

我が国の地盤における PISA 設計法の適用 (その 5) - 杭の水平載荷試験 -

洋上風力 モノパイル 杭の水平載荷試験

三菱商事洋上風力 国際会員

深沢 健 国際会員

平林 弘

シーテック

高見 一郎

鳥居 祐城

地盤試験所

国際会員

○大野 雅幸

国際会員

亀井 秀一

正会員

吉國 将大

正会員

中山 敦

1. はじめに

本報告では、固結した砂地盤 (地点 A : 銚子) と海成粘土/砂二層地盤 (地点 B : 大潟) で実施した鋼管杭の水平載荷試験¹⁾の中から、剛短杭に特徴的な杭の回転が顕著に表れると予想される最も根入れの浅い杭 No.5 の試験結果を示す。また杭の曲げ解析の結果に基づいて杭の水平挙動について考察する。

2. 試験内容

試験杭の諸元を表-1に、地盤条件と計器配置を図-1に示す。地盤条件は、杭芯および近傍地盤の N 値 (SPT) の深度分布に層毎の平均値と CPTU による補正先端抵抗 q_t を示した。試験杭は、地点 A では名洗層 (固結した砂) に 5m 根入れし、地点 B では粘土層と砂層の杭区間長がほぼ等しくなるように根入れした。杭打設から水平載荷試験までの養生期間は地点 A が 52 日、地点 B が 46 日であった。

試験杭には杭頭の加力点に荷重計と変位計および傾斜計を設置し、また地盤面付近にも変位計を設置した。地盤面以深には深度方向に 0.5m または 1.0m の間隔を置いて複数の傾斜計とひずみ計を設置した。

試験方法は地盤工学会「杭の水平載荷試験方法・同解説」杭の水平載荷試験方法 (JGS1831-2010) に準拠して、一方向多サイクルの段階載荷方式で行った。

3. 試験結果

3.1 荷重-変位関係

水平荷重と地盤面変位の関係 (P - y) を図-2に示す。地盤面変位 y は図-1の地盤面より上に設置した変位計と傾斜計の測定値から求めた。

地点 A では載荷装置の容量まで載荷して最大荷重 $P_{max} = 3,591$ kN、地盤面変位 $y = 84.1$ mm ($y = 0.42D$) で試験を終了した。荷重-変位関係は、荷重の増加とともに変位が進んでいるが、明瞭な変化点は見出せない。

地点 B では水平変位量が杭径の 10% ($y = 0.1D$) に達したところで試験を終了した。荷重-変位関係は、地盤面変位 10 mm ($y = 0.005D$) 付近で変化点が出現し、その後は荷重の増加は僅かで変位量 $y = 0.1D$ に至っている。0.1D に対応する荷重値は $P_{0.1D} = 467$ kN であった。

3.2 杭の曲げ解析

杭体を弾性 Euler 梁と仮定して杭の挙動を解析した結果を図-3に示す。ひずみと傾斜角の深度分布をそれぞれ曲線で近似し、傾斜角の近似曲線の和分から水平変位を計算した。また曲げひずみの近似曲線の差分から曲げモーメントと地盤反力を計算した。

まず水平変位を見ると、地点 A と地点 B のどちらも杭の回転が見られた。その回転中心の深度は地点 A では地盤面から概ね 3.4 ~ 3.1 m、地点 B では概ね 4.2 ~ 3.8 m であった。地盤が硬い地

表-1 試験鋼管杭諸元

項目	単位	地点 A	地点 B
外径 D	mm	2,000	
板厚 t_w	mm	35	30
幅厚比 (径厚比) D/t_w		57.1	66.7
杭長 L	m	11.0	10.5
根入れ長 L_G	m	5.0	
根入れ比 L_G/D		2.5	
実断面積 A_t	m ²	0.216	0.186
曲げ剛性 EI	MN・m ²	20,800	18,020

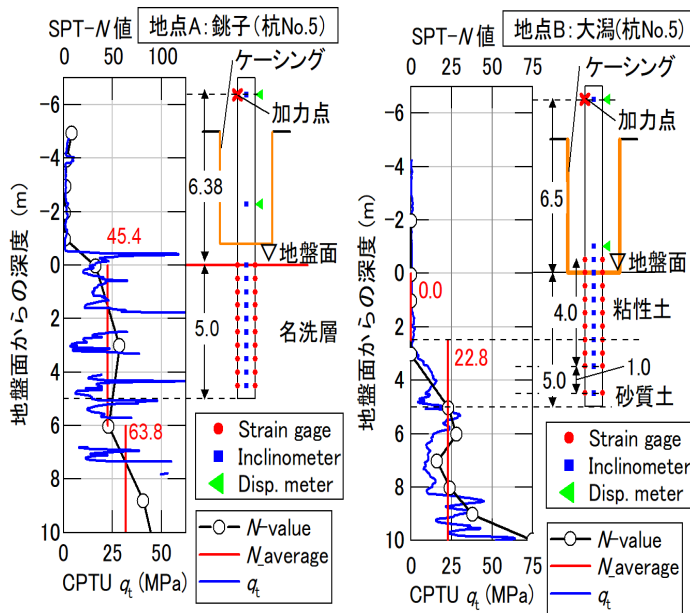


図-1 地盤条件および計器配置

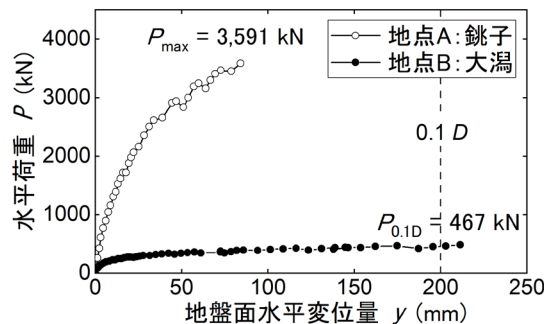


図-2 地盤面における水平荷重と水平変位量の関係

Application of PISA design method to Japanese ground (Part 5) - Lateral load test on piles -

T. Fukasawa, H. Hirabayashi (Mitsubishi Corp. Offshore Wind)
I. Takami, Y. Torii (C-Tech Corp.)
S. Kamei, M. Yoshikuni, A. Nakayama, M. Ohno (Jibanshikenjo Co. Ltd.)

点 A より軟らかい地点 B の方が回転中心は深く、杭根入れ長に対する比は地点 A では 68% ~ 62%, 地点 B では 84% ~ 76% (下部砂層への根入れ長に対して 68% ~ 52%) であった。

次に傾斜角に着目すると、地盤が硬い地点 A では傾斜角が深度方向に減少しており、杭には回転に加えて曲げ変形が生じている。地盤が軟らかい地点 B では傾斜角の深度変化はほぼ無く杭は剛体回転している。

曲げモーメントの最大値は、地点 A では地盤面から 1.0 m ($y = 10 \text{ mm} = 0.005D$) ~ 0.38 m ($y = 84.1 \text{ mm} = 0.42D$), 地点 B では 0.63 m ($y = 10 \text{ mm}$) ~ 0.5 m ($y = 200 \text{ mm} = 0.1D$) の深度に現れた。どちらも荷重の増加とともに発生位置が浅くなった。地点 A の最大値は地点 B の約 10 倍大きく、地盤が硬い地点 A では杭に大きな曲げ変形が生じている。試験最大荷重時において、杭先端付近に見られる曲げモーメントの増加は近似関数の精度の影響である。

最後に地盤反力を見ると、杭の上下で符号が異なり、加力方向に対して杭の上部は前面から、杭の下部は背面から地盤反力を受けている。地盤反力の向きが逆転する深度は、地点 A では地盤面から 3.8 m ($y = 10 \text{ mm}$) ~ 2.8 m ($y = 84.1 \text{ mm}$), 地点 B では 4.1 m ($y = 10 \text{ mm}$) ~ 2.7 m ($y = 200 \text{ mm}$) とどちらも変位が進むと浅くなった。地盤反力の分布形状は地盤の硬軟によらずほぼ放物線形状となった。

4. おわりに

水平載荷試験の結果から、浅く根入れした杭では先端から概ね 3 分の 1 の深度に回転中心軸が現れ、杭が回転することを明らかにした。その回転挙動は硬い地盤では曲げ変形が加わること、軟らかい地盤では剛体回転となることが分かった。地盤反力は放物線形状を示し、反力がゼロとなる深度は杭の回転に伴い浅くなった。

地盤の力学挙動は複雑であり、その地盤が支える杭の抵抗メカニズムを理解する上で杭の載荷試験は有力なツールである。今後も載荷試験の実績を重ね、剛短杭としての合理的なモノパイル設計の確立に貢献していきたい。

参考文献 1) 深沢ら (2024) : 我が国の地盤における PISA 設計法の適用 (その 1) - 総論 -, 第 59 回地盤工学研究発表会 (投稿中)

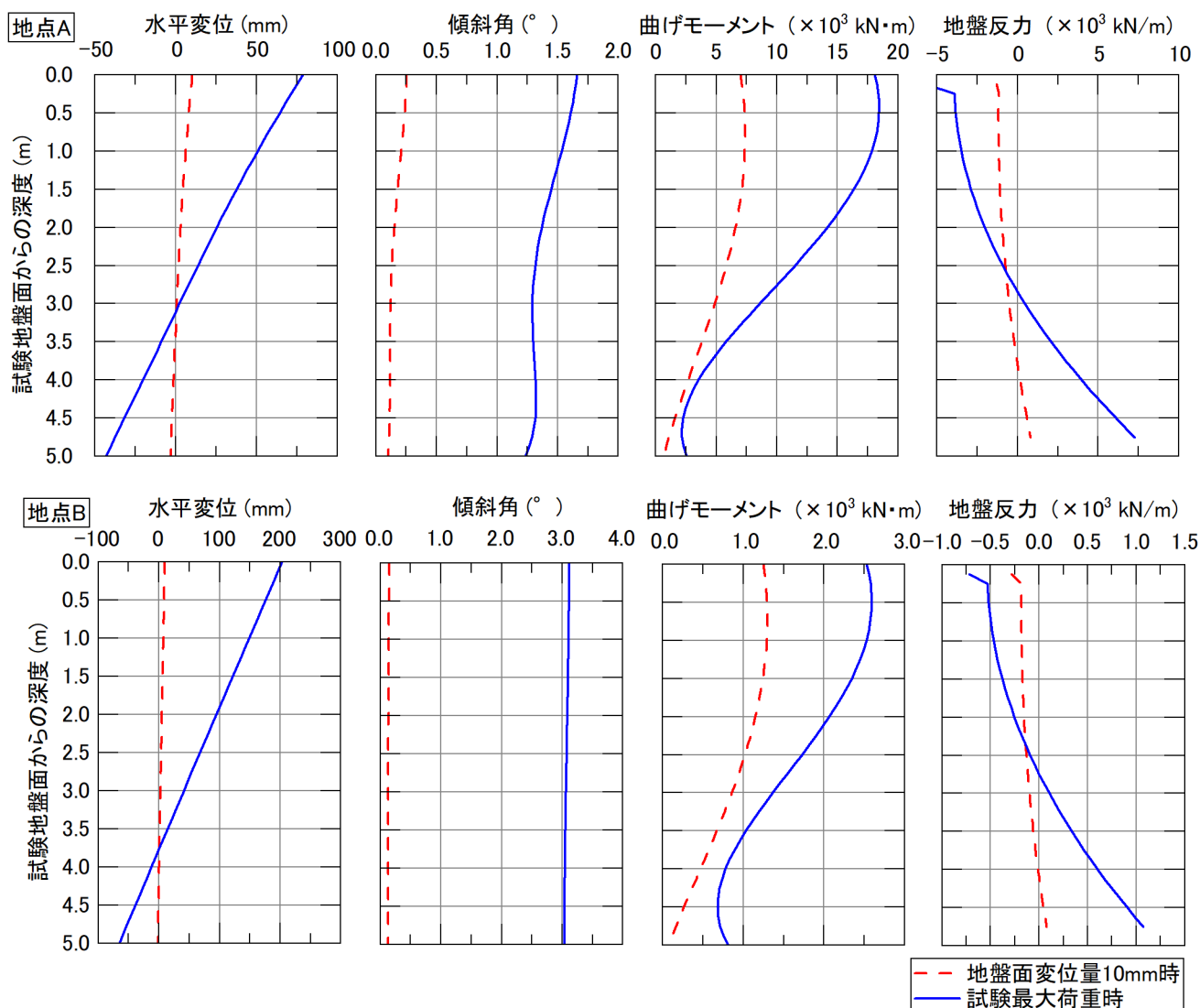


図-3 水平変位、傾斜角、曲げモーメントおよび地盤反力の深度分布