

文章编号:1671-8879(2009)05-0071-05

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层粘结滑移

黄 华,刘伯权,刘卫铎

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘 要:为避免高强不锈钢绞线网-渗透性聚合物砂浆加固层发生早期剥离破坏,保证加固层与混凝土界面的粘结性能,通过 9 个试件的剥离破坏试验,分析了加固层与混凝土界面剥离破坏特征,测试了加固层与混凝土粘结-滑移曲线,并通过 ANSYS 有限元程序建立模型,对剥离破坏试验进行数值模拟,得到了加固层粘结-滑移特征参数,建立了高强钢绞线网-聚合物砂浆加固钢筋混凝土粘结-滑移本构方程。剥离破坏试验与有限元计算的对比分析表明,建立的粘结-滑移本构方程可用于实际工程计算。

关键词:桥梁工程;高强钢绞线网;聚合物砂浆;加固;剥离破坏;粘结-滑移

中图分类号:U445.57;TU528.01 **文献标志码:**A

Bond-slip of reinforced layer with steel wire mash and polymer mortar

HUANG Hua, LIU Bo-quan, LIU Wei-duo

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: For avoiding to premature debonding failure of reinforced layer made up of stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar and ensuring the bond performance between polymer mortar and concrete, the experiments about the debonding failure between reinforced layer and concrete were carried out. The characters of the debonding failure between reinforced layer and concrete were analyzed, and the bond-slip curves were tested. The program ANSYS was used to develop the finite element models for simulating the experimental studies. The experimental results were validated, and the characteristic parameters of bond-slip were gained, and the bond-slip relationship of reinforced layer was presented. The comparison analysis on the debonding failure test and numerical simulation shows that the bond-slip relationship can be used to calculate the practical engineering problems. 2 tabs, 8 figs, 11 refs.

Key words: bridge engineering; stainless steel wire mesh; polymer mortar; reinforcement; debonding failure; bond-slip

0 引 言

高强不锈钢绞线网-渗透性聚合物砂浆加固技术是在混凝土构件表面张紧钢绞线网,然后用膨胀

螺栓固定在构件上,使其整体受力而共同工作,最后在其表面抹上渗透性聚合物砂浆作为保护层,以提高结构承载力和耐久性的一种加固方法。与常规加固方法中设置剪力连接件所不同的是,该加固技术

收稿日期:2008-11-10

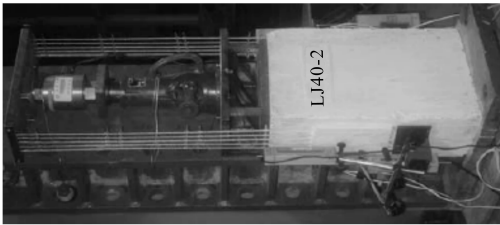
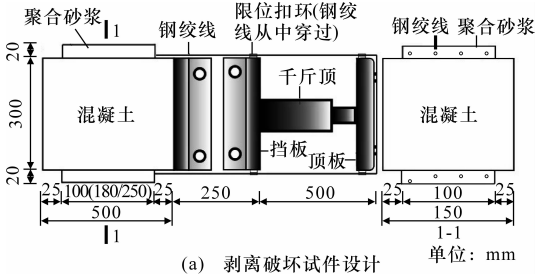
基金项目:国家自然科学基金项目(50608004);河北省交通科技项目(Y-030117)

作者简介:黄 华(1979-),男,江苏常州人,讲师,工学博士,E-mail:huanghua23247@163.com。

所采用的膨胀螺栓只起到悬挂钢绞线网的作用,并不作为抗剪连接件而存在,加固界面完全依靠砂浆与混凝土之间的粘结传力。现有研究^[1-5]表明:高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层发生剥离破坏是加固构件最重要的破坏模式之一。为此,本文从高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与混凝土界面剥离破坏特性出发,通过 9 个试件的剥离破坏试验研究以及有限元程序的数值模拟,对加固层与混凝土界面剥离破坏特征进行分析,得出相关结论。

1 试验概况

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与混凝土界面剥离破坏试验主要通过双面剪切试验,探讨加固层发生剥离破坏的特点。混凝土采用 C30、C35、C40 共 3 种强度等级,修补方位采用侧面抹灰,并对表面进行人工凿毛处理,界面粗糙度采用灌沙法^[6]量测。试件设计如图 1 所示,试件按其抹灰长度分为 100、180、250 mm 共 3 组,每组不同混凝土强度等级各 1 个,共计 9 个。



(a) 剥离破坏试件设计

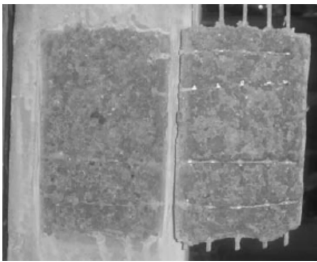
(b) 剥离破坏试验装置

图 1 剥离破坏试验

2 剥离破坏试验结果

典型的剥离破坏形式如图 2 所示。钢绞线网和聚合物砂浆组成的加固层在拉力作用下发生剥离,在粘结界面砂浆层一侧表面上附着剥离下来的部分混凝土。加载过程中,沿粘结界面出现一条与界面平行的裂缝,由加载端向自由端发展,并最终将整个加固层连同界面上的部分混凝土一起剥离下来。如果粘结面较小,则发生一次性剥离破坏,界面应力迅速下降;如果粘结面积较大,则剥离是先逐渐而后快速发展的,直至粘结面积小到有效粘结面积时,发生

一次性剥离破坏。由于加固层砂浆的脆性,随界面裂缝向自由端发展,砂浆层表面将产生裂缝。试验中 9 个试件的剥离破坏均是先逐渐而后快速发展的,当粘结面积小到一定程度后,发生一次性剥离而破坏。试验结果如表 1 所示。



(a) 剥离破坏



(b) 加固层剥离破坏裂缝的发展

图 2 加固层剥离破坏

表 1 剥离破坏试验结果

试件 编号	混凝土 强度/ MPa	粘结 龄期/ d	砂浆 强度/ MPa	界面粗 糙度/ mm	粘结面尺寸		实测剥 离强度/ kN
					宽/ mm	长/ mm	
LJ30-1	44.71	14	45.05	0.623	102	106	8.35
LJ30-2				0.639	98	179	15.00
LJ30-3				0.714	105	257	13.00
LJ35-1	48.45			0.642	99	105	8.65
LJ35-2				0.625	101	171	14.50
LJ35-3				0.618	101	245	15.50
LJ40-1	52.47			0.668	100	103	9.00
LJ40-2				0.622	102	176	11.50
LJ40-3				0.654	103	244	15.50

3 粘结滑移特征

加固层与混凝土界面剥离破坏荷载-加载端滑移曲线如下页图 3(a)所示。所有试件自由端的滑移值均没有测试到,主要原因是,由于试验中,随着层间裂缝的发展,粘结面积减小,最后均发生一次性剥离而瞬间破坏。令粘结面有效剪应力 $\bar{\tau}$ 为

$$\bar{\tau} = P_{b,u} / \tilde{A} \tag{1}$$

式中: $P_{b,u}$ 为剥离强度; $\tilde{A} = b_m L_m$ 为有效粘结面积, b_m 为加固层宽度, L_m 为加固层长度, $L_m > L_e$ 时取 $L_m = L_e$, L_e 为有效锚固长度,取 $L_e = 180$ mm。

粘结面有效剪应力-端部位移如下页图 3(b)所示。

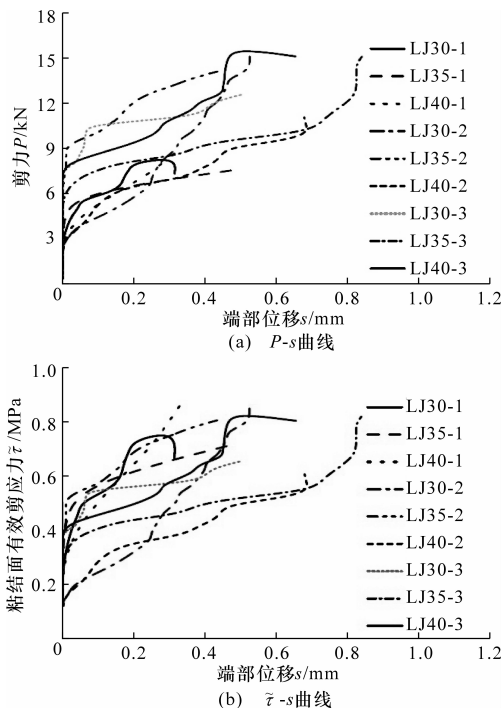


图 3 粘结-滑移曲线

由图 3 粘结-滑移曲线可见,加固层剥离破坏可分为 3 个阶段。

(1)无滑移阶段。加载初期,砂浆加固层与混凝土共同工作,变形协调,因为应力水平较低,初始变形保持稳定,混凝土与砂浆组成的“粘结破坏区”微观结构的变化不足以引起宏观结构发生改变,加载端和自由端均不发生明显滑移。

(2)滑移阶段。加载至一定荷载时,“粘结破坏区”中应力不断增长,其薄弱部位应力将达到粘结强度,宏观裂缝出现,加载端发生滑移。随着荷载继续增加,界面裂缝获得很大发展,直至粘结面积小于有效粘结面积时,伴随“嘭”的一声巨响,发生一次性剥离破坏,荷载达到极限荷载。这一阶段自由端仍然没有发生滑移。

(3)破坏阶段。荷载达到极限荷载的瞬间,砂浆加固层发生完全剥离而掉落,荷载瞬间降低为 0。这一阶段在图 3 中几乎没有显示出来,而只是一个瞬间点,这种剥离破坏具有极大脆性。自由端突然发生剥离,对滑移值的测量提出了挑战,本次试验中均没有测得有效的结果。

4 粘结-滑移本构模型

由于加固层与混凝土之间的剥离破坏发生在“粘结破坏区”,破坏面材料为混凝土和聚合物砂浆。而粘钢加固和粘贴 FRP(碳纤维布)加固的剥离破坏层位于胶层下 2~5 mm 厚的混凝土内部,因而这

三者具有相同的剥离破坏机理。以往的研究^[7-10],在粘钢加固和粘贴 FRP 加固时就已经采用了相同的粘结-滑移本构模型。由于高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与混凝土构件本体之间的粘结-滑移测试具有非常大的困难,目前尚无可行的办法来测试二者之间的相对滑移和界面应力。本文以粘钢加固和粘贴 FRP 加固的粘结-滑移本构关系为基础,结合剥离破坏试验和有限元程序的计算,推导合适的高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土结构粘结-滑移本构模型。

4.1 粘结-滑移本构模型的建立

对粘钢加固和粘贴 FRP 加固的众多研究者依据试验或有限元分析,提出了各自的粘结-滑移本构关系。陆新征^[11]在这些本构关系基础上,提出了更合理的本构关系,包括精确模型、简化模型和双线性模型。现采用文献^[11]的简化模型,结合本文剥离破坏试验数据和有限元分析,确定系数 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 ,从而建立较为合理的高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与混凝土粘结-滑移本构方程。剪应力 τ 为

$$\tau = \begin{cases} \tau_{\max} \sqrt{\frac{s}{s_0}} & s \leq s_0 \\ \tau_{\max} e^{-\xi(s/s_0 - 1)} & s > s_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:最大剪应力 $\tau_{\max} = \xi_1 \tau_{b,u}$;界面初始滑移 $s_0 = \xi_2 \tau_{b,u}$;界面总破坏能 $G_f = \xi_3 \sqrt{\tau_{b,u}}$, $\tau_{b,u}$ 为聚合物砂浆与混凝土剥离破坏剪应力,计算公式见文献^[2];系数 $\xi = 1 / \left(\frac{G_f}{\tau_{\max} s_0} - \frac{2}{3} \right)$ 。

4.2 系数 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 的确定

以通用有限元程序 ANSYS 为基础,建立剥离破坏有限元模型,分析钢绞线网-聚合物砂浆加固层与混凝土界面之间的粘结-滑移现象。混凝土和聚合物砂浆选用 SOLID65 单元,钢绞线选用 LINK8 单元,垫块选用 SOLID45 单元。

聚合物砂浆加固层与混凝土的相互作用,主要体现在粘结面间的相互作用。由于“粘结破坏区”内部潜在缺陷比整浇混凝土以及砂浆严重得多,且内部初应力(应变)更加复杂,粘结的成败取决于这一过渡层混凝土的微观结构和力学特性。此处通过有限元程序,模拟界面剥离破坏试验,在受力方向上设置弹簧单元(COMBIN39 单元),而对另外 2 个方向的自由度予以耦合。每个弹簧单元的长度为 0,其性能由弹簧拉力 F -变形位移 D 曲线(F - D 曲线)确定,而 F - D 曲线则主要由该方向的 τ - s 本构关系确定。

此处受力方向即为加固层长度方向,该方向粘

结面上的相互作用则通过加固层与混凝土之间的粘结-滑移本构关系体现出来,是剥离破坏试验中主要研究的方向。通过式(2)描述的 $\tau-s$ 本构关系来确定对应的 $F-D$ 曲线,如图 4 所示。图 4 中: F_i 、 D_i 分别为 i 点的拉力和位移; D_0 为初始拉力; F_{\max} 为最大拉力。有限元分析采用 1/2 模型,如图 5 所示。

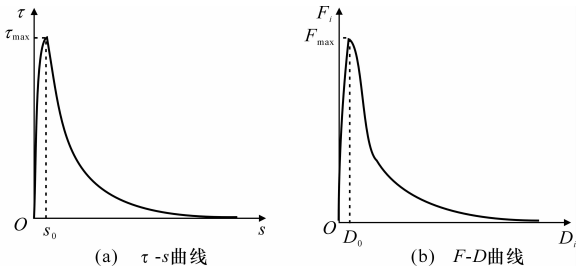


图 4 弹簧单元 $F-D$ 曲线

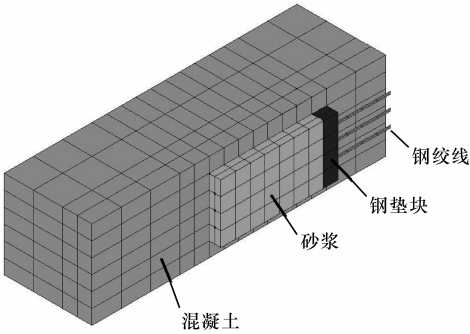


图 5 FEM 模型(1/2 模型)

根据试验数据,确定 $\xi_2 = 0.0195$,取系数 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 的初值分别为:1.5、0.0195、0.308;固定 $\xi_3 = 0.308$,调整 ξ_1 ;然后再固定 ξ_1 ,调整 ξ_3 。经多次试算,确定 $\xi_1 = 1.26$, $\xi_3 = 0.259$ 。

故可确立本构方程式(2)中各参数为

$$\tau_{\max} = 1.26\tau_{b,u}, s_0 = 0.0195\tau_{b,u}$$

$$G_f = 0.259 \sqrt{\tau_{b,u}}$$

4.3 有限元计算结果

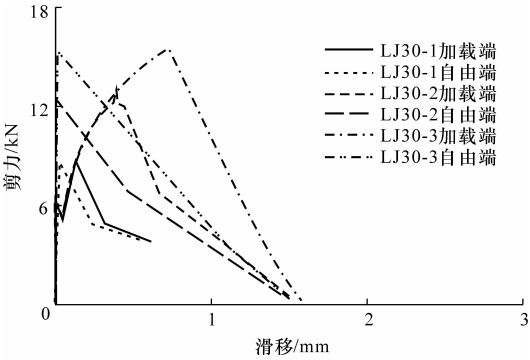
有限元计算剥离荷载结果如表 2 所示。表 2 中计算值与实测值比值的平均值为 1.019,标准差为 0.120,有限元计算结果与试验值吻合较好,所建立的有限元模型及参数取值是合理的。

FEM(有限元)模型端部荷载-滑移曲线如图 6 所示。由图 6 可见,自由端滑移在剥离瞬间产生,试验实测难以实现,有限元计算弥补了试验的不足;加载端滑移与试验实测较为符合。端部荷载-滑移曲线表明,有限元模型计算是可行的,且式(2)所示的高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与混凝土 $\tau-s$ 本构关系是合理的,可用于实际使用。

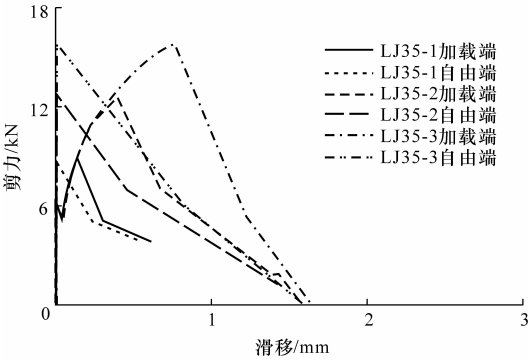
FEM 模型典型裂缝分布如下页图 7 所示。由图 7 可见,裂缝由加载端逐渐向自由端发展,这与试

表 2 剥离荷载有限元计算值与实测值对比

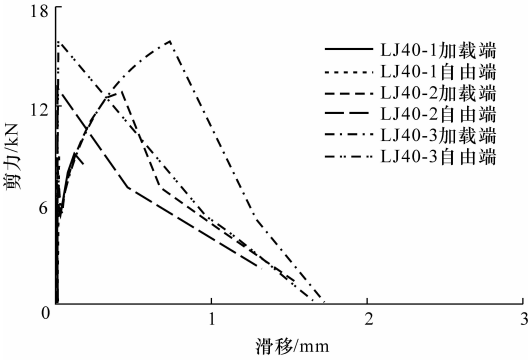
试件 编号	剥离荷载/MPa		FEM 计算值/实测值
	实测值	FEM 计算值	
LJ30-1	8.35	8.63	1.034
LJ30-2	15.00	13.21	0.881
LJ30-3	13.00	15.51	1.193
LJ35-1	8.65	8.78	1.015
LJ35-2	14.50	12.72	0.877
LJ35-3	15.50	15.91	1.026
LJ40-1	9.00	8.93	0.992
LJ40-2	11.50	12.93	1.124
LJ40-3	15.50	15.98	1.031



(a) 混凝土强度为C30簇曲线



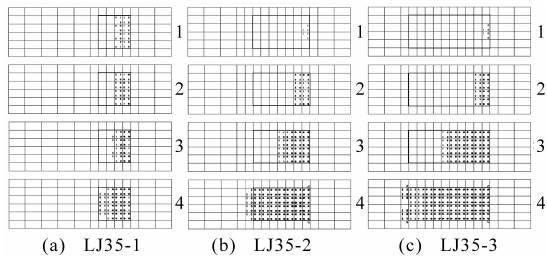
(b) 混凝土强度为C35簇曲线



(c) 混凝土强度为C40簇曲线

图 6 FEM 模型粘结-滑移曲线

验观测一致;混凝土裂缝分布超出了加固层范围,图 7 中黑线以外的裂缝,即为混凝土超出加固层范围的裂缝,但不明显,仅为一次裂缝。这说明加固层宽度对粘结性能有一定影响,但不是很大,可以忽略。



注:1、2、3、4 表示裂缝发展的先后顺序。

图 7 FEM 模型裂缝的发展及分布

FEM 模型典型应力分布如图 8 所示,均为第 1 主应力云图。由图 8 可见,加固层加载端和自由端均为应力集中部位,加载端应力最高,剥离首先出现在该部位,逐渐向自由端发展,最终发生一次性剥离破坏。

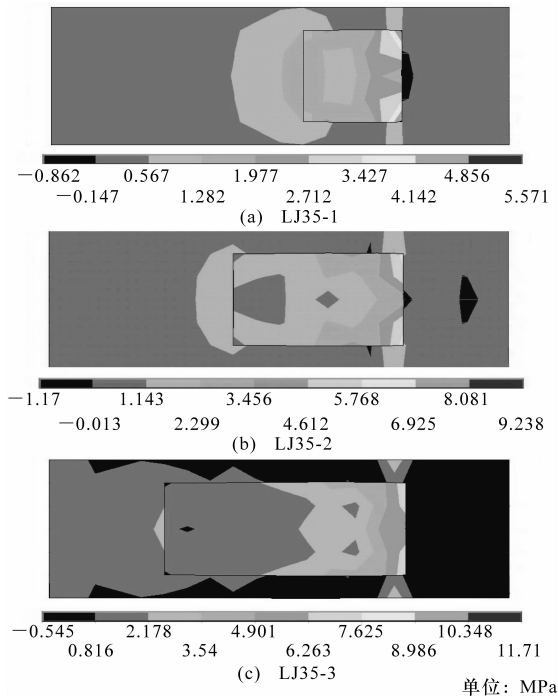


图 8 FEM 模型第 1 主应力分布

5 结 语

(1)通过高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土剥离破坏试验,测试了加固层剥离破坏特性和粘结-滑移曲线。

(2)采用有限元程序对剥离破坏进行数值模拟,结合试验数据,建立了加固层粘结-滑移本构方程。

参考文献:

References:

[1] 黄 华,刘伯权,邢国华,等. 高强不锈钢绞线网-渗透

性聚合砂浆加固的 T 型梁桥试验[J]. 中国公路学报, 2007,20(4):83-90.

HUANG Hua, LIU Bo-quan, XING Guo-hua, et al. Experiment on RC T-type beam bridge strengthened with high strength stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(4):83-90.

[2] 黄 华. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁式桥试验研究与机理分析[D]. 西安:长安大学, 2008.

[3] 聂建国,王寒冰,张天申,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗弯加固的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005,26(2):1-9.

NIE Jian-guo, WANG Han-bing, ZHANG Tian-shen, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar[J]. Journal of Building Structures, 2005,26(2):1-9.

[4] 曾令宏. 高性能复合砂浆钢筋(丝)网加固混凝土梁试验研究与理论分析[D]. 长沙:湖南大学, 2006.

[5] 曹 俊. 高强不锈钢绞线网-聚合砂浆粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京:清华大学, 2004.

[6] 赵志方,周厚贵,袁 群,等. 新老混凝土粘结机理研究与工程应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

[7] 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.

[8] Chen J F, Yang Z J. FRP or steel plate-to-concrete bonded joints; effect of test methods on experimental bond strength[J]. Steel and Composite Structures, 2001,1(2):231-244.

[9] Taljsten B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1997,17(4):319-327.

[10] 任 伟,贺拴海,宋一凡. 碳纤维布加固具有初应力的钢筋混凝土梁抗剪极限承载力[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004,24(4):40-45.

REN Wei, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Ultimate shear capacity of RC beam rehabilitated with carbon fiber reinforced plastic (CFRP) under loading case [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(4):40-45.

[11] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京:清华大学, 2004.