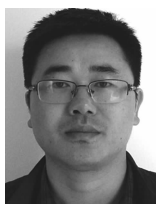


· 施 工 ·



船闸大体积混凝土温度及裂缝控制技术

涂伟成¹, 刘松^{2,3}, 张明雷^{2,3}

(1. 中交二航局第一工程有限公司, 湖北 武汉 430012;

2. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040;

3. 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430040)

摘要: 依托富春江船闸扩建改造工程, 采用有限元仿真计算方法模拟不同结构的温度应力变化, 提出本工程的温控标准和温控措施。在施工阶段通过对混凝土温度的现场监控, 验证了船闸大体积混凝土施工温控措施如浇注温度控制、表面及上表面保温、内部通水冷却等的可行性及控制效果。

关键词: 船闸; 大体积混凝土; 温控标准; 温控措施

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0197-06

Temperature and crack control of mass concrete for lock

TU Wei-cheng¹, LIU Song^{2,3}, ZHANG Ming-lei^{2,3}

(1. The First Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430012, China;

2. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

3. The Key Laboratory of New Materials and Maintenance of Marine Structure Reinforcement Technology, Wuhan 430040, China)

Abstract: Based on the Fuchun River lock expansion and renovation project, we simulate the temperature and stress of different concrete structures by the finite element simulation method, and propose the temperature index and temperature control measures for this project according to the simulation result. The temperature field is monitored in the construction phase, which verifies the feasibility of the control measures involving pouring temperature, surface and upper surface of the insulation, internal water cooling and the control effect.

Keywords: lock; mass concrete; standard for temperature index; temperature control measure

大体积混凝土是船闸工程中一种重要的结构形式, 广泛存在于闸首、闸室等主体部位。该部位除了一般的强度、刚度、稳定性要求之外, 还有整体性、防水、抗渗及抗冻性等诸多要求。由于大体积混凝土中配筋量一般相对较小, 受温度应力的影响相对较大, 施工期混凝土温度控制不好, 极易产生破坏性裂缝。因此闸首、闸室等主体部位的大体积混凝土施工的温度控制技术是工程质量控制的关键因素之一。

富春江船闸扩建改造工程工期时间较长, 混

凝土浇筑方量巨大(约42万 m^3)。浇筑高峰期集中在2013年冬季、2014年及2015年春季, 历经冬季、常温期及高温期施工, 混凝土结构受气候的不利影响更大, 更易产生温度裂缝, 故温度控制尤为重要。本文主要论述富春江船闸大体积混凝土施工中采用的温控防裂技术。

1 大体积混凝土温度裂缝控制原则及标准

1.1 大体积混凝土温度裂缝控制原则

大体积混凝土温度控制的主要原则如下:

收稿日期: 2014-10-12

作者简介: 涂伟成(1982—), 男, 工程师, 从事水运工程施工技术研究与管理工。

1) 尽量降低混凝土的温升、延缓最高温度出现时间; 2) 控制混凝土浇筑温度; 3) 控制温峰过后混凝土的降温速率; 4) 控制混凝土中心和表面之间、以及混凝土表面温度和气温之间的差值。

1.2 大体积混凝土温控标准

根据工程混凝土结构的特点, 结合实际工况, 采用大体积混凝土有限元计算方法模拟不同结构混凝土温度、应力场的分布及发展过程。计算时充分考虑混凝土分层、浇筑温度、施工间歇期、混凝土水化热的放热规律、养护方式、冷却水管降温、外界气温变化、混凝土弹性模量变化、基础约束以及混凝土徐变等复杂影响因素。图1是上闸首左边墩强约束区典型剖分图, 图2是下闸首右边墩强约束区典型剖分图。

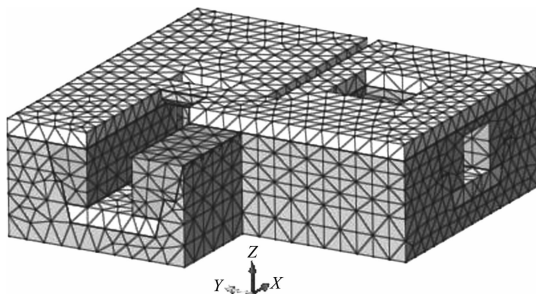


图1 上闸首左边墩强约束区剖分图

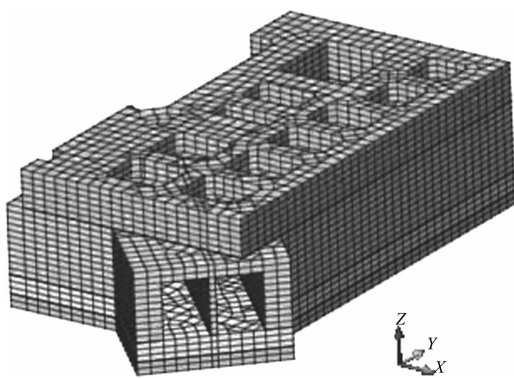


图2 下闸首右边墩强约束区剖分图

上闸首左边墩强约束区混凝土预计施工时间为10月下旬至12月下旬, 浇筑间隔期约20 d。参考 JTS 202-1—2010《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程》, 根据施工期气候条件, 估算混凝土出机口温度。采用有限元模拟计算时,

混凝土第1、第2层基坑内施工, 其迎水面侧墙及第3层采用钢模板, 不考虑布设冷却水管, 围堰内施工按风速 ≤ 4.0 m/s考虑, 在以上设定条件下, 混凝土浇筑温度及构件内部最高温度如表1所示。

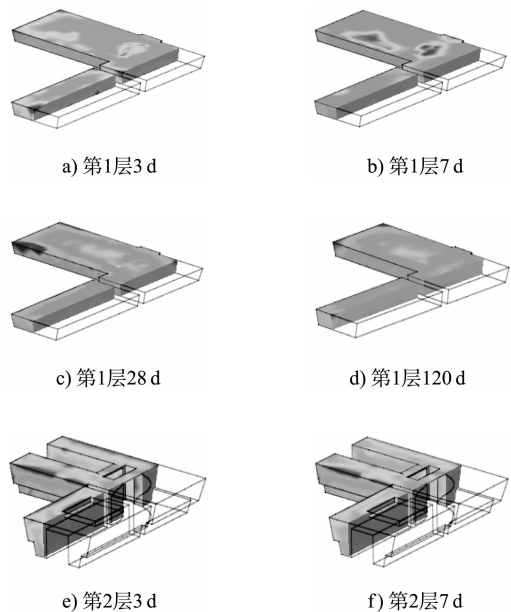
表1 各浇筑层浇筑温度及内部最高温度模拟值 $^{\circ}\text{C}$

浇筑层	浇筑温度	内部最高温度
1	20.0	41.4
2	20.0	47.2
3	16.6	41.3

由表1可以看出, 混凝土内部温度较高的部位在混凝土实心部位较厚的第2层。该部位位于基坑中, 散热较慢, 最高温度超出了 $\leq 45^{\circ}\text{C}$ 的温控标准, 且施工期环境温度较高, 通过风冷骨料和拌合水冷却相结合措施降低浇筑温度和埋设冷却水管以降低内表温差。表2为上闸首左边墩强约束区温度应力计算结果, 图3为该层不同龄期应力场分布。

表2 上闸首左边墩强约束区应力场计算结果

龄期/d	第1层温度应力/MPa	第2层温度应力/MPa	第3层温度应力/MPa	最小安全系数
3	0.91	1.83	0.91	1.26
7	1.12	1.66	0.88	1.69
28	1.61	1.84	0.82	1.74
120	1.88	1.86	0.97	2.07



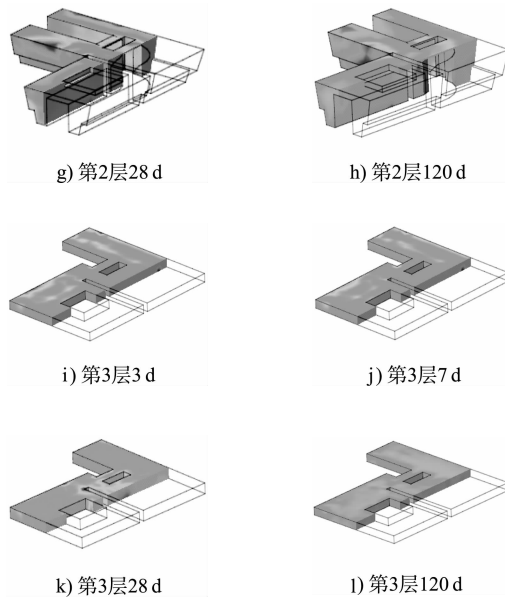


图 3 上闸首左边墩约束区混凝土不同龄期应力场分布

由表 2 和图 3 可以看出, 第 1、3 层混凝土因层厚较小, 早期 (3 d) 应力较小, 后期约束条件增加, 应力增大。受浇筑层较厚影响, 第 2 层混凝土早期 (3 d) 应力发展较快, 且集中于构件表面; 7 d 后有部分应力向构件内部转移并逐渐发展至稳定水平。

上闸首设有廊道结构, 廊道混凝土有抗冲磨要求, 且浇筑层较厚。廊道混凝土配合比胶材用量相对较多、粉煤灰掺量相对较少, 水化温升较高, 强约束区 3 d 最小抗裂安全系数为 1.26, 第 2 层混凝土早期安全系数较低 (≤ 1.4), 抗开裂能力略不足。通过仿真计算, 考虑在第 2 层混凝土较厚处埋设冷却水管, 并且采用风冷后的骨料和制冷水生产该层混凝土, 进一步降低浇筑温度, 同时在廊道的迎水立面可布设防裂钢筋网片或者分 2 次浇筑 (2.36 m+2.36 m), 每次浇筑间隔期小于 7 d, 尽量降低新老混凝土的约束, 计算结果如表 3 所示。

表 3 上闸首左边墩第 2 层 (廊道) 分 2 次浇筑应力场结果

龄期/d	第 2-1 层温度应力/MPa	第 2-2 层温度应力/MPa	最小安全系数
3	1.51	1.63	1.41
7	1.47	1.31	1.90
28	1.69	1.49	1.90

根据仿真计算结果及工程实际情况制定相应的温控标准, 采取相应的温控措施。温控标准如表 4 所示。

表 4 船闸大体积混凝土温控标准

施工时间	构件	浇筑温度/°C	内部温度/°C	内表温差/°C	降温速率/(°C·d ⁻¹)
冬季	上首首				≤ 2.0 , 早期 ≤ 2.5
	廊道	$\geq 10; \leq 20$	≤ 40	≤ 20	≤ 2.0 , 早期 ≤ 3.0
	其他构件				≤ 2.0
高温期	上闸首				≤ 2.0 , 早期 ≤ 2.5
	廊道	≤ 25	≤ 55	≤ 20	≤ 2.0 , 早期 ≤ 3.0
	其他构件				≤ 2.0
常温期	上闸首				≤ 2.0 , 早期 ≤ 2.5
	廊道	≤ 20	≤ 45	≤ 20	≤ 2.0 , 早期 ≤ 3.0
	其他构件				≤ 2.0

2 富春江船闸大体积混凝土温度裂缝控制措施

2.1 优化配合比设计

采用低水化热、抗裂性优良的配合比是大体积混凝土温度裂缝控制措施的重点^[1]。优化配合比的原则是在满足强度要求的同时, 尽量减少水泥用量, 提高混凝土的流动性, 改善混凝土的和易性。为使大体积混凝土具有良好的抗裂性能、体积稳定性和抗渗性, 混凝土优化按如下原则配制^[2]: 1) 采用低水化热的胶凝材料体系。大体积混凝土配制应采用适中水胶比, 大掺量矿物掺合料 (单掺粉煤灰或复掺粉煤灰和矿粉) 的技术路线, 尽量降低水泥用量。应优选组分均匀、各项性能指标稳定的粉煤灰, 注重需水量比、细度和烧失量等关键指标。2) 选用优质聚羧酸类缓凝高性能减水剂。缓凝高性能聚羧酸减水剂, 兼顾减水、引气和缓凝效果, 可以延缓水化热的峰值并改善混凝土的和易性, 降低水灰比以达到减少水化热的目的。3) 选用级配良好、低热膨胀系数、低吸水性率的粗集料。优质骨料体积稳定性好、用水量小, 可减小混凝土的收缩变形。粗集料含泥量不得超过 0.7%, 细集料含泥量不得超过 3%。4) 使用低流动性混凝土。在满足施工的前提下, 尽可能使用坍落度相对较低的混凝土, 有利于减少混凝土用水量, 降低温升、减少干缩、提高抗开裂性能。

本工程采用海螺 P. O42.5 水泥, 使用最大粒径为 40 mm 的粗骨料, 控制混凝土坍落度 50 ~ 70 mm, 控制总胶材用量以及大掺量矿物掺合料。上、下闸首有抗渗和抗冲磨要求的 C40 混凝土胶材用量

为 320 kg/m³, 掺入 40% 的矿物掺合料。闸室 C25 混凝土胶材用量为 266 kg/m³, 掺入 55% 的矿物掺合料, 聚羧酸高效减水剂掺量为 0.8% ~ 1.0%。表 5 为本工程主体结构混凝土配合比。

表 5 主体结构混凝土配合比

设计 强度等级	水胶比	砂率/%	单位用量/(kg·m ⁻²)								
			水泥	粉煤灰	矿粉	河砂	机制砂	5~20 mm 碎石	20~40 mm 碎石	水	外加剂
C40P8F100	0.46	36	160	64	96	266	399	621	621	147	2.56
C30F100	0.48	37	131	85	76	269	404	628	628	140	2.48
C25F100	0.54	38	120	77	69	281	421	621	621	144	2.26
C20F100	0.60	38	111	71	64	283	425	623	623	148	2.09

2.2 合理安排浇筑顺序

为有效降低大体积混凝土的内外温差, 加快混凝土散热速度, 在大体积混凝土施工过程中常采用分块浇筑。分块浇筑又可分为分层浇筑法和分段跳仓浇筑法 2 种。分层法能够使混凝土均匀散热, 不易产生垂直裂缝; 分段浇筑法适用于混凝土拌和能力低、对大体积混凝土抗渗要求不高的结构物。

富春江船闸混凝土工程分 3 个工作段。在水平方向, 各工作段混凝土浇筑采用间隔浇筑法, 即相邻仓面混凝土同一高程不同时段浇筑, 先浇筑奇数阶段, 再浇筑偶数阶段; 在垂直方向, 上、下闸首, 闸室及下游引航道按强约束区和非强约束区, 分层浇筑以减小混凝土的单次浇筑方量。

2.3 控制混凝土浇筑温度

冬季施工期, 混凝土的浇筑温度适中, 对控制混凝土的内外温差有利; 夏季通过控制混凝土的原材料温度, 加快运输速度等措施, 尽量降低混凝土入模温度。

冬季浇筑混凝土, 尽量选择在当日高温时段开仓浇筑。闸室边墙、上下闸首边墩及下游引航道边墙的强约束区混凝土浇筑主要集中在 2013 年 11 月至 2014 年 3 月, 气温偏低, 采取深层地下水拌和, 水温在 8 ~ 10 ℃。混凝土采用翻斗车运输, 利用挖掘机、皮带机等将混凝土

直接送入仓面, 实测入模温度均满足 ≥10 ℃ 且 ≤20 ℃ 的要求。

高温季节施工时应利用温度较低时段施工, 避免在温度超过 30 ℃ 的条件下浇筑混凝土。在混凝土浇筑温度超出温控标准要求时, 使用骨料风冷及制冷水拌合混凝土, 降低混凝土出机温度, 减少混凝土在运输和浇筑过程中的温度回升。加快运输和浇筑速度, 自卸汽车运输时车厢顶部设活动遮阳棚; 避免模板和新浇筑混凝土受阳光直射, 入模前的模板与钢筋温度以及附近的局部气温不超过 36 ℃, 仓面降温采取仓面喷雾机喷雾等措施以降低浇筑面环境温度。经实测, 在采取风冷骨料及制冷水拌合混凝土后, 混凝土浇筑温度在 19.3 ~ 24.3 ℃, 满足高温期混凝土浇筑温度 ≤25 ℃ 的要求。

2.4 内部通水冷却

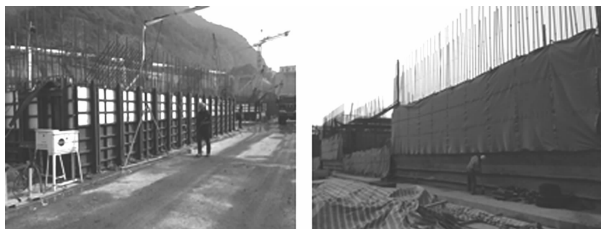
布置冷却水管和温控设备时, 根据土工布内外温差, 确定通水时间, 以降低混凝土内部温度, 防止混凝土开裂。采用直径 40 mm 的铁皮管, 弯制成 S 形, 钢管一端与冷却水源相接。冷却钢管混凝土结构内部均匀布置, 间距 1.5 m 左右。对于廊道部位采取加密冷却水管至间距 80 cm, 以保证冷却效果, 混凝土浇筑后, 在铁皮管内通入冷水, 形成循环水, 可以及时散发混凝土内部产生的水化热。每隔一定时间调换一次进出水流方向, 从而更有效地降低混凝土内部的温升。

2.5 混凝土养护

研究表明:养护措施和方式是否得当,不仅影响混凝土的强度增长,同时也会影响混凝土的温度开裂^[3]。针对不同的施工季节,结合结构特点,本工程采取了不同的养护措施(图4)。



a) 夏季及常温施工期洒水养护



b) 冬季施工期保温养护

图4 不同施工期结构养护措施

1) 高温及常温季节施工养护措施。

高温及常温季节养护主要以洒水为主,特别是高温季节,环境温度高,混凝土表面失水严重,加强混凝土养护对于干缩裂缝控制至关重要。

顶面采用人工洒水的方式对混凝土表面进行养护,确保混凝土处于湿润状态;侧面采用在仓面顶口外侧布置养护水管的方式进行自动喷淋对混凝土侧面进行养护。混凝土在浇筑完毕后12h以内对混凝土加以覆盖并保湿养护;浇水次数根据现场情况,保持混凝土处于湿润状态;混凝土养护用水应与拌制水相同;混凝土洒水养护的时间不得少于14d。

2) 冬季施工养护措施。

冬季施工期间,环境温度较低,为防止混凝土受冻,禁止洒水养护,主要采取保温措施。模板顶部1m部位(混凝土易冻区)贴5cm厚阻燃泡沫板,在浇筑凝固及拆模前起到保温作用;拆模后混凝土上表面主要采取覆盖土工布进行防

风保温,必要时加厚土工布厚度,侧面主要采取悬挂加厚防风保温布等措施进行防风保温;廊道等部位挂帘保温养护。防止混凝土表面水分蒸发过快和温度降低,避免温度裂缝及干缩裂缝的产生。混凝土浇筑完毕后12h对混凝土上表面进行覆盖防风保温。拆模后立即对侧面悬挂加厚防风保温布进行防风保温。防风保温养护时间不得小于14d。

3 现场温度监测

3.1 温度监测系统

选用性能稳定的温度传感器,绘制各测点温度随时间的变化曲线。传感器随钢筋绑扎工序进行定位安装。导线采取保护措施,以防混凝土振捣时受到损坏。本次温度监测采用SDT型温度计,适用于长期埋设在水工建筑物和其他混凝土建筑物内,测量结构物内部的温度。具有长期稳定、高防水性能、不受长电缆影响、适合自动化监测等特点。

3.2 测点布置

根据结构的对称性和温度变化的一般规律,按照重点突出、兼顾全局的原则进行。实心层内部测温点在每层混凝土1/4中心线上布置,该区域基本能够代表整个混凝土断面的最高温度分布。在平面内,由于靠近表面区域温度梯度较大,因此测点布置较密;而中心区域混凝土温度梯度较小,因此测点布置较疏。空心层因存在较多空腔结构,内部温度较高部位一般位于混凝土较厚部位。选取该部位布设中心温度测点与表面温度测点,监控其内表温差。

3.3 监测结果

富春江船闸已监控约30个构件,冬季施工混凝土的入模温度一般为10~20℃,内部最高温度不高于40℃;常温期施工混凝土入模温度一般为16~20℃,内部最高温度不高于45℃;高温期施工混凝土入模温度一般为21~25℃,内部最高温度不高于55℃,均满足所制定的温控标准。部分构件监控结果如表6所示。

表 6 部分构件温度监控数据

施工季节	构件部位	入模温度/℃	最高温度/℃	温峰时间/h	最大内表温差/℃	表观效果
冬季	下闸首右边墩第 1 层	10.6 ~ 13.0	32.5	78	19.2	无可见裂缝
	9# 闸室左边墙第 3 层	12.0 ~ 13.9	28.9	94	13.4	无可见裂缝
常温期	2# 闸室左边墙第 2 层	17.3 ~ 19.3	44.7	66	19.8	无可见裂缝
高温期	1# 闸室左边墙第 3 层	21.3 ~ 23.1	48.3	48	19.1	无可见裂缝

4 结论

1) 针对温控要求优化混凝土配合比, 及时通冷却水, 对混凝土浇筑温度进行控制, 现场实时监控混凝土入模温度及内部温度发展, 冬季采取表面保温保湿养护措施, 高温及常温季节采取保湿养护措施等控制混凝土内部最高温度及内表温差。

2) 在船闸大体积混凝土施工过程中, 内部最高温度和内表温差均在温控标准范围内; 混凝土表面未发现可见温度裂缝, 达到了预期的温控效果。

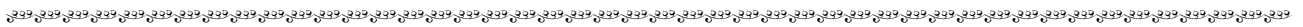
参考文献:

[1] 刘松, 邓波, 裴炳志, 等. 荆岳长江公路大桥南塔承台大体积混凝土冬期施工温度裂缝控制技术[J]. 施工技术, 2008(12): 49-51.

[2] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1999: 19-32.

[3] 朱伯芳. 聚乙烯冷却水管的等效间距[J]. 水力发电, 2002(1): 16-22.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 161 页)

3) 各影响因素对桩基承载性的敏感性: 先桩后岸坡的施工顺序下, 对桩基承载性能影响最大的是岸坡回填厚度, 其次是内摩擦角以及边坡的坡度, 而嵌入桩基的嵌入深度对桩基位移及内力影响甚小。而先岸坡后桩的施工顺序下, 桩基产生的位移及内力都很小, 所有的有限元计算模型中, 桩基的位移变化值均在毫米级变化, 所产生的弯矩也较小, 即可认为各考察因素对其影响的敏感性相差不大, 但是回填厚度在该施工顺序下敏感性最强, 在施工中可酌情考虑各影响因素, 选择最有利的岸坡形式。

参考文献:

[1] 魏汝龙, 王年香, 杨守华. 桩基码头与岸坡的相互作用[J]. 岩土工程学报, 1992(6): 38-49.

[2] 邓方明, 何光春. 岸坡对库区码头桩基变形影响分析[J]. 水运工程, 2009(11): 70-76.

[3] 左良栋. 山区河流大型水库港边坡稳定性及对高桩码头结构影响分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.

[4] 梁丰收. 码头岸坡被动桩工作特性及岸坡桩基相互作用分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.

[5] 刘明维, 贾理, 梁越, 等. 三峡成库后库区码头基础形式分析及研究展望[J]. 中国港湾建设, 2014(3): 13-19.

[6] 丁浪. 边坡稳定分析和抗滑桩优化设计[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2010.

[7] 雷文杰, 郑颖人, 王恭先, 等. 沉埋桩加固滑坡体模型试验的机制分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2007, 26(7): 1347-1355.

[8] 叶建良. 桩基工程[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2000.

[9] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].

(本文编辑 武亚庆)