

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.014

混凝土-石材粘结界面剪切性能试验研究*

张 淼¹, 钱永久¹, 张 方¹, 徐佰顺²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 四川建筑职业技术学院交通与市政工程系, 四川 成都 610399)

摘要: 为了研究混凝土和石材粘结界面的抗剪性能,设计Z型和套箍型两种试件,进行了混凝土-石材粘结界面剪切力学性能试验。试验考虑了材料强度、界面植筋情况、试件形式等变化参数。试验结果表明:界面为试件的薄弱部位,混凝土和石材的粘结界面上均发生了剪切破坏。在一定范围内,混凝土强度的提高会增强界面的剪切强度,延缓试件的开裂,减小界面同级荷载下的剪切位移;界面植筋可以显著提高试件的剪切性能,提高幅度随着植筋率的增大而增大;相同条件下,套箍型试件的剪切强度大于Z型试件,未植筋试件提高约20%,植筋试件提高约40%~55%。根据试验结果结合理论分析,提出了可考虑套箍增强作用的界面抗剪承载力计算公式。

关键词: 混凝土; 石材; 界面; 剪切强度

中图分类号: TU398^{+.9} **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0952-07

Experimental Study on Shearing Strength of Interfacial Bonding of Concrete and Stone Masonry

ZHANG Miao¹, QIAN Yongjiu¹, ZHANG Fang¹, XU Baishun²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Department of Transport and Municipal Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Chengdu 610399, China)

Abstract: To investigate the shear performance of the interface between concrete and stone, the interfacial shear tests were carried out on the Z-type and hoop-type concrete-stone bonded specimens. The effects of bonding methods, material strength and forms of embedded steel bars on interfacial shear properties were considered. The experimental results show that the bonding interface between concrete and stone is the weak part of the samples, and shear failure occurs along the interface. Within a certain range, the increase of concrete strength will enhance the shear strength of the interface, delay the cracking of the specimens and reduce the shear displacement of the interface. Interfacial reinforced steel bars can significantly improve the shear resistance of the interface. The shear strength of the interface rises greatly with the increment of the reinforcement ratio of steel bars. The shear strength of the hoop type specimen is larger than that of the Z-type specimen, with about 20% for the unrein-

* 收稿日期:2018-10-18;修回日期:2018-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51778532)资助

作者简介:张 淼(1981-),女,工程师,博士研究生。主要从事既有桥梁结构的检测、评估与加固理论和技术的研究。

Email:swjtuzm@qq.com

通讯作者:徐佰顺(1986-),男,讲师,博士。主要从事既有桥梁结构的检测、评估与加固理论和技术的研究。

Email:xu_baishun@sina.com

forced specimen and about 40% to 55% for the reinforced specimen. Based on the test results and the theoretical analysis, a formula for calculating the shear capacity of the interface considering the reinforcement of the hoop was proposed.

Keywords: concrete; stone; interface; shear strength

引言

石拱桥在我国有着悠久的历史,以其造型美观、取材方便等优点,在建国初期被广泛应用。经过多年的使用,有相当比例的石拱桥,存在承载力偏低、结构老化等不同程度的病害,不能满足现代交通发展和行车安全的要求,需要进行维修加固^[1-2]。混凝土增大截面加固法是一种常用的石拱桥的加固方法,其中混凝土套箍加固石拱桥技术做为增大截面加固法的一种应用广泛^[3],混凝土和石材能否有效的粘结在一起是保证加固效果的关键,而剪切破坏是粘结界面常见的一种破坏型式^[4],故界面的抗剪性能是衡量界面粘结力学性能的重要指标。

目前对不同材料界面受力性能的研究主要集中于新老混凝土^[5-7]、CFRP和混凝土^[8]等,对混凝土和石材界面性能的研究较少,张森等^[9]对植筋情况下混凝土和石砌体的粘结性能进行了试验研究,分析了植筋率和植筋深度对结合面抗剪强度的影响规律;张晶等^[10]对套箍法加固石拱桥主拱圈的正截面承载力进行了理论分析;刘庆阳等^[11]对增大截面法加固石拱桥最小加固层厚度进行了计算分析;刘思孟^[3]对钢筋混凝土套箍封闭主拱圈加固拱桥技术进行了研究;孙潮等^[12]、闫永伦等^[13]研究了加固后拱圈的极限承载力。

目前已有研究大多是混凝土加固石拱桥技术应用的研究,尚缺少对二者界面性能的研究,混凝土和石材界面力学性能是保证两种材料间协调变形、共同受力的基础,本文通过进行混凝土-石材界面剪切力学性能试验,对界面的剪切性能和影响因素进行了研究。

1 实验

1.1 试件的设计与制作

为研究混凝土与老石材粘结界面的剪切性能,结合已有相关抗剪试验方法^[14],考虑到制作试件和加载的简单可行性和套箍加固法的特殊结构形式,

设计了Z型和套箍型两种试件,进行混凝土和石材界面抗剪性能试验,试件设计如图1所示,套箍型试件石材底部为空心,两种试件粘结界面尺寸分别为(200×200)mm和(4×200×200)mm,为了不使其其他部位先于“粘结界面”破坏,试件的其他部位均通过配筋进行加强。

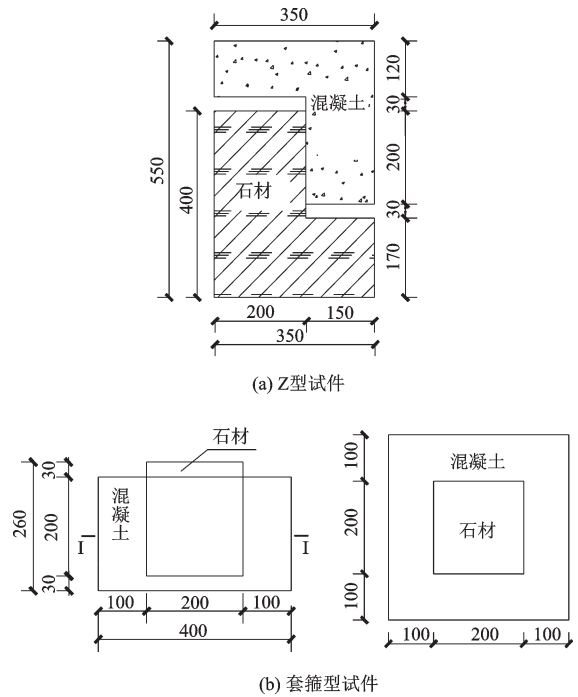


图1 试件设计

Fig 1 Design drawing of specimen

试验中石材采用四川雅安的黑砂岩,强度等级为MU60,混凝土采用现场配制,水泥采用峨眉某水泥厂的42.5R普通硅酸盐水泥,细骨料采用中粗河砂,粗骨料采用粒径为5~20mm的碎石,植入钢筋采用HRB335级钢筋。在试验中,按《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[15]对混凝土进行材料力学性能试验,结果见表1。

石材表面处理采用人工手持电锤凿毛,界面粗糙度采用灌砂法进行评定,试件粗糙度均为2mm左右。植筋试件先在石材的植筋位置处钻孔,清孔后采用喜利得(德国)HIT-RE500锚固粘结剂进行植筋,然后按设计尺寸制作模板,浇筑混凝土,标准养

表 1 混凝土材料性能

Table 1 Mechanical properties of concrete

强度等级	抗压强度平均值/Pa	弹性模量/(N·mm ⁻²)
C35	43.2	25 800
C40	51.0	26 000
C45	58.4	28 800

护 28 天后进行试验,试件制作及成型如图 2 所示。

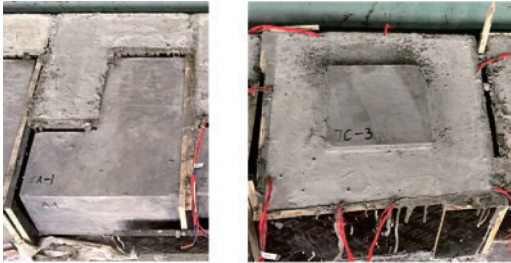


图 2 试件制作及成型

Fig.2 Manufacturing and molding of specimens

1.2 试验方案

根据实际工程中的应用情况,试验设计中考虑了混凝土强度等级、试件型式及界面植筋情况等变化参数,考察其对界面剪切性能的影响。试验设计了 Z 型和套箍型剪切试件共六组,其中植筋试件界面植筋布置情况如图 3 所示,套箍型试件四面均按图示进行植筋,试件设计方案见表 2。

1.3 试验方法

混凝土和石材界面剪切性能试验在型号为 YAW4206 的 200T 微机控制电液伺服压力试验机上进行,加载速率为 100 N/s,试验机由电脑控制加

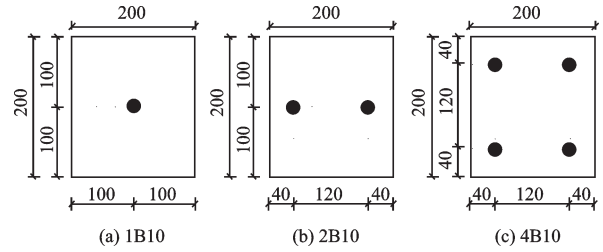


图 3 界面植筋布置

Fig.3 Interface reinforcement arrangement

载,加载精度高。

试验时试件竖直放置,为了使试件受力均匀,在试件的上下两端分别放置两块钢垫板,压力机的上承压板上装有荷载传感器,直接测定试件承受的压力。Z 型试件在界面的两侧、套箍型试件在混凝土外表面的上、中、下三个位置均粘贴应变片,考察界面应变分布情况,植筋试件在每根钢筋上贴 3 个应变片,分别贴在钢筋植入石材和混凝土部分的两端及界面处,应变布置及试验加载装置如图 4 所示。

试验加载过程根据计算极限荷载的大小,采用分级加载制度,同步记录各级荷载下试件的裂缝发

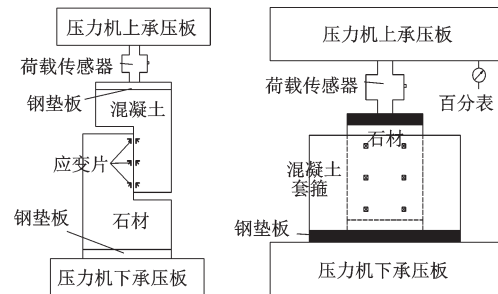


图 4 试验加载及测点布置

Fig.4 Arrangement of loading points and measuring points

表 2 混凝土和石材界面剪切试验设计

Table 2 The experiment design on concrete-stone interfacial shear property

分组	编号	混凝土强度等级	植筋情况	分组	编号	混凝土强度等级	植筋情况
ZA 组	ZA-1	C35	不植筋	TA 组	TA-1	C35	不植筋
	ZA-2	C40	不植筋		TA-2	C40	不植筋
	ZA-3	C45	不植筋		TA-3	C45	不植筋
ZB 组	ZB-1	C35	1B10	TB 组	TB-1	C35	1B10
	ZB-2	C40	1B10		TB-2	C40	1B10
	ZB-3	C45	1B10		TB-3	C45	1B10
ZC 组	ZC-1	C40	1B10	TA 组	TC-1	C40	1B10
	ZC-2	C40	2B10		TC-2	C40	2B10
	ZC-3	C40	4B10		TC-3	C40	4B10

注:编号中 Z 表示 Z 型试件;T 表示套箍型试件;植筋试件植筋深度均为 100 mm

展情况、应变及位移数据。

2 试验现象与结果

2.1 试验结果

通过试验,得到各试件的开裂荷载、极限荷载、剪切强度及位移结果(表3)。表中界面剪切强度按

式(1)计算:

$$\tau = P_u / A \quad (1)$$

式中, P_u 为试验极限荷载(kN); A 为试件粘结界面尺寸(mm^2)。

2.2 破坏形态

所有试件均在界面处发生了剪切破坏,破坏时混凝土和石材界面上出现贯穿性裂缝,这表明界面处为结构的薄弱区域。

表3 混凝土和石材剪切试验结果

Table 3 The results of concrete-stone interfacial shear tests

编号	开裂荷载 P_c /kN	极限荷载 P_u /kN	剪切强度/ MPa	剪切位移/ mm	编号	开裂荷载 P_c /kN	极限荷载 P_u /kN	剪切强度/ MPa	剪切位移/ mm
ZA-1	39.82	40.75	0.98	0.074	TA-1	198.76	202.35	1.21	0.082
ZA-2	42.78	44.75	1.13	0.068	TA-2	224.50	231.38	1.39	0.098
ZA-3	49.84	51.26	1.25	0.090	TA-3	245.32	254.47	1.53	0.103
ZB-1	40.72	54.81	1.35	0.455	TB-1	292.30	325.90	1.92	0.483
ZB-2	46.30	60.36	1.54	0.497	TB-2	311.27	362.88	2.20	0.511
ZB-3	53.65	70.81	1.71	0.517	TB-3	326.59	419.81	2.51	0.549
ZC-1	46.30	60.36	1.54	0.497	TC-1	311.27	362.88	2.20	0.511
ZC-2	56.32	116.03	2.83	0.904	TC-2	360.32	639.50	3.88	1.112
ZC-3	68.83	169.27	4.11	1.231	TC-3	580.80	1020.47	6.23	1.329

Z型未植筋试件,加载过程中界面处首先出现细微裂缝,之后立即在界面处断裂,混凝土和石材完全分离,如图5所示,断裂后,发现界面附近出现竖向、斜向细微裂缝,试件破坏前没有任何征兆,出现微裂缝后瞬间贯通界面。Z型植筋试件,加载到开裂荷载时,试件也是首先在界面处出现细微竖向裂缝,随着加载的进行,竖向裂缝宽度逐渐增大,同时界面附近开始出现一定数量的斜裂缝,很快裂缝贯穿整个界面,由于钢筋的存在,混凝土和石材没有完全分离。

套箍型未植筋试件,当加载至开裂荷载时,除界面外,混凝土顶面、外表面多处出现竖向、斜向裂

缝,继续加载,裂缝迅速延伸扩展,很快试件破坏,破坏时,石材和混凝土沿着界面分离,混凝土顶面、侧面出现多条竖向、斜向裂缝,有的为竖向通长裂缝,套箍型植筋试件除了上述位置外,破坏时混凝土外表面植筋位置处出现通长竖向裂缝,其典型裂缝情况如图6所示。

试验中未植筋试件从开裂到破坏时间很短,发生明显的脆性破坏,破坏时裂缝宽度也很小。而植筋试件从开裂到破坏有明显的征兆,发生延性破坏,且随着植筋率的增大,破坏时的最大裂缝宽度也越大,TC-3试件裂缝宽度最大约为1 mm,说明在一定的范围内植筋率越大,试件破坏的延性特点越明显。

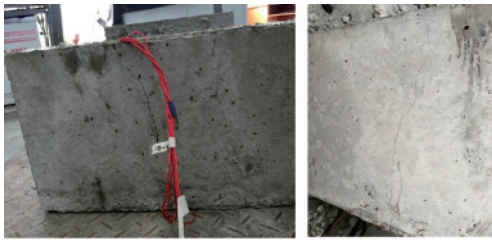
2.3 界面应力分布情况

根据试验同步采集到的应变数据可以得到试件的荷载—应变曲线,选取两个典型试件的荷载—应变曲线如图7所示(图中混凝土和石材压应变为正),Z型试件在界面处的应力分布是不均匀的,未植筋试件曲线呈线性关系,界面应力分布情况是从界面中间向上下两端逐渐减小,且界面处的混凝土和石材极限应变值很小,约为 $40 \mu\epsilon \sim 60 \mu\epsilon$ 。植筋

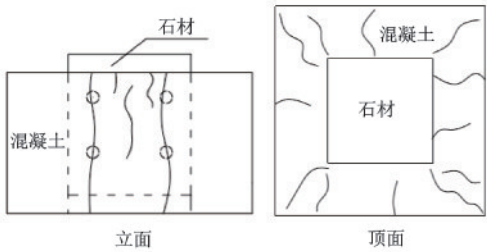


图5 Z型试件裂缝

Fig.5 Fracture diagram of Z-type specimen



(a) 试件开裂情况

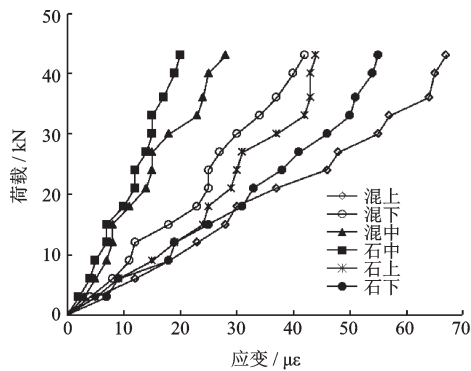


(b) 试件裂缝分布

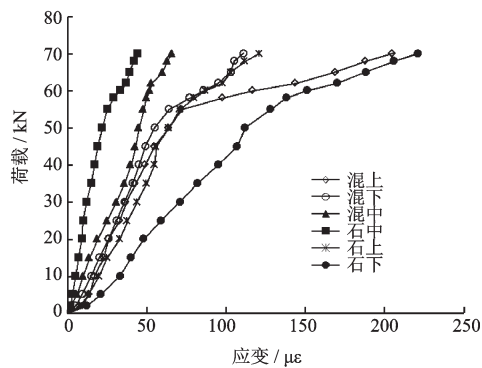
图6 套箍型植筋试件裂缝

Fig.6 Fracture diagram of hoop-type specimen

试件的荷载应变曲线在加载后期曲线呈现出非线性特点,极限应变值也比未植筋试件增大很多,当植筋率分别为0.196%、0.392%和0.785%时,极限应变分别为221 $\mu\epsilon$ 、513 $\mu\epsilon$ 和1146 $\mu\epsilon$ 。



(a) ZA-2试件



(b) ZB-2试件

图7 界面混凝土和石材荷载—应变曲线

Fig.7 Load-strain curves of the interface

钢筋荷载—应变关系如图8所示,钢筋应变在加载初期应变很小,钢筋几乎不受力,加载到开裂荷载时,钢筋应变曲线出现突变,呈非线性迅速增大,直至试件破坏。钢筋的应变分布情况是界面附近最大,向两端逐渐减小,试件破坏时,钢筋应力在界面处已接近或到达屈服应力,而两端钢筋应力较小,远未达到屈服应力。

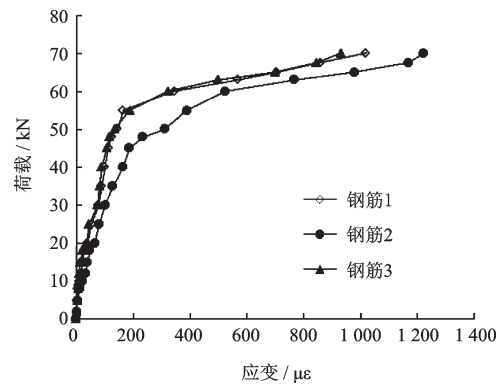


图8 ZB-1钢筋荷载—应变曲线

Fig.8 Load-strain curves of the reinforcement

2.4 界面剪切强度影响因素分析

2.4.1 混凝土强度对界面剪切性能的影响

混凝土强度等级分别从C35提高到C40及从C40提高到C45时,ZA组试件剪切强度分别提高15.3%和10.6%,ZB组试件分别提高14.1%和11.0%,TA组试件分别提高15.8%和10.8%,TB组试件分别提高为14.6%和11.4%,如图9所示。可见,随着混凝土强度等级的增大,剪切强度也在增加,但增加幅度减小。此外,从试验过程可知,混凝土强度等级的提高可以延缓试件的开裂,减小同级荷载下的界面剪切位移。

2.4.2 植筋对界面剪切性能的影响

界面植筋可有效提高界面剪切强度,植筋率分

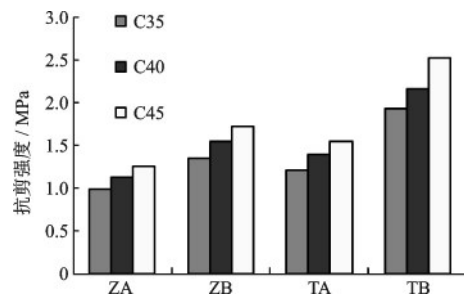


图9 混凝土强度等级与剪切强度关系

Fig.9 Relationship between concrete strength grade and shear strength of the interface

别为 0.196%、0.392% 和 0.785% 时,相比未植筋试件,Z 型试件剪切强度提高率分别为 36.3%、250.4% 和 263.7%,套箍型试件剪切强度提高率分别为 58.3%、179.1% 和 348.2%,植筋率与剪切强度关系如图 10 所示,可见,随着植筋率的提高剪切强度的提高幅度并不是线性增加,且套箍型试件提高幅度大于 Z 型试件。

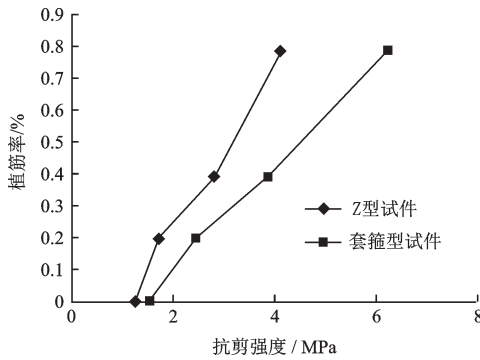


图 10 植筋率与剪切强度关系

Fig.10 The relationship between the inforcement ratio and shear strength of the interface

植筋情况下剪切强度的提高原因是界面开裂后,植筋试件界面处的抗剪力主要由钢筋的销栓力提供,界面的植筋率越大,钢筋销栓作用越明显,剪切强度也越大,故在实际加固工程中,在粘结界面配置一定数量的抗剪钢筋是必要的。

2.4.3 套箍作用对界面剪切性能的影响

在同一级荷载作用下,套箍试件的剪切位移比 Z 型试件小,说明套箍对石材的核心约束作用,可以有效减小同级荷载下的剪切位移,但套箍型试件的极限剪切强度比 Z 型试件要大,故其极限剪切位移值也大。

相同条件下,套箍型试件的开裂剪切强度和极限剪切强度均大于 Z 型试件,如图 11 所示,套箍型和 Z 型未植筋试件抗剪强度的比值在 1.2 左右,植筋试件抗剪强度的比值为 1.40~1.55,植筋试件的增大程度大于未植筋试件。这是因为套箍作用不仅加强了界面的粘结力和摩擦力,也增强了植入钢筋的销栓作用,因此套箍法加固在工程中取得了良好的加固效果。

2.5 界面抗剪承载力的计算

根据试验结果结合抗剪摩擦理论^[16]可知混凝土-石材界面抗剪承载力由三部分组成:石材和混

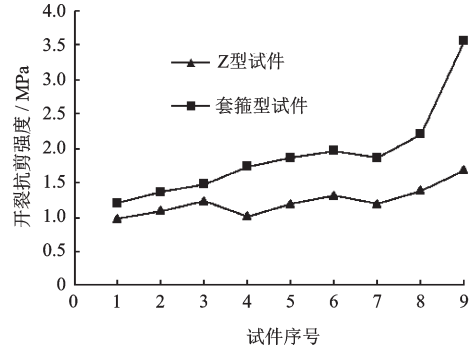


图 11 Z 型试件和套箍型试件抗剪强度对比

Fig.11 Comparison of shear strength between Z-type and hoop-type specimens

土之间的粘结抗剪力,石材和混凝土之间的摩擦抗剪力,植入钢筋销栓作用引起的抗剪力,下面对各部分的计算模式进行分析。

(1) 粘结抗剪力的计算模式为:

$$V_{\text{粘结}} = k_1 \Delta f_{cs} A \quad (2)$$

式中, k_1 为粗糙度和混凝土强度综合影响系数; Δ 为结合面粗糙度。

(2) 摩擦抗剪力由界面本身的摩擦力、钢筋提供的摩擦力、套箍效应提供的摩擦力组成,其计算模式为:

$$V_{\text{摩擦}} = (k_{21} \cdot \Delta \cdot f_{cs} + \frac{1}{L} k_{22} \Delta \cdot E_s \cdot \rho + k_{23} \cdot \zeta_{\text{con}} f_{cs}) A \quad (3)$$

式中, η 为套箍参数,用来考虑套箍法加固时套箍层对摩擦力的增强作用,套箍加固时: $\eta = f_c A_c / f_{sc} A_{sc}$,其它加固型式时 $\eta = 0$; f_c 、 f_{cs} 为混凝土和石材的抗压强度; A_c 、 A_{sc} 为混凝土和石材横截面积; k_{21} 为植入钢筋引起的摩擦抗剪系数; k_{22} 为套箍效应引起的摩擦抗剪系数; E_s 为植入钢筋弹性模量; ρ 为界面植筋率; L 为植筋深度。

(3) 钢筋销栓作用提供的抗剪力的计算模式为:

$$V_{\text{销栓}} = k_3 (1 + \beta \cdot \eta) \rho A \sqrt{f_y f_{cs}} \quad (4)$$

式中, k_3 为钢筋销栓作用抗剪强度影响系数; β 为套箍效应增大系数,用来考虑套箍作用对钢筋销栓力的增强作用; f_y 为钢筋设计强度。

将以上三项叠加并对试验数据进行回归分析,求出未知参数,即可得到考虑套箍效应增强作用下的混凝土-石材界面抗剪承载力计算公式(式(5)),式中各参数意义同前。

$$V_u = (0.0086\Delta + 0.001 \cdot \zeta_{con}) f_{cs} A + \left[\frac{0.211}{L} \Delta \cdot E_s + 1.152(1 + 1.277 \cdot \zeta_{con}) \sqrt{f_y f_{cs}} \right] \rho \cdot A \quad (5)$$

3 结 论

(1) 界面为试件的薄弱部位, 试件的破坏均表现为粘结界面的剪切破坏, 未植筋试件发生脆性破坏, 植筋试件的破坏具有延性破坏的特点, 在一定范围内, 随着植筋率的增大延性破坏特点越明显。

(2) 界面处的混凝土和石材的应力分布是不均匀的, 界面应力分布是从界面上下两端向中间逐渐减小。钢筋的应力分布为界面附近最大, 向两端逐渐减小。

(3) 在一定范围内, 混凝土强度的提高可提高界面的抗剪强度, 延缓界面的开裂, 减小同级荷载下界面的剪切位移。相同条件下, 与Z型试件相比, 套箍型未植筋试件抗剪强度提高20%左右, 植筋试件提高40%~55%左右。

(4) 通过对试验数据的拟合结合理论分析, 提出套箍参数、套箍效应增大系数的定义, 用来考虑套箍作用对抗剪强度的影响, 得到可考虑套箍效应增强作用的混凝土-石材界面抗剪强度计算公式。

参考文献:

[1] 全秋果. 现役石拱桥病害分析与加固技术研究[D]. 长沙: 中国林业科技大学, 2011: 4-5.
Tong Q G. Study on the diseases and method of strengthening of the stone arch bridge [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011: 4-5. (in Chinese)

[2] 贾悦. 石拱桥病害分析及加固研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013: 2.
Jia Y. Analysis and reinforcement of stone arch bridge [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013: 2 (in Chinese)

[3] 刘思孟. 钢筋砼套箍封闭主拱圈加固拱桥技术研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2004.
Liu S M. The study on technology of using reinforced concrete yoke to strengthen arch bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004. (in Chinese)

[4] 高剑平, 潘景龙, 王雨光. 不同界面剂对新旧混凝土粘结强度影响的试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(5): 25-29.
Gao J P, Pan J L, Wang Y G. Effect of different bond-

ing agents on bond strength between fresh concrete and hardened concrete [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 2001, 34(5): 25-29. (in Chinese)

[5] 胡铁明, 丁科翔, 张冠华, 等. 钢纤维自应力混凝土加固既有混凝土结构结合面抗剪性能研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(18): 83-87.
Hu T M, Ding K X, Zhang G H, et al. Research on shear behavior of bonding interface of existing concrete structure strengthened by steel fiber reinforced self-Stressing concrete [J]. Building Structure, 2018, 48(18): 83-87. (in Chinese)

[6] 袁群, 刘健. 新老混凝土粘结的剪切强度研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 46-50.
Yuan Q, Liu J. Study on adhesive shear strength of young on old concrete [J]. Journal of Building Structure, 2001, 22(2): 46-50. (in Chinese)

[7] 王振领. 新老混凝土粘结理论与试验及在桥梁加固工程中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
Wang Zh L. Study on bond theory and test of new and old concrete and its application in bridge strengthening engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)

[8] 王新玲, 杨佳佳, 孙宏运, 等. 基于梁式试验的CFRP布-混凝土界面粘结滑移模型研[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 312-317.
Wang X L, Yang J J, Sun H Y, et al. Experimental study on bond-slip model for cfrp-concrete interface based on beam test [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 312-317. (in Chinese)

[9] 张森, 张晶. 植筋法混凝土与石砌体粘结面剪切性能试验研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(1): 43-47.
Zhang M, Zhang J. Experimental study masonry by planting on shearing property of interfacial bonding of concrete and stone reinforced bar [J]. Building Science, 2015, 31(1): 43-47. (in Chinese)

[10] 张晶, 钱永久. 套箍法加固石拱桥主拱圈的正截面承载力的理论分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 76-80.
Zhang J, Qian Y J. Theoretical analysis of normal section bearing capacity of stone main arch ring strengthened by reinforced concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 76-80. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)

(下转第1017页)