

鋼杭打設時の施工管理効率化に向けた 検討について ～測定用ヤットコの使用による 管理用データ取得方法改善効果の検証～

川 晃太¹

¹国土交通省 中部地方整備局 企画部 企画課 (〒460-8514愛知県名古屋市中区三の丸2-5-1)

従来の鋼杭の打撃施工管理で用いられるハイリーの簡略式は精度があまり高くないことが指摘されており、品質管理において懸念がある。また、貫入量・リバウンド量の測定作業は、打設中のハンマー直下に計測員が立ち入ることが多く、安全性の懸念がある。そこで、鋼杭の打撃施工管理の品質向上及び安全性向上を図ることを目的に、新技術導入促進として、測定用ヤットコを用いた鋼杭の打撃施工管理の現地試験を国土技術政策総合研究所と共同で実施した。本論文では、四日市港霞ヶ浦地区国際物流ターミナル整備事業の鋼管杭打設工事において実施した、測定用ヤットコを用いた鋼杭の打撃施工管理の現地試験の概要及び成果を紹介する。

キーワード 栈橋式岸壁，載荷試験，ハイリー式，Case-u法

1. はじめに

四日市港北部に位置する霞ヶ浦地区は、コンテナ貨物や完成自動車、エネルギー関連貨物を取扱う背後圏産業を支える物流拠点である。近年四日市港を利用する東南アジア航路のコンテナ船の大型化が進展している。また、四日市港の背後圏に位置する自動車企業等において完成自動車の取り扱いが増加しており、それらに適応した港湾機能の強化が必要である。今後、大型船が着岸可能である岸壁の不足が見込まれるため、水深14m岸壁の更なる整備が求められている。

このため、令和3年度より、既存のW80岸壁に連続する、延長330mの耐震強化岸壁W81岸壁(水深-14m)を新たに整備する「四日市港霞ヶ浦地区国際物流ターミナル整備事業」に着手した。

W81 岸壁は、海上に鋼杭を打ち込む直杭式横栈橋構造であり、栈橋を支持する鋼杭は、支持力の推定式等を用いて照査を実施することが不可欠である。

鋼杭を打撃施工する場合においては、ハイリーの簡略式等を用いて施工管理を行うことが一般的であるが、推定手法として精度が低い。そこで、鋼杭の打撃施工における品質管理の精度向上を図ることを目的に、新技術導入促進のため、測定用ヤットコを用いた鋼杭の打撃施工管理の現地試験を国土技術政策総合研究所と共同で実施した。

本論文では、四日市港霞ヶ浦地区国際物流ターミナル整備事業の鋼管杭打設工事において実施した、測定用ヤットコを用いた鋼杭の打撃施工管理の現地試験の概要及び効果等を紹介する。

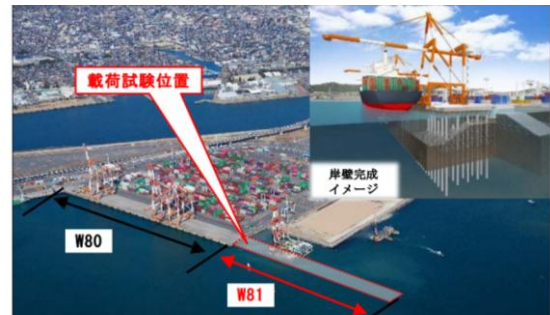


図-1 四日市港霞ヶ浦北ふ頭地区W81

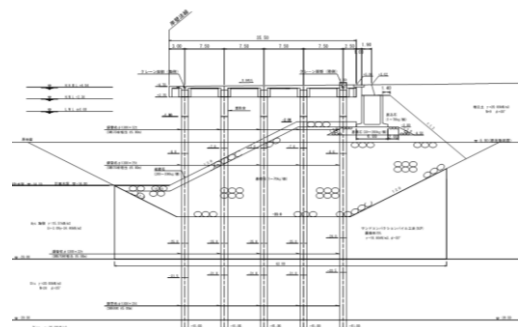


図-2 W81標準断面図

2. 現地試験の概要

(1)試験の背景

鋼杭の打撃施工管理は、支持層の計測深度付近の貫入量およびリバウンド量を記録し、ハイリーの簡略式により支持力算定を行っているが、ハイリーの簡略式は杭打ちという動的な挙動の過程において計測した貫入量およびリバウンド量を基に、静的な支持力を求めるものであり、支持力の推定式として精度が低い。

一方で、衝撃载荷試験により、鋼管杭に取り付けた計測器で、打設中の加速度・ひずみのデータを取得し、データを解析することで精度の高い支持力を算定することが可能であるが、全ての杭に対して加速度計、ひずみ計を取り付けることは施工性および経済性の観点から現実的ではない。

そこで、本試験では、施工管理精度、安全性および施工性の向上を図るため、計測器を装着したヤットコを介して計測することで、鋼管杭に計測器を取り付けなくても打設作業と並行して支持力の算定が可能となる手法を検証する。

(2)試験位置

現地試験は「令和6年度四日市港霞ヶ浦北ふ頭地区岸壁(-14m)本體工事」で打設する鋼杭160本の内、2本を対象に実施した。試験位置を図-3に示す。

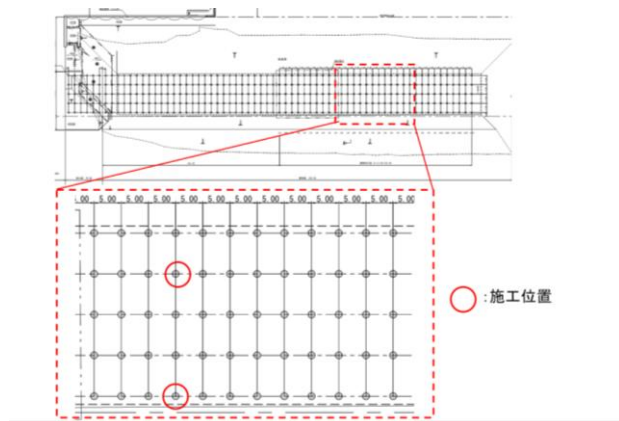


図-3 試験位置図

(3)ヤットコの構造検討

ヤットコは、杭の打設高さが施工基面より低い時、土中に打ち込む際に用いる鋼杭製の仮杭であり、鋼管杭の杭頭にかぶせて使用する。なお、ヤットコと鋼管杭は一体化されておらず、鋼管杭打ち込み時の衝撃により、ヤットコおよび鋼管杭が損傷することが懸念される。

そのため、他港で施工実績を踏まえ、構造形式はガイド鋼管式とし、打設時にヤットコがズレた場合でも鋼管杭の杭頭部が全周に渡り、ヤットコと鋼管杭が接する構造となるよう、鋼管杭と同径としたうえで鋼管杭の杭頭

との接面を厚くした。図-4にヤットコ構造図を示す。

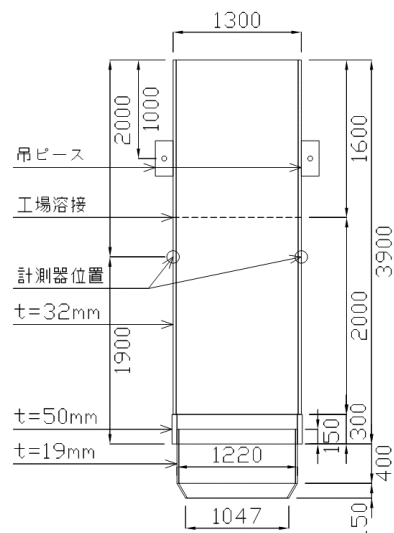


図-4 ヤットコ構造図

(4)試験方法

図-5に示すとおり、ヤットコと鋼管杭の不連続面の影響により、測定用ヤットコにおいて、先端からの引張の反射波の計測ができないことが考えられる。

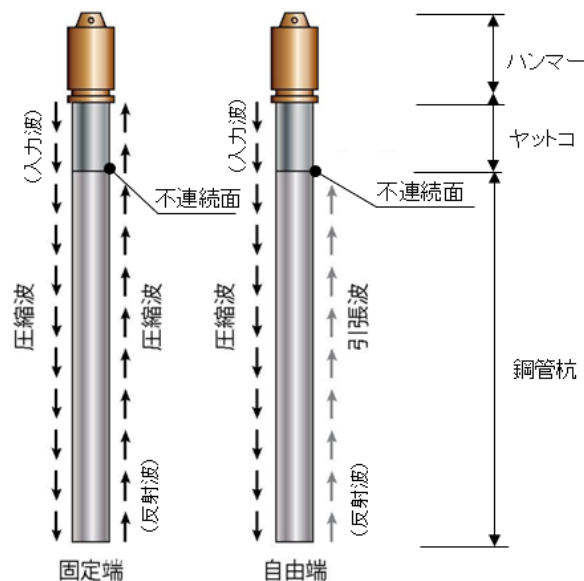


図-5 ハンマー打撃により生じる圧縮波と引張波

試験概要図を図-6に示す。本試験では、測定用ヤットコにおける先端からの引張の反射波の計測を考慮し、測定用ヤットコと鋼管杭の両者に計測器を取り付け、施工中の加速度データ・ひずみデータを連続取得し、両者の伝達エネルギーと全抵抗の相関性を確認する。

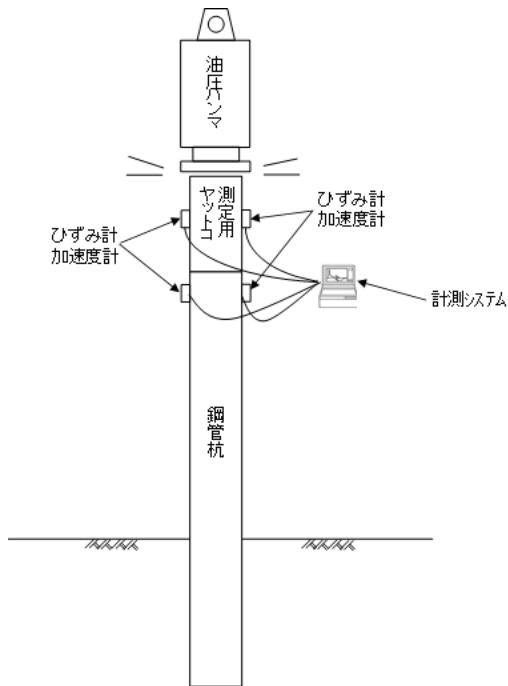


図-6 試験概略図

計測は、支持層の打ち止め深度の約3.3m手前（2.5D）の-37.7mから、鋼杭および測定用ヤットコでの計測を開始する。また、ハンマーエネルギーの違いによる相関性の変化を確認するため、支持層到達の-39.0mから-40.5mにおいては、打撃エネルギーは4段階（40kN・m、70kN・m、100kN・m、130kN・m）に変化させ、5打撃毎に段階的に上昇させた。工事において施工管理データとして貫入量およびリバウンド量を計測することから、打ち止め深度（-41.0m）の0.5m手前でヤットコを介した打撃を終了する。

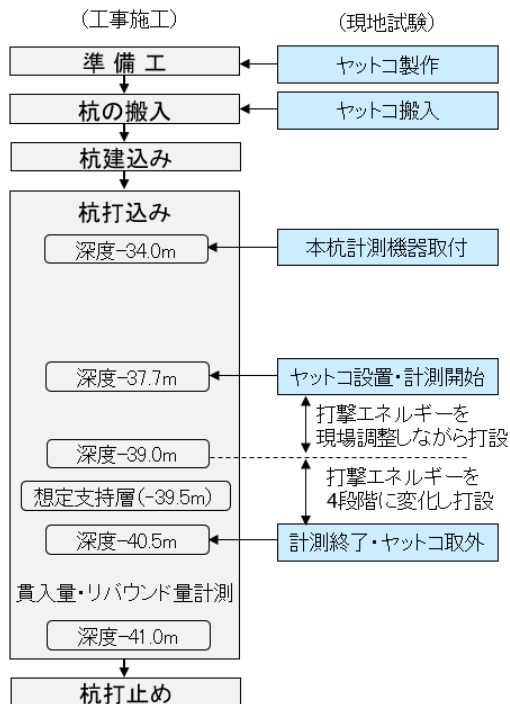


図-7 フロー

3. 現地試験結果の分析

(1) 分析方法

計測データを基に、鋼管杭およびヤットコの伝達エネルギーと全抵抗の相関性を確認する。

測定用ヤットコを用いた施工管理は、衝撃载荷試験をベースとしていることから、Case法により算出する。

なお、Case法とは、杭の支持力を評価する方法の一つであり、杭頭を打撃して波動伝播により得られるひずみと加速度を計測することにより、地盤の抵抗力を求めるものである。

杭体に生じた断面力の入力波（下降波） F_d と反射波（上昇波） F_u を式（1a）（1b）により求める。

$$F_d(x, t) = \frac{F(x, t) + (x, t)}{2} \quad (1a)$$

$$F_u(x, t) = \frac{F(x, t) - (x, t)}{2} \quad (1b)$$

F_d ：入力波（下降波）， F_u ：反射波（上昇波）

v ：速度， F ：断面力， Z ：杭体のインピーダンス

式（1a）（1b）において、速度 v は計測した加速度 a を積分することで求めることができ、断面力 F はひずみ値 ε から得ることができる。

Case法は、杭頭に与えた打撃による入力波と、それが杭体を1往復して戻ってきた反射波の和が地盤の抵抗と釣り合うとして、以下のように全抵抗（静的抵抗成分+動的抵抗成分）を計算する。

$$R = F_d(x_0, T_1) + F_u(x_0, T_1 + 2\frac{L_m}{c}) \quad (2)$$

t ：時間， x_0 ：測定位置， L_m ：測定位置から杭先端までの長さ

c ：縦波伝搬速度 $c = \sqrt{E/\rho}$ ， R ：測定位置以深の全抵抗
 E ：杭のヤング率， ρ ：密度

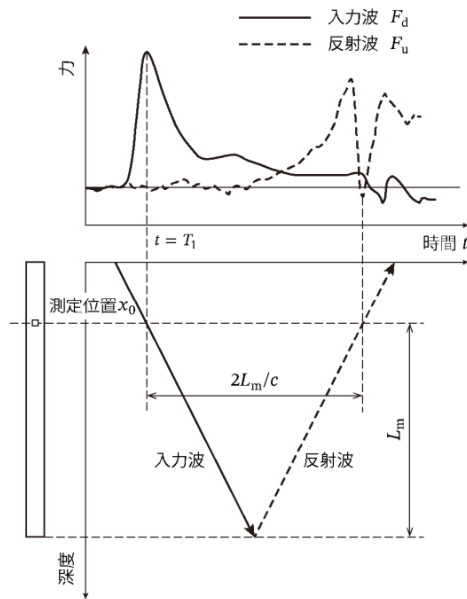


図-8 Case法の概要

(2) 分析結果の概要

伝達エネルギーおよび全抵抗の詳細な試験結果は、本試験の関係機関である国立研究開発法人 港湾技術研究所が執筆中の論文を参照願いたい。ここでは、伝達エネルギーと全抵抗の相関性を簡単に紹介する。

伝達エネルギーについて、測定用ヤットコでは、先端からの引張の反射波が計測できず、Case法を用いるにあっては、欠損した情報を補完する必要がある。また、測定用ヤットコでは杭に比べ全抵抗が大きくなった。

4. 測定用ヤットコを用いた施工管理手法

(1) 管理手法の概要

測定用ヤットコによる打撃施工管理は、簡易な衝撃载荷試験といえる。新たな管理手法は、衝撃载荷試験のデータ解析で用いるCase法をベースとし、現地試験による課題（測定用ヤットコにおいて先端からの引張の反射波が計測できなかったこと）を考慮したものとする。

現地試験において、測定用ヤットコに先端からの引張の反射波が伝わらなかったことは、杭先端の抵抗力に関する情報が欠損していることに等しいと考えられる。そのため、新たな管理手法として、Case法を杭の先端変位量（貫入量）を用いて修正したCase-u法を提案する。

Case-u法では、従来のCase法と同様に、杭施工中の地盤の抵抗値（全抵抗）をリアルタイムでモニタリングすることができ、支持層への到達を明確に確認できるようになる。また、波形マッチング解析により、Caseダンピングを求めることで、より精度の高い地盤の静的抵抗力を推定することが可能となる。

(2) 波形マッチング解析による静的抵抗比の推定

波形マッチング解析は、杭を一次元の弾性体とし、地盤の静的抵抗成分を杭軸方向のばねとスライダーで、動的抵抗成分をダッシュポットでモデル化し、一次元波動理論に基づいて、杭体を伝搬する応力波を解析する手法である。測定した反射波と計算した反射波を比較し、両者が一致するまで地盤パラメータ（ばね、スライダー、ダッシュポット）を変化させることで、実地盤の抵抗状態を表現することができ、そのうちの動的抵抗成分（ダッシュポット）を除去することにより、静的抵抗成分を評価することができる。

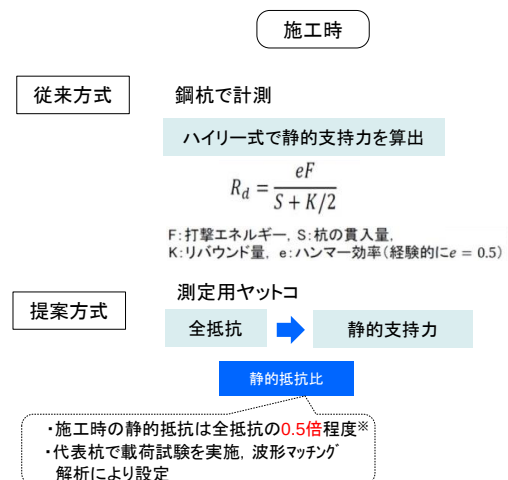
波形マッチングで得られた静的抵抗力を用いればCaseダンピング J_c という定数が得られる。この定数を用いることで全抵抗から静的抵抗を算出することができる。Caseダンピング J_c は無次元量で、主に杭先端付近の地盤材料に影響を受ける定数であるため、代表杭において支持層でのCaseダンピングを一度求めておけば、他の杭で波形マッチングをせずとも、Case法で得られた全抵抗から静的抵抗を算出できる。

しかし、測定ヤットコによる計測データでは、測定用ヤットコと杭の不連続面の影響により、波形マッチング解析を行うことができない。

そのため、港湾施設の技術上の基準に基づき実施する代表杭における载荷試験の計測データを用いて、波形マッチング解析を実施し、Caseダンピング J_c を算出することで、他の杭についても高精度で静的抵抗力を推定することができる。

(3) 従来方式と提案方式の概念

Case-u法の詳細は、本試験の実施主体である国土政策総合研究所が執筆中の論文を参照願いたい。ここでは、従来方式（ハイリー式）と提案方式（Case-u法）の概念図を示す。



※港湾研資料No.1202 p67 菊池ら 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

図-9 従来方式と提案方式の概念図

(4) Case-u法による全抵抗の比較

測定用ヤットコと鋼管杭で計測したデータを用いて、Case-u法により、全抵抗を算定した。詳細な結果は、本試験の関係機関である国立研究開発法人 港湾技術研究所が執筆中の論文を参照願いたい。ここでは、全抵抗値の比較結果を簡単に紹介する。

全抵抗値について、鋼管杭と測定用ヤットコが極めて類似した結果が得られており、Case-u法は先端からの引張の反射波の影響を受けにくく、安定した結果が得られる。

5. 課題と対応

Case-u法により算出した全抵抗値について、鋼管杭と測定用ヤットコで比較した結果、極めて類似しており、測定用ヤットコと鋼管杭が同径の場合においては、精度良く全抵抗を推定できることを確認した。

しかし、今回の現地試験では、鋼管杭の規格を考慮し、ヤットコを製作しており、費用と3.5ヶ月の期間を要した。実用化に向けては、ヤットコの製作費用及び製作期間の面で改善を図る必要があり、測定用ヤットコと鋼管杭の径が異なる場合でも全抵抗値を精度良く推定できるようにすることで、作業船が保有するヤットコを使用するなど、ヤットコを製作せずに施工管理を行うことが可能となる。汎用性の高い手法とするため、引き続き、国土政策総合研究所において検討を進める。

6. まとめ

測定用ヤットコを用いた鋼杭の打撃施工管理が可能となることにより、鋼杭の打撃施工管理における品質管理精度および安全性が向上、さらに生産性が向上し、鋼杭打設時の施工管理効率化が図れる。表1に本手法による効果を示す。

表1 本手法による効果

項目	効果
品質管理精度の向上	間接的な衝撃載荷試験を実施できるため、従来の精度の低い打ち止め管理から解放され、より高精度に支持力確認が可能となる。
安全性の向上	人的ミスのリスク回避により作業がスムーズに進行できることに加え、無人化により作業員の負担が軽減され、効率的な施工が可能となるとともに、従来のリバウンド計測が不要となり、安全性が向上する。
生産性の向上	支持力不足が懸念される場合は、データ解析により詳細な確認が可能となり、施工を中断して不必要な載荷試験や地盤調査の実施が回避でき、無駄な時間やコスト削減が可能となる。

謝辞：本稿で使用した測定用ヤットコを用いた鋼杭の打撃施工管理の現地試験は、国土技術政策総合研究所より提供いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1)公益社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（2018）
- 2)公益社団法人 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 - 第一回改訂版 - (2002)
- 3)水谷崇亮，松村聡：水島港における杭の衝撃載荷試験
空港技術研究所資料，土木学会論文集，2016.