

急速載荷試験による回転圧入鋼管杭の支持力特性調査
(その1 解析手法の選定)

(株)地盤試験所 正会員 ○亀井 秀一, 林 世峻
日本製鉄(株) 鈴木 健吾, 石濱 吉郎, 長浦 崇晃

1. はじめに

鋼管杭に代表される開端杭は杭先端に管内土を詰まらせることで支持力を発揮し、セメントを使用しない点や残土が発生しない点で環境的に優れている。閉塞確保のために支持層へ大きく根入れさせるにはハンマー打撃のような大きなエネルギーを必要とするが、杭を回転圧入させることで根入れに必要な杭頭荷重を低減させることができる。

このような杭工法の実適用に向けて、例えば道路橋に用いる基礎杭の設計においては荷重に対する抵抗要素とその力学的特性が明らかであることが求められる¹⁾。特に道路橋示方書内に規定のない工法を用いる際には、その支持力特性が明らかであることや杭と地盤の間に緩みがなく変位の小さい段階から地盤抵抗が確保できることが求められる。しかしながら、上述の鋼管杭回転圧入工法についてはこれらの検討事例が少なく、特に杭径や杭先端 N 値の違いが支持力特性に与える影響の知見に乏しい。そこで、本研究では N 値 30 程度の地盤において大径の回転圧入杭を用いた急速載荷試験 (RLT) を実施し、その支持力特性を調査した。また、別サイトで実施した杭径の異なる回転圧入杭の静的載荷試験とも結果を比較した。その 1 では実験方法、載荷条件、解析方法、RLT の結果の一部を示す。

2. 実験方法

2. 1. 杭仕様・地盤条件

実験は、(株)地盤試験所の猿島試験場で実施した。図 1 にボーリング調査位置と杭の配置を、表 1 に各杭の仕様を示す。試験杭には杭径 1200 mm, 1500 mm の 2 種類を用い、既存杭を避けて打設した。杭の打設には、全周回転機 $\phi 2000$ 級を用い、施工抵抗低減のためハンマグラブにより管内を掘削しながら施工した。図 2 に地盤調査結果と杭の打設深さを示す。深度 $z = 8$ m までは $N = 1 \sim 11$ 、それ以深では深さとともに N が増加し、 $z = 12.8$ m から $N = 30$ 程度の細砂層が存在する。

施工中の杭の貫入速度とトルクの変化から、支持層は GL-13.5m と判断した。支持層への根入れ量の杭径に対する比率は Pile 1 ($\phi 1200$) が $1.5D$ (D は杭径) であるのに対し、Pile 2 ($\phi 1500$) では $1.0D$ と若干小さい条件で打ち止めた。

2. 2. 載荷条件

試験は地盤工学会の杭の鉛直載荷試験基準 杭の急速載荷試験方法 (JGS 1815-2002)²⁾ に基づいて行った。加力装置は軟クッション重錘落下方式とし、重錘は質量 $m_h = 12 \sim 16$ ton を用いた。落下高さ h を 0.02 ~ 3.00 m に増加して 12 回の試験 (打撃) を行った。急速載荷試験では軟クッションのばね係数を調整し、載荷時間 t_L を相対載荷時間 $T_r = t_L / (2L/c) \geq 5$ (L : 杭長, c : 縦波伝達速度) となるようにした。

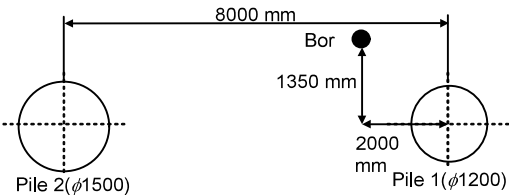


図 1 試験杭と地盤調査の配置

表 1 試験杭の仕様

杭番号	Pile 1	Pile 2
杭外径 (mm)	1200	1500
杭長 (m)	15.8	15.5
根入れ長 (m)	15.3	15.0
板厚 (mm)	19	24
施工方法	全周旋回機による回転圧入 管内土掘削を併用	
先端構造	掘削用ビット	

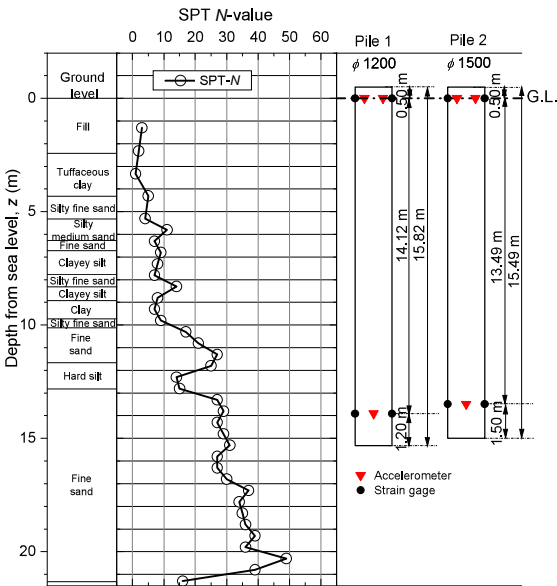


図 2 地盤調査結果と杭の打設位置

キーワード 急速載荷試験, 鋼管杭, 回転圧入
連絡先 〒130-0022 東京都墨田区江東橋 1-16-2 株式会社地盤試験所

3. 急速荷重試験(RLT)の解析方法

RLT 解析は、除荷点接続法 (ULPC 法)³⁾と Case 法を援用した除荷点接続法 (ULPC_CM 法)³⁾で行った。

3. 1. ULPC 法

ULPC 法は JGS 1815-2002 に記載されている除荷点法 (ULP 法) を拡張した方法である。ULPC 法では、杭を剛体質点でモデル化する。地盤抵抗 R_{soil} を求めるには、急速荷重 F_{rapid} から杭体慣性力 $R_a = m a$ を差し引く。ここで m は杭の質量、 a は杭加速度である。

3. 2. ULPC_CM 法

Raushe et al. (1985) による Case 法は、一次元波動理論に基づく方法であり、打撃中の杭の貫入抵抗 R_t を求める方法である。

まず、計測シグナル (軸方向力 F と杭速度 v) から下降波 F_d と上昇波 F_u を計算する (式(1), (2))。それから、式(3)を用いて、杭の貫入抵抗 R_t の時間変化を得る。

$$F_d(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) + Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (1)$$

$$F_u(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) - Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (2)$$

$$R_t(x_m, t) = F_d\left(x_m, t - \frac{L_m}{c}\right) + F_u\left(x_m, t + \frac{L_m}{c}\right) \quad (3)$$

ここで、

x : 杭軸に沿った座標 (杭頭を 0), x_m : 計測位置,
 L_m : 計測位置から杭先端までの長さ, v : 杭速度,
 F : 軸方向力, F_d : 下降波, F_u : 上昇波,
 Z : 杭体のインピーダンス (EA/c),
 E : 杭材のヤング率, A : 杭の断面積,
 c : 縦波伝達速度, R_t : 貫入抵抗 ($=R_{soil}$ 地盤抵抗)

ULPC_CM 法では、ある杭に対して複数回の打撃 (RLT) を想定している。Case 法から得られる貫入抵抗 R_t と直接測定した杭変位 S の時間変化から、 $S - R_{soil}$ 関係を求め、これから除荷点抵抗 R_{ULP} ($=R_w$ 静的地盤抵抗) と除荷点変位を得る。その後、ULPC 法と同様に、複数の除荷点を接続することで、最終的に静的な荷重-変位関係を推定する。

ULPC_CM 法は、一次元波動理論に基づいているため、杭の慣性力の補正が必要無い、杭長による適用制限が緩和される、などの利点を有する。

4. 異なる解析法を用いた Pile 1 の RLT 結果

図 3 は、Pile 1, $h=3.0$ m の RLT における急速荷重 F_{rapid} 、変位 S 、速度 v 、加速度 a の時刻歴を示す。杭頭における载荷時間 $t_L = 44.2$ ms、相対载荷時間 $T_r = 7.39$ であり、試験基準を満足した。

図 4 は、ULPC 法、ULPC_CM 法による $S-R_w$ 関係である。両解析法の $S-R_w$ 関係は $S=10$ mm まで同様の曲線を示し、同変位付近で変曲点が現れその後変位が漸増している。また、変曲点付近では支持機構の変化が打撃毎の地盤抵抗力の解析結果に影響し多少

抵抗力が増減したものと推察される。 $S=20$ mm 以降は打撃回数を重ねるにつれて両解析法の R_w が大きく乖離している。図 3 を改めて見直すと、加速度時刻歴では杭頭加速度 a_h と杭先端加速度 a_t に大きな差が表れている。除荷点時 (破線) においても大きな差が生じており、杭を剛体質点として扱えるとは言い難い。すなわち、 a_h を用いて杭体慣性力を評価する ULPC 法では地盤抵抗力を過大評価することになる。

したがって、その 2 での 2 つの試験杭の RLT 解析では ULPC_CM 法を用いることとした。

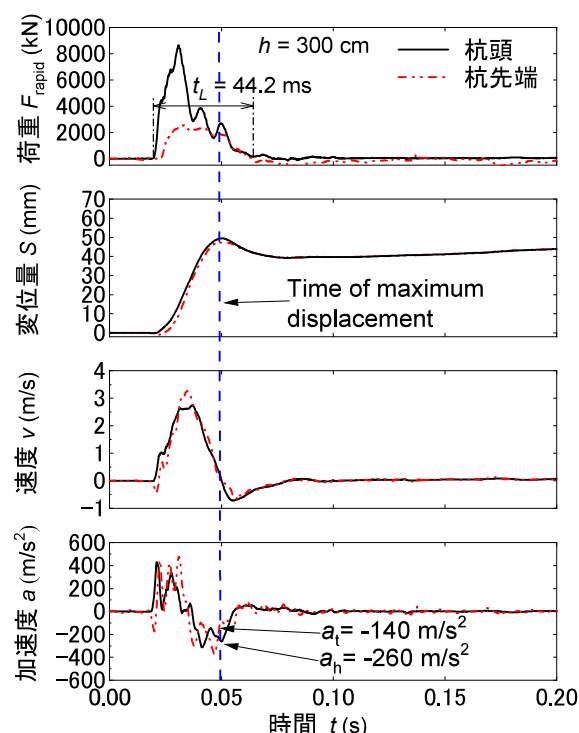


図 3 動的シグナルの一例 (Pile 1, $h=3.00$ m)

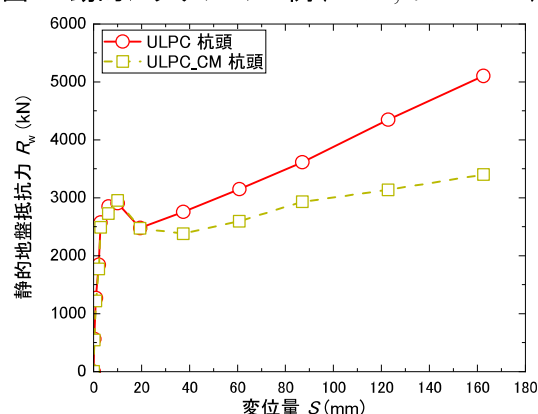


図 4 ULPC 法、ULPC_CM 法による $S-R_w$ 関係 (Pile 1)

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017 年
- 2) JGS 1815-2002 杭の鉛直载荷試験方法・同解説 (第一回改訂版) 杭の急速载荷試験方法，地盤工学会。
- 3) 中山 他 (2022)：Case 法を援用した除荷点接続法による杭の荷重-変位関係の推定法について (その 1：解析手法)，第 57 回地盤工学研究発表会。
- 4) Raushe F. Goble G., Likins G.E. Jr. (1985): Dynamic determination of pile capacity. ASCE Jour. Geotech. Div., 111(3), pp. 367-383.