

限界状態設計法による杭の鉛直支持力設計法のコードキャリブレーションに関する基礎的研究

岐阜大学 工学部 正員 本城 勇介
岐阜大学 工学部 学生員 石原 寛隆

1. はじめに

現在、世界的に設計コードの改訂作業が進行中であり、それらの設計コードは、構造物の信頼性を表す尺度に確率を採用しており、「確率に基づいた限界状態設計法」と呼ばれている。そこで本研究では、「確率に基づいた限界状態設計法」による現行設計基準の見直しのため、現行で設計された杭の鉛直支持力に関する部分について信頼性を解析し、この設計法がどの程度の目標信頼性に基づいた信頼性を持っているかを把握し、そしてこの結果を基に限界状態設計法のformatで、設計法を書き換えると、どのような部分係数をとるのかを決定する、いわゆるコードキャリブレーションの方法について検討する。

2. 研究方法

(1) 研究手順

①ここでは、建築基礎構造物設計指針の杭の鉛直支持力設計法(打ち込み杭)に基づき、いくつかの代表的な地盤条件を設定し、設計を行う。

②HasoferとLindが定義した信頼性指標 β を用い、設計された杭の鉛直支持力の信頼性解析を行う。

③総合的な考察から目標信頼性 β_T を定め、コードキャリブレーションを行い部分係数 γ を決定する。

④杭の鉛直支持力のコードキャリブレーションを行うときの問題点について総合的に考察する。

(2) 杭の鉛直支持力算定法(手順①)

杭の鉛直支持力 R_U は

$$R_U = R_S + R_F$$

ここに、 R_S : 杭先端の極限抵抗力

R_F : 杭周面の極限摩擦抵抗力

$$\text{許容支持力 } R_a = R_U \frac{F}{F}$$

ここに、 F は安全率で、建築基礎構造設計指針では、長期3.0、短期1.5である。

想定した杭の径及び長さ、それぞれ400, 500, 600mm及び10, 30, 50mで、これらを組み合わせた9ケースについて検討する。また想定した地盤は、図-1に示すような粘性土地盤と砂質地盤である。

また荷重条件については、本研究ではRC造5F程度の荷重を想定し各荷重間の分配を仮定した。荷重計算の手順は、まず与えられた杭の諸元と地盤条件に基づき、現行規準での安全率を考慮した長期及び短期許容支持力を算定する。そして、この許容支持力=荷重として、これを死荷重、活荷重、地震荷重に、下に示す比率で割り当てる。この比率は、熟練した構造設計者からの示唆により決定したものである。

長期の荷重の組み合わせ

$$L_D : L_L = 1.0 : 0.15$$

短期の荷重の組み合わせ：

$$L_D : L_L : L_E = 1.0 : 0.15 : 0.5(L_D + L_L)$$

なお、死荷重と活荷重については、このようにして算定した値を平均値としたが、地震荷重については、ここで求めた値は対数正規分布の99%超過点と仮定し、変動係数を0.8として平均値を求めた。

(3) 信頼性解析(手順②)

本研究で対象としている杭の鉛直支持力の設計の性能関数は、指針の設計式をそのまま採用した：

$$Z = \delta_S R_S + \delta_F R_F - (L_D + L_L + L_E)$$

ここに、 δ_S と δ_F は、それぞれ先端及び周面の支持力算定に関する不確実性であり、 L_D , L_L , L_E はそれぞれ、死荷重、活荷重、地震荷重である。それぞれの基礎確率変数について文献を参考に設定した平均、標準偏差、分布形を表-1に示した。

(4) 目標信頼性指標 β_T と部分係数の最適化(手順③)

後述する信頼性解析の結果を参考に、今回は目標信頼性指標 $\beta_T=2.5$ とした。これは便宜的な値である。

限界状態設計法の設計formatにおいて、部分係数を次のように定義する。なお、今回は簡単のため抵抗側の部分係数のみを考慮した。

$$\gamma_S R_S + \gamma_F R_F - (L_D + L_L + L_E) \geq 0$$

この部分係数 γ_S と γ_F を、次の目的関数を最小に設定することにより、どのようなケースにおいても信頼性指標 β ができる限り β_T に近く、また一様になるように設定する。

$$\min. Q(\gamma_S, \gamma_F) = \sum_{\text{all cases}} (\beta_i - \beta_T)^2$$

表-1 基本確率変数の平均、標準偏差、分布形

	平均	標準偏差	分布形
δ_S	1.33	0.50	NORMAL
$\bar{N}$	50.0	10	NORMAL
δ_F	1.0	0.40	NORMAL
N	20.0	$l=10m$ 3.58* $l=30m$ 2.06* $l=50m$ 1.60*	NORMAL
C_u	0.24z	$l=10m$ 0.0894* $l=30m$ 0.0516* $l=50m$ 0.040*	NORMAL
L_D	L_D	10%	NORMAL
L_L	L_L	30%	NORMAL
L_E	$0.349 \times \ln\left(\frac{L_D+L_L}{2}\right)$	$0.279 \times \ln\left(\frac{L_D+L_L}{2}\right)$	Log-NOR

キーワード：杭の鉛直支持力、限界状態設計法、コードキャリブレーション、部分係数、荷重抵抗力設計法

連絡先：岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部 Tel/Fax 058-293-2435 e-mail: honjo@cc.gifu-u.ac.jp

4. 計算結果と考察

(1)信頼性指標 β

図-2に9個の杭の諸元の組み合わせにつき、2つの地盤条件で長期と短期について β を求めた結果を示した。杭の諸元、地盤に関係なく、長期と短期でそれぞれ2.5と1.5と、ほぼ同じ β が計算されている。

長期と短期で異なるのは、荷重の統計量の設定の違いであろう。また、杭長50mで β が高くなるのは、細長比のため許容支持力に低減があるためである。

(2)感度係数 α

図-3に長期の周面が砂質土の場合の感度係数(分配係数) α の値を示した。短い杭では先端支持の不確実性 δ_s が支配的な要因であるが、杭が長くなるにつれて周面摩擦力の不確実性 δ_f が支配的となってゆく。これは、杭長が増すと周面摩擦力が大きくなって行くからである。周面粘性土地盤の場合も同様であった。

(3)部分係数 γ_s と γ_f の最適な組み合わせ

先に示した γ_s と γ_f の最適化を行うための評価関数 Q の γ_s - γ_f 平面でのコンターを、図-4(a)と(b)にそれぞれ周面砂質土と粘性土地盤の場合について示した。これはいずれも長期の場合である。

コンター図はいずれの場合も谷は左下がりであり、 γ_s と γ_f の間にトレードオフの関係があることを示している。周面砂質土の方が、粘性土地盤の場合に比べて谷がやや寝ている(これは図の表示範囲の取り方にもよるので、考察には注意を要する)のは、両者の先端支持力と周面支持力の相対的な不確実性のバランスが異なっているためと考えられる。すなわち、周面砂地盤では先端と周面支持力に関する不確実性は比較的類似した程度であるので、必要な信頼性を確保するための両支持力に対する部分係数の値は、相対的に類似している。これに対し周面粘性土の場合は、先端支持力の不確実性は周面支持力のそれに比較して大きい。従って前者より小さな部分係数を乗じることが求められる。実際の部分係数の決定では、 γ_s を定め、しかる後にそれぞれ γ_f を決定することになる。例えば図-4を例に取れば、 $\gamma_s=0.15$ と決定した場合、 γ_f は周面砂地盤では0.5程度、粘性土地盤では0.6程度となる(これらの数字は、基礎確率変数の統計量の取り方で変化する)。

このように部分係数間にはトレードオフの関係が予想され、導入される部分係数の決定は単に評価関数 Q からだけでは決定できない。これを合理的に決定するには、次の2つの要素を考慮する必要があるであろう。

i)各ケースで設計点より求められる部分形数値を参照し、決定で考慮する。

ii)各材料のせん断強度発現における変位の適合性、使用限界状態との関係(従来地盤工学では、杭の設計に大きめの安全率を取ることにより変位を制御してきた)等、地盤工学的な考察の導入が必要である。

謝辞:本研究では日本工業大学 桑原文夫教授、東京大学 神田順教授、大成建設 長瀧慶明博士らの貴重なコメントを受けたことを記し、深謝の意を表します。

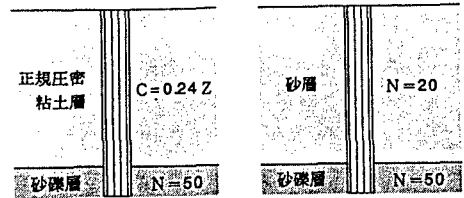
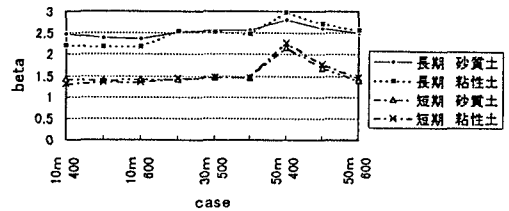
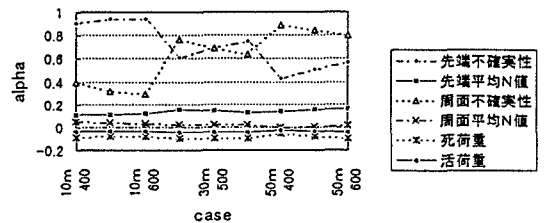
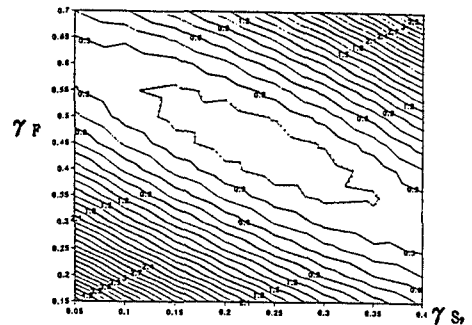
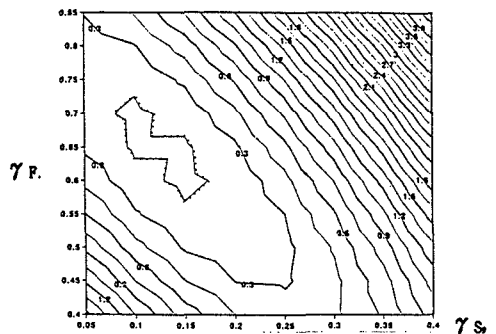


図-1 想定地盤図

図-2 信頼性指標 β の計算結果図-3 感度係数(分配係数) α の計算結果

(a)長期、周面砂地盤の場合



(b)長期、周面粘土地盤の場合

図-4 評価関数 Q (γ_s , γ_f)のコンター図