

高地震烈度沥青混凝土面板堆石坝动力响应分析

高东红,朱瑞恒,田金波

(上海勘测设计研究院有限公司,上海 200434)

摘要:某拟建抽水蓄能电站上水库大坝采用沥青混凝土面板堆石坝,为分析该大坝的抗震安全性,采用三维非线性有限元法,进行大坝静、动力应力变形分析。结果表明:大坝在静力条件下变形规律符合一般规律,满蓄期坝体水平位移和沉降量极值分别为3.1 cm和40 cm;大坝在校核地震(地震加速度为0.897g)作用下,坝体及面板的动力反应分布规律合理。坝体顺河向、坝轴向、竖向加速度极值分别为10.649 m/s²、9.824 m/s²、11.497 m/s²,考虑地震作用与静力叠加后,沥青混凝土面板最大拉应变发生在面板与库盆的交接处靠大坝一侧,为0.441%,计算分析其抗震安全性可以保证。

关键词:抽水蓄能电站;校核地震;沥青混凝土面板堆石坝;强震区;动力反应

中图分类号:TV641.1

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2025)04-0226-07

Dynamic Response Analysis of Asphalt Concrete Face Rockfill Dams Under High Seismic Intensity

GAO Donghong, ZHU Ruiheng, TIAN Jinbo

(Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: The dam of the reservoir of a proposed pumped storage power station is an asphalt concrete face rockfill dam. In order to analyze the seismic safety the dam, the three-dimensional nonlinear finite element method was used to analyze the static and dynamic stress deformation of the dam. The results of the study show that the deformation law of dam under static conditions conforms to the general law, and the extreme values of horizontal displacement and settlement of the dam body during the period of full storage are 3.1 cm 40 cm, respectively; under the action of the check earthquake (the earthquake acceleration is 0.897g), the distribution law of the dynamic response of dam body and the panel is reasonable. The extreme values of the acceleration in the along-river direction, the axis direction of the dam and the vertical direction are 10.49 m/s², 9.824 m/s² and 11.497 m/s², respectively. After considering the seismic and the static superposition, the maximum tensile strain of the asphalt concrete panel occurs at the junction of the panel and the reservoir basin on the side of the dam, which is 0.441%. The seismic safety can be guaranteed by calculating and analyzing it.

Keywords: pumped storage power station; check earthquake; asphalt concrete face rockfill dam; strong earthquake area; dynamic response

为实现“碳达峰”与“碳中和”目标,以及维护我国能源安全的战略需求,构建以新能源为核心的新型电力系统已成为亟待推进的关键性问题。基于对我国能源资源分布特征、技术发展水平、经济可行性及大规模开发利用潜力等多维度的综合评估,抽水

蓄能电站被确认为在当前阶段最具优势的选择。其优势体现在技术成熟度高、经济效益显著、开发潜力巨大,同时作为绿色低碳且具备高效灵活调节能力的电源,对于促进电力系统的清洁转型与灵活运行具有不可替代的作用^[1-2]。

抽水蓄能电站在选取坝型时,主要依据坝址的地形和地质条件,而堆石坝和重力坝是两种合适的类型。在堆石坝中,尤其是心墙坝和面板坝,因其适应抽蓄电站水位升降、技术成熟等特点,被视作首选^[3]。沥青混凝土面板具有防渗性能好、适应变形能力良好、抵抗酸碱侵蚀能力强以及对水质无污染等显著优势,在抽水蓄能工程中得到了广泛的应用,使得沥青混凝土面板堆石坝成为工程建设中的优选坝型之一^[4-5]。然而,对于坝高超过100 m的高沥青混凝土面板堆石坝而言,目前仍面临着诸多关键技术问题亟待解决^[6]。特别是在我国西部强震区域,大坝在服役期间面临极端地震威胁的可能性较大,因此,大坝运行期间的抗震安全性成为设计及研究的重点^[7-8]。为此,不少学者开展了相关研究。只炳成等^[9]考虑了土体动力特性参数等因素的变化,分析了覆盖层对沥青心墙坝动力反应的影响规律。何建新等^[10]基于等效线性黏-弹性模型和大工双曲线残余变形模型对以新疆尼雅水库沥青心墙坝进行地震反应分析。赵剑明等^[11]针对一座坝高超过250 m的高面板堆石坝,开展深入的极限抗震能力评估研究。该研究从地震残余变形、局部动力稳定性、坝坡稳定性以及防渗体系的抗震安全性等多个维度进行了全面分析,并在此基础上,对现有的抗震安全评价标准提出了富有建设性的建议。Fang等^[12]研究针对日本在建中规模最大的全库铺设沥青混凝土面板水库,采用三维有限元动力分析方法,综合考虑其所处的地质构造、地形地貌以及填筑工艺等因素,系统探究了该水库在地震作用下的响应特性。王辉等^[13-14]采用三维非线性有限元法,对Ⅷ度强震区某拟建抽水蓄能电站坝高161 m的上库高沥青混凝土面板堆石坝开展静动力应力变形计算。邹德高等^[15]对某抽水蓄能电站上库沥青混凝土面板坝典型断面进行了二维动力计算,分析了震后大坝的变形规律及模式,并对其极限抗震能力进行了探讨。

为了深入探究高地震烈度下沥青混凝土面板堆石坝抗震安全性,以我国西北部某抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板堆石坝为例开展研究工作。

1 工程概况

某抽蓄电站上水库正常蓄水位2 505.00 m,死水位2 470.00 m,大坝采用沥青混凝土面板堆石坝,坝顶高程2 509.00 m,坝高101.00 m,坝顶宽度12.00 m。坝体分区自防渗面板以下分别为碎石垫

层区、过渡料区、上游堆石区、下游堆石区等,主坝坝后设置压坡体,坡面采用框格梁植草护坡。库盆防渗采用筒式沥青混凝土面板结构,库岸与库底沥青混凝土防渗面板厚度分别为20.2 cm和18.2 cm。大坝抗震设计标准采用基准期100年超越概率2%,相应的基岩水平地震动峰值加速度为724 gal(0.739g);校核标准采用基准期100年超越概率1%,相应的基岩水平地震动峰值加速度为879 gal(0.897g)。

2 研究模型与研究条件

2.1 有限元模型

根据坝体及地基的地质资料和设计典型剖面,建立上库大坝三维整体有限元计算模型。三维有限元模型主要由六面体等参单元构成,局部用退化的三棱柱单元和四面体单元过渡,单元总数量为107 719,节点数量为83 270。其有限元计算模型网格剖分如图1所示。其中顺河向为 X 方向,垂直于坝轴向指向库外为正;竖向为 Y 向,垂直向上为正;坝轴向为 Z 向,指向右岸为正。计算分析参照工程的初设填筑方案,按照38步进行填筑施工模拟。计算对蓄水过程(分为13步加载)进行蓄水模拟,模拟大坝坝体施工、库内第一次蓄水到正常蓄水位(2 505.00 m)两个阶段。动力计算包括基于设定地震场地相关反应谱的校核地震工况,计算水位为正常蓄水位,计算对象为三维主坝及坝后压坡体。

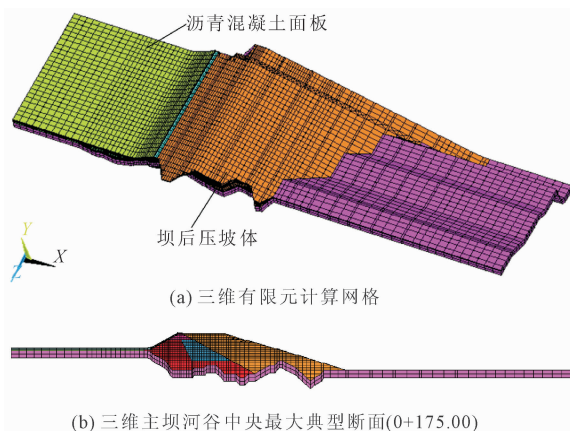


图1 沥青混凝土面板堆石坝模型

2.2 静力和动力计算参数

大坝静力计算采用邓肯-张E-B模型,流变分析计算采用可考虑围压和剪应力对颗粒破碎影响的沈珠江六参数流变模型,动力计算采用等效非线性黏弹性模型,地震永久变形采用沈珠江永久变形模

型。筑坝料和沥青混凝土的静、动力参数均采用室内大型三轴试验成果,分别见表 1、表 2 及表 3。

表 1 筑坝料和沥青混凝土邓肯-张 E-B 模型计算参数

坝体分区	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	c/kPa	K	n	R_f	K_b	m
沥青混凝土 (10℃)	2.40	29.5	—	410	249.0	0.27	0.54	2072.0	0.40
垫层料	2.29	54.7	9.9	—	1322.1	0.26	0.70	743.5	0.14
过渡料	2.26	54.6	10.3	—	1318.9	0.25	0.72	731.8	0.09
上游堆石区	2.23	53.7	10.2	—	1236.4	0.24	0.74	612.6	0.06
下游堆石区	2.20	52.4	9.7	—	1044.7	0.25	0.73	416.5	0.09
库盆回填料	2.15	51.7	9.5	—	905.5	0.25	0.70	353.0	0.10
压坡体	2.04	38.6	5.4	—	292.2	0.40	0.84	162.6	0.28

注: ρ 为密度; φ_0 和 $\Delta\varphi$ 为内摩擦角及围压增加一个对数周期内内摩擦角的变化量; c 为黏聚力; K 为模量系数; n 为模量指数; R_f 为破坏比; K_b 为体积模量系数; m 为模量指数。

表 2 筑坝材料流变计算参数

坝体分区	$\varphi/\%$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$b/\%$	$c/\%$	$d/\%$	m_1	m_2	m_3
垫层料	17	2.29	0.115	0.024	0.327	0.376	0.502	0.647
过渡料	18	2.26	0.117	0.025	0.329	0.379	0.508	0.652
上游堆石区	19	2.23	0.127	0.027	0.346	0.384	0.512	0.669
下游堆石区	20	2.20	0.145	0.031	0.385	0.393	0.523	0.682
库盆回填料	20	2.15	0.201	0.045	0.535	0.413	0.561	0.735
压坡体	24	2.04	0.450	0.108	1.105	0.466	0.638	0.783

注: φ 为初始相对变形率; b, c, d, m_1, m_2, m_3 为模型参数。

表 3 筑坝材料动力变形计算参数

坝体分区	k_2'	n	k_2	k_1'	k_1	λ
垫层料	17	0.354	2740	52.7	23.2	0.18
过渡料	18	0.354	2740	52.7	23.2	0.18
上游堆石区	19	0.335	2626	50.5	38.0	0.19
下游堆石区	20	0.346	2229	46.5	35.0	0.20
库盆回填料	20	0.376	1949	37.1	27.9	0.22
压坡体	24	0.457	820	18.4	13.9	0.27

注: k_2', n 为两个动力弹性模量计算参数; k_2, k_1', k_1 为模型参数; λ 为阻尼比。

2.3 地震动输入

依据三组加速度时程曲线进行动力反应分析,图 2 给出了代表性的设定地震场地相关反应谱拟合时程曲线。地震动输入采用一致性均匀输入,即选取微风化基岩以上的坝体作为计算对象。地震输入采用顺河向、垂直向和坝轴向三向输入,竖向输入地震动峰值取水平向峰值加速度,计算时间步长取为 0.02 s,持时 45 s。

3 大坝变形特性分析

3.1 坝体应力变形

图 3 为竣工期坝体典型断面变形分布图。主坝竣工期坝体最大沉降发生在下游压坡体内,最大值为 1.06 m,占坝高的 1.03%,坝体内最大沉降在

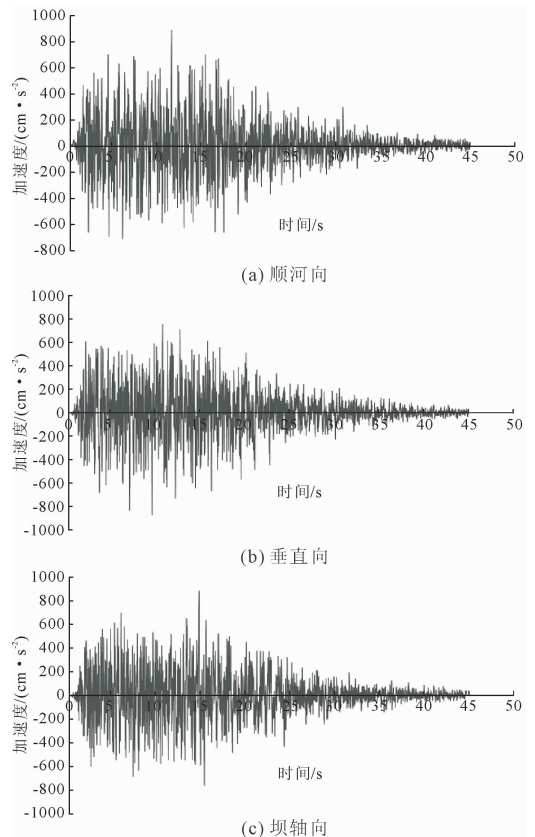


图 2 校核地震下基岩地震加速度时程图

0.4 m 左右,坝体向上、下游变形最大分别为 0.03 m 和 0.38 m,分别位于坝壳和压坡体内。竣工期,坝

体应力分布均匀,自重效应明显,符合土石坝一般分布规律。坝体最大主应力在 1.93 MPa 左右,位于坝体底部,最小主应力为 0.64 MPa,从坝体的应力水平看,竣工期坝体大部分的应力水平处于 0.2 MPa ~ 0.7 MPa 之间,具有较高的安全储备,不会发生静力剪切破坏。

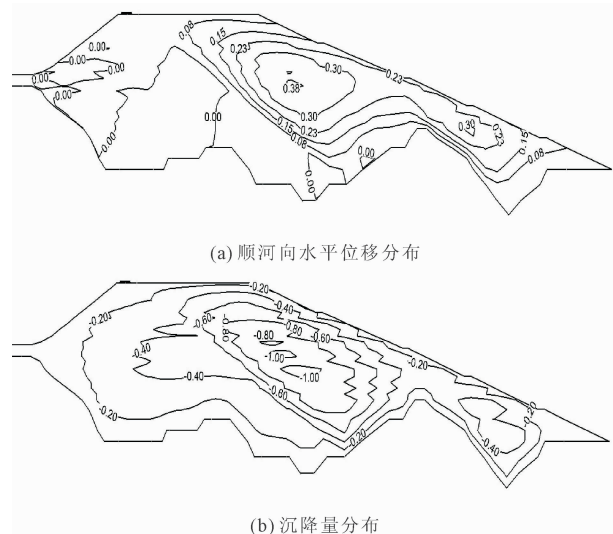


图3 竣工期坝体典型断面变形分布图

图4为满蓄期坝体典型断面变形分布图。主坝满蓄期坝体最大沉降发生在压坡体内,最大值为 1.06 m,占坝高的 1.03%,坝体向上、下游变形最大分别为 0.01 m 和 0.39 m,分别位于坝壳和压坡体内。满蓄期,坝体应力分布均匀,自重效应明显,符合土石坝一般分布规律。坝体最大主应力在 1.95 MPa 左右,位于坝体底部,最小主应力为 0.64 MPa,从坝体的应力水平看,满蓄期坝体大部分的应力水平处于 0.2 MPa ~ 0.7 MPa 之间,具有较高的安全储备,难以发生剪切破坏。

运行 20 年后,主坝最大沉降发生在压坡体内,最大值为 1.21 m,占坝高的 1.18%,坝体内最大沉降为 0.45 m 左右,坝体向上、下游变形最大分别为 0.04 m 和 0.42 m,分别位于坝壳和压坡体内。运行期,坝体应力分布均匀,符合土石坝一般分布规律。坝体最大主应力在 2.31 MPa 左右,位于坝体底部,最小主应力为 0.74 MPa,从坝体的应力水平看,运行期坝体大部分的应力水平处于 0.2 MPa ~ 0.7 MPa 之间,具有较高的安全储备,不会发生剪切破坏。

3.2 面板应力与应变

沥青面板刚刚施工完成时自身的变形很小,沥青混凝土面板竣工期顺坡向应力最大压应力 0.002 MPa 左右,位于面板与库盆的交界过渡段,最大拉应

力 0.005 MPa 左右,位于面板顶部。面板坝轴向最大压应力值分别为 0.002 MPa,位于面板与库盆的交界过渡段,最大拉应力 0.004 MPa 左右,位于面板顶部。

图5为沥青混凝土面板满蓄期应变分布图。沥青混凝土面板满蓄期顺坡向应力最大压应力 0.283 MPa 左右,位于面板与库盆的交界过渡段;最大拉应力 0.011 MPa 左右,位于面板顶部。面板坝轴向最大压应力值为 0.257 MPa,位于面板与库盆的交界过渡段;最大拉应力 0.009 MPa 左右,位于面板顶

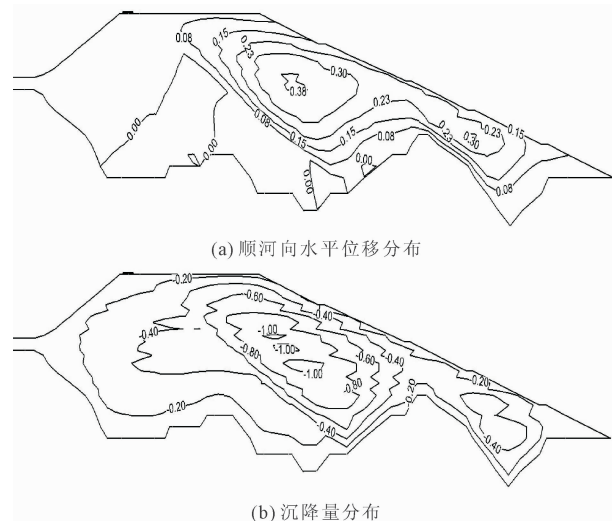


图4 满蓄期坝体典型断面变形分布图

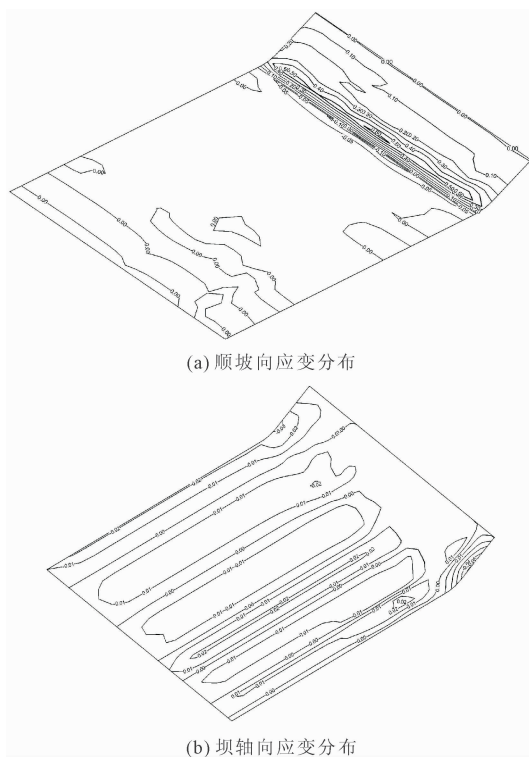


图5 满蓄期库底面板应变分布图

部。沥青混凝土面板满蓄期顺坡向应变最大压应变 0.645%，位于面板与库盆的交界过渡段；最大拉应变 0.013%，位于面板与库盆的交界处靠近库盆一侧。面板坝轴向最大压应变为 0.025%，位于面板与库盆的交界过渡段；最大拉应变 0.05% 左右，位于面板中部右岸边坡处。

沥青混凝土面板运行期顺坡向应力最大压应力 0.308 MPa 左右，位于面板与库盆的交界过渡段，最大拉应力 0.011 MPa 左右，位于面板顶部。面板坝轴向最大压应力值分别为 0.286 MPa，位于面板与库盆的交界过渡段，最大拉应力 0.011 MPa 左右，位于面板顶部靠近右岸边坡处。沥青混凝土面板运行期顺坡向应变最大压应变 0.675%，位于面板与库盆的交界过渡段，最大拉应变 0.016%，位于面板与库盆的交界处靠近库盆一侧。面板坝轴向最大压应变为 0.055%，位于面板与库盆的交界过渡段，最大拉应变 0.14% 左右，位于面板中部右岸边坡处。

4 大坝地震动力反应

4.1 大坝动力反应

分析计算结果可知，地震波产生的地震反应加速度和动位移整体较大，在该地震动作用下，大坝典型横纵断面动力响应加速度、动位移及抗震安全系数分布情况如图 6 所示。

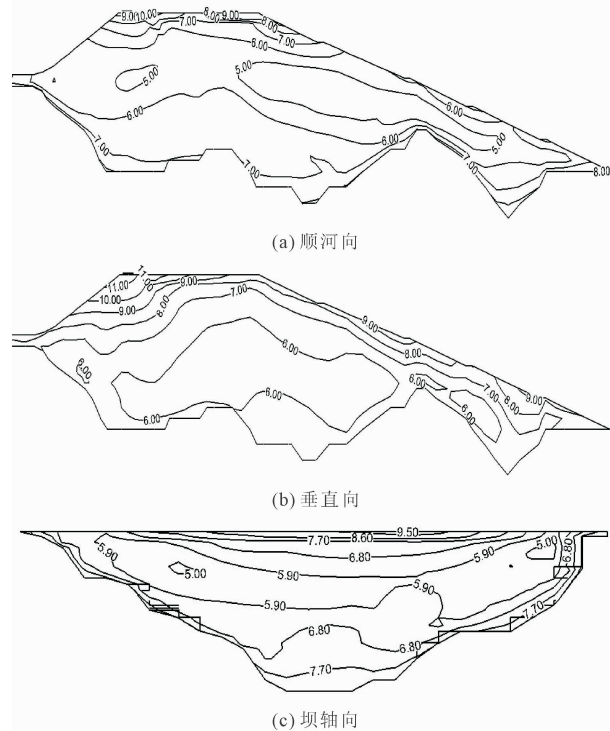


图 6 坝体地震加速度分布图

坝体竖向加速度反应较为强烈，竖向加速度反应在河谷中部坝顶与压坡体接触附近达到最大。坝体竖向最大响应加速度为 11.497 m/s^2 ，放大系数为 1.31 倍。建基面以上加速度反应沿坝体高程先有所降低再逐渐增大，在坝顶达到最大。坝体顺河向最大加速度为 10.649 m/s^2 ，放大系数约为 1.21 倍，位于河谷中部压坡体下游坡附近；坝轴向最大加速度为 9.824 m/s^2 ，放大系数为 1.12 倍。

坝体顺河向动位移反应较为强烈，在河谷中部坝顶压坡体下游坡附近达到最大。坝体顺河向最大动位移为 0.471 m。建基面以上动位移反应沿坝体高程逐渐增大，在坝顶达到最大。坝体竖向最大动位移为 0.179 m，位于河谷中部压坡体下游坡附近；坝轴向最大动位移为 0.372 m。

地震结束后，主坝的变形分布见图 7。竖向残余变形在河谷中央坝顶压坡体下游坡附近达到最大，最大沉降量约 1.01 m，坝体最大沉降在 0.5 m 左右，远小于坝顶震陷超高，地震引发的坝体变形对整体稳定性产生的效应较小。震害发生后，坝体呈现出向下的沉降趋势，并伴有两侧朝向中心的收缩变形，这一表现与面板坝在地震作用下的普遍响应规律相吻合。具体而言，最大震陷幅度约占坝体总高度的 1.0%，震后变形特征符合面板坝的一般性规律。此外，坝体沿轴向的残余变形量相对较小，而

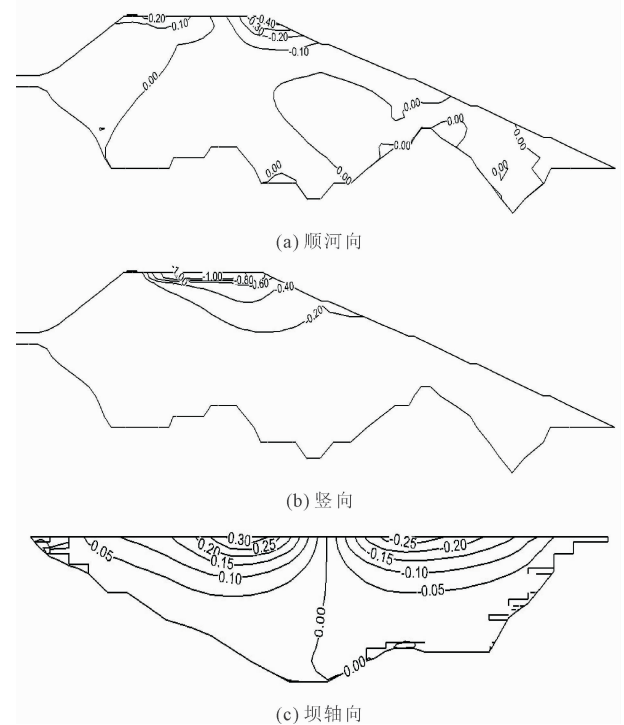


图 7 坝体典型断面残余变形分布图

在河谷中央坝顶压坡体下游坡区域,竖向残余变形的梯度达到了最大值,这一分布特点同样与面板坝的常规变形模式相一致。

在压坡体顶部区域,监测到部分单元的抗震安全系数低于临界值1,显示出一定程度的表层动力剪切损伤迹象,这一发现提示存在坡面局部发生动力剪切破坏以及浅层局部瞬时滑移的风险。然而,需强调的是,这些局部现象并不足以对坝体的整体结构安全构成威胁。

总体上,坝体竖向残余变形在河谷中央坝顶下游坡附近达到最大,远小于坝顶震陷超高,地震变形对坝体稳定性影响较小,震后坝体向下塌陷,两侧向内收缩,符合一般规律。坝轴向的坝体残余变形较小。

4.2 面板动力反应

考虑地震作用与静力应变叠加,面板的大、小主应变分布情况如图8所示。沥青混凝土面板(地震作用+静力)最大大主压应变为0.558%,最大大小主拉应变为0.437%,均发生在面板与库盆的交接靠近大坝一侧;顺坡向最大压应变为0.617%,发生在面板与库盆的交接靠近大坝一侧,最大拉应变为0.211%,发生在面板与库盆的交接靠近库盆一侧;坝轴向最大压应变为0.115%,最大拉应变为0.150%,均发生在面板左岸边坡中上部。拉应变都小于一般允许的0.5%,沥青防渗面板应变满足动力安全控制要求。

震后沥青混凝土面板最大大主应变为0.578%,最大小主应变为0.441%,均发生在面板与库盆的交接靠近大坝一侧;顺坡向最大压应变为0.652%,发生在面板与库盆的交接靠近大坝一侧,最大拉应变为0.201%,发生在坝顶靠近左岸边坡;坝轴向最大压应变为0.055%,发生在面板中部,最大拉应变为0.115%,发生在面板左岸边坡中部。震后库岸沥青面板和库盆沥青拉压应变均在允许范围内。

5 结论

(1) 在静力条件下,坝体变形与应力分布均符合土石坝的一般规律。沥青混凝土面板在竣工期与满蓄期的拉压应变均处于较低水平,最大拉应变为0.05%(坝轴向),远低于材料允许值,表明面板在静力作用下的抗裂性能满足设计要求。

(2) 在校核地震作用下,坝顶区域动位移极值达0.471 m(顺河向),但竖向残余变形最大仅1.01 m(占坝高1.0%),且震后变形模式符合面板坝的典型响应特征。尽管压坡体顶部局部单元出现抗震安全系数低于临界值的现象,但通过框格梁草皮护坡的防护措施可有效抑制堆石松动与滑移风险。值得注意的是,考虑地震与静力叠加后,沥青混凝土面板最大拉应变为0.441%(位于面板与库盆交接处),仍低于改性沥青混凝土0.5%的抗拉强度允许值,验证了面板在极端地震工况下的动力安全裕度。

(3) 综合静动力分析结果,该沥青混凝土面板堆石坝设计方案在静力稳定性、长期服役性能及抗震安全性方面均达到预期目标。然而,针对压坡体顶部局部动力剪切损伤的潜在风险,建议在施工阶段加强该区域的压实质量控制,并建立长期监测系统以追踪地震后坝体残余变形的时空演化规律。

参考文献:

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
- [2] 吴皓文,王军,龚迎莉,等.储能技术发展现状及应用前景分析[J].电力学报,2021,36(5):434-443.
- [3] 朱瑞恒,岑威钧,薛阳,等.坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):22-28.
- [4] 张春生,姜中见.抽水蓄能电站设计[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [5] 叶建春,陆忠民,蔡锦华,等.沙河抽水蓄能电站的工程特点[J].水力发电,2004,30(5):41-43.

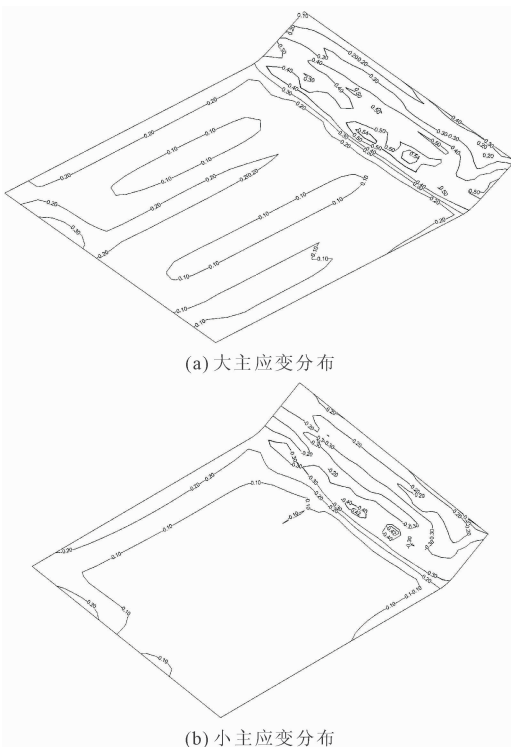


图8 (地震作用+静力)面板主应变分布云图

- [6] 王樱峻,赵琳,雷显阳,等. 抽水蓄能电站高沥青混凝土面板堆石坝设计[J]. 人民长江,2022,53(1):148-153.
- [7] 顾淦臣,沈长松,岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [8] Wang Weibiao, Höeg K, Zhang Yinbo. Design and performance of the Yele asphalt-core rockfill dam[J]. Canadian Geotechnical Journal,2010,47(12):1365-1381.
- [9] 只炳成,宋志强,王飞. 深厚覆盖层特性变化对沥青混凝土心墙坝动力反应影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):189-194.
- [10] 何建新,王景,杨海华. 尼雅水库坝料动力特性研究及三维地震反应分析[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):53-61.
- [11] 赵剑明,刘小生,杨玉生,等. 高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(12):2254-2261.
- [12] Fang Huolang, Tashiro Yukie, 田代幸英,等. Aseismic design of reservoir faced wholly with asphalt concrete (English)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006(8):1550-1562.
- [13] 王辉,岑威钧,王栋良,等. 强震区某沥青混凝土面板堆石高坝抗震安全性分析[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(5):165-171.
- [14] 王栋良,唐杰,王辉. 强震区抽蓄电站沥青混凝土面板堆石坝抗震稳定性分析[J]. 水电能源科学,2024,42(1):102-105.
- [15] 邹德高,彭俊,李俊超,等. 沥青混凝土面板堆石坝强震变形模式和极限抗震能力分析[J]. 水电与抽水蓄能,2022,8(6):15-20.

(上接第 175 页)

- [16] 胡东旭,李贤,周超云,等. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙的定量分析[J]. 岩土力学,2018,39(S1):318-324.
- [17] 杨振北. 干湿循环效应下膨胀土裂隙演化规律及水力——力学特性研究[D]. 重庆:西南大学,2021.
- [18] 杨圣涛,吕岩,贺元源,等. 基于 CT 扫描的草炭土孔隙结构分析及渗流模拟[J]. 工程地质学报,2021,29(5):1354-1365.
- [19] 韩毅,汪时机,李贤,等. 圆柱孔破损膨胀土扫描数据的三维重建研究[J]. 西南师范大学学报,2015.
- [20] 唐朝生,崔玉军,Anh-minh Tang,等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报,2012,34(12):2181-2187.
- [21] 曹宇清,吴永,安向勇,等. 考虑应力历史和应力水平影响的土体压缩模量计算方法[J]. 工程地质学报,2019,27(4):760-765.
- [22] 崔广芹,秦迪,尚志成,等. 冻融循环作用下粉质砂土的压缩变形特性研究[J]. 水利水电技术,2017,48(11):174-178.
- [23] 於永和,李素艳. 高填路堤地基压缩模量研究[J]. 路基工程,2006(5):35-36.
- [24] 曹宇清,吴永,安向勇,等. 考虑应力历史和应力水平影响的土体压缩模量计算方法[J]. 工程地质学报,2019,27(4):760-765.
- [25] Wang Jie, Li Wangcheng, Mu Min, et al. Particle size composition characteristics of weathered debris from grey-green slate under the action of freeze-thaw and dry-wet cycles[J]. Scientific Reports, 2023,13(1):1421.
- [26] 赵仕威,周小文,刘文辉,等. 考虑颗粒棱角影响的直剪试验的离散元模拟[J]. 岩土力学,2015,36(S1):602-608.
- [27] 韦秉旭,黄震,杨俭. 基于波速的膨胀土损伤变量与抗剪强度的关系研究[J]. 公路交通科技,2015,32(6):39-45.