

张泾河泵闸大体积混凝土精细化温控研究

邓群¹, 王雪丰¹, 程井²

(1.上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海市 200080; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要:以上海市张泾河泵闸工程为例,从材料性能、通水冷却及保温、温控监测等方面探讨了泵闸工程大体积混凝土施工期精细化温控防裂技术。通过室内试验及现场大体积混凝土试验获得仿真分析所需的材料热力学参数及表面散热系数,并用于现场混凝土温度场的反馈分析。最后对比分析了通水流量及冷却水管规格对混凝土温度场的影响,结果显示管材及管径对混凝土最高温度及温降速率有较大影响,建议早期采用管径40 mm以上钢管及4 m³/h以上冷却水流量。

关键词:泵闸工程;大体积混凝土;精细化温控;温度监测;通水冷却

中图分类号:TV331

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2022)01-0132-05

0 引言

我国每年有大量新建水利工程,其中泵闸工程是东部平原地区最为常见的水利工程,其数量众多,在防汛除涝,水资源调度及水生态环境改善方面具有重要作用。泵闸结构复杂,闸墩等薄壁结构与大体积混凝土结构并存,若不采取合理有效的温控措施,将很容易出现早期温度裂缝^[1-3]。泵闸结构中与水接触部位的裂缝会使结构强度下降,大幅降低其抗渗性及耐久性;钢筋混凝土出现裂缝将使混凝土对钢筋保护作用减弱,钢筋受到腐蚀后会降低结构整体抗拉性能,进一步加剧裂缝扩张,形成更大危害^[4]。轻则影响建筑物的外观、导致局部轻微漏水,重则可能形成贯穿裂缝严重影响结构强度和稳定性,工程无法长期稳定运行。因此,有必要对泵闸结构施工期温控措施进行深入研究和优化,以减少裂缝问题的发生。本文以上海张泾河泵闸工程为例,对工程施工期温控措施及相关经验进行总结,为后续类似工程的温控工作提供参考。

1 工程概况

1.1 枢纽布置

张泾河泵闸工程位于金山区金山新城,工程等别为I等。工程内容主要包括:(1)一条连通金山卫城河及张泾河出海闸的河道,河口宽度为40~50 m,

总长为2.15 km;(2)泵闸主体工程,1级水工建筑物;(3)配合工程实施新建临桂路桥等6座桥梁,翻建长约1.34 km的卫二路及排水工程。泵闸主体结构平面布置情况见图1。

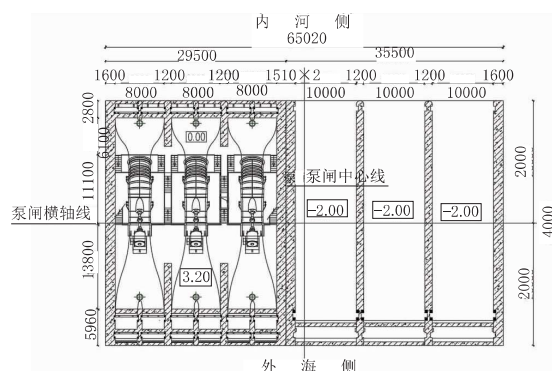


图1 张泾河泵闸主体结构平面布置图(单位:mm)

泵闸主体采用“泵+闸”方案,泵站及水闸各集中布置在一侧,水闸靠近大堤侧。泵站设3台泵,单泵流量30 m³/s;闸采用3孔,单孔净宽10 m。泵房和闸室的横断面分别见图2和图3,混凝土等级为C30。站身闸首总宽65.02 m。泵闸纵向总长约656 m,从内河侧到外河侧各部位结构分别为:内河海漫段、前池及进水池、站身闸首段、外河出水池及消力池、外河海漫段、外河防冲槽、外河导堤及外河连接段。

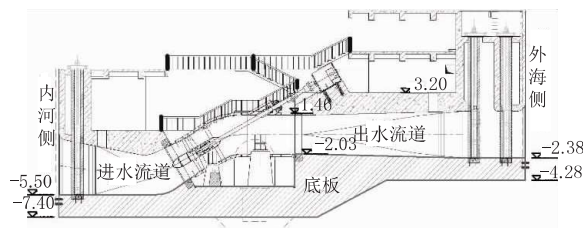


图2 泵房横断面图

收稿日期:2021-10-08

作者简介:邓群(1965—),男,学士,高级工程师,从事水利工程建设与管理工作。

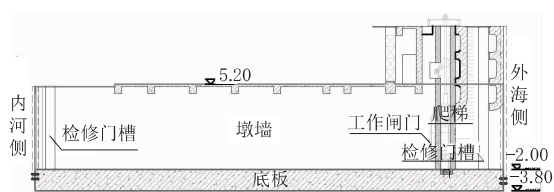


图3 闸室横断面图

1.2 地质条件及结构材料

1.2.1 地质条件

工程场地属于湖沼平原(I—2)地貌类型。工程区地基土均属第四纪沉积物,主要由填土、粘性土、粉性土及砂性土组成,成因类型主要为滨海~浅海相、滨海~河口相等。

1.2.2 原材料及配合比

本工程选用低热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥,并在满足强度的前提下,减少水泥用量,以减少混凝土水化热。细骨料选用中粗砂,细度模数2.6~3.2,含泥量不应大于3%;粗骨料选用粒径5~31.5 mm,连续级配,含泥量不应大于3%,非碱性骨料。

根据各部位混凝土性能要求,进行混凝土和砂浆配合比设计试验,在满足强度及防裂抗渗条件的前提下,减少水泥用量,确定最优配合比。泵闸主体工程采用的混凝土配合比见表1。

表1 泵闸主体工程配合比表							单位:kg/m³
部位	水	水泥	矿粉	粉煤灰	砂	石	外加剂
底板	160	222	70	56	795	1 028	4.52
墩墙及 流道	175	272	0	117	748	1 033	5.45

2 温控标准及精细化温控措施

2.1 大体积混凝土温控标准

泵闸结构大体积混凝土与薄壁结构并存,如张泾河泵站底板一次性混凝土浇筑方案达2 883 m³,需要符合现行国家标准《大体积混凝土施工标准 GB 50496—2018》等有关规定^[5-6],其温控指标应满足下列条件:(1)混凝土在入模温度基础上的温升值不应大于50℃;(2)混凝土里表温差不应大于25℃;(3)前7 d龄期内单日混凝土浇筑体的降温速率不大于3.0℃/d;7~14 d龄期混凝土浇筑体的降温速率不大于2.0℃/d;(4)混凝土内外温差不应大于25℃,拆除保温覆盖时混凝土浇筑体表面与当地气温温差不应超过20℃。

2.2 通水冷却措施

对于底板、墩墙及进出水流道等泵闸工程中的

关键部位,为减少其开裂风险,采用通水冷却的方式控制混凝土的内部温度。

以泵闸底板为例,说明冷却水管的布置情况。泵站底板厚度为1.9 m,底板转折处厚度为5 m,水闸底板厚度为1.8 m,受厚度限制,除泵站底板转折处布置有双层水管,其余位置均按单层多回路布置。水管采用HDPE管,其内径为32 mm,外径为40 mm。水管竖直方向居中布置,水平间距均为1.0~1.2 m。泵站及水闸底板的冷却水管布置见图4。

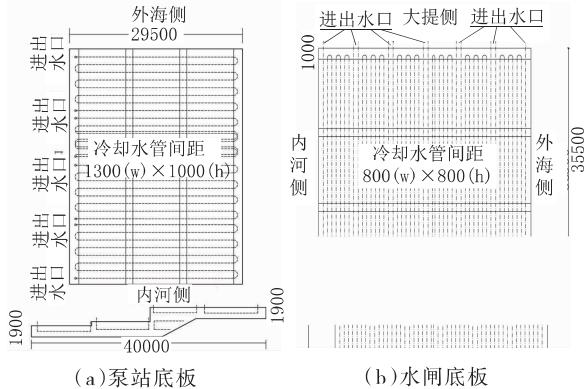


图4 冷却水管布置图(单位:mm)

2.3 泵闸大体积混凝土精细化温控要求

大体积混凝土散热慢、温升高,且容易发生早期表面裂缝及后期内部开裂。对于平原软基上的泵闸工程,还存在水化热速率快、结构体形复杂、施工工期短、结构内部不同部位间相互约束大等特点,因此,与常规大坝混凝土有本质的区别。基于张泾河工程,开展了平原地区泵闸工程的精细化温控研究,对通水冷却、拆模保温及温控监测进行了探讨和总结。

2.3.1 通水冷却及保温要求

(1)水池及冷却水源。冷却水管建议配置专门的水池,水池容量依据大体积混凝土最大浇筑强度确定,水池示意图见图5。对于大型泵闸工程,容积应不小于40 m³并覆盖遮阳篷以避免阳光直射;水池水源可取自附近河水或自来水,若选用河水则水温应不高于25℃且水质清澈不致堵塞管道。通水途中确保水源供应,尽量不使用循环水,避免中途断水。

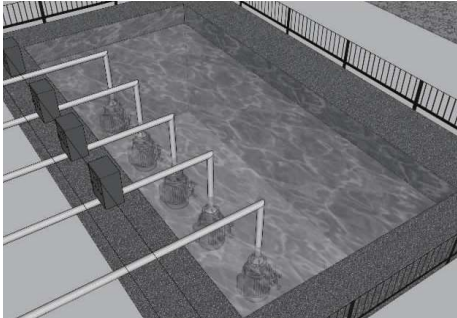


图5 冷却水池示意图

(2)冷却水管布置。冷却水管布设方案应依据温控计算分析确定;水管应均匀分布于混凝土结构中,底部冷却水管可适当加密。水管现场布置完成后,应由监理单位对水管材料(钢管、塑料管)、冷却水管布置形式(布置层数、绑扎情况)、水管的竖直与水平间距等内容进行验收,并对布置不当的问题进行调整。水闸底板冷却水管布置实物见图6。



图6 水闸底板冷却水管布置图

(3)预通水试验。冷却水管布设完成后,应在混凝土浇筑前1d进行预通水试验,检查水管接口部位的漏水情况并处理。通水流量可通过仿真分析确定,一般在 $3\sim 6\text{ m}^3/\text{h}$ 。若水管材质为塑料管,在混凝土浇筑前管道内可预先注满冷却水,使管道内部具有一定压力,避免水管遭受外力挤压从而降低过水能力,影响通水冷却效果。

(4)通水冷却。通水时间一般为10~14d,当后期混凝土内部平均温度与大气温度相差在 10°C 以内,可考虑停止通水。

(5)加冰拌和。高温季节进水温应保持在 $20\sim 24^\circ\text{C}$ 。若水源水温较高,为保证通水冷却效果,宜采取加冰措施以降低进水温。加冰拌和实物见图7。



图7 冰块投放实物图

(6)在夏季或气温较高环境下浇筑混凝土,选择夜晚或清晨浇筑以降低浇筑温度。

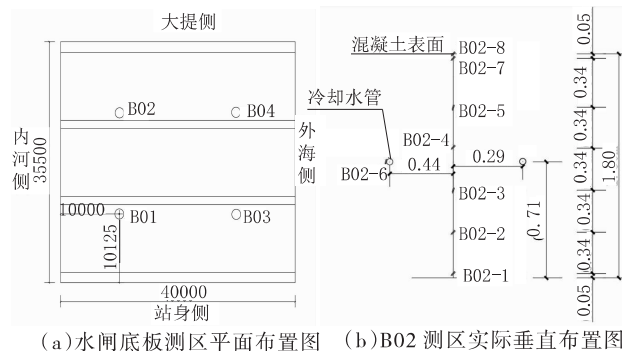
(7)待浇筑完成且仓面混凝土具有一定强度后,立即铺设薄膜及覆盖土工布,进行保温保湿养护,表面保温情况见图8。拆模工作应选在白天气温较高时段进行,侧模拆除后,应依据内外温差情况考虑是否需及时覆盖保温板。



图8 水闸底板保温情况

2.4 通水冷却温控监测

为全面反映混凝土的最高温度、降温速率、里表温差及表面与大气温差等指标,在各浇筑部位预埋温度传感器。根据各浇筑部位的特点,选取能够反映混凝土情况的典型测区,并截取相应长度的钢筋,根据设计的测温布置图将温度传感器固定于钢筋。将测温钢筋埋入木模板居中位置,待混凝土开始浇筑后,实时监测混凝土内部温度。另外布置温度传感器监测进、出水温及气温,并为每组水管安装电磁流量计以监测流量。将以上数据传输至云服务器供后续研究分析。当混凝土温度指标超出合理范围时,将自动报警,以便现场工作人员及时调整温控措施。以张泾河为例,水闸底板的测温布置见图9。



(a)水闸底板测区平面布置图 (b)B02测区实际垂直布置图

图9 水闸底板测温布置图(单位:m)

3 张泾河温控成果及反馈

3.1 泵闸主体工程浇筑及温控情况

张泾河泵闸主体工程各部位采取的温控措施及浇筑温度等特征温度汇总见表2。基本温控措施为通河水冷却,本站底板采用外径48mm钢管,其他部分采用外径40mmHDPE管;对于高温季节浇筑的泵站进水流道、水闸底板、泵站出水流道下部,对入池河水进行加冰,冰块尺寸为长宽高: $0.7\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.4\text{ m}$,单块冰块体积为 0.056 m^3 。每次投放量为40~50块,水温降至 24°C 以下时停止投放冰块。表3为水闸底板浇筑时冰块投放的详细记录。图10为加冰拌和期间水池进水温的变化过程线。

表 2 泵闸主体工程各部位温控统计表

施工部位	浇筑时间	方量 /m ³	浇筑温度 /℃	最高温度 /℃	最大内外温差 /℃	最高平均温度 /℃	管路泵站
底板	2019/12/30 06:16	2883	20.00	50.56	23	44.4	5 路
进水流道 1	2020/04/29 11:30	527	25.00	57.08	19.88	49.94	4 路
水闸底板	2020/05/22 06:30	2573	28.53	63.31	23.38	54.11	6 路
进水流道 2	2020/07/21 06:10	700	29.50	62.55	24.38	55.62	4 路
出水流道 1	2020/08/11 05:45	700	34.32	68.31	27	56.24	4 路
出水流道 2	2020/10/02 06:00	900	28.50	56.31	20.25	47.38	3 路
水闸墩墙	2020/12/08 06:45	1700	18.45	59.41	24.82	43.27	1 路

注:进、出水流道 1,2 表示施工时,分成两次浇筑。

表 3 冰块投放量

日期	时刻	龄期 /d	投放量 /m ³	降温幅度 /℃
2020.5.22	13:30	0.29	2.24	2.56
	20:00	0.52	2.24	5.69
2020.5.23	13:30	1.29	2.24	2.56
	20:00	1.56	2.24	4.19
	23:00	1.69	2.41	3.25
2020.5.24	3:00	1.85	2.24	2.69
	13:30	2.31	2.24	6.25
2020.5.25	8:30	3.08	2.24	3.57
	15:00	3.40	2.24	2.13
	20:00	3.56	2.69	3.50
2020.5.26	8:30	4.08	1.68	2.38
	13:30	4.29	2.24	2.56
2020.5.28	11:00	6.19	2.24	3.00
	18:40	6.51	2.24	2.88

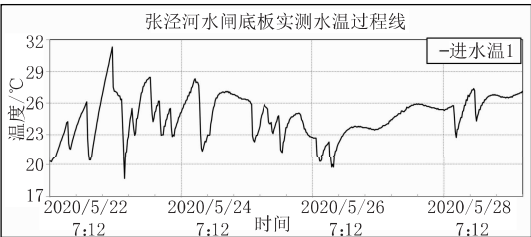


图 10 水闸底板冷却水加冰拌和期间水温变化过程线

由上述图表可知:(1)浇筑时间对混凝土最高温度影响很大。泵站底板在 12 月底浇筑,浇筑温度较低,最高温度也较低,约为 50℃。而夏季浇筑的进水流道上部及出水流道下部,受气温影响,浇筑温度较高,最高温度均在 60℃ 以上甚至接近 70℃,对温控防裂不利。因此,高温季节浇筑混凝土应避开高温时段,并采取相应措施降低混凝土浇筑温度,避免出现过高的最高温度。(2)对于主体结构,在高温季节(5~9 月)浇筑时,受浇筑进度影响,部分混凝土浇筑温度高于 28℃,因此采取冷却水加冰拌和方案,以控制进水温在 20℃~24℃。(3)加冰后水池水温降幅在 2℃~6℃,平均降温幅度为 3.4℃,加冰效果明显,能够使进水温保持在合理范围之内。

3.2 水闸温度场反演反馈分析

泵闸结构温控仿真的主要流程包括三个阶段:(1)通过室内试验或参考配合比情况,获得混凝土的热力学参数初始值;(2)依据实际原材料及配合比、冷却水管及保温材料,开展了现场大体积混凝土通水^[1]及不通水试验,基于实测混凝土温度及气温、水温监测数据,开展了保温条件下的表面散热系数及混凝土导温系数的反演分析;(3)利用反演结果,对泵闸整体施工过程开展混凝土温度场反馈分析。

图 11 和图 12 分别给出了张泾河水闸底板 B02 测区的实测温度过程线及反馈对比值。反馈成果显示各测点混凝土的温度计算值与实测值变化趋势一致,最高温度与达到最高温度龄期也基本一致。由于现场条件较为复杂,对保温保湿及通水效果的模拟与实际情况存在一定差距,各测点的反馈值与实测值误差在 5℃ 以内,在可接受范围,表明所用计算方法及参数能够满足工程精度要求。

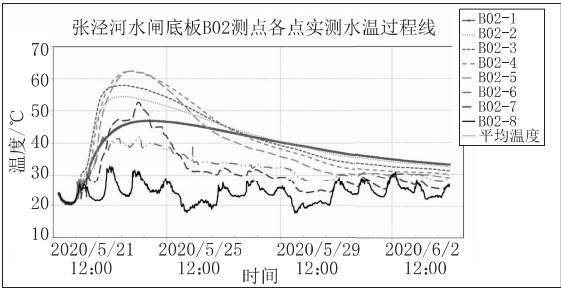


图 11 水闸底板 B02 测区反馈值与实测值对比图

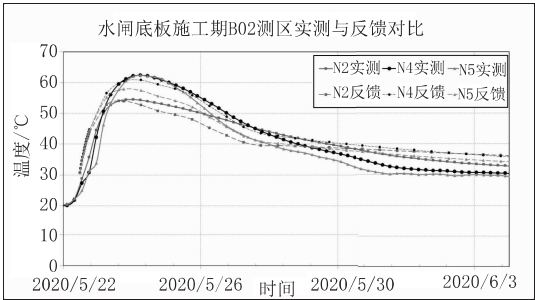


图 12 水闸底板 B02 测区反馈值与实测值对比图

4 冷却水管选择

泵送混凝土(商品混凝土)水化热高,早期温升极快,在浇筑后 1~2 d 就会达到温度峰值,与外界形成较大温差,此时混凝土强度尚未发展完全,容易产生温度裂缝,因此有必要尽早通水来控制混凝土内部温度以降低里表温差^[7-8]。此时水管材质、水管管径、水管间距等对于混凝土降温效果均有较大影响。仍以本工程水闸底板为例,参考实际可用管材,模拟分析不同材质、管径及壁厚对冷却效果的影响。水管竖直及水平间距均取为 1.0 m,单根水管长度均为 200 m,水温均为 24℃,对比结果见表 4。

表 4 温控效果汇总表

水管 材质	水管管径/ 壁厚/mm	水管间 距/m	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	水管长 度/m	最高温 度/℃	最大表里 温差/℃
钢管	40/3.0	1.0	4.0	200	56.82	11.95
	48/3.0	1.0	4.0	200	56.49	11.82
HDPE 管	32/2.5	1.0	4.0	200	58.36	12.55
	32/2.5	1.0	2.0	200	58.78	12.71
	40/3.0	1.0	4.0	200	58	12.41
	40/3.0	1.0	2.0	200	58.44	12.58
	40/4.0	1.0	4.0	200	58.42	12.57

由表 4 可以看出,同管径(管径/壁厚=40 mm/3.0 mm)同流量(4 m³/h)下采用钢管和采用 HDPE 管的混凝土最高温度分别为 56.82℃和 58℃,钢管比 HDPE 管削峰效果要大 1℃~2℃;水管材质相同时,大管径水管的降温效果更好,主要体现在接触面及通水流量的加大和进出口水温的减小。另外钢管不易发生变形,且更有利于保证后期降温速率,缩短通水冷却时间,节省施工成本。

5 总结与建议

针对上海等平原地区泵闸工程商品大体积混凝土,以张泾河泵闸工程为试点开展了施工期精细化温控防裂理论及措施研究,通过严格的通水冷却及

温度监测,取得了良好的防裂效果。主要研究成果及结论如下:

(1)浇筑温度与后期最高温度呈正比关系,高温时段浇筑会提高混凝土的浇筑温度,使得混凝土最高温度过大。建议浇筑温度不大于 28℃,应尽量避免在高温季节或时段浇筑大体积混凝土,可考虑夜间浇筑。

(2)对于深基坑部位的结构底板,进行大体积混凝土通水冷却时,受高程变化影响,冷却水沿程阻力较大。为保证充足的流量,外部引水管应采用外径 40 mm 以上的粗管并增大进水口处的压力;通水前应进行试验,确保管路接口的密封性,防止接口处水压过大而爆裂。

(3)对不同材质及尺寸的冷却水管对比仿真分析结果表明,采用大管径钢管能够更好地控制混凝土内部温度,有效降低最高温度,控制里表温差。

(4)将智能化监测控制技术与反馈仿真分析相结合,应用于泵闸结构的实时温控,能够降低人为因素造成的误判,有效提高温控的效率,是未来泵闸温控发展的趋势。

参考文献:

[1] 程井,魏李威,张玉鑫,等.基于水化度的泵送混凝土温升模型及参数反演[J].水利水电科技进展,2021,41(2):75-81.
[2] 曹为民,吴健,闪黎.水闸闸墩温度场及应力场仿真分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002(5):48-52.
[3] 程井,张宇,李明志,等.平原地区泵闸工程温控防裂优化与反馈研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2021,43(2):1-7.
[4] 谢石.澧南闸裂缝成因及加固方案优化研究[D].南京:河海大学,2006.
[5] SL 677—2014,水工混凝土施工规范[S].
[6] GB 50496—2018,大体积混凝土施工标准[S].
[7] 王振红,朱岳明,于书萍.薄壁混凝土结构施工期温控防裂研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007(6):773-778.
[8] 李硕,李同春,孙永明,等.三洋港水闸底板水管冷却温控措施优化研究[J].水利水电技术,2015,46(3):65-69.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyflh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com