

文章编号:1671-8879(2007)04-0023-05

沥青混合料三维离散元模型及其重构技术

田 莉^{1,2}, 刘 玉^{1,2}, 王秉纲¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 河南省交通科学技术研究院, 河南 郑州 450006)

摘要:为了真实反映沥青混合料的结构特征,构建沥青混合料微观结构模型,解决沥青混合料微观结构分析存在的关键问题,采用多模型体随机产生技术,以球形单元为基本计算单元,多个球形单元粘结在一起形成不同形状的多面体与混合料中粗集料匹配,较小的具有粘性的球形单元(一般小于 0.1 mm)模拟沥青玛蹄脂,从而重构沥青混合料微观结构。与传统重构技术相比,该方法无需大量试验及复杂的处理技术,操作简单;不仅能够考虑沥青混合料中粗集料的形状、级配、空间排列及表面纹理等情况,而且能够考虑特殊颗粒(针片状颗粒)体积分数等条件。

关键词:道路工程;沥青混合料;离散元;随机产生技术;数字结构;重构技术

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

3D DEM model and digital restructure technique for asphalt mixture simulation

TIAN Li^{1,2}, LIU Yu^{1,2}, WANG Bing-gang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Henan Province Research Institute of Transportation Sciences and Technology, Zhengzhou 450006, Henan, China)

Abstract: In order to describe the characters of asphalt mixture structure exactly, this paper built its microstructure model and gave a better solution for key problems existing in the analysis of its microstructure. Based on a random algorithm, the simulation of polygonal particles was carried out with digital restructure technique. In this technique, balls were used as basic elements, and a number of balls were bonded together to form a polygonal particle which could simulate the aggregate of asphalt mixture. Then, a lot of smaller balls with viscosity were used to simulate the asphalt mastic. Compared with traditional restructure techniques, the digital restructure technique has the following advantages; it needs less lab tests and processing program; not only shapes, gradations, spatial arrangement and surface textures of aggregates, but also the content of peculiar aggregates(long and slender particles) can be considered. 1 tab, 5 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; discrete element; polygon random algorithm; digital structure; restructure technique

0 引言

长期以来,由于分析工具的限制,只能采用基于现象学的经验方法,通过大量的试验,从宏观尺度分

析和研究沥青混合料的各种性能。这种方法不仅耗时、耗资,而且结果的变异性较大,再现性差。微观力学方法是一种新的研究沥青混合料性能的方法,不仅避免了大量的实验,而且能够从微观尺度深入

收稿日期:2006-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50308009);国家外专局出国(境)培训项目(2005410009)

作者简介:田 莉(1972-),女,陕西西安人,河南省交通科学技术研究院工程师,长安大学博士研究生,E-mail:tl@hntri.com。

分析混合料在外部环境作用下的内部力学反应^[1]。应用微观力学方法预测沥青混合料力学性能模型从早期开发的简单力学模型,发展到当前的数值分析模型^[2-5],其主要包括有限元模型和离散元模型。相对于有限元方法,离散单元方法(DEM, District Elements Method)在处理散体等非连续介质力学问题上具有独特的优势,易于解决接触面问题。然而,近年来的研究中,沥青混合料 DEM 模型多为二维,采用圆盘单元模拟集料,模型过于简化,信息丢失过多,与沥青混合料实际偏离较大。为此,本文提出了沥青混合料三维离散元模型及其成型技术——多面体随机产生技术,不仅能够描述混合料(集料)的级配、形状、排列、表面纹理等特性,而且能够考虑特殊颗粒(如针片状颗粒)体积分数。

1 沥青混合料离散元模型基本假设

沥青混合料中一定粒径范围内集料的形状、尺寸、空间位置等具有不确定性^[6-10],为建立沥青混合料的微观力学模型,本文作如下基本假设:①混合料中集料形状是多面体,其几何参数符合随机分布;②一定粒径范围内的集料尺寸符合随机分布;③混合料中集料的形心位置在材料空间内符合随机分布。

2 沥青混合料结构离散化

2.1 结构离散化关键问题

为了研究结构的微观力学特性,必须进行沥青混合料的离散化,离散化的尺度根据计算的需要而定。沥青混合料是多相复合材料,是由粗集料、细集料、沥青及孔隙组成,因此按照各相的实际尺寸进行离散化即可满足需求。对于体积较大、在重载作用下容易破碎的粗集料可根据需要细分。

按照实际尺度进行沥青混合料的离散化,需要考虑以下问题:①沥青近于流体,无固定形状,无法采用一定形状的单元描述;②虽然集料颗粒具有固定的形状,但形状各异,无法采用一种或多种几何体描述;③离散单元方法中的单元是刚性、不开裂的,而粗集料可能发生破碎。上述问题决定了沥青混合料试件的离散化与其他材料的离散化差别较大。

2.2 关键问题解决方案

(1)采用球单元作为基本计算单元。三维离散单元法按照单元的形状不同通常分为两类:球形离散元和块体离散元。前者的单元形状为球形,几何形状易于描述,接触定义较为简单,计算效率较高;而后者单元形状为多面体或更为复杂形状的几何

体,接触较为复杂,包括点与点、点与线、点与面、线与面等接触问题,计算效率较低。因此采用了球形单元作为基本计算单元,进行沥青混合料的离散化。

(2)以球单元粘结形成的多面体描述粗集料。一方面球形单元与集料的几何特征差别较大;另一方面离散单元法中的基本计算单元是刚性的,开裂只能发生在单元与单元之间的粘结处,只有多个单元粘结在一起才能表征集料开裂问题。在离散化中,多面体的几何特性表征混合料中的粗集料形状;球单元的大小表征粗集料的表面纹理特性。当球单元较小时,组成的多面体的表面较为光滑;反之,其表面较为粗糙。小球之间的粘结强度表征集料内部强度(压碎值)或集料之间的粘结强度(粘附强度)。

(3)采用球形单元描述玛蹄脂。沥青玛蹄脂由较细的集料、矿粉与沥青组成,混合料中细料、矿粉的体积分数虽然不大,但其颗粒个数却是粗集料的数万倍,甚至更多^{[4]35},若按实际尺度产生离散单元,计算量过大,很难实现。把较细的集料、矿粉与沥青组成的沥青玛蹄脂视为连续体,采用粘结在一起的小于 0.1 mm 的球形单元描述玛蹄脂,既不会给计算带来较大的误差,又能够描述沥青混合料中沥青玛蹄脂的开裂。

3 离散元接触模型

3.1 接触刚度模型

接触刚度模型用于描述离散单元的接触力和相对位移之间的关系,包括法向接触力与法向位移、切向力与切向位移之间的关系,见式(1)、式(2)

$$F_i^n = K^n U_i^n, \quad (1)$$

$$\Delta F_i^t = -K^t \Delta U_i^t \quad (2)$$

式中: K^n 、 K^t 分别为法向、切向接触刚度; U_i^n 、 ΔU_i^t 分别为法向位移、切向相对位移增量; F_i^n 、 ΔF_i^t 分别为法向接触力、切向接触力增量; n_i 为法向向量。

3.2 滑移模型

滑移模型通过两接触球体间最小摩擦系数 μ 定义,允许颗粒在抗剪强度范围内发生滑动,若颗粒间重叠量 $U^n \leq 0$,则令法向和切向接触力等于 0。发生滑动的判别条件为

$$F_i^t \leq \mu |F_i^n| \quad (3)$$

若 $|F_i^t| > \mu |F_i^n|$,则可以发生滑动,并且在下一循环中 F_i^t 为

$$F_i^t \leftarrow F_i^t (F_i^t / \mu |F_i^n|) \quad (4)$$

式中: F_i^n 、 F_i^t 分别为法向、切向接触力; μ 为接触面摩擦系数。

3.3 粘结模型

本文采用两种粘结模型描述离散单元之间相互粘结的性质:接触粘结模型和平行粘结模型。接触粘结模型认为粘结只发生在接触点附近极小范围内,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接触点,同时,这些弹簧具有一定的抗拉与抗剪强度。当颗粒间重叠量 $U^n < 0$ 时,允许出现张力,但法向接触张力不能超过接触连接强度。接触粘结由法向刚度、切向刚度及法向粘结强度 F_c^n 定义。当法向接触力大于或等于法向粘结强度时,粘结破坏,法向、切向接触力赋值为 0。当切向接触力大于或等于切向连接强度时,连接发生破坏,若切向力未超过摩擦极限,接触力不发生变化。由于模型定义的粘结发生于一点,所以它只传递力矢量而不传递力矩。

平行粘结模型是区域粘结模型,粘结发生在接触颗粒间圆形或方形有限范围内,可视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,同时,这些弹簧具有一定的抗拉与抗剪强度,如图 1 所示。这种粘结不仅能够传递力,而且能够传递力矩。平行粘结模型是由法向刚度 \bar{k}^n 、切向刚度 \bar{k}^t 、法向强度 $\bar{\sigma}_c$ 、切向强度 \bar{i}_c 和连接半径 \bar{R} 5 个参数定义的。

上述 3 种接触模型分别描述单元之间无粘结、滑移、有粘结(粘结范围大、小)3 种情况。这 3 种接触模型应用于沥青混合料中:接触刚度模型描述集料间的直接相互作用;滑移模型描述发生滑动时离散单元间的相互作用;粘结模型描述集料内部的抗裂能力及沥青玛蹄脂的粘结或粘附强度。集料被沥青完全包裹时采用平行粘结模型;集料被沥青部分包裹时采用接触粘结模型。

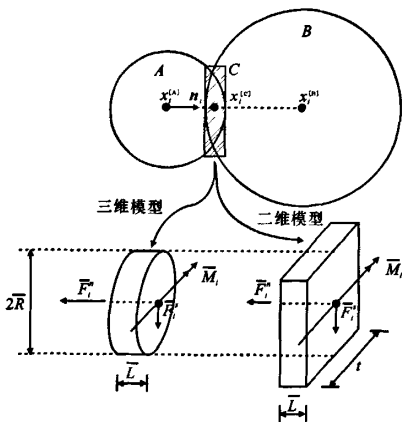


图 1 颗粒间平行粘结模型

注: A、B 分别为离散单元; F_i^n 、 M_i^n 分别为接触应力与力矩; L 为重叠距离; $x_i^{[A]}$ 、 $x_i^{[B]}$ 、 $x_i^{[C]}$ 分别为 A、B、C 的质心; t 为 y 方向的重叠距离。

4 集料空间结构的重构技术

4.1 研究背景

在重构沥青混合料空间结构时,有些研究者通过扫描技术得到集料的图像,然后根据图像构建虚拟试件来模拟混合料的微观结构^[1]。图像处理技术能够解决混合料微观结构的重构问题,但也存在如下几点不足:①切片扫描得到的是二维图形,因此图像处理得到的也是二维多边形几何参数,而集料是三维实体,用二维信息描述会大大影响数值模拟的精度及可信度;②虽然通过 X 光断层扫描技术能够得到的三维图像处理,但过程极其复杂,增大了数值模拟与分析的难度。

4.2 集料空间结构重构技术实现

根据基本假设,通过随机分布函数描述集料的形状与空间分布,重构集料空间结构模型的步骤为:

(1)在预设的混合料空间区域内,按照混合料级配随机产生球形单元,并把集料的物理参数赋予球形单元。

(2)把球形单元的几何信息(形心和半径)和物理信息(密度、刚度等)分别存储在数组中,并删除球形单元。

(3)按该区域内部规则产生小球单元,球半径根据将要产生的多面体的尺寸预先确定。

(4)遍历几何信息数组,数组中的每组数据代表一个球形区域,用两两平行的 6 个平面切割该球形区域,即可得到一定形状的多面体区域。图 2 为切割平面的位置关系:平面 P_{a1} 与 P_{a2} 平行, P_{b1} 与 P_{b2} 平行,并关于过球心的直径对称,平行平面间的距离 d_1 和 d_2 以及平面间的夹角 α 服从随机分布函数。把被该多面体区域覆盖的所有小球粘结在一起作为一个整体,使其在模拟过程中保持相对位置不变,并从物理信息数组中提取相应的参数等价赋予这些小球。

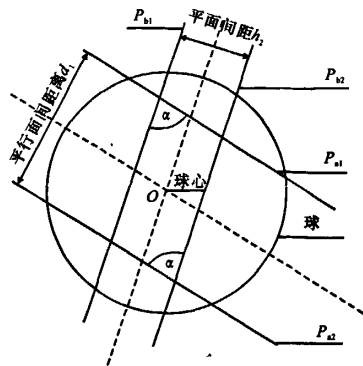


图 2 平面切割球体的位置

(5)遍历结束后,删除未被多面体区域覆盖的球单元,即在预设空间区域内生成有限个被球单元填充的多面体,并赋以集料的物理参数。

(6)级配检验与确定。多面体生成后,检验虚拟颗粒与集料实际级配的差异,并确定其生成级配,由如下两步完成:①级配检验,通过一定的算法分离出每个级配范围内的多面体虚拟颗粒,并计算各个级配虚拟颗粒的质量分数,以此百分比与级配球域的级配百分比相比较,确定该级配是否符合条件;②级配确定,若级配检验通过,则产生的多面体虚拟颗粒与混合料中集料的级配相一致,否则对其级配进行调整。

(7)对这些多面体施加外力,使其压缩至一定的骨架间隙率,这一步模拟混合料的成型过程。

(8)根据所需的试件尺寸及形状,切割形成试件。这一步模拟试件的切割过程。

按照上述步骤,在预设空间区域内,按照混合料的级配随机产生不同形状的多面体,并切割成所需的形状,即完成了集料的空间重构。采用上述技术产生的集料虚拟空间结构具有如下特点:①能够反映混合料的级配特征;②能够反映混合料集料的几何特征;③能够反映混合料中集料排列的随机性;④可以控制特殊形状颗粒(如针片状颗粒)的体积分数。

当3对平行平面间的距离差别较大时就会出现特殊颗粒,通过一定的算法控制3个距离之比即可。

5 模型算法实现的关键技术

实现模型算法需解决几个关键技术:级配球单元的随机产生算法、多面体区域的随机产生算法、多面体虚拟颗粒的级配检验与调整、几何物理参数转换等。以下通过算例说明模型建立与重构技术。

某沥青混合料圆柱形试件:直径为50 mm,高60 mm;其中2.36 mm以上的粗集料共分3档,粗集料级配情况见表1。细集料、矿粉与沥青形成的沥青玛蹄脂的粘结强度为 s_{1n} (法向)和 s_{1t} (切向),粘附强度为 s_{2n} (法向)和 s_{2t} (切向),粗集料形成的骨架间隙率为40%,达到该孔隙率时的轴向应力为0.1 MPa。

表1 混合料级配

筛孔尺寸/mm	9.50	4.75	2.36
通过率/%	80	60	30

根据模型及多面体随机产生算法,产生多面体并建立离散元模型的过程如下:

(1)预设空间为立方体区域,边长为120 mm,

并在该区域内部按照混合料粗集料的级配产生球形单元,单元个数1 743个,形成的孔隙率为15%。

(2)把产生球形单元的几何信息(形心和半径)和物理信息(密度、刚度等)分别存储在数组中,并删除球形单元。

(3)在该区域内部规则产生小球形单元,单元直径为0.1 mm,共产生单元287 496个。

(4)按照多面体随机产生技术产生多面体,并把多面体覆盖区域的小球粘结在一起,作为一个整体与混合料中集料相匹配。

(5)删除未被多面体区域覆盖的球单元,被球单元填充的多面体则随机分布在预设空间区域内部,这时多面体形成的孔隙率为64.1%。

(6)级配检验与确定。通过计算机模拟筛分过程,得到残留在筛子上的颗粒质量比值为1.015:1.070:1.348;而集料的级配为:1:1:1.5。显然,第三个筛子上的颗粒体积分数较低,则保持其体积分数不变,调整其他两个筛子上的颗粒体积分数,最终使产生的虚拟颗粒符合混合料的级配要求。

(7)采用刚性‘墙’对这些多面体施加外力,使其压缩到一定的孔隙率。施压时控制‘墙’的速度,保证轴向压力为0.1 MPa,当计算收敛时,该压力对应的孔隙率为38.4%。最终形成长方体试件的尺寸为:110.4 mm×86.3 mm×109.7 mm。

(8)切割形成直径50 mm,高60 mm的圆柱形试件,形成由多面体填充的虚拟试件,如图3、图4所示。从试件中随机取出几个虚拟颗粒单元,如图5所示。



图3 圆柱试件正面

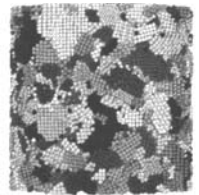


图4 圆柱试件侧面

(9)在多面体形成的孔隙中产生直径为0.1 mm的小球,小球的个数由沥青玛蹄脂的总质量与密度决定。设这种离散单元即为玛蹄脂单元,而形成多面体(模拟集料)的离散单元为集料单元。

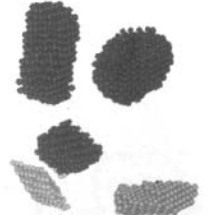


图5 部分虚拟颗粒

(10)分配接触模型。集料单元之间的接触采用接触刚度模型,集料单元与

玛蹄脂单元之间的接触采用接触粘结模型,强度按照粘附强度赋值,玛蹄脂单元之间的接触采用平行粘结模型,强度采用粘结强度赋值。

6 结 语

(1)沥青混合料是多相复合材料,不同于连续均匀的材料,也不同于非连续的散体材料,因此无法采用传统的连续介质连续求解,也很难按照散体力学方法求解。而本文提出的离散单元方法则是解决此类材料的有力工具。

(2)采用多面体模拟集料的形状、空间位置及其物理信息等,解决了圆球形单元形状简单带来的问题,从而更真实地反映混合料的微观结构特征,为沥青混合料微观结构分析奠定了基础。

(3)采用3种接触模型描述单元之间的相互作用(包括沥青的粘结作用,集料之间、集料与沥青玛蹄脂之间的作用等),并根据一定级配重构、成型混合料虚拟试件,因此能够比较真实地反映沥青混合料内部各个组成部分的相互作用。

(4)从算例结果看,本文模型及多面体随机产生算法是合理可行的,比较真实地反映了混合料的微观结构特征。

(5)在本文提出的模型算法的基础上,未来的研究可借助相关离散元分析软件,实现沥青混合料微观结构的三维微观力学模拟分析,包括三轴试验的数值模拟、直接拉伸试验的数值模拟等。

参考文献:

References:

- [1] 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.
HU Xia-guang. Review on asphalt mixture micromechanics analysis [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2005, 25(2):6-10.
- [2] 刘凯欣,高天凌. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展,2003,33(4):483-488.
LIU Kai-xin, GAO Tian-ling. A review on the discrete element method [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(4): 483-488.
- [3] 张争奇,梁晓莉,李平. 沥青老化性能评价方法[J]. 交通运输工程学报,2005,5(1):1-5.
ZHANG Zheng-qi, LIANG Xiao-li, LI Ping. Evaluation method of asphalt aging properties [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(1):1-5.
- [4] 张登良. 沥青与沥青混合料[M]. 北京:人民交通出版社,1993.
- [5] 张争奇,赵占利,张卫平. 矿料级配对沥青混合料低温性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):1-5.
ZHANG Zheng-qi, ZHAO Zhan-li, ZHANG Wei-ping. Effect of aggregate gradation on performance of asphalt mix at low temperature [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2005, 25(2):1-5.
- [6] 彭勇,孙立军. 沥青混合料均匀性与性能变异的关系[J]. 中国公路学报,2006,19(6):30-34.
PENG Yong, SUN Li-jun. Relation of homogeneity and performance variation of asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6):30-34.
- [7] 赵战利,张争奇,胡长顺. 集料级配对沥青路面抗滑性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(1):6-9.
ZHAO Zhan-li, ZHANG Zheng-qi, HU Chang-shun. Influence of gradation on anti-skidding performance of asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2005,25(1):6-9.
- [8] 陆阳,周永江,张蓉. SMA粗集料结构的数值模拟[J]. 中国公路学报,2006,19(1):38-41.
LU Yang, ZHOU Yong-jiang, ZHANG Rong. Numerical simulation of coarse aggregate skeleton of stone matrix asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(1):38-41.
- [9] 陈强,曹汉荣,张起森,等. SMA混合料体积参数研究[J]. 中国公路学报,2001,14(4):19-25.
CHEN Qiang, CAO Han-rong, ZHANG Qi-sen, et al. Research of the volume parameters of SMA mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001,14(4):19-25.
- [10] Buttler W G, Roque R. Evaluation of empirical and theoretical models to determine asphalt mixture stiffnesses at low temperatures [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1996, 22(2):99-114.