

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.03.009

一种提高重力坝抗震性能的方法

周星德¹ ,章 青¹ ,吴继敏² ,刘谦敏¹ ,刘广波¹ ,石星星¹

(1. 河海大学力学与材料学院 ,江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学地球科学与工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对我国大坝多建于高烈度地震区、坝基中存在软弱结构面和缓倾角裂隙等现象 ,以某重力坝为研究对象 ,探讨了在大坝坝底铺设铅加球墨铸铁对坝体动力反应及动力深层抗滑稳定性的影响。计算结果表明 ,坝底铺设铅加球墨铸铁可有效降低坝体动力反应 ,提高重力坝动力深层抗滑稳定性 ,这为提高大坝抗震性能提供了一种新的途径。

关键词 :重力坝 ;深层抗滑稳定性 ;动力分析 ;地震

中图分类号 :TU753.8 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)03-0031-03

Method to improve anti-seismic performance of gravity dams//ZHOU Xing-de¹ , ZHANG Qing¹ , WU Ji-min² , LIU Qian-min¹ , LIU Guang-bo¹ , SHI Xing-xing¹ (1. College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 2. College of Earth Sciences and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Aimed at the phenomenon of China 's dams mostly built on high intensity earthquake areas with weak structural surfaces and low-inclined cracks in the dam foundation , the influences of laying lead and nodular cast iron at the dam bottom on its dynamic responses and dynamic deep anti-slide stability were investigated by taking a gravity dam as an example. The results show that laying lead and nodular cast iron at the dam bottom can effectively reduce its dynamic responses and enhance its deep anti-slide stability. It may provide a new approach for raising the anti-seismic performance of gravity dams.

Key words : gravity dam ; deep anti-slide stability ; dynamic analysis ; earthquake

我国大型水工建筑物大多建于地震烈度高的西部地区 ,抗震设计要求高 ,所以需要对大坝进行动力反应和稳定性分析^[1-2]。对于重力坝 ,侧重于深层抗滑稳定性研究 ,但目前大多基于静力分析^[3-4] ,出现了界面元法、分项系数法、强度折减法等方法。坝体动力抗滑稳定性研究侧重于以下几个方面 :坝基地震液化时的稳定性分析^[5] ,动响应分析及最小动稳定性研究^[6-8] ,坝体分段侧滑稳定性研究^[9]。文献[10]针对上闸首结构进行了深层抗滑稳定性分析并绘制了动力抗滑稳定性时程曲线。但目前有关重力坝动力深层抗滑稳定性的研究还是偏少。

提高坝体稳定性的措施有 :①将坝的迎水面做成斜面或折坡形坡面 ;②将坝基面开挖成倾向上游的斜面 ;③利用地形地质特点 ,在坝踵或坝趾设置深入基岩的齿墙 ;④采用有效的防渗排水或抽水措施 ,降低扬压力 ;⑤利用预加应力提高抗滑稳定性。上述措施主要通过增加坝体强度或减小外部力来提高坝体的稳定性。从结构抗震角度来讲 ,可通过附加

阻尼装置或作动器来提高结构的抗震能力^[11]。考虑到坝体属于大型结构 ,可采用在坝底铺设铅加球墨铸铁的方式来降低坝体动力反应。为此 ,笔者以某重力坝为研究对象 ,以实际地震波作为输入 ,研究重力坝深层抗滑稳定性。动力仿真结果表明在坝底铺设铅加球墨铸铁不仅可以降低坝体动力反应 ,而且提高了重力坝的深层抗滑稳定性。

1 动力分析模型

首先对重力坝计算区域进行有限元划分 ,假设结构阻尼为比例阻尼 ,则重力坝在地震作用下的运动方程可表示为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\ddot{x}_g \tag{1}$$

式中 : X 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ 分别为结点相对于坝基底部边界的位移矢量、速度矢量、加速度矢量 ; M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵 ; I 为单位矩阵 ; $\ddot{x}_g$ 为地震波加速度。

阻尼矩阵的计算公式为

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

其中

$$\beta = \frac{2\zeta}{\omega_1}$$

式中: α, β 为比例系数; ζ 为阻尼比; ω_1 为坝体结构的第一阶固有频率(基频)。

计算坝体和库水的动力相互作用产生的动水压力时,可忽略库水的可压缩性,以坝面附加质量的形式计入。地震动水压力可折算为与单位地震加速度相应的坝面附加质量:

$$P_w(h) = \frac{7}{8} a_h \rho \sqrt{Hh} \quad (3)$$

式中: $P_w(h)$ 为作用在直立迎水坝面水深 h 处的地震动水压力; a_h 为水平向地震加速度; ρ 为水的密度; H 为总水深。

坝体材料模型采用弹塑性模型,屈服准则采用 DP 准则,为

$$aI_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4)$$

其中

$$a = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$$k = \frac{6cc\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$$

式中: I_1, J_2 分别为应力第一不变量和第二偏应力不变量; k 为仅与岩石内摩擦角 φ 和黏聚力 c 有关的试验常数。

根据非线性静力计算结果,采用哈定-德涅维契(Hardin-Dmievich)模型^[9]把动力分析模型等效为线性模型,用等效剪切模量和等效阻力来反映基岩动应力~动应变关系的非线性与滞后性。本文采用的计算公式如下:

$$G_{eq} = \frac{G_{max}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (5)$$

其中

$$G_{max} = A(\sigma'_m)^{0.5}$$

$$\sigma'_m = \frac{I_1}{3} \quad \gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_{max}}$$

式中: G_{eq} 为等效剪切模量; G_{max} 为最大剪切模量; γ 为动剪应变; γ_r 为参考剪应变,由动力剪切试验确定; A 为基岩动力性质常数, A 随着基岩的孔隙比、剪应变等因素而变化; τ_{max} 为抗剪强度。

2 深层抗滑稳定性分析

深层抗滑稳定性分析方法有应力代数和法、强度折减法、分项系数法等,本文采用应力代数和法,

该方法通过有限元法计算求得应力场,根据应力结果合成求出滑移面上的阻滑力和滑动力,再通过投影合成求出滑体的抗滑稳定安全系数 F 。 F 的计算公式为

$$F = \frac{\sum (f_i \sigma_i + c_i) l_i}{\sum \tau_i l_i} \quad (6)$$

式中:下标 i 代表滑移面上单元的第 i 个结点; f_i 和 c_i 分别为结点 i 的摩擦系数与黏聚力; σ_i 和 τ_i 分别为结点 i 的法向应力和切向应力; l_i 为结点 i 的代表面积(二维情况下为长度)。

3 实例分析

某重力坝坝高 100 m,顶宽 10 m,下游坡度为 1:0.6,上游水位为 98 m,上游结构面与水平线的夹角为 20°,下游结构面与水平线的夹角为 40°。在坝体底部铺设厚度为 1 m 的铅加球墨铸铁,直接位于坝底部嵌入基岩中。模型中的基岩采用法向约束,有限元分析软件采用 ABAQUS。

式(2)中取 $\alpha = 0, \zeta = 0.05, \omega_1 = 18.73 \text{ rad/s}$,则 $\beta = 0.0053$ 。坝体混凝土弹性模量为 30 GPa,密度为 2500 kg/m³,泊松比为 0.167;基岩的弹性模量为 15 GPa,密度为 2700 kg/m³,摩擦角为 30°,黏聚力为 1 MPa,泊松比为 0.22。结构面的弹性模量为 15 GPa,密度为 2700 kg/m³,摩擦角为 27°,黏聚力为 500 kPa,泊松比为 0.22;铅加球墨铸铁的弹性模量为 145 GPa,密度为 7300 kg/m³,泊松比为 0。

地震波采用 KOYNA 波,持续时间为 10 s,施加于外部边界线上。需要注意的是在确定位移、速度及加速度响应时,应减去外部边界处的对应值。静荷载作用时的 Mises 应力云图见图 1,动力响应的最大位移(位于坝顶)、加速度(位于坝顶)、最大 Mises 应力(位于坝踵)响应时程曲线见图 2~4。图 5 为稳定安全系数的时程曲线。

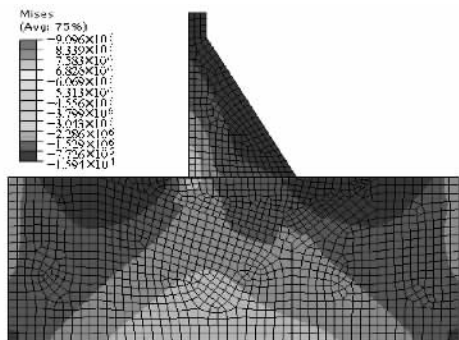


图 1 静荷载作用时的 Mises 应力云图(单位:Pa)

由于铅加球墨铸铁的破坏强度达 230 MPa,而计算所得的应力仅为 9.1 MPa,所以不会产生破坏,这里,不考虑其应力分布。不铺设与铺设铅加球墨铸

铁时的计算结果分别如下:坝踵处最大 Mises 应力为 5.62 MPa(4.87 MPa),坝顶最大水平位移为 0.064 m(0.061 m), F 值小于 2.5 的概率为 12.3%(8.41%)最小安全系数为 2.13(2.27),其中,括号内的数值为铺设铅加球墨铸铁时的结果。可见,铺设铅加球墨铸铁可使最大 Mises 应力降低 15%,最大位移降低 5%,最小安全系数降低 6.57%, F 值小于 2.5 的概率降低 3.89%。

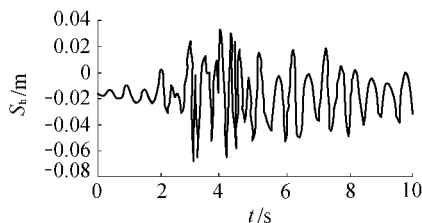


图2 坝顶水平位移响应时程曲线

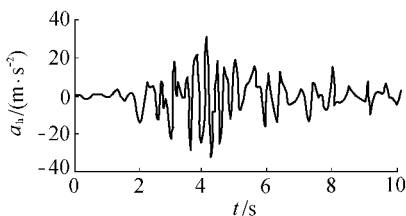


图3 坝顶水平加速度响应时程曲线

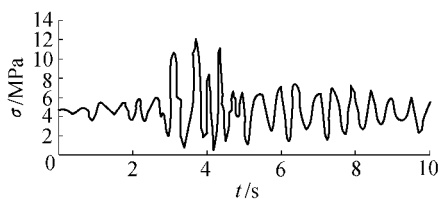


图4 坝踵处 Mises 应力响应时程曲线

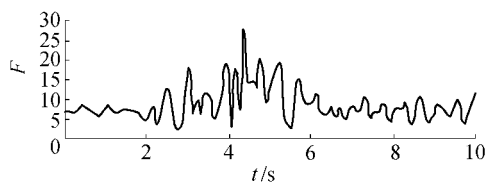


图5 稳定安全系数时程曲线

4 结 语

目前,有关坝体深层抗滑稳定性动力分析的研究还较少,主要通过增加坝体强度或减小外部力来提高坝体的抗震稳定性,从结构抗震角度来提高坝体的稳定性尚未见报道。本文通过在坝底部铺设铅加球墨铸铁的方式来提高坝体的抗震能力,从而间接地提高重力坝的深层抗滑稳定性。从计算结果来看,铺设铅加球墨铸铁有效地减小了坝踵应力,降低了坝顶部最大响应,提高了坝体的深层抗滑安全系数。此外,铅加球墨铸铁的抗破坏能力很强,在重力坝底部铺设铅加球墨铸铁不会产生破坏。在构建坝

体时,先铺设废弃的铅加球墨铸铁,虽然稍微增加了建设费用,但可提高坝体的抗震能力,这为提高大坝抗震性能提供了一种新的途径。

参考文献:

- [1] 颜天佑,李同春,郑治,等.索风营水电站 Dr2 危岩体稳定安全度有限元分析[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(6):691-696.
- [2] 陈松,陈志坚.软土地基上大型沉井基础安全监控模型[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(1):87-92.
- [3] 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.
- [4] 王平,胡再强,田春亮,等.陶家沟尾矿坝三维静力和动力稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):53-55.
- [5] 严祖文,杨建民.坝基地震液化特性及动力稳定性分析[J].世界地震工程,2008,24(3):140-145.
- [6] 张晓燕,任旭华,邵勇.碾压混凝土重力坝陡峭建基面的动力稳定分析[J].红水河,2007,26(4):35-38.
- [7] 李周顺,何江达,苏向震,等.某重力坝坝体动力结构特性及坝基动力稳定性分析[J].四川水利,2008,30(1):13-17.
- [8] 周兵,金峰,王进廷.拱坝坝肩整体动力稳定性的离心模型试验[J].水利水电科技进展,2011,31(1):15-19.
- [9] 姚文生,周志广,陈伟韦.鞍钢矿业公司大孤山尾矿坝动力稳定性分析[J].岩土工程界,2009,12(12):65-68.
- [10] 胡婷,何力,韦先锋,等.亭子口上闸首结构静动力响应分析及深层抗滑稳定研究[J].灾害与防治工程,2010,68(1):33-37.
- [11] 周星德,林小国.非线性基础隔离结构振动控制研究[J].东南大学学报:自然科学版,2007,37(6):1023-1026.
- [12] 顾淦臣.土石坝地震工程[M].南京:河海大学出版社,1988.

(收稿日期:2010-10-09 编辑:骆超)

