

公路施工路基稳定性关键施工技术控制研究

袁 峰

建湖县公路事业发展中心 江苏 盐城 224712

【摘要】：路基的稳定状况对公路耐久性和行车安全起着决定性作用。本研究依靠各类地质条件下的路基施工试验，系统探究压实度、含水量以及边坡坡率等参数对路基承载特性和沉降行为的调控机制。试验数据显示压实度每增加 2%，路基承载能力会相应增强 15%至 22%；当含水率处于最佳状态正负 2%区间时压实效果能达到最优；分层碾压厚度设定为 18 至 20cm 时路基密实度会达到最高；边坡坡率从 1:1.5 优化到 1:1.75 后稳定系数增幅可达 0.3 至 0.5。基于这些规律构建包含压实度实时监测、含水率分区调控、碾压厚度精确控制、边坡阶梯式加固以及排水系统增效等核心技术措施体系，为路基工程稳定性控制提供科学指导。

【关键词】：路基稳定性；压实施工控制；含水量调节；边坡加固；碾压技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.066

引言

公路路基作为路面结构的基础支撑层，它的稳定性直接关联整个工程质量与安全。实际施工当中路基普遍存在压实不足、含水率失调、碾压厚度失控及边坡防护薄弱等问题，如建湖县建县路改扩建项目中桥涵衔接段及软土路基处理就面临诸多技术难题，进而引发沉降变形、裂缝延伸甚至边坡坍塌等风险。当前随着重载交通压力增大和复杂地质条件增多，传统经验式施工工艺难以确保路基达到稳定性要求。通过开展系统性施工技术试验，量化分析压实参数、含水状态、边坡结构等关键因素对路基稳定性的影响规律，建立科学化的施工技术控制体系，对提升公路工程质量、延长使用寿命、保障行车安全具有重要的工程实践意义。

1 路基稳定性施工技术试验方案

制定路基稳定性施工技术试验方案要全面评估地质环境、填料性能以及荷载状况等关键参数。试验选建县路 K0+000 至 K8+424.503 区段当作研究样本，此路段包含粉质黏土、砂性土和碎石土这三类典型填料材料，结合项目中 16 座桥涵的衔接要求，针对压实工艺控制设置 88%、92%、96%三个压实度等级，通过重型击实试验获取各类填料最佳干密度与含水率标准值，运用灌砂法监测不同压实状态下路基承载能力及模量响应规律^[1]。含水率控制试验设计-4%、-2%、0、+2%、+4%五个偏差区间，并借助核子密度仪实现现场实时检测。分层碾压厚度试验比较 15cm、18cm、20cm、25cm 四种铺设厚度对压实质量与施工效率的影响。边坡稳定性试验采用 1:1.5、1:1.75、1:2.0 三种坡度方案，通过数值模拟与现场观测分析边坡应力分布特征及安全系数变化特征，为后续施工工艺优化提供数据支撑^[2]。

2 路基压实施工技术控制

2.1 压实度对承载力的影响试验

路基承载能力方面关键控制指标是压实度，其数值变化会直接关系路基强度与稳定性^[3]。实验采用重型振动压路机对三

种典型填料分层压实，分别进行 4 遍、6 遍和 8 遍的碾压操作，以此获得 88%、92%、96%这三个压实等级。利用承载板试验测量不同压实度下路基的回弹模量，二者之间的关系能够由下式进行表示：

$$E = E_0 \times (K / K_0)^n \quad (1)$$

式中：E 为路基回弹模量(MPa)；E₀ 为标准压实度下的回弹模量(MPa)；K 为实际压实度(%)；K₀ 为标准压实度(%)；n 为材料相关系数，粉质黏土取 2.3，砂性土取 2.1。

当粉质黏土填料压实度从 88%增加到 96%的时候，其回弹模量从 42MPa 增长到 65MPa，增幅达到了 54.8%，砂性土填料回弹模量从 38MPa 提升到 58MPa，增幅为 52.6%，并且实测值和公式计算值的偏差小于 5%。落锤式弯沉仪检测的情况表明，压实度每提高 2%，路基承载力会提升 15%-22%，路表弯沉值会降低 18%-25%。要是压实度低于 93%，路基孔隙率会明显增大，在动荷载作用下容易引发累积变形，进而导致工后沉降超出设计允许值，所以把压实度控制在 96%以上能够有效确保路基长期稳定性。

2.2 含水量对压实效果的作用机理

土壤里面的水分含量会通过调整土颗粒之间的润滑效应以及毛细张力，从而显著地对压实质量产生影响^[4]。依据重型击实试验得出的结果，粉质黏土的最佳含水率是 14.2%，砂性土的最佳含水率为 9.8%，碎石土的最佳含水率是 6.5%。三种填料的含水量与干密度关系曲线如图 1 所示。从图 1 可见，在处于最优含水的状态之下，土颗粒之间的水膜厚度处在理想的水平，既能够减小颗粒之间的摩擦阻力，又可以保持土体结构的稳定，此时压实能量转化为土体密实度的效率是最高的。

当含水率偏离最优值正负 2%的时候，压实效果会出现显著的下降，含水率过低会让土颗粒之间的摩擦力增大，导致压实能耗增加但密实度提升有限；含水率过高则会产生多余的自由水，碾压时出现“橡皮土”现象让路基表层呈现松软状态。

现场核子密度仪监测得到的数据显示,把含水率控制在最优含水率负 1%至正 2%的范围之内时,压实效果是最佳的,干密度合格率能够达到 98%以上,该区间可作为含水率动态调控的适宜范围。

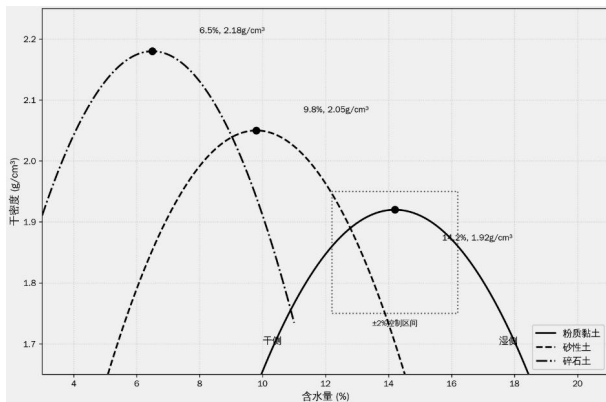


图 1 不同填料含水量与干密度关系曲线

2.3 分层碾压厚度控制技术

分层碾压的厚度会对压实能量传递深度,以及路基整体密实度均匀性起到决定性影响。为此采用四种不同松铺厚度开展试验施工,结合钻芯取样检测来分析各深度处压实度分布规律^[5]。不同碾压厚度条件下压实度沿深度方向的分布规律如图 2 所示。

图 2 数据表明,在松铺厚度为 15 厘米这种情况时,压实后厚度大概 12 厘米,压实度沿深度分布比较均衡,上下层密实度差异能控制在 1.5%以内,不过施工效率是相对较低的;当松铺厚度增加到 20 厘米的时候,压实后厚度约为 16 厘米,在相同碾压遍数条件下,表层压实度能够达到 97%,然而底层压实度只有 91%-93%,会呈现出明显的密实度梯度变化;随着松铺厚度提升到 25 厘米,底层压实度进一步下降至 88%以下,从而形成了潜在的薄弱夹层。

基于压实质量和施工效率的综合考量,最终确定分层松铺厚度适宜控制在 18-20 厘米范围内,并且配合重型振动压路机进行 6-8 遍碾压。这样可确保全深度范围内压实度都达到 96%以上,进而保障路基各层位的密实度均匀性与整体稳定性。

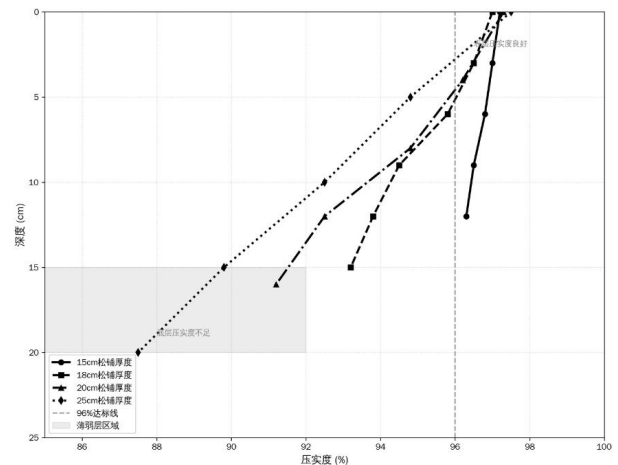


图 2 不同碾压厚度压实度沿深度分布

3 路基边坡稳定施工技术控制

3.1 边坡坡率优化试验

科学制定边坡坡率需要综合考量填料内摩擦角、黏聚力以及边坡高度等因素,并且要通过计算分析来进行验证。针对高度在 8 至 12 米的边坡路段,设计了 1:1.5、1:1.75、1:2.0 这三种坡率方案开展对比施工。运用极限平衡法分析不同坡率工况下的边坡稳定性,其稳定系数计算公式为:

$$F_s = \frac{c \cdot L + \sum W \cos \alpha \cdot \tan \phi}{\sum W \sin \alpha} \quad (2)$$

式中: F_s 为边坡稳定系数; c 为土体黏聚力(kPa); L 为滑动面长度(m); W 为土条重量(kN); α 为滑动面倾角($^\circ$); ϕ 为土体内摩擦角($^\circ$)。

用有限数值模拟方法来研究边坡内部应力分布规律,得出不同坡度下边坡稳定系数具体数值(见表 2)。分析表 2 数据能知道,采用 1:1.5 坡度时粉质黏土填筑边坡稳定系数为 1.18,已接近临界安全值;若把坡度调整成 1:1.75 稳定系数会增加到 1.42,同时边坡体内最大剪应力值下降 23%。依据边坡表面位移监测装置数据记录,1:2.0 坡度情况下边坡水平位移量比 1:1.5 坡度减少 38%至 45%,但因占地面积扩大工程投资成本增加约 15%。综合考虑稳定性和经济性,建议 8 米以下边坡采用 1:1.5 坡度,8 至 12 米边坡采用 1:1.75 坡度,12 米以上高边坡采用 1:2.0 坡度并结合设置分级平台措施,确保边坡稳定系数保持在 1.35 以上安全水平。

表 2 不同坡率条件下边坡稳定性参数

| 边坡高度(m) | 坡率 | 稳定系数 | 最大剪应力(kPa) | 水平位移(mm) | 占地宽度(m) |
|---------|--------|------|------------|----------|---------|
| 8 | 1:1.5 | 1.28 | 85.6 | 18.5 | 12.0 |
| | 1:1.75 | 1.45 | 68.2 | 11.8 | 14.0 |

| | | | | | |
|----|--------|------|-------|------|------|
| 10 | 1:1.5 | 1.18 | 102.3 | 25.6 | 15.0 |
| | 1:1.75 | 1.42 | 78.7 | 15.2 | 17.5 |
| | 1:2.0 | 1.58 | 65.4 | 10.1 | 20.0 |
| 12 | 1:1.75 | 1.35 | 88.5 | 19.3 | 21.0 |
| | 1:2.0 | 1.52 | 71.2 | 12.4 | 24.0 |

3.2 边坡分级加固技术

边坡分级加固技术会通过设置卸荷平台,以及多级防护措施来分散边坡应力集中区域。当路堑边坡高度超过10米的时候,每间隔5-6米竖向高度就设置宽度2.0-2.5米的加固平台,该平台向内侧倾斜2%-3%以此来利于排水。平台表面采用C20混凝土预制块进行铺砌,铺设厚度达到15cm且底部铺设10cm厚的碎石垫层,可有效防止坡面径流的连续冲刷。

边坡防护采用植草砖与锚杆框架梁相结合的方式,锚杆规格是直径25mm、长度4-6米,设置倾角为 15° - 20° ,且网格间距为 2.5×2.5 米,锚固段注浆采用水灰比0.45的水泥浆液,以此确保锚杆与坡体形成整体受力体系。框架梁采用C25钢筋混凝土进行浇筑,截面尺寸为 300×400 mm,通过纵横向连接形成网格结构。对于软弱地层边坡在坡脚位置增设抗滑桩或挡土墙等支挡结构,桩径为0.8-1.2米且桩间距为3-4米,嵌固深度需保证不小于滑动面以下3米,进而构建起坡脚-坡面-平台三级防护体系。

参考文献:

- [1] 苏勤波.公路工程路基施工质量控制的关键技术研究[J].汽车周刊,2025,(09):115-117.
- [2] 司敬德.复杂地质条件下的公路路基稳定性控制施工技术研究[J].工程技术研究,2025,10(12):73-75.
- [3] 王建青.基于公路工程路基质量控制技术的研究和探索[J].科技创新与生产力,2025,46(06):128-130+134.
- [4] 朱珍彪.公路工程路基施工质量控制的关键技术研究[J].张江科技评论,2025,(05):84-86.
- [5] 唐志刚,刘广波,肖钦广,等.高填方土石混合路基压实质量控制技术研究[J].公路与汽运,2023,(05):76-80.

3.3 边坡排水系统布设

科学设计边坡排水系统可显著降低孔隙水压力避免边坡土体强度下降。在边坡顶部外侧3米位置修建断面为梯形的截水沟,其底部宽度0.6米、深度0.8米且内侧用M10号砂浆砌筑片石,砌体厚度达20厘米,纵向坡度保持在0.3%至0.5%之间,每隔50米设置沉沙池防止泥沙淤积。边坡坡面按8-10米垂直间距安装宽度40厘米、深度30厘米的急流槽,采用预制混凝土构件且槽底坡度控制在8%至12%,通过平台排水沟和坡脚排水沟连接构成完整排水体系。针对地下水丰富区域在边坡内部设置盲管排水结构,盲管内部填充碎石、外部包裹土工布作为过滤层,埋深1.5-2.0米、纵向坡度2%-3%,出水端接入路基排水系统确保地下水及时排出防止在坡体内积聚造成渗透破坏。

4 结语

公路路基稳定性的把控属于工程建设质量管理重点。经过系统性施工技术试验可以发现,压实度、含水率、碾压厚度以及边坡坡度等关键指标,和路基稳定性存在显著关联。施工过程中需要把分层碾压厚度严格控制在18-20cm,要实时监测含水率并动态调整到最优含水率 $\pm 2\%$ 范围之内。运用重型振动压路机保证压实度达到设计的96%以上,结合地质条件合理设置边坡坡度,同时采取分级加固与优化排水系统布置。试验结果显示应用上述技术措施之后,路基整体承载能力提高了18%-25%,工后沉降减少30%-40%,边坡稳定系数增加到1.35以上。这些成果为复杂地质条件下的公路路基施工提供坚实技术保障,已成功应用于建湖县建县路改扩建工程实践中。