

螺旋箍筋约束叠合剪力墙 14 mm 竖向钢筋 搭接性能试验研究

江佳斐, 廖 昊, 薛伟辰, 隋 凯

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对螺旋箍筋约束叠合剪力墙 14 mm 竖向钢筋搭接试件进行了拉拔试验, 共设计了 7 个试件. 为避免加载偏心, 试件采用 2 对 2 搭接方式, 试验参变量为搭接长度($0.25l_a$, $0.45l_a$, l_a 为钢筋基本锚固长度), 配箍率(0, 0.8%, 2.8%, 3.1%)和混凝土强度(C45, C55). 其中, 4 个试件的搭接钢筋预先开槽, 重点研究不同参变量对粘结应力分布规律的影响. 搭接长度为 $0.45l_a$ 试件的试验结果表明: 当配箍率为 0.8% 时, 搭接试件叠合界面不发生劈裂破坏, 钢筋屈服后拔出, 峰值强度和对应滑移值较无箍筋约束试件的特征值分别提升了 27.1%、158.4%; 当配箍率从 0.8% 增加到 2.8% 时, 峰值强度和对应滑移值分别提升了 2.1%、38.1%, 钢筋被拔出并拉断. 开槽钢筋的搭接性能试验结果表明: 搭接长度为 $0.45l_a$ 时, 试件的应力分布均呈多峰型分布, 无箍筋试件的最大应力峰靠近自由端, 2.8% 配箍率试件的最大应力峰靠近加载端, 两试件最大应力峰峰值分别为 20.9 MPa, 20.2 MPa, 相差 3%; 搭接长度为 $0.25l_a$, 配箍率为 3.1% 时, 两种不同混凝土强度试件的粘结应力分布均呈双峰型分布, 两试件最大应力峰峰值分别为 17.37 MPa, 17.5 MPa, 相差 1%.

关键词: 钢筋搭接; 螺旋箍筋; 拉拔试验; 搭接强度; 搭接长度; 粘结应力分布

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0251-06

Experimental study on performance of 14 mm reinforcement splices confined by spiral stirrups in the composite concrete shear wall

JIANG Jiafei, LIAO Hao, XUE Weichen, SUI Kai

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The pull-out test was carried out on 14 mm reinforcement splice specimens confined by spiral stirrups in the composite concrete shear wall, and seven specimens were designed with the test variables of splice length ($0.25l_a$, $0.45l_a$, l_a is the basic anchorage length), spiral ratio (0, 0.8%, 2.8%, 3.1%), and concrete strength (C45, C55). To avoid the eccentric loading, the specimens were designed as a double lapping configuration. Among them, four specimens had the slotted reinforcement to investigate the bond stress distribution. The test results of specimens with $0.45l_a$ splice length showed that no splitting failure along the concrete interface was observed in the specimens with spiral ratio of 0.8%. The reinforcement was pulled out after yielding, and the peak load and the corresponding slip increased by 27.1% and 158.4% respectively compared with those of specimen without spiral stirrups. When the spiral ratio increased from 0.8% to 2.8%, the peak load and the corresponding slip value of specimen increased by 2.1% and 38.1%, and the reinforcement ruptured after it was pulled out. The test with slotted reinforcement demonstrated that when the splice length was $0.45l_a$, the bond stress distribution was a multi-peak type. The maximum stress peak of the specimen without stirrups was close to the free end, and the location of maximum stress peak of the specimen with 2.8% stirrup ratio was close to the loaded end. The maximum stress peak values of the two specimens were 20.9 MPa and 20.2 MPa respectively, with a difference of 3%. When the splice length was 0.25 and the spiral ratio was 3.1%, the bond stress distributions of two specimens with different concrete strength were double-peak distribution, and the maximum stress peaks of two

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2016YFC0701403)

第一作者: 江佳斐(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土木工程中 FRP 应用, 预制混凝土等方面的研究. E-mail: jfjiang@tongji.edu.cn

通信作者: 薛伟辰(1970—), 男, 博士, 教授. 主要从事预制混凝土、现代预应力混凝土、土木工程中 FRP 应用等方面的研究. E-mail: wxue@tongji.edu.cn

specimens were 17.37 MPa and 17.5 MPa, respectively, with a difference of 1%.

Key words: reinforcement splice; spiral stirrups; pull-out test; splice strength; splice length; distribution of bond stress

预制剪力墙结构是我国预制混凝土高层住宅中应用最为广泛的结构^[1]。根据墙体构造的不同,可分为预制实心剪力墙、预制叠合剪力墙、预制混凝土夹心保温剪力墙。预制叠合剪力墙是由预制板通过后浇细石混凝土叠合层连接形成整体的剪力墙。影响预制叠合剪力墙受力性能的关键是竖向连接方式。目前,双面叠合剪力墙纵筋的连接方式主要为插筋连接,搭接长度为基本锚固长度的1.2倍^[2]。墙体竖向拼接时仍然容易受搭接长度的影响。相比于插筋连接,螺旋箍筋约束钢筋搭接可有效降低钢筋搭接长度。刘硕等^[3]针对叠合剪力墙设计了螺旋箍筋约束钢筋搭接试件,研究了 $1.0l_a$ (l_a 为基本锚固长度)搭接长度、1.4%配箍率下钢筋等级HRB400和HRB500、搭接钢筋直径10 mm和14 mm的搭接性能。Jiang等^[4-5]通过足尺剪力墙抗震性能试验研究,证明了采用该搭接形式的预制叠合剪力墙具有良好的抗震性能,墙体分布区和边缘构件中采用的配箍率分别1.75%和1.96%,搭接长度为1.0倍的抗震锚固长度。

目前,不同配箍率下最小搭接长度的研究主要集中在现浇混凝土构件和预制实心构件。Einea等^[6]对现浇混凝土中螺旋箍筋约束钢筋搭接性能展开了拉拔试验研究。研究表明:螺旋箍筋约束可降低搭接长度,搭接长度与搭接钢筋强度线性相关,和混凝土强度成反比,并提出了箍筋配箍率7.1%时,最小搭接长度的计算公式。由于高强灌浆料与钢筋的粘结性能和钢筋与普通混凝土的不同,国内学者开展了相关的搭接性能研究。马军卫等^[7]设计了144个螺旋箍筋约束钢筋搭接试件,研究了搭接长度($1.0l_a \sim 1.4l_a$)、配箍率(1.62%~4.52%)等参数对该连接方式下的钢筋破坏模式和搭接强度的影响。姜洪斌等^[8-10]分析了不同搭接长度($0.29l_a \sim 1.4l_a$)、配箍率(0~9.4%)对HRB400钢筋搭接性能的影响。研究表明:配箍率从0提升到2.1%,搭接试件的峰值荷载提升了53.0%,当配箍率继续提升至9.4%,峰值荷载提升18%。江佳斐等^[11]基于现有的螺旋箍筋约束浆锚搭接性能试验数据,选取钢筋屈服前发生拔出破坏的试件,回归得到了搭接钢筋与混凝土的平均粘结强度的经验公式。基于此,提出了HRB400钢筋的最小搭接长度计算公式。计算值表明:提高配箍率可显著降低最小搭接长度,以HRB400钢筋为例,配箍率从0

增加到2.1%时,最小搭接长度可从 $30.5d$ (d 为钢筋直径)降低至 $16.0d$,当配箍率继续提升至9.4%,搭接长度可降低至 $10.9d$ 。

根据《Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension》(ACI 408R-03)规范^[12],针对梁式搭接试验,给出了考虑混凝土梁抗剪箍筋作用的搭长度的计算公式。Einea等^[6]发现:箍筋配箍率7.1%时,基于螺旋箍筋约束钢筋搭接试验得到的搭接长度公式计算值是ACI 408R-03计算公式计算值的67.6%~78.1%。但国内外现行的现浇混凝土结构设计规范中尚未规定该搭接形式的搭接长度设计值。螺旋箍筋约束浆锚搭接的设计要求则主要在中国地方标准中有相关的规定。北京市制定《装配式剪力墙结构设计规程》(DB11-1003-2013)^[13]针对不同的钢筋直径给出了用于浆锚搭接的螺旋箍筋最小配筋率,并规定最小搭接长度为 $1.0l_a$;黑龙江省制定《预制装配式房屋混凝土剪力墙技术规程》(DB23/T 1813-2016)^[14]规定螺旋箍筋约束浆锚搭接的最小搭接长度为 $1.0l_a$,并规定箍筋配箍率不小于1.0%。上述规定,限于高强灌浆料抗压强度为60~80 MPa的连接形式,且尚不考虑不同配箍率与搭接长度的相关性。

目前,搭接性能的研究普遍关注拉拔强度和滑移,并未探究搭接钢筋与混凝土的粘结应力分布规律。虽然,Sagan等^[15]早在1988年提出了搭接钢筋与混凝土的粘结应力分布与锚固钢筋的显著不同,呈马鞍形分布,但该分布规律尚未得到试验验证,还需开展进一步的研究。

综上所述,螺旋箍筋约束可有效降低钢筋的搭接长度,从而可简化预制混凝土结构构件的现场拼装。但仍然存在以下问题:(1)由于叠合混凝土结构与上述混凝土结构基材的不同,考虑不同配箍筋率的搭接长度设计值的依据尚不充分;(2)搭接钢筋与混凝土的粘结应力分布规律尚不清晰。基于此,针对叠合剪力墙,设计了7个2对2搭接试件,分别研究不同螺旋箍筋配箍率对钢筋搭接性能的影响和不同配箍率、搭接长度与混凝土强度对该搭接方式下混凝土钢筋粘结应力分布规律的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了7个钢筋搭接试件。试件编号以

L45R8C45-Y, L45R8C45-N 为例说明, 其中“L45”表示搭接长度为 $0.45l_a$, “R8”表示箍筋配箍率为 0.8% , “C45”表示预制侧混凝土立方体强度, “Y”和“N”分别表示搭接钢筋开槽处理和未做开槽处理. 根据不同的研究目的, 分为 A 组和 B 组(表 1). A 组研究不同配箍率($0, 0.8\%, 2.8\%$)对钢筋搭接的破坏模式、搭接性能的各类指标的影响, 搭接长度为 $0.45l_a$, 搭接区采用 C45 预制混凝土和相同强度的现浇细石混凝土. B 组研究该连接方式下搭接筋的粘结应力分布, 通过钢筋开槽获取搭接区域钢筋的粘结应力. 其中, B 组根据不同因素对粘结应力分布影响又分为 B-1 组与 B-2 组, B-1 组研究配箍率($0, 0.8\%, 2.8\%, 3.1\%$)对应力分布影响, B-2 组研究混凝土强度(C45, C55)对应力分布影响, B-1 和 B-2 中的 L45R28C45-Y 和 L25R31C45-Y 试件研究不同搭接长度($0.45l_a, 0.25l_a$)对搭接钢筋与混凝土粘结应力分布的影响.

试验基于螺旋箍筋约束浆锚搭接试验得到的搭接强度预测公式^[11], 以搭接破坏时钢筋不屈服为设计原则, 设计了 2 组搭接长度($0.25l_a, 0.45l_a$)和包括无箍筋组在内的 4 组箍筋配箍率($0, 0.8\%, 2.8\%, 3.1\%$), 试件参数表见表 1. 试件详细情况如下: (1)采用 2 对 2 搭接钢筋形式, 以避免 1 对 1 搭接钢筋偏心产生的附加弯矩对钢筋搭接性能的影响; (2)试件模拟叠合剪力墙构造特点, 两侧为普通混凝土预制层, 中间为细石混凝土现浇层, 预制侧混凝土设计强度为 C45、C55, 现浇侧混凝土采用等同预制侧强度的设计原则; (3)根据剪力墙边缘构件常用的钢筋直径, 选取搭接钢筋直径 14 mm, 钢筋等级为 HRB400 级; (4)螺旋箍筋覆盖搭接长度, 并在搭接区域外设置足够的锚固长度, 钢筋等级为 HPB300 级.

试件施工图如图 1 所示. 设计强度为 C45、C55 的混凝土实测强度分别为 44.2 MPa、54.1 MPa. 钢筋的实测力学性能见表 2.

表 1 试件参数表

Tab. 1 Details of specimens			
分组	试件编号	搭接长度/ l_a	配箍率/ $\%$
A	L45R0C45-N	0.45	0
	L45R8C45-N	0.45	0.8
	L45R28C45-N	0.45	2.8
B	L45R0C45-Y	0.45	0
	L45R28C45-Y	0.45	2.8
	L25R31C45-Y	0.25	3.1
	L25R31C55-Y	0.25	3.1

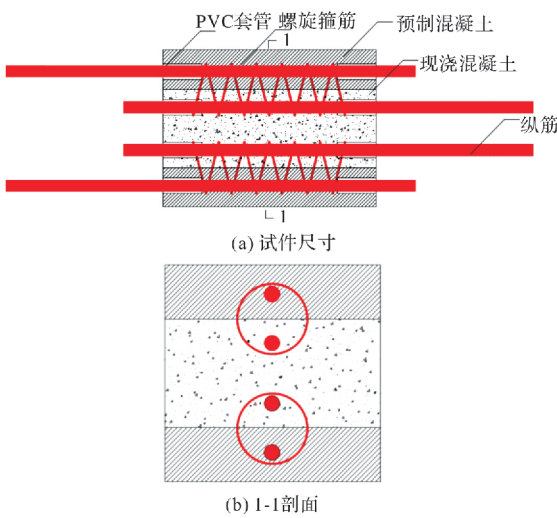


图 1 试件施工图

Fig. 1 Sketch of specimens

表 2 钢筋力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel bars

钢筋种类	屈服强度	极限强度	弹性模量
	f_y/MPa	f_u/MPa	$E_s/\text{MPa} \times 10^5$
HRB400	474	673	2.06
HPB300	475	557	2.07

1.2 加载装置与测点布置

试验采用同济大学试验室的微机控制作动器进行试验. 试件一端两钢筋通过转换钢板分别与作动器、底座铰接连接, 以确保上下拉拔方向在同一中心线上. 试验采用位移控制的单向单调加载方式.

试验测量内容包括: 荷载、钢筋自由端和加载端滑移, 最小保护层侧混凝土膨胀应变, 开槽钢筋应变. 其中, 钢筋滑移通过端部设置位移计和应变片测量; 沿搭接长度方向设置 4 个应变片测量最小保护层侧的混凝土膨胀应变; 根据文献[16-17], 通过搭接钢筋开槽等间距内置应变片获取搭接区搭接筋的应变分布.

2 试验结果与分析

2.1 受力过程与荷载-滑移曲线

A 组试件破坏过程基本相同, 钢筋滑移平均值均超过 1 mm, 钢筋出现了显著的拔出现象. 受力阶段分为弹性阶段、滑移阶段、破坏阶段. 各试件的荷载-滑移曲线见图 4, 滑移为四根钢筋加载段滑移值的平均值.

在弹性阶段, 试件的荷载-位移曲线基本近似直线, 试件到达峰值荷载的 80% 左右时, 随后进入滑移阶段, 此时钢筋未屈服. 在滑移阶段, 荷载缓慢增加, 钢筋与混凝土间出现较大滑移, 钢筋被缓慢拔出, 试件 L45R0C45-N 在滑移值达到 5.21 mm 时预制与现浇混凝土界面发生劈裂破坏,

L45R8C45-N、L45R28C45-N 的最小保护层侧混凝土表面出现纵向微裂缝见图 5(a). 在破坏阶段, 试件 L45R8C45-N 钢筋屈服后拔出破坏见图 5(b), 试件 L45R28C45-N 钢筋拉断.

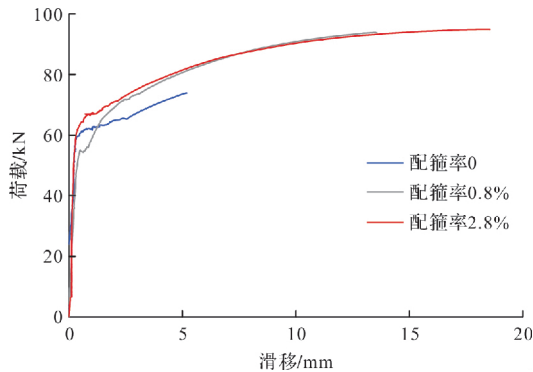
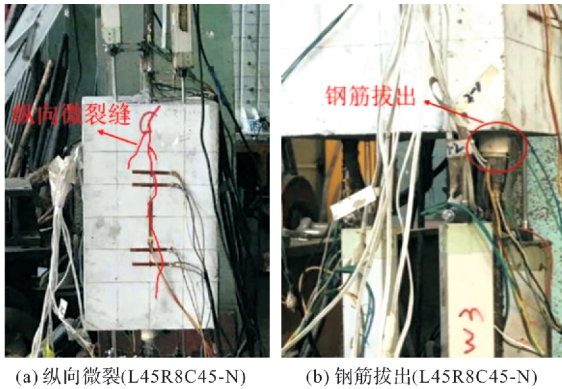


图4 荷载-滑移曲线

Fig. 4 Pull-out force vs. slip curves



(a) 纵向微裂(L45R8C45-N)

(b) 钢筋拔出(L45R8C45-N)

图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure pattern of specimens

从受力过程和破坏形态来看, 配箍率不小于 0.8%、搭接长度不小于 $0.45l_a$ 的钢筋搭接形式可确保搭接钢筋在叠合混凝土内的有效传力.

2.2 峰值强度与滑移

各试件的平均峰值强度和对应滑移值随配箍率的变化规律见图 6 所示.

根据特征值变化规律图可知:

(1) 钢筋屈服时, 当配箍率从 0 增加到 0.8% 时, 屈服强度对应的滑移值(s_y)提升了 139.8%, 当配箍率从 0.8% 增加到 2.8% 时, s_y 基本持平;

(2) 破坏时, 当配箍率从 0 增加到 0.8% 时, 峰值强度和对应滑移值(s_{max})分别提升了 27.1%、158.4%, 箍筋约束作用效果显著; 当配箍率从 0.8% 增加到 2.8% 时, 峰值强度和 s_{max} 分别提升了 2.1%、38.1%, 增长率均显著降低;

总体而言, 在低配箍率水平下, 箍筋对搭接性能特征值的影响较为显著; 当配箍率提升到一定程度时, 箍筋的约束作用有限, 增幅降低.

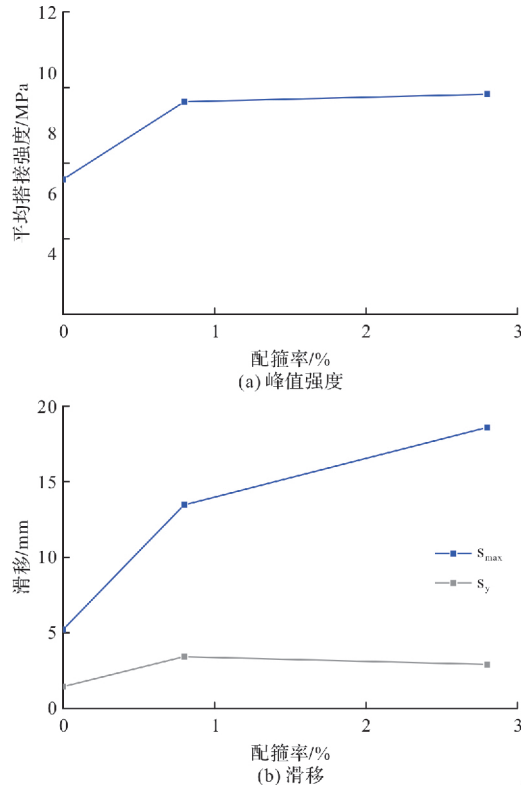


图6 特征值变化规律

Fig. 6 Characteristic relation variation

2.3 混凝土膨胀应变

根据描述混凝土钢筋粘结机理的厚壁圆筒理论, 钢筋周向混凝土的膨胀应变与混凝土钢筋界面法向压力相关. 本试验通过外贴应变片, 探究不同配箍率对箍筋和混凝土约束作用的影响. 大部分试件在荷载达到峰值荷载 80% 时, 滑移增长较快, 此时混凝土的膨胀应变也增长较快, 因此选择 80% 峰值荷载和峰值荷载两个阶段分析混凝土膨胀应变沿搭接长度方向的分布特点. 但由于部分试件的混凝土应变片在快速增长长期提前破坏未能获取完整的应变分布, 而未列为本节的分析对象. 混凝土表面膨胀应变随搭接位置变化曲线如图 7 所示, l_s 为搭接长度.

根据以上混凝土表面膨胀应变在纵向的分布曲线图可知:

(1) 在同一级荷载下, 混凝土应变随搭接方向单调变化, 加载端混凝土膨胀变形大于自由端混凝土膨胀变形. 由此可见, 混凝土和箍筋的约束力沿搭接方向的分布也呈现不均匀性, 约束力在靠近加载端区域较大;

(2) 在同一位置处, 混凝土应变随荷载增加都呈单调递增趋势, 说明对搭接钢筋的约束力逐渐增强.

(3) 相同搭接长度下, 80% 峰值荷载时, 膨胀应变随配箍率的增加而增加, 而到峰值荷载时,

规律相反. 这是由于配箍率越大, 箍筋对混凝土膨胀应变的约束作用越强, 混凝土膨胀应变发展速度越慢.

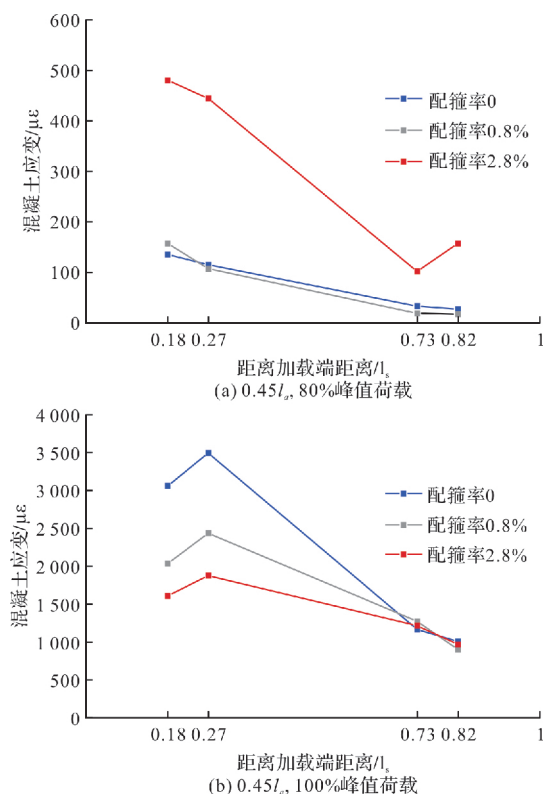


图7 混凝土表面膨胀应变分布

Fig. 7 Dilation strain distribution on concrete surface

2.4 粘结应力的分布

搭接区钢筋应力的变化受钢筋与混凝土的粘结应力分布的影响. 明确粘结应力沿搭接长度方向的分布规律是研究钢筋搭接机理及建立粘结本构关系的基础.

搭接钢筋与混凝土的粘结应力通常采用钢筋开槽内置多个应变片获得. 具体步骤如下: ①以两个应变测点间的钢筋为隔离体、计算隔离体区段的平均粘结应力; ②以相邻两应变片的中点为控制点, 根据隔离体区段的平均粘结应力为控制点粘结强度, 相邻控制点间粘结应力分布平滑曲线连接. 图8为B组各试件不同荷载水平的应力分布, 其中, 60%峰值荷载为钢筋屈服前, 80%和100%峰值荷载为钢筋屈服后.

根据以上试件应力分布图可知:

(1) 钢筋屈服前和屈服后, 粘结应力分布形式基本相近.

(2) 当搭接长度为 l_d 时, 配箍率为0的最大应力峰靠近自由端; 配箍率为2.8%的最大应力峰靠近拉拔端.

(3) 当搭接长度为 $0.45l_d$ 时, 分布呈多峰型分

布, 配箍率0, 0.8%两试件最大应力峰峰值分别为20.9 MPa, 20.2 MPa, 相差3%. 配箍率对应力峰峰值强度的影响不显著.

(4) 搭接长度为 $0.25l_d$ 时, 分布呈现双峰型分布, 混凝土强度C45, C55两试件最大应力峰峰值分别为17.37 MPa, 17.5 MPa, 相差1%. 混凝土强度对应力峰峰值强度的影响不显著.

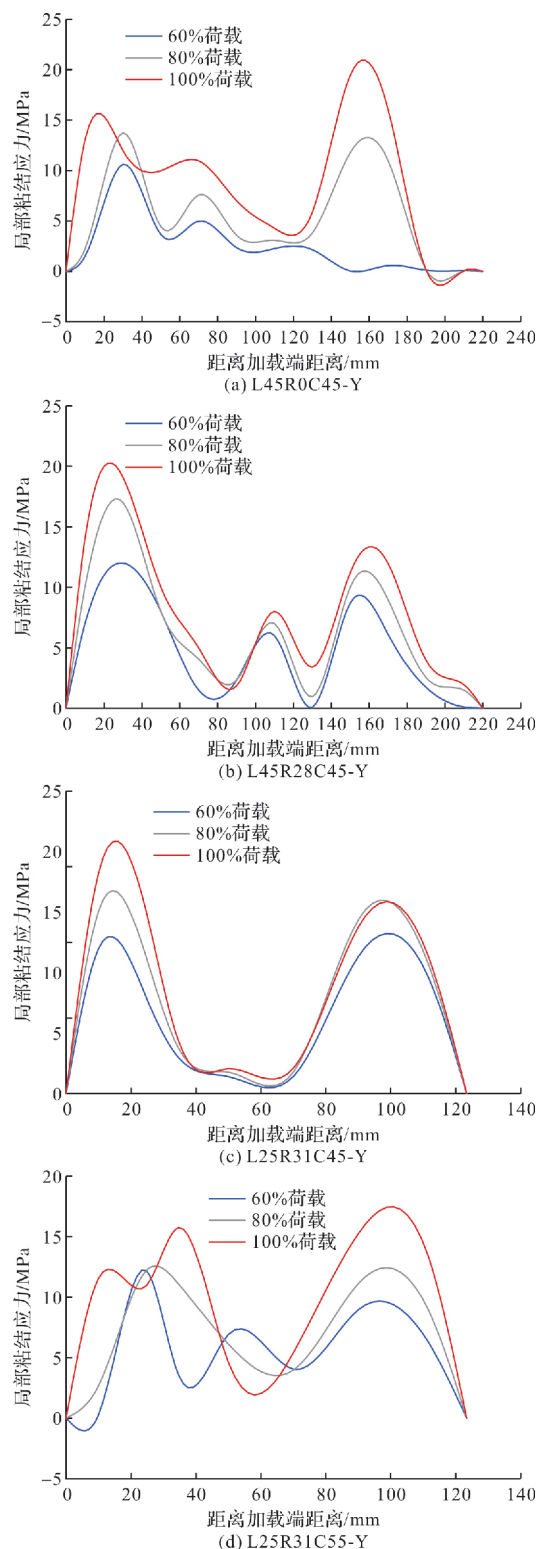


图8 钢筋粘结应力分布

Fig. 8 Bond stress distribution of reinforcement

3 结论

针对螺旋箍筋约束叠合剪力墙竖向钢筋搭接性能,设计了10个直径14 mm的2对2钢筋搭接试件,分析了不同配箍率对短搭接长度下钢筋搭接性能的影响和不同配箍率、搭接长度与混凝土强度对该搭接方式下混凝土钢筋粘结应力分布规律的影响,得到以下结论:

(1) 对于搭接长度为 $0.45l_a$ 试件,当螺旋箍筋配箍率不小于0.8%时,搭接破坏模式为钢筋屈服或钢筋拉断后拔出破坏,而无箍筋试件的破坏模式为预制与现浇混凝土界面劈裂破坏;

(2) 箍筋约束可显著增加搭接强度与滑移值,峰值强度与滑移值随配箍率增长而增加,但增幅逐渐降低;

(3) 最小保护层厚度侧混凝土的膨胀应变沿搭接长度的变化规律为从加载端向自由端单调递减;随着箍筋率的增大,箍筋对混凝土膨胀应变的约束作用越显著,混凝土膨胀应变发展速度也减慢;

(4) 搭接长度为 $0.25l_a$ 时,搭接钢筋与混凝土的粘结应力沿搭接长度方向的分布呈现双峰型;当搭接长度为 $0.45l_a$ 时,粘结应力分布呈多峰型.配箍率影响最大应力峰的位置,但配箍率和混凝土强度对应力峰峰值的影响不显著.

由于本文设计的试件并未发生屈服前拔出,因此仍有必要开展不同钢筋直径、配箍率和混凝土强度对搭接长度小于 $0.45l_a$ 的叠合剪力墙竖向钢筋搭接性能的试验研究,为建立最小搭接长度设计公式与搭接本构模型提供依据.

参考文献 References

- [1] 薛伟辰,胡翔. 预制混凝土剪力墙结构体系研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2):44-55.
XUE Weichen, HU Xiang. State of the art of studies on precast concrete shear wall structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2):44-55.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T 51231—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of HURD of China. Technical standard for assembled buildings with concrete structure; GB/T 51231—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [3] 刘硕,胡翔,周鑫,薛伟辰. 直径10mm和14mm钢筋约束搭接连接力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2017, 46(4):13-17.

- LIU Shuo, HU Xiang, ZHOU Xin, et al. Test of mechanical properties of constraint lap connection of steel bars[J]. Construction Technology, 2017, 46(4): 13-17.
- [4] JIANG J, LUO J, XUE W, et al. Seismic performance of precast concrete double skin shear walls with different vertical connection types[J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112911. 1-13.
- [5] JIANG J, XUE W, LUO J, et al. Hysteresis behavior of precast concrete composite shear walls with improved vertical connections[J]. Structures, 2022, 36: 533-548.
- [6] EINEA A, YEHIA S, TADROS M K. Lap splices in confined concrete[J]. ACI-Structural Journal, 1999, 96(6): 947-955.
- [7] 马军卫,尹万云,刘守城,等. 钢筋约束浆锚搭接连接的试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 2:32-35, 79.
MA Junwei, YIN Wanyun, LIU Shoucheng, et al. Experimental study on constraint grout-filled lap connection of steel bar[J]. Building Structure, 2015, 2: 32-35, 79.
- [8] 张海顺. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固搭接试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
ZHANG Haishun. Experimental study of plug-in filling hole for lap-joint of steel bar of PC concrete structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] 赵培. 约束浆锚钢筋搭接连接试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHAO Pei. Experimental research on restraint grouting-anchoring overlap-joint of steel bar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [10] 倪英华. 约束浆锚连接极限搭接长度试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
NI Huaying. Experimental research on the ultimate lap length of the restraint grouting-anchoring overlap-joint of steel bar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 江佳斐,隋凯,马川峰;等. 预制装配式混凝土螺旋箍筋约束浆锚钢筋搭接性能研究现状[J], 施工技术, 2018(12): 44-47.
JIANG Jiafei, SUI Kai, MA Chuanfeng, et al. Review of grout-filled rebar splicing confined by spiral stirrups for precast concrete[J]. Construction Technology, 2018(12): 44-47.
- [12] American Concrete Institute (ACI). Bond and development of straight reinforcing bars in tension; ACI 408R-03[S]. MI: Farmington Hills, 2003.

(下转第290页)

- 研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- FU Xuebao, Study on long-term performance of CFST short column under high stress state under axial compression[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [16] 于清,韩林海,张铮.长期荷载作用对 FRP 约束混凝土轴心受压构件力学性能的影响[J]. 中国公路学报, 2003,16(3):58-63.
- YU Qing, HAN Linhai, ZHANG Zheng. Effects of long-term loading on mechanical properties of FRP confined concrete axial compression members[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 58-63.
- [17] WANG Y F, ZHANG D J. Creep-effect on mechanical behavior of concrete confined by frp under axial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009 (11), 1315-1322.
- [18] 万里.长期荷载作用下 CFRP 约束混凝土的力学性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- WAN Li, Mechanical properties of CFRP-confined concrete under long-term loading [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [19] ZHANG D J, WANG Y F, MA Y S. Compressive behaviour of FRP-confined square concrete columns after creep[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 1957-1963.
- [20] 陈光明,陆奕辰,谢攀,等. FRP-混凝土-钢双壁空心桥墩分析及设计方法研究[J]. 中国公路学报,2022,35 (2):12-38.
- CHEN Guangming, LU Yichen, XIE Pan, et al. Analysis and Design Method of FRP- Concrete-Steel Double skin tubular Piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 12-38.
- [21] 赵程. FRP-混凝土-钢双壁空心柱轴压徐变性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- ZHAO Cheng, Experimental study on creep performance of FRP-concrete-steel double skin tubular column under axial compression[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [22] American Society for Testing and Materials. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete ASTM C469/C469M-14 [S]. Pennsylvania, USA: ASTM International, 2014
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验(第1部分: 室温试验方法): GB/T228. 1-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- China Association for Standardization. Tensile testing of metallic materials (Part1: Test methods at room temperature): GB/T228. 1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [24] 柳钦. FRP-高性能混凝土-钢双壁空心管短柱轴压性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2021.
- Liu Qing, Study on axial compression performance of FRP-high performance concrete-steel double skin tubular stub column[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

(编辑 沈 波)

(上接第 256 页)

- [13] 北京市规划委员会. 装配式剪力墙结构设计规程: DB11/1003—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2014.
- Beijing Planning Commission. Design specification for precast concrete shear wall structure: DB11/1003—2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [14] 黑龙江省住房和城乡建设厅. 预制装配整体式房屋混凝土剪力墙结构技术规范: DB23/T1813—2016[S]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2016.
- Heilongjiang Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Technical specification for concrete shear wall structure assembled with precast components: DB23/T1813—2016[S]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2016.
- [15] SAGAN V, GERGELYE P, WHITE R N. Behavior and design of noncontact lap splices subjected to repeated inelastic tensile loading[R]. Report No. 858-5. Ithaca : Department of Structural Engineering Research, Cornell University, 1988.
- [16] 徐有邻,沈文都. 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 Youlin, SHEN Wendu. Experimental study on bond anchorage performance of reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 26-37.
- [17] 高丹盈,陈刚, Hadi Muhammad Najib Sadraddin,等. 钢筋与钢纤维混凝土的黏结-滑移性能及其关系模型[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7):132-139.
- GAO Danying, CHEN Gang, Hadi Muhammad Najib Sadraddin, et al. Bond-slip behavior and constitutive model between rebar and steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7):132-139.

(编辑 沈 波)