

文章编号:1007-9629(2022)05-0537-08

沥青混合料饱水过程的强度演化 规律及机理分析

任敏达¹, 冯汉卿¹, 丛 林^{1,*}, 刘人玮²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 华设设计集团北京民航设计研究院有限公司, 北京 101312)

摘要:为研究 SBS 改性沥青混合料在饱水过程中的力学强度演化过程,提出了一种基于圆孔孔边应力集中效应的力学模型,分别计算了非饱水和饱水孔隙的孔边应力.对不同沥青含量的 SBS 改性沥青混合料试件进行水敏感性试验(MIST)和恒温浸水试验,采用间接拉伸强度(ITS)和拉伸强度比(TSR)来表征沥青混合料的强度演化过程,分析孔隙水压循环次数、水浴时间、孔隙水压力和温度对沥青混合料强度的影响.结果表明:在劈裂荷载作用下,孔隙水压抗力消散了薄弱孔隙的应力集中;随着孔隙水压循环次数或恒温水浴时间的增加,试件的 ITS 先减小后增大,TSR 持续增大;沥青混合料在饱水过程中的强度增加,实际上采集到的是沥青混合料自身强度与孔隙水压力的加和;温度对沥青混合料强度的影响比孔隙水压力的影响更加显著.

关键词:沥青混合料;饱水过程;水敏感性试验;孔隙水压循环;间接拉伸试验;强度演化

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.05.014

Strength Evolution Law and Mechanism Analysis of Asphalt Mixtures during Water Saturation

REN Minda¹, FENG Hanqing¹, CONG Lin^{1,*}, LIU Renwei²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

201804, China; 2. Civil Aviation Design and Research Institute, China Design Group, Beijing 101312, China)

Abstract: In order to study early strength evolution of saturated SBS modified asphalt mixture, a mechanical model based on effect of stress concentration at circular hole was proposed, and the pore-edge stress of non-saturated and saturated pore was calculated respectively. Moisture induced susceptibility test and immersion test were carried out for asphalt mixture with different asphalt contents. Then indirect tension test was utilized to obtain the indirect tensile strength and tensile strength ratio. The results show that under the splitting load, the pore water pressure dissipates the stress concentration phenomenon of the weak pore. With the increase of the moisture induced susceptibility test cycle times and the bath time, the indirect tensile strength first decreases and then increases, and the tensile strength ratio continues to increase. The strength of the asphalt mixture in the process of moisture conditioning increases, because the sum of asphalt mixture strength and pore water pressure is collected together in fact. The influence of temperature on the strength of asphalt mixture is more significant than that of pore water pressure.

收稿日期:2021-03-15; 修订日期:2021-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878499);山东省交通运输厅科技计划项目(2021B47);民航机场安全与运行工程技术研究中心开放课题(KFKT2021-07);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(22120200447)

第一作者:任敏达(1992—),男,内蒙古呼和浩特人,同济大学博士生. E-mail: 1811451@tongji.edu.cn

通讯作者:丛 林(1974—),男,山东威海人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail: conglin@tongji.edu.cn

Key words: asphalt mixture; water saturation process; moisture induced susceptibility test; pore-water pressure cycling; indirect tensile test; strength evolution

中国南方地区处于多雨气候条件,沥青路面在水、高温及交通荷载共同作用下,极易发生早期水损坏,如松散、坑洞和唧浆^[1].近年来,国内外学者采用不同试验方法来模拟路面受水、温度和荷载的作用,对沥青混合料早期水损坏进行研究.Varveri等^[2]采用水敏感性试验(MIST)和60℃静态浸水试验,分析了沥青混合料的强度变化规律,发现强度衰减主要与湿度处理条件、浸水温度和浸水时间有关,同时受级配的影响.余海游^[3]采用不同冻融循环方式,研究沥青混合料试件在不同温度影响状况下的水稳定性,发现试件劈裂强度随着温度升高而减小,劈裂强度与温度具有良好的指数相关性.在微观层面,许多学者借助于微观测试技术定量分析沥青混合料的微观损伤机理.李芬等^[4]认为采用分形理论结合CT技术对于定量描述沥青混凝土内部结构十分有效.姜继斌^[5]采用CT扫描技术研究动水冲刷和冻融循环对沥青混合料的微观破坏规律.另外,不少研究者采用有限元方法对微观水损机理进行数值模拟.如Kutay^[6]采用数值模拟的方法,分析了动荷载真空抽吸作用对沥青混合料水分分布及路面孔隙内部剪切应力的影响.Kringos^[7]开发了基于能量法的沥青混合料水损伤计算程序,并用细观数值模拟结果解释水损伤机理.

综上所述,现有的早期水损坏研究集中于物理学指标的测试和微观损伤机理的讨论,在力学理

论层面对机理的分析仍有不足.为此,本文提出了一种基于圆孔孔边应力集中效应的力学模型,计算了沥青混合料非饱水和饱水孔隙的孔边应力.同时采用水敏感性试验和0~7.0 h的恒温浸水试验,研究了沥青混合料在饱水过程中的强度演化规律,分析孔隙水压循环次数与水浴时间、孔隙水压力、温度对沥青混合料强度的影响,为沥青混合料早期水损坏研究提供参考.

1 力学模型

沥青混合料是一种典型的多孔介质材料,其孔隙包括连通孔隙、半连通孔隙和封闭孔隙3种类型.水在连通孔隙中可以自由流动,当水通过半连通孔隙渗流到结构内部,便出现固、液、气三相共存的情况.一般情况下水无法进入混合料内部的封闭孔隙,而往往在外力作用下,沥青混合料产生挤压变形,一部分含水的半连通孔隙会转变成成为封闭孔隙(如图1所示).由于水不可压缩且无法从新形成的封闭孔隙中排出,从而相应增加了沥青混合料的抗压强度.有研究表明,在劈裂条件下沥青混合料内部承受拉压状态,填充在部分内部孔隙中的水起到增大抗压强度的作用^[8].在荷载作用瞬间,沥青路面部分层位的孔隙水压力甚至超过均布轮载而达到1.0 MPa以上^[9].

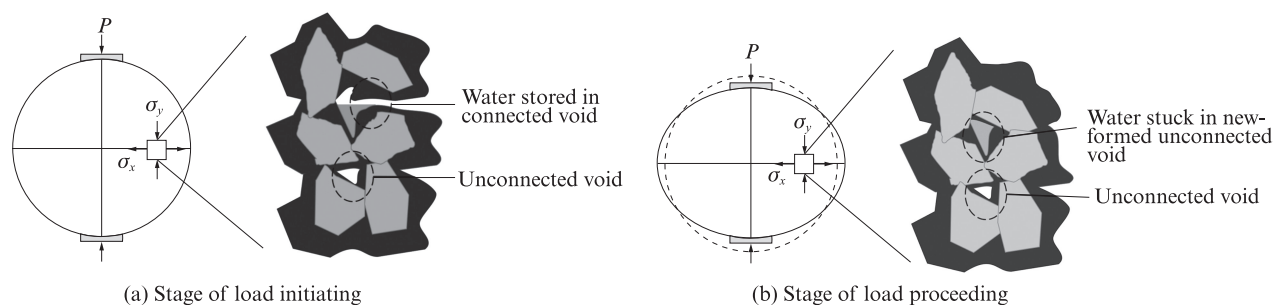


图1 劈裂荷载施加过程沥青混合料试件局部图解

Fig. 1 Local illustration of asphalt mixture during indirect tensile load application

受力的弹性体存在孔边应力集中现象,应力集中程度与孔的形状有关,而与孔的大小无关^[10].一般来说,圆孔的孔边应力集中程度最低,本文假定微孔隙为圆孔进行研究.根据圆孔孔边应力集中效应,分别计算了非饱水和饱水孔隙的孔边应力,具体力学模型及计算如下.

图2为沥青混合料局部微元体受竖直荷载作用示意图.将沥青混合料试件看作弹性体,假设孔隙尺寸远小于试件弹性体的尺寸,且孔隙边距弹性体边界较远,沥青混合料的微孔隙可以简化为微元体模型^[11].由于间接拉伸试验是通过2个弧形压条向圆柱体试件施加压力来实现的,微元体受力示意图可简

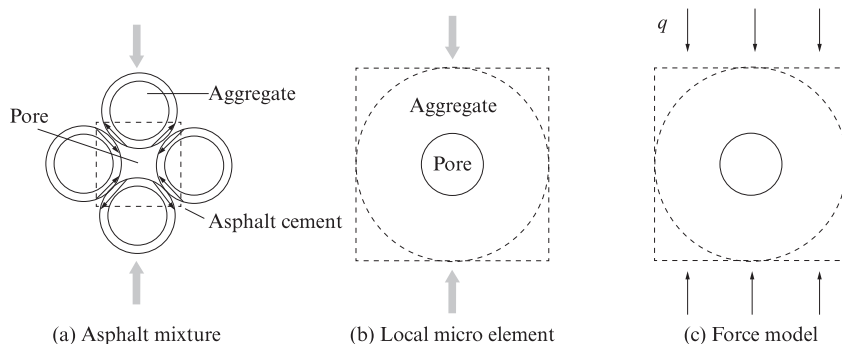


图2 沥青混合料局部微元体受竖直荷载作用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local micro element of asphalt mixture subjected to vertical load

化为图2(c)所示,其中 q 为竖向荷载.

由于圆孔孔边应力集中效应,孔口附近的应力远大

于距孔口边较远处的应力,按弹性理论计算圆孔孔边的应力状态.竖向荷载可分解为如图3所示的两部分.

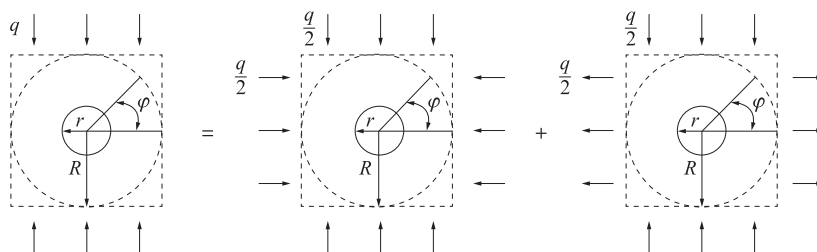


图3 竖向荷载分解示意图

Fig. 3 Schematic diagram of decomposition of vertical load

对图3所示竖向荷载作用下的孔口环向应力 σ_φ 进行计算并叠加,结果为:

$$\sigma_\varphi = -\frac{q}{2} \frac{1 + \frac{r^4}{R^4}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} - \frac{q}{2} \cos 2\varphi \left(1 + \frac{3r^4}{R^4} \right) \quad (1)$$

式中: φ 为计算应力点的角度,rad; r 为沥青混合料中小开口半连通孔隙的半径,m; R 为简化模型的半径,m; ρ 为计算应力点的半径,m.

设 R 远大于 r ,当 $\rho=r$ 时,环向应力为:

$$\sigma_\varphi = -q - 2q \cos 2\varphi \quad (2)$$

当 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3\pi}{2}$ 时,最大环向拉应力为 q ,即非饱水孔隙的孔边最大环向应力等于竖向荷载.

当封闭孔隙被水所填充,由于水是不可压缩的,会产生反作用力,不妨将孔隙水提供的反作用力称之为孔隙水压抗力.图4为沥青混合料局部微元体受竖直荷载和孔隙水压抗力示意图,其中 f 为孔隙水压抗力.

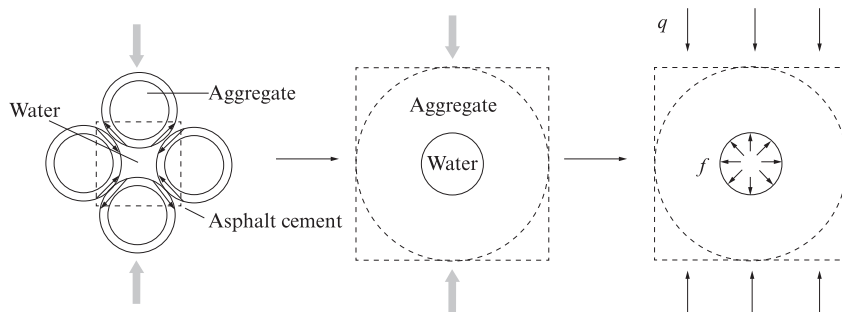


图4 沥青混合料局部微元体受竖直荷载和孔隙水压抗力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of local microelements of asphalt mixture under vertical load and pore-water load

对沥青混合料在劈裂荷载和孔隙水压抗力相互作用下的应力响应做初步分析.平面应力状态下作用在微元体 φ 斜截面上的应力 σ_φ 、 τ_φ 示意图见图5,计算式为:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\varphi - \tau_x \sin 2\varphi \quad (3)$$

$$\tau_\varphi = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\varphi + \tau_x \cos 2\varphi \quad (4)$$

如图5所示,作用在微元体内部任意斜截面上的应力为:

$$\sigma_\varphi = -\frac{q}{2} + \frac{q}{2} \cos 2\varphi \quad (5)$$

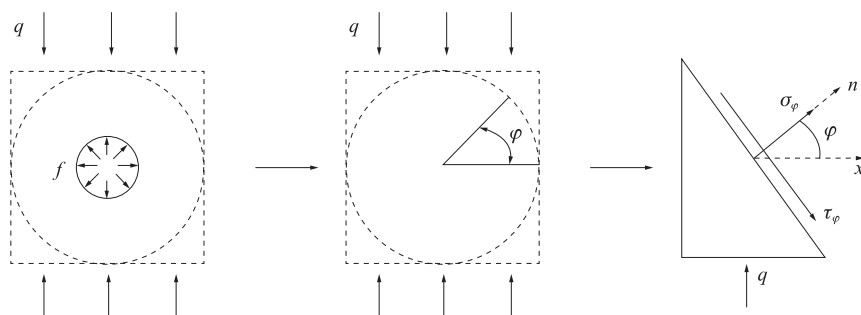
图5 作用在微元体 φ 斜截面上的应力

Fig. 5 Stress of inclined section of microelements

$$\tau_{\varphi} = -\frac{q}{2} \sin 2\varphi \quad (6)$$

显然,当 $\varphi = 0$ 或 π 时,最大正应力为0;当 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3\pi}{2}$ 时,最大剪应力为 $q/2$ 。在饱水状态下,作用在沥青混合料内部任意斜截面上的正应力和剪应力均显著小于非饱水状态下的孔边最大环向应力 q 。因此,沥青混合料处于饱水状态时,在劈裂荷载作用下,填充在孔隙内的水消散了孔口应力集中现象,使内部薄弱位置减少,沥青混合料的强度可能增大。

2 试验

2.1 试件制备

为验证上述力学模型揭示的强度变化规律,采用 Superpave 设计方法,制备了3种沥青含量¹⁾(3.5%、4.5%、5.5%)的SBS改性沥青混合料试件。3.5%、4.5%、5.5%是在相同矿料级配下确定的不同沥青含量,分别代表不同空隙结构的混合料。其中,4.5%为最佳沥青用量,3.5%和5.5%作为对照

组。沥青胶结料采用70#SBS改性沥青,集料为玄武岩。所有试件均以旋转角 1.25° 、竖向压力600 kPa、旋转速度30 r/min、旋转压实次数100次的旋转压实方法成型。成型试件直径为 (101.6 ± 0.25) mm,高度为 (63.5 ± 1.3) mm。沥青混合料矿料级配见图6,性能参数见表1。表中空隙率、VMA和VFA均为沥青混合料的体积指标,其中VMA为试件的矿料间隙率,VFA是试件的有效沥青饱和度;FL是沥青混合料流值。

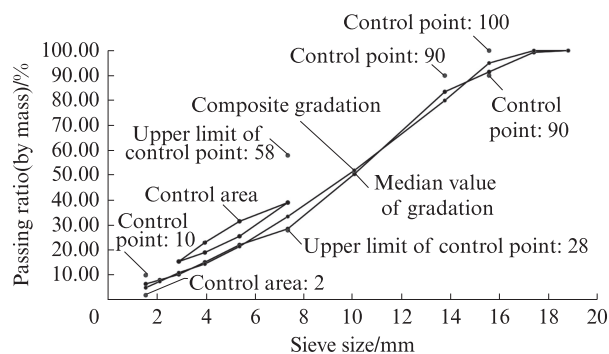


图6 沥青混合料的级配曲线

Fig. 6 Composite grading curve of asphalt mixture

表1 沥青混合料性能参数

Table 1 Properties of asphalt mixture

$w(\text{asphalt})/\%$	Bulk density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Porosity (by volume)/%	VMA/%	VFA/%	Marshall stability/kN	FL/mm
3.5	2.46	4	12.50	69	14.1	5.34
4.5	2.48	2	13.10	86	17.0	4.05
5.5	2.47	0	13.20	100	16.2	5.64

2.2 试验方法

MIST能够模拟实际路面上行驶的汽车在饱和沥青混凝土中产生的重复孔隙水压力,压力循环频率为1 000 times/h。为模拟夏季高温条件,采用美国Instrotek型湿度敏感性测试仪,试验条件设置为在 60°C 的温度下进行0~7 000次的湿度循环处理,以

模拟平均500 pcu/h的交通量,持续0~7.0 h的实际路面情况^[12]。同时,作为对照,将试件浸入恒温水浴箱,在 60°C 、 20°C 的条件下进行0~7.0 h的静态湿度处理。

具体试验设计如下:

(1)将试件放入MIST仪器中进行湿度处理,循环处理次数 n 分别为500、1 000、2 000、3 500、5 500、

1)本文涉及的含量等除特别说明外均为质量分数。

7 000次,分别对应0.5、1.0、2.0、3.5、5.5、7.0的湿度处理时间,试验温度为60℃,孔隙水压276 kPa.

(2)将试件放入恒温水浴箱中进行静态湿度处理,浸水时间 t 分别为0.5、1.0、2.0、3.5、5.5、7.0 h,试验温度为20、60℃.

(3)将经过以上湿度处理后的试件在25℃下保温2.0 h,并在25℃下测试试件的间接拉伸强度(ITS).

为了定量描述SBS改性沥青混合料试件的强度变化,根据JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,对湿度处理前后的试件进行了间接拉伸试验.试验过程如下:

(1)从恒温水槽中取出试件,置于试验台夹具的圆弧形夹条之间.

(2)迅速安装试件变形测定装置,并将记录仪与荷载及位移传感器连接.

(3)开动试验机,使压头与上下压条接触,荷载不超过30 N,迅速调整好数据采集系统到零点位置.

(4)开动数据采集系统,同时启动试验机,以50 mm/min的加载速率向试件加载,直至劈裂破坏.

根据采集数据计算ITS及拉伸强度比(TSR).

$$\text{ITS}=0.006\ 287\ P/h \quad (7)$$

$$\text{TSR}=\frac{\text{ITS}_2}{\text{ITS}_1}\times 100\% \quad (8)$$

式中: P 是试验荷载的最大值,N; h 是试件高度,mm; ITS_2 是经过湿度处理试件的间接拉伸强度,MPa; ITS_1 是未经湿度处理试件的间接拉伸强度,MPa.

3 结果及分析

3.1 孔隙水压循环次数和恒温水浴时间对沥青混合料强度的影响

图7为经过MIST湿度处理以及恒温水浴浸水处理后试件的ITS结果.由图7可见:试件的ITS随着孔隙水压循环次数的增加先减小后增大;试件的ITS随恒温水浴时间的延长先减小后增大;在3种湿度处理条件下,试件的ITS均呈现先减小后增大的变化规律;以孔隙水压循环500次或水浴0.5 h为分界线,在此界线之前ITS逐渐减小,在此界线之后ITS逐渐增大.

经过MIST循环500次或水浴0.5 h,试件的ITS降低幅度最大,说明其强度损伤最大.沥青混合料的强度主要由胶结料的黏聚力、集料间的摩阻力两部

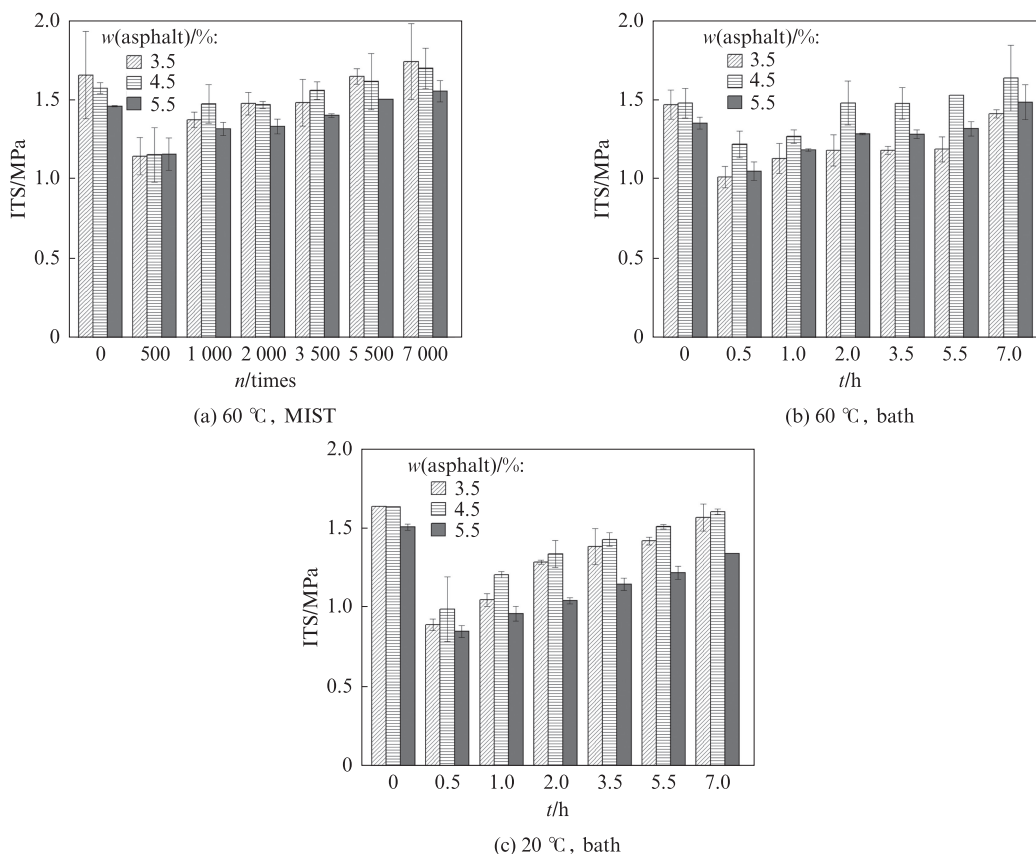


图7 经过MIST湿度处理以及恒温水浴浸水处理后试件的ITS结果

Fig. 7 ITS results of samples after MIST moisture treatment and immersion treatment

分提供.混合料内部一旦有水进入,胶结料的黏聚力就会降低,该黏聚力的降低主要来自于水分对集料-沥青界面处沥青膜的替换,但替换过程十分缓慢^[13-14].因此,在饱水 0.5 h 或 MIST 循环 500 次后,胶结料黏聚力损失对强度减小的作用较为有限,混合料强度的减小主要由集料间摩阻力减小导致.在劈裂荷载作用下,水分从连通孔隙排出,在集料界面间形成一层水膜,降低了沥青混合料的内摩阻力,导致试件强度下降.

在 MIST 循环 500 次或恒温水浴 0.5 h 之后的处理过程中,随着 MIST 循环次数和恒温水浴时间的增加,ITS 逐渐增大,表明沥青混合料的强度得到恢复.根据第 1 节的力学模型分析,随着湿度处理的持续,水逐渐进入半连通孔隙,劈裂荷载导致一部分半连通孔隙闭合,封闭孔隙水压消散了一部分孔口的应力集中现象,导致湿度处理过程后期强度增大.

为进一步说明上述现象,根据式(8)计算了试件的 TSR 值,并对结果进行了线性回归分析,如表 2 所示.由表 2 可见:试件的 TSR 值与湿度处理时间呈显著的正相关关系;在 0~7.0 h 内,TSR 持续增大,这表明湿度处理对试件强度的损伤程度不断减小;当 TSR 大于 1 时,湿度处理对试件强度反而起到了“补强作用”.

从图 7 可以看出,在不同的湿度处理条件下,3 种沥青含量的试件 ITS 和 TSR 指标的变化规律一致,因此排除了试验结果的偶然性.

分析原因可知,作为一种非均质的多相材料,沥青混合料试件不是在长度方向上产生均匀变形而破坏,而是在薄弱位置最先发生破坏^[15].沥青混合料内部孔隙存在应力集中现象,外力作用时有利于微裂纹的延展,更易产生破坏.由第 1 节的力学模型可知,当沥青混合料处于饱水状态时,填充在孔隙内的水消散了孔口应力集中现象,使内部薄弱位置减少.根据有效应力原理,饱水的闭口孔隙增大了沥青混合

表 2 TSR 与湿度处理时间的关系

Table 2 Relationship between TSR and moisture conditioning time

$w(\text{asphalt})/\%$	Moisture conditioning	Regression equation	R^2
3.5	60 ℃, MIST	$y=0.05x+0.75$	0.87
	60 ℃, bath	$y=0.03x+0.71$	0.76
	20 ℃, bath	$y=0.05x+0.59$	0.85
4.5	60 ℃, MIST	$y=0.05x+0.8$	0.85
	60 ℃, bath	$y=0.04x+0.85$	0.84
	20 ℃, bath	$y=0.05x+0.66$	0.86
5.5	60 ℃, MIST	$y=0.03x+0.83$	0.83
	60 ℃, bath	$y=0.04x+0.82$	0.82
	20 ℃, bath	$y=0.04x+0.58$	0.96

料内部的受力面积,提升了抗压强度.因此,饱水过程中的试件产生了“补强作用”,实际采集到的是沥青混合料与孔隙水压的强度加和.

3.2 孔隙水压力对沥青混合料强度的影响

MIST 是一种直接创造孔隙水压力的试验方法,近年来利用 MIST 进行水损害的表征已有很多成果.Vishala 等^[16]研究发现,冻融循环对沥青混合料造成的损伤比 MIST 更大,即温度的影响比孔隙水压力的影响更显著.李达^[17]研究发现,1 次冻融循环对沥青混合料造成的损伤高于 1 000 次孔隙水压循环.

为了研究孔隙水压力对沥青混合料强度的影响,比较了 60 ℃MIST 和 60 ℃静态恒温水浴试验的结果,计算得到 ITS 的变化幅度,如表 3 所示.其中恒温水浴浸水时间 0.5、1.0、2.0、3.5、5.5、7.0 h 的 ITS 数据折算为对应经历 500、1 000、2 000、3 500、5 500、7 000 次 MIST 循环的数据.由表 3 可见:在相同温度下,孔隙水压循环 500 次对应静态恒温水浴 0.5 h,两者导致的 ITS 下降幅度相近;孔隙水压循环 7 000 次对应静态恒温水浴 7.0 h,两者导致的 ITS 增长幅度也相近.因此,在本次试验中,孔隙水压力对沥青混合料试件造成的

表 3 孔隙水压力引起的 ITS 变化幅度
Table 3 Changing range of ITS caused by pore water pressure

$w(\text{asphalt})/\%$	Moisture conditioning	n/times					
		500	1 000	2 000	3 500	5 500	7 000
3.5	60 ℃, MIST	-31	-17	-11	-10	-1	5
	60 ℃, bath	-31	-23	-20	-20	-19	4
4.5	60 ℃, MIST	-24	-6	-7	-1	3	8
	60 ℃, bath	-19	-14	0	0	3	11
5.5	60 ℃, MIST	-21	-10	-9	-4	3	6
	60 ℃, bath	-22	-12	-5	-5	-3	10

强度损伤不明显.

3.3 水浴温度对沥青混合料强度的影响

进一步研究温度对沥青混合料强度的影响,比较了60、20℃静态恒温水浴的试验结果,计算得到ITS变化幅度,如表4所示.观察可知,20℃恒温水浴对沥青混合料造成的强度损伤比60℃恒温水浴造成的强度损伤更大,这可能是因为高温使沥青混

合料发生了短期老化.文献[18]指出,老化导致沥青黏度、针入度和劲度模量增加,进而导致沥青混合料高温抗变形能力提升.文献[19]也指出,短期老化作用会将沥青混合料的初始劲度模量提高30%~40%.总体而言,在本次试验中,温度的影响比孔隙水压力的影响更显著.

表4 不同恒温水浴温度引起ITS变化幅度
Table 4 Changing range of ITS caused by bath temperature

$w(\text{asphalt})/\%$	Moisture conditioning	t/h						/%
		0.5	1.0	2.0	3.5	5.5	7.0	
3.5	60℃, bath	-31	-23	-20	-20	-19	-4	
	20℃, bath	-46	-36	-21	-15	-13	-4	
4.5	60℃, bath	-19	-14	0	0	3	11	
	20℃, bath	-39	-26	-18	-13	-8	-2	
5.5	60℃, bath	-22	-12	-5	-5	-3	10	
	20℃, bath	-44	-36	-31	-24	-19	-11	

4 结论

(1)在劈裂荷载作用下,无水孔隙的孔边最大环向应力等于竖直荷载 q ,饱水孔隙的孔边最大应力等于 $q/2$,孔隙水压消散了薄弱孔隙的应力集中现象.

(2)在0~7.0 h湿度处理时间内,随孔隙水压循环次数或恒温水浴时间的增加,试件的间接拉伸强度先减小后增大,拉伸强度比持续增大.经过孔隙水压循环500次或恒温水浴0.5 h,试件间接拉伸强度的减小幅度最大.

(3)在相同温度下,孔隙水压力对沥青混合料试件造成的强度损伤不明显.温度对沥青混合料强度的影响比循环孔隙水压力更显著.高温使沥青混合料发生短期老化,进而导致模量提升,与20℃恒温水浴相比,经历60℃恒温水浴处理试件的劈裂强度更大.

参考文献:

[1] 孙立军. 沥青路面结构行为学[M]. 上海:同济大学出版社, 2012.
SUN Lijun. Structural behavior of asphalt pavement [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012. (in Chinese)

[2] VARVERI A, AVGERINOPOULOS S, SCARPAS A. Experimental evaluation of long-and short-term moisture damage characteristics of asphalt mixtures [J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 17(1):168-186.

[3] 余海游. 水温荷耦合作用下沥青混凝土水损机制研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2014.

YU Haiyou. Research on water damage mechanism of asphalt concrete under moisture-temperature-loading coupling action[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

[4] 李芬,沈成武,吴少鹏. 基于CT图像的沥青混合料分形特征的研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2006, 23(2):35-37.
LI Fen, CAI Chengwu, WU Shaopeng. Study on fractal characteristic of asphalt mixture based on CT image[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science), 2006, 23(2):35-37. (in Chinese)

[5] 姜继斌. 动水冲刷与冻融循环共同作用下沥青混合料的水稳定研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2019.
JIANG Jibin. Water stability of asphalt mixture with combined dynamic water scouring and freeze-thaw cycles[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese)

[6] KUTAY ME, AYDILEK AH. Dynamic effects on moisture transport in asphalt concrete [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(7):406-414.

[7] KRINGOS N, SCARPAS A, COPELAND A, et al. Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 2: Moisture susceptibility parameters[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2008, 9(2): 129-151.

[8] 冯俊领,郭忠印,陈崇驹,等. 高温多雨条件下沥青混合料水损害模拟研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5):548-552.
FENG Junling, GUO Zhongyin, CHEN Chongju, et al. Simulation study of water damage of asphalt mixtures in high-temperature and rainy weather [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5):548-552. (in Chinese)

[9] 罗志刚,周志刚,郑健龙,等. 沥青路面水损害分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3):32-36.
LUO Zhigang, ZHOU Zhigang, ZHENG Jianlong, et al.

- Analysis of moisture damage of asphalt pavement[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3):32-36. (in Chinese)
- [10] 徐芝纶. 弹性力学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006. XU Zhilun. Elastic mechanics [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 易军艳. 基于界面行为的多孔沥青混合料冻融损伤特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012. YI Junyan. Study on freeze-thaw damage characteristics of porous asphalt mixtures based on interfacial behaviors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] GAO J Q, CHEN H, JI T J, et al. Measurement of dynamic hydraulic pressure in asphalt pavement using fiber bragg grating [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 59-61.
- [13] NEJAD F M, HAMED G H, AZARHOOSH A R. Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(8):1119-1126.
- [14] ARABANI M, HAMED G H. Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(1):66-78.
- [15] 黄拓, 漆帅, 蒋浩浩, 等. 单向拉伸应力状态下沥青混合料强度和刚度特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 460-465.
- HUANG Tuo, QI Shuai, JIANG Haohao, et al. Stress and stiffness characteristics of asphalt mixture under uniaxial tensile stress state [J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2019, 50(2):460-465. (in Chinese)
- [16] VISHALA U, GOLIB A, CHOWDARY V. Comparison of AASHTO T283 and moisture induced sensitivity tester conditioning process on the moisture resistance of bituminous concrete mixtures[C]//3rd Conference of Transportation Research Group of India. 2018:https://www.researchgate.net/publication/323703713.
- [17] 李达. 旧料掺量对温拌再生沥青混合料耐久性的影响分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5):25-31, 48. LI Da. Influence of RAP content on durability of warm-mix recycled asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2018, 38(5):25-31, 48. (in Chinese)
- [18] 李新军, 李立寒. 现场老化对沥青胶结料性能的影响(英文)[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2):167-176. LI Xinjun, LI Lihan. Effect of field aging on properties of asphalt binder [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(2):167-176. (in English)
- [19] 成志辉. 老化对沥青路面的影响[J]. 湖南交通科技, 2005(3): 44-45, 71. CHENG Zhihui. Influence of aging on asphalt pavement [J]. Hunan Traffic Science and Technology, 2005(3):44-45, 71. (in Chinese)

(上接第 536 页)

- TANG Peng. Effect of sodium silicate solution concentration, temperature and sodium methyl silicate on silicate conversion coatings on hot-dip galvanized steel [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 初始含水率和改良材料掺量对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(3): 39-43, 49. YANG Jun, TONG Lei, ZHANG Guodong, et al. Effect of initial moisture content and improved material amount on shear strength of expansive soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3):39-43, 49. (in Chinese)
- [16] 王章琼, 白俊龙, 叶张颜. 过量石灰对细粒土改良效果“负效应”机理的宏-细观试验研究[J]. 武汉工程大学学报, 2020, 42(3): 316-320. WANG Zhangqiong, BAI Junlong, YE Zhangyan. Mechanism of negative effect of excessive lime addition on improvement of fine grained soil by macro-microscopic test [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2020, 42(3):316-320. (in Chinese)
- [17] 范明桥, 盛金保. 土强度指标 φ, c 的互相关性[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4):100-104. FAN Mingqiao, SHENG Jinbao. The correlation of soil strength index φ and c [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4):100-104. (in Chinese)
- [18] 蔡奕, 施斌, 刘志彬, 等. 团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12):1482-1486. CAI Yi, SHI Bin, LIU Zhibin, et al. Experimental study on effect of aggregate size on strength of filled soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12):1482-1486. (in Chinese)
- [19] 孟凡奇, 李广杰, 王庆兵, 等. 基于功效系数法的泥石流灾害预警研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3):835-840. MENG Fanqi, LI Guangjie, WANG Qingbing, et al. Research on early warning of debris flow based on efficacy coefficient method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3):835-840. (in Chinese)