

# 深厚库底回填料上面板堆石坝动力反应分析<sup>①</sup>

刘彦辰<sup>1,2</sup>, 杨 贵<sup>1,2</sup>, 王建新<sup>3</sup>

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2.河海大学安全与防灾工程研究所,江苏 南京 210098;

3.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**深厚库底回填料是影响面板堆石坝动力响应的重要因素之一。为深入研究深厚库底回填料对面板堆石坝动力响应的影响,基于某拟建抽水蓄能电站,采用三维动力有限元分析系统研究其上库面板坝的地震反应,主要包括坝体加速度、面板动力响应、接缝变位情况以及库底防渗土工膜的动应变等。计算结果表明:由于库底回填料的存在,坝体加速度放大效应被明显削弱;面板周边以受拉为主,中部大部分区域受压;垂直缝呈现出周边张开、中间闭合的趋势;土工膜的顺河向和坝轴向的动拉应变皆小于屈服应变,最大应变出现在库底材料分界处,为提高坝体渗透安全性,建议对主堆石区与连接板相接处的回填料进行适当范围换填的处理措施。研究成果可以为类似工程提供参考。

**关键词:** 面板堆石坝; 动力反应; 库底回填料

中图分类号: TV614.4; TV312

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0336-006

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0336

## Dynamic Response Analysis of Concrete-faced Rockfill Dam on Deep Reservoir Bottom Backfill

LIU Yan-chen<sup>1,2</sup>, YANG Gui<sup>1,2</sup>, WANG Jian-xin<sup>3</sup>

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2.Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3.College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** The pumped-storage power station is widely used and can change the excess electric power at low grid load into high-value power during the peak period. Limited by the topography and geological conditions, the main dam of the reservoir of many pumped-storage power stations has to be built on reservoir bottom backfill. The existence of the reservoir bottom backfill in the concrete-faced rockfill dam will affect the modulus decay, damping ratio, and natural cycle of the dam, and is one of the important factors affecting the dynamic response of concrete-faced rockfill dams. In order to further study the influence of deep reservoir bottom backfill on the dynamic response of concrete-faced rockfill dams, by using a three-dimensional finite-element method and equivalent linear model based on a pumped-storage power station under construction, the seismic response of the upstream concrete-faced rockfill dam, including dam acceleration, dynamic response of the concrete panel, displacement of joints, and dynamic strain of the geomembranes, are studied and evaluated systematically. The results show that, because the existence of the reser-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT1125); 国家自然科学基金(51109068); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(2013B26614)

作者简介: 刘彦辰(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事土石坝静动力计算方面的研究工作. E-mail: ycliuivp@163.com

voir bottom backfill material makes the dam body prolong the natural period of vibration, a high-order natural vibration period can easily coincide with the seismic predominant period and the high-mode vibration can be amplified, resulting in an acceleration distribution that is different from the standard distribution and an acceleration amplification that is weakened significantly. Surrounding areas of the concrete panel were in tension, most of the regional was pressed, the net tensile stress of the concrete in the panel was within the bearing capacity of the concrete, and the concrete panel is safe, but it is still necessary to take reasonable measures in corresponding parts in order to avoid the hazard due to potential cracks. Vertical joints were open around slabs and closed on the river valley. Vertical joints present a peripheral open-middle-close trend, and the results closer to the condition of no reservoir bottom backfill show that the effect of the joint deformation is small when built on either rock or rockfill. The dynamic strain of the geomembrane along and vertical to the river was less than the yield strain; the maximum strain appears on the boundary of the materials due to the obvious difference in material properties between the main rockfill zone and reservoir bottom backfill zone. We recommend that the replacement method used in an appropriate zone between the main rockfill zone and concrete plate can improve the dam safety of penetration. This paper can provide a reference for similar projects.

**Key words:** concrete-faced rockfill dam; dynamic response; reservoir bottom backfill

## 0 引言

抽水蓄能电站利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库,在高峰期再放水至下水库发电的水电站,可将电网负荷低时的多余电能,转变为电网高峰时期的高价值。我国从上世纪 60 年代开始研究抽水蓄能电站,早期水库以土质心墙坝和土质斜心墙坝为主,后期随着振动碾压技术的发展,使得堆石体变形有效减少,面板堆石坝从而得到了迅速的推广。面板堆石坝由于造价低、对坝址条件的适应性好、并且可以充分利用当地材料等优点,成为一个具有生命力的坝型。近年来随着水电工程建设的发展,越来越多的面板堆石坝工程修建于各种复杂的地基上。

目前对面板堆石坝地基适应性的研究,以深厚覆盖层和河谷地形方面居多,如孙大伟<sup>[1]</sup>、李国英<sup>[2]</sup>分别对覆盖层上面板坝的应力变形以及防渗体系接缝做了分析;郇能惠<sup>[3]</sup>、邓铭江<sup>[4]</sup>对深厚覆盖层上面板坝的防渗墙进行分析比较;赵魁芝<sup>[5]</sup>对梅溪水库的流变变形进行了反馈分析;王玉才<sup>[6]</sup>、李瑞青<sup>[7]</sup>、杨杰<sup>[8]</sup>分别研究了不同河谷地形对面板堆石坝应力变形的影响等。也有些学者对建在深厚覆盖层上面板堆石坝的动力响应<sup>[9-10]</sup>以及建在堆石体上的面板堆石坝应力变形进行研究<sup>[11]</sup>,但鲜有文献报道关于库底回填料对面板堆石坝动力响应的影

响。本文以某拟建抽水蓄能电站为例,通过三维有限元分析开展对建在深厚库底回填料基础上面板堆

石坝的动力响应研究,主要分析在场地波作用下坝体的加速度响应、面板的动应力、接缝变位以及库底防渗土工膜的张拉等,以期可为类似坝址的面板坝提供参考。

## 1 工程概况

某拟建抽水蓄能电站上水库由主坝、副坝和库周山岭围成,死水位 239.00 m,正常蓄水位 267.00 m,设计洪水位 267.58 m,校核洪水位 267.43 m。大坝拟采用混凝土面板堆石坝,坝顶高程 271.80 m,最大坝高 181.70 m(坝轴线处),坝顶长度 818.22 m,坝顶宽度 10 m。坝体上游面坡比 1:1.4,下游面 240 m 高程以上坡比 1:1.9,240 m 高程以下为 1:1.8,下游坝坡每隔 35 m 设一级 3 m 宽马道。坝体填筑材料分垫层区、过渡区、上游堆石区、下游堆石区、下游干砌块石护坡等。高程 237 m 以上垫层区及过渡区坡比均为 1:1.40,上游面板厚度 0.4 m,垫层区水平宽度 3.0 m,过渡区水平宽度 5.0 m。高程 237 m 以下设置反滤区和过渡区,坡比均为 1:1.0,反滤区水平宽度 2.0 m,过渡区水平宽度 3.0 m。坝体典型剖面如图 1 所示。

## 2 计算模型和参数

### 2.1 材料本构模型

动力计算分析中采用等效线性黏弹性模型,以黏弹性理论为基础,通过随剪切应变变化的等效剪切模量和等效阻尼比,考虑堆石体动力变形的非线性

性性质。该方法在堆石坝的地震反应分析中已得到普遍运用,取得了良好的效果。

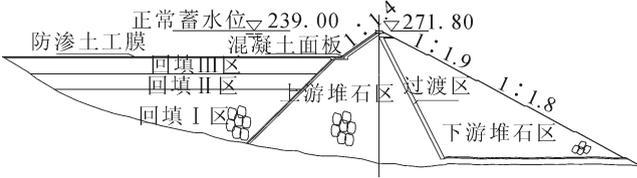


图1 坝体典型剖面

Fig.1 Typical profile of the dam

为反映材料的动力非线性,在计算中必须考虑到剪切模量和阻尼比随着剪应变的改变而改变,需要在求解过程中进行迭代,以确定与剪应变大小相协调的剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$ 。剪切模量和阻尼比随着剪应变的关系按沈珠江模型确定,其中动剪切模量  $G_d$  为:

$$G_d = \frac{k_2}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} p_a \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

阻尼比  $\lambda$  为:

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad (2)$$

式中:  $\bar{\gamma}_d$  是归一化的剪应变,可根据地震中的最大动剪应变  $\gamma_{d \max}$  计算:

$$\bar{\gamma}_d = \frac{0.65 \gamma_{d \max}}{\left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{1-n_G}} \quad (3)$$

式(1)~(3)中,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $n$  和  $\lambda_{\max}$  是由试验确定的参数,如表1所示。依据试验结果,面板、趾板、连接板采用 C25 混凝土,按线弹性模型考虑,弹性模量  $E$  取 28.0 GPa,泊松比  $\mu=0.167$ ,容重  $\gamma=25.0$  kN/m<sup>3</sup>。回填料上土工膜的拉伸屈服伸长率为 16%。

表1 动力计算参数

Table 1 Dynamic calculation parameters

坝体分区	$k_1$	$k_2$	$n$	$\lambda_{\max}$
上游堆石区	25.35	2 007	0.424	0.22
下游堆石区	22.10	2 174	0.341	0.20
过渡料	20.60	1 013	0.608	0.25
回填I区	10.40	415	0.723	0.29
回填II区	17.40	830	0.648	0.27
回填III区	19.35	922	0.638	0.26

由于面板混凝土与垫层料的刚度差异较大,在一定的受力条件下有可能在两者接触面之间发生错动滑移、开裂。为了反映面板与垫层之间的相互作用,在进行有限元分析时必须考虑接触特性,设置接触面单元。本次数值模拟采用节理材料模拟薄层单元,在使用节理材料时可将面板和垫层之间的接触

面设为节理面,当垂直于节理面为拉应力时,接触面脱开,法向刚度降低为零,相应的剪切刚度可为开裂前的刚度乘以一折减系数,该折减系数可在 0~1 之间变化。

面板垂直缝采用分离缝单元模拟,分离缝可以张开和错动,但不能压缩。

## 2.2 计算模型

根据该工程的地质资料和设计资料进行计算模型的单元剖分。模型底部取至弱风化岩,库底回填上游延伸至回填分界区。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致。整体采用六面体单元和四面体单元混合划分,共计单元总数 139 003 个,节点总数 209 844 个,由 11 个控制断面组合而成(图 2)。

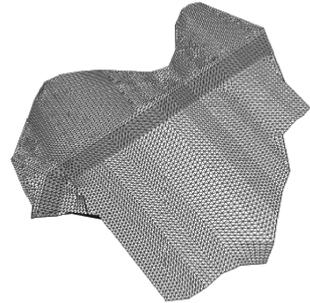


图2 坝体三维有限元网格

Fig.2 3D FEM model of the dam body

荷载施加模拟坝体填筑和蓄水的过程,采用逐级施加的方式,共计 28 级。坝体填筑分五个阶段进行,第一阶段高程 90~135 m,第二阶段高程 135~170 m,第三阶段 170~205 m,第四阶段 205~240 m,第五阶段 240 m~坝顶,每个阶段分五级加载,水荷载分三级加载到正常蓄水位。

## 2.3 地震波输入

根据该工程提供的地震安全性评价工作报告,取基准期 100 年超越概率 2% 的地震动参数作为设计地震,峰值加速度为 0.2 g。图 3 为计算过程中采用的加速度时程曲线,地震动输入采用顺河向、坝轴向和垂直向三向输入,垂直向地震动输入峰值加速度取水平向的 2/3。

## 3 计算结果分析

为研究库底回填料对坝体动力响应的影响,在其他情况都与原型坝相同的前提下,同时计算无库底回填料的坝型,并从坝体加速度、面板应力和接缝变位等方面与原型坝进行比较。

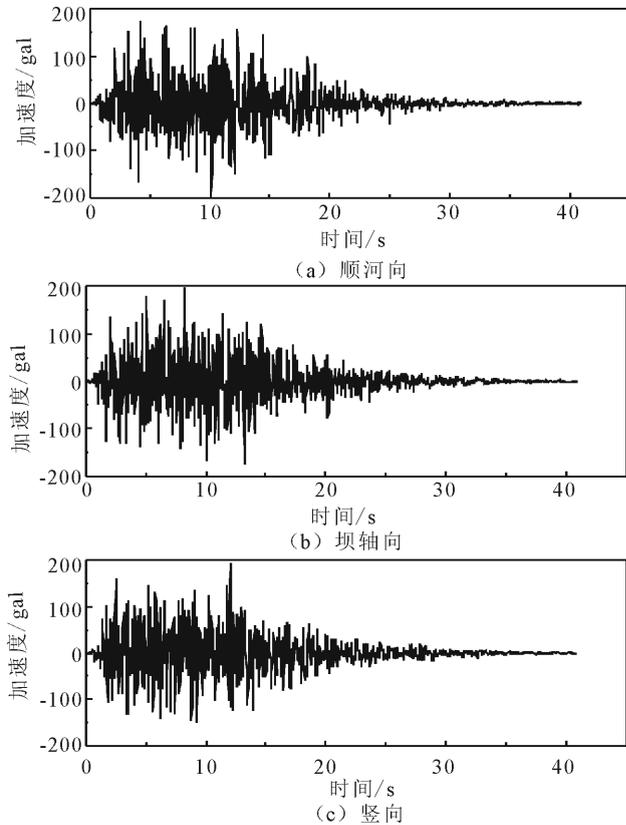


图 3 输入的加速度时程曲线

Fig.3 Input ground acceleration curve

### 3.1 坝体加速度

根据计算结果,从坝轴线上加速度分布来看,由于坝的长高比相对较大,两岸库岸又较缓,河谷大部分范围内的坝顶水平加速度基本接近,顺河向最大加速度发生在最大剖面附近的坝顶,如图 4 所示。顺河向最大加速度出现在下游顶部,为  $4.06 \text{ m/s}^2$ ,在坝体同一高程处次堆石区的加速度反应较大,这体现了材料分区的影响。

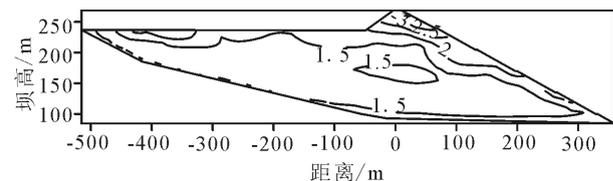


图 4 最大剖面顺河向最大反应加速度等值线( $\text{m/s}^2$ )  
Fig.4 Contour of peak response acceleration along the river on the maximum section ( $\text{m/s}^2$ )

为进一步研究坝体加速度的动态分布,将原型坝和无库底回填料两种坝体型式最大断面坝轴线上的加速度沿高程的分布绘制于图 5 中。相互比较分析,可以发现:

(1) 无论有无库底回填料,计算得到的坝体加速度放大系数在坝体下部接近 60% 坝高的情况下

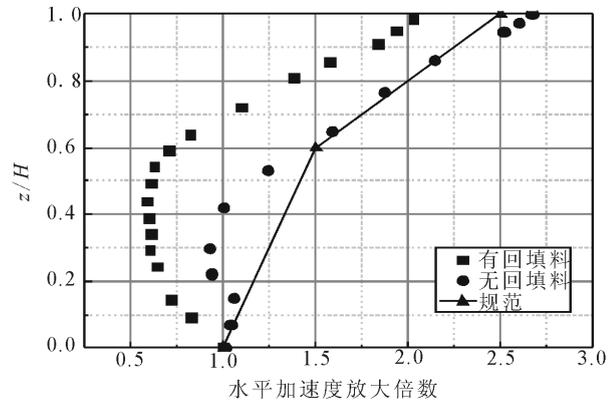


图 5 回填料对坝体加速度放大倍数的影响

Fig.5 The influence of backfill on the acceleration magnifications of dam

比较小,而在坝顶上中段增加较快,存在鞭梢效应,较大的加速度集中在坝顶附近;

(2) 有回填料的坝体放大倍数从模型底部开始随着坝高的增加而逐渐变少,最小值出现在回填料中部附近,然后随着坝高的增加逐渐增大,最大值出现在坝体表面,与无回填料的分布有所不同。无回填料的坝体在中下部加速度无明显减弱。这一现象说明回填料在一定程度上起到了减震作用,使坝体动力响应变弱;

(3) 有回填料的坝体最大放大倍数和规范有一定的差距,究其原因,除回填料对地震的衰减作用外,还由于回填料的存在使得坝体自振周期延长,高阶自振周期容易与地震卓越周期遇合,高阶振型的震动易于被激发放大,从而导致加速度分布与规范中有所不同。

### 3.2 面板应力反应

计算结果表明,在地震过程中面板的瞬时动压应力较小,在混凝土的动强度范围内出现压碎破坏的可能性小,可以不予考虑。综合考虑地震过程中瞬时的顺坡向和坝轴向的动拉应力以及震后的拉应力对面板安全威胁最大,因此将上述工况作为本小节研究重点。

图 6 为地震过程中面板顺坡向和坝轴向的瞬时最大拉应力的等值线图。可以看出,面板顺坡向最大拉应力出现在面板的中部,为  $1.9 \text{ MPa}$ ,然后向岸坡逐渐减小;面板坝轴向最大拉应力出现在岸坡周边缝附近和面板中部,为  $0.95 \text{ MPa}$ 。无回填料情况的计算结果分别是:顺坡最大拉应力为  $2.0 \text{ MPa}$ ,坝轴向最大拉应力为  $1.23 \text{ MPa}$ ,两种情况的极值和分布比较接近,同时也在经验范围内,说明回填料对面板应力影响有限。按照现行抗震规范的规

定,在地震工况下混凝土材料的承载力可较静力工况下提高 30%,可见面板净拉应力在混凝土承受范围内,面板是安全的,但依然有必要在相应部位采取合理措施,以避免因潜在的裂缝而形成危害,例如:加强周边缝止水、采取有效的排水措施、严格控制垫层的碾压压实度等。

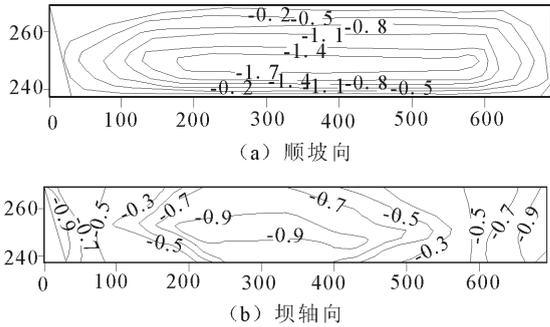


图6 面板最大动拉应力等值线(MPa)

Fig.6 Contour of maximum dynamic tensile stress of concrete panel (MPa)

图7为震前满蓄期和震后静动力合力作用下面板拉应力的分布情况。可见,震前满蓄期以压应力为主,仅在面板顶部产生小范围的拉应力,这是因为在水压力作用下堆石料有向下游的位移,由于堆石料的泊松比效应,将产生水压方向的侧向变形,地基限制了其侧向变形,堆石的位移合成结果将会在面板法线方向的上面,这种变形趋势会产生堆石料相对于面板向上的剪应力,面板产生顺坡向的拉应力。震后面板拉应力范围较震前有所增加,且主要分布在面板的周边,并且受到坝体残余变形的影响。

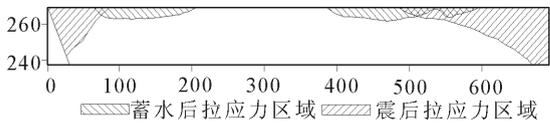


图7 面板拉应力区

Fig.7 Tensile stress area of concrete panel

### 3.3 面板垂直缝和周边缝变位

震后面板垂直缝最大张拉 3.4 mm,出现在坝体右岸坝坡,河谷区域的板间缝以受压为主。地震引起的周边缝变形较大,如计算得到震后周边缝最大张开 13.4 mm,和无回填料情况的结果较为接近,说明面板建在岩基面和堆石两种不同的材料基础上,对其接缝变形影响很小。而高度相近的吉林台面板坝(高度 155.8 m)的震后周边缝张开 14~15 mm<sup>[12]</sup>,证明计算是可行的。

震后面板垂直缝和周边缝的变形极值汇总于表2。整体周边缝的变形都在允许的范围,坝体处于

安全状态。

表2 震后接缝变形

Table 2 Post-earthquake displacement of joints

接缝名称	方向	变形值/mm
垂直缝	坝轴向张开	3.4
	坝轴向张开	13.4
周边缝	垂直面板向错动	13.0
	顺面板向错动	7.5

### 3.4 土工膜应变分析

本工程通过在库底回填料上铺设土工膜对库底进行防渗处理,库底防渗土工膜在上库大坝的防渗体系中起到重要作用,因此有必要对其拉应变进行分析。

土工膜在地震过程中所受最大顺河向拉应变和坝轴向拉应变如图8所示。可以看出:土工膜在坝轴向的拉应变小于顺河向的拉应变;两个方向的拉应变皆小于屈服拉应变;在连接板处的拉应变最大,其他区域都很小,主要是由于坝体主堆石区与库底回填料区的材料性质有明显差异,因此在两种材料的交界处引起较大的不均匀沉降。为了减少此处的动拉应变,尝试对回填料区与连接板相接处采用主堆石区材料进行换填,换填加固区为土工膜下 20 m 的三角形范围,具体如图8所示,阴影部分即为换填区域。

计算结果显示,对连接板下方进行换填后,顺河向的最大拉应变从 1.8% 降到 1.1%,降幅为 40%;对坝轴向的拉应变几乎没有影响。因此,采用对回填料换填的方法能够有效地减少土工膜的拉应变,提高库底的防渗能力。

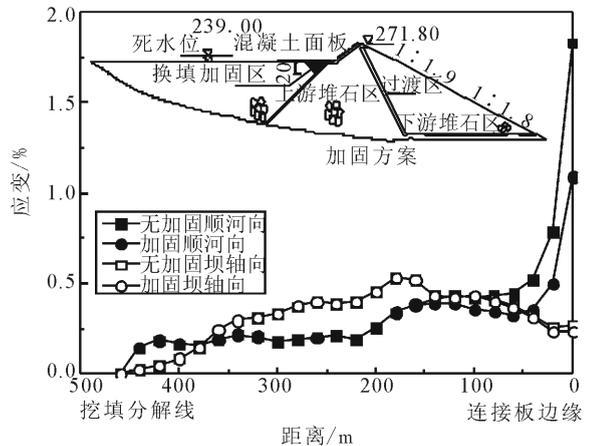


图8 土工膜顺河向最大动拉应变

Fig.8 Maximum dynamic tensile strain on geomembrane along the over

## 4 结论与建议

本文基于某拟建抽水蓄能电站上库面板坝,通过数值模拟对比研究其动力响应,主要包括坝体加速度、面板动力响应、板间缝变位情况以及土工膜的动应变等。主要得到以下结论与建议:

(1) 通过对比计算,表明建在深厚库底回填区上的面板堆石坝的加速度分布与建在基岩上的面板坝略有不同,库底回填料吸收地震波能量并且影响坝体的自振周期,导致坝体在回填料区域加速度倍数会小于 1 并且在坝顶的放大倍数也略小于规范值。

(2) 地震过程中面板顺坡向最大动拉应力出现在面板的中部,然后向岸坡逐渐减小;轴向最大动拉应力出现在岸坡周边缝附近和面板中部,皆在混凝土承受范围之内。有、无回填料二种情况的极值和分布比较接近,同时也在经验范围内,说明回填料对面板应力影响有限。

(3) 建在岩基面和回填料两种不同的材料基础上的面板接缝变形差异很小。震后面板的垂直缝最大值出现在坝体右岸坝坡,在河谷区域的板间缝以受压为主,接缝变形都在允许范围内。

(4) 库底防渗土工膜在连接板处的拉应变最大,其他区域较小,通过对主堆石区与连接板相接处的回填料进行适当范围的换填,能够明显减少交界处的不均匀沉降,有效减少土工膜的拉应变,提高库底的防渗能力。

## 参考文献 (References)

- [1] 孙大伟,邓海峰,田斌,等.大河水电站深覆盖层上面板堆石坝变形和应力形状分析[J].岩土工程学报,2008,30(3):434-439. SUN Da-wei, DENG Hai-feng, TIAN Bin, et al. Deformation and Stress Analysis of Dahe CFRD Built on Thick Alluvium Deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 434-439. (in Chinese)
- [2] 李国英.覆盖层上面板坝的应力变形性状及其影响因素[J].水利水运工程学报,1997(12):348-356. LI Guo-ying. Stress-strain Behavior and Its Affecting Factor of CFRD Built on Riverbed Alluvium[J]. Hydro-science and Engineering, 1997(12): 348-356. (in Chinese)
- [3] 郇能惠,孙大伟,米占宽.深覆盖层上面板堆石坝的圆弧型防渗墙[J].岩土力学,2006,27(10):1653-1657. LI Neng-hui, SUN Da-wei, MI Zhan-kuan. Arc Type Diaphragm Wall for Concrete Face Rockfill Dam Built on Deep Alluvium Deposit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1653-1657. (in Chinese)
- [4] 邓铭江,严寒,高震.深覆盖层混凝土面板关键技术研究综述

- [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 985-996.
- DENG Ming-jiang, YAN Han, GAO Zhen. Advance in Key Technology for Concrete Face Dams With Deep Overburden Layers Under Cold and Seismic Conditions [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 985-996. (in Chinese)
- [5] 赵魁芝,李国英.梅溪覆盖层上混凝土面板堆石坝流变变形反馈分析及安全性研究[J].岩土工程学报,2007,29(8):1230-1235. ZHAO Kui-zhi, LI Guo-ying. Back Analysis of Creep Deformation and Study on Safety of Meixi CFRD Built on Riverbed Alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1230-1235. (in Chinese)
- [6] 王玉才.河谷形状对深覆盖层上面板堆石坝变形的影响[J].地下空间与工程学报,2013,9(6):1439-1442,1456. WANG Yu-cai. Influence of Valley Shape on the Deformation of the CFRD with Deep Overburden[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6): 1439-1442, 1546. (in Chinese)
- [7] 李瑞青.折线型坝轴线和陡河谷边坡对面板堆石坝应力和变形的影响[D].武汉:武汉大学,2004. LI Rui-qing. The Influence of Fold line Dam Axis and High Steep River Valley Slope on the Stress Distribution and Deformation of Concrete-face Rockfill Dam [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [8] 杨杰,李国英,沈婷.复杂地形条件下高面板堆石坝应力变形特性研究[J].岩土工程学报,2013,36(4):775-781. YANG Jie, LI Guo-ying, SHEN Ting. Stress-strain Properties of Super-high CFRD Under Complex Terrain Conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 36(4): 775-781. (in Chinese)
- [9] 朱晟,顾淦臣,林益才.深厚覆盖层上混凝土面板堆石坝地震反应分析[J].河海大学学报,1997,25(3):80-85. ZHU Sheng, GU Gan-chen, LIN Yi-cai. Seismic Response of CFRD on Alluvial Deposit [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(3): 80-85. (in Chinese)
- [10] 赵一新.深覆盖层地基高面板堆石坝应力变形动力有限元分析[D].西安:西安理工大学,2009. ZHAO Yi-xin. The Finite Element Analysis for Dynamic Stress and Deformation Characteristics for High Concrete-face Rockfill Dam Built in Deep Alluvial Deposit [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] 麦家焯,裴文林,薛继乐,等.建在堆石体上的面板堆石坝趾板应力变形分析[J].水力发电,2001(4):54-56. MAI Jia-xuan, PEI Wen-lin, XUE Ji-le, et al. Analysis of the Stress and Deformation on Toe Board of CFRD Built on Rockfill [J]. Water Power, 2001(4): 54-56. (in Chinese)
- [12] 郇能惠,李国英,赵魁芝,等.强震区高面板堆石坝静力和动力应变变形形状[J].岩土工程学报,2004,26(2):183-188. LI Neng-hui, LI Guo-ying, ZHAO Kui-zhi, et al. Static and Dynamic Stress-deformation Behavior of High Concrete Faced Rockfill Dams in Strong Ground Motion Zone [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 183-188. (in Chinese)