

## 区間型除荷点接続法による杭の荷重－変位関係の推定（その1：解析法）

急速載荷試験  
区間型除荷点接続法  
荷重変位関係

地盤試験所 正会員 ○小林 剛 土木研究所 藤田 智弘  
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学会基準（JGS1815-2002）に新たに規定が追加され 20 年が経過した。載荷試験基準に追加された 2002 年まで急速載荷試験の加力装置は反力体慣性力方式が多くを占めていたが、加力装置の改良が進んだ現在、国内の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、載荷回数も計画最大荷重を 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る複数回載荷となっている。そのため、解析方法も除荷点（ULP）法から、ULP 法で必要とされる減衰定数  $C$  を求める必要がなく除荷点を結ぶだけで静的な荷重－変位量関係が得られる除荷点接続（ULPC）法（中山 他, 2022）が主流となっている。

このようにして、急速載荷試験の解析法として ULPC 法が普及した結果、杭全長を剛体と見なす一質点系モデルの解析について課題となる事例が出ている。そのため、一質点系で挙動していないと判断される場合の慣性力の評価として、杭体に設置した複数の加速度の平均値を用いる方法（河野 他, 2018）や杭先端の加速度相当まで低減させる方法（吉國 他, 2019）等、いくつかの解析方法が示されている。

本稿では、このような課題に対する新たな解析法として Segmental Unloading Point (SULP) method を拡張させた区間型除荷点接続法（Segmental Unloading Point Connection method : SULPC 法）を提案し、その 1 に解析法の考え方、その 2 に事例紹介として SULPC 法による杭の荷重－変位量の解析結果を示し、押込み試験結果との比較・考察を行うものである。

### 2. SULP 法の考え方

Gray Mullins et al. (2002) は、慣性力の評価を考慮した解析法の一つとして SULP 法を提案している。SULP 法の概念図を図-1 に示す。

SULP 法は杭にひずみ計が複数深度に設置された場合に適用できる手法である。ひずみ計設置深度で区間を設定し、区間毎に急速荷重と変位量を求め除荷点法を適用する。この解析結果から得られる区間静的抵抗力を合算し静的な杭頭の荷重－変位量関係を求めるものである。SULP 法の特徴は以下である。

- ・杭全体で加速度・速度・変位の大きさの違いや時間差が生じる場合でも、杭を区間で区切ることで解析対象の杭長が短くできるため、除荷点法の解析条件である剛体仮定により近づけることができ、実際の現象に近い状態の慣性力を算定することができる。
- ・異なる時刻、すなわち異なる区間変位量で求められた抵抗力であるため、区間静的抵抗力を単純に合算し杭頭荷重とすることは、支持力が過大評価となる可能性がある。
- ・ひずみ計から区間変位量を求め、その 2 階微分により

加速度を求めていることから、慣性力の評価に微分による誤差の影響を受ける可能性がある。

### 3. 区間型除荷点接続（SULPC）法の考え方

SULPC 法は前述したように、SULP 法を拡張させたもので、杭体にひずみ計・加速度計を複数深度に設置された場合に適用できる手法である。図-2 の概念図に示すように、杭はひずみ計・加速度計の設置位置で分割され、この区間毎に解析を行う。解析は、まず区間毎の急速荷重と加速度計から求めた変位量で除荷点を求め、これを ULPC 法で区間毎の静的抵抗力－変位量関係にし、荷重伝達法で静的な試験結果を求める手順で行う。解析のフローを表-1 に、解析結果のイメージを図-3～図-5 に示す。SULPC 法の特徴は以下に示すとおりである。

- ・SULP 法が除荷点法による 1 回の打撃結果から各々の区間の減衰定数  $C$  を仮定した上で静的抵抗力－変位量関係を求めるのに対し、SULPC 法は試験結果から得られた複数の除荷点をつなげた曲線であり、減衰定数  $C$  を仮定する必要はなく、実測値から初期沈下剛性や最大抵抗力までの荷重－変位量関係を得ることができる。
- ・SULPC 法は杭体への加速度計設置を前提にしているので、加速度を直接得ることができる。そのため、SULP 法の特徴である剛体仮定の考え方を踏襲した上で、より正確な慣性力が求められると考えられる。
- ・SULPC 法は区間静的抵抗力－変位量関係を非線形ばねにモデル化し、荷重伝達法によって杭頭荷重－変位量関係や軸力分布図を得るまでが含まれている。このため、各深度に生じた杭体変位に応じた静的抵抗力が得られるため、SULP 法のような区間静的抵抗力の単純合算は行わない。

このように、SULPC 法は杭全体で加速度の大きさの違いや時間差が生じる場合でも、慣性力の評価が解析者の差配に左右されず定量的な評価ができる。

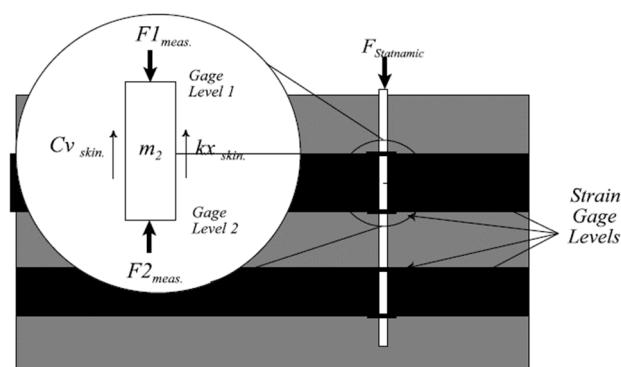
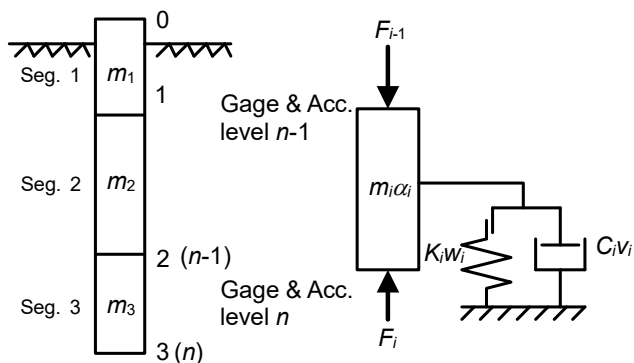


図-1 Segmental Unloading Point method 概念

Estimation of load-displacement relation of a pile using Segmental Unloading Point Connection method loading (Part 1: Calculation method)

Go KOBAYASHI, Shuichi KAMEI, Shihchun LIN (Jibanshikenjo Co., Ltd.), Tomohiro FUJITA (Public Works Research Institute), Tatsunori MATSUMOTO (Kanazawa University)



$$F_{i-1}(t) - F_i(t) = K_i \cdot w_i(t) + C_i \cdot v_i(t) - m_i \cdot \alpha_i(t) = R_{soil i}(t) + C_i \cdot v_i(t)$$

ここに、

- $n$  : 杭区間数
- $i$  : 区間
- $F_i$  :  $i$  断面における急速荷重 (kN)
- $K_i$  :  $i$  区間におけるばね (kN/m)
- $C_i$  :  $i$  区間に減衰定数 (kN・s/m)
- $m_i$  :  $i$  区間の杭体質量 (ton)
- $\alpha_i$  :  $i$  区間の杭体の加速度 (m/s<sup>2</sup>)
- $v_i$  :  $i$  区間の杭体の速度 (m/s)
- $w_i$  :  $i$  区間の杭体の変位量 (m)

図-2 Segmental Unloading Point Connection method の概念

表-1 SULPC 法の実施フロー

多サイクル方式による急速載荷試験の実施
打撃毎に各区間の急速荷重 $F_{rapid}$ - 変位量 $w$ 関係の作成 (図-3)
打撃毎に各区間の地盤抵抗力 $R_{soil}$ - 変位量 $w$ 関係の作成と除荷点の算出 (図-4)
除荷点接続法による区間毎の静的抵抗力 $R_w$ - 変位量 $w$ 関係の作成 (SULPC) と曲線の非線形モデル化 (図-5)
杭全体に対する荷重伝達法による荷重 - 変位解析
荷重 - 変位量関係, 軸力分布等の作図

4. 相対載荷時間  $T_r$  について

SULPC 法は、図-2 に示すように区間で分割した杭長毎に除荷点を求めることから、区間で相対載荷時間  $T_r \geq 5$  を満たせば、一質点系モデルの適用範囲となり波動現象の影響を無視できることになる。つまり、杭全長で相対載荷時間  $T_r \geq 5$  を満たす必要はなくなると考えらえる。

5. おわりに

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

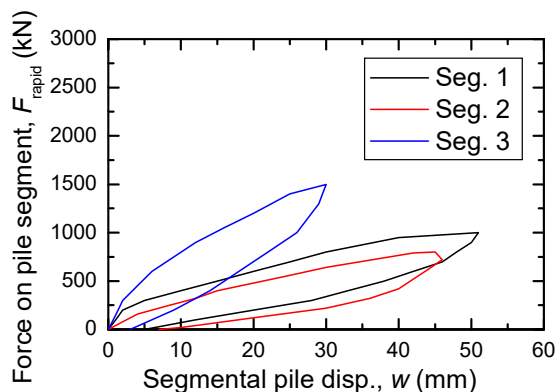


図-3 区間毎の急速荷重  $F_{rapid}$  - 区間変位量  $w$  関係イメージ

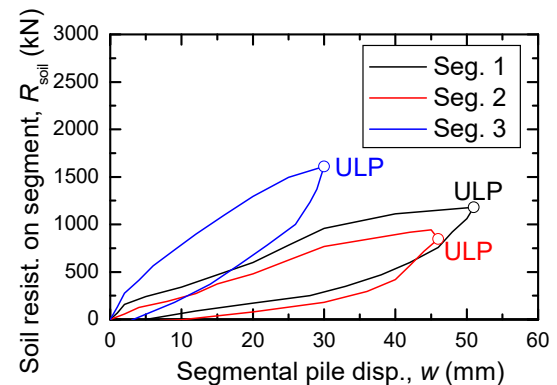


図-4 一打撃から求まる区間毎の地盤抵抗力  $R_{soil}$  - 区間変位量  $w$  関係イメージ

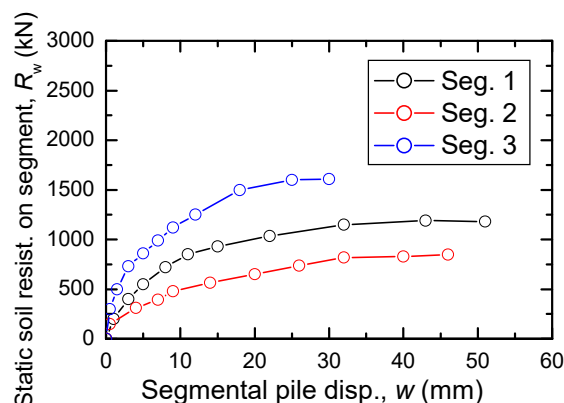


図-5 全打撃から求まる区間毎の静的抵抗力  $R_w$  - 区間変位量  $w$  関係イメージ

【参考文献】

- 1) 公益社団法人地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説第一回改定版，2002.5
- 2) 中山敦 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，(投稿中)
- 3) 河野哲也 他 (2018)：実地盤に施工した杭に対する段階載荷試験と動的載荷試験の比較，第53回地盤工学研究発表会
- 4) 吉國将大 他 (2019)：急速載荷試験を適用した杭の除荷点法解析手法の妥当性について，第54回地盤工学研究発表会
- 5) Mullins et al. (2002): Advancements in Statnamic data regression techniques, International Deep Foundations Congress, Orlando, Florida, USA, pp.1-16.