

高填方公路路基沉降控制施工技术及优化方式

晋潇圣

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘 要 高填方路基是山区公路建设中应用广泛的结构形式, 受地形地质条件、施工工艺等多重因素影响, 路基沉降尤其是不均匀沉降已成为制约公路运营安全的突出问题。传统施工技术存在压实均匀性差、沉降控制精度低等不足, 易引发路面开裂、桥头跳车、边坡失稳等病害。本文系统剖析高填方路基沉降的形成机理与主要成因, 梳理地基处理、分层填筑、压实管控、排水固结等核心施工技术, 从材料改良、工艺迭代、动态反馈、边坡加固四个方面提出针对性优化方案, 旨在为同类山区高填方工程提供技术参考。

关键词 高填方路基; 沉降控制; 地基处理; 分层填筑; 动态监测

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.020

0 引言

随着我国西部山区交通基础设施建设的全面推进, 高填方路基因地形适应性强、造价相对可控, 在峡谷、洼地等复杂地貌区域得到大规模应用。高填方路基填方高度普遍超过 20 m, 部分路段可达 60 m~80 m, 其沉降变形具有持续周期长、影响范围广、治理难度大的特点。若沉降控制不当, 会导致路面纵向开裂、桥头跳车加剧、排水系统失效等问题, 严重影响公路的行车舒适性与使用寿命^[1]。现有施工技术多沿用平原地区的成熟经验, 未充分考虑山区软弱地基分布广、地形起伏大、气候条件复杂的特点, 导致部分工程出现工后沉降超标的情况。因此, 深入研究高填方公路路基沉降控制施工技术及优化方式, 对保障山区公路建设质量、降低全生命周期运营成本具有重要的工程实践意义。

1 高填方路基工程特点与沉降成因分析

1.1 高填方路基工程特点

高填方路基主要分布在我国西南、西北山区, 具有鲜明的工程特征。一是填方高度大、自重荷载强, 路基底部承受的附加应力可达数百千帕, 易引发地基与路堤的双重压缩变形。二是沉降持续周期长, 工后沉降通常需要 3 年~5 年才能基本稳定, 深厚软弱地基段的沉降周期可延长至 10 年以上。三是地质条件复杂多变, 高填方路基多跨越沟谷与坡地^[2], 地基常分布有淤泥质土、泥炭土、松散碎石土等不良土层, 承载力低、压缩性高, 易产生不均匀沉降。四是施工干扰因素多, 山区施工场地狭小、运输条件差, 且受雨季、

冬季等气候影响显著, 施工连续性难以保障, 易导致路基压实质量波动。

1.2 路基沉降主要成因

高填方路基沉降由地基沉降与路堤本体沉降两部分组成, 其中地基沉降占总沉降量的 60%~70%^[3], 是沉降控制的重点。地基沉降主要源于天然地基的固结压缩, 在上覆路堤荷载作用下, 软弱土层中的孔隙水缓慢排出, 土体颗粒重新排列, 产生长期的固结变形。若地基处理不彻底, 软弱土层的固结过程会持续多年, 导致工后沉降超标。

路堤本体沉降主要由填料压缩变形与施工压实不足引起。填料级配不良、含水率偏离最佳值, 会导致压实后土体孔隙率过高, 在自重与车辆荷载长期作用下产生压缩变形。此外, 水的侵蚀作用是加剧沉降的重要因素, 地表水渗入路堤会降低填料强度, 地下水升降会引起地基土软化, 进一步扩大路基的不均匀沉降。地形起伏变化、填料分布不均、施工缝处理不当, 也会导致路基各部位沉降差异, 引发纵向或横向裂缝。

2 高填方路基沉降控制关键施工技术

2.1 地基处理技术

地基处理是从源头控制路基沉降的首要环节, 需根据地基土层性质与厚度选择适配的技术方案。对于浅层软弱地基(厚度小于 3 m), 采用换填垫层法, 将软弱土层全部挖除, 换填级配良好的碎石、砂砾等透水性材料, 分层压实至 93% 以上的压实度, 可快速提高地基承载力。对于碎石土、砂土等非黏性土地基, 采用强夯法, 利用 1 000 kN·m~3 000 kN·m 能级

作者简介: 晋潇圣(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

的重锤冲击地基,使土体密度显著提升,夯点间距控制在 3 m~5 m,夯击遍数根据现场试夯确定。

对于淤泥质土、粉质黏土等黏性土地基,采用水泥搅拌桩复合地基,通过深层搅拌将水泥与土体混合,形成水泥土桩体,与桩间土共同承担荷载,桩径 500 mm~600 mm,桩长穿透软弱土层。对于深厚软弱地基(厚度大于 10 m),采用 CFG 桩复合地基,桩体强度高、承载力大,可有效减小地基总沉降量,桩径 400 mm~500 mm,桩间距 1.5 m~2.5 m,桩顶设置碎石垫层形成应力扩散层^[4]。

2.2 分层填筑施工技术

高填方路基填筑严格遵循“水平分层、由低到高、分段填筑”的原则,按照横断面全宽分成水平层次逐层向上填筑。每层铺层厚度根据压实机械性能确定,细粒土不超过 30 cm,粗粒土不超过 40 cm。对于原地地面坡度大于 1:5 的路段,先将原地地面挖成宽度不小于 2 m 的台阶,台阶顶面做成 2%~4% 的向内倾斜坡度,防止填筑体沿原地面滑动。

填料选择优先采用级配良好的碎石、砾石、砂类土等透水性材料,严禁使用淤泥、腐殖土、冻土及有机质含量超过 5% 的土。在土石混填路基中,石料最大粒径不得超过铺层厚度的 2/3,且均匀分布,避免出现大块石料集中的情况。填石路基采用分层填筑分层碾压工艺,倾填高度不超过 6 m,倾填后进行补夯,确保石料之间嵌挤紧密。

2.3 压实质量控制技术

压实属于高原路施工过程中保证结构强度、抵抗冻融破坏、控制工后沉降的关键工序,压实质量的好坏直接影响到路基长期稳定和安全运行。高原地区低温干燥、冻融循环频繁的环境特点,使填料压实特性与平原地区有很大差别,压实不足容易造成路基不均匀沉降、冻胀隆起等病害,所以要根据填料种类精确选择压实机械和施工参数。细粒土填料用 18 t 光轮压路机和 22 t 振动压路机组合碾压,粗粒土及土石混填路基用 25 t 以上重型振动压路机,填石路基用 30 t 以上冲击式压路机补充碾压。所有压实参数均要经过现场试验段的确定,结合高原环境对平原地区的通用参数进行修正,一般振动压路机行驶速度控制在 2 km/h~3 km/h,静压 1 遍、弱振 2 遍、强振 1 遍~2 遍、终压 1 遍,松铺厚度根据填料类型控制在 30 cm~50 cm,碾压按照先轻后重、先慢后快、先边后中的原则进行,防止漏压、过压和填料推移^[5]。

压实质量检测应采用多种方法相结合的方式,对全断面、多频次进行质量控制。细粒土路基以灌砂法为主,环刀法做对比检验;粗粒土和填石路基用灌水法加沉

降差法检测,保证检测结果可以真实反映路基的压实情况。常规路段每 200 m 压实层检测 4 个点,桥台台背、涵洞两侧、路基与隧道衔接处、路基边缘等薄弱部位检测频率要加密到每 50 m 设 4 个点。对压实度达不到要求的地段要立即进行补压,补压后仍达不到要求的应将不合格填料挖除,重新填筑。施工期间对填料含水率进行实时检测,保证填料在最佳含水率 $\pm 1\%$ 范围内,含水率过高时用翻晒法降低含水率,含水率过低时均匀洒水并充分拌合;环境温度低于 0℃ 时不得洒水作业,也不得碾压含有冻块的填料,已受冻的压实层应全部清除后再施工。

2.4 排水固结技术

排水固结技术是高原软土地基和冻融敏感地基处理的主要技术,依靠建立竖向和水平相结合的立体排水体系,加快地基孔隙水和季节性融冰水的排出速度,缩短地基固结时间,明显减小工后沉降和不均匀沉降的风险。高原地区降雨集中、季节性冻土融化容易造成地基含水率突然上升、承载力急剧降低,因此地表排水系统必须在路基填筑前全部完成,在路基坡顶 5 m 外设置梯形截水沟拦截山坡汇水,路基两侧设置矩形排水沟和边沟,沟底铺设防渗土工膜阻断水下渗通道,在低洼地段增设急流槽和集水井,将地表水迅速排到路基范围外,防止雨水长时间浸泡地基造成软化变形。地下排水一般采用塑料排水板或袋装砂井做竖向排水体,配合堆载预压形成完整的排水固结系统。

塑料排水板采用正方形布置,间距为 1.2 m~1.8 m,打设深度要穿过整个软弱土层并进入下卧硬土层不少于 0.5 m,顶部铺设 30 cm 厚的级配良好的中粗砂垫层作为水平排水通道,砂垫层内铺设双向土工格栅增强整体稳定性。堆载预压严格按照分级加载的原则进行,每级荷载的加载速度按照实时沉降和孔隙水压力监测数据实时调整,当连续 7 d 地基沉降速率小于 8 mm/d、孔隙水压力消散率达到 70% 以上时,才可以施加下一级荷载,总预压时间不得少于 6 个月。对于工期紧张的高海拔路段,可以采用真空预压联合堆载预压技术,将真空度保持在 80 kPa 以上,可以将固结周期缩短 30% 左右,同时也可以有效地控制地基侧向变形。

3 高填方路基沉降控制施工技术优化方式

3.1 填筑材料与配合比优化

通过材料改良与级配优化,可显著提升填料的强度与抗变形能力。对于级配不良的填料,掺入 15%~20% 的碎石进行级配调整,使其满足规范要求的级配范围。对于软弱黏性土填料,采用石灰、水泥等无机结合料进行改良,不同改良方式的性能对比如表 1 所示。

表 1 不同改良方式下填料物理力学性能对比

改良方式	最大干密度 g/cm ³	最佳含水率 (%)	CBR 值 (%)	压缩模量 (MPa)	适用场景
原黏性土	1.72	16.5	3.2	4.2	低填方非软弱地基
5% 石灰改良	1.78	17.2	6.8	5.8	一般软弱地基
5% 水泥改良	1.86	15.8	7.0	6.9	高填方软弱地基
3% 水泥 +2% 石灰改良	1.83	16.3	7.5	7.2	深厚软弱地基

试验结果表明, 5% 水泥改良后填料的 CBR 值提高 120%, 压缩模量提高 65%, 可有效减小路堤压缩沉降。施工中通过室内试验确定最佳配合比, 现场严格控制改良材料的掺量与拌合均匀性。

3.2 分层填筑工艺优化

将传统 30 cm 铺层厚度优化为 20 cm ~ 25 cm 薄层碾压, 可提高压实机械的有效作用深度, 使路基各层压实度更加均匀。对于填石路基, 采用 40 cm 分层厚度替代传统 60 cm 厚度, 配合重型振动压路机碾压 6 遍 ~ 8 遍, 使石料孔隙率控制在 20% 以内。

在地形起伏路段, 采用台阶法精细化施工, 台阶

高度与铺层厚度一致, 每层填筑前清理台阶顶面浮土, 确保新旧填筑体结合紧密。路基填筑至设计标高后, 采用冲击碾压技术进行整体补强, 冲击碾压 20 遍 ~ 25 遍, 行驶速度 10 km/h ~ 12 km/h, 可进一步减小路基的工后沉降量。

3.3 动态监测与反馈优化

建立覆盖施工全过程的动态监测体系, 根据监测数据实时调整施工参数, 实现沉降的精细化管控。监测项目包括地表沉降、分层沉降、水平位移与孔隙水压力, 各项的布设要求与预警值如表 2 所示。

当监测数据超过预警值时, 立即停止填筑, 分析

表 2 高填方路基施工监测项目与预警值

监测项目	布设位置	监测频率	预警阈值
地表沉降	路基中心、路肩、坡脚	施工期 1 次 /d, 预压期 1 次 /3d	日沉降 > 15 mm, 累计沉降 > 设计值 80%
分层沉降	路基中心, 穿透软弱土层	施工期 1 次 /d, 预压期 1 次 /7d	分层沉降差 > 5 mm/m
水平位移	坡脚外侧 2 m 处	施工期 1 次 /d, 预压期 1 次 /3d	日水平位移 > 5 mm
孔隙水压力	地基软弱土层内	施工期 1 次 /d, 预压期 1 次 /7d	孔隙水压力系数 > 0.6

原因并采取加固措施, 待沉降稳定后再恢复施工。通过监测数据反馈, 动态调整填筑速率、加载分级与预压时间, 确保路基沉降控制在设计允许范围内。

3.4 边坡防护与加固优化

边坡稳定影响路基整体沉降, 采取防护加加固的综合措施提高边坡抗变形能力。高度小于 20 m 的边坡用浆砌片石骨架植草防护, 防止雨水冲刷; 高度大于 20 m 的高边坡用锚杆框架梁防护, 锚杆长度 3 m ~ 5 m, 间距 2 m ~ 3 m, 框架内植草绿化。

路堤分层填筑时铺设双向拉伸土工格栅, 格栅抗拉强度不小于 80 kN/m, 层间距 0.5 m ~ 1 m, 可以提高路堤整体性, 减小不均匀沉降。对有滑动风险的边坡进行钢筋混凝土抗滑桩加固, 桩截面为 1.5 m × 2 m, 桩长 15 m ~ 20 m, 间距 5 m ~ 6 m, 保证边坡长期稳定。

4 结束语

本文针对高填方公路路基沉降控制的技术难点, 系统分析了地基固结与路堤压缩的沉降形成机理, 梳理了地基处理、填筑压实、排水固结等关键施工技术, 提出了材料改良、薄层碾压、动态监测、边坡加固的

综合优化方案。工程实践表明, 优化后的技术体系可有效控制路基工后沉降与不均匀沉降, 提升路基整体稳定性。未来可结合 BIM 技术与物联网智能监测系统, 实现高填方路基施工的数字化建模与实时预警, 进一步提高沉降控制的智能化水平, 为山区高等级公路建设提供更完善的技术支撑。

参考文献:

[1] 梁汉华.CFG 桩复合地基在高填方路基加固中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024(19):45-47.
[2] 王建恒.砂桩与 CFG 桩复合地基在软土路基中的应用对比研究 [J]. 西部探矿工程, 2025,37(08):8-10.
[3] 唐璇勋.CFG 桩复合地基在软土路基中的施工工艺与应用分析 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2025,27(06): 16-20.
[4] 武洁,赵金科.智能压实度检测设备在公路路基施工质量控制中的实践 [J]. 消费电子, 2025(16):239-241.
[5] 周明.复杂条件下湿陷性黄土路基不均匀沉降控制关键技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2023(21):48-50.