

文章编号: 1000-7598(2012)10-3139-07

重力坝层间抗滑稳定体系的动力可靠度分析方法

张社荣, 王超, 孙博

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 受明显的层状结构影响, 加之材料参数和动荷载的双重随机性, 动力条件下碾压混凝土重力坝的层间抗滑稳定可靠度问题值得关注。考虑地震波频谱特性、峰值加速度、坝体材料参数的随机性, 统计概化出地震作用下坝体的潜在滑动失效路径; 在特定地震动作用下, 基于随机有限元分析结果, 采用刚体极限状态判断准则和响应面法构建失效路径的动力抗滑稳定功能函数, 进而求得抗滑稳定可靠指标; 接着考虑不同失效路径的相关性, 用 Ditlevsen 窄界限公式估算体系的可靠度; 最后, 考虑地震动荷载的随机性, 采用基于全概率公式的数值拟合积分方法求解大坝抗滑稳定体系的动力可靠度。研究结果表明, 动力条件下, 当水平地震系数大于 0.2 时, 重力坝层间抗滑体系可靠度不再由建基面失效路径决定, 而是由下游折坡处层面的失效路径决定。该方法数学意义明确, 实用性强。

关键词: 水工结构; 碾压混凝土重力坝; 动力体系可靠度; 层间抗滑稳定

中图分类号: TV 642.3

文献标识码: A

Dynamic reliability analysis method of anti-sliding stability between layers of gravity dams

ZHANG She-rong, WANG Chao, SUN Bo

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Due to the randomness of dynamic loads and structural parameters, dynamic reliability of stability between layers of RCC gravity dam deserves the attention. Considering the randomness of spectrum characteristics and peak acceleration of seismic waves as well as material parameters of the dam, potential sliding paths of the dam subjected to earthquake can be identified by generalized statistics; based on stochastic finite element method (SFEM) results, the limit state function of dynamic sliding is built according to rigid limit state criteria and response surface method (RSM) under a certain seismic loading; the reliability index is got as well; then, considering the relativity between different failure paths, the reliability index of the system can be estimated by Ditlevsen narrow-bound method. Finally, the randomness of seismic load is taken into account, the numerical integration method based on complete probability formula is used to get the dynamic system reliability. The results indicate that the system reliability between layers of gravity dam no longer depends on the failure path of the foundation plane, but is closely related to the failure paths at the downstream fold slope when the horizontal earthquake coefficient is greater than 0.2. This method is mathematically clear and practical.

Key words: hydraulic structure; RCC gravity dam; dynamic system reliability; anti-sliding stability between layers

1 引言

由于施工工艺和施工质量的影响, 碾压混凝土重力坝具有明显的层状构造, 坝体渗漏和层面间抗滑稳定影响坝体安全^[1], 特别是动力工况下, 受坝基和坝体材料参数不确定性及地震荷载随机性的影响, 坝体内部存在潜在滑动失稳层面, 坝体体系的层间抗滑稳定安全度^[2]必须进行校核。

地震作用下体系抗滑稳定可靠度属于结构体系动力可靠度问题。在此方面, 张社荣等^[3]采用离散化降维数值解法研究了重力坝水荷载与地震荷载的组合问题, 计算了某重力坝的动力抗滑稳定可靠度及相应的地震烈度验算点; 胡强等^[4]研究了复杂结构体系极限状态方程的拟合和可靠度计算的新方法; 陈颖等^[5]研究了随机结构在随机荷载作用下的动力可靠度问题; 范书立等^[6]采用改进拟静力法计

收稿日期: 2011-06-17

基金项目: 重大水利工程安全性的基础理论研究(No. 51021004); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金。

第一作者简介: 张社荣, 男, 1960年生, 博士, 教授, 主要从事水工结构可靠度方面的研究工作。E-mail: tjuzsr@126.com

算了重力坝动力可靠度,在简化考虑失效路径相关性的条件下研究了重力坝体系的抗震可靠度。徐强等^[7-8]研究了动力作用下重力坝受拉失效路径的可靠度及体系可靠度计算方法,并对强度失效路径进行了搜索。

动力可靠度实质上是综合应用动力分析理论和概率理论,在结构随机动力响应分析的基础上对响应结果进行概率统计分析,进而求得结构动力可靠度。重力坝体系层间动力抗滑稳定可靠度分析尚有许多问题需要解决:一方面,地震作用下坝体潜在滑动模式多为人为拟定,滑动失效路径的搜寻没有进行到底;另一方面,坝体层面动力抗滑稳定可靠度估计的方法体系尚需探讨。

本文同时考虑地震荷载和结构参数的双重随机性,通过统计概化,确定结构的潜在滑动失效路径;建立了碾压混凝土坝层面动力抗滑可靠度计算模型。根据体系可靠度理论,考虑不同滑动失效模式间的相关性和地震作用的随机性,采用基于全概率公式的数值拟合积分方法求解层面抗滑稳定体系的动力可靠度。

2 动力抗滑体系可靠度计算方法

2.1 潜在抗滑失效路径的确定

失效模式是指结构失效的方式,它与一定的功能目标相对应。失效路径是指由于结构部分单元在加载过程中会逐步破坏而形成的通道或者薄弱层面。本文研究碾压混凝土重力坝的坝体抗滑稳定失效模式及其对应的失效路径。

目前对失效路径的确定多是基于人为假定。对于常规重力坝,建基面即坝体稳定的薄弱控制面^[2];对碾压混凝土重力坝没有必要对各层面逐一计算,一般仅验算建基面、上下游折坡处层面这些较为确定的路径^[6]。但在地震作用下,坝体层面的稳定性受动荷载导致材料性能退化引起的剪应力降低及坝体坝基动力相互作用的影响,坝体抗滑薄弱层面可能会出现各不相同的分布特征,人为拟定不甚科学且容易遗漏一些不易辨识的失效路径。为此,本文以数值试验结果为基础,对潜在的抗滑失效路径进行统计确定。

考虑地震波频谱特性、峰值加速度、坝体、坝基材料参数的随机性,采用统计分析的方法确定动力条件下结构的潜在失效路径,认为结构沿各条路径均可能发生抗滑失稳。具体做法是:选取结构所在场地条件下*i*组频谱特性不同的地震波,分别按照 0.1 g~0.6 g 范围内*j*个不同地震峰值加速度进行

调幅,输入*k*个材料参数不同的结构模型中,采用断裂扩展有限元法(XFEM)研究结构的动力破坏机制,对不同的破坏模式进行统计,并概化为典型的失效路径。经研究表明:该方法统计概化出的失效路径包含了建基面、上下游折坡面这些较为确定的路径,同时也搜索出了其他一些潜在失效路径。基于此进行的概率计算是全面的、保守的。

2.2 功能函数模型的建立

按规范方法施加静力荷载,动力作用采用虚拟激励法^[8],构造虚拟激励:

$$v(t)_i = g(t)\sqrt{\lambda_i}\Phi_i e^{i\omega t} \quad (1)$$

式中: λ_i 、 Φ_i 为输入地震动功率谱矩阵的复特征对; $g(t)$ 为地震动的调制函数。代入动力反应控制方程:

$$(M + M_w)\ddot{V} + C\dot{V} + KV = -[(M + M_w)\varphi + M_g]v(t)_i \quad (2)$$

由振型分解法求解,相应的坝体动应力反应为

$$\sigma(t)_i = (A_R + iA_I)e^{i\omega t} \quad (3)$$

这里 A_R 、 A_I 均为求解得到的实向量。设 $S_{aa}(\omega, t)$ 的秩为 k' ,则动力响应的功率谱密度 $S_{yy}(\omega, t)$ 为

$$S_{yy}(\omega, t) = \sum_{i=1}^{k'} \sigma(t)_i^* \sigma(t)_i^T \quad (4)$$

相应的动应力反应的方差为

$$\sigma_\sigma(t)^2 = \int S_{yy}(\omega, t) d\omega \quad (5)$$

采用工况组合的方法进行静动力叠加,以抗滑稳定作为功能目标,采用刚体极限方程为失效准则建立薄弱层面的极限状态方程式为

$$G(\bar{X}) = \sum_i^n (-f\sigma_i + c - \tau_i)S_i = 0 \quad (6)$$

式中: f 、 c 分别为薄弱层面抗剪断摩擦系数及凝聚力; σ_i 、 τ_i 为第*i*个单元的正应力和水平剪应力; S_i 为第*i*个单元的面积。

接着进行随机有限元计算,采用响应面函数^[9]拟合结构响应与输入荷载及材料参数之间的显式关系,将式(6)表达为

$$G(\bar{X}) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (7)$$

式中: n 为随机变量的个数; a 、 b_i 、 c_i 为待定参数。这样,结构响应量的统计特性也被计入。

最后采用基于该响应面方程的 Monte-Carlo 法求得相应的可靠度指标 β ,在此不再赘述。

2.3 考虑失效路径相关性的体系可靠度

碾压混凝土重力坝滑动可靠度是一个串联体系的可靠度问题。本文采用 Ditlevsen 窄界限区间理论^[10]求解层面滑动失效体系的可靠度。

$$\left. \begin{aligned} P_f &\geq P_{f_i} + \max \left[\sum_{i=2}^k \{P_{f_i} - \sum_{j=1}^{i-1} P(E_i E_j)\}; 0 \right] \\ P_f &\leq \sum_{i=1}^k P_{f_i} - \sum_{i=2}^k \max P(E_i E_j) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\max[P(A), P(B)] \leq P(E_i E_j) \leq P(A) + P(B) \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} P(A) &= \Phi(-\beta_i) \Phi \left(-\frac{\beta_j - \rho_{ij} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \\ P(B) &= \Phi(-\beta_j) \Phi \left(-\frac{\beta_i - \rho_{ij} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： P_f 为事件的失效概率； $P(E_i E_j)$ 为两失效路径同时失效的概率； β_i 和 β_j 为失效路径 i 、 j 的可靠指标； ρ_{ij} 为两种失效路径的功能函数之间的相关系数。而相关系数为相同变量敏感系数乘积之和。

2.4 考虑地震随机性的全概率动力可靠度

结构抗震可靠度研究中，水平地震系数是一个重要的随机变量。水平向运动峰值加速度 A 与水平地震系数 K_H 之间存在关系：

$$K_H = \frac{A}{g} \quad (11)$$

式中： g 为重力加速度。特定地震动峰值加速度作用下的重力坝体系的抗滑稳定可靠度实质上是一个条件可靠度，对应的失效概率为不同水平地震加速度系数条件下的失效概率 $P(f|A)$ ，由于 $P(f|A)$ 较难用一个精确的解析式进行表达，因此，使用数值拟合积分的方法对上式进行计算^[11]。基于全概率公式可以得到体系动力抗滑稳定的失效概率 P_f 及其可靠指标 β ：

$$P_f = \int_0^a P(f|A) f(A) dA \quad (12)$$

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (13)$$

式中： $f(A)$ 为水平地震加速度系数的概率分布函数； $\Phi(\bullet)$ 为标准正态分布函数。多失效路径的动力抗滑稳定体系可靠度求解流程如图 1 所示。

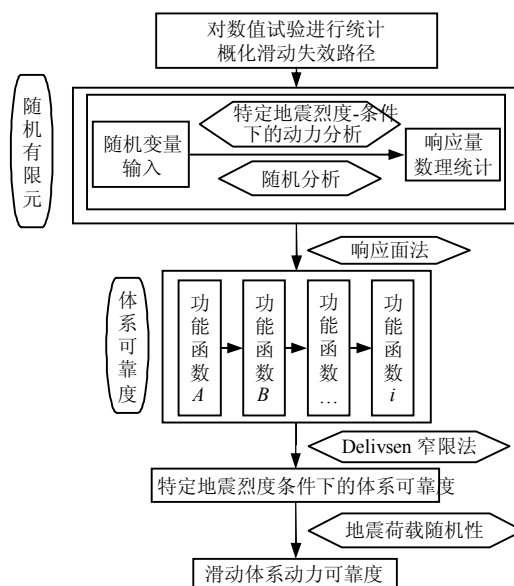


图 1 重力坝层间动力抗滑体系可靠度求解流程
Fig.1 Flow chart for system reliability of anti-sliding between layers of gravity dam under seismic loading

3 实例分析

某碾压混凝土重力坝，坝高 149 m。坝区设防烈度为Ⅷ度，一类场地。100 a 超越概率 2% 的水平向地震动峰值加速度为 0.284 g 。地震动采取顺河向和竖向两向输入，竖向地震加速度代表值 a_v 取水平向加速度代表值 a_h 的 2/3。考虑坝体混凝土材料分区。在动力计算中，坝基取无质量地基，动水压力采用 Westergaard 公式计算。荷载组合为：上游正常蓄水位水压力+下游相应尾水位水压力+坝体自重+上游淤砂压力+坝基面扬压力+地震荷载。考虑重力坝材料参数的随机性，将变异系数小于 0.05 的随机变量视为确定性变量，将地震荷载随机变量离散化处理。各参数取值根据地质勘探资料、原设计研究报告及《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》（GB50199-94）选取，见表 1，限于篇幅，只列出变异系数较大的变量。

表 1 随机变量统计特征值
Table 1 Statistical characteristics of stochastic variables

项目	地基			弹性模量 E			碾压层面参数		建基面参数	
	弹性模量 E	黏聚力 c'	摩擦因数 f'	碾压 C25	碾压 C20	碾压 C15	黏聚力 c'	摩擦因数 f'	黏聚力 c'	摩擦因数 f'
分布类型	正态	正态	对数正态	正态	正态	正态	正态	对数正态	正态	对数正态
均值	18 GPa	1.5 MPa	1.2	43.8 GPa	37.8 GPa	29 GPa	1.13 MPa	0.91	1.05 MPa	1.05
变异系数	0.1	0.2	0.15	0.1	0.1	0.1	0.2	0.15	0.2	0.15

3.1 滑动失效路径的确定

采用 2.1 节所述的统计概化分析方法, 选取 Koyna 波、Chichi 波、迁安波等一类场地条件下 5 组频谱特性不同的地震波, 分别按照 $0.1\text{ g} \sim 0.6\text{ g}$ 范围内 6 个不同地震峰值加速度进行调幅, 输入 5 个材料参数不同的结构模型中, 采用断裂扩展有限元法 (XFEM) 研究结构的动力破坏机制, 共进行了 150 组计算。断裂扩展有限元框架下的分离裂纹模型可以有效描述混凝土中的裂纹扩展, 通过在相关节点的影响域上显式富集非连续位移模式, 使得对非连续位移场的表征独立于单元边界, 同时保证被富集的位移模式在单元间的协调性, 它所使用的网格与结构内部的集合或无力界面无关, 从而克服了在诸如裂纹尖端等高应力和变形集中区进行高密度网格剖分所带来的困难, 模拟裂纹生成时也无需对网格进行重新剖分。该方法目前已成为模拟裂纹扩展等连续-非连续问题的热点方法之一。采用 XFEM 研究结构动力破坏机制的相关理论及分析方法参见文献[12-13], 本文不再赘述。在此, 仅给出最具代表性的部分随机条件下坝体结构动力破坏的典型断裂扩展模式, 如图 2 所示。(图中括号内为相应的动超载系数)

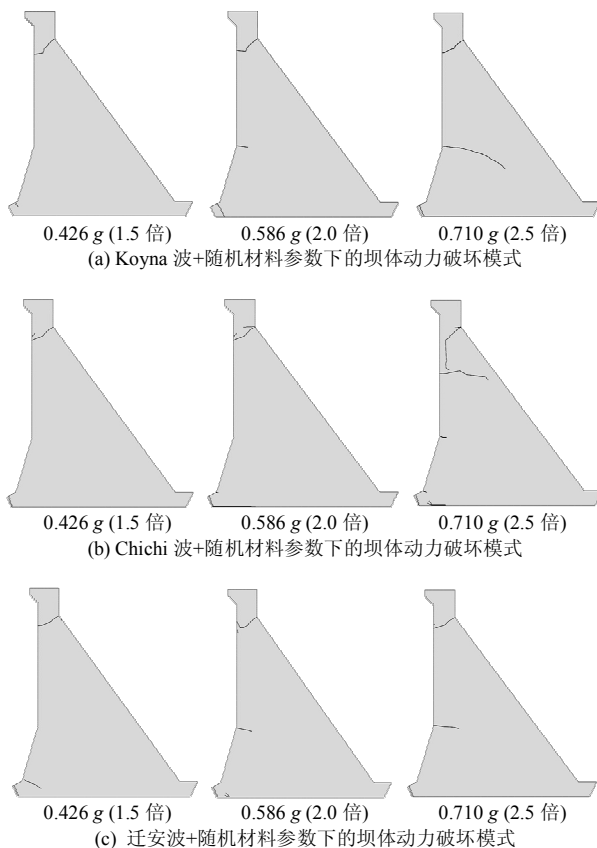


图 2 不同随机条件下坝体潜在动力破坏模式

Fig.2 Potential dynamic failure paths of dam in different stochastic conditions

对上述 150 组结果的不同破坏模式进行统计, 并概化为 6 种典型的失效路径, 如图 3 所示。

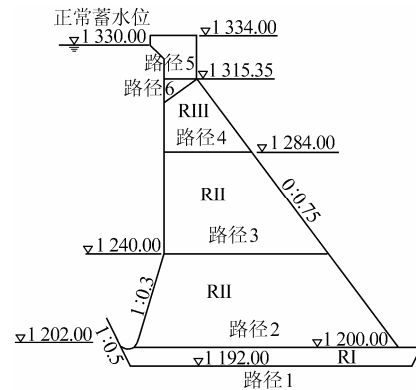


图 3 地震作用下坝体典型潜在滑动失效路径 (单位: m)

Fig.3 Potential dynamic sliding paths of dam (unit: m)

路径 1: 基建面上, 建基面抗滑失稳 (高程为 1 192 m 层面);

路径 2: C20 与 C25 碾压混凝土交接层面 (高程为 1 200 m 层面);

路径 3: 上游折坡处所在层面, 失效路径向坝体内部扩展, 发生坝体滑动失稳 (高程为 1 240 m 层面);

路径 4: C15 与 C20 碾压混凝土交接层面 (高程为 1 284 m 层面);

路径 5: 坝颈部位, 由于分层碾压, 可能存在层间薄弱面而形成水平滑动失稳模式 (高程为 1 315.35 m 层面);

路径 6: 下游折坡处附近, 由下游折坡点沿 45° 倾斜向下发展逐渐延伸至上游坡面, 失效路径向坝体内部扩展。

3.2 不同水平地震系数下层面可靠度

基于响应面法的思想, 将不同层面的抗滑稳定极限状态功能函数作为随机输出变量, 采用 ANSYS PDS 模块和 APDL 语言编制了宏命令, 对随机输出变量进行 Box-Cox 变换, 确定合理的变换函数。然后分别拟合了各条滑动失效路径极限状态功能函数的显式表达式, 进而求出各个层面的抗滑稳定可靠度见表 2。

由图 4 可知, 水平地震系数为 0, 即静力工况下碾压混凝土重力坝层面的抗滑可靠指标随层面高程的增高而增大, 即各层面的抗滑可靠指标的规律都是大致从坝体自顶而下减小, 这与文献[1]所得的规律是一致的; 但在动力工况下, 碾压混凝土坝的层面抗滑可靠指标的规律大致随层面高程的增大而减小, 且水平地震系数越大, 可靠指标自底向上减

小的程度越大。这是由于地震作用下，重力坝动力放大系数随高程增加而增大，坝体自底向上所受的动水平剪应力逐渐增大且在动力抗滑可靠度计算中

起控制作用。由图 5 可知，在地震工况下，不同层面抗滑可靠指标均随水平地震系数的增大而减小。这与实际相符。

表 2 不同水平地震系数下各层面动力抗滑可靠度

Table 2 Dynamic sliding reliabilities under different horizontal seismic coefficients

水平地震系数 K_H	建基面 路径 1	▽1 200 m 层面 路径 2	▽1 240 m 层面 路径 3	▽1 284 m 层面 路径 4	坝颈水平层面 路径 5	坝颈斜层面 路径 6
0.0	8.310	14.046	14.113	14.679	14.776	13.097
0.1	8.285	14.061	13.937	12.169	10.661	11.638
0.2	8.196	14.067	13.178	9.512	7.016	9.525
0.3	8.053	13.830	11.844	6.285	3.300	7.061
0.4	7.768	13.120	9.098	2.499	-0.143	4.345
0.5	7.423	12.153	7.269	0.706	-1.741	2.511

注：水平地震系数为 0，即为正常蓄水位静力工况。

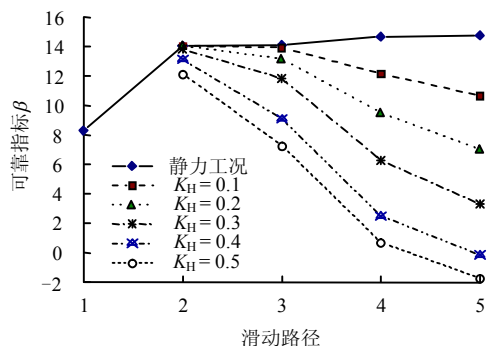


图 4 不同高程的路径下层面抗滑可靠度分布

Fig.4 Sliding reliability distribution along different elevations

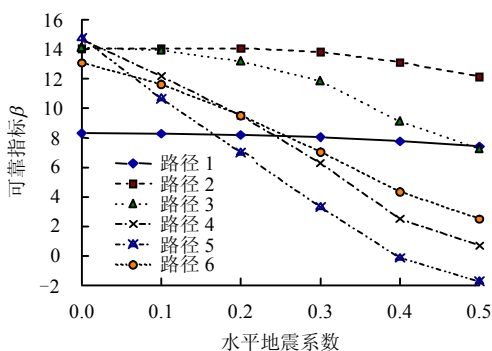


图 5 不同水平地震系数下层面抗滑可靠度分布

Fig.5 Sliding reliability distributions under different horizontal seismic coefficients

3.3 动力抗滑稳定体系可靠度

重力坝抗滑稳定体系可靠度属于串联体系可靠度问题，首先要对不同滑动失效模式间的相关性进行分析，然后采用 Ditlevsen 窄界限公式（式 8~式 10）估算层面滑动体系的失效概率的上下界限。

例如，对水平地震系数 $K_H = 0.3$ 的确定性地震作用下各层面滑动失稳模式进行相关性分析（见表 3），采用窄界限公式求得体系失效概率约为 0.048 41%~

0.048 43%（相应可靠指标约为 3.300）。同理，分别计算坝体在不同水平地震系数下的体系抗滑条件失效概率及相应的可靠指标，结果见表 4。由于失效概率较小，本文以对数形式进行描述。对表 4 的水平地震系数与失效概率上限值的关系进行曲线拟合，得到的拟合函数（如图 6）方程为

$$\left. \begin{aligned} P_f(A) &= 9e^{-16}A + 5e^{-16}, \quad 0 < A < 0.1 \\ P_f(A) &= 10^{C+B_1A+B_2A^2+B_3A^3+B_4A^4}, \quad 0.1 < A < 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

表 3 $K_H=0.3$ 时各典型滑动失效路径相关系数

Table 3 Correlation coefficient between correlated sliding failure modes when $K_H=0.3$

失效路径 1	失效路径 2	失效路径 3	失效路径 4	失效路径 5	失效路径 6
1.000	-0.129	-0.129	-0.124	-0.130	-0.141
-0.129	1.000	0.927	0.613	0.431	0.667
-0.129	0.927	1.000	0.862	0.732	0.892
-0.124	0.613	0.862	1.000	0.976	0.996
-0.130	0.431	0.732	0.976	1.000	0.958
-0.141	0.667	0.892	0.996	0.958	1.000

表 4 地震作用下坝体抗滑体系可靠度

Table 4 Reliabilities of gravity dam system under earthquake

水平地震系数 A	失效概率 $P(f A)$ 上限	$\lg P(f A)$	可靠指标 β
0.00	5.123×10^{-16}	-15.291	8.310
0.10	6.054×10^{-16}	-15.218	8.285
0.15	3.709×10^{-14}	-13.431	7.665
0.20	2.481×10^{-12}	-11.605	7.016
0.25	7.978×10^{-8}	-7.098	5.255
0.30	4.838×10^{-4}	-3.315	3.300
0.35	0.146	-0.835	1.053
0.40	0.557	-0.254	-0.143
0.45	0.848	-0.072	-1.028
0.50	0.959	-0.018	-1.741

注：失效概率界限很窄，故将上限值作为体系失效概率。

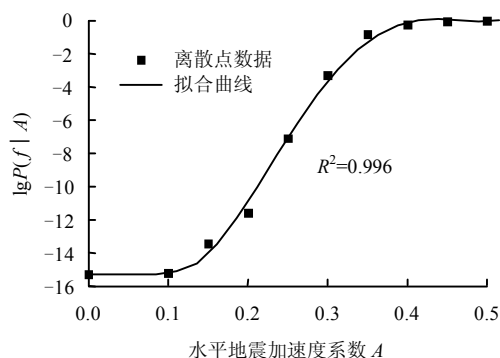


图6 水平地震系数与失效概率(对数值)的拟合关系

Fig.6 Fitting curve of horizontal earthquake coefficient and the failure probability (log Kow)

式中: $C = -0.997\ 69$, $B_1 = -298.745\ 10$, $B_2 = 1\ 989.311\ 32$, $B_3 = -4\ 348.655\ 36$, $B_4 = 3\ 144.801\ 53$ 。该方程在 $A = 0 \sim 0.5$ 的区间内拟合优度接近于 1。

根据文献[14]的研究,水平地震加速度系数的概率密度函数 PDF 服从下列分布:

$$f(A) = Bbe^{-bA}, A \geq 0 \quad (15)$$

式中: B 、 b 为待定系数,需根据场地的有关地震的统计资料确定。根据现有统计资料,暂取 $B = 0.049\ 9$, $b = 19.948$ 。

将式(14)和(15)代入式(12)并进行 $K_H = 0.5$ 的右截尾计算,得到坝体层间抗滑稳定体系在地震作用下的失效概率为 $P_f = 2.881\ 9 \times 10^{-5}$, 相应的可靠指标为 4.022。

对比表 2 和表 4 可以发现, $K_H < 0.2$ 时,坝体抗滑体系的可靠度基本是由建基面抗滑失效路径决定的,而随着地震动峰值的增大,当 $K_H > 0.2$ 时,坝体抗滑体系可靠度不再由建基面失效路径决定,而是由下游折坡处所在层面的失效路径决定,这也体现了地震效应对坝体上部层面的抗滑稳定影响显著。

由此可见,地震效应对坝体层面体系的抗滑稳定影响显著,且在动力工况下,下游折坡点的层面是坝体体系抗滑稳定的控制层面,设计和施工过程中均应引起重视。

4 结 论

本文通过大量数值试验和统计概化的方法研究确定了坝体潜在的滑动失效路径;采用基于全概率公式的数值拟合积分方法求解层面动力条件下的抗滑稳定体系可靠度。可以为相关岩土工程仿真分析中潜在失效模式、失效路径的搜索和动力体系可靠度的求解提供理论借鉴和方法参考。主要结论有:

(1) 碾压混凝土重力坝动力条件下抗滑薄弱层面可能会出现各不相同的分布特征,人为拟定不甚科学且容易遗漏一些不易辨识的失效路径。考虑多种因素随机性的统计概化的分析方法,较为全面的搜索出了潜在失效路径。

(2) 对多组数值试验的统计表明,地震作用下,挡水坝段坝颈处下游折坡点沿 45° 倾角斜向下至上游坡面的倾斜薄弱面是坝体的一条潜在滑动面,不易辨识,抗震设计中需进行稳定验算。

(3) 在动力工况下,碾压混凝土坝的层面抗滑可靠指标的规律大致随层面高程的增大而减小,且水平地震系数越大,可靠指标沿高程自底向上减小的程度越大。

(4) 随着地震加速度的增大,当 $K_H > 0.2$ 时,坝体抗滑体系可靠度不再由建基面失效路径决定,而是由靠近坝顶的下游折坡处所在层面的失效路径决定,这也体现了地震效应对坝体上部层面的抗滑稳定影响显著。

(5) 视水平地震系数为连续型分布,对不同水平地震加速度下的重力坝层面抗滑体系失效概率进行曲线拟合,进而采用数值积分的方法进行抗震可靠度的全概率计算,具有明确的数学意义,计算方法是合理可行的。

参 考 文 献

- [1] 朱俊松, 瞿进甲, 刘侠, 等. 等壳碾压混凝土重力坝层间抗滑稳定可靠度分析[J]. 中国农村水利水电, 2011, (1): 115—118.
ZHU Jun-song, ZI Jin-jia, LIU Xia, et al. A reliability analysis of antiskid stability between the layers of Dengke RCC gravity dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011, (1): 115—118.
- [2] 赵会香, 张思俊, 张广键. 龙滩水电站碾压混凝土高重力坝可靠度研究[J]. 水力发电, 1999, (2): 200—203.
ZHAO Hui-xiang, ZHANG Si-jun, ZHANG Guang-jian. Study on reliability of high RCC gravity dam of Longtan hydropower station[J]. Water Power, 1999, (2): 200—203.
- [3] 张社荣, 李振富, 郭怀志. 重力坝抗震可靠度分析[J]. 天津大学学报, 1991, (增刊 2): 137—141.
ZHANG She-rong, LI Zhen-fu, GUO Huai-zhi. Earthquake resistant reliability analysis of gravity dam[J]. Journal of Tianjin University, 1991, (Supp.2): 137—141.

- [4] 胡强, 刘宁, 李锦辉. 一种新的可靠度计算方法及其在工程中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 632—636.
HU Qiang, LIU Ning, LI Jin-hui. A new method of structural reliability analysis and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 632—636.
- [5] 陈颖, 王东升, 朱长春. 随机结构在随机载荷下的动力可靠度分析[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 82—85.
CHEN Ying, WANG Dong-sheng, ZHU Chang-chun. Dynamic reliability analysis of stochastic structures subjected to random loads[J]. **Engineering Mechanics**, 2006, 23(10): 82—85.
- [6] 范书立, 陈健云, 范武强, 等. 地震作用下碾压混凝土重力坝的可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 564—571.
FAN Shu-li, CHEN Jian-yun, FAN Wu-qiang, et al. Reliability analysis of roller compacted concrete gravity dams subjected to earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 3(3): 564—571.
- [7] 徐强, 陈建云, 李静, 等. 非平稳地震动过程中混凝土重力坝受拉失效路径可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 123—128.
XU Qiang, CHEN Jian-yun, LI Jing, et al. Concrete gravity dam reliability analysis on tension failure path under non-stationary ground motion processes[J]. **Engineering Mechanics**, 2011, 28(3): 123—128.
- [8] 徐强, 陈建云, 李静, 等. 基于贝叶斯理论的大坝体系可靠度计算方法[J]. 大连理工大学学报, 2011, (1): 84—89.
XU Qiang, CHEN Jian-yun, LI Jing, et al. Calculation method for system reliability of dam based on Bayes theory[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2011, (1): 84—89.
- [9] 颜立新, 康红普, 高谦. 基于响应面函数的可靠度分析及其应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 327—333.
YAN Li-xin, KANG Hong-pu, GAO Qian. Reliability analysis based on response surface function and its application to a chamber[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 327—333.
- [10] DITLEVSEN O. Narrow reliability bounds for structural system[J]. **Structural Mechanics**, 1979, 7(4): 453—472.
- [11] 贾超, 刘宁, 陈进. 地震作用下土坡可靠度风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (04): 703—707.
JIA Chao, LIU Ning, CHEN Jin. Slope risk analysis under the earthquake effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, (04): 703—707.
- [12] ABDELAZIZ Y, BENDAHANE K, BARAKA A. Extended finite element modeling[J]. **Basic Review and Programming Engineering**, 2011, 3: 713—718.
- [13] 方修君, 金峰, 王进廷. 基于扩展有限元法的 Koyna 重力坝地震开裂过程模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2065—2069.
FANG Xiu-jun, JIN Feng, WANG Jin-ting. Seismic fracture simulation of the Koyna gravity dam using an extended finite element method[J]. **Journal of Tsinghua University(Science and Technology)**, 2008, 48(12): 2065—2069.
- [14] MECANN W. Seismic hazard map for Puerto Rico 1994[R]. Puerto Rico: Seismic Safety Commission Puerto Rico, 1994.