



结合经济性优化的地下连续墙支护结构鲁棒性设计

楼恺俊, 俞 峰, 王子郡

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 在未考虑岩土力学参数的变异系数及变异系数标准差的情况下, 岩土工程确定性设计与可靠度设计存在一定的风险。为克服岩土力学参数的非确定性对地下连续墙支护结构设计的影响, 并优化设计方法的经济性, 针对隆起破坏、墙体倾覆破坏、支护结构侧移破坏三类破坏模式, 提出了适用于地下连续墙支护结构的鲁棒性设计方法。通过杭州地铁文新站工程案例, 分析各种破坏模式下几何参数与鲁棒性设计的关系, 并通过设计流程确定地下连续墙支护结构设计的几何参数最优解。研究结果表明: 增加地下连续墙深度、加固土厚度均可提高隆起破坏模式的鲁棒性; 增加地下连续墙深度可显著提高墙体倾覆破坏模式下的鲁棒性; 增加地下连续墙厚度、加固土厚度可显著提高支护侧移破坏模式下的鲁棒性。该设计方法可获得同时满足安全性、鲁棒性、经济性的几何参数最优解。

关键词: 地下连续墙; 支护结构; 鲁棒性设计; 可靠度设计; 帕累托前沿

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2021) 07-0534-09

Robustness design of underground diaphragm wall supporting structure combined with economic optimization

LOU Kaijun, YU Feng, WANG Zijun

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Without considering the coefficient of variation and the standard deviation of the COV of geomechanical parameters, there are certain risks in the deterministic design and reliability design of geotechnical projects. In order to overcome the influence of uncertainty of geomechanical parameters on the design of underground diaphragm wall supporting structure and optimize the economy of the design method, the author proposes a robust design method for the design of underground diaphragm wall supporting structure under three failure modes: uplift failure, wall overturn failure and sidesway failure of supporting structure. Through the engineering case of Wenxin Station, Hangzhou Metro, the relationship between geometric parameters under various failure modes and robustness design is analyzed, and the optimal solution of geometric parameters in the design of underground diaphragm wall supporting structure is determined through the design. The results show that increasing the depth of underground diaphragm wall and the thickness of reinforced soil can improve the robustness under uplift failure. Increasing the depth of underground diaphragm wall can significantly improve the robustness under wall overturn failure. Increasing the thickness of underground diaphragm wall and reinforced soil can significantly improve the robustness under sidesway failure of supporting structure. This design method can derive the optimal solution of geometric parameters satisfying security, robustness and economy simultaneously.

Key words: underground diaphragm wall; supporting structure; robustness design; reliability design; Pareto front

收稿日期: 2020-09-24 网络出版日期: 2021-03-03

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目 (LZ17E080002)

作者简介: 楼恺俊 (1995-), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事地下空间开发方面的研究。

通信作者: 俞 峰, E-mail: pokfulam@zstu.edu.cn

0 引言

地下连续墙支护结构是目前地下深基坑工程中的常用支护形式,由于其具有整体性好、刚度强等优点,在地下深基坑尤其在地铁设施的围护工程中应用较为广泛,但是也存在安全与效率方面的问题。根据是否考虑岩土力学参数的变异系数及变异系数标准差,岩土工程设计方法可分为确定性设计、可靠度设计及鲁棒性设计^[1-3]。确定性设计方法根据安全性指标进行几何参数设计,然而该方法未考虑岩土力学参数对支护系统整体功能的影响,在变形敏感地层如软黏土地区使用该方法,其不确定性会进一步放大^[1]。可靠度设计方法是根据岩土力学参数的统计规律,通过岩土力学参数变异系数,以概率理论进行极限状态计算所得的结构失效概率,对地下支护结构几何参数进行设计^[4],然而该方法未考虑岩土力学参数的变异系数标准差,且根据有限的岩土物理力学参数试验难以确定变异系数的准确范围,这使得设计的结构可靠度存在风险^[5],运用该方法设计地下连续墙支护结构难以真实反映实际的失效水平,因而极易降低整体支护系统的设计安全性^[6-8]。

确定性设计方法与可靠度设计方法无法准确反映整体支护系统对于岩土力学参数的敏感程度,鲁棒性设计则进一步考虑岩土力学参数的变异系数标准差,进而精确评估支护系统对于岩土力学参数的敏感度。很多学者对鲁棒性设计在各类地下岩土工程结构中的应用进行了研究。Juang等^[8]最先提出可将鲁棒性设计方法运用于岩土工程。之后赵密等^[3]以柱下独立基础结构为研究对象,提出了多失效模式共同作用下的柱下独立基础的鲁棒性设计。张峰等^[9]采用岩土鲁棒性设计方法,对地基土承载力的几何参数设计进行了研究。Gong等^[10]又在传统鲁棒性设计的基础上,以挡墙支护结构为研究对象,提出了基于梯度的岩土工程鲁棒性设计,丰富了鲁棒性设计的方法。对于地下连续墙支护结构,楼恺俊等^[11]针对地下连续墙,进行了支护结构稳定性设计。

由于地下连续墙支护结构的失效模式类型复杂,相关研究^[3,9-10]尚未考虑将鲁棒性设计完整引入地下连续墙支护结构设计,调整几何参数对单一失效模式的影响与对支护结构整体失效模式的影响的关联性尚不明确,前人也未结合经济性对地下连续墙支护结构进行鲁棒性分析。本文借鉴各类地下支

护结构的岩土鲁棒性设计的相关研究成果,以地下连续墙支护结构为研究对象,研究岩土力学参数对其支护结构各破坏模式失效概率及整体支护功能的影响,提出了多失效模式共同作用下的结合经济性优化的地下连续墙支护结构的鲁棒性设计方法。同时,根据实际工程案例,分析了几何参数与各类失效模式的鲁棒性之间的关系,并通过本文鲁棒性设计方法,确定地下连续墙支护结构的几何参数最优解。

1 地下连续墙支护结构设计方法

根据浙江省工程技术规范《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014)关于地下连续墙支护结构的行业标准,结合前人对地下连续墙支护结构的破坏模式分析可知,当该支护结构满足抗隆起稳定性和抗倾覆稳定性时,其整体稳定性必满足^[11]。隆起、墙体倾覆和支护结构侧移是地下连续墙支护结构的三种主要破坏模式^[12-14]。确定性设计是指根据确定的岩土力学参数,获得满足抗隆起、抗倾覆及支护结构侧移变形的安全性要求的几何参数组合。可靠度设计是指根据确定的岩土力学参数的变异系数,通过概率理论进行极限设计,确定满足上述三种破坏模式控制要求的几何参数组合。

1.1 确定性设计方法

1.1.1 隆起破坏模式

对于隆起破坏模式,根据《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014),基坑抗隆起稳定性验算公式为:

$$\frac{2 \sum (\partial A_i - \partial B_i) \tau_i}{(q_k + \gamma_3 h)} \geq K_r \quad (1)$$

其中: A_i 、 B_i 表示滑弧面与第 i 层土层的交点; ∂A_i 和 ∂B_i 为 A_i 、 B_i 与下层支点的连线与竖直方向的夹角; τ_i 为末道支撑底部至围护墙底的深度范围的第 i 层土层中间深度点的抗剪强度,kPa; q_k 为地面荷载,kPa; γ_3 为地面至开挖深度范围内的各土层天然重度的加权平均值,kN/m³; h 为地面至开挖面深度,m; K_r 为抗隆起安全性系数,根据规范要求取值。基坑抗隆起验算示意图如图1所示,图中的 A 、 B 分别表示滑弧面的起点和终点, O 表示围护墙与末道支撑的交点。

1.1.2 墙体倾覆破坏模式

对于墙体倾覆破坏模式,根据《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014),基坑抗倾覆稳定性验算公式为:

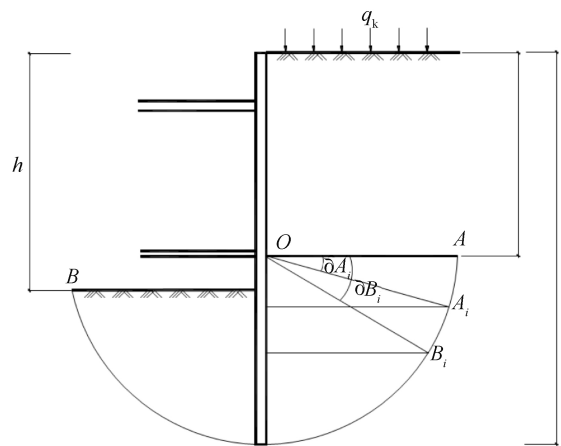


图1 基坑抗隆起验算示意

$$\frac{M_{RC}}{M_{OC}} \geq K_f \tag{2}$$

其中： M_{RC} 为抗倾覆力矩； M_{OC} 为倾覆力矩； K_f 为围护墙抗倾覆安全系数，根据规范要求取值。

1.1.3 支护结构侧移破坏模式

对于支护结构侧移破坏模式，采用平面弹性地基梁法进行分析^[15]，弹性地基梁的变形微分方程为：

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} - e_a(z) = 0, \quad 0 \leq z \leq h_n \tag{3}$$

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + mH(z - h_n)y - e_a(z) = 0, \quad z \geq h_n \tag{4}$$

其中： H 为围护结构长度， m 、 EI 为支护结构的抗弯刚度， N/m ； y 为支护结构侧移量， m ； z 为深度， m ； m 为地基土水平抗力比例系数， MN/m^4 ； $e_a(z)$ 为 z 深度下的主动土压力， N/m ； h_n 为第 n 步的开挖深度， m 。

1.2 可靠度设计方法

可靠度设计方法的结构功能函数可用式(5)表示：

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \tag{5}$$

其中： g 为结构功能函数； x_i 为表示破坏模式的变量。关于地下连续墙支护结构的功能函数包括隆起破坏模式的功能函数、墙体倾覆破坏模式的功能函数和支护结构侧移破坏模式的功能函数。

结构功能函数应符合如下要求，可用式(6)表示：

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = R(x) - S(x) \geq 0 \tag{6}$$

其中： $R(x)$ 为结构的抗力， N ； $S(x)$ 为结构的外力， N 。

通过功能函数计算相应失效概率 p_f ，可用式(7)表示：

$$p_f = p(g(x_i) < 0) = \int_D f(x) dx \tag{7}$$

其中： $f(x)$ 为概率密度函数； D 为失效域。

由于实际结构极限状态方程的复杂性、非线性等原因，可靠度一般以可靠度指标度量，根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)，可靠度指标采用一次二阶矩法或蒙特卡罗法进行计算。失效概率与可靠度指标间的关系可用式(8)表示：

$$p_f = \varphi(-\beta) \tag{8}$$

其中： φ 为标准正态分布函数， β 为可靠度指标。

2 设计方法及步骤

在实际工程中，岩土力学参数存在变异系数及变异系数标准差，确定性设计方法、可靠度设计方法无法准确估计岩土力学参数的影响程度，也无法在实际工程中合理的节约工程造价，因此本文提出结合经济性优化的鲁棒性设计方法以解决该问题。

2.1 结合经济性优化的鲁棒性设计

岩土力学参数变异系数的标准差会导致各破坏模式失效概率出现波动，并最终可能导致整体支护系统存在风险性。岩土力学参数统计值的不确定性表现为岩土力学参数变异系数、岩土力学参数变异系数的标准差。变异系数在工程试验中一般仅能获得大致范围^[16-17]，无法实验获得变异系数的标准差。变异系数的标准差 σ_{cov} 可依据 $3-\sigma$ 法计算获得^[17]，计算公式为：

$$\sigma_{cov} = \frac{H_{cov} - L_{cov}}{6} \tag{9}$$

其中： H_{cov} 为变异系数上限； L_{cov} 为变异系数下限。 $3-\sigma$ 法计算获得的变异系数标准差与实际土层的变异系数标准差之间的误差较小。

岩土鲁棒性设计通过改变几何参数来降低岩土力学参数及其标准差对支护结构的影响程度。即考虑岩土力学参数的变异系数标准差，通过改变几何参数使岩土力学参数的变异系数标准差对各破坏模式的失效概率的影响程度降到最低，使得地下连续墙支护结构具备更高的鲁棒性。

调节几何参数来降低岩土力学参数的变异系数标准差，其对支护系统整体功能的影响程度需要以指标衡量。参考前人研究^[3,8]，本文以失效概率标准差 μp_f 来表征体系对岩土力学参数的敏感性。另外，为了在实际工程中节约工程造价，将几何参数的经济成本作为经济性指标引入鲁棒性设计方法中，该方法得到的几何参数综合考虑了安全性、鲁棒性及经济性，对实际工程应用更有价值。

因此,本文提出的鲁棒性设计方法是基于失效概率标准差与经济成本两个优化目标,采用帕累托前沿非主导优化 NGSA-II 多目标优化算法^[18],对于两个目标分量,任意给定两组几何参数组合 J1、J2,若满足以下两个条件则称 J1 支配 J2,以构成帕累托前沿:对于两个目标,都有 J1 对应的目标值小于等于 J2 对应的目标值;存在某个目标满足 J1 对应的目标值小于 J2 对应的目标值。之后根据衍生的帕累托前沿找到关节点^[18-19],作为地下连续墙支护结构设计最优解。

2.2 具体步骤

本文提出的结合经济性优化的地下连续墙支护

结构鲁棒性设计,主要步骤分为以下五部分:a)对具体岩土工程进行参数分析,计算获得完整的相关岩土力学参数值;b)根据工程经验,确定几何参数的取值范围及对应所有取值参数组合;c)计算各几何参数组合对应各破坏模式下的失效概率,并根据《建筑基坑工程技术规程》要求的各失效模式的安全性指标对所有几何参数组合进行安全性校核,筛选满足要求的几何参数组合;d)计算满足要求的几何参数组合对应的两个具体目标:失效概率标准差及经济成本;e)通过帕累托前沿 NGSA-II 多目标优化算法,根据衍生的帕累托前沿找到关节点,作为最优解。优化后的鲁棒性设计流程图如图 2 所示。

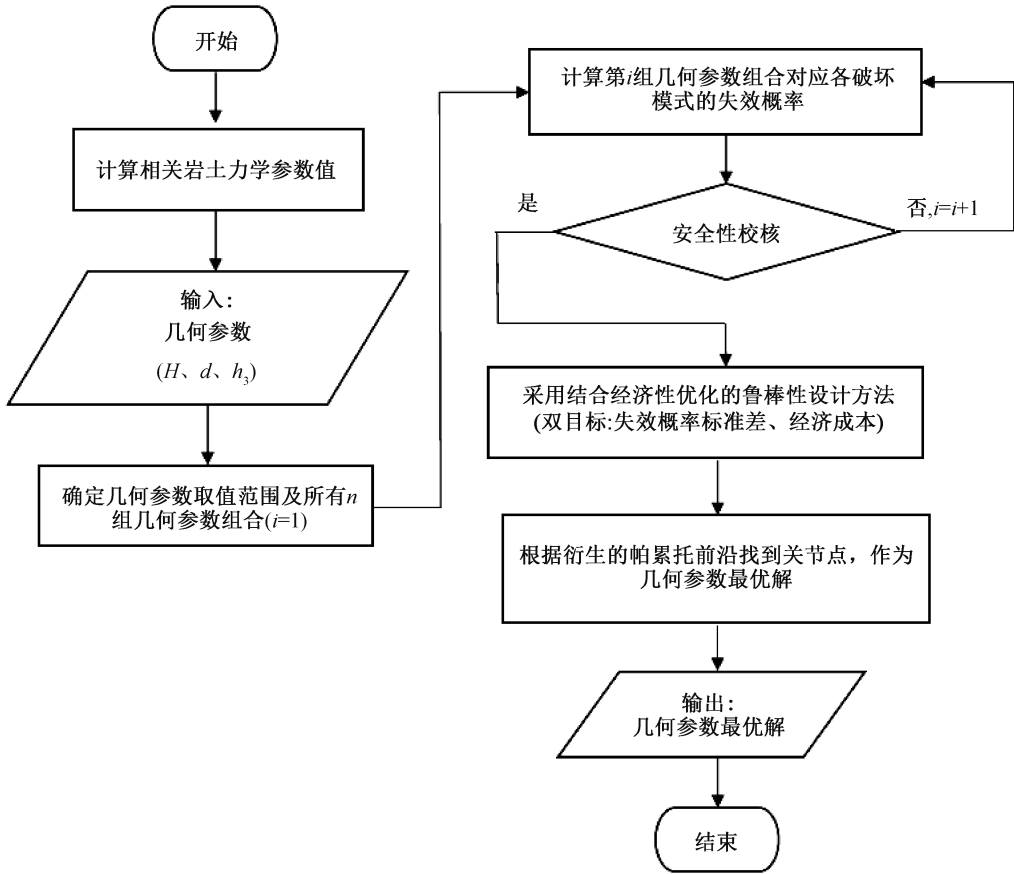


图 2 结合经济性优化的鲁棒性设计流程

3 案例分析

3.1 案例介绍

本文以杭州地铁文新路站工程为案例进行鲁棒性设计,将鲁棒性设计方法与确定性设计方法、可靠度设计方法进行比较,分析岩土力学参数的变异系数及其标准差对地下连续墙支护结构设计产生的影响;然后应用本文提出的结合经济性优化的鲁棒性设计方法,分析地下连续墙支护结构几何参数与破

坏模式的鲁棒性之间的相互关系,通过改变几何参数以减小岩土力学参数对破坏模式的影响,并获得该工程几何参数最优解,以验证本文方法的有效性。

本文对工程案例进行简化后分析。图 3 为所选典型剖面地下连续墙支护结构示意,其中:开挖深度 $h=17\text{ m}$;地面至末道支撑的距离 $h_1=14\text{ m}$;地面荷载 $q_k=20\text{ kPa}$; H 为地下连续墙深度; d 为地下连续墙厚度; h_3 为加固土厚度;墙后土体上部为均

质土,下部为砾砂。具体岩土力学参数如下(岩土力学参数包括:土体重度 γ ,土体黏聚力 c ,土体内摩擦角 φ):均质土的厚度为37 m,均质土的岩土参数 $\gamma_1=18\text{ kN/m}^3$, $c_1=10\text{ kPa}$, $\varphi_1=12^\circ$,砾砂的岩土参数 $\gamma_2=19\text{ kN/m}^3$, $c_2=5\text{ kPa}$, $\varphi_2=25^\circ$,加固土的岩土参数 $\gamma_3=20\text{ kN/m}^3$, $c_3=20\text{ kPa}$, $\varphi_3=20^\circ$ 。根据文献[20]的岩土力学参数的变异系数相关取值范围,本案例岩土力学参数取值如表1所示。

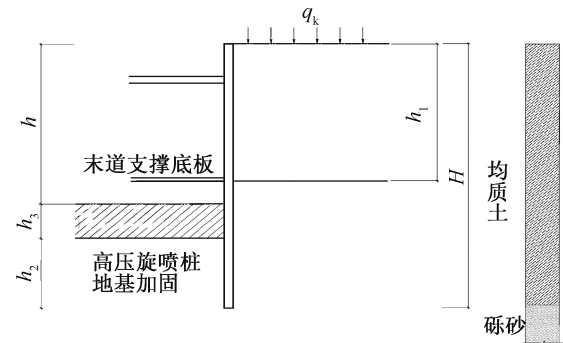


图3 杭州地铁文新路站工程案例示意

表1 地下连续墙支护结构岩土力学参数取值

物理量	分布类型	均值	变异系数取值范围/%	变异系数均值/%	变异系数标准差/%
γ_1	正态分布	18 kN/m ³	2~10	6.5	1.17
γ_2	正态分布	19 kN/m ³	2~10	6.5	1.17
γ_3	正态分布	20 kN/m ³	2~10	6.5	1.17
c_1	正态分布	10 kPa	10~30	15.0	3.33
c_2	正态分布	5 kPa	10~30	15.0	3.33
c_3	正态分布	20 kPa	10~30	15.0	3.33
φ_1	正态分布	12°	5~20	10.0	2.50
φ_2	正态分布	25°	5~20	10.0	2.50
φ_3	正态分布	20°	5~20	10.0	2.50

本工程案例中地下连续墙支护结构隆起破坏、地下连续墙支护结构墙体倾覆破坏和地下连续墙支护结构侧移破坏均为二级延性破坏。依据建筑结构可靠度设计统一标准^[17],三种失效模式对应的可靠度指标为3.2,相应的失效概率为0.00069。

对于隆起破坏模式,根据式(1),考虑本工程案例中加固土对隆起破坏模式的影响,对式(1)进行修正,有^[11]:

$$\frac{\sum (\partial A_i - \partial B_i) \tau_i}{q_k + \gamma_3 h - \Delta \gamma h_3} \geq K_r \tag{10}$$

其中: $\Delta \gamma$ 为 γ_3 与 γ_1 的差值。本工程案例为一级基坑,根据规范要求 K_r 不应小于1.6。

对于墙体倾覆破坏模式,根据式(2),并考虑本工程案例中加固土对墙体倾覆破坏模式的影响。本工程案例为一级基坑,根据规范要求 K_f 不应小于1.2。

对于支护结构侧移破坏模式,根据式(3)–(4),并考虑本工程案例中加固土对支护结构侧移破坏的影响。本案例为一级基坑,根据规范要求侧移位移应小于开挖深度的0.3%。

根据本文案例及三类破坏模式函数的相关参数,并综合考虑实际工程施工等因素,地下连续墙支护结构的几何参数为地下连续墙深度 H 、地下连续墙厚度 d 、高压旋喷桩桩长 h_3 。上述参数的取值离散,取值如表2所示。

表2 地下连续墙支护结构几何参数取值

基本设计参数	取值范围/m
H	{38,39,40,...,43,44,45}
d	{0.6,0.7,0.8,0.9,1}
h_3	{0,1,2,3,4,5}

地下连续墙的经济指标考虑的主要因素为地下连续墙深度以及厚度,其与经济指标的关系参考前人^[11,21]所述。根据实际工程,本文高压旋喷桩均价采用400元/m³。本工程案例对于地下连续墙及高压旋喷桩价格的经济成本 C 有:

$$C = I H d + 400 h_3 \tag{11}$$

式中: I 为地下连续墙经济指标。

3.2 变异系数及其标准差对设计的影响

为说明岩土力学参数的变异系数及变异系数标准差会导致各破坏模式的目标函数发生变化,其变化程度决定了后续研究的必要性。选取隆起破坏模式,经过试算,选取一组典型的地下连续墙支护结构几何参数 $\{H=40\text{ m}; d=0.8\text{ m}; h_3=3\text{ m}\}$,以第一层均质土的各岩土力学参数 γ_1, c_1, φ_1 作为随机变量,分别采用确定性设计方法、可靠度设计方法和鲁棒性设计方法,对三类破坏模式的失效概率进行求解计算。

可靠度设计方法和鲁棒性设计方法针对破坏模式的失效概率的求解,采用一次二阶矩法或蒙特卡罗法,计算结果如图4所示,图中虚线表示各破坏模式根据上文要求的安全性所不能超过的失效概率。

从图4可以看出:对于该组几何参数组合,运用确定性设计得到的三类破坏模式的失效概率均为0;当考虑岩土力学参数的变异系数为定值,运用可靠度设计,隆起破坏模式的失效概率已不满足指标要求;当考虑岩土力学参数的变异系数存在标准差,运用鲁棒性设计,隆起破坏模式和支护结构侧移破坏模式的失效概率均不满足指标要求。

运用一次二阶矩法和蒙特卡罗100万次抽样对失效概率进行求解,所得规律均相同,且考虑三类破

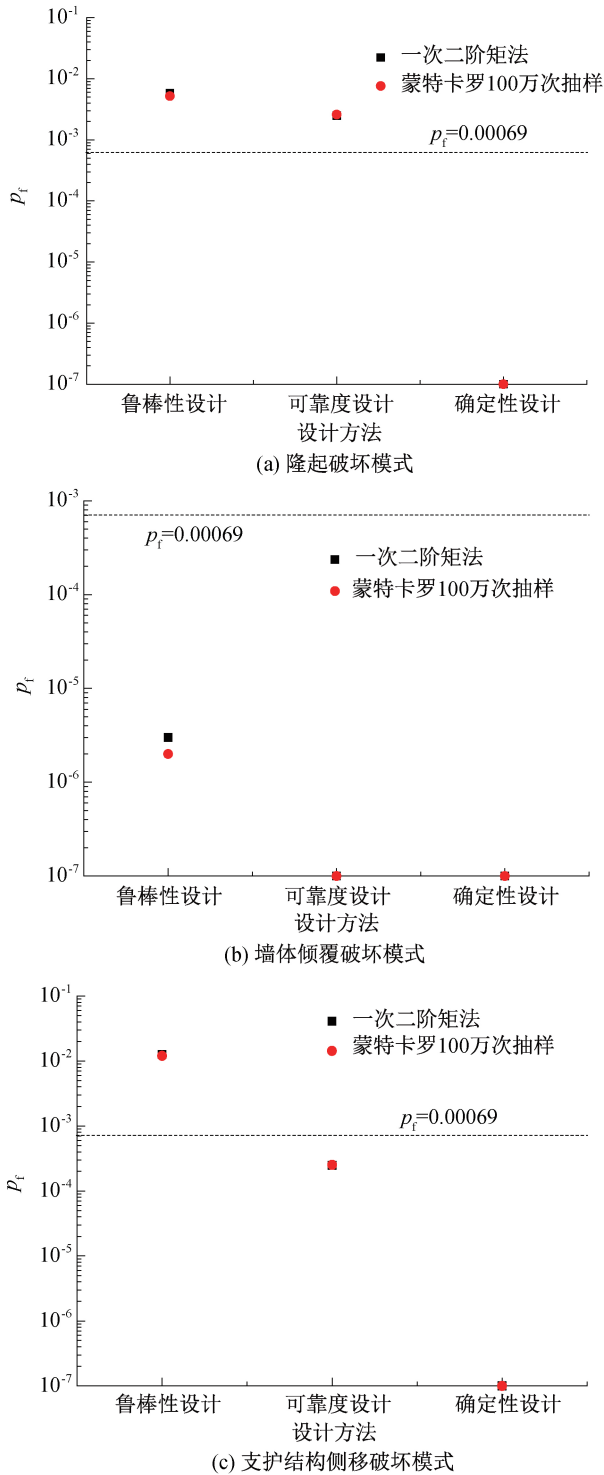


图 4 三类设计方法下的各破坏模式的变异系数及其标准差

破坏模式的函数的非线性相对都较强^[3],本文后续采用蒙特卡罗法进行失效概率的求解。岩土力学参数的变异系数及变异系数标准差均大大增加了各类破坏模式的失效概率,失效概率的变化比例从 10 倍量级至无穷倍量级,波动很大,且运用鲁棒性设计方法计算获得的失效概率最大。因此为更精准地获得满足安全性指标要求的几何参数,有必要对地下连续

墙支护结构进行鲁棒性设计。

3.3 地下连续墙支护结构鲁棒性设计

本文对地下连续墙支护结构进行鲁棒性设计,分析地下连续墙支护结构的几何参数与破坏模式的鲁棒性之间的相互关系。

根据三种破坏失效模式函数,针对表 2 中各几何参数的组合,运用鲁棒性设计方法求解各破坏模式下的失效概率,结果如图 5 所示,图中虚线表示各破坏模式根据上文要求的安全性所不能超过的失效概率。

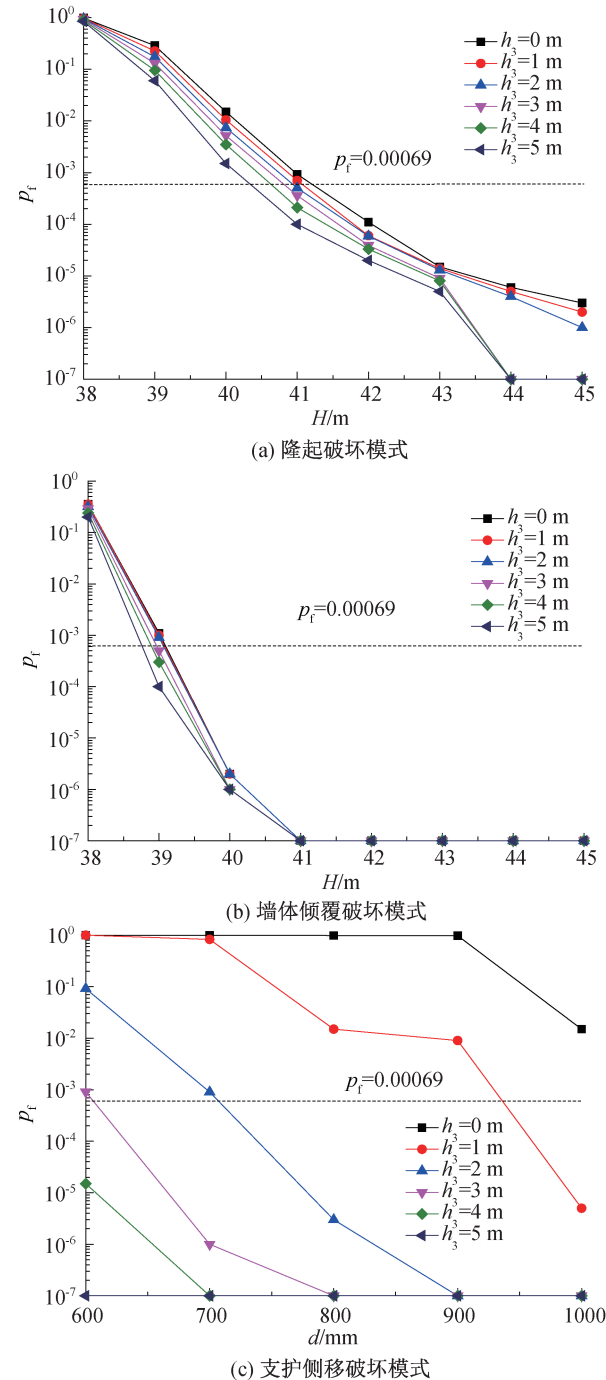


图 5 地下连续墙支护结构鲁棒性设计失效概率

图 5(a)表明,增加 H 和 h_3 均可降低隆起破坏的失效概率,且 H 对于失效概率的影响更显著;图 5(b)表明,增加 H 可迅速降低墙体倾覆破坏的失效概率, h_3 对于该破坏模式的失效概率的影响较小,且相较于隆起破坏,各结构参数组合的倾覆破坏的失效概率更易达到指标要求;图 5(c)表明,增加 d 和 h_3 均可降低支护侧移破坏的失效概率,且 h_3 对于失效概率的影响甚大。

图 5(a)—(c)表明,对于三类破坏模式,隆起破

坏模式和支护侧移破坏模式为该类地下连续墙支护结构的主控失效模式。

失效概率标准差反映了几何参数对于变异系数标准差的敏感性^[3,10]。失效概率标准差根据失效概率计算相应的方差后,对方差进行算术平方根获得。本文对各破坏模式下不同几何参数组合对应的失效概率进行标准差计算,其中满足图 5 失效概率指标的组合对应的失效概率标准差如图 6 所示。

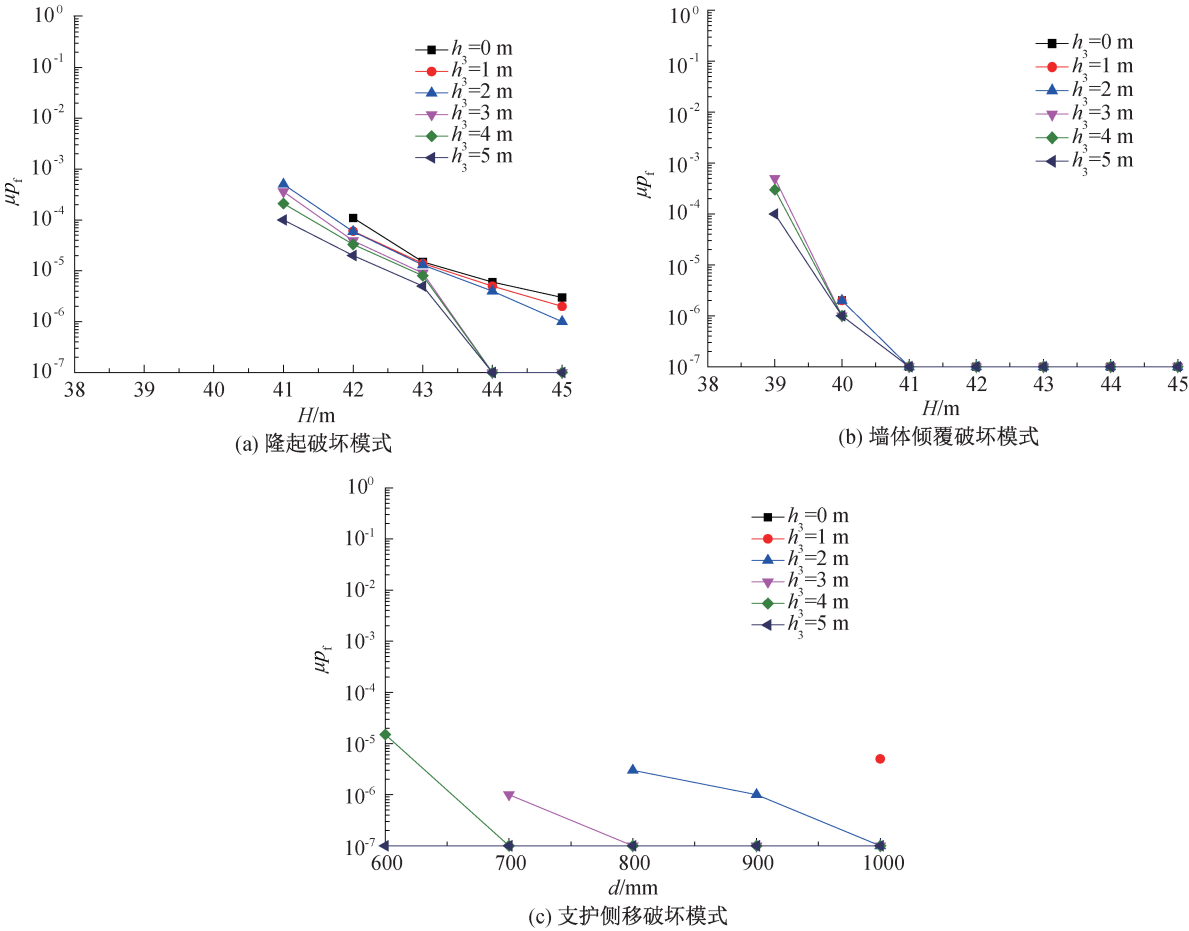


图 6 地下连续墙支护结构鲁棒性设计失效概率标准差

图 6(a)—(c)表明,对于满足要求的几何参数组合,增加各几何参数的尺寸,均可降低各破坏模式的失效概率标准差,提高支护结构的鲁棒性。其中隆起破坏与支护侧移破坏模式的失效概率标准差受几何参数的影响相较于墙体倾覆破坏更大。考虑几何参数最优解时,需同时考虑三类破坏模式的失效概率标准差。

3.4 地下连续墙支护结构设计最优解

针对图 2 所示的案例,根据本文提出的结合经济性优化的鲁棒性设计方法及式(9),以上文计算获得的失效概率标准差 μP_f 为鲁棒性指标,以地下连

续墙支护结构每延米经济造价成本为经济指标,对所有满足失效概率安全性指标的几何参数组合运用帕累托前沿 NGSA-II 多目标优化算法,以寻找设计最优解^[3]。本文共选取 240 组几何参数组合,其中 15 组符合失效概率安全性指标的要求,根据帕累托前沿寻找关节点,关节点为帕累托前沿面上同时满足两个目标的最优解,在变量空间中找不到其他的解优于它,将其作为地下连续墙支护结构设计最优解,结果如图 7 所示。

由图 7 所示,帕累托前沿上的设计解的失效概率标准差随着经济成本的增加而减小。其中设计 A

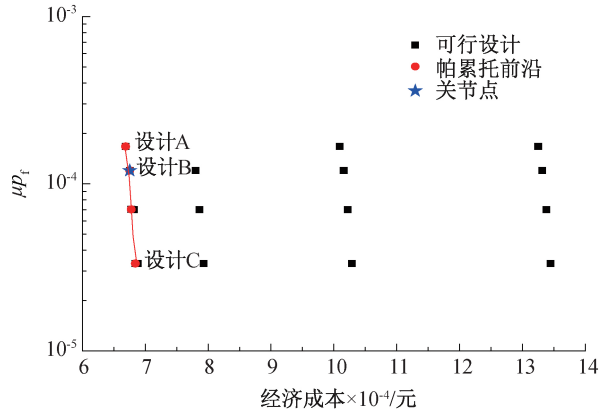


图7 地下连续墙支护结构鲁棒性指标与经济指标关系

($H=41\text{ m}$, $d=0.8\text{ m}$, $h_3=2\text{ m}$)为帕累托前沿上的经济最优解;设计C($H=41\text{ m}$, $d=0.6\text{ m}$, $h_3=5\text{ m}$)为帕累托前沿上的鲁棒性最优解;设计B($H=41\text{ m}$, $d=0.8\text{ m}$, $h_3=3\text{ m}$)为帕累托前沿上找到的关节点,相对于设计A及设计C这两个帕累托前沿点,设计B满足了鲁棒性与经济性的最优平衡,因此将设计B的几何参数组合作为本案例的地下连续墙支护结构设计最优解。

本工程案例实际地下连续墙支护结构几何参数取值为 $H=42\text{ m}$, $d=0.8\text{ m}$, $h_3=3\text{ m}$,与设计B的几何参数比较可以发现,实际工程对于支护结构的设计存在风险性或者过于保守。运用本文结合经济性优化的地下连续墙支护结构鲁棒性设计方法获得的地下连续墙支护结构的几何参数能够同时满足安全性、鲁棒性及经济性,这为未来的地下工程设计提供了一种更优的设计方法。

4 结论

本文提出了结合经济性优化的地下连续墙支护结构鲁棒性设计方法,对杭州地铁文新路站围护结构进行分析,得到了地下连续墙的几何参数与其隆起破坏模式、墙体倾覆破坏模式和支护结构侧移破坏模式的鲁棒性之间的关系,并将失效概率标准差及经济成本作为两个具体目标,应用帕累托前沿NGSA-II多目标优化算法,得到了同时满足地下连续墙支护结构的安全性、鲁棒性与经济性的几何参数最优解。所得主要结论有:

a)地下连续墙支护结构设计中的岩土力学参数的变异系数及变异系数标准差对设计结果的失效概率影响均很大,当未考虑其时均会造成失效概率偏低,支护系统偏于危险。

b)对于地下连续墙支护结构,抗隆起破坏模式和支护结构侧移破坏模式均为主控破坏模式,抗倾

覆破坏模式易达到安全要求,即前两类破坏模式对岩土力学参数的不确定性更敏感,通过几何参数的调整来减小岩土力学参数变异系数标准差的影响效果更明显。

c)增加地连墙深度和加固土厚度均可增加隆起破坏模式的鲁棒性;增加地下连续墙深度可显著增加墙体倾覆破坏模式的鲁棒性;增加地下连续墙厚度和加固土深度均可显著增加支护侧移破坏模式的鲁棒性。

结合经济性优化的地下连续墙支护结构鲁棒性设计方法不仅充分考虑岩土力学参数的变异系数及变异系数标准差对支护结构各破坏模式的影响,且考虑了工程的经济成本,使得该设计方法获得的几何参数最优解同时满足安全性、鲁棒性与经济性,为城市地下空间中地下连续墙支护结构的风险控制与绿色经济理念提供了一种可行的设计方法。

本文仅对岩土力学参数的非确定性对支护结构设计的影响进行了分析,后续研究将继续研究其他非确定参数包括模型误差、荷载误差、结构参数材料误差、施工误差等对支护系统的影响,并探索各非确定参数的相关取值方法。

参考文献:

- [1] Li B, Yao K, Hong Li Li H. Deterministic and reliability-based design of necessary support pressures for tunnel faces[J]. Geomechanics and Engineering., 2020, 22(3): 35-48.
- [2] 李俊松, 仇文革. 基于可靠度的基坑失稳风险评价与控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1136-1141.
- [3] 赵密, 张少华, 钟紫蓝, 等. 柱下独立基础稳健性设计与分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4506-4514.
- [4] 苏兴矩. 隧道初期支护可靠度稳定性动态评价研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 140-145.
- [5] 袁柳峰, 漆泰岳, 胡桑, 等. 地铁车站的有限元可靠度设计[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 111-117.
- [6] Napa-García G F, Beck A T, Celestino T B. Reliability analyses of underground openings with the point estimate method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 64: 154-163.
- [7] Sivakumar Babu G L, Basha B M. Optimum design of cantilever retaining walls using target reliability approach[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(4): 240-252.
- [8] Juang C H, Liu Z F, Atamturktur H S. Reliability-based robust geotechnical design of retaining walls

[C]// Sound Geotechnical Research to Practice. San Diego: ASCE, 2013: 514-524.

[9] 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.

[10] Gong W P, Khoshnevisan S, Juang C H. Gradient-based design robustness measure for robust geotechnical design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(11): 1331-1342.

[11] 楼恺俊, 俞峰, 夏唐代, 等. 黏土中地下连续墙支护结构的稳定性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(9): 1697-1705.

[12] 俞建霖, 龙岩, 夏霄, 等. 狭长型基坑工程坑底抗隆起稳定性分析[J]. 浙江大学学报, 2017, 51(11): 2165-2174.

[13] 张雪婵. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 15-72.

[14] 林军. 基于 CPTU 的软土空间变异性及基坑稳健性设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 27-145.

[15] 王强, 刘松玉, 童立元, 等. 多支撑地下连续墙动态开挖过程中 m 值反分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 352-358.

[16] Pan Q J, Dias D. Probabilistic evaluation of tunnel face stability in spatially random soils using sparse polynomial chaos expansion with global sensitivity analysis[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(6): 1415-1429.

[17] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 307.

[18] Deb K, Gupta S. Understanding knee points in bicriteria problems and their implications as preferred solution principles [J]. Engineering Optimization, 2011, 43(11): 1175-1204.

[19] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[20] Armaghani D J, Mirzaei F, Toghrol A, Shariati A. Indirect measure of shear strength parameters of fiber-reinforced sandy soil using laboratory tests and intelligent systems [J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 22(5): 397-414.

[21] 吴桑. 浅析上海地下明挖车站地下连续墙预算指标[J]. 科学技术创新, 2019(21): 88-90.

(责任编辑:康 锋)