

路基冲击碾压遍数对地基承载力的提升作用分析

代建龙

(中铁十九局集团第一工程有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要 为解决路基施工中冲击碾压遍数把控不精准及与地基承载力量化关联不明的问题, 依托高速公路改扩建工程, 通过现场试验探究不同冲击碾压遍数对地基承载力的影响。结果表明, 地基承载力随碾压遍数提升呈“前快后缓”特征, 16 遍为高效提升临界节点, 20 遍时达相对稳定状态, 较初始值提升 54.2%; 压实效果存在深度衰减效应, 提升作用集中于浅层。本研究揭示了二者内在关联, 旨在为优化施工参数、平衡施工效率与成本提供科学参考。

关键词 冲击碾压遍数; 地基承载力; 路基施工; 压实效果; 现场试验

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.033

0 引言

路基作为公路工程的核心承载结构, 其地基承载力直接决定了路面使用年限与行车安全, 是保障工程质量的关键指标^[1]。冲击碾压技术因压实效率高、适配性强等优势, 已被广泛应用于路基强化施工中, 但当前研究多聚焦压实度、沉降量等表层指标, 对冲击碾压遍数与地基承载力的量化关联及提升规律探讨不足。依托高速公路路基改扩建工程实践, 结合冲击碾压技术在复杂土质路基中的应用场景, 针对现有施工中碾压遍数缺乏精准把控的问题, 开展专项研究。本研究通过现场试验探究不同冲击碾压遍数对地基承载力的影响, 旨在揭示二者内在关联, 为优化施工参数、提升地基承载性能、降低工程成本提供科学依据, 对同类路基工程施工具有实践参考意义。

1 工程概况

本研究依托某高速公路路基改扩建工程, 项目起于两条高速交叉口, 终于枢纽互通, 原线路为双向四车道, 局部路段为六车道, 改扩建后为双向八车道, 设计速度 120 km/h, 路基宽度由 28 m 拓宽至 42 m。工程地处江淮分水岭区域, 属淮河水系, 沿线地势呈波状起伏, 分布标高 30.38 ~ 68.00 m, 主要土质为低液限黏土, 夹杂膨胀土、软土等特殊土, 地质条件复杂。区域属南北气候过渡带, 年平均气温 15.2 °C, 年降水量 1 071.45 mm, 地下水以松散岩类孔隙水和红层孔隙裂隙水为主, 局部路段需通过渗沟排水。为强化路基

承载性能, 工程采用三边形冲击压路机开展路基处理, 该路段的地形、土质及水文气候条件, 为探究冲击碾压遍数对地基承载力的影响提供了典型试验场景。

2 路基冲击碾压遍数对地基承载力影响试验方案

2.1 试验设备选型

试验核心压实设备选用 25 kJ 三边形双轮冲击压路机, 该设备具备稳定的冲击能量输出特性, 可精准适配路基强化施工的核心需求, 其压实宽度为 2×900 mm, 结合工程实际施工条件, 最佳工作车速控制在 10 ~ 12 km/h, 单次铺层厚度适配 500 ~ 1 000 mm 的工程常规要求。为保障试验检测数据的准确性与可靠性, 配套选用灌砂法检测套装、精度 0.1 g 的电子天平、测角精度 ±2" 的全站仪、平板载荷试验仪及含水率快速测定仪等设备。所有试验及检测设备均提前完成专业计量校准, 确保各项检测指标的精准性, 为后续试验数据的科学性提供设备保障。

2.2 试验路段与测点布置

试验路段选取依托工程中地质条件具代表性的区段, 路段长度 160 m、宽度 40 m, 其土质以低液限黏土为主且夹杂局部特殊土, 与工程全线地质条件保持一致, 可充分反映实际施工场景。测点采用三维网格状系统布置, 纵向按每 20 m 间距设置 1 个观测断面, 横向在距路线中桩 3 m 处、中桩位置及另一侧距中桩 3 m 处各布设 1 个测点, 形成全覆盖监测网络。每个测点分别在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 三个深

作者简介: 代建龙 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路工程。

度层设置检测点，重点聚焦表层及浅层地基性能变化，确保监测数据全面覆盖地基主要受力层，为精准分析冲击碾压对不同深度地基承载力的影响提供数据支撑。

2.3 试验参数设计

试验采用梯度化设计冲击碾压遍数参数，共设置8个梯度水平，分别为0遍（初始未碾压状态）、5遍、10遍、12遍、14遍、16遍、18遍、20遍，以系统探究不同碾压遍数下地基承载力的变化规律。碾压施工采用来回错轮作业方式，相邻轮迹无重叠，纵向每遍冲压错开冲击轮总周长的1/6，行驶速度严格控制在10~12 km/h，碾压范围延伸至路基坡脚外1 m，保障路基全域压实均匀性。施工前需精准检测地基表层30 cm范围内土体实际含水率，确保其处于最佳含水率的-4%~+2%区间；若含水率不达标，则通过洒水增湿或晾晒降湿方式处理，避免含水率偏差影响压实效果及试验数据准确性。

2.4 检测指标与方法

2.4.1 压实度检测

采用灌砂法测定压实度，步骤如下：按规范开挖试坑，称取坑内土样质量 m_x ，测定含水率 w ；向灌砂筒注满标准砂，称取质量 m_1 ，倒置后注入试坑，记录注满试坑的标准砂质量 m_2 。通过公式（1）计算湿密度 ρ_w ，公式（2）计算干密度 ρ_d ，最终按公式（3）求得压实度 K 。

$$\rho_w = \frac{m_x}{m_1 - m_2} \rho_s$$

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w}$$

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100\%$$

以上公式中： ρ_s 为标准砂密度（kg/m³）； ρ_{dmax} 为室内击实试验测得的最大干密度（kg/m³）。

2.4.2 地基承载力与沉降量检测

地基承载力采用平板载荷试验测定，承压板面积0.5 m²，分级施加荷载，记录各级荷载下的沉降量，取比例界限对应的荷载值作为地基承载力特征值。沉降量采用全站仪实时观测，每完成预设碾压遍数后，对所有测点进行沉降数据采集，与初始状态对比分析沉降规律，间接反映地基密实度与承载力变化。所有检测指标均按规范要求的频率进行，确保数据的代表性与可靠性。

3 路基冲击碾压遍数对地基承载力影响试验结果

3.1 冲击碾压遍数与地基压实度的关联规律

试验发现，冲击碾压遍数与地基压实度呈显著正相关，且存在明显的深度衰减效应，具体数据如表1

所示。初始状态（0遍）时，各深度层压实度普遍较低，表层（0~20 cm）仅80.9%，深层（40~60 cm）为76.3%。随着碾压遍数增加，压实度持续提升，但增长速率差异显著：前14遍压实度提升迅猛，表层在14遍时达91.9%，较初始状态提升13.6%；14~20遍期间增长趋缓，20遍时表层压实度仅增至93.2%，6遍内仅提升1.3%。同时，压实效果随深度递减，20 cm以下深度压实度始终低于表层，40~60 cm深度20遍时仅79.5%，印证了冲击能量的深度传递损耗特性。

表1 不同碾压遍数下各深度地基压实度检测结果（%）

| 碾压遍数 (遍) | 0~20 cm 深度 | 20~40 cm 深度 | 40~60 cm 深度 |
|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 0 | 80.9 | 78.7 | 76.3 |
| 10 | 88.8 | 85.1 | 77.8 |
| 14 | 91.9 | 84.6 | 78.6 |
| 16 | 92.6 | 84.8 | 78.9 |
| 20 | 93.2 | 85.0 | 79.5 |

3.2 冲击碾压遍数对地基承载力的提升规律

地基承载力随冲击碾压遍数的提升呈现“前快后缓”的阶段性特征，检测结果如表2所示。初始状态下，地基承载力特征值仅120 kPa，无法满足高速公路路基设计要求；碾压5遍后承载力达138 kPa，增幅15.0%；10~16遍为快速提升阶段，16遍时承载力升至176 kPa，较初始状态提升46.7%；16遍后提升速率显著放缓，20遍时承载力为185 kPa，较16遍仅增加5.1%。这一发现表明，16遍左右是承载力高效提升的临界节点，超过该遍数后，土体颗粒密实化潜力接近耗尽，承载力边际增益降低。

表2 不同碾压遍数下地基承载力特征值检测结果

| 碾压遍数(遍) | 0 | 5 | 10 | 16 | 20 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 承载力特征值(kPa) | 120 | 138 | 155 | 176 | 185 |

3.3 冲击碾压遍数与地基沉降量的对应规律

试验发现，地基累计沉降量随碾压遍数增加呈阶梯式增长，且增长速率与承载力提升规律高度契合，数据如表3所示。初始状态无沉降，碾压5遍后沉降量达30 mm，土体颗粒开始初步密实；10~14遍沉降量激增，14遍时达100 mm，较5遍增长233.3%；16遍时沉降量仅101 mm，增长近乎停滞；20遍时沉降量为129 mm，16~20遍期间仅增加28 mm。这一结果说明，沉降量的快速增长阶段对应地基承载力的高效提升期，当沉降增长趋缓时，地基已接近稳定密实状态，继续增加碾压遍数对承载性能优化作用有限。

表 3 不同碾压遍数下地基累计沉降量检测结果

| | | | | | | |
|------------|---|----|----|-----|-----|-----|
| 碾压遍数 (遍) | 0 | 5 | 10 | 14 | 16 | 20 |
| 累计沉降量 (mm) | 0 | 30 | 67 | 100 | 101 | 129 |

4 路基冲击碾压遍数对地基承载力的提升作用

冲击碾压技术对地基承载力的提升作用,本质是通过冲击轮瞬时释放的动能向土体深层传递,驱动土体颗粒发生位移、重组与咬合,进而降低孔隙率、提高密实度的物理力学过程,其强化效果不仅与碾压遍数呈显著量化关联,还受到冲击能量传递特性、土体力学响应规律及外界环境条件等多重因素的综合制约^[2]。结合本试验实测数据可知,研究区域初始状态下地基表层 0~20 cm 压实度仅为 80.9%,远低于高速公路路基压实度设计标准,对应的地基承载力特征值仅 120 kPa,无法满足双向八车道高速行驶荷载对路基承载性能的核心要求。经 20 遍冲击碾压处理后,表层压实度提升至 93.2%,地基承载力特征值最高增至 185 kPa,较初始状态提升 54.2%,这一数据充分印证了冲击碾压技术对低液限黏土路基承载性能的显著强化效果,也为该技术在同类复杂土质路基工程中的应用提供了直接数据支撑。

冲击碾压遍数的临界效应是提升地基承载力的核心控制因素。试验数据显示,前 16 遍碾压过程中,地基承载力呈快速增长态势,从 5 遍的 138 kPa 升至 16 遍的 176 kPa,11 遍内提升 38 kPa,平均每遍提升 3.45 kPa;而 16 遍后提升速率显著放缓,16~20 遍期间承载力仅从 176 kPa 增至 185 kPa,4 遍内仅提升 9 kPa,平均每遍提升 2.25 kPa。这一现象的核心原因在于,在冲击能量作用下,土体颗粒逐渐从松散状态向密实状态过渡,前 16 遍已基本完成颗粒重组与孔隙挤压,土体密实化潜力接近耗尽,后续碾压仅能产生少量残余沉降,对承载力的边际增益大幅降低^[3]。从工程经济性角度分析,16 遍时承载力已达 176 kPa,满足高速公路路基设计要求,过度增加碾压遍数会导致施工效率下降、机械损耗及能耗增加,造成不必要的成本浪费。

冲击能量的深度传递衰减特性,是导致不同深度地基承载力提升效果存在显著差异的关键原因,这一规律与试验中不同深度压实度检测结果高度契合。冲击轮施加的瞬时冲击荷载(本试验采用 25 kJ 冲击能量)需通过土体颗粒逐层向下传导,在此过程中,一方面由于土体颗粒间的摩擦力、黏结力会消耗部分能量,另一方面冲击应力会随深度增加呈扩散状分布,导致单位面积上的能量密度快速降低,最终呈现“表层能量集中、深层能量匮乏”的分布特征。试验数据

显示,表层 0~20 cm 土体直接承受冲击轮的瞬时荷载,能量传递损耗最小,压实度从初始 80.9% 提升至 20 遍的 93.2%,提升幅度达 15.2%,对应的承载力提升幅度也达到最大值;而 20~40 cm 深度压实度最高仅 85.0%,40~60 cm 深度仅 79.5%,对应的承载力提升幅度也远低于表层。这一规律清晰表明,冲击碾压技术对地基承载力的提升作用主要集中在 0~20 cm 浅层区域,深层土体受能量传递限制,密实化效果有限。因此,在实际高速公路路基改扩建工程中,对于深层地基承载力不足的路段,若仅依靠单一冲击碾压技术,难以实现全深度范围的承载性能达标,需结合工程地质条件采用分层冲击碾压、换填改良(如换填级配碎石)或深层加固(如 CFG 桩复合地基)等组合工艺,通过“浅层强化+深层加固”的协同方案,实现各深度层地基承载性能的均衡提升,保障路基整体稳定性^[4]。

此外,地基承载力的提升与压实度、沉降量的变化呈现高度协同性。当压实度从 80.9% 提升至 93.2% 时,累计沉降量从 0 mm 增至 129 mm,承载力同步从 120 kPa 提升至 185 kPa,三者的量化关联充分说明,土体密实化是承载力提升的核心机理,而碾压遍数则是调控这一过程的关键参数。通过精准控制碾压遍数,可实现地基密实度与承载力的高效匹配,避免欠压导致承载不足或过压造成资源浪费^[5]。

5 结束语

冲击碾压遍数通过调控土体密实化程度,对地基承载力产生显著提升作用,其提升规律呈现“前快后缓”的阶段性特征,16 遍为承载力高效提升的临界节点,20 遍时承载力达到相对稳定状态,较初始值提升 54.2%。这一研究结果为工程中优化冲击碾压施工参数提供了科学依据,合理控制碾压遍数(16~20 遍)可在保障地基承载力满足设计要求的同时,实现施工效率与成本的平衡,对同类路基工程施工具有积极的参考价值。

参考文献:

- [1] 季征,刘绍平.不同配重压路机对路基压实度与碾压遍数关系的影响[J].黑龙江交通科技,2023,46(11):11-15.
- [2] 史越.改扩建路基路面设计优化研究[J].工程技术研究,2024,09(04):188-190.
- [3] 任惠翔,李群.冲击碾压施工技术在高速公路路基施工中的运用[J].大众标准化,2025(06):59-61.
- [4] 杨生浩.浅谈高速公路湿陷性黄土路基冲击碾压施工工艺研究[J].建筑安全,2023,38(03):79-81,85.
- [5] 韩伊凡,李文豪.冲击碾压技术在高速公路路基施工中的应用[J].工程建设与设计,2025(14):201-203.