

引用本文:梅葵花,王凤轩,孙胜江.纤维增强复合材料加固混凝土桥梁结构研究进展[J].建筑科学与工程学报,2024,41(1):31-51.
MEI Kuihua, WANG Fengxuan, SUN Shengjiang. Research progress of fiber reinforced polymer in strengthening concrete bridge structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(1): 31-51.

DOI:10.19815/j.jace.2022.09044

纤维增强复合材料加固混凝土桥梁结构研究进展

梅葵花¹,王凤轩^{1,2},孙胜江¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 山东省交通规划设计院集团有限公司,山东 济南 250101)

摘要:为总结纤维增强复合材料(FRP)在混凝土桥梁加固中的研究成果,拓宽FRP加固桥梁的思路,推动其在桥梁加固领域的广泛应用,阐述了FRP加固方法的发展及其特点,系统梳理了FRP加固方法在混凝土桥梁的研究进展。根据加固机理的不同,从抗弯加固、抗剪加固、抗压加固三方面加以归纳总结,介绍了几种常见的FRP加固方式、影响因素、破坏模式及其设计理论;分析了当前研究的不足,由此提出了一些可以继续深入研究的问题。结果表明:目前研究较多的有外贴FRP法、预应力FRP技术、表层嵌入法、FRP网格加固技术,其在不同的设计参数和使用条件下呈现出不同的破坏模式;外贴FRP片材容易过早发生剥离破坏,可以通过一些锚固措施提升界面黏结性,其中HB-FRP加固技术的锚固效果最好;预应力FRP加固技术因具有较高的材料强度利用率而展现出良好的应用前景;后续应深入研究FRP加固设计理论,综合考虑各参数对加固结构性能的影响,建立统一可靠且实用的计算模型;应进一步研究既有混凝土加固结构在多因素耦合作用下的长期性能和耐久性能,完善FRP加固混凝土桥梁设计方法和规范体系。

关键词:桥梁工程;FRP加固;混凝土结构;加固方式;设计理论;综述

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)01-0031-21

Research progress of fiber reinforced polymer in strengthening concrete bridge structure

MEI Kuihua¹, WANG Fengxuan^{1,2}, SUN Shengjiang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: In order to summarize the research results of fiber reinforced polymer (FRP) in concrete bridge reinforcement, broaden the ideas of FRP strengthening bridges in China and promote its wide application in the field of concrete bridge reinforcement, the development and characteristics of FRP reinforcement methods were explained. The research progress of FRP reinforcement methods in concrete bridges was systematically combed. According to the different reinforcement mechanisms, flexural reinforcement, shear reinforcement and compressive reinforcement were summarized. Several common FRP strengthening methods, influencing factors, failure modes and their design theories were introduced. The key problems of impact resistance, fire resistance, time-varying performance and durability in FRP reinforcement were

discussed in detail. The shortcomings of the existing studies were analyzed, some problems and ideas that can be further studied were put forward. The results show that the externally bonded FRP method, prestressed FRP technology, surface embedded method, FRP grid reinforcement and other technologies have been studied more, which show different failure modes under different design parameters and service conditions. Externally bonded FRP sheets are prone to premature peeling failure. Some anchoring measures can be taken to improve the interfacial adhesion, among which HB-FRP reinforcement technology has the best anchoring effect. The prestressed FRP reinforcement technology has a good application prospect because of its high material strength utilization rate. In the follow-up, the design theory of FRP reinforcement should be deeply studied, and the influence of various parameters on the performance of the reinforced structure should be comprehensively considered to establish a unified, reliable and practical design and calculation model. Further study should be done on the long-term performance and durability of the existing reinforced concrete structure under the multi factor coupling action, and the design method and specification of FRP reinforced concrete bridges should be improved.

Key words: bridge engineering; FRP reinforcement; concrete structure; reinforcement method; design theory; review

0 引言

近些年,中国桥梁事业飞速发展,但随之而来将面临的问题是桥梁维修加固需求日益增大。由于早期建造的桥梁安全储备不足和服役条件恶化,加之桥梁材料本身存在耐久性差的问题,大量桥梁病害突出,中国桥梁逐渐进入“建设后市场”,旧桥加固迎来了前所未有的兴盛时期^[1-2]。

目前,粘贴钢板加固法、增大截面加固法、体外预应力加固法等传统的混凝土桥梁加固方法在很多方面存在不足,共同点在于加固材料耐久性差、加固后期维修养护费用高。纤维增强复合材料(FRP)作为一种新型高性能加固材料,具有稳定的物化性,能够抵抗较为恶劣的环境,又可根据不同需求生产成多种产品形式,具有极强的可设计性,适用于现代桥梁结构多样化的发展需求^[3]。近些年来,随着FRP产品制造工艺的优化、力学性能的提高、结构体系的创新以及长期性能的不断改善,FRP可以与传统材料很好地结合在一起,共同作为结构的一部分^[4]。在传统的混凝土桥梁结构中,FRP可作为一种结合材料或替代材料,将其粘贴或内嵌于桥梁结构中,可显著提高结构的刚度、承载力和耐久性,是混凝土桥梁加固领域的新兴之秀^[5]。

早在1982年,瑞士联邦实验室率先对FRP加固混凝土结构进行试验研究^[6]。之后日本^[7]、欧美等国家和地区^[8]经过不断的深入研究,相继颁布了

一些FRP加固混凝土结构的行业规范和施工规程,其中包含的结构设计概念、设计计算方法以及施工要点等内容,对FRP加固技术的发展起着良好的规范及指导作用。中国FRP加固混凝土桥梁结构研究始于20世纪90年代末,于2003年颁布《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》并沿用至今,经历了20多年的快速发展,目前已有大量的工程实践,FRP加固桥梁效率不断提高,展现出广阔的应用前景。

本文基于近些年的最新研究成果,主要从抗弯加固、抗剪加固、抗压加固3个方面对FRP加固混凝土桥梁结构的研究现状进行系统归纳,分析当前研究的不足,提出有待进一步研究的问题和思路,以促进FRP加固方法在中国桥梁加固领域的发展与工程应用,满足工程运维多样化发展需求。

1 FRP 加固技术特点

1.1 优 势

与传统桥梁结构加固方法相比,FRP加固方法优势明显,主要体现在以下几个方面:

(1)适用范围广。FRP具有很强的可设计性,且产品成型方便,可设计成多种形式,几乎可用于桥梁各种部件的加固。

(2)轻质高强。一般的FRP密度不足钢材的1/5,而强度却是钢材的3倍~8倍,因而FRP加固桥梁后结构的自重和尺寸改变几乎可忽略不计。

(3)施工简便。不需要模板、支架等大型施工设施,方便用于有限空间下的桥梁加固,施工方便快捷。

(4)弹性性能好。FRP不但有很高的抗拉强度,而且在结构大变形后产生的塑性变形小,对偶然超载后结构的变形恢复很有利^[9]。

(5)耐久性能好。FRP可在桥梁经常遭受的酸、碱、盐、潮湿等侵蚀环境下表现出良好的耐久性能,即便冻雨和极端温度变化条件都未能对其强度和其他力学性能造成显著影响,因而可以降低后期维修养护费用,显著提高结构的使用寿命^[10]。

1.2 劣势

由于FRP本身也存在一些缺陷,给桥梁加固带来某些不利影响,需要采取一定的措施加以克服。

(1)弹性模量较低。一般的FRP要比钢材弹性模量低,如果采用FRP粘贴加固方法,FRP的应力增长较小,很难发挥其高强的特点,因而往往采用施加预应力的方法提高其强度利用率^[11]。

(2)剪切强度低。FRP产品的剪切强度仅为其抗拉强度的1/5~1/20,因而加固设计时纤维方向应沿着结构主应力方向布置,且采用预应力加固时需要设置专门的锚固装置^[12]。

(3)耐火性较差。由于FRP基体是树脂材料,其在高温时会软化^[13],力学性能大大降低,有抗火要求时需要采取耐火防护措施,但桥梁结构对防火的要求不如建筑结构高,因而桥梁结构更适宜用FRP加固。

2 抗弯加固

2.1 加固方式及锚固措施

2.1.1 加固方式

FRP加固混凝土梁抗弯性能的方法有很多。根据FRP是否施加预应力,可分为普通FRP加固和预应力FRP加固;根据FRP类型的不同,可分为FRP布加固、FRP板加固、FRP筋加固和FRP网格加固;根据加固位置的不同,可分为外贴法和表层嵌入法等。

外贴FRP布加固法是最常用的抗弯加固方法,其最早被应用于混凝土桥梁的加固^[5]。外贴FRP布加固法所用的FRP布是用连续的纤维通过环氧树脂预浸成的单向纤维材料。混凝土梁加固时,利用环氧树脂黏结剂将FRP布沿着主拉应力方向或垂直于裂缝方向粘贴在需要加固补强的部位,与原结构形成一个整体,可显著提高结构的抗弯承载能

力、整体刚度和疲劳寿命。为了克服外贴FRP加固方式降低结构延性的问题,一些学者^[14-17]对部分黏结FRP加固方式进行研究。部分黏结FRP加固一般指的是FRP仅在两端与混凝土黏结,其余部分均为无黏结。与全黏结FRP加固方法相比,该加固方式可避免早期弯曲裂纹引起的脱黏,显著提高结构延性,位移延性系数可增加141%,但极限承载力提高程度有限^[17]。

在结构变形较小的情况下,外贴FRP布的应变往往滞后于钢筋的应变,而且FRP布还易与钢筋混凝土(RC)梁发生早期剥离破坏,加固后强度受制于表层混凝土保护层的抗拉强度,导致FRP布的强度利用率很低。为了解决外贴FRP布加固材料强度利用率低的问题,预应力FRP加固法被提出。施加预应力所用的FRP产品类型通常为筋材和板材。相比于FRP布,FRP筋材和板材的成品质量更好,性能也更加稳定。预应力FRP通常是体外预应力形式,高丹盈等^[18-19]对体外预应力FRP筋加固技术进行了深入研究。很多研究表明,对FRP施加预应力可有效抑制混凝土梁裂缝的发展,并能显著提高梁的开裂荷载、屈服荷载以及极限荷载^[20-22]。

表层嵌入法是指在预先开槽的混凝土构件保护层内嵌入FRP片材或筋材,然后充填胶黏剂的加固方法^[23]。采用表层嵌入FRP片材方法增大了FRP片材与混凝土构件的黏结面积,可以抑制FRP片材与混凝土梁过早发生剥离破坏;在梁受拉区表层嵌入FRP筋材可明显抑制黏结界面滑移现象的发生^[24],还可以有效抑制混凝土梁裂缝的发展^[25],显著提高悬臂梁的承载力和有效降低悬臂端挠度^[26],但开槽会对混凝土构件形成一定的损伤。预应力FRP加固技术可以提高FRP的强度利用率,表层嵌入技术能显著提高FRP与混凝土的黏结能力,二者结合形成的表层嵌贴预应力FRP加固技术,可仅靠界面黏结力抵抗FRP预应力,无需设置永久性锚具^[27]。

近几年,一些学者对FRP网格加固混凝土梁技术进行了有关研究。FRP网格加固是指梁受拉面布置FRP网格,利用改性树脂、工程水泥基复合材料(ECC)、聚合物水泥砂浆(PCM)等黏结材料固定FRP网格,使加固层与混凝土成为一体的技术,可提升梁50%~150%的抗弯承载力和100%~260%的抗变形能力^[28-32]。实际应用中应尽量选择厚度较小的网格,通过多层布置来提升加固效果^[28]。采用该方法加固的结构不仅力学性能好,而且长期性能

佳,耐腐蚀性能优异。FRP 网格加固所用黏结材料低温流动性好、固化快和透水性好^[29],可避免 FRP 片材加固法常用胶黏剂低温流动性差、固化性差和透气性差带来的施工问题,且前者具有优良的抗冲击性能和防火性能^[28],适用于低温环境、潮湿环境、有冲击荷载(车辆撞击、船舶撞击和落石碰撞等)和防火等级高条件下的加固。

2.1.2 锚固措施

FRP 与混凝土的界面黏结力主要来源 3 个方面:化学黏结力、摩擦力和销栓作用^[33]。常用的外贴 FRP 片材的加固方法主要靠化学黏结作用提供界面黏结力,如果黏结质量不好,在外荷载作用下容易发生 FRP 片材过早剥离破坏^[34],影响桥梁结构的加固效率。为了克服外贴 FRP 片材加固后的剥离问题,一些锚固方式被提出,主要包括:U 型锚固、机械锚固(MF-FRP)、FRP 锚和混合粘贴锚固(HB-FRP)^[35],如图 1 所示。

U 型箍锚固主要是采用横向包裹 FRP 片材的方式增大梁端界面摩擦力^[36],延缓了梁底剥离的发生^[37]。FRP 的 U 型箍在加固量较大的情况下仍会被剪断,纵向 FRP 片材的强度仍不能充分发挥,表明该方法锚固效率比较低^[38]。机械锚固法是利用锚固件将 FRP 片材锚固在混凝土结构表面的加固方法,该方法施工周期短,不需养护,可以提供销栓作用,但锚固件会对混凝土保护层造成损伤,安装位置受到混凝土构件内钢筋的限制^[39-42]。FRP 锚是 FRP 片材常用的机械锚固件,该方法是将 FRP 锚固件一端嵌固在环氧砂浆填充的矩形槽内,并将另一端分散的 FRP 胶黏在 FRP 片材上,可以减少集中应力,从而提供一个坚固的端部锚固系统,有效抑制剥离破坏的发生^[43]。

Wu 等^[44]结合外贴 FRP 法和机械紧固法,提出了 HB-FRP 的加固方法。HB-FRP 加固技术可以同时发挥化学黏结、摩擦和销栓作用,比传统的外贴 FRP 的黏结强度高出 6 倍~7 倍,很好地抑制了 FRP 的剥离破坏^[45]。张峰等^[46]对从高速公路旧桥拆除的 35 m 跨径预应力混凝土 T 型梁采用 HB-FRP 方法进行抗弯加固,通过全过程破坏试验研究发现,HB-FRP 加固的桥面板未发生黏结滑移破坏,展现出良好的抗弯加固效果。De Waal 等^[47]采用外贴 FRP 加固方法和 HB-FRP 加固法对预应力混凝土桥面板进行试验研究,结果发现,外贴 FRP 加固方法仅可提高混凝土桥面板 10% 的极限承载力,破坏模式为弯剪破坏,而 HB-FRP 加固方法可提高

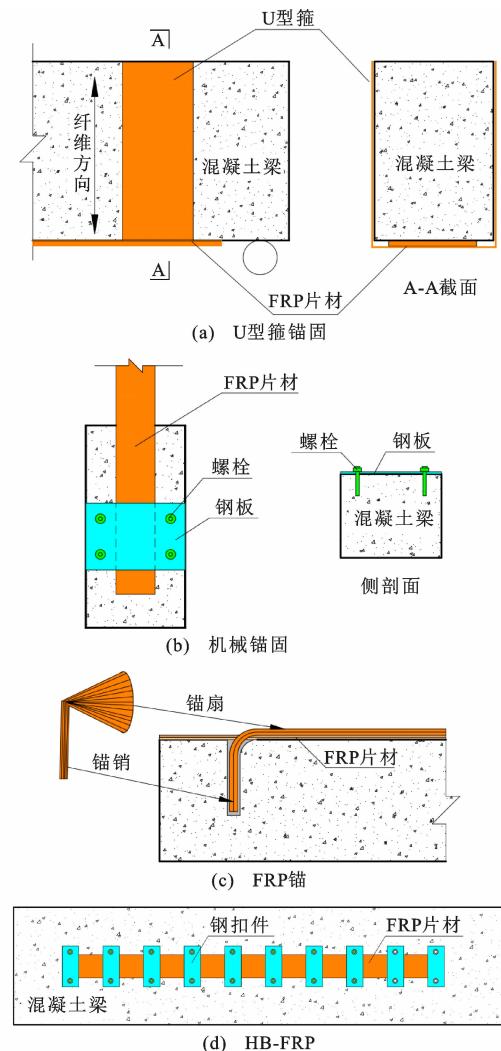


图 1 FRP 锚固方式

Fig. 1 FRP anchoring methods

混凝土桥面板 31% 的极限承载力,破坏模式为弯曲破坏。

对于预应力 FRP 加固方法,通常需要对 FRP 筋材或板材设置专门的锚具。其中,锚固 FRP 筋的锚具有黏结式锚具、机械夹持式锚具和复合式锚具^[48-52],锚固 FRP 板一般用机械夹持式锚具^[53-54]。锚具的设置在一定程度上可以抑制 FRP 与梁剥离的发生,从而可以充分发挥 FRP 的高强性能。有些学者^[55-58]还研究了波形齿夹具锚固法,该方法是依靠压紧及锁定装置将 FRP 片材夹持并锚固于上、下波形齿板及加劲波形板之间,其锚固力来自螺栓的抗剪能力,因而可以充分发挥 FRP 片材的纵向强度。

当前,FRP 抗弯加固混凝土桥梁的方法较多,通过对比各类加固方法可以发现,普通外贴 FRP 片材加固方法技术成熟,但 FRP 材料强度利用率较

低;预应力 FRP 筋(板)加固法可显著提高 FRP 的材料强度利用率,但施工较为复杂;表层嵌入技术能显著提高 FRP 与混凝土的黏结能力,但开槽会对混凝土构件形成一定的损伤。FRP 网格加固法具有力学性能好、长期性能佳、耐腐蚀性能优异等优点,是未来重点研究方向之一。为了克服外贴 FRP 加固的剥离问题,一些锚固方式被提出,U型锚固工艺简单,但锚固效率较低;机械、FRP 锚、HB-FRP 等锚固可靠,但都会对混凝土保护层造成一定的损伤;预应力 FRP 加固方法需要设置专门的锚具,一些专用锚具被开发并得到实际应用,但目前缺少标准化锚固系统。

2.2 界面黏结滑移性能

FRP 与混凝土的界面黏结滑移性能一直是抗弯加固设计中很关键的问题。FRP 与混凝土的界面黏结滑移关系往往通过建立相应的分析模型来模拟,并通过试验(单剪试验、双剪试验和切口梁试验)或有限元分析验证。Lorenzis 等^[59]提出了弹性黏结滑移模型,Lu 等^[60]基于界面断裂能提出了双线性黏结滑移模型,Nakaba 等^[61]和 Ferracuti 等^[62]基于 Popovics 公式提出了曲线形式的黏结滑移模型;吴业飞等^[63]通过三线性应力-张开位移模型有效地模拟了 FRP 与混凝土界面间的剪应力传递过程和滑移过程,董坤等^[64]基于双参数内聚力指数模型建立了温差作用下 FRP-混凝土界面黏结行为的解析理论模型;Martinelli 等^[65]和 Realfonzo 等^[66]通过简化的分析模型评估了 MF-FRP 传递的实际黏结应力与界面滑移之间的关系,Zhang 等^[67]描述了 FRP 锚固构件通用和简化的荷载-滑移响应;张峰等^[68]提出 HB-FRP 加固体系的混凝土楔体黏结滑移计算模型,都得到了较好的试验验证或有限元模型验证。FRP 与混凝土有关界面黏结滑移模型如表 1 所示。

当前,FRP 加固混凝土界面黏结性能的研究逐渐趋向成熟。国内外学者在大量试验数据的基础上,考虑不同加固参数的贡献规律,建立了与试验结果耦合良好的简化分析模型。在实际应用过程中,设计人员可根据控制参数确定的难易程度,将相应模型通过数值分析或解析方法,对加固界面的黏结强度、滑移量和内力分布进行评估和预测。然而,裂缝对加固梁剥离荷载和材料利用率的影响还不是很清楚,未来还应进一步完善 FRP 加固梁的界面黏结滑移理论以及相应计算公式,并研究动荷载下的黏结滑移性能等。

2.3 影响因素和破坏模式

2.3.1 影响因素

FRP 抗弯加固混凝土梁的影响因素可分为原梁条件(混凝土强度、纵筋配筋率、初始受荷状态等)和加固参数(FRP 类型、FRP 用量、粘贴形式、锚固方式等)两大方面。混凝土强度越高、纵筋配筋率越低,FRP 加固对抗弯承载力的提升效果越显著^[69];对超筋梁(混凝土抗压强度太低或纵筋配筋率太高)而言,受压区混凝土破坏时受拉区钢筋仍未屈服,不宜采用 FRP 加固。降低梁的初始荷载水平可以增大加固梁的极限承载力,降低其最大裂缝深度和平均裂缝间距,因而在实际工程中加固前最好对加固结构进行卸载^[70]。FRP 的力学性能越好、用量越大,加固梁的抗弯承载力和刚度的提高程度越大^[21,23,34]。部分粘贴加固梁比全粘贴加固梁有更高的延性,且加固梁的承载力并未显著下降,甚至高于端部没有锚固的 FRP 完全黏结梁的承载力^[17]。外贴 FRP 加固方法的锚固措施主要是为了抑制界面的剥离破坏,预应力 FRP 加固方法的锚固措施主要是为了维持预应力水平,二者共同点都是为了提高 FRP 的强度利用率,但不同锚固方式的锚固机理和锚固效果不同。这些加固参数直接影响着混凝土梁的加固效果,最终呈现出不同的破坏模式。

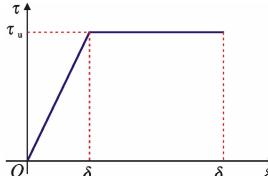
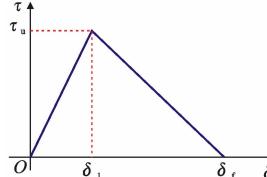
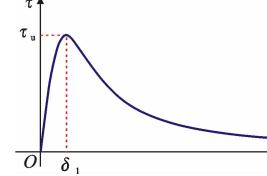
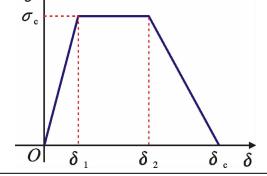
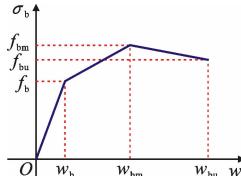
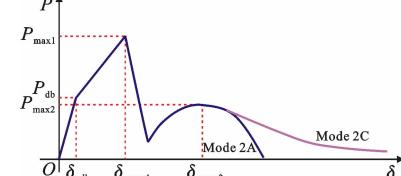
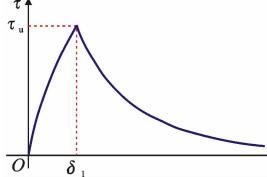
2.3.2 破坏模式

在外荷载作用下,外贴 FRP 片材抗弯加固混凝土梁的破坏模式主要有:混凝土保护层剥离破坏、FRP 片材端部界面剥离破坏、中部弯剪裂缝或者弯曲裂缝引起的界面剥离破坏、剪切破坏和混凝土压碎或者 FRP 撕裂引起的弯曲破坏^[35],如图 2 所示。与外贴法不同,表层嵌入 FRP 筋抗弯加固梁破坏时的裂缝间距较小、条数较多,主裂缝深度较大,裂缝发展充分且均匀,可以更好地发挥 FRP 筋材的强度^[24]。

关于 FRP 网格抗弯加固混凝土梁的破坏模式,王文炜等^[29]发现 FRP 格栅-改性树脂加固 RC 梁破坏模式均为 FRP 格栅断裂,界面黏结性能良好;潘毅等^[30]发现单位加固量较高的试件破坏形态表现为 FRP 网格-PCM 复合层与混凝土的剥离破坏,而单位加固量较低的试件表现为 FRP 网格拉断破坏;郑宇宙等^[31]研究发现 FRP 网格-超高韧性纤维水泥基加固 RC 梁破坏模式均为 FRP 网格被拉断,个别试件因复合加固层弯曲刚度过大而发生局部剥离破坏,且复合加固层出现许多分布均匀的微裂缝。

已有研究表明,除去原梁条件外,FRP 抗弯加

表 1 界面黏结滑移模型
Table 1 Interface bond-slip model

| 模型类型 | 模型名称 | 界面黏结滑移关系(曲线和公式) | |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FRP-混凝土界面典型黏结滑移模型 | 弹塑性黏结滑移模型 ^[59] |  | $\tau = \begin{cases} \delta \tau_u / \delta_1 & \delta < \delta_1 \\ \tau_u & \delta \geq \delta_1 \end{cases}$ |
| | 双线性黏结滑移模型 ^[60] |  | $\tau = \begin{cases} \tau_u \delta / \delta_1 & 0 \leq \delta < \delta_1 \\ \tau_u (\delta_f - \delta) / (\delta_f - \delta_1) & \delta_1 \leq \delta < \delta_f \\ 0 & \delta \geq \delta_f \end{cases}$ |
| | 曲线形式的黏结滑移模型 ^[61-62] |  | $\begin{cases} \tau = n \tau_u \delta / \delta_1 [(n-1) + (\delta / \delta_1)^n] & \delta < \delta_1 \\ \tau_u = 3.5 f_{co}^{0.19} & \delta \geq \delta_1 \end{cases}$ |
| FRP-混凝土间的裂纹正应力-张开位移关系和界面剪切应力-滑移关系 ^[63] | 用三线性应力-张开位移模型定义内聚单元本构关系 |  | $\frac{1}{2} \delta_c (1 - \delta_1 / \delta_c + \delta_2 / \delta_c) \tau_c = G_c$ |
| 温差作用下 FRP-混凝土的界面滑移分布和剪应力分布 ^[64] | 双参数内聚力指数模型 | $s(x) = s_1(x) - s_2(x) = \frac{1}{B} \ln(\frac{1}{\lambda}), \tau(x) = (1 + \rho) E_i t_i A^2 B \lambda (1 - \lambda),$ $\lambda = \frac{(1 - \eta_1^2)[1 + \eta_2 \cosh(1 + \rho) AB(L - x) \sqrt{1 - \eta_2^2}]}{(1 - \eta_2^2)[1 + \eta_1 \cosh(1 + \rho) ABx \sqrt{1 - \eta_1^2}]}$ | |
| MF-FRP 加固混凝土构件传递的轴向荷载-滑移关系 ^[65] | 简化的三线性分析模型 |  | $\sigma_b = \begin{cases} \frac{\omega}{\omega_b} f_b & 0 \leq \omega \leq \omega_b \\ f_b + \frac{\omega - \omega_b}{\omega_{bm} - \omega_b} (f_{bm} - f_b) & \omega_b < \omega \leq \omega_{bm} \\ f_{bm} + \frac{\omega - \omega_{bm}}{\omega_{bu} - \omega_{bm}} (f_{bu} - f_{bm}) & \omega_{bm} < \omega \leq \omega_{bu} \end{cases}$ |
| FRP 锚加固混凝土构件荷载-滑移响应 ^[67] | 非简化的回归分析模型 |  | |
| HB-FRP 加固混凝土结构的黏结滑移关系 ^[68] | 简化的混凝土楔体黏结滑移模型 |  | $\tau = \begin{cases} \tau_u \sqrt{\delta / \delta_1} & 0 \leq \delta < \delta_1 \\ \tau_u e^{\alpha(\frac{\delta}{\delta_1} - 1)} & \delta \geq \delta_1 \end{cases}$ |

注: τ 为界面剪切应力; τ_u 为极限剪应力; δ 为界面滑移量; δ_1 、 δ_2 分别为 τ_u 对应的最小和最大滑移量; δ_f 为 τ 下降到 0 时的滑移量; n 为与界面断裂能有关的参数; f_{co} 为混凝土抗压强度; σ_c 为裂纹张开应力; δ_c 为裂纹张开位移; G_c 为断裂韧度, 表示裂纹释放的能量; $s(x)$ 为界面滑移分布; $\tau(x)$ 为界面剪应力分布; x 为界面某位置到黏结中心的距离; L 为 FRP 黏结长度的一半; E_i 为 FRP 弹性模量; t_i 为 FRP 厚度; b_i 为 FRP 宽度; A 、 B 为界面参数; $\eta_1 = e^{-Bx_1(0)}$, $\eta_2 = 1 - e^{-Bx_1(L)}$, $\rho = E_i t_i b_i / (E_c t_c b_c)$; σ_b 为机械锚固件轴向应力; w 为锚固件相对滑移量; w_b 、 w_{bm} 、 w_{bu} 为模型滑移参数; f_b 、 f_{bm} 、 f_{bu} 为模型应力参数; P_{db} 、 δ_{db} 分别为 FRP 板开始剥离时的外荷载和对应的界面滑移量; P_{max1} 、 δ_{max1} 分别为 FRP 板完全剥离时的峰值荷载和对应的界面滑移量; P_{max2} 、 δ_{max2} 分别为 FRP 锚完全失效前的峰值荷载和对应的界面滑移量; α 为待定系数。

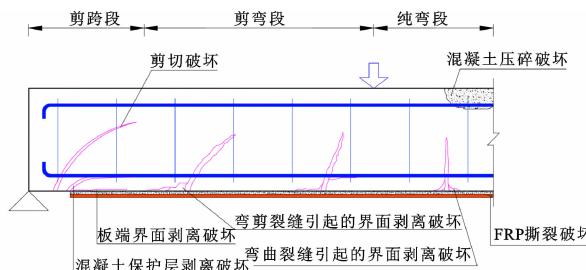


图 2 外贴 FRP 加固 RC 梁破坏形式

Fig. 2 Failure types of RC beams strengthened with externally bonded FRP

固混凝土梁的主要影响因素为 FRP 的力学性能、用量、材料强度利用率和锚固方式。FRP 的力学性能越好、用量越大、材料强度利用率越高、锚固方式越牢靠,则加固效果越好。不同加固方法受不同因素影响,会产生不同的破坏模式。外贴 FRP 加固方法的破坏方式受胶黏剂养护时间和养护环境的影响,粘贴效果不好时的破坏模式常为剥离破坏;破坏方式也受表层混凝土保护层的抗拉强度的影响,混凝土保护层的抗拉强度较低时也易发生混凝土保护层剥离破坏。预应力 FRP 筋(板)加固法通过专门的锚具锚固,有效抑制界面剥离现象的发生,使得加固梁的破坏模式常为混凝土压碎或者 FRP 断裂引起的弯曲破坏。FRP 网格加固法通过黏结性能好的材料固定 FRP 网格,破坏模式常为 FRP 网格拉断破坏。

2.4 加固设计理论

在加固设计理论方面,陈绪军等^[71]基于刚度解析法,将 FRP 片材换算为受拉钢筋,建立了 FRP 片材加固 RC 梁的短期抗弯刚度计算公式,扩大了规范中 RC 梁抗弯刚度计算公式的适用范围。周云等^[72]采用合理的计算假定,将抗弯刚度曲线划分成三段,基于有效惯性矩方法,提出了 CFRP 加固 RC 短梁的抗弯刚度计算公式,该公式也适用于普通 RC 短梁。唐皇等^[73]基于微元法思想,考虑了锈蚀钢筋与混凝土之间的黏结应力以及截面应变的相容性,建立了 FRP 抗弯加固锈蚀 RC 梁挠度计算模型,同时可以较精确地预测不锈蚀加固梁和微锈蚀加固梁的荷载-挠度曲线,使极限荷载和对应极限挠度的误差范围分别控制在 $-0.6\% \sim 1.8\%$ 和 $-10.5\% \sim 9.1\%$ 。郭蓉等^[74]提出了基于安全储备指标的 FRP 抗弯加固 RC 梁的设计方法,该方法通过设置预警 FRP 断裂使加固梁在破坏前发出明显的预警信号,解决了因 FRP 施加预应力导致的结构延性明显降低而不能满足延性指标的问题。Slaitas 等^[20]考虑

了外荷载作用条件下预应力 FRP 加固 RC 梁的情况,推导出接触刚度折减系数,可很好地预测加固梁的全弯矩-挠度响应。鲁乃唯等^[75]根据实桥加固工程建立了预应力 CFRP 板加固 T 梁的抗力概率模型,计算了加固梁的抗弯承载力可靠指标,并对可靠度参数敏感性进行分析。对于部分粘贴 FRP 加固方法,Chahrour 等^[14]考虑 CFRP 带无黏结长度的应变不相容性,提出了非弹性截面分析方法;Choi 等^[15]基于曲率法建立了加固梁受力性能的解析模型,两个模型对试验结果都有着良好的预测。

已有研究表明,抗弯加固设计时应避免出现 FRP 断裂的脆性破坏,计算时多数是将 FRP 等效为受拉筋材,建立混凝土梁抗弯刚度、挠度和承载力预测模型,关键在于确定 FRP 在极限状态时的应力。虽然各学者提出的模型与其试验结果吻合良好,但需要进一步完善多因素对构件刚度和承载力的影响程度。

综上所述,FRP 抗弯加固混凝土桥梁的方法较多,其中外贴 FRP 加固方法较为成熟,预应力 FRP 加固方法在工程上虽有较多应用,但还需要建立长期可靠的标准化锚固系统以及制定相应的规范体系;表层嵌入法还需要研究不同 FRP 混杂方式、加固比例、开槽尺寸、是否施加预应力以及二次受力等因素对加固效果的影响;FRP 网格抗弯加固混凝土梁研究相对较少,还需深入研究不同 FRP 网格类型、网格尺寸和加固层厚度等参数对破坏模式和承载力的影响,以及其抗弯机理和设计计算方法。

3 抗剪加固

3.1 加固方式

混凝土梁在竖向预应力损失、腹板厚度不足、混凝土收缩徐变和温度变形等情况下容易在腹板处产生斜裂缝,影响结构安全,需要对其进行抗剪加固。常见的 FRP 抗剪加固形式有外贴 FRP 片材加固、预应力 FRP 加固、FRP 网格加固和截面贯入式加固等。

外贴 FRP 片材加固方法是混凝土梁抗剪加固的常用方法,其粘贴形式主要分为 I 形条带粘贴、U 形条带粘贴、X 形条带粘贴和连续封闭粘贴^[76],如图 3 所示。其中,I 形条带可以正贴和斜贴,若交叉斜贴就成为 X 形条带粘贴。粘贴纵向纤维压条是 U 形条带加固最简单的锚固措施。贺拴海等^[77]对 5 片钢筋混凝土 T 梁进行破坏试验研究,结果表明适当的锚固措施不但可以提高抗剪承载力,而且可

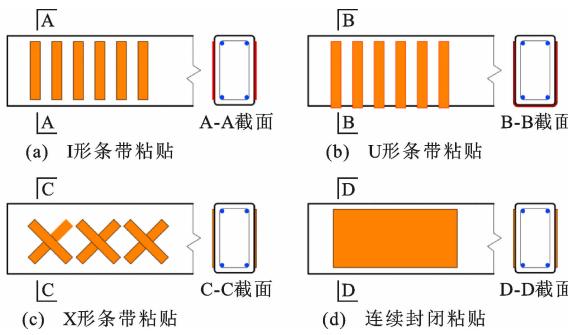


图 3 外贴 FRP 抗剪加固方式

Fig. 3 Shear strengthening method with externally bonded FRP

以增大结构延性,防止脆性破坏的发生。邢丽丽等^[78]对 AFRP 布外贴加固预损 RC 梁抗剪性能进行试验研究,结果表明压条锚固的交叉 U 形条带、斜向 U 形条带和竖向 U 形条带的加固效果依次变差。Javed 等^[79]对 RC 深梁进行试验研究发现,外贴 CFRP 片材可以延缓剪切裂缝的出现,垂直于预期剪切裂缝方向布置 CFRP 片材不仅可以有效提高抗剪极限承载力,而且最为有效地延缓了剪切裂缝的出现,但加固梁剪切裂缝的出现是突发的,属于脆性破坏。对于 HB-FRP 加固方法,Zhou 等^[80]对矩形 RC 梁进行抗剪性能试验研究发现,HB-CFRP 加固方法可以增大梁 38.6%~54.6% 的抗剪承载力和 35.3%~43.9% 的极限挠度,而外贴 U 形 CFRP 条带加固方法仅可增大梁 23.8% 的抗剪承载力和 9.2% 的极限挠度,得到 HB-FRP 抗剪加固效果更好的结论。

为了提高粘贴 FRP 片材的强度利用率,周畅等^[81]开发了用于抗剪加固的 CFRP 片材预应力张拉和锚固系统,并给出了相应的施工工艺和方法,研究结果表明,该方法可有效抑制钢筋混凝土 T 梁斜裂缝的产生和发展,显著提高加固梁的抗剪承载力。刘君等^[82]研发了适用于 U 形 FRP 条带的端锚无黏结预应力系统,通过试验发现该系统可避免条带的端部剥离破坏并实现条带被拉断破坏,证明了该锚固系统的有效性;该方法提高了纤维的强度利用率,延缓了试件斜裂缝的发展,大幅提升了试件的抗剪承载能力,而且较高持载水平和配纤率的加固梁抗剪承载力提高幅度更大,最大提升率约为 75%。

一些学者^[83-85]对 FRP 网格-ECC 和 FRP 网格-环氧砂浆加固 RC 梁的抗剪性能进行试验研究,结果表明 FRP 网格加固方法可延缓 RC 梁斜裂缝的形成,并抑制斜裂缝的发展,在显著提高试件抗剪承

载力的同时,还能在一定程度上改善梁的变形能力。郭瑞等^[86]对 FRP 网格-PCM 加固 RC 梁的抗剪性能进行试验研究,结果表明该加固方法可有效抑制斜裂缝的发展,相较于未加固梁,仅腹部加固梁的极限荷载和极限位移分别提高了 16.8% 和 4.1%,而腹部和腋部都加固梁的极限荷载和极限位移分别提高了 32.7% 和 10.2%,表明全加固方法是更为有效的加固方法。

桥面板在支座附近的剪切破坏一直是维修加固人员值得关注的问题^[87]。董鹏程等^[88]采用截面贯入 FRP 筋方法加固混凝土桥面板,该法在构件截面中部钻孔放入横向筋材,提供类似箍筋或弯曲钢筋抗剪的作用,结果表明该方法尤其适合桥面板的抗剪加固,可提高桥面板 6%~14% 的抗剪承载力和 100%~137% 的极限位移。在混凝土梁抗剪加固中,截面贯入法、表层嵌入法和外贴法的抗剪加固效果依次降低^[89]。

当前,研究人员对混凝土梁和板研发了很多抗剪加固方式,其都有各自的使用特点和受力特点。同抗弯加固类似,普通外贴 FRP 片材抗剪加固方法技术成熟,但 FRP 材料强度利用率较低;预应力 FRP 抗剪加固可充分发挥 FRP 加固材料的强度利用率,但施工工艺复杂;FRP 网格抗剪加固不仅显著提高试件抗剪承载力,还能在一定程度上改善梁的变形能力。FRP 片材和网格加固适用于混凝土梁,而截面贯入 FRP 筋加固方法特别适用于混凝土桥面板抗剪加固。

3.2 影响因素和破坏模式

3.2.1 影响因素

影响 FRP 抗剪加固混凝土梁力学性能的因素可分为原梁条件(配箍率、剪跨比、混凝土强度和初应力)和加固参数(FRP 类型、FRP 用量、粘贴形式、条带宽度、间距和厚度等)两大方面^[76]。金浏等^[90]研究了外贴 CFRP 布加固 RC 悬臂梁剪切破坏尺寸效应行为,发现 CFRP 布用量及粘贴方式对加固梁的抗剪承载力影响最大,但贡献率随着悬臂梁尺寸的增加而减小;极限抗剪承载力随配纤率的增加而增大,但增长趋势随配纤率的增加明显减缓。马莹等^[91]对钢筋混凝土 T 梁进行 HB-FRP 抗剪加固试验和数值模拟,得到混凝土强度、箍筋间距、FRP 条带间距和 FRP 厚度这 4 种因素对抗剪承载能力的影响依次降低的结论。贺拴海等^[77]对具有初应力的钢筋混凝土 T 梁进行 FRP 抗剪加固研究,发现预加载梁在加固时已开裂,箍筋承受了一定荷载,所

以 FRP 拉断破坏时箍筋的应力水平高于无预载的情况,导致预加载梁的抗剪承载力更高。

3.2.2 破坏模式

FRP 片材粘贴加固混凝土梁主要有 3 种剪切破坏模式:FRP 剥离破坏、FRP 拉断的剪切破坏和混凝土剪切破坏。FRP 剥离破坏常见于条带粘贴加固,表现为 FRP 在锚固长度较短的地方发生剥离,而 FRP 自身是完好的,其原因是 FRP 的锚固长度不足,这种破坏模式不能充分发挥 FRP 的强度,且一旦 FRP 开始剥离,梁很快发生破坏,应增加锚固长度或者采取锚固措施避免发生这种破坏;FRP 拉断的剪切破坏常见于连续封闭粘贴,当梁的配筋率和配箍率都较低时也容易发生这种破坏,表现为与斜裂缝相交的 FRP 拉应变不断增加而最终被拉断,发生这种破坏模式时梁的极限承载力最大,但该破坏模式是脆性破坏,应避免其发生;混凝土剪切破坏表现为斜裂缝很宽,但 FRP 是完好的,既无剥离也无断裂,混凝土破坏后 FRP 仍能承受较大荷载^[76]。

FRP 网格-环氧砂浆抗剪加固混凝土梁的破坏模式主要有 2 种:一种为先发生加固层与混凝土的界面剥离破坏,然后发生混凝土剪压破坏;另一种为加固层与混凝土的界面未发生剥离,剪压区加固层与混凝土一起发生压碎破坏,所有加固试件中的 FRP 网格均未出现断裂破坏和层间剥离破坏^[84]。FRP 网格-PCM 加固混凝土梁的破坏模式与之类似,当原梁的剪切斜裂缝宽度较大时,加固层与混凝土也会产生局部的界面剥离破坏^[86]。

已有研究表明,除去原梁条件外,FRP 抗剪加固混凝土梁的主要影响因素为 FRP 的力学性能、用量、材料强度利用率、粘贴方式等。采用交叉 U 形粘贴方式时,FRP 的力学性能越好、用量越大、材料强度利用率越高,则加固效果越好。原梁条件和加固参数的不同导致了不同的破坏模式。外贴 FRP 片材和预应力 FRP 加固都需要有效的锚固措施,加固设计时应避免发生脆性的条带端部剥离破坏和条带被拉断破坏。FRP 网格抗剪加固时,若端部锚固不牢靠,也会发生加固层与混凝土的界面剥离破坏,应采取相应措施,尽量避免该破坏模式的发生。

3.3 加固设计理论

FRP 加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力评估是一个具有挑战性的问题,因为混凝土、腹筋和 FRP 间的贡献规律很难精准把控。目前,已有的模型通常把加固梁的抗剪承载力看成 FRP、混凝土和腹筋

三部分抗剪承载力之和,其中混凝土和腹筋的抗剪承载力通常按照现行设计规范进行计算,而对于 FRP 提供的抗剪承载力,虽然一些文献和技术标准提供的公式表达形式有所不同,但本质是一样的,即等效为腹筋的抗剪承载力并予以一定量的折减,关键是要确定 FRP 的有效应变。周朝阳等^[76]对美国、英国、加拿大、日本、意大利以及中国设计规范中 FRP 有效应变的建议公式予以总结,但现行规范中 FRP 加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力预测模型大多是保守的。截面形状、FRP 锚固效率和 FRP 倾角对梁的抗剪承载力都有显著影响^[92]。Gao 等^[93]采用灰色关联分析(GRA)方法研究了跨高比与抗剪承载力的相关性,提出了一种考虑跨高比影响的 FRP 加固混凝土梁抗剪承载力预测模型。除此之外,吴林铭等^[94]采用灰度关联法分析了影响 FRP 试验梁受剪承载力的主要因素,针对中国公路桥梁加固设计规范中未考虑混凝土抗拉强度和 FRP 片材的差异性,在规范中推荐公式的基础上引入混凝土抗拉强度影响因素,并且对 FRP 强度折减因子和有效黏结长度予以修正。任伟等^[95]基于桁架理论,以 CFRP 布破坏为控制条件,提出了粘贴 CFRP 布加固钢筋混凝土 T 梁的抗剪承载力计算公式。王文炜等^[96]系统地总结了已有的 FRP 加固 RC 梁抗剪承载力计算方法,综合考虑开裂角度、配箍率、剪跨比的影响,提出了修正的 FRP 加固 RC 梁抗剪计算模式。Guo 等^[97]提出了一种结合 U 形粘贴和侧面纵向黏结的封闭框架式 FRP 加固方法,并建立相应的抗剪承载力计算模型。

对于其他加固方法,周畅等^[81]基于 CFRP 片材断裂的破坏模式,提出了预应力 CFRP 片材加固 RC 梁的受剪承载力公式。刘君等^[82]基于 Zsutty 公式和桁架模型提出了 U 形 FRP 条带端锚无黏结预应力系统加固 RC 梁的抗剪极限承载力计算方法,且发现根据该方法计算的结果偏安全,可为结构加固设计提供参考。郭瑞等^[86]基于杆状材料有效应变,提出以 CFRP 网格的有效应变代替传统桁架理论的断裂应变,建立了 CFRP 网格-PCM 的抗剪承载力计算方法,可为该类型的加固设计提供参考。

已有研究表明,抗剪加固理论大多数是通过静载试验研究,考虑主要影响参数,建立相应的抗剪承载力计算模型,其中将 FRP 的贡献等效为腹筋的抗剪承载力并予以一定量的折减,关键在于确定 FRP 的有效应变。虽然很多学者对各种 FRP 抗剪加固方法都提出了相应的抗剪承载力计算方法,但精准

把握各设计参数对抗剪承载力的贡献规律仍是一个需要深入研究的问题。

综上所述,研究人员对混凝土梁和板研发了很多抗剪加固方式,其中外贴 FRP 加固方法较为成熟,预应力 FRP 抗剪加固相关研究较少,没有形成成熟的施工工艺;FRP 网格抗剪加固混凝土梁研究也相对较少,还需深入研究不同 FRP 网格加固参数对抗剪承载力的影响,以及其抗剪机理和设计计算理论。此外,目前研究大多数是通过静载试验来研究其加固效果,且考虑结构二次受力的研究很少,今后可重点研究不同加固构件在疲劳荷载和二次受力情况下的抗剪性能。

4 抗压加固

4.1 加固方式

混凝土墩柱作为受压构件,FRP 加固方法不但可以提高结构轴心受压性能和偏心受压性能,还可以提高结构延性和剪切性能^[98]。常用 FRP 加固方式有外包 FRP 布加固、预应力 FRP 布加固、体外预应力 FRP 筋加固方法、喷射 FRP 纤维加固和 FRP 网格加固等。

当既有混凝土桥墩的承载力和延性不足时,可在纤维方向沿墩柱环向粘贴 FRP 片材,以约束核心混凝土,提高其延性和承载力。外包 FRP 布加固形式一般可分为塑性铰区加固、条带加固和全高加固^[99],如图 4 所示。塑性铰区加固方式主要是针对易发生弯曲破坏的长柱,通过对塑性铰区域(一般在墩柱底部)混凝土进行约束,从而实现墩柱的延性补强^[100-101];条带加固和全高加固方式适用于容易发生剪切破坏的短柱,使墩柱的破坏模式由脆性剪切破坏转化为延性弯曲破坏^[102]。FRP 约束圆柱可提供连续且均匀的侧向约束力,加固效果较好;而 FRP 对方柱的约束不均匀,加固效果较差^[103-105]。在 FRP 加固前先将方柱圆形化,可显著提高 FRP 约束的有效性^[106]。与短柱相比,外包 FRP 加固对细长柱强度和延性的改善效果较差,且缠绕后柱屈曲的可能性增大^[107]。Saini 等^[108]研究了 FRP 混杂加固 RC 细长方柱的性能,得到 FRP 约束可减小柱的二阶侧向位移,明显提高构件轴压承载力和抗弯刚度。

对于预应力 FRP 布加固方法,周长东等^[109]给出了 FRP 布的预应力施加方法,并通过试验研究发现用预应力 CFRP 条带约束的混凝土桥墩可以显著提高墩柱的承载力和延性^[110]。卢春玲等^[111]研

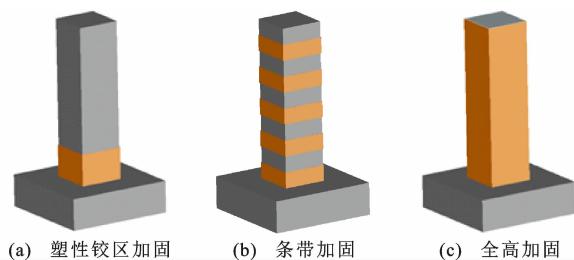


图 4 外贴 FRP 布加固 RC 墩柱的方式

Fig. 4 Strengthening method of RC pier column with FRP sheets

究了预应力 CFRP 布加固混凝土圆柱的应力损失情况,发现预应力越大、圆柱直径越小、圆柱表面越粗糙,则摩擦损失越大,且在 CFRP 布表面涂胶可有效减少预应力损失。当墩柱截面为矩形时,柱角会出现应力集中的问题。为解决该问题,Wang 等^[112]提出了一种用活性粉末混凝土(RPC)垫层修补预应力 CFRP 条带加固 RC 方柱的新技术(图 5),并通过轴压试验验证了这种新技术能快速、有效地完成对混凝土柱的加固。

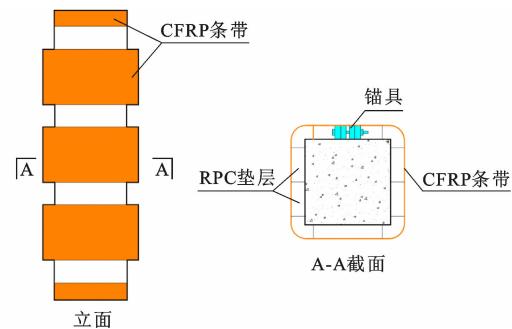


图 5 RPC 垫层修补预应力 CFRP 加固 RC 方柱

Fig. 5 Prestressed CFRP reinforced RC square column repaired by RPC cushion

体外预应力 FRP 筋不仅适用于梁的加固,同样可以很好地用于桥墩加固。该方法安装和更换方便,可以根据桥墩实际受力状态控制预应力的大小和施加位置,改善墩身的压力和弯曲应力状态。对于车辆等冲击荷载、桩基不均匀沉降等导致桥墩横向开裂的情况,可采用竖向施加预应力的方式对裂缝加以控制;对于市政桥梁,出于美观性考虑,桥墩常设计成 V 形或花瓶形,墩顶混凝土在外荷载作用下容易产生竖向裂缝,此时可在水平向施加预应力,延缓裂缝的发展,提高结构承载力^[113]。

对地震区已震损 RC 墩柱,可采用喷射 FRP 加固方法进行快速加固,喷射 FRP 加固利用短纤维喷射成型机将短切纤维和树脂黏结剂直接混合喷射到结构表面以达到加固目的,从而防止桥梁结构在余

震中发生倒塌。喷射 FRP 加固方法不仅可以增大墩柱的抗剪承载力,还表现出良好的界面黏结性能,且界面黏结力随着喷涂厚度和黏结长度的增加而增大^[114]。谷倩等^[115]通过试验研究发现玻璃纤维与乙烯基酯树脂基体的协同工作性最好,玄武岩纤维耐久性最优,加固后的墩柱表现出良好的延性和耗能能力。

除此之外,江佳斐等^[116]研究了 FRP 网格和 ECC 层交替围裹混凝土圆柱的加固方法,发现该方法可改善素混凝土的脆性压溃破坏模式,FRP 网格-ECC 加固层相当于钢管约束混凝土的作用,其在提高柱抗压承载力的同时还对核心混凝土产生围压效应,从而有效提高混凝土构件抗压延性和承载力。

当前,FRP 加固混凝土墩柱的方法较多,通过对比各类加固方法可以发现,外包 FRP 布加固、预应力 FRP 布加固和 FRP 网格加固都是通过套箍约束作用来提高混凝土构件的延性和承载力,不同之处在各加固方法约束效果不同,外包 FRP 布约束圆形短柱相比方形长柱效果更好,预应力 FRP 布加固可提高材料强度利用率;体外预应力 FRP 筋加固法和喷射 FRP 加固法分别对异形桥墩和已受损 RC 墩柱有着很好的适用性。

4.2 影响因素和破坏模式

4.2.1 影响因素

目前研究表明,FRP 加固混凝土墩柱抗压性能的主要影响因素有原柱条件、加固参数和受力条件,其中原柱条件包括纵筋配筋率、配箍率、长细比、截面形式等;加固参数包括 FRP 种类、FRP 用量及粘贴方式等;受力条件包括轴压比、荷载类型等^[99]。就原柱截面形式而言,FRP 约束圆柱的效果更好,而对方柱的约束效果会有折减,增大方柱倒角半径有利于强度和延性的提高^[106];长细比的增加对加固柱的轴压强度有负面影响^[117];就 FRP 而言,增加粘贴层数,采用延性好的 FRP 种类和多层搭接区错开布置的全包裹方式,试件将具有更好的持续承载能力和更好的变形能力^[118];就轴压比而言,增大轴压比后,约束混凝土柱的荷载位移滞回曲线会出现较严重的捏缩现象,延性会变更差。与轴心受压柱相比,偏心受压能明显降低 FRP 约束混凝土柱的极限承载力^[119]。

4.2.2 破坏模式

FRP 加固柱的破坏模式与原柱的构造、加固参数和受力条件紧密相关。在竖向荷载作用下,加固柱的破坏模式主要为 FRP 断裂破坏和混凝土压碎

破坏,二者均为脆性破坏。加固柱的破坏模式与 FRP 加固量密切相关,几乎所有的全包加固柱都是以 FRP 断裂破坏作为加固柱承载力失效模式^[102,104,106],而对于条带加固,加固层数较少时,中上部的 FRP 条带先发生断裂破坏,然后发生混凝土压碎破坏^[104]。在恒定轴力和水平反复加载作用下,加固柱的破坏模式主要为脆性的剪切破坏、延性的剪切破坏和弯曲破坏。原柱的配箍率越低、剪跨比越小,越易发生脆性的剪切破坏;FRP 配箍率越大、FRP 抗拉强度越大,则侧向约束作用越强,可将墩柱的脆性剪切破坏转变为延性弯曲破坏^[99]。较低的 FRP 配箍率可以适当增大墩柱延性,随着荷载的增加,斜截面不断出现很多细小裂缝,达到峰值荷载后 FRP 仍在受力,直至斜向断裂破坏,属于延性剪切破坏。FRP 加固柱最终发生哪种破坏模式,可根据抗剪及抗弯承载力骨架曲线的相交情况快速地预测,如果两曲线交点位于理论抗剪承载力骨架曲线的退化段,则发生延性的剪切破坏,如果两曲线不相交,则发生延性的弯曲破坏^[120],如图 6 所示。

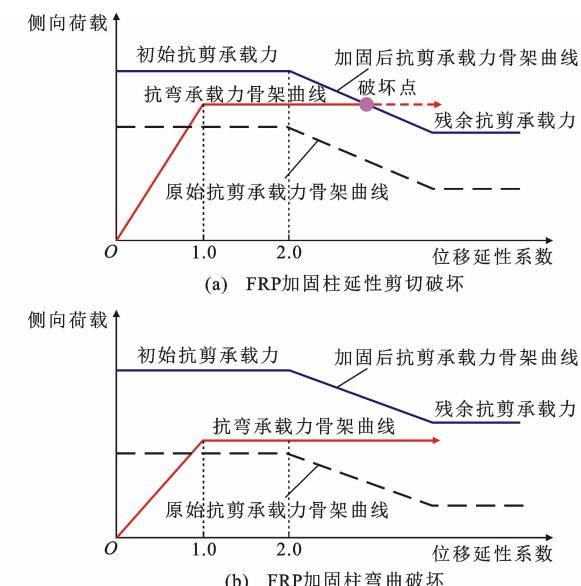


图 6 FRP 加固柱破坏模式的预测方法

Fig. 6 Prediction methods for failure mode of FRP-reinforced columns

已有研究表明,除去原柱条件外,FRP 抗压加固混凝土墩柱的主要影响因素是加固参数和受力条件,增加轴压比和偏心距将降低混凝土柱的延性和承载力。不同加固方法在不同加固量和原梁条件时,会呈现不同的破坏模式,与抗弯加固和抗剪加固的破坏模式不同,FRP 加固墩柱结构不会发生界面剥离破坏,但都有可能发生 FRP 断裂破坏。

4.3 加固设计理论

对 FRP 布约束的 RC 矩形墩柱, Saleh 等^[107] 利用 FRP 约束矩形截面的应力-应变曲线和柱承载力损失的关系, 推导出确定 FRP 约束矩形柱长细极限的预测模型。Saini 等^[108] 考虑了材料非线性和几何非线性, 提出了一种基于 Newmark 中心差分法的 FRP 加固 RC 细长方柱二阶效应数值模拟方法。刘柯等^[121] 采用有限元法分析了 FRP 类型、宽度、厚度和间距参数的影响, 考虑了 FRP 环箍和箍筋的共同约束作用, 提出了加固墩柱的侧向约束压力计算公式, 建立 FRP 约束混凝土的压力-应变模型, 并得到试验验证。

对于 FRP 布约束的 RC 圆柱, Teng 等^[122] 明确考虑了混凝土和 FRP 布的相互作用关系, 在分析无约束、主动约束和 FRP 约束混凝土的侧向变形特性基础上, 提出了一种新的 FRP 约束混凝土应力-应变模型, 对不同材料约束混凝土具有广泛的适用性。Zeng 等^[104] 通过试验验证了该模型优于其他典型模型, 且发现该模型可以精确预测 FRP 约束混凝土的极限轴向应力, 而对极限轴向应变的预测结果偏小。白玉磊等^[123] 通过大应变 FRP 约束混凝土的单调轴压试验, 研究了 FRP 约束刚度对应力-应变关系的影响, 考虑了弱约束混凝土的软化下降段, 修正了现有的侧向应变-轴向应变(膨胀)关系, 通过重新定义塑性应变和应力损伤这两个关键参数, 将现有往复轴压荷载作用下传统 FRP 约束混凝土应力-应变模型推广到大应变 FRP 约束混凝土。

江佳斐等^[116] 基于 FRP 网格和 ECC 材性特征, 对 FRP 网格-ECC 加固方法提出了弹性阶段和强化阶段的两阶段加固机制, 在多裂缝发展的强化阶段, FRP 网格-ECC 的拉伸受力将产生侧向围压, 缓解混凝土柱应力软化幅度, 而且基于基材与网格协同工作的理想状态, 提出 FRP 网格-ECC 加固素混凝土柱承载力计算方法。

已有研究表明, 对于外包 FRP 布加固墩柱, FRP 布主要作用是约束混凝土, 提高核心混凝土抗压强度, 承载力计算关键在于建立 FRP 约束混凝土应力-应变模型; 对于 FRP 网格加固墩柱, FRP 网格与基材协同作用, 提供一部分抗压承载力, 同时对核心混凝土起约束作用。目前的研究基本都是对未承载或预裂卸载后的混凝土柱进行加固试验研究, 与实际工程不符, 未来应对持续荷载情况下 FRP 加固柱性能进行更多的试验研究和理论分析。

综上所述, 研究人员对混凝土墩柱研发了很多

加固方式, 其中外包 FRP 加固方法较为成熟, 预应力 FRP 布和 FRP 筋加固墩柱研究相对较少。研究人员提出的 FRP 约束混凝土柱的加固方法、力学计算模型和损伤指标多是基于 FRP 加固矩形和圆形实心柱的试验结果, 其适用性受到截面性质、轴压比、配箍率、FRP 类型及用量和加固方法等因素的影响, 使用性受到限制, 未来综合考虑各因素的影响规律, 建立统一且可靠的计算公式。此外, 考虑到 FRP 约束墩柱受力性能改变对桥梁整体受力性能的影响, 未来应针对不同桥梁体系, 综合考虑桥墩和其他关键构件受力性能对桥梁整体性能的影响, 建立相应的加固设计方法和性能评估指标。

5 结语

5.1 研究结论

从 FRP 抗弯、抗剪和抗压加固混凝土桥梁 3 个方面综述了国内外关于 FRP 加固桥梁结构的研究进展, 汇总如图 7 所示, 并得出如下主要结论:

(1) FRP 抗弯加固混凝土桥梁的研究相对比较完善, 加固方式和锚固措施丰富, 界面黏结滑移模型的研究也逐渐趋向成熟。在一定的原梁条件下, 加固参数直接影响着混凝土梁的加固效果, 最终呈现出不同的破坏模式。界面黏结滑移模型、承载力和抗弯刚度等理论计算模型都是针对某种加固方法, 在大量试验数据的基础上考虑不同加固参数的贡献规律, 进而建立起来的简化力学模型。

(2) 在 FRP 抗剪加固混凝土梁中, 加固方法与抗弯加固方法类似, 只是 FRP 加固部位和加固目的不同。目前对配箍率、剪跨比、混凝土强度、FRP 类型及粘贴形式等参数对抗剪性能的宏观影响开展了很多研究, 提出了相应的抗剪承载力计算公式, 但各设计参数对各种加固方法的抗剪承载力的贡献规律未统一, 加固梁的剪切破坏机理仍是一个很难认清的问题。

(3) FRP 抗压加固混凝土柱的方法中, 普通环向粘贴 FRP 片材加固应用最为普遍, 预应力 FRP 加固可提高加固效果, 体外预应力 FRP 筋适用于各种桥墩类型的加固, 喷射 FRP 加固方法可很好地用于震损墩柱结构的快速加固, FRP 网格加固层有着类似钢管约束混凝土的作用。抗压加固设计理论多数是基于 FRP 加固方形和圆形实心墩柱的试验结果得到的, 其适用性受到截面性质、加固参数、受力条件等因素的影响, 有一定的局限性。

(4) 在各种加固方法中, 普通外贴 FRP 加固技

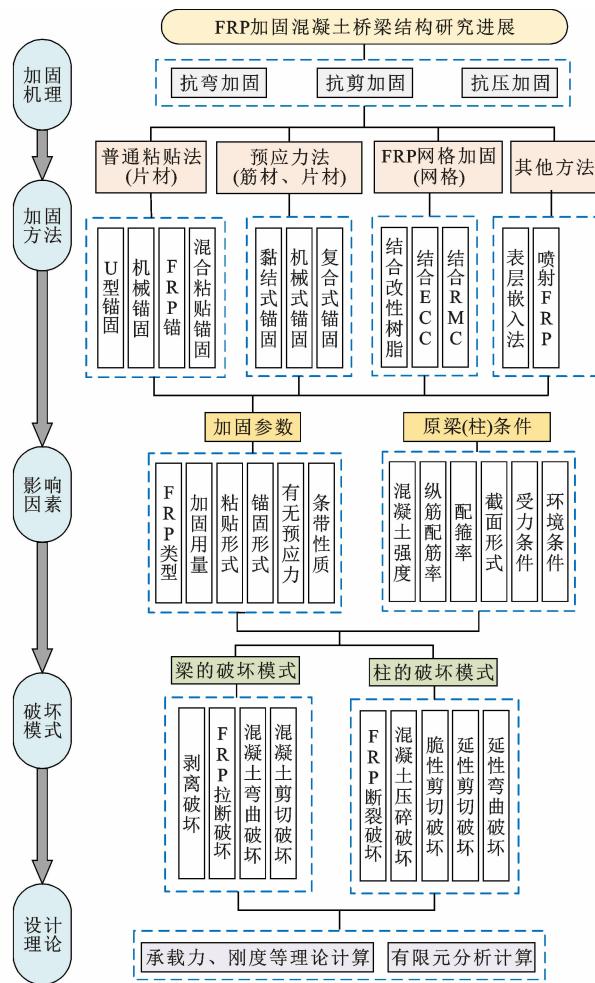


图 7 FRP 加固混凝土桥梁结构研究进展

Fig. 7 Research progress of FRP in strengthening concrete bridge structure

术相对成熟,但在外荷载和环境侵蚀作用下,外贴 FRP 片材容易发生过早剥离破坏,可以通过一些锚固措施提升界面性能,其中 HB-FRP 加固技术的锚固效果表现最好;预应力 FRP 加固技术因其较高的材料强度利用率展现出良好的应用前景;表层嵌入法、FRP 网格加固等方法在一定条件下也具有很好的适用性。原梁(柱)的条件和部分加固参数的不同导致了加固结构的破坏模式不同,相应的加固设计理论模式也会不同。

5.2 展望

为了进一步推进 FRP 在桥梁加固领域的应用,通过对研究现状的整理,发现目前还需对如下发展方向进行更深入的研究:

(1) 预应力 FRP 抗弯加固方法在工程上已有很多应用,未来需要建立长期可靠的标准化锚固系统以及制定相应的规范体系。FRP 网格加固混凝土梁可有效提高其抗弯承载力和整体刚度,但目前相

关研究相对较少,需要深入研究不同试验参数对其破坏模式和承载力的影响,以及完善相应设计计算方法。

(2) FRP 加固混凝土梁的抗剪承载力评估一直是一个极具挑战性的问题。想要弄清楚剪切破坏机理,研究人员不仅要从宏观上认识抗剪加固效果,更要精准把握各设计参数对抗剪承载力的贡献规律。目前虽有较多研究成果,但学术认识仍未统一,未来需要对各种抗剪加固方法建立统一可靠且实用的设计计算模型。

(3) 未来应综合考虑各参数对加固墩柱抗压性能的影响,针对不同桥梁体系,既要考虑墩柱截面性质、轴压比、配筋率、FRP 类型及用量和加固施工方法等因素的影响,又要综合考虑桥墩和其他关键构件对桥梁整体性能的影响,完善相应的承载力计算模型和损伤评估指标。

(4) 考虑实际桥梁结构中的旧混凝土梁与试验研究中所用新梁的不同,未来可加强对 FRP 加固损伤混凝土试验梁静力折减系数的研究以及负载状态下加固性能的研究,并进一步研究 FRP 加固桥梁结构在疲劳荷载、复杂环境等因素耦合作用下的长期性能和耐久性退化机理。

参考文献:

References:

- [1] 张喜刚,刘高,马军海,等.中国桥梁技术的现状与展望[J].科学通报,2016,61(增1):415-425.
ZHANG Xigang, LIU Gao, MA Junhai, et al. Status and prospect of technical development for bridges in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61 (S1): 415-425.
- [2] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (2): 1-97.
- [3] 冯鹏.复合材料在土木工程中的发展与应用[J].玻璃钢/复合材料,2014(9):99-104.
FENG Peng. Development and application of composite in civil engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/ Composites, 2014(9): 99-104.
- [4] 刘伟庆,方海,方园.纤维增强复合材料及其结构研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(4):1-16.
LIU Weiqing, FANG Hai, FANG Yuan. Research progress of fiber-reinforced composites and structures

- [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 1-16.
- [5] 叶华文, 唐诗晴, 段智超, 等. 纤维增强复合材料桥梁结构 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 192-200.
YE Huawen, TANG Shiqing, DUAN Zhichao, et al. State-of-the-art review of the application of fiber reinforced polymer in bridge structures in 2019[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 192-200.
- [6] MEIER U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(6): 341-351.
- [7] FUKUYAMA H. Fibre-reinforced polymers in Japan [J]. Structural Engineering International, 1999, 9(4): 263-266.
- [8] KIM Y J. State of the practice of FRP composites in highway bridges [J]. Engineering Structures, 2019, 179: 1-8.
- [9] 叶列平, 冯 鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36.
- [10] CABRAL-FONSECA S, NUNES J P, RODRIGUES M P, et al. Durability of carbon fiber reinforced polymer laminates used to reinforced concrete structures [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2011, 18(4): 201-207.
- [11] 洪 雷, 太永伟. 预应力 CFRP 加固高强混凝土梁试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(6): 66-72.
HONG Lei, TAI Yongwei. Experiment of prestressed CFRP reinforced high strength concrete beams [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(6): 66-72.
- [12] 程东辉, 杨燕红. 预应力 CFRP 布加固负载混凝土柱轴心受压性能研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4): 34-40.
CHENG Donghui, YANG Yanhong. Research on axial compressive properties of preloaded concrete columns strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(4): 34-40.
- [13] 洪 雷, 马腾龙, 王苏岩. 湿热环境下预应力 CFRP 加固高强混凝土的耐久性 [J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 25-31.
HONG Lei, MA Tenglong, WANG Suyan. Durability of high strength concrete strengthened with prestressed CFRP under wet-thermal environments [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(1): 25-31.
- [14] CHAHOUR A, SOUDKI K. Flexural response of reinforced concrete beams strengthened with end-anchored partially bonded carbon fiber-reinforced polymer strips [J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(2): 170-177.
- [15] CHOI H T, WEST J S, SOUDKI K A. Analysis of the flexural behavior of partially bonded FRP strengthened concrete beams [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(4): 375-386.
- [16] SEO S Y, LEE M S, FEO L. Flexural analysis of RC beam strengthened by partially de-bonded NSM FRP strip [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 101: 21-30.
- [17] 张智梅, 黄庆彬. 部分黏结 FRP 加固混凝土梁抗弯性能研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(4): 965-971.
ZHANG Zhimei, HUANG Qingbin. Study on flexural behavior of partially bonded FRP strengthened RC beams [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(4): 965-971.
- [18] 高丹盈, 房 栋, 祝玉斌. 体外预应力 FRP 筋加固混凝土单向板受弯性能及承载力计算方法 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 115-126.
GAO Danying, FANG Dong, ZHU Yubin. Flexural property and calculation method of one-way reinforced concrete slabs externally prestressed with unbonded FRP tendons [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 115-126.
- [19] 高丹盈, 房 栋, 祝玉斌. 体外预应力 FRP 筋加固混凝土单向板抗裂及刚度计算方法 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(3): 34-41.
GAO Danying, FANG Dong, ZHU Yubin. Anti-cracking ability and stiffness calculation of reinforced concrete one-way slabs externally prestressed with unbonded FRP tendons [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(3): 34-41.
- [20] SLAITAS J, VALIVONIS J. Full moment-deflection response and bond stiffness reduction of RC elements strengthened with prestressed FRP materials [J]. Composite Structures, 2021, 260: 113265.
- [21] YASHCHUK M, SMERDOV D. Reinforced concrete elements strengthened by pre-stressed fibre-reinforced polymer (FRP) [J]. Transportation Research Procedia, 2021, 54: 157-165.

- [22] SLAITAS J, VALIVONIS J. Concrete cracking and deflection analysis of RC beams strengthened with prestressed FRP reinforcements under external load action[J]. Composite Structures, 2021, 255: 113036.
- [23] 王兴国,岳军辉. RC 结构表层嵌入 FRP 加固技术研究概述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(4): 124-128.
WANG Xingguo, YUE Junhui. Review of RC members strengthened with NSM FRP material[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012(4): 124-128.
- [24] 王兴国,朱坤佳,郑宇宙,等. 表层嵌入混合 FRP 筋的连续梁弯曲性能与影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(2): 32-41.
WANG Xingguo, ZHU Kunjia, ZHENG Yuzhou, et al. Flexural properties and influence factors of continuous RC beam strengthened with near-surface mounted mixing FRP tendons[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(2): 32-41.
- [25] CAPOZUCCA R. Static and dynamic response of damaged RC beams strengthened with NSM CFRP rods[J]. Composite Structures, 2009, 91(3): 237-248.
- [26] 郑宇宙,王兴国,陈红强. 悬臂梁支座附近表层嵌入 FRP 筋后性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(增1): 75-78.
ZHENG Yuzhou, WANG Xingguo, CHEN Hongqiang. Behavior of support zone of cantilever beam embedded with FRP tendons[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S1): 75-78.
- [27] 陈华,陈耀嘉,谢斌,等. 表层嵌贴式预应力碳纤维复材筋加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(9): 168-173.
CHEN Hua, CHEN Yaojia, XIE Bin, et al. Study of bending behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-surface-mounted prestressed CFRP rods[J]. Industrial Construction, 2020, 50(9): 168-173.
- [28] 丁里宁,贺卫东,汪昕,等. BFRP 网格-PCM 薄面黏贴加固钢筋混凝土板抗弯性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 1085-1096.
DING Lining, HE Weidong, WANG Xin, et al. Flexural behavior of reinforced concrete slabs strengthened with BFRP grids and PCM[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(4): 1085-1096.
- [29] 王文炜,朱忠锋,杜京涛,等. BFRP 格栅/改性 MMA 树脂混凝土复合增强 RC 梁抗弯力学性能[J]. 南昌大学学报(工科版), 2019, 41(2): 127-132.
WANG Wenwei, ZHU Zhongfeng, DU Jingtao, et al. Flexural mechanical behavior of RC beams strengthen-
- ning with BFRP grid and modified MMA resin concrete[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2019, 41(2): 127-132.
- [30] 潘毅,蔡联亨,郭瑞,等. 碳纤维增强复合网格-聚合物水泥砂浆加固 RC 梁抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 110-118.
PAN Yi, CAI Lianheng, GUO Rui, et al. Experimental study on shear performance of RC beams strengthened with CFRP grid-PCM[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 110-118.
- [31] 郑宇宙,王文炜. 复材网格-UHTCC 复合增强钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 23-32.
ZHENG Yuzhou, WANG Wenwei. Experimental research on flexural behavior of RC beams strengthened with FRP grid-UHTCC composite[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 23-32.
- [32] 高子祁,张津滔,张浩,等. 纤维增强复材加固损伤混凝土梁抗弯性能的有限元分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(5): 44-50, 43.
GAO Ziqi, ZHANG Jintao, ZHANG Hao, et al. Finite element analysis of flexural behavior of damaged RC beams reinforced by FRP[J]. Industrial Construction, 2021, 51(5): 44-50, 43.
- [33] JIANG C, WAN B L, WU Y F, et al. Epoxy interlocking: a novel approach to enhance FRP-to-concrete bond behavior[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 643-653.
- [34] 任伟,郭林,杨旸,等. 曲面混凝土构件内弧粘贴 FRP 弦剥离效应[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 60-70.
REN Wei, GUO Lin, YANG Yang, et al. String debonding effect of curved RC member reinforced by bonding FRP in intrados[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 60-70.
- [35] KALFAT R, AL-MAHAIDI R, SMITH S T. Anchorage devices used to improve the performance of reinforced concrete beams retrofitted with FRP composites: state-of-the-art review[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(1): 14-33.
- [36] CHEN W S, PHAM T M, SICHEMBE H, et al. Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 134: 114-126.
- [37] 李庆伟,杨勇新,岳清瑞,等. 预应力碳纤维布加固混凝土梁锚固方式试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(4): 9-11, 39.

- LI Qingwei, YANG Yongxin, YUE Qingrui, et al. Experimental study of anchorage methods in technique of concrete structure strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. Industrial Construction, 2006, 36(4):9-11,39.
- [38] 卓 静,李唐宁,章庆学,等.波形齿夹具锚与碳纤维布U形箍锚固作用的对比试验[J].建筑结构,2006,36(3):22-24.
- ZHUO Jing, LI Tangning, ZHANG Qingxue, et al. Comparative experiment on beams strengthened with carbon fiber sheets anchored by wave-shaped-gear-grip anchorage and by carbon fiber sheet U-ferrule [J]. Building Structure, 2006, 36(3):22-24.
- [39] ALKHALIL J, EL-MAADDAWY T. Finite element modelling and testing of two-span concrete slab strips strengthened by externally-bonded composites and mechanical anchors[J]. Engineering Structures, 2017, 147:45-61.
- [40] 王小威.复合机械锚固下FRP加固钢筋混凝土梁弯剪性能研究[D].深圳:深圳大学,2019.
- WANG Xiaowei. Research on bending and shearing behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP under composite mechanical anchoring[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [41] NARDONE F, LIGNOLA G P, PROTA A, et al. Modeling of flexural behavior of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP strips[J]. Composite Structures, 2011, 93(8):1973-1985.
- [42] 董 坤,戢治鹏,杨 松,等.端部机械锚固FRP-混凝土黏结界面承载力试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(增1):399-405.
- DONG Kun, JI Zhipeng, YANG Song, et al. Experimental study on bearing capacity of FRP-concrete bonding interface with mechanical end anchorage[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (S1): 399-405.
- [43] SUN W, LIU H F, WANG Y J, et al. Impacts of configurations on the strength of FRP anchors[J]. Composite Structures, 2018, 194:126-135.
- [44] WU Y F, HUANG Y E. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3):266-273.
- [45] 张 峰,高小华,高 磊,等.HB-FRP加固混凝土梁研究综述[J].交通运输工程学报,2020,20(6):35-47.
- ZHANG Feng, GAO Xiaohua, GAO Lei, et al. Review on research on concrete beam reinforced with HB-FRP[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6):35-47.
- [46] 张 峰,吴宇飞,高华睿,等.组合粘贴纤维增强复合抗弯加固35 m T型梁破坏性试验研究[J].工业建筑,2019,49(9):152-155,129.
- ZHANG Feng, WU Yufei, GAO Huarui, et al. Experimental study on destructive behavior of 35-meters T-beam strengthened by HB-FRP[J]. Industrial Construction, 2019, 49(9):152-155,129.
- [47] DE WAAL L, FERNANDO D, NGUYEN V T, et al. FRP strengthening of 60 year old pre-stressed concrete bridge deck units[J]. Engineering Structures, 2017, 143:346-357.
- [48] 方 志,方 川,蒋正文,等.高温后CFRP筋及其黏结式锚固系统的力学性能[J].复合材料学报,2021,38(12):4031-4041.
- FANG Zhi, FANG Chuan, JIANG Zhengwen, et al. Mechanical properties of CFRP bar and bond-type anchorage system after elevated temperature exposure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(12): 4031-4041.
- [49] 谢桂华,唐永生,李十泉,等.CFRP筋黏结式锚具疲劳性能试验[J].玻璃钢/复合材料,2018(7):64-68,48.
- XIE Guihua, TANG Yongsheng, LI Shiquan, et al. Fatigue performance test of bond-type anchorage for CFRP tendon[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(7):64-68,48.
- [50] 梅葵花,孙亚民,孙晨然,等.CFRP筋新型机械夹持-黏结型复合式锚具短期静力性能试验[J].中国公路学报,2021,34(1):66-78.
- MEI Kuihua, SUN Yamin, SUN Chenran, et al. Short-term performance of a novel mechanical-bond composite anchorage with CFRP tendons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1):66-78.
- [51] 梅葵花,邹晓鸿,孙胜江,等.CFRP筋黏结型锚具受力性能分析及试验[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(3):64-71.
- MEI Kuihua, ZOU Xiaohong, SUN Shengjiang, et al. Analysis and experiment on mechanical performance of bond-type anchorage for CFRP tendons[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(3):64-71.
- [52] 刘荣桂,刘德鑫,高莉娜,等.碳纤维筋复合型群锚的设计及试验研究[J].工业建筑,2014,44(1):98-101,123.
- LIU Ronggui, LIU Dexin, GAO Lina, et al. Design and experiment investigation of wedge-bond anchorage group for CFRP tendons[J]. Industrial Construc-

- tion, 2014, 44(1): 98-101, 123.
- [53] YE H W, ZHANG Q, LIU C M, et al. Failure mechanisms governing anchoring force of friction-based wedge anchorage for prestressed CFRP plate [J]. Composite Structures, 2019, 225: 111142.
- [54] YE H W, WU C J, LIU D J, et al. Friction and wear behavior of CFRP plate in contact with roughened mould steel under high normal pressure [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 308-319.
- [55] 陈小英,李唐宁,黄 音,等.波形齿夹具张拉CFRP带的力学性能试验研究及夹具体系设计[J].工程力学,2012,29(1):187-194,213.
CHEN Xiaoying, LI Tangning, HUANG Yin, et al. Experimental research on mechanical property of pulling CFRP belt with wave-shaped-gear clamp and design of clamp system [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 187-194, 213.
- [56] 卓 静,李唐宁.波形齿夹具锚和U型箍锚固作用的力学机理[J].中国公路学报,2007,20(3):48-53.
ZHUO Jing, LI Tangning. Mechanical mechanism of anchorage effect on wave-shape-gear-grip anchor and U-ferrule[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 48-53.
- [57] 卓 静,李唐宁.FRP片材波形齿夹具锚的原理[J].土木工程学报,2005,38(10):49-53,71.
ZHUO Jing, LI Tangning. Mechanisms of an innovative wave-shape-teeth-grip anchor of FRP sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 49-53, 71.
- [58] 卓 静,李唐宁,章庆学,等.波形齿夹具锚锚固碳纤维布加固混凝土梁试验研究[J].建筑结构,2005,35(7):63-66.
ZHUO Jing, LI Tangning, ZHANG Qingxue, et al. Test on beams strengthened with carbon fiber sheets and anchored by wave-shaped-gear-grip anchorage [J]. Building Structure, 2005, 35(7): 63-66.
- [59] LORENZIS L, MILLER B, NANNI A. Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(3): 256-264.
- [60] LU X Z, TENG J G, YE L P, et al. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete[J]. Engineering Structures, 2005, 27(6): 920-937.
- [61] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 359-367.
- [62] FERRACUTI B, SAVOIA M, MAZZOTTI C. Interface law for FRP-concrete delamination[J]. Composite Structures, 2007, 80(4): 523-531.
- [63] 吴业飞,陈伟球.基于内聚力模型的FRP-混凝土黏结强度分析[J].工程力学,2010,27(7):113-119.
WU Yefei, CHEN Weiqiu. Cohesive zone model based analysis of bond strength between FRP and concrete [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 113-119.
- [64] 董 坤,郝建文,李 鹏,等.环境温差下FRP-混凝土界面黏结行为分析[J].工程力学,2020,37(11):117-126.
DONG Kun, HAO Jianwen, LI Peng, et al. Studies on the bond performance of FRP-to-concrete interfaces under environmental temperature difference[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 117-126.
- [65] MARTINELLI E, NAPOLI A, NUNZIATA B, et al. Inverse identification of a bearing-stress-interface-slip relationship in mechanically fastened FRP laminates [J]. Composite Structures, 2012, 94(8): 2548-2560.
- [66] REALFONZO R, MARTINELLI E, NAPOLI A, et al. Experimental investigation of the mechanical connection between FRP laminates and concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45 (1): 341-355.
- [67] ZHANG H W, SMITH S T, KIM S J. Optimisation of carbon and glass FRP anchor design[J]. Construction and Building Materials, 2012, 32: 1-12.
- [68] 张 峰,徐向锋,李术才.HB-FRP加固混凝土结构的黏结滑移模型[J].中国公路学报,2015,28(1):38-44,53.
ZHANG Feng, XU Xiangfeng, LI Shucai. Bond-slip model for HB-FRP systems bonded to concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(1): 38-44, 53.
- [69] 王文炜,赵国藩.纤维复合物加固钢筋混凝土梁抗弯承载力及参数分析[J].工业建筑,2003,33(9):16-19,77.
WANG Wenwei, ZHAO Guofan. Parametric analysis and bending load capacity of RC beams strengthened with glass fiber reinforced plastic plates[J]. Industrial Construction, 2003, 33(9): 16-19, 77.
- [70] ZHANG H X, PEI J W, HE L Y. Mechanical behavior for RC beams strengthened with near-surface-mounted bars considering effect of secondary loading [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638-640: 1360-1364.
- [71] 陈绪军,李华锋,朱晓娥.FRP片材加固的钢筋混凝土梁短期刚度试验与理论研究[J].建筑结构学报,2018,39(1):146-152.
CHEN Xujun, LI Huafeng, ZHU Xiaoe. Experimental

- and theoretical research on short-term stiffness of reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1):146-152.
- [72] 周云,王廷彦,张军伟. CFRP 加固钢筋混凝土短梁抗弯刚度计算方法[J]. 土木工程学报,2020,53(11):9-20,35.
ZHOU Yun, WANG Tingyan, ZHANG Junwei. Calculation method on flexural stiffness of reinforced concrete short beam strengthened by CFRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2020,53(11):9-20,35.
- [73] 唐皇,彭建新,王晗,等. 考虑黏结应力传递的抗弯加固锈蚀 RC 梁挠度计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2022,44(1):94-104.
TANG Huang, PENG Jianxin, WANG Han, et al. Deflection calculation method for corroded RC beams strengthened by bending considering bond stress transfer[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022,44(1):94-104.
- [74] 郭蓉,宁铄,王明浩,等. 基于安全储备指标的 FRP 抗弯加固 RC 梁的设计方法[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(12):3174-3180.
GUO Rong, NING Shuo, WANG Minghao, et al. A design method of FRP flexural strengthening RC beam based on safety reserve index [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(12):3174-3180.
- [75] 鲁乃唯,刘扬,彭晖. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁桥的可靠度分析[J]. 公路交通科技,2014,31(12):58-66.
LU Naiwei, LIU Yang, PENG Hui. Analysis on reliability of RC girder bridge strengthened with prestressed CFRP plates [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(12):58-66.
- [76] 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.
- [77] 贺拴海,任伟,赵小星. 碳纤维布对具有初应力的钢筋混凝土梁抗剪加固试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2004,24(1):34-39.
HE Shuanhai, REN Wei, ZHAO Xiaoxing. Experiments of shear capacity of RC beam bridges rehabilitated with CFRP under loading case [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(1):34-39.
- [78] 邢丽丽,孔祥清,韩飞,等. AFRP 布加固预损 RC 梁抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(4):26-32.
XING Lili, KONG Xiangqing, HAN Fei, et al. Experimental study on shear behavior of pre-damaged RC beams reinforced by AFRP sheets[J]. Building Structure, 2021,51(4):26-32.
- [79] JAVED M A, IRFAN M, KHALID S, et al. An experimental study on the shear strengthening of reinforced concrete deep beams with carbon fiber reinforced polymers[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016,20(7):2802-2810.
- [80] ZHOU Y W, GUO M H, SUI L L, et al. Shear strength components of adjustable hybrid bonded CFRP shear-strengthened RC beams[J]. Composites Part B: Engineering, 2019,163:36-51.
- [81] 周畅,王文炜,石劭阳. 预应力 CFRP 片材抗剪加固钢筋混凝土 T 梁试验研究[J]. 土木工程学报,2020, 53(9):68-76,84.
ZHOU Chang, WANG Wenwei, SHI Shaoyang. Experimental study on T-section RC beams shear-strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2020,53(9):68-76,84.
- [82] 刘君,周朝阳,宋朋. 持载混凝土梁端锚无黏结预应力 U 形碳纤维带受剪加固试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(12):96-104.
LIU Jun, ZHOU Chaoyang, SONG Peng. Experimental research on shear strengthening of concrete beams under sustained load with end-anchored and unbonded prestressed CFRP U-strips [J]. Journal of Building Structures, 2019,40(12):96-104.
- [83] 郭瑞,任宇,顾天宇. 纤维增强复合材料网格-工程水泥基复合材料加固钢筋混凝土梁的抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑,2019,49(9):145-151,17.
GUO Rui, REN Yu, GU Tianyu. Experimental research on shear behavior of RC beams reinforced with FRP grid-ecc [J]. Industrial Construction, 2019, 49(9):145-151,17.
- [84] 杜敏,陈思远,郭兢业,等. 纤维增强复合材料网格-环氧砂浆加固混凝土梁的抗剪性能试验[J]. 工业建筑,2021,51(8):206-213,119.
DU Min, CHEN Siyuan, GUO Jingye, et al. Experimental research on shear properties of RC beams reinforced with FRP grids and epoxy mortar[J]. Industrial Construction, 2021,51(8):206-213,119.
- [85] 陈文永,陈小兵,丁一,等. 纤维网格及 ECC 材料抗

- 剪加固性能研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 118-122.
- CHEN Wenyong, CHEN Xiaobing, DING Yi, et al. The shear behavior of concrete beam reinforced with ECC and FRP grid[J]. Industrial Construction, 2009, 39(12): 118-122.
- [86] 郭 瑞,蔡联亨,潘 穗,等. 聚合物水泥砂浆-碳纤维网格加固层与混凝土界面的黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 167-174.
- GUO Rui, CAI Lianheng, PAN Yi. Experimental study on bonding behavior of interface between concrete and CFRP grid-PCM[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 167-174.
- [87] DE SOUSA A M D, LANTSOGHTE O L, YANG Y G, et al. Extended CSDT model for shear capacity assessments of bridge deck slabs[J]. Engineering Structures, 2021, 234: 111897.
- [88] 董鹏程,夏立鹏,王绪纲,等. 截面贯入式FRP筋加固混凝土桥面板抗剪性能试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(10): 5-12.
- DONG Pengcheng, XIA Lipeng, WANG Xugang, et al. Experimental study on shear performance of embedded through section shear strengthening of concrete bridge slabs[J]. Composites Science and Engineering, 2020(10): 5-12.
- [89] 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, 2011, 15(3): 374-383.
- [90] 金 浏,夏 海,蒋轩昂,等. 基于三维细观分析方法的CFRP加固无腹筋混凝土梁剪切强度尺寸效应研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10): 93-102.
- JIN Liu, XIA Hai, JIANG Xuanang, et al. Study on size effect on shear strength of CFRP-strengthened concrete beams without web reinforcement based on 3D meso-scale analysis method[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 93-102.
- [91] 马 莹,高 磊,张 峰. 钢筋混凝土T梁HB-FRP抗剪加固试验和数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 1073-1081.
- MA Ying, GAO Lei, ZHANG Feng. Experiment and numerical simulation of HB-FRP shear strengthening concrete T beam[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 1073-1081.
- [92] AHMED M, COLAJANNI P, PAGNOTTA S. Influence of cross-section shape and FRP reinforcement layout on shear capacity of strengthened RC beams [J]. Materials, 2022, 15(13): 4545.
- [93] GAO D Y, WANG T, ZHANG C H, et al. Prediction about effect of span-to-depth ratio on shear capacity for FRP bar reinforced concrete beams without web reinforcement [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022: 1-10.
- [94] 吴林铭,王 驰,李 源,等. FRP 抗剪加固钢筋混凝土梁计算公式修正[J]. 铁道建筑, 2021, 61(9): 5-11.
- WU Linming, WANG Chi, LI Yuan, et al. Correction of calculation formula for strengthened concrete girder reinforced with FRP [J]. Railway Engineering, 2021, 61(9): 5-11.
- [95] 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 Shuanhai, SONG Yifan. 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.
- [96] 王文炜,李 果. FRP 加固钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(2): 106-110.
- WANG Wenwei, LI Guo. Study on calculated method of shear capacity of RC beams strengthened with FRP [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(2): 106-110.
- [97] GUO S S, HE H F, LIU C, et al. Theoretical and experimental study on shearing capacity of concrete beams reinforced with carbon fiber truss[J]. Composite Structures, 2021, 258: 113382.
- [98] 吴智敏,郭 夏,魏 华. 纤维增强复合材料加固混凝土柱的研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(2): 24-35.
- WU Zhimin, GUO Xia, WEI Hua. Research advances in fiber reinforced polymer retrofitting concrete columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 24-35.
- [99] 董振华,杜修力,韩 强. FRP 加固钢筋混凝土墩柱抗震性能研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 55-64.
- DONG Zhenhua, DU Xiuli, HAN Qiang. Review of research on seismic performance of RC columns strengthened with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2): 55-64.
- [100] 田石柱,贾红星,林元铮. FRP 加固混凝土连续梁桥抗震混合试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(5): 92-98.

- TIAN Shizhu, JIA Hongxing, LIN Yuanzheng. Hybrid simulation of a continuous RC girder bridge retrofitted by FRP[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(5): 92-98.
- [101] 林元铮, 田石柱. FRP 加固 RC 连续梁桥抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 21-26, 38.
- LIN Yuanzheng, TIAN Shizhu. Tests for aseismic performances of a RC continuous girder bridge retrofitted by FRP jacket [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 21-26, 38.
- [102] ZENG J J, GUO Y C, LI L J, et al. Behavior and three-dimensional finite element modeling of circular concrete columns partially wrapped with FRP strips [J]. Polymers, 2018, 10(3): 253.
- [103] RONG C, SHI Q, ZHAO H C. Behaviour of FRP composite columns: review and analysis of the section forms[J]. Advances in Concrete Construction, 2020, 9(2): 125-137.
- [104] ZENG J J, GUO Y C, GAO W Y, et al. Stress-strain behavior of concrete in circular concrete columns partially wrapped with FRP strips[J]. Composite Structures, 2018, 200: 810-828.
- [105] ZHOU J K, LIN W K, GUO S X, et al. Behavior of FRP-confined FRP spiral reinforced concrete square columns (FCFRCs) under axial compression [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103452.
- [106] ZENG J J, GUO Y C, GAO W Y, et al. Behavior of partially and fully FRP-confined circularized square columns under axial compression [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 319-332.
- [107] SALEH E, TARAWNEH A, ALMASABHA G, et al. Slenderness limit of FRP-confined rectangular concrete columns[J]. Structures, 2022, 38: 435-447.
- [108] SAINI A, PRAKASH S S. Analytical study on the effectiveness of hybrid FRP strengthening on behaviour of slender reinforced concrete square columns [J]. Structures, 2021, 33: 4218-4242.
- [109] 周长东, 赵峰, 张艾荣, 等. 预应力 FRP 布加固混凝土桥墩的力学性能研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(4): 124-127, 132.
ZHOU Changdong, ZHAO Feng, ZHANG Airong, et al. The mechanical behavior of concrete pier strengthened with lateral pre-stressed FRP sheets [J]. Industrial Construction, 2009, 39(4): 124-127, 132.
- [110] ZHOU C D, SIHA A, QIU Y K, et al. Experimental investigation of axial compressive behavior of large-scale circular concrete columns confined by prestressed CFRP strips[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(8): 1-17.
- [111] 卢春玲, 刘传超, 吴有胜, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土圆柱预应力损失试验研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(9): 41-48, 70.
- LU Chunling, LIU Chuanchao, WU Yousheng, et al. Experimental study on prestress loss of concrete circular columns strengthened with prestress CFRP sheets [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(9): 41-48, 70.
- [112] WANG Q A, LU C L, ZHU W X, et al. Axial compressive capacity of RC square columns strengthened by prestressed CFRP with RPC pads[J]. Composite Structures, 2020, 242: 112153.
- [113] 朱银珠. 体外预应力法加固桥墩[J]. 桥梁建设, 2004, 34(2): 66-68.
- ZHU Yinzhu. Strengthening of bridge piers with external prestressing method[J]. Bridge Construction, 2004, 34(2): 66-68.
- [114] YANG Z, LI J J. Double shear test on bonding mechanical properties of sprayed FRP and concrete substrate[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162: 388-396.
- [115] 谷倩, 董格, GETAHUNE Bitewlgn Mekonnen, 等. 喷射 FRP 加固震损钢筋混凝土柱抗震性能试验[J]. 复合材料学报, 2016, 33(5): 1009-1019.
GU Qian, DONG Ge, MEKONNEN G B, et al. Test of seismic performance of earthquake damaged reinforced concrete columns strengthened with sprayed FRP [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(5): 1009-1019.
- [116] 江佳斐, 隋凯. 纤维网格增强超高韧性水泥复合材料加固混凝土圆柱受压性能试验[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1957-1967.
JIANG Jiafei, SUI Kai. Experimental study of compression performance of concrete cylinder strengthened by textile reinforced engineering cement composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1957-1967.
- [117] SELMY Y M, EL-SALAKAWY E F. Numerical investigation on the seismic behaviour of GFRP-reinforced concrete rectangular columns[J]. Engineering Structures, 2022, 262: 114355.
- [118] YUAN X F, XIA S H, LAM L, et al. Analysis and behaviour of FRP-confined short concrete columns subjected to eccentric loading [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2008, 9(1): 38-49.
- [119] HADI M N S. Comparative study of eccentrically

- loaded FRP wrapped columns[J]. Composite Structures, 2006, 74(2): 127-135.
- [120] 魏 洋, 吴 刚, 吴智深, 等. FRP 加固钢筋混凝土矩形柱的破坏模式及其判别方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增1): 423-428.
- WEI Yang, WU Gang, WU Zhishen, et al. Prediction methods of failure modes for FRP-reinforced RC rectangular columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 423-428.
- [121] 刘 柯, 董振华. 钢筋混凝土矩形空心墩柱的 FRP 约束效应研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(4): 12-20.
- LIU Ke, DONG Zhenhua. Study on the FRP confining effect on reinforced concrete bridge piers with rectangular hollow section[J]. Fiber Reinforced Plastics/ Composites, 2016(4): 12-20.
- [122] TENG J G, HUANG Y L, LAM L, et al. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2): 201-210.
- [123] 白玉磊, 梅世杰, 张玉峰, 等. 基于刚度的大应变 FRP 约束混凝土模型及其在桥梁抗震加固中的应用[J]. 中国公路学报, 2022, 35(2): 115-123.
- BAI Yulei, MEI Shijie, ZHANG Yufeng, et al. Stiffness-based design-oriented model for large-rupture-strain FRP-confined concrete and its application in seismic analysis of bridge retrofitting[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 115-123.