

DOI: 10.7672/sgjs2025180077

狮子洋大桥西高墩区引桥墩身施工关键技术

田 飞^{1,2,3}, 廖林冲¹, 李培育¹

- (1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

[摘要] 狮子洋大桥为主跨 2 180m 的单跨双层钢桁梁悬索桥,南沙侧西高墩区引桥下部结构为门式墩,具有墩身高、截面尺寸大、外观要求高的特点。墩身总体采用 6m/节的翻模法施工工艺,钢筋采用整节段部品制作、现场锥套连接方式;研制了基于气囊的墩身养护罩,在保障混凝土养护时长的前提下提升了模板周转效率,墩身现场施工效率达到 1.5m/d;墩身混凝土内埋置冷却水管,结合有限元分析,通过智能温控系统控制冷却水管流量及温度,有效控制了墩身混凝土内部温峰及里表温差。实践表明,墩身施工形成的系列技术成果可有效提升墩身施工品质及效率。

[关键词] 桥梁;悬索桥;高墩;钢筋;有限元分析;智能温控;施工技术

[中图分类号] U445.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2097-0897(2025)18-0077-05

Key Construction Technology of Pier Body of the Approach Bridge in West High-pier Area of Shiziyang Bridge

TIAN Fei^{1,2,3}, LIAO Linchong¹, LI Peiyu¹

- (1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;
2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China;
3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: Shiziyang Bridge is a single-span double-layer steel truss girder suspension bridge with a main span of 2 180m, and the substructure of the approach bridge in west high-pier area on the Nansha side is a portal pier, which has the characteristics of high pier, large cross-sectional size. The appearance requirements of the pier are higher. The pier body adopted the construction technology of 6m/section turnover formwork method. the reinforcement adopted the whole section of the parts production. Taper sleeve connection was used between reinforcing parts. At the same time, the pier curing cover based on airbag was developed, which improved the turnover efficiency of the formwork under the premise of ensuring the concrete curing time. The on-site construction efficiency of the pier reached 1.5m/d. Cooling water pipe was embedded in the concrete of the pier. The flow and temperature of the cold water pipe were controlled by the intelligent temperature control system, which effectively controlled the internal temperature peak and the temperature difference of the pier concrete. Practice shows that a series of technical achievements formed by pier construction can effectively improve the quality and efficiency of pier construction.

Keywords: bridges; suspension bridges; high pier; reinforcement; finite element analysis; intelligent temperature control; construction

1 工程概况

狮子洋通道是继虎门大桥、南沙大桥后,南沙与东莞间的又一条世界级通道,也是落实《粤港澳大湾区发展规划纲要》、打造大湾区 1h 交通圈的重

大交通基础设施工程。狮子洋大桥为狮子洋通道跨越珠江口的控制性工程,采用主跨 2 180m 的单跨双层钢桁梁悬索桥,是世界上在建最大跨径钢桁梁悬索桥。

狮子洋大桥西高墩区引桥为 3 联双层钢桁梁桥,跨径布置为 $(60.5+90+60.5)\text{m}+(75+2\times 80+75)\text{m}+(2\times 90+92)\text{m}$ (见图 1),桥面宽度为 43.5m。上部结构采用华伦桁架,为双层三主桁结构,预制桥面板与主桁栓接形成板桁组合结构。下部结构采用混凝土门式墩,墩身为实心钢筋混凝土结构,采用 C40 混凝土。其中,0~7 号墩位于陆上区域,8~9 号墩位于水上区域,墩高 47.955~63.685m。墩身立面内侧垂直,其他三面倾斜,斜率为 1:52;墩身截面为四角开槽口的矩形,墩顶截面尺寸均为 5m(横桥向) $\times$ 4.5m(顺桥向)(见图 2)。

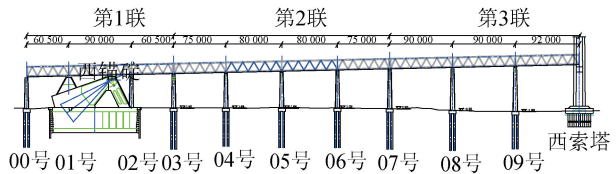


图 1 引桥桥型布置

Fig. 1 Layout of approach bridge type

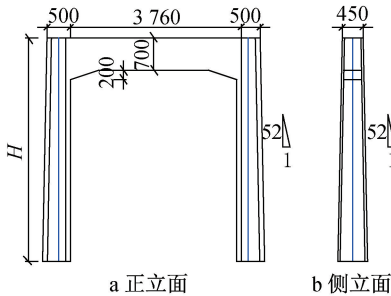


图 2 墩身立面布置

Fig. 2 Elevation layout of pier body

西高墩区引桥具有墩身高、截面尺寸大、外观要求高的特点,且项目整体进度压力大,为保障施工效率与品质,项目在墩身施工总体工艺及细节处理上做了大量优化及创新工作。

2 总体施工工艺

墩身总体工艺采用翻模法,标准节段高度为 6m。承台施工完成后,在墩底设置预浇段,预浇段在承台钢筋施工时进行墩身钢筋绑扎与预埋,与承台同时浇筑。为提升墩身施工效率、保障钢筋施工质量,应用钢筋部品制安工艺,即标准节段钢筋在钢筋集中配送中心胎架上整体加工成型,运输至现场后整体安装工艺,钢筋部品节段间采用锥套连接。

模板采用整墩定型钢模,采用模板、脚手架一

体化施工平台及爬梯,配备成品标准化梯笼上下通道和配套的水平通道。钢筋、模板采用履带式起重机吊装,墩身混凝土浇筑采用臂架泵施工,结合拖泵泵送+串筒入模施工,墩身养护采用滴灌法,侧面包裹气囊养护罩进行混凝土养护(见图 3)。

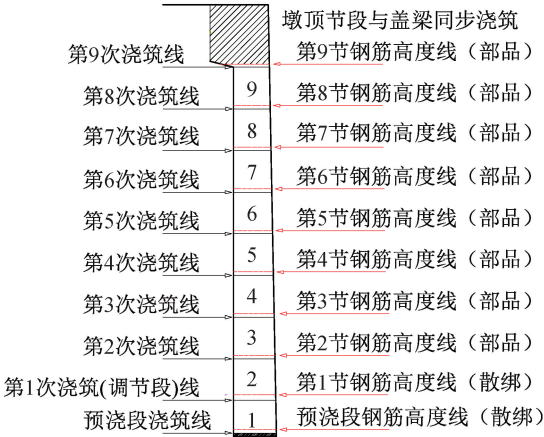


图 3 9 号墩节段划分

Fig. 3 Segment division of No. 9 pier

3 施工关键技术

3.1 预浇段施工

引桥承台采用 C35 混凝土,截面尺寸为 10.2m $\times$ 10.2m;墩身采用 C40 混凝土,且根据现场施工安排,部分墩身在承台浇筑完成后 60d 才能开始施工,为避免后期因墩身、承台混凝土强度差及尺寸差导致的收缩裂缝,墩底设置 50cm 预浇段与承台同步浇筑。墩柱施工完成后,墩底均无裂缝出现,证明预浇段设置有效。

3.2 钢筋部品制作与安装

墩身采用 HRB400 ϕ 32 主筋,主筋间距 15cm,墩身顶部 27m 设置 3 层主筋,其他部位设置 2 层主筋。由于墩身截面尺寸变化,4 个面的主筋均随墩身斜率进行收分,采用两侧主筋向轴线中心收分方式。标准节段钢筋采用部品整体制安工艺,单个钢筋部品节段重约 20t。

在钢筋集中配送中心设置 2 座胎架进行钢筋部品制作。胎架主要由台座、支撑框架、操作平台和爬梯、定位系统组成。为方便钢筋部品吊运,胎架一侧框架可快速开合。胎架上的定位系统是控制钢筋部品制作精度的关键,分为底部可调节定位卡板、主筋顶部定位梳齿板、箍筋竖向间距控制梳齿板。底部定位卡板由内径 34mm 短圆管焊接在钢底座上,圆管间距与钢筋设计间距保持一致;共设置 8 块钢底座,钢底座间可调整间距以适应钢筋收分。顶部定位梳齿板采用角钢加工而成,在角钢翼缘上

开设槽口,作为钢筋定位口;为防止梳齿板在定位过程中移位,梳齿板与胎架主体框架点焊连接(见图4)。

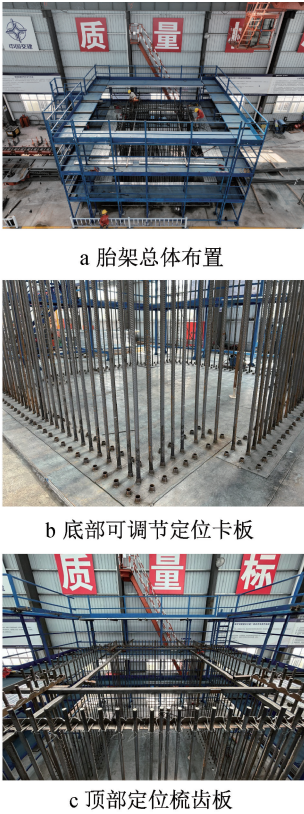


图 4 钢筋部品制作现场

Fig. 4 Site of reinforcement component fabrication

钢筋部品组拼总体流程为:部品胎架定位架复测、精确定位底座定位板位置→竖向主筋定位安装,底部落入定位板孔内,顶部限位梳齿板定位→水平箍筋安装→拉钩筋安装→架立筋定位安装→安装保护层垫块。

为减小钢筋部品在吊装过程中产生的变形,钢筋部品起吊采用吊点可调节的框架式吊具,吊具与钢筋部品通过自锁式钢筋卡具相连接,无须在钢筋部品上焊接吊耳,避免损伤主筋。钢筋部品通过平板车运输至待安装桥位,平板车上设置型钢底座及侧向支撑框架,防止部品在运输过程中倾覆。部品运输至桥位后,通过 135t 履带式起重机吊装至墩顶,墩顶角点处钢筋上设置有喇叭口导向工装,钢筋部品下放到位后进行锥套连接。

3.3 模板设计与施工

3.3.1 模板设计与制作

墩身采用翻模法施工,考虑现场进度计划,引桥按 9 号墩(最高墩)设置 1 套通配模板,标准节段模板在各墩可周转使用,调节段及预浇段模板各墩单独设置。

模板标准节高度为 3m,平面分为 8 块模板(4 块平板模+4 块变截面转角模)。为保障墩身混凝土外观质量,模板面层采用 8mm 厚 201 不锈钢板。竖肋采用[10,间距 30~35cm;背带采用双拼[20a,间距 100cm;定位销采用 $\phi 20\times 110$ 。经计算分析,顺桥向设置 4 根拉杆,横桥向设置 2 根拉杆,拉杆采用 $\phi 25$ 精轧螺纹钢。模板上设置可快速安拆的操作平台及上下通道。

为保障模板现场安装精度,模板在厂内制作完成后进行预拼。转角模板面层采用整块不锈钢板弯折而成,相较于采用 2 块钢板直角焊接方式,整块弯折的模板在棱角处无接缝,降低了拆模时混凝土与模板转角黏结力,大幅度减少拆模时墩身混凝土棱角破损现象(见图 5)。

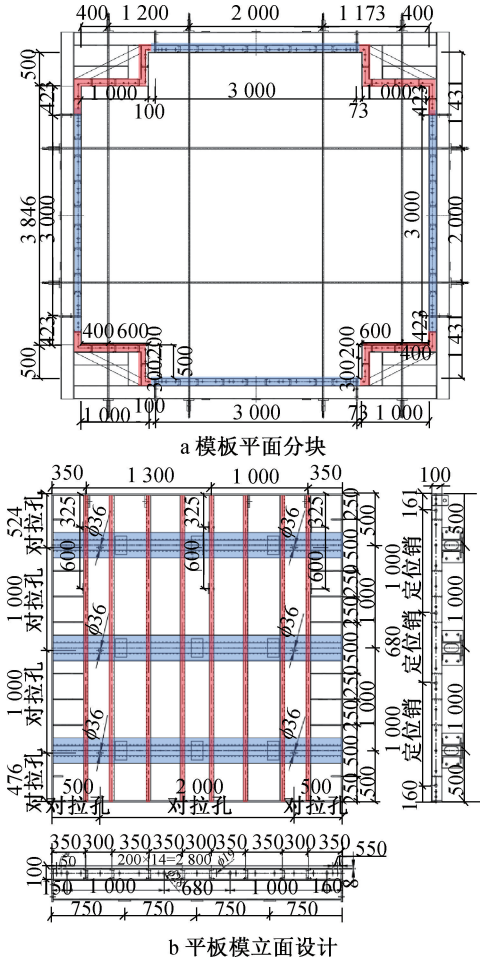


图 5 模板平、立面布置

Fig. 5 Plan and elevation layout of formwork

3.3.2 模板安装与接缝处理

经过前期缩尺小样试验及线外足尺试验总结分析,不锈钢模板配合水性脱模剂时,混凝土外观最优,本项目采用水性脱膜剂。模板采用履带式起重机分块安装,经调位、定位复测后,连接模板间销

钉,安装模板法兰接缝间螺栓。

模板接缝及拉杆孔处理的效果直接影响墩身混凝土外观。本项目模板竖向接缝间采用 EVA 泡棉双面胶带止浆,待安装模板与基模间调位后,缝隙较大,采用常规双面胶难以达到止浆效果,经调研与综合比选,待装模板与基模间的横向接缝采用 5mm 厚、膨胀率 300% 的止水胶条。模板拉杆孔与拉杆套管间隙采用专用橡胶垫圈进行止浆。

混凝土浇筑完成后,由于自收缩特性,混凝土侧面与基模间会产生 1~2mm 宽间隙,若不进行处理,在浇筑顶部节段时,混凝土浆体可顺着缝隙流至下节墩身表面,造成成品墩柱污染,严重影响混凝土外观。为此,本项目在浇筑混凝土前对底部基模与混凝土缝隙采用涂抹水泥灰配合透明玻璃胶进行封堵,通过该措施有效对成品进行了保护,大幅度提升了墩身节段接缝处外观。

3.4 混凝土温度裂缝控制

墩身平面最大尺寸为 6.2m×6.9m,节段高度 6m,单节段混凝土浇筑方量约 220m³,属于典型大体积混凝土。为防止墩身温度裂缝出现,本项目采取优化混凝土配合比、布置冷却水管、应用智能温控等措施,并经现场实施后取得了良好效果。

3.4.1 混凝土配合比

墩身为 C40 混凝土,为降低混凝土绝热温升,本项目采用双高掺(即掺加粉煤灰、粒化高炉矿渣粉)混凝土,P·II 水泥掺量 210kg/m³,粉煤灰、矿粉掺量均为 90kg/m³。搅拌站配置制冰机、冷水机,在夏季高温时段拌合用水使用冷水(水温 4~7℃),并加入冰屑,降低混凝土入模温度。

3.4.2 墩身温度场计算分析

针对墩身浇筑开展水化热有限元模拟分析,指导冷却水管布置及现场温控实施。分析了环境温度在 15,25,30,35℃ 4 种工况下墩身温度场及应力场变化,在上述工况下,墩身内部温峰均出现在浇筑后第 3 天,温峰最高为 56℃。

在模型中布置冷却水管,控制墩身主拉应力。根据计算结果,现场墩身冷却水管(φ40 铸铁管)布置如下:环境温度在 25,15℃ 时,冷却水管布置 3 层(竖向间距 2m,水平间距 1m);环境温度升高至 30℃ 时,冷却水管加密至 4 层(竖向间距 1.5m,水平间距 1m);环境温度升高至 35℃ 时,冷却水管布置 6 层(竖向间距 1m,水平间距 1m)(见图 6)。

3.4.3 水化热现场控制

钢筋部品吊装完成后,在部品内安装冷却水管,冷却水管采用 φ40 铸铁管,冷水管间通过丝头

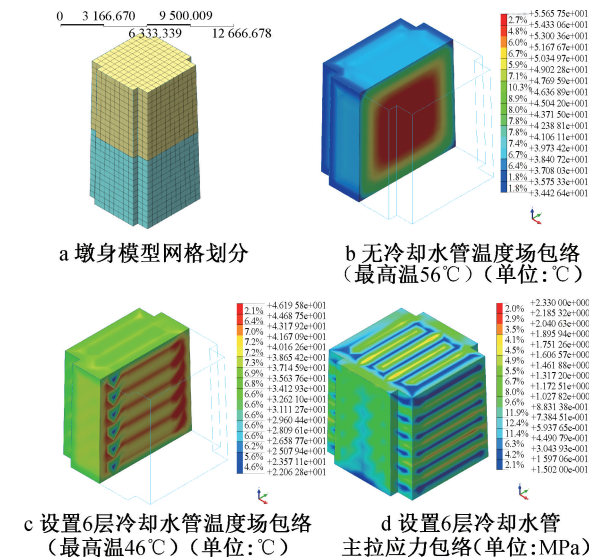


图 6 35℃环境温度工况下温度场及应力场
Fig. 6 Temperature field and stress field under 35℃ ambient temperature condition

连接。单节墩柱设置 1 个进水口、1 个出水口,进、出水口与分水器相连接,现场设置 10m³ 水箱作为冷却水循环中转容器。在墩身中心及表层设置温度传感器监测水化热温度场,传感器数据经 DTU 上传集成至智能温控系统,智能温控系统可根据墩身温度场实时调节冷却水管流速(见图 7)。

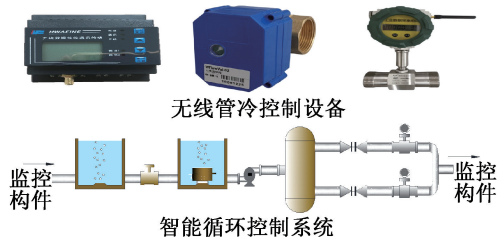


图 7 智能温控系统
Fig. 7 Intelligent temperature control system

5 号墩底节段温度场随环境温度及时间变化曲线如图 8 所示。通过对墩身混凝土水化热的精细化控制,墩身温峰控制在 <55℃,里表最大温差在 11℃,墩身表面均未出现温度裂缝,且根据环境温度动态调整冷却水管布置数量,降低冷却水管消耗。

3.5 混凝土养护

混凝土浇筑完成后,待墩顶混凝土初凝进行覆膜养护,终凝后进行覆水养护。为提升模板周转率,混凝土带模养护 3d 后,需拆除本节段的底层模板周转至其他墩柱,顶层模板须保留作为待浇节段基模。因此,6m 节段墩柱的顶部 3m 混凝土可带模养护 7d,但底部 3m 混凝土由于模板提前拆除,需考虑其他养护措施(见图 9)。

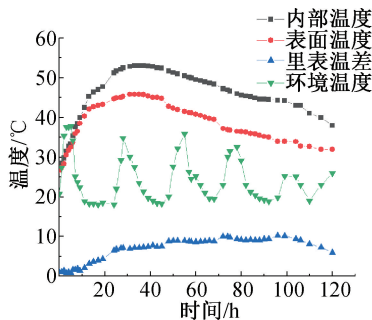


图 8 墩身温度场随环境温度及时间变化曲线

Fig. 8 Variation curves of pier body temperature field with ambient temperature and time

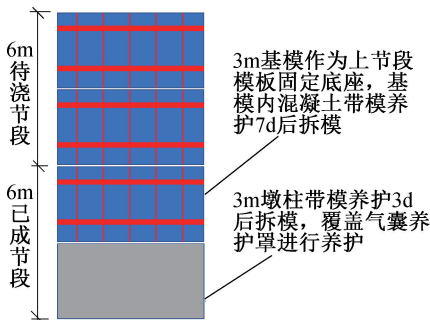


图 9 养护范围

Fig. 9 Maintenance scope

常规墩身养护措施有喷淋养护液、覆盖保湿膜等,但上述方法均存在一些问题:混凝土养护液在墩身表面易形成色泽不均的胶体且后期难以除去,影响墩身外观;模板拆除后,裸露的墩身无操作平台,保湿膜覆盖操作安全风险大,且保湿膜强度过低,在大风环境下极易破损,影响养护效果。

为保证混凝土养护时间及养护效果,本项目研发了一种养护效果好、截面适应性强、安拆方便的气囊养护罩。气囊养护罩主要由硬质气囊、养护土工布、连接带及悬挂系统组成,气囊在充气状态下可将土工布紧密覆盖在墩身表面,且气囊具有较好弹性(厚度在 5~20cm 变化),可保证土工布与墩身密贴。为适应墩柱截面尺寸变化,硬质气囊分为四大块,每块间通过长度可调整的弹力带连接。

养护气囊具体使用方法如下:下层模板拆除后,通过绳子和吊环将本装置悬挂在钢模板上,通过重力下垂至需养护高度,而后充气使气囊膨胀,将土工布贴紧墩身混凝土面,持续通水使土工布保持润湿状态;当养护完成后,放出气囊中空气,通过收紧装置将整个气囊及土工布向上收缩至顶部,人工拆除吊环,拆除模板后将装置再次固定在下一节

模板上即可进行下一次循环养护。

4 结语

狮子洋大桥西高墩区引桥墩身应用钢筋部品制安工艺,现场墩身工效达 4d/节段,相较于钢筋现场散绑工艺,墩身施工工效提升 50% 以上;采取不锈钢面层模板及一系列配套止浆措施,改善了墩身外观质量;通过温度场计算分析,并结合现场精准的温度控制措施,实现了墩身零裂纹效果。狮子洋大桥西高墩区引桥墩身施工通过先进工法、精细化的质量管理措施,提升了工效,保障了施工品质,可为同类型墩身施工提供参考。

参考文献:

[1] 张国浩. 黑山南北高速公路项目 Moracica 大桥墩身施工技术[J]. 公路,2018,63(2):77-80.

ZHANG G H. Construction technology of pier shaft of Moracica Bridge in Heishan North-south Expressway project[J]. Highway, 2018,63(2):77-80.

[2] 易达, 苾振东. 桥梁工程高墩模板施工技术比较分析[J]. 施工技术,2016,45(8):110-113.

YI D, XI Z D. Comparison and analysis for high pier formwork construction of bridge engineering[J]. Construction technology, 2016,45(8):110-113.

[3] 李建如, 刘沛元, 苏雨琳. 直插式六棱形墩柱钢筋笼整体吊装工艺[J]. 公路,2022,67(11):221-225.

LI J R, LIU P Y, SU Y L. Hoisting technology of reinforcement cage for in-line hexagonal pier column[J]. Highway, 2022, 67(11):221-225.

[4] 秦宇, 张秋信, 余毅. 平塘特大桥中塔承台大体积混凝土温控技术[J]. 世界桥梁,2018,46(2):30-34.

QIN Y, ZHANG Q X, YU Y. Temperature control techniques for massive concrete of intermediate pylon pile cap of Pingtang bridge[J]. World bridges, 2018,46(2):30-34.

[5] 张书通. 液压自爬模在双薄壁柔性墩中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,16(6):70-72.

ZHANG S T. Application of hydraulic self-climbing formwork in double thin-walled flexible pier[J]. Journal of highway and transportation research and development (application technology edition), 2020,16(6):70-72.

[6] 张永水, 高昊, 刘文军, 等. 高海拔峡谷地带桥梁快速施工结构体系优化[J]. 中外公路,2021,41(1):97-102.

ZHANG Y S, GAO H, LIU W J, et al. Optimization of structure system of rapid construction bridge with high piers in high-altitude canyon area[J]. Journal of China & foreign highway, 2021,41(1):97-102.

[7] 陈力, 臧广海. 山区桥梁超高墩施工安全管理[J]. 公路,2019,64(9):140-141.

CHEN L, ZANG G H. Construction safety management of super-high piers of bridges in mountainous areas[J]. Highway, 2019, 64(9):140-141.