

纳子峡面板砂砾石坝地震永久变形有限元分析

康雁德¹, 杨志磊², 马莹²

(1. 黄河中型水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810008; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对纳子峡面板砂砾石坝实际情况, 采用三维非线性动力有限元法, 建立了大坝的三维有限元模型, 计算了大坝在设计地震作用下的地震响应。根据面板坝土石料的三轴试验结果, 选用坝料的残余应变模式, 建立了同时计入残余体应变和残余剪应变的面板砂砾石坝地震永久变形计算模式, 应用应变势概念及其相应的整体变形计算方法, 计算预测了纳子峡面板坝的地震永久变形, 分析了坝体地震永久变形的量值和分布规律。结果表明, 大坝在 7.5 度地震作用下具有较好的抗震能力, 其永久变形能够满足工程需要。

关键词: 面板砂砾石坝; 地震响应; 残余应变; 地震永久变形; 三维有限元法

中图分类号: TV3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)03—0034—04

Analysis on Earthquake-induced Permanent Deformation of Nazixia Facing Sand-gravel Dam by FEM

KANG Yan-de¹, YANG Zhi-lei², MA Ying²

(1. Huanghe Medium-sized Hydropower Development Co., Ltd., Xining, Qinghai 810008, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: According to the actual situation of Nazixia facing sand-gravel dam, and adopting the 3-D nonlinear dynamic finite element method, a 3-D finite element model is set up to calculate the seismic response of the dam under designed earthquake action. Based on the results of triaxial test, the dam material's residual strain mode is chosen to set up the calculation model for the earthquake-induced permanent deformation of facing sand-gravel dams through considering both residual shear strain and residual volumetric strain. Then the earthquake permanent deformation of Nazixia facing sand-gravel dam is predicted, and the permanent deformation's magnitude and distribution law of the dam is analyzed. The results show that the dam has a good aseismic capacity, which could meet the needs of the engineering's permanent deformation.

Keywords: facing sand-gravel dam; seismic response; residual volumetric strain; earthquake-induced permanent deformation; 3D finite element method

0 前 言

纳子峡水电站位于青海省东北部的门源县燕麦图呼乡和祁连县皇城乡的交界处, 是以发电为主的大型枢纽工程。水库正常蓄水位高程 3 201.5 m, 校核洪水位高程 3 202.38 m, 水库总库容 7.33×10^8 m³, 电站装机容量为 87 MW。工程规模属于大(2)型, 大坝的工程等别为 II 等, 主要建筑物工程等别为 2 级, 次要建筑物工程等别为 3 级。工程的防洪标

准设计洪水频率为 500 a 一遇, 洪峰流量为 1 810 m³/s, 校核洪水频率为 5 000 a 一遇, 洪峰流量为 2 340 m³/s。枢纽主要建筑物包括混凝土面板砂砾石坝、右岸开敞溢洪道、左岸导流洞改建龙抬头泄洪洞、右岸引水发电洞和地面式厂房等。混凝土面板砂砾石坝最大坝高 121.5 m, 坝高超过 100 m, 按照工程等别为 1 级的建筑物设计, 大坝的典型断面图如图 1 所示。

土石坝地震永久变形分析有三类方法。一是以

纽马克(Newmark, 1965)刚体滑动面假设为基础和提出的屈服加速度概念建立的滑块位移算法^[1]。二是以舍夫(Serff)和西特(Seed)等提出的应变势概念为基础建立的整体变形计算方法。三是利用弹塑性

模型直接求出塑性变形,即所谓的真非线性分析方法。这里采用整体变形计算方法^[2],计算设计地震作用下纳子峡面板砂砾石坝的地震永久变形,为设计和施工提供参考。

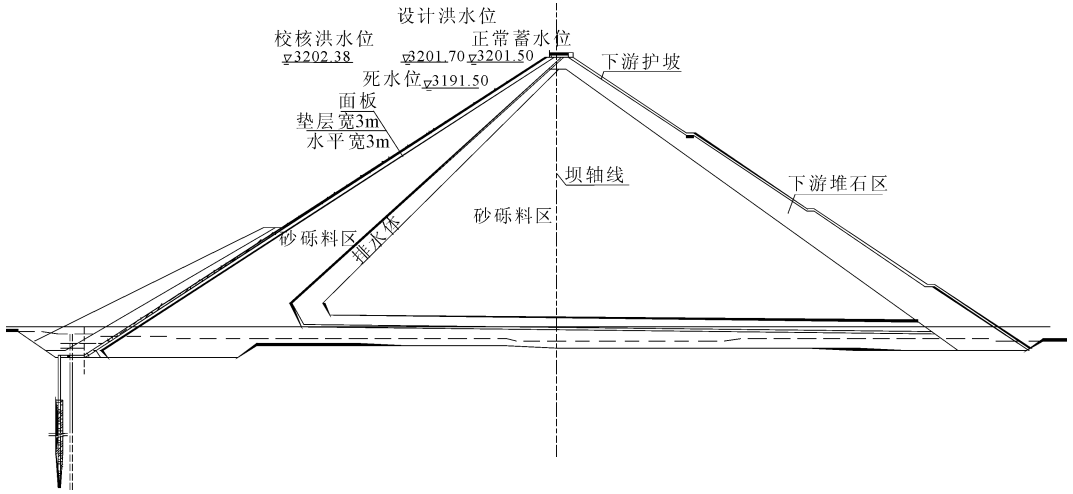


图 1 大坝典型断面图

1 面板坝地震永久变形的三维非线性有限元分析方法

1.1 面板坝地震反应分析方法

1.1.1 本构模型

本次动力计算分析采用等效非线性粘弹性模型^[3],即假定坝体砂砾石料和地基覆盖层土为粘弹性体,采用等效剪切模量 G 和等效阻尼比 λ 这两个参数来反映土的动应力应变关系的两个基本特征:非线性和滞后性,并表示为剪切模量和阻尼比与动剪应变幅的关系。

动剪切模量和动阻尼比与动剪应变 γ 的关系曲线由试验测得^[4]。动力计算时,直接输入整理后的动三轴试验曲线,根据应变值进行内插和外延取值,用于计算。

1.1.2 接触面模型

面板和砂砾石是两种不同性质的材料,且两者的弹性模量相差悬殊,在荷载的作用下可能沿接触面产生滑移或开裂,出现变形不连续现象,因此,要在面板和砂砾石体之间的接触面上设置无厚度的接触面单元。接触面单元的动力模型采用河海大学的试验成果^[4-5]。

1.2 地震永久变形的计算方法

1.2.1 残余剪应变

残余剪应变 γ_p 与残余轴应变 ϵ_{pa} 的关系:

$$\gamma_p = (1 + \mu)\epsilon_{pa} \quad (1)$$

式中: μ 为动泊松比。

根据试验结果,残余轴应变与动剪应力比的关系可以用幂函数表示如下:

$$\epsilon_{pa} = K_a \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma_3} \right)^{n_a} \quad (2)$$

式中: K_a, n_a 为试验参数,分别是以有效固结应力 σ_3' 、固结比 K_c 、等效振次 N 为参变数的系数和指数。残余轴应变 ϵ_{pa} 以百分数(%)表示,动剪应力 $\Delta\tau$ 和有效固结应力 σ_3' 采用相同的量纲^[6]。

残余剪应变 γ_p 和动剪应力 $\Delta\tau$ 的关系可以采用谷口荣一公式:

$$\Delta\tau = \frac{\gamma_p}{a + b\gamma_p} \quad (3)$$

式中: a, b 为试验参数,以有效固结应力 σ_3' 、固结比 K_c 、等效振次 N 为参变数^[7]。

1.2.2 残余体应变

根据中国水利水电科学研究院进行的坝料体积变形特性的大型动三轴试验结果,残余体应变 ϵ_{pv} 和动剪应力 $\Delta\tau$ 的关系可以表示如下:

$$\epsilon_{pv} = K_v \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma_3} \right)^{n_v} \quad (4)$$

式中: ϵ_{pv} 为残余体应变,为百分数(%); $\Delta\tau$ 为动剪应力; K_v, n_v 为试验参数,分别是以有效固结应力 σ_3' 、固结比 K_c 、等效振次 N 为参变数的系数和指数。动剪应力 $\Delta\tau$ 和有效固结应力 σ_3' 采用相同的量纲^[8-9]。

2 纳子峡面板砂砾石坝地震永久变形计算

2.1 网格剖分及地震波输入

根据纳子峡面板坝的地址和设计资料,进行了计算模型的单元剖分。三维计算模型中,根据面板分缝情况对整个坝体进行网格剖分,各横断面的位置与面板的垂直缝一直。整个结构共划分了 16 638 个结点和 14 173 个单元,包括接触面单元和接缝单元。有限元模型和典型横剖面如图 2 和图 3 所示。静力和动力计算采用相同的单元划分形式。相关计算参数均通过试验得出。

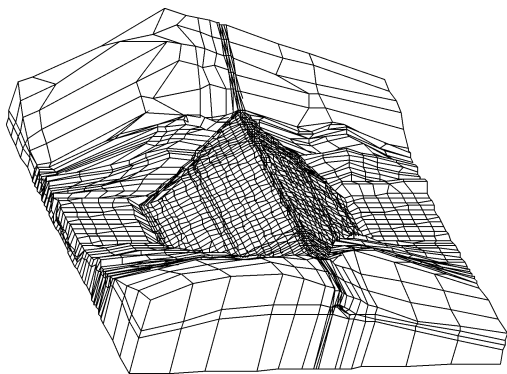


图 2 有限元模型图

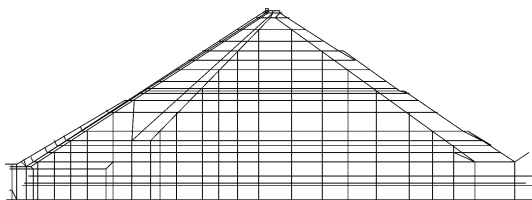


图 3 单元横剖面图

输入地震波对动力分析结果有较大影响,根据水工建筑物抗震设计规范(SL203-97),动力分析地震动输入以 50 a 超越概率 10% 的峰值加速度为 1.63 m/s^2 ,结合坝址地址情况,参照抗震设计规范,计算中采用如图 4 所示的输入基岩地震加速度时程曲线。最大加速度为 1.63 m/s^2 ,计算时长为 30 s,计算时间步长为 0.02 s。

本文计算了正常蓄水位情况下大坝受到如上所述地震时的地震永久变形。同时输入了水平顺河向和竖向地震作用,竖向加速度峰值取水平加速度峰值的 2/3。

2.2 计算参数

根据南京水利科学研究所提供的试验参数,参考九甸峡面板堆石坝工程、积石峡面板堆石坝工程等,经与设计协商讨论,选取坝料的动力特性参数如

表 1,动力残余变形特性模型参数如表 2 所示,其中 $c_3 = 0$,其他所缺土料参数则根据土料静力特性相近的原则参照类似土料选取。

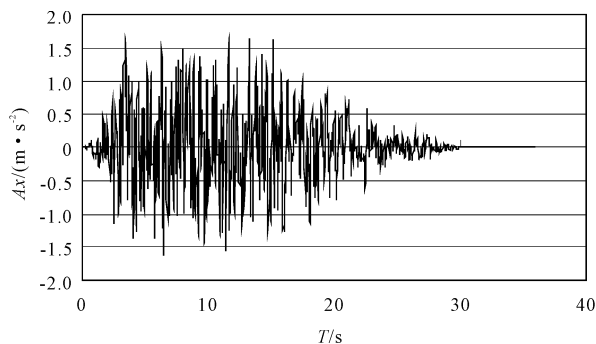


图 4 加速度时程曲线

表 1 土料动力特性模型参数

试样名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	k'_2	n	k_2	k'_1	k_1	λ
垫层料 2A	2.29	5694	0.417	2141	38.5	28.9	0.21
砂砾料 3B1	2.29	6457	0.404	2427	37.0	27.8	0.19
砂砾料 3B2	2.28	6030	0.412	2267	33.3	25.1	0.20
覆盖层	2.19	4323	0.445	1625	31.3	23.5	0.22

表 2 土料动力残余变形特性模型参数

试样名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c_1 / \%$	$c_2 / \%$	$c_4 / \%$	$c_5 / \%$
垫层料 2A	2.29	0.33	0.75	4.34	0.82
砂砾料 3B1	2.29	0.35	0.79	4.13	0.85
砂砾料 3B2	2.28	0.38	0.81	4.26	0.83
覆盖层	2.19	0.52	0.92	5.65	0.93

2.3 计算结果

2.3.1 坝体动剪应力反应

坝体典型剖面最大动剪应力分布情况如图 5 所示。所得坝体堆石最大动剪应力为 238 kPa,发生在坝体中部偏上游的位置。

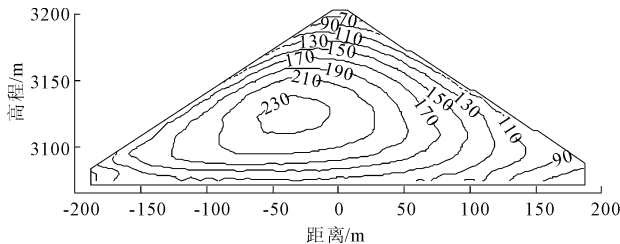


图 5 坝体典型剖面的最大动剪力分布图(单位:kPa)

2.3.2 大坝的地震永久变形

图 6 为坝体典型剖面地震永久变形示意图,图 7 为沿坝轴线断面地震永久变形分布。坝体三向地震永久变形中,垂直向永久变形最大,其值为 492

mm;顺河向次之,其值为 182 mm,坝轴线向最小,其

值为 66 mm。

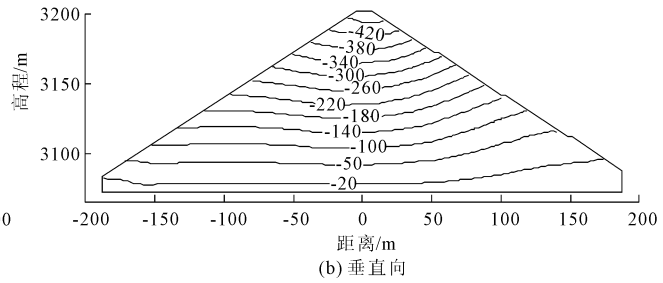
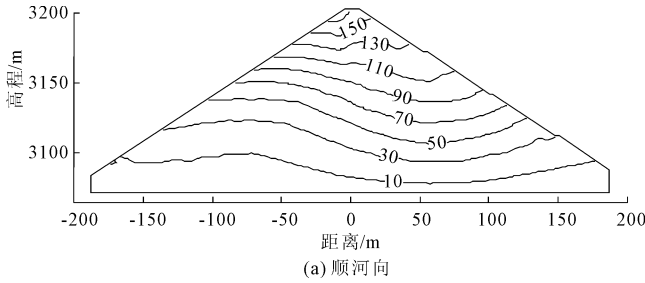


图 6 坝体典型剖面的地震永久变形分布图(单位:mm)

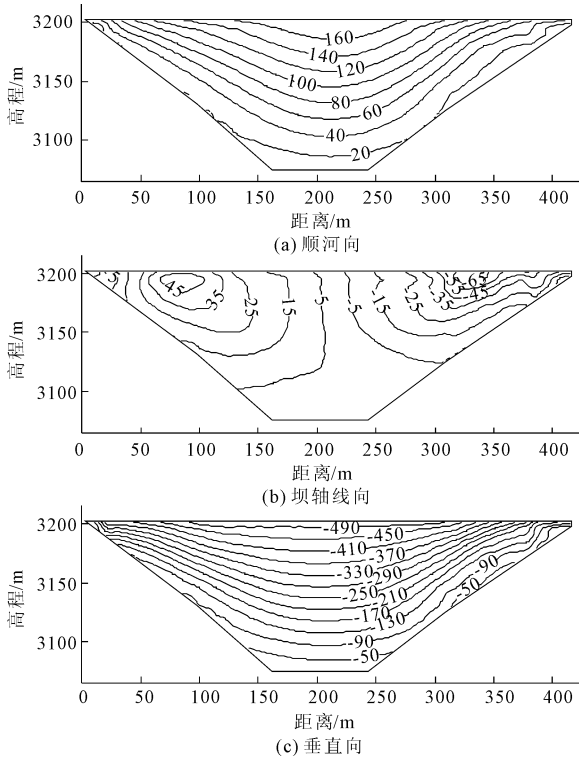


图 7 沿坝轴线断面地震永久变形分布(单位:mm)

3 结 语

本文针对面板堆石坝的特点,根据坝料动力三轴试验结果,确定了土石料的残余应变模式,结合面板坝三维非线性动力有限元分析方法建立了一套面板堆石坝地震永久变形的计算方法。所建立的计算方法为工程设计提供了结合试验、较为实用可靠的

面板坝永久变形确定方法。

通过计算分析,纳子峡面板砂砾石坝在 7.5 度地震作用下,坝体地震永久变形不大,按最大坝高 121.5 m 计算,地震永久沉降约为坝高的 0.4%,大坝具有较好的抗震能力。

参考文献:

- [1] 温续余,沈振中,吕生玺.九甸峡混凝土面板堆石坝应力变形性状研究[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(增):42-46.
- [2] 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.
- [3] 沈振中,马明,吕生玺.九甸峡混凝土面板堆石坝抗震稳定性分析[C]//中国水力发电工程学会,河海大学.首届全国水工抗震防灾学术会议论文集,2006:273-278.
- [4] 戴永志,顾淦臣.黄河公伯峡混凝土面板堆石坝三维非线性分析[J].红水河,2001,20(4):37-41.
- [5] 徐志英,沈珠江.高尾矿坝的静、动力非线性分析与地震稳定性.华东水利学院学报,1980,(4):59-75.
- [6] 朱 晟,闻世强,黄亚梅.一座 200 m 级高面板坝的变形和应力计算研究[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(6):631-634.
- [7] 卢廷浩,邵松桂.天生桥一级水电站面板堆石坝三维非线性有限元分析[J].红水河,1996,15(4):20-22.
- [8] 赵剑明,汪闻韶,戚 蓝.混凝土面板堆石坝面板地震反应分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(s2).
- [9] 顾淦臣,迟世春.高面板堆石坝动力反应分析和抗震稳定分析方法[R].南京:河海大学,1994.