

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.092



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于水泥基复合材料与弧型钢筋的后浇带 连接方法及其变形性能

徐梦楠¹, 陈适才¹, 姚爱军¹, 王强², 蔡崇德^{2,3}

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100049;
3. 中铁建设集团雄安发展有限公司, 河北 雄安 071899)

摘要:超长结构基础通常设置后浇带分区域浇筑,而后浇带是结构的薄弱部位,为了改善后浇带的轴向以及两侧不均匀沉降引起的弯曲变形性能,提出一种基于工程水泥基复合材料(ECC)及弧型钢筋的后浇带连接方法,并对其进行受力与变形性能研究。通过三点弯曲加载试验和单轴拉伸试验来探究基体类型和钢筋形态对弯曲和拉伸性能的影响,三点弯曲试验以有无体积掺量2%的PVA纤维和有无弯曲弧形钢筋为试验参数,设计了4组弯曲试件,轴向拉伸试验考虑的试验参数相同,设计了4组拉伸试件,试验采用直接静力加载方案。结果表明:随着聚乙烯醇纤维(PVA)的掺加和弧形钢筋的布置,PVA纤维能有效分担钢筋的拉力,试件呈现多缝开展的弯曲破坏和大变形拉伸延性破坏,试件的弯曲变形和拉伸变形能力显著增强;ECC和弧形钢筋的协同作用能使后浇带弯曲极限挠度和极限拉伸应变分别提高1.2倍和4.7倍。

关键词:后浇带;ECC混凝土;弧形钢筋;抗弯性能;拉伸性能

中图分类号:TU753 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-12

New post-cast strip connection method based on ECC and arc-shaped steel bars and its deformation performance

XU Mengnan¹, CHEN Shicai¹, YAO Aijun¹, WANG Qiang², CAI Chongde^{2,3}

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China;
2. China Railway Construction Group Co. Ltd., Beijing 100049, P. R. China; 3. China Railway Construction Group Xiongan Development Co., Ltd, Xiongan 071899, Hebei, P. R. China)

Abstract: Ultra-long concrete structures are usually equipped with post-cast strips, which are the weak points of the structures. In order to improve the axial deformation performance of the post-cast strips and the bending deformation performance caused by uneven settlement on both sides, a new post-cast strip connection method based on ECC and arc-shaped steel bars is proposed in this paper, and its stress and deformation performance is studied. Three-point bending loading tests and uniaxial tensile tests are designed to investigate the effects of

收稿日期:2025-07-01

基金项目:中铁建设集团重点项目(SG-GC-01262)

作者简介:徐梦楠(2001-),女,主要从事ECC混凝土结构研究,E-mail:1405645961@qq.com。

陈适才(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:csc@bjut.edu.cn。

Received: 2025-07-01

Foundation item: Key Projects of China Railway Construction Group (No. SG-GC-01262)

Author brief: XU Mengnan (2001-), main research interest: engineered cementitious composite (ECC) structures, E-mail: 1405645961@qq.com.

CHEN Shicai (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail:csc@bjut.edu.cn.

matrix type and steel reinforcement morphology on bending and tensile properties. For the three-point bending test, two experimental parameters were considered: presence or absence of 2% vol. PVA fibers and presence or absence of curved steel reinforcement. Four groups of bending specimens were designed accordingly. The axial tensile test followed the same parameter combinations, with four groups of tensile specimens being designed. Both tests adopted a direct static loading scheme. The experimental results show that with the addition of PVA fibers and the arrangement of curved steel bars, PVA fibers can effectively share the tensile force for the steel bars. The specimens exhibit multi-seam bending failure and large deformation tensile ductility failure, and the bending deformation and tensile deformation capabilities of the specimens are significantly enhanced; The synergistic effect of ECC and curved steel bars can increase the bending ultimate deflection and ultimate tensile strain of the post-cast strips by 1.2 times and 4.7 times, respectively.

Keywords: post-cast strips; ECC concrete; curved steel bars; flexural performance; tensile performance

随着城市建设的不断发展,超长筏板基础的应用逐渐增多,但也存在收缩和不均匀沉降等问题^[1-2],进而产生裂缝^[3]。目前对超长筏板基础抗裂的一般措施是通过“抗”和“放”结合:通过施加预应力、在混凝土中添加膨胀剂^[4]或纤维材料等“抗”;通过设置后浇带、跳仓施工^[5]、设置滑动层、采用橡胶支座等“放”^[3,6-7]。由于成本高,工作量大不易实现,工程中主要通过设置后浇带的方式来解决筏板基础抗裂的问题^[7]。由于超长筏板基础的不均匀沉降会导致后浇带受弯,另外,后浇带也会受到两侧筏板的约束,混凝土收缩产生的拉力,所以后浇带存在易开裂和变形能力弱的问题^[8]。因此,有必要对超长筏板基础后浇带的变形性能进行研究。

ECC (Engineered Cementitious Composites) 高延性混凝土是经系统设计,在拉伸和剪切荷载下呈现高延性的一种纤维增强水泥基复合材料^[9-12],在工程中适用范围广泛^[13-15]。已有研究表明,PVA 纤维体积掺量 2% 的 ECC,使用常规的搅拌工艺便可成型,在拉伸荷载的作用下可产生多条细微裂缝,表现出明显的应变硬化特征,极限拉应变可稳定地达到 3% 以上^[16-18]。目前关于 ECC 混凝土梁受弯性能的研究已有众多成果,比如,Wei 等^[19]在弯曲试验中发现,ECC 混凝土改善了组合梁的裂缝模式,提高了弯曲变形能力,弯曲承载力提高了 8.1%~19.9%。为探究 ECC/高强钢筋混凝土叠合梁的正截面受弯特性,高淑玲等^[20]通过正截面弯曲试验发现,ECC 叠合梁的承载力更高、挠度值更大及裂缝宽度更小,ECC 混凝土与钢筋的协调性好。钱辉等^[21]将 ECC 材料应用到梁柱节点,增强了构件的变形能力得到,提高了结构的延性及耗能能力。关于 ECC 混凝土拉伸性能:张君等^[22]、公成旭等^[23]对 ECC 混凝土进行拉伸试验发现,ECC 材料的单轴拉伸性能的改善明显,极限抗拉应变提高^[22-23]。Gu 等^[24]对 ECC 梁进行抗剪性能测试发现,对比混凝土

试件的脆性破坏,ECC 试件刚度下降缓慢,展现出优异的延性破坏特征。高云飞等^[25]对 ECC 混凝土进行单轴拉伸试验,讨论了 ECC 与 FRP 网格、混凝土的界面性能,探究了 ECC 应用于结构的加固与修复。目前,ECC 混凝土在后浇带处的应用较少,且其考虑的荷载工况相对单一,一般只分析了试件在受弯或者受拉时的性能,未进行全面分析。

弧形钢筋是采用机器将钢筋加工成微弯的弧形,利用弧形钢筋的伸缩来增强试件的变形能力。高立^[26]提出了一种微弯弧形的跨宽槽钢筋形式,通过弧形钢筋混凝土板受弯试验发现,与直钢筋混凝土板相比,弧形钢筋能够有效减少应力损失,提高施工效率。目前,在分析试件尤其是在后浇带处的承载变形能力时,现有的研究主要集中在材料性质的变化,未综合考虑钢筋形态对试件承载变形能力的影响。

由此可见,将 ECC 混凝土材料引入到后浇带,能改善其变形性能;另一方面,后浇带处的钢筋对混凝土具有一定的约束作用,如果同时将钢筋改成弧型布置,后浇带处的受力和变形性能可能会得到改善。笔者通过采用 ECC 结合钢筋曲线形布置来形成一种新的后浇带连接方法。虽然后浇带一般同时受到弯矩和轴力作用,也即后浇带同时存在弯曲变形和轴向变形,但分别通过弯曲和轴拉试验进行研究,能更方便定量分析其弯曲或轴拉性能,因此笔者分别设计了三轴弯曲加载试验和单轴拉伸试验,同时考虑 ECC 混凝土和曲线型钢筋的影响,研究 ECC 高延性混凝土和弧形钢筋耦合作用和效果。

1 试验

1.1 试验设计

1.1.1 试件设计

不同结构、不同尺寸后浇带的轴向变形和两侧不均匀沉降引起的后浇带受力和变形不同,但主要

存在轴向变形和弯曲变形两种形式,因此,设计三点弯曲加载试验和单轴拉伸试验探究此连接的弯曲和拉伸性能。另外,由于只研究后浇带部分的受力变形性能,不考虑两侧其他结构,所以试件的混凝土采用一次性浇筑。试件考虑2个试验变量:水泥基基体和钢筋形态。水泥基体分为两种:E基体为ECC混凝土,C基体为C30混凝土。钢筋形态有2种:W钢筋为弧形钢筋,根据试件的尺寸大小,三点弯试件选择在150 mm长度范围内的钢筋内弯10 mm,单轴拉伸试件选择在300 mm长度范围内的钢筋内弯10 mm;Z钢筋为普通直钢筋。两种试验分别设计4组试件,试件命名包括3部分:第1部分为试验类型,第2部分为基体类型,第3部分为钢筋形态。如,“W-E-W-01”代表三点弯试验ECC混凝土弧形钢筋梁;“L-E-W-01”代表单轴拉伸试验ECC混凝土弧形钢筋梁。单轴拉伸试件的夹具有3种方式:外夹式、内埋式和粘贴式^[27],试验选择内埋式。试件设计如表1所示。

表 1 试件设计			
Table 1 Specimen design methodology			
试件编号	混凝土类型	纵筋形态	试验类型
W-E-W-01	ECC	弧形	三点弯曲加载试验
W-C-W-02	C30	弧形	
W-E-Z-03	ECC	直	
W-C-Z-04	C30	直	
L-E-W-01	ECC	弧形	单轴拉伸试验
L-C-W-02	C30	弧形	
L-E-Z-03	ECC	直	
L-C-Z-04	C30	直	

1.1.2 试件尺寸

三点弯曲试验设计制作两种不同混凝土基体、不同钢筋形态的构件,每种各1根,共4根。试件总长为500 mm,截面面积为80 mm×100 mm,其中普通混凝土直钢筋构件为对照组。构件内部纵筋采用4根直径12 mm、HRB400级钢筋,纵筋上贴有3个应变片;箍筋采用直径为6 mm、HPB400级钢筋,间距50 mm或75 mm,共9道,保护层厚度为15 mm,如图1所示。

单轴拉伸试件总长为600 mm,两端截面放大,为100 mm×130 mm,中间截面为100 mm×100 mm,测距为300 mm,其中普通混凝土直钢筋构件为对照组。构件内部纵筋采用4根直径12 mm、HRB400级钢筋,箍筋采用直径为6 mm、HPB400级钢筋,间距50 mm,共13道,保护层厚度为20 mm,如图2所示。

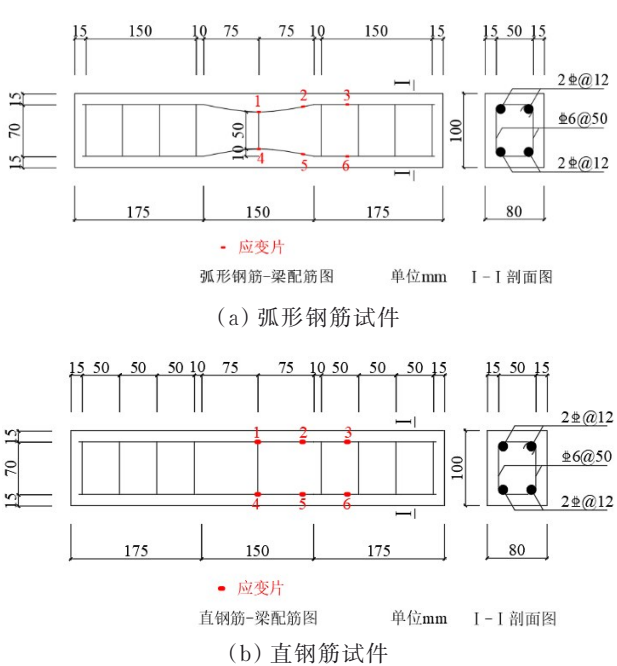


图 1 三点弯试件详细尺寸

Fig.1 Details of three-point bending specimens

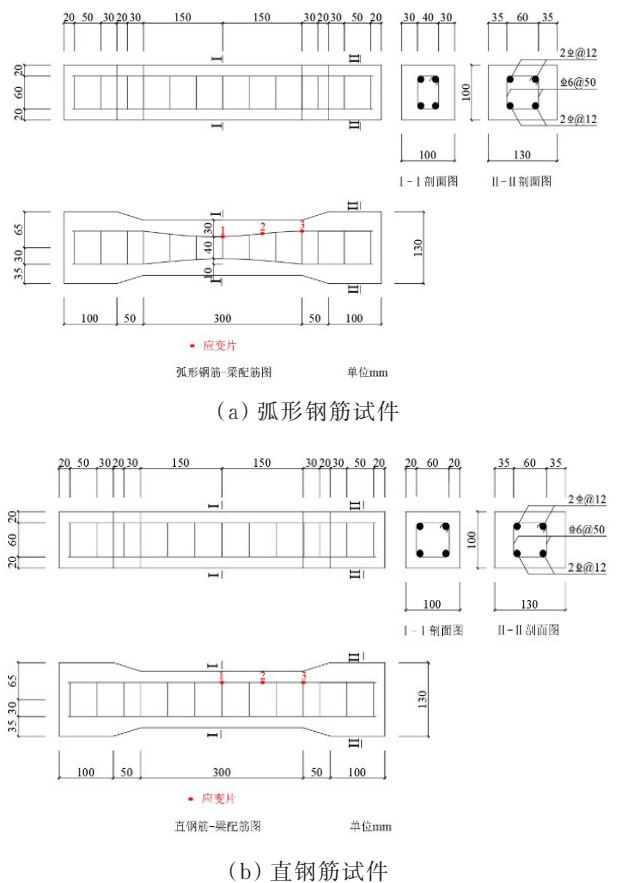


图 2 单轴拉伸试件详细尺寸

Fig.2 Uniaxial tension specimens

1.1.3 加载方案

三点弯曲试验采用MTS万能试验机来进行,在试验构件跨中布置位移计,加载模式如图3所示。试验开始前先进行100N的预加载,加载方式为单

点加载,加载过程中采用位移控制,加载速率为 0.5 mm/min,加载过程中采用分级加载,每级 3 kN,每级持荷 3 min,停止 1 min 记录数据,加载到开裂荷载时每级降为 1 kN,每级持荷 3 min,停止 1 min 记录数据。记录加载过程中的构件状态,加载完毕后进行数据记录并分析。

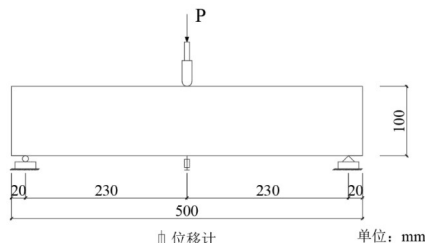


图3 三点弯曲加载模式

Fig.3 Three-point bending test setup with loading protocol

单轴拉伸试件在 MTS 万能试验机上进行拉伸试验,试验试件的两端布置竖向位移计测量拉伸长度。在试件弹性范围内进行 100N 的预拉加载,加载速率采用 0.3 mm/min,匀速对试件进行加载试验,记录数据,直至试件破坏。



图4 单轴拉伸加载模式

Fig.4 Uniaxial tensile testing protocol

1.2 试验材料

采用 P·O 42.5 级硅酸盐水泥、I 级粉煤灰、石英砂和 PVA 纤维制备混凝土试件。其中,日本可乐丽 PVA 纤维的性能参数见表 2,石英砂平均粒径 110 μm ,ECC 材料配合比如表 3 所示^[28],HRB400 钢筋材性能如表 4 所示^[29]。

表2 PVA 纤维的性能参数

Table 2 Performance parameters of PVA fiber

直径/ μm	长度/ mm	伸长率/%	密度/ (g/cm^3)	弹性模 量/MPa	抗拉强 度/MPa
39	12	7	1.3	42.8	1 600

表3 ECC 混凝土材料的配合比

Table.3 Mix proportion design of ECC materials

水泥/kg	粉煤灰/ kg	砂胶比	水胶比	减水剂/kg	纤维体积 掺量/%
1.0	1.20	0.36	0.26	0.012	2%

采用 ECC 混凝土制作试验试件和 3 个 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm 立方体块,根据《混凝土结构设计规范》^[30]对其进行混凝土抗拉试验和立方体抗压强度试验,试验发现 ECC 混凝土在拉伸作用下

表4 钢筋的材性性能

Table 4 Material properties of steel reinforcement

直径/mm	密度/ (kg/m^3)	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	极限抗拉强 度/MPa
6	7850	400	200	435
12	7850	385.0	214	421.2

产生多条细密的裂缝,极限拉应变可稳定达到 3% 以上,试验结果见表 5,ECC 混凝土的破坏形态如图 5 所示,PVA 纤维及钢筋形态如图 6 所示。

表5 试块各项力学性能

Table 5 Mechanical property matrix of concrete specimens

试件编号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
ECC-01	48.92	3.84
ECC-02	49.13	3.53
ECC-03	48.78	3.45
平均值	48.94	3.61



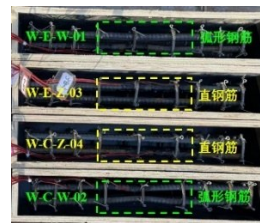
(a) ECC 狗骨形试件拉伸破坏 (b) ECC 立方体抗压破坏

图5 ECC 混凝土的破坏形态

Fig.5 Failure mode characteristics of ECC



(a) PVA 短纤维



(b) 钢筋形态

图6 PVA 短纤维和钢筋形态

Fig.6 PVA fibers and steel reinforcement

2 试验结果与讨论

2.1 裂缝发展分析

三点弯曲试件的开裂形态见图 7。保持钢筋形态相同,比较 C30、ECC 基体试件的破坏状态:试件加载初期,ECC 混凝土试件在跨中的下部出现多条细微裂缝,随着荷载的增加,跨中区域微裂缝的数量逐渐增多,逐渐蔓延到整个试件的中间部分,但裂缝的宽度始终保持大体相同,同时距支座四分之一处竖向裂缝形成 45°向加载点处延伸,加载后期支座处的裂缝逐渐增大,试件顶部的混凝土出现横向

裂缝,此时由于纤维的桥联应力,试件承载力缓慢下降,最终达到桥联应力的极限,伴随着撕拉声,试件发生破坏。而普通混凝土试件在加载初期首先也在跨中下部出现两根裂缝,随着荷载的施加,裂缝宽度逐渐增大,并在此基础上向上延伸,支座附近也开始出现斜向 45° 裂缝,并逐渐向加载点处蔓延,加载后期顶部出现横向裂缝,与斜向裂缝和跨中竖直裂缝相交,由于未掺纤维,试件达到最大承载力后承载力迅速下降,最终试件被压坏。



(a) W-E-W-01



(b) W-C-W-02



(c) W-E-Z-03



(d) W-C-Z-04

图7 三点弯曲试件的开裂形态

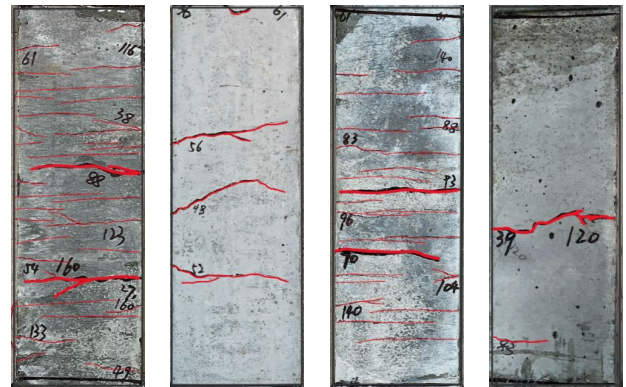
Fig.7 Crack characteristics in bending specimens

当混凝土基体相同时,比较直、弧形钢筋试件的破坏形态:弧形钢筋的试件在加载后主要沿着跨中裂缝为主裂缝发展,斜裂缝较小,呈现弯曲破坏的形态,由弯曲应力引起,试件变形较大;而直钢筋的试件主要沿着斜裂缝发展,呈现剪切破坏的形态,导致混凝土梁变形较小,试件破坏时 W-E-W-01 和 W-C-Z-04 的主裂缝的最大裂缝宽度分别为 0.15 mm 和 0.8 mm。

由破坏形态的改变得知,PVA 纤维和弧形钢筋均可以显著增强混凝土梁的变形能力,减小裂缝宽度,使试件表现更好的延性破坏的特征。

单轴拉伸试件的开裂形态如图 8 所示。在加载初期,单轴拉伸试件处于弹性阶段,未出现裂缝。随着荷载的施加,达到试件的开裂荷载时,开始在薄弱位置出现垂直于拉伸方向的微裂缝。由于普通混凝土没有纤维的辅助,裂缝处的混凝土迅速退

出工作,此处的微裂缝不断扩大发展成主裂缝,贯穿梁的横截面,伴随着部分混凝土剥落,最终试件发生破坏并退出工作;与普通混凝土试件相比,ECC 混凝土试件的裂缝间距更小,呈多裂缝开展的模式,且出现裂缝后混凝土未剥落,仍然保证了试件的整体性。试验结果表明,弧形钢筋试件比直钢筋的裂缝路径更加多变,裂缝的平均间距更小,变形能力更强。



(a) L-E-W-01 (b) L-C-W-02 (c) L-E-Z-03 (d) L-C-Z-04

图8 单轴拉伸试件的开裂形态

Fig.8 Cracking morphology in uniaxial tension specimens

2.2 破坏机理

三点弯曲试件和单轴拉伸试件的开裂及裂缝发展主要受混凝土基体种类和钢筋形态影响。对于使用 ECC 基体的混凝土试件, W-E-W-01 试件和 L-E-W-01 试件在弹性阶段承载力增强,到开裂荷载时试件出现裂缝,最终演变为多条细密裂缝开展的形式,达到最大承载力后由于弧形钢筋和 ECC 混凝土的共同作用,增强了试件的变形能力,承载力下降缓慢。试件多裂缝开展是由于混凝土开裂后,内部致密的 PVA 纤维提供稳定的桥联应力^[31],基体的裂缝以稳态开裂模式发展,在这一过程中裂缝的应力和变形保持稳定。在第一条裂缝出现后,试件的承载能力瞬间下降后又极快恢复,裂缝维持在肉眼几不可见的宽度,如此循环往复,整个试件呈现多裂缝细密开展的状态,每条裂缝大体相同,此时裂缝内的纤维形成的桥联应力不足以支撑出现更多的裂缝,随着荷载的不断施加,原有裂缝的宽度逐渐增加,直至试件破坏。

钢筋的形态影响了 ECC 混凝土试件的开裂状态和变形能力, W-E-W-01 试件和 L-E-W-01 试件的挠度和应变高于布置直钢筋的 W-E-Z-03 试件和 L-E-Z-03 试件,这是因为 W-E-W-01 试件和 L-E-W-01 试件布置的弧形钢筋存在弯曲的预变形,能提高构件的抗裂和弯曲变形的能力。而在相同的钢筋形态条件下,相较于 ECC 混凝土试件,普通混凝土试

件的裂缝间距更宽,开裂宽度更大;对于普通混凝土试件,改变钢筋形态,弧形钢筋的 W-C-W-02 试件和 L-C-W-02 试件表现出更大的位移。

2.3 荷载-挠度曲线分析

三点弯曲试件从加载到破坏的受力过程可分为 3 个阶段:弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段。试件的荷载-挠度曲线如图 10(a)所示。由图 10(a)可见,所有试件的荷载-挠度变化规律均呈现先上升后下降的趋势。W-E-W-01 试件和 W-E-Z-03 试件的峰值点和极值点均高于 W-C-W-02 试件和 W-C-Z-04 试件,这是因为 ECC 混凝土的强度和变形能力优于普通混凝土。在 5 kN 后, W-C-W-02 试件刚度比 W-C-Z-04 试件低,但 W-C-W-02 试件的峰值挠度和极限挠度值均比 W-C-Z-04 试件高。这是因为弯钢筋的预变形引起了受拉区混凝土的提前开裂,试件更早开裂所以引起了刚度下降,但是弯钢筋充分的预变形,使试件最终的变形能力获得了提高。同样地, W-E-W-01 试件在 18 kN 后的刚度略低于 W-E-Z-03 试件,这是因为虽然弯曲钢筋存在预变形,但 ECC 混凝土比普通混凝土更密实,抗裂能力更强,弯钢筋在加载初期对 ECC 混凝土试件的刚度削弱能力被减弱了。因此,弯钢筋的预变形对普通混凝土试件在加载初期的影响最显著, W-C-W-02 试件在加载初期的刚度相比其他试件更低。

以 W-E-W-01 试件为例进行分析(图 10(b))。

1) 在加载初期,试件均处于弹性阶段(阶段 I),裂缝并未出现。随着荷载的施加,试件顶部受到的压力远小于抗压强度,处于线性阶段(图 9(a))。当试件受拉区混凝土的最大拉应力 σ_t 达到混凝土的抗拉强度 f_t ,且最大拉应变 ϵ_t 大于极限拉应变

ϵ_{tu} 时,在试件跨中的薄弱位置出现第 1 条竖向裂缝。由于 ECC 混凝土试件添加 PVA 纤维,当混凝土梁下部受拉时,基体的纤维提供了充足的桥联应力,在试件开裂后仍然能在裂缝处传递拉力;而普通混凝土试件未掺纤维,导致试件很快开裂,出现单一裂缝,且在主裂缝基础上继续向顶部蔓延。试件出现裂缝标志着阶段 I 的结束(I_a),如图 10(b)中的 OA 段,此时试件承担的弯矩为开裂弯矩 M_{cr} (图 9(b));

2) 随后进入到带裂缝工作的阶段(阶段 II),受压区混凝土压应力逐渐由线性分布转为非线性分布(图 9(c))。受拉区 ECC 混凝土试件在加载作用下裂缝数量开始增加,到达试件的极限承载力时,不再有新裂缝出现,而是在原有裂缝上开始变宽;普通混凝土试件在出现主裂缝后便在此之上延伸扩展,很快到达试件的极限承载力(图 9(d))。钢筋屈服时标志着阶段 II 的结束(II_b),如图 10(b)中的 AB 段,试件承担的弯矩为屈服弯矩 M_y (图 9(e));

3) 最后到达试件承载力下降至破坏阶段(阶段 III),中和轴继续上移,此时受压区试件压应力达到最大值,顶部的混凝土出现水平方向的裂缝(图 9(f)),当受压区混凝土的最大压应变 ϵ_c 达到极限压应变 ϵ_{cu} 时,受压区的混凝土被压碎。受拉区 ECC 混凝土试件的承载力以相对缓慢的速度持续下降,钢筋屈服后使得混凝土的粘结破坏,裂缝变宽向上延伸,最终试件发生破坏并退出工作;而普通混凝土试件在到达极限承载力后承载能力迅速下降,混凝土开始剥落,试件发生破坏。如图 10(b)中的 BC 段, C 点是试件的极限点,此时承担的弯矩为极限弯矩 M_u (图 9(g))。

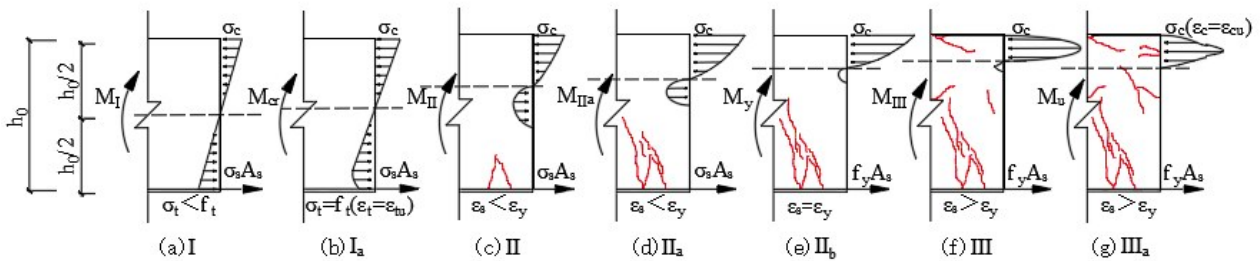
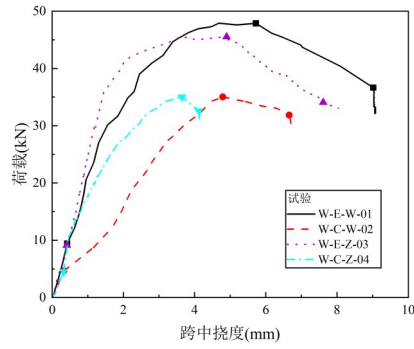


图 9 三点弯试件的截面应力和裂缝开展过程

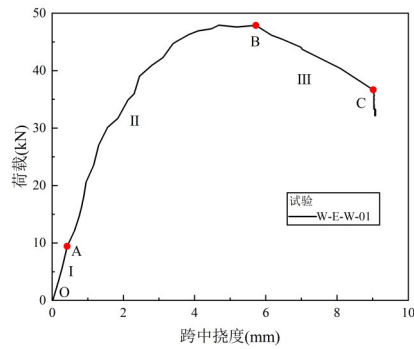
Fig.9 Stress distribution across the section and crack propagation process in three-point bending specimens

单轴拉伸试件的荷载-应变曲线如图 11(a)所示。由图 11(a)可知,所有试件的荷载应变变化规律均呈现先上升后水平最后下降的趋势。L-E-W-01 试件和 L-E-Z-03 试件的峰值平台长度和极值点均高于 L-C-W-02 试件和 L-C-Z-04 试件,这是因为

ECC 混凝土的变形能力优于普通混凝土。由于弯曲钢筋存在预变形,试件更容易开裂, L-E-W-01 试件和 L-E-Z-03 试件在初期加载时的刚度均小于 L-C-W-02 试件和 L-C-Z-04 试件。但随着荷载的不断增加,弯曲钢筋的预变形使试件的屈服荷载更大,



(a) 荷载-挠度曲线



(b) W-E-W-01 荷载-挠度曲线

图 10 三点弯试件的荷载-挠度曲线

Fig.10 Load-deflection curve of bending specimens

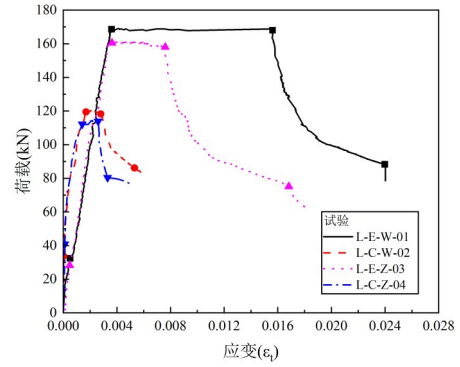
屈服平台更长,最终变形能力也更强。其中,同时布置弯钢筋和使用 ECC 混凝土的 L-E-W-01 试件屈服荷载最大,屈服平台最长,最终变形能力也最强。当布置直钢筋时,L-C-Z-04 试件相比 L-E-Z-03 试件的变形能力增大幅度不明显,说明 ECC 混凝土对试件的变形能力的提高有限。

所有试件从加载到破坏,受力过程可分为 4 个不同阶段:弹性段、荷载上升段、荷载稳定段和软化段,试件破坏过程如图 11(b)所示,以试件 L-E-W-01 为例(图 11(c))进行说明。

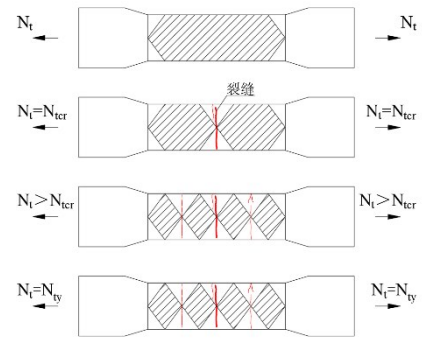
1) 从加载到出现裂缝前,属于弹性阶段(阶段 I)。加载初期,混凝土和钢筋协同作用,共同承担拉力,拉力 N_t 和应变 ϵ_t 呈线性关系,如图 11(c)中的 OA 段。

2) 从开始出现第一条裂缝到多条裂缝开展前属于荷载上升段(阶段 II)。首先在试件的薄弱位置出现垂直受拉方向的微裂缝,裂缝处的混凝土迅速退出工作,转由钢筋承担拉力,此时曲线斜率小于弹性阶段,如图 11(c)中的 AB 段。

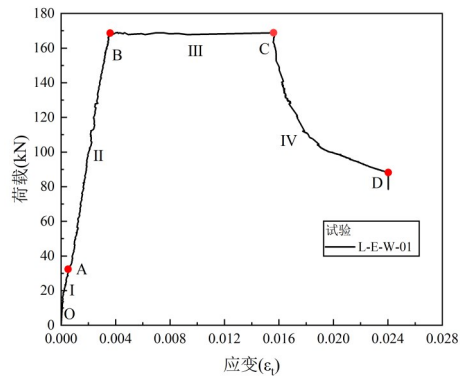
3) 从多条裂缝开展到承载力下降前属于荷载稳定段(阶段 III)。随着荷载的增加,裂缝不断开展,此时在荷载值稳定的情况下试件的应变开始增长,反映出材料的延性特点,如图 11(c)中的 BC 段。乱向分布的纤维在此过程分担了拉力,试件延性大



(a) 荷载-应变曲线



(b) 破坏过程示意图



(c) L-E-W-01 荷载-应变曲线

图 11 单轴受拉试件试验曲线及破坏过程示意图

Fig.11 Test curves and schematic diagram of failure process for uniaxial tension specimens

大提高,表现在 ECC 混凝土试件比普通混凝土试件的平台期更长。

4) 从承载力下降至破坏属于软化段(阶段 IV)。当拉力 N_t 接近屈服荷载 N_{ty} 时,钢筋开始屈服,如图 11(c)中的 CD 段。在此阶段,荷载略有增加,裂缝迅速扩展。D 点是试件的极限点,此时钢筋全部屈服,试件达到破坏状态。

PVA 纤维在试件受拉时充分发挥桥联作用,强化混凝土抗拉能力,所以 ECC 混凝土试件的荷载-应变曲线大幅提高,包括开裂之前的弹性段、荷载上升段、荷载稳定段和软化段,极限应变可达到 2.4%。与普通混凝土试件相比,ECC 混凝土试件

的不同钢筋对比效果更加明显,延性变形能力更强,曲线下降更加缓慢,说明ECC混凝土和弧形钢筋变形协调更好,对试件变形能力的提高更有效果。

2.4 特征点分析

三点弯试件在荷载作用下,每组的开裂强度、开裂挠度、峰值强度、峰值挠度、极限强度、极限挠度见表6。试件的极限强度和极限挠度根据试件破坏点处的荷载值和对应的挠度定义。由表6可知:

1)在加载初期,对于相同基体的试件,直、弧形钢筋试件的开裂荷载以及开裂挠度大致相同;对于直、弧形钢筋的试件,ECC混凝土试件相较于普通混凝土试件,其开裂荷载和开裂挠度分别提高了101%和28%。说明加载初期钢筋与混凝土协同作用,钢筋形态对试件的开裂荷载和挠度影响较小。保持钢筋形态相同,添加PVA纤维可显著提升试件的抗裂能力。由于ECC混凝土弹性模量小于普通混凝土,在曲线上升期普通混凝土试件的刚度大于ECC混凝土试件。

2)在加载中期,对于相同基体的试件,直、弧形钢筋试件的峰值荷载基本相同,但峰值挠度均有不同:在普通连接W-C-Z-04基础上,采用ECC的W-E-Z-03试件峰值挠度提高到原来的1.3倍,采用弧形钢筋时,W-E-W-01的峰值挠度进一步提高到原来的1.6倍。另外,在加载中期裂缝的出现使得受拉区混凝土逐渐退出工作,转由钢筋承担拉力,而弧形钢筋比直钢筋的变形能力更好;另外,PVA纤维的掺入也大大提升了试件的峰值强度和变形能力。

3)在加载后期,对于相同基体的试件,直、弧形钢筋试件的极限荷载基本相同,但极限挠度均有不同:在普通连接W-C-Z-04基础上,采用ECC的W-

E-Z-03试件极限挠度提高了到原来的2倍,而采用弧形钢筋时,W-E-W-01的极限挠度进一步提高到原来的2.2倍。

对比W-C-Z-04试件和W-E-Z-03试件,ECC混凝土试件相较于普通混凝土试件极限挠度提升了1倍;对比W-C-Z-04试件和W-C-W-02试件,弧形钢筋试件相较于直钢筋试件极限挠度提升了1.6倍。由此可见,ECC混凝土比钢筋形态的改变对试件挠度提升的影响更大,说明装配弧形钢筋以及浇筑ECC混凝土可以显著提升试件的抗压强度和弯曲变形的能力,优化试件性能。

在荷载作用下,单轴拉伸试件的开裂荷载、开裂应变、峰值荷载、峰值应变、极限荷载、极限应变见表7。试件的极限强度和极限挠度根据试件破坏点处的荷载值和对应的挠度定义。由表7可知:

1)在加载初期,对于相同混凝土的试件,布置直、弧形钢筋试件的开裂荷载以及开裂应变基本相同;对于直钢筋的试件,相较于普通混凝土试件,ECC混凝土试件的开裂荷载提高了76.28%,开裂应变从0.01%提高到了0.12%;对于弧形钢筋的试件,相较于普通混凝土试件,ECC混凝土试件的开裂荷载提高了71.64%,开裂应变从0.01%提高到了0.14%。这是因为ECC混凝土的抗裂能力更强。

2)在加载中期,对于相同基体的试件,直、弧形钢筋试件的峰值荷载未呈现显著变化,但峰值应变变化明显:在普通连接L-C-Z-04基础上,采用ECC的L-E-Z-03试件峰值应变提高了到原来的5倍,而采用弧形钢筋时,L-E-W-01的峰值应变提高到原来的7.4倍,说明ECC和弧形钢筋协同工作可以显著提升后浇带的轴向变形性能。

3)在加载后期,普通混凝土试件未掺加PVA纤维,出现裂缝后迅速退出工作,钢筋随后也很快达

表 6 三点弯试件的特征点

Table 6 Characteristic points of three-point bending pecimens

试件编号	开裂荷载/kN	开裂挠度/mm	峰值荷载/kN	峰值挠度/mm	极限荷载/kN	极限挠度/mm
W-E-W-01	9.43	0.42	46.27	5.72	33.46	9.04
W-C-W-02	4.68	0.33	35.46	4.79	32.73	6.70
W-E-Z-03	9.12	0.41	45.50	4.90	33.06	8.04
W-C-Z-04	4.52	0.32	35.00	3.65	32.69	4.12

表 7 单轴拉伸试件的特征点

Table.7 Characteristic points of uniaxial tensile specimens

试件编号	开裂荷载/kN	开裂应变/%	峰值荷载/kN	峰值应变/%	极限荷载/kN	极限应变/%
L-E-W-01	70.57	0.14	169.08	1.56	78.46	2.40
L-C-W-02	40.89	0.01	120.35	0.28	81.78	0.60
L-E-Z-03	69.13	0.12	160.52	1.06	61.52	1.83
L-C-Z-04	39.24	0.01	114.63	0.21	76.08	0.51

到屈服强度,试件最终破坏。与普通混凝土试件相比,ECC混凝土试件极限应变提高到原来的3.6倍,而采用曲线钢筋布置,极限应变则提高到原来的4.7倍;另外,与直钢筋试件相比,弧形钢筋试件的承载力下降段更加缓慢,应变更大,说明PVA纤维起到了类似钢筋的销栓作用,极大提升了基体界面性能,因此,在拉伸作用下可以有效为钢筋承担一部分拉力,提高试件的变形能力。

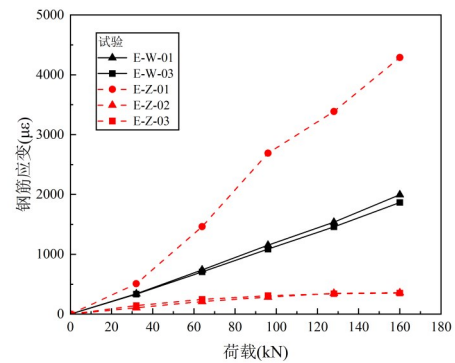
2.5 荷载-钢筋应变分析

三点弯试件和单轴拉伸试件的钢筋应变曲线如图12、图13所示,由于L-E-W-01、L-C-W-02和L-C-Z-04的应变片2在拉伸过程中损坏,没有记录到有效数值,但应变片1、3处于钢筋两个端点位置,故单轴拉伸试件应变片2的损坏不影响试验结论。由图12、13可见:

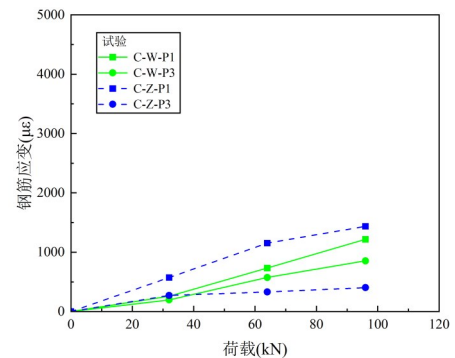
1)对于钢筋形态相同的试件,ECC混凝土试件的钢筋应变数据相对集中。由于ECC混凝土掺入PVA纤维,提高了混凝土的性能,在混凝土梁工作时能够有效分担钢筋承受的拉力,而普通混凝土内的钢筋承受的拉力更大,故钢筋应变数据相对分散。其中,因为在三点弯试件跨中部位布置了箍筋,在加载前期,图12(b)的应变片1在加载前期从受压变成受拉,且在加载过程中弧形钢筋的跨中位移更大,中部箍筋对上部纵筋产生了拉力,所以应变片1处的位置受到了拉力,但是图12(a)中应变片

1变化不大,原因是ECC材料提升了构件的变形能力。

2)对于基体相同的试件,弧形钢筋试件钢筋应变数值更小,不同应变片的数值差距也更小,相比直钢筋试件的应变数值更大,数据分布更加分散。这是由于弧形钢筋的实际受力路径比直钢筋更长,在相同荷载下,总伸长量分布在更长的路径上,导致单位长度应变减小;此外,弧形钢筋的均匀应变分布能够增强试件的延性变形能力,使得各部位的应变值更加接近。



(a) ECC基体试件



(b) C30基体试件

图13 单轴拉伸试件的荷载-钢筋应变曲线

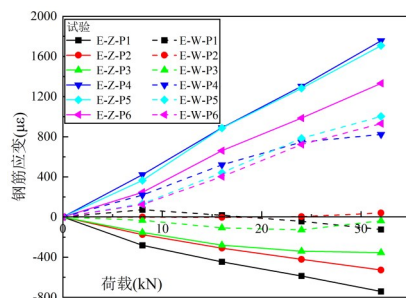
Fig.13 Load-steel reinforcement strain curve of uniaxial tension specimens

3 结论

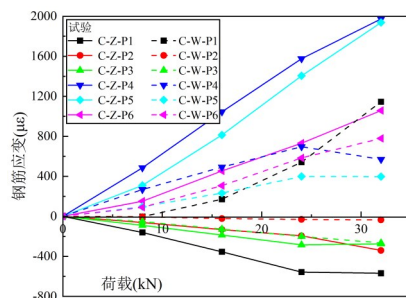
针对基于ECC及弧型钢筋的后浇带连接方法,通过三点弯曲加载试验和单轴拉伸试验研究了后浇带的受力性能与变形性能,分析了不同混凝土基体和钢筋形态对试件弯曲和拉伸性能的影响。主要结论如下:

1)PVA纤维和弧形钢筋能显著增强后浇带的变形能力,试件呈现多缝开展的弯曲破坏的形式,试件的最大承载力增强,破坏时的最大裂缝宽度显著减小,试件表现出更强的延性破坏特征。

2)PVA纤维增强了三轴弯曲试件的开裂荷载



(a) ECC基体试件



(b) C30基体试件

图12 三点弯试件荷载-钢筋应变曲线

Fig.12 Load-steel reinforcement strain curve of three-point bending specimens

和开裂挠度,开裂荷载提高了101%,单轴拉伸试件的开裂荷载提高了70%以上;直、弧形钢筋试件的极限应变分别可达1.83%和2.40%,弧形钢筋试件的承载力下降段更加缓慢,应变更大,提升了试件的峰值挠度和极限挠度。

3)弧形钢筋和ECC混凝土结合具有良好的协同作用。PVA纤维能有效为钢筋分担拉力;弧形钢筋的形态使钢筋上的应力分布更加均匀,各位置的应变差距很小,在荷载作用下不易出现薄弱部位,增强了试件的变形性能,且不同混凝土基体的钢筋应变曲线的变化规律大体相同,说明钢筋的形态在不同混凝土基体中起到的作用大致相同。

参考文献

- [1] 朱兆聪,梁汝鸣,葛序尧,等.气温骤降对超长混凝土结构底板温度应力的影响[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 1723-1727.
- ZHU Z C, LIANG R M, GE X Y, et al. Influence of temperature sudden drop on temperature stress of super-long concrete structure floor [J]. Building Structure, 2023, 53(Sup 1): 1723-1727.
- [2] 刘金砺,秋仁东,高文生,等.关于长桩超长桩桩基沉降计算问题[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊2): 38-42.
- LIU J L, QIU R D, GAO W S, et al. Settlement calculation of foundation with long and super-long piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup 2): 38-42.
- [3] 仇安兵.基于热-力耦合有限元的大体积混凝土裂缝演化分析[J]. 工程科学学报, 2025, 47(5): 995-1004.
- QIU A B. Analysis of crack evolution in large-volume concrete based on thermal mechanical coupling finite element method [J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(5): 995-1004. (in Chinese)
- [4] 陈昌礼,林喜华.氧化镁膨胀剂及其在混凝土中的应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11413-11420.
- CHEN C L, LIN X H. Magnesium oxide expansion agent and its application in concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(28): 11413-11420. (in Chinese)
- [5] 周笋,李国胜,王雪生,等.超长大体积混凝土跳仓法工程设计中的关键问题[J]. 建筑结构, 2019, 49(18): 120-125, 130.
- ZHOU S, LI G S, WANG X S, et al. Key problems in engineering design of alternative bay construction method for super-long large volume concrete structures [J]. Building Structure, 2019, 49(18): 120-125, 130. (in Chinese)
- [6] LU S, LIU J X, PENG C X, et al. Multi-objective optimization of mix proportions for mass concrete with enhanced resistance to cracking and reduced temperature rise [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02810.
- [7] LI J H, YU Z, WU J, et al. The application of heat-shrinkable fibers and internal curing aggregates in the field of crack resistance of high-strength marine structural mass concrete: A review and prospects [J]. Polymers, 2023, 15(19): 3884.
- [8] ZHONG Z H, TANG H P, LI B, et al. Construction technology and quality control of post-cast composite slab and strip[M/OL]//WANG Z F, YANG E H, YANG M J, et al. Hydraulic and Civil Engineering Technology IX. IOS Press, 2024: 136-141. [2025-05-29]. <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/ATDE240982>. DOI:10.3233/ATDE240982.
- [9] 李晓琴,周旭,李世华,等.硅灰改性高韧性水泥基材料性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 170-180.
- LI X Q, ZHOU X, LI S H, et al. Experimental study on high toughness cement-based materials modified by silica fume [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 170-180. (in Chinese)
- [10] 丁选明,刘学成,王春艳,等.ECC桩-消能锚韧性支挡结构的地震响应规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 76-88.
- DING X M, LIU X C, WANG C Y, et al. Seismic response characteristics of ECC pile-energy dissipation anchor ductile retaining structure [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(2): 76-88. (in Chinese)
- [11] 赵人达,占玉林,徐腾飞,等.混凝土桥及其高性能材料2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 37-55.
- ZHAO R D, ZHAN Y L, XU T F, et al. State-of-the-art review of concrete bridges and its high performance materials in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 37-55. (in Chinese)
- [12] 刘逸凡,章燕清,吴从晓.三种ECC夹套组合柱的力学模型对比分析及骨架曲线模型修正[J/OL]. 工程力学, 2025: 1-18. (2025-07-23). <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250722.1820.022>.LIU Y F, ZHANG Y Q, WU C X. Comparative analysis of mechanical models of three ecc jacketed composite columns and modification of skeleton curve model [J/OL]. Engineering Mechanics, 2025: 1-18. (2025-07-23). <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250722.1820.022>.(in Chinese)
- [13] CAI H B, ZANG L, HU S, et al. Application of high-strength ECC in the repair and reinforcement of deep vertical shaft lining [J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2024, 71(1): 226.

- [14] 朱俊涛, 赵奎, 邹旭岩, 等. 高强不锈钢绞线网在 ECC 中的搭接性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(3): 174-182.
ZHU J T, ZHAO K, ZOU X Y, et al. Performance of lap-spliced high strength stainless steel wire mesh in engineering cementitious composites [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(3): 174-182. (in Chinese)
- [15] 贺绍华, 陈焕伟, 江政, 等. 橡胶粉改性聚乙烯纤维增强水泥基复合材料的静力和抗冲击性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6): 167-174.
HE S H, CHEN H W, JIANG Z, et al. Static and impact properties of rubber powder modified polyethylene fiber-reinforced cement-based composites [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 167-174. (in Chinese)
- [16] LI Victor C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531-536. LIV C. Progress and application of engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531-536. (in Chinese)
- [17] 曹明莉, 许玲, 张聪. 高延性纤维增强水泥基复合材料的微观力学设计、性能及发展趋势[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 632-642.
CAO M L, XU L, ZHANG C. Review on micromechanical design, performance and development tendency of engineered cementitious composite [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(5): 632-642. (in Chinese)
- [18] HUANG T, ZHANG Y X, YANG C H. Multiscale modelling of multiple-cracking tensile fracture behaviour of engineered cementitious composites [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 160: 52-66.
- [19] WEI X Y, LI X, DI J, et al. Flexural performance of U-shaped high-strength ECC permanent formwork-concrete composite beams [J]. Structures, 2025, 74: 108641.
- [20] 高淑玲, 郭亚栋, 吴耀泉. ECC/钢筋混凝土叠合梁正截面受弯承载力试验与理论研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 123-131.
GAO S L, GUO Y D, WU Y Q. Experimental analysis and calculation theory on normal section flexural capacity of ECC/steel reinforced concrete composite beams [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(2): 123-131. (in Chinese)
- [21] 钱辉, 裴金召, 李宗翱, 等. 基于 SMA/ECC 的新型自复位框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 64-73, 80.
QIAN H, PEI J Z, LI Z A, et al. Experimental study on seismic performance of self-centering beam-column joints reinforced with superelastic SMA and ECC [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(11): 64-73, 80. (in Chinese)
- [22] 张君, 公成旭, 居贤春. 高韧性低收缩纤维增强水泥基复合材料特性及应用[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1452-1461.
ZHANG J, GONG C X, JU X C. Characteristics of high ductility and low shrinkage engineered cementitious composite and its applications [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1452-1461. (in Chinese)
- [23] 公成旭, 张君. 高韧性纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 361-366.
GONG C X, ZHANG J. Tensile performance of high ductile fiber reinforced cementitious composite [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 361-366. (in Chinese)
- [24] GU D W, PAN J L, LUKOVIĆ M. Understanding shear-resisting mechanism in reinforced engineered cementitious composite (ECC) beams using distributed strain measurements [J]. Engineering Structures, 2025, 327: 119612.
- [25] 高云飞, 鱼江婷, 尤卓, 等. ECC/FRP-ECC 复合材料力学性能及应用研究进展[J]. 混凝土, 2025(5): 174-179, 187.
GAO Y F, YU J T, YOU Z, et al. Research progress on mechanical properties and applications of ECC and FRP reinforced ECC [J]. Concrete, 2025(5): 174-179, 187. (in Chinese)
- [26] 高立. 微弯弧形钢筋混凝土构件裂缝计算方法研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(1): 40-44.
GAO L. Research on crack calculation method of slightly bending rebars concrete members [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(1): 40-44. (in Chinese)
- [27] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
WANG T M. Crack control of engineering structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)
- [28] 潘钻峰, 刘籍蔚, 吴畅, 等. 外包配筋 ECC 组合柱抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 38-45.
PAN Z F, LIU J W, WU C, et al. Experimental study and finite element analysis of seismic behavior of reinforced ECC composite columns [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 38-45. (in Chinese)
- [29] 林阳. 超高性能混凝土组合梁弯剪性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. LIN Y. Flexural and shear behavior of UHPCC composite beams. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [30] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [31] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 45-60.
- XU S L, LI H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60. (in Chinese)
- (编辑 XXX)