

跳仓法在超长混凝土结构施工中的关键技术问题研究

黄丹阳¹, 方江华^{1,2}, 郑 巍², 刘文强², 常丽军²

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 北京住总集团有限责任公司, 北京 100101)

摘要:为了解决超长混凝土结构由于温度、收缩应力引起的裂缝问题,以北京某超长混凝土结构施工地块项目为例,采用跳仓法优化原设计后浇带施工工艺,重点研究跳仓法施工的设计原则、混凝土原材料控制和配合比优化以及跳仓法施工中涉及的温度、收缩应力及仓格长度划分等关键技术问题,并通过现场施工控制、测温反馈及时采取养护措施。结果表明:采用跳仓法浇筑超长混凝土结构,不仅可以满足结构的防裂要求,还能保证工程的顺利实施。本文成果可为其他类似工程应用提供一定的借鉴与参考。

关键词:跳仓法; 超长混凝土结构; 设计原则; 混凝土配合比; 温度控制

中图分类号: TU755

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)01-0049-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.01.008

Research on key technical problems of alternative bay construction method in construction of super-long concrete structure

HUANG Danyang¹, FANG Jianghua^{1,2}, ZHENG Wei², LIU Wenqiang², CHANG Lijun²

(1. School of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology and Architecture, Huainan 232001, Anhui, China; 2. Beijing Zhuzong Group Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: In order to solve such problem as cracks caused by temperature and shrinkage stress of super-long concrete structure, a super-long concrete structure construction plot project in Beijing is taken as an example, the construction process of the original design post-pouring belt is optimized by the alternative bay construction method, focusing on the design principles of the alternative bay construction method, the control of concrete raw materials and the optimization of the mix ratio, and the key technical issues such as temperature, shrinkage stress and compartment length division involved in the construction of the alternative bay construction method, and the maintenance measures are taken in time through on-site construction control and temperature measurement feedback. The results show that the pouring of super-long concrete structures by alternative bay construction method cannot only meet the anti-cracking requirements of the structure, but also ensure the smooth implementation of the project. The results can provide a certain reference for other similar engineering applications.

Key words: alternative bay construction method; super-long concrete structure; design principle; concrete mix ratio; temperature control

随着我国高层、超高层建筑技术的不断发展以及对预拌混凝土的深入研究,越来越多的超长、超大、超厚混凝土基础工程得到了广泛的应用。筏板基础凭借抗弯刚度大、施工工艺简单、

可充分利用地基承载力和适用性强等特点被广大建筑设计从业者所运用。目前大底盘多塔楼结构(住宅小区)筏板基础尺寸近百米,属于典型的超长混凝土结构。混凝土凝结硬化过程中,水泥水

收稿日期: 2024-01-29

作者简介: 黄丹阳(1997—),男,硕士研究生,从事建筑工程技术方面的研究。

化反应产生巨大的热量,但混凝土结构导热性能差,外界气温变化导致结构里表温差过大,造成结构内外热胀冷缩程度不均,在内外约束的作用下产生温度应力,容易拉裂混凝土影响结构抗渗性、整体性和耐久性^[1]。

设计人员通常采用设置后浇带的方式,解决超长混凝土结构的温度裂缝问题。后浇带虽然是一种成熟的施工工艺,但仍然存在施工困难,间歇时间长等不足。近年来,跳仓法越来越受到工程技术人员的关注。李浩然等^[2]结合实际工程,从仓格划分、施工顺序及质量控制方面对跳仓法进行研究,解决了大体积混凝土开裂并缩短了施工时间;张喜平等^[3]通过配合比试验,探究了矿物掺合料掺量对混凝土工作性能、强度及绝热温升的影响,优化配置了一种低水化温升的 C35 大体积混凝土;石创业等^[4]针对跳仓法施工技术进行温度、应变监测,通过数据反馈及时采取措施,保证了工程的质量。本文以北京某超长混凝土结构工程为例,结合规范,从设计、原材料选择、浇筑、监测养护等方面,对跳仓法施工中的温度、收缩应力及仓格长度进行计算研究,分析基础底板跳仓法施工中的关键技术问题,以期为工程应用提供一定的借鉴和思考。

1 工程概况及设计原则

1.1 工程概况

北京某居住用地项目占地面积为 3.61 万平方米,地下 3 层,地上 20~28 层,总建筑面积约为 15 万平方米,项目全貌如图 1 所示。该工程由 8 栋高层住宅楼及大底盘地下车库组成。主楼采用 CFG 复合地基,基础采用筏板基础;地下车库采用天然地基,基础形式为平板基础加下柱墩,利用抗拔桩抗浮。基础底板长度为 216.72 m,宽度为 187.37 m,呈三角形布置。地库筏板厚度为 0.5 m,主楼下筏板厚度为 1 m。

1.2 设计原则

1.2.1 抗-放原理

地下结构在施工过程中受温度、湿度影响,承受较大的变形效应作用,而在土方回填后承受的变形效应较小。因此,可采用“抗放兼施”的设



图 1 项目全貌

计原则控制混凝土裂缝问题^[5]。“放”是利用结构的变形释放能量。通过减少结构间的约束,在温度或湿度改变的情况下,结构利用自身应变释放温度或收缩应力,避免内部产生过大的应力。“抗”是利用结构的抗拉性能吸收能量。由于内外约束会限制结构变形,通过提高结构的抗拉性能,使结构有足够的抗拉强度抵抗温度收缩应力。

跳仓法充分利用抗-放原理,将超长、超大放置混凝土结构按照浇筑顺序划分为若干小块。将先浇筑的混凝土放置不少于 7 d,释放大部分温度收缩应力后,再将先浇筑部分连成整体,依靠先浇筑混凝土产生的抗拉强度抵抗下一阶段温度收缩应力,使整个过程“抗”“放”结合、先“放”后“抗”,以达到无缝施工的目的。

1.2.2 构造措施

(1) 混凝土强度和塌落度。高强混凝土因对提高抗拉强度收效甚微,且其水化热及收缩偏大、徐变偏小、应力松弛效应偏小,不符合抗-放原则。基础底板混凝土强度不宜超过 C40,地下室外墙宜采用 C30~C35。在保证混凝土强度和耐久性、满足混凝土拌合物可泵性条件下,拌合物的坍落度越小、混凝土的收缩越小,越有利于裂缝的控制。因此,建议将坍落度控制在 120~160 mm。

(2) 地下室外墙和附壁柱分布筋。实际工况表明^[6],地下室外墙是最容易出现裂缝的部位。外墙分布钢筋应双层双向布置,间距小于 150 mm,配筋率不宜小于 0.3%,水平分布钢筋宜置于竖向钢筋外侧^[7]。部分地下室结构有上部结构的承重柱,柱进入地下室外墙后因其截面面积扩大而形成附壁柱。附壁柱处外墙截面突变,最易产生裂缝。在附壁柱处沿竖向原有水平分布钢筋之间增加直径为 8 mm,长度为柱每边伸出 800 mm 的附加钢筋,加强抗裂^[7]。

(3) 施工缝。底板施工缝处采用不锈钢丝网收口。先焊接 $\varnothing 12$ mm 钢筋成网片,再绑扎 $\varnothing 0.83$ mm 的双层钢丝网对混凝土进行封堵。采用支撑方木,保证上排钢筋保护层厚度,挂线校直,浇筑完成拆除方木,再进行凿毛处理。施工缝处是防水的关键环节。在地下水位以下施工缝处增设止水钢板,延长水流渗透路径,起到防水的作用。底板施工缝处的止水钢板应上翘,防止下部窝气影响混凝土密实度。地下室外墙施工缝处的止水钢板开口应面向迎水面。

2 混凝土原材料要求及配合比优化

按照“抗”的设计原则,从提高混凝土抗拉强度和变形性能两个角度,优选原材料和优化配合比,达到高韧及抗裂的目标。

2.1 原材料要求

(1) 水泥。优先选用低水化热水泥,3 d 水化热宜小于 240 kJ/kg,7 d 的水化热宜小于 270 kJ/kg。水泥用量控制在 220 ~ 300 kg/m³。

(2) 骨料。粗骨料选用质地坚硬,连续级配,含泥量小于 1% 的非碱活性碎石,粒径宜为 5.0 ~ 31.5 mm,不应选用吸水率较高的粗骨料。细骨料选用天然砂或机制砂,级配良好,含泥量小于 3%,细度模数在 2.3 ~ 3.0 mm 的中粗砂。

(3) 水。严格控制混凝土用水量,160 ~ 170 kg/m³ 为宜;水胶比保持在 0.40 ~ 0.45,掺入高效减水剂,以保持混凝土的流动性。

(4) 掺合料。由于粉煤灰早期水化活性较低,大掺量粉煤灰替代水泥可有效降低混凝土的水化热,减少超长混凝土结构的温升,同时粉煤灰能够降低混凝土弹性模量,相应减小了混凝土中的温度应力,从而有效降低裂缝的出现。

(5) 外加剂。聚羧酸高效减水剂配入混凝土拌合物对水泥颗粒有分散作用,能改善混凝土的工作性,在维持混凝土坍落度不变的条件下,能减少混凝土拌合用水量。

2.2 混凝土配合比优化

以 C35P8 基础底板为例,进行混凝土配合比计算。

(1) 水胶比计算。取粉煤灰掺量为 30%,矿

粉掺量为 15%,胶凝材料 28 d 胶砂抗压强度为 37.96 MPa,混凝土配制强度为 43.2 MPa,水胶比计算公式如下。

$$\begin{aligned} \frac{A}{B} &= \frac{a_a \cdot f_b}{f_{cu,0} + a_a \cdot a_b \cdot f_b} \\ &= \frac{0.53 \times 37.96}{43.2 \times 0.53 \times 0.2 \times 37.96} = 0.426 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: A 为混凝土中水的用量, kg/m³; B 为混凝土中胶凝材料的用量, kg/m³; a_a 、 a_b 为混凝土水胶比计算公式中的回归系数; f_b 为胶凝材料 28 d 胶砂抗压强度, MPa; $f_{cu,0}$ 为混凝土配制强度, MPa。

(2) 单位体积用水量计算。根据《超长大体积混凝土结构跳仓法技术规程》(DB11/T 1200—2023) 要求,混凝土拌合物坍落度为 140 mm \pm 20 mm,碎石最大粒径为 31.5 mm。以《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011) 中 90 mm 坍落度的用水量为基础,按每增大 20 mm 坍落度相应增加 5 kg/m³,用水量计算为 212.5 kg/m³,减水剂的减水率为 27%,确定单位体积用水量为 155 kg/m³。

(3) 胶凝材料、矿物掺合料用量确定。每立方米混凝土胶凝材料用量计算如式(2)所示,取水泥用量为 210 kg/m³,矿物掺合料用量为 159 kg/m³。

$$m_{b0} = \frac{m_{w0}}{A/B} = \frac{155}{0.42} = 369 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

式中: m_{b0} 为计算配合比每立方米混凝土胶凝材料用量, kg/m³; m_{w0} 为计算配合比每立方米混凝土的用水量, kg/m³;

(4) 骨料用量确定。根据碎石最大粒径为 31.5 mm、水胶比为 0.42,按 JGJ 55—2011 选定混凝土砂率为 42%。假定每立方米混凝土拌合物的质量为 2 400 kg/m³,解得砂的用量为 788 kg/m³,石子的用量为 1 088 kg/m³。混凝土的初步配合比如式(3)所示。

$$m_{10} : m_{c0} : m_{g0} : m_{s0} : m_{w0} = 159 : 210 : 1\ 088 : 788 : 155 \quad (3)$$

式中: m_{10} 为矿物掺合料用量, kg/m³; m_{c0} 为水泥用量, kg/m³; m_{g0} 为粗骨料用量, kg/m³; m_{s0} 为细骨料用量, kg/m³; m_{w0} 为水用量, kg/m³;

在混凝土初步配合比的基础上进行试拌。保持水胶比不变、胶凝材料用量和外加剂用量合理的原则下调整胶凝材料的用量、外加剂的用量和

砂率,直至混凝土拌合物性能满足设计及施工要求,然后提出试拌配合比。

在试拌配合比的基础上,进行强度试验,比较后得到混凝土施工配合比,如表 1 所示。

3 一次浇筑最大长度计算及仓格划分

3.1 一次浇筑最大长度计算

(1) 混凝土绝热温升值计算如式(4)所示。

$$T_{\max} = \frac{WQ}{C\rho} = 43.33 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

式中: T_{\max} 为混凝土的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; W 为每立方米混凝土胶凝材料用量,取 381 kg/m^3 ; Q 为胶凝材料水化热总量,取 262 kJ/kg ; C 为混凝土的比热,取 $0.96 \text{ kJ/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$; ρ 为混凝土的质量密度,取 2400 kg/m^3 。

(2) 混凝土收缩当量温度计算。为便于计算,将收缩量换算成收缩当量温差,即将收缩产生的变形,换算为产生相同变形量所需要的温度差值,计算如式(5)所示。

$$T_y(t) = \varepsilon_y^0 (1 - e^{-0.01t}) \times M_1 \times M_2 \times M_3 \cdots M_{11} / a \quad (5)$$

式中: $T_y(t)$ 为在 t 龄期时混凝土收缩值当量温度, $^{\circ}\text{C}$; ε_y^0 为混凝土标准状态下的最终收缩的相对变形值,由 DB11/T 1200—2023,取 4×10^{-4} ; $M_1 \sim M_{11}$ 为不同条件影响下的修正系数,由 DB11/T 1200—2023,分别取 1.00(普通水泥)、1.13(水泥细度为 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$)、1.06(水胶比为 0.426)、1.10(胶浆量为 22.47%)、0.93(养护时间为 14 d)、1.00(环境相对湿度为 50%)、0.67(配筋率)、0.88(水里半径倒数为 0.04)、1.3(有减水剂)、0.89(粉煤灰掺量为 30%)、1.01(矿粉掺量为 15%); a 为混凝土的线膨胀系数,由 DB11/T 1200—2023,取 1×10^{-5} 。

根据施工经验和养护措施,估计混凝土中心降到安全温度需要 15 d,将 $t = 15 \text{ d}$ 及 ε_y^0 , $M_1 \sim M_{11}$ 代入式(5),得 $T_y(t) = 4.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 混凝土最大综合温差计算如式(6)所示。

$$\Delta T = -[T_0 + \frac{2}{3}T_{\max} + T_y(t) - T_h] = -33.59 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

式中: ΔT 为混凝土的最大综合降温差, $^{\circ}\text{C}$, 如为降温,取负值; T_0 为混凝土入模温度,取 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$; T_h 为混凝土浇筑后达到稳定时的温度,取当地的日平均温度, $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 底板仓格一次浇筑最大长度计算如式(7)所示。

$$L = 1.5 \sqrt{\frac{H \cdot E}{C_x}} \operatorname{arcosh}\left(\frac{|a\Delta T|}{|a\Delta T| - \varepsilon_p}\right) \quad (7)$$

式中: L 为最大仓格长度, m ; H 为板厚或墙高,底板厚度为 1 m ; E 为混凝土的弹性模量, C35 混凝土取 $3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$; C_x 为水平阻力系数,取 0.05 N/mm^3 ; ε_p 为混凝土的极限拉伸,取 1.5×10^4 。

计算得到,基础底板一次浇筑最大长度为 45.18 m ,地下室外墙为 35.78 m 。

3.2 仓格划分

3.2.1 分仓原则

基础底板、地下车库外墙、地下车库顶板均可采用跳仓法进行施工,且可在不同垂直位置分仓,无需考虑受力影响,如在跨间钢筋少、施工方便位置^[8]。分仓缝宜拉直对齐,并合理避让柱墩、集水坑、电梯井、人防门等部位。

3.2.2 分仓

现场将整个地下结构划分为 A、B、C 三个工区共计 24 段进行施工, C-6 及 C-7 段为出土马道,待主楼出正负零后再进行浇筑。基础底板划分仓格最大长度为 52.2 m ,地下室外墙为 42.3 m 。

3.2.3 混凝土浇筑顺序

先浇筑仓块,施工完成须间隔 7~10 d 后方可进行相邻仓块浇筑。仓块划分平面布置如图 2 所示,现场底板跳仓施工如图 3 所示。各工区浇筑顺序: 1) A 工区: A-1 → A-2 → A-3 → A-4 →

表 1 混凝土施工配合比

| 部位 | 等级 | 单方材料用量 | | | | | | |
|----|-------|--------|-----|-----|-------|-----|----|-----|
| | | 水 | 水泥 | 砂 | 石 | 粉煤灰 | 矿粉 | 减水剂 |
| 底板 | C35P8 | 154 | 210 | 790 | 1 048 | 114 | 57 | 7.6 |

kg/m³

A-5→A-6→A-7; 2) B工区: B-1→B-2→B-4→B-8→B-3→B-6→B-5→B-7→B-9→B-10; 3) C工区: C-1→C-2→C-3→C-4→C-5→C-6→C-7。

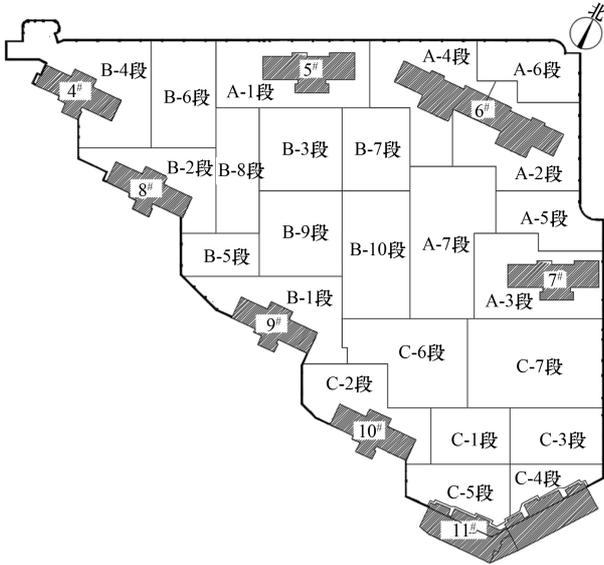


图2 底板分段平面布置



图3 现场底板跳仓施工

4 底板施工及温度控制

4.1 施工控制

(1) 钢筋工程。为保证钢筋起到控制混凝土收缩裂缝宽度的作用, 施工中应控制钢筋保护层厚度。配制双层双向钢筋, 并设置钢筋马凳, 减少钢筋绑扎后的二次踩踏。

(2) 模板工程。模板及支撑体系必须具有足够的承载力、刚度和稳定性, 水平方料与模板的接触面之间不得有任何间隙, 使每个接触面都有可靠的支撑点。

(3) 混凝土工程。基础底板混凝土浇筑采用分层布料、分层振捣、斜坡推进法施工, 沉缩完

成后进行二次振捣, 初凝前进行二次抹压, 并及时覆盖塑料布, 养护时间不少于14 d。

4.2 温度控制

4.2.1 测点布置

将测温点布置于结构中部散热不利区域(图4)。长度方向每隔6 m设一组测温点, 每组测温点分上、中、下3个测温点, 即混凝土表面内50 mm处、底面上50 mm、筏板中心位置处(图5)。

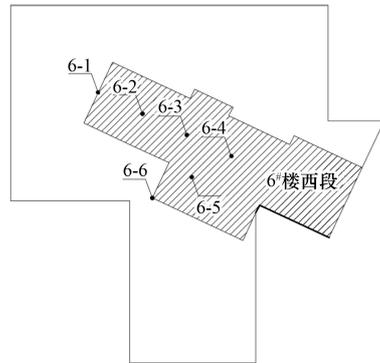


图4 A-4段测温点平面布置

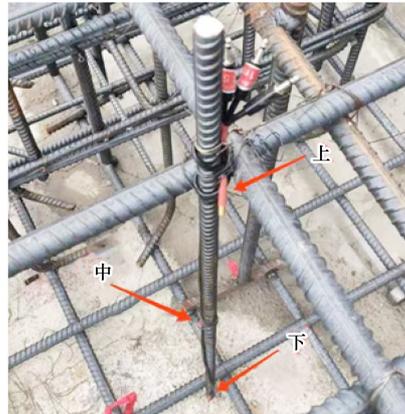


图5 测温点纵向布置

4.2.2 监测仪器及频率

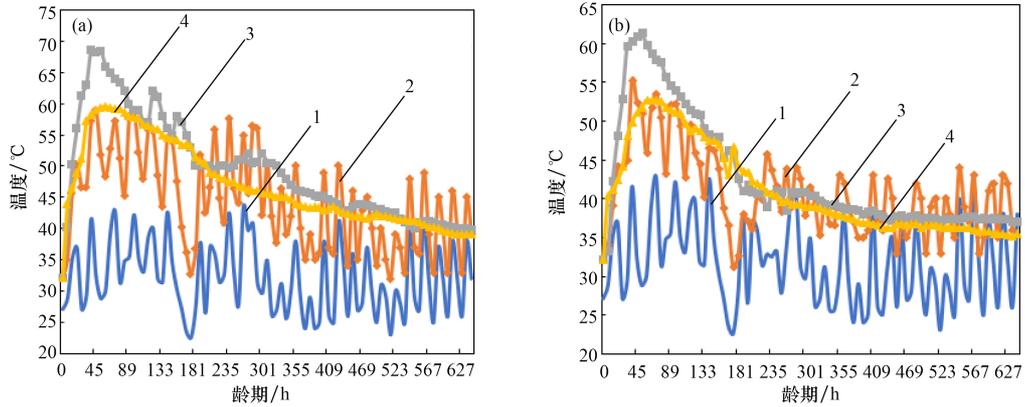
测温仪器采用JDC-2型建筑电子测温仪, 测温误差 $\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。浇筑后1~6 d, 每昼夜进行4次测温; 7~14 d每昼夜进行3次测温。

4.2.3 温控指标

混凝土浇筑后, 主要温控指标: 1) 混凝土入模温度 $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2) 混凝土浇筑后里表温差 $\leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 环境表面温差 $\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3) 混凝土降温速率 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

4.2.4 测温结果及采取措施

选取中心位置(6-4测点)、边缘位置(6-6测点)进行测温, 温度变化曲线如图6所示。由图6可知: 混凝土在浇筑后60 h左右达到温升峰值,



(a) 测点 6-4; (b) 测点 6-6

1—环境温度; 2—上; 3—中; 4—下。

图 6 不同测点温度变化曲线

最大温度峰值为 68.7 °C, 且中心位置混凝土温升峰值明显大于边缘位置峰值。中间层温升幅度最大、下层次之, 上层温升最小。浇筑约 10 d 后上、中、下 3 层混凝土温度基本趋于一致。上层混凝土温度变化受环境温度影响较大, 中、下两层温度变化趋势基本相同。实测混凝土最大环境表面温差出现在浇筑后 2 d, 为 26.7 °C (不宜大于 20 °C), 最大里表温差出现在浇筑后 7 d, 为 22.1 °C (不宜大于 25 °C)。最大降温速率出现在浇筑后 3 d, 为 3.7 °C/d (不宜大于 2 °C/d)。

通过测温数据反馈, 混凝土浇筑后前两天水化温升较大, 现场每 6 h 对新浇筑混凝土表面进行洒水降温之后再盖上塑料薄膜保湿。浇筑体在 3 d 后开始降温, 现场应做好保湿养护的同时, 夜间采用覆盖减缓表面混凝土降温速率。

4.2.5 混凝土防裂验算

混凝土一次浇筑 52.20 m 时, 通过现场混凝土温度实测, 计算出各龄期混凝土约束应力, 验算防裂是否满足要求。

(1) 混凝土浇筑体综合降温差计算如式(8)~(11)所示。

$$\Delta T_1(t) = T_m(t) - T_b(t) \quad (8)$$

$$\Delta T_2(t) = \frac{1}{6} [4T_m(t) + T_{bm}(t) + T_{dm}(t)] +$$

$$T_y(t) - T_w(t) \quad (9)$$

$$\Delta T_{1i}(t) = \Delta T_1(t) - \Delta T_1(t-j) \quad (10)$$

$$\Delta T_{2i}(t) = \Delta T_2(t-j) - \Delta T_2(t) \quad (11)$$

式中: $\Delta T_1(t)$ 为 t 龄期时, 浇筑体的里表温差, °C;

$T_m(t)$ 为 t 龄期时, 浇筑体内的最高温度, °C; $T_b(t)$ 为 t 龄期时, 浇筑体内的表层温度, °C; $\Delta T_2(t)$ 为 t 龄期时, 浇筑体的综合降温, °C; $T_{bm}(t)$ 、 $T_{dm}(t)$ 为 t 龄期时, 浇筑体块体上、下表层的温度, °C; $T_w(t)$ 为浇筑体预计稳定温度, 取龄期 t 时的日平均温度, °C; $T_{1i}(t)$ 为 t 龄期时, 在第 i 计算区段浇筑体里表温差的增量, °C; $T_{2i}(t)$ 为 t 龄期时, 在第 i 计算区段浇筑体综合降温差的增量, °C。

综合降温差计算结果如表 2 所示。

(2) 约束拉应力计算。根据增量叠加法计算外约束拉应力 $\sigma_x(t)$ 及自约束拉应力 $\sigma_z(t)$:

$$\sigma_x(t) = \frac{\alpha}{1 - \mu_i} \sum_{i=1}^n \left\{ \left[1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{C_x}{HE(t)}} \times \frac{L}{2}\right)} \right] \times \Delta T_{2i}(t) \times E_i(t) H_i(t, \tau) \right\} \quad (12)$$

$$\sigma_z(t) = \frac{\alpha}{2} \times \sum_{i=1}^n \Delta T_{1i}(t) \times E_i(t) H_i(t, \tau) \quad (13)$$

式中: $\sigma_x(t)$ 为 t 龄期时, 因综合降温差, 在外约束条件下产生的拉应力, MPa; μ 为混凝土泊松比, 取 0.15; $E(t)$ 为 t 龄期时混凝土的弹性模量, MPa; L 为混凝土浇筑体的长度, 取基础底板分仓长度, 为 52 200 mm; $\sigma_z(t)$ 为 t 龄期时, 因浇筑体里表温差产生自约束拉应力的累计值, MPa; $E_i(t)$ 为第 i 计算区段 t 龄期时, 混凝土的弹性模量, N/mm², 取值如表 3 所示; $H_i(t, \tau)$ 为龄期为 τ 时产生的约束应力, 延续至 t 时的松弛系数, 取值如表 4 所示。

表 2 综合降温差计算

| 龄期/d | $T_m(t)/^{\circ}\text{C}$ | $T_b(t)/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_1(t)/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_{1i}(t)/^{\circ}\text{C}$ | $T_{bm}(t)/^{\circ}\text{C}$ | $T_{dm}(t)/^{\circ}\text{C}$ | $T_y(t)/^{\circ}\text{C}$ | $T_w(t)/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_2(t)/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_{2i}(t)/^{\circ}\text{C}$ |
|------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 30.0 | 30.0 | 0 | — | 30.0 | 30.0 | 0 | 30 | 0 | — |
| 1 | 59.9 | 47.5 | 12.4 | 12.4 | 47.5 | 53.8 | 0.336 | 30 | 27.15 | -27.15 |
| 2 | 68.0 | 53.7 | 14.3 | 1.9 | 53.7 | 59.3 | 0.669 | 30 | 34.84 | -7.68 |
| 3 | 67.6 | 54.9 | 12.7 | -1.6 | 54.9 | 59.2 | 0.998 | 30 | 35.08 | -0.25 |
| 6 | 62.1 | 51.2 | 10.9 | -1.8 | 51.2 | 54.2 | 1.967 | 30 | 30.93 | 4.15 |
| 9 | 55.7 | 45.4 | 10.3 | -0.6 | 45.4 | 48.2 | 2.907 | 30 | 25.64 | 5.29 |
| 12 | 50.3 | 44.3 | 6.0 | -4.3 | 44.3 | 46.1 | 3.819 | 30 | 22.42 | 3.22 |
| 15 | 47.6 | 40.5 | 7.1 | 1.1 | 40.5 | 43.8 | 4.704 | 30 | 20.49 | 1.93 |
| 18 | 45.0 | 38.7 | 6.3 | -0.8 | 38.7 | 42.5 | 5.563 | 30 | 19.09 | 1.39 |
| 21 | 42.9 | 38.6 | 4.3 | -2.0 | 38.6 | 42.0 | 6.397 | 30 | 18.43 | 0.67 |
| 24 | 41.1 | 37.7 | 3.4 | -0.9 | 37.7 | 40.3 | 7.206 | 30 | 17.61 | 0.82 |
| 27 | 39.7 | 37.1 | 2.6 | -0.8 | 37.1 | 38.9 | 7.991 | 30 | 17.12 | 0.48 |
| 30 | 38.5 | 36.0 | 2.5 | -0.1 | 36.0 | 38.0 | 8.753 | 30 | 16.75 | 0.37 |

表 3 混凝土各龄期弹性模量

| | | | | | | | | | | | N/mm^2 |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
| 1 d | 2 d | 3 d | 6 d | 9 d | 12 d | 15 d | 18 d | 21 d | 24 d | 27 d | 30 d |
| 2 697 | 5 161 | 7 414 | 13 074 | 17 394 | 20 692 | 23 210 | 25 132 | 26 599 | 27 719 | 28 575 | 29 227 |

表 4 混凝土的松弛系数

| 1 d | 2 d | 3 d | 6 d | 9 d | 12 d | 15 d | 18 d | 21 d | 24 d | 27 d | 30 d |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0.186 | 0.186 | 0.186 | 0.208 | 0.214 | 0.215 | 0.233 | 0.252 | 0.477 | 0.524 | 0.570 | 1 |

(3) 混凝土防裂验算。混凝土防裂性能可按式(14)、(15)进行判断。

$$K_1 = \frac{\lambda f_{tk}(t)}{\sigma_x(t)} \geq 1.15 \quad (14)$$

$$K_2 = \frac{\lambda f_{tk}(t)}{\sigma_z(t)} \geq 1.15 \quad (15)$$

式中: K_1 为外约束应力的防裂安全系数; λ 为掺合料对混凝土抗拉强度影响系数, 由 DB11/T 1200—2023, 取 1.067 (粉煤灰掺量为 30%, 矿粉掺量为 15%); $f_{tk}(t)$ 为 t 龄期时, 混凝土抗拉强度标准值, N/mm^2 ; K_2 为自约束应力的防裂安全系数。

混凝土防裂验算结果如表 5 所示。由表 5 可知: 各龄期防裂安全系数均满足规范要求。升温阶段, 底板产生膨胀变形并受到约束, 外约束应力为压应力。同时, 由于外低内高的温差, 内部膨胀较多, 表面较小, 内部受到表面约束产生压应力, 自约束应力在整个截面上自平衡, 表面为拉应力。降温阶段, 底板体积收缩, 外约束应力由压转拉。同时, 底板内部温度降幅较大, 收缩

表 5 拉应力及防裂安全系数汇总

| 龄期/d | $\lambda f_{tk}(t)$ | $\sigma_x(t)$ | K_1 | $\sigma_z(t)$ | K_2 |
|------|---------------------|---------------|-------|---------------|--------|
| 1 | 0.608 | -0.812 | — | 0.167 | 3.641 |
| 2 | 1.059 | -0.858 | — | 0.144 | 7.354 |
| 3 | 1.393 | -0.667 | — | 0.056 | 24.875 |
| 6 | 1.959 | -0.210 | — | -0.046 | — |
| 9 | 2.189 | 0.402 | 5.445 | -0.085 | — |
| 12 | 2.285 | 0.620 | 3.685 | -0.513 | — |
| 15 | 2.321 | 0.676 | 3.433 | -0.177 | — |
| 18 | 2.337 | 0.626 | 3.733 | -0.283 | — |
| 21 | 2.343 | 0.475 | 4.933 | -0.477 | — |
| 24 | 2.346 | 0.444 | 5.284 | -0.389 | — |
| 27 | 2.347 | 0.386 | 6.080 | -0.453 | — |
| 30 | 2.347 | 0.345 | 6.803 | -0.370 | — |

注: 负数为压应力; 正数为拉应力。

较多; 表面温度降幅较小, 收缩较少, 内部收缩受到表面的约束产生拉应力, 由于弹性模量的变化, 降温产生的拉应力增量远超过升温的压应力, 表面则产生压应力。

5 结 论

(1) 采用“抗放兼施”的设计原则,控制混凝土裂缝问题。地下室外墙水平分布钢筋宜置于竖向钢筋外侧。

(2) 优选混凝土原材料,用粉煤灰、矿渣替代部分水泥,配制出可降低水化热且满足抗裂要求的混凝土。

(3) 计算出采用跳仓法施工基础底板一次浇筑结构最大长度为 45.18 m,现场实际长度为 52.2 m。通过现场温度实测及采取养护措施,验算出混凝土满足防裂要求。

(4) 夏季底板混凝土中部温升最高,下部次之,上部温升最小。新浇筑混凝土约 2 d 达到温度峰值,随后缓慢降低。前期应做好洒水降温、覆膜保湿措施,夜间气温较低宜适当覆盖,减小混凝土里表温差。

参考文献:

[1] 江昔平,王社良,段述信,等. 超大体积混凝土温度裂

(上接第 23 页)

定性 with 充填体高度也有一定关系,需进一步研究充填体不同强度与回采高度的关系,提高二步骤回采安全保障性。

参考文献:

- [1] 王志东. 充填体稳定条件下的爆破控制技术研究试验与应用[J]. 福建冶金,2023,52(2):17-20.
- [2] 赵永,杨天鸿,王薪荣,等. 基于 Mathews 稳定图法的采空区稳定性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(1):74-78.
- [3] 胡高建,杨天鸿,胡忠强,等. 基于 Mathews 稳定图等方法的多角度采空区群稳定性分析评价[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(2):348-354.
- [4] 刘嘉伟,黄明清,谭伟. 基于拓展的 Mathews 稳定图法的采场结构参数优化[J]. 有色金属工程,2023,13(1):106-113.
- [5] 肖军. Mathews 稳定图法在确定矿山采场暴露面积中的应用[J]. 新疆有色金属,2013,36(2):19-20.
- [6] TRUEMAN R, MIKULA P, MAWDESLEY C, et al.

缝产生机理分析与抗裂控制新对策[J]. 混凝土,2007(12):98-102.

- [2] 李浩然,尹志刚. 跳仓法在超长结构筏板基础中的应用[J]. 工程建设,2022,54(6):60-65.
- [3] 张喜平,刘仲洋,王山,等. 跳仓法施工中超长大体积混凝土配合比优化设计研究[J]. 建筑结构,2021,51(增刊2):1017-1019.
- [4] 石创业,余杰,元庆. 超长结构施工的温度与应力监测技术研究[J]. 工程建设,2023,55(7):48-52.
- [5] 王铁梦. 工程结构裂缝控制:“抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [6] 周筭,李国胜,王雪生,等. 超长大体积混凝土跳仓法工程设计中的关键问题[J]. 建筑结构,2019,49(18):120-125;130.
- [7] 超长大体积混凝土结构跳仓法技术规程:T/CECS 640—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [8] 超长混凝土结构无缝施工标准:JGJ/T 492—2023[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2023.

Experience in Australia with the Mathews method for open stope design[J]. CIM Bulletin,2000,93(2):162-167.

- [7] 姚鸿基. 基于 Mathews 稳定图法的巷道安全跨度计算与应用[J]. 煤炭科技,2020,41(4):129-131.
- [8] 文兴,赵亮,黄敏. 阿舍勒铜矿二步骤采场回采充填体稳定性分析[J]. 矿冶,2021,30(4):1-6;19.
- [9] 王南南. 结合多种方法研究张庄铁矿高阶段采场合理暴露面积[J]. 中国金属通报,2019(9):201-202.
- [10] 刘泽洲,王杰. 某矿采场结构参数设计及顶板稳定性判别[J]. 湖南有色金属,2017,33(1):4-7.
- [11] 尹士兵,张鸣鲁. 基于 Mathews 稳定图法的采场暴露面积确定[J]. 现代矿业,2015,31(6):8-10;14.
- [12] 房智恒. 阶段空场嗣后充填胶结充填体力学强度模型研究[J]. 工程建设,2019,51(12):39-47.
- [13] 陈敬刚,李爱兵. 某采空区的稳定性分析论证研究[J]. 采矿技术,2009,9(3):37-39;46.
- [14] R. 特鲁曼,C. 莫德利,N. 哈里斯,等. 应用 Mathews 方法进行空场采矿法设计的经验[J]. 国外金属矿山,2002(1):24-30;66.