

冷却循环水在大体积混凝土施工中的运用

张金健, 孙文飞

(中交一航局第一工程有限公司)

摘要: 为解决大体积混凝土施工中由于混凝土内部水化热产生的温升较高, 内外温差过大, 从而产生温度裂缝影响结构安全性和耐久性的问题, 在天津海洋工程装备制造基地建设项目码头工程(二期)施工过程中, 通过使用大体积混凝土智能温控设备和混凝土测温设备, 并对现浇墩台温度场和温度应力场进行仿真分析, 有效降低了混凝土内部最高温度与内表温差, 最大幅度减少了混凝土有害裂缝的产生, 可为同类工程项目提供参考借鉴。

关键词: 冷却循环水; 大体积混凝土; 裂缝控制; 温度监测

混凝土浇筑时会产生较大的水化热, 使混凝土内外温差过大, 产生温度应力超过混凝土变形能力, 最终引发混凝土开裂, 因此, 为防止温度裂缝的产生, 大体积混凝土施工必须采取有效温控措施降低混凝土内部最高温度及内外温差^[1]。随着自动化技术的发展, 智能温控系统逐渐应用于施工现场, 智能通水系统实现了大体积混凝土的智能温控, 为解决大体积混凝土温度裂缝提供了新思路和新设备^[2]。该设备以混凝土温控指标为依据, 结合实时监测温度, 对冷却循环水的温度、流速、流向实现智能化、自动化控制, 具备降温和升温功能, 可有效提高工作效率。

1 工程概况

天津海洋工程装备制造基地建设项目码头工程(二期)依次进行 DT3、DT4、DT2、DT1、DT5、DT6 共 6 个现浇墩台施工。其中 DT1 墩台尺寸最大, 长 50.0 m, 宽 25.0 m, 厚 2.7 m。

现浇墩台混凝土分 2 步浇筑: 第 1 步浇筑厚度 0.7 m, 余下部分一次性浇筑完成。混凝土浇筑间歇期控制在 7 d 以内; 第 2 步浇筑前表面应凿毛处理, 并使用空压机将杂物吹净或冲洗干净, 排除积水, 先铺一层厚度为 10~30 mm 的水泥砂浆, 水泥砂浆的水灰比小于墩台混凝土的水灰比, 然后再进行下一步混凝土浇筑。混凝土浇筑采取阶梯形推进分层浇筑, 分层厚度为 30 cm。现浇墩台采用 C40F300 混凝土, 配合比如表 1 所示。

表 1 C40F300 混凝土配合比

kg/m ³						
水泥	矿粉	砂	石 (5~25 mm)	水	减水剂 (AN4000)	引气剂 (AE-II)
370	105	695	1 058	152	5.70	1.425

2 现浇墩台大体积混凝土温度应力评价标准

2.1 温度评价标准

大体积混凝土温度评价^[3]指标主要有: 浇筑温度、内部最高温度以及内表温差、降温速率等。其中: 混凝土浇筑温度不高于 28 ℃, 内表温差不大于 25 ℃, 内部最高温度不大于 75 ℃。大体积混凝土浇筑体的温升值不应大于 40 ℃, 降温速率不应大于 2.0 ℃/d, 表面与大气温度之差不应大于 20 ℃。

2.2 应力评价标准

大体积混凝土温控抗裂安全系数是指混凝土的轴心抗拉强度与对应龄期温度应力最大值之比, 根据 GB 50496—2018《大体积混凝土施工规范》^[4], 按式(1)进行判断:

$$\frac{f_{tk}(t)}{\sigma_x} \geq K \quad (1)$$

式中: σ_x 为混凝土的温度应力, MPa; $f_{tk}(t)$ 为混凝土龄期为 t 时的轴心抗拉强度标准值, MPa; K 为混凝土抗裂安全系数, 取 1.15。

3 混凝土冷却循环水技术

3.1 现有技术缺点

降低混凝土内部最高温度的主要方法包括: 降低混凝土胶材总用量和埋设冷却水管, 但目前混凝土配合比方面几乎没有进一步降低胶材总量的空间, 因此只能采用埋设冷却水管的方法来降低混凝土内部最高温度。

人工通水冷却方法面临诸多挑战与局限性^[5]。人工调节通水流量存在显著的时间滞后, 而且温度与流量数据的手工采集不仅耗时费力, 还易受人为判断误差及设备运行不稳定的双重影响, 限

制了温控的精准度与效率。人工控制方法在面对大体积混凝土温度管理的复杂性时，往往难以满足整体温度的协调控制、精细调节以及个性化需求，这在一定程度上限制了混凝土工程质量的进一步提升。因此，探索更为智能、高效、精准的温控解决方案，成为当前混凝土技术发展的迫切需求。

3.2 大体积混凝土智能通水技术

现有通水系统精度不足直接导致温控效果欠佳，效率低下。系统数据采集频率低，信息反馈机制迟缓，加之控制方法的单一性，难以实现对混凝土温度的精准调控，往往造成温控效果远离理想设计曲线，进而引发不必要的经济损失。在本工程项目中，引入了中交天津港湾工程研究院有限公司最新研发的专利^[6]——大体积混凝土智能温控机。该智能温控机凭借其卓越的性能，实现了对混凝土内部温度变化的即时感知与动态响应，精准调控循环水的温度、流速及流向，彻底解决了人工操作带来的局限与不便。

大体积混凝土智能温控系统的引入，不仅显著提升了温控的精准度与灵活性，更在源头上有效减少了混凝土因温度变化不均而产生的开裂风险，确保了工程结构的长期稳定性与耐久性。其在线、实时、个性化的数据采集与控制能力，确保了每一项温控参数都能得到即时、精确的分析与调整，为混凝土质量的精细化管理提供了强有力的技术支撑。

通过大体积混凝土智能温控机可以实现混凝土温度调控过程的全面可视化与智能化管理。冷却水管可采用外径 32 mm，壁厚 2.0~3.0 mm 的黑铁管。每个通水循环冷却水管累计长度控制在 150 m 左右。经仿真计算，冷却水管水平及竖向间距控制在 0.8 m 左右即可满足控制混凝土自约束裂缝要求。

混凝土覆盖冷却水管后开始通水冷却，通水冷却宜满足下列要求：

- 1) 定期改变通水方向；
- 2) 冷却循环水流速不小于 0.6 m/s；
- 3) 冷却循环水温度与混凝土最高温度之差不超 25 ℃；
- 4) 通水时间根据降温速率确定，一般不超过 15 d；
- 5) 混凝土降温速率不得超过 2 ℃/d。

3.3 技术先进性

大体积混凝土智能温控机通过压缩机制冷原理降低冷却循环水温度，通过电加热方式升高冷却循环水温度。在混凝土浇筑初期的升温阶段，大体积混凝土智能温控机通过读取混凝土实时温度并结合输入的温控指标，可以输出低于混凝土温度 25 ℃左右的冷却循环水，以最大限度地提高混凝土冷却降温效率，并能使冷却循环水温度随混凝土实时温度的升高而动态升高，避免由于冷却循环水温度过低而造成混凝土结构内部冷击开裂。混凝土降温阶段，如果冷却循环水停止并采取保温措施后，混凝土结构的降温速率仍然过快（超过 2 ℃/d），大体积混凝土智能温控机还可以通过提高冷却循环水温度的方式向混凝土结构补充热量，从而达到减小混凝土降温速率、避免因混凝土降温速率过快而产生的开裂问题。

大体积混凝土智能温控机的工作状态可根据现场控裂需要，提前进行参数设置，以实现最佳工作状态。

4 现浇墩台大体积混凝土温度场仿真对比分析

4.1 材料热特性值确立

根据表 1 所列 C40F300 混凝土配合比的水泥用量以及矿粉的掺量，水化热折减系数取 0.92，折算后配合比水泥用量当量值为 437 kg。水泥采用 P·O42.5 水泥，7 d 水泥水化热按经验值取 261.7 kJ/kg。本工程所使用的材料参数及热特性值如表 2 所示。

表 2 材料参数及热特性值

项目	数值
比热容/(J·(kg·℃) ⁻¹)	1 046.75
容重/(kg·m ⁻³)	2 387.1
热传导率/(W·(m·K) ⁻¹)	0.64
对流系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)	13.95
28 d 抗压强度/MPa	40
28 d 弹性模量/MPa	3.25×10 ⁴
热膨胀系数	1.0×10 ⁻⁵
泊松比	0.18
单位体积水泥含量/(kg·m ⁻³)	437

4.2 有限元模型的建立

根据天津海洋工程装备制造基地建设项目码头工程(二期)现浇墩台 DT1 的实际结构尺寸及施工组织设计，应用 Midas Civil 建立墩台 DT1 有限元模型如图 1 所示。并对墩台 DT1 未采取循环冷却水和采取循环冷却水进行温度场和温度应力场模拟。

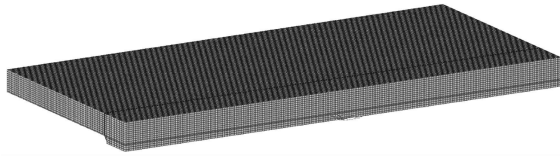
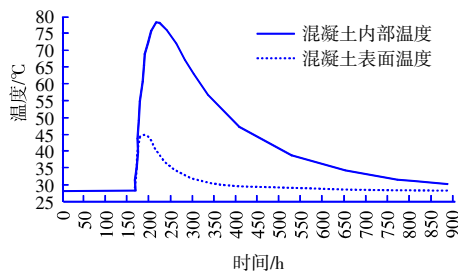


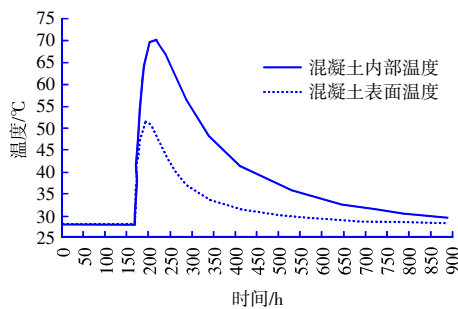
图1 墩台 DT1 有限元模型

4.3 现浇墩台 DT1 温度场对比分析

现浇墩台 DT1 第 2 步混凝土(第 1 步混凝土 7 d 后浇筑)未采取循环冷却水和采取循环冷却水模型分析见图 2。



(a) 未采取循环冷却水



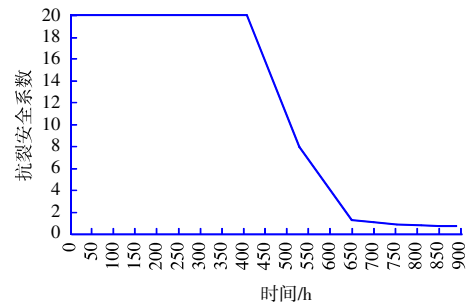
(b) 采取循环冷却水

图2 现浇墩台 DT1 温度场变化曲线图

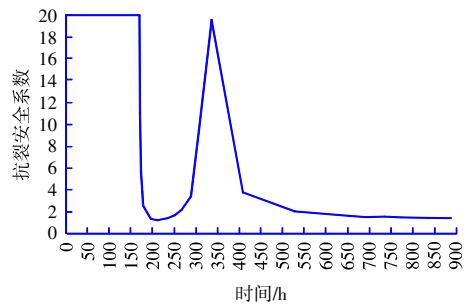
由图 2(a)可以看出,第 168 h 浇筑现浇墩台 DT1 的第 2 层混凝土,第 2 层混凝土表面在第 192 h(浇筑后 24 h)时温度达到最高值 45.2 °C,内部在第 216 h(浇筑后 48 h)时温度达到最高为 78.1 °C,此时表面温度为 40.8 °C,最大内表温差 37.3 °C,超过了相关规范允许值。由图 2(b)可以看出,采取冷却循环水控制混凝土温度后,第 2 层混凝土表面在第 192 h(浇筑后 24 h)时温度达到最高值 52.1 °C,内部在第 216 h(浇筑后 48 h)时温度达到最高为 69.8 °C,此时表面温度为 49.6 °C,最大内表温差 20.2 °C。对比可知,采取冷却水管降温后现浇墩台 DT1 混凝土内部最高温度明显下降,内表温差符合规范要求。

4.4 现浇墩台 DT1 温度应力仿真计算结果

分别对现浇墩台 DT1 第 2 层混凝土未采取循环冷却水和采取循环冷却水的温度应力场进行仿真分析,结果见图 3。



(a) 未采取循环冷却水



(b) 采取循环冷却水

图3 现浇墩台 DT1 混凝土主应力抗裂安全系数变化曲线

由图 3(a)可知,在第 700 h 时抗裂安全系数(拉应力比)最小值为 0.89,小于应力评价标准规定的 1.15,由此可见如不采取裂缝控制措施现浇墩台 DT1 第 2 层混凝土理论上会产生裂缝。采取循环冷却水后,现浇墩台 DT1 第 2 层混凝土的主应力有明显下降,抗裂安全系数大于 1.15。

4.5 分析结果

从分析结果可以看出,采取综合降温防裂措施后,结构内部的水化热最高温升和应力均有明显下降,抗裂安全系数大于 1.15,理论上可以避免由于温度应力产生的有害裂缝。

5 现浇墩台 DT1 实际温度监测

5.1 混凝土温度监测目的

在大体积混凝土施工过程中,浇筑阶段需实施严格的温度监控,确保混凝土浇筑时的温度处于可控范围内。进入养护阶段后,需进一步监测混凝土块体的温度变化,包括升温与降温过程、内部与外部的温度差异、降温速率以及周围环境温度等关键参数。这些监测措施旨在全面掌握混凝土的温度状态,预防因温度变化过大或过快而引发的质量问题,特别是温度裂缝的产生,从而确保大体积混凝土结构的长期稳定性和安全性,同时可以为与有限元温度场的对比提供数据支持。

5.2 温度监测点平面布置

根据现浇墩台 DT1 温度场有限仿真计算显示

的温度场分布特征,现浇墩台共布置1号—4号共计4个温度监测点。每个监测点布置5个温度传感器,分别在第1层混凝土中心,第1层混凝土表面,第2层混凝土下表面,第2层混凝土中心,第2层混凝土上表面。

5.3 现浇墩台 DT1 大体积混凝土温度监测结果

现浇墩台 DT1 大体积混凝土内部最高温度为 69.77 °C,温峰出现时间为混凝土浇筑完成后第 36 h。最大内表温差为 20.32 °C,出现时间为混凝土浇筑后第 50 h,温峰后第 1 d 最大降温速率为 1.9 °C/d,第 2 d 最大降温速率为 1.9 °C/d。

5.4 现浇墩台 DT1 温度对比

利用 Midas 对采取循环冷却水后的温度场仿真结果与实际采集温度对比,仿真结果与实际温度基本相符,如表 3 所示。

表 3 现浇墩台 DT1 温度场仿真结果与实际对比

温控指示	仿真结果		实际结果	
	数值/°C	出现时间	数值/°C	出现时间
内部最高温度	69.8	第 48 h	68.28	第 36 h
最大内表温差	20.2	第 48 h	20.32	第 50 h

5.5 所有现浇墩台温度监测结果

6 个墩台施工过程中温度监测结果见表 4。

表 4 各墩台温度及降温速率

墩台	内部最高温度/°C	出现时间	最大内表温差/°C	降温速率(温峰后)/(°C·d ⁻¹)			
				第 1 d	第 2 d	第 3 d	第 4 d
DT1	68.28	第 36 h	20.32	1.9	1.9	1.9	1.8
DT2	69.77	第 29 h	20.85	1.9	2.0	2.0	1.8
DT3	67.66	第 36 h	19.9	0.9	1.9	1.8	1.7
DT4	67.5	第 48 h	20.1	1.8	2.0	2.0	1.8
DT5	68.69	第 30 h	24.9	1.9	1.1	1.1	1.1
DT6	69.57	第 30 h	18.15	1.2	1.2	1.4	1.5

现浇墩台大体积混凝土浇筑温度符合 JTS/T

202-1—2022《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程》^[9]中规定的浇筑温度不高于 28 °C、混凝土内部最高温度不高于 70 °C、混凝土内表温差不超过 25 °C。第三方检测机构对承台实施了全面且细致的检测流程,所有检测指标均符合既定合格标准,验证了承台的各项性能与质量均达到了要求。

6 结语

本文系统研究了冷却循环水技术在大体积现浇墩台混凝土施工中的温度控制效果与应用价值。通过引入智能温控系统,实现对混凝土内部温度的实时监测与动态调控,显著降低了内部最高温度与内表温差,有效抑制了温度裂缝的产生。结合有限元仿真与现场实测数据,验证了该技术在工程实际中的可行性与准确性,各项温度指标均符合规范要求,具有良好的实用性与推广价值。然而,本研究仍存在一定局限性,如温度监测点数量有限,未能全面反映结构内部温度分布;此外,环境变化与材料性能波动对温控效果的影响尚未深入分析。后续研究可进一步优化监测网络、拓展不同气候与材料条件下的应用验证,并探索与 BIM、物联网等技术的深度融合,以实现更智能、精准的大体积混凝土温控管理。

参考文献:

- [1] 郑伟,袁中夏,乔宏霞,等.考虑水化度影响的大体积混凝土温度场分析[J].材料导报,2024,38(S1):262-268.
- [2] 王新刚,杨润来,陈智军.大体积混凝土智能温控系统的研发及应用[J].水运工程,2020(1):118-121,143.
- [3] JTS/T 202-1—2022,水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程[S].
- [4] GB 50496—2018,大体积混凝土施工规范[S].
- [5] 蒋昊楠.循环冷却水管降温技术在碾压混凝土施工中的探索与应用[J].人民黄河,2024,46(S1):148-150.
- [6] 中交天津港湾工程研究院有限公司,等.一种大体积混凝土温度智能调控方法:ZL 2021 1 1449756.0[P].2023-05-02.