

# 基于投资一效益准则的滑坡抗滑桩结构目标性能

罗丽娟<sup>1,2,3</sup>, 夏香波<sup>1</sup>, 陈悦<sup>1</sup>, 王瑞<sup>1</sup>, 魏雪妮<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061; 2. 陕西师范大学 旅游与环境学院,  
西安 710062; 3. 长安大学 地下结构与工程研究所, 西安 710061)

**摘要:** 基于投资一效益准则, 从滑坡抗滑桩结构在全寿命周期内总费用的构成和计算方法出发, 构建了抗滑桩结构基于投资一效益准则的优化设计模型, 通过寻找全寿命周期内总费用的最小值来实现抗滑桩结构设计的目标性能。以陕西省吴起县大路沟滑坡抗滑桩工程为研究背景, 详细介绍了抗滑桩结构的初始建造成本和各项失效损失费用的计算方法和公式, 以及抗滑桩结构的目标性能表达式。结果表明: 抗滑桩结构全寿命周期内总费用的评估是实施基于投资一效益准则优化设计的关键。根据抗滑桩工程所处地的社会经济发展水平, 依据钢筋和混凝土材料单价来确定抗滑桩结构的初始建造成本的方法是有效可行的。文中提出的关于滑坡抗滑桩结构目标性能的确定思路和方法具有一定的参考价值。

**关键词:** 抗滑桩; 黄土滑坡; 投资一效益准则; 目标性能; 全寿命周期费用

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2016)01-0319-06

## Target Performance of Anti-Slide Pile Structure in Landslide Based on Investment-Benefit Criteria

LUO Lijuan<sup>1,2,3</sup>, XIA Xiangbo<sup>1</sup>, CHEN Yue<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, WEI Xueni<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

3. Institute of Underground Structure and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Based on the investment-benefit criteria, using the composition and calculation methods of the total cost of anti-slide pile structure in the whole life cycle, the optimization design model of anti-slide pile structure based on investment-benefit criteria was composed. The target performance of anti-slide pile structure design can be achieved by finding the minimum cost of anti-slide pile structure in the whole life cycle. Then on the basis of anti-slide pile structure of Dalugou loess landslide in Wuqi County of Shaanxi Province, the calculating methods and formulas of initial construction costs and failure costs of anti-slide pile structure, and the target performance expression of anti-slide pile are described in detail. The results show that the assessment of the total cost of anti-slide pile structure in the whole life cycle is the key to implement the optimization design based on investment-benefit criteria. According to the local social and economic development level of the anti-slide pile engineering project, the methods to calculate the initial construction costs of the pile structure based on the unit price of the steel bar and concrete are effective and feasible. The ideas and methods to determine the target performance of anti-slide pile structure have a certain reference value.

**Keywords:** anti-slide pile; loess landslide; investment-benefit criteria; target performance; cost in whole life cycle

据中国地质环境监测院统计数据, 2014 年全国共发生地质灾害 10 907 起, 共造成 349 人死亡、218 人受伤、51 人失踪, 直接经济损失 54.10 亿元, 其中滑坡 8 128 起, 占地质灾害总数的 74.5%, 因此, 滑坡仍然是威胁我国人们生命财产安全的主要地质灾害之一。据不完全统计, 近 20 多年来, 我国地质灾害每年造成的

经济损失多达 200 多亿元, 滑坡治理一直是我国地质灾害防治的重要任务, 抗滑桩作为一种常见的滑坡治理工程结构得到广泛应用<sup>[1]</sup>。因岩土介质的复杂性和多样性, 同时, 还因为滑坡工程地质勘察的难度和不确定性, 常常导致滑坡治理工程结构设计中, 按承载能力安全系数法设计的工程结构偏于安全或保守, 工程造

价很高,常常比消除承灾对象的费用还要高很多或几倍,致使滑坡治理工程的经济性较差。同样是不确定性问题,基于性能的工程结构抗震设计理念正逐渐被人们所接受,已成为国际地震工程领域的一个研究热点<sup>[2-6]</sup>,我国地震工程领域的许多单位和科技工作者也开展了基于性能的结构抗震设计研究,并取得了许多重要成果。李刚、程耿东等<sup>[7-8]</sup>提出了基于投资—效应准则的结构目标性能的合理描述及在现有结构抗震加固中的应用;王亚勇等<sup>[9]</sup>针对框架—剪力墙结构和框架结构提出了基于不同性能目标的抗震设计和效益分析;邹昀等<sup>[10]</sup>将基于性能的设计方法应用于—幢带状桁架和伸臂桁架的超高层巨型结构体系的抗震性能评估;还有许多学者将基于性能的方法应用于框架结构、剪力墙结构的抗震设计中<sup>[11-13]</sup>,都取得了较好的成果。夏修身等<sup>[14]</sup>总结了桥梁结构的目标性能并描述了各性能下的桥墩地震破坏特征;张毅刚等<sup>[15]</sup>对空间大跨结构的抗震设计现状和关键问题从基于性能的角度开展了分析;赵法锁等<sup>[16]</sup>在拱形抗滑桩墙优化设计中也应用了基于性能的设计理念。

基于性能设计的核心就是基于投资—效应准则的工程结构目标性能的确定,而投资—效应准则中很重要的一部分就是工程结构寿命周期成本的计算。对于建筑结构<sup>[17-19]</sup>、桥梁结构<sup>[20-21]</sup>、隧道结构<sup>[22]</sup>的寿命周期成本的计算,取得了许多可喜的进展。目标性能确定以后,另一项重要工作就是如何获得满足目标性能的各有关设计参数,这方面也取得了不少成果<sup>[23-25]</sup>。但基于投资—效应准则的边坡支护设计还很少见。

经过近 30 年的发展,在不考虑造价的前提下,目前的科学技术水平应该可以使滑坡支护结构设计足够安全以抵御各不确定性因素带来的危害。但问题是,滑坡支护结构应该建造到怎样的坚固水平才算是“足够安全”,滑坡工程地质勘察资料本身存在不确定性,这会使支护结构有多大失效概率,会对治理工程的目标性能带来何种影响? 这些问题实际上就是怎样处理工程结构初始投资与接受风险之间的关系。

本文以投资—效益准则作为基于性能的滑坡抗滑桩设计原则,对抗滑桩在全寿命周期内进行总费用评估,在抗滑桩设计中除考虑技术因素外,还考虑社会、政治、经济等因素,所追求的目标就是抗滑桩结构全寿命总费用最小,使抗滑桩的初始造价和损失期望保持合理平衡。

## 1 基于投资—效益准则的优化设计模型

在滑坡抗滑桩的设计过程中,存在许多不确定性因素,比如工程地质勘察资料的不确定性(岩土层结

构、岩土物理性质及力学指标、滑面埋深及形态、地下水条件、地震作用及降水情况等)、抗滑桩结构本身的不确定性(材料性能、截面几何形状及构件抗力)以及抗滑桩和岩土介质间相互作用的不确定性等。所以,在抗滑桩设计过程中应充分考虑诸不确定性给支护结构安全所带来的风险。对结构设计而言,如果结构设计得特别安全,初始造价就高,但结构的失效概率就低,失效损失的期望就小;反之,若结构设计容许一定失效概率,则结构的初始造价就会降低,而结构的失效概率就会升高,失效损失的期望也增加,即所谓“初始造价与失效损失期望间的跷跷板效应”。

在抗滑桩工程结构优化设计中,首先对支护结构进行寿命周期的成本分析,然后基于投资—效益准则使抗滑桩结构在全寿命周期内的总费用达到最小,即抗滑桩的初始建造成本和失效损失期望之和最小。基于投资—效益准则的抗滑桩工程结构的优化设计模型表述如下:

$$\left. \begin{aligned} & \text{find } x \\ & \min W(x) = C_0(x) + \sum_{i=1}^{n_p} P_{fi}(x) C_{fi} \\ & \text{s. t. } P_{fi}(x) \leq [P_{fi}] \quad i=1, \dots, n_p \\ & \quad g_j(x) \leq 0 \quad j=1, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $W(x)$ ——目标函数,即抗滑桩在全寿命周期内的总费用(本文仅考虑初始建造成本和失效损失);  $x$ ——设计变量;  $C_0(x)$ ——初始造价;  $P_{fi}(x)$ ——结构基于性能  $i$  的失效概率;  $n_p$ ——描述抗滑桩结构性能的个数;  $[P_{fi}]$ ——结构基于性能  $i$  的失效概率允许值;  $P_{fi}(x) C_{fi}$ ——结构基于性能  $i$  失效模式下的损失期望;  $C_{fi}$ ——结构基于性能  $i$  的失效损失值;  $g_j(x) \leq 0$ ——确定性约束条件。考虑岩土工程结构体系失效的特点,优化设计模型以结构  $n_p$  个重要性能的失效概率与相应损失乘积之和来代替支护结构体系失效概率与损失之积,即避免求解结构体系的失效概率,又全面注重结构的安全、性能和经济。

## 2 抗滑桩支护结构全寿命费用评估

依据投资—效益准则进行抗滑桩优化设计时,问题转化为以抗滑桩全寿命总费用最小为目标函数的优化问题,所以抗滑桩全寿命总费用评估成为基于投资—效益准则的优化设计的关键环节,本文从抗滑桩初始建造成本和结构失效的损失期望两个部分分别进行阐述。

### 2.1 初始建造成本评估

从土木工程建设基本程序来看,抗滑桩的初始建造成本应该包括可行性研究、勘察、设计、施工等各个

阶段所发生的费用。抗滑桩初始建造成本在初步设计阶段的估计一般比较复杂,通常采用两种策略:其一是在抗滑桩具体设计过程中,根据具体设计文件套用相应水平定额进行计算;其二是通过实例统计建立抗滑桩的初始建造成本与某些设计参数(比如结构的可靠度和结构体积等)之间的近似关系来估算。两种方法各有侧重,前者常在结构设计阶段运用,后者常在概念设计或可行性研究阶段使用。

2.2 失效损失费用评估

要准确评估并量化滑坡支护结构失效造成的损失非常复杂,这不仅是个工程问题,还涉及到经济、政治和社会等因素。本文抗滑桩的失效损失费用仅指滑坡灾害影响区内的生命、财产损失 $\sum_i^n C_{if}$ 。

评估支护结构的失效损失必须先分析滑坡的破坏效应,滑坡的破坏效应是确定承灾体易损性、类型和范围的基础。本文将滑坡地质灾害的承灾体类型分为建筑物及内部财产、人员、线性工程(如铁路、公路、水利设施等)、土地资源、其他共五类,失效损失评估就是评估滑坡致灾范围内各承灾体的损失之和 $\sum_i^5 C_{if}$ 。

在结构全寿命周期内的总费用评估中,人员伤亡的损失评估历来受到来自伦理道德方面的批评:生命是无价的,生命的价值无法用货币来衡量,因此,生命价值的货币量仅能从经济角度给人们以参考,绝不代表生命的真正价值。本文讨论的人员伤亡损失仅为人员生命的经济价值,经济价值的量化仅仅用来进行抗滑桩结构全寿命的投资—效益分析。人员伤亡的损失模型可以表达为:

$$C_{1f}=k_1 \cdot C_{11}+k_2 \cdot C_{22} \tag{2}$$

式中: $C_{1f}$ ——人员伤亡的损失费用; $k_1$ ——预期的受伤人数; $C_{11}$ ——人均受伤的损失费用; $k_2$ ——预期的死亡人数; $C_{22}$ ——人均死亡的损失费用。其中 $k_1, k_2$ 与人口安全的易损性有关; $C_{11}$ 和 $C_{22}$ 可以参考当地人

均国民生产总值或人均国民收入等来确定。

3 抗滑桩优化设计的目标性能

3.1 抗滑桩结构设计的目标性能

在基于性能的滑坡抗滑桩优化设计过程中,首先要确定优化设计的目标性能。跟建筑结构比起来,有关滑坡抗滑桩目标性能的研究很少见,借鉴建筑结构领域基于性能的抗震设计有关成果<sup>[8,24]</sup>,可以认为基于投资—效益准则的抗滑桩结构设计的目标性能就是寻找抗滑桩结构全寿命周期内的费用最小值<sup>[16]</sup>,综合式(1),(2),可得到抗滑桩结构目标性能的优化模型为:

$$\left. \begin{aligned} &\text{find } x \\ &\min W(x)=C_0(x)+P_f(x)\sum_{i=1}^5 C_{if} \\ &\text{s. t. } P_f(x)\leqslant [P_f] \\ &\quad g_j(x)\leqslant 0 \quad j=1,\cdots,m \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中: $P_f$ ——抗滑桩结构的失效概率; $C_{if}$ ——各类承载体的失效损失; $P_f(x)\sum_{i=1}^5 C_{if}$ 为抗滑桩结构的失效损失期望; $[P_f]$ ——抗滑桩结构的允许失效概率;其它未知量涵义同式(1)。

3.2 算例分析

本文以陕西省吴起县大路沟滑坡抗滑桩治理工程为例进行基于投资—效益准则的抗滑桩结构目标性能优化设计。

3.2.1 工程背景 大路沟滑坡属老滑坡,受坡脚道路工程开挖的影响形成体积约为 856.8 万 m<sup>3</sup> 的大型滑坡,对该滑坡的治理方案中,主要支挡结构均为抗滑桩,桩截面分为 1.5 m×2.0 m,2 m×3 m,2.5 m×3.5 m 等几种,依据不同部位滑面深度相应设置桩长为 20 m,24 m,26 m 等,该治理工程共 58 根桩。该滑坡治理工程结构纵断面布置见图 1。

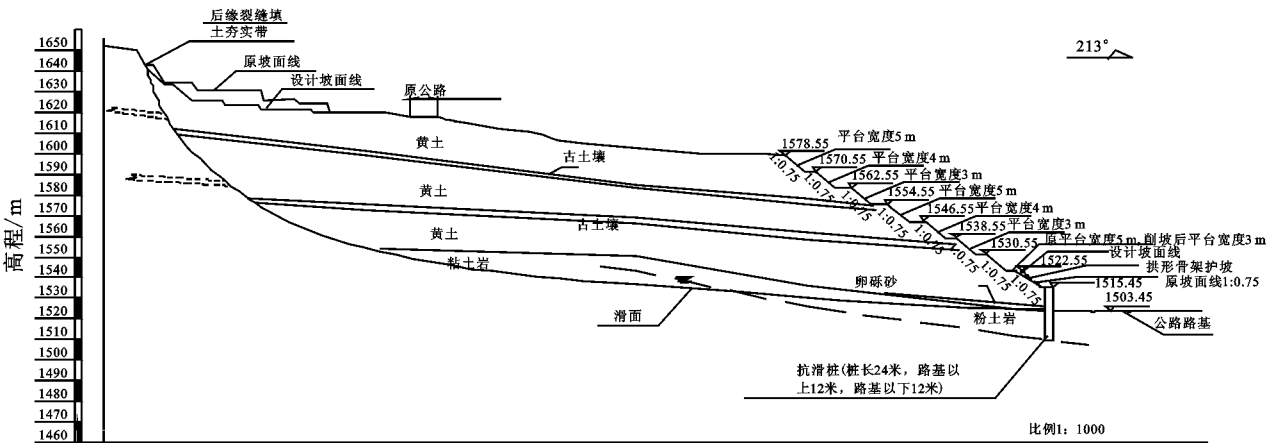


图 1 大路沟滑坡纵断面工程结构布置

3.2.2 有限元模型 由于大路沟滑坡的地表形态较复杂,为方便有限元建模,对滑坡纵断面表面形态作适当简化。根据勘察、设计资料,该滑坡的几何模型及结

构尺寸等参数见表 1;该有限元模型中桩体、滑体及滑床材料计算参数见表 2;桩侧与桩侧土体、桩端与桩端土体、滑体与滑床界面处接触单元和参数设置见表 3。

表 1 滑坡几何模型及结构尺寸参数

坡高/m	坡度/(°)	桩长/m	悬臂段桩长/m	桩截面大小/m	模型几何边界/m	滑面形态
44.0	56.0	20.0	6.0	1.5×2.0	270×110	圆弧形

表 2 桩体、滑体及滑床材料计算参数

材料类别	重度/kNm <sup>-3</sup>	弹性(压缩)模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	内聚力/kPa	膨胀角/(°)
桩体	25.00	34122	0.18	—	—	—
滑体	17.00	15.0	0.32	26.3	28.3	15.0
滑床	18.00	15.0	0.30	13.7	41.0	10.0
滑带	18.00	9.75	0.35	6.0	8.0	5.0

注:表中“—”表示没有该项数据。

表 3 接触单元和参数设置

名称	单元类型		参数
	接触面	目标面	
桩侧与土	CONTA171	TARGE169	摩擦系数 mu=0.30
			KEYOPT,9,0
			KEYOPT,12,2
桩端与土	CONTA171	TARGE169	摩擦系数 mu=0.30
			KEYOPT,9,0
			KEYOPT,12,2
滑体与滑床接触面	CONTA171	TARGE169	摩擦系数 mu=0.15
			KEYOPT,9,2
			KEYOPT,10,2
			KEYOPT,12,0

为了计算自重作用下滑坡体的变形,设置如下边界条件:左右两侧限制水平方向位移,取  $U_x=0$ ;底部边界限制竖向位移,取  $V_y=0$ ;顶部边界设为自由边界。有限元模型计算得到的 Y 方向位移云图见图 2。

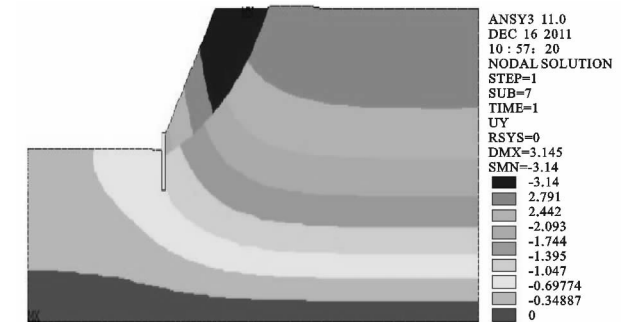


图 2 Y 方向位移  $V_y$  云图

由图 2 可知,自重作用下,滑体沿滑面的相对位移非常突出,滑体在剪出口位置的水平位移最大,显示整体滑动明显,显示了该抗滑桩桩土有限元模型的有效性。

3.2.3 初始建造成本的确定 该算例的有限元模型和可靠度计算(二维问题)通过商业软件 ANSYS 来建立和实施。取桩的截面宽度 1.0(m)、截面高度  $H$  (m),桩长  $L$  (m),同时,设滑带土的内聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ ,滑带(体)土的重度  $\gamma$ 、压缩模量  $E_s$  均为随机变

量,抗滑桩的截面尺寸及受力方向如图 3 所示。

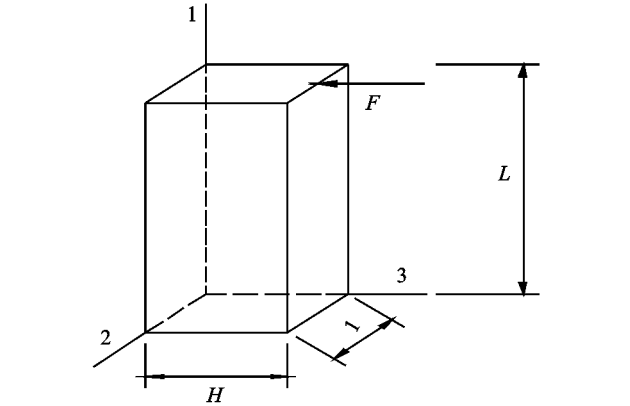


图 3 抗滑桩截面尺寸和受力方向

对于每一组  $L, H$  取值,均有一确定可靠度与之对应,也对应着抗滑桩结构的一种初始建造成本  $C_0$ 。因完成抗滑桩工程结构包含诸多内容和工序,比如桩孔施工、钢筋笼的制作与安装以及混凝土的浇筑与养护等等。为了简化抗滑桩结构初始建造成本  $C_0$  的计算,将抗滑桩结构建造过程中所发生的全部费用综合至混凝土和钢筋的材料单价,取钢筋的单价  $U_s=5000$  元/t、 $C_{30}$  混凝土的单价  $U_c=350$  元/ $m^3$ 。这样,抗滑桩结构的建造成本就可以通过混凝土和钢筋的单价  $U_c, U_s$  及数量  $V_s$  (钢筋数量/t)、 $V_c$  (混凝土体积/ $m^3$ ) 来估算确定。

工程实践中,抗滑桩结构的配筋量通常较大,本文假定:抗滑桩受拉侧的钢筋配筋率  $\rho_s=2\%$ ,受压侧的钢筋配筋率为  $\rho'_s=0.25\%$ ,剪力方向的配筋率  $\rho_{sv}=0.8\%$ ,垂直剪力方向的配筋率  $\rho'_{sv}=0.2\%$ ,由此可按下述方法计算钢筋的数量  $V_s$ :

(1) 剪力方向的箍筋面积  $A_{sv}$  和体积  $V_{sv}$ :

$$A_{sv} = \rho_{sv} \cdot L \times 1 = 0.8\% \times L (m^2) \tag{4}$$

$$V_{sv} = A_{sv} \cdot H = 0.8\% \times L \cdot H \times 7.8 (t) \tag{5}$$

式中:7.8——钢筋密度( $t/m^3$ ),以下相同。

(2) 垂直剪力方向的箍筋面积  $A'_{sv}$  和体积  $V'_{sv}$ :

$$A'_{sv} = \rho'_{sv} \cdot L \cdot H = 0.2\% \times L \cdot H (\text{m}^2) \quad (6)$$

$$V'_{sv} = A'_{sv} \times 1 = 0.2\% \times L \cdot H \times 7.8 (\text{t}) \quad (7)$$

(3) 桩身竖向钢筋面积  $A_s$  和体积  $V_{s1}$ :

$$A_s = (\rho_s + \rho'_s) \cdot H \times 1 = (2\% + 0.25\%) \times H (\text{m}^2) \quad (8)$$

$$V_{s1} = A_s \cdot L = 2.25\% \times H \cdot L \times 7.8 (\text{t}) \quad (9)$$

由上可知,抗滑桩桩身的钢筋总重量  $V_s$  为:

$$V_s = V_{sv} + V'_{sv} + V_{s1} = (0.8\% + 0.2\% + 2.25\%) \times H \cdot L \times 7.8 (\text{t}) \quad (10)$$

则抗滑桩结构的初始建设成本  $C_0$  为:

$$C_0 = U_c V_c + U_s V_s = U_c \cdot (L \times H) + U_s (0.2535 \times L \times H) = 1617.5 \times L \times H (\text{元}) \quad (11)$$

### 3.2.4 抗滑桩结构失效的损失费用 $\sum_i C_{if}$ 的确定

(1) 人员伤亡的损失费用  $C_{1f}$ 。据大路沟滑坡致灾范围的居民和建筑物的分布、人员结构等情况,综合估计该滑坡发生灾害时的人员伤亡损失费用,依据公式(2),预期受伤的人数  $k_1 = 10$  人;人均受伤的损失费用  $C_{11} = 10$  万元;预期死亡的人数  $k_2 = 0$  人;人员死亡的损失费用  $C_{22} = 40$  万元。

$$C_{1f} = k_1 C_{11} + k_2 C_{22} = 10 \times 10 + 0 \times 30 = 100 \text{ 万元} \quad (12)$$

(2) 建筑物和室内财产的损失费用  $C_{2f}$ 。据大路沟滑坡致灾范围内的居民和建筑物的分布特征,估算  $C_{2f} = 30$  万元。

(3) 线性工程等设施的损失费用  $C_{3f}$ 。据大路沟滑坡致灾范围内的铁路、水利、道路等线性工程的分布情况,估算  $C_{3f} = 200$  万元。

(4) 土地资源等的损失费用  $C_{4f}$ 。据大路沟滑坡致灾范围内的土地资源状况,估算  $C_{4f} = 50$  万元。

(5) 其他的损失费用  $C_{5f}$ 。据大路沟滑坡致灾范围内其他资源的分布情况,估算  $C_{5f} = 20$  万元。

综上所述,大路沟滑坡抗滑桩结构的失效损失总费用评估为:

$$\sum_1^5 C_{if} = 100 + 30 + 200 + 50 + 20 = 400 \text{ 万元} \quad (13)$$

3.2.5 抗滑桩结构设计的目标性能 抗滑桩结构的初始造价  $C_0(x)$  由公式(11)计算得到,抗滑桩结构的失效损失总费用(如式13)  $\sum_i C_{if}$  为  $4.0 \times 10^6$  元,假定抗滑桩结构的失效损失总费用由该滑坡治理工程的全部 58 根桩来承担,则每根抗滑桩承担的失效损失  $C_f$  为  $\frac{4.0 \times 10^6}{58} = 68\,966$  元。

取抗滑桩桩长  $L$  和桩截面高度  $H$  为设计变量,将式(11)和式(13)代入公式(3),即得到大路沟滑坡

的抗滑桩工程结构的目标性能为:

$$\left. \begin{aligned} &\text{find } x(x_1 = L, x_2 = H) \\ &\min W(x) = 1617.5 \times L \times H + P_f(x) \times 68966 \\ &\text{s. t. } P_f(x) \leq [P_f] \\ &\quad g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

## 4 结论与认识

(1) 滑坡抗滑桩结构全寿命周期内的总费用评估是实施基于投资—效益准则优化设计的关键。抗滑桩工程结构设计的目标性能就是寻找基于投资效益准则的抗滑桩结构全寿命周期内的费用最小值,优化模型式(3)具有普遍意义。

(2) 文中提出的依据滑坡所在地的经济社会发展水平,将抗滑桩工程建造各阶段发生的所有费用综合至钢筋和混凝土的材料单价,以此来确定抗滑桩结构的初始建造成本  $C_0$  的方法是有效的、可行的。

(3) 针对本文算例,大路沟滑坡抗滑桩结构设计的目标性能如式(14)所示,文中确定抗滑桩结构设计的目标性能的思路和方法具有一定的参考价值。

(4) 滑坡稳定性发展趋势预测非常复杂,抗滑桩结构耐久性影响也非常复杂,如果能在优化设计模型及公式中体现这些影响,将会使“基于投资—效益准则的抗滑桩结构目标性能”设计方法及程序更加完善,这些因素的影响值得进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 罗丽娟,赵法锁. 滑坡防治工程措施研究现状与应用综述[J]. 自然灾害学报,2009,18(4):158-164.
- [2] van Noortwijk J M. Explicit formulas for the variance of discounted life-cycle cost[J]. Reliability Engineering & System Safety,2003,80(2):185-195.
- [3] Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of building seismic safety council (FEMA Report 273) [R]. Washington D C;FEMA,1997.
- [4] Yamanouchi H, Hiraishi H, Ohashi Y, et al. Performance based engineering for structural design of buildings [R]. Japan: Building Research Institute,2000.
- [5] Bertero R D, Bertero V V. Performance - based seismic engineering; the need for a reliable conceptual comprehensive approach [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2002,31(3):627-652.
- [6] Wen Y K. Minimum lifecycle cost design under multiple hazards[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001,73(3):223-231.

- [7] 李刚,程耿东. 基于投资—效益准则的现有结构抗震加固策略[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(4): 412-415.
- [8] 李刚,程耿东. 基于投资—效益准则的结构目标性能水平[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 166-171.
- [9] 王亚勇,岳茂光,李宏男,等. 基于不同性能目标的 RC 结构抗震设计的效益分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 37-45.
- [10] 邹昀,吕西林,朱杰江. 基于性能的抗震设计方法在某复杂超高层结构中的应用研究[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 93-99.
- [11] 李英民,刘建伟,周自强. 基于性能的抗震加固方法在框架结构中的应用[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 88-92.
- [12] 徐自国,肖从真,李勇,等. 北京当代 MOMA 结构基于性能的抗震设计及静力弹塑性分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 58-64.
- [13] 季静,肖启艳,黄超,等. 基于性能的钢筋混凝土剪力墙受弯破坏变形限值的研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 35-41.
- [14] 夏修身,陈兴冲. 客运专线桥梁基于性能的抗震设计研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 40-46.
- [15] 张毅刚,杨大彬,吴金志. 基于性能的空间结构抗震设计研究现状与关键问题[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 145-152.
- [16] 赵法锁,罗丽娟,王雷. 基于性能的拱形抗滑桩墙支护结构体系优化设计的思考[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 539-544.
- [17] 金伟良,宋志刚,赵羽习. 工程结构全寿命可靠性与灾害作用下的安全性[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(11): 1862-1868.
- [18] 陈跃,吕西林. 基于成本—效益准则的高层 RC 框架结构优化设计(1):方法[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 110-115.
- [19] 吕大刚,于晓辉,宋鹏彦,等. 抗震结构最优设防水平决策与全寿命优化设计的简化易损性分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 23-32.
- [20] 吴培峰,陈艾荣. 基于全寿命设计理念的某长江通道桥概念设计[J]. 桥梁建设, 2007(6): 42-45.
- [21] 王中文. 大型桥梁成本控制与全寿命周期成本分析[J]. 桥梁建设, 2010(2): 25-28.
- [22] 尹玫,朱合华,闫治国. 盾构隧道全寿命周期成本分析方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(S1): 1393-1397.
- [23] 孙海,梁立孚,侯钢领. 结构最弱失效模式组的优化及投资—效益模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(3): 262-266.
- [24] 卜国雄,谭平,周福霖. 基于投资—效益准则的 TMD 装置的优化设计[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 24-31.
- [25] 马玉宏,赵桂峰,谭平,等. 基础隔震结构全寿命费用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 178-185.

~~~~~  
(上接第 318 页)

- [8] 刘国彬,蒋定生,朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21-28.
- [9] 方会敏,姬长英,张庆怡,等. 小麦茎秆力学性能的国内外研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 304-308.
- [10] 夏来坤,刘京宝,朱卫红,等. 干旱胁迫对夏玉米不同品种茎秆力学特性的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 46-51.
- [11] 吴胜德. 延河流域水保减沙效益及对水库设计的影响分析[D]. 西安:西安理工大学, 2003.
- [12] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2014.
- [13] Baets S D, Poesen J, Reuben B, et al. Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: Application to a Mediterranean ecosystem[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2009, 34(10): 1374-1392.
- [14] 苏工兵,刘俭英,王树才,等. 苕麻茎秆木质部力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 62-65.
- [15] Починок X Н. 植物生物化学分析方法[M]. 荆家海,丁钟荣,译. 北京:科学出版社, 1981.
- [16] 杜峰,梁宗锁,山仑,等. 黄土丘陵区不同立地条件下猪毛蒿种内、种间竞争[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 601-609.
- [17] 杜峰,山仑,陈小燕,等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究:撂荒演替序列[J]. 草地学报, 2005, 13(4): 328-333.
- [18] 邢毅,赵祥,董宽虎,等. 不同居群达乌里胡枝子形态变异研究[J]. 草业学报, 2008, 17(4): 26-31.
- [19] 赵春花,韩正晟,王芬娥,等. 收割期牧草底部茎秆生物力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 85-89.
- [20] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant & Soil, 2005, 278(1/2): 1-9.
- [21] Burylo M, Rey F, Roumet C, et al. Linking plant morphological traits to uprooting resistance in eroded marly lands[J]. Plant & Soil, 2009, 324(1/2): 31-42.
- [22] 刘窑军. 道路边坡不同生态防护措施侵蚀特征研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.