

# CFRP板 - 张弦梁结构加固技术简述

汤凯菱, 孙权伟, 谭祥军

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年6月14日; 录用日期: 2023年7月5日; 发布日期: 2023年7月18日

## 摘要

传统CFRP (碳纤维增强复合材料)加固技术是利用锚具将CFRP片材锚固于被加固结构两端,并在CFRP表面与待加固构件连接处涂抹结构胶,然后直接张拉,以这种方式对结构进行加固虽然可起到一定的效果,但长期持荷下CFRP材料易脱落。基于此,结合张弦梁受力特点和力学原理,将CFRP片材与张弦梁结构相结合,形成一种体外曲线加固方法,相对于传统的体表粘贴预应力CFRP片材加固,该方法的CFRP片材离被加固结构的形心更远,导致预应力产生的偏心距更大,能进一步发挥CFRP片材高强性能。

## 关键词

CFRP片材, 张弦梁结构, 预应力, 加固

# CFRP-String Beam Structural Reinforcement Techniques in Brief

Kailing Tang, Quanwei Sun, Xiangjun Tan

School of Architecture and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jun. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 5<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 18<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The traditional CFRP (Carbon Fiber Reinforced Composite) reinforcement technology is to use anchors to anchor the CFRP sheets at the ends of the structure to be reinforced and apply structural adhesive to the joints between the CFRP surface and the members to be reinforced, and then directly tension them. This way of structural reinforcement, although can play a certain reinforcing effect, in the long-term loading CFRP material is easy to fall off. Based on this, combined with the force characteristics and mechanical principle of the tensile string beam, the CFRP sheet is combined with the tensile string beam structure to form an *in vitro* curve reinforcement method, which is farther away from the center of the reinforced structure than the traditional body surface

pasted prestressed CFRP sheet, resulting in a larger eccentric moment generated by prestress, which can further exert the high strength performance of CFRP sheet.

## Keywords

CFRP, Beam String Structure, Prestressing Force, Reinforce

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近几十年来, 由于经济迅猛腾飞, 我国的交通建设事业和基建事业得到了快速发展, 提高人们出行便捷度, 大幅促进了经济发展。但是随着使用年限的增加和在长期荷载作用下等多方面因素, 某些构件结构性能已不满足设计使用要求, 因此对桥梁结构老化或长期受损等原因使承载力不足是桥梁领域需要解决的问题。

自 1949 年我国成立以来, 桥梁建设总量已有 80 余万座, 各类大跨度, 新类型桥梁结构层出不穷, 技术也日益推陈出新, 桥梁结构发生老化致使设计承载偏低达不到安全使用标准, 引起结构破坏, 造成各类安全事故的发生[1]。尤其是在新世纪以前建造的桥梁其设计承载力相比于现在新建桥梁的设计承载力明显偏低, 且在不同的自然环境和人为影响因素的双重作用下, 现役桥梁结构承载能力严重下降, 从而使得桥梁的交通运输作用大打折扣。为了更好的对桥梁结构进行加固维修, 需对桥梁结构性能降低的主要因素进行概括总结, 其原因主要来自以下几方面:

1) 施工技术水平差异: 在进行桥梁施工时, 由于管理水平和工人施工水平和施工效率会有所差异, 导致桥梁在建设过程中存在一些安全隐患, 对结构的耐久性有一定的影响。

2) 桥梁超载运营: 在一些交通线生命线中的桥梁, 车流量大, 行驶车辆拥堵、密度大, 某些车辆超载等因素会导致桥梁结构在使用过程中长时间处在超载运营阶段, 损害桥梁结构。

3) 突发灾害: 地震、洪水、台风、爆炸等这些因素会影响桥梁结构的耐久性。

4) 自然环境: 桥梁修建结构一般都是外露, 长期处于沿海地带和盐碱地带的桥梁建筑易受盐类介质的侵蚀影响, 处于雾霾酸雨环境下的建筑易受大气中酸根离子的侵蚀影响。在高原地区桥梁会受到水的渗透、干湿交替、冻融循环的影响。这些因素也会使桥梁结构受损。

5) 结构维护: 在桥梁修建完成的运营过程中, 不注重桥梁维护与保养, 不论桥梁工材料有多大, 技术含量有多大, 均会面临着随使用年限的增大, 其结构的使用寿命相应缩短的问题, 而在到达一定年限后未及时对其维修加固, 会进一步降低桥梁的实际使用年限。

以上因素是桥梁结构发生变形破坏的主要原因, 主要表现是结构表面出现混凝土剥落、开裂和结构内部钢筋外露、锈蚀等现象, 从而导致结构的稳定性能下降, 强度、刚度相应降低, 桥梁结构开裂增大, 结构的承载能力减弱等问题, 严重的甚至发生断裂、崩塌等现象, 造成安全事故, 损失不可估量。因此, 为了避免类似的安全事故发生, 自新世纪以来, 我国越来越重视桥梁的维修加固, 而且可以预见未来随着越来越多的桥梁达到使用年限或者使用过程中遭受损伤, 人们将会对桥梁维修加固越来越重视。

## 2. CFRP 加固技术简述

加固主要是指采用先进的科学技术措施或手段对结构中承载力达不到设计要求的地方进行施工,

使其能满足使用要求,达到设计的性能要求。但需要注意的是,在对薄弱环节的构件进行加固前,一定要对原有的结构构件进行检测,并做出有效可靠的评估标准,最后再从中选取科学合理的技术加固方案。而传统的加固方法或多或少有其缺点,比如某些加固结构是属于二次受力,在加固时要求构件与其共同变形受力,在面对结构自身承载力不足时,这就要求加固构件自身重量不能过大,避免出现过大自重对原结构产生负担。碳纤维复合材料因其具有质量轻、高强度、耐腐蚀、工程施工便捷等优点逐渐引起人们的关注和认可,被用于实际工程实践当中。专家利用碳纤维复合材料做了大量的试验研究,为碳纤维材料加固技术的应用提供了基础。

## 2.1. 国内预应力 CFRP 加固性能研究

我国有关利用 CFRP 材料加固的研究晚于国外,在 1950 年,我国工程技术人员尝试使用玻璃纤维代替钢筋,并在 1958 年开始对复材进行研究[2]。这些研究大致经历了四个阶段,从 1970 年~1980 年的设想与尝试建设大跨度桥梁使用 FRP 片材,到 1980 年~2000 年的初步应用与发展[3],将 CFRP 片材用于加固技术,到 2000 年~2015 年研究不断深入使加固技术成熟并推动了新技术发展,再到 2015 年至今进行的技术更新与形式创新[4]。

市场上有关 CFRP 材料的主流产品有三种:碳纤维布、CFRP 片材、CFRP 棒材,其中关于 CFRP 片材的研究相对较多,而将 CFRP 片材用于桥梁结构加固的方法有两种,区别是一种施加预应力,另一种没有施加预应力。非预应力 CFRP 加固技术主要是通过在被加固构件上涂抹粘结剂,然后直接把 CFRP 粘贴在被加固构件上,待粘结剂凝固后加固构件与 CFRP 形成一个整体共同承受外加荷载,从而提高原构件的承载力。然而非预应力 CFRP 加固技术属于被动加固,对原结构有应力滞后现象,同时非预应力 CFRP 加固技术的加固效果取决于 CFRP 材料与被加固构件之间的粘结效果[5],这种加固方式未能充分发挥 CFRP 片材的高强性能。

而预应力 CFRP 加固技术可以弥补前者的不足之处,文献[6] [7] [8]提出了对 CFRP 片材施加预应力的方法。先通过布置在梁跨中或在梁跨内对称布置的千斤顶使梁产生与受力状态相反的挠曲变形,再将纤维复合材料用环氧树脂粘贴到梁的受拉面,等胶固化后,移走千斤顶,梁的挠曲变形恢复时,这样对布产生拉力就对梁施加了一定的预应力。CFRP 板的预应力先张法类似于预应力钢筋混凝土构件的先张法,先使用结构胶粘结试验梁与 CFRP 板,再使用辅助张拉设备对 CFRP 板进行张拉,养护完成后切断多余 CFRP 板,即实现了对 CFRP 板施加了预应力。

CFRP 材料的预应力也有后张法[9]-[14],其特点在于通过锚固座将 CFRP 片材固定在被加固构件上,通过张拉施加一定的预应力,并涂抹粘结剂粘贴于被加固构件进行加固。这种方法除了具有非预应力 CFRP 加固技术的优点外,它还改善了结构构件的应力分布,同时由于两端锚具的存在,在受到外加荷载时,被加固构件将部分荷载通过锚具传递给 CFRP 片材使之受力,延缓了 CFRP 的剥离现象的发生,充分的发挥 CFRP 片材的高强性能。但从中可以发现,锚具的夹持方式对 CFRP 材料强度影响较大,锚具夹持能力较弱会导致 CFRP 材料滑移甚至断丝,不能充分发挥 CFRP 材料的优异性能。

在对 CFRP 材料加固效果的研究中[15] [16],对 CFRP 板加固钢筋混凝土梁,内嵌方式的预应力碳纤维片材的锚固系统,对 CFRP 片材进行疲劳试验并研究静力荷载下温度对 CFRP 片材材料性能的影响进行了研究。CFRP 板加固 RC 梁,与普通 RC 梁相比,其梁的极限荷载可提高 10%~16%,并且预应力的施加可以有效减缓梁的变形和裂纹的萌生。同时发现了 CFRP 板的初始预应力越大,加固效果越显著。但是唐元红团队[17]提到了在高预应力下 CFRP 板难以很好锚固,其导致预应力损失较大。张永兆[18]对 CFRP 片材进行了疲劳试验并研究静力荷载下温度对 CFRP 片材材料性能的影响,在静力荷载 500 kN,持续加载 1000 h 下,CFRP 片材的松弛率小于 2%,其抗疲劳性能优于钢索。[19]进行了氯离子腐蚀环境

下预应力 CFRP 板加固损伤钢筋混凝土受弯构件进行了研究, 钢筋锈蚀率 5% 变大到 10%, 试验梁的屈服荷载和极限荷载明显下降。而预应力 CFRP 板加固可以有效提高试验梁的极限荷载和屈服荷载, CFRP 板抗腐蚀性能优于钢筋。从这些文献研究中可发现, CFRP 材料在加固 RC 梁时能大大提高梁的承载能力, 其抗疲劳性能, 耐腐蚀性优于钢材。但是 CFRP 材料的锚固和夹持是一个难题。

## 2.2. 国外预应力 CFRP 加固性能研究

国外的 CFRP 材料研究始于上世纪 50 年代, 开始是美国应用于航天航空工程[20], 然后逐步运用到建筑结构中。20 世纪 80 年代, 瑞士联邦实验室的 Meier 团队做了大量试验, 研究 CFRP 材料对梁体加固的结果分析, 后将研究成果应用于 Ebach 桥, 把加固所需的钢材换成 CFRP 材料, 然后将其粘贴在梁底, 最后的结果表明加固效果良好, 被认为是桥梁加固工程的一个里程碑。从此以后, CFRP 材料加固维修技术在欧美、日本等国逐渐发展起来。

综合文献[21][22]的内容, 主要分为研究 CFRP 材料加固受损钢梁和 CFRP 加固钢-混凝土组合梁的研究, 分别从数值分析和静载试验两方面分析了 CFRP 材料对梁在抗弯承载能力和裂缝延展的影响, 受损钢梁在加固后极限承载力可以提高约 10%; 对于碳纤维板, 每增厚 5 mm 或每增宽 10 mm, 极限承载力可以提高约 3%。对后续开展 CFRP 材料的研究有重大意义。同时 Dong-Suk Yang [23]比较预应力 CFRP 板加固的有粘结试件和无粘结试件静载试验结构, 发现两种情况下破坏模式不同, 但提高结构承载力方面区别不大; 其次 Kotynia [24]对预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土板开展了静力加载和疲劳性能的试验研究。结果表明: CFRP 板的应变会随着荷载循环次数的增大而增大。Hosseini [25]开发了一种扁平预应力无粘结加固系统(FPUR 系统), 应用在了一座公路桥上。对 CFRP 板施加预应力, 改善了加固结构的应力分布、承载力和刚度。从这些文献可以看出, 国外对 CFRP 材料研究也集中在加固钢梁或混凝土梁方面, 其加固效果明显优于传统加固方法; 其预应力施加方法多为后张法, 表明预应力 CFRP 后张法是今后研究的一个方向。

## 3. CFRP 板 - 张弦梁结构加固简述

张弦梁结构是日本大学 M. Saitoh 教授提出的, 在抗弯构件下端增加撑杆连接下弦变形构件, 通过撑杆传递抗弯构件自重来达到自平衡的体系, 并研究了该结构形式的受力特性和设计方式[26][27]。基于以上工作, 将该结构运用到加固领域, 将张弦梁下弦结构传统的钢绞线替换为 CFRP 板, 钢材的质量密度为  $7.85 \text{ g/mm}^3$ , CFRP 板的质量密度为  $1.8 \text{ g/mm}^3$ , 密度之比为 0.23, 对于特殊条件下的桥梁加固, 如某些山区桥梁(桥下空间较大, 且不考虑通航通车净空等)有很好的工程应用价值。

根据吴章勇的曲线张拉 CFRP 片材预应力损失的试验表明[28], CFRP 片材的在预应力张拉过程中, 预应力达到 100 KN 时, 夹持锚具与被加固梁的夹角从  $2^\circ$  增加到  $8^\circ$ , 此时预应力损失从 1.18% 上升至 3.29%; 当保持张拉角度为  $9^\circ$  时, 将 CFRP 片材的预应力从 100 KN 增加到 140 KN 时, 预应力损失由 4.1% 上升至 4.8%。由此可见, 预应力和锚具与被加固梁夹角的变化会引起预应力的损失, 但此部分损失量不大, 可通过超张拉进行弥补。谢赞文在此基础上进行了不同摩擦介质和不同转向块个数对 CFRP 片材预应力损失的试验研究[29], 其结果表明: 转向块的个数不会引起 CFRP 片材的预应力损失; 但摩擦介质不同时, 预应力损失量均不相同, 说明摩擦介质的选择对 CFRP 片材张拉有一定影响。

基于以上研究, 提出 CFRP-张弦梁加固体系, 其受力特点是通过下弦的 CFRP 片材进行提前张拉, 产生的张拉预应力通过中间连接的撑杆传递给上部构件, 最后使上部构件产生一定的反拱值, 提高构件的承载力, 降低上部构件在外荷载作用下的变形程度, 改善跨中截面的应力分布。同时沿着构件的跨度方向合理布置撑杆的数量, 可以使得被加固构件受力均匀, 从而使得被加固构件的强度得到充分发挥, 这也是提出体外曲线 CFRP 片材加固技术的价值所在。总之体外曲线 CFRP 片材加固技术充分发挥刚性

构件的抗弯性能与 CFRP 片材的抗拉性能，形成一个协同受力的整体。对于该体系已有实验证明了通过 CFRP 片材加固试验构件，在撑杆(跨中位置处的转向支撑)高度不同的情况下施加相同的预应力，表明：撑杆越高，试验构件因预应力而产生的反拱值越大，同等预应力产生的竖向分力也越大，相应地对被加固梁的竖向荷载平衡(或抵消)就越多，加固效果就越好。撑杆高度越大，加固效果越明显。其原因是撑杆越高，CFRP 片材与被加固梁的形心距离越大，在相同应变增量下，CFRP 片材的偏心弯矩越大，加固效果越好。且在合理范围内增加撑杆数量能使被加固构件在外荷载作用下受力更加均匀。

### 体外曲线 CFRP 片材加固技术特点

加固体系的受力特点是通过对于下弦的 CFRP 片材进行提前张拉，产生的张拉预应力通过中间连接的撑杆传递给上部构件，最后使上部构件产生一定的反拱值，提高构件的承载力，降低上部构件在外荷载作用下的变形程度，改善截面的应力分布状况。总之体外曲线 CFRP 片材加固技术充分发挥刚性构件的抗弯性能与 CFRP 片材的抗拉性能，形成一个协同受力的整体，该结构具有如下特点[30] [31] [32]：

#### 1) 构件承载能力强

通过提前张拉下弦 CFRP 片材施加预应力，再通过撑杆将预应力传递给被加固构件，可以改善被加固构件的内力分布，使其均匀受力。例如，当被加固构件为简支梁时，张拉下弦 CFRP 片材锚固安装于梁底并在其跨中布置一个竖向撑杆，如图 1(a)所示。若不加固简支梁，然后对梁施加均布荷载，其最大弯矩为  $1/8 ql^2$ ，简支梁弯矩如图 1(b)所示；若对简支梁下部采用张拉 CFRP 片材提供预应力，一部分的力通过中间的撑杆传递给梁从而产生一定大小的反拱度，简支梁截面产生负弯矩，如图 1(c)所示。若在通过 CFRP 片材给简支梁产生的负弯矩达到最大值  $1/8 ql^2$  的情况下，在对简支梁施加均布荷载，此时结构整体的最大弯矩为  $1/32 ql^2$ ，大大提高简支梁的抗弯承载力，如图 1(d)所示。

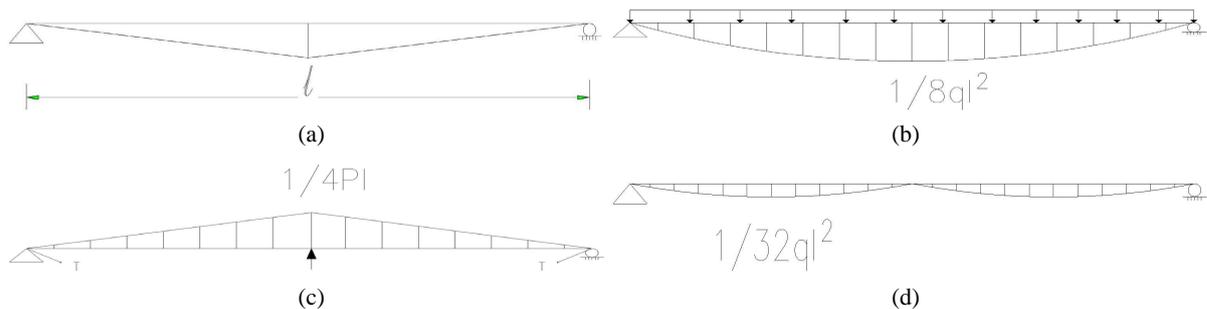


Figure 1. Diagram of internal force variation of beam

图 1. 梁内力变化图

#### 2) 在外荷载作用下被加固构件产生的变形小

体外曲线 CFRP 片材加固结构中被加固构件与下弦 CFRP 片材通过中间的竖向撑杆连接共同形成一个整体，可以协同受力，相比于单一构件提升其强度、刚度的性能。

#### 3) 稳定性更好

对上部被加固构件、竖向撑杆和下部 CFRP 片材的相对位置进行适当调整，使梁各个截面受力均匀，充分发挥结构强度。

## 4. 结语与未来展望

预应力碳纤维板加固技术凭借其轻质高强、耐腐蚀性强、施工工艺简便、施工周期短等特点克服了

传统加固方法中的工程量大、对施工质量要求较高,以及容易腐蚀等特点[33]。预应力碳纤维板加固技术在桥梁维修加固中的发展前景非常大,随着其在桥梁加固中的应用,利用 CFRP 片材进行加固其施工工艺简单、耗时短且加固施工时不需要封闭桥梁,保障交通运行,也不会降低 CFRP 片材的加固效果,大量的应用也推动了对预应力碳纤维板加固过程中对各参数取值的研究,只有在加固过程中参数的精确取值才能使预应力碳纤维板加固更具有规范性及广泛性。将预应力碳纤维板与张弦梁结构相结合,随着其材料的优化、锚固系统的改善,该结构体系应用前景广泛。

## 参考文献

- [1] Zhou, X.H. and Zhang, X.G. (2019) Thoughts on the Development of Bridge Technology in China. *Engineering*, **5**, 1120-1130. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.001>
- [2] 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]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [3] 岳清瑞. 我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J]. *工业建筑*, 2000, 30(10): 23-26.
- [4] 林强, 王玖, 党万腾, 李宇飞, 熊雅晴. 超薄碳纤维预浸料制备复合材料力学性能研究[J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(3): 236-241+277.
- [5] Wang, H.-T. and Wu, G. (2018) Bond-Slip Models for CFRP Plates Externally Bonded to Steel Substrates. *Composite Structures*, **184**, 1204-1214. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.033>
- [6] Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R. (1991) RC Beams Strengthened with GFRP Plates: Experimental Study. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, **117**, 3417-3433. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:11\(3417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417))
- [7] 林启辉, 王龙辉. 反拱法粘贴碳纤维加固混凝土梁试验研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(6): 86-89.
- [8] Stocklin, M., et al. (2001) Strengthening of Concrete Structures with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips. *Conference FRPRCS-5: Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures*, Volume 1, 291-296.
- [9] 卓静, 杨宏. 双层预应力碳纤维板加固大比例 T 型梁试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(S1): 799-802+878.
- [10] 温斌, 赵树红. Sika 预应力 CFRP 板体系在结构加固中的应用[C]//第七届全国建筑物鉴定与加固改造学术会议. 第七届全国建筑物鉴定与加固改造学术会议论文集. 重庆: 全国建筑物鉴定与加固标准技术委员会, 重庆市建设委员会, 2004: 980-985.
- [11] 庞忠华, 陆绍辉. OVM 预应力碳纤维板锚具及其静载试验研究[J]. *预应力技术*, 2015(4): 31-32, 38.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 邓朗妮, 燕柳斌, 陈华, 等. 预应力 CFRP 板夹片式锚具的研制与试验研究[J]. *建筑技术*, 2009, 40(11): 1043-1045.
- [15] 王兴国, 周朝阳. 预张碳板加固已承受荷载的 RC 梁弯曲试验[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(1): 83-87.
- [16] 陈华, 谢斌, 王鹏凯. 预应力 CFRP 板加固 RC 梁变形性能试验[J]. *广西科技大学学报*, 2018, 29(4): 21-27.
- [17] 唐红元, 潘毅, 李力, 万里, 杨虹. 预应力 CFRP 加固混凝土梁的预应力体系研究现状[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(S2): 112-116.
- [18] 张永兆, 姜文英, 等. 预应力 CFRP 片材性能试验研究[J]. *材料开发与应用*, 2018(6): 106-110.
- [19] Hou, W., Wang, F. and Wang, L. (2021) Test and Numerical Analysis on Damaged Steel Beam Strengthened with Prestressed CFRP Sheet. *Advances in Civil Engineering*, **2021**, Article ID: 6711877. <https://doi.org/10.1155/2021/6711877>
- [20] Campbell, T.L., Shrive, N.G., Soudki, K.A., et al. (2000) Design and Evaluation of a Wedge-Type Anchor for FRP Tendons. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **27**, 985-992. <https://doi.org/10.1139/100-048>
- [21] Wu, B., Zhou, Y., Yin, X., et al. (2022) The Anti-Arch Inhibition Effect of Multispan Continuous Girder Bridge Strengthened with Prestressed CFRP Plates. *Structures*, **35**, 845-855. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.055>
- [22] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2003) Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets. *Journal of Structural Engineering*, **129**, 30-40. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:1\(30\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:1(30))

- 
- [23] Yang, D.S., Park, S.K. and Neale, K.W. (2009) Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composites. *Composite Structures*, **88**, 497-508. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.05.016>
- [24] Kotynia, R., Walendziak, R., Stoecklin, I., *et al.* (2011) RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Composites for Construction*, **15**, 168-180. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000081)
- [25] Hosseini, A., Ghafoori, E., Motavalli, M., *et al.* (2018) Flat Prestressed Unbonded Retrofit System for Strengthening of Existing Metallic I-Girders. *Composites Part B: Engineering*, **155**, 156-172. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.026>
- [26] 王红云, 白正仙, 刘宁. 张弦结构应用及研究综述[C]//庆贺刘锡良教授执教六十周年暨第十一届全国现代结构工程学术研讨会. 庆贺刘锡良教授执教六十周年暨第十一届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 天津大学, 2011: 228-234.
- [27] Saitoh, M. (2019) 40 Years After-Development and Possibility of Beam String Structures. *Proceedings of IASS Annual Symposia*, **1**, 1-8.
- [28] 吴章勇. CFRP 片材预应力损失试验研究与对比[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [29] 谢赞文. 预应力碳纤维板曲线张拉工艺及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [30] 郭昊. 单榀张弦梁结构受力性能的参数分析及抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008.
- [31] 游小华, 吴美琴. 张弦梁的结构特点和研究[J]. *江西科学*, 2005, 23(6): 760-763.
- [32] 董石麟, 涂源. 索穹顶结构体系创新研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(10): 85-92.
- [33] 王欣诚, 谢忠, 许焰斌, 等. FRP 复合材料力学性能及其在工程中的应用[J]. *工程技术研究*, 2017(9): 138-139.