

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.04.011

纳子峡纤维混凝土面板坝服役期接缝变形特性分析

王玉龙¹, 覃源¹, 王迎春², 刘海敏³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验, 陕西 西安 710048; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 国家电投集团青海黄河电力技术有限责任公司, 青海 西宁 810016)

摘要: 混凝土面板堆石坝作为一种典型的水工建筑物,其面板接缝的变形特性直接影响了大坝的渗流稳定及耐久性,此问题在高寒、高海拔地区更为突出。本文基于青海省纳子峡纤维素纤维混凝土大坝面板变形实测数据,研究了纤维混凝土面板堆石坝接缝的变形规律,定量分析了纤维混凝土面板接缝间温升、温降过程中的变形特性。分析结果表明:纳子峡大坝纤维混凝土面板接缝在服役期内,垂直缝两向位移中最大变形量为 7 mm,周边缝最大变形量为 16.44 mm;蓄水期接缝位移值变化幅度较大,但是在运行期垂直缝及周边缝位移变形均在容许范围内;靠近右岸处的面板垂直缝呈张开状态,其余断面的垂直缝均以压缩状态为主;周边缝三向位移变形值对库区水位和库区温度较敏感,且随二者呈周期性变化。

关键词: 纤维混凝土; 接缝变形; 垂直缝; 周边缝

中图分类号: TV61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2019)04-0472-07

Analysis of deformation characteristics of joints of Nazixia fiber reinforced concrete face-slab dam during service period

WANG Yulong¹, QIN Yuan¹, WANG Yingchun², LIU Haimin³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. Qinghai Huanghe Electric Power Technology co. LTD, Xi'ning 810016, China)

Abstract: As a typical hydraulic structure, the deformation characteristics of concrete face rockfill dam (CFRD) have a direct impact on the seepage stability and durability of the dam, which is of more prominence in cold and high altitude areas. Based on the deformation data of the concrete face-slab of the Nazixia cellulose fiber concrete dam in Qinghai Province, this paper studies the deformation law for slab joints of CFRD, and systematically analyzes the deformation characteristics of the joints in the process of temperature rise and temperature drop between the joints of the fiber concrete face-slab. The results show that in the service period, the maximum displacement of the vertical joint is 7mm, and that the maximum deformation of the peripheral joint is 16.44 mm. During the impoundment period, the displacement of the joint changes greatly, but in the operation period, the displacement of the vertical joint and the peripheral joint are within the allowable range. The vertical joint of the face plate near the right bank is open, with the vertical joints of the plane being mainly in a compression state. The three-dimensional displacement deformation value of the peripheral joints is sensitive to the water level and temperature in the reservoir area, a periodical changes with them.

Key words: fiber reinforced concrete; joint deformation; vertical joint; peripheral joint

混凝土面板堆石坝(CFRD)是一种重要的水工坝型,其混凝土面板是大坝最重要的防渗体之一,但

由于目前施工中采用分块浇筑的施工形式,致使面板不可避免地存在“接缝”^[1]。通常接缝主要分为周

收稿日期: 2019-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679197);中国博士后科学基金资助项目(2014M562524XB)

作者简介: 王玉龙,男,硕士生,研究方向为水工混凝土结构耐久性。E-mail:421556199@qq.com

通讯作者: 覃源,男,副教授,博士,研究方向为混凝土耐久性。E-mail:qinyuan@xaut.edu.cn

边缝及面板间的垂直缝与水平缝。接缝在服役过程中,不但需要承担较大的多向变形,同时还需协调坝体与面板之间的不均匀位移^[1-3]。资料表明,历史上出现的较严重的面板坝溃坝及漏水事故中,30%以上是由面板接缝损坏所致^[3-6]。因此,周边缝、面板间的垂直缝与水平缝是整个面板坝中较薄弱、变形大且复杂的结构,对于坝体安全来说至关重要^[6]。研究发现,周边缝及面板间的垂直缝与水平缝会随气候、季节、库水位等各种因素的变化而发生位移变形,所以在施工和运行期都需要重点关注^[6,7]。

程展林等^[7]针对水布垭面板堆石坝的坝体及面板变形进行了分析;金建峰等^[8]针对闲林水库面板堆石坝在蓄水初期的坝体及面板性能进行了分析;吕高峰等^[9]对某面板坝周边缝及三向测缝计测值异常进行了分析并提出改进建议;何鲜峰等^[10]结合原位监测数据及计算分析得出了常态混凝土面板施工期开裂的主要原因,并提出了相应改善措施;梁希林等^[11]研究了高寒自然条件对接缝止水体系的影响,并结合试验数据提出了面板堆石坝接缝止水体系的改进措施;刘万新等^[12]针对高寒地区面板堆石坝的变形特点,提出了增加面板顶部厚度、增大挤压缝宽度等改善控制变形的措施。以上文献大多是针对常态混凝土面板或高寒地区常态混凝土面板周边缝及垂直缝的变形性能进行研究分析,对纤维混凝土面板周边缝及垂直缝的研究相对较少。而面板及面板接缝的变形与面板混凝土材料等因素有关^[13,14],研究表明,在混凝土中掺入 0.9 kg/m^3 的纤维素纤维可以降低83.7%的裂缝面积^[15],提升3.6%的混凝土

抗压强度^[16],并可大幅提升抗冻及抗渗性能^[15,17,18]。综上所述,加入纤维后面板的力学性能提高,对面板接缝性能有改善作用。本文基于纳子峡大坝纤维混凝土面板在服役期的接缝变形特征,分析了高寒、高海拔地区纤维混凝土面板接缝在温升、温降过程中的变形特性,揭示了纤维混凝土面板周边缝、垂直缝及水平缝在服役期的工作性能及变形规律,以期纤维混凝土面板堆石坝的研究提供参考。

1 纤维混凝土面板接缝监测布置

1.1 工程概况

纳子峡水电站位于青海省东北部,距西宁市约186 km。纳子峡大坝为纤维混凝土面板砂砾石坝,属Ⅱ等大(2)型工程,坝顶高程为3 204.6 m,坝顶宽度10 m,坝顶长度416.01 m,最大坝高121.5 m,面板共分35块,单块面板最长可达209.95 m,现场情况如图1所示。坝体工程设防烈度为Ⅶ度,地处内陆寒冷气候区,年平均气温 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大冻土深度2 m,昼夜温差较大。坝址两岸地形不对称,左岸山体相对较陡,右岸山体上陡下缓,整体岸坡呈左陡右缓的斜“U”字型。左岸坝肩岩体未有强风化带,右岸坝肩岩体强风化带厚度可达2~5 m。坝体自上游至下游的最大断面及材料分区^[19]如图2所示。本工程中纤维采用上海罗洋新材料科技有限公司RS2000型纤维素纤维,纤维素纤维混凝土的相关参数及配合比如表1所示,其纤维材料性质如表2所示。



图1 纳子峡纤维混凝土面板堆石坝

Fig. 1 Pictures of Nazixia concrete face sandy gravel dam

表1 纤维素纤维混凝土参数

Tab. 1 Parameters of cellulose fiber concrete

设计等级	用水量/ (kg/m^3)	砂率/ %	纤维/ (kg/m^3)	塌落度/ mm	骨料 级配	外加剂/ %
C30	125±5	34±2	0.9	35	Ⅱ	0.812

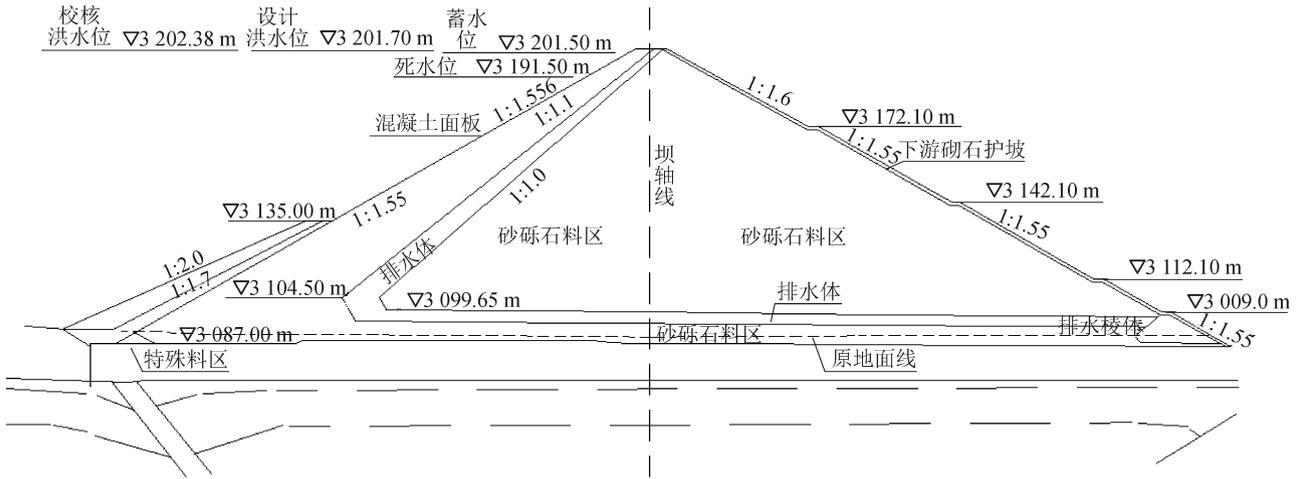


图2 纳子峡面板堆石坝最大断面及材料分区图^[19]
 Fig. 2 Maximum section and material division of Nazixia CFRD^[19]

表2 纤维素纤维的材料性质

Tab. 2 Material properties of cellulose fibers

纤维种类	长度/mm	直径/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
RS2000 纤维	5~7	10~20	600~900	8.5	3.5

1.2 接缝监测点布置

纳子峡面板堆石坝主要采用两向测缝计(JM²)对面板垂直缝的开合度和相对沉陷变形进行监测,选取编号为JM²2、JM²5、JM²27、JM²29的4组监测点;面板周边缝的监测主要采用三向测缝计(JM³),

选取编号为JM³2、JM³5、JM³8、JM³10、JM³11、JM³12的6组监测点,用以测量张拉、沉陷及剪切变形。接缝测点布置及所选测点位置如图3所示。所选测点均为该面板测值中变化幅度及变形量最大的测点。

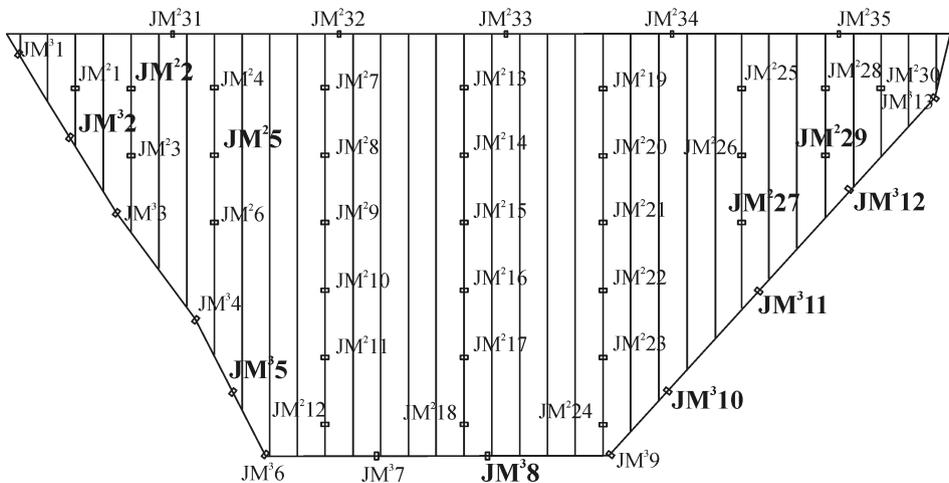


图3 面板接缝监测点布置图
 Fig. 3 Layout of monitoring points for panel joints

2 面板接缝性能分析

纳子峡水电站于2009年9月开工,2011年3月截流,2012年11月填筑施工完成,2014年2月蓄水,2015年6月溢洪道泄水;2016年至2017年间,在震中距纳子峡水电站约40 km处,发生了两次不

超过本工程抗震设防烈度的浅源地震。本文主要截取2014年至2017年间,纳子峡大坝面板垂直缝及周边缝的变形数据进行研究。

2.1 面板垂直缝工作性能分析

垂直缝两向位移数据中,最大张开量为9.893 mm,最大沉陷量为8.942 mm,均由JM²29点测得;最大闭

合量为 9.178 mm,最大抬升量为 10.454 mm,均由 JM² 点测得。同时,可以观察到,测点温测值在 6、7 月较高,进入 2、3 月份则处于零下状态,整体温测值在 -12 ℃~+30 ℃ 范围内波动。综合各测点数据来看,面板垂直缝开合方向的数值及沉降方向的数值在蓄水初期振荡较大,当达到蓄水位后,数据波动趋于平稳。期间虽遭受严寒及震害影响,但无异常变化。

图 4 为位于第 5、6 块面板接缝处 JM² 测点的位移、温度变化曲线。在张合方向,该点主要呈压缩状态,最大压缩变化量为 9.115 mm,测值在 0.063 mm~9.178 mm 范围内波动;最大张开变化量为 2.011 mm,测值在 2.013 mm~0.002 mm 之间波动。同时,在沉降方向,该测点以抬升状态为主,最大抬升变化量为 10.453 mm,测值在 0.001 mm~10.454 mm 范围内波动;最大下沉变化量为 1.508 mm,测值在区间 1.659 mm~0.151 mm 范围内波动。在温测值方面,该测点温度在 -14.131 ℃~+26.393 ℃ 范围内波动较大。在张合方向,最大温差可达 40.62 ℃,在沉降方向,最大温差为 40.52 ℃。由于测点 JM²5、JM²27、JM²29 与 JM²2 变化规律相似,故不再赘述,所选测点的垂直缝位移变化范围如图 5 所示,温度变化范围如图 6 所示。

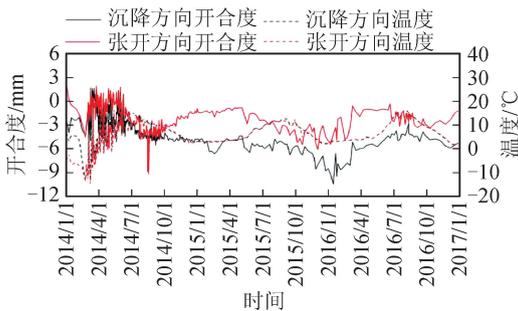


图 4 JM²2 测点位移、温度变化过程曲线

Fig. 4 JM²2 measuring point displacement and temperature change curve

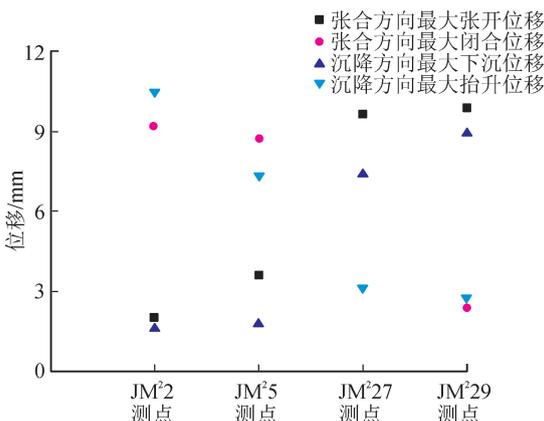


图 5 垂直缝位移变化范围

Fig. 5 Displacement range of vertical joint

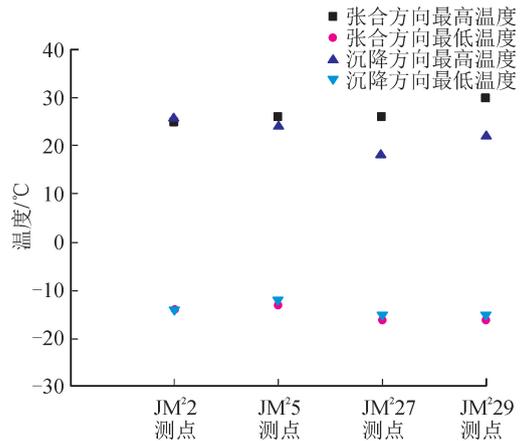


图 6 垂直缝温度变化范围

Fig. 6 Temperature range of vertical joint

本文采用郇能惠^[20]所推荐的考虑岸坡角度及坝高位移特征值的计算方法对垂直缝的位移变形进行研究。上述测点的垂直缝位移值及特征值如表 3 所示。位移特征值计算方法为:

$$C_{DV} = \frac{D_V \cos \alpha}{H} \quad (1)$$

式中: C_{DV} 为考虑坝高及坡角的面板垂直缝位移特征值; D_V 为周边缝张开方向的实测位移值; α 为测点所处岸坡最陡岸坡坡角; H 为大坝最大坝高^[20]。另外,位移模量特征值计算方法为:

$$D_s = \sqrt{O^2 + S^2} \quad (2)$$

$$C_{DS} = \frac{D_s \cos \alpha}{H} \quad (3)$$

式中: O 、 S 分别为垂直缝张开、沉降方向的实测位移; D_s 为垂直缝位移的模; C_{DS} 为考虑坝高及岸坡坡角的垂直缝位移模量特征值。

表 3 中垂直缝的位移特征值与郇能惠^[20]所统计的已建工程垂直缝位移特征值相比,均小于 0.94 的容许位移特征值。纤维混凝土面板垂直缝的实测闭合位移值为 2.39 mm~9.18 mm,优于统计的常态混凝土面板堆石坝实测闭合位移值 2.74 mm~11.5 mm;实测张开位移值为 2.00 mm~9.89 mm,优于统计的常态混凝土面板堆石坝实测张开位移值 2.0 mm~35 mm。其纤维混凝土面板垂直缝的张开平均极值位移特征值为 0.34,优于常态混凝土面板堆石坝 0.525 的张开平均极值位移特征值。同时,由于地形的不对称性及基岩承载力的差异,两岸呈现出不同的位移趋势^[3、6]。综合各测点数据可知,张性缝位于面板靠近右岸处,该区域以张开状态为主,在沉降方向表现出略微抬升的趋势,其余断面均为以压缩状态为主的压性缝,且呈现下沉状态。由图 4 曲线趋势可知,入夏后气温升高、库水位上

升,面板受压增大产生压缩变形使数值呈闭合趋势;而入冬后气温及库水位降低,释放压缩变形量,造成测点呈张开趋势,但受浮冰消融后的轻微撞击及冻胀影响,虽然释放了部分压缩变形,但测值仍会产生区域性振荡。在沉降方向,入夏后由于混凝土温升

的热胀特性,坝体产生轻微下沉;相反,入冬后由于气温骤降,坝基产生冻缩效应,同时,坝体材料冷缩效应使测点出现抬升趋势。同样,两向测温值也呈现出入夏测温增加、入冬测温下降的变化规律。

表3 垂直缝位移、温度统计表

Tab.3 Statistical displacement and temperature of vertical joints

测点	张合方向最大位移/mm		沉降方向最大位移/mm		张合方向温度/℃		沉降方向温度/℃		$C_{DV}/(10^{-4})$		$C_{DS}/(10^{-4})$
	张开	闭合	下沉	抬升	最高	最低	最高	最低	张开	闭合	
JM ² 2	2.00	9.18	1.66	10.50	25	-14	26	-14	0.14	0.63	0.97
JM ² 5	3.61	8.73	1.80	7.33	26	-13	24	-12	0.25	0.61	0.79
JM ² 27	9.63	—	7.35	3.08	26	-16	18	-15	0.53	—	0.66
JM ² 29	9.89	2.39	8.94	2.76	30	-16	22	-15	0.54	0.13	0.73

2.2 面板周边缝工作性能分析

周边缝三向变形数据中,最大张开量为 9.80 mm,由 JM³8 点测得,最大闭合量为 2.53 mm,由 JM³12 点测得。最大沉陷量为 18.8 mm,由 JM³8 点测得,最大抬升量为 5.33 mm,由 JM³5 点测得。最大正剪量为 10.04 mm,由 JM³8 点测得,最大反剪量为 4.98 mm,由 JM³12 点测得。在温测值方面,其数值变化规律与垂直缝温测值规律相似。综合来看,周边缝沉降方向、张开方向和剪切方向的变形在蓄水初期波动较大,当达到蓄水位后,周边缝各向变形量趋于稳定。

图 7 为位于左侧边坡靠河床区域 JM³5 测点的位移、温度变化曲线。该测点在张合方向,呈张开状态,张开量在 7.545 mm~0.998 mm 之间,最大张开变化量为 6.547 mm。该测点在沉降方向,呈季节性振荡规律,即夏季呈下沉状态,冬季以抬升状态为主,其下沉变化范围在 5.179 mm~0.043 mm 区间内,最大下沉变化量为 5.136 mm;抬升量在 0.023 mm~5.331 mm 以内,最大抬升量为 5.308 mm。该点在剪切方向,呈正剪变形状态,最大正剪变化量为 5.634 mm,变化范围为 8.997 mm~3.363 mm。该点各方向中,最大温差可达 37℃,最高温测值为 41℃,均发生在沉降方向,而其余两方向温测值较小,温差变化不大。由于测点 JM³2、JM³8、JM³10、JM³11、JM³12 与 JM³5 变化规律相似,故不再赘述,所选测点的垂直缝位移变化范围如图 8 所示,温度变化范围如图 9 所示。

同样,采用郇能惠^[20]所荐方法对周边缝的位移变形进行研究。上述周边缝位移及相关特征值如表 4 所示,周边缝位移及相关特征值为:

$$C'_{DS} = \frac{D'_s \cos \alpha}{H} \quad (4)$$

$$D'_s = \sqrt{O'^2 + S'^2 + T'^2} \quad (5)$$

式中: O' 、 S' 、 T' 分别为周边缝张开、沉降、剪切方向的实测位移值; D'_s 为周边缝位移量的模。

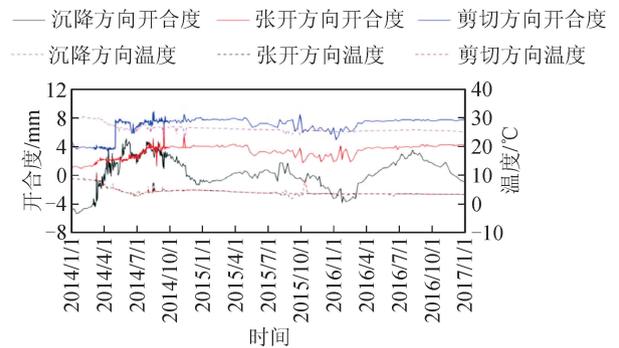


图 7 JM³5 测点位移、温度变化过程曲线
Fig. 7 JM³5 measuring point displacement and temperature change curve

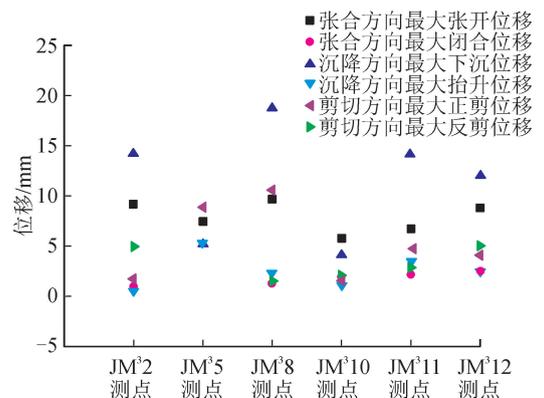


图 8 周边缝位移变化范围
Fig. 8 Displacement trend of peripheral joints

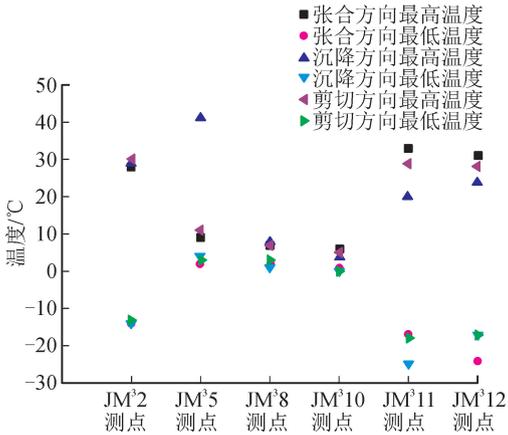


图9 周边缝温度变化范围

Fig. 9 Temperature range of peripheral joints

表4中周边缝位移特征值与郗能惠^[20]所统计的已建面板坝的周边缝位移特征值相比,均小于0.20的容许位移特征值。纤维混凝土面板周边缝的实测开合位移值为0.97 mm~5.78 mm,优于统计的常态混凝土面板堆石坝实测的开合位移值71.8 mm~6.2 mm。纤维混凝土面板周边缝的实测沉降位移

值为0.62 mm~18.8 mm,优于统计的常态混凝土面板堆石坝实测的沉降位移值10.8 mm~50.2 mm。纤维混凝土面板周边缝的实测剪切位移值为1.02 mm~10.04 mm,优于统计的常态混凝土面板堆石坝实测剪切位移值3.5 mm~58.6 mm。纤维混凝土面板周边缝的平均极值位移特征值为0.11,优于常态混凝土面板堆石坝0.15的平均极值位移特征值。同时,坝体高度、混凝土面板的弹性模量和砂砾石体的弹性模量差异及基岩承载力等都是影响周边缝变形的关键因素^[3]。综合各测点数据可以看出,周边缝在张合方向,主要呈张开状态,其中最大张开量出现在河床段,最大闭合量出现在右侧边坡坝顶位置,且该区域周边缝开合度变化速率较高。在沉降方向,周边缝各个区域主要呈下沉状态,最大沉降量及最大沉降变化率均位于右侧边坡。在剪切方向,最大正剪变形量位于大坝中部河床周边缝区域,而最大反剪量及最大剪切变化率均监测于右岸边坡区域。综上所述,周边缝的三向变形随着上游水位增减而浮动,变形数据呈现出较为明显的周期性变化规律。

表4 周边缝位移、温度统计表

Tab. 4 Statistic of displacement and temperature of peripheral joints

测点	张合方向最大位移/mm		沉降方向最大位移/mm		剪切方向最大位移/mm		张开方向温度/°C		沉降方向温度/°C		剪切方向温度/°C		$C'_{ds}/(10^{-3})$
	张开	闭合	下沉	抬升	正剪	反剪	最高	最低	最高	最低	最高	最低	
JM ³ 2	9.27	0.97	14.1	0.62	1.72	4.9	28	-14	29	-14	30	-13	0.12
JM ³ 5	7.55	—	5.18	5.33	8.9	—	9	2	41	4	11	3	0.09
JM ³ 8	9.80	1.25	18.8	2.30	10.4	1.52	7	2	8	1	7	3	0.13
JM ³ 10	5.78	1.96	4.10	1.17	1.63	2.10	6	1	4	0	5	0.3	0.04
JM ³ 11	6.8	2.11	14.2	3.43	4.61	2.74	33	-17	20	-25	29	-18	0.09
JM ³ 12	8.81	2.53	12	2.56	4.18	4.98	31	-24	24	-17	28	-17	0.09

3 结论

1) 处于高寒、高海拔地区的纳子峡大坝纤维混凝土面板,在为期3年(2014年1月至2017年1月)的服役中性能稳定。通过对长期的监测数据分析,以及类比近似工程可知,纤维混凝土面板接缝位移变形受水库蓄水影响较大,且位移值不与水位成正比,反而出现上下起伏、波动的特点,这一特征对接缝的稳定性不利。在蓄水完成之后,稳定运行期内,接缝变形值随着库水位和温度波动呈现周期性变化规律。

2) 在所研究的服役期内(2014年1月至2017年1月),垂直缝两向位移中,最大变形量为7 mm,最大温

差值为16 °C,周边缝最大变形量为16.44 mm,最大温差值为22 °C。参考已建工程的监测数据,并结合可表征河谷地形、岸坡角度的特征值计算法可知,垂直缝开合度位移特征值处于区间[0.13, 0.63]内,小于容许开合度位移特征值限值,而周边缝三向位移特征值处于区间[0.04, 0.13]范围内,也小于容许周边缝位移特征值限值。因此,垂直缝及周边缝的变形均处于合理范围内。

3) 纳子峡大坝纤维混凝土面板的垂直缝及周边缝在高海拔、严寒等较为极端的自然条件下,不但位移变形值处于容许范围内,而且通过计算所得的位移特征值优于常态混凝土,表明纤维混凝土对高寒环境及冷热交替的环境具有较强的适应性。

参考文献:

- [1] 高俊,党发宁,王振华. 混凝土面板堆石坝局部止水缝失效渗透稳定分析[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 220-224, 252.
GAO Jun, DANG Fa'ning, WANG Zhenhua. Seepage stability analysis of concrete faced rock-fill dam under the cases of local seal seam failure[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2):220-224, 252.
- [2] 马立秋,张嘎,程嵩,等. 面板水平分缝对面板堆石坝应力变形影响分析[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 145-149,161.
MA Liqiu, ZHANG Ga, CHENG Song, et al. Effect of horizontal joints on stress-deformation behavior of CFRD[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10):145-149,161.
- [3] 沈婷,李国英. 超高面板堆石坝混凝土面板应力状态影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1345-1349.
SHEN Ting, LI Guoying. Factors for stress behavior of concrete face slab of super-high CFRD [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1345-1349.
- [4] 徐耀,郝巨涛. 混凝土面板堆石坝面板接缝止水技术的发展与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5):457-465.
XU Yao, HAO Jutao. Development and prospect of slab joint waterstop technology of CFRDs[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5):457-465.
- [5] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1):62-74.
XU Zeping. Research progresses and key technologies of CFRD construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1):62-74.
- [6] 杨启贵,谭界雄,周晓明,等. 关于混凝土面板堆石坝几个问题的探讨[J]. 人民长江, 2016, 47(14):56-59,89.
YANG Qigui, TAN Jiexiong, ZHOU Xiaoming, et al. Discussion on several issues of concrete face rock-fill dam[J]. Yangtze River, 2016, 47(14):56-59,89.
- [7] 程展林,潘家军. 水布垭面板堆石坝应力变形监测资料分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12):2299-2306.
CHENG Zhanlin, PAN Jiajun. Analysis of monitoring data of stress and deformation for Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12):2299-2306.
- [8] 金建峰,方绪顺,朱航威,等. 闲林水库混凝土面板堆石坝蓄水初期实测性态分析[J]. 大坝与安全, 2019, (1): 40-44,49.
JIN Jianfeng, FANG Xushun, ZHU Hangwei, et al. Analysis on measured behavior of Xianlin concrete face-slab rockfill dam during initial impoundment[J]. Dam & Safety, 2019, (1):40-44,49.
- [9] 吕高峰,邓邦龙. 面板坝周边缝三向测缝计测值异常分析及建议[J]. 人民长江, 2017, 48(6):92-94.
LÜ Gaofeng, DENG Banglong. Analysis of monitoring value anomaly for three directions joint meter on peripheral joint in CFRD and suggestions[J]. Yangtze River, 2017, 48(6):92-94.
- [10] 何鲜峰,汪自力,何启. 寒冷地区面板堆石坝施工期面板开裂原因[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 68-74.
HE Xianfeng, WANG Zili, HE Qi. Cause analysis of face cracking of a CFRD during construction period in cold regions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3):68-74.
- [11] 梁希林,赵波,李敬玮,等. 寒冷地区结冰现象对混凝土面板堆石坝接缝止水体系的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(2):146-150.
LIANG Xilin, ZHAO Bo, LI Jingwei, et al. Study of icing effect on water-stop systems of concrete face rockfill dams in cold areas[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(2):146-150.
- [12] 刘万新,付平. 高寒狭窄河谷高面板堆石坝变形控制[J]. 水利水电工程设计, 2014, 33(4):1-2,38.
LIU Wanxin, FU Ping. Deformation control of high concrete face rockfill dam in narrow valley[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 1-2, 38.
- [13] 熊海华,徐耀,贾金生,等. 高混凝土面板堆石坝面板挤压破坏分析[J]. 水力发电, 2015, 41(1):27-30.
XIONG Haihua, XU Yao, JIA Jinsheng, et al. Analysis on face slab extruding rupture of high CFRDs[J]. Water Power, 2015, 41(1):27-30.
- [14] 郝巨涛. 高混凝土面板堆石坝面板水平向挤压破坏研究[J]. 水力发电, 2011, 37(3):23-27.
HAO Jutao. Research on horizontal spalling failure of concrete slab in high CFRD[J]. Water Power, 2011, 37(3):23-27.
- [15] 邓宗才,张永方,徐海滨,等. 纤维素纤维混凝土早期抗裂与抗渗性能试验[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6):10-13,46.
DENG Zongcai, ZHANG Yongfang, XU Haibin, et al. Experimental study on early anti-cracking and permeability resistance of cellulose fiber reinforced concrete[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(6):10-13,46.