

引用本文: 苟文忠, 陈浩, 程高, 等. 节段预制拼装胶接缝抗剪性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 77-85.

GOU Wenzhong, CHEN Hao, CHENG Gao, et al. Test on shear performance of segmental precast epoxied joint[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 77-85.

DOI: 10.19815/j.jace.2021.09068

节段预制拼装胶接缝抗剪性能试验

苟文忠¹, 陈浩², 程高^{3,4}, 王鹏琪³

(1. 陕西路桥集团有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043;
3. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 西藏天路股份有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘要:为研究混凝土节段预制胶接缝的抗剪性能, 考虑接缝形式、环氧树脂胶厚度、剪力键键齿数目进行了胶接缝剪力键足尺直剪试验, 分析了试件的破坏形态。根据试件抗剪承载力和竖向相对滑移研究规范化剪应力-竖向相对滑移曲线, 比较分析现有胶接缝剪力键抗剪承载力计算公式的误差。结果表明: 与平面胶接缝和湿接缝相比, 单键齿胶接缝试件的抗剪承载力、规范化剪应力和塑性变形能力均有所提高; 单键齿胶接缝试件的环氧树脂胶厚度越大, 则单键齿胶接缝试件抗剪承载力越高, 规范化剪应力越大, 其塑性变形能力越好; 双键齿胶接缝试件的抗剪承载力比单键齿胶接缝试件的抗剪承载力高, 其塑性变形能力比单键齿胶接缝试件的塑性变形能力好; 不宜忽略环氧树脂胶厚度对胶接缝剪力键抗剪承载力的影响。

关键词: 节段预制; 胶接缝; 剪力键; 直剪试验

中图分类号: U441.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)02-0077-09

Test on shear performance of segmental precast epoxied joint

GOU Wenzhong¹, CHEN Hao², CHENG Gao^{3,4}, WANG Pengqi³

(1. Shaanxi Road & Bridge Group Co., Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. Xizang Tianlu Co, Ltd, Lasa 850000, Xizang, China)

Abstract: In order to study the shear performance of the precast epoxied joints of concrete segments, a full-scale direct shear test of the epoxied joint was carried out in consideration of the joint form, the thickness of the epoxy resin and the number of shear keys, and the failure modes of the specimens were analyzed. According to the shear bearing capacity and vertical relative slip, the normalized shear stress-vertical relative slip curve was studied, and the existing shear bearing capacity formulas were compared and analyzed. The results show that compared with flat epoxied joints and wet joints, the shear resistance, normalized shear stress and plastic deformation capacity of the single keyed epoxied joint specimens are improved. The greater the thickness of the epoxy resin of the single key, the higher the shear resistance of the single keyed joint, the greater the normalized shear stress, and the better its plastic deformation ability. The shear

收稿日期: 2021-09-17

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2020M673601XB); 陕西省交通运输科技项目(20-35T, 19-14K);

陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-036)

作者简介: 苟文忠(1973-), 男, 高级工程师, E-mail: 15229371880@qq.com。

通信作者: 程高(1988-), 男, 工学博士, 高级工程师, 博士生导师, E-mail: chengg@chd.edu.cn。

bearing capacity of the double keyed epoxied joint specimens is higher than that of the single keyed epoxied joint specimens, and its plastic deformation capacity is better than that of the single keyed epoxied joint specimen. It is not advisable to ignore the influence of the thickness of the epoxy resin on the shear performance of epoxied joint.

Key words: segmental precast; epoxied joint; shear key; direct shear test

0 引言

节段预制拼装快速化施工技术发展迅速,被广泛地应用在公路桥、铁路桥、城市市政桥梁中^[1]。标准的节段预制拼装技术既能满足桥梁快速施工要求,又具有经济、安全、对自然环境扰动小和梁体施工质量好的显著优点^[2]。中国近年建成的夏漳跨海大桥、绍兴大桥、芜湖长江二桥引桥及 2019 年竣工的虎门二桥引桥均采用节段预制拼装技术。此类桥梁中,普通钢筋在接缝处断开,预制混凝土节段通过预应力束拼装联系在一起^[3]。接缝是预制节段混凝土桥梁结构的一个重要部位和薄弱环节,是影响预制节段混凝土梁整体行为的重要因素,因此非常有必要对其抗剪性能进行试验研究^[4]。

中国《混凝土结构耐久性设计标准》^[5]对接缝没有特殊的使用说明和限制,美国节段混凝土桥梁设计与施工指导规范 AASHTO^[6]考虑了预制节段间的接缝对全桥强度的影响,该规范将预制节段的接缝分为 A 类和 B 类,其中 A 类接缝包括湿接缝与环氧树脂胶接缝,B 类接缝为干接缝。环氧树脂胶保证了接缝受力的整体性及均匀性,提高了接缝耐久性,同时能够弥补键齿匹配的误差,因此在 AASHTO 规范中规定,所有新建预制拼装桥梁只能采用 A 类接缝,即采用环氧树脂胶的胶接缝或者灌注混凝土或砂浆的湿接缝。

针对预制拼装接缝的抗剪性能,国内外学者进行了很多试验研究^[7]。沈殷等^[8]基于节段预制桥梁腹板处多齿剪力键干接缝脱离体的应力解析,分析并推导了多齿剪力键根部剪应力分布规律。Jiang 等^[9]发现钢纤维钢筋混凝土单键齿干接缝抗剪承载力比普通混凝土单键齿干接缝抗剪承载力高 20.1%。王文敬等^[10]以澳门 C370 轻轨高架桥为工程背景,建立胶接缝节段预制桥梁有限元模型,得出桥梁的抗剪承载力均满足相关规范要求。杨树民^[11]通过模型梁试验测试试验梁的主要静力反应和应力状况,验证了铁路桥梁胶接缝的结构形式、安全储备、构造的可能性、与相关规范的吻合程度。Kuranishi 等^[12]进行了胶接缝试件抗剪承载力试

验,指出粗糙表面试件的抗剪承载力比光滑表面试件的抗剪承载力大。Buyukozturk 等^[13]研究表明胶接缝抗剪承载力比干接缝抗剪承载力高出很多,胶接缝的破坏属于脆性破坏。Issa 等^[14]通过一组单键齿胶接缝试件抗剪承载力试验,证明胶接缝试件的剪切破坏发生在剪力键根部,环氧树脂胶可明显提高接缝的抗剪承载力,高温下的环氧树脂胶接缝抗剪承载力比低温下的环氧树脂胶接缝抗剪承载力提高 28%。李国平^[15]采用剪跨比、配箍率、接缝类型、体内外预应力筋配比等参数进行了 13 根整体式和 14 根节段式(胶接缝和干接缝)体外预应力混凝土简支模型梁试验,发现节段式体外预应力混凝土梁的剪切性能和整体式梁有很大差异,接缝决定着剪切破坏形态与破坏裂缝的形成,可以降低梁的抗剪承载力,增大破坏裂缝的宽度和梁体破坏时的变形。袁爱民等^[16]进行了节段式胶接缝剪力键抗剪试验,证明胶接缝抗剪承载力与齿深、齿距关联不大,胶接缝的键齿配筋和布置体内束可以明显提高胶接缝破坏时的延性,降低开裂荷载与极限荷载的比值。Ahmed 等^[17-18]研究表明,将围压提高到 4.5 MPa 时可以极大地改善分段桥的弹性刚度和塑性变形,混凝土强度在键齿抗剪强度中的贡献率随混凝土强度等级的降低而增大。

目前对于预制节段混凝土桥梁预制拼装接缝抗剪性能影响因素的研究主要集中在混凝土类型、接缝类型、环境温度、键齿几何尺寸、水平正应力,并在抗剪性能、强度计算等方面取得了重要成果,但对于环氧树脂胶厚度对胶接缝抗剪性能的研究较少。在桥梁工程施工中,预制节段桥梁受节段端面表层剥落、接缝胶涂装厚度不均匀、挤胶应力不均匀及节段拼装误差等影响,预制节段桥梁悬拼过程易出现不等厚度的接缝胶^[19]。同时预制节段混凝土桥梁胶接缝处环氧树脂胶厚度存在不同,导致以往的研究成果可能不适用,因此有必要对此进行系统的研究。本文以环氧树脂胶厚度为关键因素,同时考虑接缝形式、剪力键键齿数目,研究试件在直剪状态下抗剪性能,并对一些国内外学者提出的抗剪承载力计算公式进行评价。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了研究剪力沿接缝面传递的情况,根据试件形态尽可能接近预制节段式混凝土桥梁接缝面剪力传递模式的原则,在综合考虑接缝面上剪力分布的均匀性、加载试验的简单可操作性,参考已有的接缝抗剪试验资料的基础上,采用 Z 形试件进行接缝抗剪性能试验。由于试件加载过程中在加载点和试件拐角处应力集中,会导致局部混凝土发生压碎破坏;同时,受局部弯矩影响,在试件外侧拉应力较大,混凝土容易发生受拉开裂破坏,以上两种破坏模式将影响直接剪切试验结果。为了不使试件的其他部位先于接缝面破坏,通过配置构造钢筋进行加强。 $2\phi 12$ 的受拉钢筋布置在试件外侧,防止外侧的混凝土发生弯曲破坏。 $2\phi 12$ 的受压钢筋斜向布置在试件中部,防止内侧拐角处的混凝土发生压碎破坏。 $\phi 12$ 的分布钢筋布置在受拉钢筋的内侧。所有试件厚度为 150 mm,图 1 和表 1 分别给出 Z 形试件的几何尺寸与构造情况。

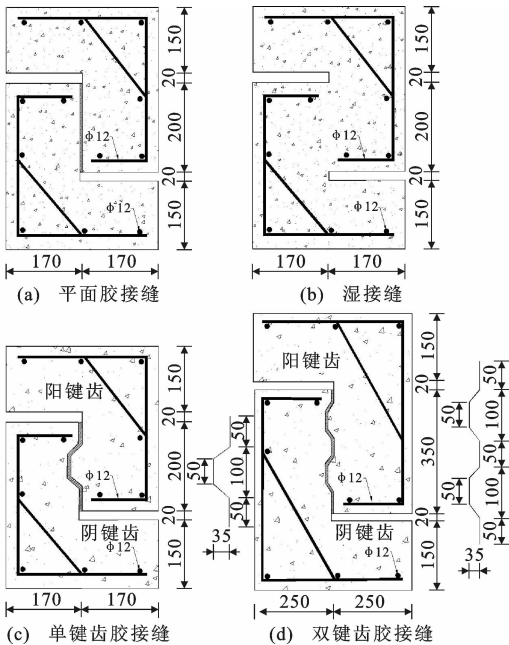


图 1 试件几何尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and configurations of specimen (unit:mm)

1.2 材料性能

本次试验混凝土设计强度等级为 C50,制备混凝土材料的水泥采用盾石牌 52.5R 普通硅酸盐水泥,细骨料采用粒径范围为 5~10 mm 的中粗河砂,粗骨料采用粒径范围为 5~20 mm 的碎石,拌合水

表 1 试件的设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	试件类型	环氧树脂胶厚度/mm	试件尺寸
BP	平面胶接缝	1.0	540 mm×340 mm×150 mm
BU	湿接缝		540 mm×340 mm×150 mm
B1	单键齿胶接缝	1.0	540 mm×340 mm×150 mm
B2	单键齿胶接缝	3.0	540 mm×340 mm×150 mm
B3	单键齿胶接缝	8.0	540 mm×340 mm×150 mm
B4	双键齿胶接缝	1.0	790 mm×500 mm×150 mm

采用自来水。混凝土中水泥、粉煤灰、砂、中石、小石、水、减水剂的质量配合比为 358 : 63 : 768 : 815 : 203 : 169 : 1,其中水灰比为 0.31。按国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)拌制 18 个尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,其实测立方体抗压强度平均值为 59.87 MPa,达到 C50 混凝土的要求,且标准差和变异系数较小,测试力学性能的混凝土与浇筑试件的混凝土为同一批次。在本次试验中采用螺纹钢筋作为试件的构造配筋,钢筋直径为 12 mm,屈服强度为 335 MPa,弹性模量为 2.0×10^5 MPa。试件所采用的接缝黏结剂特别为预制节段拼装结构桥梁黏接设计,是由环氧树脂与固化剂配合比为 3 : 1 组合而成的无溶剂型耐潮湿改性环氧树脂胶黏剂,在 12 h、24 h、7 d 的抗压强度分别为 48.0、72.3、91.2 MPa。湿接缝试件一次浇注完成,键齿试件分为阴键齿和阳键齿,使用木模板和预制形状的钢隔断将试件分为两部分,同时浇注阴键齿部分和阳键齿部分(平面胶接缝试件同时浇注两部分),待试件混凝土强度达到 80% 设计强度后,将悬拼搅拌均匀的胶黏剂用刮板均匀涂抹在试件接缝表面,必须在 2 h 内拼接完成,然后将完成拼装的试件在 20~40 ℃ 环境下放置 24 h 后进行试验,试件的详细制作过程如图 2 所示。

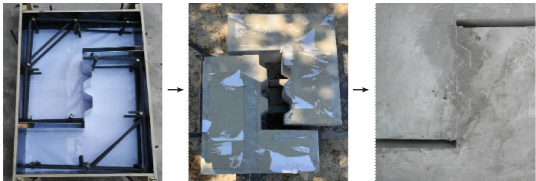


图 2 试件的制作过程

Fig. 2 Fabrication process of specimen

1.3 试验加载装置与加载方案

1.3.1 试验加载装置

本试验使用 2 000 kN 液压伺服试验机进行胶接缝剪力键的推出试验,加载方式采用位移控制,加

载速率不超过 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 试验加载装置如图 3 所示。压力油缸加载端和试件底座分别放置线性位移计, 采集竖向相对滑移。竖向荷载压力头加载端放置传感器, 传感器下方放 1 块钢板均匀传力, 并将压力信号与位移计信号同步, 以便获取荷载-位移曲线。为了模拟预制节段式混凝土桥梁节段间的预应力效应, 在试件双侧布置了水平加载装置。该装置由特制的钢约束箍、2 块钢板、1 块聚氯乙烯塑料板、小型压力传感器和油压千斤顶组成。钢约束箍包括 4 根高强锚杆, 高强锚杆穿过在试件两侧放置的约束钢板来控制加载区域, 将集中力转化为水平正应力均匀地传递至接缝接触面, 钢板内测放置聚氯乙烯塑料板, 通过在塑料板一侧涂抹润滑油消除上部剪力键在下移过程中的摩擦力。剪力键试验中通过油压千斤顶在水平方向约束钢板上施加侧向预压力, 以防止剪力键试件在推出过程中发生侧向滑移, 试验时侧向正应力设置为 0.1 MPa 。竖向荷载数据由试验机自带的控制系统采集, 竖向相对滑移数据采用江苏东华测试技术股份有限公司生产的数据采集仪采集。

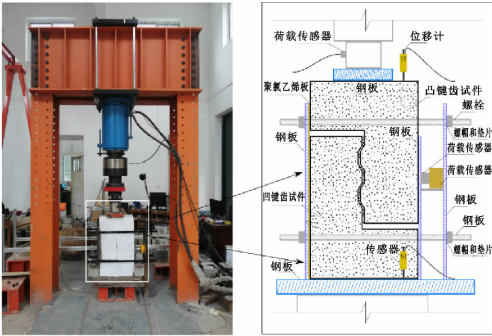


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Experimental loading setup

1.3.2 试验加载方案

试件施加的荷载主要分为竖向荷载和水平荷载两部分。水平荷载是用来模拟实际工程中因为张拉体外预应力束而产生的正应力, 在试验中水平荷载通过控制分离式油压千斤顶使水平荷载达到预定值。竖向荷载分为预加载和正式加载两部分, 预加载荷载为 20 kN , 预加载后缓慢卸载即可进入正式加载试验, 正式加载部分采用位移控制, 加载速率为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 直至试件被压坏。每级位移步加载完成后持续一段时间, 数值稳定后读取应变, 观察阳键齿和阴键齿的滑移及观测裂缝的发展情况。由于本次试验均为破坏性试验, 无需测量试件在试验后的残余变形和残余应力, 故卸载过程不进行分级

卸载, 直接缓慢卸至 0。

2 试验现象与结果分析

2.1 试验结果

试验选取 1 种平面胶接缝试件、1 种湿接缝试件、3 种单键齿胶接缝试件和 1 种双键齿胶接缝试件, 在集中荷载作用下各试件的试验结果如表 2 所示。为了确保试验结果的准确性, 每种试件制作了 2 个完全相同的试件, 进行了 2 次加载条件相同的试验, 当 2 次试验采集的试验结果差值超过试验结果平均值的 10% 时, 增加 1 次试验并分析差值过大的原因, 然后取其中 2 个试验结果差值符合要求的数据, 最后将 2 个试件的试验数据取均值并拟合成一条曲线。为了消除混凝土强度因素对抗剪性能的影响, 引入被美国公路与运输协会(AASHTO)和美国认证协会(ACI)广泛采用的规范化剪应力这一概念, 其值为剪应力与混凝土圆柱体抗压强度的算术平方根的比值, 本次试验混凝土强度等级为 C50 时, 混凝土圆柱体抗压强度可以近似由 0.79 倍的立方体抗压强度换算得到, 剪应力定义为剪切力除以剪切面积(平面胶接缝试件、湿接缝试件和单键齿胶接缝试件的剪切面积均为 $200\text{ mm}\times 150\text{ mm}$, 双键齿胶接缝试件的剪切面积为 $350\text{ mm}\times 150\text{ mm}$)。

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

试件 编号	极限荷 载/kN	相对滑 移/mm	极限剪应 力/MPa	规范化 剪应力	平均规范 化剪应力
BP-1	115.3	0.37	3.84	0.56	0.58
BP-2	123.4	0.33	4.11	0.60	
BU-1	145.4	0.41	4.85	0.70	0.68
BU-2	136.7	0.39	4.56	0.66	
B1-1	151.0	0.46	5.03	0.73	0.75
B1-2	157.2	0.47	5.24	0.76	
B2-1	173.9	0.50	5.80	0.84	0.86
B2-2	181.6	0.52	6.05	0.88	
B3-1	179.8	0.53	5.99	0.87	0.88
B3-2	182.6	0.53	6.09	0.89	
B4-1	256.0	1.03	4.88	0.71	0.72
B4-2	263.2	1.06	5.01	0.73	

2.2 试验过程及破坏形态

针对试验中具有代表性的部分试件进行试验现象描述, 观察到所有试件最终发生剪切滑移, 接缝区表面混凝土少量剥落。试件的其他区域在试验过程中均出现压碎和开裂现象, 试件破坏过程急促, 无明显征兆, 断裂时声音响亮, 属于典型的脆性破坏类

型。试件的裂缝破坏形态和裂缝示意图如图 4、5 所示。

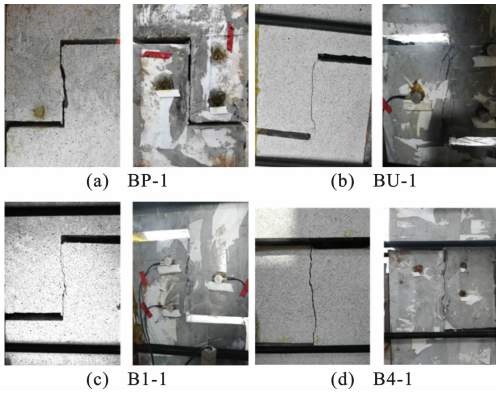


图 4 试件裂缝破坏形态

Fig. 4 Crack failure modes of specimens

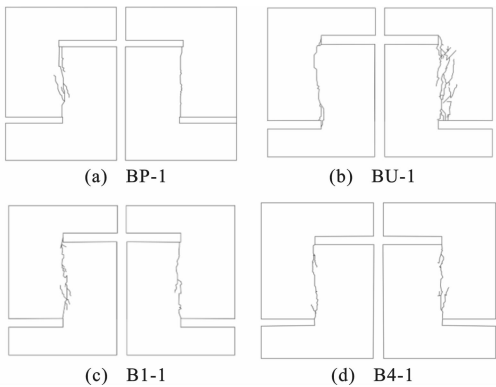


图 5 试件裂缝示意图

Fig. 5 Crack diagrams of specimens

2.2.1 平面胶接缝试件

试件 BP-1 的裂缝破坏形态和裂缝示意图如图 4(a)和图 5(a)所示。在荷载加载前期,接缝区没有出现裂缝。当荷载达到 115.26 kN 时,接缝区产生主裂缝,此时竖向相对滑移约为 0.37 mm,试件沿着混凝土与胶接缝的接触面破坏。

2.2.2 湿接缝试件

试件 BU-1 的裂缝破坏形态和裂缝示意图如图 4(b)和图 5(b)所示。在荷载加载前期,接缝区没有出现裂缝。当荷载达到 145.38 kN 时,接缝区内部微裂缝急剧增大形成主裂缝,在主裂缝附近产生大量的微裂缝,此时相对滑移约为 0.41 mm,试件发生破坏的位置位于试件中部混凝土连接处。

2.2.3 单键齿胶接缝试件

试件 B1-1 的裂缝破坏形态和裂缝示意图如图 4(c)和图 5(c)所示。在荷载加载前期,接缝区没有出现裂缝。当荷载达到 150.98 kN 时,接缝区内部微裂缝急剧增大形成主裂缝,在主裂缝附近产生少

量的微裂缝。此时相对滑移约为 0.46 mm,试件破坏后薄弱区域内的环氧胶保存完整,主要沿着混凝土区域开裂。

2.2.4 双键齿胶接缝试件

试件 B4-1 的裂缝破坏形态和裂缝示意图如图 4(d)和图 5(d)所示,在荷载加载前期,接缝区没有出现裂缝。当荷载达到 255.99 kN 时,接缝区内部微裂缝急剧增大形成主裂缝,在主裂缝附近产生少量微裂缝,此时相对滑移约为 1.03 mm,试件破坏后薄弱区域内的环氧胶保存完整,主要沿着混凝土区域开裂。

2.3 抗剪性能影响因素

2.3.1 接缝形式

表 2 中 BP、BU、B1 反映接缝形式对试件抗剪性能的影响,BP 和 BU 为对比试件。可以看出:试件 B1 的平均抗剪承载力相较试件 BP 的平均抗剪承载力提高了 29.1%,试件 B1 的平均抗剪承载力相较试件 BU 的平均抗剪承载力提高了 9.3%;试件 B1 的平均竖向相对滑移相较试件 BP 的平均竖向相对滑移提高了 32.9%,试件 B1 的平均竖向相对滑移相较试件 BU-1 和 BU-2 的平均竖向相对滑移提高了 16.3%。通过对比可知,单键齿胶接缝试件的抗剪承载力比平面胶接缝试件和湿接缝试件的抗剪承载力高,其塑性变形能力比平面胶接缝试件和湿接缝试件的塑性变形能力好。

图 6 给出了 BP、BU、B1 的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线。由图 6 可知,BP、BU、B1 的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线斜率相差不多,剪切破坏后,曲线不再上升,斜率近似为 0,竖向相对滑移继续增加。B1 的规范化剪应力和竖向相对滑移均最大,BU 的规范化剪应力和竖向相对滑移次之,BP 的规范化剪应力和竖向相对滑移均最小。综上所述,与平面胶接缝试件和湿接缝试件相比,单键齿胶接缝试件的规范化剪应力最大。

2.3.2 环氧树脂胶厚度

表 2 中 B1、B2、B3 反映环氧树脂胶厚度对试件抗剪性能的影响,B1 和 B2 为对比试件。可以看出:试件 B3 的平均抗剪承载力相较试件 B1 的平均抗剪承载力提高了 17.6%,试件 B3 的平均抗剪承载力相较试件 B2 的平均抗剪承载力提高了 2.0%;试件 B3 的平均竖向相对滑移相较试件 B1 的平均竖向相对滑移提高了 14.0%,试件 B3 的平均竖向相对滑移相较试件 B2 的平均竖向相对滑移提高了 3.9%。通过对比可知,单键齿胶接缝试件的环氧树

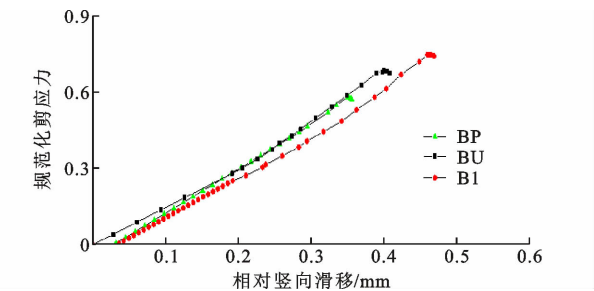


图 6 不同接缝形式试件的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线

Fig. 6 Normalized shear stress-vertical relative slip curve of different joint form of specimen

脂胶厚度越大,则单键齿胶接缝试件抗剪承载力越高,其塑性变形能力越好。

图 7 给出了 B1、B2、B3 的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线。由图 7 可知,试件 B1、B2、B3 的破坏形式相同,达到极限抗剪强度前,规范化剪应力-竖向相对滑移曲线呈线性变化,规范化剪应力-竖向相对滑移曲线斜率基本相同,剪切破坏后,曲线不再上升,斜率近似为 0,竖向相对滑移继续增加。B3 的规范化剪应力和竖向相对滑移均最大,B2 的规范化剪应力和竖向相对滑移次之,B1 的规范化剪应力和竖向相对滑移均最小,环氧树脂胶厚度从 1 mm 到 3 mm 的规范化剪应力增加幅度较大,从 3 mm 到 8 mm 的规范化剪应力增加幅度较小。综上所述,单键齿胶接缝试件的规范化剪应力随环氧树脂胶厚度的增加而增大。

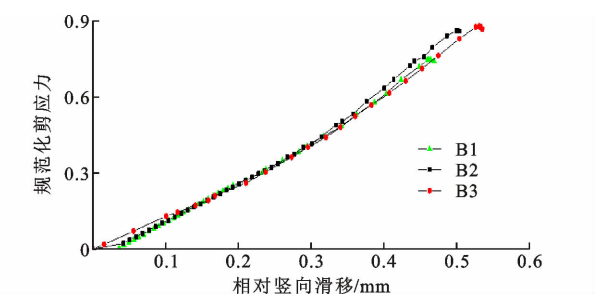


图 7 不同胶接缝厚度试件的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线

Fig. 7 Normalized shear stress-vertical relative slip curve of different epoxied joint thickness of specimen

2.3.3 剪力键键齿数目

表 2 中 B1、B4 反映剪力键键齿数目对试件抗剪性能的影响。可以看出:试件 B4 的平均抗剪承载力相较试件 B1 的平均抗剪承载力提高了 68.5%;试件 B4 的平均竖向相对滑移相较试件 B1 的平均竖向相对滑移提高了 114.7%。通过对比可知,双键齿胶接缝试件的抗剪承载力比单键齿胶接

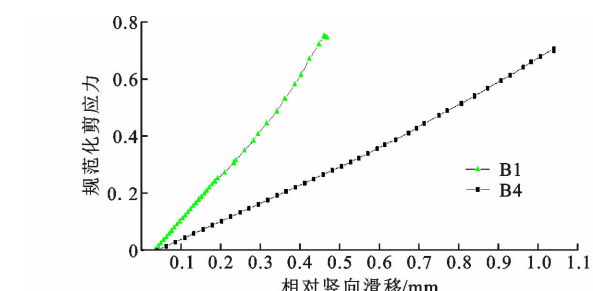


图 8 不同剪力键键齿数目试件的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线

Fig. 8 Normalized shear stress-vertical relative slip curve of different shear key number of specimen

缝试件的抗剪承载力高,其塑性变形能力比单键齿胶接缝试件的塑性变形能力好。

图 8 给出了 B1、B2、B3 的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线。由图 8 可知,试件 B1、B4 的破坏形式相同,达到极限抗剪强度前,规范化剪应力-竖向相对滑移曲线呈线性变化,B4 的规范化剪应力-竖向相对滑移曲线斜率远小于 B4 的斜率,B4 的竖向相对滑移大于 B1 的竖向相对滑移,而 B4 的规范化剪应力稍微小于 B1 的规范化剪应力,这是由于随着剪力键键齿数目的增加,阴键齿与阳键齿之间的装配误差增大,更易产生应力集中,使得每个键齿不能同时发挥抗剪作用。

3 抗剪强度分析

国内外学者对键齿胶接缝的抗剪性能进行研究,提出了一些在直剪状态下键齿胶接缝抗剪承载力计算公式,本文将试验实测值与一些学者提出的公式计算值进行对比分析。Buyukozturk 等^[13]提出的计算公式是在丰富的试验数据基础上,运用数理统计方法进行回归分析得到的半经验半理论公式。卢文良^[20]提出的计算公式是基于接缝的抗剪承载力,由全截面混凝土的摩擦抗力和剪切抗力两部分来提供,这一前提的正确性有待验证,因为抗剪承载力将由全截面混凝土的摩擦抗力以及剪切抗力中的较大者来确定,而不是两者之和,因此其提出的接缝直剪机理存在一定不合理性。孙雪帅^[21]提出的计算公式在键齿剪切抗力理论的基础上,对接缝直剪破坏机理及承载力计算方法进行了研究,并引入多键齿折减系数,考虑了多键齿受力不均匀的影响。袁爱民等^[3]提出的计算公式基于摩尔-库仑摩擦破坏准则,可以用来评估胶接缝剪力键的抗剪强度,并结合 ACI 规范和 AASHTO 规范对公式参数进行修正。上述学者提出的计算公式的计算结果如表 3

表 3 已有公式计算结果对比

Table 3 Comparisons of existing formula calculation results

试件编号	f'_c/MPa	V_u/kN	V_a/kN	V_u/V_a	V_b/kN	V_u/V_b	V_c/kN	V_u/V_c	V_d/kN	V_u/V_d
B1-1	47.30	150.98	193.62	0.78	126.28	1.20	146.87	1.03	131.05	1.15
B1-2	47.30	157.22	193.62	0.81	126.28	1.25	146.87	1.07	131.05	1.20
B2-1	47.30	173.86	193.62	0.90	126.28	1.38	146.87	1.18	131.05	1.33
B2-2	47.30	181.62	193.62	0.94	126.28	1.44	146.87	1.24	131.05	1.39
B3-1	47.30	179.83	193.62	0.93	126.28	1.42	146.87	1.22	131.05	1.37
B3-2	47.30	182.63	193.62	0.94	126.28	1.45	146.87	1.24	131.05	1.39
平均值				0.88		1.35		1.16		1.31
方差				0.004		0.010		0.007		0.009
B4-1	47.30	255.99	338.84	0.76	221.00	1.16	257.02	1.00	187.65	1.36
B4-2	47.30	263.19	338.84	0.78	221.00	1.19	257.02	1.02	187.65	1.40
平均值				0.77		1.17		1.01		1.38
方差				0.000 20		0.004 50		0.000 20		0.000 80

注: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; V_u 为试件抗剪强度,其值等于试件的极限荷载; V_a 、 V_b 、 V_c 、 V_d 分别为依照文献[13]、[20]、[21]、[3]得到的抗剪强度计算值。

所示。

Buyukozturk 等^[13]提出的键齿胶接缝抗剪承载力 V_a 计算公式为

$$V_a = V_j(0.921\sqrt{f'_c} + 1.20\sigma_n) \tag{1}$$

式中: σ_n 为接缝面正应力; A_j 为键齿接缝面总面积。

卢文良^[20]提出的键齿胶接缝抗剪承载力 V_b 计算公式为

$$V_b = A_j(0.6\sqrt{f'_c} + 0.83\sigma_n) \tag{2}$$

孙雪帅^[21]提出的键齿胶接缝抗剪承载力 V_c 计算公式为

$$V_c = \alpha_1 \alpha A_j(0.39f_{cu}^{2/3} + 1.51\sigma_n) \tag{3}$$

式中: α_1 为键齿胶接缝直剪折减系数,建议取 0.8; α 为多键折减系数,键齿数量为 1、2 时, α 取 1.00; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

袁爱民等^[9]提出的键齿胶接缝抗剪承载力 V_d 计算公式为

$$V_d = \alpha A_{\text{joint}}^{\text{eq}}(0.56\sqrt{f'_c} + 1.2\sigma_n) \tag{4}$$

式中: α 为考虑到键齿数量的系数,单键齿和多键齿的 α 分别为 1.1、0.9; $A_{\text{joint}}^{\text{eq}}$ 为换算截面面积, $A_{\text{joint}}^{\text{eq}} = A_j + (n-1)A_s$, A_s 为配筋面积,由于本文试验键齿为素混凝土,故 A_s 为 0。

将所有的键齿胶接缝试件进行直剪试验所测得的极限剪切荷载值与式(1)~(4)计算值进行对比分析,结果如表 3 所示。可以看出:对于单键齿胶接缝试件,极限剪切荷载实测值与式(1)~(4)计算值之比的平均值分别为 0.88、1.35、1.16、1.31,方差分别为 0.004、0.010、0.007、0.009,表明式(1)高估了单键齿胶接缝试件的抗剪承载力,式(2)~(4)低估

了单键齿胶接缝试件的抗剪承载力,极限剪切荷载实测值与式(1)计算值之比波动最小。极限剪切荷载实测值与式(1)计算值之比分别为 0.78、0.81、0.90、0.94、0.93、0.94,极限剪切荷载实测值与式(2)计算值之比分别为 1.20、1.25、1.38、1.44、1.42、1.45,极限剪切荷载实测值与式(3)计算值之比分别为 1.03、1.07、1.18、1.24、1.22、1.24,极限剪切荷载实测值与式(4)计算值之比分别为 1.15、1.20、1.33、1.39、1.37、1.39,表明在环氧树脂胶厚度为 1 mm 时,式(3)对单键齿胶接缝抗剪承载力的预测效果最好,在环氧树脂胶厚度为 8 mm 时,式(1)对单键齿胶接缝抗剪承载力的预测效果最好。

对于双键齿胶接缝试件,极限剪切荷载实测值与式(1)~(4)计算值之比的平均值分别为 0.77、1.17、1.01、1.38,表明式(1)高估了双键齿胶接缝试件的抗剪承载力,式(2)~(4)低估了双键齿胶接缝试件的抗剪承载力,在环氧树脂胶厚度为 1 mm 时,式(3)对双键齿胶接缝抗剪承载力的预测效果最好。

4 结 语

(1)与平面胶接缝和湿接缝相比,单键齿胶接缝试件的抗剪承载力、规范化剪应力和塑性变形能力均有所提高。

(2)单键齿胶接缝试件的环氧树脂胶厚度越大,则单键齿胶接缝试件抗剪承载力越高,规范化剪应力越大,其塑性变形能力越好。

(3)双键齿胶接缝试件的抗剪承载力比单键齿胶接缝试件的抗剪承载力高,其塑性变形能力比单

键齿胶接缝试件的塑性变形能力好。

(4)Buyukozturk 等计算公式高估了单键齿和双键齿胶接缝试件的抗剪承载力,卢文良、孙雪帅和袁爱民等公式低估了单键齿和双键齿胶接缝试件的抗剪承载力。在环氧树脂胶厚度为 1 mm 时,孙雪帅公式对单双键齿胶接缝抗剪承载力的预测效果最好,在环氧树脂胶厚度为 8 mm 时,Buyukozturk 等计算公式对单键齿胶接缝抗剪承载力的预测效果最好。

(5)当今大多学者提出的键齿胶接缝抗剪承载力计算公式一般未考虑环氧树脂胶厚度的因素,因此提出的键齿胶接缝抗剪承载力计算公式只有在特定的胶接缝厚度下才能较准确地预测键齿胶接缝直剪承载力,后续将围绕该方向进行研究。

参考文献:

References:

- [1] 张立青. 节段预制拼装法建造桥梁技术综述[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(12): 63-66, 75.
ZHANG Liqing. The summary of technologies for building bridges with assembled precast segments[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(12): 63-66, 75.
- [2] SHAMASS R, ZHOU X M, ALFANO G. Finite-element analysis of shear-off failure of keyed dry joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(6): 04014084.
- [3] 袁爱民, 符俊冬, 程磊科, 等. 节段预制桥梁胶接缝配筋剪力键剪切性能试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 81-87.
YUAN Aimin, FU Jundong, CHENG Leike, et al. Experiment of shear performance of epoxy resin joints with reinforced keys in precast concrete segmental bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 81-87.
- [4] 姜海波, 王添龙, 肖杰, 等. 预制节段钢纤维混凝土梁干接缝抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 37-49.
JIANG Haibo, WANG Tianlong, XIAO Jie, et al. Test on shear behavior of dry joints in precast steel fiber reinforced concrete segmental bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 37-49.
- [5] 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for design of concrete structures durability: GB/T 50476—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [6] AASHTO. Guide specifications for design and construction of segmental concrete bridges[R]. 2nd ed. Washington DC: AASHTO, 2003.
- [7] 闫泽宇. 节段预制拼装 UHPC 胶接缝抗剪性能试验及有限元分析[J]. 公路工程, 2019, 44(6): 228-233.
YAN Zeyu. Experimental and numerical analysis on shear behavior of epoxied joints in precast UHPC segmental bridges[J]. Highway Engineering, 2019, 44(6): 228-233.
- [8] 沈殷, 蔡鹏, 陈立生, 等. 节段预制拼装混凝土桥梁剪力键接缝的抗剪强度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 1414-1420.
SHEN Yin, CAI Peng, CHEN Lisheng, et al. Shear strength of keyed joints in segmental precast concrete bridges[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(10): 1414-1420.
- [9] JIANG H B, CHEN L, MA Z J, et al. Shear behavior of dry joints with castellated keys in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(2): 04014062.
- [10] 王文敬, 梁斌, 陈建国. 城市轻轨高架桥胶接缝预制节段箱梁的力学性能研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 108-114.
WANG Wenjing, LIANG Bin, CHEN Jianguo. Mechanical properties of precast segmental box girders with epoxy joints in urban railway transit line[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2017, 47(1): 108-114.
- [11] 杨树民. 节段预制胶拼铁路梁静力试验研究[J]. 国防交通工程与技术, 2016, 14(3): 1-6.
YANG Shumin. A static-test-based study of the segment-precast glue-jointed railway box girder[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2016, 14(3): 1-6.
- [12] KURANISHI S, NAGANUMA F, NAKAZAWA M, et al. Mechanical behavior of metal contact joint[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(7): 1977-1990.
- [13] BUYUKOZTURK O, BAKHOUM M M, MICHAEL BEATTIE S. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12): 3380-3401.
- [14] ISSA M A, ABDALLA H A. Structural behavior of single key joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 315-324.
- [15] 李国平. 体外预应力混凝土筒支梁剪切性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 58-63.
LI Guoping. Experimental study on the shear behavior

- of simply-supported externally prestressed concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2):58-63.
- [16] 袁爱民,何雨,程磊科,等. 节段预制桥梁胶接缝剪切性能试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(6):22-26,33.
YUAN Aimin, HE Yu, CHENG Leike, et al. Study on shear behavior of glued joint structure in segmental precast concrete beam [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(6): 22-26, 33.
- [17] AHMED G H, AZIZ O Q. Shear strength of joints in precast posttensioned segmental bridges during 1959-2019, review and analysis [J]. Structures, 2019, 20: 527-542.
- [18] AHMED G H, AZIZ O Q. Stresses, deformations and damages of various joints in precast concrete segmental box girder bridges subjected to direct shear loading [J]. Engineering Structures, 2020, 206:110151.
- [19] 卢文良,马晓蕾,郑强. 节段预制胶拼构件胶接缝厚度研究[J]. 铁道建筑,2019,59(8):39-41.
LU Wenliang, MA Xiaolei, ZHENG Qiang. Research on epoxy joint thickness for precast segmental members [J]. Railway Engineering, 2019, 59(8):39-41.
- [20] 卢文良. 节段预制体外预应力混凝土梁设计理论研究[D]. 北京:北京交通大学,2004.
LU Wenliang. Research on design theory of segment precast external prestressed concrete beams [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2004.
- [21] 孙雪帅. 预制拼装桥梁节段间接缝抗剪性能试验研究[D]. 南京:东南大学,2015.
SUN Xueshuai. Experimental study on shear behavior of joints in precast segmental bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.