

モノパイル基礎の軟岩部への打撃解析に関する考察

○清水建設 土木技術本部

正会員

前田 裕一

1. はじめに

日本国内の洋上風力案件での風車の大型化に伴い、今後モノパイル基礎の長尺化が想定される。一般海域を含む日本沿岸域では、比較的浅い深度から岩盤層（軟岩）が出現する地域があり、今後岩盤への打撃解析の必要性が高まってくると考えられる。

本稿では、欧州で先行している打撃解析事例を参考に疑似モデルでの打撃解析を実施し、打撃解析上必要となる情報や結果に影響を与える要素について考察する。

2. 参考とした欧州事例と解析モデルについて

表-1 に本検討において参考とした論文と内容の概要を示す。打撃解析に用いる打撃時抵抗値 SRD (Soil Resistance to Driving) およびクエーク、ダンピング係数を参考論文より引用する。

表-1 参考とした論文について

No	論文タイトル	年	著者	概要
1	Evaluating Pile drivability for Hard Clay, Very Dense Sand, and Rock	1982	S.Stevens, Robert	ベルシャ湾にて、硬質粘性土～軟岩内に打ち込まれた杭の実績を元に打撃解析手法を検証している。杭径は36～42inと比較的小径、打撃によって破壊された岩塊が粒状の土質として周面摩擦に寄与するとして周面摩擦を算出している。
2	Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations	2001	Alm,T. and Hamre,L.	CPTによる調査結果から打撃解析を実施するための基本となる論文。砂質土～粘性土での打撃時抵抗値SRDの算出手法について記載。
3	Pile driving and pile installation risk in weak rock	2015	V. Terente, J.Irvine, R. Comrie and J. Crowley	杭径4.6m、板厚70mmのモノパイルを、砂岩・泥岩・シルト岩（いずれも軟岩）へ打撃した事例での打撃解析に対する考察を記載。
4	Improved Pile Installation Predictions for Monopiles	2017	Maynard, A.W., Hamre,Liv, Butterworth,D.	No.2の論文の周面摩擦の考え方を実績を元に修正した論文。

モデル化するモノパイルの仕様および地盤定数を図-1のように仮定する。打撃解析にあたって設定した条件を以下に列挙する。

- ・根入れ長を5Dとし、杭径の変化は考慮しないものとした。
- ・軟岩層は砂岩として、岩の一軸圧縮強度を①500～1,000kN/m² および②1,000～2,000 kN/m² の2ケースを考慮した。
- ・打撃時の軟岩層の杭先端抵抗、周面摩擦の算出式は表-1のNo1論文を参考に算出する。なお安全側に考え、論文内の周面摩擦の上限値は考慮しないものとする。
- ・軟岩層のクエーク、ダンピング係数は、値による影響度合いを確認するため、表-1のNo3論文および別文献での実績から表-2の値とする。

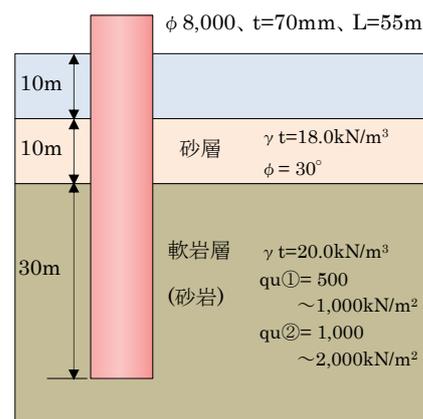


図-1 検討モデル

表-2 解析ケース

項目	軟岩強度	ダンピング係数		備考
		先端	周面	
Case1	500～1,000kN/m ²	0.5	0.1	V.terente(2015)
Case2	500～1,000kN/m ²	1.15	0.66	Beake & Sulcliffe
Case3	1,000～2,000kN/m ²	0.5	0.1	V.terente(2015)
Case4	1,000～2,000kN/m ²	1.15	0.66	Beake & Sulcliffe

キーワード 洋上風力、打撃解析、モノパイル、GRLWEAP

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設株式会社 土木技術本部

T E L 03-3561-3898

3. 解析結果・まとめ

前項にて示した条件にて、打撃解析を実施した。解析ソフトは『GRLWEAP Version 2010』を用いて解析を実施した。各ケースで条件を合わせるため、使用する油圧ハンマは IHC S-4000 とし各深度の打撃エネルギーも統一した。(図-2)

図-3 に Case1~4 の打撃解析結果を示す。岩盤部の強度およびダンピング係数を各ケースで変更しているが、岩盤強度は表-3 に示す通り、先端抵抗には寄与するが、周面摩擦には影響を及ぼさない。よって図-2 は、周面摩擦は同一として、先端抵抗およびダンピング係数の違いを比較した結果となる。

表-3 Stevens (1982)による軟岩の抵抗値算出式

項目	先端抵抗 qt	周面摩擦 fs
算出式	$qt = N_u u$ $N_u : 3$ $u : \text{一軸圧縮強度}$	$fs = K \sigma'_v \tan \delta$ $K : \text{水平土圧係数} = 0.7$ $\sigma'_v : \text{有効上載圧}$ $\delta : \text{壁面摩擦係数}$

これらの比較から以下の内容が分かる。

- Case1 と 3、Case2 と 4 の比較によって、先端抵抗が倍になったとしても解析上の差異 (m 当たりの打撃回数) は約 10%と小さい。解析上の先端抵抗の影響は小さいものと考えられる。
- Case1 と 2、Case3 と 4 の比較によって、結果に対するダンピング係数の影響が大きい。最終深度での m 当たり打撃回数は約 3 倍となっている。

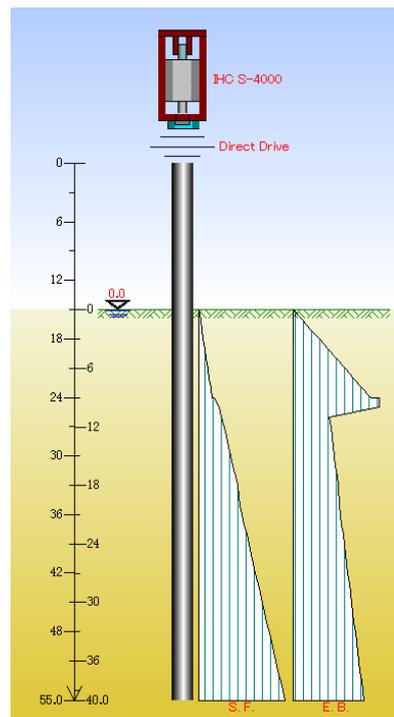


図-2 GRLWEAP 解析イメージ

ここで、周面摩擦の影響を調べるため Case1 の軟岩内の周面摩擦を 100%~200%まで 50%毎に変化させ解析を実施した。解析の結果を図-4、表-4 に示す。周面摩擦 200%とした場合、最終深度付近で必要打撃回数が増加して、打撃不可判定基準となる 400 回/mを大幅に超過する。周面摩擦の抵抗値は先端抵抗値に比べ数十倍となるため、影響が大きくなったものと思われる。

以上の結果から、軟岩内への打撃解析においては、周面摩擦およびダンピング係数の評価が重要な要素となるため、今後の地質調査においてはこれらの評価を念頭においた調査が必要であると考えられる。

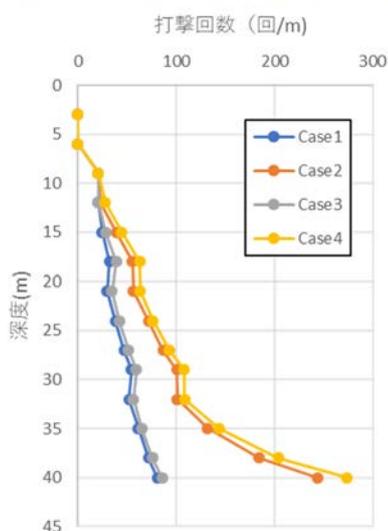


図-3 打撃解析結果

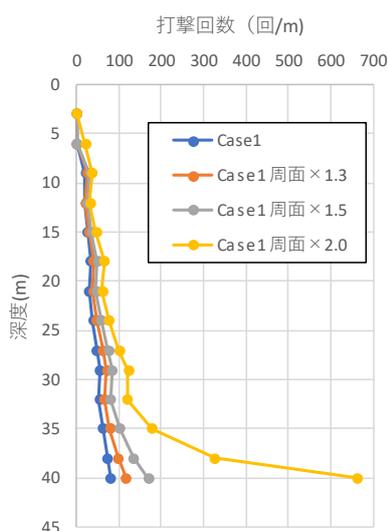


図-4 打撃解析結果

表-4 各ケースの解析結果 (打撃回数)

項目	最終深度での打撃回数(回/m)	総打撃回数 (回)
Case1	80.6	1,350
Case2	243.7	2,672
Case3	85.8	1,473
Case4	273.9	2,929
Case1	80.6	1,350
Case1 周面 × 1.3	115.6	1,722
Case1 周面 × 1.5	168.9	2,170
Case1 周面 × 2.0	660	3,926

参考文献 1) S.Stevens, Robert, Evaluating Pile drivability for Hard Clay, Very Dense Sand, and Rock, 1982. 2) Alm,T. and Hamre,L., Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations, 2001. 3) V. Terente, J.Irvine, R. Comrie and J. Crowley, Pile driving and pile installation risk in weak rock, 2015. 4) Maynard, A.W., Hamre,Liv, Butterworth,D., Improved Pile Installation Predictions for Monopiles, 2017.