

# 超高性能混凝土在公路桥梁关键构件中的设计与施工技术

喻 虎

江西省交投养护科技集团有限公司 江西南昌 330200

**摘 要:** 超高性能混凝土(UHPC)凭借其卓越的强度、韧性与耐久性,在公路桥梁关键构件的应用中展现出显著的技术优势。其设计与施工技术是一个涵盖材料、结构、工艺的系统性工程。在设计层面,需根据桥梁跨度、荷载与环境进行构件选型与结构优化,并精确确定材料性能参数与配合比,同时重点关注节点连接的可靠性与全寿命周期的耐久性设计。在制备与运输环节,严格的原材料选择、高效均匀的搅拌工艺以及长距离运输中的质量控制,是保障材料性能稳定的关键。施工技术则聚焦于高精度的模板安装、分层连续的浇筑振捣以及严格的养护制度与早期强度管理,以确保构件的成型质量与密实度。这一整套从设计到施工的精细化技术体系,充分发挥了超高性能混凝土的材料潜力,对于提升公路桥梁的结构安全性、延长服役寿命、推动桥梁工程向轻量化、长寿命方向发展具有重要的实践价值。

**关键词:** 超高性能混凝土;公路桥梁;关键构件;施工技术

## 引言

随着交通荷载增长和基础设施耐久性要求提高,传统混凝土用于公路桥梁关键构件面临性能瓶颈。超高性能混凝土作为新型水泥基复合材料,以其超高力学性能、优异韧性和出色耐久性,为大跨度、重载及恶劣环境下桥梁构件设计与施工难题提供革命性材料方案。但 UHPC 性能优势的充分发挥,高度依赖精细化设计与施工技术,从构件选型优化到材料制备施工,每个环节都决定工程质量。因此,系统梳理和研究超高性能混凝土在公路桥梁关键构件中的设计与施工关键技术,对推动材料规模化应用、提升我国桥梁建设整体技术水平具有重大理论意义和紧迫现实需求。

### 1 超高性能混凝土在桥梁关键构件中的设计要点

#### 1.1 关键构件的选型与结构优化设计

公路桥梁关键构件选型要结合桥梁跨度、荷载等级、服役环境等因素,优先选超高性能混凝土适配性强的构件类型。大跨度桥梁主梁可用超高性能混凝土预制箱梁或 T 梁,利用其高强度减小构件截面、降低自重、减少配筋、简化施工;地震频发区或高荷载场景的桥墩,可选用超高性能混凝土实心墩或空心墩,利用其高韧性提升抗冲击与抗裂能力,避免传统混凝土桥墩易开裂问题。

结构优化设计围绕超高性能混凝土特性展开,注重构件受力合理性与经济性平衡。主梁设计用有限元分析软件模拟应力分布,优化截面形式,如将箱梁腹板厚度从 30cm 减

至 20cm,减轻自重;桥墩设计对墩身与基础连接部位局部加强,用超高性能混凝土浇筑过渡段,增强节点抗剪性能,避免结构破坏。此外,优化设计要考虑施工可行性,如预制构件尺寸需适配运输与吊装设备,避免增加施工难度<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 材料性能参数的确定与配比设计

超高性能混凝土材料性能参数确定以构件功能需求为核心,明确强度、韧性、耐久性等关键指标取值范围。对于桥梁主梁等受弯构件,立方体抗压强度不低于 120MPa,抗弯强度不低于 15MPa;对于桥墩等抗冲击构件,断裂能大于 15kJ/m<sup>2</sup>;对于沿海或高寒地区桥梁构件,快速氯离子迁移系数(RCM)小于  $1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ,抗冻等级不低于 F300。

配比设计要严格控制原材料用量与比例,平衡性能与成本。胶凝材料总量控制在 800 – 1000kg/m<sup>3</sup>,水泥占 50% – 60%,硅灰占 15% – 20%,粉煤灰或矿粉占 20% – 25%;骨料选粒径不超 10mm 的石英砂,砂率 40% – 45%;钢纤维体积掺量 2% – 3%,选用长度 12 – 18mm、直径 0.2 – 0.3mm 的平直型钢纤维;水胶比控制在 0.16 – 0.20,用高效减水剂(减水率不低于 35%)调节工作性,使初始坍落度达 200 – 250mm。配比确定后进行试配验证,检测相关指标,不达标则调整比例,直至满足设计要求。

#### 1.3 节点连接与耐久性设计考虑

节点连接设计要确保超高性能混凝土构件与其他构件可靠衔接,防止连接部位成为薄弱环节。预制主梁与桥墩

连接采用超高性能混凝土灌浆套筒,套筒内径比钢筋大 2 – 3mm,用同等级超高性能混凝土作灌浆料,灌浆压力 0.3 – 0.5MPa,使灌浆料充满间隙,保证钢筋与套筒有效粘结,连接部位抗拉强度不低于钢筋标准值。主梁与支座连接用超高性能混凝土支座垫石,厚度 15 – 20cm,表面平整度误差不超 2mm,通过预埋钢板连接,钢板与垫石间用环氧砂浆找平,增强稳定性。

耐久性设计从材料、结构、防护三方面着手延长构件寿命。材料上,优化胶凝材料与水胶比,降低孔隙率,提升抗渗性;结构上,加强易侵蚀部位截面;防护上,沿海桥梁构件涂渗透型防护涂料,干膜厚不低于 80  $\mu\text{m}$ ,阻隔氯离子和水分;定期检查节点连接,发现灌浆料开裂或钢板锈蚀,及时用环氧砂浆修补或除锈,确保连接性能稳定<sup>[2]</sup>。

## 2 超高性能混凝土的制备与运输技术

### 2.1 原材料选择与高性能配合比控制

原材料选择要严格控制质量,保证性能稳定。水泥选强度等级不低于 P · O 52.5 的硅酸盐水泥,3d 抗压强度不低于 28MPa、28d 抗压强度不低于 52.5MPa,安定性合格;硅灰符合国家标准,二氧化硅含量不低于 90%,比表面积不小于 15000 $\text{m}^2/\text{kg}$  石英砂选纯度不低于 95% 的天然石英砂,粒径 0.15 – 10mm,含泥量不超 0.5%;钢纤维用低碳钢丝制成,抗拉强度不低于 2800MPa,弯折 180° 不断裂;高效减水剂选聚羧酸系高性能减水剂,氯离子含量不超 0.1%,碱含量不超 10%。

配合比控制需建立全过程质量管控体系,确保实际与设计配比一致。原材料进场按批次检测,水泥、硅灰测强度与化学成分,石英砂测粒径与含泥量,钢纤维测抗拉强度与尺寸,不合格不用;搅拌前精准计量,误差控制在  $\pm 1\%$  内,水泥、硅灰、石英砂用重量法,水与减水剂用体积法;搅拌中实时监测工作性,坍落度低于设计值 10mm 以上,在不改变水胶比时适当增加减水剂;每拌 50 $\text{m}^3$  混凝土制作 1 组试件,测 28d 立方体抗压强度,强度波动超设计值 5% 需分析原因并调整配比<sup>[3]</sup>。

### 2.2 高效搅拌与均匀性保证技术

高效搅拌需选用专用搅拌设备,优化搅拌工艺参数。搅拌设备采用双卧轴强制式搅拌机,搅拌容量不低于 1 $\text{m}^3$ ,确保原材料充分混合;搅拌顺序遵循“骨料→胶凝材料→钢纤维→水与减水剂”的原则,先将石英砂、水泥、硅灰

投入搅拌机,干拌 120s,使胶凝材料均匀包裹骨料;再加入钢纤维,继续干拌 60s,避免钢纤维结团;最后加入水与减水剂的混合液,湿拌 180–240s,直至混凝土色泽均匀、无明显纤维外露,确保搅拌均匀性。

均匀性保证需通过工艺控制与检测验证实现。搅拌过程中控制搅拌转速在 25–30 $\text{r}/\text{min}$ ,转速过低易导致混合不充分,过高则易造成钢纤维折断;定期检查搅拌机叶片磨损情况,叶片磨损量超过 5mm 时及时更换,避免因叶片磨损导致搅拌效率下降;每批次混凝土搅拌完成后,在出料口不同位置取 3 份样品,检测坍落度与含气量,若坍落度差值超过 20mm 或含气量差值超过 0.5%,需延长搅拌时间或调整搅拌参数;制作混凝土试块时,从不同部位取样成型,检测 28d 抗压强度,若强度差值超过 5MPa,需排查搅拌工艺问题,确保混凝土均匀性达标。

### 2.3 长距离运输与现场质量控制

长距离运输需选用专用运输设备,控制运输时间与温度,保障混凝土性能。运输车辆采用带搅拌功能的混凝土罐车,罐车容积不低于 8 $\text{m}^3$ ,罐体内壁需光滑平整,避免混凝土粘结;运输前对罐车进行清洗,确保罐内无积水、残渣;运输过程中罐车保持 5–8 $\text{r}/\text{min}$  的低速转动,防止混凝土离析;运输时间控制在 120min 以内,若运输距离超过 30km,需在罐车内加入缓凝剂,缓凝时间根据运输时间调整,确保混凝土到场后初凝时间满足施工需求;夏季运输时在罐车外部包裹保温层,避免阳光直射导致温度升高,混凝土到场温度控制在 5–35 $^{\circ}\text{C}$ ,超出范围时需采取降温或升温措施<sup>[4]</sup>。

现场质量控制需在混凝土到场后及时检测与调整。到场后首先检测坍落度,若坍落度低于 180mm,需在专业人员指导下加入适量减水剂(每  $\text{m}^3$  混凝土减水剂用量不超过设计用量的 5%),快速搅拌 60s 后重新检测,直至坍落度达标;检测含气量,标准值控制在 2%–4%,含气量过高需通过振动排除部分气泡,过低则需检查搅拌工艺;制作抗压强度试块,每 100 $\text{m}^3$  混凝土制作 3 组试块,分别检测 3d、7d、28d 强度,跟踪混凝土强度发展情况;对到场混凝土进行外观检查,若出现明显离析、泌水或钢纤维结团现象,严禁使用,需退回搅拌站处理。

## 3 超高性能混凝土关键构件的施工技术

### 3.1 模板工程与高精度安装技术

模板工程需选用高强度、高刚度的模板材料,确保浇

筑过程中模板不变形。预制主梁模板采用钢模板,面板厚度不低于 6mm,肋板间距不超过 30cm,模板整体刚度需满足在混凝土侧压力作用下,变形量不超过模板跨度的 1/500;模板拼接处采用螺栓连接,螺栓间距不超过 20cm,接缝处粘贴 5mm 厚的海绵条,防止漏浆;模板内表面需打磨光滑,平整度误差不超过 1mm/m,涂刷专用脱模剂,脱模剂采用水性脱模剂,涂刷均匀,避免漏涂或堆积。

高精度安装需通过测量控制与调整实现。安装前对模板基础进行处理,基础平整度误差不超过 3mm,采用水泥砂浆找平;利用全站仪与水准仪进行模板定位,预制主梁模板的轴线偏差控制在  $\pm 2\text{mm}$ ,高程偏差控制在  $\pm 1\text{mm}$ ;安装过程中采用临时支撑固定模板,支撑间距根据模板重量与混凝土侧压力计算确定,确保支撑稳固;模板安装完成后进行验收,检查轴线、高程、平整度等指标,验收合格后方可进行浇筑;浇筑过程中安排专人监测模板变形,若变形量超过允许值,立即停止浇筑,调整支撑后再继续施工。

### 3.2 浇筑、振捣与密实度控制

浇筑工艺需遵循分层浇筑、连续施工的原则,避免出现施工缝。预制主梁浇筑时,分层厚度控制在 30–50cm,采用布料机均匀布料,布料速度控制在  $1\text{--}2\text{m}^3/\text{min}$ ,避免混凝土堆积;每层浇筑完成后需在 30min 内开始下一层浇筑,确保上下层混凝土结合紧密;浇筑至模板顶部时,需超出设计标高 5–10mm,预留后期凿毛余量;浇筑过程中避免混凝土直接冲击模板或钢筋,采用溜槽或导管引导混凝土下落,下落高度不超过 2m,防止混凝土离析。

振捣需选用高频振捣设备,控制振捣时间与频率,确保混凝土密实。采用插入式振捣棒,振捣棒直径为 30–50mm,振捣频率为 8000–12000r/min;振捣时遵循“快插慢拔”的原则,插入深度超过下层混凝土 50mm,振捣间距不超过振捣棒作用半径的 1.5 倍(约 30–40cm);每个振捣点振捣时间控制在 20–30s,直至混凝土表面无明显气泡冒出、出现泛浆现象,避免过振导致钢纤维上浮或混凝土离析;振捣过程中避免振捣棒碰撞模板、钢筋或预埋件,防止模板变形或预埋件移位<sup>[5]</sup>。

密实度控制需通过工艺优化与检测验证实现。浇筑前检查模板密封性,对螺栓松动或海绵条破损处及时处理,防止漏浆导致密实度下降;振捣完成后采用平板振捣器对构件表面进行二次振捣,消除表面气泡,提升表面密实度;制作

混凝土芯样试件,每  $200\text{m}^3$  混凝土钻取 3 个芯样,检测芯样密度与孔隙率,密度需不低于  $2400\text{kg}/\text{m}^3$ ,孔隙率不超过 5%;对构件表面进行外观检查,若出现蜂窝、麻面等缺陷,需采用同配比水泥砂浆修补,修补后进行养护,确保密实度达标。

### 3.3 养护制度与早期强度管理

养护制度需根据超高性能混凝土的强度发展特性制定,确保早期强度稳定增长。浇筑完成后 12h 内覆盖保湿膜与土工布,保持混凝土表面湿润;采用蒸汽养护时,养护温度控制在 40–50℃,升温速率不超过  $10^\circ\text{C}/\text{h}$ ,恒温养护时间为 48–72h,降温速率不超过  $5^\circ\text{C}/\text{h}$ ,避免温度骤变导致混凝土开裂;自然养护时,每日浇水次数不少于 4 次,养护时间不少于 14d,养护期间环境温度不低于 5℃,低于 5℃时需采取覆盖保温措施。

早期强度管理需通过强度监测与施工安排协同推进。浇筑后 3d 检测混凝土立方体抗压强度,需达到设计强度的 50% 以上,方可拆除侧模;7d 强度需达到设计强度的 70% 以上,方可拆除底模与支撑;28d 强度需达到设计强度的 100%,方可进行构件吊装或后续施工;若早期强度增长缓慢,需分析原因——若因养护温度过低,需提高养护温度;若因配比问题,需调整胶凝材料比例;强度未达标前严禁施加荷载,避免构件产生裂缝。此外,建立早期强度监测台账,记录不同养护条件下的强度发展数据,为后续工程养护方案优化提供参考。

## 4 结语

超高性能混凝土在公路桥梁关键构件中的应用,代表了桥梁工程领域向高性能、长寿命方向发展的前沿探索。其成功实践的核心,在于将一种先进的材料,通过一套科学、严谨、精细化的技术体系,转化为可靠的工程实体。从设计阶段的精准计算与优化,到施工环节的毫厘必争与过程控制,无不体现出现代工程对质量与性能的极致追求。这种技术模式的推广,不仅能够显著提升新建桥梁的品质,也为既有桥梁的加固与维护提供了更优选择。随着材料科学的不断进步和施工工艺的持续创新,超高性能混凝土的应用将更加成熟与经济,为构建更加安全、耐久、绿色的交通基础设施网络提供坚实的技术支撑,引领桥梁工程迈向一个新的发展阶段。

**参考文献:**

- [1] 刘玉刚. 高性能混凝土技术在道路桥梁工程施工中的应用 [J]. 今天, 2020(16):1.
- [2] 李兴荣. 预应力技术在公路桥梁施工中的常见问题及解决对策 [J]. 交通世界, 2021(21):9-11.DOI:10.3969/j.issn.1006-8872(x).2021.07.004.
- [3] 蔡彦杰, 束爽, 陈辉, 等. 预应力施工技术在公路桥梁中的应用 [J]. 建筑结构, 2022.DOI:10.26789/jzjg.v7i1.875.
- [4] 李永冉. 高性能混凝土技术在道路桥梁工程施工中的应用探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2021(3):2.
- [5] 马斌, 陈晓飞, 丁志文, 等. 超高性能混凝土在桥梁工程中的应用 [J]. 合成材料老化与应用, 2021(006):050.