维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号:1001-831X(2003)04-0396-05

单桩竖向抗压承载力的分项系数研究*

赵春风，徐 超，高大钊

(同济大学地下建筑与工程系，上海 200092)

摘 要:本文结合上海市标准，利用随机场理论和可靠度理论，研究了获得 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讨论和实用化处理。并对上海地区19个预制桩场地和17个灌注桩场地获得的参数的统计特性进行了分析计算，进而分别求出了由静力触探法确定预制桩和灌注桩单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分别求出了上海地区由静力触探法确定预制桩和灌注桩承载力的分项系数。

关键词:随机场；相关距离；静力触探；可靠性；分项系数

中图分类号:TU473.13 **文献标识码**:A

1 前言

我国颁布的《建筑结构可靠度设计统一标准》[1]是以概率理论为基础的极限状态设计方法，设计表达式以各种标准值和分项系数来表示，它是制定各类结构规范以及地基基础规范时应遵守的准则。如何结合地基基础的特点，依据《建筑结构可靠度设计统一标准》的原则，提出各设计参数，这是有待解决的问题。

2 桩基础的承载力公式

2.1 预制桩的承载力公式

在众多单桩承载力的计算方法中，利用静力触探比贯入阻力推算单桩承载力就是其中的一种，在场地有静力触探资料时，根据上海市标准《地基基础设计规范》[2]的规定，地基土对预制桩的支承能力可按下式计算

$$N_d = \frac{1}{K}(\alpha_p P_{sb} A_p + U_p \sum_{i=1}^{n} f_i l_i) \qquad (1)$$

其中 N_d 为单桩竖向抗压允许承载力(kN)；K 为总安全系数；α_p 为桩端阻力修正系数，可查表取用；P_{sb} 为桩端附近的静力触探比贯入阻力平均值(kPa)；f_i 为用静力触探比贯入阻力估算的桩周各层土的极限摩阻力(kPa)；A_p 为桩端全断面面积(m^2)；U_p 为桩周长(m)；l_i 为第 i 层土的厚度(m)；n 为桩所穿过的土层数。令 $Q_u = KN_d$，则式(1)为

$$Q_u = \alpha_p P_{sb} A_p + U_p \sum_{i=1}^{n} f_i l_i \qquad (2)$$

上式即为用静力触探比贯入阻力估算的预制桩单桩极限承载力公式。其中 Q_u 为单桩极限承载力。

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。桩顶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。如桩所穿过的土层有 n 个，那么具有 $n+3$ 个分项系数的设计表达式为

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \leq \alpha_p Q_{pk} A_p \Big/ \gamma_p + U_p \sum_{i=1}^{n} Q_{f_i K} l_i \Big/ \gamma_{f_i} \qquad (3)$$

* 收稿日期:2003-09-02(修改稿)

作者简介:赵春风(1964-)，男，安徽人，博士，副教授，主要从事桩基础、软土地基变形控制及岩土工程可靠度等的教学和科研工作。

基金项目:上海市建委科技委建设基金(批准号 A9702154)和上海市重点学科基金资助项目(沪教委科[2001]44号)。

维普资讯 http://www.cqvip.com

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。

2.2 灌注桩的承载力公式

在利用静力触探比贯入阻力推算钻孔灌注桩极限承载力时,本文引用文献[3][4]的计算模式,即

$$Q_u = \sum_{i=1}^{n} f_i U_i l_i + \alpha_p P_{sb} A_p \tag{4}$$

式(4)中各量的意义同式(1)和式(2),但 f_i、P_{sb} 同 P_s 的关系为

$$f_i = a + bP_{si} + cP_{si}^2 \tag{5}$$

$$P_{sb} = \frac{1}{2}(P_{sb1} + P_{sb2}) \tag{6}$$

式(4)中 α_p 和式(5)中 a、b、c 的取值见文献[3][4];P_{sb1} 和 P_{sb2} 分别为桩端以上4倍桩径范围内的比贯入阻力平均值和桩端以下1倍桩径范围内的比贯入阻力平均值。当持力层为砂土或粉土,且桩端进入持力层深度不足 $10d$(d 为设计桩径)时,则桩端以上 $4d$ 范围内的桩侧摩阻力应修正如下

$$f_i^* = \eta f_i \qquad (\eta = 0.5) \tag{7}$$

对钻孔灌注桩来说,桩径为变量,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径,为确定性量。这样当采用分项系数方法设计桩基时,其设计表达式形式同预制桩设计表达式形式相同

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \le \alpha_p Q_{pK} A_p \Big/ \gamma_p + U_p \sum_{i=1}^{n} Q_{f_iK} l_i \Big/ \gamma_{f_i} \tag{8}$$

式(8)中各量意义同式(3)。本文着重探讨式(3)和式(8)中的各分项系数的确定方法。

3 P_s、f_i、P_{sb} 统计特性的统计原则及程序实现

3.1 比贯入阻力 Ps 的统计原则及程序实现

式(3)和式(8)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[5]获得均值方差和均值变异系数,其均值变异系数为

$$\delta_i = \delta'_i \sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{l_i}} \tag{9}$$

其中 δ_i、δ'_i 分别为第 i 层土的均值变异系数和点变异系数;$\delta_{i,0}$ 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

$$\delta_{hi} = \delta'_h \frac{1}{\sqrt{m}} \tag{10}$$

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 Ps 统计特性的公式为

$$\bar{P}_{si} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m} \bar{P}_{sil} \tag{11}$$

$$\delta_{si} = \left\{ \frac{1}{m^2}\left(\sum_{l=1}^{m} \delta'_{sil} \sqrt{\frac{\delta^{i,0}}{h_{il}}} \right)^2 + \frac{1}{m(m-1)} \times \frac{\sum_{l=1}^{m} (\bar{P}_{sil} - \bar{P}_{si})^2}{\bar{P}_{si}^2} \right\} \tag{12}$$

其中 $\bar{P}_{sil}$ 为某一场地第 l 个静力触探孔处第 i 土层 P_s 的均值;$\bar{P}_{si}$ 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。

3.2 侧摩阻力 f_i 的统计原则及程序实现

3.2.1 预制桩侧摩阻力 f_i 的统计原则及程序实现

在求出 P_s 的统计特性后,即可利用侧摩阻力同比贯入阻力的关系,按误差传递理论求出预制桩侧摩阻力的统计特性。经推导得预制桩侧摩阻力的均值 $\bar{f}_i$ 和变异系数 δ_{f_i} 为

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\bar{f}_i = a + b\bar{P}_{si} \tag{13}$$

$$\delta_{f_i} = \frac{b\bar{P}_{si}}{a + b\bar{P}_{si}}\delta_{si} \tag{14}$$

3.2.2 灌注桩侧摩阻力 f_i 的统计原则及程序实现

对灌注桩同样可采用误差传递理论求出侧摩阻力的统计特性，经推导得灌注桩侧摩阻力的均值 $\bar{f}_i$ 和变异系数 δ_{f_i} 为

$$\bar{f}_i = a + b\bar{P}_{si} + c(\bar{P}_{si}^2 + \sigma_{P_{si}}^2) \tag{15}$$

$$\delta_{f_i} = \frac{\sigma_{P_{si}}[(b + 2c\bar{P}_{si})^2 + 2c^2\sigma_{P_{si}}^2]^{\frac{1}{2}}}{a + b\bar{P}_{si} + c(\bar{P}_{si}^2 + \sigma_{P_{si}}^2)} \tag{16}$$

3.3 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

按竖向承载桩设计要求，桩底进入持力层深度宜为桩径的1～3倍[6]，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 为方桩边长或圆桩直径）。

3.3.1 预制桩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

按上海市标准[2]，预制桩桩端阻力应分别求桩端全端面上、下8倍及4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：$\frac{2d}{\delta_{i,0}}$、$\frac{4d}{\delta_{i,0}}$及$\frac{6d}{\delta_{i-1,0}}$不是整数的情况，在此，仍采用3.1节的处理方法；另一方面，当桩端全截面下第 i 层土厚度不到 $4d$ 时，会出现计算范围超出第 i 层而进入第 $i+1$ 层的情况，本文在编程时已考虑这一情况（桩端以上同样处理）。经推导可得桩端附近静力触探比贯入阻力的均值 $\bar{P}_{sb}$ 和变异系数 $\delta_{P_{sb}}$ 为

①如 $\bar{P}_{i1} > \bar{P}_{i2}$，则

$$\bar{P}_{sb} = \bar{P}_{i2} \tag{17}$$

$$\delta_{P_{sb}} = \delta_{p2} \tag{18}$$

②如 $\bar{P}_{i1} \leq \bar{P}_{i2}$，则

$$\bar{P}_{sb} = \frac{\bar{P}_{i1} + \alpha\bar{P}_{i2}}{2} \tag{19}$$

$$\delta_{P_{sb}} = \frac{(\delta_{p1}^2\bar{P}_{i1}^2 + \alpha^2\delta_{p2}^2\bar{P}_{i2}^2)^{\frac{1}{2}}}{P_{i1} + \alpha P_{i2}} \tag{20}$$

式(17)～式(20)中，凡有脚标“1”的代表桩端全断面之上值，凡有脚标“2”的代表桩端全断面之下值；δ_{p1} 和 δ_{p2} 分别代表桩端之上计算范围内总变异系数和桩端之下计算范围内总变异系数，其计算方法同式(12)，只是对同一静探孔处两个土层采用加权平均的方法。

3.3.2 灌注桩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2.2节的规定：灌注桩桩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，在求统计特性时，对$\frac{d}{\delta_{i,0}}$、$\frac{2d}{\delta_{i,0}}$及$\frac{2d}{\delta_{i-1,0}}$不是整数的情况，仍采用3.3.1节的处理方法。经推导可得桩端附近静力触探比贯入阻力的均值 $\bar{P}_{sb}$ 和变异系数 $\delta_{P_{sb}}$ 为

$$\bar{P}_{sb} = \frac{1}{2}(\bar{P}_{i1} + \bar{P}_{i2}) \tag{21}$$

$$\delta_{P_{sb}} = \frac{(\bar{P}_{i1}^2\delta_{p1}^2 + \bar{P}_{i2}^2\delta_{p2}^2)^{\frac{1}{2}}}{P_{i1} + P_{i2}} \tag{22}$$

式(21)和式(22)中各量的意义同式(20)。

4 静力触探法确定单桩竖向抗压承载力的可靠性分析

由式(2)和式(4)可知，不论对预制桩，还是灌注桩，单桩极限承载力失效模式的极限状态方程可统一为

$$\alpha_p A_p P_{sb} + \sum_{i=1}^{n} U_{pi} f_i l_i - Q_G - Q_L = 0 \tag{23}$$

在这个极限状态方程中，如考虑几何尺寸和土层厚度的不确定性，则有 $3n+5$ 个基本变量，而且是非线性的。对预制桩来说，桩身尺寸的不确定性可以忽略，对钻孔灌注桩来说，桩径为变量，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径，为确定性量；此外，土层厚度的不确定性与土层构造特征有关，在地质、地貌条件复杂的地区，应根据地质勘察资料来估计其不确定性，在不考虑土层厚度和桩径的不确定性后，基本变量就降为 $n+3$ 个，而且是线性组合。如果各基本变量都服从正态分布，可求得可靠度指标 β 为

$$\beta = \frac{m_{P_{sb}}\alpha_p A_p + U_p\sum_{i=1}^{n} m_{f_i} l_i - m_{Q_G} - m_{Q_L}}{\left(\alpha_p^2 A_p^2\sigma_{P_{sb}}^2 + U_p^2\sum\sigma_{f_i}^2 l_i^2 + \sigma_{Q_G}^2 + \sigma_{Q_L}^2\right)^{1/2}} \tag{24}$$

其中 $m_{P_{sb}}$、m_{f_i}、m_{Q_G}、m_{Q_L} 和 $\sigma_{P_{sb}}$、σ_{f_i}、σ_{Q_G}、σ_{Q_L} 分别为各相应变量的均值和标准差。

维普资讯 http://www.cqvip.com

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 $\rho=\frac{m_{Q_L}}{m_{Q_g}}$，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径的可靠度指标。本文以此方法对上海地区 19 个预制桩场地（共 67 条静力触探曲线）和 17 个灌注桩场地（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 和表 2 分别列出了 $K=2.0$、$\rho=0.2$ 和 0.5、预制桩桩截面尺寸为 350mm × 350mm 和 450mm × 450mm 以及灌注桩桩截面尺寸为 ϕ650mm 和 ϕ800mm 的计算结果。

预制桩可靠度指标 β 的统计特性　　表 1

桩截面尺寸	350mm × 350mm		450mm × 450mm	
ρ	0.2	0.5	0.2	0.5
$\bar{\beta}$	5.020	4.657	5.144	4.766
σ_β	0.581	0.483	0.471	0.378
δ_β	0.116	0.104	0.092	0.081

灌注桩可靠度指标 β 的统计特性　　表 2

桩截面尺寸	ϕ650mm		ϕ800mm	
ρ	0.2	0.5	0.2	0.5
$\bar{\beta}$	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 1 和表 2 结果可以看出：上海地区利用静力触探比贯入阻力估算预制桩和灌注桩单桩极限承载力的可靠度指标相当高，说明其安全储备较大；不论对预制桩还是钻孔灌注桩，在相同的条件下，桩径大的可靠度指标要高于桩径小的可靠度指标，同时桩径大的可靠度指标变异系数比桩径小的可靠度指标变异系数要小，说明同种情况下桩径大的桩更趋安全。值得说明的是，以上分析并没有考虑计算模式和土层厚度的不定性，当考虑计算模式和土层厚度的不定性后，理论上可靠度指标应有所降低；另外，如考虑钻孔灌注桩桩径的不定性，钻孔灌注桩的可靠度指标应降低。关于这些问题还有待进一步的研究。

5　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 $[\beta]$，而目标可靠度指标 $[\beta]$ 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。本文的目的是把单桩承载力的确定性设计方法过渡到分项系数的设计方法（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 和表 2 中可靠度指标的均值。

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 19 个预制桩场地和 17 个灌注桩场地分别进行计算，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 3 和表 4 分别列出了预制桩截面尺寸为 450mm × 450mm 且 $\rho=0.2$ 和灌注桩截面尺寸为 ϕ650mm 且 $\rho=0.2$ 时的电算结果。

预制桩分项系数值　　表 3

土层	②	③	④	⑤$_1$	⑤$_2$	⑤$_3$	⑥	⑦$_1$	端阻力	恒载	活载
均值	1.295	1.277	1.246	1.518	1.469	1.514	1.232	1.197	4.359	1.117	1.405
标准差	0.092	0.289	0.130	0.349	0.063	0.252	0.166	0.064	1.547	0.017	0.061
变异系数	0.071	0.226	0.104	0.229	0.043	0.166	0.135	0.058	0.354	0.015	0.043

灌注桩分项系数值　　表 4

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

维普资讯 http://www.cqvip.com

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19个预制桩场地和17个灌注桩场地采取了人工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

$$K = \frac{\left(\alpha_P P_{sk} A_P + U_P \sum_{i=1}^{n} f_i l_i\right)(\gamma_G + \rho\gamma_L)}{\left(\alpha_P P_{sk} A_P/\gamma_p + U_P \sum_{i=1}^{n} f_i l_i/\gamma_i\right)(1+\rho)} \tag{25}$$

经计算可得对预制桩来说，K 的均值为1.94，变异系数为0.008；对灌注桩来说，K 的均值为1.92，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，经计算可得对预制桩来说，β 的均值为5.03，变异系数为0.005；对灌注桩来说，β 的均值为4.643，变异系数为0.085。

由预制桩和灌注桩计算结果可以看出，尽管预制桩和灌注桩安全系数 K 的均值相差很少，但由于它们的统计特性相差较大，从而使得预制桩和灌注桩可靠度指标 β 的均值具有一定的差别，计算结果反映了预制桩比灌注桩更可靠，这同目前共认的结论相同。

6 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性的相关性，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[1]，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[1]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] GB 50068－2001，建筑结构可靠度设计统一标准[S].

[2] DBJ08－11－89，地基基础设计规范[S].

[3] 陈强华，等. 静力触探估算钻孔灌注桩单桩极限承载力[A]. 见：第七届土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 北京：中国建筑工业出版社，1994. 373～376.

[4] 赵春风，等. 由CPT确定灌注桩极限承载力的可靠度分析[J]. 岩土力学，1999，20(1)：65～68.

[5] Vanmarcke E.H. Random Fields: Analysis and synthesis[M]. 1983.

[6] GB 50007－2002. 建筑地基基础设计规范[S].

[7] 赵春风，等. 预制桩竖向承载力的分项系数研究[J]. 岩土工程学报，2003，25(2)：154～156.