

不同压实工艺对路基填料密实度及后期沉降特性的影响研究

张顺坤

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 乌鲁木齐 830021

【摘要】：路基是公路工程的主要承载基础，其密实度直接影响着结构的稳定，而后期沉降特性又直接关系到道路的使用寿命和交通安全。随着交通荷载等级的提高和复杂地质地区工程的不断增多，由路基沉降引起的路面裂缝和车辙等病害问题日益突出。压实过程通过对填料的颗粒排布和孔结构进行调控，是提高压实度和减少沉降的重要手段。目前，各类压实技术已得到广泛应用，但对不同填料、不同工况条件下不同工艺的作用规律尚无系统认识，制约工程质量的提高。

【关键词】：路基；压实工艺；填料密实度；后期沉降特性

DOI:10.12417/2811-0536.26.02.057

路基压实技术经历了静力-振动-复合压实的迭代发展过程，相关研究已证实工艺参数对压实度有显著影响。当前研究主要集中于单项处理效果评价，对于填料在压实过程中的细观结构演变规律研究不足，且压实度与后期沉降之间的定量关联机理尚不明确。特别是在特殊填料和复杂环境下，工艺选择缺乏科学性。因此，研究不同压实工艺对路基填料密实度及后期沉降特性的影响，并提出相应的优化策略，对提高路基工程质量具有重要意义。

1 主要压实工艺及其适应性分析

路基压实技术适应性的核心是能量传递模式与路基填料特性及工程情景的精确匹配。振动压实是一种以静压叠加周期振力为核心的压实方法，通过激发颗粒的共振，降低内部摩擦和粘结力，达到加速压实的目的，具有明显的深度和效率优势，尤其适用于粗颗粒土，但饱和粘性土在孔压积累过程中极易发生“弹簧现象”^[1]。冲击压实是利用冲击轮自由下落产生的瞬间荷载，并在深层形成应力波，可有效治理路基基底软弱夹层，在旧路加固和大块填料压实等方面表现突出，但施工噪音和振动干扰较大，需避开周边敏感结构。振荡压实方法，通过横向交变剪切代替垂向振动，能够破坏颗粒团聚体结构，对粉质粘土等细粒土具有良好的压实效果，适用于城市道路、桥梁引道等振动控制要求较高的场合，但由于设备成本过高，限制了其推广。复合压实通过过程组合，达到了优势互补的目的，特别适用于特殊填料和复杂工况条件。

2 压实工艺对填料密实度的影响规律

2.1 对宏观密度指标的提升效果对比

压实过程利用能量转移来改变填料颗粒的排列方式，其增密效果与工艺类型和填料尺寸的匹配程度有很大关系。静压成型是靠持续的正压实现颗粒的挤压，

适合于粘性土；利用高频振动（一般为 25-40 Hz）减小颗粒间的内聚力，对砂类土效果显著；冲击压力可突破颗粒间的咬合力（最高可达 200 kJ），与厚料层填料相匹配。在同一初始条件下，不同过程的密度变化如表 1 所示，数据的差异反映了填料性质和能量转移效率之间的耦合效应^[2]。

表 1 不同工艺在相同初始条件下的密度变化

压实工艺	填料初始密度(g/cm ³)	压实后密度(g/cm ³)
静压压实	1.65	1.88
振动压实	1.65	1.95
冲击压实	1.65	1.91

2.2 对细观结构特征的塑造作用

压实过程通过改变填料的颗粒排列和孔隙演变来塑造填料的细观结构，并利用扫描电子显微镜对其进行定量表征。高能压实技术使砂土颗粒间的接触方式由点接触转变为面接触，砂土中的颗粒定向排列程度提高到 0.7 以上，粘性土中的粘性胶结层厚度提高到 5~8 微米。同时压实后，孔隙体积减小至 18%-22%，当量孔径由 10~50 微米减至 2~8 微米，连通孔隙比例降低 30%以上。在此过程中，振动压实对孔隙的细化效果最为明显，可以将封闭孔隙的比例提高到 45%；同时，静压能够在孔隙中形成均匀的颗粒骨架，降低细观缺陷。

3 压实工艺对后期沉降特性的控制机制

3.1 初始状态对工后沉降的决定性影响

压实过程中形成的初始密实状态直接决定了工后沉降基准，其核心关联指标为初始孔隙比（ e_0 ）和压缩模量（ E_s ）。当 e_0 由 0.85 减小到 0.62，由于 e_0 较低，颗粒间的嵌固程度较高，有效应力传递效率提高 30%

以上,路基的工后沉降可由 125 mm 减至 38 mm。同时,充分压实可使 E_s 由原来的 8 MPa 提高到 18 MPa,从而减小加载时的压缩变形能力。有研究显示,当填料相同时,压实系数每提高 1%, e_o 平均减少 0.015,相应的工后沉降降低 5.2 mm^[3]。

3.2 对主固结沉降的影响

压实过程通过调节渗透系数 k 和固结系数 c_v 来影响主固结过程,采用振动压实技术,可使砂类土的孔隙水排泄途径延长、固结速率加快,主固结时间由 120 天缩短至 65 天。在粘性土中,静压密实导致粘粒分散度减小,其主要沉降量由原来的 98~42 mm 减小到 2×10^{-7} cm/s。另外,当压实度达到 96% 时,由于颗粒骨架的承载能力提高,使得孔压主导的压缩作用减弱,主固结沉降占总沉降的比例由 65% 下降到 40%。

3.3 对次压缩(蠕变)沉降的抑制作用

压实技术可通过强化颗粒之间的约束效应来抑制次压缩沉降,其关键是降低蠕变系数 (C_α)。冲击压实后,粘性土 C_α 由 0.035 下降到 0.012,砂性土 C_α 由 0.018 下降到 0.006,其原因在于瞬时冲击可使颗粒间形成“咬合-胶结”双重结构,剪切强度可达 35 kPa 以上。长期监测结果表明,当压实度达到 95% 时,路基的 5 年最大沉降量只有 12 毫米,而达到 90% 压实率的路基达到 48 毫米。对有机质土而言,振动压实-静压复合压实可以将 C_α 降低 0.004,有效抑制有机质分解引起的长期蠕变。

3.4 对动力稳定性与水稳定性的增强

压实法通过提高压实度来提高路基的动水稳定性和降低附加沉降的危险性。采用振动压实技术,可将填料的动弹性模量从 120 MPa 提升到 280 MPa,动剪切强度提高到 42 kPa,并在 0.5-1.0 Hz 下实现 50×10^{-6} 动应变控制,水稳定度方面,当填料压实达到 96% 时,其饱水后的抗压强度衰减率只有 8%,而当压实度达到 90% 时,其衰减率达到 32%。同时,通过压实将渗透系数控制在 1×10^{-6} cm/s 以下,减小降雨入渗引起的孔隙水压力增加,减少水致沉降至 15 mm 以内^[4]。

4 路基压实工艺优化与沉降控制策略

4.1 基于填料-工况匹配的精准工艺选型策略

路基填料物理力学性质和施工条件是压实技术选择的关键因素。由于掺灰剂量的不同,不同石灰改良土的颗粒之间的内摩擦角和内摩擦角有很大的差异。用 2% 的石灰改良后的土粒具有更高的流动性,因此应注重颗粒的嵌固作用。同时,在新老路基衔接、低填浅挖等特殊工况下,由于界面应力的差异,需要有

针对性地进行压实参数设计,以避免后期路基沉降开裂,保证技术与填料及工况的耦合适应性^[5]。具体实施措施如下:

(1) 填料分级工艺匹配: 针对 6% 石灰改良土(路床层 0-0.8 米),采用“路拌机拌和+徐工 26 T 振动压路机碾压”相结合的方法,将拌和次数控制在 2 次左右(第 1 遍不翻拌到底 2~3 cm,防止石灰下沉形成夹层);第二次翻拌至基层,破坏下层 1 厘米以加强层间结合强度),即“一次静压(1.7 km/h)→弱振 2 遍(速度 2.0 km/h)→静压 2 遍(速度 2.2 km/h)”,压实厚度严格控制为 20 cm;针对 2% 石灰改良土(下路堤,深度 >1.5 米),采用“平整机+徐工 22 T 振动压路机碾压”的方法,将碾压过程简化为“一次静压→二次强振一次静压一次”,碾压厚度也是 20 cm,松铺厚度按 25 cm 控制,匹配其颗粒流动性特征。

(2) 不同工况调整: 新老路基(台阶宽度 ≥ 1 米,反坡率为 4%)采用冲击击实(150 kJ)预处理,然后分层回填 2% 石灰改良土,每层加筋(宽度 4 米,抗拉强度 ≥ 80 kN/m);低填、浅挖段(超挖 40 cm),采用小型夯实机(激振力 30 kN)夯实,回填 2% 石灰土时,先采用五铧犁翻松 30 cm,再按“静压 2 遍→强振 1 遍”碾压,确保路基压实度达到 JTG_T3610-2019《公路路基施工技术规范》中对路基基底的要求;雨季施工时,需将填料含水量控制在最佳含水量 $\pm 2\%$ (16.5% 石灰改良土最好含水量为 16.5%,石灰改良土最好含水量 15.2%),超出部分用路拌机翻拌晾晒,不足时用 10 m³ 洒水车定量补水(每 100 m² 补水 0.8 m³)。

4.2 全生命周期压实质量动态管控策略

路基压实质量不是一个施工阶段的静态指标,它是一个动态变量,贯穿于“施工准备—施工全过程—运营养护”整个生命周期。在施工前对试验段进行参数校核是基础,需要获得松铺厚度和碾压遍数等参考值;在施工过程中,由于填料批次的不同和机械状态的不同,容易引起压实系数的波动,需要对其进行实时的监测和调整;在运营过程中,由于车辆荷载和环境水侵蚀等因素的影响,路基压实质量有可能发生劣化并诱发沉降,因此,需要建立一套基于多阶段数据联动的长效监测机制,实现由“被动验收”向“主动管控”的转变^[6]。具体实施措施如下:

(1) 施工前基准标定: 在施工前布设 300 米(包括路基、路基典型填料),按不同松铺厚度(24, 25 cm, 26 cm)、碾压次数(4, 5, 6)分组试验,按密度法(每 200 米每 2 个压实层测 2 个)进行压实度测定,确定最佳

参数: 6%石灰改良路床松铺厚度 25 cm, 碾压 5 遍, 2%石灰改良土下路堤松铺厚度 25 cm, 碾压 4 遍, 同步记录最佳含水率(16.5%, 15.2%)和机械结合效率, 形成《试验段压实参数报告》。

(2) 施工过程实时监控: 配置“压实度检测仪+含水量快测仪”, 每层填筑前对填料含水量进行检测(误差 $\leq 0.5\%$); 碾压过程中, 通过物联网压路机(配备定位和压力传感器)实时上传碾压轨迹和压强值(振动压力 ≥ 350 kPa), 对漏压、缺压区域(位置偏差大于 50 厘米, 压力小于 350 kPa)进行自动标注和返工。同时, 建立《压实质量台账》, 记录各层填料的批次、机具编号和试验数据, 实现对填料的可追溯性。

(3) 运行期间的长期监测: 在路基中线和路肩距 2 米处设置 50 米的沉降观测点, 每月用全站仪(精度 ± 0.1 mm)观测一次, 前 6 个月每半个月进行一次观测, 记录沉降。在单次沉降大于 3 mm、累计 3 个月累计沉降大于 8 mm 的情况下, 采用地质雷达(探测深度 2 米)探测路基内部密实度, 对松散区(密实度小于设计值)进行注浆(水泥浆浓度 35 Be'、注浆压力 0.3 MPa)。

4.3 融合新技术的压实效能提升与沉降预警策略

传统的压实技术主要依靠人工经验进行压实, 存在压实效果不佳和早期预警滞后的问题。将 BIM、物联网、非破坏性测试等新技术相结合, 实现路基压实过程的数字化建模、参数实时反馈及沉降风险预测: BIM 可以构建路基三维模型, 直观地展示分层填筑和压实参数。采用物联网传感器对路基内部的应力和含水量进行实时监控; 无损检测技术可以快速评价压实度, 三者协同形成“性能提升-风险预警”的闭环, 突破传统控制的局限性。

参考文献:

- [1] 唐世禄. 公路工程路基压实度控制关键技术与影响因素[J]. 大众标准化, 2025, (20): 37-39.
- [2] 苏辉. 路基路面压实技术在市政路桥工程中的实践运用[J]. 城市建设, 2025, (23): 78-80.
- [3] 王琳. 路基填料配比优化与压实工艺对路基强度的影响研究[J]. 交通世界, 2025, (19): 102-105.
- [4] 刘明. 产业路项目路基工程冲击压实技术应用[J]. 交通工程, 2025, 25(05): 90-95.
- [5] 周益军, 焦兵. 浅析路基填筑施工关键技术及机械化配置[J]. 建筑机械, 2023, (07): 79-81.
- [6] 王丽霞. 某地道路工程路基和路面施工方法与工艺综述[J]. 科技视界, 2021, (17): 12-15.

(1) 新技术赋能压实效能: 建立 BIM 路基压实模型, 引入设计标高(路床顶标高+0.8 m, 下路堤顶标高+1.5 m), 压实参数(松铺厚度 25 cm、碾压遍数 5 遍/4 遍), 分层标注填料种类和检测点位置, 并利用手机 APP 对模型进行实时对比(标高偏差 ≤ 10 mm, 压实遍数偏差 ≤ 1 次), 防止超厚、漏压; 在路床上(0-0.8 米)每 100 m 布置一个振弦式水分传感器(20 厘米, 50 厘米, 80 厘米), 每小时收集一次数据(含水量误差不超过 0.3%), 当水分含量超过最优值 $\pm 2\%$ 时, 就会自动启动(通过 APP 通知现场人员)。

(2) 建设沉降预警系统: 在新老路基衔接处、低填、浅埋段布设沉降传感器(量程 50 mm, 精度 ± 0.01 mm)和应力传感器(500 kPa 量程, 精度 ± 1 kPa), 并利用 4 G 模块将数据实时传送到监测平台。平台设置预警阈值: 当沉降计一次读数变化大于 3 毫米, 应力传感器读数波动大于 50 kPa 时, 触发 1 级警报(以短信方式通知工程技术主管); 单次沉降变化大于 5 毫米, 应力变动大于 80 kPa, 触发二级警报(现场复核开始); 在此基础上, 结合当地气象资料, 提前 24 小时提出防治措施(如覆盖彩条布, 增设 50 cm \times 50 cm)等措施, 实现沉降风险超前管控。

5 结语

综上所述, 通过揭示不同压实工艺对路基填料密实度和后期沉降的影响规律, 可为路基填筑工艺选择和参数优化提供科学依据, 对减少路基沉陷病害发生, 提高公路工程质量具有重要的现实意义。未来, 可借助智能监测技术, 建立路基施工过程参数实时调控模型, 并结合数值模拟, 深化路基沉降机理研究, 促进路基工程精细化和绿色化发展。