

重力式挡土墙鲁棒性设计

黄宏伟^{1,2}, 龚文平^{1,2}, 庄长贤³, 张 洁^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 克莱姆森大学 土木工程系, 克莱姆森 29634)

摘要: 在现有结构可靠度设计理论的基础上提出了基于多目标优化方法和基于结构失效概率置信水平的 2 种岩土工程鲁棒性设计方法, 考虑了岩土力学参数统计特征不确定性对结构失效概率的影响. 结合某重力式挡土墙倾覆与滑移 2 种失效模式, 分别运用可靠度设计方法与鲁棒性设计方法进行了挡土墙基本几何尺寸的设计. 最后通过对 2 种设计方法的对比分析验证了岩土工程鲁棒性设计的合理性与重要性.

关键词: 重力式挡土墙; 鲁棒性设计; 可靠度设计; 确定性设计; 变异性

中图分类号: TU471.8

文献标志码: A

Robust Geotechnical Design of Gravity Retaining Wall

HUANG Hongwei^{1,2}, GONG Wenping^{1,2}, ZHUANG Chuanxian³, ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil Engineering, Clemson University, SC 29634, USA)

Abstract: A new design methodology, robust geotechnical design, was proposed to improve the design of gravity retaining wall. In which, the effect of uncertainty in statistics of soil parameters on the failure probability was investigated. Furthermore, two different robust design approaches based respectively upon the multi-objectives optimization and the confidence level of structural performance were introduced. To demonstrate the effectiveness and significance of the proposed robust design methodology, an illustrative example is followed. A comparative study was made of the design on the basis of the reliability-based design methodology and the proposed robust design methodology, and the significance of the proposed robust design methodology is presented through this example.

Key words: gravity retaining wall; robust design; reliability design; deterministic design; variability

重力式挡土墙具有结构简单、就地取材以及施工方便等优点, 是当今国内外最为常见的一种挡土结构, 广泛运用于铁路、公路及边坡治理等工程. 传统重力式挡土墙结构设计主要采用确定性设计方法, 难以有效考虑岩土力学参数不确定性对挡土结构安全性能的影响^[1-3]. 20 世纪 70 年代, 结构可靠度设计方法开始出现并逐步运用于重力式挡土墙结构设计中, 相对确定性设计方法, 可靠度设计方法可有效评价岩土力学参数变异性对结构安全与使用性能的影响^[4-5].

可靠度设计必须建立在岩土力学参数具有明确统计规律基础上, 基于确定性的参数统计规律计算结构失效概率, 进而指导设计方案选择以及具体参数确定. 然而, 受土体沉积历史、工程活动以及其他因素等影响, 岩土力学参数存在较强的变异性. 根据有限的工程勘察试验难以得到准确的岩土参数统计规律^[6]. 其中, 岩土力学参数的变异性(或标准差)通常被低估或高估^[7-8]. 因此, 基于可靠度理论的结构设计方法在重力式挡土墙设计中仍然难以真实反映结构安全性能或失效水平.

针对设计参数不确定性, 鲁棒性(robustness)可有效评价系统功能对设计参数变异的敏感性. 鲁棒性设计概念由 Taguchi 于 20 世纪 70 年代针对质量控制提出, 其后在机械制造、生态系统以及航空航天等领域得到了迅速推广与发展^[9-14]. Juang 等^[7-8]最早将其引入岩土工程, 提出了岩土工程鲁棒性设计方法, 充分考虑岩土力学参数统计特征(变异系数)不确定性对岩土工程安全与使用性能的影响.

收稿日期: 2013-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(51278381, 51161130523); 上海市优秀学术带头人计划(12XD1405100)

第一作者: 黄宏伟(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土及地下工程风险分析.

E-mail: huanghw@tongji.edu.cn

相对可靠度设计与确定性设计方法,鲁棒性设计可更加合理地反映岩土工程安全水平与使用性能。

本文基于 Juang 等^[7-8]提出的岩土工程鲁棒性设计方法研究了岩土力学参数变异系数的不确定性对重力式挡土墙结构安全性能(或失效概率)的影响。基于现有岩土工程可靠度设计理论,提出了基于多目标优化方法与基于结构失效概率置信水平的 2 种鲁棒性设计方法。结合某具体重力式挡土墙^[15],考虑岩土力学参数变异系数的不确定性,对可靠度设计与鲁棒性设计结果的失效概率均值、失效概率变异性以及经济性等方面进行了对比分析。

1 重力式挡土墙设计方法简要分析

传统重力式挡土墙设计方法主要为确定性设计和可靠度设计。墙体倾覆与墙体滑移为重力式挡土墙结构最主要的 2 种破坏模式^[16-17],虽然,整体稳定性破坏也为重力式挡土墙设计的主要验算内容,然而当前在可靠度分析中对其验算尚存在一定分歧。因此,本文主要针对墙体倾覆与墙体滑移 2 种破坏模式。

1.1 确定性设计方法

图 1 为我国建筑地基基础设计规范^[18]中典型重力式挡土墙结构示意图。图中, E_a 为墙后主动土压力; E_{ax} 与 E_{az} 分别为墙后主动土压力平行于墙底方向与垂直于墙底方向分力; W 为挡土墙墙体自重; W_x 与 W_z 分别为墙体自重平行于墙底方向与垂直于墙底方向分力; b 为挡土墙墙底尺寸; α_0 为挡土墙墙底与水平方向夹角; α 为挡土墙背与水平方向夹角; Z_f 为墙后主动土压力合力作用点距墙趾 O 垂直于墙底方向距离; x_f 为墙后主动土压力合力作用点

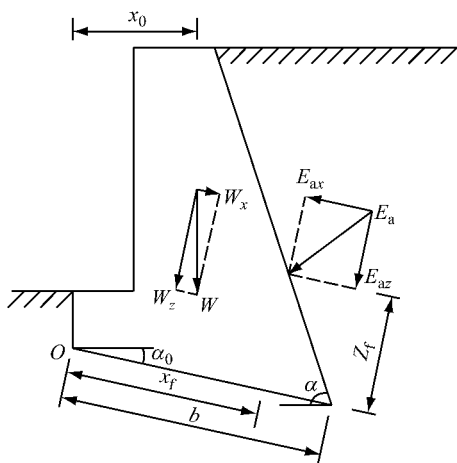


图 1 重力式挡土墙示意^[18]

Fig. 1 The diagram of gravity retaining wall^[18]

距墙趾 O 平行于墙底方向距离; x_0 为挡土墙重心距墙趾 O 水平距离。

确定性设计方法中各设计参数均假定为确定性,不存在变异性。基于确定性设计参数建立结构抗力与荷载效应之间关系,通过富余安全系数考虑实际工程中存在的诸多不确定性因素对结构安全水平与使用性能的不利影响。

假设墙底黏聚力与墙底摩擦系数分别为 c_a 与 μ ,根据图 1 所示可分别建立重力式挡土墙墙体抗倾覆与墙体抗滑移 2 种破坏模式的安全系数。

$$F_{s_1} = \frac{W \cdot x_0 + E_{az} \cdot x_f}{E_{ax} \cdot Z_f} \quad (1)$$

$$F_{s_2} = \frac{\mu \cdot (W_z + E_{az}) + b \cdot c_a}{E_{ax} - W_x} \quad (2)$$

式中: F_{s_1} 为挡土墙抗倾覆稳定安全系数; F_{s_2} 为挡土墙抗滑移稳定安全系数。

式(1)、式(2)中安全系数选择一般根据工程经验确定,显然安全系数的选取对结构设计结果影响重大,且难以真实反映不同工程中参数变异性大小对结构安全性能的影响程度,实际设计结果或偏保守或偏危险。据我国规范^[18-19], $F_{s_1} \geq 1.6$, $F_{s_2} \geq 1.3$ 。

1.2 可靠度设计方法

结构可靠度设计方法产生于 20 世纪 70 年代,随后在岩土工程中逐渐推广。可靠度设计需要首先定义结构功能函数,即结构某一性能超过某一状态就不能满足设计规定的某一项功能要求。

$$Z = Z(X) = R(X) - S(X), \quad \begin{cases} Z < 0 & \text{失效} \\ Z = 0 & \text{极限状态} \\ Z > 0 & \text{安全} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z 为结构功能函数; $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为随机向量,服从某确定的分布规律; $R(X)$ 与 $S(X)$ 分别为结构抗力函数与荷载效应函数。图 1 所示重力式挡土墙抗倾覆与抗滑移 2 种失效模式的结构功能函数 Z_1, Z_2 可分别定义为

$$Z_1 = (W x_0 + E_{az} x_f) - E_{ax} Z_f \quad (4)$$

$$Z_2 = [\mu (W_z + E_{az}) + b c_a] - (E_{ax} - W_x) \quad (5)$$

根据式(3)功能函数可计算相应的结构失效概率 P_f 。

$$P_f = P(Z < 0) = \int_D f(x) dx \quad (6)$$

式中: $f(x)$ 为随机向量 X 的联合概率密度函数; D 为结构失效域, $D = \{x | Z(x) < 0\}$; $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为随机向量。

由于 P_f 通常较小,可靠度设计中常根据可靠度指标 β 进行结构设计, β 与 P_f 的关系可表示为

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

实际工程结构功能函数复杂多样且设计参数较多,可靠度指标计算相对繁琐.为了方便实际工程应用,设计规范通常将其转化为与多安全系数相近的分项系数法^[20].

$$\gamma_1 S_1 + \gamma_2 S_2 + \cdots + \gamma_k S_k + \cdots + \gamma_{n_s} S_{n_s} \leq \frac{1}{\gamma_R} R \quad (8)$$

式中: γ_k 为荷载分项系数, $k=1,2,\dots,n_s$; S_k 为第 k 项荷载效应特征值; n_s 为荷载数; γ_R 为抗力分项系数; R 为抗力效应特征值.根据目标可靠度与各参数变异性确定,各国规范都给出了相应的结构可靠度设计分项系数推荐值.

取重力式挡土墙倾覆破坏为二级延性破坏,滑移破坏为三级延性破坏.根据《建筑结构可靠度设计统一标准》^[20]中目标可靠度指标规定,2种失效模式对应的目标可靠度指标分别为3.2和2.7,相应失效概率分别为0.000 69和0.003 50.

2 鲁棒性设计方法及步骤

相对确定性设计方法,可靠度设计方法可以计算出结构失效概率,从一定程度上考虑设计参数不确定性对设计结果的影响.然而,其必须事先知道各设计参数的准确统计规律.实际工程中岩土力学参数的准确统计规律往往难以得到,可靠度设计方法的使用受到一定制约.

岩土力学参数统计均值一般可根据有限的工程试验进行较为准确预测,而变异系数(或标准差)却难以根据有限的工程试验进行准确估计,只能得到一个大致分布范围^[6-7,21-22].岩土力学参数变异性往往被低估或高估,运用可靠度设计方法,偏大的变异系数估计可造成设计结果偏保守,偏小的变异系数估计则造成设计结果偏危险.

根据有限的工程试验以及工程经验只能确定岩土力学参数变异系数范围,则变异系数估计往往存在一定不确定性,其标准差 σ_{cov} 可按照3- σ 法则进行确定^[22].

$$\sigma_{cov} = \frac{H_{COV} - L_{COV}}{6} \quad (9)$$

式中: H_{COV} 为变异系数取值上限; L_{COV} 为变异系数取值下限.

鲁棒性设计主要研究系统功能对设计参数变异的响应问题,通过调整易控设计参数达到降低系统功能对不可控设计参数变异的敏感性的目的^[14].考

虑岩土力学参数统计特征不确定性,岩土工程鲁棒性设计即通过调整结构几何参数使结构功能对岩土力学参数统计特征变异的敏感性降低^[7-8],在岩土力学参数变异系数不确定的条件下保证可靠度要求的同时具有较高的鲁棒性.本文基于不同的鲁棒性能评估方法提出基于多目标优化方法的鲁棒性设计方法与基于结构失效概率置信水平的鲁棒性设计方法.

2.1 基于多目标优化方法的鲁棒性设计

岩土力学参数变异系数不确定性必然引起结构功能变异或 P_f 不确定性,因此,岩土工程鲁棒性设计需通过对设计参数的调整使结构失效概率变异性最小化.同时,考虑经济性要求,鲁棒性设计为多目标优化问题,其数学模型可表示为:①变量,即可控设计参数(如结构几何参数);②约束条件,即安全性要求;③最小化,即经济成本,系统功能对岩土力学参数变异系数变异的敏感性.其中,系统功能对岩土力学参数变异系数变异的敏感性可以通过结构失效概率标准差 P_{f-std} 来表示,安全水平可通过结构失效概率均值 P_{f-mean} 来表示.

经济成本与系统功能对不确定参数变异的敏感性通常为相互冲突的目标,可以采用非主导优化方法(non-dominated optimization)^[23]筛选出一系列最优的设计参数组合,构成帕雷托前沿(Pareto front),然后再从帕雷托前沿上寻找关节点(knee point)^[24]作为最佳设计,实现经济性与鲁棒性的最佳平衡.

2.2 基于结构失效概率置信水平的鲁棒性设计

为了避免复杂的多目标优化问题,鲁棒性设计可进行简化:考虑参数变异系数不确定性条件下将 P_f 控制在适当的范围内^[7,14].即以 P_f 满足安全性要求的置信水平的作为鲁棒性水平评价指标.

$$P_r[(P_f - P_d) < 0] \geq P_p \quad (10)$$

式中: P_r 为条件概率; P_d 为结构失效概率限值(本文重力式挡土墙抗倾覆破坏与抗滑移破坏的失效概率限值分别取为 $P_{d1}=0.000 69$ 和 $P_{d2}=0.003 50$); P_p 为鲁棒性置信水平.

根据式(10)鲁棒性置信水平可定义鲁棒性指标 β_p ,其与 P_p 的关系可表示为

$$P_p = \Phi(\beta_p) \quad (11)$$

基于结构失效概率置信水平的鲁棒性设计即筛选出满足结构失效概率置信水平且经济成本最小的设计.

2.3 岩土工程鲁棒性设计流程

结合图2所示岩土工程鲁棒性设计流程,岩土工程鲁棒性设计主要分为以下步骤:①针对具体岩

土工程进行数学建模与参数分析;②明确可控设计参数可能取值情况以及不可控参数(如岩土参数变异系数)变异范围;③根据工程经验确定 n 组可能设计参数组合;④分别计算各组可能设计参数组合的结构失效概率均值,以此剔除不满足可靠度要求的设计参数组合,得到一系列可行设计参数组合;⑤分别计算各可行设计的经济成本与失效概率标准差;⑥根据工程师偏好,选择基于多目标优化方法的鲁棒性设计方法或基于结构失效概率置信水平的鲁棒性设计方法完成岩土工程鲁棒性设计。

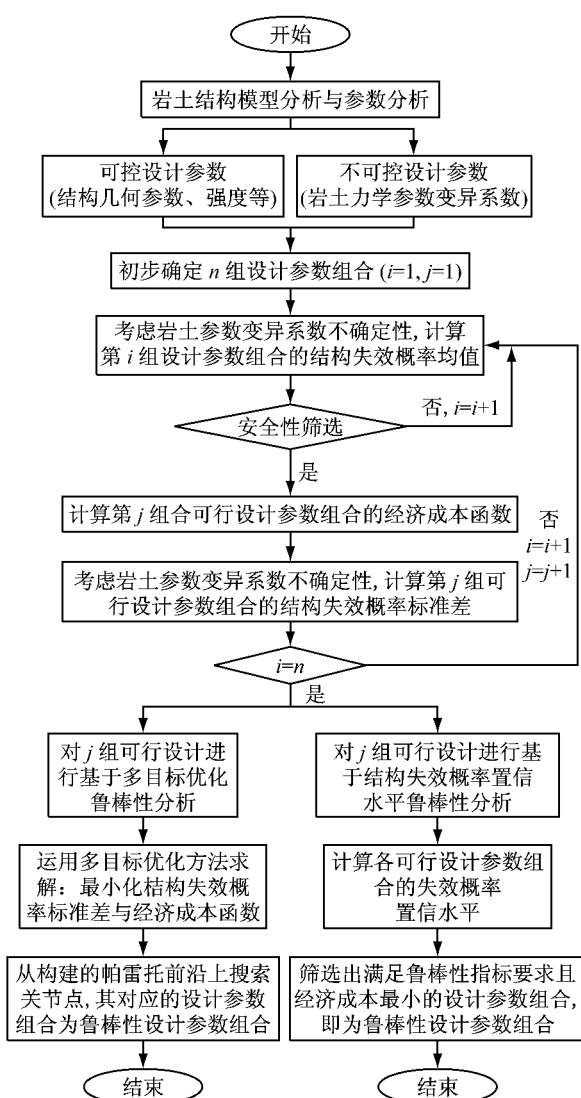


图 2 岩土工程鲁棒性优化设计流程

Fig.2 Flowchart of robust geotechnical design

综上所述,鲁棒性设计并不是对现有可靠度设计方法的否定,而是对现有可靠度设计方法的进一步完善,考虑实际工程中各设计参数统计特征不确定性,研究结构失效概率的变异性。

3 工程案例

3.1 工程案例介绍

为了对可靠度设计方法与鲁棒性设计方法进行对比分析,从文献[15]选取重力式挡土墙工程案例。图 3 为所选重力式挡土墙示意图,墙体为混凝土材料,墙后土体为砂土,不考虑墙底与地基之间摩擦力。图中: H 为挡土墙高度; W_1 与 W_2 分别为墙体三角形部分与矩形部分重度; a 与 b 分别为墙顶尺寸与墙底尺寸; P_a 为墙后土压力; c_a 与 δ 分别为墙底黏聚力和墙背与土体之间摩擦角; α 为墙背与水平方向夹角; λ 为墙后土体倾斜角度。具体几何和物理力学参数为: $H=6.0\text{ m}$, $\lambda=10^\circ$, $\alpha=90^\circ$, 墙体重度 $\gamma_{\text{wall}}=24\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$; 墙后土体重度 γ_s 、墙后土体内摩擦角 ϕ' 、墙背与土体之间摩擦角 δ 、墙底与地基之间黏聚力 c_a 均为随机变量,服从正态分布。其中, ϕ' 和 δ 存在较强相关性^[15,18],取文献[15]相关系数 0.8,不考虑其他参数之间相关性。

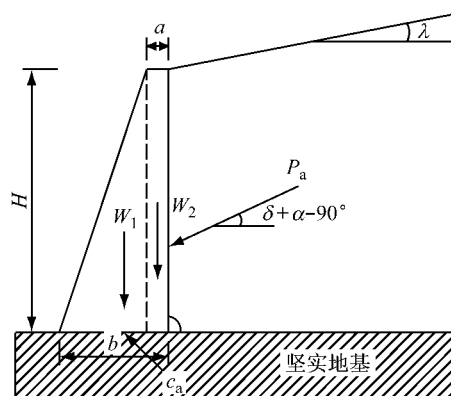


图 3 工程案例示意^[15]

Fig.3 The diagram of a project example^[15]

根据文献[6,22,25]给出的常见岩土力学参数变异系数取值范围,结合式(9)可确定墙后岩土力学参数变异系数标准差,并结合文献[15]基本参数取值情况,可确定本工程案例基本岩土力学参数取值,见表 1。

表 1 挡土墙设计基本工程参数取值

Tab.1 The value of basic engineering parameters

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_s	正态分布	18 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	2~10	6.5	1.17
ϕ'	正态分布	35°	5~20	10.0	2.50
δ	正态分布	20°	5~20	10.0	2.50
c_a	正态分布	100 kPa	10~30	15.0	3.33

墙后土压力引用文献[15]库伦土压力,土压力系数为 K_a .

$$K_a = [\sin(\alpha - \phi') / \sin \alpha]^2 / [\sqrt{\sin(\alpha + \delta) + \sqrt{\sin(\phi' + \delta) \sin(\phi' - \lambda) / \sin(\alpha - \lambda)}}]^2 \quad (12)$$

根据式(1)、式(2)与式(4)、式(5)可得该重力式挡土墙墙体倾覆与墙体滑移 2 种失效模式的安全系数与功能函数.

$$\begin{cases} F_{s_1} = \frac{W_1 A_1 + W_2 A_2 + P_{av} A_{ah}}{P_{ah} A_{av}} \\ F_{s_2} = \frac{bc_a}{P_{av}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} Z_1 = W_1 A_1 + W_2 A_2 + P_{av} A_{ah} - P_{ah} A_{av} \\ Z_2 = bc_a - P_{ah} \end{cases} \quad (14)$$

式中: A_1 与 A_2 分别为墙体自重 W_1 与 W_2 作用点距离墙趾的水平距离; P_{ah} 与 P_{av} 分别为墙后土压力 P_a 在水平方向与竖直方向分力; A_{av} 与 A_{ah} 分别为墙后土压力 P_a 作用点距离墙趾的竖直距离与水平距离.

$$A_1 = \frac{2}{3}(b-a), A_2 = b - \frac{a}{2}, A_{ah} = b, A_{av} = \frac{H}{3}, W_1 = 0.5\gamma_{wall}(b-a)H, W_2 = \gamma_{wall}aH, P_a = 0.5K_a\gamma_s H^2, P_{av} = P_a \sin \delta, P_{ah} = P_a \cos \delta.$$

如同其他工程,重力式挡土墙设计需要进行优化求解.《建筑地基基础设计规范》[18]规定混凝土墙顶宽度不宜小于 0.2 m,且考虑施工方便,优化设计中挡土墙基本可控设计参数(a 与 b)取值离散,见表 2.

表 2 重力式挡土墙基本设计参数取值范围

Tab.2 Possible values of design parameters gravity retaining wall

基本设计参数	取值范围/m
a	{0.2, 0.4, 0.6}
b	{0.6, 0.7, 0.8, ..., 2.9, 3.0}

重力式挡土墙设计中以挡土墙混凝土体积最小为经济目标,即以每延米混凝土体积表示挡土墙设计经济成本 C .

$$C = 0.5(b-a)H + aH \quad (15)$$

3.2 可靠度设计

可靠度设计默认岩土力学参数是服从明确统计规律的随机变量,挡土墙设计中仅需对结构失效概率进行计算.针对本案例,假设岩土力学参数的变异系数估计准确,即挡土墙可靠度计算中对土体参数均值与变异系数分别取表 1 中各物理量均值与变异系数均值,与文献[15]一致.

针对图 3 中重力式挡土墙确定性设计结果($a=0.2$ m, $b=2.0$ m),分别运用泰勒展开法、一次二阶

矩法[26]以及蒙特卡罗法[1]等方法进行结构失效概率计算,见表 3.由表 3 可见,一次二阶矩法具有相对较高的计算精度(与蒙特卡罗法 100 万次抽样对比)且计算工作量较小,因此可靠度设计采用一次二阶矩法进行可靠度计算.

表 3 确定性设计结果失效概率

Tab.3 Failure probabilities of the deterministic design by different methods

失效模式	泰勒展开法	一次二阶矩法	蒙特卡罗法 100 万次抽样
墙体倾覆	4.832×10^{-4}	8.815×10^{-4}	8.44×10^{-4}
墙体滑移	2.564×10^{-4}	3.637×10^{-4}	3.97×10^{-4}

根据式(14)中两功能函数,运用一次二阶矩法对表 2 中不同可能设计参数组合进行结构失效概率计算,得挡土墙失效概率 P_{f1} 与 P_{f2} ,如图 4 所示.

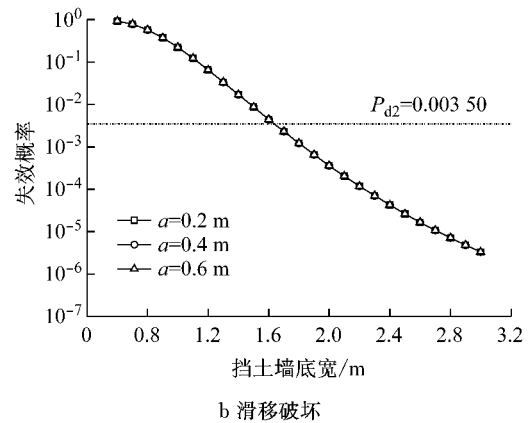
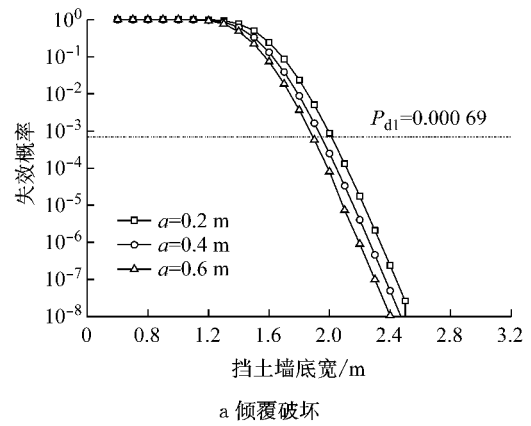


图 4 重力式挡土墙失效概率

Fig.4 Failure probabilities of gravity retaining wall

图 4a 表明,增加 b 可显著降低 P_{f1} ;图 4b 表明,由于不考虑墙底与地基摩擦力作用, P_{f2} 仅与 b 有关;随着 b 的增加 P_{f2} 逐渐减小.

根据图 4 挡土墙失效概率计算结果,结合挡土墙设计失效概率约束条件,即 $P_{d1}=0.000 69$ 与 $P_{d2}=0.003 50$,以及经济成本优化原则,可确定基本

设计参数: $a=0.2\text{ m}$, $b=2.1\text{ m}$; 对应的结构失效概率为: $P_{f1}=1.31 \times 10^{-4} < 6.9 \times 10^{-4}$, $P_{f2}=2.05 \times 10^{-4} < 3.5 \times 10^{-3}$, 满足可靠度要求; 对应的经济成本为: $C=6.9\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$. 其中, 重力式挡土墙可靠度设计控制失效模式为抗倾覆破坏.

在实际工程中, 岩土力学参数统计特征往往难以准确确定. 假设岩土力学参数 ϕ 的变异系数估计偏小或偏大(如 5.0% 或 20.0%), 而其他参数变异系数估计准确, 对应的可靠度设计结果见表 4. 由表 4 可见, 若对土体参数变异性估计过小, 即 5.0%, 可靠度设计结果偏危险, 经济成本偏低; 若对土体参数变异性估计过大, 即 20.0%, 可靠度设计结果偏保守, 经济成本偏高. 即在岩土参数统计规律难以准确确定的条件下, 可靠度设计往往不能真实反映结构失效概率, 设计结果或偏于危险或偏于保守. 基于不准确的岩土力学参数统计特征的可靠度设计结果往往不能真实反映岩土工程安全性能.

表 4 参数估计不当条件下可靠度设计结果

Tab.4 Reliability design under the mistaken estimation of soil parameters

土体摩擦角 变异系数/%	设计 结果	真实失效概率	经济 成本
5.0	$a=0.2\text{ m}$	$P_{f1}=5.04 \times 10^{-3} >$	$6.3\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$
	$b=1.9\text{ m}$	6.9×10^{-4} $P_{f2}=6.60 \times 10^{-4} <$ 3.5×10^{-3}	
20.0	$a=0.2\text{ m}$	$P_{f1}=2.64 \times 10^{-8} <$	$8.1\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$
	$b=2.5\text{ m}$	6.9×10^{-4} $P_{f2}=2.63 \times 10^{-5} <$ 3.5×10^{-3}	

注: 表中真实失效概率基于表 1 中 ϕ' 的变异系数为 10.0% 计算得到.

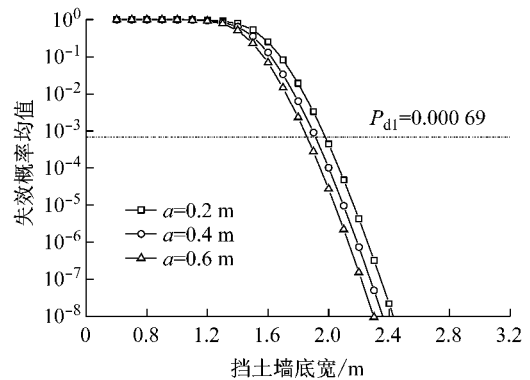
3.3 鲁棒性设计

为充分评价参数统计特征不确定性对岩土工程性能的影响, 需在可靠度设计基础上进一步进行结构鲁棒性设计, 考虑岩参数统计特征不确定性后使结构失效概率变异性最小化.

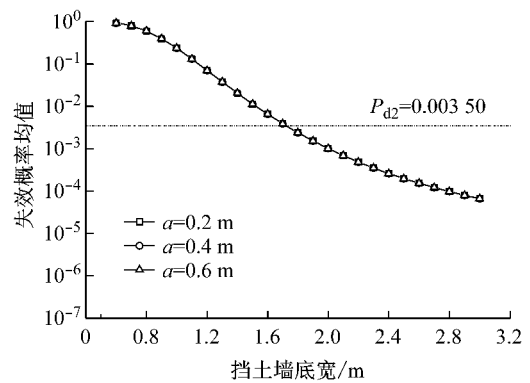
鲁棒性设计中需考虑岩土力学参数统计特征不确定性涉及到十分繁琐的可靠度计算. 该重力式挡土墙鲁棒性设计中采用较为简单的点估计法中的 7 点二阶矩法^[27]. 即, 首先运用 7 点二阶矩法计算出 P_f , 再考虑岩土参数变异系数不确定性嵌套调用 7 点二阶矩法计算 $P_{f\text{-mean}}$ 与 $P_{f\text{-std}}$.

充分考虑表 1 中岩土力学参数变异系数的不确定性, 运用点估计法可求得挡土墙结构 2 种失效模式在不同墙体几何尺寸组合下的失效概率均值与失

效概率标准差, 如图 5、图 6 所示. 其中, 图 6 仅反映了可行设计参数组合的失效概率标准差.



a 倾覆破坏



b 滑移破坏

图 5 重力式挡土墙失效概率均值

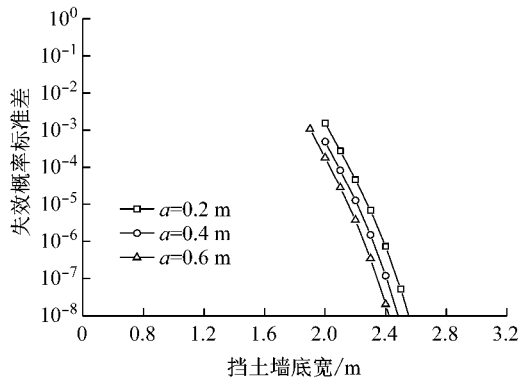
Fig.5 Mean value of failure probabilities of gravity retaining wall

对比图 5 与图 4 发现: 考虑岩土力学参数变异系数不确定性后, 抗倾覆结构失效概率均值相对可靠度设计中 P_{f1} 无明显改变; 同样, 可发现挡土墙结构抗滑移失效概率无明显改变.

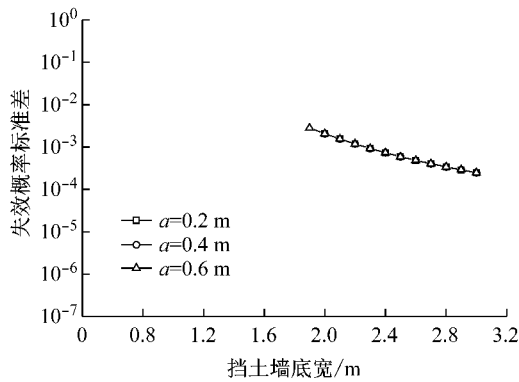
图 6a 表明, 增加挡土墙底宽 b 可显著降低挡土墙抗倾覆失效概率标准差, 提高结构鲁棒性水平. 图 6b 表明, 由于不考虑墙底与地基摩擦力作用, 挡土墙抗滑移失效概率标准差仅与 b 有关, 随着 b 增加而逐渐减小.

3.3.1 基于多目标优方法的鲁棒性设计

针对图 3 所示重力式挡土墙基于多目标优化方法进行鲁棒性设计: 以 $P_{f\text{-std}}$ 作为鲁棒性指标, 以 C 作为经济指标. 对经过安全性筛选之后的所有可行设计分别运用多目标优化方法 NGSA-II^[23] 建立针对墙体 2 种失效模式的帕雷托前沿, 然后根据建立的帕雷托前沿进一步找到其中的关节点^[24], 如图 7 所示.



a 倾覆破坏



b 滑动破坏

图 6 重力式挡土墙失效概率标准差

Fig.6 Standard deviation of failure probabilities of gravity retaining wall

图 7 表明:2 种破坏模式的 P_{f-std} 均随 C 增加显著降低;且相对墙体抗倾覆失效模式,挡土墙抗滑移模式的失效概率标准差更大.由图 7 可得,鲁棒性设计结果为: $a=0.2\text{ m}, b=2.5\text{ m}$;对应的结构失效概率均值为: $P_{f1-mean} = 1.29 \times 10^{-9} < 6.9 \times 10^{-4}$, $P_{f2-mean} = 1.99 \times 10^{-4} < 3.5 \times 10^{-3}$,满足可靠度要求;对应的 $P_{f1-std} = 5.23 \times 10^{-8}$, $P_{f2-std} = 5.93 \times 10^{-4}$;对应的 $C=8.1\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$.其中,重力式挡土墙鲁棒性设计控制失效模式为抗滑移破坏.

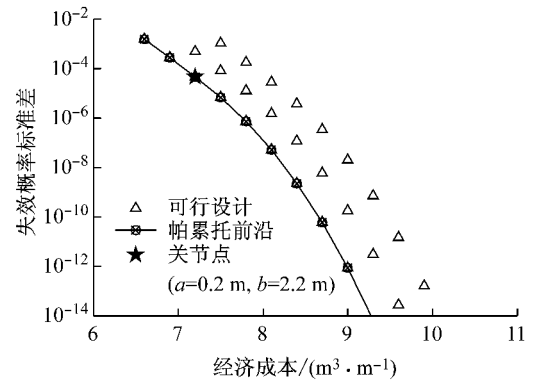
3.3.2 基于结构失效概率置信水平的鲁棒性设计

根据图 5、图 6 中计算得到挡土墙 2 种失效模式对应的 P_{f-mean} 与 P_{f-std} ,假设其 P_f 服从对数正态分布,相应的鲁棒性指标 β_{p1} 与 β_{p2} 可表示为

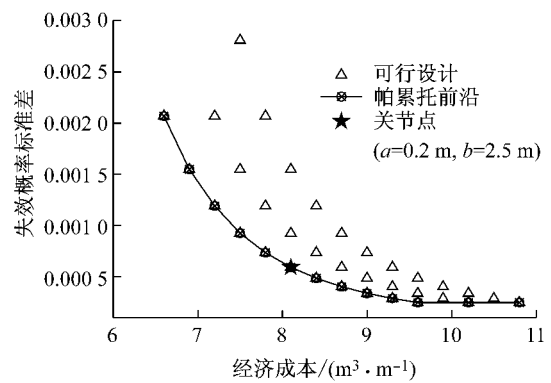
$$\beta_{p1} = \frac{\ln\left[\frac{0.00069}{P_{f1-mean}} \sqrt{1 + (P_{f1-std}/P_{f1-mean})^2}\right]}{\sqrt{\ln[1 + (P_{f1-std}/P_{f1-mean})^2]}} \quad (16)$$

$$\beta_{p1} = \frac{\ln\left[\frac{0.0035}{P_{f2-mean}} \sqrt{1 + (P_{f2-std}/P_{f2-mean})^2}\right]}{\sqrt{\ln[1 + (P_{f2-std}/P_{f2-mean})^2]}} \quad (17)$$

综合各可行设计(即满足安全性要求)的鲁棒性指标与经济成本可得图 8.



a 倾覆破坏



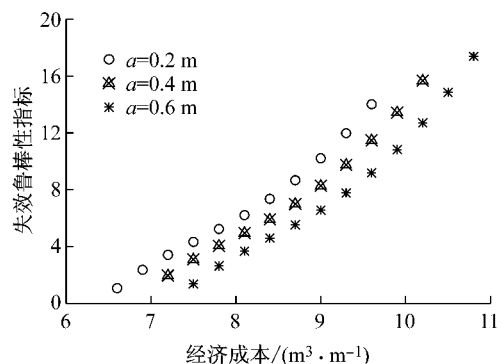
b 滑动破坏

图 7 重力式挡土墙失效概率标准差与经济成本关系

Fig.7 Standard deviation of failure probabilities of gravity retaining wall versus cost

相对图 7,图 8 得到相似结论:重力式挡土墙鲁棒性水平随经济成本增加可显著提高;挡土墙抗滑移破坏模式的鲁棒性水平相对更低,即鲁棒性设计中控制破坏模式为重力式挡土墙滑移破坏;同时,在相同的经济成本下, a 越小,挡土墙鲁棒性水平越高.据图 8 可得到该重力式挡土墙在不同鲁棒性水平下对应的鲁棒性设计结果,见表 5.

表 5 表明:随鲁棒性水平提高,鲁棒性设计结果经济成本显著增加;所有鲁棒性设计中挡土墙控制破坏模式均为抗滑移模式;当 $\beta_p = 1.5$ 时,可以得到



a 倾覆破坏

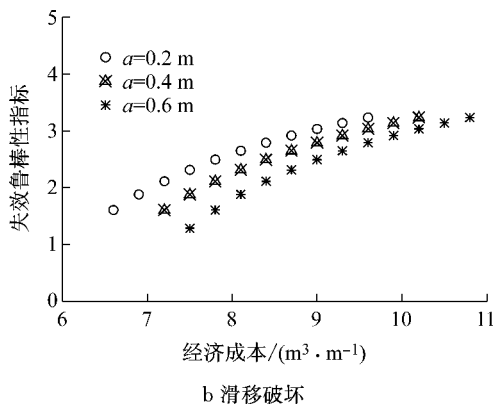


图 8 重力式挡土墙鲁棒性指标与经济成本关系
Fig. 8 Robustness index of gravity retaining wall versus cost

表 5 挡土墙鲁棒性设计结果

Tab. 5 Results of robust design of gravity retaining wall for different robust levels

β_p	鲁棒性置信水平/%	设计结果	鲁棒性指标	经济成本/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)
1.5	93.32	$a=0.2 \text{ m}$ $b=2.1 \text{ m}$	$\beta_{p1}=2.36$ $\beta_{p2}=1.88$	6.9
2.0	97.72	$a=0.2 \text{ m}$ $b=2.2 \text{ m}$	$\beta_{p1}=3.41$ $\beta_{p2}=2.11$	7.2
2.5	99.38	$a=0.2 \text{ m}$ $b=2.5 \text{ m}$	$\beta_{p1}=6.21$ $\beta_{p2}=2.65$	8.1
3.0	99.87	$a=0.2 \text{ m}$ $b=2.8 \text{ m}$	$\beta_{p1}=10.21$ $\beta_{p2}=3.03$	9.0

与可靠度设计(土体参数变异系数估计准确)相同的结果,此时 $P_p=93.32\%$;当 $\beta_p=2.5$ 时,可以得到与多目标优化方法的鲁棒性设计相同的结果,此时 $P_p=99.38\%$ 。

对比可靠度设计结果与鲁棒性设计结果发现:当岩土力学参数变异系数被准确预测时,仅仅可靠度设计即可满足结构安全性能要求;当岩土力学参数变异系数不能准确估计时,鲁棒性设计具有明显的优越性,可有效避免设计结果偏于保守或偏于危险等问题,取得较好的安全性能与经济效益。

4 结论

针对岩土工程设计分析中岩土参数统计特征不确定性,在现有可靠度基础上提出了重力式挡土墙设计方法:基于多目标优化方法的鲁棒性设计与基于结构失效概率置信水平的鲁棒性设计。结合具体工程案例比较分析了可靠度设计方法与鲁棒性设计方法,主要结论如下:

(1) 当岩土参数变异性可以准确预测时,可靠度设计具有一定合理性,然而,现有可靠度设计中岩

土参数变异性不易确定,岩土参数变异性的低估或高估使设计结果偏于危险或偏于保守,鲁棒性设计可考虑岩土参数统计特性不确定性对岩土工程安全性能的影响,并得到岩土结构安全性能的变异水平,是对现有可靠度设计方法的进一步优化。

(2) 提出了 2 种鲁棒性优化方法:基于结构失效概率置信水平的鲁棒性设计可明确反映结构的鲁棒性水平,即结构失效概率的置信水平,易于操作;基于多目标优化方法的鲁棒性设计方法可在岩土结构功能鲁棒性与经济成本之间取得最佳平衡,且不需要预先定义鲁棒性指标。

(3) 在可靠度设计中,重力式挡土墙控制失效模式为抗倾覆破坏,而鲁棒性设计中控制失效模式为抗滑移破坏,即墙体抗滑移稳定性相对抗倾覆稳定性对岩土力学参数统计特征的变化更加敏感。

参考文献:

- [1] Chandler D S. Monte Carlo simulation to evaluate slope stability [C]// Geotechnical Special Publication No. 58. New York: ASCE, 1996: 474-493.
- [2] Chalermyanont T, Benson C H. Reliability-based design for internal stability of mechanically stabilized earth walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(2): 163.
- [3] Castillo E, Minguez R, Ruiz Teran A, et al. Design and sensitivity analysis using the probability-safety-factor method—an application to retaining walls [J]. Structural Safety, 2004, 26(2): 159.
- [4] 王平, 刘东升, 田强, 等. 地下水作用下挡土墙的稳定分析 [J]. 地下空间, 2001, 21(5): 475.
WANG Ping, LIU Dongsheng, TIAN Qiang, et al. Reliability analysis of gravity wall under ground water [J]. Underground, 2001, 21(5): 475.
- [5] Babu G S, Basha B M. Optimum design of cantilever retaining walls using target reliability approach [J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(4): 240.
- [6] Phoon K K, Kulhawy F H. Characterization of geotechnical variability [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612.
- [7] Juang C, 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.
- [8] Juang C H, Liu Z, Atamturktur H S. Reliability-based robust geotechnical design of retaining walls [C]// Sound Geotechnical Research to Practice. San Diego: ASCE, 2012: 514-524.
- [9] Brik B A, Ghanmi S, Bouhaddi N, et al. Robust design in structural mechanics [J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2008, 8(1): 39.
- [10] Kuschel N, Rackwitz R. Optimal design under time-variant

- reliability constraints [J]. *Structural Safety*, 2000, 22(2): 113.
- [11] Parkinson A, Sorensen C, Pourhassan N. A general approach for robust optimal design [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1993, 115(1): 74.
- [12] Chi H W, Bloebaum C L. Mixed variable optimization using Taguchi's orthogonal arrays [J]. *Structural Optimization*, 1996, 12(2): 147.
- [13] Tsui K L. An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design [J]. *IIE Transactions*, 1992, 24(5): 44.
- [14] Beyer H G, Sendhoff B. Robust optimization—a comprehensive survey [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(33): 3190.
- [15] Low B K. Reliability-based design applied to retaining walls [J]. *Geotechnique*, 2005, 55(1): 63.
- [16] 杜永峰, 余钰, 李慧. 重力式挡土墙稳定性的结构体系可靠度分析[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(3): 349.
Du Y F, Yu Y, Li H. Analysis of reliability of structural systems for stability of gravity retaining walls [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(3): 349.
- [17] 黄太华, 袁健. 关于重力式挡土墙截面尺寸确定方法的探讨[J]. *岩土工程技术*, 2004, 18(5): 242.
Huang T H, Yuan J. Determination method for the size of cross section of self-weight type retaining wall [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2004, 18(5): 242.
- [18] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50007—2002 Code for design of building foundation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [19] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50021—2001(2009) Code for investigation of geotechnical engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [20] 中华人民共和国建设部. GB50068—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.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50068—2001 Unified standard for reliability design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [21] Wu T H, Tang W H, Sangrey D A, et al. Reliability of offshore foundation—state of the art [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(2): 157.
- [22] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4): 307.
- [23] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182.
- [24] Deb K, Gupta S. Understanding knee points in bicriteria problems and their implications as preferred solution principles [J]. *Engineering Optimization*, 2011, 43(11): 1175.
- [25] Cherubini C. Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on c' , ϕ' soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(1): 264.
- [26] Low B K, Phoon K K. Practical first-order reliability computations using spreadsheet [C] // *Probabilistics in Geotechnics: Technical and Economic Risk Estimation*. Graz: Verlag Gluckauf GmbH, 2002: 39-46.
- [27] Zhao Y G, Ono T. Moment methods for structural reliability [J]. *Structural Safety*, 2001, 23(1): 47.