

鉄道構造物に用いる杭の基準支持力の推定式の検証と提案

鉄道総合技術研究所 正〇西岡英俊 正 神田政幸 フェロー 舘山勝
 複合技術研究所 正 矢崎澄雄

1. はじめに

鉄道構造物の杭基礎の設計においては、杭の設計鉛直支持力 R_{vd} は基準先端支持力 R_p および最大周面支持力 R_f にそれぞれ部分安全係数（地盤抵抗係数）を乗じて $R_{vd} = f_{r'}R_f + f_{rp}R_p$ として算定され、基準先端支持力 R_p および最大周面支持力 R_f はそれぞれN値から算定式により求めることができる¹⁾。これらの算定式および部分安全係数は、載荷試験事例に基づく統計的検討により求められているが、杭工法別にその評価精度が異なることが指摘されていた。

現在、鉄道基礎構造物の設計標準の改訂作業が進められており、異なる杭工法間で同等の性能評価が可能となるように杭の支持力算定式および部分安全係数の見直しを行っている。本報では、これらの見直し作業のうち、杭の支持力算定式についての検討結果について報告する。

2. 検証方法

本検討では、支持力算定式を鉛直載荷試験結果と比較することにより、その妥当性について検証した。対象とする載荷試験は、十分な変位量（杭径の10%以上）まで載荷した事例（表1）である。基準支持力の定義は「杭先端変位量が杭径の10%に至るまでの最大荷重」とした（図1）。これは現行の鉄道標準の考え方²⁾や、地盤工学会基準における第2限界抵抗力の定義等を参考にして、各杭種別間で同等の評価が可能となるように定めたものである。なお、杭径の定義は主たる軸部（一般には杭頭部）における杭径とした。

3. 支持力算定式の検証と提案

表2、表3に鉄道分野での現行の支持力算定式^{1),3),4)}と新たに提案する支持力算定式を示し、載荷試験杭の現地のN値から算定式により求めた基準支持力の算定値 R_c と載荷試験での実測の基準支持力 R_t との関係（図2）および R_c / R_t の平均値（表4）を示す。なお、図2中のプロットのうち白抜きのは、杭の大半が砂礫層に根入れされているか、N値4未満の粘性土層に根入れされている事例であり、N値からの推定精度が特に低いと考えられるため、 R_c / R_t の平均値算出には用いていない。

現行算定式の結果をみると、場所打ち杭は実測値よりも若干過大評価であるのに対して、鋼管ソイルセメント杭、回転杭は安全側評価となっていることがわかる。提案式は、これらの工法別の評価精度の違いが生じないように提案しており、提案式①は平均値相当を算定するもの、提案式②はばらつきの影響もある程度考慮して安全側に評価するものとしている。図2および表4から、提案式がそれぞれ狙い通りの評価となっていることがわかる。

表1 検証に用いた載荷試験の概要

杭の種別	事例数	杭径	杭長	備考
場所打ち杭	7	0.8~2.0m	7.0~40m	オールシング工法×5 リバース工法×2
打ち込み杭	10	0.8~1.6m	27~87m	先端開放の鋼管杭のみ 杭径は0.8mが主(8例)
中掘り先端根固め杭	15	0.5~1.0m	16~68m	PHC杭および鋼管杭
鋼管ソイルセメント杭	8	0.8~1.4m	11~60m	ガンテツパイル工法
回転杭	11	0.6~1.6m	13~55m	NSエコパイル工法

※事例数は降伏支持力が明確でデータ整理に採用した数

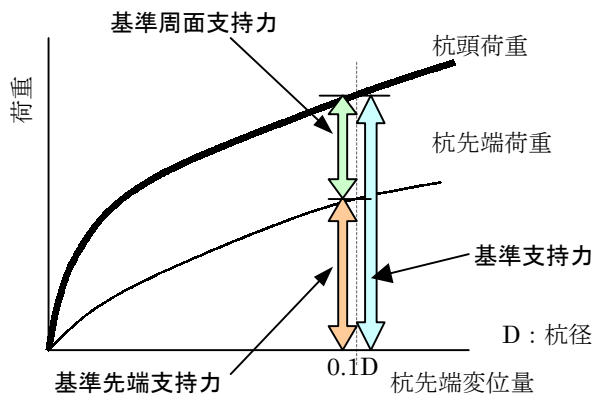


図1 基準支持力の定義

表2 基準先端支持力度の推定式 (単位: kN/m²)

杭種別	現行式		提案式① 平均評価		提案式② 安全側評価		備考 (先端面積の定義等)
	砂	砂礫	砂	砂礫	砂	砂礫	
場所打ち杭	70N ≤ 3,500	100N ≤ 7,500	70N ≤ 3,500	70N ≤ 7,500	60N ≤ 3,500	60N ≤ 7,500	公称径(掘削径)を直径とする円の面積
先端開放 開み 放杭	杭径 0.8m未満 50(ℓ/D)N ≤ 8,000	50(ℓ/D)N ≤ 12,000	40(ℓ/D)N ≤ 8,000	40(ℓ/D)N ≤ 12,000	35(ℓ/D)N ≤ 8,000	35(ℓ/D)N ≤ 12,000	既製杭径を直径とする円の面積 = 閉塞面積 N ≤ 75, ℓ/D ≤ 5
	杭径 0.8m以上 (40/D)(ℓ/D)N ≤ 8,000	(40/D)(ℓ/D)N ≤ 12,000	(32/D)(ℓ/D)N ≤ 8,000	(32/D)(ℓ/D)N ≤ 12,000	(28/D)(ℓ/D)N ≤ 8,000	(28/D)(ℓ/D)N ≤ 12,000	
中掘り先端 根固め杭	150N ≤ 7,500	200N ≤ 10,000	200N ≤ 10,000	200N ≤ 15,000	150N ≤ 10,000	150N ≤ 12,000	既製杭径を直径とする円の面積
鋼管ソイル セメント杭	150N ≤ 7,500	200N ≤ 10,000	200N ≤ 10,000	200N ≤ 15,000	150N ≤ 10,000	150N ≤ 12,000	固化体外径を直径とする円の面積
回転杭	150N ≤ 7,500	150N ≤ 7,500	200N ≤ 10,000	200N ≤ 10,000	150N ≤ 10,000	150N ≤ 10,000	先端の羽根面積(羽根開口部は除く)

表3 基準周面支持力度の推定式 (単位: kN/m²)

杭種別	現行式		提案式① 平均評価		提案式② 安全側評価		備考(杭径の定義, 周面摩擦を考慮しない範囲等)
	砂・砂礫	粘土	砂・砂礫	粘土	砂・砂礫	粘土	
場所打ち杭 (自然泥水)	5N ≤ 200	10N, q _v /2 ≤ 150	4N ≤ 160	8N ≤ 160	3N ≤ 150	6N ≤ 150	杭径は公称径(掘削径), 支持層への最低根入れ深さDf分では周面摩擦力は考慮しない
先端開放 打ち込み杭	2N ≤ 100	10N, q _v /2 ≤ 100	5N ≤ 200	10N ≤ 100	3N ≤ 120	6N ≤ 100	杭径は鋼管外径, 支持層への有効根入れ長ℓ分では周面摩擦力は考慮しない
中掘り先端 根固め杭	2N ≤ 50	5N, q _v /4 ≤ 50	2N ≤ 40	4N ≤ 40	1N ≤ 40	2N ≤ 40	杭径は既製杭外径 根固め部では周面摩擦は考慮しない
鋼管ソイル セメント杭	7N ≤ 200	10N, q _v /2 ≤ 200	10N ≤ 400*	15N ≤ 200	7N ≤ 200	10N ≤ 200	杭径は固化体外径(公称径) 根固め部では周面摩擦は考慮しない
回転杭	2N ≤ 100	5N, q _v /2 ≤ 50	4N ≤ 120	8N ≤ 100	2.5N ≤ 120	5N ≤ 100	杭径は鋼管外径, 先端から羽根径分の区間での周面摩擦力は考慮しない

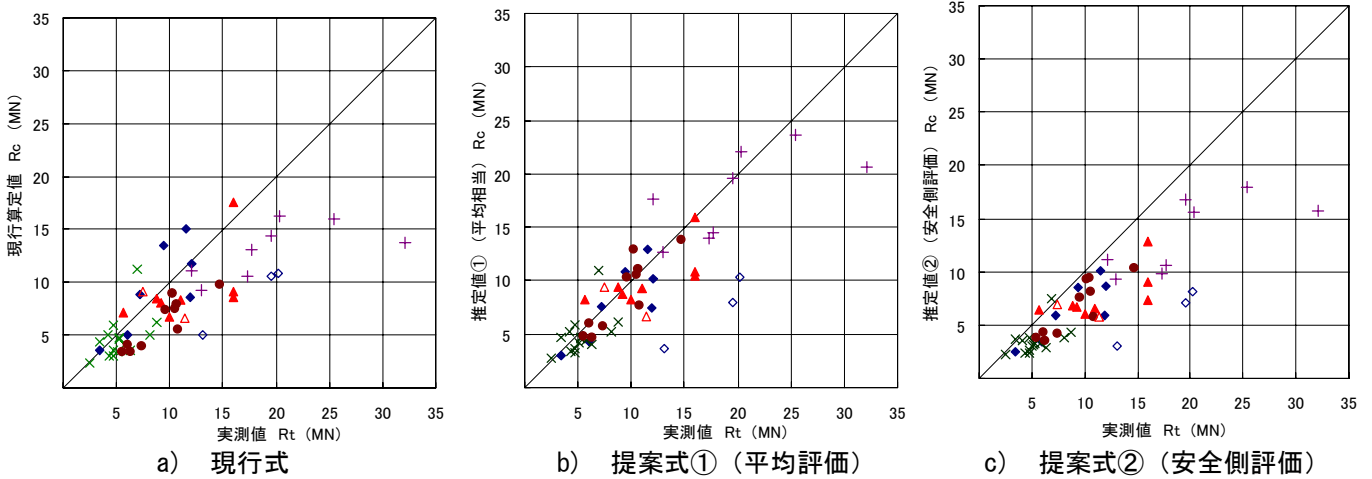


図2 基準支持力の算定値 Rc と実測値 Rt の関係

6. おわりに

杭の設計支持力の妥当性は、最終的には部分安全係数も含めた状態で検証する必要があるため、今後は提案した基準支持力推定式を元に載荷試験結果に基づいて部分安全係数の提案を行う予定である。なお、本報は「基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会(委員長: 日下部治東京工業大学教授, 幹事長: 古関潤一東京大学教授)」での検討内容の一部をまとめたものである。また、テクノックスおよび新日鉄エンジニアリングの両社には載荷試験データの提供およびデータ整理に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

表4 凡例と Rc/Rt の平均値

凡例	杭種別	現行式	推定式① 平均相当	推定式② 安全側
◆	場所打ち杭	1.08	0.91	0.73
▲	先端開放 打ち込み杭	0.84	0.93	0.71
×	中掘り先端 根固め杭	0.90	0.94	0.67
+	鋼管ソイル セメント杭	0.70	0.97	0.70
●	回転杭	0.67	0.95	0.73

参考文献

- 1) 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) SI 単位版, 丸善, 2000. 6.
- 2) 海野: 最近の鉄道橋杭基礎の設計の考え方, 基礎工, Vol. 13, No. 11, 1985.
- 3) 勅使川原, 棚村他: 鋼管ソイルセメント杭の地盤抵抗特性, 鉄道総研報告, Vol. 16, No. 9, 2002. 9.
- 4) 小松, 神田他: 回転圧入鋼管杭工法に関する支持力性状評価, 第40回地盤工学研究発表会, No. 769, 2005. 7.