

纤维增强复合材料抗剪加固混凝土梁 试验研究进展

刘华新, 柳根金, 孔祥清, 王学志

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 锦州 121001

摘要 基于纤维增强复合材料(FRP)抗剪加固混凝土梁试验研究成果,对3种不同FRP抗剪加固方法进行总结。介绍了外贴FRP(EB)、表面嵌入FRP(NSM)抗剪加固方法的试验研究历史和现状,总结了这两种方法的优缺点。重点阐述了截面中部插入FRP(ETS)抗剪加固方法的试验研究进展,提出了加强FRP抗剪加固混凝土梁试验研究的建议。

关键词 抗剪加固;外贴法;表面嵌入法;截面中部插入法

纤维增强复合材料(FRP)是一种新型工程结构材料,由连续纤维和树脂基体复合而成。目前工程应用中的FRP主要包括碳纤维(CFRP)、玻璃纤维(GFRP)、芳纶纤维(AFRP)和玄武岩纤维(BFRP)。这些材料因其具有高比强度和良好的耐久性能等优点,广泛应用于结构加固行业中。与传统的结构加固法,如:增大截面法、外包钢法、外粘钢板法、预应力加固法、增设支点法相比,FRP加固法具有施工便捷、性价比高等优点,故在工程结构加固行业中越来越受欢迎。

1981年,Meier等采用碳纤维板材(CFRP)代替钢板,粘贴在一连续箱梁桥上,获得成功,FRP加固法的技术优势逐渐为人们所认识^[1]。目前国内外研究FRP加固技术已有很多成果,在抗剪试验研究、理论计算和数值模拟等方面都取得了一定进展。本文综述3种FRP抗剪加固方法的试验研究进展。

1 外贴FRP加固法(EB法)

外贴FRP法(externally bonded)简称EB法,指在构件表面直接用树脂粘贴FRP片材或布进行加固的方法。外贴FRP片材抗剪加固的方法在土木工程中的应用已经很广泛,国内外关于粘贴FRP加固混凝土结构技术已有相关标准规程^[1,2]。不仅因为FRP材料具有耐腐蚀性良好、轻质高强等优点;工程中FRP片材的另一个突出的优势是对于不同截面形状及角部的广泛适用性^[3]。

1.1 加固方案

目前,国内外学者用EB法对梁抗剪加固采用不同的加固方式(图1),根据FRP粘贴方式分为沿全截面封闭缠绕式

粘贴FRP、沿梁两侧和梁底U型粘贴FRP(包括压条和锚固形式)和仅在梁两侧粘贴FRP这3种情况;根据纤维分布类型分为连续满贴和条带间隔粘贴两种;根据纤维的方向又可分为正贴(FRP布方向与梁轴线垂直)、斜贴、双向粘贴3种^[3,4]。

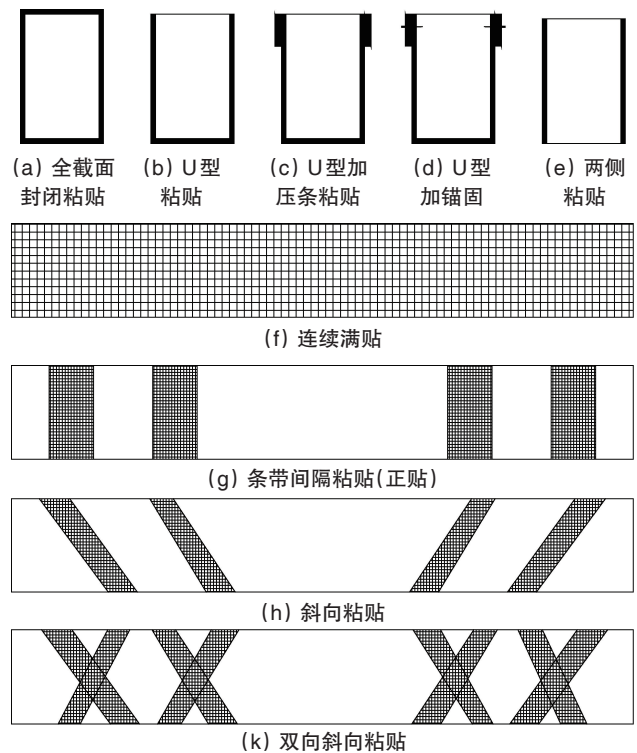


图1 EB法抗剪加固梁粘贴形式

Fig. 1 Paste form of FRP sheet for shear reinforced beams by EB method

收稿日期:2015-05-20;修回日期:2015-06-23

基金项目:辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2012020);辽宁省自然科学基金项目(2015020208)

作者简介:刘华新,教授,研究方向为工程结构加固理论,电子信箱:lgliuhuaxin@sina.com

引用格式:刘华新,柳根金,孔祥清,等.纤维增强复合材料抗剪加固混凝土梁试验研究进展[J].科技导报,2016,34(2):94-98;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.014

1.2 破坏模式

综合现有EB法抗剪加固混凝土梁试验研究成果,梁剪切破坏时呈现的破坏形式主要有FRP拉断的剪切破坏、FRP剥离引起的剪切破坏^[5]。多数全截面封闭粘贴加固和一些U型加固梁因为FRP布的应变达到极限应变而发生破坏。而FRP剥离引起的剪切破坏主要发生在几乎所有梁两侧加固和大多数的U型加固梁上。FRP的应变没有达到极限应变,梁随FRP材料的剥离而迅速破坏,致使FRP材料得不到充分利用。

1.3 影响因素与加固效果

目前,国内外学者对影响加固效果的主要因素进行了系统的研究。影响因素主要分为梁本身条件和加固条件。梁本身条件包括:剪跨比、混凝土强度等级、支座、腹筋配筋率等;加固条件包括:加固方式、FRP数量、锚固等。

对于梁本身的条件影响,周朝阳等^[1]进行了详细介绍。试验研究表明,只要梁侧面的FRP不与主拉应力方向平行,都可以在一定程度上限制剪切裂缝的出现和发展,提高梁的抗剪承载力。就加固方式而言,全截面封闭粘贴加固方式最佳,U型粘贴加固优于梁两侧粘贴加固方式,而加锚固或压条比没加的效果更好。

2 表面嵌入FRP法

表面嵌入FRP法(near surface mounted)简称NSM加固法(图2),即在构件表面开槽后嵌入FRP板材或FRP筋材,然后灌入树脂或其他类型的黏结剂进行的一种加固方式。

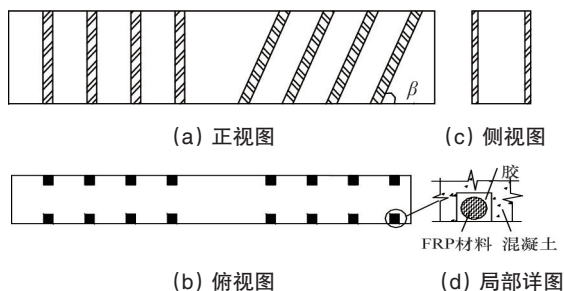


图2 NSM法加固示意(β 为加固筋倾斜角度)
Fig. 2 Schematic diagram of NSM method

1948年,Asplund就已经对一座混凝土桥梁负弯矩区采用了嵌入钢筋的加固方法,这是文献中记载的最早使用此项技术的工程实践^[6]。

NSM法相对EB法的技术优势^[5-10]:施工时对混凝土表面的预处理减少,且便于与相邻构件锚固;用水泥基黏结剂取代环氧树脂,能应用于外贴法难于施工的高温、高湿环境中加固;FRP筋或板材置于混凝土中,减少碰撞、磨损等不利影响,特别适用于连续梁负弯矩区段和桥面板的加固。FRP与混凝土的黏结面积增大,FRP利用率比EB法有所提高。

2.1 加固方案

NSM法加固的方案根据加固所用材料种类、形状及其嵌

入角度的不同而不同。就加固材料而言,分为FRP板^[11-16]、FRP筋^[6,17,18]和普通钢筋^[17];就其嵌入的角度而言,分为竖直加固(图2(a)左侧)和倾斜加固(图2(a)右侧),倾斜加固研究较多的是45°嵌入。

2.2 破坏模式

NSM法抗剪加固钢筋混凝土梁现有试验研究^[6-23]观察到的破坏模式主要有以下几种:

1) FRP周围混凝土开裂和树脂层劈裂引起的FRP剥离破坏;2) 当混凝土梁内腹筋不足易出现纵筋保护层剥离破坏;3) 梁侧混凝土保护层与FRP成一体剥离破坏;4) 典型剪切破坏;5) 梁侧箍筋保护层与核心混凝土剥离破坏,嵌贴FRP板条与混凝土黏结完好^[19]。

FRP筋或板材在剪切裂缝出现后和箍筋一起提高抗剪承载力,黏结破坏仍是NSM法的主要破坏形式,如果加锚固可以改善失黏问题。针对T型梁,在翼缘开槽,作为矩形梁侧面槽的延续,起到锚固作用。对于矩形梁也可以尝试在FRP筋材或板材外贴FRP布作为锚固处理。

2.3 影响因素与加固效果

目前,研究NSM法抗剪加固梁主要影响因素有:FRP间距、FRP数量、嵌入角度、配箍率、开槽深度、锚固等。现有研究表明NSM法可以有效提高梁的抗剪性能。Lorenzis等^[18]发现FRP间距越小,FRP数量多,加固效果好;樊烽等^[11]研究表明,配箍率对抗剪承载力影响有限但对刚度与延性影响较大;陈莉等^[12]研究表明,斜向加固比竖向加固效果好,斜向加锚固比无锚固方式加固效果好;Haskett等^[20]和Bianco等^[21,22]研究结果表明:NSM法加固梁侧面刻槽越深,FRP筋材或板材的最大应变更接近于其极限应变。

此外,Dias等^[23]对比研究了NSM法加固无裂缝和预裂缝梁的加固效果,研究了最大承载力、剪切裂缝出现后梁的刚度响应、FRP板材最大应变、梁的破坏形态。研究结果显示预裂梁刚度小于无缝梁,但两者在正常使用极限状态下最大承载力和最终挠度差别不大;在倾角不同情况下,CFRP材料利用率(最大应变/极限应变)不同,加固效率为51%~72%。

3 截面中部插入法(ETS法)

为克服现有FRP抗剪加固方法(EB和NSM法)的缺点:表面处理繁琐;加固材料暴露在构件表面;因构件边缘混凝土抗拉强度低,混凝土和FRP材料之间的黏结力不高而导致易脱胶;梁侧混凝土保护层厚度小,槽深受限等问题,工程师们致力于寻求更优加固方法,截面中部插入法应运而生。

截面中部插入法(embedded through-section)简称ETS加固法,指在混凝土构件截面中部开槽后插入FRP板材或筋材,然后灌入树脂胶进行加固的一种方法^[24]。EB法和NSM法的FRP材料主要依赖于构件表面的混凝土保护层的黏结,而ETS法的FRP筋材或板材可以包裹在核心混凝土中,有效地保护了FRP。

ETS法最初称为CDM法(core drilled mounted)^[24]。目前,

国外ETS法的研究主要集中在黏结机理和抗剪性能评估两个方面。

研究ETS法的黏结机理,主要采用拉拔试验。加固筋材主要有FRP筋和普通钢筋,黏结剂主要有环氧树脂和水泥浆。2007年Barros等^[24]研究了不同类别的加固筋材和黏结剂对黏结性能的影响。研究表明合适的黏结剂和筋材黏结-滑移曲线呈延性变化特征。2009年Valerio等^[25]用不同埋入长度的碳纤维筋、玻璃纤维筋、芳纶纤维筋及钢筋插入混凝土立方体试件内,进行拉拔试验。研究表明选用合适的黏结剂和加固筋材可以得到稳健、延性黏结-滑移关系。2011年Dalfré等^[26]又进行了拉拔试验,研究黏结性能的影响因素有黏结剂种类、黏结剂厚度、加固筋直径、黏结长度。结果表明黏结剂种类对黏结性能的影响很大,至于锚固长度和黏结剂的厚度对黏结强度的影响是次要的。2012年Godat等^[27]通过13个直剪试验试件,研究了混凝土强度、孔洞直径、FRP筋直径、FRP筋表面积、FRP筋黏结长度与黏结强度的关系。研究结果表明:提供足够的黏结长度和混凝土强度可以避免FRP与混凝土发生失黏破坏;不同的加固材料影响加固后试件的破坏模式,混凝土强度等级低时,破坏形式为混凝土劈裂,混凝土强度等级高,则破坏形式为纤维筋被拔出。

研究ETS法加固钢筋混凝土梁抗剪性能方面,主要从加固方案、破坏模式和加固效果3方面加以叙述。

3.1 加固方案

ETS法加固和NSM法加固方法相似,可以根据加固材料的种类和嵌入角度划分不同的方案。就加固材料,主要分为光圆表面和喷砂表面的FRP筋^[27];就其嵌入的角度而言,分为竖直加固和倾斜加固^[24,27]。

3.2 破坏模式

ETS法加固后梁主要的破坏模式为剪切破坏。从现有的试验结果看,还没有发现FRP筋失黏的破坏情况。剪切裂纹产生后,箍筋和加强筋开始有效工作。在特定环境下,可以用钢筋替代FRP筋,水泥浆替代环氧树脂,以达到经济、耐高温等效果。

3.3 影响因素与加固效果

根据国外学者的研究成果,ETS法对钢筋混凝土梁的抗剪加固主要影响因素有:FRP筋间距和数量、FRP筋表面特征、FRP筋直径、配箍率、FRP筋倾角。

2005年,Valerio等^[28]对4根无腹筋混凝土梁进行ETS法加固,初步验证了研究该技术的可行性;并给出竖向FRP筋最大间距的建议值为0.5~0.75倍梁的有效高度。2012年,Mofidi等^[27]对9根钢筋混凝土T型梁进行ETS抗剪加固研究,研究变量包括:CFRP筋表面特征、间距、直径及箍筋的数量,并对该方法的加固效率进行评价。结果显示:FRP筋对剪力的贡献率随箍筋的间距缩小而减小;光滑表面的CFRP筋比表面喷砂CFRP筋更有效;减小FRP筋的间距能提高FRP筋的对抗剪承载力的贡献率;FRP筋的刚度越大,对抗剪承载力贡献越大。FRP筋的利用率随其直径减小和间距的增大

而增大;光面FRP筋利用率高于表面喷砂FRP筋。研究还表明:加固筋对剪力承载力贡献率随箍筋间距减小骤减、随加固筋间距减小变大;表面光滑的FRP筋比磨砂的FRP筋利用率更高;FRP利用率随直径减小而增大。2013年Barros等^[24]研究了14根钢筋混凝土梁,进一步验证了ETS技术的有效性。研究了箍筋间距、截面面积、加固筋倾角、箍筋与加固筋的交互作用对加固效率的影响。结果显示,斜向加固比竖向加固效果更佳;ETS技术可以使梁剪脆性破坏转变为塑性弯曲破坏;并得出ETS方法抗剪加固优于EB和NSM法的结论。

4 不同加固方法的效率比较

Dias等通过试验把ETS法与EB、NSM法进行比较^[16,29],得出ETS法加固效果最佳、NSM法次之,而NSM法中FRP材料所承担的最终抗剪承载力份额比EB法的更高。2011年Chaallal等^[29]通过对抗剪承载力、挠度(图3)^[29]、FRP最大应变(图4)^[29]等的比较,研究ETS法、EB、NSM法的抗剪加固效率。其中EB、NSM、ETS3种方法加固效率分别为23%、31%、60%;进一步通过FRP最大应变和极限应变的比值说明ETS技术对FRP抗拉强度的应用是最高的。

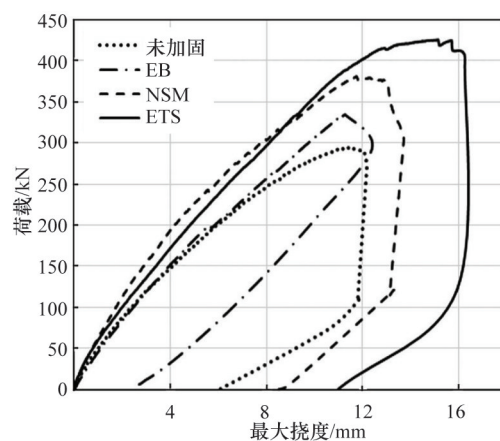


图3 挠度-荷载曲线

Fig 3 Load-deflection curves

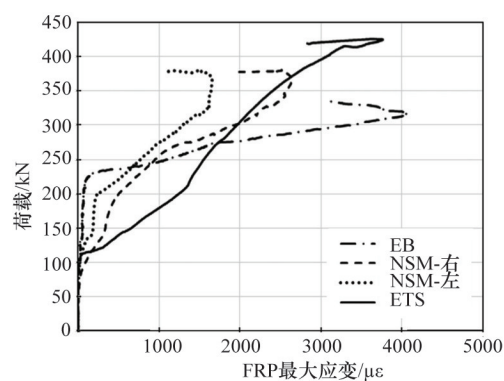


图4 FRP应变-荷载曲线

Fig 4 Load-strain curves of FRP

5 展望

对 EB 和 NSM 法的试验研究相对较多,也较系统;而对 ETS 法的试验研究还处于起步阶段。目前,国外 ETS 法黏结试验主要是拉拔试验,用梁式试验等方式还没有文献记载。国内成勃等^[30]采用后锚固筋法进行梁抗剪加固研究,把钢筋后锚固于混凝土梁的受剪区域截面中部,使之起到箍筋或弯起钢筋的抗剪作用,其加固材料不是 FRP 而是螺栓和高强钢丝,但试验加固的原理与 ETS 法有异曲同工之妙。对于 ETS 法施工时钻孔会不会对抗剪性能带来不利影响也没有资料涉及。ETS 法用的最多材料是碳纤维(CFRP)筋,很少用弹性模量虽小但抗拉强度、密度等与 CFRP 筋相差不多且价格便宜的芳纶纤维(AFRP)筋、玻璃纤维(GFRP)筋,而对来源丰富、性价比高的玄武岩纤维(BFRP)筋还没有进行过尝试。

EB 法和 NSM 法都有各自的缺陷,而 ETS 法也有先天不足:施工时要借助设计图纸和钢筋探测仪确定梁中纵向钢筋和箍筋的位置,因此在开孔的时候应避免对其造成破坏。为克服单一加固方法的技术限制,将 ETS 加固法与预应力技术结合;把 ETS 法、EB、NSM 方法结合起来,提高加固效率、增加 FRP 筋的利用效率,或将成为工程结构加固领域新的发展趋势。

参考文献(References)

- [1] 周朝阳, 谭磊, 程小念. FRP 抗剪加固钢筋混凝土梁研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 1-7.
Zhou Chaoyang, Tan Lei, Cheng Xiaonian. Review of research on reinforced concrete beams shear-strengthened with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 1-7.
- [2] CECS 146-2003. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
CECS 146-2003. Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [3] 李荣, 滕锦光. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 1-15.
Li Rong, Teng Jinguang. Concrete structure strengthen with FRP[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 1-15.
- [4] 欧阳煜, 王鹏, 张云超. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受弯受剪承载力计算分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 24-27.
Ouyang Yu, Wang Peng, Zhang Yunchao. Calculation and analysis of flexural and shear capacity of RC beams strengthened with BFRP sheets[J]. Industrial Construction, 2007, 37(6): 24-27.
- [5] Teng J G, Lam L, Chen J F. Shear strengthening of RC beams with FRP composites[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2004, 6(3): 173-184.
- [6] De Lorenzis L, Nnna A. Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods[J]. ACI Structure Journal, 2001, 98(1): 60-68.
- [7] 赵连会. FRP 筋材嵌入法加固技术[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2008(3): 26-28.
Zhang Lianhui. Strengthening technique with near surface mounted FRP[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2008(3): 26-28.
- [8] 李荣, 滕锦光, 岳清瑞. FRP 材料加固混凝土结构应用的新领域——嵌入式(NSM)加固法[J]. 工业建筑, 2004, 34(4): 5-10.
Li Rong, Teng Jinguang, Yue Qingrui. A new technique for strengthening concrete structures near-surface mounted frp reinforcement[J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 5-10.
- [9] 刘义. FRP 筋材嵌入法加固钢筋混凝土梁的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Liu Yi. Study on strengthening of RC beams with near surface mounted FRP rods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [10] 赵晋, 张雪丽. CFRP 板条加固钢筋混凝土梁的抗剪性能试验研究[J]. 混凝土, 2007(11): 8-11.
Zhao Jin, Zhang Xueli. Experimental study of shear characteristic of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates[J]. Concrete, 2007(11): 8-11.
- [11] 樊烽, 姚谏. 有腹筋 RC 梁表层嵌贴 CFRP 板的抗剪加固试验研究[J]. 科技通报, 2007, 23(4): 582-586.
Fan Feng, Yao Jian. Experimental study on the shear behavior of reinforced concrete beams with stirrups strengthened by near surface mounted CFRP strips[J]. Bulletin of Science and Technology, 2007, 23(4): 582-586.
- [12] 陈莉, 崔士起, 成勃. 嵌贴 CFRP 板条加固混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(13): 3-5.
Chen Li, Cui Shiqi, Cheng Bo. The shear performance experimental study of concrete beam reinforced by onlay CFRP batten[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(13): 3-5.
- [13] 张雪丽, 颜桂云. 内嵌碳纤维板条抗剪加固混凝土梁性能研究[J]. 福建工程学院学报, 2008, 6(6): 674-680.
Zhang Xueli, Yan Guiyun. Shear characteristics of reinforced concrete beams with near-surface mounted carbon fiber reinforced plastic(CFRP) strips[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2008, 6(6): 674-680.
- [14] 贾庆扉. 混凝土梁表层嵌贴 CFRP 板条的抗剪加固试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Jia Qingfei. Experimental study on RC beams shear strengthened with NSM CFRP strips[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [15] 汪昕, 张继文, 吕志涛, 等. 槽形 CFRP 板条嵌入式增强混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 36-42.
Wang Xin, Zhang Jiwen, Lü Zhitao, et al. Experimental study on the shear performance of RC beams strengthened with embedded groove-shape CFRP laminates[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 36-42.
- [16] Dias S J E, Barros J A O. Experimental behavior of RC beams shear strengthened with NSM CFRP laminates[J]. Strain, 2012, 48(1): 88-100.
- [17] Rahal K N, Rumaih H A. Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars[J]. Engineering Structures, 2011, 33(1): 53-62.
- [18] Rizzo A, De Lorenzis L. Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(4): 1555-1567.
- [19] 许平, 姚谏. 钢筋混凝土梁表层嵌贴 FRP 抗剪加固研究进展[C]//第七届全国建设工程 FRP 应用学术交流会. 杭州: 中国土木工程协会, 2011: 193-197.
Xu Ping, Yao Jian. Progress of Studies on RC Beams Shear Strengthened with NSM FRP strips[C]//The 7th national construction engineering FRP application of academic communication. Hangzhou: China Civil Engineering Society, 2011: 193-197.

- [20] Haskett M, Oehlers D, Wu C. Improved IC debonding resistance of embedded NSM FRP plates[C]//Asia-Pacific Conference on FRP in Structures. Hong Kong: International Institute for FRP in Construction, 2007: 865-870.
- [21] Bianco V. Shear strengthening of RC beams by means of NSM CFRP strips: Experimental evidence and analytical modelling[D]. Rome: University of Rome, 2008.
- [22] Barros J A O, Costa I G, Ventura-Gouveia A. CFRP flexural and shear strengthening technique for RC beams: Experimental and numerical research[J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(3): 551-573.
- [23] Dias S J E, Barros J A O. NSM shear strengthening technique with CFRP laminates applied in high-strength concrete beams with or without pre-cracking[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2): 290-301.
- [24] Barros J A O, Dalfré G M. Assessment of the effectiveness of the embedded through-section technique for the shear strengthening of reinforced concrete beams[J]. Strain, 2013, 49(1): 75-93.
- [25] Valerio P, Ibell T J, Darby A P. Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-structures and Buildings, 2009, 162(5): 311-321.
- [26] Dalfré G, Barros J A O. Steel bar-concrete bond behaviour in the context of the ETS shear strengthening technique for RC beams[J]. Ingeniería civil sostenible y urbanismo, 2013, 2(3): 15-29.
- [27] Godat A, L'Hady A, Chaallal O, et al. Bond behavior of the ETS FRP bar shear-strengthening method[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(5): 529-539.
- [28] Valerio P, Ibell T J, Darby A P. Shear assessment and strengthening of contiguous-beam concrete bridges using FRP bars[J]. ACI Special Publication, 2005, 230-248.
- [29] Chaallal O, Mofidi A, Benmokrane B, et al. Embedded through-section FRP rod method for shear strengthening of RC beams: Performance and comparison with existing techniques[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 15(3): 374-383.
- [30] 成勃, 周群会, 赵林杰. 混凝土梁抗剪承载力加固新方法的试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 144-147.
Cheng Bo, Zhou Qunhui, Zhao Linjie. Experimental study on a new method to improve the shear capacity of concrete beams[J]. Building Structure, 2012, 42(4): 144-147.

Review of experimental researches on concrete beams shear-strengthened with fiber reinforced polymer

LIU Huaxin, LIU Genjin, KONG Xiangqing, WANG Xuezhi

School of Civil and Architectural, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China

Abstract This paper summarizes three different FRP shear reinforcement methods based on the available research results of FRP shear reinforcement beams. The experimental investigation history of externally bonded method and near surface mounted method is introduced and the advantages and disadvantages of each method are discussed. The article also points out that the ETS technique is a blank in domestic research and application. The experimental study history and status of the embedded through-section method are summarized and expounded according to the existing foreign literature in this field, in order to provide a reference for relevant domestic research and application. Finally, some suggestions of experimental study on FRP shear-strengthened are presented, and the research direction is also prospected.

Keywords shear-strengthened; externally bonded method; near surface mounted method; embedded through-section method

(编辑 田恬)