

大体积混凝土分层浇筑工艺对裂缝控制的影响机制

薛生东

新疆生产建设兵团建设工程(集团)有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 大体积混凝土结构因其几何尺寸庞大,在硬化过程中易因水化热积聚而产生显著的温度梯度,进而诱发温度应力,成为裂缝形成的主要诱因。分层浇筑作为一种广泛应用的施工策略,通过将整体结构划分为若干水平或倾斜层进行逐层浇筑,有效调控了混凝土内部的热力学行为与力学响应。本文系统阐述了大体积混凝土裂缝产生的物理本质,深入剖析了分层浇筑工艺在热传导、应力演化、约束条件及材料性能时变性等方面的作用机理。研究表明,分层浇筑通过缩短热传导路径、降低单次浇筑体的绝热温升峰值、延缓结构整体约束刚度的发展以及优化新旧混凝土界面的应力传递,从源头上削弱了温度应力的生成强度,并增强了结构抵抗开裂的能力。该工艺的本质在于对“时间-空间”维度的主动干预,实现了热-力耦合过程的精细化调控,为大体积混凝土裂缝控制提供了理论支撑与技术路径。

关键词: 大体积混凝土; 分层浇筑; 裂缝控制; 水化热; 温度应力; 约束条件

引言

大体积混凝土结构在水利水电、核电、桥梁等关键基础设施中广泛应用,其最小几何尺寸常超1米,水泥水化放热难以及时散失,形成复杂非稳态温度场,诱发温度应力,应力超抗拉强度极限便产生裂缝。裂缝损害结构整体性与耐久性,加速钢筋锈蚀与混凝土劣化,威胁结构长期安全与寿命。因此,有效控制大体积混凝土早期裂缝是土木工程核心课题。优化施工工艺是关键,其中分层浇筑被普遍采纳,它将混凝土体沿高度等方向划分成若干浇筑层,各层间保持间隔时间依次浇筑。但该方法裂缝控制机理尚缺乏系统性理论阐释。本文剥离工程实例干扰,从热力学等基本原理解出发,探究分层浇筑影响大体积混凝土裂缝形成与发展的内在机制,为科学应用与优化提供理论基础。

1 大体积混凝土裂缝成因的物理本质

理解分层浇筑的效用,首先需明晰大体积混凝土裂缝产生的根本原因。其核心在于水化热驱动下的“热-力”耦合效应。

1.1 水化热与温度场演化

水泥与水发生水化反应是一个强烈的放热过程。对于大体积混凝土,由于其巨大的体积与相对较小的表面积之比(即低比表面积),内部产生的热量无法像普通构件那样迅速通过对流、辐射和传导等方式散失到环境中。这导致混凝土内部温度急剧上升,达到一个峰值(Peak Temperature),此过程称为升温阶段。随后,随着水化反应的逐渐减缓以及热量持续向外界散失,混凝土内部温度开始缓慢下降,进入降温阶段。这一升-降温循环并非均匀发生。靠近结构表面的混凝土,由于与环境

直接接触,散热较快,温度变化幅度小、速率快;而位于结构核心区域的混凝土,则处于近乎绝热的状态,温度升高幅度大、峰值高,且降温过程极其缓慢。由此,在混凝土内部形成了从中心高温区指向表面低温区的径向(或法向)温度梯度。

1.2 温度应力的形成

根据热弹性力学理论,物体受热膨胀,遇冷收缩。在自由状态下,这种热胀冷缩不会产生内力。然而,大体积混凝土结构在现实中必然受到各种形式的约束:(1)外部约束(External Restraint):指结构整体或其部分受到地基、相邻已硬化结构或其他固定边界对其变形的限制。(2)内部约束(Internal Restraint):主要指同一结构内部不同区域之间因温度、湿度或龄期差异导致的变形不协调。例如,前述的内外温差就构成了典型的内部约束——高温核心区试图膨胀,但被温度较低、刚度较大的外层混凝土所约束;反之,在降温阶段,核心区收缩又受到外层的阻碍。在这些约束条件下,由非均匀温度场引起的不协调变形受到了抑制,从而在混凝土内部产生了自平衡的内应力,即温度应力。在升温阶段,内部受压,外部受拉;而在更为关键的降温阶段,内部收缩受阻,产生拉应力,外部则可能受压。由于混凝土的抗拉强度远低于其抗压强度(通常仅为后者的1/10至1/15),因此降温阶段在结构内部(特别是距表面一定深度处)产生的拉应力极易超过混凝土当时的抗拉强度,导致贯穿性或深层裂缝的形成^[1]。此外,混凝土在硬化早期还伴随着显著的化学收缩和自收缩,这些体积变形同样会受到约束而产生附加的收缩应力,进一步加剧了开裂风险。综上所述,大体积混凝土的裂缝问题本质上是一个由水化热引

发、受多重约束调制、并在材料强度发展过程中动态演化的热-力耦合失效问题。

2 分层浇筑工艺的核心参数及其物理意义

分层浇筑并非简单的施工分割，其效果取决于两个核心参数的合理设定：单层浇筑厚度（ H ）和层间间隔时间（ Δt ）。这两个参数共同定义了工艺干预的时间与空间尺度。

2.1 单层浇筑厚度（ H ）

单层厚度 H 直接决定了每一浇筑单元的几何特征。从热传导角度看，热量从混凝土内部传递到表面的距离最大为 $H/2$ （对于水平分层）。根据傅里叶热传导定律，热流密度与温度梯度成正比。因此，减小 H ，相当于缩短了热量向外扩散的最大路径长度，极大地提高了单层混凝土的散热效率。这意味着，在相同的水泥品种和配合比下，较薄的浇筑层能够更快地将水化热散发出去，从而显著降低其内部所能达到的最高绝热温升（Adiabatic Temperature Rise）。从力学角度看， H 也决定了单层结构自身的约束特性。一个较薄的层，其内部由温差引起的自约束（内部约束）效应会减弱，因为整个截面的温度分布更为均匀。同时，它作为一个独立的力学单元，其对外部约束（如基础）的敏感性也与其自身刚度相关，而刚度又与厚度的立方成正比，故减小 H 能有效降低单层结构的整体刚度，使其在面對基础约束时具有更大的变形适应能力。

2.2 层间间隔时间（ Δt ）

层间间隔时间 Δt 是连接各浇筑层的时间纽带。它的设定至关重要，需要在两个相互矛盾的目标间取得平衡：（1）过短的 Δt ：下层混凝土尚处于高水化热释放期和低强度状态，此时浇筑上层，相当于给一个“热而软”的基体施加新的荷载和热源。这不仅会加剧下层的温升，还可能因其强度不足而产生塑性沉降裂缝。更重要的是，上下层几乎同步经历温升-降温全过程，使得整个结构在后期表现出类似一次性浇筑的整体性，失去了分层的意义。（2）过长的 Δt ：下层混凝土已充分冷却并达到较高强度，甚至接近其最终强度^[2]。此时浇筑上层，新浇筑的混凝土在硬化收缩和降温收缩时，会受到一个“冷而硬”的下层的强力约束。这种强大的外部约束会在新旧混凝土界面附近产生极高的拉应力，极易引发层间接缝处的冷缝或贯穿裂缝。因此，理想的 Δt 应确保下层混凝土已完成大部分（例如70%以上）的水化热释放，并已获得足够的早期强度以支撑上层荷载，但其温度尚未完全降至环境温度，仍保留一定的“余温”。这样，当上层浇筑后，两层混凝土的温度场能够较好地融合，避免出现剧烈的温度阶跃，同时下层提供的约束既非过弱也非过强，处于一个有利于

应力松弛的“温和”状态。

3 分层浇筑对裂缝控制的影响机制

基于上述对裂缝成因及工艺参数的理解，分层浇筑通过以下四个相互关联的机制实现对裂缝的有效控制。

3.1 热传导路径的缩短与温升峰值的抑制

这是分层浇筑最直接、最根本的作用。将一个总厚度为 T 的大体积体分解为 n 个厚度为 H （ $H = T/n$ ）的薄层，从根本上改变了热传导的边界条件。对于每个薄层而言，其最大热传导距离从 $T/2$ 锐减至 $H/2$ 。根据热传导方程，散热速率与特征长度的平方成反比。因此，即使 $n=2$ （即分两层），散热效率也能提升近四倍。高效的散热意味着单位时间内积聚的热量减少，从而直接压制了单层混凝土内部所能达到的最高温度。峰值温度的降低带来了双重好处：第一，绝对温升值（即峰值温度与环境温度之差）减小，这直接降低了后续降温阶段可能产生的最大温度变形量；第二，由于水化反应速率对温度高度敏感（遵循Arrhenius定律），较低的峰值温度会反过来抑制水化反应速率，形成一种负反馈机制，进一步减少了总水化热的释放速率和总量。这种对源头热源的主动管理，是从根本上削弱温度应力驱动力的关键。

3.2 温度梯度与内部约束的弱化

裂缝往往萌生于温度梯度最大的区域。一次性浇筑形成的巨大温度梯度，尤其是在结构中心与表面之间，是内部约束应力的主要来源。分层浇筑通过制造多个、更小的温度场单元，有效地将一个大的、陡峭的温度梯度场，分解为多个小的、平缓的温度梯度场。每个薄层内部的温度分布更为均匀，其自身产生的内部约束应力自然大幅降低。虽然在层与层之间可能存在微小的温度差异，但由于层厚 H 较小，这种层间的温差及其引起的应力集中远小于整体浇筑时核心与表面的巨大温差^[1]。因此，分层浇筑从空间上“稀释”了高应力区，将潜在的、集中的高风险开裂区域分散化、微弱化，使整个结构的应力状态更加平顺，远离混凝土的抗拉强度极限。

3.3 结构整体约束刚度的时序调控

一次性浇筑的结构，其整体刚度从浇筑完成那一刻起就开始快速累积。一旦与地基或其他刚性边界形成连接，强大的外部约束便立即作用于整个正在经历剧烈温度变化的混凝土体，极易导致早期开裂。分层浇筑巧妙地引入了“时间”维度。在浇筑第一层时，结构的有效高度仅为 H ，其整体刚度很低，对地基的约束反力也相应较小。此时，第一层混凝土可以在一个相对“宽松”的约束环境下完成其主要的温升和早期降温过程，产生的温度应力较小。随着后续各层的依次浇筑，结构的整体

高度和刚度是逐步、渐进式地增加的。当结构最终达到设计高度时,大部分早期的、剧烈的水化热反应和相应的体积变形已经完成。此时,虽然整体刚度很大,但混凝土的温度已趋于稳定,不再有大的温度变形来激发强大的约束应力。这种将“高刚度”状态与“大变形”过程在时间上错开的策略,是分层浇筑控制由外部约束引起裂缝的核心智慧。

3.4 新旧混凝土界面的应力传递优化

层间接缝是分层浇筑结构的薄弱环节,也是应力传递的关键部位。合理的分层工艺能将这个潜在的弱点转化为应力缓冲的“铰接点”。如前所述,通过精确控制 Δt ,可以使下层混凝土在浇筑上层时处于一个“温而韧”的理想状态。此时,新浇筑的上层混凝土在硬化初期,其收缩变形(包括化学收缩、自收缩和早期的温度收缩)可以部分地被仍有微小徐变和松弛能力的下层所吸收。下层不再是完全刚性的约束体,而是一个具有一定变形能力的“柔性”基座。这种界面处的应力松弛效应,能有效缓解新浇筑层底部的拉应力集中^[4]。此外,分层施工也为处理层间接缝提供了操作窗口。通过凿毛、冲洗、铺设水泥砂浆等标准工序,可以确保新旧混凝土之间形成良好的物理咬合和化学粘结,保证剪力的有效传递,防止层间滑移,从而维持结构的整体性。这种在保证结构连续性的前提下,对局部应力进行柔化处理的能力,是整体浇筑所不具备的独特优势。

4 分层浇筑与其他裂缝控制措施的协同效应

分层浇筑并非孤立的解决方案,而是整个裂缝综合防控体系中的关键一环。它与材料层面和养护层面的措施存在深刻的协同关系。在材料层面,采用低热水泥、掺加粉煤灰或矿渣等矿物掺合料、使用高效缓凝减水剂等,旨在从源头上降低水化热总量和放热速率。分层浇筑则是在施工层面,为这些低热水化材料创造更有利的散热条件,使其性能得以充分发挥。两者结合,可实现

对温升的双重抑制。在养护层面,保温保湿养护是控制表面温度梯度和防止塑性收缩裂缝的重要手段。对于分层浇筑结构,养护的重点可以更有针对性地放在新浇筑的表层,而无需像整体浇筑那样担忧深层的热量积聚。同时,分层结构暴露的侧面也为采取侧面保温或冷却水管等主动温控措施提供了便利的布设空间。可以说,分层浇筑为精细化、差异化的温控养护策略提供了结构基础。

5 结语

大体积混凝土分层浇筑工艺是一种基于深刻物理洞察的、行之有效的裂缝控制方法。其核心影响机制可归结为对混凝土结构热-力耦合过程在“时间”与“空间”两个维度上的主动干预与优化。在空间维度上,通过减小单层浇筑厚度,显著缩短了热传导路径,有效抑制了单层混凝土的温升峰值,并弱化了由内外温差引起的内部约束应力。在时间维度上,通过合理设置层间间隔时间,实现了结构整体约束刚度发展的时序调控,将高刚度状态与大体积变形过程错开,并优化了新旧混凝土界面的应力传递条件,利用下层混凝土的残余变形能力来缓冲上层的收缩应力。未来的研究可进一步深化对层间界面微观力学行为、不同分层模式(如阶梯式、斜层式)的适应性以及与智能温控技术集成等方面的理论探索,以推动大体积混凝土裂缝控制技术向更高水平发展。

参考文献

- [1]蒲盛旋.大体积混凝土分层浇筑层间性能及抗裂性能试验研究[J].江西建材,2024,(08):335-337.
- [2]陈运.大体积混凝土分层浇筑技术研究[J].陶瓷,2025,(11):162-164.
- [3]栗雅玲.大体积混凝土分层浇筑工艺优化研究[J].砖瓦,2025,(08):144-146.
- [4]王海龙.基础底板大体积混凝土分层浇筑施工技术[J].砖瓦,2023,(06):169-171.