

基于车辙谱的沥青路面轴载限研究

朱靓雯, 孙立军, 刘黎萍, 王 翼

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 在对全国各地大量高速公路轴载数据调查分析的基础上, 比较了不同轴型作用下的沥青路面剪应力场, 提出基于车辙的多轴型数据处理方法. 通过该方法对各地轴载谱数据进行换算, 并采用换算后的数据, 分析不同水平轴载对沥青路面车辙的影响, 据此提出轴载限的确定方法, 计算各级轴载对车辙的贡献, 并给出典型省份的轴载和车辙谱. 研究表明, 不同轴组类型作用时路面内相同位点处最大剪应力值较为接近. 荷载对路面变形特性的影响可以分为 3 个层面: 对于 ≤ 10 t 荷载, 路面具有很稳定的抗力; 对于 $> 10 \sim 15$ t 轴载, 路面具有较稳定抗力; 对于 > 15 t 轴载, 路面难以提供稳定抗力. 采用抗剪强度较高的改性沥青材料对沥青路面车辙的改善效果明显.

关键词: 沥青路面; 车辙谱; 剪切; 多轴型; 轴载限

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

Study of Axle Load Limit Based on Asphalt Pavement Rutting Spectrum

ZHU Jingwen, SUN Lijun, LIU Liping, WANG Yi

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To study the influence of axle load on asphalt pavement rutting, large amounts of highway axle load data around China were collected and analyzed. Then, the shear stress of pavements under three different axle types was analyzed, based on which the method to convert axle load spectrum of various axles to one standard axle was established and the collected load data were processed. The contribution of axle load at each level to pavement rutting was calculated and the rutting spectrums with axle load spectrums of typical provinces were plotted. The influence of different axle load on pavement rutting was studied using the processed data. It is found that the influence can be divided into three levels; for the standard axle load which is less than 10 tons, the pavements resist the deformation very well; for those

between 10 to 15 tons, the pavements resist deformation well; for those bigger than 15 tons, the pavements resist the deformation poorly. Then the relationship between shear strength and standard axle load was studied, it is found out that using modified asphalt which has high shear strength can alleviate the rutting problem.

Key words: asphalt pavement; rutting spectrum; shear stress; multi-axle load data; axle load limit

交通荷载数据在一定程度上决定了路面设计的目标^[1-2]. 路面设计中对交通荷载换算一般以该地区轴载限值为基础, 运输管理部门对载重车的计重收费也是基于轴载限值进行的. 世界各国根据自己的国情, 考虑汽车工业、道路发展状况等众多影响因素, 制定了相应的轴载限: 法国、西班牙等国家的轴载限为 13 t, 美国在州际公路上的轴载限为 10.9 t, 日本为 10 t, 中国通常将 10 t 作为车辆轴载限^[3].

调查表明, 我国高速公路上存在的超载超限问题非常严重, 超载引起路面结构内巨大的剪应力, 极易造成以路面车辙为主要形式的早期破坏^[1]. 目前的车辙防治措施主要从材料设计着手, 一般通过采用改性沥青或改进沥青混合料设计等方法来提高材料抗力. 但车辙病害与现行设计方法对超重荷载考虑不周也有一定关系: 超重轴载超出了设计规范中当量轴次换算公式的轴载范围, 因此按规范中方法进行换算必然产生较大误差, 导致设计荷载状况与路面实际交通荷载状况并不完全一致^[4]. 另外, 部分严重超限的车辆对路面造成巨大损坏, 限制该类超限车辆的通行可以更有效地减缓路面车辙等损坏, 延长路面寿命^[5-6]. 因此, 有必要从车辙角度分析不同荷载水平的影响, 并据此确定轴载限.

本文首先调查分析了全国各地高速公路的大

收稿日期: 2014-05-04

基金项目: 交通部公路局项目; 上海市城乡建设和交通委员会项目

第一作者: 朱靓雯(1989—), 女, 博士生, 主要研究方向为路面结构与材料. E-mail: 1110598@tongji.edu.cn

通讯作者: 孙立军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与交通工程. E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

量轴载数据,通过对不同轴型作用下沥青路面剪应力场的分析比较,将多轴型多轴载数据换算为标准轴型多轴载的形式。王翼通过实际路面的车辙数据和交通荷载数据标定了车辙预估模型,该模型较其他预估模型更能反映荷载变化对车辙深度的影响^[7]。本文利用各地换算后的轴载谱数据,通过该车辙预估模型,分析不同水平轴载对沥青路面车辙的影响,据此提出轴载限确定方法,并分析了使用改性沥青对标准轴载的影响。

1 方法和参数

1.1 研究方法

根据已建立的车辙预估模型,通过分析实际道路不同比例和大小的轴载对车辙的贡献来确定沥青路面设计轴载限。

为了得到实际道路轴载分布情况,对全国范围内多个省份的高速公路轴载特征和轴载谱特征进行了调查(包含全国范围内 20 个省份共 49 个典型站点的计重收费数据,其中有 8 个省份包含至少 14 d 的轴载数据)。由于温度对车辙有重要影响,故此处根据各省份设计气温从低到高的顺序给出代表省份的基本信息,见表 1。

表 1 代表省份基本信息

Tab.1 Information of representative provinces

省份	设计气温/℃	站点数目	省份	设计气温/℃	站点数目
山西	11.4	4	江苏	16.9	3
河北	14.7	4	湖北	18.3	2
山东	15.1	3	湖南	18.5	2
河南	15.8	4	福建	20.9	3

对各省份的计重收费数据处理分析可以得到多种轴型的轴载谱。其中出现频率最高的是单轴双轮、双联轴双轮和三联轴双轮 3 种轴型。对于载重车而言,这 3 种轴型在所有承重轴中的出现比例约达到 98%。因此本文主要对这 3 种常见轮轴类型进行轴载谱处理。

荷载作用下的剪应力是造成车辙的主要原因,也是车辙预估模型^[8]中的重要指标。为了在考虑多轴型轴载谱数据的基础上得到标准轴型的分析结果,通过对 3 种轴型在不同路面结构和胎压情况下的剪应力分析,研究了将多轴型多轴载数据换算为标准轴型多轴载形式的方法,并采用该方法对各省数据进行换算。

最后,采用各省换算后的标准轴型轴载谱,通过车辙预估模型分析实际道路不同比例和大小的轴载

对车辙的贡献,并以此来确定路面设计荷载限。

具体步骤如下:第 1 步,研究多轴型轴载谱换算方法,将各省轴载数据换算为标准轴型轴载谱。第 2 步,采用标准轴型轴载谱中各级轴重的频率乘以总作用次数得到各级轴重下的作用次数;通过车辙预估方程^[7]计算各级轴载作用下的车辙,即得到和该省轴载谱对应的车辙谱,其可以代表各级轴载对车辙的贡献。第 3 步,做单位数量轴次各级轴重引起的车辙比较图,结合各级位轴重下轴次频率、车辙图,分析轴重分布和车辙特征,提出基于车辙的轴载限。

1.2 材料参数

为了研究多轴型荷载在不同路面结构中对车辙的贡献,参考《公路沥青路面设计规范(JTG D50—2006)》中关于新建沥青路面结构层厚度的计算示例,确定半刚性、半柔半刚和柔性共 3 个代表结构(结构 I 至结构 III)及其计算参数。考虑到目前全国范围内半刚性基层路面沥青面层厚度普遍有增加趋势,20 cm 厚沥青层已较为常见,故结构 I 中的沥青面层厚度由规范中的 18 cm 增加至 20 cm。另外,王翼^[8]研究发现,在路面结构应力、应变计算中需要考虑温度梯度对材料模量的影响,而采用回弹模量无法考虑温度梯度的影响,故本文采用动态模量作为材料参数。具体参数如表 2 所示。

表 2 路面结构参数

Tab.2 Parameters of pavement structures

结构层材料	动态模量/MPa	厚度/cm			泊松比
		结构 I	结构 II	结构 III	
细粒式沥青混凝土	根据温度和材料确定	4	4	4	0.35
中粒式沥青混凝土	根据温度和材料确定	6	8	8	0.35
粗粒式沥青混凝土	根据温度和材料确定	10	15	20	0.35
水泥稳定碎石	11 000	45			0.20
水泥稳定砂砾	8 000		20		0.20
级配碎石	350	20		35	0.40
级配砂砾	250		18		0.40
土基	40				0.40

本研究中的材料动态模量均采用如下 Witczk 模型进行估算^[9]:

$$\lg E^* = -0.349 + 0.754 \left(|G_b^*|^{-0.0052} \right) \times \left[6.65 - 0.032\rho_{0.075} + 0.0027\rho_{0.075}^2 + 0.011\rho_{0.75} - 0.0001\rho_{0.75}^2 + 0.006\rho_{0.5} - 0.00014\rho_{0.5}^2 - 0.08V_a - 1.06 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) \right] + \left[2.56 + 0.03V_a + 0.71 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) + 0.012\rho_{0.5} - \right]$$

$$0.0001\rho_{9.5}^2 - 0.01\rho_{19}] \times [1 + \exp(-0.7814 - 0.5785 \lg |G_b^*| + 0.8834 \lg \delta_b)]^{-1} \quad (1)$$

式中: E^* 为动态模量, psi (1psi = (1/145) MPa); $\rho_{0.075}$ 为 0.075 mm 筛孔通过率, %; $\rho_{4.75}$ 为 4.75 mm 筛孔分计筛余, %; $\rho_{9.5}$ 为 9.5 mm 筛孔分计筛余, %; ρ_{19} 为 19 mm 筛孔分计筛余, %; V_a 为空隙率, %; V_{beff} 为有效沥青含量, %; $|G_b^*|$ 为沥青复数剪切模量, psi; δ_b 为与 $|G_b^*|$ 对应的相位角, (°)。

确定路面结构中每一亚层的动态模量需要先确定每一亚层的车辙等效温度。此处采用 Strategic Highway Research Program (SHRP) 计划提出的方法^[10], 公式如下:

$$T_{\text{eff}} = 30.8 - 0.12Z_{\text{cr}} + 0.92T_{\text{design}} \quad (2)$$

表 3 面层动态模量取值

Tab.3 Dynamic modulus of pavement surface

结构层材料	结构 I		结构 II		结构 III	
	温度/℃	动态模量/MPa	温度/℃	动态模量/MPa	温度/℃	动态模量/MPa
AC-13	51.4~47.8	1 547~1 782	51.4~47.8	1 547~1 782	51.4~47.8	1 547~1 782
AC-20	46.6~40.6	956~2 045	46.6~38.2	956~2 801	46.6~38.2	956~2 801
AC-25	39.4~28.6	2 384~3 780	37.0~20.2	3 063~4 721	37.0~20.0	3 063~4 610

王翼^[7]提出的车辙预估方程, 用轮辙试验和环道试验数据建立沥青路面剪切变形预估方程, 并通过实地调查数据进行标定和验证。该方程形式合理, 具有较为可靠的拟合和预估结果。本文采用该方程进行车辙深度计算。方程如下:

$$R_d = 0.4565(1 + L_p) \sum_{i=1}^n 10^{-7.6422 T_i^{3.7586} (N/(1 + 0.3441V^{1.9824}))^{0.8358(\tau_i/[\tau]_i)^{0.6256}}} \quad (4)$$

式中: R_d 为车辙深度, mm; L_p 为隆起系数; n 为路面结构分层数; T_i 为第 i 亚层的平均温度, °C, 其确定方法见式(2)和式(3); N 为轴载作用次数; V 为设计车速, km · h⁻¹; τ_i 为第 i 亚层平均剪应力, 即取图 1 中 5, 7, 9 三点位最大剪应力平均值, MPa; $[\tau]_i$ 为第 i 亚层抗剪强度, MPa。

为了选取适当的作用次数进行车辙计算, 首先需要分析车辙变化趋势。本文根据车辙预估模型计算各级位荷载作用下的车辙深度并进行比较, 较大的作用次数可以保证车辙变形已进入剪切流变阶段, 且变形较为稳定, 便于比较。此处通过试算, 发现总作用次数取 2.0×10^7 次时可达上述要求。

设计车速 V 取值根据高速公路上货车的实测车速确定; 抗剪强度 $[\tau]$ 的取值根据单轴贯入试验的测试结果取[1]: 双层改性时, 上面层使用改性沥青 $[\tau]$

$$T_{\text{design}} = T_{\text{av}} + K_a \sigma_{\text{MAAT}} \quad (3)$$

式中: T_{eff} 为车辙等效温度, °C; Z_{cr} 为沥青层深度, mm; T_{design} 为设计气温(平均气温加保证率), °C; T_{av} 为根据历史资料统计的年平均气温的平均值, °C; σ_{MAAT} 为年平均气温的标准差, °C; K_a 为保证率系数。

沥青层永久变形主要产生于 20~60 °C^[11]。此处为了从较为不利的温湿状况考虑, 假设表 1 中所示路面结构位于广州地区, 通过式(2)和式(3)确定每一亚层的车辙等效温度。然后通过 10 Hz、不同温度下的动态剪切流变试验可以得到沥青复数剪切模量和相位角结果^[8]。再由式(1)确定 3 种结构各亚层对应的动态模量, 结果见表 3。

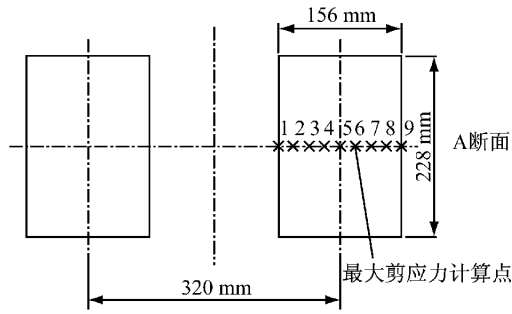
取 0.90 MPa, 中面层使用改性沥青 $[\tau]$ 取 0.85 MPa, 下面层使用普通沥青 $[\tau]$ 取 0.55 MPa; 单层改性时, 上面层使用改性沥青 $[\tau]$ 取 0.90 MPa, 中面层使用普通沥青 $[\tau]$ 取 0.60 MPa, 下面层使用普通沥青 $[\tau]$ 取 0.55 MPa; 3 层均不改型时, 上面层使用普通沥青 $[\tau]$ 取 0.65 MPa, 中面层使用普通沥青 $[\tau]$ 取 0.60 MPa, 下面层使用普通沥青 $[\tau]$ 取 0.55 MPa。

2 基于剪切的多轴型轴载谱换算方法

2.1 不同路面结构中各轴型剪应力比较

对 3 种轴型作用下的剪应力场进行计算, 后轴双轴双轮组和三轴双轮组两轴中心距取 1.31 m^[12]。对相同位点计算结果比较发现, 轮胎作用区域以外位置的剪应力均小于 0.05, 远远小于轮胎作用区域的剪应力, 且荷载作用区域中, A 断面上的剪应力总体上最大(见图 1), 故以 A 断面作为剪应力的取值断面, 这也与文献[13]关于标准轴载作用下的最大剪应力分析得出的结论一致。

文献[7]确定了用于车辙预估模型的剪应力代表值取值方法: 即取图 1 中 5, 7, 9 三点位最大剪应力的平均值。此处绘出表 1 中 3 种路面结构在 0.7 MPa 胎压时不同轴型作用下的剪应力代表值比较

图1 最大剪应力计算点^[7]Fig.1 Calculation points of maximum shear stress^[7]

图,以及3种不同结构单轴双轮组作用下的剪应力比较图,见图2。

从图2中可以看出:① 相同位点处3种轴型的剪应力略有不同,但相差不大。路面结构对不同轴型下的剪应力差别有一定影响,总体而言,半柔半刚性基层结构中3种轴型作用下的剪应力差别最大。② 同样的荷载状况下,半刚性基层结构的剪应力总体最大,柔性基层结构的剪应力总体最小;但在路面结构一定深度以下,柔性基层结构的剪应力要大于其他两种路面结构。

2.2 不同胎压下各轴型剪应力场比较

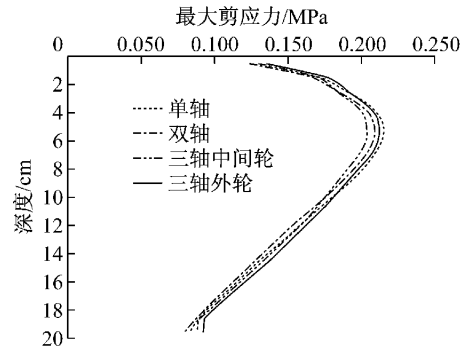
为了考虑胎压的影响,根据高速公路轴载数据,选择3种轮胎接地压强(0.70, 1.05, 1.41 MPa)分别对应标准轮压范围、中等超载轮压范围和严重超载轮压范围。采用表2中典型半刚性基层路面结构计算,可代表我国多数情况,也偏于安全^[11]。在图3中给出3种情况下各轴型的最大剪应力代表值(0.70 MPa情况下见图2a)。

从图3中可以得出以下规律:① 3种轴组类型作用下的剪应力值都随轮胎接地压强的增大而增大,但不同压强作用下3种轴组类型剪应力值的相对大小关系是一致的。② 由于应力叠加效应及其他相关因素的影响,相同轮胎接地压强情况下,不同轴组类型相同点位处最大剪应力值略有不同,但相差不大;总体而言,单轴双轮组和三轴双轮组外轮下剪应力最大,三轴双轮组的中间轮作用下剪应力最小。

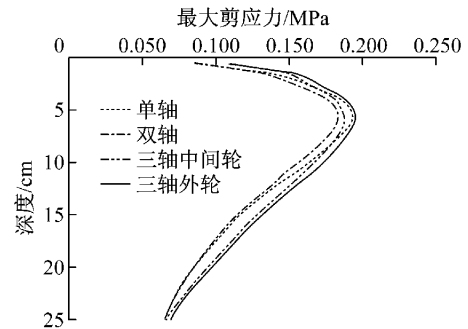
2.3 考虑剪切的多轴型轴载谱换算方法

为了将其他轴型轴载谱换算为标准轴型轴载谱以进行统一分析和比较,对各轴型作用下的剪应力场进行分析。以单轴双轮组最大剪应力代表值为标准值,给出每一结构层中其他轮轴类型作用下的剪应力代表值与标准值的相对偏差,见表4。

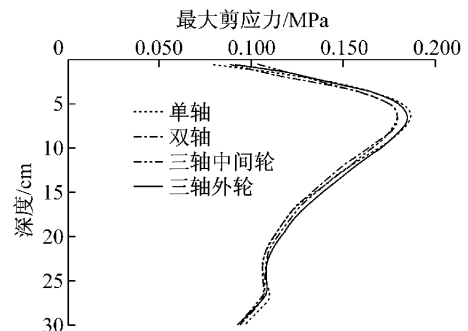
从表4中可以看出:除了结构Ⅱ中有个别相对偏差为11%以外,大多数相对偏差都在5%以内,故



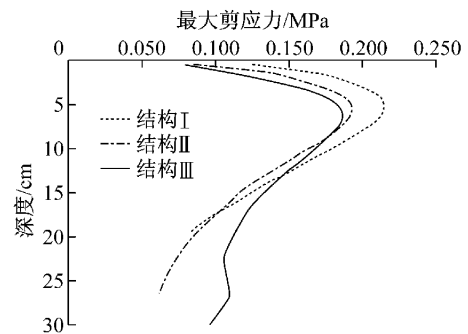
a 结构Ⅰ(半刚性基层结构)



b 结构Ⅱ(半柔半刚性基层结构)



c 结构Ⅲ(柔性基层结构)



d 不同结构(单轴)

图2 不同路面结构剪应力比较图

Fig.2 Shear stress of different pavement structures

可认为双轴和三轴组中轴与轴之间互相影响不大。本文中为了简化考虑,采用以轴重换次数的方法,将双轴双轮组和三轴双轮组轴载数据近似按2个或3个单轴双轮组统计,和单轴双轮组数据一起处理,得到换算后单轴双轮组轴载谱。如:有重27 t的三轴双

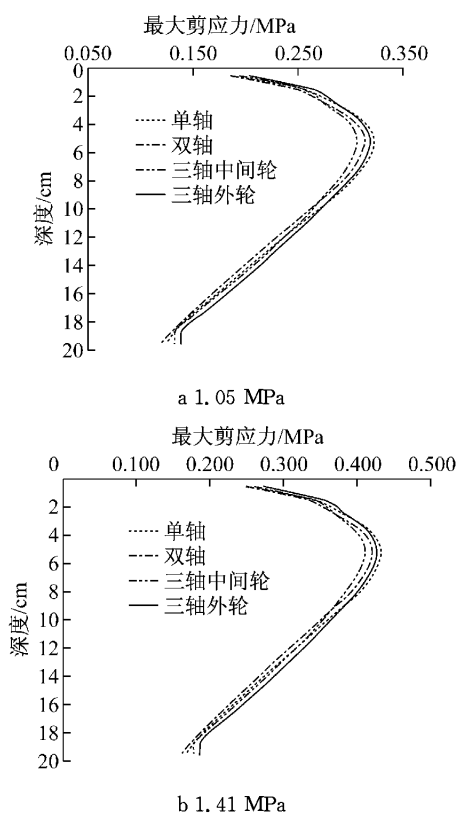


图3 不同胎压下各轴型剪应力比较

Fig.3 Shear stress of three axle types at different tire pressures

表4 不同路面结构各轮轴类型剪应力相对偏差

Tab.4 Relative deviation of shear stress of each axle type in different pavement structures

结构类型	结构层	双轴	三轴中间轮	三轴外轮
结构 I	上面层	-2.40	-0.97	3.08
	中面层	-2.81	-4.51	-0.83
	下面层	-2.75	1.17	4.77
	总平均值	-2.70	-0.96	2.75
结构 II	上面层	-4.04	8.35	11.81
	中面层	-4.67	-0.07	3.46
	下面层	-0.57	8.55	11.53
	总平均值	-2.30	5.97	9.18
结构 III	上面层	-1.07	7.79	5.94
	中面层	-3.34	-3.03	0.01
	下面层	-1.50	-0.39	0.77
	总平均值	-1.91	-0.03	1.23

注:负值表示剪应力小于标准值,正值表示剪应力大于标准值。

轮组作用1次,将其换算为单轴双轮组,即轴重为9 t的单轴双轮组作用3次。采用上述方法对各省双轴双轮和三轴双轮轴组数据进行换算,和单轴双轮数据一起处理,得到各省换算后单轴双轮轴载谱。

3 以车辙为指标的轴载限确定方法

根据建立的车辙预估模型^[7]和对高速公路轴载

数据的调查分析结果,从抗车辙角度考虑,通过分析实际道路不同比例和大小的轴载对车辙的贡献来确定路面设计轴载限。考虑到半刚性基层路面结构在我国的广泛运用,且其中剪应力也最大,故采用此路面结构进行分析是偏于安全的,路面结构选取全国较为典型的半刚性结构(表2中结构I)。

3.1 轴载限确定

对各省的轴载、车辙谱图进行计算,此处给出典型省份的轴载、车辙谱图,见图4。对于轴重 ≤ 8 t的荷载级位均归为8 t情况下考虑,以便计算。

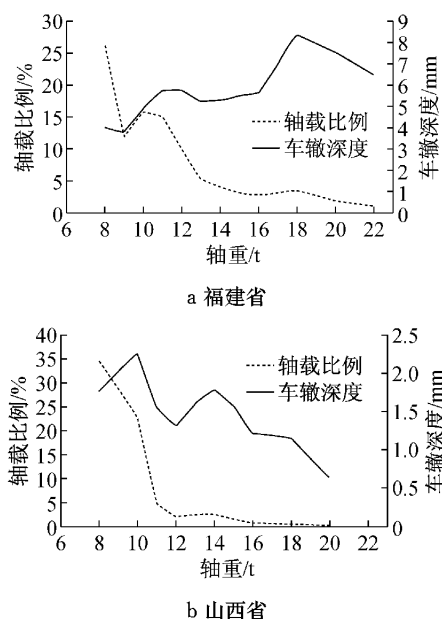


图4 典型省份轴载、车辙谱

Fig.4 Axle load and rutting spectrum of representative provinces

从图4可以看出,福建和山西轴重为15~22 t区间的轴次分别只占到12.23%和2.53%,而对车辙的贡献分别约为50%和27%。另外,超过10 t的轴重频率都在下降,但是福建省计算结果中其对车辙的贡献却在增加,山西省计算结果中其对车辙的贡献虽呈下降趋势,但也远小于轴重频率下降幅度。说明重载对车辙有重要影响。

为了比较不同级位轴载对车辙贡献的大小,作各级轴重在单位数量轴次下引起的车辙深度 R_d/N 与轴重的关系图。本文选取的8个省份设计气温涵盖了11.4℃~20.9℃范围,且轴载谱数据都不同,但呈现出了相同的规律:即根据 R_d/N 随着轴重增加的速率大体都可分为3个部分。此处以江苏省为例给出示意图,见图5。从图5中可以看出:轴重 ≤ 11 t的轴载,单位数量轴次对车辙的贡献较小,但轴重为15~22 t区间的轴载对车辙的贡献可达到 >11

~15 t 的 2~7 倍,且该区间轴次只占 4.21%,对车辙的贡献却占 36%。

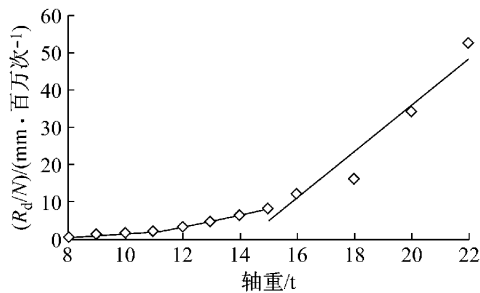


图5 典型省份各级轴重单位数量轴次车辙

Fig.5 Rutting under each axle load in unit quantity of representative province

为了进一步分析,对各省结果进行直线拟合,在表5中给出直线斜率(斜率代表单位数量轴次车辙随轴重增加的速率): k_1 为>8~11 t 段, k_2 为>11~15 t 段, k_3 为>15~22 t 段。

表5 各省拟合直线斜率

Tab.5 Slopes of fitting lines in different provinces

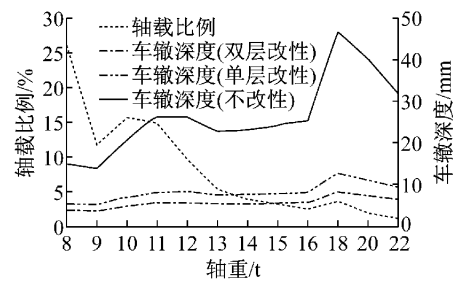
省份	k_1	k_2	k_3
山西	0.425	0.826	5.599
河北	0.437	1.551	5.341
山东	0.626	2.278	6.859
河南	0.423	1.399	5.777
江苏	0.517	1.599	6.213
湖北	0.452	1.814	5.382
湖南	0.431	1.876	7.163
福建	0.344	1.725	3.124
平均值	0.457	1.633	5.682
标准差	0.078	0.392	1.153

分析表5中数值,发现各省 k_1 最小,均值为0.457; k_2 较 k_1 更大,均值为1.633; k_3 最大,均值为5.682。即随着轴重增加,车辙随轴重增加的速率越来越大。因此,结合图5分析结果认为,对于≤10 t 的荷载,路面具有很稳定的抗力,对于>10~15 t 的轴载,路面具有较稳定的抗力,对于>15 t 的轴载,路面难以提供稳定的抗力。

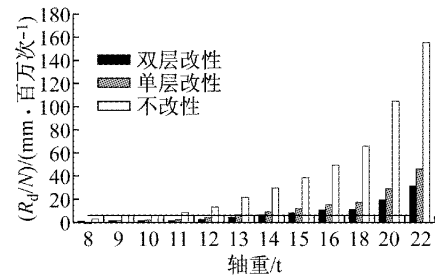
3.2 使用改性沥青对轴载限的影响

目前许多地区会采用改性沥青以改进沥青路面抗车辙性能,采用改性沥青会提高沥青混合料的抗剪强度。为了量化使用改性沥青对路面能够承受多少数量、何种程度轴载的影响,选取典型省份换算后的单轴双轮组轴载谱进行不同改性情况下的分析。下面以福建省和山西省为例,分别给出不同改性情况下的轴载、车辙谱图,以及单位数量各级轴重引起的车辙 R_d/N 与轴重的关系图,分别见图6和图7。

由图6和图7可以看出,不改性情况下车辙深



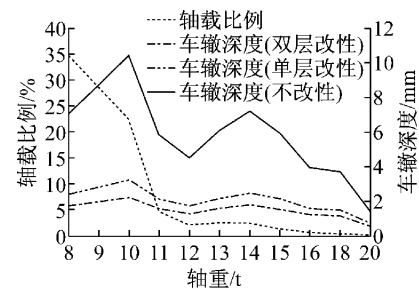
a 轴载、车辙谱



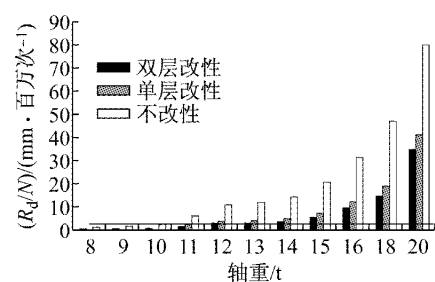
b 各级轴重单位数量轴次车辙

图6 福建省不同材料强度情况下的车辙特征

Fig.6 Rutting of different material strength in Fujian Province



a 轴载、车辙谱



b 各级轴重单位数量轴次车辙

图7 山西省不同材料强度情况下的车辙特征

Fig.7 Rutting of different material strength in Shanxi Province

度和 R_d/N 都远大于双层改性和单层改性情况,且随着轴重的增加,车辙深度的增幅也远大于双层改性和单层改性情况。由图中所绘水平线可以看出,若以不使用改性沥青情况下10 t 轴重单位数量轴次产生的车辙深度为基准,福建省单层改性情况下在13 t 轴重下 R_d/N 与之相当,双层改性情况下在>14~

15 t 轴重下 R_d/N 与之相当;山西省单层改性情况下在 11 t 轴重下 R_d/N 与之相当,双层改性情况下在 $>12\sim 13$ t 轴重下 R_d/N 与之相当。另外,轴重较小时,不同改性情况下 R_d/N 相差不大;轴重 >13 t 时,随着轴重的增加,不同改性情况下 R_d/N 相差越来越大。因此,虽然使用改性沥青对车辙有一定的缓解作用,但重载仍然会导致较严重的车辙。

4 结论

(1) 提出以轴重换次数的多轴型数据处理方法,将双轴双轮组和三轴双轮组轴载数据近似按 2 个或 3 个单轴双轮组统计,和单轴双轮组数据一起处理,得到换算后单轴双轮组轴载谱。

(2) 重载对路面变形特性的影响可以分为 3 个层面:对于 ≤ 10 t 的荷载,路面具有稳定抗力,对于 $>10\sim 15$ t 的轴载,路面具有较稳定的抗力,对于 >15 t 的轴载,难以提供稳定抗力。结合高速公路普遍采用改性沥青这一事实,可以允许一定比例的 $>10\sim 15$ t 荷载,应该严格限制 15 t 以上的单轴载。对于普通沥青路面,应该严格限制 10 t 以上的单轴载。

(3) 在设计交通量相同的情况下,使用抗剪强度较高的改性沥青对沥青路面车辙的改善效果明显。

参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
SUN Lijun. Structural behavior study for asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
HUANG Yangxian. Analysis and design of pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [3] 倪富健, 邓学钧. 公路运输车辆合理轴重限值研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 111.
NI Fujian, DENG Xuejun. The study of rational axle load limit for highway transportation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 111.
- [4] 陈浙江, 王玲娟. 超载下的沥青路面轴载换算[J]. 中外公路, 2007, 27(2): 189.
CHEN Zhejiang, WANG Lingjuan. Axle load conversion on asphalt pavements for overload[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(2): 189.
- [5] Sharma B M, Sitaramanjaneyuiu K, Kanchan P K. Effect of vehicle axle loads on pavement performance [C] // Road Transport Technology. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute, 1995: 263-272.
- [6] Salem H M A. Effect of excess axle weights on pavement life [J]. Emirates Journal for Engineering Research, 2008, 13(1): 21.
- [7] 王翼. 基于剪切的沥青路面车辙预估模型的优化与简化[D]. 上海: 同济大学, 2013.
WANG Yi. Optimization and simplification of asphalt pavement rutting transfer function based on shear mode[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [8] 王翼, 朱靛雯, 孙立军. 沥青路面剪切变形预估模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(11): 1688.
WANG Yi, ZHU Jingwen, SUN Lijun. Prediction model of shear deformation of asphalt mixture pavement[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(11): 1688.
- [9] Bari J, Witczak M W. Development of a new revised version of the witczak E^* predictive model for hot mix asphalt mixtures [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006, 75: 381.
- [10] Cominsky R J, Huber G A, Kennedy T W, et al. The superpave mix design manual for new construction and overlays [R]. Washington D C: Strategic Highway Research Program National Research Council, 1994.
- [11] Bonaquist R F, Christensen D W, Stump W. Simple performance tester for superpave mix design: First-article development and evaluation [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2003.
- [12] 李思李, 于蕾, 田波, 等. 我国公路荷载的车轴-轮型分类和几何参数研究[J]. 公路, 2011(7): 1.
LI Sili, YU Lei, TIAN Bo, et al. Research on axle-wheel type and geometric parameters of heavy load vehicle in China[J]. Highway, 2011(7): 1.
- [13] 尹谨学. 沥青路面重载特征及对路面设计的影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
YIN Jinxue. Research on axle load characteristics of asphalt pavement and effects on pavement design [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.