

基于弯沉盆参数的沥青路面损伤状况评价

王其峰¹, 马士杰², 薛志超³, 吴文娟², 王峥⁴, 张晓萌²

1. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102;

3. 山东高速基础设施建设有限公司, 山东 济南 250101; 4. 山东高速集团创新研究院, 山东 济南 250102

摘要:为评定路面结构的损伤状态,以安徽省某高速公路养护段为试验段,设计沥青路面损伤状况快速检测方法,通过落锤式弯沉仪(falling weight deflectometer, FWD)测定弯沉盆几何特征参数,分析不同病害处的弯沉情况,提出基于弯沉盆参数的沥青路面结构损伤状况评价方法,推荐评价路面整体和各结构层状况良好的标准。结果表明:高速公路损伤路面的横向裂缝、纵向裂缝和沉陷处损伤的影响区域范围分别为1.5、2.0、1.5~3.5 m;根据路面病害段和无病害段FWD弯沉盆几何特征参数的分布,将荷载中心最大弯沉小于100.1 μm 、邻近荷载区域弯沉差小于42.4 μm 、20~60 cm区域弯沉差小于31.3 μm 及弯沉盆末端弯沉小于24.5 μm 作为判断路面整体、面层、基层和路基状况良好的评价标准。该方法可为高速公路养护维修前路面损伤状况的判定提供参考和借鉴。

关键词:FWD;弯沉盆;沥青路面;损伤状况评价

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)01-0045-07

引用格式:王其峰,马士杰,薛志超,等.基于弯沉盆参数的沥青路面损伤状况评价[J].山东交通学院学报,2023,31(1):45-51.

WANG Qifeng, MA Shijie, XUE Zhichao, et al. Evaluation of asphalt pavement damage condition based on deflection basin parameters[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(1): 45-51.

0 引言

近年来,我国公路建设飞速发展,沥青路面结构被广泛应用于各等级道路,其中多以半刚性基层路面结构为主。受交通荷载、气候环境等影响,运营公路长期服役后,路面结构易出现开裂、沉陷等不同程度的损伤。弯沉是表征路基路面承载力状况的重要参数,在路面状况评价中起重要作用^[1-3]。通常采用落锤式弯沉仪(falling weight deflectometer, FWD)进行道路无损检测^[4-5]。FWD检测结果包含大量的路面特征信息,但在实际工程应用中通常仅采用弯沉盆中荷载中心最大弯沉表征结构层的表面弯沉,对检测结果的信息利用率较低^[6-7]。基于实测弯沉数据进行路面结构层模量反算的方法广受研究者青睐,但模量反算的假设条件与实际状况差异较大,且模量反算存在计算复杂、不完全收敛等问题,利用弯沉盆几何特征参数进行路面结构状况评价具有明显优势^[8-10]。

20世纪40年代以来,许多学者尝试将路面弯沉指标与路面结构承载力建立相关关系^[11-13],并提出一系列的弯沉盆参数,如弯沉盆曲率半径和弯沉盆面积参数等,弯沉盆曲率半径可在一定程度上反映路面结构强度和结构层应力应变的关系,弯沉盆面积参数可反映路面整体强度^[14-19]。近年来,关于弯沉盆参数与路面各结构层强度(模量)的相关性研究取得一些进展,学者们提出了表征各结构层强度的弯沉盆斜率^[20-22],但采用弯沉盆几何特征参数评定路面结构的损伤状态的研究相对较少^[23-24]。

本文对安徽省某高速公路养护段不同病害段进行FWD弯沉检测,设计沥青路面损伤状况快速检测

收稿日期:2021-12-20

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42107213);山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE271)

第一作者简介:王其峰(1966—),男,山东夏津人,工程硕士,主要研究方向为交通运输工程,E-mail:1171913791@qq.com。

方法,分析不同病害处的弯沉情况,提出基于弯沉盆参数的沥青路面结构损伤状况评价方法,为判定养护维修前的路面损伤状况提供参考和借鉴。

1 FWD 检测方案

选取安徽省某高速公路收费站附近养护路段进行 FWD 检测,承载板直径为 30 cm,重锤质量为 (200 ± 10) kg,施加冲击荷载为 (50 ± 2.5) kN,设置 7 个位移传感器,各传感器距荷载中心的距离分别为 0、20、30、45、60、90、120 cm,各传感器所得数据分别用 $D_0 \sim D_6$ 表示。

全面检测该路段裂缝等病害状况,在典型横向裂缝附近采用 FWD 检测方案,如图 1 所示,可获得多个位置的弯沉盆数据,每条裂缝附近布置 10 个测点。采用相同方式布点检测路面纵向裂缝,根据路面宽度确定测点数,参照图 1 确定测点间距。参照图 1 方法,从沉陷处的纵向、横向及斜向布点检测路面沉陷处。

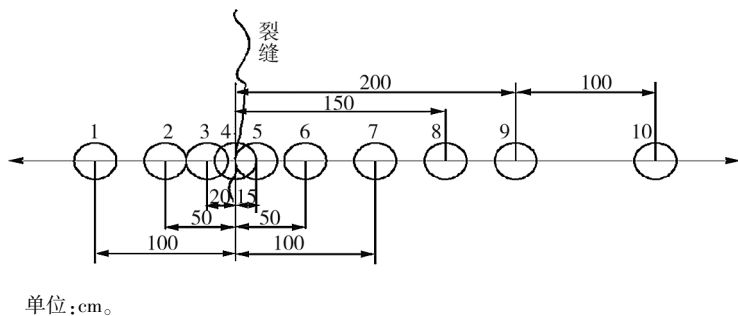


图 1 病害处 FWD 检测示意图

2 不同病害处路面结构弯沉结果及分析

2.1 横向裂缝

随机选取路面的多条横向裂缝(横向裂缝与路面车辆的行驶方向垂直),采用 FWD 检测方法检测弯沉盆数据,如第 1 节所示布设测点,其中 2 条横向裂缝弯沉的检测结果如图 2 所示,检测数据的变化规律基本一致。

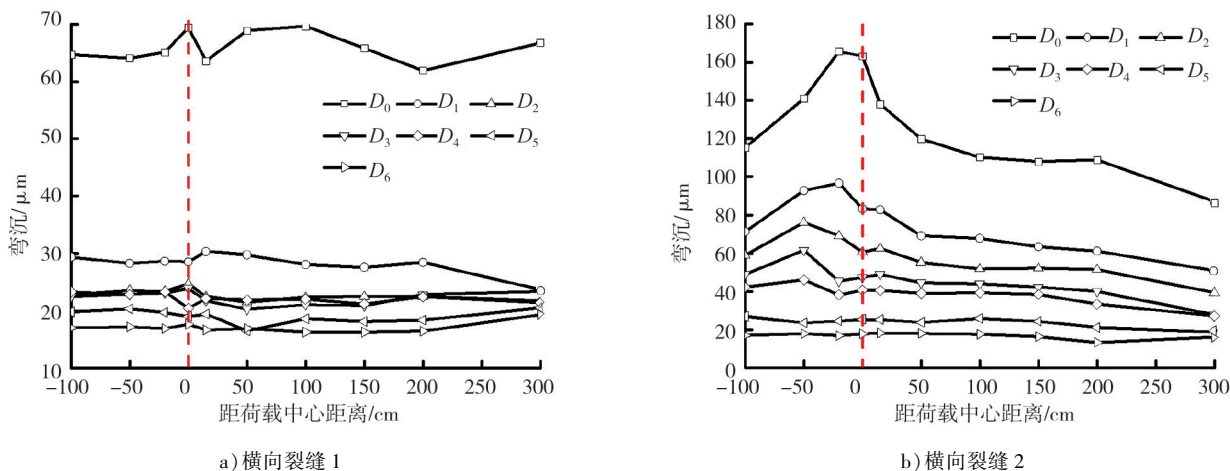


图 2 横向裂缝处弯沉检测结果

由图 2 可知:不同裂缝处损伤程度不同,有的裂缝对弯沉的影响较小,如图 2a) 所示横向裂缝 1 的弯沉与未发生开裂位置的弯沉基本相同;损伤程度较大的裂缝,如图 2b) 所示横向裂缝 2,裂缝处的弯沉与周边区域的弯沉差别较大,离裂缝处距离较近的弯沉较大,开裂导致裂缝与加载中心范围内的路表弯沉增大,离荷载中心距离较远的路面结构受荷载影响减小,远端弯沉与路面结构完好时的弯沉相当。横向裂缝的弯沉影响区域宽约 2.0 m,裂缝向左 1.0 m、向右 1.0 m 外弯沉下降趋于稳定,因此,对横向裂缝进行彻底处理的区域宽度至少约 2.0 m。

2.2 纵向裂缝

随机选取路面的多条纵向裂缝(纵向裂缝与路面车辆的行驶方向平行),采用 FWD 检测方法监测弯沉盆数据,如第 1 节布设测点,其中 3 条纵向裂缝弯沉的检测结果如图 3 所示,检测数据的变化规律基本一致。

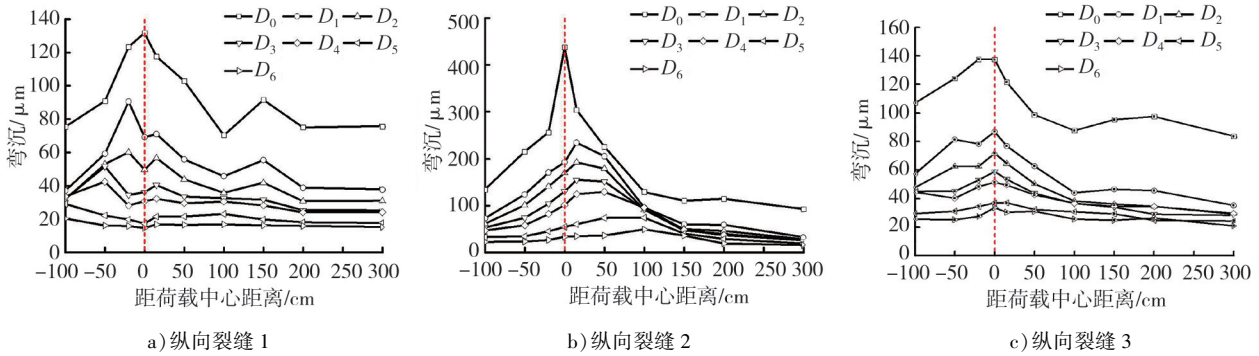


图 3 纵向裂缝处弯沉检测结果

由图 3 可知:纵向裂缝处路面的损伤程度较大,裂缝处的弯沉与周边区域的弯沉差别较大,弯沉差最大可达 4 倍以上;纵向裂缝弯沉的影响区域宽约 2.0 m,裂缝中心处弯沉最大,裂缝左右对称 1.0 m 外弯沉下降趋于稳定,因此,对纵向裂缝进行彻底处理的区域宽度至少约 2.0 m。

2.3 沉陷处

随机选取路面的多处沉陷处,采用 FWD 检测方法,如第 1 节所示布设测点测量弯沉盆数据,其中 3 处沉陷处弯沉的检测结果如图 4 所示,检测数据的变化规律基本一致。

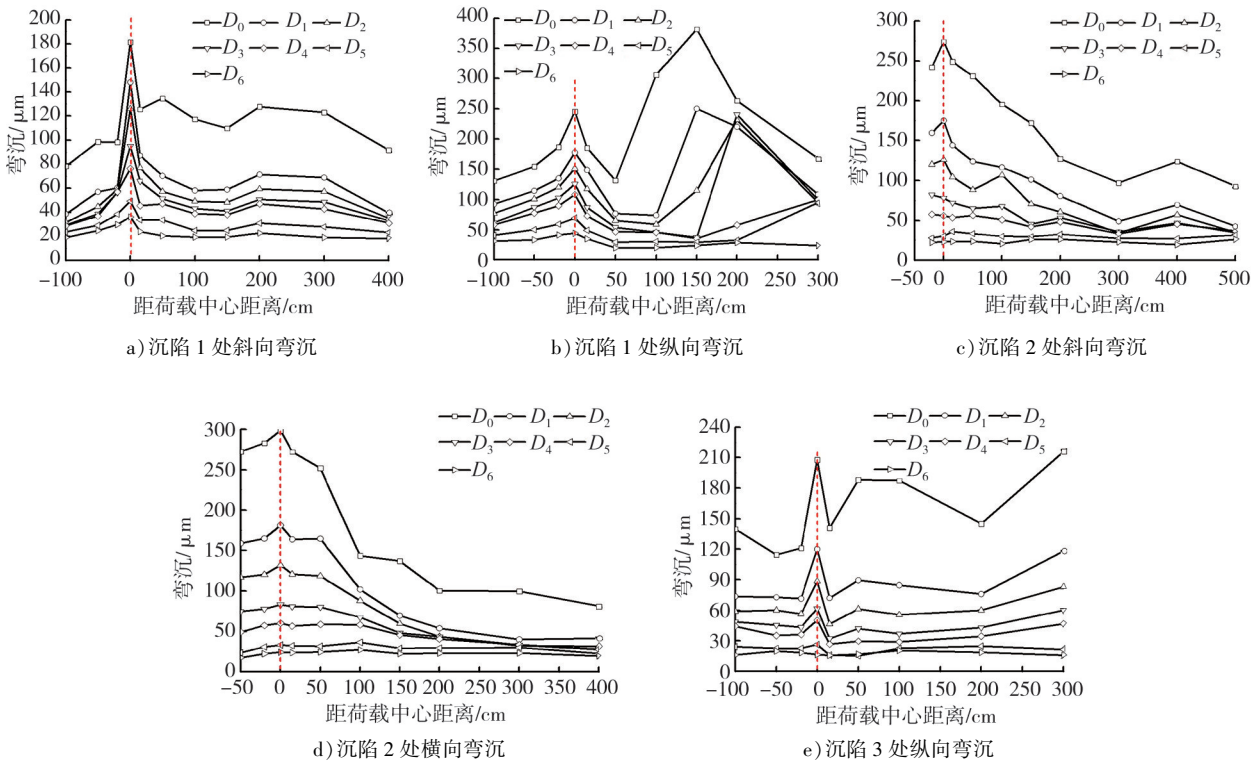


图 4 沉陷处弯沉检测结果

由图 4 可知:沉陷处路面的损伤程度较大,沉陷处的弯沉与周边区域的弯沉差别较大,大部分弯沉差达到 3 倍以上;沉陷处弯沉的影响范围比横向、纵向裂缝处大,弯沉的影响区域宽约 1.5~3.5 m,不仅在沉陷中心处有较大弯沉,不同方向的周边区域也存在较大弯沉。处理沉陷区域时,需考虑对沉陷的不同

方向进行综合处治。

3 基于弯沉盆几何特征的路面结构状况评价

3.1 弯沉盆几何特征参数

半刚性基层路面结构荷载中心的最大弯沉 D_0' 、邻近荷载区域的弯沉差 D_{0-20} 、距荷载中心20~60 cm附近的弯沉差 D_{20-60} 、弯沉盆末端的弯沉 D_{120} 可作为沥青路面整体强度、面层、基层和路基强度的评价指标^[20-21],计算公式为:

$$D_{0-20} = D_0 - D_{20},$$

$$D_{20-60} = D_{20} - D_{60},$$

式中: D_{20} 、 D_{60} 分别为距荷载中心20、60 cm处的路表弯沉。

3.2 病害处弯沉盆几何特征参数变化

不同路面损伤情况下的 D_0' 、 D_{0-20} 、 D_{20-60} 及 D_{120} 如图5所示。

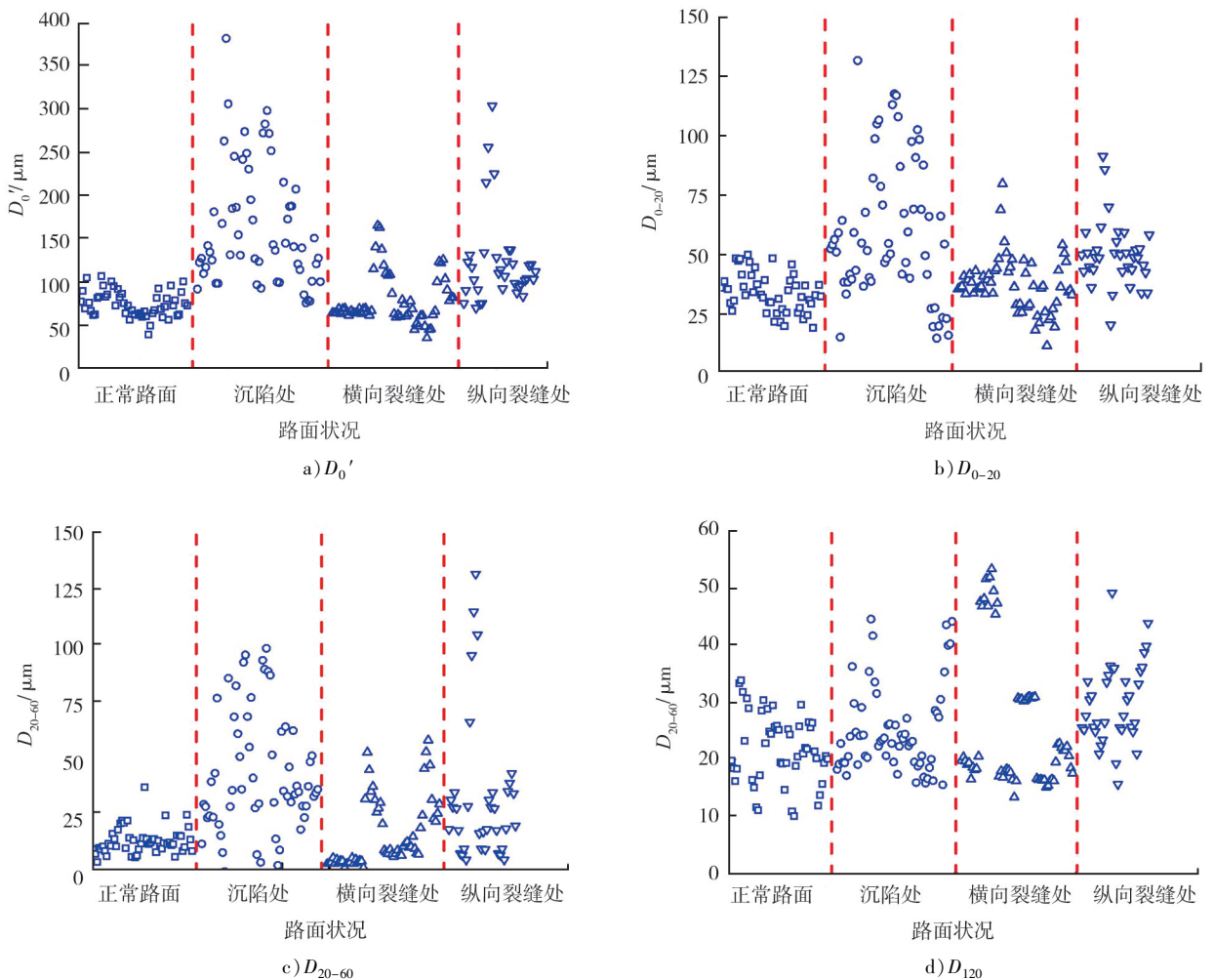


图5 不同路面状况下弯沉盆几何特征参数

由图5a)可知:与正常路面相比,路面损伤处的 D_0' 离散性明显增大,其中沉陷处 D_0' 最大,纵向裂缝处次之,横向裂缝处最小,表明沉陷处路面损伤程度最大,路面荷载扩散能力减弱,纵向裂缝处损伤程度次之,横向裂缝处损伤程度最小。由图5b)可知:按照 D_{0-20} 从大到小排序,依次为沉陷处、纵向裂缝处、横向裂缝处、正常路面。由图5c)可知:受路面损伤影响,沉陷处的弯沉差、弯沉坡度的离散性增大,按照

D_{20-60} 从大到小排序依次为沉陷处、纵向裂缝处、横向裂缝处、正常路面,表明沉陷、纵向裂缝对路面基层造成的损伤程度较大,横向裂缝对路面基层造成的损伤程度较小。由图 5d)可知: D_{120} 离散性较大,按照 D_{120} 从大到小排序,依次为纵向裂缝处、沉陷处、横向裂缝处、正常路面,表明纵向裂缝、沉陷对路基的损伤程度较大。

3.3 弯沉盆参数上限

采用统计学的距离判别分析法^[25],分析图 5 高速公路不同路面状况各弯沉盆参数的分布情况,确定路面整体结构及各结构层状况良好的弯沉盆参数上限,用于评判公路路面整体结构及各结构层状况,如表 1 所示。

表 1 路面整体结构及各结构层状况良好的评价标准

路段状况	$D_0'/\mu\text{m}$	$D_{0-20}/\mu\text{m}$	$D_{20-60}/\mu\text{m}$	$D_{120}/\mu\text{m}$
无病害路段	75.1	33.8	13.1	21.8
有病害路段	125.0	50.9	31.3	27.3
沉陷处	164.8	60.2	45.7	26.7
纵向裂缝处	131.3	55.3	32.2	29.7
横向裂缝处	78.8	37.3	16.1	25.4
路况良好的 参数上限	100.1	42.4	31.3	24.5

由表 1 可知: D_0' 的上限为 $100.1 \mu\text{m}$,可将 D_0' 小于 $100.1 \mu\text{m}$ 作为判断路面整体状况良好的标准; D_{0-20} 的上限为 $42.4 \mu\text{m}$,可将 D_{0-20} 小于 $42.4 \mu\text{m}$ 作为判断路面面层状况良好的标准; D_{20-60} 的上限为 $31.3 \mu\text{m}$,可将 D_{20-60} 小于 $31.3 \mu\text{m}$ 作为判断路面基层状况良好的标准; D_{120} 的上限为 $24.5 \mu\text{m}$,可将 D_{120} 小于 $24.5 \mu\text{m}$ 作为判断路面路基状况良好的标准。

3.4 路面结构状况分析

根据 3.3 节的路面结构状况判别标准和大量 FWD 检测数据,判断该高速公路路面结构损伤状况。

从路面整体强度看,以 $100.1 \mu\text{m}$ 为标准,7.7% 的无病害路段的 D_0' 、56.8% 的病害路段的 D_0' 大于 $100.1 \mu\text{m}$,其中 80.3% 的沉陷段、66.7% 的纵向裂缝段、23.3% 的横向裂缝段大于 $100.1 \mu\text{m}$ 。

从面层强度看,以 $42.4 \mu\text{m}$ 为标准,15.4% 的无病害路段的 D_{0-20} 、65.9% 的病害路段的 D_{0-20} 大于 $42.4 \mu\text{m}$,其中 75.9% 的沉陷段、93.5% 的纵向裂缝段、28.3% 的横向裂缝段大于 $42.4 \mu\text{m}$ 。

从基层强度看,以 $31.3 \mu\text{m}$ 为标准,2.0% 的无病害路段的 D_{20-60} 、43.5% 的病害路段的 D_{20-60} 大于 $31.3 \mu\text{m}$,其中 70.4% 沉陷段、41.9% 的纵向裂缝段、18.3% 的横向裂缝段大于 $31.3 \mu\text{m}$ 。

从路基强度看,以 $24.5 \mu\text{m}$ 为标准,38.4% 的无病害路段的 D_{120} 、56.9% 的病害路段的 D_{120} 大于 $24.5 \mu\text{m}$,其中 40.7% 的沉陷段、96.8% 的纵向裂缝段、33.3% 的横向裂缝段大于 $24.5 \mu\text{m}$ 。

4 结语

1) 分析安徽省某高速公路养护路段的弯沉变化,初步判断高速公路损伤路面横向裂缝损伤的影响区域宽约 2.0 m,纵向裂缝损伤的影响区域宽约 2.0 m,沉陷处损伤的影响区域宽约 1.5~3.5 m,建议在加铺设计时根据力学指标对路面损伤程度进行分类,考虑严重病害位置的处治范围及结构力学参数。

2) 根据路面病害段和无病害段 FWD 弯沉盆几何特征参数的分布,将荷载中心最大弯沉小于 $100.1 \mu\text{m}$ 、邻近加荷区域弯沉差小于 $42.4 \mu\text{m}$ 、20~60 cm 区域弯沉差小于 $31.3 \mu\text{m}$ 及弯沉盆末端弯沉小于 $24.5 \mu\text{m}$ 作为判断路面整体、面层、基层和路基状况良好的评价标准。

本文虽提出了路面状况良好的弯沉盆几何参数的上限,但主要是基于安徽高速公路实测弯沉数据确

定,对其他高速公路的适用性尚需进一步的数据验证。下一步研究将着重验证弯沉盆几何参数界限值的适用性,并基于路基和路面各结构层评价参数构建路面整体结构强度的综合评价模型。

参考文献:

- [1] 丰晓,唐伯明,李锦华. FWD 应用于沥青路面结构承载能力的非破损评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(5): 520-524.
FENG Xiao, TANG Boming, LI Jinhua. Nondestructive evaluation with FWD on structural bearing capacity of asphalt pavements[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1996, 24(5): 520-524.
- [2] 王浩仰. 半刚性基层沥青道路结构承载力评价体系研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
WANG Haoyang. Evaluation system of structural bearing capacity of the asphalt concrete road with semi-rigid base[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [3] 李怀月. 基于 FWD 弯沉参数的沥青路面结构承载力评价方法[J]. 中南公路工程, 2005, 30(2): 146-148.
LI Huaiyue. Evaluation on structural bearing capacity of asphalt pavement based on FWD parameters[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(2): 146-148.
- [4] 李美玲, 冉晋, 任瑞波, 等. 基于 FWD 的沥青路面结构单层模量反算研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(2): 365-369.
LIMEILING, RAN Jin, REN Ruibo, et al. Research on monolayer modulus back-calculation of asphalt pavement structure based on FWD[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(2): 365-369.
- [5] 刘崇理. 基于 FWD 的路面模量反算方法及影响因素分析[J]. 北方交通, 2010(9): 3-5.
LIU Chongli. Analysis on back calculation and influencing factors of pavement moduli based on FWD[J]. Northern Communication, 2010(9): 3-5.
- [6] 邱欣, 杨青, 游庆龙. 基于 FWD 动态弯沉盆参数的沥青路面模量反演分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 42-48.
QIU Xin, YANG Qing, YOU Qinglong. Back analysis on modulus of asphalt pavements based on FWD dynamic deflection basin parameters[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(6): 42-48.
- [7] 杨东涛. 落锤式弯沉仪模量反算精度影响因素分析与评价[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(4): 59-62.
- [8] 庄传仪, 叶亚丽, 王林. 级配碎石基层沥青路面 FWD 反算模量换算系数[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(4): 100-108.
ZHUANG Chuanyi, YE Yali, WANG Lin. Conversion coefficient for backcalculated modulus of unbound aggregate base asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(4): 100-108.
- [9] 查旭东. 路面结构层模量反算方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 1-6.
ZHA Xudong. Summary of backcalculation methods of pavement layer moduli[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 1-6.
- [10] 朱洁, 孙立军. 沥青路面三层结构模量反演最佳反演点的确定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 203-208.
ZHU Jie, SUN Lijun. Determination of optimal backcalculation point for three layer structure modulus backcalculation of asphalt pavement[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, 45(2): 203-208.
- [11] XU B. Assessing pavement layer condition using FWD deflection data[D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2001.
- [12] HEE M P. Use of falling weight deflectometer multi-load level data for pavement strength estimation[D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2002.
- [13] 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]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
GAO Zhe. Semi-rigid base asphalt pavement structure performance evaluation based on falling weight deflectometer(FWD)[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.
- [14] 杨国良. 基于落锤式弯沉仪评价路基路面结构层状况的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2007.
YANG Guoliang. Research on evaluation of subgrade and pavement structure layer condition based on falling weight deflectometer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2007.
- [15] 王旭东, 郭大进, 邓学钧. 动态弯沉盆几何特性分析[J]. 东南大学学报, 1999, 29(5): 115-120.

WANG Xudong, GUO Dajin, DENG Xuejun. Geometric characteristic analyze of the dynamic deflection basin[J]. Journal of Southeast University, 1999, 29(5):115-120.

[16]王旭东. 沥青路面弯沉指标的探讨[J]. 公路交通科技, 2015,32(1):1-11.

WANG Xudong. Discussion of asphalt pavement deflection indicator[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015,32(1):1-11.

[17]张超. 组合式基层沥青路面结构 FWD 数据特性分析[J]. 福建交通科技, 2015(3):1-5.

[18]MA L, LI M, PANG J, et al. Evaluation of transverse cracks for semi-rigid asphalt pavements using deflection basin parameters[J]. Journal of the Transportation Research Record, 2019,2673(2):358-367.

[19]陈南,曹长伟,凌建明,等. 基于弯沉盆的半刚性基层脱空判别方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014,42(5):695-700.

CHEN Nan, CAO Changwei, LING Jianming, et al. Identification method of semi-rigid base disengagement based on deflection basin[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014,42(5):695-700.

[20]丁俊峰. 基于弯沉盆的半刚性基层沥青路面结构强度评价[D]. 南京:东南大学, 2009.

DING Junfeng. Structural strength evaluation of semi-rigid base asphalt pavement based on deflection basin[D]. Nanjing: Southeast University, 2009.

[21]周岚,倪富健,王浩仰. 基于弯沉盆的高速公路沥青混凝土路面结构状况评价研究[J]. 公路, 2015,60(9):1-6.

ZHOU Lan, NI Fujian, WANG Haoyang. Research on evaluation of highway asphalt pavement structure based on deflection basin[J]. Highway, 2015,60(9):1-6.

[22]TAREFDER R A, ASCE M, AHMED M U. Modeling of the FWD deflection basin to evaluate airport pavements[J]. International Journal of Geomechanics, 2014,14(2):205-213.

[23]YANG Q, DENG Y J. Evaluation of cracking in asphalt pavement with stabilized base course based on statistical pattern recognition[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019,20(4):417-424.

[24]杨庆振, 马士杰. FWD 弯沉盆几何参数与路面结构强度关系分析[J]. 山东交通科技, 2015(5):61-64.

YANG Qingzhen, MA Shijie. Analysis of the relationship between FWD deflection basins geometrical parameters and pavement structure strength[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2015(5):61-64.

[25]潘劲松. 距离判别分析的应用[J]. 统计与决策, 2012(24):92-94.

Evaluation of asphalt pavement damage condition based on deflection basin parameters

WANG Qifeng¹, MA Shijie², XUE Zhichao³,
WU Wenjuan², WANG Zheng⁴, ZHANG Xiaomeng²

1. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Jinan 250101, China; 2. Shandong Transportation Institute, Jinan 250102, China;

3. Shandong Hi-speed Infrastructure Construction Co., Ltd., Jinan 250101, China;

4. Shandong Hi-speed Group Innovation Research Institute, Jinan 250102, China

Abstract: In order to evaluate the damage state of the pavement structure, while a maintenance section of an expressway in Anhui was used as the test section, a rapid detection method for the damage condition of the asphalt pavement is developed to analyze the deflection of different diseases through the geometric characteristic parameters of the falling weight deflectometer (FWD) deflection basin. A method for evaluating structural damage of asphalt pavement based on deflection basin is proposed, and the limit value of the overall condition of the pavement and each structural layer is recommended. The results show that, the influence areas of transverse cracks, longitudinal cracks and subsidence damage on the damaged pavement of expressway are 1.5 m, 2.0 m,

(下转第 92 页)