

FRP 在土木工程结构加固应用中的研究进展

江学良^{1,2}, 杨慧², 孟茁超¹, 毛妙³

1. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南益阳 413000
2. 中南林业科技大学土木工程与力学学院, 长沙 410004
3. 武汉公路桥梁建设集团有限公司, 武汉 430051

摘要 总结了加强纤维复合材料(FRP)的特点,比较了FRP加固与黏钢加固的异同,对FRP结构加固领域的最新研究成果与工程应用成果进行了系统地综述与分析,指出了FRP结构加固研究与应用中应着重解决的几个关键技术,FRP材料技术、FRP加固设计技术、FRP加固施工技术和FRP检测评价技术。文中还针对FRP结构加固的进一步研究给出了建议和展望,加强FRP加固材料、FRP加固的预应力施工方法、碳纤维加固结构施工方法的研究开发;加快相关加固技术规范的编制;加强混合纤维加固结构以及加固结构的长期性能的研究。研究与应用均表明,FRP用于结构加固具有维修费用少、施工方便、对交通干扰小、结构耐久性能好等特点,必将在未来的结构加固领域占据越来越重要的地位。

关键词 加强纤维复合材料;土木工程;结构加固;工程应用

中图分类号 TU36, TU37

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)18-0111-07

Applications of Fiber Reinforced Plastic in Structure Rehabilitation in Civil Engineering

JIANG Xueliang^{1,2}, YANG Hui², MENG Zhuochao¹, MAO Miao³

1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan Province, China
2. School of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China
3. Wuhan Road and Bridge Construction Co. Ltd., Wuhan 430051, China

Abstract The applications of Fiber Reinforced Plastic (FRP) materials in the structure rehabilitation is discussed and compared with steel-bonded reinforcement. The related studies are systematically reviewed and analyzed. Some suggestions for the further researches in the future are put forward. First, the innovation should be emphasized for modification technology of high performance FRP and matching materials. Second, the conventional theory is not applicable to FRP, so the theoretical study should be carried out for structure rehabilitation by FRP. Third, the construction technology for the rehabilitation structure should be further developed. Fourth, because a widely accepted standard of the FRP detection technique is not available, studies in that direction are desirable. It is shown that the FRP structure rehabilitation can reduce the time and cost for maintenance, and the disturbance for traffic, and improve durability. It will play an important role in the structure rehabilitation field.

Keywords fiber reinforced plastic; civil engineering; structure rehabilitation; engineering applications

0 引言

工业上最常采用的复合材料是加强纤维复合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)。FRP具有抗腐蚀性强、耐久性好、抗拉

强度高但抗剪强度低、比强度高、比刚度高、自重轻、施工方便、热膨胀系数与混凝土相近、磁电屏蔽及使用寿命长等特点,但由于FRP价格较高,工程应用经验少,严重制约了FRP在土木工程中

收稿日期:2010-03-12;修回日期:2010-08-30

基金项目:湖南省自然科学基金项目(07JJ6084);湖南省青年骨干教师项目

作者简介:江学良,副教授,研究方向为地下工程稳定与工程结构加固,电子信箱:iamjxl@tom.com

的应用。近年来,由于 FRP 生产技术的进步与市场竞争,FRP 价格大幅降低,再加上 FRP 混凝土结构的设计与施工应用经验表明这种材料具有良好的经济可行性,使其较多地应用于土木工程上。目前,应用于土木工程中的复合材料主要有 3 类:碳纤维(CFRP)、芳纶纤维(AFRP)和高强玻璃纤维(GFRP)复合材料。

FRP 在土木工程中的研究与应用主要分为两大部分:结构修复和形成新结构。结构修复又可分为维修、加固、更新 3 个方面;形成新结构又分为全部采用 FRP 形成新结构和 FRP 与混凝土形成混合结构。FRP 加固混凝土结构可提高结构的强度与延性,已被国内外各种结构实验证实。目前,FRP 被广泛用于加固混凝土梁、板、柱甚至砌体结构与钢结构等,FRP 加固与传统的黏钢加固相比,减少了自重与结构服役期间的维修费用,缩短了工期、减小了施工时对交通的阻断与干扰,并提高了结构的耐久性。可以预计,在 21 世纪的结构加固领域,采用 FRP 加固将会占据越来越重要的地位。

1 FRP 在结构加固中的研究现状

1.1 抗弯加固性能

在混凝土结构的受拉区粘贴 FRP,可有效提高其承载能力,抑制裂缝扩展。FRP 加固后混凝土结构的破坏特征与普通混凝土结构以及黏钢加固的混凝土结构有较大的区别,其承载力的计算方法也不相同。国内外学者的研究主要集中在 FRP 加固混凝土梁的抗弯性能、破坏形态、承载力计算、影响参数以及 FRP 加固后混凝土梁的截面变形、裂缝开展等方面^[1-9]。近几年来,不少学者对荷载状态下 FRP 加固梁展开了受力性能试验研究和理论分析,试图建立考虑二次受力的抗弯承载力计算方法、滞后应变及跨中挠度的计算公式^[9-11]。

1.2 抗剪加固性能

在混凝土梁的受剪区侧面粘贴 FRP 能有效提高其抗剪能力,工程中常用的受剪加固方法有侧面粘贴、U 型粘贴和包裹粘贴 3 种方式,其中以包裹粘贴效果最好。影响 FRP 抗剪加固性能的主要参数有梁的配箍率、混凝土强度、FRP 配筋率、梁的剪跨比、FRP 的粘贴方式与锚固性能、FRP 及黏结胶本身的材料性能等^[12-15]。目前,国内外对抗剪加固的研究主要包括破坏机制和承载力的计算等方面,其中承载力计算的理论模型,一般是在钢筋混凝土构件桁架理论模型的基础上,增加 FRP 对抗剪承载力贡献项^[16-18]。

1.3 抗震加固性能

通过外包 FRP 约束塑性铰区混凝土以提高混凝土的极限压应变,可提高构件延性,有利于结构的抗震加固。目前国内外不少学者进行了外包 FRP 加固混凝土柱、梁柱节点乃至框架的抗震性能试验研究、理论分析和工程应用研究,提出了相应的 FRP 约束混凝土应力-应变关系的计算模型。研究表明,侧向约束模量和侧向约束强度是影响 FRP 约束混凝土结构延性特征和滞回耗能性能的两个重要参数^[19-24]。此外,Xiao 等^[25-26]在钢管混凝土和套管混凝土的研究基础上,首次提出了约束钢管混凝土的概念,在这种新型钢管混凝土柱

中,为增强结构的抗震性能,在可能出现塑性铰的部位设置了 FRP 横向附加约束。附加套箍能有效地防止或延迟钢管混凝土柱中通长的钢管在塑性铰区域发生局部屈曲,提高了结构的承载性能与延性,从而改善抗震性能。

1.4 抗疲劳加固性能

FRP 片材加固构件的疲劳分为弯曲疲劳和剪切疲劳 2 种,根据荷载形式又可分为常幅荷载和变幅荷载下的疲劳问题。FRP 片材加固构件的疲劳强度,除了与原有混凝土结构的抗疲劳能力有关外,还与 FRP 加固部分的疲劳断裂能力以及 FRP 片材与混凝土界面的抗疲劳破坏能力有关。混凝土抗弯疲劳理论可以用来评价原有混凝土结构的抗疲劳能力,FRP 片材自身的抗疲劳能力可以通过材料力学实验解决,但关于 FRP 片材与混凝土的界面的抗疲劳破坏能力的研究积累甚少,目前仅有少量试验结果^[27-30],这些研究表明,在重复、移动荷载作用下,界面的黏结能力有下降的趋势。

1.5 预应力技术

对于挠度过大的受弯构件或开裂严重的混凝土梁、板,简单的 FRP 贴片加固法难以有效地增强其刚度,材料的作用得不到充分利用。采用预应力 FRP 加固技术可平衡加固梁的部分荷载,有效减少加固梁的挠度变形,延缓梁开裂,减少裂缝宽度,降低早期剥离破坏的可能性,提高梁的承载力^[31-33]。目前,一些学者对 FRP 预应力加固技术在不同负载下的 FRP 预应力张拉工艺、端部锚固措施、预应力损失及承载力计算、界面应力传递及抗疲劳性能等方面进行了一些试验研究和理论分析,并开始了工程实际应用^[34-36]。

1.6 耐久性加固性能

耐久性研究涉及 FRP 耐久性、FRP 与混凝土黏结耐久性、FRP 筋、布、板、管加固混凝土构件耐久性的研究等。

1) FRP 耐久性

对 FRP 在不同温度、湿度、酸碱环境下的性能研究表明,经过温度与湿度暴露后,CFRP 的弹性模量、抗拉强度、极限应变没有降低;GFRP 在经过温度循环后,弹性模量和抗拉强度没有下降,但延性降低,有脆化的趋势^[37]。碱性介质对高强复合玻璃纤维材料的抗拉强度基本没有影响,而在酸性介质中存放短时间后,试件抗拉强度有所下降,但经过较长一段时间后强度又有所回升,两种腐蚀介质对 FRP 的拉伸弹性模量影响不大^[38-39]。

2) FRP 与混凝土黏结耐久性

研究 FRP 与混凝土之间界面性能的试验方法有多种,如正拉黏结强度试验、剪切黏结强度试验、梁试验、修正梁试验,试验方法不同对所得到的黏结强度有不同程度的影响。正拉和剪切黏结强度试验方法比较简单,被广泛采用。研究表明,酸对 FRP 与混凝土黏结界面的影响比碱严重^[40];采用 FRP 加固受到冻融损伤的混凝土结构时,FRP 与混凝土的黏结强度会有所下降;FRP 加固混凝土结构在受到冻融循环影响时,FRP 与混凝土结构的黏结强度会降低;在 FRP 与混凝土结构产生同样的相对滑移时,受到冻融循环影响的 FRP 与

混凝土的黏结力比未经受冻融循环影响的 FRP 与混凝土的黏结力有较大幅度的下降^[41]。

3) FRP 外部加固混凝土构件的耐久性

国内外对 FRP 加固混凝土构件的耐久性能开展了多项内容的试验研究,研究参数包括构件类型(梁、柱)、FRP 类型(AFRP,CFRP,GFRP)、粘贴方式(环向、轴向)、环境类型(室温、干湿、冻融)、树脂类型等^[42-43]。研究表明,在恶劣环境下 CFRP 比 GFRP 性能好,干湿作用下,CFRP 约束试件的强度与延性没有降低,刚度得到提高,而 GFRP 约束试件的强度与延性都降低了,刚度未受影响;冻融循环作用下,CFRP 和 GFRP 约束试件的强度与延性显著降低,刚度未受影响,与室温及干湿循环作用下试件相比,受冻融作用试件的破坏方式更具灾害性^[43]。海水腐蚀后,普通钢筋混凝土梁、柱与 CFRP 加固钢筋混凝土梁、柱的承载力都降低,但 CFRP 加固混凝土梁的刚度几乎未受到任何影响^[44]。冻融循环对 FRP 加固混凝土梁的受力性能有不利影响^[41]。

1.7 砌体结构加固性能

国外大量文献研究了 FRP 片材加固混凝土砌块墙与砖墙的抗剪性能、平面外与平面内抗弯性能、沿通缝的抗剪性能^[45-46]、单调荷载作用下的短期力学性能^[47]、低周往复荷载试验^[48-49]以及模拟地震荷载试验^[50],并给出了 FRP 加固砌体结构的设计建议^[51-52];对采用 FRP 缠绕加固砖柱的力学性能^[53-54]、砖拱和穹顶的加固性能也进行了研究^[55]。试验结果表明,墙体的破坏形式由加固前的脆性剪切破坏变成了加固后延性弯曲破坏,极大提高墙体的变形能力、强度和延性,能有效减小剪切变形,改善结构整体的延性与抗震性能,提高砌体结构的承载力。从国内研究现状看,大部分的内容集中在 FRP 加固后的墙片在平面内水平低周反复荷载作用下的抗震性能研究上,研究结果表明,FRP 加固能够明显提高墙体的平面内水平抗剪强度,增强变形能力,改善结构的延性^[56-57]。

1.8 钢结构加固性能

FRP 除了用于钢结构的防腐蚀、防老化及其他一般性的加固外,对钢结构建筑及钢制品等的加固方法革新也越来越成为人们所关心的问题。目前研究重点主要围绕 RPP 对钢结构的失稳加固、界面黏结性能及荷载的传递效应、承载力计算方法以及加固后抗疲劳性能等方面开展^[58-61]。

1.9 其他加固性能

面对以爆炸为主的恐怖主义以及人为灾害日趋严重的威胁,结构抗爆逐渐成为研究的热点,FRP 由于其众多优越性,在结构抗爆中有广阔的应用前景。已有的研究成果表明,FRP 用于抗爆加固可有效提高构件和结构的抗爆性能抗冲击以及抗人为灾害性能^[62-63]。国内外一些学者对 FRP 加固火灾后混凝土结构^[64]、FRP 加固结构的抗扭性能、可靠性以及加固木结构、节点、隧道等特殊结构均做了一些研究。

2 FRP 在结构加固中应用

外贴 FRP 用于结构加固始于 20 世纪 80 年代日、美等发

达国家。日本在 FRP 的研究、开发和应用中一直占据领先地位。1989 年,日本土木工程学会设立了连续纤维增强混凝土委员会,1993 年日本建筑研究院颁布了世界上第一本关于 FRP 加固的设计指南,1996 年正式颁布《连续纤维材料补强加固混凝土结构物的设计及施工规程》等规程,促使这一新型加固技术在实际工程中得以大规模应用,加固对象也由初期的柱型结构的抗震加固转为房屋、桥梁的梁板结构的补强加固。1960 年,美国开始对 FRP 进行开发,1991 年,美国混凝土协会成立了 FRP 专业委员会,并于 1999 年推出了 FRP 加固钢筋混凝土结构技术指南。加拿大 1990 年才开始研究 FRP 加固修复混凝土结构技术,但在这一领域的研究发展很快,已经处于领先地位,加拿大桥梁设计规范将 FRP 新型结构加固技术纳入其中。1997 年,来自瑞士、奥地利、意大利、比利时、希腊、法国和德国等欧洲 9 国启动《高性能纤维复合材料加固混凝土结构设计指南》项目,经过 4 年的共同努力终于完成,促进了该技术在欧洲的应用。FRP 加固技术自 20 世纪 90 年代后期引入中国以来,已成为结构工程领域的研究热点,2000 年 6 月成立了“纤维增强塑料(FRP)及其工程应用专业委员会”,并于 2003 年颁布了《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》技术标准,促进了该技术在中国的发展。目前,FRP 在结构加固中主要应用于以下几个方面。

1) 抗弯抗剪加固

抗弯抗剪加固又分为:①外包/外粘 FRP 加固混凝土结构;②嵌入式 FRP 加固技术;③预应力 FRP 加固。目前,大部份的研究与应用都集中在外包/外粘 FRP 加固混凝土结构,这种形式主要有 FRP 加固梁、板等。嵌入式 FRP 加固技术是近年发展起来的加固技术,该技术通过在混凝土表面开槽,将 FRP 筋或 FRP 板条和树脂置于其中来达到加固目的,是对外包/外粘 FRP 加固技术的一个重要发展。预应力 FRP 加固混凝土是另一项值得深入研究的技术,通过对 FRP 施加预应力,可以更加充分地发挥 FRP 高强的优势,同时改善结构在使用极限状态的性能。

2) 混凝土结构的抗震加固

采用 FRP 外包混凝土柱是一种经济、有效的抗震加固方法。世界各地已进行了大量的 FRP 加固混凝土柱力学性能的研究与应用,国内外已有许多应用 FRP 加固房屋结构柱与桥柱的成功案例。为方便施工,还开发出了 FRP 自动缠绕系统^[65],如图 1 所示。



图 1 FRP 布自动缠绕系统

Fig. 1 Automatic wrap system of FRP sheet

3) 钢结构、砌体结构、木结构等加固

外粘 FRP 布或板是加固钢结构的一种理想方法,利用外粘 FRP 提高钢结构的抗疲劳性能,可避免在加固过程产生残余应力。此外,在砌体结构与木结构中,FRP 也有成功应用。

4) 复杂环境下下部结构的加固

最近几年,由于环境影响,地下基础显示出结构性能劣化与抗力衰减。该情况的产生原因复杂,大量 FRP 则显现出是解决复杂环境下部结构问题的可行材料。如图 2 所示,FRP 成功用于加固水下基础^[6]。

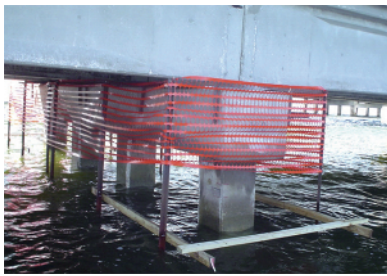


图 2 FRP 用于加固水下基础

Fig. 2 Foundation rehabilitation in water with FRP

5) 特种结构加固

除上述应用领域外,FRP 在桥梁、隧道、塔桅结构、储液罐、管道和烟囱结构也有加固应用的报道^[39]。

3 FRP 在结构加固研究与应用中亟需解决的关键技术

3.1 FRP 材料技术

1) 高性能 FRP 改性技术

CFRP 和 AFRP 的强度高,韧性差。GFRP 可满足工程结构韧性要求,但模量和强度低。如何通过对不同纤维材料的复合改性,使其具有高性能(高强、高模、高耐久性,以及良好的韧性等)的同时又具有低成本和良好的环境亲和性,是一项影响 FRP 在土木工程中应用的关键材料技术。该技术一旦获得解决,将给土木工程材料技术带来革命性的变革。

2) 高性能 FRP 关键配套材料和设备开发

除解决 FRP 复合材料改性技术,生产出适合于土木工程应用特点的材料外,还须解决相配套的关键材料与设备技术问题,主要包括特种粘树脂基体结构设计、材料合成技术、高性能 FRP 复合材料筋/索锚具及预应力张拉设备的研制。目前已有科学工作者关注到这一点,但研究成果很少。

3.2 FRP 加固设计技术

由 FRP 材料制成的板、壳及薄壁杆件的力学性能不同于传统材料制成的结构构件。基于匀质材料的经典弹塑性力学及板壳理论,不适用于分析复合材料结构构件,越来越多的学者转向复合材料力学研究。与传统材料结构相比,复合材料结构设计参数非常多,不同的设计参数组合可以导致结构力学性能的极大差别。目前绝大部分的研究成果还停留在试

验研究阶段,缺少快速有效的加固设计技术,虽然有学者做出了有益的尝试,但是还远远不够,离应用还有很大距离。

3.3 FRP 加固施工技术

近年来在国际兴起的 FRP 加固现有结构技术,其简便的施工工艺和优良的加固效果得到土木工程界的普遍好评。尽管 FRP 在结构加固补强方面已取得很多成果,并得到广泛应用,但仍有很多问题尚待解决。制约着其发展与更广泛应用,其中主要包括界面受力性能与预应力加固补强技术。

3.4 FRP 检测评价技术

目前,世界上还没有建立一套大家公认的土木工程用高性能 FRP 试验检测与评价技术体系,而中国在该方面的成果则更少。材料的试验检测、评价技术是一切材料工程应用的基础,检测技术与标准的缺失是影响 FRP 大量应用的重要障碍。

4 FRP 在结构加固中的应用前景与展望

FRP 的研发以及在土木工程中的应用,已成为复合材料界与土木工程界共同研究开发的一个热点。该技术的成功研发能极大地推动现代土木工程技术的进步,为现代复合材料产业开辟出巨大的应用市场,具有非常广阔的发展应用前景。FRP 加固混凝土结构在中国起步虽然较晚,但起点高,发展十分迅猛,为推进加固技术在中国的研究和发展,应做好以下几点。

1) 加强 FRP 加固材料的研究开发。中国高性能 FRP 中 CFRP 片材基本还依赖进口,其他纤维的 FRP 研究和应用,也还落后于国外发达国家水平。GFRP 在国内有较成熟的生产技术,但用于土木工程的研究和应用尚较少,未形成规模也不配套。所以,一方面要推进行 FRP 产品的国产化,提高质量,降低成本;另一方面要加强黏结胶的研究,提高黏结胶的性能。

2) 加强 FRP 加固的预应力施工方法研究和理论分析。现有绝大部分工程应用中 FRP 对核心混凝土的约束都是被动约束,即在混凝土受力膨胀后外围的 FRP 才开始发挥作用,在大多数情况下 FRP 材料并不能充分发挥其强度高的优势。对 FRP 施加预应力,能够对核心混凝土施加主动的约束力,可以闭合裂缝,更大地提高柱的承载能力和耐久性。

3) 加强碳纤维加固结构施工方法的开发。现阶段碳纤维加固结构的手段主要依靠人工,黏结剂一般都具有一定的刺激性,其配制、涂刷施工效率较低。对 FRP 加固机械化施工方法研究开发,不仅可以保证施工质量,更能提高效率。

4) 中国《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS146:2003)有关外贴加固技术设计计算方法主要是依据碳纤维布加固低配筋小梁的试验结果建立起来的,其是否适用于配筋率较高、尺寸较大的结构加固(如桥梁结构),还需加强试验研究。结构的加固通常是在被加固结构已负载的状态下进行的,FRP 片材与原结构之间存在应变滞后现象,若按无初载加固条件进行计算,将会过高估计加固梁的实际

承载力。因此,应加强结构在已负载状态下加固性能的研究。

5) 加强结构加固长期性能研究。目前的研究主要集中于结构的短期静载作用下的力学性能、抗疲劳性能等方面,应加强对 FRP 加固结构的长期荷载、徐变、冲击荷载与长期疲劳破坏的研究。

6) 加强对混合纤维加固法的研究和应用。CFRP 加固承载力提高显著,但价格昂贵,延性差;玻璃纤维加固延性较好,价格低,但承载能力较低,将两者混合使用,即可兼顾材料的强度、延伸率与成本,具有较好的市场应用前景。

参考文献 (References)

- [1] Ritchie P A, Thomas D A, Lu L W, et al. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics [J]. *Structural Journal*, 1991, 88(4): 490-500.
- [2] Saadatmanesh H, Ehsani M R. RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(11): 3417-3433.
- [3] 胡孔国, 岳清瑞, 叶列平, 等. 碳纤维布加固混凝土桥面板受弯性能研究[J]. *建筑结构*, 2000, 30(7): 44-48.
Hu Kongguo, Yue Qingrui, Ye Lieping, et al. *Building Structure*, 2000, 30(7): 44-48.
- [4] 王文伟. 纤维复合材料加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2003.
Wang Wenwei. Study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced Plastics [D]. Dalian: College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2003.
- [5] 夏春红. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2002.
Xia Chunhong. Experiment study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced plastics sheet [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2002.
- [6] Ye L P, Lu X Z, Chen J F. Design proposal for debonding strengths of FRP strengthened RC beams in the Chinese design code[C]//Proceedings of International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structure. Hong Kong, 2005: 45-54.
- [7] 刘建起, 王敬莎, 丁乃庆, 等. 碳纤维加固预应力梁抗弯承载力试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(11): 9-13.
Liu Jianqi, Wang Jingsha, Ding Naiqing, et al. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(11): 9-13.
- [8] El-Mihilmly M T, Tedesco J W. Deflection of reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer (FRP) plates [J]. *Structural Journal*, 2000, 97(5): 679-688.
- [9] 胡孔国, 陈小兵, 岳清瑞, 等. 考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算[J]. *建筑结构*, 2001, 31(7): 63-65.
Hu Kongguo, Chen Xiaobing, Yue Qingrui, et al. *Building Structure*, 2001, 31(7): 63-65.
- [10] Shin Y S, Lee C. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels sustaining load[J]. *Structural Journal*, 2003, 100(2): 231-239.
- [11] 贺学军. FRP 加固荷载混凝土梁的抗弯性能及剥离行为研究 [D]. 长沙: 中南大学土木建筑学院, 2007.
He Xuejun. Studies on flexural behavior and debonding mechanism of RC beams FRP-strengthened at different preloaded states[D]. Changsha: School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, 2007.
- [12] 谭壮, 叶列平. 纤维复合材料加固混凝土梁受剪性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(11): 12-18.
Tan Zhuang, Ye Lieping. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(11): 12-18.
- [13] Colotti V, Spadea G. Shear strength of RC beams strengthened with bonded steel or FRP plates [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(4): 367-373.
- [14] Sundaraja M C, Rajamohan S. Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips - An experimental study [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 856-864.
- [15] Li A, Assih J, Delmas Y. Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets[J]. *Journal of Structure Engineering*, 2001, 127(4): 373-380.
- [16] 李松辉, 赵国藩, 王松根. CFRP 加固混凝土梁受剪承载力实用计算方法[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(7): 75-80.
Li Songhui, Zhao Guofan, Wang Songgen. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(7): 75-80.
- [17] Li A, Diagna C, Delmas Y. CFRP contribution to shear strengthened RC beams[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(10): 1212-1220.
- [18] Pellegrino C, Modena C. Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(6): 104-111.
- [19] El-Amoury T, Ghobarah A. Seismic rehabilitation of beam-column joint using GFRP sheets[J]. *Engineering Structure*, 2002, 24: 1397-1407.
- [20] Huosam A T. Stress-strain characteristic of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets [J]. *Material Journal*, 1999, 96(3): 393-404.
- [21] 吴波, 王维俊, 王帆. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱的破坏曲率增大系数分析[J]. *工程力学*, 2006, 23(1): 130-138.
Wu Bo, Wang Weijun, Wang Fan. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(1): 130-138.
- [22] 欧阳煜, 黄奕辉, 钱在兹. 玻璃纤维片材加固混凝土梁柱节点的抗震性能研究[J]. *建筑结构*, 2003, 33(5): 59-61.
Ouyang Yu, Huang Yihui, Qian Zaizi. *Building Structure*, 2003, 33(5): 59-61.
- [23] 肖岩, 吴徽, 陈宝春. 碳纤维套箍约束混凝土的应力-应变关系[J]. *工程力学*, 2002, 19(2): 154-159.
Xiao Yan, Wu Hui, Chen Baochun. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(2): 154-159.
- [24] Xiao Y. Applications of FRP composites in concrete columns[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2004, 7(4): 335-343.
- [25] Xiao Y, He W H, Mao X Y, et al. Confinement design of CFT columns for improved seismic performance [C]//Proceedings of the International Workshop on Steel and Concrete Composite Construction. Taipei, 2003: 217-226.
- [26] Xiao Y, He W H, Mao X Y. Development of confined concrete filled tubular (CCFT) columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(6):

- 59-66.
- [27] 曾宪桃, 车惠民. 粘贴玻璃钢加固混凝土梁疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(1): 33-38.
Zeng Xiantao, Che Huimin. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34 (1): 33-38.
- [28] 姚国文, 黄培彦, 牛鹏志, 等. 常幅循环荷载下纤维薄板增强钢筋混凝土梁的损伤行为研究[J]. 机械强度, 2004, 26(S): 25-27.
Yao Guowen, Huang Peiyan, Niu Pengzhi, et al. Fatigue damage evolution of reinforced concrete beam strengthened with fiber laminate under constant amplitude load[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(S): 25-27.
- [29] 刘沐宇, 李开兵. 碳纤维布加固混凝土梁的疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 32-36.
Liu Muyu, Li Kaibing. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38 (9): 32-36.
- [30] Wang Y C, Lee M G, Chen B C. Experimental study of FRP-strengthened RC bridge girders subjected to fatigue loading [J]. *Composite Structure*, 2007, 81: 491-498.
- [31] Triantafillou T C, Deskovic N, Dearing M. Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets [J]. *Structural Journal*, 1992, 89(3): 235-244.
- [32] 尚守平, 彭晖, 董桦, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 24-30.
Shang Shouping, Peng Hui, Tong Hua, et al. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(5): 24-30.
- [33] 叶列平, 庄江波, 曾攀, 等. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 形梁的试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 7-12.
Ye Lieping, Zhuang Jiangbo, Zeng Pan, et al. *Industrial Construction*, 2005, 35(8): 7-12.
- [34] El-Hacha R, Wight R G, Green W F. Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets [J]. *Structure Journal*, 2003, 100 (3): 305-313.
- [35] 田水, 谷倩. 碳纤维布预应力补强加固钢筋混凝土梁受力性能研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(6): 88-91.
Tian Shui, Gu Qian. *Industrial Construction*, 2005, 35(6): 88-91.
- [36] 张坦贤, 吕西林, 肖丹, 等. 预应力碳纤维布加固一次、二次受力梁抗弯性能研究[J]. 结构工程师, 2005, 21(1): 34-40.
Zhang Tanxian, Lu Xilin, Xiao Dan, et al. *Structural Engineers*, 2005, 21(1): 34-40.
- [37] Benmokrane B, Rahman H. Durability of fiber reinforced polymer composite for construction [M]. Canada: Publishing House of University of Sherbrooke, 2002.
- [38] 肖建庄, 于海生, 秦灿灿. 复合材料加固混凝土结构耐久性研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003, 3(2): 16-21.
Xiao Jianzhuang, Yu Haisheng, Qin Cancan. *Fiber Reinforced Plastics/Composite*, 2003, 3(2): 16-21.
- [39] 任慧韬. 纤维增强复合材料加固混凝土结构基本力学性能和长期受力性能研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2003.
Ren Huitao. Study on basic theories and long time behavior of concrete structures strengthened by fiber reinforced polymers[D]. Dalian: College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2003.
- [40] GangaRao H V S, Barger J. Aging of bond between FRP and concrete cubes [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2003, 19(1-2): 83-95.
- [41] Subramaniam K V, Ali-Ahmad M, Ghosn M. Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface: Impact on cohesive fracture response[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(13): 3924-3940.
- [42] Toutanji H A, Gomez W. Durability characteristic of concrete beams external bonded with FRP composite sheets [J]. *Cement and Concrete Composite*, 1997, 19: 351-358.
- [43] Toutanji H, Balaguru P. Durability characteristic of concrete columns wrapped with FRP tow sheets[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1998, 10(1): 52-57.
- [44] 毕永清. 碳纤维增强钢筋混凝土梁、柱抗海水腐蚀的试验研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2002.
Bi Yongqing. Corrosion experimental research on RC concrete beam and column in sea water[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2002.
- [45] Laursen P T, Seible F, Hegemier G A, et al. Seismic retrofit and repair of masonry walls with carbon overlays[J]. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 1995, 30(3): 616-627.
- [46] Ehsani M R. Strengthening of earthquake-damaged masonry structures with composite materials [J]. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 1995, 30(3): 680-687.
- [47] Triantafillou T C. Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates [J]. *Journal of Composites for Construction*, 1998, 2(2): 96-103.
- [48] Ehsani M R, Saadatmanesh H, Velazquez-Dimas J I. Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading[J]. *Journal of Composites for Construction*, 1999, 3(3): 134-142.
- [49] Velazquez-Dimas J I, Ehsani M R, Saadatmanesh H. Out-of-plane behavior of brick masonry walls strengthened with fiber composites[J]. *Structural Journal*, 2000, 97(3): 377-387.
- [50] Seible F. Repair and seismic retest of a full-scale reinforced masonry building[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Structural Faults and Repair. 1995, 3: 229-236.
- [51] Luciano R, Sacco E. Damage of masonry panels reinforced by FRP sheets [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(15): 1723-1741.
- [52] Velazquez-Dimas J I, Ehsani M R. Modeling out-of-plane behavior of URM walls retrofitted with fiber composites[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(4): 172-181.
- [53] Masia M J, Shrive N G. Carbon fibre reinforced polymer wrapping for the rehabilitation of masonry columns[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(4): 734-744.
- [54] Krevaiakas T D, Triantafillou T C. Masonry confinement with fiber-reinforced polymers [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9 (2): 52-62.
- [55] Foraboschi P. Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymer strips [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(3): 52-62.
- [56] 赵彤, 张晨军, 谢剑, 等. 碳纤维布用于砖砌体抗震加固的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 89-95.
Zhao Tong, Zhang Chenjun, Xie Jian, et al. *Earthquake Engineering and*



- Engineering Vibration*, 2001, 21(2): 89-95.
- [57] 张祥顺, 谷倩, 彭少民. CFRP 对砖墙抗震加固对比试验研究与计算分析[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 77-82.
Zhang Xiangshun, Gu Qian, Peng Shaomin. *World Information on Earthquake Engineering*, 2003, 19(1): 77-82.
- [58] Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymer sheets[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(1): 30-40.
- [59] Al-Saidy A H, Klaiber F W, Wipf T J. Repaired of steel beams with carbon fiber-reinforced polymer plates [J]. *Journal of Composites for construction*, 2004, 8(2): 163-172.
- [60] 马建勋, 宋松林, 蒋湘闽. 碳纤维布-钢构件粘接性能试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 181-187.
Ma Jianxun, Song Songlin, Jiang Xiangmin. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 181-187.
- [61] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. CFRP 加固疲劳损伤钢结构的断裂力学分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(10): 79-82.
Zheng Yun, Ye Lieping, Yue Qingrui. *Industrial Construction*, 2005, 35(10): 79-82.
- [62] Muszynski L C, Purcell M R. Composite reinforcement to strengthen existing concrete structures against air blast [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2003, 7(2): 93-97.
- [63] Ballinger C, Maeda T, Hoshijima T. Strengthening of reinforced concrete chimneys columns and beams with carbon fiber reinforced plastics[C]// Proceedings of the International Symposium on Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcements for Concrete Structures. ACI SP-138: 243-248.
- [64] 徐志胜, 冯凯, 张威振, 等. CFRP 加固钢筋混凝土梁火灾后的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(1): 98-100.
Xu Zhisheng, Feng Kai, Zhang Weizhen, et al. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(1): 98-100.
- [65] Lau K T, Zhou L M, Tse P C, et al. Applications of composites optical fibre sensors and smart composites for concrete rehabilitation: An overview[J]. *Application Composite Materials*, 2002, 9(4): 221-247.
- [66] Sen R, Mullins G. Application of FRP composites for underwater piles repair[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38(5-6): 751-758.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“第三届全国微生物基因组学学术研讨会”征文

中国微生物学会主办、国家海洋局第三海洋研究所和农业微生物学国家重点实验室承办的“第三届全国微生物基因组学学术研讨会”将于 2010 年 11 月 26—29 日在福建省厦门市召开。会议主题为“中国微生物基因组研究的展望”。

征文内容: 微生物基因组学和比较基因组; 微生物新功能基因的发掘; 微生物蛋白组; 微生物转录组; 微生物代谢组。

征文截止时间: 2010 年 10 月 15 日。

联系方式: 1) 武汉市洪山区狮子山街 1 号华中农业大学微生物农药国家工程研究中心 (430070) 周萍, 电话/传真: 027-87287254, 13343476116, 电子信箱: zhouping71_@163.com; 2) 厦门市大学路 178 号国家海洋局第三海洋研究所 (361006) 周娟, 电话: 0592-2195608, 传真: 0592-2085376, 电子信箱: skidu@21cn.com。

·学术动态·



首届“全国科学、技术与公共政策论坛”征文

中国自然辩证法研究会将于 2010 年 12 月在江苏省苏州市召开首届“全国科学、技术与公共政策论坛”。论坛主题为“低碳经济背景下的科学、技术与决策”。

征文内容: 低碳经济的内涵、定义及特征; 中国低碳经济发展战略; 低碳经济、中国城镇化与产业结构调整; 低碳经济背景下的科学、技术选择; 面向低碳经济的中国科技发展战略及路线图; 中国低碳经济科技创新支撑体系研究; 其他相关议题。

征文截止时间: 2010 年 10 月 15 日。

联系方式: 北京市海淀区学院南路 86 号 (100081), 电话: 0512-67507027, 电子信箱: linping@suda.edu.cn。

会议网址: <http://www.chinasdn.org.cn/n1249550/n1249729/11978904.html>。