

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.219



# 预应力纤维增强复合材料(FRP)桥梁结构加固应用 2020 年度研究进展

叶华文<sup>1</sup>, 唐诗晴<sup>1</sup>, 段智超<sup>1</sup>, 刘吉林<sup>1</sup>, 杨军川<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 四川资潼高速公路有限公司, 成都 641300)

**摘要:**纤维增强复合材料(FRP)由于其材料耐腐、质轻高强等优越性能在新建桥梁和旧桥加固等工程领域中应用广泛、发展迅猛,已成为桥梁领域的研究热点。为促进 FRP 在桥梁加固中的应用与发展,满足工程运维多样化需求,对老旧桥梁加固特点、FRP 材料性能及其加固桥梁方法等方面的相关研究进行总结与评述,并从混凝土和钢结构桥梁加固两方面对近年来预应力 FRP 方法在桥梁加固实践中的研究和应用进行回顾。预应力 FRP 因其加固效果明显,施工速度快,已成为一种重要的桥梁加固方法并得以应用,未来还需在 FRP 锚固系统标准化、加固后桥梁行为可监测性、建立 FRP 加固桥梁结构的规范体系等方面开展研究工作。

**关键词:**纤维增强复合材料;桥梁加固;复合材料桥梁

**中图分类号:**U447 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0185-05

## State-of-the-art review of the application of fiber reinforced polymer in bridge structures reinforcement in 2020

YE Huawen<sup>1</sup>, TANG Shiqing<sup>1</sup>, DUAN Zhichao<sup>1</sup>, LIU Jilin<sup>1</sup>, YANG Junchuan<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;

2. Sichuan Zitong Expressway Company Limited, Chengdu 641300, P. R. China)

**Abstract:** Fiber-reinforced polymer (FRP) has been widely used in modern bridge engineering and old bridges reinforcement in recent years due to the excellent material properties that can adapt to the development needs of bridge structures towards light weight and durability. In order to promote the development of bridges structures reinforcement using composite materials as well as meet the diversified needs of engineering operation and maintenance, this article reviews the research on the reinforcement characteristics of old bridges, the performance of FRP and the methods of strengthening bridges. The research and application of FRP in bridges reinforcement in recent years is elaborated in detail from two aspects of concrete and steel bridge reinforcement. FRP has become an important bridge reinforcement method because of its obvious strengthening performance and great efficiency. In order to develop and expand its application scope, it is necessary to standardize FRP anchor, promote the monitorability of strengthened bridges and establish a specification system of FRP strengthened bridge structures.

**Keywords:** fiber-reinforced polymer; bridge strengthening; composite bridges

目前桥梁结构仍以混凝土、钢材和砌体材料为主,纤维增强复合材料(Fibre-reinforced plastic, FRP)被认为能够解决既有桥梁腐蚀,实现长寿命和高性能的第 4 种结构材料,因此复合材料结构在新建桥梁和旧桥加固等工程领域具有广阔的应用前景,呈现迅猛的发展态势。近几十年来,相关

研究人员已在复合材料桥梁结构的制造工艺、基本力学性能、体系创新、受力行为、长期性能等方面进行了大量的基础研究与产品研发工作,解决了一些 FRP 与传统材料不能长期合理协同工作的工程难题,形成了系列成果<sup>[1]</sup>,FRP 桥梁已成为桥梁领域的研究热点。由于公路和铁路桥梁结构的安

**收稿日期:**2021-06-18

**作者简介:**叶华文(1982-),男,博士,副教授,主要从事大跨钢桥疲劳及桥梁加固、高性能纤维材料工程应用研究,E-mail:hbha2000@163.com。

全性要求高, 活载作用效应突出及相关规范滞后等原因, FRP 主要应用于新建小跨人行桥, 在新建大跨桥梁工程应用实例不多, 如 2020 年德国斯图加特市一座跨高速公路的主跨 124 m 城市轨道交通拱桥全部采用 CFRP 吊杆<sup>[2]</sup> (如图 1 所示) 及一些具有耐腐、质轻、施工快捷、维护方便特点的 FRP 组合桥面板应用<sup>[1,3]</sup> (如图 2 所示)。由于目前已经有大量的工程实践和一些专门的结构设计规范与施工指南指导, FRP 作为一种加强和改善既有桥梁结构性能的优良材料, 在桥梁工程维修、加固中已得到了广泛的应用, 特别是在体外预应力技术基础上, 充分利用 FRP 高强度特点以提高加固效率发展而来的预应力 FRP 加固桥梁技术。

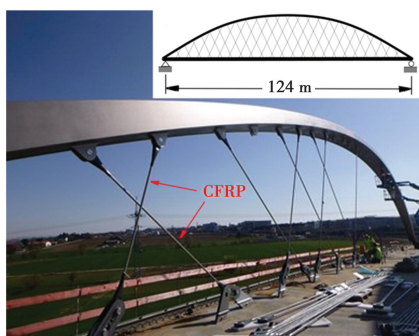


图 1 斯图加特拱桥的 CFRP 吊杆

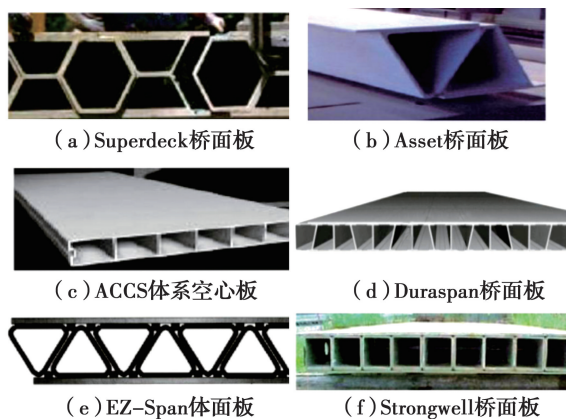


图 2 FRP 桥面板<sup>[1]</sup>

笔者基于近两年来的最新研究成果, 通过系统梳理, 主要从混凝土和钢结构桥梁加固两方面对近年来预应力 FRP 方法在桥梁加固实践中的研究和应用进行回顾, 以期促进 FRP 在桥梁加固中的应用与发展, 满足工程运维多样化需求。

## 1 预应力 FRP 加固桥梁方法

### 1.1 老旧桥梁加固的特点

桥梁结构在长期服役期间, 受到车辆荷载和环境等作用, 不可避免的产生结构损伤, 结构性能劣化, 需要加固维修。与新建桥梁工程不同, 老旧桥梁加固工程具有如图 3 所示的 3 个特点:

1) 阻止损伤恶化。老旧桥梁不可避免的存在结构损伤, 如材料性能降低、开裂、腐蚀、挠度过大、支座变形等。桥梁加固的目标须在既有桥梁结构体系基础上, 分析损伤机理及

其对结构性能的影响(诊断), 采取有针对性的方法和措施(治疗), 消除损伤或阻滞其恶化, 且不能引入新损伤或其他不利影响。

2) 交通需求急迫。出现问题的老旧桥梁往往位于重要的交通线上, 交通量及车辆荷载不断增加, 老旧桥梁承受的交通压力日益明显, 为满足急迫的交通需求, 桥梁结构的性能需要尽可能快的提升, 因此桥梁加固施工时间要避免长期影响干扰交通。

3) 新旧结构长期协同工作。桥梁加固后形成的新旧组合结构需要长期、有效的协同工作, 其合理的荷载分配机制既要考虑原结构的受力特性, 又要平衡新旧连接构造的传力效率及有效性。因此桥梁加固效果取决于加固结构能否合理、有效、长期的分担桥梁的作用。

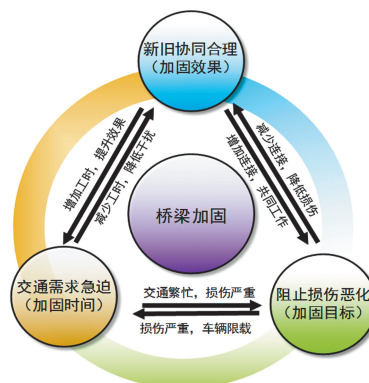


图 3 老旧桥梁加固工程的特点

综上所述, 以上三点往往相互矛盾、相互制约, 桥梁加固方法需要在有限空间和有限时间条件下最大限度提升桥梁结构性能。在传统方法基础上, 如体外预应力, 纤维增强复合材料的广泛应用为桥梁加固工程提供了新型材料和新思路, 组合形成的预应力 FRP 加固方法可最大限度满足上述桥梁加固的三个要求。

### 1.2 预应力 FRP 材料性能

桥梁现阶段工程常用的 FRP 主要是树脂基的纤维增强聚合物, 如玻璃纤维(GFRP)、玄武岩纤维(BFRP)、芳纶纤维(AFRP)及碳纤维(CFRP)等。与前几种相比, 碳纤维(CFRP)弹性模量和抗拉强度高, 耐久性能优异<sup>[4]</sup>, 是理想的预应力材料, CFRP 筋和片材广泛应用于桥梁加固工程中。在片材中, CFRP 板相比 CFRP 布能提供更大的加固量, 同时 CFRP 板的制造工艺能保证其质量、性能更稳定。因此, 预应力 CFRP 筋和 CFRP 板成为主流的桥梁加固用 FRP 材料。由于 CFRP 为线弹性材料, 其张拉后的持力水平一般不超过其抗拉强度的 50%, 实际加固工程中常用的永存应力水平约为 1 000 MPa。郭馨艳等<sup>[5]</sup>从砧抗拉强度、砧-CFRP 界面抗剪强度及 CFRP 抗拉强度等三方面出发, 也证明了预应力 CFRP 增强 RC 梁的容许张拉预应力值不超过 CFRP 抗拉强度的 50%。预应力 CFRP 的持力稳定性非常优异, Li 等<sup>[6]</sup>对加固混凝土梁的预应力 CFRP 板在 800 MPa(抗拉强度的 40%)持力水平下分别进行了干、湿环境下的长期预应力损失试验研究(170 d), 结果表明, 其长期预应力损失不超过 2%。张永兆等<sup>[7]</sup>的试验研究表明, 中国国产预应力 CFRP

板具有高的静态力学性能(抗拉强度高于 2 900 MPa)、优异的疲劳性能(600 万次以上疲劳试验后状态完好)、低的应力松弛率(500 kN、1 000 h 条件下的应力松弛率仅为 2.2%)、极小的热膨胀系数和良好的温度适应性,完全可满足桥梁预应力加固应用的技术要求。

### 1.3 预应力 FRP 锚固系统

预应力 FRP 锚固系统为 FRP 提供锚固力的关键构件,是预应力 FRP 加固技术的前提条件和瓶颈。由于 FRP 大多是单向拉伸材料,抗剪性能差,对其锚固容易使 FRP 产生横向或纵向剪切破坏。根据锚固力来源可将 FRP 锚具体系分为机械夹持式和粘结型两类。机械夹持式锚具一般应用于 FRP 片材,基于摩擦锚固原理主要利用预压力下的碳纤维板与夹片互相挤压形成的摩擦力作为锚固力<sup>[8]</sup>;粘结型锚具主要应用于 FRP 筋材,利用树脂与树脂或树脂与水泥浆体间的化学胶结力来传递剪力实现锚固<sup>[9-10]</sup>。因此,提供给预应力 FRP 构件的锚固力存在于 FRP 与锚具系统的接触界面处,只有深入理解这种界面力学行为,才能提高锚固效率。作为 FRP 锚固力来源的摩擦力或化学胶结力,取决于不同的材料匹配,由于产品专利保护或商业保密等原因,已有数据只是些 FRP 的抗拉或抗剪的基础性能参数,缺乏具有针对性的锚具设计参数,如 FRP-钢摩擦系数等。由于关键参数缺乏,采用有限元真实模拟锚固及滑移机理很困难,因此,Ye 等<sup>[11-12]</sup>针对存在接触压力条件下对 CFRP 板与粗糙夹片之间的摩擦行为及破坏模式开展了大量的试验研究,结果表明,接触压力、CFRP 板厚和板宽对摩擦行为均有影响,由此提出了可供参考的摩擦系数。总体而言,对 FRP-锚具界面力学行为的研究,特别是在持力状态下的界面性能仍然缺乏,导致实际工程中应用的锚固力水平偏低。

## 2 预应力 FRP 加固混凝土结构桥梁

FRP 因其耐腐和质轻高强的优势,最早被广泛应用于混凝土桥梁加固领域,解决老旧混凝土桥存在的抗弯、抗剪承载能力不足,挠度过大和开裂等病害。与非预应力 FRP 的被动加固方法相比,预应力 FRP 加固系统充分发挥了材料高强度优势,提高了 FRP 材料利用率(由低于抗拉极限强度的 20% 提高到 30%~50%)、有效性和经济性得到极大提高,加上已经有一些相关指导规范,近年来在一些工程上得到应用,如图 4 所示。

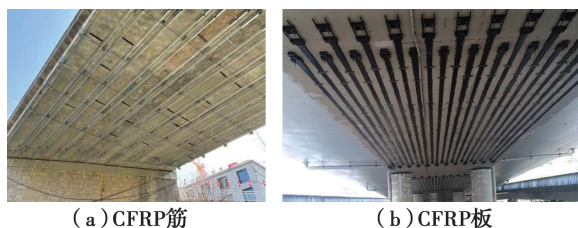


图 4 预应力 CFRP 加固混凝土梁工程应用

#### 1) 抗弯加固

数量众多的空心板梁和 T 梁因各种原因导致抗弯承载能力和刚度不足及开裂等病害,大量试验和工程应用经验<sup>[13]</sup>表明:预应力 FRP 引入体外预应力,可明显改善混凝土梁的

使用性能,有效减小挠度,明显抑制裂缝的开展,提高了其极限承载力。近年来,在逐渐趋于完善的短期性能研究基础上,预应力 FRP 加固混凝土梁的长期性能研究成为热点。王涛等<sup>[14]</sup>通过试验研究了长周期干湿交替环境对预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能影响,结果表明,长周期的干湿交替会对预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能造成显著损害。Wei 等<sup>[15]</sup>对预应力 CFRP 加固的 RC 梁在氯化物侵蚀环境中的受力性能,结果表明,氯化物侵蚀造成的混凝土开裂会导致 CFRP 锚固区失效和抗弯性能降低,如图 5 所示。赵少伟等<sup>[16]</sup>对有粘结预应力 CFRP 板加固混凝土梁进行了疲劳试验研究,表明预应力水平对疲劳性能的影响最大。综合这些研究可以看出,活载和环境因素,特别是腐蚀环境,对预应力 FRP 锚具、加固梁体承载能力的不利影响不可忽视。在预应力 FRP 技术基础上,可引入传感器,如光纤形成智能复合材料。周智等<sup>[17]</sup>采用自主研发的满足拉挤成型工艺的 OFBG-CFRP 智能预应力 CFRP 板对混凝土梁进行加固,并利用实时监测 CFRP 板应变,试验结果证明了 CFRP-OFBG 板在智能监测方面有良好的适用性,为今后结构加固与监测一体化提供了重要基础。

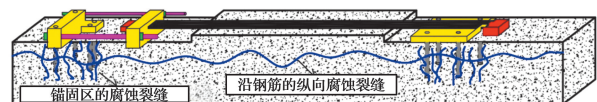


图 5 氯化物侵蚀环境预应力 CFRP 加固 RC 梁的破坏模式

#### 2) 抗剪加固

混凝土 T 梁因各种原因导致抗剪承载能力不足,腹板形成斜裂缝。与抗弯加固相比,抗剪加固无论技术手段还是理论基础都较为薄弱。周朝阳等<sup>[18]</sup>提出了一种预应力 U 形 CFRP 条带端锚与粘贴并用(简称混锚)的抗剪加固方法并进行了试验研究,结果表明,混锚预应力加固在抑制主斜裂缝开展、延缓箍筋屈服和提高箍筋塑性利用率等方面的表现均优于纯粘贴加固,能够防止 CFRP 端部剥离并大幅提高纤维强度利用率,显著提高梁的抗剪承载力。周畅等<sup>[19]</sup>开发了用于抗剪加固的 CFRP 片材预应力张拉和锚固系统,试验发现:预应力 CFRP 片材对混凝土梁斜裂缝的产生和发展有明显的抑制作用,加固后钢筋混凝土梁的抗剪承载力得到大幅提升。由于混凝土梁高有限,给预应力 FRP 的锚固、张拉及预应力损失控制带来很大挑战,且混凝土梁的剪切破坏机理及抗力评估一直是一个复杂的问题,因此需要从传力机理和施工工艺上研究预应力 FRP 的抗剪加固问题。

#### 3) 轴心抗压加固

当既有混凝土桥墩柱的受压承载力和延性不足时,可以在外围沿环向包裹高强度和高模量的 FRP 材料,加强对核心混凝土的约束,提高既有混凝土柱的承载力和延性,增强其耗能能力和抗震性能。在加固施工时预张 FRP 片材,对核心混凝土提供主动约束,从而促使 FRP 片材与既有混凝土墩柱更好地协同工作,将会显著提高 FRP 片材的利用率,大幅度增强加固效果。Zhou 等<sup>[20]</sup>对直径 800 mm 混凝土柱进行预应力 FRP 加固后的承载能力进行研究,提出了一个预应力 FRP 约束混凝土的应力-应变关系模型。预应力 FRP 片材

加固桥梁混凝土墩柱技术尚处于探索阶段,尚未有实际工程应用案例报道。

### 3 预应力 FRP 加固钢结构桥梁

钢结构桥梁由于存在各种缺陷和损伤,在车辆荷载、腐蚀环境等作用下,很可能导致开裂或结构失稳,影响桥梁结构安全服役。采用预应力 FRP 加固钢构件可有效降低应力水平、减小裂纹发展速率、提高稳定承载能力,近年来成为广大研究者关注的焦点。

#### 1) 疲劳加固

预应力 FRP 加固以改善钢桥的疲劳行为在于两方面: 1) 消减无损伤钢构件的拉应力水平。Ghafoori 等<sup>[21]</sup>采用预应力 CFRP 板对澳大利亚一座运营了 122 年的钢桥横梁进行了加固,如图 6 所示,并通过远程无线监测系统实时测量 CFRP 板的应力情况,监测结果表明,控制张拉预应力 980 MPa 情况下,钢梁应力水平消减 50%,CFRP 活载应力最大为 62 MPa。Hosseini 等<sup>[22]</sup>对粘接高弹模 CFRP 板及无粘结预应力 CFRP 板加固的受拉钢板的对比研究表明:无粘结预应力 CFRP 板加固效果远超过前者。2) 阻滞受损钢构件的裂纹扩展速率。Chen 等<sup>[23]</sup>对预应力 CFRP 加固受损方形钢管的裂纹扩展及疲劳寿命进行了试验研究,其裂纹阻滞效果很好。叶华文等<sup>[24]</sup>采用自主研发的预应力 CFRP 板锚固系统,研究了多预应力水平 CFRP 板加固受损工字钢梁的疲劳寿命,根据试验结果,提出了预应力水平对裂纹阻滞机制的效果图,如图 7 所示,预应力 CFRP 板产生的预压应力须超过加固构件的最小名义应力  $\sigma_{min}$ ,使得应力比为负,才能得到较好的加固效果,并在此基础上提出了裂纹扩展双参数驱动动力模型<sup>[25]</sup>。

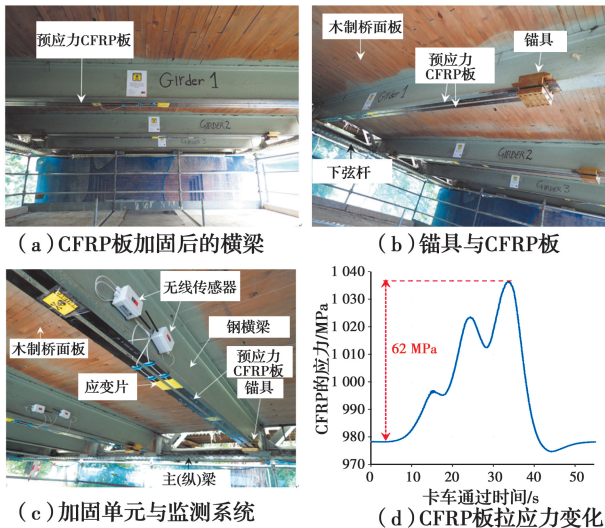


图 6 预应力 CFRP 板加固钢梁工程实例

#### 2) 稳定加固

直接粘贴 FRP 片材虽然可以提高钢柱受压承载力,但因粘贴的 FRP 刚度较小且易发生界面剥离破坏,承载能力提高的幅度有限。针对此问题,Feng 等<sup>[26]</sup>基于自平衡的概念提出了预应力 CFRP 加固钢压杆的方法,如图 8 所示,结果表明,该方法能显著提高受压钢构件轴压承载力。当然,预应

力 FRP 加固钢柱的研究还很少,其加固机理和工程应用等仍需继续研究。

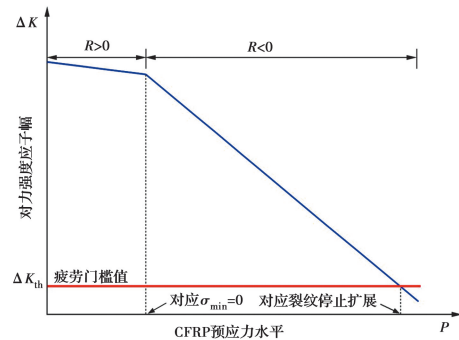


图 7 CFRP 预应力水平对裂纹阻滞效应分析

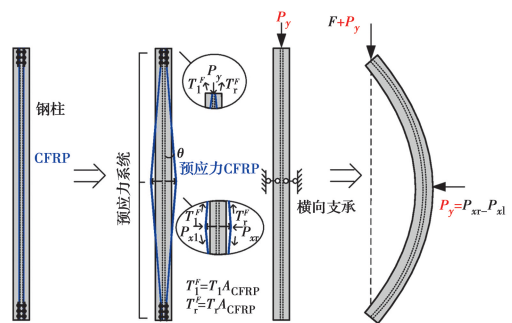


图 8 预应力 CFRP 加固钢柱的力学分析

### 4 热点与展望

预应力 FRP 因其加固效果明显,施工速度快,已经在桥梁加固领域成为一种重要的加固方法并得到一些工程应用。目前,预应力 FRP 加固的发展仍局限于作为钢索或钢板的补充或替代品,实现大规模应用仍有较大差距,面临一些亟待解决的问题,主要表现在锚固系统的长期可靠性和标准化,加固结构的长期性能和可检测性,缺乏完善的、针对性的行业规范标准。因此还应进行以下研究工作:

1) 长期可靠的标准化锚固系统的研发。目前桥梁工程常用的预应力 FRP 筋材和片材基本上都是标准化规格,但锚具产品和施工工艺差异很大,难以实现规模化生产以提高质量和降低造价,阻碍了其在桥梁加固中的推广应用。如果类似于预应力钢丝或钢绞线,针对典型的 FRP,研发几类标准化的高效、可靠的、尺寸小的锚固系统,可极大推动预应力 FRP 加固的发展。

2) 预应力 FRP 加固结构行为的可监测性。桥梁结构加固后其性能的演化,特别是 FRP 预应力变化和损伤状态,需要加以实时监测,以确保加固结构的服役安全,目前针对加固后桥梁的状态监测还处于探索阶段。

3) 预应力 FRP 加固结构的专门规范体系。目前已发布的复合材料加固规范基本上针对粘贴非预应力 FRP 或是体外预应力加固方法,关于预应力 FRP 加固的内容散布在这些规范中。按既有规范进行预应力 FRP 设计和施工、应用的 FRP 预应力水平很难有明显提高,影响 FRP 高强性能利用,因此,发展趋势是逐步改变传统加固理念(如无粘结加固),基于全寿命周期建立专门的预应力 FRP 加固结构的规范体

系,方便指导预应力 FRP 加固的不同条件和情况。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] EMPA U, WINISTRFER A U, HASPEL L. World's first large bridge fully relying on carbon fiber reinforced polymer hangers [C]// SAMPE Europe Conference 2020, The Future Composite Footprint. 2020.
- [3] ZOU X X, LIN H W, FENG P, et al. A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications [J]. Composite Structures, 2021, 262: 113336.
- [4] 董志强,吴刚. FRP 筋增强混凝土结构耐久性能研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19, 29.
- [5] 郭馨艳,黄培彦,郑小红. 预应力 CFRP 容许张拉预应力值的研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 96-100.
- [6] LI X D, DENG J, WANG Y, et al. RC beams strengthened by prestressed CFRP plate subjected to sustained loading and continuous wetting condition: Time-dependent prestress loss [J]. Construction and Building Materials, 2021, 275: 122187.
- [7] 张永兆,姜文英,全延峰,等. 预应力碳纤维板性能试验研究[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(6): 106-110.
- [8] 黄侨,万世成,关键,等. 装配式预应力 CFRP 板锚具有限元分析与施工技术[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 98-102.
- [9] 谢桂华,唐永生,李十泉,等. CFRP 筋粘结式锚具疲劳性能试验[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(7): 64-68, 48.
- [10] 方志,方川,蒋正文,等. 高温后 CFRP 筋及其粘结式锚固系统的力学性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 4051-4061.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 丁静姝,钮鹏,王晓初,等. 预应力 CFRP 板加固混凝土桥梁的研究进程[J]. 混凝土, 2020(9): 133-138.
- [14] 王涛,洪雷. 长周期干湿交替下预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 170-176.
- [15] WEI M W, XIE J H, LI J L, et al. Effect of the chloride environmental exposure on the flexural performance of strengthened RC beams with self-anchored prestressed CFRP plates [J]. Engineering Structures, 2021, 231: 111718.
- [16] 赵少伟,张晓彬,郭娇,等. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁疲劳试验研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(7): 57-61.
- [17] 周智,王珍珍,任鹏,等. 预应力 OFBG-CFRP 智能板加固 RC 梁试验研究及荷载效应分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(Sup1): 268-276.
- [18] 周朝阳,刘君,吴中会. 混锚预应力 U 形碳纤维条带抗剪加固混凝土梁试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 1-10.
- [19] 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.
- [20] 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): 04019070.
- [21] GHAFOORI E, HOSSEINI A, AL-MAHAIDI R, et al. Prestressed CFRP-strengthening and long-term wireless monitoring of an old roadway metallic bridge [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 585-605.
- [22] HOSSEINI A, GHAFOORI E, MOTAVALLI M, et al. Development of prestressed unbonded and bonded CFRP strengthening solutions for tensile metallic members [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 550-561.
- [23] CHEN T, GU X L, QI M, et al. Experimental study on fatigue behavior of cracked rectangular hollow-section steel beams repaired with prestressed CFRP plates [J]. Journal of Composites for Construction, 2018, 22(5): 04018034.
- [24] 叶华文,李新舜,帅淳,等. 无粘结预应力 CFRP 板加固受损钢梁疲劳试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(1): 129-136.
- [25] 叶华文,唐诗晴,刘德军,等. 预应力 CFRP 加固钢结构的裂纹扩展双参数驱动力模型[J/OL]. 中国公路学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20210104.1040.004.html>.
- [26] FENG P, HU L L. Steel columns strengthened/reinforced by prestressed CFRP strips: Concepts and behaviors under axial compressive loads [J]. Composite Structures, 2019, 217: 150-164.