

静的水平載荷試験によるモノパイル基礎の 曲げモーメントと変位に関する研究*

A study of bending moment and displacement of monopile foundation
using horizontal static load tests

松本 陽介**

Yosuke MATSUMOTO

田邊 成**

Shigeru TANABE

山田 一貴***

Kazutaka YAMADA

中村 俊介**

Shunsuke NAKAMURA

甲斐 郁寛***

Ikuhiro KAI

石原 孟****

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ¹⁾においては、近年導入が進む着床式洋上風力発電所のコスト低減が急務であり、欧州で確立した基礎構造を日本の地質・気候・施工・環境などに合うよう最適化し、高信頼性と低コスト化を実現することが必要であるとされている。洋上風車基礎の建設コスト（設置含む）は全体コストの20～30%を占めており、基礎設計を最適化することで、ウィンドファームの経済性を大幅に向上させることができる可能性がある²⁾。

本研究は、着床式基礎の中でも代表的なモノパイル基礎に焦点を当てる。モノパイルは、打撃により海底に打ち込む大口径の鋼管杭であり、近年では直径8～10m、長さ30～50m、重さは1,000tに及ぶ²⁾。モノパイルは杭径Dに対する根入れ長Lの比L/Dが小さく、剛短杭（short-rigid pile）に分類される^{3),4)}。

モノパイル基礎を想定した水平荷重に対する鋼管杭試験は、欧州のPISAプロジェクト⁵⁾が有名であるが、国内地盤を対象とした試験例は極めて少ない。そこで、本研究では、新第三紀～第四紀の凝灰質砂岩層において、モノパイル基礎を想定した杭径D=1.6m、根入れ長L=10.1m、L/D=6.3の鋼管杭の静的水平載荷試験を行い、地中における剛短杭の挙動（断面力、地盤反力、変位）を明らかにすることを目的とした。

載荷試験は、地盤工学会基準⁶⁾に準拠して多サイクルで実施した。なお、同じ杭で繰り返し水平載荷試験も実施した。繰り返し水平載荷試験は、静的載荷試験を行う直前に、静的水平載荷試験の最大荷重の約1/3の荷重で3日間程度行った。

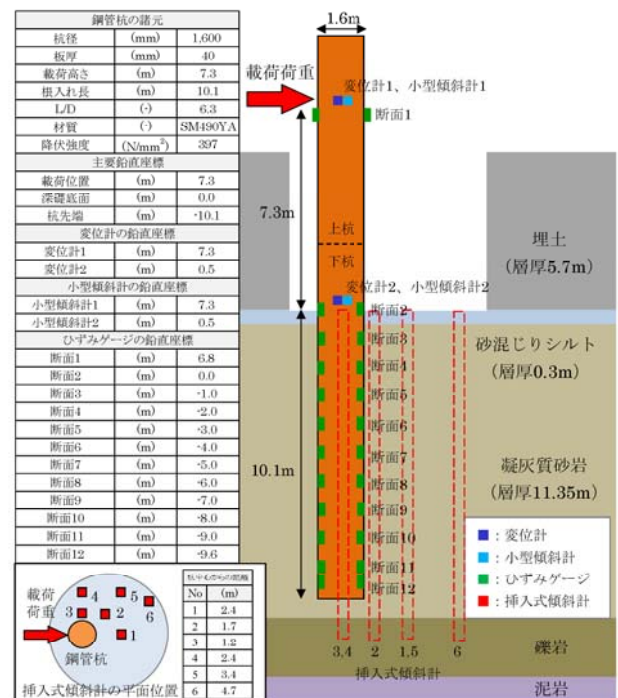


図1 試験概要図

2. 静的水平載荷試験の概要

2.1 静的水平載荷試験の方法

静的水平載荷試験の概要図を図1に示す。静的水平

2.2 鋼管杭の打設方法

鋼管杭は次の手順で打設した。①表層の埋土を深礎工により除去、②パイプロハンマ(PVE-150)により下杭を圧入、③上杭を建て込み・溶接、④油圧ハンマ(S-350)にて所定深度まで打設。

2.3 計測方法

鋼管杭の水平変位は一般用変位計（SDP-200）と巻

* 令和4年12月2日第44回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 東電電力株式会社 〒135-0032 東京都江東区東雲1-7-12

*** 会員 東電電力リニューアブルパワー株式会社

**** 会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

込型変位計 (DP-1000F , 200mm 以上の計測に使用) で計測し, 傾斜角は小型傾斜計 (KB-10DB) で計測した. これらの計測は, 深礎底面から上方に 7.3m と 0.5m の位置で行った. 各変位計と小型傾斜計は各位置に 2 台ずつ設置しており, 平均値を計測値とした.

鋼管杭のひずみは, ひずみゲージ (KCW-5-120-G1 0-11G1M3S) で計測した. ひずみゲージは軸方向ひずみの計測を目的とし, 上杭の外側に 2 枚, 下杭の内側に 22 枚設置した. 下杭に設置したひずみゲージは, 鋼管杭の内側に溶接した溝形鋼 (C150×75×6.5×10) により保護した.

地盤の変位は, 挿入式傾斜計 (KB-5HC) で計測した. 挿入式傾斜計は, 鋼管杭周辺の地盤に 6 か所設置した. 鉛直方向の計測間隔は 2m である.

2.4 地盤条件

試験サイトの地質は, 下位よりジュラ紀の泥岩, 新第三紀～第四紀の礫岩および凝灰質砂岩層が分布し, 表層は第四紀の砂混じりシルト層と埋土が分布する.

鋼管杭を打設した凝灰質砂岩層の地盤物性値を以下に示す. 鋼管杭の根入れ区間の N 値は 21～31 (単純平均 26) であり, 杭先端付近の N 値は 32 である. P S 検層 (ダウンホール方式) より求めたせん断波速度 V_s は 420m/s である. 孔内水平載荷試験より求めた変形係数 E_b の平均値は 95.9MPa ($n=2$) である. 三軸圧縮試験 (CD 試験) より求めた内部摩擦角 ϕ の平均は 32.4 度 ($n=2$), 粘着力 c は 203.9kPa ($n=2$) である. 湿潤密度試験より求めた水中単位体積重量 γ' は 7.7kN/m³ ($n=10$, 海水密度 1,025kg/m³ として計算) である.

2.5 試験結果

静的水平載荷試験の載荷荷重と水平変位の関係を図 2 に示す. 荷重はロードセルで計測した値である. 水平変位は変位計 2 (深礎底面+0.5m) で計測した値である. 本研究では, 載荷荷重と水平変位の関係がほぼ線形関係にある 1,843kN 以下を対象に分析を行った. なお, 試験の最大荷重は 4,126kN であるが, 鋼管杭は約 3,000kN 程度で深礎底面より下方約 2m 付近が降伏した.

挿入式傾斜計の計測により確認できた杭周辺地盤の変位は数 mm 程度であり, 杭の変位と比較して小さいものの, 表 1 に示す深度よりも上部の地盤は載荷方向に変位し, 下部の地盤は載荷方向と逆方向に変位する挙動が確認できた. この結果より, 鋼管杭の回転中心は深礎底面から 6m 付近にあり, 荷重の増加とともに回転中心は深くなる傾向があると推察した.

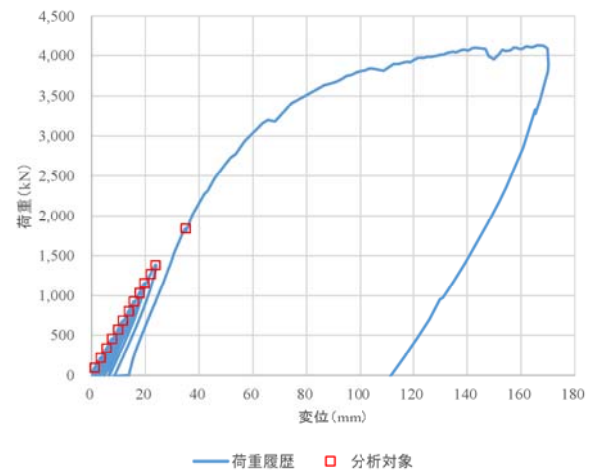


図 2 載荷荷重と水平変位 (深礎底面+0.5m) の関係

表 1 挿入式傾斜計で推定した杭の回転中心の深度

載荷荷重	傾斜計 2	傾斜計 3
1,384kN 時点	5.5m	5.3m
4,126kN 時点	6.5m	5.6m

※深礎底面からの深度.

3. 鋼管杭の応答の推定方法

3.1 深礎底面における F_0 , M_0 , θ_0 , y_0 の推定方法

(1) 作用水平力 F_0 と作用モーメント M_0 の推定方法

深礎底面における作用水平力 F_0 と作用モーメント M_0 は, 式(1)と式(2)より求めた.

$$F_0 = P \quad \text{式(1)}$$

$$M_0 = P \cdot h \quad \text{式(2)}$$

ここで, P は水平載荷荷重 (kN), h は深礎底面から載荷位置までの距離 7.3m である.

(2) 回転角 θ_0 と水平変位 y_0 の推定方法

地上部 (載荷位置から深礎底面まで) の任意高さ z におけるモーメント分布は式(3)となる.

$$M(z) = P \cdot z + M_0 \quad \text{式(3)}$$

ここで, z は深礎底面からの距離 (m) であり, 下向きを正, 上向きを負とする.

地上部の任意高さ z における回転角 $\theta(z)$ は, 式(4)を 1 回積分した式(5)より求めた. また, 水平変位 $y(z)$ は, 式(4)を 2 回積分した式 (6)より求めた.

$$\frac{d^2y}{dz^2} = -\frac{M(z)}{EI} \quad \text{式(4)}$$

$$\theta(z) = \frac{dy}{dz} = -\frac{P}{2EI}z^2 - \frac{M_0}{EI}z + \theta_0 \quad \text{式(5)}$$

$$y(z) = -\frac{P}{6EI}z^3 - \frac{M_0}{2EI}z^2 + \theta_0z + y_0 \quad \text{式 (6)}$$

ここで, E は鋼管杭の弾性係数 $205 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$, I

は鋼管杭（溝形鋼を含む）の断面二次モーメント 0.062 m^4 である。

深礎底面における回転角 θ_0 と水平変位 y_0 は、式(5)と式(6)に小型傾斜計 2 と変位計 2 で計測した回転角 θ_2 と水平変位 y_2 を代入し、 θ_0 と y_0 について解くことで求めた。

3.2 地中部における杭の M, Q, p, θ, y の推定方法

(1) 曲げモーメント分布 $M(z)$ の推定方法

地中部における杭の曲げモーメント M は、断面 2～断面 12 に設置したひずみゲージの計測ひずみより式(7)で求めた。

$$M = \frac{2\varepsilon}{d} EI \quad \text{式(7)}$$

ここで、 d は下杭の内径 $1,520\text{mm}$ （圧縮側と引張側のひずみゲージ間距離）である。 E と I は前述の値と同じである。計測ひずみ ε は、引張側のひずみ ε_t と圧縮側のひずみ ε_c がいずれも正常値と判断される場合には、それらの絶対値の平均値とした。また、どちらか一方が正常値と判断できない場合には、正常値と判断されるひずみのみを用い、両方が正常値と判断できない場合には、当該深度のデータを除外した。正常値の判断は、ひずみゲージが断線・絶縁していないことや、荷重変化とひずみ変化が連動していること等を確認することで行った。

地中部における杭の曲げモーメントの分布 $M(z)$ は式(8)より推定した。

$$M(z) = \frac{a}{12} z^4 + \frac{b}{6} z^3 + \frac{c}{2} z^2 + F_0 \cdot z + M_0 \quad \text{式(8)}$$

ここで、 a, b, c は係数であり、計測ひずみより求めた各断面の曲げモーメント M にフィッティングすることで求めた。

(2) セン断力分布 $Q(z)$ と地盤反力分布 $p(z)$ の推定方法

地中部における杭のせん断力分布は、式(8)を 1 回微分した式(9)より推定した。また、杭に作用する地盤反力分布は、式(8)を 2 回微分した式(10)より推定した。

$$Q(z) = \frac{dM(z)}{dz} = \frac{a}{3} z^3 + \frac{b}{2} z^2 + c \cdot z + F_0 \quad \text{式(9)}$$

$$p(z) = \frac{d^2 M(z)}{dz^2} = a \cdot z^2 + b \cdot z + c \quad \text{式(10)}$$

(3) 杭の回転角 $\theta(z)$ と水平変位 $y(z)$ の推定方法

地中部における杭の回転角と水平変位は、モノパイル基礎を想定した実験のデータ分析法が示されている Li et al ³⁾ の方法より求めた。この方法は、式(11)～式

(15)を用いることで、係数 a, b, c のフィッティングを行う際に、地盤反力 p が 0 となる杭の回転中心の深さ Z_r において、水平変位 y が 0 となる制約を設けている。

地中部における杭の回転角 $\theta(z)$ は、式(8)を杭の曲げ剛性 EI で除して 1 回積分した式(11)より求めた。また、水平変位 $y(z)$ は、式(8)を 2 回積分した式(12)より求めた。

$$\theta(z) = \left[\frac{\left(\frac{a}{60} z^5 + \frac{b}{24} z^4 + \frac{c}{6} z^3 + \frac{F_0}{2} z^2 + M_0 z \right)}{EI} \right] + C_0 \quad \text{式(11)}$$

$$y(z) = \left[\frac{\left(\frac{a}{360} z^6 + \frac{b}{120} z^5 + \frac{c}{24} z^4 + \frac{F_0}{6} z^3 + \frac{M_0}{2} z^2 \right)}{EI} \right] + C_0 z + y_0 \quad \text{式(12)}$$

ここで、 C_0 と y_0 は積分定数である。 C_0 は式(13)より求めた。 y_0 は深礎底面における水平変位である。なお、式(13)は式(12)から求めており、右辺にマイナスを付している点が Li et al ³⁾ の原文と異なる。

$$C_0 = - \left[\frac{\left(\frac{a}{360} Z_r^6 + \frac{b}{120} Z_r^5 + \frac{c}{24} Z_r^4 + \frac{F_0}{6} Z_r^3 + \frac{M_0}{2} Z_r^2 \right)}{EI} \right] + y_0 \quad \text{式(13)}$$

(4) 杭の回転中心の深さ Z_r の推定方法

杭の回転中心の深さ Z_r は、地盤反力が 0 になる深度であり、式(14)と式(15)より求めた。

$$p_{(z=Z_r)} = a \cdot z^2 + b \cdot z + c = 0 \quad \text{式(14)}$$

$$Z_r = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{式(15)}$$

(5) フィッティングの制約条件

本研究では、Microsoft Excel のソルバー機能を用いて、計測値と近似値の差の 2 乗和が最小となるように係数 a, b, c のフィッティングを行った。本研究で使したフィッティングの制約条件を以下に示す。

- ・ 地盤反力 p が 0 となる深さと水平変位 y が 0 となる深さが一致する。
- ・ 杭先端 ($z=10.1\text{m}$) の曲げモーメントは、断面 12 ($z=9.6\text{m}$) 以下となる。
- ・ 杭の回転中心 Z_r は深度 $5\text{m} \sim 7\text{m}$ の範囲にある。

4. 地中部における鋼管杭の応答の推定結果

3.2 節に示す方法で推定した地中部における杭の曲げモーメント分布 $M(z)$ 、せん断力分布 $Q(z)$ 、地盤反力分布 $p(z)$ 、水平変位分布 $y(z)$ を図 3 に示す。紙面の都合上、回転角 $\theta(z)$ の分布は割愛した。

杭先端の応答 (M, Q, p, y) は 0 に収束せず、荷重の

増加とともに増加する傾向が見られた。曲げモーメントの最大値は、深礎底面から 1.3～2.1m の範囲にあり、載荷荷重の増加とともに発生位置が深くなる傾向が見られた。杭の回転中心の深さ Z_r は、せん断力が最大になる深度と同じ深度 5.5 m～6.6 m であり、荷重の増加とともに深くなる傾向が見られた。杭の回転中心が荷重の増加に応じて深くなる傾向は、挿入式傾斜計で確認した結果（表 1）と概ね整合した。

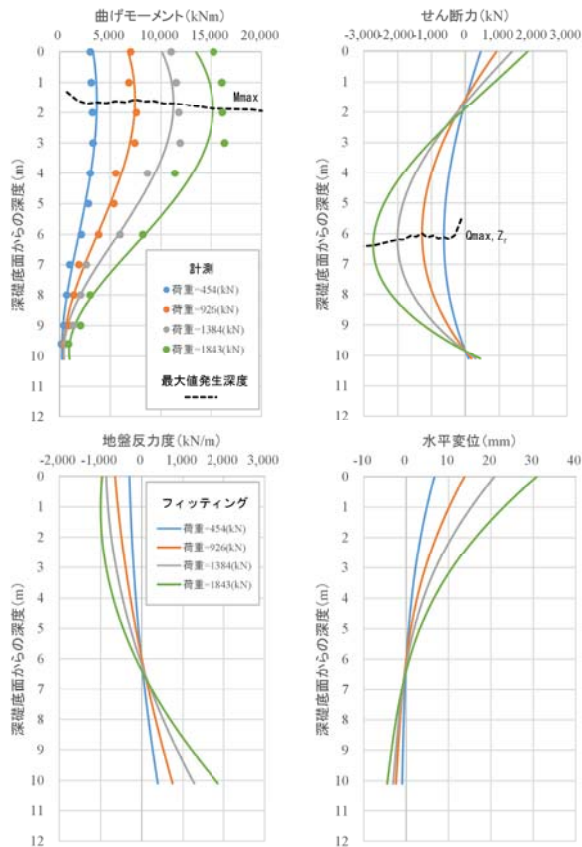


図 3 地中部における杭の応答分布 (M,Q,p,y)

5. 地盤反力曲線 (p-y 曲線) の推定結果

推定した鋼管杭の水平変位分布 $y(z)$ と地盤反力分布 $p(z)$ より求めた地盤反力曲線 (p-y 曲線) を図 4 に示す。この p-y 曲線は、API 基準⁷⁾で求めた p-y 曲線よりも傾きが急になることが分かった。また、回転中心 (6m 程度) で浅では深度の増加に応じて傾きが急になる傾向があり、回転中心以深では深度によらず傾きは各深度で同程度となった。このように、剛短杭の地盤反力曲線が API で求めたものと異なる傾向を示すことは、Li et al.³⁾の研究でも確認されている。

6. まとめ

本研究では、モノパイルを想定した杭径 $D=1.6\text{m}$ 、根入れ長 $L=10.1\text{m}$ 、 $L/D=6.3$ の鋼管杭の静的水平載荷

試験より、地中部における鋼管杭の曲げモーメント、せん断力、地盤反力、回転角、水平変位を推定した。その結果、深度 6m 程度を中心として杭が回転挙動を示すことや、杭の先端には曲げモーメント、せん断力、変位が発生することを明らかにした。また、試験より推定した地盤反力曲線 (p-y 曲線) は、API 基準で求めた p-y 曲線よりも傾きが急であることや、杭の回転中心以深では深度に応じた傾きの変化が現れにくいこと等、API 基準の p-y 曲線と傾向が異なることを明らかにした。

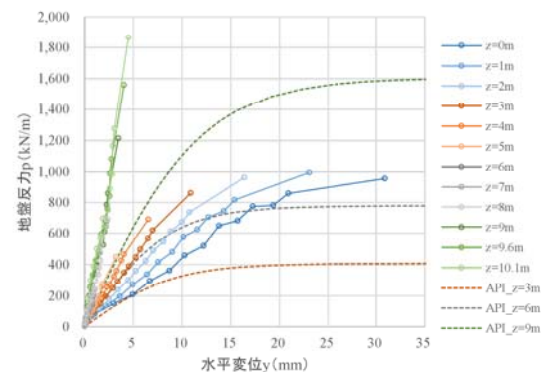


図 4 地盤反力曲線 (p-y 曲線)

7. 参考文献

- 1) NEDO：洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ、洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会，2021
- 2) B.W. Byrne：水平荷重を受ける洋上風車のモノパイルの設計，基礎工，48 巻，12 号，pp18-21，2020
- 3) W. Li, B. Zhu, M. Yang: Static Response of Monopile to Lateral Load in Overconsolidated Dense Sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(7):04017026, 2017.
- 4) C. Leblanc, G.T. Houlsby, B.W. Byrne：Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading. Geotechnique, 60(2), 79-90, 2010
- 5) B.W. Byrne et al: New design methods for offshore wind turbine monopiles, OSIG 8th International Conference, 2017.
- 6) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説 第 1 回改訂版，2010.
- 7) API：RP 2GEO, Geotechnical and Foundation Design Considerations, 2014.