

钢梁腐蚀后钢 - 混凝土组合梁疲劳性能研究

黄 锐, 石卫华

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年11月11日; 录用日期: 2024年12月7日; 发布日期: 2024年12月13日

摘 要

为了研究钢梁腐蚀后钢 - 混凝土组合梁疲劳性能, 本次试验共设计制作了6根力学性能相同的组合梁, 其中1根梁进行静力试验, 5根梁进行疲劳试验。静力试验提供组合梁的极限荷载, 为疲劳试验确定荷载幅提供了依据。本研究重点比较了在不等幅加载下, 不同疲劳加载次数对组合梁破坏形态的影响, 并分析了荷载 - 挠度曲线、残余挠度及相对滑移量的变化。对相关试验数据进行分析及处理, 深度探讨刚度退化的根本原因。通过对实验数据的深入分析, 探讨了刚度退化的根本原因。研究结果表明, 荷载幅的增加导致组合梁疲劳寿命降低, 并产生不可恢复的残余变形和应变, 残余挠度也随之上升。同时, 组合梁的刚度在疲劳加载过程中出现了一定程度的退化, 弯曲刚度的退化率随着荷载幅的增加而增大。

关键词

钢 - 混凝土组合梁, 钢梁腐蚀, 疲劳试验, 疲劳性能, 刚度退化

Study on Fatigue Performance of Steel-Concrete Composite Beams Subjected to Corrosion of Steel Beams

Rui Huang, Weihua Shi

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

Received: Nov. 11th, 2024; accepted: Dec. 7th, 2024; published: Dec. 13th, 2024

Abstract

In order to study the fatigue performance of steel-concrete composite beams after the corrosion of steel beams, a total of six composite beams with the same mechanical properties were designed and fabricated in this experiment. One beam was subjected to static testing, and five beams were subjected to fatigue testing. Static testing provides the ultimate load of composite beams and serves as a basis for determining the load amplitude in fatigue testing. This study focuses on comparing the

文章引用: 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.

DOI: 10.12677/hjce.2024.1312244

effects of different fatigue loading cycles on the failure modes of composite beams under unequal amplitude loading and analyzing the changes in load-deflection curves, residual deflection, and relative slip. Analyze and process relevant experimental data and deeply explore the fundamental causes of stiffness degradation. Through in-depth analysis of experimental data, the fundamental cause of stiffness degradation was explored. The research results indicate that an increase in load amplitude leads to a decrease in the fatigue life of composite beams, as well as irreversible residual deformation and strain and an increase in residual deflection. Meanwhile, the stiffness of the composite beam undergoes a certain degree of degradation during fatigue loading, and the degradation rate of bending stiffness increases with the increase of load amplitude.

Keywords

Steel-Concrete Composite Beams, Corrosion of Steel Beams, Fatigue Test, Fatigue Performance, Stiffness Degradation

Copyright © 2024 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-混凝土组合梁结合了钢结构和混凝土结构各自的优点, 具有明显的技术经济及社会效益, 是结构体系发展的方向[1]。随着组合梁使用频率的增加, 组合梁呈现出的疲劳相关问题开始引起人们的重视。现有研究表明, 疲劳荷载幅会显著影响组合梁的疲劳寿命[2][3]。由于组合梁在桥梁结构中广泛应用, 车辆荷载会造成组合梁疲劳损伤的不断累积, 有相关研究表明疲劳损伤会导致组合梁的极限变形能力降低[4]; 有学者对连接程度不同的组合梁进行相关的试验研究, 在荷载作用下组合梁的力学性能会随着剪切连接程度的降低而降低, 破坏模式也会随着剪切连接程度的降低而不同[5]。在桥梁交通的长期荷载作用下, 钢-混凝土组合梁中的头部剪力钉容易受到疲劳损伤, 有学者采用超声波无损检测技术对剪力钉的疲劳裂纹进行检测, 得出根部断裂是剪力钉在疲劳荷载作用下的主要疲劳失效模式[6]。

对于氯盐加速腐蚀下的钢-混凝土组合梁的耐久性也有学者进行相关研究[7][8], 我国组合梁桥所处的自然环境复杂和行车密度高, 在持续使用期间受到车辆荷载和环境侵蚀等因素的共同影响。同时有学者对腐蚀和荷载耦合作用下钢-混凝土组合梁进行试验研究, 随着腐蚀的加剧, 连接件的刚度显著降低, 而混凝土应变仅受螺柱腐蚀轻微影响[9]。对于腐蚀后的组合梁试件的单调承载能力和疲劳寿命都有不利影响, 残余弯曲刚度也随着腐蚀速率的增加而降低。残余跨中挠度和残余端滑移随腐蚀速率的增加而显著增加, 表明钢梁与混凝土板之间的协调性减弱[10]。有相关学者对不同栓钉锈蚀程度的钢-混凝土组合梁进行疲劳试验研究, 结果表明栓钉锈蚀率的增加使组合梁疲劳寿命下降, 使负弯矩区组合梁在经历相同疲劳加载次数后的残余变形增加, 滑移刚度的退化会随着栓钉锈蚀率的增加而加剧[11]。随着疲劳次数和荷载幅值的增加组合梁刚度退化逐渐加快, 在疲劳荷载加载初、末期, 疲劳刚度退化量及退化速率较大, 加载中期持续时间最长[12]。同时有学者提出在疲劳作用下适用于组合梁刚度退化规律的计算分析模型[13], 和采用适合于组合梁非线性的有限元建模计算方法, 得出的计算结果与试验结果比较吻合[14]; 以及有学者采用 ANSYS 有限元分析软件, 结合断裂力学的 Miner 累计损伤理论, 推导出栓钉锈蚀后组合梁疲劳寿命预测模型以及栓钉 N 次循环荷载后的剩余承载力计算公式[15]。对于锈蚀后的组合梁进行静载试验和疲劳试验, 得出组合梁的承载力和疲劳寿命有一定程度的下降, 残余跨中挠度和残余端滑移随腐蚀速率的增加而显著增加, 表明钢梁与混凝土板之间的协调性减弱[16]。但对基于钢梁腐蚀后的组合梁疲劳性能研究未见其报

道。

因此，本次试验共设计制作 6 根力学性能相同的组合梁进行疲劳试验，用来研究腐蚀率相同的情况下，组合梁作用不同荷载幅下的疲劳寿命、刚度退化规律、变形等力学性能。

2. 试验概况

2.1. 组合梁的设计与材料选取

为了研究钢梁腐蚀后钢 - 混凝土组合梁力学性能的变化情况，共设计制作 6 根结构尺寸都相同的组合梁，其中 1 根组合梁(未锈蚀)用于静载试验，5 根组合梁(均锈蚀)用于疲劳试验。组合梁的几何尺寸见图 1 所示，试件长度为 1800 mm，钢梁选取 H 型钢截面尺寸为 130 mm × 125 mm × 6.5 mm，长为 1800 mm，混凝土板截面尺寸见图 2 所示，长为 1700 mm，混凝土设计强度标准值选用 C40，混凝土实际力学性能指标见表 1 所示。组合梁均设计为完全抗剪连接，混凝土板钢筋布置见图 2 所示。每个组合梁单排布置 16 个栓钉，栓钉尺寸为 M16 × 70 mm，栓钉、钢梁及钢筋的力学性能指标见表 2 所示。

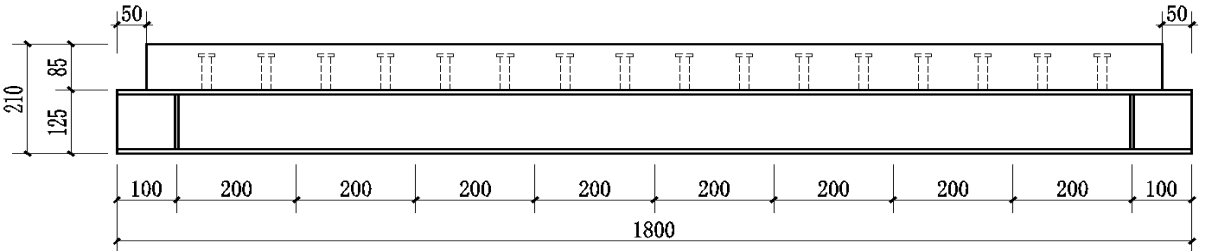


Figure 1. Geometric dimensions of composite beams
图 1. 组合梁几何尺寸

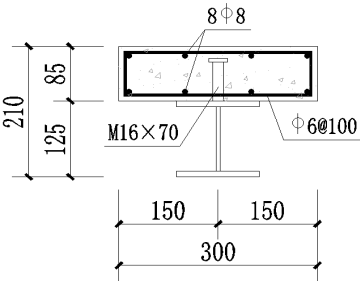


Figure 2. Cross section dimensions and construction of composite beams
图 2. 组合梁横截面尺寸及构造

Table 1. Material properties of concrete
表 1. 混凝土力学性能

组合梁编号	立方体抗压强度 f_{cu} (N/mm ²)	弹性模量 E_c /($\times 10^4$ /mm ²)
SCB0	55.2	3.55
FSCB0	55.3	3.55
FSCB4	55.4	3.45
FSCB1	54.4	3.46
FSCB2	54.8	3.58
FSCB3	54.7	3.54

Table 2. Material properties of steel beam, stud and reinforced bar
表 2. 钢梁、栓钉及钢筋材料性能

材料	屈服强度 f_y/Mpa	极限强度 f_u/Mpa	屈强比 f_y/f_u
栓钉	344	470	0.73
钢梁	314	430	0.73
钢筋	305	425	0.72

2.2. 试验方案

2.2.1. 组合梁锈蚀试验

组合梁在标准条件下养护 28 天, 将表面锈迹、松散氧化物、灰尘等进行清理后刷防锈漆。将组合梁放入人工气候环境实验室中, 采用干湿循环加速腐蚀, 然后用 5% 的 NaCl 溶液喷洒到组合梁上, 干湿循环 8 小时一轮, 加速腐蚀组合梁试件。组合梁腐蚀到一定时间后将其搬出, 表面对其进行清洗并且除去杂质, 然后将其进行烘干。

试验完成后, 从每个组合梁的钢梁下翼缘取下 2 块长 300 mm 的钢板并且对其进行除锈, 之后从钢板上选取 10 个位置不变的测点测量其厚度, 测量仪器选用 DC-2000B 智能超声波测厚仪, 最后选取平均值, 截面平均厚度损失率作为钢板的腐蚀率。图 3 为钢板腐蚀后的形态。

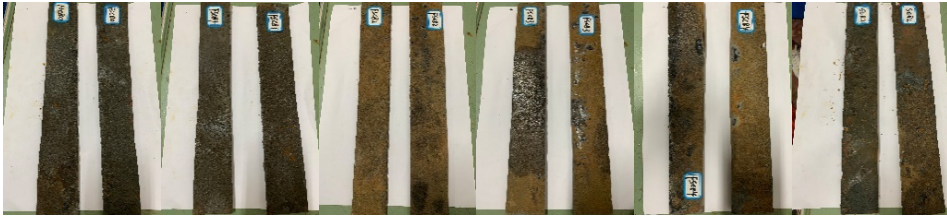


Figure 3. Corrosive steel plate
图 3. 腐蚀钢板

待加载试验结束后, 将栓钉从中取出, 采用稀盐酸进行除锈处理, 除锈完成后对其进行冲洗、烘干。每根组合梁选取 4 个栓钉, 测量出实际直径算出平均值后并计算出栓钉的截面面积。锈蚀结果见表 3 所示。

$$\rho = (A_0 - A) / A_0 \quad (1)$$

式(1)中: A_0 为栓钉锈蚀前的平均截面面积, A 为栓钉锈蚀后的平均截面面积, ρ 为锈蚀率。

Table 3. Corrosion rate
表 3. 锈蚀率

试件编号	锈蚀时间/年	锈蚀率 $\rho/\%$	
		栓钉	钢板
SCB0	0	0	0
FSCB0	5	2.86	11.73
FSCB1	5	2.80	9.87
FSCB4	5	3.00	10.22
FSCB2	5	2.92	9.31
FSCB3	5	2.73	10.49

从表 3 可以看出栓钉的锈蚀率比较低, 对组合梁力学性能影响不大可以不加以考虑; 钢板平均锈蚀率在 10% 左右, 力学性能相差不大, 认为锈蚀率相同。

2.2.2. 加载试验

在进行静力试验之前, 首先对其进行预加载, 目的是消除刚体位移对结果产生较大误差的影响, 并且检查试验设备是否能正常工作; 预加载共进行两次, 一次加载分两级进行, 每级增加 10 kN, 加载完成后卸载。随后进行正式加载, 每次加载以 10 kN 为一级, 依次增加, 并且在加载的过程中记录荷载所对应的挠度、相对滑移等数据, 还要观察在加载过程中出现的各种试验现象。当加载到屈服阶段后, 采用位移计进行控制, 以挠度每下降 1 mm 进行加载, 直到组合梁上混凝土压碎并且承载力开始出现明显的下降趋势。

然后对试件 FSCB0、FSCB1、FSCB4、FSCB2、FSCB3 进行疲劳试验, 取试件 SCB0 的静力承载力 P_u 作为疲劳加载依据。组合梁加载装置见图 4 所示, 采用全自动电液脉动疲劳试验系统(机), 本次疲劳试验采用等幅正弦波荷载, 加载频率为 4 Hz 左右。疲劳加载的幅值 $P_{\min} = 0.2 P_u$ 和 $P_{\max} = \mu P_u$ ($\mu = 0.3, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6$), P_u 、 $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为组合梁荷载极限值、疲劳荷载上限值、疲劳荷载下限值。在加载次数达到 0、1、2、5、10、20、50、n 万次时停机进行静载试验, 记录数据分析出疲劳后力学性能的变化。

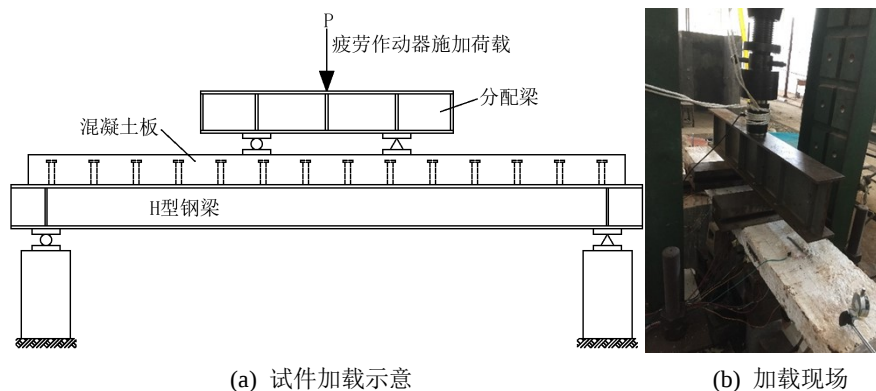


Figure 4. Loading device
图 4. 加载装置

3. 试验现象

3.1. 静力试验

在静力试验过程中, 试件 SCB0 的破坏现象为压弯破坏。加载初期, 跨中挠度与荷载呈线性变化, 荷载持续加到 109.5 kN, 此时混凝土板出现声响, 荷载到 299.6 kN 时, 混凝土板表面肉眼可见地能观察到裂缝。随着荷载的持续加载, 裂缝数量依次增加, 最终形成多条贯通裂缝。荷载到 310 kN 时, 组合梁的挠度达到最大值, 荷载始终加载不上去了, 最后混凝土被压碎, 组合梁破坏。组合梁静力破坏特征见图 5 所示。

3.2. 疲劳试验

对于梁 FSCB0 的荷载幅, 按照静载试验得到的极限承载力为 310 kN, 此时取 300 kN, 荷载上下限值分别为 $0.6 P_u$ 和 $0.2 P_u$, 荷载幅为 120 kN。当疲劳次数达到 1 万次和 2 万次时, 组合梁没有出现特别明显的变化。当疲劳次数达到 5 万次左右时, 混凝土板与钢梁之间出现轻微滑动。最后当疲劳次数达到 14.2 万次时, 组合梁跨中的钢梁突然断裂, 试件破坏, 栓钉没有被剪断。图 6 为试件的疲劳破坏形态。

梁 FSCB1、FSCB4、FSCB2 疲劳加载的幅值为 $P_{\min} = 0.2 P_u$ 和 $P_{\max} = \mu P_u$ ($\mu = 0.55, 0.5, 0.4$), 加载程序与梁 FSCB0 加载程序相同。当加载到一定次数时, 混凝土翼缘出现裂缝, 每根梁产生的裂缝长度不等。作用在梁 FSCB1、FSCB4、FSCB2 的疲劳次数分别达到 26.8 万次、31.3 万次、135.1 万次, 钢梁突然断裂, 混凝土板被压碎, 试件破坏。

梁 FSCB3 的荷载上下限值为 $0.3 P_u$ 和 $0.2 P_u$, 荷载幅为 30 kN。当疲劳次数达到 200 万次时, 组合梁没有出现变化, 直至加载到 310 万次, 组合梁上的滑移和挠度也没有出现明显的变化。最后停机做静载试验, 最后得到疲劳 310 万次后组合梁的极限承载力为 265 kN。



Figure 5. Static failure mode of composite beams
图 5. 组合梁静力破坏形态



Figure 6. Fatigue failure mode
图 6. 试件疲劳破坏形态

4. 试验结果及其分析

4.1. 不同荷载幅对疲劳寿命的影响

表 4 给出各试件在不同荷载幅下的疲劳寿命, 试件疲劳寿命 $N_{\max}-\Delta P$ 曲线见图 7 所示。组合梁 FSCB3 所选取的荷载幅值较小, 疲劳次数达到 310 万次依旧没有被破坏, 因此将构件定义为达到全寿命使用周期。表 4 和图 7 中发现组合梁疲劳寿命随荷载幅的增大逐渐减少, 组合梁 FSCB0、FSCB1、FSCB4、FSCB2 比组合梁 FSCB3 的疲劳寿命减少了 95.4%、91.4%、89.9%、56.4%, 主要原因是钢梁锈蚀后表面微裂纹被扩大, 然后在加载过程中钢梁表面微裂纹不断发展, 截面有效面积逐渐减少, 使得组合梁抗弯刚度逐渐降低。随着荷载上限值和荷载幅不断增大, 使得组合梁的破坏越快发生。

Table 4. Different load amplitudes and fatigue life
表 4. 不同荷载幅和疲劳寿命

试件编号	荷载/kN			疲劳次数 N /次数
	$P_{\max}$	$P_{\min}$	ΔP	
FSCB0	180	60	120	14.2×10^4
FSCB1	165	60	105	26.8×10^4
FSCB4	150	60	90	31.3×10^4
FSCB2	120	60	60	135.1×10^4
FSCB3	90	60	30	310.0×10^4

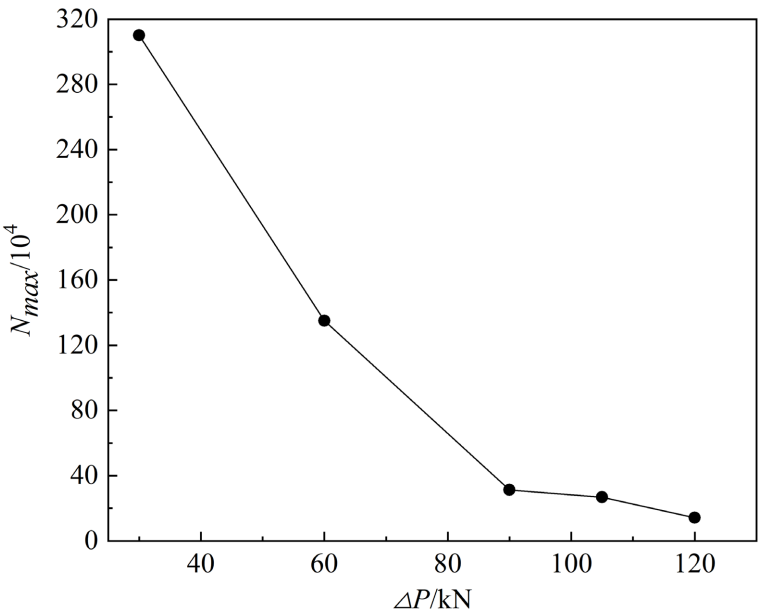


Figure 7. Fatigue life and load amplitude curve graph
图 7. 疲劳寿命与荷载幅曲线图

4.2. 不同荷载幅对组合梁残余应变的影响

疲劳会使得组合梁产生损伤并逐渐累积，组合梁在疲劳荷载作用下产生的残余变形(应变)是不可逆的。当组合梁疲劳 0、2、5、10、20、40、n 万次后进行静力试验，从而绘制出荷载 - 变形曲线，见图 8 所示。图 8 中(8-1)~(8-4)分别为试件 FSCB3 疲劳 200 万次后的荷载 - 挠度曲线、荷载 - 滑移曲线、荷载 - 钢梁拉应变曲线和荷载 - 混凝土压应变曲线。从图中可以看出，荷载 - 挠度曲线、荷载 - 滑移曲线、荷载 - 钢梁拉应变曲线向右偏移，荷载 - 混凝土压应变曲线向左偏移，伴随着疲劳次数增加试件的残余变形(应变)在逐渐累积，使组合梁的抗弯刚度逐渐降低。

对于不同 ΔP 作用下，试件所产生的残余挠度和残余挠度发展趋势各不相同。试件 FSCB0、FSCB1、FSCB4、FSCB2、FSCB3 的残余挠度发展趋势随加载次数的发展曲线见图 10 所示。由图 9 可知，不同荷载幅疲劳 10 万次后的挠度曲线(静力试验 0~100 kN 线弹性阶段曲线)产生的残余挠度逐渐加大。这是因为疲劳荷载幅值的增加使得钢梁的应力幅逐渐增加，对于每次疲劳后的组合梁使其产生的结构损伤各不相同，残余挠度也就会逐渐增加；由图 10 可知，当疲劳次数从 0 万次加载到 5 万次左右这一区间，组合梁残余挠度增加的速率较快，随后增加速率逐渐变得较平缓，最后残余挠度发展步入稳定发展阶段，

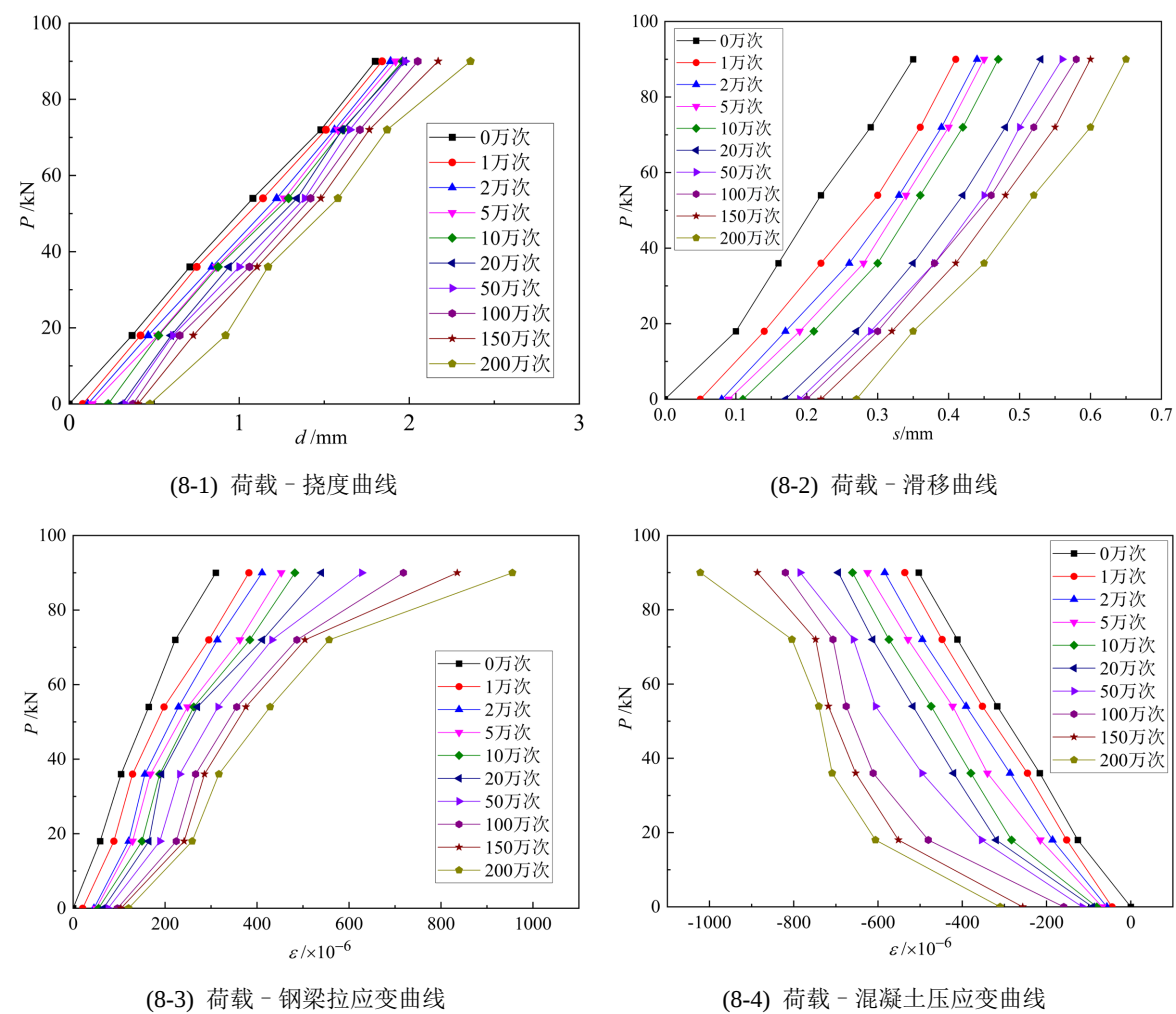


Figure 8. FSCB3 load deformation and load strain curves
图 8. FSCB3 荷载 - 变形及荷载 - 应变曲线

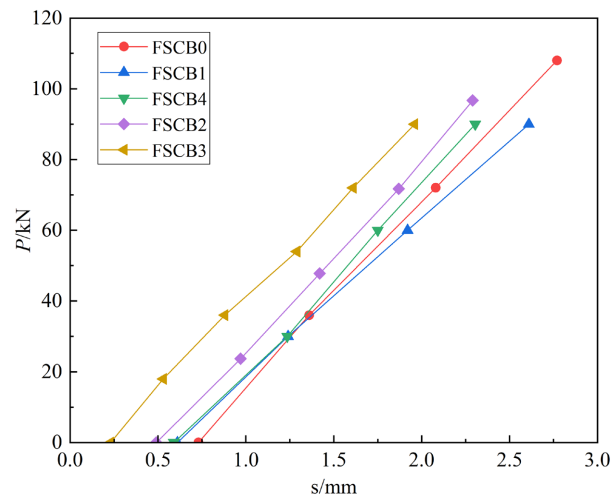


Figure 9. Comparison of deflection curves for 100,000 midspan fatigue cycles
图 9. 疲劳 10 万次跨中挠度曲线对比图

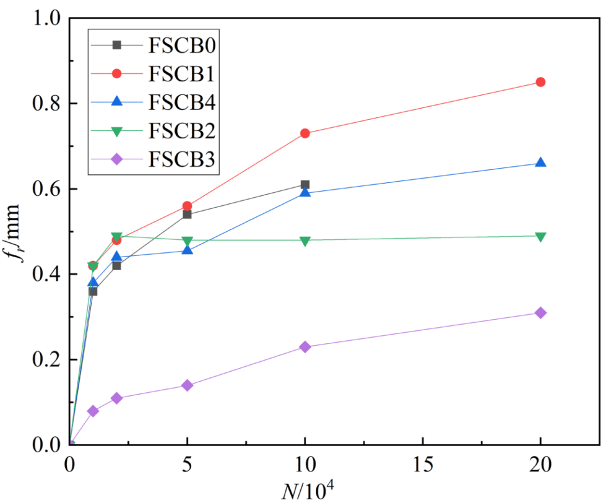


Figure 10. Residual deflection development curve of composite beam
图 10. 组合梁残余挠度发展曲线

符合疲劳试验的发展规律。由于组合梁在疲劳初始阶段钢梁表面存在微裂缝，加载初期表面微裂缝逐渐发展成多条主裂缝，此时组合梁结构损伤将进入缓慢增加阶段。

通过残余挠度发展曲线可知，随着组合梁疲劳荷载幅值的增加，在经历相同疲劳加载次数后，组合梁的残余变形随荷载幅的增加而逐渐加快。因为在荷载幅的增加下使得钢梁下翼缘的应力幅增加，应力幅越大，疲劳寿命越短。在相同锈蚀的情况下，钢梁的疲劳寿命随着应力幅增加而逐渐下降，使得挠度变形发展越来越快，最后钢梁断裂出现脆性破坏现象。

4.3. 刚度退化

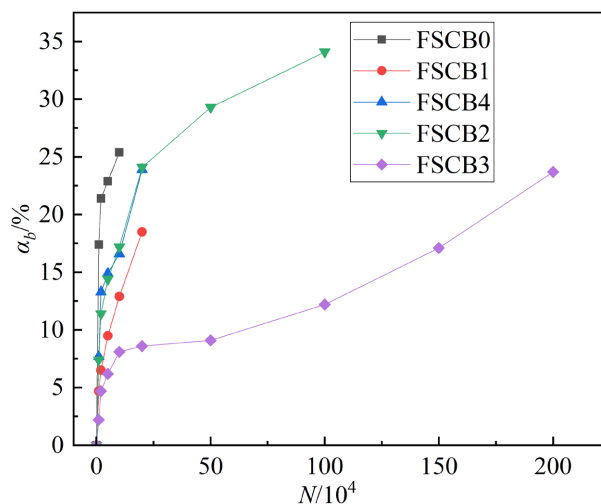
在疲劳荷载加载过程中，组合梁的弯曲刚度会逐渐的退化。根据每次静载试验所记录的数据和简支梁抗弯刚度公式计算出疲劳后的刚度[17]，从而对比作用不同荷载幅试件刚度的退化程度，表 5 为组合梁疲劳加载后弯曲刚度的退化率。

Table 5. Degree of stiffness degradation of composite beams
表 5. 组合梁刚度退化程度

试件编号	$B/(\times 10^6\text{N}\cdot\text{m}^2)$	$\alpha_b/\%$								
		1 万次	2 万次	5 万次	10 万次	20 万次	50 万次	100 万次	150 万次	200 万次
FSCB0	5.09	17.4	21.4	22.9	25.4					
FSCB1	3.24	4.7	6.5	9.5	12.9	18.5				
FSCB4	4.17	7.7	13.3	14.9	16.6	23.9				
FSCB2	4.18	7.4	11.4	14.4	17.2	24.1	29.3	34.1		
FSCB3	3.90	2.2	4.7	6.2	8.1	8.6	9.1	12.2	17.1	23.7

注：B 为初始弯曲刚度； α_b 为弯曲刚度退化率。

由表 5 可知，组合梁抗弯刚度随着疲劳次数的增加而降低，刚度退化率随着荷载幅的上升而逐渐上升。由图 11 可知，在相同疲劳次数的情况下，荷载幅的不同刚度退化率随着荷载幅增加而加快。对比图中曲线，FSCB0、FSCB1 和 FSCB4 ($\Delta P = 120, 105, 90$) 疲劳次数在 5 万次以内刚度退化速率上升很快，刚

Figure 11. α_b curve chart图 11. α_b 曲线图

度退化平缓段很短；而对于 FSCB2 和 FSCB3 ($\Delta P = 60, 30$)，刚度退化速率上升段也集中在 5 万次以内，但有明显刚度退化平缓段。所以，可以看出 ΔP 较大对组合梁刚度退化的影响非常迅速， ΔP 较低对组合梁刚度退化的影响相对来说比较缓慢。

5. 结论

本文通过对试验数据和现象的处理及分析，得出以下 3 点结论。

1) 锈蚀率相同的情况下，组合梁在一定荷载幅值疲劳作用下，试件的残余变形(应变)会逐渐累积并不可恢复，从而使得弯曲刚度会逐步退化；

2) ΔP 的增加使得组合梁在经历相同加载次数后跨中挠度逐渐增加，挠度残余增加速率也逐渐加快；

3) ΔP 的变化使得组合梁出现不同程度的刚度退化速率，本次试验中刚度退化速率较快阶段集中在 5 万次以内。对于 ΔP 较大没有明显刚度退化平缓段， ΔP 较小有明显刚度退化平缓段。

参考文献

- [1] 聂建国, 余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 3-8.
- [2] 聂建国, 王宇航. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究综述[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 1-11.
- [3] 李小珍, 谭清泉, 肖林. 钢-混凝土组合梁疲劳性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(6): 12-17.
- [4] 杨涛, 林广泰, 赵艳林, 等. 带疲劳损伤的钢-混凝土组合梁受力性能试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(12): 128-134.
- [5] Wang, B., Huang, Q., Liu, X. and Li, W. (2017) Experimental Investigation of Steel-Concrete Composite Beams with Different Degrees of Shear Connection under Monotonic and Fatigue Loads. *Advances in Structural Engineering*, **21**, 227-240. <https://doi.org/10.1177/1369433217717121>
- [6] Xu, J., Sun, H., Chen, W. and Guo, X. (2021) Experiment-Based Fatigue Behaviors and Damage Detection Study of Headed Shear Stud in Steel-Concrete Composite Beams. *Applied Sciences*, **11**, Article 8297. <https://doi.org/10.3390/app11188297>
- [7] 余志武, 匡亚川, 龚匡晖, 等. 加速锈蚀钢-混凝土组合梁的性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(3): 1-5.
- [8] Xue, W., Chen, J. and Zhu, J. (2017) Behaviour of Corroded Single Stud Shear Connectors. *Materials*, **10**, Article 276. <https://doi.org/10.3390/ma10030276>
- [9] Cao, G., Yang, L., Zhang, W., Peng, X. and Dai, Y. (2018) Long-Term Mechanical Properties of Steel-Concrete Connectors Subjected to Corrosion and Load Coupling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002224](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002224)

-
- [10] Chen, J., Zhang, H. and Yu, 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>
- [11] 张海鹏, 陈驹, 金伟良, 等. 栓钉锈蚀的钢-混凝土组合梁疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 89-95.
- [12] 张吉仁, 卜建清, 曹文龙, 等. 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.
- [13] 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.
- [14] 张吉仁, 卜建清, 荣学亮, 等. 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.
- [15] 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.
- [16] Chen, J., Zhang, H. and Yu, Q. (2019) Static and Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Beams with Corroded Studs. *Journal of Constructional Steel Research*, **156**, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.019>
- [17] 石卫华. 考虑耐久性的钢-混凝土组合梁结构力学性能研究及可靠性分析[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.