

我が国の地盤における PISA 設計法の適用 (その4) - 杭の鉛直載荷試験 -

洋上風力 モノパイル 杭の鉛直載荷試験

三菱商事洋上風力
シーテック
地盤試験所

国際会員 深沢 健
高見 一郎
正会員 ○中山 敦
正会員 吉國 将大

国際会員 平林 弘
鳥居 祐城
正会員 高野 公作
国際会員 大野 雅幸

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：大湊）において実施した鉛直載荷試験（衝撃載荷試験 DLT，急速載荷試験 RLT）¹⁾の中から、杭径が最大で最も根入れが深い杭 No.7 について、荷重—変位量関係やセットアップの結果を紹介する。

また、載荷試験の結果から開端杭の杭先端抵抗メカニズムを推定し、モノパイルの杭先端部の抵抗特性を考察する。

2. 試験概要

試験鋼管杭の諸元を表-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で実施した SPT の N 値と CPTU による先端補正抵抗 q_t の深度分布を示した。試験杭は、地点 A では名洗層（固結した砂）に、地点 B では沖積粘土と砂から成る二層地盤に、根入れ比 (L_G/D) 6 で設置した。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した。

試験杭の施工には油圧ハンマー（地点 A：IHC-S280，地点 B：IHC-S200）による打撃工法を用いた。計画根入れ深さに達するまで、地点 A では 1,469 回（打撃エネルギー 40~90 kN·m/blow），地点 B では 922 回（36 kN·m/blow）の打撃回数を要した。

杭打設終了後、地点 A では 41 日間の養生期間後、地点 B では 34 日間後に急速載荷試験 (RLT) を実施した。RLT のために試験杭には杭頭 L0，杭上端 L1（地盤面付近），杭中間 L2，杭先端部 L3 の 4 断面にひずみ計と加速度計を設置した。

前記二つの試験方法は、地盤工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」杭の衝撃載荷試験方法 (JGS1816-2002)，および杭の急速載荷試験方法 (JGS1815-2002) に拠った。

3. 試験結果

3.1 衝撃載荷試験 (DLT)

杭打設直後の杭支持力を求めるため、杭打設時の最終打撃では波形マッチング解析を行った。結果は後述の表-3 に示す。

3.2 急速載荷試験 (RLT)

地点 A では、質量 $m = 85$ ton の重錘を用いて落下高 $h = 0.4 \sim 3.0$ m で計 5 回の試験を実施した。地点 B では、 $m = 23$ ton， $h = 0.15 \sim 3.5$ m で計 8 回の試験を実施した。

2 地点の L1（地盤面）の地盤抵抗力と鉛直変位の関係を図-2 に示す。地点 A では 3 打撃目 ($h = 1.7$ m) で除荷点抵抗力 R_{ulp} （静的地盤抵抗力）の最大値 $R_{ulp(max)} = 32,597$ kN，L1 変位 13.3mm となり、その後 R_{ulp} は大幅に低下した。地点 B では 7 打撃目 ($h = 2.5$ m) で $R_{ulp(max)} = 6,910$ kN，L1 変位 35.3 mm となり、その後の最大落下高 $h = 3.5$ m でも $R_{ulp} = 6,331$ kN と $R_{ulp(max)}$ 相当を維持した。

L1 除荷点抵抗力最大時の杭軸力の深度分布を図-3 と表-2 に示す。

表-1 試験鋼管杭諸元

項目	単位	地点 A	地点 B
外径 D	mm	2000	
板厚 t_w	mm	35	30
幅厚比 (径厚比) D/t_w		57.1	66.7
杭長 L	m	18.0	14.5
根入れ長 L_G	m	12	
根入れ比 L_G/D		6	
閉塞断面積 A_o	m ²	3.142	
実断面積 A_t	m ²	0.216	0.186
外周長 ψ_o	m	6.283	
内周長 ψ_i	m	6.063	6.095
軸剛性 EA	kN	45,510	38,707

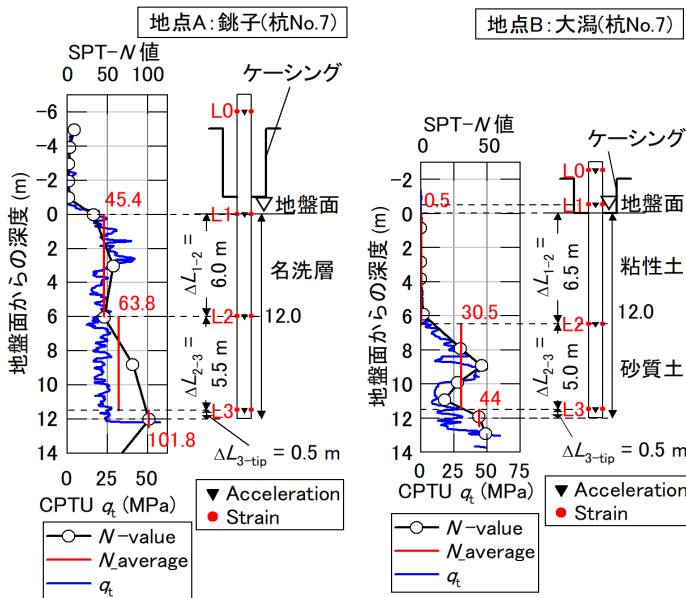


図-1 地盤条件および計器配置

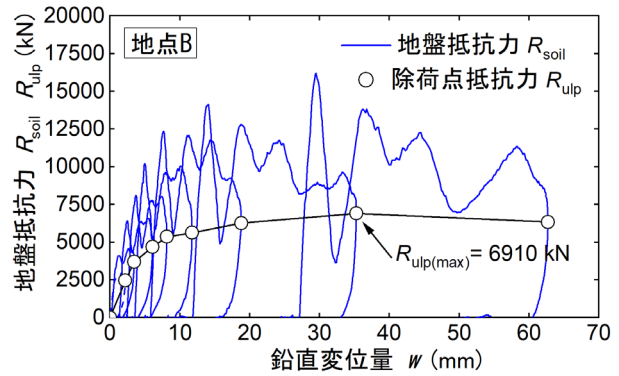
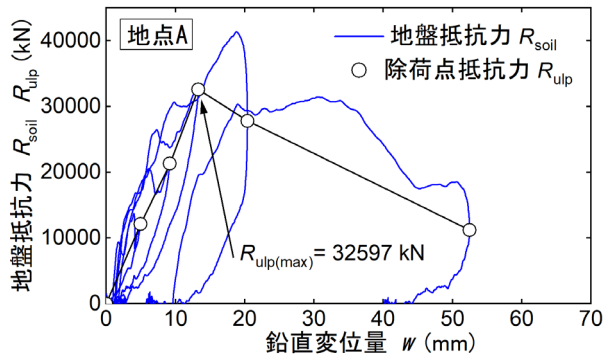


図-2 L1位置の地盤抵抗力と鉛直変位量の関係

3.3 杭の支持力およびセットアップ率

DLT, RLTの結果とセットアップ率を表-3に示す。なお周面抵抗力(L1-L3区間), 先端部抵抗力(L3位置), 全抵抗(L1位置)とも最大値である。地点Aでは周面抵抗の養生期間での増加が大きく, 地点Bでは先端抵抗の増加が大きい。杭全抵抗のセットアップ率は地点A:563%, 地点B:210%であった。菊池ら²⁾は数多くの杭施工時DLTと養生後の载荷試験の比較事例から, 杭全抵抗のセットアップ率はばらつきが大きい最低2倍程度は見込めると報告しており, 本結果も2倍を超えるセットアップ率であった。

3.4 杭先端部の鉛直抵抗特性

国内では, 杭径が10mにも及ぶモノパイルの杭先端の抵抗特性を明らかにした例はない。そこで杭径2m, 径厚比60程度の試験杭の杭先端部の抵抗力を図-4のように杭の実断面の先端抵抗力と内・外周面抵抗力の和と考え, 港湾基準の支持力係数を用いてL3位置での支持力を計算した。

支持力計算値とL3位置の静的抵抗力測定値(L1抵抗力最大時)を比較した結果を表-4に示す。支持力計算値は測定値に対して80~114%であり多少のばらつきを示すが, 载荷試験とほぼ同様の結果を示した。この結果は周面抵抗力の評価が杭先端から僅か0.5mの範囲ではあるものの, 菊池ら²⁾が示した実測の杭先端抵抗力を港湾基準における推定式で除した見かけの閉塞率と杭径の関係図における「杭径が大きくなると見かけの閉塞率が小さくなる傾向」と矛盾しておらず, モノパイルの先端抵抗が今回と同様の方法で評価できる可能性が示されたと考える。

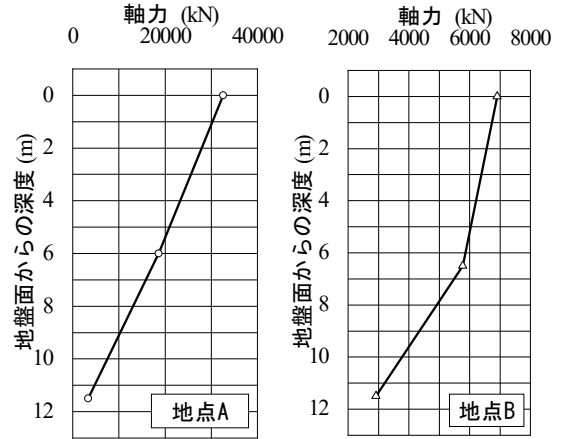


図-3 軸力分布図 (L1: R_{ulp(max)}時)

表-2 L1除荷点抵抗力最大時の杭軸力

地点	落下高 h (m)	L1 (kN)	L2 (kN)	② L3 (kN)
A	1.7	32,597	18,576	3,373
B	2.5	6,910	5,771	2,916

表-3 DLT, RLT結果及びセットアップ率

		周面抵抗 (kN)	先端抵抗 (kN)	全抵抗 (kN)
地点A	DLT	3,394	2,399	5,793
	RLT	29,224	3,373	32,597
	Set-up	861%	141%	563%
地点B	DLT	2,331	959	3,291
	RLT	3,994	2,990	6,910
	Set-up	171%	312%	210%

4. おわりに

地盤条件の異なる二地点で打設時の衝撃载荷試験と養生後の急速载荷試験を実施し, 静的な荷重-変位関係と打設時と養生後の静的抵抗力の比であるセットアップ率を確認した。また, 急速载荷試験による杭先端付近の静的抵抗力は, 杭先端実断面積に働く抵抗力と杭の内・外周面に働く抵抗力の計算値とほぼ同様の値を示した。この結果から, モノパイルの鉛直支持力評価に際しては, 杭内周面摩擦を考慮することができると考える。

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)
- 2) 菊池喜昭ら : 载荷試験を活用した鋼管杭の設計・施工管理手法の体系化, 港湾空港技術研究所資料, No.1202, 2009.9

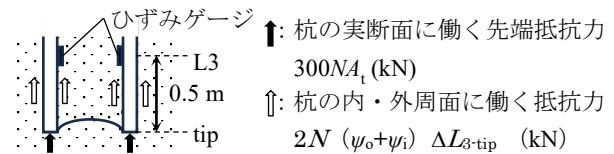


図-4 杭先端付近の模式図

表-4 L3位置における支持力計算値と測定値の比較

地点	支持力計算値 (kN)			①/ 表-2②
	先端抵抗	周面抵抗	①合計値	
A	3,241	617	3,858	114%
B	1,809	545	2,345	80%