

# 桥梁混凝土配比优化及温控养护技术研究

杨恩总, 李跃飞

(云南交投集团云岭建设有限公司, 昆明 650000)

**摘要:** 为提高城市桥梁工程混凝土抗压强度并优化温控养护工艺, 满足桥梁建设对材料性能和施工质量要求, 以某 800 m 现浇混凝土桥梁为对象, 研究桥梁混凝土配比优化及温控养护技术。通过试验分析配比参数对混凝土抗压强度的影响, 优化确定混凝土配比。在 60 °C 恒温 72 h 条件下结合蒸汽养护技术以及分层浇筑与精准振捣工艺完成施工。利用实时监测技术对比了不同粉煤灰掺量、温控养护参数下的混凝土性能。结果表明: 通过配比优化与温控养护技术, 桥梁混凝土在 90 d 龄期时抗压强度均超过 400 MPa, 各监测点极差仅 3.06 MPa, 120 d 后强度增长趋于稳定, 增幅 $\leq 0.5\%$ ; 位移量控制在 3.5 mm 以内且无结构性裂缝, 验证了该技术能有效提升混凝土强度发展均匀性和体积稳定性, 满足高标准施工要求, 为城市桥梁工程的高质量建设提供了可靠的技术保障。

**关键词:** 桥梁工程; 混凝土配比; 温控养护; 抗压强度; 性能稳定性

中图分类号: U445.57 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0067-04

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.011

## Research on Optimization of Concrete Mix Proportion and Temperature Control Maintenance Technology for Bridges

YANG Enzong, LI Yuefei

(Yunling Construction Co., Ltd., of Ycic Group, Kunming 650000, China)

**Abstract:** In order to improve the compressive strength of concrete in urban bridge engineering and optimize the temperature control curing process to meet the material performance and construction quality requirements of bridge construction, this study focuses on the optimization of concrete mix proportion and temperature control curing technology for a certain 800m cast-in-place concrete bridge. Optimize and determine the concrete mix ratio by analyzing the influence of mix parameters on the compressive strength of concrete through experiments. The construction is completed under the condition of constant temperature of 60 °C for 72 hours, combined with steam curing technology and layered pouring and precise vibration technology. Real time monitoring technology was used to compare the performance of concrete under different fly ash dosages and temperature controlled curing parameters. The results showed that through ratio optimization and temperature control curing technology, the compressive strength of bridge concrete exceeded 400 MPa at 90 days of age, with a range of only 3.06 MPa at each monitoring point. After 120 days, the strength growth tended to stabilize, with an increase of  $\leq 0.5\%$ ; The displacement is controlled within 3.5 mm and there are no structural cracks, which verifies that this technology can effectively improve the uniformity of concrete strength development and volume stability, meeting high standard construction requirements, and provide reliable

作者简介: 杨恩总 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路工程建设及管理。

通信作者: 李跃飞 (1984—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程建设及管理。

收稿日期: 2025-01-17

## 材料科学

technical support for the high-quality construction of urban bridge engineering.

**Key words:** bridge engineering; concrete mix proportion; temperature-controlled curing; compressive strength; performance stability

### 0 引言

混凝土的抗压强度直接影响着桥梁的承载能力、耐久性能和使用寿命<sup>[1-2]</sup>。特别是在现浇混凝土桥梁施工中,如何通过优化配比设计和温控养护工艺来提升混凝土性能,已成为当前桥梁工程领域的研究热点<sup>[3-4]</sup>。

潘成文<sup>[5]</sup>以预制 T 梁为研究对象,总结混凝土搅拌工艺要点,分析浇筑技术并提出雨、冬季施工质量保证措施,探讨养护施工技术;覃正秋<sup>[6]</sup>依工程需求选材料,按配合比拌合混凝土,分层浇筑振捣,养护后严格验收;王涛<sup>[7]</sup>从前期准备、确定配合比、混合料拌和、微表处摊铺、微表处封层等方面,研究了高速公路桥梁桥面铺装养护微表处技术;赵健业等<sup>[8]</sup>针对拱座等施工过程,分阶段浇筑大体积混凝土,控制每层高度,加强振捣,监控水化热及环境温度,运用温控技术防开裂,后期智慧养护、编码检测;李育文等<sup>[9]</sup>结合景洪市大桥施工,用高堆积密度及表观密度集料、优化配合比,通过合理施工保障技术指标;江东等<sup>[10]</sup>采用有限元软件模拟连续刚构桥 0#块混凝土早期温度场,分析箱梁水化热与环境温度耦合影响及截面温度场时变规律。该研究在验证模型准确性后,对养护工艺参数展开分析并给出了相关建议。马利等<sup>[11]</sup>研究了砂率、碎石比例和矿渣粉掺量对高强泵送混凝土工作性能和力学性能的影响,进行了高强泵送混凝土配合比的设计及优化;Zhu 等<sup>[12]</sup>对龙潭长江北塔 C55 高流动性泵送大体积混凝土配合比展开深入研究,提供了高强度、高流动性大体积混凝土设计方法及实践依据,以保障项目安全耐久性;张勇杰等<sup>[13]</sup>从指标设计、配合比设计、施工工艺、养护等方面阐述了高性能混凝土在道路桥梁工程中的应用要点;袁晓坡<sup>[14]</sup>通过配合比工艺优化、冷却水管理设、混凝土浇筑与优化、表面处理、混凝土养护、温度控制实现了高速公路建设中桥梁承台施工和养护;唐曾智等<sup>[15]</sup>以某地下工程中 C100 高强大体积混凝土应用为对象,

从施工环境出发研究其配合比设计,并通过多种温度控制技术解决大断面施工中的水化热温升控制及温度裂缝问题以确保施工质量;姜翠翠等<sup>[16]</sup>介绍了超缓凝混凝土性能优势与影响因素,阐述了其在道路桥梁施工中的应用要求,并探究了该混凝土在道路桥梁工程中的具体应用。以上研究为桥梁工程建设提供了思路。

分析现有研究可知,其仍面临一些技术挑战如施工质量受环境因素影响、模板加固困难、浇筑过程难以精确控制等技术挑战。基于此背景,针对某现浇混凝土桥梁工程,通过开展正交试验优化混凝土配比,采用蒸汽养护技术,结合分层浇筑与精准振捣工艺,系统研究了高强混凝土的制备与施工技术。

### 1 工程概况

以某城市现浇混凝土桥梁为研究对象。该桥为连续梁结构,呈东西走向横跨河流,全长 800 m,总宽度为 40 m。桥面两侧分别设置了宽度为 2 m 的人行道;中间部分为双向八车道。桥梁主跨跨度为 120 m,边跨跨度为 60 m。桥梁下部结构采用钢筋混凝土墩柱,基础为钻孔灌注桩。

### 2 配合比设计及温控养护技术

#### 2.1 试验材料

采用 P·O 52.5 级硅酸盐水泥;中砂细度模数 2.3~3.0,含泥量 $\leq 3\%$ ;石子为 5~31.5 mm 连续级配的碎石,压碎指标 $\leq 10\%$ ;I 级粉煤灰烧失量 $\leq 5\%$ 、需水量比 $\leq 95\%$ ;高效减水剂减水率 $\geq 20\%$ 。具体的配制方案见表 1。

表 1 C40 混凝土配合比方案

Table 1 C40 concrete mix design proposal / (kg/m <sup>3</sup> )							
材料	水泥	砂子	石子	粉煤灰	外加剂	水胶比	水
优化前用量	380	720	1 100	70	4.5	0.42	189
优化后用量	320	750	1 070	80	5.0	0.40	160

#### 2.2 试验仪器设备

施工过程中,选择以下专业施工设备:KLM1500 型混凝土搅拌站、PC4500 型混凝土搅拌机、ZLJ5339THB 49X-6RZ 混凝土泵车、ZN50 型混凝土

振捣器、MG-200 型混凝土抹光机、QY50K-II 型起重器、MQ125 型龙门吊、GQ40 型钢筋切割机、HBT80 型混凝土输送泵以及 KM4800 型缆索起重机。

### 2.3 正交试验分析

通过正交试验对配比参数对强度敏感性进行分析见表 2。

表 2 配比参数对强度的敏感性分析结果  
Table 2 Sensitivity analysis results of strength to mix proportion parameters

试验编号	水泥用量 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粉煤灰掺量 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	外加剂用量 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水胶比
1	230	786	7.1	0.45
2	250	750	6.8	0.42
3	210	800	7.4	0.48
4	230	786	7.1	0.45
5	250	750	6.8	0.42
6	210	800	7.4	0.48
7	230	820	7.1	0.45
8	250	780	6.8	0.42
9	210	760	7.4	0.48

### 2.4 温控养护技术

选用蒸汽养护方式对其养护, 其具体养护过程见表 3。

表 3 混凝土蒸汽温控养护参数

养护阶段	养护时间/h	养护温度/ $^{\circ}\text{C}$	变温速度/ $(^{\circ}\text{C}/\text{h})$
静停	4~6	5	无
升温	48	10	10
恒温	72	60	1
降温	96	65	10

### 2.5 监测点设置

在混凝土边上放置监测点, 实时监测混凝土的抗压强度、位移变化。其监测点的放置如图 1 所示。

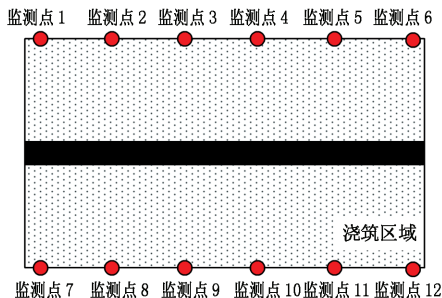


图 1 监测点设置

Fig. 1 Monitoring point setup

## 3 试验结果与分析

### 3.1 抗压强度分析

设置两组对比试验。试验组 1 调整了恒温时间, 由原本的 72 h 缩短至 60 h; 试验组 2 提高了恒温温度, 从  $60^{\circ}\text{C}$  提升至  $65^{\circ}\text{C}$ 。在养护结束后, 分别对两组试验在 30、60、90、120 d 时的抗压强度进行了监测, 结果见表 4。

表 4 不同温控养护工艺的抗压强度对比  
Table 4 Comparison of compressive strength under different temperature controlled curing

养护工艺	抗压强度/MPa			
	30 d	60 d	90 d	120 d
原方案	185.2	310.5	402.1	402.8
试验组 1	170.5	295.8	395.4	398.2
试验组 2	192.3	318.6	405.3	406.5

由表 4 可知, 恒温时间缩短 12 h 会导致混凝土在 30 d 的抗压强度降低, 在 120 d 强度损失较小。这表明延长恒温时间对混凝土早期强度发展更为关键, 对于确保混凝土早期性能的稳定至关重要。另一方面, 将恒温温度提升  $5^{\circ}\text{C}$ , 能够将 120 d 的抗压强度提高至 406.5 MPa, 相比原方案的抗压强度有所提升。然而这也需要严格控制升温速度, 以防止因温度应力而产生裂缝, 从而在提升强度的同时, 确保混凝土结构的整体性和耐久性。

不同监测点浇筑后的混凝土抗压强度结果见表 5。

表 5 不同监测点的抗压强度  
Table 5 Compressive strength at different monitoring points

监测点编号	抗压强度/MPa			
	30 d	60 d	90 d	120 d
1	212.36	312.52	400.52	402.15
2	223.21	310.25	400.15	401.15
3	215.65	311.65	401.21	402.15
4	232.12	321.25	402.32	402.36
5	205.12	314.25	401.15	401.25
6	214.15	316.25	402.25	402.36
7	206.54	314.25	403.21	403.22
8	207.45	311.25	401.12	402.12
9	206.32	317.45	402.25	402.25
10	201.15	321.26	401.36	401.52
11	205.58	321.21	402.15	402.16
12	207.45	320.14	402.54	402.88

施工完成 90 d 后, 抗压强度基本达到最大值, 其中, 监测点 7 的抗压强度最高, 为 403.21 MPa; 监测点 2 的抗压强度最低, 为 400.15 MPa, 与最大值相差甚微。混凝土在 90 d 时的抗压强度已超过 400 MPa, 到 120 d 时强度增长明显放缓 (增幅不超过 0.5%),

## 材料科学

这表明温控养护措施有效促进了强度的稳定。同时,边缘监测点(如1、6、7、12)由于温差敏感性,其抗压强度略低,因此需要加强养护覆盖措施。

### 3.2 位移控制效果分析

施工完成后,为衡量施工效果,利用设定的多个监测点,监测在混凝土浇筑完成后,桥梁的位移变化量,如图2所示。

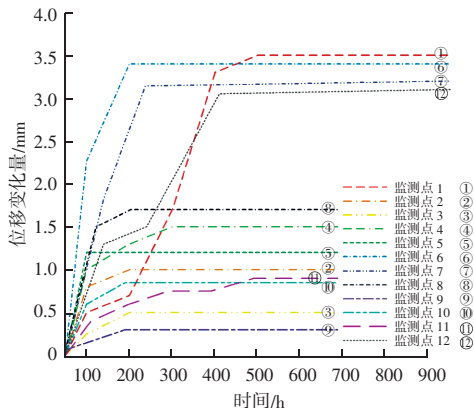


图2 混凝土浇筑后桥梁的位移变化量

Fig. 2 Displacement variation of the bridge after concrete pouring

随着施工时间的推移,各监测点的位移量呈现先增长后趋于稳定的趋势。其中,监测点1、6、7、12,由于位于桥梁边缘,受桥梁骨架影响较小,因此其位移量相对较大,最大位移量达到了3.5 mm。而其余监测点的位移量均控制在2.0 mm以下。总体而言,所有监测点位移量均符合设计要求,施工质量良好。在位移量稳定后(不超过3.5 mm),未发现结构性裂缝,这充分验证了配比优化与温控养护措施对混凝土体积稳定性的积极作用。

## 4 结论

以某800 m现浇混凝土桥梁为工程背景,通过优化混凝土配合比(调整水胶比0.45、粉煤灰掺量 $786 \text{ kg/m}^3$ 及高效减水剂 $7.1 \text{ kg/m}^3$ )并结合 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温72 h蒸汽养护技术,显著提升了混凝土的抗压强度和体积稳定性,得出结论如下:

(1) 优化后的混凝土在90 d龄期时,抗压强度均超过400 MPa,各监测点极差仅3.06 MPa,均匀性良好;120 d后强度增长趋于稳定(增幅不超过0.5%),验证了配比优化与温控养护制度对强度发展的促进作用。

(2) 浇筑后桥梁最大位移量控制在3.5 mm以内,且未出现结构性裂缝,表明温控养护制度,变温速度 $10 \text{ }^\circ\text{C/h}$ 、恒温( $60 \pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ 有效抑制了温度应力裂缝的产生。

(3) 水泥用量( $230 \text{ kg/m}^3$ )和石子承压强度( $\geq 60 \text{ MPa}$ )是影响混凝土性能的关键因素,而蒸汽养护结合分层浇筑、精准振捣工艺可确保混凝土均匀性和耐久性。

## 参 考 文 献

- [1] 马铭,于祥. 混凝土浇筑施工技术在建筑工程中的应用[J]. 科技资讯, 2024, 22(15): 111-113.
- [2] 唐钰洁. 建筑工程施工中大体积混凝土浇筑技术的应用研究[J]. 居业, 2024, 22(1): 25-27.
- [3] 王开强,周环宇,巴鑫,等. 基于SCP的超缓凝混凝土浇筑技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(16): 40-44, 99.
- [4] 梁小平. 混凝土浇筑施工技术在高层建筑工程中的应用[J]. 工程建设与设计, 2022(4): 114-116.
- [5] 潘成文. 桥梁工程中预制T梁混凝土浇筑施工技术[J]. 交通世界, 2023(17): 192-194.
- [6] 覃正秋. 公路工程中央分隔带混凝土护栏卧式浇筑技术优化分析[J]. 运输经理世界, 2024(18): 14-16.
- [7] 王涛. 高速公路桥梁桥面铺装养护微表处技术研究[J]. 运输经理世界, 2024(33): 121-123.
- [8] 赵健业,袁茂均,周筱航,等. 大跨度钢管混凝土劲性骨架拱桥施工关键技术[J]. 铁道建筑, 2024, 64(8): 58-64.
- [9] 李育文,张平,路艳松,等. 非对称跨PC斜拉桥配重用高强铁砂混凝土施工技术[J]. 价值工程, 2023, 42(6): 69-71.
- [10] 江东,曾勇,曾渝高,等. 养护工艺参数对连续刚构桥0#块混凝土早期温度场影响[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(2): 8-18.
- [11] 马利,陈灿,李秀芳,等. 高墩大跨径桥梁高强混凝土配合比优化研究[J]. 公路, 2024, 69(11): 339-344.
- [12] ZHU X, QUAN B, FANG S, et al. Study on the design and optimization of the mix proportion for high-grade concrete for the pylon of a long-span suspension bridge[J]. Prestress Technology, 2025, 3(1): 43-53.
- [13] 张勇杰,王轶鑫,王彬彬. 试析高性能混凝土在道路桥梁工程中的应用[J]. 新材料·新装饰, 2024, 6(15): 41-44.
- [14] 袁晓坡. 高速公路建设中桥梁承台施工技术[J]. 交通世界, 2023(16): 126-128.
- [15] 唐曾智,向晓峰,郭东,等. C100高强大体积混凝土配合比设计及施工温控技术[J]. 工程建设, 2024, 56(7): 56-61.
- [16] 姜翠翠,王彬彬,程荣华. 试论超缓凝混凝土在道路桥梁工程中的应用[J]. 新材料·新装饰, 2024, 6(16): 39-42.