

砂地盤における羽根径が異なる 6 本の先端羽根付き鋼管杭の静的、衝撃および急速載荷試験（その 2：解析手法・結果）

先端羽根付き鋼管杭 回転貫入杭
羽根杭径比 静的載荷試験
衝撃載荷試験 急速載荷試験

正会員○林 世峻* 正会員 MANDAL Ram Krishna **
正会員 亀井 秀一*** 正会員 山本 伊作****
正会員 松本 樹典*****

1. はじめに
（その 2）では、急速載荷試験(RLT), 衝撃載荷試験(DLT)の解析手法と RLT の結果を述べる。

2. 急速載荷試験シグナルの解釈法
2.1 ULPC 法

ULPC 法はJGS 基準（JGS 1815-2002）に記載されている ULP 法を拡張した方法である。ULPC 法では、杭を剛体の一質点でモデル化する。地盤抵抗力 R_{soil} を求めるには、載荷荷重 F_{rapid} から杭体慣性力 $R_a=ma$ を差し引く。ここで m は杭の質量、 a は杭の加速度である。杭の各載荷で得られる除荷点を接続することで静的な荷重－変位関係を求める。除荷点とは、杭の最大変位、すなわち杭速度ゼロ時 ($v=0$) の地盤抵抗力 R_{ULP} を与える点であり、 R_{ULP} は静的地盤抵抗力 R_w に等しい。

2.2 ULPC_CM 法（中山 他 2022, 林 他 2022）¹⁾
ULPC_CM 法（UnLoading Point Connection invoking Case Method）では、ある杭に対して複数回の載荷（急速載荷試験）を想定している。一次元波動理論に基づいた 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 w の時間変化から、 $w-R_{soil}$ 関係を求め、これから ULPC と同様に除荷点を得る。

3. 衝撃載荷試験シグナルの解釈法（波形マッチング解析）
衝撃載荷試験（DLT）のシグナル解釈には、一次元波動理論に基づく特性曲線法を用いた CAPWAP プログラム ²⁾ を用いて波形マッチング解析（WMA）を実施した。杭を一次元要素の連続でモデル化し、杭には Smith の地盤モデル（図-1）を考慮する。計測点での実測下降力波を境界条件として波動解析を行う。上昇力波の計算波形が実測上昇力波形に一致するよう、地盤抵抗パラメータ（降伏強度 f_{s_max} or q_{max} 、クエーク $quake=f_{s_max}/k$ or q_{max}/k 、ばね剛性 k 、ダンピング J ）の分布（周面摩擦および先端抵抗）を同定する。得られた静的地盤抵抗パラメータより静的な荷重－変位関係を導出する。

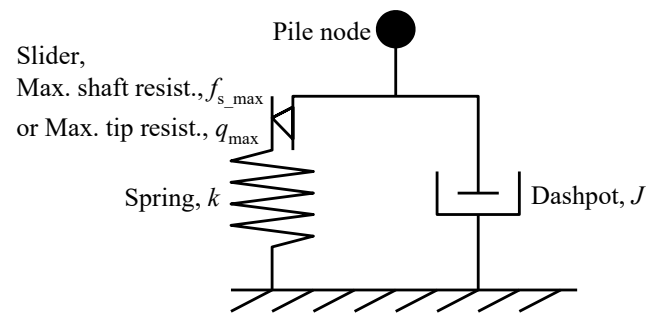


図-1 Smith の地盤モデル（周面および先端）

4. 波動解析における試験杭のモデル化
先端羽根形状のモデル化として、以下の 2 種類を設定した。1) Full model：羽根部の形状変化を忠実に再現し、断面積変化を直接反映させた詳細モデル。2) Pseudo-uniform model：断面形状は軸部と同一としつつ、羽根の質量を考慮できるように密度 ρ を増加させる。同時に縦波速度 c を維持するようにヤング率 E も増加させる等価モデル。なお、Pseudo-uniform model では、地盤抵抗を受ける先端面積は実際の羽根面積 A_{bot} とした。
表-1 は、上記のモデル化に基づく Pile No. 3 および No. 5 の幾何学的および力学的パラメータである。

Pile No.	Pile No. 3			Pile No. 5		
	Sec. 1 (SPP)		Sec. 2 (Blade)	Sec. 1 (SPP)		Sec. 2 (Blade)
		Full model	Pseudo uniform		Full model	Pseudo uniform
Sec. length (m)	10.77	0.03	0.03	10.77	0.03	0.03
Element length (m)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
No. of elements	359	1	1	359	1	1
Outer diam., D_{po} (mm)	165.2	500.0	165.2	190.7	500.0	190.7
Inner diam., D_{pi} (mm)	151.0	0	0	176.7	0	0
Cross-sect. area, A (m ²)	0.0035	0.1963	0.0214	0.0040	0.1963	0.0286
Density, ρ (ton/m ³)	7.88	7.88	72.2	7.88	7.88	54.2
Young's mod., E (GPa)	206.8	206.8	1894.7	206.8	206.8	1421.9
Bar wave vel., c (m/s)	5124			5124		
Impedance Z (kN·s/m)	141	7922	7913	432	7922	7936
Bottom area subjected to tip resist., A_{bot} (m ²)	—	0.1963	0.1963	—	0.1963	0.1963

5. 試験結果
5.1 静的載荷試験（SLT）
SLT は本報（その 1）の表-2 示したように、DLT の前に実施した。SLT は多サイクル段階載荷方式で、各荷重段階の保持時間は 30 分とした。結果は（その 3）で後述する。
5.2 急速載荷試験（RLT）
RLT では、質量 $m_h=2$ ton の重錘を用い、落下高さ h を段階的に増加(Pile No.3, No.5：0.02 m～1.8 m)させながら試験を実施した。試験（打撃）回数は両杭とも 9 回であった。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 を変化させ、相対載荷時間 $T_r=t_L/(2L/c) \geq 5$ となるようにした。測定した動的シグナルを、ULPC 法、ULPC_CM 法で解析し静的な荷重－変位関係を求めた。

図-2 に、Pile No.3 において $h = 1.8 \text{ m}$ の RLT で測定された動的シグナルである急速荷重 F_{rapid} 、杭頭変位 w 、速度 v 、および加速度 a を示す。また、図-2 には、ULPC 法による地盤抵抗 R_{soil} (ULPC)、ULPC_CM 法による R_{soil} (ULPC_CM) を示す。さらに、下降力波 F_d と上昇力波 F_u も示している。

$v = 0$ となる最大 w での R_{soil} は、ULPC 法および ULPC_CM 法における静的地盤抵抗 $R_w = R_{\text{ULP}}$ として定義される（一点鎖線を参照）。

図-3 は、Pile No.3 の F_{rapid} 、ULPC 法による R_{soil} (ULPC) および R_w (ULPC) と変位 w の関係を示す。図-4 は ULPC_CM 法による同関係である。図-5、図-6 は No.5 の結果である。

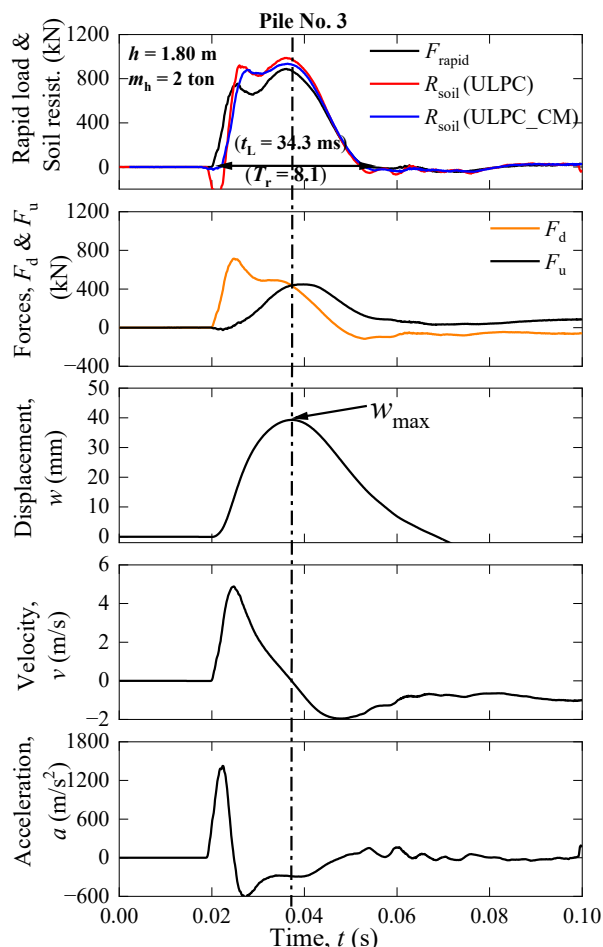


図-2 動的シグナル (Pile No.3, $h = 1.8 \text{ m}$)

6. おわりに

（その 3）では、DLT の WMA 解析結果と SLT, DLT, RLT からの静的な荷重－変位関係の比較と考察を述べる。

参考文献

- 1) 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）, 57 回地盤工学研究発表会.
- 2) Pile Dynamics, Inc. (2014): CAPWAP Background Report Version 2014

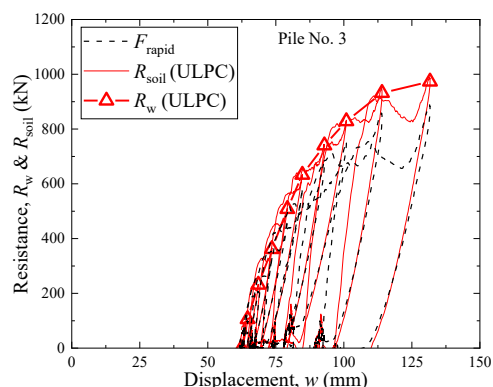


図-3 F_{rapid} , ULPC 法による R_{soil} , R_w vs 変位 w (Pile No.3)

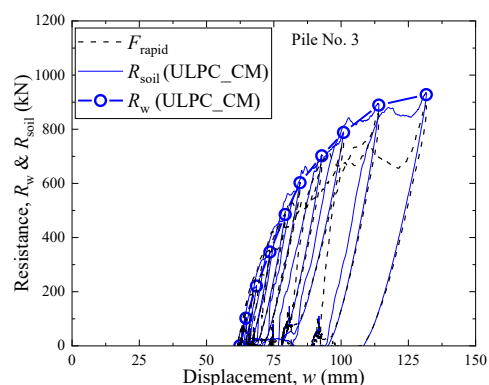


図-4 F_{rapid} , ULPC_CM 法による R_{soil} , R_w vs 変位 w (Pile No.3)

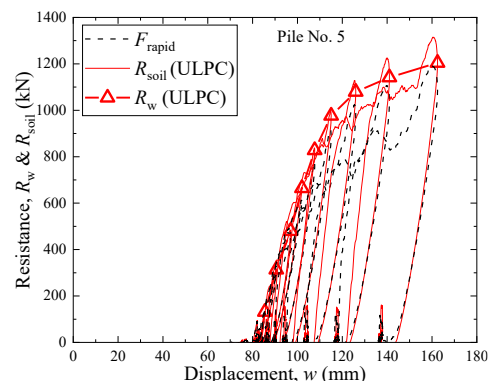


図-5 F_{rapid} , ULPC 法による R_{soil} , R_w vs 変位 w (Pile No.5)

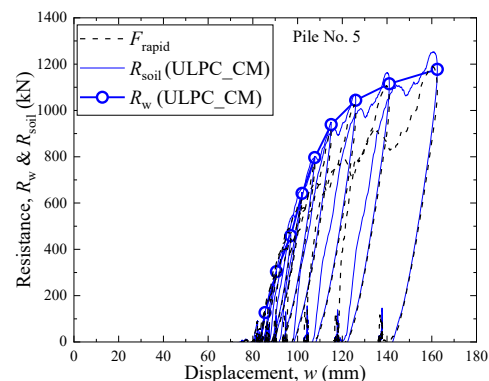


図-6 F_{rapid} , ULPC_CM 法による R_{soil} , R_w vs 変位 w (Pile No.5)

* 榊地盤試験所 主任・理学修士
 ** 榊地盤試験所 主任・工学学士
 *** 榊地盤試験所 部長・工学学士
 **** 榊地盤試験所 代表取締役・工学修士
 ***** 金沢大学 名誉教授・工学博士

* Chief Engineer, Jibanshikenjo Co. Ltd., Ms. Science
 ** Chief Engineer, Jibanshikenjo Co. Ltd., Bc. Eng.
 *** Director, Jibanshikenjo Co. Ltd., Bc. Eng.
 **** CEO, Jibanshikenjo Co. Ltd., Ms. Eng.
 ***** Emeritus Prof., Kanazawa University, Dr. Eng.