维普资讯 http://www.cqvip.com

第37卷第7期 土 木 工 程 学 报 Vol.37 No.7
2004年7月 CHINA CIVIL ENGINEERING JOURNAL July. 2004

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 徐 超 高大钊 卢隆宾

(同济大学) (仲盛集团)

摘要：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。

关键词：随机场；相关距离；可靠性；分项系数

中图分类号：TU473.13 **文献标识码**：A

文章编号：1000-131X（2004）07-0078-04

STUDY OF THE PARTICAL FACTORS DEFINING THE BEARING CAPACITY OF BORED PILE BY CPT IN SHANGHAI REGION

Zhao Chunfeng Xu Chao Gao Dazhao Lu Longbin

(Tongji University) (Ocean Group)

Abstract: The statistic principle of P_s, f_i and P_{sb} statistic features for bored Pile was researched with the random field and the reliability theory. Problems of hamony in programme such as application of the correlation distance, pile diameter and the calculating range of P_{sb} and f_P was studied. The statistic feature of the limit bearing capacity reliability of bored pile was obtained according to the numerical result of 46 CPT curves at 17 of sites in Shanghai Region. Based on these results, the partial factors defining the bearing capacity of bored pile by CPT was given by complete reliability analysis.

Keywords: random field; correlation distance; reliability; partial factors

1 极限承载力公式

在利用静力触探比贯入阻力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

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

式中，f_i为利用静力触探比贯入阻力估算的第i层土的极限摩阻力标准值（kPa）；U_i为第i层土中桩身的平均周长（m）；l_i为第i层土的厚度（m）；α_b为桩端阻力修正系数（α_b取值见文献［1，2］）；P_{sb}为桩端附近静力触探比贯入阻力的平均值（kPa）；A_p为桩端全截面的面积（m^2）。而f_i、P_{sb}同P_s的关系为

$$f_i = a + bP_{si} + cP_{si}^2 \qquad (2)$$

$$P_{sb} = \frac{1}{2}(p_{sb1} + P_{sb2}) \qquad (3)$$

式中，P_{sb1}和P_{sb2}分别为桩端以上4倍桩径范围内的静力触探比贯入阻力的平均值和桩端以下1倍桩径范围内的静力触探比贯入阻力平均值（a、b、c的取值见文献［1，2］）。

当桩端持力层为砂土、粉土，而桩端进入持力层深度不足$10d$（d为设计桩径）时，则桩端以上$4d$范围内的桩侧极限摩阻力标准值应修正如下

$$f_i^* = \eta f_i \qquad (\eta = 0.5) \qquad (4)$$

2 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

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

收稿日期：2002-06-11，收到修改稿日期：2002-10-10
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

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，所以应采用不同的分项系数。钻孔灌注桩桩径的变异性与很多因素有关，如土层性质、施工质量等，本文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，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

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \leqslant \frac{\alpha_b Q_{PK} A_P}{\gamma_P} + U_P \sum \frac{Q_{fk} l_i}{\gamma_{f_i}} \quad (6)$$

式中，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_{fK} 分别代表恒载、活载、桩端阻力和侧摩阻力的标准值。

3 P_s、f_i、P_{sb} 及端阻力 Q_b 统计特性的统计原则及程序实现

3.1 静力触探比贯入阻力 P_s 的统计原则及程序实现

式（5）中极限摩阻力标准值和极限端阻力标准值均由静力触探比贯入阻力 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，同时不至于因为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，并可求得基于点方差的变异系数，最后按一维随机场理论求得变异系数，即

$$\delta_i = \delta'_i \sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{l_i}} \quad (7)$$

式中，δ'_i 为根据某一静探孔第 i 层土的点方差求得的变异系数；δ_i 为根据一维随机场理论计算得到的该静探孔第 i 层土的变异系数；$\delta_{i,0}$ 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

$$\delta_{hi} = \delta'_h \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (8)$$

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。

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

$$\bar{P}_{si} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^{m} \bar{P}_{sil} \quad (9)$$

$$\delta_{si} = \left\{ \frac{1}{m^2} \left(\sum_{l=1}^{m} \delta'_{sil} \sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{h_{il}}} \right)^2 + \frac{\sum_{l=1}^{m} (\bar{P}_{sil} - \bar{P}_{si})^2}{m(m-1)\bar{P}_{si}^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

上两式中，$\bar{P}_{sil}$ 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。

3.2 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，即可利用极限侧摩阻力标准值同静力触探比贯入阻力的关系，按误差传递理论求出侧摩阻力的统计特性。假定 P_s 符合正态分布，经推导得极限侧摩阻力标准值的均值 $\bar{f}_i$ 和变异系数 δ_{f_i} 为

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

$$\delta_{f_i} = \frac{\sigma_{P_{si}} [(b + 2c\bar{P}_{si})^2 + 2c^2\sigma_{P_{si}}^2]^{\frac{1}{2}}}{a + b\bar{P}_{si} + c(\bar{P}_{si}^2 + \sigma_{P_{si}}^2)} \quad (12)$$

3.3 桩端附近静力触探比贯入阻力平均值 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 倍设计桩径，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 为桩直径）。按第 1 节的规定，极限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：$d/\delta_{i,0}$、$2d/\delta_{i,0}$ 及 $2d/\delta_{i-1,0}$ 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（桩端以下同样处理）。经推导可得桩端附近

维普资讯 http://www.cqvip.com

静力触探比贯入阻力平均值的均值 $\bar{P}_{sb}$和变异系数 $\delta_{P_{sb}}$为

$$P_{sb} = \frac{1}{2}(\bar{P}_{i1} + \bar{P}_{i2}) \tag{13}$$

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

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

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

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

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

式中，$\bar{P}_{i1}$、$\bar{P}_{i2}$分别表示某一场地第 i 层土为桩端持力层时，桩端上、下计算范围内静力触探比贯入阻力 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；$\bar{P}_{il1}$、$\bar{P}_{sil3}$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；$\delta_{s(i-1)l2}$、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；$\bar{P}_{s(i-1)l2}$、$\bar{P}_{sil1}$分别为桩端上第（$i-1$）土层、第 i 土层静力触探比贯入阻力的均值。

3.4 端阻力 Q_b 的统计原则及程序实现

由静力触探比贯入阻力平均值 P_{sb}估算的端阻力极限值为 $Q_b = \alpha_p P_{sb} A_p$，根据 P_{sb}的统计原则和误差传递理论，可得考虑深度方向变异性和场地变异性后，Q_b 的均值和变异系数为

$$\bar{Q} = \frac{1}{2}\alpha_p A_p(\bar{P}_{i1} + \bar{P}_{i2}) \tag{19}$$

$$\delta_{Q_b} = \left[\frac{\bar{P}_{i1}^2\frac{\delta_{0,1}}{4d}\delta'^2_{p1} + \bar{P}_{i2}^2\frac{\delta_{0,2}}{d}\delta'^2_{p2}}{(\bar{P}_{i1} + \bar{P}_{i2})^2} + \frac{1}{m}\delta'^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{20}$$

式中，δ'_{p1}、δ'_{p2}分别表示某一场地第 i 层土为桩端持力层时，桩端全截面以上 4 倍桩径范围和桩端全截面以下 1 倍桩径范围 P_s 的点方差变异系数；$\delta_{0,1}$、$\delta_{0,2}$分别表示桩端全截面上、下的相关距离；δ'为场地点方差变异系数。

4 可靠性分析

单桩极限承载力失效模式的极限状态方程为

$$\alpha_b A_p P_{Sb} + U_P\sum_{i=1}^{n} f_i l_i - Q_G - Q_L = 0 \tag{21}$$

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

$$\beta = \frac{m_{P_{Sb}}\alpha_b A_p + U_p\sum_{i=1}^{n} m_{f_i} l_i - m_{Q_G} - m_{Q_L}}{(\alpha_b^2 A_p^2\sigma_{P_{Sb}}^2 + U_p^2\sum\sigma_{f_i}^2 l_i^2 + \sigma_{Q_G}^2 + \sigma_{Q_L}^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{22}$$

式中，$m_{P_{Sb}}$、m_{f_i}、m_{Q_G}、m_{Q_L}为各相应变量的均值；$\sigma_{P_{Sb}}$、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 $\rho = \frac{m_{Q_L}}{m_{Q_G}}$，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 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 $K = 2.0$、$\rho = 0.2$ 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

Table 1 Statistical properties of reliability index

统计特性	ϕ650mm		ϕ800mm	
	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可靠度指标变异系数比桩径小的钻孔灌注桩可靠度指标变异系数要小，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和桩径的不定性，当考虑计算模式和桩径的不定性后，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。

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 2 分项系数值

Table 2 The values of partial factors

分项系数	土层								端阻力	恒载	活载
	②	③	④	⑤$_1$	⑤$_2$	⑤$_3$	⑥	⑦$_1$			
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

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 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 $\rho=0.2$ 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 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

$$K=\frac{\alpha_b P_{sb}A_p+U_p\sum_{i=1}^{n}f_i l_i)(\gamma_G+\rho\gamma_L)}{\alpha_b P_{sb}A_p/\gamma_p+U_p\sum_{i=1}^{n}f_i l_i/\gamma_i)(1+\rho)} \quad (23)$$

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。

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之改变，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具有与总安全系数设计方法相当的安全水准，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［C］. 北京：中国建筑工业出版社，1994，373～376

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

[3] 建筑结构可靠度设计统一标准（GB50068－2001）［S］. 北京：中国建筑工业出版社，2001

[4] Vanmarcke E. H. Probabilistic modeling of soil profile［J］. J. G. T, ASCE, 1977, Vol. 103, GT11: 1227～1246

赵春风 工学博士，教授。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，发表论文 30 余篇，编著 5 部。通讯地址：200092　上海同济大学地下建筑与工程系

徐　超 工学博士，副教授。从事原位测试、岩土工程监测与治理方面的教学和科研。

卢隆宾 工学学士 高级工程师，从事建筑管理。

高大钊 教授，博士生导师，从事岩土工程的教学和科研。