

# 城市快速路路基路面一体化设计及施工控制

苏琳晨

天津市国腾公路咨询监理有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8839

**[摘要]** 城市快速路作为城市交通主动脉，具有车速快、流量大、重载占比高、服役环境复杂等特征，路基与路面的协同变形、应力传递及耐久性匹配，直接决定道路整体服役寿命与行车安全。传统“路基、路面分置式”设计与施工模式，易引发路基沉降不均、路面反射裂缝、层间脱离等病害，制约快速路服务品质提升。本文立足全生命周期理念，创新提出“结构协同、材料适配、排水贯通、智能管控”的路基路面一体化设计框架，融合 BIM 正向设计、绿色再生材料、装配式施工及智能监测技术，构建从设计优化、材料创新、施工控制到运维保障的一体化技术体系。重点剖析一体化设计核心要点、关键施工工艺及质量控制标准，为解决城市快速路长期稳定性难题、延长道路使用寿命、降低全周期养护成本提供理论支撑与实践参考。

**[关键词]** 城市快速路；路基路面一体化；协同设计；施工控制；智能监测

## Integrated Design and Construction Control for Urban Expressway Subgrade and Pavement

Su Linchen

Tianjin Guoteng Highway Consulting and Supervision Co., Ltd.

**[Abstract]** As the main artery of urban transportation, urban expressways feature high speeds, heavy traffic volumes, a significant proportion of heavy loads, and complex operating environments. The coordinated deformation, stress transfer, and durability compatibility between subgrade and pavement directly determine the overall service life and traffic safety of the road. The traditional "separate subgrade-pavement" design and construction approach often leads to issues such as uneven subgrade settlement, reflective pavement cracks, and interlayer separation, hindering the improvement of expressway performance. Grounded in the full life-cycle philosophy, this paper proposes an innovative integrated design framework for subgrade and pavement characterized by "structural synergy, material compatibility, continuous drainage, and intelligent management." By integrating BIM-based design, green recycled materials, prefabricated construction, and smart monitoring technologies, the framework establishes a comprehensive technical system encompassing design optimization, material innovation, construction control, and operational maintenance. The study meticulously analyzes the core principles of integrated design, key construction techniques, and quality control standards, providing theoretical support and practical guidance for addressing long-term stability challenges, extending road service life, and reducing lifecycle maintenance costs.

**[Key words]** urban expressway; integrated subgrade and pavement; collaborative design; construction control; intelligent monitoring

### 一、引言

城市快速路是构建高效城市交通网络的核心载体，承担着快速疏解跨区域长距离交通的重要功能，设计车速多为 60-100km/h，对路面平整度、结构强度、行车舒适性及耐久性要求远高于普通市政道路。我国城市快速路建设近年来进入高峰期，截至 2025 年，全国建成通车城市快速路总里程超 2.5 万公里，但在长期服役过程中，路基沉降、路面裂缝、层间滑移、水损害等病害频发，据统计，通车 5-8 年的快速路病害发生率达 45% 以上，其中 80% 以上病害源于路基与路面设计脱节、施工衔接不畅。

传统设计模式将路基与路面作为独立单元，路基侧重承载与稳定性，路面侧重行车功能与耐久性，缺乏协同变形与应力

传递的系统性考量；施工阶段路基与路面分区分段作业，层间处理粗糙、压实标准不统一、排水系统衔接不畅，导致路基路面整体性差、病害反复发生。同时，城市快速路建设面临软土、高地下水位、地下管线密集、施工交通组织复杂等特殊工况，对路基路面一体化技术提出更高要求。

为突破传统技术瓶颈，本文基于结构力学、材料力学及排水工程理论，创新构建路基路面一体化设计体系，明确协同设计核心原则与关键参数，研发适配城市工况的绿色高性能材料与装配式施工工艺，建立全过程智能施工控制与监测机制，实现路基路面“结构一体、材料一体、排水一体、管控一体”，为城市快速路长效服役提供技术保障。

### 二、城市快速路路基路面一体化设计核心理论

### (一) 一体化设计核心原则

城市快速路路基路面一体化设计以“协同承载、变形协调、防水贯通、耐久适配”为核心,打破传统分置设计边界,实现四大统一:

1. 结构体系统一: 路基、基层、面层作为连续承载体系,实现应力逐层均匀传递,避免刚度突变引发应力集中。
2. 变形协调统一: 控制路基工后沉降、路面温缩变形与荷载变形匹配,将路基路面沉降差控制在5mm以内,杜绝反射裂缝与层间脱离。
3. 排水系统统一: 构建“路面横坡+基层排水层+路基盲沟+边坡防护”贯通式排水体系,实现雨水快速排出,阻断水损害路径。
4. 材料性能统一: 路基填料、基层材料、面层材料的强度、模量、水稳定性梯度匹配,形成“强基稳底、刚柔协同”的材料体系。

### (二) 结构协同设计

#### 1. 路基结构精细化设计

路基作为承载基础,需具备足够强度、均匀性与稳定性,快速路路基顶面回弹模量 $\geq 30\text{MPa}$ ,路床(0-80cm)压实度 $\geq 95\%$ ,路堤(80-150cm) $\geq 93\%$ 。创新采用“分层模量匹配”设计:路床采用级配碎石+水泥改良土复合结构,模量控制在40-50MPa;路堤采用再生集料改良土,模量25-35MPa,实现路基模量自上而下梯度递减,与基层模量平滑衔接。

针对软土、高地下水位等特殊路基,采用“真空预压+水泥搅拌桩”复合地基处理,结合BIM技术模拟沉降分布,优化桩长与间距,将工后沉降控制在30cm以内,较传统刚性桩方案成本降低15%,工期缩短2个月。

#### 2. 路面结构一体化匹配设计

摒弃传统“面层+基层”简单叠加模式,创新采用“高模量沥青面层+应力吸收层(SAMI)+再生水稳基层+级配碎石底基层”复合结构,总厚度控制在60-70cm。

- 面层: 4cm SMA-13 改性沥青+6cm AC-20 中粒式沥青,采用SBS改性沥青(掺量5%),提升高温稳定性与低温抗裂性。

- 应力吸收层: 1.5cm 橡胶沥青玻纤格栅复合层,缓冲基层裂缝向上反射,反射裂缝发生率降低80%。

- 基层: 20cm 再生水泥稳定碎石(掺30%旧料再生集料),强度 $\geq 4\text{MPa}$ ,兼具强度与抗冲刷性。

- 底基层: 15cm 级配碎石,兼具排水与应力扩散功能,与路基形成稳定过渡。

#### 3. 层间界面一体化设计

层间脱离是快速路路面破坏的核心诱因,创新采用“界面处理+黏结材料+嵌锁构造”三重防护:路基与底基层间铺设土工布,防止细粒土渗透;底基层与基层间采用水泥浆喷洒+铣刨嵌锁;基层与面层间采用高黏结力乳化沥青(用量 $0.6-0.8\text{kg}/\text{m}^2$ )+玻纤格栅,层间黏结强度 $\geq 0.4\text{MPa}$ ,杜绝滑移与脱空。

### (三) 排水系统一体化设计

构建“地表排水+结构排水+地下排水”三维贯通排水体系,解决城市快速路水损害难题。

1. 地表排水: 路面设置2%双向横坡,两侧设置预制装配式边沟,与市政雨水管网衔接,快速排除路面积水。

2. 结构排水: 基层底部设置横向排水盲沟(间距5m),底基层采用透水级配碎石,将渗入结构层的雨水导入边沟。

3. 地下排水: 路基底部设置防渗层+纵向盲沟,高地下水位路段增设降水井,控制路基处于干燥或中湿状态,避免路基软化沉降。

### (四) 材料一体化创新设计

立足绿色低碳与性能提升,研发适配一体化设计的新型材料。

1. 再生集料改良填料: 将城市道路拆除旧料、建筑垃圾破碎筛分,掺5%-8%石灰改良,用于路基填筑,固废利用率达90%以上,减少碳排放1500吨/公里。

2. 高韧性水稳材料: 基层水泥稳定碎石中掺0.3%玄武岩纤维,提升抗裂强度与柔韧性,减少干缩裂缝。

3. 水激活沥青黏结材料: 层间黏结采用水激活沥青,常温施工,遇水快速固化,黏结强度提升30%,缩短施工周期。

## 三、城市快速路路基路面一体化施工关键技术

### (一) BIM正向设计与施工模拟

采用BIM技术构建路基路面三维一体化模型,整合地质勘察、地下管线、结构设计等数据,实现设计可视化与碰撞检测,提前规避管线冲突、结构衔接缺陷。施工前进行全过程模拟,优化施工工序、机械配置与交通组织,采用“分区分段、立体作业”模式,将施工对交通影响降低至最小,施工效率提升20%。

### (二) 路基精细化施工控制

1. 填料质量严控: 优先选用级配良好砾类土、再生改良土,严禁使用淤泥、冻土、有机土;填料粒径路床 $\leq 10\text{cm}$ 、路堤 $\leq 15\text{cm}$ ,含水率控制在最佳含水率 $\pm 2\%$ 。

2. 分层填筑碾压: 采用水平分层填筑,松铺厚度土方20-30cm、石方30-50cm;碾压遵循“先轻后重、先慢后快、先边缘后中间”,振动压路机碾压,轮迹重叠1/3,压实度100%检测合格后方可进入下道工序。

3. 特殊路基处理: 软土路基真空预压联合水泥搅拌桩施工,严格控制桩位、桩长与喷浆量,桩身完整性检测合格率 $\geq 95\%$ ;路基拼接采用梯度渐变+冲击碾压+注浆加固,沉降差控制在5mm以内。

### (三) 路面一体化施工工艺

1. 基层装配式施工: 再生水稳基层采用厂拌集中生产、摊铺机摊铺,3D找平系统控制平整度(偏差 $\leq 3\text{mm}$ ),碾压后及时养护,7天抗压强度 $\geq 4\text{MPa}$ ;养护完成后铣刨界面,增强层间嵌锁。

2. 应力吸收层施工: 橡胶沥青加热至180-190 $^{\circ}\text{C}$ ,喷洒量2.0-2.2 $\text{kg}/\text{m}^2$ ,同步铺设玻纤格栅,碾压密实,无褶皱、无破损。

3. 面层智能摊铺压实: 沥青混合料采用厂拌热再生技术,拌和温度160-170 $^{\circ}\text{C}$ ;摊铺机配备3D找平系统,连续匀速摊铺,速度2-3 $\text{m}/\text{min}$ ;碾压采用“双钢轮初压+胶轮复压+双钢轮终压”,压实度 $\geq 96\%$ ,平整度合格率 $\geq 98\%$ 。

### (四) 层间界面与排水系统施工

1. 层间处理: 路基表面清理干净后铺设土工布,搭接宽度 $\geq 20\text{cm}$ ;基层表面铣刨后喷洒水泥浆,均匀无遗漏;面层施工前喷洒高黏结乳化沥青,撒布少量碎石,增强黏结与嵌锁。

2. 排水系统施工: 排水盲沟采用透水性强级配碎石,外

包土工布,防止堵塞;预制边沟工厂预制、现场吊装,接缝采用密封胶防水,确保排水通畅。

#### (五) 绿色与智能施工技术

1. 绿色施工:采用温拌沥青技术,降低拌和摊铺温度 30-50℃,减少沥青烟气排放;旧料再生利用,路基路面旧料利用率达 90%以上,减少固废排放

2. 智能监测:路基埋设沉降传感器、应力传感器,路面埋设温度、应变传感器,实时监测路基沉降、路面应力应变及裂缝发展,数据实时传输至管控平台,实现动态预警与精准调控。

### 四、全过程质量控制与验收标准

#### (一) 原材料质量控制

建立原材料“进场检验-过程抽检-出厂复检”三级检测体系,沥青、集料、水泥、再生集料等原材料需符合国家标准,关键指标(如沥青针入度、集料压碎值、水泥强度)100%合格,不合格材料严禁使用。

#### (二) 施工过程质量控制

1. 路基工程:压实度、弯沉值 100%合格,纵断高程偏差 $\leq \pm 15\text{mm}$ ,中线偏位 $\leq 20\text{mm}$ ,平整度 $\leq 15\text{mm}/3\text{m}$ 。

2. 基层工程:压实度 $\geq 98\%$ ,7天抗压强度 $\geq 4\text{MPa}$ ,平整度 $\leq 8\text{mm}/3\text{m}$ ,厚度偏差 $\leq \pm 10\text{mm}$ 。

3. 面层工程:压实度 $\geq 96\%$ ,厚度偏差 $\leq -5\sim +10\text{mm}$ ,平整度 $\leq 3\text{mm}/3\text{m}$ ,摩擦系数 $\geq 55\text{BPN}$ ,构造深度 $\geq 0.55\text{mm}$

4. 层间与排水:层间黏结强度 $\geq 0.4\text{MPa}$ ,无脱空、滑移;排水系统通畅,无积水、渗漏。

#### (三) 竣工验收与运营监测

完工后进行竣工验收,采用无损检测(雷达、红外)与钻芯取样结合,检测结构厚度、密实度、层间黏结质量;通车后建立运营监测体系,定期巡查病害,结合智能监测数据,评估道路服役状态,及时制定养护方案,保障一体化结构长效稳定。

### 五、工程应用案例分析

#### (一) 工程概况

某城市快速路主线全长 8.6km,双向 6 车道,设计车速 80km/h,路基宽度 32m,路面结构采用一体化复合设计。沿线地质复杂,含软土路段 2.3km,地下管线密集,交通组织难度大,要求施工周期 12 个月,通车后 5 年内无大修。

#### (二) 一体化设计与施工方案

1. 设计方案:采用 BIM 正向设计,路基采用再生集料改良土+复合地基处理,路面采用“4cmSMA-13+6cmAC-20+1.5cmSAM I+20cm 再生水稳+15cm 级配碎石”一体化结构,构建三维贯通排水体系

2. 施工方案:分 3 个工区同步施工,路基采用分层填筑+智能碾压,路面采用装配式基层+智能摊铺,层间界面强化处理,全程智能监测,旧料再生利用率 92%。

#### (三) 应用效果

工程完工后验收合格,通车 12 个月跟踪监测:路基沉降稳定,工后沉降 $\leq 15\text{cm}$ ,沉降差 $\leq 3\text{mm}$ ;路面无反射裂缝、层间脱离,平整度、摩擦系数等指标优良;施工周期较传统方案缩短 3 个月,养护成本降低 35%,实现“长寿命、低养护、绿色环保”目标。

### 六、结论与展望

#### (一) 结论

城市快速路路基路面一体化设计与施工控制,是解决传统分置模式病害频发、提升道路服役寿命的核心技术。本文构建的“结构协同、材料适配、排水贯通、智能管控”一体化技术体系,突破了传统技术瓶颈:

1. 一体化设计实现路基路面应力均匀传递、变形协调匹配,从源头抑制反射裂缝、层间脱离、路基沉降等病害;

2. 绿色再生材料与装配式施工技术,提升资源利用率,降低碳排放,契合“双碳”目标;

3. BIM 正向设计、智能摊铺压实与全过程监测技术,实现施工精细化管控,保障工程质量;

4. 工程实践表明,该技术体系可延长道路使用寿命 50%以上,降低全周期养护成本 30%-40%,适配城市快速路复杂工况需求。

#### (二) 展望

随着新材料、新技术、智能化技术的发展,城市快速路路基路面一体化技术将朝着“长寿命、绿色化、智能化、装配化”方向发展:

1. 研发自愈合沥青、纳米改性再生材料、高韧性基层材料,进一步提升结构耐久性与自愈能力;

2. 深化 BIM+GIS+物联网融合应用,构建全生命周期数字孪生平台,实现设计、施工、运维全过程智能化管控

3. 推广全装配式路基路面技术,实现工厂预制、现场快速拼装,大幅缩短施工周期,降低交通影响;

4. 开展极端气候、重载交通下一体化结构长期性能演化规律研究,完善设计理论与标准体系,为城市快速路高质量建设提供技术支撑。

#### [参考文献]

[1]张博.城市快速路路基路面结构一体化设计研究[J].交通科技,2024(5):56-60.

[2]李丹.再生绿色建造技术在城市快速路中的应用[J].建筑技术,2025,56(3):321-324.

[3]刘伯华.城市快速路软土路基复合地基处理技术研究[J].岩土工程学报,2023,45(S1):189-193.

[4]闫玲.城市快速路路面层间界面处理技术优化[J].公路工程,2022,47(4):156-160.

[5]李蒙蒙.BIM 技术在城市快速路路基路面设计施工中的应用[J].智能城市,2021,7(20):78-80.

[6]魏家丽.城市快速路路基路面一体化排水系统设计[J].城市道桥与防洪,2020(9):45-48.

[7]陈天峰.城市快速路沥青路面智能摊铺压实技术研究[J].施工技术,2024,53(12):89-92.

[8]中华人民共和国住房和城乡建设部.CJJ37-2012(2016年版)城市道路工程设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[9]孙志涛.城镇道路工程施工质量验收规范解读[M].北京:中国建筑工业出版社,2023.

[10]应波.绿色低碳理念下城市快速路旧料再生利用技术[J].环境工程,2022,40(6):234-237.