

文章编号:1673-2049(2015)01-0081-08

玄武岩纤维混凝土与钢筋粘结锚固性能 试验与分析

王 钧, 郭大鹏, 马 跃

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了研究玄武岩纤维混凝土(BFRC)与钢筋粘结锚固性能,对 18 个中心拔出试件和 9 个梁式试件进行加载试验,获得各级荷载下加载端、自由端滑移量及钢筋应变,得到了粘结应力-滑移曲线和粘结应力沿锚固长度的曲线分布。试验结果表明:随着玄武岩纤维的掺入,钢筋与混凝土粘结锚固性能未表现出有利影响,极限粘结强度有所降低;掺入长度为 25 mm 纤维的混凝土与钢筋的极限粘结强度优于掺入长度为 15 mm 纤维的混凝土与钢筋的极限粘结强度;混凝土强度的提高有利于改善玄武岩纤维混凝土与钢筋粘结锚固性能,混凝土相对保护层厚度对粘结锚固性能影响不大;锚固钢筋的应变曲线整体呈下凹形,沿锚固长度逐渐递减;粘结应力沿锚固长度呈多峰曲线;基于试验数据建立的玄武岩纤维混凝土与钢筋粘结应力-滑移本构关系可以为玄武岩纤维混凝土的理论设计与工程设计提供参考依据。

关键词:玄武岩纤维混凝土;粘结锚固性能;滑移;粘结强度;粘结应力-滑移本构关系

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

Experiment and Analysis of Bond-anchorage Properties Between BFRC and Steel Bars

WANG Jun, GUO Da-peng, MA Yue

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to study the bond-anchorage properties between basalt fiber reinforced concrete (BFRC) and steel bars, the loading end, the free end slip and strain of steel bars under various loads were acquired. Bond stress-slip curves and bond stress curves along anchorage length were obtained through 18 center pull-out specimens and 9 beam specimens' loading experiment. The experiment results show that basalt fiber has an adverse impact on the bond-anchorage properties between steel bars and concrete and reduces the ultimate bond strength. 25 mm basalt fiber shows greater ultimate bond strength between concrete and steel bars than 15 mm basalt fiber. The bond-anchorage properties between BFRC and steel bars will be improved with the increase of the concrete strength. Relative thickness of concrete cover has little effect on bond-anchorage properties. Strain curves of anchor steel bars are concave as a whole and decrease gradually along anchorage length. The bond stress curves along anchorage length are multimodal. The constitutive relation of bond stress and slip between BFRC and steel bars on the basis of experiment data can provide reference for the theory and engineering design of BFRC.

收稿日期:2014-06-11

基金项目:黑龙江省应用技术研究与开发计划项目(2013G0763);黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z12006)

作者简介:王 钧(1967-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jun. w. 619@163. com.

Key words: basalt fiber reinforced concrete; bond anchorage property; slip; bond strength; constitutive relation of bond stress and slip

0 引言

在钢筋混凝土结构中,混凝土和钢筋的粘结作用是保证钢筋和混凝土这 2 种材料共同工作的基本前提。玄武岩纤维作为一种天然无机材料,具有较高的抗拉性能、良好的化学稳定性与热稳定性、高性价比等特点,被称为 21 世纪无污染的“绿色工业材料”。以混凝土作为基体,掺入玄武岩纤维,充分发挥 2 种材料的优势,可很大程度上改善混凝土抗拉性能低、易开裂、耐腐蚀性差等不足,起到增强增韧、延长寿命等作用。

目前,中国对玄武岩纤维混凝土(BFRC)的研究仍处于初期阶段,主要涉及力学性能、耐久性等研究^[1-4]。各国关于混凝土与钢筋的粘结锚固性能已做了大量研究,主要涉及影响混凝土与钢筋粘结性能的因素、粘结-滑移本构关系等。关于 BFRC 与钢筋粘结锚固性能研究的报道尚较少,为了拓宽 BFRC 的理论研究与工程实际应用,BFRC 与钢筋粘结锚固性能的研究愈发成为不可忽视的问题。本文以玄武岩纤维掺量、纤维长度、混凝土强度、混凝土相对保护层厚度、钢筋表面特征为参数,采用梁式试验和中心拔出试验探讨参数改变对 BFRC 与钢筋粘结锚固性能的影响。

1 试验方案

本文采用中心拔出试验和梁式试验,通过对试件荷载作用下加载端、自由端滑移量以及各级荷载对应的钢筋应变分析,研究 BFRC 与钢筋粘结锚固性能。

1.1 试验设计

1.1.1 中心拔出试件设计及制作

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)^[5]中的要求,采用边长为 10 倍钢筋直径的混凝土立方体试块作为拔出试验试件,钢筋嵌固于试件轴心,有粘结部分和无粘结部分长度各占总长度的 1/2,无粘结部分由 PVC 套管包裹,如图 1 所示。

试验以玄武岩纤维体积掺量、纤维长度、钢筋表面特征为变化参数,考察其改变对混凝土与钢筋粘结性能的影响,中心拔出试件设计参数见表 1。试件共 6 组,每组 3 个。为便于试件几何尺寸的确定,选用直径为 10 mm 的 HPB300 和 HRB335 级钢筋,

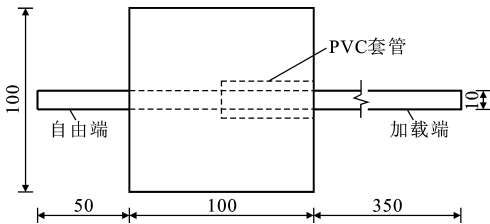


图 1 中心拔出试件示意(单位:mm)

Fig. 1 Schematic Diagram of Center Pull-out Specimen (Unit:mm)

表 1 中心拔出试件设计参数

Tab. 1 Design Parameters of Center Pull-out Specimens

试件编号	体积掺量/%	纤维长度/mm	钢筋表面特征
BC1-0	0.0	0	光圆
BC2-0	0.0	0	带肋
BC3-15	0.1	15	光圆
BC4-15	0.1	15	带肋
BC5-25	0.1	25	光圆
BC6-25	0.1	25	带肋

混凝土强度等级为 C30。

1.1.2 梁式试件设计及制作

梁式试件设计参照国际材料与结构研究试验联合会^[6]推荐的方法,由 2 个相同的混凝土半梁组成,通过下部的钢筋和上部的钢铰连接,具体几何尺寸为 150 mm×250 mm×1 260 mm,钢筋锚固长度取 10 倍钢筋直径。梁式试件及截面配筋见图 2,其中, F 为荷载。试件加工过程中,对试验纵筋进行局部开槽,内贴应变片以测试钢筋应变,应变片在锚固区内均匀布置。开槽尺寸及应变片位置如图 3 所示。梁式试验基于玄武岩纤维体积掺量、纤维长度、混凝土强度等级、混凝土相对保护层厚度等参数变化,共设计并制作 9 个梁式试件,试件设计参数见表 2。

1.2 试验材料

试验材料参照文献^[7],玄武岩纤维物理力学性能指标见表 3。选用 C30,C40 为基准混凝土强度等级,配合比设计^[8-9]见表 4。基准混凝土立方体抗压强度实测值见表 5,钢筋主要力学性能指标见表 6。

1.3 加载方法

梁式试验采用手动液压千斤顶加载。由应变测试系统自动采集试验数据,加载装置见图 4(a);中心拔出试件采用 SW-100 锚杆拉拔仪,加载装置见图 4(b)。两试验采用荷载控制法加载,加载初期每级荷载为 0.5 kN,观察到自由端出现滑移后,每级

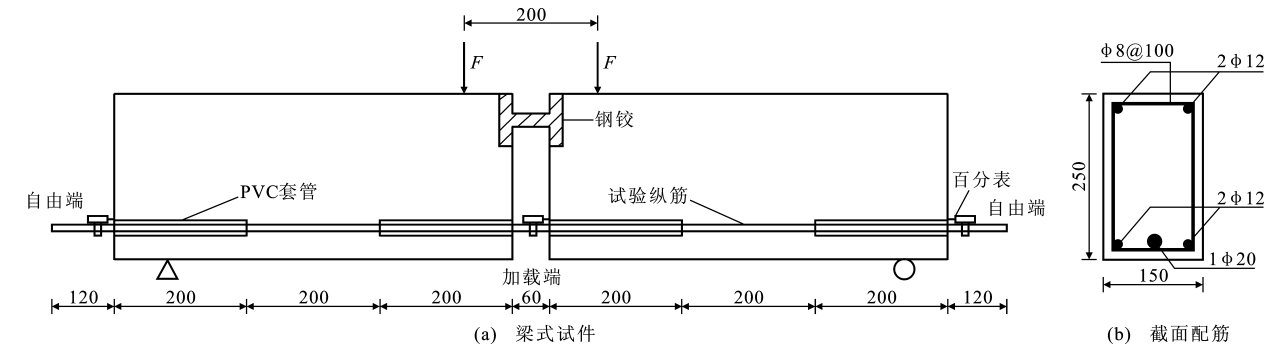


图 2 梁式试件及截面配筋(单位:mm)

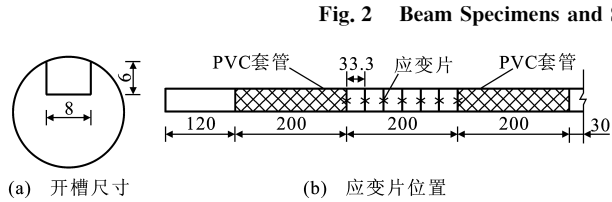


图 3 开槽尺寸及应变片位置(单位:mm)
Fig. 3 Slotted Size and Strain Gauge Position (Unit:mm)

表 2 梁式试件设计参数				
Tab. 2 Design Parameters of Beam Specimens				
试件编号	混凝土强度等级	体积掺量/%	纤维长度/mm	cd^{-1}
LS0-0	C30	0.0	0	1.25
LS1-15	C30	0.1	15	0.75
LS2-15	C30	0.1	15	1.25
LS3-25	C40	0.1	25	0.75
LS4-25	C40	0.1	25	1.25
LS5-15	C40	0.2	15	0.75
LS6-15	C40	0.2	15	1.25
LS7-25	C30	0.2	25	0.75
LS8-25	C30	0.2	25	1.25

注: c 为混凝土保护层厚度; d 为试验纵筋直径。

表 3 玄武岩纤维物理力学性能指标					
Tab. 3 Physical and Mechanical Behavior Indexes of Basalt Fiber					
长度/mm	单丝直径/ μm	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂延伸率/%
15,25	18	2.65	95~115	3 300~4 500	2.4~3.0

表 4 基准混凝土配合比

混凝土强度等级	各材料用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$				
	水泥	砂	石	水	减水剂
C30	352	714	1 164	176	7.0
C40	440	680	1 110	176	8.8

荷载为 0.1 kN,每级持荷 2 min。试件破坏或自由端滑移达到 2 mm 时,试验结束^[4]。

表 5 混凝土立方体抗压强度实测值	
Tab. 5 Measured Results of Concrete Cubic Compressive Strength	
混凝土强度等级	立方体抗压强度/MPa
C30	36.2
C40	48.0

表 6 钢筋主要力学性能指标			
Tab. 6 Main Mechanical Behavior Indexes of Steel Bars			
钢筋等级	直径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa
HPB300	8	328	487
	10	337	512
HRB335	10	361	562
	12	354	543
	20	366	578

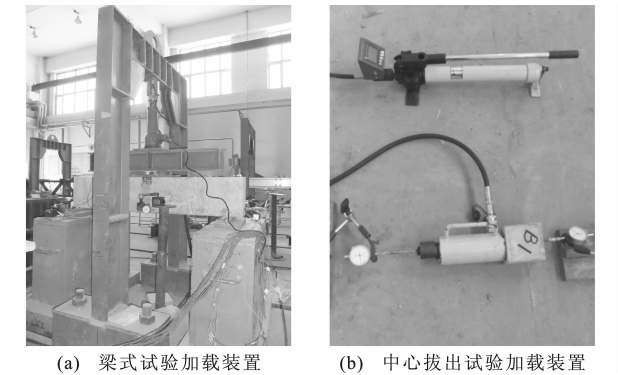


图 4 试验加载装置
Fig. 4 Experiment Loading Equipment

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及破坏形态

2.1.1 中心拔出试验

加载初期,加载端开始出现滑移并均匀增长,由于拉拔力较小,自由端无明显滑移。当荷载加至 $0.3P_u$ (P_u 为极限荷载)时,自由端产生滑移。接近极限粘结强度时,加载端与自由端滑移增长迅速,直

至试件破坏。对于光圆钢筋试件,破坏时钢筋从混凝土中拔出,破坏特征为拔出破坏。对于变形钢筋试件,破坏时试件侧面产生 1 条劈裂裂缝,破坏特征为劈裂破坏,在混凝土劈裂界面与钢筋接触位置处有明显的钢筋肋印,如图 5 所示。

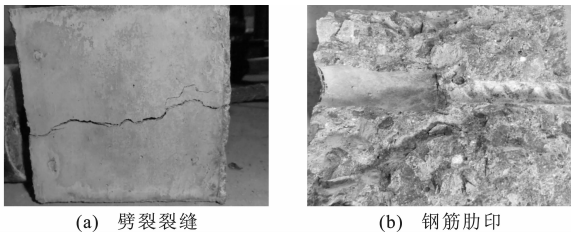


图 5 中心拔出试件劈裂破坏形态
Fig. 5 Splitting Failure Modes of Center Pull-out Specimens

2.1.2 梁式试验

当荷载增至 $0.1P_u$ 时,加载端开始出现滑移;随着荷载的增加,两侧梁端竖向立面曲率发生变化,梁挠度逐渐增大,如图 6 所示。当荷载达到 $0.3P_u$ 时,自由端出现滑移,加载端滑移的增长速度明显大于自由端。当荷载达到极限荷载时,荷载不再增加而滑移却急剧增长。由于试验梁配有箍筋并有一定的保护层厚度,约束了劈裂裂缝的产生。

2.2 试验结果分析

2.2.1 中心拔出试件粘结应力-滑移曲线

平均粘结应力可由公式(1)计算得到,即

$$\bar{\tau} = P / (\pi d l_a) \tag{1}$$

式中: $\bar{\tau}$ 为平均粘结应力; P 为钢筋长度方向的拉力; l_a 为钢筋的锚固长度。

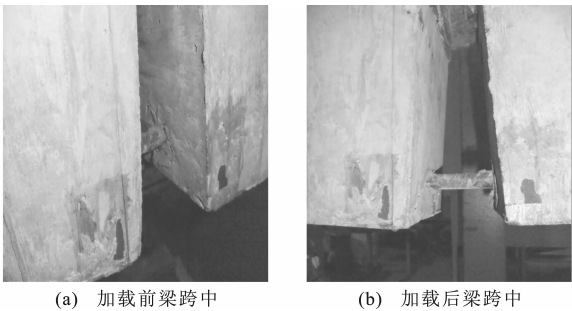


图 6 梁式试件受力状态
Fig. 6 Force States of Beam Specimens

通过数据统计得到粘结应力-滑移曲线,如图 7 所示,其中, τ 为粘结应力, s 为滑移量。由图 7 可知:埋入光圆钢筋的试件粘结-滑移曲线有明显的上升段和下降段;埋入变形钢筋的试件粘结滑移曲线仅表现出上升段,这主要是由于该类试件在达到临界拉拔力时发生劈裂破坏所导致的。中心拔出试验各试件极限粘结强度如图 8 所示。比较试件 BC1-0 与 BC3-15,试件 BC2-0 与 BC4-15,无论光圆钢筋试件还是变形钢筋试件,掺入纤维试件的极限粘结强度较普通混凝土试件均有所降低,相对于光圆钢筋试件降幅达到 20.3%,而相对于变形钢筋试件降幅达到 22.9%。比较试件 BC3-15 与 BC5-25,试件 BC4-15 与 BC6-25,由试验数据可知:随着纤维长度的增加,光圆钢筋试件极限粘结强度逐渐呈下降趋势,降幅为 21.4%;变形钢筋试件则相反,极限粘结强度随纤维长度增加而增大,增幅为 10.2%,但是仍低于普通混凝土极限粘结强度。

由试验所获数据可知,玄武岩纤维的掺入提高

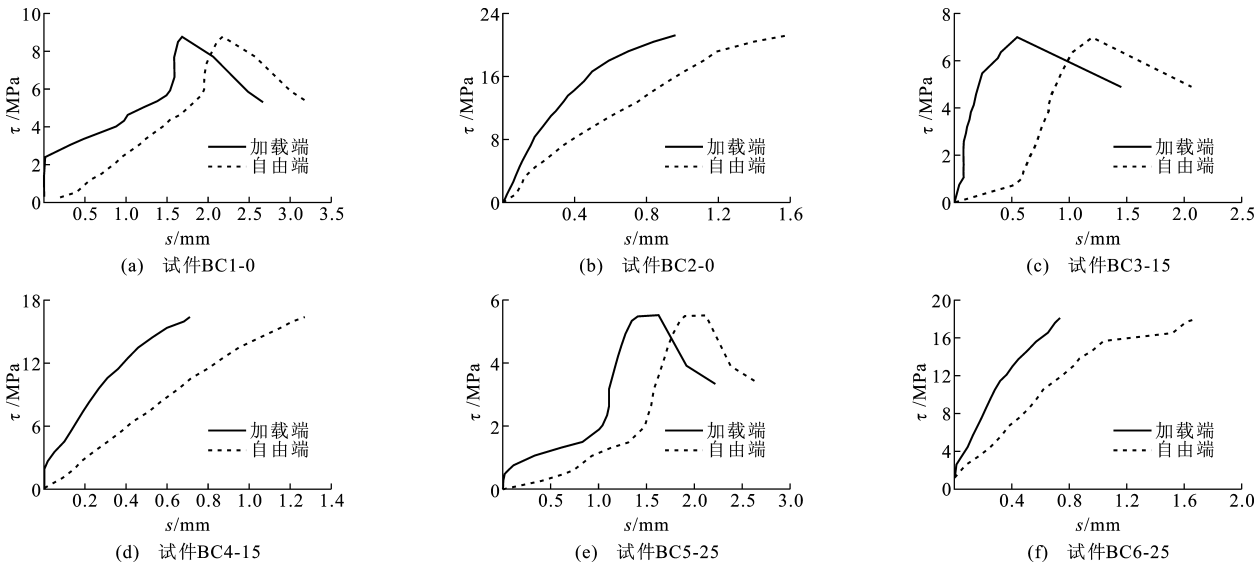


图 7 中心拔出试件粘结应力-滑移曲线
Fig. 7 Bond Stress-slip Curves of Center Pull-out Specimens

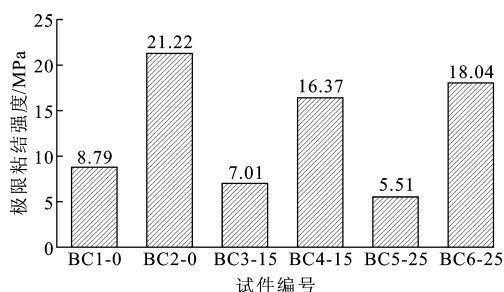


图 8 中心拔出试验各试件极限粘结强度对比

Fig. 8 Comparison of Ultimate Bond Strength of Center Pull-out Specimens

了混凝土的收缩抗裂性能^[10],减小了混凝土的收缩变形,混凝土对钢筋的握裹力降低,使得钢筋与混凝土界面摩擦力降低,从而导致粘结力的下降,称为纤维的减缩效应。纤维的阻裂作用可以抑制钢筋附近粘结裂缝的产生和发展,从而提高粘结强度,可称为纤维的阻裂效应。基于试验结果分析,减缩效应对粘结性能的影响要大于阻裂效应。比较试件 BC4-15 与 BC6-25,当纤维掺量为定值时,随着纤维长度的增加,极限粘结强度有所增加,这主要是由于 25 mm 纤维较 15 mm 纤维可更好地抑制劈裂裂缝的产生和扩展,阻裂效应增加。试件 BC5-25 极限粘结强度较试件 BC3-15 的粘结强度降低是由于 25 mm 纤维的掺入对抑制混凝土的收缩变形更为显著,进而降低了钢筋与混凝土界面的摩擦力;两者破坏形态为拔出破坏,玄武岩纤维的阻裂作用未能发挥。

从能量的角度分析,粘结破坏能越大,发生粘结破坏时外力做功越多,试件的粘结性能越好。粘结应力-滑移曲线所包络的面积可表示为粘结破坏能。图 9 为粘结应力-滑移曲线对比。从图 9 可以看出,普通混凝土对应的粘结应力-滑移曲线围合而成的面积最大,表示粘结性能最优。相同掺量下,掺入 25 mm 纤维对应的粘结应力-滑移曲线围合而成的面积大于 15 mm 纤维的,说明 25 mm 纤维 BFRC 与钢筋的粘结性能要优于 15 mm 纤维。玄武岩纤维作为一种不连续的分散相,掺入混凝土后会使得界面增多,相应的微缺陷也随之增加。微缺陷数量达到一定规模时,导致裂纹的产生,钢筋与混凝土界面对外界表现为能量释放,将积累的弹性变形能耗散,发生失稳破坏^[11]。因此,相比普通混凝土,BFRC 更容易发生粘结破坏。

2.2.2 梁式试件粘结应力-滑移曲线

根据梁式试件试验数据,可得到如图 10 所示的粘结应力-滑移曲线。从曲线总体趋势可以看出,粘

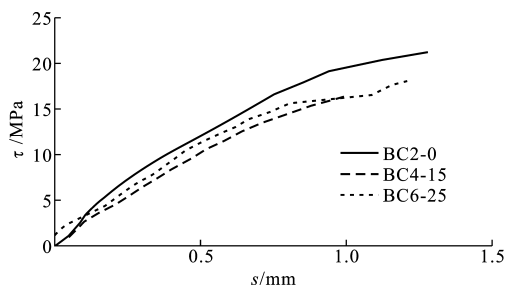


图 9 各试件粘结应力-滑移曲线对比

Fig. 9 Comparisons of Bond Stress-slip Curves of Specimens

结应力-滑移曲线可分为微滑段、滑移段、劈裂段和残余段^[12]。图 10 中粘结应力-滑移曲线未表现出下降段,这是由于试验结束(自由端滑移 2 mm)时,试件尚可持续持荷,呈现出良好的延性。加载端滑移量的发展始终大于自由端,当劈裂段拐点出现后,加载端滑移量急剧增长;随着滑移量的增加,粘结应力增长较为平缓,除试件 LS5-15 外,其余试件没有出现下降趋势。

由图 10 可以看出,强度等级为 C30 的 BFRC 极限粘结强度相对 C30 的普通混凝土平均降幅为 10.3%。相比中心拔出试件的降幅明显减小,表明 BFRC 结构中适当的箍筋和混凝土保护层厚度能增强锚固延性。强度等级为 C40 的 BFRC 极限粘结强度较 C30 的 BFRC 最大增幅为 16%,这主要是由于混凝土强度的提高增加了化学胶结力和机械咬合力,同时提高了混凝土的抗拉强度,延迟了试件的开裂,从而提高极限粘结强度。对比图 9(d)~(g)与图 9(a)可知,C30 普通混凝土极限粘结强度仍大于 C40 的 BFRC,表明各因素对混凝土与钢筋粘结性能的影响不是独立作用,而是相互耦合而成。由于试件未发生劈裂破坏,故混凝土相对保护层厚度对极限粘结强度的影响不大。通过比较可以发现,中心拔出试验的粘结强度明显高于梁式试验,其强度差异分析如下:

(1)埋长和钢筋直径是影响粘结性能的 2 个因素。埋长越大,受力时粘结应力分布越不均匀,破坏时试件的粘结强度平均值与试验状态下最大粘结强度的比值越小,故在钢筋直径相同情况下,粘结强度随埋长的增加而减小;钢筋的相对粘结面积与钢筋直径成反比,故直径较大的钢筋相对粘结面积较小,不利于粘结强度的提高。因此在埋长相同的情况下,粘结强度随钢筋直径的增大而降低^[13]。

(2)中心拉拔试验与梁式试验中钢筋的受力状态不同。中心拉拔试验的拉拔力沿钢筋长度方向为

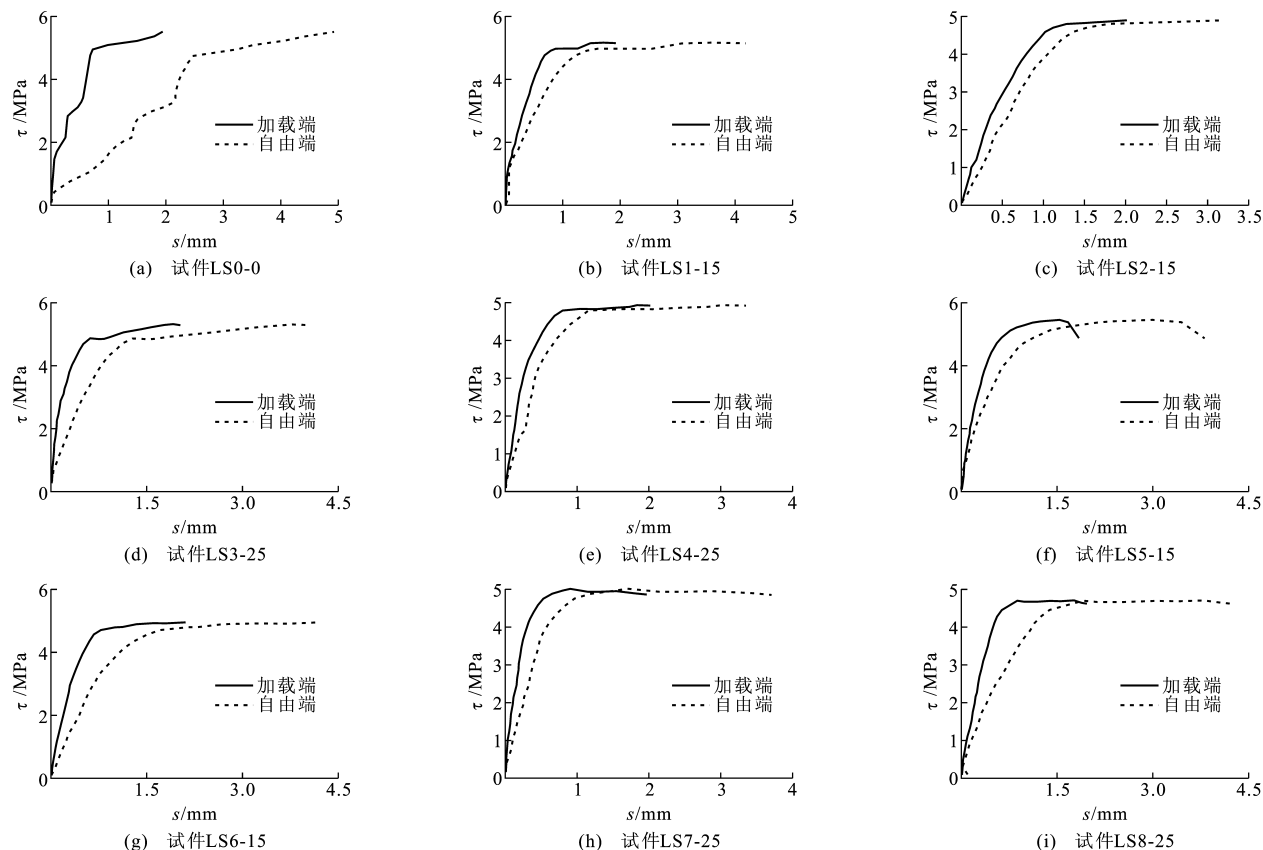


图 10 梁式试件粘结应力-滑移曲线

Fig. 10 Bond Stress-slip Curves of Beam Specimens

轴心受力状态;梁式试验的竖向荷载作用在梁上端,需要将力分解为水平力与竖向力,其中水平力直接作用于钢筋,同时试件发生一定的弯曲变形,导致应力状态变化。

2.2.3 钢筋应变沿锚固长度的分布

图 11 为梁式试件不同粘结应力情况下钢筋应变沿锚固长度的分布曲线。随着外荷载的逐级增加,钢筋应变也随之增加,加载端应变增加较快,各级荷载作用下钢筋应变沿锚固长度的分布曲线大致相同。任意一级荷载作用下,钢筋应变沿锚固长度呈递减规律,并且曲线斜率逐渐减小,曲线整体呈下凹形。

2.2.4 粘结应力沿锚固长度的分布

利用文献[14]中的方法,求得各级荷载作用下粘结应力沿锚固长度的分布曲线,如图 12 所示。由图 12 可以看出,BFRC 与钢筋的粘结应力沿锚固长度的分布曲线与普通混凝土相似,为多峰曲线。任意一级荷载作用下,粘结应力的峰值靠近加载端,在锚固段中部或靠近自由端处又出现次级峰值。随着荷载的增加,粘结应力增加。

2.2.5 粘结应力-滑移本构关系

综合考虑各因素对 BFRC 与钢筋粘结锚固性

能的影响,对梁式试件粘结应力-滑移曲线进行拟合,回归得到 BFRC 与钢筋的粘结应力-滑移本构关系,即

$$\tau = (9.751s - 6.898s^2 + 2.092s^3 - 0.231s^4) \times 10^6 \quad (2)$$

2.2.6 BFRC 中钢筋基本锚固长度设计建议

通过对试验数据的分析,BFRC 与钢筋的粘结锚固强度较普通混凝土降低约 15%,可将《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]中普通钢筋基本锚固长度的计算公式乘以修正系数 α_b 近似作为 BFRC 中钢筋基本锚固长度公式,即

$$l_{ab} = \alpha_b \alpha \frac{f_y}{f_t} d' \quad (3)$$

式中: l_{ab} 为钢筋的基本锚固长度; α 为锚固钢筋外形系数; f_y 为钢筋抗拉强度设计值; f_t 为普通混凝土轴心抗拉强度设计值; d' 为锚固钢筋直径; α_b 为玄武岩纤维对普通钢筋基本锚固长度修正系数,可考虑取 1.15。

3 结 语

(1)掺入玄武岩纤维后,钢筋与混凝土极限粘结强度有所下降。当有适量的箍筋和保护层时,可增

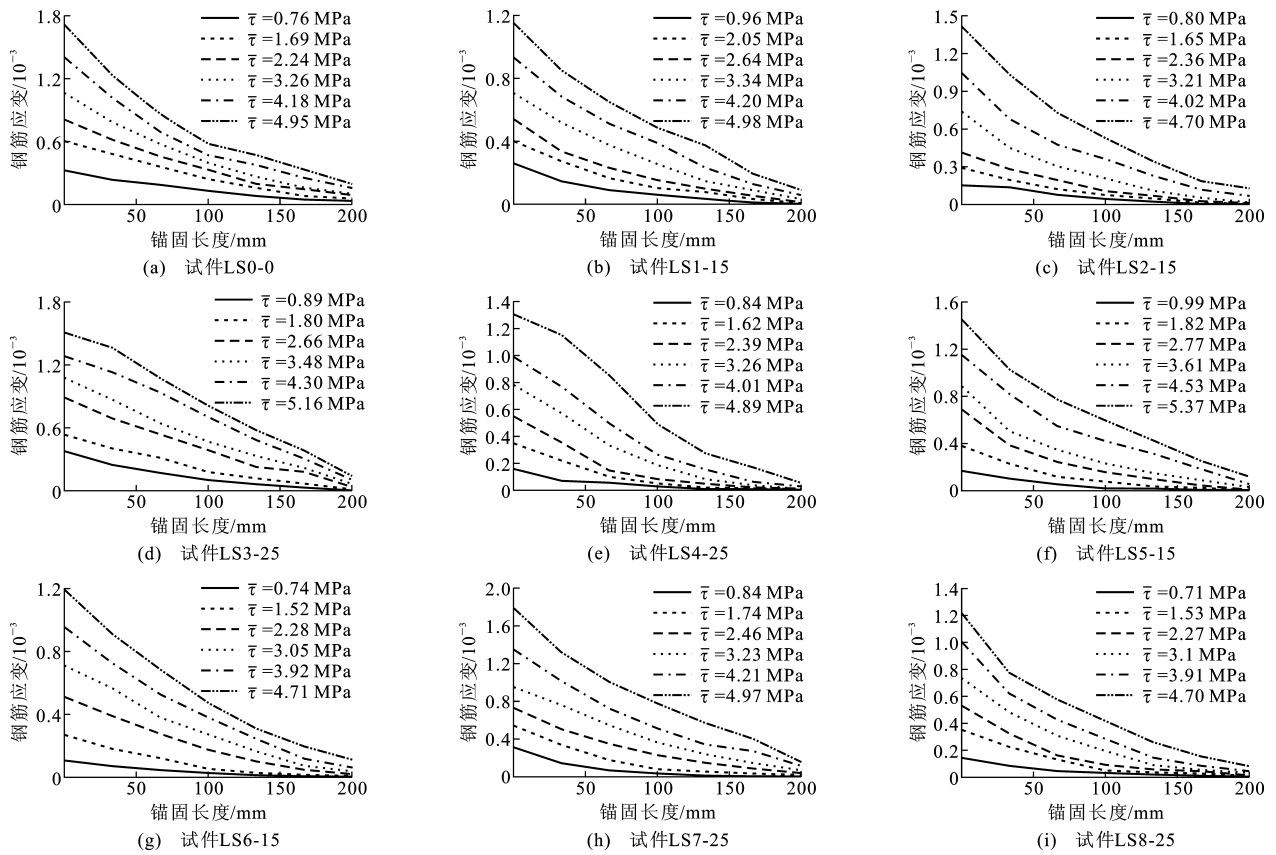


图 11 钢筋应变沿锚固长度分布曲线

Fig. 11 Distribution Curves of Strain of Steel Bars Along Anchorage Length

加 BFRC 的锚固延性。

(2)长度为 25 mm 纤维 BFRC 与钢筋的粘结锚固性能优于长度为 15 mm 纤维的。混凝土强度的增加可提高 BFRC 与钢筋的粘结性能,混凝土相对保护层厚度的变化对钢筋粘结锚固性能影响不大。

(3)BFRC 中钢筋应变、粘结应力沿锚固长度的分布规律与普通混凝土相似。根据梁式试件粘结应力-滑移曲线回归可得到玄武岩纤维混凝土与钢筋粘结应力-滑移本构关系。

(4)可考虑工程设计时对锚固长度乘以修正系数 1.15 作为 BFRC 与钢筋锚固长度计算依据。

参考文献:

References:

[1] 李为民,许金余.玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J].硅酸盐学报,2008,36(4):476-481,486.
LI Wei-min, XU Jin-yu. Strengthening and Toughening in Basalt Fiber-reinforced Concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4): 476-481, 486.

[2] 陈伟,王钧.玄武岩纤维混凝土梁斜截面受剪试验[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2011,27(4):

674-678,689.

CHEN Wei, WANG Jun. Experimental Research on Shear Capacity of Inclined Section of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27(4): 674-678, 689.

[3] 叶焕军.玄武岩纤维混凝土梁受弯性能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
YE Huan-jun. Study on Flexural Performance of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.

[4] 朱华军.玄武岩纤维混凝土耐久性能试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2009.
ZHU Hua-jun. Study on Durability of Basalt Fiber Reinforced Concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

[5] GB 50152—92,混凝土结构试验方法标准[S].
GB 50152—92, Standard Methods for Testing of Concrete Structures[S].

[6] RILEM-FIP-CEB. Tentative Recommendation: Bond Test for Reinforcing Steel[J]. Materials and Structures, 1973, 6(32): 97-105.

[7] 张野.短切玄武岩纤维混凝土基本力学性能研究

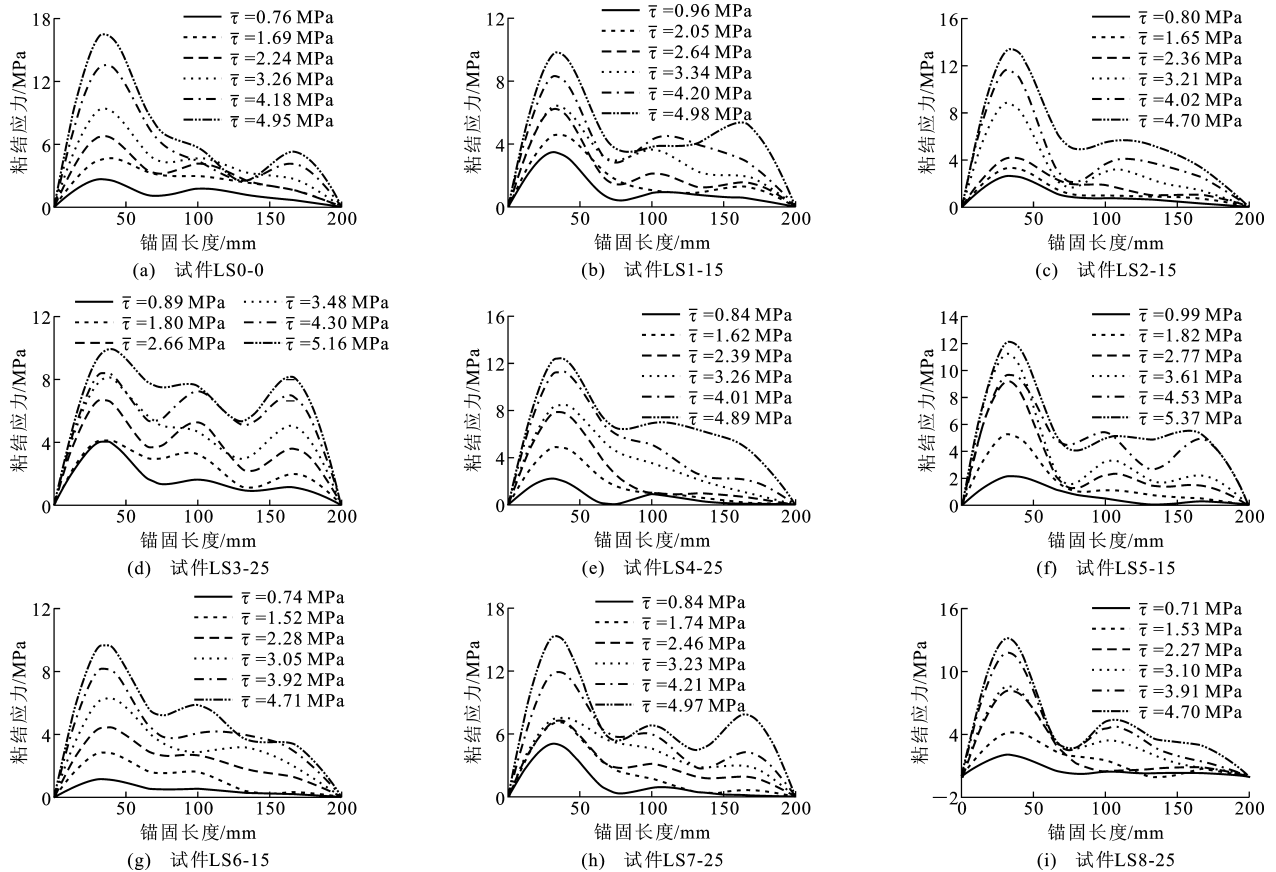


图 12 粘结应力沿锚固长度分布曲线

Fig. 12 Distribution Curves of Bond Stress Along Anchorage Length

[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

ZHANG Ye. Research on Basic Mechanical Properties of Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.

[8] JGJ 55—2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].

JGJ 55—2011, Specification for Mix Proportion Design of Ordinary Concrete[S].

[9] GB/T 23265—2009, 水泥混凝土和砂浆用短切玄武岩纤维[S].

GB/T 23265—2009, Chopped Basalt Fiber for Cement, Cement Mortar and Concrete[S].

[10] 马银华, 易志坚, 杨庆国, 等. 基于砂浆收缩抗裂性能的混凝土纤维选型研究[J]. 混凝土, 2008(2): 102-105.

MA Yin-hua, YI Zhi-jian, YANG Qing-guo, et al. Research on Type Selection of Fiber Used in Cement Concrete on the Basis of the Shrinkage and Anti-crack Property of Cement Mortar [J]. Concrete, 2008(2): 102-105.

[11] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.

LI Ru-sheng. Non-equilibrium Thermodynamics and

Dissipative Structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.

[12] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26-37.

XU You-lin, SHEN Wen-du, WANG Hong. An Experimental Study of Bond-anchorage Properties of Bars in Concrete [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 26-37.

[13] 江见鲸, 李杰, 金伟良. 高等混凝土结构理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

JIANG Jian-jing, LI Jie, JIN Wei-liang. Theory of Advanced Concrete Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

[14] 洪小健, 张誉. 粘结滑移试验中的粘结应力的拟合法[J]. 结构工程师, 2000(3): 44-48.

HONG Xiao-jian, ZHANG Yu. The Fitting Method of the Smooth Bond Stress in the Bond-slip Test [J]. Structural Engineers, 2003(3): 44-48.

[15] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S]. GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].