

基于ABAQUS的水平荷载对路面力学响应影响分析

许 勇, 张 晓, 赵昌勇

山东高速集团有限公司, 沾临项目办, 山东 滨州

收稿日期: 2022年1月20日; 录用日期: 2022年2月22日; 发布日期: 2022年2月28日

摘 要

国内沥青路面设计方法中, 只考虑了轮载的垂直力的作用, 对水平荷载作用的考虑较少。而实际情况下, 水平荷载作用是路面表面发生病害的重要原因之一。本文基于弹塑性力学基本知识, 利用三维有限元方法, 分别采用弹性模型和弹塑性模型, 计算了垂直荷载作用以及水平荷载作用下的沥青路面结构的力学响应, 对比分析了水平荷载对路面力学响应的影响。结果表明, 水平荷载对路面沥青层拉应变、剪应力分布有较大影响, 采用弹塑性模型比弹性模型计算得到的应变值更大。通过本文研究, 我们有效地认识了路面材料弹塑性的性质, 为相关深入的研究奠定了理论基础, 本文的研究成果也对路面结构力学响应分析的相关研究有一定的指导和借鉴意义。

关键词

ABAQUS, 沥青路面, 水平荷载, 弹塑性模型, 力学响应

Analysis of Horizontal Load Influence on Pavement Mechanical Response Based on ABAQUS

Yong Xu, Xiao Zhang, Changyong Zhao

Shandong High Speed Group, Co., Ltd., Zhanlin Project Office, Binzhou Shandong

Received: Jan. 20th, 2022; accepted: Feb. 22nd, 2022; published: Feb. 28th, 2022

Abstract

In the domestic asphalt pavement design method, only the effect of the vertical force of wheel load is considered, and less consideration is given to the effect of horizontal load. And in practice, the horizontal load action is one of the important reasons for the occurrence of diseases on the pavement surface. In this paper, based on the basic knowledge of elasto-plastic mechanics, the mechani-

cal response of the asphalt pavement structure under the action of vertical load as well as horizontal load is calculated by using the three-dimensional finite element method and the elastic model and the elasto-plastic model respectively, and the effect of horizontal load on the mechanical response of the pavement is compared and analyzed. The results show that the horizontal load has a large effect on the distribution of tensile and shear stresses in the asphalt layer of the pavement, and the strain values obtained by using the elasto-plastic model are larger than those calculated by the elastic model. Through the research of this paper, the elastic-plastic nature of the pavement material is effectively understood, and a theoretical basis is laid for the related in-depth research. The research results of this paper also have certain significance of guidance and reference for the research related to the mechanical response analysis of pavement structures.

Keywords

ABAQUS, Asphalt Pavement, Horizontal Load, Elasto-Plastic Model, Mechanical Response

Copyright © 2022 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

沥青路面因为其表面平整、行车舒适、施工期短、养护维修简便等优点，是我国高等级公路的主要路面形式[1]。当前国内沥青路面设计方法中，是以层状弹性体系为理论基础，进行路面力学响应的求解，并以此进行路面结构设计的。但实际工程中，车辆在行驶时启动、变速以及制动过程中，都会产生水平力，而当前设计方法中对此考虑的很少。当水平荷载较大时，沥青路面和结构内部将产生较大的剪应力和拉应力，使得路面出现严重的损坏[2] [3]。因此，研究水平荷载作用下的路面力学响应，明确水平力对路面结构内应力及位移的影响，具有十分重要的意义。本文基于弹塑性力学基本知识，通过利用 ABAQUS 有限元软件，分别采用弹性模型和弹塑性模型，计算垂直荷载作用以及水平荷载作用下的沥青路面结构的力学响应，进而对比分析水平荷载对路面力学响应的影响。

2. 有限元仿真分析

模型建立与初始条件设置

利用大型有限元软件 ABAQUS 进行路面结构模型的力学响应仿真分析，本文以半刚性基层沥青混凝土路面作为典型结构进行数值分析[4]，主要分析的响应指标有路表的弯沉分布、压应力分布、剪应力最大值、沥青混合料层层底拉应变、无机结合料层层底拉应力以及路基顶面的压应变等。

本文中综合考虑运算效率和精度要求，建立的有限元模型尺寸为 $6\text{ m} \times 3\text{ m} \times 6\text{ m}$ ，整个路面结构共分为六层，层间接触状态为完全连续，各层参数如表 1 所示。模型边界条件设置为底面完全固结，四个侧面均设置为该面法向轴线上的反对称边界条件。

Table 1. Structural parameters of each layer of road surface

表 1. 路面各层结构参数

层位	材料	层厚(cm)	弹模(MPa)	泊松比
上面层	SMA	4	1400	0.35
中面层	AC-20	6	1200	0.3

Continued

下面层	AC-25	8	1000	0.3
基层	CTB	40	1500	0.25
底基层	CTB	20	1500	0.25
土基	SG	-	40	0.4

根据我国《沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)规定, 沥青路面设计采用轴重为 100 kN 的单轴双轮轴载作为设计标准轴载, 采用层状弹性体系理论进行计算时, 则是以双圆均布荷载形式对路面进行作用, 其接地压强为 0.707 MPa, 双圆的半径值为 0.1065 m, 两轮轮心距为三倍半径, 作用示意图如图 1 所示。由于按照规范设计计算用的圆形作用区域不利于有限元模型的网格划分, 因此本文中根据静力等效原则, 将圆形区域等效为方形区域[5], 其中方形区域边长等于圆形区域直径, 则等效后的均布轴载大小设置为:

$$\frac{0.7 \times \pi \times 0.1065^2}{(2 \times 0.1065)^2} = 0.549779 \text{ MPa}$$

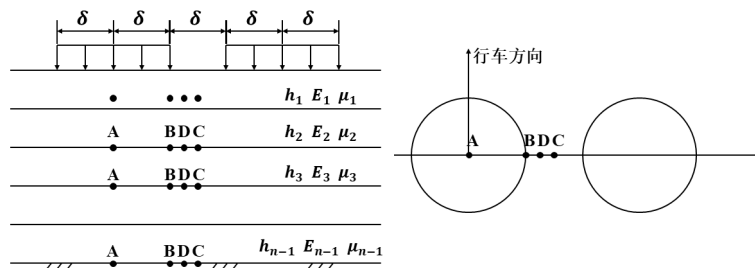


Figure 1. Schematic diagram of double-circle load action
图 1. 双圆荷载作用示意图

作用在道路区域的水平荷载按照来源主要分为车辆在行驶过程中产生的滚动摩擦力, 车辆转弯时的离心力以及由于超高的存在而产生的重力水平分力。本文主要考虑车辆行驶过程中的摩擦力对道路的影响。根据力学原理, 车辆在行驶时的滚动摩擦力以及制动时产生的滑动摩擦力, 其大小都与摩擦系数有关。正常行驶时的滚动摩擦系数可取 0.02, 缓慢制动过程中的滑动摩擦系数可取 0.1~0.3, 紧急状态下制动的摩擦系数可达 0.5 [6], 本文取滑动摩擦系数 0.2 作为水平荷载大小取值。

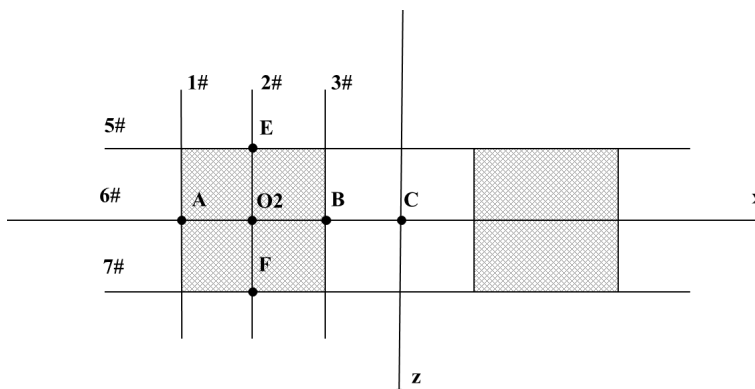


Figure 2. Schematic diagram of road structure model path division
图 2. 道路结构模型路径划分示意图

为了方便计算表示计算分析后结果,将整个模型在 XZ 平面上划分为以下几条路径,如图 2 所示。其中, Z 方向表示行车方向, X 方向表示道路横向, 阴影区域表示等效的荷载作用区域。1#、2#、3#线分别表示单个车轮荷载作用区域的外侧、中心、内侧沿行车方向的路径, 4#线为轮距中心沿行车方向的路径, 5#和 7#线则表示单个车轮荷载作用区域外侧沿道路横向的路径, 6#线表示车轮荷载中心位置沿道路横向的路径。

根据以上参数, 即可建立有限元模型。建立的道路结构模型及网格划分如图 3、图 4 所示。

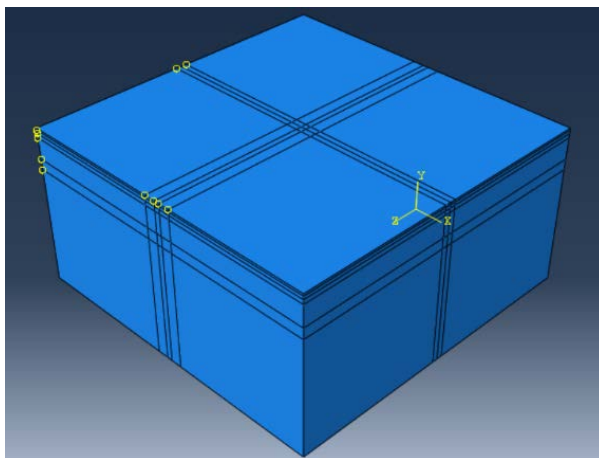


Figure 3. Finite element model of road structure

图 3. 道路结构有限元模型

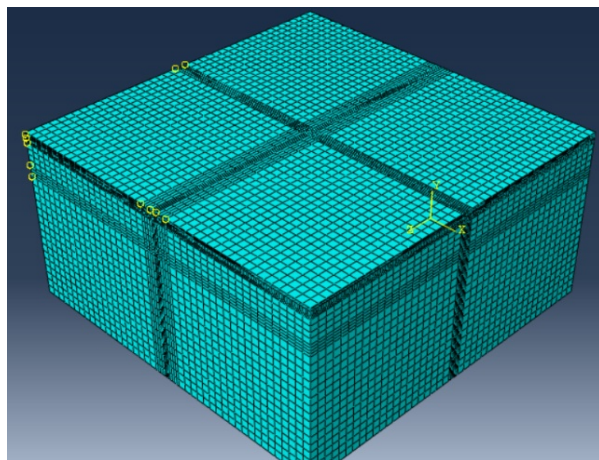


Figure 4. Finite element model meshing

图 4. 有限元模型网格划分

3. 弹性模型水平荷载作用下的影响

3.1. 路表弯沉影响

由于当前只考虑水平荷载作用在行车方向, 该情况下水平荷载在道路横向方向对道路结构的影响较小, 因此这里只考虑沿行车方向上的路径的弯沉影响。

图 5 为路表弯沉值沿着路径 2#的分布情况, 对比无水平荷载作用和有水平荷载作用的路表弯沉值分布图, 可以看出, 水平荷载作用会使得路表弯沉值发生一定变化, 无水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.212 mm, 位置为 $Z = 0$ 处(即车轮荷载作用中心), 且荷载关于车轮荷载中心道路横向对称(即 $Z = 0$

方向), 荷载有水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.213 mm, 位置为 $Z = 0.0267$ m 处, 总体路表弯沉值会向水平荷载的作用方向发生一定偏移。

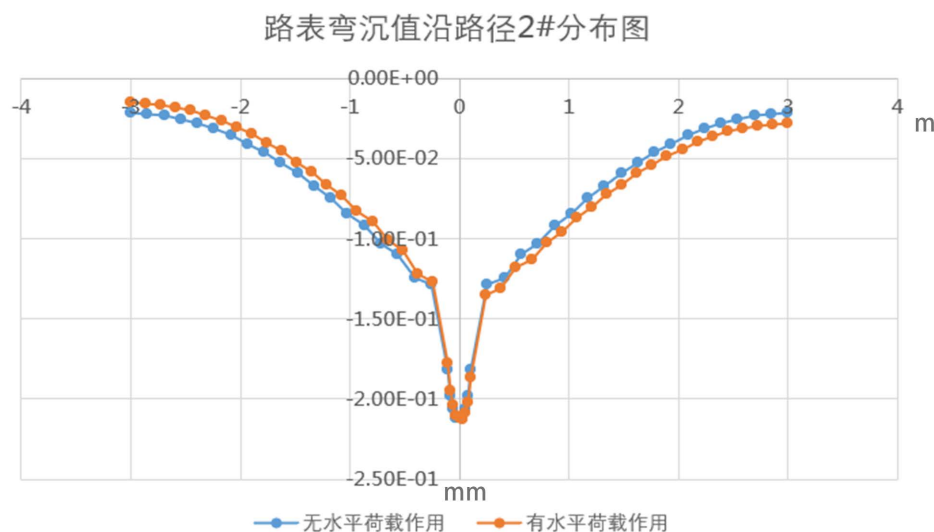


Figure 5. Distribution map of Road surface bending values along path 2#

图 5. 路表弯沉值沿路径 2# 分布图

综上所述可以看出, 水平荷载作用对路表弯沉的数值大小影响不大, 但是会影响路表弯沉产生的位置, 会使得整体弯沉分布向着水平荷载的作用方向发生偏移。因此, 考虑水平荷载后不会过于影响弯沉带来的路面病害问题。

3.2. 压应力影响

由于水平荷载作用与行车方向, 因而在道路横向的影响较小, 这里考虑沿行车方向上的影响, 分别选取沿 2# 路径下的路表、上面层层底、中面层层底和下面层层底的压应力分布图, 如图 6~9 所示。

从图中可以看出, 考虑水平荷载的影响对压应力的大小总体来说无明显影响, 但是会影响到压应力的位置分布。其中, 对于路表的压应力分布, 水平荷载几乎没有影响, 压应力仍关于车轮荷载中心道路横向呈对称分布; 对于上面层、中面层和下面层, 当考虑到水平荷载作用影响时, 会使得压应力的分布向水平荷载的作用方向偏移, 且压应力分布不再呈堆成状态, 压应力的峰值也由于水平里的作用有所增大, 但增大幅值并不大。如不考虑上面层的压应力幅值为 -0.548649 MPa, 位置位于 $Z = 0$ 处; 当考虑了水平荷载影响后, 其幅值为 -0.548775 MPa, 其位置位于 $Z = 0.003$ m 处。

3.3. 沥青层层底拉应变影响

由于水平荷载作用与行车方向, 因而在道路横向的影响较小, 这里考虑水平荷载对沥青层各层的拉应变沿行车方向上的影响, 分别选取沿 2# 路径下的路表、上面层层底、中面层层底和下面层层底的拉应变分布图, 如图 10~13 所示。

从图中可以看出, 水平荷载作用的影响对于拉应变的分别影响是比较大的。当作用有水平荷载时, 拉应变不再是只作用有垂直荷载的呈轴对称分布的状态。在路表处, 原先路表处不产生拉应变, 由于水平荷载的作用, 路表处就有拉应变的产生, 其大小可以达到 $100 \mu\epsilon$, 其位置位于水平荷载作用方向反向一侧。相关研究表明, 当水平荷载越大时, 在路表处产生的拉应变也越大; 在上面层、中面层、下面层层底, 可以看出随着深度的增加, 水平荷载作用对拉应变峰值的影响在逐渐减小。

路表压应力沿路径2#分布图

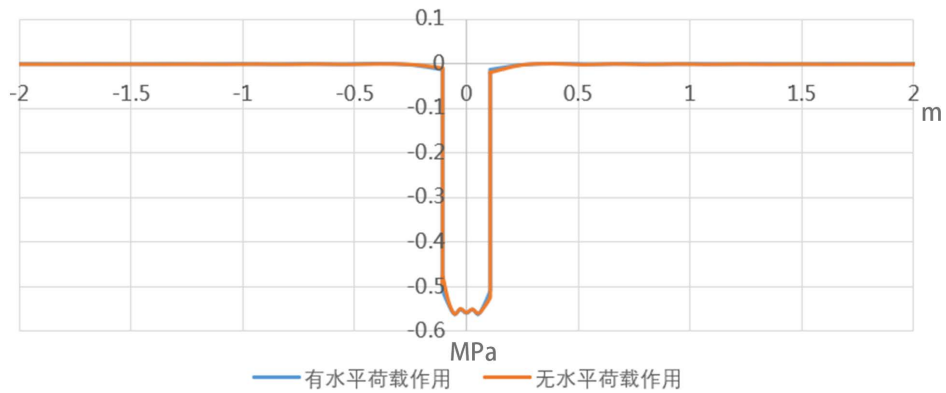


Figure 6. Distribution map of road surface compressive stress along path 2#
图 6. 路表压应力沿 2#路径分布图

上面层层底压应力沿路径2#分布图

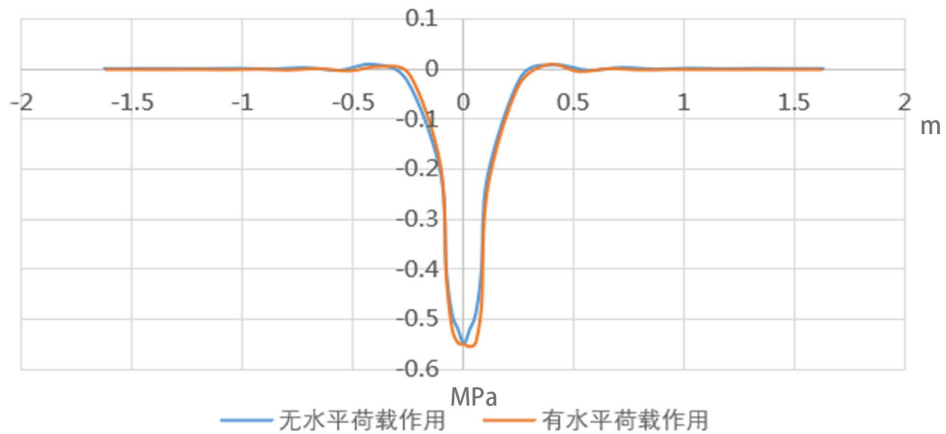


Figure 7. Distribution map of compressive stress at the bottom of the upper layer along path 2#
图 7. 上面层层底压应力沿 2#路径分布图

中面层层底压应力沿路径2#分布图

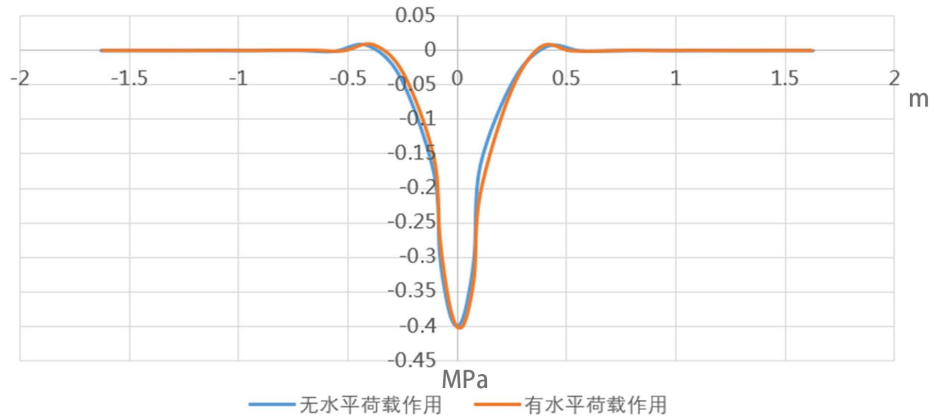


Figure 8. Distribution map of compressive stress at the bottom of the middle layer along path 2#
图 8. 中面层层底压应力沿 2#路径分布图

下面层层底压应力沿路径2#分布图

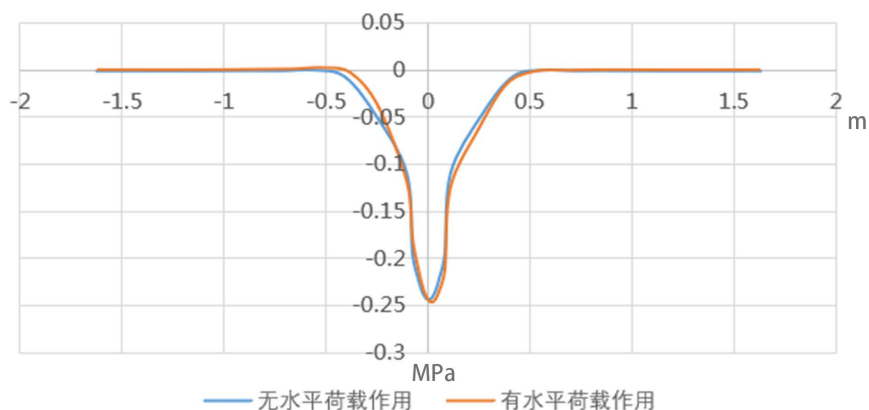


Figure 9. Distribution map of compressive stress at the bottom of the lower layer along path 2#
图 9. 下面层层底压应力沿 2#路径分布图

路表拉应变沿路径2#分布图

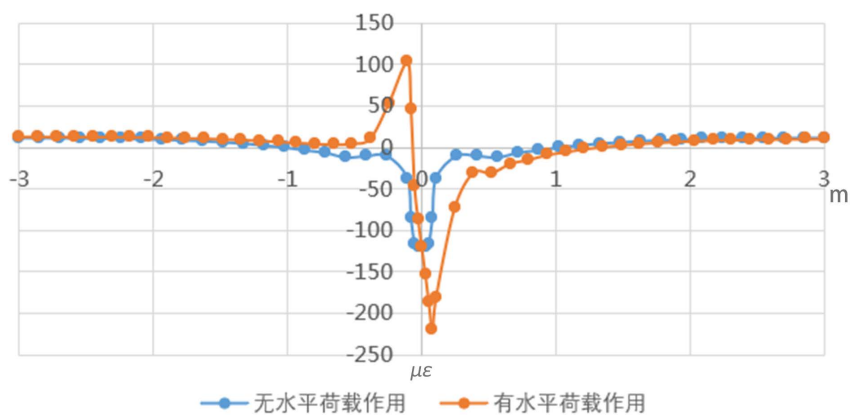


Figure 10. Distribution map of road surface tension strain along path 2#
图 10. 路表拉应变沿 2#路径分布图

上面层层底拉应变沿路径2#分布图

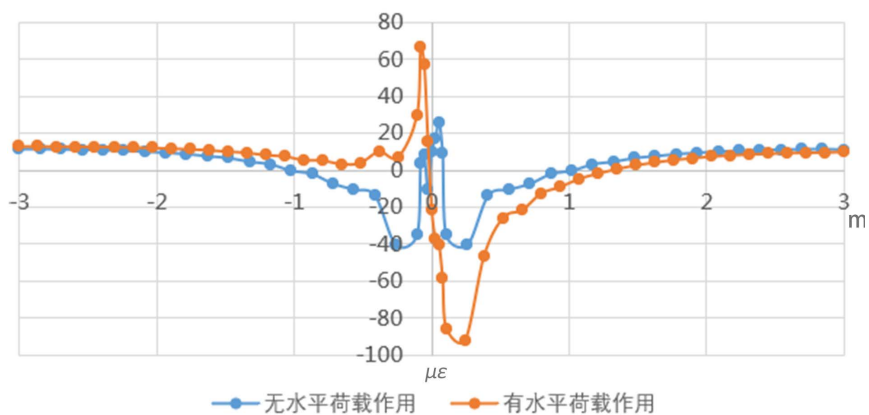


Figure 11. Distribution map of tensile strain at the bottom of the upper layer along path 2#
图 11. 上面层层底拉应变沿 2#路径分布图

中面层层底拉应变沿路径2#分布图

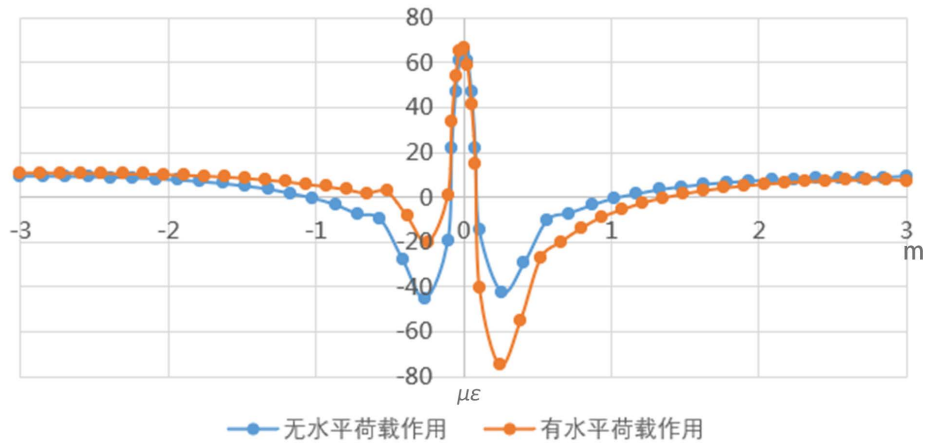


Figure 12. Distribution map of tensile strain at the bottom of the middle layer along path 2#
图 12. 中面层层底拉应变沿 2# 路径分布图

下面层层底拉应变沿路径2#分布图

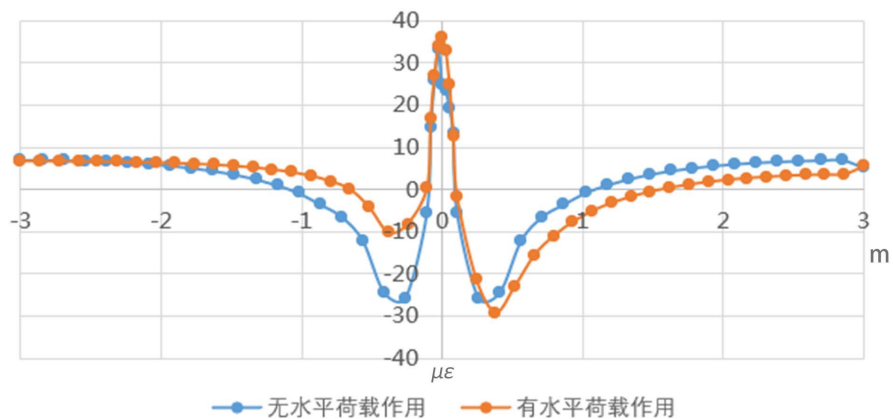


Figure 13. Distribution map of tensile strain at the bottom of the lower layer along path 2#
图 13. 下面层层底拉应变沿 2# 路径分布图

综上, 考虑到水平荷载的作用, 沥青表面层将会产生拉应变, 其位置位于水平荷载作用方向的反侧, 因此, 在交叉口等车辆制动次数较多, 制动力较大的区域, 要考虑到由于水平荷载作用的影响引起的沥青表面层和上面层的疲劳破坏。随着深度增加, 水平荷载作用对拉应变的影响将逐渐变小。

3.4. 剪应力影响

无水平荷载作用以及考虑水平荷载作用的路面结构最大剪应力云图分别如图 14、图 15 所示。

从图中可以看出, 水平荷载作用将会使得最大剪应力分布略微产生一点偏移, 原先最大剪应力分布呈轴对称状态, 考虑水平荷载作用, 最大剪应力分布将发生偏移, 总体上是朝着水平荷载作用方向偏移。值得注意的是, 相较于只作用竖向荷载时, 考虑水平荷载作用时整个路面的最大剪应力位置将发生改变, 原先位置位于沥青中面层(路表下 4~8 cm), 其值为 0.3636 MPa; 考虑水平荷载作用后, 其最大剪应力将可能会产生在路表层, 其值为 0.4254 MPa, 且峰值随着水平荷载的增大而增大。

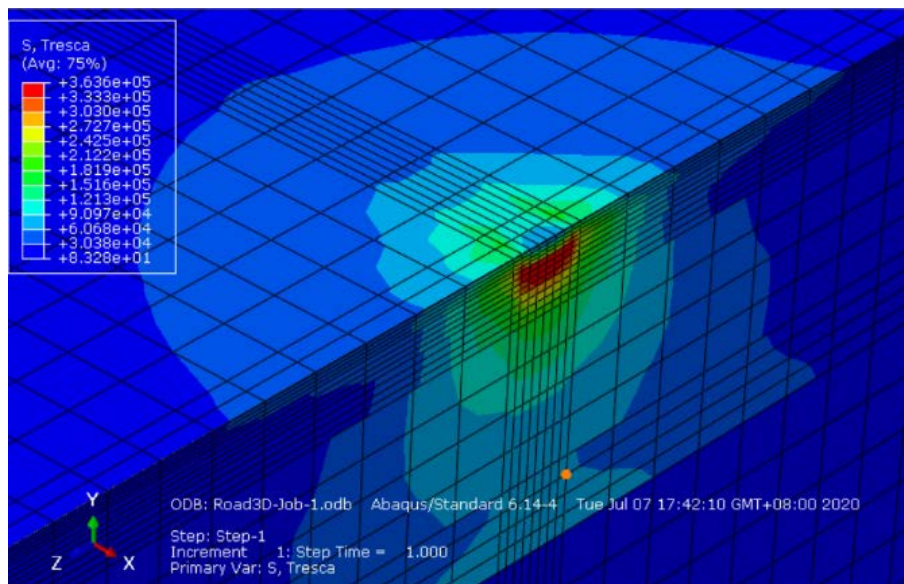


Figure 14. Nephogram of maximum shear stress without horizontal load (unit: Pa)

图 14. 无水平荷载作用下最大剪应力云图(单位: Pa)

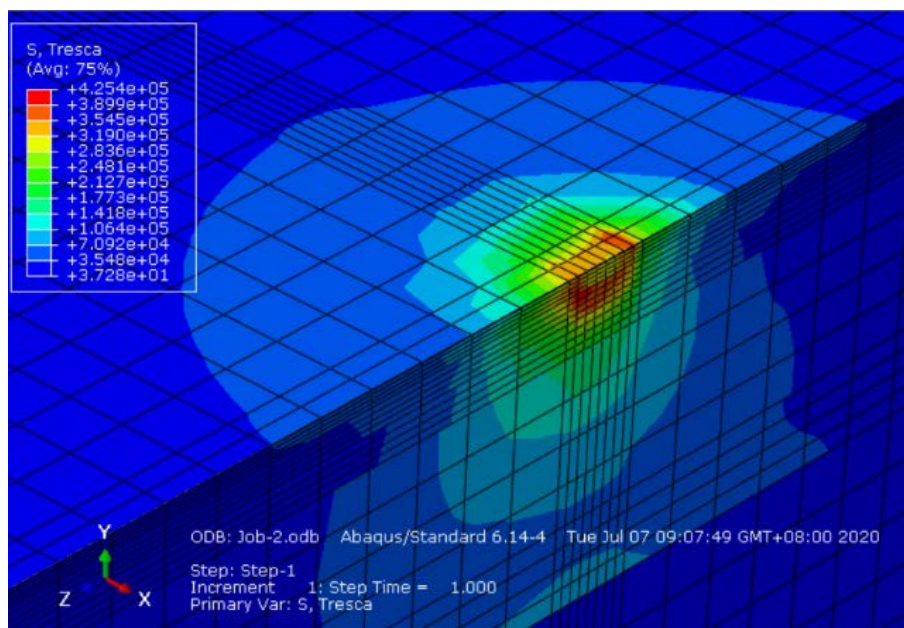


Figure 15. Nephogram of maximum shear stress with horizontal load (unit: Pa)

图 15. 有水平荷载作用下最大剪应力云图(单位: Pa)

综上所述可以看出, 水平荷载作用对最大剪应力分布发生变化, 尤其是最大剪应力位置将可能会发生改变。这直接影响到对路表面的破坏, 加速造成车辙、推挤、拥包等由于抗剪强度不足导致的病害。因此, 在交叉口、公交站台等制动频繁的交通场所, 尤其要注意水平荷载作用带来的路表剪应力增大而产生的病害。

4. 弹塑性模型水平荷载作用下的响应

沥青材料具有一定的弹塑性性质, 因此本文采用 Drucker-Prager 描述沥青塑性性质, 来探究考虑弹

塑性情况下水平荷载对路面结构的力学响应影响以及弹性模型和弹塑性模型的响应区别，主要采用的指标有路表弯沉值、沥青各层层底竖向压应变，沥青各层层底拉应变以及剪应力分布情况。

本文建立的有限元模型中，塑性参数参考相关研究，其取值如表 2 所示。

Table 2. Structural parameters of each layer of road

表 2. 路面各层结构参数

层位	材料	层厚(cm)	弹模(MPa)	泊松比	内聚力(MPa)	摩擦角(°)
上面层	SMA	4	1400	0.35	0.651	35
中面层	AC-20	6	1200	0.3	0.543	32.5
下面层	AC-25	8	1000	0.3	0.435	30
基层	CTB	40	1500	0.25		
底基层	CTB	20	1500	0.25		
土基	SG	-	40	0.4		

采用线形的 Drucker-Prager 模型，其流动势偏心率设置为默认值 0.1，流应力比值设置为 1，沥青各层材料的膨胀角取为 0°。真实应力 - 塑性应变值采用试验数据输入，参考相关研究的单轴拉伸试验数据 [3] [8] [9]，其输入值如表 3 所示。

Table 3. Plasticity model input parameters

表 3. 塑性模型输入参数

真实应力(MPa)	塑性应变 $\times 10^{-6}$	层厚(cm)	塑性应变 $\times 10^{-6}$
0.055	0	0.18	3.4
0.1	1.0	0.20	5.0
0.15	1.8	0.22	12.0

依据上述参数，在 ABAQUS 中建立有限元模型，其余参数均采用与弹性模型相同的值。建立好的模型及网格划分与图 3、图 4 基本相同。

4.1. 路表弯沉影响

路表弯沉值沿路径 2# 分布图

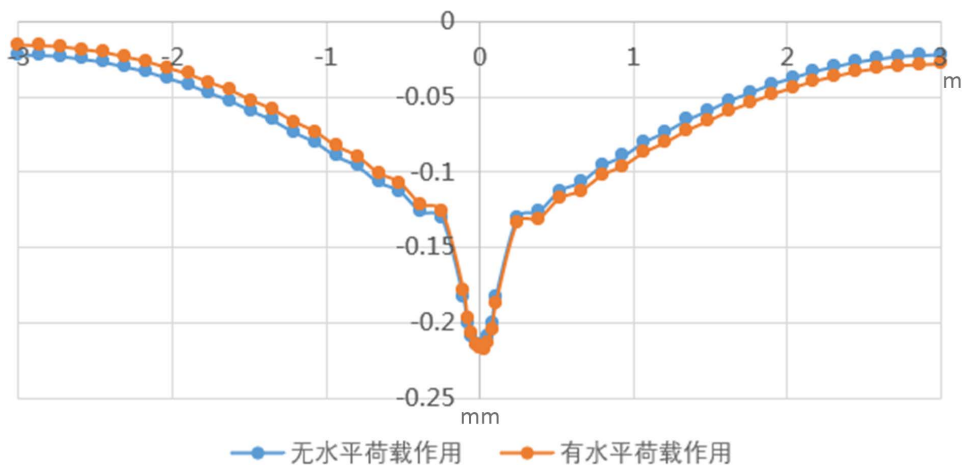


Figure 16. Distribution map of road surface bending values along path 2#

图 16. 路表弯沉值沿路径 2# 分布图

路表弯沉值沿 2 号路径的分布图如图 16 所示。从图中可以看出,在弹塑性模型下,水平荷载作用对压应力的大小的影响总体来说影响不大,略微影响到路表弯沉值的位置分布。考虑水平荷载影响后,路表弯沉值不再呈轴对称分布状态,而是会朝着水平荷载作用方向发生一定偏移。水平荷载越大,偏移幅度越大,且水平荷载作用略微改变了最大弯沉的幅值,无水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.2149 mm,位置为 $Z = 0$ 处(即车轮荷载作用中心),且荷载关于车轮荷载中心道路横向对称(即 $Z = 0$ 方向),荷载有水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.2176 mm,位置为 $Z = 0.0267$ m 处。

4.2. 各面层竖向压应变影响

考虑水平荷载对路面结构面层的层顶竖向压应变的影响,在有限元模型中,选取弹性压应变 EE22 和塑性压应变 PE22 为指标,考察采用弹塑性模型描述沥青面层性质时的竖向压应变分布情况。路表、上面层层底、中面层层底、下面层层底处的竖向压应变分布图如图 17~20 所示。

路表竖向压应变沿路径 2#分布图

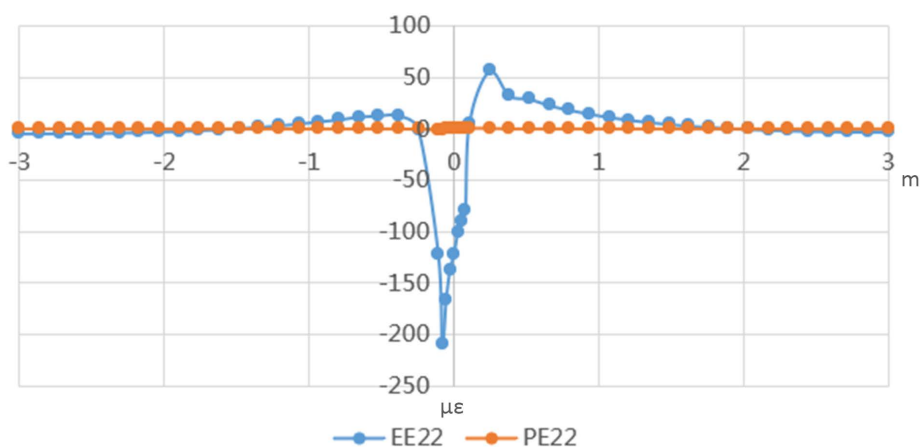


Figure 17. Distribution map of road surface vertical compressive strain along path 2#

图 17. 路表竖向压应变沿路径 2#分布图

上面层底部竖向压应变沿路径 2#分布图

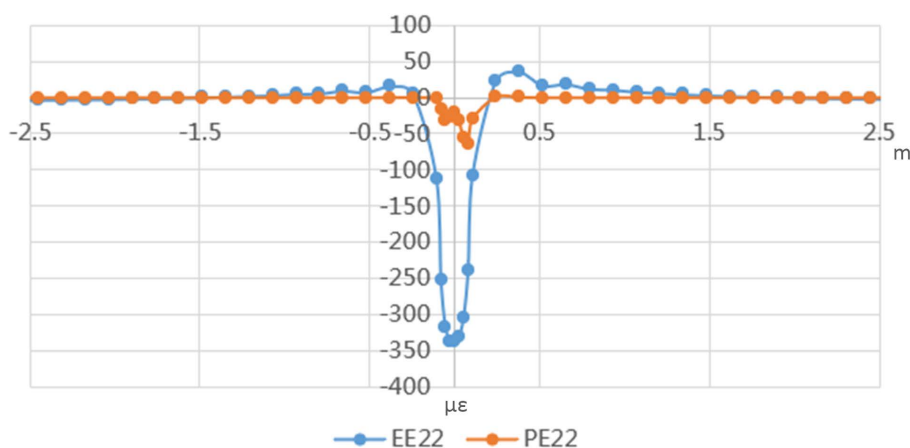


Figure 18. Distribution map of compressive strain at the bottom of the upper layer along path 2#

图 18. 上面层层底竖向压应变沿路径 2#分布图

中面层底部竖向压应变沿路径2#分布图

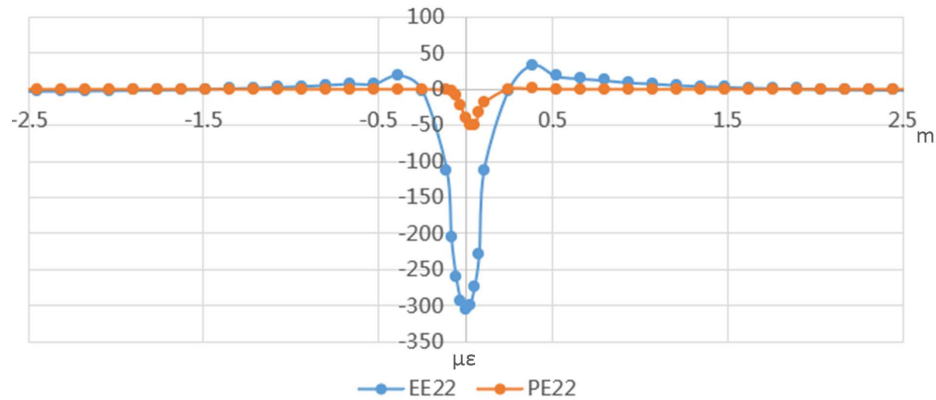


Figure 19. Distribution map of compressive strain at the bottom of the middle layer along path 2#
 图 19. 中面层层底竖向压应变沿路径 2#分布图

下面层底部竖向压应变沿路径2#分布图

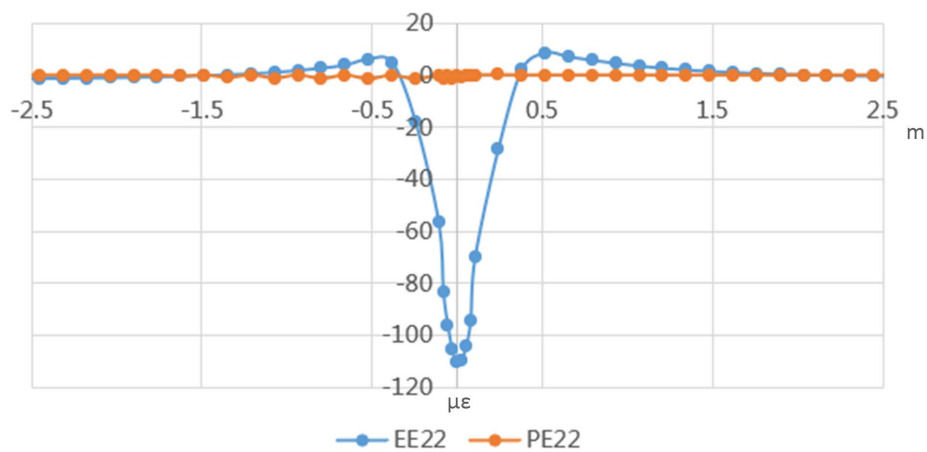


Figure 20. Distribution map of compressive strain at the bottom of the lower layer along path 2#
 图 20. 下面层层底竖向压应变沿路径 2#分布图

从上图中可以看出，当考虑弹塑性模型后，路面结构层中将会产生一定的塑性变形。其中，在路表位置处产生的塑性应变较少，主要还是弹性应变，在上面层层底和中面层层底有一定的塑性应变产生，其幅值可以达到约 $50 \mu\epsilon$ 。弹性压应变分布总体呈 V 型分布，但由于水平荷载影响其分布不是轴对称状态。竖向压应变的幅值产生在上面层层底处，其大小为 $338.607 \mu\epsilon$ 。

4.3. 沥青层层底拉应变影响

当采用弹塑性模型描述沥青材料特性时，考虑其对沥青各层层底拉应变的影响。选择有限元模型中的弹性拉应变 EE33 和塑性拉应变 PE33 作为分析指标，路表及沥青各面层层底的拉应变沿着 2 号路径分布图如图 21~24 所示。

从图中可以分析得出，采用弹塑性模型时，在沥青各面层层底将会出现塑性拉应变。其中，在路表处和下面层层底处的塑性应变较小，主要是弹性变形，在中面层、上面层层底处有一定的塑性变形，其幅值约为 $20 \mu\epsilon$ 。由于水平荷载的影响，各层层底拉应变的幅值较车轮荷载作用区域间隙中心位置

都有一定的偏移，一般朝着水平荷载作用方向的反向偏移，且随着深度增加，水平荷载的影响逐渐减少。最大拉应变出现在路表 $Z = -0.1065 \text{ m}$ 处，大约是车轮荷载作用区域的内侧边缘位置处，其大小为 $110.917 \mu\epsilon$ 。

4.4. 剪应力影响

无水平荷载作用以及考虑水平荷载作用的路面结构最大剪应力云图分别如图 25、图 26 所示。

从图中可以看出，水平荷载作用将会使得最大剪应力分布略微产生一点偏移，原先最大剪应力分布呈轴对称状态，考虑水平荷载作用，最大剪应力分布将发生偏移，总体上是朝着水平荷载作用方向偏移。值得注意的是，相较于只作用竖向荷载时，考虑水平荷载作用时整个路面的最大剪应力位置将发生改变，原先位置位于沥青中面层(路表下 4~8 cm)，其值为 0.3553 MPa ；考虑水平荷载作用后，其最大剪应力将可能会产生在路表层，其值为 0.4126 MPa ，且峰值随着水平荷载的增大而增大。

路表拉应变沿路径2#分布图

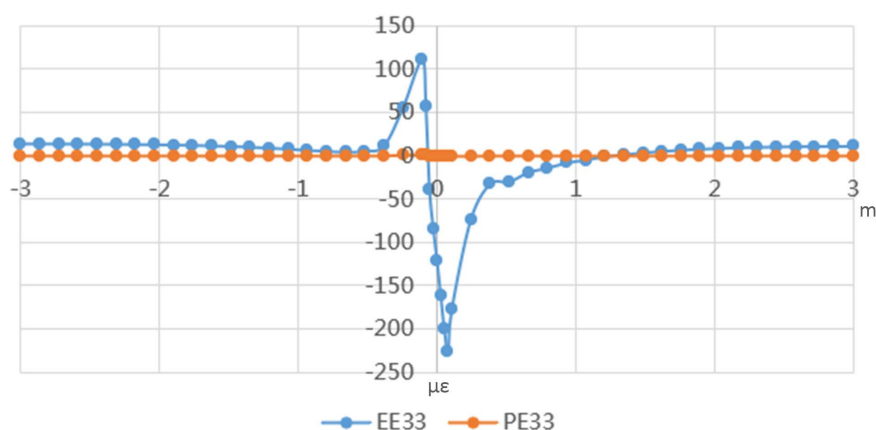


Figure 21. Distribution map of road surface tension strain along path 2#

图 21. 路表拉应变沿路径 2#分布图

上面层层底拉应变沿路径2#分布图

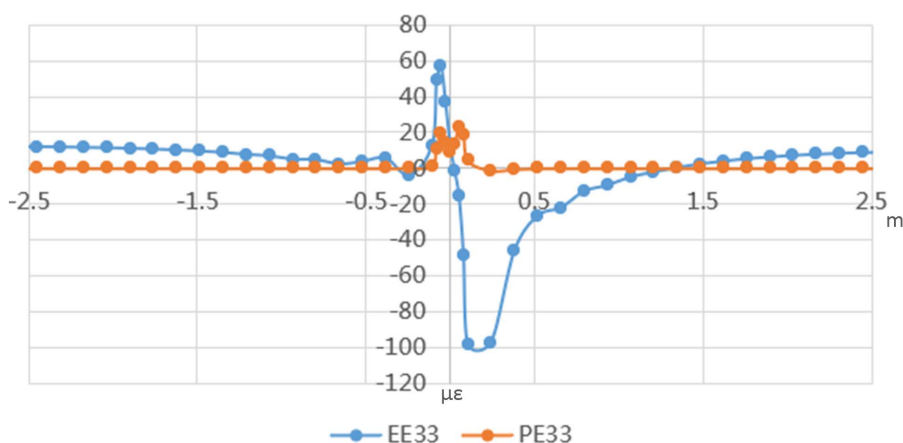


Figure 22. Distribution map of tensile strain at the bottom of the upper layer along path 2#

图 22. 上面层层底拉应变沿路径 2#分布图

4.5. 弹性 - 弹塑性模型结果比较

对于路表位置处的弯沉值，弹性模型中，无水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.212 mm，位置为 $Z = 0$ 处，有水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.213 mm，位置为 $Z = 0.0267$ m 处；弹塑性模型中，无水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.2149 mm，位置为 $Z = 0$ 处，有水平荷载作用的路表弯沉的最大值为 0.2176 mm，位置为 $Z = 0.0267$ m 处。可以看出，采用弹塑性模型计算得到的弯沉值要比采用弹性模型计算得到的弯沉值大。

对于沥青各面层层底的压应变，综合比较分析图 10~13 以及图 21~24 的拉应力分布图，可以看出，在水平荷载作用下，采用弹性模型和弹塑性模型沥青各面层层底的拉应力分布趋势大抵相同，但由于弹塑性模型中塑性变形的存在，使得弹塑性模型的弹性拉应变比弹性模型的拉应变要大，大的幅度随着深入增加而减小。

中面层层底拉应变沿路径2#分布图

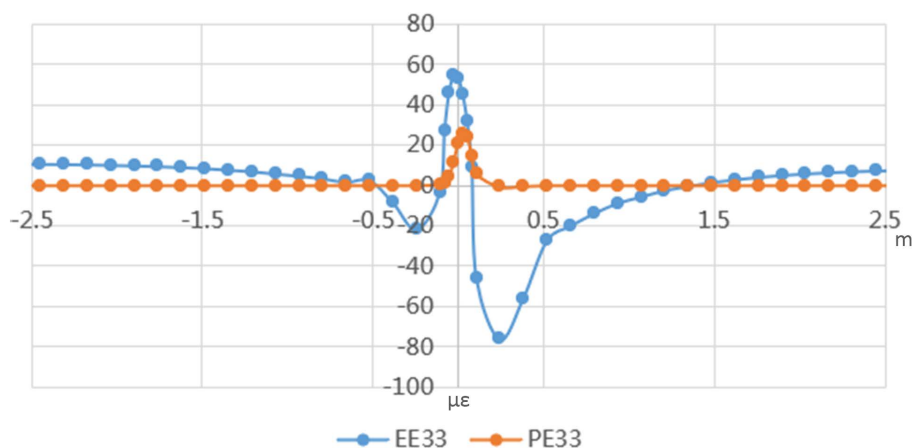


Figure 23. Distribution map of tensile strain at the bottom of the middle layer along path 2#
图 23. 中面层层底拉应变沿路径 2#分布图

下面层层底拉应变沿路径2#分布图

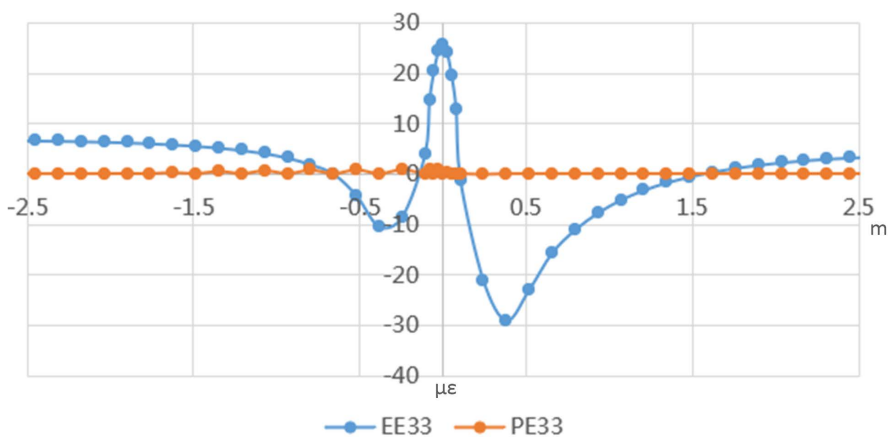


Figure 24. Distribution map of tensile strain at the bottom of the lower layer along path 2#
图 24. 下面层层底拉应变沿路径 2#分布图

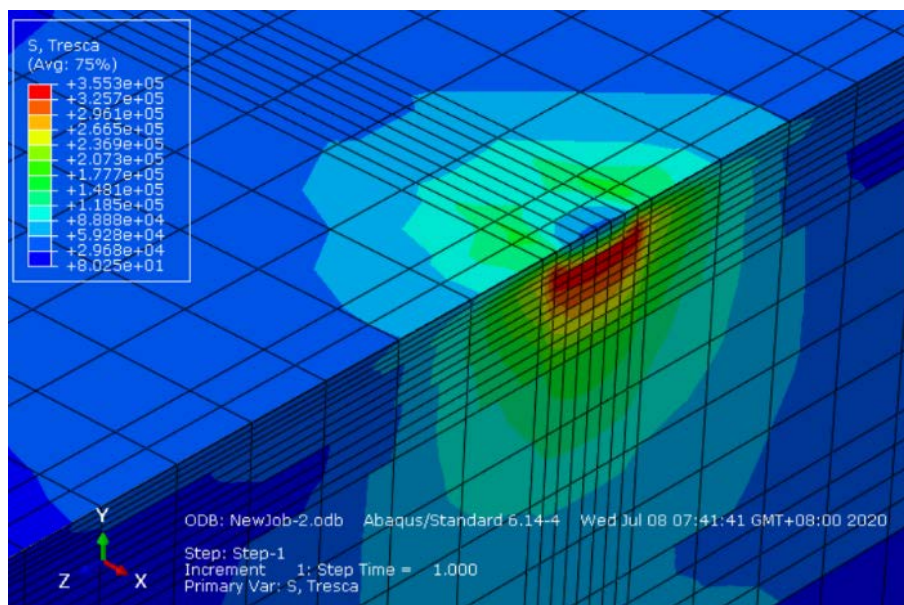


Figure 25. Nephogram of maximum shear stress without horizontal load (unit: Pa)

图 25. 无水平作用下最大剪应力云图(单位: Pa)

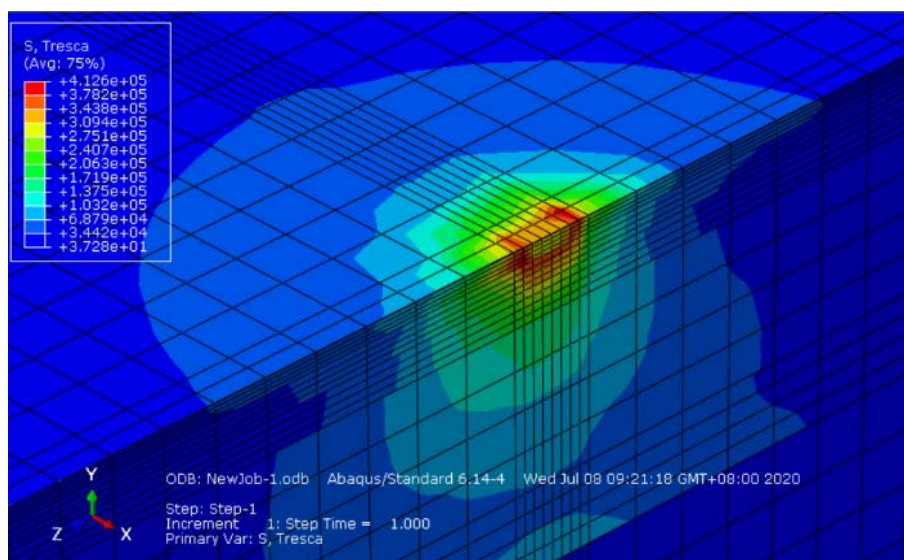


Figure 26. Nephogram of maximum shear stress with horizontal load (unit: Pa)

图 26. 有水平作用下最大剪应力云图(单位: Pa)

对于剪应力的分布情况, 采用弹性模型和弹塑性模型时的剪应力分布趋势相同, 采用弹塑性模型的最大剪应力值比弹性模型的最大剪应力值要略小。

5. 结论

本文通过探讨水平荷载对路面结构的影响, 从弹性力学角度探讨了水平荷载作用下路面结构响应的力学求解, 并用有限元软件 ABAQUS 通过建立弹性和弹塑性模型, 分析了考虑水平荷载作用前后相关力学指标的变化情况, 以及采用弹性模型和弹塑性模型的力学响应差异。

从本文中的研究成果可以看出, 当考虑水平荷载作用后, 影响较大的响应有: ①沥青各面层的拉应

变分布将产生较大变化,路表面层将会产生拉应变,其位置位于水平荷载作用方向的反侧;②道路结构的剪应力分布将产生较大变化,整个路面的最大剪应力位置将发生改变,原先位置位于沥青中面层(路表下 4~8 cm),考虑水平荷载作用后,其最大剪应力将可能会产生在路表层。因此,在考虑水平荷载后,需要注意路表的拉应变和剪应力变化,将会导致路表容易发生疲劳破坏以及剪切破坏。对于采用弹性模型和弹塑性模型的差异,采用弹塑性模型在沥青各层层底竖向压应变以及拉应变均比弹性模型要大。因此,采用弹塑性模型更接近实际受力状态,计算结果较大,用于道路结构设计也更为安全。

由于本研究仅仅是对理论求解进行了解,利用有限元软件进行仿真分析,因此仍有一些不足以及一些工作有待进一步进行:①建模过程没有考虑到沥青材料的黏性性质;②由于条件限制,本文中对于沥青混合料的塑性参数并未完全进行现场试验测量;③本文中未考虑紧急制动情况以及车辆转向时产生水平荷载的情况。

参考文献

- [1] 王前东. 水平荷载作用下沥青路面力学响应数值分析[J]. 公路与汽运, 2012(4): 133-136.
- [2] 王志红, 杨旭红. 基于重载及水平荷载的不同类型沥青路面力学响应分析[J]. 公路, 2019, 64(12): 21-26.
- [3] 周兴业, 王旭东, 张年梅. 基于弹性半空间体的水平荷载与垂直荷载非线性叠加条件下沥青路面结构受力分析[C]//中国力学学会. 第 19 届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 工程力学杂志社, 2010: 584-588.
- [4] 曹猛. 高等级沥青路面动力响应仿真与试验研究分析[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013.
- [5] 胡小弟, 孙立军. 考虑非均布轮载效应时超载对沥青路面结构的力学影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003(2): 32-36.
- [6] 包聪灵. 重载作用下半刚性基层沥青路面的力学响应分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [7] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2014.
- [8] 肖军, 彭妙娟. 沥青路面弹塑性动力响应分析[J]. 力学季刊, 2018, 39(2): 374-382.
- [9] 李朋. 基于局部应变的沥青路面力学分析及其疲劳寿命预估研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.