

基于虚拟劈裂试验研究影响沥青混合料 低温抗裂性能的因素

吴俊强¹, 吴文亮², 卢家志¹

(1.广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东 广州 510623; 2.华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘 要: 首先使用 X-ray CT 扫描粗集料, 在软件 PFC3D 中重建粗集料颗粒, 按照集料级配设计随机生成各档集料, 构建沥青砂浆相, 同时结合空隙相的实际分布, 在重力作用和伺服机制控制下生成沥青混合料虚拟试件; 随后设置合适的接触模型以及微观参数, 进行虚拟劈裂试验, 对影响沥青混合料低温性能的因素进行分析。结果表明: 使用虚拟劈裂试验来研究沥青混合料的低温抗裂性能是可行的; 增大沥青砂浆间以及粗集料与沥青砂浆间的黏结强度可以提升沥青混合料的低温抗裂性能; 增大粗集料体积分数和空隙率会减弱沥青混合料的低温抗裂性能; 粗集料摩擦系数与沥青混合料的低温抗裂性能无明显相关性。

关键词: 沥青混合料; 劈裂抗拉强度; 低温抗裂性能; 离散元法; X-ray CT; 虚拟劈裂试验

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)02-0204-06

0 引 言

沥青混合料在低温下表现为弹性体, 在温度和荷载应力的作用下容易发生开裂破坏。沥青路面出现低温开裂的原因有很多^[1], 外在原因有各种气候、水文和地质条件等, 内部原因有沥青和集料的特性等。沥青混合料的低温抗裂性能一直是沥青路面重要的路用性能。针对沥青路面出现的低温开裂病害, 国内外学者进行了大量的研究。谭忆秋等^[2]利用荷载、水、温度三者共同参与的动水作用试验方法, 设置了沥青标号、级配类型、空隙率 3 种变量, 探究了动水作用对沥青混合料低温性能的影响。Wang 等^[3]通过冻断试验, 研究了沥青类型、水泥基浆类型和骨架空隙率对半柔性路面材料低温性能的影响。陆学元等^[4]研究了不同温度下沥青混合料的劈裂强度受各种因素影响的程度。另一些学者^[5-6]则通过数值分析方法对沥青混合料的低温抗裂性能进行了研究。宋建民等^[7]利用数值分析法以及有限元模型分析了相关参数对沥青路面温度应力和应变的作用。Guo 等^[8-9]基于离散元法对沥青混合料的劈裂试验进行了虚拟仿真。季学亮等^[10]利用软件 PFC2D 研究了集料的模型、外观几何、加载方向等因素对虚拟沥青

混合料低温抗裂性能的影响。郭红兵等^[11]通过软件 PFC2D 研究了集料公称最大粒径、空隙率、油石比对开级配 OLSM-25 的影响, 发现 OLSM-25 的间接拉伸抗裂效果良好。冯新军等^[12]利用低温扫描电镜获取路面低温破裂表面的图像, 并运用图像处理技术来评价老化和再生沥青的低温抗裂性。然而, 目前很少有研究综合利用 CT 扫描技术和软件 PFC3D 对沥青混合料的低温抗裂性能进行较为精确的分析。因此, 本研究拟利用 X-ray CT 扫描技术和软件 PFC3D 对沥青混合料进行虚拟模型构建, 随后对其进行虚拟劈裂试验以研究沥青砂浆间的黏结强度、沥青砂浆与粗集料间的黏结强度、粗集料体积分数、粗集料摩擦系数以及空隙率对沥青混合料低温抗裂性能的影响。

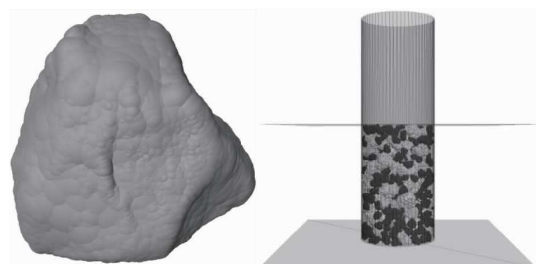
1 沥青混合料的虚拟模型构建

1.1 粗集料骨架结构模型的构建

首先对粗集料颗粒进行筛选, 筛选出多颗具有代表性的粗集料颗粒并用清水清洗, 烘干之后使用 CT 进行逐层扫描; 其次对获得的多层图像进行二值化处理, 利用 Matlab 获取粗集料颗粒的轮廓点坐标, 并将轮廓点坐标数据导入 PFC3D 中生成粗集料 Clump 模型, 如图 1(a)所示; 最后设置圆柱形墙体, 在其中根据粗集料级配随机生成粗集料颗粒, 同时设置重力 and 伺服控制参数, 使得粗集料压实并生成粗集料骨架模型, 如图 1(b)所示。

收稿日期: 2021-05-07

作者简介: 吴俊强(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路建设工作。



(a)粗集料模型 (b)粗集料骨架结构模型

图1 粗集料模型和粗集料骨架结构模型

1.2 沥青砂浆模型的构建

沥青砂浆是粗集料间的黏结体,其对于沥青混合料的低温抗裂性能有着重要的影响。在粗集料骨架模型构建完成之后,在沥青混合料内部用 ball generate 等命令生成规则排列的半径为 1 mm 的小球,如图 2 所示。通过算法遍历所有的小球,将与粗集料 Clump 模型重合的小球单独设置为团粒 Clump,剩下的小球则设置为沥青砂浆相,于是包括粗集料和沥青砂浆的沥青混合料模型得以建立。



图2 规则排列小球模型

1.3 空隙模型的构建

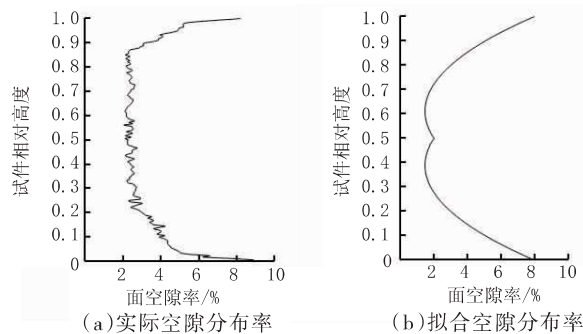
沥青混合料中广泛分布着空隙,空隙大小和分布位置都会对沥青混合料的低温抗裂性能造成较大影响。以往很多模型并没有考虑空隙在实际沥青混合料试件中的分布,只是简单地将模型中小球之间的空隙等同于实际空隙,这样的设置是不正确的。本研究参考了张建同^[13]的研究,根据其研究成果中的空隙率函数来设置本模型中的空隙,以保证较为精确的模拟。空隙率的函数关系式为:

$$F = m(h-0.5)^2 - n| h - 0.5 | + t \quad (1)$$

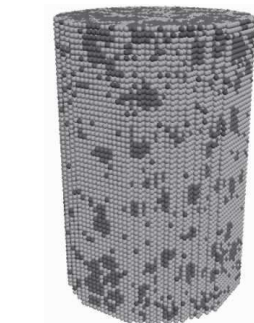
式中: F 为沥青混合料圆柱形试件某处的空隙率; h 为沥青混合料圆柱形试件的相对高度,取值范围为 0~1; m 、 n 、 t 为函数关系式的参数。

图 3(a)为实验室实际沥青混合料试件的空隙分布率,将试件中的空隙分布率利用式(1)进行拟合,可以得到式(1)中 3 个参数值分别为 43.51、9.82、2.16,而后将其代入到式(1)中可以得到拟合的空隙

分布率,如图 3(b)所示。根据空隙率函数关系式,对沥青混合料试件不同高度处的规则小球进行删除,最终得到含有粗集料、砂浆和空隙的沥青混合料试件虚拟模型,如图 3(c)所示,图中黑色小球为粗集料、灰色小球为沥青砂浆、白色小球为空隙。



(a)实际空隙分布率 (b)拟合空隙分布率



(c)沥青混合料试件虚拟模型

图3 空隙分布率和沥青混合料试件虚拟模型

2 接触模型及细观参数

2.1 接触模型的选定

沥青混合料试件虚拟模型的实体部分由粗集料和沥青砂浆所构成,因此不同的实体部分需要使用不同的模型进行力学描述。虚拟模型中的粗集料被定义为不会发生变形破坏,因此粗集料内部不用定义模型。但是粗集料颗粒相互之间存在力学行为,因此需要为其选定模型。粗集料颗粒是刚性体,在受到外在荷载作用时,接触力发生在点范围内,而且相互之间只存在线性力,所以粗集料颗粒之间的接触采用线性刚度模型。沥青砂浆的特性在不同温度下的表现是不一样的,在高温下为黏性体,中温下为黏弹性体,低温下为弹性体,所以需要根据温度选择接触模型。本次研究为低温劈裂试验,温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此使用接触黏结模型来描述与沥青砂浆有关的接触行为。

2.2 线性刚度模型参数的确定

粗集料颗粒间是线性刚度接触,线性刚度模型认为颗粒之间存在连接单元中心的弹性梁。线性刚度接触模型的细观参数主要有法向接触刚度 k_n 、切向接触刚度 k_s 和摩擦系数 f 。单个实体颗粒单元细观参数法向接触刚度 k_n 、切向接触刚度 k_s 表达式为:

$$k_n = \frac{EA}{L} \tag{2}$$

$$k_s = \frac{EA}{2L(1+\nu)} \tag{3}$$

$$\frac{1}{k_n} = \frac{1}{k_n^A} + \frac{1}{k_n^B} \tag{4}$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_s^A} + \frac{1}{k_s^B} \tag{5}$$

式中: E 为粗集料弹性模量; L 、 A 分别为等价梁长度、面积; ν 为粗集料泊松比。

粗集料的摩擦系数由对比试验获得,分别在实验室和软件中进行集料单轴贯入试验。在试验中,虚拟试验设置了5个摩擦系数,分别为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5;实际试验按照规范正常进行试验,试验结果如图4所示。

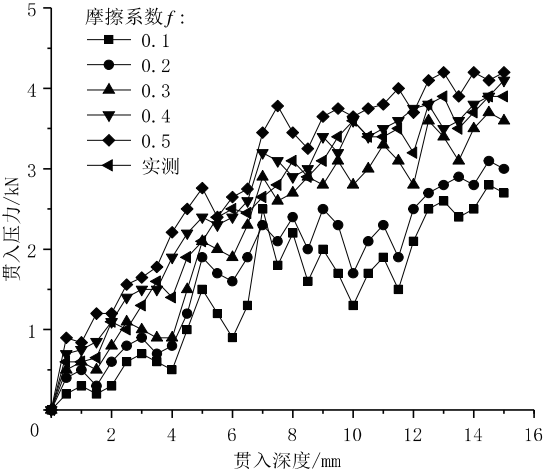


图4 集料单轴贯入试验

由图4可知,实际试验的单轴贯入试验曲线与摩擦系数为0.3、0.4的虚拟贯入试验曲线较为接近,因此摩擦系数 f 取值为0.35。本次试验所采用的粗集料为玄武岩,将各项参数代入到式(2)、式(3)中可得各项细观参数,具体如表1所示。

表1 线性刚度模型的细观参数

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	法向接触刚度 $k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	切向接触刚度 $k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	摩擦 系数 f
玄武岩	55	0.25	8.64×10^7	3.46×10^7	0.35

2.3 接触黏结模型参数的确定

-10℃低温下与沥青砂浆有关的接触模型均可以采用接触黏结模型,此模型下的细观参数主要有沥青砂浆单元间的法向接触刚度 k_n^1 、切向接触刚度 k_s^1 、黏结强度 f_1 ;粗集料与沥青砂浆单元间的法向接触刚度 k_n^2 、切向接触刚度 k_s^2 、黏结强度 f_2 。

在-10℃下对沥青砂浆进行单轴静载蠕变试验,拟合得到蠕变曲线,进而得到宏观参数,随后根据宏观参数进行相关计算即可得到单元间的细观参

数。沥青砂浆间的黏结强度以及沥青砂浆与粗集料间的黏结强度可以通过沥青混合料在-10℃下的劈裂抗拉强度值进行估算,将估算值代入虚拟模型中进行劈裂试验,并将虚拟试验结果与实际试验结果进行比较,一直调整估算值直到2种试验结果类似,最终得到各项细观参数。接触黏结模型的细观参数见表2。

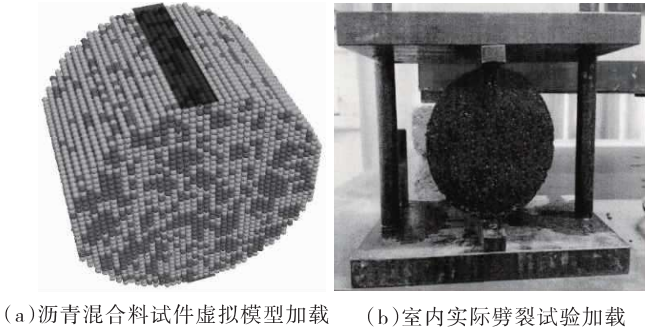
表2 接触黏结模型的细观参数

法向接触 刚度 $k_n^1/$ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向接触 刚度 $k_s^1/$ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	法向接触 刚度 $k_n^2/$ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向接触 刚度 $k_s^2/$ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	黏结 强度 f_1/N	黏结 强度 f_2/N
2.38×10^6	1.01×10^6	4.63×10^6	1.96×10^6	18	13

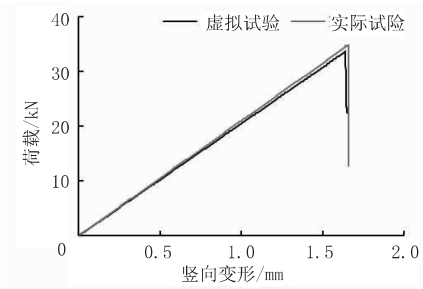
3 沥青混合料低温抗裂性能影响因素

3.1 虚拟试件的构建与分析

上述模型以及细观参数确定之后还需要对其进行检验。检验方法是:在实验室中按照SMA-13的级配制备试件并在-10℃低温下进行实际的劈裂试验;在软件中按相同的级配成型半径为50.8mm、高度为63.5mm的沥青混合料试件虚拟模型,设置各单元间的细观参数,并进行-10℃低温下的虚拟劈裂试验。试件虚拟模型加载示意、室内实际试验加载示意、实际试验与虚拟试验的竖向变形-荷载曲线见图5;虚拟劈裂试件内部的拉应力与裂缝发展情况见图6。离散元模型的小球单元所模拟的空隙比实际试件的空隙更大,为了避免空隙变大对试件破坏过程的影响,在进行虚拟劈裂加载时,不删除小球模拟空隙。



(a)沥青混合料试件虚拟模型加载 (b)室内实际劈裂试验加载



(c)竖向变形-荷载曲线对比

图5 沥青混合料试件虚拟模型加载和室内实际试验加载及其竖向变形-荷载曲线对比

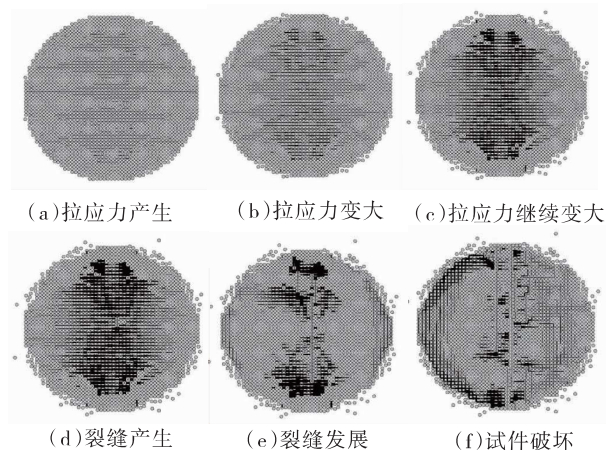


图6 虚拟劈裂试件内部拉应力与裂缝情况

由图5(c)可知,虚拟劈裂试验的竖向变形-荷载曲线与室内实际试验的竖向变形-荷载曲线相似,两者差距不明显;虚拟试验和室内实际试验的2条竖向变形-荷载曲线都是先开始上升,随后骤然下降,两者趋势保持一致,因此试件在虚拟试验与室内实际试验下具有相同的破坏形式。图6中黑色线条的粗细代表了拉应力的大小;图6(d)、(e)、(f)中

的灰色线条代表了裂缝。可以看出,随着劈裂加载的进行,试件中不断增大的拉应力导致该位置出现纵向裂缝,而裂缝的产生会使该处拉应力减小,通过应力在上下方向的传递而致使裂缝进一步发展;加载强度的不断增大使多个位置发生纵向裂缝并发展至贯穿试件,试件最终断裂破坏。2种试验方法下沥青混合料试件的最大荷载值相差仅为1.32 kN,竖向变形相差仅为0.02 mm,所以通过离散元软件来构建虚拟沥青混合料试件,并通过-10℃劈裂试验来研究其低温抗裂性能是可行的。

3.2 沥青混合料低温抗裂性能影响因素评价

通过离散元软件PFC3D建立虚拟沥青混合料试件,并进行低温劈裂试验,以研究沥青砂浆间的黏结强度、集料摩擦系数及其体积分数等因素对沥青混合料低温抗裂性能的影响。本研究采用的SMA-13级配见表3,其他设置为:试验温度为-10℃、加载速率为1 mm/min;沥青混合料试件直径101.6 mm、高度63.5 mm,压条宽度为12.7 mm。

表3 沥青混合料试件级配

级配类型	筛孔通过率/%										
	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
SMA-13	100	100	93.8	60.8	25.6	21.9	18.1	15.3	13.6	11.3	9.2

3.2.1 沥青砂浆间的黏结强度

沥青砂浆间的黏结强度决定了沥青砂浆间的抗拉强度,因此对沥青混合料的抗拉强度有着重要影响。为了探究沥青砂浆间的黏结强度对沥青混合料低温抗裂性能的影响,设置了5种黏结强度(10 N、20 N、30 N、40 N、50 N)进行虚拟劈裂试验,试验结果见图7。

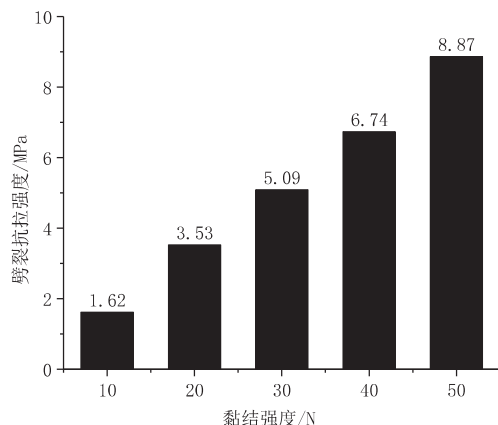


图7 沥青砂浆间的黏结强度对混合料低温抗裂性能的影响

由图7可知,增大沥青砂浆间的黏结强度,沥青混合料的劈裂抗拉强度也同样增大,而且沥青砂浆间的黏结强度每增大10 N,沥青混合料的劈裂抗拉

强度至少增加31.6%。但是随着沥青砂浆间的黏结强度越来越大,沥青混合料劈裂抗拉强度的增加幅度也从117.9%减小到31.6%。这表明沥青砂浆间黏结强度较低时,增加其强度可以使得沥青混合料试件的劈裂抗拉强度得到翻倍增长。也就是说,增大沥青砂浆间的黏结强度可以显著增大沥青混合料的劈裂抗拉强度,增强其低温抗裂性能。

3.2.2 沥青砂浆与粗集料间的黏结强度

沥青砂浆与粗集料间的黏结强度同样对沥青混合料的整体强度有着很大的影响,为了探究其对沥青混合料低温抗裂性能的影响,设置了5种沥青砂浆与粗集料间的黏结强度(10 N、20 N、30 N、40 N、50 N)并进行虚拟劈裂试验,试验结果见图8。

由图8可知,与沥青砂浆间黏结强度对沥青混合料的影响一样,随着沥青砂浆与粗集料间黏结强度的增大,沥青混合料的劈裂抗拉强度也在逐渐增大。沥青砂浆与粗集料间的黏结强度每增大10 N,沥青混合料的劈裂抗拉强度至少增大17.8%。但是随着沥青砂浆与粗集料间的黏结强度越来越大,沥青混合料劈裂抗拉强度的增加幅度也从105.9%减小到17.8%。这表明沥青砂浆与粗集料间黏结强度较

低时,增加其强度可以使得沥青混合料试件的劈裂抗拉强度得到翻倍增长。增大沥青砂浆与粗集料间的黏结强度可以显著增大沥青混合料的劈裂抗拉强度,增强其低温抗裂性能,但是总体上其对沥青混合料劈裂抗拉强度的影响稍弱于沥青砂浆间黏结强度的影响。

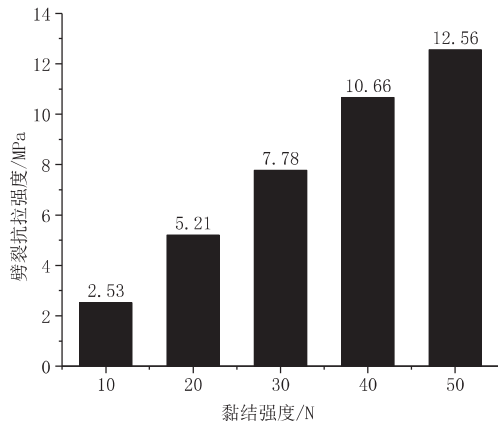


图8 沥青砂浆与粗集料间的黏结强度对沥青混合料低温抗裂性能的影响

3.2.3 粗集料体积分数

粗集料的体积分数越大,则沥青混合料中粗集料与沥青砂浆间的接触越多。为了探究粗集料体积分数对沥青混合料低温抗裂性能的影响,成型了5种粗集料体积分数(40%、45%、50%、55%、60%)的沥青混合料模型试件并进行虚拟劈裂试验,试验结果见图9。

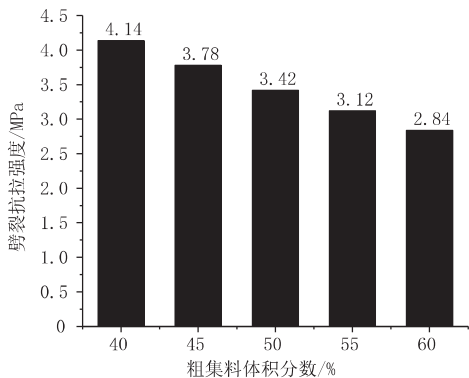


图9 粗集料体积分数对沥青混合料低温抗裂性能的影响

由图9可知:当粗集料体积分数从40%增加到60%时,沥青混合料的劈裂抗拉强度一直在减小,减小的幅度一直稳定在9.5%~10.5%。这说明粗集料体积分数增加的幅度相同时,沥青混合料的劈裂抗拉强度减小的幅度相差不大;当粗集料体积分数增大时,沥青混合料的低温抗裂性能会降低。

3.2.4 粗集料摩擦系数

粗集料的摩擦系数是粗集料比较重要的性质,反映粗集料表面的粗糙程度,越粗糙表征其表面纹

理越丰富。为了探究粗集料摩擦系数对沥青混合料低温抗裂性能的影响,试验中成型了5种粗集料摩擦系数(0.1、0.2、0.3、0.4、0.5)的沥青混合料模型试件并进行虚拟劈裂试验,试验结果见图10。

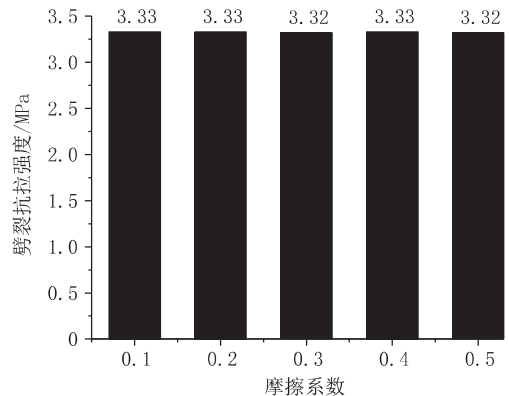


图10 粗集料摩擦系数对沥青混合料低温抗裂性能的影响

由图10可知,不同粗集料摩擦系数下,沥青混合料的劈裂抗拉强度最大为3.33 MPa,最小为3.32 MPa,基本没有发生变化。因此可以得出结论,增大或者减小粗集料的摩擦系数,沥青混合料的劈裂抗拉强度基本不会受到影响,其低温抗裂性能也无明显变化。可能的原因是,粗集料的表面纹理属于微观构造,会影响集料与沥青砂浆间的接触,若粗集料表面非光滑,则对沥青有一定的黏附性。有研究发现^[14],集料表面越粗糙,混合料的抗剪性能和承载能力越强,达到一定粗糙度后则影响程度变弱,而本文的劈裂试验属于受拉破坏,因此粗集料的摩擦系数对沥青混合料低温抗裂性能的影响较小。

3.2.5 空隙率

空隙率的大小代表着沥青混合料试件中空隙的多少,空隙率越大说明沥青砂浆和集料所占比例越少。为了探究空隙率对沥青混合料低温抗裂性能的影响,试验中成型了5种空隙率(2%、4%、6%、8%、10%)的沥青混合料模型试件并进行虚拟劈裂试验,试验结果见图11。

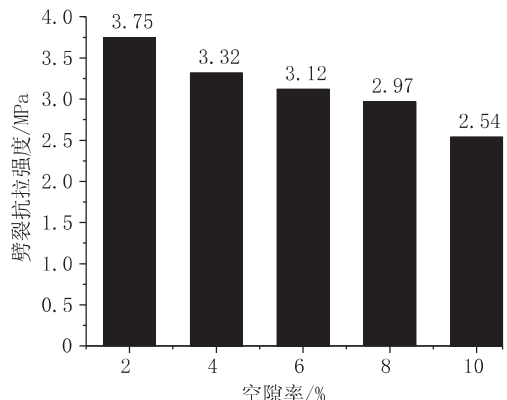


图11 不同空隙率沥青混合料的低温抗裂性能

由图 11 可知,随着沥青混合料试件的空隙率从 2% 增加到 10%, 沥青混合料的劈裂抗拉强度从 3.75 MPa 降低到了 2.54 MPa, 降低的幅度至少为 5.0%。这是因为随着荷载的增大, 沥青混合料试件内部实体部分的拉应力逐渐增加, 而内部空隙处最容易出现裂缝。空隙率越大, 混合料中出现裂缝的地方越多, 其劈裂抗拉强度也就越小, 低温抗裂性能越差。

4 结 语

(1) 从虚拟劈裂试验与室内劈裂试验的结果来看, 2 种试验结果较为相近, 虚拟试验最大荷载值的相对误差为 -3.8%, 竖向变形为 -1.2%。因此, 在离散元软件中进行虚拟劈裂试验来研究沥青混合料的低温抗裂性能是可行的。

(2) 增大沥青砂浆间的黏结强度或是沥青砂浆与粗集料间的黏结强度, 都可以增加沥青混合料的低温抗裂性能, 但随着这 2 种黏结强度的增加, 这种影响均呈减弱趋势。比较 2 种黏结强度对沥青混合料低温抗裂性能的影响大小可以发现, 沥青砂浆间的黏结强度对沥青混合料低温抗裂性能的影响更为显著; 增大 2 种黏结强度, 所增加的沥青混合料劈裂抗拉强度的最小幅度分别为 31.6% 和 17.8%。

(3) 增大粗集料体积分数和沥青混合料空隙率, 会降低沥青混合料的低温抗裂性能, 其劈裂抗拉强度减小的幅度分别约为 10% 和 5%。

(4) 增加或者减小粗集料摩擦系数, 对沥青混合料的低温抗裂性能基本无影响。

参考文献:

[1] 董希斌, 赵熙. 沥青路面低温开裂的影响因素分析[J]. 东北林业大

学学报, 2006(5): 76-77.

[2] 谭忆秋, 李晓琳, 胡斌. 动水作用对沥青混合料低温抗裂性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 119-22.

[3] WANG Liming, JUAN Haiwen. Research on the influence factors of low-temperature crack resistance of semiflexible pavement materials based on freezing test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2020, 14(3): 37-43.

[4] 陆学元, 张素云. 不同温度下沥青混合料劈裂强度的影响因素[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(6): 1178-1182.

[5] 李萍, 吴中, 马科, 等. 基于 SCB 试验的沥青混合料低温抗裂性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(2): 238-241.

[6] 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. 基于 SCB 试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 50-57.

[7] 宋健民, 曾力, 白鹏飞. 基于数值分析法对沥青路面低温缩裂纹的研究[J]. 公路工程, 2016, 41(2): 37-43, 52.

[8] GUO Hongbing, CHEN Shuanfa. Numerical analysis on the splitting test of open-graded large stone asphalt mixture based on discrete element method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2015, 9(2): 7-12.

[9] SHAN Jingsong, DU Yang, FAN Dahai, et al. Determination of parameters of the discrete element bond model for asphalt mixture based on splitting test[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1): 12-24.

[10] 季学亮, 杨敏, 周彬, 等. 沥青混合料低温劈裂试验离散元数值模拟影响因素分析[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(9): 18-23.

[11] 郭红兵, 陈拴发. 开级配大粒径沥青碎石混合料劈裂试验的离散元数值分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(11): 22-26, 40.

[12] 冯新军, 陈旺, ALI Mokhtari, 等. 利用 Cryo-SEM 和图像处理技术评价老化和再生沥青低温抗裂性的新方法[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 203-208.

[13] 张建同. 沥青混合料剪胀力学行为分析及数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

[14] 万蕾. 基于内聚力模型和三维离散元法沥青混合料劈裂试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

(上接第 203 页)

cations, Report Number: CP2C-2010-102TM Technical Memo [R]. 2010.

[5] Zanzotto L, Kennepohl G. Development of Rubber and Asphalt Binders by Depolymerization and Devulcanization of Scrap Tires in Asphalt [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996(1530): 51-58.

[6] The University Of Wisconsin-Madison A R G. The Effects of digest-

ing Crumb Rubber in Modified Binders [R]. adison, WS: The University of Wisconsin—Madison Asphalt Research Group in collaboration with the Recycled Materials Resource Center, 2011.

[7] TANG N, HUANG W, HU J, et al. Rheological characterisation of terminal blend rubberised asphalt binder containing polymeric additive and sulphur [J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 19(6): 1288-1300.