

文章编号:1673-9469(2025)03-0023-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.004

## 锚栓与粘钢连接件抗剪承载性能试验研究

叶赛炜<sup>1</sup>,吴文明<sup>2</sup>,刘荣<sup>1\*</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024;2. 北京公科固桥技术有限公司,北京 100088)

**摘要:**为进一步探究锚栓与粘钢共同连接形成的钢混界面抗剪承载性能,制作并分析了三组推出试件,分别为锚栓连接试件、粘钢连接试件以及锚栓与粘钢连接试件。通过推出试验得到三组试件的剪切破坏形态、剪力滑移曲线、极限荷载与抗剪刚度。研究显示,锚栓连接试件刚度远小于粘钢连接试件,且在达到极限抗剪承载力前,其滑移远大于粘钢连接试件。对于锚栓个数较少的锚栓与粘钢连接试件,在达到峰值荷载前,胶黏剂几乎承担了所有的荷载,试件破坏时有明显滑移。最后提出了更广泛运用的锚栓与粘钢连接件抗剪承载力计算公式,该公式可以运用于大面积连接试件以及高强混凝土连接试件的抗剪承载力计算。

**关键词:**桥梁加固;抗剪强度;推出试验;钢混粘界面;植栓粘钢

中图分类号:U445

文献标识码:A

## Experimental Study on Shear Performance of Steel-Concrete Interface Bonded with Bolt and Epoxy

YE Saiwei<sup>1</sup>, WU Wenming<sup>2</sup>, LIU Rong<sup>1\*</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;

2. Beijing Gongke Reinforced Bridge Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** To further obtain the shear capacity of the steel-concrete interface connected by bolts and epoxy, three sets of push-out tests were made and analyzed, including bolt reinforcement specimens, epoxy reinforcement specimens and bolt and epoxy reinforcement specimens. The failure mode, shear force-displacement curve, ultimate bearing capacity and shear stiffness were measured by the push-out test. The research shows that the stiffness of bolt reinforcement specimens is much smaller than that of epoxy reinforced specimens, and the slip before reaching the ultimate shear strength is much larger than that of epoxy reinforced specimen. Before reaching the peak load, for the specimens with fewer anchor bolts, the epoxy bears almost all the load, and the specimens slip obviously when the specimen was damaged. This paper puts forward a more widely used calculation formula used to calculate the shear capacity of bolt and epoxy reinforcement specimens, which can be used in the calculation of shear capacity of large-area reinforcement specimens and high-strength concrete reinforcement specimens.

**Key words:** bridge strengthen; shear strength; push-out test; steel-concrete bond; bolt and epoxy

改革开放以来大规模修建的钢筋混凝土桥梁,随着时间的推移,普遍出现混凝土开裂、梁体下挠及车辆荷载增加等问题,严重影响桥梁结构正常运行及耐久性<sup>[1-2]</sup>。因此,旧桥的修复、改造

和加固十分迫切。植入锚栓加固法<sup>[3-5]</sup>能在小幅增加重量的情况下显著提升结构承载能力,但存在钢板开孔处应力集中的问题。粘钢加固技术将薄钢板粘贴于梁体受拉区,能使钢板受力较为均匀,具有施

收稿日期:2024-09-09

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51109111)

第一作者:叶赛炜(1999—),女,浙江金华人,硕士研究生,从事组合结构桥梁方面的研究。

\* 通信作者:刘荣(1983—),男,陕西横山人,博士,副教授,从事钢桥与组合结构桥梁方面的研究。

工便捷优势<sup>[6-8]</sup>,但粘结剂仅维持钢板与混凝土表面粘结,对法向力较为敏感,易发生粘结面剥离破坏<sup>[9]</sup>。在锚栓与粘钢加固结构中,锚栓深入混凝土与钢板锚固,提供了可靠的连接,并且压紧钢板可以有效抵抗钢板与混凝土间的法向剥离力;粘钢使得钢板受力更均匀,更好提高材料利用率<sup>[10-11]</sup>。

对于粘钢连接件受力性能的研究目前现有成果多基于小面积单面剪切试验<sup>[12-14]</sup>,没有考虑试件的尺寸效应及偏心荷载产生的法向剥离力,得出的抗剪承载能力应用于实际工程时,其值可能偏高,存在安全隐患。因此,仍需对较大尺度钢混粘结面抗剪试验进行系统性研究,分析试件抗剪承载性能,并提出适用于工程的钢混粘结面抗剪承载公式。

本文通过分析三组推出试验数据,系统地探究不同形式连接件的破坏模式、变形性能、极限承载力和抗剪刚度等,探讨了影响钢混粘结面抗剪强度的因素。结合本文试验数据与大量锚栓、粘钢推出试验研究数据,在Luo修正的C-T公式基础上提出了更广泛应用于锚栓与粘钢大面积连接试件以及高强混凝土连接试件的抗剪承载力计算公式。

### 1 模型试验

#### 1.1 模型试件

设计并制作了锚栓连接试件B、粘钢连接试件

E和锚栓与粘钢连接试件EB,共3组推出试验模型试件(图1),试件编号及主要参数如表1所示。以EB21为例,其构造如图2所示。H型钢构件由两块竖向放置的钢翼板与一块加劲腹板焊接而成,钢翼板厚5mm,宽×高=300mm×550mm;钢腹板厚10mm,宽×高=240mm×550mm。每块钢翼板外侧分别粘贴1个钢筋混凝土块体,混凝土块体尺寸为宽×长×高=400mm×460mm×550mm。混凝土块沿竖向布置四层钢筋网,钢筋直径为12mm。在距混凝土块底面高275mm,距混凝土粘结面中性轴左右75mm处各钻一孔,钻孔深度为120mm,孔径为16mm,锚栓直径为12mm。依据桥梁加固

表1 试件编号及参数

Tab. 1 Notations and parameters of specimens				
试件分类	试件编号	连接方式	锚栓数量 /个	粘结面积 /mm <sup>2</sup>
B	B21	锚栓	2	0
	B22	锚栓	2	0
	B23	锚栓	2	0
E	E01	粘钢	0	300×500
	E02	粘钢	0	300×500
	E03	粘钢	0	300×500
EB	EB21	锚栓及粘钢	2	300×500
	EB41	锚栓及粘钢	4	300×500
	EB61	锚栓及粘钢	6	300×500

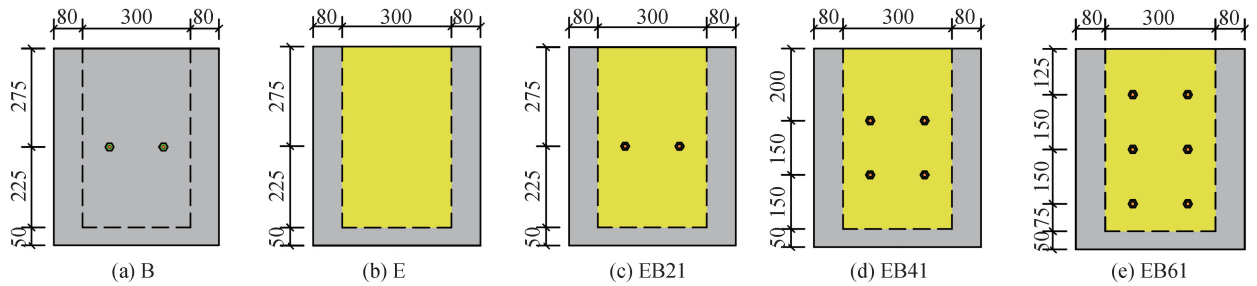


图1 试件粘结面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Details of bonding surface (unit:mm)

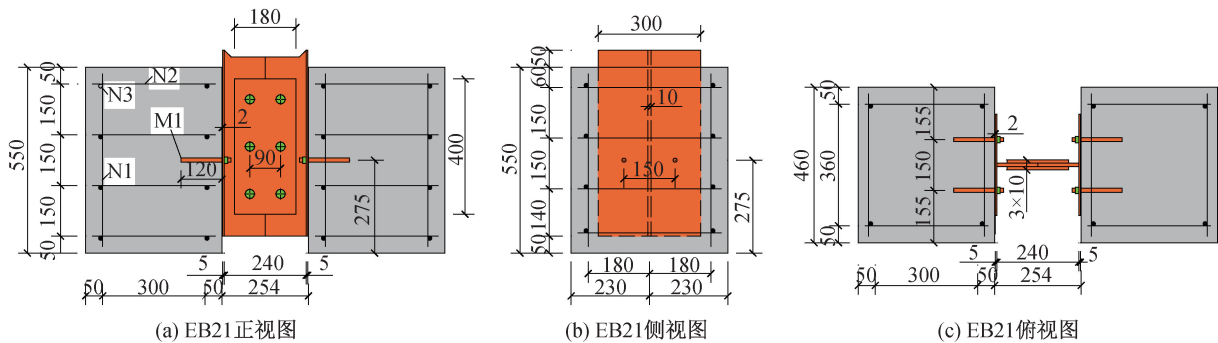


图2 试件EB21尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Details of test specimens EB21 (unit:mm)

设计规范的规定,胶黏剂采用改性环氧 A 级胶黏剂涂覆粘结面,胶层厚 2 mm。单侧钢翼板与混凝土粘结面的宽×高=300 mm×500 mm,每个试件包含两个钢混粘结面。

### 1.2 材料特性

模型试件采用 C60 混凝土、Q345 钢材和改性环氧 A 级胶黏剂。通过钢结构板材拉伸试验确定钢材的屈服强度  $f_y$  为 416 MPa,抗拉强度  $f_u$ <sup>[15]</sup> 为 533 MPa,弹性模量  $E_{sp}$  为  $2.1 \times 10^5$  MPa。通过混凝土立方体试块的抗压和劈裂试验确定的混凝土的抗压强度  $f_{cc}$  为 70.8 MPa,抗拉强度  $f_{ts}$ <sup>[16]</sup> 为 5.18 MPa,弹性模量  $E_{cp}$  为  $4.07 \times 10^4$  MPa。改性环氧 A 级胶黏剂的钢对 C45 混凝土正拉粘结强度  $f_{ce}$  为 3.3 MPa,弹性模量  $E_{cp}$  为 7 680 MPa。

### 1.3 试件制作

以试件 EB21 为例,试件的安装主要有以下步骤,试验制作过程如图 3 所示。(1)将混凝土粘结面凿毛至 20 mm,清除混凝土表面碎屑。(2)使用冲击钻垂直钻孔,钻孔深度为 120 mm、直径为 14 mm,清除孔内粉尘后用脱脂棉球堵住孔洞,防止粉尘再次进入。(3)使用胶枪注入孔洞深度 2/3 的植筋胶,垂直下入打磨除渍的锚栓。(4)将胶黏剂涂抹于凿毛的混凝土表面,胶黏剂中间厚 3 mm、

边缘厚 1 mm,下放打磨除渍后的钢板。(5)拧紧锚栓施加压力,以胶液恰好从钢板的边缝全部挤出为度,固化 24 h。(6)胶黏剂固化后,用龙门吊将左右两块混凝土吊装对齐,拧紧钢翼板处螺母以合龙<sup>[17-18]</sup>。

锚栓连接试件的安装步骤为(2)-(3)-(5)-(6);粘钢连接试件的安装步骤为(1)-(4)-(6),锚栓与粘钢试件的安装步骤类似于试件 EB21。

### 1.4 加载与测试

推出试验采用液压伺服压力试验机加载(图 4)。将推出试件放置于球形铰支撑的刚性加载台座上,试件混凝土底部与台座之间铺设垫沙,以避免混凝土局部受压破坏,并使两个粘结面受力大致对称。H 型钢构件顶面与反力台座之间从下往上依次设置钢垫板和压力传感器。加载过程中,作动器带动加载台座及试件向上移动,而反力台座限制试件向上的位移,使得钢混粘结面承受剪力作用。依据胶黏剂的抗剪强度下限值 1.5 MPa 预估推出试件的承载力  $P_u$ ,加载前期采用力控制加载方法,按照 0.1  $P_u$  逐级加载。加载至约 0.7  $P_u$ ,改为位移控制加载方法,加载速率约为 0.2 mm/min<sup>[19]</sup>,直至试件破坏。为测得钢混粘结面的剪力-滑移特性,在试件一面设置 2 个位移传感器,滑移测点距离混

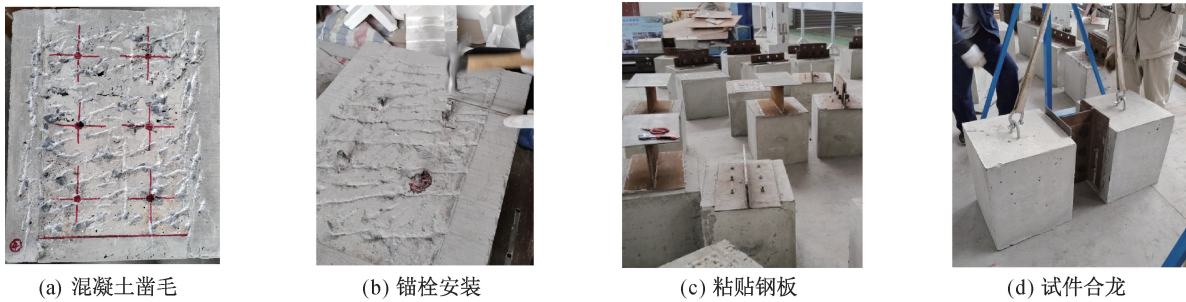


图 3 试验制作过程示意图

Fig. 3 Manufacturing operation of test specimens

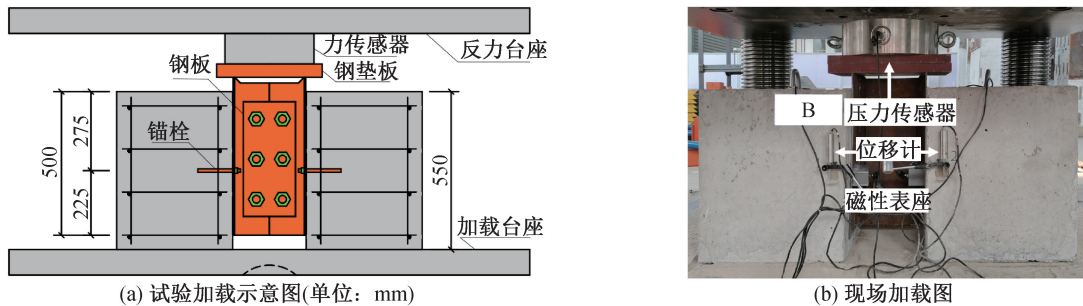


图 4 加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test setup

土底面约 300 mm。将测得的 2 个位移传感器读数取平均值,作为钢混粘结面的相对滑移值,将压力传感器的测试值作为两个粘结面的剪力合力。

## 2 模型试验结果

### 2.1 破坏模式

为了观察试件破坏后的内部情况,采用冲击钻凿碎试件,将试件中锚栓取出。由试验记录及试件破坏模式(图 5)可知,锚栓连接试件 B 类试件在加载时,钢板骤然向下位移并与锚栓顶紧。随着荷载的增加,连接件达到极限承载力后,锚栓逐一剪断,锚栓端部向下产生大幅变形,锚栓下部混凝土被压碎。粘钢连接试件 E 类试件加载时瞬间破坏,试件左下角混凝土呈块状被压碎并附着于钢板被带出。粘结面多为混凝土内聚破坏,少部分存在胶黏剂与钢板脱黏情况。锚栓与粘钢连接

试件 EB 类试件加载至约 400 kN 时,上侧粘结面开始破坏,随着荷载增加,开裂面向下延伸。其中,试件 EB21 的锚栓在达到极限荷载后被剪断,而试件 EB41 与试件 EB61 的锚栓在达到极限荷载前后均有被剪断情形,且均为上侧锚栓最先剪断。总之锚栓与粘钢连接试件粘结面剪切破坏后锚栓向下产生了较大的变形;粘结面呈现混凝土内聚破坏,少部分存在胶黏剂与钢板脱黏情况。

### 2.2 剪力滑移曲线

#### 2.2.1 锚栓连接试件

锚栓连接试件荷载与滑移曲线如图 6 所示。锚栓连接试件在极限剪力时,滑移量在 2.9~5.4 mm 之间,破坏时滑移量平均值在 5.9~8.5 mm 之间。随着剪力的增大,起始段相对滑移增加较小;在 20~60 kN 荷载区间内,滑移增长速率快速增加。达到峰值剪力后,粘结面迅速丧失约 1/4 承载力。达到



图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

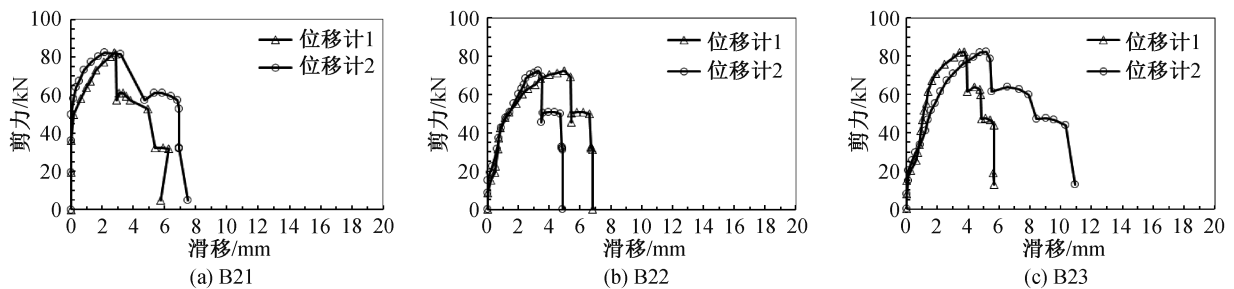


图 6 锚栓连接试件剪力-滑移曲线

Fig. 6 Shear-slip curves of anchor specimens

峰值剪力后,承载力呈阶梯式下降,同时锚栓逐个剪断。

### 2.2.2 粘钢连接试件

粘钢连接试件荷载与滑移曲线如图7所示。粘钢连接试件在极限剪力时滑移量在0.22~0.25 mm之间,远小于锚栓连接试件的相应滑移量。随着剪力的增大,钢与混凝土之间的相对滑移随之增加。达到峰值剪力后,粘结面迅速丧失承载能力。粘结面达到峰值剪力后缺少变形平台,这表明其塑性变形能力相对较小。因此,有必要合理改进钢混粘结面连接形式,从而提高粘结面的抗剪性能。

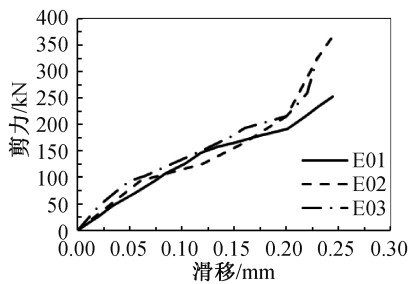


图7 粘钢连接试件剪力-滑移曲线

Fig.7 Shear-slip curves of epoxy specimens

### 2.2.3 锚栓与粘钢连接试件

锚栓与粘钢连接试件的荷载与滑移曲线如图8所示,随着剪力的增大,钢与混凝土之间初始会产生一段微小滑移,这一阶段滑移值不超过0.2 mm,这与粘钢连接试件荷载滑移曲线类似。试件EB21达到极限承载力时滑移值为0.1 mm,与粘钢连接试件达到极限承载力时的滑移值在一个量级。而试件EB41与试件EB61在达到极限承载力的滑移值分别为4 mm与6.05 mm,与锚栓连接试件在一个量级。三排锚栓连接试件的滑移值相较于两排锚栓连接试件提升了62.5%,且三排锚栓连接试件屈服平台更为明显,表明锚栓排数的增加可以提升试件的延性。

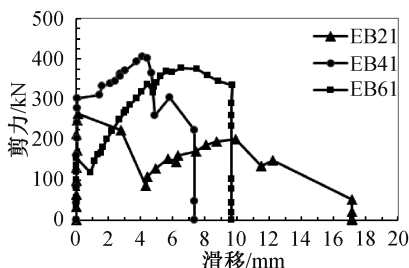


图8 锚栓与粘钢连接试件剪力-滑移曲线

Fig.8 Shear-slip curves of bolt and epoxy reinforcement specimens

### 2.2.4 试件 EB21 与试件 B21、试件 E01 对比

试件 B21、试件 E01 和试件 EB21 的荷载与滑移曲线如图9所示,锚栓与粘钢连接试件 EB21 与粘钢连接试件 E01 的极限承载力相近。在粘钢连接试件基础上额外增设四个锚栓对于承载力提升效果微弱,锚栓与粘钢连接试件最高承载力仅提升约5%,且对于试件变形能力无提升。锚栓与粘钢连接试件达到峰值剪力后,其上升段剪力增量约为锚栓连接试件 B21 的极限抗剪承载力。这是因为上部粘结面破坏后锚栓所受变形增大,此时锚栓才开始承担大量剪力,因此,为了在达到极限承载力前充分发挥锚栓的作用,可增加锚栓个数、排数、直径。

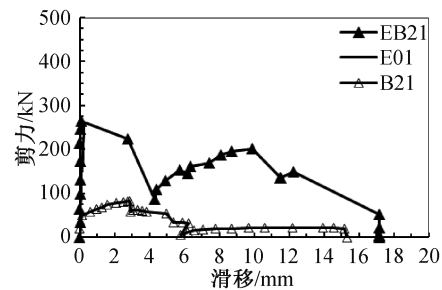


图9 剪力-滑移曲线对比

Fig.9 Comparison of shear-slip curve

## 2.3 极限承载力

对锚栓连接试件,取其极限承载力除以锚栓面积为锚栓抗剪强度;对于粘钢连接试件以及锚栓与粘钢连接试件,取其极限承载力除以粘结面积为粘结面抗剪强度。表2为各试件极限承载力及抗剪强度。锚栓连接试件其单面抗剪承载力在72~83 kN之间,锚栓抗剪强度在854~985 MPa之间,锚栓抗剪强度差值百分比为13.3%,试验结果的重复性较高,表明锚栓连接的试件抗剪承载性能离散性小。这是因为锚栓延性好,在极限承载状态下,各锚栓几乎均能达到屈服并协同受力。

对于粘钢连接试件,其单面抗剪承载力在252~372 kN之间,粘结面抗剪强度在1.68~2.48 MPa之间,抗剪强度最大相差32.2%,试验结果较为离散,表明胶黏剂连接的试件抗剪承载性能离散性大。这是因为粘钢连接试件的破坏模式多为混凝土内聚破坏,属于脆性破坏。在加载过程中,因试件存在初始的偏心以及加载时钢板变形引发的力的偏心,会产生横向剥离力,这种双向受力会大幅降低抗剪承载力。

表 2 试件极限承载力

Tab. 2 Load bearing capacities of specimens

试件分类	试件编号	试件抗剪承载力/kN	一侧粘结面抗剪承载力/kN	一侧粘结面抗剪承载力平均值/kN	粘结面抗剪强度/MPa	锚栓抗剪强度/MPa
B	B21	163	82		—	966.79
	B22	144	72	79	—	854.09
	B23	166	83		—	984.58
E	E01	504	252		1.68	—
	E02	744	372	317	2.48	—
	E03	652	326		2.17	—
EB	EB21	529	264		1.76	—
	EB41	811	405	349	2.7	—
	EB61	755	377		2.52	—

对于锚栓与粘钢连接试件,试件 EB21 承载力与试件 E01 相近,考虑到粘钢连接方式的离散性,可认为试件 EB21 承载力均由胶黏剂提供。少量添加的锚栓并未提高试件的抗剪承载能力。试件 EB41 与试件 EB61 相较于试件 EB21,抗剪承载力分别提升了 53% 和 43%,多排布置锚栓确实可以大幅提升抗剪承载力。

取 B 类锚栓连接试件平均承载力作为锚栓抗剪承载力,锚栓抗剪承载力乘以锚栓个数为 EB 类试件锚栓提供的承载力;取 E 类粘钢连接试件平均承载力作为 EB 类试件胶黏剂提供的承载力。计算实际承载力与锚栓、胶黏剂各自提供承载力总和之比,结果如表 3 所示。锚栓与粘钢连接试件的极限承载力小于锚栓、胶黏剂各自提供承载力之和,其比值在 0.67~0.85 之间。这是

因为锚栓与粘钢连接试件受剪时,先由上部胶黏剂受力。当上部胶黏剂剥离至锚栓后,锚栓才开始减小剥离力以及承担抗剪的作用。当锚栓较少时,失效的粘结面提供的抗剪承载力大于锚栓提供的抗剪承载力,实际抗剪承载力几乎等于粘结面抗剪承载力。当锚栓较多时,粘结面失效的抗剪承载力小于锚栓提供的抗剪承载力,此时锚栓与剩下的粘结面共同受力,其极限抗剪承载力才大于粘钢连接试件的极限抗剪承载力。

## 2.4 刚度

抗剪刚度是影响组合结构抗剪强度重要的参数之一,本研究采用 0.5 倍抗剪承载力与对应的滑移的比值计算各试件割线刚度,如表 4 所示。锚栓

表 3 试件极限承载力分配

Tab. 3 Distribution of load bearing capacities of specimens

试件编号	锚栓承载力/kN	粘钢承载力/kN	锚栓与粘钢/kN	实际承载力/kN	所占比例
EB21	79	317	396	264	0.67
EB41	158	317	475	405	0.85
EB61	237	317	554	377	0.68

表 4 试件刚度

Tab. 4 Stiffness of specimens

试件编号	抗剪承载力	0.5 倍抗剪承载力	0.5 倍抗剪承载力下试件滑移值/mm	割线刚度 $K_v/(kN \cdot mm^{-1})$
B21	163	81.5	3.04	26.7
B22	144	72.0	4.13	17.4
B23	166	83.0	4.44	18.7
E01	504	252.0	0.10	2 440.0
E02	744	372.0	0.19	1 950.0
E03	652	326.0	0.13	2 520.0
EB21	529	264.5	0.09	3 111.0
EB41	811	405.5	0.50	809.0
EB61	755	377.5	1.40	269.0

连接试件的刚度在 17~27 kN/mm 之间,其平均刚度为 21 kN/mm。粘钢连接试件的刚度在 1 950~2 520 kN/mm 之间,其平均刚度为 2 236 kN/mm,约为锚栓连接试件的 100 倍。因为应力等于应变与弹性模量乘积,且弹性模量和刚度呈正相关,所以在相同应变下,锚栓的应力约为粘结面应力的 1/100。由此可知,当第一排锚栓上部胶黏剂未失效时,锚栓与粘结面变形相协调,锚栓所受的剪力可以忽略不计。锚栓及粘钢连接试件的刚度在 3 111~269 kN/mm 之间,变化幅度较大。表明锚栓个数较少时,锚栓发挥作用小,试件变形能力差。可见,锚栓对于锚栓与粘钢连接试件承载力的提升起到两种作用:(1)提供法向紧合力,减小剥离力对于粘钢抗剪承载力的影响;(2)当锚栓产生一定变形时,其截面承受剪力与胶黏剂协同作用,提供抗剪承载力。

### 3 理论公式

#### 3.1 修正后 C-T 模型

为推导出更广泛适用的锚栓与粘钢连接件抗剪承载力计算公式,本文收集了五个学者的 37 个粘钢连接试件及锚栓与粘钢连接试件的抗剪试验数据(表 5)。该数据涵盖了大面积连接试件以及高强混凝土连接试件的抗剪试验数据,可用于抗剪承载力公式拟合推导。

Yue 修正过后的 C-T 公式如式(1)~(7)所示,将表 5 的试验数据代入其中,得到的结果如图 10 所示。可见修正后 C-T 公式在粘结面积较小时偏差较小,而当粘结面积较大时,公式计算所得承载力普遍大于实测承载力,有必要对公式进行修正。

$$b_{c,e} = b_p + 2.18f_{ts} \quad (1)$$

$$b_{c,c} = \min(b_{c,e}, b_c) \quad (2)$$

$$\eta = \left(1 + \alpha \frac{B_s}{A_s}\right) \quad (3)$$

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - b_p/b_{c,c}}{1 + b_p/b_{c,c}}} \quad (4)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_{sp}t_p}{\sqrt{f_{cc}}}} \quad (5)$$

$$\beta_L = \begin{cases} 1 (L \geq L_e) \\ \sin \frac{\pi L}{2L_e} (L \leq L_e) \end{cases} \quad (6)$$

$$P_u = 0.427\eta\beta_p\beta_L\sqrt{f_{cc}'}b_pL_e \quad (7)$$

式中: $b_{c,e}$  为混凝土基体影响宽度,mm; $b_{c,c}$  为混凝土基体有效宽度,mm; $b_c$  为混凝土实际宽度,mm; $\eta$  为锚栓影响系数; $\alpha$  为经验系数,取为 40, $B_s$  为锚栓面积,mm<sup>2</sup>; $A_s$  为粘结面积,mm<sup>2</sup>; $\beta_p$  为钢板与混凝土宽度影响系数; $L_e$  为钢板有效长度,mm; $\beta_L$  为粘结长度系数; $L_e$  为钢板有效长度,mm。

#### 3.2 理论模型修正

对周英武提出的粘结长度的公式乘以修正系数 1.684 1 得到式(8),再对粘结面抗剪承载力计算式(7)乘以修正系数进行数值拟合得到式(9),将式(1)~(7)中的式(5)、式(7)替换为式(8)、式(9)得到再次修正 C-T 公式。将表 5 的试验数据代入再次修正的 C-T 公式,得到结果如图 11 所示, $R^2$  达到了令人满意的 0.939 2,说明此公式可以运用于大面积连接试件以及高强混凝土连接试件的抗剪承载力计算。

$$L_e = 1.684 1 \sqrt{\frac{E_{sp}t_p}{f_{cc}'^{1/3}}} \quad (8)$$

$$P_u = 0.280 5\eta\beta_p\beta_L\sqrt{f_{cc}'}b_pL_e \quad (9)$$

### 4 结论

1) 锚栓连接试件刚度小,受剪后呈塑性破坏;粘钢连接试件刚度大,破坏时滑移变形小,呈脆性破坏,所得抗剪承载力离散性高;锚栓与粘钢连接试件在锚栓布置合理时既保证了较大的抗剪承载力,又有较好变形能力,安全性较高。

2) 锚栓与粘钢连接试件受剪时,第一排锚栓上部的粘结面破坏失效后,锚栓变形开始增大,承担的剪力大幅增加,锚栓与下部粘结面协同受力。为在达到极限抗剪承载力之前,更好地发挥锚栓对于粘结面法向剥离力的抑制作用,以及锚栓本身的抗剪作用,不宜布置单排锚栓,应合理布置锚栓个数、排数,适当提高锚栓直径。

3) 对于大面积锚栓与粘钢连接试件以及高强混凝土锚栓与粘钢连接试件的抗剪承载力的计算,用修正后的半理论半经验公式(C-T 模型)能得到满意预测值。

表5 试验数据收集表

Tab. 5 Collection of test data

数据来源	试件编号	钢板			混凝土基体		锚栓			承载力	
		厚度 /mm	粘结 宽度/mm	粘结 长度/mm	抗拉 强度/MPa	抗压 强度/MPa	直径 /mm	长度 /mm	数量 /个	极限承 载力/kN	平均承 载力/kN
Yuechun Luo & Bo Wu	L260-1	10	80	260	6.62	55.2	—	—	—	90.9	85.7
	L260-2	10	80	260	6.62	55.2	—	—	—	80.4	
	L420-1	10	80	420	6.62	55.2	—	—	—	104.0	112.1
	L420-2	10	80	420	6.62	55.2	—	—	—	120.2	
	L580-1	10	80	580	6.62	55.2	—	—	—	137.2	138.6
	L580-2	10	80	580	6.62	55.2	—	—	—	140.0	
	L260B1-1	10	80	260	6.62	55.2	12	110	1	92.0	85.9
	L260B1-2	10	80	260	6.62	55.2	12	110	1	79.8	
	L420B2-1	10	80	420	6.62	55.2	12	110	2	124.2	127.5
	L420B2-2	10	80	420	6.62	55.2	12	110	2	130.8	
蒋金龙	L580B3-1	10	80	580	6.62	55.2	12	110	3	183.5	175.6
	L580B3-2	10	80	580	6.62	55.2	12	110	3	167.7	
	DS-E-1	20	150	150	13.44	112.0	—	—	—	107.3	119.7
DS-E-2	20	150	150	13.44	112.0	—	—	—	126.9	119.7	
DS-E-3	20	150	150	13.44	112.0	—	—	—	124.9	119.7	
陈智杰	C50-0-1	14	255	500	6.72	56.0	—	—	—	356.2	—
	RPC-0-1	14	255	500	13.42	111.8	—	—	—	375.0	—
	C50-13-1	14	255	500	6.72	56.0	13	60	4	640.0	516.2
	C50-13-1	14	255	500	6.72	56.0	13	60	4	392.5	
	C50-16-1	14	255	500	6.72	56.0	16	80	4	520.0	473.8
	C50-16-1	14	255	500	6.72	56.0	16	80	4	427.5	
	RPC-13-1	14	255	500	13.42	111.8	13	60	4	444.7	499.9
	RPC-13-1	14	255	500	13.42	111.8	13	60	4	555.0	
	RPC-16-1	14	255	500	13.42	111.8	16	80	4	411.5	400.8
	RPC-16-1	14	255	500	13.42	111.8	16	80	4	390.0	
李聪	SA <sub>3</sub> -1	10	360	500	6.50	140.4	—	—	—	422.4	424.2
	SA <sub>3</sub> -2	10	360	500	6.50	140.4	—	—	—	400.1	
	SA <sub>3</sub> -3	10	360	500	6.50	140.4	—	—	—	450.1	
	SA <sub>2</sub> -1	10	360	375	6.50	140.4	—	—	—	300.1	304.3
	SA <sub>2</sub> -2	10	360	375	6.50	140.4	—	—	—	308.5	
	SA <sub>1</sub> -1	10	360	250	6.50	140.4	—	—	—	205.7	205.3
	SA <sub>1</sub> -2	10	360	250	6.50	140.4	—	—	—	200.2	
SA <sub>1</sub> -3	10	360	250	6.50	140.4	—	—	—	210.0	—	
李萌	D13GHA	12	320	80	20.52	171.0	13	24	4	380.1	365.6
	D13GHB	12	320	80	20.52	171.0	13	24	4	351.0	365.6
	D13GZA	12	80	400	20.52	171.0	13	24	4	338.1	328.7
	D13GZB	12	80	400	20.52	171.0	13	24	4	319.2	328.7
本论文 数据	E01	10	300	500	5.18	70.8	—	—	—	252.0	316.7
	E02	10	300	500	5.18	70.8	—	—	—	372.0	
	E03	10	300	500	5.18	70.8	—	—	—	326.0	—
	EB21	10	300	500	5.18	70.8	12	120	2	264.0	—
	EB41	10	300	500	5.18	70.8	12	120	4	405.0	—
	EB61	10	300	500	5.18	70.8	12	120	6	377.0	—

注:1. Luo & Wu 试件钢板弹性模量为 200 000 MPa,混凝土实际宽 1 200 mm,胶体厚 3 mm,胶对 C45 正拉粘结强度为 3.8 MPa。2. 蒋金龙试件钢板弹性模量为 206 000 MPa,混凝土实际宽 150 mm,胶体厚 1 mm<sup>[20]</sup>。3. 陈智杰试件钢板弹性模量为 200 000 MPa,混凝土实际宽 600 mm,胶体厚 2 mm。4. 李聪试件钢板弹性模量为 206 000 MPa,混凝土实际宽 360 mm,胶体厚 3 mm,胶对 C45 正拉粘结强度为 2.5 MPa。5. 李萌试件钢板弹性模量为 210 000 MPa,混凝土实际宽 460 mm,胶体厚 2 mm。6. 本论文数据试件钢板弹性模量为 200 000 MPa,混凝土实际宽 500 mm,胶体厚 2 mm,胶对 C45 正拉粘结强度为 3.3 MPa。

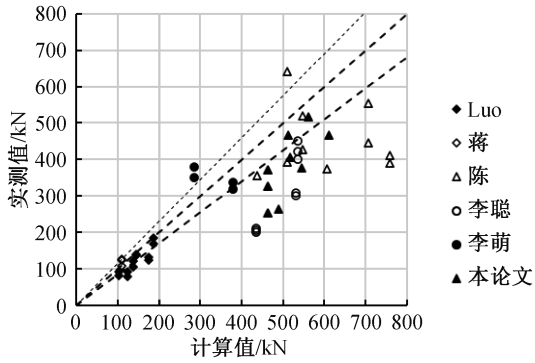


图 10 基于修正 C-T 模型的试件极限承载力  
计算值与实测值的对比(单位:kN)

Fig. 10 Comparison between measured and calculated load bearing capacities of specimens using modified C-T model(unit:kN)

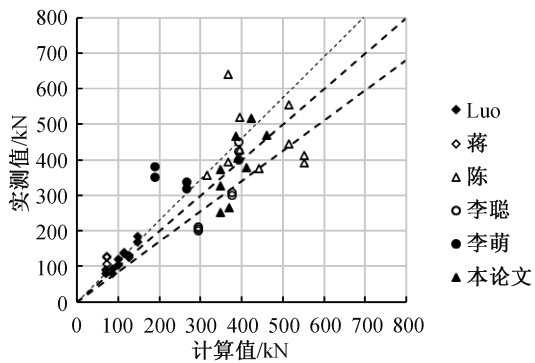


图 11 基于再次修正 C-T 模型的试件极限承载力  
计算值与实测值的对比(单位:kN)

Fig. 11 Comparison between measured and calculated load bearing capacities of specimens using twice modified C-T model(unit:kN)

参考文献:

[1] 王美宽, 潘玲珑, 王荣庆. 论桥梁结构加固与维修技术分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(07):253-254.  
 [2] 龚鸣, 张振涛. 桥梁加固施工中粘贴钢板法的应用[J]. 交通世界, 2020(36):39-40.  
 [3] 蔺钊飞, 刘玉擎. 大直径焊钉连接件抗剪性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12):1788-1793.  
 [4] 包恩和, 吴浩杰, 陈宜虎, 等. 混凝土结构植筋连接件剪拉性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16):267-271.  
 [5] 陈智杰. 钢-RPC 组合梁胶-栓钉新型连接件抗剪性能研究[D]. 广州市:华南理工大学, 2019.

[6] 李聪, 陈宝春, 谢泽豪, 等. 钢-UHPC 组合板环氧黏结界面抗剪与抗拉性能试验[J]. 土木工程学报, 2023, 56(1):25-36.  
 [7] 叶欣, 高磊, 熊文, 等. 粘贴双 L 形钢板加固 PC 简支 T 梁的抗剪性能[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2):93-102.  
 [8] 胡波, 姜宇恬. 纤维增强复材-钢界面有效黏结长度模型对比研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(03):29-35.  
 [9] 全学友, 衡倩, 李雄宋, 等. 混凝土中黏结型锚栓剪切试验方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2020, 54(4):748-758.  
 [10] 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):88-92.  
 [11] 董坤, 杨志嵩, 蒋济同, 等. 端部混锚 CFRP 加固混凝土界面黏结性能模型[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2):178-186.  
 [12] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京:清华大学, 2004.  
 [13] 张天鹏. BFRP-混凝土界面粘结性能研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2019.  
 [14] LUO Y C, WU B. Shear performance of steel plate-concrete joints connected with anchors and epoxy[J]. The Journal of Adhesion, 2020(4):1-26.  
 [15] 钢铁研究总院. 金属材料拉伸实验第一部分:室温实验方法:GB/T 228.1—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.  
 [16] 住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.  
 [17] 易南概, 张彬, 高德政等. 粘钢加固粘结界面抗剪强度检测方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006(03):411-414.  
 [18] 李萌, 邵旭东, 曹君辉, 等. UHPC 加固重度开裂钢桥面界面抗剪静力试验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(12):73-80.  
 [19] 刘传奇, 孔凡磊. 开孔板加劲型压型钢板加固混凝土界面黏结-滑移机理[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8):3333-3338.  
 [20] 蒋金龙. 适于钢桥面铺装的钢-UHPC 环氧增韧界面受力性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2021.

(责任编辑 周雪梅)