

网络出版时间:2015-01-19 09:19

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.03.025

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150119.0919.025.html

基于 JC 法的重力坝深层抗滑稳定研究

黄灵芝,司 政,杜占科

(西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】研究重力坝深层抗滑稳定特性,为确保大坝施工期、运行期抗滑稳定安全提供参考。【方法】基于 JC 法建立了重力坝深层抗滑稳定可靠度分析模型,以刚体极限平衡法构造了重力坝双斜滑动面深层抗滑稳定极限状态函数,以滑裂面抗剪断摩擦系数和抗剪断凝聚力为随机变量,分析重力坝双斜滑动面深层抗滑稳定安全度。编制基于 JC 法的重力坝深层抗滑稳定可靠度计算程序,对某水利枢纽工程非溢流坝段正常蓄水位情况下的危险断面进行分析。【结果】对某水利工程非溢流坝段在正常蓄水位下危险断面的分析表明,采用 JC 法可靠度计算程序计算得到其双斜面深层抗滑稳定的可靠度指标 $\beta=4.36$,其失效概率 $P_f=0$;而采用传统的刚体极限平衡法计算得到其双斜面深层抗滑稳定的安全系数 $K=3.23$,满足重力坝深层抗滑稳定基本组合工况下 $K>3.0$ 的要求。2 种方法计算结果均表明,该坝段的深层抗滑稳定满足要求。【结论】采用 JC 法可以运用可靠度理论实现重力坝深层抗滑稳定的计算与分析。

【关键词】 重力坝;深层抗滑稳定;极限状态;JC 法

【中图分类号】 TV64

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)03-0229-06

JC method based deep anti-sliding stability of gravity dam

HUANG Ling-zhi, SI Zheng, DU Zhan-ke

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】 This paper studied the deep anti-sliding stability of gravity dam to ensure the anti-sliding safety of gravity dam during construction and operation period. 【Method】 A reliable analysis model for deep anti-sliding stability of gravity dam was established based on JC method, and the limit state function of deep anti-sliding stability of gravity dam was constructed by using rigid body limit equilibrium method. Deep anti-sliding stability safety degree of gravity dam was calculated with the random variables including sliding plane anti-shear friction coefficient and anti-shear cohesion. In addition, calculation program of gravity dam deep anti-sliding stability based on JC method was compiled and a non-overflow gravity dam section under normal pool level was calculated. 【Result】 Deep anti-sliding stability of a hydro project of non-overflow gravity dam section was analyzed under normal water level. The reliability index β of deep anti-sliding stability using compiled program was 4.36, and failure probability P_f was zero. The safety factor K calculated using limit rigid body method was 3.23, which met the basic requirement of $K>3.0$. The results of both methods showed that deep anti-sliding stability of the dam section met the requirement. 【Conclusion】 Deep anti-sliding stability of gravity dam can be achieved by JC method.

Key words: gravity dam; deep anti-sliding stability; limit state; JC method

【收稿日期】 2014-09-01

【基金项目】 国家自然科学基金项目(51409207, 51309190, 51479168); 中央财政支持地方高校发展专项(106-5X1205); 陕西省重点学科建设专项(106-00X903)

【作者简介】 黄灵芝(1982—), 女, 湖北松滋人, 在读博士, 主要从事水工结构可靠度理论研究。E-mail: hlzsz@126.com

重力坝坝基若存在缓倾角软弱夹层,则对大坝的抗滑稳定十分不利,其可能引起坝基的深层滑动而导致坝体失稳,因此必须分析坝体带动基岩沿软弱面失稳的可能性,研究坝基的深层抗滑问题^[1]。目前,研究重力坝深层抗滑稳定的方法主要有刚体极限平衡法、有限元法、地质力学模型试验法等。

近年来,国内外学者对可靠度理论在重力坝设计中的应用进行了深入研究,并取得了大批科研成果。兰仁烈^[2]提出采用可靠度理论进行重力坝深层抗滑稳定分析,并建立了极限状态方程计算式;李守义等^[3]根据结构可靠度理论,推导出了重力坝深层单滑裂面的抗滑稳定可靠度计算公式,并通过实例验证了其正确性;杨晓贞等^[4]采用等安全系数法,建立了计入侧向阻力的深层抗滑稳定可靠指标力学模型;王东等^[5]分析了重力坝沿建基面抗滑稳定的可靠安全度,并对影响可靠度指标的多个随机变量进行了敏感性分析;Duncan^[6]运用传统的安全系数计算方法,通过变量概率取值的安全系数得到了结构的可靠度指标。另有大量科研人员采用有限元理论对重力坝深层抗滑稳定进行了专门研究,并取得了大批研究成果^[7-15]。由此可见,目前对重力坝抗滑稳定的可靠度研究主要集中在可靠度模型的建立和极限状态方程的构建等方面,而对可靠度的具体求解方式探讨甚少。为此,本研究在前人已有成果的基础上,提出采用 JC 法对重力坝深层双滑裂面的抗滑稳定进行分析,以期对重力坝深层抗滑稳定研究提供新途径。

1 可靠度分析方法

进行结构可靠度分析时,结构的极限状态由功能函数来表述,当有 n 个随机变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 影响结构的可靠度时,结构的功能函数 Z 可用下式表示:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

当 $Z > 0$ 时,结构处于可靠状态; $Z = 0$ 时,结构处于极限状态; $Z < 0$ 时,结构处于失效状态。

若随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 均服从正态分布,其均值和标准差分别为 $\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}$ 和 $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_n}$,则结构的功能函数 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 也是正态随机变量,其均值 μ_z 和标准差 σ_z 分别为:

$$\mu_z = g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}). \quad (2)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (3)$$

结构的功能函数 Z 的概率密度 $f(z)$ 为:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right). \quad (4)$$

式中: μ_z, σ_z 分别为功能函数 Z 的均值和标准差; z 为随机变量,其取值为 $(-\infty, +\infty)$ 。

将 Z 的正态分布转换为标准正态分布,则 Z 的失效概率 P_f 为:

$$P_f = \Phi(-\mu_z/\sigma_z) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta). \quad (5)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态变量的累积概率密度函数; $\beta = \mu_z/\sigma_z$,即为结构的可靠度指标。

实际工程中很多变量不服从正态分布,这就需要将非正态随机分布变量当量化为正态随机变量,一般采用国际结构安全联合委员会(JCSS)推荐的 JC 法。运用 JC 法进行当量正态化的条件为:在非正态变量 X_i 的验算点 x_i^* 处,当量正态随机变量 X_i' 与非正态变量 X_i 的分布函数值和概率密度函数值分别相等,即:

$$F_{X_i}(x_i^*) = F_{X_i'}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{X_i'}}{\sigma_{X_i'}}\right). \quad (6)$$

$$f_{X_i}(x_i^*) = f_{X_i'}(x_i^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{X_i'}} \exp\left[-\frac{(X_i^* - \mu_{X_i'})^2}{2\sigma_{X_i'}^2}\right]. \quad (7)$$

式中: $F_{X_i}(\cdot), F_{X_i'}(\cdot)$ 分别为非正态分布变量 X_i 和正态随机变量 X_i' 的分布函数, $f_{X_i}(\cdot), f_{X_i'}(\cdot)$ 分别为非正态分布变量 X_i 和正态随机变量 X_i' 的概率密度函数, $\mu_{X_i'}, \sigma_{X_i'}$ 分别为正态随机变量 X_i' 的平均值和标准差。

用当量正态随机变量 X_i' 的平均值 $\mu_{X_i'}$ 和标准差 $\sigma_{X_i'}$, 替换对应 X_i 的平均值 μ_{X_i} 和标准差 σ_{X_i} :

$$\mu_{X_i'} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)]\sigma_{X_i'}. \quad (8)$$

$$\sigma_{X_i'} = \phi\{\Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)]\}/f_{X_i}(x_i^*). \quad (9)$$

式中: $\Phi^{-1}[F_{X_i}(\cdot)]$ 为非正态分布变量 X_i 的分布函数的逆函数, $\phi(\cdot)$ 为标准正态变量的累积概率密度函数。

可靠度指标 β 是标准正态空间坐标系中,设计验算点 P^* 沿其极限状态曲面切平面的法线方向至坐标原点 O 的长度。法线 OP^* 对坐标向量的方向余弦为:

$$\cos \theta_{X_i} = -\frac{\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{P^*} \sigma_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{P^*} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}}. \quad (10)$$

式中: θ_{X_i} 为正态空间坐标系中,设计验算点 P^* 和坐标原点 O 的连线 OP^* 与坐标向量的夹角; σ_{X_i} 为非

正态分布变量 X_i 的标准差。

将上述关系变换到原始坐标系中,可得 P^* 在原始坐标系中的坐标为:

$$x_i^* = \mu_{x_i} + \bar{x}_i^* \sigma_{x_i} = \mu_{x_i} + \beta \sigma_{x_i} \cos \theta_{x_i} \quad (11)$$

式中, $\bar{x}_i^*$ 为非正态分布变量 X_i 的验算点 x_i^* 在标准正态空间坐标系中的坐标。

由于 P^* 点在极限状态曲面上,故满足极限状态方程(1),即:

$$g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0. \quad (12)$$

将式(10)~(12)联立,即可求解 β 和 $x_i^* (i=1, 2, \dots, n)$ 。

2 重力坝深层抗滑稳定分析的极限状态函数

重力坝深层滑动一般出现在软弱结构面上,且以双斜滑动面最易产生滑动,如图1所示, ΣP 为坝体上游面静水压力, ΣW 为坝体所有铅直力之和, G_1 、 G_2 分别为岩体块 ABD、BCD 的自重, θ_1 、 θ_2 分别为 AB、BC 与水平面的夹角, U_1 、 U_2 、 U_3 分别为 AB、BC、BD 面上的扬压力, Q 、 φ 分别为 BD 面上的抗力及抗力作用方向与水平面的夹角。

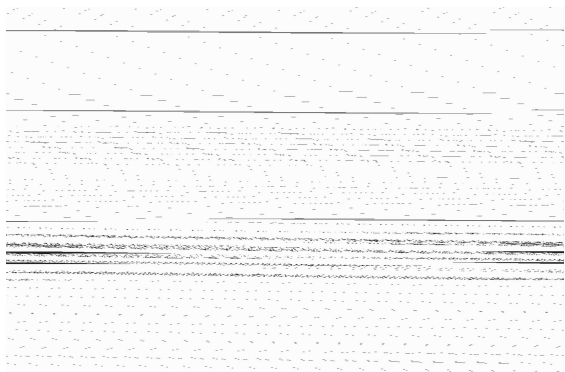


图1 重力坝深层双斜滑动面示意图

Fig.1 Sketch of double-inclined sliding plane

重力坝深层抗滑稳定对滑裂面抗剪断摩擦系数 f' 和抗剪断凝聚力 c' 尤为敏感^[7],因此本研究假定主滑裂面 AB 和辅助滑裂面 BC 的抗剪断摩擦系数 f_1' 、 f_2' 和抗剪断凝聚力 c_1' 、 c_2' 为随机变量,其均值分别为 $\mu_{f_1'}$ 、 $\mu_{f_2'}$ 、 $\mu_{c_1'}$ 、 $\mu_{c_2'}$,标准差分别为 $\sigma_{f_1'}$ 、 $\sigma_{f_2'}$ 、 $\sigma_{c_1'}$ 、 $\sigma_{c_2'}$ 。

对于重力坝的双斜面深层滑动,在水压力、自重、扬压力 3 种荷载作用下,由岩体块 ABD 上作用平衡所确定的深层抗滑稳定的极限状态函数为^[7]:

$$Z = f_1' [(\Sigma W + G_1) \cos \theta_1 - Q \sin (\varphi - \theta_1) + U_3 \sin \theta_1 - \Sigma P \sin \theta_1 - U_1] + Q \cos (\varphi - \theta_1) + c_1' A_1 -$$

$$[(\Sigma W + G_1) \sin \theta_1 - U_3 \cos \theta_1 + \Sigma P \cos \theta_1]. \quad (13)$$

式中: A_1 为岩体块 ABD 的滑动面面积; Q 为抗力,可由刚体极限平衡法中的等安全系数法求得。关于 Q 的二次方程为:

$$aQ^2 + bQ + c = 0. \quad (14)$$

式中: $a = f_1' \sin (\varphi - \theta_1) \cos (\varphi + \theta_2) - f_2' \sin (\varphi + \theta_2) \cos (\varphi - \theta_1)$;

$$b = f_2' \sin (\varphi + \theta_2) [\Sigma P \cos \theta_1 + (G_1 + \Sigma W) \times \sin \theta_1 - U_3 \cos \theta_1] - \cos (\varphi - \theta_1) \times [f_2' (G_2 \cos \theta_2 + U_3 \sin \theta_2 - U_2) + c_2' A_2] + f_1' \sin (\varphi - \theta_1) (U_3 \cos \theta_2 - G_2 \sin \theta_2) - \cos (\varphi + \theta_2) \{ f_1' [(G_1 + \Sigma W) \cos \theta_1 - \Sigma P \sin \theta_1 + U_3 \sin \theta_1 - U_1] + c_1' A_1 \};$$

$$c = \{ f_2' [G_2 \cos \theta_2 + U_3 \sin \theta_1 - U_2] + c_2' A_2 \} [\Sigma P \cos \theta_1 + (G_1 + \Sigma W) \sin \theta_1 - U_3 \cos \theta_1] - \{ f_1' [(G_1 + \Sigma W) \cos \theta_1 - \Sigma P \sin \theta_1 + U_3 \sin \theta_1 - U_1] + c_1' A_1 \} \times (U_3 \cos \theta_2 - G_2 \sin \theta_2).$$

b 、 c 计算公式中, A_2 为岩体块 BCD 的滑动面面积。

3 基于JC法求解重力坝深层抗滑稳定的计算流程

采用JC法求解重力坝深层抗滑稳定时的计算流程如图2所示。具体可以简述如下:

1) 假定结构初始可靠度指标为 β_0 。

2) 假定初始设计验算点 $x_i^* = \mu_{x_i}$,即取参数 f_1' 、 f_2' 、 c_1' 、 c_2' 的均值 $\mu_{f_1'}$ 、 $\mu_{f_2'}$ 、 $\mu_{c_1'}$ 、 $\mu_{c_2'}$ 。

3) 由式(8)、(9)将非正态分布变量当量正态化,得 $\mu_{x_i'}$ 、 $\sigma_{x_i'}$ 。

4) 确定极限状态函数对随机变量的偏导数,即求 $\frac{\partial Z}{\partial f_1'}$ 、 $\frac{\partial Z}{\partial f_2'}$ 、 $\frac{\partial Z}{\partial c_1'}$ 、 $\frac{\partial Z}{\partial c_2'}$ 。

$$\frac{\partial Z}{\partial f_1'} = (\Sigma W + G_1) \cos \theta_1 - Q \sin (\varphi - \theta_1) + U_3 \sin \theta_1 - \Sigma P \sin \theta_1 - U_1 + [\cos (\varphi - \theta_1) - f_1' \sin (\varphi - \theta_1)] \frac{\partial Q}{\partial f_1'}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial f_2'} = [\cos (\varphi - \theta_1) - f_1' \sin (\varphi - \theta_1)] \frac{\partial Q}{\partial f_2'}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial c_1'} = [\cos (\varphi - \theta_1) - f_1' \sin (\varphi - \theta_1)] \frac{\partial Q}{\partial c_1'} + A_1, \quad (17)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial c_2} = [\cos(\varphi - \theta_1) - f_1' \sin(\varphi - \theta_1)] \frac{\partial Q}{\partial c_2}.$$

(18)

式(15)~(18)中抗力 Q 对随机变量的偏导数可通过对式(14)两边取偏导求得,即:

$$\frac{\partial Q}{\partial f_1'} = \frac{1}{2aQ+b} = \left\{ \begin{aligned} & -Q^2 \sin(\varphi - \theta_1) \cos(\varphi + \theta_2) - Q \sin(\varphi - \theta_1) (U_3 \cos \theta_2 - \\ & G_2 \sin \theta_2) + [(G_1 + \sum W) \cos \theta_1 - \sum P \sin \theta_1 + U_3 \sin \theta_1 - \\ & U_1] \cdot [U_3 \cos \theta_2 - G_2 \sin \theta_2 + Q \cos(\varphi + \theta_2)] \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial f_2'} = \frac{1}{2aQ+b} = \left\{ \begin{aligned} & Q^2 \sin(\varphi + \theta_2) \cos(\varphi - \theta_1) + Q[G_2 \cos \theta_2 + U_3 \sin \theta_2 - \\ & U_2] - [\sum P \cos \theta_1 + (G_1 + \sum W) \sin \theta_1 - U_3 \cos \theta_1] \cdot \\ & [G_2 \cos \theta_2 + U_3 \sin \theta_2 + Q \sin(\varphi + \theta_2)] \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial c_1'} = \frac{1}{2aQ+b} = [Q \cos(\varphi + \theta_2) + U_3 \cos \theta_2 - G_2 \sin \theta_2] A_1, \quad (21)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial c_2'} = \frac{1}{2aQ+b} = [Q \cos(\varphi - \theta_1) - \sum P \cos \theta_1 - (G_1 + \sum W) \sin \theta_1 + U_3 \cos \theta_1] A_2. \quad (22)$$

由式(19)~(22)可计算得抗力 Q 对随机变量的偏导数,然后代入式(15)~(18)中,即可求得极限状态函数对随机变量的偏导数。

5)计算灵敏系数 α_{X_i} 。灵敏系数 α_{X_i} 为随机变量 X_i 对整个功能函数值标准差的影响,即为结构可靠度对该随机变量的敏感系数, $\alpha_{X_i} = \cos \theta_{X_i}$,可由式(10)求得。

6)由式(11)假定新的设计验算点 x_i^{2*} 。重复步骤3)~6),直至验算点前后2次的差值在允许范围内。

7)将新的 x_i^{2*} 代入极限状态方程(12),检验方程是否满足,若不满足,则以 $\beta_{n+1} = \beta_n + g_n \cdot \Delta\beta/\Delta g$ 重新计算 β 值,重复步骤3)~7),直至 $g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \approx 0$,所得 β 值即为结构的可靠度指标值。

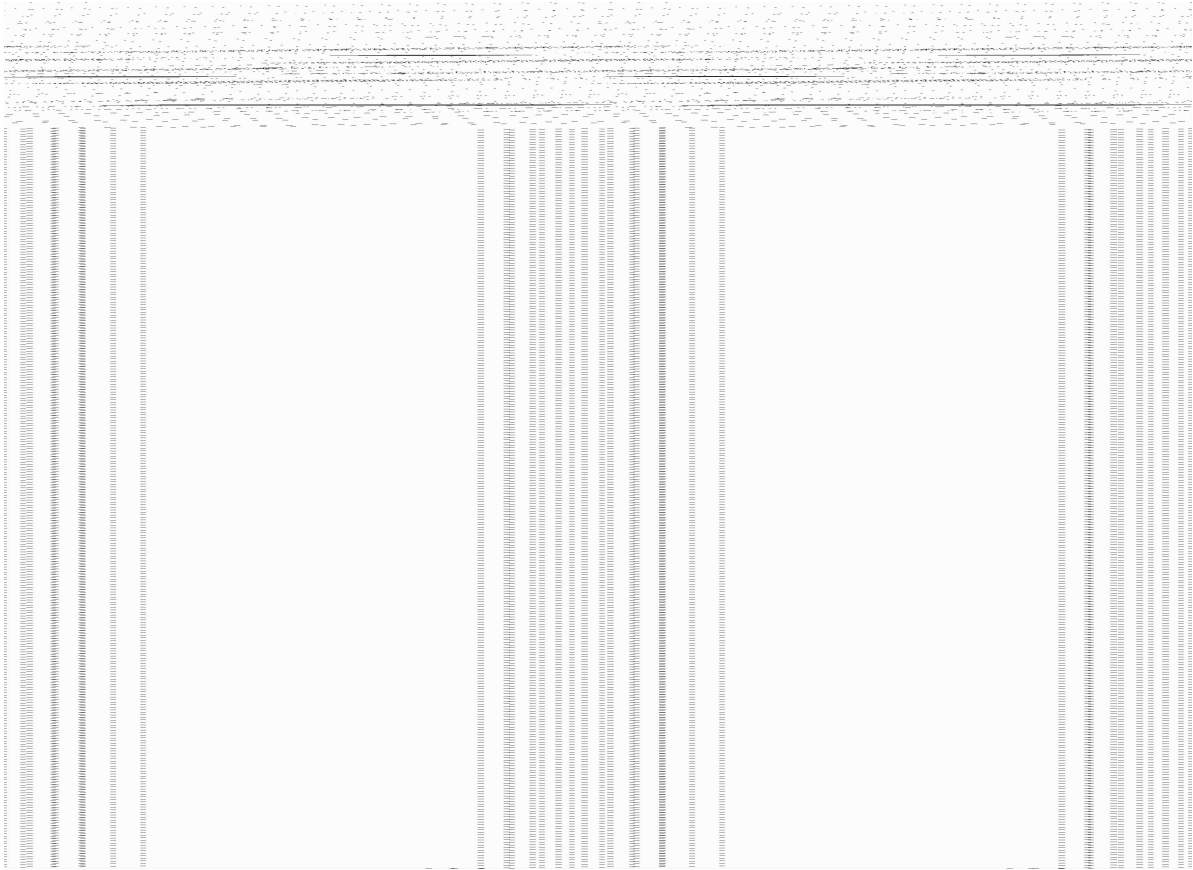


图 2 JC 法的求解流程
Fig. 2 Flow chart of JC method

4 重力坝深层抗滑稳定的实例分析

根据前述理论和计算步骤,以某水利枢纽工程非溢流坝段的较危险断面为例进行分析,其剖面如图 3 所示。

非溢流坝最大坝高 121.0 m,建基面高程 324.0 m,坝顶高程 445.0 m,坝顶宽度 12.0 m。根据工程地质资料,主滑裂面和辅助滑裂面与水平面的夹角分别为 $\theta_1=16^\circ, \theta_2=19^\circ$ 。坝基深层抗滑稳定计算中,考虑主滑裂面抗剪断摩擦系数 f_1' 、抗剪断凝聚力 c_1' 及辅助滑裂面抗剪断摩擦系数 f_2' 、抗剪断凝聚力 c_2' 为随机变量,随机变量统计特征见表 1。混凝土容重 23.8 kN/m^3 ,基岩容重 27.0 kN/m^3 。计算工况采用正常蓄水位的基本组合,上、下游水位分别为 439.0 和 345.5 m;计算荷载包括重力坝及滑

动面以上基岩自重、上下游静水压力、扬压力,扬压力折减系数取 0.25。

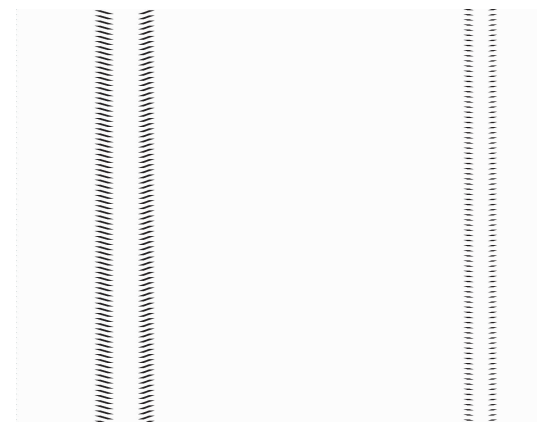


图 3 某重力坝深层抗滑稳定计算示意图(单位:m)
Fig. 3 Sketch of stability against sliding of deep foundation(Unit:m)

表 1 坝基深层抗滑稳定计算随机变量的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of random variables in calculation of gravity dam foundation deep anti-sliding stability				
随机变量 Variable	f_1'	c_1' /kPa	f_2'	c_2' /kPa
均值 Mean value	0.55	450.00	0.76	500.00
变异系数 Coefficient of variation	0.25	0.40	0.21	0.35
标准差 Standard deviation	0.15	120.00	0.16	180.00
分布类型 Probability distribution	正态分布 Normal distribution	对数正态分布 Lognormal distribution	正态分布 Normal distribution	对数正态分布 Lognormal distribution

利用编制的程序计算得重力坝双斜面深层抗滑稳定可靠度指标 $\beta=4.36$,则其失效概率 $P_f=0$,由此可知,采用可靠度理论计算的重力坝双斜面深层抗滑稳定满足实际要求。采用刚体极限平衡法进行验证,计算得重力坝双斜面深层抗滑稳定安全系数 $K=3.23$,对于基本组合 $K>3.0$ 即认为抗滑稳定满足要求。2 种方法计算结果均表明,该坝段的深层抗滑稳定满足要求,所得结论相同。

5 结 语

重力坝坝基存在的缓倾角软弱夹层可能引起坝基的深层滑动而失稳。本研究将对抗滑稳定影响最敏感的滑动面抗剪强度参数作为随机变量,利用刚体极限平衡法建立重力坝深层抗滑稳定极限状态函数,采用 JC 法将非正态分布变量正态当量化,运用结构可靠度理论对坝基深层双斜面抗滑稳定安全进行分析研究。工程实例计算结果表明,采用 JC 法和传统的刚体极限平衡法进行重力坝双斜滑动面抗滑稳定分析时,计算结论一致,说明采用 JC 法可以实现重力坝深层抗滑稳定的计算分析,可为重力坝深

层抗滑稳定研究提供新途径。

[参考文献]

[1] 周 泽,周 峰,潘军校,等. 重力坝深层抗滑稳定计算探讨 [J]. 岩土力学,2008,29(6):1719-1722.
Zhou Z,Zhou F,Pan J X,et al. Study on stability against deep sliding of gravity dam [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29 (6):1719-1722. (in Chinese)

[2] 兰仁烈. 重力坝深层抗滑稳定计算探讨 [J]. 水电站设计, 2003,19(1):26-30.
Lan R L. Reliability analysis of gravity dam stability against deep slide [J]. Design of Hydroelectric Power Station,2003,19 (1):26-30. (in Chinese)

[3] 李守义,寇效忠. 重力坝深层抗滑稳定可靠度分析 [J]. 水利学报,1998(S1):24-27.
Li S Y,Kou X Z. The reliability analysis for deep slide stability of gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998 (S1):24-27. (in Chinese)

[4] 杨晓贞,苏 燕. 重力坝深层抗滑稳定的可靠性分析 [J]. 福州大学学报:自然科学版,2001,29(2): 80-83.
Yang X Z,Su Y. Reliability analysis on gravity dam stability a- gainst deep sliding [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition,2001,29(2):80-83. (in Chinese)

- [5] 王 东,陈建康.重力坝可靠度参数敏感性探讨[J].四川大学学报:工程科学版,2001,33(4):1-5.
Wang D,Chen J K. Reliability research on sensitivity of concrete gravity dam to random variables[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2001,33(4):1-5. (in Chinese)
- [6] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126(4):307-316.
- [7] 潘军校,周 泽,陈养源.重力坝深层抗滑稳定的可靠度分析[J].水力发电学报,2007,26(5):64-67.
Pan J X,Zhou Z,Chen Y Y. The reliability analysis for stability against sliding at deep foundation of gravity dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(5):64-67. (in Chinese)
- [8] 朱建明,张宏涛,陈祖煜.重力坝深层抗滑稳定可靠度分析研究[J].岩土工程学报,2008,32(10):1444-1448.
Zhu J M,Zhang H T,Chen Z Y. Reliability analysis on deep slide of gravity dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,32(10):1444-1448. (in Chinese)
- [9] 厉丹丹,李同春,肖 峰.龙滩大坝抗滑稳定可靠度分析[J].水电能源科学,2010,28(1):54-56.
Li D D,Li T C,Xiao F. Reliability analysis of stability against sliding for Longtan dam[J]. Water Resources and Power,2010,28(1):54-56. (in Chinese)
- [10] 杨冬升,张 晖.基于 ANSYS 的混凝土重力坝坝基抗滑稳定可靠度分析[J].贵州大学学报,2010,27(1):124-127.
Yang D S,Zhang H. Reliability analysis of concrete gravity dam foundation anti-sliding stability based on ANSYS[J]. Journal of Guizhou University,2010,27(1):124-127. (in Chinese)
- nese)
- [11] 周 伟,常晓林,徐建强.基于分项系数法的重力坝深层抗滑稳定分析[J].岩土力学,2007,28(2):315-320.
Zhou W,Chang X L,Xu J Q. Analysis of anti-sliding stability in deep foundation of gravity dam based on partial coefficient[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(2):315-320. (in Chinese)
- [12] 蒋春艳,常晓林,周 伟.用于重力坝抗滑稳定分析的分项系数有限元方法[J].水力发电学报,2006,25(2):16-20.
Jiang C Y,Chang X L,Zhou W. Partial coefficient FEM for gravity dam anti-sliding stability analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2006,25(2):16-20. (in Chinese)
- [13] 曹去修,柏宝忠,王贵明.重力坝深层抗滑稳定极限状态设计式探讨[J].人民长江,2003,34(7):40-42.
Cao Q X,Bo B Z,Wang G M. Discussion on design expression of gravity stability against slide[J]. Yangtze River,2003,34(7):40-42. (in Chinese)
- [14] 黄东军,聂广明.重力坝深层抗滑稳定安全评价若干问题的思考[J].水力发电学报,2005,24(2):90-94.
Huang D J,Nie G M. Research on several problems in the safety evaluation of stability against deep slide of gravity dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2005,24(2):90-94. (in Chinese)
- [15] 封伯昊,张立翔,金 峰.基于损伤的混凝土大坝可靠度分析[J].工程力学,2005,22(3):46-51.
Feng B H,Zhang L X,Jin F. Reliability analysis of concrete dam based on damage concept[J]. Engineering Mechanics,2005,22(3):46-51. (in Chinese)