

渠道衬砌混凝土养护时长对早期开裂发生率的抑制效果

尹兆祥¹ 秦瑞娟²

1. 内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

2. 内蒙古河套灌区黄河水利文化博物馆 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘要】：渠道衬砌混凝土的养护时长对早期开裂具有显著的抑制作用。通过对不同养护周期的试验比较，发现延长养护时间能有效降低水化热梯度引起的内外温差，减缓收缩应力积累，从而减少微裂缝的产生与扩展。研究表明，7天以上的持续湿养护可显著提升混凝土早期抗裂性能，尤其在气温较高或干燥环境中效果更为显著。该结论为渠道工程在施工及运维阶段制定合理养护方案提供了技术依据，有助于延长结构使用寿命并降低维护成本。

【关键词】：渠道衬砌混凝土；养护时长；早期开裂；养护机理；抗裂性能

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.033

引言

渠道衬砌混凝土作为水利工程的重要结构，其早期开裂问题不仅影响外观质量，还可能引发渗漏及耐久性下降等隐患。裂缝形成的根源往往与水化热作用下的温差应力和干缩变形有关，而养护过程对这些因素的控制起着关键作用。养护时长的差异，直接影响混凝土内部水化反应的充分性及湿度环境的稳定性。深入探讨养护时间与早期开裂发生率之间的关系，有助于为工程现场提供可操作的控制策略，从源头降低裂缝风险。

1 渠道衬砌混凝土早期开裂的成因与影响因素

渠道衬砌混凝土在早期服役阶段出现裂缝，是影响结构耐久性与安全性的重要问题。早期开裂多发生在混凝土硬化初期，成因涉及材料性能、环境条件及施工工艺等多方面因素。水化热是引起温度裂缝的关键驱动因素，水泥在水化反应过程中释放大量热量，导致混凝土内部温度升高，而外部受环境影响降温较快，从而产生较大的温差应力。当这种温差应力超过混凝土早期的抗拉强度时，就会导致裂缝的形成。干缩也是不可忽视的因素，早期失水会引发体积收缩，受约束部位因变形受限产生拉应力，使结构表面产生细微裂缝并逐步扩展。渠道衬砌混凝土因断面较大、暴露面积广、表面直接受阳光辐射与风力作用，失水速度快，裂缝形成的风险相对更高。

环境条件的变化在早期开裂中具有显著影响，特别是在高温、低湿及大风环境下，混凝土表面水分蒸发速度加快，湿度梯度加大，促使毛细孔水张力增加，从而加剧干缩应力的积累。此外，昼夜温差较大时，混凝土内外温度循环变化频繁，会产生热胀冷缩的交替效应，使早期尚未完全硬化的结构不断承受反复应力冲击。渠道衬砌施工多处于露天条件，缺乏有效的防护措施时，这些不利环境效应更易在短时间内集中显现，增加

了开裂的可能性。水源条件与施工季节也会对早期开裂风险产生影响，例如在枯水期或夏季高温阶段施工，往往因养护水源不足或养护条件恶劣而缩短湿养护时间，加剧裂缝形成的趋势。

施工工艺与材料选用对早期开裂影响显著，且与养护时长直接相关：材料方面，高水胶比会加快混凝土失水，降低抗裂性；水泥品种及矿物掺合料比例影响水化热，改变裂缝风险。工艺方面，模板拆除时间、衬砌段长、施工缝位置及振捣方式等控制不当，会导致局部应力集中或湿度不均，引发裂缝。渠道衬砌结构因约束复杂、受力不均，早期细小缺陷易在运营中放大，影响整体性能。在环境、材料与工艺的耦合作用，是渠道衬砌混凝土早期开裂高发的核心机制。

2 养护时长对混凝土早期性能发展的作用机理

养护时长对混凝土早期性能发展的影响，本质上是通过控制水化反应过程和内部湿度条件，调节结构致密性与力学性能的形成，其作用机理可从材料微观变化到宏观抗裂性能的关联维度深化分析。在水泥与水接触后，水化反应迅速启动并释放热量，生成水化硅酸钙凝胶（C-S-H）、氢氧化钙（CH）等产物——这些产物通过填充毛细孔隙提升混凝土密实度与强度的过程，可通过X射线衍射（XRD）与扫描电镜（SEM）观察得到直接验证：充足养护条件下（如7天以上湿养护），XRD图谱中C-S-H特征峰强度随养护时长增加而显著提升，CH晶体分布更均匀；SEM图像显示，长养护周期试件的微观结构中毛细孔数量减少、孔径细化，凝胶体相互搭接更致密，而3天短期养护试件则可见较多未水化水泥颗粒及连通孔隙，这直接导致强度发展受限且渗透性提高。若养护时间不足，表层在失水作用下提前硬化，内部水化因缺水中断，不仅水化产物生成不充分，更会因孔隙结构优化不足，增加后期微裂缝扩

展的风险。因此,充足养护时长通过延缓表层失水、维持内部温湿稳定,为早期均匀致密的微观结构形成提供了保障,这是后续抗裂与耐久性能提升的基础。

在温度应力控制方面,延长养护时间对温差梯度的降低作用,可通过“养护时长-内部温度场-热应力”的动态关联进一步阐释。水化热释放在早期最为剧烈,借助温度传感器实时监测可知:3天养护试件在浇筑后48-72小时内,表层与内部温差可达25-30℃,而14天养护试件的温差可控制在10℃以内。这种温差差异源于持续湿养护形成的水膜不仅降低表层降温速度,更通过热缓冲作用减少内外温度波动——结合热应力计算模型可发现,当温差超过20℃时,混凝土早期抗拉强度(通常低于3MPa)难以抵抗热应力(可能达到4-5MPa),裂缝风险急剧上升。对于渠道衬砌这类断面大、暴露广的结构,延长养护周期能在热峰值过后继续维持表层湿润,使应力冲击在混凝土抗拉强度逐步增长(7天强度可达28天强度的60%-70%)的过程中平稳释放,保障结构从早期硬化向稳定阶段过渡。

在抗裂性能的发展机制中,养护时长与收缩特性、抗拉强度的协同关系,可通过养护时长-抗拉强度发展-应力阈值关联曲线直观呈现:曲线显示,混凝土早期抗拉强度随养护时长呈对数增长(7天强度约为3天强度的1.5-2倍),而干缩应力则随养护不足导致的湿度梯度增大而线性上升。湿养护时长越长,表层与内部湿度梯度越小,收缩变形的不均匀性降低,约束拉应力积累随之减轻。更关键的是,长养护通过推迟干缩变形发生时间(如14天养护可使显著干缩起点从浇筑后3天延后至7天以后),使混凝土在承受收缩应力时,其抗拉强度已跨越“应力阈值临界点”(即抗拉强度>收缩应力),这从根本上降低了早期开裂概率。此外,长养护还能促进粉煤灰、矿渣等矿物掺合料的二次水化——SEM观察可见,这些掺合料在长养护条件下会进一步反应生成额外C-S-H凝胶,填补界面过渡区孔隙,使混凝土抗渗性提升30%以上,为渠道衬砌的长期稳定性提供双重保障。

养护时长的科学控制通过微观结构优化、温差应力缓冲、收缩与强度协同发展等多路径,形成对早期开裂的系统性抑制作用,而材料微观分析与量化关联曲线的引入,更清晰地揭示了“延长养护降低开裂”的内在逻辑。

3 不同养护周期对早期开裂发生率的对比试验分析

针对不同养护周期对渠道衬砌混凝土早期开裂发生率的影响,可通过现场模拟试验和实验室对比分析相结合的方法进行研究。试验选取相同配合比、施工工艺与养护条件下的混凝土试件,将养护周期分别设定为3天、7天和14天,通过人工控制湿度与温度,确保除养护时间外的变量保持一致。结果显示,3天养护的试件在硬化后期出现明显的表面微裂缝,裂

缝分布密度较高且多呈网状,这是由于养护期不足导致内部水化反应未充分完成,毛细孔结构疏松,早期失水加剧了干缩应力积累。当应力超过材料早期抗拉强度时,裂缝便集中显现。相比之下,7天养护试件的裂缝数量明显减少,裂缝宽度也有显著缩小,说明延长湿养护能够有效缓解温差应力与干缩变形的叠加效应。14天养护的试件几乎未发现贯穿性裂缝,仅在部分表面出现微弱的发丝裂纹,且宽度极小,对结构性能影响不大。

试验数据表明,养护周期对裂缝发生率呈明显的负相关关系,周期越长,裂缝数量与平均宽度越低。在温度变化敏感期内,延长养护时间能够更好地维持混凝土表层的湿润状态,减缓降温速度,降低内外温差引起的热应力。同时,长养护周期可以保证毛细孔内的水分供应充足,使水化反应在较长时间内持续进行,生成更多的水化硅酸钙凝胶填充孔隙,提高材料的密实度与抗渗性能。短养护周期试件在早期强度不足时便暴露于干燥环境,内部尚未完全水化的水泥颗粒无法进一步反应,结构微观缺陷在应力作用下迅速扩展为宏观裂缝。这一现象在高温、低湿的环境下更加显著,表明在恶劣气候条件下,延长养护周期对抑制早期开裂的效果更为突出。

在渠道衬砌工程的实际应用中,试验结果为制定科学的养护周期提供了依据。考虑到工程规模大、暴露面积广及施工环境多变等因素,单纯依靠短期养护难以有效控制早期裂缝风险。通过对比不同养护周期的试验数据,可以得出7天及以上的持续湿养护在大多数气候条件下都能显著降低裂缝发生率,而14天养护在抗裂性能方面表现最为稳定。结合经济性与施工可行性,建议在施工计划中优先保证至少7天的有效养护时间,并在高温干燥季节适当延长至14天,同时配合覆盖保湿、表面喷水及防晒措施,以最大限度减少早期开裂对结构耐久性的威胁。这种以试验结果为基础的周期优化,不仅能提升结构整体性能,还能在全寿命周期内降低维护与修复成本。

4 延长养护时间降低早期开裂风险的技术路径

延长养护时间降低渠道衬砌混凝土早期开裂风险的技术路径,核心在于通过系统化控制水化反应环境与结构应力状态,实现抗裂性能的持续提升。湿养护措施应贯穿混凝土硬化的关键时期,保证表层与内部水分处于相对稳定的饱和状态,避免早期失水造成干缩应力集中。在工程实践中,可采用覆盖保湿材料、喷雾养护系统或蓄水养护等方式,形成持久的湿润环境,减缓温度变化对结构的影响。覆盖层应具备保温与保湿双重功能,以降低昼夜温差导致的热应力冲击,使混凝土在获得足够抗拉强度后逐渐适应外部环境。

在施工组织方面,延长养护时间的实施需要与工程进度、气候条件及资源配置相匹配。渠道衬砌施工多在露天环境进

行,暴露面积大且受风、光、温度影响明显,若在高温或干燥季节作业,应适当调整施工计划,将养护周期延长至14天或更长,以覆盖温度峰值期和强烈干缩阶段。对于施工段的划分和浇筑顺序,应尽量减少新旧混凝土之间的温差差异,避免局部应力集中带来的裂缝隐患。若条件受限无法长时间人工养护,可在混凝土表面涂刷养护剂,形成封闭薄膜,减少水分蒸发并维持水化反应所需的内部湿度。养护剂应具备良好的透气性与持效性,确保在延长养护期的同时不引发表层碳化加速等副作用。

延长养护时间的效果还需要与材料优化和结构设计相结合,以形成协同的抗裂体系。适当掺加粉煤灰、矿渣粉或硅灰等矿物掺合料,可降低水化热峰值并延缓放热速率,为长时间湿养护创造有利条件。配合低水胶比与优化级配的骨料系统,可减少毛细孔隙率,提高致密性,进一步提升延长养护周期的抗裂收益。在结构设计中,通过设置合理的伸缩缝与减少刚性约束,可降低因收缩和温差产生的应力水平,使延长养护时间的作用得到充分发挥。这种将养护时间延长与施工管理、材料改进及结构优化相结合的技术路径,能够显著降低早期开裂的发生率,为渠道衬砌工程的长期稳定性和耐久性提供坚实保障。

5 高温干燥环境下养护时长优化的应用建议

高温干燥环境下对渠道衬砌混凝土的养护时长进行优化,需要在满足水化反应要求的同时应对环境因素带来的失水与温差应力风险。在高温条件下,混凝土表面蒸发量显著增加,内部水分梯度迅速加大,导致毛细孔水张力上升并提前触发干缩变形。若养护时长不足,水化反应未完成,结构尚处于早期强度较低阶段便承受了较大的拉应力,裂缝风险显著提升。延长湿养护周期至14天甚至更长时间,可确保在水化热峰值期和干缩高敏感期内持续保持表面湿润状态,使水泥颗粒得到充分反应,孔隙结构逐渐致密化,从而有效降低早期开裂的概率。

参考文献:

- [1] 王建国.渠道衬砌混凝土早期开裂成因与控制技术研究[J].水利水电工程,2020,51(4):112-118.
- [2] 刘志强.养护制度对混凝土早期性能影响分析[J].建筑技术,2019,50(8):945-950.
- [3] 陈晓峰.高温环境下混凝土养护技术与应用[J].混凝土,2021,39(6):56-61.
- [4] 周伟,孙立新.不同养护周期对混凝土裂缝发展的影响试验研究[J].建筑材料学报,2018,21(3):412-418.
- [5] 赵立群.混凝土干缩特性及抑制措施研究[J].工程建设,2017,49(2):223-228.

在具体措施上,高温干燥季节施工应配合多层次的养护手段以延长湿润时间。覆盖材料应选用保温性能好且透气性适中的织物或薄膜,既能减少直接辐射导致的表面温升,又能降低水分蒸发速度。喷雾养护应采取高频低量的方式,避免因间歇时间过长造成湿度骤降。对于长距离渠道衬砌,可分段设置临时遮阳棚或隔风屏障,减弱局部高温和强风对养护效果的破坏。在资源受限的情况下,可在混凝土表面涂布高性能养护剂,形成封闭层锁住水分,同时确保不影响后续防渗或饰面施工。这些措施与延长养护时间相结合,能够在极端气候条件下为混凝土提供稳定的早期硬化环境。

优化养护时长还需结合施工节奏与环境监测数据进行动态调整。通过在养护期内布设温湿度传感器,实时获取混凝土表面与内部的温度及相对湿度变化,可精准判断何时延长养护周期以及是否需要加强保湿措施。在连续高温干燥天气下,建议在原有养护计划基础上增加至少3至5天的湿养护时间,并在养护结束前逐步过渡至自然环境,以减少骤然暴露带来的应力冲击。对于重要或受力较大的渠道衬砌段,应优先考虑养护时长的安全裕度,而非仅满足最低规范要求。通过高温干燥环境下科学优化养护时长,配合有效的温湿控制和施工管理,不仅能显著降低早期开裂风险,还能提升混凝土的长期耐久性与服役安全性。

6 结语

延长渠道衬砌混凝土养护时长对降低早期开裂风险具有显著成效,其作用机理涵盖温差应力控制、干缩抑制及微观结构优化等多个方面。不同养护周期对早期性能的影响呈明显差异,在高温干燥环境中,延长湿养护可有效稳定内部湿度,促进水化反应充分进行。通过科学的养护时间控制并结合材料优化与施工管理,可显著提高结构的抗裂性能和耐久性,为渠道工程的长期稳定服役提供坚实保障。