

纤维复合材料(FRP)在锚杆领域的应用研究进展

孙权伟¹, 汤凯菱¹, 王梦稷²

¹重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

²重庆交通大学土木工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年6月3日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

近年来, 纤维复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)由于其优异的力学性能, 逐渐在土木工程、矿山工程和岩土工程等领域中得到广泛应用。作为一种新型结构材料, 其具有重量轻、强度高、耐久性好等优点, 受到越来越多领域的关注和青睐。锚杆作为一种支护结构, 广泛应用于地质灾害防治、深基坑支护、隧道开挖等领域。对FRP锚杆在力学性能、监测与识别、设计与锚固性能、锚杆拉拔破坏全过程、磁致伸缩导波技术应用、土层锚杆界面力学行为、危岩崩塌稳定性分析与治理、工作面帮支护性能试验、纤维材料筋制备及其增强混凝土结构、岩土锚固等方面进行了全面总结和分析, 对FRP锚杆未来的研究方向提供了参考和展望。本文旨在对纤维复合材料在锚杆领域的应用研究进展进行综述。

关键词

纤维复合材料, FRP锚杆, 力学性能, 应用展望

Research Progress in the Application of Fiber Composite Materials (FRP) in the Field of Anchor Rods

Quanwei Sun¹, Kailing Tang², Mengji Wang²

¹School of Architecture and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: Jun. 3rd, 2023; accepted: Jun. 23rd, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

In recent years, fiber reinforced polymer (FRP) has gradually been widely used in fields such as civil engineering, mining engineering, and geotechnical engineering due to its excellent mechani-

cal properties. As a new type of structural material, it has the advantages of light weight, high strength, and good durability, and has attracted more and more attention and favor from various fields. Anchor rods, as a support structure, are widely used in fields such as geological disaster prevention and control, deep foundation pit support, and tunnel excavation. A comprehensive summary and analysis were conducted on the mechanical properties, monitoring and identification, design and anchoring performance, the entire process of anchor rod pull-out failure, the application of magnetostrictive guided wave technology, the interface mechanical behavior of soil anchor rods, the analysis and treatment of dangerous rock collapse stability, the testing of working face support performance, the preparation of fiber reinforced steel bars and their reinforced concrete structures, and geotechnical anchoring. This provides a reference and outlook for the future research direction of FRP anchor rods. This article aims to summarize the research progress in the application of fiber composite materials in the field of anchor bolts.

Keywords

Fiber Composite Materials, FRP Anchor Rods, Mechanical Properties, Application Prospects

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

随着城市化和基础设施建设的不断推进, 土木工程、矿山工程和岩土工程等领域对材料力学性能和工程效益提出了更高的要求[1]。在这些领域中, 纤维复合材料(FRP)因其强度可以达到 8000 MPa 以上, 而其密度仅为 $1.7\sim 1.9\text{ g/cm}^3$, 比钢材轻 50%~70%。碳纤维的弹性模量约为 230 GPa, 比钢材高 5~6 倍[2], 作为一种新型的锚固材料, FRP 锚杆在隧道、高边坡等工程中由于高强度、轻质、抗腐蚀、易加工等优点而得到广泛应用[3]。FRP 材料相比于传统的钢筋、钢绞线锚杆具有更轻的重量, 同时具有良好的强度和刚度, 耐腐蚀性好, 施工过程简便, 可以根据实际需要调节强度和刚度如图 1, 并且纤维种类多样, 如碳纤维、玻璃纤维等, 可以获得不同的力学性能[4]。国内外对 FRP 锚杆的研究已经取得了一系列的成果。

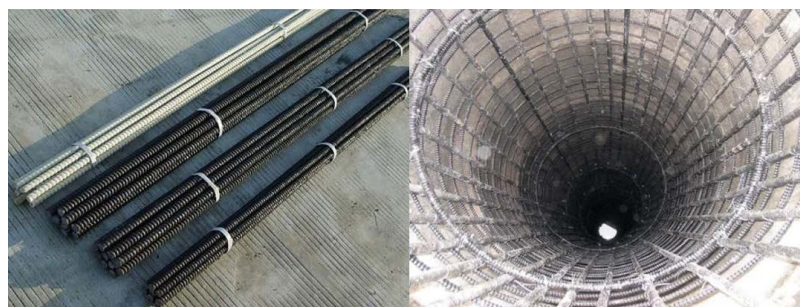


Figure 1. Schematic diagram of FRP reinforcement

图 1. FRP 筋示意图

2. FRP 锚杆国内外研究现状

2.1. FRP 锚杆国内研究现状

纤维增强聚合物(FRP)锚杆因其在公路、铁路、桥梁和隧道等结构加固中的优异性能而在土木工程中

得到广泛应用。在过去的十年里,许多研究人员对非金属 FRP 锚杆的安全性和可靠性进行了研究。

从数值模拟的角度,[5]基于建立的纤维增强塑料锚杆在岩土体中的粘结锚固方程和连续光滑粘结-滑移本构关系模式,提出了纤维增强塑料锚杆锚固性能分析的数值计算方法,并验证了其正确性。而张钢琴[6]介绍了一种新型复合锚杆——MFRP 锚杆,由金属材料、FRP 和钢纤维层构成,通过理论分析和模拟计算发现,MFRP 锚杆具有比普通 FRP 锚杆更好的延展性和协调性。这些通过对 FRP 锚杆锚固性能的影响,结果表明新型锚杆的性能较好,能够提供较为详细的理论支撑[7] [8] [9]。研究通过室内土工试验和数值模拟分析探讨了纤维类材料改良膨胀土的可行性和效果。研究发现聚乙烯纤维能有效提高膨胀土的膨胀性和膨胀力,同时减少了收缩性。数值模拟结果表明,纤维增强复合塑料能有效提高膨胀土边坡的安全系数并减少滑动位移。FRP 锚杆作为新型锚固材料具有优异的抗拉强度和长期性能,但其抗弯和抗剪性能有待改进。FRP 锚杆的研究现状和应用情况[10] [11] [12] [13],能够提供较为全面的研究背景,介绍了 FRP 锚杆的优越工程性能,从材料、力学性能和生产工艺等方面介绍了各类 FRP 锚杆的技术特点,分析了 FRP 锚杆在设计理论和工程应用中存在的问题,展望了其发展趋势和应用前景,并指出了需进一步研究的方向。此外,还提到了 FRP 锚杆适宜代替钢质锚杆应用在腐蚀性强、耐久性要求高的岩土锚固工程中,并介绍了锚具研究的进展以及 FRP 锚杆的发展方向。王洋[14]进行了 9 组 BFRP 锚杆和 2 组钢筋锚杆加固黄土边坡的现场拉拔试验,并分析了锚固体系在不同锚杆直径、锚固长度下的承载性能。通过现场试验,分析了锚固体系的破坏模式和相应的失效机理。

在智能监测方面,其中,白金超[15]在其研究中提出了结合 FRP 材料和光纤光栅传感器的 FBG-FRP 智能锚杆方案。通过理论分析和有限元模拟,研究了 FRP 锚杆的工作机理,并根据锚固系统的目的确定了监测内容和方法,构建了智能监测系统,以提高锚杆的耐久性和安全性;刘龙等人[16]则设计研制了一种 GFRP 锚杆结构预应力锁定装置,并对其在现场进行了试验,B-GFRP 锚杆的预应力损失控制在 5%~35% 之间,达到了精轧螺纹钢锚杆预应力损失的控制标准。而唐谢兴等人[17]则对锚杆-砂浆界面黏结行为进行了模拟分析,探讨了其粘接力。

同时,综合文献中的内容可以看出[18]-[24],主要分为材料性能研究和工程应用研究两个方面。其中,涉及到的锚杆材料包括纤维增强聚合物(FRP)、玻璃钢、玄武岩纤维等。研究内容包括锚杆的耐久性、工作面支护性能、安全可靠、智能化等方面,研究方法主要包括室内外试验和理论模拟。这些研究对于推动锚杆技术的发展和提高其在不同工程领域中的应用水平具有重要意义。首先罗金标等人[25]研究了新型玄武岩纤维复合材料(BFRP)锚杆的力学性能,研究三种类型 BFRP 锚杆的性能,采用平行-内锥形锚具时,绞索整体性好,锚固效率系数大于 97%。其次,李锦辉等人[26]通过研发了内嵌光纤的自感知 FRP 锚杆,并提出基于其的隧道围岩智能监测系统,可识别松动圈厚度,提高隧道结构安全,并取得了较好的实验结果。再次,刘浪[27]对不同形式的预应力 BFRP 锚杆进行了设计和锚固性能研究,得出了 BFRP 锚杆具有优秀的拉伸强度和拉伸模量,锚具锚固效率大于 90%,施加预应力后的剪切承载力和剪切刚度显著提高等结论。此外,王燕杰[28]通过三维轴对称解析方法研究了锚杆拉拔破坏的全过程,揭示了其力学行为和破坏机理。最后,董永[29]则探讨了磁致伸缩导波技术在纤维增强塑料锚杆中的应用,为提高锚杆的监测效果和安全性提供了新思路。这些文献的研究成果,有助于进一步推动 FRP 锚杆的设计应用和发展。

2.2. FRP 锚杆国外研究现状

针对 FRP 锚杆在土木工程中的应用,已经有大量的研究进行,主要涉及 FRP 锚杆的性能评估、FRP 锚杆的设计方法、FRP 锚杆的施工质量控制等方面。

首先,研究了玻璃纤维增强塑料(FRP)锚杆在矿山盾构隧道初始支护监测中的应用[30],在 2.5 公里

的隧道监测中,FRP 锚杆避免了风险并对内部变化做出了响应,为初期支护提供了新的技术支持。在 Diana 等人[31]研究了螺栓类型对玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)多螺栓双搭接连接的静态和疲劳性能的影响。研究表明,可以完全用 BFRP 螺栓替换不锈钢螺栓而不影响连接件的静态和疲劳性能。同时,混合钢 - FRP 螺栓具有韧性行为,可以显著延长复合材料连接件的疲劳寿命。Kai Yan 等人[32]介绍了一种创新的基于光纤光栅的 FRP 智能锚固系统,并进行了拉拔试验和理论分析,进一步提出了 FRP 筋与环氧树脂界面剪应力的脱粘损伤机理和失效模式,并发展了玻璃钢粘结锚理论以及基于光纤光栅的玻璃钢锚的安全监测和失效评估方法。Yasir 等人[33]使用 CFRP 锚索粘接到未开裂混凝土上的 FRP 锚具的拉伸行为,用于加强 RC 柱的抗弯性能。[34]讨论了[32]中智能 FBG FRP 锚具的安全性能监测,探讨了其在现场应用的可行性。在通过数值模拟[35] [36],研究了 FRP 尖刺锚具安装质量和混凝土修复对 FRP 加固 RC 柱地震行为的影响以及评估了用于外加加固的 FRP 锚具的性能。Zheng 等人[37]研究了纤维锚杆在嵌入实心砖中的性能,考虑五个参数。结果表明预湿折叠 FRP 片材制成的锚固件具有最佳性能,从拉拔试验中观察到四种失效模式,提出两种砖中三棱柱体破坏的拉拔强度模型。最后,是一篇关于不同参数对 FRP 锚具在与 EBR-FRP 加固系统结合时性能的影响的综述[38],并分析了各种参数对其性能的影响。在最近的一项研究中,Zhang 等人[39]研究提出一种新型 NSM FRP 锚,用于抗剪加固 RC 梁,通过全尺寸试验验证其有效性,结果表明所提出的锚杆可以减轻或防止 FRP 脱胶失效,显著提高加固梁的承载力和变形能力,锚杆配置对性能影响显著。总体来说,这些研究表明,FRP 锚具是一种有效的加固材料,能够提高建筑物和结构的抗震性能和安全性能。

3. 纤维复合材料在锚杆领域的应用

3.1. FRP 锚杆的分类

FRP 锚杆按材料组成和结构形式可以分为:碳纤维增强聚合物锚杆(CFRP)、玻璃纤维增强聚合物锚杆(GFRP)、碳纤维增强陶瓷锚杆(AFRP)、玄武岩纤维(BFRP)增强复合材料。表 1 列出了 FRP 筋材与钢筋的性能指标。

Table 1. Comparison of mechanical properties of various fiber reinforced bars [9] [40]

表 1. 各类纤维筋力学性能对比[9] [40]

类型	密度(g/cm ³)	弹性模量(GPa)	抗拉强度(MPa)	极限应变(%)	泊松比
CFRP 锚杆	1.25~1.90	120~280	1200~2500	0.5~1.7	0.3
GFRP 锚杆	1.25~2.1.5	35~65	400~1800	1.2~3.1	0.2
AFRP 锚杆	1.25~1.40	40~125	100~1800	1.9~4.4	0.38
BFRP 锚杆	1.90~2.10	50~65	600~1500	1.5~3.2	-
钢筋	7.85	210	490~700	>10.0	0.3
钢绞线	7.85	180~200	1400~1900	>4.0	0.3

3.2. FRP 锚杆的优势

FRP 锚杆相比传统金属锚杆具有多个优势。FRP 锚杆具有高强度、轻质化、耐腐蚀、环保、耐久性、良好的电磁性能和防爆性等特点,可以有效增强工程结构的承载能力,并且重量轻、易于运输、安装和加工。FRP 锚杆的聚合物基质具有优异的耐腐蚀性能[41],可以在恶劣环境下使用,并且生产过程无污染,材料可回收利用,符合环保要求。此外,FRP 锚杆具有良好的耐久性、抗老化性能和优良的电磁性能,可以应用于多种工程领域,例如需要防止电磁干扰的工程以及易爆、易燃等危险环境下的使用。

3.3. FRP 锚杆的应用

FRP 锚杆在地下支护、岩土工程、桥梁工程和海洋工程等领域中得到广泛应用[42] [43] [44] [45], 主要因为其具备以下优势: 首先, FRP 材料具有较高的强度和刚度, 可以有效地增强结构的承载能力; 其次, FRP 材料具有轻质化和耐腐蚀等特性, 可以提高工程的安全性和可靠性; 此外, FRP 材料还具有易于加工和施工等优势, 可以降低工程成本并提高施工效率。总的来说, FRP 锚杆在各个领域的应用都具有非常广泛的前景, 同时也需要不断地推进研究和发展, 以更好地适应不同的工程需求。

3.4. FRP 锚杆的制造工艺

FRP 锚杆的制造工艺主要包括预浸料法和纺织法[46] [47], 预浸料法将纤维材料和树脂混合制成成型材料, 具有高成型精度和适用范围广等优点, 但成本较高; 纺织法通过编织、缠绕等工艺将纤维材料制成织物, 再加入树脂固化成型, 具有生产效率高、成本较低等优点, 但成型精度和强度相对较低。

3.5. FRP 锚杆的应用现状

FRP 锚杆是一种新型结构材料, 在土建、煤矿、水利、隧道、桥梁和海洋等领域得到广泛应用。国内外都在逐渐提高对新材料的需求, 因此 FRP 锚杆的应用越来越广泛。FRP 锚杆具有优异的性能, 如高强度、轻质、耐腐蚀、耐久性好等, 因此在隧道支护、地铁车站、大坝加固、泄洪闸门固定[48]、桥梁加固、海底管道、海底隧道等方面得到了广泛应用。

虽然 FRP 锚杆应用已经取得了很大的进展, 但仍存在一些问题需要解决, 如设计规范、加工工艺、安装方法等需要进一步完善和优化。同时, FRP 锚杆的成本仍然较高, 需要进一步降低成本以提高其市场竞争力。另外, 长期性能和可靠性的验证和研究也需要进一步加强, 以确保其在工程实践中的可靠性和稳定性。

随着 FRP 锚杆技术的不断发展和应用推广, 相信在未来会有更多的领域和场景开始采用 FRP 锚杆, 以满足工程结构对高强度、轻质、耐腐蚀等性能要求的需求。同时, 进一步降低成本并加强长期性能和可靠性的验证研究, 将是未来 FRP 锚杆技术发展的关键。

4. 结论

在这些文献的基础上, 我们可以看到碳纤维边坡锚杆在地质灾害治理领域的应用越来越广泛。这些文献不仅从理论角度对碳纤维边坡锚杆的性能进行了研究, 还从实践角度对其在不同工程中的应用进行了探讨。同时, 这些文献也指出了碳纤维边坡锚杆技术在材料强度、安装施工和应用领域等方面的不足之处, 需要进一步加以完善和优化。

在未来的研究中, 可以探索新型的碳纤维材料, 如碳纳米管增强碳纤维等, 以提高其力学性能; 同时也可以研究更加便捷、高效的锚固技术, 如现场注浆锚固技术等, 以提高其施工效率和工程质量。此外, 还可以进一步扩展碳纤维边坡锚杆的应用领域, 如在高速公路、铁路、隧道等交通基础设施工程中的应用, 以及在海岸防护、水利工程等领域的应用, 从而进一步推动碳纤维边坡锚杆技术的发展和應用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 混凝土结构加固设计规范 GB50367-2013[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] 周初梅. 浅谈 FRP 复合材料在建筑中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 1997(4): 32-34.
- [4] 苏峰. 碳纤维-环氧树脂界面性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

- [5] 高丹盈, 张钢琴. 纤维增强塑料锚杆锚固性能的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3724-3729.
- [6] 张钢琴. 纤维聚合物锚杆的锚固机理及数值分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- [7] 张晓, 郑百林, 贺鹏飞. 新型复合 FRP 锚杆延展性及协调性数值分析[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(3): 22-25+30.
- [8] 胡斌, 王新刚, 连宝琴. 纤维类材料改善膨胀土工程性能的适用性探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 615-618.
- [9] 王洋, 冯君, 李珈瑶, 赖冰, 杨涛. FRP 锚杆在岩土锚固中的研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 776-784.
- [10] 赖冰. BFRP 土层锚杆界面力学行为研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [11] 李明, 张起森, 何唯平. FRP 锚杆的研究与应用综述[J]. 中外公路, 2005, 25(6): 141-143.
- [12] 刘弋, 薛金科, 匡亚川. FRP 锚杆研究现状及其分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(S1): 1015-1018+1078.
<https://doi.org/10.13204/j.gvz2010.s1.091>
- [13] 裴卿. 纤维增强塑料锚杆研究[J]. 公路与汽运, 2008(2): 109-112.
- [14] 王洋. BFRP 砂浆锚杆锚固机理现场试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [15] 白金超. 岩土锚固的 FBG-FRP 锚杆及其智能监测系统[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [16] 刘龙, 李国维, 贺冠军, 余亮, 刘学. GFRP 锚杆结构预应力锁定装置研制与现场试验[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 718-726.
- [17] 唐谢兴, 郭志广, 罗小勇. 纤维增强材料锚杆-砂浆界面黏结行为及模拟分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(1): 102-106+117. <https://doi.org/10.13204/j.gvz201701019>
- [18] 罗小勇, 唐谢兴, 匡亚川, 李凯雷. 腐蚀环境下 FRP 锚杆耐久性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1341-1347. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.2015.06.013>
- [19] 黄生文, 刘廷望, 邱贤辉, 李明. FRP 锚杆工程特性的室内外试验研究[J]. 工程勘察, 2008(4): 1-4+16.
- [20] 刘纪峰, 张会芝. 玻璃纤维和玄武岩纤维锚杆设计探讨[J]. 河南城建学院学报, 2012, 21(5): 5-8+50.
<https://doi.org/10.14140/j.cnki.hncjxb.2012.05.017>
- [21] 张旷怡. 基于高性能材料大型岩锚体系应用研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [22] 赵象卓, 张宏伟, CAO Chen, 李云鹏, 韩军, 马双文. 大直径玻璃钢锚杆工作面帮支护性能试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(2): 118-124. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.02.020>
- [23] 黄军. 非金属锚杆在金山店铁矿应用中的安全可靠分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- [24] 岳帅. 内嵌光纤复合纤维增强树脂智能锚杆[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [25] 罗金标, 彭哲琦, 汪昕, 严宗雪, 林敬辉, 刘浪. 新型玄武岩纤维复合材料(BFRP)锚杆力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(12): 79-86. <https://doi.org/10.19936/j.cnki.2096-8000.20221228.011>
- [26] 李锦辉, 张俊齐, 魏强, 贾大鹏, 郭东, 白石, 欧进萍. 基于自感知 FRP 锚杆的隧道围岩变形监测与松动圈识别[J/OL]. 西南交通大学学报: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220520.1839.010.html>, 2023-04-18
- [27] 刘浪. 预应力 BFRP 锚杆设计与锚固性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
<https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2021.003655>
- [28] 王燕杰. 锚杆拉拔破坏全过程的三维轴对称解析方法[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
<https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdlu.2020.003994>
- [29] 董永. 磁致伸缩导波技术在纤维增强塑料锚杆中的应用[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [30] Sensor Research; Study Data from Sun Yat Sen University Provide New Insights into Sensor Research (Application of Frp Bolts In Monitoring the Internal Force of the Rocks Surrounding a Mine-shield Tunnel). *Journal of Technology*, 2019.
- [31] Abdelkerim, D.S.E., Wang, X., Ibrahim, H.A. and Wu, Z. (2019) Static and Fatigue Behavior of Pultruded FRP Multi-Bolted Joints with Basalt FRP and Hybrid Steel-FRP Bolts. *Composite Structures*, **220**, 324-337.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.085>
- [32] Yan, K., Yang, J., Zhang, Y., Doh, J.-H. and Zhang, X. (2020) Safety Performance Monitoring of Smart FBG-Based FRP Anchors. *Safety Science*, **128**, Article ID: 104759. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104759>
- [33] Saeed, Y.M., Aules, W.A., Rad, F.N. and Raad, A.M. (2020) Tensile Behavior of FRP Anchors Made from CFRP Ropes Epoxy-Bonded to Uncracked Concrete for Flexural Strengthening of RC Columns. *Case Studies in Construction*

- Materials*, **13**, e00435. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00435>
- [34] Yan, K., Yang, J., Zhang, Y., *et al.* (2020) Safety Performance Monitoring of Smart FBG-Based FRP Anchors. *Safety Science*, **128**, 104759. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104759>
- [35] del Rey, C. and Ravi, K. (2021) Effect of FRP Spike Anchor Installation Quality and Concrete Repair on the Seismic Behavior of FRP-Strengthened RC Columns. *Journal of Composites for Construction*, **25**, e04020085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001095)
- [36] Adriana, C.F.I., Jaime, F.G., Paula, V.L., António, F. and Marco, P. (2021) Evaluation through a Finite Element Simulation of the Performance of FRP Anchors for Externally Bonded Reinforcements. *Composite Structures*, **267**, Article ID: 113919. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113919>
- [37] Zheng, X.-L., Tao, Y., Shi, Q.-X. and Chen, J.-F. (2021) Pullout Behaviour of FRP Anchors in Clay Bricks. *Construction and Building Materials*, **283**, Article ID: 122544. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122544>
- [38] Giovanni, M., Mehdi, K. and Davood, M. (2022) Effect of Different Parameters on the Performance of FRP Anchors in Combination with EBR-FRP Strengthening Systems: A Review. *Construction and Building Materials*, **354**, Article ID: 129181. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129181>
- [39] Zhang, S.S., Jędrzejko, M.J., Ke, Y., Yu, T. and Nie, X.F. (2023) Shear Strengthening of RC Beams with NSM FRP Strips: Concept and Behaviour of Novel FRP Anchors. *Composite Structures*, **312**, Article ID: 116790. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116790>
- [40] Abdelkarim, O.I., Ghenni, A., Anumolu, S., *et al.* (2015) Seismic Behavior of Hollow-Core FRP-Concrete-Steel Bridge Columns. *Proceedings of the 2015 Structures Congress*, Portland, 23-25 April 2015, 585-596. <https://doi.org/10.1061/9780784479117.051>
- [41] 罗小勇, 唐谢兴, 匡亚川, 等. 腐蚀环境下 FRP 锚杆耐久性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 7.
- [42] 张会芝, 刘纪峰, 崔秀琴, 等. 一种盾构始发或接受井井壁局部 FRP 筋支护方法[P]. 中国专利, 110107304A. 2019-08-09.
- [43] 徐晓莲, 苏培莉. 纤维增强塑料岩土工程锚杆加固机理及分析[J]. 塑料工业, 2017, 45(3): 127-130.
- [44] 宋春霞, 范钟倩, 马晔. FRP 筋混凝土受压构件承载性能有限元分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(3): 179-181.
- [45] 张福明, 张恺玲, 郑全平等. GFRP 筋锚杆耐盐酸腐蚀性研究[J]. 岩土锚固工程, 2016(3): 9-13.
- [46] 加地晓, 高野恒男, 古桥佑真. FRP 产品的制造方法[P]. 日本, 114269547A, 2022-04-01.
- [47] 内山明, 田中浩, 平井正明. 预浸料和预浸料成型品的制造方法[P]. 日本, 111770954B, 2023-01-06.
- [48] 韩仲凯, 张立新, 余建伟, 等. FRP 矩形空心闸门结构设计定型研究[J]. 山东水利, 2017(10): 61-63.