

郭家沱长江大桥锚碇大体积混凝土水化热研究

谭双全¹, 黎人亮², 熊桂开¹, 祝小龙¹, 胡奇¹

(1.重庆市勘测院, 重庆市 400020; 2.重庆中建郭家沱大桥建设运营管理有限公司, 重庆市 400020)

摘要:重力式锚碇是典型的大体积混凝土结构,施工过程中的水化热应予以严格控制,避免产生温度裂缝。以郭家沱大桥锚碇为例,在施工前进行水化热分析,制定相应的大体积混凝土温控措施。经现场监测,各项指标均满足标准限值,未出现混凝土温度裂缝,证明温控措施有效,确保了锚碇质量。

关键词:锚碇;大体积混凝土;水化热;温控

中图分类号: TU755

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)03-0114-05

0 引言

随着我国交通事业的发展,悬索桥在大跨径桥梁中应用越来越广泛。根据主缆锚固方式的不同,悬索桥可以分为地锚式和自锚式。地锚式悬索桥锚碇根据构造型式又分为两种类型,分别为隧道式锚碇和重力式锚碇,其中重力式锚碇是典型的大体积混凝土结构。

我国相关规范中对大体积混凝土的定义为:混凝土结构物实体最小尺寸 $\geq 1\text{ m}$ 的大体量混凝土,或预计会因混凝土中胶凝材料水化引起的温度变化和收缩而导致有害裂缝产生的混凝土^[1]。

如今,工程师们早已认识到温度应力是导致大体积混凝土结构出现各类裂缝的重要原因^[2]。在实际工程中,大体积混凝土结构由于其在施工过程中一次性浇筑方量比较大,水泥水化反应所释放的热量在自然状况下很难传递到结构表面,集聚在结构内部的巨大热量将使混凝土结构内部温度快速上升,而此时结构外部温度往往又比较低,这将导致混凝土结构内外存在较大的温差从而产生温度应力使其外表面处于受拉状态,当结构的产生温度应力高于混凝土的抗拉强度承载力,将使混凝土结构产生开裂,其整体性将被破坏,削弱混凝土结构的功能,影响此混凝土结构在后续施工及正常使用过程中的状态及安全^[3]。所以,进行大体积混凝土施工前,开展相应结构的温控措施以及水化热规律研究就具有重

要意义。对大体积混凝土结构施工过程中产生的水化热进行严格控制,避免其温度应力超限,从而产生温度裂缝尤为重要。本文以在建的郭家沱长江大桥锚碇为例,在锚碇结构施工前进行其水化热研究,掌握结构施工中的水化热规律,从而制定大体积混凝土结构降低水化热方案及相应的温控措施,保证结构在施工中不产生温度裂缝。

1 工程概况

作为六纵线跨越长江的重点控制性工程,重庆郭家沱大桥是一座公轨两用桥梁,该桥采用双层布置。上层为城市快速路,设计时速 80 km/h ,双向八车道,荷载标准为城-A级,人群荷载 2.4 kN/m^2 ,路幅宽度 37 m ,桥面横坡为双向 2.0% ,桥面纵坡为双向 0.5% 。下层为双线轨道交通,轨道纵坡为双向 0.5% ,轨面上净高 7.0 m 。

郭家沱长江大桥主桥桥跨布置为 $67.5\text{ m}+720\text{ m}+75\text{ m}=862.5\text{ m}$,是一座单孔悬吊双塔三跨连续钢桁梁悬索桥,主缆跨度布置为 $253.3\text{ m}+720\text{ m}+253.3\text{ m}$,垂跨比 $1/9$,垂度 80 m ,两根主缆中心距为 38.0 m 。吊索设置于中跨,桥塔处吊索距桥塔中心线水平距离为 15 m ,吊索水平间距为 15 m 。

郭家沱大桥南、北锚碇均采用重力式锚,为满足锚碇地基承载力及结构抗滑移、抗倾覆的要求,锚体及基础后部岩体按照 $1:0.3$ 开挖坡率放坡,对边坡按照永久边坡进行支护设计,锚体及基础采用原槽浇筑,以降低侧向土压力的影响。锚碇主要由锚体、散索鞍、前锚室、后锚室、压重块及扩大基础构成,各部采用材料见表1。

本文主要以南锚碇为例,南锚碇三维构造示意图见图1。南锚碇区位于丘陵斜坡,地形坡度一般 $22^\circ\sim$

收稿日期: 2021-05-22

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展(面上项目)
(cstc2020jcsx-msmX0080)

作者简介: 谭双全(1988—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

表 1 锚碇材料	
项目	混凝土标号
鞍部	C40
锚体及压重块、扩大基础、锚室、前墙	C30
扩大基础垫层	C20

30°,上覆土层为粉质黏土,厚度 0~2.0 m;下伏基岩为砂质泥岩夹薄层砂岩,砂质泥岩岩体完整性指数 0.71~0.79,为较完整~完整,岩体单轴饱和抗压强度为 10.1 MPa。南锚碇基础采用扩大基础并设置台阶,基础底面均位于中风化泥岩岩层上;基础横桥向宽 62 m,顺桥向总长 55 m,设置 3 m 襟边;扩大基础总高 15 m,基础设计用 C30 混凝土 24 366 m³。

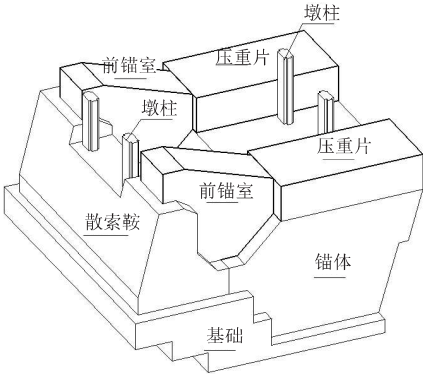


图 1 南锚碇三维构造示意图

散索鞍采用 C40 混凝土结构,横桥向总宽 56 m,设计用混凝土 15 403 m³。压重块采用 C30 素混凝土浇筑,横桥向总宽 15.5 m,顺桥向长 31.3 m,高 6.8 m;压重块共 2 块,设计用混凝土 7 242 m³。锚体横桥向宽 56 m,顺桥向总长 42.8 m,高 26.8 m,设计用 C30 混凝土 47 073 m³。锚碇为大体积混凝土结构,对锚体、散索鞍和前锚室应每块分层灌注。为防止锚体温度裂缝的发生,除要求采用低水化热水泥和对骨料进行预冷外,每层设置冷却管,进行冷却,并且锚体表面设置 $\phi 20$ mm 温度钢筋,间距 20 cm,此外,锚体表面还需设置 $\phi 6$ mm 间距 10 cm $\times$ 10 cm 的冷轧带肋钢筋网。

2 锚碇施工

扩大基础、锚体、压重块、鞍部等构造物属大体积混凝土结构物,为避免混凝土水化热引起混凝土开裂,将采用分层浇筑混凝土的方式施工,层厚为 1~2 m,并沿锚碇纵向中心线设置一条 2 m 宽的后浇带,将锚碇基础、锚体及鞍部分成左右两个部分,如图 2、图 3 所示。

混凝土浇筑完成后由于内部水化热影响较易产

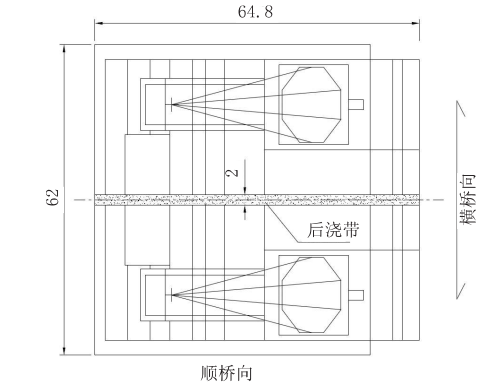


图 2 南锚碇后浇带设置示意图(单位:m)

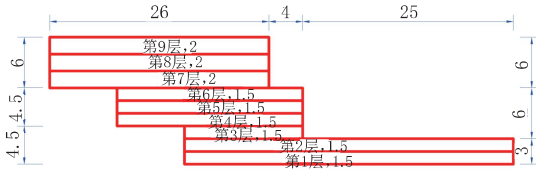


图 3 锚碇基础分层(单位:m)

生裂缝,为此在施工时设置冷却水管。扩大基础、锚体、压重块、鞍部等构造物均按照分层来布置冷却水管,小于等于 1.5 m 每层设置一层冷却水管,大于 1.5 m 每层设置两层冷却水,冷却管为直径 D50 mm,厚度 3.5 mm 的薄壁钢管,每层内冷却水管间距 1 m 如图 4 所示。

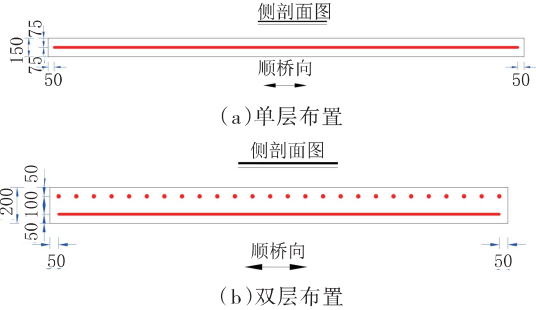


图 4 冷却管布置示意图(单位:cm)

3 温度控制措施

3.1 混凝土配合比设计

在制定混凝土温度控制措施时,首先应从混凝土材料本身性质出发,对大体积混凝土进行配合比设计,其基本原则是控制混凝土性能,配置出极限拉伸变形能力大、绝热温升小、线胀系数小、热强比小、抗拉强度大,以及混凝土自生体积变形至少应是低收缩率,最好为微膨胀的混凝土。在进行混凝土配合比设计时应按照低水胶比、低坍落度、低砂率、掺高性能引气剂、高效减水剂、及高粉煤灰掺量的基本原则进行设计,本工程 C30 混凝土的配合比如表 2 所示。其中,P.O42.5 水泥 R28=52.7;细骨料为机制砂,细度模数 2.7;粗骨料碎石粒径 5~20 mm。

表2 C30混凝土配合比

材料名称	P.O42.5水泥	粉煤灰	矿粉	细集料	粗集料	水	外加剂
每立方米用量/kg	200	70	70	833	1 069	163	4.8
相对用量/%	8.30	2.90	2.90	34.57	44.36	6.76	0.20

3.2 混凝土性能控制

温度控制措施中对于混凝土的性能控制,可根据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F5—2011)和《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)中的相关要求控制,其基本要求如下:

- (1)混凝土浇筑结构在入模温度基础上的温度升高值不宜大于 50℃;
- (2)混凝土内部最高温度小于等于 75℃、内表温差小于等于 25℃;
- (3)混凝土浇筑体的降温速率不宜大于 2.0℃/d;
- (4)混凝土浇筑体表面与大气温差不宜大于 20℃;
- (5)层与层之间的混凝土浇注间隔时间控制,按前次浇注混凝土核心温度与其表面温度差应小于 20℃,同时已浇注混凝土的强度应大于其设计强度的 50%。

3.3 埋设冷却水管及其控制要求

大体积混凝土在进行浇筑施工时,可以通过在绑扎结构钢筋时预先埋置冷却水管,在浇筑过程中,通过埋置的冷却水管中的水体流动带走混凝土内部由于水化热反应产生的巨大热量,保持所浇筑的混凝土结构内外温差不过大,可以避免产生超限的温度应力带来的温度裂缝。对于大体积混凝土结构中所埋置的冷却水管一般有如下几点要求:

- (1)冷却管使用前应做压水试验,以防出现管道漏水、阻水等情况,通水时间大约在 1h,对于出现前述问题部位马上采取修补措施;
- (2)冷却管进水口处布设分水器,每套冷却水管布设 1 个分水器,分水器设置控制阀门;每套水管应采用单独的阀门,并对每套水管逐一编号;
- (3)混凝土内部通水降温,进出口水的温差宜小于等于 10℃,且水温与内部混凝土的温差宜小于 20℃,降温速率宜小于 2℃/d^[4]。

3.4 混凝土浇筑温度的控制

在进行大体积混凝土结构的浇筑施工时,控制混凝土的浇筑温度对控制混凝土裂缝是相当重要的。同一混凝土,相较而言,浇筑入模时温度高的混

凝土所产生的温升值要比入模温度低的增大很多。所以在浇筑施工时,现场需根据施工时的环境温度对应调整混凝土的入模温度。施工过程中应控制好原材料温度和在生产运输过程中的保温,从而满足浇筑温度小于 28℃的相关要求,保证混凝土入模时温度在相对合适范围。

3.5 混凝土的养护

混凝土的养护主要包括温度和湿度,这两项因素将在较大程度上影响到结构表层混凝土的抗裂性、耐久性。在混凝土结构刚刚浇筑成型的一段时间内,结构本身并未产生足够的强度,混凝土的水化反应还在持续进行,所以在浇筑完成后需要做好结构的养护工作,保证其温度和湿度;从而进一步促进内部水化反应的加速进行,而混凝土的水泥只有其水化反应进行到一定程度才能形成有利于混凝土强度和耐久性的微结构。对于混凝土的养护一般要求有:

- (1)当环境温度大于 5℃时,根据混凝土内部升温情况,可推迟保温养护,当施工时现场环境温度小于 5℃,应对混凝土结构进行保湿、保温养护^[5]。
- (2)普通混凝土养护时间不少于 14 d,掺粉煤灰混凝土养护时间不少于 21 d。

3.6 监测实施方案及仪器设备

为实时监控浇筑混凝土时结构内部温度变化,大体积混凝土结构浇筑时的温度监测工作应提前制定好,本工程的监测方案及仪器设备要求如下:

(1)监测实施方案

监测工作包括选购传感器、现场预埋、测量及整理数据、完成报告等。混凝土的内部温度监测详细流程如图 5 所示。

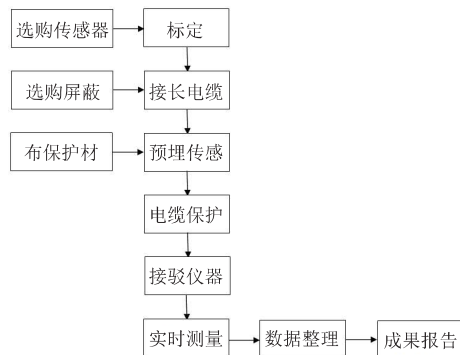


图5 温控监测流程图

传感器的选购及预埋工作应在混凝土浇筑施工前实施好。对于混凝土的温度测试,应保证在混凝土浇筑完后,能实时采集现场温度。当混凝土温度进入下降阶段,需对冷却水管流量进行合理控制,以防止混凝土温度下降过快。根据现场实测的温度决定具

体的冷水管通水情况。

(2)仪器设备

温度传感器采用 JMT-36C，采集温度的设备采用 JMW T-64RT。

(3)测温元件布置

温度监测元件的布置原则为重点突出且兼顾全局。本工程分析时按照温度变化的一般性规律以及结构对称性,选择仅在对称轴的一侧布置监测点,将浇筑平面图的四分之一平面作为监测区,部分传感器布置如图 6 所示。

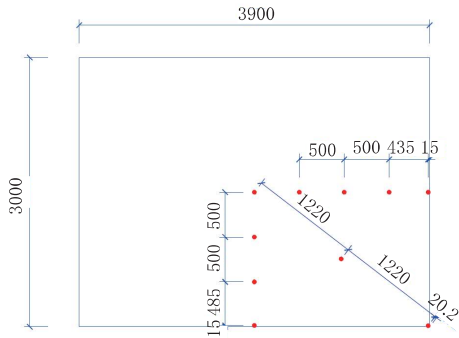


图 6 传感器布置图

3.6 温度监测停止条件

混凝土的降温速率和内外温差满足规范限值，并且环境最低温度与混凝土最高温度两者的差值连续三天小于 25℃时,温度监测工作可停止^[5]。

4 数值分析

为了在施工前研究掌握本工程中锚碇的水化热变化规律,在分析计算时,根据实际的施工情况将锚碇分为压重块、散索鞍、锚块和基础四部分,每个部分分别建立有限元模型分析，混凝土施工步骤按分层分块浇筑，埋置的冷却水管按照实际布置方案进行布设。本文选取南锚碇基础进行分析介绍。

4.1 计算参数

锚碇水化热计算热工参数见表 3,根据当地平均气温,环境温度变化曲线如图 7 所示。图 8 为南锚碇基础三维有限元分析模型,图 9 为冷却水管布置方案。

表 3 水化热计算参数

构件位置物理特性	地基	C30
比热 / $[kJ \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$	0.88	1.001
比重 / $(kg \cdot m^{-3})$	2 560	2 409.8
热传导率 / $[kJ \cdot (m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1}]$	10.8	10.94
钢模板对流系数 / $[kJ \cdot (m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1}]$	50.2	
浇注温度 / $^\circ C$	25	25
热膨胀系数	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}
泊松比	0.2	0.2

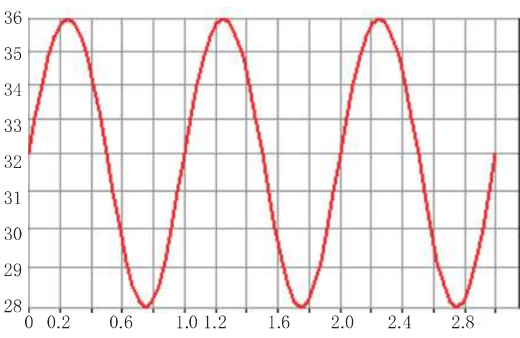


图 7 温度变化曲线

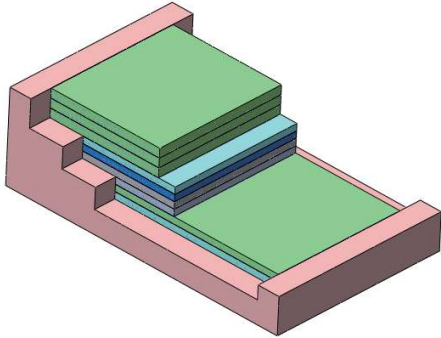


图 8 有限元模型

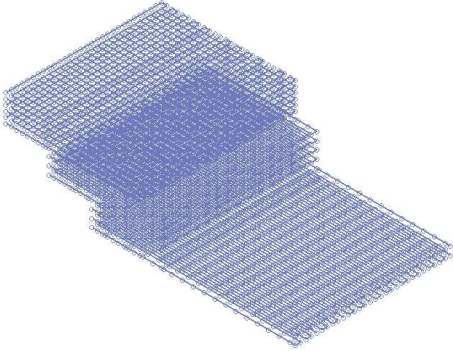


图 9 冷却水管布置

4.2 计算结果

限于篇幅,本文以基础第一层为例进行介绍。

(1)混凝土内部温度

由图 10 可知,南锚碇基础第一层混凝土浇筑后内部温度最大值约为 51.4℃,发生在浇筑后的第 24 h。

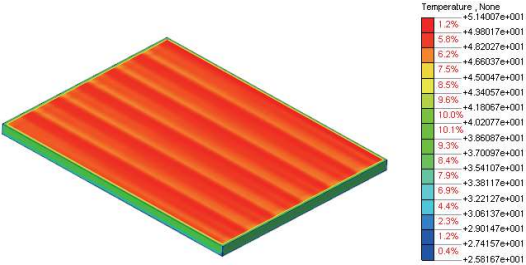


图 10 锚碇基础温度云图

(2)混凝土内部温度曲线

由图 11 可知,南锚碇基础第一层混凝土浇筑后的结构内表温差小于 25℃，且混凝土结构最大温度减去入模温度小于 50℃,满足规范要求。

南锚碇基础第一层于夜晚浇筑，约早晨 8 点浇

筑完成。现场监测数据表明,第二天中午 13:00—14:00 达温度峰值,约 60.7℃,温度峰值出现的时间与理论计算相接近。温度最大值较理论值存在一定偏差,主要因为本段时间正是重庆一年中的高温天气,复杂的外部边界条件,计算模型不能完全模拟其影响,但整个升降温趋势基本一致。

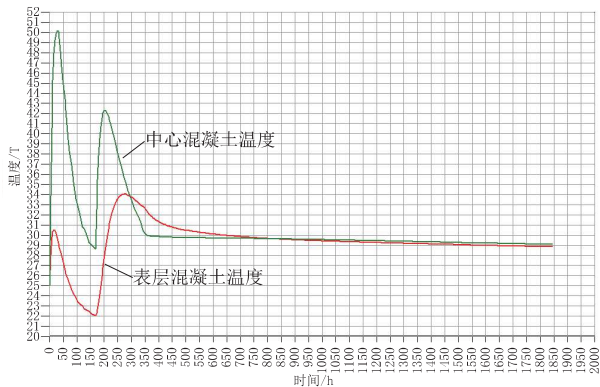


图 11 锚碇基础理论温度曲线图

5 结 语

郭家沱大桥南锚碇基础于 2020 年 8 月开始施工,2020 年 10 月施工完成。施工过程中,按照本文所述方法进行大体积混凝土温度控制,南锚碇基础混凝土的最高温度、最大温升、内外温差及层间温差均未超过标准限值。经现场检查,未发现混凝土温度裂缝,保证了混凝土的施工质量,为后续锚碇结构的施工提供了技术支持和实践经验,也对类似大体积混凝土结构的施工和分析提供了技术指导和理论参考。

参考文献:

- [1] GB 50496—2018 大体积混凝土施工标准[S].
- [2] 王军玺,吴伟雄,李琼,等.大体积混凝土锚碇温度应力特征分析[J].铁道科学与工程学报,2016(3):454-462.
- [3] 李航.悬索桥锚碇大体积混凝土水化热分析[D].成都:西南交通大学,2017.
- [4] JTG/T F50—2011,公路桥涵施工技术规范[S].
- [5] GB/T 51028—2015,大体积混凝土温度测控技术规范[S].

(上接第 110 页)

4 结 论

深圳水库截排隧洞由于上游汇水边界条件改变,隧洞水位条件发生变化,因此有必要复核在新水位条件下的过流能力能否满足上游泄洪及深圳水库水质保障的需求。本文通过过水隧洞理论计算与基于 1D 水流特征隐式格式方法相结合,研究了隧洞过流水力要素,为隧洞自身设计条件及后续的加固改造提供了依据。得出的主要结论如下:

(1)过水隧洞从无压流态变换至有压流态时,过流能力会有一小幅下跌,其原因为隧洞湿周增大,有效水力半径减小,沿程水损增大。有压流过流能力随上下游水位差增大而小幅提升,流量增加能力有限,无限制提升上游水位以期增加隧洞过流能力的经济

效益较差。

(2)隧洞有压流水力计算公式与基于 1D 水流特征隐式格式的计算结果高度吻合,证实了该模拟方法的准确性,为过水隧洞水力计算分析提供了新思路。

参考文献:

- [1] 李炜.水力计算手册(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [2] 李强.长距离输水系统明满流及水力控制研究[D].天津:天津大学,2006.
- [3] 林劲松,巨江,张根广,等.水电站长引水渠道水力瞬变过程计算研究[J].长江科学院院报,2009,26(12):36-40.
- [4] J Li, A Mccorquodale. Modelling mixed flow in storm sewers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,125(11): 1170-1180.
- [5] 张婧媛,杜敏,鞠小明.基于明满流瞬变计算方法的大型灌区输水隧洞最优泄水流量计算[J].长江科学院院报,2021,38(6): 60-66.