

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202012039



宽幅高速公路沥青路面车道 结构响应差异化数值分析

刘树堂¹, 夏建平², 栾娟¹, 杨广亮², 曹卫东¹

(1. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002;
2. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250098)

摘要: 为了研究宽幅高速公路渠化交通荷载对沥青路面车道结构响应的差异性,结合某改建高速公路的交通量,分别对行驶客车的轻载车道和行驶货车的重载车道的交通荷载进行累计轴次换算.通过沥青路面结构分析软件和数值模拟方法,对不同工况下的沥青路面车道结构响应进行计算和分析.结果表明:实际工况的轻载车道沥青路面的非弹性变形为重载车道的 68.0%,但轻载车道与重载车道无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命近似相同;实际工况的轻载车道沥青路面的非弹性变形为设计工况的 82.5%,实际工况的重载车道沥青路面的非弹性变形为设计工况的 121.3%.

关键词: 宽幅高速公路; 沥青路面结构; 轻载车道; 重载车道; 荷载响应

中图分类号: U 416.01 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2021)05-0598-07

Numerical Analysis on Structure Response Difference of Wide Expressway Asphalt Pavement Lane

LIU Shutang¹, XIA Jianping², LUAN Juan¹,
YANG Guangliang², CAO Weidong¹

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China;
2. Shandong High Speed Group Limited Company, Jinan 250098, China)

Abstract: In order to study the difference of asphalt pavement lane structure response caused by channelized traffic load of wide expressway, combining with the traffic volume of a reconstructed expressway, the cumulative axle times conversion is carried out for the traffic load of the light load lane for passenger cars and the heavy load lane for freight cars. Based on the analysis software of asphalt pavement structure and numerical simulation method, the asphalt pavement lane structure response under different working conditions is investigated. The results show that the inelastic deformation of asphalt pavement in the light load lane under actual working condition is 68.0% of that in the heavy load lane, but the fatigue cracking life of inorganic binder stabilized layer in the light load lane is approximately the same as that in the heavy load lane. The inelastic deformation of asphalt pavement in the light load lane under actual working condition is 82.5% of that under design working condition, and the inelastic deformation of asphalt pavement in the heavy load lane under actual working condition is 121.3% of that under design working condition.

Keywords: wide expressway; asphalt pavement structure; light load lane; heavy load lane; load response

经济的不断发展推动着我国高速公路网逐步趋于完善，在经济发达地区，有些早期修建的双向 4 车道高速公路的路幅宽度已无法满足繁重的交通需求，高速公路的拓宽改建成为新的发展趋势，由双向 4 车道拓宽改建为双向 6 车道、8 车道，甚至更宽的大宽幅高速公路已较为普遍。高速公路大幅增宽，为客车、货车分离通行提供了客观基础，使渠化交通成为必然。与此同时，宽幅高速公路路面结构的设计理念与方法需要重新思考，例如，按照现行的 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[1]，所有通行车道及紧急停车带均采用相同的路面结构与道路工程材料，这种设计方法可以给设计与施工带来方便，但在渠化交通的情况下，考虑到交通荷载的车道差异性，对行驶小客车与大客车的轻载车道而言，采用与重载车道相同的路面结构与道路工程材料是明显的浪费。因此，进行道路结构的差异化设计与建造非常具有必要性。

法国沥青路面设计方法充分考虑了各车道车辆荷载的差异性^[2-3]，进行交通量计算时，对于单向 2 车道路面，规定右侧第 1 车道载重汽车交通量占总交通量的 90%；对于单向 3 车道路面，规定右侧第 1 车道载重汽车交通量占总交通量的 80%；注重基层的设计，通过改变各车道的基层厚度，实现差异化设计。林利安等^[4]探讨了大修路面差异化设计的方法及措施，对于路面厚度的差异化设计，通过铣刨基层增加面层厚度、保持基层厚度不变增加面层厚度两种方式实现；对于路面材料的差异化设计，通过对主要承载货车的重载车道采用较好的沥青材料进行铺筑实现，同时，保证路面结构厚度和路面标高一致。丁君明等^[5]等提出在轻载车道和重载车道采用不同的沥青混合料，对于中面层，轻载车道使用橡胶改性沥青混合料，重载车道在轻载车道的基础上添加改性剂，提高混合料的抗车辙性能。目前，国内已开展了相关工程探索，但仍缺少基于交通轴载差异的路面结构性能差异化分析。基于此，本文以典型的双向 8 车道高速公路为例，基于实体工程和交通调查资料，对宽幅高速公路沥青路面车道结构响应差异化进行数值分析。

1 车道交通荷载调查与累计轴次换算

1.1 车道交通荷载调查

基于动态称重系统(WIM)的实测数据^[6-8]，可获取双向 8 车道高速公路各车道的车型分布。渠化交通后，轻载车道和重载车道的车型分布差异显著，大型车辆(货车)集中于外侧的两个重载车道，小型车辆(客车)集中于内侧的两个轻载车道。

某双向 4 车道高速公路位于山东省，特征年(2020 年)的日交通量高达 59 790 辆，其中，小客车、大客车、小货车、中货车、大货车、特大货车和集装箱等 7 种车型的日交通量分别为 24 036，3 288，3 049，4 424，5 321，18 356 和 1 315 辆。该高速公路拟改建为双向 8 车道，路面设计使用年限(15 a)内预测交通量增长率为 3%。

1.2 累计轴次换算

路面结构设计标准轴载换算公式^[1]为

$$EALF_{m,i,j}=c_1c_2\left(\frac{P_{m,i,j}}{P_s}\right)^b. \tag{1}$$

式(1)中： $EALF_{m,i,j}$ 为 m 类车辆中 i 种轴型在 j 级轴重区间的当量设计轴载换算系数； P_s 为设计轴载，kN； $P_{m,i,j}$ 为 m 类车辆中 i 种轴型在 j 级轴重区间的单轴轴载，kN，对双联轴和三联轴而言，其为平均分配到每根单轴的轴载； b 为换算指数，分析沥青混合料层疲劳和永久变形时， $b=4$ ，分析路基永久变形时， $b=5$ ，分析无机结合料稳定层疲劳时， $b=13$ ； c_1 为被换算轴型的轴数系数，前、后轴间距大于 3 m 时，按单轴进行计算，前、后轴间距小于 3 m 时，按照文献^[1]取值； c_2 为被换算轴-轮型的轮组系数，双轮取 1.0，单轮取 4.5。

文献^[1]在路面结构设计思想上尚未体现出针对宽幅高速公路渠化交通与车道性能差异化的新要求，仍然按照交通量同等分布于各车道的情形(即客车、货车混行)进行设计。此外，在实际宽幅高速公路中，双向 8 车道进行渠化交通后，客车和货车分车道行驶，各车道交通轴载差异明显。为了便于比较，对上述情况各车道上的交通量进行标准轴次和设计使用年限内车道累计轴次的换算。

基于特征年车型数量，可得特征年轻载车道客车(小客车和大客车)的日交通量(K_1)为 27 324 辆，

重载车道的货车(小货车、中货车、大货车、特大货车及集装箱)日交通量为 32 466 辆.采用沥青路面设计软件 HPDS(2017 版),对轻载车道和重载车道初始年交通量进行标准轴载换算,得到分析沥青混合料层疲劳和永久变形时,设计使用年限内车道累计轴次 N_e .

路面交通轴次的计算参数及结果,如表 1 所示.为保守起见,参考文献[1]的相关数据,选定轻载车道、重载车道的车道系数(单向车道数为 2 的情况)及各类型满载车所占比例.表 1 中: K_1 为初始年年平均日交通量(双向); ζ 为交通量年平均增长率; η_l 为整体式货车所占比例; η_s 为半挂式货车所占比例; N_1 为初始年设计车道日平均当量轴次.

2 不同车道的沥青路面结构响应分析

2.1 有限元模型与计算参数

2.1.1 路面结构的拟定与模型尺寸 根据我国常用的路面结构形式和规范,可以得到满足设计要求的沥青路面结构,如图 1 所示.图 1 中:从上到下的结构层依次为沥青玛蹄脂沥青混合料层(SMA13 层)、中粒式沥青混凝土层(AC20 层)、粗粒式沥青混凝土层(AC25 层)、沥青稳定碎石层(ATB25 层)、水泥稳定碎石层(CSM 层)和水泥稳定砂砾层(CSG 层),并以该路面结构作为计算分析模型.

高速公路 2 车道宽度之和为 7.5 m,模型尺寸确定为 7.5 m×3.0 m×3.0 m(宽×长×高).对荷载加载位置处进行网格加密,整个模型共划分 34 992 个单元格,单元类型为 8 节点 6 面体减缩积分.边界条件假设为模型所有侧面均无法向位移,底面完全固定,各结构层层间完全连续.

2.1.2 温度场 沥青混合料属于温度敏感性材料,其性能受温度影响较大.因此,沥青路面结构响应分析需考虑温度因素,叠加温度场.着重考虑夏季高温对路面性能的影响.根据中国天气网,获取道路所在地区夏季最高温所在月(即特征月,8 月)的气象资料.道路所在地区夏季 1 d(24 h)的代表性气温(θ_t),如表 2 所示.由表 2 及相关资料可知:特征月的最高气温为 36.0 ℃,最低气温为 25.0 ℃;实际日照时长为 12 h;平均风速为 2.6 m·s⁻¹.根据结构层材料组合,拟定沥青路面的太阳辐射吸收率为 0.9,路面发射率为 0.81^[9].

表 1 路面交通轴次的计算参数及结果

Tab. 1 Calculation parameters and results of pavement traffic axis

参数/结果	客车、货车分行		客车、货车混行
	轻载车道	重载车道	
K_1 /辆	3 288	32 466	35 754
方向系数	0.55	0.55	0.55
车道系数	0.70	0.70	0.45
ζ /%	3	3	3
η_l /%	0	39.1	12.5
η_s /%	0	60.6	32.9
$N_1/\times 10^3$ 次	3.160	40.484	22.103
$N_e/\times 10^7$ 次	2.145	27.483	15.005

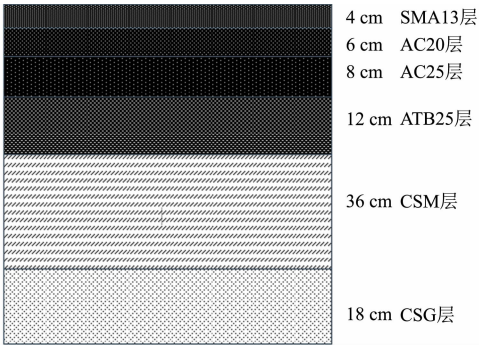


图 1 沥青路面结构

Fig. 1 Asphalt pavement structure

表 2 道路所在地区夏季 1 d 的代表性气温

Tab. 2 Representative temperature of one summer day in road-located area

时刻	θ_t /℃	时刻	θ_t /℃	时刻	θ_t /℃	时刻	θ_t /℃
1:00	25.4	7:00	29.0	13:00	36.0	19:00	31.5
2:00	25.0	8:00	30.0	14:00	35.6	20:00	30.3
3:00	25.6	9:00	32.0	15:00	35.3	21:00	29.2
4:00	26.2	10:00	33.4	16:00	34.7	22:00	28.1
5:00	27.0	11:00	34.5	17:00	33.7	23:00	26.9
6:00	28.0	12:00	35.4	18:00	32.6	24:00	25.8

基于表 2 的数据,运用有限元软件 ABAQUS 分别模拟气温、对流交换和太阳辐射,并对沥青路面结构进行温度场计算.进行有限元计算时,相关材料参数取温度场温度范围内的数值.该地区夏季沥青

路面的温度场(2:00—24:00),如图 2 所示.图 2 中: θ 为温度.

由图 2 可知:路表面及 SMA13 层、AC20 层、AC25 层的温度变化均呈现出与气温类似的有峰值的曲线状,但其曲线均高于气温曲线,气温对沥青路面深层材料温度场的影响逐渐减小;路表面温度峰值与气温峰值出现的时刻基本吻合,随着深度的增加,SMA13 层、AC20 层、AC25 层温度峰值的出现比气温峰值依次延时约 1,2,3 h,且峰值逐渐降低;柔性基层(ATB25 层)延时 4 h 后,其温度达到峰值(该值已低于气温峰值),并保持温度平稳变化;半刚性基层(CSM 层)与底基层(CSG 层)基本不受气温影响,在一个计算温度周期内始终保持原有温度;温度场的最高温与最低温均出现在路表面.

2.1.3 沥青混合料的相关参数 沥青混合料为典型的粘弹性材料,夏季气温下蠕变行为特征更为明显.采用时间硬化蠕变模型反映其蠕变性能^[10],有

$$\dot{\epsilon}_{cr}=Aq^nt^m.$$

(2)

式(2)中: $\dot{\epsilon}_{cr}$ 为单轴等效蠕变应变率; q 为应力; t 为时间; A,n,m 均为模型蠕变参数,一般通过室内材料蠕变试验与回归分析确定, $A>0,n>0,-1<m\leq0$.

沥青混合料的相关参数,如表 3 所示.表 3 中: E 为动态模量,路面材料动态模量来自路面结构的设计值,沥青混合料的蠕变参数由文献[9]调研获得.此外,水泥稳定碎石、路基的动态模量分别为 18 000,70 MPa.

表 3 沥青混合料的相关参数
Tab.3 Relevant parameters of asphalt mixture

沥青混合料类型	$\theta/^{\circ}\text{C}$	E/MPa	$A/\times 10^{-6}$	n	m
沥青玛蹄脂沥青混合料	20	12 000	6.536×10^{-5}	0.937	-0.592
	30	8 550	3.325×10^{-3}	0.862	-0.587
	40	7 640	1.446×10^{-2}	0.792	-0.577
	50	7 310	1.390	0.414	-0.525
	60	7 260	14.640	0.336	-0.502
中粒式沥青混凝土	20	12 000	4.580×10^{-5}	0.944	-0.596
	30	9 920	2.461×10^{-3}	0.796	-0.585
	40	7 910	3.673×10^{-2}	0.773	-0.570
	50	5 800	4.802	0.595	-0.532
	60	5 010	77.780	0.384	-0.441
粗粒式沥青混凝土	20	13 500	4.590×10^{-5}	0.992	-0.581
	30	11 800	3.461×10^{-3}	0.859	-0.576
	40	9 300	1.956×10^{-2}	0.830	-0.562
	50	6 550	1.200	0.322	-0.522
	60	5 110	37.550	0.210	-0.418
沥青稳定碎石	20	11 000	4.590×10^{-5}	0.992	-0.581
	30	9 600	3.461×10^{-3}	0.859	-0.576
	40	7 580	1.956×10^{-2}	0.830	-0.562
	50	5 330	1.200	0.322	-0.522
	60	4 160	37.550	0.210	-0.418

2.1.4 荷载的施加 因实际车轮与路面的接触形状更接近于矩形,故将文献[1]中的标准轴载 BZZ-100 双圆均布荷载转化为等效的矩形均布荷载,转化后的荷载矩形为 19.2 cm×18.4 cm(长×宽),矩形横向间距为 13.5 cm.车辆荷载累计作用时间 t_c ^[10]为

$$t_c=\frac{0.36NP}{n_w p B v}.$$

(3)

式(3)中: N 为轮载作用次数,次; P 为车辆轴重,kN; n_w 为轴的轮数,个; p 为轮胎接地压力,MPa; B 为轮胎接地宽度,cm; v 为行车速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

由此可得各车道在设计使用年限内的标准轴载累计作用时间.各车道施加的荷载参数及轴载换算结果,如表4所示.表4中: t_1 为一次加载作用时间.

2.2 结构响应差异分析

2.2.1 计算方案 采用文献[1]方法进行沥青路面结构设计(设计工况)时,假定高速公路各车道交通荷载分布相同,不考虑车辆荷载分布差异,理论上各车道变形一致,破坏程度相同,维修同步.然而,在渠化交通荷载作用(实际工况)下,由于车辆的行驶特性,轻载车道与重载车道车辆荷载分布存在明显差异,使各车道沥青路面结构响应显著不同,车道病害程度各异,主要以车辙和裂缝为主,且重载车道的车辙病害先发生,更为严重^[11].沥青路面变形分为弹性变形和塑性变形(非弹性变形),车辙变形属于不可恢复的塑性变形.

文献[1]以无机结合料稳定层(CSM层、CSG层)层底拉应力为依据,进行无机结合料稳定层疲劳开裂寿命计算.因此,以沿路面深度方向的沥青混合料层非弹性应变和无机结合料稳定层层底拉应力为指标,分析各车道的差异,对比设计工况和实际工况下的沥青路面结构响应.

2.2.2 不同工况下的数值模拟 采用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟.在交通荷载作用下,可近似认为 CSM 层、CSG 层和土基呈现弹性性状,非弹性应变主要发生在沥青混合料层.

1) 设计工况下的非弹性应变.设计工况下,沥青混合料层的非弹性应变(ϵ),如图3所示.图3中: D 为路面宽度.由图3可知:相邻两车道(左幅车道(0~3.75 m)为轻载车道,右幅车道(3.75~7.00 m)为重载车道的非弹性应变基本保持一致,上面层(SMA13层)应变分布受加载方式影响较大,近似呈双M型分布,其余各层分布基本相同,呈双峰分布,峰值出现于荷载作用中心;从SMA13层到ATB25层,非弹性应变依次减小,最大值发生在SMA13层,上面层、中面层(AC20层)对总体车辙的贡献较大,下面层(AC25层)产生的车辙变形也不可忽视,而ATB25层的车辙已很小.

2) 实际工况下的非弹性应变.实际工况下,沥青混合料层的非弹性应变,如图4所示.由图4可知:相邻两车道的非弹性应变分布形态与设计工况相同,但相邻两车道的非弹性应变的差异已非常明显,轻载车道的非弹性应变小于重载车道.

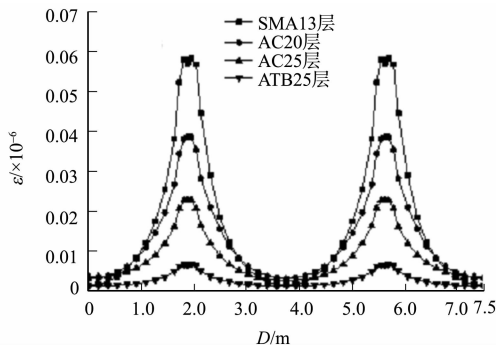


图3 沥青混合料层的非弹性应变(设计工况)
Fig. 3 Inelastic strain of asphalt mixture layer
(design working condition)

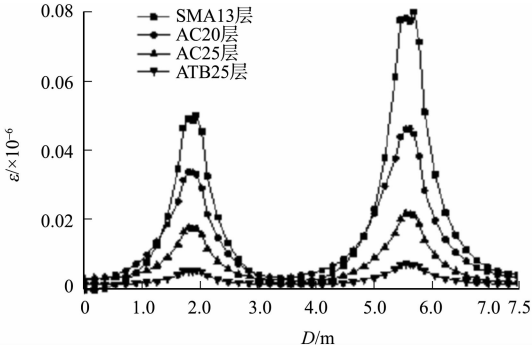


图4 沥青混合料层的非弹性应变(实际工况)
Fig. 4 Inelastic strain of asphalt mixture layer
(actual working condition)

荷载中心位置处,实际工况下轻载车道与重载车道的非弹性应变和非弹性变形,如表5所示.表5

中: d 为非弹性变形; γ 为轻载车道与重载车道各结构层非弹性应变(非弹性变形)的比值. 由表 5 可知:轻载车道的非弹性变形为重载车道的 68.0%,且上面层的非弹性应变差异最大,轻载车道的非弹性应变仅为重载车道的 62.7%.

表 5 实际工况下轻载车道与重载车道的非弹性应变和非弹性变形
Tab. 5 Inelastic strain and inelastic deformation of light load lane
and heavy load lane under actual working condition

车道类型	ϵ				d/mm
	SMA13 层	AC20 层	AC25 层	ATB25 层	
轻载车道	0.048 66	0.033 59	0.017 46	0.005 0	5.96
重载车道	0.077 55	0.046 26	0.025 50	0.007 0	8.76
$\gamma/\%$	62.7	72.6	68.5	71.4	68.0

荷载中心位置处,不同工况下轻载车道和重载车道的非弹性应变和非弹性变形,如表 6 所示. 表 6 中: δ 为实际工况与设计工况下各结构层的非弹性应变(非弹性变形)的比值. 由表 6 可知:实际工况的轻载车道非弹性应变小于设计工况,实际工况的非弹性变形比设计工况少 17.5%;实际工况的重载车道非弹性应变大于设计工况,实际工况的非弹性变形比设计工况多 21.3%. 由此可知,在设计使用年限内,轻载车道的车辙变形满足设计要求,而重载车道的车辙变形不满足设计要求.

表 6 不同工况下轻载车道和重载车道的非弹性应变和非弹性变形
Tab. 6 Inelastic strain and inelastic deformation of light load lane
and heavy load lane under different working conditions

车道类型	工况	ϵ				d/mm
		SMA13 层	AC20 层	AC25 层	ATB25 层	
轻载车道	设计工况	0.057 02	0.038 66	0.022 89	0.006 57	7.22
	实际工况	0.048 66	0.033 59	0.017 46	0.005 0	5.96
	$\delta/\%$	85.3	86.9	76.3	76.1	82.5
重载车道	设计工况	0.057 02	0.038 66	0.022 89	0.006 57	7.22
	实际工况	0.077 55	0.046 26	0.025 50	0.007 0	8.76
	$\delta/\%$	136.0	119.7	111.4	106.5	121.3

3) 设计工况与实际工况下无机结合料稳定层层底拉应力. 沿路面宽度方向,水泥稳定碎石层和水泥稳定砂砾层的层底拉应力(σ_t),如图 5 所示. 由图 5 可知:相邻车道无机结合料稳定层层底拉应力呈双峰分布,峰值均出现在荷载作用中心;实际工况和设计工况下,水泥稳定碎石层和水泥稳定砂砾层层底拉应力均基本吻合,差异极小.

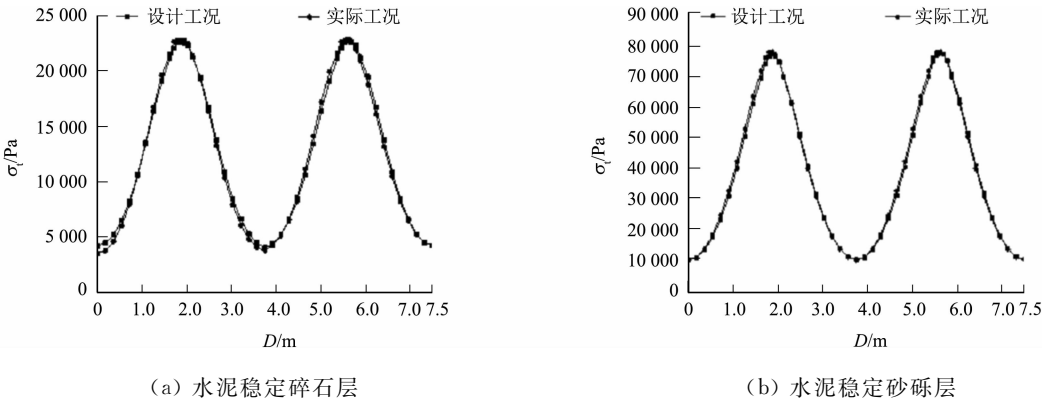


图 5 水泥稳定碎石层和水泥稳定砂砾层的层底拉应力分布
Fig. 5 Distribution of tensile stress at bottom layer of cement
stabilized macadam layer and cement stabilized gravel layer

文献[1]中无机结合料稳定层疲劳开裂寿命以沿行车方向的无机结合料稳定层层底拉应力为依据进行计算,在环境因素与路面结构组合相同的情况下,若各无机结合料稳定层层底拉应力相同,可近似认为其疲劳开裂寿命相同. 当疲劳开裂寿命大于设计使用年限内设计车道的当量设计累计轴次时,路面

结构组合满足要求.

因此,可近似认为实际工况和设计工况下无机结合料稳定层疲劳开裂寿命基本相同,但因实际工况和设计工况下车道的当量设计累计轴次存在差异(当量设计累计轴次(轻载车道实际工况)<当量设计累计轴次(设计工况)<当量设计累计轴次(重载车道实际工况),若设计工况时满足要求,则重载车道实际工况存在不满足要求的可能.

3 结 论

应用有限元软件 ABAQUS 和数值模拟方法对相同路面结构、不同车道的沥青路面结构响应进行分析,可得以下 3 点结论.

1) 相较于设计工况,实际工况的轻载车道和重载车道非弹性应变差异明显,实际工况的轻载车道沥青路面的非弹性变形仅为重载车道的 68.0%;实际工况的轻载车道沥青路面的非弹性变形为设计工况的 82.5%,实际工况的重载车道沥青路面的非弹性变形为设计工况的 121.3%.

2) 对无机结合料稳定层层底拉应力进行分析可知,实际工况下层底拉应力和设计工况差异极小,可认为疲劳开裂寿命近似相同.因此,设计时可不考虑对半刚性基层进行差异化设计.

3) 相较于设计工况,实际工况下重载车道的车辙变形不满足设计要求,而轻载车道的车辙变形远满足实际需要.为满足实际工况下的使用要求,在进行沥青路面结构设计时,应将重载车道的抗车辙性能提高 21.3%以上,可将轻载车道的抗车辙性能降低 17.5%,但不必考虑半刚性基层的差异化设计.

参考文献:

[1] 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,2017.

[2] 沈金安.国外沥青路面设计方法总汇[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

[3] PEREIRA P,PAIS J. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition),2017,4(4):316-346. DOI:10.1016/j.jtte.2017.06.001.

[4] 林利安,游婷,林利聪.高速公路大修工程沥青路面结构差异化设计初探[J]. 交通企业管理,2009,24(7):50-51. DOI:10.3963/j.issn.1006-8864.2009.07.025.

[5] 丁君明,唐国奇,张小刚,等.高等级公路路面结构差异化应用研究[J]. 交通科技,2018(1):15-18. DOI:10.3963/j.issn.1671-7570.2018.01.005.

[6] 刘黎萍,孙立军.高速公路沥青路面轮迹横向分布研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(11):1449-1452,1468. DOI:10.3321/j.issn:0253-374X.2005.11.006.

[7] 阮欣,周可攀,周军勇.某八车道高速公路车流特性及荷载效应[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(4):555-561. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2015.04.011.

[8] 周军勇,石雪飞,阮欣,等.高速公路分车道荷载差异及其响应特性[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(4):458-464. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2018.04.006.

[9] 严明星,王金昌.ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2016.

[10] 廖公云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京:东南大学出版社,2008.

[11] BARRIERA M,LEBENTAL B,POUGET S. Towards road pavement response under moving loads[J]. Road Materials and Pavement Design,2019,20(s1):1-20. DOI:10.1080/14680629.2019.1588780.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)