

郭双枫, 李宁, 姚显春, 等. 层状岩质边坡稳定性影响因素及精度问题研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(2): 0362-0368. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0362

GUO Shuang-feng, LI Ning, YAO Xian-chun, et al. Study on Factors and Precision Affecting the Stability of Layered Rock Slopes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 0362-0368. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0362

层状岩质边坡稳定性影响因素及精度问题研究^①

郭双枫¹, 李 宁^{1,2}, 姚显春¹, 寇 昊¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:层状岩质边坡的稳定性受坡高、坡角和结构面强度等多因素的影响, 不同因素其影响程度不同。基于正交试验原理, 对层状岩质边坡稳定性主要影响因素进行敏感性分析, 得出影响因素排序为: 边坡高度 $H >$ 坡角 $\beta >$ 结构面黏聚力 $C >$ 结构面内摩擦角 $\varphi >$ 岩体容重 $\gamma >$ 岩层倾角 $\alpha >$ 滑块厚度 $h >$ 岩体黏聚力 C' 。对边坡有限元的精度问题进行探讨时, 以典型单折线滑面的岩质边坡数值计算为例, 分析计算模型的单元网格尺寸和边界条件对边坡稳定安全系数的影响规律, 根据计算结果提出了数值模拟建议, 用以提高已知滑动面岩质边坡数值计算的精度。结果表明: 一般滑动面应用 20~30 个内界面单元或网格尺寸大致选用 2~3 m 即可满足精度要求, 在潜在滑动面以下至少有三~四层单元的过渡, 使其过渡到固定支座边界。初步预测, 为了防止波在界面反射, 在边坡动力稳定分析中, 因单元加密, 单元尺寸应控制在 $\lambda/10 \sim 12$ (λ 为波长), 加大模型范围。

关键词: 层状岩质边坡; 影响因素; 正交试验; 网格尺寸; 边界范围

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)02-0362-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0362

Study on Factors and Precision Affecting the Stability of Layered Rock Slopes

GUO Shuang-feng¹, LI Ning^{1,2}, YAO Xian-chun¹, KOU Hao¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xian University of Technology, Xian 710048, Shaanxi, China;

2. College of Civil Engineering Lanzhou Jiao long University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The stability of a layered rock slope is affected by many factors, such as slope height, slope angle, structural plane strength, and so on. The degrees of influence of such factors vary, and in most cases, depend on the comprehensive judgment generated from an actual engineering exploration. In an orthogonal experiment that features two main parameters (factors and levels), a factor refers to the set of elements that may directly affect the results of a test and may be single or multiple. The level of factor refers to the specific value of the human factors in the experiment. This paper analyzes the sensitivity of the main factor, which affects the stability of the rock slope and determines the composition of the primary factor as follows: the slope height $H >$ slope

① 收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51179153, 11572246)

作者简介: 郭双枫, 女, 博士生, 研究方向为边坡稳定性分析以及岩体动力学等。E-mail: gsfxyw@163.com。

通信作者: 李宁, 男, 教授, 博导, 主要从事岩体动力学特性的试验研究与裂隙动力学数值仿真模型分析、寒区冻土力学与工程研究的教学和科研工作。

angle β > structural surface cohesion C > structural surface friction angle φ > rock density γ > the dip angle α > block thickness h > rock cohesion. Next, we discuss the efficiency of the finite element method in determining slope accuracy, which is also an important factor that can affect the stability of a slope. By taking the numerical calculation of the rock slope of a typical single line sliding surface as an example, the influences of element mesh size and boundary condition on the safety factor of slope stability is analyzed. Some numerical simulation suggestions are proposed according to the calculation results, and these suggestions are used to improve the accuracy of the numerical calculation of the known sliding surface rock slope. In general, the common sliding surface application of 20~30 in the interface unit is enough, and the mesh size is roughly set at 2~3 m to meet the accuracy requirements. We also find that the smaller the mesh size is, the longer the time required, although the safety factor only showed a slight change. There should be at least three or four layer elements under the potential sliding surface to ensure the transition to the fixed support boundary. According to the preliminary forecast, in order to prevent the wave reflection at the interface, element size should be controlled in the $\lambda/10 \sim 12$ (where λ is the wavelength), because of the encryption unit within the analysis of dynamic stability of slope, thus increasing the scope of the model.

Key words: layered rock slope; influence factor; orthogonal experiment; mesh size; boundary rang

0 引言

层状岩质边坡是指发育有一组占主要优势结构面的边坡类型,它在铁路、公路和水利水电工程建设中普遍存在。其节理面、软弱夹层或层间错动面等介质缺陷的横向和纵向力学特性,例如强度和变形具有各项异性和非均匀性等特点。除此之外,层状边坡的稳定性和变形破坏机理也存在着很大的差异^[1-4]。我国三分之二的国土为山地,地质构造复杂,滑坡灾害发生十分频繁,造成损失极为严重。由于层状岩质边坡的复杂性和多样性,使实际工程设计和边坡稳定性分析具有十分复杂的动态性,而且滑坡的诱发因素和形成过程也存在不确定性,所以研究复杂地质条件下层状岩质边坡的影响因素与稳定性,建立准确的数值模型进行模拟计算具有重大实际意义^[5-8]。

层状边坡稳定性的影响因素整体分为内在因素和外在因素,内因起控制性作用,外因多为边坡变形破坏的促发因素。内因多为地形地貌、地层岩性、岩体结构、构造应力和结构面强度等,降雨或库水位变化形成的地下水、地震以及人工扰动可作为外在因素。目前常用的边坡敏感性分析方法为单因素和正交试验分析方法。单因素分析简单易行,但在一定范围内各种因素是交叉和综合的,其具有一定的局限性。因此正交试验设计在考虑各因素的随机关联的基础上采用最少的试验次数获取有效信息,利用具有规格的正交表找出影响因素间的最优搭配,进行多因素的敏感性分析。然后对计算结果进行统计

分析,以确定不同参数对边坡稳定性的影响大小^[9-13]。分析正交试验计算结果的方法有两种:极差分析方法(又称直观分析法)和方差分析方法。另外,在有限元分析中网格的疏密和模型范围也是影响边坡稳定性的重要因素。近年来,很多学者^[14-16]探讨了它们的精度问题并取得了许多重要的结论,但大多数的研究都是针对均质岩土边坡,而实际工程中大多是分层的、非均质材料组成的边坡,因此,有必要探讨其对边坡稳定性安全系数的影响规律。本文根据影响层状岩质边坡稳定性的各项因素的敏感性问题进行正交试验设计,并且研究影响层状边坡的计算精度问题,从而探讨层状岩质边坡稳定性的一些规律。

1 层状边坡影响因素正交试验分析

1.1 正交设计多因素的确定

通过适当的边坡稳定计算模型计算安全系数 F , 计算参数可以体现出影响边坡稳定各种因素:内摩擦角 φ 、黏聚力 C 、重度等体现边坡的性质;浮力、渗透力、孔隙压力等体现水的作用;水平和竖向地震力等体现地震作用;坡比、坡高等体现为地形地貌。本文以 12 种影响因素为例进行正交法设计分析。这 12 种计算参数分别为边坡坡脚 β 、边坡高度 H 、滑体厚度 h 、岩层倾角 α 、岩体容重 γ 、结构面黏聚力 C 、结构面内摩擦角 φ 、岩体弹性模量 E 、岩体泊松比 ν 、岩体抗拉强度、岩体黏聚力 C 及岩体内摩擦角 φ 。

(1)边坡高度分别按照超高边坡、高边坡、中边

坡和低边坡 4 类进行取值。(2)坡度依据张年学等^[17]对边坡的分类取值,分别为微斜边坡、平缓边坡、陡坡、急坡、悬坡及倒坡 6 种类型。(3)厚度依据浅层滑坡、中层滑坡、深层滑坡 3 类^[18]。(4)岩层倾角的大小将边坡划分为 3 种类型,倾角在 5°~20°之内称为缓倾角层状岩质边坡;倾角处于 20°~45°之内称为中倾角层状岩质边坡;若倾角大于 45°称为陡倾角层状岩质边坡^[19]。(5)滑坡岩体力学参数和结构面力学参数按照《工程岩体分级标准规范》进行分类^[20]。

1.2 正交试验分析

利用正交试验原理,通过数理统计从大量的试验点中选取若干具有代表性的点,建立“正交表”,并结合边坡实际工况建立试验模型。正交试验模型如图 1 所示。

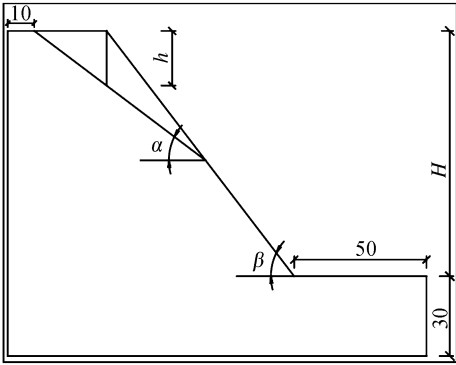


图 1 正交试验模型图
Fig.1 Model graph of orthogonal test

本文基于 12 种参数变化,对层状岩质边坡进行正交试验设计。参数选取范围依据层状边坡工程确定,最终概化为 4 个因素水平。为了降低由 4 个水平次序产生的系统误差,随机排列不同因素水平的次序。利用影响因素“正交表”进行试验,对于 4 水平 12 因素正交试验,至少试验 64 次,记为 L₆₄(4¹²)。各参数取值范围及水平如表 1 所列。

表 1 各参数取值范围及水平

Table 1 The range of parameter values and the level of value

影响因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
边坡高度 H/m	10	40	80	120
边坡坡脚 $\beta/(\text{°})$	15	30	45	60
滑坡厚度 h/m	5	15	25	35
岩层倾角 $\alpha/(\text{°})$	15	30	45	60
岩体容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	22.5	23.1	23.8	24.5
岩体黏聚力 C'/MPa	0.2	0.36	0.53	0.7
岩体内摩擦角 $\varphi'/(\text{°})$	27	31	35	39
岩体弹模 E/GPa	1.3	2.9	4.5	6.0
岩体泊松比 ν	0.35	0.33	0.31	0.30
岩体抗拉强度 F/MPa	0.09	0.20	0.30	0.38
结构面黏聚力 C/MPa	0.03	0.06	0.09	0.15
结构面内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	12	18	25	34

选用数理统计 L₆₄(4¹²)正交表,按 64 种试验方案对层状岩质边坡进行多因素显著性敏感分析。本文采用方差分析方法(即假设正态总体变量和方差均相等的条件下,检验多个正态总体的均值是否相等的一种统计方法),通常作 F 检验来判断因素的作用是否显著。主体间效应的检验由表 2 所列。

表 2 主体间效应的检验

Table 2 Main effect of inspection

因变量:安全系数

源	Ⅲ型平方和	df	均方差	F 检验	$Sig.$	排序
校正模型	1 493.492 ^a	36	41.486	13.389	.000000	
截距	1 764.525	1	1 764.525	569.455	.000000	
边坡高度	913.519	3	304.506	98.272	.000000	1
边坡坡角	128.753	3	42.918	13.851	.000012	2
滑块厚度	38.571	3	12.857	4.149	.015331	7
岩体黏聚力	32.002	3	10.667	3.443	.030642	8
岩体容重	76.828	3	25.609	8.265	.000463	5
结构面内摩擦角	80.288	3	26.763	8.637	.000351	4
结构面黏聚力	123.863	3	41.288	13.324	.000016	3
岩体弹模	7.051	3	2.350	.758	.527210	12
岩体泊松比	18.523	3	6.174	1.993	.138828	9
岩体抗拉强度	10.805	3	3.602	1.162	.342272	10
岩层倾角	56.057	3	18.686	6.030	.002787	6
岩体内摩擦角	7.233	3	2.411	.778	.516487	11
误差	83.663	27	3.099			
总计	3 341.680	64				
校正的总计	1 577.155	63				

表中,“ df ”表示自由度, F 为 F 检验,“ Sig ”表示统计量的 p 值。若 $p < 0.05$,说明在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下 F 检验是显著的,即认为该因素对安全系数有显著影响; $p > 0.05$,说明在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下 F 检验不是显著的,即接受两个总体方差是相等的假设,即没有显著差异。

由表 2 可得 $p < 0.05$ 的因素有 8 个,即这 8 个因素对安全系数都有不同程度的显著影响。故本文认为在计算分析中可对边坡的坡高、坡脚,结构面摩擦角、结构面黏聚力、容重和岩层倾角、滑块厚度和岩体黏聚力加以慎重考虑。

通过表 2,可以得出以下结论:

(1) 对于层状岩质边坡,在以上所取参数变化范围中,安全系数的变化受结构面强度影响较大,随着结构面黏聚力 C 和内摩擦角 φ 的增大而增大,但其随重度 γ 的增大而减小。

(2) 该边坡稳定性影响因素敏感性由大到小依次为:边坡高度 $H >$ 坡角 $\beta >$ 结构面黏聚力 $C >$ 结构面内摩擦角 $\varphi >$ 岩体容重 $\gamma >$ 岩层倾角 $\alpha >$ 滑块厚度 $h >$ 岩体黏聚力 C 。

(3) 虽然随着岩体重度的增加边坡稳定性变差,但采用较为成熟的试验方法测定岩体容重,其数据比较稳定,变化不大,对岩质边坡基本无影响。

(4) 层状边坡的软弱结构面强度指标是影响边坡稳定性的最重要参数,因此室内和室外试验过程及试验数据处理选取工作就显得尤为重要。

(5) 由以上正交分析可知,坡高 H ,结构面黏聚力 C ,结构面的摩擦角 φ 和坡角 β 的敏感度高于其他因素。因此,在边坡稳定性计算中要充分重视这些敏感因子的取值,在滑坡防治工作时,除了尽量降低坡角 β 、坡高 H 外,更应该注意提高结构面 C 、 φ 值。所以在进行边坡设计、分析时要慎重对待。

2 有限元强度折减法的精度研究

网格疏密对单元精度的影响大于单元类型的影响,在有限元方法中,边界范围的大小对计算结果的影响比在刚体极限平衡法中表现得更为敏感,边坡应力一应变的分布受边界大小直接影响^[21-22]。为分析网格疏密度和边界条件对有限元计算结果的影响,本文采用大型有限元软件分别对层状岩质边坡进行稳定性计算分析,提出较为合理的网格疏密度和模型边界范围取值。

2.1 有限单元网格尺寸

算例^[23]选取一个单折线滑面的岩质边坡,其高

度为 60 m,坡角为 60°。岩体为服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的材料。岩体容重 $\gamma = 23.5 \text{ kN/m}^3$,黏聚力 $C = 550 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 36^\circ$,弹性模量 $E = 5.3 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.38$ 。该边坡两侧采用水平约束条件,底部约束为完全固定边界。边坡单元类型为三角形单元,边坡的有限元计算网格变形见图 2 所示。

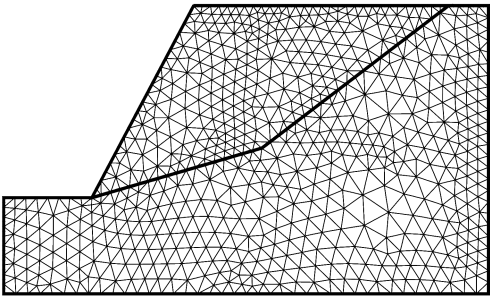


图 2 算例边坡的有限元计算网格变形图
Fig.2 Finite element computing grid example of the slope deformation

潜在滑动面的模拟精度决定整个边坡的单元网格尺寸,为了量定滑动面上单元剖分份数对边坡稳定性的影响,分别对潜在滑动面剖分 10、20、30、40 和 50 个单元进行计算分析,得到的安全系数见图 3。

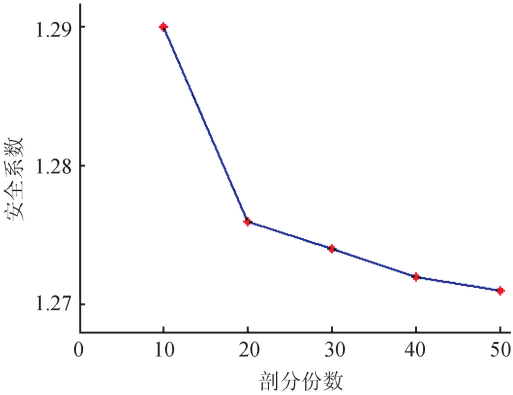


图 3 滑动面单元个数与安全系数的关系
Fig.3 Relationship between sliding surface element numbers and the safety factor

由图 3 可以看出,随着潜在滑动面上剖分份数的增加,安全系数逐渐降低,剖分 10 份时的安全系数相对其他较大,其值为 1.29,当界面单元个数为 20 和 30 时,其安全系数分别为 1.274 和 1.272,结果较为合理,且变化不大,直至界面单元个数 40、50 时,安全系数变化微乎其微,若再增加滑动面单元个数计算精度效果不明显,只会增加计算负担。因此,潜在滑动面采用 20~30 个内界面单元时所对应的

网格尺寸较为可靠。进一步分析可知对于分段开挖的边坡,表层单元尺寸应小于表层加固锚杆长度的 1/(3~5)或小于马道尺寸的 1/2。

计算精度与网格疏密密切相关,网格越密计算精度越高,但网格密度超过一定程度时,计算时间会大大增加,而计算精度提高效果并不显著。文献[24]和本文算例均对时间和网格疏密程度的关系进行了分析,如图 4 所示。从图中可得,当网格尺寸大于 2 m 时,耗时均低于 150 s,相差不大,但网格尺寸小于 1 m 时,计算耗时急剧增大。

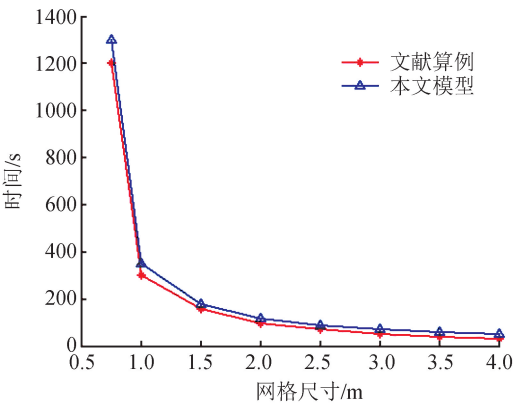


图 4 计算时间与网格尺寸关系图

Fig.4 Relationship between time and grid size consuming

研究表明,在耗时方面,其时间的长短依赖于网格尺寸的大小,网格尺寸越小计算所需时间越长,但其安全系数变化微乎其微。综合网格尺寸和计算精度与耗时长短的关系认为,网格大小不宜过大或过小,网格过大计算结果偏于安全,网格过小计算耗时很长且计算结果变化不大,因此,本文认为网格尺寸可依赖潜在滑动面的内界面单元个数或者大致选用 2~3 m 较为合理。

2.2 有限单元模型范围

为了验证模型大小和边界条件对岩质边坡安全系数的影响,选取如算例所示的岩质边坡,边坡的有限元计算模型见图 5。岩体力学参数如表 3 所列。

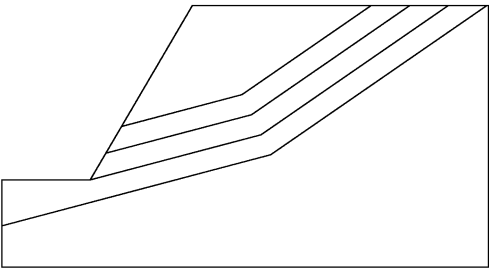


图 5 算例边坡的有限元计算模型

Fig.5 Finite element calculation model example of the slope

表 3 岩体参数选取表
Table 3 Parameter selection of rock mass table

岩体 分级	ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	E /GPa	ν	C /kPa	$\tan\varphi$	σ /kPa
Ⅳ2	2.3	5.6	0.40	595	0.68	110
Ⅳz	2.35	7.4	0.38	770	0.73	130
Ⅳ1	2.45	9.1	0.36	980	0.78	150
Ⅲ2	2.50	14.0	0.34	1 260	0.97	1 000
Ⅲ1	2.60	23.1	0.31	1 540	1.15	1 200

在边坡稳定性分析中,分别在潜在滑动面以下选取 0 层、1 层、2 层和 3 层单元,使其过渡到固定支座边界处,通过计算可以得到设置不同层数对边坡稳定性的影响,潜在滑动面下不同单元层数与安全系数的关系如图 6 所示。

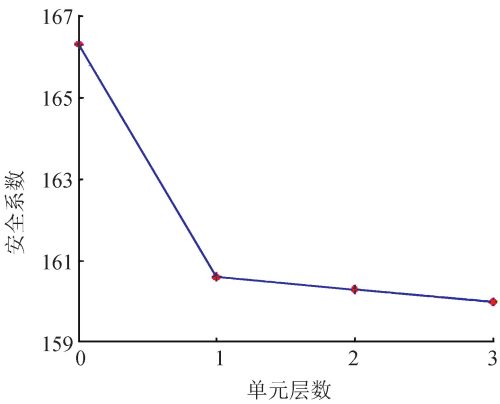


图 6 单元层数与安全系数的关系

Fig.6 Relationship between unit layers and safety factor

由图 6 可以看出:当滑动面下没有设置过渡单元,即 0 层时安全系数为 1.663,1 层、2 层和 3 层的安全系数分别为 1.606、1.603 和 1.600,0 层时的安全系数与 1 层、2 层和 3 层的相差较大,即在边坡稳定分析中,在潜在滑动面以下至少有 2~3 层单元的过渡,使其过渡到固定支座边界。在边坡动力稳定分析中,则应加密单元,单元尺寸控制在 $\lambda/10 \sim 12$ (λ 为波长),加大模型范围,以防止波在界面反射。

边坡的安全系数随着计算范围的增大逐渐增大。在数值模拟计算中,一个非常重要的建模原则是要选取足够大的计算范围来模拟地质体,以保证分析的精度。从理论上讲,采用数值模拟方法求解边坡安全系数时要遵循这一原则,但在计算中,计算的范围并非越大越好,应至少保证潜在滑动面以下有三四层可变形的单元过度到固定约束边界即可,再增大计算范围,其分析结果的差别大都在 5% 以内。所以在用数值模拟计算时,模型也不可取的太大。

3 结论

通过采用多因素综合分析方法正交试验设计对影响层状岩质边坡稳定的因素进行敏感性分析,运用数值方法分析影响边坡的精度问题,得出以下主要结论:

(1) 岩土体的抗剪强度指标是影响边坡稳定性的最重要参数。坡高 H 、结构面黏聚力 C 和结构面摩擦角 φ 、坡角 β 的敏感度高于其他因素,在进行边坡设计、分析时要慎重对待。

(2) 一般对于每个潜在滑动面应用 20~30 个内界面单元即可满足分析精度大于 90% 的要求。分段开挖的边坡,表层单元尺寸应小于表层加固锚杆长度。

(3) 网格尺寸越小计算所需时间越长,但其安全系数变化微乎其微。综合网格尺寸和计算精度与耗时长短的关系认为,网格大小不宜过大或过小,过大计算结果偏于安全,过小计算耗时很长且计算结果变化不大,因此,本文认为网格尺寸大致选用 2~3 m 较为合理。

(4) 在边坡稳定分析中,潜在滑动面以下至少有三四层单元的过渡,使其过渡到固定支座边界,在边坡动力稳定分析中,则为加密单元,单元尺寸应控制在 $\lambda/10 \sim 12$ (λ 为波长),加大模型范围,以防止波在界面反射。

参考文献(References)

- [1] 崔政权,李宇.边坡工程:理论与实践最新进展[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
CUI Zheng-quan, LI Ning. Slope Engineering: Recent Advances in Theory and Practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 鲜学福.层状岩体破坏机理[M].重庆:重庆大学出版社,1989.
XIAN Xue-fu. Layered Rock Mass Failure Mechanism[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989. (in Chinese)
- [3] 哈秋龄.三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):603-618.
HA Qiu-ling. Study on the Anisotropic Unloading Rock Mass Mechanics for the Steep-high Rock Slope of the Three Gorges Project Permanent Ship Lock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 603-618. (in Chinese)
- [4] 江泊涓,潘家军,张伟.地震作用下三峡库区典型堆积层滑坡变形特性研究[J].地震工程学报,2015,37(2):142-145.
JIANG Ji-wei, PAN Jia-jun, ZHANG Wei. Research on the Deformation Characteristics of Typical Accumulative Landslides in the Three Gorges Reservoir under Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 142-145.

(in Chinese)

- [5] 姚显春,李宇,张承客.锦屏水电站左岸拱间槽坡内洞室开挖对边坡稳定的影响分析[J].西安理工大学学报,2012,28(3):278-283.
YAO Xian-chun, LI Ning, ZHANG Cheng-ke. An Analysis of Effect of Inner Cavern Excavation in Left Bank Trench Slopes between Aches upon Side Slope Stability at Jinping Hydropower Station[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(3): 278-283. (in Chinese)
- [6] 李骞,李宇.基于参数敏感性反演分析的岩质高边坡稳定性研究[J].西安理工大学学报,2012,28(2):132-137.
LI Qian, LI Ning. Stability Research on the High Rock Slope Based on the Back Analysis of Parameter Accuracy[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(2): 132-137. (in Chinese)
- [7] 邓清禄,徐复兴,安幼林.长江三峡库区云阳县西城滑坡前期变形系统[J].人民长江,2002,33(6):11-13.
DENG Qing-lu, XU Fu-xing, AN You-lin. Early Stage Deformation System of Xicheng Landslide of Yunyang County Seat in TGP Reservoir Area[J]. Yangtze River, 2002, 33(6): 11-13. (in Chinese)
- [8] 丁梓涵,赵其华,彭社琴,等.岩层倾角对顺倾向边坡地震效应的影响[J].地震工程学报,2015,37(4):956-962.
DING Zi-han, ZHAO Qi-hua, PENG She-qin, et al. Impact of Dip Angle of Rock Stratum on Seismic Response of Consequent Slope[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 956-962. (in Chinese)
- [9] 景鹏旭,龚文俊,孟庆筱,等.地震边坡非线性特征及敏感性分析[J].地震工程学报,2015,37(增刊2):147-151.
JING Peng-xu, GONG Wen-jun, MENG Qing-xiao, et al. Non-linear Characteristics and Sensitivity Analysis of Slope under Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(Supp2): 147-151. (in Chinese)
- [10] 杨和雄,王良元.敏感性分析及其模糊方法[J].南京邮电学院学报,1998,18(1):99-108.
YANG He-xiong, WANG Liang-yuan. Sensitivity Analysis and Its Fuzzy Method[J]. Journal of Nanjing Institute of Posts and Telecommunications, 1998, 18(1): 99-108. (in Chinese)
- [11] 倪恒,刘佑荣,龙治国.正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):989-992.
NI Heng, LIU You-rong, LONG Zhi-guo. Applications of Orthogonal Design to Sensitivity Analysis of Landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 989-992. (in Chinese)
- [12] 韩宜康,杨长卫,张建经,等.土坡面角度对岩质边坡加速度高程放大效应的影响[J].地震工程学报,2014,36(4):874-880.
HAN Yi-kang, YANG Chang-wei, ZHANG Jian-jing, et al. The Influence of Slope Angle on the Elevation Amplification Effect of Rock Slope Acceleration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 874-880. (in Chinese)
- [13] 张旭辉,徐日庆,龚晓南.圆弧条分法边坡稳定计算参数的重要性分析[J].岩石力学,2002,23(3):372-374.

- ZHANG Xu-hui, XU Ri-qing, GONG Xiao-nan. Significance Analysis of Slope Stability Parameter in Circular Slice Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 372-374. (in Chinese)
- [14] 夏仲远, 马从安, 赵守鹏. 基于强度折减法的边坡安全系数求解及精度影响因子分析[J]. 煤矿现代化, 2011, 103(4): 36-38.
- XIA Zhong-yuan, MA Cong-an, ZHAO Shou-peng. Discussion on Strength Reduction Using FLAC[J]. Coal Mine Modernization, 2011, 103(4): 36-38. (in Chinese)
- [15] 贺俊, 史俊涛, 黄璐, 等. 强度折减法中非均质层状土坡失稳判据适用性[J]. 人民黄河, 2014, 36(12): 122-125.
- HE Jun, SHI Jun-tao, HUANG Lu, et al. Applicability Research on Instability Criteria for Inhomogeneous Layered Slope Using Strength Reduction Method[J]. Yellow River, 2014, 36(12): 122-125. (in Chinese)
- [16] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on Safety Factor of Slope by Strength Reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343-346. (in Chinese)
- [17] 张年学, 盛祝平, 孙广忠, 等. 长江三峡工程库区顺层岸坡研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- ZHANG Nian-xue, SHENG Zhu-ping, SUN Guang-zhong, et al. Study on Bedding Slope of Three Gorges Reservoir[M]. Beijing: Earthquake Press, 1993. (in Chinese)
- [18] 姜德义, 朱合华, 杜云贵. 边坡稳定性分析与滑坡防治[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005.
- JIANG De-yi, ZHU He-hua, DU Yun-gui. Analysis of Slope Stability and Prevention of Landslide [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2005. (in Chinese)
- [19] 唐浩. 顺层岩质边坡稳定性影响因素分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- TANG Hao. Study on Factors of Stability of Rock Bedded Slope[D]. Wuhan: Wuhan University of Science, 2009. (in Chinese)
- [20] GB50218-2014, 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- GB50218-2014, Standard for Engineering Classification of Rock Masses [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [21] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003, 1(1): 21-26.
- ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The Feasibility Study of Strength-reduction Method with FEM for Calculating Safety Factors of Soil Slope Stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 1(1): 21-26. (in Chinese)
- [22] 杨有成, 李群, 陈新泽, 等. 对强度折减法若干问题的讨论[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1103-1106.
- YANG You-cheng, LI Qun, CHEN Xin-ze, et al. Discussion on Strength Reduction Using FLAC[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1103-1106. (in Chinese)
- [23] 师刚. 岩质边坡单折线滑动模式的分析方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- SHI Gang. The Comparative on the Appraise Methods of Rock Slope with Single Broken-line Slip Surface[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [24] 褚雪松, 庞峰, 李亮, 等. 边坡稳定有限元强度折减法与极限平衡法对比[J]. 人民黄河, 2011, 33(10): 93-95.
- CHU Xue-song, PANG Feng, LI Liang, et al. Comparative Study on FEM Strength Reduction Method and Limit Equilibrium Method for the Slope Stability Analysis [J]. Yellow River, 2011, 33(10): 93-95. (in Chinese)