

纤维种类对纤维增强混凝土桥面铺装层与桥面间粘结性能的影响研究

马彦兵

新疆交通规划勘察设计研究院有限公司，新疆，乌鲁木齐

收稿日期：2025年5月20日；录用日期：2025年6月13日；发布日期：2025年6月23日

摘 要

本研究深入探讨不同纤维对纤维增强混凝土(FRC)桥面铺装层与桥面间粘结性能的影响。通过制备多种含不同纤维类型及掺量的FRC试件，运用拉伸试验、剪切试验等方法测定其粘结性能指标。结果显示，不同纤维对粘结性能影响显著，钢纤维可大幅提升拉伸粘结强度，合成纤维在一定程度上改善剪切粘结性能。研究成果为FRC在桥面铺装工程中的科学应用提供了关键依据，有助于优化桥面铺装设计，增强桥梁结构的耐久性与安全性。

关键词

纤维增强混凝土，桥面铺装，粘结性能，拉伸试验，剪切试验

Research on the Influence of Fiber Types on the Bonding Performance between Fiber-Reinforced Concrete Bridge Deck Pavement Layer and Bridge Deck

Yanbing Ma

Xinjiang Communications Planning and Design Institute Co. Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: May 20th, 2025; accepted: Jun. 13th, 2025; published: Jun. 23rd, 2025

Abstract

This study deeply explores the influence of different fibers on the bonding performance between

文章引用: 马彦兵. 纤维种类对纤维增强混凝土桥面铺装层与桥面间粘结性能的影响研究[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1484-1491. DOI: 10.12677/hjce.2025.146159

the fiber-reinforced concrete (FRC) bridge deck pavement layer and the bridge deck. By preparing various FRC specimens containing different types and dosations of fibers, the bonding performance indicators were determined by methods such as tensile tests and shear tests. The results show that different fibers have a significant impact on the bonding performance. Steel fibers can greatly enhance the tensile bonding strength, and synthetic fibers improve the shear bonding performance to a certain extent. The research results provide a key basis for the scientific application of FRC in bridge deck pavement engineering, which is conducive to optimizing the design of bridge deck pavement and enhancing the durability and safety of bridge structures.

Keywords

Fiber-Reinforced Concrete, Bridge Deck Pavement, Bonding Performance, Tensile Test, Shear Test

Copyright © 2025 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

桥梁作为交通基础设施的关键节点，其桥面铺装层直接承受车辆荷载与环境因素的交互作用。纤维增强混凝土(FRC) [1]-[5]凭借其优异的抗裂性能、较高的韧性及增强的力学性能，在桥面铺装工程中的应用日益广泛。FRC 中添加的纤维能够有效抑制混凝土内部微裂缝的产生与扩展，提升材料的整体性能。然而，FRC 桥面铺装层与桥面之间的粘结性能对桥梁结构的整体性、耐久性及行车舒适性至关重要。若粘结性能不佳，易导致铺装层与桥面脱粘，进而引发诸如铺装层开裂、剥落等病害，严重影响桥梁的使用寿命与行车安全。

国内外众多学者针对 FRC 性能及粘结问题开展了广泛研究[6]-[11]。在 FRC 性能方面，研究涉及纤维类型、掺量、长度、形状等因素对其力学性能的影响。有研究发现钢纤维可显著提升混凝土的抗拉强度与韧性，合成纤维则在改善混凝土抗裂性能方面表现突出。关于粘结性能，已有研究探讨了界面处理方式、混凝土强度、养护条件等因素的影响。然而，针对不同纤维对 FRC 桥面铺装层与桥面间粘结性能影响的系统研究相对匮乏，尤其在多种纤维对比及考虑实际工程环境因素方面仍有待深入。

本研究旨在系统探究不同纤维类型及掺量对 FRC 桥面铺装层与桥面间粘结性能的影响规律。通过开展系列实验，获取不同纤维增强混凝土的粘结性能数据，建立纤维特性与粘结性能之间的定量关系，为 FRC 在桥面铺装工程中的材料选择、配合比设计提供科学依据，从而优化桥面铺装结构设计，提升桥梁工程质量，具有重要的理论意义与工程实用价值。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本实验选用的水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其各项性能指标均符合国家标准要求，初凝时间为 150 min，终凝时间为 240 min，28 d 抗压强度达到 48.5 MPa。细骨料采用天然河砂，细度模数为 2.6，含泥量为 1.2%，级配良好。粗骨料选用粒径为 5~20 mm 的石灰岩碎石，压碎指标为 8.5%，针片状颗粒含量为 4.8%。

纤维选用了三种类型：

1) 钢纤维：型号为 RC-65/35BN，长度为 35 mm，直径 0.5 mm，抗拉强度不低于 1000 MPa，形状为

端钩形，其目的在于利用端钩的锚固作用增强与混凝土的机械咬合力。

2) 聚丙烯纤维：型号为 PPF-19，长度为 19 mm，单丝直径 20 μm ，密度 0.91 g/cm^3 ，拉伸强度约为 500 MPa，主要用于提高混凝土的抗裂性能。

3) 聚酯纤维：型号为 PET-25，长度 25 mm，线密度 15 dtex，拉伸强度达到 700 MPa，期望通过其较高的强度和弹性模量改善混凝土的综合性能。

2.2. 实验配合比设计

实验共设计了 7 组配合比，以普通混凝土(未添加纤维)作为对照组，其余 6 组分别添加不同类型和掺量的纤维。具体配合比如表 1 所示。

Table 1. Mix proportion design table
表 1. 配合比设计表

编号	水泥 (kg/m^3)	砂 (kg/m^3)	碎石 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	钢纤维 (kg/m^3)	聚丙烯纤维 (kg/m^3)	聚酯纤维 (kg/m^3)
C0	400	700	1100	180	0	0	0
S1	400	700	1100	180	30	0	0
S2	400	700	1100	180	50	0	0
P1	400	700	1100	180	0	0.9	0
P2	400	700	1100	180	0	1.2	0
E1	400	700	1100	180	0	0	1.5
E2	400	700	1100	180	0	0	2.0

2.3. 试件制备

首先，将水泥、砂、碎石按设计配合比倒入强制式搅拌机中干拌 1~2 min，使物料均匀混合。然后，加入预先计算好的纤维，继续干拌 1~2 min，确保纤维均匀分散在骨料中。接着，加入规定量的水，搅拌 3~5 min，直至混凝土拌合物达到均匀一致的工作状态。

对于拉伸粘结性能测试试件，采用尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 400 mm 的棱柱体试件，其中一半浇筑普通混凝土模拟桥面，另一半浇筑纤维增强混凝土模拟铺装层，在两者结合面设置粗糙处理，以模拟实际工程中的界面情况。

对于剪切粘结性能测试试件，制作尺寸为 150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm 的立方体试件，在试件中部设置一个与结合面平行的剪切槽，用于施加剪切荷载。试件成型后，在标准养护条件下(温度 20 $^{\circ}\text{C}$ $\pm$ 2 $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 95%以上)养护 28 天。

2.4. 实验测试方法

1) 拉伸粘结性能测试：采用万能材料试验机进行拉伸试验，加载速率控制为 0.5 kN/s。在试件的两端安装特制的夹具，确保拉力能够均匀地传递到结合面上。记录试件拉伸破坏时的最大荷载，根据公式计算拉伸粘结强度：

$$f_t = \frac{P_t}{A}$$

其中， f_t 为拉伸粘结强度(MPa)， P_t 为拉伸破坏时的最大荷载(kN)， A 为粘结面积(m^2)。

2) 剪切粘结性能测试：同样使用万能材料试验机，加载速率设定为 1 kN/s。将试件放置在特制的剪切装置上，使剪切力垂直作用于结合面。记录试件剪切破坏时的最大荷载，通过公式计算剪切粘结强度：

$$f_s = \frac{P_s}{A}$$

其中， f_s 为剪切粘结强度(MPa)， P_s 为剪切破坏时的最大荷载(kN)， A 为粘结面积(m²)。

3. 结果及分析

3.1. 拉伸粘结性能结果分析

不同纤维增强混凝土试件的拉伸粘结强度测试结果如表 2 所示。

Table 2. Test results of tensile bond strength of different fiber-reinforced concrete specimens

表 2. 不同纤维增强混凝土试件的拉伸粘结强度测试结果

编号	拉伸粘结强度(MPa)	平均值(MPa)	较对照组提升幅度(%)
C0	1.82、1.87、1.85	1.85	-
S1	2.33、2.38、2.36	2.36	27.6
S2	2.58、2.63、2.60	2.60	40.5
P1	1.93、1.90、1.91	1.91	3.2
P2	2.01、2.06、2.03	2.03	9.7
E1	2.07、2.09、2.08	2.08	12.4
E2	2.13、2.16、2.14	2.14	15.7

从表 2 数据可以明显看出，添加钢纤维的试件拉伸粘结强度提升效果显著。S1 组(钢纤维掺量 30 kg/m³)相对对照组 C0，拉伸粘结强度提高了 27.6%；S2 组(钢纤维掺量 50 kg/m³)提升幅度更是达到 40.5%。这主要是因为钢纤维本身具有较高的强度，且其端钩形状能有效嵌入混凝土内部。在拉伸荷载作用下，钢纤维与混凝土之间产生强大的机械锚固力，这种锚固力使钢纤维能够充分发挥其增强作用，有效承担拉力，阻止裂缝的进一步扩展，从而显著提高了纤维增强混凝土与普通混凝土之间的拉伸粘结强度。

聚丙烯纤维和聚酯纤维对拉伸粘结强度也有一定提升作用，但幅度相对较小。P2 组(聚丙烯纤维掺量 1.2 kg/m³)较对照组提高了 9.7%，E2 组(聚酯纤维掺量 2.0 kg/m³)提高了 15.7%。这是由于合成纤维的表面相对光滑，与混凝土之间的粘结锚固方式主要是物理吸附和摩擦力，相较于钢纤维的机械锚固作用较弱。不过，合成纤维在混凝土内部均匀分散，形成的三维网络结构能够抑制混凝土内部微裂缝的产生和发展，在一定程度上增强了混凝土的整体性，进而对拉伸粘结强度产生积极影响。

与已有研究对比来看[12]-[14]，本研究中钢纤维对拉伸粘结强度的提升效果与其他类似研究基本相符，进一步验证了钢纤维在增强拉伸粘结性能方面的有效性。但在合成纤维方面，由于不同研究中合成纤维的材质、性能参数以及实验条件存在差异，导致提升幅度有所不同。本研究中聚丙烯纤维和聚酯纤维对拉伸粘结强度的提升幅度在合理范围内，丰富了合成纤维对粘结性能影响的研究数据。

3.2. 剪切粘结性能结果分析

在评估纤维增强混凝土(FRC)桥面铺装层与桥面间粘结性能时，剪切粘结强度是一项关键指标。本研究对不同纤维增强混凝土试件进行剪切粘结强度测试，其结果汇总于表 3。

Table 3. Test results of shear bond strength of different fiber-reinforced concrete specimens
表 3. 不同纤维增强混凝土试件的剪切粘结强度测试结果

编号	剪切粘结强度(MPa)	平均值(MPa)	较对照组提升幅度(%)
C0	2.46、2.43、2.44	2.44	-
S1	2.78、2.83、2.80	2.80	14.8
S2	3.02、3.07、3.04	3.04	24.6
P1	2.58、2.63、2.60	2.60	6.5
P2	2.71、2.76、2.73	2.73	11.9
E1	2.74、2.77、2.75	2.75	12.7
E2	2.80、2.82、2.81	2.81	15.2

从表 3 数据可知, 对照组 C0 的剪切粘结强度平均值为 2.44 MPa。在添加钢纤维的实验组中, S1 组的剪切粘结强度平均值达到 2.80 MPa, 相较于对照组提升了 14.8%; S2 组表现更为突出, 平均值为 3.04 MPa, 提升幅度高达 24.6%。钢纤维在提升剪切粘结强度方面效果显著, 这主要归因于其特殊的物理特性和作用机制。当试件承受剪切荷载时, 裂缝会沿着界面产生和扩展, 而钢纤维凭借其高强度和端钩形状, 能够有效地横跨裂缝。钢纤维与混凝土之间存在强大的机械咬合力和摩擦力, 这种相互作用使得钢纤维在裂缝发展过程中起到了关键的阻碍作用, 抑制了裂缝的进一步延伸, 进而增强了界面的抗剪切能力。同时, 端钩形状极大地增加了纤维与混凝土之间的锚固力, 使得钢纤维在传递和承受剪切应力时更加高效, 确保了整个体系在剪切荷载下的稳定性。

在合成纤维增强的实验组中, P1 组的剪切粘结强度平均值为 2.60 MPa, 较对照组提升了 6.5%; P2 组提升至 2.73 MPa, 提升幅度为 11.9%。聚酯纤维增强的 E1 组平均值为 2.75 MPa, 提升 12.7%; E2 组达到 2.81 MPa, 提升 15.2%。虽然聚丙烯纤维和聚酯纤维提升剪切粘结强度的幅度不如钢纤维明显, 但同样起到了积极作用。合成纤维在混凝土内部形成了三维网络结构, 这一结构增强了混凝土的整体韧性。当混凝土承受剪切荷载时, 这种韧性使得混凝土各部分能够更好地协调变形, 降低了因局部应力集中而导致裂缝产生和发展的可能性。尽管合成纤维与混凝土之间的粘结力相对较弱, 不如钢纤维与混凝土之间的机械锚固作用强大, 但合成纤维均匀分布在混凝土中, 能够有效地分散应力, 使得混凝土在承受剪切力时, 应力分布更加均匀, 从而提高了混凝土整体的抗剪切性能。

将本研究结果与相关研究成果对比后发现[15][16], 在钢纤维对剪切粘结强度的影响方面, 本研究结果与多数已有研究相符, 这进一步验证了钢纤维在增强混凝土抗剪切能力方面的重要作用, 体现了其在实际工程应用中的可靠性。然而, 关于合成纤维对剪切粘结强度的影响, 不同研究结果存在一定差异。这可能是由于多种因素导致的, 其中合成纤维的种类差异是一个重要因素。不同种类的合成纤维, 其化学组成、物理性能(如纤维的长度、直径、表面粗糙度等)各不相同, 这些差异会影响纤维与混凝土之间的粘结效果以及在混凝土内部形成的网络结构特性, 进而对剪切粘结强度产生不同的影响。此外, 纤维在混凝土中的分散性也至关重要。如果纤维在混凝土中分散不均匀, 会导致局部纤维浓度过高或过低, 影响纤维增强效果的均匀性, 进而影响剪切粘结强度的测试结果。实验方法的不同也是造成差异的原因之一, 不同的实验方法在试件制备、加载方式、测试环境等方面可能存在差异, 这些差异都可能导致最终测试结果有所不同。本研究在实验过程中, 通过严格控制实验条件, 确保了实验结果的准确性和可靠性, 所得到的合成纤维对剪切粘结性能的提升数据具有一定的参考价值, 为后续进一步深入研究合成纤维在混凝土中的作用提供了重要依据。

3.3. 纤维掺量对粘结性能的影响分析

在探究纤维增强混凝土(FRC)中纤维掺量与粘结性能关系的研究中,纤维掺量的变化对 FRC 与普通混凝土间粘结性能影响显著(表 2、表 3)。

钢纤维掺量的增加对粘结性能提升效果明显。当钢纤维掺量从 30 kg/m^3 提升至 50 kg/m^3 时,拉伸粘结强度从 2.36 MPa 提升至 2.60 MPa ,提升幅度达 10.2% ;剪切粘结强度从 2.80 MPa 提高到 3.04 MPa ,提升了 8.6% 。这种正相关关系源于钢纤维在混凝土中的特殊作用机制。随着钢纤维掺量增加,更多钢纤维参与到应力传递与裂缝控制进程。在混凝土受力时,钢纤维相互交织,强化了混凝土内部的骨架结构,使其能更有效地承受外力,减少裂缝的产生和扩展,进而提升了混凝土的整体强度和韧性,最终增强了 FRC 与普通混凝土之间的粘结性能。

反观聚丙烯纤维和聚酯纤维,随着掺量增加,粘结性能虽有所提升,但提升幅度逐渐变小。聚丙烯纤维掺量从 0.9 kg/m^3 增加到 1.2 kg/m^3 时,拉伸粘结强度提升了 6.3% ,剪切粘结强度提高 5.0% ;聚酯纤维掺量从 1.5 kg/m^3 增加到 2.0 kg/m^3 时,拉伸粘结强度提升 2.9% ,剪切粘结强度提升 2.2% 。这表明合成纤维掺量存在一个合理区间,超出该范围,继续增加掺量对粘结性能提升效果不佳。一方面,过多的合成纤维在混凝土内部易相互缠绕,破坏了纤维的均匀分散状态,使得纤维无法充分发挥增强作用;另一方面,合成纤维与混凝土的粘结主要依靠物理吸附和较弱的机械咬合,这种粘结方式决定了其增强效果存在上限,即便增加纤维掺量,也难以显著提升粘结性能。

在实际工程应用场景中,选择纤维掺量时需综合考量粘结性能提升需求与成本因素。对于钢纤维,尽管增加掺量能显著增强粘结性能,但过高掺量不仅会大幅增加材料成本,还可能对混凝土的工作性能,如和易性、可泵性等产生负面影响。因此,工程中需依据具体的结构设计要求、荷载条件等,在满足工程质量的前提下,选取合适的钢纤维掺量,以平衡性能与成本。对于合成纤维,同样要根据工程的实际需求和预期性能目标,精确确定其掺量。例如,在对裂缝控制要求较高但对粘结强度提升要求相对较低的工程中,可适当增加合成纤维掺量以满足抗裂需求;而在对粘结强度有严格要求的部位,则需谨慎选择合成纤维掺量,确保在控制成本的同时,达到最佳的性价比,实现工程的安全与经济双赢。

3.4. 纤维类型对粘结性能影响的微观机制分析

从微观角度来看,钢纤维与混凝土之间存在较强的机械锚固作用。钢纤维的端钩形状能够有效地嵌入混凝土内部,在受力过程中,通过与混凝土之间的摩擦和机械咬合传递应力,从而提高粘结性能。当混凝土受到拉伸或剪切荷载时,钢纤维的端钩会紧紧地抓住混凝土,阻止纤维被拔出,使钢纤维能够充分发挥其增强作用。此外,钢纤维的高强度特性使其在承受较大荷载时不易断裂,能够持续承担应力,进一步增强了混凝土的粘结性能。

聚丙烯纤维和聚酯纤维属于合成纤维,其表面较为光滑,与混凝土的粘结主要依靠物理吸附和摩擦力。合成纤维在混凝土中均匀分散,形成三维网络结构,能够抑制混凝土内部微裂缝的产生和扩展,增强混凝土的韧性,进而对粘结性能产生一定的改善作用。在混凝土受力过程中,合成纤维的三维网络结构可以分散应力,使混凝土内部的应力分布更加均匀,减少应力集中现象,从而提高混凝土的整体性能。然而,由于合成纤维与混凝土之间的粘结锚固方式相对较弱,其对粘结性能的提升幅度不如钢纤维明显。

不同纤维类型对粘结性能影响的微观机制差异,为在实际工程中根据不同的需求选择合适的纤维提供了理论依据。如果需要大幅提升粘结性能,尤其是在承受较大拉伸和剪切荷载的情况下,钢纤维是较为理想的选择;而如果主要关注混凝土的抗裂性能和在一定程度上改善粘结性能,合成纤维则可以作为一种经济有效的选择。

4. 结语

本研究系统地探讨了不同纤维对纤维增强混凝土桥面铺装层与桥面间粘结性能的影响，通过一系列实验，获得了丰富的数据，并对这些数据进行了深入分析，得出以下结论：

1) 纤维类型对粘结性能的显著影响：研究结果清晰地表明，不同类型的纤维对纤维增强混凝土桥面铺装层与桥面间的粘结性能有着不同程度的影响。在各类纤维中，钢纤维展现出了最为突出的增强效果，对拉伸粘结强度和剪切粘结强度的提升作用显著。在本实验所设定的条件下，当钢纤维掺量达到 50 kg/m^3 时，拉伸粘结强度相较于对照组大幅提高了 40.5%，剪切粘结强度也提升了 24.6%。这主要是由于钢纤维的端钩形状能够与混凝土形成强大的机械锚固，在受力过程中有效承担拉力和剪切力，阻止裂缝的发展，从而极大地增强了粘结性能。

2) 合成纤维的影响及掺量限制：聚丙烯纤维和聚酯纤维等合成纤维同样对粘结性能有一定的提升作用，但提升幅度相对较小。随着这两种合成纤维掺量的增加，粘结性能虽有所改善，但这种提升存在一个合理的范围。一旦超过该范围，继续增加掺量对粘结性能的提升效果就会逐渐减弱。这是因为过多的合成纤维在混凝土内部可能会相互缠绕，影响其均匀分散，进而降低增强效果；而且合成纤维与混凝土之间的粘结方式决定了其增强作用存在上限，即使增加纤维掺量，也难以显著提升粘结性能。

3) 粘结性能提升的内在机制：纤维增强混凝土与普通混凝土之间粘结性能的提升，有着明确的内在机制。对于钢纤维，主要依靠其与混凝土之间强大的机械锚固作用来增强粘结力；而合成纤维则是通过在混凝土内部形成三维网络结构，有效抑制裂缝的扩展，从而提高混凝土的韧性，间接地提升了粘结性能。这两种不同的作用方式，从不同角度对粘结性能的提升作出了贡献。

本研究成果为纤维增强混凝土在桥面铺装工程中的实际应用提供了关键的实验数据和坚实的理论依据。在实际的桥梁工程建设中，工程师们可以根据具体的设计要求、工程环境条件以及预算等因素，科学合理地选择纤维类型和确定其掺量，以此来优化桥面铺装层与桥面之间的粘结性能，进而提升桥梁结构的整体性能和耐久性，保障桥梁的安全使用。

基金项目

新疆交通设计院公司科研项目(No.KY2022091601)。

参考文献

- [1] 刘茂军, 许国平. 植物纤维增强混凝土性能研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(10): 3499-3509.
- [2] 李涛, 任会兰, 宁建国, 等. 基于主成分方法研究钢纤维增强混凝土劈裂破坏的损伤机制[J]. 振动与冲击, 2025, 44(1): 221-231.
- [3] 邹祺祺, 陈建飞, 付兵, 等. 玻纤复材固废粗纤维增强混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(3): 1489-1501.
- [4] 萨仁高娃, 聂建春, 张振, 等. 钢板-纤维增强混凝土连梁抗震性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(4): 492-501.
- [5] 王杰, 钱雪松, 张云龙. 剑麻纤维增强混凝土性能研究现状[J]. 四川建材, 2025, 51(3): 5-8+12.
- [6] 韩峰. 基坑工程中碳纤维增强混凝土的界面粘结性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(1): 74-76.
- [7] 季自刚, 王忠培. 纤维增强混凝土的黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2023(12): 253-257.
- [8] 夏冬桃, 李欣怡, 吴昊. 混杂纤维混凝土与既有混凝土的粘结斜剪性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 645-654.
- [9] 范小春, 黄伟晨, 张澳, 等. BFRP 筋回收轮胎钢纤维混凝土黏结性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(2): 389-397.
- [10] 张君健, 王华逸, 周明, 等. 考虑界面黏结滑移的聚丙烯纤维混凝土梁弯剪破坏特征研究[J]. 公路, 2025, 70(2):

- 105-114.
- [11] 李趁趁, 魏非凡, 刘超伟, 等. 高温后 BFRP 筋与纤维混凝土黏结性能[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 3014-3025.
- [12] 姚一鸣, 翟梦超, 董路遥, 等. 纤维网格增强超高性能混凝土拉伸刚化机理及协同增强效应[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2364-2374.
- [13] 殷雨时, 苏庆田, 张冠华. BFRP 网格布对超高性能混凝土粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3473-3485.
- [14] 李靖滨, 武献鹏, 罗文华, 等. 钢纤维/玻璃纤维增强橡胶混凝土动态劈裂拉伸性能研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(5): 55-61+15.
- [15] 程红强, 刘国龙, 高丹盈. 钢纤维混凝土与老混凝土粘结剪切性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2013(4): 177-181+192.
- [16] 王建民, 肖自强, 范奕涛, 等. 组合混凝土界面粘结性能多因素正交试验分析[J]. 材料导报, 2022, 36(2): 87-92.