

文章编号:0559-9342(2004)02-0017-04

非线性强度指标边坡稳定安全系数 取值标准的研究

陈祖煜¹, 陈立宏², 孙平¹

(1.中国水利水电科学研究院,北京 100044; 2.北京交通大学,北京 100044)

关键词:土石坝;边坡稳定分析;非线性抗剪强度;可靠度分析

摘要:从强度指标的取值原则和边坡稳定的风险分析两方面,论述对土石坝堆石材料进行非线性强度的稳定分析时安全系数的合理取值原则。通过对以往工程硬岩堆石料的非线性强度试验数据统计分析和实际算例,说明使用非线性参数的安全系数和可靠度指标与传统的线性参数相应值处于同一量级。因此,在进行非线性分析时,同样可以使用现有规范对坝坡允许安全系数所规定的标准。

An investigation on the allowable factors of safety in slope stability analysis using nonlinear strength parameters

CHEN Zu-yu, CHEN Li-hong, SUN Ping

(1.Ching Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044;

2.Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Key words: embankment dam; slope stability analysis; non-linear shear strength; reliability analysis

Abstract: This paper discusses the allowable factor of safety obtained by the analysis using non-linear strength parameters. Based on a review of the non-linear shear strength test results and the risk analysis using both linear and non-linear parameters, the authors confirmed that these two approaches give factors of safety and reliability index normally at the same level. Consequently the design criterion for allowable factors of safety specified in the code can also be used for non-linear slope stability analysis.

中图分类号:TV641 文献标识码:A

0 引言

土石坝堆石材料的抗剪强度指标具有明显的非线性特点。一般来说,上覆土体厚度每增加 50 m, 其内摩擦角即减少 8°~10°。对堆石材料使用非线性强度指标进行坝坡稳定分析,可以更为合理地反映坝坡的实际安全状态。最近,水利部颁发的《碾压式土石坝设计规范》^[1]已正式规定,对堆石材料进行非线性强度的稳定分析。

但是,在以往的计算中人们发现,采用非线性强度指标,坝坡稳定安全系数往往较大。对一级坝,在很多情况下,安全系数的计算值在 1.70~1.90 之间,而规范规定的允许安全系数是 1.50。这样,就有很多人质疑,在进行非线性稳定分析时,对规范关于各等级大坝的允许安全系数的标准是否也要作相应的调整?如果要调整,其依据又何在?应该说,

这一问题一直影响着非线性强度指标在坝坡稳定分析中的应用。

笔者认为,这个问题可以通过以下两个方面的深入论证予以解决。

(1) 强度指标的取值原则。土石坝设计规范规定,在进行稳定分析时,应采用抗剪强度指标试验值的小值平均。由于非线性强度试验的数据通常较少,难以恰当地了解相应参数的小值平均,在实际工程设计中,经常出现没有或不恰当地使用小值平均值的现象,这很可能是安全系数计算值偏高的一

收稿日期:2003-11-27

基金项目:国家电力公司重点科研项目(st11-2001-03-44-02)和北京交通大学人才基金项目(2003RC030)资助。

作者简介:陈祖煜(1943—),男,浙江镇海人,博士,教授级高工,清华大学兼职教授,现主要从事水利水电工程和岩土工程的研究工作。

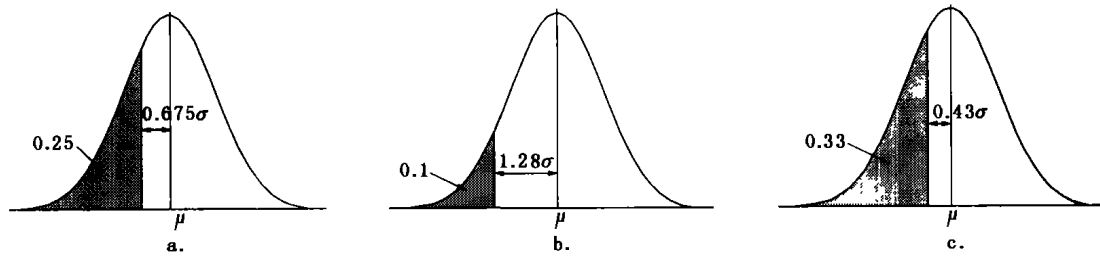


图1 相应不同分位数的强度参数取值

个原因。

(2) 边坡稳定的风险分析。边坡失稳概率是衡量其稳定性的一个客观标准,边坡的允许风险标准不会因为采用何种指标而改变。因此,通过对传统方法和非线性分析方法中包含的不确定因素以及所带来的风险的比较,有可能最终解决非线性分析的安全系数标准问题。

1 强度指标的取值原则

我国土石坝设计规范规定,强度指标应采用小值平均^[1],在《水利水电工程地质勘察规范》中则规定取0.1分位数^[2]。美国陆军工程师团对土石坝设计强度指标的规定为2/3以上的试验数据大于采用值^[3]。如果我们假定强度参数按正态分布,取强度指标值为 $\mu - k\sigma$,则此三个文件规定的分位数0.25,0.1和0.33分别相当于 $k=0.675, 1.28$ 和0.43(参见图1a,b,c),其中 μ 和 σ 为其均值和标准差。为此,我们建议用均值(期望值)减1.0倍的标准差来确定强度指标的设计值。

目前,常用于土石坝边坡非线性稳定分析的方法为邓肯的指数模式

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log(\sigma_3/P_a) \quad (1)$$

式中, σ_3 为小应力; ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 为材料参数; P_a 为大气压。通常可以将试验成果绘于如图2所示的半对数坐标上,采用一次线性回归方法来确定 ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的均值和标准差,其计算公式详见文献[4]。有了均值

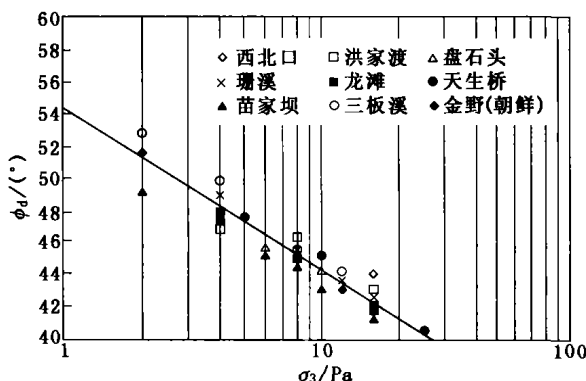


图2 堆石材料的非线性强度变异系特征和统计参数

和标准差,我们就可按照上述标准来确定非线性强度指标的设计值。

图2^[5]总结了西北口等9个工程硬岩堆石料的试验成果。表1所示为相应的统计参数。尽管这些工程的颗料组成和岩性不尽相同,考虑到硬岩的共同特性,基本上可将其合并在一起进行统计分析。从中可以发现, ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的标准差分别为 1.5° 和 1.0° 左右。

即将修建的糯扎渡大坝高265m,开展了大量关于坝料特性的研究,因而有较大数量的数据来了解非线性强度的变异特性。糯扎渡一区堆石料26组137个试样和二区22组126个试样的成果分别绘于图3和图4。相应的统计参数见表2。

表1 西北口等工程硬岩堆石料统计结果

统计方法	$\phi_0/(^\circ)$		$\Delta\phi/(^\circ)$		相关系数 ρ
	均值	标准差	均值	标准差	
矩法	53.403	1.480	9.371	1.733	-0.809
线性回归法	53.725	1.594	9.388	0.895	-0.949

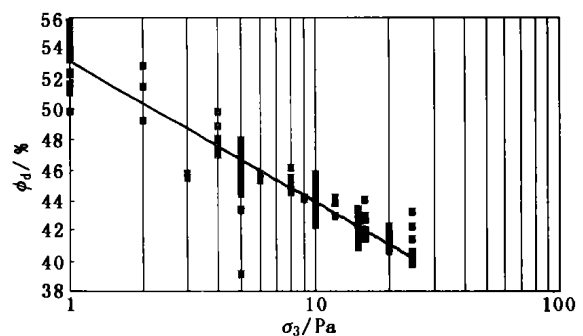


图3 糯扎渡一区堆石料非线性强度试验成果

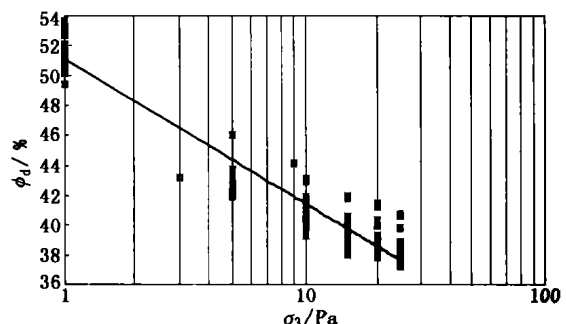


图4 糯扎渡二区堆石料非线性强度试验成果

表 2 糯扎渡堆石料非线性参数

坝料分区	统计方法	$\phi_0/(\circ)$		$\Delta\phi/(\circ)$		相关系数 ρ
		均值	标准差	均值	标准差	
一区	矩法	53.716	2.084	9.412	1.469	-0.697
	线性回归法	52.505	2.455	8.592	1.312	-0.993
二区	矩法	51.252	1.338	9.305	0.857	-0.800
	线性回归法	50.591	1.912	9.078	0.621	-0.940

综合上述试验成果我们发现,硬岩堆石料的 ϕ_0 的标准差大致为 $1.5^\circ\sim 3.0^\circ$, $\Delta\phi$ 的标准差大致为 $0.5^\circ\sim 1.5^\circ$ 。在试验数据较少无法进行严格意义的数理统计时,可按此经验数值确定 ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的小值平均值。

2 边坡稳定的可靠度和风险分析原理

边坡稳定的极限状态方程可写为^[5]

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) - 1 = 0 \quad (2)$$

式中, F 为安全系数; x_1, x_2, \dots, x_n 为影响安全系数的自变量, 如土的容重、抗剪强度指标和孔隙压力等。

相应的可靠度指标定义为

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (3)$$

式中, μ_F 和 σ_F 分别为安全系数 F 的均值和标准差。

计算可靠度指标是可靠度分析的一个专门领域, 文献[5]介绍了几种常用的方法: ①蒙特卡洛法; ②一次二阶矩法; ③ Rosenblueth 法。应该说, 一旦确定了式(2)中自变量的均值和标准差, 计算 β 值的问题已经很好地得到了解决。

我国水利水电工程结构可靠度设计统一标准曾对 β 的允许值作出规定^[6]。获得了 β 值后, 即可通过表 3 计算失效概率。例如, 对于一级大坝, β 的允许值应为 4.2, 从表 3 可查得相应的失效概率为 3.1×10^{-5} 。

表 3 可靠度指标 β 和失效概率 P_f 的关系

失效概率 P_f	0.5	0.25	0.1	0.05	0.01	0.001	0.0001	0.00001
可靠度指标 β	0	0.67	1.28	1.65	2.33	3.1	3.72	4.25

3 非线性强度指标的边坡稳定分析

3.1 确定性模型分析

现在, 我们来分析一个具有典型意义的面板坝坝坡的稳定安全系数。其坝高为 150 m, 坝坡分别为 1:1.3 和 1:1.4。

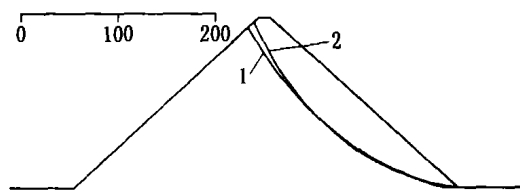
依据上节中对几个工程硬岩料的试验资料, 在确定性模型分析中, ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的小值平均按均值减去 1 倍标准差取, 分别为 51° 和 11° (见表 4)。使用规范规定的毕肖普法, 最小安全系数如表 5 所示, 临界滑裂面见图 5、6。

表 4 对典型面板坝剖面使用的非线性参数 ($^\circ$)

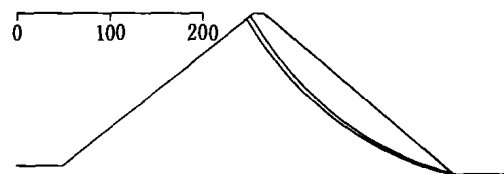
ϕ		$\Delta\phi$			
均值	标准差	小值平均	均值	标准差	小值平均
53.0	2.0	51.0	10.0	1.0	11.0

表 5 对典型面板坝剖面稳定分析成果

坝坡	确定性模型安全系数 F	可靠度和风险分析	
		可靠度指标 β	失效概率
1:1.3	1.513	4.72	1.21×10^{-6}
1:1.4	1.597	5.03	2.52×10^{-7}



滑裂面 1, 确定性模型, $F=1.513$; 滑裂面 2, 可靠度分析, $\beta=4.72$
图 5 对坝坡为 1:1.3 面板坝剖面稳定分析的临界滑裂面



滑裂面 1, 确定性模型, $F=1.597$; 滑裂面 2, 可靠度分析, $\beta=5.03$
图 6 对坝坡为 1:1.4 面板坝剖面稳定分析的临界滑裂面

计算成果表明, 如果对硬岩堆石料非线性强度指标采用具有代表意义的小值平均值, 水利水电行业目前普遍采用的面板坝的标准坡度 1:1.3 和 1:1.4 所相应的安全系数分别为 1.513 和 1.597, 此值并不比规范对一级坝的要求(1.5)大很多。

3.2 可靠度和风险分析

在可靠度分析中, ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的均值和标准差如表 4 所示。使用毕肖普法计算安全系数, 采用 Rosenblueth 法计算可靠度指标。最小可靠度指标见表 5, 临界滑裂面见图 5、6。

计算成果表明, 如果对硬岩堆石料非线性强度指标采用具有代表意义的均值和标准差, 水利水电行业目前普遍采用的面板坝的标准坡度 1:1.3 和 1:1.4 所相应的可靠度指标分别为 4.72 和 5.03, 较水利水电可靠度分析统一标准(即 4.2)稍高。说明在进行非线性强度指标边坡稳定分析时, 提高允许安全系数标准是没有必要的。

根据表 2 提供的一、二区堆石料的非线性强度指标的统计参数, 采用 Rosenblueth 法计算糯扎渡大坝的 4 种典型工况。表 6 比较了原设计指标和本

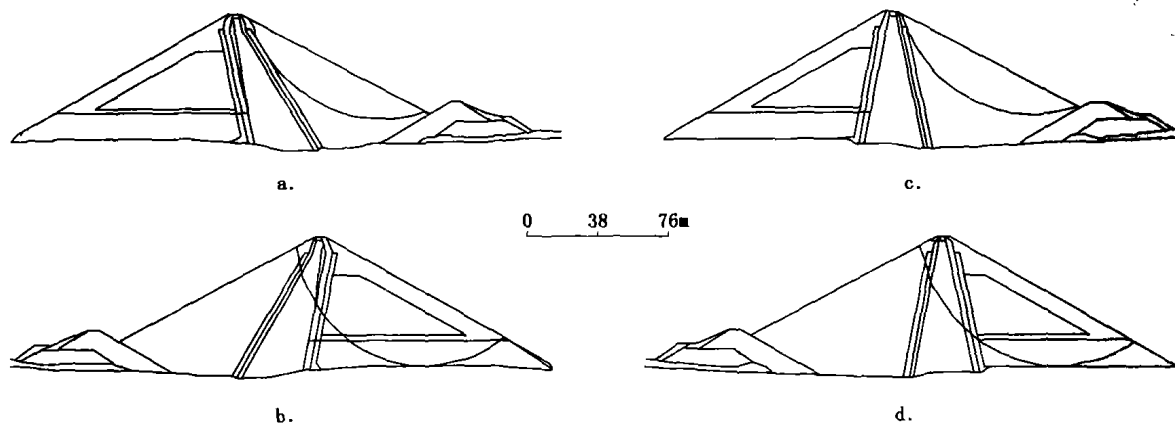


图7 糯扎渡大坝典型工况的临界滑裂面

次按小值平均调整后的指标(参见图7),由于原设计指标已按小值平均原则作了一定的折减,故两者在确定性模型计算中的 F 值相差不大。 F 值比规范要求要求的1.50大。同时进行了可靠度分析,最小可靠度指标见表6,相应的临界滑裂面见图7。由于安全系数和可靠度指标均远大于规范规定的标准,说明该工程安全系数偏大的问题与使用非线性强度指标无关。

表6 糯扎渡大坝采用调整后的指标的分析成果

编号	方案	非线性确定性模型 F 值		可靠度指标 β
		原设计指标	调整后指标	
a	斜心墙上游坡	2.447	2.293	5.495
b	斜心墙下游坡	1.799	1.800	5.022
c	直心墙上游坡	2.545	2.368	5.462
d	直心墙下游坡	1.770	1.700	4.791

4 结论

(1) 在进行非线性边坡稳定分析时,应注意使用 ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的小值平均值而不是均值。通常可以用均值(期望值)减1.0倍的标准差来确定小值平均指标。

(2) 对以往工程硬岩堆石料的非线性强度试验数据进行统计分析,得知硬岩堆石料的 ϕ_0 的标准

差大致为 $1.5^\circ\sim 3.0^\circ$, $\Delta\phi$ 的标准差大致为 $0.5^\circ\sim 1.5^\circ$ 。在试验数据较少无法进行严格意义的数理统计时,可按此经验数值确定 ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的小值平均值,用实际试验所获得的均值作为该参数的期望值。

(3) 本文对具有代表意义的一级面板坝按上述硬岩非线性参数进行边坡稳定的确定性和可靠度分析发现,如果按要求使用 ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 的小值平均指标,安全系数在1.5~1.6之间,可靠度指标 β 值在4.7~5.0之间。由此可见,使用非线性参数的安全系数和可靠度指标,与传统的线性参数的相应值(即安全系数和可靠度指标的允许值分别为1.5和4.2)处于同一个量级。因此,在进行非线性分析时,同样可以使用现有规范中对坝坡允许安全系数所规定的标准。

参考文献:

- [1] SL274—2001,碾压式土石坝设计规范[S].
- [2] GB50287—99,水利水电工程勘察规范[S].
- [3] U. S. Army Corps of Engineers. Stability of slopes and foundations. Engineering Manual[S]. Visckburg, 1967.
- [4] 陈立宏.土石坝固结和稳定的风险和可靠度分析[D].北京:清华大学,2003.
- [5] 陈祖煜.土质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [6] GB50199—94,水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].

苏帕河阿鸠田水电站成功截流

2003年11月12日,由国家电力公司昆明勘测设计研究院勘测设计的云南省重点工程保山地区苏帕河阿鸠田水电站首部闸坝截流成功。

该电站位于云南省保山地区龙陵县境内,是苏帕河梯级开发的第四级,装机容量105 MW、保证出力44.1 MW、年发电量5.95亿kW·h。电站为引水式,枢纽工程包括拦河坝、引水隧洞、高压钢管及厂房。其中首部拦河闸坝是电站建设的关键性工程之一,由取水闸、冲沙闸、泄洪闸及两岸挡水坝段组成,坝顶长89 m、宽4 m,最大坝高26 m、相应库容15.8万 m^3 。电站设计水头398 m,是目前我国冲击式水轮发电机组中,单机容量较大的高水头电站。

该电站是苏帕河梯级中技术经济指标最优越、效益最大的一个梯级,工程总投资4.928亿元人民币。工程于2002年7月正式开工,计划于2005年6月首台机组并网发电。

(昆明勘测设计研究院 李超南)