

同種シグナルの多点測定を用いた杭の急速载荷試験による荷重－変位関係の評価（その1：解析手法）

多点シグナル測定，一次元波動理論，
急速载荷試験
Multi-point signal measurement, one-
dimensional wave theory, Rapid load test

地盤試験所 正会員 ○岩田 兼太郎 国際会員 林 世峻
国際会員 亀井 秀一 国際会員 中山 敦
国際会員 MANDAL Ram Krishna
金沢大学名誉教授 国際会員 松本 樹典

1. はじめに

杭の急速载荷試験(RLT)は，2002年に杭の急速载荷試験方法（JGS 1815-2002）¹⁾として制定されて以来，静的载荷試験(SLT)に比べてコストや工期の面で優位な手法として普及している。試験目的は静的な荷重－変位関係の把握だが，実測される荷重には速度や加速度に依存する動的抵抗が含まれるため，これらを適切に評価する手法が必要である。

従来の RLT 解析では，1 点で測定した荷重（ひずみ）と加速度（速度）の別種の測定シグナルを利用している。これに対し本報では，2 点で測定した荷重（ひずみ）あるいは加速度（速度）の同種の RLT 測定シグナルを利用して荷重－変位関係を評価する手法を提案する。

本手法の基本原理は，杭の衝撃载荷試験方法（JGS 1816-2002）¹⁾に示されている「2 点ゲージ法」理論である。衝撃载荷試験(DLT)の波動理論を载荷時間の長い RLT へと適用することは，解析精度向上の新たな試みである。

本報告（その1）では，同種シグナルによる2点測定法を適用した波動分離を行い，荷重－変位関係を算定する解析手順について詳述し，同名報告（その2）では実杭の試験結果に基づき，本手法の妥当性を検討・考察する。

2. 解析手法

2.1 2点での速度測定による波動分離

従来の「2 点ゲージ法」による波動分離は，2 断面の軸方向力を用いている。これに対し本報では，2 断面で測定した速度のみを用いた解析手法を提案する。

一次元波動理論に基づき，杭内の任意位置における軸方向力 F および速度 v は，次のように表される。

$$F = F_d + F_u = Zv_d - Zv_u \quad (1)$$

$$v = v_d + v_u \quad (2)$$

ここで， $Z = EA/c$ ：杭のインピーダンス， $F_d = Zv_d$ ：下降力波， $F_u = -Zv_u$ ：上昇力波， v_d ：下降波による粒子速度， v_u ：上昇波による粒子速度， A ：杭の断面積， c ：縦波伝播速度， E ：ヤング率

本手法における座標系および計測点の配置を図-1 に示す。杭軸方向に沿った座標 x は，杭頭を原点（ $x=0$ ）として鉛直下向きを正とする。摩擦力の影響を受けない杭頭突出部において，第1計測点（ $x=x_1$ ）および第2計測点（ $x=x_2$ ）を設置する。したがって，各計測点における v は，式(2)と同様に次のように表される。

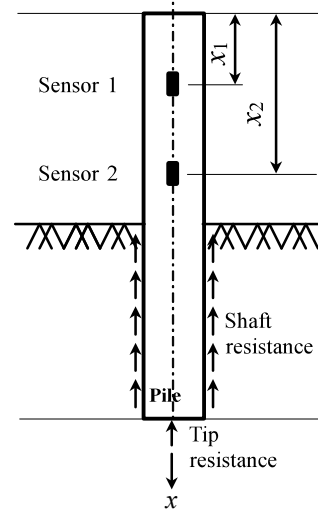


図-1 計測点配置および座標系の定義

$$v(x_1, t) = v_d(x_1, t) + v_u(x_1, t) \quad (3)$$

$$v(x_2, t) = v_d(x_2, t) + v_u(x_2, t) \quad (4)$$

この2点間を波動が伝播する時間間隔を T とすると， x_1 と x_2 における各速度成分の間には，一次元波動理論に基づき次式の関係が成り立つ。

$$v_d(x_2, t) = v_d(x_1, t - T) \quad (5)$$

$$v_u(x_2, t) = v_u(x_1, t + T) \quad (6)$$

式(5)および式(6)を式(4)に代入すると， x_2 における速度 $v(x_2, t)$ は， x_1 における各波動成分を用いて式(7)で表される。

$$v(x_2, t) = v_d(x_1, t - T) + v_u(x_1, t + T) \quad (7)$$

式(7)より， x_1 における $v_u(x_1, t + T)$ について整理すると，式(8)が得られる。

$$v_u(x_1, t + T) = v(x_2, t) - v_d(x_1, t - T) \quad (8)$$

ここで，式(8)の時刻を T だけ遡らせることで式(9)の関係が導かれる。

$$v_u(x_1, t) = v(x_2, t - T) - v_d(x_1, t - 2T) \quad (9)$$

さらに，式(3)より $v_d(x_1, t) = v(x_1, t) - v_u(x_1, t)$ であるから，これに式(9)を代入することで，式(10)が得られる。

$$v_d(x_1, t) = v(x_1, t) - v(x_2, t - T) + v_d(x_1, t - 2T) \quad (10)$$

式(10)で右辺第1項および第2項は，測定値（既知）である。右辺第3項は，式(10)の漸化式により既知量である。したがって，式(3)の関係より $v_u(x_1, t)$ が求まる。

Multi-point identical signal measurements for estimation of load-displacement curves of a bladed steel pipe pile from rapid load tests (Part 1: Analysis procedure)

Iwata K., Lin S., Kamei S., Nakayama A., Mandal R.K., (Jibanshikenjo Co.), Matsumoto T. (Kanazawa University)

式(9), 式(10)で分離された速度成分 (v_d, v_u) に Z を乗じることで, 下降力波 F_d , 上昇力波 F_u に変換できる。

$$F_d = Zv_d \quad (11)$$

$$F_u = -Zv_u \quad (12)$$

なお, 軸方向力 (ひずみ) を用いた2点ゲージ法の分離式については, 杭の衝撃载荷試験方法の付録5に詳述されているため本稿では省略するが, 本提案法は, 同基準と同様の理論背景に基づき, 2点での測定速度 v から波動成分を分離するものである。

2.2 ULPC_CM 法による静的地盤抵抗の算定

前節の提案法によって, 任意の計測位置 x_m (x_1 または x_2) において分離された F_d および F_u を用い, 一次元波動理論に基づく CASE 法を適用して杭の貫入抵抗力 $R_t(t) = R_{soil}$ を算出する (図-2 参照)。全抵抗力 $R_t(t)$ は, 計測位置 x_m から杭先端までの縦波往復時間 $2L_m/c$ を考慮し, 式(13)により求められる。

$$R_t(x_m, t) = F_d\left(x_m, t - \frac{L_m}{c}\right) + F_u\left(x_m, t + \frac{L_m}{c}\right) \quad (13)$$

ここで, L_m : 計測位置から杭先端までの長さ, R_t : 貫入抵抗力 (= R_{soil} 地盤抵抗力)

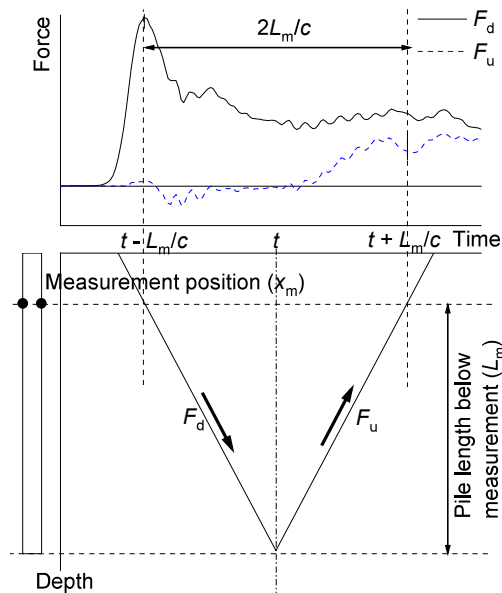


図-2 CASE 法概要

本解析で採用する CASE 法を援用した除荷点接続法 (ULPC_CM 法 中山 他 2022, 林 他 2022) ²⁾ は, この $R_t(t)$ と杭変位 $w(t)$ の時間変化から $w - R_{soil}$ 関係を求め, 杭最大変位, すなわち杭速度ゼロ時 ($v=0$) の R_{soil} (除荷点抵抗力: R_{ULP}) およびその際の変位を特定する手法である。RLT において複数回の载荷 (打撃) を実施し, 各载荷段階で得られる除荷点を順次接続することで, 静的な荷重-変位関係を得る。

本手法の最大の特徴は, 波動分離から地盤抵抗力算定まで一貫して波動理論を基盤としているため, 杭体慣性力の別途補正が不要な点にある。

3. 測定データの種類による速度および変位の算出

現在の RLT では, 加速度計による加速度とレーザー変位計あるいはカメラによる変位の測定が実施されている。

前述の波動分離 (式(9), (10)) の入力値となる速度 $v(t)$ は, x_1, x_2 に設置する同種のセンサの種類に応じて, 以下の物理量変換を経て算出できる。

(1) 加速度の積分による速度と変位の算出

加速度計より得られた加速度 $\alpha(t)$ を 1 階時間積分し, 速度 $v(t) (= \int \alpha(t)dt)$ を算出する。さらに, 変位 $w(t) (= \int v(t)dt)$ は速度 $v(t)$ の時間積分で求める。実際には, 測定した α の数値積分を行う。

(2) 変位の微分による速度算出

変位計より得られた鉛直変位 $w(t)$ を 1 階時間微分し, 速度 $v(t) = dw/dt (= \Delta w / \Delta t, \Delta t$: サンプル時間間隔, Δw : 変位差) を算出する。さらに, $v(t)$ を時間微分すると加速度 α を得ることができるが, Section 2.2 で述べたように, ULPC_CM 法では杭の慣性力の補正が必要ないため, α の算出は不必要である。

4. ひずみ (軸方向力) の多点測定による解析方法

2 点のひずみ $\varepsilon(x_1, t), \varepsilon(x_2, t)$ を測定した場合には式(14), (15)を用いて, $x = x_1$ における下降ひずみ波 $\varepsilon_d(x_1, t)$ と上昇ひずみ波 $\varepsilon_u(x_1, t)$ を得る。これらから式(16)から式(19)によって F_d, F_u, v, w が得られる。

$$\varepsilon_d(x_1, t) = \varepsilon(x_1, t) - \varepsilon(x_2, t - T) + \varepsilon_d(x_1, t - 2T) \quad (14)$$

$$\varepsilon_u(x_1, t) = \varepsilon(x_1, t) - \varepsilon_d(x_1, t) \quad (15)$$

$$F_d(x_1, t) = EA \varepsilon_d(x_1, t) \quad (16)$$

$$F_u(x_1, t) = EA \varepsilon_u(x_1, t) \quad (17)$$

$$v(x_1, t) = v_d(x_1, t) + v_u(x_1, t) = c \{ \varepsilon_d(x_1, t) - \varepsilon_u(x_1, t) \} \quad (18)$$

$$w(x_1, t) = \int v(x_1, t)dt \quad (19)$$

したがって, 2 点ひずみ測定においても ULPC_CM を適用することができる。

5. おわりに

(その 2) では, 実杭を対象とした RLT 結果に基づき, 本手法による解析結果と比較・検証を行うことで, 同種シグナルの多点測定を用いた静的な杭の荷重-変位関係の評価を行う。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 杭の鉛直载荷試験方法・同解説 第一回改定版, 2002.5
- 2) 中山 他 (2022), 林 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), (その 2: 解析結果と静的試験結果の比較), 第 57 回地盤工学研究発表会。