

# Collaborative Design of Special Subgrade Treatment and Ecological Protection for Expressways

Bin Hu

Jiangxi Transportation Design Research Institute Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330002, China

## Abstract

The Xiuping Expressway passes through the humid hilly area of southern Jiangnan, facing special geological challenges such as widespread soft soil and complex karst, where traditional treatment methods struggle to balance engineering and ecological needs. The research team deeply explores the collaborative mechanism between soft soil/karst subgrade treatment technologies and ecological protection, innovatively proposing a composite model of “engineering measures for foundation stabilization + plant community slope protection.” Engineering-wise, deep mixing piles and dynamic compaction replacement are used to reinforce soft soil, while grouting filling and beam-slab spanning address karst issues. For ecological protection, adaptive plant species are selected to build multi-layer vegetation communities. Practices show that this collaborative design reduces post-construction settlement of soft soil subgrades by 40% and increases slope vegetation coverage to over 90%, ensuring subgrade stability while reconstructing ecosystems. It provides theoretical and technical support for green construction of mountainous highways.

## Keywords

mountainous highway; soft soil subgrade; karst treatment; ecological protection; collaborative design

## 高速公路特殊路基处理与生态防护协同设计

胡斌

江西省交通设计研究院有限责任公司, 中国·江西 南昌 330002

## 摘要

修平高速公路穿越江南丘陵过湿区, 面临软土广布、岩溶复杂的特殊地质难题, 传统处理方式难以兼顾工程与生态需求。研究团队深入探究软土、岩溶路基处理技术与生态防护的协同机制, 创新提出“工程措施固基+植物群落护坡”复合模式。工程上, 采用深层挤密桩、强夯置换等加固软土, 运用注浆填充、梁板跨越应对岩溶; 生态防护则筛选适生植物构建多层植被群落。实践表明, 该协同设计使软土路基工后沉降减少40%, 边坡植被覆盖率超90%, 既保障路基稳定, 又重建生态系统, 为山区公路绿色建造提供理论与技术支持。

## 关键词

山区公路; 软土路基; 岩溶处治; 生态防护; 协同设计

## 1 引言

山区公路建设是促进区域经济发展、推动乡村振兴的重要基础 [1]。然而, 山区特殊的地质条件, 如软土、岩溶、高液限土等, 极易引发路基沉降、边坡失稳等病害, 严重威胁公路运营安全。与此同时, 在生态文明建设的时代要求下, 如何减少工程建设对生态环境的破坏, 实现路基处理与生态防护的协同发展, 成为山区公路建设领域的研究热点。

修平高速公路所处的江南丘陵过湿区, 特殊路基病害频发, 生态环境敏感脆弱。传统的路基处理与生态防护技术往往各自独立, 缺乏系统性和协同性, 难以达到理想的工程与生态效果。因此, 深入研究山区高速公路特殊路基处理与

生态防护的协同设计方法, 探寻两者的协同作用机制, 对于提高特殊路基稳定性、增强生态系统修复能力、实现山区公路绿色可持续发展具有重要的理论价值和实践指导意义。

## 2 山区特殊路基病害特征与成因

### 2.1 软土路基变形机制

在山区高速公路建设中, 软土路基的病害治理是关键技术难题之一 [2]。以修平高速为例, 其软土主要分布于 K5+200 - K7+800、K44+600 - K46+900 等山间谷地。这些区域的软土呈现灰黑色, 具有显著的“高压缩性、低强度”特性, 其天然含水率高达 45% - 60%, 孔隙比介于 1.2 - 1.8 之间。特殊的物理性质使得软土在承受路基荷载时, 极易发生变形。

在实际工程中, 软土路基病害特征明显。一方面, 路基中心沉降速率可达 5 - 8mm/d, 较大的沉降量不仅影响路

【作者简介】胡斌 (1977-), 男, 中国江西兴国人, 本科, 高级工程师, 从事公路勘察设计咨询研究。

面平整度,还会导致严重的差异沉降,进而引发路面开裂,降低道路使用寿命与行车舒适性。另一方面,由于软土抗剪强度低,边坡稳定性难以保障,稳定系数最低仅为1.05-1.10,远低于规范要求的1.25,存在较高的边坡滑移风险,威胁工程安全。

## 2.2 岩溶路基潜在风险

修平高速穿越的石灰岩区域占路线总长的8%,该路段广泛发育溶沟、石芽及小型溶洞等岩溶地貌,为路基稳定带来潜在风险。岩溶地区路基面临的首要威胁是地基不均匀沉降,当溶洞顶板厚度不足时,难以承受上部路基及车辆荷载,极易发生塌陷,导致路面沉陷、错台等病害[3]。此外,岩溶地区特殊的地质构造使得地下水渗透问题突出。在雨季,地表水通过岩溶裂隙快速渗入路基,致使地基土软化,降低土体承载能力,进一步加剧路基变形,同时增加了排水系统的负担,容易引发路基翻浆、冒泥等病害。

## 3 特殊路基处理技术体系

### 3.1 软土路基分级处治技术

#### 3.1.1 浅层软土 ( $H < 2\text{m}$ )

针对浅层软土路基,研究团队提出“砂垫层+土工格栅”联合处理方案。施工时,先清除表层腐殖土,消除软弱夹层;接着回填50cm砂垫层,压实度 $\geq 93\%$ ,利用砂料透水性加速软土孔隙水排出。随后铺设幅宽4m、搭接0.3m的TGDG180土工格栅,形成三维约束体系抑制侧向位移;最后分层填筑(每层厚30cm)。该方案中,砂垫层为竖向排水通道,土工格栅通过摩擦扩散荷载,二者协同提升地基承载能力,适用于浅层软土厚度不足2m的路段。

#### 3.1.2 中层软土 ( $2\text{m} \leq H \leq 3\text{m}$ )

中层软土路基(2-3m)采用“砂砾垫层+开山石渣+土工格栅包裹”复合处理技术。先铺设50cm含泥量 $< 3\%$ 的砂砾垫层,再分层填筑粒径 $\leq 10\text{cm}$ 、压实度 $\geq 94\%$ 的碎石土,每层铺设后加铺土工格栅形成刚性夹层。在K44+675-K46+980路段实践中,工后1年沉降量稳定在22mm,较传统换填法减少38%,兼具稳定性与经济性。

#### 3.1.3 深层软土 ( $H > 3\text{m}$ )

深层软土路基( $> 3\text{m}$ )创新采用“碎石桩+碎石垫层”排水固结方案。碎石桩直径50cm,按1.5m间距梅花形布置,穿透软土层,顶部铺设100cm碎石垫层。该方案通过碎石桩将孔隙水引入垫层排出,实测显示地基固结度达85%的时间缩短60%,承载力提升至120kPa以上,有效解决深层软土沉降难题,保障高填方路段稳定。

### 3.2 岩溶路基综合处治技术

#### 3.2.1 探测与评估

通过工程地质钻探及物探综合勘察方法,查明岩溶分布范围。本项目K21+500~K22+200段丘间谷盆地及B1标段东津水河谷盆地岩溶十分发育,且以浅层岩溶为主,

洞内多为软~流塑状土充填,局部无充填,灰岩顶板一般0.2~2.0米不等,路基填高不一。

#### 3.2.2 分类处治技术

##### 1) 一般溶洞处治方法

①清除表面耕植土和软土。

②以 $(200 \times 20)\text{kN} \cdot \text{m}$ 单击夯击能夯击,若出现空洞塌陷,则片石回填后夯实,再以 $(200 \times 6)\text{kN} \cdot \text{m}$ 单击夯击能夯击2遍,最后满夯1遍,满夯单击夯击能为 $(200 \times 4)\text{kN} \cdot \text{m}$ 。[1]

③强夯后增设三层双向土工格栅。

④路面基层设置双层配筋连续混凝土板补强。

2) 对于分布于东津水河谷盆地的特殊较大的浅层岩溶,当预先进行强夯存在困难时采用如下方法处治:

①先采用地下爆破将溶洞炸塌、炸开。

②用挖掘机、推土机平整。

③采用夯击能 $(200 \times 6)\text{kN} \cdot \text{m}$ 进行强夯,强夯工艺与石方路基强夯相同。

④利用标段内多余土石方进行正常填筑。

### 3.3 红砂岩路基填筑技术

在修平高速公路K25+000-K30+000路段,红砂岩因崩解率高达35%,遇水软化特性显著,给路基填筑带来巨大挑战。若直接使用原状红砂岩填筑,极易引发路基沉降、边坡失稳等问题[4]。为确保工程质量,项目团队从填料改良与边坡防护两方面制定解决方案。

填料改良上,将红砂岩破碎至粒径不大于15cm,并掺入5%生石灰进行改性处理。生石灰与红砂岩中的水分发生反应,通过离子交换和胶结作用,改善土体结构,提升其水稳定性与强度;同时,严格控制碾压时含水率在最佳含水率 $\pm 2\%$ 范围内,确保压实效果。

边坡防护采用“人字形骨架+喷播草灌”技术,3m间距的浆砌片石骨架可有效拦截坡面径流,内嵌三维植被网增强土体整体性,按3:1比例播种的狗牙根与木豆,前者快速固土,后者改善土壤,实现工程防护与生态修复的协同增效。

## 4 生态防护与工程措施协同设计

在山区高速公路建设中,边坡防护不仅关乎工程安全,更对生态环境有着深远影响[5]。修平高速公路将生态防护理念与工程措施深度融合,针对填方、挖方边坡及挡土墙等不同结构,构建协同防护体系。

### 4.1 填方边坡协同防护模式

#### 4.1.1 低边坡 ( $H \leq 4\text{m}$ ): 纯植物防护

对于高度不超过4米的填方低边坡,项目采用纯植物防护策略,充分发挥植被的生态与工程双重功能。植物配置上,采用喷播草灌混合种的方式,按每平方米4g狗牙根、6g百喜草、5g紫花苜蓿的比例进行播种,并以每100平方米点缀10株紫穗槐灌木。狗牙根根系发达,能够快速扎根固土;百喜草适应性强,耐干旱瘠薄;紫花苜蓿兼具固氮改

良土壤的作用，三者协同配合，实现边坡快速绿化与防护。实践表明，施工后3个月，边坡植被覆盖率可达80%，6个月后再进一步提升至95%，抗冲刷能力相较于裸露边坡提升4倍，有效防止水土流失。

#### 4.1.2 其他边坡 ( $H > 4\text{m}$ )：圬工+植物复合防护

针对4米以上的填方边坡，采用“圬工结构+植物防护”的复合模式。边坡下层采用厚度0.3m的浆砌片石“人字形骨架”，骨架不仅能够有效分散坡面水流，减少雨水冲刷，还为内部喷播的草灌植物提供稳固的生长空间；边坡上层则采用挂网喷播基材客土工艺，客土厚度达8cm，并种植油麻藤等藤本植物（株距1m）。这种设计中，圬工骨架提供结构支撑，保障边坡的初期稳定性；植物根系则随着生长不断深入土体，增强土体黏聚力，二者协同作用使边坡整体稳定系数提升至1.40，远超规范要求。

### 4.2 挖方边坡生态修复技术

#### 4.2.1 土质边坡：柔性防护+自然恢复

对于土质挖方边坡，采用“柔性防护+自然恢复”的生态修复技术。施工工艺包括清坡、挂设50mm×50mm网孔的三维植被网、喷播特制基材（腐殖土60%、河砂30%、水泥10%），并覆盖无纺布。基材中腐殖土提供养分，河砂保证透气性，水泥增强初期强度；草种按狗牙根、白三叶、木豆5:3:2的比例混合，兼顾快速固土与长期生态改善，实现边坡防护与生态恢复的平衡。

#### 4.2.2 岩质边坡：锚杆挂网+植生混凝土

针对岩质挖方边坡，采用“锚杆挂网+植生混凝土”技术。通过设置长2.5m、间距2m×2m的锚杆，挂设 $\phi 4\text{mm}$ 镀锌铁丝网，为植生混凝土提供稳固的附着基础。10cm厚的植生混凝土中掺入狗牙根草种（ $2\text{g}/\text{m}^3$ ）与保水剂（ $5\text{kg}/\text{m}^3$ ），确保植物在恶劣的岩面环境中能够扎根生长。在K18+500-K18+800岩质边坡的应用中，1年后植被覆盖率达85%，岩体表面形成0.5-1.0cm厚的生物膜。

### 4.3 挡土墙生态化改造

在挡土墙顶部设置20cm×80cm的混凝土种植池，填充腐殖土后种植常春藤（株距0.5m），藤蔓沿墙面自然垂落，覆盖率可达90%以上，有效柔化硬质工程结构。同时，在墙身每隔2m设置 $\phi 10\text{cm}$ 通气孔，孔内填充“腐殖土+草种”混合物，实现工程与自然的和谐共生。

## 5 排水系统与生态保护耦合设计

在地表排水生态化改造方面，创新采用植草沟技术与阶梯式急流槽。于边沟外侧设置50cm宽的植草沟，种植芦苇、香蒲等耐湿水生植物，有效过滤地表径流中的悬浮物（SS）和化学需氧量（COD），去除率分别达到70%和50%，既净化水质又减少水体污染。阶梯式急流槽采用“浆砌片石+植草台阶”结构，每级30cm高的台阶种植狗牙根，不仅使水流速度降低30%，缓解冲刷压力，还为昆虫等小型生物

创造栖息地。

在地下水控制与利用层面，渗沟出口处设置生态湿地，利用芦苇床的天然净化能力处理地下水，同步布置人工鸟巢，吸引鸟类栖息，构建小型生态循环系统。针对挖方平台沟，在两侧种植宽2m的胡枝子等灌木带作为植物缓冲带，凭借灌木根系固土与枝叶拦截作用，使泥沙淤积量减少60%，有效防止水土流失，促进区域生态环境的可持续发展。

## 6 协同设计效果评估

### 6.1 工程性能指标表格

项目	设计值	实测值	达标率
软土路基工后沉降	$\leq 30\text{mm}$	18~25mm	100%
边坡稳定系数	$\geq 1.25$	1.35~1.50	100%
路面破损率	$\leq 5\%$	2.3%	达标

### 6.2 生态效益指标

植被覆盖率：边坡植被覆盖率从施工前的15%提升至92%，取弃土场生态恢复率100%；

水土流失量：采用协同设计后，年水土流失量从850t/km<sup>2</sup>降至130t/km<sup>2</sup>，减少85%；

生物多样性：监测到新增植物物种12种，昆虫种类增加30%，生态系统趋于稳定。

## 7 结论与展望

在山区高速公路建设面临地质复杂、生态保护要求高的双重挑战背景下，本研究针对修平高速公路工程实际开展技术攻关，取得显著成果。

一是协同设计优势：工程措施与生态防护的有机结合，可使特殊路基处理成本降低15%~20%，生态恢复周期缩短50%以上；二是技术适用范围：适用于丘陵山区软土、岩溶等特殊路基处理，尤其适合生态敏感区公路建设；三是未来研究方向：建议引入智能监测技术（如InSAR、北斗位移监测），实现特殊路基变形的实时预警，进一步提升协同设计的可靠性。

### 参考文献

- [1] 袁腾方.岩溶区高速公路路基强夯处治技术及其稳定性分析[D].湖南大学,2018.
- [2] 乔攀攀,穆玲建,田磊.软土路基施工技术在高速公路施工中的研究[J].产业创新研究,2023,(24):129-131.
- [3] 杨丽文,杨国兵.马鞍山隧道初支变形侵限及岩溶处治方法[C]//《施工技术》杂志社.2024年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册).云南建投第十建设有限公司,2024:348-351.
- [4] 刘丽丽.岩溶地质条件下的高速公路桥梁桩基处治要点[J].交通世界,2023,(34):145-147.
- [5] 吕江,赵晖,杨杓.强夯法处治岩溶地基设计参数研究[J].中外公路,2023,43(02):26-30.