维普资讯 http://www.cqvip.com

第 23 卷 第 4 期
2004 年 2 月

岩石力学与工程学报
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

23(4): 673~677
Feb., 2004

静力触探法设计预制桩的分项系数研究*

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 结合上海市标准，利用随机场理论和可靠度理论，研究了获得预制桩 P_s，f_i，P_{sb} 统计特性的统计原则，给出了计算相应统计特性的理论公式。为解决理论公式的实用问题，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 19 个场地进行了电算，进而求出了由静力触探法(CPT)确定预制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 确定预制桩承载力的分项系数，从而为由 CPT 确定预制桩承载力的确定性设计方法过渡到概率极限状态设计方法提供了一种途径。

关键词 基础工程，随机场，相关距离，静力触探法，可靠性，分项系数

分类号 TU 473.13 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2004)04-0673-05

PARTIAL FACTORS OF PREFABRICATED PILE DESIGN BY CPT

Zhao Chunfeng, Xu Chao, Gao Dazhao

(*Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai* 200092 *China*)

Abstract Taking account of Shanghai Foundation Design Standard, the statistic criteria of P_s, f_i and P_{sb} for prefabricated pile are explored with the random field and the reliability theory, and the theoretical formulas to obtain the statistic characteristics of design parameters are put forward. For the convenience to employ the theoretical formulas in practice, a new analysis approach is derived on the basis of the correlation distance, pile dimensions and the calculating range of P_{sb} and f_P. The ultimate bearing capacity of prefabricated pile is estimated by CPT method at nineteen sites in Shanghai, and the statistic properties of the reliability index are obtained according to the numerical simulation results. Based on the results of reliability indexes and their statistic properties, the partial factors for defining the bearing capacity of prefabricated pile by CPT method are given in accordance with the complete reliability analysis. The presented research herein provides an alternative for the transition from the determinative design method of prefabricated pile bearing capacity to the probability one.

Key words foundation engineering, random field, correlation distance, CPT, reliability, partial factors

1 预制桩的设计表达式

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。

2003 年 4 月 16 日收到初稿，2003 年 6 月 10 日收到修改稿。

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

作者 赵春风 简介：男 39 岁，博士，1989 年毕业于同济大学，现任副教授，主要从事桩基础、软土地基变形控制及岩土工程可靠度等方面的教学和科研工作。E-mail：tjzhchf@sohu.com。

维普资讯 http://www.cqvip.com

在众多单桩承载力的计算方法[2]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。本文根据上海市标准《地基基础设计规范》[3]的规定，在场地有静力触探孔资料时，地基土对预制桩的支承能力可按下式计算：

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

式中：N_d 为单桩竖向允许承载力(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)变为

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

式中：Q_u 为单桩极限承载力。式(2)即为用 CPT 预估预制桩单桩极限承载力的公式。

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

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \leqslant \alpha_p Q_{pK} A_p / \gamma_p + U_p \sum_{i=1}^{n} Q_{fiK} l_i / \gamma_{fi} \tag{3}$$

式中：γ_G，γ_L，γ_p 和 γ_{fi} 分别为恒载、活载、桩端阻力和桩侧摩阻力的分项系数；Q_{GK}，Q_{LK}，Q_{pK} 和 Q_{fiK} 分别为恒载、活载、桩端阻力和侧摩阻力的标准值。本文着重探讨式(3)中各变量的统计原则以及各分项系数的确定方法。

2 由静探曲线进行统计的原则

式(2)中桩侧摩阻力和桩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[4, 5]，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[6]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，即

$$\delta_i = \delta_i' \sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{l_i}} \tag{4}$$

式中：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

$$\delta_{hi} = \delta_h' \frac{1}{\sqrt{m}} \tag{5}$$

式中：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。

3 P_s 的统计特性

如图 1，设 h_{il}' 为某场地第 i 层土第 l 个静力触探孔处的土层厚度，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，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确定实际计算厚度。

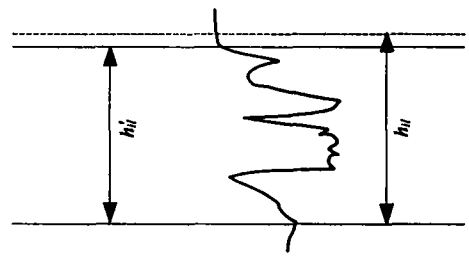


图 1 第 i 土层第 l 个静探孔处的地层剖面图

Fig.1 Soil profile of the ith stratum with l holes of CPT

按以上方法经推导可得计算 P_s 统计特性的公式为

$$\overline{P}_{si} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m} \overline{P}_{sil} \tag{6}$$

$$\delta_{P_{si}} = \left[\frac{1}{m^2}\left(\sum_{l=1}^{m} \delta_{sil}' \sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{h_{il}}}\right)^2 + \frac{\sum_{l=1}^{m} (\overline{P}_{sil} - \overline{P}_{si})^2}{m(m-1)\overline{P}_{si}^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

式(6)和(7)中：$\overline{P}_{sil}$ 为某一场地第 l 个静力触探孔处第 i 土层 P_s 的均值；$\overline{P}_{si}$ 为某一场地第 i 土层 P_s 的均值；δ'_{sil} 为该场地第 l 个静力触探孔处第 i 土层 P_s 的点变异系数。

4 极限侧摩阻力的统计特性

根据上海市标准[3]的规定，预制桩极限侧摩阻力与静力触探比贯入阻力之间的关系可表示为

$$f_i = a + bP_{si} \tag{8}$$

由式(8)可得极限侧摩阻力的统计特性为

$$\bar{f}_i = a + b\overline{P}_{si} \tag{9}$$

$$\delta_{f_i} = \frac{b\overline{P}_{si}}{a + b\overline{P}_{si}}\delta_{P_{si}} \tag{10}$$

式中：a，b 取值为：浅层土，a=15 kPa，b=0；P_s≤1 000 kPa 的粘性土，a=0，b=0.05；P_s>1 000 kPa 的粘性土，a=25 kPa，b=0.025；粉性土或砂土，a=0，b=0.02。经计算得上海地区 19 个场地分层土侧摩阻力的场地变异系数，其范围为：②层，δ_{f_i} 最大值为 0.35，最小值为 0.11，均值为 0.26；③层，δ_{f_i} 最大值为 0.41，最小值为 0.16，均值为 0.25；④层，δ_{f_i} 最大值为 0.28，最小值为 0.10，均值为 0.20；⑤$_1$层，δ_{f_i} 最大值为 0.34，最小值为 0.12，均值为 0.18；⑤$_2$层，δ_{f_i} 最大值为 0.27，最小值为 0.19，均值为 0.23；⑤$_3$层，δ_{f_i} 最大值为 0.17，最小值为 0.10，均值为 0.13；⑥层，δ_{f_i} 最大值为 0.27，最小值为 0.10，均值为 0.15；⑦$_1$层，δ_{f_i} 最大值为 0.26，最小值为 0.08，均值为 0.15。

5 极限桩端阻力的统计特性

按竖向承载桩施工要求，预制桩进入持力层深度不应小于 1.5 倍桩径，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 为方桩边长或圆桩直径)，如图 2 所示。

根据上海市标准[3]的规定，极限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，由于要考虑相关距离的因素，可能会出现 $\frac{2d}{\delta_{i,0}}$，$\frac{6d}{\delta_{i-1,0}}$ 及 $\frac{4d}{\delta_{i,0}}$ 不是整数的情况，为此，仍采用上一节的处理方法并令其整数分别为 n_1，n_2，n_3；另一方面，当桩端全断面下第 i 层土厚度小于 $4d$ 时，程序会发出警告并自动考虑第 $i+1$ 层，并使桩端全断面下计算范围达到 $4d$；对桩端全断面以上 $8d$ 范围情况，可采用同样的方法来处理。

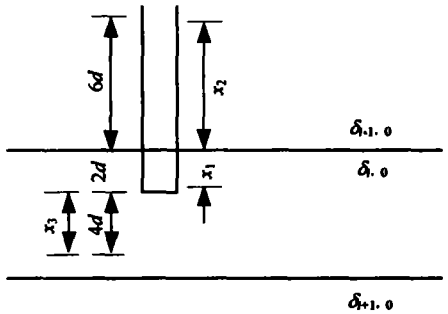


图 2　桩端阻力分析图

Fig.2　Illustration of pile tip resistance analysis

经推导可得桩端附近静力触探比贯入阻力平均值的均值 $\overline{P}_{sb}$ 和均值变异系数 $\delta_{P_{sb}}$ 为

(1) 如 $\overline{P}_{i1} > \overline{P}_{i2}$，则

$$P_{sb} = \overline{P}_{i2} \tag{11}$$

$$\delta_{P_{sb}} = \delta_{p2} \tag{12}$$

(2) 如 $\overline{P}_{i1} \leqslant \overline{P}_{i2}$，则

$$P_{sb} = \frac{\overline{P}_{i1} + \alpha\overline{P}_{i2}}{2} \tag{13}$$

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

式中：α 值可按规范选取，其他各量的表达式为

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

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

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

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

维普资讯 http://www.cqvip.com

式中：$\overline{P}_{i1}$，$\overline{P}_{i2}$分别为某一场地第 i 层土为桩端持力层时，桩端上、下计算范围内静力触探比贯入阻力 P_s 的均值；δ_{p1}，δ_{p2} 分别为某一场地第 i 层土为桩端持力层时，桩端上、下计算范围内 P_s 的均值变异系数；$\overline{P}_{il1}$，$\overline{P}_{il3}$ 分别为第 l 个静力触探孔处桩端上、下静力触探比贯入阻力的均值；$\delta_{si-1/2}$，δ_{sil1}，δ_{sil3} 分别为第 l 个静力触探孔处桩端上第 $i-1$ 土层、第 i 土层、桩端下第 i 土层比贯入阻力的均值变异系数；$\overline{P}_{si-1/2}$，$\overline{P}_{sil1}$ 分别为桩端全断面上第 $i-1$ 土层、第 i 土层静力触探比贯入阻力的均值；$\overline{P}_{sil3}$ 为桩端全断面下第 i 土层静力触探比贯入阻力的均值。

6 静力触探法设计预制桩的可靠性分析

单桩极限承载力失效模式的极限状态方程为

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

在式(19)所表示的极限状态方程中，如考虑几何尺寸的不确定性，则有 $2n+5$ 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，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，则可求得可靠度指标 β 为

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

式中：$m_{P_{sb}}$，m_{f_i}，m_{Q_G}，m_{Q_L} 分别为各相应变量的均值；$\sigma_{P_{sb}}$，σ_{f_i}，σ_{Q_G}，σ_{Q_L} 分别为各相应变量的标准差。

根据建筑荷载调查结果，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 $\rho = m_{Q_L} / m_{Q_G}$，这样在用前述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 个场地(共 67 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 350 mm×350 mm 和 450 mm×450 mm 的计算结果。

表 1 可靠度指标 β 的统计特性

Table 1 Statistical parameters of reliability index β

统计特性	350 mm×350 mm 荷载比 ρ		450 mm×450 mm 荷载比 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

从表 1 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；此外，在相同的条件下，桩径大的预制桩可靠度指标要高于桩径小的预制桩可靠度指标；同时，桩径大的预制桩可靠度指标变异系数比桩径小的预制桩可靠度指标变异系数要小。这说明同种情况下桩径大的预制桩比桩径小的预制桩更趋安全。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确定性，当考虑计算模式的不确定性后，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。

7 分项系数的研究[7~12]

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。本文的目的是把上海市目前采用的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 的可靠度指标均值 $\bar{\beta}$。

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 19 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 450 mm×450 mm 且 ρ = 0.2 时的电算结果。

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 个场地采取了人为布桩的方法进行反算，反算分为 2 步：

(1) 由分项系数设计方法反算总安全系数，经推导可得

维普资讯 http://www.cqvip.com

表2 分项系数值

Table 2 Values of partial factors

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

$$K=\frac{\left(\alpha_p P_{sb} A_p+U_p\sum_{i=1}^{n} f_i l_i\right)(\gamma_G+\rho\gamma_L)}{\left(\alpha_p P_{sb} A_p/\gamma_p+U_p\sum_{i=1}^{n} f_i l_i\Big/\gamma_i\right)(1+\rho)} \quad (21)$$

经计算可得 K 的均值为 1.94，变异系数为0.008。

(2) 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 5.03，变异系数为 0.005。

8 结 论

通过本文的理论推导、实用计算处理方法和分析，可得到如下主要结论：

(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 3 种简单荷载组合(即荷载比)情况进行分析而做出规定的[1]，在这 3 种简单荷载组合中并没有考虑桩基的情况，如采用文[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，而是如何更好地进行配套的问题。

(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现行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 中华人民共和国国家标准编写组. 建筑结构可靠度设计统一标准(GB 50068-2001)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001

2 高大钊，赵春风，徐 斌. 桩基础的设计方法与施工技术[M]. 北京：机械工业出版社，2002

3 上海市标准编写组. 地基基础设计规范(DBJ08-11-89)[S]. 上海：上海市工程建设标准化办公室出版，1989

4 包承纲，高大钊，张庆华. 地基工程可靠度分析方法研究[M]. 武汉：武汉测绘科技大学出版社，1997

5 Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. J. GE, ASCE，1977，103(11)：1 227～1 246

6 熊启东. 上海地区地基承载力的可靠度分析及分项系数研究[博士学位论文][D]. 上海：同济大学，1998

7 赵春风，叶观宝，李建新等. 由 CPT 确定灌注桩极限承载力的可靠性研究[J]. 岩土力学，1999，20(1)：65～68

8 赵春风，卢隆宾，徐 超等. 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

9 洪昌华，龚晓南. 变量相关情况下可靠度指标计算的优化方法[A]. 见：第八届土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 北京：万国学术出版社，1999，121～124

10 贺建清，张家生，梅松华. 弹性抗滑桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报，1999，18(5)：600～602

11 陈晓平，茜平一. 复合桩基竖向承载力分项系数研究[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(5)：655～658

12 黄宏伟. 微型预制桩单桩承载力时效现场试验分析[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(5)：666～669