文章编号:1008-1534(2026)05-0405-06

高延性水泥基复合材料抗拉性能研究

蒋志光[1],段拼博[2],高玲玲[2]

(1.河北科技大学资产与实验室管理处,河北石家庄 050018;2.河北科技大学建筑工程学院,河北石家庄 050018)

摘 要:为了解决装配式混凝土结构节点在复杂受力状态下易发生脆性破坏的问题,明确高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composites,ECC)对其受拉性能的改善效果,建立了 ECC 材料受拉性能的三维有限元分析模型,重点分析了基体强度和纤维掺量 2 个核心参数对抗拉强度与极限拉应变的影响规律,并进行了综合力学性能评估。结果表明:当基体强度等级从 C30 提升至 C60 时,ECC 材料的抗拉承载力随之增强,但延性显著下降;增加纤维掺量可显著提高材料的极限拉应变,但对其基体初裂强度影响较弱,其中当掺量达到 2.0%(体积分数,下同)时,可形成稳定多缝开裂,极大提升材料韧性;当基体强度为 C40,纤维掺量为 2.0%时,材料抗拉性能综合表现最佳。数值模拟结果揭示了材料参数对宏观应变硬化性能的调控规律,可为装配式混凝土结构连接节点的高性能化设计与工程推广提供理论支撑。

关键词:复合建筑材料;ECC;抗拉性能;损伤模型;有限元模拟

中图分类号:TU528 **文献标识码**:A **DOI**: 10.7535/hbgykj.2026yx05003

Study on tensile properties of ultra-high ductility cementitious composites for prefabricated bridge joints

JIANG Zhiguang[1], DUAN Pinbo[2], GAO Lingling[2]

(1. Department of Assets and Laboratory Management, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to solve the problem of brittle failure of prefabricated concrete structure joints under complex stress conditions, and to clarify the improvement effect of high ductile engineered cementitious composites (ECC) on its tensile performance, a three-dimensional finite element analysis model of ECC material tensile performance was established. The influence of two core parameters of matrix strength and fiber content on tensile strength and ultimate tensile strain was analyzed, and the comprehensive mechanical properties were evaluated. The results show that when the matrix strength grade increases from C30 to C60, the tensile bearing capacity of ECC material increases accordingly, but the ductility decreases significantly. Increasing the fiber content can significantly improve the ultimate tensile strain of the material, but has a weak

收稿日期:2026-05-14;修回日期:2026-07-23;责任编辑:丁军苗
基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(V1723102138314)
第一作者简介:蒋志光(1979—),男,河北石家庄人,工程师,硕士,主要从事高性能水泥基材料方面的研究。
通信作者:高玲玲副教授。E-mail: gll030214@163.com

蒋志光,段拼博,高玲玲.高延性水泥基复合材料抗拉性能研究[J].河北工业科技,2026,43(5):405-410.
Jiang Zhiguang, Duan Pinbo, Gao Lingling. Study on tensile properties of ultra-high ductility cementitious composites for prefabricated bridge joints[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2026, 43(5): 405-410.

effect on the initial crack strength of the matrix. When the content reaches 2.0% (volume fraction, the same below), stable multiple cracking can be formed, greatly improving the toughness of the material. When the matrix strength is C40 and the fiber volume fraction is 2.0%, the tensile properties of the material are the best. The numerical simulation results reveal the regulation law of material parameters on the macroscopic strain hardening performance, which can provide theoretical support for the high-performance design and engineering promotion of prefabricated concrete structure connection joints.

Keywords: composite building materials; ECC; tensile property; damage model; finite element simulation

装配式建筑凭借其生产效率高、质量好等优点[1],在中国的公共建筑、工业厂房和桥梁工程中迅速发展,已成为政府与社会各界关注的焦点。而装配式混凝土结构体系的核心在于预制构件的拼装,这使得连接节点成为决定结构整体性能的关键[2]。作为结构传力的核心枢纽,连接部位在整体体系中受力最为复杂[3-4]。而传统节点多采用高强水泥灌浆料,由于其固有的准脆性特征,在复杂荷载下易发生脆性破坏,进而导致结构整体失效。因此,针对连接节点的痛点,高延性材料的引入成为提升结构可靠性的关键,其中以高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composites,ECC)为代表的应变硬化材料表现尤为突出。

ECC 凭借低掺量短切纤维、可控水泥砂浆基体、纤维-基体界面以及裂缝扩展机制的协同作用,使材料在拉伸荷载作用下产生大量细密裂缝,并在峰值前保持较大的拉伸变形能力[5]。现阶段,有学者围绕 ECC 材料配比优化、性能改性提升、构件力学响应、数值模拟分析等方面开展了系统性研究,为 ECC 的工程应用奠定了重要的理论与试验基础。在材料配比优化研究方面,学者们普遍以胶凝材料组分、水胶比、矿物掺合料、纤维类型与掺量为核心调控参数,通过正交试验、单因素实验等方法优选适配不同工况的配比方案,兼顾材料抗压强度与拉伸延性、抗裂性的综合性能。贾毅等[6]的研究表明,当水胶质量比为 0.2、纤维掺量为 3%(体积分数,下同)时,ECC 具有优秀的应变硬化特征和多缝稳态开裂现象。巩妮娜等[7]的研究表明,粉煤灰掺量为 60%(体积分数,下同)、水胶比为 0.35、PVA 纤维掺量为 2%(体积分数,下同)时 ECC 的综合力学性能最佳。在性能改性与工程应用研究方面,学者们聚焦于 ECC 收缩变形偏大、复杂受力下性能稳定性不足等工程短板,通过外加剂、纤维复合等方式优化其服役性能,并逐步落地于结构关键受力部位。陈宇等[8]通过引入高性能硫铝酸钙膨胀剂开展改性研究,证实了通过加入适量膨胀剂可有效补偿 ECC 收缩,显著提升材料的力学性能。钱辉等[9]将形状记忆合金(shape memory alloy,SMA)与 ECC 复合应用于装配式梁柱节点,通过低周往复加载试验验证,ECC 复合体系可有效缓解节点刚度退化、减小残余变形,显著提升结构节点的延性与自复位抗震能力。基于优异的变形与耗能特性,ECC 常被用于结构塑性铰区、节点核心区、拉剪薄弱区等关键部位,成为提升结构整体抗震耗能能力的核心功能性材料。

现阶段以二维宏观数值模拟为主,通过构建强度准则、随机开裂模型、均质本构模型实现对 ECC 力学性能的初步预测。Yu 等[10]建立了二维宏观随机模型,将 ECC 多裂缝开裂过程量化为纤维桥接强度与基体开裂强度共同控制的随机过程,对裂缝数量与拉伸应变能力的预测精度较高。孔燕[11]基于试验本构关系建立三维薄板弯曲有限元模型,验证了数值模拟方法用于 ECC 受力分析的可行性。

综上所述,现有 ECC 相关研究已构建起较完备的宏观力学实验体系,在材料配比优化、性能改性、基础数值模拟方面有了一定积累,但多聚焦宏观性能表征与单一参数优化,对 ECC 拉伸应变硬化、多缝开裂的细观作用机理探究较为浅显,且当前数值模拟多采用二维模型,缺失空间应力特征,无法精准还原 ECC 三维损伤演化与空间裂缝扩展过程,难以实现机理层面的深度剖析。

因此,本文以 ECC 三维拉伸力学机理与精细化数值建模为核心,构建适配真实空间受力状态的 ECC 三维有限元模型,系统探究基体强度和纤维掺量对 ECC 拉伸的影响规律,揭示三维应变硬化与空间损伤演化机理并验证模型精度。研究旨在完善 ECC 多尺度力学研究体系,以期为 ECC 精细化材料设计、复杂结构数值仿真及工程抗震应用优化提供重要的理论依据与技术支撑。

1 ECC 受拉性能模拟研究

1.1 本构模型

在 ABAQUS 有限元软件模拟中,混凝土基体通常采用混凝土塑性损伤(concrete damage plastic,CDP)模型,模型部分特征值如表 1 所示。依据《混凝土结构设计标准》(2024 年版)[12]建立混凝土单轴受拉与单轴受压本构曲线,其中 C40 混凝土单轴受拉损伤本构曲线如图 1 所示。

表 1　混凝土塑性损伤模型特征值

Tab. 1　Characteristic parameters of the concrete damaged plasticity model

膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性系数
30	0.1	1.16	0.667	0.000 5

注：f_{b0}/f_{c0} 为混凝土双轴抗压强度与单轴抗压强度之比；K 为拉伸/压缩子午线上第二应力不变量。

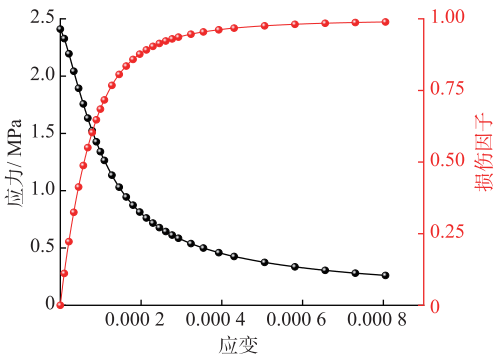


图 1　C40 混凝土单轴受拉损伤本构曲线

Fig. 1　Uniaxial tension damage constitutive curve of concrete C40

本研究采用 PE 纤维，其相关参数如表 2 所示。不同强度等级的混凝土材料参数依据《混凝土结构设计标准》[12]计算所得，而对于 ECC 材料，其基体中富含粉煤灰且不含粗骨料，因此其弹性模量和密度通常低于普通混凝土。

表 2　PE 纤维相关参数

Tab. 2　PE fiber related parameters

直径/μm	长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	密度/(g/cm^3)
40	12	1 040	1×10^5	0.97

1.2　模型建立

本研究利用 ABAQUS 软件进行模拟，基于单轴拉伸试验建立哑铃型试件及标距段模型[13]，如图 2 所示。参考蒙特卡洛算法[14]，利用 Python 编程中的 Random 模块随机生成确定空间线状纤维位置的 5 个参数(见图 3)，即可得到 2 个端点坐标，唯一确定空间纤维的具体位置，如式(1)所示。随后需确定其坐标是否处于混凝土基体范围内，若不满足要求则需剔除并重新生成，直至纤维数量满足要求。基体采用混凝土塑性损伤本构，参考文献[15]中黏结-滑移本构对纤维进行材料属性定义。

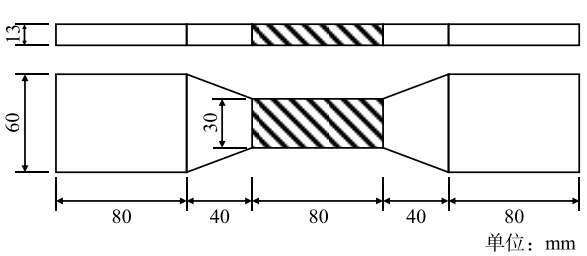
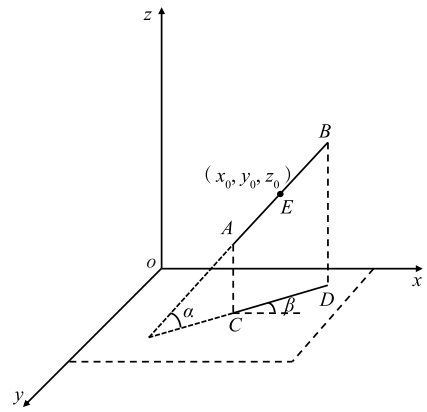


图 2　哑铃型试件及标距段示意图

Fig. 2　Dumbbell-shaped specimen and gauge section schematic diagram



注：α 为 AB 与 xy 面之间的夹角；β 为 CD 与 x 方向之间的夹角。

图 3　三维线状纤维生成过程示意图

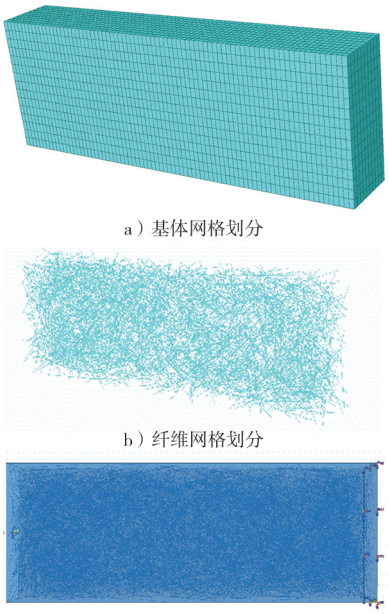
Fig. 3　Schematic diagram of the three-dimensional fiber generation process

$$\begin{cases} x_A = x_0 - \dfrac{L_f}{2}\times\cos\alpha\times\cos\beta, \\ x_B = x_0 + \dfrac{L_f}{2}\times\cos\alpha\times\cos\beta, \\ y_A = y_0 + \dfrac{L_f}{2}\times\cos\alpha\times\sin\beta, \\ y_B = y_0 - \dfrac{L_f}{2}\times\cos\alpha\times\sin\beta, \\ z_A = z_0 - \dfrac{L_f}{2}\times\sin\alpha, \\ z_B = z_0 + \dfrac{L_f}{2}\times\sin\alpha\ 。 \end{cases} \tag{1}$$

模型中混凝土基体选用三维实体单元建模，纤维采用三维桁架单元建模，并利用 ABAQUS 中的内置区域功能将纤维内嵌于混凝土基体中。由于混凝土基体主要变形发生在水平方向，该方向上网格划分相较于竖直方向需适当加密，设置为 1 mm，纤维网格单元为 1.2 mm，分别如图 4 a)—4 b)所示。ECC 受拉模型加载方式及边界条件设置如图 4 c)所示，由图可知，一端采用完全固结，在加载端几何中心建立参考点 RP-1 并将加载端耦合至 RP-1，随后在 RP-1 上进行位移加载。

1.3　结果与分析

本节采用单轴拉伸试验数据[13]验证 ECC 受拉模型的有效性，其中受拉试件的粉煤灰掺量为 1.2(质量比)、水胶比为 0.30～0.33，纤维掺量为 2.0%(体积分数，下同)。提取模型的受拉应力-应变曲线，与文献[13]中相同尺寸与边界条件下的物理试验数



a）基体网格划分

b）纤维网格划分

c）边界条件设置

图 4 模型网格划分及边界条件设置

Fig. 4 Model meshing and boundary condition setting

据进行对比，结果如图 5 所示。其中单轴拉伸试验采用位移控制，以 0.002 m/s 的速率加载。由于实际试验经历了离散多缝开裂，实测曲线呈现锯齿状波动，而本文模型基于连续损伤介质假定，曲线整体表现为平滑过渡。尽管如此，模拟结果整体与试验数据吻合较好，两者在初裂点、应变硬化平台区间及极限抗拉强度上基本一致，误差控制在 15% 以内。这表明模型能够较好地模拟 ECC 材料单轴拉伸力学响应，具有一定的可行性。

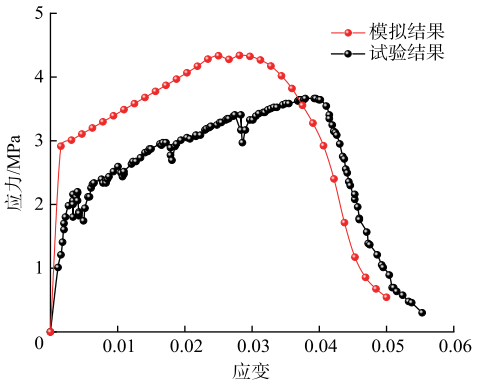
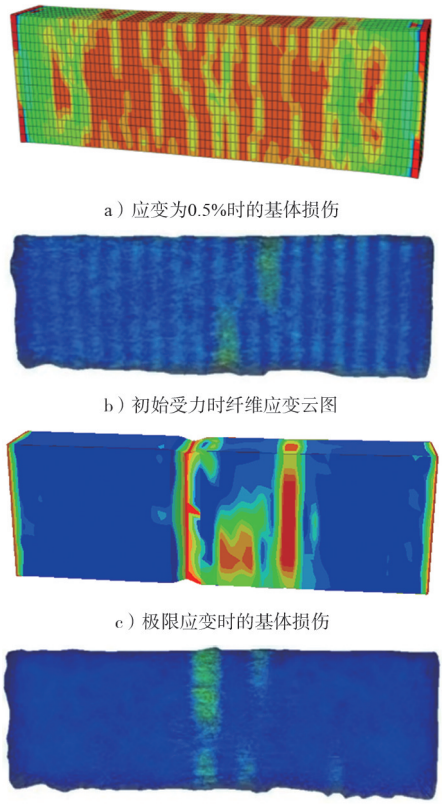


图 5 试验与有限元模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental and finite element simulation results

PE-ECC 在单轴拉伸荷载作用下，受拉试件标距段模型呈现多缝开裂的破坏模式，如图 6 a）所示。基体发生开裂后，裂缝之间的 PE 纤维将应力传递至周围未开裂的基体，经过多次反复传递，形成 ECC 的多缝开裂。此时纤维应变云图呈现明显的分层现象，如图 6 b）所示。当纤维桥接荷载增长至不足以支撑裂缝间继续传递应力时，基体中几条裂缝应力汇聚贯穿整条裂缝而发生断裂，此时对应的应变即为极限应变，如图 6 c）所示。极限应变时纤维应变云图如图 6 d）所示。



a）应变为0.5%时的基体损伤

b）初始受力时纤维应变云图

c）极限应变时的基体损伤

d）极限应变时纤维应变云图

图 6 PE-ECC 受拉试件的基体损伤过程

Fig. 6 Matrix damage process of PE-ECC tensile specimens

2 ECC 受拉试件有限元模型参数分析

为了保证材料应变硬化特征的实现，Marshall 等[16]提出了裂缝稳态开裂准则与初裂应力准则，揭示了 ECC 的高延性本质上取决于纤维、基体以及纤维与基体间界面的协同作用。其中，基体强度决定了基体初裂应力，而纤维掺量则决定了跨缝纤维所能提供的最大桥接应力，二者均对 ECC 的宏观破坏模式具有重要影响。

2.1 基体强度对 ECC 受拉性能的影响

在 ECC 材料的设计中，基体的抗压强度（f_c）与其断裂韧性（K_m）通常呈现正向耦合关系：即通过降低水胶比、提高水泥用量或掺入高活性微粉（如硅灰等）来提升密实度和化学黏结强度的方法，在显著提高 f_c 的同时，往往也导致了 K_m 的同步增长[17]。这种增长对于追求高抗压强度的普通混凝土是有益的，但对于依赖多缝开裂的 ECC 而言，会产生显著的不利影响。

依据《混凝土结构设计标准》(2024 年版)[12]为模型中基体赋予不同强度的等级混凝土本构，结果如图 7 所示。随着混凝土基体强度等级从 C30 提升至 C60，初裂应力分别提高了 45.8%、90.2%和 139.6%，而受拉峰值应力分别提高了 36.9%、72.5%和 109.6%，可以看出基体强度对 PE-ECC 的初裂强度与抗拉强度影响显著。C30 组在应变为 0.03 处达到峰值应力 2.85 MPa 后，具备较强的峰后变形能力，应变达到 0.05 时，应力仍可维持在 1.59 MPa；反观 C60 组，其峰值应力虽在极小应变(0.02)下跃升至 5.97 MPa，但随之骤降，至应变为 0.05 时已完全丧失承载力，呈现出典型的脆性破坏特征。由此可见，基体强度越高，ECC 受拉应力-应变曲线在峰值过后的下降越显著，这意味着材料在破坏前吸收的变形能越少，其延性越差。

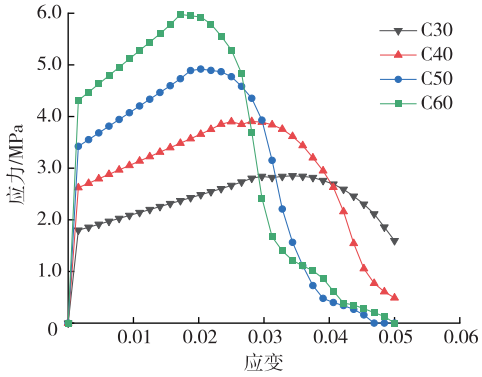


图 7　不同基体强度下 ECC 拉伸应力-应变曲线

Fig. 7　Tensile stress-strain curves of ECC with different matrix strengths

这一现象可以为 ECC 的设计提供依据。若直接使用类似 C60 及以上的高强混凝土作为基体，其自身的高脆性将制约复合材料整体的拉伸变形能力。因此，在面向装配式混凝土结构节点等需要高韧性的应用时，不能盲目追求基体的绝对高强度。相反，采用抗压强度等级为 C40、C50 的中强基体，并辅以高掺量粉煤灰等策略进行改性，使得目标基体在保有足够强度的同时，其断裂韧性更为适中，从而为纤维提供稳定的桥接与滑移条件，以满足节点连接处承受复杂应力和裂缝控制的性能需求。

2.2　纤维掺量对 ECC 受拉性能的影响

纤维掺量是影响 ECC 抗拉性能的重要因素之一，本研究通过改变纤维掺量(体积分数，下同)研究其对 ECC 试件的初裂强度、应变硬化过程的影响。不同纤维掺量下的基体损伤云图如图 8 所示。由图可以看出，当纤维掺量分别为 2.5%、2.0%时，基体在破坏时损伤云图均呈现出细密的多缝开裂。而当纤维掺量为 1.5%时，基体虽然在前期同样会形成

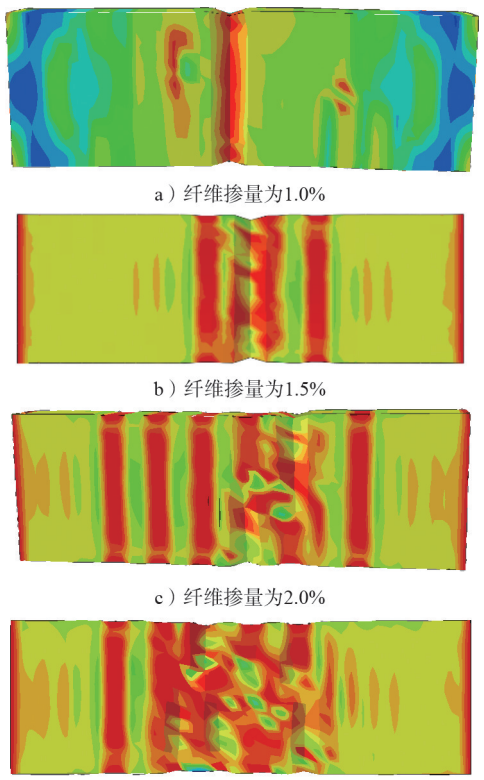


图 8　不同纤维掺量下的基体损伤云图

Fig. 8　Matrix damage cloud diagram under different fiber contents

数条裂纹，但由于纤维的数量较少，PE 纤维无法持续发挥桥接作用，在达到极限应变时其中一条裂缝宽度会迅速发展成为主裂缝，基体在此截面发生断裂。Marshall 等[16]提出的稳态开裂准则指出，在裂缝扩展过程中，基体开裂强度应低于纤维所能提供的最大桥联应力。若纤维数量较少，其提供的桥接应力不足以弥补基体开裂后损失的承载能力，此时材料就会像普通混凝土一样发生单一裂缝的脆性破坏。而当纤维掺量达到 2.0%后，材料可以产生大量细密裂缝，由纤维与基体之间的摩擦力提供材料所需的承载力，材料表现出显著的应变硬化行为。

提取加载点的时间历程曲线，可以得到不同纤维掺量下 ECC 受拉荷载-位移曲线，换算可得 ECC 受拉应力-应变关系曲线，结果如图 9 所示。由图可以看出，随着纤维掺量增加，峰值应力逐步增大，其机理在于基体内的纤维可以承担部分拉应力，提高了模型整体承载力。而 ECC 受拉模型的拉伸应力随掺量增加显著提升，纤维掺量达到 1.0%后，试件逐步形成多缝开裂，纤维掺量为 2.0%和 2.5%时，ECC 的受拉强度相近，在 2.5%的纤维掺量下达到最大。

相较于纤维掺量为 0%的对照组，当纤维掺量

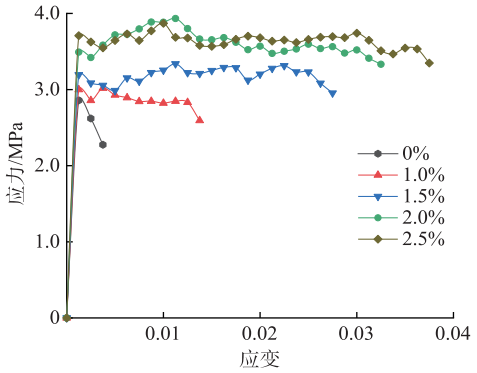


图 9 不同纤维掺量下 ECC 受拉应力-应变关系曲线

Fig. 9 Tensile stress-strain curves of ECC with different fiber dosages

分别增加至 1.0%、1.5%、2.0%、2.5%时，ECC 受拉模型的初裂强度分别提高了 5.0%、6.0%、8.0%、9.5%，极限受拉应变分别提高了 266.7%、100.8%、28.2%、15.4%。随着纤维掺量的增加，ECC 极限拉应变显著提高，而提升幅度随纤维掺量的增加呈下降趋势。因此，纤维掺量增加可有效改善 ECC 的受拉性能，显著提高其应变硬化能力，而对其初裂强度的提升幅度不大。

3 结 语

本研究建立了 ECC 材料的三维有限元模型，重点研究了基体强度和纤维掺量对装配式混凝土结构 ECC 节点单轴受拉性能的影响，揭示了材料参数对应变硬化行为的调控规律。主要结论如下。

1）混凝土基体强度对 ECC 受拉强度与延性影响显著。基体强度从 C30 增至 C60 时，峰值应力明显提高，但延性急剧下降，C60 试件在应变为 0.05 时已完全丧失承载力。

2）纤维掺量对材料极限受拉应变提升显著，对初裂强度影响有限。掺量达 2.0%时，ECC 可形成稳定多缝开裂，延性大幅提升；继续增至 2.5%时，受拉强度增幅趋缓。

3）基体强度为 C40、纤维掺量为 2.0%时，ECC 表现出较好的综合受拉性能。本文构建的三维细观模型及随机纤维生成算法，可更真实反映纤维三维空间分布对损伤演化的影响。

本文仅分析了 ECC 材料单轴受拉性能，未考虑节点在复杂应力状态下的响应及节点尺度分析，也未引入多缝开裂的本构模型。后续可进一步建立表征多缝开裂行为的本构模型，并开展节点尺度的三维精细模拟及实验，以期为 ECC 在装配式建筑中的工程推广提供更全面的理论支撑。

参考文献/References：

[1] 高静贤，柴彦凯，李伟龙，等. 装配式预应力混凝土框架足尺节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构，2026，56(2)：166-173.
Gao Jingxian，Chai Yankai，Li Weilong，et al. Experimental study on seismic performance of full-scale joint of prefabricated prestressed concrete frames[J]. Building Structure，2026，56(2)：166-173.

[2] Mashal M，Palermo A. Emulative seismic resistant technology for accelerated bridge construction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2019，124：197-211.

[3] Xu Yan，Zeng Zeng，Wang Zhigang，et al. Experimental studies of embedment length of precast bridge pier with socket connection to pile cap[J]. Engineering Structures，2021，233：111906.

[4] Mehraein M，Saiidi S. Seismic performance and design of bridge column-to-pile shaft pipe-pin connections in precast and cast-in-place bridges[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics，2019，48(13)：1471-1490.

[5] Li V C，Leung C K Y. Steady - state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics，1992，118(11)：2246-2264.

[6] 贾毅，宋浩博，柳其钱，等. 高韧性聚丙烯纤维混凝土的配合比及力学性能试验研究[J]. 材料导报，2024，38(增刊 2)：657-661.
Jia Yi，Song Haobo，Liu Qiqian，et al. Experimental study on blending ratio and mechanical properties of high toughness polypropylene fiber concrete[J]. Materials Reports，2024，38(S2)：657-661.

[7] 巩妮娜，柳文淑，蔡小宁，等. 工程用水泥基复合材料抗拉及抗弯性能研究与评估[J]. 采矿与安全工程学报，2025，42(6)：1434-1442.
Gong Nina，Liu Wenshu，Cai Xiaoning，et al. Research and evaluation of tensile and flexural properties of engineered cementitious composite[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2025，42(6)：1434-1442.

[8] 陈宇，宋学伟，吴佳梁. 抗收缩 ECC 单轴拉压力学性能及损伤本构模型[J]. 硅酸盐通报，2024，43(9)：3137-3148.
Chen Yu，Song Xuewei，Wu Jialiang. Uniaxial tensile and compressive mechanical properties of shrinkage-resistant ECC and damage constitutive model[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2024，43(9)：3137-3148.

[9] 钱辉，祝运运，张羊羊，等. 功能自恢复预制装配式梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报，2023，56(1)：57-65.
Qian Hui，Zhu Yunyun，Zhang Yangyang，et al. Experimental study on seismic behavior of earthquake resilient prefabricated beam-column joints[J]. China Civil Engineering Journal，2023，56(1)：57-65.

[10] Yu Jie，Yu Kequan，Ye Junhong，et al. Probabilistic-based investigation on tensile behavior of engineered cementitious composites (ECC)：A macro-scale stochastic model[J]. Construction and Building Materials，2023，404：133286.

[11] 孔燕. ECC 材料力学性能的试验研究与数值模拟[D]. 苏州：苏州科技大学，2020.
Kong Yan. Experimental study and numerical simulation on mechanical properties of ECC materials[D]. Suzhou：Suzhou University of Science and Technology，2020.

（下转第 434 页）