

基于检测试验的路基承载力特性评价分析

陈良锐, 何俊雄

(中机中联工程有限公司, 重庆 400041)

摘要:为探究压实次数对路基承载力的影响,以理论计算为依据,对承载板法路基回弹模量参数计算方法进行优化,结合贵州正习高速公路试验段实测数据,对路基承载力参数进行相关性分析。结果表明:1)承载板法逐级加压与卸载会影响测点处路基承载性能,需计算结果进行原点修正;2)碎石土路基中,路基回弹模量随压实次数的增加而出现减小趋势,压实5次后,平均路基回弹模量降低了13.9%;3)路基刚度整体随碾压次数的增加呈现锯齿状变化,最大增幅为22.6%,最大降幅为34.6%;4)承载板法测得回弹模量与便携式落锤仪、刚度仪测定结果具有良好相关性,便携式落锤弯沉测定结果与刚度仪测得的刚度之间线性相关性较弱,工程中需配合其他测定手段综合判定路基承载性能。本文研究成果可为路基承载特性检测方案提供工程指导意义。

关键词:公路路基; 路基承载力; 检测试验; 压实次数; 相关性分析

中图分类号:U416.1⁺1

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)09-0065-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.09.123

Evaluation and analysis of subgrade bearing capacity characteristics based on detection test

CHEN Liangrui, HE Junxiong

(CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400041, China)

Abstract: In order to explore the effect of compaction times on the bearing capacity, based on theoretical calculation, the calculation method of resilience modulus of roadbed with bearing plate method was optimized, and the correlation analysis of roadbed bearing capacity parameters was carried out based on the measured data of the test section of Zhengxi Expressway in Guizhou Province. 1) Step by step loading and unloading with the bearing plate method will affect the bearing performance of the roadbed at the measuring point, so the calculation results need to be modified at the origin point; 2) In the gravel soil subgrade, the subgrade resilience modulus decreases with the increase of compaction times. After compaction for 5 times, the average subgrade resilience modulus decreases by 13.9%; 3) With the increase of rolling times, the overall stiffness of the roadbed presents a zigzag change, with the maximum increase of 22.6% and the maximum decrease of 34.6%; 4) Correlation analysis results show that: There is a good correlation between the resilience modulus measured by the bearing plate method and the results measured by the portable drop weight instrument and the stiffness meter, but the linear correlation between the portable drop weight bending measurement results and the stiffness measured by the stiffness meter is weak. In the project, other measurement methods should be used to comprehensively determine the bearing performance of the roadbed. The research results in this paper can provide engineering guidance for the subgrade bearing characteristics detection scheme.

Key words: highway subgrade; subgrade bearing capacity; detection test; compaction number; correlation analysis

收稿日期: 2024-02-07

作者简介: 陈良锐(1992—), 男, 工程师, 从事道路交通设计工作。

在道路工程中,路基是承受和传递荷载的结构主体,路基工程造价在工程总造价中所占的比重也较大,因此路基的设计和施工是道路工程中的重要步骤。路基的强度和稳定性来源于对路基材料的压实,不同材料类型的路基所采用的压实手段和压实器械有所差异,但最终的评价指标是一致的。路基质量检验参数主要包括压实度、孔隙率、回弹模量、刚度等物理力学参数,其中弹性模量和路基刚度的量化指标在工程建设过程中具有严格的力学参数限定,是路基压实质量的重要评价指标^[1-2]。

对于路基压实质量评价指标的研究目前已较为成熟。宋超等^[3]通过贝叶斯高斯回归方法准确预测了黏土路基的回弹模量,并找到了最优的预测模型;李帅勇等^[4]探究了不同含水率和压实度下的路基动态弹性模量,并建立了多重因素共同作用下的路基动态回弹模量预估模型,为工程设计提供了参考;束冬林等^[5]研发了一套基于动态回弹模量的路基压实度快速检测与评定方法,为不同类型的填料路基质量检测提供了一种简单实用的方案;曾军^[6]通过仿真三轴试验研究了宏观弹性模量与微观颗粒刚度之间的联系,证明了沙土路基弹性模量与围压呈正相关。路基刚度方面,黄拓等^[7]提出了路基刚度补偿的有效方法,确定了补充材料与补偿厚度,并通过足尺试验验证了补偿方法的合理性;严武文等^[8]采用不同设备检测评价路基强度,研究表明不同评价结果之间具有相关性,实际工程中可结合多种检测结果相互印证。

基于现状研究成果,本文依托贵州正习高速公路工程路基承载力检测试验,探究 K25 + 180 ~ K27 + 180 路段碎石土路基的回弹模量、路基刚度与压实变数之间的关系,以及不同路基力学参数之间的相关性,并通过现场试验数据,印证各试验结果的准确性与可靠性,以期道路路基承载性能试验检测方案提供工程指导意见。

1 路基承载能力力学参数

1.1 回弹模量

承载板法通过逐级加压与卸载测定阶梯加载

条件下的回弹变形,也称为回弹弯沉值。根据半空间弹性体得到路基回弹模量计算值为

$$E = \frac{\pi D}{4} \frac{\sum P_i}{\sum l_i} (1 - \mu^2) \quad (1)$$

式中: E 为路基回弹模量, MPa; D 为承载板直径, m; P_i 、 l_i 分别为梯度荷载和与之对应的路基弯沉实测值, N、mm; i 为压实次数; μ 为泊松比, 与材料本身有关。

在实际工程中,回弹模量的测定往往采用各级加载结果的加权平均值作为最终结果。此计算过程受加载次数的影响,随着加载次数的增加,路基压实度本身已经发生变化,因此需要对此过程进行数据修正,才能得到测点的真实路基回弹模量。加载次数对路基回弹模量的影响可视为线性关系,在拟合曲线中:

$$l_i = A + k_c + p_i \quad (2)$$

式中: A 为修正截距, mm; k_c 为修正系数, 原点修正表现为纵轴截距 A 向原点进行平移。修正后的回弹变形 l'_i 为

$$l'_i = l_i - A \quad (3)$$

联立公式(2)、(3)可得

$$k_c = \frac{\sum P_i}{\sum l'_i} \quad (4)$$

公式(4)带入公式(1)中得到修正后的路基回弹模量 E_0 计算公式:

$$E_0 = \frac{\pi D}{4} \frac{1 - \mu^2}{k_c} \quad (5)$$

1.2 路基刚度

路基刚度同回弹模量一样,也是反映路基承载性能的重要力学参数。常规的路基刚度测量工具为动刚度测量仪,动刚度仪实际为落锤式测量仪器。根据力学定义,路基刚度 K_d 为落锤冲击过程中的应力最大值 $P_{\max}$ (Pa) 与瞬时沉降值 S_p (mm) 的比值:

$$K_d = \frac{P_{\max}}{S_p} \quad (6)$$

本文路基承载能力力学参数计算结果均采用公式(5)、(6)计算方法。

2 压实次数对承载力的影响

在实际工程中,路基压实碾压过程中路基承

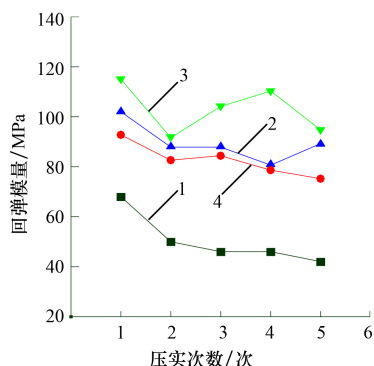
载性能会随碾压次数的增加而发生改变。为探究压实次数对路基承载性能的影响,以贵州正习高速 K25+180~K27+180 路段碎石土路基为研究对象,采用 25 t 的强震压路机碾压 5 遍,利用刚度和承载板测量路基中心线间距为 100 m 的 3 个点(依次从小桩号至大桩号为 A、B、C)的承载力特性。承载板直径为 30 cm,厚度为 20 mm,加载设备为后轴重 80 kN 的载重汽车,汽车充气胎压为 0.5 MPa,刚度仪型号为 GeoGauge,刚度参数为 3~70 MN/m,杨氏模量为 26~610 MPa。

试验过程:测点标定→设备安装→按测点顺序进行试验→第 i 遍压实→重新测定→数据整理→试验结束。

由于试验存在大量试验数据,且数据符合正态分布规律,为减小个别非典型数据对试验结果的影响,对偶然数据进行剔除。试验显著性水平为 0.05,通过查表确定检验值。采用格拉布斯法对试验数据进行分析处理。格拉布斯法主要用于检测具有正态分布特征的单变量数据集中的异常值。先计算每组数据的平均值和标准差 S ,再计算代表值,当代表值大于等于临界检验值时,剔除该数据,然后利用公式(7)计算有效数据标准差,最终得到试验数据如图 1 所示。其中回弹模量为承载板法测得。

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (7)$$

式中: X 为路基压实过程中测得的各项承载力试验数据; n 为样本总数。



测点: 1—A; 2—B; 3—C; 4—平均值。

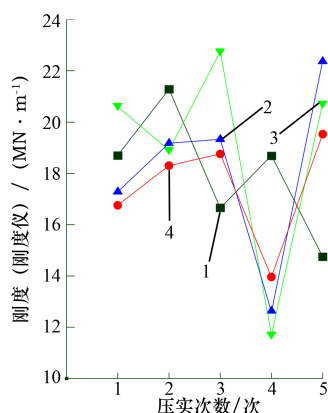
图 1 压实次数与回弹模量之间的关系

由图 1 可知:测点 A 基回弹模量均值为 104.4 MPa,标准差为 10.71,测点 B、C 标准差

分别为 6.20 和 10.31,测点 A、C 整体数据较为离散,起伏较大,而位于中间桩号的测点 B 数据较为稳定。纵向分析,当压实 1 遍时,测点 A 回弹模量为 63.5 MPa,测点 C 为 115.9 MPa,较测点 A 处增大了 82.5%,即当压实次数相同时,压路机从小桩号碾压至大桩号时,路基回弹模量呈现逐渐增大的趋势。产生上述现象的原因在于压路机从小桩号压至大桩号时,小桩号压实度较小,泥土介质被挤压至大桩号侧,使 C 点处路基更为密实^[9]。横向分析,当压实次数为 1 时,路基回弹模量为 92.5 MPa;当压实次数为 3 时,路基回弹模量为 86.3 MPa,相比系数为 1 时减小了 6.7%;当压实次数为 5 时,路基回弹模量为 79.6 MPa,在此基础上又减小了 7.8%,总体降低了 13.9%。综上,3 处测点路基回弹模量均随压实遍数的增加而减少。产生上述现象的原因在于强震压路机对此类碎石土路基具有一定的破坏性,工程中需谨慎选择压路机功率与频率,并思考和修正工程碾压工艺。

图 2 为路基压实次数与路基刚度之间的关系示意。由图 2 可知:纵向分析,当压实 1 遍时,测点 A 处刚度为 16.8 MN/m,测点 B 处刚度为 17.2 MN/m,较测点 A 增加了 2.4%;继续往大桩号碾压,测点 C 处刚度为 20.6 MN/m,较小桩号(A 点)处的增大了 22.6%,即每次大桩号处的路基压刚度大于小桩号处。横向分析,以测点 B 压实结果为例,当碾压次数由 1 增加至 3 的过程中,路基刚度由 17.2 MN/m 增至 18.6 MN/m,最后到达 18.8 MN/m,增幅分别为 8.1% 和 1.1%,增幅有明显降低的趋势;碾压 4 遍时,路基刚度陡然下降至 12.3 MN/m,降幅达到了 34.6%,测点 A、C 也出现此类现象,继续碾压第五遍时,刚度又出现上升趋势,最终刚度与碾压 3 遍时的结果一致。路基刚度整体随碾压次数的增加呈锯齿状变化,原因如下:1) 路基碾压过程中,由于路基碎石土之间相互挤密,碎石间隙被土体均匀填充形成稳定结构,此时路基刚度随碾压次数的增加明显提高;2) 当碾压至一定程度时,碎石间隙中的土体已经达到致密状态,由于物理力学性质的不同,坚硬碎石往往会往路基深层移动,土体上涌至路基表面,直观表现为路基表面裂纹起皮,此

时路基刚度较上一遍碾压已经有所下降;3)继续碾压会将上部土体在此碾压密实,路基刚度会出现短暂上升,但此时路基碎石土结构已经遭到一定程度的破坏。此条件下铺筑路基结构层会导致路面运营期出现不同程度的反射裂缝,对行车产生不利影响^[10-11]。



测点: 1—A; 2—B; 3—C; 4—平均值

图 2 压实次数与路基刚度之间的关系

综上所述,路基承载力与路基压实次数之间存在密切关系,不同类型的路基土应制定对应的碾压工艺,同时道路工程中路基碾压次数并非越多越好,适当碾压是路基承载性能及路面结构后期良好运营的保障。

3 路基承载力相关性分析

为探究不同参数测定方式得到的路基承载力结果之间的相关性,以便携式落锤仪、承载板法、刚度仪测定结果为试验数据进行路基承载力相关性分析。试验选取测点 C 作为研究对象,路基碾压 3 次后测定路基承载性能,统计结果进行两两相关性分析,试验结果如 3 所示。其中显著性水平为 0.05, y 为相关性分析因变量; x 为相关性分

析自变量; $|R|$ 为显著水平。

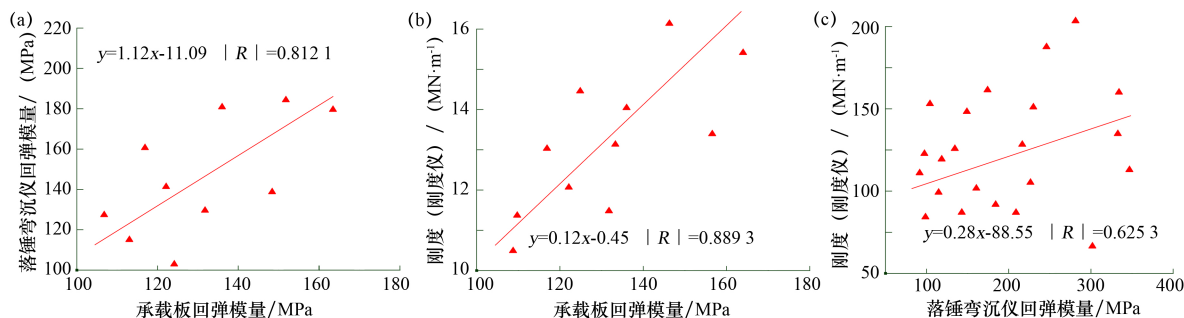
由图 3 可知:3 种路基承载力参数结果均呈现一定的相关性,但表征相关性的相关系数值不同。弹性模量和刚度散点分布曲线两侧,相关系数分别为 0.812 1 和 0.889 3,表明承载板法测得回弹模量与其他两种方式测得的承载力参数具有较高的相关性,可以相互反应试验结果的准确性与可靠性。在实际工程中,承载板法测得的回弹模量也是应用最为广泛的,其优点在于测得的试验数据代表性强,能够很好地反映路基性能,但此方法操作过程较为繁琐。

落锤式弯沉仪测得的回弹模量与刚度仪测得的刚度之间线性相关性较弱,散点分布不均匀,相关性系数为 0.625 3。便携式落锤弯沉测定方式仅能反馈弹性模量测定结果,不能直接反馈其他力学参数。其优点为携带方便,流程简单,能够很快得到弹性模量特征值,缺点为与其他参数之间的相关性较差,在工程中需配合其他测定手段(如刚度仪测定的路基刚度)综合判定路基承载性能^[12]。

4 结 论

本文以承载板法、落锤式弯沉仪、刚度仪检测手段为试验方式,结合路基承载能力力学参数优化计算方法,分析了路基压实次数与承载板法测得的路基回弹模量之间的关系,并对 3 种不同方式测定的路基承载力参数进行了相关性分析,得到结论如下。

(1) 考虑承载板法逐级加压与卸载影响的路基弹性模量修正公式为 $E_0 = \frac{\pi D(1-\mu^2)}{4 k_e}$ 。



(a) 承载板法回弹模量与落锤式弯沉仪回弹模量; (b) 承载板法回弹模量与刚度; (c) 落锤式弯沉仪回弹模量与刚度

图 3 两两相关性分析结果

(2) 路基回弹模量随压实次数的增加而呈现减小趋势,压实5次后,平均路基回弹模量降低13.9%。

(3) 路基刚度整体随碾压次数的增加而呈现出锯齿状变化,最大增幅为22.6%,最大降幅为34.6%。

(4) 便携式落锤弯沉测定结果与刚度仪测得的路基刚度之间呈现的线性相关性较弱,在工程中需配合其他测定手段综合判定路基承载性能。

参考文献:

- [1] 李丹枫,杨广庆,刘伟超. PFWD 模量控制的路基承载力动力学指标评价方法[J]. 土木工程学报,2021,54(6):117-128.
- [2] 黎侃. 路基压实度的提高及压实与路基承载力的关系[J]. 科技咨询导报,2007(11):60-61.
- [3] 宋超,赵腾远. 黏土路基回弹模量预测及贝叶斯模型选择研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2024(1):88-89.
- [4] 李帅勇,高启聚,成正伟. 细粒类路基土动态回弹模量试验与本构关系模型[J]. 路基工程,2023(5):35-41.
- [5] 束冬林,王建立,方明镜. 基于动态回弹模量的路基压实质量快速检测与评定方法[J]. 交通科技,2022(5):40-43;48.
- [6] 曾军. 基于离散元模拟试验的路基砂土抗剪强度研究[J]. 工程建设,2021,53(4):26-31;63.
- [7] 黄拓,昌振东,漆帅. 路面结构的路基刚度提高方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2777-2782.
- [8] 严武文,张彬. 路面路基刚度评估现场装置比较[J]. 建筑机械,2023(9):54-57;60.
- [9] 袁根平. 路基回弹模量变化对沥青路面结构的影响分析[J]. 交通世界,2023(28):106-108.
- [10] 胡堃. 基于便携式落锤弯沉仪的填石路基压实质量检测分析[J]. 交通科技与管理,2023,4(2):155-157.
- [11] 李丹枫,杨广庆,刘伟超. PFWD 模量控制的路基承载力动力学指标评价方法[J]. 土木工程学报,2021,54(6):117-128.
- [12] 申玲霞. 公路施工中填石路基施工工艺及其路基压实质量管理[J]. 交通世界,2018(21):52-53.