

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.06.002

沥青路面结构设计指标优化及合理厚度探究

赵楷文¹, 张洪伟², 全蔚闻¹, 马宪永¹, 董泽蛟¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 内蒙古自治区交通运输科学发展研究院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 随着我国交通领域的高速发展, 多种沥青路面结构形式被提出并应用。现有的路面结构设计指标是针对典型路面结构所提出的, 对非典型路面结构的适用性有待验证。为验证非典型沥青路面结构设计指标的适用性, 明确典型路面结构的合理厚度范围, 完善沥青路面结构设计方法, 首先, 建立了移动非均布荷载下典型与非典型沥青路面结构模型, 依据力学响应规律, 分析了路面结构设计指标。其次, 对比了移动非均布荷载与静态双圆均布荷载作用下的路面使用寿命, 并给出了每种路面结构的设计指标。最后, 改变路面各结构层厚度, 根据计算得到路面使用寿命, 确定了半刚性基层路面的合理厚度范围。结果表明: 静态双圆均布荷载下路面使用寿命计算值为移动非均布荷载下的0.7~0.9倍, 在路面力学分析中应考虑荷载的非均布移动特性; 对于半刚性基层路面、柔性基层路面、长寿命路面、倒装结构路面以及抗车辙路面, 路基顶面竖向压应变可不作为设计指标考虑; 路面类型对设计指标的适用性影响较大, 设计指标应依据路面类型选取; 对于半刚性基层路面, 基层厚度小于250 mm时, 路面使用寿命随沥青面层厚度的增加先增大后减小, 控制指标由无机结合料层层底拉应力变为沥青混合料层永久变形量; 面层厚度大于200 mm时, 路面使用寿命控制指标为沥青混合料层永久变形量, 增加面层厚度会降低路面使用寿命。

关键词: 道路工程; 结构设计优化; 数值模拟; 沥青路面; 非均布移动荷载

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 06-0009-08

Optimization of Design Indicators and Exploration of Reasonable Thickness of Asphalt Pavement Structure

ZHAO Kai-wen¹, ZHANG Hong-wei², QUAN Wei-wen¹, MA Xian-yong¹, DONG Ze-jiao¹

(1. School of Transportation Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Transport Development Research Institute, Hohhot Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: With the rapid development of transport field in China, a variety of asphalt pavement structure forms have been proposed and applied. The existing pavement structure design indicators are proposed for typical pavement structures, their applicability to atypical pavement structures needs to be verified. In order to verify the applicability of structural design indicators of atypical asphalt pavement structures, to determine the reasonable thickness range of typical pavement structures, and to improve the structural design method of asphalt pavement, first, the typical and atypical asphalt pavement structural models under moving non-uniformly distributed load are established, and the design indicators of the pavement structures are analyzed according to the mechanical response rule. Then, the pavement service lives under moving non-uniformly distributed load and static double-circular uniformly distributed load are compared, and the design indicators of each pavement structure are given. Finally, change the thickness of each pavement structural layer, the

收稿日期: 2020-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1600100); 国家自然科学基金项目 (U20A20315); 中央高校基本科研业务费专项资金项目; 内蒙古自治区交通运输厅科技项目 (NJ-2020-04)

作者简介: 赵楷文 (1997-), 女, 黑龙江宝清人, 硕士研究生. (19s032021@stu.hit.edu.cn)

reasonable thickness range of the semi-rigid base pavement is determined according to the calculated pavement service lives. The result shows that (1) the calculation value of pavement service life under static double-circular uniformly distributed load is 0.7–0.9 times of that under moving non-uniformly distributed load, thus the non-uniformly distributed load movement should be considered in pavement mechanics analysis; (2) for semi-rigid base pavement, flexible base pavement, long-life pavement, inverted structure pavement and anti-rutting pavement, the vertical compressive strain on the top of subgrade could not be taken as the design indicator; (3) the type of pavement has great influence on the applicability of the design indicators, so the design indicators should be determined according to the type of pavement; (4) for semi-rigid base pavement with base course thickness less than 250 mm, the service life of pavement increases first and then decreases with the increase of asphalt surface thickness, and the control indicator changes from tensile stress at the bottom of the inorganic binder course to permanent deformation of the asphalt binder course. However, for semi-rigid base pavement with surface thickness more than 200 mm, the control indicator of pavement service life is the permanent deformation of asphalt mixture layer, increasing the thickness of surface course will reduce the service life of pavement.

Key words: road engineering; structural design optimization; numerical simulation; asphalt pavement; non-uniformly distributed moving load

0 引言

一直以来, 沥青路面的结构设计都是一个受到广泛关注的问题, 国内外学者对于路面结构设计指标和结构合理厚度开展了大量研究。研究发现, 沥青混合料层底拉应变小于 $60 \mu\epsilon$, 路基顶面压应变小于 $200 \mu\epsilon$, 即可保证沥青路面不发生结构性破坏^[1]。张艳红等^[2]曾利用 Bisar3.0 软件对半刚性路面、柔性路面、复合路面展开计算, 提出了将面层剪应力作为设计指标。国外标准以路基顶面竖向压应变及沥青层层底弯应变这两项指标衡量长寿命路面的设计使用寿命^[3-4]。Qian 等^[5]在沥青混凝土性能测试中, 将沥青混合料的抗弯拉变形作为路面低温抗裂能力的衡量指标。庄传仪^[6]将路表剪应力及沥青层层底拉应变作为柔性基层路面的结构设计指标, 且容许标准依据材料类型确定。

基于结构设计指标, 选取合理的路面结构层厚度是延长路面使用寿命及提高路用性能的重要条件。张晓冰等^[7]通过路段调查指出, 高速公路的基层和底基层厚度通常在 50~60 mm。张朝晖^[8]基于有限元软件 ANSYS 分析指出, 半刚性基层路面的使用寿命受基层厚度的影响较大, 增加基层厚度可有效提高路面整体刚度。郭寅川等^[9]探究发现, 沥青层拉应力对面层厚度敏感性高。杨国峰等^[10]建立了路面性能预测模型, 发现路面厚度是路面使用性能的重要影响因素。邹静蓉等^[11]通过有限元分析, 发现半刚性基层厚度增加, 刚度变大, 基底应力反而增加。

Zhao 等^[12]通过有限元分析发现, 沥青表面的拉伸应变随沥青层厚度的增加而增大。Anderson 等^[13]发现当沥青层超过一定厚度时, 保证施工状态下, 路面结构不会产生自底向上的疲劳开裂。实际上, 当路面的基层厚度达到一定值时, 继续增加厚度, 不会显著提高结构性能及寿命^[14]。

经过多年发展, 我国沥青路面设计规范已更新了 7 个版本, 现有规范体系涵盖了半刚性基层路面、柔性基层路面等大部分结构类型, 通过规范可以实现对典型路面结构的合理设计。但是, 随着路面结构类型的日益更新, 倒装路面、长寿命路面、抗车辙路面等非典型路面结构设计指标的适应性还有待探究, 典型路面的合理厚度范围还有待完善。因此, 本研究考虑荷载非均布移动特性, 针对半刚性基层路面、柔性基层路面、加铺路面 3 种典型结构, 及长寿命路面、倒装结构路面、抗车辙路面 3 种非典型结构, 利用 ABAQUS 有限元分析软件, 建立路面结构力学分析模型, 探究每种路面类型所适用的结构设计指标, 并针对我国应用最广泛的半刚性基层路面, 明确其合理厚度范围, 为沥青路面结构的设计和应用提供依据。

1 有限元模型的建立

1.1 结构及材料参数

6 种沥青路面结构的厚度及材料参数^[15]如表 1、表 2 所示。为对 6 种路面结构响应进行对比分析, 相同的结构材料设置相同参数, 模量选取 20 °C 下的动态模量。

表 1 沥青路面结构

Tab. 1 Asphalt pavement structures

半刚性基层路面	长寿命路面	倒装结构路面	抗车辙路面	柔性基层路面	加铺路面
4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13
6 cm AC-20	6 cm AC-20	6 cm AC-20	12 cm AC-25	6 cm AC-20	6 cm AC-20
8 cm ATB-25	15 cm ATB-30	8 cm AC-25	2 cm SMA-5	8 cm AC-25	4 cm SMA-13
34 cm 水稳碎石	30 cm 水稳碎石	10 cm ATB-25	34 cm 水稳碎石	15 cm ATB-30	6 cm AC-20
16 cm 水稳碎石	16 cm 水稳碎石	20 cm 级配碎石	16 cm 水稳碎石	20 cm 级配碎石	8 cm ATB-25
232 cm 土基	229 cm 土基	30 cm 水稳碎石	20 cm 级配碎石	20 cm 级配碎石	34 cm 水稳碎石
—	—	222 cm 土基	212 cm 土基	227 cm 土基	16 cm 水稳碎石
—	—	—	—	—	222 cm 土基

表 2 路面结构材料参数

Tab. 2 Material parameters of pavement structure

材料名称	模量/MPa	泊松比 μ	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
SMA-13	5 500	0.25	2 400
SMA-5	4 500	0.25	2 500
AC-20	6 500	0.25	2 400
AC-25	7 000	0.25	2 400
ATB-25	4 000	0.25	2 400
ATB-30	4 500	0.25	2 500
水稳碎石	7 500	0.25	2 300
级配碎石	500	0.35	2 200
压实土	150	0.40	1 900

1.2 荷载和边界条件

传统的静力分析无法反映路面结构响应的波动性及正、负交变特性。因此,有必要考虑荷载非均匀布形式及移动特性,以尽可能反映路面真实受力状况。本研究采用的荷载为单轴双轮组,每个轮胎的平均接地压力如图 1 所示。图 1 中每个小矩形荷载纵向长度为 0.025 m,其内部数值为接地压力大小,单位为 $\text{MPa}^{[16]}$ 。

有限元模型中,将图 1 所示的轮胎接地压力模型简化为多个矩形荷载的叠加。假设车辆向 x 方向移动,如图 2 和式 (1) 所示。荷载移动长度为 3.2 m,移动速度为 25 m/s (高速公路平均行驶速度),作用总时间为 0.128 s。在此基础上,基于有限元软件 ABAQUS 完成移动荷载 DLOAD 子程序编写。

$$P = \begin{cases} P_z & |x - Vt| \leq a_0 \text{ 且 } |y| \leq b_0 \\ 0 & |x - Vt| \geq a_0 \text{ 或 } |y| \geq b_0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, P_z 为小矩形荷载大小; V 为荷载移动速度, 25 m/s; t 为荷载作用时间; a_0 为小矩形荷载纵向长度的半值, 0.012 5 m; b_0 为小矩形荷载横向宽度的半值。

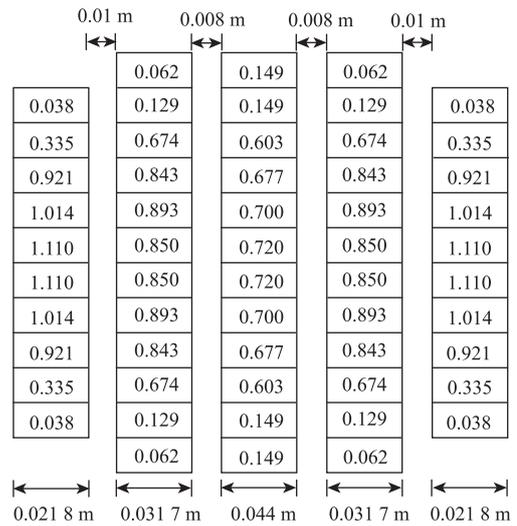


图 1 非均匀布接地压力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-uniformly distributed contact pressure

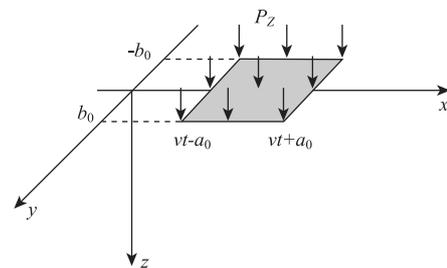


图 2 荷载移动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of moving load

基于 ABAQUS 软件建立路面结构三维有限元模型,以半刚性基层路面结构为例,平面尺寸及有限元模型如图 3 所示。为减小边界效应,沿行车方向前后各留 2.25 m,左右各留 2 m。模型底部设置完全固结,四周设置法向固结。为使每个小矩形荷载施加于独立单元上,沿行车方向每隔 0.025 m 划分单元,每个加载单元的作用时间为 0.001 s。为兼顾

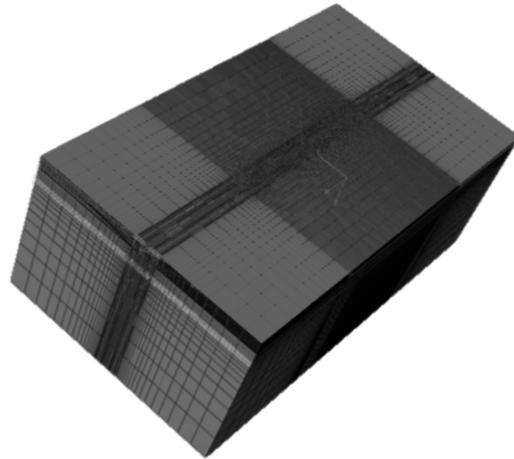
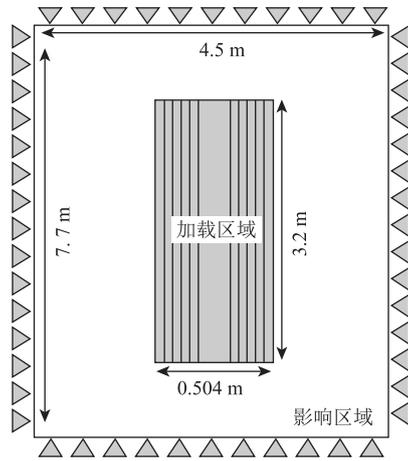


图 3 路面结构三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional FE model of pavement structure

计算效率和精度, 单元类型采用减缩积分单元。

2 不同类型沥青路面设计指标

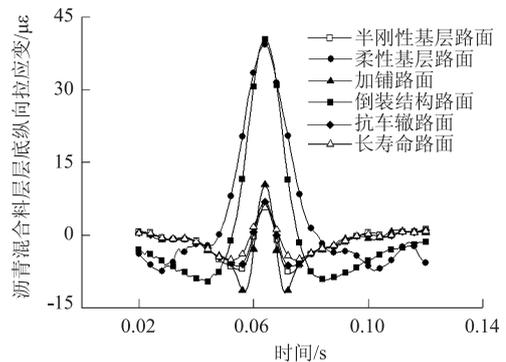
现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[17]中的路面设计指标是基于基层及底基层材料类型提出的, 忽略了面层结构的影响, 非典型路面结构设计指标不明确。为此, 本研究建立了非均匀移动荷载下 6 种路面结构的力学模型, 根据动力响应规律, 分析各指标对每种路面结构的适用性, 进一步计算 6 种路面结构在不同指标下的使用寿命, 确定每种路面类型的结构设计指标。

2.1 路面结构瞬态响应分析

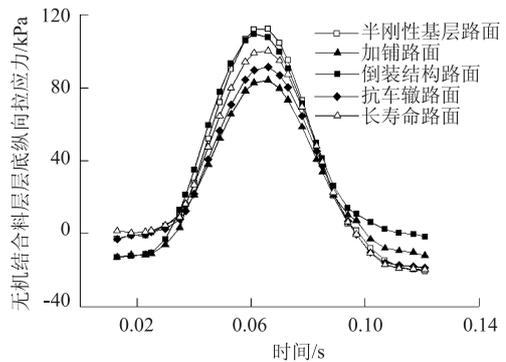
2.1.1 疲劳控制指标响应分析

规范^[17]采用沥青混合料层层底纵向拉应变及无机结合料层层底纵向拉应力控制路面结构的疲劳破坏, 图 4 为 6 种结构在上述 2 种指标下的时程变化曲线。其中, 沥青混合料层层底拉应变的最不利位置为单轮荷载中心正下方, 无机结合料层层底拉应力的最不利位置为双轮荷载中心正下方。

由图 4 (a) 可看出, 倒装结构路面与柔性基层路面的拉应变幅值较大, 分别为 40.38, 39.23 $\mu\epsilon$, 原因是这 2 种路面结构基层均采用柔性材料, 沥青混合料层的抗变形及耐疲劳能力弱。因此, 应考虑将沥青混合料层层底拉应变作为倒装结构路面及柔性基层路面的结构设计指标。由图 4 (b) 可看出, 半刚性基层路面的无机结合料层层底拉应力幅值达 112.18 kPa, 是其余 4 种路面结构幅值的 1.1~1.4 倍, 这说明采用刚-柔混合基层或适当增加上层沥青材料厚度, 可减小无机结合料层层底的拉应力。无机结合料层疲劳开裂易引起沥青层出现反射裂缝,



(a) 沥青混合料层层底拉应变



(b) 无机结合料层层底拉应力

图 4 疲劳控制指标时程

Fig. 4 Time histories of fatigue control indicators

因此需将无机结合料层层底拉应力作为路面结构的设计指标。而对于倒装结构路面, 因其在无机结合料层和沥青混合料层之间设置了级配碎石过渡层, 可有效避免反射裂缝的发生, 故对于倒装结构路面, 无机结合料层层底拉应力可不作为设计指标考虑。

2.1.2 永久变形指标响应分析

规范^[17]采用沥青混合料层永久变形量及路基顶

面竖向压应变作为路面结构永久变形的控制指标, 其中, 沥青混合料层永久变形量通过沥青层压应变来体现, 图 5 为 6 种结构沥青层压应变及路基顶面竖向压应变随深度变化规律。其中, 沥青层压应变的最不利位置为轮胎最外侧条带正中心, 路基顶面竖向压应变的最不利位置为双轮荷载中心正下方, 起始位置为沥青表面。

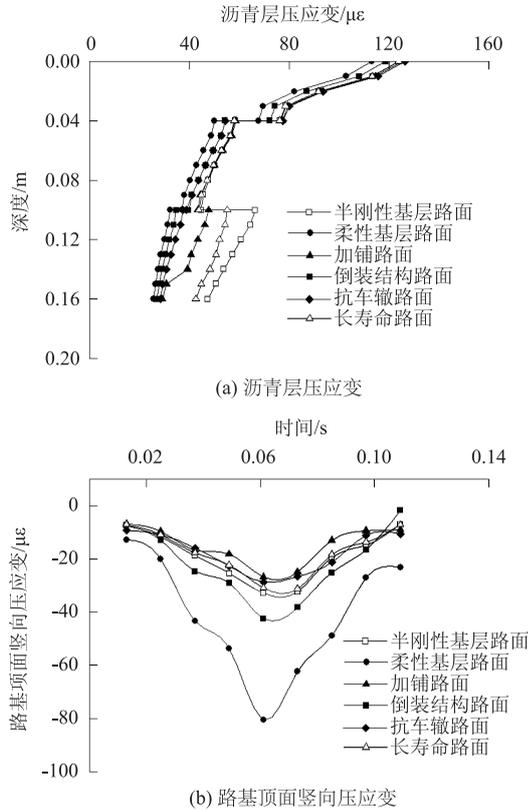


图 5 永久变形随深度变化曲线

Fig. 5 Curves of permanent deformation varying with depth

由图 5 (a) 可看出, 6 种路面结构的压应变峰值均大于 $110 \mu\epsilon$, 因此应考虑将沥青混合料层永久变形量作为上述路面结构的设计指标。由图 5 (b) 可看出, 柔性基层路面的路基顶面竖向压应变峰值最大, 为 $88.3 \mu\epsilon$, 这是因为该结构的基层及底基层材料均为柔性级配碎石, 结构抗变形能力差。当竖向压应变的值处于 $0 \sim 400 \mu\epsilon$ 的范围内时, 路基处于一个可回弹的状态^[18], 因此, 路基顶面竖向压应变可不作为设计指标考虑。

2.2 路面结构设计指标确定

以《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) 的结构验算理论^[17]为依据, 计算路面结构在静态双圆均布荷载及移动非均布荷载下的使用寿命, 结果如表 3 所示。静态双圆均布荷载作用下的路面使用寿命为移动非均布荷载作用下的 0.7~0.9 倍, 这表明采用静态双圆均布荷载计算所得的路面使用寿命较真实值偏小, 会导致路面厚度产生不必要的增加, 故在路面力学分析中应考虑荷载的非均布移动特性。

当路面使用寿命达到某一指标的使用寿命上限时, 路面结构将无法路用性能要求, 因此根据移动非均布荷载下沥青路面结构使用寿命, 选取使用寿命计算值较小的 2 个力学指标作为该路面结构的设计指标, 具体如表 4 所示。与规范相比, 表 4 依据路面结构类型明确给出了适用性结构设计指标, 提出了将无机结合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量作为长寿命路面、抗车辙路面结构的设计指标, 将沥青混合料层层底拉应变、沥青混合料层永久变形量作为倒装路面结构的设计指标。

表 3 路面结构使用寿命

Tab. 3 Service life of pavement structure

力学指标	荷载	路面结构使用寿命/次					
		半刚性基层路面	长寿命路面	倒装结构路面	抗车辙路面	柔性基层路面	加铺路面
沥青混合料层 层底拉应变	静载	9.02×10^{11}	2.91×10^{11}	6.47×10^7	3.57×10^{11}	3.74×10^7	4.48×10^{11}
	动载	1.21×10^{12}	3.56×10^{11}	7.31×10^7	4.97×10^{11}	3.78×10^7	5.52×10^{11}
无机结合料层 层底拉应力	静载	6.43×10^9	7.30×10^9	8.61×10^9	8.23×10^9	—	9.14×10^9
	动载	6.98×10^9	7.46×10^9	9.74×10^9	8.58×10^9	—	9.23×10^9
沥青混合料层 永久变形量	静载	1.62×10^9	4.50×10^8	3.62×10^8	1.55×10^9	2.57×10^8	8.17×10^8
	动载	2.17×10^9	5.96×10^8	4.77×10^8	2.08×10^9	3.46×10^8	1.09×10^9
路基顶面 竖向压应变	静载	3.60×10^{11}	5.03×10^{11}	1.43×10^{11}	8.67×10^{11}	6.51×10^9	1.35×10^{12}
	动载	2.40×10^{11}	3.26×10^{11}	1.40×10^{11}	5.27×10^{11}	3.71×10^9	1.14×10^{12}

3 半刚性基层路面合理厚度范围的确定

现行沥青路面结构厚度设计方法为, 首先大致

确定厚度, 然后进行验算调整, 直至满足验算要求, 该方法增加了路面厚度设计难度。因此, 本研究针对我国应用最广泛的半刚性基层路面, 改变面层和基

表4 路面结构设计指标

Tab. 4 Design indicators of pavement structure

路面类型	设计指标
半刚性基层路面	无机结合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量
长寿路面	无机结合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量
倒装结构路面	沥青混合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量
抗车辙路面	无机结合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量
柔性基层路面	沥青混合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量
加铺路面	无机结合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量

层厚度, 计算不同结构厚度下的路面使用寿命, 并分析结构厚度改变对使用寿命的影响, 最终确定满

足验算要求的半刚性基层路面的合理厚度范围, 以提高设计效率。

3.1 沥青混合料面层厚度影响

控制基层厚度不变, 改变沥青混合料面层厚度, 分析其对路面使用寿命影响规律, 如图6所示。

由图6可知, 当基层厚度小于250 mm时, 随沥青面层厚度的增加, 路面结构使用寿命先增大后减小。这是由于当基层厚度小于250 mm, 面层厚度小于150 mm时, 路面使用寿命控制指标为无机结合料层层底拉应力, 增加面层厚度可有效减小基层层底拉应力; 当面层厚度大于200 mm时, 控制指标为沥青混合料层永久变形量, 继续增加面层厚度, 会降低路面使用寿命, 更易引发路面永久变形病害。

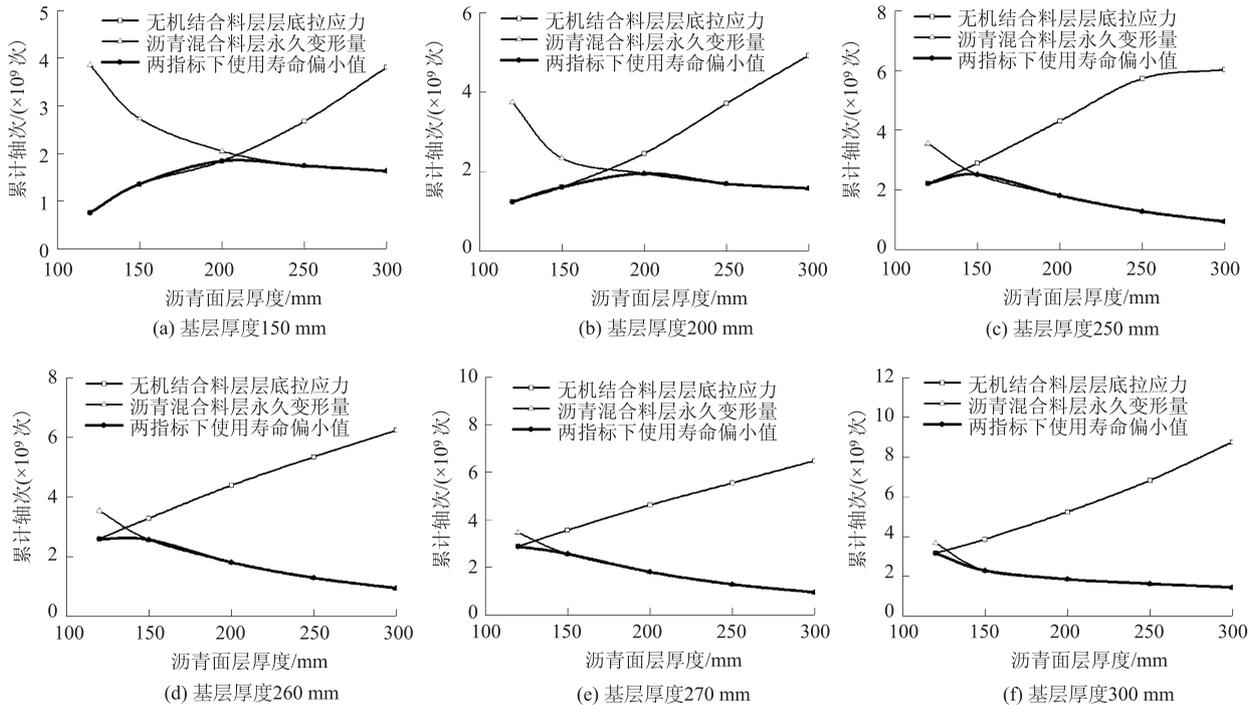


图6 不同基层厚度下累计轴次变化曲线

Fig. 6 Curves of cumulative axles with different base course thicknesses

3.2 无机结合料基层厚度影响

控制面层厚度不变, 改变无机结合料基层厚度, 分析其对路面使用寿命的影响规律, 如图7所示。

由图7可看出, 当面层厚度小于190 mm时, 随半刚性基层厚度增加, 路面结构使用寿命先增大后不变。这是因为, 当面层厚度小于190 mm, 基层厚度小于200 mm时, 路面使用寿命控制指标为无机结合料层层底拉应力, 增加基层厚度可减小该值; 当基层厚度大于300 mm时, 控制指标为沥青混合料层永久变形量, 增加基层厚度对路面使用寿命无影响。

3.3 路面合理厚度范围确定

基于上述分析, 根据不同结构厚度下的半刚性基层路面的使用寿命计算值, 以累计轴次为厚度区间划分依据, 对路面进行合理厚度范围的确定, 具体如表5所示。在进行半刚性基层路面结构设计时, 基于设计车道设计年限的累计轴次, 可直接依据表5选取合理的结构层厚度, 即可保证设计厚度满足验算要求。

4 结论

本研究重点分析移动非均布荷载下路面结构设

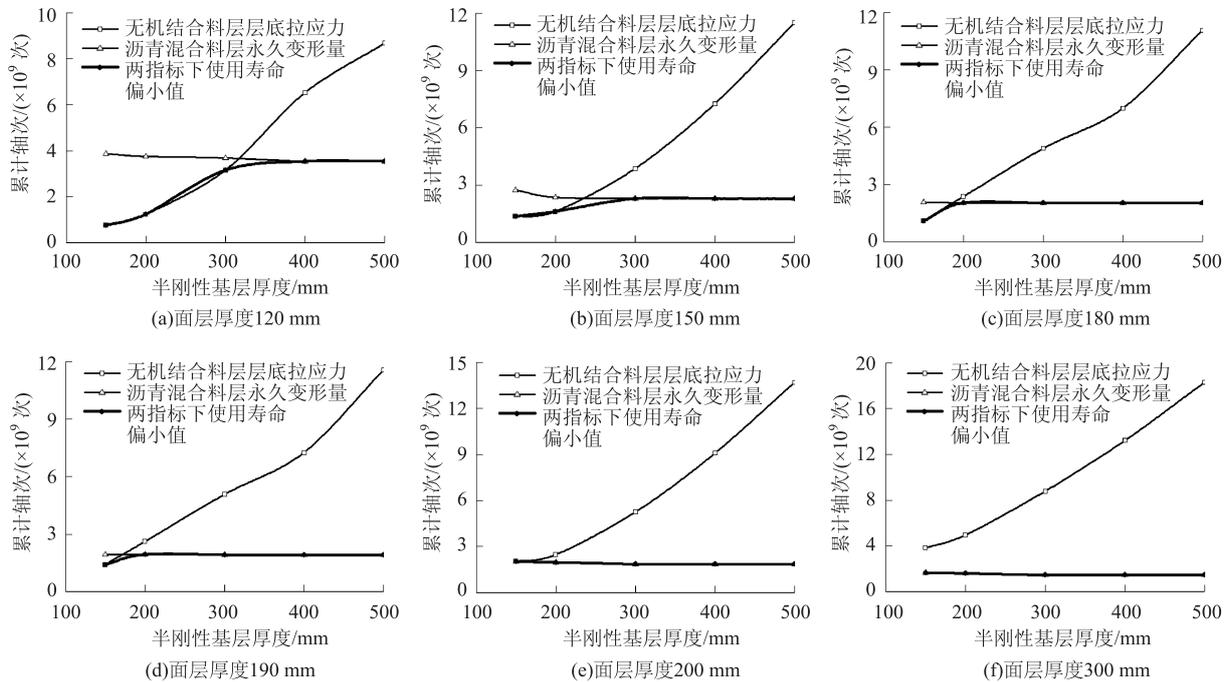


图 7 不同面层厚度下累计轴次变化曲线

Fig. 7 Curves of cumulative axles with different surface course thicknesses

表 5 半刚性基层路面合理厚度

Tab. 5 Reasonable thickness of semi-rigid base pavement

累计轴次/ ($\times 10^8$ 次)	5.0~ 10.0	10.0~ 15.0	15.0~ 20.0	25.0~ 30.0	30.0~ 35.0
面层厚度/ mm	120~150	200~300	150~250	150	120
基层厚度/ mm	100~150	100~150	200~500	300~500	300~500
底基层厚 度/mm	150~200	150~200	150~200	150~200	150~200

计指标及半刚性基层路面合理厚度范围, 建立沥青路面动力分析三维有限元模型, 进行数值模拟分析, 依据力学响应结果及路面使用寿命, 得到以下结论:

(1) 针对本研究中 6 种路面结构, 可不将路基顶面竖向压应变作为设计指标。长寿命路面、抗车辙路面结构的设计指标为无机结合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量。倒装路面结构的设计指标为沥青混合料层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量。路面类型对设计指标的适用性影响较大, 设计指标应依据路面类型进行选取。

(2) 传统静态双圆均布荷载下路面使用寿命计算值为移动非均布荷载下的 0.7~0.9 倍, 荷载形式对路面结构使用寿命的影响是不可忽略的, 在路面力学分析中应考虑荷载的非均布移动特性。

(3) 针对半刚性基层路面, 基层厚度小于

250 mm 时, 随沥青面层厚度的增加, 路面使用寿命先增大后减小, 控制指标由无机结合料层层底拉应力变为沥青混合料层永久变形量。面层厚度大于 200 mm 时, 路面使用寿命控制指标为沥青混合料层永久变形量, 增加基层厚度对路面使用寿命无影响, 而增加面层厚度则会降低路面使用寿命。

参考文献:

References:

[1] 邓学钧, 黄晓明. 路面设计原理与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
DENG Xue-jun, HUANG Xiao-ming. Principles and Design Methods of Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[2] 张艳红, 申爱琴, 郭寅川, 等. 不同类型基层沥青路面设计指标的控制 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2011, 31 (1): 6-11.
ZHANG Yan-hong, SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan, et al. Control of Designing Indices for Asphalt Pavement with Different Types of Base [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31 (1): 6-11.

[3] 谭炯, 刘朝晖, 沙庆林. 重载交通长寿命半刚性基层沥青路面浅析 [J]. 西部交通科技, 2007 (6): 1-5.
TAN Jiong, LIU Zhao-hui, SHA Qing-lin. A Study on the Long-life Heavy Load Semi-rigid Base Asphalt Pavements

- [J]. Western China Communications Science & Technology, 2007 (6): 1-5.
- [4] 薛忠军, 王春明, 张伟, 等. 半刚性基层长寿命路面结构和材料设计研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (10): 37-42, 56.
XUE Zhong-jun, WANG Chun-ming, ZHANG Wei, et al. Research on Pavement Structure and Material Design of Semi-rigid Base Long-life Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (10): 37-42, 56.
- [5] QIAN G P, YAO D, GONG X B, et al. Performance Evaluation and Field Application of Hard Asphalt Concrete under Heavy Traffic Conditions [J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116729.
- [6] 庄传仪. 基于加速加载响应的柔性基层沥青路面设计指标与参数研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
ZHUANG Chuan-yi. Structural Design Indicators and Parameters for Flexible Base Asphalt Pavement Based on Accelerated Pavement Response [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [7] 张晓冰, 黄晓明. 半刚性基层沥青路面典型结构厚度设计研究 [J]. 中国公路学报, 1999, 12 (2): 25-30.
ZHANG Xiao-bing, HUANG Xiao-ming. Design and Research on Typical Structures of Semi Rigid Base [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12 (2): 25-30.
- [8] 张朝晖. ANSYS8.0 结构分析及实例解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
ZHANG Zhao-hui. ANSYS8.0 Structure Analysis and Example Analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [9] 郭寅川, 王礼根, 申爱琴, 等. 动载作用下级配碎石基层沥青路面力学分析 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (1): 27-33.
GUO Yin-chuan, WANG Li-gen, SHEN Ai-qin, et al. Dynamic Analysis of Graded Crushed Stone as Base of Asphalt Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (1): 27-33.
- [10] 杨国峰, 王浩仰, 潘玉利. 基于混合效应模型的沥青路面使用性能预测 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (8): 19-27.
YANG Guo-feng, WANG Hao-yang, PAN Yu-li. Prediction of Asphalt Pavement Performance Based on Mixed Effect Model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (8): 19-27.
- [11] 邹静蓉, 张治强, 李涛. 普通干线公路半刚性基层沥青路面破坏机理及控制措施 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (5): 1-7, 48.
ZOU Jing-rong, ZHANG Zhi-qiang, LI Tao. Failure Mechanism and Control Measures of Common Trunk Highway Semi-rigid Base Asphalt Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (5): 1-7, 48.
- [12] ZHAO Y Q, ALAE M, FU G Z. Investigation of Mechanisms of Top-down Fatigue Cracking of Asphalt Pavement [J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19 (6): 1436-1447.
- [13] ANDERSON D A, LE HIR Y M, MARASTEANU M O, et al. Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders [J]. Transportation Research Record, 2001, 1766: 48-56.
- [14] 陈祥. 大厚度半刚性基层沥青路面结构计算及其层间处理技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
CHEN Xiang. Large-scale Semi-rigid Base Asphalt Pavement Structure Calculation and Interlayer Treatment Technology Research [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2006.
- [15] 肖峰. 基于非均匀移动荷载的沥青铺面结构设计方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
XIAO Feng. Asphalt Pavement Structural Design Methodology Based on Non-uniform Moving Load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [16] 孙立军. 沥青路面结构行为学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
SUN Li-jun. Structural Behavior of Asphalt Pavement [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013.
- [17] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范 [S].
JTG D50—2017, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [18] 姚祖康. 沥青路面结构设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
YAO Zu-kang. Structural Design of Asphalt Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.