



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2506646

引用格式:许银行,贾莉浩,杜银飞,等.基于离散元的灌浆复合混合料低温断裂特性及其抗裂性能提升机理[J].科学技术与工程,2026,26(11):4854-4863.

Xu Yinhang, Jia Lihao, Du Yinfei, et al. Low-temperature fracture characteristics and mechanism of enhancing crack-resistance of grouted mixture based on discrete element method[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(11): 4854-4863.

基于离散元的灌浆复合混合料低温断裂特性及其抗裂性能提升机理

许银行¹, 贾莉浩¹, 杜银飞^{2*}, 徐君全², 朱碧和²

(1. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 武汉 430015; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410083)

摘 要 灌浆复合混合料拥有优异的抗车辙性能,但低温抗裂性能不足,且骨架集料和灌浆料界面接触参数对其抗裂性能的影响规律尚未明确。鉴于此,为明确灌浆复合混合料的低温断裂特性,研究骨架集料和灌浆料界面细观力学参数对其抗裂性能的影响规律,采用离散元法建立灌浆复合混合料的离散元数值仿真模型,通过真实低温弯曲试验对其细观参数进行校验,并分析其断裂过程中的界面失效机理与特征,最后,调整骨架集料-骨架集料或骨架集料-灌浆料的界面细观接触参数,分析灌浆复合混合料在不同参数工况下的抗裂性能指标变化规律。结果表明,灌浆复合混合料的裂缝主要为张拉型裂缝(占比87.0%),且裂缝主要发生在骨架集料-灌浆料界面。降低骨架集料之间、骨架集料-灌浆料的黏结弹性模量,提升骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度,有利于提升灌浆复合混合料的抗裂性能,但降低黏结弹性模量会导致灌浆复合混合料内部微裂缝数量的增加。其中,骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度对抗裂性能的影响最为显著,在界面黏结抗拉强度提高50.0%的条件下,灌浆复合混合料的弯拉强度提升25.1%,最大弯拉应变提升29.3%,裂缝数量减少20.0%。研究结果可为灌浆复合混合料的抗裂性能优化提供参考。

关键词 灌浆复合混合料; 离散元数值仿真; 细观力学参数; 抗裂性能

中图分类号 U416.217; **文献标志码** A

Low-temperature Fracture Characteristics and Mechanism of Enhancing Crack-resistance of Grouted Mixture Based on Discrete Element Method

XU Yin-hang¹, JIA Li-hao¹, DU Yin-fei^{2*}, XU Jun-quan², ZHU Bi-he²

(1. Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute, Wuhan 430015, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

[Abstract] Grouted mixture exhibits excellent anti-rutting performance, but its low-temperature crack resistance is inadequate, and the influence of the interfacial contact parameters between the aggregate skeleton and the grouting material on the crack resistance is not yet clear. To clarify the low-temperature fracture characteristics of grouted mixture and the influence of the interfacial micromechanical parameters between the aggregate skeleton and the grouting material on crack resistance, a discrete element numerical simulation model of grouted mixture was established using discrete element method. The micromechanical parameters were calibrated through real low-temperature bending tests. The interfacial failure mechanisms and characteristics during the fracture process were analyzed. Subsequently, the interfacial micromechanical contact parameters between aggregate skeleton-aggregate skeleton or aggregate skeleton-grouting material were adjusted to investigate the changes in crack resistance performance indicators of grouted mixture under different parameter conditions. Results indicate that the majority of cracks in grouted mixture are tensile cracks (accounting for 87.0%), predominantly occurring at the interface between aggregate skeleton and grouting material. Reducing the bond elastic modulus both between aggregate skeleton and between the aggregate skeleton and grouting material, increasing the interfacial bond tensile strength between the aggregate skeleton and grouting material, can enhance the crack resistance of the grouted mixture. However, reducing the bond elastic modulus leads to an increase in the number of microcracks within the grouted mixture. Among these parameters, the interfacial bond tensile strength between aggregate skeleton and grouting material has the most significant impact on crack resistance. When the interfacial bond tensile strength is increased by 50.0%, the flexural tensile strength of grouted mixture increases by 25.1%, the

收稿日期: 2025-09-15 修订日期: 2025-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(52578341)

第一作者: 许银行(1979—),男,汉族,安徽萧县人,硕士,高级工程师。研究方向:市政道路设计。E-mail:153812793@qq.com。

* 通信作者: 杜银飞(1985—),男,汉族,山东临沂人,博士,副教授。研究方向:路面材料性能与传热。E-mail:yfdu_csu@csu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

maximum flexural tensile strain increases by 29.3% , and the number of cracks decreases by 20.0% . The study provides a reference for optimizing the crack resistance performance of grouted mixture.

[**Keywords**] grouted mixture; discrete element numerical simulation; micromechanical parameters; crack resistance

灌浆复合混合料 (grouted mixture, GM) 因其卓越的抗车辙性能,近年来在中国机场跑道、港口堆场及城市交叉口等重载路段得到推广应用。其以升级配大空隙沥青混合料为骨架,灌注以水泥-外加剂-矿物掺合料复合而成的高流态浆体,形成“刚柔并济”的复合结构,兼具水泥基材料的高强度、高模量与沥青材料的柔性、耐疲劳特性,能够显著抵抗车辙并延长维修周期^[1-2]。然而,GM 内部极易在骨架集料-灌浆料界面过渡区 (interfacial transition zone, ITZ) 萌生裂纹^[3]。裂纹一旦形成,便会在荷载作用下扩展,从而诱发路面开裂,严重削弱 GM 的路用性能^[4]。因此,明确灌浆复合混合料骨架集料和灌浆料界面接触参数对其抗裂性能的影响规律,是提升灌浆复合混合料抗裂性能的关键^[5-6]。

传统的沥青混合料断裂仿真倾向基于连续介质力学框架的断裂分析,如线弹性断裂力学 (linear elastic fracture mechanics, LEFM)、弹塑性断裂力学 (elastic-plastic fracture mechanics, EPFM) 及内聚力模型 (cohesive zone model, CZM),通常假设材料均质且裂纹路径已知,难以兼顾 GM 多相、非均质、界面弱化的本征特征,无法解析裂纹在骨架集料、水泥基灌浆料与 ITZ 之间的真实扩展路径^[7-8];且有限元方法在处理大变形、离散裂纹及多裂纹交互时,存在网格重划分困难、裂纹面接触算法复杂、计算效率低等问题^[9-10]。而离散元法 (discrete element method, DEM) 则通过显式追踪颗粒或块体间的接触-分离过程,天然适用于模拟非连续变形与多裂纹动态演化;可赋予骨架集料、水泥基灌浆料及 ITZ 不同的微观断裂参数 (弹性模量、抗拉强度和抗剪强度等),直接揭示各相对宏观抗裂性能的贡献;且无需预设裂纹路径,裂纹可沿最薄弱界面或高应力区自主萌生与发展^[11-13]。因此,DEM 为 GM 断裂机理研究提供了从细观到宏观的分析平台。

将离散元法系统引入灌浆复合混合料的断裂行为研究。首先,基于真实级配构建包含骨架集料、水泥基灌浆相及界面过渡区的二维离散元模型;继而通过低温三点弯曲试验数据校准灌浆复合混合料的细观接触参数,并分析其低温断裂特性 (裂缝类型与扩展特征);最后,基于校准后的界面细观接触参数,探讨界面黏结强度、界面接触模量等关键界面细观接触参数对灌浆复合混合料裂纹萌生、裂纹扩展速率、弯拉强度及最大弯拉应变的影响规律。研究结果可为 GM 的抗裂性能优化和界

面增强设计提供理论依据与技术支持。

1 灌浆复合混合料细观模型

1.1 灌浆复合混合料离散元数值仿真模型的构建

采用级配如表 1 所示,并采用马歇尔击实法开展室内试验,确定最佳油石比为 3.5%,实测空隙率为 20.0%,且配合比设计结果满足析漏和飞散试验的相关要求^[1]。

在灌浆复合混合料中,基体部分为多孔沥青混合料,其沥青膜厚度通常处于微米级别。而灌浆料、集料及空隙的尺度则为毫米级别,二者相差数个数量级^[14]。在构建灌浆沥青混合料细观模型时,若单独对沥青砂浆建模,会使模型计算量大幅增加,且可能影响计算精度。实际上,在灌浆沥青混合料的断裂过程中,沥青砂浆主要起到黏结集料和灌浆料的作用。因此,只要通过特定方法在模型中体现沥青砂浆的黏结作用,就能使离散元模型与材料的真实结构特点相匹配。基于此,将灌浆沥青混合料模型离散化为多孔沥青混合料骨架 (骨架集料) 和灌浆料两类颗粒,并将沥青胶浆的材料参数赋予多孔沥青混合料骨架和灌浆料界面之间。

参考相关文献 [15-16],在离散元分析法中,可将粒径大于 2.36 mm 的集料视为粗集料,将粒径小于 2.36 mm 的集料和沥青统一视为沥青砂浆。因此,运用灌浆复合混合料离散元数值仿真模型的构建过程如下 (图 1、图 2)。

(1) 不规则集料模板导入:考虑到集料的不规则形状,利用 MATLAB 软件,通过“二维凸包算法”生成不规则集料图形 dxf 文件,将其导入二维离散元颗粒程序 (particle flow code, PFC) 中 template 模块中形成集料模板。

表 1 GM-13 混合料级配
Table 1 GM-13 mixture gradation

粒径/mm	通过率/%
16.0	100.0
13.2	85.0
9.5	35.0
4.75	13.0
2.36	8.0
1.18	7.7
0.6	6.2
0.3	5.2
0.15	3.2
0.075	2.2

(2) 骨架集料投放:通过软件内置的 distribute 命令参考骨架集料 ($>2.36\text{ mm}$) 的级配进行骨架集料 clump template 的投放,投放区域为 $250\text{ mm} \times 35\text{ mm}$,并设置空隙率为 20%,为提高计算效率,利用统一半径为 0.25 mm 的圆颗粒对 clump 进行填充,同时设置骨架集料的密度为 $2\,800\text{ kg/m}^3$ 和阻尼系数为 0.7。

(3) 水泥基灌浆料的生成:在步骤(2)的基础上,生成半径为 0.25 mm 的圆颗粒以填充骨架集料之间的空隙,并设置其密度为 $1\,900\text{ kg/m}^3$ 和阻尼系数为 0.7。

(4) 边界与加载条件的设置:借助 wall 功能。顶部正中生成半径 10 mm 的圆形加载墙;底部对称设置两个半径 10 mm 的支撑墙,间距 200 mm ,设为全固定。

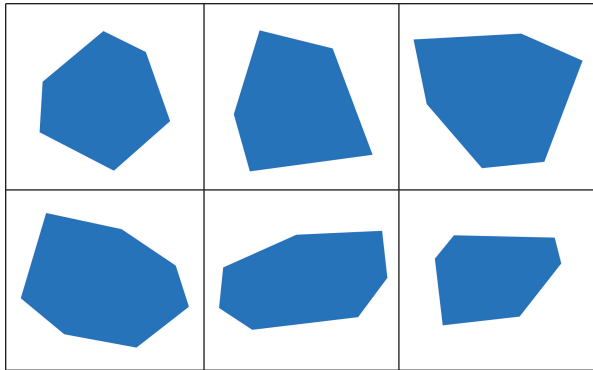


图1 集料几何模型

Fig. 1 Aggregate geometric model

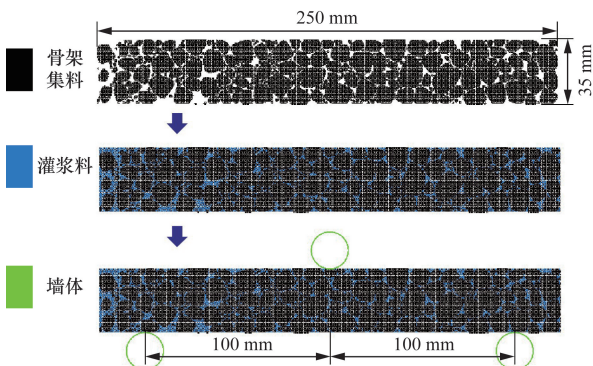


图2 离散元数值仿真模型构建过程

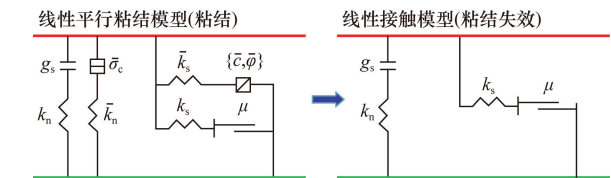
Fig. 2 The construction process of the discrete-element numerical simulation model

1.2 灌浆复合混合料离散元数值仿真模型的细观力学参数

相关研究表明,在低温 ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和静载加载速率较快 (50 mm/min) 的试验条件下,沥青砂浆的黏弹性力学特性体现较为薄弱,其黏性特征可忽略不计,主要表现为线弹性力学行为,故骨架集料之间

的接触设置为线性平行黏结模型^[15,17];多孔沥青混合料经热拌成型冷却后灌注灌浆料形成灌浆复合混合料,骨架集料表层沥青砂浆冷却后黏度较低,主要通过水泥基灌浆料的胶结作用进行界面粘结,因此,“骨架集料-灌浆料”界面作用可简化为“界面胶结作用”,采用线性平行黏结模型来描述骨架集料与灌浆料之间的接触;灌浆料为水泥基材料,颗粒间同样采用可传递力矩的线性平行黏结模型^[18];骨架集料与墙体之间以及灌浆料与墙体之间的接触设置为线性接触模型。

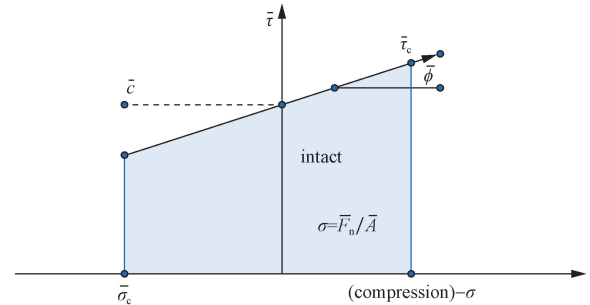
线性平行黏结模型主要由两部分构成:第一部分是无穷小的线弹性(无张力)摩擦界面,传递力;第二部分是有限尺寸的线弹性黏结界面,传递力和力矩。第一部分等效于线性模型:它不抵抗相对旋转,并通过在剪切力上施加库仑极限来允许滑动。第二部分称为平行键,因为在黏结时,它与第一部分并行作用。当第二部分处于黏结状态时,它会抵抗相对旋转,其行为是线弹性的,直至超过强度极限导致黏结断裂,变为未黏结状态。当第二部分未粘接时,它不承载载荷。未黏结的线性平行模型等效于线性模型,如图3和图4所示。



g_s 为颗粒间的法向间隙; k_n 、 $\bar{k}_n$ 分别为线性模型、平行黏结模型的法向刚度; $\bar{\sigma}_c$ 为平行黏结模型法向粘结强度; k_s 、 $\bar{k}_s$ 分别为线性模型、平行黏结模型的切向刚度; $\bar{c}$ 、 $\bar{\phi}$ 分别为平行黏结模型的内聚力与内摩擦角(黏结抗剪强度参数); μ 为摩擦系数

图3 平行黏结模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the parallel bond model



σ 为平行黏结模型法向应力; τ 为平行黏结模型剪应力; $\bar{\sigma}_c$ 为平行黏结模型抗压强度; τ_c 为平行黏结模型抗剪强度($\sigma=0$ 时, $\tau_c = \tau$, 即黏结内聚力 $\bar{c}$); $\bar{\phi}$ 为平行黏结模型的内摩擦角; $\bar{F}_n$ 为平行黏结模型法向力; $\bar{A}$ 为平行黏结模型接触面积;intact 表示黏结处于未破坏的状态;compression 表示图中右侧为压应力方向

图4 平行黏结模型的破坏包络图

Fig. 4 Failure envelope for the parallel bond model

参考相关资料对细观力学参数进行初步确定,并开展仿真试验与实际试验(加载速率 50 mm/min)。在灌浆复合混合料的弯曲仿真试验中,二维弯曲仿真模型的尺寸为 250 mm×35 mm,支点间距为 200 mm,加载墙体位于跨中,控制顶部正中圆形加载墙体以 50 mm/min 向下加载,底部的支撑墙设为全固定,通过设置内置函数以监测加载墙体的接触力与位移;同时,参考规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025)中沥青混合料弯曲试验的要求,采用澳大利亚 IPC global 公司生产的 UTM-250 型万能材料试验机进行弯曲试验(图 5),将灌浆复合混合料(多孔沥青混合料空隙率 20%)置于-10℃条件下保温至少 6 h,试件尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm,加载速度设置为 50 mm/min,加载位置位于跨中,两支点间的距离为 200 mm,记录试验过程中力与位移的数值变化。根据力-位移曲线的特征对仿真模型的细观力学参数进行调整,通过多次反演试算和调整,直至仿真试验与实际试验的结果接近^[19-20],确定的细观力学参数如表 2 和表 3 所示。



图 5 低温弯曲试验
Fig. 5 Low-temperature flexural test

表 2 模型的细观力学参数
Table 2 Mesoscale mechanical parameters of the mode

参数类型	骨架集料- 骨架集料	灌浆料- 灌浆料	骨架集料- 灌浆料
弹性模量	5.5×10^{10}	1.0×10^{10}	2.0×10^9
黏结弹性模量	3.0×10^9	1.0×10^{10}	2.0×10^9
黏结抗拉强度	1.8×10^6	1.5×10^7	1.2×10^6
黏结抗剪强度	1.5×10^6	9.0×10^6	0.8×10^6
黏结摩擦角	6.0×10^1	4.5×10^1	4.5×10^1
摩擦系数	5.0×10^{-1}	5.0×10^{-1}	5.0×10^{-1}
刚度比	1.1×10^0	1.1×10^0	1.1×10^0

表 3 外部荷载的细观力学参数
Table 3 Mesoscale mechanical parameters of external load

参数类型	墙体-骨架集料	墙体-灌浆料
法向刚度	5.5×10^{11}	5.5×10^{11}
切向刚度	5.5×10^{11}	5.5×10^{11}
摩擦系数	5.0×10^{-1}	5.0×10^{-1}

1.3 灌浆复合混合料离散元数值仿真模型的校验与断裂特性

由图 6 可知,真实试验与仿真的峰值荷载分别为 1.07 kN 和 1.05 kN,差异百分比为 1.9%;真实试验与仿真的跨中挠度分别为 0.33 mm 和 0.36 mm,差异百分比为 9.1%。仿真试验和真实试验结果差异百分比在 10% 以内,而真实试验的平行误差在 30% 以内,说明数值仿真模拟结果与真实结果具有较好的一致性,灌浆复合混合料的弯曲离散元仿真模型误差在接受范围之内^[19]。进一步证明本研究采用的细观力学参数可以较为真实地反映灌浆复合混合料在低温条件下的力学行为,可为后续的细观断裂行为分析提供依据。

由图 7 可知,离散元数值仿真试验与室内真实试验的受力情况分布一致,离散元模拟试验符合真实试验的发展状况。在荷载加载阶段,试件整体主要呈现出上部受压下部受拉的状态,受压区域主要

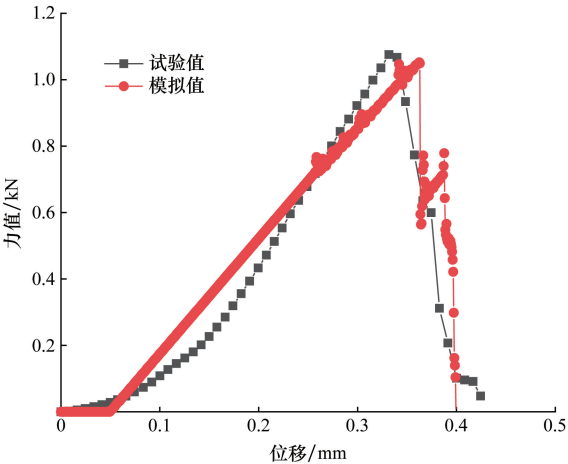


图 6 灌浆复合混合料力-位移曲线结果
Fig. 6 Force-displacement curve results of grouted mixture

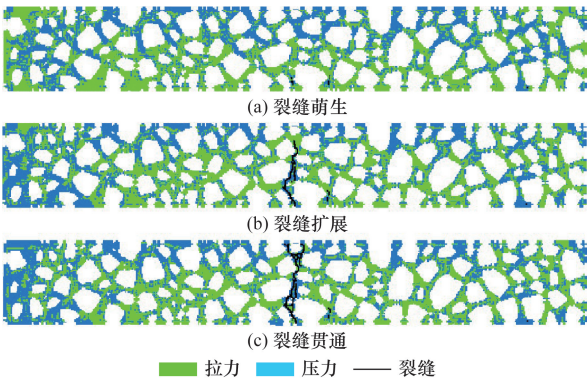


图 7 灌浆复合混合料离散元数值仿真模型的裂缝演化及力链分布规律

Fig. 7 The evolution of cracks and the distribution of force chains in the discrete element numerical simulation model of grouted composite mixture

分布在顶部加载点与底部两固定支点区域附近,受拉区域主要分布在试件底部两固定支点之间的区域,随着顶部荷载的进一步加载,试件底部受拉区域黏结逐渐失效,萌生出裂缝,裂缝尖端附近的受压区逐渐转化成受拉区域,裂缝逐渐向上扩展,致使受拉区域也随之向上迁移,受拉区域面积增大。相关研究表明,当裂缝面与应力方向正交,裂纹面产生张开位移,则应力为拉应力,裂缝为张开型(Ⅰ型)裂缝;当裂缝面与应力方向平行,裂纹面产生相对滑移,则应力为切应力,裂缝为滑移型(Ⅱ型)裂缝^[20]。采用离散元内置函数对裂缝的类型进行监测统计,发现张开型裂缝占比为 87.0%,而滑移型裂缝的占比为 13.0%,所以拉应力是灌浆复合混合料产生裂缝与拓展的主要驱动因素,因此,在此条件下灌浆复合混合料的裂缝类型主要为张拉型裂缝。

如图 8(a) 所示,数值仿真模型计算结果显示,裂缝主要在骨架集料与灌浆料接触界面萌生与发展,仅有少量裂缝在骨架集料之间的接触界面萌生。裂缝从试件底部受拉区域的最大拉应力处附近(试件底部中点周围的骨架集料-灌浆料界面)开始萌生,并逐渐向上扩展直至贯通。在裂缝扩展区域,骨架集料与灌浆料之间的界面破坏要优先于骨架集料之间的界面破坏。

同时,通过灌浆复合混合料在真实低温弯曲试验条件下的裂缝发展分布图[图 8(b)]可知,灌浆复合混合料的弯曲破坏裂缝从试件底部中点受拉区域的骨架集料-灌浆料界面开始萌生发展,且后续裂缝的主要扩展路径为骨架集料-灌浆料界面,极少部分裂缝穿越灌浆料内部和骨架集料之间。这表明灌浆复合混合料内部的裂缝易在骨架集料-灌浆

料界面萌生发展,该界面为灌浆复合混合料的应力薄弱区域。这是因为骨架集料形成的结构骨架为点接触嵌挤结构,其接触面积要远少于骨架集料与灌浆料的接触面积,此外,骨架集料-灌浆料的界面黏结强度小于骨架集料之间的界面黏结强度,而灌浆料内部的黏结强度又远高于骨架集料之间的界面黏结强度。因此,骨架集料-灌浆料界面更易产生裂缝,且该界面的裂缝面积远大于骨架集料之间和灌浆料内部的裂缝面积。

综上所述,数值仿真模型与真实低温弯曲试验的裂缝分布特性和发展规律基本一致,进一步证明数值仿真模型相关假设和细观参数的合理性,可为后续开展灌浆沥青混合料细观断裂机理研究提供模型支撑。

2 灌浆复合混合料离散元数值仿真试验设计

为探究灌浆沥青混合料离散元数值仿真模型细观力学参数对其抗裂性能的影响规律,通过调整骨架集料-骨架集料和骨架集料-灌浆料的平行黏结模型参数,分析其对于灌浆复合混合料离散元数值仿真模型抗裂性能指标的影响规律。根据上文的分析可知,灌浆复合混合料的断裂破坏主要为骨架集料-灌浆料界面和骨架集料界面黏结失效,因此通过调整模型的黏结参数(黏结弹性模量、黏结抗拉强度)(表 4),开展不同细观力学接触参数工况下的数值仿真试验,通过离散元内置函数监测其在加载条件下荷载、位移和裂缝的发展规律,并参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025)中沥青混合料弯曲试验弯拉强度和最大弯拉应变的计算方法,计算灌浆复合混合料离散元数值

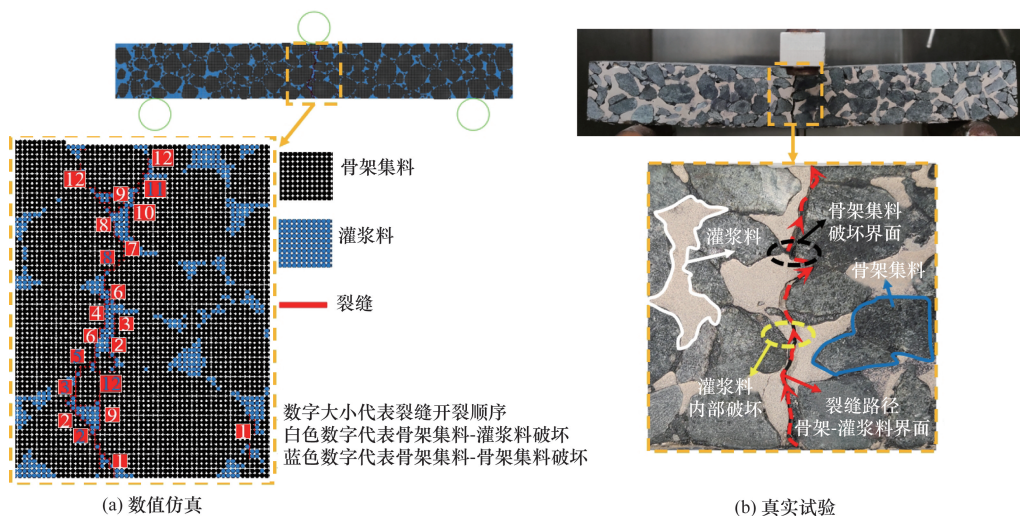


图 8 数值仿真和真实试验的灌浆复合混合料裂缝分布

Fig. 8 Crack distribution of grouted mixture in numerical simulation and real experiments

表 4 模型的细观力学参数调整

Table 4 Adjustment of the micromechanical parameters of the model

模型名称	参数调整
GM0	基准组(无调整)
GM1	1.25 倍骨架集料-骨架集料黏结弹性模量
GM2	1.50 倍骨架集料-骨架集料黏结弹性模量
GM3	0.75 倍骨架集料-骨架集料黏结弹性模量
GM4	0.50 倍骨架集料-骨架集料黏结弹性模量
GM5	1.25 倍骨架集料-灌浆料黏结弹性模量
GM6	1.50 倍骨架集料-灌浆料黏结弹性模量
GM7	0.75 倍骨架集料-灌浆料黏结弹性模量
GM8	0.50 倍骨架集料-灌浆料黏结弹性模量
GM9	1.25 倍骨架集料-骨架集料黏结抗拉强度
GM10	1.50 倍骨架集料-骨架集料黏结抗拉强度
GM11	0.75 倍骨架集料-骨架集料黏结抗拉强度
GM12	0.50 倍骨架集料-骨架集料黏结抗拉强度
GM13	1.25 倍骨架集料-灌浆料黏结抗拉强度
GM14	1.50 倍骨架集料-灌浆料黏结抗拉强度
GM15	0.75 倍骨架集料-灌浆料黏结抗拉强度
GM16	0.50 倍骨架集料-灌浆料黏结抗拉强度

仿真模型的弯拉强度、最大弯拉应变,最终采用弯拉强度、最大弯拉应变、裂缝数量和裂缝扩展速率(裂缝数量/最大弯拉应变)作为灌浆复合混合料抗裂性能评价指标。

3 结果与分析

3.1 骨架集料-骨架集料界面黏结弹性模量

由图 9 可知,提升骨架集料之间的界面黏结弹性模量,会导致灌浆复合混合料的弯拉强度与最大弯拉应变降低,与 GM0 相比,GM2 和 GM4 的弯拉强度变化率分别为 -18.9% 和 18.7%,相应的,其最大弯拉应变变化率为 -34.4% 和 26.2%,劲度模量(弯拉强

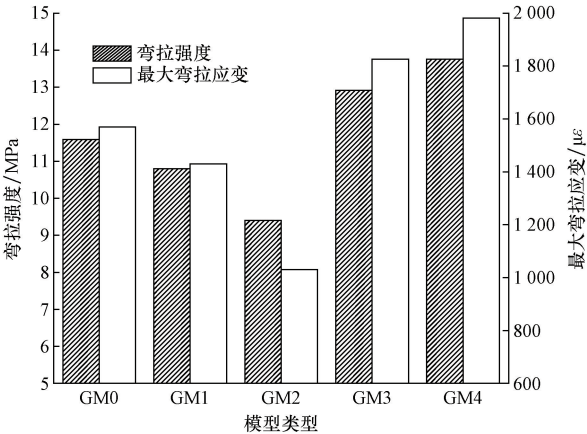


图 9 骨架集料-骨架集料界面黏结弹性模量对弯拉强度和最大弯拉应变的影响

Fig. 9 The influence of the interfacial bonding elastic modulus between aggregate and aggregate on flexural strength and maximum flexural strain

度/最大弯拉应变)的变化率为 23.6% 和 -5.9%。

由图 10 可知,随着骨架集料之间的界面黏结弹性模量的提升,灌浆复合混合料裂缝的数量减少,但其裂缝扩展速率加速。与 GM0 相比,GM2 和 GM4 的裂缝数量变化率分别为 -26.9% 和 30.9%,相应的,其裂缝扩展速率变化率为 12.5% 和 -3.3%。

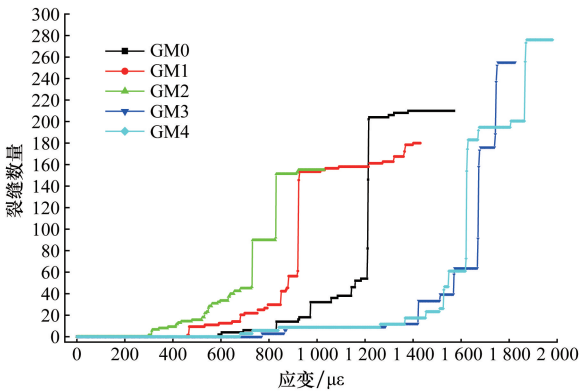


图 10 骨架集料-骨架集料界面黏结弹性模量对裂缝数量的影响

Fig. 10 The influence of the interfacial bonding elastic modulus between aggregate and aggregate on the number of cracks

综合骨架集料之间的界面黏结弹性模量对灌浆复合混合料弯拉强度、最大弯拉应变和裂缝数量的影响规律,可知:降低骨架集料之间的界面黏结弹性模量有利于提升灌浆复合混合料的弯拉强度和最大弯拉应变,降低裂缝的扩展速率,但会引起微裂缝的数量增加,一定程度上有利于灌浆复合混合料的抗裂性能提升。这是因为,降低骨架集料之间的界面黏结弹性模量实质是使点嵌挤型的骨架集料由“刚性嵌挤”向“弹塑性滑移”过渡,在外部荷载条件下,灌浆复合混合料的骨架整体可产生更大的协调变形,从而使原本集中在少数接触面上的拉应力分散到更多颗粒面上,降低灌浆复合混合料内部的应力集中,使其内部拉应力分布更均匀,因此灌浆复合混合料表现出更高的强度和应变;同时骨架颗粒的“弹塑性滑移”有利于释放松弛裂缝尖端的拉应力,宏观裂缝的扩展速率减缓。然而,骨架颗粒之间的“弹塑性滑移”也降低了微裂缝的产生条件,大量薄弱界面失效提前发生,导致微裂缝密度增加,但这些微裂缝尺度较小,方向分散,难以彼此贯穿成为宏观贯通裂缝,最终形成“多、细、慢”的微裂缝区域,实现灌浆复合混合料抗裂性能的提升。

3.2 骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量

由图 11 可知,提升骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量,会使灌浆复合混合料的弯拉强度和最大

弯拉应变降低,但弯拉强度的降幅较小(小于10%)。与GM0相比,GM6和GM8的弯拉强度变化率分别为-9.4%和9.6%,相应的,其最大弯拉应变变化率为-24.4%和13.2%,劲度模量的变化率为19.5%和-3.4%。

由图12可知,随着骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量的提升,灌浆复合混合料裂缝的数量小幅度降低,但其裂缝扩展速率加速。与GM0相比,GM6和GM8的裂缝数量变化率分别为-26.9%和30.9%,相应的,其裂缝扩展速率变化率为22.5%和-5.3%。

综合骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量对灌浆复合混合料弯拉强度、最大弯拉应变和裂缝数量的影响规律,可知:降低骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量有利于提升灌浆复合混合料的弯拉强度和

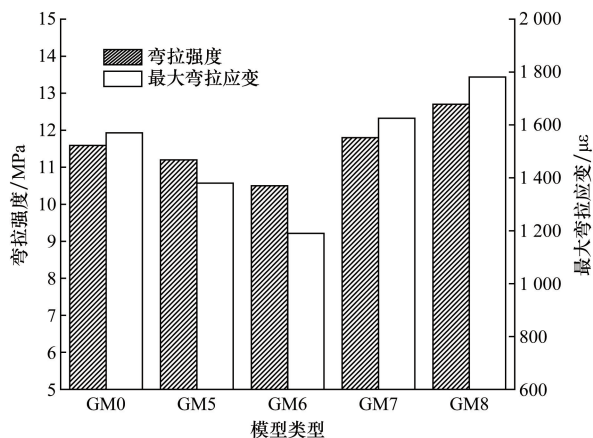


图11 骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量对弯拉强度和最大弯拉应变的影响

Fig. 11 The influence of the interfacial bonding elastic modulus between aggregate and grouting material on flexural strength and maximum flexural strain

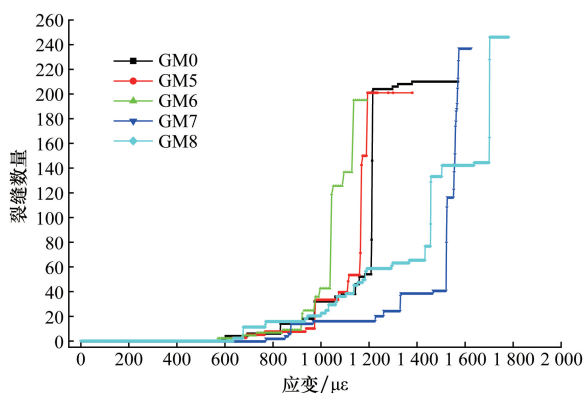


图12 骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量对裂缝数量的影响

Fig. 12 The influence of the interfacial bonding elastic modulus between aggregate and grouting material on the number of cracks

最大弯拉应变,降低微裂缝的扩展速率,但会引起微裂缝的数量增加,一定程度上有利于灌浆复合混合料的抗裂性能提升。这是因为,适度降低骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量,有利于提升骨架集料-灌浆料接触界面的变形协调性,在界面破坏强度一定的前提下,其接触界面能够产生更大的协调变形,在外部荷载条件下,骨架整体先变形而松弛灌浆料的应力集中,从而使灌浆复合混合料表现出更高的强度和应变,同时滑移界面耗散能量,微裂缝拉应力降低,扩展速率减缓,微裂隙萌生门槛降低、数量增多,形成分布式微裂网络。

3.3 骨架集料-骨架集料界面黏结抗拉强度

由图13可知,提升骨架集料界面黏结抗拉强度,会使灌浆复合混合料的弯拉强度和最大弯拉应变小幅提升(小于5%)。相比于GM0,GM10和GM12的弯拉强度变化率分别为3.8%和-4.7%,相应的,其最大弯拉应变变化率为2.6%和-2.7%,劲度模量的变化率为1.1%和3.4%。

由图14可知,随着骨架集料界面黏结抗拉强度的提高,灌浆复合混合料裂缝的数量小幅度降低,且其裂缝扩展速率减缓。相比于GM0,GM10和GM12的裂缝数量变化率分别为-14.3%和14.8%,相应的,其裂缝扩展速率变化率为-10.2%和24.7%。

综合骨架集料界面黏结抗拉强度对灌浆复合混合料弯拉强度、最大弯拉应变和裂缝数量的影响规律,可知:骨架集料界面黏结抗拉强度的变化对灌浆复合混合料的弯拉强度和最大弯拉应变影响并不显著,但提升骨架集料的界面黏结强度,有利于降低微裂缝的扩展速率,减少微裂缝的数量。这

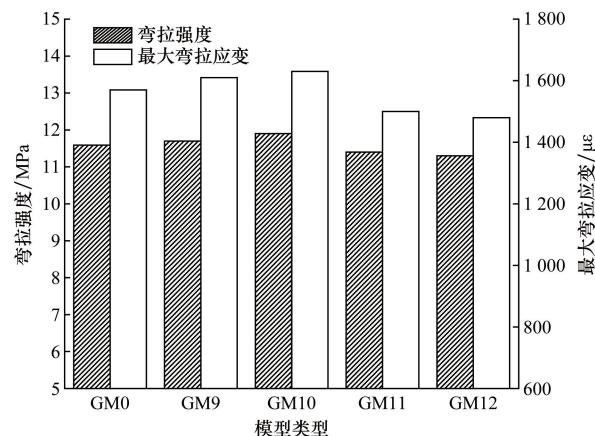


图13 骨架集料-骨架集料界面黏结抗拉强度对弯拉强度和最大弯拉应变的影响

Fig. 13 The influence of the interfacial tensile bond strength between aggregate and aggregate on flexural strength and maximum flexural strain

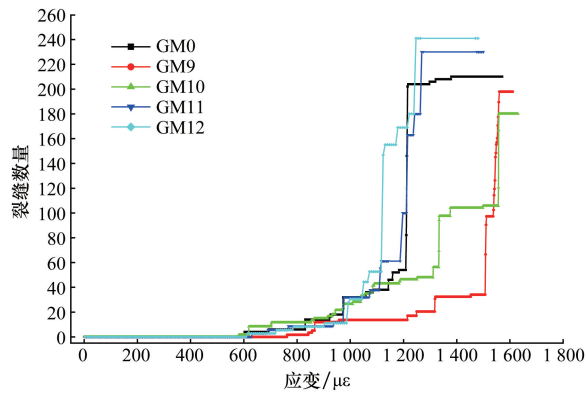


图 14 骨架集料-骨架集料界面黏结抗拉强度
对裂缝数量的影响

Fig. 14 The influence of the interfacial tensile bond strength between aggregate and aggregate on the number of cracks

是因为,灌浆复合混合料骨架集料主要通过点嵌挤形式的构成,骨架集料之间接触较少,灌浆复合混合料的断裂破坏主要来源于骨架集料-灌浆料界面黏结失效破坏,骨架集料黏结失效破坏占比较小,而提升多孔沥青混合料黏结强度,其变化仅限于骨架内部,对骨架集料-灌浆料界面相互作用影响微弱,所以提升骨架集料界面黏结抗拉强度对灌浆复合混合料的破坏应力与应变影响较小,其劲度模量几乎不变;而骨架集料界面黏结抗拉强度的提升,使内部微裂隙萌生门槛略增、裂缝数量小幅下降,扩展速率微降,但对骨架集料-灌浆料界面强度贡献不足,所以提升骨架集料黏结抗拉强度对改善灌浆复合混合料抗裂性能的提升幅度受限。

3.4 骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度

由图 15 可知,提升骨架集料-灌浆料的界面黏结抗拉强度,会使灌浆复合混合料的弯拉强度和最大弯拉应变提高。与 GM0 相比,GM14 和 GM16 的弯拉强度变化率分别为 25.1% 和 -25.0%,相应的,其最大弯拉应变的变化率为 29.3% 和 -33.2%,劲度模量的变化率为 -3.5% 和 12.4%。

由图 16 可知,随着骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度的提升,灌浆复合混合料裂缝的数量减少,且其裂缝扩展速率减缓。与 GM0 相比,GM14 和 GM16 的裂缝数量变化率分别为 -20.0% 和 41.4%,相应的,其裂缝扩展速率变化率为 -38.1% 和 111.5%。

综合骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度对灌浆复合混合料弯拉强度、最大弯拉应变和裂缝数量的影响规律,可知:提升骨架集料-灌浆料界面的黏结抗拉强度有利于提升灌浆复合混合料的弯拉强度和最大弯拉应变,降低微裂缝的扩展速率,减少微

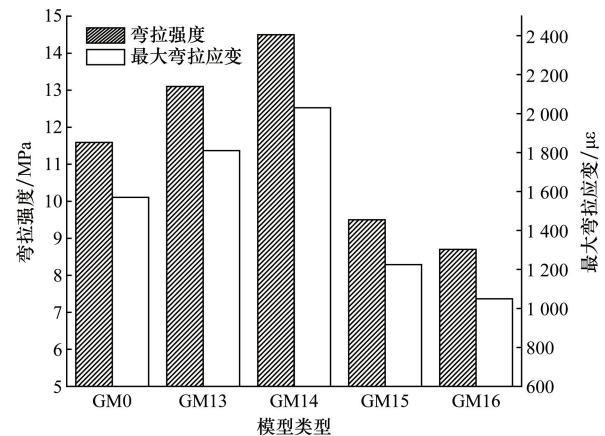


图 15 骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度
对弯拉强度和最大弯拉应变的影响

Fig. 15 The influence of the interfacial tensile bond strength between aggregate and grouting material on flexural strength and maximum flexural strain

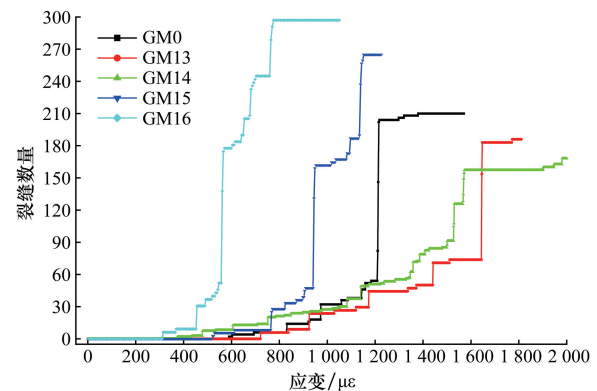


图 16 骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度
对裂缝数量的影响

Fig. 16 The influence of the interfacial tensile bond strength between aggregate and grouting material on the number of cracks

裂缝的数量,对灌浆复合混合料的抗裂性能有显著提升。这是因为,混合料试件断裂主要以骨架集料-灌浆料黏结破坏为主,提高两者界面的黏结抗拉强度,有利于提升其界面抗破坏能力,当灌浆复合混合料在外界荷载作用下时,骨架和灌浆料变形协调性提高,界面脱黏失效被推迟,拉伸应变得以充分发展,因此峰值应力和峰值应变同步提升。同时,高黏结强度提高了裂缝起裂的能量,使微裂缝萌生数量减少,扩展速率明显减缓。

4 结论

针对灌浆复合混合料低温断裂行为,构建含骨架集料、灌浆料及接触界面的二维离散元模型,结合真实低温弯曲试验标定校验模型细观力学接触参数,进而探究其低温断裂特性,并系统分析骨架

集料和灌浆料相关细观接触力学参数对灌浆复合混合料抗裂性能的影响规律。主要结论如下。

(1)线性平行黏结模型可用以表征灌浆复合混合料在低温弯曲条件下骨架集料和灌浆料接触特性,仿真与试验的荷载-位移曲线变化趋势基本一致,试验与仿真的峰值荷载和跨中挠度差异率分别为1.9%和9.1%,验证了该离散元模型在模拟此类材料低温断裂行为时的适用性。

(2)灌浆复合混合料的内部裂缝主要萌生于骨架集料-灌浆料的接触界面,且沿该界面扩展,少部分发展于骨架集料之间的界面,骨架集料-灌浆料的界面破坏优先于骨架集料间界面破坏,裂缝以张拉型为主(占比为87.0%),表明界面黏结性能是影响抗裂性能的重要因素。

(3)降低骨架集料间及骨架集料-灌浆料界面黏结弹性模量,提升骨架集料-灌浆料界面黏结抗拉强度,均有利于提升灌浆复合混合料抗裂性能,且对界面黏结抗拉强度的影响更显著,当界面黏结抗拉强度提高50.0%时,混合料的弯拉强度和最大弯拉应变分别提升25.1%和29.3%,裂缝数量减少20.0%,但降低黏结弹性模量可能会诱发内部微裂缝数量的增加。

参 考 文 献

- [1] 赵迁乔,徐君全. 水性环氧树脂增强灌浆复合混合料抗裂性能设计与评价[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(11): 4754-4760.
Zhao Qianqiao, Xu Junquan. Design and evaluation of anti-cracking performance of water-borne epoxy resin reinforced grouting asphalt mixture[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4754-4760.
- [2] 郭庆林,张博昊,高颖,等. 不同种类沥青对灌入式半柔性材料的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13550-13555.
Guo Qinglin, Zhang Bohao, Gao Ying, et al. Influence of different types of asphalt on semi-flexible materials[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13550-13555.
- [3] 谢志惠,何天明,许克健,等. 不同温域变化下半柔性路面材料细观界面损伤开裂分析[J]. 公路交通科技, 2024, 41(2): 57-68.
Xie Zhihui, He Tianming, Xu Kejian, et al. An analysis on mesoscopic interfacial damage of semi-flexible material at different temperature ranges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(2): 57-68.
- [4] 莫振辉. 半柔性固化道床力学特性分析及材料抗裂性能研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
Mo Zhenhui. Analysis of mechanical properties of semi-flexible stabilized ballast bed and study on crack resistance of semi-flexible materials[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [5] Shen Y L, Zhang Y Y. Transmission protocol for secure big data in two-hop wireless networks with cooperative jamming[J]. Information Sciences, 2014, 281: 201-210.
- [6] 周松. 基于三维细观结构模型的半柔性路面材料开裂特性研究

[D]. 南京:东南大学, 2023.

- Zhou Song. Research on cracking characteristics of semi-flexible pavement materials based on a three-dimensional mesoscopic structure model[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [7] Chen Y W, Bai T, Zhan A Y, et al. A study of fine-scale low-temperature cracking in geopolymer grouted porous asphalt mixtures based on real aggregate profile modeling[J]. Construction and Building Materials, 2024, 445: 137897.
 - [8] Su X T, Yang Z J, Liu G H. Monte Carlo simulation of complex cohesive fracture in random heterogeneous quasi-brittle materials: a 3D study[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(17): 2336-2345.
 - [9] 刘文昶,张曙光,毛永强,等. 车辙历程中的集料细观运动追踪方法及其应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33): 14379-14386.
Liu Wenchang, Zhang Shuguang, Mao Yongqiang, et al. Tracking method of aggregate meso-motion in rutting process and its application[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(33): 14379-14386.
 - [10] 马银祥,黄敏波. 再生集料沥青混凝土界面损伤行为特征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6167-6175.
Ma Yinxiang, Huang Qibo. Characteristics of failure behavior at the interface of recycled aggregate asphalt mixture[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 6167-6175.
 - [11] 王修山,刘天运,张南童,等. 粗集料形态特征及含量对沥青混合料压实行为的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23): 10084-10095.
Wang Xiushan, Liu Tianyun, Zhang Nantong, et al. Influence of coarse aggregate morphological characteristics and content on the compaction behavior of asphalt mixtures[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(23): 10084-10095.
 - [12] 张志清,吕毅,俞靖洋. 基于离散元的蓄盐沥青混合料低温劈裂试验分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14371-14378.
Zhang Zhiqing, Lu Yi, Yu Jingyang. Analysis of low temperature cracking resistance of salt storage asphalt mixture based on virtual splitting test[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14371-14378.
 - [13] 陆学元,陈远播,魏星,等. 沥青混合料低温劈裂虚拟试验影响因素研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(8): 3389-3398.
Lu Xueyuan, Chen Yuanbo, Wei Xing, et al. Influence factors of low-temperature virtual indirect tensile test for asphalt mixtures[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(8): 3389-3398.
 - [14] 雷东升,刘国全,余苗. 基于疲劳寿命的泡沫温拌沥青混合料油膜厚度确定[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 243-246.
Lei Dongsheng, Liu Guoquan, Yu Miao. Determination of oil film thickness of foamed warm-mix asphalt based on fatigue life[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 243-246.
 - [15] 柳力,李理,刘朝晖,等. 内置应变传感器对沥青混合料力学性能的影响[J]. 工程科学学报, 2025, 47(1): 179-194.
Liu Li, Li Li, Liu Chaohui, et al. Influence of built-in strain sensor on the mechanical properties of asphalt mixture[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(1): 179-194.
 - [16] 刘振辉,陈雪琴,董侨,等. 基于离散元的钢渣透水沥青混合料疲劳损伤数值仿真[J]. 江苏大学学报(自然科学版),

- 2025, 46(1): 98-104.
- Liu Zhenhui, Chen Xueqin, Dong Qiao, et al. Fatigue damage numerical simulation of steel slag porous asphalt mixture based on discrete element method[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2025, 46(1): 98-104.
- [17] 徐永江, 王伟, 谭忆秋. 不同受力模式下的沥青混合料接触力链分布特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(7): 1-10.
- Xu Yongjiang, Wang Wei, Tan Yiqiu. Contact force chain distribution characteristics of asphalt mixture under different stress modes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(7): 1-10.
- [18] 田林昌, 季日臣. 基于 PFC^{2D} 隧洞注浆混凝土三点弯曲梁破坏模拟[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 757-764.
- Tian Linchang, Ji Richen. Based on PFC^{2D} tunnel injection layer concrete three-point bending beam destruction simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 757-764.
- [19] 王伟, 谭忆秋, 徐永江. 沥青混合料 3 点弯曲内部受力研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(10): 101-111.
- Wang Wei, Tan Yiqiu, Xu Yongjiang. Study on internal stress of asphalt mixture under three-point bending mode[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2024, 52(10): 101-111.
- [20] 曾辉, 沈泽涵, 鄧晓, 等. 钢渣骨料多孔结构对沥青混合料低温抗裂性能的影响机制[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(1): 82-93.
- Ceng Hui, Shen Zehan, Zhi Xiao, et al. Investigating mechanisms of porous structure of steel slag affecting low-temperature crack resistance of asphalt mixture[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(1): 82-93.