悬索桥锚碇大体积砼温控参数分析

Analysis of Temperature Control Parameters of Large Mass Concrete in Anchor of Suspension Bridge

刘建 朱琦宏

Jian Liu Qihong Zhu

长沙理工大学 土木学院 中国·湖南 长沙 410114

School of Civil Engineering, Changsha University of Technology, Changsha, Hunan, 410114, China

摘要:以泸州市城东长江二桥东锚碇部分锚体施工为工程背景,进行了大体积砼温度变化规律及施工控制措施的研究。根据热力学基本原理,利用有限元建立模型并进行仿真计算;在施工过程中进行了实时温度监测与调整,并将实测值与计算值进行了对比;针对入模温度、表面对流系数、冷却水的温度进行了参数分析。研究结果表明:该工程入模温度宜控制在 20℃ 以下,浇筑初期冷却水流速不低于 1.5m/s,降温期间冷却水流速根据实时监控数据进行调整,取得了较好的温控效果。

Abstract: taking the construction of the east Anchorage part of the second Yangtze River Bridge in the east of Luzhou City as the engineering background, the temperature variation law of mass concrete and the construction control measures are studied. According to the basic principle of thermodynamics, the model is established by finite element method and the simulation calculation is carried out. The real-time temperature monitoring and adjustment are carried out during the construction process, and the measured values are compared with the calculated values. The parameters of the mold temperature, surface convection coefficient and cooling water temperature are analyzed. The results show that the mold temperature of the project should be controlled below 20℃, and the cooling water velocity is not less than 1.5 m/s, in the initial stage of pouring. The cooling water velocity is adjusted according to the real-time monitoring data during the cooling period, and a better temperature control effect is obtained.

关键词: 大体积混凝土;锚碇;入模温度;对流系数;通水策略

Keywords: mass concrete; Anchorage; mold temperature; convection coefficient; water strategy

DOI: 10.36012/etr.v2i11.2911

1 前言

大体积混凝土是指:混凝土结构物最小尺寸不小于 1m 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]。由于大体积混凝土具有结构尺寸大、配筋率低和施工较复杂等特点,除了要满足强度、刚度和耐久性的要求外,还必须要采用合理的措施来控制温度裂缝的产生和开展^[2]。在大体积混凝土的施工中,通过控制混凝土入模温度,能有效推迟混凝土内部温度峰值的出现时间^[3]。在大体积混凝土浇筑过程中,主要的控温措施时水管冷却,能有效降低温度梯度,减小裂缝的产生概率^[4-7]。张玉平、张亚昕^[8]等人通过对支墩基础大体积混凝土模型的数值分析,得出了大体积混凝土温度冷却水流速和通水时长的施工控制指标。司政等人提出大体积混凝土施工时采用低温通水冷却以削减混凝土最高温

度是工程中普遍采用的方式,但较低的水温往往会使得水管周边混凝土承受较大的冷击效应^[9]。但实际工程中冷却水管的水温、流速等没有形成统一的规定和操作规范。本文以泸州市城东长江二桥为工程背景,按照设计方案、实际浇筑环境及经验公式拟定计算参数,通过有限元软件 Midas FEA 进行大体积混凝土温度场的计算,将实测数据和计算结果进行对比;然后通过参数对比分析,确定合理的入模温度、保温措施及通水策略。

2 工程背景

泸州市城东长江二桥是泸州市沙茜过江通道及连接线工程的全线主要控制工程,主跨为单跨双塔地锚式公轨两用悬索桥。全长 1016m,其中主跨 576m。大桥东岸为重力式锚碇,东锚碇基础采用现浇扩大基础形式,基坑开挖深度约

【作者简介】朱琦宏(1996~),男,湖南湘潭人,硕士在读,从事桥梁结构分析与工程控制研究。

23m,基础平面布置成矩形,平面尺寸为 72m×54m,高度 33m。锚体从结构受力和功能上分为锚块、散索鞍支墩、鞍部、前锚室及后浇带。由于锚碇体积较大,为避免浇筑施工后出现收缩和温度裂缝,锚块和基础各分两块进行浇筑,各块之间设置 2m 后浇带,并在锚块和基础之间设置 2m 的后浇带。本文计算选用锚块左幅部分浇筑时的数据,单幅平面尺寸为 24m×26m,每层浇筑厚度为 2m。

3 计算参数的确定

在大体积混凝土仿真计算中,混凝土的性能,特别是热学性能,对计算结果的影响非常大,为使有限元模拟的结果更加精确,本文将根据现场实际环境及以往工程经验公式拟定计算参数。

3.1 绝热温升

混凝土的绝热温升是指混凝土在完全隔热的密闭情况下,水泥的水化热作用所引起的温度升高^[10]。混凝土的绝热温升越高,其内表温差及降温速率就越大,产生有害裂缝的风险就越大。混凝土的绝热温升主要于混凝土内水泥的含量,在保证混凝土强度的同时,通过掺加粉煤灰等材料,可有效降低混凝土的绝热温升。本次工程中,锚碇部分采用抗渗等级 P10 的 C30 混凝土,配合比为:水 157kg/m³,水泥 234kg/m³,机制中砂 868 kg/m³,碎石 978 kg/m³,粉煤灰 156 kg/m³,减水剂 6.237 kg/m³。

为了更真实的模拟实际工程的情况,也确保绝热温升表达式与有限元软件软件的热源函数的定义保持一致,本文采用指数型函数来模拟混凝土绝热温升,其计算公式为:

$$\theta(\tau) = \theta_0(1 - e^{-m\tau})$$

式中: θ 为混凝土不同龄期的绝热温升; θ_0 为最大绝热温升; m 为相关常数。

本文中,取最大绝热温升为 41℃。

3.2 边界条件

大体积混凝土在施工过程中的边界条件非常复杂,朱伯芳^[10]将边界条件分为四类。本文在进行有限元计算时,将垫层的底面和侧面设为固定温度,属于第一类边界条件;由于结构具有对称性,简化模型取结构的 1/4,对称边界绝热,属于第二类边界条件;垫层的顶部与空气发生热传递,锚块的顶部及侧面通过保温材料与空气发生热传递,属于第三类边界条件;假设垫层与锚块之间接触良好,在接触面上的温度和热流量是连续的,属于第四类边界条件。

4 计算参数的确定

4.1 管冷参数

根据施工图设计及施工方案,东西锚碇施工采用 Φ48mm×3.5mm 的冷却管降温。东锚碇每层浇筑高度为 2m,每层混凝土布置 2 层冷却水管,采用蛇形布置方式。离底面的距离分别为 0.5m 和 1.5m,水管水平间距为 1m。在

混凝土升温阶段,为保证混凝土内部的降温效果,冷却水流量不小于 1.2m³/h。8h 内部混凝土达到最大温度后,为防止降温速率过快,降低冷却水用量或采用循环水。

5 有限元模型的建立及数据对比分析

5.1 有限元模型的建立

在前述条件设定下,本文通过 Midas FEA 有限元软件对泸州城东长江二桥东锚碇部分锚块进行了有限元计算。考虑到结构具有对称性,取其 1/4 结构建立模型,共计 12985 个节点,12192 个实体单元。有限元模型如下:

图 1 部分锚块计算模型

5.2 温控测点的布置方案

大体积混凝土施工前,应提前布置温度的测点布置。根据结构的对称性和温度变化规律,选择结构的 1/4 布置温度监测点。混凝土内部的温度监测点的布置,以真实地反映出混凝土块体的里外温差、降温速率及环境温度为原则。锚块温度监测点的布置如图 2 所示;每层布置 16 个监测点。

图 2 锚块温度监测点布置示意图(单位:cm)

5.3 温控测点计算值与实测值的对比

在大体积混凝土施工过程中,对比实测值和计算值的差别。选取锚块第 1~2 部最高温度和表层温度进行实测值和计算值进行对比。结果如图 3 所示。由图分析可得:现场的实测值与计算值吻合较好,由于水泥水化热作用,锚块浇筑内部后,内部温度迅速上升,到达峰值之后,通过内部冷却管和外表面散热,温度缓慢降低,趋于稳定。

(a) 第一层

(b) 第二层

图3 计算值和实测值时程曲线图

6 温控参数分析

在混凝土材料特性和实际施工环境确定的情况下,单独考虑各种因素对混凝土内部温度的影响,对比分析锚块第一层温度时程图,从而确定更合理的温控措施。

6.1 混凝土入模温度

混凝土入模温度与其内部最高温度密切相关,还会间接影响里表温差的大小。入模温度主要由原材料温度决定,在其他参数不变的情况下,依次选取 17℃、20℃、23℃ 的入模温度,分析不同入模温度对大体积混凝土温度场的影响。不同入模温度下的锚块温度和曲线如表 1 所示。

表 1 不同入模温度下混凝土内部最高温度(℃)

时间(h)	入模温度		
	17℃	20℃	23℃
12	32.8	35.7	38.7
24	41.9	44.7	47.6
36	46.4	49.0	51.7
48	47.8	50.2	52.7
60	47.4	49.6	51.8

72	46.0	48.0	50.1
84	44.3	46.2	48.0
96	42.5	44.3	46.0
108	40.8	42.4	44.0
120	39.2	40.7	42.1
132	37.7	39.1	40.4
144	36.4	37.6	38.9
156	35.1	36.3	37.4
168	34.0	35.1	36.1

由表中数据分析可得:不同入模温度下,混凝土内部在 48h 之后到达温度峰值,温度峰值出现的时间节点基本相同;入模温度 23℃ 时,混凝土内部最高温度为 52.7℃,当入模温度降低至 17℃ 时,混凝土内部最高温度为 47.8℃。温度峰值降低 4.9℃;可见降低入模温度对于控制混凝土内部温度峰值效果有显著效果。主要是因为入模温度较高时,加快了水泥水化热的速度。

6.2 表面对流系数

在大体积混凝土温控过程中,当混凝土开始降温时,需要在混凝土表层采取保温措施,防止结构因里表温差过大或降温速率过快产生温度裂缝。在工程中的保温措施主要时在结构与空气接触的表面覆盖土工布、草席或保温泡沫板等。为研究不同保温措施对温控效果的影响,在其他参数不变的情况下,依次选取 25、15、5kj/(m²·h·℃) 的对流系数,分析不同对流系数对于大体积混凝土温度场的影响。不同对流系数下的混凝土结构温度值如表 2 所示。

表 2 不同对流系数下混凝土温度(℃)

时间(h)	对流系数(kj/(m ² ·h·℃))					
	5		15		25	
	内部温度	表层温度	内部温度	表层温度	内部温度	表层温度
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
12	35.7	34.9	35.7	33.4	35.7	30.5
24	44.8	43.0	44.7	39.8	44.7	34.0
36	49.1	47.0	49.0	42.5	48.8	35.2
48	50.5	48.2	50.2	42.7	49.8	34.3
60	50.1	47.9	49.6	42.0	48.9	33.4
72	48.7	46.7	48.0	40.3	47.0	31.6
84	47.0	45.3	46.2	38.9	44.9	30.5
96	45.3	43.6	44.3	37.1	42.7	28.9
108	43.6	42.0	42.4	35.7	40.7	28.1
120	42.0	40.5	40.7	34.3	38.9	27.1

132	40.5	39.0	39.1	33.0	37.2	26.2
144	39.1	37.6	37.6	31.8	35.7	25.5
156	37.8	36.3	36.3	30.8	34.4	24.8
168	36.6	35.2	35.1	29.8	33.1	24.3

由表 2 分析可得:当表面对流系数为 $25\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 时内部最高温度为 49.8°C , 对流系数为 $5\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 时,内部最高温度 50.5 摄氏度。不同对流系数对混凝土内部温度峰值影响不大。表面对流系数从 $25\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 降低至 $5\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 时,结构表层最高温度从 34.3°C 升至 48.2°C , 内部平均降温速率从 $3.34^\circ\text{C}/\text{d}$ 降低至 $2.8^\circ\text{C}/\text{d}$ 。里表温差最大值从 15.5°C 降低至 2.3°C 。这是由于混凝土升温期间,表层混凝土主要通过与其表面空气发生热传递散热,而内部混凝土主要通过冷却水管内的冷却水发生热传递散热,故降低表面散热系数,对混凝土表层温度影响较大。降温系数较小时,里表温差小,降温阶段混凝土内部降温速率更小。

6.3 冷却水温度

在混凝土浇筑浇筑初期,使用温度较低的冷却水可有效降低混凝土内部温度,但冷却水管与混凝土温差过大容易导致水管周边混凝土承受冷击效应。在其他参数不变的情况下,混凝土升温期间取冷却水 20°C , 依次取降温阶段冷却水温度为 $20, 25, 30^\circ\text{C}$, 分析不同冷却水温度对大体积混凝土温度场的影响。不同冷却水温度混凝土内部温度如表 3 所示。

表 3 不同冷却水温度的混凝土内部温度

时间	冷却水温度($^\circ\text{C}$)		
	20.0	25.0	30.0
0.0	20.0	20.0	20.0
12.0	35.7	35.7	35.7
24.0	44.7	44.7	44.7
36.0	49.0	49.0	49.0
48.0	50.2	50.2	50.2
60.0	49.6	49.6	49.6
72.0	48.0	48.0	48.1
84.0	45.8	46.2	46.4
96.0	43.5	44.3	44.7
108.0	41.2	42.4	43.1
120.0	39.1	40.7	41.6
132.0	37.2	39.1	40.3
144.0	35.4	37.6	39.0
156.0	33.8	36.3	37.9
168.0	32.3	35.1	36.9

由表 3 分析可得:温峰到达之前,降温期间采用不同的冷却水温度对混凝土内部温度无影响,降温期间,冷却水温度 20°C 的情况下,混凝土内部降温速率为 $3.58^\circ\text{C}/\text{d}$, 冷却水温度 25°C 时,降温速率为 $3.02^\circ\text{C}/\text{d}$, 冷却水温度 30°C 时,降温速率为 $2.66^\circ\text{C}/\text{d}$ 。冷却水温度增加 10°C , 降温速率变化幅度达 25% 。可见,混凝土浇筑期间,根据混凝土内部温度实时调节冷却水温度,既不影响冷却水在升温期的冷却作用,还能有效降低混凝土内部降温速率。

7 结论

采用 Midas/FEA 软件,建立了锚块前 2 层的有限元模型,将计算得到的温度峰值与实测值进行比较,并对部分参数进行了分析。得到以下结论:

- ①不同入模温度对于温度峰值影响较大,在实际工程中应尽可能降低入模温度,最好将入模温度控制在 20°C 以下。
- ②通过使用保温性能较好的材料或增加保温层厚度(即降低对流系数)能有效降低混凝土里表温差和降温速率。
- ③本工程中,根据混凝土内部温度,及时冷却水流速及温度,取得了较好的温控效果。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50496-2018 大体积混凝土施工标准[S]. 中国建筑工业出版社 2018
- [2] 张玉平,李传习,张磊,刘海宽. 张花高速澧水大桥索塔基础大体积混凝土温控[J]. 科技导报, 2012, 30(34): 55-60
- [3] 段峥,马朝雷,王莉莉. 现浇大体积混凝土裂缝的成因与防治
- [4] 郭磊,韩永林,黄养连,等. 混凝土表面保温和水管冷却的温控效果研究[J]. 人民长江, 2011, 42(11): 27-31.
- [5] 鲁正刚,王修信. 考虑水管冷却的大体积混凝土承台温度控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5)
- [6] 孙维刚,倪富陶,刘来君,等. 大体积混凝土水化热温度特征数值分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2015, 36(4): 475-479.
- [7] 杨慧,刘军来. 某斜拉桥承台大体积混凝土水化热温度场研究与关键施工技术应用[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 152-156.
- [8] 张玉平,张亚昕,李传习. 某桥支墩基础大体积混凝土温控及参数分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(02): 51-57.
- [9] 司政,杨丹,黄灵芝,李守义,王正鑫. 小温差冷却对大体积混凝土温度应力的影响效应[J]. 应用力学学报, 2018, 35(05): 1146-1151+1192
- [10] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.