

文章编号:1673-2049(2011)02-0075-04

界面处理对 FRP 加固钢筋混凝土梁 承载力的影响

董 海,何化南,吴智敏,石昌文

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:以梁跨度、配筋率为参数,利用 5 组试件对比研究了界面凿毛对纤维增强聚合物(FRP)加固钢筋混凝土梁极限弯矩的影响。结果表明:混凝土界面凿毛后的 FRP 加固梁的极限弯矩要小于砂轮打磨梁的极限弯矩,并且随着梁跨度的增大,砂轮打磨梁与凿毛梁的极限弯矩差值增大;随着配筋率的增大,砂轮打磨梁与凿毛梁的极限弯矩差值减小。

关键词:界面处理;纤维增强聚合物;钢筋混凝土梁;承载力;极限弯矩;凿毛

中图分类号:TU337.4

文献标志码:A

Effect of Surface Preparation on Bearing Capacity of RC Beams Strengthened with FRP

DONG Hai, HE Hua-nan, WU Zhi-min, SHI Chang-wen

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Using a total of 5 group specimens, through two variables of span of beam and reinforcement ratio, the effect of the artificial chiseling on ultimate moment of reinforced concrete (RC) beams strengthened with fiber reinforced polymer (FRP) was investigated. The results show that the ultimate moment of an FRP strengthened beam with artificial chiseling is lower than that of an FRP strengthened beam with wheel grinding. Besides, as the span of beam increases, the difference values increase between the ultimate moment of a beam with artificial chiseling and that of a beam with wheel grinding; and the difference values decrease as the reinforcement ratios increase.

Key words: surface preparation; fiber reinforced polymer; reinforced concrete beam; bearing capacity; ultimate moment; artificial chiseling

0 引 言

纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer,简称 FRP)因具有自重轻、施工方便、强度高、徐变低、抗腐蚀性和耐疲劳性好等优点,在钢筋混凝土结构加固中得到广泛应用。目前,应用较多的是将 FRP

外贴在钢筋混凝土梁上,因此,FRP 和混凝土梁界面的粘贴强度成为影响 FRP 加固梁极限弯矩的一个重要因素。

一些学者开展了对加固梁界面处理方法的研究,使加固后的 FRP 和混凝土的粘结效果更好,利用率更高,进而提高 FRP 加固梁的极限弯矩。对混

收稿日期:2011-01-05

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A03-09);国家自然科学基金项目(50578025)

作者简介:董 海(1984-),男,辽宁庄河人,工学硕士研究生,E-mail:donghainihaya@126.com。

凝土界面处理基本上有 4 种方法:①砂轮打磨处理法,这种方法被认为不能改善粘结强度,反而会因打磨而在混凝土表面留下微小裂纹^[1-2];②机械喷砂处理法,这种方法被认为可以有效地提高粘结强度^[3-4];③高压水枪喷射处理法,这种方法被认为是粘结强度高于砂轮打磨的处理法^[5];④手工凿毛处理法,这种方法被用在多层 CFRP 复合锚固技术中,取得了很好的效果。目前,进行 FRP 加固层数最多的、能够提高 FRP 加固梁承载力最大的界面处理方法是手工凿毛处理法。

Wu 等^[6]在界面凿毛处理方法的基础上,利用 FRP 复合锚固技术对 FRP 加固梁进行锚固,发现外贴 5 层 FRP 依然能够被拉断而不发生剥离破坏,极大地提高了 FRP 利用率和加固梁的极限弯矩。

胡程鹤等^[7]对上述界面处理法和复合锚固技术作了改进,结果表明,通过调整复合锚固件的间距,用界面凿毛这种方法可以保证 7 层 FRP 加固梁中 FRP 依然能够拉断破坏而不是剥离破坏,FRP 的利用率是 100%,FRP 配置率与极限承载力呈直线增长,这说明凿毛的处理方法在复合锚固技术中可以保证足够的粘结强度。

该界面凿毛配合复合锚固技术的加固方法有很好的应用前景,但是这种凿毛处理在 FRP 受拉过程中会不会产生不利影响,会不会降低 FRP 加固梁的极限弯矩,学者们并没有给出明确的结论。本文中笔者通过梁的跨度和配筋率的不同,利用砂轮打磨和凿毛 2 种对比加固梁,研究界面凿毛对 FRP 加固梁极限弯矩的影响及解释产生这种影响的原因。

1 试验概述

1.1 界面处理方法

(1)砂轮打磨。将要粘贴 FRP 的区域用打磨机把梁底表面磨平,以能看到骨料为准,如图 1 所示。

(2)凿毛。用手工凿子和锤子在粘贴 FRP 处凿出 3 mm 深度的粗糙面,具有一定的随机性,均匀性用目测控制,如图 2 所示。

1.2 锚固技术

采用改进的复合锚固技术^[8-12],即在外贴 FRP 布的基础上加上机械锚固。锚固方式如图 3 所示。锚固件由钢片、螺母、螺杆组成,具体操作步骤如下:对试件表面进行界面处理,分为凿毛和砂轮打磨,按照规定的方式粘贴 FRP 布,在已经钻孔的位置安装锚固件,第 2 天用扭矩扳手给螺母施加扭矩,使得钢

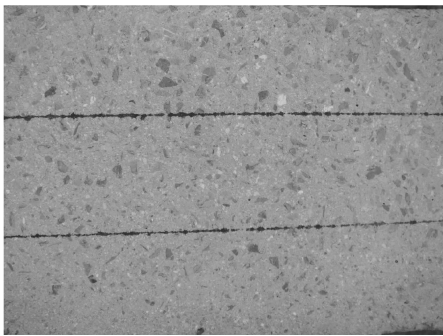


图 1 砂轮打磨

Fig. 1 Wheel Grinding

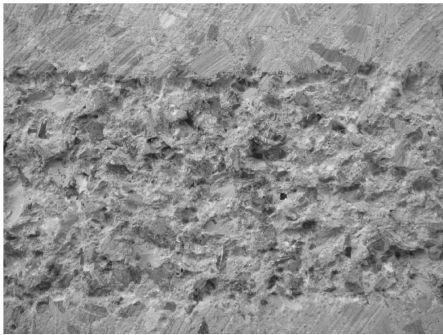


图 2 凿毛

Fig. 2 Artificial Chiseling



图 3 锚固方式

Fig. 3 Anchorage Mode

片能给 FRP 布一个压力,扭矩为 15 N · m。

1.3 试验描述

该试验共有 10 根钢筋混凝土梁,分成 A、B、C、D、E 五组。每组试件都由 1 根凿毛梁和 1 根砂轮打磨梁组成,梁的参数见表 1、图 4。

混凝土设计强度等级为 C60,实测混凝土立方体抗压强度为 73 MPa,纵向受力钢筋为 HRP335,屈服强度为 360 MPa,箍筋为 HPB235,间距为 150 mm。FRP 布为 CYMAX 12K L300-C,实测抗拉强度为 3 353 MPa,弹性模量为 226 GPa,计算厚度为 0.167 mm。该试验采用三点弯曲加载方式,在 500 t 压力试验机上进行,试验装置如图 5 所示。

表 1 梁加固参数

Tab. 1 Strengthened Parameters of Beams

梁编号	梁截面宽/mm	梁截面高/mm	梁净跨/mm	配筋型号	配筋率/%	FRP 层数	锚固件间距/mm
A-2	300	150	1 000	1Φ10	0.20	2	100
B-2	300	150	1 500	1Φ10	0.20	2	100
C-2	300	150	2 000	1Φ10	0.20	2	100
D-2	300	150	2 000	1Φ18	0.67	2	100
E-2	300	150	2 000	1Φ25	1.33	2	100

注:A-2 表示 A 组试验梁共 2 根,其他试件以此类推。

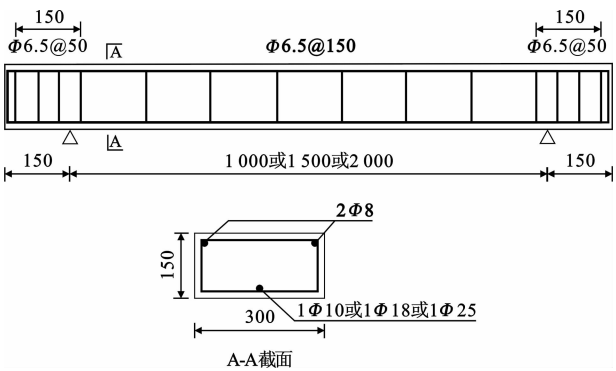


图 4 梁的尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 4 Dimensions and Reinforcements of Beams (Unit:mm)

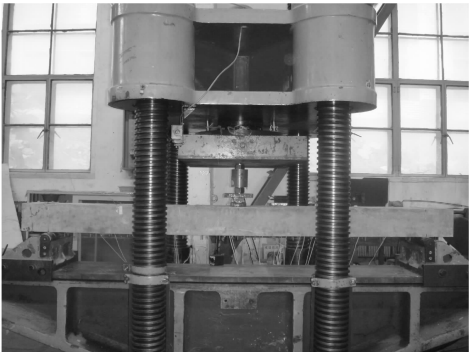


图 5 试验装置

Fig. 5 Device of Experiment

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

A、B、C、D、E 组梁都是在跨中附近 FRP 拉断后钢筋混凝土梁才破坏。在 FRP 被拉断前,加固梁与普通钢筋混凝土梁一样出现裂缝,但是由于 FRP 的作用,裂缝发展得比较慢,并且会听到胶的开裂声音,随着荷载的增大,跨中附近裂缝继续开展,跨中挠度不断增大,最后发生弯曲破坏,在梁破坏的瞬间,FRP 在跨中附近被拉断。图 6 为 FRP 加固梁的破坏形态。图 6 中混凝土的裂缝是在 FRP 被拉



图 6 FRP 加固梁的破坏形态

Fig. 6 Failure Mode of FRP Strengthened Beams

断后裂缝继续扩展引起的。

2.2 结果分析

2.2.1 凿毛对极限弯矩的影响

试验结果数据汇总见表 2,由此分析数据得出梁的极限弯矩-跨中挠度曲线如图 7 所示。由表 2 和图 7 可以看出:A、B、C、D、E 组梁中,砂轮打磨梁都比凿毛梁的极限弯矩大;在破坏时砂轮打磨后的加固梁跨中挠度都比凿毛后加固梁的跨中挠度大,延性好。这是由于凿毛梁会在 FRP 受拉过程中产生应力集中,导致 FRP 过早地被拉断。

2.2.2 跨度对极限弯矩的影响

A、B、C 组梁的跨度分别为 1 000、1 500、2 000 mm,其他条件均相同。A、B 组梁中,砂轮打磨梁的极限弯矩与凿毛梁的极限弯矩差值分别为 2.41、3.02 kN·m。分析结果表明,随着梁跨度的增大,砂轮打磨梁和凿毛梁的极限弯矩差值增大,这是因为随着跨度的增大,FRP 在受拉过程中受到应力集中的影响更大,所以 FRP 被更早拉坏。C 组梁的极限弯矩差值为 2.14 kN·m,没有比 B 组梁差值大,原因如下:①在 FRP 破坏处的凿毛情况不同以及凿毛的均匀性很难控制;②由表 2 可以看出,A、B、D、E 组凿毛梁的承载力设计值和承载力试验值至少相差 2.58 kN,而 C 组凿毛梁承载力设计值和承载力试验值相差 0.57 kN,这说明 C 组凿毛梁控制不够理想,最终导致试验结果不理想,但仍然认为 FRP 加固梁的跨度越大,FRP 在受拉时凿毛对承载力的影响就越大,FRP 受到应力集中的影响就越大,所以砂轮打磨梁与凿毛梁的极限弯矩差值越大。

2.2.3 配筋率对极限弯矩的影响

C、D、E 组梁的配筋分别为 1Φ10、1Φ18、1Φ25,其他条件都相同。D、E 组梁中,砂轮打磨梁的极限弯矩与凿毛梁的极限弯矩差值分别为 3.51、1.07 kN·m。随着梁配筋率的增大,砂轮打磨和凿毛梁

表 2 试验结果
Tab.2 Test Results

梁编号	跨中挠度/mm	承载力设计值/kN	承载力试验值/kN	极限弯矩试验值/(kN·m)	极限弯矩差值/(kN·m)
A-10-W-1.0	9.89	47.44	49.32	12.33	2.41
A-10-A-1.0	4.24		39.67	9.92	
B-10-W-1.5	20.76	31.63	37.10	13.91	3.02
B-10-A-1.5	15.46		29.05	10.89	
C-10-W-2.0	24.22	23.72	27.44	13.72	2.14
C-10-A-2.0	20.65		23.15	11.58	
D-18-W-2.0	30.36	38.64	40.30	20.15	3.51
D-18-A-2.0	19.22		33.28	16.64	
E-25-W-2.0	34.12	57.02	55.61	27.81	1.07
E-25-A-2.0	26.13		53.48	26.74	

注：A-10-W-1.0 表示 A 组梁配筋为 1 根 $\Phi 10$ 钢筋的砂轮打磨(W)、凿毛(A)净跨为 1.0 m 的梁,其他试件以此类推。

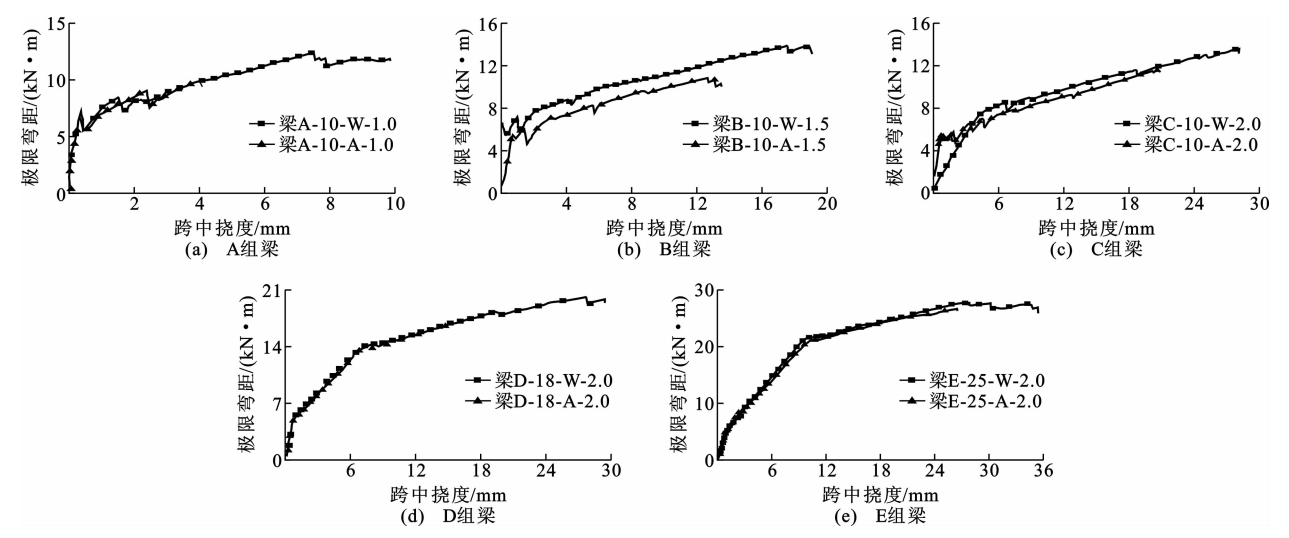


图 7 梁的极限弯矩-跨中挠度曲线

Fig.7 Relations of Ultimate Moments and Mid-span Deflections of Beams

的极限弯矩差值减小,这是因为随着配筋率的增大,FRP 在受拉过程中受到应力集中的影响比较小,所以 FRP 被拉断的比较晚。C 组梁的极限弯矩差值为 2.14 kN·m,没有比 D 组梁差值大,原因同跨度对极限弯矩的影响,但仍然认为 FRP 加固梁的配筋率越大,它的刚度越大,FRP 在受拉时凿毛对承载力的影响就越小,FRP 受到应力集中的影响就越小,所以砂轮打磨梁与凿毛梁的极限弯矩差值越小。

3 结 语

- (1)凿毛梁的承载力及破坏时的跨中挠度明显比砂轮打磨梁的承载力小。
- (2)在其他条件相同,只有跨度不同的情况下,砂轮打磨梁的极限弯矩与凿毛梁的极限弯矩的差值随着跨度的增大而增大。
- (3)在其他条件相同,只有配筋率不同的情况

下,砂轮打磨梁的极限弯矩与凿毛梁的极限弯矩的差值随着配筋率的增大而减小。

(4)凿毛后的 FRP 加固梁,虽然 FRP 与梁的粘结效果较好,但是会在 FRP 受拉过程中产生应力集中,导致 FRP 过早被拉断。

参考文献:
References:

[1] JEFFRIES J M. Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Laminates to Concrete Subjected to Varied Surface Preparation[D]. Rolla: University of Missouri, 2004.

[2] YALIM B,KALAYCI A S,MIRMIRAN A. Performance of FRP-strengthened RC Beams with Different Concrete Surface Profiles[J]. Journal of Composites for Construction,2008,12(6):626-634.

- timization and Its Application in Stiff Structures, Compliant Mechanisms and Material Designs [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [7] 赵 康. 基于 Level Set 方法的结构优化技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
ZHAO Kang. Structural Optimization Techniques Based on Level Set Methods [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [8] 王超逸. 水平集方法在连续体结构拓扑优化问题中的运用与发展[D]. 西安: 长安大学, 2008.
WANG Chao-yi. Study on Level Set Method in Continuum Structures Topology Optimization [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [9] ESCHENAUER H A, KOBELEV V V, SCHUMACHER A. Bubble Method for Topology and Shape Optimization of Structures[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1994, 8(1): 42-51.
- [10] SOKOLOWSKI J, ZOCHOWSKI A. On the Topological Derivative in Shape Optimization[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 1999, 37(4): 1251-1272.
- [11] SOKOLOWSKI J, ZOCHOWSKI A. Topological Derivatives for Elliptic Equations[J]. Inverse Problems, 1999, 15(1): 123-134.
- [12] GARREAU S, GUILLAUME P, MASMOUDI M. The Topological Asymptotic for PDE Systems; the Elasticity Case[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2001, 39(6): 1756-1778.
- [13] ALLAIRE G, DE GOURNAY F, JOUVE F, et al. Structural Optimization Using Topological and Shape Sensitivity and a Level Set Method[J]. Control via Cybernetics, 2005, 34(1): 59-80.
- [14] SIGMUND O. A 99 Line Topology Optimization Code Written in Matlab[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 120-127.
- [15] 任晓辉, 封建湖. 基于水平集方法的连续体结构拓扑优化[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(1): 74-79.
REN Xiao-hui, FENG Jian-hu. Topology Optimization of Continuum Structure Based on Level Set Method [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 74-79.

(上接第 78 页)

- [3] CHAJES M J, FINCH W W, JANUSZKA T F, et al. Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(2): 208-217.
- [4] MITSUI M, FUKUZAWA K, NUMAO T, et al. Relations Between Surface Roughness Indexes and Bond Strength Between CFRP Sheets and Concrete [J]. Journal of the Society of Material Science, 2000, 49(6): 685-691.
- [5] TOUTNAJI H, ORTIZ G. The Effect of Surface Preparation on the Bond Interface Between FRP Sheets and Concrete Members [J]. Composite Structures, 2001, 53(4): 457-462.
- [6] WU Y F, HUAN G Y. Hybrid Bonding of FRP to Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 266-273.
- [7] 胡程鹤, 吴智敏, 宿 莹, 等. FRP 复合锚固技术试验研究[J]. 防震减灾工程学报, 2010, 30(3): 309-314.
HU Cheng-he, WU Zhi-min, SU Ying, et al. Experimental Study of Hybrid FRP Anchorage Technique [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3): 309-314.
- [8] 宿 莹, 吴智敏, 胡程鹤, 等. CFRP 布加固钢筋混凝土梁的新型复合粘结技术[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 66-72.
- SU Ying, WU Zhi-min, HU Cheng-he, et al. New Hybrid Bonding Technique of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheet [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 66-72.
- [9] 蒋田勇, 方 志. CFRP 筋在活性粉末混凝土中的粘结应力分布[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 49-57.
JIANG Tian-yong, FANG Zhi. Bond Stress Distribution of CFRP Tendon in Reactive Powder Concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 49-57.
- [10] 陈小英, 李唐宁, 黄 音, 等. CFRP 体外预应力加固钢筋混凝土 T 型梁试验研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 56-63.
CHEN Xiao-ying, LI Tang-ning, HUANG Yin, et al. Experiment on Reinforced Concrete T-beams Strengthened with External Prestressed CFRP Sheets [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 56-63.
- [11] 任 伟, 贺拴海, 袁旭斌. 粘贴纤维布、钢板加固钢筋混凝土 T 梁试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(3): 323-330.
REN Wei, HE Shuan-hai, YUAN Xu-bin. Test Study of Strengthening RC T-beam with Bonded FRP and Steel Plates [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(3): 323-330.