

文章编号:1007-9629(2022)08-0798-08

SWR-PM 加固层与混凝土界面黏结性能 试验研究

柳战强¹, 郭子雄^{1,2,*}, 叶勇^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:进行了钢丝绳-聚合物砂浆(SWR-PM)加固层与混凝土的单面剪切试验,研究了混凝土强度、加固层黏结长度和加载端受压高度对试件破坏形态及剥离承载力的影响规律.结果表明:试件的破坏形态包括界面剥离破坏、混凝土拉剪破坏及混合破坏;界面剥离承载力随着黏结长度的增加而增长,直至黏结长度超过有效黏结长度后,剥离承载力才趋于稳定;试件的破坏荷载随着混凝土强度的增大而提高.建立了加固层黏结长度与界面剥离承载力的关系计算式,计算结果与试验结果吻合良好.

关键词:加固;聚合物砂浆;有效黏结长度;剥离承载力;黏结强度

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.08.005

Experimental Study on Interfacial Bond Behavior between SWR-PM Composite and Concrete

LIU Zhanqiang¹, GUO Zixiong^{1,2,*}, YE Yong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Simple shear tests of steel wire rope-polymer mortar(SWR-PM)composite-to-concrete joint were conducted, and the influence of concrete strength, bonding length and compression depth at loading end on the failure models and debonding capacity was investigated. Test results show that failure modes include the interfacial debonding, concrete tension-shear failure, and a mixture of the first two failure models. With the increase of the bonding length, the debonding capacity increases first and then tends to be stable when the bond length is larger than the effective bonding length. The ultimate load of specimen tends to increase as the concrete strength increases. A model between the bonding length and the interfacial peeling capacity is proposed, the computed results matched well with the experimental ones.

Key words: strengthening; polymer mortar; effective bonding length; debonding capacity; bond strength

钢丝绳-聚合物砂浆(SWR-PM)面层加固技术具有防火、耐久性好、成本低廉等特点,已在桥梁工程、建筑结构等加固领域受到关注与应用.研究表明,SWR-PM的抗弯加固性能能够有效提高加固梁

的承载力和刚度,但加固后构件的延性有所降低,且加固率较高时易发生剥离破坏,因此限制了该加固技术更加广泛的应用^[1-5].

加固层与混凝土间的黏结性能决定了加固构件

收稿日期:2021-05-27; 修订日期:2021-07-24

基金项目:福建省科技计划重大项目(2020Y4011)

第一作者:柳战强(1988—),男,河北邯郸人,华侨大学博士生. E-mail: 846607485@qq.com

通讯作者:郭子雄(1967—),男,福建惠安人,华侨大学教授,博士生导师,博士. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn

的破坏形态和加固效果.为研究加固构件的剥离破坏机理,研究人员常采用搭接接头形式的剪切试验方法进行加固层与混凝土的界面性能研究.黄华等^[6]通过加固层与混凝土的双面剪切试验,发现加固层存在有效黏结长度.Ascione等^[7]通过拟合和理论计算,得到加固层与混凝土界面的有效黏结长度.Sneed等^[8]分析了钢纤维增强胶凝材料与混凝土界面的黏结-滑移曲线和界面剥离破坏特征.上述工作初步研究了加固层与混凝土界面的黏结性能,但限于研究方法和量测手段的不足,常采用数据拟合的方法来确定加固层的有效黏结长度和界面剥离承载力,从而导致其物理意义不明确且未形成统一的计算式.另外,关于加固层界面剥离破坏机理和黏结-滑移本构关系模型的研究也鲜有报道.

为研究 SWR-PM 加固层与混凝土界面的黏结性能,本文进行了搭接接头形式的单面剪切试验,分析了混凝土强度、加固层黏结长度及加载端受压高度对界面黏结性能的影响,并在此基础上进一步建立了加固层黏结长度与界面剥离承载力的关系计算式.

1 试验

1.1 试件设计及参数

本试验通过拉拔砂浆加固层中的钢丝绳(SWR),达到加固层与混凝土间发生剪切破坏效果,

近似模拟加固构件界面的复杂应力状态及界面剥离破坏过程^[6,9],来研究加固层与混凝土界面的剥离破坏机理.

试件主要参数包括:混凝土强度(C20、C50、C60)、加固层黏结长度 L_{pm} (80、160、200、240、400 mm)、加载端受压高度 h_b (200、180、160 mm),以及与 h_b 相对应的混凝土自由边长度 h_c (0、20、40 mm).

试件尺寸、构造及编号含义如图1所示.由图1(a)可见:试件主要由聚合物砂浆加固层、混凝土块及钢丝绳组成;混凝土块的横截面尺寸为200 mm×200 mm,聚合物砂浆加固层厚度为50 mm,宽度为200 mm;加载端受压高度 h_b 可通过支座高度进行调整,在靠近试件加载端处的混凝土块设置了40 mm的非黏结段;镀锌钢丝绳的结构形式为6×19+IWS(6股19丝,金属股芯右交互捻钢丝绳),其破坏力为42.20 MPa,将3根直径8 mm的镀锌钢丝绳埋置在聚合物砂浆加固层的中部,其合力点距砂浆层表面25 mm.

试件编号采用A-B-C-D-E形式,见图1(b).编号含义举例说明如下:C6-I8-3S8-16H-2中的C6表示试件的组别为C6,混凝土强度等级为C60;I8表示加固层的黏结长度为80 mm;3S8表示加固层内埋置3根钢丝绳,埋深长度为80 mm,与加固层黏结长度相同;16H表示混凝土加载端受压高度为160 mm;2表示具有相同参数的第2个试件;无E编号表示具有该参数的试件只有1个.

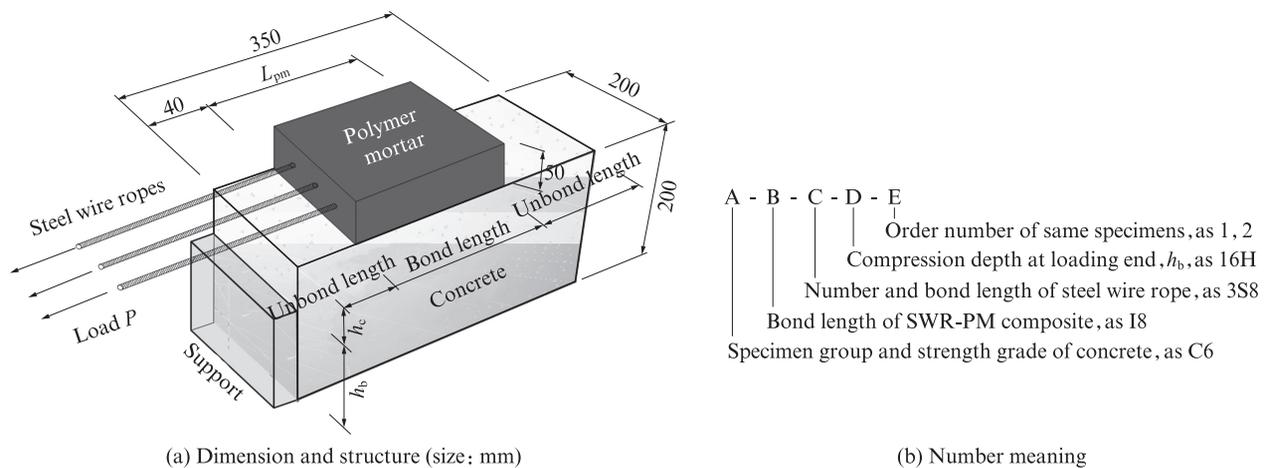


图1 试件尺寸、构造及编号含义
Fig. 1 Dimension, structure and number meaning of specimen

试件参数及试验结果汇总见表1.试验采用自配单组聚合物砂浆(按砂浆粉料质量15%加水拌制而成).混凝土和聚合物砂浆的力学性能见表2.

1.2 试件制作及步骤

所有试件均采用相同的制作工艺,如图2所示.

具体施工流程如下:(1)对混凝土块表面进行凿毛处理,并测量其表面粗糙程度(图2(a));(2)先对钢丝绳加载端进行“成环”、“连接”等预处理,随后在模板内穿拉钢丝绳呈张紧状态,并将其临时锚固在模板两侧(图2(b));(3)清理混凝土块表面,涂抹界面剂

(组分配比 $m(\text{组分A}):m(\text{组分B}):m(\text{硅灰粉})=2:1:1$),待界面剂有黏性后,抹压第1层聚合物砂浆(图2(c)、(d));(4)将带有钢丝绳的模板置于混凝土块上方,在模板内继续分层抹压聚合物砂浆至50 mm厚度,并留置材性试件(图2(e)、(f)),之后将试件置于20 °C、相对湿度90%以上的实验室内养护28 d.

1.3 试验加载及量测

试验采用液压伺服作动器进行单调加载,加载装置及量测方法如图3所示.试验时应注意:(1)将钢

丝绳与电液伺服作动器保持同一轴线上,以保证钢丝绳轴心受拉.(2)将上层端板作为支座,通过改变其宽度来调整混凝土块自由边长度 h_c ;下层钢底板则紧贴试件底面,以防止加载过程中混凝土块自由端抬起,荷载通过4根地锚螺杆传递给地梁.

试验全程采用位移控制加载方式,以0.3 mm/min的速率匀速加载.试验过程中量测内容包括:荷载值、钢丝绳加载端滑移值及加固层加载端相对于混凝土块的滑移值.

表1 试件参数及试验结果
Table 1 Parameters and test results of specimens

Group	Specimen No.	f_c^t/MPa	L_{pm}/mm	h_b/mm	$P_{u,exp}/\text{kN}$	$\bar{\tau}_{u,exp}/\text{MPa}$	$P_{u,cal}/\text{kN}$	$\bar{\tau}_{u,cal}/\text{MPa}$	$P_{u,exp}/P_{u,cal}$	Failure model
C6	C6-I8-3S8-20H-1	45.7	80	200	21.2	1.33	20.2	1.26	1.10	DBI
	C6-I8-3S8-20H-2	45.7	80	200	24.5	1.53	20.2	1.26	1.22	DBI
	C6-I16-3S16-20H	45.7	160	200	50.0	1.56	54.1	1.69	0.93	DBI
	C6-I20-3S20-20H	45.7	200	200	69.6	1.74	76.2	1.90	0.91	CPF
	C6-I24-3S24-20H-1	45.7	240	200	99.3	2.07	101.7	2.12	0.98	DBI
	C6-I24-3S24-20H-2	45.7	240	200	73.2	1.53	101.7	2.12	0.72	DBI+CPF
	C6-I40-3S40-20H-1	45.7	400	200	110.2	1.38	101.7	1.27	1.08	DBI+SWB
	C6-I40-3S40-20H-2	45.7	400	200	100.3	1.25	101.7	1.27	0.99	DBI+SWB
	C6-I40-3S40-20H-3	45.7	400	200	106.9	1.34	101.7	1.27	1.05	DBI+CPF
	C6-I8-3S8-16H	45.7	80	160	23.3	1.46	20.2	1.26	1.16	DBI
	C6-I16-3S16-18H	45.7	160	180	64.3	2.01	54.1	1.69	1.19	DBI+CPF
	C6-I16-3S16-16H	45.7	160	160	54.2	1.69	54.1	1.69	1.00	CPF
	C6-I20-3S20-18H	45.7	200	180	53.1	1.33	76.2	1.90	0.70	DBI+CPF
	C6-I20-3S20-16H	45.7	200	160	52.4	1.31	76.1	1.90	0.69	DBI+CPF
	C6-I24-3S24-18H	45.7	240	180	73.2	1.53	101.7	2.12	0.72	DBI+CPF
C2	C2-I8-3S8-20H-1	20.5	80	200	15.0	0.94				DBI
	C2-I8-3S8-20H-2	20.5	80	200	14.1	0.88				DBI
	C2-I8-3S8-16H	20.5	80	160	16.0	1.00				DBI
C5	C5-I8-3S8-20H-1	39.9	80	200	18.1	1.13				DBI
	C5-I8-3S8-20H-2	39.9	80	200	21.0	1.31				DBI
	C5-I8-3S8-16H	39.9	80	160	13.5	0.85				DBI

Note: f_c^t —Compressive strength of concrete cylinder; $P_{u,exp}$ —Failure load of specimen in test; $\bar{\tau}_{u,exp}$ —Nominal shear stress in test; $P_{u,cal}$ —Calculated debonding load; $\bar{\tau}_{u,cal}$ —Calculated nominal shear stress; DBI—Debonding failure model; CPF—Concrete tension-shear failure model; SWB—Steel wire ropes tension failure.

表2 混凝土和聚合物砂浆的力学性能
Table 2 Mechanical properties of concrete and polymer mortar

Material	Grade	f_{cu}/MPa	f_t/MPa
Concrete	C20	26.0	1.75
	C50	50.6	2.35
	C60	57.8	2.78
Polymer mortar		55.6	2.49

Note: f_{cu} —Compressive strength; f_t —Splitting strength.

将试件的名义剪应力($\bar{\tau}$)定义为黏结长度内黏结应力的平均值,其计算式为:

$$\bar{\tau} = P/A \quad (1)$$

式中: P 为破坏荷载,kN; A 为加固层黏结面积, mm^2 .

2 结果与分析

2.1 破坏特征

试件主要有3种典型破坏形式,即界面剥离破坏、混凝土拉剪破坏及混合破坏形式,如图4所示.

由图4(a)可见:(1)界面剥离破坏的特征为剥离界面常发生在砂浆层一侧,且界面上粘附着部分混

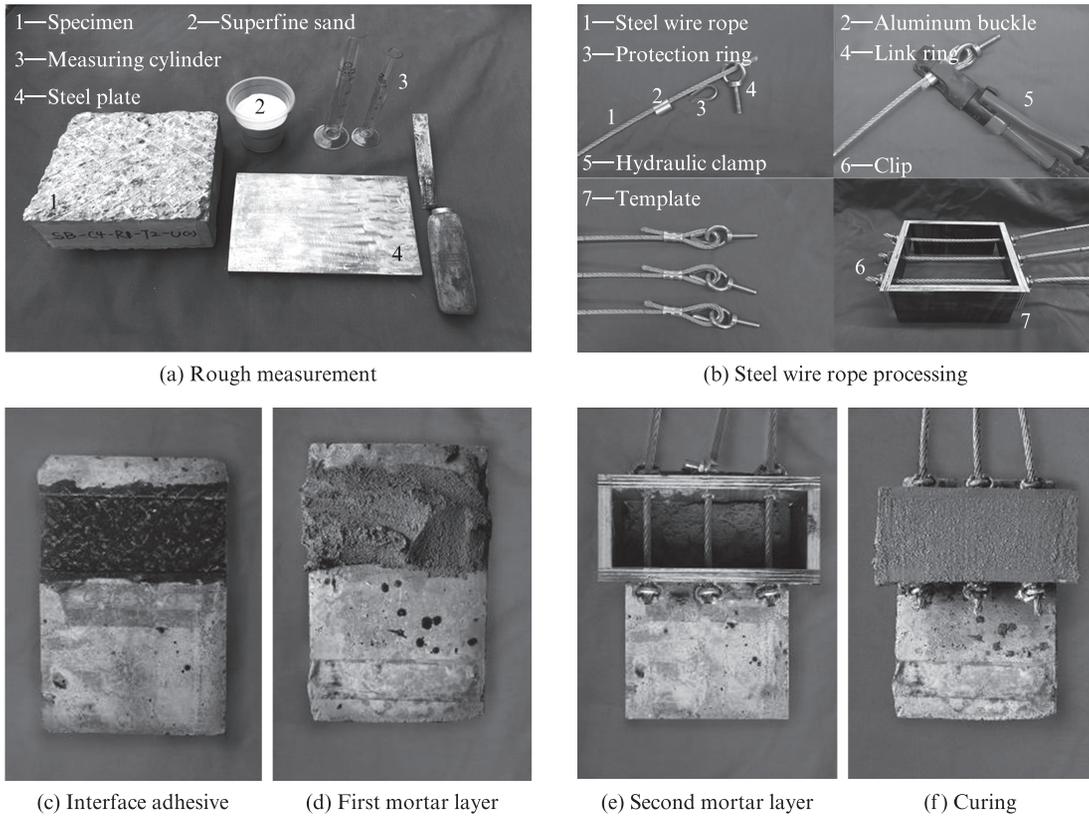


图2 试件制作工艺
Fig. 2 Fabrication process of specimen

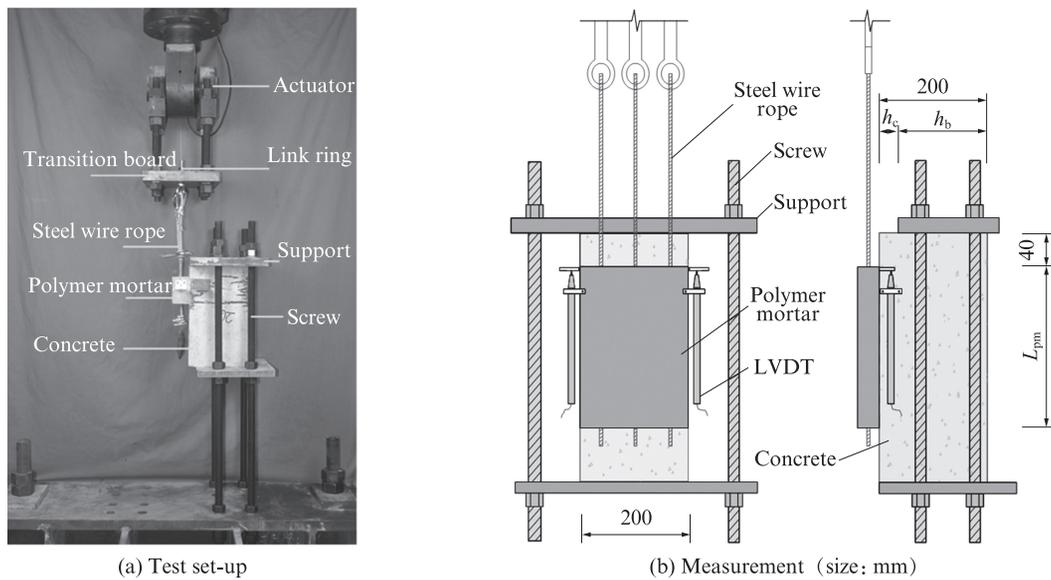


图3 试验加载装置及量测方法
Fig. 3 Test set-up and measurement

混凝土。(2)破坏发生在加载端受压高度为200 mm(混凝土自由边长度为0 mm)的试件中。(3)在加载初期,靠近加载端的加固层沿黏结界面出现1条裂缝;随着荷载的增加,该裂缝不断向加固层自由端发展。(4)当加固层黏结长度较短时,剥离破坏沿着加固层界面瞬间发生。

由图4(b)、(c)可见:当黏结长度较长,如400 mm时,界面裂缝沿界面不断向加固层自由端发展,加固层表面出现横向水平裂缝;当剩余黏结面积的承载力小于外荷载时,界面整体剥离瞬间发生。分析认为,外荷载作用下混凝土块全截面受压时,黏结界面近似处于纯剪切受力状态;随着外荷载的增加,界面

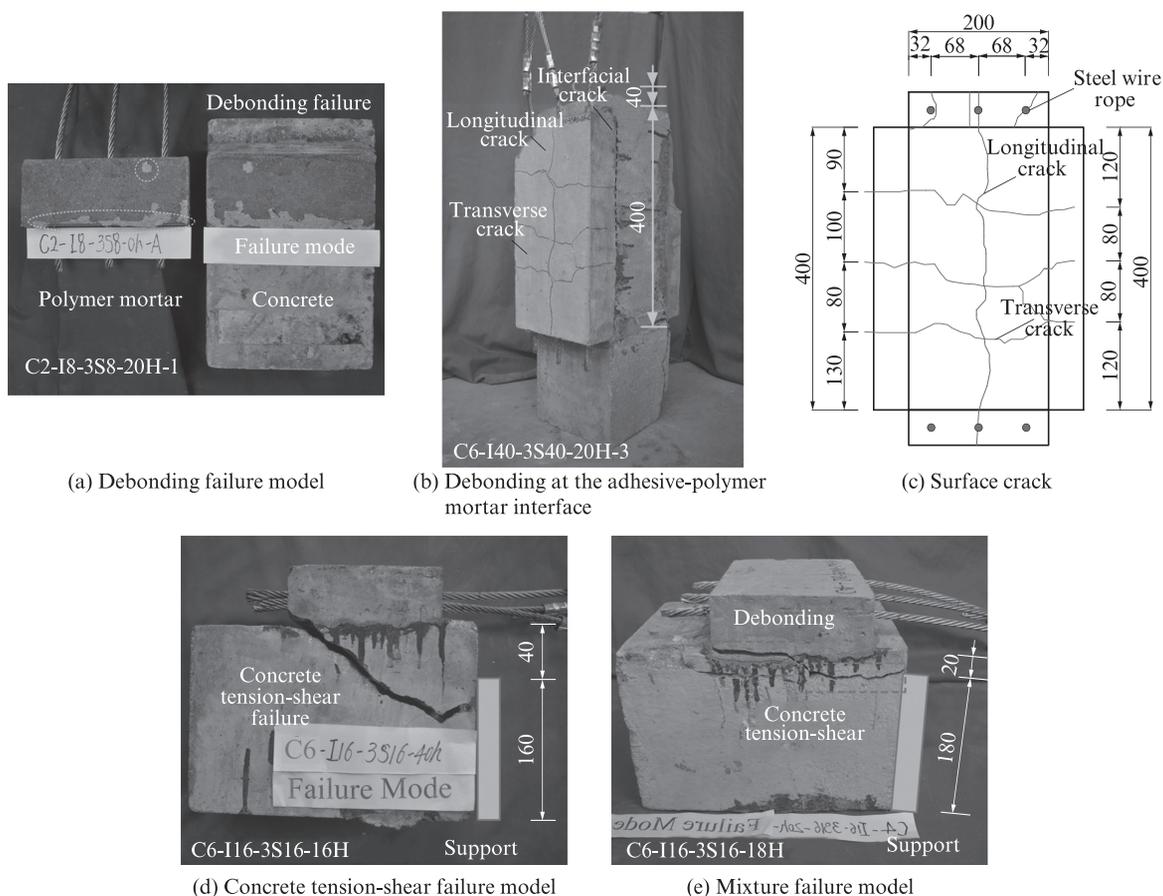


图4 试件的典型破坏形式
Fig. 4 Typical failure modes of specimen (size: mm)

剪应力超过界面黏结强度,靠近加载端的界面较早退出工作,随后由剩余界面承担外荷载;此受力过程不断地向自由端延伸,界面剥离过程也不断向加固层自由端发展。

由图4(d)可见:(1)混凝土拉剪破坏的主要特征是混凝土发生拉剪破坏,而加固层与混凝土黏结完好。(2)破坏前混凝土无明显开裂,加固界面未出现剥离;随着荷载逐渐增加,接近最大值时,试件破坏瞬间发生。(3)试件破坏发生在混凝土内部,破坏面从加固层自由端延伸至上层端板(即支座)的边缘。该破坏形式在试验中出现的次数较少,主要发生在存在混凝土自由边长度 h_c 的试件上。

由图4(e)可见:试件混合破坏的主要特征为加固层自由端附近发生界面剥离破坏,界面裂缝向加载端附近混凝土内部发展,并延伸至上层钢盖板的边缘,最终发生混凝土拉剪破坏。该破坏主要发生在加载端受压高度为180 mm,黏结长度为160、240 mm的试件中。分析认为,加载端受压高度 h_b 的降低,使得砂浆层加载端的局部刚度降低,加固层界面的局部应力需求也随之降低^[9];同时,

由于混凝土自由边长度 h_c 的存在,使得混凝土加载端受压面积减小,受压面压应力增大;随着荷载的增加,破坏面将沿着混凝土受压边缘逐渐向混凝土内部扩展,致使试件呈现混凝土拉剪破坏或混合破坏形态。

2.2 荷载-滑移曲线特征

滑移位移是加固层相对于同一水平位置处混凝土块的相对位移,钢丝绳在砂浆层中未发生明显滑移。试件的荷载-滑移($P-\Delta$)曲线关系如图5所示。由图5可见:(1)对于发生界面剥离破坏的试件,加载初期加固层界面剪应力水平较低,加固层与混凝土共同工作,两者间未发生滑移现象;随着荷载的增加,界面应力不断增长,界面微裂缝不断向自由端发展,加载端滑移量不断增长。(2)对于黏结长度较大的试件,荷载随着滑移量的增加呈先增长后稳定的趋势,界面不断剥离,且砂浆表面出现横向裂缝;当剩余黏结面积小于有效黏结面积时,加固层瞬间剥离,整体脱落,此时荷载达到最大,该阶段加固层的自由端未发生滑移;当荷载达到最大值时,加固层从混凝土块上整体剥离下来,荷载降至0。

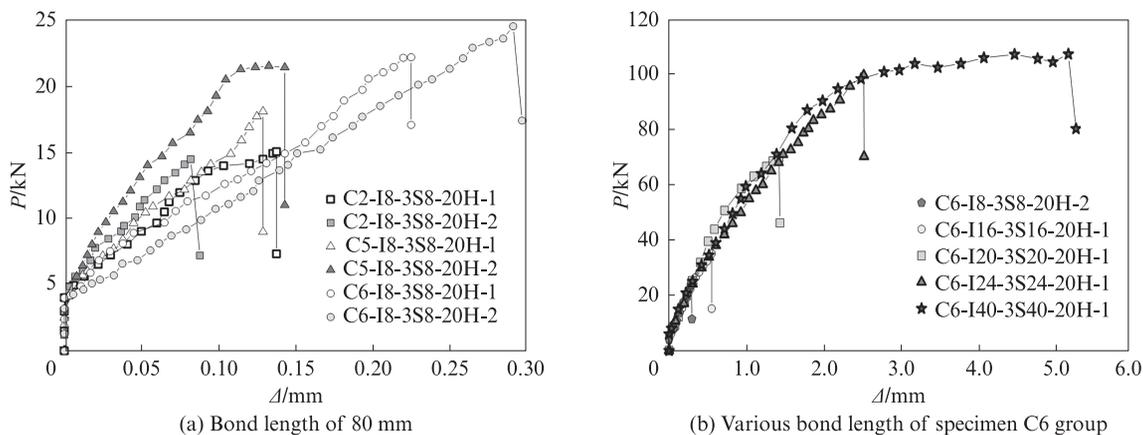


图5 试件的荷载-滑移位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curves of specimens

3 参数对黏结性能的影响

3.1 黏结长度

图6为C6组试件的剥离承载力($P_{u,exp}$)、名义剪应力($\bar{\tau}_{u,exp}$)与加固层黏结长度(L_{pm})的关系曲线.由图6可见,随着黏结长度的增加,C6组试件的 $P_{u,exp}$ 先增加后趋于稳定, $\bar{\tau}_{u,exp}$ 先升后降.这是由于随着剥离承载力的增加,加固层界面裂缝不断向加固层自由端发展,界面黏结面积不断减少.需要说明的是,计算名义剪应力时,黏结面积(A)是保持不变的,当 L_{pm} 超过某一特殊黏结长度后, $P_{u,exp}$ 将不再增加,该特殊黏结长度即为有效黏结长度(L_c).

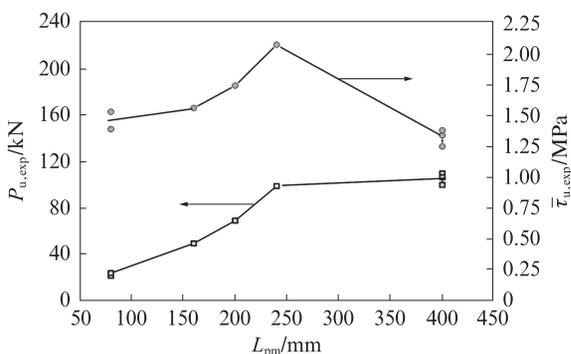


图6 C6组试件的剥离承载力、名义剪应力与加固层黏结长度的关系曲线
Fig. 6 Relation curves between debonding capacity, nominal shear stress and bonding length of reinforcement layer of specimen C6 group

图7为试件的界面应力分布和剥离发展过程示意图.由图7可见:加载初期,外荷载(P)先由靠近加载端的加固层界面承担,随着 P 的增加,界面剪应力(τ)不断增大,受力范围也不断延伸,当 P 达到最大值时,该受力范围达到最长(即有效黏结长度),此时超过该范围的界面不承担外载荷;随着加载的继续, P

不再增加.这是因为靠近加载端的界面已退出工作并出现了剥离现象, P 只能由处在有效黏结长度范围内的剩余界面承担;随后,此过程不断重复着向自由端发展,当剩余界面面积的承载力小于 P 时,界面的整体剥离瞬间发生.

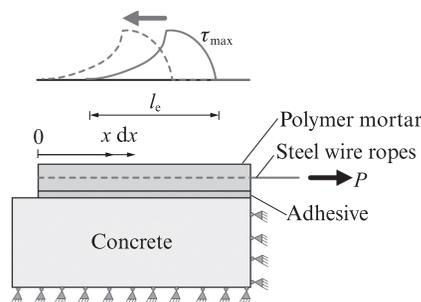


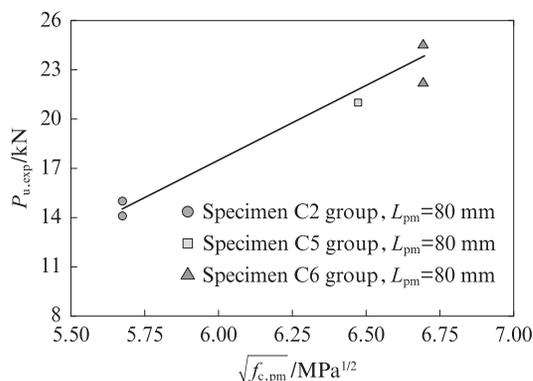
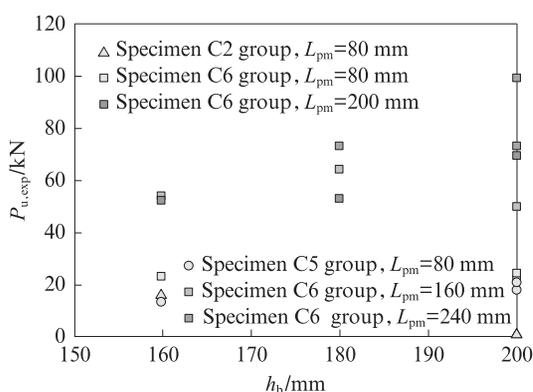
图7 试件的界面剪应力分布和剥离发展
Fig. 7 Interfacial shear stress distribution and debonding propagation of specimen

3.2 混凝土强度

试验现象显示,试件的剥离破坏界面主要发生在砂浆层与混凝土黏结界面的上下2~3 mm处.这说明混凝土和聚合物砂浆的强度影响着界面破坏面的位置和剥离承载力,因此,取混凝土和聚合物砂浆强度平均值的平方根($\sqrt{f_{c,pm}}$)作为试件剥离承载力的影响因素.图8为试件剥离承载力($P_{u,exp}$)与 $\sqrt{f_{c,pm}}$ 的关系曲线.

3.3 加载端受压高度

图9描述了试件破坏荷载与混凝土加载端受压高度的关系.混凝土加载端受压高度对纤维增强复合材料(FRP)界面黏结性能和试件破坏形态有较大影响^[9-10],但对钢丝绳-聚合物砂浆加固面层界面黏结性能的影响未见报道.试件破坏荷载随着加载端受压高度的降低(混凝土块自由边长度的增加)呈增长趋势.理论上认为,随着混凝土加载端受压高度的

图8 试件剥离承载力与 $\sqrt{f_{c,pm}}$ 的关系曲线Fig. 8 Relation curves between debonding capacity and $\sqrt{f_{c,pm}}$ of specimen图9 试件破坏荷载与混凝土加载端受压高度的关系
Fig. 9 Relationship between failure load and free edge length of specimen

减少,加固层加载端的局部刚度降低,加固层界面的局部应力需求也降低,破坏面由界面转向混凝土内部,破坏形态由界面剥离破坏转向混凝土拉剪破坏或混合破坏形态,破坏荷载增大;反之,加固层界面的局部应力需求提升,界面将先发生破坏,破坏荷载降低^[9],但图9显示这一规律并不明显.关于该参数对破坏荷载的影响规律尚需进一步研究.

4 有效黏结长度及剥离承载力的确定

4.1 有效黏结长度

加固层有效黏结长度(L_e)的确定是界面剥离破坏机理和界面黏结强度研究的重要课题,该问题在FRP加固领域虽有广泛报道^[9, 11-12],但在SWR-PM加固层方面尚缺少系统研究.目前,常采用数据拟合的方法来确定加固层的 L_e .本试验对C6组试件的试验数据进行拟合,得到C6组试件的 L_e 为243.6 mm,取为240 mm,具体过程如图10所示.

在 L_e 的相关研究中, Yao等^[9]、Yuan等^[13]和Chen等^[14]开展了大量的FRP-混凝土搭接接头形式

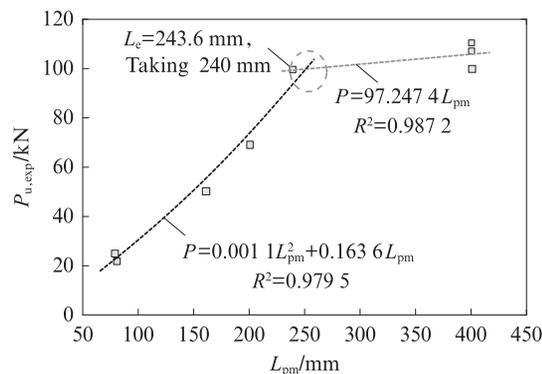


图10 加固层有效黏结长度的确定

Fig. 10 Determination of effective bonding length of strengthening layer

的单面剪切试验,并基于试验数据和断裂力学,提出半经验半理论的 L_e 计算式和Chen-Teng模型,该模型已被广泛应用于有效黏结长度和剥离承载力计算中.现假设SWR-PM加固层为弹性体,且加固层与混凝土间的黏结破坏发生在界面处,则 L_e 的计算近似满足Chen-Teng模型条件^[14].基于本试验的试件参数,如C6组试件黏结厚度(t_{pm})、弹性模量(E_{pm})、混凝土抗压强度 f'_c 分别取50 mm, 18 GPa, 44.8 MPa,由此计算得到的 L_e 为367 mm(C6组);其他2组的计算结果分别为398 mm(C2组)、373 mm(C5组).对比计算结果与拟合结果发现,C6组试件的 L_e 计算结果大于拟合结果.这是因为加固层属于非弹性连续体,不完全符合Chen-Teng模型条件,试验中加固层表面横向裂缝(见图5)的出现降低了其连续性,使得计算值大于拟合值.目前,依然建议使用数据拟合的方法寻找加固层有效黏结长度,但关于SWR-PM加固层有效黏结长度的计算方法需做进一步研究.综合考虑,将C6组试件的加固层有效黏结长度取为240 mm,利用该拟合结果计算界面剥离承载力.

4.2 剥离承载力

考虑加固层黏结长度和混凝土强度影响,建立界面剥离承载力及界面剪应力计算式:

$$P_{u,cal} = \alpha\beta_w\beta_1 L_e b_{pm} \sqrt{f_{c,pm}} \quad (2)$$

$$\bar{\tau}_{u,cal} = P_{u,cal} / L_{pm} b_{pm} = \alpha\beta_w\beta_1 L_e \sqrt{f_{c,pm}} / L_{pm} \quad (3)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_{pm}/b_c}{1 + b_{pm}/b_c}} \quad (4)$$

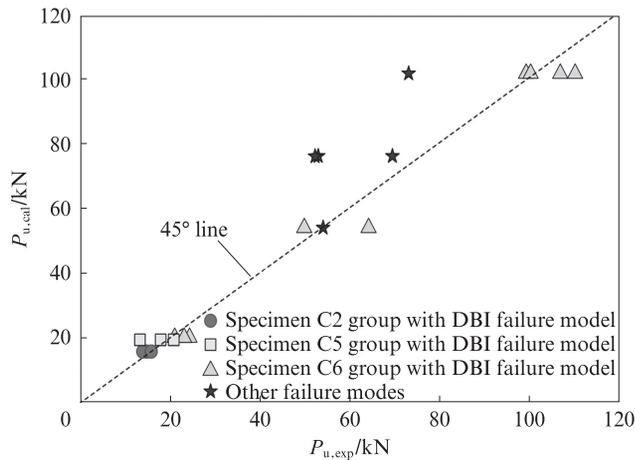
$$\beta_1 = \frac{P}{\beta_w L_e b_{pm} \sqrt{f_{c,pm}}} = \begin{cases} 1.0, & L_{pm} \geq L_e \\ 0.268 1(L_{pm}/L_e)^2 + 0.172 9L_{pm}/L_e, & L_{pm} < L_e \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{c,pm} = f_c + f_{pm} \quad (6)$$

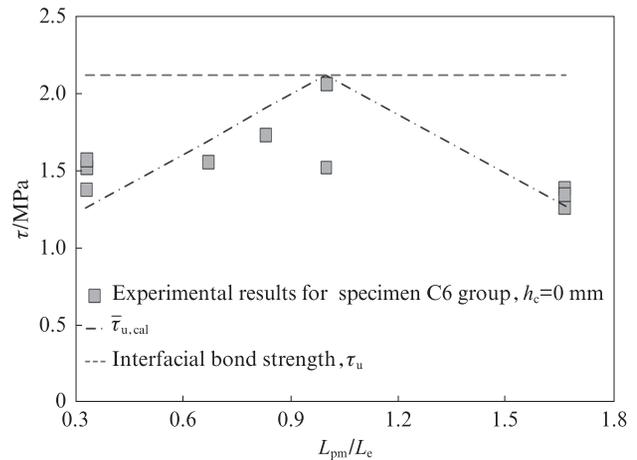
式中: α 为拟合系数,取为1.015; β_w 与 β_l 分别为加固层与混凝土黏结宽度及黏结长度影响系数,由于加固层与混凝土试块等宽, $\beta_w = 1/\sqrt{2}$; b_{pm} 、 b_c 分别为加固层的黏结宽度和混凝土试块宽度; $f_{c,pm}$ 为混凝土棱柱体试块抗压强度(f_c)和聚合物砂浆棱柱体试块抗压强度(f_{pm})加和平均值,取立方体抗压强度平均值的

0.79,MPa.

图11为界面剥离承载力(P_u)和界面剪应力(τ)的计算值.由图11(a)可以看出:对于发生界面剥离破坏的试件,其计算值与试验值相近,证明该计算公式有效.由图11(b)可以看出:随着黏结长度的增加,名义剪应力计算值先增加后降低,说明当加固层黏结长度超过有效黏结长度后,增大黏结长度并不能有效提高界面剥离承载力和界面剪应力.



(a) Comparison of calculated and experimental results of interfacial debonding capacity



(b) Interfacial shear stress at different bonding lengths

图11 界面剥离承载力和界面剪应力的计算值

Fig. 11 Calculated results of interfacial debonding capacity and shear stress

5 结论

(1)采用搭接接头形式的单面剪切试验方法,较好地模拟界面纯剪切受力状态.试件的典型破坏形式包括界面剥离破坏、混凝土拉剪破坏及混合破坏.

(2)随着黏结长度的增大,试件的剥离承载力先增加后趋于稳定,名义剪应力先增后减;剥离承载力随着混凝土强度的增大而提升;加载端受压区高度影响试件破坏形态和承载力.

(3)加固层与混凝土界面存在有效黏结长度,通过数据拟合和理论计算,可确定有效黏结长度.当加固层与混凝土块等宽时,C6组试件的有效黏结长度为240 mm.

(4)考虑加固层黏结长度和混凝土强度的影响,建立了界面剥离承载力与黏结长度计算公式,计算结果与试验结果吻合良好.

参考文献:

[1] WU G, WU Z S, JIANG J B, et al. Experimental study of RC

beams strengthened with distributed prestressed high-strength steel wire rope[J]. Magazine of Concrete Research, 2010, 62(4):253-265.

[2] 林于东,宗周红,林秋峰.高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土及预应力混凝土梁的抗弯性能试验研究[J].工程力学,2012,29(9):141-149.

LIN Yudong, ZONG Zhouhong, LIN Qiufeng. Experiment study on flexural behavior of RC/PRC beams strengthened with high strength steel wire mesh and permeable polymer mortar [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9):141-149. (in Chinese)

[3] 张阳,徐朔,姚学昌.预应力高强软钢丝加聚合物砂浆抗弯加固性能试验与理论分析[J].中国公路学报,2017,30(6):239-248.

ZHANG Yang, XU Shuo, YAO Xuechang. Theoretical analysis and experiment on flexural strengthening behaviors of prestressed high-strength steel wire ropes and polymer mortar [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6):239-248. (in Chinese)

[4] 黄群贤,郭子雄,姚秋来,等.钢绞线网片-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究及破坏机理分析[J].建筑结构学报,2019,40(12):78-87.

HUANG Qunxian, GUO Zixiong, YAO Qiulai, et al. Experimental study on flexural behavior and failure mechanism of RC beams strengthened with SSWM-PM [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12):78-87. (in Chinese)

[5] 柳战强,黄群贤,郭子雄,等.PHSW-PM加固RC桥梁受弯疲劳性能试验[J].中国公路学报,2018,31(11):102-112.