

引用本文:章一萍,李碧雄,廖 桥,等. 超高强钢筋 ECC 梁受弯性能试验及承载力分析[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(6):38-45.
ZHANG Yi-ping, LI Bi-xiong, LIAO Qiao, et al. Flexural Behaviors Test and Capacity Analysis of Ultra High Strength Rebar Reinforced Engineered Cementitious Composites Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 38-45.

DOI:10.19815/j.jace.2019.11012

超高强钢筋 ECC 梁受弯性能试验及承载力分析

章一萍¹, 李碧雄², 廖 桥³, 周 练¹, 唐丽娜¹

(1. 四川省建筑设计研究院有限公司, 四川 成都 610000; 2. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:为进一步研究工程用水泥基复合材料(ECC)与超高强钢筋组合成的超高强钢筋 ECC 梁(UHSRRE 梁)的受弯性能,对 3 根 UHSRRE 梁、1 根普通强度钢筋增强 ECC 梁(RECC 梁)和 1 根普通强度钢筋增强混凝土梁(RC 梁)进行弯曲试验,分析弯曲试验现象、ECC 应变、延性性能和特征弯矩,并研究纵筋配筋率对 UHSRRE 梁承载力的影响。结果表明:UHSRRE 梁和 RECC 梁的控裂能力比 RC 梁的控裂能力强;与 RECC 梁相比,UHSRRE 梁并未因采用超高强钢筋而使其控裂能力明显下降;UHSRRE 梁截面应变基本符合平均应变的平截面假定,梁受拉区边缘的 ECC 应变小于 ECC 单轴受拉极限应变,梁受拉区的 ECC 始终不退出工作;UHSRRE 梁受拉区和受压区边缘 ECC 应变的最大值、受压区高度和特征弯矩(除开裂弯矩)都随纵筋配筋率增加而变大;随纵筋配筋率增加,UHSRRE 梁的能量延性系数先增后减;当 UHSRRE 梁具有适当纵筋配筋率时,其延性性能可优于 RECC 梁的延性性能。

关键词:工程用水泥基复合材料;超高强钢筋;受弯性能;承载力;配筋率

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)06-0038-08

Flexural Behaviors Test and Capacity Analysis of Ultra High Strength Rebar Reinforced Engineered Cementitious Composites Beams

ZHANG Yi-ping¹, LI Bi-xiong², LIAO Qiao³, ZHOU Lian¹, TANG Li-na¹

(1. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu 610000, Sichuan, China;
2. Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Ministry Education, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to further study the flexural behaviors of ultra high strength rebar reinforced engineered cementitious composites (UHSRRE) beams which consist of engineered cementitious composites (ECC) and ultra high strength rebar, three UHSRRE beams, one reinforced engineered cementitious composites (RECC) beam and one reinforced concrete (RC) beam were tested, respectively. The experimental phenomena, ECC strains, ductility and characteristic moment of these beams were carefully analyzed. The results show that UHSRRE beams and RECC beams have a strong crack control ability compared with RC beams. In comparison with

收稿日期:2019-11-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508802);国家自然科学基金项目(51678379)

作者简介:章一萍(1961-),女,四川乐山人,教授级高级工程师,E-mail:1641694650@qq.com。

通信作者:廖 桥(1992-),男,四川德阳人,工学博士研究生,E-mail:liaoqiaosc@hotmail.com。

RECC beams, UHSRRE beams containing ultra high strength reinforcement have no obvious decrease in crack control ability. The cross-section strains of UHSRRE beams basically conform to the plane section assumption of mean strain, and ECC in the tension zone of UHSRRE beams is effective after cracking. With the increase of longitudinal reinforcement ratio, the ECC strains at the edge of compressive zone, maximum tensile strain of ECC at the edge of tensile zone, height of compressive zone and characteristic moment (except for cracking moment) of UHSRRE beams enlarge, but energy ductility coefficient increases first and then decreases. The ductility of UHSRRE beams is better than that of RECC beams when the reinforcement ratio is appropriate.

Key words: engineered cementitious composite; ultra high strength rebar; flexural behavior; bearing capacity; reinforcement ratio

0 引言

为减少钢筋用量以达到节约资源和保护环境的目的,住房和城乡建设部在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中增加了 HRB500 和 HRBF500 级钢筋,但是配置 HRB500 和 HRBF500 级钢筋混凝土梁的控裂能力通常较差^[1-2]。对此,有学者提出通过增大保护层厚度来提高梁的控裂能力^[3],然而试验结果表明,这种方法还存在一些问题。工程用水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites,ECC)作为一种高延性和高韧性的纤维增强水泥基复合材料,其控裂能力、受拉变形能力和受压变形能力都很强。在单轴受拉试验中,ECC 表现出多缝开裂和应变硬化的特点,单轴受拉极限应变大于 2%^[4]。在单轴受压试验中,ECC 的峰值压应变可达 0.4%~0.5%^[5]。尽管 ECC 的制备成本通常是普通混凝土的数倍,但是根据 ECC 材料设计理论适当调整 ECC 中的组分可大幅降低成本^[6-8]。

ECC 和钢筋的协调变形能力很强^[9-10]。此外,Li 等^[11]对采用 HRB335 级钢筋增强的 ECC 梁进行受弯试验研究,发现该类梁的控裂能力和延性性能均较好。薛会青等^[12]以 HRB500 级钢筋和 ECC 分别作为梁的纵向受拉钢筋和基体材料,发现受弯屈服时梁的裂缝宽度均在 0.09 mm 以内,远小于规范对梁裂缝宽度的限值。Noushini 等^[13]将屈服强度为 590 MPa 的钢筋与 ECC 组合成梁,发现梁受弯时表现出较强的延性性能。为减小钢筋用量及增强梁的控裂能力和延性性能,基于前述的研究结果^[4-5,9-13],文献^[14]提出以超高强钢筋(屈服强度标

准值大于等于 500 MPa 的钢筋)和 ECC 分别为纵向受拉钢筋和基体材料的超高强钢筋 ECC 梁(Ultra High Strength Rebar Reinforced Engineered Cementitious Composites Beams, UHSRRE 梁),并建立了该类梁的正截面受弯计算理论。

为进一步研究 UHSRRE 梁的受弯性能,以便为该类梁的工程应用提供相应指导。本文对 3 根 UHSRRE 梁、1 根普通强度钢筋增强 ECC 梁(Reinforced Engineered Cementitious Composites Beams,RECC 梁)和 1 根普通强度钢筋增强混凝土梁(Reinforced Concrete Beams,RC 梁)进行弯曲试验,分析弯曲试验现象、ECC 应变、延性性能和特征弯矩,并研究纵筋配筋率对 UHSRRE 梁承载力的影响。

1 试验概况

1.1 试件制备

试验采用的 ECC 中水泥、粉煤灰、水、细骨料、纤维、高效减水剂配合比为 62.48 : 137.72 : 56.78 : 137.72 : 5.11 : 1。水泥为普通硅酸盐水泥 P.O 42.5R,粉煤灰为 F 类 I 级粉煤灰,细骨料为 70~120 目的石英砂,减水剂为聚羧酸高效减水剂(砂浆减水率 $R_m \geq 23\%$)。纤维采用聚乙烯醇纤维(Polyvinyl Alcohol Fiber,PVA 纤维),纤维性能见表 1。混凝土中水泥、水、细骨料、粗骨料、高效减水剂配合比为 200 : 61.96 : 253.62 : 365.22 : 1。细骨料采用河砂(属于细砂),粗骨料为粒径 5~15 mm 的碎石,水泥和减水剂同前。试件主要参数如表 2 所示,尺寸和配筋见图 1,其中 F 为荷载。

表 1 PVA 纤维性能
Tab.1 Properties of PVA Fiber

长度/mm	直径/ μm	弹性模量/GPa	极限伸长率/%	抗拉强度/MPa	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
12	40	41	6.5	1 560	1.3

表 2 试件主要参数

Tab. 2 Main Parameters of Specimens

梁类别	试件编号	试件尺寸	保护层厚度/mm	基体材料	纵筋型号	箍筋型号	纵筋配筋率/%
RC 梁	CON335-2	1 500 mm×240 mm×130 mm	20	混凝土	2Φ20	Φ8@60	2.39
RECC 梁	ECC335-2	1 500 mm×240 mm×130 mm	20	ECC	2Φ20	Φ8@60	2.39
UHSRRE 梁	ECC500-1	1 500 mm×240 mm×130 mm	20	ECC	1Φ12	Φ8@60	0.42
UHSRRE 梁	ECC500-2	1 500 mm×240 mm×130 mm	20	ECC	2Φ12	Φ8@60	0.84
UHSRRE 梁	ECC500-3	1 500 mm×240 mm×130 mm	20	ECC	3Φ12	Φ8@60	1.27

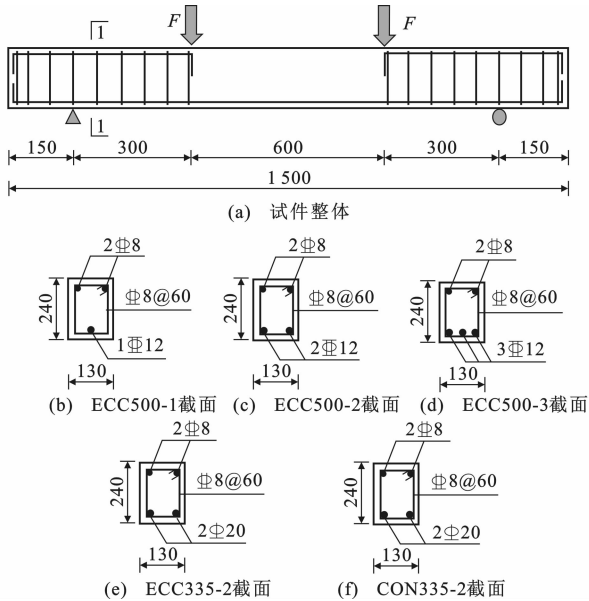


图 1 试件的尺寸和配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimension and Reinforcement of Specimens (Unit:mm)

在制备 UHSRRE 梁和 RECC 梁的过程中采用振捣棒振捣密实 ECC。在温度约为 10℃ 的室内环境中洒水养护梁 7 d 后拆模,接着便以每天洒水 2 次的养护方式再养护梁 21 d。为防止水分蒸发,需使用薄膜覆盖梁。浇筑梁的同时,制作 3 个边长为 100 mm 的 ECC 或混凝土立方体及 3 个尺寸为 300 mm×50 mm×20 mm 的 ECC 薄板,立方体和薄板的养护制度与梁的相同。

1.2 材料性能

ECC 和混凝土的单轴受压峰值强度分别为 26.5 MPa 和 66.83 MPa,后者约为前者的 2.5 倍。这是因为养护时间短及养护的温度和湿度低,使得 ECC 中的粉煤灰发生二次水化反应偏难,粉煤灰在早龄期主要充当惰性填充料^[15]。另一方面,ECC 中的胶凝材料主要为粉煤灰,水泥质量仅为粉煤灰的 45%左右。通过应变片测得 ECC 的单轴受压峰值应变为 0.36%。

经三点弯曲试验测得 ECC 薄板的荷载-跨中挠

度曲线,如图 2 所示。开裂前,荷载与跨中挠度呈正比关系,ECC 处于弹性受力阶段。随跨中挠度的增加,ECC 进入稳态开裂阶段,曲线呈“锯齿”状,挠度硬化明显。值得注意的是,荷载-跨中挠度曲线每波动一次基本对应着新裂缝产生或旧裂缝扩展。在试验结束后卸载时,可明显观测到 ECC 薄板发生弹性恢复变形。ECC 薄板受拉面的裂缝分布见图 2,所有裂缝均分布在薄板跨中附近,ECC 多缝开裂的特点明显,缝宽均小于 100 μm(不包含主裂缝),ECC 控裂能力突出。为便于确定 ECC 单轴受拉极限应变,密歇根大学的 Qian 等^[16]建议通过 ECC 的弯曲试验结果来计算得到单轴受拉极限应变。本文采用与此类似的方法(文献[17]建议的公式)来确定 ECC 的单轴受拉极限应变,算得 ECC 单轴受拉极限应变为 2.61%。

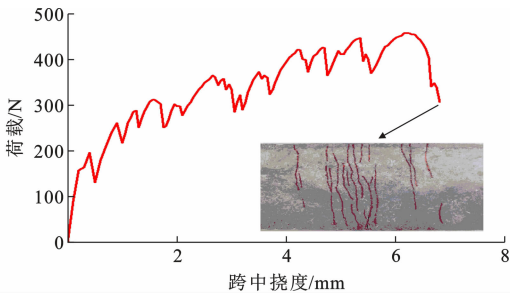


图 2 ECC 薄板的荷载-跨中挠度曲线及裂缝分布

Fig. 2 Load-midspan Deflection Curve and Crack Pattern of ECC Sheet

钢筋力学性能见表 3。由于 HRB500 级钢筋强度最大,所以断后伸长率最小,受拉变形能力最弱。

1.3 试验方案

在梁的侧面设置 6 个 80 mm×2.5 mm 的应变片,顶面布设 3 个 80 mm×2.5 mm 的应变片,底面设置 5 个 50 mm×3 mm 的应变片。在纵向受拉钢筋表面设置 4 个 5 mm×3 mm 的应变片。应当指出的是,以上应变片均被布置在梁的纯弯段内。为测定梁的跨中挠度,在支座和跨中分别设置数显千分表。试验过程中,采用 HC-CK101 裂缝宽度观测仪读取裂缝宽度。

表 3 钢筋的力学性能

Tab. 3 Mechanical Properties of Steel Bars

钢筋类别	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
HRB500	12	501	656	15.8	53.3
HRB400	8	422	595	20.4	57.5
HRB335	20	309	589	17.6	44.1

加载示意图如图 3 所示,通过微机控制电液伺服万能试验机对表 2 中 5 根梁分别进行弯曲试验。对试件 CON335-2 采用分级加载,每级荷载约为试验梁预估极限荷载的 5%。对余下 4 根梁采用荷载-位移混合控制加载,即在梁的纵向受拉钢筋开始屈服前,以每级荷载约为试验梁预估极限荷载的 5% 进行分级加载,之后采用位移控制加载,其速率为 $0.25\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

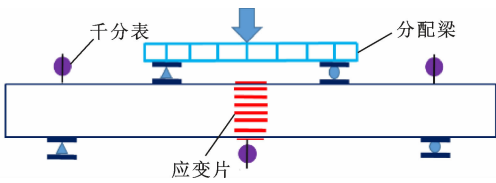


图 3 加载示意图

Fig. 3 Loading Diagram

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

5 根梁均发生的是弯曲破坏,其典型破坏形态见图 4。UHSRRE 梁和 RECC 梁的纵向受拉钢筋首先屈服,之后梁受压区边缘 ECC 的应变大于 ECC 单轴受压峰值应变,梁顶面出现压缩“褶皱”。另一方面,同 RC 梁相比,UHSRRE 梁和 RECC 梁的控裂能力很强。当 RC 梁发生破坏时,其纯弯段的裂缝数量仅为 6 条,并且每条裂缝的宽度都大于 0.2 mm 。当 UHSRRE 梁和 RECC 梁出现破坏时,纯弯段的裂缝数量在 40 条以上,平均裂缝宽度小于 0.2 mm 。分析认为,由于 PVA 纤维的有效桥接作用,ECC 具有突出的控裂能力,在单轴受拉条件下 ECC 的裂缝宽度约为 $60\text{ }\mu\text{m}$ ^[18],这使得大裂缝可被细化成微细裂缝。另一方面,ECC 和钢筋的协调变形能力很强^[9-10],裂缝处的钢筋能有效地发挥作用。与 RECC 梁相比,尽管 UHSRRE 梁受弯破坏时的平均裂缝宽度略大,但 UHSRRE 梁的裂缝数量更多。以上表明,UHSRRE 梁并未因采用超高强钢筋而使构件的控裂能力明显降低。

2.2 ECC 应变

图 5 为 UHSRRE 梁不同截面高度处 ECC 的

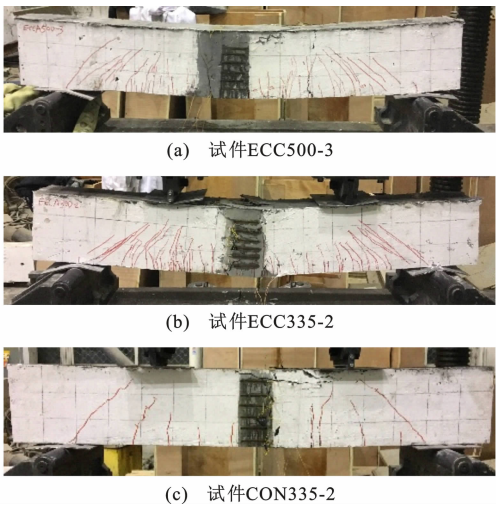


图 4 梁的典型破坏形态

Fig. 4 Typical Failure Modes of Beams

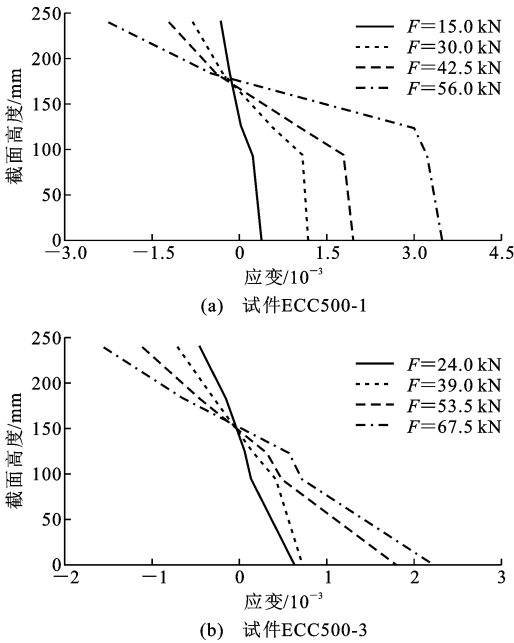


图 5 不同截面高度处 ECC 的应变

Fig. 5 ECC Strains at Different Section Heights

应变。随着荷载增加,UHSRRE 梁截面的应变相应增大,截面应变和高度也基本呈线性关系,所以 UHSRRE 梁截面应变基本符合平均应变的平截面假定。此外,图 5 表明,随着纵筋配筋率的提高,UHSRRE 梁的受压区高度增加。

UHSRRE 梁和 RECC 梁受压区边缘 ECC 的

应变-跨中挠度的关系见图 6。当跨中挠度小于 4 mm 时,ECC 应变与跨中挠度呈线性关系,并且 4 根梁的应变-跨中挠度曲线基本重合。当跨中挠度大于 4 mm 后,ECC 应变与跨中挠度呈非线性关系。由 UHSRRE 梁的截面应力分布图^[14]可知,受压区 ECC 合力需与纵筋和受拉区 ECC 的合力平衡。因此,随着纵筋配筋率的提高,梁受压区高度增加(图 5),受压区边缘 ECC 的应变增大。UHSRRE 梁和 RECC 梁受压区边缘的应变峰值均明显大于 ECC 的单轴受压峰值应变,并且在受压区边缘 ECC 的应变超过单轴受压峰值应变后,UHSRRE 梁所承受的荷载无明显降低。试验中发现,ECC 应变达到峰值后便开始降低,这是因为试验加载后期梁顶面有压缩“褶皱”,使得应变片向平面外凸起,导致应变片出现受拉变形。

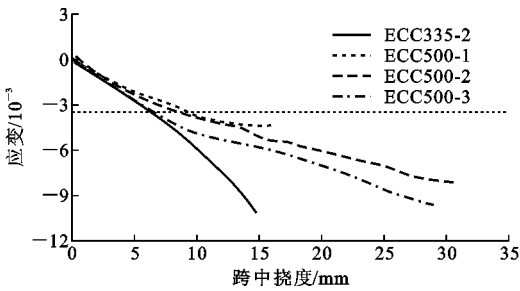


图 6 梁受压区边缘 ECC 的应变-跨中挠度关系
Fig. 6 Relationship Between ECC Strains and Midspan Deflection at Edge of Compression Zone of Beams

图 7 为 UHSRRE 梁和 RECC 梁弯曲试验过程中所测得的梁受拉区边缘 ECC 拉应变最大值。RECC 梁受拉区边缘 ECC 拉应变最大值小于 ECC 单轴受拉极限应变,表明 RECC 梁受拉区的 ECC 不退出工作。这与文献[19]在建立 RUHTCC 梁受弯计算理论时认为受拉区 ECC 不退出工作的假定吻合。UHSRRE 梁受拉区边缘 ECC 拉应变最大值也小于 ECC 单轴受拉极限应变,即 UHSRRE 梁的受拉区 ECC 也不退出工作。根据 UHSRRE 梁的截面应力分布图^[14]可知,纵筋和受拉区 ECC 的合力需与受压区 ECC 合力平衡,纵筋配筋率的提高将使受压区 ECC 合力增加,受压区 ECC 应变相应变大,从而使受拉区 ECC 应变也增加。因此,随着纵筋配筋率的提高,UHSRRE 梁受拉区边缘 ECC 拉应变最大值增加,ECC 优异的受拉变形能力得到进一步发挥。

2.3 延性性能

衡量受弯构件延性性能的指标有很多种,如能量延性系数和位移(或曲率)延性系数。能量延性系

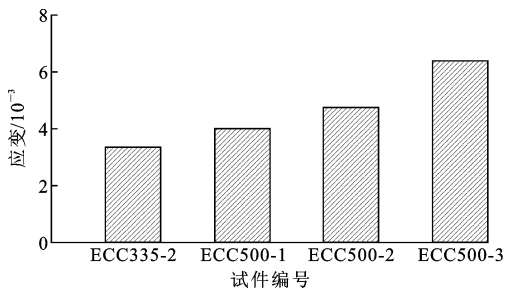


图 7 梁受拉区边缘 ECC 拉应变最大值
Fig. 7 Maximum Tensile Strains of ECC at Edge of Tensile Zone of Beams

数不但能反映构件的变形储备,而且可反映其承载力储备^[20]。此外,试验梁的纵筋配筋率变化范围较大(0.42%~2.39%),各梁之间的承载力存在明显差异(表 4),所以采用能量延性系数 μ 来评价梁的延性性能。能量延性系数计算式为

$$\mu = E_u / E_y \tag{1}$$

式中: E_y 为受弯构件屈服时的变形能; E_u 为极限变形能。

UHSRRE 梁和 RECC 梁的能量延性系数如表 4 所示。随着纵筋配筋率的增加,UHSRRE 梁的能量延性系数先增后减。虽然 UHSRRE 梁的承载力随着配筋率的提高而增加,但梁的变形能力下降。因此,UHSRRE 梁的能量延性系数随着配筋率的增加最后出现减小。与 RECC 梁相比,试件 ECC500-2 的能量延性系数提高了 25.71%,表明当 UHSRRE 梁具有适当的纵筋配筋率时,其延性性能将优于 RECC 梁的延性性能。

表 4 梁的受弯试验结果

Tab. 4 Flexure Test Results of Beams

试件编号	特征弯矩/(kN·m)			能量延性系数
	开裂弯矩	屈服弯矩	极限弯矩	
CON335-2	11.43	33.27	58.53	—
ECC335-2	4.55	22.70	53.04	35
ECC500-1	3.27	14.31	18.17	21
ECC500-2	6.03	22.55	25.55	44
ECC500-3	5.81	30.41	36.05	16

2.4 特征弯矩

5 根梁的特征弯矩见表 4。由于 RC 梁的纵筋配筋率和混凝土的单轴受压峰值强度均很高,加之试验采用的 HRB335 级钢筋的极限强度约为其屈服强度的 2 倍,故试件 CON335-2 的特征弯矩最大,且屈服后其抗弯承载力尚有明显的提高。与此相反的是,试件 ECC500-1 的配筋率最低,ECC 单轴受压峰值强度也偏低,所以该试件的特征弯矩最小。随

着配筋率的增加,UHSRRE 梁的特征弯矩(除开裂弯矩)增大。值得注意的是,尽管混凝土的单轴受压峰值强度是 ECC 的 2.5 倍,但 RC 梁和 RECC 梁的极限弯矩非常接近,后者约为前者的 0.91 倍,这是因为 RECC 梁受拉区边缘 ECC 拉应变最大值小于 ECC 单轴受拉极限应变,即梁受拉区的 ECC 没有退出工作。另一方面,RECC 梁受压区 ECC 塑性变形发展更为充分,受压区高度更大。

3 承载力分析

为对比 UHSRRE 梁和 RC 梁的承载力(极限弯矩),取与混凝土单轴受压峰值强度较为相近的 ECC 作为 UHSRRE 梁的基体材料。由文献[21]得 ECC 力学参数:ECC 单轴受压刚度变化点对应的强度 σ_{cc} 和应变 ϵ_{cc} 分别为 35.1 MPa 和 0.073%,单轴受压峰值强度 σ_{cp} 和应变 ϵ_{cp} 分别为 52.6 MPa 和 0.22%。单轴受拉初裂强度 σ_{tc} 和应变 ϵ_{tc} 分别为 2.2 MPa 和 0.19%,单轴受拉极限强度 σ_{tu} 和应变 ϵ_{tu} 分别为 6.5 MPa 和 7.98%。此外,UHSRRE 梁截面的高度 h 和宽度 b 分别为 240 mm 和 130 mm。UHSRRE 梁的纵向受拉钢筋为 HRB500E 级钢筋或 HRB600 级钢筋,钢筋直径 d 、屈服强度 σ_y 、屈服应变 ϵ_y 、极限强度 σ_{su} 和极限强度对应的应变 ϵ_{su} 如表 5 所示^[22]。保护层厚度采用 20 mm,箍筋和架立钢筋均选用直径为 8 mm 的 HRB400 级钢筋。

表 5 纵筋力学参数

Tab. 5 Mechanical Parameters of Longitudinal Steel Bars

钢筋类别	d/mm	σ_y/MPa	σ_{su}/MPa	$\epsilon_y/\%$	$\epsilon_{su}/\%$
HRB500E	20	534	717	0.277	10.1
HRB600	20	622	777	0.401	10.0

根据 UHSRRE 梁的受弯计算理论^[14]可知

$$T_c + T_s = C_c \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} T_c &= \frac{\sigma_{tc} b}{2} (h + a - x_c) + \frac{abk_2}{2} [\epsilon(0) - \epsilon_{tc}] \\ C_c &= \frac{bk_4}{2} (h - e) [\epsilon(h) - \epsilon_{cc}] + \frac{b\sigma_{cc}}{2} (h - e + x_c) \\ T_s &= \sigma_s A_s = k_6 (\epsilon_s - \epsilon_y) A_s + \sigma_y A_s \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= h - x_c + \frac{\epsilon_{tc}}{\epsilon_s} (x_c + a_s - h) \\ \epsilon(0) &= \frac{\epsilon_s}{h - x_c - a_s} (h - x_c) \\ \epsilon(h) &= \frac{x_c \epsilon_s}{h - x_c - a_s} \\ e &= h - x_c + \frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_s} (h - x_c - a_s) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: T_s 为纵向受拉钢筋合力; T_c 为受拉区 ECC 合力; C_c 为受压区 ECC 合力; a 为 ECC 受拉区开裂高度; $\epsilon(h)$ 为 h 高度处(以受拉区边缘为原点,建立沿截面高度竖直向上的 x 轴坐标系)ECC 的应变; a_s 为下部纵向受拉钢筋合力点到受拉边缘的竖向距离; A_s, ϵ_s 为纵筋的面积和应变; x_c 为受压区高度; e 为受压区刚度变化点与受拉区边缘之间的竖向距离; $k_2 = (\sigma_{tu} - \sigma_{tc}) / (\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc})$; $k_4 = (\sigma_{cp} - \sigma_{cc}) / (\epsilon_{cp} - \epsilon_{cc})$; $k_6 = (\sigma_{su} - \sigma_y) / (\epsilon_{su} - \epsilon_y)$ 。

联立式(2)~(4),解出受压区高度 x_c 。根据力矩平衡条件可对 UHSRRE 梁的受拉区边缘取矩,整理得弯矩 M 为

$$\begin{aligned} M &= -k_6 A_s a_s (\epsilon_s - \epsilon_y) - \sigma_y A_s a_s - \frac{a^2 b \sigma_{tc}}{2} - \\ &\quad \frac{a^2 b k_2}{6} [\epsilon(0) - \epsilon_{tc}] + \frac{b \sigma_{cc}}{2} (h^2 - e^2) - \\ &\quad \frac{b \sigma_{tc}}{6} (h - x_c - a) (h - x_c + 2a) + \\ &\quad \frac{b \sigma_{cc}}{6} (x_c + e - h) (2e + h - x_c) + \\ &\quad \frac{b k_4}{6} (h - e) (2h + e) [\epsilon(h) - \epsilon_{cc}] \end{aligned} \quad (5)$$

令 $\epsilon(h) = \epsilon_{cp}$,可解得 x_c ,代入式(5)中得梁的承载力。

基于上述受弯计算理论,通过 MATLAB 软件编程计算得到 UHSRRE 梁的承载力,如表 6 所示。当纵筋配筋率为 2.39%时,尽管混凝土的单轴受压峰值强度为 ECC 的 1.27 倍,但以 HRB500E 为纵向受拉钢筋的 UHSRRE 梁的承载力仅比 RC 梁低 1.61%;配有 HRB600 级钢筋的 UHSRRE 梁的承载力比 RC 梁提高了 9.53%。另一方面,文献[12]的试验结果表明,当纵筋配筋率为 1.39%时,UHSRRE 梁的承载力比 RC 梁提高了 50.07%;当配筋率为 0.70%时,UHSRRE 梁的承载力较 RC 梁提高了 85.02%。以上表明,UHSRRE 梁可以实现钢筋用量的减少。

4 结 语

(1)UHSRRE 梁和 RECC 梁的控裂能力均比 RC 梁的控裂能力强。与 RECC 梁相比,UHSRRE 梁并未因采用超高强钢筋而使其控裂能力明显下降。

(2)UHSRRE 梁截面的应变和高度基本呈线性关系,梁截面应变基本符合平均应变的平截面假定。UHSRRE 梁受拉区边缘的 ECC 应变小于 ECC

表 6 UHSRRE 梁和 RC 梁的承载力比较

Tab. 6 Comparison of Bearing Capacity Between UHSRRE Beams and RC Beams

数据来源	梁类别	纵筋类别	纵筋配筋率/%	基体材料抗压强度/MPa	承载力/(kN·m)
本文试验结果	RC 梁	HRB335	2.39	66.83(混凝土)	58.53
本文计算结果	UHSRRE 梁	HRB500E	2.39	52.60(ECC)	57.59
本文计算结果	UHSRRE 梁	HRB600	2.39	52.60(ECC)	64.11
文献[12]	RC 梁	HRB335	1.39	41.20(混凝土)	7.35
文献[12]	UHSRRE 梁	HRB500	1.39	38.50(ECC)	11.03
文献[12]	RC 梁	HRB335	0.70	41.20(混凝土)	4.14
文献[12]	UHSRRE 梁	HRB500	0.70	38.50(ECC)	7.66

单轴受拉极限应变, UHSRRE 梁受拉区的 ECC 始终不退出工作。

(3)随 UHSRRE 梁的纵筋配筋率提高, 梁受压区边缘 ECC 压应变和受拉区边缘 ECC 拉应变的最大值均增加, 受压区高度变大, 屈服弯矩和承载力增加, 但能量延性系数先增后减。当 UHSRRE 梁具有适当的纵筋配筋率时, 其能量延性系数可比 RECC 梁的大 25.71 %。

参考文献:
References:

[1] 蒋遨宇,陈 驹,金伟良. HRB500 级钢筋混凝土梁受弯性能分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2013,47(9):1566-1572,1671.
JIANG Ao-yu,CHEN Ju,JIN Wei-liang. Flexural Behaviour Analysis of HRB500 Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2013,47(9):1566-1572,1671.

[2] 赵进阶,张钦喜,杨勇新,等. 配 HRBF500 级钢筋混凝土梁受弯承载力试验[J]. 北京工业大学学报,2009,35(11):1478-1483.
ZHAO Jin-jie,ZHANG Qin-xi,YANG Yong-xin, et al. Experimental Investigation of Flexure Capacity of Concrete Beam HRBF500 Bar[J]. Journal of Beijing University of Technology,2009,35(11):1478-1483.

[3] 李志华,苏小卒,赵 勇. 大保护层混凝土梁的裂缝试验[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(1):53-57.
LI Zhi-hua,SU Xiao-zu,ZHAO Yong. Experiment on Crack of Thick-cover Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2011,28(1):53-57.

[4] YANG E H,YANG Y Z,LI V C. Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness[J]. ACI Materials Journal,2007,104(6):303-311.

[5] ZHOU J J,PAN J L,LEUNG C K Y. Mechanical Be-

havior of Fiber-reinforced Engineered Cementitious Composites in Uniaxial Compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2015,27(1):04014111.

[6] MA H,QIAN S Z,ZHANG Z G,et al. Tailoring Engineered Cementitious Composites with Local Ingredients[J]. Construction and Building Materials,2015,101:584-595.

[7] DENG H W. Utilization of Local Ingredients for the Production of High-early-strength Engineered Cementitious Composites[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2018,2018:8159869.

[8] MENG D,HUANG T,ZHANG Y X,et al. Mechanical Behaviour of a Polyvinyl Alcohol Fibre Reinforced Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC) Using Local Ingredients[J]. Construction and Building Materials,2017,141:259-270.

[9] FISCHER G O,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.

[10] DENG M K,PAN J J,SUN H Z. Bond Behavior of Steel Bar Embedded in Engineered Cementitious Composites Under Pullout Load [J]. Construction and Building Materials,2018,168:705-714.

[11] LI Q H,XU S L. A Design Concept with the Use of RUHTCC Beam to Improve Crack Control and Durability of Concrete Structures[J]. Materials and Structures,2011,44(6):1151-1177.

[12] 薛会青,邓宗才. HRECC 梁弯曲性能的试验研究与理论分析[J]. 土木工程学报,2013,46(4):10-17.
XUE Hui-qing,DENG Zong-cai. Experimental and Theoretical Studies on Bending Performance of HRECC Beams[J]. China Civil Engineering Journal,2013,46(4):10-17.

[13] NOUSHINI A,SAMALI B,VESSALAS K. Ductility and Damping Characteristics of PVA-FRC Beam Elements[J]. Advances in Structural Engineering,2015,

- 18(11):1763-1788.
- [14] 李碧雄,廖 桥,章一萍,等. 超高强钢筋工程用水泥基复合材料梁受弯计算理论[J]. 吉林大学学报:工学版,2019,49(4):1153-1161.
- LI Bi-xiong, LIAO Qiao, ZHANG Yi-ping, et al. Theoretical on Flexural Behavior of Ultra High Strength Rebar Reinforced Engineered Cementitious Composites Beam[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2019, 49(4): 1153-1161.
- [15] LIU S H, KONG Y N, WANG L. Hydration Mechanism of Low Quality Fly Ash in Cement-based Materials[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(11): 4360-4367.
- [16] QIAN S Z, LI V C. Simplified Inverse Method for Determining the Tensile Strain Capacity of Strain Hardening Cementitious Composites [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(2): 235-246.
- [17] 蔡向荣,徐世焱. UHTCC 薄板弯曲荷载-变形硬化曲线与单轴拉伸应力-应变硬化曲线对应关系研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 8-16.
- CAI Xiang-rong, XU Shi-lang. Study on Corresponding Relationships Between Flexural Load-deformation Hardening Curves and Tensile Stress-strain Hardening Curves of UHTCC [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 8-16.
- [18] LI V C. Tailoring ECC for Special Attributes: A Review[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012, 6(3): 135-144.
- [19] 李庆华,徐世焱. 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料弯曲性能计算分析与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(3): 51-61.
- LI Qing-hua, XU Shi-lang. Analysis and Experiment of Reinforced Ultra-high Toughness Cementitious Composite Flexural Members [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(3): 51-61.
- [20] 冯 鹏,叶列平,黄羽立. 受弯构件的变形性与新的性能指标的研究[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 28-36.
- FENG Peng, YE Lie-ping, HUANG Yu-li. Deformability and New Performance Indices of Flexural Members [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 28-36.
- [21] YU K Q, WANG Y C, YU J T, et al. A Strain-hardening Cementitious Composites with the Tensile Capacity up to 8% [J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 410-419.
- [22] 王君杰,苏俊省,王文彪,等. 配置 HRB500E, HRB600 钢筋的混凝土圆柱抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 93-100, 107.
- WANG Jun-jie, SU Jun-sheng, WANG Wen-biao, et al. Experiment on Seismic Performance of Circular Concrete Columns Reinforced with HRB500E, HRB600 Steel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 93-100, 107.