

沥青混凝土断裂近场动力学模拟参数的敏感性分析

沈新¹, 杨树²

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 通过半圆弯曲(semi-circular bending, SCB)实验室测试,将模拟结果与实验结果进行对比,并逐步调整模型输入,以更接近实验数据。研究识别了4个关键输入参数:砂浆刚度、砂浆裂缝能量、骨料刚度和骨料裂缝能量,并探讨了这些参数对模拟裂缝指标FE(断裂能, fracture energy)、 K_{IC} (I型平面应变断裂韧度, 简称断裂韧度)、FI(抗裂柔度指数, flexibility index)和CRI(裂纹阻力指数, cracking resistance index)的影响。研究发现,FI对砂浆刚度、砂浆裂缝能量和骨料裂缝能量最为敏感;FE对骨料刚度最敏感,而对骨料裂缝能量的敏感性最低;CRI对砂浆刚度、砂浆裂缝能量和骨料刚度的变化最不敏感。方差分析(ANOVA)结果表明,骨料刚度对FE、 K_{IC} 和CRI具有显著影响,而砂浆刚度、砂浆裂缝能量和骨料裂缝能量对FI的影响不显著。研究结论有助于理解近场动力学模拟模型及其输入参数,为模拟沥青混凝土裂缝提供了重要的输入参数选择依据。

关键词: 沥青混凝土;近场动力学模拟;输入敏感性分析;裂缝;模拟参数

中图分类号: U411; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0035-05

Analysis on Sensitivity of Peridynamic Simulation Parameters for Asphalt Concrete Fracture

SHEN Xin¹, YANG Shu²

(1. China Design Group, Nanjing Jiangsu 210014; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Through semi-circular bending (SCB) laboratory tests, the simulated results are compared with experimental findings, and the model inputs are gradually adjusted to be closer to the experimental data. Four key input parameters are identified, such as mortar stiffness, mortar fracture energy, aggregate stiffness and aggregate fracture energy. And the effects of these parameters on the simulated fracture indices (FE, K_{IC} , FI and CRI) are discussed. The research findings indicate that FI is the most sensitive to mortar stiffness, mortar fracture energy and aggregate fracture energy; FE is the most sensitive to aggregate stiffness, and the sensitivity to aggregate fracture energy is the lowest. CRI is the least sensitive to changes in mortar stiffness, mortar fracture energy and aggregate stiffness. Analysis of variance (ANOVA) results demonstrate that aggregate stiffness has a significant impact on FE, K_{IC} and CRI, while the effects of mortar stiffness, mortar fracture energy and aggregate fracture energy on FI are not significant. The research conclusion is helpful for understanding the peridynamic simulation model and its input parameters, providing an important basis for the selection of input parameters for simulating asphalt concrete fractures.

Keywords: asphalt concrete; peridynamic simulation; input sensitivity analysis; fracture; simulation parameters

0 引言

近年来,针对沥青裂缝的模拟研究已有显著进展。研究沥青混凝土断裂行为是较常使用的试验方式^[1-2],但数值模拟的方法也不可替代^[3]。这些模拟研究通常采用有限元法^[4-5]和离散元法^[6-7]。

随着近场动力学(周界动力学)模拟技术的发

展,使得模拟多种材料的裂缝行为成为可能,包括金属^[8]、陶瓷^[9]和聚合物^[10]。Zhang等^[8]结合数字图像相关技术,研究了超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)的混合模式裂缝行为。

使用近场动力学进行裂缝行为模拟具有诸多优势。近场动力学是一种非局部理论,通过积分方程描述物体的运动,避免了传统基于连续假设和微分方程的力学理论在不连续情况下所面临的问题^[11-12]。近场动力学模型的本构力学函数包含了材料点的损伤和裂缝的关键伸长 s_0 作为损伤的判别标

收稿日期: 2025-05-23

作者简介: 沈新(1986—),男,硕士,高级工程师,从事道路设计工作。

准,因此不再需要传统的临界应力作为裂缝准则,从而在损伤问题分析中,无需进行传统的裂缝预测或裂缝路径分析,裂缝的产生和扩展将自然发生^[13]。

文献中已有一些研究利用近场动力学模拟沥青混凝土的裂缝行为。Liu等^[14]建立了近场动力学模型,以模拟沥青混凝土的半圆弯曲(SCB)试验。该研究得出结论,近场动力学方法在模拟SCB裂缝扩展中的应用可行,通过比较近场动力学模拟模型与SCB试验结果的负载-位移($P-u$)曲线,分析了实验室SCB试验中的拱效应和能量转化,并进一步分析了沥青混合料的低温特性和裂缝过程。在裂缝能量方面模拟与实验结果的差异仅为6%,证明了使用近场动力学模拟沥青混合料裂缝行为的可行性。

然而,采用近场动力学对沥青混凝土裂缝进行研究的文献仍较少。模拟模型的恰当输入对模拟结果至关重要。在本文研究的二维近场动力学模拟模型中,有4个重要输入参数用于表征材料属性。这些输入未值可能会显著改变模拟结果。因此,恰当的输入值对于使模拟输出接近真实值至关重要。由于以下两个原因,较难确定恰当的输入参数。一是目前尚未建立相应的测试方法来测量某些输入,例如,二维模拟中需要单个骨料颗粒的刚度,但通过测试方法无法获得该值。二是多个因素会影响某些输入,例如,沥青砂浆的裂缝能量在沥青混凝土的近场动力学模拟中非常必要。尽管已有大量研究测量沥青砂浆的裂缝能量,如Yang等^[15]测量了沥青砂浆的裂缝能量,并研究了影响裂缝能量的因素。该研究的结果可以为沥青砂浆的裂缝能量提供一个输入值,但包括样本尺寸、加载速率、测试温度等多个因素可能会显著改变裂缝能量的数值。

因此,尚不清楚在模拟模型中使用一个裂缝能量数值是否合适。为解决这个问题,本文研究进行半圆弯曲(SCB)实验室测试试验,并将模拟结果与实验室测试结果进行比较,逐步调整模型的输入,直到结果接近实验室的测试结果。因模型中存在多个输入参数,目前尚未考虑到这些输入参数的正确性,因为输出值仅因接近实验室测试结果而被认为合理。不同输入参数组合可能导致相同的输出,且输入参数之间存在相互作用。因此,本文研究旨在隔离每个重要输入参数,研究其对模拟输出的敏感性,有助于理解近场动力学模拟模型及其输入。本次敏感性分析得出的主要结论如下:首先,FI对砂浆刚

度、砂浆裂缝能量和骨料裂缝能量变化最为敏感;其次,FE对骨料刚度最为敏感,而对骨料裂缝能量的敏感性最低;第三,CRI对砂浆刚度、砂浆裂缝能量和骨料刚度变化的敏感性最低。从统计学上看,FE、 K_{IC} 和CIR仅对骨料刚度敏感。

1 模拟模型的输入参数

图1所示各图给出了在固定其他输入参数值(厚度 $h=0.5$ mm,半径 $\delta=3$ mm,砂浆刚度=100 MN/m,砂浆裂缝能量=6 000 J/m²,骨料刚度=20 MN/m,骨料裂缝能量=20 000 J/m²)的情况下,局部损伤临界值的变化对模拟裂缝指标(FE、 K_{IC} 、FI、CRI)的影响。当局部损伤值从0.4变化到0.6时,FE、 K_{IC} 和CRI的变化较为规律,而FI的变化则较为无序。根据线性回归方程,FE和 K_{IC} 与局部损伤值呈负相关关系。相反,FI和CRI与局部损伤值呈正相关关系。

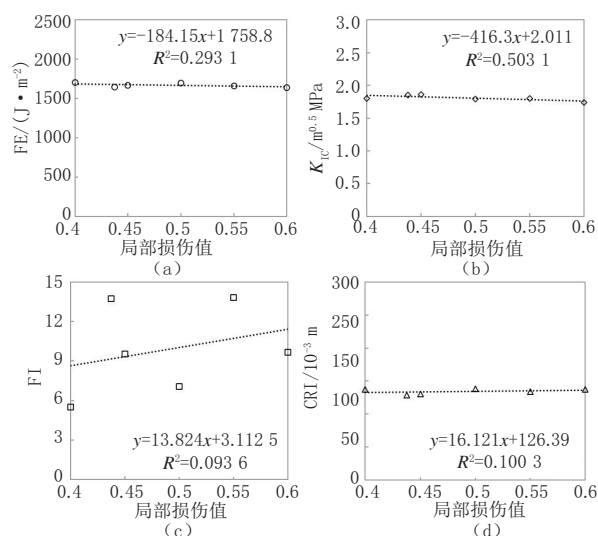


图1 局部损伤临界值对模拟断裂指标的影响

如图2所示,在固定其他输入参数值的情况下,当局部损伤值从0.4变化到0.5时,裂缝长度几乎没有变化;而当局部损伤值从0.5变化到0.6时,裂缝长度从51.9 mm减少到16.1 mm。可以推断,当局部损伤值大于0.5时,模拟裂缝长度不能反映实际裂缝的扩展情况。因此,在进行近场动力学模拟时,局部损伤值应小于0.5。

如图3所示,在固定其他输入的情况下,当厚度 h 从0.1 mm变化到0.7 mm时,FE、 K_{IC} 和CRI的变化较为规律,而FI的变化则较为无序。根据线性回归方程,FE和 K_{IC} 与局部损伤值呈正相关关系,而FI和CRI与局部损伤值呈负相关关系。

如图4所示,在固定其他输入的情况下,当半径 δ 从3dx变化到5dx时,FE、 K_{IC} 和CRI的变化较为规

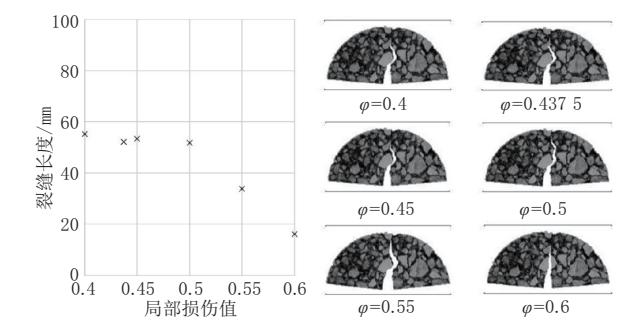


图2 局部损伤对裂缝长度的影响

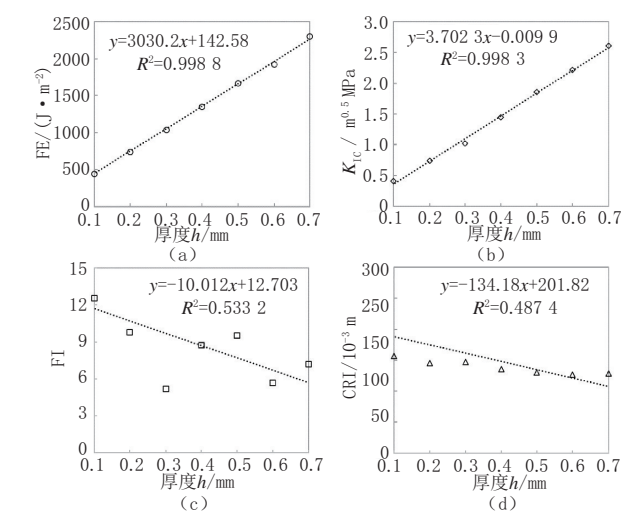


图3 厚度*h*对模拟断裂指数的影响

律,而FI的变化则较为无序。根据线性回归方程,FE、FI和CRI与局部损伤值呈负相关关系,而 K_{IC} 与局部损伤值呈正相关关系。

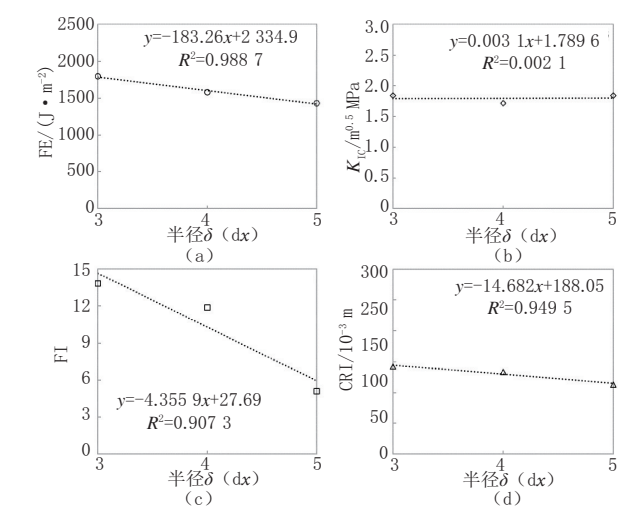


图4 半径*δ*对模拟断裂指数的影响

2 骨料和砂浆的影响研究

图5给出砂浆刚度对模拟裂缝指标的影响。当砂浆刚度从6 MN/m变化到14 MN/m时,模拟FE的百分比变化从0变为49.60%,而CRI的变化从0变为15.73%, K_{IC} 的变化从0变为29.31%。通过对砂浆刚度引起的变化幅度进行可视化观察,FE对砂浆刚度

最为敏感,而CRI对此的敏感性最低, K_{IC} 的敏感性介于两者之间。然而,FI的百分比变化未呈现出与FE、 K_{IC} 和CRI相同的趋势,FI并未因砂浆刚度的增大而单调增加,其峰值出现在砂浆刚度为12 MN/m时,而谷值出现在砂浆刚度为8 MN/m时(见表1)。

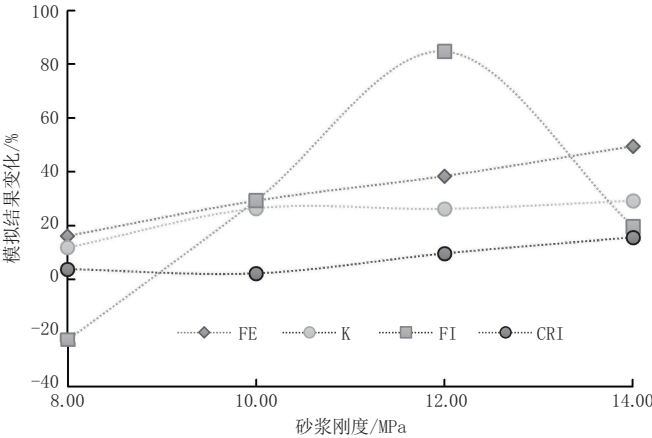


图5 砂浆刚度对模拟断裂指数的影响

表1 砂浆刚度模拟结果的百分比变化

砂浆刚度/(MN·m ⁻¹)	FE/%	K_{IC} /%	FI/%	CRI/%
6	0.00	0.00	0.00	0.00
8	16.25	11.92	1-22.46	3.90
10	29.35	26.46	29.42	2.31
12	38.51	26.26	84.78	9.74
14	49.60	29.31	19.74	15.73
平均值	26.74	18.79	31.28	6.33
排名	2	3	1	4

为了准确估计基于可视化观察的敏感性,定义了一种敏感性排序,按照模拟结果平均百分比变化的绝对值进行排序。如果某个模拟结果的平均百分比变化的绝对值最高,则相关输入被认为是最敏感的输入,反之亦然。根据这一敏感性排序的定义,敏感性的顺序(从高到低)为FI、FE、 K_{IC} 和CRI。

如图6所示,当砂浆裂缝能量从2 000 J/m²变化到10 000 J/m²时,模拟 K_{IC} 的百分比变化从0变为9.46%。然而,FE、FI和CRI的百分比变化未表现出与 K_{IC} 相同的趋势,FE、FI和CRI并未因砂浆裂缝能量的增大而单调增加。FE的峰值出现在砂浆裂缝能量为8 000 J/m²时,而谷值出现在2 000 J/m²时。FI的峰值出现在10 000 J/m²时,而谷值出现在2 000 J/m²时。CRI的峰值出现在4 000 J/m²时,而谷值出现在10 000 J/m²时。

如表2所示,砂浆裂缝能量对模拟结果的敏感性排名为FI,EF,KIC,CRI。

沥青砂浆的裂缝能量主要影响柔性指数,但对沥青混凝土的裂缝能量影响较小。这表明,沥青砂

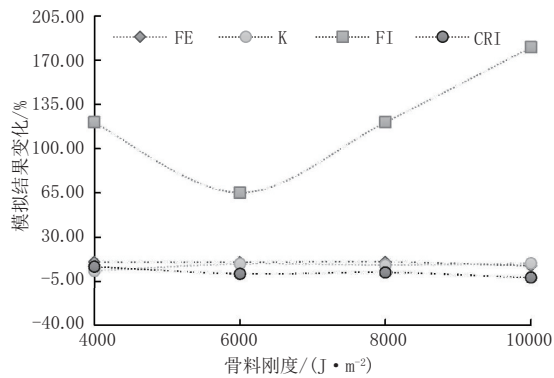


图6 砂浆断裂能对模拟断裂指数的影响

表2 砂浆断裂能模拟结果的百分比变化

砂浆断裂能/(J·m ⁻²)	FE / %	K _{IC} / %	FI / %	CRI / %
2 000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 000.00	10.45	3.33	120.79	6.80
6 000.00	10.27	8.94	65.31	1.13
8 000.00	10.57	8.06	121.03	2.24
10 000.00	7.46	9.46	180.17	-1.92
平均值	7.75	5.96	97.46	2.42
排名	2	3	1	4

浆的裂缝能量可能更多地影响裂缝的峰值行为。这一结果表明,较高的沥青砂浆裂缝能量会导致沥青混凝土更脆性的裂缝行为。

图7给出骨料刚度对模拟裂缝指标的影响。当骨料刚度从10 MN/m变化到50 MN/m时,模拟FE的百分比变化从0变为117.04%,而CRI的变化从0变为44.95%。通过对骨料刚度引起的变化幅度进行可视化观察,FE对骨料刚度更为敏感,CRI对此的敏感性较低。然而,FI和K_{IC}的百分比变化未表现出与FE和CRI相同的趋势,FI和K_{IC}未因骨料刚度的增大而单调增加。FI的峰值出现在30 MN/m时,而谷值出现在50 MN/m时。K_{IC}的峰值出现在40 MN/m时,而谷值出现在10 MN/m时。基于对骨料刚度变化幅度的可视化观察,FI对骨料刚度的敏感性较高,而K_{IC}的敏感性较低。

如表3所示,骨料刚度对模拟结果的敏感性排名

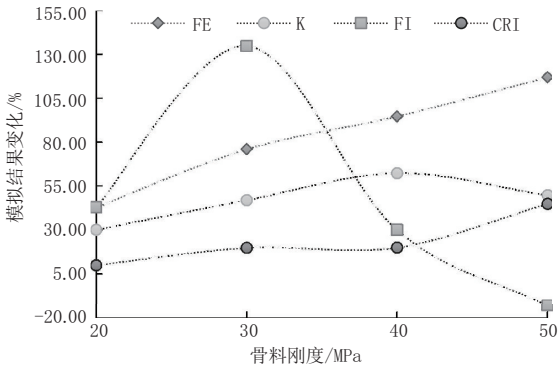


图7 骨料刚度对模拟断裂指数的影响

为FE,FI,K_{IC},CRI。

表3 骨料刚度模拟结果的百分比变化

骨料刚度/(MN·m ⁻¹)	FE/%	K _{IC} /%	FI/%	CRI/%
10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	42.86	30.10	42.97	9.90
30.00	76.02	47.04	134.89	19.81
40.00	94.75	62.41	29.94	20.01
50.00	117.04	49.86	-13.11	44.95
平均值	66.13	37.88	44.18	18.93
排名	1	3	2	4

在其他输入参数值固定(砂浆刚度=10 MN/m,砂浆裂缝能量=6 000 J/m²,骨料刚度=20 MN/m)的情况下,考虑骨料裂缝能量变量时模拟结果(FE、K_{IC}、FI、CRI)的百分比变化。

如图8所示,当骨料裂缝能量从20 J/m²变化到60 J/m²时,K_{IC}的百分比变化单调增加,从0%上升至22.51%;而模拟的CRI的百分比变化则单调下降,从0%减少至-18.30%。根据骨料裂缝能量引起的变化幅度的可视化观察,K_{IC}对骨料裂缝能量更为敏感,而CRI对此的敏感性较低。然而,FI和FE的百分比变化未表现出与K_{IC}和CRI相同的趋势,FI和FE并未随骨料裂缝能量的增大而简单地增加或减少。在骨料裂缝能量为50 J/m²时,FI达到了峰值,而在骨料裂缝能量为20 J/m²时,FI则达到了谷值。FE的峰值同样出现在骨料裂缝能量为50 J/m²时,而FE的谷值则出现在骨料刚度为30 J/m²时。基于骨料裂缝能量引起的变化幅度的可视化观察,FI对骨料裂缝能量的敏感性较高,而FE对此的敏感性较低。

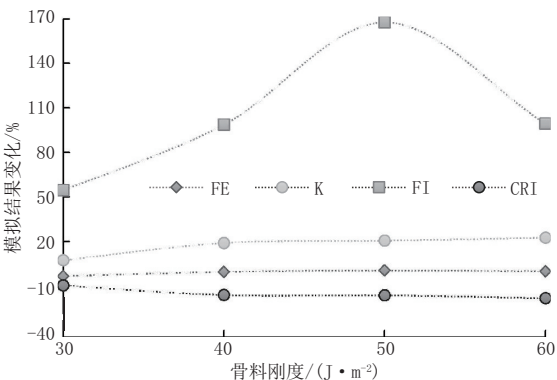


图8 集料断裂能对模拟断裂指数的影响

由表4可知,对骨料刚度的敏感性排序为FI,K_{IC},CRI,FE。

2.3 方差分析

为了检验4个模拟机理输入参数(砂浆刚度、砂浆裂缝能量、骨料刚度、骨料裂缝能量)对模拟裂缝参数(FE、K_{IC}、FI、CRI)是否具有统计显著性,进行了

95% 置信度($\alpha=0.05$)的方差分析(ANOVA)。ANOVA 结果见于表 5。结果显示 4 个 P 值低于 0.05,表明相关输入对模拟结果具有显著影响。具体而言,骨料刚度对 FE 、 K_{IC} 和 CRI 具有显著性影响。尽管 FI 被认为对所有这些输入(砂浆刚度、砂浆裂缝能量、骨料刚度、骨料裂缝能量)敏感,但 ANOVA 结果并未表明这些输入对显著影响 FI 。

表 5 方差分析结果的 P 值汇总表

骨料刚度/($MN \cdot m^{-1}$)	$FE/\%$	$K_{IC}/\%$	$FI/\%$	$CRI/\%$
10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	42.86	30.10	42.97	9.90
30.00	76.02	47.04	134.89	19.81
40.00	94.75	62.41	29.94	20.01
50.00	117.04	49.86	1-13.111	44.95
平均值	66.13	37.88	44.18	18.93
排名	1	3	2	4

3 结 论

通过半圆弯曲(SCB)实验室测试试验,将模拟结果与实验结果进行对比,并逐步调整模型输入,以更接近实验数据。研究识别了 4 个关键输入参数:砂浆刚度、砂浆裂缝能量、骨料刚度和骨料裂缝能量,并探讨了这些参数对模拟裂缝指标(FE 、 K_{IC} 、 FI 、 CRI)的影响。分析模拟结果,可以得出以下结论。

(1)抗裂柔度断裂指数(FI)是衡量材料断裂特性的关键指标。研究结果表明, FI 对砂浆刚度、砂浆裂缝能量以及骨料裂缝能量的变化表现出极高的敏感性。这意味着这些参数的微小变动均会导致 FI 的显著变化。这一发现强调了在进行材料断裂行为模拟和预测时,必须精确考虑这些参数的影响,以确保模型的准确性和可靠度。特别地,砂浆和骨料的裂缝能量对 FI 的影响尤为突出,进一步凸显了裂缝能量在评估材料断裂性能中的核心地位。

(2)细微调整会对 FE 产生显著影响。相比之下, FE 对骨料裂缝能量的敏感性相对较低。这一结果表明,在材料设计和性能评估中,应特别关注骨料刚度对断裂能的影响,以确保材料的断裂韧性符合预期要求。

(3)裂纹阻力指数(CRI)是衡量材料抵抗裂缝扩展能力的指标。研究结果表明, CRI 对砂浆刚度、砂浆裂缝能量和骨料刚度的变化相对最不敏感。这意味着这些参数的变动对 CRI 的影响有限, CRI 可能更多地受其他未研究的参数或因素支配。因此,在进

一步探究材料的裂缝抵抗性能时,需要综合考虑更多可能影响 CRI 的因素。

(4)从统计学的角度来看,断裂能(FE)、断裂韧度(K_{IC})以及裂缝相关指标主要对骨料刚度表现出显著的敏感性。这一结果表明,在利用统计方法进行材料性能预测时,应特别关注骨料刚度对这些关键指标的影响,以提高预测结果的准确性和可靠性。同时,这也为材料科学家和工程师提供了优化材料设计、提高材料性能的潜在途径。

参考文献:

[1] 田小草,韩海峰,李新伟,等.不同加载模式下沥青混凝土的断裂特性[J].建筑材料学报,2016,19(4):758-761.

[2] 李萍,刘洋,念腾,等.冻融循环条件下的沥青混合料半圆弯拉试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(1):120-124.

[3] 张东,何亮,侯曙光,等.沥青混合料断裂数值模拟进展[J].公路交通科技,2017,34(12):1-8;22.

[4] Kollmann, J, Liu P, Lu, et al. Investigation of the microstructural fracture behaviour of asphalt mixtures using the finite element method [J].Construction and Building Materials, 227, 117078.

[5] 金光来.基于扩展有限元的沥青路面疲劳开裂行为的数值研究[D].南京:东南大学,2015.

[6] 陈俊,张东,黄晓明.离散元颗粒流软件(PFC)在道路工程中的应用[J].岩土力学,2016,37(10):2944.

[7] Ren J, Sun L. Characterizing air void effect on fracture of asphalt concrete at low-temperature using discrete element method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 170:23-43.

[8] Zhang J M, Yao X H, Han F. An approach of peridynamic modeling associated with molecular dynamics for fracture simulation of particle reinforced metal matrix composites[J]. Composite Structures, 250: 112613.

[9] Giannakeas I N, Papathanasiou T K, Bahai H. Simulation of thermal shock cracking in ceramics using bond-based peridynamics and FEM [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(8): 3037-3048.

[10] Jenabidehkordi A, Abadi R, Rabczuk T. Computational modeling of meso-scale fracture in polymer matrix composites employing peridynamics[J]. Composite Structures, 2020, 253: 112740.

[11] Silling S A, Lehoucq R B. Peridynamic theory of solid mechanics[J]. Advances in applied mechanics, 2010, 44: 73-168.

[12] Kilic B. Peridynamic theory for progressive failure prediction in homogeneous and heterogeneous materials. The University of Arizona.

[13] Kilic B, Madenci E. Structural stability and failure analysis using peridynamic theory[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 44(8): 845-854.

[14] Liu W, Yan K, Li J Q, et al. Peridynamics-based simulation of semi-circular bending (SCB) testing[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121190.

[15] Yang S, Jiang , Leng Z, et al. Feasibility and performance of the Semi-circular Bending test in evaluating the low-temperature performance of asphalt mortar [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121305.