

文章编号:1671-8879(2013)01-0011-05

# 基于足尺 ALF 车辙试验的车辙等效轴载换算

纪小平<sup>1</sup>, 郑南翔<sup>1</sup>, 牛思胜<sup>2</sup>, 侯月琴<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 甘肃路桥公路投资有限公司, 甘肃 兰州 730030)

**摘 要:**为了确定沥青路面的车辙等效轴载换算系数,对 3 种路面结构进行了足尺 ALF(Accelerated Load Facility)加速加载车辙试验,并进行理论分析。根据车辙等效原则建立了轴载换算系数的方法;以 3 种路面结构在 3 种工况下的车辙数据为基础,得出车辙深度与轴载作用次数的关系,进而求解不同结构的车辙等效系数和车辙等效轴载换算系数。研究结果表明:3 种路面结构的车辙等效轴载换算系数分别为 4.56、4.90 和 2.71;改性沥青混合料比基质沥青混合料具有更小的轴载换算系数,说明其具有更低的轴载敏感性;推荐改性沥青混合料的车辙等效轴载换算系数为 2.7,基质沥青混合料的为 4.9。

**关键词:**道路工程;沥青路面;ALF;车辙等效;轴载换算

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Rutting equivalent axle-load conversion based on ALF rutting test

JI Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHENG Nan-xiang<sup>1</sup>, NIU Si-sheng<sup>2</sup>, HOU Yue-qin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Road Investment

Co Ltd of Gansu Road and Bridge Group, Lanzhou 730030, Gansu, China)

**Abstract:** To determine the rutting equivalent axle-load conversion coefficient of asphalt pavement, a full-scale ALF rutting test on three types of asphalt pavement structures was carried out. The method of axle-load conversion based on the rutting equivalent principle was proposed. The relationship of rutting depth and axle-load number was obtained based on the rutting data of three kinds of pavements under three different conditions, and the rutting equivalent coefficient and rutting equivalent axle-load conversion coefficients were further calculated. The results show that the rutting equivalent axle-load coefficients of three types of pavement structures are 4.56, 4.90 and 2.71 respectively. Modified asphalt mixture has a smaller axle-load conversion coefficient and a lower load sensitivity than asphalt mixture. The recommended rutting equivalent axle-load coefficient of modified asphalt mixture and asphalt mixture should be 2.7 and 4.9 respectively. 3 tabs, 3 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; ALF; rutting equivalent; axle-load conversion

收稿日期:2012-01-25

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2008 318 000 29)

作者简介:纪小平(1982-),男,浙江温州人,讲师,工学博士,E-mail:jixiaoping2008@yahoo.cn。

0 引言

车辙是沥青路面最主要的病害形式,是路面结构和材料设计的核心指标。在发达国家,车辙是沥青路面结构设计中的一项重要控制指标<sup>[1]</sup>;在中国,车辙尚未成为沥青路面结构设计指标,但很多研究都指出采用弯沉作为设计指标存在不足,需要补充车辙作为结构设计指标之一<sup>[2-4]</sup>。确定科学合理的车辙等效轴载换算系数是车辙结构化控制的基础,国内外对此展开了研究,但还未形成统一结论。

AASHTO 率先给出了基于 PSI 等效的轴载换算公式,轴载换算系数为 4.0<sup>[1]</sup>。AASHTO 轴载换算对各国的轴载换算公式产生了深远的影响,使等效换算成为轴载换算的基本原则。中国现行沥青路面设计规范以弯沉为设计指标、层底拉应力为验算指标,基于弯沉等效、拉应力等效的轴载换算系数为 4.35 和 8.0<sup>[5]</sup>。对于车辙等效轴载换算系数,王选仓等通过不同轴载的室内车辙试验,确定为 4.0~5.0<sup>[6]</sup>;颜利等通过 3 种典型沥青路面结构的加速加载足尺车辙试验,确定为 5.5<sup>[7]</sup>;郭炜通过力学计算和理论分析,确定为 8.0<sup>[8]</sup>。综上所述,研究方法和试验材料的不同,所得出的车辙等效系数也不同,且差距较大。

为此,本文通过 3 种路面结构的足尺 ALF 加速加载车辙试验,以不同轴重条件下车辙深度为基础,

以车辙等效为换算原则,确定合理的车辙等效轴载换算系数,并分析沥青混合料对该换算系数的影响。

1 足尺 ALF 加速加载车辙试验

沥青路面的足尺加速加载试验,可以快速了解各种材料、各种路面结构在重复荷载和各种气候环境下的使用性能,能解决室内模拟与现场观测地不足,是目前国际上对路面结构设计理念和设计效果进行评价的最有效手段。本文通过足尺 ALF 加速加载车辙试验,测试不同路面结构在不同工况下的车辙深度,以车辙深度数据为基础,研究基于车辙等效的轴载换算系数。

采用 ALF 设备对 3 种足尺路面结构进行加速加载试验,试验结构如图 1 所示。ALF 加速加载设备是直线形加载试验系统,由加速加载系统和数据采集系统组成。以半轴双轮荷载模拟标准轴载,加载范围为 80~200 kN、轮胎气压为 0.7~0.8 MPa、加载速度为 20 km/h。数据采集系统可对路面结构的性能指标进行采集和测定。通过红外线加热路面结构,可以保持沥青层中部温度高达(60±2)℃。进行了 3 种工况的加速加载车辙试验。工况 1:试验温度和轴载分别为 45℃和 16 t;工况 2:试验温度和轴载分别为 53℃和 16 t;工况 3:试验温度和轴载分别为 53℃和 10 t<sup>[9-10]</sup>。

4 cm AC16(KLMY90 <sup>®</sup> 沥青)	4 cm AC16(KLMY90 <sup>®</sup> 沥青)	5 cm Sup16(SBS改良沥青)
5 cm AC20(KLMY90 <sup>®</sup> 沥青)	6 cm AC20(KLMY90 <sup>®</sup> 沥青)	7 cm Sup25(中海70 <sup>®</sup> 沥青)
6 cm AC25(KLMY90 <sup>®</sup> 沥青)	15 cm ATB25(中海70 <sup>®</sup> 沥青)	0.7 cm封层
0.7 cm封层	0.7 cm封层	23 cm高性能基层
15 cm水泥稳定砂砾	20 cm级配碎石	20 cm高性能基层
15 cm水泥稳定砂砾	19.3 cm水泥稳定砂砾	19.3 cm水泥稳定砂砾
19.3 cm水泥稳定砂砾	土基	土基
(a) 结构1	(b) 结构2	(c) 结构3

图 1 加速加载试验路面结构  
Fig. 1 Pavement structures for accelerated load test

采用自动路面车辙仪,每隔 0.4 m 测定一个横断面车辙曲线,每种路面结构共需测定 7 个断面。以隆起高度和沉陷深度作为每个断面的车辙深度,如图 2 所示。按一定的加载次数为间隔测试车辙断面曲线,如下页图 3 所示。图 3 中,6 条曲线是在不同加载次数(6 次)下得出的。

2 车辙等效的轴载换算方法

车辙等效的轴载换算原则为:同种路面结构下

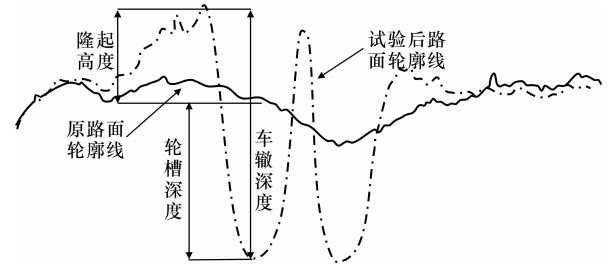


图 2 车辙深度  
Fig. 2 Rutting depth

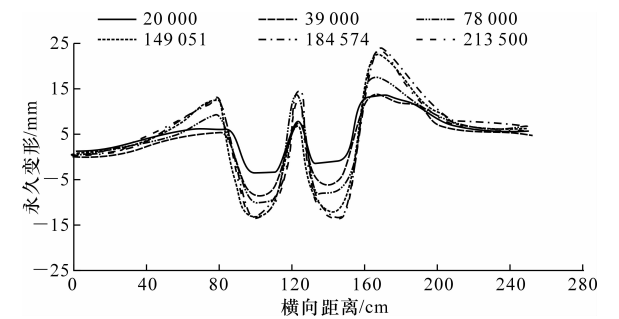


图 3 结构 1(工况 1)的实测车辙断面曲线

Fig. 3 Measured rutting curves of structure 1 at case 1

在 I 型轴载作用  $N_1$  次产生的车辙  $R_{d1}$  与 II 型轴载作用  $N_2$  次产生的车辙  $R_{d2}$  相等。本文 ALF 试验考虑了超载和标准荷载 2 个条件,以此试验建立车辙等效轴载换算系数的方法。

(1) 对车辙深度与加载次数进行回归分析,建立车辙深度与加载次数的函数,即

$$R_d = AN^B \tag{1}$$

式中: $R_d$  为车辙深度(mm); $N$  为轴载作用次数; $A$ 、 $B$  为与路面结构和材料有关的参数。

(2) 依据车辙等效原则,计算车辙等效系数。设在超载条件下与标准荷载条件下的车辙深度相等,并由式(1) 分别计算  $N_0$  与  $N_i$ ;由式(2) 计算  $N_0$  与  $N_i$  的比值,该比值为车辙等效系数  $E_r$ ,即

$$E_r = \frac{N_0}{N_i} \tag{2}$$

(3) 采用式(3) 计算车辙等效轴载换算系数  $n$ 。

$$E_r = \frac{N_0}{N_i} = \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^n \tag{3}$$

式中: $E_r$  为车辙等效系数; $N_0$  为标准轴载 BZZ-100 的作用次数; $N_i$  为轴重  $P_i$  的轴载作用次数; $P_0$  为标准轴载 BZZ-100 的轴重(100 kN); $P_i$  为待换算的轴重(kN); $n$  为车辙等效轴载换算系数。

进行具体求解时,需要在同一温度下进行,因此采用工况 2(53 ℃ 和 16 t)和工况 3(53 ℃ 和 10 t)进行求解。根据以上步骤,首先分别计算了 3 种结构的车辙等效系数  $E_r$ ,然后根据车辙等效系数的平均值,计算车辙等效轴载换算系数。根据轴重、接地面积和接地压力的关系,确定 160 kN 时的接地面积为 472 cm<sup>2</sup>,接地压力为 0.85 MPa。

### 3 车辙等效轴载换算系数的确定

按照以上方法求解车辙等效轴载换算系数。

对 3 种试验路面结构的车辙深度与轴载作用次数的关系进行统计分析,两者采用幂指数函数表征,

见式(1);统计结果见表 1。

表 1 车辙深度与轴载作用次数的关系  
Tab. 1 Relationship between rutting depths and number of axial loads

路面结构	工况	参数		判定系数 $R^2$
		A	B	
结构 1	工况 1(45 ℃ 和 16 t)	0.049 9	0.516 7	0.97
	工况 2(53 ℃ 和 16 t)	0.006 1	0.786 9	0.96
	工况 3(53 ℃ 和 10 t)	0.070 8	0.502 5	0.97
结构 2	工况 1(45 ℃ 和 16 t)	0.125 3	0.417 9	0.94
	工况 2(53 ℃ 和 16 t)	0.017 7	0.681 7	0.99
	工况 3(53 ℃ 和 10 t)	0.029 8	0.575 0	0.98
结构 3	工况 1(45 ℃ 和 16 t)	0.078 8	0.440 0	0.97
	工况 2(53 ℃ 和 16 t)	0.002 0	0.849 6	0.99
	工况 3(53 ℃ 和 10 t)	0.037 0	0.545 0	0.97

以工况 2、工况 3 的车辙深度为基础数据,采用式(2)和式(3),分别计算车辙等效系数  $E_r$  和车辙等效轴载换算系数  $n$ ,计算结果见下页表 2。由表 2 可知,3 种路面结构在 53 ℃ 条件下的总体车辙等效系数为 2.43、2.59 和 1.69;车辙等效轴载换算系数为 4.56、4.90 和 2.71。

一个重要且必须探讨的问题是:结构 1 和结构 2 的车辙等效系数较大且接近,因此厚度对车辙等效的影响微小。而结构 3 的车辙等效系数较小,除厚度较薄外,结构 3 的上面层采用了 SBS 改性沥青,因此推断是由改性沥青混合料对轴载敏感性较小引起的。为了验证该假设,对改性和基质沥青混合料进行了不同压力下的室内车辙试验,试验压力分别为 0.7 MPa 和 0.5 MPa,试验温度为 60 ℃。按上述方法进行等效系数换算,计算结果见下页表 3。表 3 中, $N_{0.5}$  为压力 0.5 MPa 的轴载作用次数。由表 3 可知,改性沥青混合料的车辙等效系数较基质沥青混合料的小,与 ALF 加速加载车辙试验的现象一致。综上所述,取足尺 ALF 加速加载的分析结果,推荐改性和基质沥青混合料的车辙等效轴载换算系数分别为 2.7 和 4.9。对于多层路面结构,按材料种类分别进行轴载换算,并求取累计标准轴载作用后,分结构层进行车辙预估,将各层车辙相加得到路表总体车辙,要求路表总体车辙不大于相关要求,详细方法见参考文献[9]。

### 4 结 语

- (1) 沥青路面的车辙深度与轴载作用次数呈良好的幂函数关系,判定系数在 0.94 以上。
- (2) 根据车辙等效原则,建立了轴载换算系数的方法;以 3 种路面结构在 3 种工况下的车辙数据为基础,得到了 3 种路面结构的车辙等效系数和车辙等

表 2 车辙等效系数和轴载换算系数  
Tab. 2 Rutting equivalent and axle-load conversion coefficients

结构 1				结构 2				结构 3			
标准条件		超载	$E_r$	标准条件		超载	$E_r$	标准条件		超载	$E_r$
$N_0$ /次	$R_d$ /mm	$N_{160}$ /次	$N_0/N_{160}$	$N_0$ /次	$R_d$ /mm	$N_{160}$ /次	$N_0/N_{160}$	$N_0$ /次	$R_d$ /mm	$N_{160}$ /次	$N_0/N_{160}$
9 378	4.4	4 287	2.19	9 378	4.2	3 050	3.07	9 378	3.4	6 343	1.48
18 912	9.8	11 860	1.59	18 912	9.4	9 945	1.90	18 912	9.4	20 997	0.90
26 000	13.0	16 984	1.53	26 000	11.2	12 859	2.02	26 000	10.0	22 583	1.15
34 343	14.3	19 171	1.79	34 343	13.2	16 364	2.10	34 343	11.9	27 714	1.24
42 541	15.6	21 412	1.99	42 541	14.0	17 839	2.38	42 541	12.3	28 814	1.48
54 244	17.6	24 959	2.17	54 244	15.8	21 302	2.55	54 244	14.5	34 971	1.55
67 873	19.2	27 878	2.43	67 873	17.4	24 540	2.77	67 873	15.3	37 253	1.82
85 000	20.2	29 736	2.86	85 000	18.6	27 062	3.14	85 000	16.9	41 880	2.03
96 000	22.0	33 143	2.90	96 000	20.8	31 884	3.01	96 000	18.3	45 993	2.09
111 338	24.8	38 593	2.88	111 338	23.6	38 374	2.90	111 338	20.7	53 172	2.09
126 750	25.6	40 182	3.15	126 750	25.6	43 238	2.93	126 750	22.7	59 269	2.14
137 555	27.0	42 995	3.20	137 555	28.4	50 349	2.73	137 555	24.2	63 906	2.15
148 000	31.4	52 088	2.84	148 000	35.3	69 270	2.14	148 000	29.0	79 074	1.87
平均车辙等效系数		2.43		平均车辙等效系数		2.59		平均车辙等效系数		1.69	
车辙等效轴载换算系数		4.56		车辙等效轴载换算系数		4.90		车辙等效轴载换算系数		2.71	

表 3 室内车辙试验车辙等效系数  
Tab. 3 Rutting equivalent coefficients based on indoor rutting tests

基质沥青混合料					改性沥青混合料				
标准条件(0.7 MPa)		轻载(0.5 MPa)		$E_r$	标准条件(0.7 MPa)		轻载(0.5 MPa)		$E_r$
$N_0$ /次	$R_d$ /mm	$R_d$ /mm	$N_{0.5}$ /次	$N_0/N_{0.5}$	$N_0$ /次	$R_d$ /mm	$R_d$ /mm	$N_{0.5}$ /次	$N_0/N_{0.5}$
1 260	2.622	1.140	5 990	0.210	1 260	1.394	1.294	4 022	0.31
1 890	3.565	1.416	10 637	0.178	1 890	1.790	1.690	6 681	0.28
2 520	3.860	1.651	12 347	0.204	2 520	2.017	1.867	8 073	0.31
5 040	5.647	2.392	25 157	0.200	5 040	2.992	2.892	18 547	0.27
平均车辙等效系数		0.20			平均车辙等效系数		0.30		
车辙等效轴载换算系数		4.81			车辙等效轴载换算系数		3.62		

效轴载换算系数。

(3)足尺 ALF 车辙试验和室内车辙试验均显示出,改性沥青混合料具有更小的轴载换算系数;推荐改性和基质沥青混合料的车辙等效轴载换算系数分别为 2.7 和 4.9。

参考文献:  
References:

[ 1 ] AASHTO. Guide for mechanistic empirical design of new and rehabilitated pavement structures final report [R]. Washington DC: National Cooperative Highway

Research Program,2004. (in Chinese)  
[ 2 ] 张艳红,申爱琴,郭寅川,等. 不同类型基层沥青路面设计指标的控制[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011,31(1):6-11.  
ZHANG Yan-hong, SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan, et al. Control of designing indices for asphalt pavement with different types of base [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31 (1):6-11. (in Chinese)  
[ 3 ] 关宏信,张起森,刘 敬. 沥青混合料车辙试验改进方法[J]. 交通运输工程学报,2011,11(3):16-21.

- GUAN Hong-xin, ZHANG Qi-sen, LIU Jing. Rutting test improving methods of asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3):16-21. (in Chinese)
  - [4] Haas R, Hudson W R, Zaniewski J. Modern pavement management [M]. Florida: Krieger Publishing Company, 1994.
  - [5] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范[S]. JTG D50—2006, Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. (in Chinese)
  - [6] 王选仓, 谭 权, 王新岐, 等. 重载沥青路面研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(4):7-10. WANG Xuan-cang, TAN Quan, WANG Xin-qi, et al. Research on bituminous pavement of running overload vehicles[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(4):7-10. (in Chinese)
  - [7] 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. YAN Li, ZHOU Xiao-qing, LI Yu-zhi, et al. Research on heavy-load axle conversion for asphalt pavement based on rutting test on full scale linear track[J].
  - (上接第 10 页)
  - [10] 杨雪茹, 毕胜强. 沥青混合料压实技术分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(6):43-45. YANG Xue-ru, BI Sheng-qiang. Analysis on compaction technology of asphalt mixture[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(6):43-45. (in Chinese)
  - [11] Guo R, Feng Z J, Li P. Experiment study of influence factors on high-temperature stability of closely gap-graded bituminous mixture [J]. Advance Materials Research, 2012(535-537), 1755-1758.
  - [12] 张素云. 沥青混合料组成对路用性能的影响[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2011, 35(3):471-475. ZHANG Su-yun. Road performance influence about asphalt mixture composition[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(3):471-475. (in Chinese)
  - Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3):35-39. (in Chinese)
  - [8] 郭 炜. 重载沥青路面轴载换算方法[J]. 内蒙古公路与运输, 2009(4):12-15. GUO Wei. Method for axle conversion of heavy-duty asphalt pavement[J]. Highway and Transportation of Inner Mongolia, 2009(4):12-15. (in Chinese)
  - [9] 纪小平. 基于足尺 ALF 车辙预估模型的甘肃地区沥青混合料高温性能标准研究[D]. 西安:长安大学, 2011. JI Xiao-ping. Study on standard of high temperature performance of asphalt mixture in Gansu province based on the full-scale ALF test[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
  - [10] 郑南翔, 牛思胜, 许新权. 重载沥青路面车辙预估的温度-轴载-轴载作用次数模型[J]. 中国公路学报, 2009, 22(3):7-13. ZHENG Nan-xiang, NIU Si-sheng, XU Xin-quan. Temperature axle load and axle load frequency model of rutting prediction of heavy-duty asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3):7-13. (in Chinese)
  - [13] 刘国杰, 黄晓明. 特大桥梁沥青铺装层材料性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(4):67-70. LIU Guo-jie, HUANG Xiao-ming. Test study on asphalt deck pavement for long-span concrete bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(4):67-70. (in Chinese)
  - [14] 李 萍, 郭 瑞, 李辉山. 间断密级配沥青混合料高温稳定性影响因素试验分析[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(1):113-116. LI Ping, GUO Rui, LI Hui-shan. Experimental analysis of influence factors on high-temperature stability of gap-graded asphalt mixture [J]. Journal of Lanzhou University, 2010, 36(1):113-116. (in Chinese)
  - [15] 谭 军, 翟丽艳. 振荡压路机压实原理及应用[J]. 东北公路, 2003, 26(3):143-144. TAN Jun, ZHAI Li-yan. Compacting principles and application of vibration rollers[J]. Journal of Northeastern Highway, 2003, 26(3):143-144. (in Chinese)