

基于改进的地震动态分布系数及修正 D-P 模型的高土石坝坝坡抗震稳定分析^①

张 锐¹, 范 增¹, 陆建飞¹, 迟世春²

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 大连理工大学 抗震研究所, 辽宁 大连 116085)

摘要:采用有限元法研究高土石坝的地震加速度分布, 提出高度为 250 m 级的土石坝建议地震加速度动态分布系数图示。在此基础上, 基于修正的 Drucker-Prager 弹塑性模型, 利用强度折减法对高度为 250 m 级的土石坝坝坡抗震稳定性作进一步分析, 结果表明随着坝体地震加速度动态分布系数的降低, 坝坡的临界安全系数有所提高。

关键词:高土石坝; 加速度分布; 修正 D-P 模型; 稳定性分析

中图分类号: TV641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 2-0137-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0137

Seismic Stability Analysis of High Earth-Rock Dams Based on Improved Dynamic Distribution Coefficients and a Modified Drucker-Prager Model

ZHANG Rui¹, FAN Zeng¹, LU Jian-fei¹, CHI Shi-chun²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, Liaoning, China)

Abstract: The seismic acceleration dynamic distribution coefficient suggested in the current code for seismic design of hydraulic structure (DL5073-1997) is suitable for earth-rock dams that are below a height of 150 m. However, currently, most earth-rock dams being designed are higher than 150 m. Compared with low-height dams, tall dams have less constraint from the stiffness of their foundation and the self-vibrating period of the high dam is prolonged under cyclic loading. During the seismic response of the dam body, the high order self-vibrating period has more opportunities to coincide with the seismic predominant period and high order vibrations are easily activated and amplified, which causes the seismic acceleration distribution to be dissimilar to that in short dams. Using the finite element method, the seismic acceleration distribution of high earth-rock dams can be analyzed. The analytical results allow for the determination of the seismic acceleration dynamic distribution coefficient of earth-rock dams 250 m level in height. On the basis of these results, employing a modified Drucker-Prager model and strength reduction technique, further research on the slope seismic stability analysis of earth-rock dams 250 m level in height was made. The conclusion of this analysis was that a decrease of the seismic acceleration dynamic distribution coefficient in the dam body causes an increase in the critical value of safety factor of the dam slope.

Key words: high earth-rock dam; acceleration distribution; modified D-P model; stability analysis

① 收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11272137); 江苏省博士后基金(1301067B); 江苏大学高级专业人才培养项目(09JGD058)

作者简介: 张 锐(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事土工问题的研究。E-mail: rzhang0411@163.com。

0 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,其中土石坝为优先选择的坝型之一^[1],坝坡抗震稳定分析也成为土石坝设计的主要内容之一。由于拟静力法的简单实用,目前土工结构的地震反应分析仍采用此法。用拟静力法分析坝坡抗震稳定时,荷载的确定是一个重要的问题^[2]。因此,地震加速度动态分布系数的取值直接影响坝坡抗震稳定分析的结果。现行的《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-1997)^[3]中的地震加速度动态分布系数适合高度 150 m 以下的大坝。然而,随着国家西部大开发的不断推进,我国在西部建设的高土石坝也随之增多。坝高的增加影响了坝体振动的特性,降低了坝体的自振频率。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。在地震反应中,高坝的高阶自振周期与地震卓越周期遇合的机率增大,高阶振型易被激发放大,从而导致地震加速度的分布与低坝相比会有所不同。为此,本文研究高土石坝在地震荷载作用下的地震加速度分布,提出高度在 150 m 至 250 m 之间的高土石坝的建议地震加速度动态分布系数图示,并利用现行规范中的地震加速度动态分布系数图示和本文建议的图示,结合强度折减法对 250 m 级的土石坝的坝坡抗震稳定性进行分析。

1 高土石坝地震加速度分布

现行的《水工建筑物抗震设计规范》对土石坝的地震加速度动态分布系数如图 1 所示。其中, a_m 在设计烈度为 VII、VIII、IX 度时分别取 3.0、2.5、2.0。该规范的地震加速度动态分布系数仅适用于高度 150 m 以下的大坝,而目前大部分土石坝工程设计中坝高已远高于 150 m,还采用此分布去进行高土石坝的抗震设计则显得不尽合理。

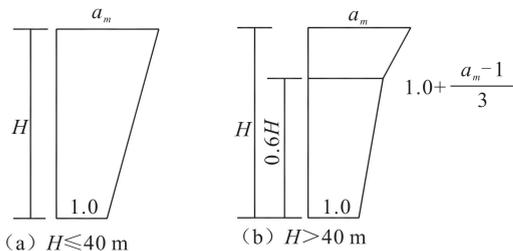


图 1 土石坝地震加速度动态分布系数
Fig.1 Seismic coefficients of earth-rock dams

匀三角形坝体地震加速度分布系数^[4]。他假设坝体剪应力沿水平面为一常量,推导坝体频率和振型,分析了坝体在 EL-Centro 地震波作用下的地震加速度分布。根据 Seed 的研究思路,本文给出 $150 \text{ m} < H < 250 \text{ m}$ 土石坝建议的地震加速度动态分布系数图示^[5],基于修正的 Drucker-Prager 弹塑性模型,采用建议的地震加速度动态分布系数图示进行高土石坝抗震稳定分析。

1.1 本构模型

采用的本构模型是邓肯-张 E-B 非线性弹性模型^[6],动力方程的求解采用 Wilson- θ 法进行。

1.2 模型计算

四座模型土石坝的心墙由黏土构成,其余部分为堆石。坝体的几何参数见表 1,大坝剖面图见图 2。其中,上游和下游的坡度分别取为 1:1.9 和 1:1.8,心墙的上下游坡度均取为 1:0.15。材料的物理参数见表 2。

表 1 四座大坝的几何参数

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

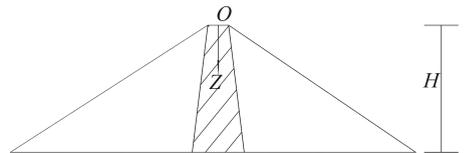


图 2 大坝模型的横断面图示

Fig.2 Cross-section of the dam model

计算各大坝的地震反应时,选取三条根据现行水工规范的设计反应谱拟合的人工波。人工波 1~3 的设计反应谱最大值的代表值 β_{\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。

1.3 建议的地震加速度动态分布系数图示

计算出四座大坝在每条人工波作用下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结果,计算结果列于表 3。

根据表 3 的计算结果,提出了高度为 250 m 级土石坝的地震加速度动态分布系数图示(图 3)。当设计烈度为 VII、VIII、IX 时,分别取 3.0、2.5 和 2.0。

Seed 曾经采用解析方法分析了不同高度的均

表 2 材料物理参数

Table 2 Physical parameters of the materials

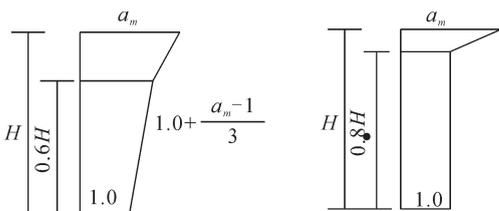
材料	r	K	K_{ur}	n	R_f	K_b	m	C	φ	K_0	k_1	n_1
堆石	19.95	1 491	2 236.5	0.241	0.719	683	0.101	0	54.37	0.5	24.56	0.6
黏土	21.56	388	582	0.311	0.755	206	0.257	0.02	24.43	0.5	15.87	0.322

注: $\gamma(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ 为材料的重量; $K_0(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ 为土压力系数。

表 3 地震加速度分布

Table 3 Seismic acceleration distribution

z/H	0 g	0.1 g	0.2 g	0.4 g	0.6 g	0.8 g	1.0 g
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



(a) 目前采用的分布 (b) 建议的分布

图 3 高土石坝地震加速度动态分布系数图示

Fig.3 Seismic coefficients of high earth-rock dams

1.4 工程实例

为了验证高土石坝建议地震加速度动态分布系数图示的可行性,选用拟建的糯扎渡土石坝,研究其在 Friuli 地震波(1976,意大利)作用下的地震反应。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 $T_g = 0.25 \text{ s}$ 。图 4 为糯扎渡大坝横断面图示。图中 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]。

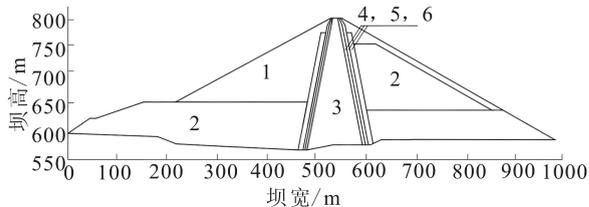


图 4 糯扎渡大坝横断面图示

Fig.4 Cross-section of the Nuozhadu dam

在 Friuli 地震波作用下,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 值见表 4。

由表 3 和表 4 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)对于高土石坝而言,图 3(b)建议的地震加速度动态分布系数更加符

合 250 m 级高土石坝的地震加速度实际分布特征。

表 4 糯扎渡大坝计算结果

Table 4 Calculation results of the 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
a	1.9	1.25	0.95	1.0	1.05	1.0	1.0

2 坝坡稳定分析

利用图 3 中现行规范的地震加速度动态分布系数图示和建议的地震加速度动态分布系数图示,采用强度折减法,对糯扎渡土石坝进行坝坡稳定性分析。

2.1 本构模型

采用 ABAQUS 提供的修正 Drucker-Prager 弹塑性模型进行坝坡稳定分析[8]。模型的屈服函数可写成:

$$F = t + p \tan \beta - d = 0 \tag{1}$$

式中:对于单轴压缩试验, $d = (1 - \frac{1}{3} \tan \beta) \sigma_c$;对于单轴拉伸试验, $d = (\frac{1}{k} + \frac{1}{3} \tan \beta) \sigma_t$; β 为材料的摩擦角; $p = \text{trace}(\sigma) / 3$ 为材料受到的平均压应力;偏应力 t 可以用下式表示:

$$t = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \tag{2}$$

式中: $q = \sqrt{3J_2}$,为 Mises 等效应力,其中 J_2 为应力偏量 S_{ij} 的第二不变量;在 ABAQUS 中,应力张量的第三不变量 r 和参数 k 的表达式为:

$$r = \sqrt[3]{\frac{27}{2} J_3}, k = \frac{3 - \sin \beta}{3 + \sin \beta} \tag{3}$$

式中: J_3 为应力偏量 S_{ij} 的第三不变量; k 的值介于 0.8 和 1 之间,当 $k = 1$ 时,修正 D-P 弹塑性模型的屈服面退化为广义 Mises 模型,在 π 平面内其屈服面如图 5 中的曲线 a,当 $k = 0.8$ 时,修正 D-P 模型的光滑屈服面近似于 Mohr-Coulomb 屈服面的曲线(图 5(b))。

当 $k = 1$ 时,式(1)可以写成:

$$q + p \tan \beta - d = 0 \tag{4}$$

式中: $\tan \beta$ 和 d 是黏聚力 C 和摩擦角 φ 的函数。

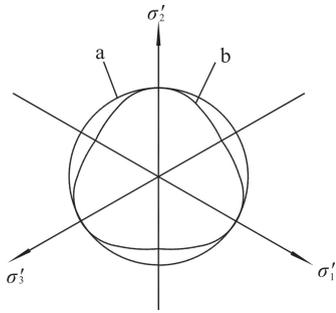


图5 偏平面中修正D-P模型屈服面

Fig.5 The modified D-P yield surface on the deviatoric plane

通过变换 $\tan \beta$ 和 d 的表达式,可以实现不同的屈服准则^[9]。各准则之间的转换关系见表5。

表5 不同屈服准则的转换关系

Table 5 Transformation relation of different yield criteria

屈服准则	$\tan \beta$	d
M-C 外接圆	$\frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$	$\frac{6C \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$
M-C 内接圆	$\frac{6 \sin \varphi}{3 + \sin \varphi}$	$\frac{6C \cos \varphi}{3 + \sin \varphi}$
M-C 内切圆	$\frac{3 \sin \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$	$\frac{3C \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$

2.2 强度折减

逐步折减土工材料的黏聚力 C 、摩擦角 φ 和剪胀角 ψ ,使之达到破坏的临界状态^[10]。

2.3 工程算例和分析

依然以糯扎渡土石坝为例,分别代入图3中现行和推荐的地震加速度动态分布系数图示,计算出

各结点的水平地震荷载^[11]。利用强度折减法以及表5列出的屈服准则和修正D-P屈服准则,对大坝上、下游的坝坡进行抗震稳定性分析。筑坝材料的物理参数见参考文献[7]。各屈服准则在偏平面内对应的屈服面如图6所示。

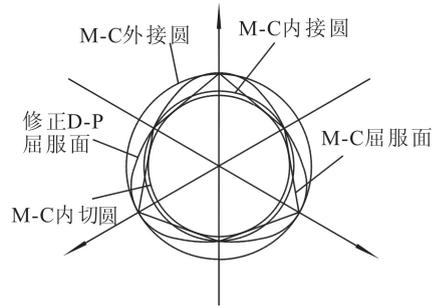


图6 偏平面中各屈服面图示

Fig.6 Different yield surfaces on the deviatoric plane

表6列出了糯扎渡大坝上下游边坡的临界安全系数。最危险滑动面的位置如图7所示。图中实线代表利用规范中的地震加速度动态分布系数图示得出的最危险滑动面,点划线代表利用建议的地震加速度动态分布系数图示得出的最危险滑动面。

表6 临界安全系数

Table 6 The critical safety factor

屈服准则	α 按目前采用的分布		α 按建议的分布	
	上游坡	下游坡	上游坡	下游坡
M-C 内切圆	1.778	1.581	1.886	1.651
M-C 内接圆	1.812	1.604	1.932	1.682
M-C 外接圆	2.533	2.300	2.652	2.375
修正D-P	2.232	2.014	2.342	2.084

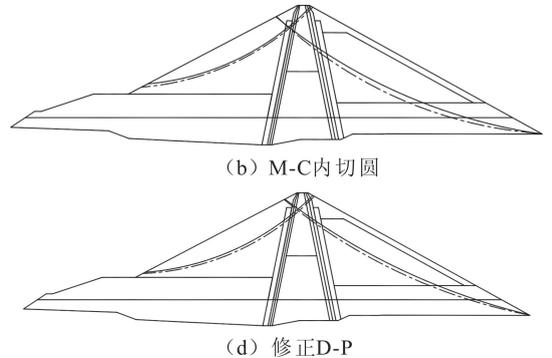
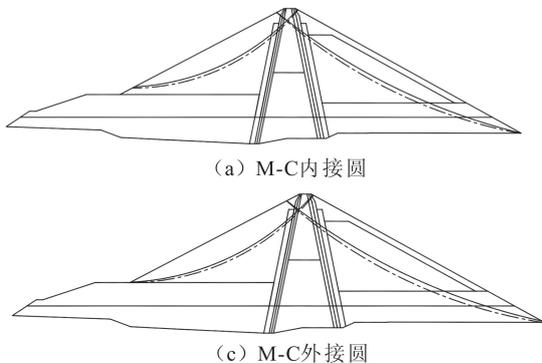


图7 临界滑动面的位置

Fig.7 Position of critical slip surface

由表6可以看出,对糯扎渡大坝的上游和下游坝坡而言,随着地震加速度动态分布系数 α 的降低,临界安全系数增加了5%左右。这主要是因为, α 取之建议的地震加速度动态分布系数图示时,结

点受到的水平地震力 Q_i 有所降低,坝坡失稳时坝体内部 Mises 应力水平有所降低,同时临界安全系数有所增大。由图7可知,虽然地震加速度动态分布系数 α 影响坝坡失稳时临界安全系数的值,但是对

临界滑动面的位置基本没有影响。此外,屈服准则对临界滑动面的位置影响甚微。

3 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150 m以下的低坝不同。整个坝体曾现的加速度分布特征是“鞭梢效应”有所增加,即整个坝体较大地震加速度分布在坝顶0.2倍坝高范围内,而坝体其余部分地震反应不明显。

(2) 修正D-P模型算得的临界安全系数介于内切(接)圆和外接圆之间。

(3) 随着整个坝体内部的地震动态分布系数的降低,坝体内部Mises应力水平有所降低,坡稳定分析得到的临界安全系数增加。

(4) 坝坡失稳时,最危险滑动面的位置基本不受地震加速度动态分布系数和屈服准则的影响。

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.
- [2] Cristiano Melo, Sunil Sharma. Seismic Coefficients for Pseudo-

static Slope Analysis[C]//13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B C, Canada, August 1-6, 2004, Paper N0.369.

- [3] 水工建筑物抗震设计规范(DL5073-1997)[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [4] H Bolton Seed, 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(S3): 25-58.
- [5] 张锐,迟世春,林皋.高土石坝地震加速度分布研究[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(8):1289-1291.
- [6] 龚晓南.土塑性力学(第二版)[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] ZHOU Rui, ZHANG Lian-hong, HE Bai-yan, et al. Numerical Simulation of Residual Stress Field in Green Power Metallurgy Compacts by Modified Drucker Prager Cap Model[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013(23): 2374-2382.
- [9] 谢卫生,周秋景.不同屈服准则对高拱坝安全度评价的影响分析[J].水利水电技术,2010,41(11):19-22.
- [10] 迟世春,关立军.应用强度折减有限元法分析土坡稳定的适应性[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(9):1298-1302.
- [11] 邓东平,李亮.基于滑动面搜索新方法对地震作用下边坡稳定性拟静力分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1):86-98.