

界面锈蚀钢 - 混凝土组合梁疲劳后剩余承载力试验研究

郭永翔, 石卫华, 黄 锐

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月11日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月12日

摘 要

为研究界面锈蚀部分抗剪连接钢 - 混凝土组合梁在疲劳荷载作用下剩余承载性能的退化规律, 设计并制作了5根钢 - 混凝土组合梁试件, 在通电加速锈蚀实验基础上, 开展静载和疲劳试验。该研究分析了不同锈蚀程度下组合梁的破坏模式、荷载 - 挠度关系、全截面应变分布及界面滑移特征。结果表明: 界面锈蚀显著影响组合梁疲劳后的破坏模式, 未锈蚀疲劳试件SFSCB-0最终发生剪切破坏, 而锈蚀疲劳试件SFSCB-1~SFSCB-3均主要表现为压弯破坏; 各试件荷载 - 挠度曲线均可分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段, 疲劳作用会降低组合梁的承载能力和变形能力; 与未锈蚀疲劳试件相比, 适度界面锈蚀在一定范围内增强了界面黏结、摩擦和咬合作用, 使锈蚀试件的疲劳后剩余承载力有所提高, 但随着锈蚀程度进一步增加, 该有利作用逐渐减弱; 各试件截面应变沿梁高方向总体近似线性分布, 整体上基本满足平截面假定, 但界面附近应变连续性减弱, 表明疲劳作用和界面锈蚀共同削弱了钢梁与混凝土板之间的协同受力能力; 荷载 - 滑移分析表明, 未锈蚀疲劳试件更易出现分布型滑移, 锈蚀疲劳试件更易表现为局部集中滑移。

关键词

钢 - 混凝土组合梁, 界面锈蚀, 疲劳试验, 剩余承载力, 界面滑移

Study on the Residual Bearing Capacity of Interfacially Corroded Steel-Concrete Composite Beams after Fatigue Loading

Yongxiang Guo, Weihua Shi, Rui Huang

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Abstract

To investigate the degradation law of the residual bearing capacity of steel-concrete composite beams with partially corroded shear connectors under fatigue loading, five steel-concrete composite beam specimens were designed and fabricated. Based on electrochemical accelerated corrosion tests, static loading tests and fatigue tests were carried out. The failure modes, load-deflection responses, full-section strain distributions, and interfacial slip characteristics of composite beams with different corrosion levels were analyzed. The results show that interfacial corrosion significantly affects the failure mode of composite beams after fatigue loading. The uncorroded fatigue specimen SFSCB-0 eventually failed in shear, whereas the corroded fatigue specimens SFSCB-1 to SFSCB-3 mainly exhibited flexural-compression failure. The load-deflection curves of all specimens can be divided into the elastic stage, elastic-plastic stage, and failure stage, indicating that fatigue loading reduces both the bearing capacity and deformation capacity of the composite beams. Compared with the uncorroded fatigue specimen, moderate interfacial corrosion enhanced the interfacial bonding, friction, and mechanical interlocking to a certain extent, thereby improving the residual bearing capacity after fatigue. However, with further increase in corrosion degree, this beneficial effect gradually weakened. The sectional strain distributions of all specimens were approximately linear along the beam depth, indicating that the plane-section assumption was generally satisfied; however, the continuity of strain near the interface was weakened, demonstrating that fatigue loading and interfacial corrosion jointly reduced the cooperative action between the steel beam and the concrete slab. Load-slip analysis further indicates that the uncorroded fatigue specimen was more likely to exhibit distributed slip, whereas the corroded fatigue specimens were more prone to localized slip concentration.

Keywords

Steel-Concrete Composite Beam, Interfacial Corrosion, Fatigue Test, Residual Bearing Capacity, Interfacial Slip

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

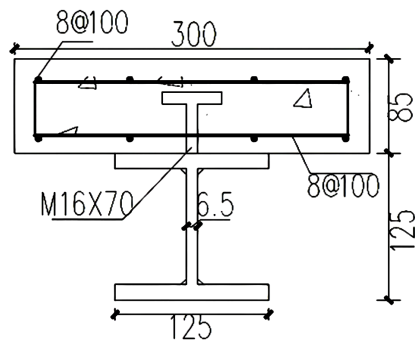
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢-混凝土组合梁兼具钢材抗拉性能好、混凝土抗压性能优及整体刚度大的特点,已广泛应用于桥梁与建筑结构中。随着服役年限增长,重复荷载、环境侵蚀及界面损伤不断累积,组合梁易出现刚度退化、界面滑移增大和剩余承载力下降等问题。汪炳等[1]建立了组合梁疲劳后刚度退化计算模型;卜建清、张吉仁[2]总结了钢-混凝土组合梁疲劳试验研究进展;Wang等[3]则从试验与理论角度分析了疲劳作用下组合梁的剩余承载力演化规律。现有研究表明,疲劳作用会持续削弱组合梁的承载性能与变形协调能力。针对疲劳后组合梁的剩余性能,学者们已从试验、有限元和理论计算等方面开展了研究。张吉仁等[4]分析了栓钉式钢-混凝土组合梁的疲劳刚度退化特征,指出疲劳损伤会导致构件刚度持续衰减;张吉仁等[5]进一步研究了疲劳后栓钉式组合梁的剩余承载力变化规律;Xu等[6]通过PBL连接组合梁试验表明,不同连接形式会显著影响疲劳后构件的承载力和刚度保持水平。这些成果为认识组合梁疲劳后受力



(b) 组合梁横截面图

Figure 1. Design drawing of composite beam

图 1. 组合梁设计图

Table 1. Material properties

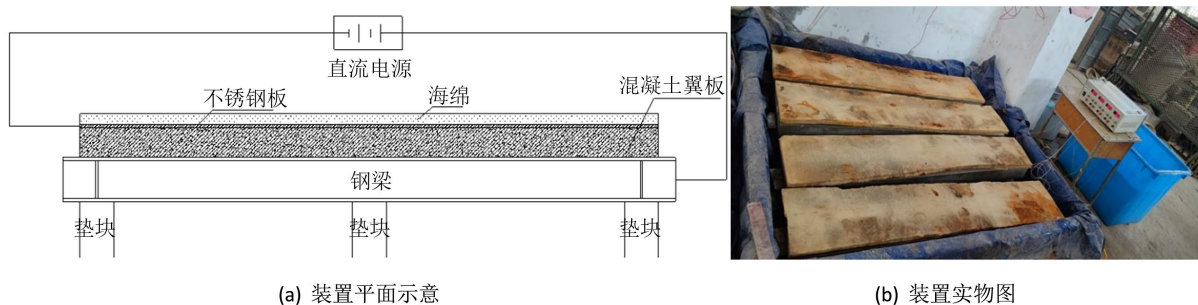
表 1. 材性参数

| 材料 | 屈服强度 f_y /Mpa | 极限强度 f_u /Mpa | 屈服比 f_y/f_u |
|----|-----------------|-----------------|---------------|
| 栓钉 | 404 | 478 | 0.85 |
| 钢梁 | 314 | 427 | 0.74 |
| 钢筋 | 305 | 425 | 0.72 |

2.2. 试验方法

2.2.1. 加速锈蚀方法

将养护完成的试件 SFSCB-1~SFSCB-3 先浸泡于 5%NaCl 溶液中 7 d, 随后进行通电加速锈蚀试验。在栓钉对应位置的混凝土板表面铺设尺寸为 1600 mm × 300 mm × 4 mm 的不锈钢板作为阴极, 将钢梁上翼缘打磨, 去除防锈层后, 通过 0.5 mm² 多股铜芯导线与直流电源正极连接。为保证电解环境稳定, 在混凝土板表面铺设海绵并定期浇洒盐水保持湿润。试件的通电锈蚀时间见表 2, 锈蚀装置示意如图 2 所示。



(a) 装置平面示意

(b) 装置实物图

Figure 2. Electrochemical corrosion accelerating device

图 2. 电化学加速锈蚀装置

2.2.2. 试验加载方式

选取 SSCB-0 进行静力试验, 以获得未锈蚀钢-混凝土组合梁的极限承载能力, 为后续疲劳加载提供对照数据和加载依据; 对 SFSCB-0~SFSCB-3 先进行 100 万次疲劳加载, 再开展剩余承载力试验。静力试验采用简支梁两点对称集中加载方式, 正式加载前进行预加载。正式加载阶段采用 20 kN/级的分级加载方式; 当试件进入破坏前阶段、荷载增长趋于缓慢后, 改用跨中挠度位移控制加载, 控制幅值为 1 mm/级,

直至构件出现明显破坏或承载力显著下降为止。疲劳试验采用疲劳试验机进行加载，加载频率控制在约 4 Hz，疲劳荷载上限取 160 kN，下限取 40 kN。在疲劳循环达到 1 万次、2 万次、5 万次、10 万次和 20 万次时分别停机进行一次弹性范围内静力检测试验，此后每增加 20 万次疲劳循环重复进行一次相同检测，直至疲劳循环次数达到 100 万次；静力检测试验的加载水平依次取 32 kN、64 kN、96 kN、128 kN 和 160 kN。疲劳试验完成后，进行静力加载直至破坏。应变片及试验布置如图 3 所示，表 2 给出了试件的破坏模式。

Table 2. Test parameters and results
表 2. 试验参数及结果

| 试件编号 | 通电时间/d | 试验类型 | P_{max}/P_u | P_{min}/P_u | P_s/kN | 加载次数/万次 | 破坏形态 |
|---------|--------|--------------|---------------|---------------|----------|---------|--------------|
| SSCB-0 | 0 | 承载力试验 | \ | \ | 266 | \ | 栓钉剪断 + 混凝土压碎 |
| SFSCB-0 | 0 | 疲劳试验 + 承载力试验 | 0.6 | 0.15 | 215 | 100 | 剪切破坏 |
| SFSCB-1 | 10 | 疲劳试验 + 承载力试验 | 0.6 | 0.15 | 273.43 | 100 | 压弯破坏 |
| SFSCB-2 | 20 | 疲劳试验 + 承载力试验 | 0.6 | 0.15 | 265.51 | 100 | 压弯破坏 |
| SFSCB-3 | 30 | 疲劳试验 + 承载力试验 | 0.6 | 0.15 | 257.18 | 100 | 压弯破坏 |

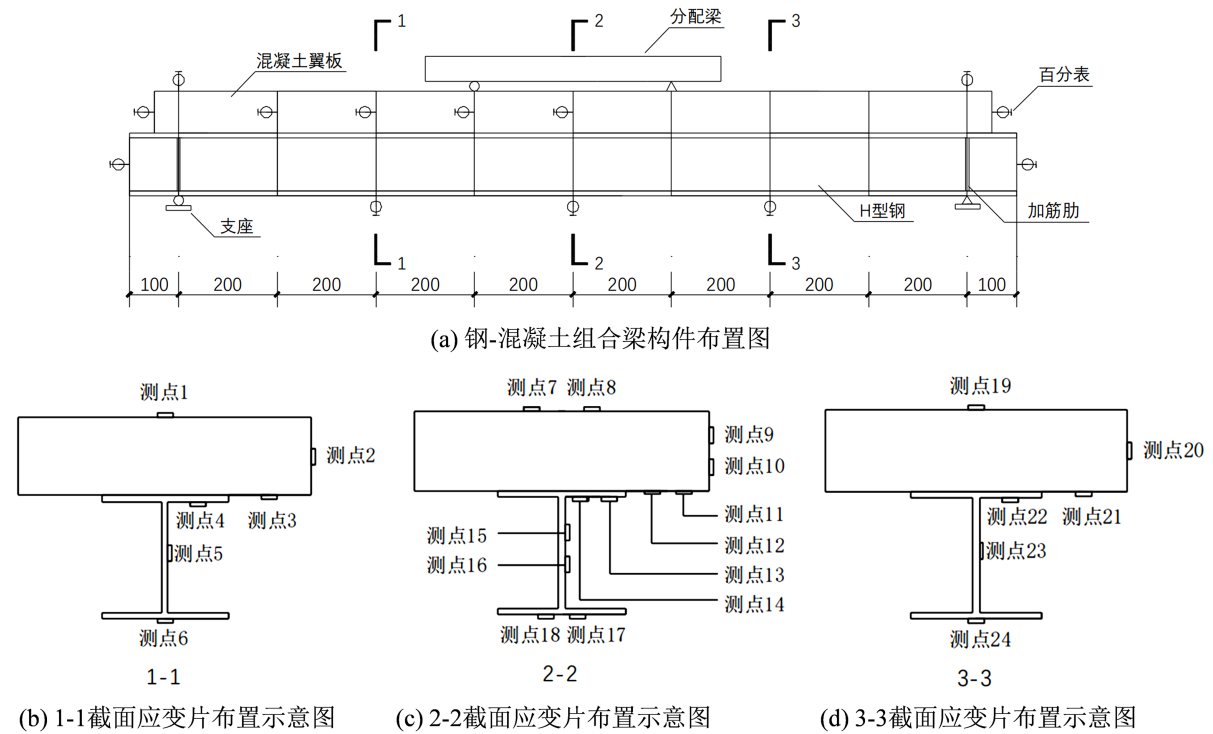


Figure 3. Layout of measuring points of steel-concrete composite beam
图 3. 钢 - 混凝土组合梁测点布置

2.3. 试验现象

2.3.1. 通电锈蚀情况

试验结果表明，不同通电锈蚀时间下组合梁表面损伤程度差异明显。通电锈蚀 10 d 时，混凝土表面未见明显裂缝，仅出现少量锈迹，说明锈蚀已开始对混凝土表层产生影响；通电锈蚀 20 d 时，栓钉上方

混凝土出现贯穿裂缝，并伴有轻微隆起，表明栓钉锈胀已引起混凝土板开裂；通电锈蚀 30 d 时，上部混凝土局部被顶裂，锈蚀栓钉外露，说明锈胀效应显著削弱了混凝土结构的完整性。试验过程中组合梁内部混凝土未发现明显裂缝，钢筋及钢梁均未出现锈蚀，表明防锈措施有效，锈蚀情况见图 4。

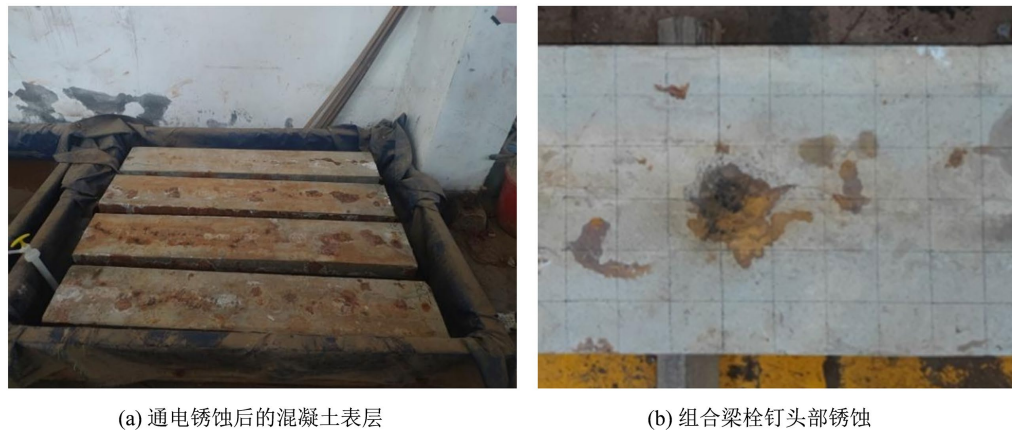


Figure 4. Phenomena after electrochemical accelerated corrosion
图 4. 电化学通电锈蚀后的现象

2.3.2. 力学试验现象

未锈蚀试件 SSCB-0 在正式加载初期整体工作状态良好，荷载与挠度基本呈线性增长关系；随着荷载逐步增大，构件内部首先出现清脆响声，随后支座下方出现斜向裂缝，跨中混凝土表面逐渐起皮并伴有局部脱落现象。当荷载达到 266 kN 时，试件达到极限承载状态，随后承载力开始下降，最终以跨中混凝土压碎破坏为主，破型后可以发现剪跨区部分栓钉被剪断，试件的破坏形态如图 5 所示。

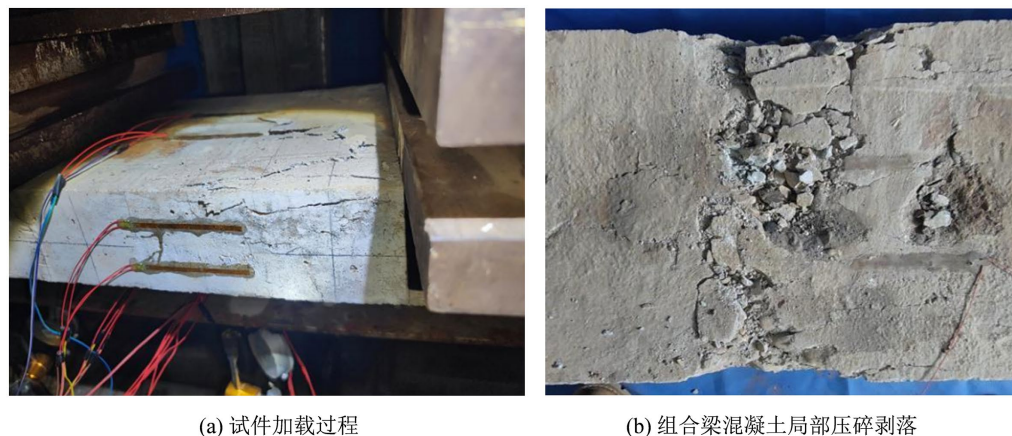


Figure 5. Specimen loading process and local concrete crushing and spalling
图 5. 试件加载过程及混凝土局部压碎剥落形态

完成 100 万次疲劳加载后，对试件 SFSCB-0~SFSCB-3 进行剩余承载力试验，各试件呈现出不同的损伤特征与破坏模式。未锈蚀试件 SFSCB-0 在疲劳过程中出现跨中纵向裂缝、钢梁与混凝土板界面滑移以及栓钉剪断等现象，疲劳后期裂缝进一步发展并贯穿混凝土板。随后的静力试验中荷载增加，构件裂缝持续扩展，并伴随栓钉剪切破坏和钢梁腹板分离现象，最终试件在荷载达到 215 kN 时发生剪切破坏，破坏形态如图 6 所示。

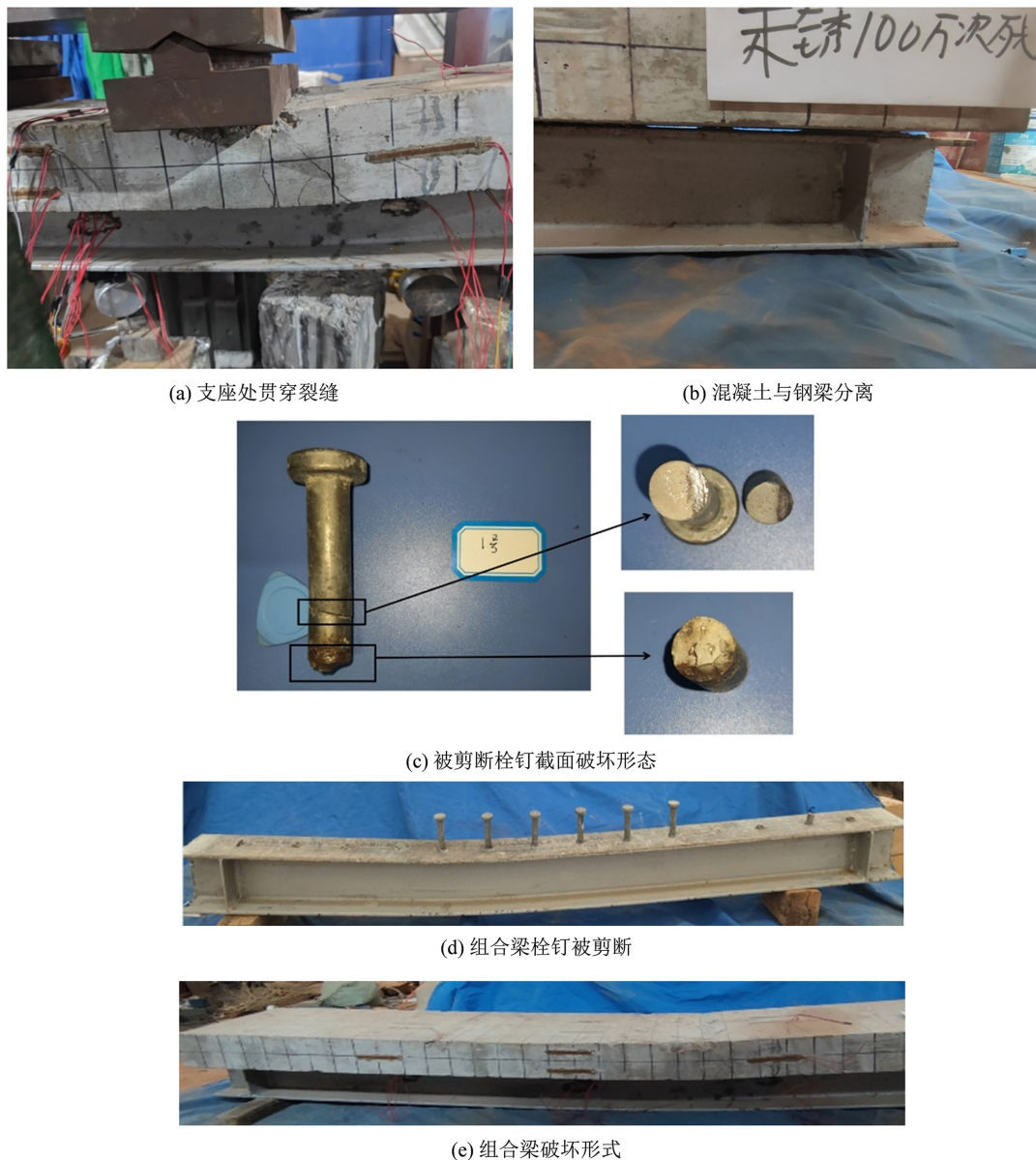


Figure 6. Failure mode of uncorroded members

图 6. 未锈蚀构件破坏形态

锈蚀 10 d 试件 SFSCB-1 在疲劳加载过程中未出现栓钉剪断现象, 但界面滑移逐渐增大; 在后续静力加载过程中, 随着荷载增加, 构件内部持续发出细碎响声, 跨中混凝土裂缝逐步扩展并伴有局部剥落现象, 当荷载达到 273.43 kN 时, 试件达到极限承载状态, 最终表现为压弯破坏。锈蚀 20 d 试件 SFSCB-2 在 100 万次疲劳循环过程中整体表现较为稳定, 未出现明显界面滑移及新增裂缝; 进入静力加载阶段后, 随着荷载不断增大, 原有裂缝逐渐扩展, 当荷载达到 265.51 kN 时, 跨中混凝土出现压碎现象, 构件承载能力开始下降, 最终以压弯破坏形式失效。锈蚀 30 d 试件 SFSCB-3 在疲劳试验过程中同样未见明显异常, 仅原有裂缝略有发展; 静力加载过程中, 随着荷载增加, 支座附近及跨中裂缝逐渐扩展, 上部混凝土出现起皮和压碎现象, 当荷载达到 257.18 kN 时, 构件承载能力达到极限并逐渐失效, 其破坏形式同样为压弯破坏, 试件的破坏形态如图 7 所示。

综上所述, 未锈蚀试件 SSCB-0 与 SFSCB-0 在加载过程中均出现较明显的界面损伤和连接件破坏, 其中 SFSCB-0 在疲劳作用后破坏更为集中, 最终表现为剪切破坏; 而锈蚀疲劳试件 SFSCB-1~SFSCB-3 在疲劳阶段整体相对稳定, 后续静力加载阶段则主要表现为压弯破坏。说明界面锈蚀与疲劳损伤的共同作用改变了组合梁的破坏演化过程。



Figure 7. Failure modes of corroded specimens

图 7. 锈蚀构件破坏形态

3. 试验结果与分析

3.1. 界面锈蚀

完成试验后, 从破坏试件中随机选取 3 个栓钉, 测量其锈蚀前后的 3 个不同截面的直径计算损失率, 取其平均值作为栓钉锈蚀率。从钢梁跨中的上翼缘取得钢板, 尺寸为 $200\text{ mm} \times 65\text{ mm}$, 使用测厚仪测量锈蚀前后的厚度损失率作为钢板的锈蚀率。试件除锈首先敲碎栓钉和钢板表面的残留混凝土, 然后将栓钉和钢板浸泡在 10% 稀盐酸中, 随后用 3% 碳酸钠溶液中和残留盐酸, 再用清水冲洗擦干。最终锈蚀结果见表 3 和图 8 所示, 可以看出锈蚀率随时间增加而上升, 钢梁锈蚀率与栓钉锈蚀率趋势一致。锈蚀率的计算公式为:

$$\rho = \frac{(A_0 - A)}{A_0} \quad (1)$$

其中 A_0 是锈蚀前栓钉截面面积, A 是锈蚀后除锈栓钉截面面积, ρ 为锈蚀率。

Table 3. Corrosion rate

表 3. 锈蚀率

| 试件编号 | 通电锈蚀时间/d | 锈蚀率 $\rho/\%$ | |
|---------|----------|---------------|------|
| | | 栓钉 | 钢板 |
| SFSCB-0 | 0 | 0 | 0 |
| SFSCB-1 | 10 | 1.74 | 2.03 |
| SFSCB-2 | 20 | 5.54 | 4.15 |
| SFSCB-3 | 30 | 6.90 | 4.83 |

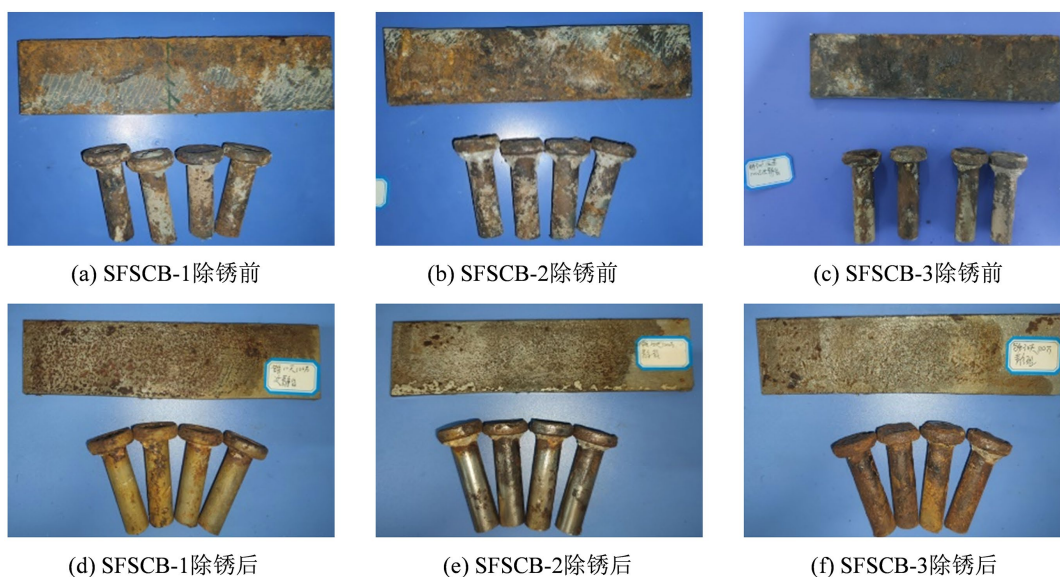


Figure 8. Corroded studs and steel beam

图 8. 锈蚀栓钉和钢梁

3.2. 荷载 - 挠度曲线

不同锈蚀程度组合梁静载试验与疲劳 100 万次后剩余承载力试验的荷载 - 挠度曲线如图 9 所示。总体来看, 各试件曲线均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。加载初期, 荷载与挠度基本呈线性关系, 说明构件整体刚度较好; 随着荷载持续增大, 曲线斜率逐渐减小, 表明构件刚度开始退化; 接近极限状态时, 挠度迅速增大, 试件进入破坏前阶段。

未锈蚀静载试件 SSCB-0 的极限承载力为 266kN。未锈蚀疲劳试件 SFSCB-0 经 100 万次疲劳循环后, 极限承载力降至 215 kN, 较 SSCB-0 下降 19.17%, 破坏挠度下降 19.80%, 说明疲劳作用显著削弱了未锈蚀组合梁的承载能力和变形能力。结合前述试验现象可知, SFSCB-0 在疲劳过程中已出现界面滑移和栓钉剪断等损伤, 后续静力加载阶段最终发生剪切破坏。锈蚀疲劳试件 SFSCB-1、SFSCB-2 和 SFSCB-3 的剩余极限承载力分别为 273.43kN、265.51kN 和 257.18 kN, 均高于未锈蚀疲劳试件 SFSCB-0。三者较 SFSCB-0 分别提高 27.18%、23.49%和 19.62%, 说明适度界面锈蚀在一定范围内增强了界面摩擦和咬合

作用，从而提高了疲劳后剩余承载力。

从不同锈蚀程度疲劳试件的对比来看，SFSCB-1 具有最高剩余极限承载力，SFSCB-2 和 SFSCB-3 则随锈蚀程度增加呈逐步下降趋势，表明界面锈蚀对疲劳后剩余承载性能具有双重影响：轻度锈蚀有利于界面黏结、摩擦和咬合作用的发挥，但随着锈蚀程度进一步增加，锈胀开裂和界面损伤累积效应逐渐增强，导致该有利作用逐步减弱。与此同时，SFSCB-1、SFSCB-2 和 SFSCB-3 的破坏挠度分别下降 14.95%、34.48%和 25.01%，说明锈蚀试件虽仍保持较高剩余承载力，但其变形能力已出现不同程度退化，其中 SFSCB-2 的延性下降最为明显。

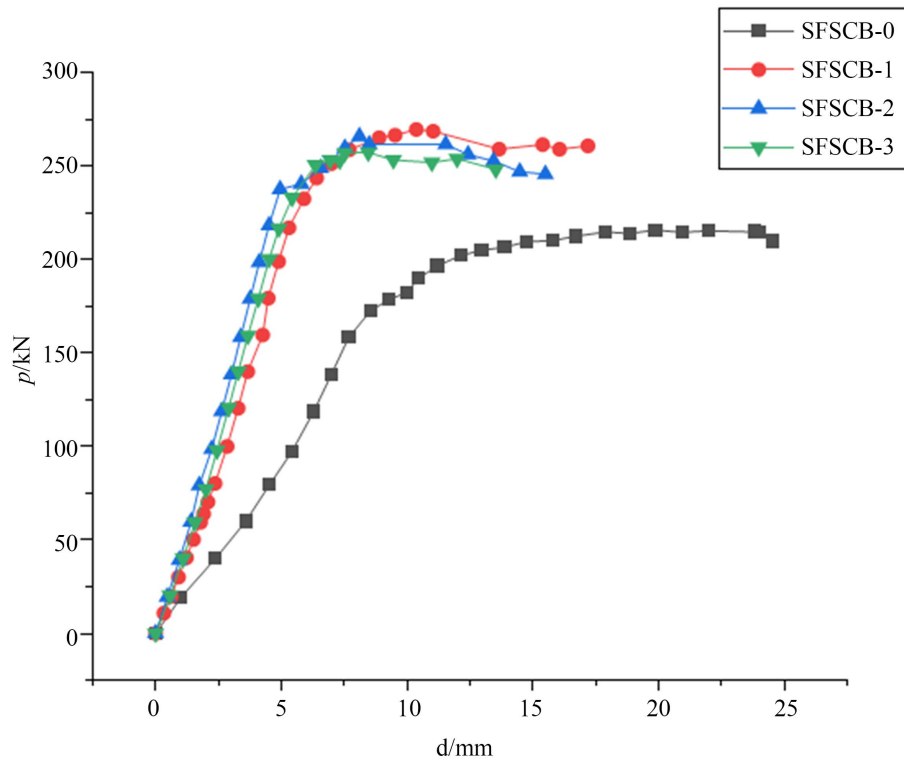


Figure 9. Load-deflection curves of the specimens

图 9. 试件的荷载 - 挠度曲线

3.3. 全截面应变曲线

各试件全截面应变曲线如图 10 所示。总体上，各试件在低荷载和中等荷载阶段沿梁高方向的应变分布基本呈线性，说明截面整体仍较好地满足平截面假定。由图 10(a)可见，静载试件 SSCB-0 的混凝土压应变和钢梁拉应变均随荷载增大而逐步增加，应变分布较为平顺，表明未锈蚀静载条件下钢梁与混凝土板之间仍具有较好的变形协调能力。从图 10(b)~(e)可见，疲劳后试件 SFSCB-0~SFSCB-3 的应变分布总体仍近似线性，但与 SSCB-0 相比，钢梁与混凝土板交界处的应变连续性有所减弱，说明疲劳作用及界面损伤会削弱组合梁的协同受力能力。其中，SFSCB-0 的受弯效应发挥相对不足，这与其最终发生剪切破坏相对应；SFSCB-1~SFSCB-3 在加载后期的钢梁拉应变和混凝土压应变增长更为明显，压弯特征更突出。进一步比较 SFSCB-1~SFSCB-3 可见，随着锈蚀程度增加，界面附近的应变突变现象逐渐明显，表明疲劳荷载与界面锈蚀共同作用后，钢梁与混凝土板之间的应变协调能力持续减弱，疲劳作用和界面锈蚀都会削弱界面连续性，并加剧截面应力重分布。

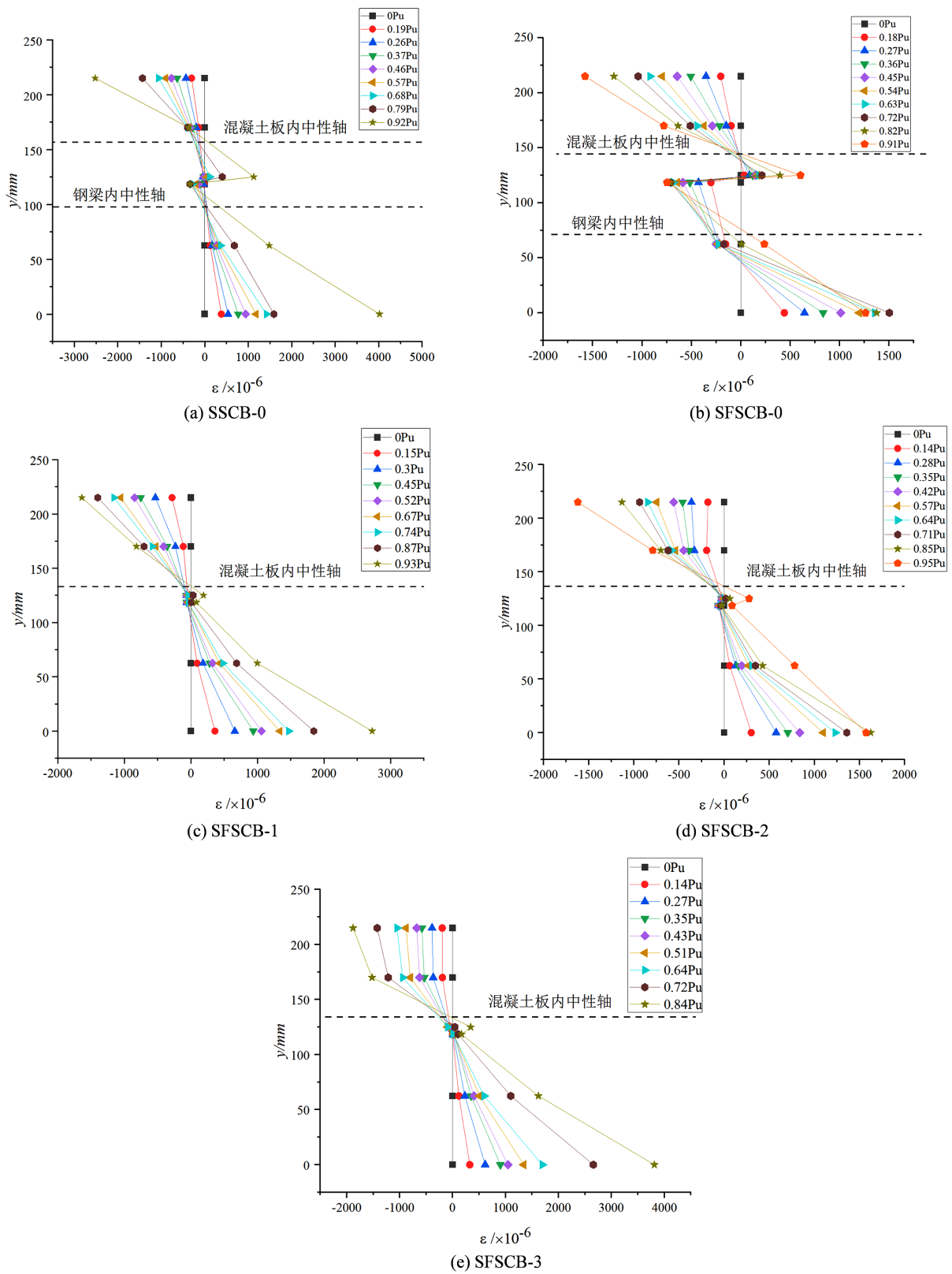


Figure 10. Cross section strain curve of each specimen
 图 10. 各试件的截面应变曲线

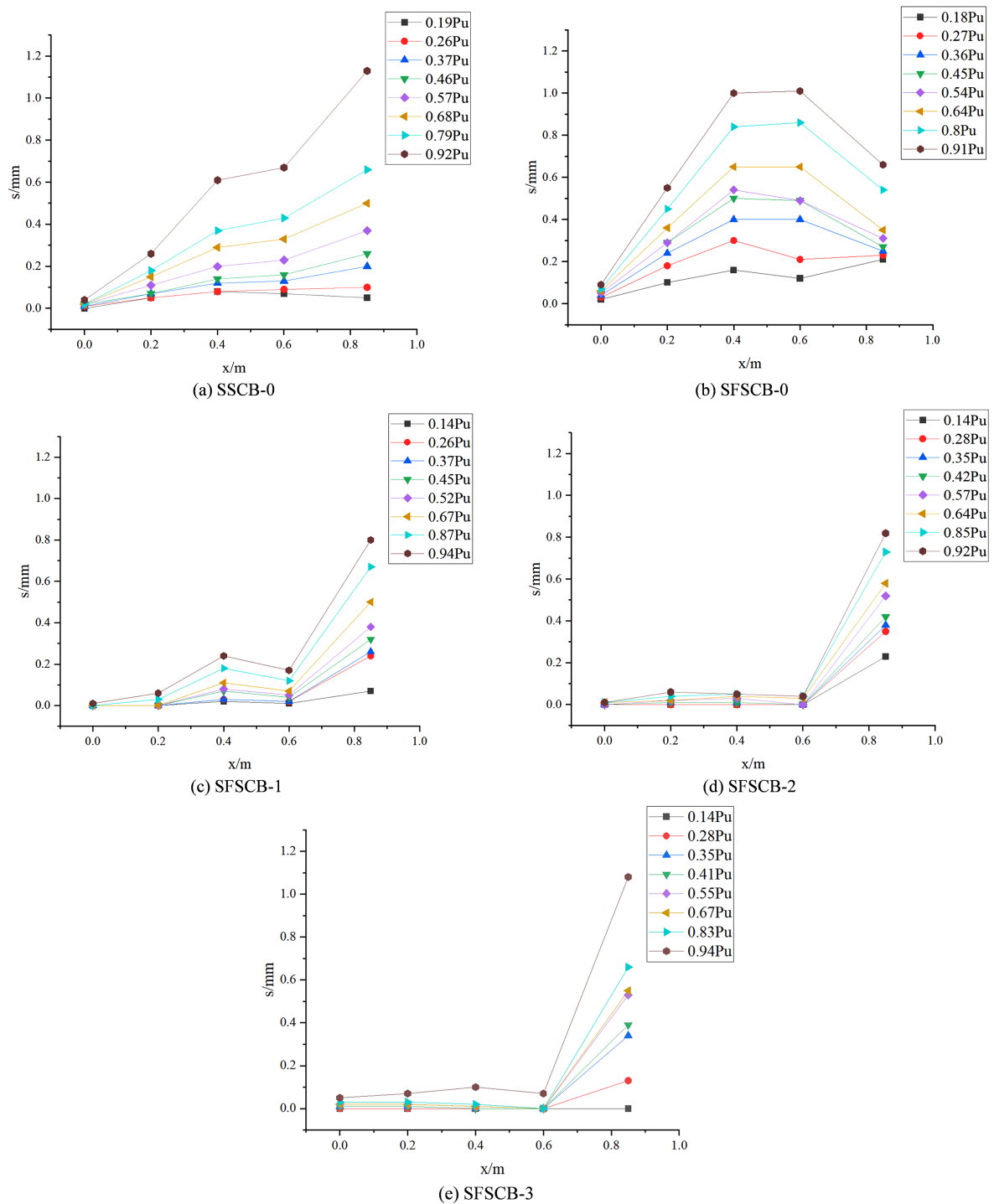


Figure 11. Load-slip curves of composite beams

图 11. 各组合梁荷载 - 滑移曲线

3.4. 荷载 - 滑移曲线

各试件荷载 - 滑移曲线如图 11 所示。各试件在低荷载阶段滑移均较小，界面协同工作较好；接近极限状态时，滑移迅速发展，界面退化开始主导构件受力响应。由图 11(a)可见，静载试件 SSCB-0 的滑移

发展较为平稳,说明未锈蚀静载条件下构件具有较好的界面约束作用和抗滑移能力。由图 11(b)可见,疲劳后未锈蚀试件 SFSCB-0 滑移启动最早、增长最快,且主要集中于跨中区域,表明疲劳作用后其界面损伤已由局部向跨中扩展,这与其疲劳过程中出现界面滑移和栓钉剪断的现象相一致。由图 11(c)~(e)可见,锈蚀疲劳试件 SFSCB-1~SFSCB-3 在大部分加载阶段内整体滑移较小,但接近极限状态时更容易出现端部局部滑移突增。其中, SFSCB-1 端部滑移增长较快, SFSCB-2 整体界面协调性相对较好, SFSCB-3 端部滑移集中最明显。说明适度界面锈蚀可在一定程度上提高界面抗滑移能力,但随着锈蚀程度增加,界面局部损伤和滑移集中趋势更加突出。总体表明未锈蚀疲劳试件更易出现分布型滑移,而锈蚀疲劳试件更易表现为局部集中滑移。随着锈蚀程度增加,组合梁界面的协同受力能力逐步减弱,局部滑移失稳趋势更加明显。

4. 结论

根据界面锈蚀钢-混凝土组合梁在 100 万次疲劳循环后的剩余承载力试验结果,可得到以下结论:

(1) 界面锈蚀显著影响组合梁疲劳后的破坏模式。未锈蚀试件 SFSCB-0 在疲劳过程中出现界面滑移和栓钉剪断,后续静力加载时最终发生剪切破坏;锈蚀试件 SFSCB-1~SFSCB-3 则主要表现为压弯破坏。说明界面锈蚀与疲劳损伤共同改变了组合梁的破坏演化路径。

(2) 疲劳作用会降低组合梁的承载能力和变形能力。未锈蚀试件 SFSCB-0 疲劳后极限承载力降至 215 kN,劣化最为明显;锈蚀试件 SFSCB-1~SFSCB-3 的疲劳后极限承载力分别为 273.43 kN、265.51 kN 和 257.18 kN,均高于未锈蚀试件。表明适度界面锈蚀可在一定范围内增强界面黏结、摩擦和咬合作用,但随着锈蚀程度增加,该效果逐渐减弱。

(3) 各试件截面应变沿梁高方向总体近似线性分布,整体上基本满足平截面假定;但疲劳后试件界面附近应变连续性减弱,且随锈蚀程度增加,应变突变更加明显。与此同时,界面滑移随荷载增加逐步发展,未锈蚀疲劳试件更易出现分布型滑移,而锈蚀疲劳试件更易表现为局部集中滑移,表明疲劳作用和界面锈蚀共同削弱了钢梁与混凝土板之间的协同受力能力。

(4) 总体上,界面锈蚀对钢-混凝土组合梁疲劳后剩余承载性能具有双重影响:轻度锈蚀有利于剩余承载力发挥,而锈蚀进一步发展后,不利影响逐渐占主导,导致构件刚度、承载能力和服役性能下降。

参考文献

- [1] 汪炳,黄侨,刘小玲.组合梁疲劳后的刚度退化规律及计算模型[J].振动与冲击,2021,40(6):265-271.
- [2] 卜建清,张吉仁.钢-混凝土组合梁疲劳性能试验研究进展[J].中外公路,2022,42(5):78-82.
- [3] Wang, B., Liu, X. and Zhuge, P. (2021) Residual Bearing Capacity of Steel-Concrete Composite Beams under Fatigue Loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 77, 559-569.
- [4] 张吉仁,卜建清,曹文龙,荀敬川.栓钉式钢-混凝土组合梁疲劳刚度退化研究[J].铁道标准设计,2022,66(5):77-82.
- [5] 张吉仁,卜建清,荣学亮,荀敬川.栓钉式钢-混凝土组合梁剩余承载力有限元分析[J].铁道标准设计,2022,66(2):66-71.
- [6] Xu, Y., Liu, X., Wang, B. and Yi, X. (2023) Residual Mechanical Properties of Composite Beams with PBL Connectors under Fatigue Loads. *Structures*, 51, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.051>
- [7] 匡亚川,陶莉,贺宇豪.锈蚀栓钉钢-混凝土组合梁的疲劳寿命预测模型[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):770-778.
- [8] 黄锐,石卫华.钢梁腐蚀后钢-混凝土组合梁疲劳性能研究[J].土木工程,2024,13(12):2215-2225.
- [9] 张凡,陈炳聪,刘爱荣,周危,刘国蔚.装配式钢-混凝土组合梁高强螺栓剪力连接件力学模型[J].工程力学,2022,39(S1):173-179.
- [10] 武芳文,冯彦鹏,戴君,王广倩,张景峰.钢-UHPC 组合结构中栓钉剪力键力学性能研究[J].工程力学,2022,

39(2): 222-234+243.

- [11] 王亮, 魏欢博, 高亚杰, 任万敏, 卫星. 不同锈蚀程度下栓钉连接件的抗剪性能分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2024, 41(1): 58-65.
- [12] 都方竹, 张世博, 邱大鹏, 张月. 栓钉初始损伤后钢-混凝土组合梁长期时变特性[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(29): 12601-12612.
- [13] Chen, J., Zhang, H. and Yu, Q.Q. (2021) Monotonic and Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Beams Subjected to Corrosion. *Structures*, **34**, 1973-1984. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.110>
- [14] Liang, X., Yi, X., Wang, B., *et al.* (2022) Slip Behavior of Stud Connectors of Steel-Concrete Composite Beams in the Whole Process of Fatigue Loading. *Structures*, **44**, 1607-1616. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.104>
- [15] Wang, B., Wang, K., Liu, X. and Xu, Y. (2023) Residual Flexural Capacity of Composite Beams with Corroded Studs after Fatigue. *Journal of Bridge Engineering*, **28**, Article 04023026. <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-6065>