

新型高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用研究

杨晓凤

云南交投集团公路建设有限公司 云南 昆明 650200

【摘要】：传统混凝土在公路桥梁施工中存在耐久性差、强度不足、施工缺陷多等问题，本文以新型高性能混凝土为研究对象，通过分析其材料特性，结合公路桥梁施工实际场景，系统探讨其应用价值与实践路径。首先阐述新型高性能混凝土高强度、高耐久性的核心特点；其次剖析当前公路桥梁混凝土施工中普遍存在的蜂窝气穴、孔道流浆、裂缝、强度不足四大典型问题及成因。最后结合工程案例，从桥梁主梁、桥墩、桥面铺装、预应力孔道灌浆四个关键施工环节，说明新型高性能混凝土的应用方法与效果。研究表明，新型高性能混凝土可显著提升公路桥梁结构承载力、延长使用寿命、减少施工缺陷发生率，为公路桥梁工程质量提升提供技术支撑，具有重要的工程实践与推广价值。

【关键词】：新型高性能混凝土；公路桥梁施工；施工缺陷；结构耐久性；工程应用引言

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.048

随着交通量增长与重载车辆比例提升，传统混凝土已难以满足现代公路桥梁高承载、长寿命的需求。新型高性能混凝土作为新一代建筑材料，通过优化骨料级配、掺入矿物掺合料、采用高效减水剂，实现了材料性能的突破性提升，其抗压强度可达 C60~C120，抗渗等级 \geq P12，抗冻等级 \geq F300，且工作性优异。近年来，HPC 在我国港珠澳大桥、京沪高铁桥梁等重大工程中成功应用，验证了其在复杂工程场景中的可靠性。本文通过系统分析 HPC 的材料特点，结合公路桥梁施工中的典型问题，探讨其具体应用方式与效果，为公路桥梁工程技术升级提供参考。

1 新型高性能混凝土的特点

新型高性能混凝土区别于传统混凝土的核心优势，源于其“材料组分优化+制备工艺革新”的双重突破，具体表现为四大核心特点，且各项性能指标均符合《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650-2020)中对高性能混凝土的技术要求，具体如下。

1.1 满足重载桥梁承载需求

新型高性能混凝土通过低水胶比 0.20~0.35+活性矿物掺合料协同作用，实现高强度特性。其立方体抗压强度普遍可达 C60~C100，轴心抗压强度较传统混凝土提升 30%~50，轴心抗拉强度提升 25%~40。例如，C80 高性能混凝土的 28d 立方体抗压强度 \geq 80MPa，轴心抗压强度 \geq 65MPa，可满足大跨径连续梁桥、刚构桥主梁的高承载需求。在某跨径 50m 的公路连续梁桥施工中，采用 C80 高性能混凝土替代传统 C50 混凝土，主梁截面尺寸可缩减 20%，既减轻结构自重，又降低基础荷载。此外，HPC 的早期强度发展快，7d 强度可达 28d 强度的 70%~80，可缩短桥梁施工养护周期，加快工程进度。

1.2 抵御复杂环境侵蚀

公路桥梁长期暴露于自然环境中，需承受雨水、冻融、盐雾、碳化等多重侵蚀，而新型高性能混凝土通过密实微观结构+抗侵蚀组分提升耐久性。低水胶比与硅灰的填充作用使凝

土孔隙率降至 10%以下，抗渗等级可达 P12~P16，较传统混凝土 P6~P8 提升 2~3 个等级，可有效阻止水分、氯离子渗入，避免钢筋锈蚀；引入引气剂形成均匀分布的微小气泡，直径 50~200 μ m，缓冲冻融循环产生的体积膨胀，抗冻等级 \geq F300，在北方严寒地区桥梁施工中，可将冻融破坏寿命从传统混凝土的 15 年延长至 50 年以上；HPC 的水化产物密实度高，碳化速度仅为传统混凝土的 1/3~1/5，在 CO₂ 浓度较高的工业区域桥梁中，可延缓混凝土中性化进程，保护钢筋骨架。

1.3 适配复杂施工场景

公路桥梁施工中，主梁、预应力孔道等构件截面复杂、钢筋密集，对混凝土工作性要求极高。新型高性能混凝土通过掺入聚羧酸系高效减水剂，减水率 \geq 30%，在低水胶比下仍能保持优异的流动性与和易性：其初始坍落度可达 200~250mm，扩展度 \geq 500mm，且经时损失小，1h 坍落度损失 \leq 30mm，无需强力振捣即可充满模板角落与钢筋间隙，尤其适用于大体积桥梁承台、薄壁桥墩等难以振捣的构件施工。例如，在某公路斜拉桥索塔施工中，采用坍落度 220mm 的 C70 高性能混凝土，通过泵送施工可实现 30m 高度垂直输送，且混凝土密实度达 99.5%以上，无蜂窝、麻面缺陷。

1.4 性能指标对比

为清晰呈现新型高性能混凝土与传统混凝土的差异，下表列出两者核心性能指标对比。

表 1 传统混凝土与新型高性能混凝土核心性能指标对比

性能指标	传统混凝土指标	新型高性能混凝土指标	依据标准
28d 立方体抗压强度	\leq 50MPa	C60~C120MPa	GB/T35156-2023
抗渗等级	\leq P8	P12~P16	JTG/T3650-2020
抗冻等级	\leq F200	\geq F300	JTG/T3650-2020
初始坍落度	\leq 150mm	200~250mm	GB/T50080-2016

28d 干燥收缩率	≥0.04%	≤0.02%	GB/T50082-2009
轴心抗拉强度	≤3.5MPa	4.5~6.0MPa	GB/T50081-2019

2 公路桥梁混凝土施工存在的问题

当前公路桥梁混凝土施工中,受材料性能局限、施工工艺不规范、环境因素影响,传统混凝土易出现各类缺陷,不仅影响结构外观,更威胁桥梁承载安全与耐久性,其中以蜂窝气穴、孔道流浆、裂缝、强度不足四类问题最为突出。

2.1 蜂窝和气穴问题

蜂窝和气穴是混凝土表面或内部出现的孔洞、空隙缺陷,多分布于桥梁主梁腹板、桥墩阴阳角等部位。传统混凝土工作性差,坍落度≤150mm,扩展度≤350mm,在钢筋密集区域难以流动,易形成空隙;振捣工艺不规范,振捣时间不足≤20s/点导致混凝土未充分密实,或振捣棒插入深度不够未达下层混凝土50mm,形成分层空隙;模板拼接缝隙过大≥2mm或表面未涂脱模剂,混凝土浆液流失,形成蜂窝状孔洞。

2.2 孔道流浆问题

孔道流浆常见于预应力混凝土桥梁施工中,指预应力孔道灌浆时,水泥浆从孔道缝隙渗漏至梁体内部或外部的现象。传统水泥浆水灰比≥0.45,流动性差、保水性弱,在长孔道≥20m灌浆中易出现离析,浆体中的水分渗出形成流浆;波纹管安装时接头未密封,缝隙≥1mm,或波纹管被钢筋戳破,导致灌浆时浆体从破损处渗漏;灌浆压力控制不当≤0.3MPa,浆体无法充满孔道,或灌浆顺序错误从一端单向灌浆,孔道内空气未排出,形成空鼓与流浆通道。孔道流浆会导致预应力筋与混凝土握裹力下降,例如预应力连续梁桥因孔道流浆,梁体出现下挠超标问题;同时未充满的孔道易积水,引发预应力筋锈蚀,严重时导致筋体断裂。

2.3 裂缝问题

裂缝是公路桥梁混凝土最常见的耐久性缺陷,按成因可分为温度裂缝、收缩裂缝、荷载裂缝三类。传统混凝土水化热峰值高≥70℃,在大体积桥梁承台厚度≥2m施工中,内部与表面温差≥25℃,产生温度应力,当应力超过混凝土抗拉强度≤2.5MPa时,形成贯穿性裂缝,宽度≥0.2mm;传统混凝土干燥收缩率高≥0.04%,在桥面铺装厚度≤10cm施工后,若养护不及时≤7d,表面水分快速蒸发,易出现网状收缩裂缝。

2.4 强度不足问题

强度不足指混凝土28d强度未达到设计要求,如设计C50实际仅达C40,主要影响桥梁结构承载能力。材料质量层面水泥强度等级不足,如设计用P.O42.5实际用P.O32.5、骨料级配不良,石粉含量≥5%、外加剂掺量错误,减水剂掺量≤0.5%,导致混凝土强度降低;配合比层面传统混凝土配合比设计粗放,水灰比控制不严,实际水灰比≥0.5,设计≤0.4,或矿物

掺合料掺量过高,粉煤灰掺量≥30%,影响强度发展;养护温度过低≤5℃或湿度不足,相对湿度≤70%,混凝土水化反应不充分,例如某公路桥墩施工后未覆盖养护,养护期仅3d,28d强度较设计值低18%。

3 新型高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用

3.1 桥梁主梁施工中的应用

桥梁主梁是承受车辆荷载的核心构件,对混凝土强度、耐久性、工作性要求极高,新型高性能混凝土可通过以下方式优化施工效果。根据主梁受力需求,选用C60~C80高性能混凝土,配合比设计采用低水胶比0.25~0.32+硅灰掺量5%~8%+聚羧酸减水剂掺量1.0%~1.5%,确保混凝土28d抗压强度≥60MPa,坍落度200~220mm,满足主梁钢筋密集区域钢筋间距≤100mm的流动与密实需求;利用HPC高工作性特点,采用泵送施工,水平输送距离≥50m,振捣时间控制在30~40s/点,振捣棒插入深度达下层混凝土50~100mm,避免蜂窝气穴;同时,HPC低热特性,水化热峰值≤55℃可减少主梁腹板温度裂缝,某跨径30m的公路T梁桥采用C70高性能混凝土,腹板裂缝发生率从传统混凝土的35%降至5%以下。

3.2 桥墩施工中的应用

桥墩承受竖向荷载与水平地震力,需具备高强度、高抗裂性。针对大体积桥墩承台厚度≥3m采用C60高性能混凝土,掺入30%~40%超细粉煤灰,降低水化热峰值≤50℃,控制内外温差≤20℃,配合分层浇筑,每层厚度≤500mm与通水冷却,避免温度裂缝。针对薄壁桥墩壁厚≤300mm利用HPC高工作性,扩展度≥500mm,采用免振捣自密实工艺,混凝土可自行填充模板与钢筋间隙,密实度达99.8%以上,解决薄壁构件振捣困难导致的蜂窝问题。

3.3 桥面铺装施工中的应用

桥面铺装直接承受车辆磨损与环境侵蚀,采用C60高性能混凝土,掺入10%~15%钢纤维,长度12~15mm,提升抗折强度≥6MPa与耐磨性,磨耗量≤3kg/m²,同时控制干燥收缩率≤0.02%,减少铺装层裂缝;桥面铺装层浇筑时,利用HPC高流动性,坍落度200mm,采用摊铺机一次成型,摊铺厚度8~10cm,初凝前进行拉毛处理,纹理深度0.8~1.2mm,提升抗滑性能;养护阶段采用覆膜保湿,养护期≥14d,确保强度充分发展;

3.4 预应力孔道灌浆中的应用

新型高性能混凝土衍生的高性能灌浆料基于HPC原理优化的水泥基灌浆材料,可解决传统孔道流浆问题。采用低水胶比0.28~0.32+硅灰5%+膨胀剂3%~5%+高效减水剂1.2%,制备的灌浆料流动度≥300mm,30min流动度损失≤20mm,保水性≥95%,避免离析流浆;采用真空辅助灌浆工艺,先对孔道抽真空,真空度≤-0.08MPa,排出空气,再从一端加压灌浆,

压力 0.4~0.6MPa，确保浆体充满孔道；某预应力箱梁桥采用该方案，孔道灌浆密实度达 98%以上，预应力损失仅 5%，远低于传统灌浆工艺的 15%。高性能灌浆料抗渗等级 \geq P12，抗冻等级 \geq F300，可阻止水分渗入孔道，预应力筋无锈蚀，灌浆体与孔道粘结完好。

4 工程案例分折

4.1 工程概况

本案例源自 G85 银昆高速寻甸（功山）至嵩明（小铺）段改扩建工程，为跨越现有 G85 高速公路，项目共设 10 座车行天桥，跨径均为 50m。天桥核心结构采用钢-UHPC 组合梁形式，涉及超高性能混凝土（UHPC）用量共计 840m³，其中现浇 UHPC 用量 130m³，预制 UHPC 用量 710m³，主要应用于桥面板制作及安装、现浇接缝工程。该工程地处交通繁忙路段，施工需兼顾结构施工质量、施工效率及既有高速公路通行安全，对 UHPC 的施工适配性、力学性能及耐久性提出极高要求。

4.2 传统施工痛点

钢-混凝土组合梁桥面板及接缝施工中，若采用传统 C50 混凝土方案，会面临多重技术难题。其一，桥面板接缝及预制构件拼接处为应力集中区域，传统混凝土抗拉强度不足 3.5MPa，且收缩变形大，极易产生宽度 \geq 0.2mm 的贯穿性裂缝，严重影响结构防水性与耐久性；其二，预制桥面板生产及现浇接缝养护受现场条件限制，传统混凝土 28d 强度达标率仅 85%，难以满足钢-UHPC 组合结构对材料强度的协同要求；其三，传统水泥浆孔道灌浆方案水灰比达 0.45，保水性差、泌水率高，灌浆密实度不足 75%，导致预应力损失超 15%，削弱结构承载稳定性；此外，传统混凝土自重较大，会增加桥梁整体荷载，与组合梁轻量化设计理念相悖。

4.3 UHPC 应用方案

针对传统混凝土方案的核心痛点，结合项目钢-UHPC 组合梁的结构特性，定制全套 UHPC 应用及智能化施工方案。材料选型方面，采用专用预制及现浇型 UHPC，其中预制桥面板用 UHPC 设计强度 \geq 120MPa，现浇接缝用 UHPC 设计强度 \geq 110MPa，水胶比控制在 0.20~0.24，掺入适量钢纤维（体积率 2%~3%）及复合矿物掺合料，自由收缩率 \leq 0.008%，兼具高韧性、高耐久性 & 微膨胀特性，可有效补偿收缩、抑制裂缝。

施工工艺方面，预制桥面板采用工厂标准化生产，配备专用模具与振动台，控制浇筑温度在 10~25℃，浇筑完成后经蒸汽养护（升温速率 \leq 20℃/h，恒温 60~70℃ 养护 4~6h），确保构件强度快速达标；现浇接缝施工前，对钢界面及预制板连接面进行抛丸处理，采用“劲性骨架定位+温度窗口期浇筑”工艺，选择气温 15~20℃ 的夜间进行浇筑，避免温差应力导致裂缝；养护阶段采用智能恒温恒湿养护系统，预制构件养护期 \geq 7d、现浇接缝养护期 \geq 14d，养护期间相对湿度 \geq 95%，同步布

设温度传感器与应力传感器，实时监测 UHPC 浇筑、养护及运营初期的温度与应力变化，数据反馈频率达 1 次/小时，及时调整养护参数。此外，针对预应力孔道灌浆问题，采用 UHPC 专用灌浆材料（水胶比 0.22），搭配真空辅助灌浆工艺，确保灌浆过程无气泡、无泌水，提升孔道密实度。

4.4 实施效果

本项目 10 座车行天桥 UHPC 构件及现浇接缝施工完成后，经第三方检测，各项指标均远超规范要求，核心问题得到彻底解决。具体表现为：UHPC 构件及接缝处内外温差控制在 15℃ 以内，表面裂缝宽度 \leq 0.03mm，无任何贯穿性裂缝，裂缝发生率仅 5%（且为微裂缝，不影响结构性能）；预制桥面板 28d 抗压强度均值达 132MPa，现浇接缝 28d 抗压强度均值达 118MPa，强度达标率 100%；预应力孔道灌浆密实度达 99%，预应力损失率降至 3.2%；同时，UHPC 材料自重较传统混凝土降低约 30%，有效减轻桥梁整体荷载，契合组合梁轻量化设计需求。具体效果对比见表 2。

表 2 UHPC 与传统混凝土施工效果对比表

评估指标	UHPC 应用效果	传统混凝土方案效果	提升/改善幅度
构件内外温差	$\leq 15^\circ\text{C}$	$\geq 30^\circ\text{C}$	温差控制幅度提升 50%
表面裂缝宽度	$\leq 0.03\text{mm}$ （无微贯穿裂缝）	普遍出现 $\geq 0.2\text{mm}$ 贯穿裂缝	裂缝宽度降低 85%，无贯穿裂缝
裂缝发生率	$\leq 5\%$ （仅微裂缝）	$\geq 35\%$	发生率降低 85.7%
混凝土 28d 强度均值	预制 132MPa/现浇 118MPa	$\leq 50\text{MPa}$	强度提升 136%~176%
混凝土强度达标率	100%	85%	达标率提升 15 个百分点
预应力孔道灌浆密实度	99%	$\leq 75\%$	密实度提升 32%
预应力损失率	3.2%	15%	损失率降低 78.7%
材料自重	较传统混凝土降低 30%	常规自重	轻量化效果显著，减负 30%

5 结语

新型高性能混凝土凭借高强度、高耐久性、高工作性、高体积稳定性的核心优势，为公路桥梁施工中的蜂窝气穴、孔道流浆、裂缝、强度不足等传统问题提供了系统性解决方案。从工程实践来看，其在桥梁主梁、桥墩、桥面铺装、预应力孔道灌浆中的应用，可使桥梁结构承载力提升 30%~50%、耐久性寿命延长至 50 年以上、施工缺陷率降低 60%以上，显著提升公

路桥梁工程质量与经济效益。尽管新型高性能混凝土材料成本较传统混凝土高 15%~20%，但从全生命周期角度看，其可减少桥梁运维费用，年均维修成本降低 40%，延长服役周期，从 20~30 年至 50 年以上，综合效益显著。随着绿色建材技术发展，

新型高性能混凝土将向低碳化掺入工业固废 $\geq 50\%$ 、功能化自修复自感知方向升级，进一步拓展其在公路桥梁施工中的应用场景，为交通基础设施高质量发展提供更强有力的技术支撑。

参考文献：

- [1] 杨一苓.高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用研究[J].工程与建设,2024,38(04):906-907+913.
- [2] 周林奇.高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用[J].运输经理世界,2024,(17):69-71.
- [3] 唐凌.高性能混凝土技术在公路桥梁工程施工中的应用研究[J].居业,2023,(11):10-12.
- [4] 杨广.高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用[J].散装水泥,2023,(03):170-172.
- [5] 韩武松.高性能混凝土在公路桥梁施工中的应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(07):127-128.