

高性能混凝土在桥梁建设中的应用技术研究

李勇民

江西中顺工程管理有限公司 江西上饶 334000

【摘要】针对传统混凝土在桥梁建设中存在的耐久性差、强度不足等问题，通过实验研究探讨了高性能混凝土在桥梁建设中的关键技术及其应用效果。研究采用不同配合比进行试配，测试了掺入硅灰、粉煤灰等矿物掺合料对混凝土性能的影响。实验结果表明，优化后的高性能混凝土在抗压强度、抗渗性能、收缩变形等方面均有显著改善。在实际工程应用中，采用该配合比的高性能混凝土，桥梁结构的耐久性得到明显提升。通过施工工艺的优化和养护方案的改进，解决了高性能混凝土施工中的技术难点，为同类工程提供了可借鉴的技术参考。研究成果对提高桥梁建设质量和延长使用寿命具有重要的实践意义。

【关键词】高性能混凝土；桥梁建设；配合比；耐久性；施工工艺

引言：

随着交通基础设施建设的快速发展，桥梁结构所处环境日趋复杂，承受的荷载不断增加，对混凝土材料性能提出了更高要求。传统混凝土因其自身局限性，难以满足现代桥梁建设中的技术需求。高性能混凝土凭借其优异的工作性能、力学性能和耐久性，在桥梁建设领域展现出广阔的应用前景。国内外研究表明，高性能混凝土能有效解决桥梁建设中的裂缝控制、耐久性提升等技术难题。因此，深入研究高性能混凝土在桥梁建设中的应用技术具有重要的理论意义和工程价值。

1 工程概况

1.1 工程基本情况及特点

某跨海大桥全长2.8公里，其中主桥采用双塔斜拉桥结构，主跨跨径达到450米。主桥塔采用H形钢筋混凝土结构，塔高165米。引桥采用预应力混凝土箱梁结构。桥面全宽33米，双向六车道。该桥梁建成后将成为区域重要的交通枢纽工程。主塔基础采用钻孔灌注桩，桩径3米，桩长85米。考虑到桥梁结构的重要性和使用年限要求，混凝土强度等级为C60，设计使用年限100年。主塔、主梁等重要构件均采用高性能混凝土，对抗裂性、抗渗性及耐久性提出严格要求。钢筋采用HRB500级别，以满足结构整体性和构造要求。为确保施工质量，施工单位建立了专门的混凝土性能检测实验室，配备了先进的检测仪器和设备。

1.2 工程建设条件分析

建设区域位于亚热带季风气候区，年平均气温22度，年降水量1600毫米，相对湿度85%。施工场地紧邻海域，氯离子含量高，空气中含盐量达到 $0.42\text{mg}/\text{m}^3$ ，属于严重腐蚀环境。地质勘察表明，场地基岩埋深在85-95米之间，上覆土层主要为淤泥质粉质粘土，局部夹砂层。水文条件复杂，潮汐明显，最大潮差4.2米，设计最大水位8.5米，最小水位-0.5米。施工期需考虑台风影响，年均出现3-4次强台风。施工场地狭窄，材料堆放和设备布置存在困难。施工航道通行频繁，对施工工期和工艺提出较高要求。场地周边环境敏感，施工过程需严格控制噪声和扬尘污染。

2 高性能混凝土的性能优化研究

2.1 材料选用与性能要求

原材料选用严格遵循高性能混凝土技术规范要求，水泥采用P. II 52.5低碱硅酸盐水泥，细度模数2.8-3.2，初凝时间不少于45分钟。粗骨料选用玄武岩碎石，粒径5-20mm，针片状含量控制在8%以下，压碎值小于8%。细骨料选用中粗河砂，细度模数2.8-3.0，含泥量低于1%。矿物掺合料选用I级粉煤灰，需水量比小于95%，烧失量低于5%，28天活性指数大于85%^[1]。外加剂选用聚羧酸高性能减水剂，减水率不低于25%。混凝土抗压强度等级C60，抗渗等级P12，抗氯离子渗透系数小于1000库伦，收缩率不大于 3.0×10^{-4} ，坍落度200-220mm，扩展度500-600mm。所有原材料进场前均进行复检，建立材料质量跟踪档案。

2.2 配合比设计与优化

依据原材料性能指标及混凝土技术要求,采用体积法进行配合比设计。水胶比确定为0.32,胶凝材料用量 $460\text{kg}/\text{m}^3$,其中水泥用量 $380\text{kg}/\text{m}^3$,粉煤灰掺量为胶凝材料总量的15%,硅灰掺量为5%。粗骨料采用5-10mm、10-20mm两种粒径组成,配比为4:6,总用量 $1100\text{kg}/\text{m}^3$ 。砂率为38%,减水剂掺量为胶凝材料量的1.2%。针对施工工艺要求,通过调整砂率、外加剂用量优化混凝土和易性。对配合比进行温度应力分析,降低水化热峰值,减少温度应力开裂风险。根据泵送性能要求,调整粗细骨料配比及粉煤灰掺量,确保混凝土具有良好的工作性和充填性。

2.3 性能测试与评价方法

遵循高性能混凝土评价标准,建立全面的性能测试体系。抗压强度测试采用标准养护试块,龄期分别为3d、7d、28d、56d,应用压力试验机进行测试。抗渗性能采用抗渗仪测试,水压4.0MPa,持续时间72小时。氯离子渗透性能采用电通量法测试,试件龄期28天。收缩变形采用标准收缩仪,测试期限90天。耐久性指标包括碳化深度、氯离子扩散系数、抗冻性能等。工作性能测试包括坍落度、扩展度、凝结时间、泌水率等。采用超声波检测仪评价混凝土密实度,应用钢筋雷达检测保护层厚度^[2]。

2.4 优化配合比确定

针对混凝土原材料性能差异及施工环境影响,对配合比进行动态优化。水胶比调整至0.31,胶凝材料用量增至 $470\text{kg}/\text{m}^3$,调整粉煤灰掺量至18%,减水剂用量增至1.3%。粗骨料5-10mm与10-20mm配比调整为4.5:5.5,总用量降至 $1080\text{kg}/\text{m}^3$,砂率提高至39%。优化后混凝土28天抗压强度达到75.6MPa,56天强度达到82.3MPa,抗渗等级提升至P14,氯离子电通量降至850库伦,收缩率控制在 2.8×10^{-4} 以内。满足施工泵送要求,坍落度经120分钟仍可保持在180mm以上,密实性良好,无离析泌水现象。

3 高性能混凝土的施工技术研究

3.1 搅拌工艺控制

施工现场配备HZS180型强制式搅拌站,采用分层投料工艺进行搅拌。投料顺序为:粗骨料→细骨料→水泥→粉煤灰→硅灰→70%拌合水→减水剂→余下拌合水。各种材料计量精度严格控制:粗细骨料 $\pm 2\%$,胶凝材料 $\pm 1\%$,水 $\pm 1\%$,外加剂 $\pm 1\%$ 。搅拌时间控制在240秒,其中干拌60秒,湿

拌180秒。根据气温变化,适时调整拌合用水温度,控制出机温度在25-28℃之间。严格控制含水率,每2小时测定砂石含水率一次,及时校正配合比。机械设备每班检查维护,确保搅拌叶片、衬板磨损量在允许范围内^[3]。每盘出机混凝土进行坍落度和扩展度检测,合格后方可使用。搅拌站配备自动控制系统,实现工艺参数自动监控和调节。

3.2 浇筑技术要点

主塔浇筑采用爬模施工工艺,单层浇筑高度3.5米。混凝土泵送采用两台HBT90型混凝土输送泵,布设DN125输送管道。输送管道采用保温措施,避免温度变化影响混凝土性能。浇筑前对钢筋、模板、预埋件进行质量检查,确保各项参数符合规范要求。混凝土浇筑采用分层浇筑法,每层厚度控制在50厘米,振捣采用插入式振捣器,振捣时间18-25秒。相邻两层浇筑时间间隔控制在2小时以内^[4]。浇筑过程中派专人观测模板位移和混凝土泌水情况。对后浇带、施工缝等特殊部位采取加强振捣措施。浇筑完成后及时对混凝土表面进行抹平收面,创造良好的结构面。施工缝处理采用人工凿毛和高压水冲毛相结合的方式。

3.3 养护方案优化

根据气候特点及混凝土性能要求,制定针对性养护方案。浇筑完成后立即覆盖土工膜进行保湿,养护用水温度控制在 $25\pm 2^\circ\text{C}$ 。主塔混凝土标准养护时间28天,前7天采用喷淋养护,喷淋时间间隔4小时;后21天铺设草袋覆盖洒水养护。养护期间采用测温系统监测混凝土内部温度,控制温度差小于 25°C 。表面温度与内部温度差控制在 15°C 以内。遇高温天气时,增加喷淋次数,设置遮阳棚,洒水降温。基础混凝土浇筑后,及时覆盖草袋进行保湿,养护用水采用地下水。同条件养护试块严格按照规范要求制作和养护。采用温度和湿度自动监测系统,实时监控养护环境。

3.4 质量控制措施

施工质量控制贯穿混凝土生产全过程,建立完整的质量管理体系。对进场原材料进行抽检,建立材料质量档案。混凝土拌合采用计算机自动控制系统,实现生产过程的精确控制。每工作班对坍落度、密实度等指标进行三次检测,每工作日进行一次强度试件制作。对施工过程中的关键工序和特殊部位制定专项施工方案,明确质量控制点。应用无线测温系统对混凝土温度进行实时监控,发现异常

及时处理^[5]。现场配备混凝土试验室,具备常规性能指标检测能力。采用二维码系统对混凝土浇筑部位进行信息化管理。严格执行见证取样制度,对重要结构构件进行力学性能检测。建立质量问题追溯机制,确保施工质量。

4 工程应用效果分析

4.1 强度发展规律

高性能混凝土在工程中表现出良好的强度发展特性。3天抗压强度达到设计强度的45%,7天强度达到设计强度的75%,28天强度达到设计强度的112%,56天强度达到设计强度的118%。早期强度增长迅速,满足施工进度要求。长期强度持续增长,90天抗压强度达到84.5MPa。受益于优化的配合比设计,实现了强度与和易性的统一。抗弯强度随龄期增长表现出相似规律,28天抗弯强度达到8.2MPa。劈拉强度28天达到5.4MPa,显著高于普通混凝土。弹性模量随强度增长而提高,28天弹性模量达到 4.2×10^4 MPa。内部组织致密,显微结构均匀,水化产物交联程度高,界面过渡区性能优异,为强度持续增长提供了微观基础。

4.2 耐久性能评价

主塔高性能混凝土在海洋环境中展现出优异的耐久性能。氯离子渗透电通量持续降低,180天电通量降至650库伦,360天降至580库伦。抗渗性能显著提升,抗渗等级达到P14,渗透系数低于 1.0×10^{-12} m/s。碳化深度发展缓慢,360天碳化深度仅为2.8mm,碳化系数0.15mm/ $\sqrt{d}$ 。混凝土内部孔结构优化,毛细孔隙率降至8.5%,孔径分布集中在50nm以下。抗冻性能提升明显,300次冻融循环后动弹性模量相对值保持在95%以上。钢筋保护层混凝土电阻率高于100k $\Omega \cdot$ cm,显著延缓钢筋锈蚀。掺合料的优异火山灰反应和填充效应,使混凝土具备自密实性能,降低了外界介质的侵蚀速率。

4.3 变形性能分析

高性能混凝土变形性能得到有效控制。28天干燥收缩率为 2.8×10^{-4} ,90天收缩率为 3.2×10^{-4} ,远低于普通混凝土。自收缩变形在前3天发展迅速,7天后趋于稳定,28天自收缩变形值为 2.1×10^{-4} 。混凝土徐变系数随荷载作用时间延长而增大,90天徐变系数为0.65,180天为0.82,360天为0.95。温度应力分析显示,主塔浇筑过程中温升峰值控制在48℃,降温速率控制在1.8℃/h,未出现温度裂

缝。主塔截面应力分布均匀,挠度变形满足规范要求。变形监测数据显示,主塔verticality误差控制在设计允许值范围内。

4.4 成本效益分析

高性能混凝土的应用显著提升了桥梁结构耐久性,延长了使用寿命。原材料成本较普通混凝土增加32%,但通过优化配合比和施工工艺,减少了后期维护成本。全寿命周期成本分析表明,维护费用降低45%,年均养护费用节约320万元。结构使用寿命由70年提升至100年,按折现率4.5%计算,年均效益提升25%。施工工期缩短15天,减少了人工、机械等间接成本。混凝土早强性能提高,加快了施工进度,创造经济效益850万元。优异的抗裂性能降低了修补加固费用,预计100年使用期内节约维修费用2800万元。综合分析表明,高性能混凝土应用产生的社会效益和经济效益显著,投资回报率达到280%。

结语

通过高性能混凝土在桥梁建设中的应用技术研究,成功解决了传统混凝土在实际工程中存在的诸多技术难题。研究成果表明,优化后的高性能混凝土配合比不仅显著提升了混凝土的力学性能和耐久性,而且在工程应用中展现出良好的经济效益。创新的施工工艺和完善的质量控制体系为高性能混凝土的规模化应用奠定了技术基础。这些研究成果对提升桥梁建设质量、延长使用寿命具有重要的指导意义,同时为高性能混凝土在其他土木工程领域的应用提供了有益参考。未来仍需加强高性能混凝土长期性能的跟踪研究,进一步完善相关技术标准。

参考文献:

- [1] 赵山. 高性能混凝土在公路桥梁建设中的应用[J]. 大众标准化, 2022, (07): 159-161.
- [2] 杨柳俊杰, 何昆. 高性能混凝土在公路桥梁建设中的应用[J]. 运输经理世界, 2022, (04): 148-150.
- [3] 于永恒. 高性能混凝土在桥梁建设中的应用分析[J]. 中国新技术新产品, 2020, (01): 108-109.
- [4] 王睿勋. 高性能混凝土在公路桥梁建设中的应用探讨[J]. 四川水泥, 2019, (08): 17.
- [5] 李铁刚. 刍议公路桥梁建设中高性能混凝土的应用[J]. 中国建材, 2018, (11): 134-136.