

典型路面结构抗车辙性能及其影响因素研究

李云良, 李 旭

哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年9月25日; 录用日期: 2022年10月15日; 发布日期: 2022年10月26日

摘 要

为了研究典型路面结构的抗车辙性能及其影响因素, 基于黏弹性本构理论及ABAQUS软件, 建立了路面结构车辙变形分析的力学模型, 对比分析了五种典型路面结构的抗车辙性能, 研究了温度及材料模量对路面结构抗车辙性能的影响。研究表明, 常规的半刚性基层路面结构的抗车辙性能优于全厚式沥青路面结构。随着温度的升高, 路面结构的抗车辙变形能力降低, 当温度超过50℃时, 抗车辙能力下降得更为显著。适当的提高中面层材料模量可以提升路面的抗车辙性能, 过大的材料模量对进一步提高路面结构的抗车辙能力有限。

关键词

路面结构, 车辙, 温度, 模量

Research on Anti-Rutting Performance of Typical Pavement Structure and Its Influencing Factors

Yunliang Li, Xu Li

School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

Received: Sep. 25th, 2022; accepted: Oct. 15th, 2022; published: Oct. 26th, 2022

Abstract

In order to study the anti-rutting performance of typical pavement structures and the influencing factors, a mechanical model for rutting deformation analysis of pavement structures was established based on viscoelastic constitutive theory and ABAQUS software. The anti-rutting properties of five typical pavement structures were compared and analyzed, and the effects of temperature

and material modulus on the anti-rutting properties of pavement structures were studied. The research shows that the anti-rutting performance of the conventional semi-rigid base pavement structure is better than that of the full-thickness asphalt pavement structure. With the increase in temperature, the anti-rutting deformation ability of the pavement structure decreases, and when the temperature exceeds 50°C, the anti-rutting ability decreases more significantly. Appropriately increasing the material modulus of the middle surface layer can improve the rutting resistance of the pavement. Excessive material modulus is limited to further improve the rutting resistance of the pavement structure.

Keywords

Pavement Structure, Rutting, Temperature, Modulus

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

沥青作为一种温度敏感性材料,在高温条件下沥青的流动性增强,抗变形能力降低。这导致在夏季高温条件下,沥青路面的车辙变形已成为一种典型的高温病害形式。因此沥青路面的车辙是一种普遍存在的路面病害形式。路面车辙产生以后,会影响到路表的平整度,显著降低路面的服役性能。较大的车辙变形,会引起路面的结构性破坏,只能通过结构性大修才能解决较大的车辙病害,使道路养护成本显著增加。因此如何有效地控制及防治车辙病害是道路领域长期存在的一个重要技术问题。

目前,对沥青路面车辙的形成机理、影响因素、预测模型等方面进行了大量的研究工作。Liu Gang 等对沥青路面车辙形成的影响因素进行了研究,分析了不同车辙预测模型的预测效果,确定了模型的选用方法[1]。郑涛辉等对沥青路面车辙病害的形成机理进行阐述,探讨了影响车辙病害的因素,并在此基础上从沥青混合料材料特性和施工工艺两个角度对车辙防控进行分析[2]。洪正强等基于车辆动力学理论,采用 CarSim 仿真软件,建立了典型车辆模型及车辙道路模型,验证了模型建立的准确性,提出了不同行驶条件下的沥青路面车辙阈值定量指标[3]。陈磊磊等研究了车辙深度对路面结构的影响,建立了车辆跨越车辙时的动荷载计算模型,研究了车辆荷载作用下路面结构的内部损伤,探索了不同车辙深度下路面使用性能的衰减规律[4]。徐敬业等对车辙统计方法的合理性与其发育机理进行了研究,基于车辙深度统计数据,拟合车辙深度分布图得到相应期望值,对比车辙深度平均值进行差异性分析,分析了高速公路车辙深度与车辆轴载之间的相关性,探讨交通荷载作用下沥青路面车辙深度的发展规律[5]。李文良通过室内静态蠕变试验和 Prony 级数转化,得到了满足有限元计算的黏弹性材料参数,对气温和路表温度进行分析,开展了不同月份车辙的贡献率研究,基于 Burgers 模型建立了温度和荷载耦合的三维有限元模型,构建了轴载、荷载作用次数及年均路表代表高温温度的 3 因素车辙预估模型[6]。李喜等研究了路面温度场与实际交通荷载分布下的车辙发展规律,分析了温度与荷载实际耦合作用对沥青路面车辙的影响,建立不同月份下的车辙预估公式,并通过室内试验分析了温度对不同类型沥青混合料的车辙影响程度[7]。付新新等基于 ABAQUS 软件,从弹性模量和使用年限两个角度对全寿命沥青路面车辙进行了力学分析,并得到车辙变化规律[8]。

本研究基于 ABAQUS 软件,建立了 5 种典型的沥青路面结构,对比分析了不同路面结构的抗车辙性能,研究了温度及材料模量等因素对路面结构抗车辙性能的影响。

2. 典型路面结构及分析方法

2.1. 典型路面结构及材料参数

为了研究不同路面结构的辙槽形成过程及其抗辙性能, 根据路面常见结构的应用现状, 选取 5 种不同的典型路面结构进行研究, 路面结构型式如图 1 所示。结构 I、II、III 是全厚式路面结构、结构 IV、V 为常见的半刚性基层路面结构及柔性基层路面结构。

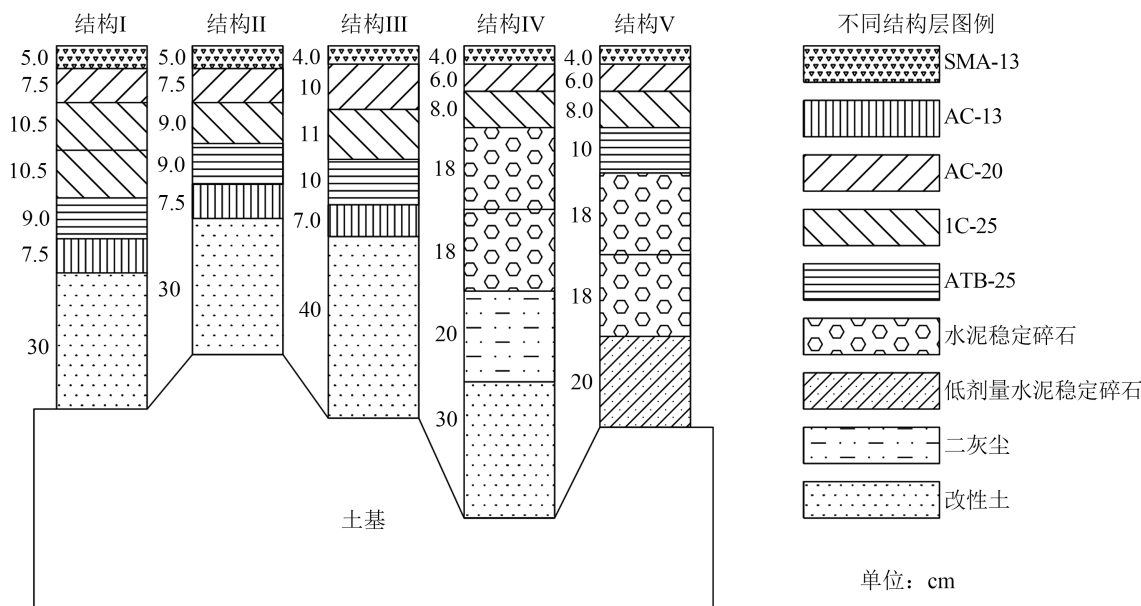


Figure 1. Pavement structure
图 1. 路面结构

2.2. 车辙模拟有限元模型

基于 ABAQUS 软件, 建立二维车辙分析模型。根据图 1 所示的 5 种路面结构, 模型深度取 7000 mm, 宽度取 6000 mm。边界条件为模型底部固定, 左右两侧水平方向固定, 载荷为标准轴载, 有限元模型如图 2 所示。

在载荷作用范围内, 模型横向上网格宽度为 20 mm, 载荷作用范围外为 50 mm; 纵向根据各结构层厚度变化确定网格尺寸。采用 CPE8R 八结点双向二次平面应变四边形单元进行网格划分。

采用 ABAQUS 软件中 Bailey-Norton 蠕变模型, 即时间硬化模型。该模型能够很好地反映沥青混合料在高温环境下的流动变形。Bailey-Norton 蠕变模型利用材料的杨氏模量和泊松比来表征材料的弹性特征, 运用蠕变参数 A, m, n 来表征材料的蠕变特征, 其具体公式为:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^m t^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ -蠕变应变率; σ -等效应力; t -载荷累计作用时间; A 、 m 、 n -蠕变参数。

3. 路面结构抗车辙性能对比分析

采用图 2 所示的车辙分析模型对不同路面结构的抗车辙性能进行研究。标准轴载的作用时间为 60,000 s。计算得到的路表车辙变形如图 3 所示。从图中可以看出, 由于考虑了材料的黏弹性, 因此在载荷的长期作用下, 路表出现了较为明显的流动型车辙变形。在载荷区域内竖向变形为负值, 变形向下; 在两轮

载荷中间和旁边为正值, 变形向上。模型顶面竖向变形呈 W 形。实际路面上的车辙病害呈现为沿轮迹带中部较深的凹槽以及沿轮迹带两侧突出的隆起变形, 可见模拟结果符合车辙变形规律。

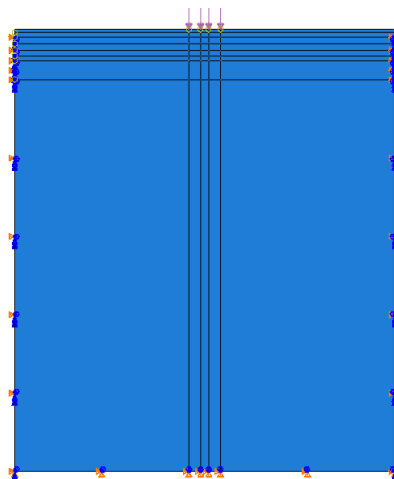


Figure 2. Finite element model of rutting analysis
图 2. 车辙分析有限元模型

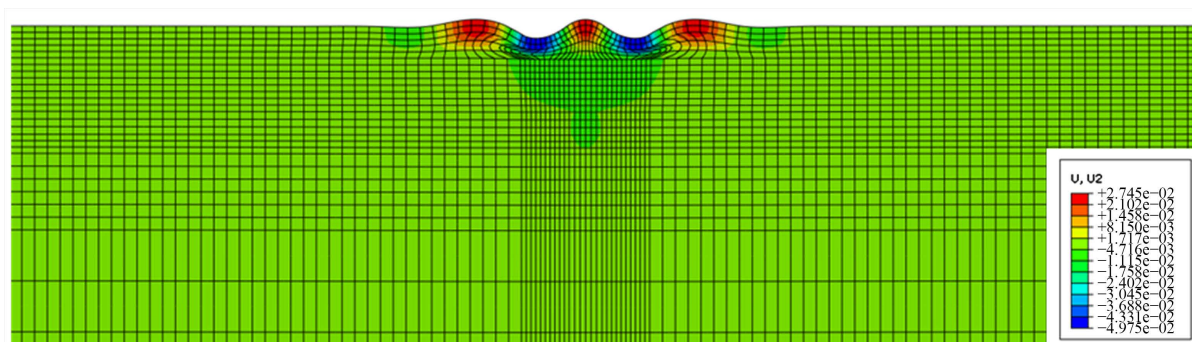


Figure 3. Rutting deformation (structure I)
图 3. 车辙变形(结构 I)

为了分析路表车辙竖向变形规律, 取路表的竖向变形随路表横向位置的变化曲线, 如图 4 所示。由 5 种结构模型顶面竖向变形曲线可以看出, 轴载作用部分竖向变形很大, 两侧数值很小可以忽略, 中部竖向变形变化很大。对于 5 种结构, 每种结构顶面取 3 个竖向变形数值, 分别为轴载处最大竖向变形、轴载外侧最大竖向变形、两轮中间最大竖向变形为对比值, 所提取的数值如表 1 所示。

Table 1. Vertical deformation of pavement structure (mm)

表 1. 路面结构竖向变形(mm)

位置	结构 I	结构 II	结构 III	结构 IV	结构 V
轴载处最大竖向变形	-42.7474	-44.1868	-61.6783	-41.9239	-42.0581
轴载外侧最大竖向变形	23.7639	26.6675	38.1129	19.8719	19.5057
中间处最大变形	23.6776	30.4930	33.2444	40.3109	40.7613

可以看出, 对轴载处的最大竖向变形, 结构 III 最大, 结构 II 次之, 结构 I 和半刚性结构 IV、结构 V 变形稍小, 但差别不大; 对于轴载外侧最大竖向变形, 结构 III 最大, 其他 4 种结构差别较小。而结构 V

中间处最大变形最大, 结构 IV 与之相近, 结构 I 最小。此外, 结构 IV 与结构 V 结构相似, 因各处竖向变形的差异也不大, 可认为两种结构抗变形能力大致相同。在工程实践中, 一般取车辙深度为指标, 即本模型中的轴载处竖向变形, 由此可以看出, 结构 IV 的抗车辙能力较好, 和结构 I、II、V 的抗车辙能力较为接近, 结构 III 的抗车辙能力最差。通过对比分析可知, 常见的半刚性基层路面结构具有较好的抗车辙性能, 而对于全厚式路面结构, 由于其沥青结构层较厚, 因此其在相同的载荷作用下, 产生的竖向变形较大, 相以而言抗车辙能力较差。

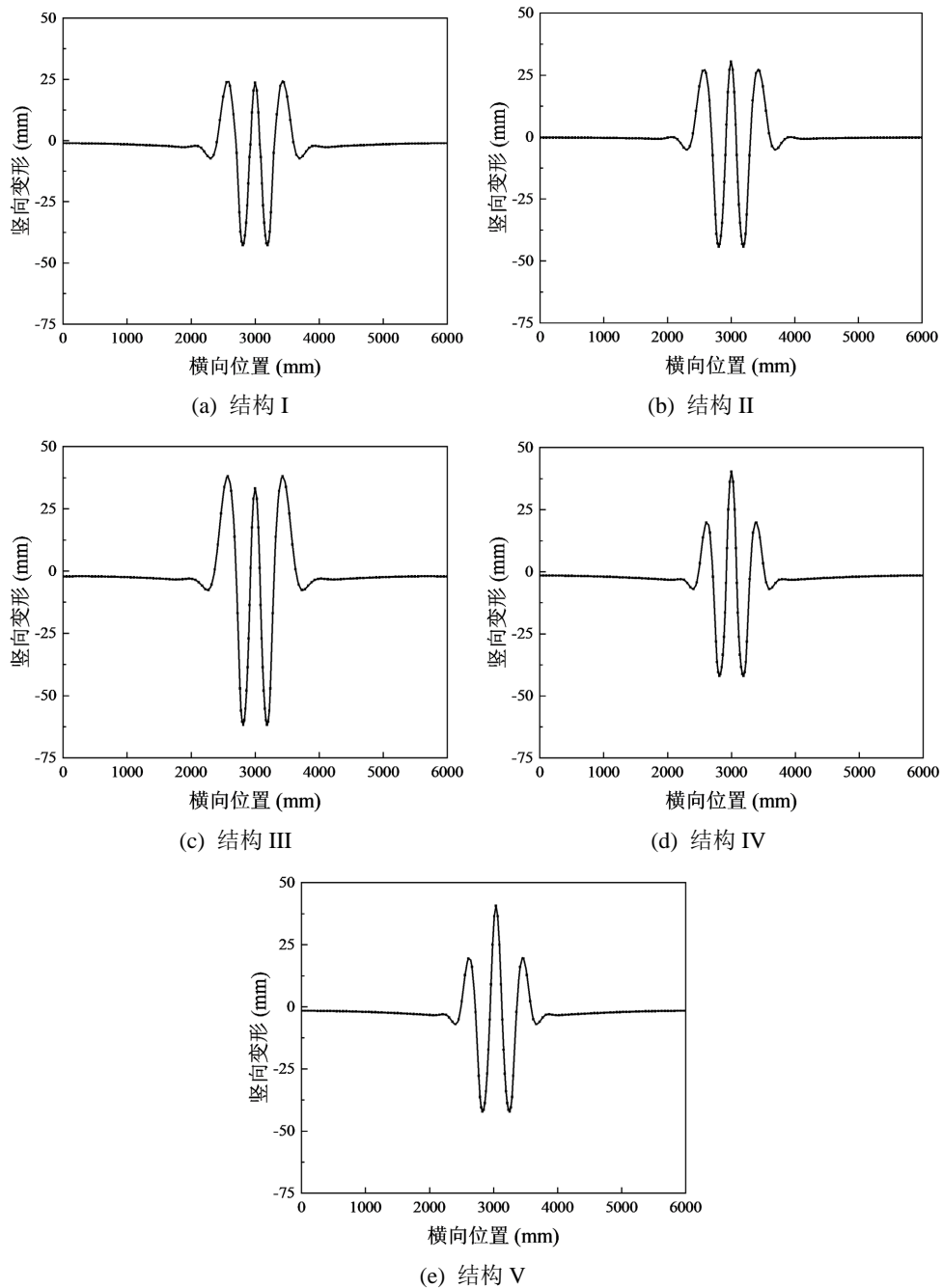


Figure 4. Vertical deformation of pavement structure
图 4. 路面结构竖向变形

4. 温度对车辙变形的影响

车辙的产生与路面的温度密切相关, 路面结构层的温度对车辙变形的大小有着显著的影响。为了分析温度对不同路面结构车辙变形的影响, 选取温度分别为 20℃、30℃、40℃、50℃、60℃。不同温度条件下, 沥青混合料的蠕变参数如表 2 所示。

Table 2. Material parameters

表 2. 材料参数

材料种类	温度(℃)	A	m	n	杨氏模量(MPa)	泊松比
SMA-13	20	6.536×10^{-11}	-0.592	0.937	1500	0.25
	30	3.325×10^{-9}	-0.587	0.862	1069	0.30
	40	1.446×10^{-8}	-0.577	0.792	955	0.35
	50	1.390×10^{-6}	-0.525	0.414	914	0.40
	60	1.464×10^{-5}	-0.502	0.336	907	0.45
AC-20	20	4.580×10^{-11}	-0.596	0.944	1400	0.25
	30	2.461×10^{-9}	-0.585	0.796	1157	0.30
	40	3.673×10^{-8}	-0.570	0.773	923	0.35
	50	4.802×10^{-6}	-0.532	0.595	677	0.40
	60	7.778×10^{-5}	-0.441	0.384	585	0.45
AC-25	20	4.590×10^{-11}	-0.581	0.922	1350	0.25
	30	3.461×10^{-9}	-0.576	0.859	1178	0.30
	40	1.956×10^{-8}	-0.562	0.830	930	0.35
	50	1.200×10^{-6}	-0.522	0.322	655	0.40
	60	3.755×10^{-5}	-0.418	0.210	511	0.45

依据图 2 所示的车辙分析模型, 得到不同路面结构车辙变形随温度的变化如图 5 所示。从图中可以看出, 5 种路面结构在不同温度下的最大竖向变形规律大致相同, 随温度的增加, 路面结构的车辙变形增大。值得注意的是, 在 20℃~50℃时 5 种路面结构的车辙变形增长缓慢, 而当温度超过 50℃时, 5 种路面结构的车辙变形迅速增大。60℃时的车辙变形约为 50℃时的 3 到 4 倍。在夏季高温季节, 沥青路面的温度将达到 60℃以上, 60℃的温度已经超过了绝大多数沥青的软化点, 在这么高的温度条件下, 沥青会明显软化, 抵抗变形的能力明显降低, 变形恢复能力下降, 塑性变形增大, 变形的长期积累即会产生车辙病害。

通过图 5 可以对比分析 5 种路面结构在不同温度下的车辙变形。在高温条件下(60℃), 结构 IV 和结构 V 的变形曲线基本重合, 在不同温度条件下, 两种结构的抗车辙性能基本相同。结构 III 的变形最大, 结构 I 次之, 结构 II 处于结构 I 与结构 IV 之间。所以与前面的分析结论相同, 在高温条件下(60℃), 半刚性基层路面结构与全厚式路面结构相比, 同样具有较好的抗车辙性能。

5. 材料模量对车辙变形的影响

沥青混合料的模量对路面的车辙变形存在较大的影响。在通常情况下, 可以提高沥青混合料的模量来提高路面结构的抗车辙性能。通常情况下, 车辙变形集中产生在中面层, 因此可以通过提高中面层的材料模量来提高路面结构的抗车辙性能。根据图 1 所示的 5 种路面结构, 通过提高 AC-20 的材料模量, 来分析中面层模量对路面结构抗车辙性能的影响。将 AC-20 杨氏模量分别设为 1000MPa-20000MPa 进行模拟, 得到 5 种路面结构的车辙变形随 AC-20 材料模量的变化曲线如图 6 所示。

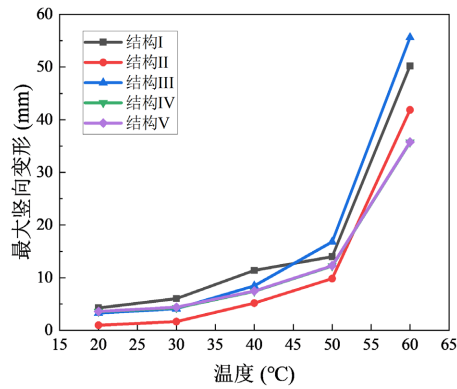
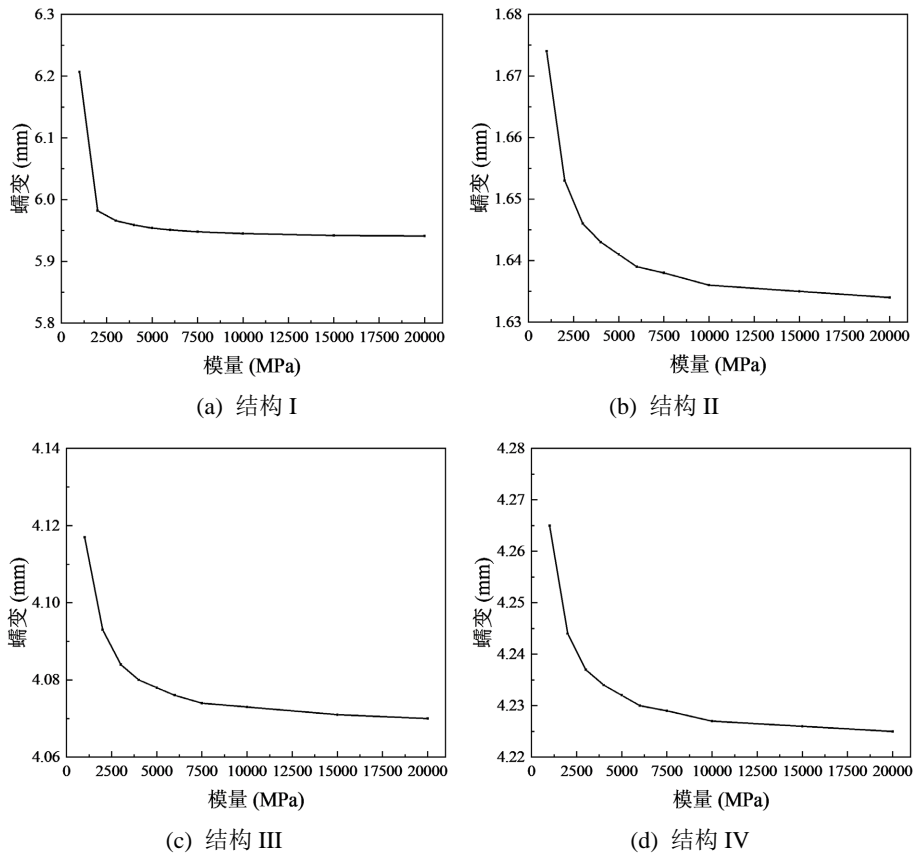
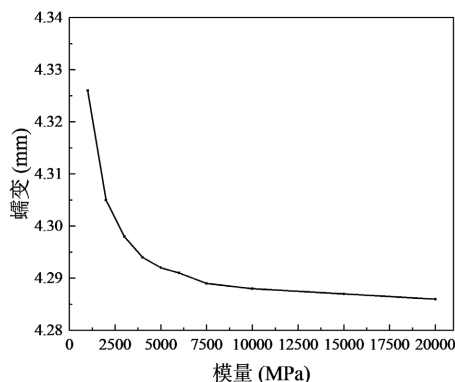


Figure 5. Maximum vertical deformation of pavement structure at different temperatures
图 5. 路面结构不同温度下最大竖向变形

从图 6 可以看出, 随着 AC-20 材料杨氏模量的增加, 各结构的车辙变形均呈减小的趋势。当模量由 1000 MPa 增加至 10,000 MPa 时, 车辙变形减小幅度较大, 随着模量继续增加, 车辙变形减小的幅度降低。说明适当提高中面层的材料模量, 对结构的抗变形能力是有利的, 会提升结构的抗变形能力。随着模量的提高, 中面层抵抗变形的能力增强, 因此随着中面层模量的提高可以减小车辙变形, 但是上面层也会产生一定的车辙变形, 中面层材料模量过大时, 对路面结构抗车辙能力的提升作用有限, 因此通过提高中面层材料模量的方式降低车辙变形是有一定的限度的, 过大的提高中面层材料模量对路面抗车辙能力的提升有限, 反而会增加建设成本。





(e) 结构 V

Figure 6. Variation of rutting deformation of pavement structure with modulus
图 6. 路面结构车辙变形随模量的变化

6. 结论

本文基于沥青材料的黏弹性本构,建立了5种典型路面结构的车辙分析模型,对比分析了不同路面结构的抗车辙性能及其影响因素。常规的半刚性基层路面结构的抗车辙性能较好,对于全厚式沥青路面结构,由于其沥青层较厚,所以其抗车辙变形能力相对较差。随着温度的升高,沥青路面的车辙变形增大,尤其是当温度超过 50°C 时,沥青路面的车辙变形迅速增加,路面结构的抗车辙能力显著下降。随着中面层材料模量的提高,路面结构抗车辙变形能力增强,但当中面层材料模量超过 $10,000\text{ MPa}$ 时,材料模量对路面结构抗车辙能力的提升有限,因此应当适当提高中面层的材料模量,过大的中面层模量对路面结构的抗车辙性能的影响较小。

参考文献

- [1] Liu, G., Chen, L.L., Qian, Z.D. and Zhou, X.Y. (2021) Rutting Influencing Factors and Prediction Model for Asphalt Pavements Based on the Factor Analysis Method. *Journal of Southeast University (English Edition)*, **37**, 421-428.
- [2] 郑涛辉. 沥青路面车辙病害形成机理及防治措施探讨[J]. *道路工程*, 2020(11):185-187.
- [3] 洪正强, 郑彬双, 陈嘉颖, 黄晓明. 基于车辆行驶稳定性的沥青路面车辙阈值[J]. *江苏大学学报*, 2020, 41(6): 719-725.
- [4] 陈磊磊, 陈道燮, 陈超录, 刘刚. 基于沥青路面结构力学行为的车辙深度控制标准[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(6): 62-70.
- [5] 徐敬业, 徐林荣, 周俊杰, 黄宇华, 张亮亮. 高速公路车辙深度期望值统计及发育规律分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(6): 1422-1428.
- [6] 李文良. 基于 Burgers 模型的沥青路面车辙预估模型研究[J]. *公路*, 2019(8): 16-21.
- [7] 李喜, 王选仓, 房娜仁, 王鑫. 基于温度与荷载实际耦合的沥青路面车辙预估[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(5): 67-75.
- [8] 付新新, 梁旭源, 王艳, 刘楠. 基于 ABAQUS 软件的全寿命周期沥青路面车辙力学分析[J]. *黑龙江交通科技*, 2018(6): 31-33.