

Analysis of Air Voids Characteristics of Drainage Asphalt Mixture Based on Discrete Element Method

Xinyue Hou, Hong Ying, Yana Jiang

College of Architecture and Traffic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi
Email: monkey618@qq.com

Received: Apr. 24th, 2019; accepted: May 9th, 2019; published: May 16th, 2019

Abstract

In order to study the air voids characteristics of drainage asphalt mixture with different gradations, the asphalt mixture specimen was generated based on discrete element method. Firstly, the central sphere diffusion method was used to simulate the morphological characteristics of coarse aggregates, and a special algorithm was generated to effectively characterize different aggregate gradations. Then, the cross-section void characteristic parameters were obtained by "virtual" cross-section slicing through image processing, and the influence of void characteristics of drainage asphalt mixture was explored. The simulation results show that the voids number is mainly distributed in the range of the void equivalent diameter of 0 mm - 6 mm. As the void ratio increases, the number of voids gradually decreases, but the equivalent diameter of the void increases. The number of voids decreases with the increase of 9.5 mm - 16 mm aggregate content. It is of practical significance to describe the void characteristics of asphalt mixture by discrete element method.

Keywords

Drainage Asphalt Pavement, Voids Characteristics, Aggregate Gradation, Discrete Element Method

基于离散元法的排水沥青混合料空隙特征分析

侯新月, 英红, 蒋娅娜

桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林
Email: monkey618@qq.com

收稿日期: 2019年4月24日; 录用日期: 2019年5月9日; 发布日期: 2019年5月16日

摘要

为研究不同级配的排水沥青混合料内部的空隙特征, 基于离散元法模拟沥青混合料试件的生成。首先利

用中心球扩散法模拟粗集料的形态特征,生成特殊算法有效地表征不同矿料级配,然后对试件进行“虚拟”的横向切片并通过图像处理获取断面空隙特征参数,探究排水沥青混合料空隙特征的影响规律。仿真结果表明:空隙数量主要分布在空隙等效直径为0 mm~6 mm的范围内。随着空隙率的增大,空隙数量逐渐减小,但空隙等效直径增大;空隙数量随着9.5 mm~16 mm集料含量的增加而减少。可见离散元法描述沥青混合料空隙特征具有实际意义。

关键词

排水沥青混合料, 空隙特征, 矿料级配, 离散元法

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

空隙特征表现为空隙宏观属性与空隙细观特征。作为空隙宏观属性参数,空隙率是排水沥青混合料配合比设计中主要的控制对象,由于空隙率的单一性,并不能够准确地呈现空隙在排水沥青混合料内部结构中的分布状况,因此需要结合空隙细观特征进行不同矿料级配的空隙特征研究。

目前常用的基于光学图像和断层扫描图像的细观研究方法虽可获取混合料空隙分布,但设备较为昂贵、复杂,难以推广应用[1]。近年来发展的离散元法可以考虑集料形状的不规则性、集料与砂浆之间刚柔接触问题以及沥青混合料内部不连续的应力场,它比较适合于沥青混合料在细观结构方面的模拟[2]。

排水沥青混合料作为集料、沥青砂浆、空隙三相构成的典型的多相复合材料,可以通过离散元法利用许多不同尺寸的重叠球形成类似于实际压载颗粒的复杂块状模拟粗集料颗粒的形状特征,以及 PFC3D 自带的 fish 语言生成算法有效地表征不同级配,从而生成不同级配的排水沥青混合料离散元虚拟试件。借助 PFC3D 软件构建离散元模型模拟沥青混合料内部结构,具有描述准确、复现性好的优点,方便进行过程分析、趋势分析及抽换部分材料的对比分析[3]。

2. 排水沥青混合料离散元模型

粗集料作为排水沥青混合料中占比最大的组成部分,其嵌挤作用在混合料的骨架空隙结构形成中起到了决定性的影响。因此在排水沥青混合料虚拟试件构建中将粗集料的形态特征模拟作为控制重点,通过准确地生成符合粗集料形态特征的“clump”模板完成粗集料的扁平值与棱角性的模拟。

2.1. 粗集料的形状特征模拟

排水沥青混合料中粗集料的形状、尺寸对混合料的宏观力学和细观结构有着显著的影响,本文借鉴 LU 和 MCDowell [4]关于不规则形状颗粒生成的研究成果,采用中心球扩散法由“clump”构成粗集料,来实现粗集料颗粒三维空间形状中的扁平值与棱角性指标的描述。

通过大量的比较发现在模拟不同粒径颗粒时,取随机方向的概率为 50%,每个方向上生成小球个数最大为 4,此时中心球的半径为粒径控制筛孔下限的 0.4 倍左右[5]。按照上述的形状参数进行设置,在 PFC3D 编写 fish 语言生成粗集料并分析生成集料的形状特征,来获得和实际粗集料形状相近的模型。

本文的研究对象排水沥青混合料是以石灰岩作为粗集料,因此根据石灰岩集料的形状特征参数长轴、中轴和短轴的范围,在 PFC 软件中使用 fish 语言编写算法选择不同尺寸的小球生成个数和生成方向模拟

石灰岩的形状特性，从而生成与石灰岩近似的粗集料 clump 模型。石灰岩的形状参数[6]见表 1。

Table 1. Axial length of limestone
表 1. 灰岩轴长统计

石灰岩粒径(mm)	轴长(mm)		
	长轴	中轴	短轴
13.2~16	18~28	14~19	11~17
9.5~13.2	12~24	10~16	8~14
4.75~9.5	7~14	5~11	4~10
2.36~4.75	4~7	3~6	2~5

按照本文的粗集料生成方法生成各档集料 15 种，然后根据石灰岩集料的形状特征进行分析，从中分别挑选出 3 个代表各档颗粒的 clump 如图 1，并统计它们的体积见表 2。

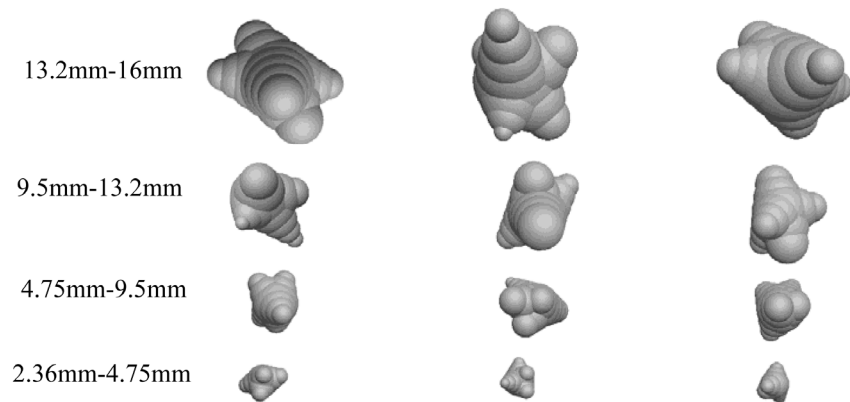


Figure 1. Coarse aggregate model clump of different three-dimensional space shapes
图 1. 不同三维空间形状的粗集料模型 clump

Table 2. Clump volumes of three typical representative particles
表 2. 各档粒径三个典型代表颗粒 clump 的体积

体积(mm ³)	颗粒类型		
	1	2	3
13.2~16 mm	796.23	894.05	1185.64
9.5~13.2 mm	370.56	448.92	568.85
4.75~9.5 mm	91.13	125.21	173.64
2.36~4.75 mm	6.88	16.09	29.16

2.2. 矿料级配的表征

由于空隙是由集料的相互接触嵌挤形成的，不同的集料含量会使其形成的骨架结构也不相同，骨架结构内部所呈现的空隙特征也会有所差异。因此为精准地反映排水沥青混合料的骨架空隙结构和空隙特性，对于虚拟试件的构建要充分考虑矿料级配的完全表征。

矿料级配模拟的关键是利用程序命令和算法来生成不同粒径和满足占比的集料。根据油石比、空隙率和矿料级配计算出各档集料的体积分数，已知集料的密度，就可以设置各档集料的质量，从而达到集料级配的直接控制以及粗集料体积百分率的间接控制目的，通过改变各档集料质量比例使级配变化。依据各档集料的分计筛余从而求得每档粗集料占虚拟试件的体积分数，表达式如下：

$$V_{Di} = \frac{(P_{Di+1} - P_{Di})}{100} \times (1 - VV) \left/ \left(1 + \frac{a\rho_c}{\rho_l} \right) \right. \quad (1)$$

其中：

V_{Di} ——第 i 档集料占虚拟试件的体积分数；

P_{Di} ——第 i 档集料质量通过百分率；

P_{Di+1} ——第 $i+1$ 档集料质量通过百分率；

VV ——试件的空隙率；

a ——试件的油石比；

ρ_c ——集料密度；

ρ_l ——沥青密度。

根据每档粗集料的体积分数以及粗集料体积求得各档集料的个数，将具有级配特征的粗集料单元投放放在生成空间，实现对粗集料级配的模拟。图 2 中图 2(a)~(d)为不同粗集料形状的替换模型。

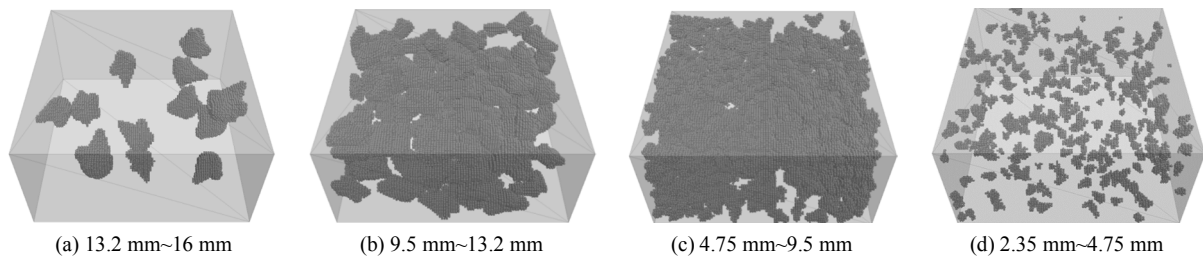


Figure 2. Replacement model of coarse aggregate

图 2. 各档粗集料的替换模型

2.3. 沥青砂浆及空隙的生成

待具有级配特征的粗集料球单元生成后，在投放区域内填充规则排列的粒径为 1 mm 的球单元来模拟沥青砂浆，小球在空间内属于六面相切的规则排列。遍历规则排列的球单元，逐一判断与粗集料 clump 块体的相对位置，若小球与 clump 单元重叠，则视为粗集料单元，否则视为沥青砂浆，最终删除原有的集料单元 clump。

在生成的沥青砂浆中随机删除一定数量的单元作为空隙。根据实测的空隙率、试件体积及空隙分布规律可以计算出空隙体积，用空隙总体积除以单个小球的体积得到需要删除的球单元个数，按照均匀分布的方式随机删除相应数量的沥青砂浆小球，并要满足实际的空隙率要求。图 3(a)为按照级配投放的粗集料模型，图 3(b)为最终生成的排水沥青混合料虚拟试件。

3. 排水沥青混合料的空隙特征获取

空隙特征在细观属性中表现为空隙等效直径和空隙数量等细观参数。对已生成的虚拟试件进行横向切割处理，通过图像处理并获取和统计空隙特征参数分析其切面空隙特征。

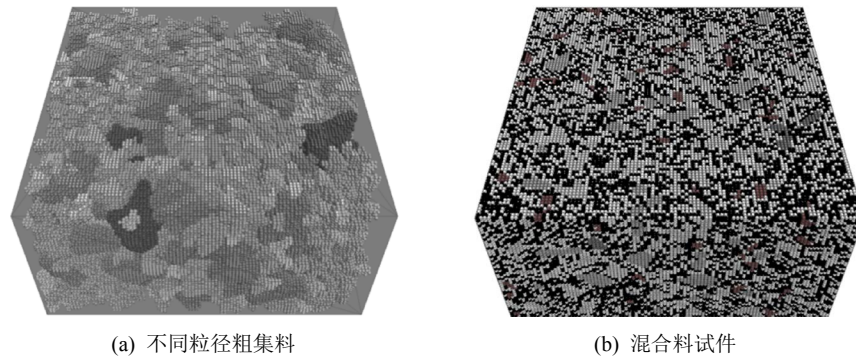


Figure 3. Generation process of discrete element model
图 3. 离散元模型生成过程

3.1. 空隙特征参数的获取

为获取虚拟试件的空隙微观特征参数，对生成的虚拟试件进行密集的横向“切片”，并使用 matlab 软件对获取的切片图像进行处理[7]。首先对图像进行二值化处理，经过滤波降噪后，生成算法统计连通区域的个数及面积，筛选极小连通区域并消除从而减小对结果的影响降低数据误差，最终获取每个断面的空隙个数和面积，处理过程见图 4(a)~(c)。

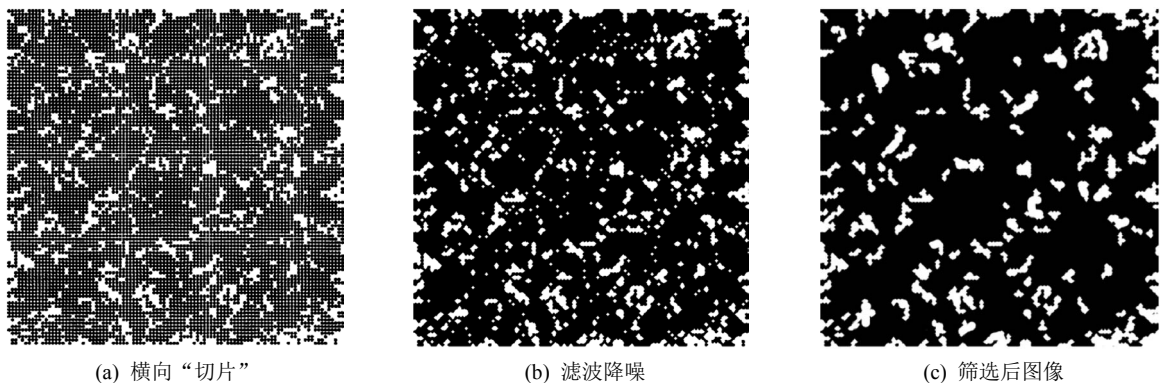


Figure 4. Image processing of cross-sectional voids
图 4. 切面空隙图像处理

3.2. 空隙特征参数

统计得到每个断面中的空隙数量和空隙面积，计算可得空隙微观参数包括：平均断面空隙个数，平均单个空隙面积、平均断面空隙总面积、空隙等效直径、最大空隙等效直径等。平均断面空隙个数是指沿高度方向的所有切片内的空隙个数的平均值，记为 N ；平均断面空隙总面积是指所有断面空隙总面积的平均值，表示为 S ；平均单个空隙面积是平均断面空隙总面积与平均断面空隙个数的比值，记为 s ；由于截面空隙构造极其复杂，形状呈现不规则性，因此将空隙形状简化为当量圆[8]，当量圆的直径等效为空隙等效直径来表征空隙的尺寸大小，通过平均单个空隙面积求得空隙等效直径记为 d 。以上参数的计算公式如下：

$$N = \frac{\sum N_i}{n} \quad (2)$$

$$S = \sum S_i \quad (3)$$

$$s = \frac{S}{N} = \frac{\sum S_i}{\sum N_i/n} = \frac{n \sum S_i}{\sum N_i} \quad (4)$$

$$d = 2\sqrt{s/\pi} \quad (5)$$

式中: S_i 为第 i 个切面的空隙总面积; N_i 是第 i 个切面上的空隙总个数; d_i 为第 i 个切面空隙的等效直径; n 为试件的层数。这些空隙细观参数描述了试件内部某个截面上的空隙分布特征, 也反映了整个试件内部空隙分布规律。

4. 排水沥青混合料空隙特征分析

主要筛孔通过率可以改变粗细集料的比例构成具有不同空隙分布特征的骨架结构。即使空隙率相近, 不同级配的混合料空隙结构也会有所不同[9]。为研究不同空隙率和空隙率相近的不同粗细级配排水沥青混合料空隙特征影响规律, 设计空隙率分别为 18%、20%、22%、24% 的 4 种级配形式 PAC-13A、PAC-13B、PAC-13C 和 PAC-13D, 并保证空隙率均在 20% 左右, 通过改变 9.5 mm~16 mm 集料和 4.75 mm~9.5 mm 集料含量的比例设计不同粗细级配, 可用 16 mm 筛孔通过率与 9.5 mm 筛孔通过率之差 $P_{16-9.5}$ 同 9.5 mm 筛孔通过率与 4.75 mm 筛孔通过率之差 $P_{9.5-4.75}$ 的比值表示不同粗细级配, 得到的级配 PAC-13B、粗型级配 PAC-13B⁺ 以及细型 PAC-13B⁻ 的 $P_{16-9.5}$ 与 $P_{9.5-4.75}$ 比值分别为 1、1.39 和 0.67。表 3 为 6 组级配的油石比、空隙率, 并绘制级配曲线于图 5 和图 6。

Table 3. Drainage asphalt mixture gradation

表 3. 排水沥青混合料级配

筛孔通过百分率%	级配名称						
	筛孔尺寸 mm	PAC-13A	PAC-13B	PAC-13C	PAC-13D	PAC-13B+	PAC-13B-
16	100	100	100	100	100	100	100
13.2	96.1	95.9	95.7	95.6	92.1	98.7	
9.5	60.4	59.2	58.6	57.4	51.2	68.2	
4.75	20.3	18.4	16.8	14.5	16.2	20.6	
2.36	17.5	14.3	11.4	9.1	14.3	14.3	
1.18	14.5	12.2	10.3	8.4	12.2	12.2	
0.6	12.3	10.5	9.1	7.3	10.5	10.5	
0.3	10.1	8.5	7.7	6.2	8.5	8.5	
0.15	7.5	7.1	6.4	5.3	7.1	7.1	
0.075	5.3	5.2	5.1	4.9	5.2	5.2	
油石比	5.4	5.2	4.8	4.6	5.2	5.2	
空隙率	17.6	19.9	22.1	23.9	20.2	19.7	
连通空隙率	12.3	15.7	18.4	20.1	18.3	13.8	

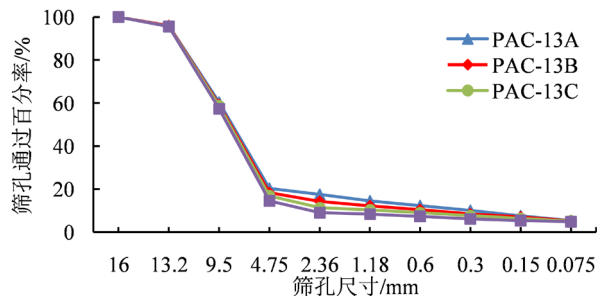


Figure 5. Gradation curves of mixture with different voids
图 5. 不同空隙率的混合料级配曲线

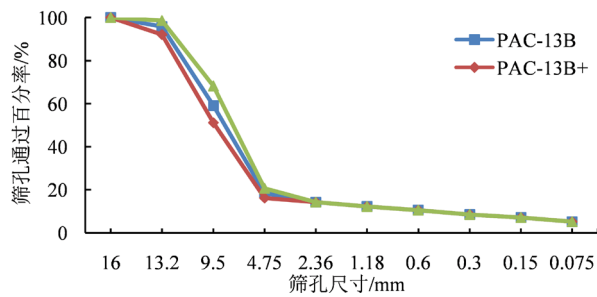


Figure 6. Gradation curves of mixture with different voids ratio and different sizes
图 6. 空隙率相近粗细不同的混合料级配曲线

4.1. 三维数字虚拟试件的生成

根据 6 组级配信息生成虚拟试件，已知沥青密度为 1.03 g/cm^3 ，粗、细集料平均密度为 2.7 g/cm^3 ，排水沥青混合料的空隙率和油石比在表 3 可得，根据计算公式(1)可得粒径大于 2.36 mm 的粗集料占虚拟试件的体积分数见表 4。

Table 4. Ratio of coarse aggregate of each file to total volume of specimen
表 4. 各档粗集料占试件总体积的比例

占总体积比例(%)	筛孔尺寸(mm)				粗集料占总体积比例(%)
	13.2~16	9.5~13.2	4.75~9.5	2.36~4.75	
PAC-13A	2.82	25.77	28.95	2.02	59.55
PAC-13B	2.89	25.87	28.76	2.89	60.41
PAC-13C	2.98	25.67	28.92	3.74	61.31
PAC-13D	2.99	25.94	29.13	3.67	61.73
PAC-13B ⁺	5.55	28.72	24.58	1.33	60.18
PAC-13B ⁻	0.92	21.55	33.64	4.45	60.56

本文选取尺寸边长为 100 mm ，高为 50 mm 的立方体作为虚拟试件的生成空间区域，根据虚拟试件总体积以及粗集料各档集料体积占比，通过空隙率计算沥青砂浆以及空隙体积，不同级配的虚拟试件各组分体积见表 5。

Table 5. Virtual specimen component volume
表 5. 虚拟试件各组分体积

体积(mm ³)	组分名称						
	级配	13.2~16 mm	9.5~13.2 mm	4.75~9.5 mm	2.36~4.75 mm	沥青砂浆	空隙
PAC-13A		14,100	128,850	144,750	10,100	297,750	88,000
PAC-13B		14,450	129,350	143,800	14,450	302,050	99,500
PAC-13C		14,900	128,350	144,600	18,700	306,550	110,500
PAC-13D		14,950	129,700	145,650	18,350	308,650	119,500
PAC-13B ⁺		27,750	143,600	122,900	6650	300,900	101,000
PAC-13B ⁻		4600	107,750	168,200	22,250	302,800	985,00

根据每档粗集料的体积分数以及粗集料体积求得各档集料的个数，将具有级配特征的粗集料单元投放在生成空间，并根据空隙率实现沥青砂浆和空隙的模拟最终生成 6 组排水沥青混合料虚拟试件。

4.2. 空隙特征参数

对 6 组虚拟试件进行间隔为 1 mm 的横向切片 50 个，使用 matlab 软件编写算法对图像进行处理获取空隙数量和空隙面积，并统计 50 个切面的空隙数量和每个空隙的面积进行分析。图 7 为 6 组级配虚拟试件的所有断面空隙数量的对比图，图 8 至图 13 为 6 组级配虚拟试件的断面空隙特征图像以及空隙数量分布情况。

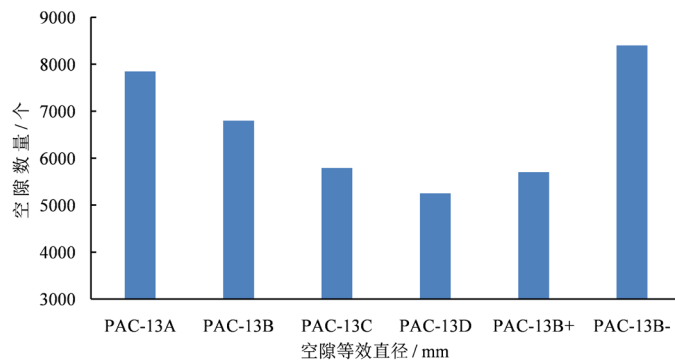


Figure 7. Voids number of all cross-section in the virtual specimen with six gradations

图 7. 6 组级配虚拟试件的所有断面空隙数量

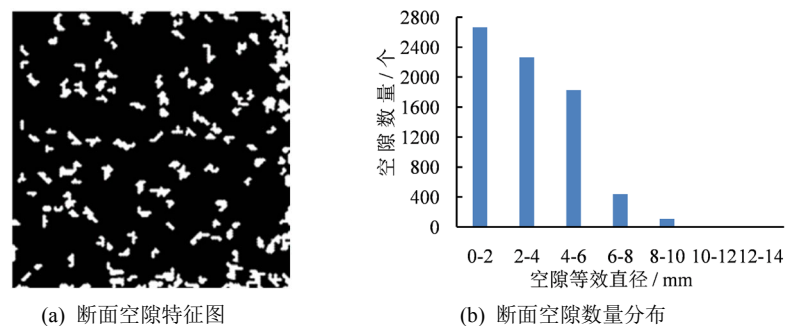
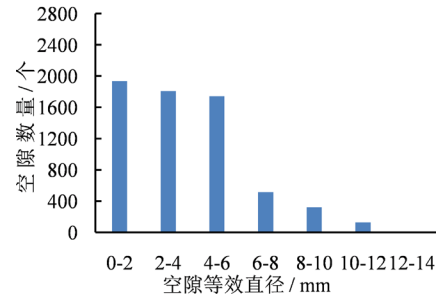


Figure 8. PAC-13A

图 8. PAC-13A



(a) 断面空隙特征图



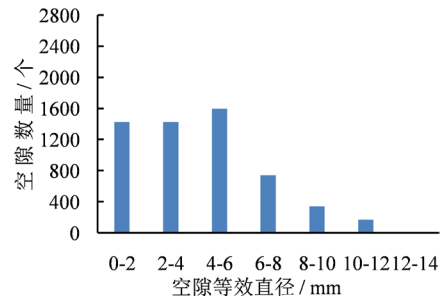
(b) 断面空隙数量分布

Figure 9. PAC-13B

图 9. PAC-13B



(a) 断面空隙特征图



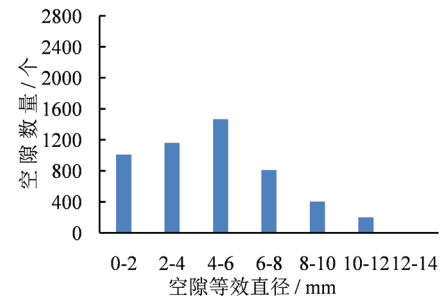
(b) 断面空隙数量分布

Figure 10. PAC-13C

图 10. PAC-13C



(a) 断面空隙特征图



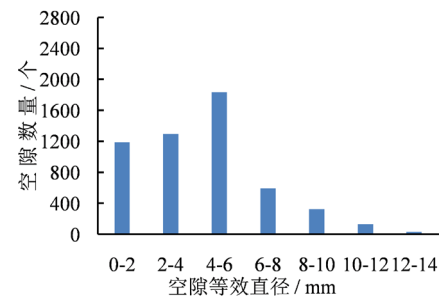
(b) 断面空隙数量分布

Figure 11. PAC-13D

图 11. PAC-13D



(a) 断面空隙特征图



(b) 断面空隙数量分布

Figure 12. PAC-13B⁺

图 12. PAC-13B⁺

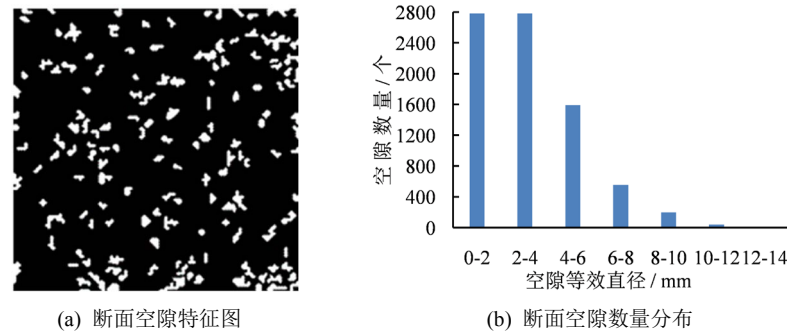


Figure 13. PAC-13B⁻
图 13. PAC-13B⁻

图 8 至图 13 显示,6 组级配虚拟试件的空隙数量集中分布在空隙等效直径为 0 mm~6 mm 的范围内。

分析图 8 至图 11 可知,随着空隙率的增大,空隙数量呈现出最大值分布在空隙等效直径为 0 mm~2 mm 的范围内逐渐向 4 mm~6 mm 范围内移动的趋势。对于空隙率较小的 PAC-13A,其分布在空隙等效直径为 0 mm~2 mm、2 mm~4 mm 和 4 mm~6 mm 范围内的空隙数量随着空隙等效直径的增大而减少;当空隙率增大时,空隙数量在空隙等效直径为 0 mm~2 mm 的范围内减少,在 2 mm~4 mm 和 4 mm~6 mm 的范围内增加,当空隙率继续增加时,表现为 PAC-13B 和 PAC-13C 在空隙等效直径为 0 mm~2 mm、2 mm~4 mm 和 4 mm~6 mm 的范围内的空隙数量几乎相等,当空隙率增至 23.9%时,空隙数量在空隙等效直径为 0 mm~2 mm 的范围内继续减少,在 2 mm~4 mm 和 4 mm~6 mm 的范围内继续增加,因此 PAC-13D 分布在空隙等效直径为 0 mm~2 mm、2 mm~4 mm 和 4 mm~6 mm 的范围内的空隙数量出现随着空隙等效直径的增大逐渐增多的现象。

对比图 9、图 12 和图 13 可知, PAC-13B⁺的空隙数量较少,集中分布在空隙等效直径为 4 mm~6 mm 的范围内,而 PAC-13B⁻的空隙数量较多集中分布在 0 mm~4 mm。同时 PAC-13B⁺的较大空隙等效直径 6 mm~14 mm 范围内的空隙数量远大于 PAC-13B 和 PAC-13B⁻。

统计分析 6 组级配的排水沥青混合料空隙细观参数,试件平均单个切面的空隙特征参数见表 6。

Table 6. Meso-characteristic parameters of voids in drainage asphalt mixture
表 6. 排水沥青混合料空隙细观特征参数

混合料	计算空隙率 (%)	空隙数量 (个)	空隙总面积 (mm ²)	平均单个空隙面积 (mm ²)	空隙等效直径 (mm)	最大等效直径 (mm)
PAC-13A	17.6	146	1622.4	11.1	3.8	9.8
PAC-13B	19.9	129	1852.8	14.4	4.3	11.2
PAC-13C	22.1	114	2034.4	17.9	4.8	11.4
PAC-13D	23.9	101	2191.1	21.8	5.3	11.7
PAC-13B ⁺	20.2	108	1871.8	17.3	4.7	12.4
PAC-13B ⁻	19.7	159	1831.3	11.5	3.9	10.3

这些空隙细观参数描述了试件内部某个截面上的空隙特征,也反映了整个试件内部空隙分布规律。级配最大公称粒径为 13 mm,而 6 组试件的最大等效直径为 12.4 mm 满足要求。

5. 空隙特征影响规律

5.1. 空隙率对空隙特征的影响

排水沥青混合料 PAC-13A、PAC-13B、PAC-13C 和 PAC-13D 的空隙率与空隙数量和空隙等效直径的关系曲线见图 14。随着空隙率的增大，试件的断面平均空隙数量逐渐减少，相反地空隙等效直径随之增大。图 15 显示的是空隙率与断面空隙总面积的回归模型，空隙率与断面空隙总面积具有良好的线性相关关系，相关系数高达 0.9981，断面空隙总面积随着空隙率的增大而增大。可见增大空隙率是指增大空隙尺寸，而不是增多空隙数量。

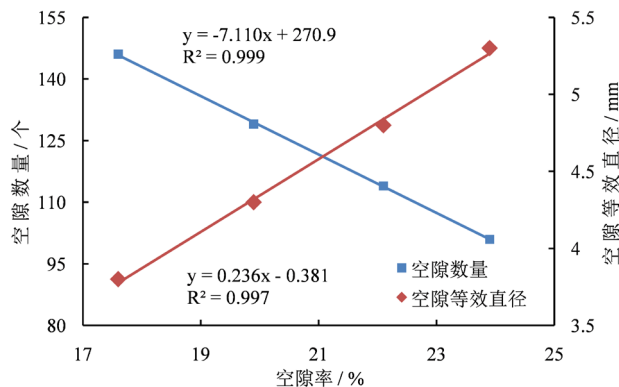


Figure 14. Relationship between the voids number, the voids equivalent diameter and the voids ratio
图 14. 空隙数量及空隙等效直径与空隙率之间的关系

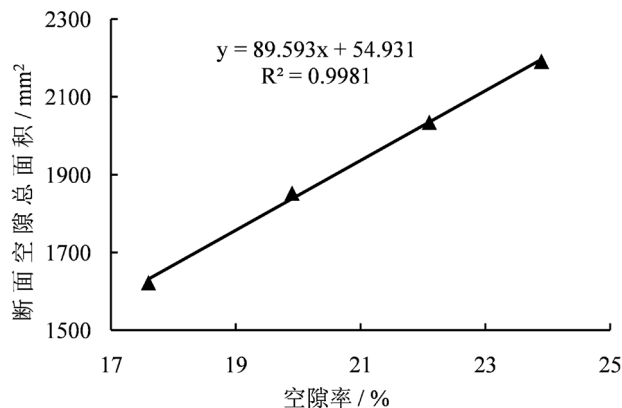


Figure 15. Relationship between total area of cross-section voids and voids ratio
图 15. 断面空隙总面积与空隙率之间的关系

5.2. 级配对空隙特征的影响

选取空隙率相近的级配 PAC-13B、PAC-13B⁺以及 PAC-13B⁻来评价不同级配对空隙特征的影响规律，三组级配公称最大粒径均为 13.2 mm，空隙率分别为 19.9%、20.1%和 19.7%，不同级配的混合料空隙等效直径和空隙数量的对比如图 16。

图 16 中显示当空隙率相近时，PAC-13B⁺的空隙等效直径最大，这是由于相比级配 PAC-13B 和 PAC-13B⁻，PAC-13B 的 9.5 mm~16 mm 集料含量最多，粗集料越多，其嵌挤构成的骨架结构内部空隙越大。因此级配越粗，空隙等效直径越大，空隙数量越少。这表明粗细不同的级配对沥青混合料的细观结构具有一定影响，较粗级配在排水沥青混合料内部易形成较大尺寸的空隙。

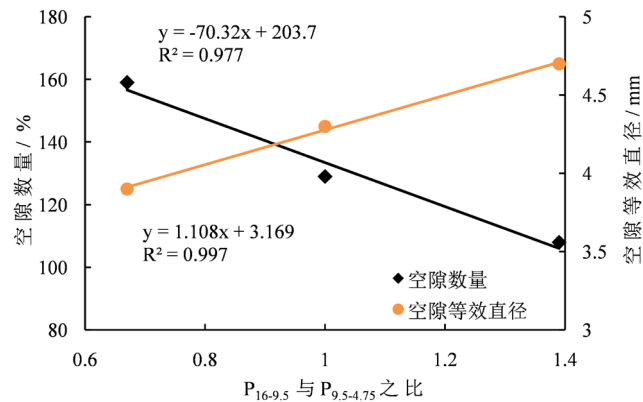


Figure 16. Voids equivalent diameter and voids number of mixture with different gradations
图 16. 不同级配的混合料空隙等效直径和空隙数量

5.3. 空隙特征与连通空隙率的关系

分析不同空隙率和不同粗细级配的排水沥青混合料的空隙特征，建立空隙细观参数同连通空隙率的回归模型以研究空隙宏观属性与细观特征的关系，两者的关系曲线见图 17。

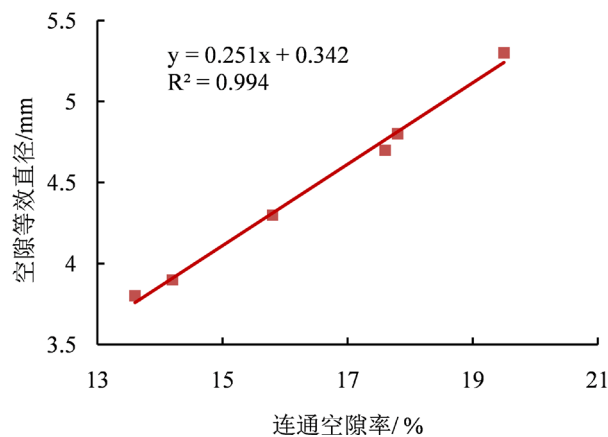


Figure 17. Relationship between voids equivalent diameter and connected voids ratio
图 17. 空隙等效直径与连通空隙率的关系

如图 17 所示，根据空隙等效直径与连通空隙率的关系曲线图可得，空隙等效直径随着连通空隙率的增大而增大。观察 PAC-13B⁺和 PAC-13C 可知，级配 PAC-13B⁺的空隙率小于级配 PAC-13C，但其连通空隙率与空隙等效直径与 PAC-13C 相差较小。这是由于 PAC-13B⁺混合料内部的 9.5 mm~16 mm 集料含量过多，粗集料较多易形成较大的空隙，大尺寸空隙极有可能形成连通通道，从而出现试件空隙率较小而连通空隙率较大的现象，可见对于不同空隙率和不同级配的排水沥青混合料，其连通空隙率均与空隙等效直径呈现出良好的相关性，连通空隙率相比空隙率与空隙特征的联系更大。

6. 结论

本文通过采用离散元方法建立排水沥青混合料虚拟试件，分析不同空隙率和不同级配下试件空隙特征参数的变化趋势以研究排水沥青混合料空隙特征的影响规律：

1) 排水沥青混合料的空隙数量主要分布在空隙等效直径为 0 mm~6 mm 的范围内。随着空隙率的增大，空隙数量逐渐减小，但空隙等效直径增大。

2) 粗型级配的空隙数量集中分布在空隙等效直径为 4 mm~6 mm 的范围内, 细型级配的空隙数量集中分布在空隙等效直径为 0 mm~4 mm 的范围内。

3) 空隙率相近而级配不同时, 粗型级配断面空隙等效直径较大, 而空隙数量少于细型级配, 增加 9.5 mm~16 mm 集料含量可增大其空隙等效直径。

4) 不同空隙率和不同粗细级配的沥青混合料连通空隙率均与空隙等效直径存在良好的相关性, 相比空隙率其更能反映空隙细观特征。

参考文献

- [1] 王江洋, 钱振东, 汪林兵. 沥青混合料三维细观数字试件的随机生成算法[J]. 公路, 2014(12): 172-178.
- [2] 刘卫东. 基于离散元的沥青混合料空间结构形成过程研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [3] 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.
- [4] Lu, M. and McDowell, G.R. (2007) The Importance of Modeling Ballast Particle Shape in the Discrete Element Method. *Granular Matter*, **9**, 69-80. <https://doi.org/10.1007/s10035-006-0021-3>
- [5] 顾永明, 王江洋, 杨旭. 基于 CT 扫描的沥青混合料试件三维离散元重构[J]. 公路, 2016(4): 182-186.
- [6] Zhang, D., Huang, X. and Zhao, Y. (2012) Investigation of the Shape, Size, Angularity and Surface Texture Properties of Coarse Aggregates. *Construction & Building Materials*, **34**, 330-336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.096>
- [7] 英红. 数字图像在沥青混合料中的应用及研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [8] Ma, T., Zhang, D., Zhang, Y., et al. (2015) Effect of Air Voids on the High-Temperature Creep Behavior of Asphalt Mixture Based on Three-Dimensional Discrete Element Modeling. *Materials and Design*, **89**, 304-313. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.005>
- [9] 基敏雪, 王宏畅. 基于数字图像处理技术的多孔沥青混合料细观空隙特征规律[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 257-261.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org