

# 基于车辙等效的 沥青路面轴载换算方法

李 强<sup>1,2</sup> 倪富健<sup>2</sup> 李国芬<sup>1</sup>

1. 南京林业大学, 土木工程学院, 南京 210037

2. 东南大学, 交通学院, 南京 210096

**摘 要:**以剪切应力强度比为指标建立了基于车辙等效的沥青路面轴载换算方法。通过有限元路面力学和温度场模型对典型高等级沥青路面结构进行分析,得到不同环境和荷载条件下的轴载换算指数,通过多元线性回归得到其预估公式,并通过实例计算结果与现行规范方法的进行了比较。研究表明:面层厚度、层位、混合料类型、温度和车速条件都对轴载换算指数有着显著的影响;沥青混合料剪切应力强度比与抗车辙性能之间的良好的相关性并不依赖于材料类型、温度、荷载和围压水平;基于不同控制指标的轴载换算结果相差较大,本文提出的基于车辙等效的换算方法可以作为现行规范方法的有益补充。另外,认为进行轴载换算时对于不同沥青层位应该分别计算。

**关键词:**沥青路面;车辙;抗剪性能;轴载换算

中图分类号:U416.01

文献标识码:A

文章编号:1672-4747(2013)04-0063-08

DOI:10.3969/j.issn.1672-4747.2013.04.011

## Conversion Method of Axle Load for Asphalt Pavements Based on the Rutting Equivalent

LI Qiang<sup>1,2</sup> NI Fu-jian<sup>2</sup> LI Guo-fen<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering,

Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. School of Transportation, Southeast University,

Nanjing 210096, China

收稿日期:2012-12-22.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20123204120011);留学人员科技活动项目择优资助经费;江苏省博士后科研资助计划项目(1202010C);南京林业大学高层次留学回国人员和引进高层次人才科研基金。

作者简介:李 强(1982-),男,汉族,江苏新沂人,博士,南京林业大学土木工程学院讲师,主要研究方向为:路面结构与材料。

Abstract : The conversion method of axle load was proposed for asphalt pavements based on the rutting equivalent using the ratio of shear stress to strength as an indicator. The typical pavement structures were analyzed using a finite element model. The conversion exponent  $n$  was calculated for different environmental and loading conditions. The  $n$  equation was obtained using a multiple linear regression. Finally, the proposed method was compared with the current specifications. It is found that the asphalt layer thickness, asphalt layer location, mix type, temperature and traffic speed have significant effects on the conversion exponent  $n$ . Also, it was observed that the ratio of shear stress to strength was nicely correlated with the rutting performance. It did not depend on the mix type, stress and temperature levels. The proposed method could be used as the useful supplement to the current specifications. The conversion exponent  $n$  should be individually calculated for each asphalt layer.

Key words : Asphalt pavement, rutting, shear properties, axle load conversion

## 0 引言

车辙是高等级沥青路面的主要病害类型之一。尤其在我国的公路交通运输量快速增长，公路超载、超限现象比较严重，加之渠化交通的影响，使得沥青路面的车辙问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。我国绝大多数的沥青路面都采用半刚性基层，车辙主要来自于沥青混凝土面层。大量研究表明<sup>[3-5]</sup>：沥青路面的抗车辙能力与材料的抗剪性能密切相关，在混合料设计过程中可以通过抗剪性能指标来评价其抗车辙性能。由于作用在路面的车辆荷载千变万化，在路面设计中一般按路面损坏等效的原则将不同轴载的作用次数转化为某一标准轴载的作用次数来进行分析。目前，我国公路沥青路面设计规范（JTG D50-2006）<sup>[6]</sup>仅通过弯沉等效和层底拉应力等效进行轴载换算，并没有考虑车辙指标。针对这一缺陷，国内学者通过足尺加速加载试验或理论分析提出了一系列基于车辙等效的轴载换算方法<sup>[7-9]</sup>，但是，不同研究得到的轴载换算指数差异较大，而且也没有考虑温度、车速、路面结构及层位等因素的影响。因此，本文结合室内试验和理论分析，考虑不同的沥青路面结构，以抗剪性能参数为指标，对基于车辙等效的轴载换算方法进行了深入研究，以完善现行沥青路面设计方法。

## 1 轴载换算公式

不同轴载间作用次数的换算均应遵守车辙等效原则，即同一沥青路面结构在不同轴载作用下达到相同的永久变形量。

### 1.1 剪切应力强度比

根据摩尔-库仑强度理论，材料在剪切破坏面上的最大剪应力  $\tau_f$ （抗剪强度）是法向应力和抗剪强度参数（粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$ ）的函数。剪切应力强度比  $\tau/\tau_f$  定义为某荷载作用下潜在破坏面上实际剪应力  $\tau$  与相同围压水平下材料的抗剪强度  $\tau_f$  的比值<sup>[3]</sup>，计算公式见式（1）。

$$\tau/\tau_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(\tan \phi \sin \phi + \cos \phi - \tan \phi)}{2(c + \sigma_3 \tan \phi)} \quad (1)$$

式中， $\sigma_1$  为实际最大主应力； $\sigma_3$  为实际最小主应力。

### 1.2 换算公式推导

在不同的单轴双轮组荷载作用下，沥青路面内剪切应力强度比与荷载水平的相关关系如下：

$$\left(\frac{\tau/\tau_f}{\tau/\tau_f}\right)_1 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^m \quad (2)$$

式中， $(\tau/\tau_f)_1$  和  $(\tau/\tau_f)_2$  分别为轴载 1 和轴载 2 作用下对应的路面内剪切应力强度比； $P_1$  和  $P_2$  分别为轴

载 1 和轴载 2 的荷载水平； $m$  为回归系数。

根据前期研究成果<sup>[3-4]</sup>，沥青混合料剪切应力强度比与抗车辙性能之间存在如下的相关关系：

$$\tau/\tau_f = a(N)^{-b} \quad (3)$$

式中， $N$  为某一车辙标准对应的沥青路面的使用寿命； $a$  和  $b$  为回归系数。

结合式 (2) 和式 (3)，可以发现：

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^m = \frac{(\tau/\tau_f)_1}{(\tau/\tau_f)_2} = \frac{a(N_1)^{-b}}{a(N_2)^{-b}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{-b} \quad (4)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m}{b}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^n \quad (5)$$

式中， $N_1$  和  $N_2$  分别为轴载 1 和轴载 2 作用下某一车辙标准对应的沥青路面的使用寿命； $n$  为轴载换算指数。

考虑到其他轴型轴载的换算，最终得到如式

(6) 所示的基于车辙等效的沥青路面轴载换算公式。交通组成中只占很小比例的单轮组轴载不作分析。

$$\frac{N_1}{N_2} = C \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^n \quad (6)$$

式中， $C$  为轴型系数，即其他轴型轴载与单轴双轮组轴载相同时，产生相同车辙量所需的轴载作用次数之比。

## 2 路面结构力学分析

### 2.1 典型路面结构

通过对江苏省高速公路网各干线公路进行调研，确定了四种典型的沥青路面结构形式用于力学分析，如表 1 所示。

表 1 典型路面结构和材料参数

Tab.1 Typical pavement structures and material parameters

层位	结构 A	结构 B	结构 C	结构 D
上面层	4cmSMA-13 (改)	4cmSMA-13 (改)	4cmSMA-13 (改)	5cmSMA-13 (改)
中面层	5cmAC-20 (普)	6cmAC-20 (普)	6cmAC-20 (改)	6cmAC-20 (改)
下面层	7cmAC-25 (普)	8cmAC-25 (普)	8cmAC-25 (普)	10cmAC-25 (普)
基层		40cm 水稳碎石 ( $E=6000\text{MPa}$ $\mu=0.20$ )		
底基层		20cm 二灰土 ( $E=2000\text{MPa}$ $\mu=0.30$ )		
土基		( $E=120\text{Mpa}$ $\mu=0.35$ )		

### 2.2 有限元模型

为了提高计算效率，采用 ABAQUS 软件建立三维线弹性有限元模型对沥青路面结构进行力学分析。沥青面层弹性模量  $E$  的取值根据温度和荷载作用频率来确定，泊松比  $\mu$  统一选用 0.40。基层、底基层和土基的弹性模量由弯沉反算获得。各结构组合和材料参数见表 1。有限元模型采用 C3D8R 减缩积分单元，经多次试算确定模型尺寸为  $3\text{m} \times 3\text{m} \times 4\text{m}$ ，如图 1 所示。模型底面边界条件为完全约束，其余四个侧面只限制其法向位移。荷载模型采用按应力等效原则换算的矩形荷载，计算参数

如表 2 所示。

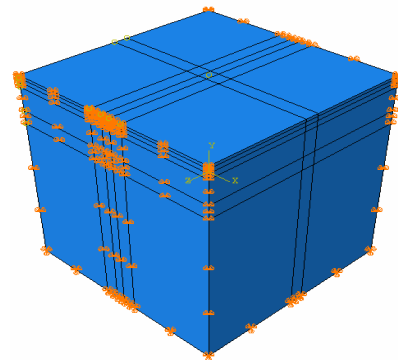


图 1 沥青路面有限元模型

Fig.1 Finite element model of the asphalt pavement

表2 有限元模型荷载参数

Tab.2 Loading parameters of the finite element model

轴重/kN	接地压力/MPa	接地宽度/cm	接地长度/cm
80	0.610	17.8	18.5
100	0.707	18.4	19.2
120	0.796	19.0	19.9
140	0.880	19.5	20.5
160	0.960	20.0	21.0

2.3 温度和荷载作用时间分布

沥青混凝土属于粘弹性材料，其力学行为具有明显的时温依赖性。因此，为了有效地描述沥青面层材料特性，必须对路面温度场以及荷载作用时间

分布规律进行准确的预估。

根据传热学的基本原理，建立沥青路面温度场的有限元模型，对各种路面结构瞬态温度场的数值解进行计算<sup>[10]</sup>。有研究表明<sup>[11]</sup>，当气温超过 23℃，沥青路面的车辙才会逐渐发展。因此，分别建立气温条件为 20℃、30℃ 和 40℃ 的路面温度场模型。根据气象资料统计近 3 年来南京地区对应气温条件下的太阳辐射、日照时数和风速的平均值，作为温度场计算的环境参数。路面各结构层材料的热特性参数如表 3 所示<sup>[10]</sup>。已有研究<sup>[12]</sup>通过试验路现场测试得到车速、路面深度和脉冲荷载持续时间的相关关系。根据该经验关系计算不同车速条件下（60 km/h、90 km/h、120 km/h）各沥青层内对应的荷载作用时间。

表3 热特性参数

Tab.3 Thermodynamic parameters

参数	结构层	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
比热容/ ( J/kg·°C )	上面层	1 124	1 188	1 271	1 326	1 356	1 374	1 374
	中面层	924	942	961	985	1 015	1 036	1 047
	下面层	928	947	970	997	1 026	1 046	1 056
	基层/底基层							810
	土 基							860
热传导率/ ( J/m·h·°C )	上面层	5 327	5 635	6 025	6 285	6 427	6 515	6 516
	中面层	5 664	5 776	5 889	6 041	6 220	6 350	6 419
	下面层	5 651	5 766	5 904	6 071	6 244	6 368	6 429
	基层/底基层							3 960
	土 基							4 680

3 室内性能试验

选取三种矿料级配（见图 2）和两种沥青胶结料：70#普通沥青（普）和 PG 76-22 的 SBS 改性沥青（改），共设计如表 1 所示的 4 种混合料进行室内性能试验。其中上面层集料采用玄武岩，中、下面层集料采用石灰岩。根据马歇尔设计法确定 SMA-13（改）、AC-20（普）、AC-20（改）、AC-25（普）的最佳油石比分别为 6.2%、4.8%、4.8% 和 4.1%。密级配（AC）沥青混合料试件空隙率控制

在（4.0±1.0）%，而 SMA 混合料为（3.0±0.5）%。

3.1 动态模量试验

分别在 6 个加载频率（25 Hz、10 Hz、5 Hz、1 Hz、0.5 Hz、0.1 Hz）和 5 个温度水平（-10°C、5°C、20°C、35°C、50°C）下进行无侧限动态模量试验。通过 S 型函数拟合试验结果建立动态模量主曲线，如图 3 所示。根据预估得到的温度和荷载作用频率，即可在主曲线上确定不同沥青层位的弹性模量取值。

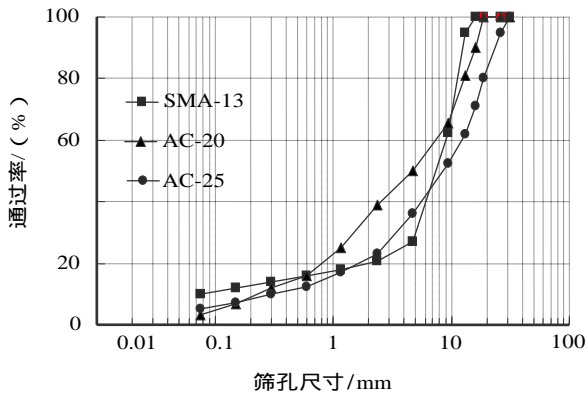


图 2 沥青混合料级配组成

Fig.2 Aggregate gradations of the asphalt mixtures

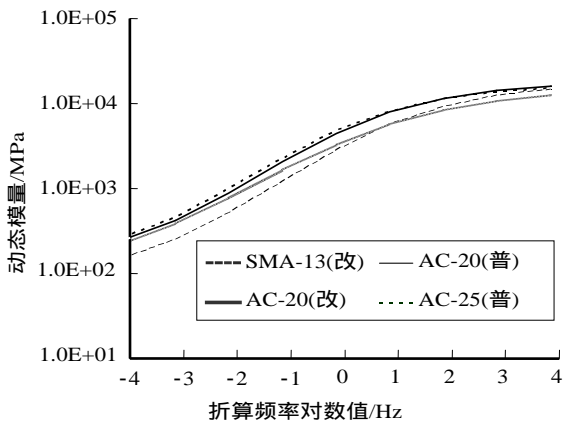


图 3 动态模量主曲线

Fig.3 Master curves of dynamic modulus for the asphalt mixtures

3.2 三轴抗剪强度试验

分别在 3 个温度水平 (40°C、50°C、60°C) 和 3 个围压水平 (0 kPa、69 kPa、138 kPa) 下进行三轴抗剪强度试验。根据摩尔-库仑强度理论，计算沥青混合料的抗剪强度参数<sup>[3]</sup>。对试验结果进行回归分析，得到式 (7) 和式 (8) 用以预估任一温度水平  $T$  (单位 °C) 下各种沥青混合料的粘聚力  $c$  (单位 kPa) 和内摩擦角  $\phi$  (单位 °)。

$$c = \alpha_1 T^{\alpha_2} \tag{7}$$

$$\phi = \beta_1 T^{\beta_2} \tag{8}$$

式中， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$  和  $\beta_2$  为回归系数，见表 4。

表 4 抗剪强度参数预估方程回归系数

Tab.4 Regression coefficients of  $c$  and  $\phi$  prediction equations

混合料类别	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$R^2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$
SMA-13(改)	96 962	-1.298	0.998	131.720	-0.271	0.953
AC-20(普)	1 371 593	-2.100	0.999	128.310	-0.290	0.975
AC-20(改)	172 199	-1.439	0.993	169.650	-0.372	0.958
AC-25(普)	385 832	-1.773	0.999	84.057	-0.158	0.988

3.3 三轴动态蠕变试验

分别在 3 个偏应力水平 (552 kPa、690 kPa、828 kPa)、3 个围压水平 (0 kPa、69 kPa、138 kPa) 和 3 个温度水平 (40°C、50°C、60°C) 下进行动态蠕变试验。采用加载 0.1 s、间歇 0.9 s 的半正弦荷载，累积永久应变达到 10% 时即结束试验。

4 轴载换算指数分析

4.1 指数  $b$

根据抗剪强度试验得到的抗剪强度参数，采用式 (1) 计算动态蠕变试验中不同荷载和温度条件下沥青混合料对应的剪切应力强度比  $\tau/\tau_f$ 。研究发现：累积永久应变达到 10% 所需的荷载作用次数  $N$  与  $\tau/\tau_f$  存在很好的相关性，且相关关系并不依赖于材料类型、温度、荷载和围压水平，见图 4。因此，采用式 (3) 回归得到统一的指数  $b = 0.154$  可适用于不同沥青层位。

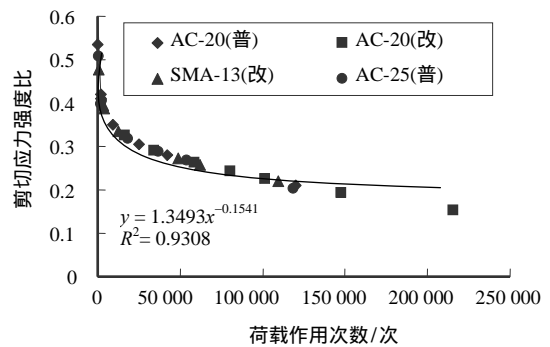


图 4 剪切应力强度比与荷载作用次数的相关性

Fig.4 Relation of the ratio between shear stress to strength and load cycle

4.2 指数  $n$

首先,通过有限元模型在不同轴重、气温和车速条件下对各路面结构进行力学分析,计算行车轮迹下不同深度处沥青路面承受的主应力,并根据式

(1)计算对应的剪切应力强度比。然后,根据式(2)回归分析得到指数  $m$ 。最终代入式(5)得到轴载换算指数  $n$ ,见表5。

表5 轴载换算指数  $n$   
Tab.5 Exponent  $n$  of axle load conversion

结构	层位	60 km/h			90 km/h			120 km/h		
		20	30	40	20	30	40	20	30	40
A	上面层	2.64	3.14	3.32	2.28	2.89	3.12	2.00	2.69	2.96
	中面层	2.85	3.04	3.35	2.72	2.96	3.19	2.61	2.90	3.08
	下面层	5.15	5.83	6.94	5.12	5.79	6.84	5.10	5.75	6.71
B	上面层	2.86	3.25	3.33	2.53	3.00	3.15	2.28	2.82	3.00
	中面层	4.87	4.93	4.97	4.72	4.76	4.83	4.68	4.70	4.77
	下面层	5.86	6.60	7.73	5.86	6.55	7.62	5.85	6.47	7.54
C	上面层	2.99	3.34	3.42	2.64	3.08	3.25	2.39	2.91	3.11
	中面层	3.16	3.37	3.81	3.03	3.21	3.48	2.94	3.10	3.46
	下面层	5.79	6.43	7.44	5.77	6.40	7.35	5.75	6.35	7.33
D	上面层	3.05	3.46	3.49	2.97	3.29	3.34	2.87	3.15	3.24
	中面层	5.25	5.37	5.40	5.20	5.29	5.32	4.78	5.23	5.27
	下面层	6.71	7.30	8.26	6.70	7.27	8.17	6.69	7.12	7.34

从表5可以看出,面层厚度、层位、混合料类型、温度和车速条件都对轴载换算指数  $n$  有着显著的影响。对比不同的路面结构 A~D 可以发现:在相同的车速和温度条件下,随着面层厚度的增加,同一沥青层位内的轴载换算指数  $n$  逐渐增大,即对于轴重变化更为敏感。但是,需要说明的是,采用较厚的面层可以有效地减小各沥青层位内的应力水平。因此,即使在重载交通作用下,增加沥青面层厚度也是有利于提高路面整体抗车辙能力的。

对于任一路面结构,在车速和温度条件相同时,不同沥青层位的轴载换算指数  $n$  相差很大。下面层最大,中面层次之,上面层最小。同上所述,虽然下面层对于轴重变化最敏感,但是,由于其结构内应力和温度水平较低,加之采用粒径较大的 AC-25 混合料,因此,该层位的抗车辙能力反而较强。

比较结构 B 和 C 可以发现,结构 B 的中面层轴载换算指数  $n$  要比结构 C 的大得多。从表 1 中可以看到,两者的唯一区别是结构 B 采用普通沥青混合料而结构 C 采用 SBS 改性沥青混合料。由于中面层一般被认为是车辙的主要贡献层,因此,在进行重载道路设计时,中面层不宜采用普通沥青混合料。

随着气温升高或车速降低,各层位的轴载换算

指数  $n$  均明显增大,证实了高温、低速和重载的组合是沥青路面产生车辙的最不利条件。

上述分析表明,在轴载换算时采用统一的  $n$  值并不准确,必须针对具体的环境条件、交通荷载、路面结构与材料组合进行分析。采用多元线性回归法,对表 5 中的数据进行分析,得到如下的轴载换算指数  $n$  回归公式 ( $R^2$  均大于 0.925):

SMA-13(改)

$$n = -0.0257h_1 + 0.0897h_{\text{面}} + 0.0301T - 0.0066V + 1.1463 \quad (9)$$

AC-20(普)

$$n = -0.0213h_1 + 0.0599h_{\text{面}} + 0.0256T - 0.0042V + 1.8114 \quad (10)$$

AC-20(改)

$$n = -0.0245h_1 + 0.1001h_{\text{面}} + 0.0225T - 0.0045V + 2.9951 \quad (11)$$

AC-25(普)

$$n = -0.6533h_1 + 0.6653h_{\text{面}} + 0.0784T + 0.0027V - 2.7514 \quad (12)$$

式中,  $h_1$  为该沥青层位厚度, cm;  $h_{\text{面}}$  为沥青面层总厚度, cm;  $T$  为气温, ;  $V$  为车速, km/h。

4.3 轴型系数  $C$

采用下式来计算轴型系数  $C^{[13]}$ :

$$C = (1/\alpha)^{1/(-b)} \quad (13)$$

式中,  $\alpha$  为其他轴型轴载与单轴双轮组轴载相同时, 预估得到的沥青路面车辙深度之比。采用有限元计算得到: 对于单轴双轮组轴载取  $C = 1.0$ ; 对于双轴双轮组轴载取  $C = 0.11$ ; 对于三轴双轮组轴载取  $C = 0.02$ 。

### 5 计算实例

以江苏省沿海高速公路响水-六套段(连盐通

方向)为例, 路面结构为: 4cmSMA-13(改)+6cmAC-20(改)+10cmAC-25(普)+38cm水稳碎石+二灰土。该路段2010年的年平均日交通量为4126 veh/d, 通过调研得到全年各月各种轴型的作用次数和气温数据<sup>[9]</sup>, 轴载谱见图5。以  $V=80$  km/h 作为代表车速, 根据上述信息, 以 BZZ-100 为标准轴载, 采用本文建立的换算方法进行计算, 并与现行规范方法<sup>[6]</sup>进行了对比(如图6所示)。从图中可以看出, 基于不同控制指标的换算结果相差较大。

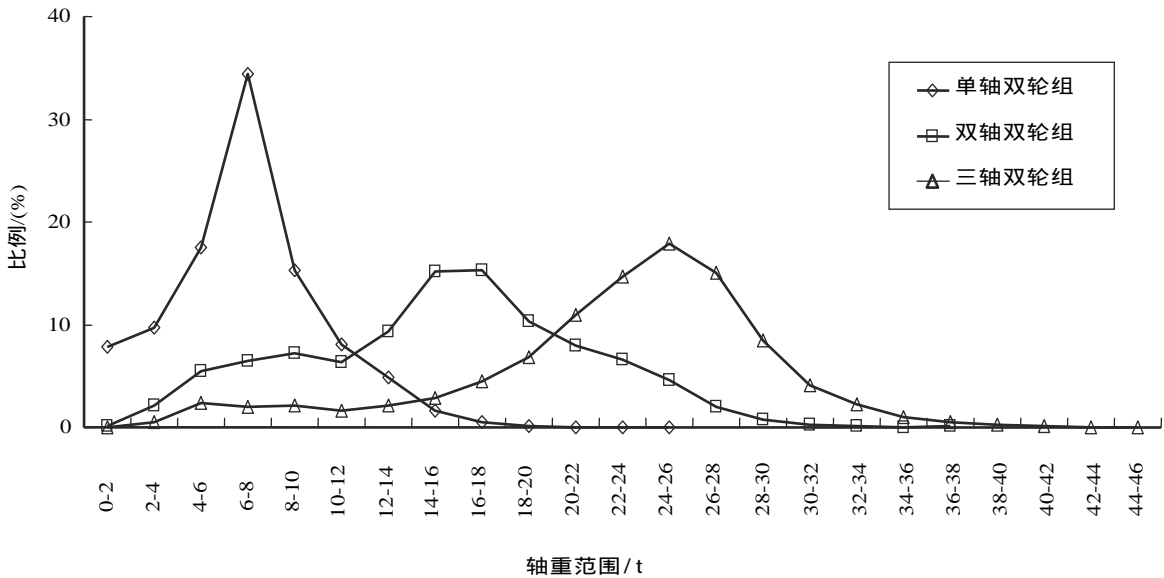


图5 各种轴型轴载谱

Fig.5 Axle load spectrum for different axle types

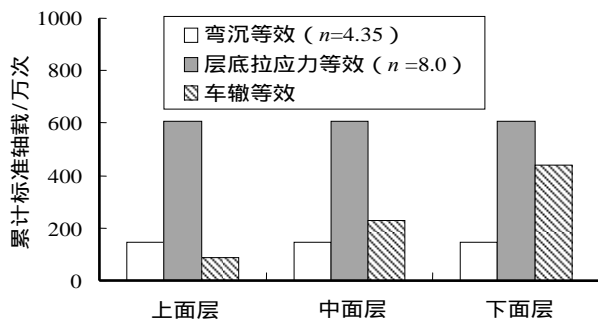


图6 轴载换算结果比较

Fig.6 Comparison of conversion results of axle load

因此, 在进行车辙分析时, 使用规范方法进行轴载换算会产生较大的误差, 而本文提出的基于车辙等

效的换算方法可以作为其有益的补充。另外, 由于规范方法对于整个路面结构使用统一的轴载换算指数, 所以, 不同沥青层位的累计标准轴载相同。而本研究表明不同沥青层位对于轴重变化的敏感性各异, 应该分别予以考虑。

### 6 结 论

(1) 以剪切应力强度比为指标, 建立了基于车辙等效的沥青路面轴载换算方法。通过有限元路面力学和温度场模型, 对江苏省内四种典型高等级沥青路面结构进行分析, 得到不同环境和荷载条件下

的轴载换算指数，并通过多元线性回归得到轴载换算指数的预估公式。

(2) 面层厚度、层位、混合料类型、温度和车速条件都对轴载换算指数有着显著的影响。同一沥青层内的轴载换算指数随着沥青层厚度的增加、气温升高或车速降低而增大。在车速和温度条件相同时，沥青路面下面层轴载换算指数最大，中面层次之，上面层最小。采用普通沥青混合料的沥青面层对于轴重变化更为敏感。

(3) 沥青混合料剪切应力强度比与抗车辙性能

存在很好的相关性，且相关关系并不依赖于材料类型、温度、荷载和围压水平。

(4) 通过实例计算发现：现行规范方法和本文提出的基于车辙等效的换算方法的计算结果相差较大，故在沥青路面结构设计中应加入车辙控制指标，且在进行轴载换算时对于不同沥青层位应该分别计算。

(5) 本研究成果主要是基于室内试验和理论分析，还有待通过现场数据进行进一步验证。

### 参考文献

- [1] 何兆益, 雷 婷, 王国清, 等. 基于动力问题的高等级公路沥青路面车辙预估方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 104-109.
- [2] 孙宗元, 李冬雪. 岩沥青混合料高温性能的车辙对比试验分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2011, 9(2): 96-101.
- [3] Li Q., Lee H. J., Hwang E. Y. Characterization of permanent deformation of asphalt mixtures based on shear properties[J]. Transportation Research Record, 2010, 2181: 1-10.
- [4] Li Q., Lee H. J., Lee S. Y. Permanent deformation model based on shear properties of asphalt mixtures: development and calibration[J]. Transportation Research Record, 2011, 2210: 81-89.
- [5] 陈光伟, 费国新, 陈荣生. 沥青路面最大剪应力分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2012, 10(2): 70-77.
- [6] 中华人民共和国行业标准. 公路沥青路面设计规范 (JTG D50-2006) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 郑志龙, 袁美俊. 基于车辙等效的轴载换算关系研究[J]. 森林工程, 2011, 27(1): 65-67.
- [8] 颜 利, 周晓青, 李宇峙, 等. 基于直道足尺车辙试验的沥青路面重载轴载换算方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 35-39.
- [9] 张久鹏, 黄晓明, 王晓磊. 基于粘弹塑性理论的沥青路面车辙分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(10): 20-24.
- [10] 袁青泉. 沥青路面高温变形的室内模拟试验方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [11] 王孙富. 沥青路面结构温度场和温度应力的数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] Swett L., Mallick R. B., Humphrey D. N. A study of temperature and traffic load related response in different layers in an instrumented flexible pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2008, 9(5): 303-316.
- [13] 黄 卫, 刘振清. 大跨径钢桥面铺装设计理论与方法研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 51-59.

(中文编辑: 吴继屏)