

FRP-混凝土粘结界面抗剪性能研究综述

何家军

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年2月24日; 录用日期: 2025年3月16日; 发布日期: 2025年3月26日

摘要

随着纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)在既有建筑结构加固领域的广泛应用, 工程实践中对其加固特性愈发重视。本文综述了纤维增强复合材料(FRP)与混凝土粘结界面抗剪性能的研究进展。详细讨论了影响界面抗剪性能的各种因素, 包括混凝土强度、FRP粘结长度、粘结宽度、粘结厚度及其弹性模量等。此外, 本文介绍了灰色关联理论在分析界面粘结强度影响因素中的应用, 通过建立试验数据库和关联度计算, 确定了各参数对极限承载力的影响程度。最后, 对现有的FRP-混凝土界面粘结强度模型进行了讨论, 指出当前模型在预测实际工程中界面性能方面的局限性, 并强调了考虑混凝土老化、损伤和钢筋锈蚀等因素的重要性。本研究为FRP加固混凝土结构的工程应用提供了科学的理论依据, 并为未来研究指明了方向。

关键词

纤维增强聚合物(FRP), 粘结界面, 抗剪性能, 灰色关联理论

A Review on the Shear Bond Strength between FRP and Concrete Interface

Jiajun He

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Feb. 24th, 2025; accepted: Mar. 16th, 2025; published: Mar. 26th, 2025

Abstract

The widespread application of Fiber Reinforced Polymer (FRP) sheets in the reinforcement of existing building structures has led to increased emphasis on their reinforcing characteristics. This paper reviews the research progress on the shear performance of the bond interface between FRP and concrete. Various factors influencing the interface shear performance are discussed in detail, including concrete strength, FRP bond length, bond width, bond thickness, and elastic modulus.

Additionally, the application of Grey Relational Analysis (GRA) in evaluating the influential factors of bond strength is introduced. Through the establishment of an experimental database and correlation degree calculations, the impact of each parameter on ultimate bearing capacity is determined. Finally, the existing bond strength models for the FRP-concrete interface are discussed, highlighting the limitations of current models in predicting interface performance in practical engineering scenarios. The importance of considering factors such as concrete aging, damage, and reinforcement corrosion is emphasized. This study provides a scientific theoretical basis for the engineering application of FRP in concrete reinforcement and points out directions for future research.

Keywords

Fiber Reinforced Polymer, Bonding Interface, Shear Strength, Grey Relational Theory

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

在自然侵蚀作用与人工损伤的双重影响下,处于在役阶段的钢筋混凝土结构性能逐渐退化,导致其无法满足原设计要求。目前采用的修缮加固既有建筑结构的方法不胜枚举,其中纤维增强复合材料(Fiber reinforced polymer, FRP)因质量轻、抗拉强度高、抗疲劳且加固操作简单等优良性能,在建筑结构的广泛使用[1]-[3]。通过粘结剂将 FRP 材料粘结在需要加固补强的部位,使之成为一个整体共同受力,故 FRP 加固混凝土结构的核心在于 FRP 与混凝土之间可靠的粘结界面,该界面的性能直接影响到加固效果及结构的安全性。在众多力学性能中,FRP-混凝土界面的抗剪性能尤为重要,因其涉及到界面在剪切应力作用下的稳定性和剥离破坏问题[4]。研究者们通过一系列的面内剪切试验,如正拉试验、单剪试验、双剪试验和梁式试验,揭示了 FRP-混凝土在剪切应力作用下的破坏特征,并探索影响界面性能的各种因素,包括混凝土强度、FRP 粘结长度、粘结宽度、粘结厚度及自身弹性模量等[5]。近年来,灰色关联分析(Grey Relational Analysis, GRA)作为一种有效的数据处理和分析方法[6],通过分析各因素之间的关联度,对不同影响因素进行系统归纳,揭示各因素对系统性能的影响程度。

本文综述了国内外学者对 FRP-混凝土粘结界面抗剪性能的研究,并建立了 743 个试验数据库。结合灰色关联理论分析,为 FRP 加固混凝土结构的工程应用提供更加科学的理论依据。

2. 数据库

FRP 材料与钢筋不同,其破坏形式大多为脆性破坏,因此探究其粘结性能的变化显得尤为重要。如图 1 所示,大量研究表明材料组分影响 FRP-混凝土界面的抗剪性能,如混凝土材料、粘结胶层、FRP 材料属性及几何参数等,其中混凝土材料考虑其抗压强度 f_c' 及截面尺寸,而 FRP 材料属性和力学参数也是必须考虑的因素如粘结长度 L_f 、粘结宽度 b_f 、粘结厚度 t_f ,及自身弹性模量 E_f 。

姜绍飞等[7]将外贴 FRP 布的典型失效模式分为六大类:模式 I 为混凝土剪切失效;模式 II 为 FRP 剥离;模式 III 为粘结剂剪切失效;模式 IV 为 FRP-粘结剂界面剥离;模式 V 为 FRP 分层;模式 VI 为 FRP 断裂。FRP-混凝土破坏是复杂的,外贴 FRP 布加固普通钢筋混凝土构件时,其表层混凝土的抗剪强度远不如 FRP-粘结剂的抗剪强度,加固材料破坏主要分为三类[8],即表层混凝土剥离、粘结胶层破坏、FRP 破坏。

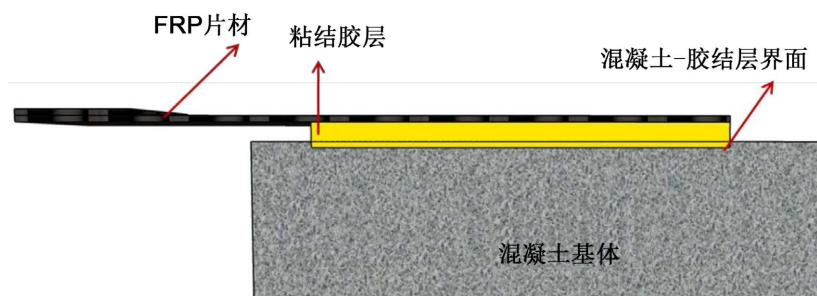


Figure 1. Diagram of FRP-concrete interface

图 1. FRP-混凝土界面示意图

根据已发表的论文研究,广泛收集到关于 FRP-混凝土直拉试验,试验方式设置为单剪试验。收集标准为主要以讨论混凝土强度的差异和 FRP 的材性及粘结参数的不同对粘结强度的影响,排除其他界面影响因素在内的试验组,且所有试验组试件均未设置锚固措施。为保证数据的质量,剔除数据误差较大的试验组,同时将混凝土强度统一为圆柱体抗压强度 f'_c 。如表 1 所示。

Table 1. Experimental data base

表 1. 试验数据库

Reference	Numbers	Concrete Properties				FRP Properties				Ultimate load P_u /kN	Failure mode
		b_c mm	h_c mm	l_c mm	f'_c MPa	L_f mm	b_f mm	t_f mm	E_f GPa		
Colombi [9]	30	150	150	600	15.20~58.00	100~500	50~100	0.22~1.2	165~409	19.052~38.070	I
Bilotta [10]	34	150	150	500	21.46~26.00	50~400	50~100	0.17~1.40	170~241	16.85~33.56	I, II
Wu [11]	65	150	150	300~400	25.30~59.02	30~400	50	0.17~0.50	238.1~248.3	7.38~30.15	I
Toutanji [12]	12	200	130	200	17.00~61.50	100	50	0.495~0.99	110	7.56~19.03	I, V
Heydari [13]	8	150	150	350	20.0~43.0	150	48	0.13~0.26	230~238	10.54~15.69	-
A. Bilotta [14]	18	160	200	400	19.0	300	60~100	1.2~1.7	109~221	29.86~54.79	I, II
Davood [15]	24	150	150	350	16.9~53.76	200	48	0.13~0.3	65~238	7.78~14.38	I
J. Yao [16]	66	100~150	150	350	18.9~27.1	95~240	25~100	0.167~1.27	22.5~256	4.75~19.07	I, II
Ardalan [17]	22	150	150	350	36.80~41.10	20~250	48	0.131	238	7.58~10.12	I
Dai [18]	26	400	200	400	35	300	100	0.11~0.38	74~230	13.5~60.9	I, VI
Ueno [19]	42	80	100	350	23.0~74.5	200	40	1.12~1.80	42.66~43.66	9.52~18.29	-
Davood [20]	52	150	150	350	24.7~40.4	200	50	0.166	230	10.30~14.55	I
Majid [21]	4	150	150	330	33.5~37.4	100~150	50	0.166	230	10.71~12.16	I, II
Biolzi [22]	6	150	120	300	32.59	30~250	50	1.4	170	7.41~37.95	I
Cheng [23]	42	150	150	300	17.70~33.45	200	50	0.12	72	5.34~13.81	I, II
Hadigheh [24]	17	150	150	300	38.0	200	25~80	1.44	165.18	16.0~49.6	I
Tong [25]	8	150	150	300	29.32~48.68	150	25	1.8	122	9.9~13.84	I, II
Zhang [26]	22	200~250	150	400	38.95~43.53	250	50~150	0.262~0.655	94~227	12.32~50.94	I, II

续表

Sharma [27]	18	100	100	500	29.70~35.82	50~300	30~50	1.20~6.00	32.7~300	11.30~46.35	I, II
Chen [28]	47	100	100	400	33.34~56.88	300	50	0.167	242	8.4~22.1	I, II, VI
Barbieri [29]	12	150	120	300	32.59	25~200	25~100	1.4	170	3.70~46.28	I
Zhou [30]	123	150	150	300	46.22~66.28	20~200	15~150	0.111~0.341	71~237	3.50~28.80	I, II
Ai [31]	18	150	150	300	26.94	60~180	20~40	1.43~2.86	104	1.98~33.37	I, II
P. Li [32]	27	150	150	400	11.79~23.57	300	50	0.167~0.501	257	7.56~22.76	I

注: l_c 为混凝土试件沿粘结方向的长度, b_c, h_c 分别为混凝土截面的宽度和高度; f'_c 为混凝土的圆柱体抗压强度; L_f, b_f, E_f 分别为 FRP 粘结长度, 粘结宽度及弹性模量; t_f 为 CFRP 材料粘结厚度。

根据顾祥林编写的《混凝土结构基本原理》得出, 关于圆柱体抗压强度 f'_c 与立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 之间的换算关系如表 2 所示。

Table 2. Ratio of compressive strength of cylinder to cube

表 2. 圆柱体 - 立方体抗压强度比值

混凝土强度等级	C15~C60	C60	C70	C80
$f'_c / f_{cu,k}$	0.79	0.833	0.857	0.875

3. 界面粘结强度影响因素

3.1. 混凝土强度

Chen and Teng 等[33]通过界面剪切试验表明 FRP-混凝土粘结界面粘结强度与混凝土强度成正比, 对于低等级的混凝土强度, 破坏形态更容易表现为混凝土基体被撕裂, 而彭晖等[34]提到 FRP-混凝土界面峰值剪应力和界面断裂能均随着混凝土强度增大而增大。混凝土强度受骨料尺寸、形状、表面状态等影响, Li 等[32]、Davood 等[20]指出裸露出来的混凝土骨料尺寸和含量会对粘结效果产生影响, 并进行单剪试验验证了, 一般认为骨料粒径的增大会导致混凝土与粘结界面出现拉应力集中现象, 降低了界面抗拉强度, 因此在粘结 CFRP 布时应注意减少大粒径的骨料裸露面积。

3.2. FRP 材料参数

3.2.1. 粘结长度

通过大量试验结果分析得出的上述公式中不难看出, FRP 以及混凝土等材料属性对粘结强度的影响较为固定, 而 FRP 粘结长度、粘结厚度以及宽度比等影响因素会根据实际情况表现出很强的自由性, 对粘结强度的预测结果会产生较大的偏差。目前已有许多学者构建了有效粘结长度模型, 表 3 列举了目前常用的有效粘结长度的模型。

通过已有的有效粘结长度模型可以看出, 其与混凝土强度成反比, 与粘结厚度成正比, 即混凝土强度越高, 其表面越光滑, 导致有效粘结长度的降低。但随着研究的逐渐深入, 影响粘结强度包括但不限于以上因素, 外界环境的优劣也对界面性能的稳定性有着至关重要的影响, 其中就包含因环境侵害导致内嵌于混凝土内部的钢筋锈蚀对加固构件的承载力的影响。

Table 3. Effective bond length model**表 3.** 有效粘结长度模型

	模型	备注
Chen and Teng [33]	$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_c}}$	E_f 、 t_f 、 f_c 分别为 FRP 弹性模量、厚度和混凝土平均抗压强度。
Seracino <i>et al.</i> [35]	$L_e = \frac{\pi}{2\sqrt{\tau_f L_{per} / \delta_f E_f A_f}}$	τ_f 、 δ_f 分别为界面剪切应力峰值、滑移值。 L_{per} 、 E_f 、 A_f 分别为脱粘破坏面的长度、FRP 弹性模量及其横向面积。

3.2.2. 粘结宽度

在 FRP-混凝土界面粘结强度研究中, 粘结宽度是一个重要的参数。为了纤维增强聚合物起来加固构件的作用, 需要 FRP-混凝土粘结界面有足够的应力分布, 粘结宽度的增加有助于分散界面应力, 减少应力集中现象。

3.2.3. 粘结厚度

张云峰等[36]研究了不同 CFRP 布的粘结层数对加固效果的影响, 试验表面 CFRP 布粘结层数越多, 混凝土柱承压效果越好。Akbarzadeh 等[37]表明增加 CFRP 布粘贴层数可以避免复合材料的拉伸断裂, 使其破坏模式转变为中间裂纹脱粘, 在一定程度上提高了其延性。

3.3. 粘结胶层

在拉剪试验中应力通过 FRP-混凝土界面粘结从混凝土传递到 FRP 复合材料上, 因此作为传递应力的介质, 胶层的性质尤为重要[38]。目前最常用的是环氧胶黏剂, 具有较好的力学性能, 但此类材料相对较脆, 断裂韧性较低, 在潮湿环境中还会产生吸湿膨胀和水解开裂等不可逆的影响。

童谷生等[25]对胶层厚度进行研究, 表明适当增加胶层粘结厚度, 可以增大界面断裂能, 提高界面承载力。郭诗惠等[39]表示对于低强度混凝土, 界面粘结强度与胶层厚度成反比, 而高强度混凝土界面粘结强度会随着胶层厚度的增加而增大。此外 Xu 等[40]还提到粘结胶层厚度的增加会抑制界面疲劳裂纹的扩展速率。黄俊豪等[41]研究了胶层对加固梁的抗弯承载力的影响, 试验证明增加胶层厚度可以增强粘结性能, 当粘结胶层厚度达到 3 mm 时能使界面应力趋于均匀, 局部应力集中放缓, 但值得一提的是随着胶层厚度的提高, 其破坏也会由混凝土基体表层剥离向胶层 - 混凝土剥离转变[34]。

许多学者不断改进胶黏剂以此提高复合材料纤维与聚合物之间的界面结合强度, 并引入了纳米技术[42]。纳米材料改性的环氧胶黏剂以及新型高强度自密实水泥胶黏剂(IHSSC-CA)既可以保证 CFRP 布的利用率和加固结构的承载力, 试验表明还在一定程度上提高了延性[43], 未来考虑将新型胶黏剂引入外贴 FRP 材料加固中, 以提高粘结胶层的耐久性。

4. 参数敏感性分析

4.1. 灰色关联理论

灰色关联分析[44][45], 作为一种多因素统计分析方法, 应用于评估多个子因素对主导因素的贡献度, 从而判断影响系统发展趋势的主要变量与次要变量。该方法有效融合了模糊数学与系统科学的理论, 为复杂系统中因素间关系的精确解析与科学决策提供有力支撑。

4.2. 粘结参数影响分析

根据前述建立数据库得出混凝土强度、FRP 粘结长度、粘结宽度、粘结厚度及其弹性模量均会对界

面粘结抗剪强度产生影响, 基于灰色关联分析法, 计算极限承载力与各界面参数之间的关联度, 评估不同参数的影响程度大小对探究 FRP-混凝土界面粘结强度具有重要意义。

现将极限承载力 P_u 、混凝土强度 f'_c 、FRP 粘结长度 L_f 、粘结宽度 b_f 、粘结厚度 t_f 和弹性模量 E_f 分别记为 $X_\sigma, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ 。定义极限承载力实测值作为参考序列 $\{X_\sigma(k) | k=1, 2, \dots, 743\}$, 关联因子作为比较序列 $\{X_i(k) | i=1, 2, \dots, 5; k=1, 2, \dots, 743\}$ 。由于各参数的量纲不一致, 因此采用式(1)进行处理, 依次得到均值象序列 $\{\bar{X}_i(k) | i=1, 2, \dots, 5; k=1, 2, \dots, 743\}$ 和 $\{\bar{X}_\sigma(k) | k=1, 2, \dots, 743\}$ 。

$$X_i(k) = \frac{743X_i(k)}{\sum_{k=1}^{743} X_i(k)} \quad (1)$$

式中 $i=1, 2, \dots, 5, \sigma$ 。

根据式(2)计算各比较序列均值象与参考序列均值象的绝对差值 $\Delta_{\sigma i}(k)$:

$$\Delta_{\sigma i}(k) = |\bar{X}_\sigma(k) - \bar{X}_i(k)| \quad (2)$$

计算得出:

$$\begin{aligned} \min_i \min_k |\bar{X}_\sigma(k) - \bar{X}_i(k)| &= 4.872\text{E} - 04 \\ \max_i \max_k |\bar{X}_\sigma(k) - \bar{X}_i(k)| &= 4.7431 \end{aligned}$$

并根据式(3)计算得出个参数的关联系数 ε_i :

$$\varepsilon_i = \frac{\min_i \min_k |\bar{X}_\sigma(k) - \bar{X}_i(k)| + \omega \max_i \max_k |\bar{X}_\sigma(k) - \bar{X}_i(k)|}{|\bar{X}_\sigma(k) - \bar{X}_i(k)| + \omega \max_i \max_k |\bar{X}_\sigma(k) - \bar{X}_i(k)|} \quad (3)$$

式中 ω 为分辨系数[6], 取 0.5。

根据式(4)计算出各参数与极限承载力的关联度 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, 5)$:

$$\lambda_i = \frac{1}{743} \sum_{k=1}^{743} \varepsilon_i(k) \quad (4)$$

关联度越大, 表示其影响程度越大。经计算, $\lambda_1 = 0.8284$, $\lambda_2 = 0.8356$, $\lambda_3 = 0.8825$, $\lambda_4 = 0.8082$, $\lambda_5 = 0.8281$ 。

根据关联度大小, 即可得出各参数对极限承载力的影响大小为: 粘结宽度 > 粘结长度 > 混凝土强度 > 弹性模量 > 粘结厚度。上述参数对极限承载力的影响均表现出强相关, 但在研究 FRP-混凝土界面粘结抗剪性能时, 其粘结宽度对结果的影响程度最大。因此, 在 FRP 的实际应用中, 应重点关注其粘结宽度问题。

5. 粘结强度模型的讨论

界面粘结强度能够很好地表征 FRP-混凝土界面的性能, 大量学者对此进行不懈研究, 并构建诸多粘结强度模型。在最早的研究中也提出了许多的 FRP-混凝土粘结强度模型, 后经诸多试验发现将有效粘结长度纳入计算可有效提高模型的精确度。周英武等[46]利用建立的数据库对已有的粘结强度模型进行评定, 表 4 所列其中预测精度较高的两种模型。

不难看出, 两种模型不仅将有效粘结长度纳入模型, 还考虑到 FRP 与混凝土的宽度比对粘结强度的影响, 均适用于 FRP 与混凝土界面的粘结强度的预测。其中 Chen and Teng 模型结合了断裂力学和试验数据, 被认为是半经验半理论的粘结强度模型, 对评估 FRP-混凝土界面的脆性断裂和剪切破坏更为确切。

Table 4. Ultimate bond strength model
表 4. 极限粘结强度模型

模型	极限粘结强度	备注
Chen and Teng [47]	$P_u = \begin{cases} 0.427 \beta_w b_f L_e \sqrt{f_c}, & L \geq L_e \\ 0.427 \beta_w b_f L_e \sqrt{f_c} \sin\left(\frac{\pi L}{2L_e}\right), & L \leq L_e \end{cases}$	$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}}$
Lu [48]	$P_u = \begin{cases} b_f \sqrt{2E_f t_f G_f}, & L \geq L_e \\ b_f \sqrt{2E_f t_f G_f} \frac{L}{L_e} \left(2 - \frac{L}{L_e}\right), & L \leq L_e \end{cases}$	$G_f = 0.308 \times \frac{2.25 - b_f/b_c}{1.25 + b_f/b_c} \sqrt{f_t}$

注：式中 b_f, t_f, E_f 分别为 FRP 的粘结宽度、粘结厚度及弹性模量， L_e 为有效粘结长度， f_c, f_t, b_c 分别为混凝土圆柱体抗压强度，抗拉强度及混凝土宽度。

因此在实际应用和研究中得到了较多的关注和验证。然而诸多所提模型在更为复杂的 FRP 材料和混凝土的组合中，将会很难保证模型的精度。

尽管现有的粘结强度模型在一定程度上能够预测 FRP 与混凝土界面的粘结行为，但大多模型是以新拌混凝土试件为试验基础，而实际工程中的混凝土结构往往存在一定的老化、损伤和钢筋锈蚀等问题。目前，已有学者[49][50]围绕着混凝土保护层锈胀开裂开展研究，在建筑结构长期服役阶段外界的水、空气会渗进混凝土基体内部，使其内埋钢筋发生锈蚀，由于锈蚀产物的堆积，会在周围产生锈胀应力，从而使混凝土保护层形成裂缝，导致混凝土在 FRP 加固初期有老化、损伤的问题。此外在实际情况下，加固后的 RC 结构依旧处于原腐蚀环境中，其性能仍会不断下降。研究指出[51][52]在 FRP 加固后期，水分的侵入将会导致粘结胶层的劣化，粘结强度下降，常常表现为混凝土 - 胶层的剥离破坏。曹文海等[53]通过模拟海水环境，研究腐蚀龄期对粘结界面性能的影响，得出试件破坏模式由最初的混凝土保护层破坏逐渐转变为胶层 - 混凝土界面的剥离破坏。因此，外界环境会对 FRP-混凝土界面的剪切性能产生持续影响，在 FRP-混凝土粘结强度的预测模型中应提出含时变量的有效粘结长度的折减系数，以此确定 FRP-混凝土粘结界面损伤因子，探明粘结界面的损伤演化规律。

针对此类问题，研究者们强调了对更全面、更精确模型的需求，特别是考虑到外界环境等被现有模型忽视的因素。这些体现了当前在 FRP-混凝土界面粘结强度模型领域的研究动态和关注焦点，对进一步的研究和模型发展具有重要的工程意义。

6. 结语

本文通过对 FRP-混凝土粘结界面抗剪性能的深入研究，结合灰色关联理论分析，得出以下三点结论：

1) 研究表明混凝土强度、FRP 粘结长度、粘结宽度、粘结厚度及其弹性模量均对界面粘结抗剪强度有显著影响。其中，FRP 粘结宽度对极限承载力的影响程度最大，表明在 FRP 加固混凝土结构的设计和应用中，应特别关注粘结宽度的优化。

2) 采用灰色关联分析法计算各参数与极限承载力的关联度，揭示了不同参数的影响程度。该方法为复杂系统中多因素关系的解析提供了科学依据，有助于在工程中进行有针对性的优化和调整。

3) 尽管现有粘结强度模型在一定程度上能够预测 FRP 与混凝土界面的粘结行为，但实际工程中的混凝土结构往往存在老化、损伤和钢筋锈蚀问题，这些因素在现有模型中尚未得到充分考虑。因此，未来研究需致力于构建更全面、更精确的模型，以更好地指导 FRP 加固混凝土结构的工程应用。

参考文献

- [1] 岳清瑞, 杨勇新. 纤维增强复合材料加固结构耐久性研究综述[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 8-15.
- [2] 许兆辉, 朱建锋, 丁勇, 等. 碳纤维复合材料力阻效应研究综述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(7): 86-90.
- [3] 梅葵花, 王凤轩, 孙胜江. 纤维增强复合材料加固混凝土桥梁结构研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(1): 31-51.
- [4] 杨港, 闫亚坤, 朱宇航, 等. CFRP 加固混凝土柱研究综述[J]. 山东化工, 2021, 50(22): 103-105.
- [5] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2004.
- [6] 柯杨, 冯诚, 周琴, 等. 基于灰关联理论的混凝土孔结构对强度和耐久性的影响分析[J]. 混凝土, 2019(5): 42-47.
- [7] 姜绍飞, 臧荣彬, 宋华霖, 等. 表面开槽碳纤维布-混凝土界面抗剪性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(6): 52-60.
- [8] 杨志泉. 基于 CZM 的 FRP-混凝土界面有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [9] Colombi, P., Fava, G. and Poggi, C. (2014) End Debonding of CFRP Wraps and Strips for the Strengthening of Concrete Structures. *Composite Structures*, **111**, 510-521. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.029>
- [10] Bilotta, A., Ludovico, M.D. and Nigro, E. (2011) FRP-to-Concrete Interface Debonding: Experimental Calibration of a Capacity Model. *Composites Part B: Engineering*, **42**, 1539-1553. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.016>
- [11] Wu, Y. and Jiang, C. (2013) Quantification of Bond-Slip Relationship for Externally Bonded FRP-to-Concrete Joints. *Journal of Composites for Construction*, **17**, 673-686. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000375](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000375)
- [12] Toutanji, H., Saxena, P., Zhao, L. and Ooi, T. (2007) Prediction of Interfacial Bond Failure of FRP-Concrete Surface. *Journal of Composites for Construction*, **11**, 427-436. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2007\)11:4\(427\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:4(427))
- [13] Heydari Mofrad, M., Mostofinejad, D. and Hosseini, A. (2019) A Generic Non-Linear Bond-Slip Model for CFRP Composites Bonded to Concrete Substrate Using EBR and EBROG Techniques. *Composite Structures*, **220**, 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.063>
- [14] Bilotta, A., Ceroni, F., Di Ludovico, M., Nigro, E., Pecce, M. and Manfredi, G. (2011) Bond Efficiency of EBR and NSM FRP Systems for Strengthening Concrete Members. *Journal of Composites for Construction*, **15**, 757-772. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000204](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000204)
- [15] Mostofinejad, D. and Arefian, B. (2021) Generic Assessment of Effective Bond Length of FRP-Concrete Joint Based on the Initiation of Debonding: Experimental and Analytical Investigation. *Composite Structures*, **277**, Article ID: 114625. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114625>
- [16] Yao, J., Teng, J.G. and Chen, J.F. (2005) Experimental Study on FRP-to-Concrete Bonded Joints. *Composites Part B: Engineering*, **36**, 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.06.001>
- [17] Hosseini, A. and Mostofinejad, D. (2014) Effective Bond Length of FRP-to-Concrete Adhesively-Bonded Joints: Experimental Evaluation of Existing Models. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **48**, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.09.022>
- [18] Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y. (2005) Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method. *Journal of Composites for Construction*, **9**, 52-62. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:1\(52\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:1(52))
- [19] Ueno, S., Toutanji, H. and Vuddandam, R. (2015) Introduction of a Stress State Criterion to Predict Bond Strength between FRP and Concrete Substrate. *Journal of Composites for Construction*, **19**, Article ID: 04014024. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000481](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000481)
- [20] Mostofinejad, D., Sanginabadi, K. and Eftekhari, M.R. (2019) Effects of Coarse Aggregate Volume on Cfrp-Concrete Bond Strength and Behavior. *Construction and Building Materials*, **198**, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.188>
- [21] Ghorbani, M., Mostofinejad, D. and Hosseini, A. (2017) Experimental Investigation into Bond Behavior of FRP-to-Concrete under Mixed-Mode I/II Loading. *Construction and Building Materials*, **132**, 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.057>
- [22] Biolzi, L., Ghittoni, C., Fedele, R. and Rosati, G. (2013) Experimental and Theoretical Issues in FRP-Concrete Bonding. *Construction and Building Materials*, **41**, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.082>
- [23] Yuan, C., Chen, W., Pham, T.M., Hao, H., Cui, J. and Shi, Y. (2020) Influence of Concrete Strength on Dynamic Interfacial Fracture Behaviour between Fibre Reinforced Polymer Sheets and Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, **229**, Article ID: 106934. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106934>
- [24] Hadigheh, S.A., Gravina, R.J. and Setunge, S. (2015) Prediction of the Bond-Slip Law in Externally Laminated Concrete

- Substrates by an Analytical Based Nonlinear Approach. *Materials & Design* (1980-2015), **66**, 217-226.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.061>
- [25] 童谷生, 赖泽坤. 基于有限断裂力学的 FRP-混凝土界面粘结强度研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(4): 13-21.
- [26] Zhang, H. and Smith, S.T. (2013) Fibre-Reinforced Polymer (FRP)-to-Concrete Joints Anchored with FRP Anchors: Tests and Experimental Trends. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **40**, 1103-1116.
<https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0525>
- [27] Sharma, S.K., Mohamed Ali, M.S., Goldar, D. and Sikdar, P.K. (2006) Plate-Concrete Interfacial Bond Strength of FRP and Metallic Plated Concrete Specimens. *Composites Part B: Engineering*, **37**, 54-63.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.05.011>
- [28] Chen, C., Li, X., Zhao, D., Huang, Z., Sui, L., Xing, F., et al. (2019) Mechanism of Surface Preparation on FRP-Concrete Bond Performance: A Quantitative Study. *Composites Part B: Engineering*, **163**, 193-206.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.027>
- [29] Barbieri, G., Biolzi, L., Bocciarelli, M. and Cattaneo, S. (2016) Size and Shape Effect in the Pull-Out of FRP Reinforcement from Concrete. *Composite Structures*, **143**, 395-417. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.097>
- [30] 周英武. FRP-高强混凝土梁强度与延性的理论与试验研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [31] 艾博雯. CFRP-混凝土界面特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- [32] Li, P., Zeng, J., Li, W. and Zhao, Y. (2022) Effect of Concrete Heterogeneity on Interfacial Bond Behavior of Externally Bonded FRP-to-Concrete Joints. *Construction and Building Materials*, **359**, Article ID: 129483.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129483>
- [33] Chen, J.F. and Teng, J.G. (2001) Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete. *Journal of Structural Engineering*, **127**, 784-791. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2001\)127:7\(784\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2001)127:7(784))
- [34] 彭晖, 高勇, 谢超, 等. FRP-混凝土界面粘结行为的参数影响研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4): 489-498.
- [35] Seracino, R., Raizal Saifulnaz, M.R. and Oehlers, D.J. (2007) Generic Debonding Resistance of EB and NSM Plate-to-Concrete Joints. *Journal of Composites for Construction*, **11**, 62-70.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2007\)11:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:1(62))
- [36] 张云峰, 梅宝瑞, 郭亚滨. 布粘贴层数对 CFRP 布加固钢筋混凝土 L 形柱力学性能的影响[J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2018, 36(3): 392-396.
- [37] Akbarzadeh, H. and Maghsoudi, A.A. (2010) Experimental and Analytical Investigation of Reinforced High Strength Concrete Continuous Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer. *Materials & Design*, **31**, 1130-1147.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.041>
- [38] Xu, T., He, Z.J., Tang, C.A., Zhu, W.C. and Ranjith, P.G. (2015) Finite Element Analysis of Width Effect in Interface Debonding of FRP Plate Bonded to Concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*, **93**, 30-41.
<https://doi.org/10.1016/j.finela.2014.08.009>
- [39] 郭诗惠, 张建仁, 高勇, 等. 胶层厚度对 CFRP 板材与混凝土界面黏结性能影响[J]. 公路交通科技, 2015, 32(9): 87-91.
- [40] Xu, X.X., Crocombe, A.D. and Smith, P.A. (1996) Fatigue Crack Growth Rates in Adhesive Joints Tested at Different Frequencies. *The Journal of Adhesion*, **58**, 191-204. <https://doi.org/10.1080/00218469608015200>
- [41] 黄俊豪, 钱永久, 杨华平, 等. 胶层厚度对 CFRP 布加固 RC 梁抗弯承载力影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 743-751.
- [42] Al-Zu'bi, M., Fan, M. and Anguilano, L. (2022) Advances in Bonding Agents for Retrofitting Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymer Materials: A Review. *Construction and Building Materials*, **330**, Article ID: 127115.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127115>
- [43] Al-Saadi, N.T.K., Mohammed, A. and Al-Mahaidi, R. (2017) Performance of RC Beams Rehabilitated with NSM CFRP Strips Using Innovative High-Strength Self-Compacting Cementitious Adhesive (IHSSC-CA) Made with Graphene Oxide. *Composite Structures*, **160**, 392-407. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.084>
- [44] 徐存东, 高懿伟, 连海东. 基于灰色关联的多因素耦合作用下混凝土材料耐久性评估[J]. 混凝土, 2018(9): 64-69.
- [45] Lyu, Z., Song, X., Li, G., Hu, X., Shi, Y. and Xu, Z. (2017) Numerical Analysis of Characteristics of a Single U-Tube Downhole Heat Exchanger in the Borehole for Geothermal Wells. *Energy*, **125**, 186-196.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.125>
- [46] Zhou, Y., Zheng, S., Huang, Z., Sui, L. and Chen, Y. (2020) Explicit Neural Network Model for Predicting FRP-Concrete Interfacial Bond Strength Based on a Large Database. *Composite Structures*, **240**, Article ID: 111998.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111998>

-
- [47] Smith, S.T. and Teng, J.G. (2002) FRP-Strengthened RC Beams. I: Review of Debonding Strength Models. *Engineering Structures*, **24**, 385-395. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(01\)00105-5](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(01)00105-5)
- [48] Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P. and Jiang, J.J. (2005) Bond-Slip Models for FRP Sheets/plates Bonded to Concrete. *Engineering Structures*, **27**, 920-937. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.01.014>
- [49] 赵羽习. 钢筋锈蚀引起混凝土结构锈裂综述[J]. 东南大学学报(自然科学版). 2013, 23(5): 1122-1134.
- [50] 吴洁琼, 郭莉, 金浏, 等. 非均匀锈蚀钢筋-混凝土黏结性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 109-117.
- [51] Cui, E., Jiang, S., Wang, J. and Zeng, X. (2021) Bond Behavior of Cfrp-Concrete Bonding Interface Considering Degradation of Epoxy Primer under Wet-Dry Cycles. *Construction and Building Materials*, **292**, Article ID: 123286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123286>
- [52] Blackburn, B.P., Tatar, J., Douglas, E.P. and Hamilton, H.R. (2015) Effects of Hygrothermal Conditioning on Epoxy Adhesives Used in FRP Composites. *Construction and Building Materials*, **96**, 679-689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.056>
- [53] 曹文海, 胡敏. 腐蚀环境下 FRP-混凝土界面黏结性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(9): 114-121.