

# 混凝土路面细观开裂行为的近场动力学分析

庞拓

(中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京市 101500)

**摘要:**混凝土为现有最广泛应用的土木工程材料,其是一种准脆性材料。为解决混凝土开裂的计算分析,在近场动力学方法的基础上,结合混凝土的细观非均质特性,建立了混凝土路面细观开裂行为的计算模型。并在此基础上,同时考虑混凝土中骨料的开裂特性,探讨了骨料对混凝土路面开裂行为的影响。结果表明:基于近场动力学建立的计算模型可以很好地反映混凝土的开裂行为及损伤脆性特性,计算结果可以很好地适用于模拟混凝土路面的开裂特性;对于细观开裂模式的计算分析与试验结果吻合较好,整体曲线的发展规律与试验结果吻合较好;计入骨料的开裂可以更好地反映混凝土的开裂特征。

**关键词:**混凝土路面;典型开裂模式;近场动力学;开裂行为

## 1 前言

混凝土为现有最广泛应用的建筑材料,其是一种准脆性材料。在初始状态不可避免地会产生大量的缺陷或微裂纹,该类微裂缝、微孔隙大多来源于混凝土老化过程中的水分流失。在外部荷载作用下,混凝土中原有的缺陷或微裂缝会引发生长,并结合成更大的裂缝,进一步蔓延,导致最终的破坏。所谓裂缝网络的演化,从微裂缝的扩展、裂缝的合并、宏观裂缝的形成和扩展,到最终的破裂,是混凝土破坏过程中一个渐进的、永久的、局部性的内部变化。混凝土内微裂缝的扩展和生成是非局部的,而宏观裂缝的形成和扩展是高度局域的。解决混凝土的裂缝开裂行为是混凝土构件力学性能研究最重要的问题之一。

近场动力学作为近年来新兴的计算方法,其计算模型可以较好地适用于分析复合材料的开裂问题。该文根据近场动力学方法与混凝土细观非均质特性,结合混凝土的微弹性脆性黏结本构力函数,建立数值模拟计算模型,探讨混凝土路面的开裂行为。同时对比试验结果,研究近场动力学方法在混凝土路面开裂行为中的适用性。

## 2 近场动力学方法基本理论

### 2.1 近场动力学方法的运动方程

近场动力学利用位移函数的积分形式来构造基本运动方程。运动方程不含微分项,位移函数不要求连续,完全避免了传统连续介质力学难以处理不连续问题的困境。近场动力学将固体离散成一系列的物质点。在有限距离内,每个材料点与任何材料点之间存在相互作用。根据近场动力学,运动方程中的相互作用力函数是计算模型准确度与适用性的关键部分,其中,键基近场动力学(PD)运动方程的离散形式为:

$$\rho_k \ddot{u}_k = \sum_{j=1}^N f_{kj}(u_j, u_k, x_j, x_k, t) V_j + b_k(x, t) \quad (1)$$

式中: $u_k$ 、 $u_j$ 为节点 $k$ 、 $j$ 的位移和坐标(如图1所示); $b_k$ 为规定的体力密度场; $f_{kj}$ 为力函数; $N$ 为近场域内的节点总数; $V_j$ 为节点 $j$ 的体积; $\rho_k$ 和 $t$ 为节点 $k$ 的物质密度和时间。

### 2.2 材料的本构力函数

材料本构力函数是近场动力学模型中的关键组成部分,结合现有研究,采用键基PD模型中较为成熟的水泥等微弹性脆性黏结模型(PMB)进行该文近场动力学模型本构力函数的定义:

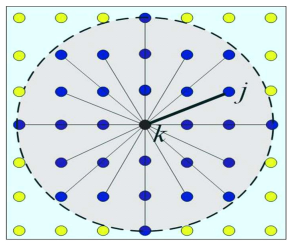


图 1 节点  $k$  近场域内节点分布

$$f(\eta, \xi) = g(\eta, \xi) \frac{\eta + \xi}{\|\eta + \xi\|} \quad (2)$$

$$g(\eta + \xi) = \begin{cases} cs(t, \eta, \xi) \mu(\eta, \xi), & \|\xi\| \leq \delta \\ 0, & \|\xi\| > \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f(\eta, \xi)$  为矢量函数, 表示单位力密度施加在点上的参考量,  $\eta, \xi$  表示参考位行上的相对位置与相对位移。恒定微模量,  $c = 18K / (\pi \delta^4)$ , 体积模量  $K = E / [3 \times (1 - 2\nu)]$ ,  $E$  为弹性模量, 泊松比  $\nu = 0.33$ ;  $s(t, \eta, \xi)$  为键的拉伸;  $\mu$  为 1 表示未断裂的键, 为 0 表示其他键。

$$s(t, \eta, \xi) = \frac{\|\eta + \xi\| - \|\xi\|}{\|\xi\|} \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为一个时间历程的函数。

$$\begin{aligned} & [1, s(t, \eta, \xi) \leq \min\{s_0(t', \eta, \xi), \\ & s_0(t', \eta', \xi')\} \\ & 0 \leq t' \leq t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(t, \eta, \xi) &= \begin{cases} s_0(t, \eta, \xi) = s_{00} - \alpha s_{\min}(t, \eta, \xi) \\ s_{\min}(t, \eta, \xi) = \min_{\xi} s(t, \eta, \xi) \\ \eta' = u(x'', t) - u(x', t), \xi' = x'' - x' \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $s_0(t, \eta, \xi)$  为一个临界拉伸;  $s_{00}$  和  $\alpha$  为与材料有关的常数。一旦拉伸  $s$  超过临界拉伸, 两个节点之间的键就会断裂。根据上述键破坏准则,  $x$  点处的损伤可表示为:

$$\varphi(x, t) = 1 - \frac{\int_H \mu(x' - x) dV'}{\int_H dV'} \quad (6)$$

为实现该破坏准则, 该文在现有本构力函数的基础上, 对材料进行二次开发以实现该模型本构力函数的构建。

### 3 混凝土开裂计算模型的数值实现

#### 3.1 近场动力学—有限元耦合计算方法

鉴于有限元计算方法的理论方法与计算适用性较广, 其可以广泛地适用于不同计算模型的计算分析。结合近场动力学研究结果, 利用 Abaqus 建立了计算

模型。为提高计算模型的计算效率, 采用近场动力学—有限元耦合计算方法建立计算模型。除跨中局部开裂位置外, 其余传递荷载部分采用有限元模型, 并耦合近场动力学—有限元计算模型。

利用 Abaqus 软件的镶嵌单元“Embedded”技术, 可以实现近场动力学(PD)和有限元(FE)子域的重叠区域中实现混合建模。如图 2 所示, “Embedded”技术可以看作是一种力耦合方法。重叠区域由有限元实体元素离散化, 重叠近场动态区域模型中的物质点被视为杆单元, 并嵌入到有限元模型中, 单元刚度通过杆单元和实体单元的叠加获得。

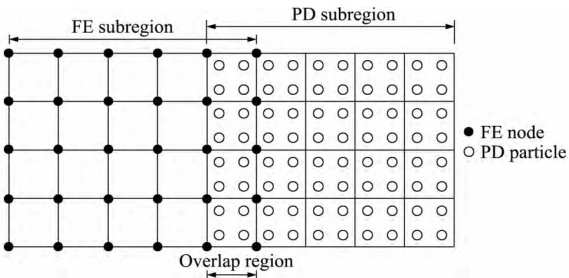


图 2 近场动力学—有限元耦合计算方法

#### 3.2 混凝土细观行为模拟

混凝土在细观尺度上能够被视为由骨料颗粒、砂浆基质以及界面过渡区组成的复合材料, 根据现有研究, 该文采用随机骨料模型来模拟混凝土的力学行为, 骨料的粒径分布来源于 Fuller 级配公式, 骨料分布采用 Monte Carlon 抽样方法。根据混凝土的微观力学行为, 在骨料周围存在界面过渡区, 根据上述描述, 最终获得混凝土的计算模型。

根据现有 I 型典型断裂行为的试验研究结果, I 型开裂混凝土试件如图 3 所示, 在混凝土跨中底部预留裂缝, 根据实际的混凝土试件结构, 建立了数值模拟计算模型, 探讨了混凝土路面的开裂行为。

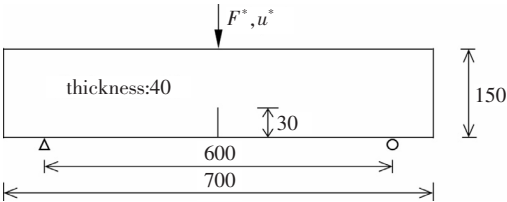


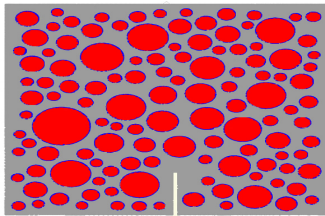
图 3 混凝土 I 型典型试件及加载方式(单位: mm)

### 4 混凝土典型开裂行为的数值模拟研究

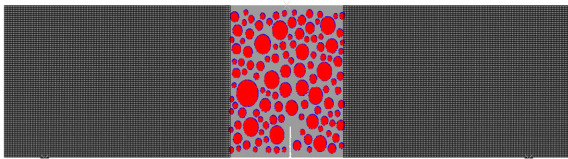
#### 4.1 计算模型

三点弯曲试验是一种典型的开裂试验方法, 可以

用来研究 I 型断裂行为。研究中,考虑了文献[13]中的三点弯曲试验研究。三点弯曲试验的试验设置如图 3 所示。试件尺寸为  $700\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ ,预留缺口长度为  $30\text{ mm}$ 。该研究建立了二维平面应力模型。为了得到合理的数值结果,均匀离散网格的尺寸为  $0.000\text{ 2 m}(\Delta x=0.000\text{ 2 m})$ 。弹性模量、泊松比、单轴抗拉强度、比断裂能和密度分别为  $E=28\text{ GPa}$ 、 $\nu=0.2$ 、 $f=2.4\text{ MPa}$ 、 $G_p=96\text{ N/m}$ 、 $\rho=2\text{ 650 kg/m}^3$ ,计算过程采用位移控制。在加载点对材料颗粒施加竖向位移增量  $\Delta u=-5\times 10^{-6}\text{ m}$ 。根据试验试件的构建立混凝土的数值模拟计算模型如图 4 所示。



(a) 近场动力学模型(局部断裂处)



(b) 整体模型(PD-FEM 耦合方法)

图 4 混凝土 I 型断裂近场动力学—有限元耦合计算模型

#### 4.2 开裂行为

计算所得混凝土的开裂模式如图 5 所示,为更好地反映该混凝土在荷载作用下的开裂行为,将计算结果的变形放大 20 倍,以便观测混凝土的开裂特性。由计算结果可得:相比均质材料,在细观非均质(骨料限制)的影响下,混凝土的裂缝分叉与试验结果更为吻合,裂缝首先在骨料前形成分叉。随后在开裂荷载的影响下,裂缝向耗散能最低的方向发展,并逐渐绕过骨料,在界面过渡区处形成裂缝,并继续向上发展。最终试件完全断裂。

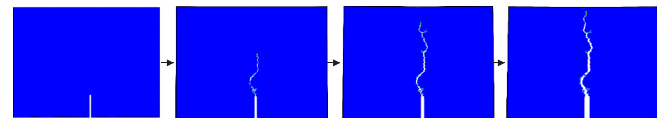
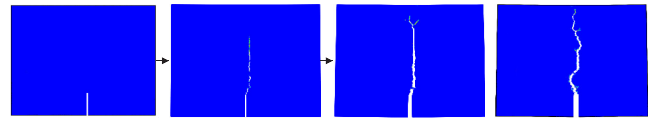


图 5 混凝土 I 型断裂行为计算结果(变形放大 20 倍)

#### 4.3 计入骨料开裂的混凝土开裂特征

计算所得混凝土的开裂模式如图 6 所示,为更好地反映该混凝土在荷载作用下的开裂行为,将计算结果的变形放大 20 倍,综合考虑骨料开裂对混凝土开裂

行为进行分析,考虑骨料开裂的混凝土试件的开裂行为相比未考虑骨料开裂的情况与试验结果吻合更好。对于实际混凝土材料,随着水化反应的进行,混凝土砂浆的强度高于骨料强度,在开裂荷载作用下,混凝土呈现“1”字形裂缝,这与混凝土 I 型断裂行为的试验研究结果更为接近。



(a) 计入骨料开裂

(b) 未计入骨料开裂

图 6 计入骨料开裂的混凝土 I 型断裂计算结果(变形放大 20 倍)

计算所得荷载—裂纹开口位移曲线如图 7 所示。由图 7 可知:计算所得的开裂荷载与试验值吻合较好,这使得计算结果的下降段与试验结果存在一定的偏差,但整体曲线的发展规律与试验结果吻合较好。基于近场动力学建立的计算模型可以很好地反映混凝土的开裂行为及损伤脆性特性,计算结果可以很好地适用于模拟混凝土路面的开裂特性。

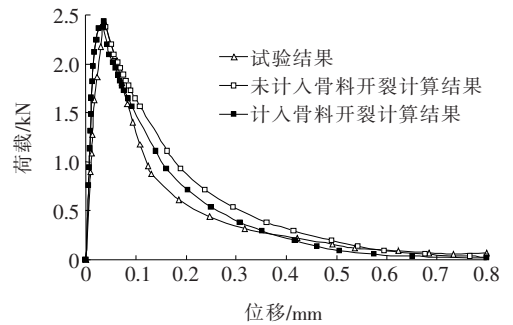


图 7 荷载—位移曲线的数值模拟与试验结果

## 5 结论

在近场动力学方法的基础上,结合混凝土的细观非均质特性,建立了混凝土路面细观开裂行为的计算模型。并在此基础上,同时考虑混凝土中骨料的开裂特性,探讨了骨料对混凝土路面开裂行为的影响。得到以下结论:

(1) 基于近场动力学建立的计算模型可以很好地反映混凝土的开裂行为及损伤脆性特性,计算结果可以很好地适用于模拟混凝土路面的开裂特性。

(2) 相比均质材料,在细观非均质(骨料限制)的影响下,混凝土的裂缝分叉与试验结果更为吻合,裂缝

首先在骨料前形成分叉。随后在开裂荷载的影响下,裂缝向耗散能最低的方向发展,并逐渐绕过骨料,在界面过渡区处形成裂缝,并继续向上发展,计算结果可以很好地反映混凝土的开裂行为。

(3) 混凝土开裂计算模型可以很好地反映混凝土的开裂行为,对于细观开裂模式的计算分析与试验结果吻合较好,整体曲线的发展规律与试验结果吻合较好,随着水化反应的进行,混凝土砂浆的强度高于骨料强度,计入骨料的开裂可以更好地反映混凝土的开裂特征。

### 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述 2013[J]. 中国公路学报, 2013(3).
- [2] 吕润华, 周游佳, 陈爽, 等. 路面快速养护技术的研究现状[J]. 中外公路, 2019(2).
- [3] 钟彪. 沥青混凝土路面预防性养护措施决策与应用[J]. 中外公路, 2018(6).
- [4] 李天一, 章青, 夏晓舟, 等. 考虑混凝土材料非均质特性的近场动力学模型[J]. 应用数学和力学, 2018(8).
- [5] 秦洪远, 黄丹, 章青. 混凝土复合型裂纹扩展的非局部近场动力学建模分析[J]. 计算力学学报, 2017(3).
- [6] 韩志腾, 秦洪远, 刘一鸣, 等. 巴西圆盘劈裂破坏的近场动力学建模与分析[J]. 计算机辅助工程, 2017(2).
- [7] 王端宜, 彭昊源. 基于声压的水泥混凝土路面板底脱空连续识别方法研究[J]. 中外公路, 2018(5).

- [8] 陈少文, 王子彬, 张晨风. 水泥混凝土路面脱空的动力有限元模拟分析[J]. 中外公路, 2017(4).
- [9] Silling S A, Askari E. A Meshfree Method Based on the Peridynamic Model of Solid Mechanics[J]. Computers & Structures, 2005, 83(17/18): 1 526—1 535.
- [10] Parks M L, Lehoucq R B, Plimpton S J, et al. Implementing Peridynamics within a Molecular Dynamics Code [J]. Computer Physics Communications, 2007, 179(11): 777—783.
- [11] Beckmann R, Mella R, Wenman M R. Mesh and Time-step Sensitivity of Fracture from Thermal Strains Using Peridynamics Implemented in Abaqus [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2013, 263: 71—80.
- [12] 章青, 郁杨天, 顾鑫. 近场动力学与有限元的混合建模方法[J]. 计算力学学报, 2016(4).
- [13] Dong W, Wu Z, Zhou X. Calculating Crack Extension Resistance of Concrete Based on a New Crack Propagation Criterion[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38: 879—889.
- [14] 刘一鸣, 黄丹, 秦洪远. 混凝土板裂纹扩展的态型近场动力学模拟[J]. 计算机辅助工程, 2016(5).
- [15] 沈峰, 章青, 黄丹, 等. 基于近场动力学理论的混凝土轴拉破坏过程模拟[J]. 计算力学学报, 2013(S1).
- [16] 郭鑫峰, 徐勋倩, 仇云强, 等. 基于应力强度因子的旧水泥路面沥青加铺层反射开裂特性研究[J]. 中外公路, 2019(2).

## 投稿须知

1. 征稿范围: 国内外公路概况; 国外公路考察见闻; 公路路线设计; 路基路面工程; 桥梁与隧道工程; 材料试验与应用; 交通工程与管理; 公路景观与环保等。

2. 稿件要求: ① 请提供 word 文档。文稿以 6 000 字左右为佳; ② 投寄本刊的稿件, 直接发至 E-mail: zhongwaigonglu@vip. 163. com(本刊唯一投稿邮箱), 本刊审稿周期 1~2 个月。若被采用, 本刊将 E-mail 通知作者。3 个月未收到通知, 作者可另行处理。请勿一稿多投, 否则后果自负; ③ 题目应简洁明晰, 字数不能多于 20 个中文字; ④ 作者单位必须注明邮政编码。第一作者须注明出生年、性别、学历、职称、研究方向、电子信箱和联系电话; ⑤ 摘要、关键词。摘要请务必按“研究目的、方法、结果、结论”四要素写。关键词: 3~8 个; ⑥ 基金项目必须写明基金项目名称和编号; ⑦ 图表。图表要与文中相对应, (示例: \* \* \* 如表 1 所示)。图表要有图名和表名。除照片外, 其余图均需提供 excel 或 origin 或 cad 源文件。表格采用三线表。所有图、表中的字体为小 5 号或 6 号; ⑧ 文后必须要有参考文献。参考文献参考格式如下: [1] 期刊: 作者姓名(列三位, 等(姓在前, 名在后)). 文章题目[J]. 刊名, 出版年份(期); [2] 专著: 作者姓名(列三位, 等). 专著名称[M]. 版本(第一版不标注). 出版地: 出版单位, 出版年; [3] 论文集: 作者姓名(列三位, 等). 题名[C]. 论文集名, 出版年; [4] 学位论文: 作者姓名. 题名[D]. 单位[硕士(博士)学位论文], 年份; [5] 专利: 专利申请者姓名(列三位, 等). 题名: 国别, 专利号[P]. 公告日期或公开日期[引用日期]; [6] 技术标准: 标准代号 标准名称[S].