

不同界面下梁端直剪型锚栓钢板剪切承载力 试验研究

全学友^{1,2}, 罗 晨^{1,2}, 刘佳迪³, 黄辉辉⁴

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 四川省建筑科学研究院有限公司, 四川 成都 610000; 4. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 开展梁端直剪型锚栓钢板剪切承载力加固试验研究。试验序列包含 1 个对比试验段、5 个剪切承载力加固试验段。试验参数包括界面条件和钢板高度。结果表明: 受力过程中钢板与混凝土之间的黏结界面终会剥离, 不同黏结界面不影响剪切承载力; 增加钢板高度和配套的直剪型锚栓数量能有效提高混凝土梁的剪切承载力。直剪型锚栓钢板剪切承载力加固存在 2 种机制, 约束机制通过限制斜裂缝宽度提高剪切承载力, 而组合受力机制通过钢板将一部分剪力直接传入支座。加固钢板高度较小时以约束机制为主, 加固钢板高度较大时, 2 种加固机制联合发挥作用。

关键词: 结构加固; 锚栓钢板加固; 直剪型锚栓钢板加固; 界面条件; 约束机制; 组合受力机制

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

Experimental Study on Shear Capacities of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Direct-shear-bolted Side-plates near Beam Ends Under Different Interfacial Conditions

QUAN Xueyou^{1,2}, LUO Chen^{1,2}, LIU Jiadi³, HUANG Huihui⁴

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Sichuan Institute of Building Research Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 4. Guangdong Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: This paper presents a test program of shear capacities of reinforced concrete beam strengthened by direct-shear-bolted side-plates near beam ends. The test program consists of one control shear span and five shear

spans strengthened in shear. Test parameters involve interfacial conditions and depth of side-plates. Test results show that all kinds of adhesion interfaces are eventually de-bonded in loading process, without affecting shear capacities whether the adhesion is weak or strong. Shear capacities are effectively improved by increasing the plate depth and the number of corresponding direct-shear bolts. There are two mechanisms in the shear strengthening of direct-shear-bolted side-plates system, i.e., the constraint mechanism and the composite action mechanism. The constraint mechanism takes effect by constraining the development of diagonal crack width, and in the composite action mechanism the bolted side-plates directly transfer part of the shear force to the support. Steel plates with lower depth are mainly in the constraint mechanism, while steel plates with higher depth work both in the constraint mechanism and composite action mechanism.

Keywords: structural strengthening; strengthening with bolted steel plates; strengthening with direct-shear-bolted side-plates; interfacial conditions; constraint mechanism; composite action mechanism

结构加固改造工程通常涉及对构件承载力的加固。在混凝土结构加固领域, 梁的承载力加固主要采用增大截面、粘贴纤维复合材料及粘贴钢板等方法。增大截面法工艺环节多, 工期长, 造价相对较高; 粘贴纤维复合材料或粘贴钢板具有施工方便快捷等优点, 但存在加固材料易于剥离^[1-3]以及在湿热环境下界面性能易于退化等缺点^[4-6]。由此锚栓钢板加固技术应运而生, 其基本思路是: 利用锚栓将加固

收稿日期: 2022-05-25

第一作者: 全学友, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为既有建筑检测、鉴定与加固。

E-mail: quanxueyou@163.com

通信作者: 刘佳迪, 助理工程师, 工学硕士, 主要研究方向为既有建筑检测、鉴定与加固。

E-mail: liujiadi06@163.com



论文
拓展
介绍

钢板固定在混凝土构件表面,构件受力变形时,锚栓以剪切受力方式带动加固钢板受力,从而摆脱对黏结界面的依赖。Roberts 等^[7]较早对锚栓钢板加固梁的抗弯能力进行试验研究。结果表明,在梁的受拉面布置锚栓钢板可以提高构件的抗弯能力。2000 年以后, Ahmedt 等^[8]、Oehlers 等^[9]、Barnes 等^[10]、Su 等^[11]、Li 等^[12-14]和蔡自伟等^[15]对在梁侧面布置锚栓钢板加固梁的抗弯承载力、剪切承载力进行了试验研究。梁侧面布置的锚栓钢板能有效加固梁的抗弯承载力和剪切承载力,但加固钢板与混凝土之间存在变形不协调现象。吴振丽等^[16]在受剪性能试验研究基础上,对梁侧面锚栓钢板加固采用有限元方法进行了参数分析。Jiang 等^[17]、姜常玖等^[18]对受火后的混凝土梁用梁侧锚栓钢板加固剪切承载力,刘鑫等^[19]用梁侧锚栓钢板加固混凝土梁并进行受火后的剪切承载力试验,均显示了良好的加固效果。

加固钢板与混凝土之间变形不协调现象来源于两方面,即锚栓与加固钢板安装孔壁之间存在的间隙^[20-21]和锚栓受剪力作用后发生的剪切变形。Su 等^[22]认为,这种不协调现象会削弱加固钢板与混凝土之间的协同工作性能。为了减小加固钢板与混凝土之间变形不协调现象,全学友^[23]提出了直剪型锚栓,消除锚栓杆体与加固钢板安装孔壁之间的间隙。随后,全学友等^[24]在简支梁受拉面布置直剪型锚栓钢板并对梁的抗弯承载力加固进行试验研究。结果表明,直剪型锚栓钢板在显著提高加固梁抗弯承载力的同时提高了抗弯刚度。

鉴于锚栓与加固钢板安装孔壁间隙对协同受力的不利影响以及实际工程中由于横向联系或横向次梁妨碍加固钢板在梁侧面的全长布置,在最大剪力分布范围内于梁的侧面布置直剪型锚栓钢板,对加固钢板与基层混凝土之间强弱不同的界面开展剪切承载力加固试验,探索梁端直剪型锚栓钢板对梁的剪切承载力加固效果及加固机制。

1 试件设计

以探索加固方法的可行性为目的,将试验参数聚焦在锚栓钢板尺寸以及钢板与混凝土梁的界面特性两方面。采用直接对比试验方案研究不同参数对破坏形态和剪切承载力的影响。如图 1 所示,试件为简支梁,两端各进行一次剪切试验。当在荷载 1 位置加载完成试验段 1 的剪切试验后,再在荷载 2 位置加载完成试验段 2 的剪切试验,荷载 1 和荷载 2 不

同时存在。试件跨度 b 略大于 a 。假定试验段 1 承载力加固的提高幅度小于 50%,则在试验段 2 中造成的剪力低于基准试件自身剪切承载力的 75%,不会影响试验段 2 剪切承载力的发挥。

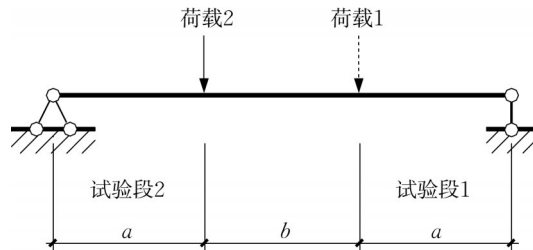


图 1 同一试件的 2 次剪切试验

Fig.1 Two separate shear tests on one specimen

1.1 基准试件

试验共包含 3 根混凝土基准试件 SP-1~SP-3,截面尺寸和配筋完全相同,如图 2 所示。基准试件混凝土设计等级为 C30,采用同一泵车预拌混凝土浇筑;钢筋型号为 HRB400;试验段箍筋直径为 8 mm,间距为 150 mm;各试验段按发生剪切破坏设计,梁弯曲破坏对应的梁端剪力标准值至少为 1.5 倍基准试件剪切承载力标准值。

1.2 加固试件

加固试件如图 3 所示,有关试验参数如表 1 所示。试验参数包括加固钢板立面高度和钢板与混凝土间的界面条件。加固钢板在试验段两侧面对称布置,高度分别为 200 mm 和 300 mm,厚度均为 5 mm,材质 Q235。钢板与混凝土间设计了 4 种界面条件:①无黏结,代号 N;②压力灌注改性环氧树脂浆液,代号 E;③压力灌注高强度低收缩水泥浆液,代号 C;④清除钢板覆盖范围深度约 12 mm 的表层混凝土,钢板内侧焊接钢质凸体,压力灌注高强度低收缩水泥浆液,代号 SC。

在 E、C 界面条件下,采用手提式砂轮清除基层混凝土表层浮浆,并采用电动钢丝刷除钢板表面的锈蚀。在 SC 界面条件下,钢板内侧表面焊接了直径 30 mm、高度 8 mm 的钢质管状凸体,如图 4 所示。钢质凸体埋入灌注的水泥浆料,在直剪型锚栓的配合下,界面条件 SC 相较于界面条件 E、C 具有更强的结合。

试验用直剪型锚栓规格均为 M16,采用 40Cr 合金钢加工。锚栓在混凝土内的植入深度统一为 8 倍锚栓直径,即 128 mm。

加固钢板按以下工艺安装:首先,采用磁感应仪扫描箍筋位置,确定钢板上锚栓孔的最终位置,完成

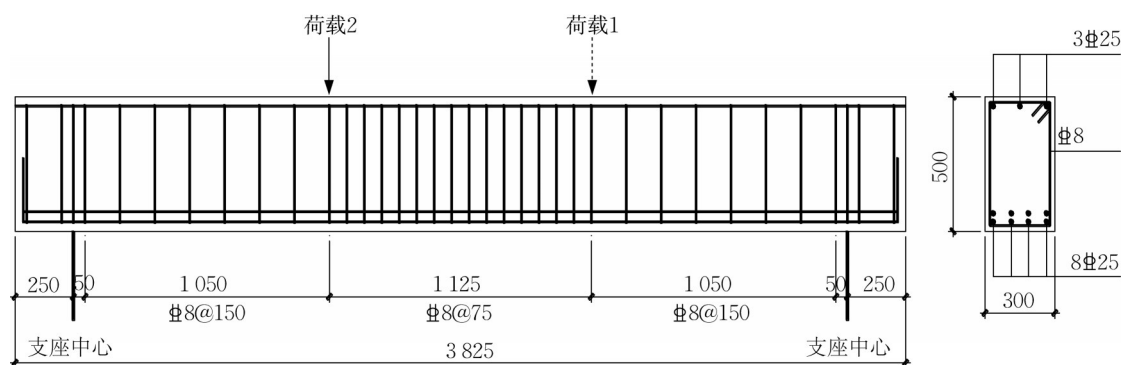


图2 基准试件设计图(单位:mm)

Fig.2 Design drawing of base members(unit: mm)

表1 试验梁参数

Tab.1 Test parameters for specimens

试件梁	试验段	加固钢板尺寸/ (mm×mm×mm)	钢板表面 特征	单侧锚栓数量/ (列数×每列数量)	锚栓规格	界面条件
SP-1	SP-1-0	不加固				
	SP-1-200N	1 000×200×5	平板	7×2	M16	无黏结
SP-2	SP-2-200C	1 000×200×5	平板	7×2	M16	灌注水泥浆料
	SP-2-200E	1 000×200×5	平板	7×2	M16	灌注环氧浆液
SP-3	SP-3-350SC	1 000×350×5	凸体钢板	7×3	M16	灌注水泥浆料
	SP-3-350E	1 000×350×5	平板	7×3	M16	灌注环氧浆液

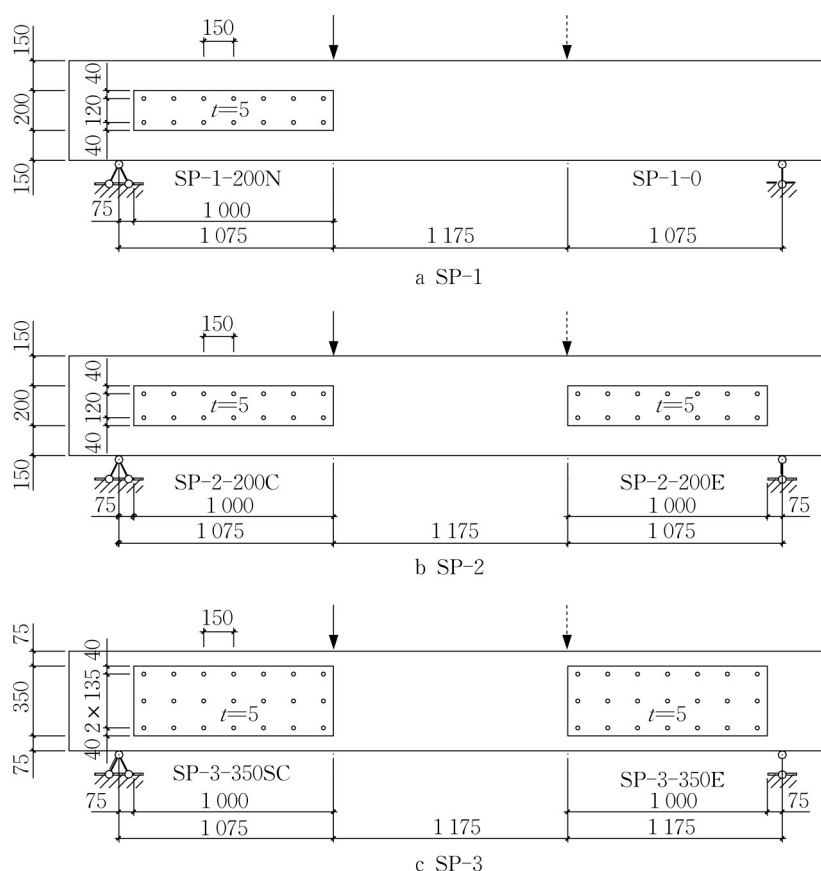


图3 加固试件钢板布置图(单位:mm)

Fig.3 Configuration of side plates for specimens(unit: mm)

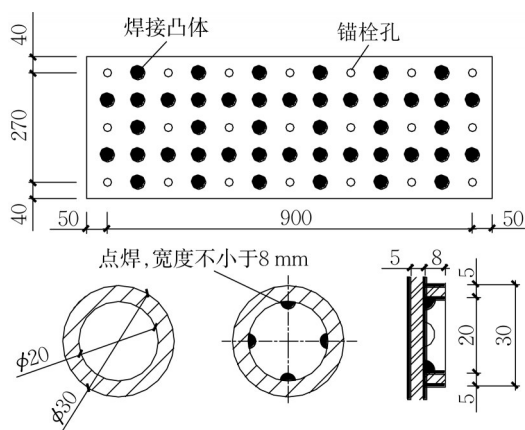


图4 SP-3-350SC的凸体钢板(单位: mm)

Fig.4 Side plate with welded convex for SP-3-350SC (unit: mm)

钢板钻孔;然后,采用夹具将钢板在试件侧面临时固定,确保打孔过程中钢板不移位;其次,穿过钢板孔,按垂直于钢板表面方向打孔至规定深度;再次,采用毛刷配合压缩空气吹尽孔内浮灰;最后,采用改性环氧锚固胶植入锚栓,适度拧紧螺帽,使具有特定构造的膨胀套消除锚栓杆体与钢板孔壁的间隙。

混凝土浇筑时预留3组边长150 mm的立方体试块,正式加载前检测了试块强度(龄期远大于28 d),其代表值分别为58.06、57.05、54.07 MPa,平均值为56.39 MPa,混凝土实际强度远高于设计等级C30;采用边长70.7 mm立方体的试块实测灌注水泥浆料的抗压强度,平均值为58.60 MPa;环氧树脂浆液采用符合国家相关标准的双组份胶^[25-26]。试验用各种钢材的实测力学性能指标如表2所示。

表2 钢材强度实测值

Tab.2 Measured strength of steel materials

钢材类型	直径或厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
箍筋	8	433.0	613.0
纵向钢筋	25	517.0	627.0
锚栓	16	537.0	840.0
钢板	5	337.0	470.0

2 试验结果

试验在重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室完成。竖向荷载由一台1 500 kN的液压千斤顶提供,加载装置如图5所示。为减小试件在水平方向受到的约束,两端支座均采用辊轴支座。

为了减小试验段1加载时试验段2混凝土出现斜裂缝的风险,采用高强螺杆对试验段2施加横向约束。横向约束体系由6根高强螺杆配合跨度方向

均匀布置在梁顶、梁底的各3根焊接型钢小梁组成,高强螺杆采用手动扳手适度预紧。为了验证该方法的有效性,先进行SP-1-200N试验段的剪切试验。SP-1-0试验段梁体侧面完全暴露,便于观察裂缝开展情况。在SP-1-200N试验段的剪切试验过程中,只在SP-1-0试验段靠近跨度中点附近观察到一条细微弯曲裂缝,未出现任何剪切裂缝,验证了保护措施的有效性。其余各试验梁进行试验段1的剪切试验时,试验段2钢板覆盖区域外均未发现剪切裂缝。所有试验段的剪切试验采用单调加载方式完成,并控制试验段1的破坏程度,确保顺利完成试验段2的加载试验。

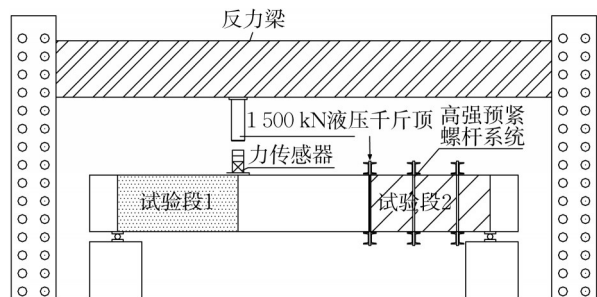


图5 加载装置示意图

Fig.5 Loading setup

2.1 破坏现象

钢板与混凝土之间黏结时,试验过程中能听到剥裂声,推断是钢板与混凝土之间黏结剥离引起的声响。将每个有黏结的试验段捕捉到的第一次声响对应的剪力称为剥离剪力。

试件SP-1、SP-2的4个试验段全部发生剪切破坏,以剪压区混凝土压碎为标志。试验段SP-3-350SC和SP-3-350E发生弯曲破坏,受压区混凝土压碎。

各试验段的剥离剪力、破坏形态和极限剪力如表3所示。表3中, V_{peel} 为剥离剪力, V_u 为极限剪力,极限剪力比为各试验段剪切承载力与试验段SP-1-0剪切承载力的比值。

表3 各试验段的承载力与破坏形态

Tab.3 Measured capacities and failure modes

试验段	V_{peel}/kN	V_u/kN	极限剪力比	破坏形态
SP-1-0		609.0	1.00	剪切破坏
SP-1-200N		730.8	1.20	剪切破坏
SP-2-200C	392.5	704.0	1.16	剪切破坏
SP-2-200E	413.0	730.8	1.20	剪切破坏
SP-3-350SC	379.0	791.7	1.30	弯曲破坏
SP-3-350E	487.2	778.2	1.28	弯曲破坏

2.2 荷载-挠度曲线

图6为各试验段实测的荷载-挠度曲线。由图6可见,未加固试验段SP-1-0的刚度最低,SP-1-200N次之,其余各试验段在达到极限剪力前或纵筋屈服前的刚度大致相当。发生剪切破坏的各试验段,一旦达到峰值后荷载立即下降,而发生弯曲破坏的试验段SP-3-350E和SP-3-350SC表现出了更好的持荷能力。

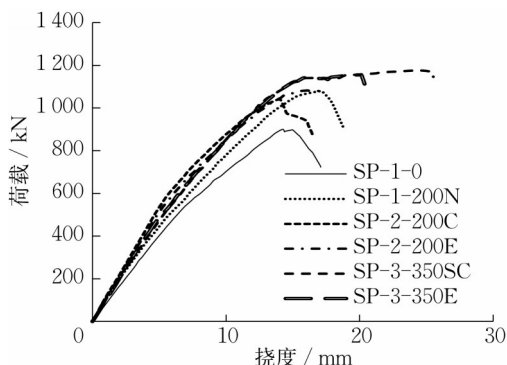


图6 荷载-挠度曲线

Fig.6 Load-deflection curves

2.3 剪力-剪切角实测曲线

通过测量试验段上、下缘纵向长度变化和对角线长度变化,可以推算试验段的平均剪切角,如图7所示。未加固试验段SP-1-0的剪力-剪切角曲线具有较明显的屈服转折点,剪力小于该屈服转折点之前;不论是否加固,所有试件的剪力-剪切角曲线基本重合;钢板尺寸及锚栓布置相同时,极限荷载前剪力-剪切角曲线基本重合,极限剪切承载力大致相当,与界面条件无关;增大加固钢板高度并增加配套锚栓数量,试验段的剪切承载力相应提高。

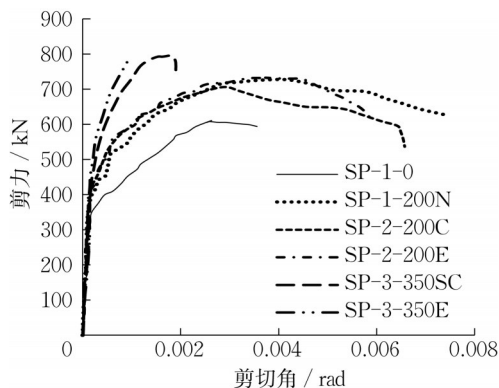


图7 剪力-剪切角曲线

Fig.7 Shear force-shear angle curves

2.4 钢板应变发展

加固钢板水平高度中心线上布置了一组电阻应

变花,以此获得加固钢板各测点沿水平方向、45°方向和竖直方向的应变。为表述方便,从支座向荷载点一侧,依次将应变花按A~F顺序编号。

不同界面条件下,钢板高度相同时应变分布规律大致相同。图8为试验段SP-1-200N和SP-3-350E加固钢板高度中线的实测纵向应变分布以及根据各应变花实测应变推算的剪应变分布。

2.5 裂缝分布及变形特征

加固试验完成后,卸下加固钢板能完整观察构件表面裂缝分布规律和残余宽度。

(1) 裂缝分布规律

未加固试验段SP-1-0具有明显的主斜裂缝,高度中部残余最大斜裂缝宽度为5.00 mm;加固钢板高度相同的其余各试件的斜裂缝在跨度方向的分布范围明显大于SP-1-0,钢板覆盖范围内最大斜裂缝宽度明显小于SP-1-0,也明显小于钢板以外的裂缝宽度;加固钢板与混凝土的界面结合状态不影响钢板覆盖范围斜裂缝分布;钢板覆盖区最大斜裂缝残留宽度约为0.55 mm,覆盖区外最大斜裂缝残留宽度约为2.50 mm,如图9所示。

试验段SP-3-350SC和SP-3-350E发生弯曲破坏,结束试验卸除加固钢板后斜裂缝完全闭合不可见,仅在试验段SP-3-350SC水泥浆料剥离后的基层混凝土表面保留了裂缝走势的痕迹,如图10所示。

(2) 锚栓变形特征

对于绝大多数锚栓,肉眼观察不到混凝土的残余相对剪切位移,仅在个别位置处观察到混凝土压碎现象,如图11所示。

3 试验结果分析

3.1 界面条件的影响

(1) 对变形特征的影响

从图6荷载-挠度曲线可以看出,极限荷载前试验段SP-2-200C和SP-2-200E的挠度小于试验段SP-1-200N,但差异很小,试验段SP-3-350SC和SP-3-350E的荷载-挠度曲线则基本重合。从图7剪力-剪切角曲线可以发现相同的规律,即相同剪力作用下,试验段SP-2-200C、SP-2-200E和试验段SP-1-200N的剪切角基本重合,表明不同界面条件对加固试验段的变形特征没有明显影响。

(2) 对承载力的影响

由表3的实测承载力数据可以发现,发生剪切

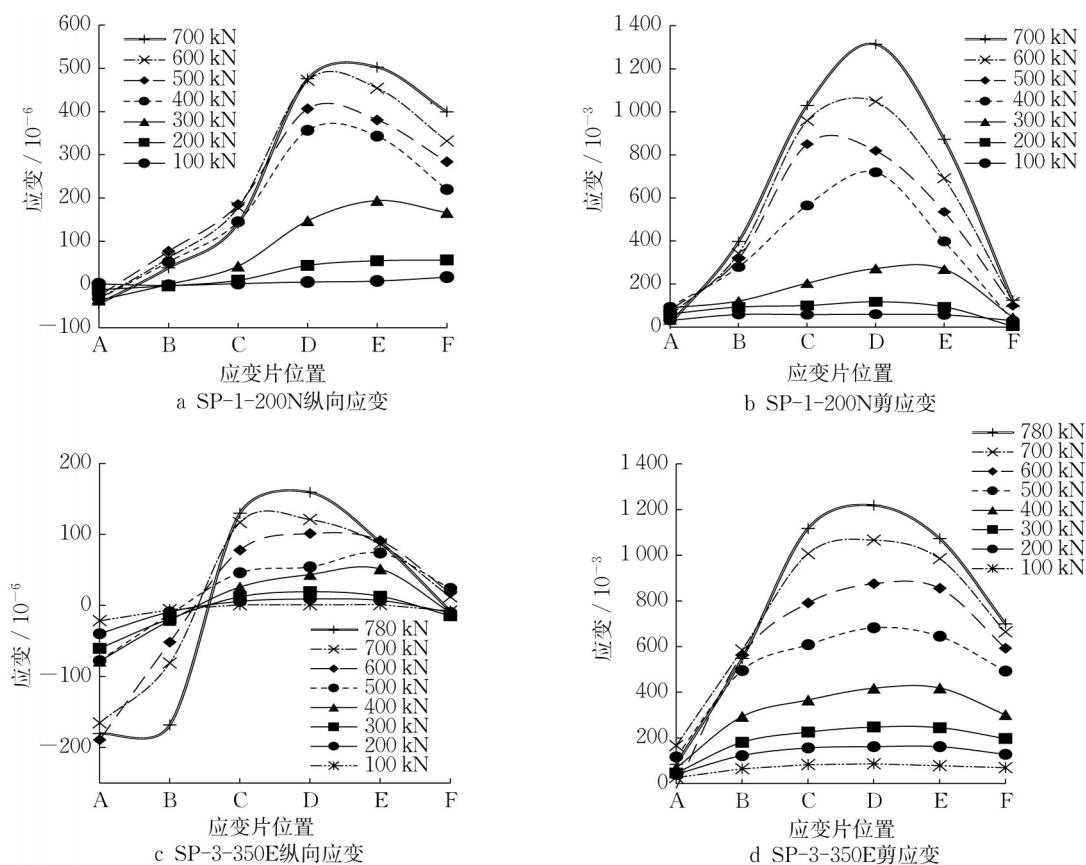


图8 钢板纵向应变及剪应变实测曲线

Fig.8 Measured longitudinal and shear strain curves of side plates

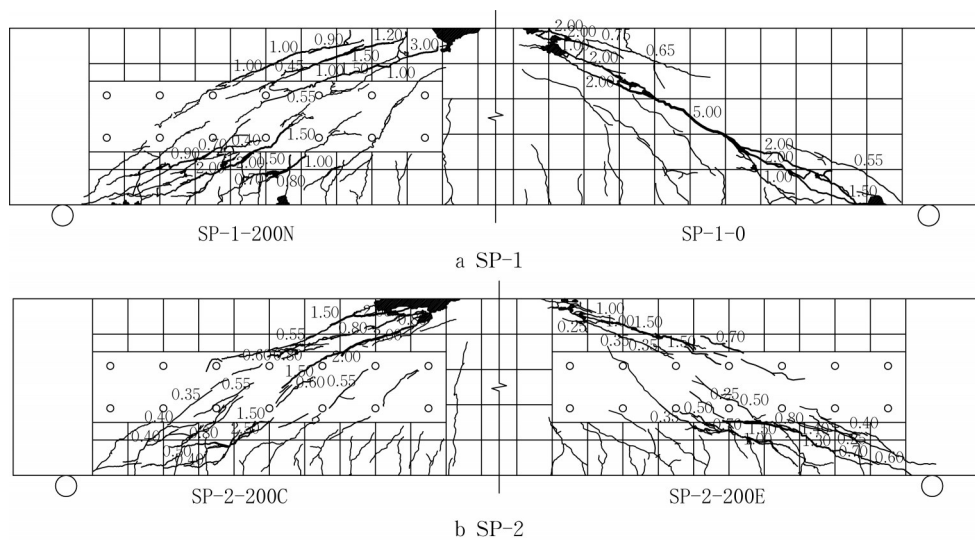


图9 试件SP-1和SP-2裂缝分布

Fig.9 Crack patterns of SP-1 and SP-2

破坏的3个加固试验段中,SP-1-200N和SP-2-200E具有相同的剪切承载力,而SP-2-200C的剪切承载力为3个试验段剪切承载力平均值的0.98倍。这表明,界面条件不影响加固试验段的剪切承载力。结合试验过程中观察到的剥离现象,可以推断,加固

钢板与混凝土之间的黏结界面终会剥离,剪切承载力极限状态下,加固钢板只依靠直剪型锚栓与混凝土基体结合在一起。

3.2 钢板高度的影响

由表3可见,增大加固钢板高度及配套的锚栓

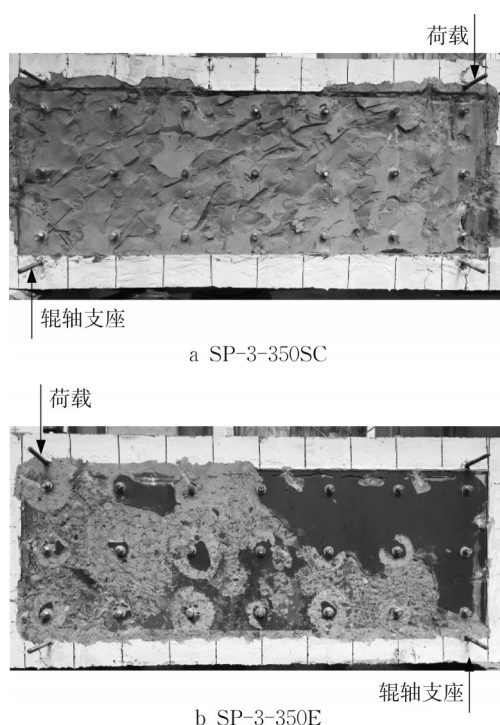


图10 试验段SP-3-350SC和SP-3-350E外观
Fig.10 Appearance of SP-3-350SC and SP-3-350E



图11 锚栓位置处混凝土压碎现象
Fig.11 Concrete crushing near bolt shaft

数量,可以进一步提高试验段的剪切承载力。试验段SP-3-350SC和SP-3-350E平均极限剪力比为1.29,比试验段SP-1-200N、SP-1-200E和SP-1-200C的平均极限剪力比1.19提高了10%。由于试验段SP-3-350SC和SP-3-350E发生弯曲破坏,因此剪切承载力应更高。

3.3 加固机理分析

综合分析钢板应变、承载力测试结果以及裂缝分布特征,可以认为直剪型锚栓钢板能有效提高混凝土梁的剪切承载力,并存在以下2种剪切承载力加固机制:

(1) 约束机制

对于未加固试验段SP-1-0,主斜裂缝一旦形成,后续加载过程中裂缝发展就体现为主斜裂缝的宽度增大。对于锚栓钢板加固试验段,当锚栓布置区域出现斜裂缝时,斜裂缝两侧的锚栓在位置关系上呈现分开的趋势。直剪型锚栓与加固钢板之间的无间隙安装使得这种分开趋势立即受到加固钢板的约束,加固钢板纵向受拉、横向受剪,在各级剪力下加固钢板实测应变分布中得到了证实。由于钢板的拉伸刚度显著高于锚栓的剪切刚度,新出现的裂缝或既有裂缝宽度扩展都会使更远处的锚栓受剪,并使裂缝宽度发展受到抑制。这种约束效应使得锚栓布置区域不会形成宽度显著发展的主斜裂缝,并扩大斜裂缝在跨度方向的分布范围,如图9所示。

由于锚栓钢板对混凝土的约束,使得钢板覆盖范围内混凝土斜裂缝的宽度显著降低,客观上更好地保持了混凝土斜裂缝咬合作用对剪切承载力的贡献。试验段SP-3-350SC和SP-3-350E发生弯曲破坏时相较于其他加固试验段承受了更大的剪力,但卸掉加固钢板后几乎没有肉眼可见的斜裂缝残留宽度,这也是由更强的约束所致。

(2) 组合受力机制

SP-3-350E与SP-1-200N试验段的区别在于加固钢板高度不同以及与之配套的锚栓数量不同。对比SP-3-350E与SP-1-200N试验段加固钢板纵向应变后可以发现,虽然两者均在长度中部纵向拉应变最大,但是SP-1-200N基本全长受拉,支座附近受压,应变接近于零,SP-3-350E靠近支座三分之一长度范围处于受压状态,支座附近的压应变与长度中部的拉应变在数值上相当,这表明试验段SP-3-350E与SP-1-200N的受力机制明显不同。

对应变花实测应变进一步整理可获得各应变测点的第一主应力、第二主应力及其方向角随剪力变化的规律。试验段SP-1-200N和SP-3-350E的加固钢板在大部分长度具有相似的受力特征,即斜向下指向支座一侧45°方向受压,与之垂直的方向受拉;靠近荷载点处,主压应力方向接近于垂直,主拉应力方向接近于水平,这些特点与剪-弯区段混凝土梁的受力特征相同,表明加固钢板与混凝土梁具有组合构件的受力特征。在靠近支座处,SP-1-200N与SP-3-350E试验段加固钢板受力特征显著不同,前者第一、第二主应力接近于零,后者第一、第二主应力分别为拉、压应力,并且具有大致相当的较高应力水平。

简支梁支座附近混凝土处于斜压状态,并存在与之对应的斜向拉应力。试验段 SP-1-200N 的加固钢板在支座附近基本处于零应力状态,这与对应位置混凝土梁基体的受力特点显著不同。试件 SP-3-350E 的加固钢板在支座附近的受力特点与对应混凝土梁基体受力特点完全相同,即指向支座的方向斜向受压,与之垂直的方向斜向受拉。考虑界面结合在受力过程中较早剥离,试验段 SP-1-200N 与试验段 SP-3-350E 的主要区别在于加固钢板的高度。因此,加固钢板高度较小时,在支座处钢板与混凝土梁体之间不能形成组合作用,无法直接将部分剪力传递至支座;当加固钢板高度较大时,加固钢板与混凝土梁体能形成组合作用,可以直接将部分剪力传递至支座。

4 结论

(1) 在加固钢板和混凝土侧面之间建立的不同界面在受力过程中逐渐剥离。加固钢板最终完全依靠直剪型锚栓与基体混凝土结合,参与被加固梁的受力。强弱不同的界面不会实质性地影响加固段的剪切承载力和剪切变形特征。

(2) 对于混凝土简支梁剪力最大的局部区段,采取在梁侧面安装直剪型锚栓钢板的加固方法,能够有效提高混凝土梁的剪切承载力。

(3) 直剪型锚栓钢板通过 2 种机制加固梁的剪切承载力:约束直剪型锚栓钢板布置范围内的斜裂缝宽度,抑制主斜裂缝的形成,使斜裂缝两侧混凝土发生剪错时保留更大的咬合作用;以组合截面的受力方式,将部分剪力直接传递至支座。加固钢板宽度较小时以约束机制为主,加固钢板高度较大时 2 种加固机制联合发挥作用。

作者贡献声明:

全学友:整个试验方案的构思与设计,指导试验开展,试验结果分析,撰写论文。

罗晨:协助完成试验方案设计,制作试验构件,开展具体试验工作。

刘佳迪:试验数据收集、整理与分析,协助完成论文撰写。

黄辉辉:协助完成试验方案设计,参与试验结果分析。

参考文献:

[1] SHEN H S, TENG J G, YANG J. Interfacial stresses in beams and slabs bonded with thin plate [J]. *Journal of*

Engineering Mechanics: ASCE, 2001, 127(4): 399.

- [2] CHEN J F, YUAN H, TENG J G. Debonding failure along a softening FRP-to-concrete interface between two adjacent cracks in concrete members [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(2): 259.
- [3] ARAM M R, CZADERSKI C, MOTAVALLI M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams [J]. *Composites, Part B: Engineering*, 2008, 39(5): 826.
- [4] TOUTANJI H A, GOMEZ W. Durability characteristics of concrete beams externally bonded with FRP composite sheets [J]. *Cement & Concrete Composites*, 1997, 19(4): 351.
- [5] SILVA M A G, BISCAIA H. Degradation of bond between FRP and RC beams [J]. *Composite Structures*, 2008, 85(2): 164.
- [6] SHRESTHA J, ZHANG D, UEDA T. Durability performances of carbon fiber-reinforced polymer and concrete-bonded systems under moisture conditions [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(5): 4016023.
- [7] ROBERTS T M, HAJI-KAZENI H. Strengthening of under-reinforced concrete beams with mechanically attached steel plates [J]. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1989, 11(1): 21.
- [8] AHMED T M, OEHLERS D J, BRADFORD M A. Retrofitting reinforced concrete beams by bolting steel plates to their sides. Part 1: behaviour and experiments [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2000, 10(3): 211.
- [9] OEHLERS D J, AHMED M, NGUYENT N T, *et al.* Retrofitting reinforced concrete beams by bolting steel plates to their sides. Part 2: transverse interaction and rigid plastic design [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2000, 10(3): 227.
- [10] BARNES R A, BAGLIN P S, MAYES G C, *et al.* External steel plate systems for the shear strengthening of reinforced concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(9): 1162.
- [11] SU R K L, SIU W H, SMITH S T. Effects of bolt-plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(6): 1769.
- [12] LI L Z, LO S H, SU R K L. Experimental study of moderately reinforced concrete beams strengthened with bolted-side steel plates [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2013, 16(3): 499.
- [13] LI L Z, JIANG C J, JIA L J, *et al.* Local buckling of bolted steel plates with different stiffener configuration [J]. *Engineering Structures*, 2016, 119: 186.
- [14] LI L Z, CAI Z W, LU Z D, *et al.* Shear performance of bolted side-plated reinforced concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2017, 144: 73.
- [15] 蔡自伟, 陆洲导, 李凌志, 等. 梁侧锚固钢板加固混凝土梁受剪性能试验 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(1): 82.
- CAI Ziwei, LU Zhoudao, LI Lingzhi, *et al.* Experimental study on shear performance of bolted side-plated reinforced

- concrete beams[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(1): 82.
- [16] 吴振丽, 陆洲导, 李凌志, 等. 梁侧锚固钢板法加固混凝土梁的非线性有限元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 906.
- WU Zhenli, LU Zhoudao, LI Lingzhi, *et al.* Non-linear finite element analysis of bolted side-plated beams [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(7): 906.
- [17] JIANG Changjiu, LU Zhoudao, LI Lingzhi. Shear performance of fire-damaged reinforced concrete beams repaired by a bolted side-plating technique [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(5): 04017007.
- [18] 姜常玖, 陆洲导, 李凌志, 等. 梁侧锚固钢板加固火后混凝土梁受弯试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(12): 1755.
- JIANG Changjiu, LU Zhoudao, LI Lingzhi, *et al.* Experimental study on flexural performance of fire-damaged RC beams strengthened by bolted side-plating [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(12): 1755.
- [19] 刘鑫, 陆洲导, 蔡自伟, 等. 梁侧锚钢加固钢筋混凝土梁火灾后受剪性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(5): 853.
- LIU Xin, LU Zhoudao, CAI Ziwei, *et al.* Post-fire shear performance of bolted side-plated reinforced concrete beams[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(5): 853.
- [20] European Organisation for Technical Approvals (EOTA). Guideline for European technical approval of metal anchors for use in concrete: ETAG 001[S]. 3rd ed. Brussels: EN, 1997.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构后锚固技术规范: JGJ 145—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for post-installed fastenings in concrete structures: JGJ 145—2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [22] SU R, SHAN Z, LI L. Structural behavior of strengthened concrete beams with bolted side plates[C]//Ninth International Conference on Advances in Steel Structures. Hong Kong: The Hong Kong Institute of Steel Construction, 2018: 1323-1332.
- [23] 全学友. 直接剪切型加固组件: 中国, 201210290563.X[P]. 2012-11-21.
- QUAN Xueyou. Direct shear fastening assemblage for structural strengthening: China, 201210290563.X [P]. 2012-11-21.
- [24] 全学友, 邓扬, 刘辉, 等. 直接剪切型锚栓钢板加固混凝土梁的抗弯承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(18): 88.
- QUAN Xueyou, DENG Yang, LIU Hui, *et al.* Experimental study on flexural capacity of concrete beams strengthened by direct-shear-bolted steel plate [J]. Building Structure, 48(18): 88.
- [25] 四川省住房和城乡建设厅. 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范: GB 50728—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Sichuan Province. Technical code for safety appraisal of engineering structural strengthening materials: GB 50728—2011[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [26] 四川省住房和城乡建设厅. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Sichuan Province. Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.