维普资讯 http://www.cqvip.com

第27卷 第7期 岩 土 工 程 学 报 Vol.27 No.7
2005年 7月 Chinese Journal of Geotechnical Engineering July, 2005

桩基础安全度控制的若干问题

高大钊[1, 2]，姜安龙[1,2]，张少钦[1]
(1.南昌航空工业学院 土建系，江西 南昌 330034；2.同济大学，上海 200092)

摘 要：讨论了桩基础安全度控制的总安全系数与分项系数，推导了考虑分层土统计特性的分项系数的计算公式，还提出了用静力触探指标描述的变异性计算分项系数的方法。

关键词：安全系数；分项系数；桩基础；静力触探
中图分类号：TU 473 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2005)07－0808－04

作者简介：高大钊(1935－)，男，浙江平湖人，教授，博士生导师，主要从事土的基本性质和岩土工程设计方法研究。

Safety control on pile foundations

GAO Da-zhao[1, 2], JIANG An-long[1, 2], ZHANG Shao-qin[1]
(1. Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The general factor and the partial factors of safety of pile foundations were discussed. Considering the statistic characteristic of layered soils, the calculating method of partial factors was derived and the evaluating method of partial factors with CPT test results was also provided.

Key words: safety factor; partial factors; pile foundations; cone penetration test

0 前 言

工程结构物的安全度是客观存在的现实，安全水准是人类对安全度的主观控制要求，取决于技术经济水平。而工程设计的安全度控制则是设计者或设计标准对安全水准的一种定量控制方法。通常采用安全系数或分项安全系数（简称分项系数）作为定量控制设计安全度的准则。

我国建筑工程桩基的安全系数一般采用 2，它涵盖了包括了地质条件、材料性能和施工等不定因素，也反映了桩顶荷载的不确定性。

随着我国荷载规范对结构荷载性质和设计参数的进一步规定，必然影响桩基础的设计；同时由于确定单桩承载力方法的多元化，研究与承载力的确定方法相适应的安全度控制方法，也应提到日程上来。

本文试图对桩基安全度控制的有关问题，从基本概念到计算方法作一些探讨，所提出的方法，有的已在地方标准中应用，经过了设计实践的检验。而有一些问题的应用尚需作进一步的研究。

1 桩基础设计表达式与安全系数

安全系数是在设计表达式中调节作用与抗力两者关系的控制准则，其值与作用和抗力的取值方法有着密切的关系，反映着工程设计的水平与工程经验，不是一成不变的。不同的年代，不同的标准，不同的设计方法，安全系数的取值应当是不同的。

安全系数的取值与设计方法有关，采用确定性方法的桩基设计通用表达式为

$$Q \le \frac{Q_u}{K} \quad , \tag{1}$$

式中 Q 为作用于桩顶的轴向荷载的标准值；Q_u 为桩的极限承载力；K 为安全系数。

如果采用概率极限状态设计方法，则安全系数 K 就分解为两个分项系数，设计表达式变为

$$\gamma_s Q \le \frac{Q_u}{\gamma_R} \quad , \tag{2}$$

式中 γ_s 为作用分项系数； γ_R 为抗力分项系数。

如果作用由可变荷载 Q_L 和恒载 Q_G 组成，则作用分项系数分解为可变荷载分项系数 γ_L 和恒载分项系数 γ_G，同时引入可变荷载与恒载之比 ρ，

$$\rho = \frac{Q_L}{Q_G} \quad 。 \tag{3}$$

可以证明，安全系数与分项系数之间存在着如下的关系：

$$\gamma_R = K\frac{1+\rho}{\gamma_G + \rho\gamma_L} \quad 。 \tag{4}$$

收稿日期：2004－07－19

维普资讯 http://www.cqvip.com

这个关系式具有通用性，根据我国建筑荷载规范的相应规定，与恒载分项系数 1.20 和可变荷载分项系数 1.40 相匹配时，可变荷载与恒载之比值ρ 对抗力分项系数的影响很小，因此单桩承载力抗力分项系数可取为 1.60。对于以恒载为主的建筑物，当荷载分项系数为 1.35 时，抗力分项系数可取为 1.48。

其实，安全系数或分项系数的取值应当和确定桩的极限承载力的方法有关，如果确定极限承载力的方法比较可靠，那么就可以将安全系数取得小一些；反之，如果承载力的确定方法不太可靠，那只有用提高安全系数的方法来控制安全度。但我国一般不论什么桩型，也不管用什么方法预估单桩承载力，不区别上部结构荷载的性质，大多取总安全系数为 2 进行控制，这显然是不太合理的，需要进行研究，分别不同情况取用安全系数的数值。

如表 1 所示的，在欧洲规范第七卷中，对桩基设计的分项系数按不同的条件取不同的数值。当根据载荷试验确定极限承载力时所用的分项系数为 1.6；不做载荷试验，只按经验确定极限承载力时，分项系数可以提高到 2.0；对于作载荷试验的桩，已经非常确切地掌握其承载性能，因此可以将分项系数降低到 1.4，这种思想值得我们借鉴。

表 1　欧洲规范关于桩的分项系数[1]

Table 1 Partial factors of pile foundation in EURO CODE 7

使用条件	分项系数
根据经验方法确定	2.0
根据载荷试验确定	1.6
对于作载荷试验的桩	1.4

2　单桩极限承载力代表性数值的选取

欧洲规范还规定，对于载荷试验的结果，当试桩数量≥2 时，如果最大的极限承载力与最小的极限承载力之比≤1.3，则可以用极限承载力的平均值除以分项系数；如果此比值>1.3，则只能用最小值除以分项系数[1]。我国《建筑地基基础设计规范》规定，极限承载力极差与平均值之比小于 30%时，取平均值除以安全系数[2]。如采用和欧洲规范相同的表示方式，则相当于最大的极限承载力与最小的极限承载力之比等于 1.35。但规范对大于 30%的情况却没有作出规定，为了解决这个问题，下面提出了一种基于最大变异系数估计的方法。

若试桩的数量 $n=3$，其极限承载力的排列为 $Q_1<Q_2<Q_3$。根据规范的规定，$Q_3-Q_1=0.3\overline{Q}$，取 $Q_2=\psi\overline{Q}$，则标准差由下式计算：

$$\sigma=\sqrt{\frac{(Q_1-\overline{Q})^2+(Q_2-\overline{Q})^2+(Q_3-\overline{Q})^2}{3-1}}$$

$$=\overline{Q}\sqrt{0.75\psi^2-1.5\psi+0.7755}$$

$\psi=1$ 时，$\delta=0.15$，变异系数为最小值；$\psi=0.9$ 或 1.1 时，$\delta=0.17$，变异系数为最大值。

若试桩的数量 $n=4$，极限承载力的排列为：$Q_1<Q_2<Q_3<Q_4$，$Q_4-Q_1=0.3\overline{Q}$，取 $Q_2=\psi_1\overline{Q}$，$Q_3=\psi_2\overline{Q}$，则 $Q_1=0.5(3.7-\psi_1-\psi_2)\overline{Q}$，$Q_4=0.5(4.3-\psi_1-\psi_2)\overline{Q}$。

标准差：

$$\sigma=\overline{Q}\sqrt{\frac{4.045+1.5\psi_1^2+1.5\psi_2^2-4\psi_1-4\psi_2+\psi_1\psi_2}{4-1}}$$

$$=\overline{Q}\sqrt{\frac{y}{4-1}}。$$

当 $\psi_1=\psi_2=1$ 时，y 得最小值，变异系数 $\delta=0.12$；当 $\psi_1=0.85$，$\psi_2=1.15$ 时，y 得最大值，变异系数 $\delta=0.17$。

故不论 3 根桩的试验还是 4 根桩的试验，当极差为平均值的 30%时，最大的变异系数 $\delta=1.7$。还可以看出，随着试桩桩数的增加，最大变异系数不会超过 0.17，用最大变异系数估计代表性数值是偏于安全的。

根据对总体平均值的区间估计理论，用试桩结果估计单轴极限承载力的标准值计算公式为

$$Q_{uk}=\overline{Q}[1-\xi(\delta_t-0.17)]\quad，\qquad(5)$$

式中　$\overline{Q}$ 为试桩极限承载力的平均值；δ_t 为试桩极限承载力的变异系数；ξ 为与试桩桩数及学生氏函数有关的修正系数，$\xi=\frac{t_\alpha}{\sqrt{n}}$，当取 $\alpha=0.05$ 时，系数 ξ 可由表 2 查得。单桩极限承载力代表性数值的这一取用方法已经列入上海市工程建设标准[3]。

表 2　ξ 系数表[3]

Table 2 Correcting factor ξ

试桩数	2	3	4	5
ξ	4.50	1.67	1.20	0.95

3　分层抗力分项系数计算公式的推导

如果按经验方法确定分层土中的单桩承载力，需要分层考虑不同土层性能指标的变异特性对承载力估计可靠程度的影响时，应当采用按土层提供分项系数的方法。这一方法推导如下：

在荷载的分项系数已知的条件下，桩的分层抗力分项系数共有 $n+1$ 个，分别为 n 个桩侧摩阻力分项系数和一个桩端阻力分项系数。

分层抗力分项系数由下式确定：

$$\gamma_i=\frac{1}{1-\beta\delta_i\cos\theta_i}\quad（i=1，2，\cdots，n+1）\quad，\qquad(6)$$

式中　$\cos\theta_i=\frac{\sigma_i}{\sigma_Z}$ 为抗力分量的敏感度系数；σ_i 为某

维普资讯 http://www.cqvip.com

一抗力分量的标准差；σ_Z为功能函数的标准差。

为了将已知的条件从式（6）中分解出来，令σ_R为抗力的标准差，$\rho_i=\frac{f_i}{f_R}$为某一抗力分量均值与总抗力均值之比，则敏感度系数可写成：

$$\cos\theta=\frac{\sigma_i}{\sigma_z}=\frac{\sigma_i}{f_i}\cdot\frac{f_i}{f_R}\cdot\frac{f_R}{\sigma_R}\cdot\frac{\sigma_R}{\sigma_z}=\delta_i\frac{\sigma_R}{\sigma_z\delta_R}\rho_i \quad , \tag{7}$$

可得分项系数表达式：

$$\gamma_i=\frac{1}{1-\beta\delta_i^2\frac{\sigma_R}{\sigma_Z\delta_R}\rho_i} \quad , \tag{8}$$

令

$$\Delta_i=\beta\delta_i^2\frac{\sigma_R}{\sigma_Z\delta_R}\rho_i \quad , \tag{9}$$

当参与统计的子样确定之后，对任一抗力分项，$\frac{\sigma_R}{\sigma_Z\delta_R}$及$\beta$均为常数，故而：

$$\frac{\Delta_i}{\Delta_j}=\frac{\delta_i^2\rho_i}{\delta_i^2\rho_i} \quad , \tag{10}$$

$$\gamma_i=\frac{1}{1-\Delta_i} \quad , \tag{11}$$

$$\Delta_i=1-\frac{1}{\gamma_i} \quad , \tag{12}$$

用$n+1$项分项系数表示的第i项分项系数表达式为

$$\gamma_i=\frac{1}{1-\frac{\delta_i^2\rho_i}{\delta_{n+1}^2\rho_{n+1}}\Delta_{n+1}}=\frac{1}{1-\frac{\delta_i^2\rho_i}{\delta_{n+1}^2\rho_{n+1}}\left(1-\frac{1}{\gamma_{n+1}}\right)}$$

（$i=1,2,3,\cdots,n$） , (13)

共有n个方程，再加上闭合条件：

$$\sum_{i=1}^{n+1}\frac{f_i}{\gamma_i}=\frac{f_R}{\gamma_R} \quad , \tag{14}$$

即

$$\sum_{i=1}^{n+1}\frac{\rho_i}{\gamma_i}=\frac{1}{\gamma_R} \quad , \tag{15}$$

共计有$n+1$个方程，可以解出$n+1$个抗力分项系数。由式（13）代入式（15）可得：

$$\sum_{i=1}^{n+1}\rho_i\left[1-\frac{\delta_i^2\rho_i}{\delta_{n+1}^2\rho_{n+1}}\left(1-\frac{1}{\gamma_{n+1}}\right)\right]=\frac{1}{\gamma_R} \quad , \tag{16}$$

考虑到

$$\sum_{i=1}^{n+1}\rho_i=1 \quad , \tag{17}$$

式（16）可改写为

$$1-\frac{1}{\gamma_{n+1}}=\frac{1-\frac{1}{\gamma_R}}{\sum_{i=1}^{n+1}\frac{\delta_i^2\rho_i^2}{\delta_{n+1}^2\rho_{n+1}}} \quad , \tag{18}$$

式（18）代入式（13）可以得到：

$$\gamma_i=\frac{1}{1-\frac{\delta_i^2\rho_i}{\sum_{i=1}^{n+1}\delta_i^2\rho_i^2}\left(1-\frac{1}{\gamma_R}\right)} \quad , \tag{19}$$

令

$$\delta_e=\frac{\sum_{i=1}^{n+1}\delta_i^2\rho_i^2}{\sum_{i=1}^{n+1}\rho_i^2} \quad , \tag{20}$$

称为综合变异系数，代入（19）可以得到：

$$\gamma_i=\frac{1}{1-\frac{\delta_i^2\rho_i}{\delta_e^2\sum_{i=1}^{n+1}\rho_i^2}\left(1-\frac{1}{\gamma_R}\right)} \quad , \tag{21}$$

取$\frac{\delta_i^2}{\delta_e^2}=\lambda_i$，$\frac{\rho_i}{\sum\rho_i^2}=k_i$分别代表变异系数平方比和影响系数，则式（21）变为

$$\gamma_i=\frac{1}{1-\lambda_i k_i\left(1-\frac{1}{\gamma_R}\right)} \quad 。 \tag{22}$$

式（22）即为桩基的分层分项系数的一般表达式。若已知各土层的统计参数，就可以求得δ_i，ρ_i及δ_e，代入式（22）即可求得每个抗力分量的分项系数。

4 桩端阻力和桩侧总摩阻力的分项系数计算公式

在桩基设计时，如不需要分层提供分项系数，而只需分别对桩端阻力和桩侧总摩阻力提供分项系数。

已知桩端阻力和桩侧总摩阻力，桩端阻力与单桩极限承载力之比为

$$\rho_p=\frac{Q_{pk}}{Q_{uk}} \quad , \tag{23}$$

则单桩承载力的设计值可由下式计算：

$$Q_{ud}=\frac{Q_{pk}}{\gamma_p}+\frac{Q_{sk}}{\gamma_s} \quad , \tag{24}$$

式中 γ_p和γ_s分别为桩端阻力的分项系数和桩侧总摩阻力的分项系数。

令式（13）中的$n=2$，即可推导求得桩侧总摩阻力抗力分项系数和桩端阻力抗力分项系数如式（18）和（20）所示。

$$\gamma_s=\frac{\gamma_R\left[\rho_p^2(1+\alpha)-2\rho_p+1\right]}{\gamma_R\rho_p^2(1+\alpha)-\rho_p(1+\gamma_R)+1} \quad , \tag{25}$$

$$\gamma_p=\frac{\gamma_R\rho_p\gamma_s}{\gamma_s-\gamma_R(1-\rho_p)} \quad , \tag{26}$$

式中 α为端阻变异系数与侧阻变异系数之比，

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 3　桩端阻力和桩侧总摩阻力的分项系数[3]

Table 3 Partial factors for end resistance and skin friction of piles

分项系数	ρ_p								
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
γ_p	1.02	1.05	1.08	1.12	1.18	1.24	1.30	1.41	1.50
γ_s	1.64	1.70	1.75	1.79	1.82	1.83	1.80	1.76	1.69

表 4 地质资料

Table 4 geological condition

土层编号	土名	桩穿越厚度 l_i	均值 $\bar{p}_{si}$ /kPa	方差 $\tilde{p}_{si}$ /×10⁴kPa²	均值 $\bar{p}_{sp}$ /kPa	方差 $\tilde{p}_{sp}$ /×10⁴kPa²	$\bar{f}_{si}$ /kPa	α_p
①	填土	1.0					15	
②	粉质粘土	1.5					15	
③	淤泥质粉质粘土	8.3	630	1.25			31.5	
④	淤泥质粘土	14.6	750	0.51			37.5	
⑤	灰色粘土	2.6	1230	19.1	2360	10.0	84.0	0.83

$$\alpha=\left(\frac{\delta_p}{\delta_s}\right)^2 \quad 。 \tag{27}$$

对于没有确切掌握桩端阻力和桩侧总摩阻力变异系数的情况，可以假定比值α=1.0，不考虑桩端阻力和桩侧摩阻力变异性的差别，则可令式（25）中α= 1，即得由式（28）表示的桩侧总摩阻力分项系数公式:

$$\gamma_s=\frac{2\gamma_R\left(\rho_p^2-\rho_p+0.5\right)}{2\gamma_R\rho_p^2-\rho_p(1+\gamma_R)+1} \quad 。 \tag{28}$$

对于恒载分项系数为 1.20，可变荷载分项系数为 1.40 的设计条件，由式（26）和（28）计算的结果见表 3 。这一结果已经列入上海市工程建设标准。

5　由静力触探估计的分层分项系数计算

用静力触探的贯入阻力估计单桩承载力的方法已在我国广泛地推广使用，已列入许多技术标准。静力触探试验可以提供各层土的桩侧摩阻力的平均趋势和变异性的信息，因而可以提供反映分层变异性的分项系数值。

作为第一步，先在计算桩端阻力和总桩侧摩阻力的分项系数时反映变异性的影响。将桩端土层贯入阻力的变异系数和总桩侧摩阻力的变异系数代入式(27)求得α值，根据式（26），（28）就可以计算桩端阻力的分项系数和总桩侧摩阻力的分项系数。

将式（27）进一步用方差和均值表示：

$$\alpha=\left(\frac{\delta_p}{\delta_s}\right)^2=\frac{\tilde{Q}_p}{\tilde{Q}_s}\left(\frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_p}\right)^2 \quad , \tag{29}$$

式中　$\bar{Q}_p$ 为端阻力的均值；$\tilde{Q}_p$ 为端阻力的方差；$\bar{Q}_s$ 为总桩侧摩阻力的均值；$\tilde{Q}_s$ 为总桩侧摩阻力的方差。

根据工程经验，用静力触探贯入阻力估计桩端阻力和桩侧摩阻力的经验公式为

端阻力均值　$\bar{Q}_p=A_p\alpha_p\bar{p}_{sp}$ ，　(30)

端阻力的方差　$\tilde{Q}_p=\left(A_p\alpha_p\right)^2\tilde{p}_{sp}$ ，　(31)

总桩侧摩阻力的均值　$\bar{Q}_s=U_p\sum l_i\bar{f}_i$ ，　(32)

总桩侧摩阻力的方差　$\tilde{Q}_s=U_p^2\sum l_i^2\tilde{f}_i$ ，　(33)

分层桩侧摩阻力的均值　$\bar{f}_i=a_i+b_i\bar{p}_{si}$ ，　(34)

分层桩侧摩阻力的方差　$\tilde{f}_s=b_i^2\tilde{p}_{si}$ 。　(35)

6　实例计算

工程场地的地质资料及各层土的静力触探数据见表 4，采用 28 m 长的桩，桩径 0.5 m，桩端面积为 0.20 m²，周长 1.57 m。将表 4 的数据代入式（30）~（35），得端阻比ρ_p=0.16，α=3.3，其它结果见表 5。根据表 5 的计算结果用式（25），（26）计算，求得总桩侧摩阻力分项系数γ_s=1.64；桩端阻力分项系数γ_p=1.45。

表 5 实例计算的主要结果

Table 5 Calculated results for a sample

	桩端阻力	总桩侧阻力	桩极限承载力
均值	391.76	1671.84	2063.60
方差	0.2756	1.5244	1.8

与表 3(α=1)的结果比较，可以发现，当端阻力的变异系数与总侧阻力的变异系数之比增大时，桩端阻力估计值的可靠性降低，故桩端阻力的分项系数提高，而桩侧摩阻力的分项系数则降低，这将使对桩的承载力的可靠性估计更加接近实际情况。

参考文献：

[1] Draft Model for EURO CODE 7. The Geotechnical Societies within the European Committee, 1987.

[2] GB 50007-2002,建筑地基基础设计规范[S].

[3] DGJ 08-11-1999,地基基础设计规范[S].