

論文 鉄道構造物に用いる回転切削圧入杭の設計鉛直支持力のモデル化

鈴木 直樹¹・木村 育正¹・佐名川 太亮²・西岡 英俊²

¹正会員 (一社)全国圧入協会 (〒108-0075 東京都港区港南 2-4-12 港南 YK ビル 9 階)

E-mail: jpa@atsunyu.gr.jp

²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

近年、鋼管杭の貫入方法の一つとして、先端ビット付き鋼管杭の回転切削圧入（ジャイロプレス）工法の普及が進んでいる。鉄道構造物の基礎の設計は、鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物（以下、基礎標準）に従って実施される。基礎標準では、過去の鉄道構造物基礎としての施工実績が豊富な杭工法を対象として、杭の地盤抵抗特性（鉛直支持力や鉛直ばね定数）を N 値等の地盤調査結果から推定するモデル化方法（鉛直地盤抵抗モデル）が示されているが、近年普及が進みつつある回転切削圧入工法は、その適用対象外となっており、特殊な施工方法の杭基礎として扱われる。そこで本稿では、回転切削圧入杭の静的鉛直載荷試験データに対して一般工法に準じた統計処理および信頼性解析に基づく検討を行い、鉛直地盤抵抗モデルの評価を行った。

Key Words: *rotally press-in, steel tubular pile, vertical loading test, reliability design method, vertical bearing capacity*

1. はじめに

近年、鋼管杭の貫入方法の一つとして、先端ビット付き鋼管杭の回転切削圧入（ジャイロプレス）工法の普及が進んでいる¹⁾。回転切削圧入工法は、先端に鋼材のリングと硬質地盤切削用のビットからなるリングビットを有する鋼管杭を回転切削圧入する杭工法である（図-1）。表-1 のような特徴を有する回転切削圧入工法は、とくに硬質地盤や上空制限などの施工が困難な箇所での適用が期待され、既設橋梁の桁下や水上での橋脚補強などに実績がある（例えば、文献³⁾や図-2 など）。

一方、鉄道構造物の基礎の設計は、鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物⁴⁾（以下、基礎標準）に従って実施される。基礎標準では、過去の鉄道構造物基礎としての施工実績が豊富な杭工法を対象として、杭の地盤抵抗特性（鉛直支持力や鉛直ばね定数）を N 値等の地盤調査結果から推定するモデル化方法（鉛直地盤抵抗モデル）が示されている。近年普及が進みつつある回転切削圧入工法は、その適用対象外となっており、「基礎構造物の性能照査の手引き」⁵⁾（以下、手引き）では特殊な施工方法の杭基礎として扱われている。例えば杭先端の鉛直地盤抵抗では、杭の円環断面のみを抵抗面積とした打込み杭工法の算定式を準用した安全をみた設計がなされて

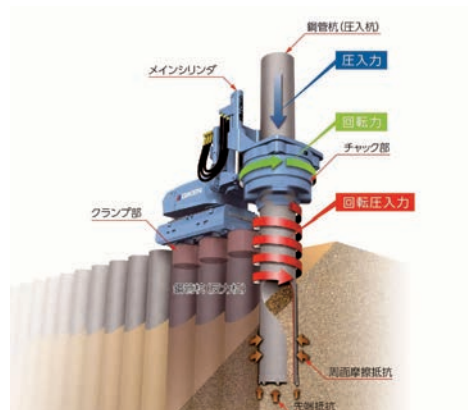


図-1 回転切削圧入工法のメカニズム²⁾



図-2 回転切削圧入工法の鉄道構造物への適用例⁶⁾

表-1 回転切削圧入工法の特徴

対象	特徴
地盤	特殊なビットを取り付けることにより、硬質地盤やコンクリート構造物などの地中障害物がある場合にも施工が可能。
施工	既設の鋼管杭を把持して施工機械の反力を得るとともに、その上を自走しながら施工するため、仮設用構台などが不要となり、狭隘地での施工が可能。 鋼管杭の胴体部分を把持して回転力と圧入力を与える工法であるため、既設橋梁の桁下や道路・鉄道等に近接している場合に求められる低杭頭での施工が可能。 仮設用構台の設置、建設残土の処理が不要であり、施工時間の制限を受けないため、短工期施工が可能。
環境	低騒音、低振動であるとともに鋼管内への水吐出量もウォータージェット等と比べて少量であるため、周辺環境への影響を最小限に抑えることが可能。
その他	杭径で600mmから2500mmまでの施工ができるため、壁高に応じた経済的な設計が可能。

Note: 文献²⁾を参考に施工機械更新に伴う対象杭径を修正

おり、改善の余地は大きい。

そこで本稿では、回転切削圧入工法で施工された杭（以下、回転切削圧入杭）の静的鉛直載荷試験データに対して基礎標準ならびに手引きに基づき、統計処理および信頼性解析に基づく検討を行い、鉛直地盤抵抗モデルの評価を行った。

2. 基礎標準における杭の設計鉛直支持力算定の基本的な考え方

基礎標準における考え方の詳細は、基礎標準巻末の付属資料、手引きの付属資料および文献⁷⁾に詳述されているが、本稿に関係する特徴について以下に概説する。

(1) 杭の設計鉛直支持力

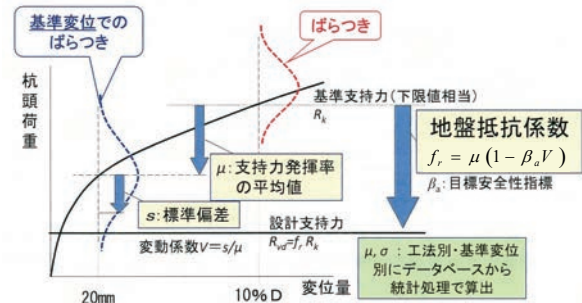
基礎標準では、杭の設計鉛直支持力 R_{vd} は、ある一定の信頼性（目標安全性指標 β_d ）において、要求性能に応じた基準変位量を下回するために必要な支持力として、基準支持力 R_k （特性値）に地盤抵抗係数 f_r を乗じた式(1)～(3)により算定される（図-3）。

$$R_{vd} = f_r R_k = f_{rt} R_{tk} + f_{rf} \sum R_{fk} \quad (1)$$

$$R_{tk} = q_{tk} A_t \quad (2)$$

$$R_{fk} = r_{fk} U \Delta_t \quad (3)$$

この基準支持力の推定式および地盤抵抗係数は、実杭の載荷試験データベースの統計処理に基づき、信頼性設計法により導出される。

図-3 地盤抵抗係数の考え方（文献⁹⁾を加筆修正）

(2) 基準支持力

基礎標準では、基準支持力を地盤工学会基準における第2限界抵抗力の定義を参考に、杭先端変位が杭径の10%に到達した時点での荷重の特性値とし、さらに特性値を載荷試験結果の下限値として設定している。ただし、後述の通りデータ数が少ないため、本稿では回転切削圧入工法の施工プロセスを考慮するとともに他の工法と比較しながら特性値を設定した。

(3) 地盤抵抗係数の導出

基礎標準では、地盤抵抗係数 f_r は基準変位量における載荷試験結果の基準支持力 R_k に対する比率の平均値 μ と変動係数 V 、目標安全性指標 β_d から式(4)で算定される。

$$f_r = \mu(1 - \beta_d V) \quad (4)$$

ここで目標安全性指標 β_d は、長期的な施工実績が最も豊富と考えられる打込み杭工法において基礎標準平成24年改訂前と同等の信頼性が確保できるようにコードキャリブレーションにより設定される。これにより異なる杭工法でも、打込み杭工法と同等の信頼性が確保されると考えられている。平均値 μ と変動係数 V は後述する載荷試験の統計処理結果が用いられる。なお本工法は後述の通りデータ数が少ないため、統計的不確実性を考慮してデータ数 n に応じて信頼水準0.75の下限値となるように平均値 μ を算出した。

地盤抵抗係数の算定について、基礎標準平成24年改訂時では、計算の簡素化のために自然数正規分布を仮定した統計処理を行っている。手引きでは改善した方法を用いているため、本稿では以下の3点を考慮して分析した。詳しい方法は手引きを参照されたい。

- ・ 対数正規分布の仮定による統計処理
- ・ 変動係数の細分化
- ・ 上記の統計処理結果を考慮した目標安全性指標の再設定

なお本稿の地盤抵抗係数算定において、群杭効果は考慮せず、地盤の空間変動 V_3 は最大値である45%（地盤調査位置から試験杭までの距離 $AL \geq 50m$ の場合：ボーリング転用で設計することに相当）と仮定した。

表-2 要求性能に応じた目標安全性指標と基準変位量

性能項目	対数正規分布仮定 ⁵⁾		基準変位量 ⁴⁾
	目標信頼性指標 β_d'	超過確率 P_f'	
長期支持性能	1.2	0.12	①長期変位 20(≈13.3)mm
短期支持性能	0.85	0.2	②20mm
安定(地震時以外)	0.5	0.31	③min(50mm, 杭径 5%)
安定レベル 1	0.4	0.34	
安定レベル 2	0.1	0.46	④杭径 10%
安定レベル 3	0.0	0.50	

表-3 載荷試験の概要

試験名	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭長 (根入れ長) (m)	支持層への 換算根入れ 深さ(m)	支持地盤		中間層			
					土質区分	N 値	土質区分	N 値	土質区分	N 値
II	800	16	19.65	2.5	G	86	G	43~66	-	-
T1	800	16	17.5	2.0	G	36	S	3	S	9
F1	1000	16	15.0	3.1	S	58	S	7	S	58
A1	800	12	4.7	0.8	S	15	C	3	-	-
N1	1000	12	25.0	2.4	G	60	S	6	C	4

Note: 土質区分 S: 砂質土, G: 砂礫, C: 粘性土

(4) 要求性能毎の基準変位量と目標安全性指標

各要求性能に応じた目標安全性指標は、打込み杭工法と同等の信頼性が確保できるようコードキャリブレーションされた値とし⁹⁾、目標信頼性指標と基準変位量を表-2に示した。

3. 載荷試験の概要と評価結果の適用範囲

(1) 載荷試験の概要

本検討では、以下の条件を満たす載荷試験を支持力評価の対象とした。

- ・ 地盤工学会基準に従った多段階静的載荷試験が実施されている
 - ・ 杭先端変位で杭径の 10%まで載荷されている
 - ・ 杭先端の沈下量が先端沈下計で計測されている
- 最終的に評価対象とした載荷試験一覧を表-3に示した。

(2) 評価結果の適用範囲

一般的に回転切削圧入工法は硬質地盤への貫入を対象としているため、支持層にはある程度根入れされると考えられるが、他の杭工法との整合性や載荷試験におけるひずみゲージの位置などを鑑み、基礎標準に示される支持層への最小根入れ深さは、鋼管外径 D とした。なお、基礎標準では、先端支持力には支持層への最小根入れ深さ $1D$ 分の周面抵抗を含めている（引抜き時の周面抵抗は期待できる）。そのため、支持層への根入れが最小根入れ深さを満たさない場合は、先端支持力の補正を行う必要がある。

また、評価対象の杭径は 800~1000mm であることから、

後述する内容についても、この範囲に適用されるのが妥当と考えられる。

4. 鉛直地盤反力係数/鉛直地盤ばね定数の推定式

(1) 杭先端の鉛直地盤反力係数・鉛直地盤ばね定数

基礎標準では、地盤反力係数を基準変位量が 10mm に達した際の地盤反力～変位関係の割線剛性として求めている。ただし、杭先端の地盤反力係数のモデル化において、寸法効果として杭径の $3/4$ 乗則を考慮するとともに、荷重保持時間の影響を地盤反力係数に関する地盤修正係数 ρ_{gk} が 1.0 となる短期載荷時の設計用値に変換するため、30 分保持の載荷試験での実測値を 1.33 (≈2/1.5) 倍に割り増すこととしている。また、砂質土では地盤の変形係数の設計用値を $E_d = 2000 \text{ N}$ (粘性土では 4000 N) として推定している。

これらを踏まえ、各載荷試験における杭先端の地盤ばね定数を先端面積 A_t で除して、さらに荷重保持時間による補正をした地盤反力係数（荷重保持時間の影響は $\rho_{gk} = 1.0$ 相当に補正）と杭先端の N 値から推定した地盤の変形係数の関係を図-4に示した。

補正をした地盤反力係数は、他の杭工法と同様に、杭先端の地盤の変形係数に対して線形の関係が見られた（図-4）。そこで、杭先端の鉛直地盤反力係数 k_n 、および地盤バネ定数 K_n を式(5)および式(6)により推定した（図-4 点線）。ここで、杭先端の鉛直地盤ばね定数 K_n を推定する際の杭先端の面積を先端閉塞面積とした。

$$k_n = 1.4 \rho_{gk} E_d D^{-3/4} \quad (5)$$

$$K_{iv} = k_{iv} A_t \quad (6)$$

なお基礎標準では、地盤反力係数のモデル化については下限値相当ではなく、平均値相当でモデル化している。これは地震応答解析等を考えた場合、必ずしも過小評価することが安全側とは限らないためである。図-4から、式(5)が載荷試験結果を概ね平均値相当で評価できていることが確認できた。

(2) 杭周面のせん断地盤反力係数

基礎標準では、杭周面のせん断地盤反力係数のモデル化において、載荷試験におけるひずみゲージ貼付区間毎の鉛直せん断地盤反力係数を用いて統計的な検討を行っている。載荷試験結果から逆算される鉛直地盤反力係数を荷重保持時間による補正をした値（先端と同様に荷重保持時間の影響は $\rho_{gk} = 1.0$ 相当となるよう 1.33 倍に割増しを実施）と、地盤の N 値から $\rho_{gk} = 1.0$ として算出した地盤変形係数の設計用値の関係を図-5に示した。

図-5から地盤の変形係数が大きい場合、地盤反力係数が一定となるバイリニアの関係が見られる。一方、基礎標準の他の杭工法では杭周面の地盤反力係数の上限値は

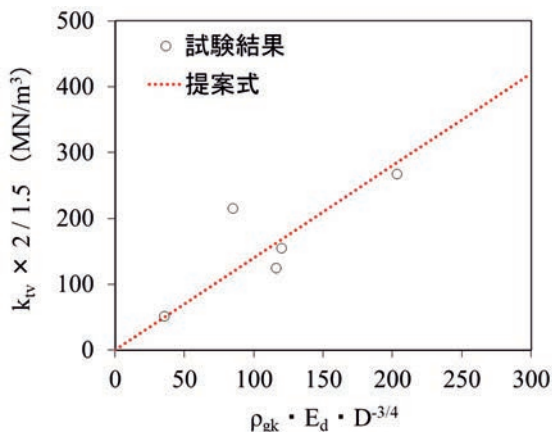


図-4 杭先端の地盤反力係数と地盤の変形係数の関係

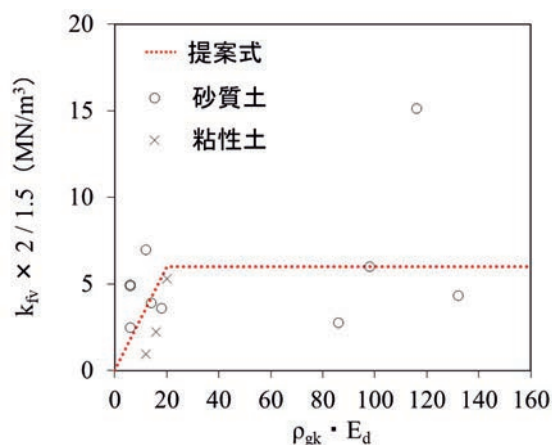


図-5 杭周面の地盤反力係数と地盤の変形係数の関係

設定されていない。これは、回転切削圧入工法が硬質地盤を対象にするケースが多く、硬質地盤への圧入時の回転切削の影響により本来の地盤の強度への依存性が小さくなること等が原因と推測される。そこで、地盤反力係数の推定式(7)を提案した（図-5点線）。

$$k_{fv} = \min(0.3\rho_{gk}E_d, 6000) \quad (7)$$

5. 基準支持力の推定式

(1) 基準先端支持力

載荷試験の基準先端支持力の実測値 R_t を先端閉塞面積 A_t で除した基準先端支持力度と先端 N 値との関係を図-6に示した。なお、基礎標準の先端 N 値は、「杭先端から上方 1D、下方 3D での最小 N 値」としているが、回転切削圧入工法では最小 N 値よりも「同区間の平均 N 値」で先端支持力度への高い相関が確認できたため、「同区間の平均 N 値」を用いることとした。ただし、後述の通りデータ数が少ないこと、とくに区間内の平均 N 値と最小 N 値の差が大きい場合のデータ数が少ないことから、実際の運用の際には他の杭工法と同様に最小 N 値を用い

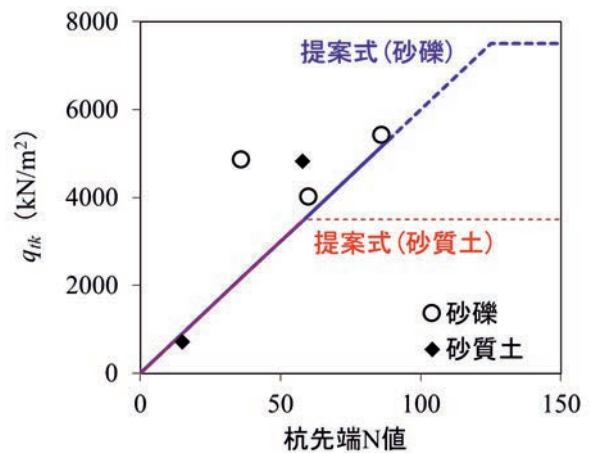


図-6 杭先端の N 値と基準先端支持力度の関係

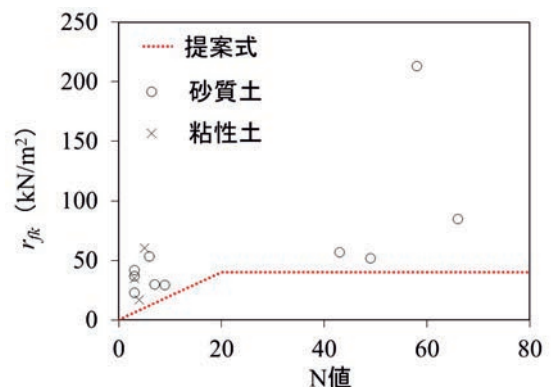


図-7 杭周面の N 値と基準周面支持力度の関係

て、安全側の設計とするのがよいと考えられる。

回転切削圧入杭の基準先端支持力の推定式は、図-6から他の杭工法と同様に下限値相当のモデル化として、式(8)、(9)で推定した。なお、載荷試験の範囲に限られていることから、載荷試験で確認された範囲を実線、範囲外を点線で示した。

$$R_{ik} = q_{ik} A_i \quad (8)$$

$$q_{ik} = \begin{cases} \min(60N, 3500) & \text{：砂質土} \\ \min(60N, 7500) & \text{：砂礫} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)は、基礎標準で提示されている場所打ち杭の式と同等である。一方、同じ開端鋼管杭工法である杭径800mm以下の打込み杭工法では、 $q_k = 35(L/D)N$ が提示されており⁴⁾、支持層への根入れ比 L/D が1~2程度の場合には $q_k = 35 \sim 70N$ 程度で、今回の式(9)とほぼ同等となる。支持層付近での杭の造作過程において、回転切削圧入杭は場所打ち杭よりも打込み杭に近いメカニズムだと筆者らは考えている。

上限値については他の杭工法の中で先端支持力度の算定値が最小となっている場所打ち杭の値を準用した。この点は、今後載荷試験のデータベースを増やすことで改善する可能性は高いと考えている。

(2) 基準周面支持力

回転切削圧入工法の載荷試験から得られた基準周面支持力度と地盤のN値の関係を図-7に示した。

ここでは、粘性土のデータが少ないことから、砂質土と粘性土で同じ基準周面支持力度の推定式とし、先端と同様に下限値相当のモデル化として、図に点線で示した。

$$\gamma_{fk} = \min(2N, 40) \quad (10)$$

図-7 から、式(10)は載荷試験結果を下限値相当で評価していることが確認できた。

6. 載荷試験データベースの統計処理結果と地盤抵抗係数の提案

各載荷試験に対し、地盤情報(N値)から前章の基準支持力の推定式を用いて基準支持力を求めた。各載荷試験の基準変位時の実測荷重を基準支持力で正規化した値について、統計処理を行った。得られた平均値と変動係数の値を表-4に示した。なお少数標本からの推定となるため、前述の通り、他の杭工法と同様に統計的不確実性を考慮してデータ数 n に応じて信頼水準0.75の下限値となるように平均値を算出した。

次に、前述の統計値を用いて地盤抵抗係数を算出し、地盤抵抗係数 f_i と基準先端支持力度 p_i の関係を図-8に示した。

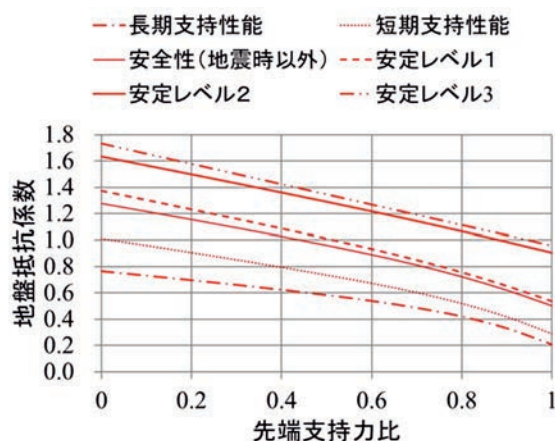


図-8 地盤抵抗係数と先端支持力度の関数

(手引きに準拠し、対数正規分布を仮定したもの)

表-4 回転切削圧入杭の載荷試験データベースの統計処理結果

統計パラメータ			性能項目					
			長期 支持性能	短期 支持性能	安全性 (地震時以外)	安全性 レベル1	安全性 レベル2	安全性 レベル3
			基準変位量					
			①	②	③		④	
周面 支持力	有効データ数 n		5 個	5 個	5 個		5 個	
	正規分布 仮定	平均値 μ	1.94	2.05	2.14		2.06	
		変動係数 V_{test}	0.54	0.53	0.55		0.49	
		設計変動係数 V_{design}	0.68	0.67	0.69		0.64	
	対数正規 分布仮定	平均値 μ'	1.60	1.70	1.76	1.76	1.73	1.73
		設計変動係数 V_{design}'	0.44	0.48	0.53	0.55	0.57	-
先端 支持力	有効データ数 n		5 個	5 個	5 個		5 個	
	正規分布 仮定	平均値 μ	0.52	0.59	0.80		1.14	
		変動係数 V_{test}	0.53	0.54	0.48		0.49	
		設計変動係数 V_{design}	0.67	0.68	0.63		0.64	
	対数正規 分布仮定	平均値 μ'	0.43	0.49	0.68	0.68	0.96	0.96
		設計変動係数 V_{design}'	0.43	0.48	0.50	0.52	0.57	-

Note: 性能項目と基準変位量は表-2による

7. おわりに

本稿では、回転切削圧入杭の静的鉛直載荷試験データに対して一般工法に準じた統計処理および信頼性解析に基づく検討を行い、鉛直地盤抵抗モデルの評価を行った。上述のように載荷試験数が十分多くないことから、安全をみた提案となっているが、今後載荷試験のデータベース数が増えることにより、改善される可能性が高いと考えている。今後も、狭隘箇所での施工性に優れた回転切削圧入杭を鉄道構造物へ適用できる環境を整えていく予定である。

付録

本稿で用いた記号の意義は次の通りである。

記号	単位	定義
A_t	m ²	杭先端の閉塞面積
D	m	杭径（鋼管外径）
E_d	kN/m ²	地盤の変形係数の設計用値
f_r	-	地盤抵抗係数
f_{rf}	-	周面支持力に対する地盤抵抗係数
f_{rt}	-	先端支持力に対する地盤抵抗係数
k_p	kN/m ³	杭周面の鉛直地盤反力係数
k_v	kN/m ³	杭先端の鉛直地盤反力係数
K_v	kN/m	杭先端の鉛直地盤ばね定数
N	-	N 値
p_t	-	基準先端支持力比
q_k	kN/m ²	基準先端支持力度
r_k	kN/m ²	基準周面支持力度
P_f	-	基礎標準に準じた基準変位の超過確率
P_f'	-	手引きに準じた基準変位の超過確率
R_k	kN	基準支持力
R_{rk}	kN	基準周面支持力
R_{rt}	kN	基準先端支持力
R_{td}	kN	杭の設計鉛直支持力

U	m	杭の周長
V_1	-	杭の施工法に応じたばらつき
V_2	-	N 値から地盤の強度特性を推定する変換誤差（ここでは $V_2=0.1$ ）
V_3	-	地盤の空間変動（ここでは $V_3=0.45$ ）
V_{est}	-	推定した変動係数
V_{design}	-	設計変動係数（正規分布仮定）
V_{design}'	-	設計変動係数（対数正規分布仮定）
β_a	-	基礎標準に準じた目標安全性指標
β_a'	-	手引きに準じた目標安全性指標
Δ_i	m	各土層の厚さ
μ	-	推定した平均値（ $=\bar{\mu}-k_s\sigma$ ）
$\bar{\mu}$	-	データベースの平均値
μ'	-	設計平均値
k_s	-	データ数に応じた係数 (0.33 at n=5)
σ	-	データベースの不偏標準偏差

参考文献

- 1) 国際圧入学会：ジャイロプレス（回転切削圧入）工法による鋼管土留め擁壁設計・施工指針，2014.
- 2) 平田 尚，松井延行：ジャイロプレス工法®の適用範囲拡大，新日鉄住金技報．Vol.403，pp.41-47，2015.
- 3) 木村育正：ジャイロプレス工法による基礎の補強・補修（特集 進化した橋脚・基礎の耐震補強），基礎工，第 44 巻，第 5 号，pp.34-37，2016.
- 4) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，丸善，2012.
- 5) 鉄道総合技術研究所編：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，研友社，2018.
- 6) 技研製作所：圧入工法実績，<<http://www.gtoss.net/ja/jpa/pressin-archive>>，（最終閲覧日：2019 年 3 月 4 日）
- 7) 西岡英俊，神田政幸：載荷試験データによる杭工法別の設計鉛直支持力，基礎工，第 41 巻，第 5 号，pp.42-46.，2013.

(2019.4.5 受付)

MODELING OF VERTICAL BEARING CAPACITY OF ROTALLY PRESS-IN PILE USED FOR A RAILWAY STRUCTURE

Naoki SUZUKI, Yasumasa KIMURA, Taisuke SANAGAWA and Hidetoshi NISHIOKA

In recent years, rotary press-in method (Gyropress Method), which is one of the installation methods for steel tubular piles, has progressed. Foundations of the railway structure is designed according to the design standard of railway. In the design standard, it is shown how to model and estimate the characteristics of piles (such as vertical bearing capacity and coefficient of vertical stiffness) from the soil investigation results such as N values as for pile installation methods with a plenty of construction experiences as foundations of railway structures. Rotary press-in method, however has been excluded from the above application, and it is treated as a special installation method of pile. In this paper, the vertical bearing capacity of piles which are installed by rotary press-in method is modeled and proposed based on the statistical processing and the reliability design method according to the design standard, using databases of static vertical loading tests of piles which are installed by rotary press-in method.