

回旋车辙试验仪与沥青混合料抗扭转性能

姚鸿儒^{1,2}, 王强³, 陆广衍², 周晓龙^{1*}

(1.华东理工大学 石油加工研究所,上海市 200237;2.上海城建日沥特种沥青有限公司,上海市 200436;
3.上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433)

摘要:沥青路面在受到扭转力时,容易出现塑性变形和骨料飞散等病害,当前对于沥青混合料抗扭转性能的评价,尚无规范的试验方法和设备。为了研究沥青混合料抵抗扭转剪切性能的有效评价手段,该文介绍日本开发的3种设备的构造及工作原理,采用回旋车辙试验评价5种典型沥青混合料的抗扭转性能,分析沥青混合料抗扭转性能的影响因素。结果表明:沥青混合料的结构类型和胶结料种类对其抗扭转性能均有显著影响。虽然I-D改性沥青SMA-13混合料和高黏度改性沥青OGFC-13混合料具有相仿的动稳定度,但骨架空隙型混合料的抗扭转性能比骨架密实型更差。不同胶结料种类的沥青混合料在抗扭转性能上按优劣排序为:高黏度改性沥青+高模量剂、高黏度改性沥青、I-D改性沥青。半柔性铺装虽然抗扭转性能优异,但容易产生开裂。

关键词:抗扭转性能;回旋车辙试验仪;半柔性铺装;排水性沥青混合料;裂缝

中图分类号:U414

文献标志码:A

Rotating Wheel Tracking Tester and Torsional Resistance of Asphalt Mixtures

YAO Hongru^{1,2}, WANG Qiang³, LU Guangyan², ZHOU Xiaolong^{1*}

(1.Petroleum Processing Research Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;2.Shanghai Urban Construction NichiReki Special Asphalt Co., Ltd., Shanghai 200436, China;3.Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Asphalt pavement is prone to plastic deformation and aggregate raveling when it is in torsion. At present, there is no standard test method and equipment to evaluate the torsional resistance of asphalt mixtures. In order to study the effective evaluation method for the torsional shear resistance of asphalt mixtures, this paper introduced the structures and working principles of three kinds of equipment developed in Japan. The torsional resistance of five typical asphalt mixtures was evaluated by rotating wheel tracking tests, and factors affecting the torsional resistance of asphalt mixtures were analyzed. The results show that the types of structures and binders of asphalt mixtures have an obvious influence on the torsional resistance of asphalt mixtures. Though I-D modified asphalt SMA-13 mixtures and high-viscosity modified asphalt OGFC-13 mixtures have similar dynamic stability, the torsional resistance of void-skeleton asphalt mixtures is worse than that of dense-skeleton ones. The torsional resistance of asphalt mixtures with different types of binders in descending order is high-viscosity modified asphalt + high modulus additive, high-viscosity modified asphalt, and I-D modified asphalt. Although semi-flexible pavement has excellent torsional resistance, it cracks easily.

Keywords: torsional resistance; rotating wheel tracking tester; semi-flexible pavement; porous asphalt mixtures; crack

0 引言

夏季高温时,沥青路面在转弯路段、道路交叉

口、车辆停靠站和大型车辆出入口等处容易出现塑性变形以及骨料飞散的情况。产生此类病害的内因是沥青对温度敏感,温度升高时,抗剪强度、黏度和

收稿日期:2022-06-13

基金项目:上海市2021年度“科技创新行动计划”启明星项目(编号:21QB1401100)

作者简介:姚鸿儒,男,博士研究生,工程师.E-mail:yaohongru@126.com

*通信作者:周晓龙,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:xiaolong@ecust.edu.cn

黏结强度下降^[1];外因则是车辆频繁的制动启动、加减速和扭转导致面层产生了较大的剪应力,沥青混合料的抗扭转剪切性能无法满足,使路面产生塑性变形以及骨料飞散。如何评价沥青混合料抵抗扭转剪切性能是一个值得研究的课题。

目前评价沥青混合料抗剪切变形能力的试验方法大致分为两类:① 测试混合料自身的模量、强度等指标,如三轴试验、单轴贯入试验、Superpave 剪切试验等,可用于路面结构和材料性能设计,其结果需要进行解析,操作过程较为复杂;② 模拟实际情况,通过加载使试件产生变形或破坏,并测试试验后试件的体积、质量等变化,如车辙试验、汉堡车辙试验、路面分析仪 APA 等,可以更直观地评价材料的性能优劣,但一般仅考虑竖直方向的作用。对于水平扭转和竖向剪切同时存在的情况,目前尚无合适的模拟试验。

日本开发了扭转飞散试验仪(回旋车辙试验仪),通过试验轮对试件同时加载竖向压力和水平扭转作用,采用一定时间后的质量损失、车辙深度或达到一定车辙深度所需的时间来评价沥青混合料的抗扭转性能。该试验主要用于评价排水性沥青混合料的性能,上野贞治等^[2]发现试验温度越高、压实度越小、施工时接缝越多、空隙率越大,沥青混合料产生变形的速度越快;同样级配的排水沥青混合料,环氧沥青优于高黏度改性沥青;绵谷茂等^[3]发现回旋车辙破坏(变形达 10 mm)时间与回转半径的 3 次方成正比,与荷载的 2.5 次方成反比;小野寺陵太郎等^[4]发现胶结料指标中 60℃ 动态剪切试验(DSR)得到的剪切应力与回旋车辙破坏时间相关性最好。

日本排水性沥青铺装应用较广,回旋车辙试验仪最初设计是用于评价排水性沥青混合料抗扭转飞散的性能。中国的沥青铺装以密级配沥青混合料为主,车辆轴载更大,回旋车辙试验仪若能用于评价密级配沥青混合料,对中国更有实际意义。本文先介绍相关设备构造及工作原理,再运用该方法评价常见的 5 种典型沥青混合料的抗扭转性能,提出测试密级配沥青混合料的建议试验参数,最后分析回旋车辙试验仪对密级配沥青混合料的适用性和抗扭转性能的影响因素。

1 日本扭转飞散试验仪的构造及原理

排水性沥青铺装采用骨架空隙型沥青混合料,容易发生骨料飞散,因此通常采用肯塔堡试验评价

抗飞散性能。同样的材料,温度越低,肯塔堡飞散损失越大^[5]。但扭转造成的飞散在温度较高时更容易发生。日本开发了 3 种试验仪,用于评价排水性沥青混合料在高温下的抗飞散能力。通过模拟沥青铺装在实际使用中受到扭转剪切的情况,使得骨料发生飞散现象,并用飞散损失率评价抗扭转能力^[6-7]。下面简单介绍 3 种扭转飞散试验仪的工作原理。

(1) A 型扭转飞散试验仪。其试验轮与试件以不同的速度和角度进行旋转,从而在试件表面产生扭矩。设备示意图如图 1 所示,实物如图 2 所示。其标准试验条件如表 1 所示。采用空压机加载,通过气压调整接触压强。试验轮转速可调,范围为 4~14 r/min。试件固定在试验台上,试验台转速可调,范围为 4~14 r/min。飞散掉的骨料会影响试验结果,因此,该试验仪配置去除松散骨料的装置。其中,刮板用于去除附着在轮胎上的混合料,空气喷嘴用于去除试件表面的飞散骨料。

(2) B 型扭转飞散试验仪。其同样是通过轮胎扭转在试件表面产生扭矩的装置。示意图如图 3 所示,实物如图 4 所示。B 型扭转飞散试验仪与 A 型扭

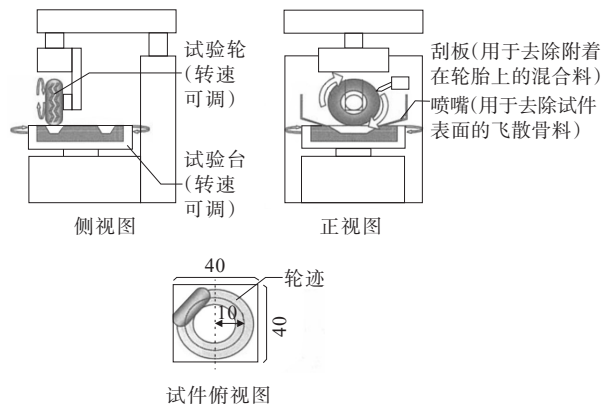


图 1 A 型扭转飞散试验仪示意图(单位:cm)

Figure 1 Type A torsion raveling tester (unit:cm)

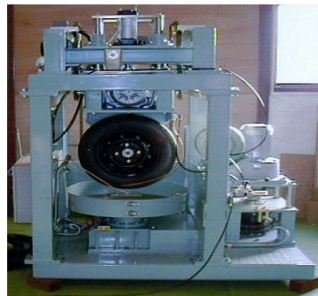


图 2 A 型扭转飞散试验仪照片

Figure 2 Photo of type A torsion raveling tester

表 1 扭转飞散试验仪的标准试验条件

Table 1 Standard test conditions of torsion raveling tester

类型	试验轮	试验轮尺寸/ (cm×cm)	轮胎花纹	荷载/ kN	试件尺寸/ (mm× mm×mm)	试验台转速/ (次·min ⁻¹)	试验轮转 速/(次· min ⁻¹)	回转半 径/cm	试验温 度/℃	试验 时间
A 型扭转飞 散试验仪	小型卡车 轮胎	轮轴直径25.4× 宽度 12.7	纵横沟组合 花纹	0.20(接触压 强 0.15 MPa)	400× 400×50	5.0	10	10.0	50	120 min
B 型扭转飞 散试验仪	手推车 轮胎	直径 20× 宽度 6.5	纵横沟组合 花纹	0.49 N(接触压 强 0.43 MPa)	300× 300×50	10.5		7.5	50	120 min
轮胎静扭 试验仪	普利司通 M890 11R-22.5 16PR	直径 110.0× 宽度 22.5	见图 5	21.40	300× 300×50			0.0	60	3 s 转 45°

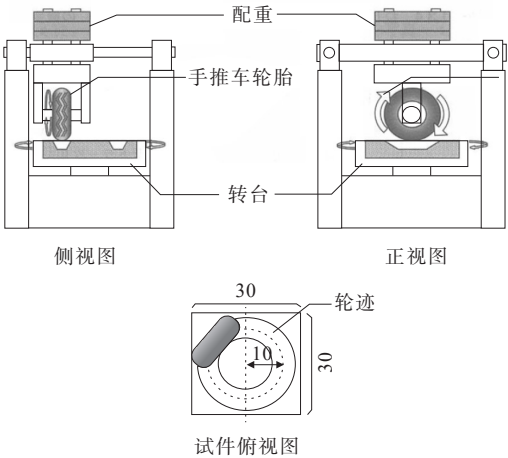


图 3 B 型扭转飞散试验仪示意图(单位:cm)
Figure 3 Type B torsion raveling tester (unit:cm)

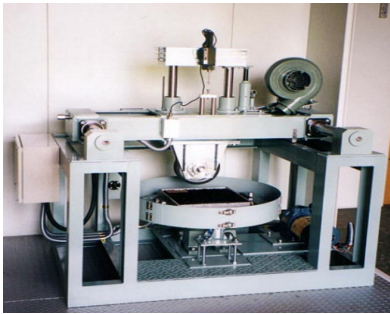


图 4 B 型扭转飞散试验仪照片
Figure 4 Photo of type B torsion raveling tester

转飞散试验仪的区别在于:A 型的试验轮为主动旋转,B 型的试验轮为被动旋转;A 型为空压机加载,B 型为配重块加载;A 型轮胎较大,试件也较大,B 型轮胎小,试件为常规车辙试件;A 型有去除飞散骨料的装置,B 型需要手动去除。

(3) 轮胎静扭试验仪^[8]。其实物如图 5 所示。与前两种试验仪不同的是,该试验仪用于模拟大型车辆在停止状态打方向时轮胎正下方骨料的飞散。这

种飞散的机理在于高温时沥青胶结料黏结性低,轮胎挤压路面同时扭转,粗集料嵌入轮胎花纹中,形成“甜甜圈”形的飞散,如图 6 所示。这种飞散一般不会发生在密级配沥青铺装,仅发生在开级配的排水沥青铺装。常发生的场合包括高速公路匝道上交通拥堵多发区,以及交叉口大转弯车道的停车线后方的区域等。由于该试验模拟的飞散机理与前两种试验仪不同,因此不能互相替代。试验时,将保温好的试件固定好,轮胎下降,施加 21.4 kN 的压力,3 s 旋转 45°,将轮胎抬起后取出试件,在试件表面用钢丝刷纵横各刷 50 次,刷掉松散的骨料。由于试验设备较大,3 种扭转飞散试验仪均被安置于步入式环境箱内,以便于控温。



图 5 轮胎静扭试验仪
Figure 5 Photo of stationary torsion tester of tire

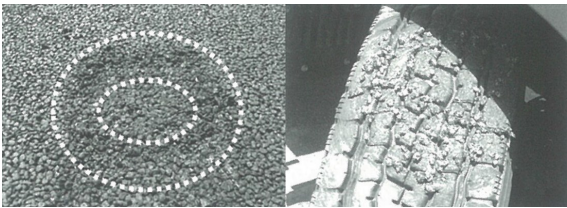


图 6 排水沥青路面轮胎静扭飞散照片
Figure 6 Photo of stationary torsion raveling of tire on porous asphalt pavement

2 沥青性能评价与沥青混合料动稳定度

本文采用扭转飞散试验仪评价5种常见沥青混合料的抗扭转性能,研究的沥青混合料为高黏度改性沥青 OGFC-13 混合料、I-D 改性沥青 SMA-13 混合料、高黏度改性沥青 SMA-13 混合料、高黏度改性沥青 SMA-13 混合料+高模量剂和半柔性铺装。首先,测试所用沥青胶结料的性能和沥青混合料的动稳定度。其中,I-D 改性沥青和高黏度改性沥青性能见表2。I-D 改性沥青和高黏度改性沥青均为 SBS 改性沥青,不同的是 I-D 改性沥青的 SBS 含量低,富沥青质相为连续相,富 SBS 相为分散相;高黏度改性沥青的 SBS 含量高,富沥青质相为分散相,富 SBS 相为连续相。

表 2 改性沥青性能

Table 2 Properties of modified asphalt

项目	单位	I-D 改性沥青	高黏度改性沥青	试验方法
25℃针入度	0.1 mm	58	48	T0604
软化点	℃	70.5	98.5	T0606
5℃延度	cm	27	39	T0605
25℃弹性恢复率	%	87	98	T0662
5℃弹性恢复率	%	65	89	T0662
135℃旋转黏度	Pa·s	1.51	4.81	T0625
180℃旋转黏度	Pa·s	0.23	0.69	T0625
弗拉斯脆点	℃	-19	-30	T0613
TFOT 质量变化	%	-0.074	-0.044	T0609
25℃针入度比	%	76	79	T0604
5℃延度	cm	18	30	T0605
SHRP 分级	PG 76-22 PG 88-28 AASHTO M320			

由表2可知:高黏度改性沥青的软化点、延度、弹性恢复率、弗拉斯脆点和 PG 分级均优于 I-D 改性沥青,具有更优的高低温性能。

设计 SMA-13 和 OGFC-13 两种级配。SMA-13 沥青混合料油石比 6.1%,空隙率 3.8%;OGFC-13 沥青混合料油石比 4.4%,空隙率 20.2%。级配曲线如图 7 所示。SMA-13 和 OGFC-13 均为间断级配。

采用 I-D 改性沥青制备 SMA-13 混合料,高黏度改性沥青制备 OGFC-13 和 SMA-13 混合料。高黏度改性沥青 SMA-13 添加 0.4% 高模量剂,高模量剂为法国 PR Module 添加剂。半柔性铺装试件是在排水性沥青混合料的空隙中灌注水泥浆制得的。测试不同沥青混合料的 60℃动稳定度,结果如图 8 所示。

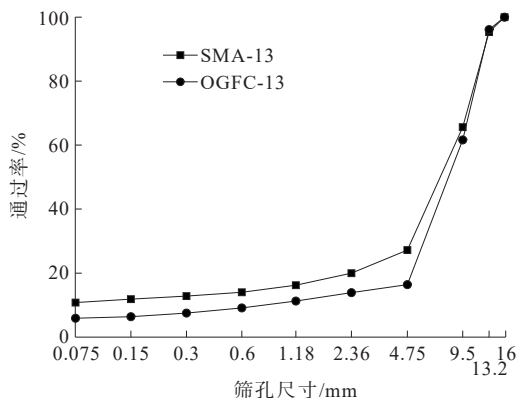


图 7 SMA-13 和 OGFC-13 沥青混合料级配曲线

Figure 7 Gradation curves of SMA-13 and OGFC-13 mixtures

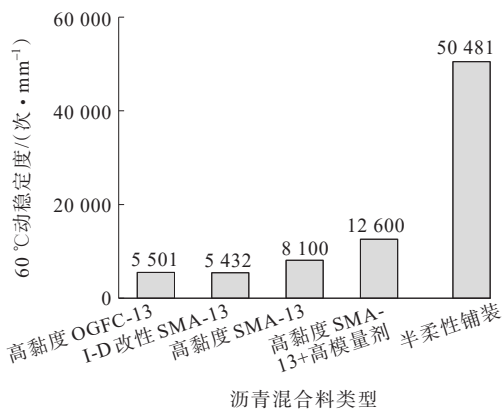


图 8 不同沥青混合料的动稳定度

Figure 8 Dynamic stability of various asphalt mixtures

由图 8 可知:高黏度改性沥青 OGFC-13 混合料和 I-D 改性沥青 SMA-13 混合料的动稳定度相仿;高黏度改性沥青 SMA-13 混合料的动稳定度优于 I-D 改性沥青 SMA-13 混合料;添加高模量剂后,动稳定度更高;半柔性铺装几乎不产生变形。

3 沥青混合料抗扭转性能评价

本文采用 B 型扭转飞散试验仪(型号 NA-527,日本ナカジマ技販株式会社),并根据中国实际情况对试验条件进行调整。设备上安装位移传感器,不是采用飞散损失率,而是采用车辙变形量评价沥青混合料的抗扭转性能,因此也可称为回旋车辙试验仪。每转约采集 53 个位移数据,计算每转的位移平均值,并进行原点校正。为与动稳定度试验一致,将试验轮由充气轮胎改为车辙试验用的实心橡胶轮,接触压强调整为 0.7 MPa,试验温度 60℃,旋转半径 10 cm。由于研究的沥青混合料抗扭转性能优异,120 min 时

变形小,区分度不足,将加载时间延长至720 min。回旋车辙试验得到的变形-时间曲线如图9所示,扭转720 min后的试件如图10所示。其中,高黏度改性沥青 OGFC-13 混合料由于飞散较大,变形量超过12 mm,停止了试验。

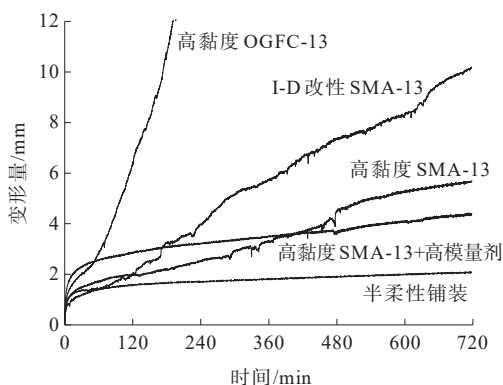


图9 沥青混合料回旋车辙试验变形-时间曲线

Figure 9 Deformation-time curves of asphalt mixtures in rotating wheel tracking test

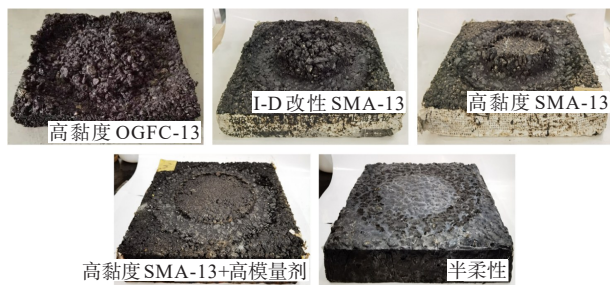


图10 沥青混合料扭转后试件照片

Figure 10 Photos of specimens of asphalt mixtures after torsion

由图9可知:变形产生的速度从快到慢依次为高黏度改性沥青 OGFC-13 混合料、I-D 改性沥青 SMA-13 混合料、高黏度改性沥青 SMA-13 混合料、高黏度改性沥青 SMA-13 混合料+高模量剂、半柔性铺装。高黏度改性沥青 OGFC-13 混合料和 I-D 改性沥青 SMA-13 混合料虽然具有相仿的动稳定度,但是回旋车辙试验的变形速度有明显差距。这是因为 SMA-13 为骨架密实型沥青混合料,在粗集料骨架空隙中填充了细集料和沥青胶浆,能够协助粗集料骨架抵抗扭转作用;而 OGFC-13 为骨架空隙型,黏聚力小,更容易受到扭转作用。采用不同胶结料的 SMA-13 混合料,表现出不同的抗扭转性能,按性能优劣排序为:高黏度改性沥青+高模量剂、高黏度改性沥青、I-D 改性沥青。这说明级配类型和胶结料性

能对沥青混合料的抗扭转能力均有影响。

除半柔性铺装外,其他曲线不平滑,这是由于飞散的骨料卡在试验轮和试件之间,采集到的位移数据产生波动,同时加速了变形和飞散。后续研究中,改造设备,借鉴 A 型扭转飞散试验仪,增加连接空压机的吹尘枪,间隔一定时间吹除试件表面的飞散骨料。从试验后的试件来看,高黏度改性沥青 OGFC-13 混合料、I-D 改性沥青 SMA-13 混合料和高黏度改性沥青 SMA-13 混合料试件均有水平和垂直方向的流动变形,并伴随骨料飞散的情况。推移的骨料在车辙内侧形成不同大小的拥包,变形量小的试件拥包小。高黏度改性沥青 SMA-13 混合料+高模量剂和半柔性铺装两个试件车辙深度很浅,内侧没有拥包,几乎也没有骨料飞散的现象,说明具有十分优异的抗扭转性能。半柔性铺装试件的车辙外侧发现了开裂现象,裂缝位于排水性沥青混合料和水泥浆的界面处,这可能是由于二者的界面结合较差和模量差异较大造成的^[9]。半柔性铺装在实际应用中,交叉口等车辆扭转作用较大处也容易出现开裂现象^[10],但缺少有效的模拟和表征手段,回旋车辙试验可能能够模拟这一现象^[11]。今后将在回旋车辙试验仪上添加高速摄像机,观察裂缝发展的过程,并采用更多的变量,分析半柔性铺装裂缝产生的影响因素。

车辙的产生通常可分为3个典型阶段:第一阶段,车辙产生速度迅速增加随后减缓,这主要是进一步压密后空隙率减小导致密度变化;第二阶段,车辙产生速度较小且保持稳定,这主要是剪应力引起稳定剪切变形;第三阶段,变形速度明显加快,发生了剪切破坏^[12]。第一阶段的模拟试验误差大;第三阶段的模拟试验耗时长且复现性差,鲜有试验来表征这两阶段的特征。车辙试验主要对应第二阶段,此时车辙产生的速度是恒定的,被称为动稳定度。当进行普通车辙试验时,即使延长试验时间,骨料也不会飞散。然而,采用回旋车辙试验仪时却出现了骨料飞散的现象,这说明回旋车辙试验可能能够模拟车辙产生过程第三阶段剪切破坏的情况。另外,关于回旋车辙试验中试件的受力情况与实际路面中沥青混凝土的相关性,目前鲜见研究。在分析密级配沥青混合料的抗扭转性能时,也缺少相关的力学基础研究,因此需要更多的分析来支撑这一领域的研究。当混合料抗扭转性能优异时,回旋车辙试验初

期的变形量对结果影响较大,对于此类材料,可以采用车辙产生速度来评价其抗扭转性能。

4 结论

沥青路面在受到扭转时,容易出现塑性变形和骨料飞散等病害,目前尚无规范的试验方法和设备来评价沥青混合料的抗扭转性能。本文介绍3种日本用于评价排水性沥青混合料抗扭转性能的扭转飞散试验仪(回旋车辙试验仪)的构造及原理。通过回旋车辙试验,评价了5种典型的沥青混合料的抗扭转性能,并分析了其影响因素,得到主要结论如下:

(1) 回旋车辙试验仪可以用于评价密级配沥青混合料的抗扭转性能。推荐的试验参数包括:试验轮采用实心橡胶轮,接触压强设定为0.7 MPa,试验温度设置为60℃,旋转半径为10.0 cm,试验在达到720 min或变形量达到12 mm时终止。

(2) 沥青混合料的级配类型和胶结料性能对其抗扭转性能具有显著影响。在相同动稳定度下,骨架空隙型混合料的抗扭转性能比骨架密实型混合料的差。

(3) 对于相同级配类型,不同胶结料种类的混合料按抗扭转性能优劣排序依次为:高黏度改性沥青+高模量剂、高黏度改性沥青、I-D改性沥青。

(4) 半柔性铺装具有十分优异的抗扭转性能,但在沥青混合料和水泥浆的界面处出现了开裂现象,具体原因需要进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 日本道路協会.舗装性能評価法 別冊:必須に応じ定める性能指標の評価法編[M].東京:丸善出版,2008.
Japan Road Association. Evaluation method of pavement performance appendix-evaluation methods of performance indicators according to requirements[M]. Tokyo: Maruzen Publishing, 2008.
- [2] 上野貞治,羽入昭吉,小野寺陵太郎.排水性舗装の耐久性に関する一検討[C]//第23回日本道路会議一般論文集.東京:日本道路協会,1999:42-43.
UENO S, HANYU A, ONEDERA R. Study on durability of drainage pavement[C]// Proceeding of the 23rd Japan Road Conference. Tokyo: Japan Road Association, 1999: 42-43.
- [3] 綿谷茂,伊藤達也,上野貞治.回転ホイールトラッキング試験の試験条件に関する一検討[C]//土木学会第59回
年次学術講演会.豊田:日本土木学会,2004:1099-1100.
WATADANI S, ITO T, UENO S. Study on conditions of rotating wheel tracking test[C]// JSCE 59th Symposium. Toyota: Japan Society of Civil Engineers, 2004: 1099-1100.
- [4] 小野寺陵太郎,黄木秀実,伊藤達也.排水性舗装のねじれ抵抗性に対するバインダ評価手法の一検討[C]//土木学会第59回年次学術講演会.豊田:日本土木学会,2004:1101-1102.
ONEDERA R, OKI H, ITO T. Study on binder evaluation methods of torsional resistance of drainage pavement[C]// JSCE 59th Symposium. Toyota: Japan Society of Civil Engineers, 2004: 1101-1102.
- [5] 深代勝弘,黄木秀実.改質アスファルトの舗装維持への貢献[J].改質アスファルト,2005,25:19-31.
FUKADAI K, OKI H. Contribution of modified asphalt to pavement maintenance[J]. Modified Asphalt, 2005, 25: 19-31.
- [6] 王强,姚鸿儒,李健,等.抗扭转型高黏度改性沥青的研发与性能评价[J].石油沥青,2020,34(3):17-21.
WANG Qiang, YAO Hongru, LI Jian, et al. Development and performance evaluation of anti-torsion high viscosity modified asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2020, 34(3): 17-21.
- [7] 蔡明,姚鸿儒,王强.采用旋回式车辙试验仪评价排水沥青混合料的抗扭转性能[J].中国市政工程,2020(2):19-22.
CAI Ming, YAO Hongru, WANG Qiang. Evaluation of torsional performance of drainage asphalt mixture by using cyclic rutting tester[J]. China Municipal Engineering, 2020(2): 19-22.
- [8] 首都高速道路株式会社.舗装設計施工要領[M].東京:首都高技術株式会社,2019.
Metropolitan Expressway Company. Guildbook for pavement design and construction[M]. Tokyo: Shutoko Engineering Company, 2019.
- [9] GONG M H, XIONG Z J, CHEN H, et al. Evaluation on the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 387-395.
- [10] GONG M H, XIONG Z J, DENG C, et al. Investigation on the impacts of gradation type and compaction level on the pavement performance of semi-flexible pavement mixture[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126562.
- [11] YANG B H, WENG X Z. The influence on the durability of semi-flexible airport pavement materials to cyclic wheel load test[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 171-175.
- [12] XU Y, SUN L J. Study on permanent deformation of asphalt mixtures by single penetration repeated shear test[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 96: 886-893.