

文章编号:1674-2974(2014)02-0040-07

基于双参数法刚性抗滑桩嵌固深度可靠性设计*

陈昌富[†], 杜翠翠, 张根宝

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要:将计算推力桩的双参数法应用于刚性抗滑桩,建立刚性抗滑桩嵌固深度可靠度分析模型,并引入随机优化算法搜索嵌固深度范围内最小可靠度指标作为该嵌固深度下的可靠度指标,然后以目标可靠度指标指导刚性抗滑桩嵌固深度的设计.通过工程实例分析表明,在满足目标可靠度的条件下采用双参数法进行刚性抗滑桩嵌固深度可靠性设计比传统的地基系数法更为经济.由参数敏感性分析可知,刚性抗滑桩嵌固深度的确定对滑体重度及滑动面土体内摩擦角、粘聚力的敏感性较强,对嵌固段土体重度及地基系数的比例系数的敏感性较弱.因此在进行刚性抗滑桩嵌固深度设计时应重点考虑滑体重度、滑动面土体内摩擦角和粘聚力变异性的影响.

关键词:抗滑桩;嵌固深度;双参数法;可靠度分析

中图分类号:TU473

文献标识码:A

Reliability Design of the Embedded Depth of the Rigid Anti-slide Piles Based on Bi-parameter Method

CHEN Chang-fu[†], DU Cui-cui, ZHANG Gen-bao

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: An analytical model for the reliability of the embedded depth of rigid anti-slide pile was established by introducing the bi-parameter approach used in the computation of lateral loaded pile. A reliability index target was determined by searching for the minimum of reliability index at a specified embedded depth incorporating with stochastic optimization algorithm, and was used to guide the design for the embedded depth of rigid anti-slide pile. Practical case study demonstrated that it was more economical to determine the embedded depth in the bi-parameter approach than in traditional ground coefficient methods. Analysis of the parametric sensitivity indicated that the determination of the embedded depth of the rigid anti-slide pile was more sensitive to the unit weight, internal frictional angle and cohesion of sliding mass than to the gravity of the embedded length and the proportional coefficient of ground coefficient. It is suggested that more concern be given to the variation of the former three parameters when conducting the embedded depth design of rigid anti-slide pile.

Key words: anti-slide pile; the embedded depth; bi-parameter approach; reliability analysis

* 收稿日期:2013-01-17

作者简介:陈昌富(1963-),男,湖南祁东人,湖南大学教授

[†] 通讯联系人, E-mail: cfchen@163.com

抗滑桩是边坡支挡工程中常用的一种结构物,因其抗滑能力强、桩位灵活、施工方便等优点而被广泛应用.抗滑桩嵌固深度是抗滑桩设计时的一个重要指标,嵌固深度过浅可能造成抗滑作用失效,嵌固深度过深又会造成工程投资增大,因此寻求既能保证边坡加固工程安全可靠,又可节约工程投资的合理嵌固深度,成为学者们关注的重要课题.

对于桩顶自由的刚性抗滑桩,由于桩的相对刚度较大,桩体本身一般不发生破坏,其水平承载力主要由桩侧土体的强度控制.工程上一般根据经验初选嵌固深度,然后以嵌固段桩周土体的强度作为验算条件,即要求滑动面以下桩的最大横向压应力不大于土体横向容许抗压强度^[1].而初选嵌固深度需要丰富的经验,否则需要经过多次试算,过程复杂.于是,蒋建国等^[2],年廷凯等^[3]基于文献^[1]分别推导了抗滑桩嵌固深度的计算公式.文献^[1]认为嵌固段地层横向容许应力为被动抗力与主动土压力之差,力学概念不够明确.胡晓军等^[4]认为地层侧向容许应力应符合摩尔-库伦强度准则,运用强度折减法建立了刚性桩嵌固深度的相关公式.陈昌富等^[5]引入统一强度理论考虑中主应力影响推导出横向容许应力计算公式从而确定嵌固深度.

以上研究在确定抗滑桩嵌固深度时主要采用定值方法,即用安全系数表示其安全度.但实际上,抗滑桩嵌固深度的确定与岩土体的物理力学性质参数密切相关,而岩土体物理力学性质指标具有较强的变异性.因此不少学者针对刚性抗滑桩嵌固深度确定的可靠性方法进行了研究.张文居等^[6]以文献^[1]为基础,针对不同的地基系数形式及不同的嵌固段地层,建立了嵌固深度的可靠性设计模型.胡晓军等^[7]基于抗滑桩嵌固深度确定的强度折减法,建立抗滑桩嵌固深度可靠性分析的极限状态方程,并进行了参数敏感性分析.吴坤铭等^[8]基于强度折减有限元法对抗滑桩嵌固深度进行了可靠度分析.以上可靠性分析方法通常以滑动面以下桩侧应力最大值的应力状态建立极限状态功能函数,然后以目标可靠度指标指导抗滑桩嵌固深度的设计.研究表明,可靠度分析方法确定嵌固深度是合理的,然而均存在以下不足:①为简化计算,假设滑动面处的地基系数及滑坡推力分别为独立的随机变量,这两个参数是关于土层力学参数的间接变量,因此直接以土层力学参数作为随机变量从而确定其变异性更加符合实际;②桩对土层的压力以及土层相应的抗力均随着深度不断变化,因此不能简单判定地层最大应

力点即为最容易破坏点;③地层横向应力采用单一参数法(m 法或 K 法)计算得到,而单一参数法往往因为待定参数太少导致计算结果不能正确反映实际情况.

鉴于以上不足,本文将吴恒立^[9]提出的计算推力桩的双参数法应用于刚性抗滑桩,以比例系数和抗力指数两个参数来确定地层水平地基系数.同时本文认为刚性抗滑桩嵌固深度范围内土层最小可靠度指标为该嵌固深度下的可靠度指标,在此基础上建立刚性抗滑桩锚固深度可靠度分析模型,然后以目标可靠度为控制指标指导刚性抗滑桩嵌固深度的设计.

1 可靠性分析模型的建立

刚性抗滑桩在某一嵌固深度 h_d 下的可靠度由该深度范围内最小可靠度指标确定,因此需建立滑动面以下任意深度 z 处土体的极限状态功能函数以搜索最小可靠度指标.

1.1 双参数法确定桩侧地层横向应力

刚性抗滑桩在上部滑体作用下的变形和受力如图1所示. h_1 为桩体附近滑体厚度, h_d 为抗滑桩锚固深度;滑体的物理力学参数分别为 γ_1, c_1, φ_1 ,嵌固段地层的物理力学参数为 γ_2, c_2, φ_2 .

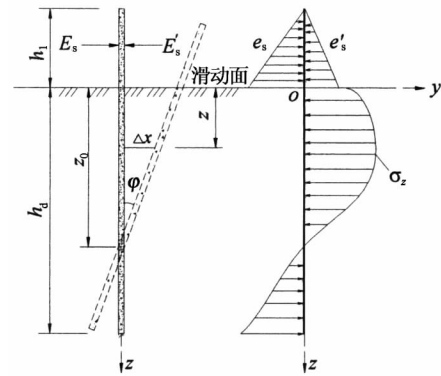


图1 抗滑桩受力及变形示意图
Fig. 1 Schematic for force and deformation of anti-slide pile

根据地基系数概念计算桩侧土体横向应力,则滑动面以下桩侧任一深度 z 处的应力为:

$$\sigma_z = K_z \Delta x. \quad (1)$$

式中: K_z 为滑动面下深度 z 处的地基系数; Δx 为该深度处桩的位移.

滑动面以下 z 深度处桩的位移为:

$$\Delta x = |z_0 - z| \varphi. \quad (2)$$

式中: z_0 为滑动面至抗滑桩转动中心的距离; φ 为

抗滑桩中心转动角。

对于抗滑桩计算常用的单一参数法中出现的问题,其解决的途径就是增加参数,因此采用双参数法确定地基系数:

$$K_z = A + mz^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中: m 为地基系数随深度变化的比例系数; $1/n$ 为随岩土类别而变化的抗力指数. 通过调整这两个参数来改变抗力系数的分布图式,以符合桩在地面处的位移等于实测值. 其值的确定如文献[9]所述. 不同参数下的地基系数 K 随深度的分布图式如图 2 所示.

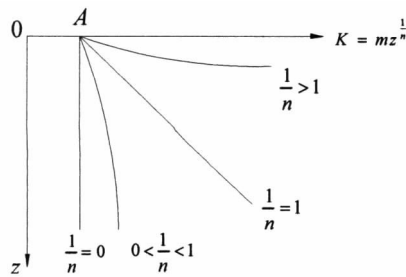


图 2 水平地基系数 K 的分布图
Fig. 2 Distribution of horizontal ground coefficient K

图 2 中 A 为滑动面处地基系数,假设滑动面处桩前、桩后地基系数相等,可用换算系数法求得:

$$A = m \left(\frac{\gamma_1 h_1}{\gamma_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

综上,将式(2)和式(3)代入式(1),得滑动面以下 z 深度处土层横向应力为:

$$\sigma_z = (A + mz^{\frac{1}{n}}) |z_0 - z| \varphi \quad (5)$$

滑动面至转动中心的距离 z_0 和抗滑桩中心转动角 φ 可由桩的受力平衡方程及边界条件求得,假设桩底自由支撑,以桩体水平方向受力平衡和对桩底弯矩平衡得方程:

$$\begin{cases} \sum Q = 0, \\ \sum M = 0. \end{cases} \quad (6)$$

进而得:

$$\begin{aligned} Q_0 &= \int_0^{z_0} (A + mz^{1/n})(z_0 - z)\varphi B_p dz - \\ &\int_{z_0}^{h_d} (A + mz^{1/n})(z - z_0)\varphi B_p dz = \\ &\varphi B_p \left[(Ah_d + \frac{mn}{n+1}h_d^{\frac{1}{n}+1})z_0 - \frac{1}{2}Ah_d^2 - \right. \\ &\left. \frac{mn}{n+2}h_d^{\frac{1}{n}+2} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Q_0 h_d + M_0 &= \int_0^{z_0} (A + mz^{1/n})(z_0 - z)(h_d - z)\varphi B_p dz - \\ &\int_{z_0}^{h_d} (A + mz^{1/n})(z - z_0)(h_d - z)\varphi B_p dz. \end{aligned} \quad (8)$$

将式(8)计算结果进行简化,得

$$\begin{aligned} M_0 &= \varphi B_p \left[-\left(\frac{1}{2}Ah_d^2 + \frac{mn}{n+2}h_d^{\frac{1}{n}+2} \right)z_0 + \right. \\ &\left. \frac{1}{3}Ah_d^3 + \frac{mn}{n+3}h_d^{\frac{1}{n}+3} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

联立式(7)和(9)得

$$\begin{cases} z_0 = \frac{FQ_0 - DM_0}{CM_0 - DQ_0}, \\ \varphi = \frac{CM_0 - DQ_0}{B_p(CF - D^2)}. \end{cases} \quad (10)$$

其中, $C = Ah_d + \frac{mn}{n+1}h_d^{\frac{1}{n}+1}$,

$$D = -\frac{1}{2}Ah_d^2 - \frac{mn}{n+2}h_d^{\frac{1}{n}+2},$$

$$F = \frac{1}{3}Ah_d^3 + \frac{mn}{n+3}h_d^{\frac{1}{n}+3}.$$

式中: B_p 为桩的计算宽度; Q_0 和 M_0 分别为滑动面处抗滑桩的剪力和弯矩.

$$\begin{cases} Q_0 = (E_s - E'_s)L, \\ M_0 = (E_s - E'_s)Lh_0. \end{cases} \quad (11)$$

式中: L 为桩间距; h_0 为滑坡推力作用点至滑动面的距离; E_s 为作用在桩上的滑坡推力的水平分量; E'_s 为桩前抗滑力的水平分量.

抗滑桩设桩处滑坡推力 E 通常以外荷载的形式作用于抗滑桩,其大小是确定嵌固深度的重要因素,采用传递系数法计算. 由传递系数法原理,假设设桩处在第 i 条块处,则作用在桩上的滑坡推力为

$$E_i = W_i \sin \alpha_i - W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_3 - c_3 l_i + \psi_i E_{i-1}. \quad (12)$$

式中: ψ_i 为传递系数, $\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi$; W_i 为第 i 条块的自重, $W_i = \gamma_i V_i$; c_3 和 φ_3 分别为滑动面处土体粘聚力和内摩擦角,采用试验值或经验数据,也可以通过反算确定; α_{i-1} 和 α_i 分别为第 $i-1$ 和第 i 块滑动面倾角.

由式(12)可知,在滑动面已知的情况下,滑坡推力大小与滑体重量 γ_i , 内摩擦角 φ_3 和滑面处粘聚力 c_3 3 个参数相关.

抗滑桩桩前滑体抗力 E' 由极限平衡时滑坡推

力曲线和桩前被动土压力确定,选用两者中较小值。当桩前滑体可能滑走时,不应计其抗力。

因此,式(11)中滑坡推力和桩前抗力的水平分力分别为

$$\begin{cases} E_s = E \cos \theta, \\ E'_s = E' \cos \theta'. \end{cases} \quad (13)$$

式中: θ 和 θ' 分别为桩后和桩前滑块底边倾角。

1.2 桩侧地层横向容许应力的确定

当嵌固段地层为土层或风化破碎岩层时,桩侧地层横向容许应力满足摩尔-库伦强度准则。在滑动面以下 z 深度处土体单元,自重应力 σ_{zh} 为最小主应力,水平应力 σ_z 为最大主应力。由极限平衡时大小主应力之间的关系可以确定桩侧地层的横向容许应力值为:

$$\begin{aligned} [\sigma_z] &= \sigma_{zh} \tan^2(45^\circ + \varphi_2/2) + 2c_2 \tan(45^\circ + \varphi_2/2) = \\ &(\gamma_1 h_1 + \gamma_2 z) \tan^2(45^\circ + \varphi_2/2) + 2c_2 \tan(45^\circ + \varphi_2/2). \end{aligned} \quad (14)$$

1.3 极限状态功能函数的建立

刚性抗滑桩的嵌固深度与嵌固段地层的强度、滑坡推力、桩的刚度、间距及截面尺寸等因素有关,岩土体材料作为自然历史的产物,其物理力学性质存在较强的变异性。结合以上分析,将 $\gamma_1, \gamma_2, \varphi_2, c_2, m, \varphi_3$ 和 c_3 7 个土体参数作为嵌固深度可靠性分析的随机变量,而将桩的截面尺寸、间距以及土体抗力指数作为确定参量。

刚性抗滑桩的嵌固深度根据滑动面以下桩侧地层的承载力来确定。因此结合结构可靠性分析定义并由式(5)和(14)确定滑动面以下任意深度 z 处的极限状态功能函数为:

$$\begin{aligned} g_z(\gamma_1, \gamma_2, \varphi_2, c_2, m, \varphi_3, c_3) &= \\ [\sigma_z] - \sigma_z &= (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 z) \tan^2(45^\circ + \varphi_2/2) + \\ &2c_2 \tan(45^\circ + \varphi_2/2) - (A + mz^{\frac{1}{n}}) | z_0 - z | \varphi. \end{aligned} \quad (15)$$

式中 z_0, φ, A 的求解分别见式(10)和式(4)。

2 可靠度指标的求解

在常用的可靠度指标的计算方法中,JC法和蒙特卡罗法应用较多。JC法要求功能函数能用随机变量的函数形式表达出来,且能求出功能函数对各随机变量的偏导数。而蒙特卡罗法是通过随机模拟和

统计试验来求解结构可靠性的数值计算方法。用蒙特卡罗法评价结构可靠度,受问题条件限制的影响较小,其收敛性与极限状态方程的非线性、变量分布的非正态性无关,适应性强。

本文在求解滑坡推力时进行了迭代,极限状态功能函数呈现出高度非线性。鉴于极限状态方程的特殊性和蒙特卡罗法的优点,选用蒙特卡罗法求解可靠度指标更为合适。通过 MATLAB 编程先对影响可靠度的 7 个随机变量进行大量随机抽样,然后将这些抽样值一组一组代入极限状态功能函数,确定结构失效与否,最后根据 Bernoulli 大数定理可求得失效概率,进而求得可靠度指标。

3 基于双参数法的刚性抗滑桩嵌固深度可靠性设计

基于以上原理和模型,利用双参数法进行刚性抗滑桩嵌固深度可靠性设计的具体步骤如下:

- 1) 确定双参数法中参数 m 和 $1/n$ 的取值(方法见文献[9]),并确定评价抗滑桩嵌固深度稳定性的目标可靠度指标 β_0 (见文献[10])。
- 2) 已知土体参数的均值和变异系数,由上节式(15)的极限状态功能函数,采用蒙特卡罗法求解滑动面以下 z 深度处的可靠度指标 β_z 。
- 3) 假定嵌固深度为 h_d ,采用随机优化算法搜索该嵌固深度下最小可靠度指标为该嵌固深度下的可靠度指标,即 $\beta_{h_d} = \min(\beta_z), z \in [0, h_d]$ 。
- 4) 重复步骤 3),直至 β_{h_d} 达到目标可靠度指标 β_0 ,此时的嵌固深度 h_d 即为最佳嵌固深度。

4 工程实例

某已发生滑动的边坡经过削坡后采用抗滑桩治理,边坡及抗滑桩如图 3 所示。上层滑体主要组成物质为残坡积土堆积层, $\gamma_1 = 20 \text{ kN/m}^3, \varphi_1 = 12^\circ, c_1 = 20 \text{ kPa}$ 。下层滑床土体为碳质页岩, $\gamma_2 = 21 \text{ kN/m}^3, \varphi_2 = 23^\circ, c_2 = 120 \text{ kPa}$ 。滑带土体的摩擦角和粘聚力分别为 $\varphi_3 = 8^\circ, c_3 = 19 \text{ kPa}$ 。桩体附近滑体厚度为 10 m。由文献[10]确定土体抗力参数 $m = 2 \times 10^6, 1/n = 0.6$ 。

抗滑桩选取直径为 2 m,桩间距为 3 m 的圆截面钻孔灌注桩,桩的变形系数 $\alpha = 0.289 \text{ m}^{-1}$,初选

嵌固深度 $h_d = 7.5$ m, 则桩的计算深度 $\alpha h_d = 2.175 < 2.5$, 属于刚性桩. 根据文献[1]计算 $h_d = 7.5$ m, 经验算满足设计要求.

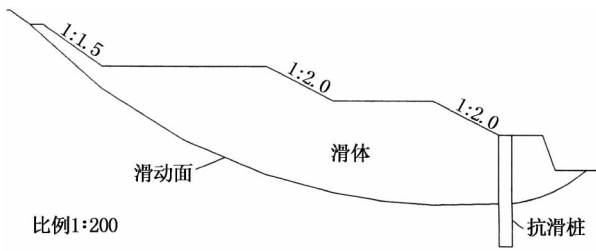


图3 边坡及抗滑桩示意图
Fig. 3 Schematic for slope and anti-slide piles

4.1 双参数法可靠性设计

假设各参数均服从正态分布, 均值和变异系数见表1. 为便于结果分析, 变异系数选择高、中、低3种, 分别为表1中的 δ_1, δ_2 和 δ_3 .

表1 各计算参数的均值和变异系数
Tab. 1 Means and variation coefficients of calculation parameters

变量	γ_1	γ_2	φ_2	c_2	m	φ_3	c_3
u	20	21	23	120	2e6	8	19
δ_1	0.020	0.020	0.10	0.20	0.15	0.10	0.20
δ_2	0.025	0.025	0.20	0.30	0.35	0.20	0.30
δ_3	0.030	0.030	0.40	0.50	0.5	0.40	0.50

根据任意深度 z 处的功能函数, 用蒙特卡罗法计算任意深度 z 处的可靠度指标并结合随机优化算法编程求解抗滑桩嵌固深度可靠度指标. 求得不同变异系数下抗滑桩嵌固深度可靠度指标与嵌固深度的关系如图4所示. 从图4的计算结果可知, 当 $h_d = 7.5$ m时, 在低中高3种变异系数下的可靠度指标分别为 $\beta_1 = 3.0564, \beta_2 = 1.7208, \beta_3 = 0.7348$, 可见参数的变异性对可靠度指标有显著的影响, 可靠度指标随着参数变异性的增大而减小. 若该边坡安全等级为二级, 由文献[10]延性破坏对应的目标可靠度指标 $\beta_0 = 2.7$. 由此可知, 当参数变异系数较低时, 按文献[1]中设计抗滑桩嵌固深度为7.5 m满足可靠度设计要求, 但是当参数变异系数为中变异系数或者高变异系数时, 将无法满足可靠度设计要求.

假定达到目标可靠度指标的嵌固深度为临界嵌固深度. 通过计算可以知道, 当变异系数较低的时候, 抗滑桩临界深度为6.85 m; 在中等变异系数和高变异系数下, 抗滑桩的临界深度分别为9.57 m,

17.05 m.

嵌固深度为9 m时不同变异系数下失效概率及可靠度指标随深度的变化规律如图5所示. 由图5可知, 可靠度指标随着深度增大呈现先减小后增大再减小的趋势, 失效概率反之. 在滑动面附近以及桩端处失效概率较大, 即滑动面附近及桩底处土体最容易破坏, 在本文案例中失效概率最大点在滑动面附近, 因此在采用抗滑桩进行边坡支护时要尤其注意滑动面附近土体强度稳定性. 抗滑桩在转动中心因未发生位移故失效概率为零, 可靠度指标为无穷大, 因此可靠度指标分布图中存在间断部分, 并且随着变异系数的减小间断部分会增多.

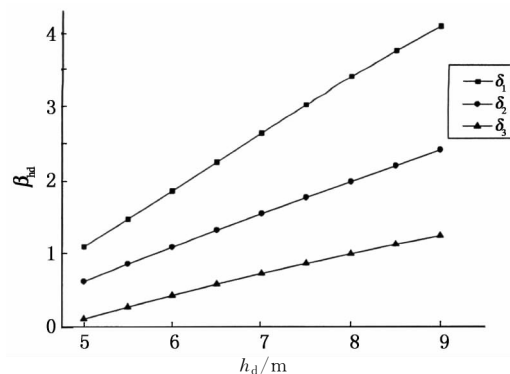


图4 不同变异系数下嵌固深度和可靠度指标的关系
Fig. 4 Relationship of embedded depth and reliability index with different variation coefficients

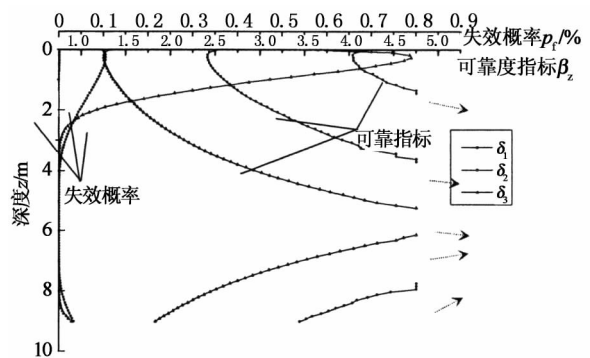


图5 不同变异系数下失效概率及可靠度指标随深度变化规律
Fig. 5 Failure probability and reliability index over depth with different variation coefficients

4.2 参数敏感性分析

取抗滑桩嵌固深度为7 m, 分别考虑上述7个参数对抗滑桩嵌固深度可靠度的影响. 假定某个参数的变异系数变化范围为0.05~0.4, 其他参数的变异系数取表1中的低变异系数 δ_1 一栏的取值, 计算结果如图6所示. 由图6可知, 各参数变异性的变

化对抗滑桩嵌固深度可靠度指标有显著影响,随着参数变异系数的增大,抗滑桩嵌固深度可靠度指标明显减小;随着变异系数的增大,滑体重量 γ_1 , 滑动面处内摩擦角及粘聚力 φ_3 和 c_3 对应曲线的可靠度指标减小速率较大;嵌固段地层的粘聚力和内摩擦角 φ_2 和 c_2 对抗滑桩嵌固深度可靠度指标的影响次之;而嵌固段土体重量 γ_2 和比例系数 m 对应的曲线的抗滑桩临界深度减小速率较小. 表明抗滑桩临界深度对参数 γ, φ_3 和 c_3 的敏感性比较强,对参数 φ_2 和 c_2 的敏感性次之,而对参数 γ_2 和 m 的敏感性比较弱.

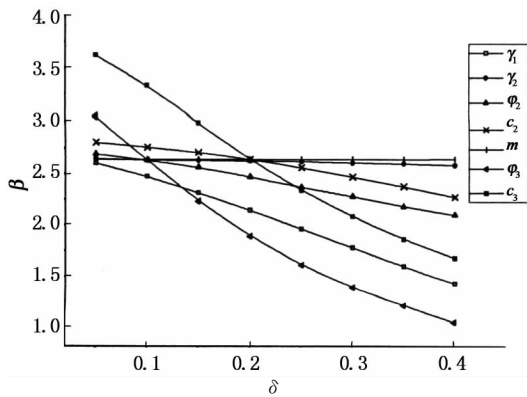


图 6 参数敏感性分析结果
Fig. 6 Analysis of parametric sensitivity

4.3 抗力指数对嵌固深度可靠度的影响分析

抗滑桩嵌固深度取 7 m,其他条件相同,不同抗力指数可靠度指标随深度的变化规律如图 7 和图 8 所示.

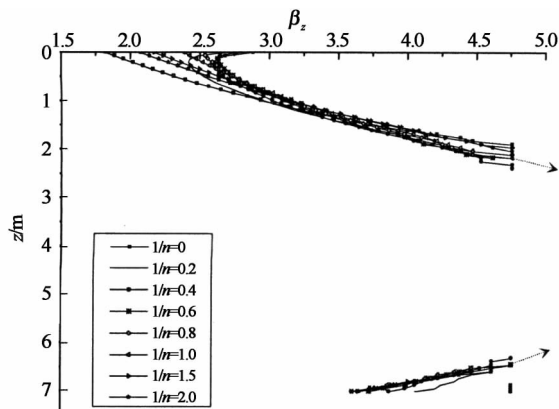


图 7 不同抗力指数可靠度指标随深度变化规律
Fig. 7 Reliability index over depth with different resistance indices

由图可知,抗力指数对抗滑桩嵌固深度可靠度指标有较大影响.当 $0 < 1/n < 1$ 时,随着 $1/n$ 增大,最小可靠度指标逐渐减小,并且最容易失效点在靠

近滑动面处.当 $1/n \geq 1$ (其中 $1/n = 1$ 即为 m 法)时,最小可靠度指标亦随着 $1/n$ 的增大而减小,但最容易破坏点在滑动面处.当 $1/n = 0$ (K 法)时可靠度指标最小.因此传统的 K 法和 m 法计算的抗滑桩嵌固深度可靠度指标均小于双参数法,偏于保守.

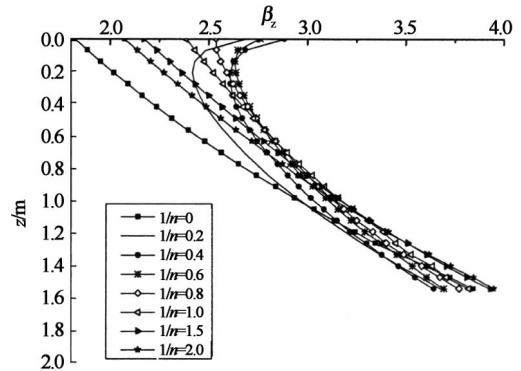


图 8 不同抗力指数可靠度指标随深度变化规律(细部图)
Fig. 8 Reliability index with different resistance indices (refined figure)

5 结 论

1) 基于双参数法建立了刚性抗滑桩嵌固深度可靠度分析模型,并搜索嵌固深度范围内最小可靠度指标作为该嵌固深度下的可靠度指标,然后以目标可靠度为控制指标指导刚性抗滑桩锚固深度的设计.

2) 工程实例表明,参数的变异性对刚性抗滑桩嵌固深度的确定有显著影响,因此在实际工程中应考虑参数的变异性,以目标可靠度指标为控制指标指导刚性抗滑桩嵌固深度的设计.

3) 刚性抗滑桩的嵌固深度对滑体重量及滑动面土体内摩擦角、粘聚力的敏感性较强,对嵌固段土体重量及地基系数的比例系数的敏感性较弱.因此在确定刚性抗滑桩嵌固深度时尤其要注意滑体重量及滑动面土体内摩擦角、粘聚力这 3 个影响抗滑桩滑坡推力参数的变异性.

4) 通过算例分析可知采用双参数法计算所得刚性抗滑桩嵌固深度可靠度指标大于 K 法和 m 法计算所得可靠度指标,在满足可靠度要求的基础上采用双参数法设计抗滑桩嵌固深度更为经济.

参考文献

[1] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁

- 道出版社,1983:32-33.
The Second Survey and Design Institute of Railway Ministry. Design and computation of anti-slide piles[M]. Beijing: China Railway Publishing House,1983:32-33. (In Chinese)
- [2] 蒋建国,邹银生,周绪红. 刚性抗滑桩锚固深度的简化计算[J]. 工程力学,2001(增刊):457-460.
JIANG Jian-guo, ZOU Yin-sheng, ZHOU Xu-hong. Simplified calculation on rigid anti-slide piles anchorage depth[J]. Engineering Mechanics,2001(S):457-460. (In Chinese)
- [3] 年延凯,栾茂田,郑德凤,等. 抗滑桩锚固深度的极限分析下限方法[J]. 水利学报,2007,38(6):743-748.
NIAN Ting-kai, LUAN Mao-tian, ZHENG De-feng, *et al.* Low-bound method for limit analysis of anchorage depth of sliding resist ant-piles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 743-748. (In Chinese)
- [4] 胡晓军,王建国. 基于强度折减法的刚性抗滑桩锚固深度确定[J]. 土木工程学报,2007,40(1):65-68.
HU Xiao-jun, WANG Jian-guo. Determination of the anchorage depth of rigid anti-piles based on strength reduction method[J]. China Civil Engineering Journal, 2007,40(1):65-68. (In Chinese)
- [5] 陈昌富,肖淑君. 基于加权残值法和统一强度理论抗滑桩合理锚固深度的确定方法[J]. 工业建筑,2009,39(1):85-89.
CHEN Chang-fu, XIAO Shu-jun. Determination method of the rational anchorage length of anti-slide piles based in unified strength theory and weighted residual method[J]. Industrial Construction, 2009,39(1):85-89. (In Chinese)
- [6] 张文居,赵其华,刘晶晶. 抗滑桩锚固深度的可靠性设计[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):53-55.
ZHANG Wen-ju, ZHAO Qi-hua, LIU Jing-jing. Reliability design of anchorage depth of friction piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(12):53-55. (In Chinese)
- [7] 胡晓军,吴延枝. 抗滑桩锚固深度的可靠度与参数敏感性[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(1):49-53.
HU Xiao-jun, WU Yan-zhi. The reliability analysis and parameter sensitivity analysis about anchorage depth of anti-slide piles[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(1): 49-53. (In Chinese)
- [8] 吴坤铭,王建国,谭晓慧. 基于可靠度分析确定刚性抗滑桩锚固深度[J]. 岩土工程学报,2012,34(2):237-242.
WU Kun-ming, WANG Jian-guo, TAN Xiao-hui. Determination of anchorage depth of rigid anti-slide piles based on reliability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 237-242. (In Chinese)
- [9] 吴恒立. 计算推力桩的综合刚度原理和双参数法[M]. 北京:人民交通出版社,2000:22-28.
WU Heng-li. Composite stiffness and bi-paramer method for computation of lateral loaded pile[M]. Beijing:China Communications Press, 2000:22-28. (Chinese)
- [10] GB 50068-2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
GB 50068-2001 Unified standard for reliability design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (In Chinese)