

繰り返し作用による地盤のひずみ硬化を想定した短杭の水平載荷試験

東京都 (元 ㈱ 熊 谷 組) 正会員 ○中村 滋
(㈱ 熊 谷 組) 正会員 吉田 健治

1. 研究背景

洋上風力発電所の基礎形式としてモノパイル基礎があるが、この構造は片持ち梁構造であり、海上での風車のゆれや海水中での波が直接基礎部分に伝播し、海底面付近の地盤は日常的に繰り返し作用を受ける。今後、風車の大型化や沖合での風車の設置に伴い、風荷重及び波荷重は共に増加すると想定される。そこで本研究では、繰り返し荷重が杭の根入れ地盤に与える影響を検討した。

2. 実験概要

実験は、Fig. 2 に示すように実験土槽(2500×1200×1700)に作成した砂地盤中に、直径216.4mmの鋼管を設置し、地盤面から650mmの位置で載荷を行なった。地盤材料は霞ヶ浦砂 ($\rho_s=2.652\text{g/cm}^3$, $e_{\text{max}}=0.846$, $e_{\text{min}}=0.580$) を使用した。地盤作成は、鋼管を予め設置した後、ふるいを使用した空中落下法にて行なった。試験は根入れ、相対密度及び載荷方法を変化させて合計3ケース実施した。実験ケースをTable1に、計測項目及び載荷方法をTable2, 3に示す。

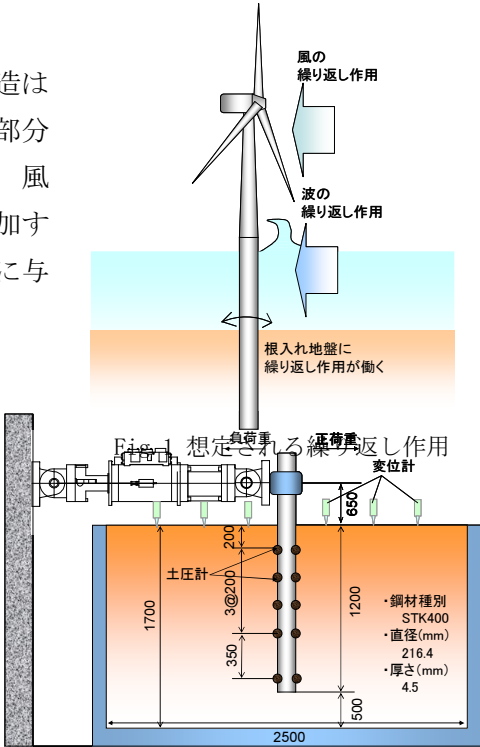


Fig. 2 模型実験概要

Table1 実験ケース

実験ケース	相対密度Dr(%)	根入れ長(m)
No.1	82	1.5
No.2	77	1.2
No.3	103	1.2

Table2 計測項目

項目	計測点数	備考
載荷荷重	1	
載荷変位	2	載荷点と地盤面の2箇所
土圧	10	GL-200,-400,-600,-800,-1150
	12	GL-100,-300,-500,-700,-1100,-1450
地表面変位	10	ひずみゲージ変位計

Table3 載荷方法

実験ケース	載荷手順①	載荷手順②	載荷手順③	載荷手順④
No.1	単調載荷	繰り返し載荷	単調載荷	-
No.2	単調載荷	繰り返し載荷	単調載荷	-
No.3	繰り返し載荷	単調載荷	繰り返し載荷	単調載荷

3. 実験結果・考察

(1) P- δ x 関係と土圧増加

試験体 No. 1~3 の水平荷重-水平変位関係を Fig. 3~5 に、土圧-水平変位関係を Fig. 6~8 に示す。なお、水平変位は載荷点における変位量を示す。なお、模型実験で想定した10mmと30mmの変位振幅(片振幅)は、実際の設計例での常時及び発電時最大風荷重時の海底面での水平変位量を参考に定めた。

Fig. 3, 4 より、No. 1, 2 試験体共に、単調載荷後に繰り返し作用を与えると最大水平荷重は No. 1 で11kN→17kN (1.55 倍)、No. 2 で7kN→10kN (1.43 倍) に向上した。No. 1, 2 の最大水平荷重 (11kN と7kN) の大小は根入れ長の違いによるもので根入れの深い No. 1 の方が地盤の反力が大きく最大水平荷重が大きくなっている。また、単調載荷時において初期状態から20mmの水平変位を与えた時のP- δ x 関係の傾き(剛性)を求めると、No. 1 で0.176→0.390kN/mm (2.2 倍)、No. 2 で0.110→0.239kN/mm (2.2 倍) 向上した。一方、Fig. 5 より、繰り返し作用を与えた後単調載荷し、再び繰り返し作用を与えても最大水平荷重は13kN→13kNと変化がなかった。No. 4 試験体のP- δ x 関係の傾き(剛性)は、0.702→0.527kN/mm (0.8 倍) と若干減少した。

Fig. 6~8 より、単調載荷後の繰り返し作用と共に土圧が上昇していることがわかる。相対密度80%の実験ケース (No. 1, 2) では、繰り返し作用により土圧が上昇することで、単調載荷(1回目)での最大土圧を遥かに上回る。Dr=100%以上の実験ケース (No. 3) では、単調載荷(1回目)での最大土圧と同等まで土圧が上昇している。また、地表面に設置した変位計測データより、繰り返し作用により交互に杭背面の沈下が進行していくことがわかった。

キーワード 洋上風力発電所 モノパイル基礎 繰り返し載荷 ひずみ硬化

連絡先 〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1 株式会社熊谷組土木事業本部 TEL 03-3235-8622

(2) 土圧増加と杭前面背面の沈下のメカニズムの考察¹⁾

参考文献 1) を参照し、以下に土圧増加のメカニズムを示す。

1) 载荷背面のラチェット効果

鋼管が主働側に変位すると、鋼管背後の地盤内の主働領域が沈下する。次に受働側に変位しても、土の変形特性は非弾性のため、地盤内の主働領域が元の位置に押し上げられることはなく、主働域は上昇できず締め固まる。繰り返し载荷で地盤が硬化（ストレインハードニング）していき、土圧が上昇する。

2) 载荷前面のラチェット効果

鋼管が受働側に変位すると、鋼管前面の地盤内の受働領域が上昇する。次に主働側に変化すると、上昇した受働領域は元の地面の位置よりも下がる。次に受働側に载荷を加えると、受働域は元の地面の位置までは上昇できず、同様にして締め固まっていく。繰り返し载荷で地盤が硬化（ストレインハードニング）していき、土圧が上昇する。

この杭の前面背面のラチェット効果（ダブルラチェット効果）により土圧は上昇していく。

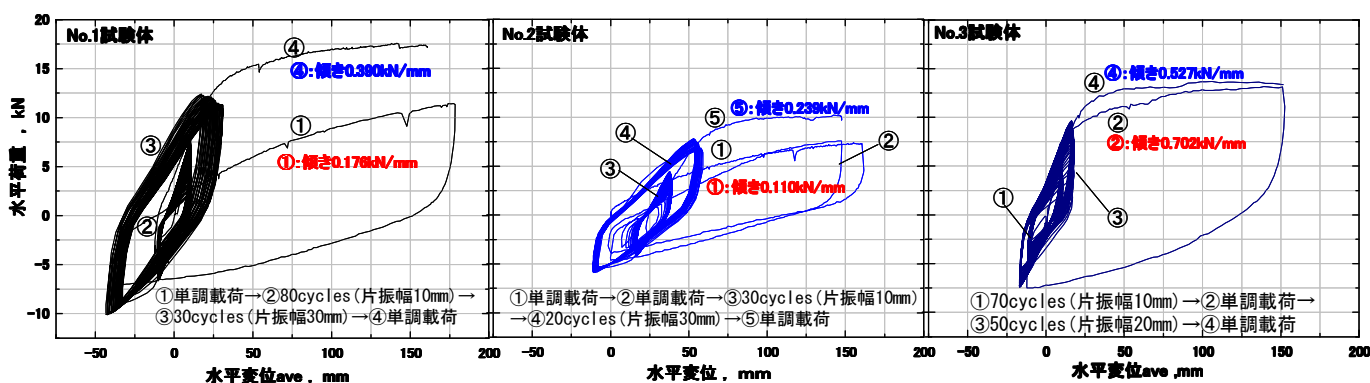


Fig. 3 No.1 荷重-変位関係

Fig. 4 No.2 荷重-変位関係

Fig. 5 No.3 荷重-変位関係

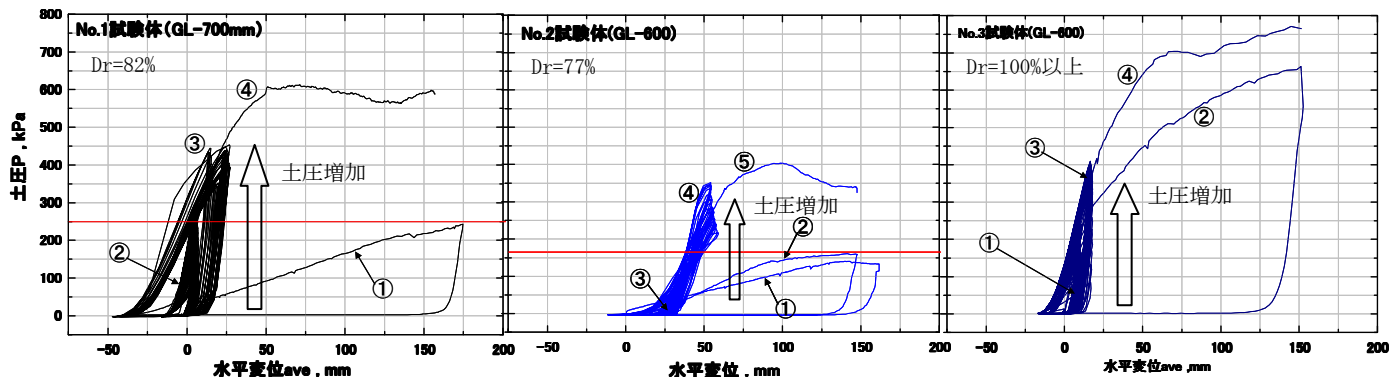


Fig. 6 No.1 土圧-変位関係

Fig. 7 No.2 土圧-変位関係

Fig. 8 No.3 土圧-変位関係

4. まとめ

繰り返し作用が根入れ地盤に与える影響

模型実験では、単調载荷後の繰り返し载荷により、杭周辺の土圧が増加していくことがわかった。

① よく締め固まった地盤 (Dr=100%以上) の場合、繰り返し载荷後の地盤剛性は元の 0.8 倍

② やや締め固まった地盤 (Dr=80%) の場合、繰り返し载荷後の地盤剛性は元の 2.2 倍

今回の実験結果から、以下の可能性がある。

砂質地盤が繰り返し载荷を受けるとダブルラチェットの効果により地盤の締め固めが進行し、地盤の剛性は向上する（ストレインハードニング）。一度塑性化した地盤でも同様の効果により剛性は回復する。なお、表層部分がゆるい場合は元の地盤剛性以上になりうる。

【参考文献】

- 1) 野尻ら：水平繰り返し载荷を受ける擁壁の残留変位のジオテキスタイル盛土補強による抑制，2005 ジオシンセティックス論文集
- 2) 吉田ら：洋上風力発電所モノパイル基礎の設計と施工について，土木学会第 65 回年次学術講演会