

第I部門

2024年9月6日(金) 9:00 ~ 10:20 Ⅲ A104(川内北キャンパス講義棟A棟)

耐風・風工学(1)

座長：中藤 誠二（関東学院大学）

9:20 ~ 9:30

[I-322] 繰返し水平荷重を受けるモノパイルの劣化パラメータに関する研究

*中村 俊介¹、松本 陽介¹、甲斐 郁寛²、飯田 芳久²、石原 孟³ (1. 東電設計株式会社、2. 東京電力リニューアブルパワー株式会社、3. 東京大学大学院工学系研究科)

キーワード：洋上風力発電、モノパイル基礎、繰返し水平載荷試験、地盤反力曲線、劣化パラメータ

凝灰質砂岩を対象として、モノパイルを対象とした繰返し水平載荷試験を行った。繰返しにより発生する地表面の変位増加率は、 F_D の値を0.8から0.4に低減した場合に、凝灰質砂岩で適用できることが分かった。また繰返しによる地盤反力低減範囲は、API基準より定めた2.625D (4.2m) から1.25D (2m) 程度になった。

繰返し水平荷重を受けるモノパイルの劣化パラメータに関する研究

東電設計（株） 正会員 ○中村 俊介, 正会員 松本 陽介
東京電力リニューアブルパワー（株） 甲斐 郁寛, 正会員 飯田 芳久
東京大学大学院工学系研究科 正会員 石原 孟

1. はじめに

モノパイル式洋上風車は供用期間中に風や波による繰返し水平荷重を受ける。繰返し水平荷重を受けるモノパイルの実験的研究は欧州を中心に行われてきたが、そのほとんどが砂質土地盤を対象としており、国内の建設候補地点で見られる固結砂を対象とした事例はない。そこで、本研究では凝灰質砂岩層（固結砂）に設置されたモノパイルの繰返しによる影響を明らかにすることを目的として、凝灰質砂岩層でモノパイルを対象とした繰返し水平載荷試験を行い、繰返し水平荷重による剛性低下を調べ、砂質土地盤の予測式と比較する。

2. 繰返し水平載荷試験の概要と結果

試験位置における凝灰質砂岩の地盤調査結果の平均値と試験数を表 1 に示す。N 値は標準貫入試験より求めた換算 N 値である。湿潤密度 ρ_t は密度検層より求めた。変形係数 E_N は 2800N より求め、 E_b は孔内水平載荷試験より求めた。P 波速度と S 波速度は PS 検層より求めた。粘着力 c_d と内部摩擦角 ϕ_d は、不攪乱試料の三軸圧縮試験（CD 試験）より求めた。再構成試料の粘着力 c_{dr} と内部摩擦角 ϕ_{dr} も求めた。不攪乱試料と再構成試料の c と ϕ より、当該地盤は不攪乱状態では固結して粘着力を発揮し、攪乱後は砂化して粘着力がほとんど無くなる特性があることが分かる。相対密度 RD は、Meyerhof の式より求めた。全深度の RD の平均値は 89% であり、相対密度区分の Very dense¹⁾ に相当するが、粘着力が高く、通常の砂質土地盤と大きく異なる。

繰返し水平載荷試験装置の計測器配置や地質区分を図 1 に示す。鋼管杭の寸法は、直径 $D=1.6\text{m}$ 、板厚 $t=40\text{mm}$ であり、凝灰質砂岩層に 10.1m 根入れした。試験は地盤工学会基準²⁾に準拠して行った。載荷は油圧ジャッキを複数台使用して行った。載荷荷重と地表面の水平変位の関係を図 2 に示す。繰返し載荷は、初期の段階載荷の後に 200 回行った。200 回は試験サイ

トの使用期間の制約による上限回数である。載荷は繰返し一方向載荷とし、終局水平載荷試験の目標最大荷重の 1/3（以下、 $0.3P_u$ ）を上限とした。地表面変位は、地表面+0.5m 位置の回転角と変位の計測値より求めた。繰返し回数と $0.3P_u$ に対応するロードセル荷重・地表面変位の関係を図 3 に示す。繰返し載荷 1～5 回目は荷重が上がりきらず、6 回目以降で概ね安定した。6 回目以降の $0.3P_u$ の平均値は 1,376kN であり、1～5 回目はこれより 1～6%程度小さかった。なお、初期の段階載荷の最大荷重は 1,384kN、繰返し載荷後に継続して実施した終局載荷試験の最大荷重は 4,126kN である。

表 1 試験サイトの地盤諸元

Item	Value	n	Item	Value	n	
N-value	(-)	27	11	pt (t/m3)	1.70	1
En	(kN/m2)	74,800	-	cd (kN/m2)	203.9	2
Eb	(kN/m2)	95,900	2	ϕ_d (°)	32.4	2
Vp	(m/s)	1,620	1	c_{dr} (kN/m2)	3.7	2
Vs	(m/s)	420	1	ϕ_{dr} (°)	35.5	2
RD	(%)	89	11	RD=21 × $\sqrt{(100N/(\sigma'z+70))}$		

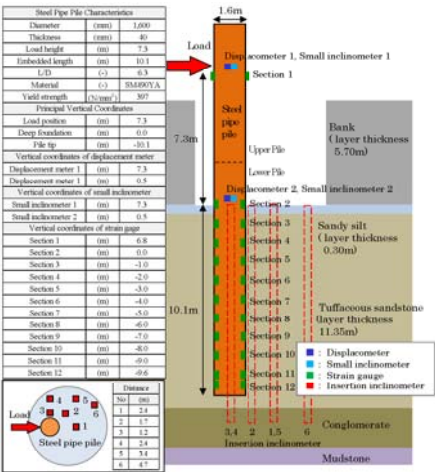


図 1 繰返し水平載荷試験の計測機配置と地質構造

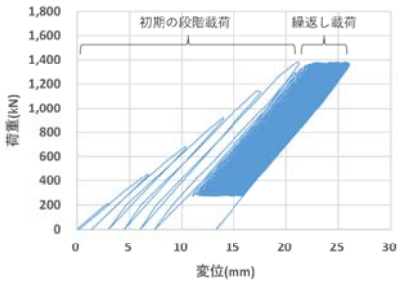


図 2 ロードセル荷重と地表面変位の関係

キーワード 洋上風力発電, モノパイル基礎, 繰返し水平載荷試験, 地盤反力曲線, 劣化パラメータ
連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲 1 丁目 7 番 12 号 東電設計（株） TEL：03-6372-5001

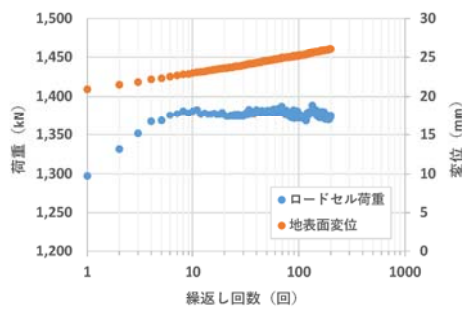


図3 繰返し回数とロードセル荷重・地表面変位の関係

3. 変位増加率と地盤反力の低減範囲

繰返し水平荷重による変位増加率を式(1)より求め、既往の研究^{3),4)}と比較した結果を図4に示す。

$$R_s = \frac{\delta_N}{\delta_1} \quad (1)$$

ここで、 δ_N は繰返し回数N回目の地表面変位、 δ_1 は1回目の地表面変位である。

既往研究は、伊藤ら³⁾より砂の試験結果を読み取り、また、Longら⁴⁾の提案式を併記した。

$$\frac{\delta_N}{\delta_1} = N^{0.6t}, \quad t = 0.17 \cdot F_L \cdot F_I \cdot F_D \quad (2)$$

ここで、 t は劣化パラメータ、 F_L は繰返し荷重の範囲の影響係数、 F_I は杭の設置方法の影響係数、 F_D は地盤密度の影響係数であり、表2のように定義される。

伊藤ら³⁾は、砂の試験結果と劣化パラメータの係数を $F_L=1.0$ 、 $F_I=1.4$ 、 $F_D=1.1$ として求めたLongの式を比較し、繰返し回数100回程度まではおおそ合致していると評価している。

本試験結果は表2に示す係数 $F_L=1.0$ 、 $F_I=1.0$ 、 $F_D=0.8$ に対応しているが、計算結果は試験結果よりも変位増加率を過大に評価した。本試験サイトの凝灰質砂岩は固結砂であり、Longらの提案式に適用できる砂質土の密度よりも高いことから、密度に関する係数 F_D を小さくする必要がある。本研究では、 $F_D=0.4$ とした場合にLongの式は本試験結果とよく整合した。

図5には繰返しによる地盤反力の低減を示す。地盤反力は、ひずみゲージの計測結果を基に曲げモーメント分布を求め、それを2回微分して求めた⁵⁾。ひずみゲージの計測値は、1回目の繰返し荷重開始時点で0になるよう、初期の段階荷重で生じたひずみを除いた。地盤反力の減少率は、繰返し荷重が安定した6回目の結果を基準として求めた。繰返しによる地盤反力の低減は、地表面から1.25D(2m)程度の範囲まで生じた。この結

果は、API基準¹⁾のp-y曲線で繰返し(100回)の影響を考慮する深度2.625D(4.2m)の1/2程度であった。

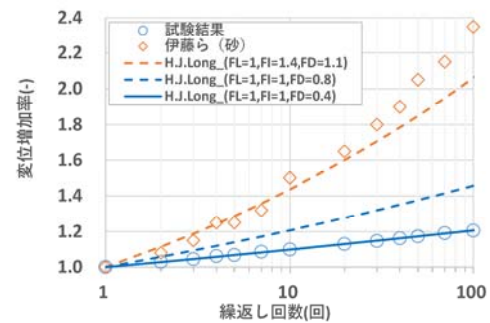
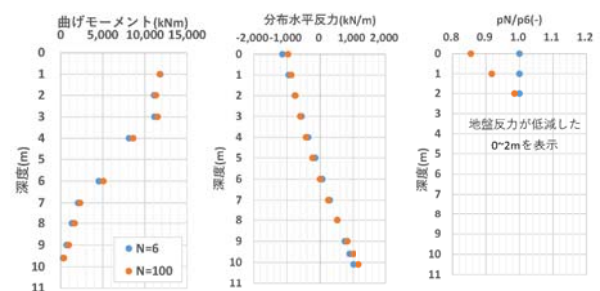


図4 0.3Puにおける地表面の変位増加率

表2 劣化パラメータの係数⁴⁾

Load ratio RH = Hmin/Hmax	FL	Method of installation	FI
-1.00 (two-way loading)	0.2	Driven	1.0
-0.25	-	Vibrated	0.9
0.00 (one-way loading)	1.0	Backfilled	1.4
0.50	-	Backfilled and compacted	1.0
1.00 (static loading)	0.0	Drilled	1.3
Soil density	FD	Precycled	1.0
Loose (contractive)	1.1		
Medium	1.0		
Dense	0.8		
Precycled	1.0		



(a)曲げモーメント (b)水平地盤反力 (c)低減率

図5 0.3Puにおける地盤反力の低減範囲

4. まとめ

凝灰質砂岩を対象として、モノパイルを対象とした繰返し水平荷重試験を行い、以下の結果を得た。

- 繰返しにより発生する地表面の変位増加率は、既往研究から得られた砂質土地盤の値より小さく、 F_D の値を0.8から0.4に低減した場合に、本凝灰質砂岩にLongの式を適用できることが分かった。
- 繰返しによる地盤反力の減少は、地表面から1.25D(2m)程度の範囲にあり、API基準に定めた2.625D(4.2m)の約半分になることが分かった。

参考文献

- API: RP 2GEO, Geotechnical and Foundation Design Considerations, 2014,
- 地盤工学会, 地盤工学会基準 杭の水平荷重試験方法・同解説, 地盤工学会, 第1回改訂版, 2010,
- 伊藤 他: 繰返し水平荷重を受けるモノパイルの挙動評価(その1: 荷重実験), 第57回地盤工学研究発表会, 2022,
- J. H. Long, Geert Vanneste: Effects of Cyclic Lateral Loads on Piles in sand, J. Geotech. Engrg., ASCE, 120(1), PP225-244, 1994.
- 松本 他: 静的水平荷重試験によるものパイル基礎の曲げモーメントと変位に関する研究, 第44回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022