

基于三维离散元模型的加筋沥青混合料抗拉特性研究

江明古¹ 包涵¹ 袁鑫² 吴育林² 王先榕³

1 中交路桥建设有限公司

2 中交路桥南方工程有限公司

3 南昌航空大学

DOI:10.32629/etd.v7i2.18971

[摘要] 为了从细观的角度探究土工格室加筋对沥青混合料抗拉性能的影响,采用离散单元法建立沥青混合料三维细观结构模型,并通过室内间接拉伸试验标定模型参数,验证数值模型的合理性与科学性,最后利用PFC3D软件中的测量球监测间接拉伸过程中土工格室加筋前后沥青混合料内部平均应力的变化特征。研究表明,三维离散元模型能够准确的描述间接拉伸过程中土工格室加筋沥青混合料的应力-应变曲线变化趋势,而土工格室在间接拉伸曲线的上升和峰值阶段对内部平均应力的影响并不显著,但在曲线下落阶段加筋后试件的内部平均应力明显小于未加筋试件。

[关键词] 道路工程; 间接拉伸试验; 土工格室; 离散单元法; 抗拉特性

中图分类号: U416 **文献标识码:** A

Study on tensile properties of geocell-reinforced asphalt mixture based on three-dimensional discrete element model

Minggu Jiang¹ Han Bao¹ Xin Yuan² Yulin Wu² Xianrong Wang³

1 Road & Bridge Construction CO., LTD

2 Road & Bridge Southern Engineering CO., LTD.

3 Nanchang Hangkong University

[Abstract] In order to investigate the effect of reinforcement of geocell on the tensile properties of asphalt mixtures from a detailed point of view, a three-dimensional meso-structure model of asphalt mixtures was established by using discrete element method. Through the indoor indirect tensile test, the model parameters were calibrated to verify the rationality and scientificity of the numerical model. Finally, the measuring ball in PFC3D software is used to monitor the change characteristics of the internal stress of asphalt mixture before and after reinforcement in the indirect tensile process. The results show that the three-dimensional discrete element model can accurately describe the variation trend of the stress-strain curve of the geocell-reinforced asphalt mixture during the indirect tensile process. The effect of geocell on internal stress in rising and peak phases of the indirect tensile curve is not significant, but in falling phase the internal stress of the reinforced virtual specimen is obviously smaller than that of the unreinforced specimen.

[Key words] Road engineering; indirect tensile test; geocell; discrete element method; tensile properties

引言

沥青混合料在高速公路的路面中应用最为广泛,而随着载货汽车吨位增加,大部分沥青路面难以达到设计使用寿命^[1,2]。当沥青混合料达到极限强度时,路面内部就会形成裂缝并在车载和环境作用下扩展。为了抑制裂纹扩展,在沥青混合料中采用土工格室加筋^[3,4]。这样可有效抑制混合料的侧向流动变形,并通过侧向阻力和摩擦作用提高沥青混凝土抗拉强度。此外,沥青混合料的抗拉强度远低于抗压强度^[5],路面服役时也往往是受拉

破坏,因此对抗拉力学性能分析具有实际意义。

宏观现象的本质应该从微观的角度来解释,利用离散单元法可以研究沥青混合料内部的应力变化特征,建立沥青混合料内部结构与宏观力学性能间的关联^[6,7]。离散单元法的核心是颗粒间接触模型和牛顿第二定律,最初应用于岩土类材料,黏结接触模型出现后开始应用于沥青混合料,这也是目前广泛应用于沥青混合料细观特性研究的数值模拟方法^[8]。本文利用颗粒流软件PFC构建土工格室加筋沥青混合料细观结构模型,而后进行

虚拟劈裂试验并利用测量球监测间接拉伸过程中的内部应力, 分析土工格室加筋前后的影响。

1 土工格室加筋沥青混合料离散元模拟

1.1 室内与虚拟间接拉伸试验

室内试验中的沥青黏结剂为高黏度的SBS改性沥青, 能够较好的黏结骨料与土工格室。粗、细集料均为玄武岩, 具有一定的碱度, 也能够与沥青粘结良好。土工格室为聚丙烯材料(PP), 具有强度高、耐高温性好等优点, 各项性能指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)^[9]的要求, 原材料的技术指标和要求如表1-2所示。

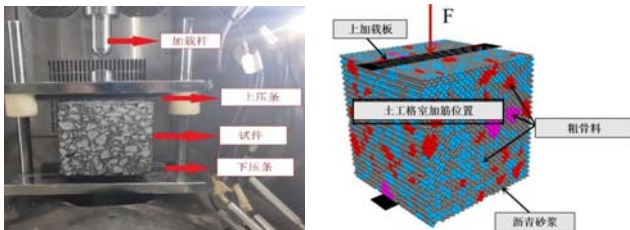
表1 集料基本性能指标

	粒径 (mm)				规范
	0-2.36	2.36-4.75	4.75-9.5	9.5-16	
矿石含泥量	1.1%	0.8%	0.8%	0.4%	≤ 3.0%
吸水率	0.79%	0.67%	0.46%	0.42%	≤ 2.0%
表观密度 (g/cm ³)	2.737	2.718	2.961	2.972	≥ 2.6%

表2 沥青和筋材基本性能指标

SBS 改性沥青	针入度 (0.1mm)	57	40-60
	延度 (cm)	30	≥ 20
	软化点 (°C)	81	≥ 75
PP 土工格室	熔点	185°C	≥ 170°C
	尺寸	2cm×2cm×3cm	-
	抗拉强度	3.18 kN/cm	≥ 0.28 kN/cm
	伸长率	5.42%	≤ 10.0%

通过MTS万能材料试验机进行间接拉伸试验, 试验温度设为 15 °C, 加载速率设为50 mm/min, 采用试验机系统记录间接拉伸过程时轴向载荷和位移, 有效试验重复不少于3次, 室内试验加载装置如图1a。虚拟试验采用与室内试验相同的荷载和边界条件, 下加载板固定, 上加载板以50mm/min的速度向下移动, 如图1b所示。



(a) 室内试验

(b) 虚拟试验

图1 室内与虚拟间接拉伸试验

1.2 细观参数的选择与标定

上文将土工格室加筋沥青混合料离散为球单元, 并采用基本球单元构成“Cluster”模拟粗集料、沥青砂浆和土工格室。为了使数值模型具有与真实加筋沥青混凝土相似的力学性能, 对各相组分设置相应的物理参数和接触模型。离散元模型由粗骨料、沥青砂浆、空隙和土工格室组成, 空隙则是通过删除一定量的沥青砂浆基本球单元形成, 可以不考虑其接触问题。因此, 沥青混合料内部各相组分接触可分为以下七类: 粗骨料内部、沥青砂浆内部、土工格室内部、粗骨料之间、粗骨料与沥青砂浆

之间、土工格室与粗骨料之间、土工格室与沥青砂浆之间, 如图2所示。

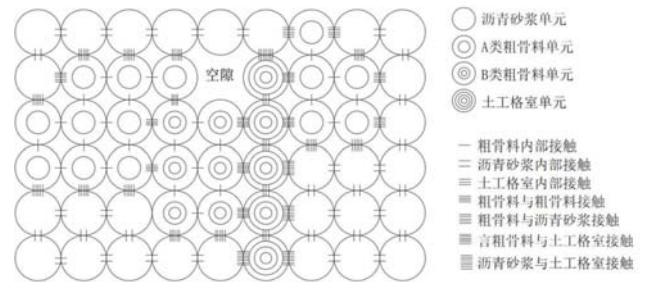


图2 土工格室加筋沥青混合料离散元模型细观接触示意图

粗集料内部接触与土工格室内部接触的主要作用是维持其结构形态特征, 在沥青混合料中起骨架作用, 结构难以被破坏。因此, 本研究不讨论其破碎状态, 只需采用黏结力极大的黏结模型传递力与力矩来保证承载过程的完整性。沥青砂浆具有明显的黏弹性, 因此在沥青砂浆内部, 粗骨料与沥青砂浆之间, 以及土工格室与沥青砂浆之间采用平行黏结模型反映夹杂结构的黏弹性行为。粗集料之间以及土工格室与粗集料之间的接触属于松散介质之间的无黏结作用接触, 因此采用线性模型。综上所述, 本研究选择平行黏结模型和线性模型作为细观结构的接触模型。

平行黏结模型包含两部分, 一部分是线性部分, 物理参数为界面间隙 g_s , 线性部分的法向与切向刚度 k_n 和 k_s , 摩擦系数 μ ; 另一种是平行黏结部分, 物理参数有黏结部分法向与切向刚度 \bar{k}_n 和 \bar{k}_s , 抗拉强度 $\bar{\sigma}_c$, 内聚力 \bar{c} , 内摩擦角 $\bar{\varphi}$, 平行黏结力与力矩 \bar{M} 和 \bar{F} 。黏结未断裂时平行黏结部分生效, 断裂时线性部分生效, 物理元件模型如图3所示。

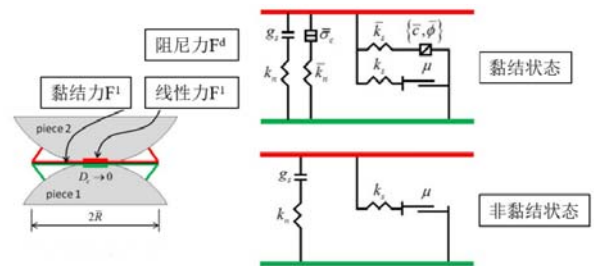


图3 平行黏结物理元件模型

采用上述模型的基本参数可以计算法向与切向刚度比 ($Kratio$ Pb $Kratio$) 以及有效模量 ($Emod$ Pb $Emod$), 计算公式如下:

$$\begin{cases} Emod = \frac{k_n L}{A} \\ Kratio = \frac{k_n}{k_s} \\ Pb_emod = \bar{k}_n \bar{L} \\ Pb_Kratio = \frac{\bar{k}_n}{k_s} \end{cases} \quad (1)$$

上式中A、R和L的计算方法如下:

$$A = \begin{cases} 2rt, & 2D \quad (t=1) \\ \pi r^2, & 3D \end{cases}$$

$$r = \begin{cases} \min(R^{(1)}, R^{(2)}), & \text{ball-ball} \\ R^{(1)}, & \text{ball-facet} \end{cases}$$

$$L = \begin{cases} R^{(1)} + R^{(2)}, & \text{ball-ball} \\ R^{(1)}, & \text{ball-facet} \end{cases}$$

离散元细观模型的难点在于标定接触模型参数。由于细观参数与宏观力学性能之间没有一一对应的映射关系,所以无法通过室内试验直接测得。因此,本文采用“反算演练”的方式对模型参数进行标定。首先初步假定细观参数,而后采用这些参数进行虚拟劈裂试验获取荷载一位移曲线并与室内试验中的真实曲线对比,如果两条曲线拟合良好则选定该参数作为模型细观参数,否则调节假定参数并重复模拟,直至虚拟曲线与试验曲线吻合。离散元模拟和室内试验得到的虚拟和真实荷载一位移曲线如图4所示。

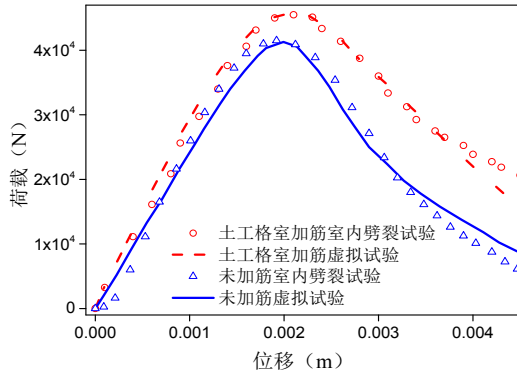


图4 间接拉伸试验荷载-位移曲线

2 结果与分析

通过内部应力变化可以从细观层面研究材料的性能,但是应力却是连续系统中的概念,无法在离散元模型中直接获得。本文采用平均法将细观尺度转化为连续尺度,应力平均过程如下所示。对于一定体积材料V的平均应力张量 如式(2)。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \quad (2)$$

上式中 $\bar{\sigma}_{ij}$ 是作用在体积V的材料上的应力张量。在DE模型中,应力只存在于球单元上,所以积分可以用体积V中所有球单元的数量和 N_p 来代替,如式(3)所示。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{N_p} \bar{\sigma}_{ij}^{[p]} dV^{[p]} \quad (3)$$

$\bar{\sigma}_{ij}^{[p]}$ 是作用在球[p]上的平均应力张量,同理,根据公式

(3), $\bar{\sigma}_{ij}^{[p]}$ 可用(4)式表示。

$$\bar{\sigma}_{ij}^{[p]} = \frac{1}{V^{[p]}} \int_{V^{[p]}} \sigma_{ij}^{[p]} dV^{[p]} \quad (4)$$

对于任何应力张量 S_{ij} 都存在下列关系。

$$S_{ij} = \delta_{ik} S_{kj} = x_{i,k} S_{kj} = (x_i S_{kj})_{,k} - x_i S_{kj,k} \quad (5)$$

上式中 S_{ij} 是Kronecker符号,当 $i=k$ 时其值为1,否则值为0。将(5)式代入(4)式中可得如下(6)式。

$$\bar{\sigma}_{ij}^{[p]} = \frac{1}{V^{[p]}} \int_{V^{[p]}} [(x_i \sigma_{kj}^{[p]})_{,k} - x_i \sigma_{kj,k}^{[p]}] dV^{[p]} \quad (6)$$

假定每个颗粒球单元的应力连续平衡,当无体积应力时平衡条件为 $\sigma_{ij,i} = 0$ 。根据一阶高斯定理,将体积分转化为面积积分如下。

$$\bar{\sigma}_{ij}^{[p]} = \frac{1}{V^{[p]}} \int_{S^{[p]}} (x_i \sigma_{kj}^{[p]}) n_k dS^{[p]} = \frac{1}{V^{[p]}} \int_{S^{[p]}} x_i t_j^{[p]} dS^{[p]} \quad (7)$$

上式中 $S^{[p]}$ 为球单元表面积, n_k 为曲面的外法向量, $t_j^{[p]}$ 是拉应力向量,由于力对离散球单元的作用是通过球单元间的接触传递,所以上述积分可以对接触数量 N_c 求和如下。

$$\bar{\sigma}_{ij}^{[p]} = \frac{1}{V^{[p]}} \sum_{N_c} x_i^{[c]} F_j^{[c]} \quad (8)$$

上式中 $x_i^{[c]}$ 和 $F_j^{[c]}$ 表示接触[c]的接触位置和接触力, $x_i^{[p]}$ 是球单元的中心坐标, $n_i^{[c,p]}$ 是球单元的中心到接触位置的单位法向量。每个球单元平均应力张量可利用Fish函数通过式(8)求得。通过在PFC3D软件中设置一定半径的测量球,可以得到一定体积内沥青混合料的平均应力张量。图5为土工格室加筋沥青混合料离散元模型的测量球布置示意图。

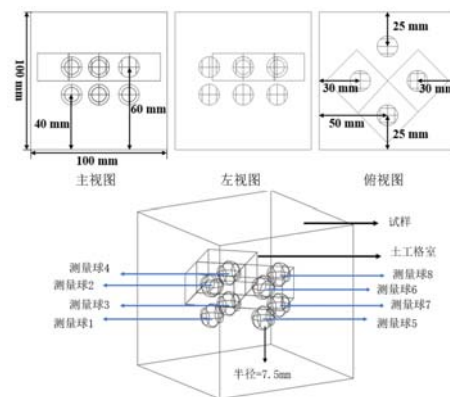


图5 土工格室加筋虚拟试样测量球布置示意图

由图5可知,共设置8个测量球,其中测量球2、测量球4、测量球6和测量球8均设置于高度60cm的土工格室加筋层中,其中测量球2、4和6在格室单元内,测量球8在格室单元外,测量球2和8以及测量球4和6对称分布。此外,测量球1、测量球3、测量球5和测量球7分别设置于高度40cm处测量球2、4、6、8的正下方,其中测量球1和7与测量球3和5同样对称分布,而测量球的半径均设置为7.5mm。为比对分析,在未加筋沥青混合料虚拟试样中相同位置设置同样测量球。

根据上述应力张量计算方法,得到各测量球在X方向上的应力。不同劈裂位移下测量球监测的X方向上的应力变化如图6所示。图中,数字1、2、3、4、5、6、7、8分别代表测量球1、测量球2、测量球3、测量球4、测量球5、测量球6、测量球7、测量球8。

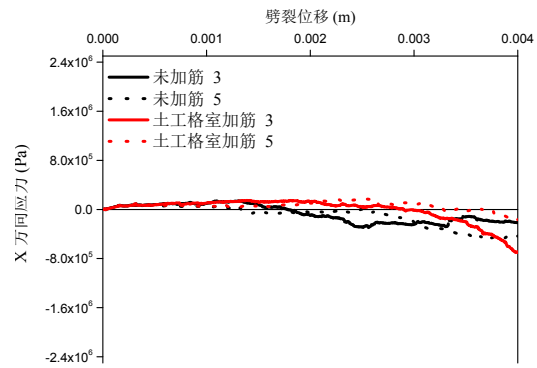


图6 测量球X方向应力与劈裂位移的关系曲线

从图6中可以看出,在劈裂曲线上阶段加筋与未加筋沥青混合料虚拟试样在X方向上应力的差异并不显著,而直接位于劈裂中心位置的应力明显大于两侧应力。由测量球2、4、6的监测结果可知,在劈裂曲线的峰值和下降阶段,加筋层位置的X方向应力明显小于未加筋试样,这直观地表明土工格室加筋可以降低试样在损伤阶段的内部应力。根据测量球1、3、5、7的监测结果来看,加筋层下方X方向上应力受土工格室的影响不大。此外,虽然测量球3、4和5、6的监测位置对称,但监测到的应力曲线仍然存在一定差异。这是由于沥青混合料内部结构的非均匀性所导致,也间接反映了离散元模型能够准确表征沥青混合料内部微观结构。

3 结语

(1) 利用平行黏结模型和线性模型分别表征沥青砂浆与粗骨料之间以及粗骨料之间的接触,建立土工格室加筋沥青混合料离散元数值模型并进行虚拟间接拉伸试验,以室内试验结果标定接触模型微观参数并验证了虚拟试验准确性和有效性。

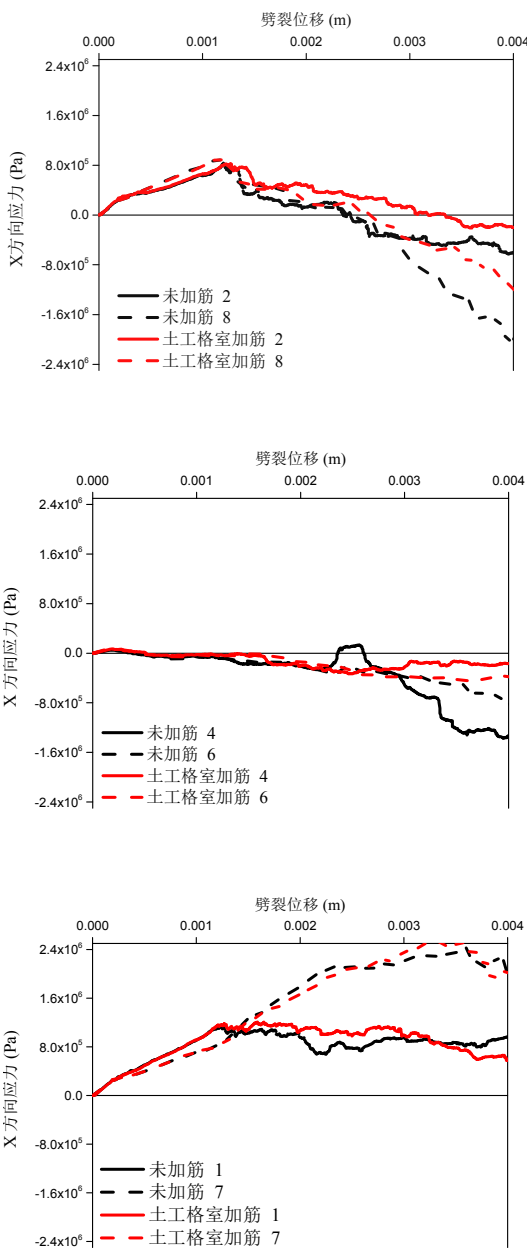
(2) 通过测量球可以有效监测球内的平均应力且中间劈裂区域的平均应力明显高于两侧,而在荷载-位移曲线的上升和峰值阶段,土工格室加筋对应力曲线没有较大影响,但在曲线下降阶段,同一位置处加筋层虚拟试件的内部应力明显小于未加筋试样,这表明土工格室主要作用于间接拉伸过程中的损伤破坏阶段,在该阶段可以显著降低沥青混合料内的平均应力。

[基金项目]

项目来源:江西省自然科学基金资助项目(20252BAC200340)。

[参考文献]

[1]吕松涛,赵霏,鲁巍巍.面向长寿命的既有高速公路沥青路面延寿设计综述[J].交通运输工程学报,2024,24(02):20-49.
 [2]房娜仁,胡士清,吴朝玥.半刚性基层开裂后沥青路面寿命预估方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(10):45-52.
 [3]李小伟,朱云升,赵世杰.新型土工格室加筋沥青路面实测响应特性研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(01):109-114.



[4]朱云升,苏天圣,李小伟.土工格室加筋沥青混凝土阻裂性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(6):956-961.

[5]陈柏丹,孙杰,潘勤学.基于拉压差异的沥青混合料强度与疲劳特性[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(01):50-58+109.

[6]吴庭然,李浩,许建辉.再生沥青混合料复合骨架与细观力学性能的离散元分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(06):1152-1158.

[7]彭勇,章秀芳,郭泽宇.离散元法分析集料接触特性对沥

青混合料剪切疲劳寿命的影响[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(01):178-187.

[8]石立万,王端宜,徐驰.基于离散元法的沥青混合料骨架细观性能研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(10):50-56.

[9]中华人民共和国交通运输部.JTG F40公路沥青路面施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2004.

作者简介:

江明古(1989--),男,汉族,湖北省天门市人,本科,中交路桥建设有限公司,工程师,研究方向:道路工程。