

DOI:10.11918/202311072

实形粗集料三维离散元马歇尔仿真试件的构建与应用

邬金麒¹, 纪 伦¹, 郭宏斌², 程邳策^{1,3}, 刘济玮¹, 谭忆秋¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 吉林省路桥工程(集团)有限公司, 长春 130062;
3. 中国五冶集团有限公司, 成都 610011)

摘要: 为提高沥青铺面工程的质量控制技术能力, 采用 CT 扫描获取粗集料形状, 生成实形粗集料颗粒模型群组, 再使用离散元软件生成具有粗集料形状和级配组成特征的沥青混合料仿真试件, 探讨数字仿真试验, 继而实现沥青混合料质量的数字化管控。通过 4 种不同接触行为: 粗集料本体、砂浆-砂浆、集料-砂浆、集料-集料, 与骨架结构复合构建生成马歇尔仿真试件; 采用间接拉伸劈裂试验验证了模型试件的准确性, 并结合质量控制典型状况进行了应用和分析。以沥青混合料低温性能为例, 进行配合比优化的等体积、等质量替换性能比较的仿真试件应用分析。研究表明: 采用三维离散元构建的马歇尔试件可有效模拟间接拉伸力学行为, 并可区分质量控制过程中的典型状况; 从劈裂强度和断裂能角度分析发现, 等体积替换方式较等质量替换方式更接近原级配的劈裂试验性能; 较大粒径范围的粗集料形貌与混合料结构联系更加紧密。实形粗集料三维离散元马歇尔仿真试件可以应用于沥青混合料的质量控制中, 具有显著效果, 能够使工程管控工作的开展更加方便快捷。

关键词: 粗集料; 离散元; 仿真试件; 接触行为; 质量控制

中图分类号: U415 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)03-0001-13

Construction and application of solid coarse aggregate three-dimensional discrete element Marshall simulation specimen

WU Jinqi¹, JI Lun¹, GUO Hongbin², CHENG Zhice^{1,3}, LIU Jiwei¹, TAN Yiqiu¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Jilin Road and Bridge Engineering (Group) Co., Ltd., Changchun 130062, China;
3. China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu 610011, China)

Abstract: In order to improve the quality control technology capability of asphalt pavement engineering, CT scanning is used to obtain the shape of coarse aggregate, generate a group of solid coarse aggregate particle models, and then use discrete element software to generate asphalt mixture simulation specimens with coarse aggregate shape and gradation composition characteristics. Digital simulation experiments are explored to achieve digital control of asphalt mixture quality. Marshall simulation specimens were generated by combining four different contact behaviors: coarse aggregate body, mortar mortar, aggregate mortar, and aggregate aggregate with the skeleton structure; The accuracy of the model specimen was verified by indirect tensile splitting test, and applied and analyzed in combination with typical quality control conditions. Taking the low-temperature performance of asphalt mixture as an example, the application analysis of simulation specimens for comparing the replacement performance of equal volume and equal mass with optimized mix proportion is carried out. The research results indicate that Marshall specimens constructed using three-dimensional discrete element method can effectively simulate indirect tensile mechanical behavior and distinguish typical conditions in the quality control process; From the perspective of splitting strength and fracture energy, it is found that the equal volume replacement method is closer to the splitting test performance of the original grade than the equal mass replacement method; The morphology of coarse aggregates with a larger particle size range is more closely related to the structure of the mixture. The solid coarse aggregate three-dimensional discrete element Marshall simulation specimen can be applied to the quality control of asphalt mixture, which has remarkable effect and can make the project management and control work more convenient and faster.

Keywords: coarse aggregate; discrete element; simulation specimen; contact behavior; quality control

收稿日期: 2023-10-17; 录用日期: 2024-01-14; 网络首发日期: 2025-02-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250219.1702.003>

基金项目: 黑龙江省自然科学基金研究团队项目(TD2022E001); 国家自然科学基金(U20A20315); 国家重点研发计划(2016YFE0202400)

作者简介: 邬金麒(2001—), 男, 硕士研究生; 纪 伦(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 纪 伦, jilun@hit.edu.cn

粗集料的形貌特征影响混合料的性能^[1-2],对于粗集料形貌特征的表征,有的学者从二维角度进行分析^[3],但二维图像无法展示集料颗粒在空间上的所有形貌特征,缺乏完整性,如无法体现内部空隙结构的分布和形状特征。而利用 CT 技术对集料进行扫描,可构建集料三维实体模型,继而分析粗集料的形貌特征及其与级配、混合料性能之间的联系^[4-6]。

目前,判断沥青混合料材料性能优劣主要是通过实际试验操作来验证,而利用数值模拟方法可有效提高操作的效率,减少试验时间和成本,其实用性能有广阔的前景。离散元法是一种基于离散的、独立运动的颗粒单元的数值模拟方法,方法中结构被分解为许多小的颗粒单元,每个单元均具有几何形状和物理化学特征,通过相互接触和作用模拟整个结构的力学行为。通过离散元法,研究者可以在微观尺度上对沥青混合料的结构和性能进行深入的探究,对沥青混合料中的各种颗粒单元进行准确建模,并考虑它们之间的相互作用,以及与外界环境的相互作用^[7-10]。离散元模拟方法作为工具用于分析沥青混合料的力学性能已经广泛应用,但离散元模拟的难点在于对沥青混合料还原的准确性,目前的研究通常将粗集料颗粒的模型用多个小球替换或仅采用少量的粗集料模型反复生成形成沥青混合料虚拟试件,而采用大量实形颗粒模型还原试件可以提高还原度,并且可以用于快速检测沥青混合料的性能。

本文借助三维颗粒流程序 (particle flow code in 3 dimensions, PFC3D), 基于实形粗集料颗粒模型生成具有级配特征的沥青混合料仿真试件,通过虚拟劈裂试验研究沥青混合料的力学性能,同时模拟沥青混合料生产过程中材料发生变异后使用等体积和等质量替换所造成的性能差异,从而模拟实际工程一些材料变异问题,利用相关的离散元软件对沥青混合料进行探究分析,解决实际工程中的相应问题,实现沥青混合料从设计到实际路面效果整体体系的质量控制。

对于东北地区,气温常年较低,降温幅度大、速度快,冻融循环次数较多,而体现在路面上的破坏形式就以低温开裂最为广泛,因此本文将利用低温抗裂的性能指标验证离散元仿真试件的真实性和可行性。

1 具有级配特征的沥青混合料模型构建

1.1 PFC3D 基本原理

PFC3D 是一款离散元软件,用于模拟颗粒流和

颗粒固体相互作用的力学行为。PFC3D 的基本原理是基于离散元法,将颗粒看作刚性球体,在一定空间范围内模拟一个颗粒系统内部中所有颗粒的作用和运动。PFC3D 将系统分为颗粒层、接触层和网格层 3 个层次。在颗粒层中,每个颗粒被看作一个刚性球体,并具有一定的质量和速度;在接触层中,模拟颗粒之间的相互作用力;在网格层中,PFC3D 将颗粒层和接触层的信息转化为网格信息,用于计算应力和应变等物理量。

1.2 级配组成设计

采用来自 3 种不同产地的集料 (P1、P2、P3), 以及两种不同产地的矿粉 (R1、R2), 分别试配出 AC-16、AC-20、AC-13 规格的沥青混合料,P1、P3 集料与 R1 矿粉结合,P2 集料与 R2 矿粉结合,3 种集料分别设计 4 种级配,结果见表 1~3,配合比曲线如图 1 所示。同时,按集料类型为矿料级配编号。

表 1 P1 矿料级配结果

Tab. 1 Results of P1 mineral aggregate mixture ratio

级配	矿料组成比例/%				
	>10~15 mm (黑)集料	>10~15 mm 集料	>5~10 mm 集料	0~5 mm 集料	R1 矿粉
P1-01	15	25	27	26	7
P1-02	25	14	30	25	6
P1-03	20	15	33	27	5
P1-04	29	8	25	30	8

表 2 P2 矿料级配结果

Tab. 2 Results of P2 mineral aggregate mixture ratio

级配	矿料组成比例/%				
	>15~20 mm 集料	>10~15 mm 集料	>5~10 mm 集料	0~5 mm 集料	R2 矿粉
P2-01	28	16	16	33	7
P2-02	24	17	18	35	6
P2-03	20	21	22	31	6
P2-04	18	25	20	30	7

表 3 P3 矿料级配结果

Tab. 3 Results of P3 mineral aggregate mixture ratio

级配	矿料组成比例/%				
	>10~15 mm 集料	>5~10 mm 集料	石屑	机制砂	R1 矿粉
P3-01	34	14	37	11	4
P3-02	29	16	36	14	5
P3-03	30	20	30	16	4
P3-04	40	24	16	16	4

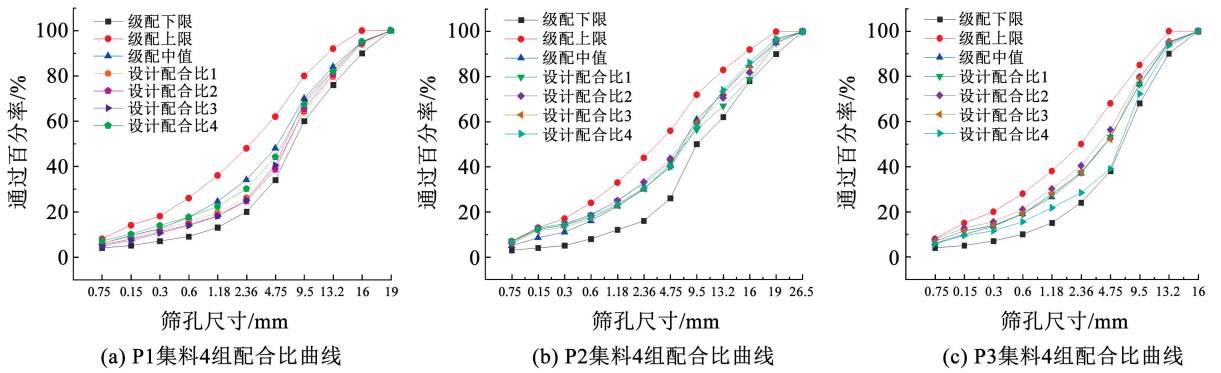


图1 集料各组设计配合比曲线

Fig.1 Synthetic grading curve of design mix ratio of aggregate groups

1.3 粗集料颗粒模型的生成及体积计算

1.3.1 离散单元模型 clump 的生成

对于普通模型在 PFC3D 软件中一般由小球体构成,而本研究所用的粗集料颗粒形状复杂,有棱角、纹理等各项形貌特征,因此,可以采用 clump 命令对粗集料颗粒模型进行定义。采用 clump template 命令定义颗粒模板,使每一个粗集料颗粒内部由多个小球(pebble)填充而最终形成粗集料颗粒模板(clump)。模型内部 pebble 数目越多越能还

原真实的颗粒,但同时 pebble 的数量还影响着颗粒之间的相互作用,当 pebble 数量越多时各项数值模拟的运算量也会增大,导致在短时间内无法快速得到更真实的模拟结果,因此采用两个参数命令对 pebble 数量进行控制。其中,distance 的范围为 0~180,值越大模板表面越光滑;ratio 代表最小与最大颗粒间的半径比,取值在 0~1 之间,其值越小模型越精准。

本研究选择 distance = 140, ratio = 0.2, 3 种粗集料生成模型模板如图 2 所示。

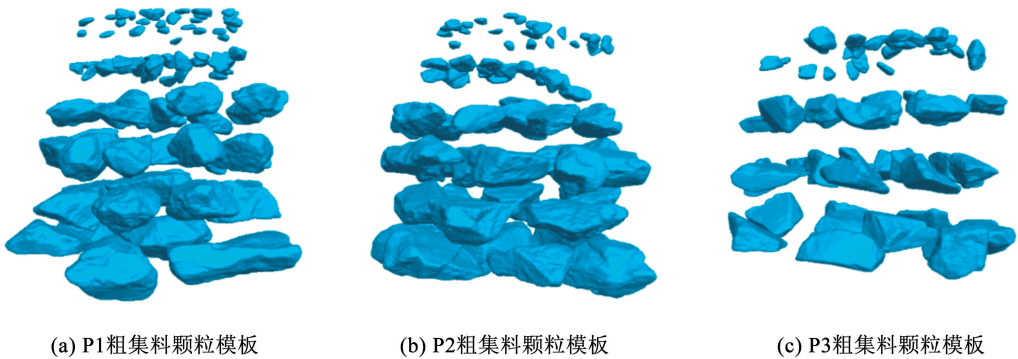


图2 3种集料颗粒模板

Fig.2 Three kinds of aggregate particle templates

1.3.2 不同规格集料体积计算

通过定义模板体积,PFC3D 软件可以实现一定空间范围内投放指定体积的颗粒单元。为了达到既可以成型仿真试件,又能保证生成的沥青混合料离散元模型与实际级配接近的目的,需要通过实际目标级配计算每一粒径范围内粗集料所占的体积。同一碎石厂生产的各档粗细集料密度相差不大,因此,研究假设粗细集料密度分别为各档粗细集料密度的平均值,以 P2 集料的配合比 1 为例演示计算各档集料的体积。除集料密度之外,沥青混合料试件的空隙率也会影响成型仿真试件的准确性,本次采用室内试验实测的方法,认为仿真试件的空隙率与实测值相同。

根据上述假设,P2 集料的配合比 1 的最佳沥青用量为 4.90%,空隙率为 4.5%,粗集料密度为 2.746 g/cm³,细集料密度为 2.715 g/cm³,根据分计筛余百分率和矿料配合比等可以计算各档的质量比和体积比,即: >19.00~26.50 mm 粗集料、>16.00~19.00 mm 粗集料、>13.20~16.00 mm 粗集料、>9.50~13.20 mm 粗集料、>4.75~9.50 mm 粗集料、>2.36~4.75 mm 粗集料、细集料、沥青的质量比为 4.76:16.14:11.95:10.52:14.18:9.64:32.61:5.15,体积比为 1.80:5.88:4.35:3.83:8.78:11.84:8.05:27.55:11.68。再纳入空隙率,将体积比转换为体积百分率计算得到各档体积百分率,马歇尔试件的体积为 621.14 cm³,可以计算每档的体积值,结果见

表 4。其中,空隙率为 4.5%, 体积为 27.95 cm³。

表 4 P2 集料配合比 1 各材料所占体积

Tab.4 Volume of P2 aggregate mix proportion 1 in each file

组成材料	体积百分比/%	体积/cm ³
> 19.00 ~ 26.50 mm 粗集料	4.14	25.71
> 16.00 ~ 19.00 mm 粗集料	13.48	83.74
> 13.20 ~ 16.00 mm 粗集料	9.98	62.00
> 9.50 ~ 13.20 mm 粗集料	8.78	54.55
> 4.75 ~ 9.50 mm 粗集料	11.84	73.53
> 2.36 ~ 4.75 mm 粗集料	8.05	50.02
细集料	27.55	171.11
沥青	11.68	72.53

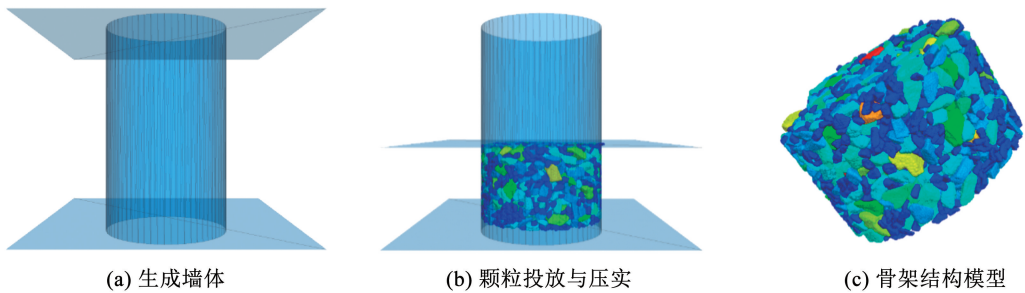


图 3 具有级配特征骨架结构模型的生成过程

Fig.3 Generation process of skeleton structure model with gradation characteristics

为了验证所生成的模型与理论级配的误差,遍历模型中的 clump 单元,确定单元数量,反算出集料颗粒模型的总体积,计算出粗集料模型级配。以 P1-01 (P1 集料配合比 1) 为例,与粗集料理论体积级配进行对比,结果如图 4 所示,模型与理论级配差异不大,说明该方法能还原级配特征。

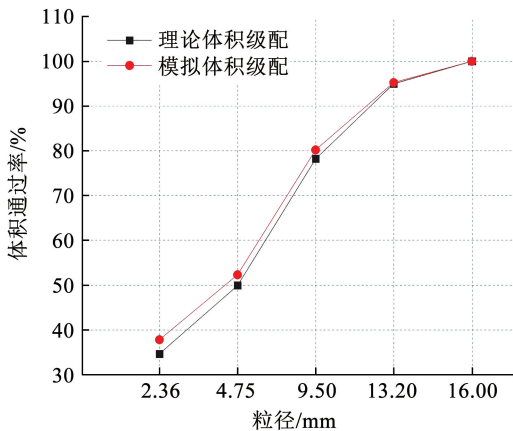


图 4 理论体积级配和模型体积级配的对比

Fig.4 Comparison between theoretical volume gradation and model volume gradation

1.4 沥青砂浆及空隙相的模拟

对于沥青混合料骨架结构,还需要生成沥青砂

1.3.3 具有级配特征的骨架结构模型的生成

由于投放的颗粒单元间有重叠部分,为了保证能消除重叠,先采用 clump attribute、wall property 及 clump property 命令分别赋予颗粒单元密度、阻尼参数,赋予墙体、颗粒刚度和摩擦系数;后通过关键词 gravity 和 cycle 循环赋予颗粒单元重力,让其受重力作用,同时利用 cycle 命令消除重叠区域,最终形成试件集料颗粒群。

赋予上述步骤中生成的集料颗粒群模型中的上部墙体一个竖向向下的速度,并对该墙体施加一个向下 10 kN 的力模拟沥青混合料压实成型的过程,该压力直至试件达到指定高度停止,最终能获得骨架结构模型。生产过程如图 3 所示。

浆,并保证整体空隙率。对于小于 2.36 mm 的细集料、填料以及沥青组成的砂浆,很难在 PFC3D 中以单独的颗粒构建,因此一般统一将沥青砂浆视为均匀的黏弹体。

为了表征沥青砂浆,采用 ball generate 和 radius、cubic 等命令在混合料试件范围内生成无数个规则排列的直径 1 mm 的小球,通过判断“ball-ball”、“ball-pebble”间是否接触或重叠,通过 ball delete 命令删除这部分小球,仅留下与颗粒单元无重叠以及无接触的小球。剩下的小球共同构成了沥青砂浆模型,如图 5 所示。

计算各档集料所占体积时,根据室内试验所完成试件的实际空隙率,计算出空隙的体积。通过 1.3 节中的级配验证发现,粗集料颗粒的模拟体积级配与实际体积级配间相差不大。因此,空隙相仅通过砂浆模型中各规则排列的小球之间的空隙来模拟,如图 6 所示。

通过遍历空间中所有小球的信息获得小球的数量,计算出小球的总体积,与实际砂浆总体积进行对比发现,本次所分析的 P1 集料配合比 1 所生成的沥青混合料试件模型中小球的总体积比实际砂浆总体积多 3 451 mm³,主要原因是小球单元间已经存在空隙,这类空隙可以替代实际整体模型中的部分空

隙。鉴于试件内部实际空隙部分较复杂,假设虚拟试件内部空隙为随机分布,因此通过 ball delete、

range 等代码随机删除固定体积的小球,形成最终的沥青混合料模拟马歇尔试件。

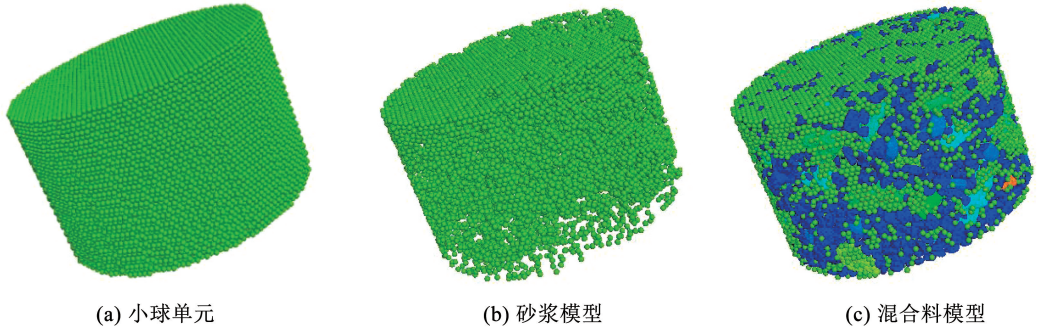


图5 沥青砂浆的生成过程

Fig. 5 Formation process of asphalt mortar

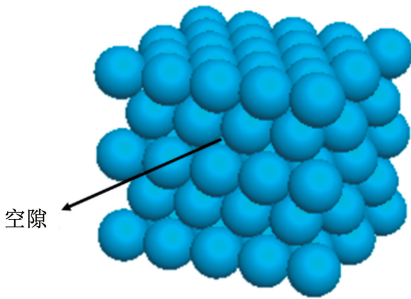


图6 规则排列小球间的空隙

Fig. 6 Spaces between regularly arranged balls

2 离散元接触模型及细微观参数的确定

2.1 离散元接触模型介绍

2.1.1 线性模型

线性模型假设粒子间的接触是由一个弹簧和一个阻尼器组成的系统。当两个粒子之间的距离小于等于其初始距离时,弹簧会被压缩,产生一个相应的反弹力,而阻尼器则会消耗系统的能量,使得粒子最终停止振动。通常用以下公式描述两个粒子之间的相互作用力:

$$F_n = k_n \delta_n + \gamma_n v_{rel}^n \quad (1)$$

式中: F_n 为相互作用力, k_n 为接触刚度, δ_n 为相对位移, γ_n 为阻尼系数, v_{rel}^n 为相对速度。

可以看到,模型中的相互作用力包括了两个部分:一个是弹性力,其与两个粒子之间的相对位移成正比;另一个是阻尼力,其与两个粒子之间的相对速度成正比。这两个部分都能够模拟粒子之间的相互作用,从而实现模拟。

2.1.2 线性接触黏结模型

离散元中的线性接触黏结模型是在线性接触模型的基础上进行改进的,除了考虑粒子之间的接触力,还考虑了接触面上的黏结力,从而更加准确地描述了粒子间的相互作用。在离散元中,线性接触黏

结模型通常包含线性接触模型和黏结模型两个部分。线性接触模型描述了粒子之间的弹性力和阻尼力,黏结模型描述了粒子间接触面上的黏结力,计算公式为

$$F_s = k_s \delta_s \quad (2)$$

式中: F_s 为黏结力, k_s 为黏结系数, δ_s 为黏结位移。

当两个粒子的接触面分离时,黏结力消失。线性接触黏结模型通过将线性接触模型和黏结模型结合起来,描述了粒子之间的弹性力、阻尼力和黏结力,从而更加准确地模拟了粒子之间的相互作用。

2.1.3 线性平行黏结模型

线性平行黏结模型是在改进了线性接触模型的基础上,增加了平行于接触面的黏结力,以更好地描述颗粒之间的接触行为。常包括线性接触模型、切向弹性模型和平行黏结模型3部分。切向弹性模型用于描述颗粒之间的切向弹性力,计算公式为

$$F_t = k_t^c \delta_t \quad (3)$$

式中: F_t 为切向弹性黏结力, k_t^c 为切向弹性系, δ_t 为切向位移。

平行黏结模型用于描述颗粒之间的平行黏结力,计算公式为

$$F_p = k_p \delta_p - \gamma_p v_{rel}^p \quad (4)$$

式中: F_p 为平行黏结力, k_p 为平行黏结系数, δ_p 为平行位移, γ_p 为平行阻尼系数, v_{rel}^p 为平行相对速度。

综合上述3部分,可以得到线性平行黏结模型的总作用力为

$$F_{total} = F_n + F_t + F_p \quad (5)$$

2.1.4 Burgers 接触模型

对于常温或低温条件下,2.1.2节和2.1.3节所述的黏结模型适用于沥青混合料的数值模拟分析。而高温条件下,沥青混合料有明显的黏弹性,因此需要采用 Burgers 模型。Burgers 接触模型描述了两个颗粒之间的力学接触行为,其中每个颗粒都是

由一系列小球或弹簧模型组成。

该模型基于下列假设:1)颗粒之间的接触可视为一系列小球或弹簧模型的弹性变形;2)变形程度取决于颗粒之间的相对位移;3)颗粒之间的相互作用受到一定的阻尼和摩擦力的影响。

基于上述假设,Burgers 接触模型可以表示为

$$F_k = k_k \delta_k^{\frac{3}{2}} - \gamma_k \delta_k \dot{\delta}_k \quad (6)$$

式中: F_k 为法向力, k_k 为归一化刚度系数, δ_k 为接触变形, γ_k 为阻尼系数, $\dot{\delta}_k$ 为接触变形速度。

式(6)表示接触力随着接触变形的增加而增加,同时还考虑了阻尼和摩擦力的影响。

2.2 沥青混合料各组分接触行为分析

根据沥青混合料的材料组成特点,目前大部分学者研究离散元时将 2.36 mm 作为粗细集料的分界线^[11-15]。因此,在进行离散元模拟时,认为粒径大于 2.36 mm 的粗集料、沥青砂浆以及空隙是组成沥青混合料离散元模型的 3 部分。考虑到模型中所出现的接触问题,空隙与其他部分不产生接触,而沥青砂浆与粗集料颗粒单元则明显会产生接触,因此,模型中会出现粗集料内部、砂浆-砂浆、集料-砂浆、集料-集料 4 种接触类型,但粗集料颗粒单元在模型中定义为刚体,加载时几乎不会破坏,因此不再描述粗集料内部的接触,其他接触类型示意如图 7 所示。对于集料-集料接触,可以采用线性模型进行描述;对于砂浆-砂浆接触及砂浆-集料接触,由于沥青砂浆是一种温度敏感性材料,其自身性质会随着温度的变化而发生巨大差异,因此,难点在于定义集料颗粒与砂浆之间的接触。

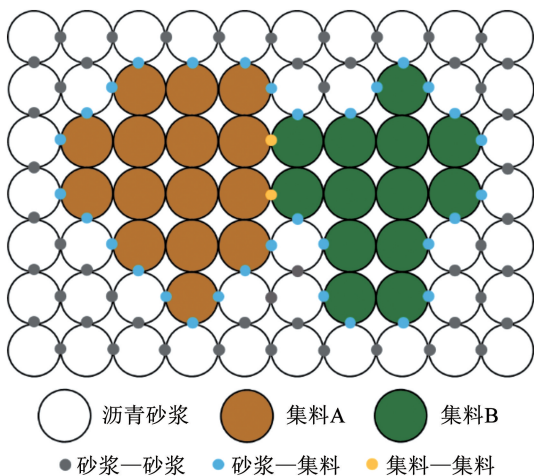


图 7 沥青混合料内部接触示意图

Fig. 7 Schematic diagram of internal contact of asphalt mixture

在低温或室温条件下,颗粒间的接触是产生结构刚性的主要因素,而黏结作用可以被忽略不计,因此,考虑采用线性平行黏结模型。而在高温条件下,

黏结作用的表现更加明显,因此,考虑采用 Burgers 模型。基本以上几点,本文所研究的劈裂试验环境温度为一 10 ℃,对集料-集料接触采用线性模型,砂浆-集料接触及砂浆-砂浆接触采用线性黏结模型。

2.3 沥青混合料模型物理及细观参数的确定

2.3.1 模型物理参数的确定

离散元模型中,沥青混合料模型组成部分中的粗集料、沥青砂浆及墙 3 部分均需要被赋予主要的物理参数。

1)墙体物理属性参数。根据文献[16],将墙体的法向刚度与切向刚度分别确定为 1.0×10^7 、 5×10^6 N/m,摩擦系数则取 0.2。

2)粗集料物理属性参数。本研究的粗集料为玄武岩,参考弹性模量 E_c 为 55 GPa,泊松比 ν 为 0.25。

当两个接触的单元相同时,单个单元自身的法向刚度和切向刚度分别为

$$K_n = \frac{2E \times A}{L} \quad (7)$$

$$K_s = \frac{E \times A}{L(1 + \nu)} \quad (8)$$

式中: L 为模型弹性梁的长度, A 为弹性梁的截面面积, E 为弹性模量, ν 为泊松比。

根据式(7)、(8),得出粗集料 clump 单元的法向刚度为 1.73×10^8 N/m,切向刚度为 6.91×10^7 N/m,粗集料密度取 2700 kg/m³,阻尼系数为默认值 0.7,摩擦系数为 0.35。

3)沥青砂浆物理属性参数。对于沥青砂浆的密度取值,取沥青、沥青和矿粉密度的体积加权平均数,经计算大致取 1400 kg/m³。沥青砂浆的摩擦系数取 0.5,阻尼系数为默认值 0.7。

2.3.2 细观参数的确定

除 Burgers 模型之外的 3 个接触模型的细观参数也需要确定。

1)粗集料颗粒之间的接触细观参数为

$$K_n = \frac{A \times E}{L} \quad (9)$$

$$K_s = \frac{A \times E}{2L(1 + \nu)} \quad (10)$$

式中: L 为模型弹性梁的长度, A 为弹性梁的截面面积, E 为弹性模量, ν 为泊松比, K_n 为法向刚度, K_s 为切向刚度。

粗集料单元间采用线性接触模型。根据弹性模量 55 GPa,泊松比 0.25,计算得粗集料颗粒间的法向刚度为 8.64×10^7 N/m,切向刚度为 3.46×10^7 N/m,摩擦系数为确定的 0.35。

2)低温状态下沥青砂浆间及砂浆和颗粒间的

接触细观参数为

$$\frac{1}{K_n} = \frac{1}{K_n^a} + \frac{1}{K_n^b} \quad (11)$$

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{K_s^a} + \frac{1}{K_s^b} \quad (12)$$

式中: K_n^a 、 K_n^b 、 K_s^a 、 K_s^b 分别为实体间的法向刚度和切向刚度, K_n 、 K_s 分别为法向刚度和切向刚度。

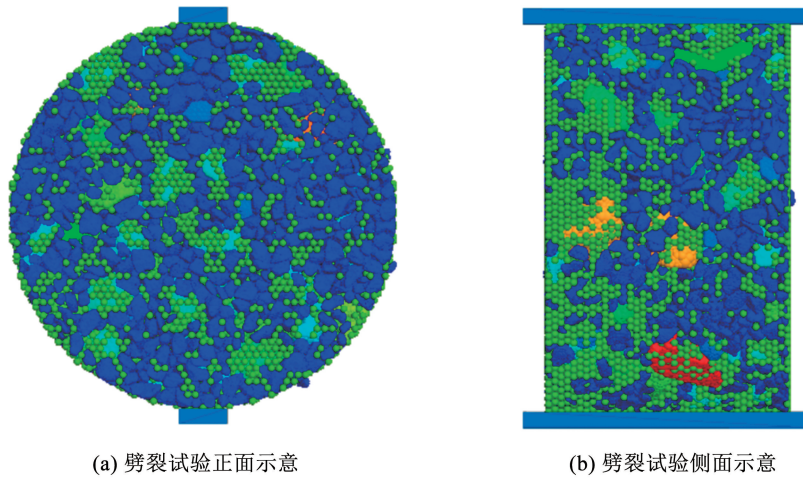
低温状态下砂浆内部单元间的接触以及砂浆单元与粗集料颗粒单元间的接触采用线性接触黏结模型。由文献[17]确定 SBS 改性沥青砂浆的弹性模量等宏观参数,计算砂浆内部单元间的法向刚度和切向刚度分别为 2.38×10^6 、 1.02×10^6 N/m,砂浆单元与粗集料单元间的法向刚度为 4.63×10^6 N/m,切向刚度为 1.96×10^6 N/m,沥青砂浆内部单元间

以及粗集料单元和砂浆单元间的黏结强度分别为 34、26 N。

2.4 模型准确性验证

为验证模型物理及细观参数的设置是否准确,通过比较室内低温(-10℃)劈裂试验和离散元模型虚拟数值试验的结果进行验证。将1.4节中生成的P1粗集料配合比1的模拟沥青混合料仿真试件经参数赋予的命令将2.3节中所确定的参数赋予仿真试件中的各部分。在仿真试件生成相应的夹具墙体,为了模拟劈裂的加载过程,赋予墙体向下1 mm/min的速度,示意如图8所示。

室内劈裂试验与离散元模型虚拟试验对比如图9所示。



(a) 劈裂试验正面示意

(b) 劈裂试验侧面示意

图8 沥青混合料仿真试件劈裂试验

Fig. 8 Splitting test of asphalt mixture simulation specimen

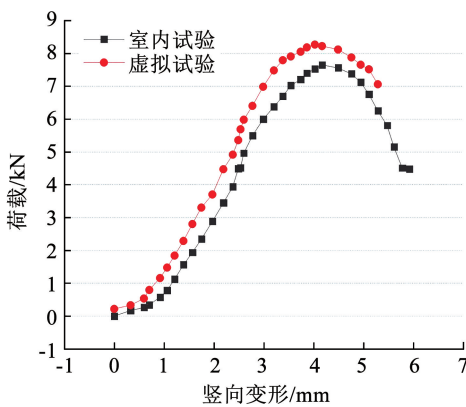


图9 室内劈裂试验和虚拟劈裂试验对比

Fig. 9 Comparison diagram of indoor splitting test and virtual splitting test

由图9可以看出,两个试验的结果较为一致,差异百分比小于10%,说明本文构建的虚拟劈裂试验评价沥青混合料的力学性能是可行的。

3 基于质量控制的沥青混合料离散元实体模型的质量保证技术

目前,在研究粗集料的形貌对沥青混合料的性能影响时,常难以排除集料本身其他性质(如密度、空隙结构等)所造成的误差,而离散元方法恰好可以避免这些环节,从数值模拟的角度探究不同形貌对沥青混合料力学性能的影响。同时,在实际工程中,常会出现材料变异问题,依据体积级配的思想使用同一粒径范围内的不同形貌特征的粗集料颗粒同体积进行替换,同时进行等质量替换,并将两者进行对比分析,为沥青混合料的质量保证提供一种新的思路。

3.1 沥青混合料仿真试件级配设计

为探究3种粗集料各粒径范围内颗粒形貌特征的差异,将复合形貌特征参数总结于表5。

表 5 3 种粗集料颗粒各粒径范围的复合形貌参数

Tab. 5 Composite morphological parameters of three kinds of coarse aggregate particles in different particle size ranges

集料	粒径	复合球形度	复合纹理指数	复合棱角度	复合针片状
P1	>2.36 ~ 4.75 mm	0.841	37.411	1.185	1.902
	>4.75 ~ 9.50 mm	0.812	29.189	1.255	1.768
	>9.50 ~ 13.20 mm	0.807	14.274	1.232	1.816
	>13.20 ~ 16.00 mm	0.806	11.986	1.233	1.829
	>16.00 ~ 19.00 mm	0.814	10.224	1.228	1.787
P2	>2.36 ~ 4.75 mm	0.864	37.481	1.181	1.789
	>4.75 ~ 9.50 mm	0.830	26.345	1.213	1.811
	>9.50 ~ 13.20 mm	0.480	13.666	1.239	1.840
	>13.20 ~ 16.00 mm	0.807	11.406	1.242	1.782
	>16.00 ~ 19.00 mm	0.818	9.958	1.236	1.644
P3	>2.36 ~ 4.75 mm	0.949	39.623	1.186	1.812
	>4.75 ~ 9.50 mm	0.795	22.394	1.253	1.889
	>9.50 ~ 13.20 mm	0.773	17.248	1.300	1.791
	>13.20 ~ 16.00 mm	0.770	14.730	1.291	1.856

观察表 5 中形貌参数数据,选择不同粗集料间形貌差异较大的粒径范围的粗集料进行替换,最终确定粗集料替换方案如下:

1) 将 P2 中 > 9.50 ~ 13.20 mm、> 13.20 ~ 16.00 mm、> 16.00 ~ 19.00 mm 的粗集料颗粒分别以等体积和等质量的方式替换 P1 粗集料中相同粒径范围内的粗集料颗粒,配合比采用 P1 集料配合比 1。

2) 将 P3 中 > 2.36 ~ 4.75 mm、> 4.75 ~ 9.50 mm 的粗集料颗粒分别以等体积和等质量的方式替换 P1 粗集料中相同粒径范围内的粗集料颗粒,配合比采用 P1 集料配合比 1。

3) 将 P2 中 > 9.50 ~ 13.20 mm、> 13.20 ~ 16.00 mm、> 16.00 ~ 19.00 mm 的粗集料颗粒以及 P3 中 > 2.36 ~ 4.75 mm、> 4.75 ~ 9.50 mm 的粗集料颗粒分别以等体积和等质量的方式替换 P1 粗集料中相同粒径范围内的粗集料颗粒。

3.1.1 等体积替换粗集料的混合料仿真试件的生成

通过以上 3 种等体积替换集料的方式,分别生成 3 个与 P1-01 级配对应的沥青混合料仿真试件。由于离散元中集料属性可以用体积表示,粗集料填充的过程实质上是体积填充的过程,因此,在整个过程中,P1-01 级配中集料体积级配是不变的。但是,还需要考虑空隙率的变化。对于 3 种等体积替换粗集料方式,在有实测空隙率后,需要替换档的体积是固定不变的,因此可以利用生成骨架结构的方法生成本次设计的 3 种等体积替换的粗集料骨架结构。通过计算对应粒径范围内粗集料的质量,3 种等体

积替换方式的级配与原级配(P1-01 级配)的合成曲线对比如图 10 所示。由图 10 可以发现,3 种替换方式的合成级配曲线与原级配合成曲线几乎重合,每个粒径的通过率差值极小,最大的差值仅 0.6% 左右,说明在进行等体积替换粗集料后级配变化很小。

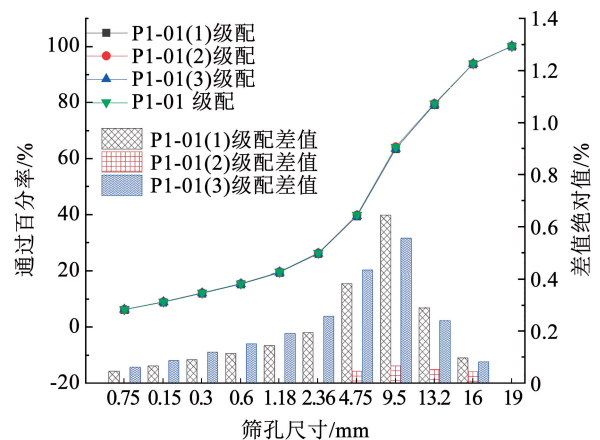


图 10 3 种等体积替换方式的级配与原级配(P1-01 级配)对比

Fig. 10 Comparison between the gradation of three equal volume replacement methods and the original gradation (P1-01 gradation)

1) 粗集料骨架结构的生成。在生成粗集料骨架结构前,分别将 3 种集料组合与 3 种级配通过室内马歇尔击实成型马歇尔试件,并测得 3 种替换粗集料后的级配对应的马歇尔试件的空隙率分别为 4.6%、4.1%、5.1%。在 3 个准确空隙率以及假

设沥青用量依然为 4.8% 的基础上,按照 1.3 节中粗集料体积的计算方法分别计算 3 种体积替换方式所对应沥青混合料各组分的体积计算,结果见表 6。

根据表 6 中计算的不同种类集料的体积和 1.3 节中介绍的粗集料生成方法,生成 3 种粗集料骨架结构,如图 11 所示。

2) 沥青砂浆、空隙相的模拟及接触的设置。采用 1.4 节中的方法,通过生成并删除与粗集料重叠的直径 1 mm 的小球模拟沥青砂浆,同时遍历所有小球获取其数量信息,通过试件总体积减去粗集料、小球的体积得到现有空隙相体积。计算发现 3 个级配的仿真试件分别需要删去 3 647、3 129、3 415 个小球,在试件内部随机位置删除相应数量的小球得到最终的沥青混合料仿真试件,如图 12 所示。

表 6 不同等体积替换方式的各组分体积

Tab.6 Volume of each component in different equal volume replacement methods

材料及空隙相	不同级配的组分体积/cm ³		
	P1-01(1)	P1-01(2)	P1-01(3)
>16.00 ~ 19.00 mm 粗集料	26.98	27.12	26.84
>13.20 ~ 16.00 mm 粗集料	61.94	62.26	61.61
>9.50 ~ 13.20 mm 粗集料	67.58	67.93	67.23
>4.75 ~ 9.50 mm 粗集料	105.17	105.72	104.62
>2.36 ~ 4.75 mm 粗集料	59.20	59.51	58.89
细集料及矿粉	115.23	115.84	114.63
沥青	55.03	55.32	54.75
空隙相	23.68	21.11	26.26

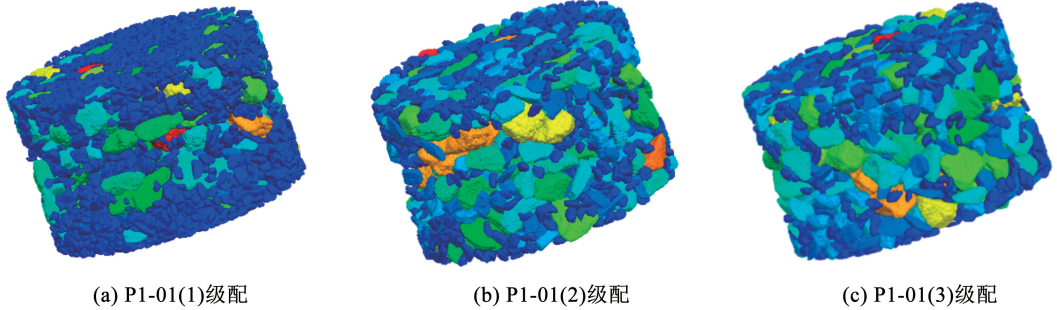


图 11 3 种等体积替换方式生成的沥青混合料骨架结构

Fig. 11 Skeleton structure of asphalt mixture generated by three equal volume replacement methods

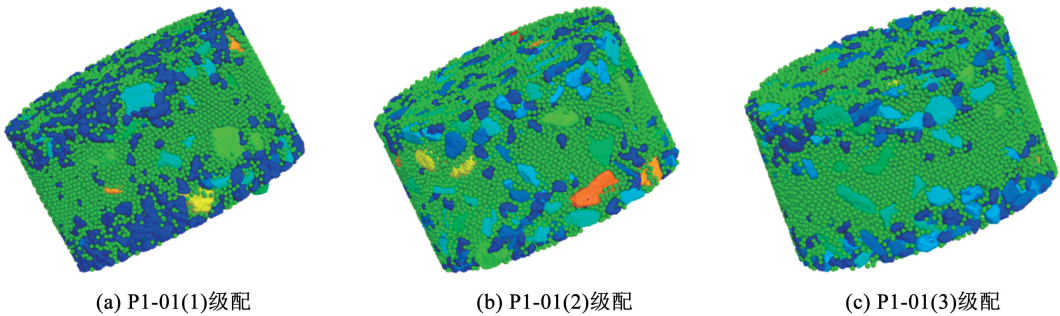


图 12 沥青混合料仿真试件

Fig. 12 Simulation specimen of asphalt mixture

3.1.2 等质量替换粗集料的混合料仿真试件的生成

与等体积替换类似,以等质量为依据采用 3 种不同的替换方式对 P1-01 级配中的部分或全部粒径范围的颗粒进行替换。将 3 种等质量替换方式所生成的沥青混合料的级配分别编号 P1-01(4)、P1-01(5)、P1-01(6)。在保证生成的马歇尔试件质量、沥青用量一定的基础上(P1-01 级配的马歇尔试件的室内实测质量为 1 275 g,沥青用量为 4.8%),3 种替换方式均为等质量替换,因此,3 个新级配与原级配(P1-01 级配)完全相同。

1) 粗集料骨架结构的生成。在离散元模拟中沥青混合料中的集料是以体积来定义的,因此,在等质量替换后需要利用粗集料实测密度计算出新的沥

青混合料试件各组分的体积。考虑到空隙率的变化问题,采用室内马歇尔击实试验得到 3 种等质量替换后的新试件的空隙率分别为 5.6%、5.0%、5.7%,通过集料密度以及空隙计算出的各组分体积,结果见表 7。

根据计算出的各粒径范围内粗集料的体积,按 1.3 节中粗集料的生成方法,生成 3 个粗集料骨架结构,如图 13 所示。

2) 沥青砂浆、空隙相的模拟及接触的设置。与上部分方法相同,分别随机删除 4 109、3 659、3 321 个小球单元生成如图 14 所示的 3 个级配对应的沥青混合料仿真试件,并同样设置了各项参数。

表 7 不同等质量替换方式的各组分体积

Tab.7 Volume of each component with different equal mass replacement methods

材料及空隙相	不同级配的组分体积/cm ³		
	P1-01(1)	P1-01(2)	P1-01(3)
>16.00~19.00 mm 粗集料	25.62	26.03	25.62
>13.20~16.00 mm 粗集料	58.66	60.30	58.66
>9.50~13.20 mm 粗集料	63.84	65.84	64.33
>4.75~9.50 mm 粗集料	102.39	101.56	101.56
>2.36~4.75 mm 粗集料	57.92	57.73	57.73
细集料及矿粉	120.11	120.11	120.11
沥青	57.36	57.36	57.36
空隙相	28.82	25.73	29.34

3.2 基于低温抗裂性的沥青混合料品质保证技术

参照 2.4 节中的虚拟劈裂试验中夹具及加载方式的设置,分别对等体积替换和等质量替换的 6 个仿真试件进行虚拟劈裂试验,获取加载部分的数据,

绘制荷载-变形曲线。

3.2.1 等体积替换方式试验结果分析

3 种等体积替换方式下的虚拟劈裂试验的荷载-变形曲线如图 15 所示。由图 15 及与替换前的虚拟试验结果对比发现,不同替换方式的劈裂试验结果均满足室内劈裂试验加载过程曲线的变化趋势,但受计算机性能的限制,离散元软件模拟过程中记录数据的时间点之间存在间隔,导致整体曲线数据点出现波动。对于 3 种等体积替换方式,替换 >2.36~9.50 mm 的粗集料颗粒的仿真试件的力学性能明显更接近原级配,而替换所有粒径范围内的粗集料颗粒的仿真试件与原级配的力学性能相差较大。说明等体积替换较小粒径的粗集料颗粒,混合料性能差异并不大,而差异多数来源于粗集料颗粒的形貌差异。

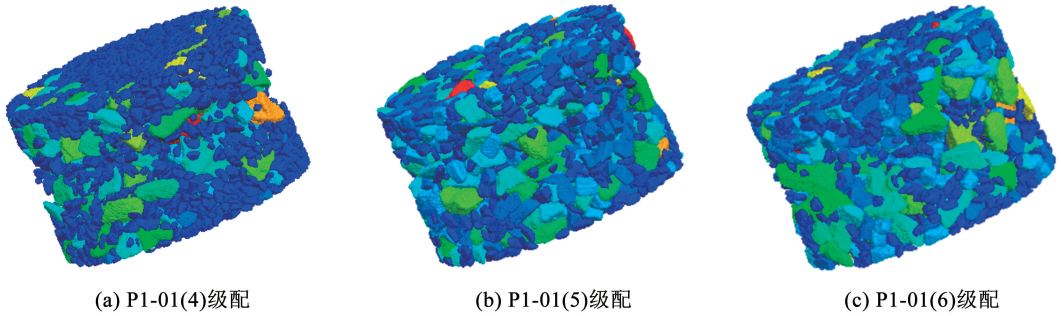


图 13 3 种等质量替换方式生成的沥青混合料骨架结构

Fig.13 Skeleton structure of asphalt mixture generated by three equal mass replacement methods

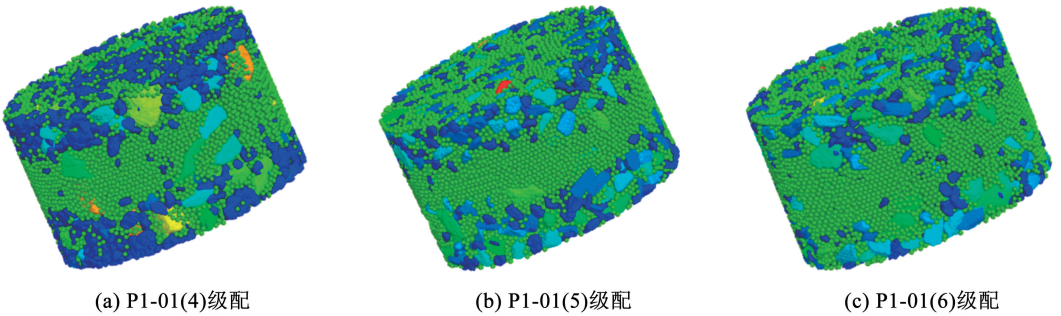


图 14 沥青混合料仿真试件

Fig.14 Simulation specimen of asphalt mixing

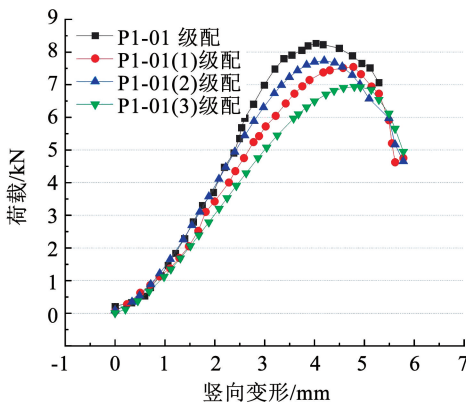


图 15 3 种等体积替换方式下虚拟劈裂试验结果

Fig.15 Virtual splitting test results under three equal volume replacement methods

3.2.2 等质量替换方式试验结果分析

3 种等质量替换方式下的虚拟劈裂试验的荷载-变形曲线如图 16 所示。由图 16 及与替换前的虚拟试验结果对比发现,在荷载水平为 5 000 N 之前,第

1、2种等质量替换方式的荷载-变形曲线与替换前的曲线几乎重合;在荷载大于5 000 N时,两种方式的荷载-变形曲线发生较大变化,其中第2种等质量替换方式的差异最小,而第3种等质量替换方式的曲线差异最大,与等体积替换的规律相似,认为同样是粗集料的形貌对混合料的性能产生影响。

表8 等体积替换下虚拟劈裂试验的试验结果

Tab.8 Experimental results of virtual splitting test under equal volume replacement

替换方式的级配	荷载峰值/N	荷载峰值差值百分比/%	荷载峰值对应变形/mm	荷载峰值对应变形差值百分比/%
P1-01	8 268.82	0	4.03	0
P1-01(1)	7 542.56	-8.8	4.78	+18.6
P1-01(2)	7 735.38	-6.5	4.20	+4.2
P1-01(3)	6 938.05	-16.1	4.80	+19.1

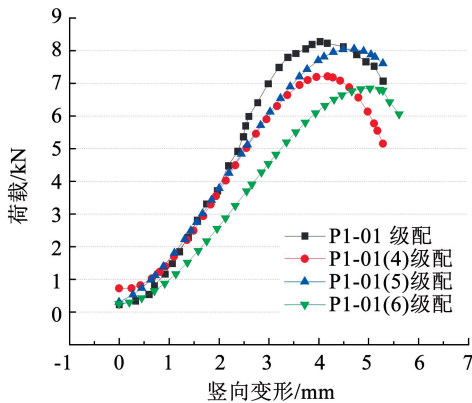


图16 3种等质量替换方式下虚拟劈裂试验结果

Fig.16 Virtual splitting test results under three equal mass replacement methods

表9为劈裂试验的试验结果,可以发现,第2种等质量替换方式的荷载峰值与替换前最接近,而第1种方式荷载峰值对应的变形则与替换前最接近,因此无法直接比较第1种和第2种等质量方式所成型试件的优劣。

表9 等质量替换下虚拟劈裂试验的试验结果

Tab.9 Experimental results of virtual splitting test under equal mass replacement

替换方式的级配	荷载峰值/N	荷载峰值差值百分比/%	荷载峰值对应变形/mm	荷载峰值对应变形差值百分比/%
P1-01	8 268.82	0	4.03	0
P1-01(1)	7 211.17	-12.8	4.18	+3.7
P1-01(2)	8 047.87	-2.7	4.71	+16.9
P1-01(3)	6 840.09	-17.3	5.03	+24.8

为了详细研究不同替换方式下的沥青混合料仿真试件的性能,探讨沥青混合料粗集料发生变异时

的解决办法,引入劈裂试验的劈裂强度参数 R_l :

$$R_l = 0.006 287 P_l / h \quad (13)$$

式中: R_l 为劈裂强度,MPa; P_l 为荷载峰值,N; h 为试件高度,mm。

为了评价断裂性能,引入AASHTO规范^[18]中的断裂能 W :

$$W = \sum_{i=1}^n (u_{i+1} - u_i) \times P_i + \frac{(u_{i+1} - u_i) \times (P_{i+1} - P_i)}{2} \quad (14)$$

式中: P_i 为第 i 点所施加的荷载,kN; P_{i+1} 为第 $i+1$ 点所施加的荷载,kN; u_i 为第 i 点的变形位移,m; u_{i+1} 为第 $i+1$ 点的变形位移,m。

断裂能的计算范围为全过程范围,但由于离散元的模拟机理,在虚拟劈裂试验后期位移与荷载的变化混乱,为了保证断裂能比较的合理性,对已有荷载-变形曲线进行拟合预测,补充缺失的曲线部分。采用三次多项式拟合模拟的荷载-位移数值,7种不同级配的荷载-位移曲线拟合及拟合方程分别如图17和表10所示。

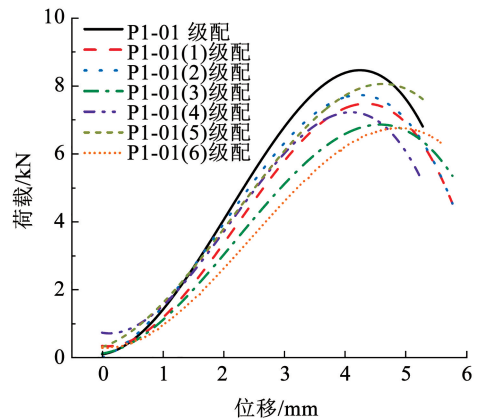


图17 荷载-位移曲线拟合图

Fig.17 Fitting diagram of load-displacement curve

表10 不同级配荷载-位移拟合曲线方程

Tab.10 Load-displacement fitting curve equation of different gradations

替换方式的级配	荷载-位移拟合曲线方程	R^2
P1-01	$y = -204.51x^3 + 1 277.6x^2 + 236.0x + 78.3$	0.996 9
P1-01(1)	$y = -184.8x^3 + 1 232.1x^2 - 220.1x + 325.3$	0.993 2
P1-01(2)	$y = -162.0x^3 + 949.2x^2 + 714.4x - 17.5$	0.998 6
P1-01(3)	$y = -127.5x^3 + 848.6x^2 + 262.8x + 100.6$	0.997 1
P1-01(4)	$y = -205.8x^3 + 1 305.3x^2 - 305.9x + 714.6$	0.985 4
P1-01(5)	$y = -128.4x^3 + 829.2x^2 + 590.8x + 291.0$	0.989 3
P1-01(6)	$y = -114.2x^3 + 845.9x^2 - 80.9x + 286.4$	0.990 1

按照位移间隔 0.2 mm, 根据拟合方程选择数据点预测缺失荷载、位移数据, 分别计算 6 种替换方式下的沥青混合料仿真试件经虚拟劈裂试验后的劈裂强度和断裂能, 并将两个指标与荷载峰值和变形总结, 见表 11。

表 11 不同替换方式下的劈裂试验结果

Tab. 11 Splitting test results under different replacement methods

级配	荷载峰值/N	荷载峰值对 应变形/mm	劈裂强度/ MPa	断裂能/J
P1-01	8 268.82	4.03	0.82	21.32
P1-01(1)	7 542.56	4.78	0.75	24.61
P1-01(2)	7 735.38	4.20	0.77	20.76
P1-01(3)	6 938.50	4.80	0.69	23.03
P1-01(4)	7 211.17	4.18	0.71	21.48
P1-01(5)	8 047.87	4.71	0.80	25.76
P1-01(6)	6 840.09	5.03	0.68	23.42

不考虑指标的重要性, 由表 11 结果相对分析发现, P1-01(5) 最优, P1-01(1) 略次之, P1-01(4) 最差, 总体性能显著低于原级配。

对于等体积和等质量两种替换方式, 可以认为尽管级配差异不大, 但等体积替换较等质量替换能更好地还原原级配沥青混合料的力学性能, 其中替换较小粒径范围内粗集料颗粒效果更好。可见, 需要调整级配时, 使用基于实形粗集料颗粒的离散元仿真试件性能试验, 可以预测分析方案差异, 提供优化改进策略。空隙率与劈裂强度和断裂能见表 12。

表 12 空隙率与劈裂强度、断裂能试验结果

Tab. 12 Porosity and splitting strength and fracture energy data

替换方式的级配	空隙率/%	劈裂强度/MPa	断裂能/J
P1-01	4.5	0.82	21.32
P1-01(1)	4.6	0.75	24.61
P1-01(2)	4.1	0.77	20.76
P1-01(3)	5.1	0.69	23.03
P1-01(4)	5.6	0.71	21.48
P1-01(5)	5.0	0.80	25.76
P1-01(6)	5.7	0.68	23.42

由表 12 可以看出, 在等体积替换组中, 劈裂强度随空隙率的增大而减小, 断裂能随空隙率的增大而先增大再减小; 在等质量替换组中, 劈裂强度随空隙率的增大而减少, 断裂能随空隙率的增大先减小再增大。因此, 可以结合实际工程需要确认仿真试件空隙率。

4 结 论

1) 可采用实形粗集料模型导入 PFC3D 软件, 按

级配和室内试验实测空隙率生成粗集料骨架结构构建仿真试件, 仿真试件级配与实际级配的误差较小且仅在小粒径尺寸出现, 认为基于实形粗集料的数字试件能够很好地仿真马歇尔试件的力学行为。

2) 模拟等体积和等质量替换方式下的沥青混合料仿真试件的劈裂试验, 从劈裂强度和断裂能角度分析发现, 等体积替换方式较等质量替换方式更接近原级配的劈裂试验性能, 替换小粒径范围内粗集料较替换大粒径范围内粗集料更接近原级配的劈裂试验性能, 因此等体积替换和等质量替换方法在不同指标测试下有所差异, 可根据所需性质进行替换。

3) 提出了一种基于实形粗集料颗粒模型生成的具有级配特征的沥青混合料仿真试件、数字化试验及混合料质量优化的方法体系, 可作为工程现场沥青混合料的性能试验的级配调整依据, 显著提升了工作时效。

参考文献

- [1] 吴国雄, 姜勇, 张伟, 等. 粗集料分布形态对沥青混合料疲劳性能影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 80
WU Guoxiong, JIANG Yong, ZHANG Wei, et al. Influence of coarse aggregate distribution morphology on the fatigue performance of asphalt mixtures [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(4): 80. DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2023.04.11
- [2] 李慧. 基于集料形态的沥青混合料细观模型构建与断裂特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022
LI Hui. Research on meso-model construction and fracture characteristics of asphalt mixture based on aggregate morphology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022. DOI:10.27151/d.cnki.ghnl.2022.003275
- [3] 陈迎姿, 胡小松, 陈钧然. 基于细观尺度沥青混合料二维建模方法及数值模拟[J]. 广东建材, 2022, 38(8): 15
CHEN Yingzi, HU Xiaosong, CHEN Junran. Two-dimensional modeling method and numerical simulation of asphalt mixture based on mesoscale [J]. Journal of Guangdong Building Materials, 2022, 38(8): 15
- [4] 张宇, 王伟成, 方珑, 等. 基于 X-ray CT 图像的沥青混合料车辙过程空隙分布评估[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(4): 508
ZHANG Yu, WANG Weicheng, FANG Long, et al. Assessment of air void distribution of rutted asphalt mixtures using X-ray CT technology [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(4): 508. DOI:10.11936/bjtu.2023040015
- [5] 冯宝平. 路用粗集料的三维形态表征及加工工艺影响分析[J]. 路基工程, 2023(2): 124
FENG Baoping. Three-dimensional shape characterization of road coarse aggregate and analysis of processing technology influence [J]. Subgrade Engineering, 2023(2): 124. DOI:10.13379/j.issn.1003-8825.202208009
- [6] 蒋进, 寇博, 杨刚, 等. 粗集料三维棱角对沥青混合料体积指标

- 及性能的影响[J]. 公路交通科技, 2022, 39(11): 8
- JIANG Jin, KOU Bo, YANG Gang, et al. Influence of 3D angularity of coarse aggregate on volume indicator and performance of asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(11): 8. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2022.11.002
- [7] JIN Can, YANG Xu, YOU Zhanping. Automated real aggregate modelling approach in discrete element method based on X-ray computed tomography images[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 18(9): 837. DOI:10.1080/10298436.2015.1066006
- [8] 杨宇明. 钢桥面铺装用热固性环氧沥青混凝土压实机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2017
- YANG Yuming. Research on compaction mechanism of thermosetting epoxy asphalt mixture for steel deck pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2017
- [9] 杨军, 张旭, 朱浩然. 沥青混合料三轴剪切试验的离散元模拟研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 64
- YANG Jun, ZHANG Xu, ZHU Haoran. Discrete element simulation on tri-axial test of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1): 64. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2012.01.012
- [10] ZELELEW H M, PAPAGIANNAKIS A T. Micromechanical modeling of asphalt concrete uniaxial creep using the discrete element method[J]. Road Materials and Pavement Design, 2010, 11(3): 613
- [11] 李智, 王子硕, 邓志刚, 等. 沥青混合料三维仿真设计及虚拟剪切试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 1049
- LI Zhi, WANG Zishuo, DENG Zhigang, et al. Experimental study on three-dimension simulation design and virtual shear test of asphalt mixture[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(8): 1049. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2018.08.007
- [12] 陈俊, 黄晓明. 基于离散元法的沥青混合料虚拟疲劳试验方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 435
- CHEN Jun, HUANG Xiaoming. Virtual fatigue test of asphalt mixture based on discrete element method[J]. Journal of Jilin University(Engineering and technology Edition), 2010, 40(2): 435. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb2010.02.011
- [13] YOU Z, BUTTLAR G W. Application of discrete element modeling techniques to predict the complex modulus of asphalt-aggregate hollow cylinders subjected to internal pressure[J]. Transportation Research Record, 2005, 1929(1): 218. DOI:10.1177/0361198105192900126
- [14] ZHANG Yao, MA Tao, HUANG Xiaoming, et al. Algorithms for generating air-void structures of idealized asphalt mixture based on three-dimensional discrete-element method[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2018, 144(2): 144. DOI:10.1061/JPEODX.0000045
- [15] YANG Xu, DAI Qingli, YOU Zhanping, et al. Integrated experimental-numerical approach for estimating asphalt mixture induction healing level through discrete element modeling of a single-edge notched beam test[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 27(9): 04014259. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001231
- [16] 邓志刚. 基于三维离散元的沥青混合料数值模拟方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017
- DENG Zhigang. Study on numerical simulation method of asphalt mixture based on three dimensional discrete element method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017
- [17] 张建同. 沥青混合料剪胀力学行为分析及数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2015
- ZHANG Jiantong. Analysis of dilative mechanical behavior of asphalt mixtures and its numerical simulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2015
- [18] American Association of State Highway, Transportation Officials. AASHTO guide for design of pavement structures[M]. Washington DC: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993

封面图片说明

封面图片来自本期论文“LNG油罐车火灾下的大跨径悬索桥结构热力响应”, 图片为浙江省舟山西堠门大桥现场实景。西堠门大桥采用分体式钢箱梁悬索桥方案, 主跨为1 650 m的两跨连续钢箱梁悬索桥, 南边跨引桥采用预应力混凝土刚构连续组合箱梁的桥梁方案, 北跨及中跨为悬吊结构。西堠门跨海大桥桥面经常运输大量易燃物质液化天然气, 存在巨大火灾隐患, 为了保障桥梁运行安全, 依据 Babrauskas 的油池燃烧理论与 Ingason H. 的火灾热释放理论, 建立了燃料控制的 LNG 油罐车火灾热释放率指数增长模型, 用于模拟桥面开放空间发生的 LNG 油罐车火灾, 进一步计算悬索桥上火灾产生的高温场, 分析结构高温下力学响应。依据 ABAQUS 有限元软件模拟结果, 可获取桥梁易被火灾高温影响的危险位置与受高温破坏后对结构安全影响较大的关键构件。对桥梁在火灾中的力学行为进行模拟预测, 可提前针对西堠门跨海大桥关键构件采取相应防火措施、增设防火设计。同时验证了外包双层 5 mm 复合气凝胶绝热层的防护设计在火灾中可以有效降低高温对主缆与吊索的温度影响, 从而进行有效的火灾险情的预防与避免。

(图文提供: 杨明, 畅卫杰, 周业凯, 等。东南大学交通学院, 浙江省交通集团高速公路舟山管理中心)