

气化框架基础大体积混凝土施工技术实践与探讨

王昌盛

盛虹炼化(连云港)有限公司, 江苏 连云港 222042

[摘要] 此文结合某煤化工项目气化框架基础大体积混凝土施工的实际过程, 从钢筋工程、模板工程、混凝土工程施工进行全面描述, 通过对其施工程序及施工方法的介绍, 探讨气化框架大体积混凝土施工的技术先进性、经济合理性和安全实用性, 确保大体积混凝土工程的优质高效完成。

[关键词] 气化框架基础; 大体积混凝土; 施工技术

DOI: 10.33142/aem.v4i12.7560

中图分类号: TU375

文献标识码: A

Practice and Discussion on Construction Technology of Mass Concrete for Gasification Frame Foundation

WANG Changsheng

Shenghong Refining and Chemical (Lianyungang) Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222042, China

Abstract: Based on the actual construction process of gasification frame foundation mass concrete in a coal chemical project, this paper comprehensively describes the construction of reinforcement engineering, formwork engineering and concrete engineering, and discusses the technical progressiveness, economic rationality, safety and practicality of gasification frame mass concrete construction through the introduction of its construction procedures and construction methods, so as to ensure the high-quality and efficient completion of mass concrete engineering.

Keywords: gasification framework foundation; mass concrete; construction technology

1 工程概述

本气化框架平面轴线尺寸 89m×28m, 占地面积 1761.6m², 装置框架 15 层, 建筑高度 94m, 其中 45m 平面以下为钢筋混凝土框架剪力墙结构, 45m 平面以上为钢框架结构, 电梯间、楼梯间为钢筋混凝土框架剪力墙结构; 框架混凝土柱最大截面尺寸 2200×2200mm、1600mm×1600mm, 模板支撑架搭设最大高度 5m; 混凝土梁 600×1800mm、截面面积 1.08m²; 设计使用年限为 50 年, 抗震设防烈度为 7 度。本气化框架基础混凝土设计强度等级为 C45, 基础混凝土方量共计 8909.3m³ (不含基础垫层混凝土量)。根据国标 GB 50496-2018《大体积混凝土施工标准》的规定, 气化框架基础的混凝土施工属于大体积混凝土工程。气化框架基础尺寸如下:

表 1 气化框架基础尺寸

基础名称	基础长度(m)	基础宽度(m)	基础厚度(m)	基础数量
CT-1	11	11	2.8	3
CT-2	38	14	3.5	3
CT-3	11	11	2.8	1
CT-4	23	20.55	3.2	1
CT-5	6.26	6.26	2.5	4
CT-6	8	6	2.5	1
CT-7	2	2	1	4
CT-8	2	2	1	8

气化框架基础平面布置图如下:

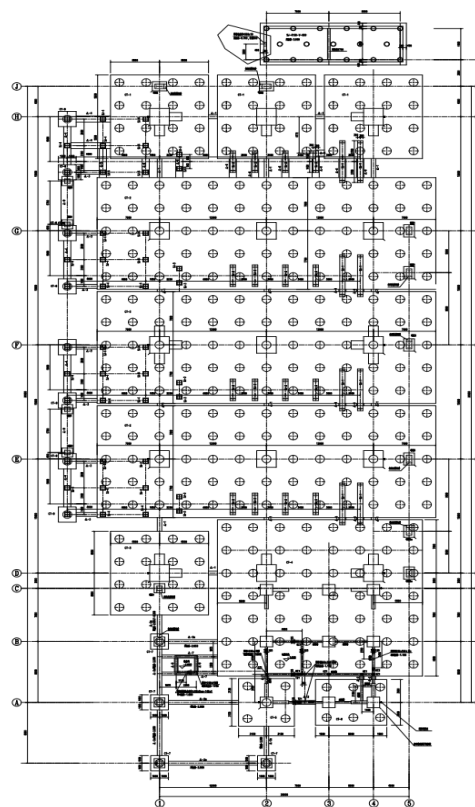


图 1 气化框架基础平面布置图

本工程体量大,单个基础大小不一,形式多样,具有体积大、结构厚、混凝土数量多、工程条件复杂和施工技术要求高等特点,除强度、整体性和耐久性的要求外,还必须控制温度变形裂缝,施工难度较大。需要从材料选择、技术措施等环节做好充分准备,才能保证基础大体积砼施工质量。

2 施工技术准备

组织施工技术人员消化施工图,清楚设计意图,收集相关图集和质量验收规范、标准;对相关施工人员进行技术交底,浇筑流向、浇筑方法、浇筑等是混凝土施工交底的要点。对所用钢筋原材料和试件取样,组织检验和试验且结果合格。支设模板并预验收模板,监理方对相应的钢筋、预埋件进行隐检并签认。经现场工程师、质检员、资料员、现场经理确认的混凝土浇筑、开盘鉴定等资料完成签认。检查模板支设质量,重点关注模板板面是否平整、阴阳角是否漏缝、钢/木支撑是否牢固稳定等问题。结合施工图计算混凝土需求量,综合考虑编制混凝土施工预算。搭设施工所用脚手架、平台及走道,在模板上做好相应的标高标记。

3 施工程序与方法

3.1 钢筋工程

3.1.1 钢筋加工

本工程设计要求钢筋材料为HPB300、HRB400级;钢筋保护层厚度50mm。钢筋进场时按炉批号及直径对标志、外观进行分批检验,并按设计标准或《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》的规定抽样作力学性能试验,在浇筑混凝土之前履行钢筋隐蔽工程验收程序。

钢筋加工依照技术负责人审定的料表加工,加工质量满足抗震构造要求、构件满足设计有效截面要求、接头位置和接头数量满足验收规范的规定。钢筋半成品挂标识牌分构件类型堆放,标识牌注明规格、原材料来源、检验和试验状态及构件图纸编号、名称和部位。钢筋的直径、级别、根数和间距符合设计要求,钢筋保护层垫块具有一定的抗压强度。钢筋弯曲前依据配料单明确的尺寸,用石笔将各弯曲点位置标识出来。利用钢筋弯曲机完成钢筋弯曲成型加工,平面上无翘曲不平、弯曲点处没有裂缝现象,弯曲成型偏差控制在钢筋全长 $\pm 10\text{mm}$ 以内。

钢筋连接采用直螺纹连接方式,连接套筒选用低合金结构钢,套筒表面无裂纹、表面及内螺纹无严重锈蚀现象。钢筋连接端头无弯曲、端面平直并与钢筋轴线垂直、螺纹加工长度满足规定;加工完钢筋丝头及时套上塑料保护帽或拧上连接套筒。钢筋连接用管钳扳手拧紧,两钢筋丝头在套筒中央位置相互顶紧;已拧紧的接头采用黄色漆标记;不合格的接头用红色漆标记。

钢筋连接接头力学检验按检验批进行,同一施工条件下采用一批材料的同等级同型式同规格接头,以500个为一个验收批,不足500个的按500个视为一个验收批。每

一验收批随机截取3个试件做单向拉伸强度试验,3个试件均符合强度要求时,该批为合格;如有1个不合格,再取6个试件复检,复检仍有1个试件不合格时,该批为不合格。

3.1.2 钢筋绑扎

钢筋绑扎执行“放线→验线→画分档线→下层钢筋绑扎→焊马凳筋→中层钢筋→安装降温管→上层钢筋绑扎→降温管试压检测→封边钢筋绑扎→柱插筋→验收”工艺流程。

先在垫层上弹出基础位置线,用石笔标明钢筋的位置和根数,结合钢筋间距弹线,确定钢筋位置和间距。所有钢筋交错点均绑扎牢固,同一水平直线上相邻绑扣呈八字形。底板钢筋下铁先放长向钢筋后放短向钢筋,上铁先放短向钢筋后放长向钢筋。三层钢筋网底层和中间设置钢筋马凳支撑(支撑钢筋为 $\Phi 28$ 间距 $0.9\text{m} \times 0.9\text{m}$),斜撑4根 $\Phi 28$,与地面成 60° ,均布四个方向,马凳筋形式根据现场实际情况布置,斜撑的焊点分别在马凳支撑钢筋高度的 $3/4$ 处,斜撑底部与基础底部钢筋网节点焊。纵横马凳支撑钢筋等所有受力钢筋焊接牢固,形成可靠支撑。再绑扎上层钢筋,绑扎方法同下铁,下铁钢筋弯钩朝上。马凳筋如下图:

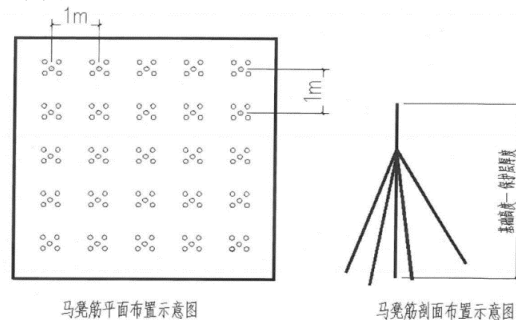


图2 马凳筋图

基础短柱底部钢筋与承台基础底部钢筋网牢靠绑扎(必要时焊接),同时在基础短柱(约束边缘柱)主筋外侧绑扎一套定位箍筋来定位基础短柱,再在基础短柱钢筋内侧设置定位筋,与承台基础顶部钢筋网片点焊,再焊接基础短柱主筋与定位筋。基础短柱(约束边缘柱)定位具体做法如下图所示:

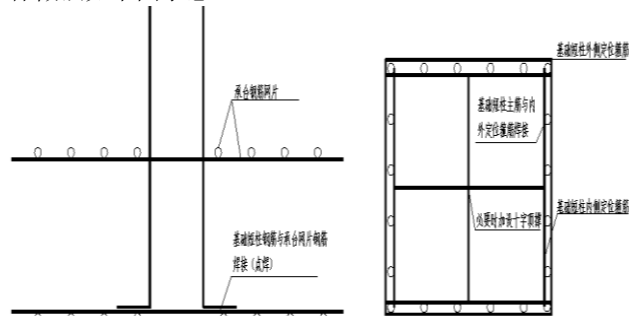


图3 基础短柱(约束边缘柱)定位措施示意图

3.1.3 钢筋工程质量控制

为保证混凝土外观质感,每个钢筋交叉点均绑扎,绑扎钢丝不少于2圈,扎扣及尾端朝向构件截面的内侧,钢筋和绑扎钢丝严禁外漏。钢筋焊接部位清理干净,确保无油污、杂质等。混凝土施工前标识清楚预埋钢筋和埋件位置,施工完成后及时清凿表面混凝土。

3.2 模板工程

本工程基础采用建筑木模板配置,加固系统采用40×70mm方木及钢管并配合Φ16的对拉螺杆进行加固。

首先在基础模板上开洞,然后穿入Φ16的对拉螺杆与基础主筋进行焊接,搭接焊的长度为50mm,Φ16的对拉螺栓长度为500mm;对拉螺杆的间距:第一排水平向及竖向对拉螺杆距基础平面的距离为150mm,往上水平向及竖向对拉螺杆的间距均为400mm×400mm。模板背面用40×70mm木方及钢管进行加固,竖向木方排布间距为150mm,水平向钢管排布间距为400mm,然后木方及钢管之间用5mm厚的卡具及Φ16mm的元宝扣进行连接、加固。外侧搭设双排脚手架作为操作平台(宽度1m,立杆间距1.5m,一步架,满铺跳板)。

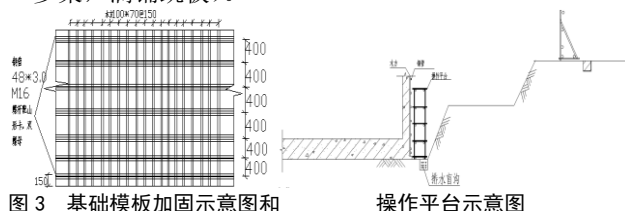


图3 基础模板加固示意图和 操作平台示意图

由于高度为3.5m,采取泵车浇筑。混凝土对模板侧面的压力标准值,按以下式计算:

$$F = \gamma c h$$

F—新浇筑混凝土对模板的最大侧压力(KN/m²);

γc—混凝土的重力密度(KN/m³);

其中:h为有效压头高度

$$F_2 = \gamma c h = 24 \times 3.5 = 84 \text{ KN/m}^2$$

混凝土侧压力设计值

$$F = F_1 \times \text{分项系数} \times \text{折减系数} = 84 \times 1.2 \times 0.9 = 90.72 \text{ KN/m}^2$$

混凝土时产生的水平荷载

采用泵送混凝土,属导管浇筑,取倾倒压力标准值为:2KN/m²。

混凝土时产生的水平荷载设计值为:2×1.4×0.9=2.52 KN/m²。

$$\text{荷载组合: } F' = 90.72 + 2.52 = 93.24 \text{ KN/m}^2$$

混凝土效压头高度, $h = F / \gamma c = 93.24 / 24 = 3.88 \text{ m}$ 。

对拉杆验算:

Φ16钢筋的截面积: $A = 201 \text{ mm}^2$

纵横间距按400mm布置对拉杆

$$\text{对拉杆的拉力: } N = 93.24 \times 0.4 \times 0.4 = 14.91 \text{ KN}$$

$$\text{对拉杆的应力: } \sigma = N / A = 14.91 \times 1000 / 201 = 74.2 \text{ N/mm}^2 \leq 210 \text{ N/mm}^2$$

经计算,满足要求。

模板拼接缝处采用双面胶条密封,双面胶条缩入模板面1mm,不突出模板面。混凝土浇筑前,清除模板内杂物、垃圾并浇水湿润模板,模板内无积水。模板拆除时避免硬砸、硬撬,采取保护措施防止模板表面损伤,及时清扫模板表面混凝土残余灰浆。

4 混凝土施工

4.1 混凝土材料要求

本工程混凝土运输主要采用混凝土罐车。浇筑前,对混凝土材料供应方进行交底,要求:①采用水化热较低的水泥,3天水化热≤250KJ/Kg,7天水化热≤280KJ/Kg;②粗骨料采用连续级配,细骨料采用中砂;③选择满足《混凝土外加剂》GB8076-2008及《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119-2013规定的、对混凝土后期收缩影响小的外加剂;④控制石子含泥量低于0.7%,砂子含泥量低于2%;⑤使用饮用水作为混凝土拌合用水。

在混凝土中添加适量的粉煤灰能够起到控制混凝土综合性能的作用,提高混凝土结构的耐久性和抗裂性。根据设计图纸要求,对混凝土原材料进行混凝土配合比试配,最后得出优化配合比。经混凝土搅拌站沟通确定本次施工所用混凝土采用如下配合比:

表1 所用混凝土采用如下配合比

水胶比	砂率	水	水泥	中砂	石子	粉煤灰
0.37	40.6%	174kg	320kg	705kg	1031kg	70.5kg

4.2 混凝土运输

混凝土由搅拌罐车运送到指定浇筑地点,再用3台臂长不小于62米的混凝土输送泵车(其中1台备用)输送到基础内。混凝土浇筑连续进行,如不得已间隔,则尽量缩短其间隔时间,必须在前层混凝土初凝之前将次层混凝土浇筑完毕。混凝土运输、浇筑及间隔时的全部时间不得超过下表要求:

表2 混凝土运输、浇筑及间隔时的全部时间不得超过

混凝土强度等级	气温(℃)	
	≤25	≥25
<C30	210min	180min
≥C30	180min	150min

混凝土运送中搅拌筒低速(2~4r/min)转动,到达工地后搅拌筒以8~12r/min转动2~3min。待搅拌筒停转后,再使搅拌筒6~8r/min反转卸料。对沾在进料斗、搅拌机洞口、搅拌筒拖轮等处的混凝土及时冲洗干净,搅拌筒停止转动后再铲除混凝土结块。

混凝土泵车的实际平均输出量,计算如下:

$$Q_1 = Q_{\max} \times \alpha_1 \times \eta = 120 \times 0.9 \times 0.7 = 75.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$Q_{\max}$ —每台混凝土泵车的最大输出量(m^3/h), $120\text{m}^3/\text{h}$;

α —配管条件系数, 0.8-0.9, 取 0.9;

η —作业效率系数, 0.5-0.7, 取 0.7。

每台混凝土泵车连续作业时, 每台混凝土泵车需要配置的混凝土罐车数量计算如下:

$$N = (L/S + T_t) Q_1/V = (60/60 + 1) \times 75.6/15 = 7 \text{ 辆}$$

Q_1 —混凝土泵车实际平均输出量;

V —每台混凝土罐车容量, $12-20\text{m}^3$, 平均按 15m^3 考虑;

S —混凝土罐车平均行车速度, 按 60Km/h 考虑;

L —混凝土罐车往返距离, 60Km ;

T_t —每台混凝土罐车总计停歇时间, 按 1 小时考虑。

现场实际需求计算: 按分层浇筑速度要求, 分层厚度 0.5m , 每层需要浇筑 279.3m^3 混凝土, 每层浇筑时间: $279.3/(75.6 \times 2) = 1.8\text{h}$, 混凝土初凝时间控制到 2-3h, 考虑天气原因, 计划每层浇筑时间控制在 2h 左右, 计划准备 3 台臂长不小于 62m 混凝土泵车 (1 台备用), 14 辆混凝土罐车 (平均容量 15m^3), 实际供应能力达 $151.2\text{m}^3/\text{h}$, $151.2/120 = 1.26 \geq 1.2$, 满足分层连续浇筑要求。

混凝土泵车站位平面布置示意图如下:

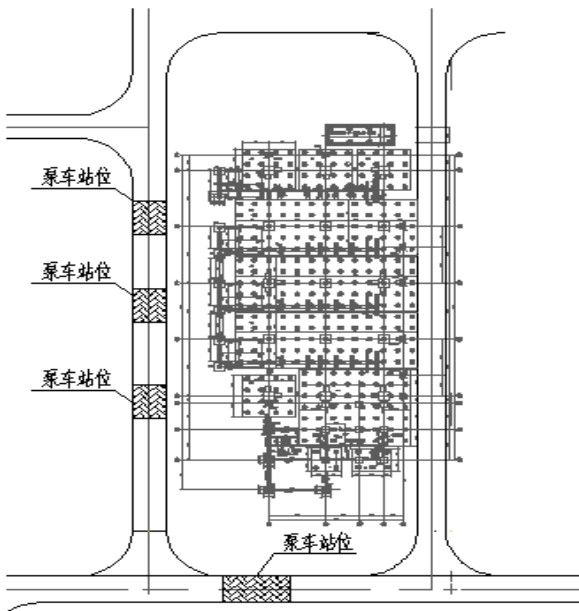


图4 混凝土泵车站位平面布置示意图

4.3 混凝土浇筑

为了确保基础混凝土不出现施工冷缝, CT1/3/4/5/6 采用分层浇筑的方法浇筑, CT2 采用分段浇筑的方法浇筑, 做法见基础底板混凝土浇灌方式的示意图。浇筑带前后略有错位, 形成阶段式分层退打的局面, 提高泵送工效, 确保混凝土上下层的结合。整体连续浇筑时层厚为 500mm , 层与层之有意预留一定的时间间断, 但层与层之间的混凝土接合时间控制在混凝土初凝前完成。

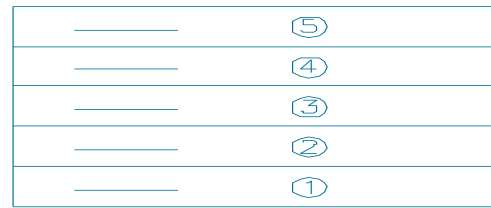


图5 分层浇筑施工和分段浇筑施工

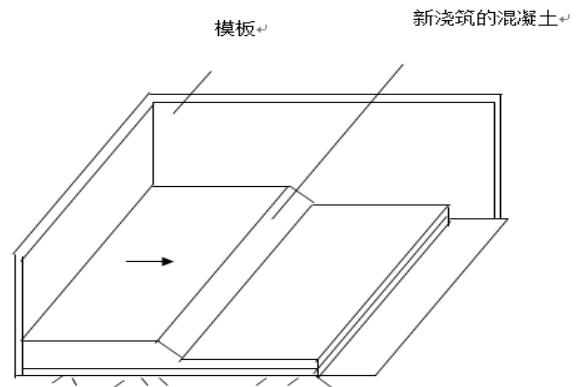


图5 基础底板混凝土浇灌方式示意图

因气框架基础单个基础工作量大小不一, 形式各异, 因此在浇筑时进行分批次浇筑。具体浇筑顺序、批次及工程量如下表:

表3 具体浇筑顺序、批次及工程量

序号	浇筑部位	浇筑方量 (m^3)	基础名称	浇筑基 础数量	砼浇筑用 时 (h)	备注
1	J-H 轴 /1-5 轴	1016.4	CT-1	3 个	6.7	第一次 浇筑
2	F-G 轴 /1-5 轴	3724	CT-2	2 个	25	第二次 浇筑
3	A-E 轴 /1-5 轴	4168.9	CT-2/3/4/5/6	8 个	28	第三次 浇筑

每台混凝土泵车配置 3 台振动棒, 3 名混凝土振捣工。合计配置 10 台振动棒及电机 (备用 4 套)。人力: 6 名混凝土振捣工, 10 名瓦工, 8 名普工, 钢筋工 2 人, 木工 5 人, 电工 1 人, 合计 32 人。第二次及第三次混凝土浇筑时实行倒班制度 (两班倒), 第二次及第三次混凝土浇筑时总人数共计 54 人。

浇筑混凝土前, 清除模板内的泥土和杂物, 基础承台混凝土浇筑采用泵送混凝土直接入模, 分层浇筑的厚度控制在 500mm 左右, 插入式振动棒振捣。振捣上层混凝土时

振捣棒插入下层混凝土 100mm 以上,振捣棒移动间距不大于振捣棒作用半径的 1.5 倍,每一振点的延续时间以“混凝土表面不再显著下沉、表面无气泡产生且混凝土表面有均匀的水泥浆泛出”为标准,振捣时“快插慢拔”,保证上、下两层混凝土结合良好,保证混凝土施工质量。同时采用二次振捣工艺,二次振捣时间控制在浇筑后的 1—2h,保证下层混凝土初凝前,上层混凝土能覆盖。基础泵送混凝土,其表面水泥浆较厚,混凝土浇筑结束后按标高用长刮尺刮平。初凝前用木抹子拍压三遍,搓成麻面,以闭合收水裂缝。

大体积混凝土浇筑、振捣过程中,容易产生泌水现象,泌水现象严重时会影响相应部分的混凝土强度指标。一般情况下上涌的泌水和浮浆会顺着混凝土浇筑坡面排集到模板边集水坑内,及时用水泵抽除混凝土表面泌水(见下图),避免粗料下沉、混凝土表面水泥浆过厚,致使混凝土强度不均和产生收缩裂缝。

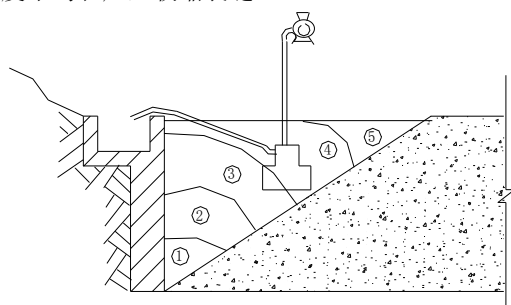


图6 水泵抽除混凝土表面泌水

当一次连续浇筑 $\leq 1000\text{m}^3$ 同配合比的大体积混凝土时,混凝土强度试件现场取样不少于 10 组;当一次连续浇筑 $\leq 1000\text{m}^3$ — 5000m^3 同配合比的大体积混凝土时,超出 1000m^3 的混凝土,每增加 500m^3 取样不少于一组,增加不足 500m^3 取样一组;当一次连续浇筑大于 5000m^3 同配合比的大体积混凝土时,超出 5000m^3 的混凝土,每增加 1000m^3 取样不少于一组,增加不足 1000m^3 取样一组。

4.4 混凝土浇筑应注意的问题

浇筑过程中,经常观察模板、钢筋、预埋件的情况,当发现有变形、移位时,立即停止浇筑,并立即采取措施在已浇筑的混凝土凝结前修整完好。同时安排专人根据混凝土的先后浇筑时间记录,该部位的浇筑开始时间、浇筑完时间,并根据混凝土的缓凝时间,确定上一层混凝土的浇筑插入时间,避免出现混凝土冷缝。

混凝土责任工程师组织对每车坍落度进行测试,检查每车的坍落度是否符合混凝土小票技术要求,并做好坍落度测试记录。如遇不符合要求的,必须退回、严禁使用。现场工程师及时检查混凝土的凝结时间及和易性是否能满足工程需要。

4.5 混凝土养护及测温

混凝土养护及测温执行“布置测温点——温点的深度

——选择合适的测温线——预埋测温线——浇筑混凝土——进行测温”工艺流程。

测温点布置以混凝土浇筑体平面图对称轴线的半条轴线为检测区,监测点按平面分层布置;根据混凝土浇筑体内温度场的分布情况及温控的要求确定监测点的布置与数量,在每条测试轴线上监测点不少于 3 处;沿混凝土浇筑体厚度方向,在混凝土外表、底面和中心布置温度测点,其余测点按间距 $\leq 600\text{mm}$ 布置;混凝土浇筑体的外表温度和底面温度为混凝土外表以内 50mm 处的温度。

测温点布置如下图:

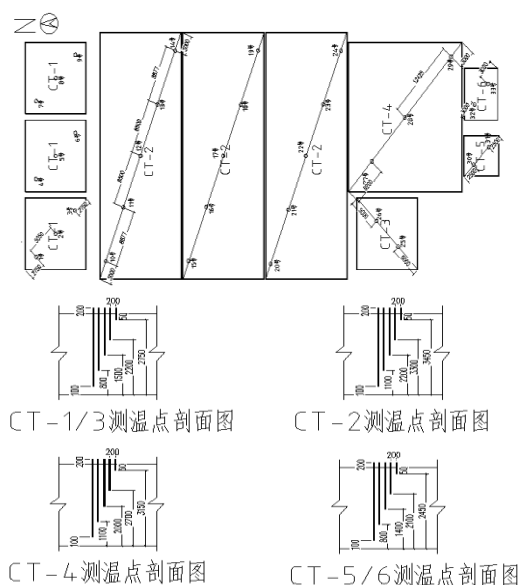


图6 测温点布置如下图

按测温布置图对每一个测温探头进行编号,且埋设前做测试检验,合格后才能使用。预埋时用钢筋等杆件作支承物,将测温线按照测温点距离绑在支承物上,温度传感器与支承物之间做隔热处理。浇筑混凝土时,将绑好测温线的支承物植入混凝土中,为便于操作留在外面的导线长度大于 20cm,温度传感器处于测温点位置,插头留在混凝土外面并用塑料袋罩好,避免潮湿,保持清洁。

根据 GB50496-2018 大体积混凝土施工标准规定,在混凝土浇筑完成后,每昼夜测温不少于 4 次,入模温度测量每台班不少于 2 次。设专人持建筑电子自动测温仪坚持 24 小时连续测温,混凝土终凝后 3 天内每 2 小时测一次,4—6 天每 4 小时测一次,7—14 天每 6 小时测一次,同时测大气温度,并按测温孔编号进行测温记录。当混凝土表面和内部温度变化趋于平稳时停止测温。同时,针对大体积混凝土控制混凝土浇筑体入模温度基础上的温升值 $\leq 50^\circ\text{C}$ 、混凝土浇筑体里表温差(不含混凝土收缩当量温度) $\leq 25^\circ\text{C}$ 、混凝土浇筑体降温速率 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{d}$ 、拆除保温覆盖时混凝土浇筑体表面与大气温差 $\leq 20^\circ\text{C}$ 。

根据测温数据,在混凝土升、降温过程中,如混凝土

内外温差值超过 25℃, 而混凝土表面温度与周围环境温差较小, 则加盖保温层, 以防止结构裂缝; 如混凝土内外温差值较小, 而混凝土表面温度与周围环境温差超过 25℃, 则减少保温层, 以防止表面温度裂缝。当两者出现矛盾时, 以混凝土内外温差控制为主要矛盾。在混凝土降温过程中, 当混凝土内外温差趋于稳定并逐步减少时, 在底板混凝土表面逐层取走棉毡, 加快混凝土降温速率, 使其逐渐趋于常温。

混凝土浇筑完成并进行二次抹面压实后, 经监理单位确认后先覆盖保湿薄膜, 然后再覆盖保温材料(棉被), 为防止保温材料湿水失去保温效果, 且在保温材料上覆盖防雨布, 防止雨淋。安排专人负责养护保温工作, 保湿养护持续时间不少于 14 天, 经常检查塑料薄膜完整情况, 并保持混凝土表面潮湿。

4.6 大体积混凝土温度控制

本基础工程 CT-2 和 CT-4 混凝土基础厚度分别为 3500mm、3200mm, CT-1、CT-3、CT-5、CT-6 混凝土厚度分别为 2800mm、2500mm, 计算需要保温厚度 30mm 保温材料, 依据大体积混凝土温度测控技术规范(GB/T51028-2015)规定, 为保证本工程大体积混凝土施工质量, 对气化框架基础筏板承台采用两层 20mm-50mm 金属管水冷却方式控温。

表 4 冷却水管直径及水平方向管间距执行下表

序号	管材	钢管
1	管径 (mm)	20-50
2	管间距 (m)	1.0-2.0
3	水流速 (m/s)	0.8-1.0

为保障冷却水流量大小, 将在冷却水管主管上设置同管径的分流管(分流管里的冷却水流向循环水池), 同时在分流管末端设置阀门, 通过关闭阀门大小, 达到控制冷却水流量的大小。

具体做法如示意图如下:

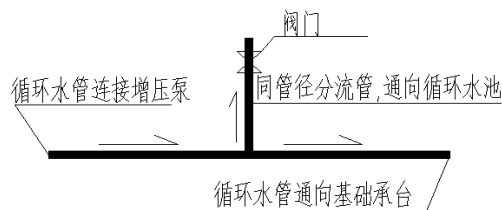


图 7 具体做法如示意图

冷却管的计算与布置:

① 单位体积混凝土发热量, 按下式计算:

$$Q_{c0} = k \cdot Q_0 \cdot W \quad (1)$$

Q_{c0} —混凝土的总发热量, KJ/m³;

Q_0 —水泥的水化热, KJ/Kg, 42.5 硅酸盐水泥为 375KJ/Kg;

W —混凝土的胶凝材料用量 (Kg/m³), $W=320+70.5+79.9=470.4\text{Kg/m}^3$;

k —不同掺量掺和料水化热调整系数, 查 GB50496-2018 大体积混凝土施工标准:

$$k=k_1+k_2-1=0.95+0.93-1=0.88。$$

$$\text{计算: } Q_{c0}=0.88 \times 375 \times 470.4=155232\text{KJ/m}^3。$$

②混凝土绝热温升

计算公式:

$$T(t) = \frac{W \cdot Q_{c0}}{C_{c0} \cdot \rho} (1 - e^{-m \cdot t}) \quad (2)$$

式中: $T(t)$ —混凝土最大绝热温升 (°C);

W —混凝土的胶凝材料用量 (Kg/m³), $W=320+70.5+79.9=470.4\text{Kg/m}^3$;

Q_{c0} —胶凝材料水化热, KJ/Kg, $Q_{c0}=155232/470.4=330\text{KJ/Kg}$;

C_{c0} —混凝土比热, 取 0.97KJ/(Kg·K);

ρ —混凝土密度, 取 2400Kg/m³;

e —为常数, 取 2.718; t —混凝土龄期 (d);

m —为系数, 随浇注温度改变, 经咨询商混站,

混凝土入模温度按 30℃考虑, 则 m 为 0.406。

按龄期 15 天计算, 经计算绝热温升值为: 66.48℃。

③混凝土 t 龄期累计总发热量

按下式计算:

$$Q_1 = C_{c0} \cdot \rho \cdot V_{c0} \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中: Q_1 —水冷却期间混凝土散热量, kJ;

C_{c0} —混凝土的比热, 一般为 (0.92~1.0) kJ/(kg·°C);

ρ —混凝土密度, kg/m³;

V_{c0} —混凝土体积, m³;

ΔT — t 时段混凝土温差, °C。

15 天龄期, 混凝土混凝土累计发热量计算: $Q_t=0.97 \times 2400 \times 2370 \times (66.48-30)=2.01 \times 108\text{KJ}$ 。

④水冷却带走热量

按下式计算:

$$Q_{cool} = k_c \cdot Q_t \quad (4)$$

式中: k_c —总热量中被水冷却带走的热量系数, 取 0.3~0.4;

Q_t — t 龄期间的混凝土累计总发热量, kJ;

Q_{cool} —冷却水带走的总热量, kJ。

K 取 0.4, 冷却水带走的总热量为: $Q_{cool}=0.4 \times 2.01 \times 108=0.805 \times 108\text{KJ}$ 。

⑤冷却水总量

按下式计算:

$$m_w = \frac{Q_{cool}}{C_w \cdot (T_{out} - T_{in})} \quad (5)$$

式中: Q_{cool} —冷却水带走的总热量, kJ;

C_w —水的比热, 取 4.18kJ/(kg·°C);

m_w —冷却水总质量, kg;

T_{out} —冷却水出口温度, °C;

T_{in} —冷却水进口温度, °C。

进出水温差按 10℃ 计算, 冷却水总量为: $m_w = 0.805 \times 108 / (4.18 \times 10) = 1.92 \times 106 \text{Kg}$ 。

⑥冷却水管管径
单回路按下式计算:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{m_w}{\pi \cdot v_w \cdot t_c \cdot \rho_w}} \cdot 10^3 \quad (6)$$

式中: d —冷却水管内径, mm;

m_w —冷却水总质量, kg;

v_w —冷却水的流速, 取 $(0.8 \sim 1.0) \text{ m/s}$;

t_c —预计混凝土冷却时间, s;

ρ_w —水的密度, 取 1000 kg/m^3 。

本工程水冷却系统分 2 个回路, 每个回路冷却水量为: $1.92 \times 106 / 2 = 0.96 \times 106 \text{Kg}$, 冷却水管径经计算为 48mm。采用 $\phi 48 \text{mm}$ 的钢管为冷却管。

⑦水冷却系统布置

采用 $\phi 48 \text{mm}$ 的钢管, 离边缘距离为 1.5m (边缘混凝土厚度 1.75m), 管间距为 1.5m, 单层布置, 布置在气化框架承台中部构造筋上面, 以中部构造筋网片为铺设平面。

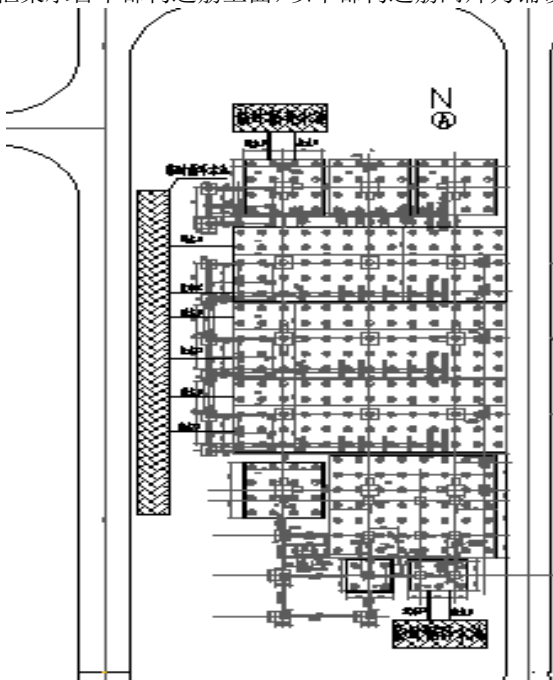


图 8 中部构造筋网片为铺设平面

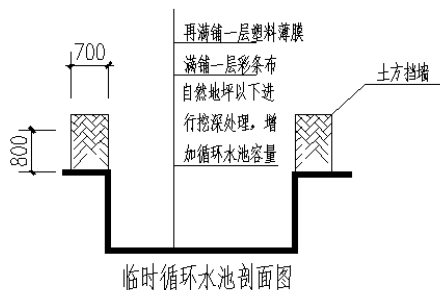


图 9 临时循环水池剖面图

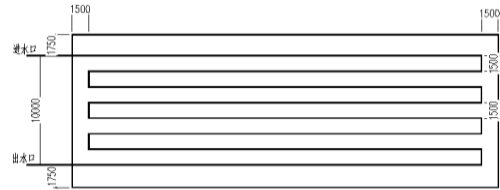
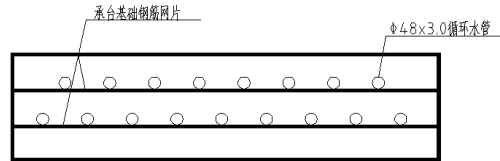


图 10 CT-2/4 双层循环水管平面布置图



CT-2/4 双层循环水管剖面图

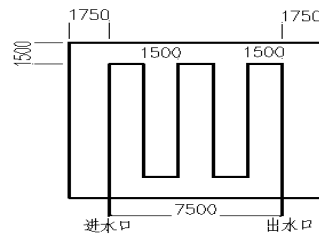
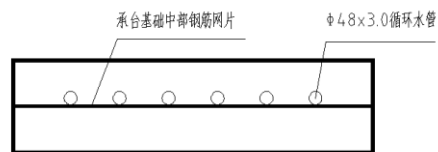


图 11 CT-1/3/5/6 单层循环水管平面布置图



CT-1/3/5/6 单层循环水管剖面图

图 12 单层循环水管剖面图

4.7 温度应力与收缩应力计算

4.7.1 混凝土绝热温升计算

计算公式:

$$T(t) = \frac{W \cdot Q_{c0}}{C_{c0} \cdot \rho} (1 - e^{-m \cdot t}) \quad (7)$$

$T(t)$ —混凝土最大绝热温升 (℃);

W —混凝土的胶凝材料用量 (Kg/m^3), $W = 320 + 70.5 + 79.9 = 470.4 \text{Kg/m}^3$;

Q_{c0} —胶凝材料水化热, KJ/Kg , $Q_{c0} = 155232 / 470.4 = 330 \text{KJ/Kg}$;

C_{c0} —混凝土比热, 取 $0.97 \text{KJ}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$;

ρ —混凝土密度, 取 2400Kg/m^3 ;

e —为常数, 取 2.718; t —混凝土龄期 (天);

m —为系数, 随浇注温度改变, 经咨询混凝土供应商, 混凝土入模温度按 30℃ 考虑, 则 m 为 0.406。

由于水冷却系统带走总热量的 40%, 总热量按 0.6 折减。按龄期 30 天计算, 经计算绝热温升值为: 39.88℃。

4.7.2 混凝土中心温度计算

计算公式: $T_1(t) = T_j + T_h \xi(t)$

$T_1(t)$ — t 龄期混凝土中心计算温度 (℃);

T_j —混凝土浇筑温度 ($^{\circ}\text{C}$);

$\xi(t)$ — t 龄期降温系数, 同时考虑混凝土养护、模板、外加剂、掺和料的影响。

表 5 4m 厚混凝土不同龄期降温系数见下表

龄期	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
$\xi(t)$	0.74	0.73	0.72	0.65	0.55	0.46	0.37	0.3	0.25	0.24

表 6 4m 厚不同龄期混凝土中心温度计算见下表: ($^{\circ}\text{C}$)

浇筑温度	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
30°C	56.9	64.3	66.2	63.2	58.3	53.7	49.1	45.5	42.9	42.4

4.7.3 多种保温材料组成的保温层总热阻

计算公式:

$$\beta = 1 / \left[\frac{\sum \delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\beta_q} \right] \quad (8)$$

β —保温层总传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$];

δ_i —第 i 层保温材料厚度 (m); 塑料薄膜厚度为 0.02m , 棉被和防雨布总厚度按 0.5mm 考虑;

λ_i —第 i 层保温材料导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$], 塑料薄膜 $0.05\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, 棉被和防雨布 $0.20\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$;

β_q —固体在空气中的传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$], 本工程处于海边, 风力较大, β_q 取 $82\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$;

保温层总传热系数: $\beta = 1 / (0.02/0.05 + 0.0005/0.20 + 1/82) = 2.41 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。

4.7.4 混凝土虚厚度

保温层相当于混凝土的虚拟厚度, 按下列公式计算:

$$h' = k\lambda/\beta \quad (9)$$

式中: h' —混凝土虚厚度 (m);

k —折减系数, 取 $2/3$;

λ —混凝土导热系数, 取 $2.33[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})]$ 。

$h' = 0.67 \times 2.33 / 2.41 = 0.65\text{m}$ 。

4.7.5 混凝土计算厚度

$H = h + 2h' = 4 + 2 \times 0.65 = 5.3\text{m}$

4.7.6 混凝土表面温度

计算公式:

$$T_{2(t)} = T_4 + 4h'(H - h')[T_{1(t)} - T_q]/H^2 \quad (10)$$

式中: $T_{2(t)}$ —混凝土表面温度 ($^{\circ}\text{C}$);

T_q —施工期大气平均温度 ($^{\circ}\text{C}$);

h' —混凝土虚厚度 (m);

H —混凝土计算厚度 (m);

$T_{1(t)}$ —混凝土中心温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

施工期间大气平均温度按 25°C 考虑,

表 7 各龄期混凝土表面温度计算见下表:

$t(\text{d})$	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$T_1(t)$ ($^{\circ}\text{C}$)	56.9	64.3	66.2	63.2	58.3	53.7	49.1	45.5	42.9	42.4
$T_2(t)$ ($^{\circ}\text{C}$)	43.9	47.8	48.8	47.3	44.7	42.3	39.9	38.0	36.7	36.4
$T_1(t) - T_2(t)$	12.9	16.5	17.4	16.0	13.6	11.4	9.2	7.4	6.2	5.9

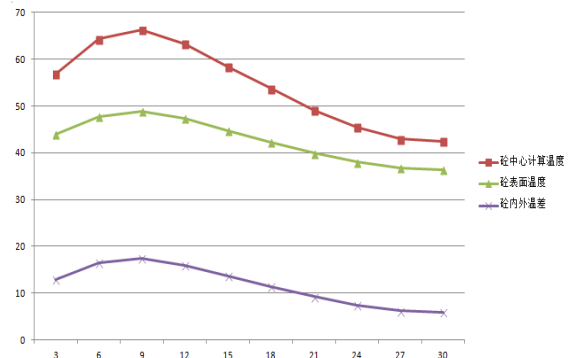


图 13 温度计算曲线分析图

有上表可知: 混凝土表面与大气温差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$, 满足规范要求; 混凝土内外温差 $< 25^{\circ}\text{C}$, 符合要求

4.8 温度应力计算

4.8.1 地基约束系数

单纯地基约束系数:

C_{x1} (N/m^3), 软黏土 $0.03-0.06\text{N}/\text{m}^3$, 查地勘报告, 冲填强夯地基承载力为 150KPa , C_{x1} 取 $0.03\text{N}/\text{m}^3$ 。

桩的阻力系数:

计算公式:

$$C_{x2} = Q/F \quad (11)$$

式中: C_{x2} —桩的阻力系数 (N/mm^3);

Q —桩产生单位位移所需水平力 (N/mm);

当桩与结构铰接时 $Q = 2EI \left[\frac{K_n D}{4EI} \right]^{\frac{3}{4}}$

当桩与结构固接时 $Q = 4EI \left[\frac{K_n D}{4EI} \right]^{\frac{3}{4}}$

E —桩混凝土的弹性模量 (N/mm^2);

I —桩的惯性矩 (mm^4);

K_n —地基水平侧移刚度, 取 $10^{-2}(\text{N}/\text{mm}^3)$;

D —桩的直径或边长 (mm);

F —每根桩分担的地基面积 (mm^2)

本工程桩径 1000mm , C35 混凝土, 弹性模量 $E = 3.15 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$, 惯性矩 $I = 3.14 \times 1000^4 / 32 = 9.81 \times 10^{10} \text{mm}^4$, 桩与结构固接, $Q = 9.81 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}$ 。每根桩分担的地基面积 $F = 14000 \times 36000 / 65 = 7.75 \times 10^6 \text{mm}^2$, 桩的阻力系数为: $C_{x2} = 9.81 \times 10^4 / 7.75 \times 10^6 = 0.01 \text{N}/\text{mm}^3$ 。

4.8.2 大体积混凝土弹性模量

计算公式:

$$E_{(t)} = E_0(1 - e^{-0.09t}) \quad (12)$$

式中: $E_{(t)}$ — t 龄期混凝土弹性模量 (N/mm^2);

E_0 —28d 混凝土弹性模量 (N/mm^2);

e —常数, 取 2.718 ;

t —龄期 (d)。

C45 混凝土 28 天混凝土弹性模量为 $E_0 = 3.35 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ 。

表 8 不同龄期 C45 混凝土弹性模量计算如下表:

龄期	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
弹性模量 (10 ⁴ N/mm ²)	0.77	1.35	1.80	2.14	2.40	2.60	2.76	2.87	2.96	3.03

4.8.3 地基约束系数

计算公式:

$$\beta_{(t)} = \sqrt{\frac{C_{x1} + C_{x2}}{h \cdot E_{(t)}}} \quad (13)$$

式中: $\beta_{(t)}$ —t 龄期地基约束系数 (mm⁻¹);

h —混凝土实际厚度 (mm);

C_{x1} —单纯地基阻力系数 (N/mm³);

C_{x2} —桩的阻力系数 (N/mm³);

$E_{(t)}$ —t 龄期混凝土弹性模量 (N/mm²)。

表 9 地基约束系数计算见下表:

龄期	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
地基约束系数 (10 ⁻³ mm ⁻¹)	1.11	0.8	0.7	0.66	0.62	0.60	0.58	0.57	0.56	0.56

4.8.4 混凝土干缩率和收缩当量温差

为了便于将混凝土降温产生的温度应力与水泥水化热过程中因为拌合水蒸发等原因引起混凝土收缩而产生的温度应力用同一计算公式计算, 必须将混凝土各龄期的收缩量转换为收缩当量温差。

混凝土干缩率:

$$\varepsilon_{Y(t)} = \varepsilon_Y^0 (1 - e^{-0.01t}) M_1 M_2 \dots M_{10} \quad (14)$$

式中: $\varepsilon_{Y(t)}$ —t 龄期混凝土干缩率;

ε_Y^0 —标准状态下混凝土极限收缩量, 取

4.0×10^{-4}

M_1 、 M_2 ... M_{11} —各修正系数, 针对本工程大体积混凝土查 GB50496-2018 附表 B. 2. 1 可得:

$M_1=1.0$, $M_2=1.35$, $M_3=1$, $M_4=1.45$, $M_5=1.11$, $M_6=1$, $M_7=0.76$, $M_8=0.85$, $M_9=1.3$, $M_{10}=0.9$,

$M_{11}=1.03$ 。 M_1 、 M_2 ... $M_{11}=1.69$ 。

表 10 不同龄期本工程混凝土干缩率计算见下表:

龄期	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
干缩率 (10 ⁻⁵)	1.57	3.10	4.58	6.02	7.41	8.77	10.08	11.35	12.59	13.79

收缩当量温差

$$T_{Y(t)} = \varepsilon_{Y(t)} / \alpha \quad (15)$$

式中: $T_{Y(t)}$ —t 龄期混凝土收缩当量温差 (°C);

α —混凝土线性膨胀系数, 1×10^{-5} (1/°C)。

表 11 不同龄期本工程收缩当量温差计算见下表:

龄期	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
收缩当量温差 (°C)	1.57	3.10	4.58	6.02	7.41	8.77	10.08	11.35	12.59	13.79

4.8.5 结构计算温差

一般 3 天为一区段

$$\Delta T_i = T_{m(i)} - T_{m(i+3)} + T_{Y(i+3)} - T_{Y(i)} \quad (16)$$

式中: ΔT_i —i 区段结构计算温度 (°C);

$T_{m(i)}$ —i 区段平均温度起始值 (°C);

$T_{m(i+3)}$ —i 区段平均温度终止值 (°C);

$T_{Y(i+3)}$ —i 区段收缩当量温差终止值 (°C);

$T_{Y(i)}$ —i 区段收缩当量温差起始值 (°C)。

根据前面的计算, 结构计算温差见下表:

表 12 各区段平均温度值如下表:

龄期 (d)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$T_{m(t)}$	50.40	56.08	57.46	55.25	51.48	48.00	44.48	41.75	39.79	39.40

表 13 可得出结构计算温差如下表 (°C)

区段	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
ΔT_i	-4.2	0.1	3.6	5.2	4.8	4.8	4.0	3.2	1.6	1.59

4.8.6 各区段拉应力计算

一般 3 天为一区段

$$\sigma_i = \bar{E}_i \alpha \Delta T_i \bar{S}_i (1 - \frac{1}{ch \frac{E_i L}{2}}) \quad (17)$$

式中: σ_i —i 区段混凝土内拉应力 (N/mm²);

$\bar{E}_i$ —i 区段平均弹性模量 (N/mm²);

α —混凝土的线膨胀系数 (一般取 1.0×10^{-5});

$\bar{S}_i$ —i 区段平均应力松弛系数;

$\bar{\beta}_i$ —i 区段平均地基约束系数;

L —混凝土最大尺寸 (mm);

ch —双曲余弦函数。

表 14 不同年龄平均弹性模量

龄期	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
平均弹性模量 (10 ⁴ N/mm ²)	1.06	1.58	1.97	2.27	2.50	2.68	2.81	2.91	2.99	3.10
平均松弛系数	0.57	0.52	0.48	0.44	0.41	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32
ΔT_i (°C)	-4.2	0.1	3.6	5.2	4.8	4.8	4.0	3.2	1.6	-4.2
地基约束系数 (10 ⁻³ mm ⁻¹)	1.11	0.8	0.7	0.66	0.62	0.60	0.58	0.57	0.56	0.56
σ_{max} (N/mm ²)	0.08	0.30	0.54	0.78	1.02	1.26	1.48	1.70	1.84	1.95
	7	6	5	7	7	0	6	2	6	1

4.8.7 安全系数

$$K = f_t / \sigma_{max} \quad (18)$$

式中: K —大体积混凝土抗裂安全系数, 应 ≥ 1.15 ;

f_t —到指定期混凝土抗拉度设计值 (N/mm²)。

$$f_t = f_k (1 - e^{-\gamma t}) \quad (19)$$

式中: f_k —混凝土抗拉强度标准值 (N/mm²), C45 混凝土;

$f_k=2.51$ N/mm²;

γ —系数, 取 0.3。

本工大体积混凝土抗裂安全系数计算见下表:

表 15 大体积混凝土抗裂安全系数计算

龄期	3d	6d	9d	12d	15d	18d	21d	24d	27d	30d
$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	0.08	0.30	0.54	0.78	1.02	1.26	1.48	1.70	1.84	1.95
f_t (N/mm ²)	1.32	1.76	1.89	2.12	2.23	2.38	2.38	2.39	2.39	2.39
K	15.1	5.76	3.47	2.95	2.69	1.89	1.61	1.40	1.29	1.23
	8		1							

抗裂安全系数 K 均满足要求。

5 结束语

随着现代洁净煤化工项目在国内的快速发展,气化框架基础大体积混凝土施工是工程建设中重点控制环节,需要在施工过程中重点关注。建筑工程混凝土施工技术管理工作必须与设计方、施工方保持高度沟通,掌握设计意图和施工现状,把标准规范与现场实际结合起来,制定科学、合理、可行的施工技术方案,并督促落实到位,确保大体积混凝土工程整体施工质量,为后续气化框架建设

和生产运行奠定坚实基础。

[参考文献]

- [1]王飞. 建筑工程大体积混凝土施工裂缝控制措施[J]. 建筑工程与管理, 2020(10): 29-31.
 - [2]苏景兰. 浅析建筑工程混凝土浇筑施工技术[J]. 科学技术创新, 2016(26): 229.
 - [3]陈冬林. 浅议建筑工程砼浇筑技术[J]. 工程技术: 全文版, 2017(2): 119.
 - [4]陈招娣. 建筑工程大体积混凝土施工技术研究[J]. 江西建材, 2017(12): 85-89.
 - [5]巫福钦. 建筑大体积混凝土浇筑施工技术分析[J]. 住宅与房地产, 2017(18): 206.
 - [6]孝伟. 研究建筑工程大体积混凝土浇筑施工技术[J]. 建材与装饰, 2017(22): 48-49.
- 作者简介: 王昌盛 (1972. 10-), 男, 毕业学校西北工业大学。