

# 非均质性对水稳碎石材料细观开裂行为影响的数值研究

董侨<sup>1</sup>,袁嘉伟<sup>2</sup>,赵晓康<sup>1</sup>,陈雪琴<sup>3</sup>

(1.东南大学 交通学院,江苏 南京 211189;2.云南省交通规划设计研究院有限公司,云南 昆明 650041;

3.南京理工大学 理学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**为了研究水泥砂浆非均质性对水泥稳定碎石(CSM)材料细观开裂行为的影响,该文基于有限元法(FEM)构建圆形骨料细观断裂模型,通过嵌入双线性内聚力模型的零厚度内聚力单元模拟材料细观开裂行为,引入Weibull分布的材料随机场表征砂浆基体和界面过渡区(ITZ)的非均质特性。基于虚拟半圆弯曲(SCB)试验模拟细观开裂过程,分析材料均质度对CSM细观开裂行为的影响。结果表明:所建立的非均质细观断裂模型能够实现对细观断裂的精确模拟,CSM材料宏观裂纹的产生经历了微裂纹萌生和快速贯通的过程,界面和孔隙缺陷是微裂纹扩展的薄弱区。CSM材料的抗裂性能随着随机场不均匀性的增大而降低,建议在实际施工过程中采取有效措施提高水泥砂浆的拌和均匀性来改善CSM材料的抗裂性能。

**关键词:**道路工程;水泥稳定碎石;有限元法;细观非均质;半圆弯曲试验

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

水泥稳定碎石(Cement-Stabilized Macadam, CSM)作为典型的半刚性基层材料在中国公路建设中得到了广泛的应用,由于抗拉强度远小于抗压强度,在以弯拉应力为主的基层环境中,长期的循环荷载作用会使基层结构出现不同程度的损伤,其中荷载裂缝为水稳基层损伤的主要形式<sup>[1-2]</sup>。面对半刚性基层结构长期存在的问题,有必要对由荷载引起的损伤开裂行为进行深入研究。CSM属于典型的准脆性材料,在外界荷载作用下容易发生准脆性断裂,主要表现为裂纹的萌生、扩展、贯通,进而导致材料失效破坏<sup>[3-4]</sup>。目前,针对CSM材料的研究以强度、抗裂和疲劳等一系列宏观性能试验为主<sup>[5-7]</sup>,绝大多数理论都建立在均匀介质假设的基础上,很少涉及材料自身的非均匀性质。但同大多数水泥基复合材料类似,在细观尺度上,CSM也可看作是一种由骨料、

砂浆、界面过渡区(Interface Transition Zone, ITZ)以及孔隙组成的非均质多相复合材料<sup>[3]</sup>;其次,在微观层次上,水泥浆体和ITZ中又包含有大量随机分布的毛细孔隙、未水化颗粒和结晶体,使得砂浆及界面的力学性能在空间分布上表现出一定的非均匀性<sup>[4]</sup>。相关研究表明:材料在宏观尺度上的性能是由其细观结构决定的,宏观开裂现象是细观尺度上损伤和裂纹扩展行为的积累<sup>[8-9]</sup>。而基于均匀介质假设的传统断裂力学研究方法,无法深入研究材料在外界荷载作用下内部微裂纹的萌生、扩展、贯通直至形成宏观裂缝导致材料失效破坏的过程,更无法研究材料细观结构特性对宏观力学性能的影响。随着材料力学的不断深入以及计算机水平和仿真技术的快速发展,人们逐渐认识到宏观性能在一定程度上是由细观结构决定的,基于细观尺度的数值模拟已成为研究复合材料损伤破坏机理的重要手段<sup>[10-12]</sup>。为了解决非均质建模的问题,国内外学者开展了大量的研究,其中应用最广泛的是基于随机场理论的参

收稿日期:2022-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51978163);江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20181279)

作者简介:董侨,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:qiaodong@seu.edu.cn

数字化建模法<sup>[13-15]</sup>,其利用网格划分将复合材料的材料属性按照一定的概率分布规律映射到模型上,便可以实现大量的随机数值模拟。曹庆坚<sup>[16]</sup>利用Weibull分布模型研究了不同分布规律的材料属性对混凝土结构细观开裂行为的影响,并验证了参数化建模法的可靠性。目前,针对非均质CSM材料的细观开裂行为的数值模拟研究还比较少,因此有必要建立非均质细观断裂模型,从细观尺度上深入探索非均质特性与CSM细观开裂行为之间的关系。

本文运用有限元法(Finite Element Method, FEM)构建CSM细观开裂的二维数值仿真模型,采用Weibull模型表征砂浆基体材料性能的随机分布,通过预先嵌入符合分离-牵引定律的零厚度四节点内聚力单元来模拟材料细观开裂行为,为了排除集料相的影响,将骨料设定为服从一定级配特征的圆形颗粒,然后基于虚拟半圆弯曲(Semicircular Bending, SCB)试验探索CSM材料的细观开裂规律,分析砂浆基体非均质性对CSM细观开裂行为的影响。

1 细观断裂模型

1.1 圆形骨料数值试件

本文通过Abaqus建立二维SCB数值试件,虚拟试件直径为150 mm,集料按照《公路水泥稳定碎石基层振动成型法施工技术规范》(DB 33/T 836—2011)规定的级配中值设定。由于数量较多的小颗粒会消耗大量的计算成本,借鉴Bandyopadhyaya等<sup>[17]</sup>的经验,将2.36 mm以下的颗粒视为水泥砂浆,仅对2.36 mm以上的骨料颗粒进行建模。粒径大于2.36 mm的骨料体积一般占试样总体积的40%~60%,本文中的骨料含量取为45%。为了排除骨料不规则形状对细观开裂产生的影响,进而实现单因素条件下研究砂浆特性与CSM细观开裂行为间的关系,统一将骨料简化为圆形颗粒,试件孔隙率设为2%<sup>[3]</sup>。圆形骨料设计级配如表1所示。

表1 水泥稳定碎石材料的级配

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
31.5	100	4.75	30
19	80	2.36	21
9.5	48		

首先采用Matlab程序按照设定级配生成圆形骨料,然后采用自定义算法按照从大到小的顺序将圆形骨料投放到SCB试件中。由于混合料中相邻骨料之间往往会存在一薄层砂浆而并非直接接触,并且在有限元数值模拟中,如果两个骨料之间的间距过小,也会导致计算成本增加,出现难以收敛的问题,因此,本文在建模过程中通过设定一缓冲区来有效控制相邻骨料之间的最小间距。生成的圆形集料数值试件如图1所示。

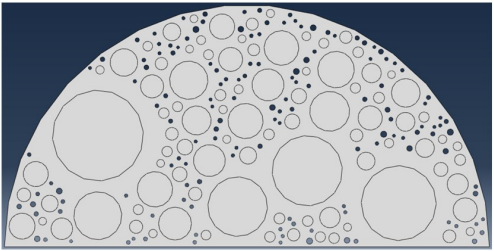


图1 圆形骨料数字试件

1.2 模型网格划分

将建立的数字试件导入有限元软件Abaqus中进行网格划分。考虑到骨料轮廓的复杂性,同时为了满足裂纹扩展的随机性,本文采用三角形实体单元CPS3行进网格划分。为了平衡模拟精度和计算成本之间的关系,选择采用2 mm的网格尺寸,网格划分结果如图2所示。最后导出inp文件,用于下一步界面相的设定。

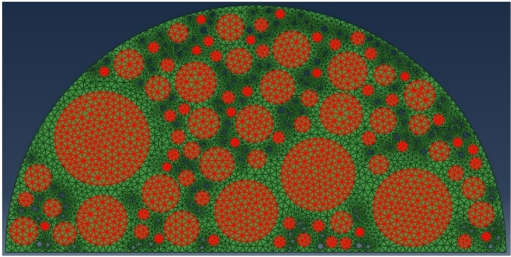


图2 网格划分(L=2.0 mm)

2 本构模型及细观参数

2.1 双线性内聚力模型

CSM材料属于典型的准脆性材料,可以采用双线性内聚力模型(Cohesive Zone Model, CZM)来模拟材料的开裂行为。内聚力模型是由Dugdale<sup>[18]</sup>与Barenblatt<sup>[19]</sup>首先提出的一种基于弹塑性断裂力学研究裂纹尖端微小塑性区的有效方法。内聚力区位于

裂纹尖端,在宏观上还未表现出裂纹的微小塑性区,通过两个假想的裂纹面来定义。CZM的本构关系是通过假想裂纹面上的内聚力与假想面之间的距离关系来定义。图3为双线性CZM本构关系,横坐标为裂纹面张开位移 $\delta$ ,纵坐标为内聚力 $t$ 。 $\delta_n^0$ 和 $\delta_s^0$ 为单元开始出现损伤的位置,称为裂纹起始点; $\delta_n^f$ 和 $\delta_s^f$ 为单元彻底失效,也即不能再承受荷载的位置,称为失效位移; $t_n^0$ 和 $t_s^0$ 为裂纹起始点所对应的应力,称为黏结强度; $K_n^0$ 和 $K_s^0$ 为材料刚度; $G_n^f$ 和 $G_s^f$ 为断裂能,是指裂纹尖端裂纹面的相对位移从0增长到失效位移时所消耗的能量,可以通过式(1)进行计算。双线性本构模型分为两个阶段:在内聚力上升段( $\delta < \delta_n^0$ 或 $\delta < \delta_s^0$ ),材料为线弹性,当内聚力达到黏结强度( $t_n^0$ 和 $t_s^0$ )后,损伤开始出现;在内聚力下降阶段( $\delta > \delta_n^f$ 或 $\delta > \delta_s^f$ ),材料表现出线性软化行为,属于材料损伤扩展阶段。

$$G = \int_0^{\delta^f} t(\delta) d\delta = \frac{1}{2} t_0 \delta_f \quad (1)$$

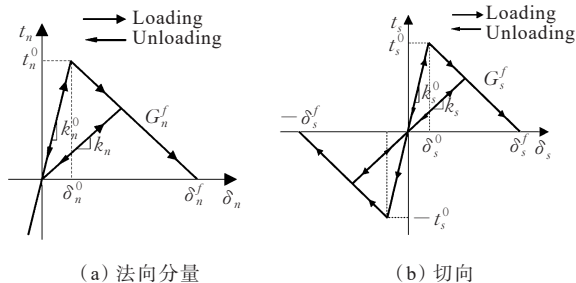


图3 双线性CZM本构关系<sup>[20-22]</sup>

损伤起始准则采用Abaqus提供的最大名义应力损伤起始准则,如式(2)所示。损伤扩展准则采用Abaqus提供的基于能量耗散的损伤扩展准则,如式(3)所示。

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} = 1 \quad (2)$$

$$\left\{ \frac{G_n}{G_n^f} \right\} + \left\{ \frac{G_s}{G_s^f} \right\} = 1 \quad (3)$$

式中: $\langle \rangle$ 为Macaulay括号。

在达到裂纹起始点后,为了表征材料的损伤水平,双线性CZM模型引入了损伤因子 $D$ ,在Abaqus输出场中对应SDEG(Scalar Stiffness Degradation),定义为:

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (4)$$

式中: $\delta_m^{\max}$ 为加载过程中最大的有效加载位移; $\delta_m^0$ 为内聚力达到黏结强度时裂纹面的相对位移,由 $\delta_n^0$ 和 $\delta_s^0$ 通过式(5)计算得到; $\delta_m^f$ 为单元失效时裂纹面的相对位移,由 $\delta_n^f$ 和 $\delta_s^f$ 通过式(5)计算得到。

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2} \quad (5)$$

显然,在双线性CZM模型的第一阶段,损伤因子 $D=0$ ,表示材料未出现损伤;第二阶段,材料开始出现损伤,最大有效加载位移 $\delta_m^{\max}$ 由 $\delta_m^0$ 过渡到 $\delta_m^f$ ,损伤因子 $D$ 由 $D=0$ 过渡到 $D=1$ ,表示材料已经失效并出现了宏观裂纹。

## 2.2 零厚度内聚力单元

内聚力单元(Cohesive Element)是有限元软件Abaqus专门为CZM模型提供的一种特殊单元,用于研究复合材料的复杂断裂行为。在Abaqus中,内聚力单元可以以零厚度的形式作为一种潜在裂缝嵌入到有限元模型内部,然后为其赋予CZM本构关系,从而实现断裂仿真。在有限元模型中,荷载作用下,当内聚力单元满足损伤起始准则便会出现损伤;当达到失效位移 $\delta_f$ ,内聚力单元便会失效,并被Abaqus自动删除,产生断裂的模拟效果。

本文采用零厚度的内聚力单元模拟ITZ,对三角形实体单元CPS3进行网格划分后,通过Matlab对inp文件中的有限元网格进行处理,实现零厚度内聚力单元的批量嵌入。由于CSM材料中骨料的强度远高于砂浆和ITZ,在发生脆性断裂的绝大部分情况中,骨料基本上不会发生断裂,可以认为开裂区主要集中在砂浆和ITZ处。因此,为了减少单元数量,节约计算成本,提高计算效率,仅在骨料-砂浆之间的ITZ和砂浆内部嵌入Cohesive单元。

内聚力单元嵌入原理如图4所示,在Abaqus中进行网格划分后得到如图4(a)所示的网格,其中01、02、03和04为4个三角形实体单元,与之对应的5个节点分别为1、2、3、4和5。由于Abaqus不允许同一个单元内存在两个相同的节点,因此为了在单元之间嵌入零厚度内聚力单元,首先对节点进行分裂,如将节点1分裂为11、12、13、14四个具有相同坐标的节点[图4(c)]。然后在每个单元之间插入内聚力单元,如在单元01和03之间插入内聚力单元001,最终得到带有零厚度内聚力单元的网格[图4(c)]。



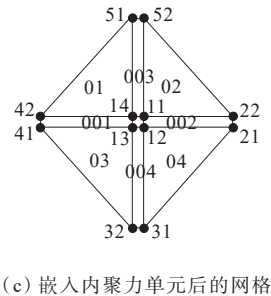
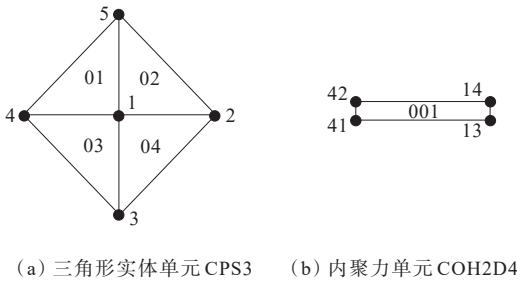


图4 零厚度内聚力单元嵌入原理

Cohesive单元批量嵌入程序如图5所示。首先遍历模型砂浆及界面开裂区所有单元的节点,记录每个节点出现的次数 $N$ ;对节点进行分裂,将每个节点分裂为 $N$ 个与原节点坐标相同的节点;然后将新生成的节

点分配给原有的三角形实体单元 CPS3;最后生成 Cohesive单元,根据新节点信息为其分配节点。

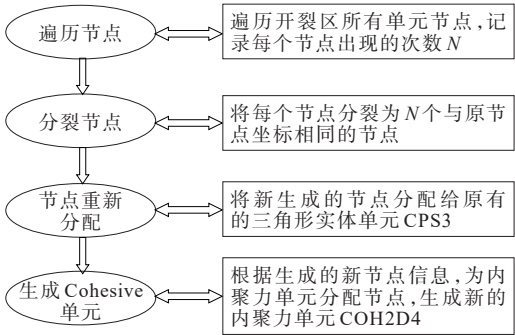


图5 Cohesive单元批量嵌入程序

2.3 模型参数

确定细观模型中骨料、砂浆和 ITZ 的力学参数是进行数值仿真的关键。本文中,骨料和砂浆被视为线弹性材料,其本构模型由模量 $E$ 决定;砂浆内部和 ITZ 的内聚力单元采用双线性本构模型,主要参数有刚度 $K$ 、黏结强度 $T$ 和断裂能 $G$ 。细观参数的获取借鉴先前研究<sup>[3]</sup>所提供的方案,最终引入的细观断裂模型的材料参数如表2所示。

表2 细观模型材料参数

材料		弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比	密度 $\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	刚度 $K/$ $(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	黏结强度 $T/\text{MPa}$	断裂能 $G/$ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
实体单元	骨料	74.6	0.2	2 500	—	—	—
	砂浆	30	0.2	2 200	—	—	—
内聚力	砂浆	—	—	2 200	82.3	0.44	1.99
单元	ITZ	—	—	2 200	41.8	0.32	1.85

3 非均质材料随机场

为了表征砂浆和 ITZ 的非均质特性,引入概率的方法表征其力学性能在空间分布上的随机性:假定砂浆和 ITZ 的力学性质在空间分布上满足某种概率统计分布。Van Mier 等<sup>[23]</sup>指出 Weibull 分布是描述混凝土材料细观结构随机特性的有效方法。因此,本文采用 Weibull 分布概率密度函数表征 CSM 材料中砂浆和 ITZ 在力学性能上的非均质特性。

3.1 Weibull 分布理论

Weibull 分布在数学上的概率密度函数和分布函数分别如式(6)、(7)所示:

$$U \sim f(u) = \frac{m}{u_0} \left( \frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{u}{u_0} \right)^m \right] \quad (6)$$

$$F(u) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{u}{u_0} \right)^m \right] \quad (7)$$

式中: $U$ 为满足 Weibull 分布的随机变量(如黏结强度、模量等细观力学参数); $F(u)$ 为非均质材料场内某点力学参数  $U < u$  的概率; $u_0$ 和 $m$ 为 Weibull 分布的两个参数。 $u_0$ 与均值 $E(U)$ 相关但却并不完全相等,二者关系见式(8); $m$ 为材料均质度,也即 Weibull 分布的形状参数,其反映了 Weibull 分布随机场的均匀化程度,当 $m$ 从小向大变化时,曲线由扁平向高窄变化,材料的细观力学参数分布趋于均匀,且更多数值位于 $u_0$ 附近,也即 $m$ 越大,材料随机场越均匀。

服从 Weibull 分布的随机变量  $U$  的均值  $E(U)$  和方差  $D(U)$  计算公式见式(8)、(9)。由此可见,可以通过  $m$  和  $u_0$  来控制  $U$  的均值和方差。

$$E(U) = u_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (8)$$

$$D(U) = u_0^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (9)$$

### 3.2 非均质细观断裂模型

基于建立的细观断裂模型,为砂浆和 ITZ 赋予材料随机场,便可得到非均质细观断裂模型,建模程序如图 6 所示。首先,以内聚力单元的 CZM 参数作为随机变量  $U$ ;以形状参数  $m$  控制材料随机场的离散程度,也即随机力学参数的均匀程度;以随机变量的均值  $E(U)$  作为该参数取定值时的取值,通过式(8)确定 Weibull 分布的另一个参数  $u_0$ 。然后通过 Matlab 程序批量嵌入 Cohesive 单元得到细观断裂模型;最后根据给定的非均质参数  $m$  和  $u_0$  生成 Weibull 分布随机数,并遍历所有的 Cohesive 单元,为其赋予

Weibull 分布随机力学参数。最后对三角形实体单元和内聚力单元赋予相应的材料属性。

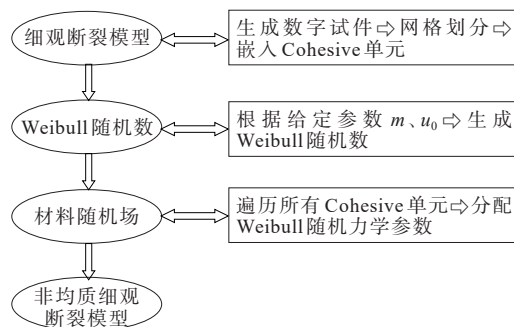
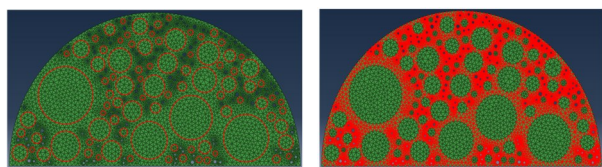


图 6 非均质细观断裂模型建模程序

本文重点研究均质度  $m$  对抗裂性能的影响,均质度  $m$  分别取为 1.5、3.0 和 6.0,内聚力单元参数的均值  $E(U)$  按表 2 取值,根据式(8)计算得到 Weibull 分布的另一个参数  $u_0$ ,结果如表 3 所示。保持模型实体单元位置不变,每一均质度下制备 3 个试样,用于平行试验。生成的细观断裂模型如图 7 所示。

表 3 基于 Weibull 分布的随机场模型参数计算结果

均质度 $m$	$\Gamma(1+1/m)$	ITZ				砂浆内部			
		T 参数		G 参数		T 参数		G 参数	
		均值/ MPa	$u_0$	均值/ (N·m <sup>-1</sup> )	$u_0$	均值/ MPa	$u_0$	均值/ (N·m <sup>-1</sup> )	$u_0$
1.5	0.902 6	0.32	0.35	1.85	2.05	0.44	0.49	1.99	2.20
3.0	0.893 0	0.32	0.36	1.85	2.07	0.44	0.49	1.99	2.23
6.0	0.927 9	0.32	0.34	1.85	1.99	0.44	0.47	1.99	2.14



(a) ITZ 的 COH2D4

(b) 砂浆内的 COH2D4

图 7 非均质细观断裂模型

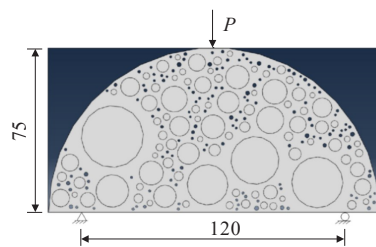


图 8 SCB 数值试件边界条件(尺寸单位:mm)

## 4 虚拟 SCB 试验

### 4.1 虚拟 SCB 试验设计

模型边界条件如图 8 所示,在顶部添加竖直向下的位移荷载,底部两个支座之间的距离为 120 mm。值得注意的是,如果在顶部直接施加一个竖直向下的位移荷载,在有限元中,荷载施加位置在几何上是

一个没有面积的点,容易使模型顶部出现应力集中,进而导致模型不收敛或顶部出现局部破碎。为了解决这一问题,本文采用耦合约束的方式(图 9)将顶部一个很小的面与上方某个点耦合起来,在这个点上施加位移荷载,使荷载通过耦合约束方式传递到模型顶部,从而避免了应力集中。底部两个支座约束也采用同样方式处理。然后,选择 Abaqus/Explicit

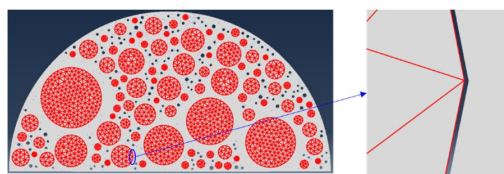
显式求解算法对半圆弯曲试验的准静态过程进行模拟,采用位移控制单调加载模式进行加载,加载速率设定为1 mm/min,直至试件断裂,并在整个加载过程中自动采集上部施加的载荷和竖向位移。最后在Visualization模块查看数值计算结果。



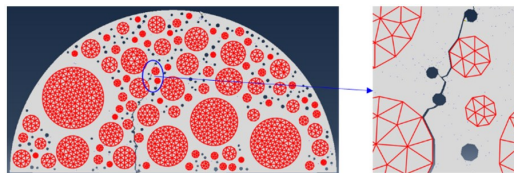
图9 边界耦合约束

## 4.2 细观开裂过程

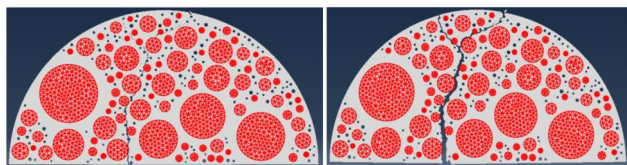
细观开裂过程如图10所示,在加载位移达到0.72 mm之前,试件几乎没有出现损伤,荷载-位移曲线呈现线性变化;当加载位移达到0.72 mm时,微裂纹首先在骨料与砂浆之间的界面过渡区ITZ处萌生[图10(a)],但此时并没有达到试件的极限承载力;当位移荷载继续增加达到0.80 mm时,试件内部产生更多微裂纹,且有相当一部分微裂纹与初始缺陷贯通[图10(b)],此时试件达到极限承载能力,荷载达到峰值;当加载位移超过0.80 mm后,裂纹迅速发展[图10(c)],荷载-位移曲线迅速下降;当加载位移达到0.88 mm时,裂纹贯穿整个试件[图10(d)],试件



(a) 加载位移 0.72 mm



(b) 加载位移 0.80 mm



(c) 加载位移为 0.82 mm

(d) 加载位移为 0.88 mm

图10 细观裂纹扩展过程

彻底失效,不能继续承受荷载。试件从裂纹开始萌生到最终失效破坏,加载位移变化仅为0.16 mm,这是由CSM这一准脆性材料的固有属性所导致。以上过程揭示了CSM材料的裂纹扩展机理:在外界荷载作用下,材料首先处于线弹性状态,不会出现损伤;当荷载增加到一定程度时,骨料-砂浆界面开始萌生微裂纹;随着荷载进一步增大,微裂纹与材料内部的初始缺陷逐渐贯通,试件达到极限承载能力,荷载达到峰值;随后裂纹迅速扩展,材料失效破坏,表现出明显的准脆性破坏特征。

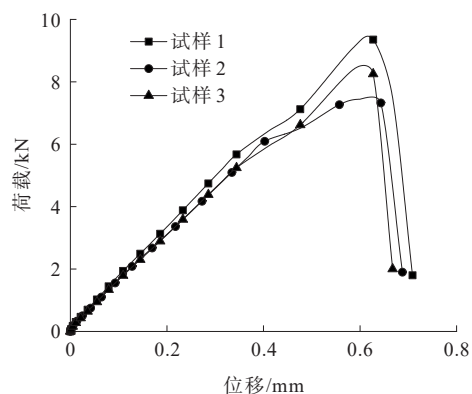
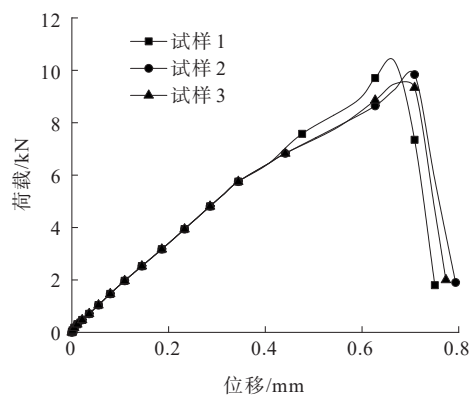
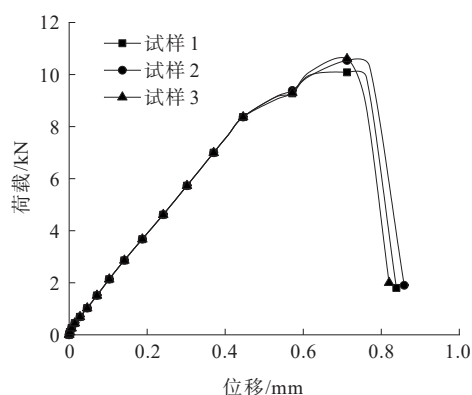
## 4.3 砂浆非均质性对细观断裂行为的影响

对构建的非均质细观模型进行虚拟断裂试验,提取荷载-位移曲线如图11所示。可以看出:在Weibull参数 $m$ 和 $u_0$ 相同的情况下,模拟结果仍然存在一定的离散性,这是因为材料参数在空间上是按照Weibull模型随机分布的,各试样间具有一定的离散性。值得注意的是,离散性主要表现在加载后期,特别是峰值荷载后的损伤演化阶段,表明当均质度相同时,随机力学参数对线弹性阶段影响较小,而对损伤演化阶段影响较大。这是因为本文仅针对黏结强度和断裂能两个参数赋予了随机场,这两个参数主要决定了材料的损伤演化机理,而在加载前期材料主要处于线弹性阶段,因此加载前期没有表现出明显的离散性。对比图11(a)、(b)和(c)可以发现,随着均质度 $m$ 值增大,模拟结果的离散性逐渐降低,这是因为 $m$ 值决定了随机场的离散程度, $m$ 值越大,材料场越均匀,模拟结果的离散性也越低。

将同一均质度的模拟结果取平均值,并与理想均匀材料进行对比,结果如图12所示,峰值荷载和达到峰值荷载时消耗的能量如图13所示。

由图12、13可以看出:随着 $m$ 值增大,峰值荷载和达到峰值荷载所消耗的能量逐渐增加,荷载-位移曲线逐渐趋近于理想均匀材料的模拟结果。这是因为当均质度 $m$ 较小时,材料随机场离散性较高,材料内部存在更多强度低的单元,在外界荷载作用下,这些“劣质”单元很容易失效破坏,导致应力集中,于是裂纹便在此萌生并扩展,使材料提前进入损伤演化阶段。因此,从提高CSM材料抗裂性能的角度出发,在施工过程中应尽可能使砂浆搅拌均匀。

基于工程中面临的水稳碎石离析的问题,结合本文的研究,可以发现,提高砂浆基体和界面过渡区

(a)  $m=1.5$ (b)  $m=3.0$ (c)  $m=6.0$ 图 11 不同均质度  $m$  下的荷载-位移曲线

的均质性,可以增强砂浆胶结材料的强度和黏结力,使水泥浆体与骨料表面接触更充分,从而减少集料颗粒在拌和、运输、摊铺过程中的自由滚动,因此也可以在一定程度上减少水稳碎石材料离析现象的发生。目前推广使用的振动拌和技术可以很好地达到这一目的,首先,在拌和过程中加入激振力,可以促使水泥颗粒分散更加均匀,有效提高水泥水化效率和凝胶产物的产生,增强水泥浆体的强度;其次,激振作用产生的振幅能量能够破坏结合料因吸水产

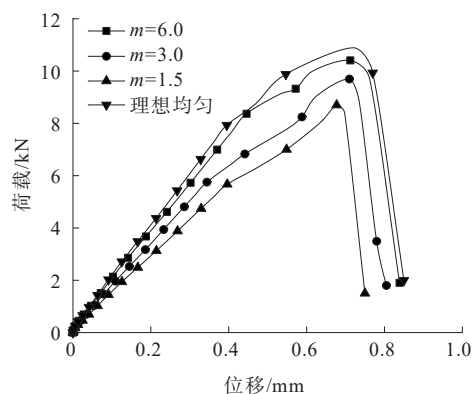
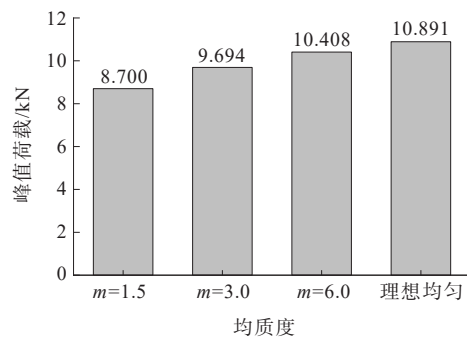
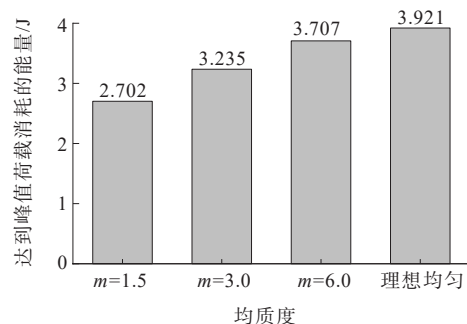


图 12 荷载-位移曲线对比



(a) 不同均质度下的峰值荷载



(b) 不同均质度下达到峰值荷载时消耗的能量

图 13 峰值荷载和达到峰值荷载时的能量消耗与均质度  $m$  之间的关系

生的水膜,使水泥浆体与骨料接触更加充分,从而使水泥浆体及界面的黏结性能提高,增强水泥稳定碎石的抗离析能力。

## 5 结论

基于随机骨料生成的二维细观有限元模型,对CSM材料的细观断裂行为进行研究,并引入随机场理论来表征砂浆基体的非均质特性,分析材料均质度对CSM细观开裂行为的影响。得出以下主要结论:

(1) 采用有限元法开发了一种基于内聚力模型



单元嵌入算法,可以有效地将 Cohesive 单元嵌入到模型内部,以实现数值试件的开裂与裂纹扩展仿真。并引入 Weibull 分布来表征砂浆和界面的非均质特性,建立了非均质细观断裂模型。

(2) 基于所构建的细观模型,通过虚拟 SCB 试验,研究 CSM 的细观开裂过程,结果表明:宏观裂纹的产生经历了微裂纹萌生和快速贯通的过程,界面和孔隙缺陷是微裂纹扩展的薄弱区,裂纹的扩展源于微裂纹的逐渐聚集与连通。模型断裂过程表现出典型的准脆性,所提出的建模方法可以很好地用于 CSM 材料的细观断裂仿真研究。

(3) 在非均质特性方面,CSM 材料的抗裂性能随着随机场不均匀性的增大(即均质度  $m$  的降低)而降低,建议在实际施工过程中采取有效措施提高水泥砂浆的拌和均匀性来改善 CSM 材料的抗裂性能。

#### 参考文献:

- [1] DONG Q A, ZHAO X K, CHEN X Q, et al. Long-term mechanical properties of in situ semi-rigid base materials[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(7): 1692-1707.
- [2] 钟勇强,黄晓明,马涛.基于室内结构试验的半刚性基层开裂数值仿真[J].北京工业大学学报,2013,39(5): 690-695,729.
- [3] CHEN X Q, YUAN J W, DONG Q, et al. Meso-scale cracking behavior of cement treated base material[J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117823.
- [4] 赵晓康,董侨,陈雪琴,等.考虑初始缺陷的水泥基复合材料细观开裂研究[J].中国公路学报,2020,33(10): 230-239.
- [5] 曾梦澜,薛子龙,谷世君,等.开级配水泥稳定碎石基层路用性能的试验研究[J].北京工业大学学报,2015,41(4):579-583.
- [6] 吕悦晶,魏彩霞,张蕾,等.基于CT图像的水泥稳定碎石环形分区损伤研究[J].中外公路,2021,41(3):269-273.
- [7] 韦金城.沥青路面半刚性基层材料与结构疲劳损伤研究[D].西安:长安大学,2014.
- [8] 张显安,周宇豪,李雪连,等.振动搅拌水泥稳定碎石的力学性能研究[J].中外公路,2021,41(4):332-336.
- [9] 金浏.细观混凝土分析模型与方法研究[D].北京:北京工业大学,2014.
- [10] 龙慧,刘义伦,李松柏.基于有限单元法的裂纹梁结构疲劳寿命预测模型[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(4):953-961.
- [11] 叶丹燕,王浩,王帅,等.粗集料形状对纤维混凝土力学性能影响的数值模拟[J].混凝土,2015(12):97-101.
- [12] 徐海滨,杜修力.基于预插黏性界面单元的混凝土细观拉伸断裂过程数值模拟[J].北京工业大学学报,2014,40(11):1666-1672,1686.
- [13] KOUTSOURELAKIS P S, DEODATIS G. Simulation of multidimensional binary random fields with application to modeling of two-phase random media[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(6): 619-631.
- [14] PUGLIA V B, KOSTESKI L E, RIERA J D, et al. Random field generation of the material properties in the lattice discrete element method[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2019, 54(4): 236-246.
- [15] GRASSL P, BAŽANT Z P. Random lattice-particle simulation of statistical size effect in quasi-brittle structures failing at crack initiation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(2): 85-92.
- [16] 曹庆坚.基于网格模型的混凝土细观结构数值模拟[D].大连:大连理工大学,2006.
- [17] BANDYOPADHYAYA R, DAS A, BASU S. Numerical simulation of mechanical behaviour of asphalt mix[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(6): 1051-1058.
- [18] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [19] BARENBLATT G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55-129.
- [20] 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.
- [21] WANG X F, ZHANG M Z, JIVKOV A P. Computational technology for analysis of 3D meso-structure effects on damage and failure of concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 80: 310-333.
- [22] ZHAO Y J, NI F J, ZHOU L, et al. Heterogeneous fracture simulation of asphalt mixture under SCB test with cohesive crack model[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(6): 1411-1422.
- [23] VAN MIER J G M, VAN VLIET M R A, WANG T K. Fracture mechanisms in particle composites: Statistical aspects in lattice type analysis[J]. Mechanics of Materials, 2002, 34(11): 705-724.