

内聚力模型在泡沫沥青混合料 离散元模拟中的应用

梁何浩¹, 王端宜^{1†}, 邓志刚², 梁遐意¹, 徐驰¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州, 510641;

2. 广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁, 530000)

摘要:为研究内聚力本构模型对泡沫沥青冷拌混合料的适用性,基于内聚力本构模型,结合 Matlab 软件“凸包法”和三维 ODEC 算法,建立了泡沫沥青冷拌混合料的三维模型试件。同时,对不同级配的混合料进行模拟劈裂试验,用对比分析和统计分析的方法观察数值模拟与室内试验的结果。研究表明:“凸包法”和三维 ODEC 算法相结合能够模拟泡沫沥青冷拌混合料中的粗集料棱角性,数值模拟的劈裂试验强度-变形曲线发展趋势和实际的劈裂试验规律基本相符。模拟数据与试验数据具有良好的相关性,表明内聚力本构模型的三维离散元模拟能有效应用于泡沫沥青冷拌混合料设计。

关键词:沥青混合料;数值模拟;泡沫沥青;内聚力模型;离散元;劈裂试验

中图分类号:U414

文献标志码:A

Application of Cohesive Zone Model in Discrete Element Simulation of Foamed Asphalt Mixture

LIANG Hehao¹, WANG Duanyi^{1†}, DENG Zhigang², LIANG Xiayi¹, XU Chi¹

(1. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangxi Transportation Research & Consulting Co., Ltd, Nanning 530000, China)

Abstract: This study dealt with the applicability of Cohesive Zone Model (CZM) on the cold-mix foamed asphalt concrete by analyzing the results of both numerical simulation and laboratory tests comparatively and statistically. Based on CZM, 3D model specimens were built up for cold-mix foamed asphalt concrete by applying Matlab Convex Hull Algorithm and 3D ODEC Algorithm. Meanwhile, virtual splitting tests of the mixtures with different gradations were also carried out. The study indicates that the combination of Convex Hull and 3D ODEC Algorithm is able to simulate the coarse aggregates angularity. The simulated trend of strength-deformation curve obtained from the virtual splitting test is similar to the actual pattern, which suggests that the CZM-based 3D discrete element simulation can be applied to the design of cold-mix foamed asphalt concrete.

Key words: asphalt mixtures; numerical simulation; foamed asphalt; cohesive zone model; discrete element method; splitting test

* 收稿日期:2018-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278203), National Natural Science Foundation of China(51278203)

作者简介:梁何浩(1990—),男,广东佛山人,华南理工大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: tcdywang@scut.edu.cn

泡沫沥青冷拌工艺是将集料常温拌合后,通过专门设备喷入泡沫沥青,经过拌和、碾压成型的沥青混合料施工工艺,是一种节能环保、性能较好的道路施工技术.劈裂强度是泡沫沥青混合料设计的关键指标之一,劈裂试验也是研究泡沫沥青混合料破损机理的重要方式.但是传统的劈裂试验无法诠释混合料的破损机理,劈裂试验的数值模拟一直是混合料微细观力学分析的重要方式.王端宜等^[1]从微细观尺度研究沥青混合料,验证了虚拟劈裂试验方法评价混合料的可行性.裴建中等^[2]利用二维离散元数值模拟马歇尔试件的间接拉伸试验,阐释马歇尔试件对荷载的动态响应规律.郭红兵等^[3]采用二维离散元方法对几种特殊级配混合料的劈裂强度进行数值模拟,分析级配、孔隙率、公称最大粒径及油石比对劈裂试验的影响.万蕾^[4]基于内聚力模型和三维离散单元法构建劈裂试验的数值模型,研究沥青混合料在劈裂试验过程中的微观力学性能等.但已有研究主要针对热拌沥青混合料,尚未涉及对于泡沫沥青冷拌混合料的劈裂试验离散元研究.

随着颗粒流软件(Particle Flow Code)的应用,离散元方法逐渐被引入到沥青混合料力学性能分析中^[5-6].离散元方法的颗粒程序可反映沥青混合料的不连续特性,从细观角度借助劈裂试验研究集料性质对沥青混合料破损机理的影响,建立的虚拟试验的重复性和再现性较好.基于上述背景,本文采用三维离散元单元法构建泡沫沥青冷拌混合料结构模型,并进行劈裂试验数值模拟,最后通过实际试验验证模型的合理性与准确性.

1 内聚力模型及离散元分析法

近年来,内聚力模型应用于热拌沥青混合料的虚拟断裂试验中,能够较好地模拟沥青混合料裂纹扩展的全过程及开裂过程中混合料力学性能的变化^[7-9].已有研究表明,双线性内聚力模型尤其适用于沥青混合料^[10-11].内聚力模型在国内更多的是结合有限元法进行分析使用,与离散元方法结合分析较少,故本研究尝试将双线性内聚力模型应用于泡沫沥青混合料劈裂试验离散元模拟.双线性内聚力模型的 $t-\delta$ 曲线如图1所示,参数包括:内聚力 t ;裂缝面的相对位移 δ ;内聚力达到 T_c 时裂缝面的位移 δ_0 ;裂缝完全形成时2个裂缝面的张开位移 δ_f ;断裂能 G_c 等于 $t-\delta$ 曲线下方的面积,表达式如式(1);开裂强度 T_c 为材料的抗拉强度,内聚力所能达到的最大

值.模型主要由两部分组成:即在初始损伤发生前($\delta \leq \delta_0$)的线性关系和单元达到初始损伤后($\delta > \delta_0$)的线性软化过程.在理论上,初始损伤处的内聚力达到 T_c 后材料出现开裂破坏.

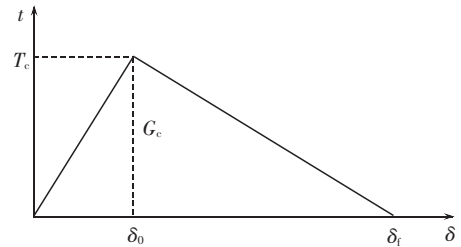


图1 双线性内聚力模型曲线

Fig.1 Bilinear cohesive zone model

$$G_c = \frac{1}{2} T_c \delta_f. \quad (1)$$

材料的断裂能获取较为复杂,一般需通过精细的试验获取.从式(1)看出断裂能也可以通过抗拉强度和断裂位移来表示,如Abaqus中的内聚力损伤模型就是选用此类处理办法.为便于PFC模型的二次开发,本文选用抗拉强度和线性下降段斜率来描述.在传统线性模型中引入2个变量 F_{max} 和 $Detacoh$. F_{max} 用来表示标准抗拉强度, $Detacoh$ 用来控制下降段的斜率,定义 $k_{down} = k_{up} \times Detacoh$, k_{up} 为材料黏结的法向刚度.

离散元建模可将外形复杂的混合料颗粒简化为理想的单个球形颗粒簇或数个球形组合而成的不规则颗粒簇,通过设置颗粒间的细观参数,使生成的虚拟试件性能接近真实的沥青混合料^[12-13].泡沫沥青冷拌混合料是一种复杂而不均匀的材料,根据沥青砂浆理论,可将粒径小于2.36 mm的细集料、沥青及填充料(水泥)视为沥青砂浆进行建模.基于上述理念,本文采用PFC5.0三维颗粒程序模拟构建泡沫沥青冷拌混合料离散元三维数值模型,以尽可能精确地描述实际混合料试件的微细观特性.

2 劈裂试验数值模拟

2.1 集料及试件的生成

本文采用Matlab软件结合PFC软件对集料颗粒的棱角性以及轮廓形状进行重构.首先通过Matlab根据每档集料颗粒的粒径范围,确定外接球直径 d ,并在球体表面上随机生成均匀点,从中选出 N 个点生成不同大小形状的凸多面体(凸包),如图2所示.由于球体表面上的点是随机生成的,形成的凸包也

是随机的,因此生成的凸包可能会与真实颗粒的外部形状、尺寸大小有所差别.因此再编写函数计算出凸包的最小包围盒(能包裹整个凸包且尺寸最小的长方体,设定其长度 \geq 宽度 \geq 高度,根据方孔筛原理,宽度决定该颗粒能通过的筛孔大小),通过调整包围盒顶点坐标对形成的凸包形状尺寸进行控制,得到所需的颗粒凸包形状,并从各档中筛选若干个接近颗粒实体且具有典型代表性的颗粒凸包.然后提取凸包轮廓内部的骨架,获取形状内部所有骨架点坐标和该点处的最大内切球体半径.最后根据获得的骨架及半径信息,基于三维 ODEC 算法^[14],使用 PFC 在颗粒轮廓内部(凸包)填充一系列相互重叠的最大内切球颗粒,实现对粗集料不规则形状的模拟,如图 3 所示.

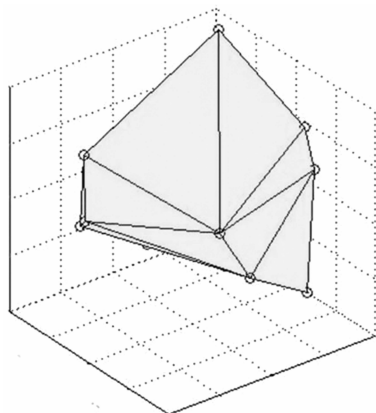


图 2 随机点形成的凸包
Fig.2 Convex hull generated by random points

不规则颗粒形成后,使用 PFC 软件中的 wall 命令生成尺寸为直径 101.6 mm、高 63.5 mm 的圆柱体试件空间区域,如图 4 所示.投放颗粒前必须获取各档集料所占体积分数,并根据各档粗集料体积分数

在空间区域内投放颗粒.各档集料体积分数可通过推算简化后的式(2)求得^[15].

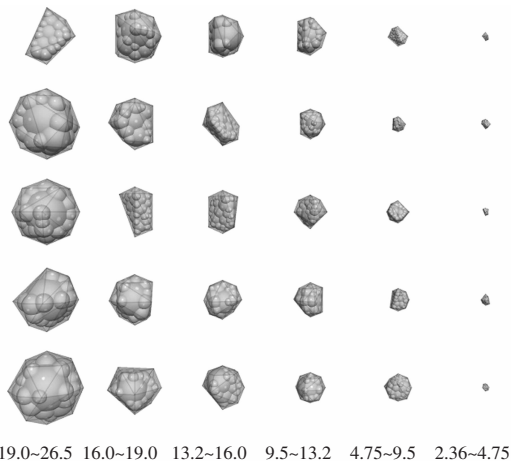


图 3 填充颗粒后的凸包

Fig.3 Shell filled with particles

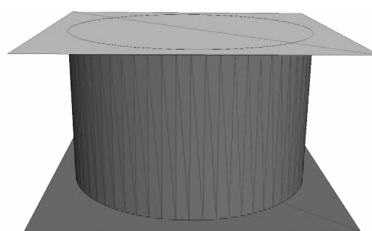


图 4 圆柱体空间区域

Fig.4 Cylindrical space

$$V_{D_i} = \frac{(P_{D_{i-1}} - P_{D_i})(1-n)\rho_a}{100(\rho_a + a\rho_s)} \quad (2)$$

式中: V_{D_i} 为第 i 档集料的体积分数; $P_{D_{i-1}}$ 为 i 的上一档集料通过率; P_{D_i} 为第 i 档集料通过率; ρ_a 为沥青密度; n 为空隙率; ρ_s 为粗集料(粒径 >2.36 mm)、细集料的密度; a 为油石比,所设计的 6 组级配见表 1.

表 1 泡沫沥青混合料级配

Tab.1 Foamed asphalt mixture gradation

粒径 大小 /mm	各档集料相应通过率/%											
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
级配 1	100	93.8	86.4	77.8	63.7	45.5	30.3	21.3	14.9	10.2	6.4	3.9
级配 2	100	98.3	94.1	88.1	73.8	49.9	31.8	22.0	15.1	10.1	6.3	3.9
级配 3	100	96.4	91.0	84.0	70.2	49.2	32.2	22.4	15.6	10.5	6.6	4.0
级配 4	100	100	97.0	91.9	77.5	51.0	32.0	21.9	14.9	9.9	6.2	3.9
级配 5	100	100	96.7	91.1	75.0	45.0	26.5	17.7	11.7	7.6	5.0	3.5
级配 6	100	97.8	93.1	86.6	71.9	47.9	30.3	20.9	14.3	9.9	6.1	3.8

计算出各档粗集料占虚拟试件总体积的比例后,生成各档满足体积分数要求且不重合的不规则颗粒簇,并投入指定区域内.同时在试件区域内生成规则排列的 1 mm 粒径球体,以模拟沥青砂浆,再采用随机算法删除相应数量的球体单元以实现空隙的模拟.经上述步骤生成的三维离散元数值试件如图 5 和图 6 所示.

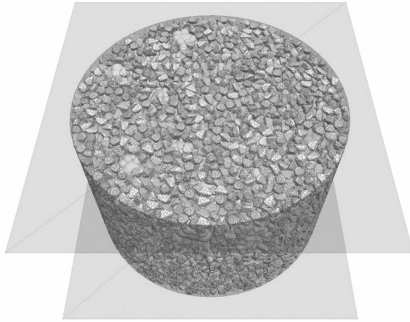


图 5 颗粒簇(pebble)投放
Fig.5 Placement of particle pebbles

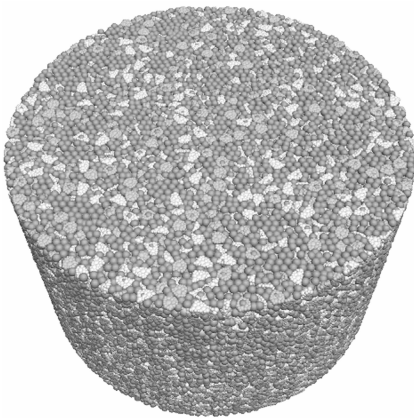


图 6 胶浆颗粒投放后最终试件
Fig.6 Final specimen of simulation

2.2 劈裂试验模拟及细观参数

泡沫沥青和普通沥青与集料的黏结特性有着显著不同.普通沥青在集料表面形成连续的沥青膜结构,大量研究表明,平行黏结模型(单元体间的黏结发生在一定范围内的圆形截面上)与伯格模型(线弹性或黏弹性接触模型)能较好地适用于该种结构.泡沫沥青在集料中则分散成无数小液滴以及丝状结构^[16],并不适用平行黏结模型,而在 15 °C 的试验状态下,混合料更接近于脆性材料,也不适用伯格模型.因此本研究在沥青胶浆与集料及沥青胶浆间选用更偏向于研究脆性材料断裂行为的内聚力黏结模型.模型内部各材料单元间的力学接触模型见表 2.

表 2 模型内部各材料单元间的力学接触模型
Tab.2 Mechanical contact model between various material elements in the model

接触类型	力学接触模型
相邻颗粒簇之间的接触	线性接触刚度模型
沥青砂浆内部单元之间接触	内聚力模型(CZM)
沥青砂浆和颗粒簇之间接触	内聚力模型(CZM)

细观参数的获取可通过室内试验的宏观参数进行计算间接转化,也可通过已有成果参考取值.然而不论哪种方式获取的参数,都未必会切合模型,故在此基础上还需不断调整细观参数,反复进行试验模拟试算,并与室内试验结果相比较,确定最终能切合实际的模型参数.这个过程亦称为参数的标定.

根据前人研究及综合考虑岩石参数取值范围,粗集料弹性模量 E_c 取值为 55 GPa^[17],试验温度 15 °C,由规范^[18]可知泊松比 ν 为 0.3.确定集料的弹性模量及泊松比后,根据离散元线性接触刚度模型基本公式(3)^[19] 计算出单个集料单元的法向和切向的细观接触刚度分别为 $k_n=1.1 \times 10^8$ N/m, $k_s=4.2 \times 10^7$ N/m,其中 L 为弹性梁长度(两接触单元半径之和).

$$k_n = 2LE_c, \quad k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu)}. \tag{3}$$

沥青胶浆间的接触刚度能通过单轴压缩试验得到胶浆的弹性模量转化而来,然后同样根据式(3)计算出.获取胶浆刚度后,胶浆与集料之间的接触刚度能通过 2 种不同材料(集料、胶浆)的接触刚度的公式(4)^[19]来计算:

$$k_n = \frac{k_n^1 k_n^2}{k_n^1 + k_n^2}, \quad k_s = \frac{k_s^1 k_s^2}{k_s^1 + k_s^2}. \tag{4}$$

计算后发现,胶浆与集料之间的接触刚度与胶浆的接触刚度非常接近,取整为与胶浆一致,胶浆参数见表 3.摩擦因数取值在 0.3~0.5 范围模拟结果相差不大^[20],本研究取值 0.3.

表 3 泡沫沥青混合料细观参数
Tab.3 Micro-parameters of foamed asphalt mixture

接触类型	线性刚度模型		摩擦 因数	$F_{max}/$ ($N \cdot m^{-1}$)	Detacoh
	$k_n/(N \cdot m^{-1})$	$k_s/(N \cdot m^{-1})$			
沥青胶浆之间	1.0×10^6	5.0×10^5	0.3	9.5×10^5	0.45
颗粒簇与沥青 胶浆之间	1.0×10^6	5.0×10^5	0.3	9.5×10^5	0.45

F_{max} 与试件的抗拉强度 (由劈裂试验记录的最大荷载计算所得)有着直接的关系,选取级配 1 的试验数据(最大荷载)作参数的标定,试算后发现 F_{max} 取值 9.5×10^6 时,模拟所得最大荷载与室内试验结果最为接近. Detacoh 为两段曲线斜率之间的系数,受抗拉强度 T_c 与强度衰减接近 0 时的最大位移 δ_f 影响.已有成果^[16]表明泡沫沥青冷拌料的劈裂试验曲线遵循“升快降缓”的趋势,因此 Detacoh 取值小于 1,即曲线 $k_{down} < k_{up}$,曲线达到顶峰后下降段衰减趋势比曲线上升段增长趋势要缓慢.以级配 1 试验数据估算出 Detacoh 值,并作参数的标定,最后发现取值 0.45 时,曲线下降趋势与试验曲线更为接近.

图 7 所示为整合各个参数后的模拟结果与室内试验结果对比,模拟曲线和试验曲线基本吻合,说明标定后的该组细观参数接近真实试验效果,能反映材料力学特性,可用于此次虚拟试验研究中.模拟劈裂试验如图 8 所示,以上墙体作加载板,向下加压,模拟室内试验中的弧形加载压条.设置加载速率为 0.025 m/s 以匹配现实中的加载速率为 50 mm/min,考虑运算的时间成本,加载至最大应力的一半.

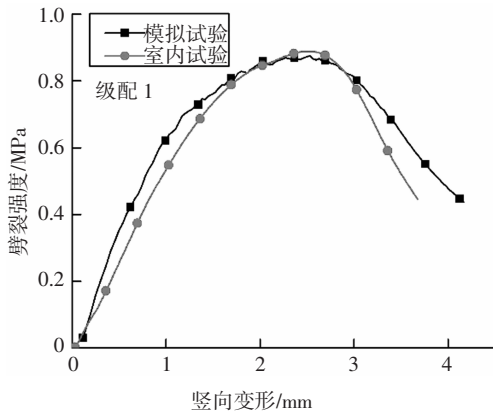


图 7 级配 1 模拟与室内试验对比

Fig.7 Comparison of Gradation 1 between indoor test and virtual test

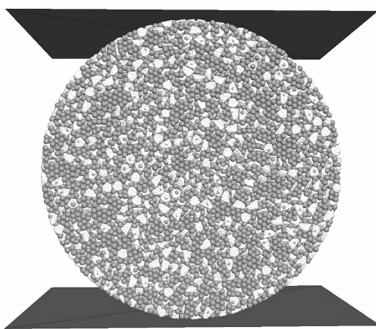


图 8 模拟劈裂试验

Fig.8 Virtual splitting test

2.3 模拟结果的分析

分别对所建立的 6 种级配的泡沫沥青冷拌混合料虚拟试件进行模拟劈裂试验,并对各试样的最大劈裂强度及强度增减曲线进行分析,如图 9、图 10 所示.

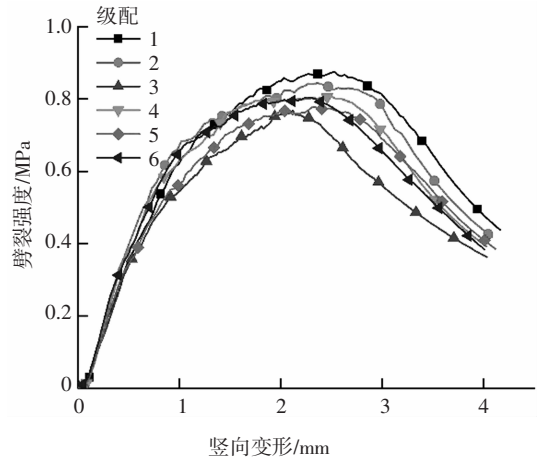


图 9 各级配模拟劈裂试验数据

Fig.9 Virtual splitting test data of each gradation

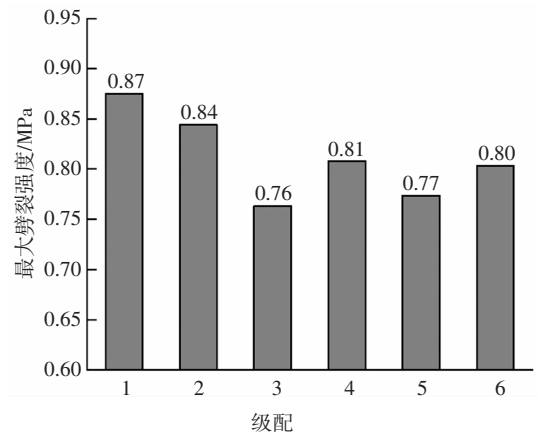


图 10 各级级配最大劈裂强度

Fig.10 The max cleavage strength of each gradation

如图 9、图 10 所示,随着加载板位移增加,6 组级配试件劈裂强度均呈先上升后下降趋势,与室内劈裂强度试验趋势一致,表明了模拟试验结果的真实性与有效性.其次,各组级配的虚拟试件劈裂强度呈现出的增长衰减趋势不一致,这表明了不同级配的集料构成对试件最大劈裂强度存在影响.级配 1、2、4、6 的最大劈裂强度均达到了 0.8 MPa 以上,级配 3、5 的最大劈裂强度较其余 4 组低,仅达到 0.75 MPa 以上.此外,级配 1 的劈裂强度最大,接近 0.9 MPa,表明通过虚拟试验可得该组级配抗裂性能最佳.

3 室内试验结果与分析

3.1 室内泡沫沥青混合料劈裂试验

沥青的发泡效果通常是以膨胀比和半衰期作为评定指标,通过室内试验测得沥青的最佳发泡温度和最佳发泡用水量,见表 4.

表 4 沥青的最佳发泡条件和发泡效果

Tab.4 The best foaming conditions and foaming effect of asphalt

沥青	发泡温度/°C	发泡用水量/%	膨胀率	半衰期/s
70# 基质沥青	150~155	3	16	9

按照模拟的 6 组级配配比混合料,采用重型击实试验确定各组级配混合料的最佳含水量,结果见表 5,试验中油石比为 3%,水泥掺量为 1.5%.

表 5 拌合用水量试验

Tab.5 Test of water consumption during blending

级配	1	2	3	4	5	6
含水量/%	4.11	4.41	4.41	4.52	4.22	4.35

试件在 15 °C 恒温水槽内浸水 2 h 后,取出各组试件(每组级配共有 4 个试件),利用万能材料试验机对各组级配试件进行劈裂试验,加荷速度 50 mm/min,试验荷载降至峰值荷载的 50%时试验停止,并记录荷载数据.试验结果如图 11、图 12 所示.

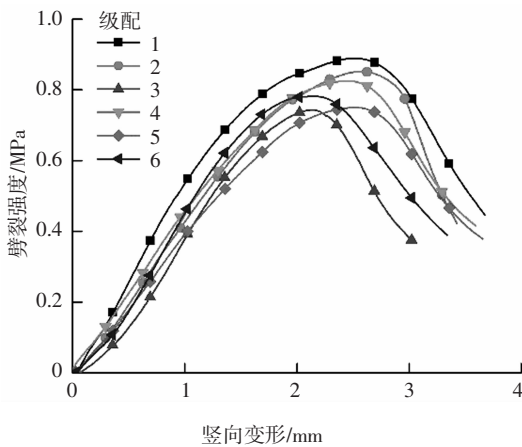


图 11 各级配室内劈裂试验数据

Fig.11 Indoor splitting test data of each gradation

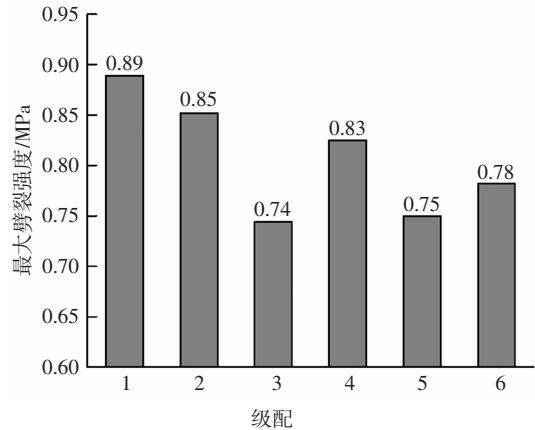
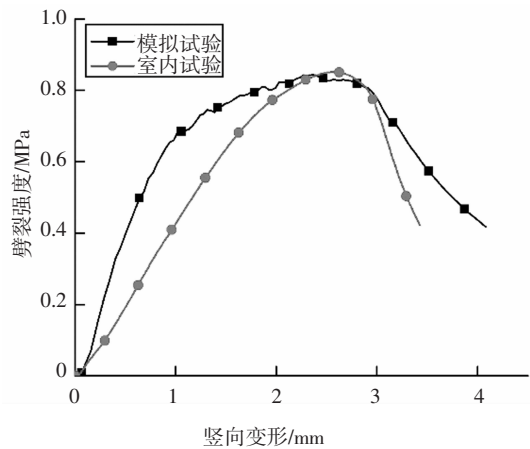


图 12 各组级配最大劈裂强度

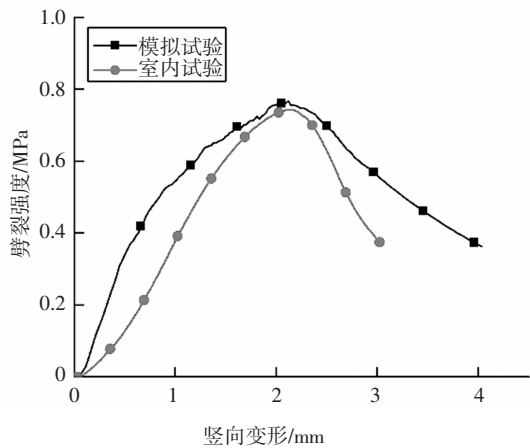
Fig.12 The max cleavage strength of each gradation

3.2 劈裂强度室内试验与模拟试验对比

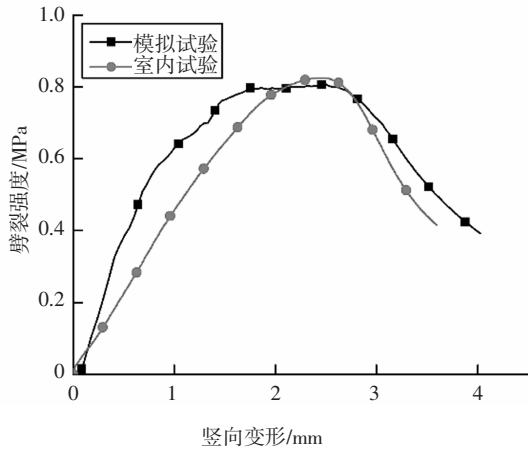
为分析泡沫沥青冷拌混合料模拟试验与实际室内试验之间的差别,以验证模拟试验的准确性,选取模拟与室内试验结果的剩余 5 组级配劈裂强度增减曲线进行对比分析,如图 13 所示.



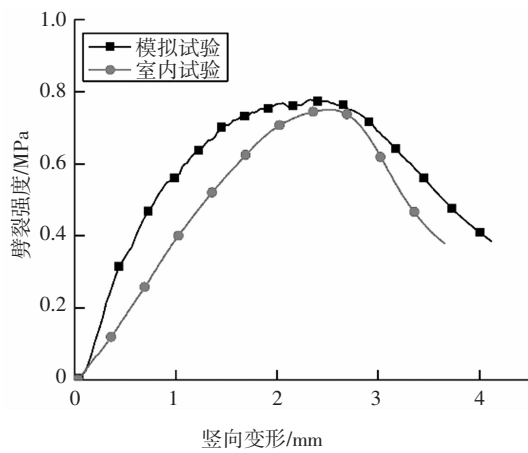
(a)级配 2



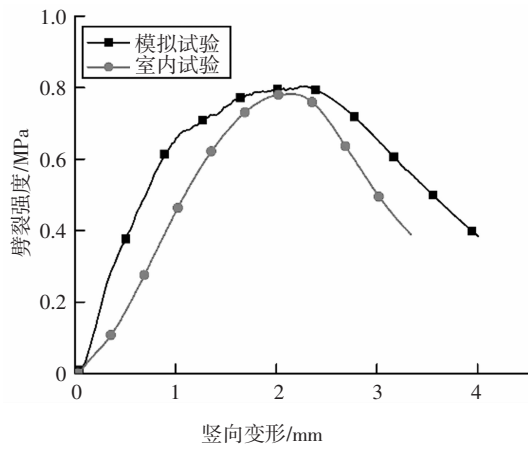
(b)级配 3



(c)级配 4



(d)级配 5



(e)级配 6

图 13 5 组级配数值模拟和室内试验对比
Fig.13 Comparison of the other gradations between indoor test and virtual test

如图 13 所示,5 组级配的劈裂强度曲线增长趋势均为先增后减,表明模拟试验与室内劈裂试验所呈现的强度随竖向变形的变化规律一致.其次,每组级配的数值模拟结果最大劈裂强度与室内试验所

得的结果接近,验证了模拟计算的准确性.此外,各组级配曲线在破坏阶段呈现出一定的差异,明显看出曲线下滑趋势走向差异逐渐变大.研究者认为,由于数值模拟中采用的细观参数、加载条件(速率及加载墙的平面与实际夹具具有一定弧度)和虚拟试件采用 1 mm 颗粒替代沥青砂浆及填充料的综合作用,致使模拟结果与室内试验结果存在差异性.本研究中可能发生的误差可通过对模型参数进行反复的微调整、多组试验的参数标定及模型颗粒级配的细化,达到两曲线的基本重合,但这样会导致计算的复杂化,以及耗费大量的时间,对计算机的要求也更高,对比室内试验将会得不偿失.由于目前以最大劈裂强度为评价指标,所以模拟与实际试验满足了最大劈裂强度的一致性即可.本文对 6 组级配(含级配 1)室内试验与虚拟试验获取的数据进行统计回归分析,分析结果如图 14~图 16 所示.

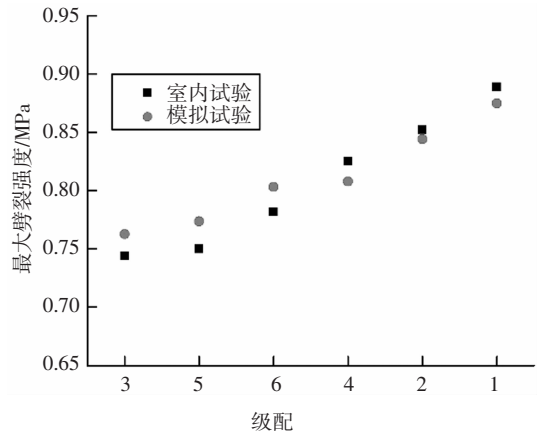


图 14 最大劈裂强度对比

Fig.14 Comparison of max cleavage strength

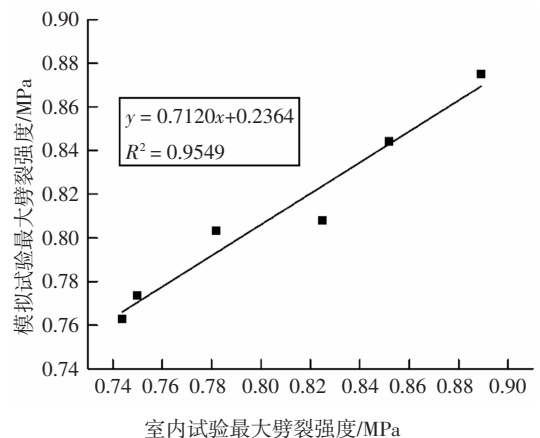


图 15 最大劈裂强度相关性

Fig.15 Correlation of max cleavage strength

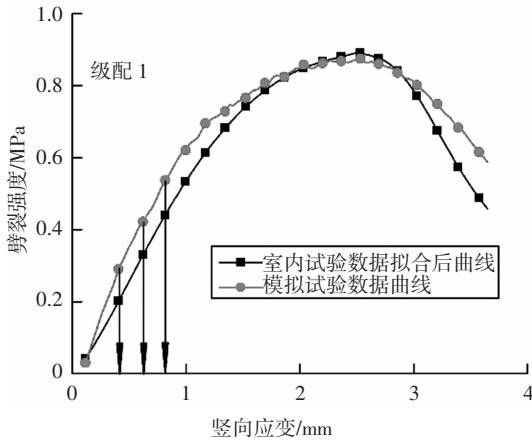


图 16 试验曲线拟合后对比

Fig.16 Comparison of indoor test data after curve fitting and virtual test data

如图 14 所示,数值模拟与室内试验获取的最大劈裂强度存在一定误差,数值模拟中因各客观条件统一,试验结果相对稳定,室内试验中试件生成过程受人为因素影响较大,该误差存在合理且无法避免.其次,数值模拟和室内试验计算的最大劈裂强度级配顺序均为:1>2>4>6>5>3,与室内试验结果一致.图 15 则表明了 6 组级配实际试验与模拟试验的最大劈裂强度数值均相当接近,相关性达到 0.955,表明数值模拟劈裂试验计算结果与室内试验获取的结果大致相同.

此外,由于室内试验获取的数据曲线线型良好,对 6 组级配室内试验数据进行曲线拟合,并以变形量为自变量,强度为因变量,获取函数,再将数值模拟曲线的变形量作自变量代入该函数式,可获得应变相同情况下的室内试验与数值模拟强度曲线如图 16 所示.根据这一方式可求得各组级配两曲线之间的相关性,见表 6.考虑到选用级配 1 的曲线数据进行参数调试,因此忽略级配 1 的相关系数,余下 5 组级配曲线的相关性平均值达到 0.908,各组曲线数值模拟劈裂试验数据与室内试验数据结果匹配程度十分理想.

表 6 各组级配曲线相关性

Tab.6 The correlation analysis of each gradation between the virtual data and the actual data

级配	1	2	3	4	5	6
相关系数 R^2	0.969	0.872	0.920	0.909	0.925	0.916

统计分析表明内聚力本构模型能有效应用于泡沫沥青混合料三维离散元模拟劈裂试验,可用于

劈裂试验力学性能分析以及计算.

4 结论与展望

本文基于内聚力本构模型,采用 Matlab 软件“凸包法”并结合三维 ODEC 算法,对泡沫沥青冷拌混合料建立三维模型试件,并进行不同级配情况下的模拟劈裂试验,通过对室内试验与数值模拟试验结果进行对比分析和统计回归分析,得到以下结论:

1)本文基于内聚力本构模型,以及采用 Matlab 软件“凸包法”、三维 ODEC 算法,利用离散元软件的块体生成技术能实现对泡沫沥青冷拌料中粗集料的不规则形状模拟.

2)构建 6 组不同级配的离散元试件并进行模拟劈裂试验,试验过程与结论表明:模拟试验的劈裂强度发展(变化)趋势与实际劈裂试验规律基本相符,验证了内聚力本构三维离散元模型用于评价泡沫沥青混合料设计的合理性和可行性.

3)经统计回归分析可知,数值模拟与室内试验结果一致.其次,数值模拟数据与最大劈裂强度值对比室内试验结果均相关性高,表明了模拟试验数据与实际试验结果匹配度高.

因此,采用内聚力本构模型的三维离散元模拟能有效应用于泡沫沥青冷拌混合料的级配选择.这一方法对比传统室内试验更省时省力,可推广于各种泡沫沥青冷拌混合料的评价与级配设计.然而本研究中部分参数的取值是基于前人研究的经验值及前期试验成果,后续研究将考虑在模型中采用多参数、多特征值以提高模拟分析精度,并为进一步提高参数标定的有效性,将采用更多的试验进行二次标定.此外,还会尝试把内聚力本构模型应用于模拟更多的有关泡沫沥青混合料的抗裂性能试验等,使其应用更加广泛.

参考文献

[1] 王端宜,吴文亮,张肖宁,等.基于数字图像处理和有限元建模方法的沥青混合料劈裂试验数值模拟[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(4):969—972.
WANG D Y, WU W L, ZHANG X N, et al. Numerical simulation of splitting test of asphalt mixture based on DIP-FEM [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41 (4): 969—972. (In Chinese)

- [2] 裴建中,常明丰,陈拴发,等. 沥青混合料间接拉伸试验的数值模拟[J].长安大学学报(自然科学版),2010,30(5):7—10.
PEI J Z, CHANG M F, CHEN S F, *et al.* Numerical simulation of indirect tensile test for asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(5): 7—10. (In Chinese)
- [3] 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.
GUO H B, CHEN S F. Numerical analysis on splitting test of open-graded large stone asphalt mixture using discrete element method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(11):22—26. (In Chinese)
- [4] 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:浙江大学建筑工程学院,2016:37—52.
WAN L. Study on asphalt mixture splitting test using cohesive zone model and three-dimensional discrete element method [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2016: 37—52. (In Chinese)
- [5] 王江洋, 钱振东, Wang Lin-bing. 环氧沥青混凝土裂纹发展的三维可视化离散元模拟 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(6):112—119.
WANG J Y, QIAN Z D, WANG L B. Three-dimensional visualization discrete element modeling of the crack development of epoxy asphalt concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(6): 112—119. (In Chinese)
- [6] 颜可珍, 葛冬冬, 游凌云. 沥青混合料单轴贯入抗剪试验的微观分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):113—119.
YAN K Z, GE D D, YOU L Y. Microscopic analysis of asphalt mixture uniaxial penetration shear test [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(5):113—119. (In Chinese)
- [7] KIM H, WAGONER M P, BUTTLAR W G. Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone element model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(8): 552—563.
- [8] KIM H, BUTTLAR W G. Discrete fracture modeling of asphalt concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46: 2593—2604.
- [9] KIM H, WAGONER M P, BUTTLAR W G. Numerical fracture analysis on the specimen size dependency of asphalt concrete using a cohesive softening model [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2112—2120.
- [10] 张东, 黄晓明, 赵永利. 基于内聚力模型的沥青混合料劈裂试验模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(6):1276—1281.
ZHANG D, HUANG X M, ZHAO Y L. Simulation of indirect tension test of asphalt mixtures based on cohesive zone model [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(6): 1276—1281. (In Chinese)
- [11] 高磊. 乳化沥青冷再生混合料的裂纹发展行为及抗裂机理研究 [D]. 南京:东南大学交通学院,2016:108—109.
GAO L. Cracking behavior and fracture mechanism of cold recycled mixes with emulsion [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2016: 108—109. (In Chinese)
- [12] LIU Y, YOU Z, ZHAO Y. Three-dimensional discrete element modeling of asphalt concrete: size effects of elements [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37:775—782.
- [13] 周健, 杜强, 于仕才. 泥石流启动试验的数值模拟研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(9):96—103.
ZHOU J, DU Q, YU S C. Numerical simulation study on the experiments of the initiation of debris flow [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(9):96—103. (In Chinese)
- [14] TIAN X, HAN G, LI Z, *et al.* 3D skeletonization and its application in plant root image analysis [J]. Journal of Computational Information Systems, 2005, 1(2): 241—246.
- [15] 邓志刚. 基于三维离散元的沥青混合料数值模拟方法研究[D]. 广州:华南理工大学土木与交通学院,2017:28—29.
DENG Z G. Study on numerical simulation method of asphalt mixture based on three dimensional discrete element method [D]. Guangzhou: School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2017:28—29. (In Chinese)
- [16] 徐金枝. 泡沫沥青及泡沫沥青冷再生混合料技术性能研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2007:65—67.
XU J Z. Technical performance of foamed asphalt and foamed asphalt cold recycled mix [D]. Xi'an: Highway College, Chang'an University, 2007: 65—67. (In Chinese)
- [17] YOU Z P, ADHIKARI S, DAI Q L. Three-dimensional discrete element models for asphalt mixture [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(12):1053—1062.
- [18] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京:人民交通出版社,2011:253—256.
JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2011:253—256. (In Chinese)
- [19] 张德育. 基于离散元方法的沥青混合料虚拟永久变形试验研究 [D]. 南京:东南大学交通学院,2013:38—48.
ZHANG D Y. Virtual permanent deformation tests of asphalt mixture using discrete element method [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2013:38—48. (In Chinese)
- [20] 张焱. 基于 PFC3D 的沥青混合料虚拟实验研究[D].南京:东南大学交通学院,2015:52—53.
ZHANG Y. Research on virtual tests of asphalt mixture based on PFC3D [D]. Nanjing School of Transportation, Southeast University, 2015:52—53. (In Chinese)