DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.020　　文章编号：2097-583X(2026)04-0663-06

不同缝高比下高延性水泥基复合材料Ⅰ-Ⅱ复合型断裂性能模拟研究

巩妮娜[1,2]，李乾坤[1*]，翟剑峰[3]，周　莹[4]

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院，江苏 连云港 222005；
2. 南京工程学院 管理工程学院，江苏 南京 211167；
3. 华设设计集团股份有限公司，江苏 南京 210008；
4. 南京航空航天大学金城学院，江苏 南京 211156)

摘　要：为探究缝高比影响下高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composites，ECC)Ⅰ-Ⅱ复合型断裂性能演化规律，依托ABAQUS分析平台，结合损伤塑性模型(concrete damage plasticity，CDP)与单元删除技术，建立ECC三点弯曲梁数值模型，通过对比模拟与试验所得荷载-裂缝张开位移曲线、裂缝扩展路径等，验证了模拟的有效性。选取4种初始缝高比分别为0.1、0.2、0.3、0.4的试件，建立有限元分析模型，从破坏形态、荷载特征、断裂韧度等维度分析缝高比对Ⅰ-Ⅱ复合型断裂性能的影响。结果表明：试件从预制裂尖起裂，后向试件上表面偏转延伸，最终形成明显偏斜的Ⅰ-Ⅱ复合型贯通裂缝，但并未到达加载点；随着初始缝高比的增大，起裂荷载、失稳荷载及断裂韧度逐步降低；模拟过程可体现Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝扩展过程的3个阶段。

关键词：高延性水泥基复合材料；Ⅰ-Ⅱ复合型断裂；单元删除法；断裂性能

中图分类号：TV331　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

Study on simulation of mixed-mode Ⅰ-Ⅱ fracture behavior of engineered cementitious composites with different notch-depth ratios

Gong Ni'na[1,2], Li Qiankun[1*], Zhai Jianfeng[3], Zhou Ying[4]

(1. College of Civil, Harbor and Coastal Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;
2. Institute of Civil Engineering and Intelligent Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
3. China Design Group Company Limited, Nanjing 210008, China;
4. Nanhang Jincheng College, Nanjing 211156, China)

Abstract: In order to explore the evolution law of mixed-mode Ⅰ-Ⅱ fracture properties of engineered cementitious composites (ECC) under the influence of notch-depth ratio, a numerical model of three-point bending ECC beams was established based on the ABAQUS analysis platform, combined with the concrete damage plasticity (CDP) model and element deletion technique. The validity of the simulation was verified by comparing the load-crack opening displacement curves and crack propagation paths obtained from both simulation and experimental results. Four specimens with different initial notch-depth ratios of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 were selected to establish the finite element analysis model. The influence of the notch-depth ratio on the mixed-mode Ⅰ-Ⅱ fracture properties was systematically analyzed from the aspects such as failure mode, load characteristics, and fracture toughness. The results showed that the specimen cracked from the pre-fabricated notch tip, then extended towards the upper surface

收稿日期：2026-06-04；**修回日期：**2026-06-12；*.**通信联系人，**E-mail：2692306351@qq.com

基金项目：国家自然科学基金项目(52101313)；南京工程学院科研启动基金项目(YKJ202322)

作者简介：巩妮娜(1981—)，女，陕西铜川人，副教授，博士，硕士生导师，主要从事高性能水泥基复合材料、混凝土损伤断裂方面的研究。

引用格式：巩妮娜，李乾坤，翟剑峰，等.不同缝高比下高延性水泥基复合材料Ⅰ-Ⅱ复合型断裂性能模拟研究[J].信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：663-668.

Gong Ni'na, Li Qiankun, Zhai Jianfeng, et al. Study on simulation of mixed-mode Ⅰ-Ⅱ fracture behavior of engineered cementitious composites with different notch-depth ratios[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(4):663-668.

of the specimen and finally formed a significantly deviated mixed-mode Ⅰ-Ⅱ through crack, but it did not reach the loading point. As the initial notch-depth ratio increased, the initial load, unstable load and toughness gradually decreased. The simulation process can reflect the three-stage propagation process of the mixed-mode Ⅰ-Ⅱ fracture.

Key words: engineered cementitious composites (ECC); mixed-mode Ⅰ-Ⅱ fracture; element deletion method; fracture properties

0　引言

高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)凭借高延性、多缝开裂与应变硬化等特性[1],具有高耗能、抗震、防腐蚀等优势,可用于水工防渗工程、抗震结构关键部位(如梁柱等),在沿海地区氯盐侵蚀等恶劣服役环境中,还可用于构筑物的修复及加固。由于结构、荷载的不对称性以及材料各向异性等原因,实际工程结构中的裂缝通常处于复杂应力场中,裂缝的扩展不再是单纯的Ⅰ型或Ⅱ型,其中Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝是出现最广泛、需要重点研究的断裂形式。缝高比作为控制初始缺陷特征的关键几何参数,直接决定裂缝扩展路径、破坏形态与断裂参数演化规律。然而,ECC细观组分复杂、纤维-基体协同作用机制特殊,各类初始条件对其断裂性能的影响难以全部通过常规试验完成,依托数值模拟开展精细化研究能够有效弥补这一不足。

随着计算力学和计算机技术的飞速发展,数值模拟已成为与理论分析和试验研究并重的第三种科学研究范式,在材料与结构力学性能研究中发挥着不可替代的作用。已有研究通过ABAQUS对比弹簧单元、连接器单元与面-面接触算法,证实弹簧单元法在模拟界面滑移行为时精度更高、收敛性更稳定,可为水泥基复合材料界面力学行为研究提供可靠的数值分析方法[2]。在材料科学领域,数值模拟可复现试验现象、细观揭示材料损伤与断裂机理,ABAQUS凭借优异的非线性求解与本构能力,成为研究水泥基复合材料力学行为的重要工具,尤其适用于ECC这类非均匀、高非线性材料,可系统建立细观结构与宏观性能的关联[3-4]。在大型混凝土结构动力响应领域,三维比例边界有限元法凭借网格依赖性低、接触模拟精度高等优势,有效解决了高拱坝横缝开合及地震响应模拟的传统难题,拓展了非线性数值方法在水工结构中的应用范围[5]。工程结构数值模拟过程中采用混凝土损伤塑性(concrete damage plasticity, CDP)模型[6-7],可综合描述受拉软化、受压强化及刚度恢复等力学行为。

现有研究多聚焦ECC纯Ⅰ型断裂行为,对Ⅰ-Ⅱ复合型断裂的裂缝扩展规律、破坏形态转变及初始条件影响机制尚不明确,缺少缝高比对裂缝偏转、断裂参数影响的定量模拟研究。同时,传统CDP模型无法实现损伤单元实时删除,难以直观反映裂缝贯通与结构渐进破坏过程。

鉴于此,本文采用单元删除技术,建立ECC三点弯曲梁数值模型,系统研究不同缝高比试件Ⅰ-Ⅱ复合型断裂发展全过程,为高延性水泥基复合材料断裂性能评估与工程应用提供理论依据与数据支撑。

1　理论与方法

1.1　拉伸和压缩行为

目前关于材料损伤演化规律已有较多成果[8],采用文献[9]改进的损伤模型开展分析,见式(1)。

$$\begin{cases} d_{\mathrm{t}}=1-\sqrt{\dfrac{\sigma_{\mathrm{t}}}{E_0\left(\varepsilon_{\mathrm{t}}-\beta_{\mathrm{t}}\varepsilon_{\mathrm{t}}^{\mathrm{ck}}\right)}}, \\ d_{\mathrm{c}}=1-\sqrt{\dfrac{\sigma_{\mathrm{c}}}{E_0\left(\varepsilon_{\mathrm{c}}-\beta_{\mathrm{c}}\varepsilon_{\mathrm{c}}^{\mathrm{in}}\right)}}, \end{cases} \tag{1}$$

式中:d_{c}和d_{t}分别为压缩损伤和拉伸损伤参量;σ_{c}和σ_{t}分别为受压和受拉应力;ε_{c}和ε_{t}分别为受压和受拉应变;β_{c}和β_{t}分别表示等效压缩和拉伸应变因子,取值范围为0~1;$\varepsilon_{\mathrm{t}}^{\mathrm{ck}}$和$\varepsilon_{\mathrm{c}}^{\mathrm{in}}$分别为开裂应变和非弹性应变;$E_0$为初始弹性刚度。

CDP模型中受拉弹性极限应力以受拉峰值应力计,受压弹性极限应力$\sigma_{\mathrm{c}0}$采用式(2)[10]计算。

$$\sigma_{\mathrm{c}0}=\left(1-\mathrm{e}^{-0.0125f_{\mathrm{cm}}}\right)f_{\mathrm{ck}}, \tag{2}$$

式中:f_{ck}为抗压强度标准值,f_{cm}为抗压强度平均值。

开裂应变$\varepsilon_{\mathrm{t}}^{\mathrm{ck}}$和非弹性应变$\varepsilon_{\mathrm{c}}^{\mathrm{in}}$根据式(3)计算,拉伸和压缩等效塑性应变$\varepsilon_{\mathrm{t}}^{\mathrm{pl}}$、$\varepsilon_{\mathrm{c}}^{\mathrm{pl}}$根据式(4)计算。

$$\begin{cases} \varepsilon_{\mathrm{c}}^{\mathrm{in}}=\varepsilon_{\mathrm{c}}-\dfrac{\sigma_{\mathrm{c}}}{E_0}, \\ \varepsilon_{\mathrm{t}}^{\mathrm{ck}}=\varepsilon_{\mathrm{t}}-\dfrac{\sigma_{\mathrm{t}}}{E_0}, \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases}\varepsilon_{\mathrm{t}}^{\mathrm{pl}}=\varepsilon_{\mathrm{t}}^{\mathrm{ck}}-\dfrac{d_{\mathrm{t}}}{1-d_{\mathrm{t}}}\dfrac{\sigma_{\mathrm{t}}}{E_0},\\ \varepsilon_{\mathrm{c}}^{\mathrm{pl}}=\varepsilon_{\mathrm{c}}^{\mathrm{in}}-\dfrac{d_{\mathrm{c}}}{1-d_{\mathrm{c}}}\dfrac{\sigma_{\mathrm{c}}}{E_0}。\end{cases}\tag{4}$$

1.2 失效单元删除理论及方法

ABAQUS软件具有CDP模型失效单元的删除功能，可将拉伸开裂应变或位移、压缩非弹性应变或损伤阈值作为材料失效的标准[11]，当任意一项失效标准满足时，认定该单元失效并删除。

在ABAQUS中触发单元删除时，需为材料完全失效明确判定准则。当前该操作无法通过材料定义界面实现，需在损伤定义完成后向ABAQUS输入文件中添加新的关键字，以拉伸应变作为失效准则。纤维单元的失效判定是通过设置纤维单元的塑性应变属性参数实现，当纤维单元的塑性应变值超过预设值即判定纤维单元失效。

1.3 双K断裂参数

起裂韧度$K_{\mathrm{IC}}^{\mathrm{ini}}$是指材料开始出现微裂纹扩展所需要的最小能量或应力强度因子，可衡量首次微裂纹萌生前的抗裂能力，失稳韧度$K_{\mathrm{IC}}^{\mathrm{un}}$是指裂纹发生稳态扩展直至整体失效的临界应力强度因子，是材料抵抗进一步破坏的核心能力指标。

断裂韧度计算依据《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005)[12]，公式如下：

$$K_{\mathrm{IC}}^{\mathrm{ini}}=\frac{3\left(P_{\mathrm{ini}}+\dfrac{m_1 g}{2}\times10^{-2}\right)\times10^{-3}\times s\times\alpha_0^{1/2}}{2th^2}f(\alpha_1),\tag{5}$$

$$K_{\mathrm{IC}}^{\mathrm{un}}=\frac{3\left(P_{\max}+\dfrac{m_1 g}{2}\times10^{-2}\right)\times10^{-3}\times s\times\alpha_{\mathrm{c}}^{1/2}}{2th^2}f(\alpha_2),\tag{6}$$

式中：P_{ini}为起裂荷载，单位kN；$P_{\max}$为失稳荷载，单位kN；$K_{\mathrm{IC}}^{\mathrm{ini}}$为起裂韧度，单位MPa·m$^{1/2}$；$K_{\mathrm{IC}}^{\mathrm{un}}$为失稳韧度，单位MPa·m$^{1/2}$；$m_1$为支座间试件质量，单位kg；$\alpha_0$为预制裂缝长度，单位m；$\alpha_{\mathrm{c}}$为有效裂缝长度，单位m；$t$为试件厚度，单位m；$h$为试件高度，单位m；$s$为试件两支座间的跨度，单位m；$f(\alpha_1)$、$f(\alpha_2)$是几何因子，按式(7)、(8)计算：

$$f(\alpha_1)=\frac{1.99-\alpha_1(1-\alpha_1)(2.15-3.93\alpha_1+2.7\alpha_1^2)}{(1+2\alpha_1)(1-\alpha_1)^{3/2}},\tag{7}$$

$$f(\alpha_2)=\frac{1.99-\alpha_1(1-\alpha_2)(2.15-3.93\alpha_2+2.7\alpha_2^2)}{(1+2\alpha_2)(1-\alpha_2)^{3/2}},\tag{8}$$

式中：$\alpha_1=\alpha_0/h$，$\alpha_2=\alpha_{\mathrm{c}}/h$。

α_{c}按下式计算：

$$\alpha_{\mathrm{c}}=\frac{2}{\pi}(h+h_0)\arctan\left(\frac{tE\times\mathrm{CMOD_c}}{32.6P_{\max}}-0.113\,5\right)^{1/2}-h_0,\tag{9}$$

式中：$\mathrm{CMOD_c}$为裂缝口张开位移临界值，单位μm；h_0为装置夹式引伸计刀口薄钢板的厚度，单位m；E为计算弹性模量，单位GPa。

E按下式计算：

$$E=\frac{1}{tc_{\mathrm{i}}}\left(3.70+32.6\tan^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{\alpha_0+h_0}{h+h_0}\right)\right),\tag{10}$$

式中：c_{i}为试件初始柔度，即P-CMOD曲线上升段任取一点，$c_{\mathrm{i}}=\mathrm{CMOD_i}/P_{\mathrm{i}}$。

2 试验概况

试验采用的材料质量配比见表1。其中，PVA纤维直径0.031 mm，长度12 mm，体积分数2%。三点弯曲梁试件尺寸选取$l\times t\times h$=400 mm×100 mm×100 mm，跨间尺寸s=300 mm，预制裂缝长40 mm，偏离试件中心距离d为112.5 mm，见图1，采用WDW3300微控电子万能试验机加载，位移加载控制，加载速率为0.3 mm/min。荷载为P，预制裂缝处通过夹式引伸计测量裂缝开口位移(crack mouth opening displacement，CMOD)，预制裂尖周围及拟开裂路线上布置应变片测量起裂荷载，图1中绿色短线条代表应变片。

表1 ECC材料配比

Tab. 1 Mix proportion of ECC

材料	质量配比
水泥	0.40
粉煤灰	0.60
水	0.35
石英砂	0.36
减水剂	0.15%
PVA纤维含量	2.00%

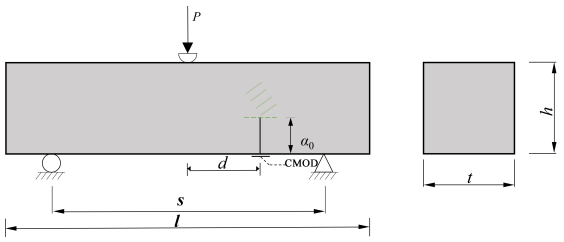


图1 三点弯曲梁试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a three-point bending beam specimen

3 结果与分析

3.1 模型建立

采用ABAQUS软件创建三点弯曲梁模型，尺

寸、边界条件等见试验概况，梁的下部预留切口，上部跨中施加外荷载P，初始缝高比a_0，模型见图2，图2中红色框线表示梁下部预制切口。为了与试验相吻合，支座采用简支的方式，即右支座被完全约束，左支座解除对水平位移的约束，垫块与梁通过绑定连接。

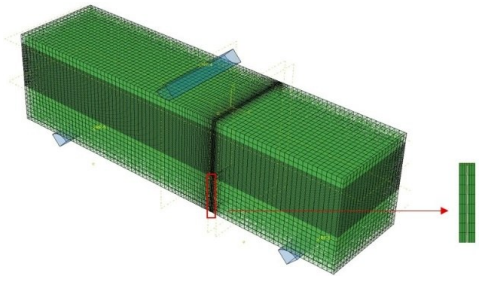


图2　模型示意图

Fig. 2　Model diagram

建模过程中，PVA纤维选用桁架单元(T3D2)进行模拟。通过设置试件长宽高控制纤维生成区域，设置体积比为0.02，控制纤维数量，实现PVA纤维在基体中的随机分布，并通过内置区域约束方式实现纤维单元与网格单元的连接。

3.2　模拟有效性

为验证模拟的有效性，依据试验建立初始缝高比0.4，初始偏移比($2d/s$)为0.75的结构模型，对比模拟与试验所得的P-CMOD曲线，见图3。

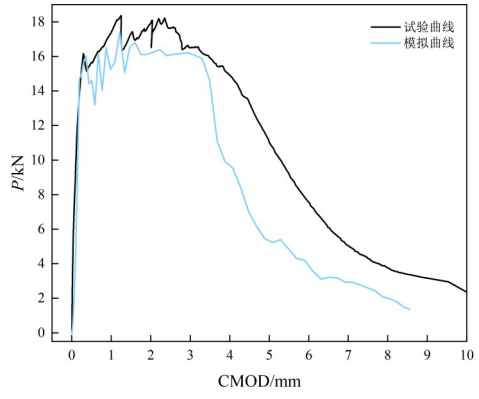


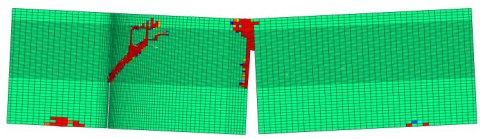
图3　模拟与试验P-CMOD曲线

Fig. 3　Simulated and experimental P-CMOD curves

由图3可知，二者在初始上升段、硬化及软化前期吻合良好，采用模拟结果分析起裂荷载、失稳荷载及断裂韧度等性能参数是合理的。同时，依据图3能够清晰地观察到裂缝扩展的3个阶段：1)弹性阶段：第一条裂缝出现之前，此时梁处于弹性阶段，随着持续的位移加载，荷载线性上升，此时ECC试件还未开裂，刚度保持不变；2)稳定扩展阶段：当第一条宏观裂缝出现，荷载随着位移非线性上升，继续增加到达失稳荷载，此时P-CMOD曲线会出现波动性上升与下降：波动性上升的原因是基体内PVA纤维发挥其“桥接”作用，通过纤维在裂缝中传递荷载，维持其承载力[13]，此类情况占绝大多数；波动性下降的原因是相对于纤维拔出导致的应力减小，纤维与基体间的滑移硬化现象处于劣势；3)失稳扩展阶段：此阶段梁开始失稳破坏，在P-CMOD曲线中表现为随着位移的增加，荷载持续下降。

从曲线整体变化规律来看，上升段模拟曲线与试验曲线吻合良好，峰值荷载数值接近；进入峰值后下降阶段，模拟曲线下降速率略快于试验实测曲线，同等CMOD下模拟荷载低于试验值，其原因是损伤塑性CDP本构仅从基体连续介质角度定义受拉软化规律，未内置表征PVA纤维的桥接增韧、滑移硬化作用。ECC达到峰值荷载后，基体开裂退出承载，荷载主要依靠跨裂缝的PVA纤维承担，纤维拔出、滑移耗能会持续延缓荷载跌落，使试验曲线下降平缓；CDP模型依据基体损伤演化判定刚度退化，裂缝萌生后基体刚度快速折减，无纤维延性耗能机制，荷载衰减较快。

图4(a)和(b)分别为通过单元删除法模拟得到的裂缝扩展路径和试验得到的裂缝扩展路径。试验中观察到两处裂缝，即试件跨中直裂缝和预制裂缝尖端起裂后的斜裂缝，为了表达清晰，用白色箭线表示预制裂缝，红色线条标记扩展的斜裂缝，对比可发现，模拟和试验结果在裂缝数量、位置与扩展趋势上展现出良好的一致性，验证了数值模型对裂缝扩展行为的模拟有效性。



(a) 模拟



(b) 试验

图4　模拟与试验裂缝扩展路径

Fig. 4　Simulated and experimental crack propagation paths

3.3 缝高比对Ⅰ-Ⅱ复合型断裂性能的影响

3.3.1 破坏形态

为探究初始缝高比对断裂参数的影响，选取初始偏移比为0.4，初始缝高比分别为0.1、0.2、0.3、0.4等4组方案，其他参数保持不变建立有限元模型。图5展示了不同缝高比下的裂缝扩展路径，由图5可见，当初始缝高比较小时，裂尖靠近试件底部，周围拉应力较大，Ⅰ型断裂占据主导地位，起裂后先出现较小的偏移，随后转为较大偏移，随着缝高比的增大，试件更快进入大偏移。总体而言，4种方案下均由切口尖端起裂，随荷载提升，裂缝向试件上表面偏转延伸，最终形成明显偏斜的Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝，但并未到达加载点。同时可以看出，基于单元删除法的模型可精准同步刻画裂缝开口位移（CMOD）及裂缝面竖向滑移位移这两项Ⅰ-Ⅱ复合型断裂关键指标，完整输出全加载历程*P*-CMOD曲线，从起裂、峰值荷载到软化下降段；与Ⅰ型断裂仅有开口位移的特征不同，从图5可知，Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝两侧界面的竖向错动滑移量。

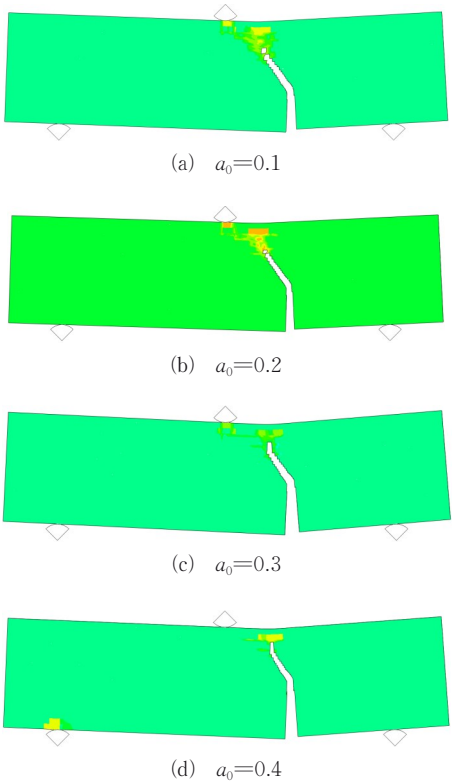


图5 不同缝高比试件裂缝扩展路径

Fig. 5 Crack propagation paths of specimens with different notch-depth ratios

3.3.2 断裂参数

图6为模拟得到不同缝高比试件的*P*-CMOD曲线。起裂荷载采用刚度退化标量（scalar stiffness degradation，SDEG）确定[14]，提取预制裂缝尖端上部相邻单元SDEG随分析步的曲线，在初始阶段SDEG为0，表示裂缝尚未产生。当SDEG开始逐渐增大，裂缝开始扩展，混凝土开始出现损伤，梁截面刚度开始退化，这一时刻对应荷载为起裂荷载。模拟得到不同缝高比的起裂荷载与失稳荷载见图7，可知缝高比与临界荷载呈负相关，起裂荷载与失稳荷载均随着缝高比的增加而减小，失稳荷载的下降更明显，分析原因可知，缝高比越大，有效受力截面越小，同时应力集中效应更显著，导致结构在更低的荷载下就达到极限承载状态，失稳荷载随之降低。

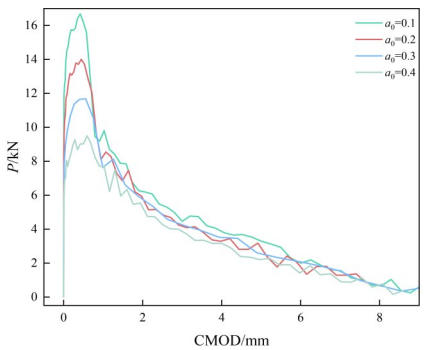


图6 不同缝高比试件*P*-CMOD曲线

Fig. 6 *P*-CMOD curves of specimens with different notch-depth ratios

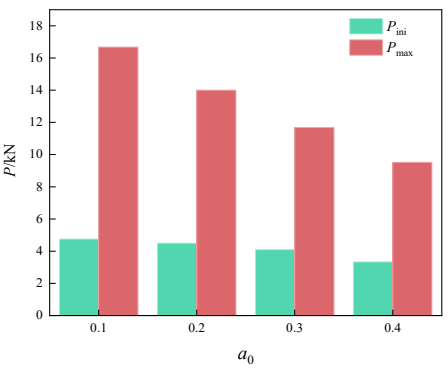


图7 不同缝高比试件荷载变化规律

Fig. 7 Load of specimens with different notch-depth ratios

利用式（5）和式（6）求解不同缝高比试件的起裂韧度与失稳韧度，得到其变化趋势，见图8。

由图8可知，失稳韧度随着缝高比的增大呈现下降趋势，这说明预制裂缝高度占比越大，梁在失稳破坏时的断裂韧性越弱，结构更易发生脆性断

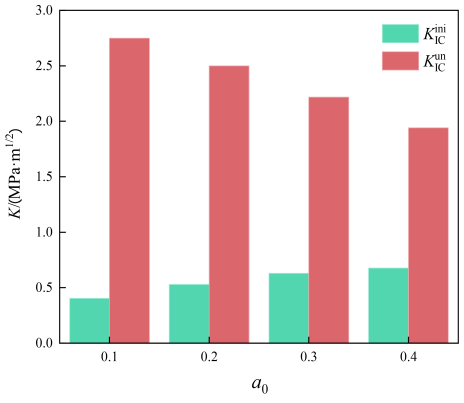


图 8　不同缝高比试件断裂韧度

Fig. 8　Fracture toughness of specimens with different notch-depth ratios

裂;而起裂韧度随着缝高比的增大呈现略微上升趋势,表明更长的预制裂缝使裂纹起裂所需的应力强度因子略增,即裂纹萌生的门槛更高,但一旦起裂后更易快速失稳。

4　结论

1) 采用本文方法模拟所得 *P*-CMOD 曲线、裂缝扩展轨迹与试验结果吻合良好,整体可精准复现 ECC 弹性开裂、裂缝稳定扩展、失稳破坏 3 个阶段受力特征,能够实现Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝扩展的动态模拟。

2) 4 种工况下Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝先由切口尖端起裂,随荷载提升裂缝向试件上表面偏转延伸,最终形成明显偏斜的Ⅰ-Ⅱ复合型贯通裂缝,但未到达加载点。

3) 随着初始缝高比的增大,起裂荷载与失稳荷载单调减小,失稳韧度持续衰减,说明预制裂缝高度占比越大,梁在失稳破坏时断裂韧性越弱,抗断裂安全储备下降。

参考文献:

[1] Li V C. On engineered cementitious composites (ECC): a review of the material and its applications[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215-230.
[2] 袁晓辉,陈格格. 钢筋与碱矿渣混凝土界面黏结性能有限元分析[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版),2026,39(1): 129-138.
[3] 刘志. 混杂纤维混凝土细观力学性能分析及纤维拉拔数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学,2023: 9-14.
[4] 郭鑫. 超高韧性水泥基复合材料的断裂性能试验研究及多缝开裂特征模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学,2022: 1-5.
[5] 章鹏,俞泽皓,鲁建峰. 基于三维比例边界有限元的高拱坝地震响应模拟[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版),2026,39(2): 250-256.
[6] 张田,侯正猛,李晓琴,等. 混凝土塑性损伤模型参数计算方法研究[J]. 计算力学学报,2024,41(6): 1130-1137.
[7] Haghighi H, Urgessa G. Investigation of geometrical and numerical parameters on ultra-high-performance concrete link slab performance using finite element modeling[J]. Applied Mechanics, 2026, 7(1): 14.
[8] 李晓琴,张田. 循环荷载下混凝土开裂-闭合行为计算方法研究[J]. 振动与冲击,2021,40(9): 254-263.
[9] 张田,侯正猛,张盛友,等. 基于 Zhang-Hou 损伤计算模型的不同强度混凝土裂缝贯通与损伤演化规律[J]. 工程科学与技术,2025,57(3): 124-133.
[10] Wosatko A, Genikomsou A, Pamin J, et al. Examination of two regularized damage-plasticity models for concrete with regard to crack closing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 194: 190-211.
[11] 黎广宾. 基于 CONWEP 加载的钢筋混凝土联体筒仓爆破拆除损伤及倒塌过程研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2024: 50-51.
[12] DL/T 5332—2005 水工混凝土断裂试验规程(附条文说明)[S].
[13] 汪鹏. 纳米高性能混凝土断裂性能试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2012: 43-48.
[14] 胡少伟,鲁文妍. 基于 XFEM 的混凝土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(4): 48-51.

责任编辑:申晓伟　郭红建