

钢纤维对混凝土与变形钢筋之间黏结性能试验研究

延潇^{1,2†}, 史庆轩^{1,2}, 徐赵东³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;

3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:在对不同掺量钢纤维普通和轻质混凝土试块的基本力学性能试验研究的基础上, 通过中心拉拔试验, 分析钢纤维对混凝土与变形钢筋之间黏结性能的影响机理. 研究表明: 钢纤维的加入提高了混凝土和钢筋之间的黏结性能及混凝土抗裂缝发展的能力. 同时, 相同钢纤维掺量下, 普通混凝土自身的抗裂缝发展能力高于轻质混凝土, 从而使其与钢筋的黏结强度也高于轻质混凝土. 钢纤维的加入使得混凝土对于钢筋的黏结强度显著增大, 最大增长率可达到 49.94%(普通混凝土钢纤维掺量为 40 kg/m³ 时) 和 51.94%(轻质混凝土钢纤维掺量为 60 kg/m³ 时). 本文研究可为后续黏结性能的研究提供一定的理论参考, 同时推进轻骨料钢纤维混凝土在实际工程中的应用.

关键词: 黏结应力; 钢纤维混凝土; 变形钢筋; 拉拔试验

中图分类号: TU377.1

文献标志码: A

Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and Deformed Steel Bar with Different Steel Bar

YAN Xiao^{1,2†}, SHI Qingxuan^{1,2}, XU Zhaodong³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance (XAUAT)

of the Ministry of Education, Xi'an 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the study of mechanical property test in normal weight concrete and lightweight concrete with different fiber volume fractions, the influence of steel fiber on the bond mechanism between deformed steel bar and reinforced concrete was discussed through the central pullout test program. It can be found that the ability to resist crack propagate of the concrete was increased because of the steel fiber added in the concrete. The bond behavior of the concrete was also increased. With the same fiber volume fractions in two concretes, normal weight concrete has a better performance to avoid the crack propagation than lightweight concrete. Therefore, the bond behavior of normal weight concrete is also better than that of lightweight concrete. The maximum increase of the reinforced concrete bond

* 收稿日期: 2019-01-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703406), National Key Research and Development Program of China (2017YFC0703406); 国家自然科学基金资助项目(51878540), National Natural Science Foundation of China (51878540)

作者简介: 延潇(1991—), 男, 陕西西安人, 西安建筑科技大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: yanxiao_xauat@163.com

strength was 49.94% (normal weight concrete with 40 kg/m³ fiber volume fractions) and 51.94% (lightweight concrete with 60 kg/m³ fiber volume fractions), respectively. The research in this paper can provide theoretical reference for the follow-up research on the bonding performance and promote the application of lightweight aggregate steel fiber concrete in practical engineering.

Key words: bond stress; steel fiber reinforced concrete; deformed steel bar; pullout testing

在建筑构件的设计中,为了使建筑构件中的钢筋屈服后,混凝土才被压碎而发生破坏,需要对钢筋与混凝土之间的黏结机理进行深入的研究^[1].对于一般的钢筋混凝土结构,钢筋与混凝土之间的黏结力主要由三部分组成:1)胶结力;2)摩擦力;3)机械咬合力.这三个部分主要受到钢筋的外表面状态和混凝土本身性质的影响^[2].纤维混凝土的受力过程中,纤维材料发挥其抗拉强度高的特点,而混凝土发挥其抗压强度高的优点.通过在混凝土中加入纤维,增加了其在最大荷载下的压缩应变,提高了其最大拉伸应力和拉伸变形,同时混凝土的能量吸收性能、韧性、抗剪能力、抗脆性破坏的能力及抵抗裂缝发展的能力等都得到了改善^[3-7].在我国,方志等人^[8]发现钢纤维的加入能显著提高活性粉末混凝土的抗疲劳性能. Soroushian 等人^[9]的研究表明在混凝土材料中加入纤维材料可显著提高钢筋和混凝土之间的黏结强度,这主要是由于纤维材料的加入提高了混凝土的抗劈拉能力. Won 等^[10]研究了钢纤维对于 FRP 材料和高强混凝土之间黏结性能的影响,发现钢纤维可显著提高混凝土结构的黏结性能.在 Semsli 等人^[11]关于钢纤维对混凝土和带肋钢筋黏结性能的研究中也得到了同样的结论. Harajli 和 Salloukh^[12]在钢纤维对结构的黏结强度影响的研究中得出,钢纤维在混凝土中的质量分数为 2% 时,混凝土结构的黏结强度增加了 55%. Ezeldin 和 Balaguru^[13]在普通高强混凝土结构中进行了相同的研究,表明钢纤维质量分数为 0.25% 时,减弱了混凝土和钢筋之间的黏结强度,而当钢纤维在混凝土中质量分数为 0.5% 和 0.75% 时,其黏结强度最多增加 18%.

目前,针对钢纤维轻骨料混凝土与钢筋黏结性能的研究较少,钢筋混凝土黏结机理、黏结-滑移关系还存在许多亟待解决的问题.本文采用试验研究的方法,对普通钢纤维混凝土与轻骨料钢纤维混凝土进行了研究,深入地分析了钢纤维掺量与钢筋黏结应力之间的关系.同时对两种钢纤维混凝土与钢

筋之间的黏结性能进行了分析对比,对钢筋和混凝土之间的黏结性能做了进一步研究.

1 黏结滑移试验

1.1 材料及试件基本性能

本试验中两类混凝土粗骨料分别为膨胀黏土(轻质混凝土)和碎石(普通混凝土),其中膨胀黏土的粒径为 2~10 mm,吸水率为 15%;碎石的粒径为 2~8 mm,吸水率为 1.48%.细骨料均为粒径 0~2 mm 的天然砂,其表观密度为 2 570 kg/m³,吸水率为 1%;所用锚固钢筋为直径 20 mm 的带肋钢筋;混凝土内钢纤维采用 35 mm 长、等效直径 0.5 mm、长径比为 70 的弯钩形钢纤维.钢纤维在混凝土搅拌过程中均匀地撒入搅拌机中,当全部钢纤维加入后搅拌机继续运转大约 1 min 来确保搅拌均匀.

试验所用的混凝土的配合比见表 1.

表 1 试验用混凝土配合比

Tab.1 The concrete mix composition in experiment

	$\rho_{\text{水泥}}$ /(kg·m ⁻³)	$\rho_{\text{细骨料}}$ /(kg·m ⁻³)	$\rho_{\text{粗骨料}}$ /(kg·m ⁻³)	$\rho_{\text{水}}$ /(kg·m ⁻³)	$w_{\text{减水剂}}^{\text{①}}$ /%	水灰 比
轻质混凝土 (LWFC)	360	772	472	204	0.5	0.35
普通混凝土 (NWFC)	350	935	884	180	0.5	0.45

注:①减水剂用量为相对水泥用量的质量分数.

不同钢纤维掺量下试件的抗压强度、抗拉强度及弹性模量均基于欧洲规范 DIN EN 12390 进行测试,混凝土坍落度基于欧洲规范 DIN 12650-2 进行测试,抗弯强度采用 ASTM.C1609-12 中的三点加载法进行测试.根据规范要求,抗压强度与抗拉强度均采用 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试块进行测试,抗弯强度试验采用 150 mm×150 mm×700 mm 试

块进行测试,弹性模量采用直径为 100 mm、高为 200 mm 的圆柱体试块进行测试. 测试结果见表 2.

表 2 试件的基本力学性能

Tab.2 The mechanical properties of specimens

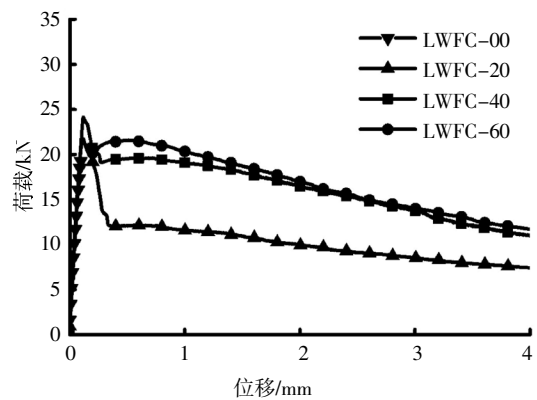
	钢纤维 掺量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压 强度 /MPa	抗拉 强度 /MPa	最大抗 弯强度 /MPa	弹性 模量 /MPa	坍落度 /mm
LWFC	0	37.98	2.50	3.48	1.95×10^4	440
	20	39.98	2.75	3.87	1.98×10^4	420
	40	45.98	2.87	4.68	1.92×10^4	390
	60	41.37	2.73	3.93	1.83×10^4	385
NWFC	0	41.53	2.75	4.14	3.17×10^4	390
	20	39.13	2.68	4.70	3.13×10^4	395
	40	46.20	2.99	5.15	3.68×10^4	390
	60	41.26	2.84	5.04	3.25×10^4	365

由表 2 可知,加入钢纤维后,对于轻质混凝土和普通混凝土的抗压强度、抗拉强度及弹性模量的影响都相对较小. 其抗压强度和抗拉强度均在钢纤维掺量为 40 kg/m^3 时达到最大值,而在普通混凝土中钢纤维掺量为 20 kg/m^3 时均有一定的减小. 最大抗弯强度在钢纤维掺量为 40 kg/m^3 的轻质混凝土和普通混凝土中达到最大增量分别为 34.48%和 24.40%. 同时,由图 1 可知,钢纤维的加入极大地提高了混凝土抵抗裂缝发展的能力,两种混凝土表现出良好的延性.

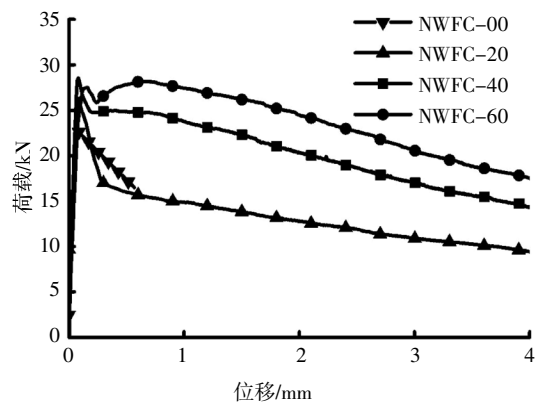
1.2 试件设计

测量混凝土结构黏结性能的最常用方法是 Losberg 拉拔试验和 RILEM/CEB/FIP 测试方法^[14].

由于试验环境及条件限制,本试验采用 RILEM/CEB/FIP 方法,根据该方法规定^[14],拉拔试验的混凝土立方体试块的边长为拉拔钢筋直径的 10 倍,即 $10d$. 文中用于拉拔试验的试件如图 2 所示,试块的边长取 20 cm,钢筋的有效锚固长度为 10 cm,未黏结部分采用塑料套管来隔离,钢筋锚固于立方体中心位置. 试块放置于承重板上,穿过钢板端钢筋为加载端,另一端为自由端. 自由端和加载端在混凝土试块外长度分别为 5 cm 和 30 cm. 试件根据不同钢纤维掺量共分为 4 组,每组拉拔试验均有 3 个试块,试验结果取平均值.



(a) 轻质混凝土



(b) 普通混凝土

图 1 弯曲荷载-变形曲线图

Fig.1 Flexural load against beam deflections of LWFC and NWFC

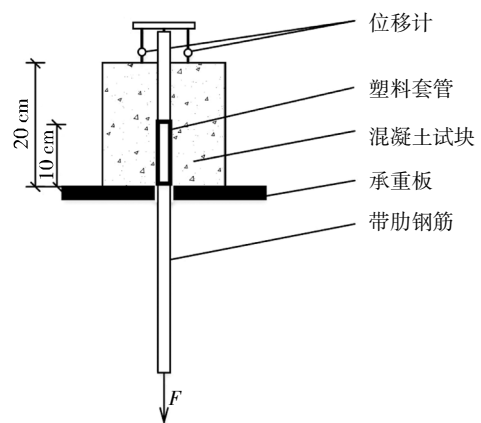


图 2 拉拔试验装置示意图

Fig.2 Equipment of bond strength test

试块被分别记为 LWFC-X-20-Y 和 NWFC-X-20-Y, 其中 LWFC 代表轻骨料钢纤维混凝土, NWFC 代表普通钢纤维混凝土, X 表示钢纤维在混凝土中的掺量 ($0, 20\text{ kg/m}^3, 40\text{ kg/m}^3, 60\text{ kg/m}^3$), Y 表示试块的编号 (1, 2, 3), 20 表示锚固钢筋的直径为 20 mm.

1.3 试验装置及测试方法

锚固试验主要用于测量钢筋在加载端和自由端的锚固滑移关系,采用 RILEM/CEB/FIP 法^[14],测试所用的试验仪器及试件如图 3 所示.加载端钢筋被固定于试验台上,通过加载装置将承重板向上拉起进行加载.试块加载端和自由端分别安装有 3 个位移计(呈 120°分布),测试时取 3 个位移计测量的平均值.

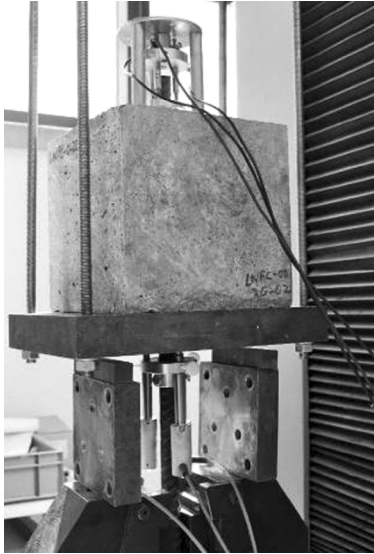


图 3 拉拔试验仪器及试件

Fig.3 Testing machine and specimen for bond strength test

加载时使用以位移为控制变量的装置,最大荷载为 600 kN,测量时使用的加载速率为 0.005 mm/s 直到加载至拔出位移为 4 mm 时停止.与以荷载为控制变量的试验相比,位移作为控制变量可得到更好的裂缝形态,进而可更直观地了解钢纤维对混凝土黏结性能的影响.

通过对钢筋拔出荷载、钢筋锚固长度及钢筋截面周长的分析,运用式(1)可得出钢筋的黏结应力以及拉拔试验的应力-变形曲线.

$$\tau = F/(\pi\Phi L). \quad (1)$$

式中: τ 为钢筋的黏结应力, N/mm²; F 为拉拔试验时施加的荷载, N; Φ 为钢筋的横截面直径, mm; L 为钢筋在混凝土中的锚固长度, mm.

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程

加载端开始加载后,黏结力通过锚固在混凝土内的钢筋进行传递,使钢筋从混凝土试块中逐渐被

拔出.在加载开始时,黏结强度由锚固钢筋和其周围的混凝土之间的化学黏结力提供.随着荷载的增加,化学黏结力很快消失,此时钢筋和混凝土之间的机械锚固力成为主要抵抗钢筋拔出的力.当拉拔力继续增大时,钢筋与混凝土之间的接触面上开始出现裂缝,并且向混凝土试块的外侧发展.达到最大黏结强度后,随着钢筋的拔出,裂缝继续扩展,向混凝土试块的外侧面处延伸,直到钢筋拔出长度为 4 mm 时停止施加荷载.

在所有的拉拔试验中,轻质混凝土试块(如图 4(a)所示)及普通混凝土试块(如图 4(b)所示)的破坏均为劈裂破坏,裂缝从加载端钢筋与混凝土试块表面交汇处开始逐渐向外侧扩展.



(a)轻质混凝土

(b)普通混凝土

图 4 混凝土的破坏形态

Fig.4 Different failure model of LWFC and NWFC

2.2 普通混凝土的黏结性能分析

2.2.1 黏结强度

表 3 中所示为普通混凝土最大黏结强度测量值.由表 3 可知,随着不同含量钢纤维的加入,普通混凝土与钢筋的最大黏结强度均增大.黏结应力的增长量在钢纤维掺量为 20 kg/m³ 时较小,可知钢纤维掺入量过少时,对其黏结强度的影响较小.当钢纤维掺量为 40 kg/m³ 时,最大黏结应力增长率达到 49.94% 的最大值,而在钢纤维掺量为 60 kg/m³ 时,其增长率略微下降.

从表 2 中混凝土的坍落度数据可发现,钢纤维掺量为 60 kg/m³ 时普通混凝土的坍落度有很大的下降,说明该掺量下,混凝土的流动性变差,导致混凝土内部密实度变差,其最大黏结应力增长率也随之下降.即使钢纤维掺量为 60 kg/m³ 时钢筋与混凝土之间的最大黏结应力比 40 kg/m³ 时低,但依然比无钢纤维加入的普通混凝土最大黏结应力要高很多.

因此,钢筋与其周围混凝土之间的黏结性能在很大程度上由钢纤维在混凝土中的掺量决定。

表 3 普通混凝土最大黏结强度

Tab.3 Maximum bond strength of NWFC

试件编号	最大黏结 应力/MPa	平均值 /MPa	增长率 /%	标准差	变异 系数
NWFC-00-20-01	10.57				
NWFC-00-20-02	8.98	10.75	0	1.86	0.17
NWFC-00-20-03	12.69				
NWFC-20-20-01	11.59				
NWFC-20-20-02	12.20	12.09	12.53	0.46	0.03
NWFC-20-20-03	12.48				
NWFC-40-20-01	15.90				
NWFC-40-20-02	16.43	16.11	49.94	0.28	0.02
NWFC-40-20-03	16.00				
NWFC-60-20-01	14.68				
NWFC-60-20-02	13.72	14.25	32.62	0.49	0.03
NWFC-60-20-03	14.35				

2.2.2 黏结应力-滑移曲线

普通混凝土试块的平均黏结应力-滑移曲线如图 5 所示。

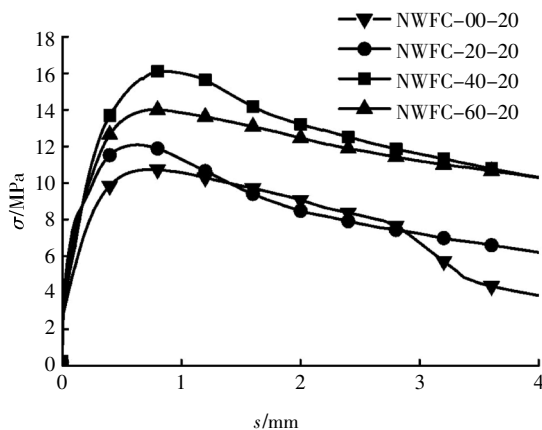


图 5 普通混凝土平均黏结应力-滑移($\sigma-s$)曲线

Fig.5 Bond stress-slip curve for NWFC with different fiber content

由图 5 中曲线可知:

1) 钢纤维对于普通混凝土与钢筋的黏结残余强度的影响较大,混凝土中含钢纤维越多,其黏结应力-滑移曲线后半段也越平缓,进而说明其黏结残余强度越大。这是由于,混凝土开裂后,在裂缝处钢纤

维起到了锚固作用,阻止混凝土的开裂。当钢纤维掺量增加时,穿过裂缝处的钢纤维量随之增加,从而其黏结残余强度也相应增强。同时,钢纤维掺量为 20 kg/m^3 时,起到锚固作用的钢纤维太少,其黏结残余强度只有微小的提高,而在钢纤维掺量为 40 kg/m^3 和 60 kg/m^3 时裂缝处钢纤维增多,其黏结残余强度的增加也较为明显。

2) 曲线的前半段几乎一致,而达到峰值点后出现不同,可知钢纤维的加入对于峰值前的黏结强度影响较小,但对于混凝土开裂性能的影响十分显著。钢筋拉拔初期,混凝土内部产生裂缝较少,且产生的微裂缝宽度也较小,钢纤维对于裂缝处的锚固作用不明显,因此曲线前半段几乎一致。当拉拔力继续增大,混凝土内部裂缝逐渐变大变宽时,钢纤维开始发挥作用,抵抗裂缝的继续发展。当钢纤维在混凝土中的掺量增加时,混凝土抵抗裂缝发展的能力随之增加,但过量钢纤维加入也会导致其增长率有所下降。

3) 试验中,普通混凝土的钢纤维最佳掺量为 40 kg/m^3 ,钢筋与混凝土之间的黏结残余强度达到了最大值。而过多钢纤维加入将导致普通混凝土的流动性降低,使得混凝土试块密实性变差,抵抗开裂的能力降低,进而导致黏结残余应力降低。

2.3 轻质混凝土的黏结性能分析

2.3.1 黏结强度

轻质混凝土的最大黏结强度测量值见表 4。由表 4 可知,随着钢纤维掺量的增加,轻质混凝土与钢筋的最大黏结强度明显增加,钢纤维掺入量的提高能使钢筋与混凝土的黏结性能得到提升。与普通混凝土不同的是,在轻骨料混凝土中,钢纤维掺量为 60 kg/m^3 时的钢筋与其黏结强度比钢纤维掺量为 40 kg/m^3 时高。由于碎石的不规则性导致钢纤维在普通混凝土中更容易形成孔隙,而膨胀黏土形状规则,钢纤维的加入对其流动性的影响没有在普通混凝土中大。因此普通混凝土中最优钢纤维掺量为 40 kg/m^3 而轻质混凝土中却仍未达到最优钢纤维掺量的值。由图 6 可知钢筋与轻骨料混凝土最大黏结强度增长率曲线仍呈现上升趋势。因此可预测,随着轻质混凝土中钢纤维掺量的继续增加,其最大黏结强度还会增大。由于试验条件所限,后续将增大钢纤维在轻质混凝土中的掺量进行补充试验,得出相应的轻骨料混凝土最优钢纤维掺量值并进行分析。

表4 轻质混凝土最大黏结强度

Tab.4 maximum bond strength of LWFC

试件编号	最大黏结应力/MPa	平均值/MPa	增长率/%	标准差	变异系数
LWFC-00-20-01	9.05				
LWFC-00-20-02	6.53	7.89	0	1.27	0.16
LWFC-00-20-03	8.09				
LWFC-20-20-01	7.55				
LWFC-20-20-02	9.43	8.50	7.71	0.94	0.11
LWFC-20-20-03	8.52				
LWFC-40-20-01	11.52				
LWFC-40-20-02	9.52	10.13	28.35	1.21	0.12
LWFC-40-20-03	9.35				
LWFC-60-20-01	11.57				
LWFC-60-20-02	11.60	11.99	51.94	0.70	0.06
LWFC-60-20-03	12.80				

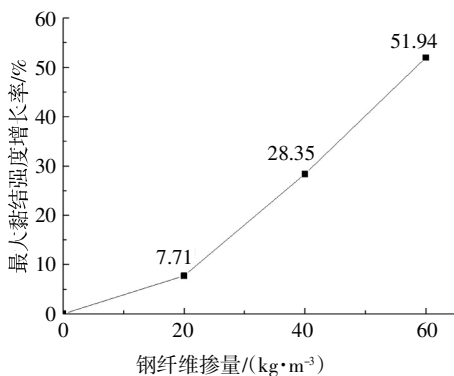


图6 钢筋与轻骨料混凝土最大黏结强度增长率曲线

Fig.6 Rate of increment for the maximum bond strength of LWFC

2.3.2 黏结应力-滑移曲线

轻质混凝土试块的平均黏结应力-滑移曲线如图7所示。

从图7中曲线可看出,随着轻质混凝土中钢纤维掺量的增加,试件抵抗滑移的能力也在增加,试块的黏结应力增强.混凝土中加入的钢纤维在拉拔试验中起到限制试块中裂缝发展的作用.裂缝产生后钢纤维能够将裂缝两侧的混凝土连接在一起,起到锚固作用,使其能继续抵抗拉力从而增强了混凝土的残余黏结强度.并且随着钢纤维掺量的增加将会有更多的钢纤维用于抵抗混凝土裂缝的发展.因而,钢纤维对于混凝土黏结性能的影响非常明显.当轻质混凝土与钢筋之间达到最大黏结应力后,钢纤维掺量越多,其黏结应力-滑移曲线后半段越平缓.对

于不含及含有少量钢纤维的混凝土试块,当达到最大黏结应力后,由于没有或只有少量钢纤维用于抵抗裂缝的发展,混凝土将突然破坏,拉拔力迅速降低.此时的黏结残余应力仅由混凝土和钢筋之间拔出时的摩擦力提供。

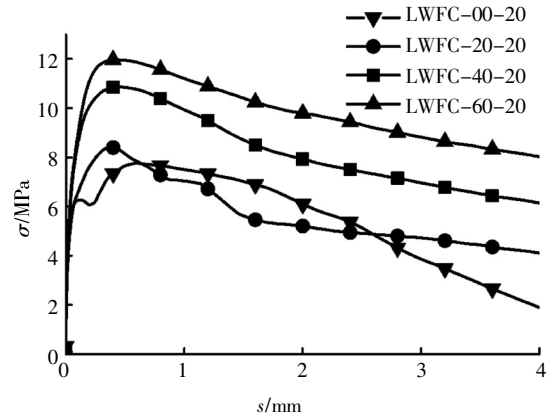
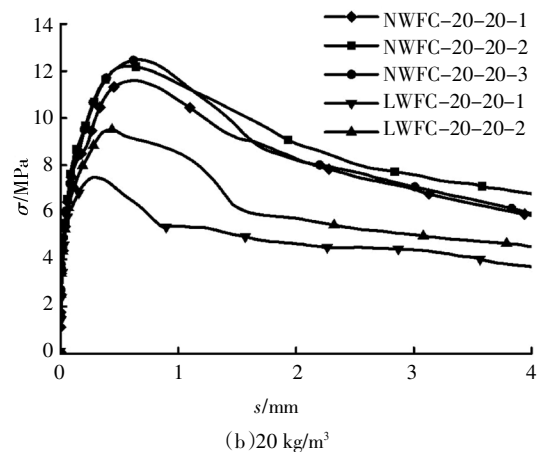
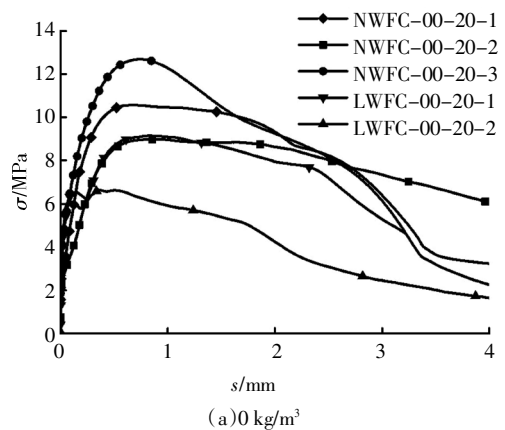


图7 轻质混凝土平均黏结应力-滑移(σ-s)曲线

Fig.7 Bond stress-slip curve for LWFC with different fiber content

2.4 两种混凝土的黏结性能对比

相同钢纤维掺量下,两种混凝土的黏结应力-滑移曲线如图8所示,两种混凝土试块的拉拔破坏面如图9所示。



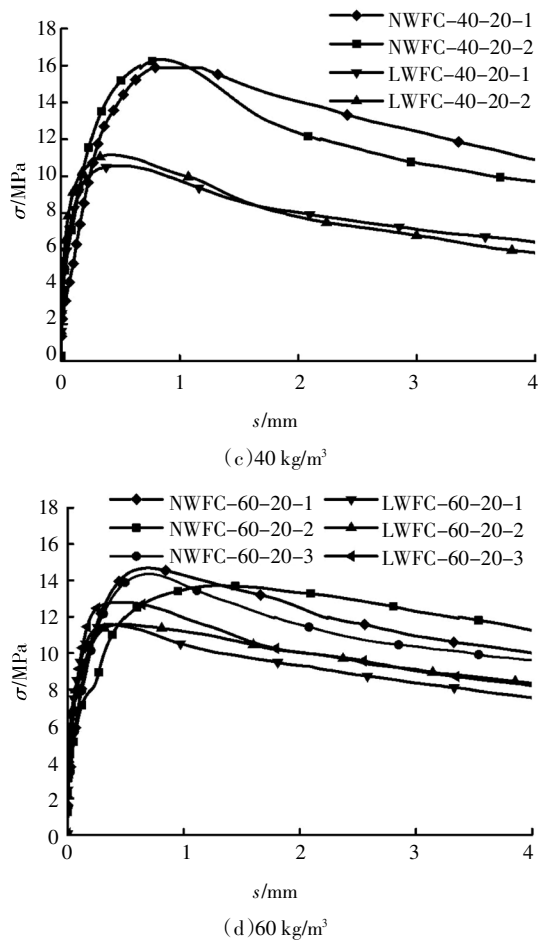
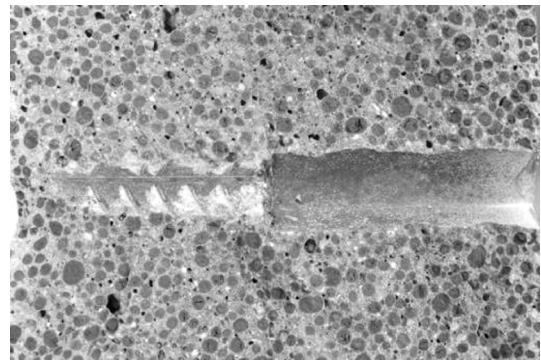


图 8 相同钢纤维掺量下两种混凝土的黏结应力-滑移($\sigma-s$)曲线

Fig.8 Bond stress-slip curve at same fiber content for LWFC and NWFC

将图 8 中数据与表 3、表 4 中数据对比可知,在相同的钢纤维掺量下,轻质混凝土的黏结强度均低于普通混凝土.在图 9 中,轻质混凝土的破坏面上大约 90%的膨胀黏土被劈裂,但普通混凝土中的碎石均保持了基本形状,裂缝只在碎石之间的水泥里传播.由图 9 可知,试块在膨胀黏土劈裂且水泥达到最大强度时产生破坏,这是由于轻质混凝土中的粗骨料强度低,无法限制裂缝的发展.而在普通混凝土中,当水泥达到最大强度时,由于混凝土中的粗骨料强度较高,也可用来抵抗裂缝的发展,进而提高了混凝土与钢筋的黏结强度.因此在相同的钢纤维掺量下,普通混凝土的黏结性能要高于轻质混凝土.



(a) 轻质混凝土



(b) 普通混凝土

图 9 混凝土拉拔破坏面

Fig.9 Different failure model of LWFC and NWFC

3 结论

本文进行了变形钢筋与普通混凝土和轻质混凝土之间黏结性能的试验研究,对比了不同钢纤维掺量下钢筋和混凝土之间黏结应力的关系,之后分析比较了在相同钢纤维掺量下,两类混凝土与钢筋的黏结性能.通过对试验数据的分析和总结,可得出下列结论:

1)钢纤维的掺量对于钢筋和混凝土之间的黏结性能有着很大的影响,钢纤维掺量增加,混凝土的最大黏结应力也相应增加.但钢纤维在普通混凝土中的掺量存在最优值,当掺量大于最优值时,继续增加钢纤维掺量会导致混凝土和钢筋的黏结应力增长率下降.

2)在拉拔试验中,混凝土中的钢纤维起到了限制裂缝发展的作用,由于钢纤维能够传递裂缝之间的应力,从而减弱了裂缝的发展速度,进而使得混凝土的残余黏结应力也得到相应的增强.

3)在相同的钢纤维掺量下,轻质混凝土的黏结强度均低于普通混凝土.主要由于在水泥达到最大强度后,普通混凝土中的粗骨料起到了抵抗裂缝发

展的作用,而轻质混凝土中的粗骨料会随着裂缝的发展产生劈裂破坏,因此普通混凝土的黏结性能要高于轻质混凝土。

参考文献

- [1] 李超飞,苏有文,詹妮,等. 钢纤维、硅粉再生骨料混凝土钢筋锚固性能试验研究[J]. 工业建筑,2014,44(9):101—105.
LI C F, SU Y W, ZHAN N, *et al.* Experimental research on anchorage performance of recycled aggregate concrete with steel fiber and silica fume concrete [J]. *Industrial Construction*, 2014, 44 (9): 101—105. (In Chinese)
- [2] 梁兴文,史庆轩. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2008:35—36.
LIANG X W, SHI Q X. Design theory for concrete structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008: 35—36. (In Chinese)
- [3] 丁一宁,董香军,王岳华. 钢纤维混凝土弯曲韧性测试方法与评价标准[J]. 建筑材料学报,2005,8(6):660—664.
DING Y N, DONG X J, WANG Y H. Testing methods and evaluating standards of flexural toughness for steel fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(6): 660—664. (In Chinese)
- [4] 朱德举,李向阳,史才军,等. 水泥基体中仿生钢纤维的拔出试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):84—89.
ZHU D J, LI X Y, SHI C J, *et al.* Pullout test of bio-inspired steel fiber from cementitious matrix [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(1): 84—89. (In Chinese)
- [5] 潘慧敏,马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. 建筑材料学报,2017,20(6):956—961.
PAN H M, MA Y C. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete and its mechanism of crack resistance and toughening [J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(6): 956—961. (In Chinese)
- [6] 赵国藩. 钢纤维混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999:2—4.
ZHAO G F. Steel fiber reinforced concrete structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999: 2—4. (In Chinese)
- [7] 刘汉勇,王立成,宋玉普,等. 钢纤维高强轻骨料混凝土力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(5):110—117.
LIU H Y, WANG L C, SONG Y P, *et al.* Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Building Structure*, 2007, 28(5): 110—117. (In Chinese)
- [8] 方志,向宇,匡镇,等. 钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2011,38(6):6—12.
FANG Z, XIANG Y, KUANG Z, *et al.* Fatigue properties of reactive powder concrete with different steel fiber ratios [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 38(6): 6—12. (In Chinese)
- [9] SORUSHIAN P, MIRZA F, ALHOZAIMY A. Bonding of confined steel fiber reinforced concrete to deformed bars [J]. *ACI Materials Journal*, 1994, 91(2): 141—149.
- [10] WON J P, PARK C G, KIM H H, *et al.* Effect of fibers on the bonds between FRP reinforcing bars and high-strength concrete [J]. *Composites Part B Engineering*, 2008, 39(5): 747—755.
- [11] SEMSI Y, AREL H S. The effect of steel fiber on the bond between concrete and deformed steel bar in SFRCs [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 40: 299—305.
- [12] HARAJLI M H, SALLOUKH K A. Effect of fibers on development/splice strength of reinforcing bars in tension [J]. *ACI Materials Journal*, 1995, 94(4): 317—324.
- [13] EZELDIN A S, BALAGURU P N. Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1989, 86(5): 515—524.
- [14] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions [J]. *Journal of Composites for Construction*. 2004, 8(2): 173—181.