

寒冷地区面板堆石坝施工期面板开裂原因

何鲜峰^{1,2},汪自力^{1,2},何启³

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003;

2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心,河南 郑州 450003; 3. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对寒区面板堆石坝施工期面板开裂问题,结合某实际工程,在原型监测基础上,通过结构变形、气温变化、水化温升、自身收缩等方面的计算分析,发现水化温升与环境温差是影响累积降温温差的主要因素,当累积降温温差较大时,混凝土内的温度应力可能超出面板混凝土的抗拉强度,导致面板开裂。因此,针对年度温差较大、混凝土浇筑期水化升温较高的工程,提出了避免此类温度裂缝的处理建议,如优化混凝土配合比,优化施工工序,提高混凝土抗裂能力。

关键词:混凝土面板;施工期;面板开裂;裂缝成因;寒冷地区;收缩变形;温度应力

中图分类号:TV641.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)03-0068-07

Cause analysis of face cracking of a CFRD during construction period in cold regions//HE Xianfeng^{1,2}, WANG Zili^{1,2}, HE Qi³(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. MWR Center for Levee Safety and Disease Prevention Engineering and Technology Research, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the face cracking of a CFRD during construction in cold regions, the structural deformation, temperature variation, hydration temperature rise and its own shrinkage were analyzed with an actual project based on prototype monitoring. It is found that the highest value of the hydration temperature rise and the maximum temperature difference in the later cooling is the main factor affecting the temperature difference of cumulative cooling. When the temperature difference of the cumulative cooling is larger, the temperature stress may exceed the tensile strength of the panel concrete, causing panel cracking. Suggestions for avoiding temperature cracks were put forward for construction projects with larger annual temperature difference and higher hydration temperature during the concrete pouring period, such as optimizing the concrete mix ratio, optimizing the construction process and improving concrete crack resistance.

Key words: concrete face slab; construction period; face slab cracking; cause of cracks; cold region; shrinkage deformation; temperature stress

混凝土面板堆石坝因其对地形和地质条件的适应能力强、施工方便、投资节省、工期较短、运行安全性高、抗震性能好等优点,在国内得到广泛应用^[1-3]。截至2015年底,全国已建坝高超过30m的面板堆石坝约270座,在建约60座,拟建约80座,总数超过400座^[4],其中坝高超过100m的有70余座^[5]。面板堆石坝的诸多优点使得该坝型在西北寒冷地区也越来越受青睐。目前,仅新疆地区就已建面板堆石坝4座,拟建2座。混凝土面板作为面板堆石坝防渗体系的主要组成部分,在设计、施工及管理备受工程人员关注^[6-10]。特别是在寒冷地区,由于昼夜温差大,空气相对湿度小,水分蒸发量大,加之设计和施工中多种不利因素的影响,致使混凝土面板开

裂问题一直困扰着工程技术人员^[11-13]。笔者拟结合某工程实例,就混凝土面板堆石坝施工期开裂原因进行分析,并探讨其防治办法。

1 工程概况

某水库为IV等小(I)型工程,总库容436.67万m³。坝址位于北纬43°17'18",坝址区昼夜温差大,年均气温5.3℃,极端最高气温36.4℃,最低气温-27℃。大坝为混凝土面板砂砾石坝,坝顶高程1600.33m,最大坝高54.66m,坝轴线长217m,顶宽6m。上游坝坡坡比为1:1.6,下游坡比为1:1.5,并设两级2m宽马道。防渗钢筋混凝土面板厚0.4m,混凝土等级为C30S300W8。面板混凝土设计配合比见

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401610);黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2014-04, HKY-JBYW-2017-21)
作者简介:何鲜峰(1974—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水工结构安全研究。E-mail:hexf7403@126.com

表1。混凝土所用水泥为 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,各项性能指标见表2;为改善和易性、降低水化热,在混凝土中掺入一定量的 I 级粉煤灰,粉煤灰各项性能指标检测结果见表3;在混凝土中掺加少量矿渣,矿渣各项性能指标检测结果见表4;细骨料采用细度模数为 2.8 的河沙,粗骨料为两级配卵石,最大粒径分别为 20 mm、40 mm,级配比例为 3 : 7,粗细骨料的物理特性见表5、表6。所用高效减水剂的相关指标如下:沁水率为 42%,减水率为 14%,初凝时间为 45 min,终凝时间为 100 min。

表1 面板混凝土设计配合比 kg

材料	水泥	粉煤灰	矿粉	水	砂子	小石	中石	NF 高效 减水剂	CAS-I 引气剂
质量	252	72	36	135	634	589	589	2.87	0.0277

表2 水泥各项性能指标

指标	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		凝结时间/min		细度 (80 μm 筛余)/%	安定 性
	3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝		
检测值	≥3.5	≥6.5	≥17	≥42.5	≥45	≤600	≤10	合格

表3 粉煤灰品质检测结果

测试 内容	细度 (45 μm 方孔筛余)/%	需水量 比/%	烧失量/%	含水量/%	SO ₃ 质量 分数/%
检测值	≤12.0	≤95	≤5.0	≤1.0	≤3.0

大坝上游面板共分 35 块,坡度为 1 : 1.6。其中,左右岸斜坡面板宽 6 m,主河床部位面板宽 12 m,所有面板只设纵缝,不设水平缝,面板最大长度为 86.6 m。

该坝面板混凝土浇筑采用跳仓法无轨滑模施工,混凝土搅拌站至施工现场间以混凝土罐车运输。来料经溜槽自流入仓,塌落度为 50 ~ 70 mm,分层布料,每层布料厚 25 ~ 30 cm。仓内混凝土摊平后使用振捣器垂直于坡面振捣,振捣间距不大于 40 cm。模板平均滑升速度为 1.0 ~ 1.5 m/h,每次滑升幅度为

表4 矿渣品质检测结果

测试内容	比表面积/(m ² · kg ⁻¹)	氯离子质量分数/%	烧失量/%	含水量/%	SO ₃ 质量分数/%	密度/(g · cm ⁻³)	流动性/%
检测值	≥300	≤0.06	≤3.0	≤1.0	≤4.0	≥2.8	≤95

表5 细骨料物理特性

测试内容	表观密度/ (g · m ⁻³)	堆积密度/ (g · m ⁻³)	SO ₃ 质量 分数/%	轻物质 含水量/%	云母质量 分数/%	含泥量/%	坚固性/%	有机物含量	泥块质量 分数/%
检测值	≥2.5	≥1.4	≤0.5	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤8	合格	0

表6 粗骨料物理特性

测试内容	表观密度/ (g · m ⁻³)	含泥量/%	泥块质量 分数/%	针、片状颗 粒质量分数/%	压碎值/%	坚固性/%	吸水率/%	有机物含量
5 ~ 20 mm 粒组	2.725	0.1	0	3.6	7.3	4	0.27	合格
20 ~ 40 mm 粒组	2.683	0.4	0	2.4	7.5	4	0.27	合格
标准值	≥2.6	≤0.5	0	≤5	≤12	≤5	≤1.0	合格

20 ~ 30 cm,滑升间隔时间不超过 30 min。

主坝面板自 2013 年 4 月下旬开始浇筑,在 8 月中旬的检查中发现面板混凝土有不同程度开裂现象。当年 10 月中旬对所有面板开裂情况进行检查,共发现不同宽度裂缝 97 条,基本为水平缝,最大缝宽 0.38 mm,裂缝间距 5 ~ 8 m,其中 20 号、21 号面板分别出现 6 条和 7 条裂缝,裂缝间距 7 m 左右,最大缝宽 0.2 mm。

2 面板监测

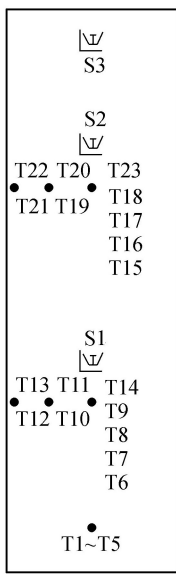
2.1 监测布置

为监测施工期面板混凝土内部温度和应变变化规律,选择主河床部位宽 12 m、长 86.6 m 的 20 号及 21 号面板,在内部埋设温度计和应变计。测点埋设高程分别为 1 555.00 m、1 563.35 m、1 575.00 m 及 1 586.65 m。20 号面板典型测点埋设位置见图 1,21 号面板测点布置方式与 20 号面板相同,仪器编号依序递增,如 S4、S5、S6 为 21 号面板的应变计组。

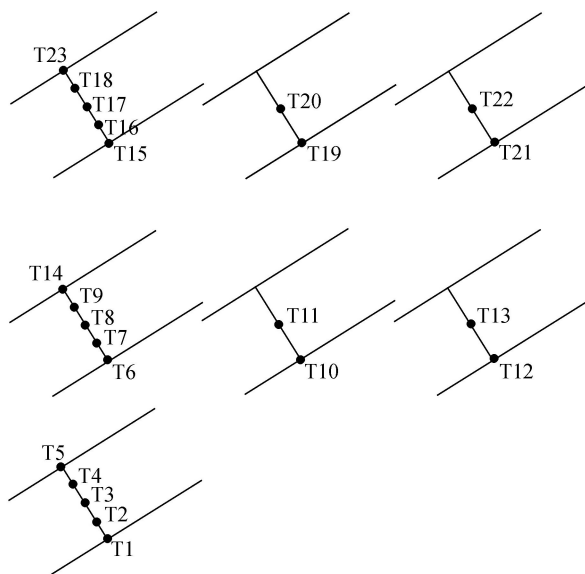
2.2 监测成果分析

a. 温度变化。20 号面板于 2013 年 5 月 20 日 16:00 开始浇筑,5 月 22 日 23:00 浇筑完毕;21 号面板于同年 6 月 11 日 8:00 开始浇筑,6 月 12 日 17:00 浇筑完毕。上述面板浇筑后混凝土温度变化曲线见图 2。监测数据表明,20 号面板混凝土浇筑时,入仓温度为 18.8 ~ 19.2℃,在浇筑 21 h 后,板内温度升至最高温度 28.7℃,水化温升约为 9.9℃。21 号面板混凝土浇筑时,入仓温度为 21.0 ~ 21.9℃,在浇筑 10 h 后板内温度升至最高温度 35.3℃,水化温升约为 13.5℃。面板温度在达到最大水化温度后开始缓慢下降,经 2 ~ 3 d 后基本降至正常水平。

面板温度变化曲线显示,相同高程的测点,其最低温度随埋设深度的增加而升高,最高温度则相反。



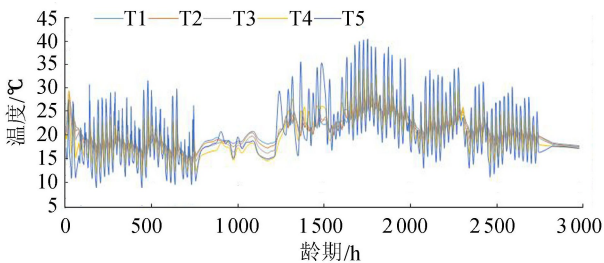
(a) 平面



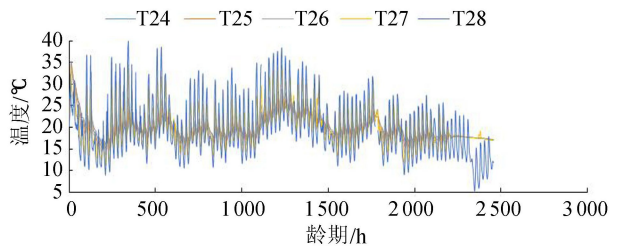
(b) 剖面

T—温度计;S—应变计组

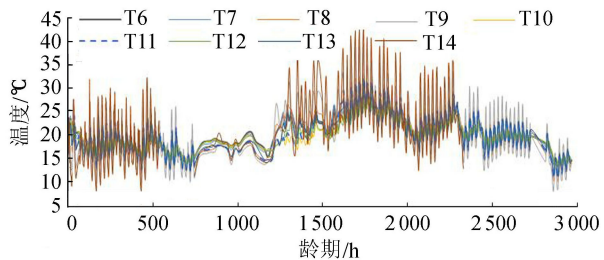
图1 20号面板混凝土监测点布置示意图



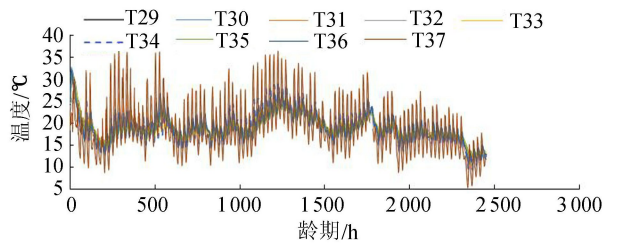
(a) 1555.00m高程(20号面板)



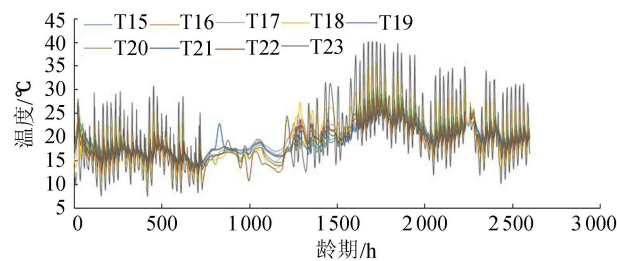
(b) 1555.00m高程(21号面板)



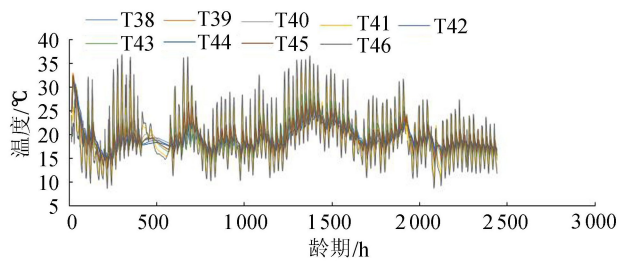
(c) 1563.35m高程(20号面板)



(d) 1563.35m高程(21号面板)



(e) 1575.00m高程(20号面板)



(f) 1575.00m高程(21号面板)

图2 不同高程面板混凝土水化升温曲线

其中,20号面板1555.00m高程由底至表的最低温度为13.6~7.3℃,最高温度为26.2~40.3℃;1563.35m高程由底至表最低温度为12.7~7.0℃,最高温度为25.6~40.5℃;1575.00m高程由底至表最低温度为17.2~10.1℃,最高温度为25.7~41.9℃。21号面板1555.00m高程由底至表最低温度为15.6~

5.3℃,最高温度为25.7~40.0℃;1563.35m高程由底至表最低温度为12.4~5.3℃,最高温度为24.2~36.8℃;1575.00m高程由底至表最低温度为13.0~7.5℃,最高温度为25.3~39.1℃。

测点温度变幅分析表明,同一高程测点温度变幅随着埋设深度的增加而降低。20号面板1555.00m

高程由底至表温度变幅为 12.6 ~ 33.0℃, 1563.35 m 高程由底至表温度变幅为 12.9 ~ 33.5℃, 1575.00 m 高程由底至表温度变幅为 8.5 ~ 31.8℃; 21 号面板 1555.00 m 高程由底至表温度变幅为 10.1 ~ 34.7℃, 1563.35 m 高程由底至表温度变幅为 11.7 ~ 31.5℃, 1575.00 m 高程由底至表温度变幅为 12.3 ~ 31.6℃。

在 20 号、21 号面板的浇筑及养护期内, 环境温度变化过程见图 3。其中, 日最高气温 39.5℃, 最低气温 5.2℃, 昼夜温差变化范围为 4.0 ~ 29.8℃, 这期间共计发生 2 次日平均气温降幅超过 5℃ 的寒潮。第 1 次日均气温降幅为 6.3℃, 日最高气温由 30.5℃ 降为 19.7℃; 第 2 次日均气温降幅为 6.4℃, 日最高气温由 23.0℃ 降为 13.0℃。

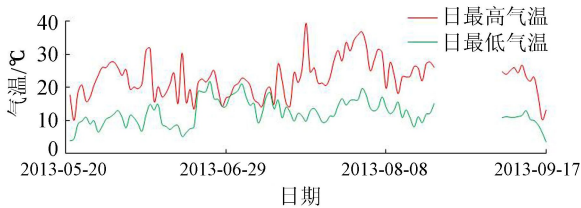


图 3 面板浇筑养护期气温变化过程

b. 应变变化。应变监测数据表明, 各监测断面水平向和顺坡向应变计测值的变化基本与温度呈正相关关系, 应变测值随温度的上升而增大, 随温度的降低而减小。

20 号面板, 水平向应变计中, 1563.35 m 高程处 S1-1 最大拉应变量为 126×10^{-6} , 1586.65 m 高程处 S3-1 最大拉应变量为 115×10^{-6} ; 顺坡向应变计中, 1586.65 m 高程处 S3-2 最大拉应变量为 102×10^{-6} 。21 号面板, 水平向应变计中, 1563.35 m 高程处 S4-1 最大拉应变量为 100×10^{-6} , 1575.00 m 高程处 S5-1 最大拉应变量为 99×10^{-6} ; 顺坡向应变计中, 1563.35 m 高程处 S4-2 最大拉应变量为 142×10^{-6} , 1575.00 m 高程处 S5-2 最大拉应变量为 120×10^{-6} , 1586.365 m 高程处 S6-2 最大拉应变量为 99×10^{-6} 。

3 温度收缩及裂缝成因分析

混凝土开裂原因主要有荷载裂缝和非荷载裂缝两大类。该工程面板混凝土在开裂之前尚未受到水荷载作用, 因此可以排除当前裂缝是由荷载引起。对非荷载裂缝而言, 结构变形、温度变化、收缩变形等都是混凝土开裂的诱发因素。然而该工程的坝体填筑质量较好, 坝体填筑料的压实度均在设计控制范围之内, 且在面板混凝土施工之前, 坝体已有 1 年以上的自然沉降, 实测数据显示, 自坝体填筑到顶至裂缝观测日, 大坝最大沉降量不到 10 mm, 坝体变形

不大。由此分析, 自身收缩、温度收缩和边界约束是造成面板混凝土开裂的主要影响因素。

3.1 收缩变形

混凝土作为一种当前广泛使用的人造建筑材料, 通常由水泥、砂、粗骨料混合胶结而成。混凝土在混合、搅拌和浇筑过程中, 内部产生大量的空隙、微孔和毛细管, 这些空隙中充盈着水分。混凝土在凝固过程中, 水泥石中的一部分水分参与到水泥的水化反应被消耗掉; 另一部分水分在毛细孔的毛细管张力和凝胶孔内表面张力作用下向混凝土表面迁移蒸发, 造成水泥石的脱水收缩。而水泥石中砂和粗骨料的脱水收缩量极小, 对水泥石的脱水收缩造成约束。这种脱水收缩过程开始于混凝土结构裸露的表面, 越靠近结构内部, 脱水收缩程度越小, 由于结构内外收缩程度的差异, 在结构内部又产生相互约束。当结构的收缩程度超过内部约束能力时, 结构将出现裂缝。混凝土的收缩量可通过下式计算^[14]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_y^0(\infty) M_1 M_2 M_3 M_4 M_5 M_6 M_7 M_8 M_9 M_{10} (1 - e^{-bt}) \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_y^0(\infty)$ 为标准状态下的极限收缩, 取 3.24×10^{-4} ; M_1 为水泥品种修正系数, 该工程使用的是普通水泥, 取 $M_1 = 1.0$; M_2 为水泥细度修正系数, 该工程所使用水泥细度为 3000, 取 $M_2 = 1.0$; M_3 为骨料岩性修正系数, 该工程所使用骨料岩性为花岗岩, 取 $M_3 = 1.0$; M_4 为水灰比修正系数, 该工程混凝土配合比中水灰比为 0.375, 取 $M_4 = 0.792$; M_5 为水泥浆量修正系数, 该工程水泥浆量为 21.6%, 取 $M_5 = 1.064$; M_6 为初期养护时间修正系数, 该工程自然养护 14 d, 取 $M_6 = 1.0$; M_7 为环境湿度修正系数, 该工程施工期环境湿度为 45%, 取 $M_7 = 1.05$; M_8 为水力半径倒数修正系数, 该工程水力半径倒数为 0.025 cm^{-1} , 取 $M_8 = 0.591$; M_9 为操作条件修正系数, 该工程采用机械振捣, 取 $M_9 = 1.0$; M_{10} 为配筋率模量比修正系数, 该工程配筋率模量比为 0.0445, 取 $M_{10} = 0.875$; b 为经验系数, 取 0.01; t 为计算龄期。

根据 GB50496—2009《大体积混凝土施工规范》, 当混凝土中掺加粉煤灰和矿渣时, 混凝土的收缩会发生变化, 考虑掺加粉煤灰和矿渣时的修正系数分别为 M_{11} 、 M_{12} 。该工程粉煤灰掺量为 20%, 矿渣粉掺量 10%, 取 $M_{11} = 0.86$, $M_{12} = 1.005$ 。

由于该工程中每条裂缝的出现时间不曾准确观测, 裂缝是在后期养护过程中发现并统计的, 此时开裂面板的龄期基本在 28 ~ 150 d 之间。因此, 利用上述参数, 分别对 28 d、60 d、90 d、120 d 和 150 d 龄期的面板混凝土收缩量进行计算, 结果分别为 3.562×10^{-5} 、 6.581×10^{-5} 、 8.656×10^{-5} 、 10.193×10^{-5} 、 11.332×10^{-5} 。

3.2 混凝土累积降温温差

混凝土的累积降温温差 ΔT 可表示为

$$\Delta T = T_1(t) + T_2 + T_3 \quad (2)$$

式中: $T_1(t)$ 为不同龄期混凝土收缩当量温差; T_2 为水化温升; T_3 为环境温度差。

3.2.1 收缩当量温差

混凝土的收缩当量温差可由下式计算:

$$T_1(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\alpha} \quad (3)$$

式中: α 为混凝土的线膨胀系数, 取 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5}$ 。

将 3.1 节中混凝土收缩量计算结果代入式(3), 可得面板混凝土 28 d、60 d、90 d、120 d、150 d 龄期的收缩当量温差分别为 3.6℃、6.6℃、8.7℃、10.2℃、11.3℃。

3.2.2 水化温升及环境温度差

在温度应力分析中, 主要考虑面板累积降温温差引起的约束应力。监测数据显示, 20 号面板和 21 号面板浇筑后混凝土内部最高水化温升分别为 28.7℃ 和 35.3℃, 取平均值 32.0℃。自面板混凝土开始浇筑至裂缝出现, 面板经历的最低环境温度为 5.2℃, 即最大环境温度差为 -5.2℃。由此得到总温降为 $T_2 + T_3 = 32.0^\circ\text{C} - 5.2^\circ\text{C} = 26.8^\circ\text{C}$ 。

3.2.3 累积降温温差

根据收缩当量温差、水化温升及环境温度差计算值, 由式(2)可得混凝土 28 d、60 d、90 d、120 d、150 d 的累积降温温差分别为 30.4℃、33.4℃、35.5℃、37.0℃、38.1℃; 不同龄期水化温升与环境温差占累积降温温差的比例 η 分别为 88%、80%、75%、72%、70%。由此可见, 水化温升与环境温差是影响累积降温温差的主要因素。

3.3 温度收缩应力应变

随着混凝土内外温度的变化, 在边界约束和累积降温温差共同作用下的最大温度正应力可近似由下式计算^[16-17]:

$$\sigma_{\max} = -E_c \alpha \Delta T \left[1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{\beta L}{2}\right)} \right] H(t) \quad (4)$$

其中 $E_c = E_0(1 - e^{-0.09t})$

式中: E_c 为混凝土弹性模量; E_0 为混凝土最终弹性模量, 取 $3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$; β 为综合计算系数, 根据参

考文献[17]求得; $H(t)$ 为混凝土应力松弛系数, 当 $t = 28 \text{ d}$ 时, $H(t) = 0.3306$, 当 $t > 40 \text{ d}$ 时, 取 $H(t) = 0.283$; L 为顺坡面板长, $L = 86400 \text{ mm}$ 。

根据上述参数, 计算得到 28 d、60 d、90 d、120 d、150 d 的混凝土面板顺坡向和水平向最大拉应力分别为 2.49 MPa 和 0.15 MPa、2.48 MPa 和 0.14 MPa、2.64 MPa 和 0.15 MPa、2.75 MPa 和 0.16 MPa、2.83 MPa 和 0.16 MPa, 相应的拉应变见表 7。计算结果表明, 不同龄期面板混凝土的顺坡向最大拉应力均超过其抗拉极限强度 2.01 MPa, 而水平向最大拉应力均小于其抗拉极限强度。因此, 面板混凝土仅出现水平裂缝而基本未出现竖缝。计算拉应变与实测值基本一致, 也进一步印证了计算结果的正确性。

3.4 裂缝间距

面板水平裂缝的最大、最小缝间距可近似由以下公式^[16]计算:

$$L_{\max} = \frac{2}{\beta} \operatorname{arccosh}\left(\frac{\alpha |\Delta T|}{\alpha |\Delta T| - \varepsilon_p}\right) \quad (5)$$

$$L_{\min} = \frac{1}{\beta} \operatorname{arccosh}\left(\frac{\alpha |\Delta T|}{\alpha |\Delta T| - \varepsilon_p}\right) \quad (6)$$

式中: ε_p 为弹性极限拉伸应变。由此计算得到面板水平裂缝的最大、最小缝间距见表 7。实测缝间距为 5~8 m, 且大部分集中在 7 m 左右, 与计算结果基本一致。

3.5 裂缝成因分析

导致混凝土面板坝面板开裂的原因较多, 如坝体沉降过大、面板施工期环境温度剧烈变化、混凝土自身质量或施工质量低劣等, 总体上可归纳为结构因素、混凝土自身因素和施工因素 3 个方面。就该工程而言, 自面板施工开始至裂缝出现, 坝体沉降在 10 mm 以内, 沉降变形不足以造成面板开裂。前述计算分析表明, 混凝土水化温升以及环境温度差引起的累积降温温差大是造成该工程面板混凝土开裂的主要原因。

首先, 面板混凝土浇筑时外部气温偏高, 使得入仓温度较高, 再加上水泥的水化温升, 造成混凝土内部浇筑期温度相对偏高。

其次, 施工过程中混凝土拆模后盖毡和洒水养护不及时, 而当地中午及下午气温又较高, 空气湿度相对较低, 造成混凝土表层失水过快, 自身收缩较

表 7 面板温度收缩及裂缝计算成果

龄期/d	收缩量/ 10 ⁻⁵ m	收缩当量 温差/℃	累积降温 温差/℃	顺坡向 拉应力/MPa	水平向 拉应力/MPa	顺坡向 拉应变/10 ⁻⁶	水平向 拉应变/10 ⁻⁶	最大缝 间距/m	最小缝 间距/m
28	3.562	3.6	30.4	2.49	0.15	85	5	16.9	8.5
60	6.581	6.6	33.4	2.48	0.14	78	4	16.7	8.3
90	8.656	8.7	35.5	2.64	0.15	83	5	16.2	8.1
120	10.193	10.2	37.0	2.75	0.16	86	5	15.8	7.9
150	11.332	11.3	38.1	2.83	0.16	89	5	15.5	7.8

大。同时,监测结果表明,坝址区昼夜温差大,加之施工后期气温骤降,在混凝土内部和表面形成较大温度梯度,产生超出混凝土抗拉强度的温度应力,并导致混凝土开裂。这种后期气温较低,造成混凝土后期温度与浇筑期温度出现较大温差,致使出现较大温度应力的现象,在实际工程中往往因混凝土龄期较长,混凝土强度已相对较高而容易被忽略,但造成的危害不容忽视^[18-23]。此外,施工工序安排不当也是导致面板开裂的另一个重要原因。为了释放混凝土的温度收缩应力,减小混凝土温度收缩对面板的约束作用,避免和减少面板混凝土可能出现的裂缝,规范^[24]要求较长的面板施工时要分期浇筑,并设置水平施工缝。但该工程采用一次施工成型工艺,没有设置施工缝,从而加大了混凝土温度收缩对面板的纵向约束作用,导致内部拉应力增大。

4 结 语

对填筑质量较好的坝体,自身收缩、水化温升、后期环境温差之和是导致高寒地区混凝土面板坝面板开裂的主要原因。对寒区混凝土面板而言,水化最大温升与后期最低气温之间的温差产生的温度应力容易被工程技术人员忽视,而这种忽视有时会产生严重的不良后果。因此,针对年度温差较大、混凝土浇筑期水化温升较高的工程,提出以下几点建议:

a. 优化混凝土配合比,提高混凝土的抗拉强度,降低水化温升。在混凝土配合比设计时,结合工程要求,在混凝土中掺加适量的粉煤灰和矿渣粉,以降低混凝土的最大温升。

b. 优化施工工序,控制最大温升。在跳仓施工的同时,对较长的面板,应结合实际合理设置水平施工缝,以降低混凝土面板温度收缩造成的约束作用。必要时,采取措施控制入仓温度,以减小混凝土内部最大温升。

c. 提升混凝土抗裂能力,加强施工养护。在设计面板混凝土时,可通过优化设计以提高混凝土的抗拉强度,必要时可适当增加钢纤维或碳纤维材料。混凝土浇筑后,应及时开展混凝土的养护工作。在混凝土初凝后,应通过在其表面覆毡淋水或覆盖塑料薄膜,以及使用养护剂涂层等措施,加强混凝土的保湿养护作用。

参考文献:

[1] MA H, CHI F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams [J]. Engineering, 2016, 2(3): 332-339.
 [2] 吴毅瑾,邹青,谭志伟,等. 中国面板堆石坝安全监测

技术进展[J]. 水电与抽水蓄能,2017,3(1):24-31. (WU Yijin, ZOU Qing, TAN Zhiwei, et al. China concrete faced rock-fill dam safety monitoring technology progress[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, 3(1): 24-31. (in Chinese))
 [3] 束一鸣,吴海民,姜晓桢. 高面膜堆石坝发展的需求与关键技术:高面膜堆石坝关键技术(一)[J]. 水利水电科技进展,2015, 35(1): 1-9. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen. Need and key technology on development of high membrane faced rockfill dam: key technology of high membrane faced rockfill dam(I) [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 1-9. (in Chinese))
 [4] 杨泽艳,周建平,王富强,等. 中国混凝土面板堆石坝发展 30 年[J]. 水电与抽水蓄能,2017,3(1):1-5. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, WANG Fuqiang, et al. The 30 years' development of concrete face rockfill dam in China [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, 3(1):1-5. (in Chinese))
 [5] 沈凤生. 混凝土面板堆石坝设计与实践关键技术研究 [J]. 水利规划与设计, 2017(1): 1-6. (SHEN Fengsheng. Key technologies for design and practice of concrete face rockfill dam [J]. Water Conservancy Planning and Design, 2017(1):1-6. (in Chinese))
 [6] 顾玉川. 堆石坝面板裂缝分析和处理[J]. 水利建设与管理, 2010(9): 18-20. (GU Yuchuan. Analysis and treatment of the cracks in the face slab of the rockfill dam [J]. Water Conservancy Construction & Management, 2010(9):18-20. (in Chinese))
 [7] 王子健,刘斯宏,李玲君,等. 公伯峡面板堆石坝面板裂缝成因数值分析[J]. 水利学报,2014,45(3):343-350. (WANG Zijian, LIU Sihong, LI Lingjun, et al. Numerical analysis of the causes of slab' s cracks on Gongboxia face rockfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3):343-350. (in Chinese))
 [8] 赵雅睿. 某拦河坝面板混凝土防裂及裂缝处理技术 [J]. 河南水利与南水北调,2017(6):67-68. (ZHAO Yarui. Crack prevention and treatment technology for concrete face slab of a certain dam [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2017(6): 67-68. (in Chinese))
 [9] 李斌,孟宪磊,王磊,等. 一次成型与分期成型面板混凝土施工与防裂措施探讨[J]. 水电与抽水蓄能,2018(2):8-13. (LI Bin, MENG Xianlei, WANG Lei, et al. Discussion on concrete construction and crack prevention measures of faced concrete dam with single-time and multi-stagescasting [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2018(2):8-13. (in Chinese))
 [10] 罗井伦. 天生桥一级水电站堆石坝面板破损分析[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(6): 76-79. (LUO Jinglun. The breakage analysis of concrete panel in Tianshengqiao-1 Hydropower Station [J]. Advances in

- Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (6):76-79. (in Chinese))
- [11] 赵庆, 苗喆, 李学强. 高寒、高蒸发地区面板坝钢筋混凝土面板防裂抗裂技术探讨[J]. 西北水电, 2014(4):29-32. (ZHAO Qing, MIAO Zhe, LI Xueqiang. Study on technology of crack prevention and resistance of reinforced concrete face of dam in high-cold and high-evaporation region[J]. Northwest Hydropower, 2014(4):29-32. (in Chinese))
- [12] 郭海志, 刘儒. 高寒地区混凝土面板堆石坝渗漏原因分析及治理[C]//中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会. 高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展论文集. 北京:中国水利水电出版社, 2013: 151-157.
- [13] 郇能惠, 王君利, 米占宽, 等. 高混凝土面板堆石坝变形安全内涵及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 193-201. (LI Nenghui, WANG Junli, MI Zhankuan, et al. Connotation of deformation safety of high concrete face rockfill dams and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2):193-201. (in Chinese))
- [14] 冶金工业部建筑研究总院. 块体基础大体积混凝土施工技术规程: YBJ224—1991[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [15] 中冶建筑研究总院有限公司. 大体积混凝土施工规范: GB50496—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [16] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [17] 徐荣年. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 赵石进, 林祖昌, 陶燕, 等. 某超长结构温度应力分析及应用[J]. 低温建筑技术, 2015(1): 87-89. (ZHAO Shijin, LIN Zuchang, TAO Yan, et al. Thermal stress analysis and application of a super long structure[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015(1): 87-89. (in Chinese))
- [19] 焦彬如, 吴彦, 陈黎明, 等. 超长混凝土墙体温度应力计算及裂缝控制新技术研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9):35-41. (JIAO Binru, WU Yan, CHEN Liming, et al. Temperature stress calculation and crack control of long concrete walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9):35-41. (in Chinese))
- [20] 李长凤, 周莉, 徐晓红, 等. 寒冷地区混凝土箱型梁桥温度裂缝研究[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(10):31-34. (LI Changfeng, ZHOU Li, XU Xiaohong, et al. Research of the temperature crack on reinforced box girder in cold region [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013, 35(10):31-34. (in Chinese))
- [21] 郭俊娥. 基于超长混凝土结构的温度效应分析与工程实践研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018, 41(4):46-49. (GUO Jun'e. Research on analysis of temperature variation and engineering practice based on super-long concrete structures [J]. Automation & Instrumentation, 2018, 41(4):46-49. (in Chinese))
- [22] 杨竣, 王晓东. 超长结构中的温度应力分析[J]. 山西建筑, 2015(22):37-38. (YANG Jun, WANG Xiaodong. On temperature stress analysis in super-long structures [J]. Shanxi Architecture, 2015(22): 37-38. (in Chinese))
- [23] 孙文, 吴亚平, 季日臣. 干寒地区太阳辐射影响下箱型梁温度效应分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1):65-69. (SUN Wen, WU Yaping, JI Richen. Analysis of temperature effect of box girder under solar radiation in dry cold region [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 65-69. (in Chinese))
- [24] 中华人民共和国水利部. 混凝土面板堆石坝设计规范: SL228—2013[S]. 北京: 水利水电出版社, 2013. (收稿日期:2018-05-02 编辑:骆超)

(上接第 61 页)

- [23] MOORE W L, MASCH F D. Experiments on the scour resistance of cohesive sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 67(4):1437-1446.
- [24] PATERSON D M. Short-term changes in the erodibility of intertidal cohesive sediments related to the migratory behavior of epipellic diatoms [J]. Limnology & Oceanography, 1989, 34(1): 223-234.
- [25] LIU X, ZHENG J, ZHANG H, et al. Sediment critical shear stress and geotechnical properties along the modern Yellow River Delta, China [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017(10): 1-8.
- [26] BLACK K, CRAMP A. A device to examine the in situ response of intertidal cohesive sediment deposits to fluid shear[J]. Continental Shelf Research, 1995, 15(15): 1945-1954.
- [27] WATTS C W, TOLHURST T J, BLACK K S, et al. In situ measurements of erosion shear stress and geotechnical shear strength of the intertidal sediments of the experimental managed realignment scheme at Tollesbury, Essex, UK [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 58(3): 611-620.
- [28] 朱正雷. 便携式泥沙起动测量仪器改进与优化研究[D]. 南京: 河海大学, 2017.
- [29] ANSYS INC. Ansys fluent 14.0 theory guide [M]. Canonsburg: ANSYS Inc, 2011.
- [30] GHARABAGHI B, KRISHNAPPAN B G, RUDRA R P. Flow characteristics in a rotating circular flume[J]. Open Civil Engineering Journal, 2007, 1(1): 30-36. (收稿日期:2018-10-10 编辑:雷燕)