

DOI:10.11918/202205094

# 不同受力模式下的沥青混合料接触力链分布特征

徐永江<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 谭忆秋<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090;  
2. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为了研究拉压弯剪不同受力模式下沥青混合料内部的接触力链传递分布情况, 明确骨料砂浆不同组分抵抗荷载时的各自贡献水平, 基于工业 CT 与数字图像处理技术获取了骨料颗粒模型, 利用 PFC3D 软件构建了 SMA13 级配的沥青混合料三维数字化试件并进行了不同受力模式下的虚拟试验, 对沥青混合料内部接触力链的传递分布特征以及砂浆骨料不同组分的接触力组成分布情况进行可视化及量化分析, 以力链概率作为量化指标对不同受力模式下各类接触力链的分布特征进行统计分析。研究结果表明: 利用离散元方法建立的三维数字化模型可以较好地模拟沥青混合料低温力学行为; 单轴压缩受力模式下各类接触的强力链占比均为 4 种受力模式当中的最高水平, 骨料间的嵌挤作用为抵抗外载的主要因素, 骨料所传递的接触力水平占总接触力的 69.9%; 间接拉伸与半圆弯拉荷载模式下, 沥青砂浆内部与界面位置的强力链占比显著高于骨料间的强力链占比, 沥青砂浆所传递的接触力分别占总接触力的 50.1% 和 57.4%, 沥青砂浆间的黏结力为抵抗破坏的主导因素; 单轴贯入受力模式下沥青砂浆与界面位置的强力链占比略高于骨料间接触的强力链占比, 骨料所传递的接触力占总接触力的 64.7%。强弱力链占比可以较好地反映沥青混合料不同组分在不同受力模式下的传递载荷能力, 依据研究结果可以从细观结构角度为深入了解沥青混合料的力学行为提供理论依据。

**关键词:** 道路工程; 三维离散元; 沥青混合料; 细观力学; 接触力链

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2024)07-0001-10

## Contact force chain distribution characteristics of asphalt mixture under different stress modes

XU Yongjiang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, TAN Yiqiu<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resources and Water Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

**Abstract:** In order to study the transmission and distribution of contact force chain in asphalt mixture under different stress modes of tension, compression, bending and shearing, clear different aggregate mortar components resistance load in the respective levels of contribution, based on industrial computed tomography (CT) and digital image processing method for aggregate particle model, using software PFC3D constructed SMA13 gradation of asphalt mixture of 3D digital specimen, and virtual tests were carried out under different stress modes. The transfer and distribution characteristics of contact force chain inside asphalt mixture and the distribution of contact force composition of different components of mortar aggregate were visualized and quantitatively analyzed. At the same time, the force chain probability was used as a quantitative index to analyze the distribution characteristics of various contact force chains under different force modes. The results show that the three-dimensional digital model established by discrete element method can better simulate the low temperature mechanical behavior of asphalt mixture. In uniaxial compression mode, the ratio of all kinds of contact strong chains is the highest among the four stress modes. The interlocking extrusion between aggregates is the main factor to resist external load, and the contact force level transmitted by aggregates accounts for 69.9% of the total contact force. Under indirect tensile and semi-circular flexural loading modes, the proportion of the strong chain between the interior and interface of asphalt mortar is significantly higher than that between aggregate. The contact force transmitted by asphalt mortar accounts for 50.1% and 57.4% of the total contact force, respectively. The bond between asphalt mortar is the dominant factor to resist damage. In uniaxial penetration force mode, the proportion of strong chain between asphalt mortar and interface is slightly higher than that between aggregate, and the contact force transmitted by aggregate

收稿日期: 2022-05-25; 录用日期: 2022-08-02; 网络首发日期: 2024-05-22

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240521.1959.004>

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U20A20315)

作者简介: 徐永江(1999—), 男, 硕士研究生; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 谭忆秋, tanyiqiu@hit.edu.cn

accounts for 64.7% of the total contact force. The ratio of strong and weak force chain can better reflect the load transfer capacity of different components of asphalt mixture under different stress modes. The results can provide theoretical basis for understanding the mechanical behavior of asphalt mixture from the perspective of meso-structure.

**Keywords:** road engineering; three-dimensional discrete element; asphalt mixture; meso-mechanics; the chain of contact force

从结构材料组成而言,沥青混合料是由骨料、沥青、填料组成的内部存在空隙的多相复合材料,具有明显的非匀质各向异性、颗粒属性和非线性特性。不同组分之间的力学性能差异使得外载作用下沥青混合料内部接触力链传递分布不均匀,受力变形复杂,差异性较大,而传统的宏观性能试验无法考虑沥青混合料细观结构组成的复杂性,亦无法深入了解混合料内部细观组成结构与力学行为之间的关联,因此具有一定的局限性。

离散元方法(discrete element method, DEM)是一种模拟颗粒类材料力学行为的数值方法,基于非连续介质理论,特别适用于散体或胶结材料的细观力学特性和受力变形分析(非均匀、不连续、大变形问题),可以量化材料受载时内部接触力链传递分布状况,各颗粒所受的力、所产生的位移都可以直观的表达出来,从而可以较好地由细观结构层面了解材料受力时内部的力学机理<sup>[1-2]</sup>。

因此,许多道路研究者将离散元方法应用于沥青混合料的数值模拟。文献[3]分析了单轴压缩试验过程中沥青混合料虚拟试件内部的接触力分布及颗粒位移情况,给出了接触力随载荷作用过程的变化规律。文献[4]建立了沥青道面现场压实模型,给出了压实过程中集料的运动以及接触力的分布特点。文献[5]研究了虚拟车辙试验过程中沥青混合料内部位移场的演变过程,揭示了车辙局部隆起和泛油机理。文献[6]模拟了沥青混合料的三点弯曲试验,明确了试件的裂缝扩展机理以及局部颗粒位移变形特点。文献[7]分析了间接拉伸试验下不同结构形式沥青混合料内部接触力链的分布特征,以力链概率和角度分布为量化指标描述了沥青混合料的细观力学响应。文献[8-9]采用多面体集料随机生成算法构建了沥青混合料三维离散元模型,并

基于此给出了单一受力模式下沥青混合料内部集料之间、砂浆内部以及砂浆集料界面位置处的接触力链分布情况。文献[10]通过对混合料内部接触力和裂纹演化的分析研究了半圆弯曲(SCB)试验下SCB试件的破坏机理。

根据上述文献可以看出,离散元方法在沥青混合料细观力学行为分析方向的研究应用较为广泛。然而当前关于沥青混合料接触力链传递分布特征的研究多集中于单一受力模式下,对于不同受力模式下沥青混合料内部接触力链的分布特征及规律以及骨料砂浆组分抵抗荷载作用时的各自贡献水平的研究则相对较少。因此,本研究着眼于建立沥青混合料三维离散元数字化试件,分析不同受力模式下沥青混合料的内部接触力链传递分布特征并进行量化分析,明确骨料砂浆组分各自抵抗载荷的贡献水平,从细观力学的角度分析沥青混合料的力学行为。

## 1 三维数字化试件构建及细观参数获取

首先基于工业CT获取SMA13级配的沥青混合料马歇尔试件切片图像,利用数字图像处理方法进行骨料颗粒模型的三维重构,并导入PFC3D离散元软件,进行沥青混合料三维数字化试件构建;在PFC3D当中选取相应的接触模型表征沥青混合料低温状态下的力学行为,并根据材料宏观参数与细观参数的转换原则,获取沥青混合料在-10℃下的离散元细观模型参数。

### 1.1 沥青混合料三维骨料模型重构

沥青混合料的强度来源于粗骨料之间的嵌挤作用和沥青的黏结作用,本文以工程应用较为广泛的骨架密实结构的SMA13级配沥青混合料为例进行接触力链传递分布模式研究。研究所采用的目标级配见表1,沥青用量为6%。

表 1 SMA13 级配

Tab. 1 The graduation of SMA13

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分数/%	100	95	62.5	27	20.5	19	16	13	12	10

在室内成型如表1所示级配类型的沥青混合料马歇尔试件,利用工业CT扫描并进行三维重构获

取沥青混合料切片图像。基于图像处理软件Avizo,利用数字图像处理技术,对沥青混合料切片图像进

行预处理以及图像分割,将骨料结构进行识别提取并三维重构。图像预处理过程如图 1(a)~1(f)所

示,图像分割过程如图 1(g)~1(l)所示,骨料颗粒模型的三维重构结果如图 2 所示。

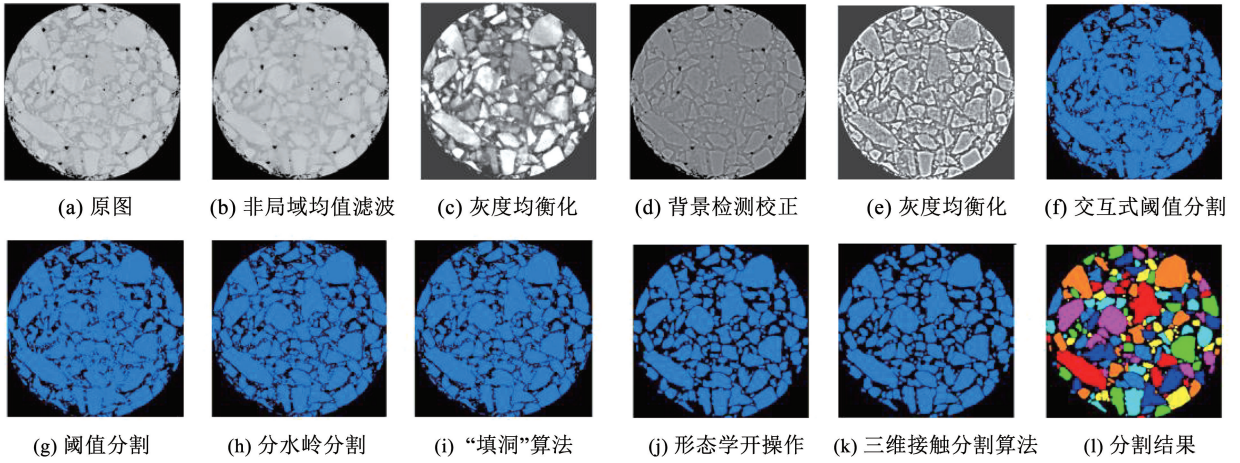


图 1 图像处理流程

Fig. 1 Image processing

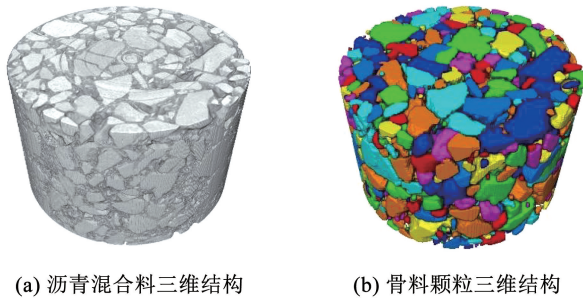


图 2 重构模型对比

Fig. 2 Comparison of reconstructed models

### 1.2 单颗骨料模型的生成

基于工业 CT 与数字图像处理方法获取了单个

骨料模型的 STL 文件,将 STL 文件导入 PFC3D 当中进行 Clump 模板创建,Clump 模板的创建具有两个控制参数,分别是 distance 和 ratio。其中,distance 表征模型表面的平滑程度,取值 0~180,数值越大模型表面越平滑;ratio 表征组成 Clump 模型内部 pebble 最小粒径与最大粒径的比值,取值 0~1,其值越小,模型表面越尖锐。如图 3 所示,骨料模拟的真实程度随 distance 与 ratio 两个参数的改变而变化,经过对参数的测试,综合考虑骨料模型的真实程度与计算效率,最终采用参数值 distance = 160、ratio = 0.3。为了较好地考虑骨料颗粒的不规则性与多样性,本文共构建了 100 颗不同粒径的骨料模型。

STL文件	参数取值	distance=60	distance=120	distance=160
	ratio=0.5			
	ratio=0.3			
	ratio=0.1			
	ratio=0.5			
	ratio=0.3			
	ratio=0.1			

图 3 骨料颗粒模型生成

Fig. 3 Aggregate particle model generation

### 1.3 沥青混合料三维数字化试件构建

本文采用随机生成算法进行建模<sup>[5,13]</sup>, 沥青混合料三维离散元数字化试件构建流程如图 4 所示。

首先利用随机生成算法在一定空间内生成指定级配类型的 Clump 骨料群, 在重力作用下进行重力

堆积, 然后利用墙体作为加载板将骨料模型压实至指定高度形成骨架结构; 利用 fish 语言编写程序在骨料之间的空隙填充规则排列的半径为 0.8 mm 的 ball 球体模拟砂浆结构, 并随机删除指定数量的 ball 模拟空隙, 最终生成沥青混合料三维离散元数字化试件。

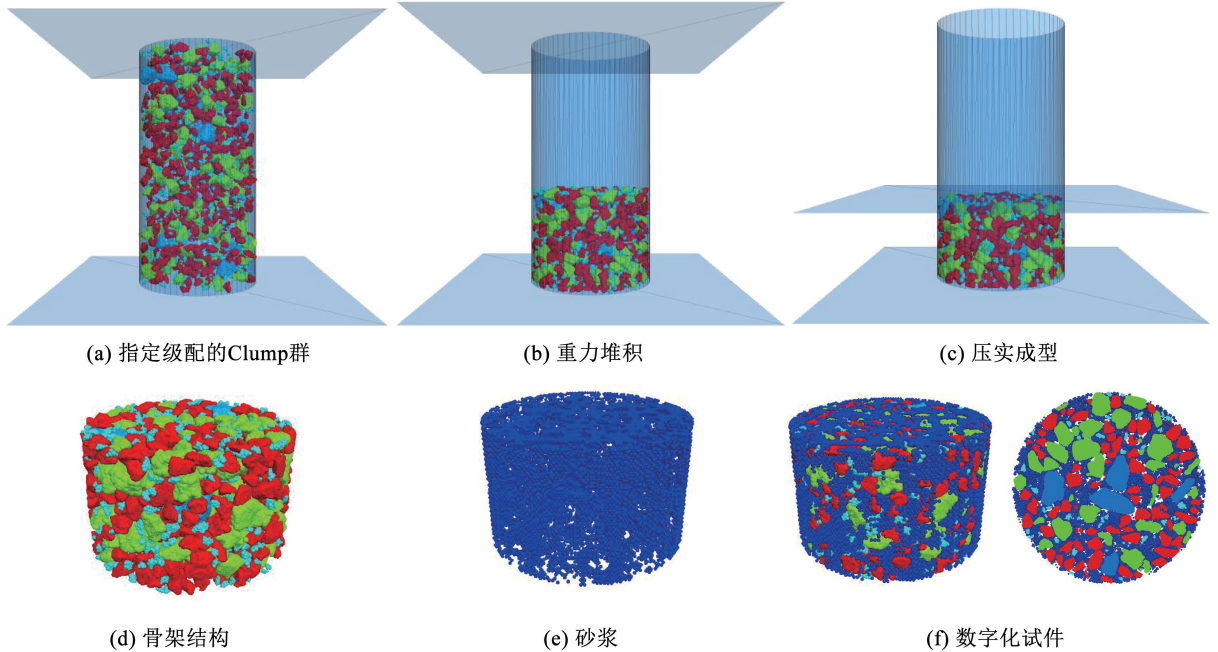


图 4 数字化试件构建流程

Fig. 4 Digital specimen construction process

### 1.4 微观参数获取

本文将试验温度设定为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 骨料之间的接触设置为线性刚度接触模型(骨料 Clump 块体内部不需要设置接触), 砂浆内部以及砂浆与骨料之间的接触设置为线性接触黏结模型(低温条件下沥青砂浆近似为弹性材料)。在当前的研究中, 骨料的弹性模量  $E$  及泊松比  $\nu$  一般分别取值为  $55.5\text{ GPa}$ 、 $0.25$ <sup>[11-13]</sup>, 沥青砂浆在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的弹性模量及泊松比  $\nu$  参考相关文献当中的实测结果分别取值为  $1.2\text{ GPa}$ 、 $0.4$ <sup>[14-15]</sup>。

PFC3D 离散元软件当中, 线性刚度接触模型与线性接触黏结模型的宏微观参数转换原则如式(1)~(3)所示:

$$k_n = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{EA}{2L(1+\nu)} \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_F = \tau_c A \\ T_F = \sigma_c A \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $A$  为接触弹性梁截面面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$  为接触弹性梁长度,  $\text{m}$ ;  $k_n$  为法向接触刚度,  $\text{N/m}$ ;  $k_s$  为切向接触刚度,  $\text{N/m}$ ;  $S_F$  为接触黏结模型中的切向抗剪强度,

$N$ ;  $T_F$  为接触黏结模型中的法向抗拉强度,  $N$ ;  $\tau_c$  为抗剪强度,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_c$  为抗拉强度,  $\text{MPa}$ ;  $A$ 、 $L$  可利用 fish 语言对所有接触进行遍历, 获取接触两端的实体单元半径进行计算得到, 本文设  $A/L = l$ ;  $\tau_c$ 、 $\sigma_c$  分别为沥青砂浆的抗剪强度与抗拉强度, 本文分别通过对沥青砂浆进行单轴贯入试验与劈裂试验进行参数获取, 取值分别为  $14.21$ 、 $3.96\text{ MPa}$ 。

对于骨料与砂浆之间的接触刚度与摩擦系数, 按照属性继承原理进行属性继承, 法向抗拉强度与切向抗剪强度按照沥青砂浆间的参数乘以  $0.8$  进行折减。

骨料间的法向接触刚度和法向接触刚度分别为  $55.5 \times 10^9 l\text{ N/m}$  和  $22.2 \times 10^9 l\text{ N/m}$ , 摩擦系数和阻尼系数分别为  $0.35$  和  $0.7$ ; 沥青砂浆内部的法向接触刚度和法向接触刚度分别为  $1.507 \times 10^6\text{ N/m}$  和  $6.765 \times 10^5\text{ N/m}$ , 法向抗拉强度和切向抗剪强度分别为  $7.96\text{ N}$  和  $28.56\text{ N}$ , 摩擦系数和阻尼系数分别为  $0.5$  和  $0.7$ ; 沥青砂浆与骨料间法向接触刚度和切向接触刚度采用属性继承, 法向抗拉强度和切向抗剪强度分别为  $3.168 \times 10^6 A\text{ N}$  和  $11.368 \times 10^6 A\text{ N}$ , 摩擦系数和阻尼系数分别为  $0.35$  和  $0.7$ 。

## 2 数字化试件虚拟力学试验

### 2.1 模型验证

首先通过室内宏观试验对离散元模型及细观参数的准确性进行验证。在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下进行沥青混合料的间接拉伸试验,试件尺寸为  $\phi 101.6\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$  的标准马歇尔试件,加载速率为  $1\text{ mm/min}$ 。图 5 为单轴压缩试验 SMA13 试件的力-位移曲线室内试验结果与模拟结果。离散元模拟结果与室内试验结果的力-位移曲线基本一致,并且峰值荷载的差值较小,说明通过建立合理的离散元模型与合适的细观模型参数,可以较好地模拟沥青混合料的力学行为。

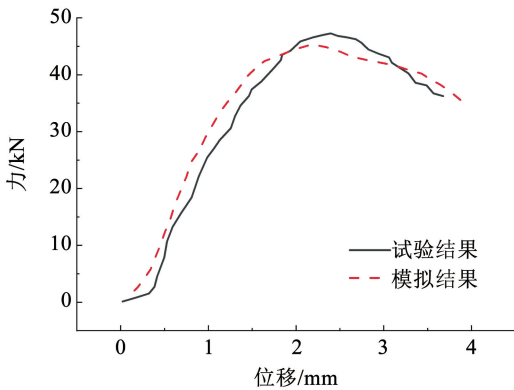


图 5 力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curve

### 2.2 间接拉伸虚拟试验

在试验温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下进行沥青混合料间接拉伸虚拟试验,模拟沥青混凝土的受拉工况,试件尺寸为标准马歇尔试件  $\phi 101.6\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$ ,以矩形墙体作为加载板,加载板宽度为  $12.7\text{ mm}$ ,加载速率设置为  $4\text{ mm/min}$ ,试验情况如图 6 所示。

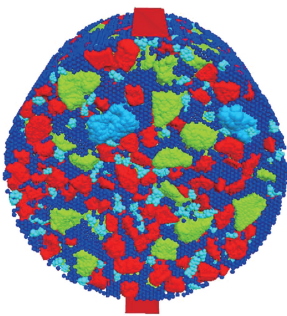


图 6 间接拉伸试验

Fig. 6 Indirect tensile test

由于沥青混合料三维离散元模拟较为耗时,同时本文重点分析沥青混合料受载情况下的内部力学响应,虚拟试验不进行至试件发生破坏,当沥青混合料内部形成稳定的接触力链时即可。间接拉伸虚拟试验求解时间为  $0.01\text{ s}$ 。

### 2.3 单轴压缩虚拟试验

在试验温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下进行沥青混合料单轴压缩虚拟试验,模拟沥青混凝土的受压工况,试件尺寸为标准马歇尔试件  $\phi 101.6\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$ ,以平面墙体作为加载板,加载速率设置为  $4\text{ mm/min}$ ,试验情况如图 7 所示。单轴压缩虚拟试验求解时间为  $0.01\text{ s}$ 。

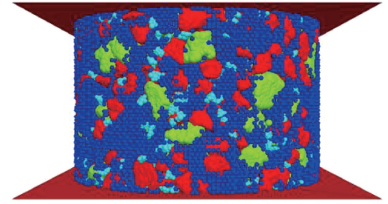


图 7 单轴压缩试验

Fig. 7 Uniaxial compression test

### 2.4 单轴贯入虚拟试验

在试验温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下进行沥青混合料单轴贯入虚拟试验,模拟沥青混合料的受剪工况。试件尺寸为标准马歇尔试件  $\phi 101.6\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$ ,以直径为  $28.5\text{ mm}$  的圆柱形墙体作为加载棒,加载速率设置为  $4\text{ mm/min}$ ,试验情况如图 8 所示。沥青混合料单轴贯入虚拟试验求解时间为  $0.01\text{ s}$ 。

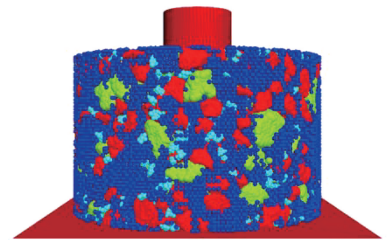


图 8 单轴贯入试验

Fig. 8 Uniaxial penetration test

### 2.5 半圆弯拉虚拟试验

在试验温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下进行沥青混合料半圆弯拉虚拟试验,模拟沥青混合料的受弯拉工况,试件尺寸为  $\phi 101.6\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$  的半圆柱形试件,以直径为  $6\text{ mm}$  的圆柱形墙体作为加载设备,加载速率设置为  $4\text{ mm/min}$ ,试验情况如图 9 所示。沥青混合料半圆弯拉虚拟试验求解时间为  $0.01\text{ s}$ 。

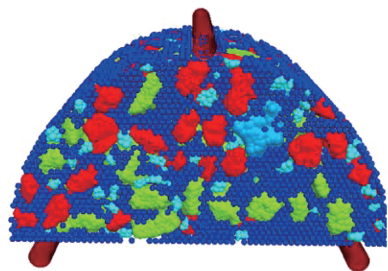


图 9 半圆弯拉试验

Fig. 9 Semi-circular bending test

### 3 结果与分析

#### 3.1 接触力链传递分布特征

图 10 为间接拉伸受力模式下沥青混合料虚拟试件内部总的接触力链分布情况,图 11 分别展示了骨料-骨料间、砂浆-骨料间以及砂浆内部的接触力链分布情况。

在沥青混合料当中,共存在 3 类接触,分别为骨料-骨料间的接触、骨料-砂浆间的接触以及砂浆内部的接触。间接拉伸受力模式下,骨料间接触力远大于其他两类接触力,这是由于不同组分间的模量差异较大导致的,整体接触力链从矩形加载板作用区域沿竖向及水平两侧扩展传递并逐渐衰减。

间接拉伸受力模式下,重点考察接触拉力链的分布特征,图 12 展示了各类接触的拉力链的分布特征(骨料间不存在接触拉力)。

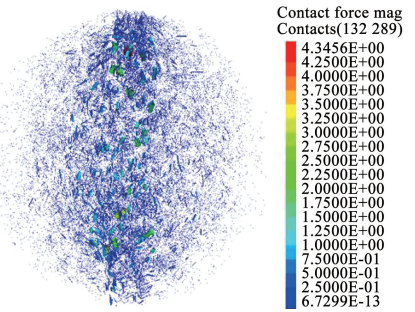


图 10 接触力链(间接拉伸)

Fig. 10 The chain of contact force(indirect tensile)

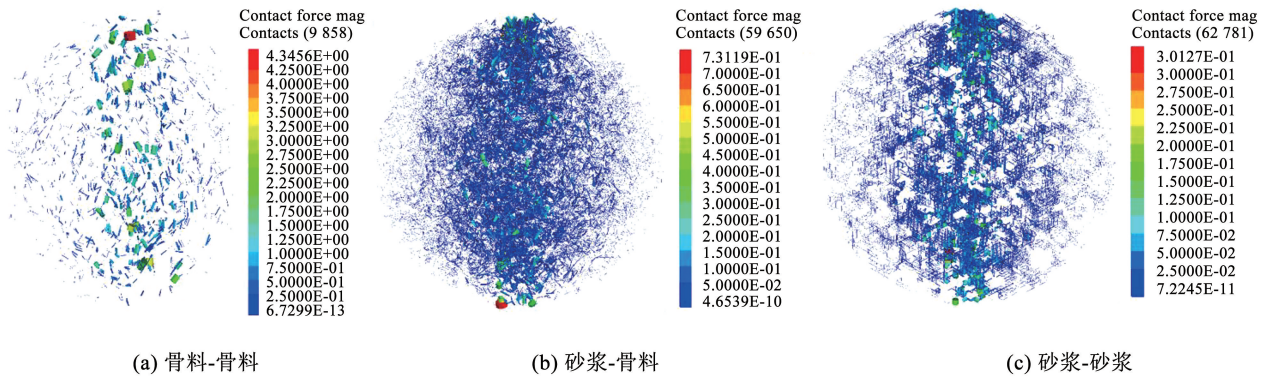


图 11 不同接触类型的接触力链(间接拉伸)

Fig. 11 Contact force chains of different contact types(indirect tensile)

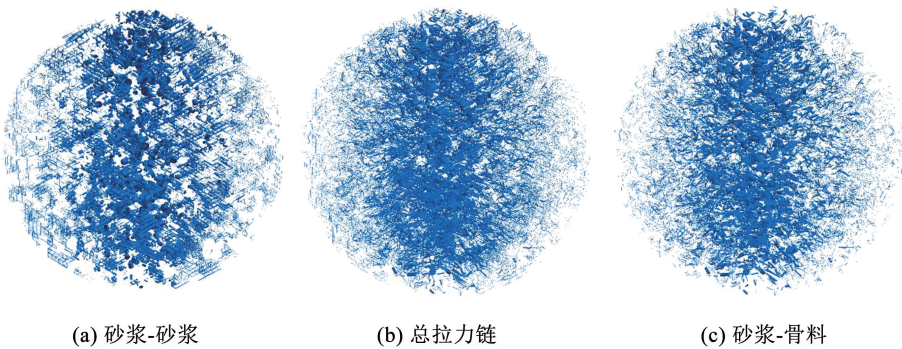


图 12 接触拉力链分布(间接拉伸)

Fig. 12 Contact tension chain distribution(indirect tensile)

接触拉力链在跨中位置的分布集度最大并沿水平方向向两侧递减,这与间接拉伸的破坏模式是一致的,骨料与砂浆间的拉力链要明显占据主导,说明沥青混合料受拉时骨料与砂浆间界面位置承受的拉力水平较大,界面位置为薄弱环节。

图 13 为单轴压缩受力模式下沥青混合料虚拟试件内部总的接触力链分布情况,图 14 分别展示了骨料-骨料间、砂浆-骨料间以及砂浆内部的接触力链分布情况。

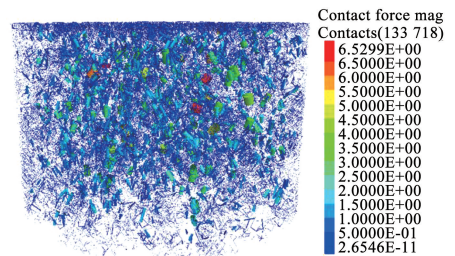


图 13 接触力链(单轴压缩)

Fig. 13 The chain of contact force(uniaxial compression)

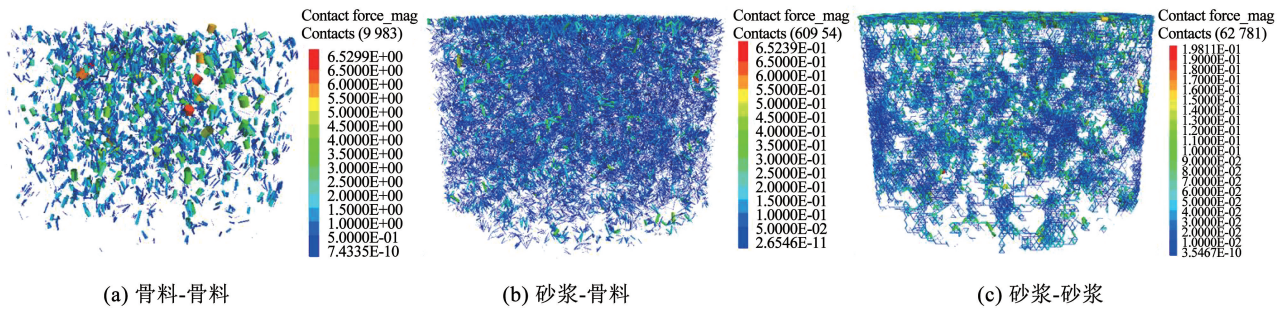


图 14 不同接触类型的接触力链(单轴压缩)

Fig. 14 Contact force chains of different contact types(uniaxial compression)

单轴压缩受力模式下,骨料间的接触力要远强于其他两类接触,在整个接触力链网中起到主导作用。对于3类接触各自而言,强弱接触力链的位置分布都没有表现出一定的规律性,这也在微观层面的角度上揭示了沥青混合料材料自身的力学行为变异性是由于材料内部接触力链分布的不均匀性的所导致的。

图 15 为单轴贯入受力模式下沥青混合料虚拟试件内部总的接触力链分布情况,图 16 分别展示了

骨料-骨料间、砂浆-骨料间以及砂浆内部的接触力链分布情况。

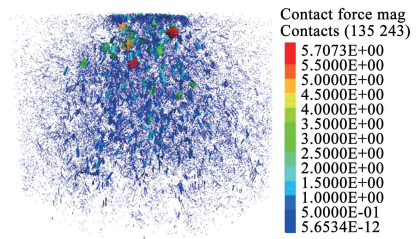


图 15 接触力链(单轴贯入)

Fig. 15 The chain of contact force(uniaxial penetration)

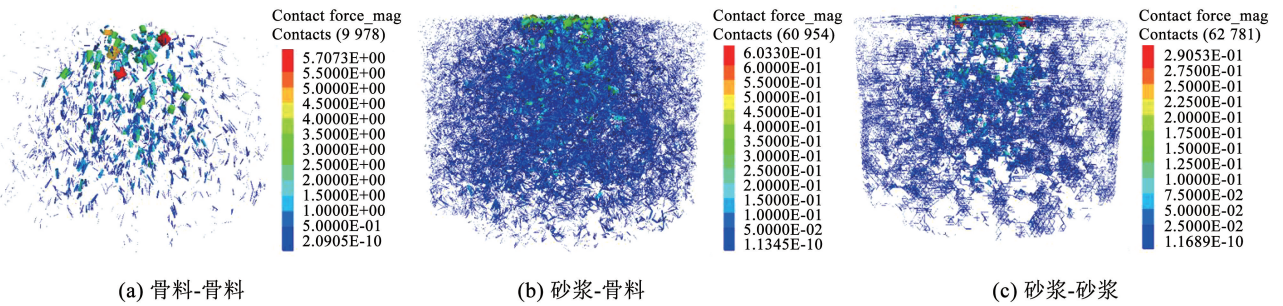


图 16 不同接触类型的接触力链(单轴贯入)

Fig. 16 Contact force chains of different contact types(uniaxial penetration)

在单轴贯入受力模式下,3类接触的强接触力链分布区域均较为集中,由圆柱形加载棒所作用的圆形区域向下进行纵深扩展传递,骨架间的接触力仍起到主导作用,接触力水平远高于砂浆-砂浆以及砂浆-骨料间的接触力。

图 17 为半圆弯拉受力模式下沥青混合料虚拟试件内部总的接触力链分布情况,图 18 分别展示了骨料-骨料间、砂浆-骨料间以及砂浆内部的接触力链分布情况。

半圆弯拉受力模式下,沥青混合料虚拟试件内部存在较为明显的受拉区与受压区,骨料间的接触力链在受压区起到承担压力荷载的主要作用,而砂

浆-砂浆与砂浆-骨料间的接触则在受拉区主要承担拉力荷载的作用。图 19 展示了半圆弯拉受力模式下虚拟试件内部拉力链与压力链的分布情况。

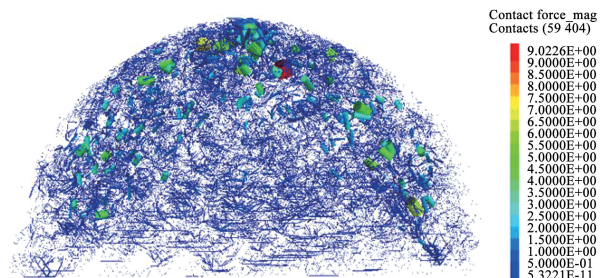


图 17 接触力链(半圆弯拉)

Fig. 17 The chain of contact force(semi-circular bending)

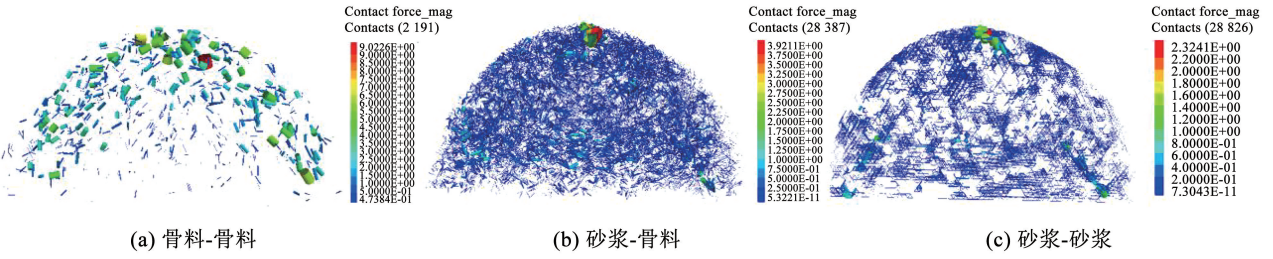


图 18 不同接触类型的接触力链(半圆弯拉)

Fig. 18 Contact force chains of different contact types(semi-circular bending)

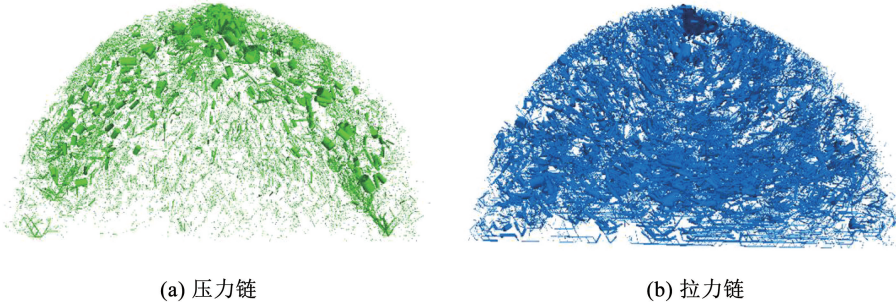


图 19 拉压力链(半圆弯拉)

Fig. 19 Tensile stress chain(semi-circular bending)

### 3.2 接触力链概率分布统计分析

对不同受力模式下接触力链的大小分布特征进行表征,以接触力链概率分布  $P(f)$  作为量化指标,  $P(f)$  根据式(4)进行计算。定义接触力大于接触力平均值的接触力链为强力链,反之则为弱力链。图 20~23 分别展示了不同受力模式下的混合料内部接触力链概率分布情况。

$$P(f) = \frac{N[\cdot]_k}{N} \quad (4)$$

式中:  $P(f)$  为接触力链概率分布;  $f$  为接触力与平均接触力的比值;  $N[\cdot]_k$  为指定区间内的接触力链数量,  $N[\cdot]_1$  为  $[0, 0.2]$ ,  $N[\cdot]_2$  为  $[0.2, 0.4]$ ,  $\dots$ ;  $N$  为接触力链总量;  $k$  为区间数。

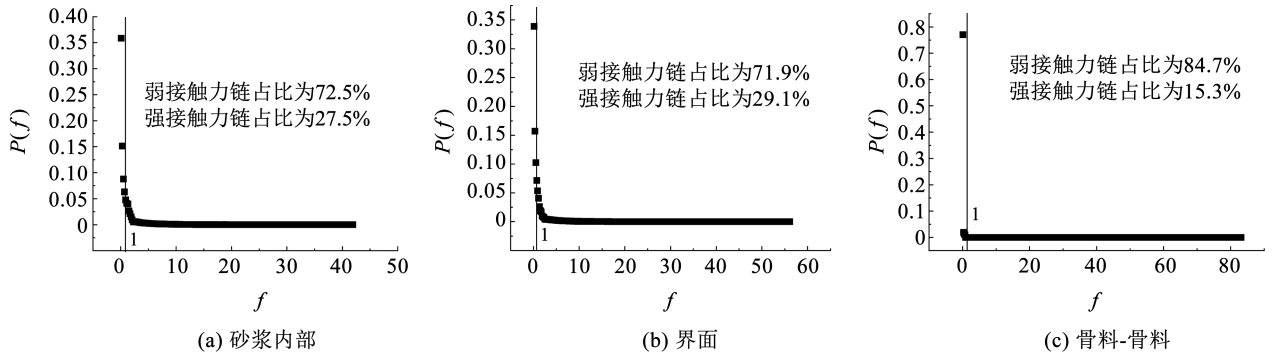


图 20 力链概率分布(间接拉伸)

Fig. 20 Force chain probability distribution(tensile stress chain)

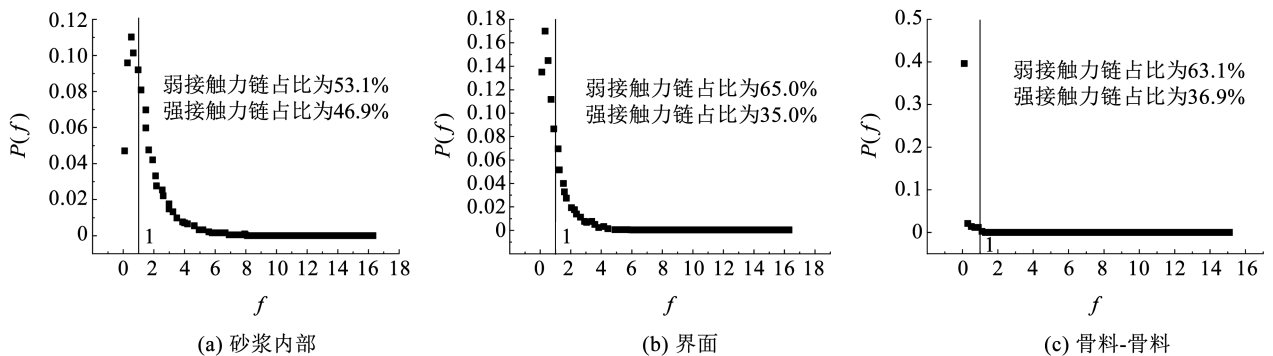


图 21 力链概率分布(单轴压缩)

Fig. 21 Force chain probability distribution(uniaxial compression)

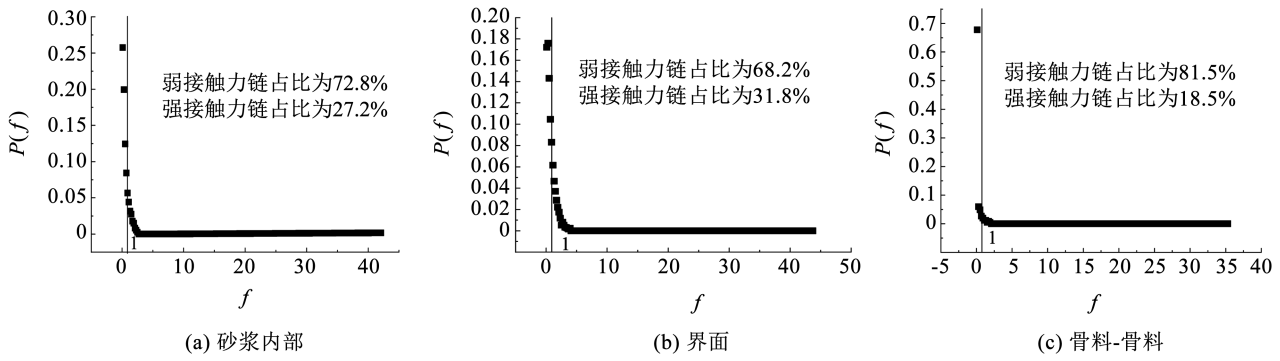


图 22 力链概率分布(半圆弯拉)

Fig. 22 Force chain probability distribution(semi-circular bending)

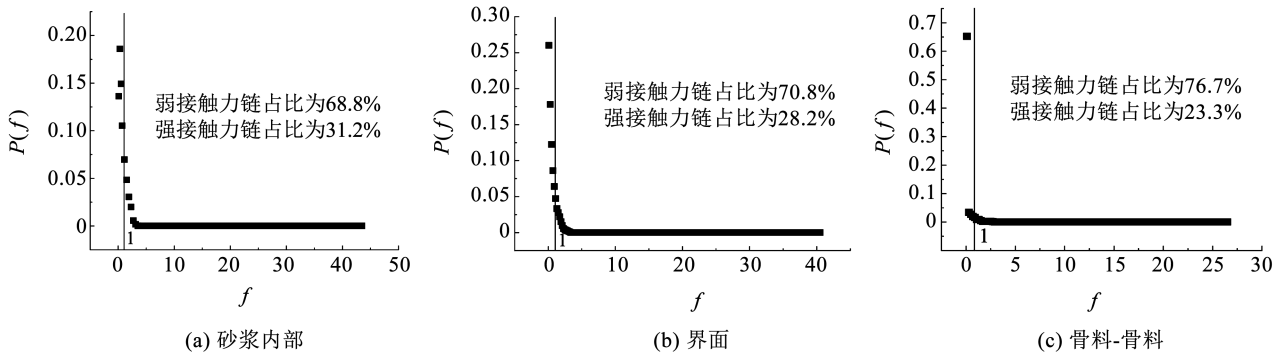


图 23 力链概率分布(单轴贯入)

Fig. 23 Force chain probability distribution(uniaxial penetration)

对于间接拉伸载荷模式, 砂浆内部和界面位置的强力链占比分别为 27.5% 和 29.1%, 均显著高于骨料间的强力链占比 15.3%, 说明在该种受力模式下骨料间的接触传递荷载能力有限, 沥青砂浆内部与界面位置的接触传递荷载能力更强, 沥青砂浆的黏结力为抵抗开裂的主要因素; 对于单轴压缩载荷模式, 3 类接触的强力链占比分别为 46.9%、35%、36.9%, 均为 4 种载荷模式中强力链占比最高水平, 说明单轴受压模式下材料内部传递荷载能力最强, 相应的抵抗荷载能力更强; 对于半圆弯拉载荷模式, 砂浆内部和界面位置强力链所占比例分别为 27.2%、

31.8%, 明显高于骨料间的强力链占比 18.5%, 说明沥青混合料在弯拉受力状态下骨料间的接触传递荷载能力有限, 主要依赖与沥青砂浆的黏结力抵抗外载, 与间接拉伸载荷模式较为类似; 单轴贯入载荷模式下, 砂浆内部和界面位置的强力链占比分别为 31.2%、29.2%, 均略高于骨料间的强力链占比 23.3%, 沥青砂浆的黏结力传递荷载能力略强于骨料间的嵌挤作用。

对作用在骨料与沥青砂浆各自部分的接触力进行遍历统计, 图 24 为不同受力模式下沥青混合料虚拟试件内部接触力的组成情况。

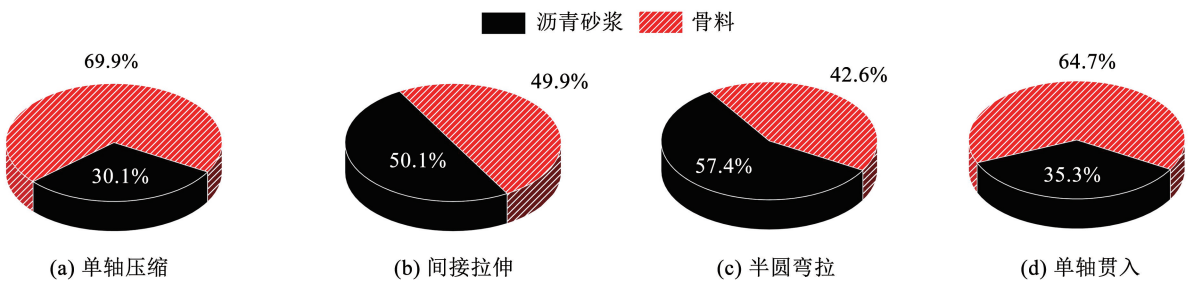


图 24 接触力组成

Fig. 24 Contact force composition

对于间接拉伸受力模式,骨料于沥青砂浆所分担的载荷水平相当,骨料的嵌挤作用承担抵抗压力作用,沥青砂浆的黏聚力主要承担抵抗拉力作用;对于单轴压缩与单轴贯入两种受力模式,骨料之间的嵌挤作用对于抵抗外载荷发挥主导作用,骨料承担的接触力分别可占混合料内部总接触力的 69.9% 与 64.7%;对于半圆弯拉受力模式,沥青砂浆的黏聚力对于抵抗外载荷则发挥主导作用,沥青砂浆所承担的接触力可占混合料内部总接触力的 57.4%。

## 4 结 论

本文开展了沥青混合料内部细观结构接触力链分布及组成特点的研究,建立了沥青混合料三维离散元数字化试件,并进行了拉压弯剪 4 种不同受力模式下的虚拟试验,对接触力的分布特征及组成特点进行了可视化与量化分析,主要结论如下:

1) 利用离散元方法建立的沥青混合料三维离散元数字化试件能够较好地模拟低温条件下的沥青混合料力学行为,与宏观室内试验结果有较好的一致性。

2) 单轴压缩模式下各类接触的强力链占比在 4 种受力模式中均为最高水平;半圆弯拉与间接拉伸载荷模式下,沥青砂浆内部与界面位置的强力链占比均显著高于骨料间的强力链占比,骨料的嵌挤作用对于抵抗外载贡献能力较为有限;单轴贯入受力模式下,沥青砂浆内部与界面位置的强力链占比略高于骨料间的强力链占比。

3) 间接拉伸与半圆弯拉受力模式下,沥青砂浆组分所传递的接触力分别占总接触力的 50.1%、57.4%;单轴压缩与单轴贯入受力模式下,骨料所传递的接触力分别占总接触力的 69.9%、64.7%。

4) 强弱力链占比可以较好地反映沥青混合料不同组分在不同受力模式下的传递载荷能力,可一定程度表征沥青砂浆与骨料各自组分抵抗外载荷的贡献度。

本文仅对沥青混合料低温条件下的不同载荷模式情况的接触力链传递分布特征进行了统计分析,未考虑沥青砂浆的黏弹特性,下一步的研究工作可通过引入伯格接触模型探讨中高温情况下沥青混合料的接触力链传递分布特征及演变规律。

## 参考文献

[1] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems[J]. Proc Int Symp on Rock Fracture, 1971, 1: 11

[2] CUNDALL P A. The measurement and analysis of acceleration in rock slopes[D]. London: University of London, 1971

[3] 侯曙光, 徐恺, 张浩. 基于离散元模拟的沥青混合料单轴压缩试验细观力学分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),

2015, 37(5): 73

HOU Shuguang, XU Kai, ZHANG Hao. Micromechanical analysis of asphalt mixture uniaxial compression test based on discrete element simulation[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2015, 37(5): 73

[4] 刘卫东, 高英, 黄晓明, 等. 沥青路面现场压实细观特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 99

LIU Weidong, GAO Ying, HUANG Xiaoming, et al. Mesoscopic characteristics of asphalt pavement during field compaction[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 99

[5] 薛斌. 沥青混合料细观力学特性与演化行为研究[D]. 西安: 长安大学, 2020

XUE Bin. Research on meso-mechanical properties and evolution behavior of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020

[6] 郑得标, 倪富健, 蒋继望, 等. 基于离散元法的沥青混合料复合断裂行为研究[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 87

ZHENG Debiao, NI Fujian, JIANG Jiawang, et al. Study on composite fracture behavior of asphalt mixture based on discrete element method[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 87

[7] 常明丰, 刘志玲, 张久鹏, 等. 基于间接拉伸模式的沥青混合料内部力链分布特征[J]. 中国公路学报, 2022, 35(9): 224

CHANG Mingfeng, LIU Zhiling, ZHANG Jiupeng, et al. Distribution characteristics of force chain in asphalt mixture based on indirect tensile model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 224

[8] YOU Z, BUTTLAR W. Micromechanical modeling approach to predict compressive dynamic moduli of asphalt mixtures using the distinct element method[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1970(1970): 73

[9] YU L, YOU Z. Visualization and simulation of asphalt concrete with randomly generated three-dimensional models [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2009, 23(6): 340

[10] XUE B, PEI J, ZHOU B, et al. Using random heterogeneous DEM model to simulate the SCB fracture behavior of asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 1

[11] 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. Research on numerical simulation method of asphalt mixture based on three-dimensional discrete element[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017

[12] 邢超. 沥青混合料骨架填充体系细观结构及应力应变传递机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018

XING Chao. Study on meso-structure and stress-strain transfer mechanism of asphalt mixture skeleton filling system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018

[13] 涂志先. 基于 X-ray CT 与离散元法的沥青混合料数值模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019

TU Zhixian. Numerical simulation of asphalt mixture based on X-ray CT and discrete element method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019

[14] 孙梦阳, 朱涵, 田稳苓, 等. 两步法预测沥青混合料低温弹性模量及细观力学分析[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(5): 125

SUN Mengyang, ZHU Han, TIAN Wenling, et al. Prediction of low temperature elastic modulus and micromechanics of asphalt mixture by two-step method [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, 40(5): 125

[15] 艾长发. 高寒地区沥青路面行为特性与设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008

AI Changfa. Research on behavior characteristics and design method of asphalt pavement in alpine area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008