

非均匀锈蚀对建筑钢混组合梁承载力退化的影响分析

Analysis of the Influence of Non-uniform Corrosion on the Degradation of Load-bearing Capacity in Steel-Concrete Composite Building Beams

江小兵

(江西建工国际工程有限责任公司, 南昌 330000)

摘要: 为及时获取非均匀锈蚀环境下建筑钢混组合梁的性能退化情况, 通过分析非均匀锈蚀深度对组合梁有效截面的影响, 判断组合梁全圆周、半圆周锈蚀厚度与锈蚀率间的关系, 并构建组合梁有限元模型。分别设计四种的锈蚀率, 模拟分析组合梁试件在受到载荷加载时的承载力变化情况。结果表明: 未锈蚀状态下的试件强屈比、延性比以及抗剪承载力均保持较高水平, 且试件的跨中位移、混凝土顶板压应变以及钢梁底板拉应变均保持较低状态。锈蚀率越大, 试件的承载力越弱, 锈蚀率较高试件的跨中位移、混凝土顶板压应变以及钢梁底板拉应变大幅度增加, 试件的屈服强度明显低于未锈蚀试件。因此, 非均匀锈蚀对建筑钢混组合梁的性能具有显著的负面影响。

关键词: 非均匀锈蚀; 钢混组合梁; 承载力; 锈蚀率; 强屈比; 跨中位移; 顶板压应变; 底板拉应变
中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 03-0164-05
DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.029

JIANG Xiaobing

(Jiangxi Construction International Engineering Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to timely obtain the performance degradation of steel-concrete composite beams in non-uniform corrosion environments, this article conducts experimental analysis. By analyzing the influence of non-uniform corrosion depth on the effective cross-section of composite beams, the relationship between the corrosion thickness and corrosion rate of the entire circumference and semicircle of composite beams is determined, and a finite element model of composite beams is constructed. Design corrosion rates of 5%, 10%, and 20% respectively, and simulate and analyze the changes in bearing capacity of composite beam specimens under load loading. The results showed that the strength yield ratio, ductility ratio, and shear bearing capacity of the specimens in the non-corroded state remained at a high level, and the mid span displacement, compressive strain of the concrete top plate, and tensile strain of the steel beam bottom plate of the specimens remained low. The higher the corrosion rate, the weaker the bearing capacity of the specimen. The mid span displacement, compressive strain of the concrete top plate, and tensile strain of the steel beam bottom plate of the specimen with a higher corrosion rate increase significantly, and the yield strength of the specimen is significantly lower than that of the non-corroded specimen. Therefore, non-uniform corrosion has a significant negative impact on the performance of steel-concrete composite beams in buildings.

Key words: heterogeneous corrosion; steel concrete composite beam; bearing capacity; corrosion rate; strong yield ratio; mid span displacement; top plate compressive strain; floor tension strain

0 引言

建筑钢混组合梁是以钢结构和混凝土结构为基础,构建的一种新型结构梁。这种组合梁具有较好的力学性能和使用寿命^[1-2]。钢梁与混凝土板之间通过栓钉与钢筋实现连接,受力由混凝土板和钢梁共同承担。若钢梁、混凝土板、栓钉或钢筋任何一处存在被锈蚀的现象,都会对组合梁的承载力产生不同程度的影响。特别是当建筑钢混组合梁的钢筋与栓钉出现非均匀锈蚀后,会削弱部件的有效截面,并增加部件的体积,由此生成结构细部锈胀力,会对组合梁的承载力造成影响,进而导致工程出现安全隐患。

目前,已有许多学者对钢混组合梁的承载力展开研究。陈冠^[3]聚焦于钢混组合梁多部件非均匀锈蚀对承载力的影响,结果表明:非均匀锈蚀下应力分量增大,承载力退化随锈蚀率上升而加剧,全圆周非均匀锈蚀及钢筋锈蚀影响突出;赵长军等^[4]以5根梁为对象,探究栓钉锈蚀钢-混凝土组合梁在负弯矩下的力学性能,结果显示:随锈蚀率增加,抗弯承载力略降,抗剪承载力显著下降;张吉仁等^[5]针对组合梁剩余承载力展开有限元分析,发现组合梁剩余承载力退化呈单调递减趋势。周旺保等^[6]分析了波形钢腹板钢混组合箱梁的抗弯承载力,建立任意剪力连接度下波形钢腹板钢-混组合箱梁的抗弯承载力计算公式;苏庆田等^[7]分析了橡胶-焊钉组合连接件对钢-混组合梁受力性能的影响,研究发现:组合焊钉连接件在不降低推出试件承载能力的前提下显著减小抗剪刚度;舒兴平等^[8]分析了榫卯钢结构外包U型钢-混组合梁抗弯性能,结果表明:试件承载力良好,破坏模式均为正截面弯曲破坏,破坏后呈现较大挠度变形;蒋明利等^[9]对钢桁腹混凝土梁进行静载试验,研究对称荷载下的受力,发现钢桁腹与混凝土协同良好、延性佳,无腹杆屈曲及节点剪切破坏,剪切屈曲稳定性好;许绮炎等^[10]考虑轴力的作用,计算了型钢-混凝土组合梁的抗弯承载力,发现轴力作用点和塑性中和轴之间的距离曲率主要由组合梁宽度、材料强度决定,其值越大,曲率越小,曲线越平;陈思程等^[11]分析了带T形肋剪力键的钢-混凝土组合梁的受弯性能,

结果表明:多数试件为延性弯曲破坏,少数为弯剪破坏,孔径40 mm+钢筋直径10 mm,其承载力与延性表现最佳;张西丁等^[12]建立了钢混组合梁桥抗弯可靠度评估方法,计算了某桥正负弯矩区抗弯可靠度,发现负弯矩区可靠度低于规范目标值;朱劲松等^[13]采用有限元方法构建预应力UHPC-NC组合梁在纯弯曲作用下的数值分析模型,研究了预应力筋配筋率、普通钢筋直径、普通钢筋强度等级以及高跨比等关键参数对组合梁抗弯承载力的影响规律;王春森等^[14]对4根筒支圆形钢-混凝土组合梁板进行中心单点静力加载试验,探究其静力性能。结果表明:组合梁板经历四阶段破坏,呈弯曲特征,承载力高,延性好,安全冗余度高,中心节点非薄弱部位,且钢梁数量增多增强了对混凝土的约束;祝俊祥等^[15]通过对3根部分充填式窄幅钢箱组合梁加载试验,探究其负弯矩区受剪性能,结果表明组合梁钢箱上箱室发生剪切破坏,UHPC翼板组合梁性能优于NC翼板。

非均匀锈蚀是一种常见的金属腐蚀现象。在金属表面,腐蚀引起的截面削弱可能使部件在远低于其设计强度的应力下发生断裂,降低金属部件的机械性能和使用寿命。当组合梁中的任意部位发生非均匀锈蚀时,会影响组合梁整体的质量。基于上述内容,分析非均匀锈蚀对建筑钢混组合梁承载力退化的影响。构建了有限元模型,设计无锈蚀、5%、10%、20%的锈蚀率进行模拟分析,并开展不同锈蚀率工况模拟分析。

1 建筑钢混组合梁有限元模型设计

1.1 工况设置

模拟设计中,梁跨径为3 000 mm,混凝土翼缘的厚度和宽度分别为80、300 mm。钢梁的结构为焊接工字梁,钢板厚度为10 mm,按照双排布置的形式布置栓钉。钢筋的直径为6 mm,设置为三列双层布置,箍筋直径为6 mm、间距为100 mm,主要放置在混凝土板内。

为深入分析非均匀锈蚀对钢梁承载力的影响,在试验过程中,分别设置对照组与锈蚀组。同时,除钢梁外,还要考虑栓钉与钢筋的锈蚀深度,全面分析锈蚀对组合梁带来的影响。由于结构具有对称

建筑结构

性,为降低计算难度,只对半个结构,即半圆周进行分析,设计4组模拟试件,每组试件工况见表1。

表1 试件设置
Table 1 Setting of test specimens

跨径/mm	混凝土板厚度/mm	混凝土板宽度/mm	上翼缘宽度/mm	下翼缘宽度/mm	钢梁腹板高度/mm
3 000	80	300	120	160	150

1.2 模型构建

半个模型对称建模,建模时,为不同构件建立接触面,具体接触情况见表2。

表2 模型中构件接触关系分析

Table 2 Analysis of component contact relationships in the model

钢筋与混凝土板	螺栓与混凝土板	混凝土板底面与钢梁顶面	螺栓底面与钢梁顶面
嵌入	嵌入	法向硬接触,切向罚接触	合并

按照划分结构化网格的方式构建模型网格,并对关键位置进行网格加密设计。在对称面上设计对称边界约束,并在支座处设计水平(X)、竖直(Y)方向上的平动约束。

加载建模时,使用位移加载控制法,在跨度中央设置参考点,并将参考点与混凝土顶面耦合,施加竖直向下载荷并分析载荷引起的钢混组合梁承载力退化情况。建筑钢混组合梁有限元模型如图1所示。

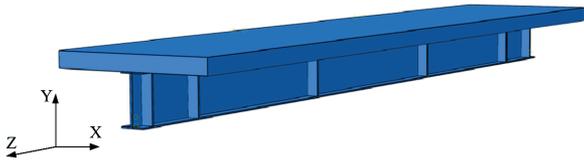


图1 组合梁有限元模型设计

Fig. 1 Design of finite element model for steel-concrete composite beams

2 试验分析

将钢混组合梁试件分别置于5%、10%以及20%锈蚀率的环境中,分别编号为A-2、A-3、A-4, A-1为对照组不作锈蚀处理,分析试件的跨中位移、混凝土顶板压应变、钢梁底板拉应变、抗剪承载力、屈服强度以及栓钉应力分布情况。

2.1 性能测试

对未实施载荷加载的试件进行强屈比与延性比分析,模拟分析不同试件的应用效果,分析结果如图2所示。

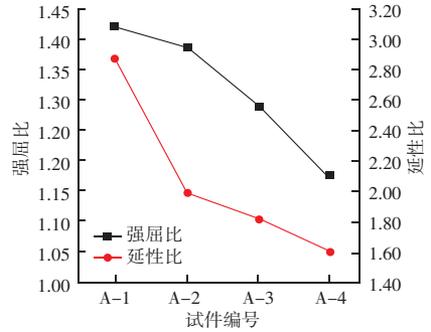


图2 试件强屈比与延性比分析

Fig. 2 Analysis of the strength bending ratio and ductility ratio of test specimens

当试件未锈蚀时,试件的强屈比与延性比均保持较高水平。随着锈蚀率的增加,试件的强屈比与延性比开始出现下降,当试件锈蚀率为20%时,即A-4试件的强屈比与延性比均达到最低水平,说明当锈蚀率越高,试件的承载能力越弱。

2.2 不同载荷对组合梁跨中位移的影响

分析不同载荷加载程度对组合梁试件的跨中位移影响,以此验证不同锈蚀率试件在加载过程中的承载效果如图3所示。

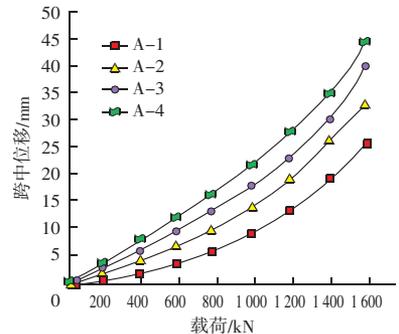


图3 试件跨中位移分析

Fig. 3 Mid span displacement analysis of test specimens

随着载荷强度的不断加大,不同锈蚀率试件的跨中位移均呈现增长趋势。对于锈蚀率为20%的试件,其跨中位移可达到40 mm以上,而未锈蚀的试件A-1跨中位移最高仅为25 mm左右。由此可以看出,锈蚀率会影响混合梁整体的跨中位移,导致其在受压时出现位移变化,影响自身承载力。通过试件的跨中位移变化可以看出,当锈蚀率越大,在加载时则会导致跨中位移越大。

2.3 不同加载载荷对组合梁混凝土顶板压应变的影响

由图4可知,当载荷不断上升,试件的混凝土顶板压应变也会逐渐增高。在载荷小于600 kN的情况下,试件的混凝土顶板压应变均保持较小的上升状

态。当载荷达到 600 kN 以上时, 试件的混凝土顶板压应变值均快速上升, 延性变形增大。在四组试件中, 未锈蚀试件的混凝土顶板压应变始终处于最低水平。试件的锈蚀率越高, 则试件的混凝土顶板压应变值就越大。上述结果说明, 较大的锈蚀率会影响试件混凝土顶板的稳定性与承载能力。

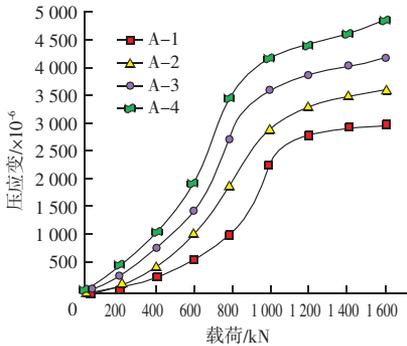


图4 混凝土顶板压应变情况分析

Fig. 4 Analysis of compressive strain of concrete roof slab

2.4 不同载荷对组合梁钢梁底板拉应变的影响

由图 5 可知, 试件钢梁底板拉应变会随着载荷的增大逐渐上升, 而锈蚀率越小的试件钢梁底板拉应变上升幅度越小。锈蚀率为 20% 的试件钢梁底板拉应变可达到 $8\,000 \times 10^{-6}$ 以上, 在四组试件中始终保持最高水平; 未锈蚀的试件钢梁底板拉应变最高仅为 $5\,000 \times 10^{-6}$ 左右, 未出现大幅度升高, 因此, 试件的非均匀锈蚀程度越严重, 其钢梁底板拉应变程度越大。

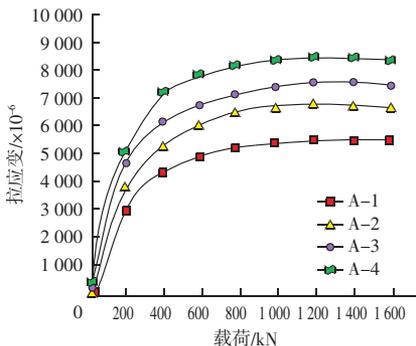


图5 钢梁底板拉应变情况分析

Fig. 5 Analysis of tensile strain of steel beam bottom plate

2.5 试件抗剪承载力分析

当载荷越大, 试件的跨中位移就越大。模拟分析不同跨中位移情况下, 试件的抗剪承载力, 如图 6 所示。

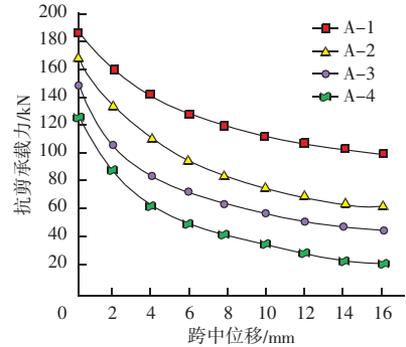


图6 试件抗剪承载力分析

Fig. 6 Shear capacity analysis of test specimens

当试件的跨中位移越大, 即试件承受的载荷越大, 则试件的抗剪承载力越小。针对处于不同锈蚀率环境下的试件, 锈蚀率越大, 试件抗剪承载力越低。其中, A-4 组试件的抗剪承载力在四组试件中最低, 最低值仅为 20 kN。而 A-1 组试件的抗剪承载力可达到 180 kN 以上, 虽然在加载过程中存在下降, 但下降幅度并不明显, 处于合理范围内, 因此, 经锈蚀后的试件抗剪承载力会受到影响。

2.6 不同锈蚀率试件屈服强度分析

不同锈蚀率试件在加载完成后的屈服强度, 见表 3。

表3 不同试件屈服强度分析

Table 3 Analysis of yield strength of different specimens

试件编号	锈蚀率/%	屈服载荷/kN	屈服位移/mm	极限载荷/kN	屈服载荷降低率/%	屈服位移降低率/%
A-1		220.5	8.2	275.3	0.5	0.4
A-2	5	201.4	7.3	254.3	7.8	5.3
A-3	10	174.3	7.1	204.3	16.4	9.5
A-4	20	146.3	6.7	153.2	27.3	16.3

当完成加载后, 未锈蚀的试件屈服载荷、屈服位移以及极限载荷均处于最高水平, 屈服载荷降低率仅为 0.5%, 屈服位移降低率仅为 0.4%, 说明未锈蚀的试件的屈服强度并未下降; 而锈蚀率为 20% 的试件屈服载荷、屈服位移以及极限载荷均保持在较小水平, 屈服位移、屈服载荷降低率较大, 可以看出其整体承载力存在下降。由此可知, 锈蚀程度较为严重的试件承载力较弱。

2.7 组合梁栓钉应力分布研究

选取 A-1 试件与 A-4 试件进行应力分析, 两种组合梁试件中的栓钉在载荷加载时的应力分布情况, 如图 7 所示。

建筑结构

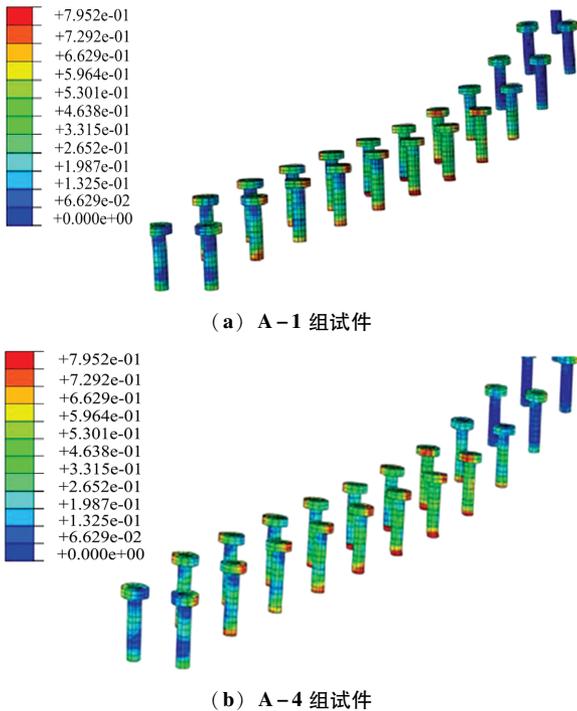


图7 试件栓钉应力分布情况分析

Fig. 7 Analysis of stress distribution of specimen bolts

A-1 试件栓钉的变形范围要明显低于 A-4 试件栓钉应力。在较强的载荷下, A-1 试件的栓钉仅有部分被剪切破坏, 破坏强度不大, 而 A-4 试件栓钉的破坏范围较为明显, 破坏强度较大。由此可知, 锈蚀率较为严重的试件栓钉会受到较大损伤, 导致其承载力变差。

3 结论

研究通过构建钢混组合梁有限元模型, 系统分析了非均匀锈蚀对其承载力退化的影响机制, 主要结论如下:

(1) 非均匀锈蚀对承载力的直接影响。锈蚀率与承载力退化呈显著正相关。未锈蚀试件的强屈比、延性及抗剪承载力均保持较高水平(强屈比降低率仅 0.5%), 而锈蚀率为 20% 时, 屈服载荷降低 27.3%, 极限载荷下降 44.3%, 抗剪承载力最低降至 20 kN, 表明锈蚀率增加直接削弱结构承载能力。

(2) 锈蚀的局部效应与整体劣化机制。非均匀锈蚀通过削弱有效截面和引发锈胀力, 加剧材料与界面间的应力重分布。锈蚀区域局部应力集中加速了整体刚度与延性的非线性退化, 导致承载力退化

速率高于均匀锈蚀。

研究结果为实际工程中锈蚀损伤评估与维护策略的制定提供了理论依据, 未来可结合多环境耦合作用及长期监测数据, 进一步深化锈蚀动态演化与结构性能退化的关联性研究。

参 考 文 献

- [1] 宋福春, 苏洪业, 刘帅. 考虑界面滑移效应的钢-混凝土组合梁新型非线性纤维梁单元模型 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38 (1): 50-57.
- [2] 金天德, 叶再利. 钢板组合剪力墙-钢梁侧板连接节点承载力研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (14): 81-86.
- [3] 陈冠. 多部件非均匀锈蚀对钢混组合梁承载力退化的影响研究 [J]. 公路工程, 2022, 47 (3): 35-42, 130.
- [4] 赵长军, 秦肖, 陈驹, 等. 栓钉锈蚀钢-混凝土组合梁在负弯矩作用下的力学性能研究 [J]. 公路交通技术, 2017, 33 (6): 60-65.
- [5] 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.
- [6] 周旺保, 许添鑫, 谭志化, 等. 波形钢板腹钢-混凝土筒支组合箱梁抗弯承载力分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (8): 2089-2096.
- [7] 苏庆田, 苏航, 吴飞. 橡胶-焊钉组合连接件对钢-混凝土组合梁受力性能影响分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49 (8): 1079-1087.
- [8] 舒兴平, 刘筱钰, 贺冉, 等. 榫卯钢结构外包 U 型钢-混凝土组合梁抗弯性能试验及理论分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (8): 80-87.
- [9] 蒋明利, 陈建兵, 匡冠桦. 钢桁腹混凝土组合梁试验与承载力设计方法研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (10): 24-29.
- [10] 许绮炎, 刘全林, 毕平均. 考虑轴力作用下的型钢-混凝土组合梁抗弯承载力计算 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (5): 120-125.
- [11] 陈思程, 黄海林, 邓轩, 等. 带 T 形肋剪力键的钢-混凝土组合梁受弯性能试验及理论分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (3): 72-79.
- [12] 张西丁, 周军勇. 运营荷载作用下钢混组合梁桥抗弯性能可靠度研究 [J]. 公路, 2022, 67 (4): 125-132.
- [13] 朱劲松, 秦亚婷, 史腾. 预应力 UHPC-NC 组合梁抗弯承载力计算方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53 (10): 3989-4000.
- [14] 王春森, 杨可扬, 邢民, 等. 圆形钢-混凝土组合梁静力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2025, 46 (2): 94-106.
- [15] 祝俊祥, 郑艳, 莫时旭, 等. 负弯矩区部分充填式窄幅钢箱-UHPC-NC 组合梁抗剪承载力研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21 (10): 4136-4147.