

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および急速載荷試験結果の比較
(その 2：試験結果)

先端羽根付き鋼管杭，静的載荷試験，
急速載荷試験
Bladed steel pipe pile, Static load test,
Rapid load test

地盤試験所 国際会員 ○亀井 秀一 国際会員 MANDAL Ram Krishna
国際会員 山本 伊作
金沢大学名誉教授 国際会員 松本 樹典

1. はじめに

（その 2）では，急速載荷試験(RLT)の解析方法と静的載荷試験(SLT)，RLT の結果と考察について述べる。

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) にある 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，急速荷重 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。

2.3 $\alpha\beta$ 法 (小林 他 2025, 関口 他 2025)²⁾

$\alpha\beta$ 法は，地盤の動的抵抗を杭速度の非線形関数とした Brown (2004)³⁾ の手法に基づいている。本法では，測定された地盤抵抗力 $R_{soil} (= F_{rapid} - ma)$ から，杭速度 v および土質に応じた経験的パラメータ α, β を用いて速度依存成分を補正することで，静的地盤抵抗力 R_w を算出する。複数の急速載荷における最大荷重時の R_w と w の点を接続することで，静的な荷重－変位関係を求める。

2.4 $\alpha\beta_{CM}$ 法 (小林 他 2025, 関口 他 2025)²⁾

$\alpha\beta_{CM}$ 法は， $\alpha\beta$ 法に一次元波動理論に基づく CASE 法を援用した手法である。CASE 法で算出された貫入抵抗力 $R_t (= R_{soil})$ から $\alpha\beta$ 法と同様の補正を適用して R_w を得る。

3. 試験結果

3.1 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実施し，各荷重段階の保持時間は 30 分とした。結果は後述する RLT 結果との比較で示す。

3.2 急速載荷試験 (RLT)

RLT では，質量 $m_h = 2 \text{ ton}$ の重錘を用い，落下高さ h を段階的に増加 (Pile No.3 : 0.02 m ~ 1.8 m, Pile 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 $T_r \geq 5$ ($T_r = t_L / (2L/c)$ ここで， c = 縦波速度) となるようにした。測定した動的シグナルを，ULPC 法，ULPC_CM 法， $\alpha\beta$ 法， $\alpha\beta_{CM}$ 法で解析し，静的な荷重－変位関係を求めた。
図-1 に，Pile No.3 最大落下高 $h = 1.8 \text{ m}$ の RLT で測定された動的シグナルである F_{rapid} , R_{soil} , R_w , w , v , a , 下降力波 F_d , 上昇力波 F_u を示している。 $\alpha\beta$ 法， $\alpha\beta_{CM}$ 法では，既往の研究 ²⁾ に基づき $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.2$ を用いた。同図に示す計測波形より，ハイブリッドナミッククッションによって $T_r = 8.1 \geq 5$ となっており，杭体全体がほぼ一体となって変位する急速載荷の要件を満たしていることがわかる。また， F_{rapid} が下降力波 F_d と上昇力波 F_u に明瞭に分離されている。

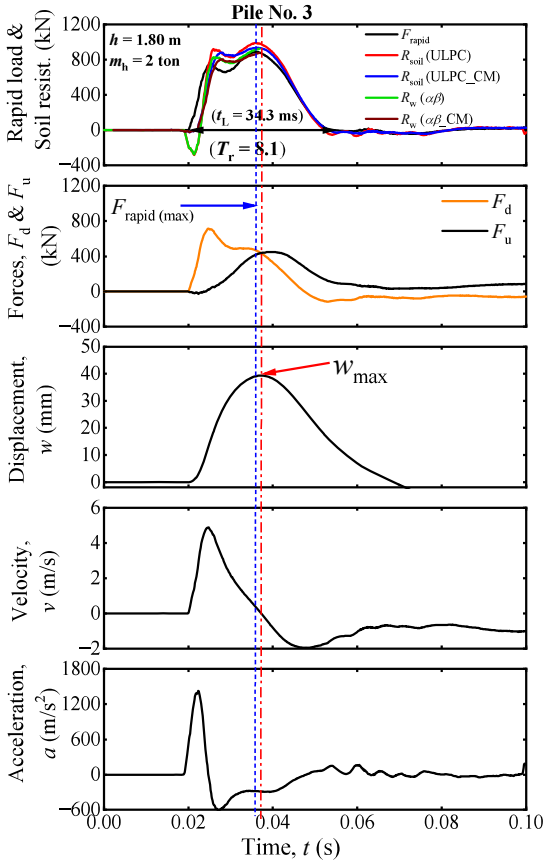
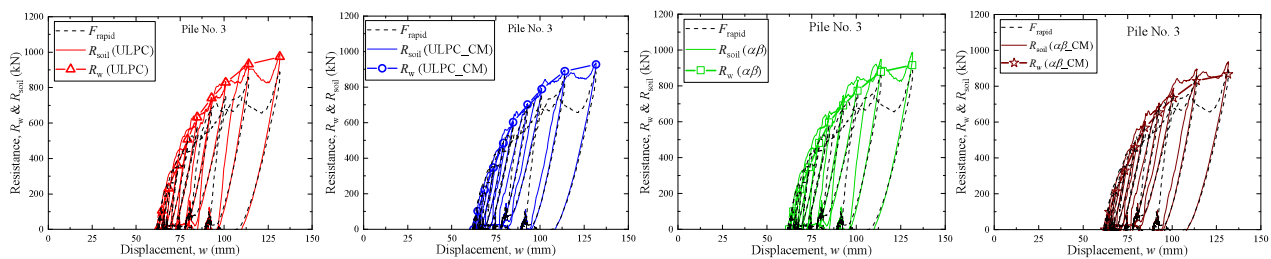
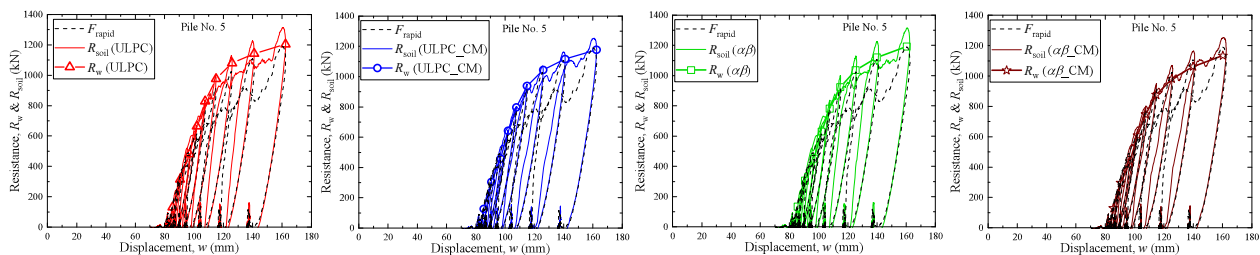


図-1 動的シグナルの一例 (Pile No.3, $h = 1.80 \text{ m}$)

図-2，図-3 は，Pile No.3, No.5 における各解析法による， F_{rapid} , R_{soil} , R_w と w の関係である。両図において，ULPC 法，ULPC_CM 法では R_{ULP} とその時点の w を結ぶ曲線が静的な荷重－変位関係である。一方， $\alpha\beta$ 法， $\alpha\beta_{CM}$ 法では，最大 F_{rapid} から速度依存抵抗成分を補正して得られる R_w とその時点の w を結ぶ曲線が静的な荷重－変位関係である。

図-2 各解析法による F_{rapid} , R_{soil} , R_w - w 関係 (Pile No.3)図-3 各解析法による F_{rapid} , R_{soil} , R_w - w 関係 (Pile No.5)

4. SLT, RLT からの静的な荷重－変位関係の比較

図-4 および図-5 に Pile No.3, No.5 の SLT, RLT から得られた静的な荷重－変位関係の比較を示す。SLT 結果は荷重保持 30 分時のデータを結んだ曲線で示している。両図では、SLT と RLT の間に DLT を実施しているので、DLT 中に生じた累積変位量を考慮して RLT の荷重－変位関係を示している。

RLT 結果の ULPC 法, ULPC_CM 法, $\alpha\beta$ 法, $\alpha\beta_{\text{CM}}$ 法のいずれの解析法でも、載荷履歴を考慮すれば、SLT 結果とよく整合した。各解析法別の傾向に着目すると、杭を剛体と仮定する ULPC 法, $\alpha\beta$ 法は両図においてそれぞれ ULPC_CM 法, $\alpha\beta_{\text{CM}}$ 法に比べてやや大きな荷重を示している。一方、一次元波動理論に基づき杭体の慣性力を適切に考慮している ULPC_CM 法, $\alpha\beta_{\text{CM}}$ 法の結果は SLT の結果と極めて良好に整合した。また、 $\alpha\beta_{\text{CM}}$ 法で用いたパラメータ ($\alpha = 0.1$, $\beta = 0.2$) は、本試験箇所の砂地盤における静的挙動の推定において概ね妥当であった。

5. まとめ

砂地盤に根入れされた先端羽根付き鋼管杭 (BSPP) を対象に、静的載荷試験 (SLT), 急速載荷試験 (RLT) を実施し、RLT の各解析手法による静的な荷重－変位関係の推定精度を検証した。主な結果を以下にまとめる。

- 1) RLT から導出される静的な荷重－変位関係は、SLT の実測値と良好に整合し、荷重－変位関係評価における RLT の有効性が確認された。
- 2) 解析手法の比較において、杭体の剛体質点モデルよりも一次元波動理論をベースとした手法 (ULPC_CM 法, $\alpha\beta_{\text{CM}}$ 法) の方が、SLT との整合性が高い傾向にあることが示された。
- 3) 砂地盤における $\alpha\beta$ 法, $\alpha\beta_{\text{CM}}$ 法のパラメータとして $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.2$ を適用することで、BSPP の鉛直抵抗特性を精度よく推定可能であることがわかった。
- 4) RLT の各解析手法は、先端羽根という複雑な形状を有する BSPP に対しても適用可能である。

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。

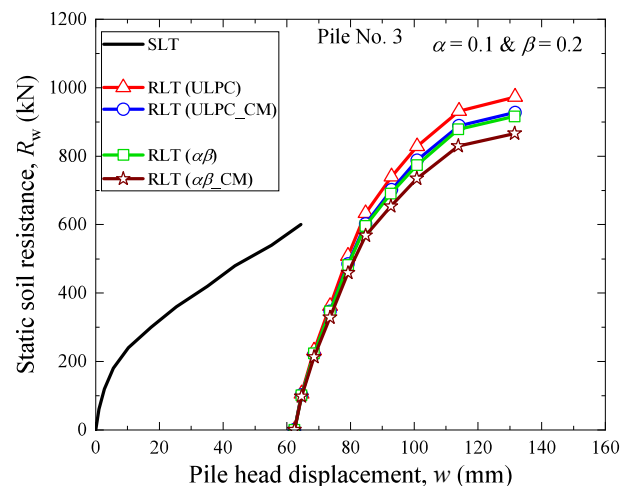


図-4 SLT, RLT による静的な荷重－変位関係 (Pile No. 3)

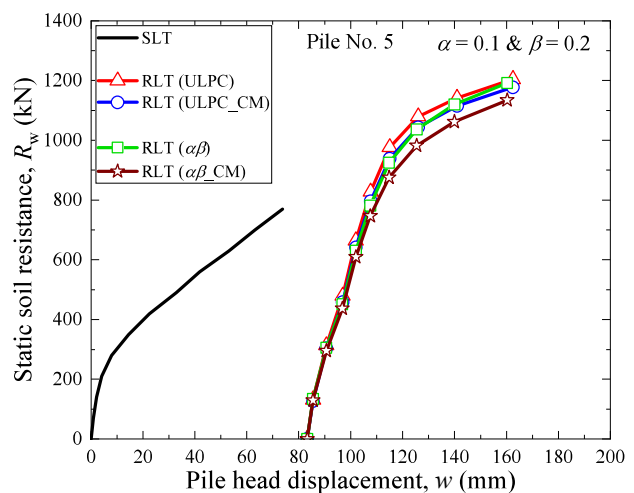


図-5 SLT, RLT による静的な荷重－変位関係 (Pile No. 5)

- 2) 小林 他(2025), 関口 他(2025): 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析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, その 2: 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析法による急速載荷試験結果の比較, 60 回地盤工学研究発表会。
- 3) Brown M.J. (2004): The rapid load testing of piles in fine-grained soils. Ph.D. thesis, Univ. of Sheffield, Sheffield, U.K.