

接触面抗剪断强度离散性对重力坝稳定的影响

蔡云鹏^{1,2}, 田 英³, 汤徐敏³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065; 3. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 混凝土重力坝沿滑移面的抗滑稳定性与接触面材料的摩擦系数 f 和黏聚力 c 密切相关, 现有的重力坝规范, 有的取 f 和 c 为定值进行分析, 有的视 f 和 c 为随机变量, 并规定了它们的随机分布规律. 实际上, f 和 c 既不是一个定值, 也不一定符合给定的随机分布规律. 关于重力坝抗滑稳定安全系数分布规律的研究成果甚少. 应用可靠性方法, 针对重力坝沿建基面的抗滑稳定问题, 研究了摩擦系数 f 与黏聚力 c 的随机分布线型、均值和变异系数对稳定安全系数 K 的影响, 揭示了 K 的离散特征, 以及概率分布曲线和可靠指标的变化规律. 研究成果有助于对重力坝规范的进一步认识.

关 键 词: 重力坝; 抗滑稳定; 抗剪断强度; 离散性; 可靠性方法

中图分类号: TV642.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)06-0021-08

混凝土重力坝的结构设计, 要求按规范^[1-2]校核坝体混凝土与基岩接触面、坝体混凝土层面、坝基岩体深层软弱结构面的抗滑稳定性, 这些接触面(层面或软弱结构面)材料的抗剪断强度, 即摩擦系数 f 和黏聚力 c 是影响大坝抗力的主要因素. 《混凝土重力坝设计规范》(SL 319-2005)中关于抗滑稳定安全系数的计算, 摩擦系数 f 和黏聚力 c 为确定值. 实际上, 即使同一类岩体和结构面, f 和 c 的数值也有很大的离散性; 而且, 大坝在服役过程中, 由于水文地质条件的变化, 抗剪强度 f 和 c 也会改变, 从而导致大坝抗滑稳定安全度的不确定性. 由于有限的岩土力学试验样本, 难以确定 f 和 c 的离散特征, 所以, 《混凝土重力坝设计规范》(DL5108-1999)8.4.2条规定: 抗剪断强度的标准值按现场或室内试验测定成果概率分布的0.2分位值确定; 摩擦系数概率分布模型取正态分布, 抗剪断黏聚力取对数正态分布. 由于实际岩体和结构面的 f 和 c 既不是一个定值, 也不一定符合这样的概率分布模型, 此时重力坝抗滑稳定安全度会有怎样的变化? 以往的研究主要集中在 f 和 c 的相关性^[3-4]以及考虑相关性后的合理取值问题^[5-6], 本文重点研究 f 和 c 的离散性如果不符合规范分布线型时, 对重力坝抗滑稳定安全性的影响.

1 混凝土重力坝的抗滑稳定校核

按照《混凝土重力坝设计规范》(SL 319-2005), 重力坝沿水平滑移面的抗滑稳定安全系数 K 为:

$$K = \frac{f(\sum W - U) + cA}{\sum P} \quad (1)$$

式中: $\sum W$ 和 $\sum P$ 分别为作用于滑移面以上的力在铅直方向投影的代数和与水平方向投影的代数和; U 为作

收稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079045, 11132003); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2013BAB06B01); 江苏省2013年度普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13_0236)

作者简介: 蔡云鹏(1970-), 男, 陕西大荔人, 教授级高级工程师, 硕士研究生, 主要从事坝工设计工作.

通信作者: 田英(E-mail: zlte2011@163.com)

用于滑移面上的扬压力. 该规范规定, 不分坝的级别, 要求基本组合 $K \geq 3.0$.

关于摩擦系数 f 和黏聚力 c 的取值, 一般通过岩土体样本的剪切试验获得^[7-9]. 将试验成果分为若干组, 按照 Mohr-Coulomb 强度公式回归计算, 得到该组的内摩擦角 $\varphi = \arctan f$ 和黏聚力 c , 再把不同组的 φ 和 c 按常规统计方法求其均值和方差. 应用式(1)时, 摩擦系数 f 和 c 采用上述方法得到的定值, 未考虑其离散性.

与以上规范不同, 《混凝土重力坝设计规范》(DL 5108-1999) 采用分项系数法进行大坝的结构设计. 重力坝的抗滑稳定计算按照承载能力极限状态分析, 对于基本组合, 其极限状态方程为

$$\gamma_0 \psi S(\gamma_G G_K, \gamma_Q Q_K, a_K) \leq \frac{1}{\gamma_{dl}} R\left(\frac{f_K}{\gamma_m}, a_K\right) \quad (2)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; ψ 为设计状况系数; $S(\cdot)$ 为作用效应函数; $R(\cdot)$ 为大坝的抗力函数; γ_G 为永久作用分项系数; γ_Q 为可变作用分项系数; G_K 为永久作用标准值; Q_K 为可变作用标准值; a_K 为几何参数的标准值(可作为定值处理); f_K 为材料性能的标准值; γ_{dl} 为基本组合结构系数; γ_m 为材料性能分项系数.

2 可靠性方法用于混凝土重力坝抗滑稳定分析

式(1)和(2)中的作用荷载、材料强度和分项系数等实际上均为随机变量, 这就需要研究人员重视实际工程中存在的随机性因素, 并对这些信息加以分析和处理, 从而用更加合理、符合实际情况的方法对结构的稳定安全性进行科学分析, 即结构可靠性分析. 结构可靠性的概率度量定义为结构可靠度^[10], 是指结构在规定时间内和规定条件下完成预定功能的概率, 用 P_r 表示; 反之, 结构不能完成预定功能的概率, 称为失效概率, 用 P_f 表示. 二者之间存在关系: $P_r + P_f = 1$. 因此, P_r 和 P_f 都可用来表示结构的可靠度, 有时因计算和表达上的方便而常用 P_r . 用可靠性方法进行混凝土重力坝安全性分析的主要问题就是处理结构的随机信息以确定结构的可靠度或失效概率.

如果用向量 X 表示结构的随机变量, X 包括构件的几何尺寸、材料强度及荷载效应等, 表示为 $[X_1, X_2, \dots, X_n]$, 用 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 表示描述结构工作状态的函数, 称为结构功能函数, 则结构的工作状态可用下式表示:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} Z < 0, \text{失效状态} \\ Z = 0, \text{极限状态} \\ Z > 0, \text{可靠状态} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)和(2)均可转化为式(3)的形式, 以判别结构是否可靠.

假设重力坝的抗力随机变量为 R , 荷载效应随机变量为 S , 且 R 与 S 相互独立, 其相应的概率密度函数为 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$, 则结构功能函数为:

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (4)$$

结构的失效概率可表示为:

$$R_f = P(Z < 0) = \iint_{r < s} f_R(r) f_S(s) dr ds \quad (5)$$

由于一般情况下, 结构的功能函数比较复杂, 基本随机变量的联合概率密度函数也难以得到, 所以直接计算积分式(5)十分困难. 本文采用比较简便的近似计算方法——蒙特卡罗法^[11-12]. 蒙特卡罗法是从概率的角度出发来求解失效概率的, 首先对影响可靠度的随机变量进行大量随机抽样, 然后将这些抽样值逐个代入功能函数, 累计功能函数值小于零的个数, 由此确定失效概率, 又称随机抽样法, 其关键是产生已知分布变量的随机数, 通常分两步进行: 首先产生在开区间 $(0, 1)$ 上的均匀分布随机数; 再变换成给定分布变量的随机数^[13-14]. 该方法具有收敛速度与基本随机变量的维数无关、极限状态函数的复杂程度与模拟过程无关的优点, 能够较好解决抗剪断强度 f 和 c 相关性的问题^[3-4]. 而且, 对于状态函数非线性程度较大或者极限状态曲

面较复杂的情况,不需要将极限状态函数线性化和随机变量当量正态化,可直接进行计算.同时,该方法能够较容易地确定数值模拟的误差,从而确定抽样的次数和精度;但存在的主要问题是抽样次数相当大,需要较多的计算时间.

目前,人们往往也通过求得结构的可靠指标来度量结构的可靠性,需要时再给出相应的失效概率.

设 R 与 S 分别服从正态分布 (μ_R, σ_R^2) 和 (μ_S, σ_S^2) , 其中 μ 表示均值, σ 表示标准差, 且相互独立, 则其功能函数 Z 服从 (μ_Z, σ_Z^2) , 其中, $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$, $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$, 则可靠指标 β 可表示为:

$$\beta = \mu_Z / \sigma_Z \quad (6)$$

需要指出, 式(6)是在 R 与 S 服从正态分布的条件下得出的, 如果 R 与 S 为非正态分布随机变量, 则由式(6)算出的 β 值是近似的, 可供工程设计时参考. 因此, 在实际工程中, 不管 R 与 S 服从什么分布, 都可以把可靠指标 β 作为评价结构可靠性的标准.

3 抗剪断强度随机分布线型对抗滑稳定的影响

3.1 研究方法

取一个典型的重力坝剖面, 研究其沿水平滑移面的抗滑稳定性. 假定荷载作用效应 S 不变, 仅考虑抗剪断强度 f 和 c 离散性对重力坝稳定性的影响, 即由于 f 和 c 随机分布线型不同 (特征值不变) 引起的抗力函数和稳定安全系数的改变, 并与 f 和 c 取定值的结果进行比较.

抗力函数变化按以下 4 种抗剪强度 f 和 c 的随机分布线型组合进行分析 (表 1), 依次称为工况 1 ~ 工况 4, 其中工况 4 为规范^[2]规定的随机分布线型组合.

表 1 抗剪断强度 f 和 c 的随机分布线型组合

Tab. 1 Random distribution linear combination of shearing strength f and c

抗剪断强度	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
f	正态分布	对数正态分布	对数正态分布	正态分布
c	正态分布	对数正态分布	正态分布	对数正态分布

根据式(1)计算该重力坝工况 1 ~ 工况 4 的抗滑稳定安全系数 K , 应用蒙特卡罗法对大量的计算结果进行统计分析, 得到 $K < 3$ 和 $K < 1$ 的概率, 前者表示抗滑稳定不满足规范^[1]要求的概率, 后者表示处于极限平衡状态的失稳概率; 再由式(6)确定其可靠指标. 在此基础上, 研究它们因抗剪断强度随机分布线型不同而产生的变化规律.

3.2 计算结果及分析

图 1 为具有代表性的重力坝简化模型. 假定坝高 150 m, 底宽 100 m, 沿坝轴线方向取单位长度 1 m. 作用荷载包括坝体及基岩自重、上下游水压 (上游水深 140 m, 下游水深 0)、扬压力、淤沙压力 (淤沙重度为 5.8 kN/m^3 , 内摩擦角为 15° , 淤沙深度为 42.9 m, 坝踵处扬压力折减系数为 0.3, 坝体密度为 2.4 t/m^3). 重力坝自重为 183.456 MN, 静水压力为 96.040 MN, 淤沙力为 3.149 MN, 扬压力为 20.580 MN, 建基面上的法向合力为 162.876 MN, 切向合力为 99.189 MN. 建基面材料抗剪断强度的离散特征值如表 2 所示, 摩擦系数 f 和黏聚力 c 的变化范围基本上覆盖了现有重力坝建基面 f 和 c 取值.

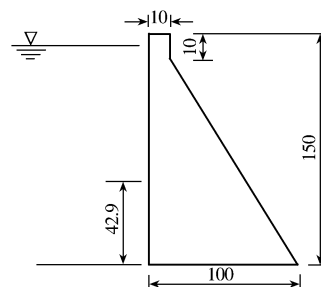


图 1 重力坝计算剖面尺寸 (单位: m)

Fig. 1 Cross-sectional dimensions of a gravity dam (unit: m)

在应用蒙特卡罗法研究重力坝沿建基面的抗滑稳定失效概率时, 为保证计算精度, 抽样计算次数要足够大. 不同计算次数下 4 种工况抗滑稳定安全系数 $K < 3$ 的概率和相对误差见表 3. 可以看出, 当取值次数为 10^6

次时,相对误差<0.1%,可近似忽略不计,因此下文进行抗滑稳定计算时,抽样计算次数均选定为 10^6 次.

表4列出4种工况以及抗剪断强度 f 和 c 取均值进行定值分析时,坝体沿建基面抗滑稳定计算的结果.

表 2 重力坝建基面岩体材料参数

Tab. 2 Material parameters of rock mass on foundation base of the gravity dam

凝聚力 c / MPa				摩擦系数 f			
μ	δ	σ	取值范围	μ	δ	σ	取值范围
0.742	0.35	0.26	(0.1,1.5)	0.89	0.2	0.178	(0.31,1.48)

表 3 不同抽样计算次数下安全系数 $K<3$ 的概率及相对误差

Tab. 3 Probability and relative errors of safety coefficient $K<3$ under different sampling calculations

抽样次数	安全系数 $K<3$ 的概率				相对误差
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	
10^4	98.120%	97.920%	97.540%	98.030%	$10^4 \sim 10^5, \varepsilon = (0.074 \sim 0.219) \%$
10^5	97.970%	97.706%	97.612%	97.896%	
10^6	97.968%	97.687%	97.587%	97.946%	$10^5 \sim 10^6, \varepsilon = (0.002 \sim 0.051) \%$

表 4 坝体沿建基面滑动的计算结果

Tab. 4 Calculated results of dam sliding along the foundation base

安全系数 K	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	定值计算
最小值 $K_{\min}$	0.645	0.953	0.818	0.801	$f=0.89$ $c=0.742$ MPa 由式(1)得 $K=2.210$
最大值 $K_{\max}$	3.913	3.926	3.886	3.851	
均 值	2.213	2.193	2.209	2.197	
标准差	0.385	0.371	0.381	0.376	
$K<3$ 的概率	97.97%	97.69%	97.59%	97.95%	
$K<1$ 的概率	0.050 9%	0.000 5%	0.007 5%	0.016 4%	
可靠指标 β	3.151	3.217	3.176	3.185	

分析计算结果可知:

(1)重力坝失稳破坏的可能性很小但稳定安全性不满足规范要求.从表4中 $K<1$ 和 $K<3$ 的概率来看,无论哪种工况(分布线型),该结构失稳破坏的可能性很小,但几乎都达不到规范规定的稳定性要求,即要求的安全余度不够.从表5美国土木工程师团对堤坝破坏概率的要求可以看出,由于 $K<1$ 的概率取值位于(0.000 03,0.001)之间,可靠指标取值位于(3,4)之间,该结构的稳定性高于平均水平,应当是比较好的.这反映了中美规范之间的差别.

表 5 堤坝的目标可靠指标和破坏概率 (USACE,1999)

Tab. 5 Target reliability index and failure probability of dam

稳定性	可靠指标	失效概率	稳定性	可靠指标	失效概率
非常好	5	0.000 000 3	差	2	0.023
好	4	0.000 03	失效	1.5	0.07
高于平均水平	3	0.001	危险	1	0.16
低于平均水平	2.5	0.006			

(2)4种工况中工况1最危险.从 $K<3$ 和 $K<1$ 的概率来看,均为工况1(f 和 c 均为正态分布)最大;从可靠指标 β 来看,工况1最小.抗滑稳定安全系数的最小值 $K_{\min}=0.645$,也发生在工况1;其均值为2.213,与抗剪断强度 f 和 c 取均值进行定值计算得到的 $K=2.210$ 最接近.

上述算例显示,工况1这种线型组合比规范^[2]规定的线型组合(工况4)更危险,采用工况1的线型组合

进行抗滑稳定性校核将偏于安全.可见,规范所用的分布线型(工况4)不一定对应于最不利的计算结果.因此,建议在应用规范^[2]进行抗滑稳定校核时,如果工程有足够的岩样试验资料,应根据材料抗剪强度的实际随机分布线型进行抗滑稳定分析;如果没有足够的试验样本,从安全的角度,可辅以按工况1的线型组合进行重力坝的稳定分析,即抗剪断强度 f 和 c 均采用正态分布线型.

4 抗剪断强度随机分布特征值对抗滑稳定的影响

4.1 研究方法

研究方法与第3节类似,假定荷载作用效应 S 不变,仅考虑抗剪断强度 f 和 c 离散性对重力坝稳定性的影响.此时,保持 f 和 c 的随机分布线型不变,研究随机分布特征值变化引起的抗力函数和稳定安全系数的改变.本文以规范^[2]建议的随机分布线型,即摩擦系数 f 正态分布,黏聚力 c 对数正态分布为例进行研究.

表6给出抗剪断强度 f 和 c 离散特征值变化的16种情况.其中,情况(1)~(4)黏聚力 c 为定值,摩擦系数 f 的变异系数一定而均值变化;(5)~(8)黏聚力 c 为定值,摩擦系数 f 的变异系数不同而均值一定;(9)~(12) f 为定值, c 的变异系数一定而均值变化;(13)~(16) f 为定值, c 的变异系数变化而均值一定.根据式(1)计算这16种情况的抗滑稳定安全系数 K ,并应用蒙特卡罗法对计算结果进行统计分析,得到 $K < 3$ 和 $K < 1$ 的概率,再由式(6)确定其可靠指标.在此基础上,研究它们随抗剪断强度随机分布特征值的变化规律.

表6 摩擦系数 f 和黏聚力 c 均值及变异系数变化的16种情况

Tab. 6 16 kinds of circumstances for the mean values and coefficients of variation of friction coefficients f and cohesion c

摩擦系数		f 均值改变				f 变异系数改变			
f		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
均值	0.89	0.7	0.8	0.9	1		0.89		
变异系数	0.2		0.2			0.1	0.2	0.3	0.4
标准差	0.178	0.14	0.16	0.18	0.2	0.089	0.178	0.267	0.356
黏聚力		c 均值改变				c 变异系数改变			
c		(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
均值	0.742	0.6	0.7	0.8	0.9		0.742		
变异系数	0.35		0.35			0.15	0.25	0.35	0.45
标准差	0.26	0.21	0.245	0.28	0.315	0.111	0.186	0.26	0.334

4.2 计算成果及分析

计算模型与第3节相同,蒙特卡罗法计算失效概率的抽样计算次数仍为 10^6 次.表7列出 f 和 c 均值与变异系数不同的16种情况下 K 的离散特征、失效概率和可靠度.图2为 f 和 c 离散特征值改变时大坝稳定安全系数的概率分布.

由表7和图2可以看出:

(1)随着摩擦系数 f 和黏聚力 c 均值的增大,稳定安全系数 K 的概率分布曲线逐渐向右移动, K 的均值和可靠指标 β 递增.计算得到的结构安全度增加,使得结构偏于不安全.为防止过于乐观估计结构安全度,在选取抗剪断强度均值时应客观、严谨.

(2)随着摩擦系数 f 和黏聚力 c 变异系数的增大,稳定安全系数 K 的概率分布曲线绕中间某一点(分别对应于 $K=2.2$ (图2(b)) and 2.4 (图2(d)))发生顺时针转动. K 的标准差递增,可靠指标 β 递减.可见,计算得到的结构安全度减小,使得结构偏于安全.

表 7 f 和 c 均值及变异系数不同情况下 K 的离散特征

Tab. 7 Discrete characteristics of K for different mean values and variation coefficients of f and c

参数	工况	最小值	最大值	均 值	标准差	$K<3$ 的概率	$K<1$ 的概率	可靠指标
f	(1)	0.729	3.537	1.887	0.330	99.918%	0.088%	2.690
	(2)	0.807	3.701	2.050	0.354	99.406%	0.033%	2.971
	(3)	0.806	3.914	2.214	0.378	97.670%	0.014%	3.208
	(4)	0.700	3.935	2.371	0.398	93.960%	0.008%	3.441
	(5)	1.177	3.520	2.197	0.280	99.500%	0	4.276
	(6)	0.818	3.901	2.197	0.376	97.930%	0.015%	3.183
	(7)	0.743	3.917	2.198	0.467	95.502%	0.130%	2.566
	(8)	0.710	3.923	2.200	0.519	93.595%	0.249%	2.311
c	(9)	0.762	3.857	2.063	0.356	99.308%	0.054%	2.986
	(10)	0.746	3.865	2.159	0.371	98.453%	0.023%	3.123
	(11)	0.717	3.892	2.247	0.382	97.150%	0.009%	3.268
	(12)	0.802	3.931	2.327	0.387	95.510%	0.005%	3.426
	(13)	0.983	3.515	2.209	0.311	99.444%	0	3.883
	(14)	0.882	3.811	2.208	0.344	98.727%	0.003%	3.513
	(15)	0.796	3.909	2.197	0.376	97.963%	0.016%	3.185
	(16)	0.694	3.912	2.174	0.400	97.501%	0.041%	2.937

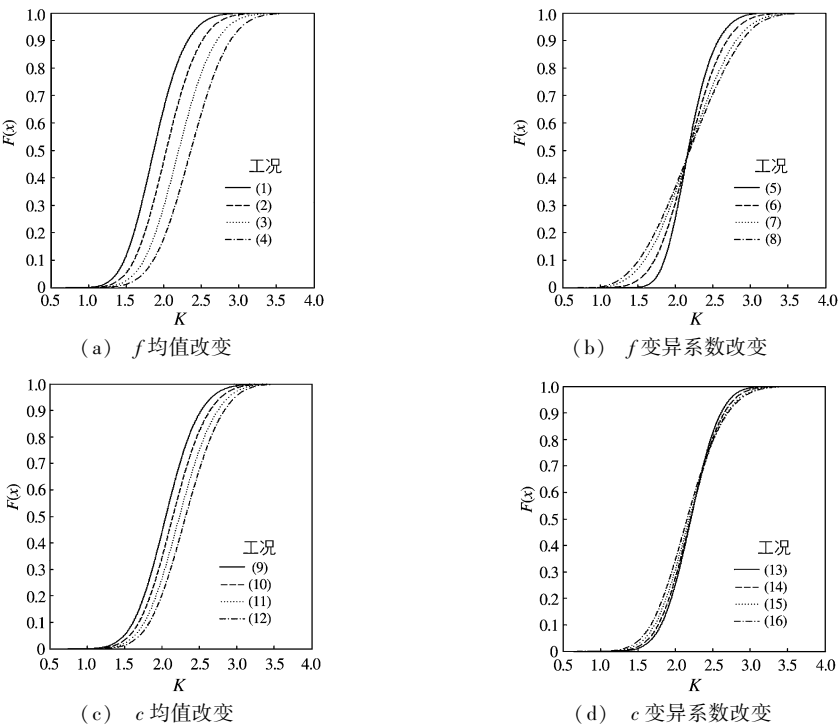


图 2 摩擦系数 f 和黏聚力 c 特征值变化引起的大坝稳定安全系数的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of dam stability safety factor caused by changes in characteristic values of friction coefficient f and cohesion c

5 结 语

考虑到重力坝建基面和岩基结构面抗剪断强度 f 和 c 的离散性与规范给定的分布规律可能不符,本文研究了抗剪断强度 f 和 c 的分布线型和离散特征值对大坝抗滑稳定安全性的影响,结论如下:

(1)抗剪断强度 f 和 c 均采用正态分布线型时,重力坝沿水平建基面失稳破坏(稳定安全系数 $K < 1$)的概率最大,可靠指标 β 最小.可见,规范所用的分布线型(工况4)不一定对应于最不利的计算结果.因此,建议应用规范^[2]进行抗滑稳定校核时,如果工程有足够的岩样试验资料,应根据材料抗剪强度的实际随机分布线型进行抗滑稳定分析;如果没有足够的试验样本,应辅以抗剪断强度 f 和 c 均采用正态分布的线型组合进行沿建基面的抗滑稳定分析最为安全.

(2)随着摩擦系数 f 和黏聚力 c 均值的增大,稳定安全系数 K 的概率分布曲线逐渐向右移动,可靠指标 β 增大,实际结构偏于不安全.为防止过于乐观估计结构安全度,在选取抗剪断强度均值时应客观、严谨.

(3)随着 f 和黏聚力 c 变异系数的增大,稳定安全系数 K 的概率分布曲线绕中间某一点发生顺时针转动.可靠指标 β 减小,使得结构偏于安全.

参 考 文 献:

- [1] SL319-2005, 混凝土重力坝设计规范[S]. (SL319-2005, Design specification for concrete gravity dams[S]. (in Chinese))
- [2] DL5108-1999, 混凝土重力坝设计规范[S]. (DL5108-1999, Design specification for concrete gravity dams[S]. (in Chinese))
- [3] 朱红霞, 闫澍旺. 随机场理论在抗剪强度指标统计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 3040-3046. (ZHU Hong-xia, YAN Shu-wang. Application of the random field theory in the shear strength index statistics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl): 3040-3046. (in Chinese))
- [4] 严春风, 王桂林, 冯劲, 等. 基于 Mohr-Coulomb 抗剪强度准则的岩体可靠度分析[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(2): 89-94. (YAN Chun-feng, WANG Gui-lin, FENG Jin, et al. Reliability analysis of rock mass based on the Mohr-Coulomb criterion of shear strength[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1999, 21(2): 89-94. (in Chinese))
- [5] 范明桥, 盛金保. 土强度指标 φ , c 的互相关性[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 100-104. (FAN Ming-qiao, SHENG Jin-bao. Cross correlation of soil strength index φ and c [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 100-104. (in Chinese))
- [6] 卞首蓉, 陈贵喜. 土的抗剪强度指标取值研究[J]. 土工基础, 2010, 24(2): 88-90. (BIAN Shou-rong, CHEN Gui-xi. Value research of the shear strength indexes of soil[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(2): 88-90. (in Chinese))
- [7] 杨强, 陈新, 周维垣. 抗剪强度指标可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 868-873. (YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Wei-yuan. Reliability analysis of shear strength index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 868-873. (in Chinese))
- [8] 李华晔, 黄志全, 刘汉东, 等. 岩基抗剪参数随机-模糊法和小浪底工程 c , φ 值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 155-161. (LI Hua-ye, HUANG Zhi-quan, LIU Han-dong, et al. Random-fuzzy method of batholith shear parameters and c , φ values calculation in Xiaolangdi project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 155-161. (in Chinese))
- [9] 肖本职, 吴相超, 熊诗湖. 地下厂房岩体结构面抗剪强度参数试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 75-77. (XIAO Ben-zhi, WU Xiang-chao, XIONG Shi-hu. Experimental study on shear strength parameters of underground powerhouse rock mass structural plane[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 75-77. (in Chinese))
- [10] 张明. 结构可靠度分析——方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (ZHANG Ming. Structural reliability analysis——methods and procedures[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. (XU Zhong-ji. Monte Carlo method[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985. (in Chinese))
- [12] 许文达. 基于蒙特卡罗-有限元法的边坡可靠度分析[J]. 福州大学学报, 2004, 32(1): 73-77. (XU Wen-da. Slope reliability analysis based on the Monte Carlo finite element method[J]. Journal of Fuzhou University, 2004, 32(1): 73-77. (in Chinese))
- [13] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. (WU Qing-xi. Structural reliability analysis and stochastic finite element method[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese))

- [14] 傅旭东, 赵善锐. 用蒙特卡洛(Monte_Carlo)方法计算岩土工程的可靠度指标[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 164-168. (FU Xu-dong, ZHAO Shan-rui. Reliability index of the geotechnical engineering calculated by using the Monte Carlo method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(1): 164-168. (in Chinese))

Impacts of shear strength discreteness along contact surface of dam on gravity dam stability

CAI Yun-peng^{1,2}, TIAN Ying³, TANG Xu-min³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. HydroChina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China; 3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Stability against sliding along the slide plane of concrete gravity dams is closely related to the friction coefficient f and cohesion c of the contact surface. In design criterion of the gravity dams, sometimes f and c are regarded as the constant values, and sometimes regarded as random variables where distribution is specified. In fact, f and c are not constant or don't accord with a given distribution. For the distribution of the stability safety factor against sliding of the gravity dam, very little research achievements can be found. In this paper, aiming at problems of stability against sliding along the foundation base of the concrete gravity dams, a reliability method is used in the studies of the effect on the stability safety factor K brought by the random distribution linear, the mean values and coefficients of variation of the friction coefficient f and cohesion c , revealing the discrete character and the varying patterns of the probability distribution curves and reliability index. The research results will contribute to the further recognition of the design criterion of the gravity dams.

Key words: gravity dams; stability against sliding; shear strength; discreteness; reliability method

版 权 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。

该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《水利水运工程学报》编辑部