

细级配沥青混合料的抗裂指标研究

沈新¹, 林英乔², 杨树²

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 裂缝严重影响了沥青路面的使用, 研究沥青材料的微观断裂机理有助于提高路面使用寿命。通过利用半圆弯曲实验获取了不同试验条件下试件的荷载-位移数据, 然后得出试件的强度以及断裂能, 抗裂指数等各种断裂指标, 分别研究了沥青砂浆在不同温度下的抗裂特性。分析了不同沥青种类、沥青膜厚度、试验温度、加载速率等因素对沥青砂浆的力学特性的影响, 特别是抗裂性能。对沥青砂浆试件进行了定量定性的对比分析研究。

关键词: 沥青; 断裂; 断裂能; 应力应变曲线

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0243-06

Research on Crack Resistance Index of Fine Graded Asphalt Mixture

SHEN Xin¹, LIN Yingqiao², YANG Shu²

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Cracks seriously affect the use of asphalt pavement. The study on the microscopic fracture mechanism of asphalt materials can help to improve the service life of pavements. The load-displacement data of specimens under different test conditions are obtained through the use of a semi-circular bending experiment, and then various fracture indicators such as the strength and fracture energy of the specimens, as well as the crack resistance index are obtained to study the crack resistance characteristics of asphalt mortar at different temperatures separately. The influences of different asphalt types, asphalt film thicknesses, test temperatures, loading rates and other factors on the mechanical properties of asphalt mortar are analyzed, especially its crack resistance. The quantitative and qualitative comparative analysis and study are conducted on the asphalt mortar specimens.

Keywords: asphalt; fracture; fracture energy; stress-strain curves

0 引言

沥青路面有着行车舒适性好、低噪声、养护简单、施工容易等不可替代的优点, 因此在我国有着广泛应用^[1]。随着十四五计划的不断推进, 沥青路面占公路路面的比例将不断提高。但随着使用年限的增加、交通量的不断增长、湿度温度变化、重载超载车辆的增加, 出现了多种沥青路面病害比如沥青路面的裂缝、松散、沉陷、翻浆等, 极大的影响了道路的正常使用以及耐久性^[2-3]。为了尽量减少路面裂缝病害, 深入研究沥青路面裂缝的萌生以及扩展规律, 进一步发掘开裂机理, 完善路面抗裂性设计, 具有重要的实际工程意义。

研究发现, 沥青砂浆与沥青混合料同为多结构

多层次的多尺度分散系, 其性能受温度、级配等多种因素影响。Hasan M^[7]基于DMA的方法, 获得了沥青砂浆的动态力学响应曲线、特征温度等指标, 研究了沥青砂浆的高低温性能。结果表明, 相变温度为 T_1 , T_0 , T_g 可用于评价沥青砂浆的低低温性能。细级配提高了沥青砂浆的低低温性能, 粗级配提高了改性沥青砂浆的高温性能。Osman Sami A^[8]为了研究沥青砂浆的动态力学性能, 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)对砂浆进行了中等应变率下的压应力-应变试验。试验结果表明: 砂浆峰值强度随应变速率的增加而增大, 增长速率逐渐减小。Woldekidan MF^[9]利用改进的半圆弯曲试验参数建立沥青混凝土断裂弹性指标, 并提出了由荷载-位移曲线推导出的柔性指数(FI)。Xing C^[10]采用了数字图像相关技术采集裂缝长度等信息, 发现沥青应变和面积大小的关系。ZHAN Xiao^[11]对沥青、沥青砂浆和沥青混合料的高温特性和动态流变特性进行了分析比较, 发现矿物

收稿日期: 2024-08-08

作者简介: 沈新(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程设计工作。

填料和0.15mm细骨料对沥青混合料高温性能影响较大。Harris and Stuart、Kavussi and Hicks^[12-13]对沥青砂浆与沥青混合料之间的力学关系相关性进行了大量研究,结果发现,通过提高砂浆的力学性能可提高沥青混合料的抗裂性。由于对于砂浆的界定具有争议,本文中所使用的沥青砂浆,也可以理解为细级配沥青混合料。本文主要通过对沥青砂浆SCB试验的能量指标分析,研究沥青砂浆的抗裂性能。

1 原材料及试验方法

1.1 级配与油石比

本试验采用SUP-13级配,并根据规范要求和已有研究经验确定了相应的沥青含量,确保马歇尔试验中沥青混合料的孔隙率低于4%。其级配曲线见图1。

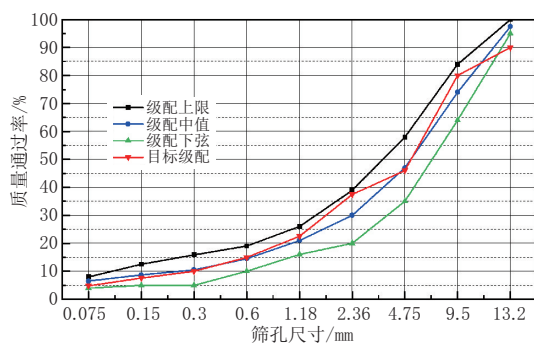


图1 SUP-13级配曲线图

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)所推荐的沥青膜厚度计算的公式为:

$$P_b = T_f \times S_A \quad (1)$$

式中: P_b 为沥青最佳用量; T_f 为沥青膜所需厚度, μm ; S_A 为集料比表面积, cm^2/g 。

S_A 则采用美国AI提供的公式来计算,具体见式(2):

$$SA = 10 \times [0.41 + 0.004 1P_{4.75} + 0.008 2P_{2.36} + 0.016 4P_{1.1} + 0.028 77P_{0.6} + 0.061 4P_{0.3} + 0.122P_{0.15} + 0.327 7P_{0.075}] \quad (2)$$

式中: P_i 为第*i*级筛孔的通过率。

根据公式,结合SUP-13级配,计算得到沥青膜厚度分布为9 μm 和10 μm 所对应的油石比。

1.2 试验方法

半圆弯曲试验(SCB)在静载条件下可用来评价沥青混合料的低温抗裂性,见图2。通过旋转压实,路面取芯等方法得到圆柱形试件以后可根据试验需要按照不同厚度进行切割,且试件的利用率高。根据试验目的,试件可以预先开缝,在断裂过程中一般

沿开口方向进行断裂,预切缝深度和位置不同,断裂过程也会有所区别。评价指标包括断裂能、柔性指数和J积分等^[14-15]。

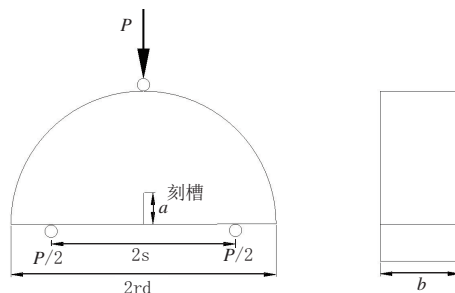


图2 半圆弯曲试验示意图

与间接拉伸试验相比,半圆弯曲试验更能反映裂缝萌生和扩展规律,与断裂指标的相关性更强,更适用于评价沥青混合料的低温抗裂性能。该试验通过荷载位移曲线面积计算断裂能,通过试件尺寸和最大荷载计算弯拉强度,进而获得能量指标和强度指标,为全面评估沥青砂浆的抗裂性能提供了更可靠的依据。因此,采用半圆弯曲试验评价沥青砂浆的抗裂性能具有明显优势。

1.3 试验指标

1.3.1 断裂能

断裂能是指裂缝扩展单位面积所需的能量,它表征了沥青路面在低温环境下的抗裂性能。一般而言,沥青混合料的断裂能数值越大,表明其在该低温条件下的抗裂性能越好。断裂能的具体计算方法见式(3):

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (3)$$

式中: G_f 为断裂能, J/m^2 ; W_f 为断裂功, J 。

$$A_{lig} = (r - a) \times t \quad (4)$$

式中: A_{lig} 为韧带区域, m^2 ; r 为试样半径, m ; a 为切口长度, m ; t 为试样厚度, m 。

1.3.2 柔性指数

柔性指数是衡量材料发生柔性断裂时的性能指标,它体现了沥青混凝土裂缝扩展的速度,一定程度上体现了抗裂性能。柔性指数综合考虑了峰值后荷载位移曲线的拐点斜率和断裂能,代表了裂缝平均扩展速率。通过分析柔性指数,可以发现早期容易发现开裂的脆性部分,并根据其数值对不同类型沥青混凝土的抗裂性能进行评价。柔性指数计算方法见式(5):

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad (5)$$

式中: F_I 为柔性指数; G_f 为断裂能, J/m^2 ; A 为单位换算系数,取0.01; m 为峰后荷载位移曲线拐点斜率, kN/mm 。

1.3.3 抗裂指数

为了更准确地评估沥青混合料的抗裂性能,研究人员提出了一种新的指标——抗裂指数,用来替代传统的柔性指数。抗裂指数采用峰值荷载来进行计算,有效降低了抗裂性能计算当中可能出现的变异性。同时,它能够区别开断裂能数值接近,但峰值荷载不同的情况,不过却无法反映实际中裂缝的发展速度。抗裂指数的计算公式见式(6):

$$\text{GRI} = \frac{G_f}{|P_{\max}|} \tag{6}$$

式中:GRI为抗裂指数, $10^{-3}/\text{m}$; G_f 为断裂能, J/m^2 ; $P_{\max}$ 为临界荷载, kN 。

2 结果与讨论

2.1 断裂能及其影响因素

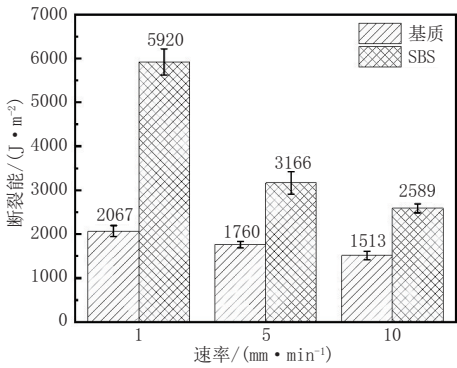
2.1.1 加载速率

在半圆弯曲试验中,相比高加载速率,低加载速率能更好模拟沥青砂浆在低温下裂缝的发生和扩展,可以更好的评价沥青砂浆的低温抗裂性能。记录半圆弯曲试件在3个不同加载速率下的荷载-位移信息,并通过计算荷载-位移曲线的面积得到断裂能数值,试件在1 mm/min,5 mm/min,10 mm/min三种加载速率下断裂能的变化情况见图3。

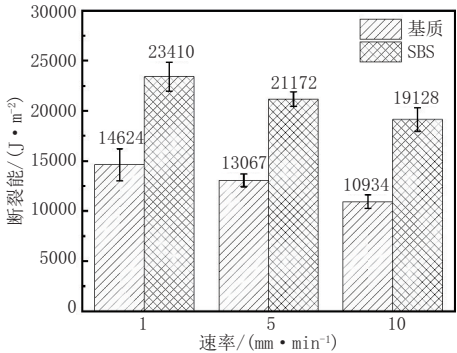
由图3(a)可以看出,在沥青膜厚度为9 μm,温度为-5℃的条件下,断裂能随着加载速率的升高而降低,加载速率为1 mm/min时断裂能最大,SBS改性沥青降低幅度最大。由图3(b)可以看出,在沥青膜厚度为9 μm,温度为10℃的条件下,基质沥青和SBS改性沥青的断裂能均随着加载速率的提高而降低。图3(c)和图3(d)显示的断裂能变化趋势保持一致。在本次试验中,断裂能变化幅度虽受到试验条件的影响,但总体趋势一致。这种现象可能与加载速率较低时,整个试验过程持续时间较长有关。。

2.1.2 温度

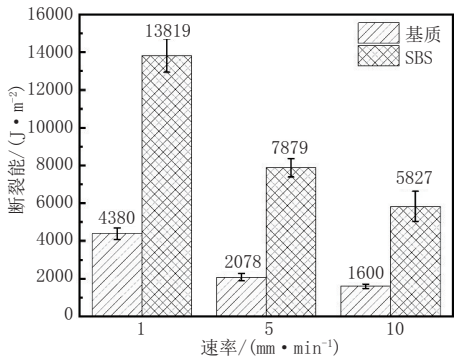
如图3(a)、图3(b)所示,SBS沥青的沥青膜厚度均为9 μm时,在各自3个不同加载速率的条件下,10℃时所表现出的断裂能均比-5℃时的要高,提升幅度较大;沥青砂浆在-5℃时,通常呈现出脆性断裂,而10℃则往往表现出柔性断裂,此时荷载-位移曲线囊括的面积更大,断裂能数值也会因此由较大



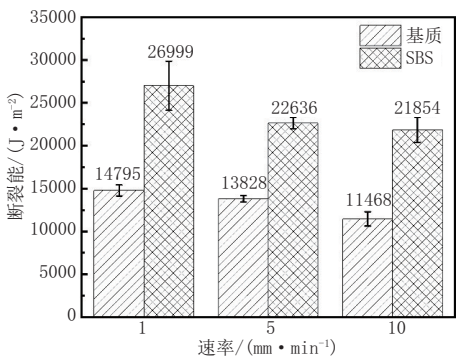
(a) 沥青膜厚度9 μm,温度-5℃



(b) 沥青膜厚度9 μm,温度10℃



(c) 沥青膜厚度10 μm,温度-5℃



(d) 沥青膜厚度10 μm,温度10℃

图3 不同条件对断裂能的影响

的增长。
如图3(c)、(d)所示,SBS沥青的沥青膜厚度均为10 μm时,在各自3个不同加载速率的条件下,10℃时所表现出的断裂能均比-5℃时的要更好,提

升幅度也比较大,断裂能的变化趋势保持一致。

如图3所示,基质沥青的沥青膜厚度均分别为10、9 μm 时,分别在各个加载速率条件下,10 $^{\circ}\text{C}$ 的断裂能数值相比-5 $^{\circ}\text{C}$ 时要更大,并且对比更为明显,说明基质沥青比SBS沥青对温度变化更为敏感。由此可以总结温度对断裂能的变化影响较大,并且在10 $^{\circ}\text{C}$ 时断裂能表现更好。

2.1.3 沥青种类

由于沥青砂浆的沥青含量高于沥青混合料,因此沥青性质对沥青砂浆的力学特性影响更为直接。本文选用基质沥青和SBS改性沥青,分析了它们对沥青砂浆低温抗裂性能的影响,结果见图3。

图3的结果表明,在所有加载速率下,SBS改性沥青的断裂能均优于基质沥青,尤其是在1 mm/min速率下差异最为显著。在10 $^{\circ}\text{C}$ 、9 μm 膜厚条件下,SBS改性沥青的断裂能同样优于基质沥青。无论加载速率如何,SBS改性沥青的低温抗裂性能均优于基质沥青,尤其是在1 mm/min速率下差异最大。总体而言,与基质沥青相比,SBS改性沥青能够显著提升沥青砂浆的低温抗裂性能。

2.1.4 沥青膜厚度

本文选取9 μm 和10 μm 两种沥青膜厚度进行比较分析,对试件进行了半圆弯曲试验。在完成试验数据的整理后,计算得到的断裂能如图3所示。

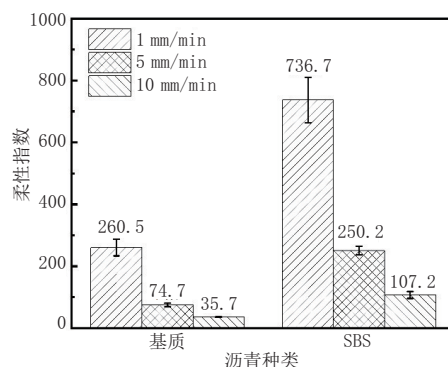
图3(a)、图3(c)分别为SBS沥青和基质沥青在-5 $^{\circ}\text{C}$ 时断裂能变化情况,可以看出,沥青膜厚度为10 μm 时断裂能数值较大。图3(b)、(d)分别为SBS沥青和基质沥青在10 $^{\circ}\text{C}$ 时断裂能变化情况,同样沥青膜厚度为10 μm 时断裂能数值较大,并且在-5 $^{\circ}\text{C}$ 时对比更为明显,可能油石比以及沥青含量在低温时对于断裂特性更为重要。沥青含量的提高会提高沥青砂浆的断裂能,让沥青砂浆有更好的抗裂性,但沥青含量增加到一定值时,断裂能将不再提高,继续增加沥青含量,断裂能将会减小,抗裂性能将会下降。由此可见选择合适的沥青膜厚度对于提高沥青砂浆的低温抗裂性至关重要。

2.2 柔性指数及其影响因素

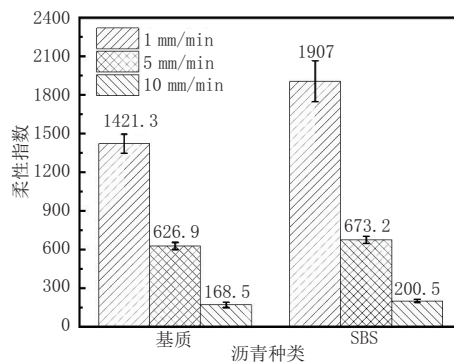
2.2.1 沥青种类

在试验温度为10 $^{\circ}\text{C}$ 时试件发生的柔性断裂,柔性指数对比见图4(a)、图4(b)。图4(a)为沥青膜厚度为9 μm 时柔性指数对比,图4(b)则为沥青膜厚度为10 μm 时的柔性指数。1 mm/min时的加载速率最高,SBS沥青砂浆的柔性指数明显高于基质沥青砂

浆,且在沥青膜厚度为9 μm 时最为明显。沥青膜厚度为10 μm 时相对差距不是很大,但也能看出SBS沥青砂浆的柔性指数整体高于基质沥青砂浆。整体来说,SBS沥青砂浆的柔性指数是要好于基质沥青砂浆的。SBS沥青砂浆可能具有更好的低温抗裂性。



(a) 沥青膜厚度9 μm , 温度10 $^{\circ}\text{C}$



(b) 沥青膜厚度10 μm , 温度10 $^{\circ}\text{C}$

图4 不同条件对柔性指数的影响

2.2.2 沥青膜厚度

在沥青混合料的半圆弯曲试验当中,沥青含量的多少对于沥青砂浆的力学性能具有重要影响,所以在本次试验当中分别选取了沥青膜厚度为9 μm 和10 μm 作为对比研究。图3(b)中SBS沥青膜厚度为10 μm 且加载速率为1 mm/min时柔性指数最大,在三个加载速率下,沥青膜厚度为10 μm 时的柔性指数均大于沥青膜厚度为9 μm 时。由此可以看出,在本次试验条件下,沥青膜厚度为10 μm 时的柔性指数明显好于沥青膜厚度为9 μm 时,沥青膜厚度为10 μm 时可能有着更好的低温性能。

2.2.3 加载速率

由前面的试验结果可以看出沥青砂浆试件在不同加载速率的条件下,断裂能会有不同的数值,并且具有一定规律性,由于柔性指数和断裂能具有一定的相关性,所以柔性指数可能会随着加载速率具有一定的波动。图4(a)是沥青膜厚度为9 μm 时,不同

加载速率的柔性指数变化。基质沥青砂浆和SBS沥青砂浆柔性指数都随着加载速率升高而降低,其中基质沥青砂浆的柔性指数降低幅度最为明显,柔性指数最小时为35.7。图4(b)为沥青膜厚度为10 μm时的柔性指数变化,可以看出柔性指数的变化趋势与图4(a)保持一致,柔性指数降低幅度均比较大,说明加载速率对柔性指数的变化具有显著影响。在本次试验条件下柔性指数都会随着加载速率的增大而减小。

2.3 抗裂指数及其影响因素

2.3.1 温度

在半圆弯曲试验当中,试件的力学特性与温度变化密切相关。沥青是一种温度敏感性很高的材料,不同温度的沥青其性能也会很大变化。随着温度的变化,沥青砂浆的断裂能和峰值荷载也会发生变化,所以会导致断裂指数也会发生变化。图5中分别列出了基质沥青和SBS沥青在9 μm和10 μm的沥青膜厚度时的断裂指数,可以看出图中标记都处于斜线上方,表明10℃时的抗裂指数比9℃时的高,以沥青膜厚度为9 μm时的SBS沥青砂浆和沥青膜厚度为10 μm的SBS沥青砂浆最为明显。说明抗裂指数对温度的敏感性比较高,温度能较大幅度的影响沥青砂浆的抗裂指数,温度为10℃时的沥青砂浆抗裂指数要明显好于9℃时的沥青砂浆抗裂指数。

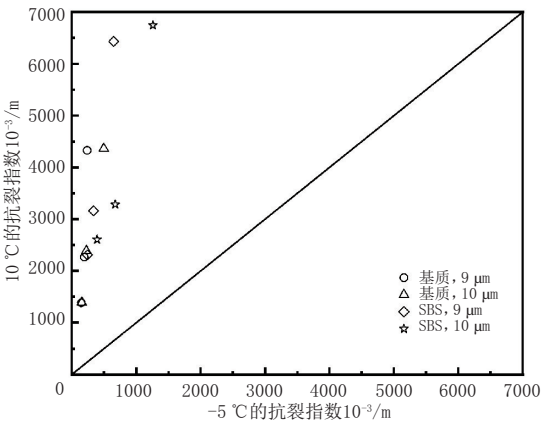


图5 温度对抗裂指数的影响

2.3.2 沥青膜厚度

沥青膜厚度不同意味着沥青含量和沥青在沥青砂浆中的占比不一样,会极大的影响沥青砂浆低温抗裂的性能。前文已经研究沥青膜厚度不同时的断裂能和临界荷载的变化,抗裂指数由断裂能和临界荷载得出,所以断裂指数也会随着沥青膜厚度的变化而发生变化。

图5结果表明:在-5℃和10℃温度下,无论是

SBS改性沥青砂浆还是基质沥青砂浆,其抗裂指数均随着沥青膜厚度的增加而提高。特别是在加载速率为1 mm/min时,沥青膜厚度为10 μm时的抗裂指数达到最大值。这说明适当提高沥青膜厚度可以在一定范围内提升沥青砂浆的低温抗裂性能。但并不意味着沥青膜越厚越好,需要把握合理的膜厚范围,才能最大程度优化沥青砂浆的耐低温性。

3 结 语

本文利用了沥青砂浆的半圆弯曲试验所得出的试验结果,研究了不同沥青种类,不同的沥青膜厚度以及3种不同的加载速率对各种能量指标的具体影响,具体包括断裂能,柔性指数,抗裂指数等。采取应用统计学中的方差分析法,各个试验因素对抗裂指数和断裂能等能量评价指标的影响程度进行了分析。对比了不同试验条件下各个断裂指标的变化趋势,探讨了变化规律并做出了一定分析,研究结论如下:

不同的沥青种类对断裂能有较大的影响,SBS改性沥青砂浆的断裂能数值明显好于基质沥青砂浆。在不同的加载速率条件下,随着加载速率的增大,断裂能数值不断减小。不管是基质沥青砂浆还是SBS改性沥青砂浆都在沥青膜厚度为10 μm时的断裂能表现明显好于沥青膜厚度为9 μm时,在试验温度为10℃时的断裂能一般比温度为-5℃时的断裂能表现要好,试件在10℃时一般为柔性断裂,而在试验温度为-5℃时一般为脆性断裂,表现出两种不同的荷载-位移曲线。综上,本文推荐在实际工程中使用断裂能作为细级配沥青混合料的抗裂设计指标。

参考文献:

[1] 于华洋,马涛,王大为,等.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.
[2] Zhou Z, Gu X, Jiang J, et al. Fatigue cracking performance evaluation of laboratory-produced polymer modified asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement material[J]. Construction and Building Materials, 2019(216): 379-389.
[3] Wu S, Muhunthan B. A mechanistic-empirical model for predicting top-down fatigue cracking in an asphalt pavement overlay[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(6): 1322-1353.
[4] Zeiada W, Liu H, Ezzat H, et al. Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization[J]. Construction and Building Materials, 2022(319): 126063.
[5] Omar S M, Sharif B M, Ahmed H U, et al. Comparison Study between Marshall and Superpave Mix Design Methods[J]. Halabja University Journal, 2021, 6(1): 348-365.

- [6] Qiu C, Du X, Teng J, *et al.* Seismic design method for multi-story SMA braced frames based on inelastic displacement ratio[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021(147):106794.
- [7] Hasan M R M, Hamzah M O, Van De Ven M, *et al.* Disruption of air voids continuity based on permeability loss due to mortar creep[J]. *Construction and Building Materials*, 2016(116):347-354.
- [8] Osman, Sami A. The role of bitumen and bitumen/filler mortar in bituminous mixture fatigue[J]. *University of Nottingham*, 2005.
- [9] Woldekidan M F, Huurman M, Mo L T. Nonlinear response characterization of bituminous mortar[M]. *ASTM International*, 2012.
- [10] Xing C, Tan Y, Liu X, *et al.* Research on local deformation property of asphalt mixture using digital image correlation[J]. *Construction and Building Materials*, 2017(140):416-423.
- [11] Zhan X, Lou T, Ming X. Effect of asphalt mortar on high-temperature properties of asphalt mixture[M]. *ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation*, 2013.
- [12] Harris B M, Stuart K D. Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt[J]. *Asphalt Paving Technology*, 1995(64):54-95.
- [13] Kavussi A, Hicks R G. Properties of bituminous mixtures containing different fillers[J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1997, 66.
- [14] Yang S, Jiang J, Leng Z, *et al.* Feasibility and performance of the Semi-circular Bending test in evaluating the low-temperature performance of asphalt mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2021(269):121305.
- [15] Liu T, Yang S, Braham A, *et al.* An alternative of crack length extension in R-curve analysis of asphalt concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020(265):120741.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

