

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,以及承载板法、落锤式弯沉仪、刚度仪 3 种试验方式测定的路基承载性能的线性相关性,文章以理论计算为依据,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,因对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而呈现出锯齿状变化,最大增幅为 22.6%,最大降幅为 34.6%;4)相关性分析结果显示: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。

关键词:路基承载力; 检测试验; 压实次数; 相关性分析

中图分类号:U416.2

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)08-0056-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.08.106

Evaluation and analysis of subgrade bearing capacity characteristics based on test

CHEN Liangrui, HE Junxiong

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

Abstract: To explore the effect of compaction times on the bearing capacity of the subgrade, and the linear correlation of the bearing performance of the subgrade measured by three test methods: bearing plate method, drop weight bending meter and stiffness meter. 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. The results show that: 1) Step by step loading and unloading with the bearing plate method will affect the bearing performance of the roadbed at the test point, because the calculation results are modified by the origin; 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.

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

收稿日期: 2023-09-06

作者简介: 陈良锐, 男(1992—), 工程师, 从事道路交通设计。

道路工程中, 路基是承受和传递荷载的结构主体, 而路基工程在工程造价中所占据的比重较大, 因此, 路基部分的设计和施工是道路设计过程中的重要步骤。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。

关于路基承载力的研究已有较多成果, 多被运用于新建道路工程或旧路检测和改造工程中。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, 以期可为道路路基承载性能试验检测方案提供工程指导意见。

1 路基承载能力学参数

1.1 回弹模量

承载板法的测量原理在于逐级加压与卸载,

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

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

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

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看做线性关系, 在拟合曲线中有:

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

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)和(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 计算公式为

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

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:

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

本文路基承载能力学参数计算结果均采用公式(5)与公式(6)计算方法。

2 压实次数对承载力的影响研究

实际工程中, 路基压实需经过多次反复碾压,

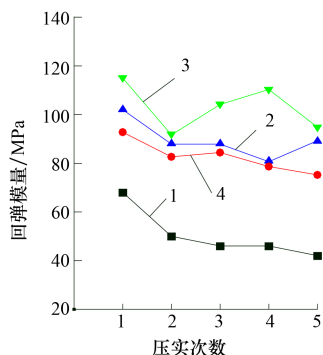
碾压过程中路基承载性能均会随碾压次数的增加而发生改变,为探究压实次数对路基承载性能的影响,特以贵州正习高速 K25+180~K27+180 路段碎石土路基为研究对象,采用 25 t 的强震压路机碾压 5 遍,利用刚度仪和承载板测量路基中心线间距为 100 m 的 A、B、C 这 3 点(依次从小桩号至大桩号)的承载力特性。承载板直径为 30 cm,厚度为 20 mm,加载设备为后轴重 80 kN 的载重汽车,汽车充气胎压为 0.5 MPa,刚度仪选用 GeoGauge 型号刚度仪,其刚度参数为 3~70 MN/m,杨氏模量 26~610 MPa。

试验过程:标定测点→安装设备→按测点顺序进行试验→第 i 遍压实→重新测定→数据整理→完成试验。

由于本次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,需对偶然数据进行剔除,本次试验显著性水平为 0.05,通过查表确定检验值。后续试验结果处理同样沿用该水平,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。首先计算每组数据的平均值 $\bar{X}$ 和标准差 S ,再计算代表值 G_i , $G_i = \text{大于临界检验值 } G_{p(n)}$ 时,该数据应与剔除,有效数据标准差由公式(7)计算,最终得到试验数据如图 1 所示。

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

式中: s 为样本标准差; X 和 $\bar{X}$ 分别为检测数据及每组数据对应的平均值; n 为样本数量,个。

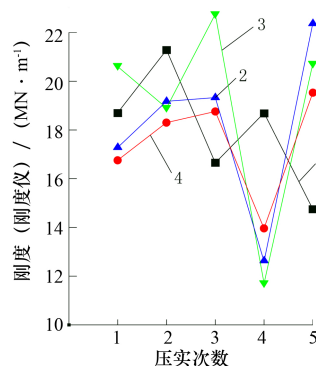


1—测点 A; 2—测点 B; 3—测点 C; 4—平均值。

图 1 压实次数与回弹模量之间的关系

根据公式(7)计算结果,测点 A 基回弹模量

(本节单指承载板法测得的回弹模量,单位为 MPa)的均值为 104.4,标准差为 10.71,测点 B 和测点 C 标准差分别为 6.20 和 10.31,由此可知,测点 A 与测点 C 处整体数据较为离散,起伏较大,位于中间桩号的测点 B 数据较为稳定。根据图(1):纵向分析,相同压实次数时,压路机从小桩号(测点 A)碾压至大桩号(测点 C)时,路基回弹模量呈现逐渐增大的趋势,例如压实 1 遍时,测点 A 回弹模量为 63.5 MPa,测点 C 为 115.9 MPa,测点 C 处回弹模量较测点 A 处增大了 82.5%,产生上述现象的原因在于压路机从小桩号至大桩号走过时,小桩号压实度较小,泥土介质被挤压至大桩号测,使 C 点处路基更为密实^[9]。横向分析,3 处测点路基回弹模量均随压实遍数的增加而减少,以回弹模量平均值为参考依据,压实此数为 1 时,路基回弹模量为 92.5 MPa,压实系数为 3 时,路基回弹模量为 86.3 MPa,减小了 6.7%,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%。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。



1—测点 A; 2—测点 B; 3—测点 C; 4—平均值。

图 2 压实次数与路基刚度之间的关系

如图所示:压实次数对路基刚度的影响与对回弹模量的影响不同,纵向分析可以看出,每次压实结果大桩号(测点 C)处的路基压刚度均比小桩号处(测点 A)大,以第一遍压实结果为例,刚度仪测得测点 A 处刚度为 16.8 MN/m,测点 B 处刚度为 17.2 MN/m,较测点 A 点增加了 2.4%,继续往大桩号碾压,测点 C 处路基刚度为 20.6 MN/m,较小桩号处的 A 点路基刚度增大了 22.6%,产生上述现象的原因同刚

路基回弹模量变化原因一致。横向分析,路基刚度整体随碾压次数的增加而呈现出锯齿状变化,以测点B压实结果为例,碾压此时由1遍增加至3遍的过程中,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,碾压第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、B、C均在碾压第4遍的时候出现了此类现象,继续碾压第5遍时,刚度又出现上升趋势,最终与刚度与碾压第三遍时结果相当。产生上述现象的原因有如下几点:1)路基碾压过程中,首先是路基碎石土之间相互挤密,碎石间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)当碾压至一定程度是,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^[1,10]。

综上所述,路基承载力与路基压实次数之间存在密切关系,不同类型的路基土因制定相应的碾压工艺,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,特以便携式落锤仪、承载板法、刚度仪测定结果为实验数据进行路基承载力相关性分析,用以判断各试验结果的准确性与可靠性。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,试验结果如图3~5所示。

拟合承载板法路基回弹模量与落锤式弯沉仪路基回弹模量之间线性关系,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下,拟合得到二者之间关系表达式如下:

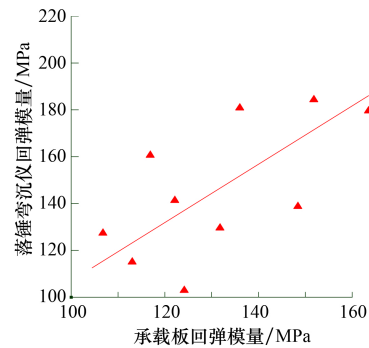


图3 承载板法回弹模量与落锤式弯沉仪回弹模量相关性

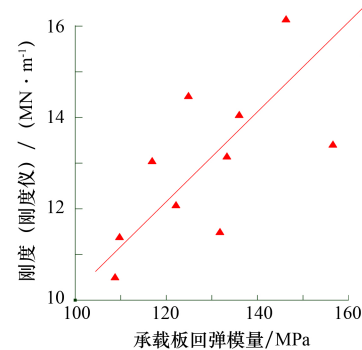


图4 承载板法回弹模量与刚度(刚度仪)相关性

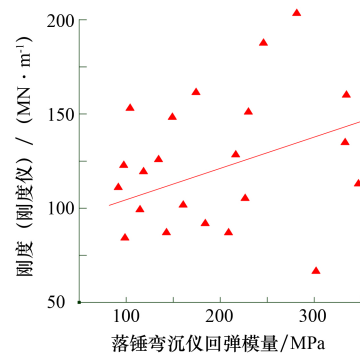


图5 落锤式弯沉仪回弹模量与刚度(刚度仪)相关性

$$y = 1.12x - 11.09 \quad |R| = 0.8121$$

其中: $|R|$ 为相关系数,用以反映变量之间相关关系密切程度。

拟合承载板法路基回弹模量与刚度仪测定的刚度之间之间线性关系,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下,拟合得到二者之间关系表达式如下:

$$y = 1.12x - 0.48 \quad |R| = 0.8893$$

拟合承载板法路基回弹模量与刚度仪测定的刚度之间之间线性关系,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下,拟合得到二者之间关系表达式如下:

$$y = 0.28x - 88.55 \quad |R| = 0.6253$$

对比分析上述实验结果,三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,表明其相关程度不同,图 3 和图 4 中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,实际工程中,承载板法测得的回弹模量也是工程中应用最为广泛的,其优点在于测得的试验数据代表性强,能够很好的反应路基性能,但此方法操作过程同样较为繁琐,在《公路路基路面现场测试规程》相关规范中对承载板法的工艺流程和计算方法有明确的描述。

由图 5 可以看出,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,图中散点分布不均匀,相关性系数为 0.625 3。由图 3 和图 5 可知,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,其优点在于携带方便,流程简单,能够很快得到弹性模量特征值,缺点在于与其他参数之间的相关性较差,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^[11]。

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,结合路基承载性能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,以期对路基承载特性检测方案提供工程指导意义,本文的主要研究结论有以下几点:

(1) 考虑承载板法逐级加压与卸载的影响后的路基弹性模量修正公式为。

(2) 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 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 22.6%,最大降幅 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。

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/OL]. 长沙理工大学学报(自然科学版),1-12[2024-01-29]. DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20231201001.
- [4] 李师勇,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] 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.