上海地区由CPT确定钻孔灌注桩承载力的分项系数研究*

赵春风　叶观宝　李建新　高大钊
（同济大学地下建筑与工程系，上海 200090）

提　要　本文利用随机场理论和可靠度理论，研究了获得钻孔灌注桩P_s、f_i、P_{sb}统计特性的统计原则，对相关距离、桩截面尺寸、端阻力计算范围等在程序编制中的协调问题进行了研究，并对上海地区17个场地的46条CPT曲线进行了电算，进而求出了由CPT确定钻孔灌注桩极限承载力的可靠度指标的统计特性。在此基础上，利用完全可靠性分析方法求出了上海地区由CPT确定钻孔灌注桩承载力的分项系数。

一　极限承载力公式

在利用静探P_s值确定钻孔灌注桩极限承载力时，首先应确定计算模式，本文引用文献[1][2]的计算模式，即：

$$Q_u = \sum_{i=1}^{n} f_i U_i l_i + \alpha_b P_{sb} A_p \tag{1}$$

式中：f_i为比贯入阻力估算的某土层i的侧摩阻力（kPa）；U_i为某土层i的桩身平均周长（m）；l_i为某土层i的厚度(m)；α_b为端阻力修正系数（α_b取值见文献[1][2]）；P_{sb}为桩端附近比贯入阻力的平均值（kPa）；A_p为桩端横截面的面积（m^2）。而f_i、P_{sb}同P_s的关系为（其中a、b、c取值见文献[1][2]）：

$$f_i = a + bP_{si} + cP_{si}^2 \tag{2}$$

$$P_{sb} = \frac{1}{2}\left(P_{sb1} + P_{sb2}\right) \tag{3}$$

持力层为砂土、粉土，而桩端进入深度不足$10d$（d为设计桩径），则桩端以上$4d$范围内的桩侧摩阻力应修正如下：

$$f_i^* = \eta f_i \quad (\eta = 0.5) \tag{4}$$

而P_{sb1}和P_{sb2}分别为桩端以上4倍桩经范围内的比贯入阻力的平均值和桩端以下1倍桩经范围内的比贯入阻力平均值。

* 上海市建委科技委建设基金项目部分研究内容。

二 设计表达式

当采用式(1)并令总安全系数为K时，可得总安全系数下的单桩容许承载力N_d的设计表达式：

$$N_d \le \frac{1}{K}\left(a_b P_{sb} A_p + \sum_{i=1}^{n} U_i f_i l_i\right) \tag{5}$$

当采用分项系数方法设计桩基时，将总安全系数分解为荷载和抗力两部分分项系数。桩头荷载由恒载和活载组成，两者的变异系数不同，因而分别用不同的分项系数乘以相应的荷载标准值。由于桩所穿过的土层往往具有不相同的桩侧摩阻力统计参数，应采用不同的分项系数。钻孔灌注桩桩径的变异性同很多因素有关，如土层性质、施工质量等，本文为方便起见，不考虑桩径的变异性，即认为桩径为设计桩经，为确定性量。这样，假使桩所穿过的土层有n个，那么具有n+3个分项系数的设计表达式为：

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \le {a_b Q_{PK} A_P}\Big/{\gamma_P} + U_P \sum {Q_{fi} l_i}\Big/{\gamma_{fi}} \tag{6}$$

其中：γ_G、γ_L、γ_P和γ_{f_i}分别代表恒载、活载、桩端阻力和侧摩阻力的分项系数；Q_{GK}、Q_{LK}、Q_{PK}和Q_{f_iK}分别代表恒载、活载、桩端阻力和侧摩阻力的标准值。

本文着重探讨（6）式中的各分项系数的确定方法。

三 P_S、f_i、P_{Sb}统计特性的统计原则及程序实现

1. 比贯入阻力P_S的统计原则及程序实现

(5)式中桩侧摩阻力和端阻力均由静力触探P_s值按经验公式求得，因而其参数统计依赖于P_s值的参数统计。由于静力触探得到的是P_s值沿深度的连续变化曲线，这样就带来了沿深度方向对某一层土的P_s值如何取值进行统计的问题。由于土性的相关性，为使所取P_s值相互独立，同时不至于由于少取值而造成统计结果的统计误差，应按上海地区典型土层相关距离来取值再进行统计，这样获得的方差为点方差，最后按一维随机场理论获得均值方差和变异系数，即：

$$\delta_i = \delta_i' \sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{l_i}} \tag{7}$$

其中δ_i、δ_i'分别为第i层土的均值方差和点方差；$\delta_{i,0}$为第i层土的相关距离，l_i为第i层土的厚度。

以上仅考虑了深度方向的统计特性，对于场地来说，还要考虑场地的变异性。由于静力触探孔的间距较大且一般工程场地的静力触探孔数不会很多，因而可用随机变量理论平均值方差的方法来近似计算空间均值方差，其变异系数δ_{hi}为：

$$\delta_{hi} = \delta_h' \frac{1}{\sqrt{m}} \tag{8}$$

其中：δ'_h为场地的变异系数，按点方差计算；m为场地的静力触探孔数。

另一方面，在用随机场理论对实际土层进行计算时，会出现实际土层的厚度并非正好为该土层相关距离的整数倍，为解决此矛盾，本文采取先以实际厚度除以相关距离，然后按四舍五入取整数的方法来定实际计算厚度（以h_{il}表示）。

按以上方法经一系列推导可得计算P_s统计特性的公式为：

$$\overline{P}_{Si}=\frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{P}_{Sil} \tag{9}$$

$$\delta_{Si}=\left\{\frac{1}{m^2}\left(\sum_{l=1}^{m}\delta'_{Sil}\sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{h_{il}}}\right)^2+\frac{1}{m(m-1)}\times\sum_{l=1}^{m}\left(\overline{P}_{Sil}-\overline{P}_{Si}\right)^2\Big/\overline{P}_{Si}^2\right\} \tag{10}$$

上两式中：P_{Sil}为某一场地第l个静力触探孔处第i土层P_S的均值；P_{Si}为某一场地第i土层P_S的均值；δ'_{Sil}为某一场地第l个静力触探孔处第i土层P_S的点变异系数；$\delta_{i,0}$为第i层土的相关距离。

2. 侧摩阻力f_i的统计原则及程序实现

在求出P_s统计特性后，即可利用侧摩阻力同比惯入阻力的关系，按误差传递理论求出侧摩阻力的统计特性。经推导得侧摩阻力的均值f_i和变异系数δ_{f_i}为：

$$\bar{f}_i=a+b\overline{P}_{si}+c(\overline{P}_{si}^2+\sigma_{Psi}^2) \tag{11}$$

$$\delta_{fi}=\frac{\sigma_{Psi}\left[(b+2c\overline{P}_{si})^2+2c^2\sigma_{Psi}^2\right]^{\frac{1}{2}}}{a+b\overline{P}_{si}+c(\overline{P}_{si}^2+\sigma_{Psi}^2)} \tag{12}$$

3. 桩端附近静力触探比贯入阻力P_{Sb}的统计原则及程序实现

按竖向承载桩施工要求，钻孔灌注桩进入持力层深度不应小于2倍桩径，为不失一般性，本文假定桩端全断面进入持力层深度为$2d$（d为直径）。按第1节的规定：端阻力应分别求桩端全端面上、下4倍及1倍桩径范围内静力触探比贯入阻力的平均值，可是在求统计特性时，一方面，由于要考虑相关距离的因素，可能会出现同3.1节所述相同的情况，即：$\frac{d}{\delta_{i,0}}$、$\frac{2d}{\delta_{i,0}}$及$\frac{2d}{\delta_{i-1,0}}$不是整数的情况，在此，仍采用3.1节的处理方法并令其整数分别为n_3、n_2、n_1；另一方面，当桩端全截面上第(i-1)层土厚度不到$2d$时，会出现计算范围超出第(i-1)层而进入第(i-2)层的情况，本文在编程时已考虑这一情况(桩端以下同样出理)。经推导可得桩端附近静力触探比贯入阻力的均值$\overline{P}_{Sb}$和变异系数$\delta_{P_{Sb}}$为：

$$P_{sb}=\frac{1}{2}(\overline{P}_{j1}+\overline{P}_{j2}) \tag{13}$$

$$\delta_{P_{sb}}=\frac{(\overline{P}_{i1}^{2}\delta_{p1}^{2}+\overline{P}_{i2}^{2}\delta_{p2}^{2})^{\frac{1}{2}}}{\overline{P}_{i1}+\overline{P}_{i2}} \tag{14}$$

$$\overline{P}_{i1}=\frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\frac{n_1\delta_{i-1,0}\overline{P}_{si-1l2}+n_2\delta_{i,0}\overline{P}_{sil1}}{n_1\delta_{i-1,0}+n_2\delta_{i,0}} \tag{15}$$

$$\overline{P}_{i2}=\frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{P}_{sil3} \tag{16}$$

$$\delta_{p1}=\left[\frac{\sum_{l=1}^{m}\left(\overline{P}_{il1}-\overline{P}_{i1}\right)^{2}}{m(m-1)\overline{P}_{i1}^{2}}+\frac{1}{m^{2}}\left(\sum_{l=1}^{m}\frac{n_1\delta_{i-1,0}\delta_{si-1l2}+n_2\delta_{i,0}\delta_{sil1}}{n_1\delta_{i-1,0}+n_2\delta_{i,0}}\right)^{2}\right]^{1/2} \tag{17}$$

$$\delta_{p2}=\left[\frac{\sum_{l=1}^{m}\left(\overline{P}_{sil3}-\overline{P}_{i2}\right)^{2}}{m(m-1)\overline{P}_{i2}^{2}}+\frac{\left(\sum_{l=1}^{m}\delta_{sil3}\right)^{2}}{m^{2}}\right]^{1/2} \tag{18}$$

其中：$\overline{P}_{i1}$、$\overline{P}_{i2}$分别表示某一场地第i层土为桩端持力层时，桩端上、下计算范围内P_s的均值；δ_{p1}、δ_{p2}分别表示某一场地第i层土为桩端持力层时，桩端上、下计算范围内P_s的变异系数；$\overline{P}_{il1}$、$\overline{P}_{sil3}$分别为第l个静力触探孔处桩端上、下比惯入阻力的均值；δ_{si-1l2}、δ_{sil1}、δ_{sil3}分别为第l个静力触探孔处桩端上（i-1）土层、i土层、桩端下i土层比惯入阻力的均值变异系数；$\overline{P}_{si-1l2}$、$\overline{P}_{sil1}$分别为桩端上第（i-1）土层、第i土层比惯入阻力的均值。

四　可靠性分析

单桩极限承载力失效模式的极限状态方程为：

$$\alpha_b A_p P_{Sb}+U_p\sum_{i=1}^{n}f_i l_i-Q_G-Q_L=0 \tag{19}$$

如前所述，在这个极限状态方程中，基本变量为n+3个，且是线性组合的。如果各基本变量都服从正态分布，那么可求得可靠性指标β为：

$$\beta=\frac{m_{P_{sk}}\alpha_b A_p+U_p\sum_{i=1}^{n}m_{f_i}l_i-m_{Q_G}-m_{Q_L}}{\left(\alpha_b^2A_p^2\sigma_{P_{sk}}^2+U_p^2\sum\sigma_{f_i}^2l_i^2+\sigma_{Q_G}^2+\sigma_{Q_L}^2\right)^{1/2}}\tag{20}$$

其中：$m_{P_{sk}}$、m_{f_i}、m_{Q_G}、m_{Q_L}为各相应变量的均值；$\sigma_{P_{sk}}$、σ_{f_i}、σ_{Q_G}、σ_{Q_L}为各相应变量的标准差。

根据建筑荷载调查假定活载服从极值I型分布，变异系数为0.29，恒载服从正态分布，变异系数为0.07，令荷载比为$\rho=m_{Q_L}/m_{Q_G}$，这样在用前一节方法得到抗力的统计特性后，即可对不同的总安全系数K和荷载比ρ按JC法求出每一场地不同桩经的可靠度指标。本文以此方法对上海地区17个场地（共46条静力触探曲线）进行了电算，并对不同组合情况所得的可靠度指标进行统计，表1中列出了K=2.0、ρ=0.2和0.5、桩截面尺寸为ϕ650mm和ϕ850mm的计算结果。

表1　可靠度指标β的统计特性

	ϕ650mm		ϕ800mm	
ρ	0.2	0.5	0.2	0.5
$\overline{\beta}$	4.889	4.573	4.940	4.618
σ_β	0.576	0.475	0.489	0.398
δ_β	0.118	0.104	0.099	0.086

从表中结果可以看出：上海地区利用静力触探比贯入阻力估算钻孔灌注桩单桩极限承载力的可靠性指标相当高；此外，在相同的条件下，桩径大的钻孔灌注桩可靠度指标要高于桩径小的钻孔灌注桩可靠度指标，同时桩径大的钻孔灌注桩变异系数比桩径小的钻孔灌注桩变异系数要小，说明同种情况下桩径大的钻孔灌注桩比桩径小的钻孔灌注桩更趋安全，这一结果对以后选择桩断面尺寸会有所帮助；值得说明的是，以上分析并没有考虑计算模式的不定性，当考虑计算模式的不定性后，理论上可靠度指标应有所降低，关于这一问题还有待进一步的研究。

五 分项系数的研究

确定分项系数首先要选定目标可靠度指标[β]，而目标可靠度指标[β]的确定是一项非常复杂的统计工作，它随结构类型、性质以及一个国家综合国力的强弱不同而有所差异。本文的目的是在假定确定性方法可接受的前提下，把确定性方法过渡到分项系数的方法（即按概率极限状态方法），为此，目标可靠度采用以实际工程为基础所统计出的可靠度指标，即表1的可靠度指标均值。

在选定目标可靠度指标后，取不同的ρ，按完全可靠性分析方法，利用JC法对上海地区17个场地分别进行计算，可得各场地荷载和抗力的分项系数，再对这些分项系数进行统计。表2列出了桩截面尺寸为ϕ650mm且ρ=0.2时的电算结果。

表2　分项系数值

土 层	2	3	4	5-1	5-2	5-3	6	7-1	端阻力	恒载	活载
均值	1.412	1.384	1.268	1.493	1.383	1.666	1.268	1.085	4.843	1.098	1.338
标准差	0.343	0.266	0.188	0.360	0.259	0.453	0.190	0.072	1.097	0.017	0.061
变异系数	0.242	0.192	0.148	0.241	0.187	0.271	0.149	0.066	0.226	0.015	0.046

为了比较总安全系数设计方法和分项系数设计方法的结果，对上海地区17个场地采取了人为布桩的方法进行反算，反算分为两步：

第一步：由分项系数设计方法反算总安全系数，经推导可得：

$$K=\frac{\left(\alpha_b P_{Sb} A_P+U_P\sum_{i=1}^{n} f_i l_i\right)\left(\gamma_G+\rho\gamma_L\right)}{\left(\alpha_b P_{Sb} A_P/\gamma_P+U_P\sum_{i=1}^{n} f_i l_i/\gamma_l\right)\left(1+\rho\right)} \tag{21}$$

经计算可得K的均值为1.97，变异系数为0.018。

第二步：由分项系数设计方法反算可靠度指标β，采用JC法，经计算可得β 的均值为4.643，变异系数为0.085。

六 结 论

(1)利用随机场理论获取桩侧摩阻力和桩端阻力统计特性的方法可充分体现土体的相关性，本文对其所做的实用化处理方法是可行的。

(2)本文对分项系数的研究采用完全的可靠性分析方法，主要考虑到上部结构荷载分项系数是根据14种有代表性的构件的三种简单荷载组合情况进行分析而做出规定的[3]，在这三种简单荷载组合中并没有考虑桩基的情况，如采用文献[3]中的分项系数即等于认为简单叠加是可以接受的，上部结构荷载传到基础底面各项荷载的统计特征参数不变，忽略了荷载传递分布过程中各种分布荷载的组合效应，此为一；其二，规定好荷载分项系数后不利于桩基分项系数的研究，原因是，桩基分项系数本应考虑桩基荷载的组合情况，同时一旦上部结构荷载分项系数改变后，桩基分项系数也会随着改变，这并不是上、下分开的问题，而是如何更好配套的问题。

(3)由本文计算结果可以看出，采用分项系数设计方法不仅与总安全系数设计方法具有相当的安全水准，而且安全度的分配更为合理。

参考文献

[1] 陈强华等：《静力触探估算钻孔灌注桩单桩极限承载力》，见《第七届土力学及基础工程学术会议论文集》，北京，中国建筑工业出版社，1994。

[2] 赵春风等：《由CPT确定灌注桩极限承载力的可靠度分析》，见《岩土力学》，1999，20（1）。

[3] 中国建筑科学研究院：《建筑结构设计统一标准》(GBJ68-84)，中国建筑工业出版社，1987。

[4] Vanmarcke E.H. Probabilistic modeling of soil profile.ASCE,Vol.103,GT11,1977.