

文章编号:1671-8879(2015)03-0059-08

# 抗车辙柔性基层耐久性沥青路面 车辙疲劳影响规律

李丽民<sup>1,2</sup>, 张国祥<sup>2</sup>

(1. 湖南科技学院 土木与环境工程学院, 湖南 永州 425199; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:**为了解决柔性基层的车辙问题,从车辙破坏机理出发,采用英国壳牌设计软件及剪应变、弯拉应变、路基顶面压应变 3 个代表性指标,通过大量分析计算,得到了结构层厚度、模量等因素对抗车辙柔性基层耐久性沥青路面的影响规律。研究表明:抗车辙柔性基层耐久性路面面层总厚度应不小于 18 cm,半刚性底基层厚度应不小于 15 cm,但半刚性底基层厚度的增加会引起中、下面层层内剪应变的增加,对抗车辙不利,不宜过大,面层和基层总厚度宜大于 40 cm;中面层采用高模量沥青混凝土,能明显增强柔性基层耐久性路面的抗车辙和疲劳性能;设计合理的抗车辙柔性基层耐久性沥青路面结构,柔性基层及其下层发生疲劳破坏的可能性不大。

**关键词:**道路工程;车辙;柔性基层;耐久性沥青路面;疲劳

**中图分类号:**U411;U418.68

**文献标志码:**A

## Influence law of rut and fatigue on the resisting rut durable flexible base asphalt pavement

LI Li-min<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-xiang<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** In order to solve the rutting problem of flexible base, this paper studied the formation mechanism of rutting and adopted shell pavement design software and three representative indexes including shear strain flexural-tensile strain, and compression strain on top of subgrade to obtain the influence law of the factors such as the structure thickness and elastic modulus to the rut durable flexible base asphalt pavement based on the formation mechanism of rutting. The results indicate that the total thickness of surface courses should not be less than 18 cm; the thickness of semi-rigid bottom base should not be less than 15 cm; but the semi-rigid bottom base can't be too thick, because when its thickness is added, the shearing strain of interface layer and underlying surface will be added, which isn't good for the resisting rut of pavement; the total thickness of surface courses and base should exceed 40 cm; the rut and fatigue property of the durable flexible base asphalt pavement can be enhanced significantly by using high modulus

收稿日期:2014-12-20

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2015JJ2073)

作者简介:李丽民(1974-),男,湖南邵阳人,湖南科技学院副教授,中南大学工学博士,E-mail:li-li-min@126.com。



asphalt concrete in middle course; for the resisting rut durable flexible base asphalt pavement designed rationally, the possibility of fatigue failure of flexible base and the layers below flexible base is not high. 1 tab, 22 figs, 11 refs.

**Key words:** road engineering; rut; flexible base; durable asphalt pavement; fatigue

0 引言

目前,中国半刚性基层沥青路面耐久性差,使用寿命短已成为阻碍中国道路建设发展的主要问题。借鉴国外成功经验,采用柔性基层来解决中国半刚性基层沥青路面的早期破坏问题,提高路面使用寿命,已是中国道路发展的必然趋势。车辙问题是采用柔性基层需要解决的关键问题。路面沥青层厚度对路面抗车辙性能有显著影响,材料相同的路面结构,不同厚度路面的抗车辙性能明显不同,即使仅沥青层各层厚度不同的路面结构的路面抗车辙性能也存在较大差异;厚度相同的路面结构,面层材料不同时,路面的抗车辙性能也存在明显差异<sup>[1-2]</sup>。因此,如何选择最佳抗车辙路面结构是抗车辙路面设计必须解决的问题。近年来,张艳红等对不同类型基层沥青路面设计指标的控制进行了研究,但研究成果只局限于基层<sup>[3]</sup>;从志敏等研究了重载对沥青路面车辙及疲劳寿命的影响,但只研究了半刚性基层

沥青路面<sup>[4]</sup>。目前,中国对沥青路面车辙的研究几乎都是针对半刚性基层沥青路面的,对柔性基层耐久性沥青路面结构的车辙问题未见专门报道。为此,本文对抗车辙柔性基层耐久性沥青路面结构进行深入研究,为抗车辙柔性基层耐久性路面结构设计提供理论依据。

1 抗车辙耐久性沥青路面结构比选

借鉴国内外已有研究成果<sup>[5-7]</sup>,选取路面结构及计算参数,见表 1,采用英国 BISAR3.0 软件进行计算。考虑到引起沥青路面产生车辙的主要原因是剪切变形,主要发生在沥青面层<sup>[8-11]</sup>,疲劳破坏原因是沥青层底开裂破坏,主要计算沥青层剪应力、剪应变、弯拉应变,同时将顶面压应变作为参考指标。路面结构分析模型见下页图 1,相邻 2 个计算点 X、Y 方向距离均为 0.5,计算荷载采用标准轴载,层间假定完全连续,计算结果取 16 个点的最大值,结果见下页图 2~图 6。

表 1 路面结构及材料参数  
Tab. 1 Pavement structure and material parameters

半刚性底基层+ ATB 基层	半刚性底基层+ 级配碎石+ATB 基层	级配碎石+ ATB 基层	ATB 柔性基层	半刚性基层	抗压回弹 模量/MPa	泊松比
4 cm SMA13	4 cm SMA13	4 cm SMA13	4 cm SMA13	4 cm SMA13	2 200	0.35
6 cm SUP20	6 cm SUP20	6 cm SUP20	6 cm SUP20	6cm SUP20	2 100	0.35
8 cm SUP25	8 cm SUP25	8 cm SUP25		8 cm SUP25	2 000	0.35
8 cm ATB25	8 cm ATB25	18 cm ATB25	26 cm ATB25		1 100	0.35
	10 cm 级配碎石	20 cm 级配碎石			350	0.35
20 cm 水稳碎石	20 cm 水稳碎石		20 cm 水稳碎石	20 cm 水稳碎石	1 200	0.20
20 cm 石灰土	20 cm 石灰土	20 cm 石灰土	20 cm 石灰土	20 cm 石灰土	200	0.30
土基	土基	土基	土基	土基	45	0.40

注:SUP 为 Superpave asphalt mixture 的缩写。

由表 1 可以看出,半刚性底基层+ATB 基层路面结构的抗车辙性能最优;柔性基层沥青路面基层底拉应力比半刚性基层小,在 4 种柔性基层中,半刚性底基层+ATB 基层路面结构沥青层底拉应力和拉应变均较小,半刚性底基层+ATB 基层路面结构的抗疲劳性能也较优;半刚性底基层+ATB 基层路面结构在柔性基层路面结构中沥青层厚度最小,并且半刚性基层在中国有丰富的使用经验和材料,综合考虑,最后选定半刚性底基层+ATB 基层路面结构

作为抗车辙柔性基层耐久性沥青路面的优选结构。

2 路面结构抗车辙性能影响因素分析

对表 1 半刚性底基层+ATB 基层优选路面结构和参数,进行抗车辙性能影响因素分析。

2.1 厚度对路面结构沥青层内剪应变的影响

选用剪应变指标,路面深度方向厚度间隔为 1 cm 进行计算,结果取 16 个点计算值的最大值,结构层厚度对沥青层内各深度最大剪应变的影响见下



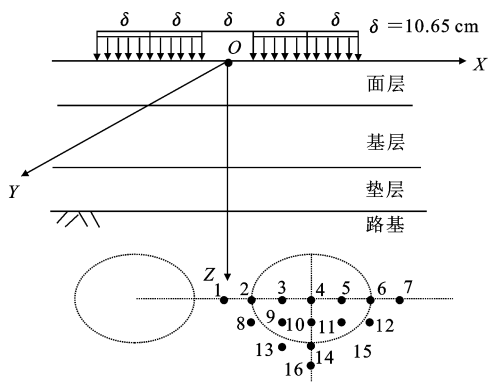


图 1 分析模型与计算点位分布

Fig. 1 Analytical model and distribution of calculation point

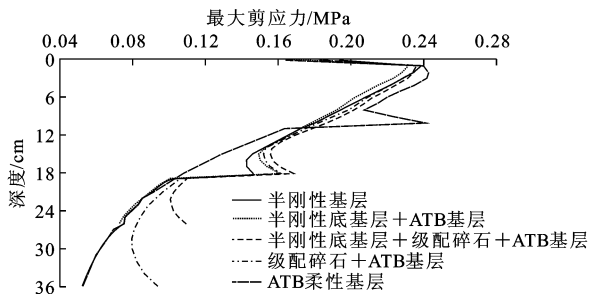


图 2 沥青层最大剪应力分布

Fig. 2 Maximum shearing stress distribution of asphalt layer

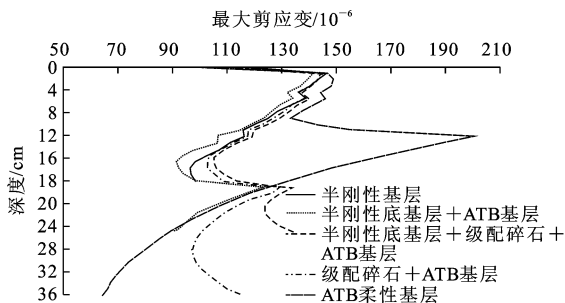


图 3 沥青层内最大剪应变分布

Fig. 3 Maximum shearing strain distribution of asphalt layer

页图 7~图 8。由图可得如下结论。

(1) 沥青层内各深度处最大剪应变随各结构层厚度的增加而减小, 增加各结构层厚度能提高路面的抗车辙性能, 但半刚性底基层厚度的增加会引起中、下面层层内剪应变的增加, 对中面层抗车辙关键区不利, 不宜过大。各结构层厚对沥青层内最大剪应变的影响具有相似性, 最大剪应变出现 2 个峰值, 分别在上面层和柔性基层顶面下 1 cm 处。

(2) 沥青面层厚度的增加能显著减小路表面和柔性基层内的剪应变, 各厚度对最大剪应变的影响基本相同, 剪应变随厚度的增加而减小, 各层厚度大于 6 cm 后, 最大剪应变大小的增长率基本不变, 厚度的增加对最大剪应变的影响趋于稳定。最大剪

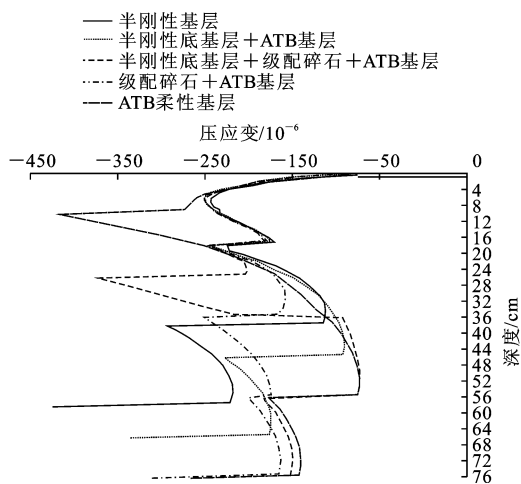


图 4 路面结构内顶面压应变分布

Fig. 4 Top compression strain distribution of pavement structure

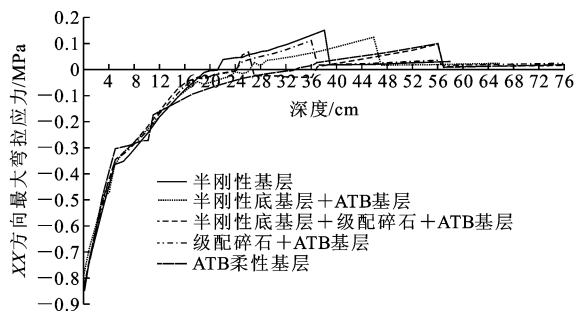


图 5 最大弯拉应力分布

Fig. 5 Maximum stretch stress distribution

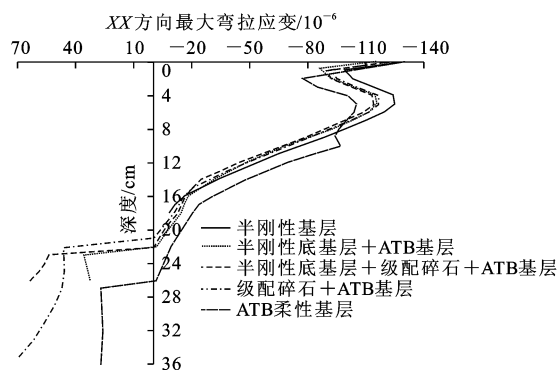


图 6 沥青层内最大弯拉应变分布

Fig. 6 Maximum stretch strain distribution

应变随面层厚度的增加而减小, 当面层总厚度大于 18 cm 后, 最大剪应变的增加明显减小。

(3) 半刚性基层厚度对柔性基层内的最大剪应变影响显著, 半刚性基层厚度大于 10 cm 后, 影响明显减小, 大于 15 cm 后, 最大剪应变随厚度的增加趋于稳定; 垫层厚度主要对柔性基层内的最大剪应变有影响, 但影响不大, 柔性基层厚度对沥青层最大剪应变基本没有影响。抗车辙柔性基层路面结构设计时, 面层总厚度应不小于 18 cm, 半刚性底基层厚度



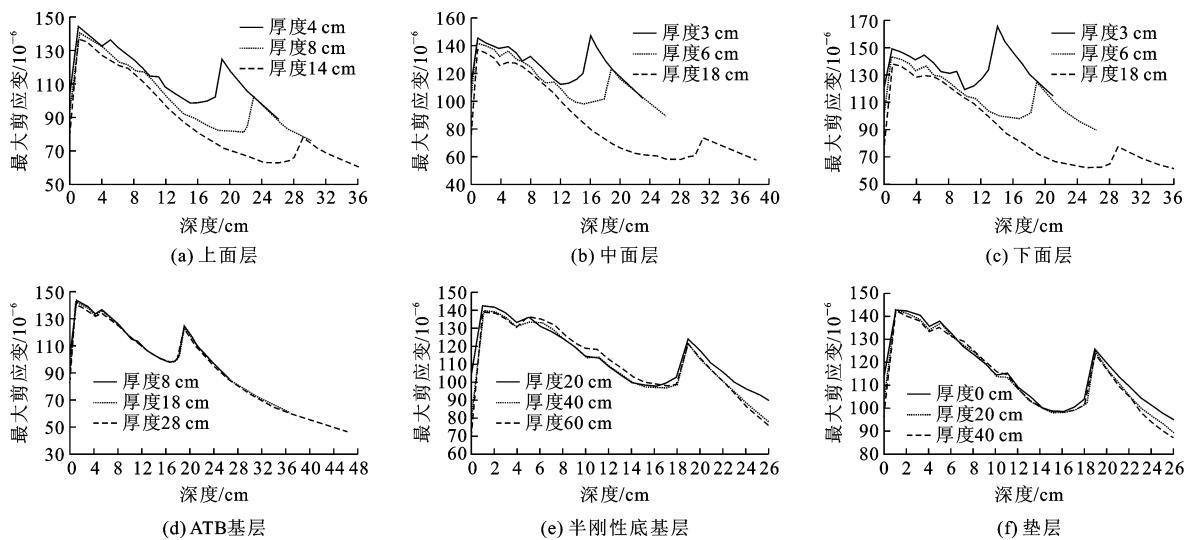


图 7 厚度对沥青层内最大剪应变的影响

Fig. 7 Thickness effect on maximum shearing strain of asphalt layer

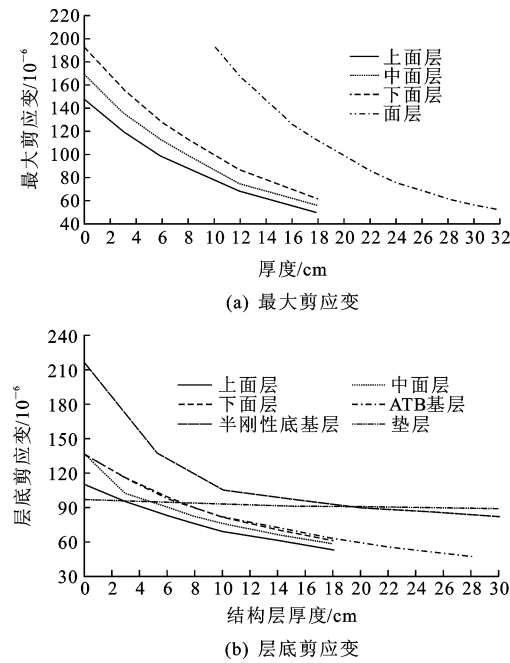


图 8 厚度对柔性基层内剪应变的影响

Fig. 8 Thickness effect on shearing strain of flexible base

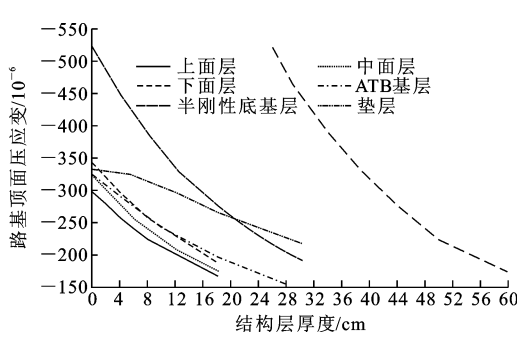


图 9 厚度对路基顶面压应变的影响

Fig. 9 Thickness effect on shearing strain of top subgrade

对路基顶面压应变影响显著。面层和基层总厚度对路基顶面最大压应变起主要控制作用,总厚度小于 40 cm 时,厚度对路基顶面最大压应变影响明显,为提高路面的抗车辙性能,面层和基层总厚度宜大于 40 cm,必要时设置一定厚度的垫层。

2.3 模量对路面结构沥青层内剪应变的影响

选用剪应变指标,路面深度方向厚度间隔为 1 cm 进行计算,结果取 16 个点计算值的最大值,经大量计算得到,各层模量对沥青层内剪应变的影响见下页图 10,模量对各层内剪应变变化最快点的最大剪应变的影响见下页图 11。

由图可看出:沥青层各层模量的增加能显著减小自身层的最大剪应变,对其他各层最大剪应变基本没什么影响。沥青层各层模量大于 2 800 MPa 时,模量对最大剪应变的影响已不明显,此外,中面层模量的增加会增加上面层层底最大剪应变。垫层、半刚性底基层模量的增加能减小沥青层各深度处的最大剪应变。

2.2 厚度对路面结构路基顶面压应变的影响

选用路基顶面压应变指标,路面深度方向厚度间隔为 1 cm 进行计算,结果取 16 个点计算值的最大值,经大量计算得到,各结构层厚度和路面总厚度对路基顶面最大压应变的影响见图 9。

从图 9 可知:路基顶面压应变随各结构层厚度的增加而减小,垫层厚度对路基顶面压应变影响最小,各沥青层厚度小于 8 cm 时,对路基顶面最大压应变有很大影响,半刚性底基层厚度小于 20 cm 时,

应不小于 15 cm,但不宜太大。



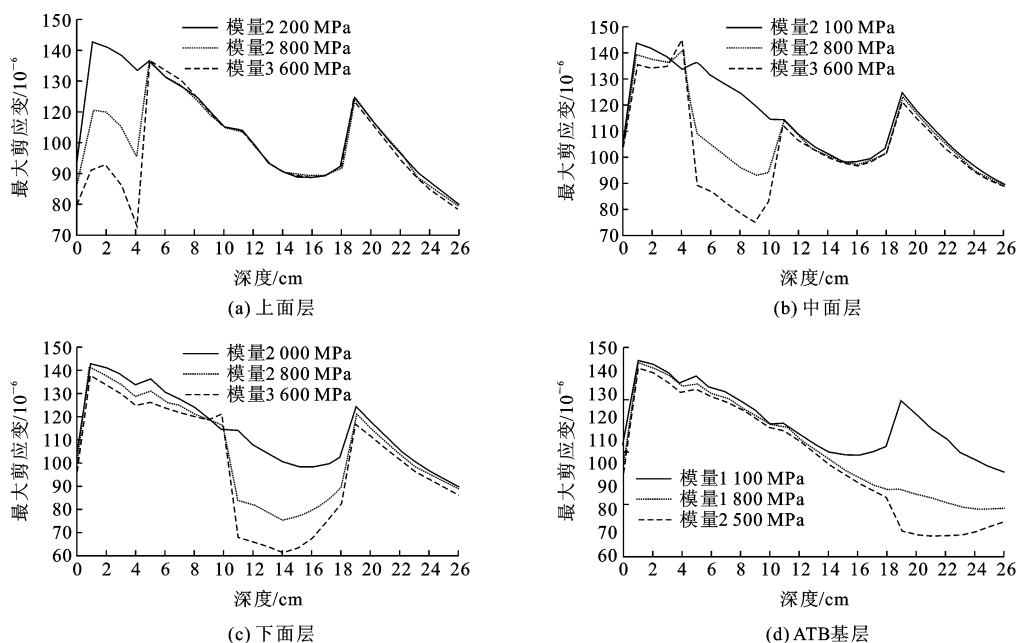


图10 模量对沥青层内最大剪应变的影响

Fig. 10 Modulus effect on maximum shearing strain of asphalt layer

## 2.4 模量对路面结构路基顶面压应变的影响

选用路基顶面压应变指标,路面深度方向厚度间隔为1 cm进行计算,结果取16个点计算值的最大值,经大量计算得到各结构层模量对路基顶面最大压应变的影响,见下页图12。

从图12可看出:随着结构层模量的增大,路基顶面的最大压应变减小,沥青层各结构层模量对路基顶面最大压应变的影响较小;半刚性底基层和垫层模量对路基顶面最大压应变有较大影响,半刚性底基层模量小于1 200 MPa、垫层模量小于800 MPa时,模量的增加能明显减小路基顶面的压应变;土基模量对路基顶面最大压应变影响最大,提高土基模量能显著降低路基顶面的最大压应变。

## 3 路面结构抗疲劳性能影响因素

对表1中的半刚性底基层+ATB基层优选路面结构和参数,进行抗疲劳性能影响因素分析。

### 3.1 厚度对路面结构抗疲劳性能的影响

选用弯拉应力和弯拉应变指标,路面深度方向厚度间隔为1 cm进行计算,结果取16个点计算值的最大值。经计算发现:面层、ATB基层及半刚性底层厚度对路面各深度处的最大弯拉应力、应变的影响相似,如下页图13、图14所示;垫层厚度对路面各深度处的最大弯拉应力、应变的影响见下页图15、图16;各结构层厚度对沥青层内最大弯拉应变的影响下页见图17。由图可得如下结论。

(1)随着各结构层厚度的增加,路面结构层内弯拉应力和弯拉应变减小,路面疲劳破坏可能性减小,设计合理的柔性基层路面结构能够实现耐久性路面的抗疲劳破坏的目标。

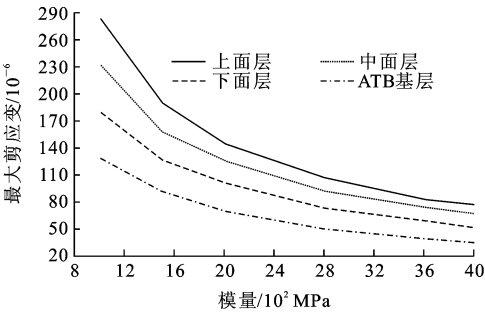
(2)垫层厚度对路面抗疲劳性能影响不大;沥青层各结构层厚度大于8 cm后,厚度的增加对路面抗疲劳性能的影响趋于稳定,沥青层总厚度大于26 cm后,厚度对路面抗疲劳性能的影响大大减小,大于40 cm后影响已经很小;半刚性底基层厚度小于10 cm时,对路面抗疲劳性能有很大影响,大于20 cm后影响已经很小。考虑抗疲劳性能进行路面结构设计时,面层总厚度应不小于18 cm,大碎石柔性基层厚度宜不小于8 cm,半刚性底基层厚度宜不小于10 cm。

### 3.2 模量对路面结构抗疲劳性能的影响

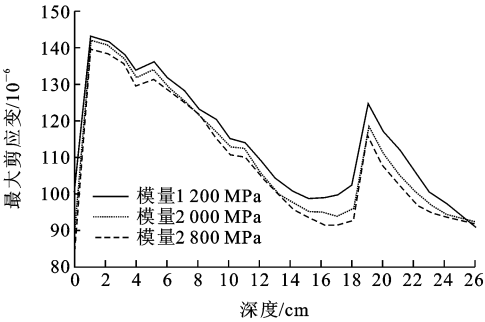
选用弯拉应力和弯拉应变指标,路面深度方向厚度间隔为1 cm进行计算,结果取16个点计算值的最大值。经大量计算发现:沥青层模量对路面各深度处的最大弯拉应力、应变的影响具有相似性,如下页图18、图19所示,半刚性基层、垫层、土基模量对路面各深度处的最大弯拉应力、应变的影响如下页图20、图21所示,沥青层取弯拉应变变化最快的点的弯拉应变,半刚性基层、垫层、土基取沥青层底弯拉应变作为指标,各结构层模量对沥青层内最大弯拉应变的影响见下页图22。由图可得如下结论。

(1)面层模量不影响路面结构的疲劳性能,中、

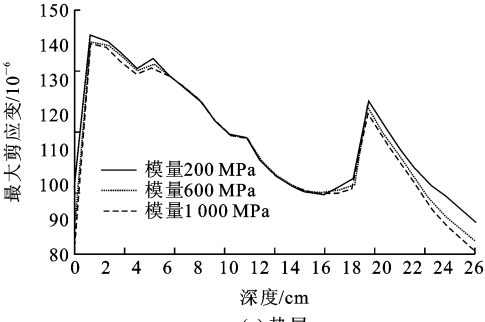




(a) 剪应变变化最大点



(b) 半刚性底基层



(c) 垫层

图 11 模量对沥青层各深度处最大剪应变的影响  
Fig. 11 Modulus effect on maximum shearing strain of asphalt layer

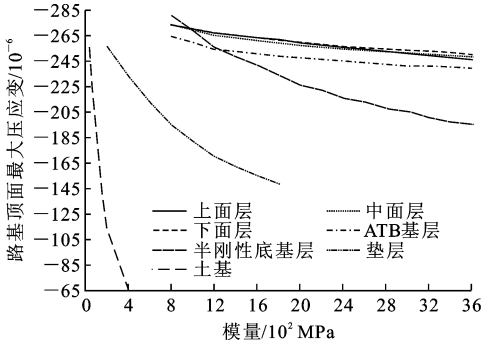


图 12 模量对路基顶面最大压应变的影响  
Fig. 12 Modulus effect on top maximum compression strain of subgrade

下面层、ATB 基层的模量不影响沥青层以下路面结构的疲劳性能,模量的增加仅对其自身和其上一层的最大弯拉应力和最大弯拉应变有影响,随着模量的增加,最大弯拉应力和应变减小,对路面抗疲劳性

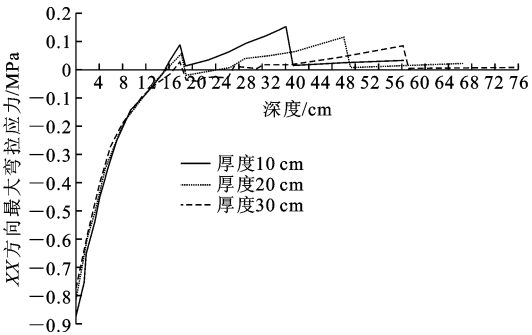


图 13 半刚性底基层厚度对各深度最大弯拉应力的影响  
Fig. 13 Semi-rigid bottom base thickness effect on maximum stretch stress

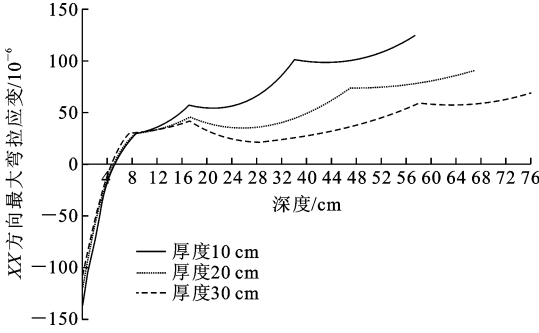


图 14 半刚性底基层厚度对各深度最大弯拉应变的影响  
Fig. 14 Semi-rigid bottom base thickness effect on maximum stretch strain

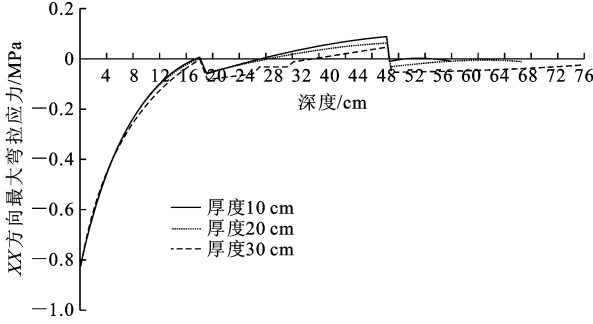


图 15 垫层厚度对各深度最大弯拉应力的影响  
Fig. 15 Cushion thickness effect on maximum stretch stress

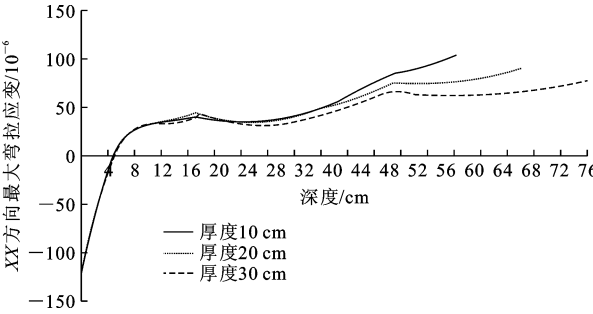


图 16 垫层厚度对各深度最大弯拉应变的影响  
Fig. 16 Cushion thickness effect on maximum stretch strain

能有利,但各层模量大于 2 800 MPa 后,对沥青最大弯拉应变的影响已不明显,并且模量的增加会引



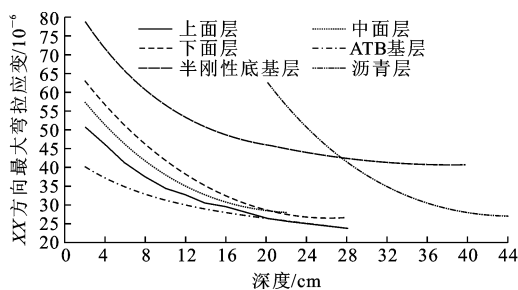


图 17 结构层厚度对沥青层底层最大弯拉应变的影响

Fig. 17 Thickness effect on bottom maximum stretch strain of asphalt layer

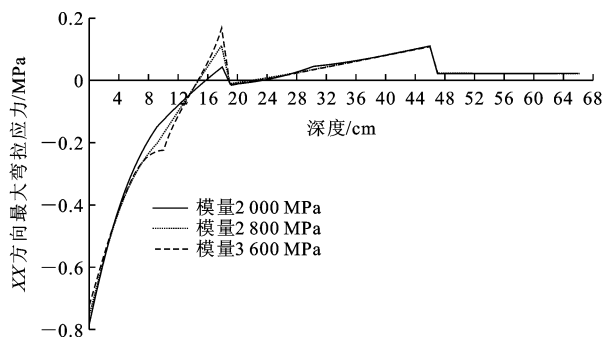


图 18 中面层模量对各深度处最大弯拉应力的影响

Fig. 18 Middle asphalt layer modulus effect on maximum stretch stress

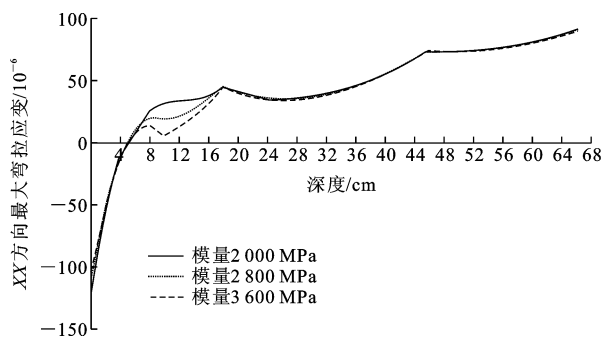


图 19 中面层模量对沥青层内各深度处最大弯拉应变的影响

Fig. 19 Middle asphalt layer modulus effect on maximum stretch strain

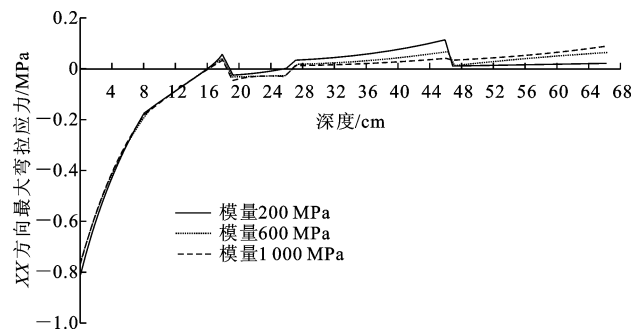


图 20 垫层模量对各深度最大弯拉应力的影响

Fig. 20 Cushion modulus effect on maximum stretch stress

起自身层底最大拉应力的增加,不宜太大。

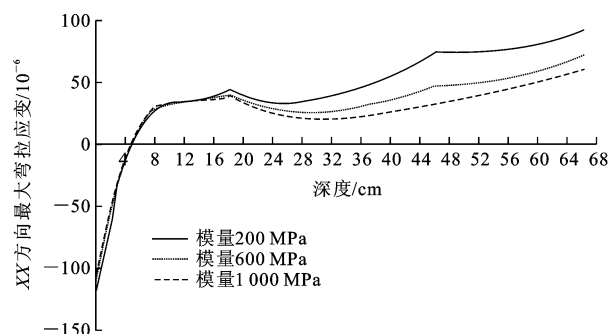


图 21 垫层模量对各深度最大弯拉应变的影响

Fig. 21 Cushion modulus effect on maximum stretch strain

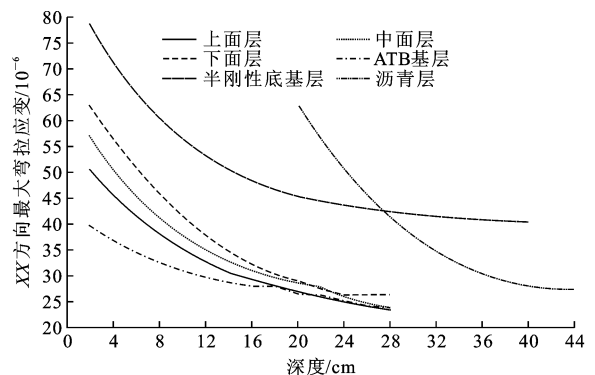


图 22 结构层模量对沥青层内最大弯拉应变的影响

Fig. 22 Modulus effect on maximum stretch strain of asphalt layer

(2)半刚性底基层、垫层、土基模量的增加能减小中面层以下路面结构的最大弯拉应力和应变,对路面结构抗疲劳性能有利,但也会增加自身层的最大弯拉应力,不宜太大,同时土基模量大于 100 MPa、垫层模量大于 800 MPa、半刚性底基层模量大于 1 600 MPa时,对沥青层的疲劳性能影响已不明显。

## 4 结 语

(1)在半刚性基层和柔性基层路面结构中,半刚性底基层柔性基层复合式路面结构的抗车辙性能最优,抗疲劳性能也较优,加上半刚性基层在中国有丰富的使用经验和材料。半刚性底基层+ATB 基层沥青路面结构是实现耐久性沥青路面的最佳选择。

(2)沥青层内各深度处最大剪应变随各结构层厚度的增加而减小,沥青层内最大剪应变有 2 个峰值,分别在上面层和柔性基层顶面下 1 cm 处。沥青面层厚度的增加能显著减小路表面和柔性基层内的剪应变,半刚性基层厚度对柔性基层内的最大剪应变影响显著,垫层厚度主要对柔性基层内的最大剪应变有影响,但影响不大,柔性基层厚度对沥青层最大剪应变基本没有影响,增加各结构层厚度有利于



路面的抗车辙性能,但半刚性底基层厚度的增加会引起中、下面层层内剪应变的增加,对抗车辙不利,不宜过大。抗车辙柔性基层路面结构设计时,面层总厚度应不小于 18 cm,半刚性底基层厚度应不小于 15 cm,但不宜太大。

(3)路基顶面压应变随各结构层厚度的增加而减小,垫层厚度对路基顶面压应变影响最小,面层和基层总厚度对路基顶面最大压应变起主要控制作用,总厚度小于 40 cm 时,厚度对路基顶面最大压应变影响明显,为提高路面的抗车辙性能,面层和基层总厚度宜大于 40 cm,必要时设置一定厚度的垫层。

(4)沥青层各层模量的增加能显著减小自身层的最大剪应变,中面层模量的增加会增加上面层层底最大剪应变。随着结构层模量的增大,路基顶面的最大压应变减小,沥青层各结构层模量对路基顶面最大压应变的影响较小;半刚性底基层和垫层对路基顶面最大压应变有较大影响,半刚性底基层模量小于 1 200 MPa、垫层模量小于 800 MPa 时,模量的增加能明显减小路基顶面的压应变;土基模量对路基顶面最大压应变影响最大,提高土基模量能显著降低路基顶面的最大压应变。

(5)合理设计抗车辙柔性基层沥青路面结构,柔性基层及以下层的疲劳破坏的可能性不大,能够实现耐久性路面的目标。

(6)后续研究可以引入更符合实际情况的车辆动载,对抗车辙柔性基层耐久性沥青路面车辙疲劳影响规律进行研究,进一步完善研究成果。

## 参考文献:

## References:

- [1] 雷 婷. 基于动力问题的沥青路面车辙预估[D]. 重庆:重庆交通大学,2006.  
LEI Ting. Calculation method for prediction of asphalt pavement rutting under dynamic loading[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2006. (in Chinese)
- [2] 徐建国,韩 波,汪永林,等. 沥青路面抗车辙性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(1):59-62.  
XU Jian-guo, HAN Bo, WANG Yong-lin, et al. Research on anti-rutting performance of asphalt pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2011,28(1):59-62. (in Chinese)
- [3] 张艳红,申爱琴. 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. 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. (in Chinese).

- [4] 从志敏,邹晓翎. 重载对沥青路面车辙及疲劳寿命的影响[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(4):54-58.  
CONG Zhi-min, ZOU Xiao-ling. Influence of heavy load on rutting and fatigue life of asphalt pavement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013,35(4):54-58. (in Chinese).
- [5] 沈金安,李福普,陈 景. 高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策[M]. 北京:人民交通出版社,2004.  
SHEN Jin-an, LI Fu-pu, CHEN Jing. Analysis of causes and countermeasures for premature failures of highway asphalt pavement[M]. Beijing: China Communications Press,2004. (in Chinese)
- [6] Torbruegge S, Wies B. Characterization of pavement texture by means of height difference correlation and relation to wet skid resistance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition,2015,2(2):59-67.
- [7] 周 刚. 高速公路沥青路面结构环道试验研究[D]. 上海:同济大学,2008.  
ZHOU Gang. Study on highway asphalt pavement structures by circular track testing [D]. Shanghai: Tongji University,2008. (in Chinese)
- [8] Maggiore C, Airey G, Marsac P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition,2014,1(1):49-54.
- [9] El-Basyouny M M, Witczak M W, El-Badawy S. Verification for the calibrated permanent deformation models for the 2002 design guide[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies,2005,74(5):601-652.
- [10] Suresh I S. Development of flexible pavement rut prediction models from the NCAT test track structural study sections data[D]. Auburn: Auburn University,2007.
- [11] Epps J A, Monismith C L, Seeds S B, et al. Wet track performance-interim findings[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,1998,67(7):214-219.