

预应力CFRP钢筒混凝土管锚具性能试验研究

李煜晓^{1*}, 雷亚娟¹, 郭旭^{1,2}, 董志彦^{1,3}, 茹宁¹, 刘桂荣^{1#}

¹华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

²中国建筑第八工程局有限公司发展建设分公司, 山东 青岛

³新野县人民政府办公室, 河南 南阳

收稿日期: 2024年11月17日; 录用日期: 2024年12月13日; 发布日期: 2024年12月19日

摘要

针对预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, 简称PCCP)在使用过程中预应力钢丝易氢脆及锈蚀现象, 提出使用CFRP布替代预应力钢丝的思路, 并设计新型预应力CFRP锚具, 解决CFRP布在PCCP上的锚固问题。文章首先设计并制作了固定端及张拉端锚具, 固定端锚具采用缠绕式复合锚具, 以先固定后张拉的方式应用在PCCP承口位置; 张拉端锚具采用加嵌条带齿平板锚具, 以先张拉后固定的方式应用在PCCP插口位置。然后针对锚具进行拉拔试验, 最后对该锚具系统开展放张后的预应力损失试验。结果表明: 固定端和张拉端锚具盖板螺栓扭矩分别为3 N·m和5 N·m时, CFRP布均为拉断破坏, 且拉应力分别可以达到其极限拉应力的90.7%和88.3%; 在本文试验条件下, 较高应力水平下的CFRP布预应力损失仅为5.84%, 满足工程要求。

关键词

预应力钢筒混凝土管, CFRP布, 锚具, 拉拔试验, 预应力损失

Experimental Research on Performance of the Anchor for Prestressed CFRP Concrete Cylinder Pipes

Yuxiao Li^{1*}, Yajuan Lei¹, Xu Guo^{1,2}, Zhiyan Dong^{1,3}, Ning Ru¹, Guirong Liu^{1#}

¹School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Development and Construction Branch of China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Qingdao Shandong

³Xinye County People's Government Office, Nanyang Henan

*第一作者。

#通讯作者。

Received: Nov. 17th, 2024; accepted: Dec. 13th, 2024; published: Dec. 19th, 2024

Abstract

In order to avoid wire breakage due to hydrogen embrittlement or corrosion in prestressed concrete cylinder pipes (PCCP), this paper proposes a method of wrapping CFRP sheets instead of prestressed steel wires around the structures. Moreover, innovative anchors that were used for prestressed CFRP sheets were designed to transfer the forces from CFRP sheets to the body of PCCPs. Firstly, the post-tensioning anchor, which had a shaft to wrap CFRP sheets around it through a groove to grip and prestress the CFRP, and the pre-tensioning anchor, which consisted of two steel plates with embedded strip teeth, were proposed and manufactured. The post-tensioning and pre-tensioning anchors were applied at the socket and spigot end of PCCPs, respectively. Secondly, these two anchors were tensioned experimentally to investigate the tensile performance. Finally, the pre-stress loss of CFRP sheets anchored with the above anchors was tested. The results show that the failure mode was the sudden tensile failure of the CFRP sheets outside of the anchors when a torque of 3 N·m and 5 N·m was applied on each bolt in the post-tensioning and pre-tensioning anchor, respectively. Moreover, the tensile stress of CFRP sheets at failure reached 90.7% and 88.3% of the ultimate stress of CFRP. Under the conditions of this experiment, the prestress loss of CFRP sheets accounted only for 5.84% of the initial loading stress at higher levels, meeting engineering requirements.

Keywords

Prestressed Concrete Cylinder Pipe (PCCP), CFRP Sheets, Anchorage, Pull-Out Test, Prestress Loss

Copyright © 2024 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

预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, 简称 PCCP)是一种复合管材，主要由钢管、混凝土、钢丝、砂浆保护层及防腐涂料组成。

PCCP 质量受多种因素影响，主要包括混凝土强度、管壁外观质量、管壁裂缝[1]、保护层砂浆性能[2][3]、预应力钢丝性能。其中预应力钢丝性能对 PCCP 力学性能影响尤为显著。一方面，PCCP 中采用的钢丝为高强钢丝，由于钢盘条反复拉拔使钢丝脆性进一步发展，所以随着 PCCP 服役时间增加，预应力钢丝易出现氢脆性断裂；另一方面，由于辊射水泥砂浆厚度较薄，且高强钢丝与砂浆的粘结性能较差，因此导致水泥砂浆易出现空鼓甚至裂缝，从而使水泥砂浆失去保护作用[4]。孙岳阳等人[5]将冷轧带肋钢筋替换钢丝并加大砂浆保护层厚度，取得了较好的效果，但仍未完全解决锈蚀问题，且出现了自重大、材料用量变多、运输困难等新的问题。胡冰磊[6]用玄武岩筋替换钢丝进行缠绕，发现玄武岩筋在高张拉应力下易发生脆性断裂，导致无法缠丝。

碳纤维布(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 简称 CFRP)具有质量轻、强度高、耐腐蚀、耐高温[7]等优点，已广泛应用于工程加固领域[8]。使用 CFRP 布替换钢丝，不仅可以避免锈蚀和氢脆的发生，还可以减轻 PCCP 管体重量、提高经济效益，且已有研究表明 CFRP 与混凝土具有较好的黏结性能，能够保证 CFRP 应用于 PCCP 中[9]。但是，采用 CFRP 布代替传统 PCCP 钢丝后，现有的预应力钢丝锚

固夹具不再适用，需根据 CFRP 的材料特性及几何形貌特征，重新设计新型锚具，以保证 CFRP 布与锚具的高效锚固。

Mohee 等人[10]设计了一种用于 CFRP 板的新型预应力锚具，该锚固系统将楔形夹片顶入预留好的槽道内，利用预紧的螺栓夹板来产生预紧力，该锚具可有效夹持 CFRP 板，锚固性能优越：锚固后的 CFRP 板应力可达其极限拉应力，且不会过早发生破坏。汪志昊等人[11]在平板锚具的基础上增加了圆齿纹，研发了预应力 CFRP 板张拉锚固系统。通过锚固试验测试了 CFRP 板应变和预应力损失。结果表明：锚固后的 CFRP 板拉伸应变可达极限应变的 50%，且 4 小时内预应力 CFRP 板的应变损失仅为 2.45%，锚固性能优越。

综上研究表明，以上预应力 CFRP 锚具虽然锚固效率高，但仅适用于表面为平面的构件。由于 PCCP 表面为弧形，因而需要设计适用于 PCCP 的新型预应力 CFRP 锚具。

因此，本文结合已有预应力 CFRP 板锚具特点，设计并制作预应力 CFRP-PCCP 锚具。该锚具外形为弧形，可与 PCCP 管外表面契合。锚具分为固定端与张拉端，固定端锚具尺寸小且锚固效率高，张拉端锚具不同于常见的先锚固后张拉锚具，而是先张拉 CFRP 布，张拉结束后进行锚固。本文通过拉拔试验与预应力损失试验验证该锚具锚固效能，为实际工程应用提供试验和技术支撑。

2. 试验概况

2.1. 试件设计与制作

2.1.1. 固定端锚具设计

针对预应力 CFRP-PCCP 生产工艺特点，要求 CFRP 布先锚固再张拉，锚具的锚固效率高且尺寸小。固定端锚具应用于 PCCP 承口端，采用缠绕 - 机械夹持复合锚具，其构造包括夹板、缠绕轴和固定螺栓。夹板包括底板和顶板，底板和顶板相互靠近的一侧均开设有弧形槽，弧形槽内设置缠绕 CFRP 布的缠绕轴，轴上另设置供 CFRP 布穿过的长槽，两根螺栓同时穿过缠绕轴将其固定于两夹板间锚固。固定端锚具如图 1 所示。

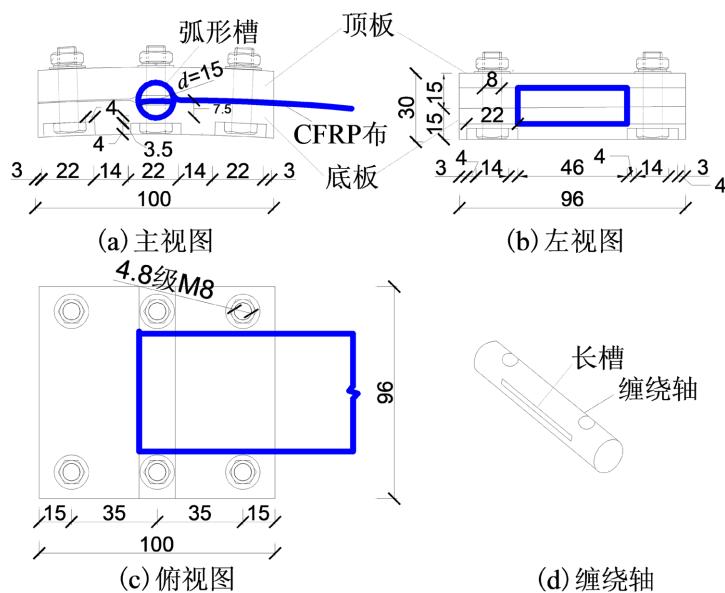


Figure 1. The post-tensioning anchor
图 1. 固定端锚具

2.1.2. 张拉端锚具设计

针对预应力 CFRP-PCCP 生产工艺特点, 张拉端锚具应用于 PCCP 插口端。与常见锚具的先锚固后张拉不同, 张拉端锚具需要满足先张拉 CFRP, 张拉结束随即锚固的要求。由于结束张拉锚固 CFRP 布时还存在张拉应力, 锚具无法与布体提前黏结。因此, 采用螺栓和夹板简便组合方式来达到对 CFRP 布快速、可靠锚固, 张拉端锚具有足够的长度并设置凹槽及嵌条。张拉端锚具与 CFRP 布接触面有一定的弧度, 本文忽略弧度的影响, 近似按平板锚具计算方法进行设计, 如图 2 所示。

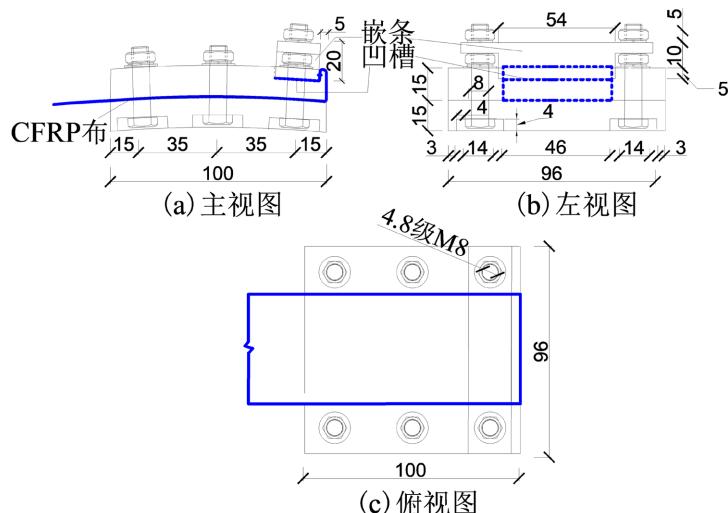


Figure 2. The pre-tensioning anchor

图 2. 张拉端锚具

2.2. 材料性能

CFRP 布采用高强度 II 级单向碳纤维布, 名义厚度为 0.167 mm。实测抗拉强度为 2506 MPa, 弹性模量为 2.45×10^5 MPa, 伸长率为 1.76%。CFRP 布粘结剂采用 TLS-500 系列碳纤维加固专用胶, 其抗拉强度为 43.7 MPa, 受拉弹性模量为 2612 MPa, 伸长率为 1.54%。锚具选用带齿纹 Q235 钢板, 厚度为 15 mm。齿深、齿间距分别为 0.5 mm 和 1 mm, 屈服强度为 235 MPa, 抗拉强度为 375 MPa, 弹性模量为 200 GPa。

2.3. 加载装置及测试方案

2.3.1. 锚具拉拔试验

锚具拉拔试验通过自行设计一套钢框架并利用 MTS 万能试验机完成, 试验装置如图 3 所示。其中, 钢框架由两块钢板、两根 $\phi 18$ 及一根 $\phi 20$ 高强螺栓组成, 钢板厚度为 25 mm, 长 200 mm, 宽 50 mm, 底板切割预留长槽, 以便万能试验机夹紧穿过该长槽的 CFRP 布, 进行锚具拉拔试验。

试验前, 采用扭矩扳手对固定端盖板螺栓施加 3 N·m 的扭矩, 对张拉端盖板螺栓分别施加 3 N·m 和 5 N·m 扭矩, 对张拉端嵌条螺栓施加 7 N·m 扭矩。试验中匀速施加载荷, 直至破坏。加载制度采用位移控制, 加载速度为 0.02 mm/s。

2.3.2. 预应力损失试验

为研究该套锚具在张拉 CFRP 布时的预应力损失, 以实验室长 2.9 m 工字钢梁作为张拉台座进行预应力损失测试试验。CFRP 布张拉长度为 1.9 m, 试验装置如图 4 所示, 张拉设备采用 10 t 油压千斤顶, 荷载传感器采用 20 t 高精度拉压传感器。



Figure 3. Loading device
图 3. 加载装置

张拉前, 先在钢梁上钻孔将反力架提前与基座通过螺栓连接, 然后将千斤顶、传感器等试验设备安装就位, 最后将传感器与应变片连接到数据采集系统, 开始张拉。

试验设计 CFRP 最大张拉预应力为其抗拉强度的 0.4~0.5 倍, 即 1000~1250 MPa。试验过程中采用分级加载, 每级荷载持荷 3 min, 当加载至 CFRP 设计最大张拉预应力时, 固定反力架的张拉丝杆, 同时千斤顶卸载。调整采样频率为 1 min 一次, 观察预应力损失相对稳定时, 试验结束。

为了量测 CFRP 布在张拉过程中的应变, 在 CFRP 布张拉端锚具端部、固定端锚具端部以及跨中位置沿轴线各对称布置 2 个应变片, 共 6 个应变片, 如图 4 所示。

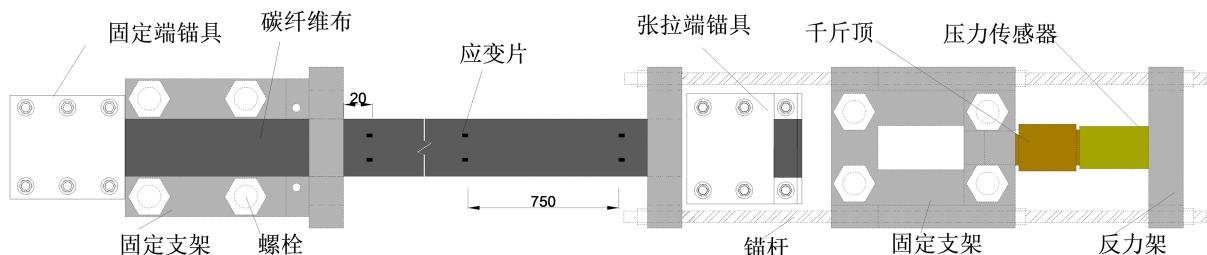


Figure 4. Loading device and arrangement of strain gauge
图 4. 加载装置及应变片布置

3. 试验结果及分析

3.1. 锚具性能

对于固定端锚具, 缓慢施加荷载至 18.98 kN 时, 伴随“砰”的一声, CFRP 布被拉断, 破坏时 CFRP 布张拉应力为抗拉强度的 90.7%。卸载后拆卸锚具后发现: 锚具内部的缠绕轴、上下夹板都与 CFRP 布接触良好, 位于锚具端部的 CFRP 布被拉断, 破坏形态如图 5(a)所示。

对于施加 3 N·m 扭矩的张拉端锚具, 缓慢加载至 12.91 kN 时, 荷载突然下降, CFRP 布滑脱, 如图 5(b)所示。卸载后, 拆开锚具后发现 CFRP 布未出现明显损伤滑脱, CFRP 布张拉应力为抗拉强度的 61.7%。而对于施加 5 N·m 扭矩的张拉端锚具, 缓慢加载至 18.48 kN 时, 伴随响亮的爆炸声, CFRP 布在中间部位被拉断, 如图 5(c)所示。破坏时, CFRP 布张拉应力为抗拉强度的 88.3%。

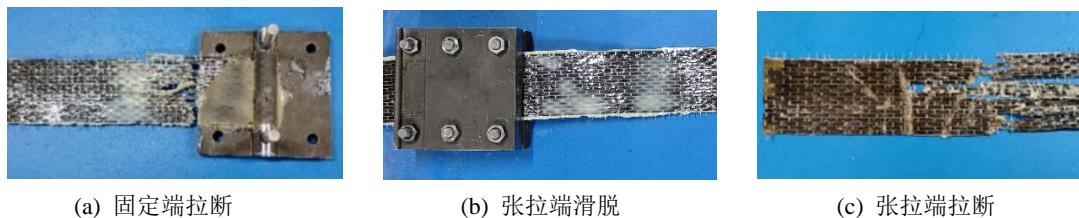


Figure 5. Failure mode of anchor
图 5. 锚具破坏情况

CFRP 锚具试件测试结果如表 1 所示。由表 1 可知：对于固定端锚具，CFRP 布破坏形式为拉断，而张拉端锚具随着盖板螺栓施加扭矩的增加，CFRP 布破坏形式由滑脱破坏过渡到拉断破坏。本文设计的锚具效率最小可达 CFRP 布极限抗拉强度的 61.7%，而一般进行预应力张拉的应力水平不大于 0.5，充分表明本文设计的锚具性能良好，满足 PCCP 的锚固需求。

Table 1. Summary of test results
表 1. 试验结果汇总

锚具类型	扭矩/N·m	CFRP 布的破坏方式	CFRP 布的应力/MPa	锚具效率/%
固定端锚具	3	拉断	2272	90.7
张拉端锚具	3	滑脱	1546	61.7
张拉端锚具	5	拉断	2212	88.3

注：锚具效率为 CFRP 破坏应力/极限应力。

3.2. 放张后的预应力损失

将 CFRP 布张拉至控制应力，千斤顶卸载后实测碳纤维板应变得到其应力与时间变化曲线，如图 6 所示。

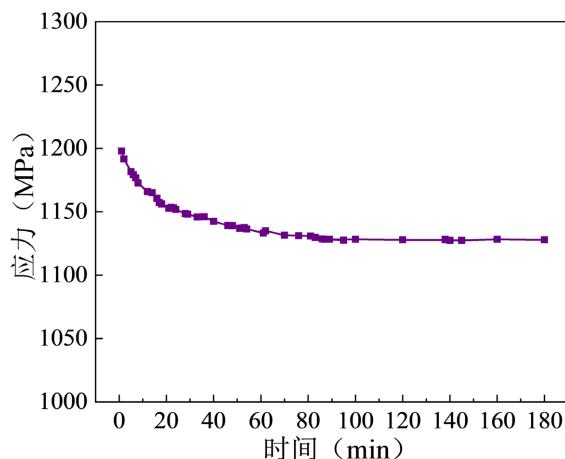


Figure 6. Stress of CFRP sheet varies with time
图 6. CFRP 布应力随时间变化

CFRP 布的预应力损失 σ_{ls} 主要包括：CFRP 材料在持荷过程中预应力损失 σ_{ll} ，CFRP 材料在张拉过程中与接触面的摩擦损失 σ_{lll} ，如式(1)所示：

$$\sigma_{ls} = \sigma_{II} + \sigma_{III} \quad (1)$$

在持荷过程中的预应力损失 σ_{II} 主要包括：锚具变形引起的预应力损失 σ_{II} 、CFRP 布滑移损失 σ_{I2} ，以及 CFRP 布自身材料特性有关的松弛损失 σ_{I3} 。由于本试验中 CFRP 布没有与基座直接接触，故材料在施加预应力过程中的损失即 σ_{III} 可以忽略不计。总预应力损失如式(2)所示：

$$\sigma_{ls} = \sigma_{II} + \sigma_{II} + \sigma_{I2} + \sigma_{I3} \quad (2)$$

由图 6 可知：CFRP 布在放张后的前 36 min 预应力损失较大，CFRP 布应力从 1198 MPa 降到了 1146 MPa，应力损失为 52 MPa，占初始应力的 4.32%。从第 36 min 到 100 min 后，CFRP 布应力变化很小，预应力损失为 18 MPa，占初始应力的 1.50%。从 100 min 到 180 min 后，CFRP 布应力保持不变，即不再发生预应力损失。在放张 180 min 内，CFRP 布应力损失共计 5.84%。依据文献[12]对预应力损失的研究分析可知：持荷 36 min 内的预应力损失为锚具变形 σ_{II} 及 CFRP 布滑移产生预应力损失 σ_{I2} ，而 36 min 后的预应力损失是由布松弛造成，即 σ_{I3} 。

4. 结论

本文针对预应力 CFRP-PCCP 的生产工艺特点，分别设计了固定端及张拉端锚具。主要结论如下：

- 1) 固定端锚具为满足先锚固后张拉的要求，采用缠绕 - 机械夹持复合锚具，将 CFRP 布缠绕并固定于两夹板间实现锚固。针对锚具性能研究发现：破坏时位于锚具端部的 CFRP 布被拉断，锚具效率约为 90.7%，满足工程要求。
- 2) 张拉端锚具为满足先张拉后锚固的要求，采用带齿平板并安装嵌条防止应力松弛锚具，保证在 CFRP 布张拉完成的同时锚固。随着固定端盖板螺栓施加扭矩从 3 N·m 增加到 5 N·m，CFRP 布破坏形式从滑脱破坏过渡到拉断破坏，且锚具效率由 61.7% 增至 88.3%。
- 3) 通过设计、制作加载反力架和张拉台座对该锚具系统开展放张后预应力损失试验发现：放张预应力 100 min 时，CFRP 布预应力损失达最大值，在较高应力水平下预应力损失率仅为 5.84%，表明该套锚具性能较为可靠，满足工程要求。

基金项目

河南省高等学校重点科研项目：预应力 CFRP 钢筒混凝土管张拉锚固体系及可靠性研究(23A570007)；2024 年河南省高校国家级大学生创新创业训练项目(202410078041)。

参考文献

- [1] 尚鹏然, 刘桂荣, 王军, 等. 基于层次分析法的 PCCP 混凝土管芯生产质量控制[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 31-38.
- [2] 王浩, 杨亚彬, 王坤, 等. PCCP 保护层砂浆性能影响因素的试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 24-30.
- [3] 曲福来, 杨亚彬, 宋万万, 等. 机制砂混凝土应用于 PCCP 试验研究[J]. 华北水利水电大学学报, 2022, 43(5): 19-23.
- [4] Zhai, K., Guo, C., Fang, H., Li, B., Ma, B., Hu, Q., et al. (2021) Stress Distribution and Mechanical Response of PCCP with Broken Wires. *Engineering Structures*, **245**, Article 112858. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112858>
- [5] 孙岳阳, 胡少伟, 明攀, 等. BCCP 结构设计计算方法与设计准则[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 460-465.
- [6] 胡冰磊. PCCP 断丝数值分析及纤维筋新型管材可行性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [7] 曲福来, 许哲, 于涛, 等. 内嵌碳纤维增强复合材料板——混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 华北水利水电大学学报, 2020, 41(1): 65-69.
- [8] Liu, G., Wang, Y., Qu, F., Guo, X., Li, Y. and Cheng, S. (2023) Bonded Behavior of Hybrid-Bonded CFRP to Heat-

- Damaged Concrete Interface. *Buildings*, **13**, Article 2736. <https://doi.org/10.3390/buildings13112736>
- [9] Qu, F., Wei, H., Lu, H., Feng, D., Meng, Q. and Zhao, S. (2023) Experimental Study on Bond Behavior between CFRP and Concrete with a Convex-Circular Arc Interface. *Buildings*, **13**, Article 3077. <https://doi.org/10.3390/buildings13123077>
- [10] Mohee, F.M. and Al-Mayah, A. (2017) Development of an Innovative Prestressing CFRP Plate Anchor: Numerical Modelling and Parametric Study. *Composite Structures*, **177**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.039>
- [11] 汪志昊, 范宏宇, 刘召朋, 赵顺波. 预应力碳纤维板圆齿纹平板锚具锚固性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 279-283.
- [12] Mortazavi, A.A., Pilakoutas, K. and Son, K.S. (2003) RC Column Strengthening by Lateral Pre-Tensioning of FRP. *Construction and Building Materials*, **17**, 491-497. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(03\)00046-1](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(03)00046-1)