

文章编号:1671-8879(2016)02-0052-07

混杂纤维布加固轻骨料混凝土梁的试验研究

王 丹¹, 郭志昆¹, 邵 飞², 陈万祥¹

(1. 解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 解放军理工大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要:针对 11 根纤维布加固的轻骨料混凝土梁和纤维增强轻骨料混凝土梁,采用静载试验方法,研究了纤维布加固轻骨料混凝土复合梁在静力作用下结构受力的变化规律、混杂纤维布加固梁的加固效果和混杂纤维轻骨料混凝土梁的纤维增强效果。研究表明:采用混杂纤维布加固可以有效提高复合梁的抗弯承载能力,梁的抗弯刚度也有一定的提高;混杂纤维布加固复合梁的变形性能和延性要好于碳纤维布加固梁;在轻骨料混凝土中掺入塑钢混杂纤维对加固梁的抗弯承载力、抗弯刚度和梁的延性均有一定的改善。

关键词:结构工程;混杂纤维布;塑钢混杂纤维;轻骨料混凝土梁;承载力;延性

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

Experimental study on LC beams strengthened with hybrid fiber sheets

WANG Dan¹, GUO Zhi-kun¹, SHAO Fei², CHEN Wan-xiang¹

(1. School of Defence Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. School of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the static load experiment on eleven LC beams strengthened with fiber sheets and hybrid fibers reinforced LC beams, this paper studied the changing law of the structure stress of LC beams strengthened with hybrid fiber sheets and the strengthening effects of hybrid fiber sheets and hybrid fibers on LC beams under static environment. The results show that the flexural capacity of LC beams strengthened with hybrid fiber sheets improves effectively. Its flexural rigidity also increases to the some extent. The deformability and ductility of LC beams strengthened with hybrid fiber sheets are better than those of beams strengthened with carbon fiber sheet. The ductility, flexural capacity and stiffness of LC beams can be improved by adding HPP hybrid fibers to light weight aggregate concrete. 4 tabs, 4 figs, 20 refs.

Key words: structural engineering; hybrid fiber sheet; HPP hybrid fiber; LC beam; bearing capacity; ductility

0 引 言

纤维布加固混凝土是目前结构物加固改造领域

研究开发的一个热点。玻璃纤维布和碳纤维布是 2 种常用的加固材料^[1]。玻璃纤维布价格便宜,延伸率相对较大(约 2%~3%),但由于其抗拉强度和弹

收稿日期:2015-07-10

基金项目:总参军训部防护工程方向研究项目(KYGYZXJK1006)

作者简介:王 丹(1974-),女,山东菏泽人,讲师,工学博士,E-mail:yhtwd@sina.com。

性模量较低,增强效果不佳。碳纤维布抗拉强度和弹性模量指标极高,但延伸率较低(约 1%~1.4%),且价格一般为玻璃纤维布的几十倍,加固成本很高^[2-3]。因单一纤维布性能的局限性,汕头大学熊光晶等提出混合采用碳纤维布(CFRP)和玻璃纤维布(GFRP)对钢筋混凝土梁进行加固,并进行了一系列试验研究,研究表明,GFRP与CFRP体积比为2的混杂纤维复合材料的断裂应变比CFRP高30%~50%;在CFRP中加入15%的GFRP,抗冲击强度可增加2~3倍,且价格低廉^[4-5]。国内外对混杂纤维布加固普通钢筋混凝土梁的研究已取得丰硕成果,但对轻骨料混凝土梁的加固研究还鲜见报道^[6]。轻骨料混凝土因其强度低、脆性大等特点常用于墙体材料等非承重结构,但在轻骨料混凝土中掺入混杂纤维可有效改善比强度,并大大提高其韧性^[7-8];故在对结构构件自重要求较高的工程领域,纤维增强轻骨料混凝土材料用作承重构件的情况越来越多,对混杂纤维布加固纤维增强轻骨料混凝土梁进行试验研究具有重要的理论意义和工程实践价值。为此,本文通过对11根纤维布加固的轻骨料混凝土梁和纤维增强轻骨料混凝土梁进行静载试验,研究纤维布加固轻骨料混凝土复合梁在静力作用下结构受力的变化规律,以及静载作用下混杂纤维布加固梁的加固效果和混杂纤维轻骨料混凝土梁的纤维增强效果。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了6组共11根纤维布加固轻骨料混凝土梁,其中第1组为素轻骨料混凝土梁,其余均为塑钢混杂纤维轻骨料混凝土梁。为了实现战时封堵人防工程出入口时使用钢筋混凝土构件重量减半的目标,梁的配筋仅采用构造纵筋和构造箍筋。纵向

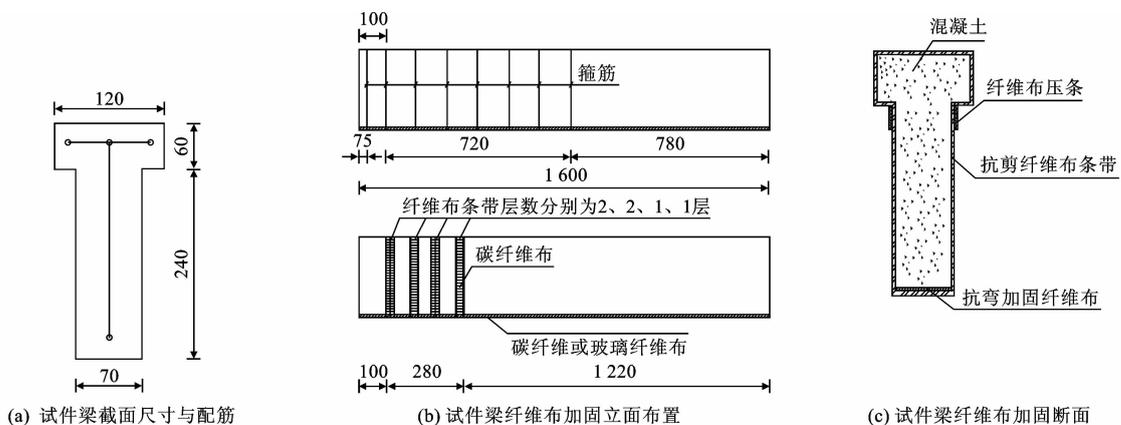
受拉钢筋采用1Φ8,压筋采用3Φ8@45。在梁跨端部1/4范围内设置箍筋,箍筋直径为6mm,间隔为120mm,即7Φ6@120,采用封闭式单筋形式。根据《人民防空地下室设计规范》(GB 50038—2005)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)设计要求,考虑到试验中试件边缘较薄,故采用实心T型梁进行试验。试件梁的截面尺寸及钢筋布置见图1(a)。

1.2 加固方案

试验采用在复合梁底部粘贴碳纤维布和玻璃纤维布的抗弯加固方法。碳纤维布和玻璃纤维布的层数根据设计要求确定,碳纤维布在内层。抗弯加固方式有3种情况:①粘贴1层碳纤维布;②粘贴1层碳纤维布和1层玻璃纤维布;③粘贴1层碳纤维布和2层玻璃纤维布。抗剪加固采用在复合梁侧面粘贴纤维布条带的方法,抗剪纤维布的粘贴层数也根据设计要求确定,粘贴方式为U形箍加压条。条带宽40mm,条带边缘的净间距为40mm。在梁纵向共粘贴4条,从梁端到跨中纤维布粘贴层数的布置分3种情况:①不加固;②1、1、1、1;③2、2、1、1。其中“1”为1层碳纤维布;“2”为1层碳纤维布和1层玻璃纤维布,碳纤维布粘贴在里面。试件梁纤维布的粘贴见图1(b)、(c)。

1.3 试件组成

纤维布加固轻骨料混凝土试件梁共有11根。设为:①素轻骨料混凝土梁2根;②混杂短纤维增强轻骨料混凝土梁6(3×2)根,主要验证静载作用下纤维布加固复合梁的抗弯抗剪承载能力,通过②与①的比较,研究轻骨料混凝土基体中掺加短纤维对混杂纤维布加固混凝土梁承载力、刚度、延性、裂缝分布等的影响;③混杂纤维增强轻骨料混凝土梁3根,通过③与②中相应试件的比较,研究粘贴纤维布条带进行抗剪加固后复合梁的抗剪性能。



单位: mm

图 1 试件参数与配筋

Fig. 1 Parameters and reinforcement for specimens

1.4 试验原材料

1.4.1 轻骨料混凝土

课题组前期就高性能轻骨料混凝土的制备进行了大量试验,确定了高性能轻骨料混凝土和纤维轻骨料混凝土的最优配合比,并测试了其相关力学性能指

表1 轻骨料混凝土试验配合比

Tab.1 Concrete mixture ratios of LC

名称	水胶比	体积砂率	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硅粉/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	陶粒/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/%	聚丙烯纤维/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	塑钢纤维/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
素轻骨料混凝土	0.27	0.3	520	52	711	512	1		
纤维增强轻骨料混凝土	0.27	0.3	520	52	711	512	1	0.9	4

注:配合比设计中的水胶比为净水胶比;减水剂为水泥质量的百分比。

表2 纤维的主要性能指标

Tab.2 Main performance indexes of fibers

纤维名称	密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	长度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
聚丙烯纤维	0.91	19	纤细	>3.8	>280
塑钢纤维	0.95	35~40	0.6~0.9	>7.0	>530

1.4.2 加固材料(碳纤维布、玻璃纤维布)

试验采用的碳纤维布是上海生产的日本东丽(T-700-12K原丝)同固牌单向碳纤维布,玻璃纤维布采用南京玻璃纤维研究设计院高强玻璃纤维研究开发中心生产的,供航空航天使用的SGFW型高强玻璃纤维。纤维布主要性能指标见表3。

表3 纤维布的主要性能指标

Tab.3 Main performance indexes of fiber sheets

名称	极限抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	单位面积质量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	厚度/mm
碳纤维布	4 089	217	1.88	300	0.170
玻璃纤维布	4 020	83	4.85	430	0.169

1.5 试验方案

为了着重研究纤维布加固轻骨料混凝土梁正截面受力和变形的变化规律,采用机械式千斤顶为加载设备。梁的实际受力为简支梁结构,通过分配梁对试件进行2点集中加载。试验梁的加载装置如图2所示。对纤维布加固梁进行破坏性试验,采取分级加载方式,在梁开裂前和破坏前分级适当加密,以确定梁的开裂荷载和极限荷载。试验测定内容包括:试件梁的开裂荷载、极限荷载、荷载-位移曲线、荷载-应变曲线及裂缝开展情况。以上数据均用IMP数据采集系统自动采集,并在试验过程中实时监控。

标。根据试验结果,轻骨料混凝土和塑钢混杂纤维轻骨料混凝土的配合比见表1。纤维的主要性能指标见表2。轻骨料混凝土和塑钢混杂纤维轻骨料混凝土的立方体抗压强度分别为57.7、56.4 MPa,劈裂抗拉强度分别为4.52、5.98 MPa。

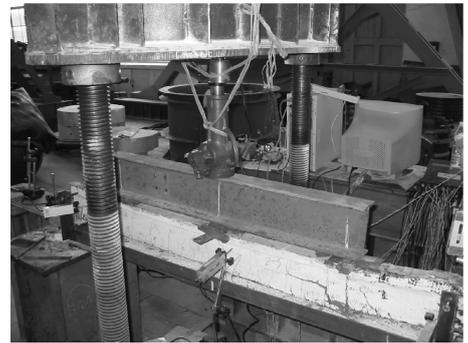


图2 试验梁加载装置

Fig.2 Loading device of test beams

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

所有试件梁均加载至极限破坏状态,各试验梁的加固方式、剪跨比、承载力、挠度及破坏特征见下一页表4。

2.2 试验分析

2.2.1 承载力分析

由表4可得如下结果。

(1)试件梁的开裂荷载和纤维布的加固方式与加固量没有直接关系。2层混杂纤维布加固梁3-2的开裂荷载比1层纤维布加固梁2-2的开裂荷载高6%,3层混杂纤维布加固梁4-2的开裂荷载比梁3-2的开裂荷载低10%,因此粘贴碳纤维布或混杂纤维布不能提高梁的开裂荷载^[9-10]。

(2)所有梁试件经纤维布加固后,极限荷载均有所提高,并且梁极限荷载的提高随着纤维布粘贴面积的增加而增加。如粘贴1层碳纤维布和1层高强玻璃纤维布的复合梁3-1与粘贴1层碳纤维布和2层

表 4 承载力与挠度试验结果

Tab. 4 Experiment results of bearing capacity and deflection

试件编号	含纤维	加固方式		剪跨比	初裂荷载/kN	初裂挠度/mm	破坏荷载/kN	最大挠度/mm	破坏特征
		抗弯	抗剪						
1-1	无	C+G	1、1、1、1	3.3	3.48	1.67	13.97	31.19	剪切破坏
1-2	无	C+G	1、1、1、1	1.5	5.04	1.48	24.42	24.85	剪切粘拉破坏
2-1	有	C	1、1、1、1	3.3	3.61	1.59	10.00	21.01	弯剪破坏,纤维断裂
2-2	有	C	1、1、1、1	1.5	5.39	1.04	20.81	24.89	弯曲破坏,纤维断裂
3-1	有	C+G	1、1、1、1	3.3	4.00	1.64	13.40	22.06	剪切粘拉破坏
3-2	有	C+G	1、1、1、1	1.5	5.70	1.60	27.96	30.35	弯剪破坏
4-1	有	C+2G	1、1、1、1	3.3	3.92	2.60	21.01	32.38	剪切斜拉破坏
4-2	有	C+2G	1、1、1、1	1.5	5.13	0.95	32.64	23.11	剪切破坏
5-1	有	C+G	不加固	1.5	5.50	0.83	25.40	26.98	弯曲破坏,纤维断裂
6-1	有	C+G	2、2、1、1	3.3	3.75	1.67	13.94	21.05	弯曲破坏
6-2	有	C+G	2、2、1、1	1.5	4.97	1.18	24.10	25.42	弯剪破坏

注:1.抗弯加固中,“C”为1层碳纤维布,“G”为1层玻璃纤维布,碳纤维布粘贴在内层;2.抗剪加固中,数字表示依次从梁端到跨中布置的4条纤维布条带情况,“1”为1层碳纤维布,“2”为1层碳纤维布和1层玻璃纤维布,碳纤维布粘贴在内层。

高强玻璃纤维布的梁4-1,比粘结1层碳纤维布的纤维混凝土梁2-1(参照梁)的极限荷载分别高35%和57%。由文献[11-12]可知,这种增加并非与纤维布的使用面积成线性关系。当纤维布层数较少时,增长的幅度较大。随着加固层数的增加,各层加固材料之间并不能完全地共同协调工作,部分加固材料的强度不能完全发挥出来(如碳纤维)。另外,随着加固层数的增多,还将改变构件的破坏形态,出现类似超筋梁的破坏特征,因此对梁进行加固设计时,选择合适的层数非常重要。

(3)在相同受力和加固条件下,混杂纤维轻骨料混凝土加固梁的开裂荷载、极限荷载均比普通轻骨料混凝土加固梁有所提高。如粘贴1层碳纤维布和1层高强玻璃纤维布的纤维混凝土梁3-1、3-2,分别比相同条件下的素轻骨料混凝土加固梁的开裂荷载高15%和13%。这是因为:①轻骨料混凝土中掺入短纤维减少了其在凝固时产生的原生裂缝,即减少了混凝土的原始缺陷;②受力时聚丙烯纤维与混凝土基体有较好的粘接强度,能够阻止细微裂缝的开展^[13]。当应力自基体传给纤维时,纤维因变形而消耗能量,使混凝土构件的初裂荷载增大。粘贴1层碳纤维布和1层高强玻璃纤维布的纤维混凝土加固梁3-2,比相同条件下的素轻骨料混凝土加固梁1-2的极限荷载高14%。这是因为纤维的桥梁作用,使裂缝的扩展受到阻止,只有当混凝土受到的弯曲应力大于纤维与基体的粘结强度或大于纤维的抗拉强度时,纤维才可能被拔出或拉断,从而使梁的极限荷载得到提高。但纤维混凝土加固梁3-1的极限荷载与素轻骨料混凝土加固梁1-1的极限荷载比较接

近,这是由于纤维混凝土加固梁3-1发生了剪切粘拉破坏,加固梁的抗弯能力没有得到充分发挥。

(4)剪跨比对梁的承载力有很大影响。如剪跨比为1.5的加固梁的开裂荷载,比相同加固条件下剪跨比为3.3的加固梁的开裂荷载大约高40%。主要是因为在一定外荷载作用下,随着剪跨比的降低,跨中纯弯段的弯矩变小。粘贴1层碳纤维布和1层高强玻璃纤维布与1层碳纤维布和2层高强玻璃纤维布的纤维混凝土梁3-2、4-2(剪跨比为1.5)的极限荷载,比相同加固条件下剪跨比为3.3的加固混凝土梁3-1、4-1的极限荷载分别高100%和55%。

2.2.2 裂缝分布及破坏形态

由于轻骨料混凝土为脆性材料,混凝土梁的破坏过程伴随着各种弯曲或者剪切裂缝展开。梁最终破坏时的裂缝分布情况可以确定梁的破坏形态。部分试件梁破坏后的裂缝分布情况见下页图3。由图3可知,纤维布加固轻骨料混凝土梁的破坏形式有多种,破坏形式的不同决定了材料性能的发挥程度和梁承载力的大小。本次试验中,加固梁共出现了5种破坏形式:剪切斜拉破坏、剪切破坏、弯剪破坏、剪切粘拉破坏、弯曲破坏(表4)。

(1)部分梁发生弯曲破坏,纤维布断裂。如加固梁2-2、5-1,这些梁剪跨比较小,加固层数不多。发生纤维布拉断破坏,不仅使加固材料得到充分利用,承载力达到最高,而且梁具有较好的延性。但随着剪跨比增大,加固层数增多,加固梁的抗弯能力提高,跨中最大弯矩降低。试件梁则发生弯剪破坏、剪切破坏、乃至剪切斜拉破坏等,导致加固材料不能得到充分利用,梁的延性降低。

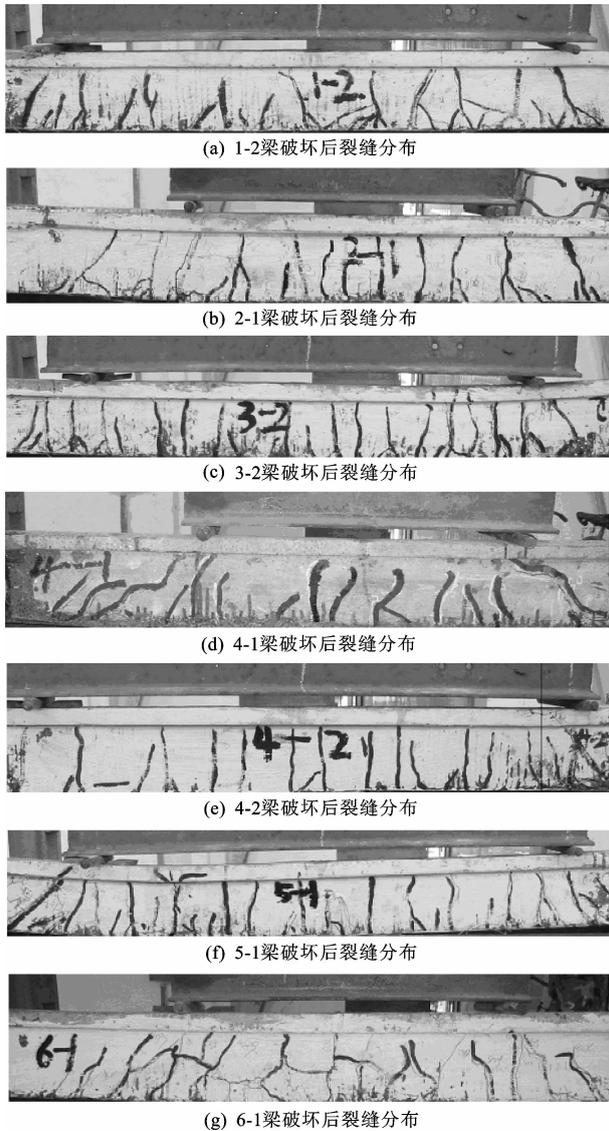


图3 梁破坏形态

Fig. 3 Failure modes of beams

(2) 加固梁的抗剪能力对梁的破坏形态也有明显影响。抗弯加固时应注意保证梁有足够的抗剪承载力, 尽量避免发生受剪破坏^[14]。从本次试验的破坏形态来看, 不少试件在加载点附近的抗剪承载力不够。试验梁的抗剪能力较低, 在受剪区较早出现弯剪裂缝, 且宽度较大, 导致锚固区的剪应力和正应力较大, 较易发生粘结破坏。

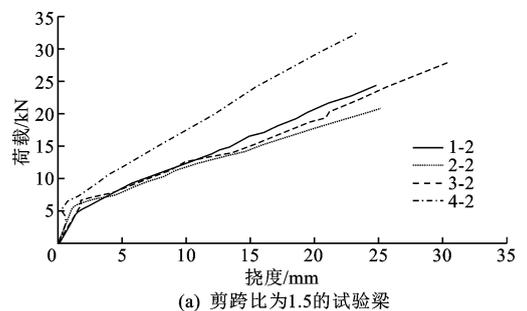
(3) 本次试验中没有出现加固梁受压区混凝土压坏的脆性破坏。根据文献^[15-16], 由塑钢混杂纤维轻骨料混凝土应力-应变曲线可知, 塑钢混杂纤维轻骨料混凝土的峰值压应变比普通混凝土的峰值压应变高 2 倍以上, 即使在加固梁破坏时, 加固梁的受压区混凝土最大压应变依然小于其峰值压应变。

(4) 由各加固梁破坏后的裂缝分布情况可知, 轻骨料混凝土中加入混杂短纤维后的裂缝分布更加密

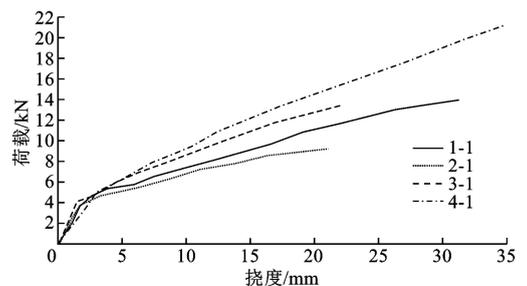
集, 裂缝间隔变小, 裂缝宽度变细。极限破坏时, 裂缝间纤维的拉结作用能使已产生较大变形的梁保持良好的完整性且仍具有一定的承载能力。而素轻骨料混凝土复合梁破坏时仅有几条主裂缝, 纯弯段内混凝土还出现大块崩落的现象。无论是从传力机理还是从能量消耗各方面看, 混杂短纤维轻骨料混凝土梁都具有明显的优势^[17]。

2.2.3 刚度

图 4 为剪跨比为 3.3 和 1.5 的加固试验梁在加载过程中跨中挠度随荷载变化的曲线。由图 4 可知, 所有加固梁的荷载-挠度曲线形状基本相同。荷载-挠度曲线大体上可分为 3 个阶段。①加载初期, 曲线大致呈线性关系, 挠度基本相同, 各梁的刚度基本一致, 加固材料未发挥作用。②继续施加荷载, 受拉区混凝土开裂, 荷载-挠度曲线出现拐点, 曲线斜率明显变小, 裂缝开始发展。相同荷载和相同剪跨比的条件下, 1 层碳纤维布加固梁 2-1 和 2-2 的挠度较大, 然后依次是 1 层碳纤维布和 1 层玻璃纤维布加固梁 3-1 和 3-2、1 层碳纤维布和 2 层玻璃纤维布加固梁 4-1 和 4-2, 说明纤维布的加固作用开始发挥。③进入塑性状态后, 纤维布的加固作用逐渐明显, 荷载由纤维布和纵向钢筋共同承担, 加固梁具有较高的 2 次刚度, 并且随着粘贴层数增多, 刚度增强幅度越大^[18]。在剪跨比相同的情况下, 2 次刚度从小到大的试件梁的加固方式依次为: 1 层碳纤维布、1 层碳纤维布和 1 层玻璃纤维布(素轻骨料混凝土)、1 层碳纤维布和 1 层玻璃纤维布(纤维轻骨料



(a) 剪跨比为1.5的试验梁



(b) 剪跨比为3.3的试验梁

图4 试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection of test beams

混凝土)、1层碳纤维布和2层玻璃纤维布。

总体上看,纤维轻骨料混凝土加固梁的抗弯刚度比素轻骨料混凝土梁大。如粘贴1层碳纤维布和1层高强玻璃纤维布的纤维混凝土梁3-1、3-2,均比相同条件下的素轻骨料混凝土加固梁1-1、1-2的刚度大。这是因为纤维混凝土中的纤维有抑制混凝土中裂缝发展的作用,并使纤维混凝土梁的刚度沿全梁的分布更均匀。

2.2.4 延性

由表4可以看出,加固梁试件2-1、3-1、4-1的破坏挠度分别为21.01、22.06、32.38 mm,可知混杂纤维布加固梁的变形性能要好于单一碳纤维布加固梁。混杂纤维布加固梁具有更好的塑性变形能力和能量吸收能力^[19],但混杂纤维布加固梁的延性与试件的破坏形态也有一定的关系,如剪跨比为1.5时,混杂纤维布加固梁4-2的破坏挠度反而小于单一碳纤维布加固梁2-2,这是因为梁2-2是弯曲破坏,梁的延性充分发展;4-2梁属于剪切破坏,导致梁的延性降低。

3 结 语

(1)采用混杂纤维布加固可以有效提高复合梁的抗弯承载能力,梁的抗弯刚度也有一定的提高。混杂纤维布加固复合梁的变形性能优于碳纤维布加固梁,延性也较好。

(2)在轻骨料混凝土中掺入短纤维对加固梁的性能有一定改善^[20],如梁的抗弯承载力、抗弯刚度均略有提高。最重要的是,纤维增强使轻骨料混凝土复合梁开裂时裂缝发展缓慢、间距较小、比较细密,破坏时仍保持良好的完整性。而素轻骨料混凝土梁弯曲破坏时裂缝单一,甚至出现大块混凝土崩落的现象,从而导致其承载力不能正常发挥。

(3)为了实现战时封堵人防工程出入口时使用钢筋混凝土构件重量减半的目标,试验梁的配筋仅采用构造纵筋和构造箍筋。如果对本文设计的复合梁布置适当数量的纵筋,可用于封堵更高抗力级别的人防工程出入口,从而可以进行更进一步地推广应用。

参考文献:

References:

[1] 卢亦焱,黄银燊,张号军. FRP加固技术研究新进展[J]. 中国铁道科学,2006,27(3):34-42.
LU Yi-yan, HUANG Yin-shen, ZHANG Hao-jun. New progress in the study of the technology of reinforcement with fiber reinforced plastics [J]. China

Railway Science,2006,27(3):34-42. (in Chinese)

[2] 王文炜,赵国藩,李果,等. 玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 大连理工大学学报,2003,43(6):799-805.
WANG Wen-wei, ZHAO Guo-fan, LI Guo, et al. Experimental study of strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded GFRP sheets[J]. Journal of Dalian University of Technology,2003,43(6):799-805. (in Chinese)

[3] 谢建和,孙明炜,郭永昌,等. FRP加固受损RC梁受弯剥离承载力预测模型[J]. 中国公路学报,2014,27(12):73-79.
XIE Jian-he, SUN Ming-wei, GUO Yong-chang, et al. Prediction model for debonding bearing capacity of damaged reinforced concrete beam flexurally strengthened with fiber reinforced polymer[J]. China Journal of Highway and Transport,2014,27(12):73-79. (in Chinese)

[4] 熊光晶,姜浩,黄冀卓. 混杂纤维布加固混凝土梁的试验研究[J]. 土木工程学报,2001,34(4):62-66.
XIONG Guang-jing, JIANG Hao, HUANG Ji-zhuo. Experimental study on hybrid-fiber-sheet strengthened concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal,2001,34(4):62-66. (in Chinese)

[5] 熊光晶,蒋小青,杨建中,等. 高强玻璃纤维布碳纤维布混杂加固混凝土梁柱的试验研究[J]. 工业建筑,2001,33(9):14-16.
XIONG Guang-jing, JIANG Xiao-qing, YANG Jian-zhong, et al. Experimental research of hybrid high strength glass fiber sheet/carbon fiber sheet strengthening concrete beams and columns[J]. Industrial Construction,2001,33(9):14-16. (in Chinese)

[6] 腾锦光,陈建飞,SMITH S T,等. FRP加固混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2004. (in Chinese)

[7] 王丹,郭志昆,陈万祥,等. 混杂纤维轻骨料混凝土性能试验研究[J]. 建筑结构,2014,44(14):22-25.
WANG Dan, GUO Zhi-kun, CHEN Wan-xiang, et al. Experimental study on performance of lightweight aggregate concrete reinforced by hybrid fiber[J]. Building Structure,2014,44(14):22-25. (in Chinese)

[8] 霍俊芳,申向东,崔琪. 纤维增强轻骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土,2007(1):36-39.
HUO Jun-fang, SHEN Xiang-dong, CUI Qi. Study on mechanical properties of fiber reinforced lightweight aggregate concrete[J]. Concrete,2007(1):36-39. (in Chinese)

[9] 喻林,蒋林华,储洪强. 混杂纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究[J]. 建筑材料学报,2006,9(3):

- 274-278.
- YU Lin, JIANG Lin-hua, CHU Hong-qiang. Bending bearing capacity of reinforced concrete beam strengthened by hybrid fiber sheet[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 274-278. (in Chinese)
- [10] 张小冬, 王耀杰, 邓宗才. 混杂纤维片材拉伸性能研究[J]. 国防交通工程与技术, 2010(1): 21-24.
- ZHANG Xiao-dong, WANG Yao-jie, DENG Zong-cai. An experimental study of the tensile property of IHFRP[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2010(1): 21-24. (in Chinese)
- [11] 邓宗才, 李建辉. 混杂纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验及理论研究[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 115-123.
- DENG Zong-cai, LI Jian-hui. Experimental and theoretical research on flexural performance of RC beams strengthened with hybrid fiber sheets[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 115-123. (in Chinese)
- [12] 张小冬, 王耀杰, 邓宗才, 等. 碳、玻璃层内混杂纤维布加固混凝土梁抗弯性能研究[J]. 建筑技术, 2010, 41(10): 945-948.
- ZHANG Xiao-dong, WANG Yao-jie, DENG Zong-cai, et al. Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with carbon/glass intraply hybrid fiber sheets[J]. Architecture Science, 2010, 41(10): 945-948. (in Chinese)
- [13] 杨成蛟, 黄承逵, 车 轶, 等. 混杂纤维混凝土的力学性能及抗渗性能[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(1): 89-94.
- YANG Cheng-jiao, HUANG Cheng-kui, CHE Yi, et al. Mechanical properties and impermeability of hybrid fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(1): 89-94. (in Chinese)
- [14] LI J C, SAMALI B, YE L. Behaviour of concrete beam-column connections reinforced with hybrid FRP sheet [J]. Composites Structures, 2002, 57(1-4): 357-365.
- [15] 吴平安, 刘宜平, 高明亮, 等. 混杂纤维轻骨料混凝土冲击性能试验研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(6): 776-781.
- WU Ping-an, LIU Yi-ping, GAO Ming-liang, et al. Experimental study on impact performance of hybrid fibers reinforced light weight aggregate concrete[J]. Acta Armam Entar, 2010, 31(6): 776-781. (in Chinese)
- [16] TOUTANJI H A. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets[J]. Materials Journal, 1996, 96(3): 397-404.
- [17] 宋焕成, 张佐光. 混杂复合材料[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.
- SONG Huan-cheng, ZHANG Zuo-guang. Hybrid composite materials[M]. Beijing: Beihang University Press, 1989. (in Chinese)
- [18] 杨建中, 熊光晶, 严 州, 等. 高强玻璃纤维/碳纤维混杂复合材料加固混凝土梁的抗弯试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(7): 18-22.
- YANG Jian-zhong, XIONG Guang-jing, YAN Zhou, et al. Experimental study on flexural strength of hybrid CF/SGF composite strengthening concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(7): 18-22. (in Chinese)
- [19] 邓宗才. 碳纤维布增强钢筋混凝土梁抗弯力学性能研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(2): 45-51.
- DENG Zong-cai. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 45-51. (in Chinese)
- [20] 梅国栋, 李继祥, 刘肖凡, 等. 混杂纤维混凝土抗弯性能及混杂效应试验研究[J]. 混凝土, 2013(2): 21-27.
- MEI Guo-dong, LI Ji-xiang, LIU Xiao-fan, et al. Hybrid fiber reinforced concrete flexural behavior and hybrid effects[J]. Concrete, 2013(2): 21-27. (in Chinese)
- stabilized crushed clay brick for road base material [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 73-79, 86. (in Chinese)
- [21] 李明杰. 水泥稳定碎石振动试验方法研究及应用[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- LI Ming-jie. Study on vibrating test methods for cement stabilization of crushed aggregate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [22] 刘延金. 水泥冷再生混合料 VVTM 设计方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- LIU Yan-jin. Research on designing methods of cement cold recycling mixtures based on VVTM [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- (上接第 16 页)
- [18] JIANG Y J, FAN L F. An experimental investigation of optimal asphalt-aggregate ratio for different compaction methods[J]. Construction and Building Materials, 2015, 91: 111-115.
- [19] 陈 磊. 水泥稳定碎石振动试验方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- CHEN Lei. Research on vibrating test methods for cement stabilization of crushed aggregate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [20] 胡力群, 沙爱民. 水泥稳定废粘土砖再生集料基层材料性能试验 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 73-79, 86.
- HU Li-qun, SHA Ai-min. Performance test of cement