

文章编号: 1000-7598-(2008) 04-1072-05

地震加速度动态分布及对高土石坝坝坡抗震稳定的影响

张 锐¹, 迟世春¹, 林 皋¹, 张宗亮²

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 国家电力公司昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘 要:《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-1997) 建议的土石坝地震加速度动态分布系数适合于 150 m 以下的土石坝, 而前许多土石坝的设计高度已远大于 150 m。与低坝相比, 高坝受地基刚性的约束减弱, 坝体的自振周期延长。在坝体地震反应中, 高阶自振周期与地震卓越周期耦合的机率增大, 高阶振型的振动易被激发放大, 从而导致坝体地震加速度沿坝高的分布与低坝有所不同。据此, 采用有限元法研究了高土石坝的加速度分布, 提出了高于 150 m 土石坝的地震加速度动态分布系数图示。在此基础上, 利用堆石材料的非线性强度准则, 对高度超过 150 m 的土石坝坝坡抗震稳定性作了进一步的分析, 得出随着坝体地震加速度动态分布系数的降低, 坝坡临界破坏的安全系数有所提高。

关 键 词: 高土石坝, 有限元法, 加速度分布, 稳定性分析

中图分类号: TV641.1; TV 435

文献标识码: A

Discussion on seismic coefficient of high earth-rock dams and its influence on dam slope seismic stability

ZHANG Rui¹, CHI Shi-chun¹, LIN Gao¹, ZHANG Zong-liang²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Kunming Design Institute of State Power Corporation; Kunming 650051, China)

Abstract: The seismic coefficient suggested in the present Specifications for Seismic Design of Hydraulic Structures (DL5073-1997) is suitable for earth-rock dams lower than 150 meters. While at the present time, many earth-rock dams to be constructed are higher than 150 meters. Compared with low dams, high dams get less constraint from stiffness of foundation, and its natural vibrating period becomes prolonged. During the seismic response, high order natural vibrating period gets more opportunities to coincide with the seismic predominant period, and the vibrations of high orders are easily to be activated and amplified, which result in the seismic acceleration distribution is somewhat different from low dams. With the finite element method, the seismic acceleration distribution of high earth-rock dams is analyzed. The figure of the seismic coefficient of earth-rock dams higher than 150 meters is put forward. Based on the above analysis, further research of the slope seismic stability of earth-rock dams higher than 150m is made. The conclusion is, with the decrease of the seismic coefficient in the dam body, the critical value of safety factor of the dam slope increases.

Key words: high earth-rock dams; finite element method; acceleration distribution; stability analysis

1 引 言

我国水利水电资源丰富, 所建的水利水电工程规模及数量都居世界前列, 而其中土石坝为优先选择的坝型之一^[1]。坝坡稳定分析也是土石坝设计的主要内容之一。目前, 坝坡稳定分析仍然采用极限平衡法。极限平衡法分析坝坡抗震稳定, 荷载的确

定是重要的问题^[2]。现行《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-1997)^[3] (简称 97 规范) 关于地震加速度动态分布系数的规定适合于高度 150 m 以下的大坝。然而, 随着国家西部大开发的不断推进, 我国在西部的水利水电工程得到了较快的发展, 高土石坝的建设也随之增多。坝高的增加改变了坝体振动的动力特性, 降低了坝体的自振频率。与低坝相

收稿日期: 2006-12-4

基金项目: 国家自然科学基金雅龙江水电联合基金重点项目 (No. 50639060)。

作者简介: 张锐, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事土工问题的研究。E-mail: rzhang0411@163.com

比,在坝体地震反应中,高坝的高阶周期与地震卓越周期耦合的机率增大,高阶振型易于被激放大,从而导致沿坝高的加速度动态分布系数的分布会有所不同。为此,我们研究了高土石坝在地震荷载作用下,沿坝高的加速度分布,提出的坝高 H 在150~250 m高土石坝的建议地震加速度动态分布系数图,并利用筑坝材料的非线性强度准则,讨论了地震加速度动态分布系数对坝坡的抗震稳定性的影响。

2 高土石坝加速度分布

“97”规范对土石坝的地震加速度动态分布系数提供了图1所示的分布。其中地震加速度动态分布系数 a_m 在设计烈度为7,8,9度时,分别取3.0,2.5,2.0。但是“97”规范关于地震加速度动态分布系数的规定适合于高度150 m以下的大坝。而目前,土石坝工程实践中坝高已远高于150 m,还采用此分布去进行高土石坝的抗震计算则显得不尽合理。

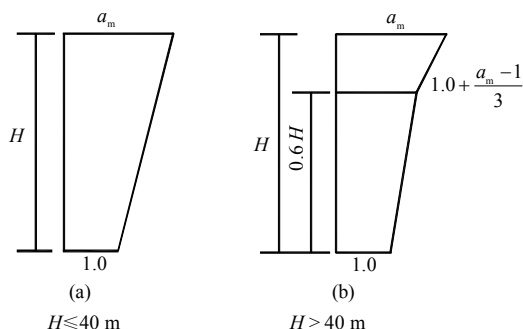


图1 土石坝地震加速度动态分布系数
Fig.1 Seismic coefficient of earth-rock dams

Seed 曾经采用解析方法分析了不同高度的均匀三角形坝体地震加速度动态分布系数^[4]。他假设坝体剪应力沿水平面均匀分布,推导了坝体频率和振型,分析了坝体在 EL Centro1940 (N.S.) 地震波作用下的地震加速度分布,得到的结论是:坝高一定时,随着波速的增加,大坝各个相对高度处的加速度数值有所增大;波速一定时,随着坝高的增加,大坝各个相对高度处的加速度数值有所减小,同时,加速度的分布也有了变化。因此,根据 seed 的研究

思路,我们用编写的有限元程序计算了40 m,100 m,150 m和250 m模型大坝的地震加速度分布,给出250 m级高度的土石坝的建议地震加速度动态分布系数图示。

2.1 土石料的本构模型

静力计算中采用的本构模型是邓肯-张 $E-B$ 非线性弹性模型^[5,6],动力方程的求解采用 wilson- θ 法进行逐步积分。计算切线变形模量 E_t 为

$$E_t = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (1)$$

卸载以及再加载时的弹性模量 E_{ur} 和体积模量 B 的表达式为

$$E_{ur} = K_{ur} P_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (2)$$

$$B = K_b P_a (\sigma_3 / P_a)^m \quad (3)$$

式(1)~(3)中: R_f 为材料的破坏比; K , K_{ur} , K_b , m 和 n 为试验常数; P_a 为大气压强; σ_3 为小主应力, c 为材料的黏聚力; φ 为材料的内摩擦角。

2.2 模型计算

所选的坝型为黏土心墙堆石坝,坝体的几何参数见表1。坝体由堆石和黏土心墙构成,大坝剖面见图2。其中,黏土心墙的顶宽与大坝顶宽相等,上游和下游的坡度分别取为1:1.9和1:1.8,心墙的上下游坡度取为1:0.15。堆石和黏土的物理参数见表2。

表1 大坝几何参数

Table 1 Geometric parameters of the four dams

坝高/m	坝顶宽/m	坝底宽/m
40	8	156
100	12	382
150	16	571
250	20	945

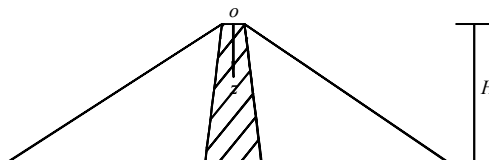


图2 大坝模型剖面图
Fig.2 Cross-section of the dam model

表2 材料物理参数

Table 2 Physical parameters of the materials

材料	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	K	K_{ur}	n	R_f	K_b	m	c / MPa	$\varphi / (^\circ)$	$K_0 / \text{MPa} \cdot \text{m}^{-3}$
堆石	19.95	1491	2236.5	0.241	0.719	683	0.101	0	54.37	0.5
黏土	21.56	388	582	0.311	0.755	206	0.257	0.02	39.46	0.5

注:表中, k_0 为土压力系数。

筑坝材料的模量衰减曲线和阻尼增长曲线如图

3所示,供计算时采用。图中,实线代表模量衰减

曲线，点划线代表阻尼增长曲线。

在计算各座大坝的地震反应时，一共选取了 3 条规范波计算出每座大坝在规范波作用下各相对高度处的加速度数值，各条地震波的加速度时程曲线见图 4。规范波 1~3 的设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{\max}$ 分别为 1.6, 1.3 和 1.47，特征周期 T_g 分别为 0.17 s, 0.11 s 和 0.10 s。

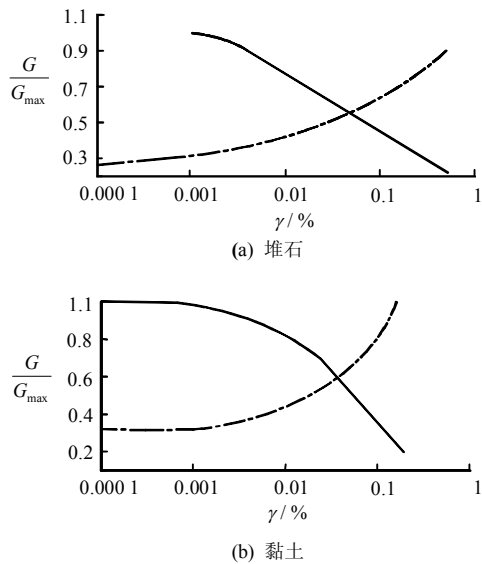


图 3 模量和阻尼变化曲线
Fig.3 Modulus and damping variation curve

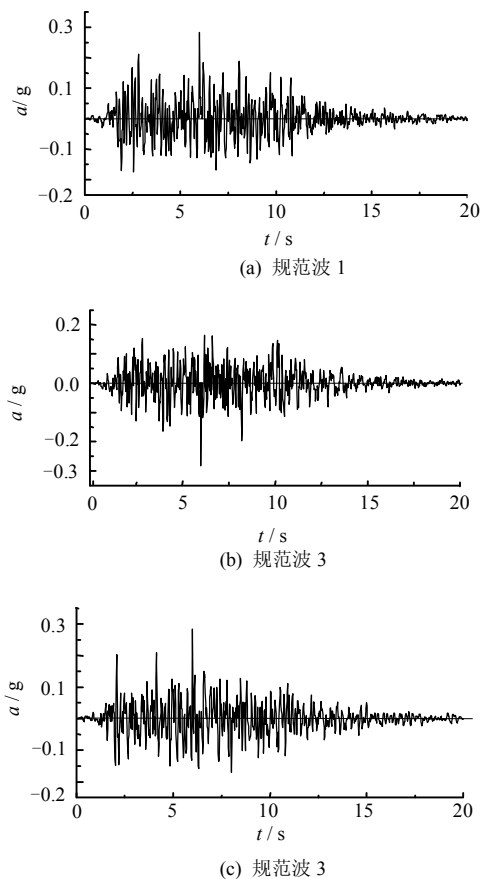


图 4 地震加速度时程曲线
Fig.4 Seismic acceleration-time curve

2.3 改进的加速度分布图示

我们算出了每座大坝在 3 条规范波作用下，在各个相对高度处的最大加速度数值，最后选取其中的最大值作为最终的结果，计算结果见表 3，并且根据计算结果，提出高度大于 150 m 的高土石坝的地震加速度动态分布系数图示(以下简称加速度分布 II)，并与现行规范中的地震加速度动态分布系数图示(以下简称加速度分布 I)相比较，见图 5。和“97”规范相一致，规定设计烈度为 7, 8, 9 度时，地震加速度动态分布系数 a_m 分别取 3.0, 2.5 和 2.0。

表 3 加速度分布 (单位: g) Table 3 Acceleration distribution							
z/H	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
40 m 大坝	0.53	0.50	0.42	0.32	0.29	0.22	0.20
100 m 大坝	0.46	0.41	0.32	0.26	0.25	0.22	0.20
150 m 大坝	0.36	0.31	0.21	0.19	0.18	0.19	0.20
250 m 大坝	0.36	0.24	0.19	0.15	0.15	0.14	0.20

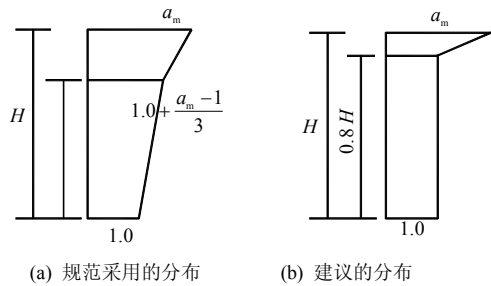


图 5 高土石坝地震加速度动态分布系数
Fig.5 Seismic coefficient of high earth-rock dams

2.4 工程实例

为了验证上节提出的高土石坝地震加速度动态分布系数图示，本节选用拟建的糯扎渡土石坝(图 6)为例，研究其在 Friuli 地震波(1976 年 5 月 6 日，意大利)作用下，沿坝高的加速度分布。Friuli 地震波的加速度时程曲线见图 7。

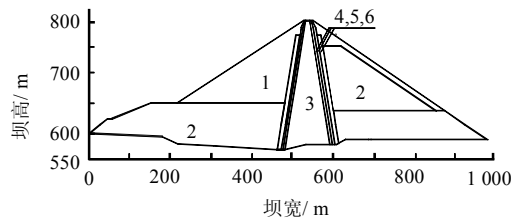


图 6 糯扎渡大坝剖面图
Fig.6 Cross-section of NuoZhaDu Dam

拟建的糯扎渡水电站位于云南省境内澜沧江上^[7]，心墙堆石坝最大坝高 261.5 m，工程为 I 等大型工程。其中，大坝坝顶宽度 18 m，坝顶高程为 821.5 m，最低建基面高程为 560.0 m，防渗心墙为中央直

心墙形式,顶宽为 10 m,顶高程为 820.5 m,上下游坡度均为 1:0.2,上游坝坡坡度为 1:1.9,下游坝坡坡度为 1:1.8。图 6 中 1~6 分别代表硬岩、软岩、掺砾土料、I 区反滤料,II 区反滤料和细堆石,材料计算参数见参考文献[7]。Friuli 地震波的设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{\max} = 1.83$,特征周期 $T_g = 0.25$ s。

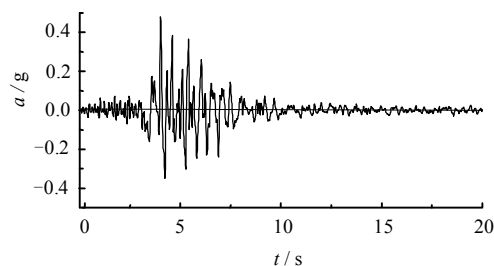


图7 Friuli 地震波

Fig.7 Friuli seismic wave

在 Friuli 地震波作用之下,大坝各相对高度处的地震加速度数值和地震加速度动态分布系数 α 的值见表 4。

表4 糯扎渡大坝计算结果

Table 4 Calculation results of Nuozhadu Dam

z/H	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
a/g	0.38	0.25	0.19	0.20	0.21	0.20	0.20
α	1.9	1.25	0.95	1.0	1.05	1.0	1.0

由表 3 和表 4 的计算结果可以看出:1)随着坝高的增加,沿坝高的加速度数值有所降低;2)对于 250 m 级高度的土石坝而言,地震加速度动态分布系数基本符合如图 5(b) 所提出的分布图示。

3 坝坡稳定分析

利用图 5 中现行规范规定的加速度分布 I 和新建议的加速度分布 II,采用简化毕肖普法,考虑了堆石材料抗剪强度的非线性准则,研究了地震加速度动态分布系数对糯扎渡高坝的坝坡抗震稳定性的影响。

3.1 计算公式

在滑动土体 n 个竖向土条中任取一条记为 i ^[8],其受力如图 8 所示:

图中, W_i 为土条自重与竖向地震荷载的矢量和, N_i 为土条底部所受的支持力, U_i 为土条底部孔隙压力, E_{i-1} 和 E_i 为相邻土条间的作用力, S_i 为土条底部的黏聚力, β_i 为土条的水平倾角, φ_i 为土条摩擦角, R 为滑动圆弧的长度, R_d 为水平地震力的力臂长度, x_0, y_0 为滑弧的圆心坐标, Q_i 为作用在

土条重心处的水平地震力,其表达式为^[9]

$$Q_i = \alpha_h \xi G_{Ei} \alpha_i / g \quad (4)$$

式中: ξ 为地震作用的效应折减系数,取 0.25; G_{Ei} 为集中在质心的重力作用标准值; α_i 为地震加速度动态分布系数; g 为重力加速度; α_h 为水平向设计地震加速度代表值,取 0.2 g。竖向地震荷载大小取为 $Q_i/3$,方向按向上、向下考虑,以不利于稳定的方向为准。

对简化毕肖普法,安全系数的计算公式为

$$S(x_o, y_o, R) = F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1.0}{m_{\alpha_i}} \times ((W_i - U_i \cos \beta_i) \times \tan \varphi_i + S_i \times \cos \beta_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \beta_i + Q_i \times R_d / R} \quad (5)$$

其中 $m_{\alpha_i} = \cos \beta_i + (\tan \varphi_i / F_s) \times \sin \beta_i$

对于堆石、碎石等粗粒土材料而言,内摩擦角 φ 与 σ_3 呈非线性关系^[10,11],进而使得材料的抗剪强度呈现非线性关系。Duncan 推出了粗粒土抗剪强度的内摩擦角公式:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right) \quad (6)$$

式中: φ_0 为堆石在法向应力为 100 kPa 时的内摩擦角; $\Delta \varphi$ 为 σ_3 增加一个对数周期下 φ 的减小值。

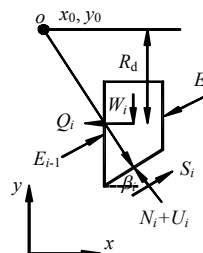


图8 土条受力图

Fig.8 Force figure of the trip

3.2 工程算例及分析

依然以上节中的糯扎渡土石坝为例,分别代入图 5 加速度分布 I 和加速度分布 II 中不同的地震加速度动态分布系数值计算土条的地震力,利用简化毕肖普法,同时考虑了材料强度的线性准则和非线性准则,研究了地震加速度动态分布系数对坝坡抗震稳定性的影响,计算结果见表 5 (表中的向上、向下代表竖向地震力的方向)。并从表 5 中选取坝坡在线性强度和非线性强度下安全系数的最小值,根据计算结果,绘出上游坡和下游坡在两种不同的加

速度分布下最危险滑弧的位置,如图 9 所示(1 代表线性强度下利用加速度分布 I 得出的最危险滑弧。2 代表线性强度下利用加速度分布 II 得出的最危险滑弧。3 代表非线性强度下利用加速度分布 I 得出的最危险滑弧。4 代表非线性强度下利用加速度分布 II 得出的最危险滑弧)。

表 5 临界安全系数
Table 5 Critical safety factor

加速度分布	上游坡				下游坡			
	线性强度		非线性强度		线性强度		非线性强度	
	向上	向下	向上	向下	向上	向下	向上	向下
I	1.398	1.419	1.808	1.800	1.362	1.391	1.711	1.703
II	1.515	1.523	1.915	1.906	1.467	1.506	1.828	1.818

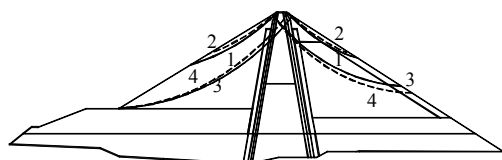


图 9 临界滑动面的位置
Fig.9 Position of critical slip surface

由表 5 可以看出: 对上游和下游坝坡而言, 无论在线性强度还是非线性强度下, 采用建议的加速度分布 II 计算得到的坝坡临界安全系数均比采用加速度分布 I 算得的临界安全系数有所提高, 增加了约 6 %~8 % (在考虑粗粒料的非线性强度情况下, 增加的幅度略有降低)。这主要是因为, 在新建议的加速度分布 II 图示下, 大坝各相对高度处的地震动态分布系数有所降低, 从而导致各土条受到的水平地震力 Q_i 有所降低。由式 (5) 可知, 土条所受的水平地震力 Q_i 降低后, 滑动力矩即分母有所降低。因此, 利用新建议的加速度分布 II 算得的安全系数有所增大。在非线性强度下, 由于额外考虑了内摩擦角在高应力状态下有所减小的变化趋势, 所以抗滑力矩即分子增大的幅度有所降低, 因此在非线性准则下, 利用新建议的加速度分布 II 算得的坝坡临界破坏安全系数增大的幅度略有减缓。

此外, 由图 9 可以看出, 在线性强度下, 最危险滑弧均没有穿过心墙, 而考虑粗粒土料的非线性强度准则后, 最危险滑弧的位置变深, 且均穿过心墙。与采用加速度分布 I 得到的最危险滑弧相比, 采用加速度分布 II 得到的最危险滑弧, 滑动面的位置基本不变。

4 结 论

(1) 对于高度在 150~250 m 之间的高土石坝

而言, 其地震加速度分布与低坝不同。整个坝体呈现的加速度分布特征是“鞭梢效应”有所增加, 即较大的加速度数值上移。

(2) 由于整个坝体内部的地震加速度动态分布系数有所降低, 导致坝坡稳定分析得到的临界安全系数增加, 但对最危险滑弧的位置基本没有影响。

参 考 文 献

- [1] 赵剑明, 常亚屏, 陈宁. 加强高土石坝抗震研究的现实意义及工作展望[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 95—99. ZHAO Jian-ming, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Significance and prospects about earthquake resistant of high earth and rockfill dams [J]. **World Earthquake Engineering**, 2004, 20 (1): 95—99.
- [2] CRISTIANO M, SUNIL S. Seismic coefficients for pseudostatic slope analysis [C]// 13th World Conference on Earthquake Engineering. VANCOUVER B C. Canada: [s.n.]. 2004: 3 691—3 696.
- [3] 水利部水利水电规划设总院. DL5073-1997 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] SEED H, GEOFFREY R, MARTIN. The seismic coefficient in earth dam design[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering**, 1966, 92(SM3): 25—58.
- [5] 赵剑明. 高土石坝地震反应的三维非线性有效应力分析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1999.
- [6] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001: 71—76.
- [7] 迟世春. 心墙堆石坝动力反应分析计算理论及抗震措施研究[R]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [8] 李亮. 智能优化算法在土坡稳定分析中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [9] 吕擎峰, 殷宗泽, 王叔华, 等. 拟静力法边坡稳定分析的改进[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 35—38. LV Qing-feng, YIN Zong-ze, WANG Shu-hua, et al. Improvement of pseudo-static method for slope stability analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.): 35—38.
- [10] 迟世春, 顾淦臣. 混凝土面板堆石坝的抗震稳定分析[J]. 东北水利水电, 1995, 11: 3—5. CHI Shi-chun, GU Gan-chen. Seismic stability analysis of concrete faced rockfill dams[J]. **Water Resources and Hydropower of Northeast China**, 1995, 11: 3—5.
- [11] 吕擎峰, 殷宗泽. 高土石坝坝坡稳定非线性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 793—797. LV Qing-feng, YIN Zong-ze. Nonlinear analysis of slope stability for high earth-rock dams[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 793—797.