砂地盤に施工された鋼管杭の静的載荷試験および各種解釈法による急速載荷試験結果の比較
その１：急速載荷試験シグナルの各種解析法

杭，急速載荷試験，動的シグナル解析法
Pile, Rapid load test, Interpretation method

地盤試験所　正会員　○小林　剛　　正会員　関口　雄紀
国際会員　亀井　秀一　国際会員　山本　伊作
国際会員　MANDAL Ram Krishna
金沢大学　国際会員　松本　樹典

1. はじめに

砂地盤に施工された鋼管杭に対して静的載荷試験（SLT）およびハイブリッドナミック急速載荷試験（RLT）を実施した。試験杭は長さ 48m，外径 800mm，内径 750mm であった。RLT による静的荷重－変位曲線は，除荷点接続法（UnLoading Point Connection（ULPC）法），Case 法を援用した除荷点接続法（ULPC invoking Case（ULPC_CM）法），および新しく提案する方法（$\alpha\beta$法および $\alpha\beta$_CM 法と呼ばれる）で推定した。新しい解析方法では，静的荷重－変位曲線を取得するために，α および β の経験値が使用される。本稿では種々の解析方法について記載し，その２では SLT と種々の解析方法による RLT からの静的荷重－変位曲線を比較・考察する。

2. RLT の解析方法

2.1 ULPC 法（亀井ら、2023）

ULPC（UnLoading Point Connection）法（亀井ら，2023）は，Kusakabe & Matsumoto（1995）が提案した UnLoading Point（ULP）法の拡張法である。

ULP 法では，杭に作用する荷重 F_{rapid} は，杭の慣性力 R_a，地盤の動的抵抗成分 R_v，および静的抵抗成分 R_w によって抵抗される（式（1））。地盤抵抗力 R_{soil} は，測定した F_{rapid} と杭体加速度 a から式（2）で得られる。したがって，地盤抵抗力 R_{soil} と杭変位量 w の関係は図-2 のように表される。最大変位点（UnLoding Point：ULP）での R_{soil} は静的抵抗 R_w に等しい。これは，杭速度 v が ULP でゼロとみなされるためである（式（4）および図-2）。

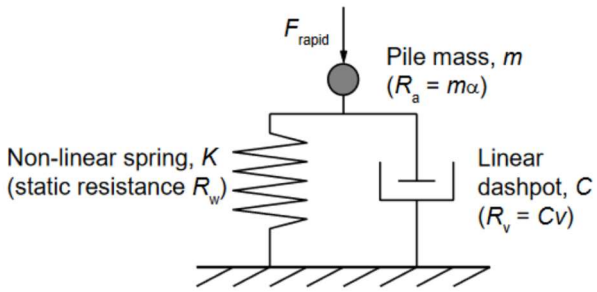

図-1 急速載荷試験中の地盤と杭のモデル化

$$F_{rapid} = R_a + R_v + R_w = m\ a + C\ v + R_w \quad (1)$$

$$R_{soil} = F_{rapid} - ma \quad (2)$$

$$R_w = R_{soil} - Cv \quad (3)$$

$$R_{soil\ at\ ULP} = R_{ULP} = R_w \quad (4)$$

ここで，m：杭体質量，　a：杭体加速度，　C：減衰定数，R_{ULP}：除荷点抵抗力

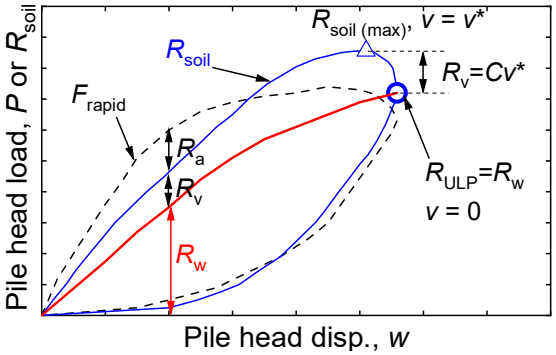

図-2 ULPC法における杭頭荷重・地盤抵抗力と杭頭変位量の関係の模式図

2.2 ULPC_CM法（亀井ら，2023）

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 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(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，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），c：縦波伝播速度，
E：杭材のヤング率，A：杭の断面積，
R_t：貫入抵抗力　（$= R_{soil}$ 地盤抵抗力）

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。

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 ($= R_{soil}$)と直接測定した杭変位量 w の時間変化から，w － R_{soil} 関係を求め，これから除荷点抵抗力 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，静的な荷重－変位関係を求める。

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。

Static load test and rapid load test with different interpretation methods on a steel pipe pile in sandy ground (Part 1: Interpretation methods of dynamic signals)

Kobayashi G., Sekiguchi Y., Kamei S., Yamamoto I., Mandal R.K. (Jibanshikenjo Co.),
Matsumoto T. (Kanazawa University)

© 公益社団法人 地盤工学会

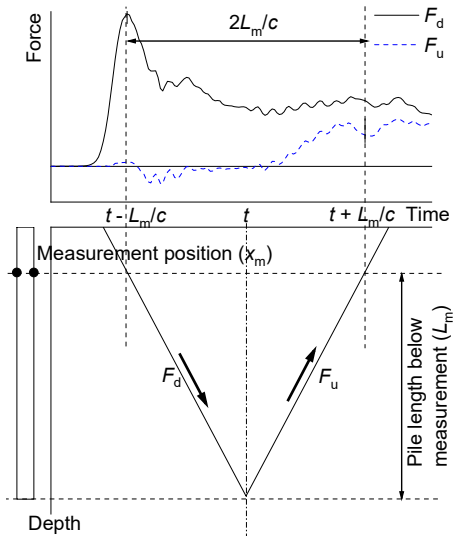

図-3　Case 法概要

2.3　αβ法

動摩擦 τ_d は一般に速度の非線形関数としてとらえられ，式 (8) で表される。ここで，τ_s は静的周面摩擦，v_0 は基準速度 (便宜上 1 m/s とする)，Δv は杭と隣接する地盤間の相対速度である (Randolph and Deeks, 1992)。

$$\tau_d = \tau_s \left[1 + \alpha \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^{\beta} \right] \tag{8}$$

α と β は土質に依存するモデルパラメータである。α と β の範囲を表-1 に示す。

Brown (2004)は，式(8)に基づいて RLT シグナルの非線形速度依存解析法を提案した。この方法では，式（9）によって RLT 中の静的地盤抵抗力を求める。

$$R_w = \frac{R_{soil}}{1 + \alpha \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^{\beta} - \alpha \left(\frac{\Delta v_{min}}{v_0} \right)^{\beta}} \tag{9}$$

R_{soil} = 地盤抵抗力 $(= F_{rapid} - ma)$，
Δv = 杭と隣接地盤間の相対速度，
Δv_{min} = CRP (一定貫入速度) 杭載荷試験での杭貫入速度，
v_0 = 基準速度 (便宜上 1 m/s とする)。

式(10)(Brown et al. (2006))は式(9)の拡張法である。

$$R_w = \frac{R_{soil}}{1 + \alpha \left(\frac{F_{rapid}}{F_{rapid(max)}} \right) \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^{\beta} - \alpha \left(\frac{F_{rapid}}{F_{rapid(max)}} \right) \left(\frac{\Delta v_{min}}{v_0} \right)^{\beta}} \tag{10}$$

ここで，$F_{rapid(max)}$は F_{rapid} の最大値である。

表-1. αとβの提案された範囲（Powell & Brown, 2006）

Originator	Soil type	α	β	Test conditions
Randolph & Deeks	Sand	0.1	0.2	Summary of previous work
	Clay	1.0	0.2	
Balderas-Meca	Grimsby glacial till	0.9	0.2	Full-scale Statnamic tests
Brown	Model clay	1.26	0.34	Model Statnamic tests
Litkouhi & Poskitt	London clay	1.77	0.18	Model pile skin friction test
	Forties clay	0.99	0.23	
	Magnus clay	0.86	0.46	

式（10）は杭に対して 1 回の RLT のみを実施することを想定している。現在多く実施されているハイブリッドナミック RLT では，ハンマー落下高さを増加させながら杭に複数回の打撃を与える。一般的に，SLT の荷重－変位関係は，荷重保持試験での各荷重ステップで変位増加がほぼ終了したときの変位から得る。したがって，式（10）の Δv_{min} はゼロと見なすことができ，式（10）は式（11）のように表される。$F_{rapid} = F_{rapid(max)}$のとき、式（11）は式（12）のように簡略化される。これを図-4 に示す。杭に隣接する地盤の速度を測定することは容易ではないため，Δv は測定された杭の速度に等しいと仮定する。

$$R_w = \frac{R_{soil}}{1 + \alpha \left(\frac{F_{rapid}}{F_{rapid(max)}} \right) \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^{\beta}} \tag{11}$$

$$R_w = \frac{R_{soil}}{1 + \alpha \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right)^{\beta}} \tag{12}$$

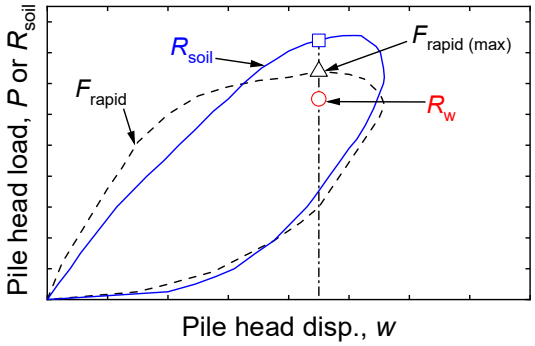

図-4 $\alpha\beta$法および$\alpha\beta$_CM法における杭頭荷重・地盤抵抗力と杭頭変位量の関係の模式図

2.4　αβ_CM法

$\alpha\beta$_CM 法では，式(12)の R_{soil} を Case 法で求める。その他の手順は $\alpha\beta$ 法と同じである。

3. おわりに

（その２）では，本稿記載の解析方法で求めた試験杭の荷重－変位関係を静的載荷試験結果と比較・考察する。

参考文献

1) 亀井 他 (2023)：鋼管杭を対象とした急速載荷試験と静的載荷試験の比較実証実験（その１：実験概要），第 58 回地盤工学研究発表会.
2) Kusakabe O. & Matsumoto T. (1995): Statnamic tests of Shonan test program with a review of signal interpretation. *Proc. 1st Int. Statnamic Seminar*, Vancouver, Canada, 113-122.
3) Raushe F., Goble G. & Likins G.E.Jr. (1985): Dynamic determination of pile capacity. *ASCE Jour. Geotech. Div.*, 111(3), 367-383.
4) Randolph M.F. & Deeks A.J. (1992): Dynamic and static soil models for axial response. *Proc., 4th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 3-14.
5) Powell J.J.M. & Brown M.J. (2006): Statnamic pile testing for foundation re-use. *Proc., Int. Conf. on the Re-use of Foundations for Urban Sites*, IHS BRE Press, Bracknell, U.K., 223-236.
6) Brown M.J. (2004): The rapid load testing of piles in fine-grained soils. Ph.D. thesis, Univ. of Sheffield, Sheffield, U.K.
7) Brown M.J., Anderson W.F. & Hyde A.F.L. (2006): Analysis of rapid load test on instrumented bored pile in clay. *Géotechnique*, 56(9), 627–638.

© 公益社団法人 地盤工学会