

长大纵坡沥青路面车辙发展规律与 轴载换算修正系数研究

郭晨晨¹, 丁婷婷², 吕鑫¹, 孙建秀², 张吉哲^{1*}, 姚占勇¹

(1. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250031)

摘要: 现有设计规范未对长大纵坡路面做出特殊设计规定, 直接套用设计规范忽略了其受力特点, 不能较好地保证路面使用性能及寿命。为实现特殊路段路面结构差异化设计, 该文基于实测沥青混合料动态模量、全年交通量及温度数据, 利用自主开发的温度-轴载分析软件, 将真实交通量转换为标准轴载。采用 Abaqus 软件, 建立实测轴载与温度耦合作用下的车辙模型, 分析长大纵坡对车辙发展规律的影响。研究表明: 坡度增大导致速度降低, 容易引发长大纵坡路段沥青路面车辙病害的发生。基于车辙等效原理, 提出不同坡度及坡长下的轴载换算修正系数, 为长大纵坡路段沥青路面的差异化设计提供理论依据。

关键词: 路面结构设计; 轴载换算修正; 车辙等效; 长大纵坡; 修正系数

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

Rut Development Law and Correction Factor of Axle Load Conversion of Asphalt Pavement in Long and Large Longitudinal Slope

GUO Chenchen¹, DING Tingting², LYU Xin¹, SUN Jianxiu², ZHANG Jizhe^{1*}, YAO Zhanyong¹

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan, Shandong 250002, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China)

Abstract: The existing design specifications do not make special design provisions for pavements in long and large longitudinal slopes, and the directly applied design specifications ignore the stress characteristics of these pavements, which fail to guarantee pavement performance and life. In order to realize the differential design of the pavement structure of special road sections, based on the measured dynamic modulus of asphalt mixture, annual traffic volume, and temperature data, this paper used the self-developed temperature-axle load analysis software to convert the real traffic volume into standard axle load. Abaqus software was used to establish a rut model under the coupling effect of measured axle load and temperature, and the influence of long and large longitudinal slopes on rut development law was analyzed. The results show that the increase in slope leads to a decrease in speed, which easily causes rut disease of asphalt pavements in long and large longitudinal slopes. Based on the rut equivalence principle, the correction factor of axle load conversion under different slopes and slope lengths is proposed, which provides a theoretical basis for the differential design of asphalt pavements in long and large longitudinal slopes.

Keywords: pavement structure design; axle load conversion correction; rut equivalence; long and large longitudinal slope; correction factor

收稿日期: 2023-06-14 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (编号: 51908331); 山东省自然科学基金资助项目 (编号: ZR2019BEE004); 山东省交通科技计划项目 (编号: 2020B66)

作者简介: 郭晨晨, 女, 硕士研究生. E-mail: 17865316091@163.com

*通信作者: 张吉哲, 男, 博士(后), 副研究员. E-mail: jizhe.zhang@sdu.edu.cn

0 引言

随着中国交通建设进程的不断加快,高速公路建设选线不断向高原、山区延伸,由于山区地形的复杂性以及地势的限制,长大纵坡路段普遍存在^[1]。长大纵坡特殊路段沥青路面受力特点及车辆行驶特性与平坡路段相比有较大差异,但现行规范并未考虑其特殊性而规定差异化的设计方法。对现有规范直接套用,忽略了行驶速度降低及水平荷载作用带来的不利影响,不能保证特殊路段沥青路面的使用性能和使用寿命^[2]。

秦艺^[1]、华学翰^[3]的研究中显示,车辙是长大纵坡路段最严重的病害类型。目前长大纵坡路段货车占比增加,轴重增大;车辆爬坡过程中速度逐渐降低,与路面作用时间增长;沥青混合料因其黏弹特性对温度较为敏感,在夏季高温、重载、低速等因素的耦合作用下,长大纵坡沥青路面车辙病害更为突出^[4]。车辙的产生影响路面平整度,降低行车安全性,缩短了路面的使用期限。

本文采用时间-硬化蠕变模型,基于动态模量设计参数,结合车辆爬坡速度曲线,研究长大纵坡路段沥青路面在实测荷载-温度耦合作用下的动力响应。基于车辙等效原理,以速度为中间变量,提出长大纵坡特殊路段不同坡度及坡长下的轴载换算修正系数,实现特殊路段路面结构差异化设计。

1 设计参数选取

沥青路面在竣工投入运营后,路面结构暴露于大气中,与外界环境直接接触,受太阳辐射、风速等影响。同时来自外界的重复交通荷载不断地作用于路面结构上,温度场及轴载的相互作用对沥青路面动力响应影响显著。

1.1 温度场参数

提取山东省气象局郯城气象站2018年1—12月份典型日代表性温度数据,其变化曲线如图1所示。

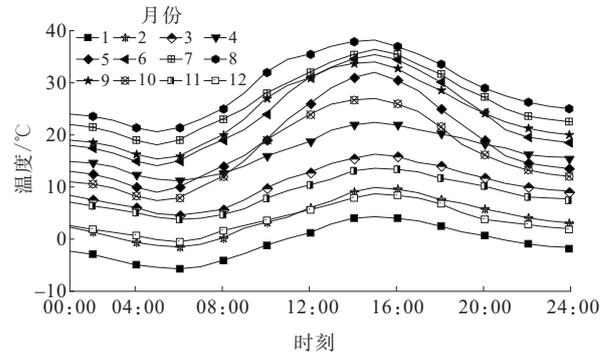


图1 山东省1—12月份典型日气温变化图

Figure 1 Typical daily temperature variation of Shandong Province from January to December

由图1可知:8月外界最高温近40℃。为研究路面内部各结构层位温度的变化,参考了谌及时等^[5]的研究得到了热属性参数,由于篇幅限制,仅将8月不同路用材料的热力学参数,作为温度场的输入参数,如表1所示。

1.2 交通量参数

对山东省内具有代表性的典型路段进行轴载调研,获取了京沪高速鲁苏界收费站(郯城)的交通量信息。基于实时统计的高速公路轴载数据和收费口附近的实时气温变化数据,建立了轴载与温度数据的耦合关联分析方法,开发了基于称重数据的温度-轴载分析软件^[6]。该软件能够将全年实测交通量与实测温度耦合,按照规范规定的方法分别按温度、小时将实测轴载换算为各月典型日标准轴载。

经过计算,得到2018年1—12月各月典型日交通量分布,标准累计轴载作用次数分布如图2所示。

表1 8月各结构层材料热属性参数

Table 1 Thermal property parameters of materials of each structural layer in August

| 结构层 | 热传导率 $k/[J \cdot (m \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1}]$ | 密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$ | 热容量 $C/[J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$ | 太阳辐射吸收率 a | 路面发射率 ϵ | 绝对零度值 $T_z/^\circ C$ | 日太阳辐射/ $(J \cdot m^{-2})$ | 日照有效时长/h | 平均风速/ $(m \cdot s^{-1})$ |
|--------|----------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------|------------------|----------------------|---------------------------|----------|--------------------------|
| 沥青混合料 | 4 680 | 2 300 | 925.0 | 0.9 | 0.81 | -273 | 2.63E+7 | 10.7 | 2.6 |
| 水泥稳定碎石 | 5 616 | 2 200 | 911.7 | | | | | | |
| 土基 | 5 616 | 1 800 | 1 040.0 | | | | | | |

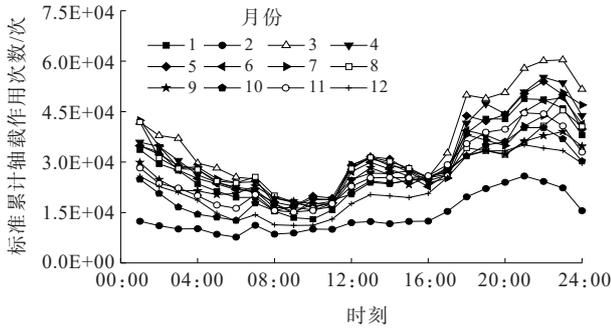


图2 各月典型日各小时段交通量分布(2018)

Figure 2 Hourly traffic volume distribution on typical days of each month(2018)

1.3 路面结构层材料设计参数

由于路面受到来自外界时刻变化的轴载和温度作用,采用传统的静态模量不能完全反映路面的实际工作状态,故新规范^[7]引入动态模量作为设计参数。材料设计参数选取由静态模量转变为动态模量,静态设计到动态设计成为未来路面设计工作的发展趋势^[8]。

由于沥青混合料具有独特的黏弹特性,其力学性能受外界荷载、温度等因素的影响显著,进而影响

沥青路面的使用性能^[9-10],故需考虑其蠕变特性。沥青材料各项指标的测定需遵循《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[11]规定,测试结果如表2所示。

表2 基质沥青各技术指标值

Table 2 Technical indexes of matrix asphalt

| 项目 | 针入度(25℃, 5 s, 100 g)/(0.1 mm) | 软化点/℃ | 延度/cm | 溶解度/% |
|-------------|-------------------------------|-------|-----------|-------|
| 基质沥青试验结果 | 68.3 | 48.2 | 40.1(10℃) | 99.60 |
| SBS改性沥青试验结果 | 51 | 77.8 | 30(5℃) | 99.97 |
| 技术要求 | 60~80 | ≥47 | ≥15 | ≥99.0 |

集料采用石灰岩、玄武岩材料,表3为各面层材料的级配通过率,按照一定的配合比进行沥青混合料拌制工作,利用旋转压实仪进行试件制备,如图3所示。分别采用简单性能试验机(SPT)、万能试验机(UTM)进行沥青混合料动态模量和蠕变参数的测定,结果如表4所示。

表3 面层材料级配通过率

Table 3 Material gradation pass rate of surface layer

| 混合料类型 | 级配 | 通过下列筛孔(mm)的质量百分率/% | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|
| | | 37.5 | 31.5 | 26.5 | 19 | 16 | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| SMA-13 | 级配上限 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 90 | 50 | 20 | 15 | 14 | 12 | 10 | 9 | 8 |
| | 合成级配 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 95 | 62.5 | 27 | 20.5 | 19 | 16 | 13 | 12 | 10 |
| | 级配下限 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 75 | 34 | 26 | 24 | 20 | 16 | 15 | 12 |
| AC-20C | 级配上限 | 100 | 100 | 100 | 90 | 78 | 62 | 50 | 26 | 16 | 12 | 8 | 5 | 4 | 3 |
| | 合成级配 | 100 | 100 | 100 | 95 | 85 | 71 | 61 | 41 | 30 | 22.5 | 16 | 11 | 8.5 | 5 |
| | 级配下限 | 100 | 100 | 100 | 100 | 92 | 80 | 72 | 56 | 44 | 33 | 24 | 17 | 13 | 7 |
| AC-25 | 级配上限 | 100 | 100 | 90 | 75 | 65 | 57 | 45 | 24 | 16 | 12 | 8 | 5 | 4 | 3 |
| | 合成级配 | 100 | 100 | 96.8 | 81.7 | 70.6 | 60.8 | 52.4 | 33 | 20.4 | 14.5 | 10.9 | 7.8 | 5.6 | 4.3 |
| | 级配下限 | 100 | 100 | 100 | 90 | 83 | 76 | 65 | 52 | 42 | 33 | 24 | 17 | 13 | 7 |

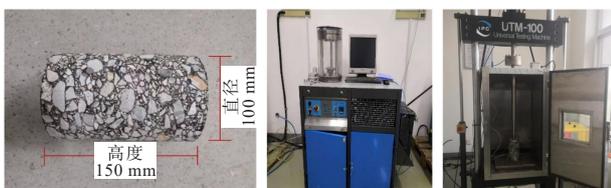


图3 制备试件与试验仪器图

Figure 3 Prepared specimen and test instrument

假定基层及土基为线弹性材料,无机结合料稳定类材料弹性模量的测定应符合《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[12]中T0851的有关规定。路基顶面回弹模量的确定应符合《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[13]的有关规定,同时根据交通荷载等级,满足沥青路面设计规范要求值。根据现场取芯后进行压缩试验及交通荷

载等级分别确定了基层与土基材料的弹性参数,如表5所示。

表4 沥青混合料弹性及蠕变参数

Table 4 Elastic and creep parameters of asphalt mixture

| 混合料类型 | 温度/℃ | 弹性参数 | | 蠕变参数 | | |
|--------|------|----------|------|-----------|-------|--------|
| | | 回弹模量/MPa | 泊松比 | A | n | m |
| SMA-13 | 20 | 6 754 | 0.25 | 2.290E-11 | 0.937 | -0.592 |
| | 30 | 3 373 | 0.30 | 1.230E-10 | 0.862 | -0.587 |
| | 40 | 1 536 | 0.35 | 6.020E-10 | 0.792 | -0.577 |
| | 50 | 794 | 0.40 | 6.250E-08 | 0.414 | -0.525 |
| | 60 | 328 | 0.45 | 1.250E-06 | 0.336 | -0.502 |
| AC-20C | 20 | 9 697 | 0.25 | 4.580E-12 | 0.944 | -0.596 |
| | 30 | 5 615 | 0.30 | 2.461E-10 | 0.796 | -0.585 |
| | 40 | 2 892 | 0.35 | 3.673E-08 | 0.611 | -0.728 |
| | 50 | 1 479 | 0.40 | 1.250E-07 | 0.368 | -0.547 |
| | 60 | 617 | 0.45 | 7.778E-06 | 0.304 | -0.467 |
| AC-25 | 20 | 9 561 | 0.25 | 4.590E-11 | 0.922 | -0.581 |
| | 30 | 4 881 | 0.30 | 3.460E-09 | 0.859 | -0.576 |
| | 40 | 2 262 | 0.35 | 1.960E-08 | 0.830 | -0.562 |
| | 50 | 1 036 | 0.40 | 1.200E-06 | 0.322 | -0.522 |
| | 60 | 351 | 0.45 | 3.760E-05 | 0.210 | -0.418 |

表5 基层及土基材料弹性参数

Table 5 Elastic parameters of base and soil-based materials

| 材料 | 抗压回弹模量/MPa | 泊松比 |
|--------|------------|-----|
| 水泥稳定碎石 | 27 000 | 0.2 |
| 土基 | 60 | 0.4 |

2 荷载-温度耦合作用下车辙模型建立

2.1 计算模型

本文利用 Abaqus 分析软件,建立三维有限元模型进行计算。模型尺寸长宽高分别为 3 m×3.75 m×3 m,其中 X、Y、Z 方向分别为路面宽度方向、路面深度方向及沿行车荷载方向,假定模型层间完全连续。边界条件的设定:左右及前后两侧分别限制其法向方向位移,底部为完全固定。路面结构层位及材料参数见表6。为保证模拟结果的可靠性,将荷载作用区域进行网格细分如图4所示,共计划分 112 860 个网格。

2.2 荷载施加形式

在进行路面结构设计时,现行规范规定标准轴载采用单轴双轮形式。但相关研究表明^[14],车辆荷

表6 路面结构层位及材料参数

Table 6 Pavement structure layers and material parameters

| 路面结构层位 | 厚度/m | 材料 |
|--------|------|--------|
| 上面层 | 0.04 | SMA-13 |
| 中面层 | 0.06 | AC-20 |
| 下面层 | 0.08 | AC-25 |
| 基层 | 0.36 | 水泥稳定碎石 |
| 底基层 | 0.18 | 水泥稳定碎石 |
| 土基 | 2.28 | — |

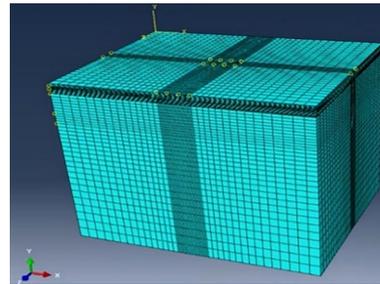


图4 模型网格图

Figure 4 Model grid

载与路面的接地形状更加接近于矩形。采用波特兰水泥协会的换算方法将单轴双轮均布荷载转换为矩形均布荷载^[15-16](图5)。利用式(1)~(3)进行计算,得到矩形荷载的长、宽、面积等数据如表7所示。

$$\text{矩形面积: } A = 0.5227K^2 \quad (1)$$

$$\text{矩形长度: } l = 0.8712K \quad (2)$$

$$\text{矩形宽度: } b = 0.6K \quad (3)$$

式中:A为矩形面积;l为矩形长度;b为矩形宽度;K为中间变量。

表7 矩形轴载、接地压力计算值

Table 7 Calculated values of rectangular axle load and ground pressure

| 标准轴载/kN | 矩形面积 A/cm ² | 矩形长度 l/cm | 矩形宽度 b/cm | 接地压力/MPa |
|---------|------------------------|-----------|-----------|----------|
| 100 | 352 | 22.6 | 15.6 | 0.701 6 |

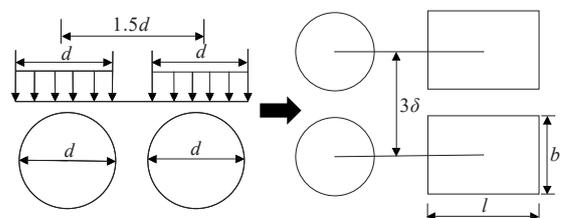


图5 等效荷载示意图

Figure 5 Equivalent load

2.3 轴载作用时间

长大纵坡路段与正常路段的重要区别是车辆爬坡速度,车辆在路面上的行驶速度较慢,作用时间较长,根据时温等效原则,相当于间接提升了路面的温度,变形量增大。李江等^[17]将单次长时间加载与多次加载-卸载作用结果等效,进行等效时间的换算。参考廖公云等^[18]的相关研究,荷载累计作用时间可由式(4)进行计算。

$$t = \frac{0.36NP}{n_w p b v} \quad (4)$$

式中: N 为轴载作用次数; P 为轴重; n_w 为轴的轮数; p 为接地压力; v 为速度。

以8月交通量和行驶速度取80 km/h为例,计算可得一次加载作用时间为0.010 17 s,同时根据前文交通量分布,可计算得到8月典型日各时刻累计作用时间如图6所示。

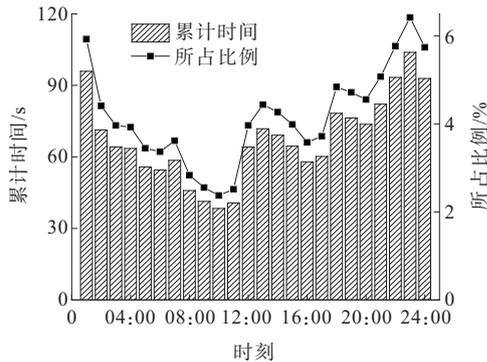


图6 8月典型日各时刻累计时间及所占比例

Figure 6 Cumulative time and proportion of each hour segment on a typical day in August

3 基于长大纵坡车辆运行速度的工况确定

3.1 坡度、坡长的限制

行驶在长大纵坡路段的交通量中,重载、超载车辆占比较大。车辆在纵坡路段行驶时,速度逐渐降低,易产生一定的危害。为保证行车安全,相关规范标准对坡度、坡长做出一系列限制规定。

《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)^[19]规定了不同设计速度对应的最大纵坡值(表8),本文设计速度为80 km/h时,最大坡度取5%,故坡度设计工况为1%、2%、3%、4%、5%。同时为保证长大纵坡路面的行车安全性,对不同坡度对应的最大坡长做出

限制规定,如表9所示。

表8 不同设计速度对应最大纵坡值
Table 8 Maximum longitudinal slope values corresponding to different design speeds

| 设计速度/ (km·h ⁻¹) | 最大纵坡/ % | 设计速度/ (km·h ⁻¹) | 最大纵坡/ % |
|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| 120 | 3 | 40 | 7 |
| 100 | 4 | 30 | 8 |
| 80 | 5 | 20 | 9 |
| 60 | 6 | | |

表9 不同坡度下的坡长限制

Table 9 Limits of slope length under different slopes

| 坡度/% | 坡长/m | 坡度/% | 坡长/m |
|------|-------|------|------|
| 1 | — | 4 | 900 |
| 2 | — | 5 | 700 |
| 3 | 1 100 | 6 | 500 |

注:设计速度80 km/h。

3.2 长大纵坡车辆行驶特性

车辆在行驶过程中受到水平荷载作用、行驶速度随着坡度坡长的增加而逐渐降低是区别于平坡路段的特征。车辆在行驶过程中受到各水平荷载的综合作用,路面结构受力如图7所示,不同坡度及不同速度下水平荷载计算方法可参考相关的文献^[20-21]。

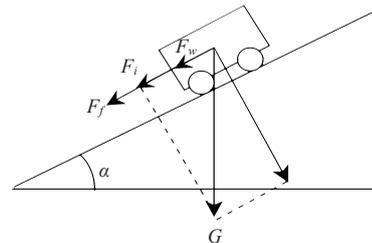


图7 长大纵坡沥青路面车辆行驶示意图

Figure 7 Driving of vehicle on asphalt pavement in long and large longitudinal slope

现阶段对长大纵坡车辆爬坡性能的研究方法主要分为3种:①特殊路段实测法,高速公路长大纵坡路段中,采用断面车牌照对号观测法监测车辆在行驶过程中不断变化的速度,设置观测断面,测试设备采用手持雷达测速枪进行测速^[22-25];②车辆动力学理论方法^[26-27],建立车辆动力模型,从而进行重载车辆爬坡特性的相关研究,获取车辆在不同坡度、不同坡长下行驶速度数据;③理论结合实际,建立与各因

素关联的模型,通过对选定试验路段车辆行驶速度进行测试,在大量实测数据上结合汽车行驶理论,建立汽车爬坡曲线^[28-29]。

《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)条文说明中对车辆爬坡特性进行了详细说明。根据上述众多学者的研究,考虑规范对坡度、坡长的限制条件,确定车辆爬坡速度特性曲线如图8所示。

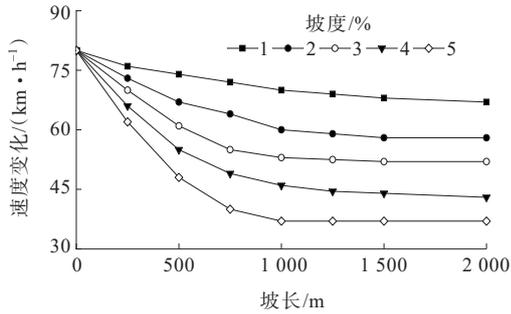


图8 车辆爬坡速度特性曲线

Figure 8 Characteristic curve of vehicle climbing speed

3.3 工况确定

由图8可知:1%~5%各坡度稳定速度分别为65 km/h、55 km/h、50 km/h、45 km/h、40 km/h。按5 km/h为间隔进行速度区间划分,考虑到各月份无坡的情况,每个月份共35种工况。经计算冬季与5—10月夏季高温月份产生的车辙量分别为2.802 mm和0.169 mm,占全年车辙量的比例分别为94.31%和5.69%(图9),冬季月份车辙量数值微小可忽略不计。为简化计算量,本文主要计算5—10月6个月内的车辙量作为全年车辙量,此时设计工况共计为6×35=210种,如表10所示。

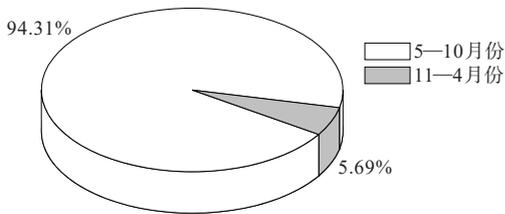


图9 各月份车辙量对比图

Figure 9 Comparison of rut quantity in each month

4 计算结果与分析

4.1 温度场分析

以8月为典型月份,绘制其各结构层位24 h各时刻温度变化如图10所示,由图10可知:夏季8月路表处温度最高近65℃。在06:00—18:00内温度变化幅

度大,同时随着路面深度的增加,温度变化幅度减小。由于温度在路面内部的传递需要一定的时间,具有迟滞性,故路表处温度率先达到峰值,随着深度的增加,温度峰值逐渐后移。

表10 长大纵坡设计工况

Table 10 Design condition of long and large longitudinal slope

| 月份 | 坡度/% | 计算选取速度/(km·h ⁻¹) | 稳定速度/(km·h ⁻¹) | 工况数 |
|-------|------|------------------------------|----------------------------|-----|
| | 0 | 80 | — | 6 |
| 5—10 | 1 | 80,75,70,65 | 65 | 24 |
| | 2 | 80,75,70,65,60,55 | 55 | 36 |
| | 3 | 80,75,70,65,60,55,50 | 50 | 42 |
| | 4 | 80,75,70,65,60,55,50,45 | 45 | 48 |
| | 5 | 80,75,70,65,60,55,50,45,40 | 40 | 54 |
| 合计工况数 | | | | 210 |

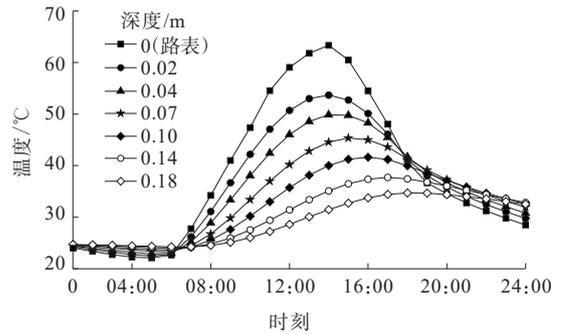


图10 8月各结构层位24 h各时刻温度变化

Figure 10 Temperature changes of each structural layer at each time segment in August

4.2 长大纵坡沥青路面车辙特性分析

为研究坡度对车辙的影响,将速度保持80 km/h或保持坡度不变,绘制不同坡度时全年车辙变化图,如图11~13所示。

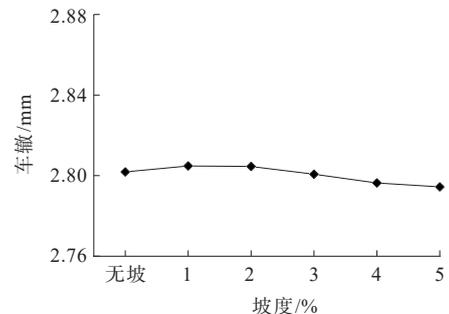


图11 速度80 km/h各坡度车辙量

Figure 11 Rut quantity at each slope at a speed of 80 km/h

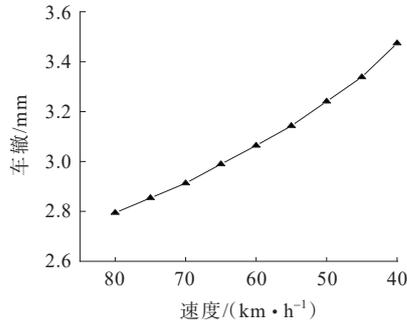


图 12 5% 坡度各速度下车辙量

Figure 12 Rut quantity at a slope of 5% at different speeds

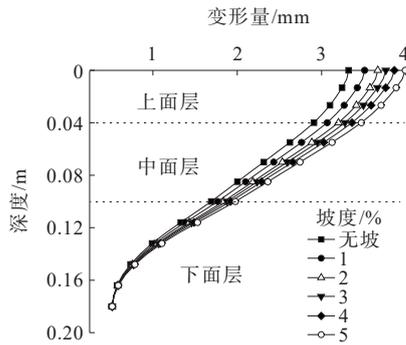


图 13 各坡度稳定速度时全年变形量沿深度分布图

Figure 13 Annual deformation along depth distribution of each slope at stable speeds

由图 11 可知:随着坡度的增加,车辙量变化微小,即相同速度下,坡度对车辙的影响较小;由图 12 可知:若保持坡度不变,速度由 80 km/h 降至 40 km/h,车辙量增加 0.68 mm,增长率为 24.3%。速度越低斜率越大,即车辙发展越快。对比图 11、12 可知:坡度保持不变,随着坡长的增加,车辆行驶速度降低,更容易引发长大纵坡路段沥青路面车辙病害的发生。

由图 13 可知:随着深度的增加,变形量逐渐减小,在深度为 0~0.10 m 即中上面层内,变形量较大;在 0.04~0.10 m 即中面层范围内,曲线斜率较大,表明中面层车辙发展较快。同时绘制了车辙量随着坡度坡长的变化关系,如图 14 所示。由图 14 可知:保持坡度不变,随着坡长的增加,车辙逐渐增大。

提取每月各坡度稳定速度时的车辙量绘制成柱形图,并将每月的车辙量进行累加,如图 15 所示。由图 15 可知:8 月份车辙量最大,7、8 月份累计车辙量折线斜率最大,说明温度对车辙具有显著影响。

4.3 基于车辙等效的长大纵坡沥青路面轴载换算修正系数

相关研究^[30-31]及前文分析表明:车辙是长大纵坡

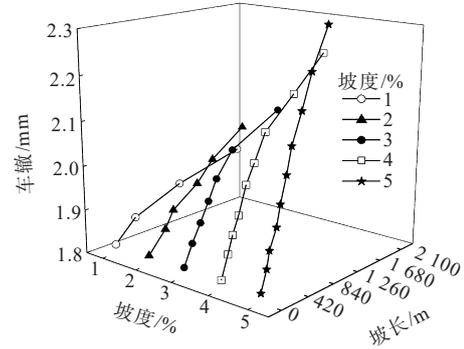


图 14 车辙随坡度坡长的分布图

Figure 14 Distribution of rut with slope and slope length

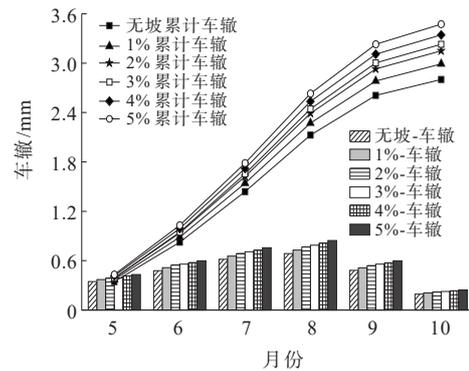


图 15 各坡度稳定速度时各月车辙及累计车辙量

Figure 15 Rut and cumulative rut quantities of each slope in each month at stable speeds

路面最为严重的病害,本文基于车辙等效原则提出相应的轴载修正系数。Zhang 等^[32-33]建立了 $h_{RD} = aN^b P^c$ 关系式,旨在描述沥青路面车辙深度与轴载及加载作用次数的关系,其中 h_{RD} 为车辙深度; N 为轴载作用次数; P 为轴载, a 、 b 、 c 均为回归系数。由上述关系式可知:车辙深度与轴载累计作用次数关系呈幂函数关系。图 16 为标准轴载作用下车辙量与累计轴载作用次数的变化关系图。

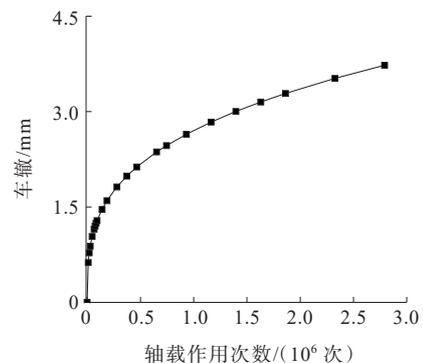


图 16 车辙与轴载作用次数关系图

Figure 16 Relationship between rut and axle load times

对上述 $h_{RD} = aN^b P^c$ 关系式两边取对数,可得式 (5):

$$\ln(h_{RD}) = \ln a + b \cdot \ln N + c \cdot \ln P \quad (5)$$

利用 Origin 软件进行多元线性公式回归拟合,得到计算式 (6),其中 $R^2 = 0.9996$ 。

$$h_{RD} = 7.33 \times 10^{-5} N^{0.31727} P^{1.34538} \quad (6)$$

同时统计相应工况的全年车辙变化值如表 11 所示。按照式 (6),利用车辙等效原理进行轴载换算,得到不同坡度、不同速度时的轴载换算修正系数,利用速度为中间变量,结合刘学^[26]、董忠红等^[27]研究的车辆爬坡速度曲线,采用内插方法得到不同坡度不同坡长下的轴载换算修正系数如表 12 所示。

表 11 不同坡度、不同速度下全年累计车辙

Table 11 Annual cumulative rut at different slopes and speeds

| 坡度/% | 不同速度(km/h)时的全年累计车辙/mm | | | | | | | | |
|------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 |
| 1 | 2.807 8 | 2.857 6 | 2.921 3 | 2.991 8 | | | | | |
| 2 | 2.804 5 | 2.855 9 | 2.920 4 | 2.986 4 | 3.061 9 | 3.149 0 | | | |
| 3 | 2.800 7 | 2.853 8 | 2.918 5 | 2.986 7 | 3.059 8 | 3.142 4 | 3.242 7 | | |
| 4 | 2.796 4 | 2.852 6 | 2.912 0 | 2.979 3 | 3.052 5 | 3.142 8 | 3.240 8 | 3.343 7 | |
| 5 | 2.794 4 | 2.851 9 | 2.912 8 | 2.989 4 | 3.063 8 | 3.134 3 | 3.231 1 | 3.338 7 | 3.474 7 |

表 12 不同坡度与坡长下的轴载换算修正系数

Table 12 Axle load conversion correction factors at different slopes and slope lengths

| 坡度/ % | 不同坡长(m)时的轴载换算修正系数 | | | | | | | |
|----------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 250 | 500 | 750 | 1 000 | 1 250 | 1 500 | 1 750 | 2 000 |
| 1 | 1.030 6 | 1.065 8 | 1.095 4 | 1.125 0 | 1.143 2 | 1.161 4 | 1.161 4 | 1.161 4 |
| 2 | 1.068 2 | 1.177 6 | 1.229 8 | 1.309 0 | 1.333 2 | 1.357 4 | 1.357 4 | 1.357 4 |
| 3 | 1.129 0 | 1.288 8 | 1.399 2 | 1.481 6 | | | | |
| 4 | 1.187 4 | 1.413 0 | 1.590 6 | | | | | |
| 5 | 1.278 4 | 1.635 0 | | | | | | |

5 结论

现行规范未对长大纵坡路段做出差异化设计规定,采用无差别的统一化设计易产生车辙病害,本文针对以上问题,利用有限元分析软件,建立轴载与温度耦合的车辙模型,研究长大纵坡路段的车辙发展规律。根据车辙等效原则,提出不同坡度和坡长下的轴载换算修正系数,为长大纵坡路段的结构与材料设计提供理论指导。具体结论如下:

(1) 山东省夏季 8 月路表处温度最高近 65℃,随着路面深度的增加,温度变化幅度减小。由于温度传递具有迟滞性,随着路面结构层位的降低,温度峰值逐渐后移。

(2) 车辙是长大纵坡沥青路面最为严重的病害。保持速度不变,坡度的增加对车辙影响可忽略不计,坡度增大导致的速度降低容易引发长大纵坡路段沥青路面车辙病害的发生。

(3) 现行设计规范未对长大纵坡路面做出特殊设计规定,基于车辙等效原理,以速度为中间变量,提出了不同纵坡、不同坡长时的轴载换算修正系数。

参考文献:

References:

- [1] 秦艺.长大纵坡段沥青路面施工技术研究[J].华东公路,2020(1):65-67.
QIN Yi. Research on construction technology of asphalt pavement in longitudinal slope section[J]. East China Highway,2020(1):65-67.
- [2] 曹卫锋.车辆动载作用下长大上坡沥青路面力学响应研究[D].西安:长安大学,2014.
CAO Weifeng. Research on mechanical response of long-uphill asphalt pavement under vehicle dynamic load[D]. Xi'an:Chang'an University,2014.
- [3] 华学翰.长大纵坡沥青混凝土路面病害分析及对策[J].

- 公路交通科技(应用技术版),2019,15(11):79-80.
- HUA Xuehan. Disease analysis and countermeasures of asphalt concrete pavement with long longitudinal slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2019, 15 (11):79-80.
- [4] 冯刚. 长大纵坡路段沥青路面车辙防治研究[J]. 山东农业工程学院学报,2018,35(9):24-27.
- FENG Gang. Study on rut prevention and control of asphalt pavement in long longitudinal slope[J]. The Journal of Shandong Agriculture and Engineering University,2018,35(9):24-27.
- [5] 谌及时,唐启文. 基于ABAQUS有限元软件的沥青路面温度场分布规律研究[J]. 黑龙江交通科技,2020,43(10):36-37.
- CHEN Jishi, TANG Qiwen. Research on temperature field distribution of asphalt pavement based on ABAQUS finite element software[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang,2020,43(10):36-37.
- [6] 张吉哲,孙昌军,刘胜杰,等. 当量轴载计算系统[P]. 中国: 2018SR890037,2018.
- ZHANG Jizhe, SUN Changjun, LIU Shengjie, et al. Equivalent Axle Load Calculation System[P]. China: 2018SR890037,2018.
- [7] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- China Communications Road and Bridge Technology Co., Ltd.. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2017.
- [8] 崔德荣. 温度及加载频率对沥青混合料模量的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- CUI Derong. Study on effect of temperature and frequency on modulus of asphalt[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2017.
- [9] 范安俊,黄晓明,彭彬. 沥青混合料粘弹性行为 ABAQUS 有限元模拟[J]. 石油沥青,2009,23(5):10-15.
- FAN Anjun, HUANG Xiaoming, PENG Bin. ABAQUS finite element simulation of viscoelasticity behaviors for asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt,2009,23(5):10-15.
- [10] 封基良,黄晓明. 沥青粘结料粘弹性参数确定方法的研究[J]. 公路交通科技,2006,23(5):16-18,22.
- FENG Jiliang, HUANG Xiaoming. Study on the method of determining viscoelastic parameters of asphalt binder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2006,23(5):16-18,22.
- [11] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing:China Communications Press,2011.
- [12] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009[S]. Beijing: China Communications Press,2009.
- [13] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范:JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing:China Communications Press Co., Ltd.,2015.
- [14] 胡小弟,孙立军. 不同车型非均布轮载作用力对沥青路面结构应力影响的三维有限元分析[J]. 公路交通科技, 2003,20(1):1-5.
- HU Xiaodi, SUN Lijun. The stress response analysis of asphalt pavement structure under non-uniform distributed tire pressure of different vehicles with 3D finite element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2003,20(1):1-5.
- [15] 张扬. 重载车辆作用下长大上坡沥青路面力学行为研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- ZHANG Yang. Research on mechanical behavior of long-uphill asphalt pavement under heavy vehicle loading[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [16] 刘红坡. 层间接触对半刚性沥青路面力学响应的影响[D]. 成都:西南交通大学,2006.
- LIU Hongpo. Analysis on the mechanical response of semi-rigid base pavement with contact model[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2006.
- [17] 李江,张旭光,孔永健. 长大上坡沥青路面内部应力分析[J]. 公路交通科技,2012,29(12):35-40,62.
- LI Jiang, ZHANG Xuguang, KONG Yongjian. Analysis of stress in asphalt pavement of long and steep upgrade section[J]. Journal of Highway and Transportation

- Research and Development,2012,29(12):35-40,62.
- [18] 廖公云,黄晓明. Abaqus有限元软件在道路工程中的应用[M]. 2版. 南京:东南大学出版社,2014.
- LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. Application of Abaqus finite element software in road engineering[M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2014.
- [19] 交通运输部公路局,中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路工程技术标准:JTG B01—2014[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- Highway Bureau of the Ministry of Transport, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd.. Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [20] 林有贵,杜荣耀,石菊创. 大纵坡沥青路面车辙估算及混合料设计研究[J]. 西部交通科技,2020(2):80-85.
- LIN Yougui, DU Rongyao, SHI Juchuang. Study on rutting estimation and mixture design of asphalt pavement with large longitudinal slope[J]. Western China Communications Science & Technology, 2020(2):80-85.
- [21] PEI J Z, CHEN Y, CHANG M F. Mechanism of rutting formation in long and steep climbing sections of asphalt pavement[C]//ICCTP 2009. Harbin, China. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009.
- [22] 徐进,林伟,刘炫兵,等. 山地城市长上坡路段大型车行驶速度的模式特征[J]. 公路,2016,61(12):149-156.
- XU Jin, LIN Wei, LIU Xuanbing, et al. Pattern characteristics of large vehicle speed on uphill section of mountainous city road[J]. Highway, 2016, 61(12):149-156.
- [23] 陈莹,周涵,徐进. 山地城市道路长上坡路段运渣车运行速度特征[J]. 科学技术与工程,2019,19(36):349-356.
- CHEN Ying, ZHOU Han, XU Jin. Characteristics of operation speed of slag truck in long uphill section of mountainous city road[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36):349-356.
- [24] 束海波,邵毅明. 高速公路上坡路段半挂汽车列车行驶速度特性试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9):128-132.
- SHU Haibo, SHAO Yiming. Experimental study on operating speed characteristics of tractor-semitrailer on expressway uphill section[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(9):128-132.
- [25] 刘娟. 山区高速公路连续纵坡路段运行速度研究[D]. 西安:长安大学,2007.
- LIU Juan. Study on the operating speed of continuous longitudinal gradient about mountain area freeway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [26] 刘学. 长大纵坡路段重型车辆荷载特性研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- LIU Xue. Study on the loading performance of long and steep longitudinal slope sections under heavy truck[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [27] 董忠红,倪凤英,柳帅蒙,等. 长大纵坡路段重型车辆爬坡速度[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014,34(3):23-27.
- DONG Zhonghong, NI Fengying, LIU Shuaimeng, et al. Heavy truck climbing speed on long and steep longitudinal slope section[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(3):23-27.
- [28] 雷斌,许金良,刘洁. 长大上坡路段载重汽车运行速度预测模型[J]. 长安大学学报(自然科学版),2013,33(6):8-15.
- LEI Bin, XU Jinliang, LIU Jie. Heavy truck's climbing speed prediction model of long uphill section[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(6):8-15.
- [29] 庄传仪. 基于汽车动力性能的山区高速公路爬坡车道设计研究[D]. 西安:长安大学,2006.
- ZHUANG Chuanyi. Research on design of mountainous expressway climbing lane based on vehicle dynamic performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [30] 吴美平,叶晶晶. 长大纵坡沥青路面典型病害调查及其成因探析[J]. 工程质量,2019,37(11):85-88.
- WU Meiping, YE Jingjing. Investigation and analysis of typical diseases in long longitudinal slope asphalt pavement[J]. Construction Quality, 2019, 37(11):85-88.
- [31] 葛浩,张迪,刘旭东. 长大纵坡沥青路面车辙防治措施效果评价[J]. 现代交通技术,2018,15(1):23-26.
- GE Hao, ZHANG Di, LIU Xudong. Effect evaluation of rut prevention measures for asphalt pavement of large longitudinal slope[J]. Modern Transportation Technology, 2018, 15(1):23-26.
- [32] ZHANG J P, ZHU C Z, LI X Q, et al. Characterizing the three-stage rutting behavior of asphalt pavement with semi-rigid base by using UMAT in ABAQUS[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140:496-507.
- [33] ZHANG W W, WANG J, ZHUANG W, et al. Rutting prediction and regularity analysis of typical structures in Shandong Province[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 330(2):022-028.