



## Study on Collaborative Application of Recycled Asphalt Mixture and New Cement-Based Materials and Subgrade Stability Technology

Qihang Zhang\*

Yunnan Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan, China

**【Abstract】** To address issues in highway engineering such as high resource consumption of pavement materials, insufficient sub-grade stability, and construction difficulties in special geological sections, this study conducts systematic research from four dimensions: development of new pavement materials, optimization of pavement structure, subgrade stabilization technology, and construction quality control. In terms of material development, recycled asphalt mixture is prepared by incorporating 30% Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and new composite cement (containing 10% ground granulated blast-furnace slag). Its high-temperature stability (dynamic stability of 3850 times/mm) and low-temperature crack resistance (low-temperature bending strain of 2850 $\mu\epsilon$ ) are increased by 28.3% and 19.2% respectively compared with ordinary asphalt mixture. For pavement structure optimization, based on the elastic layered system theory, the thickness of the semi-rigid base is adjusted from 20cm to 18cm, combined with a new cement-based material base, improving the pavement bearing capacity by 15.6%. In subgrade engineering, vacuum preloading combined with cement-soil mixing piles is adopted for soft soil subgrades, controlling settlement within 15mm; for frozen soil subgrades, polyurethane insulation boards and crushed stone blind ditches are used synergistically, reducing frost heave to 8mm. During construction, real-time monitoring (moisture content, compaction degree) and digital management increase the qualified rate of pavement compaction from 92% to 98%. Applied to a highway project in Yunnan, the pavement damage rate is only 3.2% after 3 years of service, and subgrade stability meets specification requirements, providing technical support for the green and efficient construction of highway engineering.

**【Keywords】** Recycled Asphalt Mixture; New Cement-Based Materials; Subgrade Stability Technology; Pavement Structure Optimization; Construction Quality Control

## 再生沥青混合料与新型水泥基材料协同应用及路基稳定技术研究

张启航 \*

云南省交通规划设计研究院有限公司，云南昆明 650011

**【摘要】** 针对公路工程路面材料资源消耗大、路基稳定性不足及特殊地质路段施工难等问题，本研究从新型路面材料研发、路面结构优化、路基稳定技术及施工质量控制四维度展开系统研究。材料研发方面，掺 30% 废旧沥青混合料 (RAP) 与含 10% 矿渣粉的新型复合水泥制备再生沥青混合料，其高温稳定性（动稳定性 3850 次 /mm）、低温抗裂性（低温弯曲应变 2850 $\mu\epsilon$ ）分别较普通沥青混合料提升 28.3%、19.2%；路面结构优化基于弹性层状体系理论，将半刚性基层厚度调整为 18cm 并结合新型水泥基材料基层，承载能力提升 15.6%；路基工程中，软土路基采用真空预压 + 水泥土搅拌桩联合处理，沉降量 < 15mm，冻土路基通过聚氨酯保温板与碎石盲沟协同措施，冻胀量降至 8mm；施工阶段依托实时监测与数字化管控，路面压实度合格率从 92% 提升至 98%。研究成果应用于云南某高速公路，路面使用 3 年破损率仅 3.2%，路基稳定性达标，为公路工程绿色高效建设提供技术支撑。

**【关键词】** 再生沥青混合料；新型水泥基材料；路基稳定技术；路面结构优化；施工质量控制

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

公路工程作为交通基础设施的核心组成，其建设质量与耐久性直接影响区域经济发展。当前，我国公路建设面临三大核心挑战：一是**资源消耗问题**，传统沥青路面施工需大量原生石料与沥青，每公里高速公路沥青用量约1200吨，且废旧沥青路面（RAP）回收率不足60%，资源浪费与环境污染问题突出[1]；二是**路基稳定性问题**，在软土、冻土等特殊地质区域，路基沉降、冻胀等病害发生率达25%以上，导致路面早期破损率升高[2]；三是**结构承载问题**，随着重载交通量增长，传统半刚性路面基层易出现反射裂缝，路面使用寿命缩短至8-10年，远低于设计预期的15年[3]。

新型路面材料研发、路基稳定技术创新及施工质量管控成为解决上述问题的关键。再生沥青混合料的推广应用可降低30%以上的石料消耗，新型水泥基材料（如复合水泥、纤维增强水泥）能提升基层强度与抗裂性，而针对性的路基处理技术（如真空预压、保温措施）可有效控制特殊地质病害[4]。因此，开展再生沥青混合料与新型水泥基材料协同应用及路基稳定技术研究，对推动公路工程绿色化、长寿命化建设具有重要现实意义。

### 1.2 国内外研究现状

国外在再生沥青混合料研究方面起步较早，美国联邦公路管理局（FHWA）已实现RAP掺量40%的工程应用，通过添加抗老化剂使再生混合料性能接近原生材料[5]；欧洲在新型水泥基材料领域开发了碱激发水泥基层，利用工业废渣（矿渣、粉煤灰）替代50%以上水泥，降低碳排放的同时提升基层耐久性[6]。国内研究聚焦特殊地质路基处理，如针对软土路基研发了真空预压+塑料排水板联合技术，沉降控制效果提升30%[7]；针对冻土路基采用通风管路基与保温层协同措施，冻胀量控制在10mm以内[8]。

但现有研究仍存在不足：一是再生沥青混合料与新型水泥基材料的协同应用研究较少，未形成系统的路面结构设计方案；二是特殊地质路基处理技术多针对单一病害，缺乏多措施协同优化；三是施工质量控制多依赖人工检测，数字化、实时化管控技术应用不足。本研究针对上述短板，构建“材料

研发 - 结构优化 - 路基稳定 - 质量管控”一体化技术体系，填补相关研究空白。

### 1.3 研究内容与技术路线

本研究围绕四个核心内容展开：（1）再生沥青混合料与新型水泥基材料研发，确定最优配合比与性能指标；（2）基于弹性层状体系理论优化路面结构，提出再生混合料面层与新型水泥基基层的协同设计方案；（3）针对软土、冻土路基，研发多措施协同的稳定技术；（4）建立施工阶段实时监测与数字化质量控制体系。技术路线分为三个阶段：实验室试验（材料性能测试）→理论分析（结构设计与力学计算）→工程验证（实体工程应用与效果评估），确保研究成果的科学性与实用性。

## 2 新型路面材料研发与性能评价

### 2.1 再生沥青混合料配合比设计与性能

再生沥青混合料的性能关键在于RAP掺量与再生剂的选择。本研究采用三级配RAP（铣刨料粒径5-30mm），通过室内试验确定最优配合比：RAP掺量30%，再生剂（糠醛抽出油）掺量3%，新沥青（SBS改性沥青）用量4.8%，石料采用玄武岩（压碎值18%）。性能测试结果表明：该再生混合料高温稳定性（60℃动稳定性）达3850次/mm，较普通沥青混合料（2990次/mm）提升28.3%，满足重载交通路段要求（规范要求≥3000次/mm）；低温抗裂性（-10℃低温弯曲应变）达2850 $\mu\epsilon$ ，较普通混合料（2390 $\mu\epsilon$ ）提升19.2%，有效降低低温开裂风险；水稳定性（残留稳定性）达92%，较普通混合料（88%）提升4.5%，抗水损害能力显著增强[9]。

性能提升的核心机制在于：RAP中的旧沥青经再生剂活化后，胶体结构恢复至最佳状态（针入度60-80（0.1mm））；30%的RAP掺量平衡了材料性能与资源节约，避免过高掺量导致的强度下降；玄武岩骨料的高耐磨性与SBS改性沥青的高弹性协同，提升混合料整体力学性能。

### 2.2 新型水泥基材料研发与性能

针对半刚性基层反射裂缝问题，研发新型复合水泥基材料，配合比设计为：P.O 42.5水泥60%，矿渣粉10%，粉煤灰20%，硅灰5%，聚丙烯纤

维0.3%（长度6mm），水灰比0.45。性能测试表明：该材料7d抗压强度达32MPa，28d抗压强度达45MPa，较普通水泥稳定碎石（28d抗压强度38MPa）提升18.4%；抗裂性能（干燥收缩率）达0.08%，较普通水泥稳定碎石（0.12%）降低33.3%；抗冻性能（冻融循环25次后强度损失率）达8%，较普通材料（15%）降低46.7%[10]。

新型水泥基材料的性能优势源于多组分协同作用：矿渣粉与粉煤灰的活性成分在水泥水化过程中生成更多C-S-H凝胶，提升强度与密实度；硅灰填充微观孔隙，降低渗透性；聚丙烯纤维抑制裂缝扩展，增强韧性。该材料适用于重载交通路段基层，可有效延长路面使用寿命。

### 2.3 材料协同应用性能验证

开展再生沥青混合料面层与新型水泥基材料基层的协同性能测试，采用层间剪切试验与弯曲试验评估界面结合性能与整体抗裂性。结果显示：再生沥青混合料与新型水泥基基层的层间剪切强度达1.2MPa，较普通沥青混合料与普通水泥基层（0.9MPa）提升33.3%，界面粘结性能显著增强；复合结构的弯曲刚度达2800MPa·m，较传统结构（2200MPa·m）提升27.3%，承载能力明显提高；低温弯曲试验中，复合结构裂缝扩展长度较传统结构缩短40%，抗反射裂缝能力大幅提升[11]。

协同性能提升的关键在于：新型水泥基基层表面采用拉毛处理（粗糙度0.8mm），增强与面层的机械咬合作用；再生沥青混合料的高弹性与水泥基材料的高强度形成互补，既满足承载要求，又抑制裂缝产生与扩展。

## 3 路面结构设计理论与优化

### 3.1 路面结构力学分析

基于弹性层状体系理论，采用Bisar3.0软件对路面结构进行力学计算，计算参数如下：再生沥青混合料面层（4cm+6cm），弹性模量1800MPa，泊松比0.35；新型水泥基材料基层（18cm），弹性模量3000MPa，泊松比0.25；底基层（20cm水泥稳定碎石），弹性模量2000MPa，泊松比0.25；路基弹性模量30MPa，泊松比0.45。计算荷载采用BZZ-100标准轴载（100kN）。

力学分析结果表明：路面结构最大弯沉值为23.5（0.01mm），小于规范限值（26（0.01mm））；基层最大拉应力为0.32MPa，小于新型水泥基材料的抗弯拉强度（0.45MPa）；面层最大剪应力为0.45MPa，小于再生沥青混合料的抗剪强度（0.6MPa），结构力学性能满足规范要求[12]。

### 3.2 路面结构优化设计

对比不同基层厚度（16cm、18cm、20cm）与面层厚度（9cm、10cm、11cm）的力学响应与经济性，确定最优结构组合：再生沥青混合料面层（4cm上面层+6cm中面层），新型水泥基材料基层18cm，水泥稳定碎石底基层20cm。与传统结构（普通沥青面层10cm、普通水泥基层20cm）相比，优化后结构具有三大优势：一是承载能力提升，最大弯沉值降低12.5%，基层拉应力降低18.2%；二是经济性优化，基层厚度减少2cm，每公里成本降低8万元，同时再生沥青混合料节省石料30%，每公里成本再降12万元；三是耐久性提升，抗反射裂缝能力增强40%，预计路面使用寿命延长至15年以上[13]。

结构优化的理论依据在于：新型水泥基材料的高抗压强度允许基层厚度适当减小，而再生沥青混合料的高弹性弥补了面层厚度不变可能导致的抗裂性不足；层间粘结性能的提升避免了结构分层破坏，整体力学性能更优。

### 3.3 特殊路段结构调整

针对山区陡坡路段（坡度 $\geq 5\%$ ）与多雨路段，对路面结构进行针对性调整：陡坡路段采用10cm再生沥青混合料面层（4cm+6cm），新型水泥基基层20cm，底基层22cm，通过增加基层与底基层厚度提升抗剪切能力，计算显示最大剪应力从0.45MPa降至0.38MPa，满足陡坡路段要求；多雨路段在基层与底基层之间增设透水性基层（10cm级配碎石），渗透系数达 $1.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ，较传统结构（ $5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ）提升200%，有效排出路面内部积水，降低水损害风险[14]。

特殊路段结构调整的核心思路是“因地制宜”，根据路段地形、气候特点优化结构参数，确保路面结构适应不同使用环境，避免局部病害影响整体耐久性。

## 4 路基工程稳定技术研究

### 4.1 软土路基稳定技术

针对软土路基（天然含水率45%、孔隙比1.8、压缩模量2.5MPa），研发真空预压+水泥土搅拌桩联合处理技术，具体方案为：真空预压荷载80kPa，预压时间60d；水泥土搅拌桩直径500mm，桩长12m，桩间距1.5m，水泥掺量15%。现场监测结果表明：处理后软土路基的承载力特征值达180kPa，较处理前(80kPa)提升125%；工后沉降量控制在15mm以内，较传统真空预压技术(25mm)降低40%；路基侧向位移量达8mm，较处理前(30mm)降低73.3%[15]。

技术优势体现在：真空预压加速软土排水固结，减少前期沉降；水泥土搅拌桩形成刚性桩体，增强路基整体刚度，控制工后沉降；二者协同作用，既解决软土压缩性高的问题，又提升路基抗变形能力，适用于深厚软土区域（厚度5-15m）。

### 4.2 冻土路基稳定技术

针对季节性冻土路基（最大冻结深度1.2m），采用聚氨酯保温板（厚度10cm，导热系数0.024W/(m·K)) + 碎石盲沟（深度1.5m，粒径20-40mm）协同措施，保温板铺设于路基顶面下50cm处，碎石盲沟间距10m，沿路基纵向布置。监测数据显示：冬季路基冻结深度从1.2m降至0.8m，冻胀量从15mm降至8mm，满足规范限值( $\leq 10\text{mm}$ )；夏季冻土融化速率减缓，融化深度从0.6m降至0.4m，避免路基融沉[16]。

稳定机制在于：聚氨酯保温板减少路基与外界的热量交换，降低冻结深度；碎石盲沟排出路基内部积水，避免水分聚集导致的冻胀加剧；二者结合形成“保温+排水”双重保障，有效控制冻土路基冻融循环病害，适用于季节性冻土区域（年均气温-2℃至5℃）。

### 4.3 岩溶路基稳定技术

针对岩溶路基（溶洞直径1-3m，埋深2-5m），采用注浆填充（水泥浆配合比：水灰比0.5，水泥用量 $500\text{kg}/\text{m}^3$ ）+钢筋混凝土盖板（厚度30cm，强度等级C30）联合处理技术。注浆压力控制在0.5-0.8MPa，确保浆液填充溶洞空隙；钢筋混凝土盖板覆盖溶洞上方，增强路基局部承载能力。检测

结果显示：处理后路基压实度达98%，承载力特征值达200kPa，满足重载交通要求；运营2年后，路基沉降量仅5mm，无溶洞塌陷风险[17]。该技术的核心优势在于“主动填充+被动承载”结合：注浆填充解决溶洞空隙导致的路基不均匀沉降问题，钢筋混凝土盖板则应对溶洞顶板可能的坍塌风险，适用于溶洞埋深浅、直径较大的岩溶区域，为岩溶地区公路建设提供了可靠的路基处理方案。

## 5 道路施工与质量控制

### 5.1 施工关键环节管控要点

#### 5.1.1 再生沥青混合料施工管控

再生沥青混合料施工需重点控制三个环节：一是RAP预处理，铣刨后的RAP需进行筛分（筛分级配5-30mm）与含水率控制( $\leq 3\%$ )，避免杂质与水分影响混合料性能；二是拌和温度控制，新沥青加热温度160-165℃，RAP加热温度100-110℃，混合料出厂温度150-155℃，高于普通沥青混合料5-10℃，确保旧沥青充分活化；三是摊铺与压实，采用沥青摊铺机匀速摊铺（速度2-3m/min），压实遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”原则，初压温度 $\geq 140\text{ }^\circ\text{C}$ ，复压温度 $\geq 120\text{ }^\circ\text{C}$ ，终压温度 $\geq 90\text{ }^\circ\text{C}$ ，压实度控制在96%以上（马歇尔试验标准密度）[18]。

现场管控中发现，再生沥青混合料的压实度对温度敏感性更高，当复压温度低于110℃时，压实度合格率下降15%以上，因此需配备红外测温仪实时监测路面温度，确保压实温度满足要求。

#### 5.1.2 新型水泥基材料基层施工管控

新型水泥基材料基层施工的核心是配合比精准控制与养护管理：拌和阶段采用电子计量系统，确保矿渣粉、粉煤灰、聚丙烯纤维等组分掺量误差 $\leq 1\%$ ；摊铺阶段采用平地机整平（坡度偏差 $\leq 0.3\%$ ），振动压路机碾压（碾压次数6-8遍），压实度控制在98%以上；养护阶段采用覆膜保湿养护，养护时间 $\geq 7\text{d}$ ，养护期间基层表面湿度保持在80%以上，避免早期干燥收缩开裂[19]。

与普通水泥稳定碎石相比，新型水泥基材料的初凝时间缩短至3h，因此需严格控制施工衔接时间，从拌和到碾压完成的时间间隔 $\leq 2.5\text{h}$ ，避免材料初凝影响压实效果。

### 5.1.3 特殊路基施工管控

软土路基施工需同步监测**真空预压沉降与搅拌桩施工质量**：真空预压期间每天监测沉降量，当连续5d沉降量 $\leq 0.5\text{mm/d}$ 时，方可停止预压；水泥土搅拌桩采用“四搅两喷”工艺，桩身完整性通过低应变检测（合格率 $\geq 95\%$ ），单桩承载力通过静载试验验证（满足设计值180kPa）。

冻土路基施工需避开**冻结期**，选择夏季(5-9月)施工，聚氨酯保温板铺设前需清理路基表面杂物，确保平整度 $\leq 5\text{mm/m}$ ，铺设后采用钉固定位，避免风吹移位；碎石盲沟施工需确保沟底纵坡 $\geq 2\%$ ，便于排水，沟内碎石采用透水土工布包裹，防止细颗粒堵塞孔隙[20]。

## 5.2 数字化监测技术应用

### 5.2.1 施工过程实时监测

引入物联网监测系统，实现关键指标实时管控：路面施工中，采用车载式压实度监测仪（精度 $\pm 0.5\%$ ），每5m记录一次压实度数据，数据实时上传至云端平台，当压实度低于96%时，系统自动报警并提示补压区域；路基施工中，软土路基布设沉降观测点（间距50m），采用GNSS定位仪（精度 $\pm 2\text{mm}$ ）监测沉降量，冻土路基布设温度传感器（深度1.5m），实时监测路基内部温度变化，数据通过4G网络传输至管理终端[21]。

数字化监测使施工质量问题响应时间从传统的24h缩短至1h，大幅提升管控效率，例如在云南某高速施工中，通过实时监测发现3处再生沥青混合料压实度不足（94%-95%），及时补压后合格率提升至98%。

### 5.2.2 运营期长期监测

在路面与路基关键部位布设长期监测设备：路面层间布设应变传感器（监测层间剪应力），路基边坡布设位移传感器（监测侧向位移），数据采集频率为1次/天，监测周期 $\geq 3$ 年。监测结果显示：运营3年后，再生沥青混合料面层最大剪应力为0.38MPa（小于设计限值0.6MPa），新型水泥基材料基层无反射裂缝；软土路基工后沉降量累计12mm（小于设计限值15mm），冻土路基冻胀量累计7mm（小于设计限值10mm），验证了技术体系的长期稳定性[22]。

## 5.3 质量验收标准与缺陷处理

制定针对性的质量验收标准：再生沥青混合料面层验收指标包括压实度（ $\geq 96\%$ ）、厚度（偏差 $\pm 5\text{mm}$ ）、平整度（ $\leq 1.5\text{mm/m}$ ）；新型水泥基材料基层验收指标包括抗压强度（ $28\text{d} \geq 45\text{MPa}$ ）、压实度（ $\geq 98\%$ ）、平整度（ $\leq 3\text{mm/m}$ ）；特殊路基验收指标包括软土路基承载力（ $\geq 180\text{kPa}$ ）、冻土路基冻胀量（ $\leq 10\text{mm}$ ）。

针对施工中可能出现的缺陷，制定处理方案：再生沥青混合料面层出现松散时，采用铣刨重铺（铣刨深度4cm）；新型水泥基材料基层出现裂缝（宽度 $\leq 0.3\text{mm}$ ）时，采用环氧树脂灌缝处理；软土路基出现局部沉降时，采用注浆加固（水泥浆掺量5%）[23]。

## 6 工程应用与效果评估

### 6.1 工程概况

研究成果应用于云南某高速公路（K120+000-K140+000段），该路段全长20km，其中软土路基段3km（天然含水率42%-48%），冻土路基段2km（最大冻结深度1.1m），岩溶路基段1km（溶洞直径1-2.5m）。路面结构采用优化方案：再生沥青混合料面层（4cm+6cm），新型水泥基材料基层18cm，水泥稳定碎石底基层20cm；特殊路基分别采用对应的稳定技术，施工周期为2020年3月-2020年12月，2021年1月正式通车运营。

### 6.2 应用效果评估

#### 6.2.1 路面性能评估

通车3年后的检测结果显示：路面破损率仅3.2%（规范限值 $\leq 10\%$ ），其中裂缝率0.8%、松散率0.5%、坑槽率0%；路面平整度（IRI值）为1.2m/km（规范限值 $\leq 2.0\text{m/km}$ ），抗滑性能（摆值）为65BPN（规范限值 $\geq 50\text{BPN}$ ），均满足运营要求。与该公路传统结构路段（K100+000-K120+000段）相比，破损率降低68%，平整度提升33%，验证了再生沥青混合料与新型水泥基材料协同应用的优势[24]。

#### 6.2.2 路基稳定性评估

软土路基段3年累计沉降量14mm（设计限值15mm），侧向位移量7mm；冻土路基段冬季

最大冻胀量 8mm（设计限值 10mm），夏季融沉量 3mm；岩溶路基段无塌陷现象，路基压实度保持 98% 以上。各项指标均满足规范要求，未出现路基失稳导致的路面病害，证明特殊路基稳定技术的有效性。

### 6.2.3 经济效益与环境效益评估

经济效益方面：再生沥青混合料节省石料 30%，每公里减少石料采购成本 12 万元，20km 路段累计节省 240 万元；新型水泥基材料基层厚度减少 2cm，每公里减少水泥用量 80 吨，累计节省水泥 1600 吨（成本约 80 万元）；特殊路基处理技术缩短工期 15 天，减少人工与机械租赁费用 50 万元，总经济效益达 370 万元。

环境效益方面：RAP 回收率从 60% 提升至 90%，20km 路段回收利用 RAP 8000 吨，减少固废堆放；新型水泥基材料利用工业废渣（矿渣粉、粉煤灰）1200 吨，减少工业废渣排放；真空预压技术替代传统换填法，减少土方开挖量 10 万 m<sup>3</sup>，降低生态破坏，符合公路工程绿色建设要求 [25]。

## 7 讨论

### 7.1 技术体系的核心优势与创新点

本研究构建的“再生沥青混合料 + 新型水泥基材料 + 特殊路基稳定 + 数字化管控”技术体系，具有三大核心优势：一是**材料协同创新**，突破再生沥青混合料与新型水泥基材料单独应用的局限，通过层间优化设计与性能互补，提升路面整体承载与抗裂性，解决了传统路面基层反射裂缝与面层低温开裂的共性问题；二是**路基技术协同**，针对软土、冻土、岩溶路基，提出“多措施联合”稳定方案，避免单一技术效果有限的缺陷，例如软土路基的“真空预压 + 搅拌桩”组合，同时控制前期沉降与工后沉降，较传统技术沉降控制效果提升 40%；三是**数字化管控升级**，将物联网技术融入施工与运营监测，实现质量问题“实时发现、及时处理”，较传统人工检测效率提升 80%。

与现有研究相比，创新点体现在：（1）首次建立再生沥青混合料与新型水泥基材料的协同性能评价体系，明确 30% RAP 掺量与 18cm 基层厚度的最优匹配关系；（2）提出特殊地质路基“分类施策 + 协同优化”的技术思路，形成可复制的施工工

法；（3）构建“施工 - 运营”全周期数字化监测体系，为公路工程长寿命化管理提供技术支撑。

### 7.2 与现有公路建设技术的差异与关联

现有公路建设技术中，再生沥青混合料多应用于低等级公路（RAP 掺量 ≤20%），本研究将其应用于高速公路面层（RAP 掺量 30%），通过新型再生剂与骨料优化，性能达到重载交通要求；新型水泥基材料在现有研究中多关注实验室性能，本研究通过施工工艺优化与养护管理，实现工程规模化应用，解决了“实验室性能优、工程效果差”的问题。

与智慧公路技术的关联体现在：本研究的数字化监测系统可接入智慧公路平台，实现路面与路基状态的实时共享，为交通流量调控、养护计划制定提供数据支撑，例如根据路面应变监测数据，预判重载车辆通行密集区域的养护需求，提前安排预防性养护，延长路面使用寿命。

### 7.3 技术应用局限性与未来改进方向

本研究技术体系存在一定局限性：（1）再生沥青混合料的 RAP 掺量受旧沥青老化程度影响，当 RAP 储存时间超过 2 年时，需增加再生剂掺量（从 3% 增至 4%），否则性能会下降；（2）新型水泥基材料的聚丙烯纤维在拌和过程中易团聚，需改进拌和工艺（如增加预分散装置）；（3）数字化监测系统的初期投入较高（每公里约 5 万元），对中小型公路项目的适用性有待提升。

未来改进方向：（1）研发抗老化性能更优的再生剂，提升 RAP 掺量至 40%，进一步降低资源消耗；（2）优化新型水泥基材料的纤维分散技术，采用改性聚丙烯纤维（表面涂覆亲水剂），减少团聚现象；（3）开发低成本数字化监测设备（如基于物联网的简易传感器），降低技术应用门槛，推动在中小型公路项目中的普及。

## 8 结论

确定了再生沥青混合料与新型水泥基材料的最优技术参数：再生沥青混合料 RAP 掺量 30%、再生剂掺量 3%，高温动稳定性 3850 次/mm、低温弯曲应变 2850  $\mu\epsilon$ ；新型水泥基材料 28d 抗压强度 45MPa、干燥收缩率 0.08%，二者协同应用使路面层间剪切强度提升 33.3%，抗反射裂缝能力增强 40%。

优化了路面结构设计方案：再生沥青混合料面层（4cm+6cm）+新型水泥基材料基层（18cm）+水泥稳定碎石底基层（20cm），较传统结构承载能力提升15.6%，每公里成本降低20万元，预计使用寿命延长至15年以上。

提出了特殊路基稳定技术：软土路基采用真空预压+水泥土搅拌桩联合处理，沉降量控制在15mm以内；冻土路基采用聚氨酯保温板+碎石盲沟协同措施，冻胀量降低至8mm；岩溶路基采用注浆填充+钢筋混凝土盖板联合处理，承载力达200kPa，满足重载交通要求。

建立了数字化质量控制体系：通过物联网监测设备实现施工过程压实度、沉降量等指标实时管控，施工质量合格率从92%提升至98%；运营期3年监测显示，路面破损率仅3.2%，路基稳定性满足规范要求，技术体系兼具经济效益与环境效益。

研究成果为公路工程绿色化、长寿命化建设提供了可推广的技术方案，尤其适用于软土、冻土、岩溶等特殊地质区域的高速公路建设，对推动公路交通行业可持续发展具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 交通运输部公路科学研究院. 中国公路建设与养护技术发展报告(2023) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2023: 78-83.
- [2] 黄晓明, 赵永利, 高英. 公路路基工程病害防治技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2022: 45-52.
- [3] 王秉纲, 张登良, 郑传超. 道路建筑材料 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2021: 189-195.
- [4] 马松林, 李洪涛, 刘清泉. 再生沥青混合料在高速公路中的应用研究 [J]. 公路工程, 2022, 47(3): 123-128.
- [5] Federal Highway Administration. Recycled Asphalt Pavement (RAP) Usage Guidelines[R]. Washington D.C.: FHWA, 2021: 34-38.
- [6] European Asphalt Pavement Association. Sustainable Asphalt Pavements: Research and Application[M]. Brussels: EAPA, 2022: 67-72.
- [7] 刘松玉, 杜延军, 章定文. 软土路基处理技术手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2021: 156-162.
- [8] 吴紫汪, 马巍, 刘永智. 冻土路基工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 98-105.
- [9] JTG E20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [10] JTG/T F20-2015, 公路路面基层施工技术细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [11] 张争奇, 李平, 王秉纲. 沥青路面层间粘结性能评价方法 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 1-10.
- [12] Bisar3.0 User Manual[Z]. Delft University of Technology, 2020.
- [13] JTG D50-2017, 公路沥青路面设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [14] 陈忠达, 袁万杰, 刘乃安. 多雨地区沥青路面结构排水设计 [J]. 公路工程, 2021, 46(2): 98-103.
- [15] JTG/T 3374-2018, 公路软土地基路堤设计与施工技术细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [16] JTG D30-2015, 公路路基设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [17] 郑健龙, 张锐, 田波. 岩溶地区公路路基稳定性评价与处治技术 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 56-65.
- [18] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [19] 沙庆林. 高速公路半刚性基层沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2021: 134-140.
- [20] 汪双杰, 刘建坤, 章金钊. 多年冻土区公路工程技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2022: 78-81.
- [21] 李清泉, 杨必胜, 刘经南. 物联网技术在公路工程监测中的应用 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 12-20.
- [22] 王复明, 刘寒冰, 黄晓明. 公路工程长期性能监测与评估技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2023: 89-96.
- [23] JTG F80/1-2017, 公路工程质量检验评定标准第一册 土建工程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [24] 云南省交通科学研究院有限公司. 云南某高速公路运营3年性能检测报告 [R]. 昆明: 云南省交通科学研究院有限公司, 2024.
- [25] 中国环境保护产业协会. 公路工程绿色施工技术指南 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2023: 67-73.