

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0336

带锈蚀栓钉的组合梁疲劳后抗弯承载力影响因素分析

王 凯¹, 刘小玲^{1*}, 汪 炳²

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了探索钢-混组合梁锈蚀和疲劳后抗弯承载力的影响因素, 开展了组合梁的理论和试验研究. 基于断裂力学和疲劳剩余强度理论得到栓钉、钢梁和混凝土的剩余强度, 在此基础上建立了一种组合梁抗弯承载力的计算方法, 并利用 5 个试验梁进行了验证, 最后选取混凝土强度、栓钉直径、疲劳加载上限、栓钉锈蚀率等影响因素进行参数分析. 结果表明: 随着栓钉锈蚀率增大, 抗弯承载力呈现先慢后快的退化趋势, 当锈蚀率为 20% 时, 组合梁抗弯承载力下降 9.1%; 所建模型与试验值较为吻合, 表明该模型具有良好的适用性; 混凝土强度、疲劳加载上限、栓钉锈蚀率以及栓钉数是影响组合梁抗弯承载力的主要因素.

关键词: 组合梁; 栓钉; 抗弯承载力; 锈蚀; 疲劳; 断裂力学

中图分类号: U448.38

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 05-0051-07

钢-混组合梁是将钢梁和混凝土板各自优点相结合的一种新型结构, 具有显著的经济效益和社会效益. 近年来, 钢-混组合梁在我国的桥梁及建筑结构中广泛应用^[1-5]. 然而, 随着桥梁使用年限的增长, 由恶劣环境导致的构件锈蚀和车辆荷载致使的疲劳损伤不断积累, 且组合梁在车辆等荷载的作用下, 混凝土板会出现裂缝, 钢梁和混凝土板界面也会产生滑移^[6]. 裂缝和滑移产生的缝隙会使水和氯盐更易侵入, 导致抗剪连接件锈蚀^[7]. 而抗剪连接件在锈蚀和疲劳的共同作用下使得其强度降低, 将减弱组合梁的组合作用, 进而造成组合梁整体性能的退化, 影响结构的安全性和耐久性^[8-10]. 因此, 有必要对抗剪连接件锈蚀的组合梁在疲劳作用后的性能进行研究.

目前已有学者研究了疲劳和锈蚀共同作用下组合梁的力学性能, 如 Chen 等^[11]研究了锈蚀对疲劳寿命的影响, 并通过试验确定锈蚀对疲劳寿命和承载力的降低效应, 结果发现组合梁疲劳寿命随着栓钉锈蚀率的增加而急剧降低, 达到 29.69%. 汪炳^[12]通过电化学加速锈蚀试验对组合梁的抗剪

连接件锈蚀问题进行模拟, 进而对不同程度的锈蚀组合梁进行疲劳加载, 研究锈蚀与疲劳共同作用下组合梁的剩余承载力等力学性能的退化规律. Cao 等^[13]研究了锈蚀与疲劳对钢-混凝土组合结构性能的影响, 并对 8 个连接件进行长达 200 d 的试验, 结果发现随着锈蚀与疲劳荷载的耦合, 加速了复合结构应变的发展和刚度的退化, 导致结构发生变形. 此外, 也有学者对组合梁力学性能进行预测并提出了相关模型, 如 Kuang 等^[14]基于锈蚀栓钉疲劳裂纹扩展理论和疲劳失效机理, 提出了锈蚀栓钉疲劳寿命的预测模型. Wei^[15]为了得到锈蚀疲劳裂纹扩展速率, 提出将理想环境和锈蚀环境的裂纹扩展速度简单相加的叠加模型. 匡亚川等^[16]结合基于断裂力学理论的栓钉疲劳寿命预测模型和栓钉经过 N 次循环荷载后的剩余承载力计算公式, 建立了钢-混组合梁有限元分析模型. 以上学者研究发现了环境与荷载的耦合作用将加速组合梁耐久性能、疲劳性能和承载力的劣化, 降低其疲劳寿命, 但是在锈蚀和疲劳共同作用下组合梁剩余承载力计算还有待完善, 其中的影响因素有待

收稿日期: 2023-03-22.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ19E080006).

第一作者: 王凯(1997-), 男, 安徽阜阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 钢-混组合梁力学性能. E-mail: wangkai9705@163.com

*通信作者: 刘小玲(1988-), 女, 江苏连云港人, 博士/副教授, 主要研究方向: 公路桥梁的养护与评估. E-mail: liuxiaoling@nbu.edu.cn

进一步研究.

本文基于断裂力学和材料剩余强度理论,建立了栓钉、钢梁和混凝土板的剩余强度退化模型,提出了一种带锈蚀栓钉的组合梁抗弯承载力计算方法,并进行参数分析,讨论各种影响因素对抗弯承载力的影响.旨在为钢-混组合桥梁的设计和养护加固提供参考,也为相关学科领域的研究提供新的思路和方法.

1 锈蚀和疲劳共同作用下组合梁抗弯承载力计算

钢-混组合梁是由栓钉连接件、钢梁和混凝土板组成,当栓钉连接件、钢梁和混凝土板中任何一个发生损伤或性能退化都将导致组合梁承载力下降.然而,在锈蚀和疲劳荷载作用下,各个构件由于锈蚀和疲劳损伤,会导致其性能退化,并因各自的退化造成不同程度的强度衰减.

断裂力学主要研究带裂纹构件的疲劳寿命和强度,它能定量计入初始裂纹对疲劳寿命的影响,为研究锈蚀栓钉的疲劳退化提供了方法.因此,引入断裂力学和材料剩余强度模型,以描述栓钉连接件、钢梁、混凝土板在锈蚀和疲劳荷载作用下的强度变化规律,并可基于结构受力分析,求得组合梁在锈蚀和疲劳后的剩余承载力.

1.1 栓钉剩余强度

断裂力学将初始裂纹的大小和裂纹扩展速率作为结构损伤大小的依据,对剩余寿命和巡检周期等进行判定.断裂力学中裂纹的扩展速率(da/dN)与应力强度因子幅值的函数曲线和 S-N 曲线一样,都能表达材料的疲劳性能,断裂力学表达了材料的疲劳裂纹扩展性能和疲劳裂纹萌生性能;而 S-N 曲线则由基于断裂力学中 Paris 公式积分推导得出,用于评估材料的疲劳寿命. da/dN 与 ΔK 的关系如图 1 所示.

由图 1 可见, da/dN 与 ΔK 曲线可划分为 I 区(低速率区)、II 区(中速率裂纹扩展区)和 III 区(高速率区),其中 II 区满足(Paris 公式).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (1)$$

式中: ΔK 为应力强度因子幅值, $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$; N 为疲劳荷载循环次数; a 为裂纹长度; C 和 m 为材料疲劳裂纹扩展性能参数.

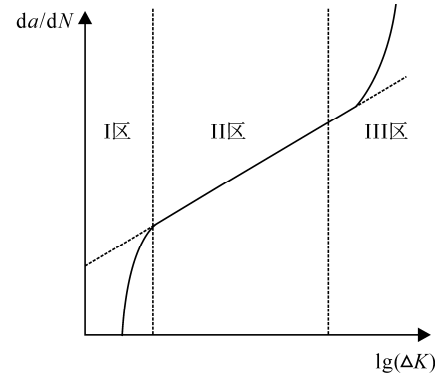


图 1 裂纹扩展速率与应力强度因子幅值的关系^[17]

本文对栓钉在疲劳作用下的力学性能研究主要针对中速率裂纹扩展区.在钢-混凝土组合梁中,栓钉主要承受剪应力,基于断裂力学理论,以 Paris 公式为基础,以简支梁跨中单点疲劳加载为例,可得钢-混凝土组合梁中栓钉在疲劳作用下的承载力随疲劳加载次数变化模型^[17]:

$$(1 - P_{st}(n) / (A_{st} f_u))^{-1.05} = -6.19 \times 10^{-16} / d_0^{-1.05} \cdot \Delta \tau^{4.1} n + (a_0 / d_0)^{-1.05}. \quad (2)$$

通过推导可得:

$$P_{st}(n) = A_0 f_u \cdot \left(1 - \frac{1}{d_0^{1.05} \sqrt{a_0^{-1.05} - 6.19 \times 10^{-16} \Delta \tau^{4.1} n}} \right), \quad (3)$$

式中: $P_{st}(n)$ 为 n 次疲劳加载后栓钉承载力; A_{st} 为单个栓钉有效横截面积; f_u 为栓钉的极限抗剪强度; d_0 为初始栓钉直径; n 为疲劳加载次数; a_0 为栓钉初始裂纹深度,本文取 2 mm; A_0 为单个栓钉的初始横截面积,栓钉未锈蚀时, $A_{st} = A_0$; $\Delta \tau$ 为名义剪应力幅值,可按式(4)计算:

$$\Delta \tau = (P_{\max} - P_{\min}) S_0 \Delta l / (2 I_0 n_l A_0), \quad (4)$$

式中: $P_{\max}$ 为疲劳荷载上限值; $P_{\min}$ 为疲劳荷载下限值; S_0 为混凝土板对组合截面中性轴的面积矩; Δl 为栓钉纵向布置间距; I_0 为组合梁换算截面惯性矩; n_l 为栓钉纵向布置列数.

文献[18]表明,在腐蚀环境下金属材料的疲劳裂纹扩展仍然接近线性关系,可以使用 Paris 公式描述,但是 Paris 公式中的参数变化并不能直接反映腐蚀环境对构件疲劳寿命的影响.而栓钉锈蚀会导致其有效直径减小,降低其抗剪承载力.通过引入栓钉锈蚀对栓钉抗剪承载力和直径的退化规律,在未锈蚀栓钉的承载力预测模型的基础上,进

一步可得锈蚀栓钉的承载力预测模型:

栓钉锈蚀后栓钉的有效直径(d_1)为:

$$d_1 = d_0 \times \sqrt{1 - \rho}, \quad (5)$$

故锈蚀栓钉承载力($P(n)$)的预测模型为:

$$P(n) = f_u(1 - \rho)A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{d_1^{1.05} \sqrt{a_0^{-1.05} - 6.19 \times 10^{-16} \Delta \tau_1^{4.1} n}} \right), \quad (6)$$

式中: ρ 为锈蚀率; $\Delta \tau_1 = \frac{(P_{\max} - P_{\min})S_0 \Delta l}{2I_0 n_1(1 - \rho)A_0}$.

因此, 栓钉剩余强度($f_{st}(n)$)为:

$$f_{st}(n) = P(n) / ((1 - \rho)A_0). \quad (7)$$

1.2 混凝土板剩余强度

在锈蚀试验中, 钢-混组合梁通常倒置于电解液中, 已有试验证明^[23], 混凝土板浸泡在 NaCl 溶液中和经受疲劳加载会使其强度退化. 因此, 混凝土强度退化分为海洋环境浸泡退化和疲劳损伤退化. 参考文献[19], 得到混凝土在海洋环境中强度退化的计算公式为:

$$f_c(t) = f_c a_c = f_c(-6.01 \times 10^{-4} a_t + 1.03), \quad (8)$$

式中: $f_c(t)$ 为浸泡时间 t (单位: d) 后混凝土圆柱体抗压强度; f_c 为未浸泡混凝土圆柱体抗压强度; a_c 为混凝土抗压强度变化参数; a_t 为时间变化系数, $a_t = t/t_1$, t 为浸泡时间, t_1 为单位时间, 取 t_1 为 1 d.

疲劳加载导致强度折损($f_c(n)$)计算公式为^[20]:

$$f_c(n) = f_c(1 - \sigma_{c,\max} / f_c)(n / N_c), \quad (9)$$

式中: $\sigma_{c,\max}$ 为疲劳加载过程中混凝土所承受应力幅值上限; N_c 为混凝土疲劳寿命, 由疲劳试验测得. 当缺乏相应疲劳试验时, 可采用文献[21]中提出的混凝土抗压疲劳强度计算公式, 由式(10)确定.

$$N_c = 10^{\frac{1 - S_{\max}}{\alpha(1 - R)}}, \quad (10)$$

式中: $S_{\max} = \sigma_{\max} / f_c$; $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$; α 为材料常数, 当疲劳应力比 $R < 0.8$ 时, α 可取 0.068 5.

混凝土板的最大应力可在经过截面换算后按材料力学基本公式计算确定.

由式(8)和式(9)可得混凝土板的剩余强度为:

$$f_c(t, n) = f'_c(t) - f_c(n) = f_c(-6.01 \times 10^{-4} a_t + 1.03 - (1 - \sigma_{c,\max} / f_c)(n / N_c)). \quad (11)$$

1.3 钢梁剩余强度

在工程应用中通常对钢梁进行刷防锈漆处理,

处理后锈蚀对钢梁的影响很小, 故本文不考虑钢梁的锈蚀退化. 钢梁的疲劳退化过程参照文献[22], 其疲劳退化($f_s(n)$)为:

$$f_s(n) = (1 - D_s(n)) f_s = (1 - (1 - \sigma_{s,\max} / f_s)(n / N_s)) f_s, \quad (12)$$

式中: $D_s(n)$ 为钢梁的疲劳损伤度; f_s 为初始钢材的抗拉强度; $\sigma_{s,\max}$ 为疲劳加载过程中钢梁所受应力峰值; N_s 为钢梁疲劳寿命.

1.4 组合梁的抗弯承载力计算

在疲劳作用下组合梁的抗剪性能下降, 将由完全抗剪转变为部分抗剪, 使钢梁和混凝土板拥有各自的中性轴, 故需先计算抗剪连接度, 再计算其抗弯承载力(可参考文献[20]).

抗剪连接度计算公式为:

$$n_f = \frac{\min\{A_s f_s(n), A_c f_c(t, n)\}}{A_0(1 - \rho) f_{st}(n)}, \quad (13)$$

$$\eta = n_s / n_f, \quad (14)$$

式中: n_f 为经 t 时间锈蚀和 n 次疲劳循环后组合梁满足完全抗剪连接所需栓钉数; A_s 和 A_c 分别为钢梁和混凝土翼板的截面面积; n_s 为简支梁一个剪跨区内实际布置栓钉数.

图 2 为锈蚀和疲劳共同作用下钢-混组合梁剩余承载力的计算流程. 先根据改进 Paris 公式计算锈蚀栓钉的剩余强度, 然后根据疲劳损伤和材料剩余强度理论计算钢梁和混凝土板的剩余强度, 接着计算抗剪连接度, 判断中性轴位置, 最后基于力学平衡原理计算钢-混组合梁的剩余承载力.

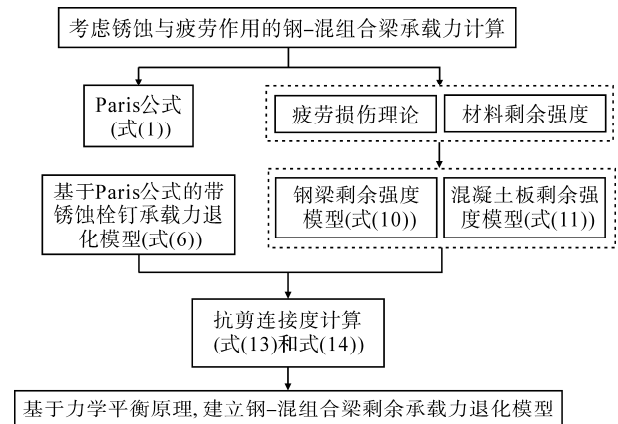


图 2 锈蚀和疲劳共同作用下剩余承载力的计算流程

2 试验验证

图 3 为试件尺寸, 总长 3.2 m, 计算跨径 3.0 m.

钢梁由厚度为 10 mm 的 Q345 焊接而成, 钢梁上翼缘板和下翼缘板宽度分别为 120 mm 和 160 mm, 腹板高度 150 mm; 混凝土板尺寸 3 000 mm×300 mm×80 mm, 强度 C50, 28 d 养护后的立方体抗压强度 59.7 MPa. 栓钉材料为 ML-15, 直径 13 mm, 用双排布置, 共 28 个, 横向间距 60 mm, 纵向间距 215 mm.

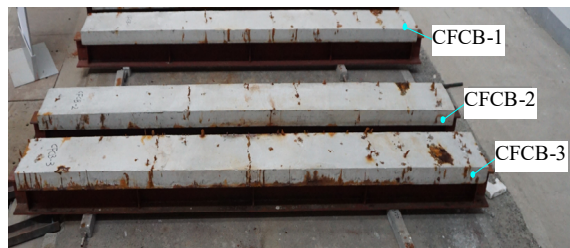


图3 试件尺寸设计

本试验制作了 5 个试验梁, 其中 1 个进行静力试验, 1 个进行无锈蚀疲劳试验, 编号分别为 SCB-1 和 SCB-2, 其余 3 个通过电化学加速锈蚀试验制得不同锈蚀率栓钉的试验梁, 编号为 CFCB-1~CFCB-3, 然后进行疲劳试验, 加载现场如图 4 所示.



图4 试件加载

为验证计算模型的准确性, 对 5 个组合梁试验数据进行分析, 采用本研究的计算方法, 对比试验组合梁的抗弯承载力, 结果见表 1.

试验结果测试值小于理论计算值, 这可能是由于锈蚀速率的测定不准确导致. 本研究采用了

质量损失率测定栓钉的锈蚀速率, 而实际栓钉的锈蚀不均匀, 有些地方的锈蚀比平均速率严重, 可能会加剧结构损伤, 导致测量的剩余弯曲能力小于理想值. 误差大小各异的原因可能是由于测试结果的分散性随着腐蚀速率的增加而增加导致.

从表 1 可见, 试验梁在承受 100 万次循环荷载后, 其抗弯承载力随着锈蚀率的增加而降低, 当锈蚀率为 9.1% 时, 试验梁抗弯承载力下降了 8.8%. 采用本文提出公式得到的钢-混组合梁抗弯承载力与试验结果较为吻合, 最大误差不超过 6.5%, 能较准确预测组合梁的抗弯承载力. 试验梁的破坏模式随着锈蚀率的增加发生转变, 对未锈蚀试验梁和锈蚀率为 4.4% 的组合梁疲劳加载 100 万次后, 静力破坏时模式为栓钉剪断; 随着锈蚀试验的进行, 混凝土板的强度退化要快于栓钉强度退化, 故当锈蚀率为 6.6% 和 9.1% 时, 试验梁的破坏模式转变为混凝土压碎.

3 参数分析

为了更全面地分析影响组合梁抗弯承载力因素, 选取栓钉直径、初始缺陷、疲劳加载上限值和混凝土强度等级等参数. 根据图 2 的计算流程, 计算出带有不同锈蚀率栓钉的组合梁随不同参数的变化趋势.

3.1 栓钉直径

选取直径为 13、16、19、22 mm 的 4 种栓钉进行参数计算, 结果如图 5 所示. 从图 5 可见, 当栓钉直径不变时, 随着锈蚀率的增大, 组合梁的抗弯承载力呈下降趋势. 当锈蚀率不变时, 随着栓钉直径的增加, 组合梁抗弯承载力有所增加, 但是当栓钉直径超过 16 mm 后, 其抗弯承载力基本不变. 这是由于栓钉直径变大, 组合梁的抗剪连接度将提高, 由部分抗剪转变为完全抗剪, 此时栓钉的强

表 1 组合梁承载力计算值和试验值对比

编号	锈蚀率/%	$P_{\max}/\text{kN}$	$P_{\min}/\text{kN}$	疲劳加载 次数($\times 10^4$)	抗弯承载力计 算值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	抗弯承载力试 验值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	误差/%	破坏模式
SCB-1	0	136	80	0	168.1	171	1.69	混凝土压碎
SCB-2	0	136	80	100	159.5	160	0.31	栓钉剪断
CFCB-1	4.4	136	80	100	157.7	155	1.74	栓钉剪断
CFCB-2	6.6	136	80	100	156.7	152	3.09	混凝土压碎
CFCB-3	9.1	136	80	100	155.5	146	6.50	混凝土压碎

度提高对组合梁的抗弯承载力贡献很小. 因此, 并不是栓钉直径越大, 组合梁的承载力提升越大, 在工程中应根据实际情况, 选取合适的栓钉直径.

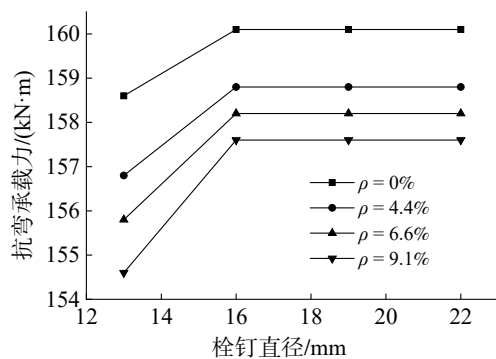


图5 栓钉直径对组合梁抗弯承载力的影响

3.2 栓钉初始缺陷

栓钉在焊接过程中会形成初始裂纹, 威胁栓钉的耐久性和安全性. 为了研究不同初始裂纹尺寸对组合梁抗弯承载力的影响, 选取 1.2~2.4 mm 共 7 种尺寸进行参数计算, 结果如图 6 所示. 从图 6 可见, 组合梁承载力退化随着初始缺陷的增加而不断增加, 且随着锈蚀率的增加, 组合梁抗弯承载力下降幅度变大. 当栓钉未锈蚀时, 随着初始裂纹的增大, 组合梁的抗弯承载力退化速率较缓, 其相对变化率在 2% 以内; 但当栓钉锈蚀率为 9.1% 时, 随着初始裂纹的增大, 组合梁的抗弯承载力退化速率加快, 抗弯承载力下降了 3.3%.

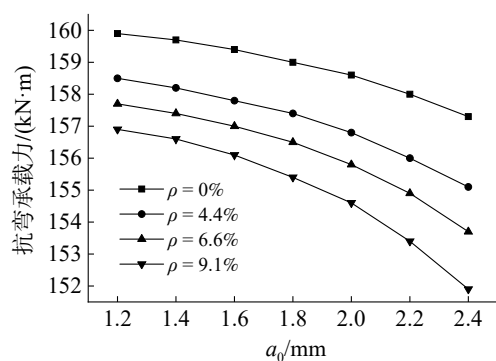


图6 初始缺陷对组合梁抗弯承载力的影响

3.3 混凝土等级

混凝土对提升钢-混组合梁抗剪承载力起着重要作用, 在钢梁上翼缘发挥其出色的抗压性能, 防止钢梁过早弯曲. 根据本文所建模型, 分别对混凝土强度为 C40、C45、C50、C55、C60 进行组合梁抗弯承载力计算, 结果如图 7 所示. 从图 7 可见,

混凝土强度对栓钉锈蚀组合梁抗弯承载力的影响较小, 当使用高强度混凝土时, 栓钉锈蚀率的影响才会明显. 对比 C60 与 C40 组合梁, 前者抗弯承载力提高了 9.08%.

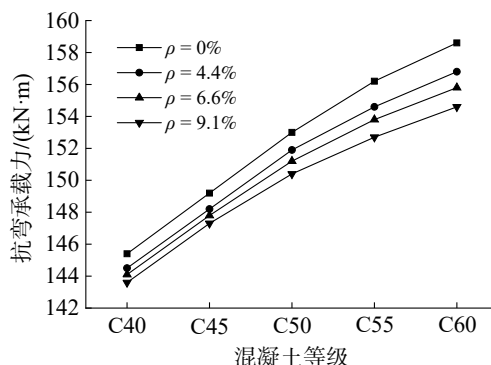


图7 混凝土等级对组合梁抗弯承载力的影响

3.4 疲劳加载上限

疲劳加载上限将影响各部件的应力幅值, 进而对各部件造成不同程度的疲劳损伤. 根据本文所建模型, 选择 $P_{\max}$ 与 P_u 比值为 0.40、0.45、0.50、0.55、0.60 进行计算, 结果如图 8 所示. 从图 8 可见, 疲劳加载上限值是控制承载力退化的重要影响因素, 随着疲劳加载上限的增加, 组合梁承载力下降呈现先慢后快趋势; 当 $P_{\max}$ 与 P_u 比值从 0.40 上升到 0.60 时, 承载力下降了 5.21%, 且随着锈蚀率增加这种下降趋势逐渐变大.

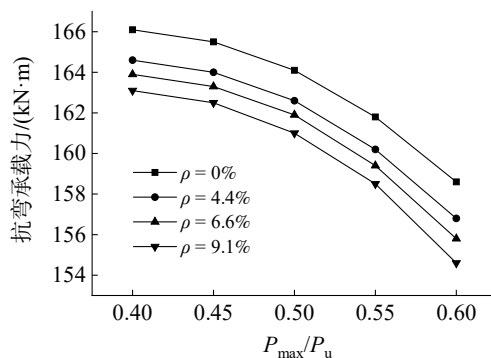


图8 疲劳加载上限值对组合梁抗弯承载力的影响

3.5 栓钉数

栓钉数是影响抗剪连接度的主要因素之一. 根据抗剪连接度计算公式, 分别对栓钉数为 24、26、28、30 个进行计算, 结果如图 9 所示. 从图 9 可见, 随着栓钉数的增加, 抗剪连接度也逐渐增长, 直到 1. 值得注意的是, 栓钉锈蚀率也对抗剪连接度产生较大的退化影响, 随着栓钉数的减少, 锈蚀

对抗弯承载力的影响越来越大。

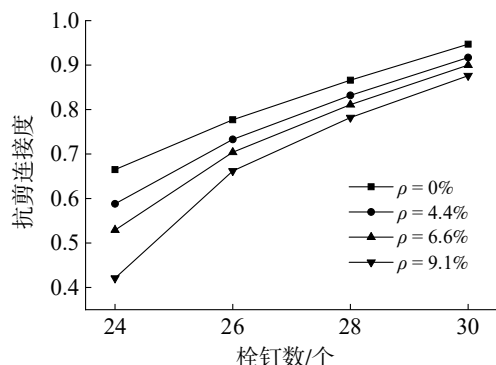


图9 栓钉数对组合梁抗剪连接度的影响

3.6 栓钉锈蚀率

栓钉锈蚀会直接降低栓钉抗剪承载力,进而减弱钢梁和混凝土板之间的组合作用,降低组合梁抗弯承载力。为探究锈蚀率对组合梁抗弯承载力的退化规律,除已测锈蚀率外,又选取15%和20%栓钉锈蚀率为参数进行计算,结果如图10所示。从图10可见,随着锈蚀率的增加,抗剪连接度和抗弯承载力的退化较为明显,抗剪连接度和抗弯承载力呈现先慢后快的退化规律;当栓钉锈蚀率达到20%时,抗剪连接度仅为0.53,抗弯承载力下降幅度为9%。

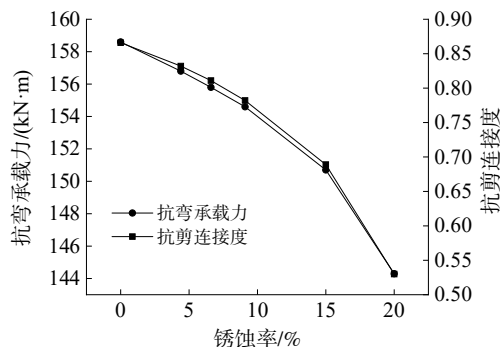


图10 不同锈蚀率组合梁的抗弯承载力和抗剪连接度

4 结论

(1)基于断裂力学,建立了锈蚀栓钉承载力退化模型,结合钢梁及混凝土板的强度退化模型,建立了带锈蚀栓钉的钢-混凝土组合梁疲劳荷载作用下抗弯承载力的计算方法。结果表明,模型计算值与相关试验梁测试值吻合。

(2)混凝土强度、疲劳加载上限、栓钉锈蚀率以及栓钉数是影响组合梁抗弯承载力的主要因素。

当栓钉锈蚀率达到20%时,抗弯承载力下降9%,当混凝土强度由C40提升到C60时,抗弯承载力提高了9.08%,而栓钉直径和栓钉初始缺陷影响幅度相对较小。

(3)组合梁抗弯承载力并不会随着栓钉直径的变大而提升,当栓钉直径超过一定值后,其对组合梁抗弯承载力基本无影响,这是由混凝土的力学性能导致,因此在工程中应合理使用栓钉规格。

(4)当栓钉锈蚀率不断增加时,钢-混凝土组合梁抗弯承载力和抗剪连接度的大小呈现不断减小趋势。在锈蚀率较低时,下降速率较为缓慢;当锈蚀率超过15%时,下降速率大幅增加。

参考文献:

- [1] Huang D W, Wei J, Liu X C, et al. Experimental study on long-term performance of steel-concrete composite bridge with an assembled concrete deck[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214:606-618.
- [2] Hanswille G, Porsch M, Ustundag C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading Part II: Analytical study[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(4):485-493.
- [3] Abu-Sena A B, Shaaban I G, Soliman M S, et al. Effect of geometrical properties on strength of externally prestressed steel-concrete composite beams[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2020, 173(1):42-62.
- [4] 薛文, 陈驹, 吴麟, 等. 栓钉锈蚀钢-混凝土组合梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(S1):222-226.
- [5] 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.
- [6] Ding F X, Yin G A, Wang H B, et al. Static behavior of stud connectors in bi-direction push-off tests[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 120:307-318.
- [7] 荣学亮, 黄侨, 任远. 栓钉连接件锈蚀后静力性能和抗疲劳性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 10-18.
- [8] Pape T M, Melchers R E. Performance of 45-year-old corroded prestressed concrete beams[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2013, 166(10):547-559.
- [9] Jnaid F, Aboutaha R S. Numerical and analytical models of RC beams with corroded compression reinforcement[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2019, 172(12):859-870.

- [10] Yu Q Q, Wu Y F. Fatigue retrofitting of cracked steel beams with CFRP laminates[J]. *Composite Structures*, 2018, 192:232-244.
- [11] Chen J, Jiang A Y, Jin W L. Behaviour of corroded stud shear connectors under fatigue loading[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on the Durability of Concrete Structures*. West Lafayette, IN: Purdue University Press, 2016:1-7.
- [12] 汪炳. 基于疲劳累积损伤效应的钢-混凝土组合梁桥剩余力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [13] Cao G H, Yang L A, Zhang W, et al. Long-term mechanical properties of steel-concrete connectors subjected to corrosion and load coupling[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(5):04018058.
- [14] Kuang Y C, Wang K, He Y H, et al. Fatigue behaviour of corroded stud based on crack growth theory[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 2023, 176(1):2-12.
- [15] Wei R P. Environmental considerations for fatigue cracking[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2002, 25(8/9):845-854.
- [16] 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.
- [17] 荣学亮, 黄侨, 赵品. 考虑疲劳损伤的栓钉连接件抗剪承载力研究[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(4):88-93; 101.
- [18] 余志武, 石卫华, 匡亚川. 锈蚀栓钉力学性能试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(1):249-255.
- [19] 陈宗平, 黎盛欣, 周济, 等. 海洋环境 GFRP 筋海水海砂混凝土梁受力性能试验及承载力计算[J/OL]. *材料导报*, 2023, 37(20):1-18.
- [20] Schaff J R, Davidson B D. Life prediction methodology for composite structures. Part I – Constant amplitude and two-stress level fatigue[J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(2):128-157.
- [21] Aas-Jakobsen K, Lenschow R. Behavior of reinforced columns subjected to fatigue loading[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1973, 70(3):199-206.
- [22] 汪炳, 黄侨, 刘小玲. 考虑多组件疲劳损伤的组合梁剩余承载力计算方法及试验验证[J]. *工程力学*, 2020, 37(6):140-147.
- [23] 刘保东, 李鹏飞, 李林等. 混凝土含水率对强度影响的试验[J]. *北京交通大学学报*, 2011, 35(1):9-12.

Analysis of influencing factors on flexural capacity of composite beams with corroded studs after fatigue

WANG Kai¹, LIU Xiaoling^{1*}, WANG Bing²

(1. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to explore the factors affecting the flexural capacity of steel-concrete composite beams after corrosion and fatigue, this paper conducts theoretical and experimental research on the composite beams. Based on fracture mechanics and the theory of fatigue residual strength, the residual strength of studs, as well as that of steel beams and concrete, are determined. Based on this, a calculation method for the flexural capacity of composite beams is established, and the data of 5 test beams are used for verification. Finally, the influencing factors such as concrete strength, stud diameter, upper limit of fatigue loading, and stud corrosion rate are selected for parameter analysis. The results show that with the increase of stud corrosion rate, the flexural capacity shows a degradation trend of first slowing down and then accelerating, and when the corrosion rate reaches 20%, the flexural capacity of the composite beam decreases by 9.1%. The established model is in good agreement with the experimental values and has good applicability. Concrete strength, upper limit of fatigue loading, stud corrosion rate, and number of studs are the main factors affecting the flexural capacity of composite beams.

Key words: composite beam; stud; flexural capacity; corrosion; fatigue; fracture mechanics

(责任编辑 史小丽)