

高性能混凝土在公路工程关键结构中的应用实践

黄剑锋

徐州市交通运输综合行政执法支队

DOI:10.32629/etd.v7i1.22216

[摘要] 高性能混凝土用在公路工程里,得同时满足力学承载、长期耐久和施工和易性这几方面的要求。承重结构主要看立方体抗压强度和疲劳强度,附属防护结构则更看重抗冻融循环能力、抗渗等级和耐冲刷性能。路基路面、桥隧主体和防护排水体系这些不同的部位,通过配合比精细化设计、施工过程管控和规范化养护,能够提高结构的抗弯刚度、抗裂性和服役寿命。遇到高温、负温或侵蚀性介质环境,配合比要动态调整,做好温控防裂,系统性地防止离析、泌水和收缩裂缝这些常见问题,保证工程质量,延长公路基础设施的使用年限。

[关键词] 高性能混凝土; 公路工程; 承重结构; 防护结构; 耐久性; 配合比设计

中图分类号: U414 文献标识码: A

Application of High-Performance Concrete in Key Structures of Highway Engineering

Jianfeng Huang

Xuzhou Municipal Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment

[Abstract] The application of high-performance concrete in highway engineering must simultaneously meet requirements for mechanical load-bearing capacity, long-term durability, and construction workability. For load-bearing structures, emphasis is placed on cube compressive strength and fatigue strength, while auxiliary protective structures place greater emphasis on resistance to freeze-thaw cycles, impermeability grade, and scour resistance. For different components, including roadbeds and pavements, main bridge and tunnel structures, and protection and drainage systems, refined mix proportion design, construction process control, and standardized curing can improve structural flexural stiffness, crack resistance, and service life. Under high-temperature, subzero-temperature, or corrosive-media conditions, the mix proportion should be dynamically adjusted, with effective temperature control and crack prevention measures implemented. Common problems such as segregation, bleeding, and shrinkage cracking should be systematically prevented to ensure engineering quality and extend the service life of highway infrastructure.

[Key words] high-performance concrete; highway engineering; load-bearing structures; protective structures; durability; mix proportion design

引言

高性能混凝土是保证公路工程结构安全和耐久的关键材料,但不同结构部位对它的要求不太一样:承重构件得兼顾静力强度储备和抗疲劳性能,防护类的附属设施则更看重抗冻融、抗渗和耐冲刷能力。此文就从性能适配的角度出发,梳理了高性能混凝土在路基路面、桥隧主体和防护排水体系里具体怎么用,然后从原材料进场怎么把控质量、施工工艺怎么标准化、特殊工况怎么应对这三个方面展开聊,希望能给提升公路工程全寿命周期的服役性能提供点参考。

1 公路工程关键结构混凝土性能适配要求

1.1 土建承重结构性能要求

承重结构用的高性能混凝土,得满足极限抗压强度和疲劳寿命这两个控制指标。强度等级要根据最不利荷载组合效应来定,还得把冲击系数和振动荷载带来的动态放大效应算进去,保证极限承载力储备够用,弹性变形量也得控制在规范容许的范围内^[1]。车辆荷载反复作用的情况下,得通过优化骨料和浆体界面的微观结构、提升基体韧性这些手段,抑制疲劳微裂纹的萌生和扩展,防止累积损伤引发结构失效。

耐久性方面,重点要防混凝土碳化和氯离子侵蚀。用低水胶比设计,配合粉煤灰、矿粉这些活性矿物掺合料一起掺,把孔隙结构细化,阻断有害介质的传输通道,延缓钢筋锈蚀。早期温度裂缝和干燥收缩裂缝,得从胶凝材料水化热调控和骨

料级配优化下手,降低绝热温升值,削减约束拉应力。弹性模量和收缩徐变参数得跟结构设计的理论假定对得上,控制好使用阶段的挠度超限和预应力损失。新拌混凝土的保水性和流动性要足够好,保证钢筋密集区也能浇筑密实,不能出现蜂窝麻面和空洞。

1.2 防护附属结构性能要求

防护附属结构用的高性能混凝土,核心任务是扛住水流冲刷和季节性冻融循环引起的体积胀缩。抗冻等级(F)要依据当地年冻融循环次数来确定,通过引气剂引入微米级的封闭气泡,缓冲冰晶生长带来的静水压力和渗透压,防止表层被剥蚀。抗渗等级(P)得满足把外部水分挡在基底外面的要求,别让土体含水率升上去导致地基承载力下降或者冻胀变形。耐磨性指标要靠选用高硬度骨料和优化浆体强度来保证,对付含沙水流和除雪作业带来的机械磨损。

针对融雪剂里的氯盐和大气酸性沉降物,混凝土得有一定的化学耐腐蚀能力,延缓表层中性化。要严格控制干缩和温缩系数,防止裂缝冒出来变成渗水通道,削弱防护效果。施工的时候,新拌混凝土黏度要适中,方便在狭窄模腔里振捣排气,保证边角部位成型完整。硬化后表面构造深度得符合设计要求,排水通畅性和抗滑性能都得兼顾到。养护期间得采取保水蓄热措施,防止塑性收缩开裂,促进表层形成致密的保护层。

2 高性能混凝土在公路关键结构中的具体应用

2.1 路基与路面结构应用

在路基和路面工程里,高性能混凝土主要用在重载交通路段的面层铺装和刚性基层加固上。面层混凝土得有较高的抗弯拉强度(抗折强度)和抗冲击韧性,直接扛住车轮荷载产生的弯拉应力和振动疲劳。通过优化骨料级配和胶凝材料体系,能保证路面刻槽构造的耐磨保持能力,确保潮湿状态下行车安全。基层这边,侧重于把荷载横向扩散和分布开,利用高性能混凝土的高弹性模量和抗压强度,提升路面结构的整体刚度,抑制车辙和拥包这些病害。在温差大的地方,靠混凝土优化后的孔隙结构,能降低温度梯度引起的翘曲应力,减少横向反射裂缝。其渗透性低,能有效阻止水分下渗,避免路基软化和冻胀,路面大中修的周期能明显拉长^[2]。施工的时候,摊铺均匀性和振捣密实度都得严格控制,层间粘结力也要强化。养护阶段做好保湿保温,让强度平稳增长,最终形成耐久、平整、抗滑的路面服役体系。

2.2 桥隧主体结构应用

桥梁工程里头,上部结构像主梁、桥面板这些,得靠高性能混凝土的高抗压强度和高韧性来扛住恒载和活载。利用它收缩小、徐变低的特点,保证预应力体系能一直有效,防止跨中下挠太大影响线形。下部结构比如墩台、承台,要求混凝土有好的抗渗性和抗化学侵蚀能力,顶住地下水和河流里氯盐、硫酸盐这些介质的侵蚀,保护好钢筋的钝化膜。隧道衬砌这块,高性能混凝土既要提供足够的支护抗力来平衡围岩压力,又要靠低渗透性形成防水屏障,降低衬砌背后的水压力积聚。施工阶段,高性能混凝土泵送性和填充性都不错,能在狭窄模板间隙里均匀流动,

保证衬砌厚度一致。大体积桥墩和隧道仰拱,得掺低热水泥和矿物掺合料,把水化热温升降下来,防止温度裂缝,保证桥隧主体在全寿命周期里结构完整、安全冗余够用。

2.3 防护排水结构应用

高性能混凝土在防护排水设施里头用得不少,像边坡护砌、挡土墙、排水沟渠、急流槽这些都在用。这类结构长期泡在地表径流、干湿交替和冻融循环的环境里,要求混凝土抗冲刷、耐磨蚀能力都得出色,才能抵抗水流挟沙带来的切割,防止断面缺损和骨料外露。高抗冻融性是必备指标,通过引气技术来缓冲结冰时的膨胀应力,防止表层剥落,保证护排设施过水断面的尺寸和设计泄流能力不受到影响。抗渗性能得满足阻隔墙后土体渗流的要求,降低静水压力和土体软化的风险。挡土墙结构的话,混凝土的抗压和抗弯强度得满足抗倾覆和抗滑移稳定性的验算要求。施工的时候,新拌混凝土黏聚性要好,方便在陡坡和异形模板里头成型密实^[3]。表面最好做一下收面处理,降低粗糙度来减小水流阻力,按规范留好变形缝来适应温度变化。

3 高性能混凝土施工质量控制体系

3.1 原材料与配合比质量管控

原材料品质是决定高性能混凝土性能的先决条件。水泥得选用质量稳定、水化热适中的旋窑水泥,矿物组成和细度得跟高效减水剂合得来,满足凝结时间和工作性的要求。粗骨料要选岩质坚硬、粒形规整(针片状颗粒含量低的)、级配连续的碎石,这样空隙率低,砂浆填充量少,混凝土体积稳定性好。细骨料的含泥量和云母含量要严格控制住,最好选质地坚硬的机制砂或者天然中砂,保证浆体的粘结力。粉煤灰、矿粉、硅灰这些矿物掺合料,活性指数和需水量比得通过复试检验,用复掺技术优化胶凝体系的粒度分布,改善孔结构。高效减水剂的减水率、保坍率和对环境温度的适应性,都要经过适配性试验来验证。配合比设计得遵循“最小单位用水量”和“最大堆积密度”这两个原则,通过正交试验把强度、耐久性和工作性平衡好,保证新拌混凝土满足施工要求,硬化后各项力学性能和耐久性指标都能达标。

3.2 现场施工工艺过程控制

施工工艺控制是让高性能混凝土的设计性能真正落到实处的关键环节。搅拌的时候,计量系统得保证精度,投料顺序和搅拌时间严格执行,物料要分散均匀,不能有干粉团块或者外加剂堆在一块儿的情况。运输过程中要防止混凝土分层离析,转运次数和等待时间都得控制好,有必要的在入模前再搅一遍,把工作性恢复过来。浇筑之前,模板刚度、拼缝严不严实、钢筋保护层垫块这些都得核查一遍,仓里头的杂物清干净,洒水润湿。浇筑速度和自由倾落高度要控制住,不能分层,也不能让模板移位。振捣作业得根据结构断面尺寸选合适的振捣器,按“快插慢拔”的节奏来,振捣间距和时间要科学合理,把内部气泡排出去,既不能漏振,也不能振过头导致骨料下沉或者浆体上浮。

3.3 成型养护与质量检测管控

规范的养护和质量检测,是保证混凝土最终质量、把整个流程闭环收住的关键一步。养护制度要根据结构类型、环境温度 and 胶凝材料的水化特性来定。初凝之后,得马上用覆盖、喷雾或者涂刷养护剂这些办法,防止表面水分蒸发太快,让水化反应持续进行下去。大体积或者薄壁结构,要重点盯着芯部和表层的温差,该保温保温,该降温降温,别让温度梯度弄出收缩裂缝来,养护龄期也得适当延长。质量检测分两块,过程控制和竣工验收。过程控制这块,要测出机混凝土和入模混凝土的坍落度、扩展度、含气量、凝结时间,不合格的坚决不能入模^[4]。竣工验收阶段,得做标准养护试件的抗压、抗渗、抗冻试验,再结合回弹法、超声回弹综合法这些无损检测手段,综合评定混凝土的实体强度和耐久性。

4 高性能混凝土性能优化与应用改良

4.1 材料组分优化技术

材料组分的微观调控,是提升高性能混凝土综合性能的基础路径。胶凝材料这块,宜选中热或低热硅酸盐水泥,细度控制一下,别让早期水化热放得太快。骨料体系优化,主要是调整粗骨料的粒径和级配曲线,把针片状颗粒剔出去,搭一个紧密堆积的骨架,这样胶凝材料用量能降下来,体积稳定性和强度都能提上去。矿物掺合料多元复合,比如粉煤灰、矿粉、硅灰搁一块儿用,能发挥微集料填充效应和火山灰活性效应,界面过渡区结构会明显改善,后期强度和抗侵蚀能力也能提上来。外加剂方面,聚羧酸系高性能减水剂跟缓凝剂、引气剂这些复配着用,在极低水胶比下也能让混凝土流动性好、保坍性好,引气气泡结构也稳得住。

4.2 特殊工况性能提升方法

碰上高温、负温、高盐侵蚀这些特殊工况,得用不一样的性能提升策略来应对。高温季节施工,要用缓凝型高效减水剂,矿物掺合料多掺一点,把水化热峰值削下去;拌合水里加冰、骨料喷淋降温这些措施跟上,控制好入模温度,防止塑性收缩裂缝;运输和浇筑过程中也得做好防晒和保湿。负温环境下面,要选早强型复合外加剂,调整胶凝材料的水化放热速率,让早期强度快点上来抵抗冻害;采用综合蓄热法养护,别让混凝土冻着。对于可能接触氯盐侵蚀或硫酸盐侵蚀的部位,得把水胶比降下来(<0.40),掺硅灰或超细矿粉,提高抗氯离子渗透性能,把侵蚀介质挡在外面^[5]。容易磨损冲刷的结构部位,要选高硬度耐磨骨料(比如石英岩、玄武岩),胶凝材料适当多加点来提升浆体结合力,振捣工艺也优化一下,减少表层气孔。

4.3 常见施工缺陷改良对策

针对离析、泌水、气泡聚集、裂缝这些常见的施工缺陷,得从材料、工艺和管理三个方面系统性地来防。离析防治主要通过调整砂率、增加胶凝材料用量来改善混凝土的黏聚性,运输和浇筑操作也要规范起来,防止振动离析。泌水控制则要优化外加剂组分(比如添加增稠剂)或者调整配合比,把自由水析出的速度降下来;浇筑完了及时排掉表层的浮浆和积水,别让表层强度往下掉。针对表面气泡,得优化振捣工艺(延长振捣时间、缩小振捣间距),有必要的话用消泡剂和引气剂复配着用。裂缝控制得分分类来:塑性收缩裂缝在抹面后马上覆盖塑料薄膜或者湿麻袋,防风保湿;温度裂缝则要分层浇筑、埋设冷却水管、加强保温养护,把混凝土内外温差严格管住。

5 结束语

高性能混凝土在公路工程里能不能发挥出应有的效能,取决于三件事能不能捏到一块儿:性能适配性设计、全过程施工管控,还有持续性能优化。科学界定承重结构和防护结构各自该用什么性能指标,把材料组分设计和微观结构调控做精细了,拌合、运输、浇筑、振捣、养护整个流程都按标准化工艺来,离析、裂缝这些通病就能有效避开,结构的耐久性和安全性也能明显往上提。面对复杂多变的环境条件,配合比动态调整和温控防裂措施也要跟上,这样公路基础设施的建设品质和服役寿命还能再上一个台阶,推动公路工程往绿色化、长寿命化的方向走。

[参考文献]

- [1]杨晓凤.新型高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用研究[J].工程建设与发展,2026,5(3):143-146.
- [2]刘光亮.高性能混凝土在交通工程中的应用[J].石材,2024(9):86-88.
- [3]王芳佼.超高性能混凝土在公路桥梁设计及施工中的应用[J].甘肃科技,2025,41(12):16-20,27.
- [4]蒋南,黄卉.装配式钢-混凝土组合梁在公路桥梁中的创新应用与力学性能分析[C]//2025中国国土经济学会学术年会——城市规划与工程技术管理论坛(四)论文集,2025:1-3.
- [5]薛广彬.公路桥梁工程施工中混凝土施工技术的应用[J].建筑工程与管理,2024,6(12).

作者简介:

黄剑锋(1976--),男,汉族,四川自贡人,本科,高级工程师,研究方向:公路桥梁工程。