维普资讯 http://www.cqvip.com

第 20 卷第 6 期　　工　程　力　学　　Vol. 20 No.6
2003 年　12 月　　ENGINEERING　MECHANICS　　Dec.　2003

文章编号：1000-4750(2003)06-0141-05

上海标准推荐的预制桩极限承载力分项系数研究

赵春风，徐　超，缪俊发，高大钊

(同济大学地下建筑与工程系，上海 200092)

摘　要：提出了获得上海市标准预制桩推荐表格统计特性的一种新方法，在运用该方法求得桩侧摩阻力和桩端阻力统计特性后，利用可靠度理论对上海地区 31 个场地进行了计算，并对计算结果进行统计分析，得到了可靠度指标的统计特性。在此基础上，按完全可靠性分析方法，求出了上海地区由标准推荐公式确定单桩竖向抗压承载力的分层桩侧摩阻力分项系数和桩端阻力分项系数，并对上海地区 31 个场地在利用分项系数设计方法的基础上反算了安全系数，结果说明所研究方法可作为规范过渡时的参考。

关键词：岩土工程；预制桩；可靠度；极限承载力；分项系数；统计特性

中文分类号：TU47　　**文献标识码**：A

ON PARTIAL FACTORS OF LIMIT BEARING CAPACITY OF PRECAST PILE IN SHANGHAI CODE

ZHAO Chun-feng , XU Chao , MIAO Juu-fa , GAO Da-zhao

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

Abstract: The partial factors of limit bearing capacity formula recommended by Shanghai Foundation Design Code are explored in this paper. With the statistical properties of pile tip resistance and shaft frictional resistance, the reliability indexes of precast piles on thirty-one (31) construction sites are calculated by JC method and the statistical properties of the reliability indexes are derived accordingly. Based on these results and the complete reliability theory, the partial factors of pile tip resistance and layered shaft frictional resistance of vertical load limit bearing capacity formula of Shanghai Foundation Design Code are obtained, and the back calculation method is employed to compute the safety factors of the aforementioned thirty-one (31) construction sites. Results indicate that the new method can serve as a reference duing the intergrade of foundation design code.

Key words: geotechnical engineering; precast pile; reliability; limit bearing capacity; partial factor; statistical property

1　桩基础的设计表达式

中华人民共和国国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068-2001)[1]以概率理论为基础，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。

单桩承载力的计算方法很多，本文根据上海市

收稿日期：2002-05-31；修改日期：2002-12-26

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

作者简介：赵春风(1964)，男，安徽人，副教授，硕士生导师，博士，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研究；
徐　超(1964)，男，河南人，副教授，硕士生导师，博士，从事工程地质的教学和研究；
缪俊发(1964)，男，江苏人，副教授，博士，硕士生导师，从事岩土工程的教学和研究；
高大钊(1935)，男，浙江人，教授，博士生导师，学士，从事土力学与基础工程的教学和研究

维普资讯 http://www.cqvip.com

标准《地基基础设计规范》(DBJ08-11-89)[2]的规定，地基土对预制桩的支承能力可按下式计算：

$$N_d=\frac{1}{K}(f_P A_P+U_P\sum_{i=1}^{n}f_i l_i) \tag{1}$$

式中：N_d—单桩垂直允许承载力(kN)；K—安全系数；f_P—桩端处土的极限端承力(kPa)；f_i—桩周第 i 层土的极限摩阻力(kPa)；A_P—桩端横截面面积(m^2)；U_P—桩身截面周长(m)；l_i—第 i 层土的厚度(m)；n—桩所穿过的土层数，而 f_P、f_i 可根据土的名称、土层的埋藏深度及土的性质并结合土的原位测试值按标准[2]推荐值选用。令 $Q_u=KN_d$，则式(1)为：

$$Q_u=f_P A_P+U_P\sum_{i=1}^{n}f_i l_i \tag{2}$$

式(2)即为用标准推荐的方法预估的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通常情况下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：

$$\gamma_G Q_{GK}+\gamma_L Q_{LK}\le Q_{f_PK}\frac{A_P}{\gamma_P}+U_P\sum_{i=1}^{n}\frac{Q_{f_{iK}}}{\gamma_{f_i}} \tag{3}$$

式(3)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_{f_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。

本文着重探讨式(3)中的各分项系数的确定方法。为了求出分项系数，必须首先获得标准推荐表格中推荐的桩侧摩阻力和桩端阻力的统计特性。通过实测桩的轴力变化，可以换算得到桩侧平均的摩阻力。但由于受测点数量的限制，很难获得足够的轴力实测数据来对桩侧摩阻力进行统计。为解决这一矛盾，高大钊、陈汉忠[3][4]曾用多参数最优解的方法，根据试桩资料和静力触探资料的对比，把桩侧分层土极限摩阻力假定为静力触探比贯入阻力与土层埋藏深度的函数，从而确定出每层土的极限摩阻力参数。本文从标准推荐的表格入手来导出桩侧摩阻力和端阻力的统计参数。

根据文献[5]等研究知道，桩侧摩阻力基本上服从正态分布，桩端阻力基本上服从对数正态分布。本文基于这种设想，同时考虑推荐表格的置信概率来导出标准推荐表格中推荐的桩侧摩阻力和桩端阻力的统计参数。

2 侧摩阻力的统计特性

设第 i 层土的侧摩阻力 f_i 的均值和标准差分别为 $\bar{f}_i$ 和 σ_i，按前面的假定，f_i 分布为 $N(\bar{f}_i,\sigma_i^2)$，即 f_i 概率密度函数为：

$$f(f_i)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i}\exp\left[-\frac{(f_i-\bar{f}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \tag{4}$$

$f_i\in[f_{ia},f_{ib}]$ 的概率为：

$$\begin{aligned}P[f_i\in[f_{ia},f_{ib}]]&=F(f_{ib})-F(f_{ia})\\&=\int_{f_{ia}}^{f_{ib}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i}\exp\left[-\frac{(f_i-\bar{f}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right]df_i\end{aligned} \tag{5}$$

其中 f_{ia}、f_{ib} 分别为对应于推荐表格中第 i 层土的侧摩阻力 f_i 的下限和上限；再令 $t=\frac{f_i-\bar{f}_i}{\sigma_i}$，把式(5)变为标准正态分布后，并设推荐表格的置信概率为 95%，经运算后可得：

$$\delta_i=\frac{f_{ib}-f_{ia}}{1.96x_1(f_{ib}+f_{ia})} \tag{6}$$

式中 δ_i 为第 i 层土的侧摩阻力的变异系数，x_1 为修正因子。表 1 为计算结果，土层的划分仍采用文献[2]中的划分方法，从表中 δ_i 的数值可见，其变异系数不大，取其平均值作为标准值。

3 端阻力的统计特性

在假定端阻力为对数正态分布的情况下，首先利用推荐表格把 f_P 的取值范围变换成 $\ln f_P$ 的取值范围，再求 $\ln f_P$ 的均值及在 95%置信概率下的变换系数，最后由对数正态分布与正态分布的关系求出 f_P 的均值和变异系数。如 f_P 为对数正态分布，$\ln f_P$ 则为正态分布，设 f_P 的均值和标准差分别为 $\bar{f}_P$ 和 σ_P；$\ln f_P$ 的均值和标准差分别为 λ 和 V。则在当量变换条件下有[6]：

$$V=[\ln(1+\delta_P^2)]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

$$\lambda=\ln\left[\frac{\bar{f}_P}{\sqrt{1+\delta_P^2}}\right] \tag{8}$$

式中 δ_P 为 f_P 的变异系数。$f_P\in[f_{Pa},f_{Pb}]$ 的概率为：

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$P[f_P \in [f_{Pa}, f_{Pb}]] = \int_{f_{Pa}}^{f_{Pb}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}V} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln f_P - \lambda}{V}\right)^2\right] df_P \quad (9)$$

令 $t = \frac{\ln f_P - \lambda}{V}$，经变换式(9)，并设推荐表格的置信概率为95%，经运算可得：

$$\Phi\left(\frac{\ln f_{Pb} - \lambda}{V}\right) - \Phi\left(\frac{\ln f_{Pa} - \lambda}{V}\right) = 0.95 \quad (10)$$

其中 $\Phi(\bullet)$ 代表标准正态分布的累积分布函数。

考虑到 $\lambda = \frac{1}{2}(\ln f_{Pb} + \ln f_{Pa})$，由式(10)可得：

$$V = \frac{\ln f_{Pb} - \ln f_{Pa}}{3.92 x_2} \quad (11)$$

式中 x_2 为修正因子。因而 $\ln f_P$ 的变异系数 η 为：

$$\eta = \frac{1}{1.96 x_2} \frac{\ln f_{Pb} - \ln f_{Pa}}{\ln f_{Pb} + \ln f_{Pa}} \quad (12)$$

计算结果见表1。

表1 预制桩侧摩阻力和端阻力的统计特性

Table 1 Statistical properties of frictional resistance f_i and tip resistance f_P of precast pile

土层编号	土层名称	$\bar{f}_i$	δ_i	λ	V	$\bar{f}_P$	δ_P
②	褐黄色粘性土	15	0.2788				
	灰色粘质粉土	30	0.2788	6.56		718	
	灰色砂质粉土	40	0.2123	7.25		1431	
	灰色粉砂	50	0.164	7.80		2453	
③	灰色淤泥质粉质粘土	22.5	0.2788	5.76		326	
		35	0.1148	6.56	0.3983	718	0.4147
	灰色砂质粉土、粉砂	45	0.1804	7.57	0.2932	1955	0.2996
		55	0.1476	7.99	0.2052	2963	0.2074
④	灰色淤泥质粘土	27.5	0.1312	5.99	0.4319	426	0.4528
		47.5	0.1312	7.14	0.4322	1297	0.4532
⑤或⑤$_1$	灰色粘性土	55	0.1476	7.57	0.2932	1955	0.2996
⑤$_2$	灰色砂质粉土	60	0.1476	7.88	0.3147	2670	0.3227
	灰色粉砂	85	0.1476	8.50	0.2275	4939	0.2305
⑤$_3$	灰黑色粘性土	60	0.1476	7.66	0.3983	2156	0.4147
⑥	暗绿、褐黄色粘性土	70	0.1148	7.57	0.2932	1955	0.2996
		90	0.0984	7.88	0.3147	2670	0.3227
⑦$_1$	草黄色砂质粉土、粉砂	85	0.1476	8.50	0.2275	4939	0.2305
⑦$_2$	灰色粉细砂	110	0.082	8.84	0.1670	6923	0.1682
⑧$_1$	灰色粉质粘土夹粉砂	62.5	0.0984	7.80	0.2275	2453	0.2305
⑧$_2$	灰色粉质粘土与粉砂互层	72.5	0.082	8.15	0.1670	3473	0.1682
⑨	灰色细、中、粗砂	115	0.0328	9.10	0.1308	8970	0.1314

4 现行桩基设计方法的可靠性分析

在得到抗力的统计特性之后，即可用JC法来进行可靠性分析。单桩极限状态方程(功能函数)为：

$$Z = U_P \sum_{i=1}^{n} f_i l_i + f_P A_P - Q_G - Q_L = 0 \quad (13)$$

式(13)中 Q_G、Q_L 分别表示作用在单桩上的恒载、活载，其它符号意义见式(1)。式(13)中共有 $2n+5$ 个变量，对预制桩来说，桩截面尺寸的变异性可不考虑，另外，对土层厚度变化不大的地区，可把土层厚度视为确定性量，这样，式(13)中的变量个数就减少为 $n+3$ 个，且为线性方程。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：

$$\beta = \frac{m_{f_P} A_P + U_P \sum_{i=1}^{n} m_{f_i} l_i - m_{Q_G} - m_{Q_L}}{\left(A_P^2 \sigma_{f_P}^2 + U_P^2 \sum_{i=1}^{n} \sigma_{f_i}^2 l_i^2 + \sigma_{Q_G}^2 + \sigma_{Q_L}^2\right)^{1/2}} \quad (14)$$

式中：m_{f_P}、m_{f_i}、m_{Q_G}、m_{Q_L} 为各相应变量的均值；σ_{f_P}、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 $\rho = \frac{m_{Q_L}}{m_{Q_G}}$，这样在得到抗力的统计特性后，即可对不同的安全系数 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31个场地进行了电算，并对不同组合情况所得的可靠度指标进行统计，表2列出了 $K=2$，荷载比 ρ 分别为0.2和0.5，桩身断面尺寸为450×450mm的电算结果。

表2 可靠度指标 β 的统计特性

Table 2 Statistical properties of reliability index β

参数	工况	
	ρ =0.2	ρ =0.5
$\bar{\beta}$	4.92	4.60
σ_β	0.42	0.34
δ_β	0.08	0.07

由表1可以看出，侧摩阻力变异系数的最大值为0.28，最小值为0.03，大部分位于0.11到0.16之间，其均值为0.15；端阻力变异系数的最大值为0.45，最小值为0.13，大部分位于0.16到0.33之间，其均值为0.29；由表2结果可以看出，上海地区由标准[2]推荐的侧摩阻力和端阻力极限值确定预

维普资讯 http://www.cqvip.com

制桩单桩承载力的方法是可行的，且安全储备较大。

5 分项系数的计算

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。本文的目的是研究如何把单桩承载力的设计方法由安全系数设计方法过渡到分项系数设计方法(即按概率极限状态方法)，为此，目标可靠度采用以原地基基础设计规范推荐的极限侧摩阻力和端阻力为基础所统计出的可靠度指标，即表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法对上海地区31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3列出了桩截面尺寸为450 × 450mm且ρ=0.2时的电算结果。

表3 分项系数值

Table 3 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	1.195	1.184	1.081	1.481	1.127	1.743	1.090	1.037	3.633	1.108	1.374
标准差	0.178	0.092	0.013	0.372	0.060	0.454	0.032	0.009	1.647	0.012	0.043
变异系数	0.148	0.078	0.012	0.251	0.053	0.260	0.029	0.009	0.453	0.011	0.031

从表3计算结果可以看出，由于各层土的侧摩阻力的分项系数和桩端阻力的分项系数是按各个部分的阻力对单桩极限承载力的贡献大小和变异系数的大小分配的，并同荷载分项系数大小及恒载和活载组合情况相关，因而不同土层侧摩阻力的分项系数值并不相同，利用分层侧摩阻力的分项系数进行设计比用总摩阻力的分项系数进行设计更加符合工程实际。

为了比较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31个场地进行反算，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：

$$K=\frac{(f_P A_P+U_P\sum_{i=1}^{n}f_i l_i)(\gamma_G+\rho\gamma_L)}{(f_P A_P/\gamma_P+U_P\sum_{i=1}^{n}f_i l_i/\gamma_i)(1+\rho)} \tag{15}$$

经计算可得K的均值为1.97，变异系数为0.006。

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4.89，变异系数为0.004。

6 结论

1、要想把标准推荐公式的单一安全系数设计桩基方法转变为分项系数设计桩基方法，必须首先求出标准推荐表格中推荐的桩侧摩阻力和桩端阻力的统计参数，本文在综合现有资料的基础上，假定桩侧摩阻力服从正态分布，桩端阻力服从对数正态分布，并考虑推荐表格的置信概率来导出标准推荐表格中推荐的桩侧摩阻力和桩端阻力的统计参数的方法，为获得推荐表格统计特性提供了一个新的途经。

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。

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。

(参考文献转98页)

维普资讯 http://www.cqvip.com

析方法对乔治亚穹顶进行成形分析，可以非常精确地得到满足设计要求的结构初始形态。

5 结论

本文针对大跨度悬吊索系结构建立了一种新的结构成形分析方法，称之为目标位置成形分析方法，并将这个方法应用于大跨度悬吊索系结构和索穹顶结构的成形分析中。分析结果发现，本文提出的分析方法，理论是正确的，采用的计算方法是有效的，并通过调整控制参数，可以达到很高的计算精度。目标位置成形分析方法可以作为结构成形分析的一种有力的分析工具。

参考文献：

[1] 向阳. 薄膜结构的初始形态设计、风振响应分析及风洞试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1998.
Xiang Yang. Initial form-finding, wind-reducing response analysis and wind tunnel test research of membrane structure[D]. Herbin: Ph.D. Dissertation of Herbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998. (in Chinese)

[2] 陈志华, 王小盾, 刘锡良. 张拉整体结构的力密度法找形分析[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 29-35.
Chen Zhihua, Wang Xiaodun, Liu Xiliang. Form finding of tensegrity structures by force density method[J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(5): 29-35. (in Chinese)

[3] Klaus Linkwitz. About formfinding of double-curved structures[J]. Engineering Structures, 1999, 21: 709-718.

[4] M R Barnes. Form-finding and analysis of pre-stressed nets and membranes[J]. Computers and Structures, 1988, 30(3): 685-695.

(上接 144 页)

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家标准. 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.
China National Code: Standard for Construction Structure Reliability Design (GB50068-2001) [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2001. (in Chinese)

[2] 上海市标准. 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, 1989.
Shanghai Standard: Foundation Design Code (DBJ08-11-89) [S]. Shanghai: Shanghai Construction Standardization Office, 1989. (in Chinese)

[3] 高大钊, 曾朱家. 桩基竖向承载力的分项系数研究[J]. 同济大学学报, 1991, 19(1):43-49.
Gao Dazhao, Zeng Zhujia. On partial factors of vertical bearing capacity of pile[J]. Journal of Tongji University, 1991, 19(1): 43-49. (in Chinese)

[4] 陈忠汉, 高大钊. 用多参数最优解法求桩侧分层土的极限摩阻力[J]. 工程勘察, 1988, 5:15-19.
Chen Zhonghan, Gao Dazhao. Determination of limit frictional resistance of layered pile shaft by multi-parameter optimum method [J]. Engineering Exploration, 1988, 5: 15-19. (in Chinese)

[5] 上海地基基础设计规范. 静力触探估算单桩承载力(条文及编制说明初稿)[M]. 上海:同济大学科学技术情报站, 1986.
Shanghai Foundation Design Code: Estimation of pile bearing capacity by CPT (first draft of explanation on items and edition)[M]. Shanghai: Scientific and Technological Information Station of Tongji University. 1986. (in Chinese)

[6] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
Gao Dazhao. Soil mechanics reliability theory[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1989. (in Chinese)