

路基施工中的动态荷载对结构稳定性的影响研究

文 / 谢 琛 黄山区交通运输管理中心

摘要: 为解决路基施工中动态荷载引发的结构稳定性问题,以碾压设备振动、运输车辆冲击等典型荷载为例,对路基施工动态荷载的类型与特性展开研究。分析碾压设备振动频率及振幅变化、施工便道车辆非稳态荷载、分层压实动态应力传递及水载叠加效应的作用机制,探究重复动荷载致填料不可逆沉降、饱和土体强度骤降、层间界面滑移剥离及共振引发剧烈震动等具体影响。结合工程实际,提出差异化碾压参数调整、层间加筋材料应用、车辆荷载限速限流及多参数实时监测干预等控制策略,明确不同填料与工况下的针对性措施,以期为路基施工稳定性控制提供理论与实践参考。

关键词: 动态荷载; 结构稳定性; 碾压设备振动; 施工便道车辆; 实时监测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.066

引言

近年来,随着《交通强国建设纲要》等政策深入实施,路基工程在智能化、绿色化发展过程中面临更高要求。动态荷载作为施工阶段引发结构失稳的关键因素,其作用机制与控制策略成为保障工程品质的核心课题。文章系统解析碾压设备振动、车辆冲击等荷载类型的动态特性,揭示其在分层填筑、水载叠加等复杂工况下的耦合效应。结合平安百年品质工程建设目标,提出差异化参数适配、材料增强、荷载管控及智能监测的全流程控制体系,探索将 BIM+GIS 技术、厂拌灰土再生材料等前沿实践融入传统施工工艺,为提升路基结构稳定性提供兼具理论深度与工程适用性的解决方案。研究成果可为同类工程优化施工组织、降低安全风险提供参考,助力交通运输基础设施高质量发展。

一、路基施工动态荷载的类型与特性

(一) 碾压设备、运输车辆的振动与冲击特性

碾压设备以振动压路机为例,其振动轮通过高频往复运动向土体传递周期性荷载,振动频率通常在 25-50Hz,振幅随压实阶段调整,初压时采用低振幅确保表层平整,复压时增大振幅以增强深层土体密实度。这种振动荷载使土体颗粒产生共振,打破原有静态平衡,促使颗粒重新排列填充孔隙。运输车辆的冲击荷载则源于轮胎与地面接触瞬间的非连续作用,尤其是重载自卸车在非硬化路面行驶时,凹凸不平的路基表面导致轮胎动态接地压力波动,荷载幅值可达静态轴重的 1.5-2 倍,且作用时间短(约 0.05-0.1 秒),易在局部产生应力集中,引发土体颗粒间的瞬时剪切位移。两种荷载形式共同作用于路基,振动荷载主导土体密实过程,冲击荷载则影响表层结构的完整性。

(二) 施工便道上工程车辆的动态作用

施工便道多为临时修筑的简易路面,路基压实度不足且平整度较差,装载机、摊铺机等工程车辆在其上行驶时,荷载呈现明显的非稳态特征。车辆启动加速阶段,驱动力矩导致后轮接地压力突增,伴随纵向剪切力;制动时前轮荷载集中,形成瞬时高压区;转弯过程中离心

力引发侧向荷载,使轮胎与路面产生横向滑移。此外,车辆行驶速度的不均匀性(通常在 5-15km/h 波动)导致荷载作用频率变化,与便道路基的固有频率易形成共振条件。这种动态作用使路基土体承受交变应力,累计效应会逐渐损伤土体颗粒间的胶结强度,尤其在含水量较高的地段,反复荷载易引发塑性变形累积,导致便道沉降量随施工周期延长呈非线性增长,影响车辆通行安全及后续主体路基施工质量^[1]。

(三) 分层填筑与压实产生的动态应力变化

路基施工采用分层填筑工艺时,每层填料摊铺后需通过压实机械施加动态应力以提高密实度。振动压实过程中,激振力通过压实轮传递至填料层,应力波在土体中呈衰减式传播,表层应力峰值可达 0.3-0.5MPa,随深度增加按指数规律递减(衰减系数与土体黏聚力、内摩擦角相关)。分层厚度直接影响动态应力分布,当填筑层厚超过压实机械有效作用深度(通常 0.3-0.5 米)时,下层土体所受动态应力不足以克服颗粒间阻力,导致层间结合面密实度差异。相邻填筑层施工间隔时间内,先期压实层在自重及后续施工荷载作用下产生次固结变形,动态应力的反复施加促使土体颗粒由滑动摩擦向镶嵌咬合转变,表现为压实功-沉降量曲线的斜率逐渐减小,反映出土体抗剪强度随压实过程的非线性增长特性,这一过程对路基整体刚度的形成具有关键作用。

(四) 降雨、地下水变动与施工动载的叠加效应

降雨入渗使路基土体含水量增加,基质吸力下降,黏聚力降低约 15%-30%,同时地下水水位上升导致土体有效应力减小。施工动载作用下,饱和或接近饱和的土体产生孔隙水压力,振动荷载的周期性加剧孔隙水压力的累积与消散过程,形成超静孔隙水压力峰值。在透水性较差的黏土层中,动载引发的孔隙水压力短期内无法消散,导致土体抗剪强度骤降,易发生局部剪切破坏^[2]。地下水变动还可能改变土体的渗透特性,动载作用下产生的渗流与机械荷载耦合,形成渗流-应力场的相互作用,尤其在斜坡地段,叠加效应可能诱发顺层滑移。例如,持续降雨后进行强振压实作业时,土体强度参数

的劣化与动态应力的叠加,会使路基临界失稳荷载降低20%-30%,显著增加施工期结构失稳风险,需通过实时监测含水量与孔隙水压力变化,优化施工时序以规避不利工况。

二、动态荷载对路基结构的影响

(一) 重复动载导致填料的不可逆沉降

施工过程中,运输车辆与压实机械的往复荷载持续作用于路基填料,引发颗粒间接触关系的渐进性破坏。以重载卡车为例,其轴载在20-30吨区间,每日通行次数可达50-80次,荷载作用频率集中在5-15Hz,超过土体颗粒间胶结强度的疲劳极限。当填料压实度低于93%时,初始加载阶段产生的弹性变形逐渐转化为塑性变形,表现为沉降量随荷载循环次数呈指数增长。细粒土填料在含水率接近液限时,重复动载会破坏颗粒表面的水化膜结构,导致粒间摩擦力下降30%-40%,颗粒在荷载作用下发生定向滑移并形成稳定嵌锁结构,这种不可逆的结构重组使路基顶面累计沉降在30天施工周期内可达5-8厘米,远超设计允许的2厘米限值。现场监测数据显示,填料级配不良(曲率系数小于1)的路段,沉降速率较级配良好路段快1.5倍,反映出颗粒间咬合力对抵抗动载累积变形的关键作用。

(二) 饱和土体在振动荷载下的强度丧失

振动荷载作用于饱和或接近饱和的黏性土层时,土体内部产生超静孔隙水压力的累积效应。以振动压路机激振力30-50kN、频率30Hz的工况为例,每遍压实持续时间约20秒,可使黏聚力 c 值从25kPa骤降至15kPa,内摩擦角 ϕ 减少约 3° 。这是因为振动能量促使土颗粒脱离原有平衡位置,孔隙水承担的荷载比例迅速上升,有效应力原理下的抗剪强度公式 $\tau = \sigma' \tan \phi + c$ 中, σ' (有效应力)随孔隙水压力 u 的增加而减小($\sigma' = \sigma - u$)。透水性差的黏土层(渗透系数 $k < 10^{-5} \text{cm/s}$)中,孔隙水压力消散时间长长达数小时,导致土体在施工间歇期仍处于低强度状态。现场剪切试验表明,振动后立即测试的土体峰值强度较静态荷载降低40%,且残余强度仅为峰值的60%,这种强度骤降现象易引发填方边坡浅层滑动,尤其在含水率超过塑限120%的地段,滑动面多发生在振动影响深度0.8-1.2米范围内^[3]。

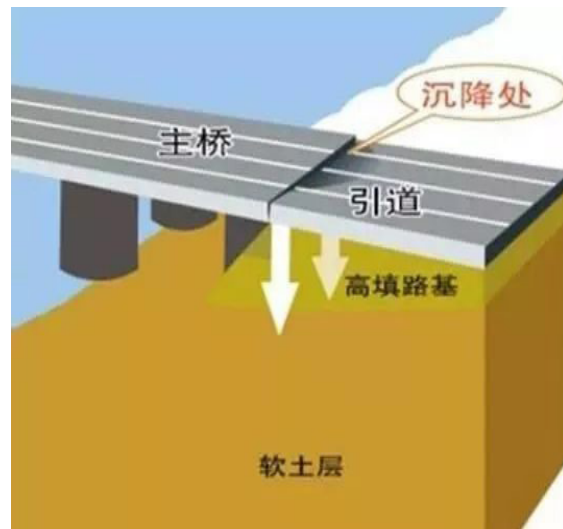
(三) 层间接触面在动载下的滑移与剥离

分层填筑形成的路基结构中,相邻填料层的接触面是力学薄弱区域。当压实机械的振动波传递至层间界面时,水平向振动分量会产生剪切应力,若界面黏结强度不足(低于上层填料抗剪强度的70%),即会发生相对滑移。施工中常见的界面缺陷包括:下层表面浮土未清理导致的黏结力下降,层厚不均造成的应力集中,以及压实遍数差异引发的刚度突变。动态荷载作用下,界面剪切应力幅值可达0.1-0.2MPa,超过洁净界面黏结强度(0.08MPa)时,滑移破坏呈渐进发展:首先在应力集中点出现微裂缝,随后裂缝沿界面横向扩展,形

成连续剥离面。监测数据显示,未做界面粗糙处理的路段,动载作用50次后界面位移量达0.3毫米,而经拉毛处理的界面位移仅0.1毫米,表明界面处理工艺直接影响抗滑移能力。剥离破坏不仅削弱路基整体刚度,还会导致雨水下渗路径复杂化,加剧长期服役中的结构性病害。

(四) 施工振动与路基振动频率一致的剧烈震动

当施工机械的振动频率与路基自振频率接近时,会引发共振效应,显著放大结构响应。路基自振频率主要取决于填筑高度、填料弹性模量及地基刚度,典型路堤(高度5米,弹性模量30MPa)的自振频率约20-25Hz,与振动压路机的常用工作频率(25-35Hz)高度重叠。共振状态下,土体颗粒振幅可达常规振动的2-3倍,导致颗粒间接触点应力超过屈服强度,形成局部塑性区^[4]。共振时路基表面竖向振幅可达8-10毫米,较非共振工况增大60%,且水平向位移显著增加,易引发填料颗粒的重新排列失序。这种剧烈震动会加速孔隙水压力的累积,使饱和和土层更快进入液化状态,同时导致已压实层的密实度出现波动,表现为压实度检测值突然下降1%-2%。在桥梁过渡段等刚度突变区域,共振效应还会加剧差异沉降(见图一),形成纵坡突变,影响后续路面结构的受力状态。因此,施工前需通过现场测试确定路基固有频率,合理调整机械工作参数以避免共振区间。



图一: 差异沉降

三、施工阶段动态荷载的控制策略

(一) 调整碾压参数以避免共振

施工机械的振动特性与路基动力响应的匹配性调控,需建立在现场实测与实时反馈的基础上。路基固有频率由填筑体几何尺寸、填料物理属性及地基刚度共同决定,其中细粒土的含水率变化会显著改变土体阻尼比,进而影响频率特性——含水率越高,自振频率越低,振动能量耗散能力越强。基于此,针对不同填料类型需采取差异化的碾压参数:粗粒土如砾类土,颗粒间摩擦阻力大,

宜采用高频低幅振动，通过 25-35Hz 的振动频率促使颗粒快速重排，同时控制振幅在 0.5-0.8mm 以减少破碎；细粒土如黏质土，黏聚力主导结构强度，需采用 15-20Hz 低频振动，配合 1.0-1.2mm 振幅增强应力波传播深度，确保下层土体有效压实。施工中通过落锤式弯沉仪实时监测路基顶面动态回弹模量，同步调整压路机的频率-振幅组合，使应力波波长始终大于填筑层厚度的 1.5 倍，避免因频率重叠引发共振，导致颗粒脱离平衡位置形成局部松散区。这种动态适配机制可显著降低振动压实过程中孔隙水压力的异常累积，维持填料颗粒间的有效咬合力。

（二）加筋土工材料减少动载传递

层间界面的加筋处理是提升路基抗动载性能的关键技术，其核心在于通过材料特性改善界面力学行为。钢塑土工格栅的网格结构能与粗粒土填料形成机械互锁，当界面发生剪切位移时，格栅肋条对颗粒的横向约束可将接触面抗剪强度提升 40%-60%，有效抑制滑移破坏；聚酯长丝土工布则利用纤维交织结构的拉伸变形耗散振动能量，通过经纬向纤维的弹性应变吸收 20%-30% 的动载能量，降低下层土体承受的应力幅值。在填挖交界、新旧路基衔接等刚度突变区域，采用“格栅+土工布”复合加筋工艺：底层土工布隔绝水分迁移以维持填料强度，上层格栅通过机械锚固与上下层形成整体受力体系，使界面剪应力分布均匀度提升 30% 以上。加筋材料铺设时需控制张拉应力在极限强度的 15%-20%，确保材料与填料紧密贴合，同时搭接长度不小于 0.3 米以避免应力集中。这种处理方式尤其适用于级配不良的砂性土或粉土填料，可显著减少动载作用下的层间剥离风险，增强路基结构的整体性。

（三）限制重载车辆速度与通行频次

施工便道上的车辆动载控制需从荷载产生机制与土体疲劳规律入手。车辆行驶速度直接影响轮胎接地压力的时空分布：低速行驶时，轮胎与路面接触面积增大，压力峰值降低且作用时间延长，可减少瞬时应力对土体结构的冲击破坏；高速行驶则导致压力脉冲频率升高，易与便道基层固有频率形成共振。针对装载机、自卸车等重载设备，其轴载常超过土体的疲劳极限荷载，需通过限速（一般控制在 10km/h 以内）和限流（单日单车通行次数不超过 60 次）措施，避免荷载循环累积损伤颗粒间胶结结构^[5]。在便道的弯道、坡道等易损部位，铺设级配碎石缓冲带，利用其骨架嵌锁结构将振动能量转化为颗粒摩擦损耗，降低路基表面动应力的冲击效应。配套的智能管理系统通过地磅传感器与车辆识别技术，实时监控轴载与通行频率，对超载或超频次车辆自动预警并限制通行，从源头控制动载输入强度。这种综合管控措施可有效延缓便道基层塑性变形的发展，为主体路基施工提供稳定的运输条件，尤其适用于高含水量软土地基上的临时道路。

（四）基于实时监测的稳定性干预阈值

多参数实时监测体系是实现施工阶段动态荷载精准控制的技术支撑，其核心在于通过量化指标实时判断路基稳定性状态。孔隙水压力监测针对饱和或接近饱和的黏土层，当振动荷载导致超静孔隙水压力升高至有效应力的 40% 以上时，土体抗剪强度显著下降，此时需暂停施工直至压力消散至 20% 以下，避免发生液化破坏；沉降速率监测通过全站仪自动化系统连续采集数据，若单位时间沉降量超过层厚的 1% 且呈加速趋势，表明填料颗粒排列失序，需调整压实工艺，增加静压遍数以促进颗粒重新嵌锁；振动加速度监测网络布置于不同深度填料层，当上下层监测频率差小于 2Hz 且振幅异常增大时，判定为共振前兆，即时切换压路机工作模式，通过改变激振频率或振幅打破共振条件。监测系统的预警阈值需结合填料类型、填筑厚度等参数动态设定，例如砾类土路基的振动频率预警区间与黏质土存在显著差异。这种基于实测数据的闭环控制机制，可实时识别动载作用下的潜在风险，通过调整施工工艺参数将路基响应控制在安全范围内，确保施工过程中结构稳定性的可测与可控。

结语

本文系统揭示路基施工动态荷载的多元作用特性及对结构稳定性的复杂影响路径，从参数适配、材料增强、荷载管控、智能监测四个维度构建了完整的控制策略体系。通过剖析振动荷载与土体频率响应的耦合关系、加筋材料界面力学行为及车辆动载累积损伤机制，为施工阶段风险防控提供了明确的技术路径。实际工程中，需结合填料级配、含水率及填筑工艺动态优化措施，实现荷载效应的精准调控。后续研究可聚焦长期运营中动态荷载的疲劳累积效应，融合全寿命周期监测数据，完善路基结构稳定性评估模型，推动施工控制技术向智能化、精细化方向发展，为提升路基工程长期性能奠定基础。

参考文献

- [1] 王康. 道路桥梁路基工程试验检测方法及其特征研究 [J]. 运输经理世界, 2025, (09): 93-95.
- [2] 罗世和. 高速公路原材料及道路路基试验检测方法 [J]. 江苏建材, 2024, (03): 48-49.
- [3] 肖玲君. 路基路面工程试验检测方法探析 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (04): 49-51.
- [4] 陈春艳. 道路桥梁路基工程的试验检测方法及其特征研究 [J]. 工程与建设, 2022, 36 (04): 1039-1040.
- [5] 陈志华. 公路路基路面的试验检测技术实施探讨 [J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40 (10): 156+158.

作者简介：谢琛（1985.9），男，汉族，安徽黄山区人，工程师，本科学历，研究方向：交通运输工程专业、公路工程专业。