文章编号:1001-7372(2017)12-0234-08

考虑箍筋效应的 PP-ECC 梁抗剪试验研究

张 锐1,孟庆利2,何 畏1,二羽淳一郎3

(1. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031; 2. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 3. 东京工业大学 土木工学专攻,东京 152-8552)

摘要:为了研究钢筋加强工程水泥基复合材料(ECC)梁中的箍筋抗剪加强效应,针对发生剪切破坏 的普通钢筋混凝土(RC)构件,考虑箍筋率的影响,分别进行 RC 与 ECC 梁的四点加载试验研究。 首先开展 ECC 材料试验,采用直接拉伸的加载方式,对聚丙烯纤维工程水泥基复合材料(PP-ECC) 的拉伸力学性能进行试验研究。在材料试验结果的基础上,通过考虑箍筋效应,分别设计5根不同 箍筋率的钢筋增强 PP-ECC 梁和2根普通钢筋混凝土梁试件,对7根梁进行四点加载试验,并在加 载过程中对5根 PP-ECC 梁的斜裂缝进行观测,分析箍筋率对 ECC 梁斜裂缝开展行为的影响。通 过修正桁架模型,分析箍筋率对 ECC 梁抗剪承载力的影响。试验结果表明:PP-ECC 具有拟应变 硬化和微裂缝的多缝开裂特征,其屈服拉伸强度和拉伸极限强度分别不小于2,3 MPa,极限拉应变 大于2.5%;PP-ECC 梁有较好的剪切延性,随着箍筋率的增长,PP-ECC 梁的抗剪承载力也逐渐加 大;在相同箍筋率下 PP-ECC 梁的抗剪承载力大于 RC 梁,而无箍筋 PP-ECC 梁的抗剪承载力 2 倍 于无箍筋 RC 梁;由于箍筋限制了 R/ECC 梁斜裂缝的开展,加剧了斜裂缝的剪切滑移,从而削弱了 斜裂缝间的纤维桥接作用,导致 PP-ECC 承担的剪力随着箍筋率的增大而减小;现有规范未考虑斜 裂缝间剪切滑移对 PP-ECC 抗剪承载力的削弱作用,使得计算剪切承载力过大而导致偏危险。 关键词:桥梁工程;钢筋 PP-ECC 梁;四点加载;剪切滑移;箍筋效应

中图分类号:U443.3 文献标志码:A

Experimental Investigation on Shear Behavior of PP-ECC Beams by Considering Effect of Stirrup

ZHANG Rui¹, MENG Qing-li², HE Wei¹, NIWA Junichiro³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and

Technology, Mianyang 621010, Shchuan, China; 3. Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8552, Japan)

Abstract: To investigate the shear reinforcing effect of stirrups in the steel reinforced engineered cementitious composite (ECC, R/ECC) beams, in allusion to the steel reinforced concrete (RC) structural member with shear failure, four-point loading tests were conducted on both RC and ECC beams by considering the effect of stirrup ratios. The tensile mechanical properties of polypropylene fiber reinforced engineered cementitious composites (PP-ECC) were firstly investigated by conducting uniaxial tensile tests. Based on the results, a total of 7 beams, classifying into 2 categories, namely, 5 steel reinforced PP-ECC and 2 RC beams, were designed

收稿日期:2017-02-19

作者简介:张 锐(1986-),男,甘肃定西人,讲师,工学博士,E-mail:zr430@163.com。

and constructed. All beams were tested by four-point loading tests. In addition, the shear cracking behavior of 5 PP-ECC beams were carefully observed and measured during the loading, and the effect of stirrup ratio on the shear cracking behavior was analyzed. Through the modified truss model, the shear capacities of 5 PP-ECC beams were investigated by considering the effect of stirrup ratio. The experimental results show that PP-ECC exhibiting pseudo strain-hardening behavior and multiple fine cracking has tensile yield and tensile strength which is no less than 2 MPa and 3 MPa, respectively, and its tensile strain capacity is greater than 2.5%. ECC beams are with good ductility, whose shear capacity gradually increases with the increase of stirrup ratio. Under the same stirrup ratio, the shear capacity of R/ECC beam is larger than that of RC, and the R/ECC beam without stirrups shows twice shear capacity of RC beam. In addition, the shear carried by PP-ECC decreases with the increase of the stirrup ratio. The reason is that the higher stirrup ratio restricts the development of shear cracks, and the sliding in the critical shear cracks increases, thus decreasing the bridging effect of fibers. However, the current design and specification does not take the effect of shear sliding into considerations, which may result in overestimation on shear capacity of R/ECC beams.

Key words: bridge engineering; steel reinforced PP-ECC beam; four-point loading; shear sliding; effect of stirrup

0 引 言

以往的震害经验表明,由结构构件抗剪承载力 不足引发的脆性剪切破坏,造成了大量结构失效,导 致人民生命财产的巨大损失。因此国内外学者对地 震作用下结构构件的剪切破坏进行了广泛研究,并 根据研究成果不断修订各国规范。当前各国规范均 规定了较大富余量抗剪承载力的配筋设计方法以及 在关键抗剪部位的箍筋构造措施。而随着结构的复 杂程度越来越高,一些关键构件的抗剪配筋越来越 密,这不仅给混凝土施工带来较大的难度,同时导致 混凝土在浇筑过程中容易产生缺陷。

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)最早是美国密歇根大学的 Li等^[1]在20世纪90年代根据微观力学和断裂力 学原理,经过优化设计而提出的一种新型工程水泥 基复合材料。ECC的成份与混凝土相似,但不使用 粗骨料,而是掺入了体积率约为2%~3%的短纤 维。由于没有粗骨料,ECC的压缩弹性模量小于普 通混凝土,但其抗压强度与普通混凝土类似。ECC 在单轴拉伸荷载作用下表现出微裂缝多缝开裂和拟 应变硬化特征,其最大拉应变通常在1%~5%。在 压缩荷载作用下,ECC的压应变也大于普通混凝 土。目前为止,多种纤维已被用来试制 ECC,其中 包括钢纤维、碳纤维、合成纤维等。大多数文献和实 际工程中,高强高弹模的聚乙烯(PE)纤维^[2]和聚乙 烯醇(PVA)纤维^[3]使用最多。美国、日本和欧洲等 国的一些学者对 ECC 的基本力学性能进行了试验 研究。Li 等^[3]对 PVA-ECC 进行了单调单轴拉伸 试验,结果表明纤维体积掺量 2%的 PVA-ECC 拉 应变峰值可达4%,所对应的抗拉强度为4.5 MPa。 Matsumoto 等^[4] 通过试验对比 PE-ECC 与 PVA-ECC 的力学性能发现 PE-ECC 的强度和应变能力 都高于 PVA-ECC,但其裂缝数量较 PVA-ECC 少。 徐世烺等^[5]使用 PVA 纤维研制了极限拉应变可稳 定到3%以上并具有良好裂缝宽度控制能力的 PVA-ECC。张君等^[6]研制了低收缩 ECC 材料,其 主要力学性能也较传统 ECC 有明显改进。为了降 低 ECC 的成本并进行工程推广,乔治等^[7]和汪卫 等^[8]研究了混杂中国产与日本产 PVA 纤维 ECC 的 基本力学性能,通过 UM 法^[9] 预测出该 ECC 极限 抗拉应变在 2%~3%。Kawanishi 等^[10] 研究了聚 丙烯(PP)纤维体积掺量 3%的 PP-ECC 的基本力学 性能,表明 PP-ECC 抗拉强度不低于 3.5 MPa,极限 拉伸应变可稳定达到 2.5%以上,且轴心抗压强度 不小于 30 MPa。尽管使用 PE 与 PVA 纤维的 ECC 研究成果较多,但是由于 PE 与 PVA 的经济成本较 高,导致 ECC 与规模化的工程应用仍有相当的距 离。与 PE 或 PVA 纤维相比, PP 纤维更加柔软且 容易分散,纤维成本更低,因而具有更高的和易性和 经济性,有利于实际工程的推广。此外,由于 PP 材 料的疏水和非极性本质,PP 纤维在碱性环境中的耐

久性更加优良^[11]。因此,本文研究使用了经过表面 改性且基体黏结增强的 PP 连丝纤维用于制备 PP-ECC。

在钢筋增强 ECC(R/ECC) 柱和梁柱节点中减 少箍筋已有一定的研究成果。在 R/ECC 梁方面, Shimizu 等^[12] 通过大量奥诺剪力梁的加载试验对 PVA-ECC 梁的抗剪承载力进行了研究,并基于 PVA-ECC 直接拉伸试验结果,通过桁架-拱模型对 其抗剪承载力进行了预测。Survanto 等^[13]指出, R/ECC 中只有少部分 ECC 的拉伸性能被用于抗 剪,这是由于斜裂缝的剪切滑移对裂缝中的纤维造 成了破坏,从而削弱了纤维的桥接作用。候立军 等^[14]通讨开展无腹筋 PVA-ECC 梁抗剪性能试验, 研究发现无腹筋 ECC 梁的抗剪承载力约为 RC 对 比梁的2倍。Hou等^[15]对有腹筋ECC梁的剪切性 能进行了试验研究,发现箍筋的配置并未显著提高 ECC 梁的抗剪承载力。许青青^[16]对 ECC 深梁的抗 剪性能通过四点加载进行了试验研究,发现 ECC 深 梁的剪切破坏与 RC 深梁相比更具延性。张秀芳 等[17] 对不同纤维含量的 ECC 梁进行了集中加载受 弯试验,研究了 ECC 简支梁的抗剪性能,并指出 ECC 构件可以不受最小配箍率的影响。

截至目前,由斜裂缝剪切滑移造成的 R/ECC 构件抗剪承载力折减方面的研究较少,因此本文分 别通过开展材料试验和 7 根试验梁的加载试验,研 究 PP-ECC 拉伸力学性能和箍筋率对 R/ECC 梁的 抗剪承载力及其折减程度的影响。

1 PP-ECC 直接拉伸试验

1.1 试验材料

本文中所使用 的 PP-ECC 属于一 种三维乱向分布短 纤维增强水泥基复 合材料。所使用的 PP 纤维为连丝状 PP 纤维(图 1),长 度为 12 mm,单丝 直径为 36 μm,体积 掺入率为 3%,纤维



图 1 表面处理后的 PP 纤维 Fig. 1 PP Fiber after Surface Treatment

具体性能见表 1。为了增强 PP 纤维与水泥基体的 黏结,使配制而成的 ECC 具备微裂缝多缝开裂与应 变硬化特征,该 PP 纤维表面进行了粗糙处理,具体 如图 1 所示。本文使用的 PP-ECC 配合比见表 2。

表 1 PP 纤维物理性能参数

Tab. 1 Performance Properties of Polypropylene Fiber

Ł 座 /mm	古久/m	拉伸弹性	抗拉	密度/	
人皮/ ШШ	L1L/μm	模量/GPa	强度/MPa	$(g \cdot cm^{-3})$	
12	36	5	482	0.92	

表 2 PP-ECC 配合比

Tab. 2 Mix Proportion of PP-ECC

W/B/%	F/B/%	单位质量/(kg・m ⁻³)			
		水	胶凝材料	PP 纤维	减水剂
27	33	371	1 400	27	7

注:W为水的质量;B为胶凝材料的质量;F为粉煤灰的质量。

1.2 试件成型与养护

首先将胶凝材料、水和减水剂投入双轴强制搅 拌机中,搅拌4 min,此时净浆具有良好的流动性与 黏聚性。再将 PP 纤维投入搅拌机中搅拌4 min。 搅拌过程中 PP 易分散,未出现纤维结团现象。PP-ECC 直接拉伸试验以薄板为拉伸试件,其横截面尺 寸为(76×13) mm,长度为 200 mm,如图 2(a)所 示。在向模子中浇筑 PP-ECC 的过程中进行振捣, 浇筑完成后进行抹面,用塑料薄膜进行覆盖。24 h 后拆模,并放入相对湿度 90%以上、温度(20±3)℃ 的养护室中进行养护,28 d 龄期时取出。



Fig. 2 Tensile Specimens of PP-ECC

1.3 试验前准备与加载程序

在养护完成后的试件两端 50 mm 内分别将 2 片铝板通过环氧树脂胶粘接,以便与加载设备耦合。 试件面内两侧设置分别设置位移传感器(LVDT)以 采集测试区间的轴向拉伸位移数据。试验装置设置 示意如图 2(b)所示。在设置完成后,将试件连同加 载连接器与闭环数控材料试验加载仪耦合。加载方 式以位移加载进行,加载速度取 0.1 mm•min⁻¹。

1.4 PP-ECC 拉伸试验结果

PP-ECC 薄板在轴向拉伸荷载下表现出明显的 拟应变硬化特征,试验曲线如图 3 所示。从加载开 始,应力持续增长直到初裂发生,初裂发生时伴随着



图 3 PP-ECC 直接拉伸试验应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain Curves of Tensile Test of PP-ECC 应力骤减。在初裂至应力峰值的过程中,出现了应 力增长与骤减的循环,此循环过程中伴随着试件表 面出现大量均匀分布的微裂缝。在应变为3%左右 时,应力开始缓慢下降,并在试件表面形成了1条集 中裂缝。最终,屈服拉伸强度和拉伸极限强度分别 不小于2 MPa和3 MPa,极限拉应变大于2.5%。

2 PP-ECC 梁试验

2.1 试验材料

PP-ECC 梁所使用的 PP-ECC 与其直接拉伸试 验中所使用的 PP-ECC 相同,材料配合比如表 2 所 示。RC 梁使用 C30 混凝土,成分包括最大粒径 20 mm 的粗骨料、细骨料以及早强水泥。普通混凝土 的配合比如表 3 所示。表 4 为梁试验中所采用的钢 筋的力学性能指标。 表 3 混凝土配合比

Tab. 3 Mix Proportion of Concrete

水ホル	单位质量/(kg・m ⁻³)				
小灰几	水	水泥	细骨料	粗骨料	减水剂
0.60	176.6	294.3	829.9	970.3	2.943

表 4 钢筋的力学性能指标

Tab. 4 Mechanical Properties of Steel Bars

公称直径/	屈服强度/	极限强度/	屈服应变/	极限应变/	表面
$\mathbf{m}\mathbf{m}$	MPa	MPa	10^{-6}	%	特征
25.40	400	577	2 000	22	异型
6.35	323	499	1 615	17	异型
6.00	277	434	1 385	33	光圆

2.2 试件设计

本文试验共设计了 7 根试验梁,包括 2 根 RC 试验梁(作为参照对比)和 5 根 PP-ECC 试验梁。2 根 RC 试验梁试验中的 1 根配有箍筋且配箍率为 0.42%(RC-Ref),根据日本土木学会 RC 构件设计 规范^[18]设计为剪切破坏,另一根无配箍(RC-00)。5 根 PP-ECC 梁配箍率由 0.42%(RE-42 编号中后面 两位数字为箍筋率)逐渐降至 0.00%(RE-00)。所 有 7 根试验梁的具有相同的几何尺寸、纵筋配筋率 和剪跨比。所有试验梁横截面为(150×300) mm, 剪跨比为2.8。所有配箍试验梁中的箍筋均匀对称 分布在两端的剪跨中。试验梁详细尺寸与配筋如图 4 所示。







2.3 试验装置及加载方式

全部试件在加载前,在试件侧面使用白色涂料

进行喷涂处理,待白 色喷漆干燥以后,在 每个试件的剪跨面 内绘制了(50×50) mm的正方形方格 (图 5),以便通过设 置在试件侧面的高 性能相机进行图像



分析观测裂缝开展情况。全部试件在东京工业大学 结构混凝土实验室进行。加载设备采用 500 kN 油 压加载试验机,荷载数据由加载设备力传感器输出。 加载前,将试件放置于简支支座上,通过分配梁实现 两点加载,并在分配梁与试件间设置简支支座。试 件跨中两侧分别设置 2 个 LVDT 以测定跨中挠度, 在两侧简支支座处分别设置 2 个 LVDT 以测定支 座变形的影响。除此之外,在跨中下部纵筋和箍筋 粘贴了应变片以采集钢筋的应力、应变变化。试验 加载采用荷载控制分级加载模式,按每级荷载 10 kN逐渐增加,每级荷载增量后,将裂缝开展情况用标记笔进行标记。在荷载达到峰值后采用位移加载模式,以观察梁发生剪切破坏后的软化情况。所有试件均被单调荷载加载至破坏。

3 试验结果与分析

3.1 破坏过程及模式

与 RC 试验梁的破坏过程相似,所有 PP-ECC 试验梁的开裂均从跨中纯弯段开始,且裂缝细微不 易观察。随着荷载的逐步加大,越来越多的细微裂 缝形成。2 根 RC 试验梁在到峰值荷载后,斜裂缝 向加载点继续开展,同时向下延纵筋扩展,且通过布 置在纵筋的应变片未发现纵筋屈服,最后的破坏由 于加载点附近受压区压碎或支座附近的劈裂破坏引 起,因此2根 RC 试验梁属于剪压破坏。另外5根 PP-ECC 试验梁的临界斜裂缝由于在纵筋弯曲屈服 后形成并导致破坏,因此属于弯剪破坏。

3.2 剪切开裂行为

图 6 为发生剪切破坏后的剪跨裂缝开展形态。 由图 6 可知:在 RC 试验梁的剪跨区只有少量斜裂缝,而 PP-ECC 试验梁的斜裂缝相比较多,且裂缝缝隙较小。此外,在最大荷载时,RC 试验梁的临界斜裂缝已经显著开展,而 PP-ECC 试验梁的临界斜裂缝仍然无法与其他斜裂缝区分。随着加载过程的继续进行,PP-ECC 试验梁的临界斜裂缝逐渐显著开展。此外,在 PP-ECC 试验梁中,随着箍筋率的减小,斜裂缝的数量增多,且倾斜角度逐渐变缓,这可能是由于箍筋的限制由斜裂缝的开展不充分所致。







通过对试件加载峰值后的软化阶段进行图像分析,可以测定临界斜裂缝的开裂行为。本文研究对 软化阶段中130,160 kN两种荷载下,共5个 PP-ECC 试验梁观测区中的临界斜裂缝的张开量与剪 切滑移量进行了测定。取临界斜裂缝与网格平行线



段荷载为160 kN时,5根试验梁的临界斜裂缝张开量分布与箍筋率相关性较小,而剪切滑移量则表现出了与箍筋率的显著相关性,即箍筋率较大的试件,临

界斜裂缝的剪切滑移量也较大。当在软化阶段加载 至130 kN时,5根试验梁的临界斜裂缝张开量与160 kN时相比增大,但5根试验梁的张开量仍然与箍筋 率相关性较小;而剪切滑移量与160 kN时相比,箍筋 率较大试件的剪切滑移量增量更大。

此外,本文对临界斜裂缝在观测区的倾斜角度 定义为:临界斜裂缝与观测区上、下界线交点的连线 与梁轴向构成的夹角,如图 6(a)所示。根据 5 根 PP-ECC 试验梁的临界斜裂缝的开裂情况,图 9 绘 制了临界斜裂缝倾斜角与箍筋率的关系。由图 9 可 知,随着箍筋率的增大,临界斜裂缝的倾斜角越大, 说明箍筋的配置的越密,临界斜裂缝的开展越受限。

3.3 荷载-挠度关系

根据加载试验机的荷载输出数据、所采集的跨中挠度数据以及同批次浇筑的材料试验数据,得到 了全部试验梁的梁加载试验荷载特征值(表 5)。图 10为所有的荷载-挠度曲线。表 6为以 RC-Ref 为 基准,对比了全部试件的抗剪承载力。由表 6可知: 所有曲线在加载初始均为线弹性阶段,随着荷载的 加大,非线性特征越来越显著。分别比较 RC-Ref 和 RE-42, RC-00与RE-00两对箍筋率相同的试件















Tab. 5 Summary of Beam and Material Tests

表 5

试验梁与材料试验实测值

试验梁	最大荷载/ kN	挠度/mm	轴心抗压 强度/MPa	拉伸屈服 强度/MPa	拉伸极限 强度/MPa
RC-Ref	234.06	6.98	29.1		2.53*
RC-00	100.54	3.54	34.9		2.88*
RE-42	282.18	7.39	30.4	2.51	3.67
RE-30	261.12	8.44	33.1	2.30	3.56
RE-24	250.48	7.89	31.5	2.38	3.39
RE-12	252.10	8.01	35.6	2.45	3.68
RE-00	208.76	6.55	32.8	2.50	3.71

注:*表示拉伸极限强度通过劈裂压缩试验获得。



图 10 试验梁的荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection Curves of Test Beams

表 6 梁的抗剪承载力比较

Tab. 6 Comparisons for Shear Capacity

试件	抗剪承载力/kN	承载力变化率/%
RC-Ref	117.03	
RC-00	50.27	-57.0
RE -42	141.09	20.6
RE- 30	130.56	11.6
RE-24	125.24	7.0
RE-12	126.05	7.7
RE- 00	104.38	-10.8

可知,RE-42的荷载峰值较 RC-Ref 增长了 20.5%, 而 RE-00的荷载峰值较 RC-00增长了 107.6%。 PP-ECC 对无箍筋梁的抗剪增强作用更加显著。

4 理论分析

4.1 修正桁架模型的建立

桁架模型自提出以来,经各国学者的不懈研究, 一直不断改进并发展为修正桁架理论^[19],并显示出 了较高的准确性,现已被广泛推广至 RC 构件的抗 剪承载力验算。在 RC 构件中,含箍筋的 RC 构件 抗剪承载力为^[20]

$$V_1 = V_{\rm c1} + V_{\rm s} \tag{1}$$

式中:V1为RC构件的抗剪承载力;Vc1为受压区混

凝土、斜裂缝开裂面内的骨料咬合和纵筋销栓的共同作用所承担的剪力;V。为箍筋所承担的剪力。

本文基于日本土木学会 HPFRCC 2008 规 范^[20]中所提出的修正桁架理论,对 PP-ECC 梁的抗 剪承载力进行了分析,图 11 为 PP-ECC 梁修正桁架 模型受力示意, PP-ECC 梁的抗剪承载力 V₂ 为^[20]

$$V_2 = V_{\rm c} + V_{\rm s} + V_{\rm f} \tag{2}$$





Fig. 11 Force of Modified Truss Model for PP-ECC

式中:V。为 R/ECC 构件未开裂剪压区的 ECC 与纵筋的销栓共同作用承担的剪力;V_f 为与 ECC 的拉伸作用力,主要源于 ECC 中的纤维桥接作用。

4.2 箍筋效应

全部试验梁的抗剪承载力与箍筋率的关系如图 12 所示。随着箍筋率的增长,RC 与 PP-ECC 试验 梁的抗剪承载力均逐渐增长,但箍筋在 PP-ECC 试 验梁中的抗剪加强效应不如其在 RC 试验梁中显 著。通过修正桁架模型对 RC 试验梁和 PP-ECC 试 验梁的抗剪承载力各部分所分担剪力的比例进行分 析,在 RC 试验梁中随着箍筋率的增大,RC 试验梁 的抗剪承载力也逐渐增大,且 V。基本稳定保持不 变,而 V。随着箍筋率增大呈线性增长,符合修正桁 架模型的假设。对 5 根 PP-ECC 试验梁而言,通过 黏接在箍筋上的应变片可知箍筋在荷载峰值时箍筋 的剪切承载力 V。。根据 HPFRCC 2008 规范,由于 ECC 不使用粗骨料,PP-ECC 试验梁中的 V。较普通 混凝土减小,即

 $V_{c} = 0.7 \times 0.3 \sqrt[3]{f_{c}} \sqrt[4]{1/d} \sqrt[3]{100 p_{w} b_{w} d}$ (3) 式中: f_{c} 为 PP-ECC 的轴心抗压强度;d为梁的有效 高度; p_{w} 为纵筋配筋率; b_{w} 为梁宽。

 V_{c} 通过式(3)计算可得,则 ECC 拉伸作用所承 担的剪力 V_{f} 可由式(2)计算得到。图 13 为 5 根 PP-ECC 试验梁中 V_{c} , V_{s} 和 V_{f} 对于梁抗剪承载力 贡献的分布比例。由图 13 可见,与混凝土情况相 反,在 PP-ECC 试验梁中,随着箍筋率的增大, V_{f} 逐 渐减小。



图 12 试验梁抗剪承载力与箍筋率的回归分析

Fig. 12 Regression Analysis of Shear Capacities and Stirrup Ratios of Test Beams



图 13 PP-ECC 试验梁中的剪力承担分布

Fig. 13 Contributions of Shear Capacity of PP-ECC Test Beam

4.3 PP-ECC 梁抗剪承载力折减

在 HPFRCC 2008 规范中,纤维桥接作用所承 担的剪力可由式(4)定义为

$$V_{\rm f} = \left[f_{\rm ty} / \tan(\beta_{\rm u}) \right] b_{\rm w} z \tag{4}$$

式中: f_{1y}为基于 ECC 拉伸应力-应变曲线的拉伸屈 服强度; β_u 为临界斜裂缝与梁轴线的夹角; z 为力偶 臂长度。

 V_{f} 的计算值与试验值的比较如表 7 所示。由表 7 可见: V_{f} 的计算值比试验值较大,这是由于式 (4)未考虑将箍筋率增大所导致的剪切滑移所削弱的纤维桥接作用,因而可能造成过分高估 ECC 梁的 抗剪承载力。将 V_{f} 试验值与计算值的比值定义为 折减系数 v_{f} 则 v可表示为

$$v = V_{\rm f_exp} / V_{\rm f_cal} \tag{5}$$

kΝ

式中: $V_{f_{exp}}$ 为试验值; $V_{f_{cal}}$ 计算值。

表 7 V_r的计算值与试验值比较

Tab. 7 Comparison Between Calculated Values and

Experimental Value of $V_{\rm f}$

试验梁	RE-42	RE-30	RE-24	RE-12	RE-00
$V_{ m f\text{-}cal}$	85.1	88.4	95.0	154.7	163.3
$V_{ m f\text{-}exp}$	27.0	36.4	51.6	71.6	71.3

折减系数 v 与箍筋率的关系如图 14 所示。由图 14 可知:v 为 0.32 \sim 0.54,总的趋势是,随着箍筋率的增大, $V_{\rm f}$ 的折减增大。



5 结 语

(1)使用表面改性基体黏结增强的 PP 纤维所 制备的聚丙烯纤维工程水泥基复合材料(PP-ECC) 在拉伸作用下展现出了拟应变硬化与微裂缝的多缝 开裂特征,并且其拉伸屈服和极限拉伸强度分别不 小于 2MPa 和 3 MPa,极限拉应变大于 2.5%。

(2) 在相同配箍率下, PP-ECC 梁的抗剪承载力 明显高于 RC 梁。但随着箍筋率的提高, PP-ECC 梁的抗剪承载力增长不如 RC 梁显著。PP-ECC 梁 的剪切破坏过程中生成了更多的斜裂缝, 且与 RC 梁的脆性剪切破坏相比, 具有更好的剪切延性。

(3)由于 PP-ECC 中的纤维桥接作用, PP-ECC 承担的剪力较混凝土高;随着箍筋率的提高,由于箍 筋限制了 PP-ECC 梁中临界斜裂缝的开展,使临界 斜裂缝的倾斜角度更陡,加剧了临界斜裂缝的剪切 滑移,从而削弱了纤维的桥接作用,最终导致纤维所 承载的剪力降低。因此,在配箍 R/ECC 构件中不 对其抗剪承载力进行折减,会导致其抗剪承载力计 算值偏高。

(4)本文研究选取的剪跨比有限,在后续工作中 仍需要对不同剪跨比的 ECC 梁的抗剪承载力进行 进一步研究。此外,由于试验加载数量所限,ECC 中纤维桥接作用的抗剪承载力的折减系数在本文研 究中未能表示出与箍筋率的显著相关性,这些都需 在未来的工作中进行进一步深入研究。

参考文献:

References:

- [1] LI V C, LEUNG C K Y. Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 188 (11): 2246-2264.
- [2] LIVC, WUHC. Pseudo Strain-hardening Design in Cementitious Composites in High Performance Fiber

Reinforced Cement Composites[M]. London: E & F N Spon, 1992.

- [3] LI V C. Engineered Cementitious Composites (ECC)-Material, Structural, and Durability Performance, Concrete Construction Engineering Handbook [M]. Boca Raton; CRC Press, 2008.
- [4] MATSUMOTO T, SUTHIWARAPIRAK P, KAN-DA T. Mechanisms of Multiple Cracking and Fracture of DFRCCs Under Fatigue Flexure [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 299-306.
- [5] 徐世烺,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 Shi-lang, LI He-dong. Uniaxial Tensile Experiments of Ultra-high Toughness Cementitious Composite[J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42 (9):32-41.
- [6] 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 Jun, GONG Cheng-xu, JU Xian-chun. Characteristics and Application of Ultra-high Toughness and Low Shrinkage Fiber Reinforced Cementitious Composites [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(12):1452-1461.

- [7] 乔 治,潘钻峰,孟少平,等. 混杂 PVA-ECC 配合比 优化设计及力学性能试验研究[J]. 土木建筑与环境 工程,2015,37(5):72-81.
 QIAO Zhi, PAN Zuan-feng, MENG Shao-ping, et al. Optimization of Mix Proportion and Experimental Analysis of Mechanical Properties of Hybrid PVA-ECC[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2015,37(5):72-81.
- [8] 汪 卫,潘钻峰,孟少平,等. 国产 PVA 纤维增强水 泥基复合材料力学性能研究[J]. 工业建筑,2014,44 (增):958-964.
 WANG Wei, PAN Zuan-feng, MENG Shao-ping, et al. Study on Mechanical Properties of Domestic PVA Fiber Reinforced Cementitious Composite[J]. Industrial Construction,2014,44(S):958-694.
- [9] QIAN S, 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.
- [10] KAWANISHI T, HIRATA T, OSHIMA A, et al. Experimental Study on Uniaxial Tensile Properties and Durability of High Toughness Polypropylene Fiber Reinforced Cementitious Composites [J]. Journal of JCI Annual Convention, 2009, 31(1):289-294.

for Post-tensioned Precast Concrete Segmental Bridge Columns[J]. Engineering Structures, 2013, 46: 205-217.

- [12] ELGAWADY M A, DAWOOD H M. Analysis of Segmental Piers Consisted of Concrete Filled FRP Tubes[J]. Engineering Structures, 2012, 38:142-152.
- [13] BILLINGTON S L, YOON J K. Cyclic Response of Unbounded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-reinforced Concrete [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004,9(4):353-363.
- [14] WHITE S, PALERMO A. Quasi-static Testing of Posttensioned Nonemulative Column-footing Connections for Bridge Piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016,21(6):1-13.
- [15] 贾俊峰,赵建瑜,张 强,等.后张预应力节段拼装 CFST桥墩抗侧力学行为试验[J].中国公路学报, 2017,30(3):236-245.

JIA Jun-feng, ZHAO Jian-yu, ZHANG Qiang, et al. Experiment on Lateral Bearing Behavior of Post-tensioned Segmental CFST Bridge Pier Columns [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (3):236-245.

(上接第241页)

- [11] BROWN R, SHUKLA A, NATARAJAN K R. Fiber Reinforcement of Concrete Structures [R]. Rhode Island; University of Rhode Island, 2002.
- [12] SHIMIZU K, KANAKUBO T, KANDA T, et al. Shear Behavior of Steel Reinforced PVA-ECC Beams [C]//WCEE. Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering Conference. Vancouver: WCEE,2004:1-9.
- [13] SURYANTO B, NAGAI K, MAEKAWA K. Modeling and Analysis of Shear-critical ECC Members with Anisotropic Stress and Strain Fields [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2010,8(2):239-258.
- [14] 侯利军,陈 达,徐世烺,等.无腹筋 RUHTCC 梁抗 剪性能试验研究[J].东南大学学报:自然科学版, 2014,44(1):133-139.

HOU Li-jun, CHEN Da, XU Shi-lang, et al. Experimental Investigation on Shear Response of RUHTCC Beams Without Stirrups [J]. Journal of Southeast University: Nature Science Edition, 2014, 44(1): 133-139.

[15] HOU Li-jun, LUAN Zhi-yong, CHEN Da, et al. Experimental Study of Shear Properties of Reinforced Ultra-high Toughness Cementitious Composites Beams [J]. Journal of Zhejiang University—Science

- [16] 布占字,吴威业.预制拼装混凝土桥墩抗震性能拟静力循环加载试验[J].建筑科学与工程学报,2013,32
 (1):42-50.
 BU Zhan-yu, WU Wei-ye. Experiment on Seismic Behavior of Precast Segmental Concrete Bridge Piers Under Quasi Static Cyclic Loading[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2013,32(1):42-50.
- [17] DAWOOD H, ELGAWADY M, HEWES J. Factors Affecting the Seismic Behavior of Segmental Precast Bridge Columns[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2014, 8(4): 388-398.
- [18] 韩林海,杨有福.现代钢管混凝土结构技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
 HAN Lin-hai,YANG You-fu. Modern Concrete-filled Steel Tube Structure Technology[M]. Beijing: China Building Industry Press,2007.
- [19] 张 强.节段预制拼装钢管混凝土桥墩抗震性能研究
 [D].北京:北京工业大学,2016.
 ZHANG Qiang. Research on Seismic Performance of Precast Segmental Concrete Filled Steel Tube Column
 [D]. Beijing; Beijing University of Technology,2016.

A,2015,16(4):251-264.

- [16] 许青青.超高韧性水泥基复合材料在深受弯构件中的应用研究[D].大连:大连理工大学,2016.
 XU Qing-qing. Improving Shear Performance of RC Deep Beam with Use of Ultrahigh Toughness Cementitious Composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2016.
- [17] 张秀芳,姬仁楠.钢筋超高韧性水泥基复合材料梁的 抗剪性能[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4): 168-172.

ZHANG Xiu-fang, JI Ren-nan. Shear Performance of Steel Reinforced Ultrahigh Strength Cementitious Composite Beams[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(4):168-172.

- [18] JSCE 2007, Standard Specifications for Concrete Structures—2007 (Design)[S].
- [19] OKAMURA H, HIGAI T. Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement[C]//JSCE. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Tokyo:JSCE, 1980:131-141.
- [20] JSCE HPFRCC 2008, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)[S].