文章编号:1673-0062(2011)01-0092-05

面板堆石坝最大加速度放大倍数经验公式

周 晖1,李俊杰2,康 飞2

(1. 南华大学 城市建设学院,湖南 衡阳 421001;2. 大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116024)

摘 要:对面板堆石坝进行三维动力反应计算分析,采用等价线性化模型以不同坝体 高度、不同河谷形状为对象,研究了输入不同地震波坝体的反应.结果表明,在坝高相 同、基础输入加速度不变情况下,随河谷宽度增加,坝顶坝轴线最大加速度位置由中 间向两岸对称移动;对狭窄河谷,最大加速度在坝轴线中间坝顶部位,对宽阔河谷,最 大加速度在靠近两岸的部位.对面板堆石坝地震反应加速度分布规律进行了统计分 析,给出了计算坝体最大加速度放大倍数的经验公式,为实际工程中进行基于拟静力 法的面板堆石坝抗震稳定分析提供了参考依据.

关键词:面板堆石坝;三维动力反应分析;等价线性化方法;地震放大系数;最大加速度

中图分类号:TV 641.4*3 文献标识码:A

Empirical Formula for Calculating Maximum Acceleration of Concrete-faced Rockfill Dam

ZHOU Hui¹, LI Jun-jie², KANG Fei²

(1. School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: On the condition of different dam heights and different shapes of river valley, 3-D dynamical responses of concrete-faced rockfill dams subjected to different seismic intensity input are analyzed based on equivalent-linear model in this paper. The results present that on the condition of the same dam height and the base acceleration excitations unchanged, with the increase of the river valley width, the position of the maximum acceleration on the axis of the top moves from the middle to the riversides symmetrically. To the narrow river valley, the position of the maximum acceleration which occurs near the riversides to the wide valley is on the middle of the axis at the top. Statistical analysis is also

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90815024);中国博士后科学基金资助项目(20100471444)

作者简介:周晖(1964-),男,湖南衡阳人,南华大学城市建设学院讲师,博士.主要研究方向:结构工程、岩土工程、 土石坝静力和动力数值分析.

收稿日期:2010-12-20

made to the seismic coefficient, and an empirical equation for calculating the maximum acceleration of the dam is provided, which provide an reference for the seismic stability analysis of rockfill dams using pseudo-static method.

key words:concrete-faced rockfill dam;3-D dynamical response analysis;equivalent-linear method;seismic amplification factor;maximum acceleration

0 引 言

近年来在高烈度区修建了大量 200 m 级的高 面板堆石坝,2008 年四川汶川大地震就给紫坪铺 面板堆石坝带来严重震害^[1],所以土石坝抗震研 究工作的迫切性和重要性越来越突出^[2-3].

边坡稳定分析受到很多关注^[4-5],常用分析方 法是极限平衡法和有限元法.土石坝地震稳定性分 析采用的是极限平衡法中的拟静力法,地震加速度 分布系数是进行土石坝拟静力抗震稳定分析的关 键数据,《水工建筑物抗震设计规范》(SL203-97)^[6] 仅适用于高度 150 m 以下的土石坝,且研究时间较 早,不能适应现阶段堆石坝抗震稳定性计算的需 要.张锐等对高于 150 m 土石坝的地震加速度动态 分布系数规律进行了研究^[7].本文结合不同地震 波、不同坝高和不同河谷形状,对面板堆石坝地震 反应加速度分布规律进行统计分析,给出计算坝体 最大加速度放大倍数经验公式.

1 堆石坝动力计算原理

根据结构动力学原理,面板堆石坝整体动力 平衡方程式为

 $[M] \{ \ddot{u} \} + [C] \{ \dot{u} \} + [K] \{ u \} = \{ R(t) \}$ (1)

式中:[M]、[C]、[K]为整个坝所有节点与惯性 有关的质量矩阵、整体阻尼矩阵、整体刚度矩阵. $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 、 $\{u\}$ 分别为加速度、速度和位移向量; $\{R(t)\}$ 为地震荷载向量.

在时域内求解动力平衡方程式(1)是采用逐步积分法完成的.本文采用 Wilson-θ法.

非线性等价黏-弹性模型能比较好的表征堆 石动力性质的基本关系,因而在面板堆石坝动力 反应分析中得到广泛的应用^[8].

任一点的剪切模量 G 为

$$G = \frac{G_{\text{max}}}{1 + \bar{\gamma}/\bar{\gamma}_{\text{r}}}$$
(2)

式中: $\bar{\gamma}_r$ 为参考剪应变幅值; G_{max} 为堆石的最大剪 切模量. 阻尼比 λ 为

$$\lambda = \lambda_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) = \lambda_{\max} \frac{\gamma/\gamma_r}{1 + \overline{\gamma}/\overline{\gamma}_r} \quad (3)$$

最大阻尼比 λ_{max} 可以通过试验经统计得到.

式(2)、式(3)表明,动剪切模量和阻尼比随 剪应变幅值而变化,在等价非线性黏 - 弹性模型 中的剪应变幅值 $\bar{\gamma}_r$ 可取最大剪应变幅值与一个 折减系数的乘积,对地震过程,折减系数通常取为 0.65.但式(2)、式(3)和真实的堆石料动力特性 曲线还有差别,所以一般都选用文献[9]建议的 曲线来计算.图1和图2分别为文献[9]建议的堆 石料等效动剪切模量与动剪应变幅、等效阻尼比 与动剪应变幅的关系曲线.



图 1 堆石料归一化等效动剪切模量与动剪 应变幅关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between the normalized dynamic equivalent shear modulus and amplitude of dynamic shear strain of rockfill materials



图 2 堆石料等效阻尼比与动剪应变幅关系曲线 Fig. 2 Relationship curves between equivalent damping ratio and amplitude of dynamic shear strain of rockfill materials

2 计算方案

本文对一混凝土面板堆石坝进行三维非线性 地震反应分析,并就地震波的形式、输入地震波强 度、坝高、河谷宽度、河岸坡度等5种因素对动力反 应的影响进行了研究,共计算了1200种工况见表 1,力求得出一些规律性结论.坝顶宽10m,上、下游 坝坡均为1:1.6,堆石的质量密度为2000 kg/m³, 混凝土面板的质量密度为2180 kg/m³.

计算中选择 4 条地震加速度记录(见表 1), 分别为 Taft 地震加速度记录(本文记为地震波 1)、El Centro 地震加速度记录(地震波 2)、日本阪 神地震加速度记录(地震波 3)、日本神户地震加 速度记录(地震波 4);这 4 条地震波的加速度反 应谱见图 3.4 条地震波的卓越周期分别为 0.34、 0.26、0.20、0.30 s,地震历时分别为 16、20、20、 25 s,均为顺河向输入.

表1 计算工况 Table 1 The computational case

地震波 形式	输入地震 波强度	坝高 /m	河谷宽 /m	河岸 坡度
(1)Taft 地震波	(1)0.1 g	(1)100	(1)50	(1)0.4
(2)ElCentro 波	(2)0.2 g	(2)150	(2)150	(2)0.6
(3)阪神波	(3)0.4 g	(3)200	(3)300	(3)0.8
(4)神户波		(4)250	(4)500	(4)1.0
		(5)300		(5)1.5

注释:对表1中5种影响因素进行组合,共计算了1200种工况.



图 3 输入地震动的加速度反应谱 Fig. 3 The seismic response spectra of inputted waves

3 最大加速度放大倍数计算公式

堆石坝的地震放大倍数与下面几种参数密切 相关:第一是坝高 H,由于坝高不同,坝体的自振周 期 T_b 不同,对地震的敏感性就有所差别;第二是地 震波的卓越周期 T_d ,如果地震波的卓越周期恰好 与坝体自振周期较接近,则坝体的动力反应会相当 大,尽管在地震过程中,坝体的自振周期也有所改 变,但两者的相关性是很大的;第三是地震波加速 度反应谱的宽带范围 $\alpha_{0.5}$,但由于地震波反应谱的 宽带范围 $\alpha_{0.5}$ 本身是一个比较模糊的概念,怎样 $\alpha_{0.5}$ 把反映到坝体地震反应中还需专门研究;第四 是地震动强度a,随着地震动强度的提高,坝体的 加速度放大倍数 β_i 呈减小的趋势.因此坝体地震 加速度放大倍数可写成下面的函数形式^[10]:

$$\boldsymbol{\beta}_i = f(\boldsymbol{H}, \boldsymbol{T}_d, \boldsymbol{\alpha}_{0.5}, \boldsymbol{a}) \tag{4}$$

对 5 种不同高度的堆石坝输入 8 种不同的地 震波进行动力分析,并对计算结果进行统计分析, 得到加速度放大倍数的计算公式为:

$$\beta_{i} = A_{i}K_{i}(\eta_{1}\beta_{1} + \eta_{2}\beta_{2} + \eta_{3}\beta_{3})\frac{T_{d}}{T_{b1}}$$
(5)

其中, β_i :坝顶加速度放大倍数; A_i :反映不同地震 烈度条件下坝顶加速度放大倍数的系数; K_i :地震 系数;烈度 7°: A_i = 35 K_i = 0.1 烈度 8°: A_i = 16

 $K_i = 0.2$ 烈度 9°: $A_i = 5$ $K_i = 0.4$; $\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3$: 坝体前三阶自振周期在 D = 4% 地震加速度反应 谱上的放大倍数; 坝体前三阶自振周期, 按经验公 式(6) 计算^[10].

$$\begin{cases} T_{b1} = \frac{1}{100} H^{0.83} \\ T_{b2} = \frac{1}{150} H^{0.83} \\ T_{b3} = \frac{1}{200} H^{0.83} \end{cases}$$
(6)

 η_1, η_2, η_3 —坝体前三阶自振周期参与系数; $\eta_1 = 0.7, \eta_2 = 0.2, \eta_3 = 0.1; T_d$ ——输入地震波的卓越周期.

用公式(5)估算处于宽阔河谷中的低面板堆 石坝的地震反应加速度放大倍数是合适的,但当 坝高超过200m,筑坝河段狭窄时,用式(5)计算 出来的加速度放大倍数就偏小了.因此,需先对坝 高进行修正,修正后的计算公式如下:

$$\beta = \beta_i \left(\frac{H}{85}\right)^{1.2} \tag{7}$$

上式即为在考虑了坝高 H、地震波的频谱特 性和地震动强度后坝体最大加速度放大倍数计算 公式,再把河谷宽度以及河岸坡度考虑进去后可 得到综合考虑了这 5 个因素后坝体最大加速度放 大倍数估算公式如下:



(2) 当坝高 H > 200 m, $\beta_{\max} = \beta_i \left(1.0 + \frac{500 - B}{900} \right) \left(1.0 + \frac{1.0 - 2m}{5} \right) (9)$

其中,*β*_{max}——最大加速度放大倍数;*β*_i—按 公式(5)计算得到的加速度放大倍数;*H*—坝高 (m);*B*—河谷宽度(m);*m*—河岸坡度.

图 4 为有限元计算与公式计算之差值(加速 度)分布图.图中 X 轴代表河谷参数序号,如表 2 所示; Y 轴代表坝体参数序号,如表 3 所示; Z 轴 为加速度之差值,量纲是 m/s².从图 4 中可以看 出,用公式(8)或式(9)计算得到的最大加速度放 大倍数与采用有限元计算得到的值较接近,说明 本文总结得到的公式可以用于估算坝体的最大加 速度放大倍数.

对1200种计算工况进行归纳总结得到的地 震加速度分布系数沿坝高的变化如图5所示.图 5结合计算最大加速度放大倍数β_{max}的经验公式 (8)或式(9)就可以方便地应用于堆石坝拟静力 法地震稳定计算.





(b) EI Centro seismic wave



图 4 实际计算与公式估算之差值分布图 Fig. 4 Distribution of the margins between the results calculated using FEM with results calculated using empirical formula

表 2 闪谷参数序号

Table 2The sequence numbers of	valley parameters
--------------------------------	-------------------

宽度/m 坡度	50	150	300	500
0.4	1	6	11	16
0.6	2	7	12	17
0.8	3	8	13	18
1.0	4	9	14	19
1.5	5	10	15	20

表 3 坝体参数序号表

Table 3 The sequence numbers of dam parameters

				_
地震烈度 坝高/m	7	8	9	_
100	1	6	11	
150	2	7	12	
200	3	8	13	
250	4	9	14	
300	5	10	15	





4 结 论

1) 坝高相同,随基础输入加速度增加,坝顶 加速度放大倍数减少;

2)当坝高 H>200 m,坝高相同,基础输入加 速度不变,最大加速度放大倍数随河谷宽度的增 大和岸坡坡度变缓而减小;当坝高 H≤200 m 且 河谷宽度 B>300 m,河谷宽度与河岸坡度对最大 加速度放大倍数没有影响;

3)地震波频谱特性对坝体的加速度反应有 较大的影响,其规律如下:坝体自振周期如果和输 入的地震波卓越周期相近,则坝体加速度放大倍 数较大;具有较宽频带的地震波对不同高度的面 板堆石坝的加速度都有较大的放大作用.

4) 对面板堆石坝地震反应加速度分布规律进行了统计分析,给出了计算坝体最大加速度放大倍数的经验公式,为实际工程中进行基于拟静力法的面板堆石坝抗震稳定分析提供了参考依据.

参考文献:

- [1] 陈厚群,徐泽平,李敏. 汶川大地震和大坝抗震安全[J]. 水利学报,2008,39(10):1158-1167.
- $\left[\,2\,\right]$ Rampello S,Cascone E,Grosso N. Evaluation of the seismic

response of a homogeneous earth dam[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(5):782-798.

- [3] Cheng Y M, Lansivaara T, Wei W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods [J]. Computers and Geotechnics, 2007,34(3):137-150.
- [4] SU Yong-hua, ZHAO Ming-hua, ZHANG Yue-ying. Numerical method of slope failure probability based on Bishop model[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(1):100-105.
- [5] Shukha R, Baker R. Design implications of the vertical pseudo-static coefficient in slope analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 35(1):86-96.
- [6] 中国水利水电科学研究院. SL203-97 水工建筑物抗 震设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [7] 张锐,迟世春,林皋. 地震加速度动态分布及对高土石 坝坝坡抗震稳定的影响[J]. 岩土力学,2008,29(4): 1072-1076.
- [8] 李俊杰,韩国城,孔宪京.关门山面板堆石坝三维地震 反应分析和研究[J].水利学报,1994,2(2):76-83.
- [9] 孔宪京,娄树莲,邹德高,等. 筑坝堆石料的等效动剪 切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报,2001,32(8): 20-25.
- [10] 李俊杰,韩国城,林皋. 混凝土面板堆石坝自振周期的 简化公式[J]. 振动工程学报,1995,8(3):274-279.