# 软土地基碎石换填加固路基处理施工技术

张鸿保

（四川路桥城市建设有限公司，四川 绵阳 621000）

**摘 要** 软土地基具有含水率高、压缩性大、承载力低等特点，直接在其上修筑路基易产生过大沉降和不均匀沉降，碎石换填是处理浅层软土地基的有效方法。本文以四川地区公路工程为案例，分析了工程地质条件和软基处理方案，从软土开挖与清基、碎石分层填筑与碾压、分层检测与验收、路基填筑与沉降观测四个方面阐述了关键施工技术，从原材料控制、过程管控、压实度检测、沉降观测四个方面提出质量控制措施，以期为软土地基碎石换填施工提供参考。

**关键词** 软土地基；碎石换填；路基处理；软土开挖；碎石分层填筑

**中图分类号**：U416.1 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.016

## 0 引言

四川地区广泛分布的浅层软土普遍具备天然含水率远超塑限、孔隙比大、压缩模量低、天然承载力不足80 kPa的典型工程特性，若未经过有效处置直接在这类地层上施作路基结构，极易引发工后沉降超标、横向不均匀沉降差超限等病害。碎石换填法凭借工艺简便、固结速度快、加固效果直观的优势，是浅层3 m以内软土地基处置的高效适配方案。碎石换填法是将路基范围内的软土全部或部分挖除，换填强度高、压缩性低的碎石材料，分层碾压密实，形成良好的持力层，适用于软土层厚度不超过3 m的浅层软基处理。该方法施工工艺简单、质量易控、加固效果直接，在公路工程中应用广泛。因此，研究软土地基碎石换填加固路基处理施工技术，对保障路基工程质量具有重要的工程意义。

## 1 案例工程概况

### 1.1 工程地质条件

四川地区某二级公路改扩建项目，路线全长12.6 km，其中K3+200～K3+850段为河谷阶地地貌，地表分布厚约1.5 m～2.8 m的软土层，主要为淤泥质粉质黏土，天然含水率为45%～62%，孔隙比为1.2～1.6，压缩系数0.8 $MPa^{-1}$～1.2 $MPa^{-1}$，承载力特征值仅50 kPa～70 kPa，不满足路基填筑要求。软土层下伏为稍密卵石层，承载力特征值250 kPa以上，工程性质良好。

该路段地下水位较高，稳定水位埋深0.8 m～1.5 m，软土长期处于饱和状态，开挖换填时坑底将位于地下水位以下，施工需采取降排水措施，避免坑底积水、基底受水浸泡。经技术经济比较，设计采用碎石换填法处理该段软土地基，换填厚度1.5 m～2.8 m，换填宽度超出路基坡脚每侧1.0 m（经稳定性验算确定）。

### 1.2 软土地基处理方案

根据软土层厚度分布和下卧层承载力情况，采用全挖全换的碎石换填方案。换填材料选用级配良好的碎石，最大粒径不超过50 mm，含泥量不超过5%，压碎值不超过26%。换填分层厚度控制在30 cm～40 cm，采用工作质量不小于18 t单钢轮振动压路机，宜采用20 t及以上机型，碾压工艺参数由试验段确定，压实度要求不低于93%（路床底面以下0 cm～80 cm不低于95%）[1]。

换填施工前先做好排水措施，在换填范围两侧设置排水沟、集水井及降水井，采取明排与井点降水相结合的方式，将地下水位降至换填底面以下不小于500 mm，确保软土开挖和碎石填筑在干燥条件下进行，施工过程中持续降水，防止水位回升。换填完成后进行路基填筑，同时布设沉降观测点，对路基沉降进行动态监测，根据沉降数据调整填筑速率。

## 2 软土地基碎石换填加固路基处理关键施工技术

### 2.1 软土开挖与清基

软土开挖是碎石换填的第一道工序，开挖前先测量放线，确定换填范围和开挖深度，设置明显的开挖边界标志。由于软土层厚度最大达2.8 m，且地下水位较高，放坡开挖易导致坑壁坍塌，开挖时根据坑深和土质条件采取分级放坡与坑壁支护相结合的方式，坑深不超过1.5 m时按1:1.5放坡，坑深超过1.5 m时采用分级放坡并在坡脚设置袋装土挡墙或钢板桩支护，

作者简介：张鸿保（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁。

确保坑壁稳定。软土开挖采用挖掘机配合人工修整，开挖顺序从一端向另一端推进，分层开挖，每层开挖厚度不超过 1.0 m。开挖过程中随时测量开挖深度和边坡坡度，避免超挖和扰动下卧层原状土[2]。

开挖至设计标高后，对基底进行清理，清除残留软土、杂物和松散土层，基底应平整、坚实，无软弱夹层。若基底存在局部软弱区或坑穴，应继续挖除至坚实土层，用碎石回填密实。基底清理过程中保持降排水系统持续运行，坑底设置临时排水沟和集水井，及时排除坑内积水，严禁基底受水浸泡。基底清理完成后进行验槽，检查基底土质、承载力、标高、平整度等，符合设计要求后方可进行碎石填筑。碎石换填材料技术要求如表 1 所示。

表 1 碎石换填材料技术要求表

| 材料指标 | 技术要求 | 检测方法 | 检测频率 |
|---|---|---|---|
| 碎石粒径 | ≤ 500 mm，级配良好 | 筛分试验 | 每 500 $m^3$ |
| 含泥量 | ≤ 5% | 水洗法 | 每 500 $m^3$ |
| 压碎值 | ≤ 26% | 压碎试验 | 每 500 $m^3$ |
| 针片状含量 | ≤ 20% | 规准仪法 | 每 500 $m^3$ |
| 有机质含量 | ≤ 2% | 灼烧法 | 每料源 |
| 含水率 | 接近最佳含水率 | 烘干法 | 每作业段 |

如表 1 所示，碎石材料各项技术指标均有明确要求，材料进场时按批次抽检，不合格材料不得使用。

### 2.2 碎石分层填筑与碾压

碎石填筑采用水平分层填筑法，按试验段确定的松铺厚度分层摊铺，松铺厚度一般为 35 cm～45 cm（压实后 30 cm～40 cm），每层填筑宽度在换填设计宽度基础上每侧超宽 30 cm（换填设计宽度已超出路基坡脚每侧 1.0 m，超宽填筑为保证边缘压实质量，二者不冲突），确保路基边缘压实质量。碎石摊铺采用推土机配合平地机，摊铺后检查松铺厚度和平整度，符合要求后进行碾压。

碾压采用工作质量不小于 18 t 单钢轮振动压路机，宜采用 20 t 及以上机型，碾压工艺参数由试验段确定，碾压遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中”的原则，先静压 1 遍稳定填料，再振动碾压 4 遍～6 遍，最后静压 1 遍收面消除轮迹。碾压速度控制在 2 km/h～4 km/h，碾压轮迹重叠 1/3 轮宽，避免漏压。碾压过程中检测碎石含水率，含水率偏低时适当洒水，含水率偏高时晾晒，确保在最佳含水率 ±2% 范围内碾压。压实度计算公式为：

$$K=\frac{\rho d}{\rho d,\max}\times 100\% \quad (1)$$

式（1）中，$K$ 为压实度（%），$\rho d$ 为现场实测干密度（g/$cm^3$），$\rho d,\max$ 为室内标准击实试验确定的最大干密度（g/$cm^3$）。通过公式计算每层压实度，达到设计要求后方可填筑上一层。

### 2.3 分层检测与验收

每层碎石碾压完成后，及时进行压实度检测，检测合格后方可填筑上一层。压实度检测采用灌砂法，每 200 m 检测 4 处，检测点布置在路基中部和边缘，确保检测结果具有代表性。除压实度外，还检测分层厚度、平整度、横坡等指标，各项指标均符合设计和规范要求后进行工序验收。

验收合格后填写分层验收记录，注明检测数据、检测位置、检测时间、检测人员等信息，作为质量追溯依据。上一层填筑前，将下层表面清扫干净，适当洒水湿润，增强层间结合。分层检测与验收是保障换填整体质量的关键环节，每一层都必须检测合格，严禁未检测或检测不合格即进行上一层施工。

### 2.4 路基填筑与沉降观测

碎石换填完成并验收合格后，进行路基土方填筑。路基填筑同样采用水平分层填筑法，每层松铺厚度不超过 30 cm，压实度按路基设计要求控制。路基填筑过程中严格控制填筑速率。

沉降观测是控制路基填筑速率和评估地基稳定性的重要手段。在换填段路基顶面布设沉降观测点，间距 50 m，每个断面布设 3 个观测点（路中和两侧路肩）。路基填筑期间每天观测一次，沉降速率超过 15 mm/d 时暂停填筑，待沉降稳定后再继续[3]。

## 3 软土地基碎石换填加固路基处理质量控制措施

### 3.1 原材料质量控制

原材料质量是换填加固效果的基础，应从料源选择、进场检验、存储管理三个方面严格控制。料源选择时对候选料场进行实地考察，取样进行级配、含泥量、压碎值等试验，选择质量稳定、供应能力强的料场。材料进场时查验质量证明文件，按批次进行抽样检测，检测项目包括级配、含泥量、压碎值、针片状含量等，不合格材料坚决退场，不得用于工程。

材料存储时分类堆放，设置明显标识，避免不同规格材料混堆；堆放场地硬化处理，设置排水坡和排水沟，防止材料被泥水污染。

### 3.2 施工过程质量控制

施工过程质量控制是保证换填效果的重要环节，应实行全过程、全方位的控制。施工前进行技术交底，向施工人员交代换填范围、深度、分层厚度、压实标准、

安全注意事项等，使每个作业人员了解施工要求。施工中实行“三检制”，班组自检、项目部复检、监理抽检，每道工序检验合格后方可进入下道工序[4]。

重点控制软土开挖深度、基底清理质量，保证软土全部清除、基底坚实无软弱夹层；控制碎石分层厚度、碾压遍数，严禁超厚填筑、漏压；控制碾压时碎石含水率，保证在最佳含水率附近碾压。施工过程中做好施工记录，详细记录每层填筑时间、厚度、碾压遍数、检测数据等，实现质量可追溯。

### 3.3 压实度检测控制

压实度是碎石换填质量的主要指标，必须严格控制检测频率和检测质量。检测人员必须经过专业培训，熟悉灌砂法检测操作规程，检测仪器定期检定校准，保证检测结果准确可靠。检测点布置要有代表性，包括路基中部、边缘、接缝等不同位置，不能只在容易达标的地方检测。

检测时严格按照操作规程进行，灌砂筒标定准确，试坑开挖规则，砂的密度定期标定，保证检测数据真实可靠。检测不合格的路段坚决返工处理，翻松后重新碾压，直到检测合格。建立压实度检测台账，记录每个检测点的位置、数据、检测人员、检测时间，便于质量分析和追溯。

### 3.4 沉降观测与动态调整

沉降观测是评价换填效果、指导路基填筑的重要手段，从观测点布置、观测频率、数据分析三个方面进行规范管理。观测点布置在换填段路基顶面，按设计要求的间距和位置布置，观测点埋设牢固、标识清楚，施工过程中注意保护，防止损坏。观测频率根据施工阶段确定，路基填筑期间每天观测一次，填筑完成后前 3 个月每 3 天观测一次，3 个月后每周观测一次[5]。

观测数据及时整理分析，绘制沉降—时间曲线和沉降速率曲线，判断地基沉降趋势。当沉降速率大于控制标准（一般 15 mm/d）时，立即停止路基填筑，分析原因并采取措施，待沉降速率回落到允许范围内再继续填筑。根据沉降观测数据动态调整填筑速率和施工安排，保证路基填筑安全。沉降稳定标准为连续 2 个月沉降速率不大于 3 mm/ 月，达到稳定标准后方可进行路面施工。

换填施工各项目质量控制指标明确，检测方法和频率具体，施工中严格按指标控制，确保换填质量（如表 2 所示）。

表 2 碎石换填施工质量控制指标表

| 控制项目 | 允许偏差 / 要求 | 检测方法 | 检测频率 |
|---|---|---|---|
| 换填深度 | 不小于设计值 | 水准仪测量 | 每 200 m 测 4 点 |
| 换填宽度 | 不小于设计值 | 钢尺量测 | 每 200 m 测 4 点 |
| 分层厚度 | 压实后 300 mm ～ 400 mm | 水准仪 / 钢尺 | 每层检测 |
| 压实度 | ≥ 93%（路床下≥ 95%） | 灌砂法 | 每 200 m 测 4 点 |
| 平整度 | ≤ 15 mm | 3 m 直尺 | 每 200 m 测 2 处 ×10 尺 |
| 横坡 | ±0.3% | 水准仪 | 每 200 m 测 4 断面 |
| 中线偏位 | ≤ 50 mm | 全站仪 | 每 200 m 测 4 点 |

## 4 结束语

本文从软土开挖与清基、碎石分层填筑与碾压、分层检测与验收、路基填筑与沉降观测四个方面阐述了软土地基碎石换填加固路基处理关键施工技术，通过选取四川地区某公路工程作为实证案例，分析工程地质条件和处理方案，提出原材料控制、过程管控、压实度检测、沉降观测等方面的有效质量控制措施。结果表明，碎石换填法能够有效提高地基承载力、减小路基沉降，施工工艺简单、质量易控，是浅层软土地基处理的有效方法。通过严格的原材料控制、过程质量管控、压实度检测和沉降观测，能够保障换填加固效果。未来可进一步探索碎石换填与其他地基处理方法的组合应用，以及基于沉降监测数据的地基稳定性智能评估技术，推动软土地基处理技术向精细化、智能化方向发展。

## 参考文献：

[1] 王进.公路工程碎石桩加固软土地基的作用机理及施工工艺 [J]. 石河子科技 ,2026(04):73-74.
[2] 赵平.公路工程中软土路基换填施工要点研究 [J]. 交通科技与管理 ,2026,07(15):143-145.
[3] 毛荣麟.路桥施工中软土地基处理技术应用研究 [J].散装水泥 ,2026(07):103-105.
[4] 洪军.道路施工中的软基加固技术研究 [J].低碳世界 ,2026,16(07):131-133.
[5] 宫效峰.公路桥梁施工中软土地基施工技术研究 [J].建设机械技术与管理 ,2026,39(03):164-166.