

强震作用下苏家河口面板堆石坝动力响应

王乐华^{1,2}, 邓华锋^{1,2}, 汤开宇¹, 朱敏¹, 彭云枫²

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为了分析苏家河口面板堆石坝坝体在强震作用下的安全性能, 建立了面板堆石坝的整体三维有限元模型和面板、趾板子模型, 采用 Hardin-Drnevich 本构模型, 对坝体在强震作用下的动力响应规律进行了详细分析。结果表明, 在 0.38g 的强震作用下, 面板堆石坝的加速度、动位移、动应力以及垂直缝和周边缝的动变形分布符合一般规律, 未发现有特殊不利的现象, 整体上满足抗震要求, 但是坝体顶部振动的“鞭梢”效应比较明显, 在 3/4 坝高以上坝顶区域以及靠近下游坡面处存在较小的拉应力区域。建议加强 3/4 坝高以上区域面板、坝顶及下游护坡的抗震工程措施, 以保证大坝在强震下的安全。

关键词: 面板堆石坝; 三维有限元模型; 强震; 动力响应; 苏家河口

中图分类号: TV641.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2014)06-0007-06

Dynamic response analysis of Sujiahekou concrete-face rock-fill dam under strong earthquake//WANG Lehua^{1,2}, DENG Huafeng^{1,2}, TANG kaiyu¹, ZHU Min¹, PENG Yunfeng² (1. China Three Gorges University Kay Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China)

Abstract: As the Sujiahekou concrete-face rock-fill dam (CFRD) is located next to the strong earthquake activity belt, the analyze and evaluation of the safety performance of the dam should be assessed. To archive this goal, this study established the three-dimensional finite element model of the CFRD and corresponding sub model of concrete face and toe board. We used the Hardin-Drnevich constitutive model to calculate and analyze the dynamic response rules of dam's body under strong earthquakes in detail. The results show that under the action of 0.38g earthquake, the acceleration, dynamic displacement, dynamic stress, and dynamic deformation of vertical seam and peripheral joint distribution conform to the general rules. There is no special adverse phenomenon; The CFRD can meet seismic requirements. However, the whipping effect of the dam body vibration is obvious and there is a small tensile stress area in 3/4 dam high above crest and areas close to the downstream slope. Therefore, seismic engineering measures, strengthening the 3/4 dam high above area panel, dam crest and downstream slope, have been suggested to ensure the safety of the dam in earthquake.

Key words: concrete-faced rock-fill dam; three-dimensional finite element model; strong earthquake; dynamic response; Sujiahekou

混凝土面板堆石坝以其安全性、经济性、适应性等优点受到国内外坝工界的普遍重视^[1-2]。目前很多面板堆石坝位于强震区,使得面板堆石坝抗震问题研究的重要性和迫切性越来越突出^[3-5]。苏家河口面板堆石坝位于云南省境内,为一梯级开发电站,最大坝高为 131.49 m,水库正常蓄水位为 1 590.00 m,总库容为 2.25 亿 m³。根据 DL5180—2003《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》,该水电站工程等别为 II 等工程,工程规模为大(2)型,根据场地地震安全

性评价,工程区 50 a 超越概率 10% 的地震动基岩峰值加速度为 0.19g,50 a 超越概率 5% 的地震动基岩峰值加速度为 0.25g,100 a 超越概率 2% 的地震动基岩峰值加速度为 0.38g,基本烈度为 VIII 度,工程按 8 度设防。对于该类型的工程,一般按照基本烈度进行设计计算(有的工程在此基础上考虑 50 a 超越概率 5% 的校核地震),但很少考虑强震的作用。汶川地震时,紫坪铺面板堆石坝的坝基加速度在 0.5g 以上,达到了 IX 度^[6],因此,有必要对强震区的坝体

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划基金(Q20091301);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB426502);水利部公益性行业科研专项(201401029)

作者简介:王乐华(1977—),男,安徽怀宁人,副教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail: lehuatg@126.com

进行强震作用下动力分析。本文研究的工程场地位于地震活动强烈的北西向腾冲—龙陵以西约20 km,属于区域构造稳定性较差地区,因此,本文对坝体在强震作用下的动力响应进行了详细计算分析,对其安全性做出评价,并提出加强坝体抗震安全性能的工程措施,为面板堆石坝的抗震设计提供科学依据。

1 动力分析方法

1.1 堆石料动力本构模型及参数

地震作用是一种非等幅、非等周期的不规则荷载,在一次地震中,土石料将经历数十次甚至上百次卸载和再加载过程,并且它们之间无规律可循,给动力分析造成了一定困难。为了解决分析困难,比较常用的方法是应用 Masing 规则制定一个应力应变关系的骨架曲。在此基础上的本构模型主要有双线性、黏弹性和弹塑性等模型,其中等效线性模型因具有概念明确、应用方便的优点,在有限元动力计算中得到广泛运用^[7-8]。本文采用 Hardin-Drnevich 双曲线本构模型进行计算,相关的动力计算参数见表 1。

表 1 Hardin-Drnevich 模型动力计算参数

材 料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动剪模量 系数 C	切线模量 指数 n	动剪应变 R_f	最大阻尼比 $\lambda_{\max}$
过渡层	2270	2400	0.48	0.0003	0.28
垫层料	2280	2500	0.47	0.0003	0.28
主堆石料	2250	2310	0.48	0.0004	0.30
次堆石料	2255	1910	0.47	0.0004	0.29
冲积层	2050	1600	0.50	0.0005	0.24

地基计算条件:在动力计算中,基岩均采用线弹性模型,动弹性模量在静弹性模量的基础上提高 30%,即静弹性模量乘以系数 1.3。只考虑坝基的弹性作用,消除坝基对振动的放大作用,采用无质量坝基方案进行分析。

1.2 加速度时程曲线

根据地震安全性评价报告,坝址区 100a 超越概率 2% 的地震动基岩峰值加速度为 0.38g,地震动反应谱特征周期 0.35 s。计算中,根据抗震规范反应谱拟合的人工地震波作为输入地震波,并按 3 个方向输入(顺河向、横河向和竖向),计算地震历时 30 s,顺河向、横河向最大加速度为 0.38g,竖向最大加速度为水平向的 2/3。地震波各方向加速度时

程曲线如图 1 所示。

1.3 计算流程

建立三维有限元模型,首先进行静力计算,坝体与覆盖层材料采用邓肯 E-B 双曲线模型,并模拟分层填筑与蓄水过程,将静力结果作为时程动力计算的初始状态。动力计算中,坝体与覆盖层材料采用 Hardin-Drnevich 模型,地震波三向基底输入。大地震属小概率事件,因此一般情况下,在地震计算中,将地震作用与水库的正常蓄水位组合,在本文的动水压力分析中,采用附加质量法进行考虑^[9]。

2 有限元计算模型

面板堆石坝的垂直缝、周边缝以及面板和垫层之间的接触是大坝三维动力分析的关键位置,但是这些部位构造尺寸与大坝整体尺寸相差悬殊,而且结构尺寸、材料属性和结构边界的变异性均较大。目前,对面板堆石坝的应力变形分析通常采用整体模型进行计算。分析时,对接触部位及坝体同时进行保证应力计算精度的网格剖分难度较大,此时若均采用较密的网格划分,会导致有限元模型规模非常庞大,求解困难;若采用较稀疏的网格则无法保证细节部位的结构特征,上述关键部位的真实应力变形状态不能得到保证。如何既快又好地计算局部结构的真实应力和变形是一个值得研究的问题,以往的研究表明采用子模型进行局部结构的细化分析可以较好地解决此类问题^[10-12]。

子模型方法又称切割边界位移法或特定边界位移法,其主要思路是从整体模型中把重点研究的区域切割出来,作为子模型单独进行网格细分,并以切割边界的位移计算结果作为子模型的边界条件。由于子模型和整体模型的相对独立性,因此可以增加子模型中的网格密度,以便对指定区域进行更高精度计算,具体分析流程如图 2 所示。在本文的分析中,建立了大坝的有限元整体模型、面板和趾板的子模型。

2.1 有限元整体模型

为考虑坝基及两岸山体变形对混凝土面板堆石坝应力变形的影响,本文计算范围除了混凝土面板堆石坝以及坝基覆盖层外,还包括了覆盖层下的岩石基础和两岸山体,地基范围在冲积层底部以下延伸

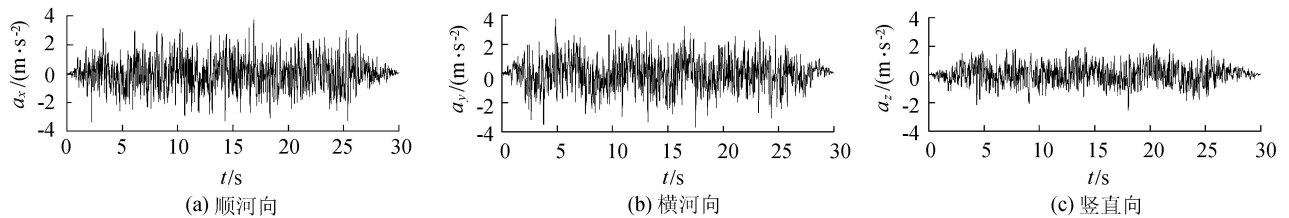


图 1 输入地震加速度时程曲线

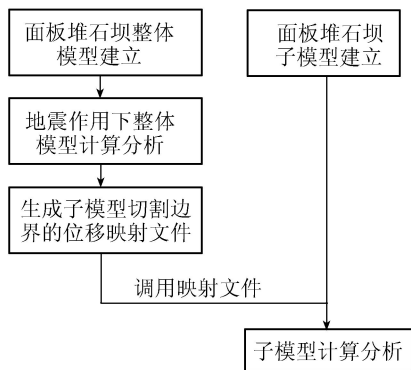


图2 有限元子模型分析流程

150 m,上下游方向和左右岸方向也各延伸 150 m。顺水流方向为 x 轴的正向;沿坝轴方向从右到左为 y 轴正向;竖直向上为 z 轴的正向(图3)。三维网格剖分时主要采用8节点六面体单元和少数的6节点三棱柱过渡单元。单元总数为 10 762,节点总数为 9 253,模型底部、四周均为法向约束。

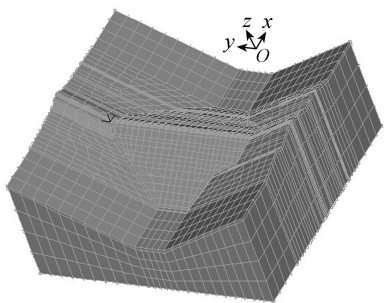


图3 面板堆石坝整体三维有限元网格

2.2 面板、趾板子模型

面板、趾板子模型如图4所示,该子模型包括面板、垂直缝、周边缝、趾板、面板和垫层的接触面、垫层、过渡层及下部部分堆石料和基岩。在子模型中采用基于薄层单元的有厚度动力接触单元进行接触面的模拟^[13-14], Desai 等^[15]建议薄层单元的厚度

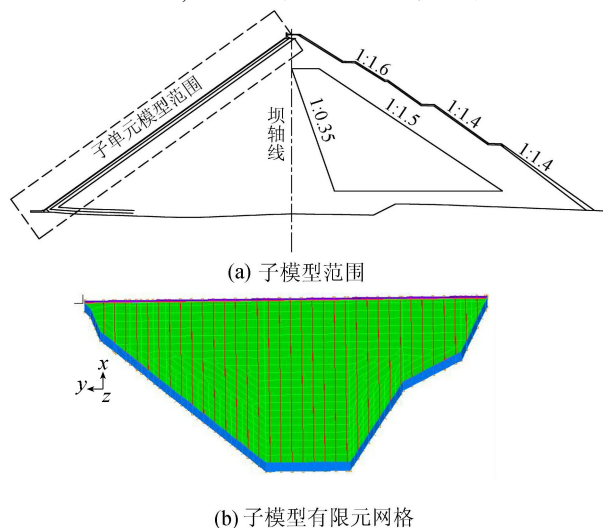


图4 子模型范围和有限元网格

$t=(0.01 \sim 0.10)B$ (B 表示薄层单元的宽度),根据殷宗泽等^[16]的研究,在不产生显著误差的情况下,应使厚度尽可能的小。本文计算中薄层单元的厚度取 5 cm,子模型单元总数为 19 349,节点总数为 17 423。

3 计算结果及分析

3.1 坝体动力响应分析

3.1.1 坝顶动加速度反应

坝顶沿坝轴线方向上各点的峰值绝对动加速度分布如图5所示。坝顶3个方向的峰值绝对动加速度变化趋势基本一致,以坝中线为对称轴基本呈对称分布,分布图近似呈马鞍形、有双峰,坝轴线中点峰值绝对动加速度不是最大值。坝顶顺河向峰值绝对动加速度在河床最大断面附近达到最大值,最大值为 8.24 m/s^2 ,动力放大倍数为 2.21;坝顶竖直向峰值绝对动加速度最大值发生在左岸靠近河床部位,最大值为 6.12 m/s^2 ,动力放大倍数为 1.64;坝顶横河向峰值绝对动加速度最大值发生在最大断面右岸部位,最大值为 6.26 m/s^2 ,动力放大倍数为 1.68。

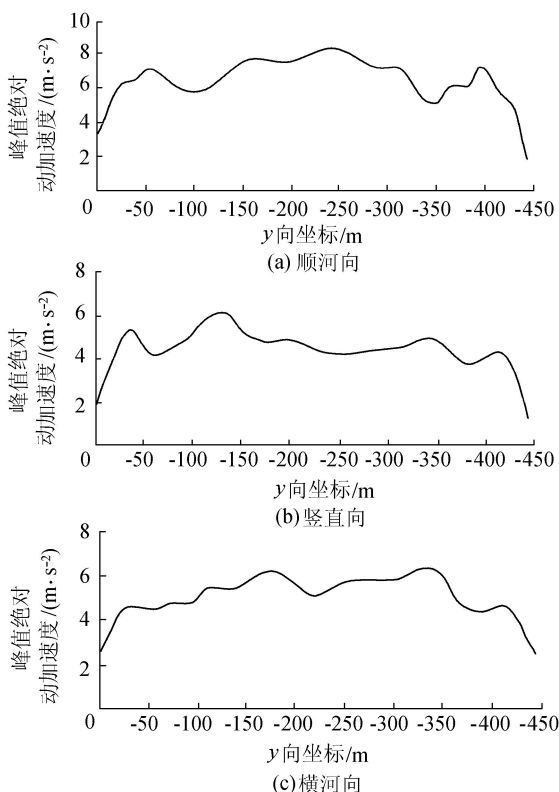


图5 坝顶峰值绝对动加速度

坝体最大断面的峰值绝对动加速度分布如图6所示,顺河向峰值绝对动加速度随坝高增加而逐渐增大,最大值为 8.13 m/s^2 ,动力放大倍数为 2.18,发生在坝顶部位;竖直向峰值绝对动加速度亦随坝高的增加而逐渐增大,最大值为 6.78 m/s^2 ,动力放大

倍数为 1.82,发生在 3/4 坝高下游面;横河向峰值绝对动加速度也是随坝高增加而逐渐增大,在坝体中部上下游面产生了 2 个加速度放大区域,最大值为 6.44 m/s^2 ,动力放大倍数为 1.73,发生在 3/4 坝高下游面。

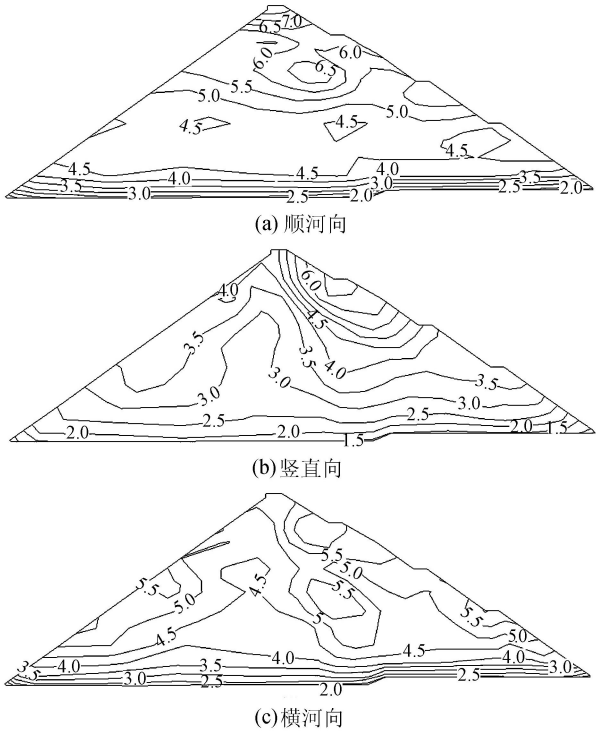


图 6 坝体最大断面峰值绝对动加速度 (单位: m/s^2)

3.1.2 坝体地震动位移

坝体最大剖面的顺河向、竖直向和横河向峰值绝对动位移等值线如图 7 所示。由图 7 可见,最大

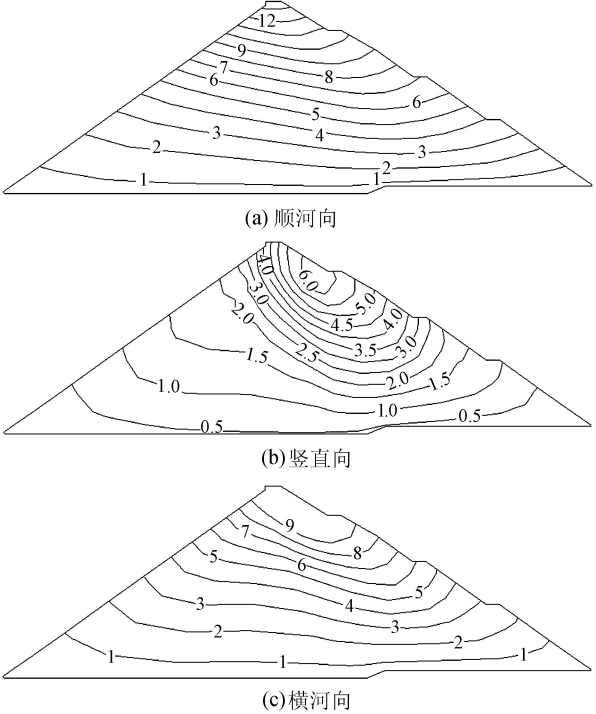


图 7 坝体最大剖面峰值绝对动位移 (单位: cm)

剖面顺河向峰值绝对动位移随着坝体的升高而增大,最大位移发生在坝顶位置,最大值为 13.70 cm ;最大剖面竖直向峰值绝对动位移也随着坝体的升高而增大,最大位移发生在 3/4 坝高下游面,最大值为 6.30 cm ;最大剖面横河向峰值绝对动位移分布规律和竖直向峰值绝对动位移分布规律相似,最大动位移发生在坝顶靠下游面,最大值为 10.10 cm 。

3.1.3 坝体地震动应力

坝体最大剖面顺河向、竖直向和横河向峰值动拉应力等值线如图 8 所示。顺河向峰值动拉应力在 2/3 坝高以下的分布规律是由坝坡向坝轴线逐渐增大,在 2/3 坝高以上的拉应力区的分布规律是由坝坡向坝轴线逐渐减小,最大值也发生在此区域,最大值为 191.55 kPa ;竖直向峰值动拉应力越靠近坝基越大,最大值为 329.52 kPa ,发生在坝基靠下游的地方;横河向峰值动拉应力也基本是越靠近坝基越大,最大值为 143.07 kPa ,发生在坝基靠下游的部位。

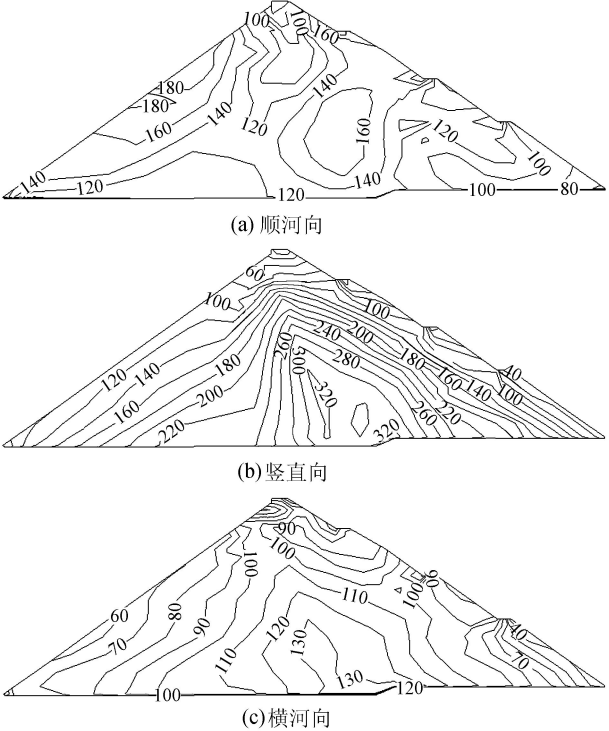


图 8 坝体最大剖面峰值动拉应力等值线 (单位: kPa)

坝体动拉应力最大值与静应力叠加后的等值线如图 9 所示。与静应力叠加后,在顺河向和竖直向坝体应力基本呈受压趋势,但在顺河向,在坝顶附近的上游堆石区以及靠近下游坡面处有少量拉应力出现。

3.2 面板动力响应分析

3.2.1 面板地震动加速度反应

面板顺坡向、垂直向和横河向峰值绝对动加速度等值线如图 10 所示。面板顺坡向峰值绝对动加速度由面板顶部向底部逐渐减小,面板最大顺坡向峰值绝对动加速度发生在面板顶部偏右岸处,最大值

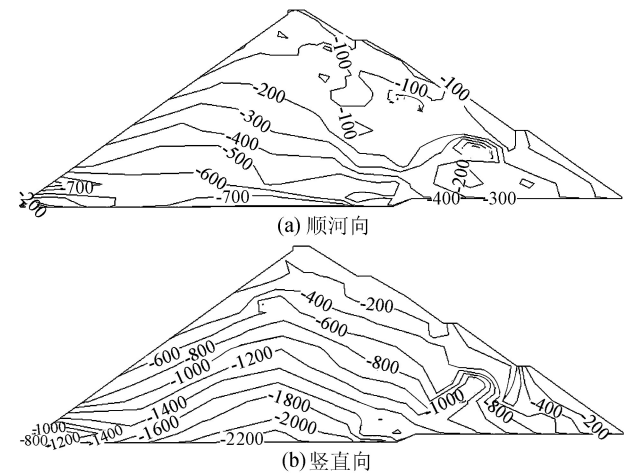


图9 坝体最大剖面动拉应力与静应力叠加后等值线(单位:kPa)

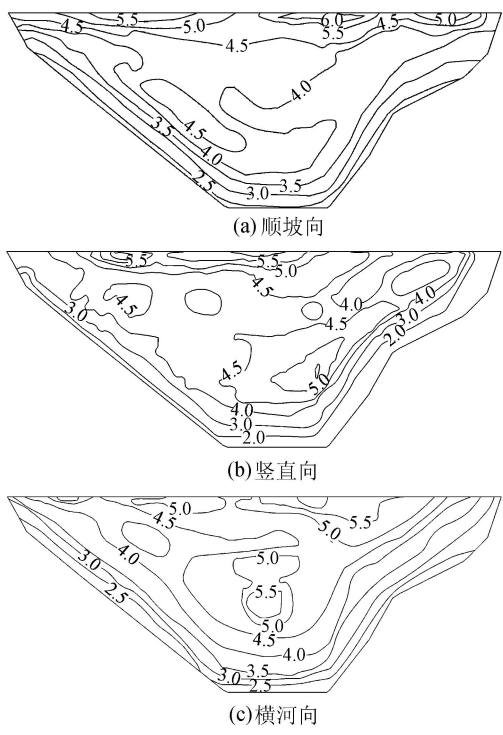


图10 面板峰值绝对动加速度(单位: m/s^2)

为 6.50 m/s^2 , 放大倍数为 1.74; 竖直向峰值绝对动加速度也是由面板顶部向底部逐渐减小, 最大值为 6.37 m/s^2 , 放大倍数为 1.71, 发生在面板顶部偏左岸处; 面板横河向峰值绝对动加速度分别在面板两岸形成 2 个加速度放大区, 最大值发生在面板顶部偏右岸处, 最大值为 6.11 m/s^2 , 放大倍数为 1.64。

3.2.2 面板地震动位移

面板的动位移很大程度上取决于堆石体的动位移, 3 个方向的峰值绝对动位移等值线如图 11 所示。顺坡向峰值绝对动位移分布规律比较对称, 形成规则的水波纹, 在面板顶中部位置达到最大, 最大值为 10.90 cm ; 垂直向峰值绝对动位移最大值同样发生在面板顶中部位置, 为 9.16 cm ; 横河向峰值绝

对动位移在面板顶部偏左岸达到最大, 为 9.84 cm 。

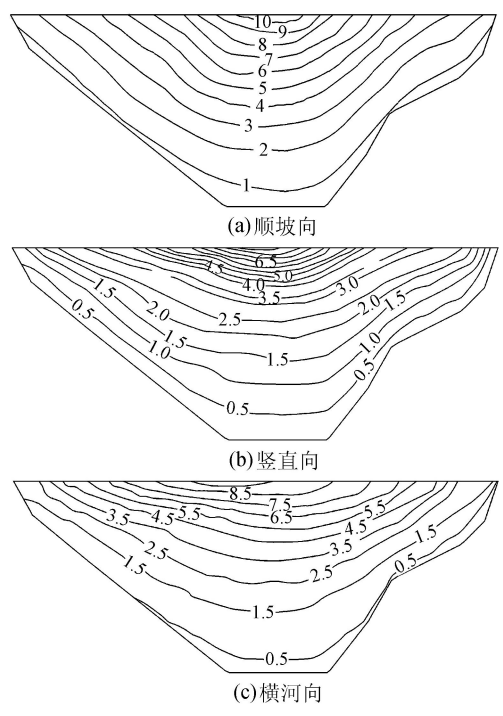


图11 面板峰值绝对动位移(单位:cm)

3.2.3 面板地震动应力

面板顺坡向、横河向峰值动拉应力等值线如图 12 所示, 顺坡向峰值动拉应力在面板中部 3/4 坝高的地方达到最大, 向四周逐渐减小, 最大动拉应力为 2295.71 kPa ; 横河向峰值动拉应力在面板顶部右岸位置达到最大, 最大动拉应力为 1630.78 kPa 。

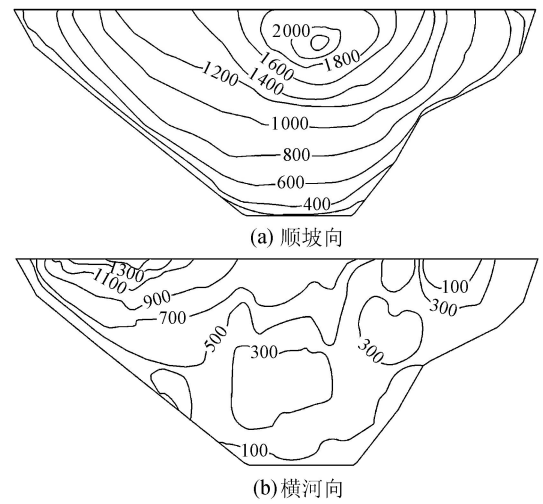


图12 面板峰值动拉应力(单位:kPa)

3.3 面板垂直缝、周边缝动变形响应分析

面板垂直缝、周边缝的动变形见表 2, 垂直缝、周边缝的动张拉变形如图 13 所示(图中为了表示垂直缝不同高程张拉变形的变化, 在面板上绘制了多条横向辅助线, 图中所标数值为垂直缝与辅助线交点位置处的张拉变形)。

由图 13 可以看出, 垂直缝、周边缝的动张拉变

表 2 面板垂直缝、周边缝的动变形

缝的位置	类型	变形/ mm	位置
垂直缝	顺坡向剪切变形	4. 153	面板靠左岸 2/3 坝高附近
	张拉变形	7. 287	面板靠右岸坝顶
	沉降剪切变形	1. 127	面板靠左岸 5/6 坝高附近
周边缝	顺缝向剪切变形	2. 892	面板靠左岸底部
	张拉变形	3. 576	面板靠右岸 1/2 坝高附近
	沉降剪切变形	0. 574	面板靠左岸 2/3 坝高附近

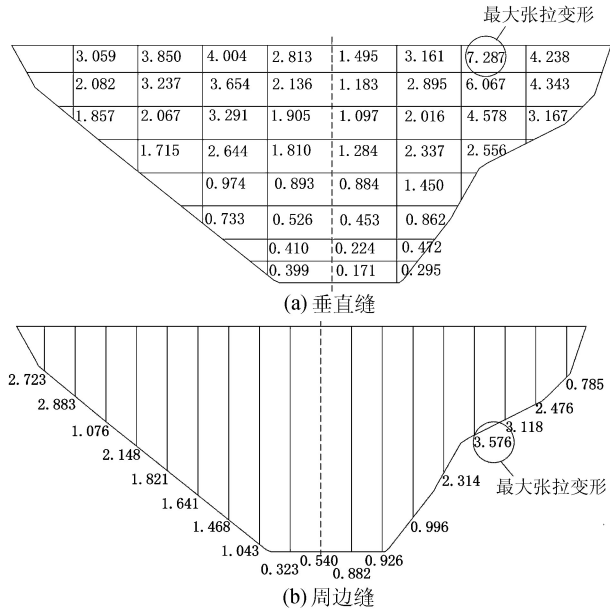


图 13 面板垂直缝、周边缝动张拉变形 (单位:mm)

形均以面板中心轴线呈对称形式分布,其中垂直缝张拉变形在面板中心轴线一侧同一高程上变形有先增大后减小的趋势,且随着高程的增加张拉位移不断变大,最大张拉变形为 7. 287 mm,出现在面板中心轴线右侧顶部;周边缝动张拉变形随高程的增加呈现先变大后减小的趋势,在面板顶部和底部张拉变形均较小,最大张拉变形为 3. 576 mm,出现在面板中心轴线右侧约 1/2 高程处。

4 结论及建议

- a. 在 0.38g 强震作用下,面板堆石坝的加速度、动位移、动应力以及垂直缝和周边缝的动变形分布符合一般规律,而其量值也比较合理,未发现有特殊不利的现象,整体满足抗震要求,说明该面板堆石坝的设计合理。
- b. 地震作用下顶部振动的“鞭梢”效应比较明显,坝体顶部地震惯性力可能导致坝顶区堆石体的松动,堆石颗粒间咬合力丧失,从而有可能使坝顶和下游侧发生坝面堆石表层滑动。
- c. 地震过程中,在坝高 3/4 以上区域面板的加速度、动位移、动拉应力均较大,因此,建议加强坝高 3/4 以上区域面板、坝顶及下游护坡的抗震工程措

施,以保证大坝抗震安全。

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. (CHEN Houqun, XU Zeping, LI Min. Wenchuan Earthquake and seismic safety of large dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (10): 1158-1167. (in Chinese))

[2] 朱亚林,孔宪京,丁克伟,等. 高土石坝的抗震研究进展 [J]. 安徽建筑工业学院院报:自然科学版, 2009, 17 (3): 1-6. (ZHU Yalin, KONG Xianjing, DING Kewei, et al. Research progress on earthquake resistant studies of high earth-rockfill dams [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry: Natural Science, 2009, 17 (3): 1-6. (in Chinese))

[3] 赵剑明,常亚屏,陈宁. 高心墙堆石坝地震变形与稳定分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (增刊 2): 423-428. (ZHAO Jianming, CHANG Yaping, CHEN Ning. Study on earthquake-induced permanent deformation and dynamic stability of high core rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (Sup2): 423-428. (in Chinese))

[4] 顾淦臣. 土石坝地震工程 [M]. 南京:河海大学出版社, 1989.

[5] 孔宪京,邹德高,邓学晶,等. 高土石坝综合抗震措施及其效果的验算 [J]. 水利学报, 2006, 37 (12): 1489-1495. (KONG Xianjing, ZOU Degao, DENG Xuejing, et al. Comprehensive earthquake resistant measure of high earth-rockfill dams and effectiveness verification [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (12): 1489-1495. (in Chinese))

[6] 张楚汉. 汶川地震工程震害的启示 [J]. 水利水电技术, 2009 (1): 1-3. (ZHANG Chuhan. The Wenchuan Earthquake engineering disaster revelation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009 (1): 1-3. (in Chinese))

[7] 李宏男,肖诗云,霍林生. 汶川地震震害调查与启示 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29 (4): 10-19. (LI Hongnan, XIAO Shiyun, HUO Linsheng. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29 (4): 10-19. (in Chinese))

[8] 何蕴龙,刘俊林,熊堃. 汶川地震冶勒大坝动力响应规律分析 [J]. 四川大学学报:工程科学版, 2009, 41 (3): 157-164. (HE Yunlong, LIU Junlin, XIONG Kun. Seismic response of Yele Dam during Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41 (3): 157-164. (in Chinese))

(下转第 26 页)

- (5):24-26. (in Chinese))
- [3] 李金玉,彭小平,曹建国,等.高贝利特水泥低热高抗裂大坝混凝土性能的研究[J].硅酸盐学报,2004(3):364-371. (LI Jinyu,PENG Xiaoping,CAO Jianguo,et al. Research of high belite cemeng dam concrete with low heat and high crack resistance[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2004(3):364-371. (in Chinese))
- [4] 王可良,李文训,隋同波,等.高贝利特水泥对大体积混凝土温控的影响[J].混凝土,2011(8):128-130. (WANG Kelian,LI Wenxun,SUI Tongbo,et al. High belite cement affecting on temperature controlling of large volume concrete[J]. Concrete,2011(8):128-130. (in Chinese))
- [5] 吕鹏飞,吴勇.高贝利特水泥(HBC)性能试验研究与应用[J].人民长江,2010(9):67-70. (LYU Pengfei,WU Yong. Performance test and analysis of high belite cement (HBC) and application[J]. Yangtze River,2010(9):67-70. (in Chinese))
- [6] MINDESS S, YOUNG J F, DARWIN D. Concrete [M]. 2nd. New Jersey:Prentice Hall,2002.
- [7] 李光伟.组合骨料对大坝混凝土体积稳定性的影响[J].水力发电学报,2010(5):98-101. (LI Guangwei. Effects of composite aggregate on the volume stability of dam concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010(5):98-101. (in Chinese))
- [8] 彭小平,李金玉.高贝利特水泥(HBC)的性能分析[J].混凝土与水泥制品,2001(6):14-16. (PENG Xiaoping, LI Jinyu. HBC's performance analysis [J]. China Concrete and Cement Products, 2001(6):14-16. (in Chinese))
- [9] 廉慧珍.水泥标准修订后对混凝土质量的影响[J].建筑技术,2002(1):8-12. (LIAN Huizhen. Influence of cement standard revision on quality of concrete [J]. Architecture Technology,2002(1):8-12. (in Chinese))
- [10] 李洋,王述银,陈霞. MgO 膨胀剂的特性及在水工混凝土中的研究进展[J].混凝土,2012(3):84-87. (LI Yang,WANG Shuyin,CHEN Xia. Research advanced in characteristic of MgO-type expansion agent and its application in hydraulic concrete[J]. Concrete,2012(3):84-87. (in Chinese))
- [11] 刘彬,王军,杨文.粉煤灰抑制碱硅酸反应的机理研究评述[J].混凝土世界,2012(3):85-87. (LIU Bin,WANG Jun,YANG Wen. Mechanism of inhibition of alkali-silica reaction fly research review [J]. China Concrete,2012(3):85-87. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-11-22 编辑:胡新宇)
- +++++
- (上接第12页)
- [9] 赵剑明,常亚屏,陈宁.龙首二级面板堆石坝三维真非线性地震反应分析和评价[J].岩土力学,2004(增刊2):388-392,396. (ZHAO Jianming,CHANG Yaping,CHEN Ning. 3-D authentic nonlinear dynamic analysis and evaluation of Longshou concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics,2004(Sup2):388-392,396. (in Chinese))
- [10] 汪明元,程展林,林绍忠,等.高面板堆石坝应力变形的三维子模型法研究[J].长江科学院院报,2005,22(5):49-51,69. (WANG Mingyuan,CHENG Zhanlin,LIN Shaozhong,et al. Study on 3D submodel method for stress and deformation analysis for high concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2005,22(5):49-51,69. (in Chinese))
- [11] 武甲庆,杨令强,杨克坤,等.用子模型法研究拱坝裂缝的产状[J].中国农村水利水电,2009(9):108-111. (WU Jiaqing,YANG Lingqiang,YANG Kekun,et al. Sub-models used to study strength cracking generation of arch dams[J]. China Rural Water and Hydropower,2009(9):108-111. (in Chinese))
- [12] BAZANT Z P,CEDOLIN L. Blunt crack band propagation infinite element analysis[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division,ASCE,1979,105(EM2):297-315.
- [13] 沈振中,徐志英. V 形河谷中非均匀土石坝振动的简化分析[J].水利学报,2002(3):74-79. (SHEN Zhenzhong,XU Zhiying. Simplified analysis of transverse vibration for inhomogeneous earth-rock dams in triangular canyons[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002(3):74-79. (in Chinese))
- [14] 李远略,李中原.观音岩水坝地震动力分析[J].河南科学,2009,27(10):1301-1304. (LI Yuanlue,LI Zhongyuan. Guanyinyan dynamic analysis on the dam[J]. Henan Science,2009,27(10):1301-1304. (in Chinese))
- [15] DESAI C S,ZAMAN M M,LIGHTNER J G,et al. Thin-layer element for interfaces and joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1984,8:19-43.
- [16] 殷宗泽,朱泓,许国华.土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J].岩土工程学报.1994,16(3):14-22 (YIN Zongze,ZHU Hong,XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3):14-22. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-09-05 编辑:刘晓艳)