

## 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）

Case法を援用した除荷点接続法  
 急速載荷試験  
 荷重変位関係

地盤試験所 正会員 ○中山 敦  
 地盤試験所 国際会員 亀井 秀一

地盤試験所 国際会員 林 世峻  
 金沢大学 国際会員 松本 樹典

## 1. はじめに

杭の急速載荷試験は動的な載荷試験法として地盤工学会基準（JGS1815-2002）に新たに規定が追加され20年が経過した。急速載荷試験が載荷試験基準に追加された2002年当時、急速載荷試験の加力装置は反力体慣性力方式が主流であったが、加力装置の改良が進んだ現在では試験のほとんどが軟クッション重錘落下方式で実施されている。これに伴って、載荷回数も極限支持力相当の荷重を1回載荷する方法から、ハンマー落下高さを段階的に上げ、最後に極限支持力相当を載荷する複数回載荷となっている。

反力体慣性力方式では1回の載荷で測定した動的シグナルから除荷点法（ULP法）によって荷重－変位量の関係を算出していた。しかし、載荷回数が複数回となったことで、静的抵抗力とみなせることができる除荷点荷重とそのときの杭変位が落下回数分だけ得られるようになった。そのため、杭の荷重－変位関係は、複数の除荷点での荷重と変位を単純に接続する除荷点接続法（ULPC法）が主体となっている。

その一方、軟クッション重錘落下方式の試験実績が増えより多くのデータが集まった結果、杭を剛体と見なし一質点系モデルで解析する除荷点法の仮定条件や解析方法について課題となる事例が出ている（例えば、Kamei et al., 2022）。

本稿（その1）では、一質点系モデル解析に基づくULP法とULPC法の特徴を説明した上で、一次元波動理論に基づくCase法を援用した除荷点接続法（ULPC\_CM法）を提案する。その2では、相対載荷時間 $T_r = 5, 4, 3$ の急速載荷試験を対象として、静的載荷試験、ULP法、ULPC法およびULPC\_CM法から得られる杭の荷重－変位関係を比較・考察する。

## 2. 除荷点法（ULP法）

Middendorp et al. (1992) は、杭の急速載荷試験では杭体中の波動伝播の影響は無視できるものとし、急速載荷試験では、杭を剛体質点として、杭に動的荷重 $F_{\text{rapid}}$ が作用するとき、杭には静的地盤抵抗力 $R_w$ と動的地盤抵抗力 $R_v$ が作用するものと仮定した。これらの関係は、式(1)、(2)および図-1 で表わされる。

$$R_{\text{soil}} = F_{\text{rapid}} - R_a = F_{\text{rapid}} - m \cdot \alpha \quad (1)$$

$$R_{\text{soil}} = R_w + R_v = R_w + C \cdot v \quad (2)$$

ここで、

$F_{\text{rapid}}$ : 杭頭における荷重,  $R_{\text{soil}}$ : 地盤抵抗力,

$R_a$ : 杭体の慣性力,  $R_w$ : 静的抵抗成分,

$R_v$ : 動的抵抗成分,  $m$ : 杭体の質量,

$\alpha$ : 杭体の加速度,  $C$ : 減衰定数,  $v$ : 杭体の速度

変位 $w$ の最大値 $w_{\text{(max)}}$ は除荷点と呼ばれる。除荷点では、杭速度 $v$ が0となるため、除荷点での荷重（除荷点荷重 $R_{\text{ulp}}$ ）は、静的抵抗力 $R_w$ に等しくなる。

除荷点以外での $R_w$ を求めるには、減衰定数 $C$ を決定する必要がある。Kusakabe & Matsumoto (1995)は、式(3)によって、 $C$ を決定することを提案している。

$$C = (R_{\text{soil}(\text{max})} - R_{\text{ulp}}) / v^* \quad (3)$$

ここで、 $R_{\text{soil}(\text{max})}$ は $R_{\text{soil}}$ の最大値、 $v^*$ は $R_{\text{soil}(\text{max})}$ 時の杭変位速度である。

$C$ が杭の変位や速度に関わらず一定と仮定すれば、式(4)を用いて、 $R_w - w$ 関係を求めることができる。

$$R_w = R_{\text{soil}} - C \cdot v \quad (4)$$

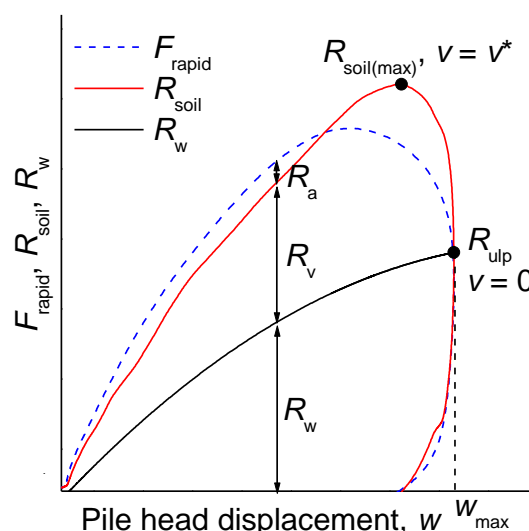


図-1 除荷点法における地盤抵抗成分

## 3. 除荷点接続法（ULPC法）

ULP法は、極限支持力相当の荷重を1回載荷することを想定しているため、減衰定数 $C$ の決定が必要となる。しかし、 $C$ の値は杭の変位や速度によって変わってくることもあり得る。

軟クッション重錘落下方式の載荷試験では、ハンマー落下高さを段階的に上げる複数回載荷となっている。そのため、各打撃において、除荷点荷重とそれに対応する除荷点変位が複数個得られる。したがって、除荷点を単に接続することで、ULP法で必要とされる減衰定数 $C$ を求める必要が無く、除荷点を結ぶだけで図-2に示すように簡単に $R_w - w$ 関係を得ることができる。

ただし、ULP法やULPC法では、杭を剛体質点と仮定しているため、杭長が長くなるほど、杭の弾性変形の影響が大きくなる。例えば、杭の加速度の測定位置によって、荷重－変位関係の推定結果が影響される（Kamei et al., 2022）。

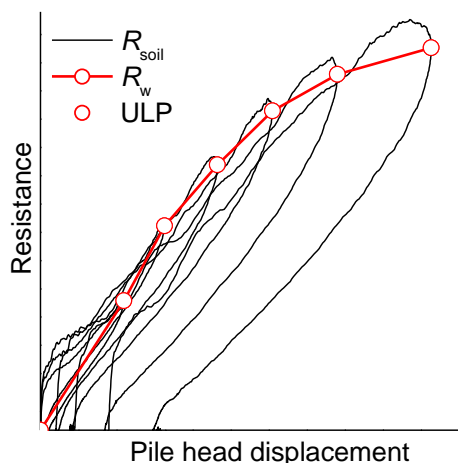


図-2 除荷点接続法 (ULPC法) による荷重-変位関係

#### 4. Case法を援用した除荷点接続法 (ULPC\_CM法)

##### 4.1 Case method (Case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力および $J_c$ 係数と呼ばれる経験的係数を用いて静的貫入抵抗力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(5), (6))。それから、式(7)を用いて、杭の貫入抵抗力 $R_t$ の時間変化を得る (図-3を参照)。

$$F_d(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) + Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (5)$$

$$F_u(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) - Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (6)$$

$$R_t(x_m, t) = F_d\left(x_m, t + \frac{L_m}{c}\right) + F_u\left(x_m, t - \frac{L_m}{c}\right) \quad (7)$$

ここで、

$x$ : 杭軸に沿った座標 (杭頭を0),  $x_m$ : 計測位置,

$v$ : 杭速度,  $L_m$ : 計測位置から杭先端までの長さ,

$F$ : 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 ( $EA/c$ ),

$c$ : 縦波伝達速度,  $E$ : 杭材のヤング率,

$A$ : 杭の断面積,  $R_t$ : 貫入抵抗力

Case法は、打込み時の杭の貫入抵抗力を評価するものであり、これだけでは杭の荷重-変位関係を得ることはできない。しかし、Case法は一次元波動理論に基づいた方法であるため、杭長が長くなってもほぼ正しく杭の貫入抵抗力を評価できる。

児島・西村 (2021) は、杭の急速載荷試験の数値解析を行い、Case法から得られる地盤抵抗力とULPC法解析から得られる地盤抵抗力を比較・検討した。その結果、相対載荷時間 $T_r = t_l / (2L_m/c)$  (ここで $t_l$ は載荷継続時間) が5を下回ると、後者の解析から得られる地盤抵抗力が前者の解析から得られる値を過大評価することを示している。しかし、荷重-変位関係に及ぼす影響には言及していない。

Matsuzawa et al. (2008) は、先端支持杭の急速載荷試験を行い、静的な杭の荷重-変位関係を求めている。この試験では、打撃力が比較的大きな1回の打撃を行っている。そのため、減衰定数 $C$ の決定が必要であった。

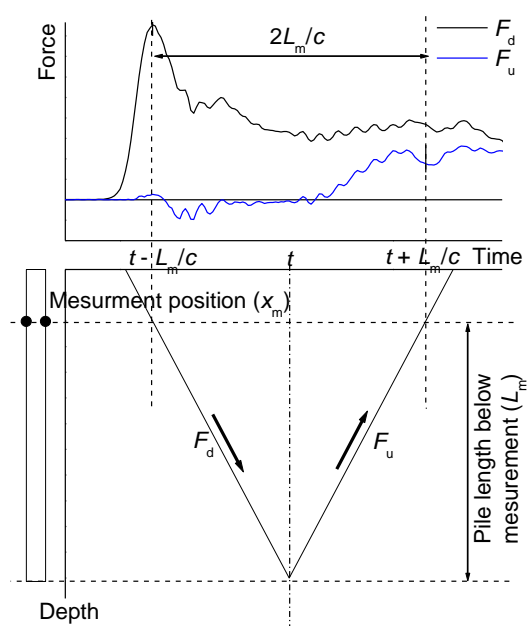


図-3 Case法概要

##### 4.2 ULPC\_CM法 (新しい提案)

ULPC\_CM法では、ある杭に対して複数回の打撃 (急速載荷試験) を想定している。Case法から得られる貫入抵抗力 $R_t$ と直接測定した杭変位 $w$ の時間変化から、 $w - R_{soil}$ 関係を求め、これから除荷点荷重 $R_{ulp}$ 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。

##### 5. おわりに

(その2) では、押込み試験の後に実施した急速載荷試験の結果についてULPC法、ULPC法とULPC\_CM法で解析した事例を報告する。

##### 【参考文献】

- 児島・西村 (2021) : 急速載荷試験の地盤抵抗の解析方法について, 第56回地盤工学研究発表研究会。
- Kamei S., Takano K., Fujita T. (2022): Comparison of static load test and rapid load test on steel pipe piles in two sites, Proc. the 11th Int. Conf. on Stress Wave Theory and Design and Testing Methods for Deep Foundations, Rotterdam, the Netherlands (to be presented).
- Kusakabe O., Matsumoto T. (1995): Statnamic tests of Shonan test program with review of signal interpretation, Proc. 1st Int. Statnamic Seminar, Vancouver, Canada, pp. 113-122.
- Matsuzawa, Nakashima, Nakayama, Matsumoto (2008): A piling method accompanying rapid load testing, Proc. the 8th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal, pp. 487-495.
- Middendorp P., Bermingham P., Kuiper B. (1992): Statnamic load testing of Foundation Pile, Proc. of 4th Int. Conf. on Application of Stress-Wave Theory To Piles, The Hague, pp. 581-588.
- Raushe F. Goble G., Likins G.E. Jr. (1985): Dynamic determination of pile capacity. ASCE Jour. Geotech. Div., 111(3), pp. 367-383.