

细观模型在混凝土损伤和断裂分析中的应用

兰海¹, 黎耀鑫², 贾明晓²

(1. 上海市市政工程检测中心有限公司, 上海市 200082; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 鉴于当前计算资源对实施结构精细化建模的显著约束, 提出了一种基于多尺度框架的简支梁建模策略。该策略在结构关键区域系统地实施混凝土细观建模, 开展材料在拉伸与压缩荷载作用下的力学响应数值模拟, 并构建细观混凝土简支梁模型, 以揭示其损伤萌生、扩展至贯通的演化关联机制。研究表明, 提出的多尺度模型能够精确捕捉混凝土材料内部的损伤演化过程, 并有效再现其最终的宏观断裂模式, 计算结果与物理规律呈现良好的一致性。

关键词: 多尺度建模; 混凝土细观建模; 细观混凝土简支梁

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0078-06

Application of Mesoscopic Model in Analysis on Concrete Damage and Fracture

LAN Hai¹, LI Yaoxin², JIA Mingxiao²

(1. Shanghai Municipal Engineering Testing Center Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Based on the significant constraints imposed by current computational resources on the implementation of refined structural modeling, a modeling strategy for simple-supported beams based on a multi-scale framework is proposed. In this strategy, the mesoscopic modeling of concrete within critical structural regions is systematically implemented, the numerical simulations of the mechanical response of the materials under the tensile and compressive loading is conducted, and a mesoscopic concrete simple-supported beam model is constructed to reveal the evolutionary correlation mechanism of its damage initiation, expansion and penetration. The research results demonstrate that the proposed multi-scale model can accurately capture the internal damage evolution process within the concrete material and effectively reproduce its ultimate macroscopic fracture pattern. The calculation results show a good consistency with the physical laws.

Keywords: multi-scale modeling; mesoscopic modeling of concrete; mesoscopic concrete simple-supported beam

0 引言

由于混凝土材料的非均质性, 混凝土结构的失效通常起始于关键部位的局部破坏, 混凝土材料内部损伤的累积与扩展最终导致构件整体承载能力的丧失。此外, 关键部位的局部损伤易形成结构内部显著的应力集中, 失效之前结构的主体部分可能仍处于弹性变形阶段, 而应力集中的区域则已率先进入塑性状态并加剧发展, 导致整体结构崩塌常具突发性。由于这些关键区域常被忽略, 其失效前兆通常难以察觉。因此, 深入研究混凝土材料内部损伤机制及结构关键连接节点, 特别是应力集中区域, 具

有重大意义。

在结构承受实际荷载时, 其力学行为不仅体现在宏观尺度上, 构件层次的力学表现以及材料内部的本构响应同样显著。传统有限元方法通常在宏观尺度上建立高度简化的结构模型, 导致分析结果与真实工况存在显著差异, 难以准确反映结构的实际受力状态。全模型的精细化有限元建模能够有效模拟结构损伤的真实演化过程, 然而此类高精度数值模拟往往需要耗费过量的计算时间, 效率相对低下。采用关键区域精细化建模与非关键区域宏观建模相结合的多尺度策略, 不仅能在多尺度层面上保证模型精度, 更为真实地呈现控制结构整体承载力的关键部位损伤发展机制, 同时也能显著降低单元和节点数量, 使计算时间缩短到全模型的1/2~1/3, 甚至更少。

收稿日期: 2025-07-31

作者简介: 兰海(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥梁检测与结构分析工作。

混凝土细观尺度数值建模方法最初由Wittmann^[1]确立。伴随计算技术的持续演进,该类模型已从基础二维形态扩展至复杂三维几何构型,集料形态亦由规则圆形发展为非规则多边形。当前建模体系呈现显著多元化趋势,涵盖随机力学特性模型^[2]、格构模型、随机骨料模型^[3]等多种范式。在混凝土损伤机制数值表征领域,众多学者已对细观模型的应用开展了系统性探索^[4-7]。本研究旨在基于细观尺度建模理论,对混凝土内部结构损伤演化过程实施数值模拟分析。

1 混凝土细观尺度数值模型中的材料本构关系表征

混凝土作为典型多相复合材料,其组成包含水泥基质、水化产物、粗骨料、细骨料及化学添加剂。该材料体系可概念化为粗骨料颗粒嵌锁于水泥砂浆基体(含外加剂与矿物掺合料)的复合结构。传统有限元方法常将混凝土简化为均质材料进行建模,导致数值分析结果与实际力学行为存在显著偏差。

基于细观力学原理的建模策略,将粗骨料与砂浆基体分别赋予独立本构关系,并通过界面过渡区黏结模型实现多相介质耦合。此种多尺度表征方法能够准确模拟复合非均质材料在荷载作用下的真实损伤演化机制。

1.1 粗骨料与砂浆基体本构关系表征

混凝土作为典型多相复合非均质材料,其组份力学性能存在显著差异。在混凝土结构体系中,粗骨料因具有较高抗压强度而构成主要承载体。当结构达到极限状态时,粗骨料通常保持结构完整性,其本构行为普遍采用线弹性模型表征[见图1(a)]。相较而言,砂浆基体主要承担胶结功能,其强度参数相对较低。在结构破坏过程中,该组分呈现渐进式塑性发展特征。数值模拟中需要采用包含双折线硬化准则的弹塑性本构关系进行描述[见图1(b)]。

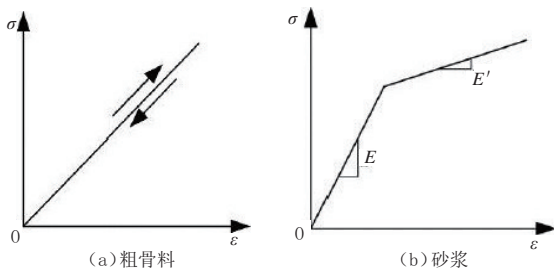


图1 粗骨料和砂浆的基本本构关系

1.2 黏结界面本构模型表征

黏结界面的力学行为采用黏聚力模型进行数值表征。该模型基于连续介质力学框架,通过表征接触力与表面张力建立理论体系,为模拟混凝土集料间相互作用提供数学描述基础。黏聚力模型对解析复合材料细观力学响应具有关键意义,可预测集料在扭转载荷、压缩应力及剪切变形耦合作用下的强度特性与变形响应,同时为评估材料耐久性能及结构可靠性提供量化依据^[8]。本构框架中引入牵引-分离准则,该准则作为工程力学中模拟渐进式损伤的方法,其理论基础在于材料应力集中诱发的累积破坏机制。该准则将损伤过程抽象化为材料内部承载纤维(表征强度属性)在力学载荷作用下的渐进失效过程。

牵引-分离准则的损伤演化机制以损伤指数为理论基础。该无量纲参数定义为当前材料强度与初始强度的比值,其值域严格限定于[0,1]区间。当参数趋近于零值时,表征材料达到完全失效状态。该变量的演化规律由当前应力状态、应变历史及材料本构特性共同决定。损伤指数的更新通过实验标定的损伤函数实现,此类函数精确描述特定应力-应变路径下材料损伤程度的量化演变过程。在工程实践中,双线性牵引-分离曲线、多项式牵引-分离曲线、梯形牵引-分离曲线构成3种典型牵引-分离本构响应曲线。

本研究采用双线性牵引-分离模型来表征混凝土细观尺度黏聚力单元的本构响应。单元理论厚度设定为零值,实际几何厚度 T_0 设定为0.01。所构建的三维数值模型中,包含法向和第一、第二剪切方向3个分量,其数学表述如式(1)所示。

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}, \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0} \quad (1)$$

式中: ε_n 、 ε_s 、 ε_t 分别为法向和第一、第二剪切方向应变; δ_n 、 δ_s 、 δ_t 分别为法向和第一、第二剪切方向位移。

相对应的名义牵引力应力的表示见式(2)。

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{sn} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{tn} & E_{ts} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = E\varepsilon \quad (2)$$

式中: t_n 、 t_s 、 t_t 分别为法向和第一、第二剪切方向的牵引力。

黏聚力模型的损伤判定则依照平方和损伤准则,见式(3)。

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

式中: t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 分别为极限法向和第一、第二剪切方向牵引力。

黏聚力模型的损伤演化基于能量的幂法准则,如式(4)所示。

$$\left\{ \frac{G_n}{G_n^c} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_s}{G_s^c} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_t}{G_t^c} \right\}^\alpha = 1 \quad (4)$$

式中: G_n 、 G_s 、 G_t 分别为法向和第一、第二剪切方向的能量; G_n^c 、 G_s^c 、 G_t^c 分别为法向和第一、第二剪切方向在混凝土细观模型内部黏聚力单元失效时的能量。

在黏聚力模型当中,位于软化阶段的名义牵引应力如式(5)所示。

$$\begin{aligned} t_n &= \begin{cases} (1-D)\bar{t}_n, & \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n, & \text{其他(无损伤时)} \end{cases} \\ t_s &= (1-D)\bar{t}_s \\ t_t &= (1-D)\bar{t}_t \end{aligned} \quad (5)$$

式中: D 为损伤变量。

在描述损伤演化的过程中,有效位移 δ_m 的表达见式(6)。

$$\delta_m = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (6)$$

式中: δ_m 为有效位移; δ_n 、 δ_s 、 δ_t 分别为法向和第一、第二剪切方向的位移。

采用线性软化方式描述的黏聚力模型,其损伤变量 D 的表达如式(7)所示。

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (7)$$

式中: $\delta_m^{\max}$ 为在整个细观模型模拟过程中的最大有效位移; δ_m^f 为混凝土细观模型在完全失效时的有效位移; δ_m^0 为相对损伤开始时的有效位移。

蒙特卡罗方法为模拟三维混凝土细观结构中骨料的空间配置提供了数值实现途径。该方法通过概率算法在计算域内实现骨料的随机分布,构建多相复合材料几何模型。

为表征细观尺度损伤演化机制,在砂浆基质界面-砂浆基质界面和骨料-砂浆基质界面中嵌入黏聚力单元(见图2)。此类单元的力学行为采用双线性牵引-分离曲线进行量化表征。

2 立方体试件单轴抗拉压数值模拟

2.1 数值模型构建

依据富勒级配理论,建立了两个 150 mm 边长的混凝土立方体数值试件模型。各模型均嵌入两种粒

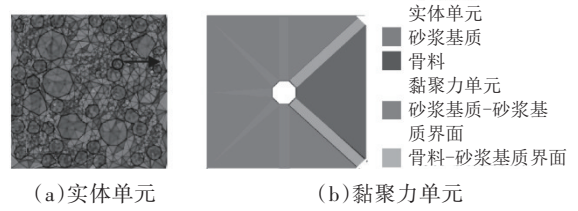


图2 黏聚力单元插入示意图

径等级(15 mm 与 30 mm)的球形骨料。模型一骨料体积分数为 37%,模型二提升至 41%。骨料参数详见表 1。

表1 两个模型的混凝土骨料参数

模型	骨料	小石	中石
模型一	直径/mm	15	30
	数量/个	420	37
模型二	直径/mm	15	30
	数量/个	420	45

在 ABAQUS 中生成的混凝土细观模型如图 3 所示,插入黏聚力单元后见图 4。

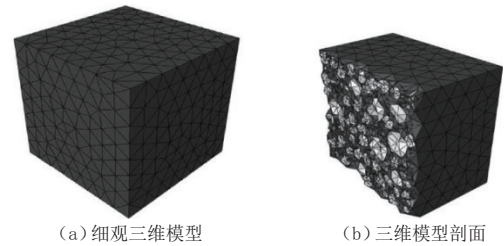


图3 混凝土细观三维模型

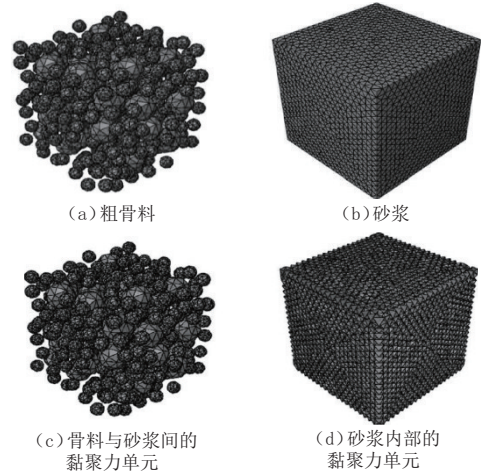


图4 插入黏聚力单元后的混凝土细观模型

在 ABAQUS 中通过再现单轴拉伸与压缩试验的整个过程,模拟混凝土损伤演化过程。拉伸工况下,立方体试件上表面施加轴向位移载荷,下表面施加完全位移约束;压缩工况中,试件上下端面设置刚性加载板,通过控制刚性加载板的位移实现压缩加载。其边界条件配置见图 5。

混凝土作为典型三相复合材料,由砂浆基体、粗骨料及界面过渡区构成。尽管各组分材料可视为均

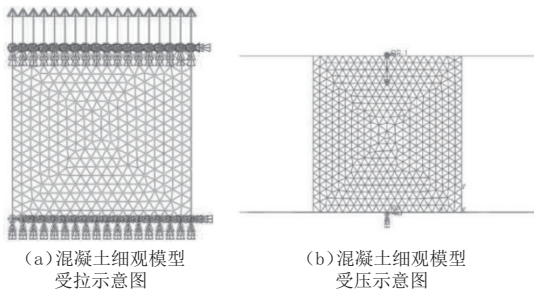


图5 混凝土细观模型加载示意图

质介质,但其复合体系却呈现显著非均匀特性。本研究采用以下本构策略:粗骨料赋予线弹性模型,砂浆基体采用弹塑性本构关系,骨料-砂浆界面过渡区通过双线性黏聚力准则表征。单轴拉伸模拟中,基于最大主应力准则判定损伤萌生,并采用基于能量的线性软化损伤模型描述黏聚力单元损伤演化。各类材料力学参数均基于文献[10]试验数据标定,具体数值详见表2所列。

表2 混凝土模型材料参数

材料参数	混凝土	骨料	砂浆基质	界面
弹性模量/GPa	36.1	47.2	29.2	20.4
泊松比	0.2	0.2	0.2	0.2
质量密度/(kg·m ⁻³)	2 400	2 700	2 100	2 000
抗拉强度/MPa	4.0	10.0	4.4	1.6
抗压强度/MPa	51.8	100.0	44.0	16.0
断裂能/(N·m ⁻¹)	198	200	40	20
损伤演化速率α	—	—	7.5	7.5

2.2 拉伸模拟结果

混凝土试件拉伸破坏演化过程如图6所示。初始阶段,细观模型内出现微裂纹;随着荷载持续增加,裂纹沿骨料界面渐进式扩展并贯穿基体;最终,损伤路径环绕粗骨料发展,导致结构整体失效。该过程揭示:混凝土破坏源于内部初始缺陷,在荷载作用下沿骨料-砂浆界面扩展。由于粗骨料强度显著高于混凝土,损伤路径绕行骨料颗粒而非贯穿,证实界面过渡区为力学薄弱区域。此现象为混凝土强度机理研究提供了重要依据。由此可见,粗骨料的存在使细观模型裂纹扩展路径显著区别于均质材料,呈现非连续多向性特征。单条主裂纹可衍生多重分支结构,真实再现实际混凝土的破坏模式。

两个模型的拉伸应力-应变响应如图7所示,其曲线形态符合工程试验典型特征。模型峰值拉应力分别为 3.88 MPa 与 3.62 MPa。文献[10]表明:骨料体积分数 40% 混凝土的抗拉强度范围为 2.88~4.32 MPa,验证了本模型对混凝土拉伸损伤机理模拟的有效性。数值试验揭示:同尺寸试件中,骨料体积

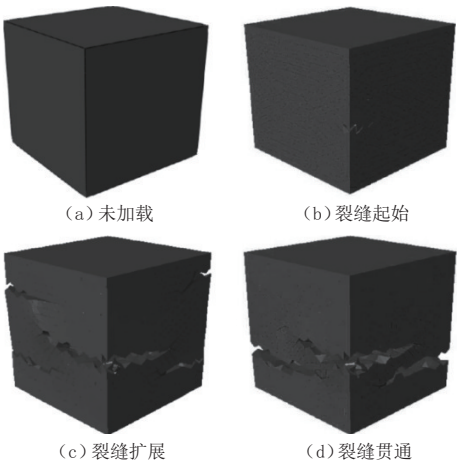


图6 混凝土试件单轴拉伸破坏过程

分数的增加导致断裂萌生位置向试件端部偏移。其机理在于骨料增量提升试件中部抗拉强度,而端部区域骨料分布密度较低,从而形成力学薄弱区。该现象证实骨料空间分布对混凝土抗拉性能具有显著调控作用。

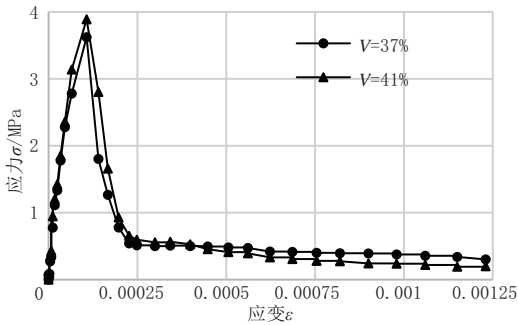


图7 两个模型的混凝土单轴拉伸应力-应变曲线

2.3 受压模拟结果

如图8所示,混凝土压缩损伤演化过程呈现显著复杂性。初始阶段,试件表面形成随机分布的微裂纹群,其几何特征与空间取向呈非规律性。随着荷载持续增长,部分裂纹沿骨料-砂浆界面扩展,模型内部形成密集裂缝网络。此阶段结构虽呈现临近失稳状态,但骨料与未损伤区域仍维持承载功能。最终阶段结构整体失效,试件离散为碎屑状破坏形态,骨料大量脱离基体。该过程表明:压缩破坏模式区别于拉伸破坏的单一主裂纹特征,表现为多裂纹协同演化机制。表面裂纹与骨料界面裂纹共同发展,削弱骨料承载效能,最终诱发多尺度损伤贯穿。

两个模型的压缩应力-应变响应如图9所示。初始低应力区段呈现近似线性关系,表征材料处于弹性变形阶段。荷载持续增加至峰值强度后,曲线开始下降,最终渐进至稳定平台。实测峰值应力分别为 46.9 MPa 与 41.3 MPa,其中体积分数 41% 试件

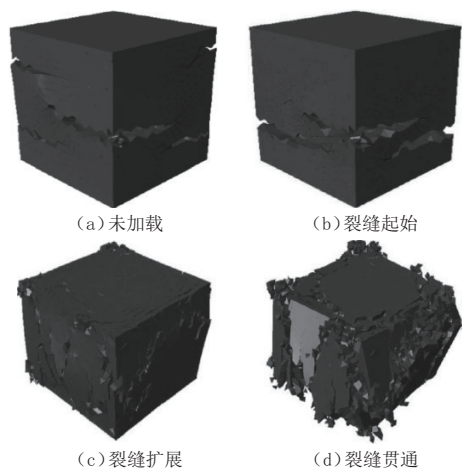


图8 混凝土试件单轴压缩破坏过程

的抗压强度与文献[11]中C50混凝土抗压强度49.7 MPa的偏差率为5.6%,验证了数值模型对混凝土压缩破坏机理表征的有效性。

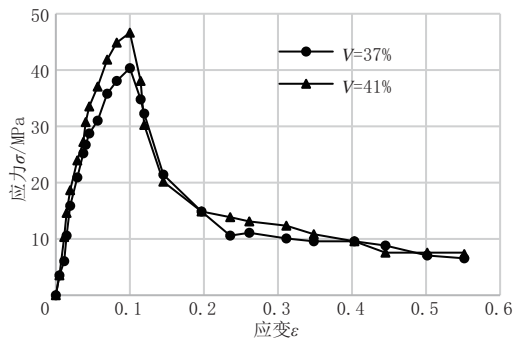


图9 两个模型的混凝土单轴压缩应力-应变曲线

3 混凝土梁多尺度建模及损伤演化数值模拟

3.1 数值模型构建

本文基于Bazant^[12]的混凝土梁三点弯曲模拟研究,建立多尺度混凝土简支梁数值模型。该模型截面尺寸为200 mm×200 mm,跨度为900 mm。三点弯曲模拟中,跨中潜在开裂区域(即关键区域)采用细观尺度三维复合材料模型,其余区域赋予宏观均质本构属性。为进行对比分析,同步建立含初始裂缝的均质混凝土梁参照模型^[13],旨在探究多尺度与均质模型力学响应的本质差异(见图10)。

3.2 数值结果分析

荷载-位移响应曲线如图11所示。梁1的刚体参考点峰值荷载为8.75 kN,对应位移0.074 52 mm;梁2的刚体参考点峰值荷载达14.88 kN,位移响应为0.058 mm。

基于最大正应力的计算公式得梁1的最大应力 $\sigma_{1\max}=3.81$ MPa。与文献[14]中得到的最大拉应力4.04 MPa对比,相对偏差为5.69%。梁2最大应力 $\sigma_{2\max}=$

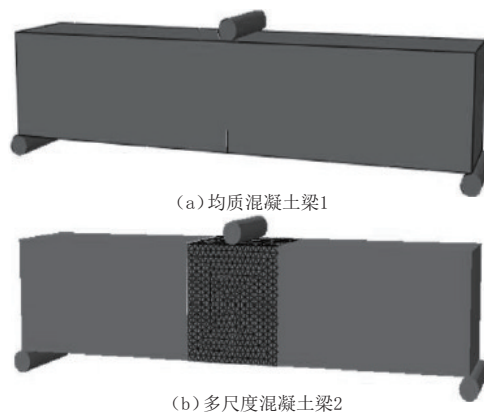


图10 三点弯曲混凝土梁试验示意图

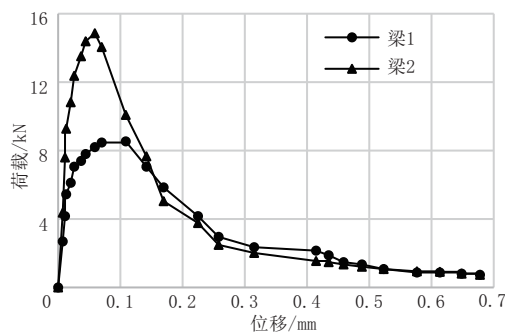


图11 两种混凝土梁的荷载-位移曲线

3.88 MPa,与参考文献数据误差为3.96%。两个模型计算误差均在工程允许范围内,验证了数值方法的可靠性。

梁1与梁2各阶段的三点弯曲应力云图比较见表3。

梁1呈现理想化均匀应力分布,裂纹呈线性垂直扩展,反映理想材料破坏模式,与实际混凝土损伤行为存在显著偏差。

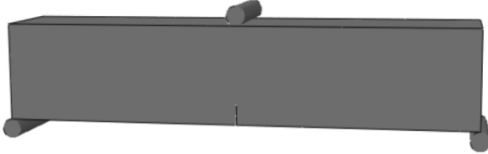
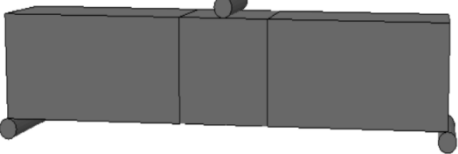
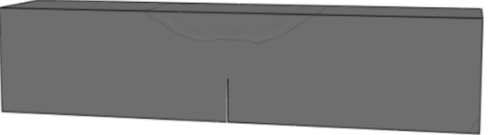
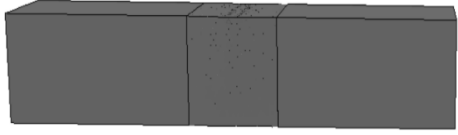
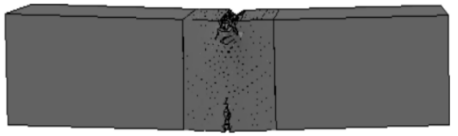
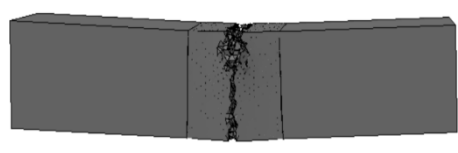
梁2展现复杂损伤演化特征:初始损伤发生于加载点附近,随后裂纹沿非连续路径向上分叉扩展。此现象源于骨料界面过渡区的力学弱化效应——裂纹绕行骨料颗粒至砂浆基体中曲折延伸。相较于梁1的理想路径,梁2的裂纹扩展模式更符合实际混凝土破坏机理,清晰呈现骨料引起的裂纹偏转效应。

4 结论

(1)引入黏聚力模型表征混凝土损伤演化机制,使细观模型能够有效模拟荷载作用下的渐进开裂行为。相较于传统有限元方法,该方法显著提升了破坏模式模拟的物理真实性。

(2)基于三维细观立方体模型的单轴拉压数值试验,模拟所得强度参数与文献试验数据高度吻合,验证了该模型对混凝土拉压力学行为表征的有效性。

表 3 两种混凝土梁的裂纹扩展示意图比较表

	梁 1	梁 2
未加载		
裂缝起始		
裂缝扩展		
裂缝贯通		

(3)通过对比均质与多尺度细观混凝土简支梁的三点弯曲响应,证实多尺度模型能更精确再现混凝土梁的破坏模式。

(4)通过对混凝土结构关键区域的局部精细化建模,在保证工程应用精度的同时,减少了结构整体精细化建模的复杂程度及对计算资源的需求,具有更广泛的应用场景。

参考文献:

[1] Zaitsev Y B, Wittmann F H. Simulation of crack propagation and failure of concrete[J]. Materials & Structures, 1981, 14(5): 357-365.

[2] Mohamed A R, Will Hansen. Micromechanical Modeling of Concrete Response under Static Loading-Part 1: Model Development and Validation [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(2):706-709.

[3] Lubliner J, Oliver J, Oller S, Oñate E. A plastic-damage model for concrete[J].International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.

[4] 赵吉坤.混凝土四相复合模型的三维细观破坏模拟[J].土木建筑与环境工程,2009,31(4):37-43.

[5] 唐欣薇,张楚汉.基于改进随机骨料模型的混凝土细观断裂模拟[J].清华大学学报(自然科学版),2008(3):348-351.

[6] Zhang Y, Xiong X Y, Mohamed Elobaid Musa Moneef, et al. Analysis of

a compressive strength model for FRP-confined damaged concrete columns based on the Drucker-Prager yield criterion[J]. Structural Concrete, 2022, 23(6): 3467-3482.

[7] 崔凤坤,朱谊彪,杜朋,等.钢管混凝土系杆拱桥拱脚一致多尺度建模及分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(2):211-217.

[8] 董默闻.考虑粘聚力分布形式的断裂模型[J].四川建材,2019,45(12):9-10.

[9] Trawinski W, Tejchman J, Bobinski J. A three-dimensional meso-scale modeling of concrete fracture, based on cohesive elements and X-ray uCT images[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 189:81-102.

[10] 刘强.基于随机骨料模型的混凝土细观损伤与宏观强度研究[D].北京:北京工业大学,2005.

[11] Kasım MERMERDAŞ, İPEK Süleyman, Muhammet Burak BOZGEYİK. Experimental evaluation and modeling of the compressive strength of concretes with various strength classes of cements[J]. Cumhuriyet Science Journal, 2020, 41(2): 482-492.

[12] Bazant Z P . Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics. ASCE, 1990, 116(8): 1686-1705.

[13] 胡少伟,鲁文妍.基于XFEM的混凝三点弯曲梁开裂数值模拟研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(4):48-51.

[14] Trawiński W, Bobiński J, Tejchman J. Two-dimensional simulations of concrete fracture at aggregate level with cohesive elements based on X-ray μ CT images[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 168: 204-226.