

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20221020240470

文章编号: 1674-599X(2024)02-0001-07

引用格式: 田小草, 杨帆, 窦文利, 等. 木质素纤维增强型透水性沥青稳定碎石疲劳研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 1-7.

Citation: TIAN Xiaoge, YANG Fan, DOU Wenli, et al. Fatigue performance of fiber-reinforced asphalt treated permeable base[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 1-7.

木质素纤维增强型透水性沥青稳定碎石疲劳研究

田小草¹, 杨帆¹, 窦文利², 昝慧芹³, 李慧珍⁴

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 河北省高速公路京雄临时筹建处, 河北 保定 071700;

3. 承德市交通局交通规划设计院, 河北 承德 067000; 4. 河北高速公路集团有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘 要: 为提高增强型透水性沥青稳定碎石 (asphalt treated permeable base, ATPB) 的抗裂性能和耐久性, 以 SBS 改性沥青为胶结材料配制掺入木质素纤维的 ATPB 混合物——纤维增强型透水性沥青稳定碎石 (fiber asphalt treated permeable base, FATPB), 并制作不同木质素纤维掺量的 FATPB-25 梁式试件进行不同应力比下的四点弯曲疲劳试验。将木质素纤维掺量为 0.3% 的 FATPB-25 与普通的 AC-25、ATB-25 的疲劳性能进行对比分析, 探究考虑失效概率的应力比与纤维掺量对疲劳寿命的影响。研究结果表明: 纤维掺量为 0.3% 的 FATPB-25 的抗疲劳性能明显比普通的 AC-25 和 ATB-25 的高, 可用作耐久型的透水性下面层或柔性基层; 通过包含失效概率的双对数方程可以对 FATPB-25 的疲劳寿命进行预测。

关键词: 路面工程; 透水性沥青稳定碎石; 疲劳; 纤维增强; Weibull 分布

中图分类号: U414

文献标志码: A

Fatigue performance of fiber-reinforced asphalt treated permeable base

TIAN Xiaoge¹, YANG Fan¹, DOU Wenli², CHANG Huiqin³, LI Huizhen⁴

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114,

China; 2. Hebei Province Expressway Jingxiong Temporary Preparation Office, Baoding 071700, China;

3. Traffic Planning and Design Institute of Chengde Transportation Bureau, Chengde 067000, China;

4. Hebei Expressway Group Limited, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: In order to enhance the cracking resistance of asphalt treated permeable base (ATPB) and improve its durability, an ATPB mixture using SBS modified asphalt as cementing material and adding lignin fiber was designed (FATPB). Four point bending fatigue tests were carried out on the beam specimens of FATPB-25 with different fiber content under different stress ratios. The fatigue properties of FATPB-25 with 0.3% fiber content were compared with those of AC-25 and ATB-25, and the effects of stress ratio and fiber content on fatigue life considering failure probability were investigated. The results show that the fatigue resistance of FATPB-25 with 0.3% fiber content is obviously better than that of AC-25 and ATB-25, which can be used as a durable water-permeable underlayer or flexible

收稿日期: 2022-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51978086)

通信作者: 田小草 (1970—), 男, 教授, 主要从事路面设计理论与方法、路面新材料方面的研究。E-mail: tianxiaoge@126.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

base layer. The fatigue life of FATPB-25 can be expressed by the log-log equation with failure probability.

Key words: pavement engineering; asphalt treated permeable base; fatigue; fiber reinforced; Weibull distribution

近年来,透水性沥青稳定碎石基层越来越广泛地应用于半刚性基层与沥青混凝土下面层之间,用以排出渗入到路面结构内部的水分,避免沥青路面水损害的发生^[1-2]。但是,传统的ATPB混合料中,粗集料用量较大,沥青用量较小且空隙率大,导致其耐久性较差^[3]。ZHANG等^[4-5]、BEJARANO等^[6]使用动态模量和相位角作为指标,评价了ATPB混合料中各种材料对其产生水损坏的影响,并验证了传统ATPB混合料水稳定性差的缺陷。HASSAN等^[7]在开级配抗滑表层(open graded friction course, OGFC)中掺入木质素纤维,并将其与丁苯橡胶(polymerized styrene butadiene rubber, SBR)改性沥青混合料进行了路用性能试验对比。PELTONEN^[8]、谭海勤^[9]通过疲劳试验,研究了木质素纤维、玻璃纤维、聚酯纤维、碳纤维、玄武岩纤维等对沥青混合料相关性能的影响,结果表明,各纤维对改善沥青混合料的稳定性都有明显的作用,且有助于疲劳耐久性能的提高。刘刚^[10]对掺入不同种类纤维的透水性沥青混合料的性能进行了研究,结果表明,通过纤维的吸油稳定作用,增大沥青膜的厚度,可使混合料获得良好的耐久性。余琦等^[11]提出了一种建筑垃圾再生集料沥青稳定碎石基层,并通过试验验证了其再生混合料的水稳定性和力学性能均满足要求且高温性能有所提高的结论。

针对中国南方高温多雨的实际情况,在分析了影响ATPB混合料耐久性因素的基础上,本研究提出采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)改性沥青作为胶结材料,同时掺入木质素纤维等,拟设计一种既具有一定的透水能力,也具有较强的抗反射裂缝能力和抗疲劳能力的木质素纤维增强型改性沥青稳定碎石混合料(fiber asphalt treated permeable base, FATPB-25),并通过试验对其透水性能和疲劳性能进行验证,以期为木质素纤维增强的改性沥青稳定碎石混合料的工程使用和推广提供借鉴和参考。

1 原材料及其性能指标

1.1 沥青

本试验使用东莞泰和沥青有限公司生产的SBS改性沥青,其技术指标见表1。

表1 SBS I-D改性沥青技术性能

Table 1 Technical index of SBS I-D modified asphalt

指标	试验结果	规范要求
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	52.4	30.0 ~ 60.0
针入度指数	0.53	≥0.00
软化点/℃	81.5	≥60.0
5℃延度/cm	26.3	≥20.0
135℃运动黏度/(Pa·s)	2.8	≤3.0
闪点/℃	268	≥230
溶解度/%	99.64	≥99.00
贮存稳定性(48 h软化点差)/℃	2.0	≤2.5
弹性恢复(25℃)/%	93	≥75
相对密度(25℃)	1.022	实测
薄膜加热试验后		
质量变化/%	-0.46	±1.0
残留针入度比(25℃, 5 s, 100 g)/%	80.1	≥65
残留延度(5℃, 5 cm/min)/cm	24.2	≥15

1.2 集料指标

试验所用粗集料、细集料、矿粉均由石灰岩加工而成。粗集料的技术性能见表2。

表2 石灰岩粗集料性能

Table 2 Technical index of limestone coarse aggregate

指标	实测	技术要求
石料压碎值/%	13.5	≤28.0
表观相对密度	2.656	≥2.500
坚固性(硫酸钠溶液法5次循环后质量损失)/%	9.4	≤12.0
吸水率/%	1.2	≤3.0
水洗法直径<0.075 mm 颗粒质量分数/%	0.43	≤1.00
针片状颗粒质量分数(混合料)/%	8	≤18
与SBS改性沥青黏附性/级	5	≥4

1.3 纤维

本试验使用德国JRS集团生产的颗粒状木质素纤维。该纤维长度为6 mm,灰分含量为18.0%,pH值为7.5,吸油量为纤维质量的6倍,各项指标均符合技术指标要求。

2 FATPB-25的级配设计

2.1 FATPB-25的级配

采用二段式间断级配法进行FATPB混合料的级配设计:

1) 拟定4.75、9.5 mm和最大公称粒径等3个筛孔的通过率。4.75 mm筛孔的通过率可以根据9.5 mm筛孔的通过率按照完全或部分间断来确定;

2) 根据9.5 mm和最大公称粒径这2个筛孔的通过率,确定出各档粗集料的通过率;

3) 选定0.075 mm筛孔的通过率为3%~4%,然后根据4.75和0.075 mm筛孔的通过率,确定出各档细集料的通过率;

4) 按计算出的级配称取各档集料的粗集料,进行干捣试验,测定粗集料间隙率,再按估计的沥青用量计算混合料的空隙率。若计算空隙率过小,可通过减小9.5 mm筛孔的通过率,增大粗集料用量、减少细集料用量对级配进行调整;若计算空隙率过大,则增大4.75 mm的通过率,减小粗集料用量,增大细集料的用量。

5) 对计算空隙率符合要求的级配,采用马歇尔法成型试件,用CoreLok抽真空密封试件,再采用水中重法,实测试件的空隙率,并进行马歇尔试验,确定最佳沥青用量。

在试件成型过程中,应先将木质素纤维与热集料一同倒入预热好的拌锅搅拌90 s,在确定木质素纤维均匀地分散在热集料中后,再加入SBS改性沥青,在温度为180 °C下拌和均匀后加入矿粉继续搅拌。

按此级配设计FATPB-25混合料,并通过试配和比选,最终确定的FATPB-25级配见表3,油石比为4.0%。

表3 FATPB-25的级配

Table 3 Gradations of FATPB-25

筛孔/ mm	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/ %	100	95	79	60	40	23	20	16	12	9	7	5	4

2.2 不同纤维掺量的FATPB-25的最佳油石比

因为木质素纤维吸收沥青能力较强,当木质素纤维掺量发生改变时,FATPB-25混合料中的最佳沥青用量亦会随之发生变化。参考刘铁山^[12]、任旭^[13]对木质素纤维路用性能的评估,本试验中,不同木质素纤维掺量的FATPB-25混合料所对应的最佳沥青质量分数的取值为:木质素纤维掺量每增加0.1%时,最佳沥青质量分数相应增加0.1%。

3 不同纤维掺量的FATPB-25的弯拉疲劳性能

本试验用木质素纤维(掺量分别为0%、0.15%、0.30%、0.45%和0.60%)配制5种FATPB-25沥青混合料进行四点弯曲疲劳试验,研究木质素纤维掺量对FATPB弯拉疲劳性能的影响。

试件:通过轮碾法成型300 mm×300 mm×80 mm板式试件,然后再锯切成尺寸为300 mm×60 mm×80 mm的梁式试件。

疲劳试验条件:通过分析比较控制应力、控制应变两种加载控制模式的特点^[14-15],本试验选用控制应力的加载模式进行弯拉疲劳试验。试验温度为15 °C,正弦波加载,加载频率为10 Hz,荷载循环特征值为0.1,并以最大荷载的10%对试件进行预加载。

3.1 不同纤维掺量FATPB-25的弯拉强度

对不同纤维掺量的FATPB-25进行15 °C温度下的四点弯曲强度试验,控制加载速率为50 mm/min,测得不同纤维掺量的FATPB-25的弯拉强度见表4。

表4 不同纤维掺量的FATPB-25的弯拉强度

Table 4 Flexural strength of FATPB-25 with different fiber content

纤维掺量/ %	弯拉强度/ MPa
0	2.55
0.15	2.78
0.30	3.37
0.45	3.14
0.60	3.05

由表4可知,木质素纤维的掺入可提高FATPB混合料的弯拉强度。随着木质素纤维掺量的增加,FATPB混合料的弯拉强度呈先增大后减小的趋势,当木质素纤维的掺量为0.3%时,FATPB-25的弯拉强度达到最大值,比未掺入木质素纤维的ATPB的弯拉强度提高了32%。

3.2 不同纤维掺量的FATPB-25的疲劳性能

对木质素纤维掺量分别为0%、0.15%、0.30%、0.45%和0.60%的FATPB-25混合料成型试件进行四点弯曲疲劳性能试验。疲劳加载的频率为10 Hz,应力比分别取0.3、0.4、0.5和0.6四种^[16]。不同应力比状态下的FATPB-25试件疲劳寿命与木质素纤维掺量之间的关系如图1所示。

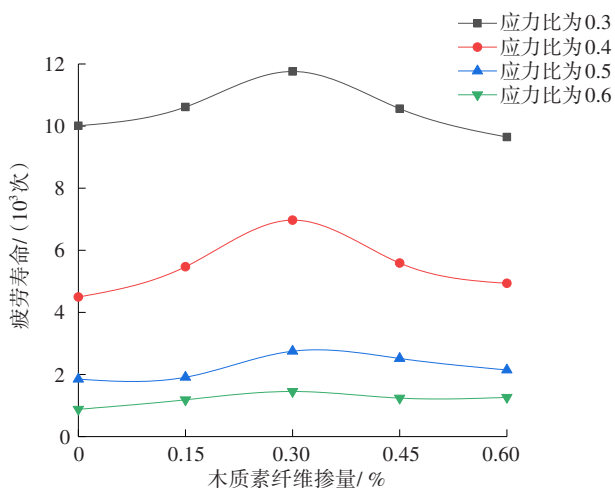


图1 FATPB-25的疲劳寿命与纤维掺量的关系

Fig. 1 Relationship of fatigue lives of FATPB-25 with fiber content

从图1可以看出,木质素纤维的掺入可以改善FATPB混合料的疲劳性能。随着木质素纤维掺量的增加,疲劳寿命呈先增加后减小的变化规律,与弯拉强度随纤维掺量的变化规律类似。这是因为当木质素纤维掺量增加到一定程度后,木质素纤维不能均匀分散在混合料中而产生结团现象,既不能充分发挥木质素纤维的作用,也会在混合料内部产生结构缺陷,从而降低混合料的性能。所以木质素纤维掺入FATPB混合料中存在一个“最佳掺量”。对于FATPB-25,木质素纤维的最佳掺量为0.3%。当木质素纤维的掺量为0.3%时,且应力比分别为0.3、0.4、0.5、0.6时,FATPB-25的疲劳寿命分别增加了16%、50%、57%、60%。表明:木质素纤维的掺入对提高FATPB的疲劳性能效果相当明显。

4 FATPB-25与普通AC-25和ATB-25的疲劳性能对比

本研究设计的FATPB-25是将其用作透水基层,甚至是透水下面层,要求其既能够排出渗入到路面结构内部的水分,也不影响路面结构的耐久性。但由于目前尚没有针对FATPB的疲劳性能的技术要求,因此依据中国沥青路面结构下面层常用的AC-25、柔性基层常用的ATB-25的疲劳性能进行对比。

FATPB-25的木质素纤维掺量选用0.3%,沥青胶结料采用符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求的埃索70#A级道路石油沥青。依据马歇尔法确定AC-25和ATB-25的最佳沥青用量分别为4.3%、3.7%^[16]。

由于本研究只对比这3种材料的疲劳性能,因此这3种材料的疲劳加载条件均为:温度为15℃,加载频率为10 Hz,荷载波形为正弦波,循环特征值 $D=0.1$,每组4个平行试件。试验结果见表5。

表5 3种混合料的四点弯曲疲劳寿命

Table 5 Four-point bending fatigue lives of three mixtures

级配	疲劳寿命/次				
	试件1	试件2	试件3	试件4	平均
AC-25	506	342	417	485	437
ATB-25	379	442	408	261	372
FATPB-25	1 098	1 422	1 311	1 227	1 264

由表5可知,木质素纤维掺量为0.3%的FATPB-25的疲劳性能明显比AC-25和ATB-25的高,约为AC-25的3倍,ATB-25的4倍。因此,该FATPB-25完全可以代替普通的AC-25和ATB-25用作具有透水能力的下面层或基层,既可以保证其疲劳性能,又能避免水损害的发生。

5 考虑失效概率的FATPB-25的疲劳方程

由于不同纤维掺量的FATPB-25在不同应力比条件下的疲劳寿命具有较大的离散性。因此,直接根据相同木质素纤维掺量、应力比条件下的疲劳寿

命的平均值回归计算得到的疲劳方程并不可靠,只有 5% 的准确率^[17]。因此,本研究将 FATPB-25 的疲劳寿命看作是一个随机变量,通过概率统计来描述其疲劳寿命的分布情况,建立包含失效概率 p 的 P-S-N 型疲劳方程。

由于 Weibull 分布具有比对数正态分布更好的适用性,且能充分反映材料缺陷和应力集中对材料疲劳寿命的影响,所以本研究选用 Weibull 分布模型来分析 FATPB-25 的疲劳寿命。

根据 Weibull 理论^[17],如果 $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{p}\right)\right]$ 和疲劳寿命 $\ln N_f$ 呈良好的线性关系,则可以认为疲劳寿命 N_f 服从双参数 Weibull 概率分布。用图 1 中的疲劳寿命数据,可计算出不同条件下的 Weibull 分布参数 $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{p}\right)\right]$ 和 $\ln N_f$,采用公式(1)对其分别进行线性回归,得到不同木质素纤维掺量和不同应力比下 $\ln N_f$ 与 $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{p}\right)\right]$ 间的回归系数 a 、 b 及相应的相关系数 R^2 ,计算结果见表 6。

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{p}\right)\right] = a \ln N_f - b \tag{1}$$

表 6 不同条件下 FATPB-25 疲劳寿命的 Weibull 参数

Table 6 Weibull parameters of fatigue life of FATPB-25 under different conditions

纤维掺量/ %	应力比	a	b	R^2
0	0.3	5.061 0	46.528	0.972 2
0	0.4	4.550 5	38.653	0.973 6
0	0.5	4.723 0	35.868	0.973 1
0	0.6	4.427 7	30.124	0.973 9
0.15	0.3	4.891 6	45.674	0.980 5
0.15	0.4	4.441 6	38.666	0.973 9
0.15	0.5	6.396 5	48.643	0.969 5
0.15	0.6	5.372 9	38.406	0.971 5
0.30	0.3	4.841 1	45.675	0.971 4
0.30	0.4	5.295 0	47.089	0.971 6
0.30	0.5	6.771 3	54.316	0.968 9
0.30	0.6	7.713 9	55.867	0.967 6

表 6 (续)

Table 6 (Continued)

纤维掺量/ %	应力比	a	b	R^2
0.45	0.3	6.149 7	57.620	0.969 8
0.45	0.4	6.974 1	60.903	0.968 6
0.45	0.5	4.129 8	32.728	0.974 9
0.45	0.6	7.882 5	55.980	0.967 4
0.60	0.3	5.941 8	55.019	0.970 3
0.60	0.4	5.901 0	50.684	0.970 4
0.60	0.5	6.440 7	49.772	0.969 4
0.60	0.6	5.295 9	37.430	0.971 6

由表 6 可知,不同木质素纤维掺量的 FATPB-25 在不同应力比下的 $\ln N_f$ 与 $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{p}\right)\right]$ 之间表现出很好的线性关系(R^2 均大于 0.96),表明: FATPB-25 的疲劳寿命服从双参数 Weibull 分布。

将 $\ln N_f$ 与 $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{p}\right)\right]$ 间的线性回归系数 a 、 b 的值代入两参数 Weibull 概率分布公式(2)中,可计算出不同木质素纤维掺量和应力比下失效概率分别为 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40 和 0.50 的疲劳寿命 N_p ,计算结果见表 7。

$$N_p = e^{\frac{b}{a}} \left[\ln(1 - p) \right]^{\frac{1}{a}} \tag{2}$$

表 7 不同失效概率下 FATPB-25 的疲劳寿命

Table 7 Fatigue lives (times) of FATPB-25 under different failure probability

纤维掺量/ %	应力比	疲劳寿命/ 次					
		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0	0.3	5 045	5 816	6 746	7 401	7 945	8 439
0	0.4	2 331	2 731	3 221	3 570	3 863	4 131
0	0.5	973	1 133	1 328	1 467	1 583	1 689
0	0.6	421	496	587	653	708	759
0.15	0.3	5 696	6 599	7 693	8 467	9 113	9 699
0.15	0.4	2 828	3 326	3 938	4 377	4 745	5 083
0.15	0.5	1 181	1 322	1 486	1 599	1 692	1 774

表7 (续)

Table 7 (Continued)

纤维掺量/%	应力比	疲劳寿命/次					
		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.15	0.6	678	775	891	972	1 040	1 100
0.30	0.3	6 235	7 235	8 448	9 307	10 024	10 676
0.30	0.4	3 846	4 406	5 077	5 547	5 936	6 288
0.30	0.5	1 844	2 051	2 292	2 456	2 590	2 709
0.30	0.6	899	987	1 088	1 156	1 211	1 260
0.45	0.3	6 757	7 596	8 582	9 262	9 819	10 318
0.45	0.4	3 811	4 225	4 705	5 032	5 298	5 535
0.45	0.5	1 226	1 459	1 750	1 960	2 138	2 302
0.45	0.6	788	864	950	1 008	1 055	1 097
0.60	0.3	5 940	6 705	7 607	8 232	8 745	9 206
0.60	0.4	3 026	3 419	3 882	4 204	4 467	4 705
0.60	0.5	1 341	1 499	1 684	1 812	1 915	2 008
0.60	0.6	620	710	818	894	957	1 013

采用双对数方程 $\ln N_f \sim \ln S$ 对表7中的数据进行分析,得到包含失效概率 p 的FATPB-25的疲劳方程为:

$$\ln N_p = (a_1 p^2 + b_1 p + c_1) \ln S + (a_2 + b_2 + c_2) \quad (3)$$

式中: S 为应力比; N_p 为考虑失效概率的疲劳寿命; p 为失效概率; a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 均为相关参数。

其中, $a_1 = -12.94n^2 + 7.53n - 0.28$; $b_1 = 13.74n^2 - 8.06n + 0.31$; $c_1 = -5.83n^2 + 3.82n - 3.55$; $a_2 = -13.10n^2 + 8.49n - 2.52$; $b_2 = 13.92n^2 - 9.03n + 2.67$; $c_2 = -8.57n^2 + 5.93n + 4.24$; n 为纤维掺量,%。

通过式(3),可以预测不同木质素纤维掺量和不同应力比下的FATPB-25材料的疲劳寿命。

6 结论

1) 添加木质素纤维可以提高FATPB-25的疲劳寿命。随纤维掺量的增大,疲劳寿命呈先增大后减

小的趋势。对于本试验设计的级配,木质素纤维的最佳掺量为0.3%。

2) 疲劳性能对比试验表明:木质素纤维掺量为0.3%的FATPB-25的疲劳性能明显比普通的AC-25和ATB-25的高。

3) 试验表明:木质素纤维增强型透水性沥青稳定碎石可以用作下面层或柔性基层。既可以保证其疲劳性能,又具有排出路面结构内部水分的能力,避免水损害的发生。同时,在木质素纤维掺量为0.3%时,其路用性能提高最为明显。

4) 考虑到FATPB-25在不同条件下的疲劳寿命具有较大的离散性,将疲劳寿命视为随机变量,基于Weibull分布,建立了考虑失效概率 p 的P-S-N型疲劳方程,可以对FATPB-25混合料的疲劳寿命进行预测。

参考文献(References):

- [1] 付其林. 升级配大粒径沥青碎石组成设计参数与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
FU Qilin. Research on composition design parameters and method of open-graded large stone asphalt mixes[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [2] 吉青克. 路面内部排水系统设计[D]. 上海: 同济大学, 2002.
JI Qingke. Design of internal drainage system of pavement[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [3] 贾晓阳. 沥青路面沥青稳定透水层材料疲劳特性分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
JIA Xiaoyang. Study on the fatigue character of asphalt treated permeable material in asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [4] ZHANG Y N, WANG L B, DIFENDERFER B K, et al. Determining volumetric properties and permeability of asphalt-treated permeable base mixtures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(4): 343-352. DOI: 10.1080/10298436.2014.993193.
- [5] ZHANG Y N, WANG L B, DIFENDERFER B K. Evaluation of moisture susceptibility of high-porosity ATPB drainage layer materials using modified dynamic modulus test [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(10): 91-99. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001597.

- [6] BEJARANO M O, HARVEY J T. Accelerated pavement testing of drained and undrained pavements under wet base conditions [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1816(1): 137-147. DOI: 10.3141/1816-15.
- [7] HASSAN H F, AL-ORAIMI S, TAHA R. Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibers and styrene butadiene rubber polymer [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(4): 416-422. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2005)17: 4(416).
- [8] PELTONEN P. Wear and deformation characteristics of fibre reinforced asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 1991, 5(1): 18-22. DOI: 10.1016/0950-0618(91)90027-i.
- [9] 谭海勤. 不同类型纤维沥青混合料路用性能研究 [J]. 公路与汽运, 2021(3): 61-63. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.015.
- TAN Haiqin. Study on road performance of different types of fiber asphalt mixtures [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(3): 61-63. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.015.
- [10] 刘刚. 纤维改性排水性沥青混合料组成设计与性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- LIU Gang. Study on component design and properties of fibers modified porous asphalt mix [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [11] 余琦, 许立, 高金仓, 等. 建筑垃圾再生集料沥青稳定碎石基层性能研究 [J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 1-7, 97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.001.
- YU Qi, XU Li, GAO Jincang, et al. Pavement performance of asphalt treated permeable base using construction waste recycled aggregate [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 1-7, 97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.001.
- [12] 刘铁山. 外掺纤维沥青混合料路用性能的综合评价 [D]. 西安: 长安大学, 2005.
- LIU Tieshan. Comprehensive evaluation of fiber asphalt mixtures on the pavement performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [13] 任旭. 纤维沥青混合料性能室内试验研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- REN Xu. Research on laboratory test of performances for fiber-reinforced asphalt mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [14] 栾利强, 田小草. 沥青混合料疲劳损伤的非线性分析 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 508-512. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.04.014.
- LUAN Liqiang, TIAN Xiaoge. Non-linear analysis of fatigue damage of asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 508-512. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.04.014.
- [15] 田小草, 吕松涛, 郑健龙. 沥青混合料的疲劳效应研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 11-13, 39. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2005.10.004.
- TIAN Xiaoge, LYU Songtao, ZHENG Jianlong. Bituminous mixture fatigue effect study [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(10): 11-13, 39. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2005.10.004.
- [16] 周志刚, 袁秀湘. 加筋沥青路面 APA 试验及其非线性疲劳损伤分析 [J]. 工程力学, 2012, 29(9): 166-176.
- ZHOU Zhigang, YUAN Xiuxiang. APA test and nonlinear fatigue damage analysis of the reinforced asphalt pavement [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 166-176.
- [17] 张福渊, 郭绍建, 萧亮壮, 等. 概率统计及随机过程 [M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- ZHANG Fuyuan, GUO Shaojian, XIAO Liangzhuang, et al. Probability statistics and stochastic process [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2012.

(责任编辑: 欧兆虎; 英文编辑: 杜雪明)