

小交通量农村公路不同路面结构形式性能评价及分析

司青山, 王林, 孙兆云, 张磊, 韦金城

山东省交通科学研究院, 山东 济南
Email: sqs50800@163.com

收稿日期: 2021年2月28日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月30日

摘要

目前国内路面结构形式研究主要聚焦于高速公路等高等级路面, 关于小交通量农村道路的研究较少。本文通过铺筑三种不同路面结构形式的小交通量道路, 利用便携式路面弯沉仪(PFWD)对其进行测试, 测试结果表明: 采用水泥稳定碎石作为半刚性基层的贯入式路面比采用级配碎石的柔性基层贯入式路面, 其动态弹性模量高出49.5%, 采用水泥稳定碎石半刚性基层大粒径路面的动态弹性模量比贯入式的高49.5%。采用动态变形模量仪(LFG)对路面动态变形模量随机选点进行了测试并与PFWD测试结果进行对比发现, 当弹性模量小于200 MPa时, 二者检测结果较为相近, 具有良好的幂函数相关性。

关键词

农村公路, PFWD, 路面结构, 动态弹性模量

Performance Evaluation and Analysis of Different Pavement Structure Forms of Small-Volume Rural Highway

Qingshan Si, Lin Wang, Zhaoyun Sun, Lei Zhang, Jincheng Wei

Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong
Email: sqs50800@163.com

Received: Feb. 28th, 2021; accepted: Mar. 23rd, 2021; published: Mar. 30th, 2021

Abstract

The domestic research on pavement structure is mainly focused on expressway and other

文章引用: 司青山, 王林, 孙兆云, 张磊, 韦金城. 小交通量农村公路不同路面结构形式性能评价及分析[J]. 土木工程, 2021, 10(3): 241-248. DOI: 10.12677/hjce.2021.103027

high-grade pavement. There are few researches on the rural roads with small traffic volume. In this paper, there are three different types of pavement structure of small traffic roads paved. The portable pavement deflector (PFWD) was used to detect the deflection. The test results show that: the dynamic elastic modulus of the embedded pavement with cement stabilized macadam as semi-rigid base is 49.5% higher than that with graded macadam; the dynamic elastic modulus of cement stabilized macadam with semi-rigid base course is 49.5% higher than that of the penetration type. Dynamic deformation modulus (LFG) was used to test the random selection of pavement dynamic deformation modulus and the results were compared with those of PFWD, finding that when the modulus of elasticity is less than 200 MPA, the test results of the two methods are similar and have good power correlation.

Keywords

Rural Highway, PFWD, Pavement Structure, Dynamic Modulus of Elasticity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

截至 2019 年底,我国农村公路总里程已超 404 万公里,占我国公路网总里程的 83.6% [1]。小交通量农村公路是我国公路路网的重要组成部分,主要分布于我国农村地区,设计年平均日交通量小于等于 1000 辆客车。这些道路由于投资较少,设计等级较低,面对日益增长的车流量及超载车辆违法绕行等情况,路面质量堪忧。如何设计出一种能够耐高温、抗车辙且施工工艺简单、造价成本低且适用于小交通量农村公路的路面结构形式具有较大的经济和社会效益。

现有研究认为[2],粒径越大的骨料,内摩阻角越大。因此,在保证级配及适当空隙率的情况下,适当提高骨料的粒径可以有效增加内摩阻角。粗骨料之间的钳锁作用能够使骨料在较大的荷载作用下拥有较高的荷载能力和抵抗变形的能力[3]。钳锁密实状态下的粗骨料,骨架很密实,接触点密集,在行车荷载的反复碾压或冲击下,产生的车辙较小,且骨料间由于钳锁力的存在,使得相对移动产生困难或者过程较为缓慢,故采用大粒径的骨料能有产生较好的抗高温耐车辙能力[4]。

本试验研究基于对国内外文献资料及现有农村公路路面结构形式的调查及室内试验的基础上,提出了四种适用于小交通量农村公路的辙典型路面结构形式,并按照规定施工工艺进行试验路铺筑并开展路面回弹模量及抗高温车辙等相关路用性能检测,为建立小交通量农村公路路面结构设计方法提供一定依据。

2. 路面结构方案及材料

2.1. 路面结构方案确定

根据魏建明[5]等人研究,目前我国农村公路路面结构主要分为两种:第一种是小交通量的县乡道路,主要是以厚度较小的沥青混合料面层为主,采用粒料类材料如级配碎石或级配砂砾为基层或底基层;第二种是交通量较大的县乡道路,其面层与第一种道路相似,粒料类材料做底基层,稳定类材料做基层或者稳定类材料做基层和底基层的结构组合形式。通过以上研究以及拟定的小交通量农村道路路面结构方案,铺筑了三种不同路面结构用于试验,各路面结构组合情况如表 1 所示。

Table 1. Different types of pavement structure
表 1. 不同路面结构形式

| A | B | C |
|-------------|---------------|---------------|
| AC-10 30 mm | AC-10 30 mm | AC-10 30 mm |
| 贯入式 40 mm | 贯入式 40 mm | 大粒径 40 mm |
| 级配碎石 180 mm | 水泥稳定碎石 180 mm | 水泥稳定碎石 180 mm |
| 土基 800 mm | 土基 800 mm | 土基 800 mm |

2.2. 原材料指标

1. 集料。选用质地坚硬、耐磨、不脆、有棱角、强度不低于三级的石料。集料物理技术指标如表 2 所示。

Table 2. Physical and technical index of aggregate
表 2. 集料物理技术指标

| 指标 | 单位 | 技术要求 | 实测值 |
|------------------------|----|------|------|
| 石料压碎值, 不小于 | % | 30 | 22.1 |
| 洛杉矶磨耗损失, 不大于 | % | 35 | 28.3 |
| 表观相对密度, 不小于 | - | 2.45 | 2.52 |
| 吸水率, 不大于 | % | 3.0 | 2.2 |
| 针片状颗粒含量(混合料), 不大于 | % | 20 | 15.3 |
| 水洗法<0.075 mm 颗粒含量, 不大于 | % | 1 | 0.6 |
| 软石含量, 不大于 | % | 5 | 3 |

2. 沥青。沥青选用 70 号基质沥青, 指标如表 3 所示。

Table 3. Technical Specification of Zhonghai A-grade 70 base asphalt
表 3. 中海 A 级 70 号基质沥青技术指标

| 针入度(25°C)/(0.1 mm) | 软化点/°C | 延度(10°C)/cm | 密度(25°C)/g·cm ⁻³ | 针入度指数 PI |
|--------------------|--------|-------------|-----------------------------|----------|
| 67 | 46 | 31 | 1.037 | 0.81 |

2.3. 上面层 AC-10 混合料组成设计

上面层采用 AC-10 混合料, 混合料设计级配详见图 1。

2.4. 大粒径沥青混合料组成设计

大粒径沥青混合料下面层碎石最大粒径不超过 31.5 mm, 混合料设计级配详见图 2。

2.5. 贯入式路面原材料规格及用量

贯入式路面集料规格及用量见表 4。

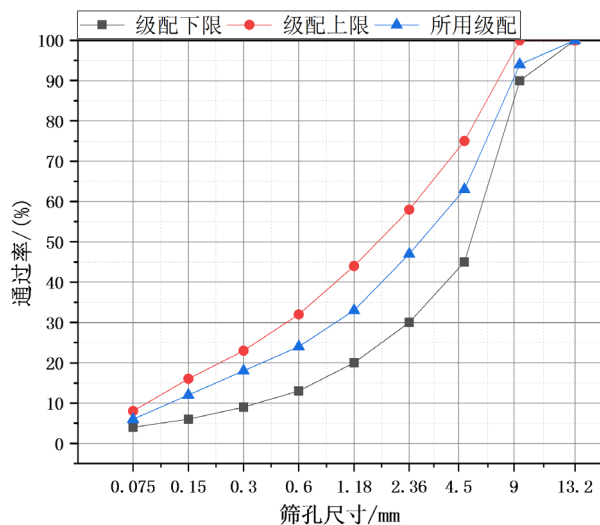


Figure 1. Grading curve of AC-10 upper course asphalt mixture
图 1. AC-10 上面层沥青混合料级配曲线

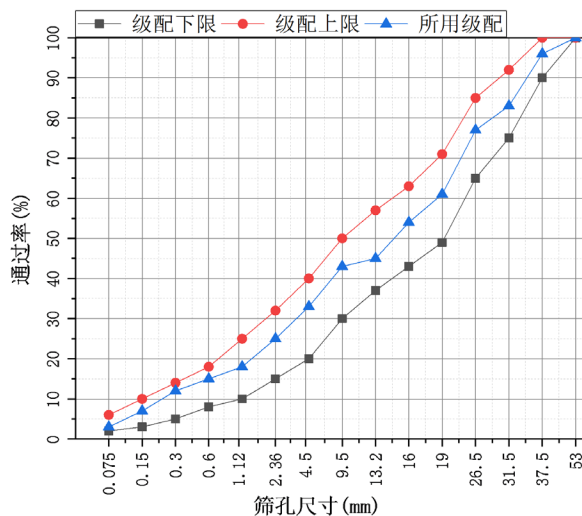


Figure 2. Gradation of asphalt mixture with large grain size under layer
图 2. 大粒径下面层沥青混合料级配曲线

Table 4. Specifications and dosage of penetrating pavement aggregate
表 4. 贯入式路面集料规格及用量

| 沥青品种 | | 基质沥青 | |
|--------|----------|------------------------|--------------------------|
| 规格和用量 | 规格 | 用量(kg/m ²) | 松散密度(kg/m ³) |
| 第二遍嵌缝料 | 6~12 | 9.5 | 1416.8 |
| 第二遍沥青 | - | 1.75 | - |
| 第一遍嵌缝料 | 13~16 | 14.7 | 1371.84 |
| 第一遍沥青 | - | 2.3 | - |
| 主层石料 | 20~40 mm | 40kg | 1403.28 |
| 沥青总用量 | | 4.05 | |

3. 不同路面结构性能分析

3.1. PFWD 测试原理

便携式落锤式弯沉仪(PFWD), 对于平整表面能快速进行承载能力检测[6]。进行 PFWD 测试时, 将一个固定重的落锤提升至一个固定高度, 然后释放, 让落锤自由下落, 冲击置放在路基表面的承载板, 承载板与路基表面产生竖向位移。由此, 压力传感器和位移传感器将荷载和位移的时程数据记录下来, 并传输到计算机数据处理软件中, 然后根据压力和位移的峰值来确定路基的动态弹性模量。PFWD 的基本原理[7]是弹性半空间接触理论。假定在弹性半空间表面有一个半径为 R 的圆形压板。单位面积压力为 $P = \frac{F}{\pi r^2}$, 根据弹性半空间理论, 圆板中心下(Z 轴)位移的表达式如公式(1)所示[7]:

$$D(Z) = \frac{(1+\mu)P}{E} \sqrt{r^2+z^2} - z \left[2(1-\mu) + \frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} \right] \quad (1)$$

式中 μ 和 E 分别为泊松比和动态弹性模量。设 z 为 0, 圆板中心下位移 D_0 和动态弹性模量 E 之间的关系如公式(2)所示:

$$D_0 = \frac{2r(1-\mu^2)P}{E} \quad (2)$$

于是以压力和位移峰值为基础, 动态弹性模量的计算如公式(3)所示:

$$E = \frac{\eta r(1-\mu^2)P_{\max}}{D_{\max}} \quad (3)$$

式中, E —PFWD 的计算动态弹性模量(MPa);

η —材料参数取值, 取 $\eta = 2$;

r —压板的半径(mm);

μ —泊松比;

P_{\max} —最大压力(kPa);

D_{\max} —最大位移(m)。

3.2. PFWD 现场测试注意事项

在 PFWD 测试过程中, 要注意以下事项[8]: 一是提起落锤后, 检测人员按照要求对仪器进行调试, 严禁因操作不当使落锤松脱造成人员受伤; 二是选取测点进行测试时, 应选择表面平整的区域, 确保承载板与接触面接触紧密, 避免承载板与接触面之间存在较大空洞, 影响测试结果; 三是在准备工作过程中, 应在数据采集软件中尽可能填写详尽的桩号、测点等信息, 方便后期数据处理; 四是在测试过程中, 要严防滑杆失稳, 确保滑杆尽量垂直, 以免落锤斜向冲击垫块产生的水平力影响测试结果; 五是要检查测试数据的稳定性, 统一测点的模量值相对误差宜控制在 5% 以内, 一般采取落锤 3 次, 取后两次落锤平均值进行计算。

3.3. 不同路面结构形式检测结果对比分析

3.3.1. A、B 两种路面结构形式性能对比分析

试验路铺筑 7 d 后, 对 A 和 B 两种不同路面结构, 采用便携式落锤弯沉仪(PFWD)对路面弹性模量进行测试, 测试结果如图 3 所示。

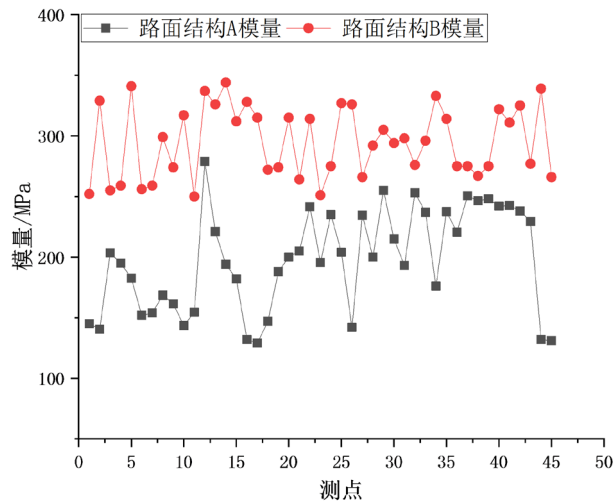


Figure 3. Elastic modulus of graded macadam and cement stabilized macadam base
图 3. 级配碎石与水泥稳定碎石基层贯入式路面模量对比

从图 3 可以看出,路面结构 B 的弹性模量平均值为 295.0 MPa,路面结构 A 的弹性模量平均值为 197.3 MPa,采用水泥稳定碎石路面基层的弹性模量较级配碎石的高 49.5%。经分析水泥稳定碎石以级配碎石作骨料,采用一定数量的胶凝材料和足够的灰浆体积填充骨料的空隙,按嵌挤原理摊铺压实。其压实度接近于密实度,强度主要靠碎石间的嵌挤锁结原理,同时有足够的灰浆体积来填充骨料的空隙。它的初期强度较高,并且强度随龄期而增加很快结成板体,因而具有较高的强度,从而弹性模量较大。级配碎石作为一种典型的离散型材料,其弹塑性特点较为显著,应变随着应力的增加呈现出非线性增长的特点,回弹模量受应力状态的影响较大,整体上看,与水泥稳定碎石相比,级配碎石柔性基层强度低,刚度较差。

3.3.2. B、C 两种路面结构形式性能对比分析

试验路铺筑 7 d 后,对 B 和 C 两种不同路面结构,采用便携式落锤弯沉仪(PFWD)对路面弹性模量进行测试,测试结果如图 4 所示。

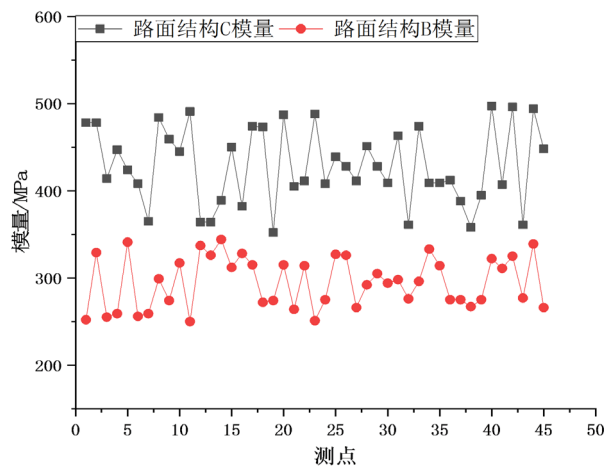


Figure 4. Elastic modulus of graded macadam and cement stabilized macadam base
图 4. 级配碎石与水泥稳定碎石基层贯入式路面模量对比

从图2可以看出,路面结构B的弹性模量平均值为428.4 MPa,路面结构C的弹性模量平均值为295.0 MPa,采用大粒径下面层的路面结构弹性模量较贯入式下面层的高45.2%。经分析骨架密实型大粒径路面结构的内摩阻角较大,由于内摩阻角的温度敏感性小,因而内摩擦力的变化也很小,强度衰减慢。大粒径粗集料之间能形成良好的接触,充分发挥骨架的作用,而且由于大粒径沥青混合物与贯入式路面相比,其沥青用量相对较多,集料间的沥青膜裹覆效果要优于贯入式路面的,因此,虽然二者路面结构均采用了粒径较大的粗集料进行铺筑,但大粒径路面结构的动态弹性模量仍要高于贯入式路面的。

3.3.3. LFG与PFWD快速检测路面模量的相关性分析

检测过程中,除使用PFWD进行检测外,还使用LFG对路面动态变形模量随机选点进行了测试。由于PFWD的落锤高度及压力可调,因此,选择与LFG相同的参数进行试验,并与LFG所得结果进行对比,并对PFWD及LFG两种不同测试方法所得模量进行了相关性分析,发现LFG所得模量与PFWD所得模量有较好的幂函数关系,其相关性曲线如图5所示。

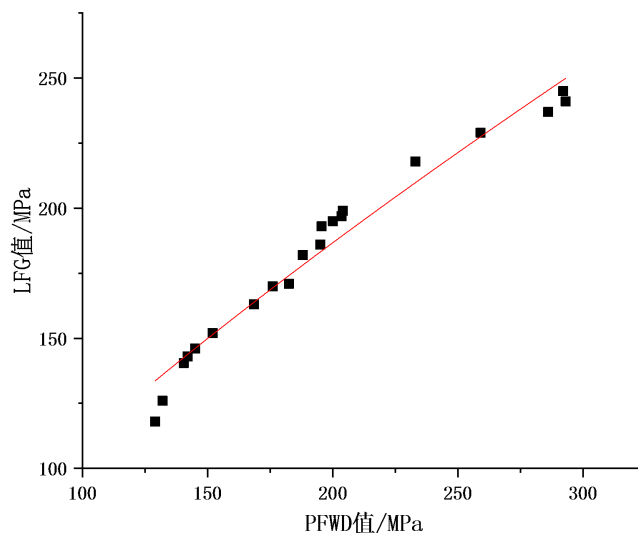


Figure 5. Correlation graph of PFWD and PFG detection results
图5. PFWD与PFG检测结果相关性关系图

$$E_L = 3.6727E_p^{0.7631} \quad (n = 20, R^2 = 0.97)$$

将二者值做比较,发现二者在模量小于200 MPa以下时具有较好的相关性,说明其位移应力比相近,因此,在该值LFG的应力值最接近设备的设定值,即7.07 kN。研究表明[9]在动态荷载作用下,压实良好的路基表现为线弹性性质,因此PFWD在不同刚度的路基检测结果,虽然应力存在一定幅度的变化,但应力、位移均为实测结果,因而计算结果可靠。而LFG荷载通过固定落锤高度而取固定值,未考虑路基刚度对荷载的阻尼影响进而影响到作用在承载板上的荷载的变化,因而其变形模量结果只是一个相对结果。LFG设备的推荐测试范围为10~225 MPa,当路基基础软弱,刚度较低时,路基为弹塑性体,且“点对点”检测存在对路基的进一步压实作用,检测结果会存在一定的偏差。测试结果表明:两种设备在检测范围的最大偏差为10.7%,表明路基刚度的不同,相同的落锤高度对承载板形成的荷载偏差约为10.7%,日常的PFWD检测中也可以验证这一点。

4. 结论

- 1) 采用水泥稳定碎石作为半刚性基层的贯入式路面比采用级配碎石的柔性基层贯入式路面,其动态

弹性模量高出 49.5%。

2) 采用水泥稳定碎石半刚性基层大粒径路面的动态弹性模量比贯入式的高 49.5%。

3) 采用 LFG 对路面动态变形模量随机选点进行了测试并与 PFWD 测试结果进行对比发现, 当弹性模量小于 200 MPa 时, 二者检测结果较为相近, 具有良好的幂函数相关性。

参考文献

- [1] 张可誉. 大粒径沥青混合料组成结构研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [2] 王鑫磊. 沥青混合料中空隙结构的三维细观建模及分析研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [3] 李同林. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2002.
- [4] 高哲. 基于落锤式弯沉仪(FWD)的半刚性基层沥青路面结构性能评价[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [5] 李月勇. 基层组合形式对沥青路面性能影响的效果评价与分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(2): 458-460.
- [6] 田耀刚, 韩庆, 田世亮, 等. 半刚性基层沥青路面层间病害调查与研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010(4): 169-172.
- [7] 刘中林, 王富玉, 郝培文, 等. 大粒径沥青混合料组成结构的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(7): 59-63.
- [8] Leonardi, G. (2010) Fractal Dimension for the Characterization of the Porosity of Asphalt Concretes. *Archives of Civil Engineering*, **56**, 321-333. <https://doi.org/10.2478/v.10169-010-0018-5>
- [9] 付其林, 陈拴发, 陈华鑫. 开级配大粒径沥青碎石混合料的高温稳定性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 20-23.