



铝合金板-混凝土界面的粘结滑移性能及其本构关系

姜德文¹, 黄海林¹, 刘光伟¹, 张明亮², 黄曙³

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南建工集团有限公司, 长沙 410004;
3. 长沙市人防工程质量监督定额管理站, 长沙 410013)

摘要: 铝合金板具有轻质高强、耐腐蚀性和延展性好等优点, 是复杂恶劣环境中加固混凝土结构的理想材料。基于双剪试验进行铝合金-混凝土界面粘结滑移性能研究, 完成了45个构件的双面纯剪试验, 得到了其破坏形态、荷载-应变关系曲线、粘结界面剪应力分布曲线、荷载-滑移关系曲线以及界面极限承载力, 分析了不同的混凝土强度等级、铝合金板表面粗糙度、铝合金板粘结长度和粘结宽度条件下界面粘结滑移性能的演化规律。研究表明: 加载过程中, 界面应力从加载端向自由端逐步传递, 且随着混凝土强度等级、铝合金板的粘结长度和宽度的增加, 试件的剥离承载力也有所提高。但铝合金的粘结长度存在一个有效粘结长度值, 超过该值试件的剥离承载力将不再增加, 同时, 铝合金表面粗糙度对试件剥离承载力的提高没有实质影响。通过测量铝合金板的应变得到了不同参数条件下铝合金板-混凝土粘结滑移本构曲线, 结果表明: 铝合金板-混凝土粘结滑移本构曲线存在明显的界面软化特征和非线性行为。

关键词: 铝合金板; 双剪试验; 粘结滑移; 剥离承载力

中图分类号: TU746.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)03-0080-10

Bond-slip performance and constitutive curve of aluminum alloy sheet-concrete interface

Jiang Dewen¹, Huang Hailin¹, Liu Guangwei¹, Zhang Mingliang², Huang Shu³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China;
2. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410004, P. R. China; 3. Engineering Civil Air Defense Quality Supervision Station of Changsha, Changsha 410043, P. R. China)

Abstract: Aluminum alloy plate has the advantages of light weight, high strength, corrosion resistance and good extensibility. It is an ideal material for strengthening concrete structure in complex and harsh environment. In this paper, the study of bond-slip behavior of aluminum alloy-concrete interface was carried out by conducting double-sided pure shear tests on 45 members. The failure form, load-strain

收稿日期: 2019-09-07

基金项目: 湖南省自然科学基金(2018JJ3161); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B666); 湖南建工集团基础科研项目(JGJTK-2018003)

作者简介: 姜德文(1994-), 男, 主要从事基于新材料的既有结构修复与加固研究, E-mail: 1192065782@qq.com。
黄海林(通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: hhlvs genius@163.com。

Received: 2019-09-07

Foundation items: Natural Science Foundation of Hunan (No. 2018JJ3161); Hunan Graduate Scientific Research Innovation Project (No. CX2018B666); Basic Research Project of Hunan Construction Industry Group (No. JGJTK-2018003)

Author brief: Jiang Dewen (1994-), main research interests: the repair and reinforcement of existing structures based on new materials, E-mail: 1192065782@qq.com。
Huang Hailin (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: hhlvs genius@163.com。

relationship curve, bond interface shear stress distribution curve, load-slip relationship curve and interfacial ultimate bearing capacity were obtained. The evolution of interfacial bond-slip behavior under different concrete strength grades, surface roughness of aluminum alloy plate, bond length and bond width of aluminum alloy plate were analyzed. The results show that the interfacial stress is gradually transferred from the loading end to the free end during loading. With the increase of the strength grade of concrete, and the length/width of bonding interface, the peeling capacity of the specimen is improved. But there is an effective bond length value for the aluminum alloy, beyond which the peeling bearing capacity of the specimen will not increase. Meanwhile, the surface roughness of the aluminum alloy has no substantial effect on the peeling bearing capacity of the specimen. By measuring the strain of aluminum alloy plate, the bond slip test curve of aluminum alloy plate and concrete under different parameters was obtained. The results show that the curve is of obvious interfacial softening characteristics and nonlinear behavior, which can be used to guide the actual engineering design of aluminum alloy plate reinforced concrete.

Keywords: aluminum alloy plate; double shear test; bond-slip; peeling capacity

随着时代的发展和时间的推移,有相当一部分建筑物会因为使用功能改变、材料性能劣化、结构或构件损伤造成房屋结构性能下降,因此,混凝土结构修复和加固技术变得越来越重要。外粘金属、复合材料板材或者片材增强混凝土结构或构件是目前常见的加固方法^[1-5]。同时,钢材和FRP是使用最广泛的两种加固材料,钢材强度高、延展性好,但耐腐蚀性差;FRP材料具有轻质高强、耐腐蚀性强的优点,但延展性差,明显呈脆性材料特征^[6-9];铝合金材料耐腐蚀性好、延展性好,克服了钢材和FRP的材料缺点,是工程结构加固材料领域很有前景的材料。学者围绕铝合金加固混凝土结构的受力性能做了大量研究^[10-11],文献[12]采用外部粘贴铝合金条带的方式来增强混凝土梁的抗剪能力,提出了外粘铝合金条带混凝土梁的抗剪加固计算公式;文献[13]提出了铝-混凝土组合梁承载力和刚度的数值分析模型;文献[14]为了研究铝合金和碳-环氧树脂复合材料的粘结界面行为,使用有限元方法模拟了界面粘结破坏过程,结果表明,界面粘结强度和失效模式很大程度上取决于粘结剂。文献[15-16]通过单剪试验研究了混凝土强度、铝合金板宽度和厚度、粘结长

度等因素对铝合金板与混凝土界面性能的影响,得到了铝合金板与混凝土的有效粘结长度和粘结强度的理论计算公式。铝合金板与混凝土界面性能的影响因素较多,由物理与化学反应过程共同控制,因此,有关界面粘结滑移行为尚未形成统一的认识^[17]。笔者通过不同参数下的双剪试验,研究铝合金板-混凝土界面的粘结破坏机理、界面的应力传递、界面粘结-滑移规律。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试件设计过程中主要考虑混凝土强度等级、铝合金板表面粗糙度、铝合金板粘结长度和粘结宽度对界面粘结强度的影响,具体参数见表1。每个试件由混凝土试块、结构胶、铝合金板材3部分组成,混凝土试块设计强度等级为C30、C40,其组成成分分别为水、水泥、中砂及碎石。C30质量配合比为 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{石}}:m_{\text{水}}=1:1.90:3.52:0.60$,C40质量配合比分别为 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{石}}:m_{\text{水}}=1:1.36:2.89:0.49$ 。试验时C30、C40试件实测混凝土立方体抗压强度平均值分别为33.4、42.2 MPa。双剪试件具体构造及几何尺寸见图1。

表1 试件设计

Table 1 Specimen design

试件编号	混凝土强度等级	试件尺寸	表面粗糙度	粘结宽度/mm	粘结长度/mm
G-75-120-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	G类	75	120
G-75-170-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	G类	75	170
G-75-220-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	G类	75	220
G-75-120-C30	C30	300 mm×150 mm×150 mm	G类	75	120

续表 1

试件编号	混凝土强度等级	试件尺寸	表面粗糙度	粘结宽度/mm	粘结长度/mm																		
G-75-170-C30	C30	300 mm×150 mm×150 mm	G类	75	170																		
G-75-220-C30	C30	300 mm×150 mm×150 mm	G类	75	220																		
G-50-220-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	G类	50	220																		
G-75-220-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	G类	75	220																		
G-100-220-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	G类	100	220																		
B-75-120-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	B类	75	120																		
B-75-170-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	B类	75	170																		
B-75-220-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	B类	75	220 </tr <tr> <td>N-75-120-C40</td> <td>C40</td> <td>300 mm×150 mm×150 mm</td> <td>N类</td> <td>75</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>N-75-170-C40</td> <td>C40</td> <td>300 mm×150 mm×150 mm</td> <td>N类</td> <td>75</td> <td>170</td> </tr> <tr> <td>N-75-220-C40</td> <td>C40</td> <td>300 mm×150 mm×150 mm</td> <td>N类</td> <td>75</td> <td>220</td> </tr>	N-75-120-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	N类	75	120	N-75-170-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	N类	75	170	N-75-220-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	N类	75	220
N-75-120-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	N类	75	120																		
N-75-170-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	N类	75	170																		
N-75-220-C40	C40	300 mm×150 mm×150 mm	N类	75	220																		

注:G表示沟槽表面,B表示钻孔表面,N表示自然表面;G-75-120-C30表示沟槽表面,粘结宽度为75 mm,粘结长度为120 mm,混凝土强度等级为C30。

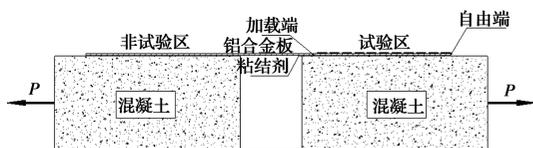


图1 双剪试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of twin-shear specimen

结构胶采用广州西卡建筑材料有限公司生产的sika-30CN双组份、无溶剂、触变型环氧树脂结构胶。根据《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567—2008)采用MTS材料试验机进行了结构胶的拉伸试验,结构胶拉伸弹性模量为7.6 GPa,抗拉强度为39.9 MPa。根据《硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度测定方法》(GB/T 13936—1992)采用MTS材料试验机进行了结构胶-铝合金板的粘结性能试验,结构胶-铝合金板界面粘结剪切强度为9.8 MPa。

铝合金板材型号为6061-T6。为了考察铝合金板表面粗糙度对粘结性能的影响,铝合金板表面做了两种不同机械加工刻痕处理,并与自然光滑表面做对比。沟槽采用的构造方式为:沟槽深度与宽度分别为1、3 mm,相邻中心距为20 mm。钻孔方法为:钻孔的直径与深度分别为3、1 mm,竖向中心距为20 mm,横向中心距为10 mm,具体做法见图2。

1.2 试验加载装置及测点布置

装置由钢立柱框架、穿心千斤顶、刚性连杆、六边形连接件、钢套筒、螺帽、万向转铰、拉力传感器、铝合金板上下夹具、加劲肋支撑钢板等组成,见图3。

试验时,上、下夹具固定上下两块混凝土试块,

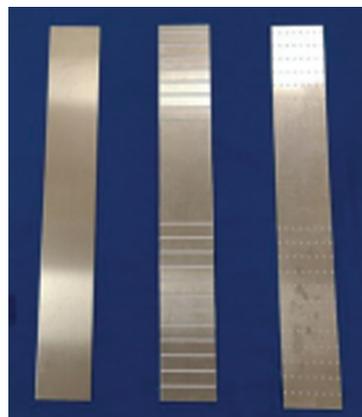
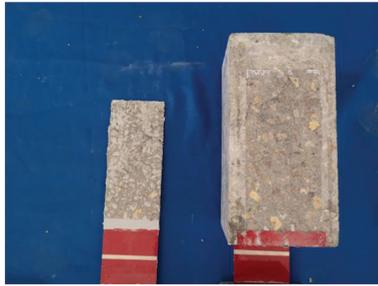


图2 铝合金不同表面处理方式

Fig. 2 Different surface treatment of aluminum alloy

通过顶升穿心千斤顶对试件施加拉力,完成双剪试验。为简化试验测点布置,铝合金板的上、下两部分按非对称布置粘贴,以保证界面粘结失效破坏始于试件上半部分。其中,试件下半部为非试验区,粘结长度为250 mm;试件上半部分为试验区,布置位移计与应变片,粘结长度分别为120、170、220 mm。为了防止试验过程中加载端混凝土发生局部三角形拉裂破坏,在混凝土端部留有20 mm的非粘结区。通过设置上下两个球铰,可在最大程度减少偏心的影响,保证铝合金板与混凝土界面处于纯剪受力状态。试验加载前首先进行预加载,加载速率控制在2 kN/min,预加载至8 kN结束。正式加载速率控制在2 kN/min,直至试件破坏。

试验过程中,通过设置拉力传感器来测量拉力大小;为测量铝合金板沿粘结长度的应变变化规律,在试验区铝合金板中部以20 mm间距均匀布置应



(a) 试件G-100-220-C40-a



(b) 试件B-75-170-C40-a

图5 试件典型破坏形态

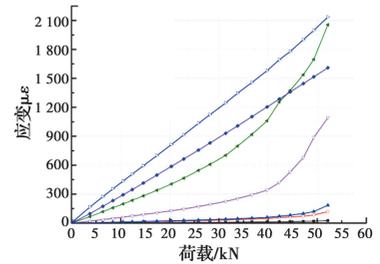
Fig. 5 Typical failure mode of specimens

2.2 荷载-应变关系曲线

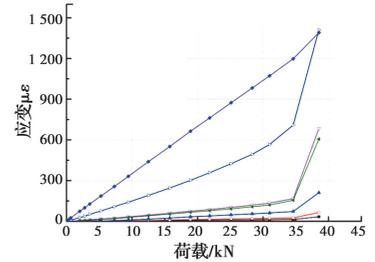
通过在铝合金板表面中心线上连续布置应变片,可精确测量出沿长度方向的铝合金板应变分布规律。应变片编号规则为:自由端附近为1#截面,至铝合金板悬空段中部依次增大。

图6给出了4种不同参数下的铝合金板荷载-应变分布曲线。尽管由于应变测试误差导致试件G-75-120-C40-a的6#截面应力大于7#截面应力,但总体上看,试件基本呈现出相同的应变变化规律:在初始加载阶段,只有加载端附近的应变测点读数有明显变化,此时铝合金板、胶粘剂和混凝土共同参与工作,荷载-应变曲线呈线性变化;随着荷载的增加,铝合金板与混凝土之间开始产生滑移,界面刚度减弱,荷载-应变变化规律呈现出非线性;在整个加载过程中,粘结长度不同的试件自由端附近应变读数都很小,可见这部分区域并没有出现有效应力传递现象,说明各试件都存在一个有效应力传递的粘结长度,超过这个有效粘结长度,应力将不再传递,从不同参数影响下的应变传递区域来看,可以得到有效粘结长度在80~120 mm。并且从表2和图6可知,随着混凝土强度等级以及铝合金板粘结宽度的增加,剥离承载力也有所增加,而铝合金表面的粗糙度对界面粘结性能的影响不大。在荷载-应变曲线的线性阶段,从加载端至自由端的曲线斜率依次降低,说明应力从加载端逐步向自由端传递;在达到

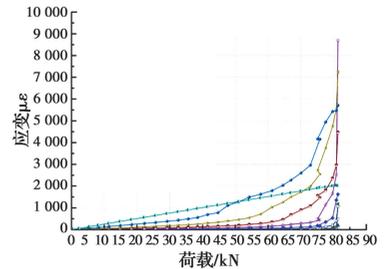
极限荷载时,铝合金板都有一个应变突变急剧增大的过程,最终铝合金板从混凝土表面剥离导致试件破坏。



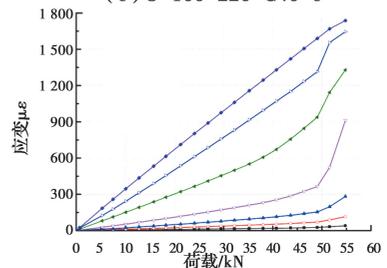
(a) G-75-120-C40-a



(b) G-75-120-C30-a



(c) G-100-220-C40-c



(d) N-75-120-C40-a

注: --1#截面 --2#截面 --3#截面 --4#截面
--5#截面 --6#截面 --7#截面 --8#截面
--9#截面 --10#截面 --11#截面 --12#截面

图6 各级荷载下铝合金板上的应变分布

Fig. 6 Strain distribution of aluminum plate under various loads

2.3 粘结界面剪应力分析

根据铝合金板上应变片的布置方案,可选取相邻两个应变片之间的铝合金板作为单元体,通过分析该单元体力的平衡方程,可以得到:铝合金板拉力差由粘结界面剪应力的合力来平衡。其中,铝合金板粘结界面剪应力可通过相邻测点的应变进行计算。根据以上方法,绘制不同试件界面剪应力的演化规律如图7所示。其中,横坐标表示距混凝土加

载端距离,纵坐标表示界面上的剪应力。

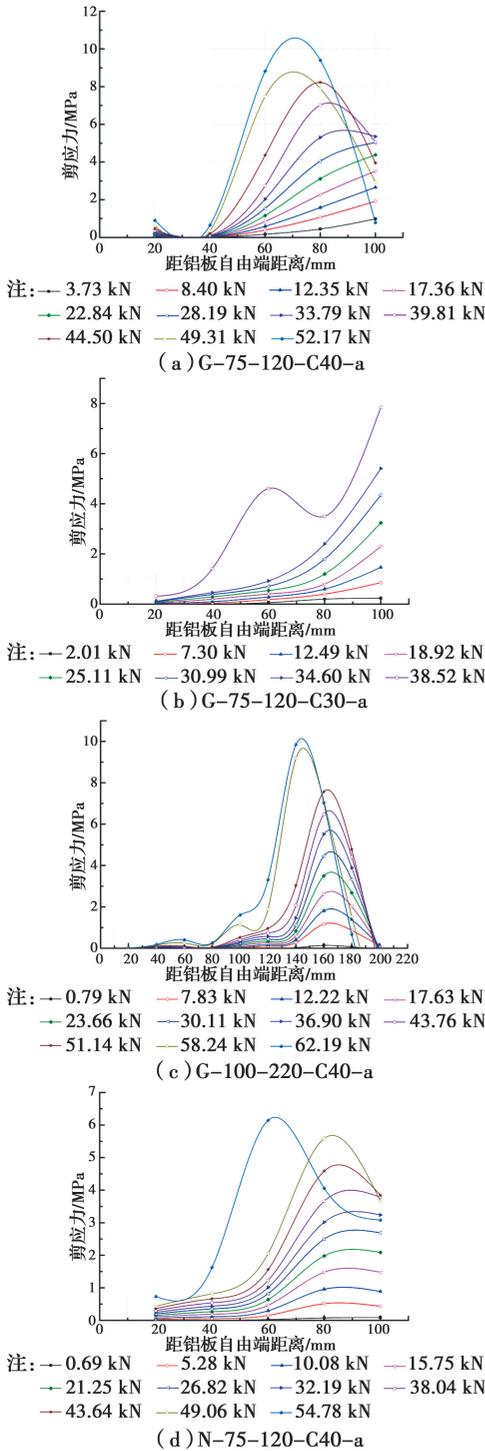


图 7 各级荷载下界面剪应力分布曲线

Fig. 7 The shear stress distribution curve of interface under various loads

加载初期,局部粘结剪应力主要分布在加载端附近区域。剪应力分布曲线大致为抛物线,且抛物线的最高点随着荷载的增加,不断向自由端转移,说明随着荷载的增加,加载端界面剪应力快速增长,并不断向自由端转移,当加载端附近剪应力减少至 0

时,表明界面开始剥离,直到界面完全剥离失效。在极限状态时,最大粘结剪应力一般情况下均出现在距离加载端 60~80 mm 的位置,其值一般约为 5~10 MPa。而图 7(b)对应的极限剥离承载力较小且峰值剪应力值没有传递过程就发生剥离破坏,这是因为在调制结构胶的过程中会产生气泡和缺陷,导致界面出现应力集中,使得铝合金提前发生剥离。试验数据表明;粘结长度越长,其峰值剪应力越高,剪应力开始由加载端向自由端传递的速度越慢;混凝土强度等级越高,峰值剪应力值越高,剪应力开始由加载端向自由端传递的速度越快;粘结宽度越宽,其对峰值剪应力没有太大影响,剪应力开始由加载端向自由端传递的速度越快;同时 G、B 类试件的峰值剪应力比 N 类试件要高,分析其原因,可能是在截面削弱处产生应力集中,剪应力开始由加载端向自由端传递的速度要慢。

2.4 荷载-滑移关系曲线

试验通过在铝合金板加载端与自由端设置 WY 系列位移传感器的方法来测量相对滑移。相对滑移值反映了在加载过程中铝合金板与混凝土之间的位移差值,也间接反映了界面的粘结刚度。由试验结果可知,在整个加载过程中,各试件的铝合金板/混凝土界面自由端相对滑移几乎为 0,可以忽略不计,因此,仅考虑铝合金板/混凝土在加载端的相对滑移。典型试件在加载端铝合金板与混凝土之间的荷载-滑移曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,荷载-滑移曲线大致呈现出相同的规律:1)线性增长阶段,滑移随荷载的增长呈线性增长,此时界面 3 种材料共同工作、协同变形;2)快速增长阶段,滑移随着荷载的增加出现非线性增长,界面开始出现损伤,界面刚度变弱;3)失稳增长阶段,加载端界面开始剥离,此时,荷载不增加但滑移会迅速增长。

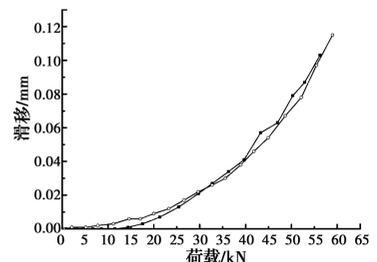


图 8 铝合金板/混凝土在加载端的相对滑移曲线

Fig. 8 Relative slip curve of aluminum alloy plate/concrete at the loading end

图9给出了4种不同参数影响下的荷载-滑移关系曲线对比图。由图9(a)可知,经过表面粗糙度加工处理后的G、B类试件相比N类试件相对滑移还有一定程度的增加,可能是表面加工处理后试件截面刚度会降低,且界面受力时更容易出现应力集中现象,导致剪应力值较大的截面过早出现损伤软化,因此,界面的粘结刚度会变弱。由图9(b)可知,混凝土强度等级越高,其界面粘结刚度越大,相对滑

移值越小,这是因为混凝土强度等级越高,混凝土表面抗拉强度越大,混凝土、结构胶与铝合金板三者之间的共同相互作用增强,导致粘结界面的刚度变大,滑移值变小。由图9(c)可知,粘结宽度越宽的试件,界面粘结刚度越大,相对滑移值越小,达到极限荷载时的滑移值越大。由图9(d)可知,粘结长度对试件的初始粘结刚度并没有太大影响,初始曲线斜率基本保持一致。在加载后期,有效粘结长度范围内,粘结长度越短的试件应力传递速度更快,界面损伤更快发生,界面粘结刚度下降更快,导致在相同荷载作用下滑移值最大。粘结长度越长的试件,破坏时的滑移值越大。

2.5 界面极限承载力

表2给出了各试件的极限承载力、界面平均粘结强度的具体试验结果,为了能直观观察出不同参数下的极限承载力规律,分别绘出不同参数下的极限承载力柱状图,见图10。由图10可知,当混凝土强度等级为C40,对于N类,当粘结长度为170 mm时,试件的极限承载力较120 mm时提高了10.4%;当粘结长度为220 mm时,试件的极限承载力较170 mm时提高了22.3%。但G、B类铝合金板相对于N类铝合金板,其极限承载力并没有提高。铝合金板的粘结承载力会随着粘结宽度的增加而增加,当试件类型为G类,混凝土强度等级为C40,粘结长度为220 mm时,粘结宽度为75 mm的试件比粘结宽度为50 mm的试件承载力提高了69.8%,粘结宽度为100 mm的试件比粘结宽度为75 mm的试件承载力提高了25.5%。

由图10(c)可知,当试件类型为G类,铝合金板宽为75 mm时,粘结长度为120 mm的C40试件比C30试件极限承载力提高了35.2%,粘结长度为170 mm的C40试件比C30试件极限承载力提高了14.1%,粘结长度为220 mm的C40试件比C30试件极限承载力提高了5.7%,表明随着混凝土的强度等级增加,铝合金板的粘结强度也会增加。

由试验结果可知,试件的极限荷载会随着铝合金板的粘结长度和宽度以及混凝土的强度等级的增加而增加,而增加铝合金板表面粗糙度并未达到试验预期效果,没有随着刻痕而增加界面的极限承载力,分析原因,可能是对铝合金板表面做的处理虽然增加了粘胶面积和化学胶结力,但截面削弱处更容易产生应力集中现象,使应力最大处界面过早软化,

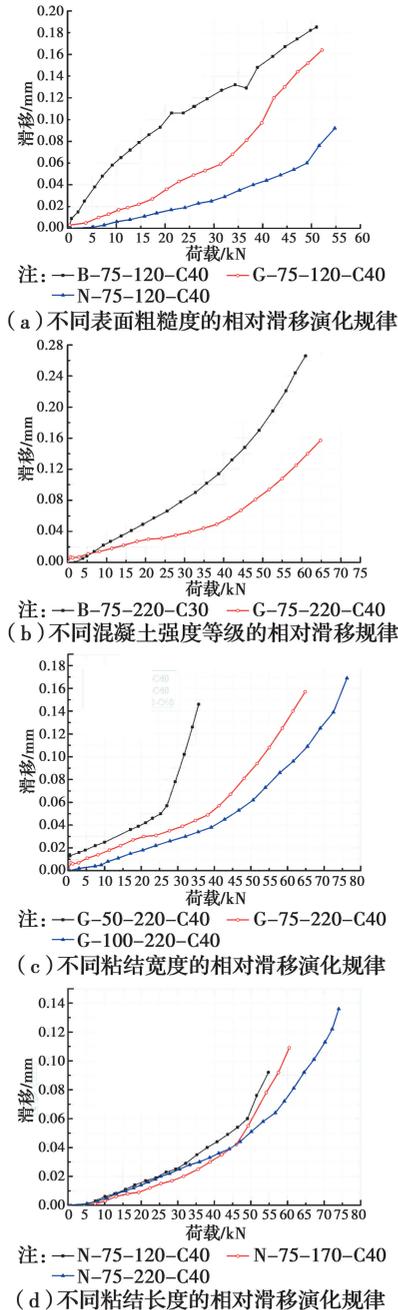


图9 不同参数下铝合金板/混凝土加载端的相对滑移演化规律

Fig. 9 Relative slip evolution rule under the influence of different parameters

在此处首先产生滑移,界面粘结强度降低,使试件承载力降低。

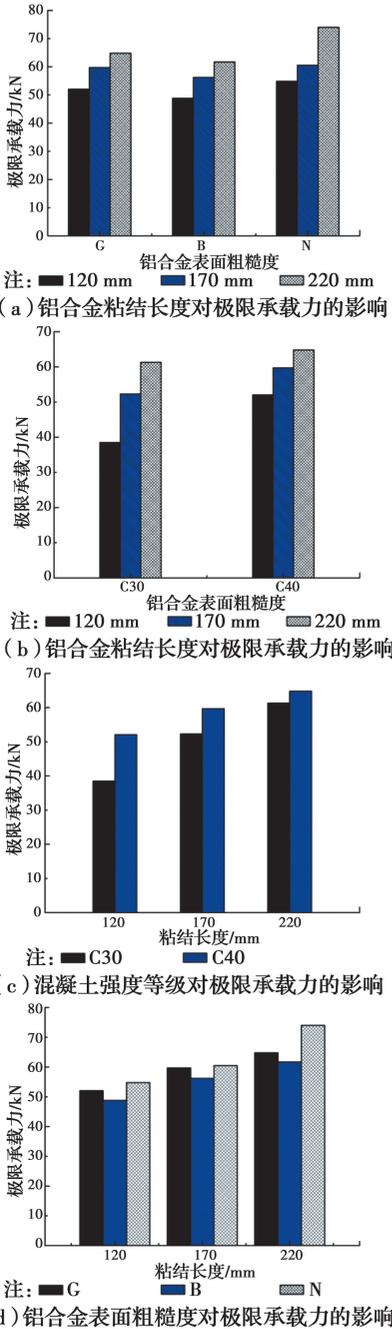


图 10 试验基本参数对界面极限承载力及粘结强度影响
Fig. 10 Effect of basic Test parameters on Interface Ultimate bearing capacity and bonding strength

3 铝合金板-混凝土界面粘结滑移本构关系

铝合金板-混凝土的界面粘结滑移本构曲线是铝合金板加固混凝土结构受力分析的基础,为了得到铝合金-混凝土界面粘结-滑移本构曲线,需要获

得铝合金界面某点的剪应力和滑移量。常用的方法是通过沿粘结长度方向在铝合金板上粘贴应变片,根据相邻应变片的读数计算出局部粘结剪应力,再利用应变片的读数采用叠加的方法得到局部滑移量的大小,进而求得界面的粘结-滑移关系试验曲线,图 11 为铝合金-混凝土界面受力示意图。

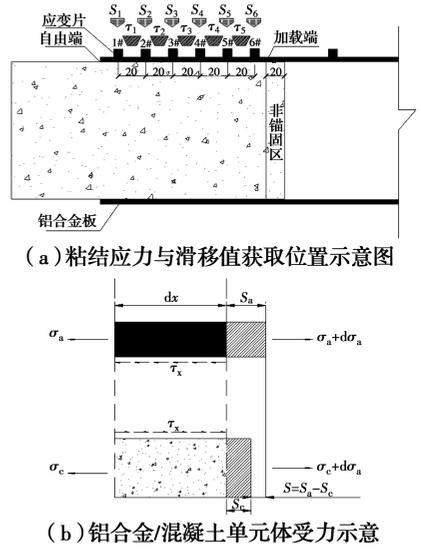


图 11 双剪试验界面受力示意
Fig. 11 Interface stress diagram of double shear test

局部粘结剪应力可按照图 11 微段单元受力平衡得

$$\sigma_a b_a t_a + \tau_x b_a dx = (\sigma_a + d\sigma_a) b_a t_a \quad (1)$$

$$\sigma_a = E_a \epsilon_a \quad (2)$$

$$\tau_x = E_a t_a \frac{d\epsilon_a}{dx} \quad (3)$$

式中: E_a 为铝合金板的弹性模量; t_a 为铝合金板的计算厚度。由分析可知,铝合金表面加工处理对试件的应变分布、承载力几乎没有影响,所以,计算局部粘结剪应力可忽略铝合金板表面刻痕、钻孔对铝合金板厚度的影响。

界面 i 处的滑移可定义为 i 处铝合金的滑移量与混凝土滑移量的差值,即

$$\Delta s = s_a - s_c = s_i \quad (4)$$

$$S = \int \epsilon_a dx \quad (5)$$

从自由端 $x=0$ 开始计算滑移量 s_i 则为

$$S(x_{i+1}) = S(x_i) + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \epsilon(x) dx \quad (6)$$

试验中应变片的布置间距均为 20 mm。因此,式(3)~(6)可改写为

$$s_i = \left[\frac{(\epsilon_{x=0} + \epsilon_i)}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} \epsilon_j \right] \Delta x \quad (7)$$

式中: s_i 为*i*点滑移量; ϵ_i 为*i*点处的应变值; ϵ_j 为*j*点处的应变; Δx 为相邻应变片之间距离。

根据式(3)、式(7)可以得到截面*i*位置(加载端)处的局部剪应力和滑移值。图12为按上述方法得到的典型试件的粘结剪应力-滑移量散点图。图13为试验中铝合金板-混凝土界面粘结滑移本构图。

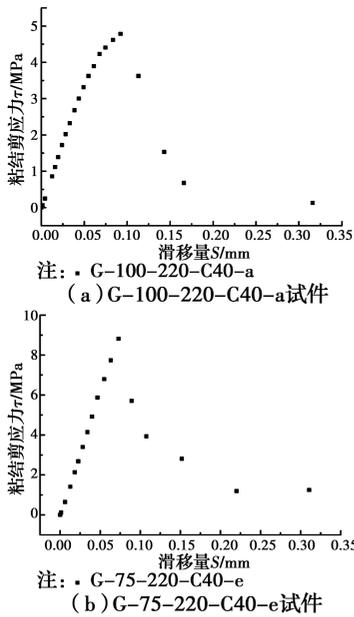


图12 典型试件界面粘结滑移散点图

Fig. 12 Scatter plot of bond-slip on the interface of typical specimens

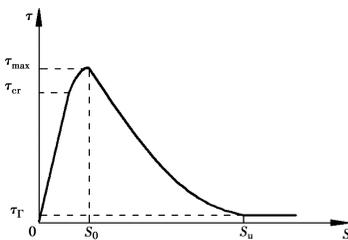


图13 铝合金-混凝土界面粘结滑移曲线模式

Fig. 13 Interface bond slip curve mode of aluminum alloy-concrete

根据图13,铝合金-混凝土界面粘结滑移模型应当满足以下条件:

- 1) 当 $s=0$, $d\tau/ds=k_0$;
- 2) 当 $s=s_0$, $\tau/\tau_{\max}=1$, $d\tau/ds=0$;
- 3) 当 $s>s_u$, $\tau/\tau_{\max}=\mu$, $d\tau/ds \rightarrow 0$

式中: k_0 为界面的初始粘结刚度; μ 为界面的摩擦系数。

由试验数据可知,铝合金板-混凝土界面粘结呈

现明显的非线性和界面软化行为,其中, $0 \rightarrow \tau_{cr}$ 为直线上升段,此时,界面的粘结主要由结构胶的化学胶结力提供,滑移较小,可认为荷载产生的位移可恢复。 $\tau_{cr} \rightarrow \tau_{\max}$ 段为曲线上升段,粘结界面的初始缺陷在应力集中的作用下开始扩展,削弱了界面粘结刚度。 $\tau_{\max} \rightarrow \tau_r$ 段为曲线下降段,当滑移值到 s_0 、界面应力达到峰值,曲线开始进入下降段,此时,界面出现损伤,不能承担粘结区段释放的剪应力,承载力下降,卸载后界面的粘结刚度不可恢复。 $\tau_r \rightarrow \infty$ 段为平稳段,此阶段曲线接近于水平线,界面粘结应力几乎为零,此时,界面发生剥离。

4 结论

1) 铝合金板-混凝土双剪试验的破坏位置主要发生在铝合金板和混凝土之间的胶层界面,并且破坏形态分为剥离和分层两种,破坏前构件没有明显征兆,属于脆性破坏。

2) 铝合金板-混凝土界面的受力过程是界面应力逐步从加载端向自由端传递的过程,且从应力传递区域来看,各试件均存在一个有效粘结长度值,超过该值应力即不再进行传递。

3) 不同参数条件对试件界面应力的影响:粘结长度越短、粘结宽度越小、混凝土强度等级越低的试件界面应力传递速度越快;不同表面粗糙度的试件应变分布曲线规律基本保持一致,且应变大小也基本相同,说明铝合金板表面处理对试件应变分布、承载力的提高并没有实质影响。

4) 不同参数条件对试件加载端与自由端相对滑移的影响:提高混凝土强度等级、增加粘结宽度,可以增加界面粘结刚度,从而使得界面相对滑移较小;粘结长度对界面粘结刚度没有太大影响,但可以增加试件的延性;对于表面粗糙度不同的试件,N类表面粘结刚度最大,G类次之,B类最小。

5) 不同参数条件对试件剥离承载力和粘结强度的影响:增加粘结长度、粘结宽度、提高混凝土强度等级能够提高试件剥离承载力,尤以粘结宽度影响最为显著,而铝合金表面处理对剥离承载力并没有实质影响;增加粘结长度,粘结强度有所降低,粘结宽度和铝合金板表面处理对粘结强度影响不大,提高混凝土强度等级,粘结强度增加。

6) 通过测量铝合金板的应变得到了不同参数条

件下铝合金板-混凝土界面粘结滑移试验曲线,该曲线存在明显的界面软化特征和非线性行为。

参考文献:

- [1] APRILE A, SPACONE E, LIMKATANYU S. Role of bond in RC beams strengthened with steel and FRP plates [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(12): 1445-1452.
- [2] 柳红滨. 铝合金加固钢筋混凝土梁破坏模式的理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
LIU H B. Theoretical and experimental study on failure modes of reinforced concrete beams with aluminum alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(4): 10-18.
LU X Z, YE L P, TENG J G, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(4): 10-18. (in Chinese)
- [4] 韩强. CFRP-混凝土界面粘结滑移机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
HAN Q. Study on the bond-slip mechanism of CFRP-concrete interface [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] 齐云. 粘钢加固混凝土梁的粘结应力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
QI Y. Study on the interfacial stresses of the strengthened RC beams bonded with steel plates [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(7): 784-791.
- [7] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-08) [M]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [8] Fédération Internationale du Béton (FIB). Externally bonded FRP reinforcement for RC structures [R]. 2001.
- [9] TANARSLAN H. Repairing and strengthening of earthquake-damaged RC beams with CFRP strips [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62(5): 365-378.
- [10] RASHEED H A, ABDALLA J, HAWILEH R, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded aluminum alloy plates [J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 473-485.
- [11] ABDALLA J A, ABU-OBEIDAH A R, HAWILEH R A. Use of aluminum alloy plates as externally bonded shear reinforcement for R/C beams [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2019, 17: 403-410.
- [12] ABDALLA J A, ABU-OBEIDAH A S, HAWILEH R A, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally-bonded aluminum alloy plates: An experimental study [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 128: 24-37.
- [13] POLUS Ł, SZUMIGALA M. A numerical analysis of the resistance and stiffness of the aluminium and concrete composite beam [J]. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2015, 15(4): 99-112.
- [14] RIBEIRO T E A, CAMPILHO R D S G, DA SILVA L F M, et al. Damage analysis of composite-Aluminium adhesively-bonded single-lap joints [J]. *Composite Structures*, 2016, 136: 25-33.
- [15] 杨立军, 邓志恒, 杨海峰, 等. 铝合金板与混凝土的粘结性能[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(3): 111-119.
YANG L J, DENG Z H, YANG H F, et al. Study on bond behaviors between aluminum alloy plate and concrete [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(3): 111-119. (in Chinese)
- [16] 杨立军, 邓志恒, 陈卫, 等. 铝合金板与混凝土的粘帖粘结强度研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(3): 101-107.
YANG L J, DENG Z H, CHEN W, et al. Study on interfacial bond strength between aluminum alloy plate and concrete [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(3): 101-107. (in Chinese)
- [17] 刘光伟. 基于双剪试验的铝合金板-混凝土界面粘结滑移性能研究[D]. 湖南湘潭: 湖南科技大学, 2018.
LIU G W. Study on bond slip performance of aluminum alloy-concrete interface based on double shear test [D]. Xiangtan, Hunan: Hunan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)