

# 基于温度场仿真的某悬索桥重力锚 温控监测设计与实践

鲁志强<sup>1</sup>, 杨晓泉<sup>2</sup>, 陈贺<sup>1</sup>, 廖明进<sup>3</sup>

(1. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041;

2. 云南省交通运输厅路网监测与应急指挥中心, 云南 昆明 650100;

3. 武汉科技大学, 湖北 武汉 430065)

**摘要:** 重力锚是悬索桥主缆的地下巨型锚固结构, 这一大体积结构的混凝土浇筑施工过程成为控制工程建设质量的关键。以某悬索桥的重力锚建设为例, 基于其特定气候环境, 通过科学设计材料配比, 并根据仿真方法模拟混凝土浇筑施工过程内外温度变化规律, 形成指导施工和布设浇筑施工的温控测点方案; 结果显示监测数据与仿真均呈现了重力锚浇筑施工温控过程的基本特点; 最后结合案例的施工过程总结了大体积混凝土浇筑过程的温控措施与建议。案例研究结果可为同类工程提供借鉴和参考。

**关键词:** 重力锚; 大体积混凝土; 温控; 仿真; 监测

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2021)01—0114—08

## Design and Application of Gravity Anchor Construction Monitoring Scheme for a Suspension Bridge Based on Temperature Control Simulation

LU Zhiqiang<sup>1</sup>, YANG Xiaoquan<sup>2</sup>, CHEN He<sup>1</sup>, LIAO Mingjin<sup>3</sup>

(1. Broadvision Engineering Consultants Co. Ltd, Kunming, Yunnan 650041, China;

2. Road Network Monitoring and Emergency Command Center, Yunnan Provincial Transportation Department, Kunming, Yunnan 650100, China; 3. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China)

**Abstract:** Gravity anchor is the underground anchorage structure of the main cable of suspension bridge. Due to its huge shape, the temperature control during the concrete pouring has become a key concern in the construction. Taking the gravity anchor construction of a suspension bridge as an example, based on its specific climate environment, through the scientific design of material ratio, the simulation method is adopted to simulate the internal and external temperature changes in the process of concrete pouring construction, and the construction is then guided and the temperature control measuring points of pouring construction are arranged. The monitoring and simulation results show the basic characteristics of the temperature control process of gravity anchor pouring construction. Finally, combined with the general, the relevant temperature control measures and suggestions are given in the construction process of accumulative concrete pouring. The results of the case study can provide reference for similar projects.

**Keywords:** gravity anchor; mass concrete; temperature control; simulation; monitoring

随着我国建设的发展, 大型工程的日渐增多, 大体积的混凝土浇筑施工问题成为了工程界面临的普遍性问题。大体积混凝土的施工过程, 常伴随因水

化热等因素导致的材料温度变化, 并由此影响到混凝土的浇筑质量, 进而引起一系列的工程质量事故<sup>[1]</sup>。面对这一难题, 若能准确掌握其温度变化规

律,并有效控制其温度变化过程 and 变化幅度,就成为了保障工程施工质量的关键<sup>[2]</sup>。由于影响混凝土浇筑质量因素众多,更需因地制宜的结合浇筑过程,科学设计其浇筑方案,精确监测其温度变化并及时指导和调整施工方案,才能克服这一障碍。

某特大桥是普宣高速公路控制性工程之一,一岸采用隧道锚,另一岸采用重力锚。两岸锚碇的大体积混凝土施工过程自然成为了工程质量把控的重点。其中,大体积混凝土浇筑的温控问题成了影响工程质量的关键。为保障重力锚结构施工过程的温控质量控制,通过对重力锚结构特点分析,基于大桥所在区域环境气候特点,严格筛选混凝土原材料,科学设计其配比,分析混凝土热物理性质和抗裂能力,并采用仿真模拟手段展现施工过程温度变化特点,然后在此基础上,合理布置温控监测点,为重力锚的科学施工提供了强有力的技术保障。监测结果表明,这一监测方案的实施及施工控制技术,将重力锚温控施工过程严格控制在预定设计目标内,圆满地实现了工程质量目标。

## 1 工程概况

### 1.1 区域气象特点

某特大桥位于云南高原东北部,属低纬高原季风气候。工程所在区域气候的主要特点有:

(1) 所辖区域四季气候差异较小;常年光照充足。数据统计显示这一区域多年平均气温 13.4℃,年平均温度最高 14.6℃,年平均温度最低 12.7℃。而桥址区气候调查结果显示昼夜温差较大。

(2) 从雨水条件来看,年度降水的时间和区域较为集中。大约在每年 11 月一次年 5 月中旬,由于受大陆性气团控制,晴天多、降水少,占全年总降水量约为 16.8%,为干旱季。从每年 5 月下旬—10 月,受西南季风和东南季风影响,由于湿度大、日照少,期间降水量大增,这期间的平均降水量约为 815.7 mm,占年度降水量的 83.2%,尤其在年度 6 月—7 月,降水量更为集中,多洪涝灾害。

### 1.2 重力锚结构及其浇筑分层

本特大桥一岸锚碇形式为重力式锚碇,施工过程主要包括重力锚基坑开挖、浇筑锚体混凝土及锚固系统安装三大部分。其中重力锚的锚体由六个部分组成,即锚块、散索鞍支墩基础、散索鞍支墩、后浇段、前锚室和后锚室,以及锚室走道、防水等附属工程。

重力锚锚碇顶面高程为 1 831.0 m,底面高程

1 789.5 m,长 56.0 m,宽 44.0 m,高 42.5 m,混凝土总数量达 4.53 万 m<sup>3</sup>,详见图 1。

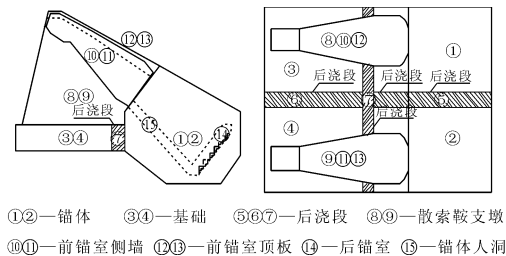


图 1 重力锚外观及结构组成

锚块、散索鞍支墩及其基础属大体积混凝土结构物,每块分层灌注,层厚约 2 m,具体分层情况见图 2。

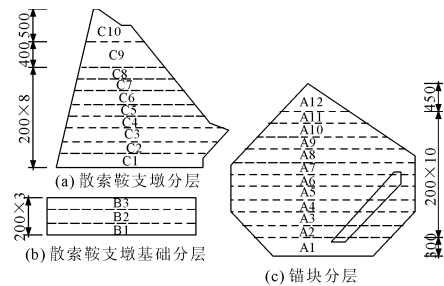


图 2 重力锚三个部分的浇筑分层(单位:cm)

重力式锚碇各部位混凝土强度等级 C30,分层混凝土方量见表 1。

表 1 重力式锚碇三部分的分层混凝土方量统计 单位:m<sup>3</sup>

| 层号 | 混凝土体积  | 层号  | 体积     | 层号  | 体积    |
|----|--------|-----|--------|-----|-------|
| A1 | 1197.0 | A10 | 783.0  | C4  | 411.2 |
| A2 | 1008.0 | A11 | 575.0  | C5  | 437.1 |
| A3 | 1176.0 | A12 | 529.0  | C6  | 409.0 |
| A4 | 1260.0 | B1  | 1008.0 | C7  | 349.3 |
| A5 | 1260.0 | B2  | 1008.0 | C8  | 294.1 |
| A6 | 1260.0 | B3  | 1008.0 | C9  | 440.7 |
| A7 | 1250.0 | C1  | 303.4  | C10 | 359.1 |
| A8 | 1165.0 | C2  | 326.2  |     |       |
| A9 | 989.0  | C3  | 366.9  |     |       |

注:单次混凝土最大方量 1 260 m<sup>3</sup>(A4—A6)

### 1.3 重力锚温控的重难点问题

- 本桥重力式锚碇大体积混凝土施工的特点是:
- (1) 结构尺寸大,浇筑方量大。
  - (2) 桥址区昼夜温差在 10℃ 以上,不易控制大体积混凝土内表温差。
  - (3) 泵送混凝土施工,胶材用量高,水化热温升大,易产生温度裂缝。
  - (4) 整个重力式锚碇施工期间,泵送混凝土施

工经过不同气候条件,并且锚碇埋于回填土层,易遭受地下水及土层盐碱侵蚀。

从上述特点来看,重力锚对材料和浇筑施工过程要求极为严格。一方面,混凝土表面密实度高,无蜂窝、孔洞等侵蚀通道,另一方面,混凝土方量大,胶凝材料用量较高,水化热高,混凝土内部最高温度远远高于外部气温;再者,混凝土受风速影响大,失水迅速,早期收缩大(包括塑性收缩、干缩、自收缩等);而且,混凝土在内外温差和收缩的叠加可能导致混凝土早期开裂。

为此,有必要针对大桥锚碇的大体积混凝土温控防裂技术进行研究,开展混凝土物理、热学性能试验,采用有限元计算方法模拟锚碇大体积混凝土的内部温度场及仿真应力场<sup>[3-5]</sup>,然后依据计算结果分析其温度场特点,并确定和提出严控有害温度裂缝的温控标准和温控措施。

## 2 基于重力锚温控特点的材料选择与配合比设计

从重力锚混凝土浇筑的温控过程而言,这是一个贯穿重力锚施工全过程的系统工程,所采取的温控措施需从原材料及配比、混凝土配制、运送、浇筑、振捣到通水、保温、养护等环节进行协调配合才能达到预期效果。大体积混凝土温控的关键在于控制混凝土内部最高温度、内外温差及降温速率,合理分层避免结构应力集中,同时混凝土配合比须满足工作性和强度要求的同时兼顾低热和高抗裂性两个方面<sup>[6-7]</sup>。

混凝土的配合比设计,应以满足设计和施工要求、确保混凝土工程质量且达到经济合理为原则,按照原材料性能及对混凝土的技术要求进行计算,并经过实验室试配调整后确定<sup>[8]</sup>。从本工程案例而言,混凝土配合比设计需优选原材料,在强度和工作性能达标的前提下,实现体积收缩小、抗渗性能好、绝热温升尽可能低的目标,本案例中混凝土绝热温升要求 C30 低于 35℃。

### 2.1 原材料的优选

材料比选是实施温控措施的第一步。选择混凝土的原材料,不仅要满足相关标准的强度要求,而且要满足低热等指标规定。优选原材料、优化混凝土配合比,其最终目标就是要使得混凝土具备有较强的抗裂能力,即达到抗拉强度较大、绝热温升较小、极限拉伸变形能力较大、线膨胀系数较小、热强比较小、自生体积变形为微膨胀或低收缩的目的<sup>[9]</sup>。结

合本案例而言,主要从以下几方面进行控制。

(1) 混凝土温控防裂的重要指标是绝热温升值。通过原材料特别是水泥品种的优选,可有效降低这一指标值<sup>[10]</sup>。本案例在充分进行原材料调研的前提下,优选强度富裕系数大、水化热较低、生产和供应有保证的普通硅酸盐水泥。

(2) 由于重力式锚碇结构庞大,浇筑过程中混凝土应有具备较好的黏聚性和可泵性,同时应赋予较低的绝热温升值和合适的水化速率,才能有效缓解温度应力和初始结构强度这一矛盾<sup>[11]</sup>。因此,应用粉煤灰和外加剂以达到增强黏聚性和泵送性能以及降低水化热的目的。本案例在原材料调研基础上,优选质量优良的Ⅱ级粉煤灰进行锚碇大体积混凝土试验,测试分析其细度、需水量比、烧失量、含水率、抗压强度比等技术指标,结合经济性能,优选 1~2 种粉煤灰进行了相关试验。

(3) 减水剂是混凝土中最常用也最重要的添加剂。适量的高效减水剂,可通过改善水泥浆体的流变性能,实现改善混凝土性能的功能<sup>[12]</sup>。从原理而言,在保持水胶比及流动性不变的前提下,可有效减少水泥及水的用量,因此能从源头上降低水化热的产生。本案例进行市场调研后,优选了 3 种减水剂进行了试验比选。

(4) 优质的骨料一方面可提高混凝土的韧性,另一方面,采用连续级配的骨料,提高混凝土的密实性,节约水泥,并因此降低水化热和减少用水量,而且,骨料自身具备吸收热量的功用,可进一步降低水化热,同时减少混凝土的收缩和泌水,此外骨料的粒径还应符合运输泵送混凝土的要求。一般而言,骨料应选用含泥量低(砂子小于 2%,石子小于 1%)、热膨胀系数小且无裂缝的骨料,并兼顾连续级配(尽量用粒径大的骨料)和强度指标<sup>[8]</sup>。本课题在原材料调研基础上,选择 1~2 种碎石和河砂进行了优选试验。

### 2.2 混凝土配合比设计

混凝土的配合比设计,是实现工程设计与施工质量目标的前提,应确保混凝土工程质量且达到经济合理为原则,按照原材料性能及对混凝土的技术要求进行计算,并经过实验室试配调整后确定。

(1) 混凝土配合比设计步骤。首先,按照材料优选后的原始资料进行比较计算并得到“理论配合比”;其次,经过试验室试拌调整,从满足施工和易性角度提出“基准配合比”;然后,根据基准配合比进行不同配合比条件下的强度和表观密度调整,拟

定满足设计标准和施工质量要求的;最后,基于现场气候条件下的砂石实际含水率,再将前述“试验室配合比”换算成“施工配合比”<sup>[13]</sup>。

(2) 本案例的配合比设计。本案例通过在混凝土中掺粉煤灰部分取代水泥以降低水化热和提高混凝土抗裂能力。具体来说,本案例以基准混凝土配合比为基础,按照等量取代方法进行调整。同时,为了验证高效减水剂和水泥的相容性,优选原材料,应先进行外加剂和水泥相容性试验,以保证混凝土拌合物稳定性。

在保证工程结构设计强度和施工要求条件下,通过调整如凝胶材料用量、外加剂掺量、粉煤灰掺量以及砂率等参数,从混凝土的力学性能、抗裂性能及耐久性等方面,优化水灰比、胶凝材料用量、砂率和粗集料级配等配合比设计参数,实验测试不同配比混凝土的力学性能、体积稳定性和耐久性能,重点针对水化热温升和抗裂能力,兼顾经济性能,实现配合比优化设计。

2.3 混凝土热物理性质和抗裂能力分析

低水化热温升、高温度稳定性和高抗裂能力是重力式锚碇大体积混凝土低温升、高抗裂施工顺利完成的材料基础<sup>[14]</sup>。本方案运用热膨胀变形分析、温度-协调发展试验和和微观结构分析方法,系统分析了不同配比参数对水泥浆体热膨胀系数的影响规律,运用温度-应力测试系统分析了锚碇混凝土的抗裂性能。具体而言,本方案通过制备不同配比混凝土试样,采用美国 Anter 公司生产的 WorkHorse-1 型卧式热膨胀仪测试混凝土 3 d、7 d、28 d 热膨胀系数与热应变,解释水灰比、集料用量、粉煤灰用量、胶凝材料用量等参数对混凝土热膨胀性能的影响规律,并结合 XRD、MIP、SEM 分析结果阐释其机理。

在一定约束条件下,通过测量温度变化时混凝土试件的变形和应力,计算其弹性模量和热膨胀系数等重要参数,并对混凝土的抗裂性能进行评价。其中,开裂温度是混凝土抗裂性能的综合评价指标<sup>[15]</sup>。根据不同配比条件下混凝土试验及工程实际检验,一般混凝土的开裂温度应小于 14℃,在此前提下混凝土抗裂性能较好。第二零应力温度是试件拉压应力转换的温度,这一指标既与混凝土的水化热温升值相关,也受混凝土内部应力作用的影响,间接体现了混凝土最高温度和室温应力差异。试验结果显示,第二零应力温度应低于 40℃。另一参数应力储备,体现了混凝土的抗裂安全系数,应力储备

与温度应力和极限应力的比值相关,应力储备应大于 35%,见表 2。

表 2 混凝土试验特征参数

| 指标类型   | 参 数            | 数值     | 时间/h   |
|--------|----------------|--------|--------|
| 开裂细化指标 | 新拌混凝土温度/℃      | 22.700 | 0.00   |
|        | 产生应力时间/MPa     | -0.005 | 0.37   |
|        | 第一次收缩最大拉应力/MPa | -0.005 | 1.12   |
|        | 收缩转膨胀时间/h      | 11.400 | 11.40  |
|        | 第一零应力温度/℃      | 24.500 | 11.40  |
|        | 最大压应力/MPa      | 0.315  | 27.10  |
|        | 达到最大压应力时温度/℃   | 35.300 |        |
|        | 最高温度/℃         | 42.900 | 46.10  |
|        | 温升/℃           | 18.000 |        |
|        | 第二零应力温度/℃      | 38.600 | 57.70  |
| 开裂核心指标 | 膨胀转收缩时间/h      | 82.600 | 82.60  |
|        | 降温前温度/℃        | 22.600 |        |
|        | 室温应力/MPa       | -1.620 | 117.90 |
|        | 开裂应力/MPa       | -2.530 | 128.50 |
| 开裂综合指标 | 应力储备/%         | 38.60  | —      |
|        | 开裂温度/℃         | 10.40  | —      |

3 重力锚浇筑施工过程的温控仿真

通过有限元分析,建立重力式锚碇结构内部温度场、应力场随龄期的演变规律,评价结构温度应力开裂风险,为抑制温度致裂缝措施提供计算依据,并用于指导、优化传感器布置方案。

3.1 计算模型及参数

仿真分析参数除结构参数外,还包括混凝土比重、线膨胀系数、最终弹性模量、泊松比、比热、导热系数、绝热温升等参数。

锚体混凝土设计标号 C30,按 60 d 强度评定设计配合比;混凝土劈裂抗拉强度和绝热温升试验委托相关工程质量检测有限公司进行试验,具体参数取值,见表 3、表 4、图 3。

表 3 混凝土劈裂抗拉强度试验值

| 标号  | 不同龄期抗拉强度/MPa |      |      |      |
|-----|--------------|------|------|------|
|     | 3 d          | 7 d  | 14 d | 28 d |
| C30 | 2.57         | 2.93 | 3.32 | 3.69 |

表 4 混凝土物理、热学参数经验值

| 混凝土等级 | 弹性模量 /MPa           | 热胀系数 /(1/℃)          | 比热 /(kJ·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> ) | 绝热温升 /℃ |
|-------|---------------------|----------------------|---------------------------------------------|---------|
| C30   | 3.8×10 <sup>4</sup> | 8.0×10 <sup>-6</sup> | 0.98                                        | 60.7    |

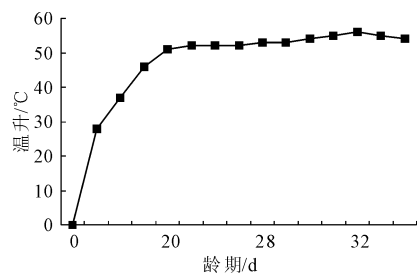


图 3 C30 混凝土的绝热温升试验成果

3.2 重力式锚碇仿真分析

模拟计算过程将首先设定浇筑温度、环境温度等温度参数,考虑冬季低温保温及和夏季施工无保温等不同工况,结合混凝土绝热温升试验结果,考虑徐变、约束对混凝土应力的影响,模拟环境风速,仿真计算不同龄期(3 d、7 d、28 d、180 d)混凝土内部温度场与应力场。具体而言,根据结构对称性,重力锚鞍部基础、锚块和鞍部的仿真模型,分别取结构 1/4 进行温度应力计算;模型中混凝土受基岩约束;参考本地区气候资料,计算风速取值 6 m/s;沿厚度方向每层混凝土布置 2 层冷却水管(φ32 mm),水管水平间距为 1 m,即计算时考虑冷却水管降温效果;考虑徐变对混凝土应力的影响;混凝土物理热学参数取值见表 4,混凝土的导热系数估算值 207 kJ/(m·d·℃);温度及应力计算从浇筑开始,模拟半年内锚碇内部温度应力的发展。

(1) 锚碇鞍部基础温控仿真分析。鞍部基础模型厚 6 m,每层 2 m 分三层浇筑。混凝土浇筑温度按 18℃ 计算。鞍部基础仿真模型见下图 4,鞍部基础浇筑后温度变化见图 5—图 8。

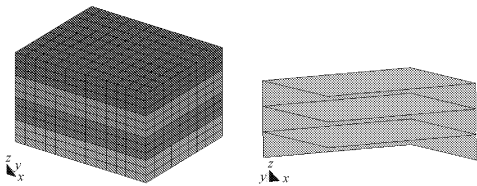


图 4 1/4 鞍部基础块有限元剖分图 - 散热面

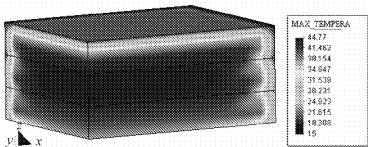


图 5 鞍部基础最高温度(℃)

在以上设定条件下,鞍部基础混凝土内部最高温度为 44.5℃,温峰出现时间为 2 d~3 d 龄期,鞍部基础各龄期温度应力见表 5。

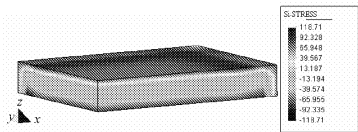


图 6 鞍部基础首层 3 d 应力场(10<sup>-2</sup> MPa)

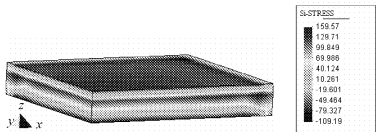


图 7 鞍部基础首层第 10 d 应力(10<sup>-2</sup> MPa)

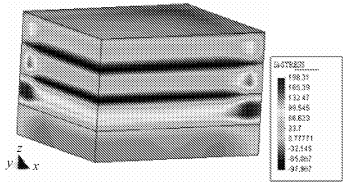


图 8 鞍部基础最终应力(10<sup>-2</sup> MPa)

表 5 鞍部基础混凝土各龄期温度应力

| 鞍部基础   | 应力/MPa |      |      |      |
|--------|--------|------|------|------|
|        | 3 d    | 7 d  | 28 d | 半年   |
| 第一层    | 1.19   | 1.15 | 2.25 | 1.98 |
| 第二层    | 1.07   | 0.78 | 1.60 | 1.50 |
| 第三层    | 0.95   | 0.77 | 1.27 | 1.01 |
| 最小安全系数 | 2.16   | 2.55 | 1.86 | —    |

(2) 锚块温控仿真分析。重力锚锚块厚 27.5 m,分 12 层浇筑,仿真模型及其计算结果分别见图 9 和图 10。混凝土浇筑温度按 15℃~20℃ 计算。

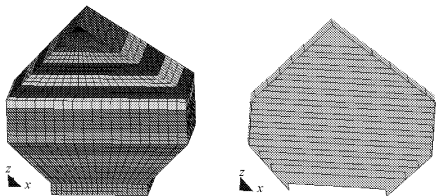
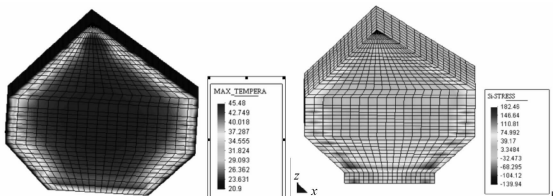


图 9 锚块 1/4 块有限元剖分图(附带基岩约束) - 散热面



(a) 最高温度/℃ (b) 最终应力/10<sup>-2</sup> MPa

图 10 锚块最高温度和最终应力包络图

在以上设定条件下,锚块混凝土内部最高温度

为 45.5℃,温峰出现时间为 2 d~3 d 龄期,锚块各龄期温度应力见表 6。

表 6 锚块混凝土各层最高温度及各龄期温度应力

| 锚块类别   | 浇筑温度/℃ | 最高温度/℃ | 应力/MPa |      |      |      |
|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
|        |        |        | 3 d    | 7 d  | 28 d | 半年   |
| 第一层    | 20     | 47.8   | 0.81   | 1.03 | 1.87 | 1.57 |
| 第二层    | 20     | 48.6   | 0.81   | 1.09 | 1.63 | 1.61 |
| 第三层    | 20     | 49.2   | 0.85   | 0.97 | 1.83 | 1.82 |
| 第四层    | 16     | 46.5   | 0.72   | 0.84 | 1.70 | 1.76 |
| 第五层    | 16     | 47.6   | 0.67   | 0.82 | 1.67 | 1.74 |
| 第六层    | 17     | 47.6   | 0.64   | 0.81 | 1.69 | 1.70 |
| 第七层    | 17     | 47.5   | 0.69   | 0.57 | 1.31 | 1.05 |
| 第八层    | 17     | 47.4   | 0.77   | 0.58 | 1.31 | 0.98 |
| 第九层    | 18     | 47.2   | 0.85   | 0.76 | 1.41 | 1.15 |
| 第十层    | 18     | 46.8   | 0.93   | 0.84 | 1.48 | 1.02 |
| 第十一层   | 20     | 48.1   | 0.99   | 0.91 | 1.25 | 0.79 |
| 第十二层   | 20     | 48.9   | 1.45   | 1.06 | 0.85 | 0.42 |
| 最小安全系数 | —      | —      | 1.77   | 2.69 | 1.97 | —    |

(3) 鞍部温控仿真分析。鞍部厚 25 m,分 10 层浇筑,仿真模型见图 11。混凝土浇筑温度 18℃~28℃。

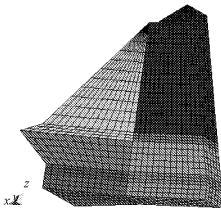


图 11 鞍部有限元剖分图(附带基岩约束)

在以上设定条件下,鞍部混凝土内部最高温度为 57.8℃,温峰出现时间为 2 d~3 d 龄期,鞍部基础各龄期温度应力见表 7。

综合以上计算结果可知,重力锚鞍部基础、锚块和鞍部的大体积混凝土内部应力发展规律基本相同,即:前期混凝土升温过程中,混凝土内部最大应力主要在表面;温峰过后,随着混凝土内部温度逐渐降低,最大应力逐渐向内部传递;最终达到准稳定温度场后,混凝土内最大应力集中在平面尺寸的中间部位约二分之一处,且由于混凝土的徐变特性会产生应力松弛,混凝土最终拉应力并不是混凝土最大拉应力。

另一方面,理论计算表明最小安全系数>1.4,根据《水运工程大体积混凝土裂缝控制技术规程》及国内特大桥大体积混凝土温控经验,温度应力产

生裂缝的概率小于 85%。但由于桥址区施工季节气温较高太阳辐射强烈,混凝土出现表面干缩裂缝的几率较大,因此必须加强拆模后的保湿养护工作,尽量减少或避免表面干缩裂缝的产生。

表 7 鞍部混凝土各层最高温度及各龄期温度应力

| 锚块类别   | 浇筑温度/℃ | 最高温度/℃ | 应力/MPa |      |      |      |
|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
|        |        |        | 3 d    | 7 d  | 28 d | 半年   |
| 第一层    | 25     | 52.8   | 0.64   | 1.18 | 1.59 | 1.72 |
| 第二层    | 25     | 53.6   | 0.57   | 1.14 | 1.55 | 1.80 |
| 第三层    | 25     | 54.2   | 0.52   | 1.11 | 1.65 | 1.82 |
| 第四层    | 28     | 54.5   | 0.49   | 1.09 | 2.03 | 1.95 |
| 第五层    | 28     | 55.6   | 0.40   | 1.33 | 2.05 | 1.94 |
| 第六层    | 28     | 55.7   | 0.43   | 0.75 | 1.94 | 1.84 |
| 第七层    | 28     | 55.5   | 0.45   | 0.72 | 1.86 | 1.71 |
| 第八层    | 30     | 56.2   | 0.48   | 0.79 | 1.91 | 1.77 |
| 第九层    | 30     | 57.2   | 0.73   | 0.84 | 1.82 | 1.69 |
| 第十层    | 30     | 57.8   | 0.86   | 0.96 | 1.78 | 1.61 |
| 最小安全系数 | —      | —      | 3.00   | 2.50 | 1.90 | —    |

4 重力锚施工过程的温控监测和措施

为全面检验重力锚混凝土浇筑施工过程质量和温控措施的实际效果,并及时调整和改进相应的温控措施,以上述温控仿真结果为参照,对重力锚混凝土的浇筑施工过程进行了全程温度监测。本次温控监测的采用 WJY-100 型智能化数字多回路温度巡检仪和热敏电子温度传感器。

4.1 重力锚的温控测点布设及监测方法

总体而言,温控测点的布设遵循突出重点、兼顾全局的原则。在满足监测要求的同时以尽量少的测点获得所需的温控监测资料。从重力锚结构自身特点出发,基于结构的对称性和温度变化的一般规律,并依据前述温控仿真模拟结果,采用重力锚结构一侧的监测数据指导另一侧施工。平面上看,由于每层混凝土的中心线区域为整个混凝土断面的最高温度分布区,温度传感器布置在中心线附近。另外,由于在平面内靠近表面区域温度梯度较大,测点布置较密,而中心区域的混凝土温度梯度较小,测点布置可减少。监测点的布置见图 12。

温控监测的各项测试宜在混凝土浇筑后立即开始且持续进行。混凝土的温度监测频率,到达峰值以前每 2 h 监测一次,峰值出现后每 4 h 监测一次,持续 7 d,之后减少至每天测 1 次~2 次,直至混凝土的温度变化幅度趋于稳定,这一过程持续时间一

一般为 15 d ~ 30 d 左右。

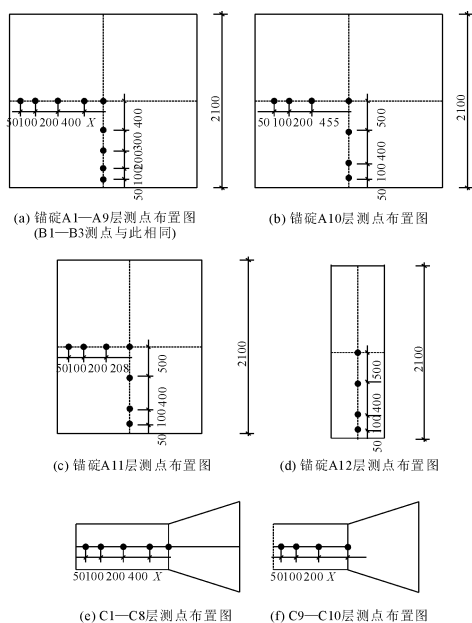


图 12 重力锚的温控测点布置图

## 4.2 重力锚浇筑过程的温控措施

### 4.2.1 温度、温差的主动控制

(1) 浇筑温度的控制。相同条件下,若浇筑温度高,混凝土温升值要比浇筑温度低的大许多<sup>[16]</sup>。施工时可在在混凝土浇筑前,基于原材料如水泥、粉煤灰、砂石和水的温度,估算混凝土当时的浇筑温度。

一般情况下,泵送施工浇筑温度比出机温度上升 1℃ ~ 2℃。混凝土的浇筑温度应视气温而调整。在炎热气候下不应超过 28℃。若浇筑温度不在控制要求内,则应采取冷却、避免直射、夜间施工等工程措施。冬季控制浇筑温度不宜低于 5℃。

(2) 冷却水管的埋设。为了满足冷却水管中连续通水要求,需在基坑两侧设置两个冷却水池来蓄冷却循环水。若由于气温较高,循环水自然冷却无法达到要求的温度时,采取利用大功率水泵抽取新鲜地下水补充到进水池内,以降低冷却管进口处水流的温度,必要时可在水池内加入冰块进行降温。

冷却水管方案应根据混凝土内部温度分布特征及最高温度的控制要求合理埋设。冷却水管管路可由现场构件的形状灵活布置,一般按冷却水从高温区流向低温区的原则设置进出水口<sup>[17]</sup>。在每层砼中均布设两层管径 40 mm、厚 2 mm 的冷却水管,水管水平及竖向间距均为 1 m 左右,冷却水管固定于浇筑平台下的钢筋上。

(3) 混凝土的内外温差控制。对于大体积混凝土

土,由于水化放热过程将导致混凝土的内部温度持续升高,因此在升温期间内应加强内部散热措施,如降低通水温度和提高通水流量等。当混凝土已处于降温阶段,则要采取保温措施覆盖混凝土以降低降温速率。

由于重力锚所在地区昼夜温差较大,为防止偶然性的气温较低或突遇寒潮导致的气温骤降,当混凝土内外温差大于 25℃ 或气温低于混凝土表面温度超过 20℃,必须对大体积混凝土进行保温养护<sup>[18]</sup>。具体措施如下:在混凝土的上表面,可采用塑料薄膜加土工布保温保湿,夏季施工时可用深度大于 30 cm 蓄水养护;在混凝土侧面,采用土工布外包一层彩条布进行保温;最后,混凝土的拆模时间不仅要考虑混凝土强度因素,还要兼顾混凝土的温度和内外温差,以免混凝土突然暴露于空气中导致降温过快产生开裂,且拆模应选择在当天温度较高时段,拆模后应及时刷涂养护液并覆盖保温层。

从保温措施来说,当混凝土进行充分保温且时间足够时,在混凝土降温的缓慢过程进行中,拉应力会在砼内逐步松弛消散,进而有效控制裂缝的产生,直到内外温差达到目标区间。

### 4.2.2 温控的施工控制措施

(1) 混凝土的浇筑。项目部建立生产能力达 180 m<sup>3</sup>/h 的混凝土搅拌站和输送能力达 90 m<sup>3</sup>/h 以上的输送混凝土泵,实际产量可达 80 m<sup>3</sup>/h, BLZ25 布料机布料,最大块(1 260 m<sup>3</sup>) 预计在 24 h 内浇筑完成。混凝土采用混凝土输送泵输送,采用一部半径为 25 m 的布料机进行布料混凝土,振捣采用插入式振动器进行振捣,泵管走向根据实际情况确定。

从施工过程控制来说,为确保大体积混凝土施工质量,提高混凝土的均匀性和抗裂能力,必须加强并落实对混凝土每一个环节的技术控制要求,现场操作人员必须从混凝土搅拌、运输、浇筑、振捣、养护全程实施有效监控。

(2) 混凝土浇筑后的养护。混凝土的养护目标是控制混凝土的温度和湿度。尤其作为锚碇结构表层混凝土,其抗裂性和耐久性主要取决于后期养护过程中的温度和湿度环境。特别是掺有大量矿物掺和料的低水胶比混凝土,为尽量减少早期自收缩,保证表层混凝土有密实的微结构,充分的潮湿养护过程尤其重要。而且,在湿养护的同时,还需严格控制混凝土的温度变化。根据不同季节和气温条件分别采取保温和散热的综合措施,保证混凝土内表温差及气温与混凝土表面的温差在控制范围内<sup>[19]</sup>。

大掺量矿物掺和料的低水化热混凝土,由于二次水化反应致使内部升温,故需要持续给水,且潮湿养护的期限应不少于7 d,潮湿养护结束后,仍宜继续保湿覆盖一周。这一过程将尽量使混凝土长时间保持湿润状态,保证混凝土抗拉强度增长充分,从而抵抗混凝土的收缩应力。养护结束时若迅速干燥也会使应力骤增,因此可将保温养护材料覆盖直到混凝土干燥<sup>[20]</sup>。

### 4.3 温控监测成果

从重力锚混凝土浇筑过程的温控监测结果来看,重力锚三部分的分层浇筑温度变化过程及其内外温度变化规律,与温控仿真模拟结果基本一致。以重力锚的鞍部为例,其混凝土各层最高温度见表7,温度变化范围 $52.8^{\circ}\sim 57.8^{\circ}$ ,温控监测的数据结果显示浇筑过程最高温度区间与其基本重合。基于温控仿真的温控监测测点布置方案较好的实现了施工过程的温控信息反馈,为圆满完成浇筑施工提供了有力技术支撑。施工完毕后混凝土质量的检测结果也表明,浇筑质量符合预定设计标准,这也为工程的顺利完工奠定了坚实的基础。

## 5 结 论

(1) 从材料角度而言,影响重力锚温控最主要因素,包括原材料选择,混凝土配合比设计及混凝土混凝土热物理性质和抗裂能力。这三要素是也是保障大体积混凝土浇筑质量的重要前提。

(2) 重力锚鞍部基础、锚块和鞍部三个部分的温控仿真模拟显示,依据本案例设计的分层方案进行的浇筑过程,这三部分的温度变化规律基本一致。监测结果显示,温控监测与仿真模拟结果相符,这也为保障工程的浇筑质量和顺利施工提供了有力的技术支撑。

### 参考文献:

[1] 季日臣,夏修身,陈尧隆. 承台大体积混凝土温度场计算与温控防裂措施[J]. 混凝土,2006(9):92-93,95.  
[2] 闫松涛,周世军,魏庆朝. 大体积混凝土承台施工期温控仿真分析研究[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(5):51-56.  
[3] 刘亚朋,李 盛,王起才,等. 大体积混凝土温度场仿真分析与温控监测[J]. 混凝土,2019(2):138-141.

[4] 刘杏红,周 伟,常晓林,等. 改进的非线性徐变模型及其在混凝土坝施工期温度应力仿真分析中的应用[J]. 岩土力学,2009,30(2):440-446.  
[5] 崔景川,陈声敢. 坞墩大体积混凝土施工期温度场仿真分析[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(3):127-128,149.  
[6] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.  
[7] 胡开富,龚振宇,徐前卫,等. 引水工程超深圆形基坑施工风险分析与质量控制[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(5):143-148.  
[8] 王天骄. 大体积混凝土温度裂缝控制的研究[D]. 长春:吉林大学,2019.  
[9] 刘 英,税宁波. 桥梁大体积混凝土承台浇筑温度控制研究[J]. 四川水力发电,2019,38(5):13-15,21.  
[10] 高东杰. 公路桥梁工程大体积混凝土施工技术的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,16(2):189-190.  
[11] 扬鹏创,杨 静. 卡洛特水电站大体积混凝土温度控制措施[J]. 人民长江,2018,49(S2):203-205.  
[12] 孙长胜,栾家玉,王 旭,等. 11.1m厚混凝土底板施工技术[J]. 施工技术,2018,47(S4):340-344.  
[13] 刘 英,税宁波. 桥梁大体积混凝土承台浇筑温度控制研究[J]. 四川水力发电,2019,38(5):13-15,21.  
[14] 段 寅,潘洪月,梁仁强,等. 乌东德拱坝低热水泥混凝土绝热温升反演及温控措施优化研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):46-49,59.  
[15] 江晨晖,杨 杨,马成畅,等. 基于温度-应力试验和层次分析法的混凝土抗裂性能综合评价[J]. 硅酸盐学报,2015,43(8):1017-1023.  
[16] 石立国,翁邦正,王文渊,等. 超大深基坑内溜管浇筑大体积混凝土施工技术[J]. 建筑技,2019,50(10):1234-1236.  
[17] 贺 云,贺金龙,余 棚,等. 索塔承台大体积混凝土温度控制研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(2):372-378.  
[18] 柳 静. 桥梁冬期施工混凝土配合比试验及施工技术研究[J]. 施工技术,2018,47(8):62-65.  
[19] 王立霞. 混凝土内养护技术国内外研究进展[J]. 混凝土,2014(5):30-34.  
[20] 李建涛. 大体积混凝土施工与温度监控研究[D]. 西安:长安大学,2017.