

複数羽根を有する回転杭の設計支持力を求める部分安全係数に関する一考察

新日鐵住金 正会員 ○澤石正道 豊福浩司 日鐵住金建材 正会員 徳岡孝俊 和田昌敏
ジェイアール総研エンジニアリング 正会員 西村昭彦 日野篤志

1. はじめに

2018年に改訂された道路橋示方書に部分安全係数が導入され、土木分野の各基準で信頼性設計法に基づく杭基礎の照査方法が適用された。ただし、一般の杭工法の設計支持力を求めるための部分安全係数は各基準で定められているが、複数羽根を有する回転杭（以下、本工法と呼ぶ）¹⁾等の新工法について部分安全係数が評価されたものはほとんどない。そこで、本研究では、本工法の設計支持力を求める部分安全係数について、「平成24年版 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物（以下、H24基礎標準と呼ぶ）」の考え方を準用し、杭の載荷試験（押込み試験）データに基づき部分安全係数（以下、地盤抵抗係数とも呼ぶ）を試算し考察する。

2. 検討方法と条件

鉛直地盤抵抗の設計限界値を設計鉛直支持力とし、一次近似信頼性設計法（FORM）の手法により、押込み試験のある限界状態の性能関数が正規分布関数の線形和で表されるものと仮定する。そして、図2.1の基準支持力と設計支持力との関係となるように各限界状態の目標安全指標に応じた地盤抵抗係数を設定する。ここで、杭の特性値となる基準支持力（第二限界抵抗力の下限値相当）について、H24基礎標準では杭径の10%変位時の荷重と定義しているが、本工法では鉛直支持力が羽根径に依存するため、羽根径の10%変位時の荷重を基準支持力と定義し、式(2.1)で本工法の基準支持力 R_k (R_{tk} : 基準先端支持力, R_{fk} : 各土層の基準周面支持力) を算定する。各限界状態の基準変位量については、本工法の適用範囲が杭径700mm以下、羽根径900mm以下の小口径であるため、小口径回転杭²⁾の考え方を参考に表2.1に示すH24基礎標準よりも小さな値に見直した。以上の条件の元に式(2.2)で算定する設計支持力 R_{vd} の地盤抵抗係数 f_r (f_{rt} : 先端支持力に対する地盤抵抗係数, f_{rf} : 周面支持力に対する地盤抵抗係数) を式(2.3)で求めるため、次節で実測値と計算値の比の平均 μ_t , μ_f と標準偏差 σ_t , σ_f を整理し、各限界状態での目標安全指標 β_a において、基準先端支持力比 $p_t = R_{tk} / (R_{tk} + R_{fk})$ に対する感度係数 α_t , α_f を式(2.4)で試算する。

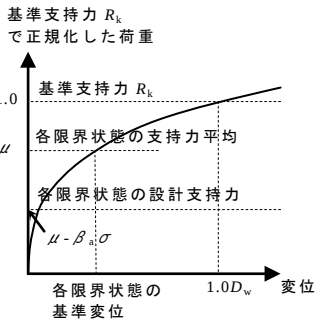


図 2.1 基準支持力と設計支持力との関係

$$R_u = R_k = R_{tk} + R_{fk} = q_d A_{w0} + (\sum f_{ci} L_{wci} + \sum f_{si} L_{wsi}) U_w \tag{2.1}$$

$$R_{vd} = f_r R_k = f_{rt} R_{tk} + f_{rf} \sum R_{fk} \tag{2.2}$$

$$f_{rt} = \mu_t - \beta_a \alpha_t \sigma_t \qquad f_{rf} = \mu_f - \beta_a \alpha_f \sigma_f \tag{2.3}$$

$$\alpha_t = p_t \sigma_t / \sqrt{\{p_t^2 \sigma_t^2 + (1-p_t)^2 \sigma_f^2\}} \qquad \alpha_f = (1-p_t) \sigma_f / \sqrt{\{p_t^2 \sigma_t^2 + (1-p_t)^2 \sigma_f^2\}} \tag{2.4}$$

ここに、 q_d : 先端支持力度で粘性土は $q_d = 4.5 q_u$ (杭先端の一軸圧縮強さ)、砂質土は $q_d = 100N$ (杭先端のN値)、 A_{w0} : 羽根面積 $A_{w0} = (D_w^2 - D_p^2) \cdot \pi / 4$, f_{ci} : 粘性土層の周面支持力度で $f_{ci} = 8N_i$, f_{si} : 砂質土層の周面支持力度で $f_{si} = 5N_i + 20$, D_p : 杭径, D_w : 羽根径, $U_w = \pi \cdot D_w$ とする。

表 2.1 要求性能に応じた基準変位量と目標安全指標

a) 地震時以外				b) 地震時				
構造物の要求性能	基礎の性能項目	基準変位量	目標安全指標 β_a 基準変位量の超過確率 P_t	構造物の要求性能	基礎の性能項目	対応する安定レベル	基準変位量	目標安全指標 β_a 基準変位量の超過確率 P_t
使用性	長期支持性能	$\min(20/1.5mm, 0.0133D_w)$	$\beta_a = 1.6, P_t = 5\%$	復旧性 性能レベル1	残留変位	安定レベル1	$\min(50mm, 0.05 D_w)$	$\beta_a = 0.85, P_t = 20\%$
	短期支持性能	$\min(20mm, 0.02 D_w)$	$\beta_a = 1.3, P_t = 10\%$			安定レベル2	$0.1D_w$	$\beta_a = 0.5, P_t = 30\%$
安全性	安定	$\min(50mm, 0.05 D_w)$	$\beta_a = 1.0, P_t = 16\%$	復旧性 性能レベル2				
				安全性	安定	安定レベル3	$0.1D_w$	$\beta_a = 0, P_t = 50\%$

キーワード 複数羽根, 回転杭, 設計支持力, 部分安全係数, 押込み試験
連絡先 〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1 新日鐵住金(株) 090-7004-2017

3. 検討結果と考察

本検討に用いた押込み試験数は9データで、各パラメータは杭径 D_p が 165.2～700mm、羽根径 D_w が 300～900mm、羽根ピッチ比 P/B が 4.5～10、羽根区間長 L_w が 2.4～17m である。これらの試験データから、各限界状態の基準変位における先端支持力と周面支持力の実測値と式(2.1)から求まる計算値との比を表 3.1（先端支持力に関する例）に示すように整理した。次に、表 3.2 に示す実測値／計算値の値を統計処理して得られた平均 μ_t 、 μ_f 、標準偏差 σ_t 、 σ_f 、変動係数 (σ/μ) から式(2.3)により感度係数 α_t 、 α_f を求め、本工法の基準先端支持力比 p_t と地盤抵抗係数 f_t との関係を試算した結果について図 3.1 に示す。ここで、本工法の先端支持力の実測値／計算値の変動係数は 30%未満となっているため、先端支持力の変動係数は 30%として感度係数を求めた。試算の結果、地盤抵抗係数は長期支持性能で 0.2～0.5、短期支持性能で 0.4～0.7、安全性と復旧性レベル 1 で 0.8～1.0、復旧性レベル 2 で 1.1～1.3 となった。

表 3.1 各限界状態における実測値と計算値との比（先端支持力の場合）

試験ケース	分類	N値	実測先端荷重(kN)				基準支持力 計算値 (kN)	実測/計算 R_r^t/R_{rk}			
			13.3m, 0.0133Dw	20m, 0.02Dw	50m, 0.05Dw	0.1Dw		13.3m, 0.0133Dw	20m, 0.02Dw	50m, 0.05Dw	0.1Dw
F165W300-0	細砂	5.0	19	21	26	33	25	0.75	0.84	1.04	1.34
F216W300-0	細砂	5.0	22	23	27	33	17	1.28	1.38	1.58	1.92
F400W600-OSHI-L	硬質シルト・中砂	18.5	304	354	445	587	291	1.04	1.22	1.53	2.02
F400W600-OSHI-S	細砂	10.0	160	179	207	262	157	1.02	1.14	1.32	1.67
F400W600-OSHI-N	細砂	10.0	105	123	148	170	157	0.67	0.78	0.94	1.09
F400W600-OSHI	細砂	10.0	86	103	98	107	71	1.21	1.45	1.39	1.52
OSHI-400	砂	3.0	43	54	94		47	0.91	1.15	2.00	
OSHI-600	細砂	11.0	162	197	292	391	242	0.67	0.81	1.21	1.62
OSHI-700	シルト質粘土	9.5	219	257	277	302	193	1.14	1.33	1.44	1.56

表 3.2 実測値／計算値の統計処理結果

	地震時以外			地震時	
	使用性		安全性	復旧性性能レベル1	復旧性性能レベル2
	長期支持性能	短期支持性能			
基準変位量	13.3m, 0.0133Dw	20m, 0.02Dw	50m, 0.05Dw	50m, 0.05Dw	0.1Dw
目標安全指標 β_a	1.6	1.3	1.0	0.9	0.5
基準変位量の超過確率 P_f	0.05	0.10	0.16	0.20	0.30
先端平均 μ_t	0.90	1.05	1.30	1.30	1.51
先端標準偏差 σ_t	0.27	0.32	0.39	0.39	0.45
変動係数 V_t	30%	30%	30%	30%	30%
周面平均 μ_f	0.86	0.99	1.27	1.27	1.43
周面標準偏差 σ_f	0.41	0.46	0.50	0.50	0.61
変動係数 V_f	47%	47%	39%	39%	43%

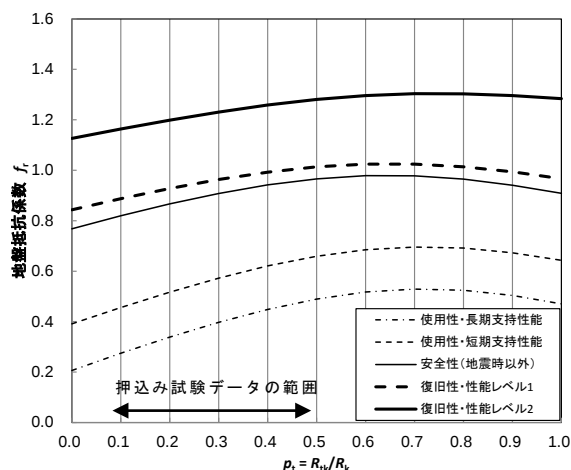


図 3.1 本工法の基準先端支持力比と地盤抵抗係数との関係

4. おわりに

本研究では、複数羽根を有する回転杭の設計支持力を求める部分安全係数（地盤抵抗係数）について、H24 基礎標準の考え方を準用し試算した。以下に本検討で得られた知見を示す。

- (1) 周面支持力に比べ先端支持力のばらつきが小さいため、本工法の地盤抵抗係数は基準先端支持力比 p_t が大きいほど大きくなる傾向となる。
- (2) 本工法の使用頻度が高い基準先端支持力比 p_t が 0.4 以下の範囲では、長期支持性能の地盤抵抗係数が 0.2～0.4 程度、短期が 0.4～0.6 であり、従来の許容応力度設計法における安全率と同等程度である。

参考文献

- 1) 土木学会，回転圧入鋼管杭（NS エコスパイラル）の設計施工法に関する技術評価 報告書，土木学会技術推進ライブラリーNo.13，2013
- 2) 西岡英俊，山田聖治，澤石正道，市川和臣，小橋弘樹：鉄道構造物に用いる小口径回転杭の鉛直地盤抵抗のモデル化，鉄道総研報告 Vol.29，No.10，pp.35-40，2015