

## 路面结构数值计算尺度效应分析\*

谢波, 张健

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为研究沥青路面在标准双圆轮荷载作用下结构数值计算模型的合理尺度, 运用有限元数值模拟分析方法, 考虑荷载与路面结构的对称性, 建立路面结构轴对称模型, 分析其在车辆荷载作用下的力学响应, 确定给定路面结构在不同尺度下的计算误差, 从而确定合理计算尺度。结果表明, 采用结构半空间尺度  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  作为基准, 以弯沉值为控制指标时, 与标准尺度相对误差确定的结构半空间尺度较大; 以基层层底拉应力为控制指标时, 相对误差为 1% 的结构半空间尺度为  $6\text{ m}$ , 相对误差为 5% 的结构半空间尺度为  $3.8\text{ m}$ ; 以底基层层底拉应力为控制指标时, 相对误差为 1% 的结构半空间尺度为  $8\text{ m}$ , 相对误差为 5% 的结构半空间尺度为  $4.3\text{ m}$ ; 基层厚度越大时, 结构尺度比上述结论适当增大; 以竖向压应力为控制指标时, 与  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  标准值的相对误差很小; 以底基层层底拉应力为控制指标更安全 and 精确。

**关键词:** 公路; 沥青路面; 行车荷载; 路面结构尺寸; 力学性能

**中图分类号:** U416.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2020)03-0053-06

合理、准确地分析沥青路面结构的力学响应规律, 往往需借助设置合理有效的力学模型。通常采用有限元法计算分析行车荷载作用下沥青路面响应规律, 采用的是有限结构模型, 与沥青路面的假设即半空间无限体存在误差。因此, 存在模型尺度合理选择问题。若尺度过小, 会导致数值分析结果失真; 若尺度过大, 会增加计算分析的工作量, 影响计算分析速度。

任俊达等建立基于实测参数的典型半刚性基层沥青路面三维粘弹有限元仿真模型, 该模型在长度、宽度和深度方向的尺度分别为  $8\text{ m}$ 、 $4\text{ m}$ 、 $5\text{ m}$ , 分析路面结构在不同加载位置下的力学响应和路面结构内部的力学响应规律。张丽娟等根据旧路及拟定加铺层结构形式确定模型尺度, 其中每块板的尺度为  $5\text{ m} \times 3.75\text{ m} \times 0.26\text{ m}$ , C20 水泥砼底基层的尺度为  $10.008\text{ m} \times 3.75\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ , 地基扩大尺度取  $12.008\text{ m} \times 4.75\text{ m} \times 9\text{ m}$ , 通过预埋温度传感器实测路面温度场, 根据传热学原理建立了旧水泥路面加铺沥青层结构的非线性瞬态 3D 温度场计算模型。任瑞波等建立纵向、横向及竖向尺度分别为  $14\text{ m}$ 、 $6.3\text{ m}$ 、 $3.14\text{ m}$  的有限元模型, 分析移动荷载作用下饱和沥青路面的动力响应。陆辉等建立尺度为  $x=2.2\text{ m}$ 、 $y=2.0\text{ m}$ 、 $z=5.0\text{ m}$  的模型, 进行轮载作用下沥青路面三维非线性

有限元分析。董轶等利用尺度为  $x=3.75\text{ m}$ 、 $y=6.0\text{ m}$ 、 $z=3.5\text{ m}$  的模型, 利用三维非线性有限元分析了沥青路面车辙问题。Niki D. Beskou 等开展移动车辆下 3-D 柔性路面动态弹性与非弹性分析, 有限元模型在垂直、横向、纵向的尺度分别为  $29.45\text{ m}$ 、 $15.00\text{ m}$ 、 $30.00\text{ m}$ 。Reaz Imaninasab 等考虑半轮载荷下长度为  $1.3\text{ m}$ 、宽度为  $1.5\text{ m}$ 、深度为  $3.02\text{ m}$  的路面块, 采用有限元方法分析了橡胶多孔沥青的车辙性能。不同学者在分析沥青路面时所采用的三维结构尺度五花八门, 精确确定结构尺度势在必行。该文采用轴对称模型对路面进行分析, 利用沥青路面多层弹性层状体系理论研究沥青路面结构有限元模型, 计算确定特定沥青路面结构在不同误差下的精确尺度, 为工程实践问题分析提供参考与帮助。

## 1 土基弯沉效应数值分析

面层、基层、垫层和路基材料为线弹性材料, 应力应变关系符合广义虎克定律; 平面方向每个层面无限大, 且最远处的应力和位移分量为零; 垂直方向有一定厚度, 在无限远处和无限深处应力、位移都为零; 行车荷载作用下路面表面产生的荷载是对称的。

根据 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478053); 交通运输部道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙)开放基金重点资助项目(KFJ120201)

范》,路面结构设计采用双圆垂直均布荷载作用下的多层弹性层状体系理论进行计算,路面设计采用双轮组单轴载 100 kN 作为标准轴载,以 BZZ-100 表示。考虑到荷载与路面结构的对称性,采用轴对称结构对路面进行分析,并将单轮传压面当量圆直径取为 20 cm。计算荷载(JZZ-100)与 JTG D50-2017 中标准轴载(BZZ-100)的对应关系见表 1。

表 1 轴载计算参数

轴载类型	标准轴载 $P/\text{kN}$	轮胎接地压强 $q/\text{MPa}$	接地圆直径 $d/\text{cm}$
标准轴载 BZZ-100	100	0.700 0	21.3
计算轴载 JZZ-100	100	0.795 8	20.0

提出表 1 所示换算关系,一是考虑到数值实施上的便利性,二是基于设计计算的合理性。此外,这种转换也是符合实际情况的,如载重货车中广泛使用的 11.00-20 轮胎,其胎冠宽度的实测值更接近 20 cm,而 BZZ-100 将单轮传压面当量圆直径  $d$  取为 21.3 cm,可能是为了取得一个包含较少有效数字的轮胎接地压强(0.7 MPa)而做的简单处理。这里先考虑荷载直接作用在土基上,根据 JTG D50-2017,土基弹性模量取 80 MPa,泊松比为 0.4,采用八节点四边形单元,结构尺度从 1 m 逐渐变化到 20 m,采用轴对称结构(见图 1)。

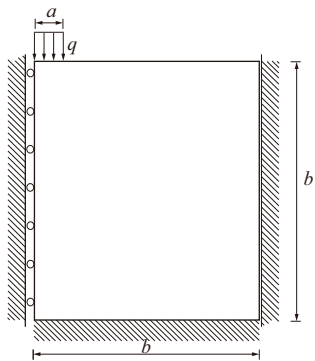
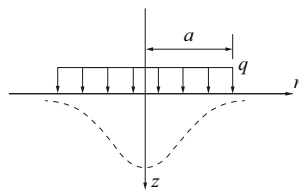
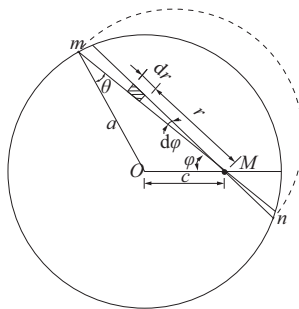


图 1 荷载作用土基轴对称模型

半无限体圆形边界平面上,半径为  $a$  的圆内受到均匀压力  $q$ [见图 2(a)]。如图 2(b)所示,计算点  $M$  在圆内时,根据文献[1],其竖向位移  $w$  见式(1);点  $M$  在圆周上时, $c=a$ ,其竖向位移见式(2);点  $M$  在圆心时, $c=0$ ,其竖向位移见式(3)。



(a) 半无限体圆形界面受均匀压力



(b) 圆内点位移的积分

图 2 半空间无限体图示

$$w = \frac{4(1-\nu^2)qc}{\pi E} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2 \sin^2 \theta} d\theta - \right. \quad (1)$$

$$\left. \left[ 1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2 \right] \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - (a/c)^2 \sin^2 \theta}} d\theta \right\}$$

$$w = \frac{4(1-\nu^2)qa}{\pi E} \quad (2)$$

$$w = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E} \quad (3)$$

式中: $\nu$  为泊松比,取为 0.4; $q$  为计算荷载,其值为 0.795 8 MPa; $E$  为弹性模量,取为 80 MPa; $a$  取单轮传压面当量圆的一半,为 0.1 m。

对比可见,圆心处位移最大,且位移随圆半径  $a$  增大而呈比列增大。根据式(3)计算的理论值为  $1.671 2 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。网格大小分别取 0.05、0.1、0.2 m,土基尺度  $a$  取为 1~20 m,计算与理论值的误差,结果见图 3。由图 3 可知:网格宽度分别为 0.05 和 0.1 m 时,误差曲线基本重合;而网格宽度为 0.2 m 时,与前二者误差较大,曲线发散。因此,有限元计算时设置网格宽度为 0.05 m。

为确定最大误差为 1% 时土基结构尺度,采用拉格朗日插值法,得式(4),每个拉格朗日基本多项式见式(5)。运用拉格朗日插值法得  $1.671 2 \times 10^{-3} \times 99\% = l_0(x)f(7) + l_1(x)f(9) + l_2(x)f(11)$ ,  $x=8.7 \text{ m}$ 。结构尺度取土基尺度为 8.7 m,有限元计算弯沉值与理论弯沉值的误差为 1%,要保证数

值计算与理论值误差在 1% 以内,结构尺度至少要大于 8.7 m。

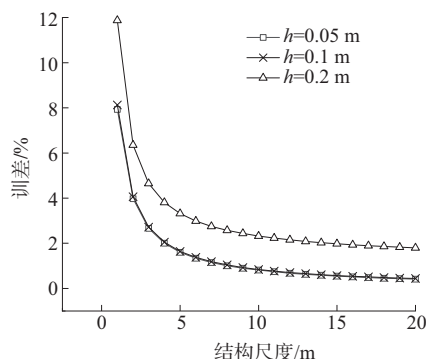


图 3 不同结构尺度下的误差分析

$$\begin{cases} f(7) = 1.6504 \times 10^{-3} \text{ m} \\ f(9) = 1.6550 \times 10^{-3} \text{ m} \\ f(11) = 1.6579 \times 10^{-3} \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} l_0(x) = \frac{(x-9)(x-11)}{(7-9)(7-11)} \\ l_1(x) = \frac{(x-7)(x-11)}{(9-7)(9-11)} \\ l_2(x) = \frac{(x-7)(x-9)}{(11-7)(11-9)} \end{cases} \quad (5)$$

同样取网格宽度为 0.05 m,采用拉格朗日插值法,得式(6),每个拉格朗日基本多项式见式(7)。运用拉格朗日插值法得  $1.6712 \times 10^{-3} \times 95\% = l_0(x)f(1) + l_1(x)f(2) + l_2(x)f(3)$ ,  $x = 1.8 \text{ m}$ 。土基尺度为 1.8 m,有限元计算弯沉值与理论弯沉值的误差为 5%,要想数值计算与理论值的误差在 5% 以内,结构尺度至少要大于 1.8 m。变化土基模量,结论一致,说明与假设的土基模量没有关系。

$$\begin{cases} f(1) = 1.5276 \times 10^{-3} \text{ m} \\ f(2) = 1.5984 \times 10^{-3} \text{ m} \\ f(3) = 1.6226 \times 10^{-3} \text{ m} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} l_0(x) = \frac{(x-2)(x-3)}{(1-2)(1-3)} \\ l_1(x) = \frac{(x-1)(x-3)}{(2-1)(2-3)} \\ l_2(x) = \frac{(x-1)(x-2)}{(3-1)(3-2)} \end{cases} \quad (7)$$

## 2 多层路面数值分析

选取一条典型路段,路面结构及材料参数见表 2,为典型的半刚性沥青路面结构。

沥青面层采用 20 °C、10 Hz 条件下的动态压缩模量,无机结合料稳定层采用经调整系数修正后的

表 2 典型路段的结构参数

路面结构	材料名称	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
面层	沥青砼	15	11 000	0.25
基层	5%水泥稳定碎石	35	12 000	0.25
底基层	4%水泥稳定碎石	30	8 000	0.25
路基	土基	—	80	0.40

弹性模量。该文是研究多层沥青路面的精确尺度,虽然 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》取消了弯沉值这一传统指标,但考虑到弯沉是反映路面结构在荷载作用下整体结构承载能力大小的指标,与路面结构的各种病害形式和使用功能评价有一定关系,一味地追求弯沉指标或忽视弯沉指标对于路面结构设计都是不完善的,保留弯沉值这一传统控制指标。以 JTG D50—2017 为依据,从弯沉值、基层层底拉应力、底基层层底拉应力与反映沥青混合料永久变形量的竖向压应力 4 个指标进行分析。由于多层沥青路面的弯沉理论值公式极其复杂,采用路面结构尺度为 50 m×50 m 的计算值作为弯沉理论值,通过结构层的尺度变化与 50 m×50 m 作比较[见式(8)],得出误差分别为 1% 与 5% 的结构尺度。同时考虑到设计中通常通过调整基层厚度来设计路面结构,主要分析基层厚度与基层模量变化对结构尺度的影响。用基层层底拉应力、底基层层底拉应力和竖向压应力作为控制指标采取的方法与以弯沉值为控制指标的方法一样。图 4 为高速公路、一级公路常见沥青路面结构,图 5 为各控制指标的误差分析结果。

$$\tilde{e} = \frac{|s - s_{50}|}{|s_{50}|} \times 100\% \quad (8)$$

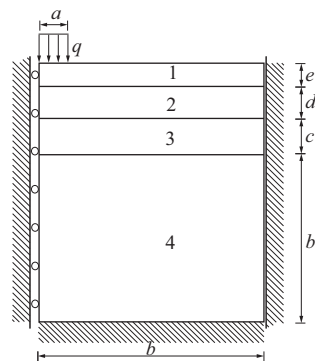


图 4 多层轴对称模型

图 5(a)表明随土基尺度的逐渐增大,弯沉值比

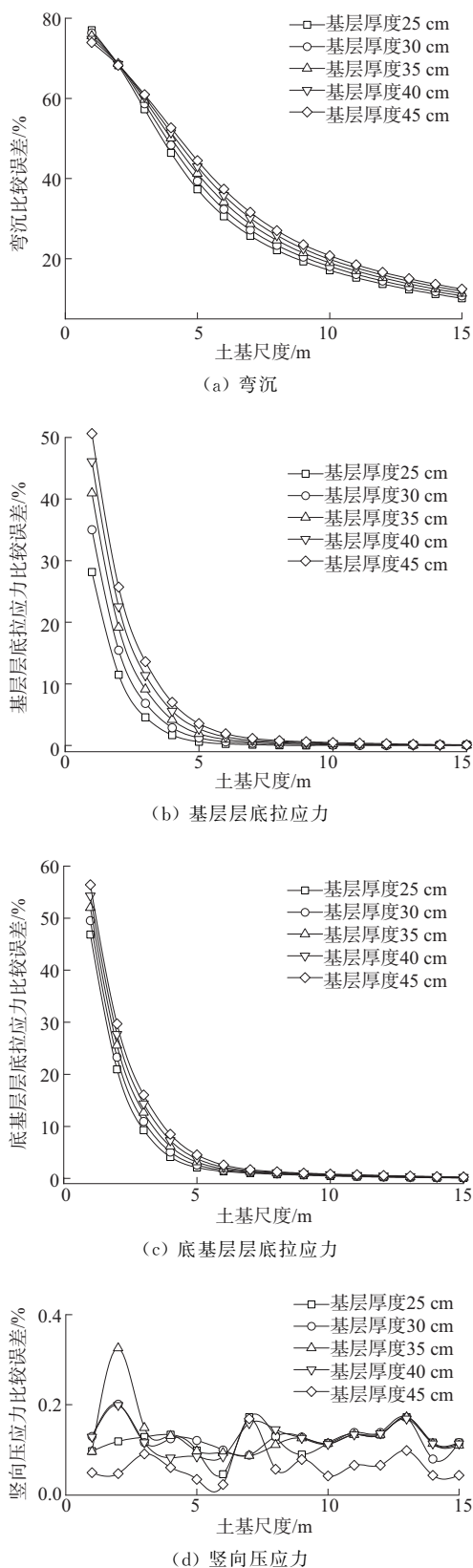


图5 控制指标比较误差分析

较误差逐渐减小,与结构尺度为  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  的比较误差较大,当结构尺度达到  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$  时比较

误差超过 10%;基层厚度越大,弯沉值比较误差越大。图 5(b)表明以基层层底拉应力为控制指标时,土基尺度与基层层底拉应力成反比;基层厚度越大,结构尺度相同的情况下与理论值的相对误差越大。图 5(c)表明以底基层层底拉应力为控制指标时,土基尺度与底基层层底拉应力成反比;底基层厚度越大,结构尺度相同的情况下与理论值的相对误差越大。与以基层层底拉应力指标相比,所得结论更趋于保守,即所取结构尺度更大。图 5(d)表明以竖向压应力为控制指标时,土基尺度的变化与标准值的比较误差非常小,土基尺度为  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$  时相对误差在 0.4%以内,结构尺度的变化对其竖向力的影响很小。

由图 5 可知:当基层弹性模量一定时,基层厚度由 25 cm 变化为 45 cm 时,所取土基厚度与其相对误差成反比。基层厚度越大,与结构尺度为  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  的相对误差越大。以弯沉值为控制指标时,与标准尺寸相对误差确定的结构半空间尺度较大;以基层层底拉应力为控制指标时,  $f(3) = 9.14\%$ ,  $f(4) = 4.19\%$ ,  $f(5) = 1.92\%$ ,  $f(6) = 1.00\%$ ,根据土基尺度变化与  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  的相关关系及拉格朗日插值法,得出相对误差为 1% 的结构半空间尺度为 6 m、相对误差为 5% 的结构半空间尺度为 3.8 m;以底基层层底拉应力为控制指标时,  $f(4) = 6.16\%$ ,  $f(5) = 3.13\%$ ,  $f(6) = 1.85\%$ ,  $f(7) = 1.30\%$ ,  $f(8) = 1.03\%$ ,得相对误差为 1% 的结构半空间尺度为 8 m、相对误差为 5% 的结构半空间尺度为 4.3 m。基层厚度越大,所取结构尺度应适当增大。王旭东认为对于半刚性基层和底基层,底基层的拉应力、拉应变略高于基层是符合一般规律的。马士宾等认为以弯沉为控制指标时,路面结构满足设计要求的概率最低;以层底弯拉应力和路基顶压应变为控制指标时,满足设计要求的概率较高。综上,考虑以底基层层底拉应力为控制指标,其相对误差为 1% 的结构尺度为 8 m,相对误差为 5% 的结构尺度为 4.3 m。

基层弹性模量与结构尺度的关系见表 3。由表 3 可知:基层厚度为 35 cm 固定不变,基层模量的变化不会影响结构尺度与标准值比较误差的关系,比较误差几乎一致。使用基层层底拉应力、底基层层底拉应力和竖向应力为控制指标时,结论一致。结构尺度为  $8\text{ m} \times 8\text{ m}$  时的应力与位移见图 6。

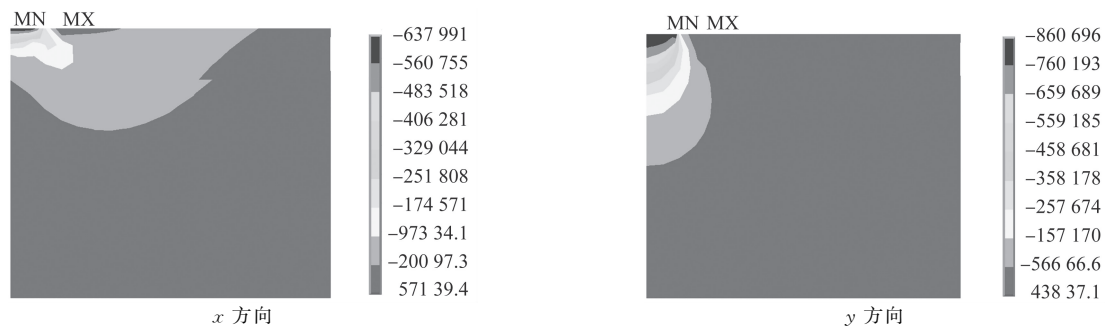
### 3 结论

(1) 由于模型及荷载的对称性,在轮载作用下

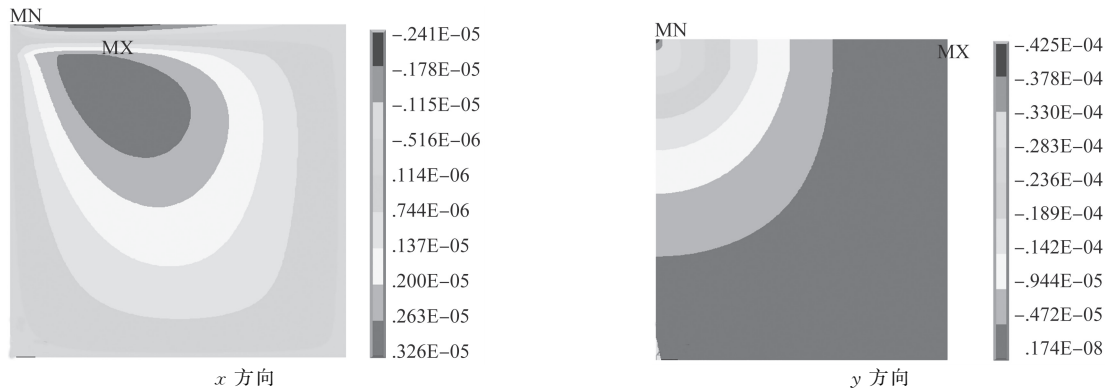
的数值模拟计算结果呈对称分布。由于应力在传递 时不断扩散,沿深度方向的应力值呈减小趋势。

表 3 基层弹性模量与结构尺度的关系

土基尺度/m	不同基层弹性模量(MPa)下的弯沉和比较误差							
	10 000		11 000		12 000		13 000	
	弯沉/ (0.1 mm)	比较误 差/%	弯沉/ (0.1 mm)	比较误 差/%	弯沉/ (0.1 mm)	比较误 差/%	弯沉/ (0.1 mm)	比较误 差/%
1	0.144 99	74.77	0.141 03	75.20	0.137 64	75.58	0.134 70	75.90
2	0.185 49	67.72	0.180 72	68.23	0.176 61	68.66	0.173 01	69.04
3	0.185 49	67.72	0.231 81	59.24	0.227 15	59.69	0.223 04	60.09
4	0.291 96	49.19	0.286 24	49.67	0.281 22	50.10	0.276 76	50.48
5	0.341 90	40.50	0.336 02	40.92	0.330 83	41.29	0.326 19	41.63
6	0.382 15	33.50	0.376 23	33.85	0.371 00	34.16	0.366 32	34.45
7	0.412 93	28.14	0.407 03	28.43	0.401 81	28.70	0.397 14	28.94
8	0.435 89	24.15	0.430 02	24.39	0.424 82	24.61	0.420 17	24.82
9	0.453 57	21.07	0.447 71	21.28	0.442 52	21.47	0.437 88	21.65
10	0.467 56	18.64	0.461 70	18.82	0.456 52	18.99	0.451 88	19.14
11	0.479 02	16.64	0.473 15	16.81	0.467 96	16.96	0.463 32	17.09
12	0.488 73	14.95	0.482 85	15.10	0.477 66	15.24	0.473 01	15.36
13	0.497 16	13.48	0.491 27	13.62	0.486 08	13.74	0.481 42	13.86
14	0.504 35	12.23	0.498 47	12.36	0.493 26	12.47	0.488 60	12.57
15	0.510 69	11.13	0.504 81	11.24	0.499 60	11.34	0.494 94	11.44



(a) 应力云图(单位:Pa)



(b) 位移云图(单位:m)

图 6 土基尺度为 8 m×8 m 的应力和位移云图



(2) 分析沥青路面结构精确尺度,根据有限元软件计算分析以弯沉值为控制指标的土基尺度时,最大误差为 1% 的土基尺度为 8.7 m,最大误差为 5% 的土基尺度为 1.8 m。

(3) 对于常见半刚性基层沥青路面结构,以弯沉值为控制指标时,与标准尺度相对误差确定的结构半空间尺度较大;以基层层底拉应力为控制指标时,相对误差为 1% 的结构半空间尺度为 6 m,相对误差为 5% 的结构半空间尺度为 3.8 m;以底基层层底拉应力为控制指标时,相对误差为 1% 的结构半空间尺度为 8 m,相对误差为 5% 的结构半空间尺度为 4.3 m。基层厚度越大,所取结构尺度比上述结论适当增大。以竖向压应力为控制指标确定的结构尺度与标准尺度相对误差很小。以底基层层底拉应力为控制指标更安全和精确。

#### 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).
- [2] 张丽娟,骆亚军,陈晓生,等.旧水泥路面加铺沥青层结构温度场特性及数值模拟[J].公路交通科技,2019,36(5).
- [3] 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).
- [4] 陆辉,孙立军.轮载作用下沥青路面三维非线性有限元分析[J].土木工程学报,2004,37(7).
- [5] 董轶,彭妙娟,薛继盛.交通荷载下沥青路面车辙三维非线性有限元分析[J].应用力学学报,2012,29(1).
- [6] Beskou N D, Tsinopoulos S V, Theodorakopoulos D D. Dynamic elastic analysis of 3-D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM treatment[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 82.
- [7] Beskou N D, Hatzigeorgiou G D, Theodorakopoulos D D. Dynamic inelastic analysis of 3-D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM treatment[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90.
- [8] Imaninasab R, Bakhshi B, Shirini B. Rutting performance of rubberized porous asphalt using Finite Element Method (FEM) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106.
- [9] 贺炜,凡子义,罗超云,等.圆形地连墙设计关键问题及轴对称有限元法[J].中国公路学报,2017,30(9).
- [10] 朱兹祯,王伟波,高存法,等.面内变刚度功能梯度圆形薄板的轴对称弯曲[J].船舶力学,2018,22(11).
- [11] 寇磊,徐建国,王博.直角坐标系下黏弹性层状地基动力响应分析[J].应用数学和力学,2018,39(5).
- [12] Pater Z. FEM analysis of loads and torque in a skew rolling process for producing axisymmetric parts[J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2017, 62(1).
- [13] 刘英伟.基于层状弹性体系理论的沥青路面结构力学响应研究[J].中国水运:下半月,2014,14(1).
- [14] 王路君,艾智勇.非稳态热传导时层状路面体系的温度响应[J].岩土力学,2018,39(9).
- [15] 王旭东.沥青路面弯沉指标的探讨[J].公路交通科技,2015,32(1).
- [16] 马士宾,徐文斌,刘昊杨,等.半刚性基层沥青路面结构可靠性分析[J].中外公路,2017,37(6).

收稿日期:2019-11-19

\*\*\*\*\*

## 《中外公路》2021 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于 1980 年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办。邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业,发行量大,影响面广。属全国中文核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、首届(2006 年)中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊,由中国科学技术信息研究所组织评选)、湖南省十佳科技期刊、“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008 年)湖南省优秀栏目、2009 年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、多次被评为交通部、湖南省优秀期刊。

2021 年《中外公路》为大 16 开,页码 256 页以上,每册定价 15.00 元,全年 6 期共 90.00 元。

邮发代号:42-63。读者也可通过邮局或银行汇款至杂志社直接订阅。

地 址:长沙理工大学云塘校区 58 号信箱

户 名:长沙理工大学

开 户 行:长沙市农行高云支行

联 系 人:白雪

邮 编:410114

帐 号:18-051401040000158

电 话:0731-85258033(带传真)

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com

收款单位:《中外公路》编辑部