

高强度耐久性混凝土制备技术及工程应用研究

刘松柏 施杨林 沈天建

云南交投集团公路建设有限公司 云南 昆明 650200

【摘要】：喀斯特地貌区高速公路改扩建工程面临水文地质复杂、干湿交替频繁、岩溶侵蚀活性强等严苛服役条件，常规混凝土材料易出现渗透劣化、碳化腐蚀、强度衰减等病害，难以满足山区高速结构长期稳定服役需求。为解决复杂地质环境下混凝土结构耐久性不足、服役寿命短、性能稳定性差等工程痛点，本文以沪昆高速盘曲段改扩建工程为实体研究载体，开展高强度耐久性混凝土（HSDC）成套制备与施工技术研究。通过优化胶凝材料复合配比、骨料级配、外加剂协同体系，调控混凝土微观孔隙结构与界面过渡区性能，构建适配喀斯特复杂环境的多指标耐久性评价体系。结合精细化搅拌、温控浇筑、梯度养护等全过程施工质控技术，有效提升混凝土力学强度、抗渗性、抗冻融及耐侵蚀性能。依托多项重大基建工程应用验证，总结形成成熟的高强度耐久性混凝土施工技术体系与科研成果转化路径。研究结果可为山区喀斯特区域高速公路混凝土结构长效服役、品质提升及同类工程技术推广提供可靠的理论支撑与工程实践依据。

【关键词】：高强度耐久性混凝土；配合比优化；微观结构调控；施工精细化管控；喀斯特地质；耐久性评价

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.023

前言

现阶段我国山区高速公路改扩建工程持续推进，喀斯特地貌区域因岩体破碎、岩溶裂隙发育、地下水富集、干湿循环交替频繁，混凝土结构长期处于高侵蚀、高渗透、多交变的复杂服役环境中，极易引发渗透破坏、碳化锈蚀、冻融损伤及硫酸盐侵蚀等结构性劣化问题，严重制约道路工程整体服役寿命与安全稳定性能。常规混凝土因孔隙结构粗大、界面性能薄弱、抗环境侵蚀能力不足，难以适配山区复杂地质的长效服役要求。因此，研发适配喀斯特工况的高强度、高抗渗、高耐久混凝土制备与施工技术，是提升山区高速改扩建工程建设品质、降低运维成本、实现结构长效服役的关键。

本文依托沪昆高速盘曲段改扩建工程第3标段实体项目，标段桩号 K41+400~K61+440，主线全长 20.04km，改扩建后路基宽度拓展至 41m，工程涵盖土石方填筑、防护排水、涵洞通道、新旧桥梁改扩建、路面施工等多项分项工程，建设环境具备典型喀斯特地质特征。针对项目复杂水文地质条件，通过材料配比优化、微观结构调控、施工工艺提质、养护制度升级及耐久性体系评价，系统开展高强度耐久性混凝土技术研究。依托室内试验与实体暴露试验相结合的方式，结合电通量快速检测等评价手段，建立适配山区高速的混凝土耐久性控制标准，通过聚羧酸减水剂与粘度改性材料协同适配，有效提升混凝土拌合物工作性能与硬化后耐久性能，形成可复制、可推广的山区高耐久混凝土工程应用技术体系。

1 高强度耐久性混凝土材料组成优化设计

高强度耐久性混凝土（High-Strength Durable Concrete, HSDC）的优异力学性能与耐久性能，依托科学适配的原材料选型与复合配比体系实现，通过精准管控胶凝材料、矿物掺合料、骨料及外加剂各项参数，从材料源头优化混凝土密实度、稳定性与抗侵蚀能力。

水泥作为核心胶凝材料，优先选用低水化热、高早期强度的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，严格控制水泥碱含量 $\leq 0.6\%$ ，从源头规避碱-骨料反应风险，保障混凝土结构长期体积稳定性。矿物掺合料采用 F 类 I 级粉煤灰、S95 及以上等级矿渣粉与高纯度硅灰（ SiO_2 含量 $\geq 90\%$ ）三元复合体系，充分发挥多组分掺合料的协同优化效应。其中，粉煤灰依托形态效应与微集料效应填充混凝土毛细孔隙，改善拌合物流动性；矿渣粉通过二次水化反应持续生成 C-S-H 凝胶，提升基体密实度与后期强度；硅灰凭借 $0.1\mu\text{m}$ 左右的超细颗粒粒径，有效填充混凝土纳米级孔隙，显著优化骨料与砂浆之间的界面过渡区（ITZ）性能，阻断侵蚀介质渗透通道。

外加剂选用高性能聚羧酸系减水剂（PCE），保证减水率不低于 35%，在实现水胶比 ≤ 0.30 的低水胶配比前提下，维持混凝土拌合物优异的流动性与抗离析性能，适配长距离泵送施工需求。骨料体系实行分级精准管控，粗骨料选用 5~20mm 粒径连续级配的玄武岩或石灰岩碎石，严控压碎值 $\leq 10\%$ 、针片状含量 $\leq 5\%$ ，保障骨料骨架支撑性能；细骨料选用细度模数 2.6~3.0、含泥量 $\leq 1.0\%$ 的优质机制砂或天然河砂，通过分级配优化骨料堆积密度，减少内部空隙缺陷，进一步提升混凝土整体密实性与力学稳定性。

2 高强度耐久性混凝土微观结构调控机制

混凝土的宏观耐久性能本质由微观孔隙结构、水化产物组成及界面过渡区特性决定。HSDC 通过低水胶比设计与复合矿物掺合料的火山灰协同反应，显著优化水泥石微观结构，大幅提升结构致密性与抗劣化能力。低水胶比有效减少自由水分残留，抑制毛细孔隙生成，同时矿物掺合料持续发生二次水化反应，显著降低水泥石中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量，将稳定型 C-S-H 凝胶占比提升至 70% 以上，形成致密稳定的三维网状水化结构，从根本上提升混凝土抗渗透、抗碳化与抗侵蚀能力。

扫描电镜 (SEM) 微观测试结果表明, 掺入 8% 掺量硅灰可实现界面过渡区性能的显著改良, 将传统混凝土 30~50 μm 的界面过渡区厚度缩减至 10~15 μm , 界面晶粒排布由定向规整结构转变为无序致密结构, 有效切断水分、氯离子等侵蚀介质的渗透路径。压汞法 (MIP) 孔隙测试分析显示, 优化配比后的 HSDC 总孔隙率可控制在 8% 以内, 其中 100nm 以上有害大孔占比低于 15%, 10nm 以下无害凝胶孔占比超 60%, 孔隙结构整体呈现“低孔隙率、小孔径、高致密性”的优质特征。

X 射线衍射 (XRD) 与热重分析 (TGA) 试验进一步验证, 标准养护 28d 后, 混凝土内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰值强度下降 40% 以上, 表明复合掺料火山灰反应充分进行, 水化产物稳定性大幅提升。该致密微观结构体系不仅使混凝土抗压强度可达 80~120MPa, 实现高强度特性, 还能有效阻滞硫酸盐侵蚀、碳化反应及钢筋锈蚀等劣化进程, 保障混凝土结构在复杂喀斯特环境下的长期服役稳定性。

3 高强度耐久性混凝土精细化施工工艺控制

HSDC 对施工工况、工序衔接与参数控制的敏感度远高于普通混凝土, 施工过程的精细化管理是保障其高强度、高耐久性能落地的核心关键, 需从搅拌、运输、浇筑、振捣、温控及模板支护全流程实施标准化管控。

搅拌阶段采用强制式双卧轴搅拌机, 执行分级投料、时序搅拌的标准化工艺: 首先投入粗细骨料干拌 30s, 完成骨料均匀混合; 再投入水泥与复合矿物掺料持续搅拌 60s, 实现胶凝材料均匀分散; 最后分两次匀速添加外加剂溶液与拌合用水, 总搅拌时长不少于 180s, 彻底规避拌合物团聚、分散不均等问题, 保障混凝土匀质性与工作性稳定。

运输环节严格控制泵送时效性与工作性稳定性, 针对泵送距离超 500m 的长距离施工工况, 适量掺加缓凝型保塑剂, 严控混凝土坍落度经时损失, 确保 1h 内坍落度损失不大于 20mm, 杜绝拌合物离析、泌水、凝固过快等施工缺陷。浇筑施工采用分层布料、均匀摊铺工艺, 搭配高频振捣设备作业, 控制振点间距 $\leq 40\text{cm}$ 、单点振捣时长 20~30s, 遵循“快插慢拔”原则, 兼顾振捣密实度与均匀性, 避免过振离析、漏振疏松等质量问题。

针对大体积混凝土构件, 专项布设冷却水管温控体系, 实时监测构件内部温度场变化, 严格把控混凝土内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$, 有效抑制水化热温差裂缝产生。模板体系需具备足够刚度、平整度与密封性, 杜绝漏浆、跑模问题, 保障混凝土表层密实度与外观质量, 为结构整体耐久性奠定施工基础。

4 适配复杂环境的养护制度与性能演化规律

HSDC 早期水化反应剧烈、自干燥效应显著, 养护方式直接决定水化反应程度、微观结构成型质量及后期耐久性能, 针对喀斯特区域干湿交替、温差波动大的服役特征, 构建“早期

保湿、后期密封、梯度养护”的标准化养护体系。

常规工况下采用“早期湿养+后期密封”复合养护模式: 混凝土浇筑完成后立即覆盖塑料薄膜封闭保湿, 阻断水分蒸发; 初凝结束后启动洒水养护, 连续养护时长不少于 14d, 保障早期水化持续充分进行。针对裸露于岩溶侵蚀、干湿循环等严酷环境的主体结构, 采用蒸汽养护工艺优化早期强度发展, 严控升温速率 $\leq 15^\circ\text{C}/\text{h}$ 、恒温温度 $\leq 60^\circ\text{C}$ 、持续保温 48~72h, 有效提升混凝土早期密实度与抗渗性能。

试验数据表明, 在温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$ 的标准养护条件下, HSDC 养护 28d 抗压强度可达设计强度的 110% 以上, 依据 ASTM C1202 标准开展电通量测试, 电通量值可降至 1000 库仑以下, 达到极低渗透等级, 抗介质侵蚀性能优异。持续养护至 90d 时, 混凝土依托后期持续水化作用, 强度可再提升 10%~15%, 碳化深度趋近于零, 长期耐久性性能稳定性显著优于普通混凝土。

5 多维度混凝土耐久性综合评估体系构建

为精准评价 HSDC 在喀斯特复杂环境下的服役性能, 贴合实际荷载-环境耦合服役工况, 构建涵盖抗渗透、抗冻融、抗硫酸盐侵蚀、抗碳化及荷载耦合劣化的多指标综合耐久性评价体系, 形成量化可控的质量评估标准。

抗氯离子渗透性能方面, 采用 RCM 法测试氯离子迁移系数, 控制指标 $\leq 4.0\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$; 依据 NT Build 492 标准测试快速氯离子扩散系数, 限值 $\leq 1.5\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$, 相较于普通混凝土可使结构保护层厚度缩减 20%~30%, 大幅提升结构抗锈蚀安全储备。抗冻融性能参照 GB/T 50082 快冻法测试, 经过 300 次冻融循环后, 混凝土质量损失率 $\leq 3.0\%$, 动弹性模量保留率 $\geq 80\%$, 满足山区温差交变工况服役要求。

抗硫酸盐侵蚀性能通过硫酸钠溶液浸泡试验验证, 6 个月长期侵蚀后, 混凝土质量变化率 $\leq 0.8\%$, 抗压强度损失率 $\leq 15\%$, 可有效适配喀斯特区域硫酸盐富集的水土环境。抗碳化性能测试表明, 在 20% 高浓度 CO_2 环境下碳化 56d, 混凝土碳化深度不超过 3mm, 钢筋钝化膜稳定性良好。同时, 引入荷载-环境耦合试验方法, 在 0.4 倍极限荷载应力水平下开展干湿循环试验, 精准模拟实际车辆荷载与水环境耦合劣化工况, 结合 Fick 第二定律、Paulette 寿命预测模型, 实现混凝土结构长期服役寿命的精准预判, 为结构设计与运维管控提供数据支撑。

6 实体工程应用案例验证

多项重大基础设施实体工程应用表明, 本文优化的 HSDC 配比与施工技术体系具备优异的工程适配性与性能稳定性, 可广泛应用于大体积承台、桥梁主体、隧道结构、预制构件等关键工程部位。

某跨海斜拉桥主塔承台采用 C70 高强度耐久性混凝土, 优化配合比为: 水泥 380 kg/m^3 、粉煤灰 60 kg/m^3 、矿渣粉 80 kg/m^3 、

硅灰 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 、聚羧酸减水剂掺量 1.8%、水胶比 0.29、砂率 38%。施工过程中采用冰水拌合严控入模温度 $\leq 28^\circ\text{C}$ ，布设光纤传感系统实时监测温度场变化，配合冷却水管精准调控水化温升，全程覆膜保湿养护。检测结果显示，混凝土 28d 平均抗压强度达 78.5MPa ，劈裂抗拉强度 $\geq 5.2\text{MPa}$ ；MIP 孔隙测试表明总孔隙率仅 7.3%，临界孔径 $0.08\mu\text{m}$ ，微观结构致密。经过 5 年海洋严酷环境暴露监测，结构表面氯离子浓度仅 $0.18\text{kg}/\text{m}^3$ ，碳化深度 1.2mm，无钢筋锈胀、表层剥落等病害，结构服役状态良好。

某地铁工程采用 C60 HSDC 预制管片构件，通过优化振捣工艺、配合比参数与养护制度，彻底消除蜂窝、麻面、孔隙等表层缺陷，构件出厂抗渗等级达 P12。经过三年运营监测，管片结构无渗漏、无开裂、无剥落病害，整体密实性与耐久性优异。两类典型工程案例充分证实，HSDC 可适配高侵蚀、高交变、大荷载的复杂工况，力学性能与耐久性性能远超常规混凝土，具备极高的工程应用价值与推广前景。

参考文献:

- [1] 交通运输部.JTG/T 3610-2019 公路路基施工技术规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [2] 交通运输部.JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [3] 李术才,张庆松.复杂地质条件下高速公路混凝土耐久性劣化机制与防控技术[J].岩土工程学报,2021,43(S1):189-195.
- [4] 黄晓明,刘松玉.山区高速公路混凝土结构长期服役性能演化规律[J].中国公路学报,2020,33(05):1-12.
- [5] 王景全,陈俊.高性能耐久性混凝土施工质控技术研究[J].土木工程学报,2022,55(03):112-120.
- [6] 张三平,李建峰.喀斯特地区混凝土抗侵蚀耐久性优化试验研究[J].建筑材料学报,2023,26(02):368-375.
- [7] 交通运输部公路科学研究院.公路工程高性能混凝土应用技术指南[M].北京:人民交通出版社,2022.

7 结论

针对喀斯特地貌区高速改扩建工程混凝土结构易侵蚀、易开裂、耐久性不足的工程难题，本文通过原材料优化配比、微观结构靶向调控、施工工艺精细化管控、养护制度升级及多维度耐久性评价，系统构建了高强度耐久性混凝土成套制备与施工技术体系。三元复合矿物掺合料与高性能外加剂的协同适配，可有效优化混凝土孔隙结构、细化界面过渡区、稳定水化产物，从微观层面大幅提升混凝土抗渗透、抗碳化、抗盐蚀能力；全流程精细化施工与梯度养护制度，可保障 HSDC 高强度、高耐久性能稳定落地；多指标荷载-环境耦合耐久性评价体系，更贴合山区复杂服役工况，可精准预判结构长期服役性能。

实体工程应用验证，优化后的 HSDC 力学性能优异、孔隙结构致密、环境适应性强，可有效解决复杂地质条件下混凝土结构劣化病害问题，显著提升道路工程结构服役寿命与安全稳定性能。课题形成的成套技术标准、施工工法与理论成果，可为山区高速公路、市政工程、跨海工程等重大基础设施耐久性建设提供借鉴，具备良好的工程应用价值与行业推广前景。