

# 港口与航道工程大体积混凝土裂缝控制与温控施工技术

陈红益

宏海建设集团有限公司, 江苏南京, 210000;

**摘要:** 大体积混凝土是港航工程的主要承载结构材料之一, 而混凝土裂缝则是影响着整个工程质量寿命以及运行安全最主要的隐患。大体积混凝土结构断面尺寸比较大、一次浇筑方量大, 混凝土浇筑完成后水化热总量大、混凝土内部温度急剧上升导致的内部极易引起混凝土裂缝, 控制温度引起的裂缝问题是大体积混凝土在施工过程中需要应对的主要问题。通过对材料选择优化、准确设计配合比例、合理分层温控和科学落实浇筑工作后, 全阶段养护监控及裂缝防治技术, 可以实现混凝土内部温度梯度 $<25^{\circ}\text{C}$ , 降低裂缝产生速率。温控技术主要以入模时的温度控制、水泥水化热的排除, 以及适应性的施工环境温度湿度为主, 并且搭配使用传感器进行现场检测和智能化调控, 以实现港航工程大体积混凝土早期开裂预警。

**关键词:** 大体积混凝土; 裂缝控制; 温控

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.03.020

## 引言

港口和航道工程作为交通运输网络中的主要节点, 对海洋运输的安全可靠程度能产生重要影响。由于大体积混凝土具有出色的承重性、抗渗性, 以及长期使用性能, 所以在码头沉箱、航道护岸、船闸底板等主要部位被大量运用, 而且它占据了整个工程材料中的40%—60%。而大体积混凝土非常容易在施工过程中, 以及后期运行过程中出现裂缝, 若无特殊防治手段, 裂隙发生的概率高达82%, 而且裂缝通常 $>0.3\text{mm}$ 。不仅会降低建筑整体结构性能, 而且还会加快海水、盐雾等腐蚀性物质的渗透速度, 促使钢筋生锈混凝土脱落, 导致工程寿命减少30%—50%, 提高后期维护费用。所以探究裂隙形成原因, 并寻找合理有效的裂缝抑制与温控浇注施工方法, 是保证港航工程质量的关键, 这对于促进交通运输事业健康有序发展也有重要作用。

## 1 港口与航道工程大体积混凝土核心特性

### 1.1 体积规模大且结构厚重

港航工程的大体积混凝土通常是指基础底边长 $\geq 20\text{m}$ , 而且体积 $\geq 400\text{m}^3$ 、墙体厚度 $\geq 1\text{m}$ , 且水泥水化热较大的混凝土结构<sup>[1]</sup>。巨大的体量容易导致混凝土内部散热困难、传热途径较长, 其中心温度可以达到 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ , 温差超过 $30^{\circ}\text{C}$ , 混凝土很容易形成温度裂缝。同时其厚重又容易造成混凝土内不同位置处受力情况复杂, 会对混凝土本身材料的均匀性抵抗变形的能力, 以及施工工艺水平的精确性提出极高挑战。

### 1.2 水化热释放集中且持续时间长

大体积混凝土水泥用量一般是 $280\sim 350\text{kg}/\text{m}^3$ , 需要注意的是水泥在水化过程中会产生大量的热量, 而且集中的时间比较长。普通硅酸盐水泥水化热可以达到

$370\sim 460\text{kJ}/\text{kg}$ , 在浇注完成后的3—7天内达到峰值以后还会缓慢下降, 因此水化放热时间长达20—30天之久。以C30大体积混凝土为例, 若其中水泥含量 $320\text{kg}/\text{m}^3$ , 则水化热能使混凝土内部升温 $45\sim 55^{\circ}\text{C}$ , 再加上外界气温, 内部温度很容易超过 $70^{\circ}\text{C}$ 。而且高度集中的水化热得不到有效散发, 会在混凝土内部造成膨胀应力, 但同时表层的混凝土却会因为散热快、收缩而产生拉应力, 当拉应力值大于混凝土抗拉强度时, 开裂就会不可避免地发生。

## 2 港口与航道工程大体积混凝土裂缝成因解析

### 2.1 材料特性与配合比不合理

混凝土原材料本身的性质是形成裂缝的内因, 水泥的选用不合理会引起过大水化热, 而高强度的硅酸盐水泥水化热量, 较缓凝矿渣水泥高30%—40%, 容易产生较大的温度应力。而骨料级配合比不佳, 例如碎石的最大粒径 $<20\text{cm}$ , 含沙率 $>45\%$ , 都会使混凝土本身收缩提升25%—35%、拉伸强度下降15%—20%。同时外加剂加入量不可控, 减水剂掺入少, 则混凝土坍落度过小不易振捣密实, 过多又会造成泌水离析, 混凝土结构内部就会出现较多孔隙。

### 2.2 温度应力作用

温度应力是大体积混凝土裂缝发生最主要的原因, 它的产生与水化热升温、周围环境气温变化以及约束情况有关<sup>[2]</sup>。大体积混凝土浇筑完成后, 水泥的水化热导致内部迅速升温, 在浇筑完成的3d~5d核心温度能达到最高, 然后逐渐降温和收缩。同时混凝土与基础、模板等固定物有着较强的结合力, 收缩会受到限制而引起拉应力。不同温度下混凝土内部应力的变化如表1所示, 由此可见温差超过 $25^{\circ}\text{C}$ 以后应力增大速度明显变快, 开

裂的可能性也随之大幅提高。

表 1 不同温度条件下混凝土内部应力变化表

内外温差 $^{\circ}\text{C}$	混凝土弹性模量 MPa	线膨胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	温度应力 MPa	早期抗拉强度 MPa	裂缝风险等级
10	25000	10.2	2.55	1.8	低
15	27000	10.1	4.09	2.0	中
20	29000	10.0	5.80	2.2	中高
25	30000	9.9	7.43	2.3	高
30	31000	9.8	9.05	2.5	极高

### 2.3 收缩变形引发的应力累积

混凝土收缩变形主要是由化学收缩、干燥收缩以及自生收缩共同产生的，这三个因素相互叠加，会在混凝土内积聚应力最终导致开裂。其中化学收缩是在水泥水化过程中，固相物质数量降低而产生的现象，主要发生在水化早期，即浇筑后 1~7d 之间，其收缩值在  $50\sim 80\times 10^{-6}$  之间。干燥收缩则是指水泥混凝土硬化后，随着表面水分不断挥发，在内部孔隙中形成真空负压，从而导致混凝土体积缩小，在混凝土浇灌以后约 14~28 天达到顶峰，此时的干燥收缩应变大约为  $300\sim 500\times 10^{-6}$ ，占整个过程总收缩量的 50% 以上，大概为 60%~70% 之间。自生收缩与使用的水泥类型，以及水灰的比例有密切联系，通常情况下对于低水灰比的混凝土而言，其自身收缩情况比较严重，在养护 28d 后自生收缩可达  $100\sim 150\times 10^{-6}$ 。此外外界各种对混凝土的限制条件，地基对混凝土板的约束、钢筋网对混凝土的制约等，都会进一步激化混凝土收缩带来的危害，导致裂缝过早地产生和发展。例如，当底板与岩石地基接触面不存在隔离层时，出现收缩裂缝的概率，较有隔离层时高 40% 左右。

### 2.4 外部荷载与施工因素影响

外加荷载是引发混凝土裂缝较为常见的环境因素之一<sup>[3]</sup>。混凝土在施工过程中，其早期强度低，3d 龄期时混凝土仅具有其设计强度的 30%~40%，此时一旦受到施工机械碾压荷载达  $5\sim 8\text{kN}/\text{m}^2$ 、各种物料堆放高度超过 1.5m 等临时性活荷载，就有可能形成贯穿性裂缝。而且混凝土结构物在投入运行后，船舶碰撞、波浪冲击力以及行车荷重等动力荷载不断作用的结果，都会导致混凝土微裂缝演变成宏观裂缝，而且面临同样的荷载条件，动态作用下的大体积混凝土裂缝产生速度比静态要高大约 2-3 倍。此外，如果施工方法不当，如仓面浇筑速度过快造成混凝土层间离析，以及混凝土振捣时长 < 20s，容易导致内部出现空洞、施工缝处置不到位，尤

其是新老混凝土交界面，不凿毛、不涂刷界面剂导致连接面之间粘结力不够等，都会使混凝土结构本身存在着先天缺陷，成为应力集中区并在短时间内产生裂缝。

## 3 裂缝控制与温控一体化施工技术

### 3.1 材料优化与配合比精准设计

在混凝土浇筑前应提前做好大体积混凝土浇筑施工方案，其中原材料及配合比的选择是控制裂缝的前提，主要目的是减小水化热、收缩变形，并且增大抗拉强度<sup>[4]</sup>。水泥应该选择以矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥为代表的低热水泥，它们的水化热峰较普通硅酸盐水泥低 25%~30%，比如 P·S42.5 矿渣水泥的水化热峰仅有  $310\text{kJ}/\text{kg}$ ，能显著降低混凝土内的温升值。骨料使用连续级配置碎石 20~40mm，以及中粗砂且含泥量  $\leq 2\%$ ，加大粒径可以节约水泥用量，并且每增大粒径 10mm，水泥用量就会相应减少 5%~8%，同时还能降低收缩量。显然，采用连续级配骨料所制得的混凝土，其收缩应变值比使用间断级配的低约 30%。掺合料则可以使用缓凝型减水剂且减水率  $\geq 25\%$ ，以及膨胀率为 0.02%~0.05% 的膨胀剂，其中缓凝型减水剂可以使初凝时间达到 12~16h，避免施工过程中形成冷缝，此外还可以降低水泥水化热峰，膨胀剂的作用则是为了弥补混凝土的收缩，抵消一部分收缩应力。

在大体积混凝土浇筑中根据项目结构及施工环境特点设计合适的混凝土配合比，同时施工过程中配合比的设计需要经过试验分析，得到科学的水胶比砂率和掺合料用量范围。水胶比设定需要控制在 0.40-0.50 范围内，砂率则要依据碎石粒径大小确定，其具体数值如表 2 所示。掺合材料粉煤灰、矿粉占胶凝材料总质量的 30%~50%。使用粉煤灰可以减少水化热加入量为 30% 的情况下，可以降低水化热达 20%，添加矿粉则可以使混凝土的抗拉强度增加，掺量为 40% 情况下抗拉强度能提高约 15%。

表 2 不同碎石最大粒径对应的最优砂率表

碎石最大粒径 mm	水泥用量 $\text{kg}/\text{m}^3$	最优砂率%	混凝土收缩应变 $\times 10^{-6}$	抗拉强度 MPa
20	320	34-40	380	2.8
30	300	32-38	320	3.0
40	280	28-34	260	3.2
50	260	25-31	220	3.3

### 3.2 温控施工核心技术

混凝土养护应考虑大体积混凝土内外温差及混凝

土表面的湿度两个方面,前期在大体积混凝土水化热达到峰值前应主要考虑混凝土表面湿度损失过快在初凝阶段产生的混凝土表面裂缝,后期应主要考虑内外温差造成内部温度裂缝。其中入模温度控制中,夏季施工材料需要提前喷水冷却,控制温度 $\leq 28^{\circ}\text{C}$ ,而且水泥需要存放在阴凉通风温度 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ 的环境,搅拌用水需要适量添加碎冰,要注意的是,碎冰添加量应小于等于用水量的一半,保障拌合物的入模温度 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ 。冬季施工则需要将材料剔除结冰颗粒杂物,而且搅拌用水温度应保持在 $40\text{--}60^{\circ}\text{C}$ ,促使浇注温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 。

水化热排除可以采取内冷外排的方式,内嵌冷却水管直径 $40\text{mm}$ ,间距 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ,混凝土浇筑完成后还需要送入 $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ 循环水,并且将冷却水管进口与出口水温差控制在 $5\text{--}8^{\circ}\text{C}$ ,以内循环水与混凝土进行热交换,排出内部水化热,促使中心部位降温 $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ 。外部排热则可以在表层洒水降温、搭建遮阴棚以减免阳光直射带来的辐射热等,加速混凝土最外面一层的热量挥发。

### 3.3 浇筑工艺优化

为保证混凝土在浇筑过程中振捣密实,每段混凝土浇筑至少配备4台 $50$ 插入式振捣器,其中一台备用,根据自然形成的流淌坡度,分前、中、后各布置1台振捣器。而且浇筑之前有必要检查模板钢筋,必须达到模板支撑稳固、模板承载能力 $\geq 10\text{kN/m}^2$ 、钢筋摆放正确位置误差 $\leq \pm 5\text{mm}$ 的要求。而且浇注要使用斜面层次推移的方法,推移的速度则要控制在 $1.5\text{--}2.0\text{m/h}$ 之间,浇注时要注意避免使混凝土堆积太高,要 $\leq 1.2\text{m}$ 否则会产生离析。施工缝布置方面也要注意,纵向施工缝距离不超过 $15\text{m}$ ,水平施工缝则应在底板向上 $1.0\text{m}$ 的位置,而且在施工缝位置必须凿毛,且深度不低于 $10\text{mm}$ ,并清理干净杂物,再 $20\text{--}30\text{mm}$ 与混凝土相同配合比的水泥砂浆,才能使新旧混凝土结构紧密连接。

### 3.4 全过程养护技术

养护是预防混凝土收缩开裂的重要步骤,要遵循保湿保温、及时充分的原则。养护期不得小于 $14\text{d}$ ,对于抗渗混凝土或者是处在高温低湿天气下浇筑的混凝土应大于 $21\text{d}$ 。保湿养护可以采取覆盖保湿层洒水养护喷淋养护剂等方法,使混凝土表面始终保持相对湿度在 $\geq 90\%$ 的状态,混凝土浇注完毕以后,必须在 $12\text{h}$ 以内进行养护,避免混凝土结构表面失水。保温养护则需要视气温情况而定,在夏天高温情况下,应采取洒水降低温度与覆盖保温材料同时进行的方式控制混凝土表面的温度下降速度低于 $2^{\circ}\text{C/d}$ 。冬天低温条件下则可以采取加盖保温棉被,或搭建保温棚的方法使其表面温度下降

速度不大于 $1^{\circ}\text{C/d}$ ,以防温差过大产生裂缝。

### 3.5 裂缝靶向处理

裂缝处置必须做到测后再判断,而且要最后进行处置,以保证处置有效。首先要进行超声波、裂缝宽度尺量测等测试,找出裂缝位置大小、深浅分布以及发展情况,分析判断出裂缝影响结构工作性能的程度。如果是活动型裂缝宽度会随着环境温度与所受荷载的不同产生改变,要采取柔性措施处理,例如粘贴遇水膨胀,止水条可以随着裂缝的形变发生相应的改变。而对于静止性的裂缝采取刚性处置措施即可,例如灌浆或者表面修补永久封闭裂缝。而且要科学布置温度伸缩缝布置间距为 $20\text{--}30\text{m}$ ,宽为 $6\text{--}40\text{mm}$ 的温度伸缩缝缓解温度应力,减少裂缝的发生概率。此外要在开工前对工作人员进行针对性的教育培训,向其传授预防裂缝的技术细节、施工标准,以及突发状况应对方案,提高工作人员的标准作业水平避免由于人的失误造成大体积混凝土结构裂缝。

## 4 结束语

港航工程大体积混凝土的裂缝防治和温控施工是综合性较强的工作,其重点就是对原材料、特征温度、应力、收缩应变、施工技术和适应条件等各种主要因素进行准确把握。裂缝的发生实际上是材料、负载、环境条件以及施工等多个方面综合作用的结果,其中温度应力和收缩应变属于最主要的内在影响因素,外加负荷以及环境腐蚀则是最为重要的外部诱发因素。材料选择以及配比科学设定可以从根源上减少水化热能及收缩量,而温控施工技术运用可以对内部与外部温差加以合理控制,并将水化热散发出去,从而减少温度裂缝。浇筑、振捣技术改进,强化全程养护及观测可以提高密实程度和结构整体性,以减少因施工导致产生的裂缝,此外裂缝定向修复技术可以即时修补已经形成的混凝土裂纹,避免其继续发展。

### 参考文献

- [1]魏志强.建筑大体积混凝土施工中的温度裂缝控制技术[J].中国建筑装饰装修,2025,(23):178-180.
- [2]肖洪.大体积混凝土施工中温控与裂缝控制一体化技术研究[J].水泥,2025,(12):83-85.
- [3]王超.房建工程大体积混凝土施工裂缝控制技术研究[J].工程技术研究,2025,10(22):53-55.
- [4]关学林,刘群.超长体积混凝土施工中裂缝控制技术的研究[J].建筑技术开发,2025,52(11):129-131.