

# 高海拔地区开挖支护混凝土结构的耐久性提升措施研究

梁先吉

中国水利水电建设工程咨询中南有限公司, 湖南长沙, 410007;

**摘要:** 为解决高海拔地区开挖支护混凝土结构易受环境侵蚀、耐久性不足的问题, 以高海拔特殊气候与地质条件为背景, 对混凝土结构耐久性损伤机理及提升措施开展研究。分析冻融循环、缺氧紫外线协同作用及地质气候附加影响对结构的核心损伤路径, 从材料优化与施工控制两大维度, 提出胶凝材料改良、骨料外加剂选型、功能改性材料应用及浇筑振捣优化、适配性养护、开挖支护协同施工等针对性措施。这些措施可构建多层次防护体系, 有效优化混凝土微观结构、提升抗逆性能, 减少环境损伤。

**关键词:** 高海拔地区; 混凝土结构; 耐久性; 开挖支护; 施工控制

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.04.051

## 引言

随着高海拔地区基础设施建设向纵深推进, 开挖支护混凝土结构服役环境愈发复杂, 冻融循环、缺氧紫外线耦合及极端地质气候等多重因素叠加, 易引发结构开裂、钢筋锈蚀等病害, 严重制约工程服役寿命。当前行业新标准已明确高海拔混凝土抗冻等级分级控制要求, 新型防冻剂、智能温控等技术不断涌现, 但多因素耦合下的耐久性防控仍存瓶颈。立足高海拔特殊工况, 剖析结构损伤内在机理, 构建适配性强的材料优化与施工控制体系, 对破解耐久性难题、保障工程长期稳定具有重要现实意义。

## 1 高海拔环境对混凝土结构耐久性的核心影响

### 1.1 冻融循环的侵蚀作用

冻融循环是高海拔地区混凝土损伤的首要诱因, 加速结构劣化。高海拔区域常年低温, 混凝土内部孔隙水随昼夜及季节温度变化反复经历结冰、融化过程。水结冰时体积膨胀约 9%, 产生的冻胀应力直接破坏混凝土微观晶体结构, 使内部孔隙连通性增强, 形成贯穿性微裂隙。孔隙率是影响冻融损伤程度的关键因素, 孔隙率越高, 冻胀应力集中效应越显著, 表层砂浆与内部骨料的粘结力逐步丧失, 最终引发表层剥落、露骨等病害。不同海拔高度对应的冻融频次存在明显差异, 海拔每提升 1000 米, 年冻融循环次数可增加 15-20 次, 这种频次差异直接导致低海拔区域混凝土损伤呈渐进式发展, 高海拔区域则表现为快速累积性破坏。冻融循环还会削弱混凝土与钢筋的握裹力, 为后续侵蚀介质侵入创造通道, 形成损伤连锁反应, 进一步缩短支护结构服役寿命

[1]。

### 1.2 缺氧与紫外线的协同破坏

缺氧条件让水化过程变慢, 紫外线照射则让材料老化更快, 两者一起作用使得混凝土的力学表现和耐久性能都受到削弱。高海拔地带气压偏低, 氧气含量还不到平原区域的 60%到 70%, 水泥的水化反应本身需要氧气参与, 在氧气不够的环境里, 熟料矿物水化的速度会明显下降, 一部分水化反应没办法充分展开, 留下一些没有完全水化的颗粒, 这会让混凝土内部构造的密实程度下降, 抗渗透和抗冰冻的能力天生就比较弱, 而且水化产出的晶体发育也不够完整, 晶体之间的连接强度不足, 进一步拉低了结构整体的稳定程度。强紫外线照射是高海拔地区另一个典型特点, 紫外线能够穿透混凝土表层的砂浆, 破坏水泥石里面的水化硅酸钙凝胶构造, 造成表层砂浆出现粉化、开裂, 表层防护体系失去作用, 同时紫外线照射还会让混凝土表层 pH 值降低, 加快碳化反应的进行, 表层开裂之后, 二氧化碳更容易进入内部引起碳化反应, 降低混凝土的碱性, 失去对钢筋的钝化保护效果, 引发钢筋锈蚀问题, 缺氧和紫外线的破坏效应并不是各自独立存在的, 水化不充分的混凝土表层构造本来就比较薄弱, 更容易受到紫外线的侵蚀, 而紫外线造成的表层损伤又会加重氧气、水分的交换阻碍, 进一步抑制内部水化进程, 形成一个恶性循环。

### 1.3 地质与气候的附加影响

复杂地质条件与极端气候状况进一步推动混凝土结构耐久性能的下降, 高海拔地带白天与夜晚的温差常常达到 15 到 25 摄氏度, 混凝土材料热传导能力不高,

温度变动带来内部温差应力,这种应力反复施加在结构上,逐渐引起细小裂缝,裂缝发展之后变成贯穿性通道,给侵蚀性介质创造了方便路径,而且温度应力会让混凝土内部孔隙构造出现不可逆转的改变,减弱结构紧密程度<sup>[2]</sup>。岩土体渗漏水现象是高海拔开挖支护工程里经常遇到的问题,渗漏水带着岩土中的盐分、碱性物质等侵蚀介质进入混凝土内部,跟水化产物产生化学反应,形成膨胀性物质造成内部构造胀裂,同时氯离子、硫酸根离子可能引起钢筋锈蚀,锈蚀产物由于体积膨胀进一步加重混凝土开裂,形成“渗漏-腐蚀-开裂”这样的负面循环。开挖工作本身会干扰周围岩土体的稳定状态,改变原有应力场分布情况,支护构造需要承担不均衡的围岩压力,这种受力不均容易在结构薄弱位置引发应力集中,导致裂缝出现与发展,高海拔地区短时间暴雨、强风等极端天气事件频繁发生,暴雨冲刷会加快混凝土表层砂浆的流失速度,强风带着砂石颗粒打击结构表面,加重表层损害,地质条件的复杂性还让岩土体力学性质表现出明显差别。

## 2 耐久性提升的材料优化策略

### 2.1 胶凝材料体系改良

借助胶凝材料复合加以改进,带进混凝土抗冻、抗侵蚀跟水化适配方面的表现,添加优质矿物掺合料变成优化胶凝材料体系的关键方式,粉煤灰与矿粉作为经常用到的掺合料,能够发挥填充、活性激发这两方面作用,粉煤灰里边的玻璃微珠可以填充混凝土内部毛细孔隙,让孔隙连通程度降低,与此同时它的活性成分在水化后期跟水泥水化产物氢氧化钙产生二次水化反应,形成稳定的水化硅酸钙凝胶,让微观结构得到优化并让孔隙率下降,矿粉的活性比粉煤灰要高,能够明显带进混凝土后期强度,让结构致密程度跟抗侵蚀能力得到增强,选择高标号硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,配合合理水胶比加以控制,能够从源头带进混凝土基础性能,一般把水胶比控制在0.45以内,减少毛细孔隙数量。就高海拔缺氧环境这一方面,需要调整胶凝材料混合比例,适当加大矿粉掺量来弥补水化速率不够的情况,同时控制水泥用量避免水化热过高引发温度裂缝,达成抗冻、抗侵蚀跟水化适配性的协同提升<sup>[3]</sup>。

### 2.2 骨料与外加剂选型

科学选择骨料与外加剂,加强混凝土抗冻、抗裂跟工作表现,骨料作为混凝土骨架组成,它的性能直接决定结构稳定性,优先选择质地坚硬、抗压强度高、级配

良好的玄武岩或花岗岩骨料,这一类骨料孔隙率低、抗冻性强,能够减少冻融循环里的颗粒脱落与结构破坏,合理调整骨料级配,让粗细骨料搭配达到密实堆积状态,降低混凝土拌和物空隙率,减少水分侵入通道,引气剂是高海拔混凝土必须的外加剂,借助引入直径50-200  $\mu\text{m}$ 的微小封闭气泡,可以有效减轻孔隙水结冰产生的冻胀应力,气泡能够吸收冻胀体积膨胀量,避免微观结构破坏,这有助于提升混凝土抗冻等级,搭配聚羧酸系高效减水剂,在低水胶比条件下可以明显改善混凝土拌和物工作表现,提升流动性与黏聚性,避免离析、泌水现象,确保浇筑过程中结构密实度均匀。外加剂选型需要兼顾兼容性,避免不同外加剂之间发生化学反应影响效果,同时按照高海拔低温环境调整外加剂掺量,确保它在低温下仍然可以发挥稳定作用,实现抗冻、抗裂与工作表现的同步加强。

### 2.3 功能型改性材料应用

带进功能改性材料,有目标地提升混凝土专项耐久表现,纤维材料的加入可以很好地控制裂缝出现跟扩展,钢纤维依靠高强度和弹性模量大的特点,能加强混凝土抗拉和抗折强度,阻挡宏观裂缝继续延伸;聚丙烯纤维则能够控制混凝土早期塑性裂缝,它分散性不错,可以在混凝土内部建立起三维支撑网络,减少由于水分蒸发带来的收缩裂缝,渗透型结晶型材料借助渗透作用深入混凝土内部,遇到水以后产生不溶于水的结晶物质,堵住毛细孔隙和微小裂缝,不仅可以提高混凝土抗渗表现,还拥有自修复能力,能够对后期出现的微小裂缝进行自行封堵,阻挡侵蚀介质进入<sup>[4]</sup>。面对高海拔岩土体里盐、碱这类侵蚀介质,加入复合型抗腐蚀剂能够形成有目标的防护,阻锈型抗腐蚀剂可以在钢筋表面形成钝化膜,防止氯离子、硫酸根离子侵蚀;抗碱型抗腐蚀剂则能够抑制碱骨料反应,避免膨胀性物质产生。功能型改性材料的选择要结合工程实际需要,按照高海拔环境主要损伤类型来搭配使用,形成多层次防护体系,有目标地提升混凝土抗裂、抗渗、抗腐蚀等专项耐久表现。

## 3 施工过程耐久性控制措施

### 3.1 浇筑与振捣工艺优化

精细化浇筑振捣操作,减少混凝土内部缺陷,提升密实度。高海拔低温环境对混凝土入模温度有严格要求,需将入模温度控制在5-35 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,浇筑前对骨料、拌和水进行预热处理,避免低温导致混凝土水化停滞或强度增长缓慢。拌和过程中精准控制各组分用量,确保配

合比稳定性,避免因计量偏差影响混凝土性能。浇筑采用分层推进方式,每层浇筑厚度控制在50cm以内,结合支护结构形态调整浇筑顺序,从低处向高处对称浇筑,减少接缝处气泡聚集与缺陷产生。振捣作业选用插入式振捣器,振捣时间以混凝土表面呈现浮浆、不再沉落为准,避免漏振导致蜂窝、麻面等缺陷,同时防止过振引发骨料离析,破坏混凝土微观结构。针对支护结构阴阳角、钢筋密集等薄弱部位,采用小型振捣器辅助振捣,确保振捣到位。浇筑完成后及时进行表面整平,减少表层裂缝隐患,通过全过程工艺优化,最大限度降低内部孔隙与缺陷,提升混凝土密实度,为耐久性提供基础保障。

### 3.2 适配高海拔的养护技术

针对性的养护方案能够保证水泥实现充分水化过程,从而让结构耐久基础得到加强,高海拔地带具备低温、低湿度以及缺氧这些环境特征,造成混凝土水化速度偏慢、水分丢失较快,必须采用保温与保湿结合在一起的养护方法,浇筑结束之后马上铺上土工布和塑料薄膜,塑料薄膜可以较好地留住内部水分,土工布同时具备保温和保湿两种作用,防止因为低温冻伤以及水分过快散失引起的表面开裂问题,按照海拔高低来调整养护时间长度,高海拔位置养护时间不应短于14天,寒冷地带则增加到21天,以此确保水泥充分完成水化,提高混凝土强度与密实程度,养护期间需要实时观察混凝土表面温度变化,避免温度突然波动带来温度应力,当外界温度降到5℃以下时,采用保温被覆盖、加热毯辅助保温等办法,保持混凝土养护温度处于稳定状态<sup>[5]</sup>。对支护结构的拱顶、边墙等重点部位执行专门养护,增加覆盖层数和养护次数,这些地方受力集中并且容易受到环境侵蚀影响,必须借助强化养护来提升耐久性,保证养护效果贯穿于混凝土强度增长的整个过程。

### 3.3 开挖与支护协同施工

协同把握开挖跟支护的节奏,减少结构受力方面的损伤以及环境暴露带来的影响,高海拔区域的开挖支护工程需要严格依据“短开挖、快支护”这一原则,把每循环开挖进尺把握在1到2米,缩短岩土体暴露的时长,降低围岩变形以及坍塌的可能性,减少支护结构承受的不均匀压力,开挖作业结束后及时清理掌子面,快速开展支护结构的施工,避免岩土体长时间暴露引发风化、

剥落现象,同时减少混凝土早期受力,为强度提升留出足够时间,提升支护结构安装的精确程度,严格把握支护构件轴线偏差以及安装间距,避免由于安装误差带来的应力集中问题,应力集中容易在支护结构局部位置引发裂缝,对耐久性造成不利影响,协调开挖扰动与混凝土强度增长的节奏,开挖后等到支护混凝土达到设计强度的70%以上,再开展下一轮开挖作业,避免混凝土早期受力超出承载能力引发损伤。施工过程中实时监测围岩变形以及支护结构受力状态,依据监测数据调整开挖与支护的节奏,当围岩变形速率超出预警值时,暂停开挖并加强支护,确保开挖扰动与支护结构承载能力、混凝土强度增长相互匹配,减少受力损伤以及环境侵蚀对耐久性的负面影响。

## 4 结语

高海拔地区开挖支护混凝土结构的耐久性直接关系到工程安全与服役寿命,其损伤过程受多重环境因素耦合作用,机理复杂且防控难度大。材料优化是提升耐久性的核心基础,施工控制则是确保材料性能充分发挥、规避额外损伤的关键环节,二者协同发力可有效破解高海拔环境下的耐久性难题。文中提出的系列措施贴合工程实际,能针对性抵御各类侵蚀风险,为同类工程提供实践参考。后续可结合具体工程工况,进一步细化参数配比与施工工艺,强化措施的适配性与经济性,为高海拔地区基础设施工程的耐久性提升提供更全面的技术保障。

### 参考文献

- [1] 钱凯旋,朱四辈,李凯,等. 浅谈高海拔双闸室薄壁竖井开挖支护施工技术[J]. 四川水力发电,2024,43(03):106-110.
- [2] 黄启贵,陈慧伟,胡俊. 高海拔地区贯穿破碎带涌水涌泥地段隧道初期支护体系及开挖方法研究[J]. 公路,2022,67(07):441-444.
- [3] 魏红平. 高海拔地区钙质页岩隧洞施工方法与施工技术研究[J]. 四川水利,2021,42(05):65-67.
- [4] 钱凯旋,朱四辈,李凯,等. 浅谈高海拔双闸室薄壁竖井开挖支护施工技术[J]. 四川水力发电,2024,43(03):106-110.
- [5] 刘王平. 高海拔长大铁路隧道施工通风方案优化[J]. 铁道建筑技术,2024,(02):143-147.