

浅谈高速公路桥梁与隧道连接工程施工关键技术

孔伟

中铁隧道集团三处有限公司 518051

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22164

[摘要] 随着我国高速公路建设不断延伸,桥梁与隧道连接工程日益成为线路建设的关键节点,兼具桥梁柔性结构与隧道刚性围岩结构的双重特性,存在结构刚度突变、受力体系复杂、沉降变形差异大、防水防渗难度高、施工交叉干扰多等诸多技术难题,是高速公路施工质量控制、安全管控及行车舒适性保障的关键薄弱环节。本文阐述桥隧连接工程的施工难点,深入剖析桥隧连接工程核心施工关键技术。同时结合深中通道与广深沿江高速公路“隧包桥”工程案例,分析创新工艺在桥隧交界面施工中的应用成效,总结技术控制要点,为同类高速公路桥隧连接工程施工、质量管控与技术推广提供参考。

[关键词] 高速公路;桥隧连接工程;施工技术;防水施工;质量管控

引言

低桥梁与隧道连接区段是高速公路线路的特殊过渡结构,主要由隧道洞口、桥隧过渡段、桥台、伸缩缝、防水防护体系等部分组成,承担着刚性隧道围岩结构向柔性桥梁梁板结构平稳过渡的核心作用^[1]。相较于常规桥梁、隧道独立施工工程,桥隧连接工程施工空间狭小、工序交叉密集、结构受力转换频繁,极易出现不均匀沉降、结构裂缝、防水层破损、行车跳车、洞口边坡坍塌等病害问题,直接影响道路结构使用寿命与行车安全舒适性能。因此,精准掌握桥隧连接工程施工关键技术,优化施工工艺流程,强化全过程质量与安全管控,是保障高速公路桥隧衔接段施工质量、提升工程耐久性的核心举措^[2]。本文依托现有施工规范与多项高速公路案例,全面梳理桥隧连接工程施工关键技术要点,总结施工难点与优化策略,为工程实践提供技术支撑。

一、高速公路桥隧连接工程施工难点

桥隧连接工程施工核心难点主要包含四大方面

（一）不均匀沉降控制难度大

隧道洞口围岩与桥梁桩基、桥台地基承载特性差异显著,隧道区域围岩密实度高、沉降极小,而桥梁地基经填筑、压实处理后,后期仍存在微量沉降,长期运营中沉降差会引发路面开裂、伸缩缝破损、桥头跳车等病害。

（二）结构刚度过渡难以均匀

刚性隧道与柔性桥梁无缓冲过渡,会导致车辆荷载作用下衔接部位应力集中,反复荷载冲击下易出现结构疲劳破损。

（三）防水防渗施工难度高

桥隧衔接处存在结构接缝、施工缝、伸缩缝等多重缝隙,雨水、地下水易沿缝隙渗入结构内部,侵蚀钢筋、冲刷基层,引发结构锈蚀、路基空洞等隐患。

（四）洞口边坡稳定性管控难

隧道洞口开挖会破坏原有山体应力平衡,岩土体易出现松动、坍塌,加之桥梁施工荷载叠加,进一步加剧边坡失稳风险^[3]。

二、高速公路桥梁与隧道连接工程施工关键技术

（一）隧道洞门施工技术

桥隧相连段洞门施工严禁采用常规大开挖工艺,严格遵循“早进洞、晚出洞,少开挖、强支护”原则,最大程度降低山体原有结构扰动。施工前期依托地质雷达与超前地质预报,精准探明洞口围岩特性、风化层厚度及地下水分布情况,针对破碎、偏压等不良围岩,采取专项预加固措施。工程主要采用大管棚超前支护结合小导管注浆工艺,将无缝钢管环向布设,通过浆液填充围岩裂隙,在开挖轮廓外侧形成稳固承载拱,有效约束围岩变形,防范边坡失稳坍塌。预加固施工完成后,采用微震控制爆破开展土石方开挖,减轻爆破振动对邻近桥台基础的损伤。施工秉持“开挖一级、支护一级”的方式,严控围岩暴露时长,雨季进一步缩短暴露时间,防止岩体遇水软化垮塌。随即采用喷射混凝土、钢筋网、钢拱架与系统锚杆组合支护体系,快速封闭开挖面。待支护结构稳定后开展明洞衬砌施工,精准匹配桥台位置与高程,预留桥梁衔接预埋件及止水构件。同时落实防排水施工,配套布设排水构件疏导渗水。明洞外侧采用砂砾填料分层夯实反压回填,抵消偏压结构内力。施工全程布设监测测点,动态监控结构变形,超标立即停工补强。针对“隧包桥”工况,提前核算设备尺寸,预留洞内架梁作业净空。

（二）桥台施工技术

桥隧连接段桥台施工前,利用BIM模型模拟基坑开挖与支护全过程,评估施工对隧道洞口围岩的扰动影响,优化基

坑坡度及支护方案。桥台基础采用钻孔灌注桩，钻孔前加固洞口围岩，施工中严控泥浆指标，规避孔壁坍塌问题。桩基成孔、钢筋笼安装、混凝土灌注连续施工，成桩后依规检测，保障桩身完整性和承载能力达标。承台基坑采用跳槽开挖、分层分段支护，并设置排水系统及时排净积水，防止基底土体泡水软化，开挖完成后快速浇筑垫层与承台，缩短基底暴露时间。台身混凝土分层浇筑，高度超8m时采用串筒下料，分层厚度控制为30~40cm，规范振捣确保层间结合密实。桥台各类预埋件采用全站仪精准定位、牢固固定，浇筑过程专人值守监测，防止移位变形。台背回填选用级配碎石或水泥稳定碎石，分层填筑且单层厚度不大于20cm，边角区域采用小型设备夯实，逐层检测压实度，减少后期沉降、缓解桥头跳车问题。桥隧衔接处设置止水构件，同时开展桥台与隧道围岩协同监测，发现不均匀变形及时处置^[4]。

（三）箱梁施工技术

桥隧连接段箱梁包含预制箱梁与现浇箱梁两类，高速公路以预制预应力箱梁为主，采用场外集中预制、现场架设的施工模式。箱梁在预制场统一完成钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑、预应力张拉及压浆等工序，严格把控梁体尺寸与平整度，待强度达标后方可移梁运输。洞内运输采用低平板运梁车，提前清理隧道障碍物、优化运输路线，配套布置照明与导向标识，低速平稳完成转运。针对“隧包桥”净空狭小的施工难题，需对架桥机进行专项改造，优化吊具、钢丝绳与滑轮组结构，降低设备整体高度，并采用模块化拆解、洞内拼装的方式适配洞内作业条件。架设过程依托激光定位实时校准梁体轴线与高程，严控落梁误差，保障支座受力均匀。箱梁就位后及时做好临时固定与横向限位，防止滑移错位。单跨箱梁架设完成后，依次开展湿接缝、横隔板施工，实现梁体整体化，再推进桥面系施工。洞内架梁实施分区隔离作业，严禁交叉施工，同步监测隧道衬砌变形，全程落实毫米级精度管控^[5]。

（四）短路基施工技术

桥隧之间的短路基是桥梁与隧道刚性结构的过渡段，也是施工沉降易失控的薄弱部位。施工首要开展地基处理，针对软弱土层、承载力不足的基底，采用水泥搅拌桩、CFG桩复合地基加固，桩体按梅花形布设，严格控制桩位与垂直度，成桩养护完成后检测单桩及复合地基承载力，确保地基稳固。桩顶铺设级配碎石垫层与双向土工格栅，借助格栅抗拉性能分散结构应力，平缓过渡桥隧刚度差值，规避刚度突变引发的结构病害。路基填筑选用高强度、低压缩性级配碎石或掺

水泥级配碎石，分层摊铺碾压，单层厚度不超过20cm，主体区域采用重型压路机压实，桥台周边50cm范围采用小型机具补强夯实，逐层检测压实度与含水率。填筑完成后实施堆载预压，加速土体固结，待沉降速率稳定后再施工路面结构层，有效消除残余沉降。高陡边坡紧邻隧道工况可采用轻质泡沫混凝土填筑，减小桥台桩基侧向土压力。同步施工排水系统疏导路基渗水，结构衔接处设置搭板弱化沉降差、缓解桥头跳车问题，施工全程布设测点持续监测沉降，保障施工质量稳定^[6]。

三、工程案例

（一）工程概况

广深沿江高速公路大桥是广东省重点公路建设项目，线路位于深圳市宝安区，是深中通道主线与广深沿江高速交叉设置的枢纽型互通立交，主要服务高速公路间的交通转换。本项目主要工程内容为新建三围互通施工标段主线范围：K5+575.003~K5+695.000，长度119.997米，与深中通道主线工程界面为K5+695.000，互通内共设置主线桥梁1座，长70m；匝道桥梁8座，总长5087.687m；路基土石方数量为8522m³，PHC管桩39972m。合同工期：38个月，计划2024年8月30日交工。广深沿江高速公路大桥作为项目关键控制性工程，存在典型“桥隧界面”工况，隧道出口直接衔接桥梁，属于少见的隧包桥结构。若沿用传统露天架梁工艺，隧道洞口内部吊装高度不足，运梁通道受限、运梁距离过长，常规架桥机无法在洞口狭小空间完成箱梁吊装作业，严重制约架梁施工效率，是项目施工最大技术瓶颈之一。

本项目桥梁上部结构采用40m预制预应力箱梁，桥隧衔接段共计8片箱梁需要在隧道出口狭小交界面完成架设。项目团队成立专项技术攻关小组，针对洞口净空不足、洞内架梁空间受限难题，创新应用隧包桥施工工艺，重新规划架桥机行进路径，改造架桥设备，编制专项架设方案，配套高精度测量监测体系，攻克桥隧交界面施工难题。2025年4月，大桥右幅顺利合龙，完成12片40m预制箱梁架设，其中桥隧衔接段8片箱梁全部依靠隧包桥工艺完成架设；2025年6月，最后一块40m预制箱梁精准落位，广深沿江高速大桥实现全桥合龙，施工质量检测结果表明箱梁架设误差控制在毫米级，达到预期设计目标。

（二）工程重难点分析

广深沿江高速公路大桥桥隧连接段主要难点集中在三个方面：第一，空间约束强，隧道出口净空限制架桥机竖向尺寸，常规架桥机整机高度超出洞内允许限值，无法直接进入

洞口作业；第二，运梁与架设组织难度大，便道曲折，梁体需要通过隧道内部运输至架设位置，洞内视线差、空间狭窄，运输与吊装风险高；第三，结构界面协同控制要求高，隧道明洞、桥台、短路基、箱梁多个结构交汇，沉降、变形需要协同控制，一旦工序时序安排不当，会造成围岩扰动、结构变形。

（三）隧包桥工艺实施方案

项目团队对180型架桥机进行设备改造，加长吊具、缩短钢丝绳，优化滑轮组布置，降低架桥机整体吊装高度，解决隧道内竖向空间不足的核心矛盾。施工时序上优先完成隧道洞口段开挖、初期支护与明洞衬砌施工，待洞口围岩监测数据稳定后，再开展桥台桩基、承台及台身施工，减少桥台基坑开挖对洞口围岩的扰动。在隧道衬砌施工阶段，提前复核洞内断面尺寸，预留架桥机、运梁车通行与架设作业空间，做好洞内照明、通风、安全防护设施。箱梁预制在项目预制场集中生产，养护达标后由低平板运梁车沿隧道内部通道运至架设工位，采用激光定位装置实时控制梁体轴线与高程，架桥机在洞内完成梁体起吊、纵移、落梁作业。每片箱梁落位后，复核支座位置、梁体标高，保证对位精度，将架设误差控制在毫米级别。桥隧衔接短路基采用复合地基加固，分层填筑级配碎石，布设土工格栅，实施沉降观测，实现隧道、桥台、路基刚度平稳过渡。

项目建立统一调度机制，协调隧道衬砌施工、桥梁下部结构施工、箱梁运输架设作业，划分独立作业区域，避免交叉施工冲突，同步开展围岩收敛、边坡位移、桥台沉降监测，一旦监测数据超过预警值立即停工处置。

（四）工程实施成效与技术启示

广深沿江高速公路大桥采用隧包桥工艺顺利完成桥隧衔接段箱梁架设，解决传统工艺吊装高度不足、运梁距离过长的行业难题，大幅提升狭小洞口工况下的架梁施工效率，保障施工安全与结构精度。工程实践证明，隧包桥工艺可以在隧道明洞内部完成箱梁架设，不需要大面积开挖洞口土体，减少土石方开挖量，降低边坡扰动，兼顾工程建设与生态保护。

该项目形成可复制、可推广的桥隧连接施工技术范本，为国内同类“隧包桥”工况提供工程参考。该案例表明，桥隧连接工程不能孤立开展隧道、桥梁施工，必须坚持一体化设计、一体化施工组织，提前预判空间、地质、设备限制，通过设备改造、工序优化、全过程监测，实现不同结构体系的平稳过渡。同时，高精度测量监测体系是狭小空间桥隧施

工质量的重要保障，毫米级控制标准可以有效避免梁体安装偏差带来的后期运营病害。

结语

高速公路桥隧连接工程是两种不同结构体系的交汇节点，地质条件复杂、作业空间受限、结构刚度突变、交叉工序繁多，施工风险点多，质量控制难度远高于独立桥梁与隧道工程。隧道洞门施工要坚持“预加固、弱爆破、强支护、勤监测”，保障洞口围岩稳定；桥台施工重点管控基坑扰动、台背回填与预埋件精度；箱梁架设在隧包桥等狭小工况下，需要结合洞内净空改造架桥设备，优化洞内运输与吊装方案；短路基施工核心在于地基加固、分层填筑、预压与刚度过渡，控制不均匀沉降，缓解桥头跳车病害。

广深沿江高速公路大桥隧包桥工程实践证明，通过技术创新、一体化施工组织、全过程动态监测，能够有效突破桥隧交界面施工瓶颈，实现毫米级高精度箱梁架设，保障桥隧衔接结构的安全稳定。在后续高速公路建设中，桥隧连接工程应当进一步推行BIM技术在施工模拟、冲突检查中的应用，深化桥隧协同监测体系，持续优化隧包桥等创新工艺，完善过渡段地基处理、防排水一体化技术体系，降低不均匀沉降、结构开裂、渗漏水等病害发生概率。同时，持续总结工程经验，完善标准化施工工法，推动桥隧连接工程施工技术体系不断成熟，提升高速公路建设质量与长期服役安全性。

【参考文献】

- [1] 万凯巍. 桥梁隧道工程施工中灌浆加固技术的应用研究——以广西鱼宜高速公路项目为例[J]. 城市建设, 2025, (23): 81-83.
- [2] 陈连鹏. 高速公路隧道与桥梁连接段的路基工程关键技术研究[C]//中国智慧工程研究会. 2025 智慧设计与建造经验交流论文集. 2025: 126-128.
- [3] 金建军. 高速公路隧道与桥梁连接段的路基工程关键技术研究[J]. 产品可靠性报告, 2025, (4): 147-148.
- [4] 杨超. 高速公路桥梁与隧道连接工程施工关键技术研究[J]. 交通世界, 2024, (7): 163-165.
- [5] 李太平. 高速公路路基、桥梁、隧道衔接方案研究[J]. 运输经理世界, 2024, (2): 89-91.
- [6] 李迪, 盛利. 隧道地质预报技术写入交通部《公路隧道施工技术规范》[N]. 科技日报, 2020-08-17 (007).

作者简介: 孔伟 1987.04.21 男 甘肃张掖 汉族 大学本科 工程师 中铁隧道集团三处有限公司 研究方向: 高速铁路隧道与桥梁工程。