

移动荷载下道路病害的弯沉盆特性

蔡迎春, 谢申健

(郑州大学 黄河实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:移动荷载作用下道路弯沉盆蕴含路基、路面的病害信息,充分利用移动弯沉盆信息开展道路病害快速无损检测受到行业重要关注。该文通过分析道路病害的弯沉盆特性,为移动弯沉车开发道路病害检测方法提供技术参考。首先建立半刚性基层沥青路面有限元模型,通过设置不同类型和程度的病害有限元模型,分析在移动荷载作用下路表弯沉盆的连续变化情况。结果表明:荷载移动到病害区域时,各病害模型中路表弯沉盆的中心弯沉值均会变大;路面结构层出现横向裂缝时,弯沉盆的形状会发生明显变化,贯通性横向裂缝对弯沉盆形状的影响最明显;基层与底基层局部松散对弯沉盆形状的影响比面层松散对弯沉盆的影响更明显;土基顶部出现空洞时,弯沉盆形状变化不明显;路基唧泥病害会严重影响路表弯沉盆形状与大小。

关键词:半刚性基层沥青路面;病害;移动荷载;有限元;弯沉盆特性

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Deflection Basin Characteristics of Distressed Roads under Moving Load

CAI Yingchun, XIE Shenjian

(Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: The deflection basins of roads under moving load imply the distress information of subgrade and pavement. Therefore, how to use the information of deflection basins under moving load to rapidly test road distresses non-destructively has received much attention. In this paper, the finite element model of semi-rigid base asphalt pavement was established. By setting different types and degrees of finite element distress models, the continuous changes of surface deflection basins under moving load were analyzed. The results show that when the load moves to the distress area, the center deflection value of surface deflection basins in each distress model will become larger. When transverse cracks appear in the pavement structure layer, the shape of the deflection basins will change. The through transverse cracks have the most obvious influence on the shape of the deflection basins. The influence of the locally loose base and subbase on the shape of the deflection basins is more obvious than that of the loose surface. When a void appears at the top of the subgrade, the shape of the deflection basins is almost unchanged. Subgrade mud pumping will seriously affect the shape and size of surface deflection basins.

Keywords: semi-rigid base asphalt pavement; distresses; moving load; finite element; deflection basin characteristics

0 引言

改革开放以来,中国公路交通基础设施建设取得了巨大成就^[1]。沥青路面因具有较好的行车舒适

性和养护便利性被广泛采用,特别是半刚性基层沥青路面结构形式使用比例极高。但是,半刚性基层容易出现收缩裂缝,会进一步导致面层开裂。带裂缝路面在雨水浸泡和行车荷载作用下,容易出现面

层与基层松散等问题;当雨水下渗至路基后,在泵吸作用下容易引起唧泥病害;当路基土被不断带出后,形成路基脱空^[2-4]。这些病害极大地影响道路承载能力,同时也会威胁道路行车安全。因此,道路病害的无损检测一直受到行业的重点关注,而移动荷载作用下弯沉盆的特性隐含了道路病害特征,充分分析道路病害的弯沉盆特性能够为道路病害检测提供技术参考。

目前,路面动力响应特性的研究主要针对完好路面结构,如:黄兵等^[5]和 Assogba 等^[6-7]分析了不同荷载条件对沥青路面的影响;李江等^[8]、王宝峰等^[9]研究了车辆在匀速移动和刹车制动时对沥青路面造成的结构响应;郑元勋等^[10]、王强等^[11]和张宜洛等^[12]均研究了沥青路面结构层参数变化对路面设计指标的影响情况;Sun 等^[13]研究了高模量改性沥青路面在移动荷载作用下的黏弹性动力响应;Zhang 等^[14]对比了沥青路面在 FWD 荷载和 TSD 荷载作用下路面响应的差异。相对而言,道路病害的动力响应情况更为复杂^[15],梁俊龙等^[16]和艾长发等^[17]均对沥青路面结构裂纹的动态扩展特性进行了研究;张兰峰^[18]和冯伟等^[19]对沥青路面的车辙变形问题进行了数值模拟;Chen 等^[20]根据测量的路面弯沉曲线确定反射裂缝的阈值,进而定量确定裂缝的严重程度。道路病害的定性表征和数值量化等研究在不断深入,Alavi 等^[21]使用压电传感器检测路面损伤进程;Yan 等^[22]采用沥青路面竖向加速度峰值的变化率表征裂缝情况;Tan 等^[23]建立智能骨料姿态变化与车辙变形的关系并对车辙变形进行监测。路表弯沉盆信息能够对道路结构状况进行说明,Nasimifar 等^[24]通过现场数据对比验证了低速移动荷载下弯沉测量分析模型的可靠性。利用移动弯沉盆进行路基路面结构病害快速检测是一项基础性工作,本文利用 Abaqus 软件建立不同道路病害有限元模型,研究其在车辆移动荷载作用下动态弯沉盆特点,进一步明晰道路病害如何影响连续弯沉盆的变化,为下一步道路病害检测提供技术参考。

1 有限元计算模型

1.1 道路有限元模型

为简化建模,选取的道路计算模型的尺寸($x, y,$

z)为 $7\text{ m} \times 6\text{ m} \times 15\text{ m}$, x 为道路横向, y 为道路竖向, z 为道路纵向。路面结构形式为半刚性基层沥青路面,路面结构层及土基采用线弹性本构模型。由于本文采用的荷载为车辆移动荷载,路面材料模量选用动态模量,选用的各结构层动态模量采用《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017)推荐值^[25]。

同时,道路结构进行动力学分析时考虑了阻尼作用,本文选用瑞利阻尼,即: $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$, $[C]$ 为体系的阻尼矩阵; $[M]$ 为质量矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; α, β 为阻尼参数。其中 α, β 取简化的计算形式: $\alpha = \lambda_1 \omega_1, \beta = \lambda_2 / \omega_1$, 其中 ω_1 为计算体系的基频, λ_1 为该频率时对应的阻尼比,参照文献^[26]的结果,土基 ω_1 取 8.2 rad/s , 路面结构层 ω_1 取 18.6 rad/s 。为了考察不同阻尼比对结果稳定性的影响,试算了各阻尼比的变化,如图 1 所示。整体上看路面结构层阻尼比取 5%, 土基阻尼比取 7% 时,结果较为稳定合理。本文具体的结构参数取值见表 1。

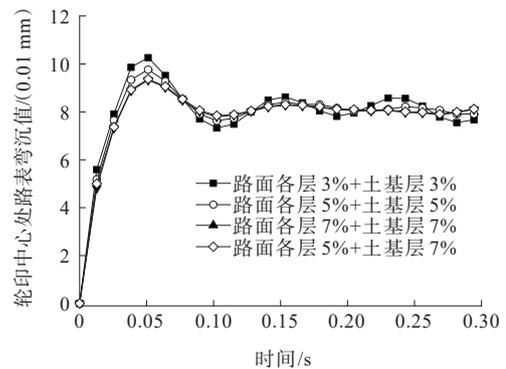


图 1 阻尼比试算结果

Figure 1 Calculated results of damping ratio

表 1 道路结构参数

Table 1 Parameters of pavement structures

层位	厚度/ cm	模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	阻尼参数	
					α	β
沥青面层	18	10 000	0.25	2 400	0.930	0.002 7
水泥稳定 碎石基层	36	12 000	0.25	2 300	0.930	0.002 7
水泥稳定 碎石底基层	18	8 000	0.25	2 300	0.930	0.002 7
土基	—	60	0.40	1 800	0.574	0.008 5

层间采用完全连续性的假设,边界条件设置为:模型底部完全固定,4个侧面仅固定垂直于侧面的位移。

1.2 病害有限元模型

考虑到实际道路病害的复杂性,本文对病害特征进行简化处理。在局部范围内通过设置模量降低,结构层内出现开口裂缝,模拟面层和基层的松散、开裂以及路基的脱空与唧泥等病害,进而开展移动荷载下有限元动态响应分析。

1.2.1 病害模型

为了研究不同种类和程度的病害区域对移动弯沉盆的影响,本文设置了几种病害有限元模型。

(1) 病害 I : 面层开裂

本文设置的裂缝为开口裂缝,即裂缝左右面有微小间距,裂缝宽度为 2 mm,裂缝长度为 7 m,贯穿道路横向,位于模型结构层中间,面层开裂深度 18 cm,仅面层出现横向裂缝。

(2) 病害 II : 基层与底基层开裂

基层与底基层开裂设置的裂缝形式与面层开裂相同,不同之处在于裂缝设置在基层与底基层两层,开裂深度为 54 cm,基层和底基层同时出现横向裂缝。

(3) 病害 III : 贯通裂缝

贯通裂缝的设置方式为面层、基层和底基层开裂同时出现,开裂深度为 72 cm,面层、基层和底基层均出现横向裂缝。

(4) 病害 IV : 面层松散

在面层设置模量降低的三维空间区域,水平范围大小为小(1.920 m×1.920 m)、中(2.688 m×2.688 m)、大(3.072 m×3.072 m)3个水平,竖向大小为面层厚度 18 cm,将研究范围内模量降低至 4 000 MPa。

(5) 病害 V : 基层与底基层松散

在基层与底基层设置模量降低区域,其水平范围大小与上述面层松散相同,为小、中、大3个水平,竖向范围取基层与底基层总厚 54 cm,将研究范围内模量降低为 4 000 MPa,其他区域模量保持不变。

(6) 病害 VI : 路基脱空

在土基顶部的区域设置脱空,脱空的水平范围大小与松散的设置相同,取为小、中、大3个水平,竖向深度取 0.5 m,脱空区域内模量为 0。

(7) 病害 VII : 路基唧泥

首先,设置路面结构层贯通裂缝(上述病害 III);其次,把该区域土基顶部 3 cm 深度的模量设置为 1 MPa。唧泥病害同样设置上面松散类相同的小、中、大3个水平范围,贯通裂缝长度对应病害区域内

的宽度,裂缝宽度设为 2 mm,且位于病害区域正中间。

为了更清楚地示意病害模型,在不同种类病害模型中用虚线标记病害位置与形状,方框内为病害放大纵向剖面图,如图 2 所示。

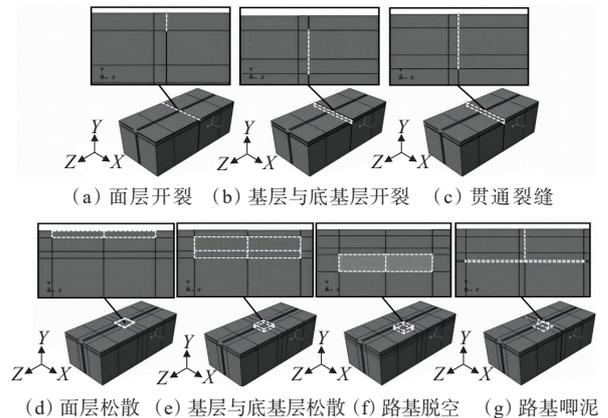


图 2 病害有限元模型示意图

Figure 2 Finite element distress models

1.2.2 网格划分

采用 C3D8R 单元(三维六面体八节点线性减缩积分等参单元),该单元能以较低的成本得到较好的计算结果。考虑到模型计算成本和计算精度的影响,网格划分时对模型的荷载施加区域和病害区域进行加密,远离病害区域的网格渐渐变稀疏。采用粗网格、中等网格和密集网格 3 种网格水平对小范围面层松散模型进行计算,划分单元数量和节点数目分别为:粗网格,51 072 单元,56 500 节点;中等网格,141 120 单元,150 629 节点;密集网格,314 496 单元,332 519 节点。模型表面中心位置处节点的弯沉时程曲线见图 3。

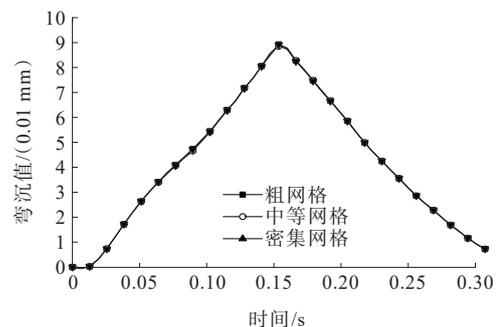


图 3 不同网格计算结果

Figure 3 Calculation results of different grids

由图 3 可知:不同网格密度导致弯沉时程曲线峰

值有轻微的差异,3种计算结果之间误差小,满足精度要求,因此本文选择中等网格划分方式。对面层松散模型的网格划分如图4所示,其他病害模型的网格划分方式大同小异。

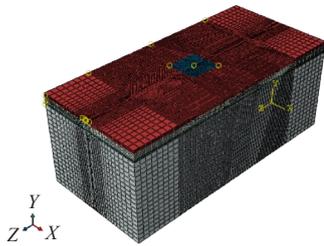


图4 面层松散模型网格划分

Figure 4 Meshing of loose surface model

1.3 加载方式

采用简化的移动均布荷载。首先在模型表面设置荷载移动带^[26],在荷载移动带上施加移动荷载,移动荷载通过 Abaqus 附加的用户子程序接口 Dload 模块编写对应代码施加,荷载的移动速度、持续时间和荷载作用区域均通过代码实现。

为减弱模型边界的影响,荷载移动带设置在路表中间,长度取 9.216 m,加载位置见图5。荷载移动方向沿 z 轴负方向,荷载移动速度设置为 30 m/s,荷载大小选用标准轴载,即单轴双轮组 100 kN,接地压强为 0.7 MPa,考虑单侧双轮的作用。为方便建模,将接触面等效为矩形作用面,接触面的宽度和长度分别为 18.6 cm 和 19.2 cm^[27],两轮间距为 12.8 cm。

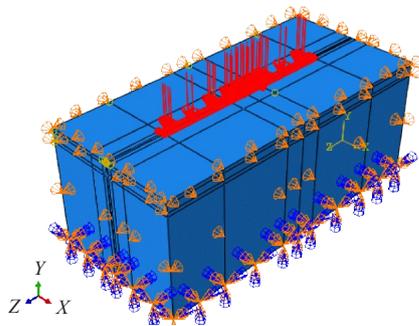


图5 加载位置

Figure 5 Load position

1.4 弯沉取值

在沥青路面的动力响应研究中发现,路表弯沉时程曲线峰值出现的时间相对于荷载出现的时间滞后^[28-29]。一般情况下,路表弯沉的计算取值点位于两个轮迹的中间,如图6所示。在图6轮迹中间的A、B

两点上,计算其路表弯沉(未设置病害区域),结果为:A处的弯沉值为 8.31(0.01 mm),B处的弯沉值为 8.26(0.01 mm),可以明显地看出弯沉响应的滞后性。为了更好地表征路面承载能力,选取轮载下A点作为计算点位,以轮载下A点作为弯沉盆中心点。

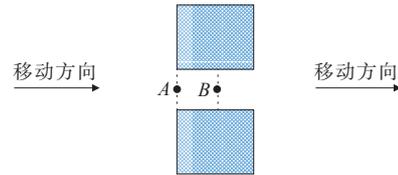


图6 弯沉计算取值点位

Figure 6 Value points for deflection calculation

为了研究弯沉盆随荷载移动时的动态变化,考虑到建模和后期弯沉盆提取的方便,作如下设定:

(1) 弯沉盆取点方式:以轮载作用处计算点位(A点)为中心点,向移动路径前后各取5个点,总共11个点,相邻两点之间间隔 0.384 m(轮胎接地长度2倍),整个弯沉盆水平范围为 3.840 m,弯沉盆的取值点位置分布如图7所示。

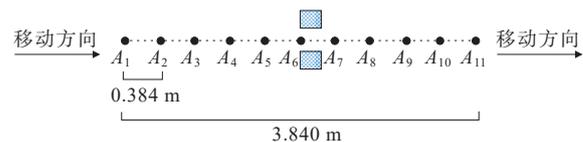


图7 弯沉盆的取值点位置分布

Figure 7 Distribution of value points of deflection basin

(2) 弯沉盆提取频率:提取移动荷载跨越病害区域前后的弯沉盆,从 0.089 6 s 开始,每隔 0.012 8 s(荷载移动 0.384 m)取一次弯沉盆,总共取 11 个盆,结束时为 0.217 6 s,弯沉盆标号的先后顺序为 1[#]~11[#],荷载移动至模型中央的时间为 0.153 6 s(6[#]弯沉盆)。为了清晰显示各个位置的弯沉盆形状的差异,在图 9(a)~15(a)中各序号弯沉盆按增量 0.01 mm 累加堆叠成图。

1.5 数值算例

为了验算本文模型结果的准确性,对文献[30]中 8.5 节玄武岩纤维沥青路面三维有限元模型进行计算,模型尺寸、材料参数和荷载条件使用原文参数,网格划分及建模细节与原文保持一致,计算结果与文献结果的对比如图8所示。从图8可以看出:二者的曲线变化规律相同,仅数值大小存在较小误差,说明本文的建模流程是正确的,模型计算结果是合理可靠的。

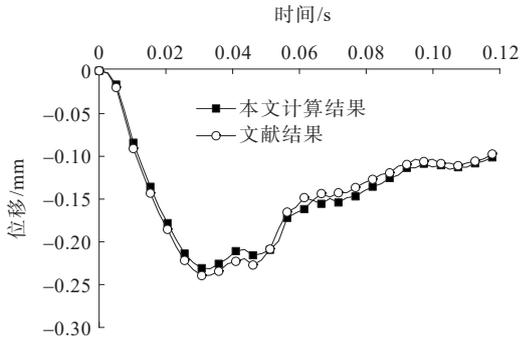
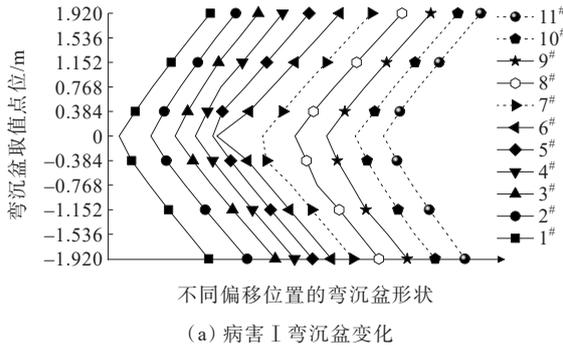


图8 算例计算结果

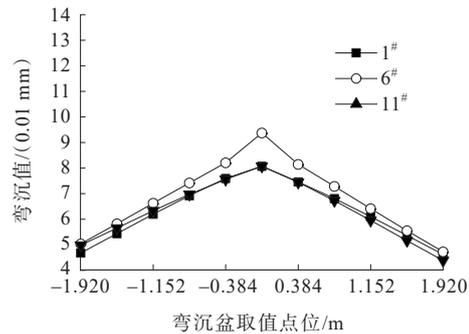
Figure 8 Result of calculation example

2 计算结果与分析

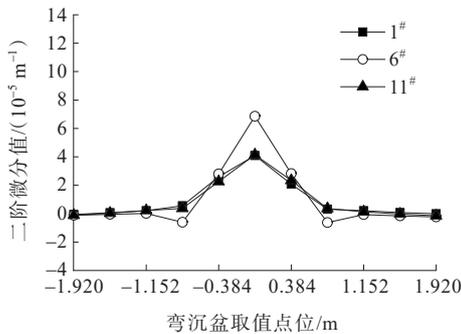
通过各病害模型计算得到对应的路表弯沉盆序



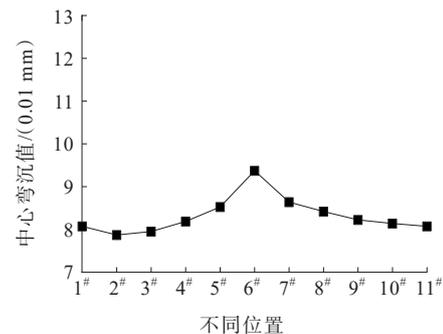
(a) 病害 I 弯沉盆变化



(b) 跨越病害 I 前、中、后的弯沉盆



(c) 跨越病害 I 前、中、后弯沉盆的二阶微分



(d) 中心弯沉值连续变化

图9 面层开裂计算结果

Figure 9 Calculation results of surface cracking

由图9(a)可知:移动荷载跨越面层开裂病害时,弯沉盆形状会发生变化,靠近面层开裂位置附近的弯沉盆形状变化明显,远离面层开裂位置的弯沉盆形状基本相同。由图9(b)、(c)可知:面层开裂病害跨越前、后的弯沉盆及其二阶微分值基本一致;相比之下跨越中的弯沉盆及其二阶微分值会产生较大变化;在弯沉盆中心处,面层开裂模型的弯沉值和二阶微分值比跨越前分别增大约16%和68%。由图9(d)

列,为进一步表征弯沉盆的形状特征,使用后处理 differentiate() 函数对数据进行数值微分计算,得到弯沉盆的二阶微分值。本文讨论移动荷载在跨越病害区域过程中路表弯沉盆及其二阶微分值的变化,并对跨越前(1#盆)、中(6#盆)、后(11#盆)3个位置作具体分析,病害之间的差异由中心弯沉值的连续变化对比表示。

2.1 面层开裂

图9(a)为移动荷载跨越面层开裂病害的弯沉盆序列1#~11#;图9(b)、(c)为荷载跨越面层开裂病害前、中、后3个位置的弯沉盆及其二阶微分值,弯沉盆序号分别为1#、6#、11#,图9(d)为移动荷载下不同位置中心弯沉值的变化情况。

可知:在荷载移动过程中,弯沉盆的中心弯沉值在靠近面层开裂位置时变大,变化率随着距离减小而变大,远离面层开裂位置时中心弯沉值逐渐变小。

2.2 基层与底基层开裂

图10(a)为基层与底基层开裂的弯沉盆序列1#~11#。图10(b)、(c)为荷载跨越基层与底基层开裂病害前、中、后3个位置的弯沉盆及其二阶微分值,弯沉盆分别为序号1#、6#、11#。图10(d)为移动荷载下不

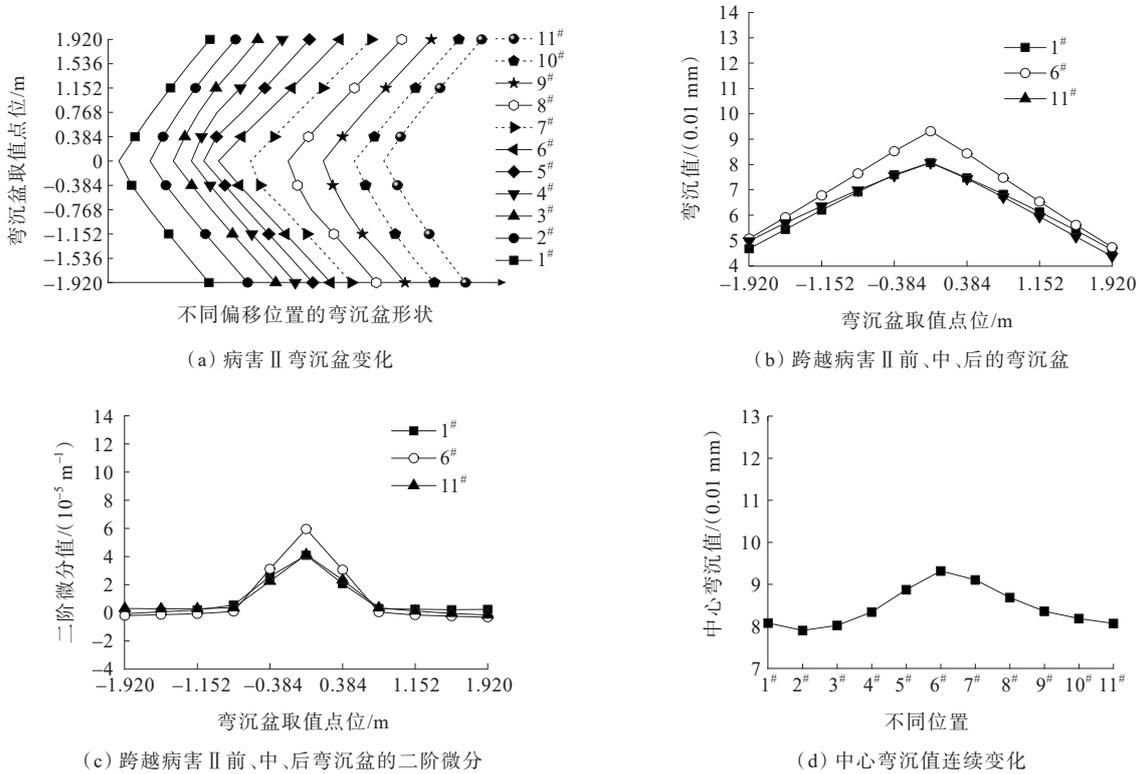


图10 基层与底基层开裂计算结果

Figure 10 Calculation results of base and subbase cracking

同位置中心弯沉值的变化情况。

由图10(a)可知:基层与底基层开裂对连续弯沉盆的形状变化存在影响,荷载靠近开裂位置处时弯沉盆形状的变化较明显。由图10(b)、(c)可知:基层与底基层开裂病害在跨越前和跨越后的弯沉盆及其二阶微分值基本相同。跨越中的弯沉盆及其二阶微分值会产生较大变化,其弯沉值和二阶微分值分别增大约15%和46%。对比图9(b)、(c)发现:虽然基层和底基层开裂的深度为54 cm,远大于面层开裂的深度18 cm,但这两种开裂病害跨越中的弯沉盆中心处的弯沉值和二阶微分值变化相差不多,显示出基层和底基层开裂具有隐蔽性。由图10(d)可知:移动荷载跨越基层和底基层开裂病害时,弯沉盆的中心弯沉值变化曲线在一定程度上可以反映出开裂位置。

2.3 贯通裂缝

图11(a)为贯通裂缝病害的弯沉盆序列1[#]~11[#]。图11(b)、(c)为荷载跨越贯通裂缝病害前、中、后3个位置的弯沉盆及其二阶微分值,弯沉盆分别为序号1[#]、6[#]、11[#]。图11(d)为移动荷载下不同位置中心弯沉值的变化情况。

由图11(a)可知:当路面结构层出现贯通裂缝时,会严重影响路表弯沉盆的形状。对比图9(a)、10(a)和11(a)可以发现:在3种结构层开裂病害中,贯通横向裂缝对弯沉盆的影响最显著,原因在于贯通横向裂缝的形成使路面在裂缝处不连续,极大地削弱了裂缝两边路面的传荷能力,荷载移动时使裂缝两边产生的弯沉值差异大,造成弯沉盆形状变化明显。由图11(b)、(c)可知:贯通裂缝跨越中的弯沉盆和二阶微分值相比于跨越前和跨越后产生了明显变化,在弯沉盆中心处,贯通裂缝模型的弯沉值和二阶微分值比跨越前分别增大约57%和229%,再次说明了贯通裂缝的产生对路面的影响极为严重。对比图9(d)、10(d)和11(d)可知:贯通裂缝的中心弯沉值变化曲线比其他两种开裂病害的变化曲线更剧烈。

2.4 面层松散

图12(a)为小范围(1.92 m×1.92 m)面层松散病害弯沉盆序列1[#]~11[#]。图12(b)、(c)为荷载跨越小范围面层松散病害前、中、后3个位置的弯沉盆及其二阶微分值,弯沉盆分别为序号1[#]、6[#]、11[#]。图12(d)为不同范围(小、中、大)面层松散移动荷载下不同位置中心弯沉值的变化情况。

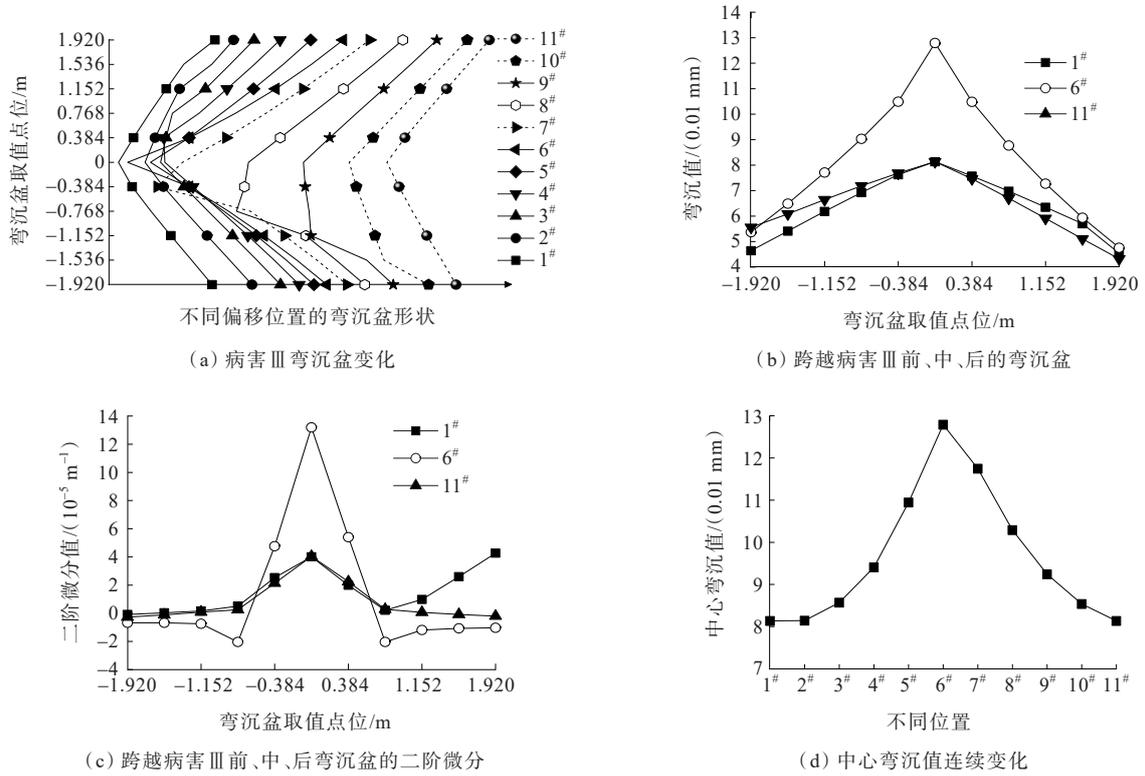


图 11 贯通裂缝计算结果

Figure 11 Calculation results of through cracks

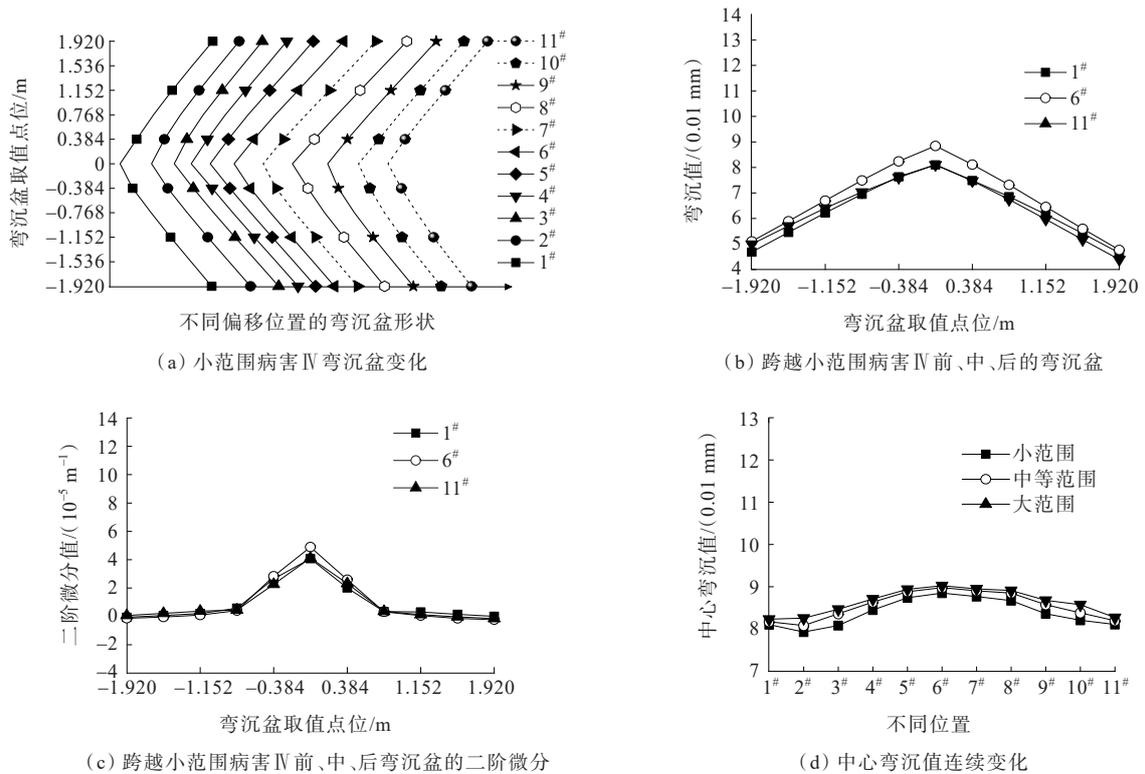


图 12 面层松散计算结果

Figure 12 Calculation results of loose surface

由图 12(a)可知:荷载在移动过程中,面层松散对弯沉盆的形状变化影响不明显。由图 12(b)、(c)可知:小范围面层松散区域在跨越前和跨越后的弯沉盆及其二阶微分值基本一致,而在跨越中的弯沉盆及其二阶微分值会产生一定变化。在弯沉盆中心处,小范围面层松散模型的弯沉值和二阶微分值分别增大约 9% 和 20%,可见面层松散对弯沉值和弯沉盆形状的影响都比较小。由图 12(d)可知:荷载在移动过程中,面层松散病害的中心弯沉值变化曲线较

平缓,说明面层松散范围的增大对弯沉值变化的影响有限。

2.5 基层与底基层松散

图 13(a)为小范围基层与底基层松散病害的弯沉盆序列 1[#]~11[#]。图 13(b)、(c)为荷载跨越小范围基层与底基层松散病害前、中、后 3 个位置的弯沉盆及其二阶微分值,弯沉盆分别为序号 1[#]、6[#]、11[#]。图 13(d)为不同范围基层与底基层松散病害移动荷载下不同位置中心弯沉值的变化情况。

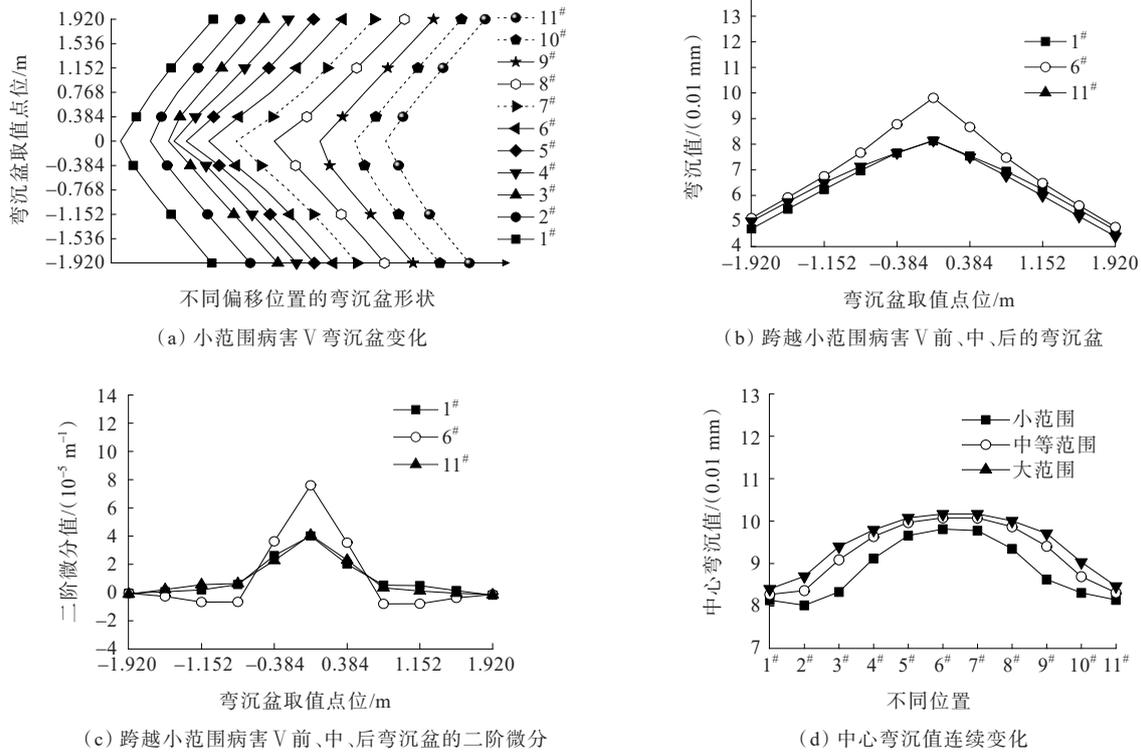


图 13 基层与底基层松散计算结果

Figure 13 Calculation results of loose base and subbase

由图 13(a)可知:移动荷载跨越基层与底基层松散病害时,病害区域内弯沉盆形状发生改变。对比图 13(a)和 12(a)可以发现:基层与底基层松散对弯沉盆形状的影响比面层松散更明显。由图 13(b)、(c)可知:在小范围基层与底基层松散病害中,相比于跨越前和跨越后的弯沉盆及其二阶微分值,跨越中的弯沉盆及其二阶微分值会产生一定变化。在弯沉盆中心处,该模型的弯沉值和二阶微分值分别增大约 21% 和 90%。由此可见,基层与底基层松散导致该区域路表的弯沉盆形状发生变化。由图 13(d)可知:基层与底基层松散模型的中心弯沉值变

化曲线存在明显下凹现象,且随着病害范围的增大,下凹宽度也在相应增加,说明基层与底基层是路面的承重层,该层位局部松散会大幅影响路面的承载能力。

2.6 路基脱空

图 14(a)为小范围路基脱空病害的弯沉盆序列 1[#]~11[#]。图 14(b)、(c)为荷载跨越小范围路基脱空病害前、中、后 3 个位置的弯沉盆及其二阶微分值,弯沉盆分别为序号 1[#]、6[#]、11[#]。图 14(d)为不同范围路基脱空病害在移动荷载下不同位置中心弯沉值的变化情况。

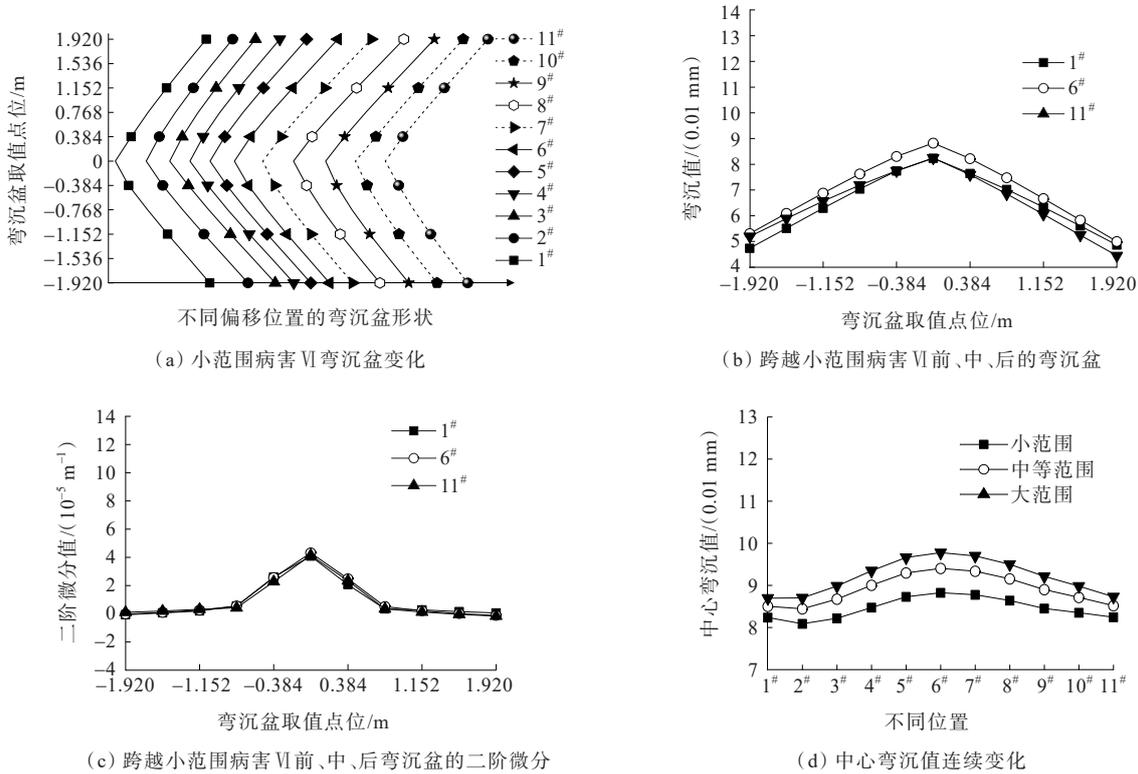


图 14 路基脱空计算结果

Figure 14 Calculation results of subgrade void

由图 14(a)可知:在移动荷载作用下,路基脱空病害不会导致路表弯沉盆形状发生明显变化,弯沉盆整体形状对路基脱空病害不敏感。由图 14(b)、(c)可知:荷载在跨越路基脱空区域前、中、后 3 个位置,弯沉盆的二阶微分值基本保持不变,只有弯沉值稍微变大。荷载在跨越小范围路基脱空区域时,中心弯沉值比跨越前增大约 7.2%。由此可见,路基脱空对路表弯沉值和弯沉盆形状的影响轻微,主要原因在于荷载移动时路面结构层使用动态模量,对比之下土基模量数值较小,而路面结构的刚度大致使路表弯沉盆对刚度小的土基部分反应不明显。由图 14(d)可知:在靠近土基脱空病害区域时,中心弯沉值逐渐变大,在远离时逐渐变小。随着病害范围的增大,中心弯沉值变大,曲线的变化曲率也稍微增加,说明路基脱空病害范围越大,对道路表面弯沉影响的范围越广。

2.7 路基唧泥

图 15(a)为小范围路基唧泥病害的弯沉盆序列 1#~11#。图 15(b)、(c)为荷载跨越小范围路基唧泥病害前、中、后 3 个位置的弯沉盆及其二阶微分值,弯沉盆分别为序号 1#、6#、11#。图 15(d)为不同范围路

基唧泥病害在移动荷载下不同位置中心弯沉值的变化情况。

由图 15(a)可知:路基唧泥病害会导致移动荷载下弯沉盆形状发生显著变化,病害区域内弯沉盆形状都不尽相同,靠近路基唧泥区域的弯沉盆形状变化尤甚,此现象是由唧泥区域的裂缝和模量降低两者综合导致。由图 15(b)、(c)可知:小范围路基唧泥病害跨越前和跨越后的弯沉盆及其二阶微分值基本一致,相比之下跨越中的弯沉盆及其二阶微分值有明显变化,二者分别增大约 40% 和 190%,可见唧泥病害会严重影响道路的承载能力。对比图 15(b)、(c)与图 11(b)、(c)发现:路基唧泥对弯沉盆的影响情况与贯通裂缝类似,原因在于路基唧泥是贯通裂缝病害的进一步发展。由图 15(d)可知:当荷载进入唧泥范围时,弯沉盆的中心弯沉值会急剧变大,变大的速率随唧泥范围的增大而增大。同时,随着唧泥范围的变大,中心弯沉值峰值也相应变大,各曲线的形状也会发生改变。由于路基唧泥时路面各结构层和土基层均产生了病害,因此对道路承载能力的削弱非常明显,小范围路基唧泥时贯通裂缝的特征表现突出,大范围唧泥时模量降低的表现突出。

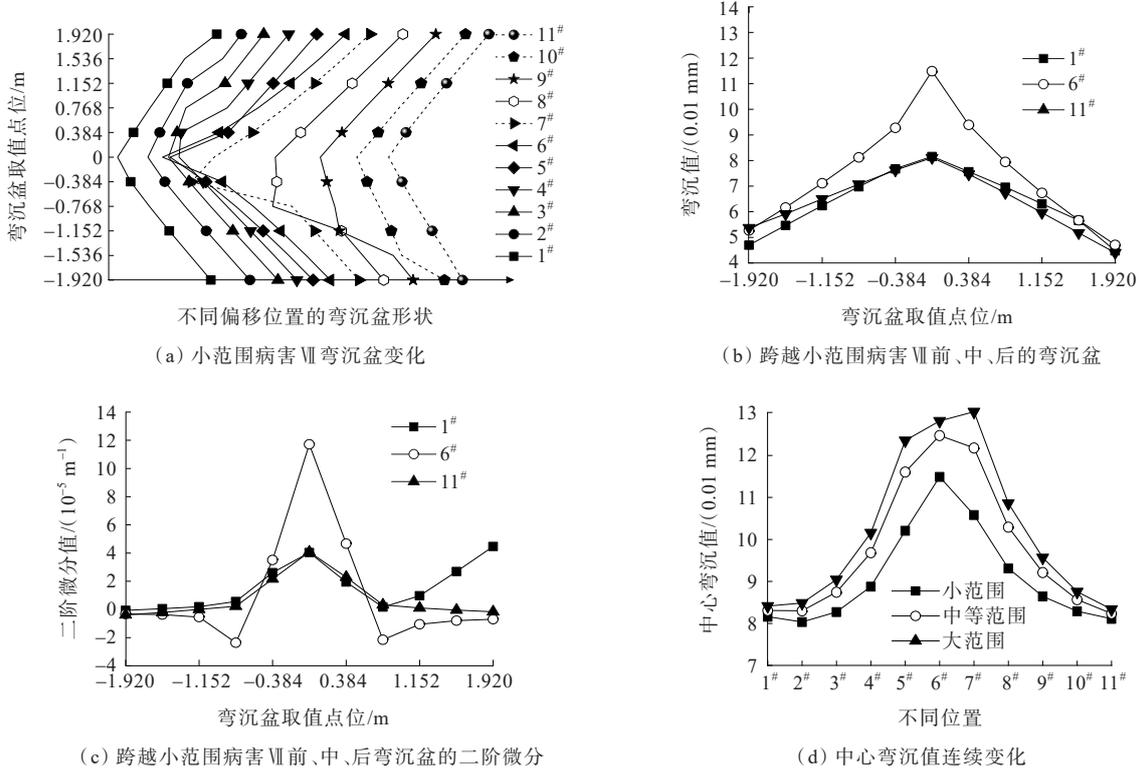


图 15 路基唧泥计算结果

Figure 15 Calculation results of subgrade mud pumping

3 结论

本文通过Abaqus有限元软件建立开裂、松散、脱空与唧泥等7类典型病害的半刚性基层沥青路面有限元模型,分析其在车辆移动荷载作用下路表弯沉盆的连续变化规律,得出以下主要结论:

(1) 路面结构层出现横向裂缝时,影响裂缝两边路面的传荷能力,使路表弯沉盆形状发生变化。相比于面层开裂,基层与底基层开裂具有隐蔽性。贯通横向裂缝的形成严重影响道路承载能力,荷载移动下弯沉盆形状发生明显变化。

(2) 基层与底基层局部松散时,区域内弯沉盆的部分弯沉值整体性变大。相比之下,荷载移动对面层松散的弯沉改变不太明显。

(3) 在移动荷载作用下,路基脱空病害的弯沉盆在整个过程中形状基本不会发生变化,只有弯沉值大小发生变化,弯沉盆整体形状对土基脱空病害不敏感。土基脱空病害发生的范围越大,对道路表面影响的范围越广。

(4) 路基唧泥会使路表弯沉盆在荷载移动过程中发生显著变化,该病害极大地降低了道路的承载

能力。当荷载进入唧泥范围内时,弯沉盆形状急剧变大,中心弯沉迅速增大,且增大的速率随唧泥范围的增大而增大。

参考文献:

References:

[1] 交通运输部综合规划司.在加快建设交通强国新征程上建新功:《2021年交通运输行业发展统计公报》评读[J].交通财会,2022(6):96-97.
Comprehensive Planning Department of Ministry of Transport.Build new achievements in accelerating the new journey of building a strong transportation country: Interpretation of statistics bulletin of 2021 transportation industry development[J]. Finance & Accounting for Transport,2022(6):96-97.

[2] 石福周,韩飞,汤丹丹,等.国道109线白银段路面早期破坏特征及影响因素分析[J].中外公路,2023,43(1):57-62.
SHI Fuzhou, HAN Fei, TANG Dandan, et al.Analysis on pavement early damage characteristics and influence factors of Baiyin section of national highway 109[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1):57-62.

[3] 艾长发,邵珠涛,黄杨权,等.外因素作用下沥青路面坑

- 槽修补界面缝疲劳特性试验研究[J].中外公路,2023,43(3):42-46.
- AI Changfa, SHAO Zhutao, HUANG Yangquan, et al. Experimental study on interface fatigue characteristics of asphalt pavement pothole patch under external factors[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023, 43(3):42-46.
- [4] 刘兴东,向昕,杨锡武.中国南方高速公路沥青路面唧浆病害原因分析与处治措施[J].中外公路,2010,30(3):103-106.
- LIU Xingdong, XIANG Xin, YANG Xiwu. Cause analysis and treatment measures of slurry pumping disease on asphalt pavement of China south expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway,2010,30(3):103-106.
- [5] 黄兵,周正峰,贾宏财,等.半刚性基层沥青路面结构动力响应分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(1):47-51,74.
- HUANG Bing, ZHOU Zhengfeng, JIA Hongcai, et al. Dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2014,33(1):47-51,74.
- [6] ASSOGBA O C, TAN Y Q, ZHOU X Y, et al. Numerical investigation of the mechanical response of semi-rigid base asphalt pavement under traffic load and nonlinear temperature gradient effect[J]. Construction and Building Materials,2020,235:117406.
- [7] ASSOGBA O C, TAN Y Q, SUN Z Q, et al. Effect of vehicle speed and overload on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Road Materials and Pavement Design,2021,22(3):572-602.
- [8] 李江,王晓涛,余胜军.不同车速下沥青路面结构的动力响应[J].公路交通科技,2015,32(8):6-11.
- LI Jiang, WANG Xiaotao, YU Shengjun. Dynamic responses of asphalt pavement structure to different vehicle speeds[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015,32(8):6-11.
- [9] 王宝峰,梁春雨,刘虎.车辆制动对沥青路面结构影响分析[J].公路,2016,61(2):65-69.
- WANG Baofeng, LIANG Chunyu, LIU Hu. Analysis of influence of vehicle braking on asphalt pavement structure [J]. Highway,2016,61(2):65-69.
- [10] 郑元勋,蔡迎春,张亚敏.沥青混凝土路面动力特性数值模拟研究[J].公路,2012,57(3):84-89.
- ZHENG Yuanxun, CAI Yingchun, ZHANG Yamin. A study on numerical simulation of asphalt concrete pavement dynamic characteristics[J]. Highway,2012,57(3):84-89.
- [11] 王强,刘运丹,李志勇.移动荷载作用下结构参数对沥青路面的动力响应分析[J].湖南交通科技,2018,44(1):1-5,73.
- WANG Qiang, LIU Yundan, LI Zhiyong. Dynamic response analysis of structural parameters to asphalt pavement under moving load[J]. Hunan Communication Science and Technology,2018,44(1):1-5,73.
- [12] 张宜洛,邓展伟,郭创.基于动载作用的组合式柔性基层路面典型结构优化设计研究[J].中外公路,2021,41(3):16-23.
- ZHANG Yiluo, DENG Zhanwei, GUO Chuang. Research on optimal design of typical structure of composite flexible base pavement based on dynamic loading[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):16-23.
- [13] SUN Y Z, GU B C, GAO L, et al. Viscoelastic mechanical responses of HMAP under moving load[J]. Materials,2018, 11(12):2490.
- [14] ZHANG M M, ZHANG J L, GONG H R, et al. Numerical investigation of pavement responses under TSD and FWD loading[J]. Construction and Building Materials,2022,318: 126014.
- [15] 崔新壮,黄丹,刘磊,等.沥青路面病害力学研究进展[J].山东大学学报(工学版),2016,46(5):68-87.
- CUI Xinzhuang, HUANG Dan, LIU Lei, et al. A review of mechanics of asphalt pavement disease[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(5): 68-87.
- [16] 梁俊龙,高江平,栾亮.基于动态模量的含多裂缝沥青路面开裂分析[J].广西大学学报(自然科学版),2016,41(1): 246-252.
- LIANG Junlong, GAO Jiangping, CHANG Liang. Cracking analysis of asphalt pavement with multi-crack based on dynamic modulus[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2016,41(1):246-252.
- [17] 艾长发,徐铖,任东亚,等.移动荷载下沥青路面双 Top-Down 裂纹扩展特性[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(2):235-242.
- AI Changfa, XU Cheng, REN Dongya, et al. Characterization of double Top-Down cracking propagation in asphalt pavement under moving load[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2017,33(2):235-242.
- [18] 张兰峰.连续变温沥青路面车辙变形数值模拟[J].公路交通科技,2018,35(2):15-24.
- ZHANG Lanfeng. Numerical simulation of rutting deformation of asphalt pavement at continuous variable

- temperature[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2018,35(2):15-24.
- [19] 冯伟,刘朝晖,柳力,等.半刚性基层沥青路面车辙有限元模拟及灰关联分析[J].中外公路,2021,41(6):60-65.
FENG Wei, LIU Zhaohui, LIU Li, et al. Finite element simulation and grey correlation analysis of rutting on asphalt pavement with semi-rigid base[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6):60-65.
- [20] CHEN D H,ZHOU F J,LEE J L,et al.Threshold values for reflective cracking based on continuous deflection measurements[J].Canadian Journal of Civil Engineering, 2007,34(10):1257-1266.
- [21] ALAVI A H,HASNI H,LAJNEF N,et al.Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:719-736.
- [22] YAN G N, WANG L B, YE Z J, et al. Effects of crack damage on acceleration response of asphalt pavement via numerical analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2020,32(7):04020163-1-04020163-9.
- [23] TAN Y Q,LIANG Z D,XU H N,et al.Research on rutting deformation monitoring method based on intelligent aggregate[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2022,23(11):22116-22126.
- [24] NASIMIFAR M,SIDDHARTHAN R V,RADA G R,et al. Validation of dynamic simulation of slow-moving surface deflection measurements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016,2589(1):127-134.
- [25] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.
CCCC Road and Bridge Technology Co., Ltd.. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2017.
- [26] 马涛,廖公云,黄晓明.Abaqus有限元软件在道路工程中的应用[M].3版.南京:东南大学出版社,2021.
MA Tao, LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. Application of Abaqus finite element software in road engineering [M].3rd ed.Nanjing:Southeast University Press,2021.
- [27] 朱登元,姚占勇.含裂缝沥青路面结构轮载响应分析[J].山东大学学报(工学版),2013,43(4):74-79.
ZHU Dengyuan, YAO Zhanyong. Mechanical responses of asphalt pavement structure with a crack under wheel load [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2013,43(4):74-79.
- [28] 付国志,韦金城,赵延庆,等.沥青路面结构的动态效应对验收弯沉值的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2021,49(4):90-96.
FU Guozhi, WEI Jincheng, ZHAO Yanqing, et al. Influence of asphalt pavements' dynamic effects on the surface acceptance deflection[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2021, 49(4):90-96.
- [29] SUN Z J,KASBERGEN C,SKARPAS A,et al.A nonlinear spectral element model for the simulation of traffic speed deflectometer tests of asphalt pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23(4):1186-1197.
- [30] 严明星,王金昌.ABAQUS有限元软件在路面结构分析中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2016.
YAN Mingxing, WANG Jinchang. Application of ABAQUS finite element software in pavement structural analysis[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press,2016.