

# 沥青混合料击实成型过程离散元仿真

陈钊<sup>1</sup>, 侯利军<sup>1</sup>, 单景松<sup>2</sup>, 刘后虎<sup>1</sup>, 唐兴亮<sup>1</sup>, 雷明<sup>1</sup>

(1.中电建路桥集团有限公司,北京市 100048; 2.山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室)

**摘要:** 为了从细观角度研究沥青混合料的压实过程,基于离散元方法建立了沥青混合料颗粒体模型,对马歇尔击实成型过程进行了仿真分析。离散元模型中考虑了马歇尔击实试验冲击荷载变化规律,以 Clump 颗粒束方法生成加载板,进而通过编程实现了多次冲击荷载的施加。按照实际松铺系数确定仿真模型高度,施加冲击荷载过程中可观测颗粒体运动轨迹、相互作用力及填充挤压内部空隙过程。通过对比击实过程中室内试验和仿真结果的试件高度变化,验证了离散元模型的合理性,进而分析了沥青混合料内部颗粒之间的接触力链分布规律、颗粒之间的应力传递特性、颗粒的运动规律及混合料内部空隙率变化等,为从细观角度分析沥青混合料成型特点提供一种方法。

**关键词:** 沥青混合料; 离散元; 击实试验; 冲击荷载; 颗粒位移

## 1 前言

离散元法可用于模拟离散颗粒组合体在准静态或动态条件下的变形及破坏过程,在岩石、岩土、化工等领域获得了广泛应用。它由美国学者 Cundall P.A 在 1971 年率先建立,采用变形接触和显式时间初始运动方程,提出了用于解决非连续介质问题的特殊单元程序,即最初的离散元程序。1978 年,Cundall 和 Strack 联合编写了 Ball 程序,此程序可有效用于对颗粒介质力学行为的模拟。沥青混合料由沥青作为黏结料黏结矿料而成,对于热拌沥青混合料,需要在高温下碾压成型,压实过程受到温度、沥青用量、矿料级配及骨料形状等因素的影响,传统的连续力学方法很难模拟具体过程。离散元法用于其成型过程仿真可监测加载过程中内部颗粒运动规律及应力变化状况。

离散元方法中的基本单元是相互独立的颗粒,它能够跟踪颗粒单元的受力状态以及运动状态随时间的变化规律,用非连续性力学的方法来研究颗粒与颗粒之间的相互作用。1997 年 Chang K. G. 运用离散元方法 DEM 模拟沥青混合料在不同黏弹性模型下的力学特性,研究表明:Burgers 模型可以较好地模拟沥青胶浆的力学性能,模拟结果与试验结果较为吻合;You Z 和 Liu Y 等运用离散元软件 PFC2D,对沥青混合料在

-20℃、5 Hz 条件下沥青砂浆及沥青混合料试件的复数模量、强度等进行了模拟,以低温劈裂试验为依据对数值结果进行了有效校正,建立了两者间的对应关系;Habtamu Zelelew 等采用离散元法模拟了 3 种沥青混合料(粗级配、连续级配、细级配)的微观流变性,模拟结果显示 3 种沥青混合料的流变特性差别比较明显,建议利用这 3 种沥青混合料比较它们的车辙敏感性;王端宜、赵熙等利用二维离散元软件 PFC2D 对马歇尔试件的间接拉伸试验过程进行了模拟;张德育、黄晓明等采用离散元软件 PFC3D 建立了包含孔隙、粗集料和沥青砂浆的三维单轴蠕变模型,从细观角度研究分析了级配、空隙等对沥青混合料性能的影响。

从已有研究可以发现:离散元在研究沥青混合料性能方面有了比较广泛的应用。沥青混合料高温成型是颗粒体重新排列挤压密实的过程,使用连续力学很难模拟这一过程。该文基于离散元方法对沥青混合料击实成型进行仿真,拟从细观颗粒运动及相互作用角度解释成型过程。

## 2 离散元基本理论

离散元法建立的模型是一种有限颗粒离散模型,它的主要要素为颗粒单元及颗粒之间的接触。离散元法利用牛顿第二定律,求解过程利用显式的中心差分

收稿日期:2019-03-02

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(编号:J17KA213)

作者简介:陈钊,男,高级工程师,E-mail:737123124@qq.com

法,故常用于模拟材料失效、非线性、大变形等动态问题。求解单个颗粒单元需要用到运动方程和物理方程,颗粒体较多时求解运算量较大,循环过程如图 1 所示。

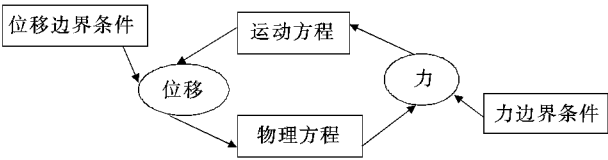


图 1 循环计算过程

二维离散元软件 PFC2D 提供了两种可模拟结合料黏弹性力学性质的模型,分别为平行黏结模型和接触黏结模型。接触黏结模型如图 2 所示,可视为一对有恒定法向刚度与切向刚度的弹簧作用于颗粒间接触点,颗粒间允许出现张力,但法向拉力不能超过法向黏结强度。当法向拉力超过法向黏结强度时黏结破坏,此时法向、切向接触力都将为零。平行黏结模型如图 3 所示,假定颗粒之间有限接触范围内有夹层材料,可以将其想象为一组有恒定法向刚度与切向刚度的弹簧均匀分布于接触平面内,该模型可同时传递力和弯矩。

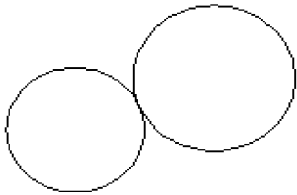


图 2 接触黏结模型

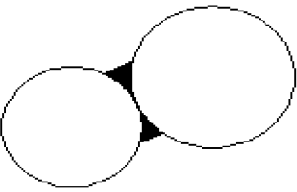


图 3 平行黏结模型

这两种黏结方式均可以实现颗粒单元间的胶结。沥青混合料颗粒间接触特点为沥青胶浆填充于粗颗粒之间,相互作用的颗粒接触特点使用离散元平行黏结模型比较合理。

3 沥青混合料击实成型试验

3.1 材料级配

沥青采用 70# 基质沥青。粗集料采用石灰岩碱性石料,细长扁平颗粒含量需满足规范要求。细集料同样为石灰岩,保证其干燥、洁净、无杂质。填料和粗细集料来源都为山东地区。此次试验以 AC-13 型沥青混合料为例,试验采用的沥青混合料级配如表 1 所示。

表 1 AC-13 矿料级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16	100	1.18	26.5
13.2	95.0	0.6	19.0
9.5	76.5	0.3	13.5
4.75	53.0	0.15	10.0
2.36	37.0	0.075	6.0

3.2 试件高度变化

按照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》击实试验方法,马歇尔标准试件高 63.5 mm,直径 101.6 mm,双面各击实 75 次。试验室成型的一组试件数量 6 个。成型 AC-13 试件过程中,每击实 1 次,使用游标卡尺迅速测量套模顶面和试件顶面之间的高度差,以此计算试件本身的高度。前 10 次击实过程中,每击实一次用游标卡尺测量一次试件高度,后面第 15 次再测量一次试件高度,各试件测得的高度变化结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出:随着击实次数的增加,试件高度开始阶段减少最快,而后逐渐变缓,说明击实初期试件

表 2 各试件高度测量结果

击实次数/次	各试件高度/mm						平均高度/mm
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	
0	83.56	84.62	89.35	85.36	88.35	86.80	86.34
1	73.21	74.02	73.56	75.61	72.43	73.85	73.78
2	70.06	70.30	71.12	70.11	69.05	69.45	70.18
3	68.23	68.02	67.97	67.98	69.01	67.81	68.17
4	67.16	66.69	67.23	67.01	66.87	67.52	67.08
5	66.65	66.34	67.18	66.96	66.37	67.42	66.82
6	66.46	65.91	67.12	66.65	66.24	67.28	66.61

续表 2

击实次 数/次	各试件高度/mm						平均高 度/mm
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	
7	65.87	65.34	66.11	65.82	65.66	67.02	65.79
8	65.36	65.09	65.06	65.19	65.11	66.39	65.35
9	65.15	64.99	64.86	64.98	64.84	65.60	64.92
10	64.86	64.81	64.51	65.04	64.31	65.15	64.78
15	64.56	64.37	64.47	64.70	64.01	64.61	64.57

压密作用最显著,如以最终击实高度 63.5 mm 计算,试验前 3 次击实作用后,试件的压实量占总压实量的 79.6%。下文以离散元方法模拟沥青混合料击实成型过程,分析内部颗粒的受力及运动规律。

## 4 离散元仿真模型

### 4.1 冲击荷载计算

马歇尔击实试验中,落锤以一定速度冲击圆形压头。此过程作用时间很短,会形成较大的冲击力。落锤冲击力是一个单脉冲,其持续时间为  $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$  s。落锤冲击力计算中最大冲击力  $F_{\max}$  的计算是研究的重点。冲击力的求解方法有几种:① 基于能量守恒理论的计算方法及一些试验公式;② 基于 Hertz 碰撞理论的计算方法;③ 基于半弹性碰撞理论得到的强冲击力的计算方法。

基于方法③,可得出落锤的运动方程如式(1)所示:

$$M \frac{d\eta^2}{dt^2} = -F \quad (1)$$

式中: $M$  为落锤的质量; $\eta$  为落锤从触地点起算的位移; $t$  为落锤从触地点起算的时间; $F$  为落锤触地产生的冲击力。

借助弹性理论接触问题的求解结果,可获得力  $F$  与位移  $\eta$  之间的关系。用抛物线近似表示接触部分的球面,可以得到下述关系:

$$F = 1.05 \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{M}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{6}} \eta^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中: $E$  为沥青混合料的弹性模量; $\nu$  为沥青混合料的泊松比; $\rho_0$  为落锤的密度。

$\eta$  的最大值  $\eta_0$  和作用时间  $t_0$  分别为:

$$\eta_0 = 1.41 \left[ \frac{1-\nu^2}{E} (M^5 \rho_0)^{\frac{1}{6}} gh \right]^{\frac{2}{5}} \quad (3)$$

$$t_0 = 2.94 (2gh)^{-0.5} \eta_0 \quad (4)$$

进一步可求得冲击荷载的峰值  $F_0$  为:

$$F_0 = 1.76 \left( \frac{E}{1-\nu^2} \right)^{\frac{2}{5}} M^{\frac{2}{3}} \rho_0^{-\frac{1}{15}} (gh)^{\frac{3}{5}} \quad (5)$$

计算时,沥青混合料的弹性模量  $E$  的大小与材料、级配、粒径和温度都有关系,且随压实度的增加而增加,因此可将冲击荷载最大值设置成呈指数增长变化的趋势。热拌沥青混合料的弹性模量  $E$  取值范围为 1~100 MPa,泊松比  $\nu$  取 0.3,  $M$  取 4.536 kg,  $\rho_0$  取 7 800 kg/m<sup>3</sup>,  $g$  取 9.8 m/s<sup>2</sup>,  $h$  取 0.457 m。冲击荷载随试件密实程度的增加而增加,具体变化如图 4 所示。

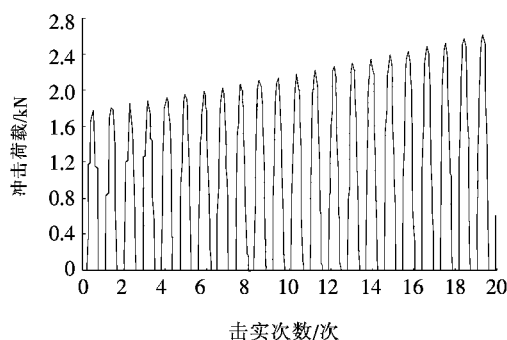


图 4 冲击荷载图

### 4.2 离散元建模及加载方法

#### 4.2.1 建模方法

采用不同粒径的圆盘形颗粒表示各档集料。建模过程分为以下几步:

- (1) 根据尺寸要求生成墙体,赋予墙体相应的性质参数。
- (2) 设置初始空隙率。
- (3) 在墙体内,按各档料所占比例生成颗粒单元并赋予颗粒单元相应的性质参数,颗粒生成顺序为先生成大颗粒单元再生成小颗粒单元。
- (4) 在低速度下将重叠的颗粒单元分开。
- (5) 生成加载板,对试件施加外部冲击荷载。
- (6) 计算结果输出与分析。

#### 4.2.2 加载方法

离散元中外部加载方式主要有两种:① 用墙体来施加荷载,此方法为对墙体施加一定的位移速度,通过

墙体运动将力施加于内部颗粒;② 利用 Clump 命令生成“平板”形状的颗粒簇,此颗粒簇本身不会产生变形,类似于一块刚性板,然后将荷载施加于颗粒簇上,此方法可以实现多种形式的可变荷载。

此击实试验采用生成加载板方法,首先将模型箱中上方墙体删除,然后使用 Ball 命令按从左到右、从下向上的顺序生成球形颗粒,并赋予颗粒相关属性,其中  $dens=3\ 000\ \text{kg/m}^3$ ,  $ks=1\times 10^9\ \text{N/m}$ ,  $kn=1\times 10^9\ \text{N/m}$ ,再使用 Clump 命令将两排 32 个颗粒生成刚性体。模型箱的长度为 101.6 mm,此处将小球半径设置为 3.175 mm,单排球体数恰好为 16。赋予颗粒簇属性时,密度  $dens$  以及刚度的设置值应比试件内部颗粒体的数值大,若颗粒簇刚度设置过小会出现颗粒穿墙而过的现象。生成的加载板如图 5 中上部两排黑色颗粒所示。

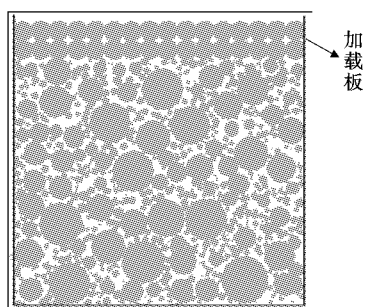


图 5 加载板示意图

## 5 离散元仿真结果分析

### 5.1 离散元仿真与室内试验结果对比

马歇尔试验击实过程应在高温下完成,若温度降低太多,沥青的黏度会相应增加,影响击实的效果。因此,在击实试验过程中,每次测定击实后的试件高度须快速完成,否则将影响测试结果的准确性。离散元计算时,每次冲击荷载施加完成后,观测加载周期内加载板的高度变化,以加载板球体的中心高度平均值推算试件高度的变化。以击实过程中试件的高度变化为比较对象,对比室内试验与离散元仿真结果,以验证数值仿真的正确性。对比结果见图 6。

从图 6 可以看出:离散元仿真结果与室内试验结果曲线规律和数值都比较接近,都表现为击实开始阶段试件高度降低最快,随着击实次数的增加试件高度降低速度逐渐变缓的特性。击实前两次和第 10 次击实以后的试件高度仿真结果与试验测量结果非常接近,击实第 3~10 次之间试件仿真高度小于试验测量

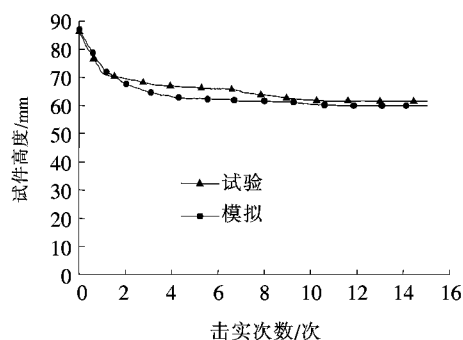


图 6 试件高度随击实次数的变化

高度。总体来讲,离散元仿真可以较好地模拟沥青混合料击实成型过程。

### 5.2 颗粒间接触力及运动状态变化

由前文知,击实荷载为半正弦荷载,图 7、8 为第 1、2 次加载过程中颗粒间接触力状态,分别为单个荷载周期中荷载施加初期、荷载峰值和荷载完成瞬间的颗粒间相互接触力。图中每一段线代表一个颗粒间接触,线的粗细代表接触力的大小。从中可以看出:从加载开始到加载结束的一个周期内,荷载由混合料顶部逐渐向下部传递。第 1 次加载周期内荷载向下传递的速度相对较慢,图 7 中可明显观察到荷载传递过程。与第 1 个加载周期相比第 2 个加载周期内荷载传递(图 8)的速度明显加快,后续加载周期内荷载由顶部到底部传递会迅速完成,通过颗粒接触力图已很难分辨加载初期或加载完成。这是因为初次加载时沥青混合料处于松散状态,内部空隙较大,颗粒间接触点相对较少,荷载作用下颗粒发生运动,需要较长的距离与其他颗粒产生接触力,并达到初步平衡状态。随着击实

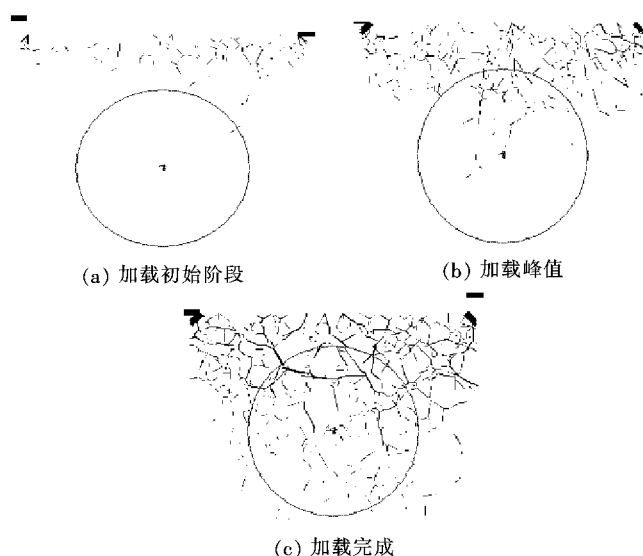


图 7 第 1 次加载颗粒间作用力

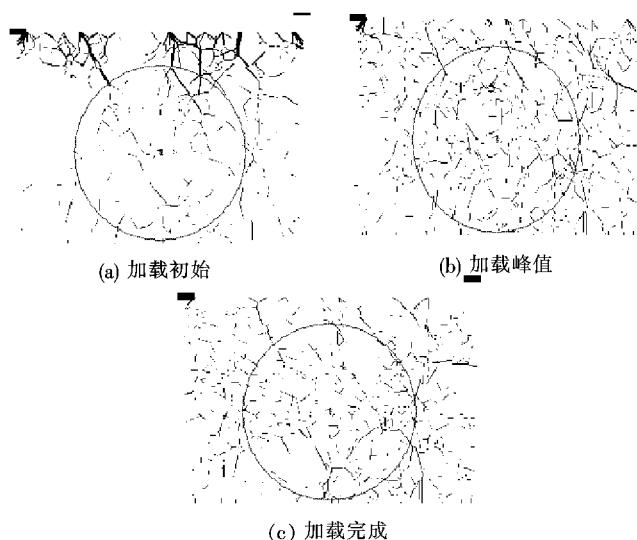


图8 第2次加载颗粒间力传递

次数的增加,混合料相对逐渐密实,颗粒间相互接触,接触点多,这时在击实外力作用下颗粒间只产生相对微小的运动位移,力的传递相对较快。因而,随着击实次数的增加,冲击力在试件内部的传输速度越来越快。

图9为沥青混合料颗粒的运动状态,箭头方向及长短分别表示颗粒运动方向和大小。

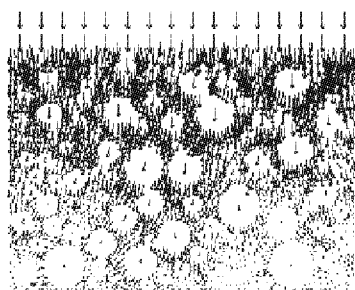


图9 颗粒体位移矢量图

从图9可以看出:内部颗粒总体运动方向是向下的,上部颗粒位移量明显大于下部颗粒的位移量,这是因为下部颗粒会受到底板的约束作用,呈现向下和向左右两侧移动规律。另外,小颗粒的运动易受大颗粒的影响,这时大颗粒顶部的小颗粒运动方向会变化,绕行向大颗粒偏左下或右下方向。

### 5.3 试件空隙率分布变化

在离散元模型中建立测量圆,计算过程中每一荷载步可实时监控测量圆范围内空隙率的变化,对于二维问题空隙率为颗粒间空隙面积占测量圆面积的比例,击实过程空隙率变化结果如图10所示。

从图10可以看出:空隙率的变化趋势为第1次击实空隙率下降最多,随着击实次数的增加,空隙率下降

速度逐渐降低。此仿真试验中试件初始松装空隙率为31.8%,经第1次击实后空隙率降为19.5%,第2次击实后空隙率减少为17.3%,降低速度逐渐变缓,这与前文分析的试件高度变化规律一致。另外,空隙率监测过程中发现,除第1次加载外,后续加载周期内空隙率都有一定的波动,波动规律和周期与施加的冲击荷载一致。造成这一现象的原因为,当冲击荷载施加时,颗粒间相互接触碰撞,较大的接触力使颗粒体产生一定重叠,卸载过程中外载逐渐变小,颗粒间较大的作用力会将颗粒“弹开”,因而空隙率会出现一定反弹现象。

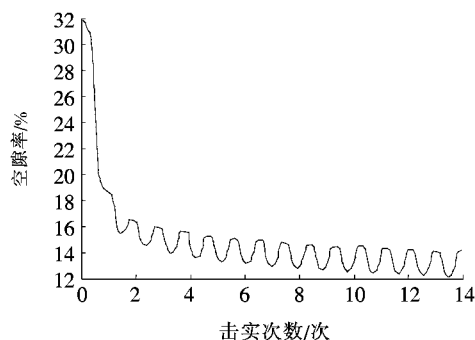


图10 空隙率随击实次数变化

## 6 结论

应用离散元方法对沥青混合料马歇尔击实成型过程进行了数值仿真,得到以下主要结论:

(1) 对AC-13型沥青混合料马歇尔击实成型过程进行了室内试验和离散元数值仿真,对比了不同击实次数下室内试验和离散元仿真的试件高度,发现两者结果比较接近,验证了离散元分析模型的正确性。

(2) 由击实过程中的试件高度和空隙率可以看出:初始几次击实对击实效果最为显著,试件高度和内部空隙率下降最显著,占到击实作用的80%左右。说明在实际施工时一定要重视初压环节,保证压路机紧跟摊铺机在高温下完成。

(3) 离散元仿真可以从颗粒运动和颗粒间相互作用的角度解释沥青混合料的击实成型过程。通过离散元仿真可以看出,初次击实作用时冲击力由上向下传递速度较慢,随着混合料内部不断挤密压实,击实荷载的传递速度不断增加。

(4) 击实过程中内部颗粒移动路径受到颗粒粒径和位置的影响。颗粒总体运动方向是向下的,上部颗粒位移量明显大于下部颗粒。大颗粒顶部的小颗粒会在击实荷载作用下沿大颗粒周围向左下方或右下方

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.06.040

## 不同外掺纤维增强排水沥青混合料性能研究

高桂海,熊梅,钱波

(西昌学院,四川 西昌 61500)

**摘要:**以提高排水沥青路面的稳定性、抗变形能力以及抗疲劳开裂性能为目标,分别选取3种不同纤维(玄武岩纤维、木质素纤维、聚丙烯纤维)作为增强稳定剂,纤维掺量以0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%不等进行PAC-13排水沥青混合料配合比设计,以高温车辙、残留稳定度、冻融劈裂强度比、低温抗裂性以及四点弯曲疲劳寿命作为评价指标衡量排水沥青路面的路用性能。研究表明:玄武岩纤维作为一种新型材料,用其制备成型的沥青混合料在低温抗裂和抗疲劳性能方面具有较好的表现,更适用于排水沥青路面的材料选择。在室内研究的基础上铺筑掺玄武岩纤维的排水沥青路面试验段,验证了玄武岩纤维增强排水沥青路面性能的有效性。在“海绵城市”发展理念的大背景下,玄武岩纤维在排水沥青路面中具有较好的应用前景。

**关键词:**排水路面;不同纤维;纤维掺量;路用性能;工程应用

排水沥青混合料(Porous Asphalt Concrete, PAC)是一种具有连通空隙的级配沥青混合料,因其具有良好的排水抗滑性能而在国内外得以广泛应用。但排水沥青混合料的高空隙率致使它抵抗外界侵蚀能

力较差,易发生沥青膜老化现象,且抗压、抗剪切能力差,所以在地形复杂、地势较陡或车流量较大地区较少使用。现阶段中国经济发展突飞猛进,高速公路交通路况呈现重载荷、高流量和渠道化等明显特点,复杂的

运动,最终填充大颗粒间空隙。处于试件下部的颗粒受到底部约束的作用,向下方运动的同时向两侧偏移。

## 参考文献:

- [1] Timoshenko S. P., Goodier J. N., Theory of Elasticity [M]. McGraw-Hill Book Company, 1970: 420-422.
- [2] 张争奇,边秀奇,杜群乐. 沥青混合料压实特性影响因素研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012(6).
- [3] 何义. 真空压实沥青混合料细观结构研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2016.
- [4] 李晓辉. 沥青路面真空压实技术的试验研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2016.
- [5] 苏沛. 基于离散元法的沥青混合料真空压实特性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.
- [6] Chang, K. G., Meegoda, J. N., Micromechanical Simulation of Hot Mix Asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 12(5): 495-503.
- [7] You, Z., Buttlar, W. G., Application of Discrete Element Modeling Techniques to Predict the Complex Modulus of Asphalt-Aggregate Hollow Cylinders Subjected to Inter-
- nal Pressure[J]. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, 2005: 218-226.
- [8] You, Z. P., Development of a Micromechanical Modeling Approach to Predict Asphalt Mixture Stiffness Using the Discrete Element Method[D]. Ph.D. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [9] Zelelew, H., Papagiannakis, T., Micromechanical Modeling of Asphalt Concrete Uniaxial Creep Using the Discrete Element Method[J]. International Journal of Road Materials and Pavement Design, 2010, 11(3): 613-632.
- [10] Habtamu Zelelew, Enad Mahmoud, Micromechanical Simulation of the Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures[C]. Niki Kringos, Björn Birgisson, David Frost, Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials, Dordrecht Heidelberg New York London: Springer, 2013: 421-432.
- [11] 张德育, 黄晓明, 高英. 沥青混合料三维离散元虚拟单轴蠕变试验[J]. 华南理工大学学报, 2012(7).
- [12] 裴建中, 张嘉林, 常明丰. 矿料级配对多孔沥青混合料空隙分布特性的影响[J]. 中国公路学报, 2010(1).

收稿日期: 2019-06-02

作者简介: 高桂海, 男, 大学本科, 高级工程师/副教授, E-mail: 1526160064@qq.com