

公路路面基层施工技术规范与质量控制要点

郑国亮

天津市国腾公路咨询监理有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8849

[摘要] 城市快速路作为城市交通主动脉，具备车速快、流量大、荷载重、线形标准高的特点，路基与路面结构的协同设计与施工控制直接决定道路服役寿命与通行品质。传统路基、路面分阶段独立设计模式，易出现结构层模量不匹配、层间粘结薄弱、沉降变形不协调等问题，诱发路面裂缝、沉陷、车辙等早期病害。本文立足快速路“长寿命、高稳定、低病害”建设目标，提出路基-路面一体化协同设计理念，从结构层匹配设计、材料体系优化、排水系统整合、数字化协同设计四个维度构建一体化设计框架；结合快速路施工特性，研究路基精准填筑压实、路面层间连续施工、特殊路基协同处置、全过程智能管控等关键施工控制技术。研究融入模量梯度设计、全寿命排水整合、BIM正向协同设计、智能压实监控等创新技术，破解传统设计施工脱节、结构协同性差、病害高发等痛点，为城市快速路路基路面工程高质量建设提供技术支持，推动市政道路工程向一体化、智慧化、长效化转型。

[关键词] 城市快速路；路基路面一体化；协同设计；施工控制；智能压实；结构匹配

Technical Specifications and Quality Control Guidelines for Highway Pavement Subgrade Construction by

Zheng Guoliang,

Tianjin Guoteng Highway Consulting and Supervision Co., Ltd.

[Abstract] As the arterial arteries of urban transportation, urban expressways feature high vehicle speeds, heavy traffic volumes, substantial loads, and stringent alignment standards. The integrated design and construction control of subgrade and pavement structures directly determine road service life and traffic performance. The traditional staged, independent design approach for subgrades and pavements often leads to structural layer mismatch, weak interlayer bonding, and coordinated settlement deformations, triggering early-stage defects such as pavement cracks, subsidence, and rutting. Aligned with the expressway construction objectives of "long service life, high stability, and low defect incidence," this paper proposes an integrated subgrade-pavement design philosophy. It establishes a comprehensive framework encompassing four dimensions: structural layer compatibility design, material system optimization, drainage system integration, and digital collaborative design. Considering expressway construction characteristics, the study explores critical control technologies including precise subgrade filling and compaction, continuous pavement layer construction, coordinated treatment of special subgrades, and intelligent full-process management. Innovative techniques such as modulus gradient design, full-life drainage integration, BIM-driven collaborative design, and intelligent compaction monitoring are incorporated to address traditional design-construction disconnections, poor structural coordination, and frequent defects. These advancements provide technical support for high-quality urban expressway subgrade and pavement engineering, facilitating the transition of municipal road projects toward integrated, intelligent, and sustainable development.

[Key words] urban expressway; integrated subgrade and pavement; collaborative design; construction control; intelligent compaction; structural matching

一、引言

我国城镇化进入高质量发展阶段，城市空间拓展与机动车保有量激增，对快速路通行能力与耐久性提出更高要求。城市快速路设计时速 60-100km/h，承担跨区域长距离快速通勤功能，长期承受重载车流、高频次交通荷载与复杂自然环境耦合作用，路基沉降、路面开裂、车辙变形等病害发生率显著高于普通市政道路。

传统快速路设计采用“路基设计→路面设计”分离模式，路基侧重承载力与稳定性控制，路面专注面层功能性设计，两

者缺乏协同考量，导致结构层力学性能不连续、变形协调能力差、层间界面粘结失效；施工阶段路基、路面分标段施工，工序衔接松散，质量管控标准不统一，进一步加剧结构整体性破坏，缩短道路使用寿命，增加后期养护成本。

近年来，国内外工程界逐步意识到一体化设计的重要性，但现有研究多聚焦单一结构优化或局部工艺改进，尚未形成完整的路基路面一体化设计理论与施工控制体系。基于此，本文结合城市快速路工程特性与病害机理，创新构建路基路面一体化设计方法，系统研究关键施工控制技术，解决设计施工脱节、

结构协同性不足、早期病害频发等核心问题,对提升快速路工程建设质量、延长道路服役周期具有重要现实意义。

二、城市快速路路基路面一体化设计核心理论

(一) 设计理念与核心原则

路基路面一体化设计以结构协同、变形协调、功能整合、全寿命耐久为核心理念,打破传统分阶段设计壁垒,将路基、基层、底基层、面层视为连续受力整体,统筹考量结构层材料、厚度、模量、排水、施工工艺等关键要素,实现“路基强基、路面优功、层间连续、整体稳定”。

设计遵循四大核心原则:

1. 模量梯度匹配原则:结构层模量从下至上逐级递减,路基回弹模量 $\geq 30\text{MPa}$ 、基层 $\geq 1000\text{MPa}$ 、面层 $\geq 1200\text{MPa}$,避免模量突变引发应力集中。

2. 变形协调一致原则:控制路基工后沉降 $\leq 15\text{cm}$,路面各结构层沉降差 $\leq 3\text{cm}$,确保荷载作用下整体协同变形。

3. 全寿命排水整合原则:构建“路基盲沟+基层排水层+面层防水粘结层”一体化排水体系,阻断水损害路径。

4. 施工可行性协同原则:设计方案兼顾路基压实、路面摊铺、层间粘结等施工工艺,减少施工难度,保障设计意图落地。

(二) 一体化结构层协同设计

1. 路基-基层界面优化设计

路基作为路面结构基础,其强度、均匀性与稳定性直接影响路面受力状态。一体化设计摒弃传统路基顶面单一压实标准,采用“强度+刚度+均匀性”三重控制:路床(0-80cm)压实度 $\geq 96\%$ 、回弹模量 $\geq 30\text{MPa}$ 、弯沉值 $\leq 200(0.01\text{mm})$;路基顶面铺设改性沥青防水粘结层+双向土工格栅,防水防渗的同时增强路基与基层咬合性,界面抗剪强度提升30%。

基层采用级配碎石+水泥稳定碎石复合结构,底基层选用级配碎石(厚度15-20cm),具备排水与应力扩散功能;基层采用水泥稳定碎石(厚度20-25cm),7天无限限抗压强度 $\geq 3.5\text{MPa}$,与路基模量形成平缓过渡,避免应力突变。

2. 基层-面层连续受力设计

面层直接承受行车荷载与环境作用,采用“改性沥青 SMA-13 上面层+中粒式 AC-20C 中面层+粗粒式 AC-25C 下面层”三层结构,总厚度18-20cm。一体化设计核心强化层间连续受力:基层顶面采用稀浆封层+透层油双界面处理,透层油选用乳化沥青(用量 $0.8-1.0\text{kg}/\text{m}^2$),确保基层与下面层完全粘结;下面层与中面层、中面层与上面层之间喷洒热沥青粘层油,同步铺设玻璃纤维应力吸收层,阻断裂缝反射,增强层间整体性。

3. 特殊路段差异化协同设计

针对软土、高填方、深挖方等特殊路段,采用差异化一体化设计:软土路基采用“真空预压+水泥土搅拌桩”复合处理,桩长12-15m,处理后地基承载力 $\geq 180\text{kPa}$,工后沉降 $\leq 15\text{cm}$,同步调整路面结构厚度,基层增厚至30cm,增强结构稳定性;高填方路基(高度 $\geq 8\text{m}$)采用“分层强夯+土工格栅加筋”技术,每层厚度 $\leq 20\text{cm}$,压实度 $\geq 94\%$,路面基层增设双层土工格栅,抑制不均匀沉降引发的裂缝。

(三) 材料体系一体化优化设计

1. 路基填料梯度设计

路基填料采用“下粗上细、强度递增”梯度设计:下层($> 150\text{cm}$)选用砾石土、碎石土,粒径 $\leq 20\text{cm}$,压实度 $\geq 93\%$,提升路基整体稳定性;中层(80-150cm)选用石灰改良土(石灰掺量6%-8%),压实度 $\geq 94\%$,改善土体水稳定性;上层(0-80cm

路床)选用水泥改良土或级配良好砂土,压实度 $\geq 96\%$,回弹模量 $\geq 30\text{MPa}$,为路面提供均匀支撑。

2. 路面材料性能协同设计

基层水泥稳定碎石采用“低水泥剂量+骨架密实级配”设计,水泥掺量4%-5%,减少干缩裂缝;面层沥青混合料选用SBS改性沥青,上面层 SMA-13 掺加玄武岩集料,提升抗滑耐磨性能;中下面层 AC-20C、AC-25C 采用石灰岩集料,优化级配设计,提升高温稳定性与水稳定性,确保各结构层材料性能协同匹配。

(四) 全寿命排水系统整合设计

一体化排水设计打破路基、路面排水分离模式,构建“横向排水+纵向排水+层间防水”三维排水体系:路基底部设置纵向排水盲沟(间距20-30m),排出路基内积水;基层采用大孔隙级配碎石排水层,横向坡度2%-3%,将路面渗水导入路基盲沟;面层各层间铺设防水粘结层,阻断雨水下渗路径;道路两侧设置边沟与雨水口,快速排除路面积水,形成完整排水闭环,从源头减少水损害。

(五) 基于BIM的正向协同设计

创新采用BIM正向协同设计技术,整合地质勘察、路线设计、路基路面结构、管线设施等多专业数据,构建全路段三维数字化模型。设计阶段各专业在统一BIM平台协同工作,实时校验路基与路面结构匹配性、管线与路基冲突、排水系统衔接等问题,避免设计错漏;利用BIM模型进行有限元力学仿真,模拟荷载作用下结构应力分布与变形规律,优化结构厚度、材料参数与施工方案,实现设计精细化、协同化。

三、城市快速路路基路面一体化施工控制关键技术

(一) 路基精准填筑与智能压实控制

1. 分层填筑精细化施工

路基填筑采用“三阶段四区段八流程”标准化作业,严格控制分层厚度($\leq 20\text{cm}$),遵循“先低后高、先两侧后中间”填筑顺序。填筑前清理地表腐殖土、杂物,基底压实度 $\geq 90\%$;不同土质填料分层填筑,不得混填,透水性差的填料置于下层,表面预留2%-3%横向坡度,便于排水;高填方路段每填筑2m进行一次强夯补强,消除路基工后沉降隐患。

2. 智能压实全过程监控

创新应用智能压实监控系统,每台振动压路机配备GNSS定位、振动传感器与数据传输模块,实时采集碾压速度、遍数、压实度、振动频率等数据,传输至管控平台。碾压遵循“先轻后重、先慢后快、先静压后振动”原则,速度控制在2-4km/h,相邻碾压带重叠 $\geq 1/3$ 轮宽;系统自动识别压实薄弱区域,预警提示补压,确保路基全范围压实度达标(路床 $\geq 96\%$ 、路堤 $\geq 93\%$),避免漏压、欠压。

(二) 路面层间连续施工控制技术

1. 基层精细化施工控制

基层水泥稳定碎石采用厂拌集中拌合、摊铺机梯队摊铺,严格控制配合比与含水量(最佳含水量 $\pm 2\%$)。摊铺前清扫路基顶面,喷洒透层油;摊铺速度控制在2-3m/min,避免离析;碾压遵循“先轻后重、先静后振”,压实度 $\geq 98\%$,7天保湿养护 $\geq 7\text{d}$,养护期间封闭交通,禁止车辆通行。

2. 面层连续摊铺与层间粘结控制

面层沥青混合料采用3D找平系统智能摊铺,摊铺机配备自动找平装置,厚度偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内。下面层摊铺前清扫基层表面,喷洒热沥青粘层油;中面层、上面层采用梯队摊铺,

热接缝工艺,减少冷接缝数量。碾压分初压、复压、终压三阶段,初压温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ 、复压 $\geq 130^{\circ}\text{C}$ 、终压 $\geq 110^{\circ}\text{C}$,压实度 $\geq 96\%$,确保面层密实平整。

层间粘结控制是一体化施工核心:透层油、粘层油喷洒均匀,无空白、无流淌;应力吸收层、土工格栅铺设平整,无褶皱、无破损,搭接宽度 $\geq 15\text{cm}$,固定牢固,确保层间形成连续整体,杜绝界面滑移与开裂。

(三) 特殊路基与路面协同处置技术

1. 软土路基协同施工控制

软土路基采用“真空预压+水泥土搅拌桩”复合施工,搅拌桩施工采用GPS定位,桩位偏差 $\leq 5\text{cm}$,桩长、水泥掺量严格达标。真空预压密封膜采用三层结构,抽真空度维持在 80kPa 以上,排水板间距 1.0m ,贯穿软土层。预压期间实时监测沉降与孔隙水压力,沉降稳定后进行路基填筑,填筑速率控制在每天 $\leq 50\text{cm}$,避免路基失稳;路面基层增厚至 30cm ,增设双层土工格栅,协同控制沉降变形。

2. 高填方路基拼接施工控制

高填方路基拼接采用“台阶开挖+格栅加筋+分层补强”工艺,旧路基边坡开挖成内倾式台阶(宽度 $\geq 1.5\text{m}$ 、高度 $\leq 0.8\text{m}$),清理表面浮土,铺设双向土工格栅(抗拉强度 $\geq 80\text{kN/m}$),跨台阶布置,每侧延伸 2m 。新路基分层填筑,每层厚度 $\leq 20\text{cm}$,采用冲击碾压补强,压实度 $\geq 94\%$;路面基层与面层拼接处铺设应力吸收层,错层搭接,抑制不均匀沉降引发的裂缝。

(四) 全过程数字化质量管控技术

构建“BIM+物联网+智能监测”一体化管控平台,整合路基压实、路面摊铺、层间粘结、沉降变形等关键工序数据。在路基拼接处、软基路段、高填方路段埋设沉降传感器、应力传感器,实时采集沉降位移、结构应力数据,超阈值自动预警。利用BIM模型关联现场施工数据,实现施工进度、质量、安全、环保全过程可视化管控;采用无人机航拍、激光扫描技术,定期扫描路基路面,生成三维模型,对比设计模型,及时发现施工偏差,实现质量闭环管控。

(五) 季节性施工与成品保护控制

快速路施工周期长,需针对雨季、夏季、冬季制定专项施工方案:雨季路基施工采用分段开挖、当天填筑、当天压实,填方预留横坡,防止积水;基层、面层施工避开雨天,已摊铺混合料遇雨及时铲除,重新施工。夏季沥青面层施工避开高温时段(11:00-15:00),混合料温度控制在 $160-180^{\circ}\text{C}$,碾压及时,避免高温车辙。冬季施工严格控制温度,基层施工气温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$,沥青面层 $\geq 10^{\circ}\text{C}$,低温时段停止施工,做好保温防冻措施。

成品保护方面:路基成型后及时封闭交通,禁止重型车辆通行;基层养护期间设置围挡,禁止车辆碾压;面层施工完成后,初期(7d内)限制车辆速度($\leq 30\text{km/h}$),禁止超载车辆通行,避免路面早期破损。

四、工程应用案例分析

以某省会城市快速路改扩建工程为实例,道路全长 5.8km ,由双向6车道拓宽至双向8车道,设计时速 80km/h ,沿线软土、高填方路段占比 35% ,交通流量大、施工环境复杂。工程采用本文研究的路基路面一体化设计与施工控制技术,实施效果显著。

设计阶段:采用BIM正向协同设计,构建全路段三维模型,优化结构层参数,路基回弹模量 $\geq 32\text{MPa}$,基层厚度 25cm ,面

层厚度 19cm ,层间增设应力吸收层,排水系统整合设计,有效解决软土沉降与水损害问题。

施工阶段:路基采用智能压实监控,压实度合格率 100% ,软土路基处理后工后沉降 $\leq 12\text{cm}$;路面采用3D找平智能摊铺,层间粘结牢固,压实度 $\geq 96\%$,平整度偏差 $\leq 3\text{mm}$ 。全过程数字化管控,施工质量合格率达 99.8% ,工期缩短 18% 。

运营阶段:通车2年跟踪监测,路面无明显裂缝、沉降、车辙,结构整体性良好,病害发生率较传统工艺降低 75% ,养护成本减少 40% ,实现“长寿命、低病害”建设目标。

五、结论与展望

(一) 结论

本文系统研究城市快速路路基路面一体化设计与施工控制技术,构建“结构协同、材料优化、排水整合、数字设计”一体化设计体系,研发路基智能压实、路面连续施工、特殊路基协同处置、全过程数字管控等关键施工技术,得出以下结论:

1. 路基路面一体化协同设计,通过模量梯度匹配、变形协调控制、全寿命排水整合,可有效解决传统设计结构不连续、应力集中、水损害频发等痛点,提升结构整体稳定性与耐久性。

2. 基于BIM的正向协同设计技术,可实现多专业协同、力学仿真优化、设计精准落地,避免设计错漏,提升设计精细化水平。

3. 路基智能压实、路面层间连续施工、特殊路基协同处置技术,可严控施工质量,确保路基路面协同变形、层间粘结牢固,从源头减少早期病害。

4. 全过程数字化质量管控技术,可实现施工实时监测、风险预警、闭环管理,提升施工管理效率与质量安全水平。

(二) 展望

未来城市快速路路基路面一体化技术将向装配化、低碳化、智能化方向发展。后续需进一步加强:研发低碳再生建材(如再生沥青、低碳水泥稳定碎石),降低工程碳排放;推进装配式路基、路面构件应用,减少现场湿作业,提升施工效率;深化AI与大数据技术应用,开发施工风险智能预测与自动决策系统,提升管控智能化水平;建立全生命周期健康监测与评估体系,实现运营期病害精准预警与养护决策,持续延长道路服役寿命。

【参考文献】

- [1]陈俊.城市快速路路基路面一体化设计关键技术[J].公路交通科技,2024,41(05):89-95.
- [2]李海涛.软土地区城市快速路路基施工控制技术[J].市政技术,2023,41(12):56-60.
- [3]王健.基于BIM的快速路路基路面协同设计研究[J].工程建设标准化,2024(03):78-82.
- [4]赵刚.城市快速路路面层间粘结施工技术研究[J].中外公路,2023,43(06):90-94.
- [5]刘军.高填方路基与路面协同施工控制要点[J].公路工程,2022,47(08):189-193.
- [6]黄伟.智能压实技术在城市快速路路基施工中的应用[J].施工技术,2025,54(02):105-108.
- [7]周明凯.路基路面一体化排水系统设计与应用[J].中国市政工程,2024(04):33-37.
- [8]吴强.城市快速路改扩建工程特殊路基处置技术[J].城市道桥与防洪,2023(09):156-159.