

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240717001

工程水泥基复合材料三轴压缩强度与变形特性*

马超¹, 郭青玥¹, 王国盛², 路德春², 廖维张¹

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 102616; 2. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 工程水泥基复合材料(Engineered Cement Composite, ECC)因其良好的抗拉和抗裂性能在混凝土结构中得到了广泛应用, 实际工程中ECC常处于复杂应力状态下工作。为研究ECC在复杂应力状态下的力学特性, 设计并开展了ECC的常规三轴压缩与劈裂拉伸试验, 探究了纤维掺量、围压对ECC的压缩强度与变形的影响规律, 以及纤维掺量对其劈裂强度的影响规律, 从材料黏聚强度与摩擦强度发挥机制的角度, 阐释了纤维掺量对ECC强度与变形的影响机制。试验结果表明: 随着纤维掺量的增加, ECC的黏聚强度增大, 表现为劈裂强度逐渐增大, 但其内摩擦角随纤维掺量增加呈减小趋势, 导致其三轴压缩强度也呈减小趋势; 随着纤维掺量的增加, ECC的延性逐渐增大, 在三轴压缩条件下的变形行为由剪缩/剪胀型转变为剪缩型。基于试验结果构建了ECC的强度面, 研究成果对建立复杂应力条件下ECC本构模型与ECC结构设计具有重要的理论意义。

关键词: ECC; 三轴压缩试验; 劈裂拉伸试验; 摩擦强度; 黏聚强度

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0513-09

Triaxial Compressive Strength and Deformation Characteristics of Engineered Cementitious Composites

MA Chao¹, GUO Qingyue¹, WANG Guosheng², LU Dechun², LIAO Weizhang¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil and Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Faculty of Architecture, Civil and transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Engineered Cementitious Composites (ECC) have been widely applied in concrete structures due to their excellent tensile strength and crack resistance. In practical engineering, ECC often operates under complex stress states. To investigate the mechanical properties of ECC under complex stress states, conventional triaxial compression and splitting tensile tests were designed and conducted. The study explored the influence patterns of fiber content and confining pressure on the compressive strength and deformation characteristics of ECC, as well as the influence of fiber content on its splitting tensile strength. The influence mechanisms of fiber content on ECC strength and deformation were explained from the perspective of the mechanisms of material cohesive and frictional strength. The experimental results showed that as fiber content increased, the cohesive strength of ECC in-

* 收稿日期: 2024-07-17; 修回日期: 2024-09-06

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFC3800901)、国家自然科学基金项目(52278323; 52378471; 52025084)资助

作者简介: 马超(1986—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事地下结构防灾减灾研究。E-mail: machao@bucea.edu.cn

通信作者: 王国盛(1990—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事混凝土力学特性及本构模型研究。

E-mail: wangguosheng@bjut.edu.cn

creased, as evidenced by a gradual rise in splitting tensile strength. However, the internal friction angle showed a decreasing trend with increasing fiber content, leading to a reduction in triaxial compressive strength. Moreover, ECC exhibited enhanced ductility with increasing fiber content. The deformation behavior under triaxial compression transitioned from shear shrinkage/dilation mode to shear shrinkage mode. Based on the experimental results, the strength envelope of ECC was established. The research findings provide important theoretical support for establishing constitutive models and structural design of ECC under complex stress states.

Keywords: ECC; triaxial compression test; splitting tensile test; frictional strength; cohesive strength

0 引言

工程水泥基复合材料由于其具有较高的拉伸强度、延性和抗裂性能等^[1-2],在钢筋混凝土结构加固改造与性能提升中得到了广泛的应用^[3-4]。钢筋混凝土结构或砌体结构中的部分构件或节点也采用ECC,利用其高韧性的优势提高结构整体的抗震能力,尤其是变形能力^[5-8]。ECC在单轴拉伸荷载作用下,表现出优越的变形性能,能够实现多裂缝工作状态^[9]。实际工程中,ECC构件常处于复杂应力状态下工作,其在复杂应力条件下的强度与变形特性,将显著影响结构整体承担正常服役状态荷载与偶然荷载的能力。因此,研究ECC在复杂应力状态下的强度与变形特性,对ECC构件与结构的设计具有重要的理论意义与工程实用价值。

目前关于ECC力学性质的研究,主要集中在材料组分对其单轴拉压性能和抗弯性能的影响方面。研究表明,纤维类型与掺量是影响ECC抗拉强度和抗弯强度的决定性因素^[10]。纤维能够增强材料的拉伸力学性能和抗弯性能,但会降低抗压性能,且纤维的增强效果存在限值^[11-12]。Y. C. Wang等^[13]研究纤维掺量对ECC力学性能的影响,得出:随纤维掺量增加,ECC拉伸性能先提升后降低,抗压强度降低,但提高加载峰值后的压缩延性。S. H. Said等^[14]的研究表明,PVA纤维可显著提高ECC破坏前期的抗弯性能;随着纤维增强系数增大,抗压强度呈非线性降低,试样峰值后残余强度增加。M. Khan等^[15]研究了玄武岩纤维掺量和纤维长度,对钢-玄武岩多尺度混杂纤维ECC单轴抗压力学性质的影响,表明混杂纤维层次复杂,可阻碍微观、细观和宏观裂缝扩展,提升抗压强度、抗压韧性指数和承载能力系数;同时,最佳纤维掺量为1%的CaCO₃晶须、0.35%的钢纤维和0.45%~0.60%的12 mm

玄武岩纤维。此外,由于ECC与混凝土的界面粘结强度大,具有微裂缝特性,与纤维网格组合后可用于提升RC梁^[16-19]和RC柱^[20-22]的承载力和变形能力。

关于ECC在双轴和三轴压缩条件下强度特性,一部分研究者认为纤维的掺入将增加其三轴压缩强度^[23],而另一部分研究者则认为纤维的掺入会减小ECC的三轴压缩强度^[24];但关于围压对ECC三轴压缩强度的认识较为统一,即围压的增加对ECC的三轴压缩强度有提升作用^[23-24]。潘金龙等^[25]研究了不同应力比下ECC立方体试样的抗压强度,在侧压力较小时,其破坏形态表现出单轴破坏的特性,与普通混凝土抗压强度相近;在侧压力较大时,试件会产生斜剪破坏状态,ECC的抗压强度增幅小于普通混凝土强度的增幅。周俊等^[26]通过常规三轴试验探究了纤维掺量和围压对超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)材料三轴抗压强度和破坏模式的影响,表明:纤维影响试样破裂面的角度;围压改变了试样的破坏形态,随着围压增大,试样的破坏模式从剪切破坏过渡到挤压破坏。Y. Li等^[27]开展的PVA纤维增强ECC三轴压缩试验表明,掺入纤维对试样的峰值应力影响不明显,而围压对试样的峰值应力和对应的峰值应变有提升作用。Z. B. Wang等^[28]开展的PVA-钢混杂纤维ECC抗压试验和原位渗透性试验表明,增加钢纤维掺量对试件的峰值强度略有增加,但对峰值后抗压强度有削弱作用。以上研究说明,关于纤维和围压对ECC强度与变形特性影响规律的认识存在差异,主要是由于对ECC的强度发挥机制认识不清。

ECC属于黏聚-摩擦型材料^[29],其强度由黏聚强度与摩擦强度提供^[30]。本文拟通过开展ECC的常规三轴试验和劈裂拉伸试验,从材料的破坏模式、黏聚强度与摩擦强度的发挥机制等角度,探究

纤维掺量、围压对 ECC 强度与变形的影响规律,给出 ECC 的强度面,为 ECC 结构承载力设计与变形分析提供理论支撑与数据支持。

1 试验方案

1.1 试验材料

为了探究纤维掺量、围压(σ_c)对 ECC 三轴压缩强度特性的影响规律,设计了一组 ECC 在不同围压条件下的常规三轴压缩试验和一组劈裂拉伸试验。选用的 ECC 组分为:水泥、石英砂、粉煤灰、硅灰、水、分散剂、减水剂和增稠剂;内掺纤维选为 PVA 纤维,性能参数见表 1;水泥采用 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥,细骨料采用 80-120 目石英砂,粉煤灰采用一级粉煤灰;试验用水采用实验室自来水,减水剂选用 YH-A 聚羧酸高性能减水剂母液,增稠剂选用甲基纤维素醚增稠剂。

表 1 PVA 纤维性能参数

Table 1 Parameters of PVA fiber properties

纤维长度/mm	纤维直径/ μm	断裂伸长率/%	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
12	15.09	6.9	1 830	40	1.29

研究表明^[31],掺入 PVA 纤维的 ECC 最佳配合比为:每升水泥基材料中水泥、水、粉煤灰、硅灰、石英砂、减水剂的含量分别为 793 g、366 g、366 g、61 g、488 g 和 5 g;此外,选取分散剂质量占比为 0.15%,主要是由于在该掺量下,PVA 纤维在砂浆中分散更加均匀、不易结团。

1.2 试验设计

廖维张等^[31]开展的 ECC 单轴拉伸试验研究结果表明,水泥内掺 PVA 纤维的最佳体积掺量为 2.0%,因而,选取 PVA 纤维掺量为 1.0%、1.5%、2.0% 和 2.5% 的试样,开展 ECC 常规三轴压缩和劈裂拉伸试验;同时浇筑一组素水泥基试件作为对照组。选择 0、5、10、15 和 20 MPa 5 个 σ_c 开展试验,探究 σ_c 对 ECC 三轴压缩强度的影响规律。常规三轴压缩试件采用高度为 100 mm、直径为 50 mm 的圆柱体试样,常规三轴压缩试验试样编号与控制变量见表 2。每种工况浇筑 5 个试样(素水泥基对照组浇筑 1 个试样),选择 3 个试样进行试验,当试验结果

表 2 常规三轴压缩试验工况

Table 2 Operating conditions of conventional triaxial compression tests

试件编号	σ_c /MPa	纤维掺量/%
S1000	10	0
S1010	10	1.0
S1015	10	1.5
S1020	10	2.0
S1025	10	2.5
S0020	0	2.0
S0520	5	2.0
S1020	10	2.0
S1520	15	2.0
S2020	20	2.0
S0000	0	0
S0500	5	0
S1000	10	0
S1500	15	0
S2000	20	0

出现较大离散时,增加试验数量。劈裂拉伸试验试件采用高度为 50 mm、直径为 100 mm 的圆盘型试样,试样浇筑时预制裂缝。

1.3 试验设备及加载方式

试验采用如图 1 (a)所示的 RTR-1500 高温高压三轴仪,额定最大轴向载荷 1 500 kN,最大围压 140 MPa,轴向变形量程为 ± 2.5 mm,环向应变的量程为 ± 2.5 mm。常规三轴压缩试验采用应变控制方式加载,选取加载速率为 0.001%/s,试件受力模式如图 1 (a)所示,试验中记录试件轴向、径向应力与应变。劈裂拉伸试验亦采用应变控制加载,加载速率为 0.002 mm/s,试件受力模式如图 1 (b)所示,试验中记录施加的竖向荷载和试件竖向形变量,同时采用 VIC-2D 高速摄影机记录试件劈裂破坏过程,用于分析试件的应变发展过程与破坏模式。

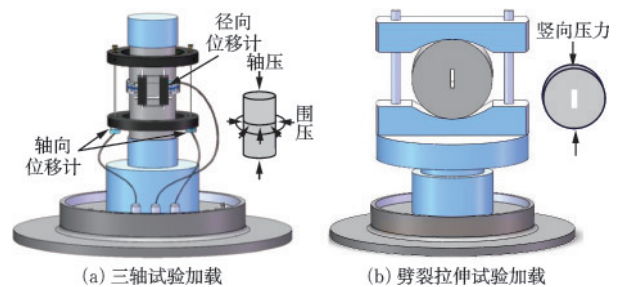


图 1 试件加载示意图

Fig.1 Schematic diagram of specimen loading

2 破坏模式

ECC属于黏聚-摩擦类材料^[30],与普通混凝土或水泥基材料相比,ECC中的纤维能够提高材料的黏聚强度,尤其是当水泥基体产生裂缝后,周围的纤维起到桥联作用,能够有效抑制裂缝的发展。本节从裂缝发展入手,分析纤维掺量和围压对ECC试样破坏模式的影响规律。

2.1 三轴压缩破坏模式

以 $\sigma_c = 10 \text{ MPa}$ 为例,分析纤维掺量对ECC三轴压缩条件下破坏模式的影响规律。当未掺纤维试样在轴向荷载达到最大值时,迅速形成斜裂缝,表现出明显的脆性破坏特征;而掺入纤维的试样在

轴向荷载达到最大值后,斜裂缝的发展较为缓慢,表现出明显的延性破坏特征;各试样的破坏模式如图2(a)所示。由图可知,未掺纤维试样的破坏面与大主应力作用面(水平面)的夹角约为 69° ,而掺入纤维后,试样的破坏面与大主应力作用面之间的平均夹角约为 58° 。由于摩擦型材料破坏面与大主应力作用面的夹角 θ 为 $45^\circ + \varphi/2$, φ 为材料的内摩擦角。可以得出,水泥基材料中掺入PVA纤维,将明显减小材料的内摩擦角,即纤维的掺入降低了水泥基材料的摩擦强度。分析其原因,材料的摩擦强度取决于其组分之间的摩擦、咬合作用,而PVA纤维表面较水泥、石英砂等更光滑,使得材料组分之间的摩擦系数减小、咬合作用减弱,从而降低了材料的摩擦强度。此外,对比图2(b)与(c)两组可知,相同围压下,掺入PVA纤维试样破坏面的夹角 θ ,均小于

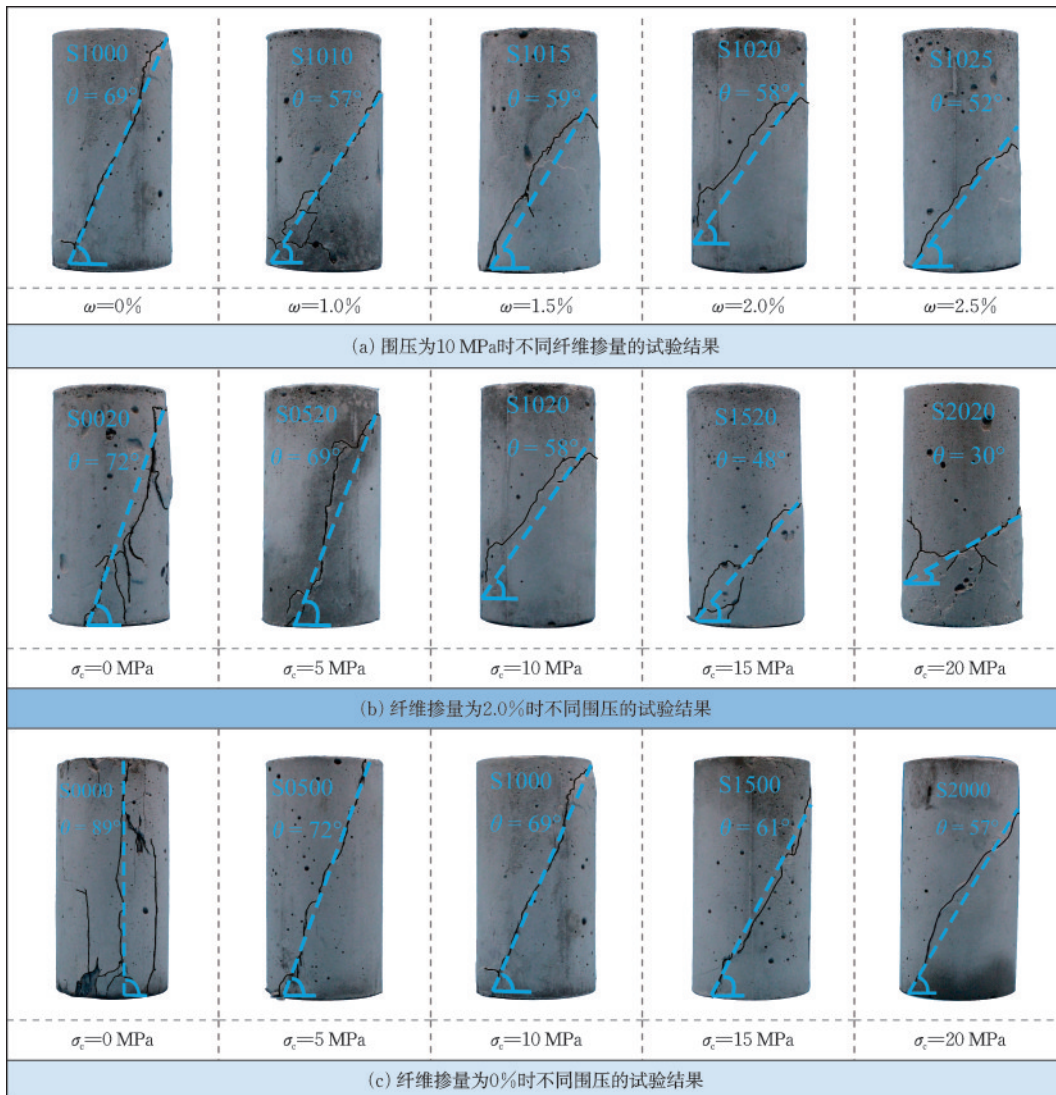


图2 常规三轴压缩试验试样的破坏模式

Fig.2 Failure modes of specimens in conventional triaxial compression tests

未掺纤维试验破坏面的夹角 θ , 进一步验证了PVA纤维的掺入将减小ECC摩擦强度的认识。

以纤维掺量为2.0%为例, 分析围压对ECC破坏模式的影响, 各试样破坏模式如图2(b)所示。由图可知, 随着围压的增大, 材料的破坏面与大主应力作用面的夹角逐渐减小, 参考G.S.Wang等^[29]关于静水压力对摩擦型材料强度特性的分析可知, 围压的增大导致了破坏面上的正应力增大, 材料组分之间的咬合紧密, 不容易发生相对运动, 致使组成摩擦型材料的组分本身发生破坏, 进而导致材料的内摩擦角减小。图2(c)给出了未掺纤维水泥基材料的破坏面与大主应力之间夹角 θ , 可知夹角 θ 随围压的变化规律与图2(b)所示的掺入纤维破坏面的变化趋势一致, 进一步验证了ECC属于摩擦型材料的认识。

2.2 劈裂抗拉破坏模式

图3给出了纤维掺量为2.5%的ECC在劈拉破坏过程中横向应变的发展过程。由图可知: 加载初期, 试件顶部受压, 预制裂缝端部受拉, 预制裂缝端部和试件顶底面首先产生新的裂缝; 随着荷载的增大, 新形成的裂缝沿预制裂缝长度方向逐渐延伸, 并在竖向荷载达到约35 kN时, 裂缝贯通整个试件; 之后, 随着荷载的继续增大, 裂缝宽度逐渐增大。裂缝起裂时, 裂缝处的横向拉伸应变为0.192%, 此时纤维和水泥同时发挥抗拉作用。新形成的裂缝几乎平行, 裂缝贯通后, 水泥退出工作, 纤维继续发

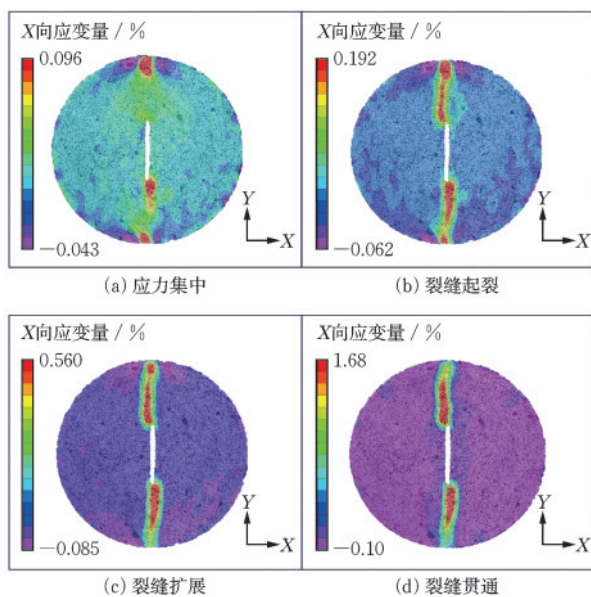


图3 劈裂抗拉试验试件破坏过程

Fig.3 Failure process of specimens in splitting tensile tests

挥作用, 在材料破坏时的拉伸应变可达3.4%。

图4为各组试样的最终破坏模式。由图可知, 未掺入纤维的试样, 在加载持续55 s时立即发生破坏; 而掺入纤维的试件, 由于试件在劈裂过程中, 纤维起到承担拉伸荷载的作用, 提升了材料的黏聚强度, 劈裂破坏所需要的时间显著增长, 表明掺入纤维后试样的延性得到了提升; 而在最佳纤维掺量时, 试件破坏所需的时间最长, 且随着纤维掺量的增大, 纤维水泥基试件的延性也呈增大趋势。

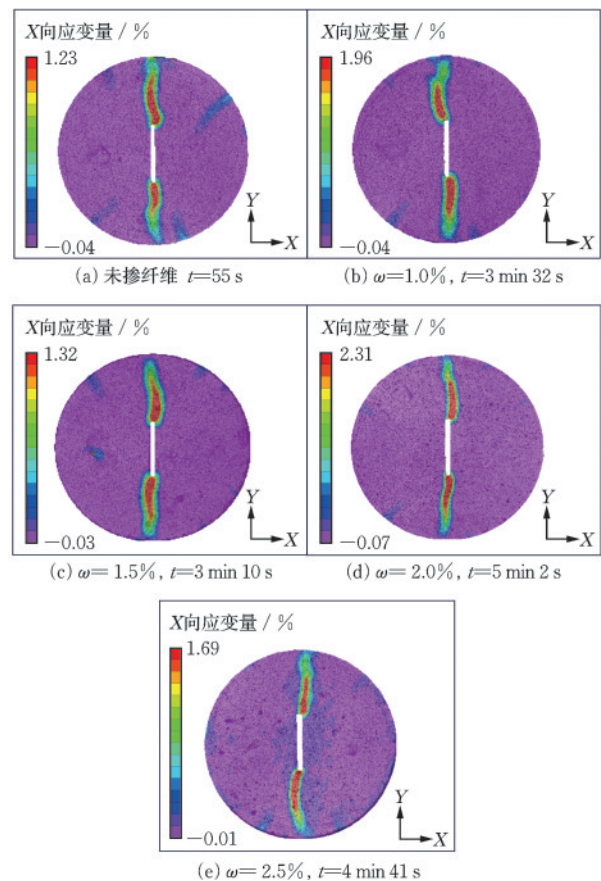


图4 劈裂抗拉试验试件破坏模式

Fig.4 Failure modes of specimens in splitting tensile tests

3 强度与变形特性

纤维的掺入改变了水泥基材料各组分之间的相互作用方式, 继而影响材料的强度与变形规律。通过第2节对ECC破坏模式的分析可知: 纤维的掺入减小了水泥基的摩擦强度, 但显著提高水泥基的黏聚强度与延性。本节通过分析ECC在常规三轴压缩与劈裂拉伸荷载作用下的应力-应变关系, 阐述纤维掺量和围压对其强度与变形的影响规律。

3.1 三轴压缩强度与应变规律

图 5 (a) 给出了围压为 10 MPa、不同纤维掺量时 ECC 的应力-应变关系, 图中 ϵ_s 为轴向应变、 ϵ_r 为径向应变、 q 为广义剪应力。由图可知, 随着纤维掺量的增加, 试样的初始压缩模量呈减小的趋势, 这主要是由于纤维的压缩模量小于水泥基的压缩模量; 与 ECC 的单轴拉伸强度随纤维掺量增加而增大^[32]不同, ECC 的三轴压缩强度, 随纤维掺量的增加而减小, 且当纤维掺量从 0 增加至 1.0% 时, 三轴压缩强度的降幅最大。这主要是由于, ECC 在三轴压缩条件下工作时, 相对于水泥基本身的变形, 纤维与水泥基之间的变形协调性较差, 且由于纤维的压缩模量较小, 掺入纤维变相增加了水泥基材料的初始“缺陷”, 导致 ECC 三轴压缩强度降低。另一方面, 所有试样峰值强度对应的应变几乎相等, 即纤维的掺入对水泥基峰值强度前的变形能力影响不大。但相对于未掺纤维水泥基材料, ECC 峰值后软化段下降缓慢, 且随着纤维掺量的增加, 软化段下降越缓和, 这主要是由于, 水泥基在出现微裂缝后, 纤维发挥桥联作用, 增大 ECC 的黏结强度, 延缓了裂缝的发展, 增加了 ECC 的延性。

当纤维掺量为 2.0% 时、围压对 ECC 三轴压缩强度与变形规律的影响如图 5 (b) 所示, 改变试样的初始围压, 几乎不影响其初始压缩模量; 但随着围压的增加, ECC 的峰值强度呈增大趋势, 且峰值强度对应的应变也呈增大趋势, 这与普通混凝土和水泥基材料的强度规律一致, 说明围压对恒定纤维掺量 ECC 强度的影响规律符合摩擦型材料的强度规律。

由图 6 (a) 所示的纤维掺量对 ECC 体积变形的影响规律可知: 随着纤维掺量的增加, 相同 q 下, ECC 的体缩量增大, 峰值强度后, 材料开始发生剪胀变形。需要指出的是, 当纤维掺量为 2.5% 时, ECC 的体应变由剪缩/剪胀型转变为剪缩型, 这主要是因为摩擦型材料的剪胀特性很大程度上取决于材料的密实度, 由于 PVA 纤维弹性模量较小, 其掺入至水泥基中, 一定程度上增大了材料的孔隙比, 而随着掺量的增加, 孔隙比增大, 导致 ECC 在剪切过程中仅发生剪缩, 而不会发生剪胀。另一方面, 由图 6 (b) 可知, 相同纤维掺量下, ECC 的体应变随着围压的增大而呈现出剪胀程度减小的趋势, 主要是由于约束围压的增大, 使得材料组分难以相

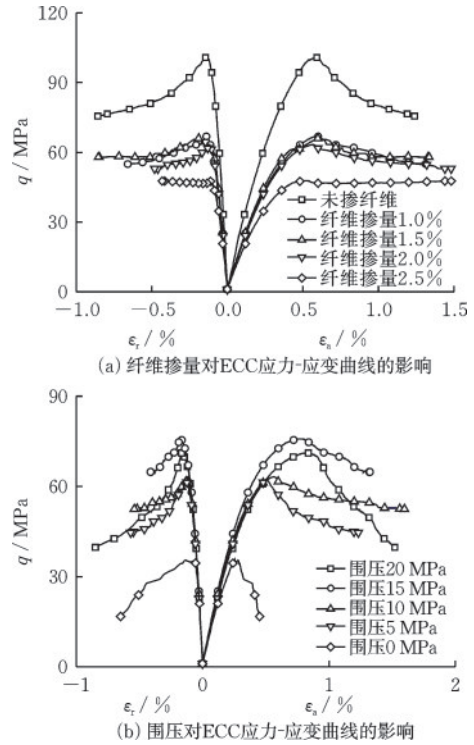


图 5 常规三轴压缩试验应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of conventional triaxial compression tests

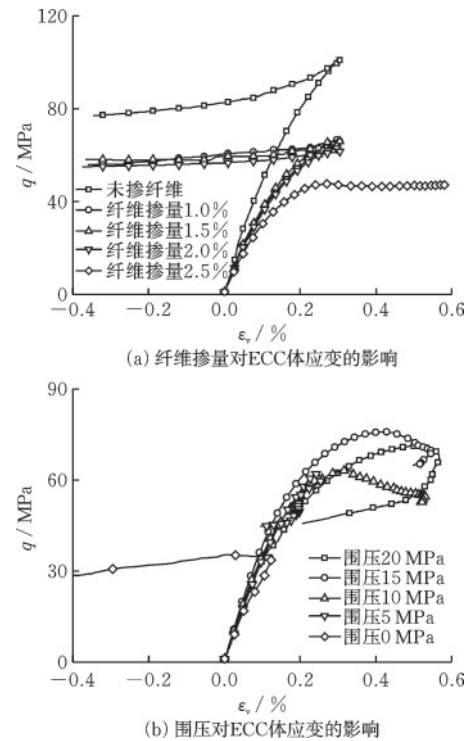


图 6 常规三轴压缩试验体应变-应力曲线

Fig.6 Volumetric strain-stress curves of conventional triaxial compression tests

互越过而产生相对运动, 导致材料的剪胀程度减弱, 这也与普通摩擦材料的变形规律一致。

3.2 劈裂拉伸强度与应变规律

劈裂拉伸试验中获得的应力-应变曲线如图7所示,劈裂拉伸应力由式(1)计算获得,劈裂拉伸应变为试件预制裂缝尖端拉伸应变。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

式中, P 为施加的竖向荷载; d 为试件直径; l 为试件厚度。

由图7可知,随着纤维掺量的增加,ECC的初始劈裂刚度呈先增大后减小的趋势,当纤维掺量为1.0%时,ECC的初始劈裂刚度约为137 MPa,为未掺纤维水泥基材料初始劈裂刚度的1.49倍;对于未掺纤维水泥基材料,当劈裂应力达到0.42 MPa时,材料发生脆性破坏,此时材料的拉伸应变约为0.09%;当纤维掺量为1.0%时,ECC峰值强度对应的拉伸应变,比未掺纤维水泥基材料的高1.66倍,且随着纤维掺量的增大也呈现出增大的趋势,当纤维掺量达到2.5%时,峰值强度对应的拉伸应变可达5%。

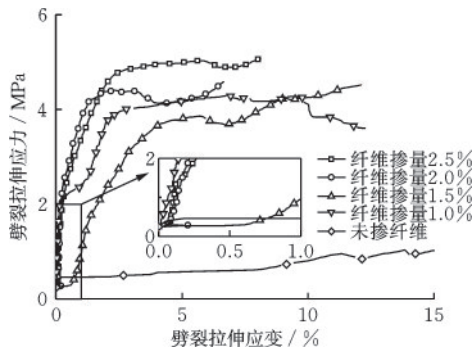


图7 劈裂拉伸试验应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of splitting tensile tests

由劈裂试验中ECC试样的破坏过程可知,当试样受到的劈裂应力较小时,水泥基基体与纤维同时承担拉应力;当水泥基承担的拉应力超过其抗拉强度时,试样预制裂缝端部开始产生细小裂缝,水泥基退出工作,不再承担拉应力;由于纤维与水泥基之间的黏结作用,使试样可以继续承担劈裂荷载,因此,提高了试样的延性和劈裂强度。

4 讨论

图8给出了PVA纤维掺量对ECC三轴压缩强度的影响规律。由图可知,随着纤维掺量的增加,

ECC的三轴压缩强度呈现出减小的趋势,但强度减小的幅值随纤维掺量的增加而变小。与未掺纤维试件相比,当纤维掺量为1.0%时,强度下降约33%;而当纤维掺量为2.0%(单轴拉伸强度最佳掺量)时,强度下降约37%。纤维掺量对ECC三轴压缩强度的影响规律可用指数型函数描述,如图8所示,其中 ω 为纤维掺量, q_0 为纤维三轴压缩强度, A 和 T 是纤维掺量对ECC三轴抗压强度影响的系数。虽然在水泥基材料中掺入纤维,能够显著提高水泥基的单轴抗拉强度与延性^[33],但对材料的压缩强度减小幅度也较为显著,因此,在采用ECC加固钢筋混凝土结构、提升其延性或抗拉强度时,应避免使ECC处于受压区,或不能将ECC浇筑为抗压为主的构件,避免导致结构轴向承载能力降低。

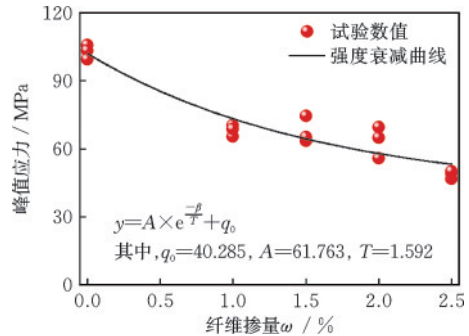


图8 纤维掺量对ECC三轴压缩强度影响规律

Fig.8 Effect of fiber content on triaxial compressive strength of ECC

由3.1节分析可知,围压对ECC三轴压缩强度的影响符合摩擦型材料的强度规律,采用G.S. Wang等^[29]提出的子午面上破坏函数曲线,描述围压对ECC三轴压缩强度的影响规律,如图9所示,图中水平轴为静水压力 p 、竖轴为峰值广义剪应力

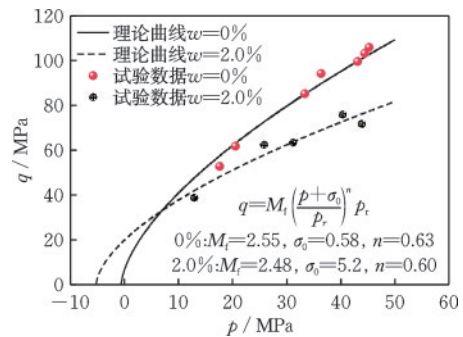


图9 围压对ECC三轴压缩强度影响规律

Fig.9 Effect of confining pressure on triaxial compressive strength of ECC

q_i 。由图可知,随着静水压力的增加,ECC的抗剪强度增大的幅值逐渐减小。图中同时给出了采用指数型破坏函数拟合材料强度变化规律获得的各参数,其中, M_i 为参考应力, p_i 下的破坏应力比, σ_0 为反映材料黏聚强度的三向拉伸强度, n 为静水压力效应指数。对于纤维掺量为2.0%的ECC, $\sigma_0 = 5.2$ MPa,明显高于素水泥基材料的拉伸强度, $n = 0.6$ 。

将ECC的 q_i 与纤维掺量、 p 之间的关系绘制于图10。由图可知,在三维坐标系下,随纤维掺量增加,强度面沿 p 正方向的切线斜率逐渐减小;而随着纤维掺量的增加, p 负半轴的ECC强度呈增大趋势,而 p 正半轴的ECC强度呈减小趋势。构造的ECC强度曲面能够同时反映纤维掺量与 p 对ECC强度的影响规律,可作为强度面对ECC结构进行承载力设计,或作为屈服面建立ECC的弹塑性本构模型。

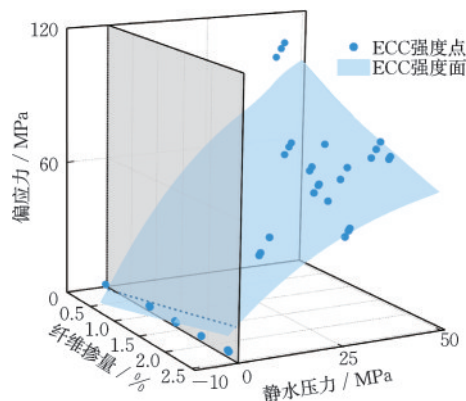


图10 纤维掺量-静水压力-三轴压缩强度之间的关系
Fig.10 Relationship between fiber content, hydrostatic pressure and triaxial compressive strength

5 结 论

通过开展内掺PVA纤维的ECC三轴压缩试验与劈裂拉伸试验,从材料强度发挥机制的角度,阐述了纤维掺量与围压对ECC强度与变形的影响规律,获得的结论如下:

(1) 纤维的掺入改变了ECC摩擦强度与黏聚强度的发挥,减小了材料组分之间的摩擦特性,使得材料的摩擦强度降低,表现为三轴压缩条件下的破裂面随着纤维掺量的增加而逐渐减小;纤维的掺入提高了ECC的黏聚强度,延长了材料的劈拉破坏过程,增大破坏应变。

(2) 围压对ECC强度特性的影响符合摩擦材

料强度规律,即材料的强度随静水压力增加呈非线性增大趋势,由摩擦型材料转变为非摩擦型材料;综合纤维对ECC摩擦强度与黏聚强度的影响,ECC的三轴压缩强度随着纤维掺量的增加而减小。

(3) 纤维的掺入减小了ECC的三轴压缩模量,对其峰值强度前的变形行为影响不大,但显著影响了峰后材料的变形行为,随着纤维掺量的增加软化速度减缓,且随着纤维掺量的增加,ECC的体积变形由剪缩/剪胀型变为剪缩型。

参考文献:

- [1] 徐世焯,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 32-41.
Xu S L, Li H D. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 32-41. (in Chinese)
- [2] Fischer G, Li V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(6): 781-790
- [3] Pimentel T M, De Andrade S F. Repair of pre-damaged RC beams using hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites [J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112081.
- [4] Zhang R, Matsumoto K, Hirata T, et al. Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements[J]. Engineering Structures, 2015, 86: 146-156.
- [5] Pan Z F, Zhu Y Z, Qiao Z, et al. Seismic behavior of composite columns with steel reinforced ECC permanent formwork and infilled concrete [J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110541.
- [6] Qudah S, Maalej M. Application of Engineered Cementitious Composites (ECC) in interior beam-column connections for enhanced seismic resistance [J]. Engineering Structures, 2014, 69: 235-245.
- [7] 钱辉,康莉萍,郭院成,等. 基于SMA和ECC复合材料的自恢复剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 51-61, 71.
Qian H, Kang L P, Guo Y C, et al. Experimental study on seismic behavior of self-centering shear wall reinforced with shape memory alloy bars and engineered cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 51-61, 71. (in Chinese)

- [8] 吴孝鑫, 谢群, 赵鹏, 等. 超高延性混凝土加固砌体墙抗震性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(4): 859-869.
- Wu X X, Xie Q, Zhao P, et al. Seismic behavior of masonry wall strengthening with ultra-high ductility concrete[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(4): 859-869. (in Chinese)
- [9] Ma H, Zhang Z G, Ding B, et al. Investigation on the adhesive characteristics of Engineered Cementitious Composites (ECC) to steel bridge deck[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 679-691.
- [10] Yu K Q, Li L Z, Yu J T, et al. Direct tensile properties of engineered cementitious composites: A review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 346-362.
- [11] Sun L Z, Hao Q, Zhao J L, et al. Stress strain behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced cementitious composites under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 349-360.
- [12] Singh M, Saini B, Chalak H D. Performance and composition analysis of engineered cementitious composite (ECC) - A review[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26: 100851.
- [13] Wang Y C, Liu F C, Yu J T, et al. Effect of polyethylene fiber content on physical and mechanical properties of engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 251: 118917.
- [14] Said S H, Razak H A, Othman I. Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 176-188.
- [15] Khan M, Cao M, Xie C, et al. Effectiveness of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete under compression[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00941.
- [16] Yang X, Gao W Y, Dai J G, et al. Flexural strengthening of RC beams with CFRP grid-reinforced ECC matrix[J]. Composite Structures, 2018, 189: 9-26.
- [17] Zheng Y Z, Wang W W, Brigham J C. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with a composite reinforcement layer: BFRP grid and ECC[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 424-437.
- [18] Ge W J, Ashour A F, Ji X, et al. Flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 175-188.
- [19] 刘春阳, 顾一凡, 高英棋, 等. 钢纤维全再生粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(5): 946-953.
- Liu C Y, Gu Y F, Gao Y Q, et al. Experimental study on flexural performance of concrete beams with steel fiber and fully recycled coarse aggregate[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5): 946-953. (in Chinese)
- [20] Zhang Y X, Deng M K, Li T, et al. Strengthening of flexure-dominant RC columns with ECC jackets: Experiment and analysis[J]. Engineering Structures, 2021, 231: 111809.
- [21] Chen X, Zhuge Y, Nassir AL-Gemeel A, et al. Compressive behaviour of concrete column confined with basalt textile reinforced ECC[J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112651.
- [22] 朱忠锋, 王文炜. FRP 编织网/ECC 复合加固钢筋混凝土圆柱力学性能的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1082-1087.
- Zhu Z F, Wang W W. Experimental study on mechanical behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with FRP textile and ECC[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1082-1087. (in Chinese)
- [23] Noori A, Shekarchi M, Moradian M, et al. Behavior of steel fiber-reinforced cementitious mortar and high-performance concrete in triaxial loading[J]. ACI Materials Journal, 2015, 112(1): 95-104.
- [24] Zhang S S, Wang J J, Lin G, et al. Stress-strain models for ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHP-FRC) under triaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2023, 370: 130658.
- [25] 潘金龙, 何信轩, 王路平, 等. ECC 双轴压力学性能及破坏准则试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 186-193.
- Pan J L, He J X, Wang L P, et al. Experimental study on mechanical behaviors and failure criterion of Engineered Cementitious Composites under biaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 186-193. (in Chinese)
- [26] 周俊, 韦建刚, 杨艳, 等. UHPC 三轴受压力学性能研究[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 206-217, 226.
- Zhou J, Wei J G, Yang Y, et al. Research on mechanical properties of UHPC under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(11): 206-217, 226. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)

(下转第 531 页)