

# 基于 PFC3D 的沥青混合料摊铺均匀度分析\*

陈宇, 梁乃兴, 曾晟, 向华林

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** 沥青混合料的摊铺均匀度很大程度上影响沥青路面的使用性能。为准确分析摊铺沥青混合料的均匀性,文中基于广那(广南县—那洒镇)高速公路项目,利用三维颗粒流程序 PFC3D,引入颗粒与颗粒间、颗粒与墙体间的接触黏结关系建立沥青混合料颗粒及墙体模型,模拟不同位置、不同级配下沥青混合料摊铺情况,并利用 MATLAB 图像处理技术分析实际摊铺均匀度。结果表明,模拟沥青混合料摊铺均匀度与现场采集图像的均匀度基本相符,两者间的相关系数为 0.93,模拟方法切实可行。

**关键词:** 公路;沥青混合料;摊铺均匀度;三维颗粒流程序 PFC3D

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)04-0056-04

沥青路面摊铺均匀性分析是当前道路研究的重点和难点。对沥青路面均匀性进行验证往往需钻芯取样,费时费力,阻断交通,破坏路面,还会导致取样区与新料黏结性减弱,降低路面服务年限。离散元法通过控制参数,能相对准确地对沥青混合料内部结构的力学性能进行模拟。为此,引入颗粒本构接触关系,利用三维颗粒流程序 PFC3D 建立差异性大级配沥青混合料摊铺模型,结合 MATLAB 强大的图像处理技术,检测模型的均匀度与实际摊铺均匀度的相关性,为快速检测沥青混合料均匀度提供参考。根据相关研究成果,粗集料的分布状态对沥青路面均匀性有重要影响,而细集料对均匀性的影响不大,可忽略不计。因此,重点研究沥青路面粗集料的分布均匀性,即仅考虑粒径 4.75 mm 以上集料分布对均匀性的影响。

## 1 PFC3D 模拟原理简述

三维颗粒流程序 PFC3D 主要用来模拟颗粒与颗粒或颗粒与墙之间的力—位移关系,在处理非连续、不均匀介质和材料大变形等方面具有优势。颗粒间的接触力  $F$  可分为法向力  $F^n$  和切向力  $F^s$  两部分,即:

$$F = F^n + F^s \quad (1)$$

接触速度  $v$  可分为法向速度  $v^n$  和切向速度  $v^s$ , 公式如下:

$$v = v^n + v^s \quad (2)$$

颗粒离散元模拟颗粒单元的运动规律,运动规律由颗粒的角速度和角加速度共同决定,计算颗粒流模型需通过重力加速度和墙体的运动实现控制加载。利用 PFC3D 软件对墙体和颗粒的边界条件进行定义,可为实现颗粒在实际状态中受到的限制情况进行模拟打下基础。

PFC3D 中,颗粒间接触处的黏结模型主要有两类:一类是接触黏结模型,颗粒接触点沿法向和切向承受相应的拉应力和剪应力,当接触黏结发生破坏时,颗粒间发生相对滑动;另一类是平行黏结模型,用于描述离散单元之间受限尺寸内有中间层材料或胶合材料的本构特性,抽象表达成一组具有恒定法向刚度与切向刚度的弹簧在接触面内均匀分布。引入的颗粒黏结模型可在两黏结颗粒之间传递力和力矩,可用于沥青砂浆之间、沥青砂浆与集料颗粒之间的相互黏结作用,符合平行黏结模型原理,故接触模型采用平行黏结模型。

## 2 数字图像处理技术计算沥青路面均匀度

现场采集的图像经预处理(灰度化、直方图均衡化及形态学操作等)得到二值图像,计算其集料颗粒质心位置分别到四边的静矩(见图 1)。利用 MATLAB 软件中的 `biconncomp` 函数提取颗粒的个数,假设为  $n$ ,则第  $i$  个颗粒的静矩  $S_i$  为:

$$S_i = A_i d_i \quad (3)$$

式中: $A_i$  为第  $i$  颗集料的面积; $d_i$  为第  $i$  颗集料的质

\* 基金项目:云南省交通运输厅科技项目(2017B0106)

心到边界的距离。

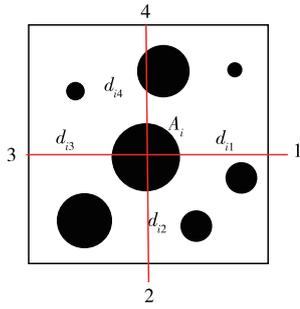


图1 静矩理论分析图

所有集料颗粒分别对第1、2、3、4条边的静矩和 \$S\_1、S\_2、S\_3、S\_4\$ 为:

$$S_1 = \sum_{i=1}^n A_i d_{i1} \quad (4)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^n A_i d_{i2} \quad (5)$$

$$S_3 = \sum_{i=1}^n A_i d_{i3} \quad (6)$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^n A_i d_{i4} \quad (7)$$

静矩的平均值为:

$$\bar{S} = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}{4} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{d_{i1} + d_{i2} + d_{i3} + d_{i4}}{4} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{l}{2} \quad (8)$$

式中: \$d\_{i1}、d\_{i2}、d\_{i3}、d\_{i4}\$ 为第 \$i\$ 颗集料的质心到4条边的静矩; \$l\$ 为正方形的边长。

标准差能反映数据的离散程度。利用静矩标准差 \$S\_d\$ 反映集料颗粒分布的离散情况,公式如下:

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (S_i - \bar{S})^2}{4}} \quad (9)$$

定义沥青路面摊铺均匀度 \$U\$ 为:

$$U = \frac{S_{d \max} - S_d}{S_{d \max} - S_{d \min}} \times 100 = 100 - \frac{S_d}{S_{d \max}} \times 100 \quad (10)$$

式中: \$S\_{d \min}\$ 为最理想分布状况下均匀度,代表集料分布完全均匀,即 \$S\_{d \min} = 0\$; \$S\_{d \max}\$ 为理想最不均匀度,考虑集料仅存于图像中的一边(见图2)。

计算图2中集料的四边静矩,得到静矩标准差,求得理想状态下集料最不均匀分布的静矩值 \$S\_{d \max}\$。

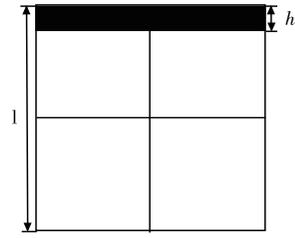


图2 理想最不均匀分布示意图

### 3 沥青混合料摊铺均匀度分析

为简化模型,作如下假设:1) 颗粒单元为刚体; 2) 颗粒单元为球体; 3) 接触方式为点接触; 4) 接触处柔性接触的重叠与颗粒大小相比很小。

#### 3.1 细观参数标定

沥青混合料的虚拟试件具有三相结构,包括不规则的粗集料、沥青和空隙。从粗集料受力情况出发,通过模拟试验模拟沥青混合料摊铺后的均匀度,颗粒与墙的各项参数选取与实际材料尽可能相符(见表1)。利用PFC3D模拟沥青混合料摊铺时,若按照实际粒径大小进行模拟,则容易造成计算耗时长或程序运行中断,故将集料颗粒粒径放大1000倍后再进行模拟计算。

表1 颗粒与墙的参数

项目	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	泊松 比	法向 刚度/ Pa	切向 刚度/ Pa	阻尼 系数	颗粒- 墙摩擦 系数
颗粒	2 716	0.27	4.4 × 10 <sup>7</sup>	1 × 10 <sup>9</sup>	0.7	0.477
墙	—	—	1 × 10 <sup>9</sup>	1 × 10 <sup>9</sup>	0.7	0.100

将4.75 mm以下集料、沥青和空隙视为透明颗粒,计算其体积,在PFC3D中用空隙率表示,基于此,建立粗集料与空隙的整体结构模型。模型中,集料粒径不尽相同,为使模拟与实际相符,不同粒径集料颗粒对应不同大小模拟颗粒。根据实际工程级配,确定各档集料的体积比,并利用PFC3D对集料进行投放,生成不同粒径的颗粒。

沥青密度为1.03 g/cm<sup>3</sup>,粗、细集料平均密度为2.7 g/cm<sup>3</sup>,设计空隙率为4%,各档集料的油石比和质量均已知,据此可计算出各档集料的体积和体积比。选取6个测区进行数值模拟,每个级配对应模拟10张图片,求其平均值作为模拟结果,并与现场采集图像进行对比,分析不同级配下PFC3D模拟的准确性。

#### 3.2 投放过程模拟

采用PFC3D对沥青混合料的细观结构进行建

模,能准确实现集料颗粒的准确投放。颗粒在墙的作用下逐渐向前推进,为方便图像处理,结果图采用统一红颜色颗粒。根据生成的离散元模型,可在模型中准确计算颗粒的位置和个数,结合静矩理论,计

算级配的均匀度。

通过级配和油石比确定各成分的体积比,级配情况见表2和图3,其中A、B、C、D、E、F分别表示下面层AC-25沥青混合料不同位置的6个测区。

表2 下面层AC-25沥青混合料筛分组成

筛孔尺寸/mm	A测区 质量/g	A测区通 过率/%	B测区 质量/g	B测区通 过率/%	C测区 质量/g	C测区通 过率/%	D测区 质量/g	D测区通 过率/%	E测区 质量/g	E测区通 过率/%	F测区 质量/g	F测区通 过率/%
26.50	129.0	94.6	41.6	98.3	83.2	96.4	95.1	96.3	68.4	96.5	174.8	94.2
19.00	277.7	83.0	362.8	83.3	489.6	75.2	412.7	80.0	276.1	82.4	707.2	70.9
16.00	92.0	79.2	147.7	77.2	153.2	68.6	270.8	69.3	114.3	76.6	349.2	59.4
13.20	188.7	71.3	175.1	69.9	222.3	59.0	249.9	59.5	225.6	65.1	335.6	48.4
9.50	314.9	58.2	313.0	56.9	273.4	47.2	306.6	47.4	281.8	50.7	351.0	36.9
4.80	476.7	38.4	485.0	36.9	333.5	32.7	396.4	31.8	336.8	33.5	381.5	24.3
<4.75	924.1	27.0	889.6	21.9	756.6	22.1	804.5	22.0	656.6	21.6	740.0	16.6

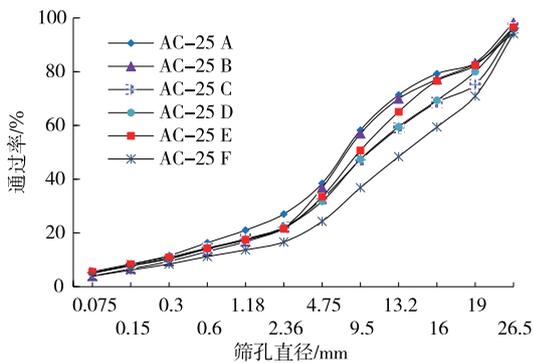


图3 下面层AC-25沥青混合料级配曲线

利用PFC3D对测区A进行沥青混合料摊铺过程模拟,并给墙施加1 m/s的法向速度,同时定义集料的边界条件,确保集料准确投放。沥青混合料集料投放过程见图4。利用PFC3D中的剪切工具输出只包含集料颗粒分布的彩色平面图像,再利用MATLAB软件对图像进行二值化(见图5)。

### 3.3 沥青混合料摊铺均匀度计算

CCD相机采集的6个测区实际图像的预处理结果见图6。由于各测区中筛分结果差异较大,现场摊铺后表面状态存在差别,为说明其差异,对每一

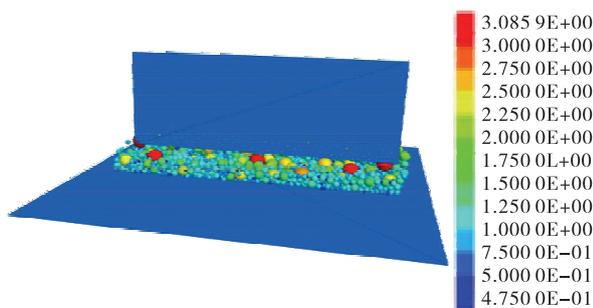


图4 沥青混合料摊铺集料投放(单位:cm)

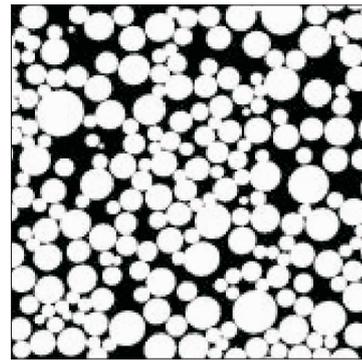


图5 模拟图像二值化

测区的预处理图像进行对比。由图6可知:不同筛分结果的差异较大,如图6(c)中集料颗粒分布相对偏细而粗集料相对较少,模拟所得C区的均匀度最低,为94.78;图6(e)中集料颗粒分布相对均匀,模拟所得E区的均匀度最高,为97.91。说明PFC3D模拟现场级配差异性明显,对沥青混合料摊铺均匀度模拟具有可行性。

对6个测区分别进行10次模拟,取均匀度平均值与各测区实际均匀度进行比较,结果见表3。由表3可知:1)6个测区的均匀度标准差最大值为1.89,说明模拟结果可靠,稳定性好;与实际均匀度的误差小,精度满足要求。2)模拟均匀度比实际均匀度小,其原因是利用PFC3D进行摊铺模拟时,集料颗粒的粒径放大了1000倍,导致计算静矩时有较大差别。但总体来说,两者相差不大。

图像法所得实际均匀度 $U_{实际}$ 与模拟所得均匀度 $U_{模拟}$ 的拟合结果见图7,两者的线性拟合关系为 $U_{模拟} = 0.82U_{实际} + 17.13$ ,相关系数为0.93,相关性显著。

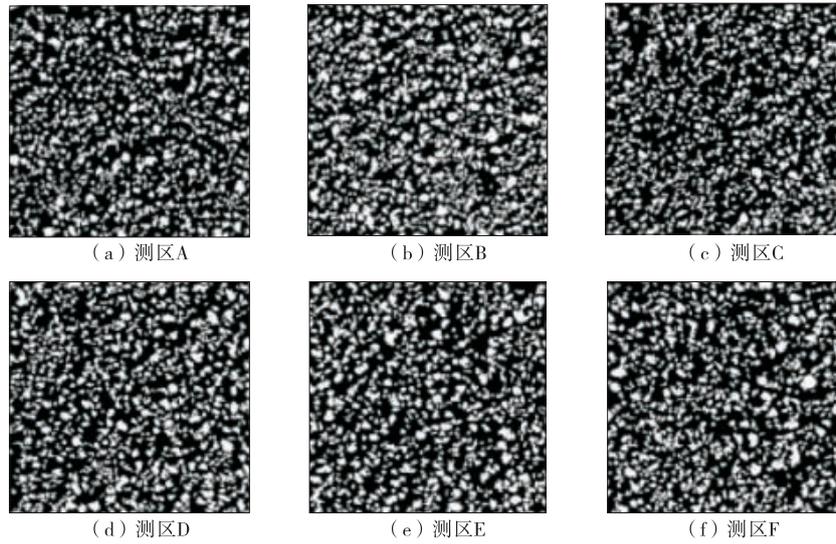


图6 各测区原始图像的预处理

表3 沥青混合料摊铺均匀度计算结果

测区	实际均匀度	PFC3D 计算均匀度										均值	标准差	两者的误差/%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
A	96.47	94.99	94.58	97.06	95.73	95.72	98.25	98.34	97.53	94.71	96.08	96.30	1.34	0.18
B	97.36	94.93	94.79	95.81	98.65	99.43	96.14	99.14	96.65	98.45	99.16	97.32	1.75	0.04
C	94.92	93.14	95.52	94.73	97.10	96.07	94.75	96.69	95.12	92.79	91.91	94.78	1.62	0.15
D	95.68	93.33	97.30	95.63	94.66	96.45	98.72	93.27	94.88	93.65	92.45	95.03	1.89	0.67
E	99.06	99.23	95.54	95.88	98.23	99.24	99.13	98.96	96.73	97.95	98.26	97.91	0.83	1.16
F	95.55	96.61	94.62	94.72	95.30	95.81	95.99	96.58	96.07	92.38	95.80	95.39	1.26	0.16

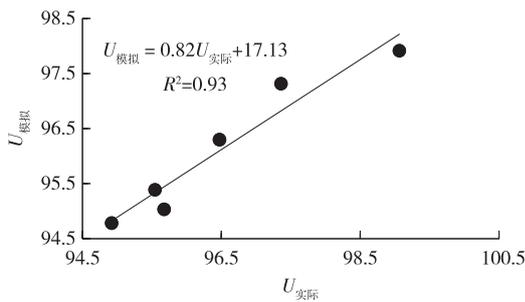


图7 实际均匀度  $U_{实际}$  与模拟均匀度  $U_{模拟}$  的相关性关系

#### 4 结论

应用 PFC3D 软件,通过设定颗粒与颗粒、颗粒与墙之间的模拟参数,获得模拟图像的均匀度,并与数字图像法所得结果进行对比,得到如下结论:

(1) 沥青路面摊铺均匀度  $U$  的取值范围为  $[0, 100]$ ,  $U$  值越接近 100,说明路面摊铺越均匀。

(2) 采用 PFC3D 软件能有差别地模拟沥青的级配,同一测区的模拟计算均匀度可靠、稳定性好。

(3) PFC3D 模拟均匀度与实际均匀度的最大

误差为 1.16%,模拟精度满足要求。

(4) 实际均匀度与模拟均匀度的相关系数为 0.93,相关性显著。利用 PFC3D 模拟沥青混合料摊铺均匀度,可实现数字图像处理过程的简化,为快速无损检测道路均匀度打下基础。

#### 参考文献:

[1] 赵毅,梁乃兴.沥青混凝土均匀性数字图像评价方法[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(9):88-95.

[2] 黄志福,赵毅,梁乃兴,等.基于数字图像处理技术的沥青混合料摊铺均匀性实时监测评价方法[J].公路交通科技,2017,34(64):8-15.

[3] 张争奇,徐耀辉,胡红松,等.沥青路面离析的数字图像评价方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(69):129-135.

[4] YUE Z, MORIN I. Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(2): 479-489.

(下转第 125 页)

荷载与所要计算荷载的大小,若临界荷载大于计算荷载,则优先选用NR法计算;若临界荷载小于计算荷载,则选用弧长法进行计算。对于在特定的一个或多个荷载作用下结构非线性分析问题,则可采用荷载增量法计算。

#### 参考文献:

- [1] 王欣,范雯霖,高顺德.基于弧长法的臂架非线性稳定性分析[J].起重运输机械,2018(11):127-132.
- [2] 孟阳君,张家生.杆系结构的大变形几何非线性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(8):2034-2039.
- [3] 李云飞,陈朝晖,杨永斌,等.基于刚体准则和广义位移控制法的拱结构屈曲与后屈曲分析[J].土木工程学报,2017,50(12):37-45.
- [4] 王殿龙,骆广,王欣,等.基于弧长法的桁架臂结构全过程非线性稳定性分析[J].中国工程机械学报,2015,13(6):480-485.
- [5] 邓继华,邵旭东,谭平.几何非线性与徐变共同作用下三维杆系结构有限元分析[J].工程力学,2015,32(6):117-123.
- [6] 丁泉顺,陈艾荣,项海帆.空间杆系结构实用几何非线性分析[J].力学季刊,2001,22(3):300-306.
- [7] 刘锋,李丽娟.空间网壳结构的稳定性分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2003 31(增刊1):26-29.
- [8] 魏鹏,李建光,李延强,等.从一实例分析看弧长法与牛顿-拉普森法[J].科技与创新,2018,120(24):11-12+18.
- [9] CRISFIELD M A. An arc-length method including line searches and accelerations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 19(9): 1269-1289.
- [10] HRINDA G A, NGUYEN D T. Optimization of stability-constrained geometrically nonlinear shallow trusses using an arc length sparse method with a strain energy density approach[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44(15): 933-950.
- [11] RABINOVITCH O, FROSTIG Y. Fracture mechanics approach to geometrically nonlinear debonding problems in RC beams strengthened with composite materials[J]. Advances in Structural Engineering, 2006, 9(6): 765-777.
- [12] 杨则英,张亚磊,曲建波,等.基于BP神经网络的中等跨径桥梁损伤识别探讨[J].公路与汽运,2020(3):136-140+155.
- [13] 齐念,叶继红.基于离散元法的杆系结构几何非线性大变形分析[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(5):917-922.

收稿日期:2019-06-26

\*\*\*\*\*

(上接第59页)

- [5] CUNDALL P A, STRACK O D L. Discussion: A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1980, 30(3): 331-336.
- [6] MA Tao, ZHANG Deyu, ZHANG Yao, et al. Micro-structure modeling and virtual test of asphalt mixture based on three-dimensional discrete element method [J]. Journal of Central South University, 2016(6): 1525-1534.
- [7] CROSS Stephen A, BROWN E R. Segregation in hot-mix asphalt pavements[M]. Washington D C: National Academy Press, 2000.
- [8] 张垚.基于PFC3D的沥青混合料虚拟试验研究[D].南京:东南大学,2015.
- [9] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [10] 吴文亮,涂志先,李智.基于离散元法离析对混合料骨架结构特征影响[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(6):2303-2310.
- [11] FENG H, PETTINARI M, HOFKO B, et al. Study of the internal mechanical response of an asphalt mixture by 3-D discrete element modeling[J]. Construction & Building Materials, 2015, 77: 187-196.
- [12] 张超,展旭财,杨春和.粗粒料强度及变形特性的细观模拟[J].岩土力学,2013,34(7):2077-2083.
- [13] 杜镇宇,梁乃兴,赵毅.数字图像技术分析沥青路面均匀性的方法[J].中外公路,2017,37(5):62-66.
- [14] 曾晟,梁乃兴,薛轲,等.摊铺沥青路面集料均匀性数字图像评价方法[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(9):144-148.
- [15] ZHANG Y, HUANG X, TAO M, et al. Simulation of meso factors influencing fracture performance of dense-graded asphalt concrete at low temperature[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2017, 33(3): 293-300.
- [16] 吴文亮,卢家志,涂志先.基于X-ray CT和离散元法级配离析对沥青混合料骨架结构力学性能的影响[J].公路工程,2020,45(1):55-61.
- [17] 林超.自然落料状态下路面混合料离析研究[D].西安:长安大学,2014.

收稿日期:2020-10-19