

仙游抽水蓄能电站上水库主坝面板混凝土配合比及抗裂性能研究与应用

胡应新¹, 赵正², 刘天云¹, 施慧聪², 姚欣², 戴立琼²

(1. 葛洲坝集团 三峡实业公司, 湖北 宜昌 443000; 2. 上海罗洋新材料科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 仙游抽水蓄能电站上水库主坝为混凝土面板堆石坝, 最大坝高72.6 m。为提高其面板混凝土抗裂性能, 对四种抗裂方案进行对比试验研究。结果表明: 掺纤维素纤维混凝土的坍落度及含气量损失率较小, 抗拉强度和极限拉伸值最高, 弹性模量较低; 纤维素纤维混凝土抗裂性能最好, 与基准相比, 减裂率达到85.6%, 而增密剂和抗裂剂分别为17.3%和30.5%。经综合分析混凝土各项性能研究结果, 最终采取纤维素纤维混凝土设计方案。混凝土面板在下闸蓄水前仅在中间分块出现少数小于0.2 mm的裂缝, 并按照设计要求进行了处理, 面板混凝土质量符合设计及规范要求, 满足下闸蓄水要求。

关键词: 纤维素纤维混凝土; 混凝土面板堆石坝; 面板混凝土; 抗裂性能; 仙游抽水蓄能电站

中图分类号: TV43

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860(2013)02-0051-04

Study on mixing ratio and anti-cracking performance of face slab concrete for dam of upper reservoir of Xianyou Pumped Storage Hydropower Station and its application

HU Yingxin¹, ZHAO Zheng², LIU Tianyun¹, SHI Huicong², YAO Xin², DAI Liqiong²

(1. Gezhouba Group Sanxia Industrial Co., Yichang 443000, Hubei, China;

2. Shanghai Royang Innovative Material Technologies Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The main dam of the upper reservoir of Xianyou Pumped Storage Hydropower Station is a concrete face rock-fill dam with the maximum height of 72.6 m. In order to improve the anti-cracking performance of the concrete for its face-slab, a comparative experiment is made on four anti-cracking schemes. The result shows that the loss ratios of both the slump and air content of the concrete mixed with cellulose fiber are less, moreover, the tensile strength, ultimate tensile value are highest with a lower elastic modulus. Compared with the reference concerned, the anti-cracking performance is best with the crack-reducing ratio up to 85.6%, while the contents of concrete densifying agent and anti-cracking agent are 17.3% and 30.5% respectively. Through a comprehensive analysis on the study results of all the relevant performances of the concrete, the design scheme of the concrete mixed with cellulose fiber is finally adopted. Generally, only a few cracks with the width less than 0.2 mm are found within the mid-blocks of the face-slab before the impoundment of the reservoir, which are immediately disposed in accordance with the design requirement, thus the quality of the concrete for the face-slab can meet the design requirement and the relevant specifications, and then satisfy the requirement of the impoundment the reservoir as well.

Key words: cellulose fiber concrete; concrete face rock-fill dam; face-slab concrete; anti-cracking performance; Xianyou Pumped Storage Hydropower Station

1 概述

仙游抽水蓄能水电站为周调节抽水蓄能电站, 电站装机容量为1 200 MW(4 × 300 MW), 属大(1)型

收稿日期: 2012-07-11

作者简介: 胡应新(1970—), 男, 湖北沙市人, 工程师, 仙游抽水蓄能电站项目部常务副经理。

表1 各种方案的混凝土配合比

编号	水 /kg·m ⁻³	水泥 /kg·m ⁻³	粉煤灰 /kg·m ⁻³	减水剂 /%	引气剂 /10 ⁻⁴	抗裂剂 /kg·m ⁻³	增密剂 /%	纤维 /kg·m ⁻³	砂 /kg·m ⁻³	小石 /kg·m ⁻³	中石 /kg·m ⁻³
C1	144	270	67	1.0	1.6	—	—	—	723	612	612
C2	137	279	70	1.0	1.55	—	2.0	—	726	614	614
C3	141	255	68	1.0	1.3	19	—	—	714	604	604
C4	146	272	68	1.0	1.55	—	—	1.0	720	609	609

注: C1 为基准方案, C2 为增密剂方案, C3 为抗裂剂方案, C4 为纤维方案, 下文同。

水电站。电站上水库主坝为钢筋混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 747.6 m, 顶宽 8.0 m, 坝轴线长 340.0 m, 最大坝高 72.6 m。面板顶部高程 743.6 m, 顶部厚度为 0.3 m, 渐变至面板底部厚度为 0.5 m, 面板设垂直缝, 间距为 12 m, 面板设计用 C25W10F100 混凝土, 坍落度宜 4~7 cm, 适合溜槽施工。

面板混凝土作为堆石坝的主要防渗结构, 其质量对保证大坝的安全运行具有重要的作用。国内外面板堆石坝工程实践表明, 面板混凝土存在普遍的混凝土裂缝问题, 本文旨在研究面板混凝土配合比, 采取合适的方案提高混凝土抗裂性能以及耐久性能。

2 面板混凝土裂缝成因及防裂措施

混凝土裂缝主要是由于拉应力超过其抗拉强度引起, 根据拉应力成因不同, 一般将裂缝分成结构裂缝和收缩裂缝。面板混凝土的结构裂缝主要是由坝体不均匀变形引起; 混凝土收缩裂缝成因包括塑性收缩、干燥收缩、自收缩、温降收缩、碳化收缩等^[1-3]。

为提高面板混凝土的抗裂性能, 从配合比设计角度应尽可能使混凝土具有高抗拉强度、低收缩、低弹模、高极限拉伸特性, 目前工程上主要有以下两种方法: (1) 掺用功能性外加剂, 如减缩剂、膨胀剂、抗裂剂、增密剂等; (2) 掺用纤维。纤维素纤维是新一代工程纤维, 与混凝土相容性好, 不影响混凝土和易性, 同时可以提高混凝土保水性、抗裂性能以及耐久性能, 整体性能超越了传统合成纤维^[4-8]。

3 面板混凝土配合比及试验方法

3.1 面板混凝土性能指标要求

仙游抽水蓄能电站上水库面板混凝土性能指标要求为 C25W10F100, 粗骨料为二级配, 坍落度为 4~7 cm, 含气量宜为 3.5%~4.5%。

3.2 原材料

水泥采用 P. O42.5 级水泥; 粉煤灰采用 F 类 I

级粉煤灰; 骨料采用自产砂石骨料, 砂石骨料级配优良, 砂的细度模数为 3.2; 增密剂选用武汉天衣化工有限公司生产的 WHDF 混凝土增强密实(抗裂)剂, 简称增密剂; 抗裂剂选用江苏博特新材料有限公司生产的 JM-III(A) 抗裂防渗增强剂(类似膨胀剂), 简称抗裂剂; 纤维选用上海罗洋新材料科技有限公司生产的罗赛 RS2000 纤维素纤维, RS2000 具有亲水性好、单位体积混凝土内纤维根数多、与混凝土间的握裹力较强等优点, 可限制混凝土裂缝产生, 提高混凝土抗裂性能以及耐久性能。

3.3 混凝土配合比

如表 1 所列。

3.4 试验方法

混凝土拌和物性能、物理力学性能、干缩试验、耐久性等按照《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2001) 中相关方法测试, 抗裂试验按照 ASTM C1579 测试方法进行。

4 试验研究结果

4.1 拌和物性能

根据表 2 结果表明: C2 方案的混凝土初始坍落度较低, 但其保坍性比 C1 和 C3 方案好, C4 方案混凝土坍落度经时损失较小, 1 h 后仍有 25 mm; 四种方案的混凝土初始含气量较为接近, 但 C1 和 C3 方案经时损失较大, 混凝土施工后无法保证达到设计要求的抗冻性, C2 和 C4 方案含气量经时损失相对较小, 有利于保证混凝土的抗冻性能; C3 方案由于含有缓凝剂, 混凝土初凝时间过长, 对施工存在不利影响, C1、C2 和 C4 方案初凝时间较为合理。综合比较几种混凝土拌和物性能可知, C2 和 C4 方案较好。

4.2 物理力学性能

混凝土的抗裂性与混凝土自身的抗拉强度、极限拉伸值、弹性模量密切相关, 根据方坤河等提出的抗裂指数如下式可知, 混凝土轴拉强度和极限拉伸值越高、弹性模量越低, 混凝土的抗裂指数越高^[9]。

表2 混凝土拌和物性能测试结果

编号	坍落度/mm				含气量/%				初凝时间
	出机	10 min	30 min	60 min	出机	10 min	30 min	60 min	
C1	65	45	30	10	3.6	3.2	2.8	1.5	8 h20 min
C2	50	40	30	20	3.6	3.3	3.1	2.5	7 h37 min
C3	60	45	25	15	3.5	3.2	2.3	1.0	18 h18 min
C4	60	40	35	25	3.9	3.5	3.0	2.5	8 h27 min

$$K = \frac{\varepsilon_p R_t}{\alpha \cdot \Delta T \cdot E_t} \quad (1)$$

式中, K 为抗裂指数; ε_p 为混凝土极限拉伸值; R_t 为混凝土轴拉强度; α 为线膨胀系数; ΔT 为温差值; E_t 为混凝土拉伸弹模。

如表3所列, C4方案的轴心抗拉强度和极限拉伸值比其他方案高, 而弹性模量比其他方案低, 因此C4方案混凝土的综合抗裂性优于其他方案。

表3 混凝土物理力学性能

编号	轴心抗拉强度 /MPa		轴心抗压强度 /MPa		极限拉伸值 / 10^{-4}		弹性模量/GPa	
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
	C1	1.63	1.95	17.0	23.3	0.86	1.05	21.4
C2	1.77	2.13	17.5	23.9	0.89	1.07	21.3	24.0
C3	1.81	2.26	17.2	23.6	0.91	1.09	21.1	24.2
C4	1.92	2.37	16.5	23.1	0.93	1.18	20.8	23.0

4.3 干缩率

如图1所示, 混凝土失水引起的干缩在基础及自身约束下易导致大坝面板开裂, 而且混凝土干缩伴随着混凝土整个龄期, 对结构的耐久性始终产生不利影响, 因而在配制混凝土时应考虑干缩因素。如图1所示, C2、C3和C4方案的28 d干缩率均比基准方案C1小, 其中C3方案由于掺膨胀剂, 补偿了混凝土部分收缩, 因而干缩率较小。

4.4 抗裂性能

混凝土早期裂缝主要是由于混凝土失水收缩并受到约束引起, 混凝土早期抗拉强度较低, 当收缩应力超过抗拉强度时便产生裂缝。混凝土早期裂缝对结构耐久性不利, 早期裂缝加速腐蚀介质侵入、钢筋锈蚀及混凝土碳化, 而且当大坝服役后, 在外力或大坝沉降作用下, 早期裂缝成为面板结构的薄弱点, 裂缝会进一步扩展, 对耐久性的威胁更大。

表4为采用 ASTM C1579 试验方法对各种方案进行混凝土抗裂性能试验的结果, 其中C4方案的抗裂效果最为显著, 不仅延长了混凝土的初裂时

间, 而且大幅降低了裂缝平均宽度及裂缝面积, 与基准方案C1相比, 裂缝面积减少了85.6%; C2和C3方案的抗裂效果一般, 减裂率分别为17.3%和30.5%。

4.5 耐久性

面板作为坝体的防渗层, 其抗渗性能至关重要, 关系到坝体长期运行的安全, 而冬季低温期时, 面板应具有一定的抗冻融循环能力。经试验, 四个配合比的抗渗及抗冻指标均符合 W10F100 设计要求。

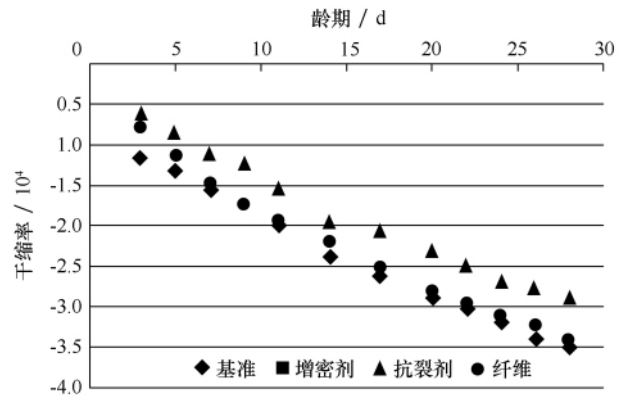


图1 混凝土干缩率试验结果

表4 混凝土抗裂性能对比

编号	初裂时间/min	裂缝平均宽度/mm	裂缝面积/mm ²	减裂率/%
C1	50	0.44	210.67	—
C2	55	0.38	174.22	17.3
C3	60	0.38	146.34	30.5
C4	90	0.13	30.32	85.6

5 面板纤维混凝土质量检测

5.1 施工质量检测及验收结果

为确保面板混凝土质量, 在整个施工期间对纤维混凝土的各项指标进行了监测, 除混凝土坍落度、含气量合格率分别为94.4%和98.3%之外, 其余指标合格率均达到100%。

5.2 裂缝检测及处理

由于面板采取了有效的抗裂措施(添加罗赛纤维RS2000), 并严格控制原材料质量以及混凝土拌和、浇筑、养护等施工过程, 混凝土面板在流水养护90 d后面板在下闸蓄水前仅在中部受拉区出现少量宽度小于0.2 mm的裂缝, 裂缝按照设计要求进行了处理, 其处理质量均满足设计要求。

5.3 大坝面板混凝土工程评价

根据《水电水利基本建设工程单元工程质量等级评定标准》(第一部分: 土建工程)(DLT 5113.1—2005)对施工质量进行评定,共评定单元26个,其中优良单元25个,合格单元26个,优良率96.2%。上水库主坝面板混凝土质量符合设计及规范要求,满足下闸蓄水要求。

6 结 论

(1) 纤维素纤维混凝土的坍落度及含气量损失率较小,凝结时间与基准混凝土基本相同;基准混凝土和掺抗裂剂混凝土的坍落度及含气量损失率较大,不利于施工;抗裂剂明显延长混凝土初凝时间,达18 h,混凝土塑性时间过长对早期抗裂不利。

(2) 纤维素纤维混凝土的劈拉强度高于基准、增密剂、抗裂剂方案,比基准混凝土高10%;纤维素纤维混凝土的轴心抗拉强度和极限拉伸值最高,而弹性模量比其他方案小,抗裂指数最高。

(3) 采用ASTM C1579标准方法对混凝土抗裂性能的研究结果表明纤维素纤维混凝土抗裂性能最好,与基准混凝土相比,减裂率达到85.6%,而增密剂和抗裂剂分别为17.3%和30.5%。

(4) 综合混凝土工作性能、力学性能、抗裂性能及耐久性能的研究结果,最终采取纤维素纤维设计方案。面板施工过程中对混凝土质量进行了严格监测,混凝土出机温度、28 d抗压强度、抗渗及抗冻等级

等指标的合格率达到100%,面板在下闸蓄水前仅在中间分块出现少量小于0.2 mm的裂缝,并严格按照设计要求进行了处理,面板混凝土质量符合设计及规范要求,满足下闸蓄水要求。

参考文献:

- [1] 鲁电. 堆石坝混凝土面板防裂机理研究[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(4): 47-49.
- [2] 席隆海. 水布垭大坝一期面板裂缝分析与处理[J]. 中国新技术新产品, 2010(6): 113-114.
- [3] 张绍明, 陆恩施, 罗蓉. 浅议混凝土面板裂缝与控制[J]. 四川水力发电, 2003, 22(2): 32-36.
- [4] Fisher A K, Bullen F, Beal D. The durability of cellulose fibre reinforced concrete pipes in sewage applications[J]. Cement and Concrete Research, 2001(31): 543-553.
- [5] Ankit Bhargava, Nemkumar Banthia. Permeability of concrete with fiber reinforcement and service life predictions[J]. Materials and structures, 2008(41): 363-372.
- [6] Balaguru P. Contribution of Fibers to Crack Reduction of Cement Composites During the Initial and Final Setting Period[J]. ACI Materials Journal, 1994, 91(3): 280-288.
- [7] 刘国平, 马鹰, 等. 生态合成纤维抑制混凝土开裂性能的研究与应用[J]. 混凝土, 2006(10): 41-44.
- [8] Ankit Bhargava, Nemkumar Banthia. Permeability of concrete with fiber reinforcement and service life predictions[J]. Materials and structures, 2008(41): 363-372.
- [9] 方坤河. 混凝土面板堆石坝面板混凝土抗裂性能的研究[J]. 红水河, 1996, 15(4): 23-27.

(责任编辑 于尧尧)

(上接第50页)

灌井综合折减系数,无量纲; α_{fc} 为承压完整稳定流

$$\text{系数,无量纲, } \alpha_{fc} = \frac{2\pi K_0 M m_f}{K_f A_f \ln \frac{R_0}{r_w}}$$

反滤回灌井稳定流模型如式(1)~式(3)所列,其中式(1)为土工织物垂向渗流方程,式(2)为普通回灌井水平并流方程,式(3)为水流通过土工织物后的水头 H_f 和回灌井内有效回灌水头 H_n 之间的假定关系式。

在求解承压含水层完整土工织物反滤回灌井稳定流模型时,先由式(4)计算水流通过土工织物后的水头 H_f ,将 H_f 代入式(3)得到回灌井内有效回灌水头 H_n ,然后将 H_f 和 H_n 分别代入式(1)和式(2)均可求得土工织物反滤回灌井的单井回灌量。

4 结 语

本文在分析反滤回灌井现状及存在问题的基

础上,指出井口结构不合理是产生这些问题的主要原因,提出了反滤回灌井结构改进的主要措施,即进行回灌池外型优化、采用防淤抗冲技术,以及用土工材料代替砂碎石反滤料等。在此基础上提出了土工织物反滤回灌井的改进方法,并给出了承压含水层完整土工织物反滤回灌井单井回灌量的理论计算公式,可供类似地下水回灌工程参考使用。

参考文献:

- [1] 李旺林, 束龙仓, 殷宗泽. 地下水库的概念和设计理论[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 613-618.
- [2] 李旺林, 束龙仓, 李砚阁, 等. 承压一潜水含水层完整反滤回灌井的稳定流计算[J]. 工程勘察, 2006, 5: 27-30.
- [3] 李旺林. 反滤回灌井的结构设计理论和方法[J]. 地下水, 2009, 31(1): 126-129.

(责任编辑 郭利娜)