

高原高海拔地区节段梁湿接缝蒸汽养护技术

潘亚杰, 黄雄文

(中交一公局第一工程有限公司, 北京 102205)

摘 要 混凝土养护通常根据环境温度及湿度条件采用对应的养护措施, 常规环境下的养护技术已经较为成熟, 在高原该海拔地区预制箱梁蒸汽养护技术应用也较为广泛。但是针对高原高海拔地区节段梁湿接缝的养护技术仍处于探索研究阶段, 采用传统的覆盖洒水保湿包裹加热保温等措施, 养护效果难以保证, 施工质量难以控制, 尤其是在冬期施工作业中, 质量保障更是困难; 采用整孔梁包裹进行梁蒸汽养护的措施, 常规的工装配置难以实现且施工难度大, 高空作业的危险性较大且不具备经济效益。基于此, 本文以某大桥 40 m 节段梁预制及架设施工为研究对象, 开展高原高海拔地区节段梁湿接缝蒸汽养护技术的应用研究, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 铁路桥梁; 节段梁; 湿接缝; 节段梁湿接缝养护棚

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.039

0 引言

高原高寒地带, 昼夜温差大, 环境干燥, 水分蒸发快, 冬春季节分界不清; 冬期施工环境恶劣, 极低的温度和复杂的环境变化对室外且高空施工混凝土养护工作造成了较大的困难。干燥又水汽散发迅速的环境使混凝土水汽散发过快发生缺水情况, 致使已经生成胶凝体的水泥颗粒不能完全水化, 水泥颗粒不能转变成稳定的晶体并且缺少足够的沾着力, 混凝土表层出现片状剥落情形, 这种片状剥落接着变成粉末掉落现象, 水分提前蒸发会使混凝土出现收缩变形, 从而产生干缩裂缝, 也会引起混凝土强度不足等问题。为经济有效地解决高原高海拔地区节段梁湿接缝的养护问题, 消除湿接缝混凝土裂缝, 确保节段梁湿接缝混凝土质量问题; 项目自主创新节段梁湿接缝蒸汽养护装置对湿接缝进行蒸汽养护。

1 工程概况

某大桥 40 m 节段预制组装简支箱梁按照设计规定, 主线梁被设计成单箱双室预应力混凝土简支梁, 而站台梁则被设计成单箱单室预应力混凝土简支梁, 主线梁具有很多重要的尺寸, 其中, 梁顶宽度分为两种类型, 一种是 16.12 m, 这种类型包含有站台区域, 另一种则是 17.62 m, 此类型没有设置站台区域, 梁底宽度固定为 11 m, 箱梁端部支点处横向支座间的距离达 5 m, 梁的高度是 3.3 m; 站台梁也有一定的规格, 其顶面宽度为 8.5 m, 底面宽度为 4.5 m, 而且站台梁两端支撑

点与横向支座之间的距离为 3.7 m, 梁的高度为 2.6 m。

40 m 节段预制拼装箱梁, 每跨采用奇数分块, 跨中部设置湿接缝, 对称布置; 主线梁分为 9 个节段, 设 8 个湿接缝, 站台梁分为 7 个节段, 设 6 个湿接缝, 湿接缝长 80 cm, 全桥主线梁 225 节, 站台梁 168 节, 共计 393 个节段。

2 节段梁湿接缝养护

2.1 环境气候调查分析

本工程位于海拔约 3 500 m 的高原高寒地区, 区域以高山峡谷地貌为主, 气候干燥多风, 年、日温差大, 水分蒸发迅速, 年平均蒸发量约 838.7 mm, 极端最高气温达 39.4 °C, 最低气温达 -26.0 °C^[1], 无霜期约 124 d。受高海拔及复杂地形影响, 冬期施工时间长达 5 个月 (10 月至次年 3 月), 全年约 50% 的施工周期处于低温或温差剧烈变化环境。在此条件下, 混凝土易出现早期失水、温差应力增大等问题, 采用常规覆盖洒水等养护方式难以稳定控制湿接缝混凝土的温湿度环境, 难以满足质量控制要求。

2.2 冬期施工规定

铁道混凝土工程施工作业依照规程中规定的环境日平均气温展开, 此处的环境日平均气温是指一天里最高气温与最低气温的平均数, 也可以用当地的时间 6 点来表示, 在户外分别于 14 点和 21 点测温然后求平均值, 混凝土工程作业有其特定的条件, 检测地点应位于距离地面 1.5 m 高的地方并且远离热源, 如果平

作者简介: 潘亚杰 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 桥梁工程施工。

均气温连续三天低于 5℃ 而且最低气温低于 0℃ 的时候,就要按照冬季施工准则来进行,这样可以保证冬季施工的质量,进而保障整个工程的质量。

2.3 节段梁湿接缝蒸汽养护装置

2.3.1 蒸汽养护装置设计

针对节段梁湿接缝养护环节存在的技术难题,项目团队立足工程实际需求,自主完成节段梁湿接缝蒸汽养护装置的设计,为湿接缝养护提供了高效解决方案。该装置通过外设蒸汽发生器产生高温蒸汽,经专用输送管路精准泵入养护罩内部,再由罩板预设的蒸汽喷射孔均匀喷入节段梁湿接缝养护位置。装置核心的套装式蒸汽养护组件,可实现对湿接缝的全包裹密封,确保蒸汽被约束于养护区域内,能够同步作用于每一处接触面,实现均匀加温与湿润养护。

此套自主研发装置的应用,不仅大幅提升了湿接缝蒸汽养护的作业效率,更关键在于解决了传统养护方式中接触面温湿度分布不均的难点。通过蒸汽的全域均匀覆盖,使湿接缝各部位的温湿度指标趋于一致,为水泥水化反应创造了稳定适宜的环境。养护效果改善保障粘结质量,进而有力地保障水泥水化反应完全度,从而给节段梁工程结构稳定性和耐久性提供可靠支撑,技术革新显示出对工程质量提升的帮助作用,这种帮助作用是十分关键的^[2]。

2.3.2 湿接缝养护装置架体结构数值计算

节段梁湿接缝蒸汽养护装置采用 ANSYS 2021 R1 软件开展模拟剖析,继而对架体实施结构核验。相关材料用量见表 1。

表 1 湿接缝保温棚材料构成

序号	产品名称	规格型号	单位	数量
1	蒸养框架	40*60 方钢	吨	3
2	隔水帆布	加棉	m ²	65
3	填充橡胶	/	米	50
4	U 型卡	/	套	50

荷载说明:(1)恒载:养护装置架体自重 G_1 ,篷布管路配件等自重 G_2 ,恒载分项系数取值 1.2。(2)活载:养护时的冲击荷载 P_1 ,人员机具荷载 P_2 ,活载分项系数取值 1.4。

组合工况总荷载 $F_1=1.2 \times (G_1+G_2)+1.4 \times (P_1+P_2)$,通过程序对模型施加重力加速度模拟 G_1 计算施加荷载 $F_2=1.2 \times G_2+1.4 \times (P_1+P_2)=15\ 000\text{ N}$ 。

约束说明:通过对模型施加位移约束的方式模拟养护架吊点的约束。

直接应力:梁单元中遇到的轴向载荷引起的应力分量。构件的弯曲载荷会产生局部 Y 和 Z 方向的弯矩。这导致以下四个弯曲应力:顶部/底部的 Y 弯曲应力和顶部/底部的 Z 弯曲应力。最大最小弯曲应力表示四种弯曲应力极值情况,其中包含最大值也含有最小值,最大复合应力为一种合成形式,这种合成是轴向应力与最大弯曲应力的线性组合;极小复合应力是一种应力,它是轴向应力与极小挠曲应力的线性组合;该指标用以评估材料的内力水平,整体变形情况见图 1。

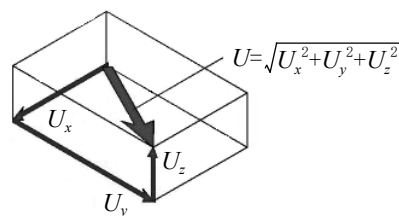


图 1 整体变形示意图

计算结果显示,结构整体变形满足规范限值要求:X、Y、Z 三向最大位移分别为 0.30 mm、2.97 mm、0.027 mm,均小于 L/400 控制标准。综合应力与变形分析表明,架体主要受力参数满足钢结构许用设计值及相关规范要求,能够满足现场蒸汽养护施工的安全使用条件^[3]。

2.3.3 蒸汽养护设备应用

针对湿接缝养护需求,配置 2 台 150 kW 蒸汽发生器为采用 2 条主管道为蒸养棚输送蒸汽,根据现场实测,温度能稳定保持在 20~25℃,湿度达到 95% 以上,满足施工养护需求。在高原海拔大于 3 000 m 以上的节段拼装梁蒸汽养护温度宜控制在 10~25℃,湿度达到 90% 以上。

2.4 节段梁湿接缝蒸汽养护措施

2.4.1 蒸汽养护原理

通过蒸汽养护棚,减缓混凝土表面的热量消散,提升周围节段梁体的温度,降低节段梁与周围介质之间的温差,降低梁体混凝土内外温差及混凝土补偿收缩产生的自应力,延缓节段梁湿接缝前期的降温速率,增加热量散发时长,充分发展混凝土前期强度的增长潜力和材料的松弛特性^[4],达到湿接缝各项混凝土质量通病防治的目的。

蒸汽发生器通过一套自动控制系统,控制水泵抽水、蒸汽输送、水温控制等,通过蒸汽养护棚内温湿度反馈数据进行智能调节,保证蒸汽养护效果。

2.4.2 蒸汽养护施工

湿接缝浇筑完成后,针对高原地区混凝土养护需求,应立即对湿接缝混凝土进行养护,为保证前期混凝土强度增长,采取蒸汽带模养护;针对大于 3 000 m 海拔地区,带模养护时长应不小于 60 h。总体养护时长不低于 14 d。

湿接缝浇筑选取当日温度较高的白天进行,降低混凝土自身水化热的丧失。

1. 静停保温阶段。静停保温阶段应保证施工环境温度及介质温度不低于 10 °C,若冬施环境温度较低(低于 10 °C),应提前配置暖风炮对模板及施工环境进行预热,边浇筑混凝土边通入蒸汽,保证混凝土处于 10 ~ 20 °C 的环境中。

2. 匀速升温阶段。湿接缝浇灌完毕后温度上升,升温速率不超出 10 °C/h,通常以 5 ~ 10 °C/h 持续匀速升温,接着在 2 ~ 4 h 内让养护棚里的温度达到 20 ~ 25 °C,湿气的能达到 95% 以上^[5]。升温时期要管控蒸汽运送,升温之际每 0.5 h 观测并记录温度,倘若升温速度超过 10 °C/h 就需即刻管控。

3. 恒温恒湿阶段。当蒸汽棚内的温度达到设定温度 20 ~ 25 °C 后,通过蒸汽发生器智能温控系统,对棚内温湿度进行恒定控制,保证养护温湿度满足要求(带模不小于 60 h),每 0.5 h 观测记录一次,确保湿接缝蒸汽养护温度。

4. 匀速降温阶段。在气温降低阶段挑选一日当中温度处于最高的时段,降温的速度通常把控在 5 ~ 10 °C/h,也能够依据棚内和大气之间的温度差值做适度的调整。节段梁湿接缝拆除保温装置时,应保证节段混凝土箱内与箱外、表层与环境芯、部与表层温差均不超过 15 °C。

2.4.3 质量控制要点

静停阶段:湿接缝灌注环境温度管控影响灌注品质,温度需调控在 10 ~ 20 °C,而且升温期间升温速率不能超过 10 °C/h,恒温恒湿阶段要切实保障蒸汽养护棚的状态,既要让棚内温度始终保持在 20 ~ 25 °C,也要保证棚内有 90% 以上($\geq 90\%$)的恒湿状况,降温的时候也要控制好降温速率,速率不能大于 10 °C/h,等到大气与棚内温差小于或者等于 10 °C 的时候再拆掉养护棚。

3 节段梁湿接缝蒸汽养护技术效益分析

3.1 社会效益

节段梁湿接缝蒸汽养护工艺革新采用养护设备,这种设备的应用效果很好,所以得到建设等有关单位

的一致好评,它的建设成果显著,不但花费的成本低,而且建设的速度快,工程质量达标。节段梁湿接缝蒸汽养护工艺的发展,促使蒸汽养生技术更加完善。

3.2 经济效益

在高原地区梁体养护施工中,传统养护方式存在投资成本高、施工周期长的短板,且难以充分保障梁体养护质量。相比之下,蒸汽养护技术的推广应用优势显著,不仅能有效节约施工成本、缩短养护周期,还能大幅提升养护质量,降低各类不均匀、不稳定因素的干扰,确保梁体强度均衡稳定达到设计标准^[6]。该技术可从根源上避免因质量缺陷导致的梁体报废问题,进一步降低综合经济成本。本项目涵盖 49 孔梁、344 个湿接缝,通过应用蒸汽养护技术,实现了工期与人工费用的双重节约,创造出十分显著的经济效益。

4 结束语

针对高原高海拔地区特殊气候条件,以及冬季施工期间气温偏低、环境工况复杂多变的现实难题,节段梁施工质量稳定性难以得到有效管控的问题尤为突出。为此,本项目聚焦现场施工难点开展技术攻关,自主创新研发节段梁湿接缝蒸汽养护专用装置,同时结合工程实际制定针对性的专项蒸汽养护方案,对湿接缝施工全过程实施标准化、精细化的蒸汽养护作业。从节段梁湿接缝质量检测结果来看,该应用成效十分显著,不仅能够切实保障湿接缝施工质量符合设计及规范要求,还能大幅提升现场作业工效。相较于传统常规养护方式,蒸汽养护技术在质量稳定性、施工效率等方面优势突出,能加快施工进度,兼具良好的社会效益与经济效益。

参考文献:

- [1] 张维东.混凝土预制箱梁蒸汽养生施工质量控制研究[J].交通世界,2022(34):114-117.
- [2] 尤琦,陈飞翔,明鑫,等.蒸汽养护条件下混凝土节段梁水化热仿真计算[J].施工技术(中英文),2023,52(10):41-45.
- [3] 颜奎,崔超,郑辉.超高性能混凝土预制节段梁接缝抗剪性能尺寸效应试验[J].绿色科技,2023,25(22):208-214.
- [4] 赵帮轩.高寒地区混凝土箱梁施工关键技术研究[J].水利与建筑工程学报,2022,20(06):163-168.
- [5] 刘海青,高昭龙.冬季桥梁墩柱混凝土蒸汽养护温湿度控制研究[J].科技创新与应用,2024,14(25):53-58.
- [6] 吴志波.预制T梁蒸汽养护技术研究[J].运输经理世界,2025(26):130-132.