

降低戈壁滩渡槽混凝土裂缝率的关键技术与应用研究

王伟

上海宏波工程咨询管理有限公司, 中国·上海 201700

摘要: 戈壁滩地区极端的气候环境(强风、干旱、剧烈温差)对渡槽混凝土结构耐久性构成严峻挑战,裂缝问题尤为突出。论文系统分析了戈壁滩环境下渡槽混凝土裂缝的主要成因(剧烈干缩、显著温缩、约束应力集中及施工工艺缺陷),并针对性提出材料优化(高性能复合外加剂、优质骨料)、结构设计优化(合理分缝、配筋增强)、精细化施工(温控养护、防风保湿)及智能监测预警等综合防控技术。结合新疆某引水工程实践,验证了综合技术措施的有效性,裂缝率显著降低,为类似严酷环境下混凝土结构耐久性提升提供了重要参考。

关键词: 戈壁滩; 渡槽; 混凝土裂缝; 干缩; 温缩; 施工控制; 耐久性

Research on Key Technologies and Applications for Reducing Concrete Crack Rate of Aqueducts in Gobi Desert

Wei Wang

Shanghai Hongbo Engineering Consulting & Management Co., Ltd., Shanghai, 201700, China

Abstract: The extreme climate conditions in the Gobi Desert (strong winds, drought, and drastic temperature differences) pose a severe challenge to the durability of aqueduct concrete structures, with cracking being a particularly prominent issue. This paper systematically analyzes the main causes of concrete cracks in aqueducts in the Gobi Desert environment (severe drying shrinkage, significant temperature shrinkage, concentrated constraint stress, and construction process defects), and proposes comprehensive prevention and control technologies, including material optimization (high-performance composite admixtures, high-quality aggregates), structural design optimization (reasonable jointing, reinforcement enhancement), refined construction (temperature control and curing, wind protection and moisture retention), and intelligent monitoring and early warning. Combined with the practice of a water diversion project in Xinjiang, the effectiveness of the comprehensive technical measures is verified, with a significant reduction in the crack rate, providing an important reference for improving the durability of concrete structures in similar harsh environments.

Keywords: Gobi desert; aqueduct; concrete cracks; drying shrinkage; temperature shrinkage; construction control; durability

0 前言

渡槽作为重要的输水建筑物,在干旱地区水资源调配中扮演关键角色。中国西北广袤的戈壁滩地区,气候极端恶劣:年降水量稀少(通常 $< 100\text{mm}$)、蒸发量巨大(可 $> 3000\text{mm}$)、昼夜及季节性温差剧烈(日温差常超 25°C ,年温差可达 $60^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$)、风沙活动频繁且强烈。这些严苛条件使得渡槽混凝土结构极易产生裂缝,导致渗漏、钢筋锈蚀、冻融破坏加剧,严重威胁结构安全、耐久性和输水效率。因此,深入研究戈壁滩渡槽混凝土裂缝成因并探索有效的防控措施,具有重要的工程价值和现实意义。

1 工程概况

本工程位于新疆且末县境内,工程建设任务以灌溉、供水为主,通过新建引水渠首、输水暗渠、调节沉沙池、场内骨干管网及配套构筑物等工程,新增取水量 $6794\text{万}\text{m}^3$,承担新建灌区 10万亩 灌溉任务。1#渡槽地处塔克拉玛干沙漠,穿越戈壁滩,设计流量 $8.2\text{m}^3/\text{s}$,加大流量 $9\text{m}^3/\text{s}$ 。渡槽

槽身为钢筋混凝土箱式矩形槽,采用等跨双悬臂结构,总长 2700m ,单槽长度 30m ,跨中 15m ,两侧悬臂段各 7.5m 。槽身采用C35 F200 W6高性能混凝土,水泥为普通硅酸盐水泥。槽内净宽为 2m ,槽内净高为 2m ,槽底板厚度 0.4m ,侧墙部位底板局部加厚 0.2m ,两侧边墙等厚为 0.4m ,渡槽顶部有交通要求,铺设 10cm 厚C50混凝土路面,宽度 4m ,两侧设防护栏。槽墩为钢筋混凝土桩柱式槽架,桩径 1m ,桩长 $21\sim 25\text{m}$,采用C35钢筋混凝土。槽身与进、出口建筑物之间采用以U形GB复合橡胶止水带为主体的压板式新型止水结构。渡槽采用盆式橡胶支座,单节槽身下两槽墩各布置2个(详见渡槽示意图1)。

渡槽槽身混凝土裂缝问题被发现,根据浇筑完成的 60米 渡槽裂缝数据统计显示裂缝分布于两侧边墙和顶板内侧,裂缝宽度类似头发丝,边墙裂缝走向垂直水流方向上下走向,顶板裂缝走向垂直水流方向左右走向,部分边墙和顶板裂缝联通。

A类细微裂缝(缝宽 $< 0.2\text{mm}$,缝深 $\leq 300\text{mm}$)平

均占比 39.8%，B 类浅层裂缝（ $0.2\text{mm} \leq \text{缝宽} < 0.3\text{mm}$ ， $3000\text{mm} < \text{缝深} < 1000\text{mm}$ 且不超过结构宽度 $1/4$ ）平均占比 38.4%，C 类深层裂缝（ $0.3\text{mm} \leq \text{缝宽} < 0.4\text{mm}$ ， $100\text{cm} \leq \text{缝深} < 200\text{cm}$ 或大于结构厚度 $1/4$ ）平均占比 18%，D 类贯穿裂缝（缝宽 $\geq 0.4\text{mm}$ ，缝深 $\geq 200\text{cm}$ 或大于 $2/3$ 结构厚度）平均占比 3.8%（详见渡槽裂缝图 2）；传统的施工工艺无法有效控制裂缝的产生，裂缝的出现对渡槽的结构安全和使用寿命产生了严重影响。



图 1 渡槽示意图

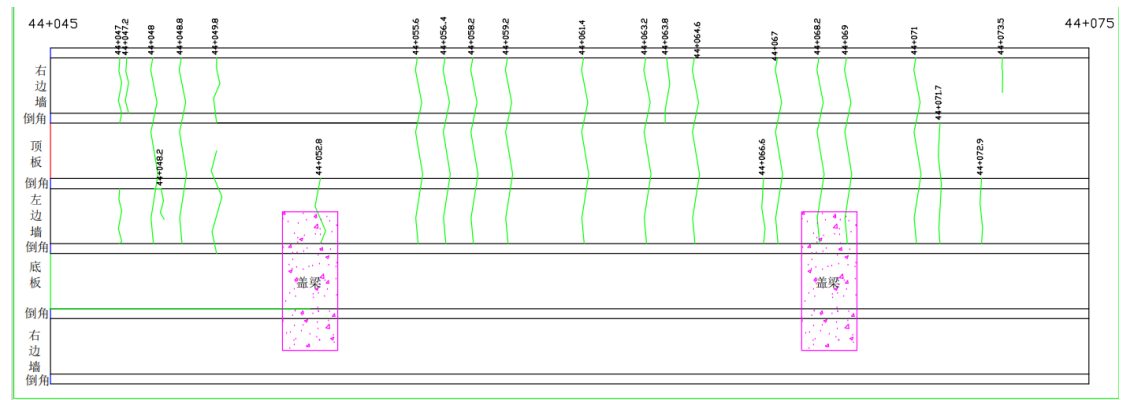


图 2 渡槽裂缝图

2 戈壁滩渡槽混凝土裂缝产生主要成因分析

2.1 剧烈干缩变形

极低的空气湿度（常低于 30%）与强风加速混凝土表面水分蒸发，导致内部负压增大，引发显著的塑性收缩与干燥收缩。尤其在浇筑后初凝至终凝阶段，表面失水过快是塑性裂缝产生的主要原因。

2.2 显著温度收缩应力

巨大的昼夜温差及季节性温差使混凝土经历反复的热胀冷缩。施工期混凝土（如渡槽槽身、墩台）内部水化热温升与外部环境骤降形成内外温差，后期使用中环境温度的剧烈变化，均产生显著的温度应力。当应力超过混凝土抗拉强度时，温度裂缝易产生。

2.3 约束应力集中

渡槽结构体形复杂，存在基础、墩台、槽身连接处以及预埋件、孔洞周围等部位。这些部位由于几何形状突变或外部约束强，易产生应力集中，成为裂缝高发区。

2.4 施工工艺缺陷

在戈壁滩恶劣环境下，若施工控制不当，极易加剧裂缝风险：

原材料控制不严：骨料含泥量高、级配不良，水泥温度高或品种选用不当。

配合比设计欠佳：水胶比过大，单位水泥用量过高，导致水化热大、收缩大。

振捣与抹面不当：振捣不足产生蜂窝麻面，振捣过度导致离析；抹面时机不当或未进行二次抹压，未能及时闭合塑性裂缝。

养护严重不足：养护是戈壁滩防裂的重中之重。传统的单一洒水养护极易被强风迅速吹干，无法保证混凝土表面持续湿润状态，导致养护失效。覆盖措施不到位同样加剧水分蒸发。

拆模过早：混凝土强度不足时拆模，易因温湿度骤变或外力作用产生裂缝。

3 降低裂缝率的关键技术措施

3.1 材料优化与配合比设计

- 优选原材料：
 - 水泥：选用中低热或低热硅酸盐水泥，降低水化热温升。
 - 骨料：严格控制含泥量（ $\leq 1.0\%$ ），优化级配（连续

级配或双掺级配), 提高堆积密度, 降低空隙率。优先选用坚固耐久的硬质砂岩或花岗岩骨料。

掺合料: 掺加优质粉煤灰 (I 级或 II 级) 或矿渣粉 (S95 级及以上)。粉煤灰可降低水化热、改善和易性、提高后期强度与抗渗性; 矿渣粉能显著降低水化热、减少收缩、提高密实度和耐久性。两者可复掺, 比例需经试验优化 (如粉煤灰 20%~30%, 矿粉 10%~20%)。

外加剂: 采用高性能复合外加剂:

高效减水剂 (聚羧酸系): 显著降低水胶比 ($\leq 0.40 \sim 0.42$), 提高密实度与强度。

缓凝剂: 延缓凝结时间, 降低早期水化放热速率, 减少温度应力峰值, 改善高温环境下施工性能。

引气剂: 引入适量 (4%~6%) 微小、稳定、密闭气泡, 显著提高混凝土抗冻融能力 (戈壁滩冬季严寒)。

减缩剂 (SRA): 有效降低混凝土自收缩和干燥收缩 (降低幅度可达 20%~50%), 是控制收缩裂缝的核心材料之一。

抗裂防水剂 / 膨胀剂 (补偿收缩): 在约束条件下产生适度膨胀 (0.02%~0.04%), 补偿部分收缩, 减少裂缝。需注意膨胀剂的品种 (硫铝酸钙类、氧化钙类) 和掺量控制, 以及与缓凝剂的相容性。

优化配合比:

在满足强度 (C30-C40 为主) 和工作性要求前提下, 严格控制水胶比 ($W/B \leq 0.42$)。

降低水泥用量 ($\leq 280 \sim 300 \text{ kg/m}^3$), 充分利用粉煤灰 / 矿粉的 “胶凝效应” 与 “微集料效应”。

通过试验确定最佳砂率 (通常 36%~42%), 保证良好和易性。

进行绝热温升试验、收缩试验 (干燥收缩、自收缩)、抗裂性能试验 (圆环约束试验、平板法), 验证配合比的抗裂效果。

3.2 结构与构造优化

合理设置诱导缝: 在应力集中部位或长墙上部设置诱导缝, 引导裂缝在预定位置发生并控制其宽度。

优化配筋设计:

适当增加构造配筋率: 在易裂部位 (如渡槽侧墙顶部、底部、转角处、孔洞周边) 设置强度钢筋, 提高混凝土抗裂能力。

采用钢筋网片或焊接骨架: 增强混凝土的整体性, 分散收缩应力。

改善约束条件: 墩台与槽身连接处设置滑动层或柔性垫层, 减少基础对上部结构的约束。优化结构几何形状, 避免截面突变。

3.3 精细化施工过程控制

原材料温度控制: 高温季节对骨料 (尤其是砂) 采取遮阳棚覆盖、喷淋降温等措施; 使用冷却水拌和; 避免水泥、掺合料暴晒。

搅拌与运输: 确保搅拌均匀, 运输过程中防止离析、漏浆和水分蒸发损失。运输车应有遮盖。

浇筑与振捣:

合理分段分层浇筑, 控制浇筑速度。

使用插入式振捣器充分振捣, 确保密实, 避免过振。对钢筋密集区、预埋件周围加强振捣。

初凝前进行二次抹压 (至少 2~3 次), 有效消除塑性沉降裂缝和表面早期收缩裂缝。

温控措施:

埋设温度传感器: 对混凝土结构, 实时监测内部与表层温度、环境温度。

控制入模温度 ($\leq 30^\circ\text{C}$)。

内部降温: 在混凝土内部预埋冷却水管 (通循环冷却水)。

表面保温与隔热: 浇筑后及时覆盖保温材料 (如土工布、草帘、泡沫塑料板), 减少内外温差 (目标 $\leq 25^\circ\text{C}$)。高温季节, 在模板外侧设置遮阳棚。

科学养护:

原则: “早、湿、长、防风”。浇筑完毕表面收光后立即开始养护。

核心方法: 覆盖保水 + 防风屏障。

覆盖材料: 优先选用吸水性强、保水性好的材料 (如土工布、麻袋片、无纺布), 紧密覆盖混凝土表面。在土工布上再覆盖塑料薄膜密封效果更佳。

持续保湿: 通过覆盖物下布设微孔喷淋管、自动喷雾系统或人工洒水, 确保覆盖物和混凝土表面始终处于饱和湿润状态。切忌直接对裸露混凝土表面进行大水漫灌或间歇性洒水。

防风屏障: 在养护区域 (尤其是迎风面) 搭建防风棚 (如彩条布、帆布围挡), 有效降低风速, 减少水分蒸发。这是戈壁滩环境下保证养护效果的关键。

养护时间: 不少于 14 天, 重要部位或使用早强水泥时不少于 21 天。拆模后应立即对侧面进行覆盖保湿养护。

拆模控制: 根据同条件养护试块强度和环境温湿度确定拆模时间, 保证拆模时混凝土强度足以抵抗温湿度变化和自重荷载。拆模后仍需加强养护和保温。

3.4 智能监测与预警

在关键渡槽段或重要结构部位预埋应变传感器、温湿度传感器, 实时监测混凝土的应力、应变、温度和湿度变化, 建立裂缝风险预警, 指导养护措施的动态调整和长期维护。

4 工程应用综合防裂措施与效果分析

本工程原采用常规混凝土配合比和养护方法 (主要依靠洒水), 渡槽槽身裂缝较多。应用综合防裂技术后:

材料: 采用 P·O 42.5 低热水泥, 掺加 25% I 级粉煤灰和 15% S95 矿粉, 水胶比 0.40。复合外加剂包含减水剂、

缓凝剂、引气剂和减缩剂。

结构：伸缩缝间距加密至 10m，槽身侧墙顶部和底部增设 $\Phi 10@100\text{mm}$ 强度钢筋网片。

施工：骨料遮阳喷淋降温，控制入模温度 $\leq 28^{\circ}\text{C}$ 。浇筑后立即覆盖双层土工布并喷淋保湿。

在渡槽两侧搭设高防风围挡（彩条布）。侧墙模板延迟至 7 天后拆除，拆模后立即包裹土工布喷淋养护至 21 天。

效果：经全面检查，后续每节渡槽裂缝检测发现均在 5 条以内（裂缝长度约 20cm，宽度均 $< 0.2\text{mm}$ ，属于 A 类裂缝），均为无害或微细裂缝。结构密实度提高，渗漏现象基本消除，工程质量和耐久性得到有力保障。

5 结论与展望

戈壁滩环境下降低渡槽混凝土裂缝率是一项系统工程，需从材料、设计、施工、养护各环节进行综合防控：通过掺加优质矿物掺合料、高性能复合外加剂（特别是减缩剂）优化配合比，降低收缩与水化热。合理分缝、优化配筋（增设

温度筋）是分散应力、提高抗裂能力的关键。

严控浇筑质量（振捣、抹压）、强化温控（入模温度、内部降温、表面保温）、实施科学养护（覆盖保水+防风屏障）是确保防裂措施落地的决定性环节，其中戈壁滩环境下搭建防风屏障对维持有效湿养护至关重要。

实践证明，综合应用上述关键技术措施，可显著降低戈壁滩渡槽混凝土裂缝率，大幅提升工程质量和长期耐久性。未来研究可进一步关注新型纳米抗裂材料、智能温控养护系统及基于大数据的混凝土裂缝预测与防控技术，为极端环境混凝土工程提供更强大的技术支撑。

参考文献：

- [1] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [2] 刘加平,田倩.减缩剂作用机理及其对混凝土性能影响研究进展[J].建筑材料学报,2020,23(1):1-12.
- [3] 李响,张君.干旱大风地区混凝土结构早期开裂机制及防风养护技术[J].水利水电技术,2021,52(S2):212-21.