

# 透水沥青混合料车辙试验离散元仿真

柴荣山<sup>1</sup>,董震<sup>1</sup>,单景松<sup>2</sup>,倪效学<sup>1</sup>,王延忠<sup>1</sup>

1. 山东省公路桥梁建设集团有限公司,山东 济南 250013; 2. 山东科技大学土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590

**摘要:**为分析车辙对透水沥青混合料内部空隙的影响,以透水沥青混合料 PAC-13 为研究对象,进行按级配上限及级配中值成型的沥青混合料试件的车辙试验,得到轮迹处的车辙及空隙率的变化规律;基于车辙试验数据,采用离散元软件 PFC 2D,从细观角度建立透水沥青混合料离散元颗粒仿真模型,分析透水沥青混合料车辙产生过程中内部空隙及颗粒间接触力的变化规律,并考虑试件厚度对空隙率的影响。研究表明:车辆荷载作用处沥青混合料空隙率变化比其他部位大;在相同荷载作用下,级配中值沥青混合料空隙率变化比级配上限沥青混合料小;级配上限沥青混合料的模型厚度增大,空隙率变化减小,颗粒间接触力向下传递的趋势降低,且车辙板底部所受颗粒间接触力较小;厚 8 cm 的车辙板在荷载位置的空隙率变化较大,且随距表面距离的增大,空隙率变化幅度减小。

**关键词:**透水沥青混合料;车辙试验;离散元法;空隙率

**中图分类号:**U414;U214.7

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2024)02-0026-07

**引用格式:**柴荣山,董震,单景松,等. 透水沥青混合料车辙试验离散元仿真[J]. 山东交通学院学报,2024,32(2):26-32.

CHAI Rongshan, DONG Zhen, SHAN Jingsong, et al. Discrete element simulation of wheel rutting test for permeable asphalt mixture[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2024,32(2):26-32.

## 0 引言

透水型沥青路面通常采用较大单一粒径的集料,路表构造深度大,抗滑特性优异。但水可在沥青混合料内部自由流通,沥青混合料须有较好的水稳定性和渗透性<sup>[1]</sup>。透水型沥青路面结构的空隙率较大,在长期行车荷载和堵塞物的作用下,空隙率可能改变,影响路面结构的排水能力,缩短路面结构的正常寿命,弱化路面的使用功能,研究透水型沥青路面在行车荷载作用下的空隙衰变情况有重要的现实意义。

通常采用试验观察的方法分析沥青混合料的力学性能,沥青混合料对加载时间、试验温度等因素较敏感,试验结果可能出现较大偏差,且时间成本和人力成本较大。徐光霁等<sup>[2]</sup>比较石灰岩与玄武岩 PAC-16 排水沥青混合料在荷载作用下的级配细化与空隙衰减特性、路用性能与力学性能,发现采用玄武岩粗集料代替纯石灰岩 PAC-16 混合料中 4.75~9.50 mm 粗集料可减缓级配细化与空隙率衰减现象。陈书豪<sup>[3]</sup>通过拟合车辙试验曲线获得修正的 Burgers 模型参数,并将其转化为 Prony 级数参数形式,精确描述沥青混合料永久变形的变化规律。Meng 等<sup>[4]</sup>研发多方向透水测试装置,分析透水沥青混合料的渗透性,研究沥青混合料的渗透性对流体流动的影响。

采用基于有限元法的仿真软件进行仿真,仿真结果有一定误差。离散元方法广泛应用于岩土工程、采矿工程等领域,离散元软件的开发和应用具有现实意义。在道路工程方面,采用离散元法建立沥青混合料宏观性质与微观性质间的关系,可从细观角度研究沥青混合料的性质。刘文昶等<sup>[5]</sup>采用离散元方法

收稿日期:2022-11-22

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME004)

第一作者简介:柴荣山(1973—),男,山东菏泽人,高级工程师,主要研究方向为路基路面新材料和道路新型结构设计, E-mail:610350151@qq.com。

建立沥青混合料非均质模型,统计分析沥青混合料在压实过程中各相体间荷载的演化特征。凌天清等<sup>[6]</sup>模拟不同空隙率沥青混合料的微细观结构特征及力学性能,对比分析不同空隙率沥青混合料微细观结构特征下的力学特性与排水特性的关系。Senior-Arrieta 等<sup>[7]</sup>采用离散法模拟沥青混合料单轴压缩试验,得到符合试验材料宏观性质的微观参数,研究微观接触模型中接触刚度、黏结强度、摩擦系数、黏结半径的变化对模拟结果的影响。郑冬<sup>[8]</sup>基于粗集料形貌特性,采用离散元仿真、宏观试验模拟、细观结构解析等多种技术手段,构建包括粗集料形貌、空隙结构特征、混合料性能、粗集料形貌的多层次闭合研究体系,研究多孔沥青混合料空隙结构演变机理。于聪聪<sup>[9]</sup>基于离散元方法,从细观角度分析沥青路面产生车辙破坏时的力学响应,分析单轴压缩模拟试验过程中颗粒的位移变化和模型内部的裂缝发展。杨盼盼等<sup>[10]</sup>采用软件 PFC 2D 建立上层为 SMA-13、下层为 AC-20 的二维离散元模型,研究试件内部接触力的分布与大小、集料的空间运动轨迹对车辙形成的影响。王昊鹏等<sup>[11]</sup>、牛冬瑜等<sup>[12]</sup>采用离散元方法建立沥青混合料细观结构模型,并进行沥青混合料三维离散元虚拟三轴剪切试验,与室内试验结果规律一致。现有研究中缺乏对不同级配仿真模型的探索,对车辙试验微观模型的接触力分析不足,无法为现场试验提供对应的理论支撑。

本文采用离散元方法仿真不同级配下透水沥青混合料的抗车辙性能,追踪车辙试验过程中车辙板内部空隙率、颗粒间接触力链变化规律,并与实际车辙试验结果对比,为透水大空隙沥青混合料优化设计提供理论指导。

## 1 车辙试验

### 1.1 原材料及配合比

选择沥青混合料 PAC-13,主要成分包括粗集料、细集料、沥青、改性添加剂,采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯热塑性橡胶类(styrene butadiene styrene, SBS)改性沥青与高黏度硫化助剂(high viscosity vulcanization additives, HVA)合成高黏度改性沥青。将集料加热到试拌温度 190 °C 并恒温保持大于 6 h 后,与热熔胶(hexadecyl methacrylate, HMA)同时加入拌和锅中搅拌 90 s,再将沥青、矿粉按规定顺序加入拌和锅,各搅拌 90 s,使沥青混合料混合均匀,将制备好的沥青混合料放入烘箱恒温 165 °C 保存。

在推荐级配范围内,按期望目标空隙率试配 3 种配合比,分别选择 0~3 mm (1<sup>#</sup>配合比)、5~10 mm (2<sup>#</sup>配合比)、>10~15 mm (3<sup>#</sup>配合比)的石料作为调级集料,使各级配曲线尽量靠近所选级配曲线。级配上限、级配中值的合成级配曲线如图 1 所示。

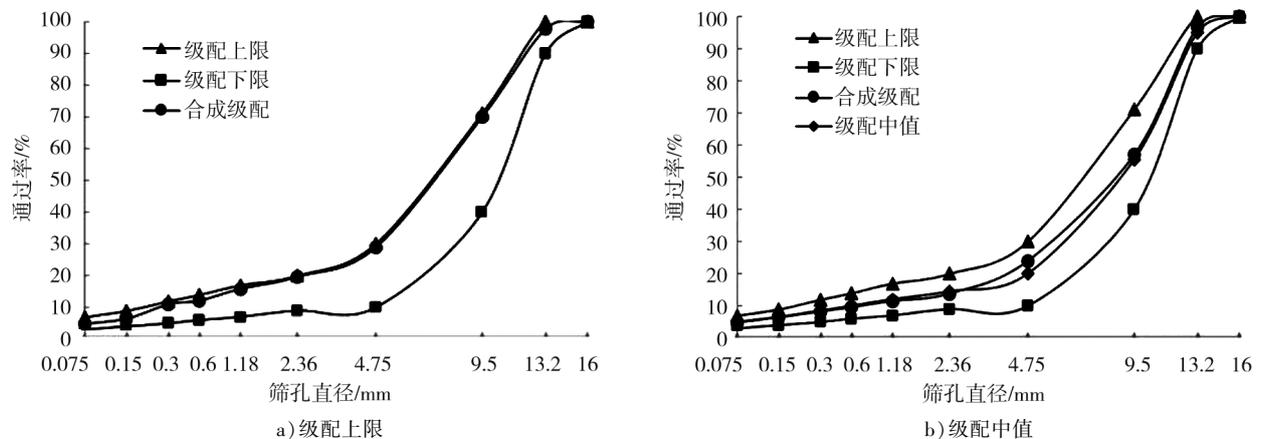


图1 级配上限、级配中值合成级配曲线

### 1.2 车辙板碾压成型试验

采用轮碾法碾压成型车辙试验试件,试件长 300 mm,宽 300 mm,厚 50~100 mm,把试件连同试模共同置于(60±1)°C 的保温室内保温 5~12 h,在试件车轮不行走的位置粘贴 1 个热耦温度计。将试模和试件一

起移至车辙试验机试验台上,试验轮置于试件的中间位置,试验轮运动方向与运用轮碾法成型试件时的碾压方向相同,启动车辙自动变形记录仪,随即启动车辙试验机,试验轮往返行走约1 h或试件最大变形为25 mm时停止试验<sup>[13]</sup>。试验结束后,待试件冷却后脱模,按级配上限及级配中值碾压成型车辙板。

2种级配的沥青混合料在启动车辙试验机后45、60 min的车辙深度及动稳定度,如表1所示。由表1可知,级配中值沥青混合料的车辙深度比级配上限沥青混合料小,动稳定度比级配上限沥青混合料明显增大。

表1 不同级配试件的车辙深度及动稳定度

沥青混合料级配	车辙深度/mm		动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
	启动车辙试验机后45 min	启动车辙试验机后60 min	
级配上限	1.969	2.351	1 649
级配中值	1.725	1.787	10 161

### 1.3 空隙率测试

根据所选2种级配,分别击实成型马歇尔试件,采用体积法测试试件的空隙率。沿垂直于橡胶轮运动方向的中轴线方向均切割为3个车辙板试件,试件长15 cm,宽5 cm,高5 cm。不同级配试件检测位置处的空隙率变化如表2所示。

表2 不同级配试件的空隙率

沥青混合料级配	试件	厚度/mm	体积/cm <sup>3</sup>	毛体积相对密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	空隙率/%
级配上限	1 <sup>#</sup>	53.0	397.5	2.235	15.4
	2 <sup>#</sup>	53.0	397.5	2.174	17.6
	3 <sup>#</sup>	50.9	381.8	2.320	13.1
级配中值	4 <sup>#</sup>	54.0	405.0	2.202	16.3
	5 <sup>#</sup>	54.1	405.8	2.168	17.6
	6 <sup>#</sup>	52.2	391.5	2.212	16.0

由表2可知:假设在车辙荷载作用下,切割部位试件的质量保持不变,级配上限试件的毛体积相对密度大于级配中值试件,空隙率明显小于级配中值试件。PAC-13透水型沥青混合料的级配对其抗车辙能力有较大影响,粗集料越多,荷载施加位置的试件空隙率变化越小,抗车辙能力越强,增加粗集料有利于提高沥青混合料的抗空隙衰变能力。

## 2 车辙试验离散元仿真

### 2.1 透水沥青混合料离散元颗粒模型

为进一步探究荷载作用下颗粒运动规律及其对沥青混合料空隙率的影响,采用离散元方法模拟车辙试验过程<sup>[14-15]</sup>。

根据车辙板试件建立离散元墙体边界,根据所选级配类型的沥青混合料集料的通过率,计算各挡集料的质量比,为方便模拟计算,将粒径小于1.18 mm的细集料作为填充料处理,选用接触黏结模型模拟颗粒间的相互作用<sup>[16]</sup>。

模拟车辙试验前先删除建模时建立的顶面墙体,以5个半径为5 mm的小球(自左向右依次为1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>)模拟车轮施加荷载,车辙试验模拟加载模型如图2所示。

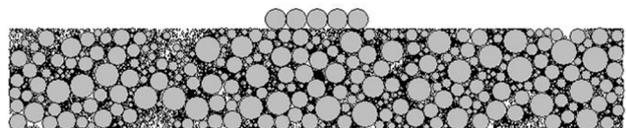


图2 车辙试验模拟加载模型

## 2.2 荷载施加及测量圆建立

车辙试验中加载频率为 42 次/min,为在软件 PFC 2D 中更精确地模拟车辙对沥青层的加载情况,给 5 个小球以正弦波绝对值(半正弦波)的形式将向下的接触力施加给下部车辙板,模拟滚轮碾压沥青层,控制峰值荷载为 0.7 MPa。建立荷载与步长的函数关系,编程语言施加的正弦波函数为

$$y = A \sin(0.7\pi t),$$

式中: $A$  为施加的正弦波振幅, $t$  为模拟时间步长。

根据实际室内车辙试验得到的相关宏观参数确定微观参数。设定 1 组微观参数,通过软件 PFC 模拟车辙试验并记录模拟结果,根据测试结果不断调整该组微观参数,直至试验数据和模拟数据吻合,将调试后的微观参数作为模拟车辙试验的微观参数<sup>[17]</sup>。采用试错方法得到在 PFC 2D 中模拟温度 60 °C 下沥青混凝土的细观参数为:弹性模量为 32 kPa,接触黏结抗剪强度为 2.9 MPa,接触黏结抗拉强度为 2.6 MPa,摩擦因数为 0.4,阻尼因数为 0.7。

为分析在行车荷载下车辙板不同位置沥青混合料试件的空隙率变化情况,在车辙板 3 个位置设置测量圆监测空隙率变化,车辙板轮迹带两侧对称位置的受力状态基本一致,3 个测量圆均在车辙板轮迹带的同一侧。测量圆半径为 25.0 mm,以车辙板左下角为坐标原点,确定 3 个测量圆圆心的位置坐标分别为测量圆 1 (25.0 mm, 25.0 mm)、测量圆 2 (87.5 mm, 25.0 mm)、测量圆 3 (150.0 mm, 25.0 mm),位置分布情况如图 3 所示。采用软件 PFC 中追踪颗粒位置变化的功能,选择测量圆 3 的圆心位移信息表征车辙深度。

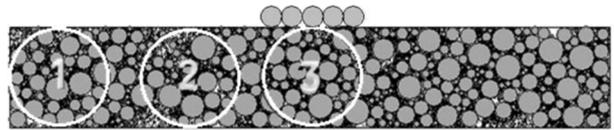


图3 测量圆位置分布

## 2.3 模拟结果分析

### 2.3.1 车辙深度

按级配上限、级配中值沥青混合料情况编程,设定与实际一致的车辙板颗粒模型,监测并导出测量圆 3 圆心对应的车辙曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知:按级配上限制备试件模拟产生的最大车辙深度为 2.38 mm,实际车辙试验中的最大车辙深度为 2.35 mm;按级配中值制备试件模拟产生的最大车辙深度约为 1.75 mm,实际车辙试验的最大车辙深度为 1.79 mm;模拟结果与试验结果基本吻合,说明该组微观参数可较好地模拟车辙试验过程。

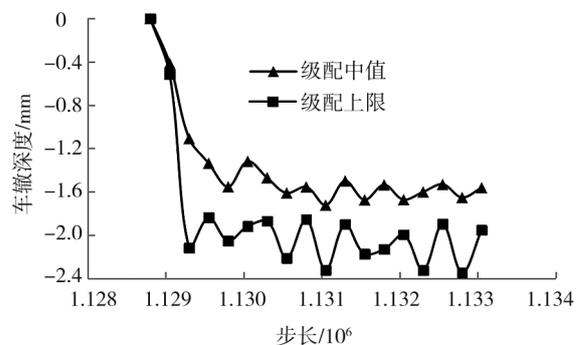


图4 不同级配下测量圆3圆心对应的车辙深度曲线

加载初期是车辙板的压密过程,车辙曲线切线斜率较大,车辙深度增大较快,随后车辙深度在较小范围内波动,与理论上车辙的形成过程相符。在相同车辆荷载和路面厚度下,随级配中值试件粗集料增多,车辙深度减小<sup>[18-20]</sup>。

### 2.3.2 颗粒间接触力

采用软件 PFC 2D 分析颗粒间接触力的力链,如图 5 所示。

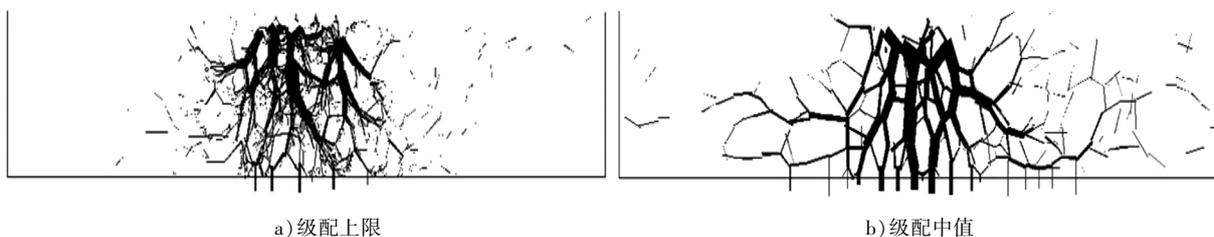


图5 不同级配试件颗粒间接触力的力链

由图5可知:随粗颗粒增多,接触力向两侧传递的趋势更明显,且接触力大多以粒径较大的颗粒为传递对象向下传递。

### 2.3.3 空隙率变化

按级配上限和级配中值制备试件所得3个测量圆圆心空隙率随步长的变化曲线如图6所示。

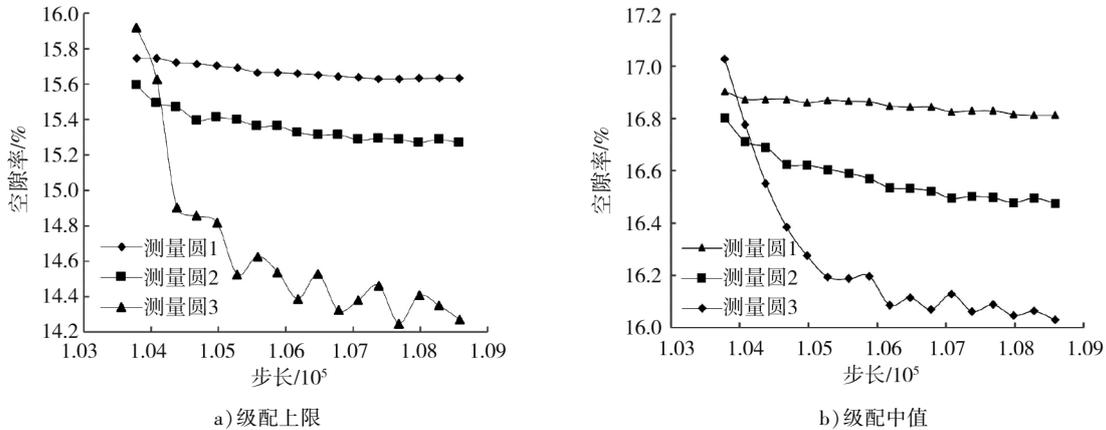


图6 不同级配试件3个测量圆圆心空隙率随步长变化曲线

由图6a)可知:随荷载的增大,测量圆1、2的空隙率一直缓慢减小;在加载过程中测量圆1的空隙率变化最小,荷载对测量圆1处颗粒的影响可忽略不计;测量圆2的空隙率变化比测量圆1略大,荷载对测量圆2处颗粒的影响较小;加载初期,测量圆3的空隙率变化显著,变化范围为14.2%~16.0%,比加载前减小10.5%,说明在荷载小球正下方附近空隙衰变非常明显<sup>[21]</sup>,随后小幅波动减小并趋于稳定。由图6b)可知:级配中值试件的空隙率变化趋势与级配上限试件基本一致,但级配中值试件测量圆3的空隙率变化率明显减小,表明适当增加粗集料能有效减少空隙衰变的速率。

### 2.3.4 车辙板厚度的影响

建立长30 cm、宽8 cm的二维矩形车辙板模型,选择级配上限试件车辙板进行模拟车辙试验,厚5、8 cm试件的车辙深度曲线如图7所示。由图7可知:厚8 cm试件的最大车辙深度约为1.8 mm,比厚5 cm试件的最大车辙深度小,增大车辙板厚度可有效减小车辙深度。

加载结束时厚8 cm车辙板的颗粒间接触力的力链如图8所示。对比图5可知:车辙板厚度对接触力的传递有一定影响,车辙板越厚,接触力向下传递的趋势越小,主要集中在加载处向下的一定深度范围内,板底处接触力基本为0。

为监测厚8 cm车辙板主要位置空隙率的变化情况,在车辙板上建立4个半径为25 mm的测量圆,以车辙板左下角为坐标原点,4个测量圆圆心的位置坐标分别为测量圆4(25 mm, 55 mm)、测量圆5(90 mm, 55 mm)、测量圆6(150 mm, 55 mm)、测量圆7(150 mm, 25 mm),位置分布如图9所示。

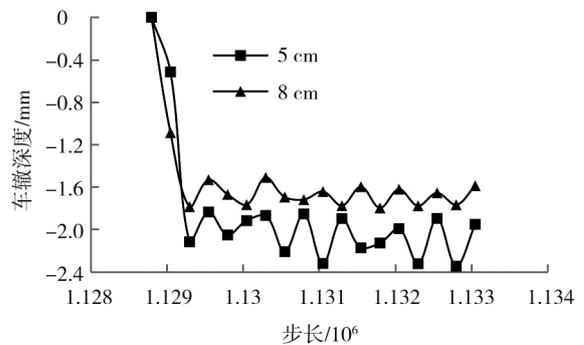


图7 不同厚度试件的车辙深度曲线

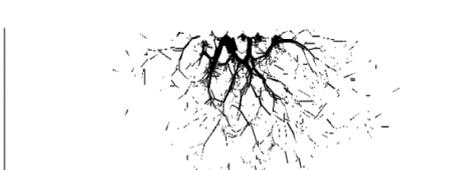


图8 厚8 cm试件颗粒间接触力力链

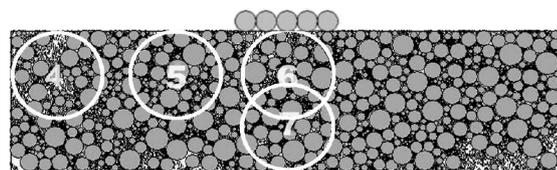


图9 测量圆位置分布

4个测量圆圆心空隙率随步长的变化曲线如图10所示。由图10可知:随步长增大,测量圆4、5空隙率变化较小;测量圆6的空隙率变化最大,变化范围为14.2%~16.0%,加载结束时空隙率比加载前减小10.2%,比厚5cm车辙板同一位置处空隙率变化小;测量圆7的空隙率变化比测量圆1、2大,空隙率变化范围为14.8%~15.6%,加载结束时空隙率比加载前减小5.5%。随车辙板厚度的增大,距加载位置处一定深度内的空隙率变化幅度逐渐减小,但影响不大,随深度继续增大,荷载对空隙率变化率的影响极小。

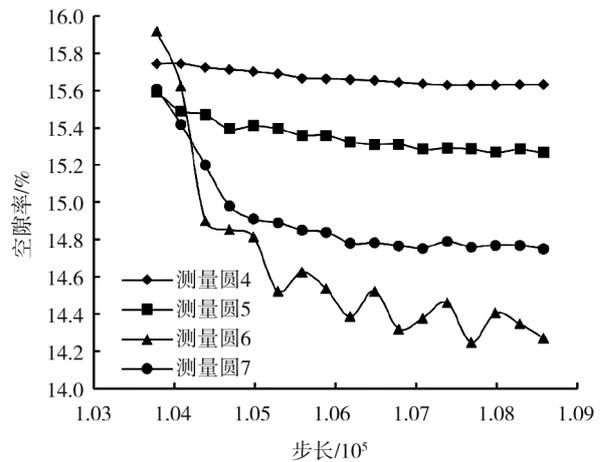


图10 测量圆圆心空隙率的变化曲线

### 3 结论

1) 采用 PFC 2D 离散元分析法模拟沥青混合料试件的车辙试验可知,最靠近碾压轮处车辙板试件的空隙率变化比其他位置大。

2) 建立二维离散元模型模拟车辙板加载过程,在车辙板3个不同位置设置测量圆监测空隙率的变化,发现随荷载的增大,加载位置正下方的空隙率变化较大,其他位置的空隙率变化不明显,模拟结果和试验结果较接近,验证了离散元方法的可行性。

3) 对比接触力的力链图及颗粒竖向运动规律,级配中值沥青混合料路面向下传递荷载的趋势比级配上限沥青混合料明显,增大粗颗粒数能有效减小车辙深度。随试件厚度增大,接触力向下传递的趋势更小,车辙板顶部相对变形减小,增大试件厚度可有效减小车辙板底的接触力。

#### 参考文献:

- [1] 曾哲,刘星,罗蓉,等. 空隙率对透水沥青混合料路用性能的影响[J]. 中外公路, 2019,39(6):220-224.
- [2] 徐光霖,徐书东,马涛,等. 石灰岩排水沥青混合料空隙率衰变与综合性能研究[J]. 公路, 2022,67(12):60-66.
- [3] 陈书豪. 沥青路面抗裂性能评价研究[J]. 四川建材, 2022,48(1):162-163.
- [4] MENG A X, XING C, TAN Y Q, et al. Flow regime analysis of fluid in permeable asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2020,250:118906.
- [5] 刘文昶,张曙光,毛永强,等. 车辙历程中的集料细观运动追踪方法及其应用[J]. 科学技术与工程, 2021,21(33):14379-14386.
- [6] 凌天清,杨云龙,赵城,等. 基于 PFC 3D 的低空隙率沥青混合料设计研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020,39(6):73-80.
- [7] SENIOR-ARRIETA V, GRACIANO C. Experimental investigation on the rutting resistance of permeable friction courses [J]. Construction and Building Materials, 2021,268:121210. 1-121210. 12.
- [8] 郑冬. 基于集料形貌特性的多孔沥青混合料空隙演变机理研究[D]. 南京:东南大学,2020.
- [9] 于聪聪. 基于离散元方法的沥青路面车辙行为细观特性分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [10] 杨盼盼,肖鹏,丁燕,等. 基于离散元法的沥青混合料细观特性分析[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(4):900-906.
- [11] 王昊鹏,焦丽亚,王潇婷,等. 基于离散元方法的沥青混合料三轴剪切试验模拟研究[J]. 中外公路. 2016,34(4):256-261.
- [12] 牛冬瑜,谢希望,窦晖,等. 粗集料接触参数对沥青混合料力学性能影响分析[J]. 大连理工大学学报,2021,61(3):265-271.
- [13] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011 [S]. 北京:人民交通出版社,2011.

- [14] ZHANG X M, YANG D T, WU G X. Fatigue damage property of permeable friction courses under the water-temperature-load coupling action[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2021,21(3): 723-735.
- [15] CHEN J, YIN X J, WANG H, et al. Directional distribution of three-dimensional connected voids in porous asphalt mixture and flow simulation of permeability anisotropy[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020,21(11/12):1550-1562.
- [16] REN J Q, XIAO M, LIU G Q. Rock Macro-Meso parameter calibration and optimization based on improved BP algorithm and response surface method in PFC 3D[J]. Energies, 2022,15(17):15176290.
- [17] SHOWKAT B, SINGH D. Effect of MIST conditioning on the air voids and permeability of hot asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement[J]. Road Materials and Pavement Design, 2022,23(7):145-172.
- [18] 程俊杰. 湿热环境下沥青混合料迁移与蠕变特征的细观力学研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018.
- [19] 侯芋杉. TLA 和 SBR 复合改性沥青混合料路用性能分析及离散元模拟研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022.
- [20] 马涛,张斯琦,陈泳陶. 基于离散元法的多孔沥青混合料空隙衰变研究[J]. 建筑材料学报, 2017,20(5):727-732.
- [21] 周阳阳,张哲安,范容雪,等. 基于汉堡车辙试验的玄武岩纤维沥青混合料高温性能研究[J]. 科学技术创新, 2021(3):105-107.

## Discrete element simulation of wheel rutting test for permeable asphalt mixture

CHAI Rongshan<sup>1</sup>, DONG Zhen<sup>1</sup>, SHAN Jingsong<sup>2</sup>, NI Xiaoxue<sup>1</sup>, WANG Yanzhong<sup>1</sup>

1. Shandong Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

**Abstract:** To analyze the influence of ruts on the internal voids of permeable asphalt mixtures, with the permeable asphalt mixture PAC-13 as the research subject, rut tests are conducted on asphalt mixture specimens formed according to the upper limit and median particle size distribution. The variation of ruts and void ratio at the wheel track are obtained. Based on the rut test data, the discrete element software PFC 2D is used to establish a discrete element particle simulation model of permeable asphalt mixtures from a microscopic perspective. The study analyzes the variation of internal voids and interparticle contact forces during the formation of ruts in permeable asphalt mixtures, taking into account the effect of specimen thickness on void ratio. Research results indicate that the void ratio in asphalt mixtures changes more significantly at the wheel load application area than in other parts. Under the same load, the void ratio change in asphalt mixtures with median particle size distribution is smaller than that in mixtures with upper limit particle size distribution. As the model thickness of asphalt mixtures with upper limit particle size distribution increases, the change in void ratio decreases, and there is a lower trend in the transmission of interparticle contact forces downward. The interparticle contact forces at the bottom of the rut board are relatively small. A rut board with a thickness of 8 cm shows a significant change in void ratio at the load position, and as the distance from the surface increases, the magnitude of void ratio changes decrease.

**Keywords:** permeable asphalt mixture; wheel rutting test; discrete element method; void ratio

(责任编辑:王惠)