复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

纤维增强树脂基复合材料筋/拉索数值模拟研究综述

朱江涛 赵杏

Review of numerical simulation research on fiber reinforced composite bar/cable

ZHU Jiangtao, ZHAO Xing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231212.002

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维编织陶瓷基复合材料偏轴拉伸力学性能预测

Mechanical properties prediction of 2D braided ceramic matrix composites under off-axial tension

复合材料学报. 2018, 35(12): 3423-3432 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180209.002

热固性树脂基复合材料固化变形和残余应力数值模拟研究综述

A review of numerical simulation of cure-induced distortions and residual stresses in thermoset composites

复合材料学报. 2017, 34(3): 471-485 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170105.001

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629-1638 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001

陶瓷基复合材料多层界面相应力传递的有限元模拟

Finite element simulation of stress transfer through the multilayer interphase in ceramic matrix composites

复合材料学报. 2018, 35(12): 3415-3422 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180322.001

短切碳纤维/乙烯基酯树脂片状模塑料拉伸性能的有限元模拟

Finite element simulation of tensile properties of chopped carbon fiber/vinyl ester resin sheet molding compounds

复合材料学报. 2019, 36(12): 2843-2850 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190305.002

有限元法研究填料形貌与介电常数对无机/有机介电复合材料介电性能的影响

Computational study of both morphologies and dielectric constant of fillers on dielectric properties of inorganic/organic dielectric composites by finite element method

复合材料学报. 2019, 36(12): 2887-2893 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190416.003

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 41 卷 第 4 期 4 月 2024 年
Vol. 41 No. 4 Apr 2024

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20231212.002

纤维增强树脂基复合材料筋/拉索数值模拟研究综述

分享本文

朱江涛，赵杏*

（南京航空航天大学 民航学院，南京 210016）

摘 要：纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 是由纤维和树脂基体组合而成的一种材料，在各种领域中拥有广泛的应用。利用数值模拟方法可以更加简单、精确地预测 FRP 筋/拉索性能，从而加快设计效率、减少试验工作量，因此大量学者针对 FRP 筋/拉索进行了数值模拟研究。本文主要介绍了单向纤维增强聚合物复合材料的模拟控制因素和需求，在微观、细观和宏观尺度下研究 FRP 的理论模型和分析方法，提出了在不同尺度下对 FRP 筋/拉索进行数值模拟的不足之处及数值模拟在微观、细观和宏观层面中的应用。重点论述了不同尺度数值模拟方法在 FRP 筋/拉索中的应用和最新多尺度数值研究进展及 FRP 筋/拉索在锚固区的数值模拟方法及现状，最后简要阐述了 FRP 筋/拉索数值模拟在未来可能的研究发展方向。为建立精细化 FRP 筋/拉索损伤和性能预测模型发展提供参考。

关键词：FRP 结构；数值模拟；多尺度分析；有限元法；耐久性

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)04-1653-19

Review of numerical simulation research on fiber reinforced composite bar/cable

ZHU Jiangtao , ZHAO Xing*

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Fiber reinforced resin matrix composite (FRP) is a material composed of fibers and resin matrix, which has a wide range of applications in various fields. The use of numerical simulation methods can more easily and accurately predict the performance of FRP bars/cables, thereby accelerating design efficiency and reducing experimental workload. Therefore, a large number of scholars have conducted numerical simulation research on FRP bars/cables. This article mainly introduces the simulation control factors and requirements of unidirectional fiber reinforced polymer composites, studies the theoretical models and analysis methods of FRP at micro, micro, and macro scales, proposes the shortcomings of numerical simulation of FRP bars/cables at different scales, and the application of numerical simulation at micro, micro, and macro levels. The focus is on the application of different scale numerical simulation methods in FRP bars/cables, as well as the latest progress in multi-scale numerical research, as well as the numerical simulation methods and current status of FRP bars/cables in the anchorage zone. Finally, a brief explanation is given of the possible research and development directions of FRP bar/cable numerical simulation in the future. To provide reference for the development of refined FRP reinforcement/cable damage and performance prediction models.

Keywords: FRP structure; numerical simulation; multi scale analysis; finite element method; durability

纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 是由纤维和基体组合而成的一种材料，具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳、便于运输等优点[1]，在交通运输、土木工程、化学化工、医疗设施、电力运输及体

收稿日期：2023-09-27; **修回日期**：2023-12-06；**录用日期**：2023-12-07；**网络首发时间**：2023-12-13 12:40:16
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231212.002
基金项目：国家自然科学基金 (52008209)
National Natural Science Foundation of China (52008209)
通信作者：赵杏，博士，讲师，硕士生导师，研究方向为土木及交通运输工程结构材料和设计一体化、监测检测维护和寿命评估、FRP 多场耦合多尺度精细化静力及疲劳寿命预测理论及有限元分析方法 E-mail: xingzhao@nuaa.edu.cn
引用格式：朱江涛，赵杏. 纤维增强树脂基复合材料筋/拉索数值模拟研究综述 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1653-1671.
ZHU Jiangtao, ZHAO Xing. Review of numerical simulation research on fiber reinforced composite bar/cable[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(4): 1653-1671(in Chinese).

育用品等领域发挥着重要的作用。其中，FRP 筋/拉索因其较好地利用了 FRP 材料延性高、强度好等特点，在国内外桥梁工程领域具有广泛的应用实例，国内对 FRP 桥梁结构的研究起源于人行桥，例如国内在重庆建立的第一座 FRP 箱梁斜拉人行桥——交院桥，此后在香港、深圳及内地的一些省市相继建造了一些人行桥[2]；还有由东南大学、江苏大学和北京特希达科技有限公司共同研制的我国第一座碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 索斜拉桥[3]；CFRP 吊杆和系杆混凝土拱桥等[4]。相比于传统钢拉索，FRP 具有强度高、跨越能力强，同时耐腐蚀、耐疲劳性能好等优点。随着 FRP 筋/拉索的应用范围和形式越来越广泛，它也为开发高性能土木工程结构设施和既有工程设施的加固增强提供了一种新的选择。但随之而来的也有许多暴露出来的问题：例如材料组成复杂、材料属性和构件性能离散性大、存在复杂环境下长期性能认识不足等[5]。为了解决这些在材料性能、结构分析与设计理论方面的问题，学者们需要进行更深入的研究。

面对 FRP 筋/拉索的各种问题，进行大量的工程实验研究非常重要，但是试验费时费力，同时结果可能存在一定的偶然性。而利用数值模拟方法可以简单、精确地预测 FRP 筋/拉索的材料性能，从而加快设计效率、减少试验工作。利用数值模拟方法还可以对构件模型进行多尺度分析，使用多尺度层面下的数值耦合可以解决 FRP 显著的多层级特征和非均质性问题，通过对于不同尺度下 FRP 性能的研究进行整合串联，形成关于 FRP 的多尺度研究方法。数值模拟方法的优势不仅于此，在进行构件的结构优化设计时，通过数值模型可以预测构件在多尺度层面下的性能变化，从而达到优化设计的目的。开展不同尺度下 FRP 各项性能强度的研究，建立相应的数值计算模型和评价方法，将会为 FRP 多尺度下的性能预测提供理论依据，对指导 FRP 设计和推动 FRP 的工程应用具有重要的意义。本文将首先从 FRP 模拟的控制所需因素和需求引入，通过需求参数等来影响 FRP 构件的各项性能。随后引入现阶段学者们研究 FRP 及其构件常见的 3 种尺度方法，即微观尺度、细观尺度和宏观尺度，最后阐述在未来发展趋势下需要的更进一步研究。

1 FRP 模拟的控制因素和需求

FRP 筋/拉索作为现在工程中常见的应用构件之一，对其进行性能的预测及数值的模拟来研究其适用性是必不可少的。而在进行数值模拟时需要考虑许多控制因素及需求，由于 FRP 筋在应用过程中具有许多性能需求，对于不同的性能需求引起其改变的参数影响不同，对应的研究方法也就不同。例如材料因素可以影响 FRP 构件的许多性能，不同的纤维种类 FRP 筋的力学性能不同，数值分析中需要考虑纤维的差异来进行不同材料性能的输入；同样界面粘接性能不同会造成 FRP 层间剪切性能和锚固性能的差异，在抗剪或者锚固区的数值分析中需要考虑这些差异影响；FRP 筋在生产制造过程中，其工艺结构的不同及制造缺陷的随机性产生也会对其内部应力场造成明显的改变，精细化有限元方法可以分析其对宏观性能的影响；不同的表面形态 FRP 筋也会表现出不同的锚固性能[6]，锚固区的数值分析中可以对此进行细化研究。这些不同的因素会对 FRP 构件造成不同层面下的影响，研究其性能因材料界面等因素的变化趋势，是探索 FRP 构件受力性能变化的首要目标。

1.1 材料因素

常见的 FRP 筋/拉索根据其组成的纤维材料不同可以分为芳纶纤维增强树脂基复合材料 (AFRP) 筋/拉索、玄武岩纤维增强树脂基复合材料 (BFRP) 筋/拉索、CFRP 筋/拉索和玻璃纤维增强树脂基复合材料 (GFRP) 筋/拉索。FRP 筋/拉索组成的树脂基材料也可以分为环氧基、乙烯基和聚氨酯基等。从微观尺度上说，材料组成直接决定了 FRP 的分子结构及其之间的相互作用。从细观尺度上看，纤维和基体等材料具有各异的本构关系、占比和界面等情况，FRP 作为复合材料也会表现出随材料变化的性能情况。宏观尺度上，不同纤维和树脂基体材料组成的 FRP 筋/拉索性能有很大差异[7-8]，进行 FRP 的模拟分析时，需要考虑其对 FRP 构件产生的不同力学性能影响，对不同的性能需求需要用不同的 FRP 种类来对应其力学性能需要[9]。

1.2 界面性能

界面性能一直是复合材料构件在应用时需要考虑的重点，FRP 作为纤维复合材料，在工程应用中，其构件内部存在许多不同材料所形成的接触界面，例如纤维和树脂基体之间界面，或者树脂、混凝土及钢材之间的连接界面。结构界面之间有效应力的传递非常重要，往往由于界面性能

不足，不同组分或者部位无法共同工作而过早地失效，从而严重影响到 FRP 材料在工程中的应用。

当前实验研究表明，FRP 复合材料在极端环境下的性能会有不同程度的退化，其界面性能主要取决于 FRP 与树脂材料间的粘接性能[10-12]。界面结合的强弱还与 FRP 复合材料的宏观性质密切相关。对于在极端环境下工作的复合材料，常需要有较强的界面结合，同时减少界面毛孔、杂质和裂纹等缺陷的存在，从而提高 FRP 材料界面的粘接性能[13-15]。在 FRP 与混凝土界面的实验中，由双剪实验发现胶层厚度、粘接长度等都会影响其界面性能，而 FRP 与混凝土的剥离破坏常发生在界面以下的混凝土中，这是由于混凝土的抗拉强度要远低于粘结层和 FRP 材料[16]。除此之外，在极端恶劣环境中，环境的影响包括高温湿热、低温干冻、盐雾、海水、碱溶液 (例如混凝土渗透液) 等恶劣环境因素的侵蚀及外力耦合作用，尤其是近海结构。这些环境因素的影响导致了 FRP 结构与其他材料 (例如环氧树脂) 等之间的粘接性能严重退化，最后导致构件的服役寿命明显缩短[17]。有很多学者针对 FRP 界面性能进行了数值模拟，在关于界面结构与性能研究的分子动力学 (MD) 模拟中，碳纤维/环氧树脂的粘结界面通常被模拟为双层结构，由碳纤维外层结构和附着在纤维表面的环氧树脂基体组成，而没有考虑纤维表面活性物[18-19]，而在考虑表面活性物之后其界面性能会有不同的变化出现。由此可见，利用数值模拟与实验相结合的方法研究 FRP 材料及其与其他材料之间的界面性能，对于 FRP 构件的工程应用具有重要的意义。

1.3 工艺结构

工艺结构是指材料在制作过程中因其编织方式、成型方式等工艺情况不同导致其在微观层面纤维材料的纤维方向、排列不同的情况。工艺结构对构件性能的影响是一种确定且可预测的影响，可以根据不同的工艺结构情况，分析评估生产的 FRP 性能。建立数值模拟模型，准确地反映纤维在微观层面的工艺结构，是解决新产品性能预测和工艺优化的关键[20]。章中才[21] 通过有限元分析手段，并结合正交试验设计方法和遗传算法优化的误差反向传播 (BP) 神经网络，对 FRP 筋的肋纹参数和纤维材料的工艺结构进行了数值分析，较精确地预测出相应的 GFRP 筋与混凝土的粘结强度随工艺结构影响的变化。FRP 还可以作为可回收锚索的主体材料来解决钢锚索自身质量大、运输与安装不便、耐腐蚀性差等问题，但是由于 FRP 锚索的制作工艺流程比较固定，通过拉挤成型得到以轴向纤维为主的 FRP 棒材其表面光滑，难以提供足够的锚固力。为了提高 FRP 筋的粘结性能，常采用固化前螺旋缠绕纤维束成肋或者在筋材表面用纤维带编织，形成凹槽的方法来提升其表面的粘结强度，从而使 FRP 材料与棒材粘接更紧密[22]。这些在微观层面工艺结构上的变化会在很大程度上影响 FRP 材料的内部受力情况，从而影响结构的力学性能。

1.4 制造缺陷

FRP 筋/拉索制作过程中不可避免的会存在一定的缺陷，同时这些缺陷的形成、形态、位置等往往都是随机的。这是导致 FRP 筋/拉索力学性能出现离散性的主要原因之一。其中纤维角度偏移或位错是由于纤维的局部方向角度可能与设计方向角度存在一定偏差，这种纤维波纹缺陷会对基体的应力应变产生很大的影响。而气泡孔隙会影响纤维材料的排列走向，最后影响复合材料的层间力学性能[23]。

现有研究主要关注制造缺陷引起的性能改变，而对制造缺陷引起的不确定性问题研究较少。制造缺陷作为构件在生产制造过程中一个不可避免的问题，会由于其形态位置甚至孔洞的改变引起 FRP 拉索微观层面传力状态的随机性改变，从而引起 FRP 拉索受力性能的不确定性，建立宏观尺度拉索和单筋的多尺度有限元模型，利用数值模拟可以探究微观和细观尺度的制造缺陷对宏观性能的不确定性影响[24]。另外 FRP 层合板在受冲击后可能在多个界面发生重叠分层损伤，利用数值模拟研究多层损伤发生前后的一系列模态频率变化值来预测 FRP 层合板中的多分层损伤情况，可以有效减少因微观层面的损伤缺陷带来的宏观结构问题[25-26]。

1.5 筋材表面形态

筋材的表面形态会影响筋材的粘接性能，从而影响 FRP 的受力性能。不同深浅的肋纹也会影响 FRP 筋的表面形态，随着直径减小，浅肋 FRP 筋会增大其极限抗拉强度，深肋 FRP 筋会增大其粘结强度，且随着直径减小，拉伸强度和粘结强度都逐渐提高[27]。研究筋材不同的表面形态带来的影响对于掌握结构的稳定性具有重大意义。通

过实验可以发现随着 FRP 筋直径增大，其粘结强度会降低，这是由于泊松效应会通过减小直径从而降低粘结力，直径增大会需要更多的锚固长度来产生法向应力来平衡，因此在粘结长度不变的情况下，应力分布会变得不均匀，使粘结强度降低[28]。

FRP 筋表面的各种工艺对 FRP 筋粘结性能也会有影响，喷砂工艺会增大粘结强度，同时也会增大化学粘结力；不同表面特性有着不同的粘结强度系数，也有不同的滑移值[29]。为了较准确地描述 FRP 筋表面形态对混凝土粘结滑移界面的影响关系，通过数值模拟，在 ABAQUS 中设置摩擦力、过盈量、粘结力 3 种作用模块模拟出 FRP 筋与混凝土界面粘结力中的表面摩擦力、机械咬合力和化学胶结力作用，建立与试验相同的加载条件和试验工况下的数值模型，结果表明模拟结果与试验结果吻合性较好，模拟破坏模态与试验破坏模态亦有相近的结论[30]。尹世平等[31] 建立了 FRP 筋全珊瑚骨料海水混凝土拉拔试验的数值计算模型，模拟计算结果可以看出：随着界面粘结长度和筋材直径的增加，试件的极限拉拔承载力和相应的界面滑移量也会增大。数值模型验证了 FRP 筋与混凝土粘结滑移界面关系有限元模型的正确性和 FRP 筋与混凝土界面关系参数取值的正确性直接相关[32-33]。

影响 FRP 构件的因素有很多，纤维含量、纤维方向和弯曲情况、气泡等初始缺陷、随机因素、筋材表面形态等因素都是现阶段 FRP 数值模拟的重点。而不同尺度间影响因素的变化也有可能会影响到彼此，例如构件中气泡孔洞等随机因素可能会影响到纤维-FRP 界面的性能，筋材不同的表面形态可能会在宏观层面影响构件锚固区的强度从而最后影响到 FRP 构件的整体性能。这种多尺度间的连锁反应可以利用数值模拟更直观地体现出来，有效补充实验数据并进行材料、工艺等步骤的优化设计，是对 FRP 筋/拉索数值模拟研究的重要需求。

2 FRP 性能需求

在明确了对 FRP 构件进行数值模拟所需要考虑的控制因素之后，便需要对 FRP 构件在工程中所需的各项性能进行分析测试。FRP 筋其本身具有许多性能，包括拉伸、压缩、抗拉、抗剪、抗冲击性能、长期受力性能 (蠕变、疲劳)、耐久性等。除此之外，还有 FRP 筋/拉索与其他材料粘接时锚固区的性能。由于 FRP 筋锚固区表面的应力分布不均匀，其变化规律复杂容易引起锚固性能的改变，从而影响 FRP 筋/拉索在工程中的使用。全面准确地对 FRP 筋及其构件的各项性能进行数值模拟来预测性能的变化情况，对于解决应用 FRP 构件的工程问题具有重要意义。

2.1 拉伸性能

FRP 筋/拉索模拟建模过程中，要考虑到各种性能及其可能的影响因素。首先是拉伸性能，其中关于 FRP 混凝土构件拉伸刚化效应的众多实验研究表明，FRP 混凝土构件拉伸性能受到一些参数如配筋率、混凝土强度、FRP 弹性模量等诸多因素的影响。研究各类因素对 FRP 构件拉伸性能的影响关系，对解决其性能需求具有重要意义。

研究发现随着配筋率增大，混凝土相对面积会减小，这会使其拉伸刚化效应减弱，而 FRP 筋直径的变化对其拉伸刚化效应没有影响[34]。在持续荷载作用下 FRP 筋与混凝土之间的粘结性能会发生退化，平均粘结应力和混凝土拉伸应力降低，导致其拉伸刚化效应减弱，并且较高的混凝土强度下混凝土拉伸应力损失较小[35]。在对 FRP 和钢筋的相对面积对混杂配筋混凝土构件拉伸刚化效应的影响效果进行研究时，发现随着 FRP 筋的相对面积增加及等效配筋率的减小，构件的拉伸刚化效应会得到增强[36-40]。

利用数值模拟研究 FRP 在拉伸载荷下的力学行为时，学者们从实验测试、理论分析和数值模拟 3 个方面进行研究，确定了杨氏模量、拉伸强度、破坏应变和泊松比等力学参数，得到了与实验一致的拉伸损伤演化模型，验证了 FRP 层合板具有动态韧性的设想[41-43]。根据以上实验及数值模拟的结果来看，利用数值模拟与实验相结合的方法来研究 FRP 拉索的拉伸性能及其影响因素是正确的，而对 FRP 拉索构件的拉伸性能进行分析和预测，对正确认识 FRP 构件在拉伸载荷下的损伤演化和破坏机制具有重要意义。

2.2 抗压性能

FRP 筋与其他材料结合使用作为受压构件时，其压缩强度很低，其主要原因是当拉挤 FRP 筋材时，其承受轴向压力载荷时会在远低于其拉伸强度的应力条件下被破坏，造成材料力学性能的较大浪费，研究其压缩性能的影响因素对解决 FRP 承压构件所遇到的问题具有重要意义。研究表明

GFRP 筋材和 CFRP 筋材的压缩强度分别只有其拉伸强度的 40% 和 11% 左右[44]。在端部无约束的情况下，FRP 筋材试样受纵向压缩时发生自端部开始的局部开裂破坏，因此应对其端部采用适当形式的约束，端部约束可以提高筋材的压缩强度[45]。基于 ABAQUS 对不同 CFRP 压缩构件进行数值模拟。通过建立混凝土损伤塑性模型和引入 CFRP 与混凝土的粘聚力界面关系，并与试验结果进行对比分析，获得了 FRP 构件在压缩载荷下的损伤扩展情况和界面开裂情况，明确了破坏载荷和极限载荷随压缩形式的变化规律[45-46]。

2.3 受弯性能

目前对 FRP 筋的使用，将其单独作为受弯构件的应用较少，主要是对于 FRP 筋在桥梁拉索中受弯性能的研究，而大部分研究都是针对 FRP 混凝土构件的受弯性能进行探究。作为具有轻质、高强、耐腐蚀性能好等优点的材料，FRP 混凝土构件的受弯性能也是其不可忽视的主要性能之一。用 FRP 筋取代钢筋可有效解决钢筋锈蚀带来的不利影响，但由于 FRP 筋弹性模量较低且为线弹性材料，当 FRP 筋混凝土构件作为受弯构件在使用时，易产生过大的挠度和裂缝宽度，甚至发生脆性断裂，这便使 FRP 筋混凝土梁的应用受到一定限制[47]，为了有效改善混凝土性能、阻碍裂缝的产生、扩展及贯通，可以在混凝土中利用纤维筋代替部分钢筋，这样在构件开裂时会由纤维筋良好的抗拉性能来代替钢筋，从而限制裂缝的开展，提升构件的受弯性能。因此利用 FRP 筋与钢筋进行混合配筋来增强受弯构件抗弯性能的研究具有重要意义。在 FRP 筋梁中增加钢筋，随着钢筋含量增多，构件的延性、刚度变好，裂缝宽度减小[48-49]。有限元模拟结果验证了该试验结果，且在梁达到破坏之前，FRP 筋应力曲线与荷载挠度曲线均呈双线性[50-54]。

2.4 抗剪性能

对于 FRP 抗剪能力的研究，主要为利用 FRP 进行加固钢筋混凝土梁结构，来改善其抗剪性能。在海工结构中，采用薄碳纤维层外包裹 GFRP 筋制备碳-玻璃纤维混杂筋 (HFRP 筋) 来提升芯层 GFRP 筋长期力学性能是一项具有巨大的应用潜力的研究。学者们在对水，强、弱碱，盐碱等溶液下 GFRP、HFRP 裸筋吸湿行为和层间剪切强度变化规律进行研究，发现模拟海水溶液下砂浆包裹 GFRP 和 HFRP 筋的破坏模式和层间剪切强度变化与弱碱溶液下 GFRP 和 HFRP 裸筋相似。基于 Arrhenius 理论，预测了强碱、盐碱溶液下 GFRP 和 HFRP 裸筋在 4~21℃ 下的长期层间剪切强度[55]。有学者研究了 BFRP、GFRP 和 CFRP 筋在水、强碱溶液、弱碱溶液、模拟海水及酸溶液 5 种腐蚀溶液环境下的性能劣化情况。通过层间剪切强度测试探究了不同老化温度与腐蚀时间下 FRP 筋层间剪切强度的劣化规律。试验结果表明：FRP 筋的层间剪切强度受腐蚀环境的影响显著，在强碱溶液中的劣化速率远高于其他溶液；与 BFRP 筋和 GFRP 筋相比，CFRP 筋的耐久性相对优异，在相同老化条件下具有更高的层间剪切强度保留率[56-58]。目前无论是国内还是国外对 FRP 筋本身抗剪能力的研究都比较少，在如今海工结构等工程结构中对 FRP 筋抗剪性能的需求日益增多，因此未来对 FRP 筋自身及其相关构件在极端环境下的抗剪性能研究是必不可少的。

2.5 抗冲击性能

对于 FRP 抗冲击性能的研究，主要是在各种 FRP 混凝土构件中，利用不同的 FRP 复合材料及不同的结构工艺来对其进行加固，使构件在原有基础上具有更强的抗冲击性能。

在实际工程中，CFRP 增强钢筋混凝土结构除了承受静荷载作用外，也常常会面临落石、地震、爆炸等各种冲击荷载的作用[59-60]。而目前对 CFRP 增强钢筋混凝土结构力学性能的研究大多基于静荷载作用[61-63]，对其在冲击荷载条件下进行量化的研究相对较少。学者们通过相关试验和理论方法，在 CFRP 增强钢筋混凝土梁静载试验的基础上，考虑冲击速度和 CFRP 粘贴长度、宽度与层数等多种因素的影响，对 CFRP 增强钢筋混凝土梁的力学性能与 CFRP-混凝土界面间的粘结性能进行了落锤冲击试验和数值模拟研究[64-67]。结果表明，梁的冲击力峰值、位移峰值、耗散能量、裂缝扩展速度均随着冲击速度的增大而增大。对于 FRP 构件抗冲击性能的研究目前基本上都是对 FRP 加固或增强混凝土构件的抗冲击性能进行建模预测，使用数值模拟的方法研究不同种类 FRP 筋对混凝土构件的增强效果，这说明 FRP 材料在加固增强构件的抗冲击性能方面具有很好的应用前景。

2.6 长期受力性能 (蠕变、疲劳)

无论是构件的疲劳性能还是蠕变性能，对于

FRP 在各类工程中的应用，其长期受力性能一直是被广泛关注的重点所在，尤其是在桥梁拉索中的应用，其受力性能的研究重点主要在于疲劳及蠕变，而桥梁拉索的疲劳和蠕变会大大减少其工程使用寿命，如今对于 FRP 构件的长期受力性能的研究主要不足之处在于数值模型的建立不够完善，其对环境和受力等多场叠加状态下的效应考虑不够细致及其实验数据的数据库也需要更加完善。如何通过实验与数值模拟相结合的方式更加完善的预测其受力性能随各种因素的变化趋势，是解决 FRP 构件在桥梁等领域中应用的重中之重。

FRP 拉索的疲劳寿命主要取决于荷载水平、作用次数、时间和原材料抵抗疲劳破坏的能力。导致疲劳失效的循环荷载峰值通常小于静态断裂分析估算的安全荷载[68]。复合材料的疲劳失效源于材料在其整个寿命期间不同区域出现的不同损伤机制。由于锚固系统受力集中且复杂，因此，开展拉索锚固区的疲劳研究具有重要意义[69]。

蠕变也是 FRP 在桥梁拉索应用中需要考虑的问题，彭哲琦等[70] 以剪切滞后模型的理念为基础，提出以浸胶纱为基本单元的 FRP 浸胶纱-单筋-拉索多尺度短期静力与长期蠕变预测模型。模型揭示了由 FRP 浸胶纱、单筋到拉索的多尺度强度退化规律和拉索内部的短长期损伤演化机制，可为后续拉索性能优化和设计提供支撑。在对纤维增强树脂基复合材料的弯曲蠕变进行分析和细观模型研究时，学者们[71-72] 建立了包含界面的 FRP 蠕变混合率单胞模型，对 FRP 的蠕变性能进行分析与预测，证明了利用 FRP 蠕变混合率单胞模型模拟分析 FRP 的弯曲蠕变是可行的。在现阶段的大规模 FRP 构件中，基本上都会受到长期的蠕变和疲劳荷载，尤其在桥梁拉索中的应用，合理而高效地利用实验和数值模拟相结合的方式来对纤维增强复合材料拉索性能进行预测，可以有效解决拉索足尺试验难度大、耗时长等问题，也可以更加清楚直观地展示其在长期的疲劳荷载下的性能变化，对 FRP 构件在长期项目中的应用具有重要意义。

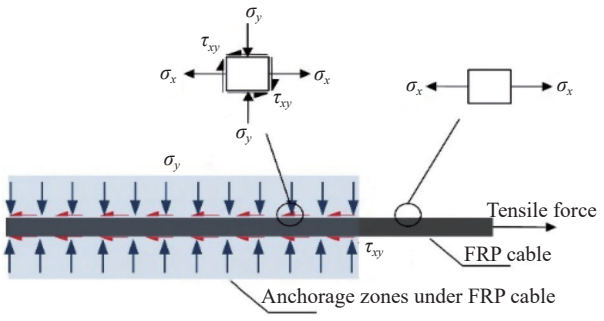
2.7 耐久性能 (腐蚀)

FRP 筋作为工程应用中不可或缺的材料，其长期耐久性能直接影响了工程结构的安全性和使用年限，因此对于其在恶劣环境下的耐腐蚀性能的研究是不可或缺的。相比于普通钢筋，FRP 筋的耐腐蚀性更强，故 FRP 筋被较多地应用于恶劣环境中。现有的研究也多为恶劣环境下的加速模拟试验，包括各种 pH 值溶液的浸泡环境、极端温度环境等环境作用[73]。王伟等[74] 开展了碱溶液环境下的 GFRP 筋的加速老化试验研究。研究表明，高温会加快碱环境下 GFRP 筋的拉伸强度及伸长率的下降速率。与此类似，Al-Salloum 等[75] 开展了 GFRP 筋在室温和 50℃ 下在碱溶液和自来水中浸泡的加速老化试验。试验结果表明，在自来水中和碱溶液中浸泡 18 个月后，GFRP 筋的抗拉强度最高可降低 24.48% 和 24.05%。有学者开展了高温下人工海水环境中 GFRP 筋抗拉性能的老化试验，将劣化过程分为了两个过程，一个是树脂和溶液发生水解反应，然后是纤维与树脂水解产物 OH^- 发生化学反应造成纤维腐蚀[76]。学者们从试验、理论分析和数值模拟 3 个方面对 FRP 筋与海水海砂混凝土的界面粘结耐久性能进行了研究，在真实海水环境下，进行中心拉拔试验获得实验数据，根据试验粘结-滑移曲线，结合已有 FRP 筋粘结-滑移本构模型，提出了 FRP 筋与海水海砂混凝土粘结-滑移本构模型，通过 ABAQUS 有限元软件对 15 个拉拔试件进行数值模拟。结果表明，计算得出的粘结-滑移曲线和粘结应力峰值与试验结果吻合较好，而粘结应力峰值对应的滑移计算值比试验值略大[77]。

2.8 锚固性能及其优化设计

由于拉挤生产的 FRP 是正交各向异性材料，沿着纤维方向的力学性能是垂直于纤维方向的 5~10 倍。复合材料横向的抗剪切与抗局压性能较差，导致其锚固困难，为了研究 FRP 构件的锚固性能并进行其优化设计，可从微观角度到宏观角度进行类比研究。FRP 构件常用的锚固系统有两种：粘结型锚固系统和复合型锚固系统，影响两种锚固系统的因素各不相同，粘结型锚固系统其静载锚固性能受锚具设计参数、筋材表面特性和粘结介质性能等因素的相互影响；对于串式复合型锚固系统需要考虑夹持段和粘结段的长度比例，还要考虑夹持长度和夹持位置对于锚固性能的影响[78]。

图 1 为 FRP 拉索锚固区应力分布图。可见，在 FRP 拉索的锚固区域，其应力分布遵循一定规律，在进行锚固区性能分析时，一定要考虑各项应力之间的相互影响。



σ_x, σ_y—Normal stress in the x, y directions; τ_{xy}—Shear stress

图 1　纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 拉索锚固区应力分布图

Fig. 1　Stress distribution diagram of fiber reinforced resin matrix composite (FRP) cable anchorage zone

对 FRP 缆索的各类锚固系统进行有限元分析数值模拟发现，对粘结型锚固系统而言，其锚固系统存在两类界面：一是粘结介质与 FRP 筋外表面之间的界面，通常称为第一界面；二是粘结介质与锚杯内壁之间的界面，通常称为第二界面[79]。在针对这两类界面进行锚固系统设计时，除了要考虑筋材表面特性及夹持长度外，还要考虑锚杯刚度与缆索径向压力[80-81]及孔径、锚固长度、杆体材料和形式的影响，在对预应力 BFRP 锚杆的锚固性能进行数值模拟分析时，通过 BFRP 锚杆静载拉伸试验数据发现：BFRP 锚杆由于外表面肋纹形状，需要更长的锚固长度来保证其锚固性能[82]。

FRP 锚固性能还有一个衡量标准是其长期使用能力，许多学者对 CFRP 拉索锚固系统进行了广泛研究，但同时满足短期和长期使用要求的锚固系统还很少，能够成功应用到工程上的更少。因此，有必要进一步对 CFRP 拉索锚固系统进行开发和研究。在对大吨位 FRP 拉索锚固体系及长期性能进行研究时，冯博[83]开发了一种分段变刚度粘结挤压型锚固系统，建立了 3D 精细化仿真模型，模拟了锚固系统荷载传递介质分段刚度、几何参数和界面参数变化对锚固区拉索力学性能的影响。结果表明刚度梯度变化有助于使其应力分布变得相对平缓。钢套筒内壁粗糙度降低和内锥度减小，有利于荷载传递介质整体楔进，从而增加拉索的锚固力[84-87]，利用数值模拟可以看出增强构件的锚固性能会直接决定其在工程中的长期使用能力，从而增加其使用年限，提高工程耐久性。

3　模型理论和分析方法

在明确了模拟 FRP 筋的各项控制因素之后，一般有 3 类方法对其各项性能进行研究，分别属于 3 个尺度下，有微观方法、细观方法和宏观方法，通过研究 3 种方法之间的区别与联系，将不同尺度之间联系起来形成迭代关系链，见图 2。这样针对 FRP 筋不同的性质需求可以利用不同尺度下的方法对其进行研究，并最后将多尺度串联在一起，提高对构件性能研究的准确性和全面性。

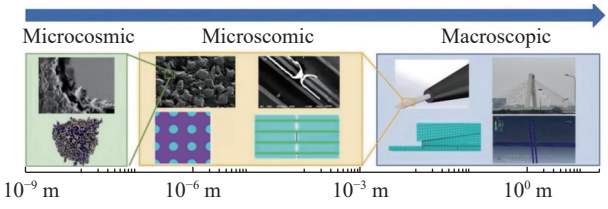


图 2　3 种尺度层面的递进关系

Fig. 2　Progressive relationships at three scale levels

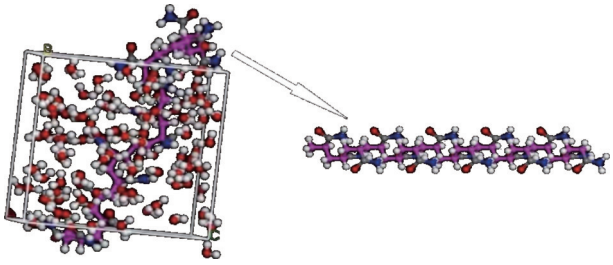
3.1　微观方法

微观方法考虑了纤维和基体的微观结构、形状、位置及材料属性，可以详细、真实地体现出复合材料的细微结构。采用微观方法建立模型可以更加清楚直观地展现出复合材料分子模型的变换特性。

微观方法的理论基础主要来源于随机性模型。它出现于 80 年代末期，是相对较新的一类枝晶生长模型，其主要特点是建立在形核和枝晶生长动力学及结晶取向物理机制，实现动态显示每个晶粒的具体形态及其生长演变上，因此比确定论模型更成熟。目前发展的随机性模拟方法主要有蒙特卡罗方法和自动元胞机方法两种[88]。其中蒙特卡罗方法是建立在最小界面能原理基础上，以概率统计为其主要理论基础，以随机抽样为主要手段。它将计算区域剖分成更细小单元，一般为正方形或六边形网格，为每个网格中的结点 i 赋一个正整数 (从 1 到晶粒总数) P_i 以表示其晶向。晶向相同并相邻的结点组成一个晶粒，不同晶向的结点之间形成晶界[89]。

在研究界面性能在微观层面的变化规律时，常用的微观方法是利用分子动力学来探索微观层面下分子的运动轨迹，建立分子结构的微观模型，如图 3 所示。例如在研究由木材、环氧树脂和 CFRP 组成的复合系统时，运用分子动力学来分析验证环氧树脂-木材界面的断裂能，探讨界面行为受温度影响的机制[90-91]。

除此之外还有研究碳纤维与环氧树脂基体界面剪切蠕变[92]。随着时间的推移，界面区域中的诱导力导致黏弹性变形，这种变形即为蠕变。利用恒定力将纤维从基质中拉出是一种典型且有效



(a) Polymer system (b) Molecular structure of local aggregation

图 3 微观尺度下的分子模型

Fig. 3 Molecular model at micro scale

的方法来描述碳纤维与基体界面在持续载荷下的蠕变行为及为了研究恒定载荷下的界面失效模式。随着力的增加，纤维位移迅速增加，界面脱粘成为主要失效模式。实验结果表明，存在一个导致界面退化的临界载荷水平，从而导致复合材料试样的破坏。利用分子动力学模拟方法将环氧树脂分子键合到代表纤维外层的石墨片上，通过对碳纤维/环氧树脂基体界面的蠕变行为研究发现，为碳纤维/环氧树脂界面的蠕变行为提供了纳米级的见解，有助于理解 CFRP 复合材料的长期界面完整性和蠕变性能[93]。

微观方法还可以模拟侵蚀环境因素对界面特性的影响。例如杨清瑞[94]研究了 FRP-混凝土界面、环氧树脂-混凝土界面、环氧树脂-水化硅酸钙 (C-S-H) 界面劣化行为，Tam 等[95-98]分析了碳纤维/环氧树脂界面在盐水暴露下的分子动力学行为。Lau 等[99]研究提供了 CFRP 复合材料界面劣化的微观信息，为预测考虑环境暴露的宏观 CFRP 性能退化提供了依据。这也是从纳观尺度入手建立由纳观到微观最后到宏观的多尺度分析模型的典型例子。

在利用分子动力学研究 FRP-混凝土系统的延展性时，尽管经典断裂力学已经在结构层面和中尺度层面使人们能够通过临界断裂韧性来量化界面劣化，但它并不能提供任何关于界面裂纹附近实际发生的事情的见解。在 Gunes 等[100]的研究中描述了一种使用自由能概念在纳米尺度上测量粘合系统的载荷-位移响应的新方法，多尺度研究表明，从纳米尺度到宏观尺度，延性总体呈下降趋势。在纳米尺度上，范德华力和库仑相互作用仍然很重要，其中某些部分的能量可以在脱粘过程中耗散。利用分子动力学模拟可用于揭示宏观材料现象背后的微观物理和化学过程。通过模拟揭示了这些建筑材料中的分子信息和变形机制及与其他材料的相关界面问题。

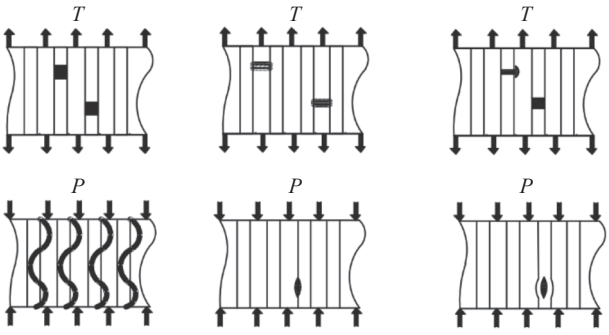
但微观方法也有其局限性。首先在微观尺度下，数值模拟的结果很难通过实验印证，无法做到理论与试验相统一；其次，对于一些微观数值模拟，其时间尺度大多在皮秒级，而真实的实验的时间尺度为天，甚至是年。时间与空间两个尺度上的差距在现阶段无法仅靠数值模拟来解决；最后一点是在尺度层面上的联系与迭代，如何形成微观层面与细观甚至是宏观层面的联系，是需要后续研究的基础。

3.2 细观方法

细观力学强度分析的主要目的是建立复合材料强度与组分材料性能、含量、微观结构等参数之间的关系。再根据材料的组分、微观结构及外载荷特征，分析可能出现的失效模式；针对可能的失效模式，建立相应的力学模型，并根据各相材料的性质及界面特点分别选取适当的强度准则或屈服条件；最后求解复合材料的应力-应变关系，得到极限载荷和极限应变[101]。

复合材料在外载荷作用下存在多种可能的失效模式，且细观结构不同、外载荷形式不同，其失效模式也有所不同。因此，复合材料细观强度分析首先需要针对具体问题，结合实验观测和物理机制分析其可能的失效模式。例如，连续纤维增强复合材料在轴向拉伸载荷作用下，可能发生纤维断裂、基体开裂、界面脱粘等不同模式的失效，在轴向压缩载荷作用下，则可能发生纤维屈曲、界面脱粘、基体开裂、剪切破坏等不同模式的失效，如图 4 所示。随后建立具体的复合材料微观结构建立合理的理论模型，分析各组分间的载荷传递及相互作用。然后，根据各组分材料的特性选择合适的失效或屈服准则进行失效分析[102]。

在探究 FRP 构件在细观尺度上力学性能方面的问题时，往往利用实验与数值模拟相结合的方法。例如在研究氧化硅纳米颗粒和碳纳米管对环氧树脂和乙烯基树脂的断裂韧性和各项基本力学性能时，利用数值模拟发现 GFRP 的疲劳破坏主要受到树脂中裂纹的影响，通过将氧化硅纳米颗粒添加到环氧树脂中，提高了树脂的断裂韧性和弹性模量，起到了限制裂缝发展的作用，可有效改善 FRP 构件的力学性能[103]。在研究 FRP 筋的耐腐蚀性能时，利用数值模拟建模发现 GFRP 筋在



T—Tension force; *P*—Compression force

图 4　轴向荷载作用下连续纤维增强复合材料常见失效模式

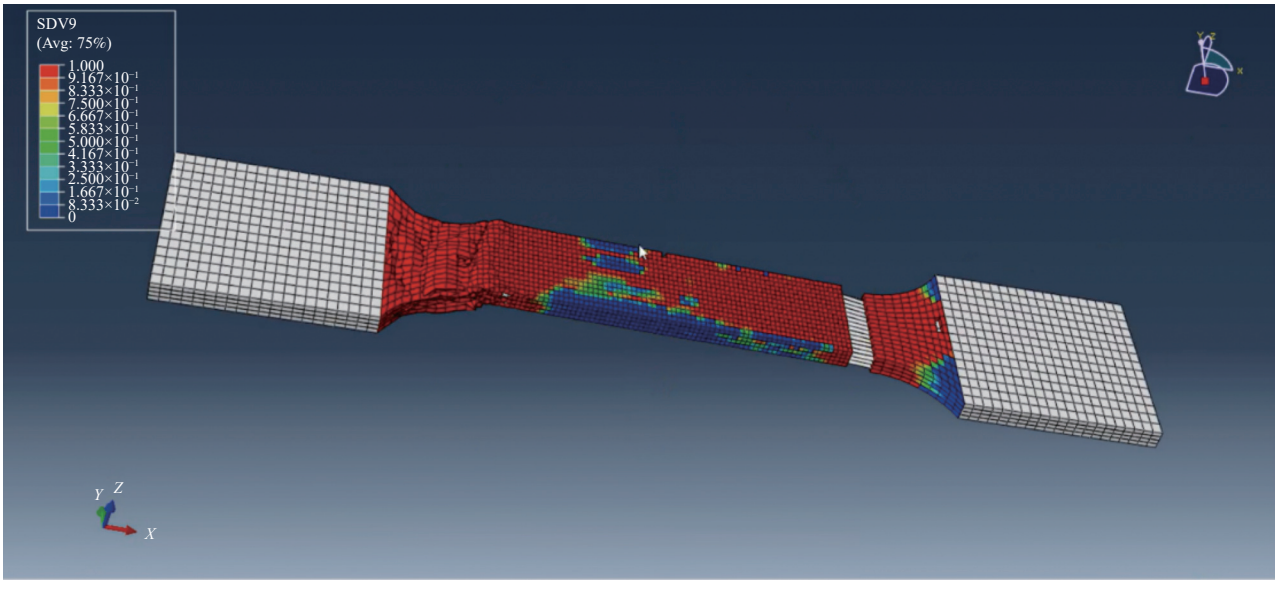
Fig. 4　Common failure modes of continuous fiber reinforced composite materials under axial load

水溶液腐蚀环境下的拉伸强度随浸泡周期的延长而降低，水分子作为增塑剂破坏了聚合物链中的范德华力，使纤维和树脂吸水膨胀，产生了初始应力，影响了纤维树脂界面的粘结性能，加速了 FRP 筋的力学性能的退化[104]。

这些实验或者理论的提出，细观方法在其中做出了不可磨灭的贡献。模型的建立应以实验观测到的变形、失效机制及实验测量得到的力学参数为基础，其分析结果需要得到实验验证，无论是环氧树脂和乙烯基树脂的断裂韧性的试验结论还是 FRP 混凝土的剪切滑移模型[105] 或者 CFRP 加固混凝土组合梁的数值模型的建立[106]，都离不开细观层面思想的帮助。但细观方法也有其局限性所在。最明显的一点就在许多模拟实验用的单胞模型过于宽泛，并没有对于某一个实验模型有更加细致的模型出现，这会导致许多真实条件下的初始缺陷等无法被发现并预测，而过于单一的单胞模型也会使计算量变得更大。在研究 FRP 构件其性能需求时，如何探寻其微观工艺结构或随机误差产生的影响，利用细观尺度数值模拟与实验相结合的方法探索其各项力学性能的变化规律，是其核心问题所在。

3.3　宏观方法

宏观方法是将复合材料假设为正交各向异性材料，采用静力等效的方法获得正交各向异性材料的性能参数。在宏观尺度下，对复合材料的力学性能分析可以忽略其非均匀性，以均匀化后的材料为研究对象。宏观复合材料力学分为材料力学和结构力学，前者的核心是层合板理论，经典层合板理论基于基尔霍夫假设、小变形假设和薄板假设，认为每一单层板都处于平面应力状态，将单层板应力沿着厚度方向积分得到整体层合板的内力和内力矩，然后根据单层板的应力-应变关系，推导整体层合板内力、内力矩与中面应变、中面曲率之间的关系，进而得到整体层合板的刚度系数。后者则从更宏观的角度进行分析，以层合板的性能为起点，把层合板看作均匀材料，借助板壳理论等结构力学的分析方法，对其弯曲、屈曲、振动、疲劳等性能进行研究，并进行数值模拟分析[107]，如图 5 所示。



SDV9—Abaqus subroutine state variables

图 5　复合材料单轴拉伸数值模拟模型

Fig. 5　Numerical simulation model for uniaxial tension

在研究 GFRP 筋与超高性能混凝土粘结性能时，利用宏观层面的思路探寻了许多种因素对其粘接性能的影响。其中发现筋的直径对于结果的影响最为明显[108]。由于 FRP 筋相比钢筋具有更高的抗拉强度、较低的弹模和耐腐蚀性，应用于桥面连接板中有助于解决连接板区域刚度过大和筋材锈蚀问题。学者们通过结构模型试验，借助数值模拟对结构试验中未能涉及到的变量进行了参数化分析，对预留试件和筋材进行试验，获取相应材料物理参数，使用有限元软件 ABAQUS 对连接板结构进行模拟分析。对比电算结果和试验结果，建立的有限元模型计算结果与试验结果吻合较好，有限元计算能够有效反映连接板受力和变形状态[109]。史健喆[110] 在研究高性价比 BFRP 体外预应力加固技术时，从海洋环境下 BFRP 筋蠕变、松弛、疲劳性能，体外预应力 BFRP 筋关键区域(锚固和转向区) 力学性能，体外预应力 BFRP 筋加固混凝土梁短长期性能 3 个层次展开研究，通过蠕变和松弛试验全面评价 BFRP 筋的蠕变断裂应力、蠕变率和松弛率，揭示了 BFRP 筋在长期持荷下的破坏和性能退化机制；利用有限元软件建立三维有限元模型，分析了 FRP 筋转向区受力状态，提出了体外预应力 BFRP 筋转向区合理设计参数。这种源于宏观方法的分析，是探索 FRP 各项性能影响因素的重要方法。

在大量的宏观实验中，学者们都是在宏观尺度上设计实验思路来探寻 FRP 的各种特性，这也是现阶段对于 FRP 的研究中使用最广泛的方法，但宏观方法也具有自己的局限性，由于需要与实验相结合，宏观层面的实验大都依赖模型的本构关系，其机制的正确性与精确性还有待完善。现阶段我们无法将微观层面的机制变化与宏观层面的实验结合起来，但若是能够与之前的微观层面与细观层面相结合，由微观和细观层面出发探究 FRP 与钢筋接触面的界面特性，形成微观-细观-宏观的多尺度实验及模拟思路，就可以更加清晰的探索多尺度层面下实验结果与数值模拟结果的对应关系，这也是多尺度研究方法在利用数值模拟分析 FRP 构件过程中的意义。

3.4 多尺度方法

多尺度研究方法即为不同尺度层面下 FRP 影响因素相互耦合的方法。目前，研究者们针对不同的空间、时间尺度，都已发展了一些较成熟 为了实现原子尺度模拟与宏观尺度模拟的无缝连接，2004 年，Liu 等[111] 发展了原子尺度有限元方法。该方法直接从原子势能出发推导能量表达式，能够达到与分子力学相同的精度；并且，该方法具有与传统有限元法相同格式的控制方程，可以实现与传统有限元法的无缝连接。该方法中，对于 N 个原子组成的系统，设贮存在原子键中的总能量为 $U_{\mathrm{tot}} = U_{\mathrm{tot}}(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，其中 $x_i = (x_i, y_i, z_i)^{\mathrm{T}}$ 为原子 i 的坐标，则系统的总能量为

$$E_{\mathrm{tot}}(x) = U_{\mathrm{tot}}(x) - \sum_{i=1}^{N} \overline{F_i} x_i \tag{1}$$

其中，$\overline{F_i}$为作用在原子 i 上的外力，待求状态为平衡状态，该状态的能量极小，即

$$\frac{\partial E_{\mathrm{tot}}}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

将总能量在初始假定的位置，$x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)} \cdots, x_n^{(0)})^{\mathrm{T}}$处 Taylor 展开，忽略高阶小量，得到：

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{tot}}(x) \approx\ & E_{\mathrm{tot}}\left(x^{(0)}\right) + \left.\frac{\partial E_{\mathrm{tot}}}{\partial x}\right|_{x=x^{(0)}} \left(x - x^{(0)}\right) + \\ & \frac{1}{2}\left(x - x^{(0)}\right)^{\mathrm{T}} \left.\frac{\partial^2 E_{\mathrm{tot}}}{\partial x \partial x}\right|_{x=x^{(0)}} \left(x - x^{(0)}\right) \end{aligned} \tag{3}$$

记$u = x - x^{(0)}$，得到

$$Ku = P \tag{4}$$

其中，

$$K = \left.\frac{\partial^2 E_{\mathrm{tot}}}{\partial x \partial x}\right|_{x=x^{(0)}} = \left.\frac{\partial^2 U_{\mathrm{tot}}}{\partial x \partial x}\right|_{x=x^{(0)}} \tag{5}$$

$$P = -\left.\frac{\partial E_{\mathrm{tot}}}{\partial x}\right|_{x=x^{(0)}} = \bar{F} - \left.\frac{\partial U_{\mathrm{tot}}}{\partial x}\right|_{x=x^{(0)}} \tag{6}$$

为非平衡力向量，外力$\overline{F} = (\overline{F_1}, \overline{F_2}, \cdots, \overline{F_n})^{\mathrm{T}}$，迭代求解方程直到 P=0 即可得到平衡状态。可见，自适应有限元法 (AFEM) 的控制方程与传统有限元方法的形式完全一致。在使用该方法时，最重要的是需要根据模拟对象建立单元并写出原子势能表达式[112]。

多尺度方法在研究 FRP 拉索多尺度精细化性能预测的实验中已经有所应用，例如彭哲琦[113] 以浸胶纱作为基本单元，提出的考虑单元随机强度的 FRP 拉索预测模型，其多尺度之间的联系如图 6 所示，利用该模型对拉索本体的静力性能、混杂性能和长期蠕变性能 3 个方面分别展开系统分析，揭示 FRP 拉索的短长期和多尺度损伤演化机制。目前，大多数已有的模型都局限于选取纤

维单丝作为基本组成单元，但是结果表明纤维单丝的强度离散过大，得出的强度规律可靠度偏低，无法准确表征 FRP 拉索整体的多尺度性能特征。

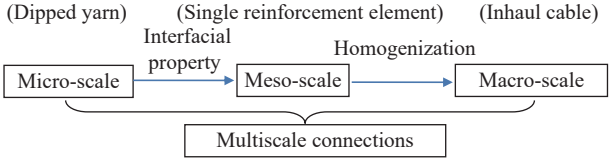


图 6　多尺度层面间的联系

Fig. 6　Connection between multi-scale levels

在进行 FRP 构件的力学性能研究时，可以将多尺度层面的研究思路运用其中。例如在 BFRP 的力学性能研究中，利用数值模拟分析的方法，基于强度失效准则和 Weibull 统计理论建立的数值模型，可以通过玄武岩纤维丝的拉伸强度 Weibull 参数来模拟同等标距下纤维束的拉伸应力-应变响应，进而为获取纤维丝的强度分布 Weibull 参数提供一种简易而精确的方法[114]。

纤维微观层面的初始缺陷作为 FRP 构件的模拟需求之一，在探究其对玄武岩纤维复合材料构件的性能影响时，也可以引入多尺度建模的思路，分别在微观、细观、宏观尺度建立含缺陷有限元模型，揭示缺陷的存在对材料力学性能和损伤失效机制的影响。在微观尺度下，建立三维玄武岩纤维复合材料的微观几何缺陷模型和微观单元缺陷模型。采用单元缺陷模型构建方法建立细观单胞缺陷有限元模型。在宏观尺度下，采用多裂纹夹杂方式代替初始缺陷，建立含多裂纹夹杂的复合材料宏观模型，结合扩展有限元法实现对裂纹扩展的预测。利用 3 个尺度下的模型联系，揭示了初始缺陷存在对复合材料力学性能和损伤失效机制的影响[115]。

对于一般具有确定性几何状态和力学性能的复合材料，在进行建模分析时往往无法准确反映出其临近极限状态时破坏的随机性和渐近性，造成模型的预测结果不精确和失效机制不明确的问题。相比之下，多尺度模型在建模分析时考虑了几何模型的随机性 (如纤维、孔隙的空间随机分布) 和力学性能的随机性 (如纤维、基体的强度随机分布)，可以在精确还原复合材料的内部状态并有效反映这一渐近失效过程。对于具有多相性的复合材料，其力学性能和失效机制不仅与其宏观性能有关，也与其微细观的组分性能、几何形态、界面特性等特征息息相关。然而，传统单一宏观尺度下的分析方面并不能反映这些特征，在当前 3 种研究方法之下，每一种单一的方法都拥有其适用性与局限性，见表 1。因而建立微-细-宏观的多尺度分析方法对于深入揭示复合材料的各个尺度下性能规律、内在联系和优化方法尤为重要。现阶段对于形成多尺度层面下的研究方法还比较

表 1　不同尺度方法的适用性与局限性

Table 1　Applicability and limitations of different scale methods

Different scale methods	Applicability	Limitation
Microscopic methods	(1) Consider the microstructure, shape, position, and material properties of fibers and matrix; (2) It can reflect the fine structure of composite materials in detail and truthfully; (3) Can more clearly and intuitively demonstrate the transformation characteristics of composite material molecular models	(1) Difficulty in accurately fitting with the experimental process, unable to obtain accurate experimental data for argumentation; (2) Too many factors to consider, complex parameters such as modeling node elements, and complex calculation process
Mesoscopic methods	(1) Reduced the number of nodes and units, reducing the difficulty of modeling; (2) Compared with macroscopic methods, it has added the function of strain, stress, and failure analysis for each layer and interlayer of composite materials; (3) Can establish the relationship between the strength of composite materials and the properties, content, microstructure and other parameters of component materials	(1) Expanded the research scale, reduced workload, and reduced accuracy; (2) Due to the different environments and failure modes of different structures, the research process may be slightly cumbersome
Macroscopic methods	Starting from experiments and analyzing the mechanical properties of composite materials, the feasibility of research is higher	(1) There will be many ideal conditions set during the experimental process, and there may be errors in the experimental data; (2) Unable to consider issues such as strain, stress, and failure analysis between composite layers

匮乏，许多学者还在致力于寻找其中的可行性，这也是未来对于 FRP 构件数值模拟发展的重点之一。

4 结论及展望

近些年纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 筋/拉索逐渐走进大众的视野，因其具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳、便于运输等优点，越来越广泛的工程中都开始运用 FRP 筋/拉索及其复合构件。而机遇也是挑战，广泛地应用随之带来的是越来越多材料性能、结构分析与设计理论等方面问题的出现。根据对如今 FRP 筋/拉索的数值模拟等研究现状的调研综述，得到以下几个方面的结论：

(1) 如今对于数值模拟的研究主要是根据工程实例中所需的控制因素和参数需求来建立有限元模型，模拟其性能的变化。根据某一参数变化来模拟模型变化虽然可以控制变量，但影响 FRP 筋/拉索性能的控制因素却有很多，例如由随机因素引起的缺陷与损伤，或是纤维的工艺结构和筋材的表面形态等，这些因素都可能会影响到 FRP 构件的力学性能与各项指标。如今针对这些随机性因素的模拟方法是单一变量进行模拟，无法将这些因素准确预测并建立模型来模拟其变化规律以解决其随机性所带来的影响，这是未来有限元数值模拟需要继续发展并解决的问题；

(2) 目前数值模拟方法已经能够完整建立模型并预测单一尺度下 FRP 构件的性能变化，但对于工程使用中的 FRP 筋/拉索构件而言，影响构件力学性能的参数原因还有很多，不同尺度下的参数影响也需要利用不同的尺度方法来建模预测，因此需要提出多尺度联系的方法来解决此问题，根据不同尺度间的联系，结合其参数及性能变化，最后形成完整的多尺度迭代链，这便是利用多尺度之间联系的数值模拟方法所应用的思路所在；

(3) 除了现阶段可以进行模拟预测的参数之外，对于与实验相结合的数值模拟研究方法，准确全面地还原工程环境也是非常重要的。例如在特殊环境条件下 (如海洋结构、高温环境等) 如何还原实验环境并且在数值模拟中予以体现，是如今数值模拟与宏观试验的结合之间需要解决的问题。

在现阶段关于 FRP 构件的数值模拟还具有许多不足之处，除了上述提到的工艺结构、锚固性能、界面性能等重点研究方向，未来对于 FRP 筋/拉索的研究也将会从以下几个方面入手：

(1) 考虑微观随机缺陷的模型。随着 FRP 结构在桥梁工程中的应用日益增多，其采用的复杂制造工艺会导致 FRP 材料属性及其构成结构性能存在较大的离散性，同时不确定性参数的多层级、非均质和种类多等特点使其结构可靠性较难准确量化。在 FRP 筋与其他材料粘接时也会由于锚固区的微观裂缝、表面形态等原因对构件的稳定性产生负面影响。微观初始缺陷是 FRP 构件在应用过程中无法避免的问题，现阶段能够直观精确地检测出各种构件中不同初始缺陷的方法还不够完善，因此对不同初始缺陷下 FRP 构件的力学性能进行有效预测，建立考虑例如纤维结构形状、树脂流动产生的气泡、混凝土初始裂缝、环氧树脂流动性能及锚固区表面形态的随机性等客观随机初始因素的有限元模型，分析其可能存在的影响因素并对其运行预测，对于有效利用 FRP 力学性能，避免因随机初始缺陷引发安全隐患具有重大意义；

(2) 现阶段由于 FRP 筋与混凝土之间的界面性能受 FRP 筋种类、表面形式、锚固长度、保护层厚度等多种因素影响，而环境因素如干湿交替、酸碱氯盐、温度变化等也会导致界面粘结强度下降，要建立反映多种因素影响的界面粘结强度统一理论模型难度较大。机器学习的方法可以解决这些问题，得到更高的计算精度及适用性更强的常温、高温下的粘结强度预测模型。现阶段对于数据学习方法的研究，大部分基于数据库的收集与模型的建立使用，机器学习方法用于解决模型参数不统一、计算繁琐、精度有限等问题有良好的效果，通过大量研究发现机器学习方法使用模型的整体精度较高，有良好的模拟性能，大大减轻了人为建立模型的考虑欠缺的问题，也解决了人工建模过程中无法真实还原实验环境的难题，在未来机器学习方法也会为 FRP 模拟的研究带来更深远的意义；

(3) 随着 FRP 在海洋工程中的应用也越来越广泛，其在多场条件下的长期耐久性能也越来越为人们所关注。对于热带海洋建筑结构来说，服役期间易遭受高温、高湿、高盐和高紫外线等各种损伤因子作用，这对 FRP 筋及其构件的长期性能是一种严峻的挑战。对于 FRP 在受腐蚀条件下的长期受力和耐久性能，现阶段其研究主要以试验为主，但在实验过程中也有许多不足之处，在腐

蚀环境下对 FRP-混凝土界面粘结性能进行试验研究时，由于宏观试验无法百分之百模拟真实的海洋环境，其模型所基于的本构关系也无法全面的再现在多场效应下 FRP 构件所服役的真实环境，如何解决宏观实验中的真实问题也是未来研究的重点。

未来对于 FRP 筋/拉索的研究展望将会着眼于微观尺度的微观随机缺陷方面及细观尺度中的有限元数值模拟建模与实验方法的结合上，在宏观尺度对于机器学习方法也需要更加拓展与深入，与此相对应的宏观试验也需要更进一步考虑多场条件下环境因素的变化，尽可能还原工程环境影响，减少工艺损伤，更加精确地模拟多场条件下 FRP 筋/拉索构件所受的环境影响。从多尺度层面出发，解决不同尺度下各自的问题，是未来研究 FRP 构件的重点所在。

参考文献：

[1] WAN B L, JIANG C, WU Y F. Effect of defects in externally bonded FRP reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 63-76.

[2] 范向前, 刘决丁, 胡少伟, 等. FRP 加固混凝土研究现状与展望 [J]. 混凝土, 2019(12): 156-160.
FAN Xiangqian, LIU Jueding, HU Shaowei, et al. Research status and prospects of FRP reinforced concrete[J]. Concrete, 2019(12): 156-160(in Chinese).

[3] 张鑫, 代清利, 李伟, 等. FRP 复合材料在道路路面裂缝安全处治中的运用 [J]. 城市建设理论研究, 2023(23): 147-149.
ZHANG Xin, DAI Qingli, LI Wei, et al. The application of FRP composite materials in safe treatment of road surface cracks[J]. Urban Construction Theory Research, 2023(23): 147-149(in Chinese).

[4] 袁方, 赵修远. FRP 筋-钢筋增强 ECC-混凝土组合柱抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2021, 38(8): 55-65.
YUAN Fang, ZHAO Xiuyuan. Research on seismic performance of FRP reinforced ECC concrete composite columns[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 55-65(in Chinese).

[5] 白娜妮. 单向纤维复合材料疲劳性能数值模拟方法 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
BAI Nani. Numerical simulation method for fatigue performance of unidirectional fiber composite materials[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2023(in Chinese).

[6] 刘杰. 基于 FRP 的钢桥箱梁疲劳损伤加固方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
LIU Jie. Research on fatigue damage reinforcement method for steel bridge box girders based on FRP[D]. Nanjing: Southeast University, 2020(in Chinese).

[7] 贾瀚翔, 吴超, 夏林祥, 等. 纤维增强复合材料疲劳性能研究进展 [J]. 新技术新工艺, 2023(8): 5-9.
JIA Hanxiang, WU Chao, XIA Linxiang, et al. Research progress on fatigue performance of fiber-reinforced composite materials[J]. New Technology and Process, 2023(8): 5-9(in Chinese).

[8] YE Y J, ZHENG K G, HUA K Q. Rate-dependent multiaxial life prediction for polyamide-6 considering ratchetting: Semi-empirical and physics-informed machine learning models[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 163: 107086.

[9] TAO C C, ZHANG C, JI H L, et al. Fatigue damage characterization for composite laminates using deep learning and laser ultrasonic[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 216: 108816.

[10] 刘志明, 陈静芬, 毛欢, 等. 纤维增强复合材料混合模式分层破坏数值模拟研究 [J]. 应用力学学报, 2023, 40(3): 545-557.
LIU Zhiming, CHEN Jingfen, MAO Huan, et al. Numerical simulation of mixed mode delamination failure in fiber reinforced composite materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(3): 545-557(in Chinese).

[11] 魏志远. 碳纤维编织复合材料变形与内部损伤精细化测量与数值模拟 [D]. 保定: 河北大学, 2021.
WEI Zhiyuan. Fine measurement and numerical simulation of deformation and internal damage in carbon fiber woven composite materials[D]. Baoding: Hebei University, 2021(in Chinese).

[12] 杨玉娥, 张文习. 碳纤维复合材料的无损检测综述 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2015(6): 471-476.
YANG Yu'e, ZHANG Wenxi. Review of non-destructive testing of carbon fiber composite materials[J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2015(6): 471-476(in Chinese).

[13] 文琼华, 孟江燕, 龚楚, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料孔隙率检测方法的分析比较 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(7): 32-37.
WEN Qionghua, MENG Jiangyan, GONG Chu, et al. Analysis and comparison of porosity detection methods for carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. Fiber Glass/Composite Materials, 2016(7): 32-37(in Chinese).

[14] 闫清峰, 张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15314-15322.
YAN Qingfeng, ZHANG Jigang. Application and development of fiber reinforced composite materials in civil engineering[J]. Science and Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15314-15322(in Chinese).

[15] 梅葵花, 李宇, 贾文科, 等. 纤维增强复合材料缆索锚固系统研究与应用进展 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(4): 83-102.

MEI Kuihua, LI Yu, JIA Wenke, et al. Research and application progress of fiber reinforced composite cable anchorage system[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(4): 83-102(in Chinese).

[16] CHEN Z P, QIN W H, LIANG Y H, et al. Axial compressive performance of seawater sea sand concrete-filled CFRP-stainless steel tube short columns[J]. Construction and Building Materials, 2023, 369: 130501.

[17] 吴超, 吴瑞东, 蒋金桥, 等. 土木工程应用中碳纤维/环氧树脂界面在环境影响下退化的分子模拟研究进展 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(12): 2941-2952.
WU Chao, WU Ruidong, JIANG Jinqiao, et al. Recent advances in understanding environmental effects on degradation of carbon fiber/epoxy matrix interface in civil engineering applications via molecular simulation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(12): 2941-2952(in Chinese).

[18] WU C, WU R D, TAM L H. Understanding degradation of fiber/matrix interface under environmental effects using molecular simulation[C]//10th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, CICE 2021. Istanbul: Lecture Notes in Civil Engineering, 2022, 198: 2096-2108.

[19] WU R D, WANG X Q, ZHAO D Y, et al. Degradation of fiber/matrix interface under various environmental and loading conditions: Insights from molecular simulations[J]. Construction and Building Materials, 2023, 390: 131101.

[20] 刘颖红林. 纤维增强复合材料损伤演化声发射量化表征方法研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
LIU Yinghonglin. Research on quantitative characterization method of acoustic emission for damage evolution of fiber reinforced composite materials[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022(in Chinese).

[21] 章中才. 基于正交数值试验与 GA-BP 算法的玻纤筋参数优化及预测研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
ZHANG Zhongcai. Research on optimization and prediction of fiberglass reinforcement parameters based on orthogonal numerical experiments and GA-BP algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022(in Chinese).

[22] 杨步云, 肖明, 罗宁, 等. 锚杆剪切过程中的受力机理分析 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2019, 47(3): 127-132.
YANG Buyun, XIAO Ming, LUO Ning, et al. Analysis of the stress mechanism during the shearing process of bolts[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 127-132(in Chinese).

[23] 周小燚, 钱盛域, 王能威, 等. FRP 工程结构多尺度不确定性分析研究进展 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 97-113.
ZHOU Xiaoyi, QIAN Shengyu, WANG Nengwei, et al. Research progress on multi-scale uncertainty analysis of FRP engineering structures[J]. Chinese Journal of Highway Engineering, 2023, 36 (1): 97-113(in Chinese).

[24] 朱德举, 沈琰, 李晟, 等. 考虑内部缺陷的 FRP 拉索力学行为仿真分析 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49(1): 85-93.
ZHU Deju, SHEN Yan, LI Sheng, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of FRP cables considering internal defects[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2022, 49(1): 85-93(in Chinese).

[25] 黄梅, 潘静雯, 江剑, 等. 纤维增强复合材料中多分层损伤的识别研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2021(5): 21-30.
HUANG Mei, PAN Jingwen, JIANG Jian, et al. Identification of multi layered damage in fiber reinforced composite materials[J]. Composite Materials Science and Engineering, 2021(5): 21-30(in Chinese).

[26] 詹超, 马晓静, 张芝芳. 纤维增强复合材料梁的分层损伤识别 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(9): 5-12.
ZHAN Chao, MA Xiaojing, ZHANG Zhifang. Identification of delamination damage in fiber reinforced composite beams[J]. Fiber Glass/Composite Materials, 2017(9): 5-12(in Chinese).

[27] 高嘉琪. 不同表面特性 FRP 筋与海水海砂混凝土粘结性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
GAO Jiaqi. Experimental study on the bonding performance between FRP bars with different surface characteristics and seawater sand concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022(in Chinese).

[28] ZHANG P, ZHANG S, GAO D, et al. Influence of rib parameters on mechanical properties and bond behavior in concrete of fiber-reinforced polymer rebar[J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 24(1): 196-208.

[29] SOLYOM S, BALÁZS G L. Bond of FRP bars with different surface characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 119839.

[30] 张羽, 傅丰, 郑吉丰, 等. 基于试验验证下的 FRP 筋与混凝土粘结滑移界面关系有限元模型的建立方法 [J/OL]. 建筑结构: 1-11[2024-01-21].
ZHANG Yu, FU Feng, ZHENG Jifeng, et al. Method for establishing a finite element model of the bond slip interface relationship between FRP bars and concrete based on experimental verification [J/OL]. Building Structure: 1-11[2024-01-21](in Chinese).

[31] 尹世平, 李雨珊, 刘运超. FRP 筋与全珊瑚骨料海水混凝土粘结性能数值模拟 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(1): 210-223.
YIN Shiping, LI Yushan, LIU Yunchao. Numerical simula-

tion of bonding performance between FRP bars and seawater concrete with coral aggregate[J]. Journal of Applied Fundamentals and Engineering Science, 2023, 31(1): 210-223(in Chinese).

[32] 赵卫平, 肖建庄. 带肋钢筋与混凝土间粘结滑移本构模型 [J]. 工程力学, 2011, 28(4): 164-171.
ZHAO Weiping, XIAO Jianzhuang. Bond slip constitutive model between ribbed steel bars and concrete[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 164-171(in Chinese).

[33] 褚天舒. 基于耐久性的 FRP 筋-混凝土构件粘结滑移本构关系研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
CHU Tianshu. Study on the bond-slip constitutive relationship between FRP reinforcement and concrete members based on durability[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018(in Chinese).

[34] SOORIYAARACHCHI H, PILAKOUTAS K, BYARS E. Tension stiffening behavior of GFRP-reinforced concrete[J]. Special Publication, 2005, 230: 975-990.

[35] VILANOVA I, TORRES L, BAENA M, et al. Experimental study of tension stiffening in GFRP RC tensile members under sustained load[J]. Engineering Structures, 2014, 79: 390-400.

[36] RIMKUS A, BARROS J A O, GRIBNIAK V, et al. Mechanical behavior of concrete prisms reinforced with steel and GFRP bar systems[J]. Composite Structures, 2019, 220: 273-288.

[37] 贾道光. 考虑 GFRP 筋拉伸性能劣化的 GFRP 筋-钢筋双层配筋墩柱抗震性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
JIA Daoguang. Research on seismic performance of GFRP reinforced double layer reinforced pier columns considering the deterioration of tensile performance of GFRP reinforcement[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021(in Chinese).

[38] 吴刚, 罗云标, 吴智深, 等. 钢-连续纤维复合筋 (SFCB) 力学性能试验研究与理论分析 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 53-61.
WU Gang, LUO Yunbiao, WU Zhishen, et al. Experimental study and theoretical analysis on the mechanical properties of steel continuous fiber composite reinforcement (SFCB)[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 53-61(in Chinese).

[39] MU Y N, SHI L, ZHANG Z. Studies and improvements on modal pushover analysis and application on bridge[J]. Advanced Materials Research, 2010, 163-167: 4076-4082.

[40] GUO F, AL-SAADI S, SINGH RAMAN R S, et al. Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment[J]. Corrosion Science, 2018, 141: 1-13.

[41] 周小祥. 复合材料板冲击拉伸性能的实验研究与数值模拟 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
ZHOU Xiaoxiang. Experimental study and numerical simulation of impact tensile properties of composite plates[D]. Xi'an: Northwest University of Technology, 2005(in Chinese).

[42] 郝仙娟, 许有纯, 舒营. FRP 材料动态本构模型综述 [J]. 低温建筑技术, 2022, 44(4): 21-24, 29.
HAO Xianjuan, XU Youchun, SHU Ying. Overview of dynamic constitutive models for FRP materials[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2022, 44(4): 21-24, 29(in Chinese).

[43] LUO S D, WANG Y, WANG G T, et al. Hybrid spray-coating, laser-scribing and ink-dispensing of graphene sensors/arrays with tunable piezoresistivity for in situ monitoring of composites[J]. Carbon, 2018, 139: 437-444.

[44] 张新越, 欧进萍. FRP 加筋混凝土短柱受压性能试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2006(4): 467-472, 485.
ZHANG Xinyue, OU Jinping. Experimental study on compressive performance of FRP reinforced concrete short columns[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2006(4): 467-472, 485(in Chinese).

[45] 周健南, 孔新立, 王鹏, 等. CFRP 加固素混凝土拱压缩性能数值模拟 [J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1(1): 80-88.
ZHOU Jiannan, KONG Xinli, WANG Peng, et al. Numerical simulation of compressive performance of CFRP reinforced plain concrete arches[J]. Journal of Army Engineering University, 2022, 1(1): 80-88(in Chinese).

[46] 任振华, 曾宪桃, 孙浚博. 内嵌 CFRP 筋加固宽缺口混凝土梁内力解析与试验研究 [J]. 工程力学, 2019, 36(4): 117-124.
REN Zhenhua, ZENG Xiantao, SUN Junbo. Analysis and experimental study of internal forces in reinforced wide gap concrete beams with embedded CFRP reinforcement[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(4): 117-124(in Chinese).

[47] 徐可. 混合配筋高强混凝土梁受弯性能试验研究及数值模拟 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
XU Ke. Experimental research and numerical simulation on the flexural performance of high-strength concrete beams with mixed reinforcement[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020(in Chinese).

[48] 张智梅, 魏久燚. 钢筋与 FRP 筋混杂配筋混凝土梁的抗弯性能 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2022, 28(4): 678-688.
ZHANG Zhimei, WEI Jiuyi. Flexural performance of concrete beams with mixed reinforcement of steel bars and FRP bars[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2022, 28(4): 678-688(in Chinese).

[49] MUSTAFA S A A, HASSAN H A. Behavior of concrete

beams reinforced with hybrid steel and FRP composites[J]. HBRC Journal, 2018, 14(3): 300-308.

[50] 蒋祖发. FRP 筋 ECC 梁受弯性能研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
JIANG Zufa. Research on the flexural performance of FRP reinforced ECC beams[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021(in Chinese).

[51] 刘水, 汪昕, 吴智深. FRP 筋-钢筋混合配筋混凝土受弯构件短期刚度计算方法 [J/OL]. 工程力学: 1-11[2023-12-07].
LIU Shui, WANG Xin, WU Zhishen. Short term stiffness calculation method for FRP reinforced concrete flexural members with mixed reinforcement[J/OL]. Engineering Mechanics: 1-11[2023-12-07](in Chinese).

[52] 高丹盈, 赵军, BRAHIM B. 玻璃纤维聚合物筋混凝土梁裂缝和挠度的特点及计算方法 [J]. 水利学报, 2001, 32(8): 53-58.
GAO Danying, ZHAO Jun, BRAHIM B. Characteristics and calculation methods of cracks and deflections in concrete beams reinforced with glass fiber polymer reinforcement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(8): 53-58(in Chinese).

[53] DAVOOD M, MARYAM M A. Effect of confining of boundary elements of slender RC shear wall by FRP composites and stirrups[J]. Engineering Structures, 2012, 41: 1-13.

[54] 朱虹, 张继文. 预应力 FRP 筋增强 RC 梁受弯破坏模式研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(5): 97-101.
ZHU Hong, ZHANG Jiwen. Research on the flexural failure mode of prestressed FRP reinforced RC beams[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2012, 34(5): 97-101(in Chinese).

[55] JIN L, YU W X, DU X L, et al. Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 1-12.

[56] 王自柯, 段建新, 赵军, 等. FRP 筋在不同腐蚀环境下的层间剪切性能劣化试验 [J/OL]. 复合材料学报: 1-14[2023-11-24].
WANG Zike, DUAN Jianxin, ZHAO Jun, et al. Deterioration test of interlayer shear performance of FRP reinforcement under different corrosive environments[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica: 1-14[2023-11-24](in Chinese).

[57] 王自柯. FRP 筋在模拟海水-海砂混凝土孔溶液浸泡下的耐久性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
WANG Zike. Durability study of FRP reinforcement under simulated seawater sea sand concrete pore solution immersion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018(in Chinese).

[58] 庞育阳, 吕远晨, 王强. 氯盐侵蚀环境下液体橡胶改性 CFRP-钢界面耐久性 [J/OL]. 复合材料学报:1-15[2024-02-04].
PANG Yuyang, LYU Yuanchen, WANG Qiang. Interfacial durability of liquid rubber modified CFRP-steel under chloride salt erosion[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica: 1-15[2024-02-04](in Chinese).

[59] DE LORENZIS L, TENG J G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2): 119-143.

[60] 袁良柱, 苗春贺, 单俊芳, 等. 冲击下混凝土试样应变率效应和惯性效应探讨 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(1): 18-30.
YUAN Liangzhu, MIAO Chunhe, SHAN Junfang, et al. Discussion on strain rate effect and inertia effect of concrete specimens under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(1): 18-30(in Chinese).

[61] SOLIMAN S M, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Bond performance of near-surface-mounted FRP bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(1): 103-111.

[62] PENG B, LI Q, FENG X Q, et al. Effect of shear stress on adhesive contact with a generalized Maugis-Dugdale cohesive zone model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 148: 104275.

[63] 曹吉星. 钢纤维混凝土的动态本构模型及其有限元方法 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
CAO Jixing. Dynamic constitutive model and finite element method of steel fiber reinforced concrete[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018(in Chinese).

[64] LIU T, XIAO Y. Impact behavior of CFRP-strip-wrapped RC beams without stirrups[J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(5): 04017035.

[65] LIU T, LIU T, KANG T H K, et al. Impact testing of reinforced concrete beams shear-strengthened with fiber-reinforced polymer wraps[J]. ACI Structural Journal, 2020, 117(3): 297-310.

[66] 卢娟. 冲击荷载下 CFRP 增强钢筋混凝土梁的动力性能及界面粘结机制研究 [D]. 广州: 广州大学, 2023.
LU Juan. Research on the dynamic performance and interface bonding mechanism of CFRP reinforced concrete beams under impact load[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023(in Chinese).

[67] ZHU H, WANG Q, DAI J G, et al. Innovative additional aluminum alloy ribs anchorage for improving the bond reliability of pretensioned CFRP bar: A feasibility study[J]. Composite Structures, 2022, 280: 114817.

[68] 崔兆发. 冻融及疲劳荷载耦合作用下 BFRP-混凝土界面粘结性能研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2023.
CUI Zhaofa. Study on the bonding performance of BFRP concrete interface under the coupling effect of freeze-

thaw and fatigue loads[D]. Changchun: Jilin University of Architecture, 2023(in Chinese).

[69] TOUMPANAKI E, RAMAGE M. Cyclic loading of glued-in FRP rods in timber: Experimental and analytical study[J]. Journal of Composites for Construction, 2022, 26(2): 0001182.

[70] 彭哲琦, 汪昕, 吴智深. FRP 拉索静力及蠕变性能的多尺度预测 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(2): 98-105.
PENG Zheqi, WANG Xin, WU Zhishen. Multi scale prediction of static and creep properties of FRP cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 98-105(in Chinese).

[71] 石康乐, 何朗, 朱四荣, 等. 基于基因表达式编程的 FRP 蠕变分析与预测 [J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(7): 1-9.
SHI Kangle, HE Lang, ZHU Sirong, et al. Analysis and prediction of FRP creep based on gene expression programming[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(7): 1-9(in Chinese).

[72] 张尧. 纤维增强树脂基复合材料弯曲蠕变分析及其细观模型研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.
ZHANG Yao. Bending creep analysis and mesoscopic model study of fiber reinforced resin matrix composite materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2023(in Chinese).

[73] 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
DONG Zhiqiang, WU Gang. Research progress on durability performance of FRP reinforced concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 1-19, 29(in Chinese).

[74] 王伟, 薛伟辰. 碱环境下 GFRP 筋拉伸性能加速老化试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 760-766.
WANG Wei, XUE Weichen. Research on accelerated aging test of tensile properties of GFRP reinforcement in alkaline environment[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 760-766(in Chinese).

[75] AL-SALLOUM Y A, EL-GAMAL S, ALMUSALLAM T H, et al. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 835-844.

[76] 付凯, 薛伟辰. 人工海水环境下 GFRP 筋抗拉性能加速老化试验 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 35-41.
FU Kai, XUE Weichen. Accelerated aging test on tensile properties of GFRP bars under artificial seawater environment[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 35-41(in Chinese).

[77] 于志力. FRP 筋与海水海砂混凝土界面粘结耐久性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
YU Zhili. Study on the durability of interface bonding between FRP reinforcement and seawater sand concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023(in Chinese).

[78] FENG B, WANG X, WU Z S, et al. Performance of anchorage assemblies for CFRP cables under fatigue loads[J]. Structures, 2021, 29: 947-953.

[79] FENG P, ZHANG P, MENG X M, et al. Mechanical analysis of stress distribution in a carbon fiber-reinforced polymer rod bonding anchor[J]. Polymers, 2014, 6(4): 1129-1143.

[80] 李扬, 贾丽君. 基于 Tsai-wu 准则的 CFRP 拉索粘结型锚具的仿真分析 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, 39(1): 60-66.
LI Yang, JIA Lijun. Simulation analysis of CFRP cable bonded anchorage based on Tsai-wu criterion[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2020, 39(1): 60-66(in Chinese).

[81] 王文广. FRP 抗剪加固混凝土梁锚固效果的有限元分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
WANG Wenguang. Finite element analysis of anchorage effect of FRP shear strengthening concrete beams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019(in Chinese).

[82] 刘浪. 预应力 BFRP 锚杆设计与锚固性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
LIU Lang. Design and anchoring performance research of prestressed BFRP anchor rods[D]. Nanjing: Southeast University, 2022(in Chinese).

[83] 冯博. 大吨位 FRP 拉索锚固体系及长期性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
FENG Bo. Research on large tonnage FRP cable anchorage system and long term performance[D]. Nanjing: Southeast University, 2020(in Chinese).

[84] 熊文, 肖汝诚, CAI C S, 等. 基于力学与造价的 CFRP-钢组合拉索斜拉桥设计理论 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 97-106.
XIONG Wen, XIAO Rucheng, CAI C S, et al. Design theory of CFRP steel composite cable-stayed bridge based on mechanics and cost[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 97-106(in Chinese).

[85] 周建超. 基于高性能材料超大跨径混合梁斜拉桥的结构方案及力学性能 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
ZHOU Jianchao. Structural scheme and mechanical properties of ultra long span hybrid beam cable-stayed bridges based on high-performance materials[D]. Changsha: Hunan University, 2021(in Chinese).

[86] NANNI A, BAKIS C E, DIXON T O. Performance of FRP tendon-anchor systems for prestressed concrete structures[J]. PCI Journal, 1996, 41(1): 34-43.

[87] 余锐锋. GFRP/CFRP 混杂纤维筋土层锚杆的锚固机制与设计方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
YU Ruifeng. Research on the anchoring mechanism and design method of GFRP/CFRP hybrid fiber reinforced soil anchor rods[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022(in Chinese).

[88] WANG Y L, WANG Y S, WAN B L, et al. Properties and mechanisms of self-sensing carbon nanofibers/epoxy composites for structural health monitoring[J]. Composite Structures, 2018, 200: 669-678.

[89] ABED F, OUCIF C, AWERA Y, et al. FE modeling of concrete beams and columns reinforced with FRP composites[J]. Defence Technology, 2021, 17(1): 1-14.

[90] TAM L H, ZHOU A, YU Z C, et al. Understanding the effect of temperature on the interfacial behavior of CFRP-wood composite via molecular dynamics simulations[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 109: 227-237.

[91] TAM L H, JIANG J Q, YU Z C, et al. Molecular dynamics investigation on the interfacial shear creep between carbon fiber and epoxy matrix[J]. Applied Surface Science, 2021, 537: 148013.

[92] WU C, JIANG J, TAM L H, et al. An atomistic study of creep deformation in fiber/matrix interface[C]//ICCM22 2019. Melbourne: VIC, 2019: 2526-2535.

[93] TAM L H, WU R D, MINKENG M A N, et al. Understanding creep behavior of carbon fiber/epoxy interface via molecular dynamics simulation[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023, 30(19): 4052-4064.

[94] 杨清瑞. 侵蚀离子环境下 FRP/混凝土界面劣化机制与性能调控的分子动力学研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
YANG Qingrui. Molecular dynamics study on the degradation mechanism and performance control of FRP/concrete interface under corrosive ion environment[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022(in Chinese).

[95] TAM L H, MINKENG M A N, LAU D, et al. Molecular interfacial shearing creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix interface under moisture condition[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 282: 109177.

[96] TAM L H, HE L, WU C. Molecular dynamics study on the effect of salt environment on interfacial structure, stress, and adhesion of carbon fiber/epoxy interface[J]. Composite Interfaces, 2019, 26(5): 431-447.

[97] TAM L H, ZHOU A, WU C. Nanomechanical behavior of carbon fiber/epoxy interface in hygrothermal conditioning: A molecular dynamics study[J]. Materials Today Communications, 2019, 19: 495-505.

[98] TAM L H, ZHOU A, ZHANG R X, et al. Effect of hygrothermal environment on traction-separation behavior of carbon fiber/epoxy interface[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 728-738.

[99] LAU D, JIAN W, YU Z, et al. Nano-engineering of construction materials using molecular dynamics simulations: Prospects and challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 282-291.

[100] GUNES O, LAU D, TUAKTA C, et al. Ductility of FRP-concrete systems: Investigations at different length scales[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 915-925.

[101] 杨强, 解维华, 孟松鹤, 等. 复合材料多尺度分析方法与典型元件拉伸损伤模拟 [J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 617-624.
YANG Qiang, XIE Weihua, MENG Songhe, et al. Multi-scale analysis method of composites and damage simulation of typical component under tensile load[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 617-624(in Chinese).

[102] 陈玉丽, 马勇, 潘飞, 等. 多尺度复合材料力学研究进展 [J]. 固体力学学报, 2018, 39(1): 1-68.
CHEN Yuli, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale composite material mechanics[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(1): 1-68(in Chinese).

[103] 苏畅. FRP 筋性能设计及其增强海水海砂混凝土构件长期性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
SU Chang. Performance design of FRP bars and long-term performance study of reinforced seawater sand concrete components[D]. Nanjing: Southeast University, 2021(in Chinese).

[104] 王川, 欧进萍. GFRP 筋酸碱盐腐蚀老化实验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(S1): 373-377.
WANG Chuan, OU Jinping. Experimental study on acid alkali salt corrosion and aging of GFRP tendons[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(S1): 373-377(in Chinese).

[105] 芦思羽, 陈德, 吴昊. FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型 [J/OL]. 工程力学: 1-13[2023-04-07].
LU Siyu, CHEN De, WU Hao. FRP concrete interface dynamic shear slip model[J/OL]. Engineering Mechanics: 1-13[2023-04-07](in Chinese).

[106] CHEN Z L, WANG J, CHEN J Y, et al. Responses of concrete-filled FRP tubular and concrete-filled FRP-steel double skin tubular columns under horizontal impact[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 155: 106941.

[107] 谭力豪. FRP 螺旋条带部分包裹混凝土柱轴压力学性能试验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
TAN Lihao. Experimental study on the axial compressive performance of partially wrapped concrete columns with FRP spiral strips[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020(in Chinese).

[108] 翟可仪. GFRP 筋与超高性能混凝土 (UHPC) 粘结性能研

究［D］. 广州: 广东工业大学, 2022.
ZHAI Keyi. Study on the bonding performance between GFRP reinforcement and ultra high performance concrete (UHPC)［D］. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022(in Chinese).

［109］ 吴镇铎. FRP 筋增强 ECC 桥面连接板工作机制及受力特性研究［D］. 广州: 华南理工大学, 2020.
WU Zhenduo. Research on the working mechanism and stress characteristics of FRP reinforced ECC bridge deck connection plates［D］. Guangzhou: South China University of Technology, 2020(in Chinese).

［110］ 史健喆. 海洋环境下 BFRP 筋体外预应力加固钢筋混凝土梁长期性能研究［D］. 南京: 东南大学, 2020.
SHI Jianzhe. Long term performance study of reinforced concrete beams strengthened with BFRP tendons externally prestressed in marine environments［D］. Nanjing: Southeast University, 2020(in Chinese).

［111］ LIU B, JIANG H, HUANG Y, et al. Atomic-scale finite element method in multiscale compotation with applications to carbon nanotubes［J］. Physical Review B, 2005, 72(3): 035435

［112］ 李军平, 刘宝瑞, 童军, 等. 纤维增强复合材料递阶多尺度分析方法综述［C］//北京力学会第二十八届学术年会论文集(上). 北京: 北京力学会, 2022: 7.
LI Junping, LIU Baorui, TONG Jun, et al. Summary of hierarchical multiscale analysis methods for fiber-reinforced composite materials［C］//Proceedings of the 28th Academic Annual Meeting of the Beijing Society of Mechanics (Part 1). Beijing: Beijing Society of Mechanics, 2022: 7(in Chinese).

［113］ 彭哲琦. 大跨结构用 FRP 拉索多尺度精细化性能预测及结构分析［D］. 南京: 东南大学, 2021.
PENG Zheqi. Multi scale refined performance prediction and structural analysis of FRP cables for large-span structures［D］. Nanjing: Southeast University, 2021(in Chinese).

［114］ 欧云福. 玄武岩纤维增强复合材料的多尺度力学性能研究［D］. 长沙: 湖南大学, 2017.
OU Yunfu. Study on multiscale mechanical properties of basalt fiber reinforced composite materials［D］. Changsha: Hunan University, 2017(in Chinese).

［115］ 张如灏. 考虑初始缺陷的三维玄武岩纤维复合材料多尺度渐进损伤分析［D］. 长春: 吉林大学, 2023.
ZHANG Ruhao. Multiscale progressive damage analysis of three-dimensional basalt fiber composite materials considering initial defects［D］. Changchun: Jilin University, 2023(in Chinese).