを報告する。

2. 検討概要

はじめに、本検討の対象とする DDD 工法によるモノパイル式基礎の施工イメージを示す（図-1）。杭の打撃貫入時の地盤抵抗について一般的な打撃工法と DDD 工法を比較すると、DDD 工法では、杭先端をドリリング（先行掘削）するとともに、内部の土砂を排出するため、打撃貫入時の先端抵抗と内側の周面摩擦抵抗を低減する効果が見込める（表-1）。検討の手順はドリリングのなしとありについて、FEM によるプッシュオーバー解析から得た変位（貫入量）と荷重の関係により最大反力（先端抵抗）を取得し、その結果を用いて杭打ち解析によりモノパイルの貫入に必要な打撃回数を算定し、その結果を比較し評価した（図-2）。また、通常のドリリングなしの杭打ち解析用の静的抵抗の提案式と FEM 解析による結果を比較した。解析対象の地盤は一軸圧縮強度 15MPa の岩盤とし、モノパイルは根入れ部の直径 9.5m、板厚 100mm、根入れ長 30m とした（図-3）。

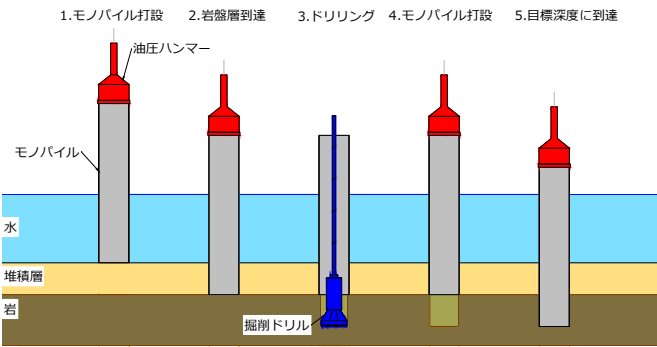


図-1：DDD 工法イメージ図

表-1：DDD と通常工法の抵抗比較

杭打ち時の地盤抵抗	通常の打撃工法（ドリリングなし）	DDD工法（ドリリングあり）	備考
先端抵抗	R_{t1}	$R_{t2} (< R_{t1})$	ドリリングにより低減
周面抵抗 外側	R_{se1}	$R_{se2} (= R_{se1})$	変化なし
周面抵抗 内側	R_{si1}	$R_{si2} (= 0)$	ドリリングにより低減

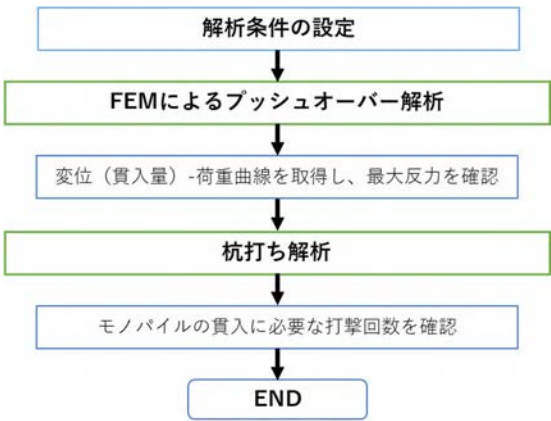


図-2：検討手順

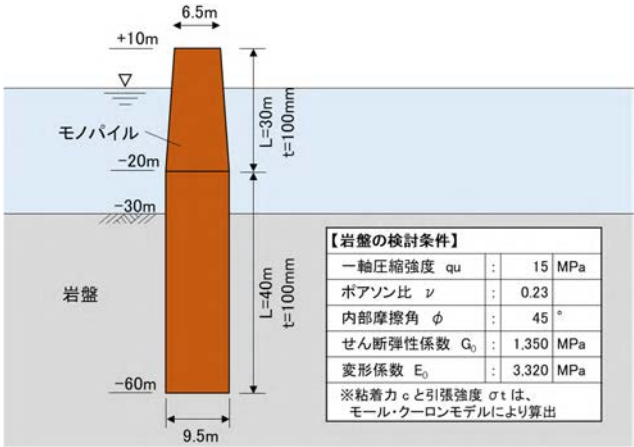


図-3：検討モデル図

キーワード：着床式洋上風力発電，Drive-Drill-Drive 工法，ドリリング，先行掘削，杭打ち，FEM 解析

連絡先：〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8，五洋建設（株） 洋上風力事業本部技術部，TEL 03-3817-7587（代表）

3. 解析結果および考察

(1) FEM 解析

FEM 解析は、2D 軸対称 FEM (解析ソフト: PLAXIS2D) とし、モノパイルの先端位置に鉛直方向の強制変位を与え、プッシュオーバー解析を実施した (図-4)。解析ケースは、一軸圧縮強度 15MPa の岩盤を対象に、ドリリングなしとありの 2 ケースを実施した (表-2)。また、プッシュオーバー解析による変位 (貫入量) と反力 (荷重) の関係から、最大反力、つまり先端抵抗を取得した (図-4)。先端抵抗は Case1 では 750MN、Case2 では 135MN となり、ドリリングによりモノパイルの先端抵抗が大幅に低減されることが確認できた (図-5)。

(2) 杭打ち解析

モノパイルの杭打ち解析は、波動理論に基づく解析ソフトである GRLWEAP を用いた。解析用ハンマーは打撃エネルギー 5500kJ 級とし、解析用の地盤の静的抵抗は、FEM 解析結果と既存の手法を合わせて設定した。解析ケースは 3 ケースとし、先端抵抗は FEM 解析結果と比較のため Stevens の方法²⁾を用い、周面抵抗は Terente の方法³⁾を用いたが Alm の方法⁴⁾の周面抵抗の疲労の考え方も合わせて適用した (表-3)。

解析の結果、ドリリングなしの Case1 では、打撃レートは 0.25m 当り 1 万回以上と非常に大きくなったが、ドリリングありの Case2 では、打撃レートは 0.25m 当り 24.4 回となり、ドリリングにより大幅に先端抵抗が低減し打撃貫入性の向上が FEM 解析結果から評価できた。一方で、Case0 では、打撃レートは 0.25m 当り 37.7 回であり、同じくドリリングなしの Case1 と大きく異なった。ゆえに、本研究の FEM 解析では Stevens の方法に比べて先端抵抗を過大評価している可能性がある。

5. まとめ

本研究では、大口径のモノパイル式基礎を対象として、FEM 解析と波動理論に基づく杭打ち解析を組合せ、ドリリングによるモノパイルの打撃貫入性の変化について解析的に検討を行った。その結果、ドリリングにより大幅に先端抵抗が小さくなり打撃貫入性が向上することが、FEM 解析と杭打ち解析により評価できた。

また、本研究で使用した構成則での FEM 解析では既存の手法に比べ先端抵抗を過大評価している可能性があるため、岩盤における大口径モノパイル打撃貫入時の先端抵抗をより合理的に評価するための FEM 解析手法の開発が今後の課題である。

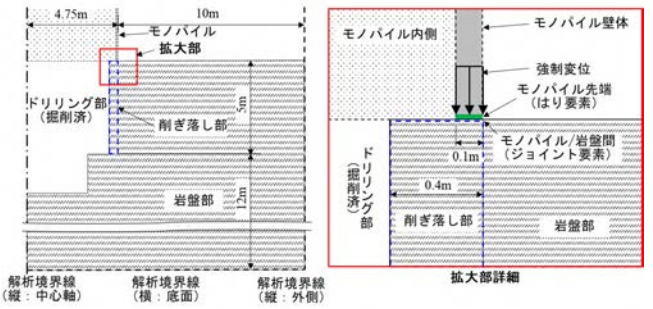
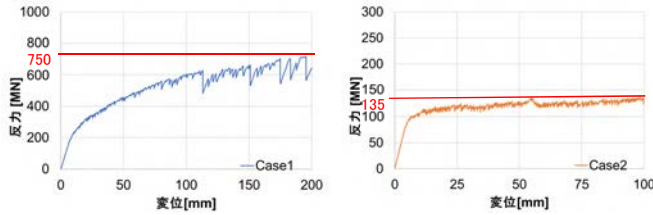


図-4 : FEM モデル図

表-2 : FEM 解析ケースと結果

Case	岩盤の一軸圧縮強度 [MPa]	ドリリング	最大反力 (先端抵抗) [MN]
1	15	なし	750
2	15	あり	135



(a)Case1 ドリリングなし (b)Case2 ドリリングあり

図-5 : FEM 解析結果 (プッシュオーバー)

表-3 : 杭打ち解析ケースと結果

Case	ドリリング	岩盤モデル*		静的抵抗 (SRD)			総打撃回数	打撃レート
		先端抵抗	周面抵抗	先端抵抗 R_t	周面抵抗 R_s	合計 R_u		
#	-	-	外面 内面	MN	MN	MN	回	回/0.25m
0	なし	S	T/A T/A	133	173	306	3141	37.7
1	なし	FEM	T/A T/A	750	173	926	N/G	>10000
2	あり	FEM	T/A -	135	87	263	2471	24.4

*S: Stevens の方法, T/A: Terente の方法と Alm の方法の組合せ, FEM: FEM 解析結果

参考文献

1) J. G. Castillo, S. Nagula, C. Schallück and J. Grabe, “Numerical Simulation of Drive-Drill-Drive Techniques for Open-Ended Pile Installations”, Recent Advancements in Civil Engineering, pp. 539–548

2) R. S. Stevens, E. A. Wiltse and T. H. Turton, “Evaluating pile driveability fr hard clay, very dense sand and rock”, Offshore Technology Conference 4205, Houston, 1982, pp. 465-469.

3) V. Terente, I. Torres, J. Irvine and C. Jaeck, “Driven Pile Design Method for Weak Rock”, In Proceedings of the Offshore Site Investigation Geotechnics 8th International Conference, London, UK, 12–14 September 2017; pp. 652–657.

4) T. Alm and L. Hamre, “Soil model for driveability predicitions based on CPT interpretations”, 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul, Aug. 2001, pp. 1297-1302.