

基于离散元法的沥青混合料性质分析

李明,王彦伟,李振中

(山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室,山东 青岛 266590)

摘要:基于离散元理论方法,以AC-13、SMA-13两种混合料作为研究对象,介绍生成颗粒的方法,对比两种混合料颗粒生成情况与现实是否相符,结果表明:建模得到的两种混合料是悬浮密实型和骨架密实型,与实际相符;以两种混合料的劈裂试验为基础分析两者的性质,验证离散元方法的可行性。

关键词:离散元法;沥青混合料;颗粒生成方法;劈裂试验;细观分析

中图分类号:TU528

文献标识码:A

Analysis of properties for asphalt mixtures based on discrete element method

LI Ming WANG Yanwei LI Zhenzhong

(Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shan Dong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, Shandong)

Abstract: we take AC-13, SMA-13 mixtures as the research object, and describe the method of generating particles which is based on the theory of discrete element method. We judge whether the result of generating two mixture particles is consistent with the reality, results show that: two kinds of mixtures are suspended dense type and skeleton dense type, and agree with the actual situation; analysis properties of two kinds mixed material based on splitting test to verify the the feasibility of discrete element method, and a new train of thought is proposed for the research of the mixture properties in the future.

Key words: discrete element method; asphalt mixtures; method for generating particles; Split test; microscopic analysis

以往对沥青混合料的力学性质研究,大都只停留于宏观层面,大多通过实验室试验:如混合料马歇尔试验,得到混合料的压实度、空隙率、稳定度、流值、冻融劈裂强度比等宏观参数,之后通过宏观的数据判断混合料的性质。如今不少学者尝试通过试验的方法对混合料性质细观分析,如通过数字图像处理 and CT 扫描技术^[1-5]得到混合料中粗细集料分布、形状和空隙数量、大小、形状等。通常通过有限元法对混合料结构划分单元,然后得到各单元的受力状态,由于假设混合料为连续介质,各单元之间必须满足变形协调条件,这与实际混合料中粗细集料的离散状态不符,因此许多

学者开始运用离散元法对沥青混合料的性质进行分析,此方法所建模型以颗粒作为基本单元,通过大小不同粒径颗粒的组合而组成材料,对颗粒间赋予相应微观参数来实现颗粒相互作用,同时体现出混合料的非连续性。本文基于离散元法对AC-13和SMA-13劈裂试验过程的材料细观性质^[6]进行分析。

1 离散元法的原理与求解过程

离散元法只需满足运动方程和物理方程即可,具体计算循环过程如图1。

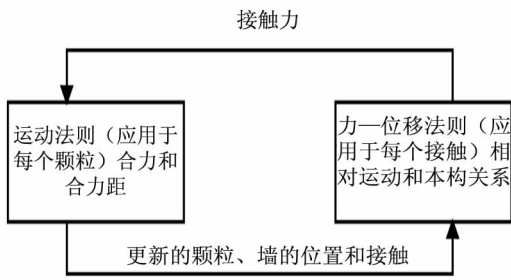


图1 离散元计算循环过程

Fig.1 The calculation process of discrete element method

运动方程应满足:

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} + \eta \frac{du_i}{dt} + ku_i = 0$$

$$I_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} + \eta \frac{d\varphi_i}{dt} + k\varphi_i = 0 \quad (1)$$

式中, m_i 为颗粒质量; I_i 为颗粒转动惯性矩; u_i 为颗粒的位移矢量; φ_i 为颗粒转动角度; k 为刚度系数; η 为阻尼系数。(1)式可简化为:

$$m\ddot{u}(t) + \dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2)$$

运用中心差分法,把微分方程转换为如下方程:

$$\dot{u}(t) = [u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)] / \Delta t^2 \quad (3)$$

$$\ddot{u}(t) = [u(t + \Delta t) - 2u(t) + u(t - \Delta t)] / \Delta t^2 \quad (4)$$

将(3)、(4)代入到(2)中可得:

$$u(t + \Delta t) = \left\{ \left(\frac{\eta}{2} \Delta t - m \right) u(t - \Delta t) + [2m - k(\Delta t)^2] u(t) \right\} / \left(m + \frac{\eta}{2} \Delta t \right) \quad (5)$$

因此只需知道 $u(t - \Delta t)$ 和 $u(t)$, 即可求出 $u(t + \Delta t)$, 从而求出 t 时刻的速度 $\dot{u}(t)$ 和加速度 $\ddot{u}(t)$ 。运用此规律一直循环下去, 就可求出任意小球任意时刻的位移、速度和加速度。

2 颗粒的生成方法

离散元法模拟过程主要包括三个步骤: 颗粒的生成、限制初始和边界条件、施加荷载。颗粒生成是按照混合料级配确定各粒径颗粒的质量百分比, 虽然颗粒生成是模拟过程最基础的一个步骤, 但是生成的级配^[7-9]是否达标将影响到模拟的结果, 因此需要研究颗粒的生成方式。离散元法提供的颗粒生成方式有两种, 分别为通过 GENERATE 命令和 BALL 命令, 两命令存在一定的区别。

GENERATE 命令的特点是需要限定生成颗粒的数量、颗粒半径范围, 当需要生成一定数量颗

粒, 但是颗粒间出现重叠时, 程序不再继续运行, 颗粒数未达到所需个数, 所以为避免此类问题的发生, 在刚开始时应适当减小生成颗粒的半径, 当所需颗粒数量达到要求时再扩大颗粒半径, 但是按此方法生成的颗粒级配符合要求是比较困难的, 此方法比较适合生成不规则排列的颗粒。

$$N = \frac{A(1-n)}{\pi R^2}, \bar{R} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2}$$

$$A(1-n) = \sum \pi R^2, A(1-n_0) = \sum \pi R_0^2 \quad (6)$$

$$m = \sqrt{\frac{1-n}{1-n_0}} \quad mR_0 = R$$

N 表示颗粒总数, A 表示试件总面积, R_{\max} 、 R_{\min} 分别为最大半径和最小半径, \bar{R} 为平均半径, R 为目标级配颗粒半径, n 为目标空隙率, R_0 为初始级配颗粒半径, n_0 为初始空隙率, m 为半径扩大系数, 图2为 GENERATE 命令生成的各种颗粒组合。

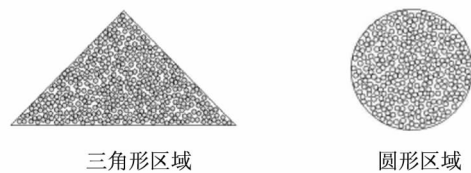


图2 GENERATE命令生成颗粒

Fig.2 generate particles by command GENERATE

BALL 命令不需要限定区域内颗粒生成个数, 颗粒是一个接一个生成的, 需限定每个颗粒的半径和圆心坐标, 当在颗粒生成区域内生成的颗粒数小于达到限定空隙率所需颗粒数时, 颗粒继续生成, 直至颗粒数量达到空隙率要求为止。此方法生成颗粒时允许颗粒间出现重叠和 GENERATE 命令有较大区别, BALL 命令比 GENERATE 更适合生成按级配组成的沥青混合料。图3为 BALL 命令生成的规则排列颗粒。

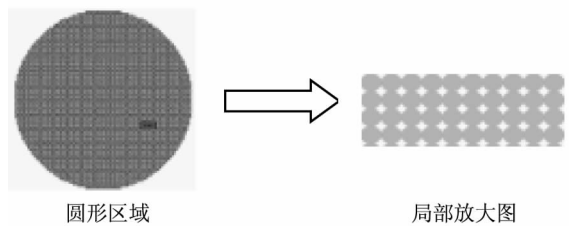


图3 BALL命令生成颗粒

Fig.3 generate particles by command BALL

3 劈裂试验模拟

本文选择 AC-13 和 SMA-13 两种最大公称粒径相同, 但是结构形式完全不同的混合料进行

表 1 AC-13、SMA-13 级配组成
Tab.1 Gradations of AC-13、SMA-13

混合料	通过各筛孔的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	100	95	76.5	53	37	26	19	13.5	10	6
SMA-13	100	95	62.5	27	20.5	19	16	13	12	10

表 2 平行粘结模型参数
Tab.2 Parameters of parallel bond model

混合料	模型参数						
	颗粒密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	颗粒摩擦 系数	平行粘结 半径	平行粘结法向 刚度 $/(Pa \cdot m^{-1})$	法向切向 刚度比	平行粘结法向 粘结强度/Pa	法向切向 强度比
AC-13	2 400	0.5	0.5	5×10^{12}	1.0	5×10^6	1.0
SMA-13	2 500	0.5	0.5	5×10^{13}	1.0	1×10^6	1.0

劈裂试验, AC-13 为连续密级配混合料, 整体呈现悬浮-密实状态, SMA-13 为间断级配混合料, 整体为骨架-密实状态^[10], 以往试验已经验证了有着相同最大公称粒径的间断级配骨架型混合料要比连续密级配悬浮型混合料抗裂性能好^[11], 那么我们来验证用离散元法模拟结果与实际是否相符。AC-13、SMA-13 空隙率分别取 $n=5\%$ 、 $n=6\%$ 。级配组成见表 1。

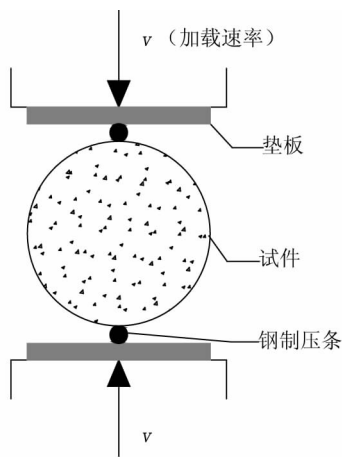


图4 劈裂试验模型

Fig.4 model of Split test

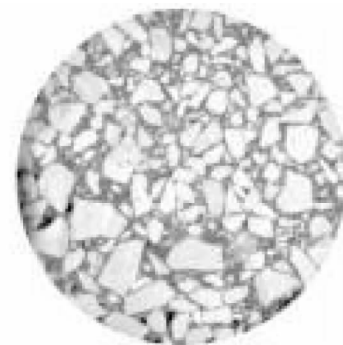
应用离散元软件 PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions) 模拟劈裂试验过程, 劈裂试验加载模型如图 4 所示, 根据文献^[12], 试件为已经击实成型的马歇尔标准试件: $\phi 101.6 \text{ mm} \times 63.5 \text{ mm}$, 加载速率为 50 mm/min 。试验中同时开启试验机和记录仪, 试验机以恒定速度加载直至试件破坏, 记录仪记录荷载和竖向位移, 之后可根据以下公式计算劈裂强度:

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{\pi R t} \quad (7)$$

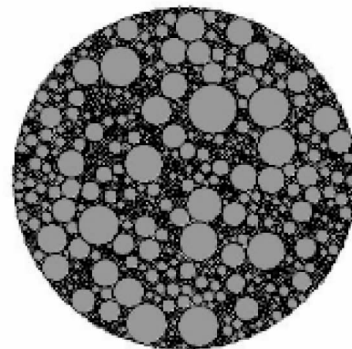
式中 σ 为劈裂强度, F_{\max} 为轴向峰值力, R 为

试件的半径, t 为试件厚度, 二维情况下取 $t=1$ 。

数字图像与离散元建模图形对比如图 5 所示 (非同一种混合料), 通过观察可得, 本文用的离散元建模方法虽然已解决了按照级配的组成生成大小不同粒径的颗粒, 但通过对比可看出, 实际混合料的不同粒径集料都有不同的形状, 集料的形状直接影响着混合料抗裂性能, 但是本文所建模型都是以半径不同的圆形颗粒来代替不同粒径的集料的, 存在一定的弊端, 在今后的研究中需考虑颗粒不规则形状对模拟的影响。



数字图像



离散元建模图形

图5 数字图像与离散元建模图形

Fig.5 Digital image and discrete element modeling

在本文的模拟过程中应考虑颗粒间的接触模型^[13-17],离散元中提供了三种接触模型:刚度模型、滑移模型、粘结模型:接触粘结模型、平行粘结模型,根据沥青混合料中沥青胶浆包裹集料从而集料间相互粘结的属性,我们选择平行粘结模型进行下面的模拟,相关参数见表 2。

4 试验结果分析

两种混合料的劈裂试验结果如图 6、图 7 所示,从建模模型可看出,AC - 13 混合料中大小粒径颗粒分布比较均匀,大粒径颗粒基本悬浮于其

他粒径颗粒之间,SMA - 13 混合料中小粒径颗粒所占体积比例明显减少,大粒径颗粒体积比例增大,大粒径颗粒之间相互接触、嵌挤,形成骨架结构。从级配模型图和劈裂破坏图对比发现试件竖向轴线方向附近出现微裂缝,这与实际的劈裂试验也是相符的。从破坏时接触力链图可看出连续密级配混合料 AC - 13 接触力分布较为均匀,间断级配混合料 SMA - 13 接触力分布相对分散,这与混合料结构形式有关,骨架型结构以相互嵌挤的大颗粒作为力的传递路径。

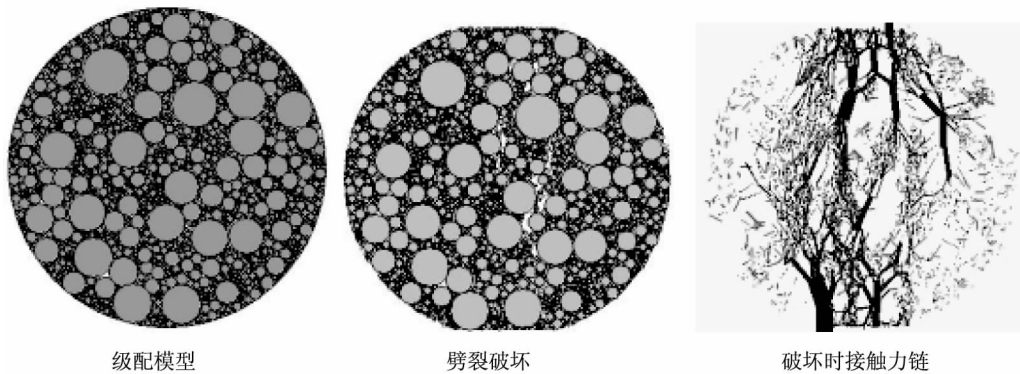


图6 AC-13劈裂试验结果

Fig.6 results of AC-13 splitting test

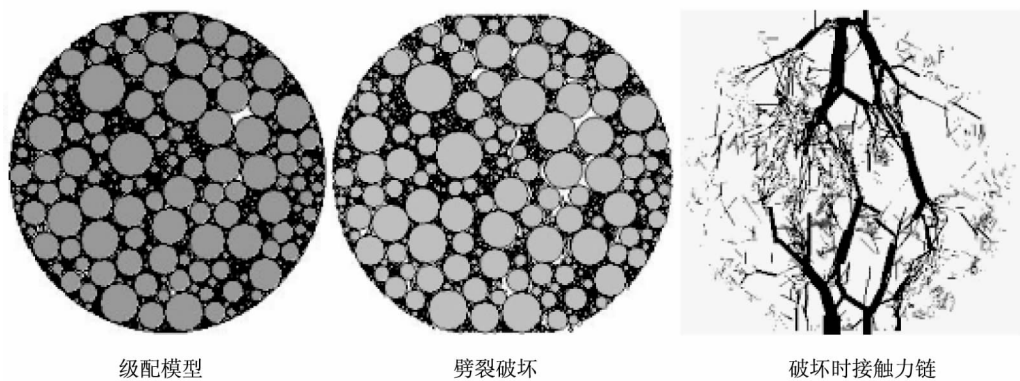


图7 SMA-13劈裂试验结果

Fig.7 results of SMA-13 splitting test

两种试件劈裂试验的轴向力曲线如图 8,试验结果见表 3,由表 3 可得,SMA - 13 试件的劈裂强度为 1.66 MPa,AC - 13 试件的劈裂强度为 1.35 MPa,显然 SMA - 13 试件在劈裂破坏前承受的最大力要大于 AC - 13 试件,所以就承受荷载方面而言,SMA - 13 抗裂性能要明显优于 AC - 13。

表 3 AC - 13、SMA - 13 劈裂试验结果
Tab.3 AC - 13, SMA - 13 splitting test results

试验结果	混合料类型	
	AC - 13	SMA - 13
峰值轴向力/N	2.7×10^5	3.3×10^5
劈裂强度/MPa	1.35	1.66

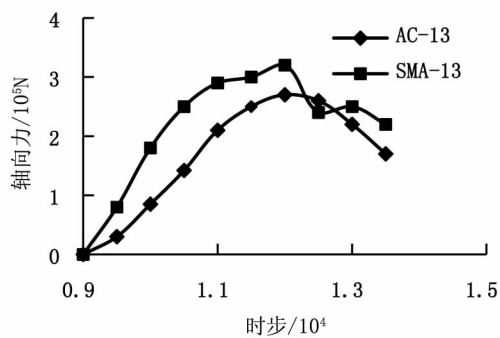


图8 AC-13、SMA-13劈裂试验轴向力曲线

Fig.8 Axial force curve of AC-13 and SMA-13 splitting test

5 结语

1) 试件破坏时出现裂缝,监测的轴向力先增大到峰值之后减小,模拟的劈裂试验结果较符合实际情况,SMA-13抗裂性能优于AC-13。

2) 本试验模拟过程中虽然考虑了级配,但是大小粒径颗粒的形状都为圆形,与实际的颗粒不规则形状还有一定区别,这对试验结果会产生影响,因此,在今后的模拟试验中,应在模型中考虑添加不规则颗粒形状。

参考文献:

- [1]周基,田琼,芮勇勤,等.基于数字图像的沥青混合料离散元几何建模方法[J].土木工程与环境工程,2012,34(1):136-139.
- [2]李晓军,张肖宁.CT技术在沥青胶结颗粒材料内部结构分析中的应用[J].公路交通科技,2005,(2):14-16.
- [3]李晓军,张登良.路基填土单轴受压微观结构CT监测分析[J].岩土工程学报,2000,22(2):205-209.
- [4]吴文亮,王端宜,张肖宁,等.基于工业CT技术的沥青混合料内部空隙分布特性[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(6):77-87.
- [5]魏星.云南高海拔地区沥青混合料性能仿真研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [6]郭红兵,陈拴发.开级配大粒径沥青碎石混合料劈裂试验的离散元数值分析[J].公路交通科技,2014,31(11):22-26.
- [7]常明丰.基于颗粒物质力学的沥青混合料细观特征研究[D].西安:长安大学,2013.
- [8]郭红兵,赵亚兰,陈拴发.开级配大粒径沥青碎石 OLSM-25 细观结构的离散元分析初探[J].河北工业大学学报,2015,44(5).
- [9]王端宜,张肖宁,王绍怀.用虚拟试验方法评价沥青混合料的级配类型[J].华南理工大学学报:自然科学版,2003,31(2):48-51.
- [10]黄晚清.SMA粗骨料骨架结构的细观力学模型研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [11]裴建中,常明丰,陈拴发,等.沥青混合料间接拉伸试验的数值模拟[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(5):6-10.
- [12]JTG E052—2000,《沥青及沥青混合料试验规程》[S].
- [13]颜可珍,葛冬冬,游凌云.沥青混合料单轴贯入试验的细观分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(5):113-119.
- [14]李明,彭伟,王彦伟.沥青混合料单轴压缩试验的细观分析[J].山东交通学院学报,2016,24(1):64-67.
- [15]肖昭然,胡霞光,刘玉.沥青混合料细观结构离散元分析[J].公路,2007,(4):145-148.
- [16]胡帮艳,于江,李林萍,等.温拌沥青混合料压实特性宏细观研究[J].公路工程,2016,41(1):24-27.
- [17]胡霞光.沥青混合料微观力学分析综述[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):6-10.

(责任编辑 李军)