

文章编号:1672-9331(2018)03-0054-10

基于荷载影响区域下不同形状轮载的等效性

李友云¹, 罗磊¹, 胡迪², 蔡彰³

(1.长沙理工大学 交通运输学院, 湖南 长沙 410114; 2.广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530022;
3.云南省建设投资控股集团有限公司, 云南 昆明 650501)

摘要: 为了研究不同形状轮载的等效性,通过有限元数值模拟分析方法,得到了沥青路面在不同形状轮载作用下的力学响应。分别从路面横断面、行车和路面深度三个方面,研究了方形轮载、矩形轮载与圆形轮载作用下的荷载影响区域。并从影响区域角度出发,比较了三者的应力与位移值。研究结果表明,三种轮载作用下的路面力学响应非常接近,荷载影响区域具有良好的重复性,三种轮载具有良好的等效性;由于网格划分等原因需要选用圆形轮载的等效轮载时,方形轮载与矩形轮载都较为可行。

关键词: 沥青路面; 数值模拟; 有限元方法; 荷载影响区域; 力学响应; 等效轮载

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

Equivalence about different shapes of wheel loads with influence area

LI You-yun¹, LUO Lei¹, HU Di², CAI Zhang³

(1.School of Traffic and Transportation Engineering,Changsha University of Science and Technology,Changsha 410114,China; 2.Guangxi Communication Investment Group Co. Ltd., Nanning 530022,China;
3.Yunnan Construction Investment Holding Group Co. Ltd., Kunming 650501,China)

Abstract: In order to study the equivalence of wheel load in different shapes, by means of finite element numerical simulation analysis, the mechanical response of asphalt pavement under different shape wheel load is obtained, and the load influence region of square wheel load, rectangular wheel load and circular wheel load are studied from three directions of pavement cross-section, driving and road depth respectively. The stress and displacement values of the three were compared from the influence of the region. The results show that the mechanical response of three kinds of wheel load is very close to the surface, and the load influence area has good repeatability, three kinds of wheel load have good equivalence, because the grid partition and so on need to choose the equivalent wheel load of circular wheel load, both the square wheel load and rectangular wheel load are feasible.

Key words: asphalt pavement; numerical simulation; finite element method; load affected area; mechanical response; equivalent load

路面结构力学响应分析是研究路面破坏机理的主要方法。当前,我国沥青路面分析与设计方

法多是基于多层弹性理论和静态响应分析的。然而沥青混合料作为一种典型的黏弹性材料,有着

收稿日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(511072041)

通讯作者:李友云(1973-),男,湖南益阳人,长沙理工大学教授,博士,主要从事道路工程方面的研究。E-mail:liy-ouyun8@hotmail.com

与线弹性材料完全不同的本构关系;另外,由于路面结构表面的不平整性,车辆行驶状态下对路面施加的是典型的动态荷载。按照传统简化处理方法,不可避免地会造成分析结果和路面结构实际行为的偏差。因此,越来越多的学者开始对路面结构进行黏弹性动态分析,如:任俊达等^[1]开展了路面结构力学仿真方法及力学响应特征研究,建立了基于实测参数的典型半刚性基层沥青路面三维黏弹有限元仿真模型,对路面结构内部的力学响应规律进行了分析;李洪印^[2]选用两种黏弹性本构模型表征沥青混合料的非线性特性,基于室内单轴静载蠕变分别获取两种模型的参数,运用有限元软件模拟蠕变试验过程,进而分析不同模型在数值分析中的适用性,揭示了不同黏弹性本构模型在沥青路面永久变形数值模拟中的差异。林丽蓉等^[3]利用矩形波和半正弦波、钟罩形波,模拟了沥青路面沥青层不同层位在行车荷载作用下的加载波形,建立了沥青路面结构的有限元模型,研究了基于动态模量加载波形的沥青路面力学响应。

网格质量的好坏对于模型的计算精度具有很大的影响。然而想要网格质量良好的同时又要网格密度密集,那么计算成本就会非常高。因此,在使用有限元计算时,在保证网格质量好的情况下还需要保证网格的密度,使它能满足要求又不需要花费过多的计算成本^[4]。通过数值模拟方法分析动载作用下的三维黏弹性沥青路面结构时,对有限元模型的要求非常高,如果建立模型时依旧采用圆形轮载,将提高网格划分难度,并增加路面模型数值分析的计算内存及等待时间,从而影响到数值模拟分析结果。因此,目前大部分学者在进行三维黏弹性沥青路面结构动态力学响应分析时,都采用圆形轮载的等效轮载进行代替,但很少有学者验证了所采用的等效轮载与圆形轮载的等效性。

同时,国内外有部分学者致力于研究轮载作用于路面的实际接地面积,如:陈松强^[5]通过研究轮胎接地压力的分布图,发现其形式呈非轴对称性,且将其处理为双曲抛物面荷载及椭圆抛物面荷载,并在弹性半空间体系下将其与圆形荷载作用下的力学响应进行了对比分析;Smail Hamlat 等^[6]提出了一种测量局部压力分布和轮胎与地面

道路之间的真实接触面积的方法。这些学者的研究重点都在轮胎的实际接地面积,因此提出的轮载接地形状十分复杂,有些在考虑轮胎花纹等情况下提出的接地形状,比圆形荷载更为复杂,如果用于有限元分析会进一步加大网格划分的难度。

因此,作者以沥青路面结构动态力学响应分析时所采用的圆形轮载的等效轮载为研究对象,从荷载影响区域角度出发,运用有限元软件,对圆形轮载及其等效轮载作用下的力学响应进行分析,探讨圆形轮载与等效轮载之间的等效性,以及采用圆形轮载的等效轮载的可行性,为沥青路面结构有限元分析提供经验与方法。

1 路面有限元模型与计算参数

1.1 模型尺寸与材料参数

考虑到路面结构三维模型在车辆荷载作用下的力学响应规律^[7],结合路面结构有限元研究文献中所采用的模型尺寸,综合确定路面模型尺寸为 $2.2\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 2.7\text{ m}$,路基计算深度取 2 m 。

不同的路面结构在轮载作用下,其内部出现的应力和应变场是不同的。本研究的主要目的在于探讨不同形状轮载作用下沥青路面内部的力学响应,所以仅选取了一种路面结构,并根据公路沥青路面设计规范中对沥青混合料适宜厚度以及各种结构层适宜厚度的规定,结合近年来国内外学者研究中所采用的路面结构,综合确定了各结构层材料与厚度,具体的道路结构示意图如图 1 所示。

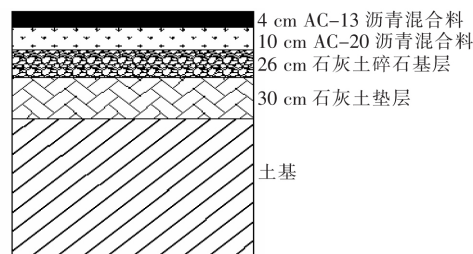


图 1 道路结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of road structure

由于本研究只针对于不同形状轮载的等效性,因此采用了多层弹性理论,将各结构层均视为弹性材料,其中,上面层采用 AC-13 细粒式沥青混合料,其材料参数通过室内试验确定,并根据公路沥青路面设计规范中对沥青混合材料与基层、

底基层材料设计参数的规定,确定其余各结构层的材料参数。各结构层的具体参数如表1所示。

表1 路面各结构层参数

Table 1 Parameters of pavement structure layer

结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
上面层	4	1 506	0.28
下面层	10	1 500	0.30
基层	26	900	0.30
底基层	30	500	0.30
土基	200	40	0.30

1.2 模型的建立

采用 ABAQUS 有限元软件,根据模型尺寸及各结构层厚度,建立的沥青路面结构数值模型如图2(路面模型的坐标原点为土基边缘线交点处)所示,其中, x 方向为路面横断面方向; y 方向为行车方向; z 方向为路面深度方向。

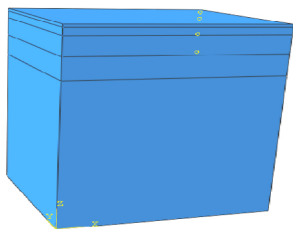


图2 路面数值模型

Fig. 2 Pavement numerical model

2 模型的赋值与轮载尺寸的确定

2.1 边界条件与网格划分

路面模型的尺寸采用以上数据,材料属性也赋予相应的值。数值建模时,ABAQUS 软件中的1,2,3方向分别代表三维模型的 x, y, z 三个方向。模型边界条件均假设为:底面无 z 方向位移($U_3=0$),前后侧无 y 方向位移($U_2=0$),左右侧无 x 方向位移($U_1=0$)。网格划分时,上面层以下各层网格形式采用六面体,上面层面上由于需要画出荷载的作用区域,故根据实际情况划分。

2.2 轮载尺寸

网格划分完成后赋予模型不同形状的轮载,进而研究路面在标准轮压下不同形状轮载的等效性。根据轮载接地面积相等原则,结合以往研究中所采用的等效轮载的形状与尺寸^[7-10],综合确

定三种不同形状轮载尺寸如下:标准单轮传压面当量圆直径 $d=21.3\text{ cm}$,接触面面积为 356.15 cm^2 ,双轮中心距离为 $1.5d$;等效方形轮载施载区域为 $18.9\text{ cm} \times 18.9\text{ cm}$,接触面面积为 357.21 cm^2 ,双轮中心距离为 32 cm ;等效矩形轮载施载区域为 $24\text{ cm} \times 15\text{ cm}$,接触面面积为 360 cm^2 ,双轮中心距离亦为 32 cm 。标准轮压取为 0.7 MPa ,各形状轮载都采用均布荷载计算,均布荷载大小与轮压一致。荷载形状类型及网格划分(以圆形荷载为例)如图3~6所示。

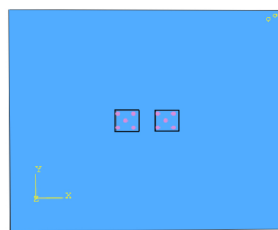


图3 方形荷载示意图

Fig. 3 Square load diagram

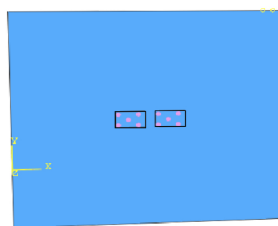


图4 矩形荷载示意图

Fig. 4 Rectangular load diagram

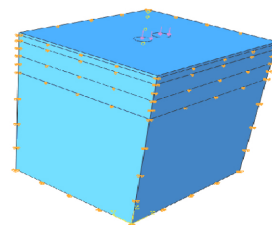


图5 圆形荷载及边界条件

Fig. 5 Circular load and boundary condition

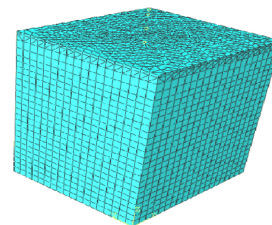


图6 圆形荷载网格划分

Fig. 6 Mesh division under circular load

3 数值模拟结果与分析

根据圆形轮载作用下的应力、位移值,研究圆形轮载作用下的荷载影响区域。并以此为基础,进一步研究轮载形状为矩形、方形的情况下对荷载影响区域的影响^[11]。由于数值模拟结果中的云图较多,这里以圆形轮载作用下的 Mises 应力云图(如图 7~10 所示)为例。

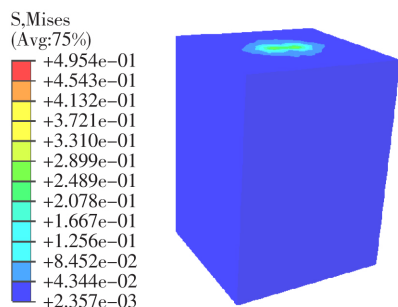


图 7 Mises 云图

Fig. 7 Mises cloud picture

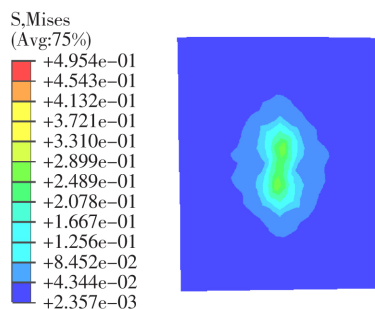


图 8 Mises— z 切片

Fig. 8 Mises— z section cloud picture

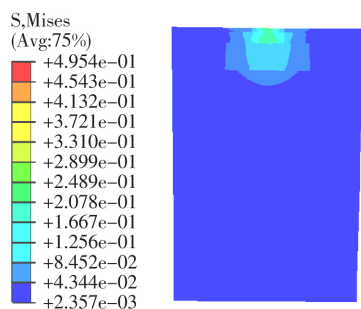


图 9 Mises— x 切片

Fig. 9 Mises— x section cloud picture

为进一步研究不同形状轮载之间的等效性,在确定荷载影响区域的基础上,从等效轮载作用下的应力、位移方面着手分析,分别从 x 、 y 、 z 三

个方向对三种不同形状轮载作用下的应力、位移值进行比较。为直观比较圆形、方形、矩形轮载作用下的应力、位移值,在应力位移曲线图中,同样以圆形、方形、矩形表示该点的应力、位移值。

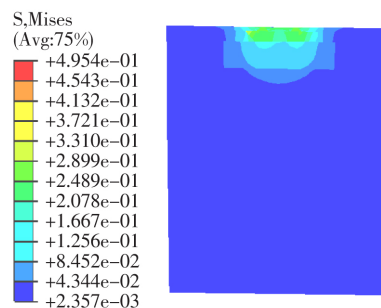


图 10 Mises— y 切片

Fig. 10 Mises— y section cloud picture

1) 沿 x 方向(横断面方向)。

首先,给出沿 x 方向参考点应力、位移值,这些点的 y 值均取 1 000 mm, z 值均为 2 700 mm,沿 x 方向只有 x 取值不同,且每隔 100 mm 取一个参考点。由于参考点数据较多,这里取圆形轮载作用下沿 x 方向部分参考点的应力位移值进行说明(如表 2 所示)。

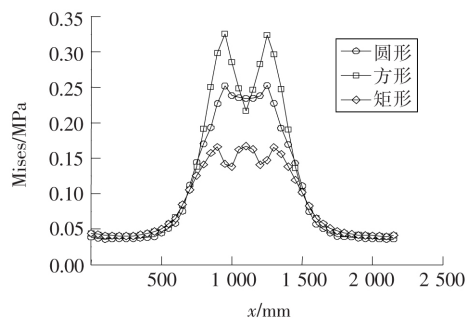
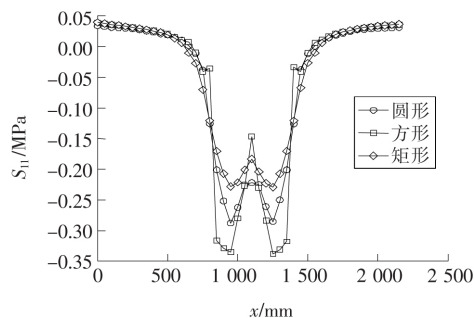
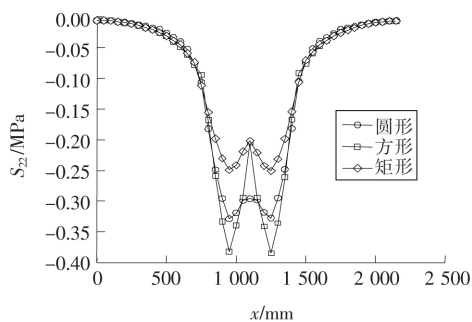
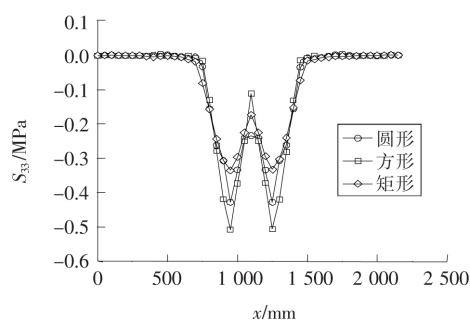
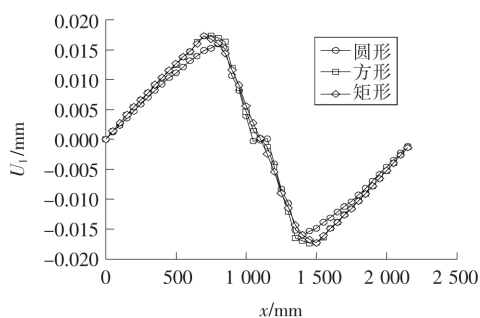
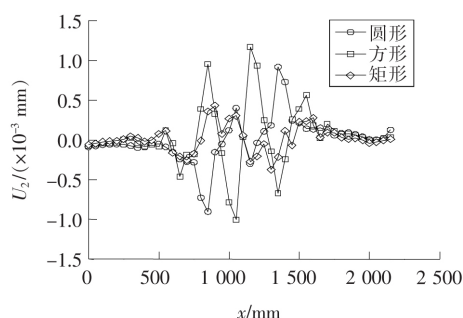
为了直观比较应力位移沿 x 方向的变化趋势以及不同形状轮载在 x 方向的等效性,在同一个坐标系中分别画出不同形状轮载作用下的应力位移沿 x 方向的变化曲线图(如图 11~17 所示)。

从图 11~17 可以看出,对于受对称荷载作用下的均质路面模型,三种不同形状轮载作用下的应力与位移都关于 $x=1\ 100$ mm 对称或反对称,在离 $x=1\ 100$ mm 较远处,应力、位移值较大,变化也较大;离 $x=1\ 100$ mm 较远处,应力、位移值渐趋平稳,各形状轮载作用下的荷载影响区域沿 x 方向的长度与区间大致相同,拟定荷载的影响长度为 1 000 mm,区间为 $[600\text{ mm}, 1\ 600\text{ mm}]$ 。在荷载影响区域范围外,三种形状轮载作用下的应力、位移曲线基本重合,具有良好的重复性;在荷载影响区域范围内,三种形状轮载作用下的应力、位移值波动趋势基本一致,应力、位移值的差值较小,故三种轮载具有良好的等效性。

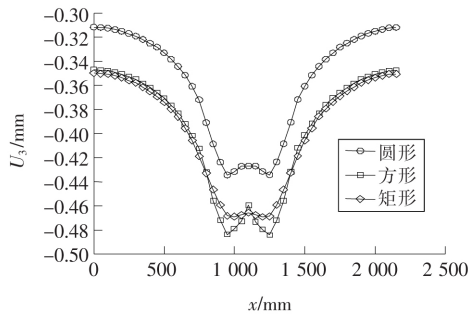
再对不同形状轮载作用下的应力位移数据进行分析,进一步探讨三者的等效性。由于应力位移数据较多, x 方向将取 Mises 应力、 S_{11} 应力、 U_1 位移进行计算分析,计算结果如表 3 所示。

表2 x 方向参考点选取表Table 2 Reference point selection table in x direction

x 值	Mises	S_{11}	S_{22}	S_{33}	U_1	U_3
100	0.035 627	0.031 245	-0.006 06	-0.000 100	0.002 350	-0.312 5
200	0.036 580	0.029 575	-0.008 91	-0.002 350	0.004 706	-0.315 2
300	0.036 663	0.026 911	-0.012 36	-0.002 040	0.006 997	-0.319 2
400	0.038 210	0.022 982	-0.017 80	-0.000 210	0.009 217	-0.325 1
500	0.044 621	0.018 922	-0.026 57	0.001 181	0.011 137	-0.333 0

图11 x 方向 Mises 应力Fig. 11 Mises stress diagram in x direction图12 x 方向 S_{11} 应力Fig. 12 S_{11} stress diagram in x direction图13 x 方向 S_{22} 应力Fig. 13 S_{22} stress diagram in x direction图14 x 方向 S_{33} 应力Fig. 14 S_{33} stress diagram in x direction图15 x 方向 U_1 位移Fig. 15 U_1 displacement diagram in x direction图16 x 方向 U_2 位移Fig. 16 U_2 displacement diagram in x direction表3 x 方向数据计算表Table 3 Data calculation table in x direction

荷载	Mises 应力			S_{11} 应力			U_1 位移		
	差值平均值	差值峰值	相关系数	差值平均值	差值峰值	相关系数	差值平均值	差值峰值	相关系数
圆形与方形	0.014 9	0.073 8	0.985 0	0.004 6	0.116 9	0.964 3	5.664 65E-06	0.002 5	0.999 1
圆形与矩形	0.017 8	0.109 4	0.971 6	0.008 6	0.059 6	0.993 1	3.737 31E-05	0.003 0	0.996 3

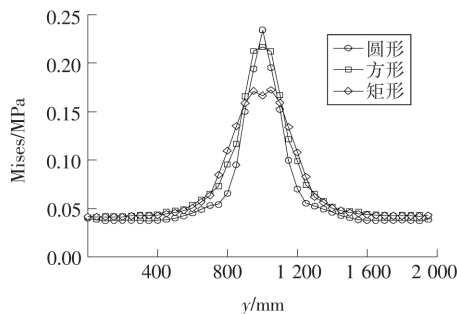
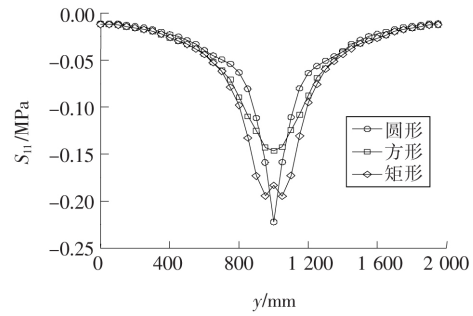
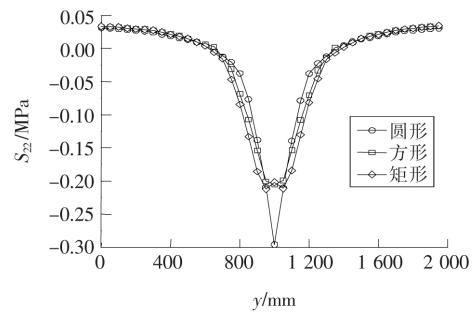
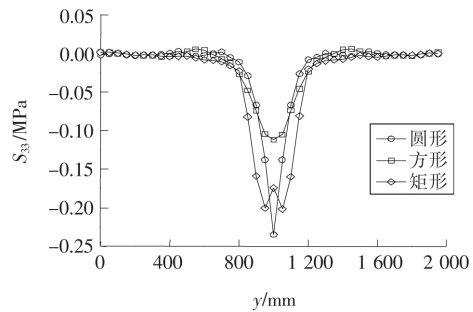
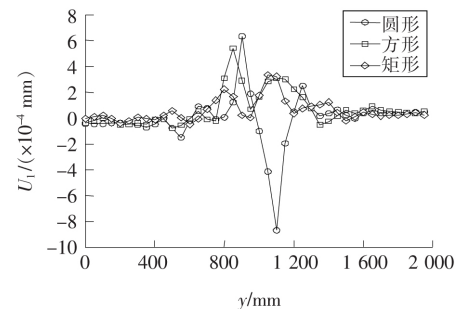
图 17 x 方向 U_3 位移Fig. 17 U_3 displacement diagram in x direction

由表 3 的计算结果可以看出,应力位移差值的平均值都较小,Mises 应力差值平均值均小于 0.018 MPa, S_{11} 应力差值平均值均小于 0.009 MPa、 U_1 位移差值平均值均小于 0.000 04 mm,部分 Mises 应力、 S_{11} 应力差值的峰值较大,说明存在个别点位应力值相差较大,但不影响整体相关性。圆形轮载与方形轮载作用下的 Mises 应力、 S_{11} 应力、 U_1 位移之间的相关系数分别达到了 0.985, 0.964 3, 0.999 1,而圆形轮载与矩形轮载作用下的 Mises 应力、 S_{11} 应力、 U_1 位移之间的相关系数分别达到了 0.971 6, 0.993 1, 0.996 3,相关系数均大于 0.9,说明圆形轮载作用下的应力位移值与方形轮载、矩形轮载作用下的应力位移值具有良好的相关性,圆形轮载与方形轮载、矩形轮载在 x 方向具有良好的等效性。

2) 沿 y 方向(行车方向)。

给出沿 y 方向参考点应力、位移值,这些点的 x 值均取 1 100 mm, z 值均为 2 700 mm,沿 y 方向只有 y 取值不同,且每隔 100 mm 取一个参考点。

为了直观比较应力位移沿 y 方向的变化趋势以及不同形状轮载在 y 方向的等效性,在同一个坐标系中分别画出不同形状轮载作用下的应力位移沿 y 方向的变化曲线图(如图 18~24 所示)。

图 18 y 方向 Mises 应力Fig. 18 Mises stress diagram in y direction图 19 y 方向 S_{11} 应力Fig. 19 S_{11} stress diagram in y direction图 20 y 方向 S_{22} 应力Fig. 20 S_{22} stress diagram in y direction图 21 y 方向 S_{33} 应力Fig. 21 S_{33} stress diagram in y direction图 22 y 方向 U_1 位移Fig. 22 U_1 displacement diagram in y direction

从图 18~24 可以看出,对于受对称荷载作用下的均质路面模型,三种不同形状轮载作用下的应力与位移都关于 $y=1\ 000\text{ mm}$ 对称或反对称,

在离 $y=1\,000\text{ mm}$ 较远处,应力、位移值较大,变化也较大;离 $y=1\,000\text{ mm}$ 较远处,应力、位移值渐趋平稳;各形状轮载作用下的荷载影响区域沿 y 方向的长度与区间大致相同,拟定荷载的影响长度为 700 mm ,区间为 $[650\text{ mm}, 1\,350\text{ mm}]$ 。在荷载影响区域范围之外,三种形状轮载作用下的应力、位移曲线基本重合,具有良好的重复性;在

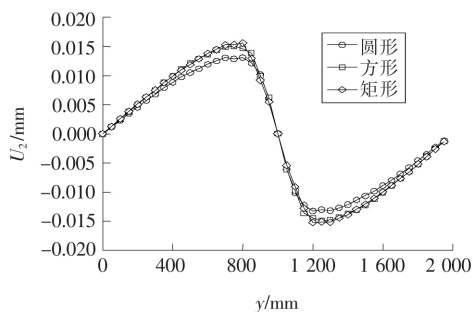


图 23 y 方向 U_2 位移

Fig. 23 U_2 displacement diagram in y direction

荷载影响区域范围之内,三种形状轮载作用下的应力、位移值波动趋势基本一致,应力、位移值的差值较小,三种轮载具有良好的等效性。对不同形状轮载作用下的应力位移数据进行分析,进一步探讨三者的等效性。由于应力位移数据较多, y 方向取 Mises 应力、 S_{22} 应力、 U_2 位移进行计算分析,计算结果如表 4 所示。

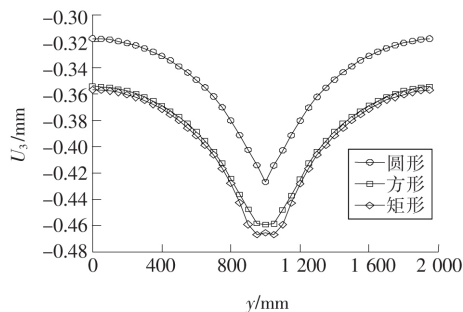


图 24 y 方向 U_3 位移

Fig. 24 U_3 displacement diagram in y direction

表 4 y 方向数据计算表

Table 4 Data calculation table in Y direction

荷载	Mises 应力			S_{22} 应力			U_2 位移		
	差值平均值	差值峰值	相关系数	差值平均值	差值峰值	相关系数	差值平均值	差值峰值	相关系数
圆形与方形	0.009 3	0.030 1	0.987 2	0.000 2	0.090 7	0.971 0	$3.203\,8\text{E}-05$	0.002 2	0.999 2
圆形与矩形	0.006 8	0.067 5	0.934 3	0.005 3	0.094 1	0.951 1	$3.267\,7\text{E}-05$	0.002 5	0.997 8

由表 4 的计算结果可以看出,应力位移差值的平均值都较小,Mises 应力差值平均值均小于 $0.009\,5\text{ MPa}$, S_{22} 应力差值平均值均小于 $0.005\,5\text{ MPa}$, U_2 位移差值平均值均小于 $0.000\,035\text{ mm}$;部分 Mises 应力、 S_{22} 应力差值的峰值较大,说明存在个别点位应力值相差较大,但不影响整体相关性。圆形轮载与方形轮载作用下的 Mises 应力、 S_{22} 应力、 U_2 位移之间的相关系数分别达到了 $0.987\,2$, $0.971\,0$, $0.999\,2$,而圆形轮载与矩形轮载作用下的 Mises 应力、 S_{22} 应力、 U_2 位移之间的相关系数分别达到了 $0.934\,3$, $0.951\,1$, $0.997\,8$,相关系数均大于 0.9 ,说明圆形轮载作用下的应力位移值与方形、矩形轮载作用下的应力位移值具有良好的相关性,圆形轮载与方形、矩形轮载在 y 方向具有良好的等效性。

3) 沿 z 方向(深度方向)。

最后,给出沿 z 方向参考点应力、位移值,这些点的 x 值均取 $1\,100\text{ mm}$, y 值均为 $1\,000\text{ mm}$,

沿 z 方向只有 z 取值不同,且每隔 100 mm 取一个参考点。需要说明的是,这里沿 z 方向不是沿坐标轴的 z 方向,而是沿路面的深度方向,这样可以更直观地反映荷载作用下深度的影响区域。

为了直观比较应力位移沿 z 方向的变化趋势以及不同形状轮载在 z 方向的等效性,在同一个坐标系中分别画出不同形状轮载作用下的应力位移沿 z 方向的变化曲线图(如图 25~31 所示)。

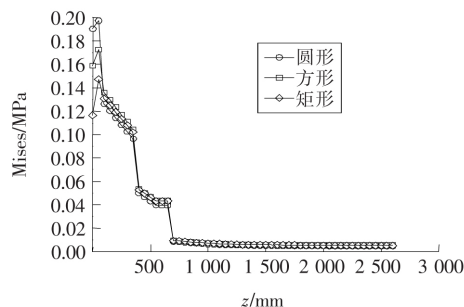
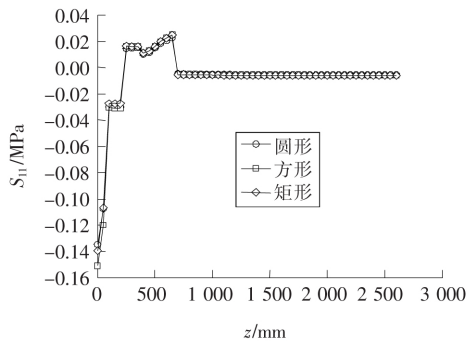
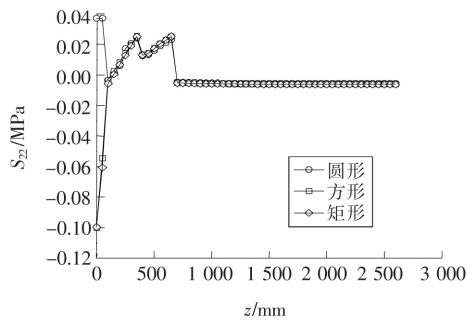
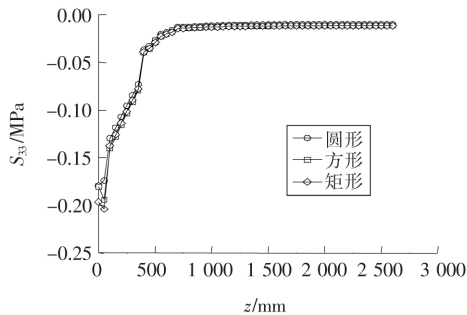
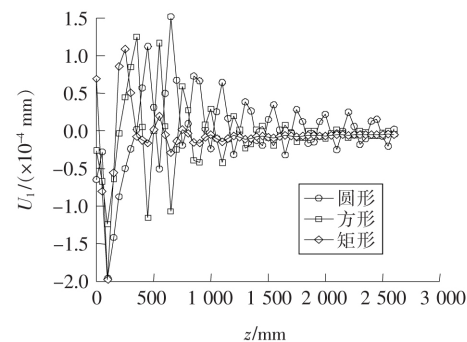
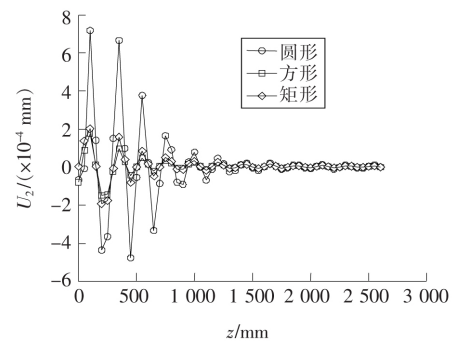
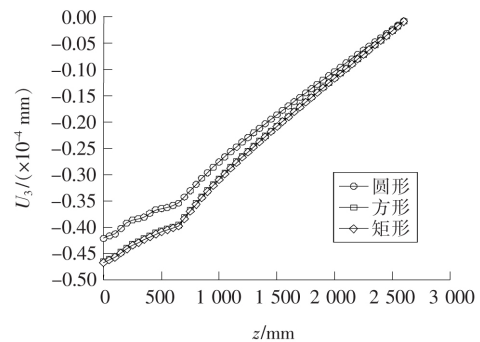


图 25 z 方向 Mises 应力

Fig. 25 Mises stress diagram in z direction

图 26 z 方向 S_{11} 应力Fig. 26 S_{11} stress diagram in z direction图 27 z 方向 S_{22} 应力Fig. 27 S_{22} stress diagram in z direction图 28 z 方向 S_{33} 应力Fig. 28 S_{33} stress diagram in z direction图 29 z 方向 U_1 位移Fig. 29 U_1 displacement diagram in z direction图 30 z 方向 U_2 位移Fig. 30 U_2 displacement diagram in z direction图 31 z 方向 U_3 位移Fig. 31 U_3 displacement diagram in z direction

从图 25~31 可以看出,因为是沿深度方向,三种不同形状轮载作用下的应力、位移不再对称分布,不过各应力在沿深度方向都有减小的趋势,沿深度方向小于 700 mm 时,应力、位移值较大,变化也较明显;当深度大于 700 mm 时,应力、位移值渐趋平稳,各形状轮载作用下的荷载影响区域沿 z 方向的长度与区间大致相同,拟定荷载的影响长度为 700 mm,区间为 $[0 \text{ mm}, 700 \text{ mm}]$ 。在荷载影响区域范围之外,三种形状轮载作用下的应力、位移曲线基本重合,具有良好的重复性;在荷载影响区域范围之内,三种形状轮载作用下的应力、位移值波动趋势基本一致,应力、位移值的差值较小,三种轮载具有良好的等效性。对不同形状轮载作用下的应力位移数据进行分析,进一步探讨三者的等效性。由于应力位移数据较多, z 方向将取 Mises 应力、 S_{33} 应力、 U_3 位移进行计算分析,计算结果如表 5 所示。

由表 5 的计算结果可以看出,应力位移差值的平均值都较小,Mises 应力差值平均值均小于 0.000 9 MPa, S_{33} 应力差值平均值均小于 0.003 MPa,

U_3 位移差值平均值均小于 0.03 mm; 部分 Mises 应力、 S_{33} 应力差值的峰值较大, 说明存在个别点位应力值相差较大, 但不影响整体相关性。圆形轮载与方形轮载作用下的 Mises 应力、 S_{33} 应力、 U_3 位移之间的相关系数分别达到了 0.991 3, 0.999 0, 0.999 9, 而圆形轮载与矩形轮载作用下的

Mises 应力、 S_{33} 应力、 U_3 位移之间的相关系数分别达到了 0.969 9, 0.998 8, 0.999 9, 相关系数均大于 0.9, 说明圆形轮载作用下的应力位移值与方形、矩形轮载作用下的应力位移值具有良好的相关性, 圆形轮载与方形轮载、矩形轮载在 z 方向具有良好的等效性。

表 5 z 方向数据计算表Table 5 Data calculation table in z direction

荷载	Mises 应力			S_{33} 应力			U_3 位移		
	差值平均值	差值峰值	相关系数	差值平均值	差值峰值	相关系数	差值平均值	差值峰值	相关系数
圆形与方形	0.000 8	0.031 4	0.991 3	0.002 5	0.020 3	0.999 0	0.025 2	0.047 3	0.999 9
圆形与矩形	0.000 9	0.073 7	0.969 9	0.002 8	0.030 0	0.998 8	0.026 8	0.049 4	0.999 9

4 结论

通过对不同形状轮载作用下的应力、位移进行分析, 得到以下结论。

1) 由于模型及荷载的对称性, 各不同形状轮载作用下的数值模拟计算结果在 x, y 方向沿荷载影响区域中轴线呈对称或者反对称分布。另外, 由于应力在传递时不断扩散, z (深度) 方向的应力值呈减小趋势。

2) 在三种不同形状轮载作用下, 沿 x, y, z 方向的荷载影响区域长度与区间基本相同, 三者的荷载影响区域具有良好的重复性。

3) 通过对不同形状轮载作用下相同参考点位置的应力、位移值进行比较, 发现圆形轮载与方形轮载、矩形轮载作用下的应力位移差值的平均值都较小, 应力位移值的相关系数均大于 0.9, 圆形轮载与方形轮载、矩形轮载作用下的路面力学响应非常接近, 方形轮载、矩形轮载、圆形轮载具有良好的等效性。由于网格划分等原因需要选用圆形轮载的等效轮载时, 方形轮载与矩形轮载都较为可行。

〔参考文献〕

- [1] 任俊达, 张怀志, 谭忆秋. 基于三维黏弹有限元法的沥青路面结构力学响应分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 15—23.
REN Jun-da, ZHANG Huai-zhi, TAN Yi-qiu. A-

analysis on mechanical response of asphalt pavement structure based on 3D viscoelastic finite element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(1): 15—23.

- [2] 李洪印. 不同粘弹性本构模型对沥青路面永久变形的影响分析[J]. 公路与汽运, 2016, 1(3): 106—108.

LI Hong-yin. Analysis of influence of different viscoelastic constitutive models on permanent deformation of asphalt pavement[J]. Highways and Automotive Applications, 2016, 1(3): 106—108.

- [3] 林丽蓉, 阮莉, 胡小弟. 基于动态模量加载波形的沥青路面力学响应分析[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 53—56.

LIN Li-rong, RUAN Li, HU Xiao-di. Analysis of mechanical response of asphalt pavement based on dynamic modulus loading waveform[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(6): 53—56.

- [4] 李明松. 典型轮胎非均匀接触应力获取及其作用下的路面 TDC 开裂分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

LI Ming-song. The typical non-uniform tire-road contact stress obtained and the road TDC crack analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

- [5] 陈松强. 非轴对称垂直荷载下层状黏弹性体系理论解与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

CHEN Song-qiang. The analytical solution and application of viscoelastic multilayered structures subjected to asymmetric vertical load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

- [6] Smail Hamlat, Ferhat Hammoum, Jean-Pierre Kerzre-

- ho. Evaluation of the distribution of local pressures and the real contact area between the tyre and the road surface[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 16(9): 832–841.
- [7] 李友云, 蔡彰. 沥青路面结构数值计算模型的最优尺寸研究[J]. 交通科学与工程, 2016, 32(4): 16–21.
LI You-yun, CAI Zhang. Research on the optimal size of the numerical calculation model for asphalt pavement structure[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2016, 32(4): 16–21.
- [8] 任瑞波, 祁文洋, 李美玲. 移动荷载作用下饱和沥青路面动力响应三维有限元分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(9): 11–16.
REN Rui-bo, QI Wen-yang, LI Mei-ling. Analysis on dynamic response of saturated asphalt pavement under moving vehicle loads by 3D finite element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(9): 11–16.
- [9] 颜可珍, 游凌云. 横观各向同性沥青路面结构力学行为分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(4): 1–6.
YAN Ke-zhen, YOU Ling-yun. Analysis of structural mechanical behavior of transverse isotropic asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(4): 1–6.
- [10] 周艳. 考虑层间状态的沥青路面动力响应有限元分析[J]. 交通科技, 2017(4): 13–15.
ZHOU Yan. Finite element analysis of asphalt pavement dynamic responses considering interface interaction[J]. Transportation Science and Technology, 2017(4): 13–15.
- [11] 胡迪, 李友云. 双圆轮载作用下沥青路面的荷载影响区域范围研究[J]. 北方交通, 2015(11): 56–57.
HU Di, LI You-yun. Research on impact area of asphalt pavement under the double circular loads[J]. Northern Communications, 2015(11): 56–57.
-
- (上接第 26 页)
- [5] 黄刚, 蔡延光, 汤雅连. 带取送货的关联运输调度问题的优化[J]. 东莞理工学院学报, 2013, 20(5): 37–43.
HUANG Gang, CAI Yan-guang, TANG Ya-lian. The optimization of incident vehicle route problem with pickup and delivery[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2013, 20(5): 37–43.
- [6] 董蕊, 刘冉, 江志斌, 等. 具有时间窗约束累积性车辆路径问题的禁忌搜索优化算法[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(1): 49–55.
DONG Rui, LIU Ran, JIANG Zhi-bin, et al. A tabu search algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem with time window [J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(1): 49–55.
- [7] 张文博, 苏秦, 程光璐. 基于动态需求的带时间窗的车辆路径问题[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(6): 68–74.
ZHANG Wen-bo, SU Qin, CHENG Guang-lu. Vehicle routing problem with time windows based on dynamic demands [J]. Industrial Engineering and Management, 2016, 21(6): 68–74.
- [8] Erbao Cao, Ruotian Gao, Mingyong Lai. Research on the vehicle routing problem with interval demands [J]. Applied Mathematical Modelling, 2017(54): 332–346.
- [9] Oscar M González, Carlos Segura, S Ivvan Valdez Peña. A parallel memetic algorithm to solve the capacitated vehicle routing problem with time windows[J]. International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, 2018, 9(1): 35–45.
- [10] 石建力, 张锦. 行驶时间和服务时间随机的集配货一体的分批配送车辆路径优化[J]. 控制与决策, 2018, 33(4): 0657–0670.
SHI Jian-li, ZHANG Jin. Optimization on simultaneous pick-up and delivery vehicle routing problem with split delivery and stochastic travel and service time[J]. Control and Decision, 2018, 33(4): 0657–0670.
- [11] 周和平, 王芳, 成军. 区间阻抗下的多路径交通分配[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2014, 11(3): 2–3.
ZHOU He-ping, WANG Fang, CHENG Jun. Multipath traffic assignment under interval-valued impedance[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 11(3): 2–3.
- [12] R Montemanni, L M Gambardella, A V Donati Istituto. A branch and bound algorithm for the robust shortest path problem with interval data[J]. Operations Research Letters, 2004(32): 225–232.