

港口与航道工程大体积混凝土裂缝控制

尹 镖

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 大体积混凝土是港口与航道工程中码头承台、沉箱、防波堤、船坞坞室等结构的主要用材, 其裂缝问题是影响结构长期服役安全与耐久性的关键病害。本文结合港航工程海洋侵蚀环境与结构约束特点, 系统梳理了大体积混凝土裂缝的分级标准与形成机理, 从原材料管控、温度应力调控、施工工艺优化、养护防护四个维度构建了全流程裂缝控制体系, 归纳了针对性的防控技术要点, 以为同类港航工程施工提供参考。

关键词 港口与航道工程; 大体积混凝土; 裂缝控制; 温度应力

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.033

0 引言

随着我国水运事业的高质量发展, 沿海大型港口、深水航道、跨海枢纽、船坞船闸等港航工程的建设规模持续扩大, 大体积混凝土结构凭借承载能力强、整体性好、抗渗性能优的特点, 广泛应用于码头承台、重力式沉箱、直立防波堤、船坞坞室等关键部位。港航工程大体积混凝土多处于海洋浪溅区、水位变动区等恶劣服役环境, 长期面临干湿交替、氯离子渗透、潮汐冲刷、温度骤变等耦合作用, 同时结构断面尺寸大、与下部基础刚性连接, 浇筑后极易因水化热集中释放、收缩变形受约束等因素产生裂缝^[1]。裂缝不仅会影响结构外观质量, 还会为侵蚀介质提供渗透通道, 加速内部钢筋锈蚀与混凝土劣化, 严重时削弱结构承载能力, 大幅缩短工程服役寿命。当前, 港航工程大体积混凝土裂缝防控仍存在措施针对性不足、全流程管控体系不完善等问题。基于此, 本文系统分析裂缝的形成机理, 构建标准化的全流程控制技术体系, 为同类工程施工提供系统性参考。

1 港航工程大体积混凝土的特性与裂缝分级

1.1 港航工程大体积混凝土的结构与服役特性

港航工程大体积混凝土区别于普通工民建工程, 具有显著的结构与环境特殊性。在结构层面, 港工大体积混凝土多为长条形、大断面复合结构, 如码头胸墙、防波堤堤身等, 单段浇筑长度大, 与桩基、沉箱、方块等下部基础刚性连接, 混凝土温降收缩、干燥变形受强约束作用, 易产生拉应力开裂; 同时结构配筋密集、

预埋件多, 临水作业空间受限, 对浇筑振捣工艺要求更高。在服役环境层面, 港工大体积混凝土绝大多数处于海洋环境, 其中浪溅区、水位变动区受干湿交替、氯离子侵蚀、潮汐冲刷、海风温湿度骤变的耦合作用, 是裂缝高发且危害最严重的区域, 对混凝土的抗裂、抗渗、抗侵蚀性能要求远高于普通工程^[2]。

1.2 裂缝的分级判定标准

结合《水运工程混凝土结构设计规范》与港航工程海洋服役环境要求^[3], 根据裂缝宽度、深度、所处环境分区与危害程度, 将大体积混凝土裂缝划分为 4 个等级, 具体判定标准如表 1 所示。

2 港航工程大体积混凝土裂缝的形成机理

2.1 水化热释放与温度应力作用

水化热引发的温度应力是港航工程大体积混凝土开裂的最主要诱因。大体积混凝土浇筑后, 水泥水化反应会释放大量的水化热, 由于结构断面尺寸大, 热量不易散发, 会在混凝土内部形成温度峰值, 而表层热量散发较快, 形成显著的内外温差。根据热胀冷缩原理, 内部混凝土受热膨胀, 表层混凝土温降收缩, 两者变形不协调会在表层产生拉应力, 当拉应力超过混凝土早期极限抗拉强度时, 便会产生表面温度裂缝。后期混凝土整体温降过程中, 体积收缩受到下部基础的刚性约束, 会在结构内部产生较大的整体拉应力, 当拉应力超过混凝土抗拉强度时, 便会形成深层甚至贯穿性温度裂缝。港航工程临水露天作业的特点, 易因海风、昼夜温差加剧混凝土内外温差, 进一步提升开裂风险。

作者简介: 尹镖 (1987-), 男, 本科, 研究方向: 港口与航道工程。

表1 港航工程大体积混凝土裂缝分级判定标准

裂缝等级	裂缝宽度限值	裂缝深度特征	适用环境分区	危害程度
轻微	≤ 0.15 mm	表面裂缝，深度< 50 mm	大气区、水下区	仅影响外观，无显著耐久性危害
中等	0.15 mm ~ 0.30 mm	深层裂缝，深度50 mm ~ 200 mm	大气区、水下区	削弱局部断面，存在氯离子渗透风险
严重	0.30 mm ~ 0.50 mm	深层裂缝，深度> 200 mm	浪溅区、水位变动区	显著降低结构耐久性，加速钢筋锈蚀与混凝土劣化
极严重	> 0.50 mm	贯穿裂缝，穿透结构断面	全环境分区	破坏结构整体性，危及结构承载安全与使用功能

2.2 收缩变形与约束作用耦合

收缩变形与约束作用的耦合，是港航工程大体积混凝土开裂的重要诱因。混凝土浇筑后会产生塑性收缩、干燥收缩、自生收缩等多种收缩变形，其中塑性收缩发生在混凝土初凝前，海风作用下表面水分快速蒸发，易产生塑性收缩裂缝；干燥收缩发生在混凝土硬化过程中，内部多余水分持续蒸发，引发体积收缩。港航工程大体积混凝土多与桩基、沉箱等已成型的下部基础刚性连接，混凝土的收缩变形受到强约束作用，无法自由释放，会在结构内部产生持续的拉应力，当拉应力超过混凝土的极限抗拉强度时，便会产生约束裂缝。同时，港航工程长条型大体积结构单段浇筑长度过长，会导致收缩应力叠加，进一步加剧开裂风险^[4]。

2.3 原材料与配合比设计影响

原材料性能与配合比设计是混凝土开裂的内在基础因素。在原材料方面，若选用水化热较高的普通硅酸盐水泥，会加剧水化热集中释放，提升温度裂缝风险；骨料级配不良、含泥量超标，会增大混凝土的收缩变形，降低抗拉性能；掺合料掺量不合理，无法有效降低水化热、改善混凝土抗裂性能；外加剂与水泥适应性差，易引发混凝土泌水、离析，导致表层砂浆富集，干缩变形增大。在配合比设计方面，水胶比过大是导致混凝土干缩开裂的关键因素，过量水分蒸发后会形成大量毛细孔隙，增大收缩值；胶凝材料总量过高，会加剧水化热释放；砂率不合理、未掺加抗裂组分，会导致混凝土极限拉伸性能不足，无法抵抗应力作用引发开裂。

2.4 施工工艺与环境因素影响

施工工艺管控不到位与海洋环境的耦合作用，是裂缝产生的直接触发因素。在施工层面，浇筑方案不合理，分层厚度过大、浇筑速度过快，会导致水化热

集中释放，内部温度峰值过高；振捣作业不规范，漏振、欠振会导致混凝土密实度不足，过振会引发离析，均会形成局部缺陷诱发裂缝；拆模时间过早，混凝土强度未达到设计要求，无法抵抗温度变化与约束应力；施工缝处理不规范，新旧混凝土收缩差会诱发沿施工缝的裂缝。在环境层面，港航工程临水露天作业，海风风速大、昼夜温差大，会加速表面水分蒸发，加剧内外温差；潮汐水位变化会导致早期混凝土受潮水冲刷，表层结构受损；夏季高温、冬季低温等极端天气，会分别引发温降收缩开裂与冻胀开裂。

3 港航工程大体积混凝土裂缝全流程控制技术

3.1 原材料优选与配合比抗裂优化

原材料优选需以降低水化热、提升混凝土抗裂性能为目标，开展全流程管控。水泥优先选用中低热硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥，降低水化热释放速率与峰值；粗骨料选用质地坚硬、级配良好的连续级配碎石，严控含泥量与针片状颗粒含量，细骨料选用级配良好的中粗砂，严禁使用未淡化海砂，严控氯离子含量；合理复配Ⅰ级粉煤灰、S95级矿粉等活性掺合料，替代部分水泥，降低水化热的同时，改善混凝土和易性与密实度；选用与水泥适应性良好的聚羧酸系高效减水剂，搭配适量引气剂、聚丙烯抗裂纤维，提升混凝土的极限拉伸性能与抗渗能力。

配合比优化需遵循“低水化热、低收缩、高抗拉、高密实”的原则，在满足强度、工作性与耐久性要求的前提下，严格控制水胶比，最大限度降低用水量；合理控制胶凝材料总量，通过试配确定最优的掺合料复配比例，减少水泥用量；优化砂率参数，保证混凝土的和易性与可泵性，避免离析、泌水；针对浪溅区、水位变动区的结构，优化抗裂组分掺量，兼顾混凝土的抗裂与抗侵蚀性能。

3.2 温度应力与约束释放调控

温度应力与约束释放调控是防控大体积混凝土裂缝的关键环节。在温度应力管控方面,采用“内降外保”的温控模式,通过优化浇筑方案,采用分层分段连续浇筑,分层厚度控制在 300 mm ~ 500 mm,合理控制浇筑速度,避免水化热集中释放;在混凝土内部预埋冷却水管,采用冷却水循环降温,降低内部温度峰值;混凝土表层采用土工布、保温棉等材料覆盖保温,缩小混凝土内外温差,严格控制内外温差不超过 25 °C,表层与环境温差不超过 20 °C;合理选择浇筑时间,优先选择夜间、低温时段浇筑,严控混凝土入模温度,夏季入模温度不超过 30 °C,冬季不低于 5 °C。在约束释放方面,合理优化分段分缝设计,根据结构断面尺寸与环境条件,控制单段浇筑长度,合理设置变形缝、诱导缝,有效释放混凝土的温度应力与收缩应力;优化结构与下部基础的连接设计,在旧混凝土结合面设置滑动缓冲层,减弱刚性约束作用;优化结构断面设计,避免断面突变,在转角处设置圆弧过渡,减少应力集中;在易开裂区域加密配置防裂钢筋网片,提升混凝土的极限拉伸能力,约束裂缝的产生与扩展^[5]。

3.3 施工全过程标准化管控

施工全过程标准化管控是防控裂缝的重要保障。浇筑作业需严格执行经审批的专项方案,采用分层分段连续浇筑工艺,避免出现冷缝;采用二次振捣、二次抹面工艺,在混凝土初凝前完成二次振捣,提升密实度,在初凝后、终凝前完成二次抹面,消除表层塑性收缩裂缝;规范振捣作业,严格执行“快插慢拔”的操作要求,控制振捣间距与时间,对钢筋密集区、预埋件周边采用小型振捣器加强振捣,避免漏振、欠振、过振。

在模板与拆模管控方面,选用刚度、强度满足要求的模板,做好拼缝密封处理,避免漏浆;严格控制拆模时间,待混凝土强度达到设计要求、内外温差符合规范限值后再拆模,拆模后及时做好保温保湿养护,避免混凝土表面温度骤降引发裂缝;规范施工缝处理,彻底凿除表面浮浆与松散混凝土,涂刷界面剂后再进行后续浇筑,保证新旧混凝土结合良好。

3.4 海洋环境适配的养护与防护技术

养护管控需结合港航工程海洋环境特点,构建全周期养护体系。混凝土浇筑完成后,在初凝前及时覆盖土工布、保湿棉等保湿材料,避免海风导致表面水

分快速蒸发;严格控制养护时间,普通硅酸盐水泥配制的混凝土养护不少于 14 d,掺加活性掺合料的混凝土养护不少于 21 d,确保养护期内混凝土表面始终处于湿润状态;针对临水作业区域,设置防风围挡,降低作业区域风速,减少表面水分蒸发;潮汐区施工,精准把握低潮位施工窗口期,养护期内做好临时防护,避免混凝土受潮水冲刷、浸泡。

针对海洋侵蚀环境,在混凝土养护完成后,可在浪溅区、水位变动区结构表面涂刷防腐涂层,隔绝氯离子、水分等侵蚀介质,降低裂缝引发的耐久性风险;针对已产生的裂缝,根据裂缝等级采取差异化处置措施,轻微表面裂缝采用环氧树脂封闭处理,深层裂缝采用低压灌缝处理,贯穿裂缝需采用灌浆加固与结构补强联合处置,确保结构安全。

4 结束语

本文结合港口与航道工程大体积混凝土的结构特点与海洋服役环境要求,系统梳理了裂缝的分级判定标准,从水化热温度应力、收缩约束耦合、原材料配合比、施工环境影响四个维度,全面解析了裂缝的形成机理,构建了从原材料优选到养护防护的全流程裂缝控制技术体系。当前,我国港航工程正向深水化、大型化方向发展,对大体积混凝土结构的抗裂性能与长期耐久性提出了更高要求,现有管控体系在智能化、精细化方面仍有优化空间。未来研究可聚焦绿色低碳抗裂混凝土研发、智能化温控监测技术、结构全生命周期裂缝预警等方向,完善抗裂管控标准,提升港航工程大体积混凝土结构的建设质量与长期服役能力。

参考文献:

- [1] 张焱.探究港口与航道工程大体积混凝土施工中的裂缝问题及控制[J].珠江水运,2020(01):101-102.
- [2] 王崇宇.港口与航道工程中大体积混凝土的施工裂缝控制[J].珠江水运,2024(06):111-113.
- [3] 花长春.港口与航道工程大体积混凝土施工裂缝控制[J].价值工程,2026,45(02):10-12.
- [4] 李厚平.分析港口与航道工程大体积混凝土施工裂缝控制[J].珠江水运,2024(12):43-45.
- [5] 刘中兴.港口航道工程大体积混凝土裂缝的施工工艺探讨[J].珠江水运,2021(03):58-59.