

考虑多失效模式的桩锚结构鲁棒性设计 及经济性优化

侯世伟¹,袁正明¹,陈昕¹,曹秀秀²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124)

摘要 目的 研究岩土力学参数的不确定性对桩锚支护体系的整体影响,探究经济性和鲁棒性共同作用的优化设计。方法 选取黄土地地区工程案例,考虑支护桩隆起破坏、支护桩倾覆破坏、整体稳定性破坏三类破坏形式,使用蒙特卡洛及点估计法嵌套的方式求出不同设计组合下的失效概率及标准差;同时考虑优化设计的经济性,筛选出桩锚支护结构体系的鲁棒性优化设计方案。结果 随着桩长增加,主控模式由隆起破坏向整体稳定性改变,不同的几何参数对结构鲁棒性影响不同,优化后可以获得同时满足经济性、鲁棒性及可靠度要求的最佳设计方案。结论 在桩锚结构设计中考虑经济性优化及多失效模式的鲁棒性设计是必要的。

关键词 桩锚支护;多失效模式;可靠度;鲁棒性;多目标优化

中图分类号 TU473

文献标志码 A

引用格式:侯世伟,袁正明,陈昕,等.考虑多失效模式的桩锚结构鲁棒性设计及经济性优化[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):123-130.(HOU Shiwei, YUAN Zhengming, CHEN Xin, et al. Robust design of pile anchor structure considering economic optimization and multiple failure modes[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):123-130.)

Robust Design of Pile Anchor Structure Considering Economic Optimization and Multiple Failure Modes

HOU Shiwei¹, YUAN Zhengming¹, CHEN Xin¹, CAO Xiuxiu²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124)

Abstract: The overall influence of the uncertainty of geotechnical parameters on the pile-anchor support system is studied to explore the joint role of economy and robustness. The failure probabilities and standard deviations of different design combinations are obtained by Monte Carlo

收稿日期:2022-10-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1100404);辽宁省教育厅基金面上项目(LJKZ0564);北京工业大学教育部重点实验室项目(2022B08)

作者简介:侯世伟(1982—),女,副教授,博士,主要从事土体渐进破坏模拟等方面研究。

with point estimate method, taking into the three failure forms of uplift failure, overturn failure and overall stability failure. The robustness optimization design of the pile-anchor support system is selected by considering the economy of the optimization design, by selecting engineering cases in loess areas. With the increase of pile length, the main control mode changes from uplift failure to overall stability failure, as the pile length increases, and different geometrical parameters have an impact on the structural robustness, the optimal design solution can be obtained after optimization to meet the requirements of economy, robustness and reliability. It is important to consider economic optimization and robust design for multiple failure modes in the design of pile anchor structures.

Key words: pile-anchor support; multiple failure modes; reliability; robust design; multi-objective optimization

在地下深基坑结构设计及施工中, 桩锚支护体系结构由于具有整体性强、分层开挖施工易于施工等优点在地下维护工程中应用广泛。但是由于对土层参数的不确定性缺乏考虑, 故而存在安全与效率方面的问题。

岩土工程设计方法目前可分为确定性设计、可靠度设计及鲁棒性设计。使用鲁棒性设计可以更加准确地反应支护结构对于岩土力学参数的敏感度。在岩土工程领域, C. H. Juan 等^[1-3]首次引入鲁棒性理论并应用于不同基坑工程中; 在桩土方面, 杜修力等^[4]通过考虑不同方向荷载共同作用下的4种桩基础失效模式, 研究多失效模式下不同几何参数的不同主控模式及鲁棒性关系。张峰等^[5]基于传统的地基承载力计算公式确定不确定因素并进行鲁棒性分析, 对比了不同的公式计算对鲁棒性设计方案的影响。在挡土墙方面, N. Ravichandran 等^[6]将墙顶最大挠度视为挡土墙的系统响应并将系统响应的标准差和成本相关联得到散点并使用帕累托前沿确定最佳设计方案。S. Khoshnevisan 等^[7]采用响应面法构建随机模型, 使用表格法筛选方案并进行优化分析, 研究了基坑支护结构的鲁棒性。

由于桩锚支护结构的失效模式复杂, 考虑结构的几何参数较多, 对于不同结构的几何参数对单一破坏模式及整体破坏模式影响的关联性尚不明确, 且在桩锚结构中同时考虑经济性和鲁棒性的研究较少, 故笔者研究

岩土力学参数对桩锚支护结构不同破坏模式失效概率及多失效模式共同作用下的鲁棒性设计方法; 通过黄土地区工程案例, 对不同几何参数的单失效模式及多失效模式的失效概率及失效概率标准差进行分析, 并通过经济性优化确定满足桩锚支护体系结构设计的各项参数最优解。

1 桩锚支护结构设计方法

1.1 可靠度设计方法

可靠度设计方法是以概率论为基础, 通过结构功能函数计算对比结构极限状态的一种设计方法, 结构功能函数为

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (1)$$

式中: $g(x)$ 为每种破坏模式下的结构功能函数; x_i 为结构函数中的变量 $i = 1, 2, \dots, n$ 。结构功能函数应符合式(2)要求:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{R(x)}{S(x)} - k \geq 0. \quad (2)$$

式中: $R(x)$ 为功能函数中的抗力, N ; $S(x)$ 为功能函数中的外力, N ; K 为结构保持安全状态的安全系数。当 $g(x_i) = 0$ 时代表结构处于即将破坏的状态。

通过功能函数计算相应失效概率 P_f 对结构整体的安全性能进行验证:

$$P_f = p(g(x_i) < 0) = \int_D f(x) dx. \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为计算土体不确定参数 x 的概率密度函数; D 为结构失效时的情况, 即 $D[(g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0)]$ 。

1.2 桩锚支护失效模式判别

根据我国《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120—2012)和《基坑工程手册》的设计要求,桩锚支护体系需要同时满足因施工地点的土体强度不足而造成支护系统的塌陷或倾覆,及因支护结构的强度、刚度或稳定性不足而导致的支护系统的整体破坏。因此,笔者考虑三种失效模式:倾覆破坏模式、隆起破坏模式和整体稳定性。

1.2.1 倾覆破坏模式

对于倾覆破坏模式,桩锚支护结构的抗倾覆稳定性验算公式为

$$K_e = \frac{E_{pk}z_p + Gz_G}{E_{ak}z_a} \quad (4)$$

式中: K_e 为结构的抗倾覆安全系数,对于桩锚组合支护结构安全等级其对应的 K_e 不应小于1.25; E_{pk} 为桩锚结构内侧被动土压力标准值,kN; z_p 为桩锚支护内侧被动土压力的合力作用点到支点的距离,m; E_{ak} 为桩锚支护外侧主动土压力标准值,kN; z_a 为桩锚支护外侧主动土压力合力作用点到支点的距离,m; G 为基坑外侧上方的附加荷载,kN; z_G 为基坑附加荷载的作用点到支点的距离,m。

1.2.2 隆起破坏模式

对于隆起破坏模式,桩锚支护结构的抗隆起稳定性验算公式为

$$K_s = \frac{\gamma_{m2}DN_q + cN_c}{\gamma_{m1}(H+D) + q} \quad (5)$$

式中: K_s 为支护墙底地基承载力安全系数,对于桩锚组合支护结构安全等级其对应的 K_s 不应小于1.8; γ_{m1} 为地面到支护桩底之间土层的天然重力密度加权平均值,kN/m³; γ_{m2} 为开挖面到支护桩底之间土层的天然重力密度加权平均值,kN/m³; q 为地面荷载,kN; c 为支护桩底部所对应的土层的黏聚力,kPa; H 为基坑开挖深度,m; D 为支护桩入土深度,m。

1.2.3 整体稳定性

对于桩锚的整体稳定性,采用瑞典圆弧

法将桩锚支护结构单侧设定为平面问题,假定滑裂面为圆弧,以划弧圆心作为矩心。采用条分法进行计算,使用圆弧搜索法搜索出最危险圆弧,并在最危险圆弧条件下计算出其整体性安全系数,其计算公式见式(6)。圆弧条分法及搜索示意如图1所示。

$$K_{ij} = \frac{M_R}{M_s} \quad (6)$$

式中: K_{ij} 为整体稳定性的抗力分项系数,对于桩锚组合支护结构安全等级其对应的 K_{ij} 不应小于1.3; M_R 为危险滑动面上的总抗力标准值,kN·m; M_s 为危险滑动面上的总滑动力矩设计值,kN·m。

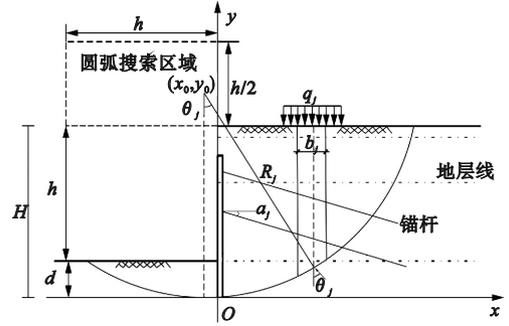


图1 桩锚支护圆弧条分法及搜索示意图

Fig.1 The circular arc strip division and search schematic diagram of pile anchor support
总滑动力矩的计算公式为

$$M_s = \left[\sum_{i=1}^n (qb_i + W_i) \sin\theta_i \right] R \quad (7)$$

式中: b_i 为条分法所分条宽,m; W_i 为所分条的土压力提供的力矩,kN·m; θ_i 为分条处于滑动面上交点的切角; R 为搜索法滑动面的半径,m。结构整体稳定性抗滑力矩为

$$M_R = \left[\sum_{i=1}^n c_i l_i + \sum_{i=1}^n (qb_i + W_i) \cos\theta_i \tan\varphi_i \right] R + M_{TR} \quad (8)$$

式中: c_i 、 l_i 为各土层的重力密度和厚度; φ_i 为各土层的内摩擦角,(°); M_{TR} 为锚索产生的抗滑力矩,其计算公式为

$$M_{TR} = \sum_{j=1}^m T_j [\cos(\alpha_j + \theta_j) + \sin(\alpha_j + \theta_j) \tan\varphi_j] R / S_{\alpha_j} \quad (9)$$

式中: T_j 为第 j 根锚索在土体中的极限抗拔力, kN; m 为锚索的排数; α_j 为第 j 根锚索倾角, ($^\circ$); θ_j 为分条处于滑动面上交点的切角, ($^\circ$); S_{xj} 为第 j 排锚索的水平间距, m。

2 鲁棒性设计方法及流程

2.1 鲁棒性设计方法

鲁棒性设计方法以可靠度设计为基础, 旨在研究桩锚支护体系中的土体不确定因素变异性对整体结构的影响, 进而提高支护体系的安全性和经济性^[8-12]。笔者采用点估计法并且嵌套蒙特卡洛的随机算法来进行桩锚支护结构体系可靠度及鲁棒性分析。在满足常规目标可靠性要求的情况下, 通过最小化失效概率的标准差来实现鲁棒性。采用七点估计法, 利用 Rosenblatt 变换使任意分布的无关点转化为标准正态分布的七个估计点 $x_j (j=1, 2, \dots, 7)$, 得出其均值 μ_x 和第 k 阶中心距 M_{kx} , 并满足式(10)要求。

$$\sum_{j=1}^7 P_j (x_j - \mu_x)^k = M_{kx} \quad (10)$$

其中七个点的不同点位及权重 P_j 如表 1 所示。

表 1 七点估计法各点位置与权重

Table 1 The locations and weights of the points in the 7 points estimate method

点号	位置 u_j	权重 P_j
1	0	0.457 142
2,3	1.154 405	0.241 233
4,5	2.366 759	0.030 757
6,7	3.750 438	0.000 548

2.1 鲁棒性运行流程

桩锚结构在多失效模式下的多目标优化的鲁棒性设计流程如下:

表 2 桩锚结构参数取值设计

Table 2 The design parameters of pile-anchor structure

桩长/m	锚索水平倾角/($^\circ$)	水平间距/m	锚索直径/m
17.5, 17.7, ..., 19.5	10, 15, 20	1.2, 1.6, 2.0	0.1, 0.15, 0.2

Step. 1 确定桩锚支护设计中的几何参数(锚杆直径、锚杆角度、桩长度、锚杆水平间距), 确定随机参数中土体参数(内摩擦角及黏聚力)的概率分布形式, 并根据分布性质产生随机变量的抽样值 $x(k)$ 。

Step. 2 计算每组设计在每个失效模式下的失效概率, 当 $g(x(k)) > 0$ 时, 判断为单失效模式下未失效, 当且仅当所有的 $g(x(k))$ 均满足条件时, 对于总体的多失效模式 $G(x(k)) > 0$ 。

Step. 3 将不同设计各个失效模式的失效概率进行统计, 将单失效模式的失效概率计为 P_i , 筛选规范中的失效概率标准线加以对比并且进行可靠度分析。

Step. 4 使用点估计法嵌套蒙特卡洛的方法, 获得不同失效模式及多失效模式的失效概率均值及标准差, 并进行鲁棒性分析。

Step. 5 计算不同设计参数下的经济成本, 将其带入到遗传优化方法 NSGA-II 中, 进行排序并筛选出第一序列的设计组合, 建立帕累托前沿并寻找关节点, 关节点即为最佳方案点。

3 案例设计分析

3.1 单失效模式可靠度分析

选取黄土地区某工程, 并对其具体数据进行计算。支护桩采用 C30 混凝土钻孔灌注桩, 其桩径为 800 mm。排桩上设置 3 道锚索, 长度依次为 15 m、18 m、16 m, 孔径 300 mm, 其垂直间距分别为 5 m、3.5 m、3.5 m。其中设计参数包括桩长、锚索的水平倾角(每道锚索角度相同)、桩之间的水平间距以及锚索的直径, 基于工程设计经验, 桩锚结构设计参数范围见表 2。

各个土层中的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 设计为桩锚支护结构所考虑的不确定因素, 不确定因素均设计为正态分布, 根据文献[8]可以得到土体的具体参数和变异系数。其中

黏聚力和内摩擦角的变异系数的取值范围分别为 $0 \sim 0.4$ 和 $0.15 \sim 0.25$, 变异系数标准差分别为 $0.126\ 667$ 和 $0.056\ 667$, 土层的具体参数参见表 3。

表 3 桩锚结构土层参数

Table 3 The soil parameters of pile-anchor structure

编号	土层名称	平均厚度/m	重力密度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力均值/kPa	内摩擦角均值/($^\circ$)
1	杂填土	0.5	15	4.6	0.51	10	10
2	湿陷性黄土	5.0	17.4	7.8	0.31	30	24
3	中砂	7.5	20	14.8	0.24	0	37
4	粗砂	18	20	15.2	0.23	0	38

将桩锚结构失效模式判别中的式(4)、式(5)、式(6)作为设计方案的功能函数, 采用蒙特卡洛方法(样本总数 $N = 10^7$)对黏聚力和内摩擦角进行选取, 对不同土体和不同组合设计的失效模式安全系数进行对比, 进行可靠度计算^[13-14]。在《建筑结构可靠度设计统一标准》中结构对应的可靠度计算出界限失效概率 $P_f = 0.003\ 5$, 小于此失效概率则说明此基于可靠度设计方案可行。

支护桩长度的增加会降低结构的整体性能力并且显著升高结构的失效概率。支护桩水平间距的增加会提升结构的整体性能力, 锚索水平倾角的增大会降低结构的整体性能力, 锚杆直径的增加会提升桩锚结构的整体性能力。而且锚杆直径对结构整体能力的影响比支护桩水平间距和锚索直径的影响更强。

在单失效模式下, 锚索水平倾角为 15° , 水平间距为 $1.6\ \text{m}$, 锚索直径为 $0.15\ \text{m}$ 的情况下, 桩锚基础抗倾覆及抗隆起失效模式和桩长变化的关系如图 2 所示。由图 2 可知, 支护桩长度的增加对于桩锚结构抗倾覆破坏模式的影响效果微弱, 但可以有效提高结构抗隆起破坏的能力。在不同锚索水平倾角、桩之间水平间距以及锚索直径的情况下, 桩锚基础整体稳定失效模式失效概率和桩长变化的关系如图 3 所示。由图 3 可知,

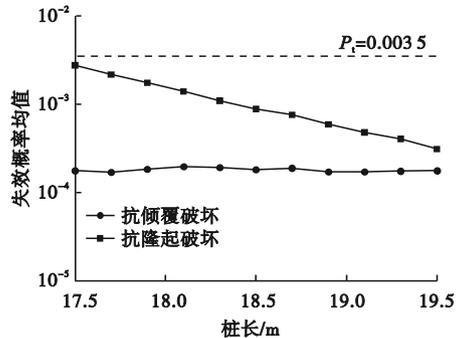


图 2 桩锚支护抗隆起及抗倾覆破坏模式失效概率
Fig. 2 The failure probability of anti-uplift and anti-overturning failure mode of pile anchor supporting

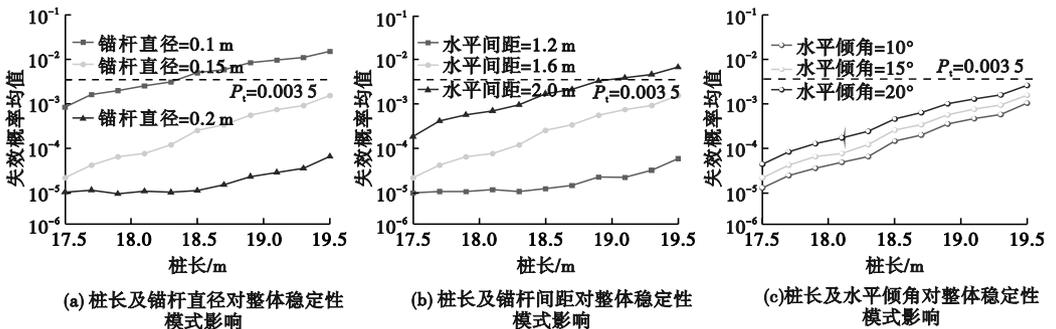


图 3 桩锚支护整体稳定性破坏模式失效概率

Fig. 3 The failure probability of global stability failure mode of pile anchor supporting

对比图2、图3可知,所选择的设计组合全部满足抗倾覆破坏模式和抗隆起破坏模式的可靠度要求,即所有的组合的失效概率都位于标准线($P_i=0.0035$)下方,但是对于整体稳定性破坏要求来说,只有部分设计与要求符合。同时,因为支护桩长度的增加会降低结构的整体性能力,然而增加支护桩长度可以有效提高结构的抗隆起能力,不同的设计组合三种失效模式的失效概率不同,且影响因素各不相同,故需要对不同设计进行多失效模式分析。

3.2 多失效模式可靠度分析及鲁棒性分析

同可靠度计算流程,使用点估计法嵌套蒙特卡洛的方法,计算得出不同设计下,在各个失效模式及多失效模式下结构的失效概率均值及标准差^[15-16]。当锚索水平倾角为 15° 、水平间距为1.6 m、锚索直径为0.15 m时,各个失效模式失效概率随着桩长变化的曲线如图4所示。由图4可知,桩锚结构每种设计下多失效模式的失效概率均大于所有单一失效模式的失效概率。当桩长较小时,考虑桩锚结构抗隆起失效模式的计算结果和多失效模式相似,即此阶段抗隆起模式为整个桩锚结构的主控模式。当桩长比较大时,多失效模式下的计算结果更加接近整体稳定失效模式的计算结果,说明此时桩锚结构的

主控模式为整体稳定性破坏模式。不同的主控模式改变了不同状态下多失效模式的失效概率。

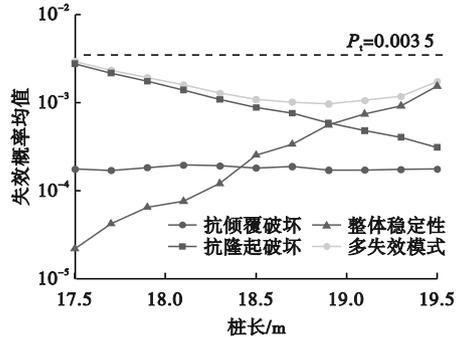


图4 不同失效模式桩锚支护结构失效概率对比

Fig. 4 The failure probability comparison of pile anchor supporting with different failure modes

在多失效模式下,不同的锚索水平倾角、桩之间水平间距以及锚索直径对桩锚基础的失效概率随着桩长的变化的曲线如图5所示。由图5可知,锚杆直径的增大使桩锚支护结构多失效模式的失效概率减小,整体结构更加稳固。支护桩水平间距的增大和锚杆水平倾角的增大则使失效概率增大导致结构不稳。锚杆直径的变化对多失效模式失效概率的影响较大,水平间距对多失效模式失效概率的影响大,锚杆直径、锚杆水平倾角对多失效模式失效概率的影响较小。

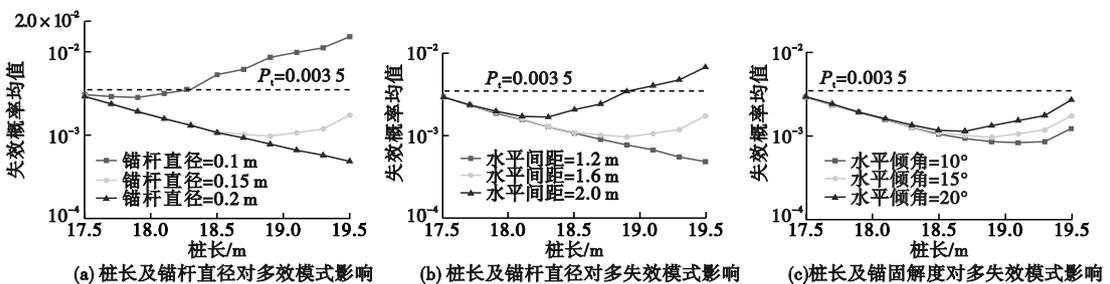


图5 多失效模式下桩锚支护结构失效概率均值对比

Fig. 5 The comparison of mean failure probability of pile anchor supporting with multiple failure modes

在考虑内摩擦角及黏聚力的变异系数影响下,用桩锚支护结构失效概率标准差 $\sigma(P_i)$ 来反映结构的鲁棒性水平。其中, $\sigma(P_i)$ 越小说明结构的鲁棒性越好,反之结

构的鲁棒性越差。筛选出可靠度设计可行方案条件下,支护桩桩长变化对各模式下失效概率标准差的影响情况如图6所示。由图6可知,增加支护桩的桩长可降低抗倾覆及抗

隆起破坏模式的失效概率标准差,且桩长的变化对抗隆起破坏模式的影响较大,但支护桩桩长的增加会降低整体稳定性的鲁棒性而且受桩长的影响比其他两种破坏模式的影响更大。因为支护结构尺寸不同,其对应失效概率标准差不同,故在考虑鲁棒性影响时需要同时考虑三类破坏模式的影响。

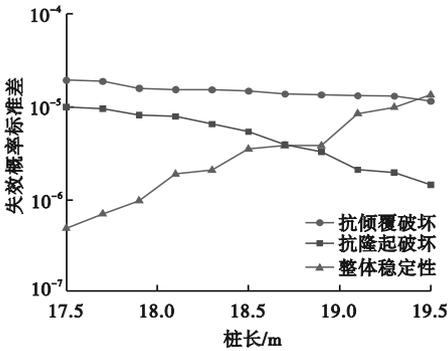


图6 桩锚基础体系失效概率标准差

Fig. 6 The standard deviation of failure probability of pile anchor supporting system

3.3 基于多目标优化的桩锚结构最优设计

多目标优化是通过优化算法将所有设计方案进行排序并根据设计目标筛选出最优的一组^[17]。如果这个设计拥有最大成本,那么这个设计也需要具有最大的鲁棒性水平。用于桩锚支护结构鲁棒性设计优化的成本为支护桩的成本 C_w 和锚固系统的成本 C_l 的总和,故作为经济指标的标准经济成本 C 计算如下:

$$C = C_w + C_l \quad (13)$$

以桩锚支护体系为例,设计目标为失效概率水平、失效概率标准差水平及结构的经济成本。笔者先筛选出满足结构可靠度即低于目标失效概率的方案,以失效概率标准差 $\sigma(P_i)$ 的大小作为鲁棒性标准,以 C 作为成本计算标准,采用 NSGA-II 的遗传优化算法对不同设计根据成本和失效概率标准差进行快速非支配排序,筛选选择拥挤度较大的设置为最佳组。选取最佳组设计中的最佳方案构成帕累托前沿,并分别对成本最小值和失

效概率最小值取界线相交形成乌托邦点,通过最小距离法取得关节点。图7为桩锚支护结构失效概率标准差与经济成本指标关系及帕累托前沿、乌托邦点和关节点的选取。由图7可知,经济成本的增加会降低桩锚支护结构多失效模式的失效概率标准差 $\sigma(P_i)$ 。其中,曲线上最优方案的点构成帕累托前沿,得到的关节点桩长为 18.7 m,锚索的水平倾角为 20° ,桩之间水平间距为 1.2 m 以及锚索直径为 0.15 m 的设计方案。通过验证,此关节点的失效概率均值 $\mu(P_i) = 0.0009 < 0.0035$,满足安全性要求;其失效概率标准差 $\sigma(P_i) = 8.22945 \times 10^{-6}$;经济成本 $C = 109481$ 元。

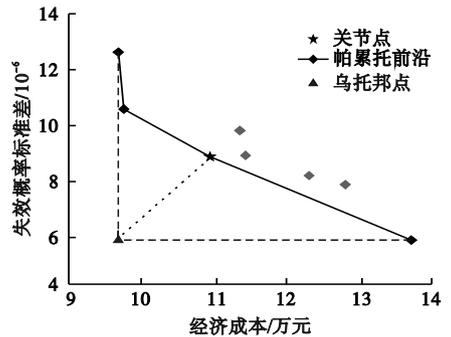


图7 桩锚支护结构失效概率标准差与经济成本指标

Fig. 7 The standard deviation of failure probability versus cost of pile anchor supporting system

4 结论

(1)多失效模式下,支护桩桩长、锚杆直径、水平间距及水平倾角对不同失效模式的影响不同;随着支护桩桩长的增加,桩锚支护结构体系的主控失效模式逐渐由抗隆起失效模式向整体稳定性模式转变,多失效模式考虑更加全面。

(2)增加支护桩的桩长可提高抗倾覆和抗隆起破坏模式的失效概率标准差,而且桩长的变化对抗隆起破坏模式的影响较大;增加支护桩桩长会降低整体稳定性的失效概率标准差,相较于其他两种破坏模式的影响更大。

(3)通过鲁棒性设计方法获得了帕累托前沿并找到了关节点,即本案例最佳设计方案:桩长为18.7 m,锚索水平倾角为 20° ,桩水平间距为1.2 m,锚索直径为0.15 m,经济成本为109 481元。

参考文献

- [1] JUANG C H, LIU Z F, ATAMTURKTUR S. Reliability-based robust geotechnical design of retaining walls [C]//Sound geotechnical research to practice. San Diego: ASCE, 2013: 514 - 524.
- [2] JUANG C H, WANG L, LIU Z, et al. Robust geotechnical design of drilled shafts in sand: new design perspective [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2013, 139(12): 2007 - 2019.
- [3] JUANG C H, WANG L, HSIEH H S, et al. Robust geotechnical design of braced excavations in clays [J]. Structural safety, 2014, 49: 37 - 44.
- [4] 杜修力,曹秀秀,钟紫蓝,等.考虑多失效模式的桩-土结构体系稳健性设计[J].中国安全科学学报,2020,30(6):23 - 30.
(DU Xiuli, CAO Xiuxiu, ZHONG Zilan, et al. Robust geotechnical design of soil-pile foundation system considering multiple failure modes [J]. China safety science journal, 2020, 30(6): 23 - 30.)
- [5] 张峰,周峰,王耀,等.基于鲁棒性的地基土承载力设计研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(6):1594 - 1602.
(ZHANG Feng, ZHOU Feng, WANG Yao, et al. Study of foundation soil bearing capacity design based on robustness [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018, 14(6): 1594 - 1602.)
- [6] RAVICHANDRAN N, WANG L, RAHBARI P, et al. Robust design optimization of retaining wall backfilled with shredded tire in the face of earthquake hazards [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2021, 80(2): 1351 - 1363.
- [7] KHOSHNEVISAN S, WANG L, JUANG C H. Simplified procedure for reliability-based robust geotechnical design of drilled shafts in clay using spreadsheet [J]. Georisk: assessment and management of risk for engineered systems and geohazards, 2016, 10(2): 121 - 134.
- [8] 王佩.黄土地区深基坑桩锚支护结构稳定性可靠度分析[D].西安:西安科技大学,2020.
(WANG Pei. Reliability analysis for pile-anchor retaining structure stability of deep foundation pit in loess area [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.)
- [9] TAN X, SHEN M, JUANG C H, et al. Modified robust geotechnical design approach based on the sensitivity of reliability index [J]. Probabilistic engineering mechanics, 2020, 60: 103049.
- [10] WANG X Y, ZHANG P Y, DING H Y, et al. Experimental study on wide-shallow composite bucket foundation for offshore wind turbine under cyclic loading [J]. Marine georesources & geotechnology, 2019, 37(1): 1 - 13.
- [11] ZHOU X J, HUANG W X, LI J, et al. Robust geotechnical design for soil slopes considering uncertain parameters [J]. Mathematical problems in engineering, 2020, 2020: 5190580 (11).
- [12] 黄宏伟,龚文平,庄长贤,等.重力式挡土墙鲁棒性设计[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(3):377 - 385.
(HUANG Hongwei, GONG Wenping, ZHUANG Changxian, et al. Robustness design of gravity retaining wall [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2014, 42(3): 377 - 385.)
- [13] DODIGOVIĆ F, IVANDIĆ K, KOVAČEVIĆ M S, et al. Modified, reliability-based robust geotechnical design method, in accordance with Eurocode 7 [J]. Applied sciences, 2021, 11(18): 8423.
- [14] WANG Y, AU S K, KULHAWY F H. Expanded reliability-based design approach for drilled shafts [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2011, 137(2): 140 - 149.
- [15] 吴志轩.岩土工程稳定和变形问题中随机场方法的应用体系初探[D].北京:清华大学,2019.
(WU Zhixuan. Preliminary study on application system of random field method in geotechnical engineering stability and deformation problems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.)
- [16] 陈昌富,成晓炜.锚杆多种失效模式与双滑块边坡锚固系统可靠性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(3):1 - 7.
(CHEN Changfu, CHENG Xiaowei. Reliability analysis of anchorage system considering multiple failure modes of bolts of bi-block slide [J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2010, 21(3): 1 - 7.)
- [17] 卜康正,赵勇,郑先昌.基于NSGA2遗传算法的地铁隧道上方基坑工程优化设计[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):459 - 467.
(BU Kangzheng, ZHAO Yong, ZHENG Xianchang. Optimization design for foundation pit above metro tunnel based on NSGA2 genetic algorithm [J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(2): 459 - 467.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)