维普资讯 http://www.cqvip.com

第24卷 第4期 地 下 空 间 Vol.24 No.4
2004年12月 UNDERGROUND SPACE Dce.2004

文章编号:1001-831X(2004)04-0449-04

基于随机场模型的桩基竖向承载力可靠性分析*

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:结合随机场理论和误差传递原理求得了利用CPT确定桩基竖向抗压承载力统计特性的理论公式。为把所得公式应用于工程实际,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,给出了符合实际土层厚薄不均特点的统计原则。最后利用可靠度理论,对上海地区19个预制桩场地和17个灌注桩场地进行了电算,求出了上海地区利用CPT确定桩基竖向抗压承载力的可靠度指标及其统计特性。从而为桩基确定性设计方法向概率极限状态设计方法的过渡提供了理论依据和符合实际的计算结果。

关键词:随机场;CPT;相关距离;统计特性;可靠性

中图分类号:TU437.1+1;TB114.3 **文献标识码**:A

1 引言

确定性设计方法向概率极限状态设计方法过渡首先需要解决的问题就是如何获得基本变量的统计特性,由于土性的相关性,使得获取桩承载力统计特性变得相当复杂。本文利用随机场模型很好地解决了土性的相关性,并将其应用于由静力触探比贯入阻力确定桩竖向抗压承载力的方法中,在具体推导中,考虑了相关距离、桩截面尺寸、端阻力计算范围等在程序编制中的协调问题,给出了由静力触探比贯入阻力确定桩竖向抗压承载力方法中各基本变量统计特性的实用公式,最后利用可靠度理论,通过实际场地的计算,求出了上海地区利用CPT(静力触探试验)确定桩基竖向抗压承载力的可靠度指标及其统计特性。

2 单桩极限承载力公式

2.1 预制桩的竖向抗压极限承载力公式

在利用静力触探比贯入阻力确定预制桩竖向抗压极限承载力时,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 Q_u 为单桩竖向抗压极限承载力(kN);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 为桩端横截面的面积(m^2);n 为桩所穿过的土层数。

2.2 灌注桩的竖向抗压极限承载力公式

利用静力触探比贯入阻力确定灌注桩的竖向抗压极限承载力目前在规范、标准中还没有采用,其主要原因不仅是灌注桩不像预制桩那样有确定的截面,同时灌注桩的承载能力还受到像桩底沉淤、泥浆护壁灌注桩的泥皮厚度等多种因数影响。尽管如此,由于灌注桩在很多地方都在使用,且按国家和地方规范和标准规定,土建工程勘察时均应采用静力触探技术,因此,很多学者对利用静力触探比贯入阻力确定灌注桩的极限承载力进行了大量的研究,为了对利用静力触探比贯入阻力确定灌注桩的竖向抗压极限承载力的可靠性进行研究,本

* 收稿日期:2004-07-29(修改稿)

作者简介:赵春风(1964-),男,安徽人,博士,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

文引用文献[3][4]的计算模式，即

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

该式同式(1)形式相同且各量所代表的意义也一样，但桩端阻力修正系数 α_b（α_b 取值见文献[3]，[4]）及对桩侧阻力和桩端阻力的计算方法都不相同。

3 P_s 统计特性的统计原则及计算方法

3.1 静力触探比贯入阻力 P_s 的随机场模型

设 $P_{sil}(z)$ 为某场地第 l 个静力触探孔处第 i 层土在深度为 z 处的比贯入阻力值，可用下式表示

$$P_{sil}(z) = \overline{P_{si}}(z) + X_{sil}(z) \tag{3}$$

式中 $\overline{P_{si}}(z)$ 为某场地第 i 层土在深度为 z 处的比贯入阻力值的均值，$X_{sil}(z)$ 为 $P_{sil}(z)$ 的随机分量部分。$\overline{P_{si}}(z)$ 在 $[z, z+\Delta z]$ 区间内的空间均值 $\overline{P_{si}(z, z+\Delta z)}$ 和空间均值方差 $\sigma^2_{P_{si}(z+\Delta z)}$ 分别为

$$\overline{P_{si}(z, z+\Delta z)} = \frac{1}{\Delta z}\int_z^{z+\Delta z} \overline{P_{si}}(t)\,dt \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\sigma^2_{P_{si}(z+\Delta z)} &= \sigma^2_{X_{sil}(z)} \\ &= {\sigma'_{sil}}^2 \frac{2}{\Delta z}\int_0^{\Delta z}\left(1-\frac{t}{\Delta z}\right)\rho_i(t)\,dt \\ &= \sigma'^2_{sil}\Gamma_i^2(\Delta z)\end{aligned} \tag{5}$$

式(5)中 $\rho_i(t)$ 为 X_{sil} 的自相关函数，σ'^2_{sil} 为 X_{sil} 的点方差，$\Gamma_i^2(\Delta z)$ 为方差折减函数。根据 Vanmarcke 的理论[5]，对充分大的 Δz 有

$$\Delta z\Gamma_i^2(\Delta z) \approx \delta_{i,0} \tag{6}$$

式中 $\delta_{i,0}$ 为第 i 层土的相关距离。课题组利用递推空间法对上海地区 17 个场地的 46 条 *CPT* 曲线进行了电算，并求出了上海地区典型土层的相关距离，具体可参见文献[6]。

以上是对某场地先求同一深度处的静力触探比贯入阻力均值 $\overline{P_{si}}(z)$，再对不同深度进行统计。但由于实际土层的厚薄不均及土层埋深的不同，使得先按同一深度进行统计很难进行，为不失一般性，本文采用先按深度进行统计，再按水平向进行统计的方法。

3.2 静力触探比贯入阻力 P_s 按场地的统计原则及实用化处理

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，同时不至于由于少取值而造成统计结果的统计误差，应按式(6)求得的上海地区典型土层相关距离来取值再进行统计，在式(6)中，Δz 取静力触探孔处第 i 层土的厚度，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，最后按式(5)一维随机场理论求得深度方向的变异系数；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第 i 层土水平向空间均值方差，进而求得第 i 层土水平向变异系数。最终获得第 i 层土同时考虑深度方向和水平向的总均值变异系数 $\delta_{P_{si}}$

$$\delta_{P_{si}} = \left(\frac{\delta_{i,0}}{l_i}{\delta'_{P_{si}}}^2 + \frac{1}{m}{\delta'_{P_{sh}}}^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

式(7)中 $\delta'_{P_{si}}$ 为根据某一静探孔第 i 层土中静力触探比贯入阻力考虑深度方向求得的点变异系数；$\delta'_{P_{sh}}$ 为根据场地 m 个静力触探孔考虑水平向求得的点变异系数；$\delta_{i,0}$ 为第 i 层土的相关距离，l_i 为第 i 层土的厚度。

对实际工程情况，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定实际计算厚度的方法。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，$\delta_{i,0}$ 为第 i 层土的相关距离，对 $\left[\frac{h'_{il}}{\delta_{i,0}}\right]$ 按四舍五入取整数，并设对应厚度为 h_{il}。经推导可得符合实际土层厚薄不均特点的实用公式

$$\overline{P_{si}} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{P_{sil}} \tag{8}$$

$$\delta_{P_{si}} = \left[\frac{1}{m^2}\left(\sum_{l=1}^{m}\delta'_{sil}\sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{h_{il}}}\right)^2 + \frac{\sum_{l=1}^{m}(\overline{P_{sil}} - \overline{P_{si}})^2}{m(m-1)\overline{P_{si}}^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

式(8)和(9)中 $\overline{P_{sil}}$ 为 h_{il} 内 P_{sil} 的均值，$\overline{P_{si}}$ 为场地第 i 层土 $\overline{P_{sil}}$ 的均值，δ'_{sil} 为第 i 层土第 l 个静力触探孔静力触探比贯入阻力按相关距离取值求得的点变异系数。

维普资讯 http://www.cqvip.com

4 f_i 统计特性的计算方法

4.1 预制桩侧摩阻力 f_i 统计特性的计算方法

对预制桩的情况，按规范[1][2]第 i 层土侧摩阻力 f_i 可写成

$$f_i = a + bP_{si} \tag{10}$$

式(10)中 a、b 可按规范取值，由式(10)及误差传递理论可得预制桩侧摩阻力 f_i 的统计特性

$$\overline{f_i} = a + b\overline{P_{si}} \qquad \delta_{f_i} = \frac{b\overline{P}_{si}}{a + b\overline{P}_{si}}\delta_{P_{si}} \tag{11}$$

4.2 灌注桩侧摩阻力 f_i 统计特性的计算方法

对灌注桩的情况，第 i 层土侧摩阻力 fi 可写成[3][4]

$$f_i = a + bP_{si} + cP_{si}^2 \tag{12}$$

式(12)中 a、b、c 可按文献[3][4]取值，由式(12)及误差传递理论，并设 P_{si} 符合正态分布。可得灌注桩侧摩阻力 f_i 的统计特性

$$\overline{f_i} = a + b\overline{P_{si}} + c(\overline{P_{si}}^2 + \sigma_{P_{si}}^2) \tag{13}$$

$$\sigma_{P_{si}}^2(f_i) = b^2\sigma_{P_{si}}^2 + 4bc\,\overline{P_{si}}\sigma^2 + 4c^2\,\overline{P_{si}}^2\sigma_{P_{si}}^2 + 2c^2\sigma_{P_{si}}^4 \tag{14}$$

$$\delta_{f_i} = \frac{\sigma_{P_{si}}[(b + 2c\overline{P}_{si})^2 + 2c^2\sigma_{P_{si}}^2]^{\frac{1}{2}}}{a + b\overline{P}_{si} + c(\overline{P_{si}}^2 + \sigma_{P_{si}}^2)} \tag{15}$$

5 P_{sb} 统计特性的计算方法

5.1 预制桩端阻力 P_{sb} 统计特性的计算方法

按竖向承载桩设计要求，桩端全端面进入持力层深度宜为桩身直径的 1～3 倍[8]，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）。下面给出求预制桩端阻力 P_{sb} 统计特性的计算方法。

(1)按规范预制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 $\frac{2d}{\delta_{i.0}}$、$\frac{4d}{\delta_{i.0}}$ 及 $\frac{6d}{\delta_{i-1.0}}$ 不是整数的情况，本文采取与静力触探比贯入阻力 Ps 按场地的计算方法相同的四舍五入取整数的方法，这样一方面会减少计算误差，另一方面也适应随机场理论，并设对应整数和厚度分别为 n_1、n_3、n_2 和 x_1、x_2、x_3；具体计算时，当桩端全截面下第 i 层土厚度不到 $4d$ 时，程序会发出警告并自动考虑第 $i+1$ 层，并使桩端全端面下计算范围达到 $4d$；对第 $i-1$ 层土厚不到 $6d$ 情况，完全类似。

(2)设 x_1 范围内比贯入阻力均值为 $\overline{P}_{sd1}$、均值变异系数为 δ_{sd1}；x_2 范围内比贯入阻力均值为 $\overline{P}_{si-1/2}$，均值变异系数为 $\delta_{si-1/2}$；可求得第 l 个静力触探孔处($x_1 + x_2$)范围内加权平均的变异系数 δ_{d1} 和均值 $\overline{P}_{d1}$ 为

$$\delta_{d1} = \frac{x_2\delta_{si-1/2} + x_1\delta_{sd1}}{x_1 + x_2} \qquad \overline{P}_{d1} = \frac{x_2\overline{P}_{si-1/2} + x_1\overline{P}_{sd1}}{x_1 + x_2} \tag{16}$$

(3)场地($x_1 + x_2$)范围内的深度方向变异系数 δ_{i1} 和均值 $\overline{P}_{i1}$ 为

$$\delta_{i1} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\delta_{d1} \qquad \overline{P}_{d} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{P}_{d1} \tag{17}$$

(4)场地 x_3 范围内的深度方向变异系数 δ_{i2} 和均值 $\overline{P}_{i2}$ 为

$$\delta_{i2} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\delta_{sd3} \qquad \overline{P}_{i2} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}P_{d3} \tag{18}$$

(5)设第 i 层土桩端上、下计算范围内场地变异系数分别为 δ_{hi1} 和 δ_{hi2}，则第 i 层土桩端上、下计算范围内总变异系数 δ_{p1} 和 δ_{p2} 为

$$\delta_{p1} = (\frac{1}{m}\delta_{hi1}^2 + \delta_{i1}^2)^{\frac{1}{2}} \qquad \delta_{p2} = (\frac{1}{m}\delta_{hi2}^2 + \delta_{i2}^2)^{\frac{1}{2}} \tag{19}$$

(6)端阻力均值 P_{sb} 和变异系数 δ_{sb} 为

①：$\overline{P}_{i1} > \overline{P}_{i2}$

$$P_{sb} = \overline{P}_{i2} \qquad \delta_{sb} = \delta_{p2} \tag{20}$$

②：$\overline{P}_{i1} \le \overline{P}_{i2}$

$$P_{sb} = \frac{\overline{P}_{i1} + \alpha\overline{P}_{i2}}{2} \qquad \delta_{sb} = \frac{(\delta_{p1}^2\overline{P}_{i1}^2 + \alpha^2\delta_{p2}^2\overline{P}_{i2}^2)^{\frac{1}{2}}}{\overline{P}_{i1} + \alpha\overline{P}_{i2}} \tag{21}$$

5.2 灌注桩端阻力 P_{sb} 统计特性的计算方法

灌注桩端阻力 P_{sb} 统计特性的计算方法与预制桩端阻力 P_{sb} 统计特性的计算方法基本相同，但灌注桩端阻力 P_{sb} 计算范围为桩端全段面以上 4 倍桩径和桩端全段面以下 1 倍桩径。按 5.1 相同的方法，可求得端阻力均值 P_{sb} 和变异系数 δ_{sb} 为

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

式(22)中各量意义与 5.1 相同。

6 单桩承载力的可靠性分析

预制桩和灌注桩单桩竖向抗压极限承载力失

维普资讯 http://www.cqvip.com

效模式的极限状态方程均为

$$\sum_{i=1}^{n} f_i U_i l_i + \alpha_p P_{sb} A_p - Q_G - Q_L = 0 \quad (23)$$

对灌注桩而言，土层性质、施工质量等直接影响着灌注桩的桩径，如何对灌注桩桩径进行统计，会直接影响最终结果。作者认为在对桩径进行统计时，不论是单个土层还是整个桩身的所有土层，

上海地区 19 个场地 β 的统计特性(预制桩) 表 1

桩截面尺寸	350 × 350	d_5/d_6	450 × 450	d_6/d_7
场地 ρ	0.2	0.5	0.2	0.5
1	4.803	4.512	5.000	4.674
2	5.727	5.251	5.690/6.052	5.222/5.498
3	4.739	4.419	4.619/5.261	4.326/4.823
4	5.510	5.044	5.662	5.159
5	6.139	5.562	5.976/5.242	5.441/4.870
6	5.440	5.027	5.063/5.505	4.725/5.078
7	5.202	4.837	5.018/5.773	4.688/5.286
8			4.409/4.907	4.154/4.597
9	5.365	4.932	5.106/5.463	4.717/5.045
10	4.289	4.077	4.234/5.029	4.030/4.697
11	5.119	4.735	5.077	4.695
12	4.726	4.397	4.694/5.106	4.379/4.687
13	3.727/4.643	3.557/4.344	4.793/5.222	4.419/4.853
14	4.598	4.290	4.348/5.233	4.095/4.862
15	5.569	5.128	5.605/5.617	5.156/5.165
16			4.882	4.577
17	4.586	4.282	4.413/5.004	4.149/4.677
18			5.386	4.984
19	4.798/5.384	4.484/4.947	5.649/5.606	4.972/5.094
$\bar{\beta}$	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

都应根据桩侧摩阻力相等的条件来推算。本文为方便起见，在对灌注桩的研究中，认为桩径为设计桩径。这样，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

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

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。

表 1 列出了上海地区预制桩 19 个场地算出的 β 值及 β 的统计特性，桩截面为两档，分别为 350mm × 350mm 和 450mm × 450mm，其中 d_5、d_6 和 d_7 分别表示桩端持力层为⑤层、⑥层和⑦层，总安全系数为 $K=2$，荷载比 ρ 分为 0.2 和 0.5 两档，表 2 中列出了上海地区灌注桩 17 个场地算出的 β 值及 β 的统计特性，桩径为两档，分别为 650mm 和 800mm，其中 650mm 的桩径持力层为⑦$_1$ 层，桩径为 800mm 的持力层为⑦$_2$，总安全系数为 K = 2，荷载比 ρ 分为 0.2，0.5 两档。

上海地区 17 个场地 β 的统计特性(灌注桩) 表 2

桩截面尺寸	650mm		800mm	
场地 ρ	0.2	0.5	0.2	0.5
1	4.118	3.930	4.631	4.368
2	4.922	4.610		
3	5.123	4.773		
4	4.132	3.942	4.608	4.099
5	5.457	5.040	5.567	5.126
6	5.497	5.058		
7	5.454	4.295		
8	4.768	4.482		
9	3.851	3.695	4.556	4.305
10	5.122	4.773	4.892	4.585
11	5.412	5.004		
12	5.214	4.847	4.848	4.549
13	5.228	4.859	5.313	4.926
14	4.519	4.274	4.608	4.349
15	4.872	4.569		
16*	5.997	5.456	5.734	5.256
17	4.350	4.130		
$\bar{\beta}$	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

注：* 桩端位于⑦$_1$ 层

6 结论

(1)引入随机场模型对连续采样的静力触探实测结果进行研究并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)同等情况下，桩径大的可靠度指标比桩径小的可靠度指标高，且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，这一结果对如何合理选择桩截面尺寸具有一定的参考价值。

(3)同等情况下，预制桩的可靠度指标要大于灌注桩的可靠度指标，且其变异系数比灌注桩可靠度指标的变异系数也要小。这一结论与上海地区预制桩和灌注桩多年经验相符，同时也与现行国家规范相一致。

(下转第 464 页)

维普资讯 http://www.cqvip.com

合函数。采用Hill函数进行拟合，其拟合程度相对来说是最好的。Hill函数表达式为：

$$y = A\frac{x^n}{B^n + x^n}$$

式中：A、B、n 为回归系数。

(3)两主洞施工时，围岩相互扰动较为明显，特别是先掘进主洞开挖时对后掘进主洞围岩扰动较大，从而引起后掘进主洞围岩拱顶位移绝大多数大于先掘进主洞对应测点围岩的位移。在施工过程中，应特别加强对后掘进主洞围岩稳定性的控制。

(4)开挖方案Ⅰ在控制围岩稳定性方面稍优于方案Ⅱ。但开挖方案Ⅱ开挖工序较方案Ⅰ简单，便于组织施工和加快工程进度。因此，在Ⅲ类围岩中施工，一般建议采用开挖方案Ⅰ。在采取强预支护的情况下，也可以采用开挖方案Ⅱ进行施工。

参考文献：

[1] 卢耀宗，杨文武．莲花山大跨度连拱隧道施工方法研究[J]．中国公路学报，2001，14(2)
[2] 余晓琳，黄小华，彭立敏．软弱围岩条件下连拱隧道施工阶段的受力分析[J]．西部探矿工程，2002，(4)
[3] 周玉宏，赵燕明，程崇国．偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]．岩石力学与工程学报，2001，21(3)
[4] 林刚，何川．双连拱公路隧道支护结构体系试验研究[J]．西南交通大学学报，2004，39(3)
[5] 徐挺．相似方法及其应用[M]．北京：机械工业出版社，1995

(上接第433页)

参考文献：

[1] Scott R A．Pearce R W．Soil compaction by impact[J]．Geotechnique，1975，25(1)：1－19
[2] Jessberger H L，Beire R A．Heavy tampings：theoretical and practical aspects．Proc．of 10th Inter．Conf．on Soil Mech．And Foundation Eng．Stockholm，1981，695－699
[3] Thilaksiri H S，Gunaratne M el al．Investigation of impact stress induced in laboratory dynamic compaction of soft soils[J]．Int J for Numer Anatyt Methods Geomech，1996，20(10)：753－776
[4] 钱家欢．动力固结理论与实践[J]．岩土工程学报，1986，8(6)：1－17
[5] 蒋鹏，李荣强，孔德坊．强夯大变形冲击碰撞数值分析[J]．岩土工程学报，2000，22(2)
[6] 孔令伟，袁建新．强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]．岩土工程学，1998，20(2)：86－92
[7] 孙雨明，高广运，邱畅，梁涛．帽子模型在强夯动应力计算中的应用[J]．地下空间，2003，23(2)：147－152
[8] 水伟厚，高广运，吴延炜，王亚凌．湿陷性黄土在强夯作用下的非完全弹性碰撞与冲击应力解析[J]．建筑结构学报，2003，24(5)
[9] 黄诚．强夯非线性有限元分析及部分施工参数的优化设计，同济大学硕士论文．2003
[10] 梁志荣，曹名葆，叶柏荣．强夯特性的数值分析[A]，首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集[C]．杭州，1992
[11] 李天光．重锤低落距与轻锤高落跨强夯法加固湿陷性地基效果对比[J]．工程勘察，1995，(2)

(上接第452页)

(4)本文所得可靠度指标未考虑计算模式的误差，当计及计算模式的误差后，可靠度指标应有所降低，对灌注桩而言，当考虑桩径的不定性时，可靠度指标会进一步降低，关于这一问题还有待进一步研究。

参考文献：

[1] JGJ 94－94，建筑桩基技术规范[S]
[2] DBJ08－11－89，地基基础设计规范[S]
[3] 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
[4] 陈强华，等．静力触探估算钻孔灌注桩单桩极限承载力[J]．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
[5] Vanmarcke E.H．Probabilistic modeling of soil profile[J]．ASCE，GT11，1977，Vol.103：1227～1246
[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[D]．上海：同济大学博士学位论文．1998．23～28
[7] 赵春风，等．上海标准推荐的预制桩极限承载力分项系数研究[J]．工程力学，2003，20(6)：141－144
[8] GB50007－2002．建筑地基基础设计规范[S]