論文 複数羽根を有する回転杭で信頼性設計法を 用いる鉛直地盤抵抗に関する考察

澤石 正道1・徳岡 孝俊2・西村 昭彦3・日野 篤志4

¹正会員 工博 日本製鉄 建材事業部 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区丸の内2-6-1) E-mail:sawaishi.m53.masamichi@jp.nipponsteel.com

²正会員 日鉄建材 エコパイル商品部 (〒135-0042 東京都江東区木場2-17-12)
 E-mail:ttokuoka@ns-kenzai.co.jp
 ³正会員 工博 ジェイアール総研エンジニアリング 顧問 (〒186-0002東京都国立市東1-4-13)

E-mail:a_nisimura@jrse.co.jp ⁴正会員 ジェイアール総研エンジニアリング 構造技術部 (〒186-0002東京都国立市東1-4-13)

E-mail:hino@jrse.co.jp

複数羽根を有する回転杭は鉄道構造物基礎に用いられており,設計にあたっては土木学会で技術評価さ れた載荷試験に基づく支持力や地盤ばねの評価式が用いられている.しかし,それらの評価式は許容応力 度設計法や限界状態設計法に対応したものであり,信頼性設計法が導入された平成24年鉄道構造物等設計 標準・同解説 基礎構造物に対して適用したものはない.そこで,本研究では複数羽根を有する回転杭の 設計において,信頼性設計法を適用することを目的に,載荷試験データに基づき鉛直支持性能に関する評 価式を再構築した.まず地盤抵抗モデルの構築にあたり,載荷試験データの平均値相当を推定する地盤ば ねの評価式と基準支持力から平均値相当の降伏支持力と終局支持力を求めるための地盤修正係数を提案し た.この新たに設定された二次勾配をもつ地盤抵抗モデルを用いることで,従来のモデルに比べ精度良く 載荷試験データを再現できることを確認した.次に,鉛直地盤抵抗の確率分布を対数正規分布と仮定して, 一次近似信頼性設計法による各限界状態での目標安全性指標を満足する設計支持力を算定するための地盤 抵抗係数を提案し,小径回転杭(先端一枚羽根)の鉛直地盤抵抗性能との違いを検討した.

Key Words : helical piles, reliability analysis, bearing capacity, safety factor

1. はじめに

複数羽根を有する回転杭(以下,本工法と呼ぶ)は, 先端に一枚の羽根を有する一般的な回転杭に比べ周面抵 抗性能が高く,N値10程度の地層が続く場合に比較的軽 量な設備を支持する杭として適用されている.また,本 工法は,残土を排出させずにコンパクトな機械で施工で きるため,狭い場所かつ時間制限を受ける鉄道設備基礎 の工事に適している.

本工法による杭基礎の設計にあたっては、土木学会の 技術評価報告書¹²⁰で取りまとめられた基準支持力や地盤 ばね等の評価式を用いている.しかし、それらの評価式 は許容応力度設計法や限界状態設計法に対応したもので あり、信頼性設計法が導入された鉄道、道路、港湾等の 現行基準に対して適応したものはない.

そこで、本研究では平成24年鉄道構造物等設計標準・ 同解説 基礎構造物³⁾(以下、H24鉄道基礎標準と呼ぶ) を参考に,信頼性設計法に対応した本工法の鉛直支持性 能に関する支持力や地盤ばね等の評価式を載荷試験デー タに基づいて検討する.

2. 信頼性設計法に対応するための検討事項

H24鉄道基礎標準では信頼性設計法で用いる杭の応答 値とその安全性を照査する設計限界値は、仮定した確率 分布の平均値に部分安全係数を乗じて求められる.ただ し、杭の鉛直支持性能の設計限界値を求めるための特性 値である基準支持力は、載荷試験データの下限値側で評 価されているため、各限界状態における支持力の制限値 である設計支持力は、それが考慮された部分安全係数 (以下、地盤抵抗係数とも呼ぶ)を基準支持力に乗じて 求める必要がある.その地盤抵抗係数の設定にあたって は、支持力の平均値とばらつき(変動係数)が反映され るため、各杭工法の鉛直支持性能に応じて特有の値が求 められる.

前述の考え方を参考に検討された既往の研究として, 西岡ら⁴は,小口径回転杭(先端一枚羽根)の鉛直支持 性能を4種類の回転杭の載荷試験データに基づきモデル 化し,橋上駅の柱基礎に小口径杭の群杭を適用するため の方法を示している.石原ら⁵は,杭の設計鉛直支持力 の設定方法を合理化するため,鉛直支持性能の確率分布 を対数正規分布と仮定して地盤抵抗係数を設定する方法 を提案しており,両者らの成果は平成24年版 基礎構造 物の性能照査の手引き⁹(以下,手引きと呼ぶ)に取り 入れられている.

しかし、本工法はこれらの研究対象に含まれておらず, 信頼性設計法に関する検討はこれまで行われていなかっ た.そこで、徳岡ら⁷⁾、澤石ら⁸⁾、西村ら⁹は、まずH24鉄 道基礎標準を参考に本工法の鉛直支持性能の確率分布を 正規分布と仮定して信頼性設計法を適用する検討を始め ている.本研究では、先行研究⁷⁸⁹⁹や、手引きを参考に 鉛直支持性能の確率分布を対数正規分布と仮定して、信 頼性設計法で本工法を合理的に設計するための地盤抵抗 モデルと杭の設計支持力を求めるための地盤抵抗係数を 検討することとした.なお、設計にあたっては水平地盤 抵抗の検討も必要であるが本工法の水平支持性能は一般 の鋼管杭と同等と見なせることが確認されている¹こと から、ここでは鉛直支持性能のみを検討対象とした.

3. 地盤抵抗モデル

(1) 基準変位量と基準支持力

杭の鉛直変位と鉛直地盤反力との関係には、ひずみ依存性があるため、双曲線やバイリニア等でその関係が表現されている.本研究では、比較的取り扱いが容易で載荷試験結果の実挙動に近い、H24鉄道基礎標準で用いられている二次勾配を持つバイリニアモデルを用いる.

まず第一勾配,第二勾配を設定するための基準変位量 と基準支持力を定義する. H24 鉄道基礎標準では,基準 変位量を杭径,基準支持力を杭先端変位量が杭径の10% に達した時の抵抗力としている.しかし,図-1に示すよ うに本工法の杭体は,広範囲に設けられた羽根が杭周辺 土と密着し,羽根径の範囲の周辺土と一体で挙動する. そこで,杭径を羽根径と読み替えて基準変位量を定義し, 杭先端変位が羽根径の10%に達した時の抵抗力を基準支 持力とする評価式(1)³を用いることとする.

$R_{\rm k} = R_{\rm tk} + R_{\rm fk}$

 $= q_{d}A_{wo} + (\Sigma f_{ci}L_{wci} + \Sigma f_{si}L_{wsi})U_{w}$ (1) ここに、 q_{d} :先端支持力度(kN/m³)で粘性土は q_{d} =4.5 q_{u} (q_{u} は杭先端の一軸圧縮強さ) 、砂質土は q_{d} =100N (Nは杭 先端のN値), A_{wo} : 羽根面積(m²)で $A_{wo} = (D_w^2 - D_p^2) \cdot \pi/4$, f_{di} : 粘性土層の周面支持力度(kN/m³)で $f_{di} = 8N_i$, f_{si} : 砂質土 層の周面支持力度(kN/m³)で $f_{si} = 5N_i + 20$, N_i : 各土層のN 値, D_p : 杭径(m), D_w : 羽根径(m), U_w : 羽根周長(m)で $U_w = \pi \cdot D_w$ とする.

次に羽根径を基準とする本工法の地盤抵抗モデルを図 -2に示す。本モデルは原点と10mmまたは0.01D_w変位時の 小さい方の抵抗力を結んだ割線勾配を初期剛性とし,降 伏支持力を折れ点として終局支持力に至るバイリニアで ある.降伏支持力は20mmまたは0.02D_w変位時の小さい 方の抵抗力,終局支持力は0.1D_w変位時の抵抗力と定義 し,基準支持力に後述の地盤修正係数を掛けて求められ る.H24鉄道基礎標準では,初期剛性,降伏支持力,終 局支持力を設定する基準変位はそれぞれ10mm,20mm, 杭径の10%変位であるが,本工法の適用範囲は杭径 700mm以下,羽根径900mm以下であり,10mm程度の変 位で降伏支持力レベルに達する杭径400mm以下の小径杭 が多用されるため,本工法と同等の杭径が用いられる小 口径回転杭⁴を参考に基準変位量を設定した.



図-2 地盤抵抗モデル

(2) 載荷試験データの整理

地盤抵抗モデルの検討にあたっては、表-1に示す12本 (押込み試験10本、引抜き試験2本)の載荷試験データ を用いた.載荷試験杭の各パラメータは杭径D₀が114.3 ~700mm,羽根径D_wが264~900mm,羽根ピッチPと羽根の幅Bとの比P/Bが4.5~10,羽根区間長L_wが2.4~17mであり,実測杭頭荷重の第1限界は変位の急増点,第2限界は基準変位0.1D_w時の値である.図-3に全ケースの載荷試験結果で得られた正規化杭頭荷重(杭頭荷重を基準支持力で除した値)と正規化杭先端変位(杭先端変位を基準変位量0.1D_wの長さで除した値)との関係を示す.

これらの試験データに基づき,H24鉄道基礎標準で規 定する杭径Dを羽根径D_w,杭先端面積A_tを羽根先端部の 円環面積A_{wo}= $(D_w^2 - D_p^2)$ ・ π /4 (外径は羽根径D_w,内径は杭 径D_p),杭周長Uを羽根外周長U_w= π ·D_wと読み替えて地 盤反力係数を求める.その結果,基準変位時(10mmま たは0.01D_w変位時の小さい方)の割線剛性k_{tw}= q_tS_0 (杭先 端変位量S₀,杭先端支持力度q)として求まる杭先端の 鉛直地盤反力係数の実測値k_{tw}は24~166MN/m³,同様の 基準変位時での割線剛性k_{tw}= τ / S (各層での区間中点変位 量S,区間周面支持力度 τ)として求まる杭周面の鉛直せ ん断地盤反力係数の実測値k_{tw}は2.1~372MN/m³となった. なお, k_{tw} はN値3~19の範囲, k_{tw} はN値2~36の範囲にお いて求められた値である.

表-1 載荷試験データ(試験名H*の下2段は引抜き試験)

	杭諸元					実測杭頭荷重(kN)		基準先端		
試験名	杭径	羽根径	羽根径比	P/B	杭長	羽根区間長	第2限界	第1限界	支持力比	N値
	(mm)	(mm)			(m)	(m)			pt	
SK165W300	165.2	300	1.82	4.45	6.0	5.5	233	100	0.14	2~5
SK216W300	216.3	300	1.39	7.17	6.0	5.5	262	100	0.12	2~5
KG400W600L	400	600	1.50	6.00	18.0	17.0	3668	2700	0.16	2~36
KG400W600S	400	600	1.50	6.00	12.0	11.0	1800	1400	0.15	2~24
KG400W600N	400	600	1.50	6.00	12.0	5.0	1390	720	0.12	9~23
KG400W500	400	500	1.25	10.00	12.0	11.0	1321	960	0.08	2~23
FK400W600	400	600	1.50	6.00	6.0	5.0	589	480	0.26	3~6
NY114W264	114.3	264	2.31	3.53	13.0	3.5	330	-	-	2~23
IK600W800	600	800	1.33	8.0	6.0	2.4	823	450	0.48	11~14
NJ700W900	700	900	1.29	7.00	7.0	2.8	1200	900	0.25	7~10
H-KG400W600	400	600	1.50	6.00	12.0	11.0	1360	960	-	2~23
H-IK600W800	600	800	1.33	8.00	6.0	2.4	600	340	-	14



図-3 正規化した杭頭荷重と杭先端変位との関係

(3) 地盤反力係数の評価式

前項で整理した地盤反力係数の実測値は、地盤の強さ (変形係数)に比例し、杭先端については載荷幅依存性 を考慮し羽根径の-3/4乗 (D_w^{-34})に比例、杭周面につい ては載荷幅に依らないものと仮定する.この仮定より、 杭先端の鉛直地盤反力係数を式(2),杭周面のせん断地 盤反力係数を式(3)と表し,各々の比例係数を検討する.

$$k_{\rm tv} = X_{\rm tv} \rho_{\rm gk} E_{\rm d} D_{\rm w}^{-3/4} \tag{2}$$

$$k_{\rm fv} = X_{\rm fv} \rho_{\rm gk} E_{\rm d} \tag{3}$$

ここに、 k_v : 杭先端の鉛直地盤反力係数 (kN/m³)、 k_v : 杭 周面のせん断地盤反力係数 (kN/m³)、 X_v 、 X_{fv} : 比例係数 で、後述する載荷試験データから求めた実測値との関係 により設定、 ρ_{gk} : 地盤反力係数に関する地盤修正係数で 本検討では1.0 (短期作用時)、 E_d : 地盤の変形係数の設 計用値(kN/m²)で $E_d = \rho_{gE} E_N / \gamma_{gE}$, E_N : 標準貫入試験から得 られたN値から推定される地盤の変形係数(kN/m²)で、砂 質土の場合は $E_N = 2000N$ 、粘性土の場合は $E_N = 4000N$ 、 ρ_{gE} : 地盤の変形係数に関する地盤修正係数で本検討で は $\rho_{gE} = 1.0$ 、 γ_{gE} : 地盤の諸数値に関する地盤調査係数で 本検討では $\gamma_{gE} = 1.0$ とする.



図-5 杭周面の地盤反力係数

20

40

 $\rho_{gk}E_d$

60

80

0

比例係数X_w,X_fの検討は次の手順で行った.まず静的 載荷試験による荷重保持時間の補正として,載荷試験デ ータから求まる地盤反力係数の実測値を1.5で除して長 期レベルに補正する.次にその値を2倍して短期荷重に 対する地盤反力係数の値(実測値の1.33倍)に換算する. この補正された実測地盤反力係数とN値から求まる地盤 の変形係数との関係を図4,図-5に示す.両者の関係か ら比例係数Xを実測地盤反力係数と変形係数の比が対数 正規分布になると仮定すると,杭先端の鉛直地盤反力係 数の比例係数が, $X_w = 3.25$ (対数の平均M = 0.512,標準 偏差s = 0.121),杭周面のせん断地盤反力係数の比例係 数が, $X_{fv} = 0.95$ (対数の平均M = -0.021,標準偏差s = 0.212) と求まる.

(4) 降伏支持力および終局支持力算定のための地盤修 正係数

基準支持力と終局支持力R_u, R_hは共に第二限界抵抗力 を示すが,前者は下限値,後者は平均値相当のため,前 者に補正係数(地盤修正係数)を乗じる式(4)で後者を 求める.地盤修正係数は,基準変位量0.1D_wでの載荷試 験データの実測値と式(1)による設計値との比の平均値 であり,対数正規分布を仮定する.同様に降伏支持力は 基準変位量min(20mmまたは0.02D_w)での実測値と式(1)に よる設計値との比の平均値であり,式(5)より求める.

> $R_{tu} = \rho_{gtu} R_{tk} \quad R_{fu} = \rho_{gfu} R_{fk}$ (4) $R_{tv} = \rho_{gty} R_{tk} \quad R_{fy} = \rho_{gfy} R_{fk}$ (5)

ここに、 ρ_{gu} 、 ρ_{gu} :終局支持力に関する地盤修正係数、 ρ_{gy} 、 ρ_{gy} :降伏支持力に関する地盤修正係数で、後述す る表4.1の自然数平均値 μ の値であり、終局のうち杭先端 ρ_{gu} は1.44、杭周面 ρ_{gu} は1.28、降伏のうち杭先端 ρ_{gy} は1.01、 杭周面 ρ_{gy} は0.89と求まる.

(5) 押込み試験の再現解析

本工法の押込み試験の再現解析の1例として, 杭径 400mm, 羽根径600mm, 杭長11mの実測値と前節で提案 した地盤抵抗モデルと以前の基準に基づくフラットバイ リニア型の地盤抵抗モデルによる計算結果を図-6に示す. これより, 前節で提案した地盤抵抗モデルによる計算値 は従来のものに比べ,より忠実に載荷試験を再現できて いることが分かる.



図-6 押込み試験(KG400W600S)の再現解析結果

4. 杭の設計支持力を求めるための地盤抵抗係数

(1) 検討方法と条件

一次近似信頼性設計法を用いて、押込み試験の各限界 状態での鉛直抵抗が確率分布関数の線形和で表されるも のと仮定する.そして、図-7に示す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性指標 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 *R*_kは前節で示した式(1)で求め、各限 界状態の基準変位量と目標安全性指標は手引き⁹付属資 料4に示されている値を用いる.以上の条件の元に式(6) で算定する設計支持力 *R*_{vd}の地盤抵抗係数 *f*_f (*f*_a:先端支 持力に対する地盤抵抗係数,*f*_f:周面支持力に対する地 盤抵抗係数)を式(7)で求めるため、次節で各係数を設 定する.

 $R_{vd} = f_r R_k = f_{rt} R_{tk} + f_{rf} \Sigma R_{fk}$ (6) $f_{rt} = \mu_t (1 - \beta_a \alpha_t V_t)$ $f_{rf} = \mu_f (1 - \beta_a \alpha_f V_f)$ (7) ここに、 $\mu, \mu_t : 実測値と計算値の比の平均値, V_t, V_f :$ 実測値と計算値の比の変動係数、 $\beta_a : 各限界状態での目$ $標安全指標、<math>a, a_f : 基準先端支持力比p_t に対する感度係$ 数、 $p_t : 基準先端支持力比でp_t = R_{tk} / (R_tk + R_tk) とする.$



図-7 基準支持力と設計支持力との関係

(2) 地盤抵抗係数の検討

地盤抵抗係数の検討にあたり、まず表-1のうち極限レベルまで載荷した9本の押込み試験データから、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を抽出する.次に実測値を式(1)から求まる基準支持力で正規化(実測値/計算値)し、表-2に示す正規化支持力の平均値と変動係数を求める.変動係数 Vは手引きに従い式(8)で示され、杭の施工によるばらつき V_1 , N値から強度定数への変換誤差 V_2 ,載荷試験位置とボーリング調査位置との空間変動 V_3 が含まれている.

$$V = \sqrt{\left(\frac{V_1}{n}\right)^2 + V_2^2 + V_3^2}$$
(8)

ここで、手引きに準じて $V_2 \ge 10\%$ 、 $V_3 \ge 18\% \ge 6$ 定する と表-2に示す本工法の施工によるばらつき V_1 が得られ、 設計で考慮する空間変動 $V_{3331} \ge 45\%$ 、群杭本数 $n \ge 1$ 本 する場合、表-2に示す設計変動係数 V_{3331} が得られた.

続いて、これらの平均値 μ と設計変動係数 V 設計を式 (9)、式(10)で対数正規化し、各限界状態における目標安 全性指標となる時の平均値 μN と標準偏差 のN を自然数正 規分布に換算した値を表-2の最下段行に示す.

$$\mu_{\rm N} = \ln(\mu) - \frac{1}{2}\sigma_N^2 \tag{9}$$

$$\sigma_{\rm N} = \sqrt{\ln\left(1 + V_{\rm pres}^{2}\right)} \tag{10}$$

最後に統計処理して得られた平均値と標準偏差を自然 数正規分布に換算した表-2の最下段行に示す平均値 μ,

 μ_{f} ,標準偏差 σ_{v} , σ_{f} ,から式(11)により感度係数 a_{v} , a_{f} を 求め,その感度係数により求まる基準先端支持力比 p_{t} と 地盤抵抗係数 f_{t} との関係を図-8に示す.

$$\alpha_{t} = \frac{p_{t}\sigma_{t}}{\sqrt{\{p_{t}^{2}\sigma_{t}^{2} + (1-p_{t})^{2}\sigma_{f}^{2}\}}} \quad \alpha_{f} = \frac{(1-p_{t})\sigma_{tf}}{\sqrt{\{p_{t}^{2}\sigma_{t}^{2} + (1-p_{t})^{2}\sigma_{f}^{2}\}}} \quad (11)$$

以上の結果,本工法の地盤抵抗係数は使用性・長期支 持性能で0.39~0.56,使用性・短期支持性能で0.55~0.73, 安全性(地震時以外)で0.89~1.03,復旧性・性能レベ ル1で0.94~1.06,復旧性・性能レベル2で1.22~1.38とな った.

(3) 地盤抵抗係数に関する考察

図-8に対数正規分布(無印)と正規分布⁸(●印)を 仮定した本工法の地盤抵抗係数と対数正規分布を仮定し

	要求性能	長期支持 短期支持		安全性(地震時以外)	復旧性レベル 1	復旧性レベル2		
	基準変位量	13. 3mm, 0. 0133Dw	20mm, 0.02Dw	50mm, 0.05Dw	50mm, 0.05Dw	0. 1Dw		
載荷試験データ	平均 μ	0.97	1. 12	1.38	1.38	1.59		
自然数正規分布	変動係数 V _{test}	0.25	0.24	0. 24	0. 24	0.20		
変動係数	施工ばらつき V1	0.14	0.12	0.12	0.12	0.00		
	N値変換誤差 V2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10		
	載荷試験空間変動 V3	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18		
	設計空間変動 V3設計	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45		
	群杭本数 n	1	1	1	1	1		
	設計変動係数 V設計	0.48	0.48	0.48	0.48	0.46		
対数正規化	平均值 μΝ	-0.14	0. 01	0. 22	0. 22	0.37		
	標準偏差 σN	0.46	0.45	0.45	0.45	0.44		
自然数	目標安全性指標 βa	1.20	0.85	0.50	0.40	0.10		
正規分布	超過確率 Pf	0.12	0.20	0.31	0.34	0.46		
換算	自然数平均值 μ'	0.87	1.01	1.25	1. 25	1.44		
	標準偏差 σ'	0.31	0.38	0. 51	0. 52	0.62		

表-2	対数正規分布を仮定した平均値と変動係数
	(a)柿先端

	要求性能	長期支持	短期支持	安全性(地震時以外)	復旧性レベル 1	復旧性レベル2
	基準変位量	13. 3mm, 0. 0133Dw	20mm, 0.02Dw	50mm, 0.05Dw	50mm, 0.05Dw	0. 1Dw
載荷試験データ	平均 μ	0.90	1.04	1.32	1. 32	1.48
自然数正規分布	変動係数 V _{test}	0.46	0.45	0.38	0.38	0.40
変動係数	施工ばらつき V1	0.41	0.40	0.31	0. 31	0.34
	N値変換誤差 V2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	載荷試験空間変動 V3	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	設計空間変動 V3設計	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
	群杭本数 n	1	1	1	1	1
	設計変動係数 V設計	0.62	0.61	0.56	0.56	0.57
対数正規化	平均值 μΝ	-0.27	-0.12	0.14	0.14	0. 25
	標準偏差 σN	0.57	0.56	0. 52	0. 52	0.53
自然数	目標安全性指標 βa	1.20	0.85	0.50	0.40	0.10
正規分布	超過確率 Pf	0.12	0.20	0.31	0.34	0.46
換算	自然数平均值 μ'	0.77	0.89	1.15	1.15	1.28
	標準偏差 σ'	0.32	0.40	0.53	0. 54	0.67

(b)杭周面

た小径回転杭[®](先端一枚羽根:■印)の地盤抵抗係数 を示す.(全ケースとも実線は性能レベル2,一点鎖線 は長期支持性能を示す)まず,2つの確率分布で求まる 本工法の地盤抵抗係数を比較すると,全体的に対数正規 分布(無印)は正規分布(●印)よりも大きくなってい る.これは,鉛直地盤抵抗分布の平均値がゼロに近いと, 正規分布では実測されない負の値を含んだ分布が仮定さ れるが,負とならない対数正規分布を用いることによっ て,実測に近い分布を表現した結果と言える.そのため, 本工法が使われやすい基準先端支持力比05以下の範囲 では,対数正規分布を用いることで地盤抵抗係数の値が 正規分布の場合よりも引き上げられ,より実現象を反映 した設計ができるようになっていると思われる.

次に、対数正規分布を仮定した本工法の地盤抵抗係数 (無印)と小径回転杭(■印)を比較する.同じ限界状 態において、全体的に本工法の地盤抵抗係数は小径回転 杭に比べ大きくなっている.これらの地盤抵抗係数は両 者の設計支持力が同じ安全余裕度になるよう求められた 値であるため、両者の地盤抵抗係数の違いは、本工法の 基準支持力が載荷試験データに対して小径回転杭よりも 控えめに評価されている結果を表していると言える.ま た、長期支持性能において、基準先端支持力比が大きい ほど小径回転杭の地盤抵抗係数の値は小さいため、杭長 が短い杭(相対的に周面支持力が小さく基準先端支持力 比が大きい)の設計にあたっては、小径回転杭に比べ本 工法の設計支持力が大きく設定される傾向にあるものと 考えられる.



図-8 鉛直地盤抵抗に関する地盤抵抗係数

5. まとめ

本研究では、本工法を信頼性設計法で設計することを 目的に、H24鉄道基礎標準や手引きを参考に鉛直支持性 能に関する設計支持力や設計地盤ばね等を求めるための 評価式を載荷試験データに基づいて検討した.本検討で 得られた成果を下記に示す.なお、本工法の基準支持力 評価式(1)や載荷試験データは参考文献2)によるため、本 検討で提案した評価方法等は同文献2)に示されている適 用範囲において用いることが可能なものである.

- 本工法の杭体は広範囲に設けられた羽根が杭周辺土と 密着し、羽根径の範囲の周辺土と一体挙動する.その ため、本工法の鉛直地盤抵抗における基準支持力の評 価式は羽根径を基準に構築されているが、杭径を羽根 径と読み替えることでH24鉄道基礎標準が示す基準支 持力の評価式としても適用できることを示した.
- 2)小口径回転杭を参考に羽根径で定義した基準変位量により載荷試験データを整理し、二次勾配を持つバイリニア型の地盤抵抗モデルを提案した.この地盤抵抗モデルを用いた載荷試験の再現解析結果は従来モデルよりも試験結果を忠実に再現していることが分かった.
- 3) 鉛直地盤抵抗の確率分布を対数正規分布と仮定し、各限界状態において所定の安全性を見込んだ設計支持力を求めるための地盤抵抗係数を提案した.その値は鉛直地盤抵抗の確率分布を正規分布とした場合に比べ、高精度化されたことで引き上げられている.
- 4)長期支持性能において、本工法の地盤抵抗係数に比べ 小口径回転杭(先端一枚羽根)の地盤抵抗係数は基準 先端支持力比が大きいほど値が小さくなる.そのため、 周面抵抗が相対的に小さい杭長が短い杭を設計する場 合、小径回転杭に比べ本工法の設計支持力が大きく設 定される傾向にあるものと考えられる.

謝辞:本検討にあたっては,公益財団法人鉄道総合技術 研究所基礎・土構造研究室殿にご指導をいただいたの で,ここに謝意を表す.

参考文献

- 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.7,2010.
- 2) 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.
- 3) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解 説基礎構造物 平成 24 年 1 月, 2012.
- 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
- 5) 石橋匠,西岡英俊,佐名川太亮:鉄道における杭の 鉛直支持力評価方法の合理化に向けた検討,第60回 地盤工学シンポジウム 平成28年度(2016年度)論 文集,pp.261-266,2016.
- 6) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解
 説 基礎構造物 平成 24 年版 基礎構造物の性能照査の
 手引き,2018.
- 7) 徳岡孝俊,和田昌敏,澤石正道,豊福浩司,西村昭 彦,日野篤志:複数羽根を有する回転杭の地盤抵抗 モデルに関する一考察,土木学会第73回年次学術講 演会講演概要集,pp.785-786,2018.
- 澤石正道,豊福浩司,徳岡孝俊,和田昌敏,西村昭 彦,日野篤志: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,土木学会 第73回年次学術講演会講演概要集,pp787-788,2018.
- 9) 日野篤志,西村昭彦,澤石正道,豊福浩司,徳岡孝 俊,和田昌敏:複数羽根を有する回転杭の地盤抵抗 の設定法の違いが構造物の応答に与える影響,土木 学会第73回年次学術講演会講演概要集,pp789-790, 2018.

(2019.4..5 受付)

CONSIDERATION ON BEARING CAPACITY FOR HELICAL PILES BY RELIABILITY ANALYSIS

Masamichi SAWAISHI, Takatoshi TOKUOKA, Akihiko NISHIMURA and Atsushi HINO

Our helical piles have been used for the railway structure foundation, and in its design, the evaluation for-mula of the bearing capacity based on the pile loading tests are used. However, these evaluation for-mulas corre-spond to the conventional allowable stress design method and the limit state design method, and are not applied to 2012 Design Standards for Railway Structures and Commentary (Foundation Structures) introduced the reliability analysis.

In this research, in order to design the helical piles, the evaluation formula on the vertical support performance of the pile is reexamined based on the pile loading test data for the purpose of using the reliability analysis, and the ground resistance model has been constructed that estimates the load test data more accurately than before by setting a ground correction coefficient that corrects the reference bearing force evaluation formula to an average value. In addition, by assuming the probability distribution of vertical ground resistance as a lognormal distribution, we proposed a ground resistance coefficient to calculate the design support force that satisfies the target safety index in each limit state. And we discussed the difference of the vertical ground resistance performance of between the screwed pile with single blade and the our helical pile.