

文章编号: 1000-7598-(2007)08-1744-05

基于刚性承台群桩沉降的可靠度研究

吴 鹏

(中南大学 土建学院, 长沙 410075)

摘 要: 针对在总结目前的群桩可靠度设计理论完全是基于承载力, 提出了对于超大超长群桩基础采用基于沉降的可靠度设计概念, 其中沉降计算模式考虑了桩身压缩以及桩端刺入量。在讨论了计算参数的分布规律后, 用蒙特卡罗方法进行了可靠度指标的计算。通过一个算例表明, 荷载水平增加会导致群桩可靠度指标急剧降低; 可接受位移增加, 可靠度指标增大, 但这种趋势逐渐变缓。

关 键 词: 可靠度; 刚性承台; 超大群桩基础; 蒙特卡罗法; 群桩沉降

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Reliability study of pile group with rigid cap based on settlement

WU Peng

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the summarization that design theory of reliability is based on bearing capacity wholly, a new concept of reliability design based on settlement aiming at great super-long pile group is presented. Compression of pile body and stab deformation is considered in the settlement calculating model. After discussion about distribution regularity of calculating parameters, index of reliability is calculated by Monte Carlo method. An example shows that index of reliability would decrease with load level increasing; and it would increase with acceptable settlement increasing. But increase trend becomes slower.

Key words: reliability; rigid cap; great pile group; Monte Carlo method; settlement of pile group

1 前 言

传统的桩基设计方法, 是将荷载、承载力(抗力)等设计参数看成不变的定值, 根据经验确定的安全系数来确定桩基的安全度。对于不同地质条件、不同土层、不同桩型和承受不同性质荷载的桩基, 在取相同安全系数的条件下的安全度是不同的, 这是因为影响桩基安全度的基本因素为荷载和抗力都不是定值, 而是随机变量。

目前国内外对桩基可靠度的研究主要是集中在单桩承载力可靠度^[1-5], 并采用随机场模型确定桩周土参数^[6]和引入模糊随机的概念^[7], 或者对可靠度分析方法的改进^[8]等。对于群桩, 只能对其体系的承载力进行可靠性分析, 所选择的承载力计算公式一般均很简单。实际上, 群桩基础的荷载沉降曲

线绝大多数均为缓变型, 这就导致群桩基础的极限承载力很难确定, 常常是通过分析方法判定其极限承载力, 然而该极限承载力并非为真正的最大承载力, 继续增加荷载, 沉降仍能趋于稳定, 是塑性区开展范围扩大, 塑性沉降量增加而已。对于大直径超长桩构成的超大群桩基础, 其荷载沉降曲线变化更为平缓, 渐进破坏特征更明显, 并不存在所谓的极限承载力, 达到极限承载力时的沉降已经远远超出允许范围, 那么研究这种极限承载力就失去实际意义。由于这种基于承载力能力极限状态的可靠度设计方法是人为假定桩侧、桩端同时达到极限状态, 故与实际情况是不符的, 本文着重于基于沉降控制的竖向受压群桩体系的可靠度研究, 其中沉降计算方法考虑了超长摩擦群桩的桩身压缩量和桩端刺入变形^[9]。

收稿日期: 2005-09-08

修改稿收到日期: 2006-03-06

基金项目: 江苏省交通厅科学研究项目(No. 04Y029)。

作者简介: 吴鹏, 男, 1980年生, 博士, 主要从事地下结构方面的研究。E-mail: wupeng008@eyou.com

2 理论分析

2.1 沉降计算方法的基本假定

(1) 土为均匀弹性体, 具有确定的弹性模量 E 和泊松比 ν_s ;

(2) 承台为绝对刚性, 即各桩桩顶沉降相等, 且承台脱空, 即承台不受土反力;

(3) 桩为弹性体, 具有确定的弹性模量 E_p 和泊松比 ν_p ;

(4) 单桩桩侧荷载传递函数已知, 即桩侧摩阻力与桩土相对位移的关系已知, 假定为

$$\tau = \frac{s}{a + bs} \quad (1)$$

式中: a , b 为参数; s 为桩土相对位移;

(5) 单桩桩端荷载传递函数已知, 即桩端阻力与刺入变形的关系已知, 假定为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= k_{b1}s_b, (s_b \leq s_0) \\ \sigma_b &= k_{b1}s_0 + k_{b2}(s_b - s_0), (s_b > s_0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_b 为桩端应力; k_{b1} 、 k_{b2} 为桩端刚度系数; s_0 为桩端界限刺入变形; s_b 为桩端刺入变形。

2.2 可靠度基本概念

2.2.1 安全余量的概念

所谓群桩体系的安全余量, 是根据群桩体系的极限状态方程定义的一个随机变量, 又称为安全储备。

群桩基础的安全余量可以用下式来表示:

$$Z = R - S \quad (3)$$

式中: Z 为群桩基础的安全余量, 即安全储备; R 为群桩的允许沉降; S 为作用于桩顶的总荷载效应导致的沉降。

2.2.2 失效概率

所谓群桩体系的失效概率, 是指在一定的荷载效应作用下, 群桩体系中的桩进入极限状态的概率, 本文指超过允许沉降的概率。求解群桩基础的可靠度, 只需研究结构的失效概率即可, 即计算 $P(Z < 0)$ 的值。

2.3 计算分析

2.3.1 功能函数

按式(3)的定义, R 为定值, S 为一受多元随机变量影响的函数, 其计算方法有很多, 如弹性理论法、有限单元法、变分法和混合法等。但这些计算方法均比较复杂, 不太适合进行可靠度分析, 而常规的等代墩基法则太粗糙, 没有考虑到超大群桩基础的桩身压缩量以及桩端刺入变形等, 有很大的局

限性, 本文基于考虑桩土滑移和桩顶刚度动态调整的群桩分析方法上的简化方法^[10]来分析群桩的可靠度, 该方法的群桩沉降可表达为

$$S = f(a, b, k_{b1}, k_{b2}, s_0, E_s, P) \quad (4)$$

式中: E_s 为土的压缩模量; P 为承台竖向荷载。简化为^[7]

$$\left. \begin{aligned} s_T &= m_s \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{P}{(A + h/2 + \sum_{j=1}^i h_j/2)(B + h/2 + \sum_{j=1}^i h_j/2)} \right\} \frac{h_i}{E_{si}} + \\ &\quad \frac{\zeta \bar{P}}{k_{b1} A_p} + \frac{(1 + \zeta) \bar{P} L}{2 E_p A_p}, \quad \zeta \bar{P} < k_{b1} s_0 A_p; \\ s_T &= m_s \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{P}{(A + h/2 + \sum_{j=1}^i h_j/2)(B + h/2 + \sum_{j=1}^i h_j/2)} \right\} \frac{h_i}{E_{si}} + \\ &\quad s_0 + \frac{\zeta \bar{P} - k_{b1} s_0 A_p}{k_{b2} A_p} + \frac{(1 + \zeta) \bar{P} L}{2 E_p A_p}, \quad \zeta \bar{P} > k_{b1} s_0 A_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: ζ 为端阻比, $\zeta_{\lambda < 0.8} = k_1 \frac{E_p}{E} + k_2 \ln m + k_3 \ln L +$

$k_4 D + k_5 n + k_6 a + k_7 k_{b1} + c_1$; $\zeta_{\max} = k_8 \ln L + k_9 D +$

$k_{10} b + k_{11} k_{b1} + k_{12} s_0 + c_2$; h 为力心水平面到桩端的距离, 定义为 $h = \frac{\int_0^L \tau(z) U(L-z) dz}{\int_0^L \tau(z) U dz + \sigma_R A_p}$, 按简化方法,

假定侧阻力沿桩侧程均匀分布, 有 $h = (1 - \zeta) L / 2$, m_s 为沉降计算经验系数, A 为群桩外围竖向投影长边边长, B 为群桩外围竖向投影短边边长, h_i 为计算分层土第 i 层土厚度, E_{si} 为第 i 层土的压缩模量, A_p 为桩身截面积, λ 为荷载水平系数, $\lambda = \bar{P} / P_{ud}$, $\bar{P}$ 为平均桩顶荷载, P_{ud} 为单桩极限荷载 (该处的极限荷载是接近极限荷载某数值), D 为桩径, m 为桩距与桩径之比, L 为桩长, n 为桩数, $c_1 = 0.151 23$, $k_1 = 4.523 5 \times 10^{-5}$, $k_2 = -2.015 0 \times 10^{-2}$, $k_3 = -7.442 1 \times 10^{-2}$, $k_4 = 6.393 8 \times 10^{-2}$, $k_5 = 1.624 6 \times 10^{-3}$, $k_6 = 8.117 0 \times 10^4$, $k_7 = 6.7196 \times 10^{-3}$, $c_2 = 0.352 29$, $k_8 = -0.154 13$, $k_9 = 7.091 1 \times 10^{-2}$, $k_{10} = 7.126 9 \times 10^3$, $k_{11} = 1.911 \times 10^{-2}$, $k_{12} = 0.561 03$ 。

2.3.2 可靠度分析方法

可靠度分析方法有很多种, 如一次可靠性方法 (FORM)、二次可靠性方法 (SORM)、蒙特卡罗方法 (MCS) 等。

蒙特卡罗法又称为随机抽样法、概率模拟法或统计试验法。该法以概率论和数理统计理论为基础,通过随机模拟和统计试验来求解结构可靠性的近似数值方法。该方法具有较大的优越性:它能够克服一般可靠度分析方法因为复杂的功能函数而带来的复杂运算,并且只要有足够多的抽样次数,就能够得到一个相对精确的计算结果,而且一般来说,其计算结果精度最高;它不要求随机变量有确定的分布类型,即知数值的分布规律就可以了,而本文采用的沉降计算方法的功能函数的表达式就比较复杂,如果按 JC 方法等将导致计算表达式在形式上非常繁,并且有些随机变量也很难得出其具体的分布,本文选择蒙特卡罗法进行可靠度分析。

蒙特卡罗法计算原理是首先对影响结构可靠度指标的各随机变量进行大量的随机抽样;然后把这些抽样值一组一组代入功能函数式,确定结构是否失效;最后从中求出结构的失效概率。其基本思路如下:设有独立随机变量 $X_i (i=1,2,\dots,k)$, 功能函数为 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_k)$; 根据各随机变量的相应分布,产生 M 组随机数 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 值,计算功能函数 Z , 若其中有 N 组随机数对应的功能函数值 $Z_i \leq 0$, 则当抽样次数 $M \rightarrow \infty$ 时,根据大数定理的特性有失效概率:

$$P_f = \{g(x_1, x_2, \dots, x_k) \leq 0\} = N/M \quad (6)$$

式中 N 为失效次数。则可靠度指标:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (7)$$

2.3.3 变量分布规律

(1) 承台荷载 P

作用于承台的荷载效应与作用于承台的荷载有关,而目前作用于承台的荷载的现场实测资料非常少,要直接利用实测资料来统计分析它的概率分布特征尚存在很大的困难。由于作用于承台的荷载主要来源于上部结构,故可以近似地采用上部结构荷载的概率分布特征作为作用于承台的荷载的概率分布特征,而忽略荷载在传递到承台的过程中概率分布特征的变化,并假定作用于承台的荷载效应的概率分布特征与相应荷载的概率分布特征相同。

本文仅考虑荷载效应的简单组合,即考虑恒载效应 P_G 与一种活载效应 P_Q 组合,则

$$P = P_G + P_Q \quad (8)$$

对恒载,可以认为其在使用过程中变化很小,即对于某确定的结构可以认为为常量。

活载的种类很多,具体研究起来要考虑多种活

载的荷载效应组合,这不是本文研究的重点,因此,简化考虑,认为活载服从正态分布,即服从均值 μ_{P_Q} 、方差 $\sigma_{P_Q}^2$ 的通过活载效应组合后的分布进行当量正态化后的正态分布为 $P_Q \sim N(\mu_{P_Q}, \sigma_{P_Q}^2)$, 因此 $P \sim N(P_G + \mu_{P_Q}, \sigma_{P_Q}^2)$ 。

(2) 土层弹性模量 E

土的形成过程决定了土体存在固有的空间变异性。空间一定范围内土层的平均特性决定了大部分岩土工程的性状。因此,在岩土工程可靠性分析时应该计算土工参数空间平均值及其方差。要正确模拟土层的性质,就必须把土层看作是随机场,考虑土的空间变异性^[11],即考虑土性参数不仅仅是一个随机变量,而且是一个随空间位置变化的随机变量。这里以弹性模量为例,说明考虑土性参数的空间变异性的概率密度分析方法。

对于统计均匀场土层的弹性模量,假定其服从正态分布,其空间变化通常可以表示为趋势分量和随机分量的和其表达式为。

$$E(z) = E + e(z) \quad (9)$$

式中: $E(z)$ 为深度 z 处的弹性模量; E 为弹性模量的趋势分量,对均匀土可以认为是定值; $e(z)$ 为深度 z 处的随机分量。

土层随机模型都是针对平稳随机场, $e(z)$ 的概率特性(均值和协方差)可以表示为

$$\bar{E}[e(z)] = 0 \quad (10)$$

$$\text{Cov}[e(z_i), e(z_j)] = \sigma^2 \rho(z_i - z_j) = \sigma^2 \rho(\tau) \quad (11)$$

式中: $\bar{E}$ 为表示求数学期望; σ^2 为随机场 $e(z)$ 的方差。

由式(9)和式(10)有

$$\bar{E}[E(z)] = E \quad (12)$$

可以认为 E 和 $e(z)$ 不相关, 故

$$\text{Var}[E(z)] = \text{Var}(E) + \text{Var}[e(z)] \quad (13)$$

而

$$\text{Var}[e(z)] = \frac{1}{L^2} \sigma^2 \int_0^L \int_0^L \rho(z_i - z_j) dz_i dz_j = \sigma^2 \Gamma^2(L) \quad (14)$$

式中: $\Gamma^2(L)$ 为方差折减函数^[11]; L 为深度范围。

只要知道了自相关函数,就可以得出弹性模量的方差。

Vanmarcke^[12]在 1977 年对土的一维随机场的 $\Gamma^2(L)$ 提出了近似表达式:

$$\Gamma^2(L) = \begin{cases} 1, & r \leq L_r \\ L_r / r, & r \geq L_r \end{cases} \quad (15)$$

式中： L_r 为相关距离，即在 L_r 范围内的土被认为土性强烈相关，而距离大于 L_r 土性互不相关； r 为进行空间平均的范围。

参考文献[13]，对黏土可取相关距离为 0.95。因此，对某具体工程，知道 r 后就可以得到土弹性模量的分布了。

(3) 土层压缩模量 E_s

根据定义及弹性理论得出：

$$E_s = \frac{E}{1 - 2\nu_s^2 / (1 - \nu)} \quad (16)$$

由于土体泊松比对计算结果影响很小，可认为是常数，知道了弹性模量的数值，也就得出压缩模量的数值。

(4) 桩侧极限摩阻力参数 b

均匀土层中，可以认为桩侧极限摩阻力 f_u 服从正态分布，类似于弹性模量的分析方法，桩侧极限摩阻力 f_u 的分布参数，即

$$f_u \sim N(\mu_{f_u}, \sigma_{f_u}^2) \quad (17)$$

而 $\frac{1}{b} = f_u$ ，直接很难得出参数 b 的分布，而如果确定了极限摩阻力 f_u ，就确定了参数 b 。因此，在蒙特卡罗抽样中，避免直接对 b 抽样，而先对 f_u 抽样后再计算 b ，这样也解决了参数 b 的分布问题。

(5) 桩侧剪应力初始刚度参数 a

在实测中可得极限摩阻力对应位移 s_u ，可以假定其服从正态分布，类似于弹性模量分析方法，可以得出其分布参数，即 $s_u \sim N(\mu_{s_u}, \sigma_{s_u}^2)$ ，而 $\frac{1}{a} = \frac{f_u}{s_u}$ ，因此，在蒙特卡罗抽样中得出了 f_u 和 s_u 的值就得出了 a 的值。

(6) 桩端初始刚度 k_{b1}

假定桩端初始刚度 k_{b1} 服从如下正态分布：

$$k_{b1} \sim N(\mu_{k_{b1}}, \sigma_{k_{b1}}^2)$$

(7) 桩端后期刚度 k_{b2}

假定桩端后期刚度 k_{b2} 服从如下正态分布：

$$k_{b2} \sim N(\mu_{k_{b2}}, \sigma_{k_{b2}}^2)$$

(8) 桩端界限变形 s_0

假定桩端界限变形 s_0 服从如下正态分布：

$$s_0 \sim N(\mu_{s_0}, \sigma_{s_0}^2)$$

(9) 单桩极限承载力 P_{ud}

假定单桩极限承载力 P_{ud} 服从如下正态分布：

$$P_{ud} \sim N(\mu_{P_{ud}}, \sigma_{P_{ud}}^2)。$$

这里需要说明的是，上述参数大多没有统计值，本文主要是初步讨论基于沉降的桩基可靠度设计，所取参数有一定的经验性和简化性。而在采用的沉降计算方法中所用到的参数均是建立在实测资料之上，其均值就取实测值，方差则考虑一定的变异系数或者工程经验予以确定。

3 算 例

3.1 计算模型参数

4×4 群桩，桩距为 4 d ，(d 为桩径) 桩径为 2 m，桩长为 90 m，土体泊松比 0.3。

3.2 基本变量的概率分布和统计参数

计算参数的统计参数见表 1。

表 1 变量概率分布参数表

Table 1 Parameters of distribution of random variable

参数	均值	方差
E / MPa	33	2
f_u / kPa	60	3
s_u / m	0.006	0.001 5
k_{b1} / MN · m ⁻³	9	0.9
k_{b2} / MN · m ⁻³	1	0.3
s_0 / m	0.2	0.02
P_{ud} / MN	34.5	2

模型中的各个参数都对可靠度存在一定的影响，但这里重点研究荷载水平以及可接受位移对可靠度的影响。图 1 在可接受位移 200 mm 情况下荷载水平（这里指均值变化）对可靠度的影响，图 2 为平均单桩荷载均值取 28 MN 的情况下可接受位移对可靠度的影响。由图 1 可见，荷载水平增加会导致群桩可靠度指标急剧降低。图 2 显示，可接受位移增加，可靠度指标增大，但这种趋势逐渐变缓。

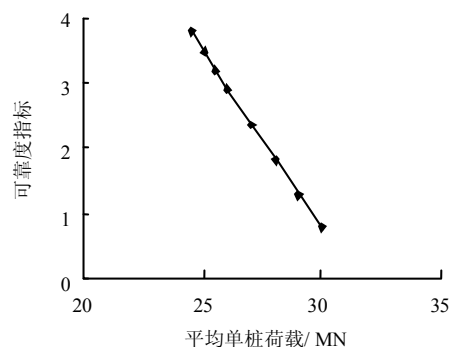


图 1 荷载水平对可靠度指标的影响

Fig.1 Affection of load level to index on reliability

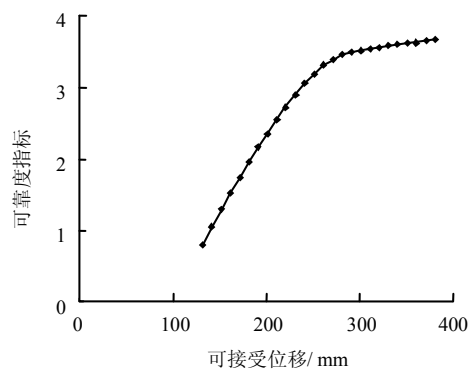


图2 可接受位移对可靠度的影响
Fig.2 Affection of acceptable settlement
on index of reliability

4 结 论

(1) 在总结目前的群桩可靠度设计理论完全是基于承载力的基础上, 提出了针对超大超长群桩基础的基于沉降的可靠度设计理念; 采用考虑了桩身压缩以及桩端刺入量的群桩沉降计算方法来进行可靠度计算, 这是桩基设计理论的一个大的进步; 简单分析了各参数的概率分布规律及可靠度计算方法。

(2) 通过一个算例, 重点研究了群桩基于沉降的可靠度设计中, 荷载水平和可接受位移对可靠度指标的影响。即荷载水平增加会导致群桩可靠度指标急剧降低; 可接受位移增加, 可靠度指标增大, 但这种趋势逐渐变缓。

参 考 文 献

- [1] 李启信, HITEW W, 楚剑, 等. 土层概率模型及其在桩基分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1989, (6): 120—128.
LI Qi-xin, HITEW W, CHU Jian, et al. Probabilistic modelling of soil profiles and its application to the analysis of pile foundations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, (6): 120—128.
- [2] 傅旭东. 钻孔灌注桩可靠度理论研究和工程应用[D]. 成都: 西南交通大学, 1998.
- [3] 朱彦鹏, 王文达, 王秀丽, 等. 考虑地基土共同作用时的灌注桩设计[J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(4): 81—84.
ZHU Yan-peng, WANG Wen-da, WANG Xiu-li, et al. Design of poured pile with consideration of associated action of pile and soil[J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 2001, 27(4): 81—84.
- [4] 陈晓平. 复合桩基承载力可靠度研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1998.
- [5] 邓志勇, 陆陪毅, 王成华. 钻孔灌注桩单桩承载力的可靠度研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 83—87.
DENG Zhi-yong, LU Pei-yi, WANG Cheng-hua. Reliability research on bearing capacity of single bored pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 83—87.
- [6] 李境培, 高大钊. 桩基承载力参数估计的随机场模型[J]. 岩土工程师, 1992, (6): 1—6.
- [7] 李镜培, 舒翔. 竖向承载桩的模糊随机可靠度计算方法[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 754—756.
LI Jing-pei, SHU Xiang. Calculation method for fuzzy random reliability of vertical bearing piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 754—756.
- [8] 傅旭东, 茜平一, 刘祖德. 单桩沉降可靠度的随机有限元分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(1): 70—75.
FU Xu-dong, QIAN Ping-yi, LIU Zu-de. Stochastic finite element method for reliability analysis of pile settlement[J]. *Journal of The China Railway Society*, 2002, 24(1): 70—75.
- [9] 吴鹏, 龚维明, 梁书亭, 等. 考虑桩土滑移和整体刚度动态调整的群桩分析方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 225—230.
WU Peng, GONG Wei-ming, LIANG Shu-ting, et al. A method for the analysis of pile group considering slipping between pile and soil and integral stiffness dynamic adjusting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(2): 225—230.
- [10] 吴鹏. 超大群桩基础竖向承载性能及设计理论研究. [博士学位论文 D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [11] 洪昌华, 龚晓南. 不排水强度的空间变异性及单桩承载力可靠性分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 66—70.
HONG Chang-hua, GONG Xiao-nan. Spatial variability of undrained strength and reliability analysis of single pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(3): 66—70.
- [12] Vanmarcke E H. Probabilistic Modeling of Soil Profiles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1977, 103(11): 1 227—1 246.
- [13] 冷伍明. 基础工程可靠度分析与设计理论[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.