

信頼性理論に基づいた支持力算定式

小椋仁志 (㈱ジオトップ)

1. はじめに

現在用いられている杭の支持力算定式(以下、算定式)の多くは、載荷試験データに基づいたものとはいえ、その信頼性は明確ではない。たとえば、データの下限值に近いとされている算定式 $f_s = N_s / 5$ (f_s : 砂質土の周面摩擦応力度、 N_s : 砂質土のN値) にしても、漠然と「安全側」と感じられるだけで、得られた値が何%の割合で実験値を満足しているのかは十分には検討されていない。また、安全率を考慮しているとしても、それによって信頼性がどの程度増すのかは明確ではない。このように、現行の算定式では、得られた支持力の値の信頼性を技術者が自信をもって主張できる状況にはないのが現状である。そこで、本論では、多数の杭の鉛直載荷試験データから、信頼性の明確な算定式について検討する。

2. 信頼性の明確な算定式の作成

信頼性設計法は「構造物がいかにかに壊れるかに基づいた確率論的手法による設計法」と定義される。言い換えると「破壊確率を一定値以内におさえること」、に基づく設計法」である¹⁾。ここでは杭の鉛直支持力について考え、載荷試験データをもとに破壊確率が明確な算定式の作成方法を検討する。なお、載荷試験のデータ数は、統計処理が可能だけの数は得られているものとする。

1) 載荷試験の結果をもとに、図1のように先端や周面摩擦の応力度と地盤定数(N値、 q_u 値など)のデータを求める。

2) 平均値 μ (回帰式。ここでは直線回帰のみを扱うこととする。) と標準偏差 σ を計算する。図1に μ を一点鎖線、 $(\mu \pm \sigma)$ と $(\mu \pm 2\sigma)$ を細実線で示す。

3) 適切な係数 α を決め、 $(\mu - \alpha\sigma)$ を安全率 F で除した式を仮の算定式とする。図-1に $(\mu - \alpha\sigma)$ の式と $(\mu - \alpha\sigma) / F$ の式とを太実線で示す。

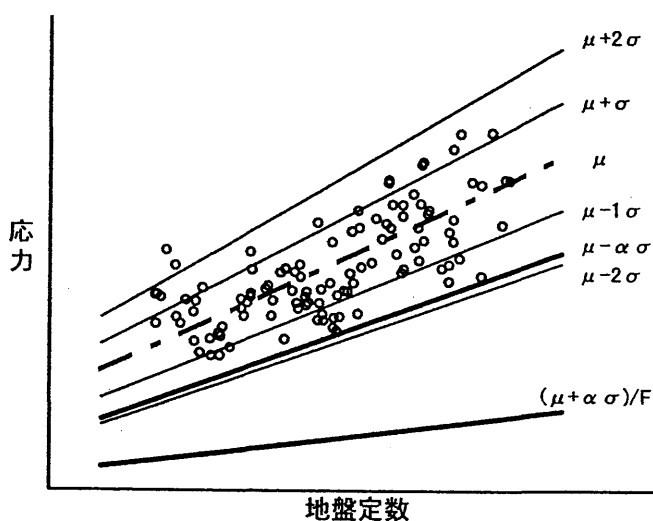


図-1

4) 仮の算定式の信頼性を検討するために、信頼性指標 β を次式で算定する。

$$\text{正規分布を仮定} \quad \beta = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)} \quad (1)$$

$$\text{対数正規分布を仮定} \quad \beta = \ln(\mu_R / \mu_S) / \sqrt{(V_R^2 + V_S^2)} \quad (2)$$

ここに、 μ_R, μ_S : 耐力と荷重の平均値

σ_R, σ_S : 耐力と荷重の標準偏差

V_R, V_S : 耐力と荷重の変動係数

(1)式や(2)式では、耐力側の平均値等(μ_R, σ_R, V_R)と荷重側の平均値等(μ_S, σ_S, V_S)をそれぞれのデータから独立して求めた上で β を検討する。松井らは、耐力側は載荷試験のデータ(先端支持力度、周面摩擦応力度など)による値を、荷重側には算定式による値が作用するものとして β を検討した²⁾。すなわち、 μ_S を $(\mu_R - \alpha \sigma_R) / F$ とし、

図-2のように荷重が分布すると仮定して、破壊確率(図で黒塗りの部分となる確率)を求めている。この仮定を用いると、結果的には、載荷試験データに対する算定式の信頼性を検討することになる。ただし、長期荷重時についてはこの仮定

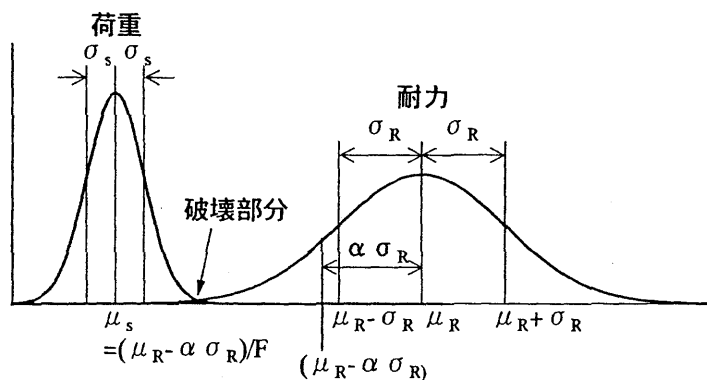


図-2

は妥当と考えられるが、短期荷重時には算定式による値(一般に長期の2倍)が荷重としてそのまま作用するわけではないため、この仮定は成り立たない。

5) 得られた β の値から破壊確率を求め、それが許容値以内かどうかを確かめる。その結果、仮の算定式が妥当であれば、それを算定式として採用する。

3. 算定式作成における課題

前節で述べた手順で信頼性が明確な算定式が作成できる。しかし、その過程には多くの課題も残っている。その主なものを以下に述べる。

① 回帰式として原点を通る式とするか否か

現行の算定式は、原点を通る直線式が多い。しかし、載荷試験データ、特に摩擦応力度の分布は一般に原点を通らない式の方が説明しやすい。また、原点を通る回帰式の計算手法は数種類あるが一長一短があり、確立された手法はない。原点を通らない直線式を回帰式とした場合にはこれらの問題は解消されるが、後述のように β の算定時に別の問題が生じる。

② データの分布形を正規分布とするか対数正規分布とするか

一般には正規分布とすることが多いが、対数正規分布の方が実際の分布とよく合うようである^{2) 3)}。しかし、対数正規分布は平均値や標準偏差の計算が面倒になる。

③ 分散、標準偏差を定数とするか非定数とするか

分散を定数とすると、 $(\mu - \alpha \sigma)$ の線は μ の線に平行になる。このとき切片は負になることがあり（回帰式として原点を通る線を採用した場合には必ず負になる）、支持力式として不適切な線となることが多い。反対に、分散を非定数とすると、 $(\mu \pm \alpha \sigma)$ の線が μ の線の両側に扇形に開くことになる。 $(\mu - \alpha \sigma)$ の線が支持力式として不適切な線になることはないが、 σ の計算が複雑になる（特に回帰式として原点を通らない線を用いた場合）。応力度のばらつきが地盤定数に依存するかどうかを見て、どちらの方法にするかを決める必要がある。

④ α の値をいくりに設定するか

一般に土質基礎関係の設計では $\alpha = 0 \sim 0.5$ とすることが多いようである⁴⁾が、超過確率が95%となる $\alpha = 1.64$ とする規準類もある⁵⁾。コンクリート関係では $\alpha = 1.64$ とすることが多いようである⁶⁾。

⑤ 信頼性指標 β 算定時の平均値や標準偏差の計算に問題が残る

β の算定では耐力側のデータとして載荷試験データを用いる。このとき μ_s は応力度の単純平均として与えられるが、これは一つの値であって地盤定数とは無関係となる。また、 σ_s は個々の応力度と μ_s との差から求めるため、回帰式との関係を表現することができない。これらの問題は、回帰式として原点を通る線を用いると、 μ は勾配として与えられるため解消されるが、①で述べた問題は残る。

⑥ (1)式(正規分布)と(2)式(対数正規分布)のどちらを採用するか。

②と同じ問題であるが、対数正規分布の方が実際の分布とよく合うこと、両式とも計算は簡単であることを考えると、(2)式による β を主とし、(1)式による β は参考値とするのが妥当と思われる。

4. 支持力式の作成例

ここでは、前節の方法によって作成した支持力式の例を示す。データとして、埋込み工法によるPHC節杭（節部径440mm、500mm、根入れ長6～35m）の載荷試験による周面摩擦力度（砂質土） $f_s \sim N_s$ 値関係を用いる。データ数は100個であって、統計処理するには問題はない数である。前節で述べた事項については、それぞれ、①回帰式として原点を通らない線を採用、②正規分布を仮定、③分散は非定数と仮定、④ $\alpha = 1.64$ とした。その結果、図-3のように、回帰式は $f_s = 4.83 + 0.66 N_s$ 、 $(\mu - 1.64 \sigma)$ の式は $f_s = 3.40 + 0.47 N_s$ となった。この式の超過確率は95%であって、不良率5%ということになる。安全率Fを3とすると、仮の算定式は $f_s = (3.40 + 0.47 N_s) / 3$ となった。この支持力式について、(2)式による信頼性指標 β を求めた。荷重の変動係

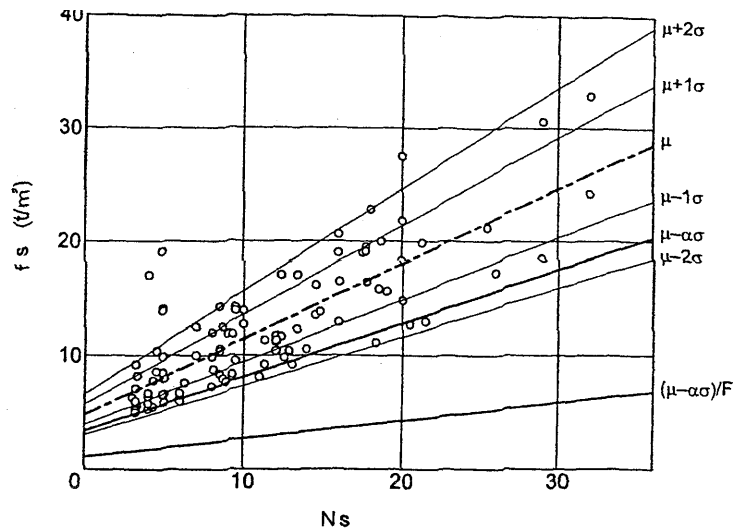


図-3

数 V_s は、松井の提案⁷⁾にしたがって、 $V_s=0.1$ とした。

計算の結果 $\beta=3.14$ となった。この値に対応する破壊確率を求めると 8.5×10^{-4} となる。社会的に許容される基礎構造物の年間破壊確率は、MeyerhofやWhitmanらの提案¹⁾では $10^{-2} \sim 10^{-4}$ の範囲となっている。したがって、仮の算定式の信頼性は、社会的にみても十分に大きいく、算定式として妥当であることが分かる。

5. 結語

本論では、多数の鉛直載荷試験データから、信頼性の明確な算定式の作成方法について検討した。しかし、この手法は十分なものではなく、残された課題も多い。また、応力度による検討だけでなく、杭全体の支持力や沈下量を考慮した検討も必要となる。性能設計等を考えると算定式の信頼性を明確にすることは不可欠と思われるので、より合理的な算定式の作成方法が提案されることが期待される。

参考文献

- 1) 星谷勝、石井清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、昭和61年5月
- 2) 松井謙二、桑原文夫、鈴木誠、小椋仁志：杭の周面摩擦力の信頼性と安全係数、第29回土質工学研究発表会、平成6年6月
- 3) M.B.Karkee、H.Ogura、T.Horiguchi、H.Kishida：NOMINAL CAPACITY OF BORED PHC NODULAR PILES BASED ON LOADING TEST DATA CONSIDERING LOGNOMAL DISTRIBUTION、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1、平成11年9月
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説、昭和49年11月
- 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・抗土圧構造物、平成9年3月
- 6) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法(第2版)、昭和59年5月
- 7) 松井謙二：地盤の不確定性を考慮した場所打ち摩擦杭の支持力評価に関する研究、九州大学学位論文、平成4年3月