

# 人工挖孔桩护壁的可靠度分析<sup>\*</sup>

李 桐

( 华侨大学建筑设计院, 泉州 362011 )

**摘要** 通过对人工挖孔桩护壁承受外界作用的分析, 建立孔桩护壁的可靠度模型, 结合工程实例, 对孔桩护壁进行了可靠度设计, 为目前孔桩护壁的设计提出一个合理的方法.

**关键词** 人工挖孔桩, 护壁, 可靠度, 设计

**分类号** TU 472; TU 311.2

人工挖孔桩基础起源于美国, 日本于 30 年代末亦开始采用. 我国挖孔桩的出现是受了高层建筑对大直径桩的迫切需求的推动和国外经验的启发, 并且很快从南方到北方推广开来, 成为高层建筑桩基础的一种常用桩型<sup>[1]</sup>. 人工挖孔桩具有扩底承载力高, 施工无噪声、无振动, 不污染环境, 持力层便于检查、易保证质量等诸多优点, 故一直为设计人员所青睐. 由于人工挖孔桩是地下作业, 其安全防护措施显得尤其重要, 经常可以看到人工挖孔桩成孔过程中由于孔桩护壁的破坏或崩塌, 造成人身安全事故的发生. 因此, 亟需建立一套安全可靠、经济有效的孔壁设计理论和施工方法, 以保证操作人员的生命安全和孔桩质量. 然而, 目前人工挖孔桩护壁设计理论的研究所见极少. 在现行的孔桩护壁设计中对于不同场地、不同桩长、不同桩径, 其护壁的设计都是千篇一律, 从材料的选材、强度的确定到几何尺寸的界定往往缺少科学的设计依据. 由此对于短桩容易造成护壁材料的浪费, 而对于长桩却往往存在着危险的隐患. 本文把结构可靠度理论引入孔桩护壁的设计, 通过考虑影响护壁可靠度的各种随机因素, 建立随机可靠度模型, 并在给定的可靠度指标下进行孔桩护壁的可靠度设计. 本文的研究对今后人工挖孔桩护壁的设计具有一定的实际意义.

## 1 孔桩护壁应力分析

### 1.1 受力情况

人工挖孔桩成孔浇筑混凝土之前, 作用在护壁上的主要外荷载是壁后的土对壁筒产生的侧向压力. 根据护壁的位移情况和壁后土体所处的应力状态, 该压力为主动土压力. 分层按土的重度  $\gamma_i$ , 内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $C_i$  进行计算, 第  $n$  层土层底面对护壁的主动土压应力为<sup>[1]</sup>

$$q_n = [P_n + \sum_{i=1}^n \gamma_i (h_i - h_{i-1})] \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) - 2C_n \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2}), \quad (1)$$

其中  $P_n$  为地面施工荷载 (如成孔过程中的堆土、砂石材料等), 转递到第  $n$  层土底面的垂直荷

载. 当进一步考虑地下水产生的水压力, 则需在式(1)右边加上水压力  $\sum_{i=1}^n \gamma_w (h_i - h_0)$ , ( $\gamma_w$  为地下水重度,  $h_0$  为地下水水位标高), 而土体重度取浮容重.

## 1.2 应力分析

设孔桩护壁的厚度远小于孔桩半径, 由于实际施工中同一节护壁厚度并不一定相同, 为理论分析方便, 取施工中每一节最小截面厚度为该节壁厚. 因此, 其力学模型可简化为四周承受均匀压力的园柱壳, 并且柱壳薄膜应力远大于其弯曲应力(图1). 按柱形壳无矩理论可建立其力平衡方程<sup>[6]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{x\varphi}}{\partial \varphi} + x &= 0, \\ \frac{\partial N_{x\varphi}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + y &= 0, \\ N_{\varphi\varphi} &= Zr, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $r$  为柱壳中心到护壁中面曲率半径,  $N_x$  为壳体纵向内力,  $N_{\varphi\varphi}$  为剪切力,  $x$ ,  $y$  和  $z$  分别为纵向、环向和径向的载荷强度. 在孔桩护壁的力学模型中分别为  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = -q^n$ . 设圆柱壳两端自由, 即在边界条件  $N_{x\varphi}|_{x=0, l=0}$  和  $N_x|_{x=0, l=0}$  情况下, 式(2)的解为

$$N_x = 0, \quad N_{x\varphi} = 0, \quad N_{\varphi\varphi} = -qnr. \quad (3)$$

圆柱壳无矩理论结果说明, 孔桩护壁主要内力是环向压力, 其余内力均为零.

## 1.3 现行孔桩护壁的设计

在现行孔桩护壁的设计中, 护壁按地下最深段所承受的土压力及地下水的最大侧压力来确定其厚度, 其公式<sup>[6]</sup>为

$$a = N\varphi/f_c \quad (4)$$

式中  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值. 这种过于简单的设计方法往往造成桩上部护壁设计偏于保守, 而下部护壁设计偏于不安全. 因此, 本文试想从可靠度的角度来对孔桩护壁进行可靠度设计.

# 2 孔桩护壁可靠度分析

所谓孔桩护壁可靠度, 是指孔桩护壁结构在孔桩成孔至浇灌混凝土整个施工期间, 在来自外界的作用影响下, 完成挡土支护功能的概率.

## 2.1 孔桩护壁可靠模型

孔桩护壁所承受的外界作用包括直接作用和间接作用两类. 直接作用指作用在护壁上的3类荷载: (1) 恒荷载, 包括土压力、水压力和地面施工荷载; (2) 活荷载, 包括地面活荷载、雪荷载和雨水荷载; (3) 偶然荷载, 包括爆炸力和冲撞力. 间接作用指地基变形、温度变化和地震对孔桩护壁所产生的影响. 通常研究恒荷载作用下孔桩护壁问题更具有实际意义, 因此本文建立的孔桩可靠度模型为

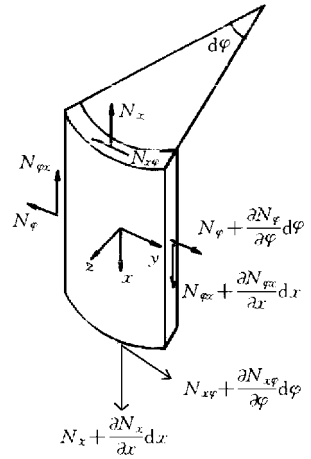


图1 护壁单元受力图

$$Z = g(R, S_q, S_w) = R - S_q - S_w$$

(5)

其中  $Z = g(\cdot)$  为孔桩护壁的功能函数,  $R$  为护壁构件抗力,  $S_q$  为压力荷载效应,  $S_w$  为水压力效应, 它们都是随机变量. 利用功能函数  $Z = g(\cdot)$  值, 可判断护壁所处的状态: 当  $Z > 0$ , 护壁处于安全可靠状态; 当  $Z < 0$ , 护壁处于失效状态; 当  $Z = 0$ , 护壁处于临界状态.

2.2 可靠度指标

为了对孔桩护壁结构可靠度进行定量描述, 引入可靠度指标  $\beta$ . 当功能函数  $Z$  符合正态分布, 则可靠度指标与护壁失效概率有如下的关系:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ = \Phi(-\beta),$$

(6)

式中  $P_f$  为孔桩护壁结构失效概率,  $f(Z)$  为功能函数的概率密度函数,  $\Phi(\cdot)$  为标准正态函数.

我国 GBJ 68-84 标准给出的建筑设计所用的可靠指标, 如表 1 所示.

表 1 结构构件承载力极限状态设计时采用的可靠指标  $\beta$  值

结构构件破坏类型	结构构件所属建筑物类型		
	重要的工业与民用建筑	一般的工业与民用建筑	次要的建筑
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

2.3 孔桩护壁的可靠性设计

我国从 1985 年起开始实行 GBJ 68-84 《建筑设计统一标准》, 采用了国际上正在推行的概率极限状态设计方法. 即以结构的失效概率或可靠指标来度量结构可靠度, 并且建立结构可靠度与结构极限状态方程之间的数学关系的设计方法. 根据上述统一标准, 护壁结构可靠度状态极限方程可由式(5)表示为

$$R - S = 0,$$

(7)

其中  $S = S_q + S_w$ .

设  $R, S$  均为正态分布, 将其作标准正态化变换后,  $\hat{R} = (R - U_R) / \sigma_R$ ,  $\hat{S} = (S - U_S) / \sigma_S$ . 那么, 标准正态坐标中原点到极限状态线的最短距离, 即为概率极限状态设计中描述系统可靠程度的指标  $\beta$ (图 2). 它的垂足为系统最可能导致破坏的控制点, 即设计验算点.

当给定孔桩护壁结构可靠度指标后, 可按如下所列的步骤进行其可靠度设计.

(1) 列出极限状态方程为

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

确定所有基本变量的分布类型和统计参数.

(2) 假定  $X_i^*$  的初始值.

(3) 对非正态变量在  $X_i^*$  的初始值, 进行当量正态转换.

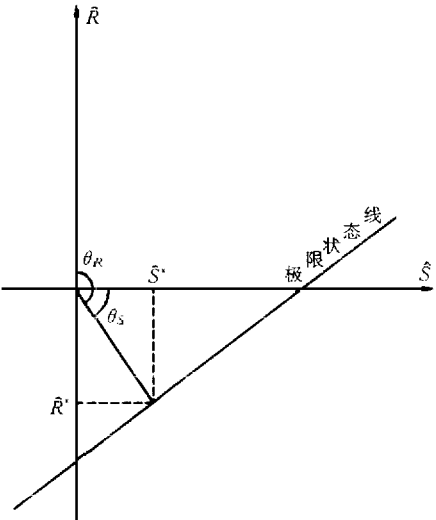


图 2 可靠度指标与极限状态方程的关系

(4) 求方向余弦

$$\cos\theta = - \frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{x_i^*} \sigma_{xi} / \Sigma (\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{x_i^*} \sigma_{xi})^{1/2}.$$

(5) 按公式

$$X_i^* = U_{xi} + \cos\theta\beta\sigma_{xi}, \quad g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0,$$

优化计算  $X_i^*$  的新值.

重复上述步骤(3)到(5),直到数值收敛. 按此方法求得抗力平均值及标准值,从而确定孔桩护壁的截面尺寸或护壁材料.

2. 4 混凝土护壁随机模型的可靠性设计

当孔桩护壁为现浇混凝土时,护壁混凝土的龄期往往在未达到混凝土规定的养护期时护壁就已开始它的挡土功能. 因此,护壁的抗力远未达到它的实际的抗力. 在成孔阶段,抗力是时间的递增随机过程 $\{R(t), t \in [0, T]\}$ , 因而其结构的功能函数为

$$Z(t) = R(t) - S, \tag{8}$$

构成了一个随机过程. 从结构工程实际考虑,结构失效往往发生在抗力最小值瞬间;就孔桩护壁而言,一般即护壁拆模时刻. 从可靠度的观点出发,对功能函数在设计基准期取最小值,即

$$\begin{aligned} \min_t Z(t) &= \min_t \{R(t) - S\} = \\ &= \min_{0 \leq t \leq T} R(t) - S. \end{aligned} \tag{9}$$

记  $Z_m = \min_t Z(t)$ ,  $R_m = \min_t R(t)$ . 由于  $Z_m, R_m$  均为随机变量, 因此通过这样变换, 消去了时间参数, 把动态模型转换成静态模型为

$$Z_m = R_m - S. \tag{10}$$

由此, 就可以采用上一节所述的可靠性设计方法进行求解.

3 实例分析

某高层建筑工程地质情况如图 3 所示. 设计人工挖孔桩直径(m), 分别为 1. 0, 1. 2, 1. 4, 1. 6, 1. 8. 采用现浇混凝土护壁,  $L = 26\text{m}$ . 不考虑土的凝聚力, 设各土层参数服从正态分布其

深度 $d$ / mm	桩长 $L$ / m	柱状图	岩性描述	容重 $\gamma$ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	变异系数 $\delta_\gamma$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	变异系数 $\delta_\varphi$
6			粉质粘土	19. 6	0. 024	17. 8	0. 127
10			残积砂质土(1)	19. 2	0. 025	19. 15	0. 145
20			残积砂质土(2)	19. 5	0. 025	19. 47	0. 145
26			强风化花岗岩				

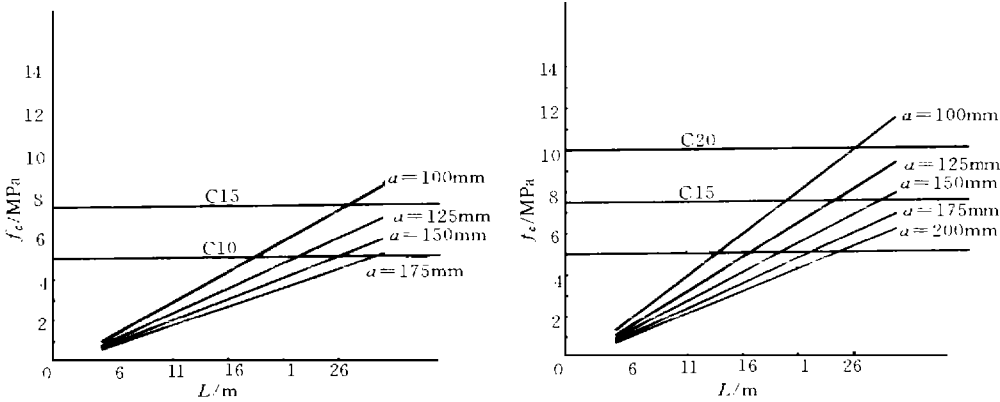
图 3 工程地质简图

统计特征值列于图 3 中. 地下水位  $h_0$  服从正态分布, 均值  $u_{h0} = 2. 5\text{ m}$ , 变异系数  $\delta_{h0} = 0. 1$ . 根据挖孔桩成孔的施工情况, 护壁支模一般在浇灌后 2 ~ 3 d 拆模. 此时混凝土抗压强度, 若按

$f_{c\min}=M_{\min}f_c(t)=0.35f_c$ 取值且混凝土抗压强度 $f_c$ 服从正态分布,其均值 $\bar{u}_{f_c}$ ,变异系数 $\delta_{f_c}=0.17$ ,则由式(10)可建立该工程孔壁功能函数为

$$Z_m=R_m-q_n=R_m-\sum_{i=1}^n\gamma_i(h_i-h_{i-1})\text{tg}^2(45^\circ-\frac{\varphi_i}{2})-\sum_{i=1}^n\gamma_{wi}(h_i-h_0), \tag{11}$$

其中 $R_m=0.7qf_c/(d+a)$ ,  $a$ 为护壁厚度,  $d$ 为孔桩直径. 取可靠度指标  $\beta=3.2$ , (相当于失效概率 $P_f=6.87\times10^{-4}$ ). 与桩径 1.0 和 1.4 m 相当的孔桩护壁混凝土,其抗压强度标准值可靠度设计的结果绘于图 4.



(a)  $d=1\,000\text{ mm}$  (b)  $d=1\,400\text{ mm}$

图 4  $d=1\,000\text{ mm}$  和  $1\,400\text{ mm}$  时  $f_c$ - $L$  关系( $\beta=3.2$ )

分析所得结果,可得到如下 3 点认识.(1) 孔桩护壁混凝土等级与桩径、护壁深度成正比,与壁厚成反比.(2) 当  $L<10\text{ m}$  时,现今设计中通常采用的  $a=150\text{ mm}$  及砼强度等级为 C20 的护壁形式过于保守,致使孔桩护壁具有极高的可靠度,导致材料浪费.若减少壁厚至  $80\sim100\text{ mm}$ ,护壁的可靠度同样可以得到保证.(3) 当  $10\text{ m}\leq L\leq26\text{ m}$  时,应根据不同的桩径、深度和地质,分段选择护壁的混凝土强度等级和设计尺寸,而不应采用一成不变的设计,以免造成材料的浪费或护壁的危险性.

根据以上结果,本工程人工挖孔桩护壁,采用如表 2 所示的设计结果.

表 2 人工挖孔桩护壁设计结果

$d/\text{m}$	$a/\text{mm}$	$h/\text{m}$		
		0~10	10~20	20~26
1.0	$a$	80	100	125
		C15	C15	C15
1.2	$a$	80	125	150
		C15	C15	C15
1.4	$a$	100	125	150 或 175
		C15	C15	C20 或 C15
1.6	$a$	100	150	150 或 200
		C15	C15	C20 或 C15
1.8	$a$	100	150 或 175	175
		C15	C20 或 C15	C20

## 4 结束语

综上所述, 结构可靠度设计的原则和方法, 完全能够应用于人工挖孔桩护壁结构的设计. 使得护壁结构的安全性有了定量的保证, 也为孔桩护壁施工方案的决策者提供了孔桩挡土的可靠性指标. 因此, 既保证了孔桩人工成孔的安全性, 又为孔桩的浇灌质量打下了良好的基础.

### 参 考 文 献

- 1 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计——土与结构物共同作用的理论与应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 312 ~ 114
- 2 华南工学院, 东南大学, 浙江大学等编. 地基及基础, 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 148 ~ 167
- 3 Timoshenko S 著. 板壳理论. 《板壳理论》翻译组译. 北京: 科学出版社, 1977. 488 ~ 490
- 4 何广乾, 陈祥福, 徐至钧. 高层建筑设计与施工. 北京: 科学出版社, 1992. 463 ~ 468
- 5 林忠民. 工程结构可靠性设计与估计. 北京: 人民交通出版社, 1990. 303 ~ 340

## Reliabilty Analysis Made on the Dado of the Cast-in-Place Pile with Man-Made Hole

Li Tong

(Design Inst. of Arch., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** For the dado of the cast-in-pile pile with man-made hole, a reliability model is set up based on the analysis of its bearing capacity; and a reliability design is carried out on the dado in the light of engineering example. The present work give a resonable method to the design of dado of cast-in-place lile.

**Keywords** cast-in-place pile with man-made hole, dado, reliability, design