

塑钢纤维增强轻骨料混凝土与钢筋粘结性能试验研究

牛建刚¹, 郝吉¹, 孙立斌², 陈旭¹

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 青岛冠中生态股份有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要: 通过对内贴应变片钢筋的直接拔出试验, 分析塑钢纤维掺量、基体强度以及轻骨料筒压强度等单一及多重因素对纤维增强轻骨料混凝土与钢筋间粘结强度和粘结应力分布的影响, 得出三种影响因素对试件粘结性能的影响规律, 并通过正交试验分析三种因素对试件粘结性能的影响程度. 试验结果表明: 塑钢纤维掺量对不同水灰比试件表现出不同的增强规律, 对于水灰比大的试件, 其极限粘结强度随纤维掺量增加而增大; 对于水灰比小的试件, 纤维增强作用随纤维掺量增大而减小; 混凝土基体强度等级越高, 试件极限粘结强度、自由端初始滑移对应粘结强度越高, 峰值滑移减小; 轻骨料筒压强度降低, 纤维增强轻骨料混凝土的抗压强度、劈拉强度及基体与钢筋的极限粘结强度均会降低; 通过正交试验得出轻骨料筒压强度对试件极限粘结强度影响程度最大.

关键词: 塑钢纤维; 轻骨料混凝土; 粘结性能; 正交试验

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)06-805-08

Research on bond performance between bars and HPP fiber reinforced lightweight aggregate concrete

NIU Jiangang¹, HAO Ji¹, SUN Libin², CHEN Xu¹

(1. School of Civil Eng, Inner Mongolia Univ. of Sci & Tech., Baotou 014010, China;

2. Guanzhong Ecological Co., LTD., Qingdao 266100, China)

Abstract: Through pull-out test to steel bars attached strain gages inside, the single and multiple factors effect of HPP fiber dosage, concrete matrix strength and lightweight aggregate cylinder pressure strength to the bond performance between steel bar and HPP fiber reinforced lightweight aggregate concrete was analyzed. The results of pull-out test with different influences show that: reinforced function of HPP fiber for different water cement ratio specimens show different strengthening rules, for high w/c specimens, the ultimate bond strength increases with increasing of fiber content; for low w/c specimens, fiber reinforced function decreases with increasing fiber content; increase the concrete strength grade, the ultimate bond strength, and bond strength corresponding to the initial slip of free end increase, the ultimate bond strength corresponding to the free end displacement decreases; reduce lightweight aggregate strength, the HPP fiber reinforced lightweight aggregate concrete compressive strength, splitting tensile strength and ultimate bond strength decreases; lightweight aggregate cylinder pressure strength affected the ultimate bond strength most through orthogonal experiments.

Key words: HPP fiber; Lightweight aggregate concrete; Bond properties; Orthogonal experiments

轻骨料混凝土(简称 LWC)具有质轻、耐久性和保温性能好等的优点^[1-2], 便于装配式结构运输与安装, 有利于提高建筑物的抗震性能^[3-4], 符合建筑结构节能环保设计要求. 纤维增强轻骨料混凝土克服了轻骨料混凝土脆性大、抗拉和抗折强度低等的缺点^[5-8], 进一步推动轻骨料混凝土在混凝土结构中的应用. 目前, 钢纤维增强轻骨料混凝土试验研究较多, Campione^[9]对钢纤维增强轻骨料混凝土在单调及循环荷载作用下钢筋与轻骨料混凝土的粘结性能进行试验分析, 得出钢纤维可改善轻骨料混凝土的脆性; Güneysi^[10]等通过直接拔出试验, 得出在轻骨料混凝土中掺入钢纤维可提高试件的粘结强

度, 并能提高试件破坏时的延性. 但掺入钢纤维会增加轻骨料混凝土的容重, 抵消轻骨料混凝土质轻的优势. 塑钢纤维(高性能改性异性聚丙烯塑钢纤维)具有良好的分散性及与水泥基体的粘结力, 且抗酸碱能力强, 在轻骨料混凝土中加入塑钢纤维, 利用其较高的弹性模量和抗拉强度, 可提高试件的力学性能及轻骨料混凝土与钢筋的粘结性能^[11], 替代钢纤维在轻骨料混凝土中使用, 且塑钢纤维不会影响轻骨料混凝土容重, 在混凝土结构工程中具有良好的发展前景.

对塑钢纤维掺量、基体强度及轻骨料筒压强度等单一及多重因素对轻骨料混凝土与钢筋的粘结

性能的影响进行试验研究和理论分析,得到不同因素对轻骨料混凝土与变形钢筋粘结性能的影响规律,并通过正交试验得出对试件极限粘结强度影响最大的因素,为进一步开展试验研究和推动该材料在实际工程的应用提供试验参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥:蒙西牌 P·O 42.5R 早强型硅酸盐水泥。
塑钢纤维:宁波大成新材料股份有限公司生产波浪形高性能改性塑钢纤维,纤维性能指标见表 1。

细骨料:包头本地河砂,粒径小于 5 mm,细度模数 2.94,堆积密度 1 575 kg·m⁻³,含泥量低于 3%。

轻骨料:包头精正公司生产的粉煤灰陶粒 I、粉煤灰陶粒 II;天津彤上轻质建材厂生产的页岩陶粒、粉煤灰陶粒 III。粉煤灰陶粒均为圆球形,页岩陶粒为碎石形,陶粒性能指标见表 2。

减水剂:钢鹿牌萘系 B2 减水剂,减水率为 20%。

钢筋:选用表面无锈蚀的同一批次普通热轧 HRB400 级月牙肋钢筋。

按照松散体积法进行 LC35、LC40 和 LC45 三种强度等级的基准配合比设计,基本参数见表 3。

表 1 塑钢纤维性能指标
Tab.1 HPP fiber performance metrics

密度/g·cm ⁻³	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%	长度/mm	直径/mm
0.95	530	7 000	15±2	30	0.8

表 2 陶粒性能指标
Tab.2 Ceramsite performance metrics

陶粒种类	粒径/mm	堆积密度/kg·m ⁻³	表观密度/kg·m ⁻³	筒压强度/MPa	1 h 吸水率/%
粉煤灰陶粒 I	5~20	970	1 760	8.4	12.25
粉煤灰陶粒 II	5~20	960	1 785	7.2	12.87
页岩陶粒	5~10	725	1 334	6.6	6.21
粉煤灰陶粒 III	5~16	804	1 818	5.0	17.12

表 3 轻骨料混凝土基本参数
Tab.3 The basic parameter of LWC

设计强度等级	水灰比	材料用量/kg·m ³				
		水	水泥	砂	轻骨料	减水剂
LC45	0.32	144	450	764	598	6.750
LC40	0.35	151	435	693	640	3.045
LC35	0.4	166	415	658	662	2.125

1.2 试件设计

混凝土抗压强度与劈裂抗拉强度试块均为立方体标准试件,每组三个试块。直接拔出试件根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T50152- 2012)中规定的直接拔出试验标准,确定试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm³。钢筋为 HRB400 级钢筋,长 400 mm,直径 16 mm,粘结长度为 5 d,在自由端和加载端分别预留 20 mm、230 mm 长的钢筋以便固定百分表以及施加荷载,粘结长度外无粘结的钢筋使用 PVC 套筒隔离,试件简图如图 1(a)所示。钢筋开槽处理,在锚固长度范围内粘贴 5 个应变片,应变片将锚固长度分为 4 个区段,每个区段长 20 mm,应变片测点编号及区段划分如图 1(b)。

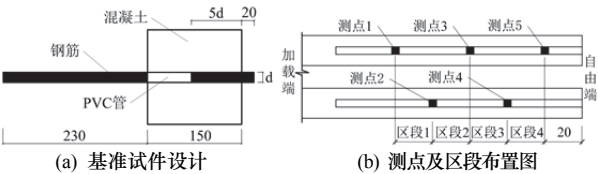


图 1 基准试件设计简图
Fig.1 The benchmark specimen design diagram

1.3 试验加载

抗压试验及劈裂抗拉试验根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002),在 2 000 kN 压力试验机上进行试验,试验结果取 3 个试件的平均值。直接拔出试件在 600 kN 的万能试验机上以 200 N/s 的加载速度进行直接拔出试验,试件连续加载至破坏。在钢筋自由端布置一支百分表测钢筋滑移量,直接拔出试验固定装置如图 2。

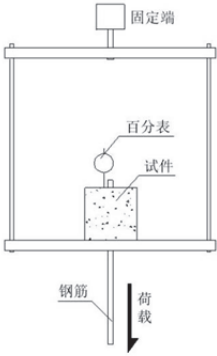


图 2 直接拔出试验固定装置
Fig.2 Fixture of pull-out test

2 试验结果与分析

在研究钢筋与轻骨料混凝土的粘结性能时，采用平均粘结强度来描述钢筋与塑钢纤维轻骨料混凝土间的粘结强度，粘结强度按式(1)计算：

$$\tau = (1000P)/(\pi dl_a) \tag{1}$$

其中： τ 为粘结强度(MPa)； P 为拔出荷载(kN)； d 为钢筋直径(mm)； l_a 为锚固长度(mm)，取 $5d$ 。

塑钢纤维增强轻骨料混凝土试件的抗压强度、劈裂抗拉强度及粘结性能如表 4 所示。由表 4 知，掺入塑钢纤维对 LC45 试件的力学性能有一定的增强效果，增强作用随纤维掺量增大而减小。LC45-4 的抗压强度和劈拉强度最高，较 LC45-0 提高 5.78%和 14.46%；LC45-6 和 LC45-8 的力学性能较于 LC45-0 有一定提高；LC45-10 较于 LC45-0，抗压强度提高 2.39%，劈拉强度降低 5.54%。

表 4 纤维增强轻骨料混凝土试件力学性能
Fig.4 Mechanical property of fiber reinforce lightweight concrete specimens

试验分组	纤维掺量 /kg·m ⁻³	抗压强度 /MPa	劈拉强度 /MPa	极限粘结强度 /MPa	初始滑移粘结强度 /MPa	峰值滑移量 /mm
LC45-0	0	46.01	3.25	22.70	4.34	0.75
LC45-4	4	48.67	3.72	24.12	14.74	0.70
LC45-6	6	48.40	3.65	23.33	12.11	0.69
LC45-8	8	47.76	3.50	23.11	5.96	0.45
LC45-10	10	47.11	3.07	18.41	3.21	0.34
LC40-0	0	41.93	2.99	21.98	2.58	0.86
LC40-4	4	43.44	3.23	22.63	3.82	0.88
LC40-8	8	45.89	3.40	23.01	4.14	0.92

适量塑钢纤维可增强混凝土力学性能，但由于塑钢纤维是憎水材料，与水泥浆的粘结界面为弱界面，对 LC45 混凝土基体的力学强度有一定影响。当纤维掺量增大时，弱界面的积累对试件的影响作用增大，使得塑钢纤维对基体的增强作用随掺量增大而减小。LC40 塑钢纤维轻骨料混凝土的抗压强度和劈拉强度随纤维掺量增加而提高，LC40-8 的抗压强度、劈拉强度分别较 LC40-0 提高了 9.44%、13.71%。

2.1 塑钢纤维对试件粘结性能的影响

试验考虑塑钢纤维掺量单一因素对试件粘结性能的影响，使用粉煤灰陶粒 I 作为轻骨料，基体强度为 LC45，纤维掺量分别为 0、4 kg·m⁻³、6 kg·m⁻³、8 kg·m⁻³ 和 10 kg·m⁻³。

2.1.1 塑钢纤维掺量对试件粘结强度-滑移性能的影响

试件均为劈裂破坏，加载过程中，试件的粘结强度-滑移曲线如图 3 所示。掺入适量塑钢纤维，试件的极限粘结强度和钢筋初始滑移对应的粘结强度较 LC45-0 均有不同程度的提高，增强效果随纤维掺量的增多而降低。LC45-4、LC45-6 和 LC45-8 的极限粘结强度较 LC45-0 分别提高 6.26%、2.78%和 1.81%，而 LC45-10 的极限粘结强度仅为 LC45-0 的 81.10%。峰值滑移随纤维掺量的增大而减小，LC45-4、LC45-6 和 LC45-8 较与 LC45-0 分别提高 239.63%、179.03%和 37.33%，而 LC45-10 较于 LC45-0 降低 26.27%。由图 3 各组试件的 τ - s 曲线可知，纤维掺量对试件粘结刚度(混凝土试件受拔出荷

载时抵抗钢筋拔出的能力，即 τ - s 曲线滑移段斜率)的影响规律与对试件极限粘结强度的影响规律相同。结果表明塑钢纤维掺量为 4 kg·m⁻³、6 kg·m⁻³ 和 8 kg·m⁻³ 时，均能提高试件粘结性能；10 kg·m⁻³ 的纤维掺量会削弱试件的密实程度，从而影响试件的粘结性能。

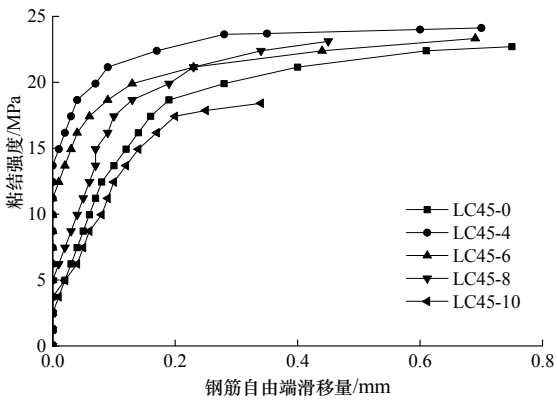


图 3 不同纤维掺量试件的粘结强度-滑移曲线
Fig.3 Specimen τ - s curve with different fiber dosage

LC45-0 试件中，轻骨料混凝土与钢筋表面均匀接触，对钢筋握裹充分，粘结作用较好；由于素混凝土抗拉强度较低，受荷时裂缝发展快，试件 τ - s 曲线较早进入内裂滑移阶段，极限粘结强度较低。LC45-4 试件的粘结性能最优，纤维对基体的增强效果最佳，该掺量的纤维能够明显提高混凝土抗裂能力、延缓裂缝发展，使钢筋与基体的机械咬合力能有效持久地发挥作用，因而该组试件粘结强度和粘结刚度最大。掺量为 6 kg·m⁻³ 的塑钢纤维对基

体的增强效果较好,对试件粘结性能有较大的提高. LC45-8 的极限粘结强度和粘结刚度较 LC45-6 有所降低, $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 掺量的塑钢纤维仍能对基体发挥较好的阻裂与增强效果,从而维持较高的粘结性能. 塑钢纤维掺量达到 $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,试件粘结强度及粘结刚度均低于 LC45-0,塑钢纤维在该组试件中未起到增强作用.

塑钢纤维与水泥间粘结弱界面对试件粘结性能的影响作用随纤维掺量的增大而积累,导致塑钢

纤维对 LC45 试件粘结强度与粘结刚度的增强作用随纤维掺量的增大而减小. 对于 LC45 试件,适量塑钢纤维可以提高试件的粘结强度,掺量为 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,纤维的增强效果较明显.

2.1.2 纤维掺量对试件粘结应力-锚固位置的影响

由钢筋各点应变差绘制钢筋与塑钢纤维轻骨料混凝土的粘结-锚固位置关系曲线. 各级荷载作用下,试件加载端和自由端的粘结应力均为零. 不同塑钢纤维掺量试件粘结应力-锚固位置关系如图 4.

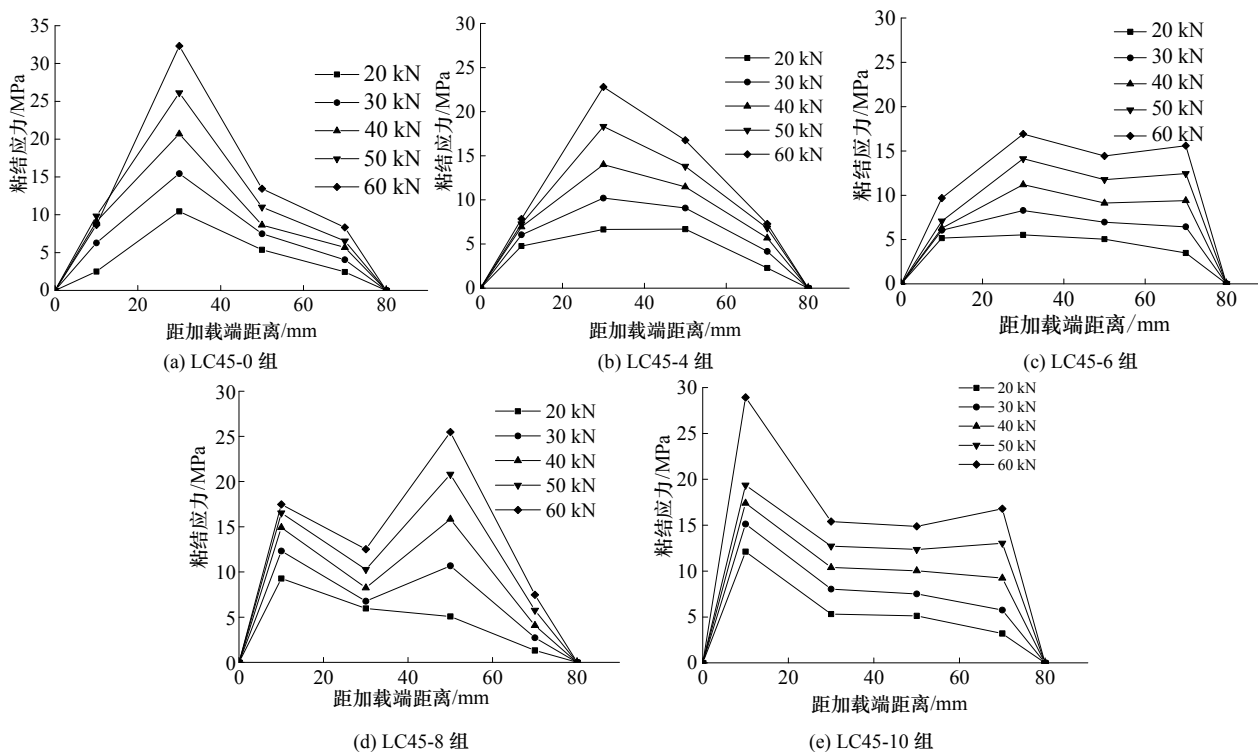


图4 试件的粘结应力-锚固位置关系

Fig.4 Bond-anchorage curve with different fiber dosage

由图 4 可知,LC45-0 试件的粘结应力峰值位于区段 2 内;拉拔荷载增加,试件粘结应力集中现象明显,其它区段内的粘结应力增幅较小,钢筋在锚固段受力不均匀. LC45-4 粘结应力均匀分布,钢筋应变均匀变化;各级荷载下的粘结应力峰值均小于 LC45-0,拉拔荷载在锚固段均匀传递. LC45-6 粘结应力在各级荷载作用下应力峰值不明显;应力在区段 4 内变化幅度较大. LC45-8 受荷载较小时,粘结应力由加载端到自由端逐渐减小;荷载增加,区段 1、3 内的粘结应力增长幅度较大,粘结应力在锚固长度内出现下凹现象. LC45-10 在各级荷载下,粘结应力峰值分布于区段 1 内,其它区段内粘结应力变化较小,应力集中现象明显.

适量塑钢纤维可以有效提高混凝土应力扩散能力,使试件受拉拔荷载时可以将粘结应力均匀传递到保护层边缘,使保护层能协调变形;同时纤维

能够限制混凝土裂缝开展,提高混凝土保护层的利用程度. 掺入 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 或 $6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 纤维可以改善钢筋在锚固段内的应力分布,使粘结应力均匀分布,有利于粘结作用向试件自由端的传递.

2.2 混凝土强度等级对试件粘结性能的影响

为研究混凝土强度等级与塑钢纤维掺量双重因素对试件粘结性能的影响,对强度等级为 LC40 和 LC45,纤维掺量为 $0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的试件进行试验分析.

2.2.1 纤维掺量对 LC40 试件的粘结性能的影响

LC45 试件的粘结性能如上文所述,LC40 试件的粘结强度滑移曲线如图 5 所示. 各纤维掺量下 LC40 试件破坏形态均为劈裂破坏,LC40 纤维增强轻骨料混凝土与钢筋的极限粘结强度、自由端初始滑移粘结强度均随纤维掺量的增加而增长. LC40-4 与 LC40-8 的极限粘结强度较 LC40-0 分别提高了

2.96%、4.69%。LC40 试件的粘结刚度随纤维掺量的增加而明显增强,纤维掺量为 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的试件较 LC40-0 分别提高了 48.06%和 60.47%。

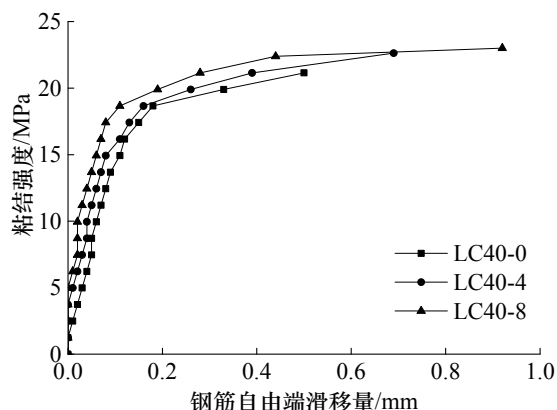


图5 不同纤维掺量 LC40 试件的粘结强度-滑移曲线

Fig.5 LC40 specimen τ -s curve with different fiber dosage

由图 5 可知,随塑钢纤维掺量增多,LC40 纤维增强轻骨料混凝土的初始滑移粘结强度逐渐提高,但强度增长幅度较小;粘结强度相同时,塑钢纤维掺量越大,钢筋自由端滑移量越小,钢筋与基体的粘结刚度越大;三组试件在劈裂阶段均有较大滑移。试验结果表明 LC40 纤维增强轻骨料混凝土与钢筋的粘结强度较 LC40-0 试件的粘结强度有一定增强作用。

2.2.2 基体强度与塑钢纤维掺量对试件粘结性能影响

将 LC45 和 LC40 两种强度等级的基体与钢筋的粘结性能进行对比,如图 6 所示。

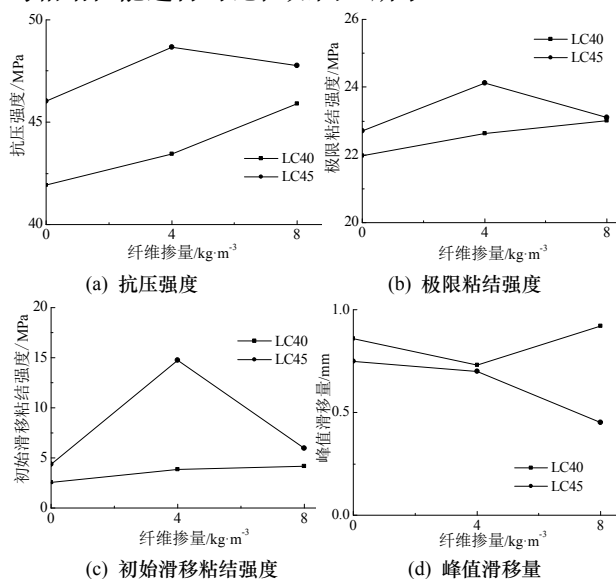


图6 基体强度对试件粘结性能的影响

Fig.6 Bond properties with different matrix strength

由图 6(a)可知,LC40 试件的抗压强度随纤维掺量增大而增强;对于 LC45 试件,LC45-4 抗压强度最高;各纤维掺量下 LC45 试件的抗压强度均高于

LC40. 掺入塑钢纤维可增强轻骨料混凝土的抗压强度,对于不同基体强度的试件,纤维增强作用表现出不同增强规律. 这主要受纤维与水泥石粘结界面的影响,塑钢纤维与水泥石的粘结弱界面受水灰比影响较大,塑钢纤维为憎水材料,当混凝土水灰比较小时,水泥浆对塑钢纤维的包裹程度偏低,导致纤维与水泥基间的粘结弱界面现象高于水灰比较大的试件;由于 LC45 混凝土的工作性受纤维掺量的影响较大,试件强度随工作性的减弱而降低. LC45 试件的纤维掺量由 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,粘结弱界面累积效应大于纤维增强作用,从而影响基体强度. 在水灰比较大的 LC40 试件中,基体受粘结弱界面累积效应较小,纤维增强作用强于弱界面效应,基体强度随纤维掺量增加而增强。

试件的极限粘结强度和自由端初始滑移粘结强度受塑钢纤维掺量与基体强度双重因素的影响规律如图 6(b)、(c),其影响规律与 6(a)相近. 不掺塑钢纤维时,LC45 试件的极限粘结强度和自由端初始滑移粘结强度较 LC40 试件分别提高 3.28%和 1.76 MPa; LC45-4 试件较 LC40-4 试件提高 6.58%和 10.92 MPa; LC45-8 与 LC40-8 相比,仅提高 0.43%和 1.82 MPa. 这是因为试件的粘结强度与试件的抗压强度相关,而粘结强度受粘结弱界面的影响更为敏感。

图 6(d)为两种影响因素对试件峰值滑移量的影响规律. LC40 试件的钢筋自由端滑移量随纤维掺量的增加而增大,在该组试件中,纤维增强作用大于粘结弱界面效应,塑钢纤维可以同时增强试件的强度与韧性;试件受拉拔荷载作用,混凝土保护层的应力扩散能力随纤维掺量的增大而增强,从而峰值滑移增大. 对于 LC45 试件,纤维掺量对峰值滑移量的影响与 LC40 相反. 在水灰比较小的试件中,由于试件受塑钢纤维表面的粘结弱界面效应的影响较大,塑钢纤维阻裂作用减弱,混凝土保护层应力扩散能力较差,试件受拉拔荷载作用时,峰值滑移随纤维掺量的增大而减小. LC45 试件水灰比小,水泥用量多,水泥浆体强度高,与钢筋粘结性能比 LC40 试件强. 各塑钢纤维掺量下的 LC45 试件的自由端初始滑移粘结强度更大,极限粘结强度对应的自由端滑移更小,粘结刚度提升明显. 尽管 LC45 试件的粘结刚度较 LC40 试件有大幅提高,但极限粘结强度提升幅度较小,这是因为轻骨料自身强度低,是基体材料中最薄弱环节,拉拔过程中裂缝能够直接贯穿轻骨料发展,受轻骨料强度的影响,基

体强度等级由 LC40 提高至 LC45, 极限粘结强度提高幅度较小. 纤维对强度等级较高的混凝土试件的增强作用低于强度较低的试件, 与文献[12]试验结果一致.

2.3 轻骨料种类对塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋粘结性能影响

LC45-4 试件的力学性能和粘结性能最佳, 选择该组试件参数作为基本参量, 进行轻骨料种类对试件粘结性能影响的试验研究.

表 5 不同轻骨料混凝土力学性能
Tab.5 Specimen mechanical property with different ceramsite

分组	抗压强度/MPa	劈拉强度/MPa	极限粘结强度/MPa	峰值滑移量/mm
A1	48.67	3.72	23.08	0.70
A2	41.58	3.31	21.91	0.66
A3	36.89	2.86	19.60	0.96
A4	34.71	2.60	18.06	0.74

A2、A3 和 A4 的抗压强度较 A1 分别降低 14.57%、24.20%和 28.68%; 劈拉强度分别降低 11.02%、23.12%和 30.11%; 极限粘结强度分别降低 5.07%、15.08%和 21.75%. 筒压强度低的轻骨料在受荷载时易破坏, 削弱基体的抗裂能力, 所以试件极限粘结强度降低. 三种圆球形粉煤灰陶粒轻骨料试件的极限粘结强度对应的自由端滑移相接近; 页岩陶粒的形状不规则, 相同体积下较其它轻骨料与水泥浆体接触的面积更大, 所需水泥浆体更多, 导致水泥浆体对钢筋的锚固能力减弱, 自由端滑移量增大.

2.3.2 不同种类轻骨料试件的粘结强度-滑移曲线

四种拉拔试件均为劈裂破坏, 混凝土破坏面内的轻骨料均被劈碎, τ - s 曲线如图 7 所示.

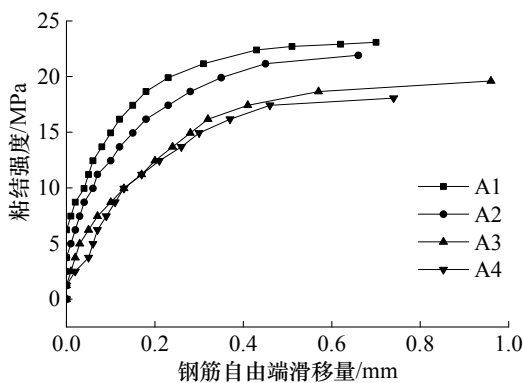


图 7 不同种类轻骨料试件的粘结强度-滑移曲线
Fig.7 Specimen τ - s curve with different ceramsite

由图 7 可以看出, 在轻骨料种类相同的条件下, 如图中 A1、A2 和 A4 曲线, 试件的粘结强度和粘结刚度受陶粒筒压强度的影响较大. 基体与钢筋的极限粘结强度和自由端出现滑移时的粘结强度均随筒压强度的减小明显降低; 试件粘结刚度随

2.3.1 轻骨料种类对试件粘结性能的影响

不同种类轻骨料纤维混凝土试件力学性能如表 5, 四种轻骨料依次为粉煤灰陶粒 I、粉煤灰陶粒 II、页岩陶粒和粉煤灰陶粒 III. 由表 5 可得出, 轻骨料筒压强度降低, 塑钢纤维增强轻骨料混凝土的抗压强度、劈拉强度及基体与钢筋的极限粘结强度均会降低.

轻骨料筒压强度降低而明显减小, A2 和 A4 曲线在内裂滑移和劈裂滑移段明显低于 A1. 对于不同种类陶粒的试件, 混凝土保护层劈裂面内的轻骨料均劈碎, 水泥石与陶粒粘结界面未开裂, 由此说明对于不同种类轻骨料混凝土试件, 陶粒形状是影响试件粘结强度的主要影响因素; A3 的筒压强度比 A4 高 32%, 而两种轻骨料试件的 τ - s 曲线在上升段接近, A3 极限粘结强度仅比 A4 高 1.54 MPa. A3 的 τ - s 曲线在内裂滑移初期出现了下凹现象, 这是因为碎石形陶粒的形状不规则, 在试件受荷载时, 易在骨料不规则处形成应力集中而过早发生破坏, 导致试件承受荷载能力与较低筒压强度的圆球形陶粒混凝土试件 A4 相近.

2.3.3 不同种类轻骨料试件粘结应力-锚固关系

不同种类轻骨料混凝土试件的粘结应力-锚固位置关系如图 8 所示. 对于同种类型轻骨料, 如图 8(a)、(b)和(d), 粘结应力在 A1 和 A2 试件中沿钢筋锚固长度分布较均匀, 试件拉拔荷载增加, 粘结应力分布趋势无明显变化; A1 较于 A2, 粘结应力在钢筋加载端和自由端变化平缓, 粘结应力在锚固段内均匀传递; A4 试件在区段 1 内形成应力集中现象, 加载端和自由端的粘结应力变化幅度较大. 碎石形轻骨料试件, 如图 8(c), 应力峰值位于区段 3 内, 较于圆球形陶粒试件, 应力峰值向自由端移动, 拔出荷载增大, 应力沿锚固段有下凹现象, 不利于粘结应力在试件内传递.

轻骨料筒压强度是影响粘结应力分布与传递的主要影响因素, 筒压强度越高, 试件粘结应力分布与应力传递效果越好. 碎石形陶粒在试件受荷载时, 在加载端处骨料易破坏, 粘结应力峰值向自由

端转移; 碎石形陶粒破坏几率高于圆球形陶粒, 试件粘结应力沿锚固长度分布和应力传递效果低于圆球形试件.

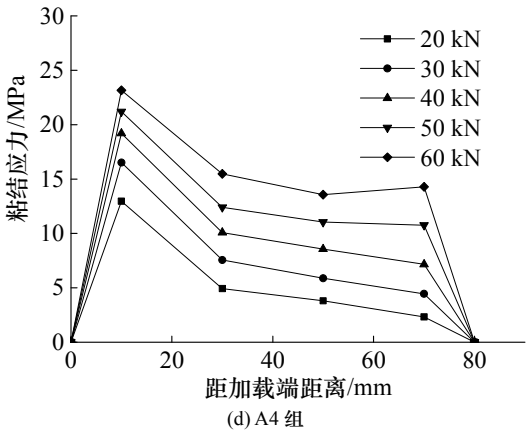
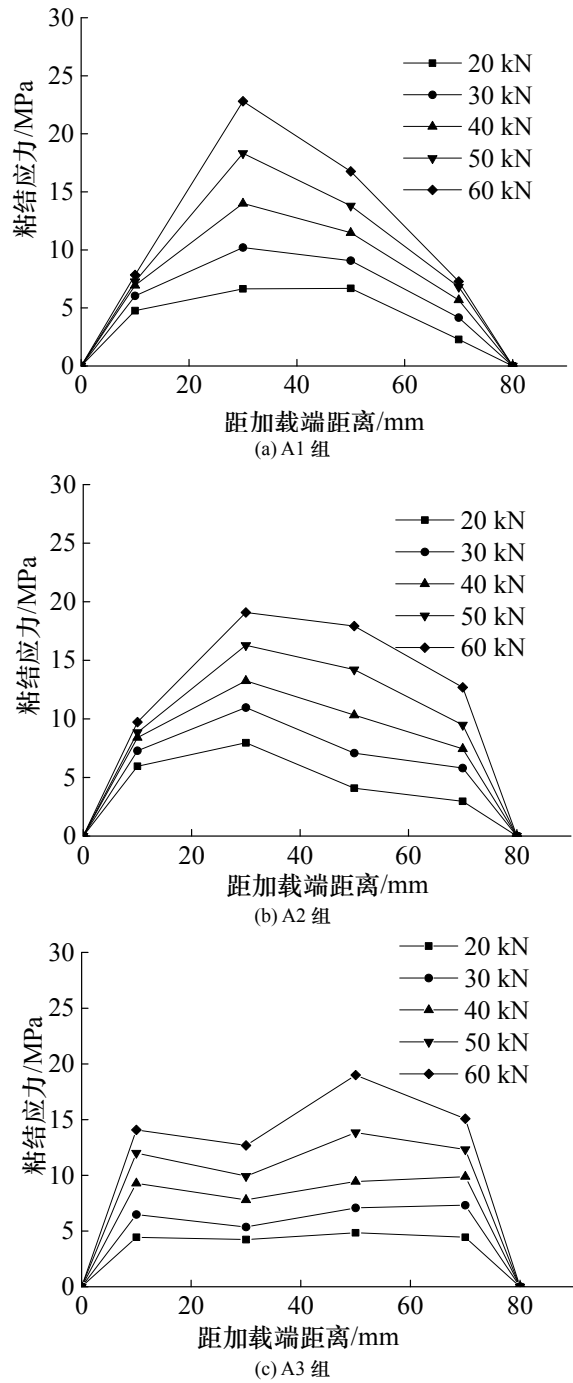


图 8 不同种类轻骨料试件的粘结应力-锚固位置关系
Fig.8 Bond-anchorage curve with different ceramsite

2.4 基体材料对极限粘结强度影响正交试验研究

塑钢纤维掺量、基体强度等级及轻骨料筒压强度三个因素对试件极限粘结强度都具有一定的影响, 利用正交试验能够更直观地对比这三个因素对试件粘结强度的影响程度.

2.4.1 正交试验设计

选取的试验因素为: 0、4 kg·m⁻³、8 kg·m⁻³ 三种塑钢纤维掺量; LC35、LC40、LC45 三种基体强度等级; 粉煤灰陶粒 I、II、III 三种轻骨料种类.

根据 L₉(3³) 正交试验进行试验分组. LC45、LC40 和 LC35 的素轻骨料混凝土配比都是在粉煤灰陶粒 I 基础上配制的, 实测强度分别为 46.01 MPa、41.93 MPa 和 38.32 MPa. 轻骨料种类改变时需对轻骨料的掺量进行调整, 其它材料掺量不变, 试验分组如表 6 所示.

2.4.2 正交试验结果

正交试验方差分析结果如表 7 所示. 当 $F_j \geq F_{0.01}(f_j, f_E)$ 时 j 因素是高度显著因素, 当 $F_{0.01}(f_j, f_E) > F_j \geq F_{0.05}(f_j, f_E)$ 时, j 因素是显著因素, 如果 $F_j < F_{0.05}(f_j, f_E)$, 表明 j 因素是非显著因素, $F_\alpha(f_j, f_E)$ 由 F 分布表查得. 由表 7 可知, 轻骨料种类对试件极限粘结强度的影响显著; 基体强度等级和纤维掺量的 F 值类似, 对极限粘结强度影响均不显著.

表 6 正交试验分组
Tab.6 The orthogonal experiment grouping

分组	陶粒种类	设计强度等级	纤维掺量/kg·m ³	水灰比	极限粘结强度/MPa
1	粉煤灰陶粒 III	LC35	8	0.40	21.15
2		LC40	4	0.35	22.35
3		LC45	0	0.32	20.89
4	粉煤灰陶粒 II	LC35	4	0.40	22.93
5		LC40	0	0.35	23.34
6		LC45	8	0.32	24.42
7	粉煤灰陶粒 I	LC35	0	0.40	24.22
8		LC40	8	0.35	25.57
9		LC45	4	0.32	27.18

表 7 方差分析结果
Tab.7 The results of variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	$F_{0.01}(2,2)$	$F_{0.05}(2,2)$
A	26.38	2	13.19	28.67	99	19
B	3.09	2	1.55	3.37	99	19
C	2.78	2	1.39	3.02	99	19
误差	0.91	2	0.46	—	—	—
总和	33.16	8				

2.5 极限平均粘结强度计算公式

根据本文试验数据,考虑基体抗拉强度与纤维掺量,得出塑钢纤维增强轻骨料混凝土试件的极限粘结强度与试件抗压强度及劈裂抗拉强度的关系,如下式:

$$\tau = 6.344f_t \tag{2}$$

其中劈拉强度与抗压强度关系如式(3):

$$f_t = (-0.001x^2 + 0.013x + 0.386)f_{cu}^{0.55} \tag{3}$$

式中: f_t 为劈拉强度; f_{cu} 为抗压强度; x 为塑钢纤维掺量($x \in [0,10 \text{ kg/m}^3]$). 本文拟合公式的计算值与试验值相关系数为 0.85,吻合度较高.

3 结论

通过对塑钢纤维增强轻骨料混凝土与钢筋粘结性能的直接拔出试验与正交试验得出:

- (1) 掺入适量塑钢纤维能够提高轻骨料混凝土的力学性能及试件的粘结强度和粘结刚度.
- (2) 对于水灰比不同的试件,塑钢纤维掺量对试件的增强规律不同,对于水灰比小的试件,纤维增强作用随纤维掺量的增大而减小;对于水灰比较大的试件,增强作用随掺量增加而增强.
- (3) 塑钢纤维可以有效提高混凝土应力扩散能力,使试件受拉拔荷载时可以将粘结应力均匀传递到保护层边缘,保护层协调作用;同时纤维能够限制混凝土裂缝开展,提高混凝土保护层利用程度.
- (4) 正交试验结果显示轻骨料筒压强度对试件极限粘结强度影响显著,基体强度与塑钢纤维掺量影响程度较弱.

参考文献 References

[1] TUAN B L A, HWANG C L, LIN K L, et al. Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 334-339.
[2] HASSANPOUR M, SHAFIGH P, BIN H. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement -A review [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 452-461.
[3] 赵全儒, 钟声. 水灰比对钢筋混凝土梁裂缝影响试验

的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(1): 120-123.
ZHAO Quanru, ZHONG Sheng. Experimental research on influence of water-cement ratio on reinforced concrete beam [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(1): 120-123.
[4] 胡晓鹏, 牛荻涛, 张永利. 粉煤灰混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1):139-146.
HU Xiaopeng, NIU Ditao, ZHANG Yongli. Experimental research on bonding performance of reinforcement and fly ash concrete [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 139-146.
[5] PORTAL N W, PEREZ I F, THRANE L N. Pull-out of textile reinforcement in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014,71: 63-71.
[6] IQBAL S, ALI A, HOLSCHEMACHER K, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC) [J]. Construction and Building Materials, 2015,98: 325-333.
[7] GHAVIDEL R, MADANDOUST R, RANJBAR M M. Reliability of pull-off test for steel fiber reinforced self-compacting concrete[J].Measurement,2015,73:628-639.
[8] 王立成, 宋玉普. 一个针对轻骨料混凝土的四参数多轴强度准则[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 27-33.
WANG Licheng, SONG Yupu. A four-parameter multi-axial strength criterion for lightweight aggregate (LWA) concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 27-33.
[9] CAMPIONE G, CUCCHIARA C, MENDOLA L L, et al. Steel-concrete bond in lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic actions [J]. Engineering Structures, 2005,27(6): 881-890.
[10] GÜNEYISI E, GESOGLU M, IPEK S. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes [J]. Construction and Building Materials, 2013,47(10): 358-365.
[11] 孙立斌. 塑钢纤维轻骨料混凝土与变形钢筋粘结性能的试验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
SUN Libin. Research on bond properties between plastics-steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete and deformed bars [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2015.
[12] HASSANPOUR M, SHAFIGH P, MAHMUD H B. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement-A review [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37(37): 452-461.

(编辑 吴海西)