

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

不同锈蚀程度下栓钉连接件的抗剪性能分析

王亮¹, 魏欢博², 高亚杰³, 任万敏¹, 卫星³

1) 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031; 2) 焦作师范高等专科学校, 河南焦作 454011;
3) 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031

摘要: 为研究栓钉连接件锈蚀条件下的抗剪性能退化规律, 建立ABAQUS有限元模型进行数值模拟. 针对均匀圆环、受压区半环、受拉区半环及拉压区半环4种不同的锈蚀分布形态, 考虑不同的锈蚀高度、锈蚀深度进行数值分析. 结果表明, 当锈蚀深度相同时, 4种锈蚀分布形态的栓钉抗剪承载力随锈蚀高度的增加而降低, 在锈蚀高度为10 mm时降到最小, 且锈蚀深度越大, 承载力降低程度也越大; 当锈蚀高度相同时, 随着锈蚀深度的增加, 抗剪承载力和抗剪刚度基本上呈线性下降趋势; 当锈蚀高度和深度相同时, 均匀圆环锈蚀的抗剪承载力和刚度的降低程度最大, 相比其他3种情况降低60%左右, 受压区半环锈蚀的抗剪承载力和刚度的降低程度最小. 研究成果可为钢混组合结构栓钉连接件耐久性设计提供参考.

关键词: 桥梁工程; 栓钉连接件; 锈蚀; 抗剪承载力; 抗剪刚度; 有限元分析

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.01058

Analysis of shear resistance of stud connectors under different levels of corrosion

WANG Liang¹, WEI huanbo², GAO Yajie³, REN Wanmin¹, and WEI Xing³

1) China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, Sichuan Province, P. R. China

2) Jiaozuo Normal College, Jiaozuo 454011, Henan Province, P. R. China

3) School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, P. R. China

Abstract: To study the degradation patterns of shear resistance of stud connectors under corrosion conditions, an ABAQUS finite element model was established for numerical simulation. Four different corrosion distribution patterns, namely, uniform annulus, compressive zone semi-annulus, tensile zone semi-annulus, and tensile-compressive zone semi-annulus, were considered. Numerical analyses were carried out for different corrosion heights (CH) and depths. The results show that when the corrosion depth (CD) is constant, the shear bearing capacity decreases with the increase of CH, reaching its minimum at a CH of 10 mm. Moreover, the greater the CD, the greater the degree of reduction. When the CH is constant, the shear capacity and stiffness decrease linearly with the increase of CD. Under the conditions of equal CH and CD of the studs, the reduction of shear capacity and stiffness of uniform annulus corrosion is the largest, which is about 60% lower than the other three situations, while the smallest reduction occurs in the studs with compressive zone semi-annulus corrosion. The research results can provide reference for the durability design of stud connectors in steel-concrete composite structures.

Key words: bridge engineering; stud connector; corrosion; shear capacity; shear stiffness; finite element analysis

Received: 2023-02-23; **Revised:** 2023-09-30; **Accepted:** 2023-11-09; **Online (CNKI):** 2023-12-22

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52078424)

Corresponding author: Professor WEI Xing (we_star@swjtu.edu.cn)

Citation: WANG Liang, WEI huanbo, GAO Yajie, et al. Analysis of shear resistance of stud connectors under different levels of corrosion [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(1): 58-65. (in Chinese)



钢混组合结构能充分发挥混凝土和钢材的性能, 近年来在中国公路和铁路桥梁中所占的比例逐步提高^[1-3]. 桥梁长期服役过程中, 暴露在空气中的钢构件需要通过涂装防锈. 外荷载长期作用下钢梁与混凝土板间的结合面会产生相对滑移, 导致界面产生间隙, 使得腐蚀介质从间隙侵入. 剪力连接件是钢-混组合结构能协同工作的关键构件^[4]. 腐蚀介质从混凝土与钢梁的界面侵入后, 可能导致栓钉产生锈蚀, 使栓钉传递剪力的性能退化, 从而减弱混凝土和钢梁的协作能力, 影响钢混组合梁静力行为^[5]、抗弯性能^[6-7]、长期变形^[8]及疲劳性能^[9-10]. 研究锈蚀影响下的钢混组合梁中栓钉剪力连接件抗剪性能退化规律, 分析栓钉表面的锈蚀机理, 保证钢混组合梁在设计基准使用期内的耐久性, 具有重要的工程应用价值及理论意义^[11-14]. 国内外学者基于锈蚀栓钉连接件的推出试验及数值模拟方法, 研究了锈蚀对栓钉连接件抗剪性能的影响, 结果表明, 栓钉直径会随着锈蚀率的增大而减小, 栓钉抗剪承载力及抗剪刚度也会随锈蚀率增大而减小, 栓钉锈蚀后会影响钢混组合梁疲劳性能, 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^[15-21].

锈蚀栓钉抗剪性能退化的主要原因是锈蚀引起栓钉体积的损失^[22-23]. 锈蚀分布范围和锈蚀深度是描述锈蚀程度的主要参数. 为探究锈蚀分布范围和锈蚀深度引起的栓钉连接件抗剪性能退化规律, 本研究基于数值模拟方法, 建立不同锈蚀程度的栓钉模型, 分析了均匀圆环、受压区半环、受拉区半环及拉压区半环4种不同锈蚀形态下, 不同锈蚀深度和锈蚀高度对栓钉连接件抗剪承载力和抗剪刚度的影响规律.

1 有限元建模及验证

1.1 有限元建模及验证

本研究采用ABAQUS建立栓钉推出模型(图1). 为验证所建立有限元模型的有效性, 采用与文献[14]试件相同的混凝土块尺寸、栓钉尺寸和钢板尺寸. 为提高计算效率, 利用对称性选取1/4推出试件建立有限元分析模型, 包括栓钉连接件、钢筋、1/2混凝土和1/2钢梁共4个部分. 其中, 栓钉直径为22 mm, 高度为100 mm.

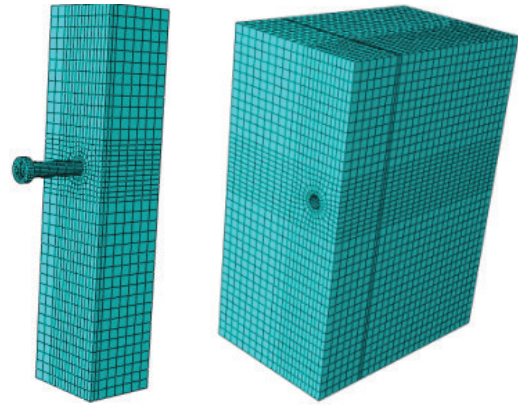


图1 栓钉推出试验有限元模型

Fig. 1 (Color online) Finite element model of stud push-out test.

本研究选用ABAQUS中的混凝土损伤塑性模型(图2). 其中, E_c 为混凝土弹性模量; σ_0 为单轴拉伸情况下的屈服应力; ε_t^{ck} 为单轴拉伸情况下的开裂应变; ε_{0t}^{el} 为单轴拉伸情况下的弹性应变; ε_t^{pl} 为单轴拉伸情况下的等效塑性应变; ε_t^{el} 为单轴拉伸情况下的等效弹性应变; d_t 为单轴拉伸情况下的受拉损伤演化参数; σ_{c0} 为单轴压缩情况下的屈服应力; σ_{cu} 为单轴压缩情况下的极限应力; ε_c^m 为单轴压缩

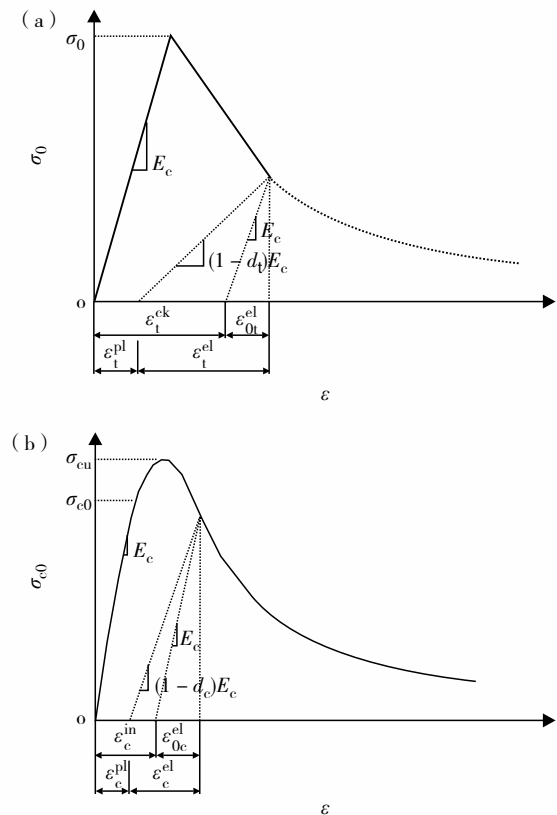


图2 混凝土单轴应力-应变曲线 (a)受拉; (b)受压

Fig. 2 Stress-strain curve of concrete. (a) Tension, (b) compression.

情况下的非弹性应变; ε_{0c}^e 为单轴压缩情况下的弹性应变; ε_c^p 为单轴压缩情况下的等效塑性应变; ε_c^e 为单轴压缩情况下的等效弹性应变; d_c 为单轴压缩情况下的受压损伤演化参数.

栓钉连接件采用的材料为 ML15, 钢梁采用的材料为 Q345qD, 两者都选取三折线式的弹塑性本构模型, 如图 3(a); 钢筋材料是 HRB400, 选取双折线本构模型(图 3(b)). 其中, E_s 为钢材弹性模量; σ_y 为屈服应力; σ_u 为极限应力; ε_y 为屈服应变; ε_u 为极限应变. 混凝土、栓钉连接件和钢梁均采用三维 8 节点实体线性减缩积分单元(C3D8R)进行模拟, 钢筋单元采用三维两节点线性桁架单元(T3D2). 混凝土和钢筋之间的黏结滑移忽略不计,

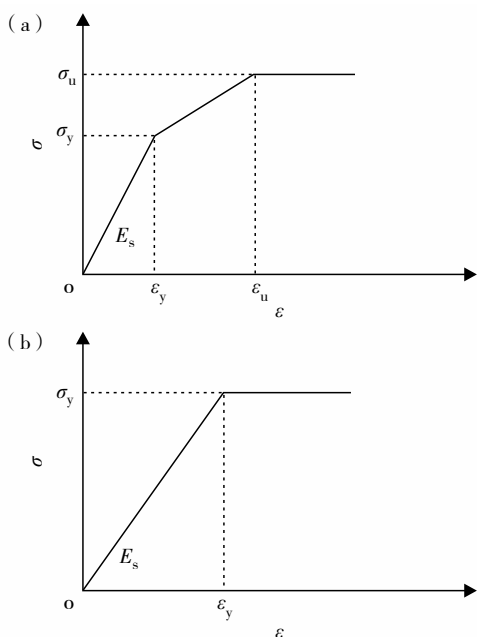


图 3 钢材应力-应变曲线 (a)Q345qD; (b)HRB335
Fig. 3 Stress-strain curve of steel. (a) Q345qD, (b) HRB335.

栓钉连接件与混凝土之间和混凝土和钢梁之间均采用表面-表面的接触关系.

本研究计算得到的栓钉连接件的荷载-位移曲线与文献[14]获得的曲线结果如图 4. 由图 4 可见, 数值模拟和文献[14]试验所得到的栓钉连接件荷载-滑移曲线的变化趋势基本一致, 数值分析得到的栓钉连接件极限承载力约为 143.9 kN, 与文献[14]的试验值 132.8 kN 的误差为 8.3%. 这说明本研究栓钉连接件建模开展数值分析方法有效, 分析结果可靠.

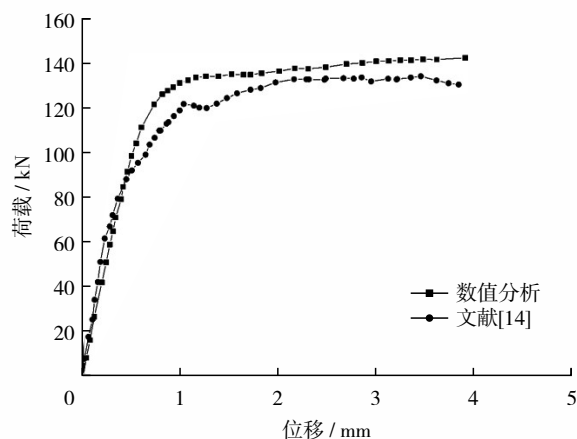


图 4 荷载-位移曲线数值分析和试验结果对比

Fig. 4 Comparison of load-slip curve from FEM data (square) and test data (circle, Ref [14]).

1.2 锈蚀栓钉的推出模型

为研究栓钉锈蚀后抗剪承载力和抗剪刚度的退化规律, 采用 Eurocode 4 标准推荐的推出试件模型, 对直径为 22 mm、高度为 100 mm 的栓钉连接件进行数值分析. 标准推出试件的尺寸如图 5. 实际结构中栓钉的锈蚀分布形式多样, 且存在一定的

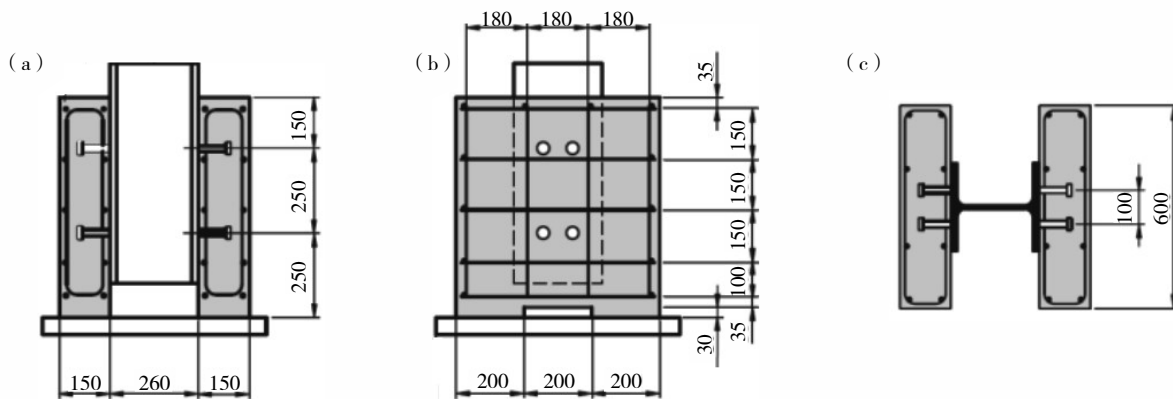


图 5 标准推出试件示意图(单位: mm) (a)立面图; (b)侧视图; (c)俯视图

Fig. 5 Push-out test specimen. (a) Elevation view, (b) side view, and (c) top view. (unit: mm)

随机性. 本研究假定了4类标准的锈蚀区域形态^[13, 24], 包括均匀圆环(A类)、受压区半环(B类)、受拉区半环(C类)和拉压区半环(D类), 如图6.

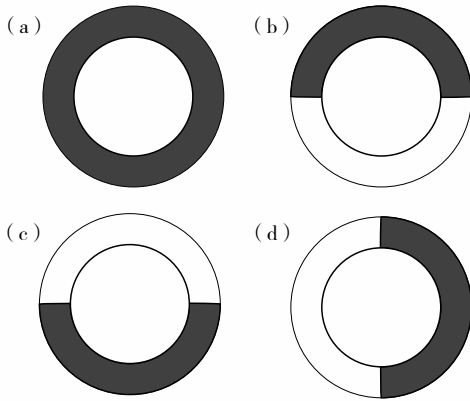


图6 不同锈蚀区域示意图 (a)均匀圆环(A类); (b)受压区半环(B类); (c)受拉区半环(C类); (d)拉压区半环(D类)

Fig. 6 Definition of different corrosion areas. (a) Uniform annulus (type A), (b) compressive zone semi-annulus (type B), (c) tensile zone semi-annulus (type C), (d) tensile-compressive zone semi-annulus (type D).

栓钉锈蚀程度主要从不同的锈蚀深度 C_d 和不同的锈蚀高度 C_h 来加以分析, 锈蚀深度 C_d 分别取栓钉直径的5% d 、10% d 、15% d 、20% d 和25% d (d 为栓钉直径), 锈蚀高度 C_h 分别取栓钉高度的5% h 、10% h 、20% h 和30% h (h 为栓钉高度), 对20个不同组合的模型进行分析.

2 分析结果

荷载-滑移曲线能很好地反映栓钉连接件的力学性能, 通常由弹性阶段和塑性发展阶段构成. 栓钉抗剪刚度反映了推出试件在弹性阶段抗滑移性能, 即栓钉连接件荷载-滑移曲线在弹性阶段的斜率. 本研究利用荷载-滑移曲线的相对滑移值为0.2 mm处对应的割线斜率计算得到栓钉的抗剪刚度.

2.1 均匀锈蚀

当栓钉锈蚀率较低时, 栓钉锈蚀形态通常表现为均匀锈蚀. 图7给出了锈蚀深度 C_d 分别为5% d 和25% d 时所对应的栓钉不同锈蚀高度的荷载-位移曲线. 由图7可见, 栓钉承载力随锈蚀深度的增加显著减小, 而锈蚀高度对栓钉承载力影响不明显, 极限承载力基本都是在栓钉锈蚀高度为10% h 时降到最低, 锈蚀高度继续增加时栓钉抗剪承载力无明显

降低. 锈蚀深度较小时, 栓钉的抗剪刚度随锈蚀高度的增加变化不明显, 锈蚀深度较大时, 栓钉的抗剪刚度随锈蚀高度的增加而减小.

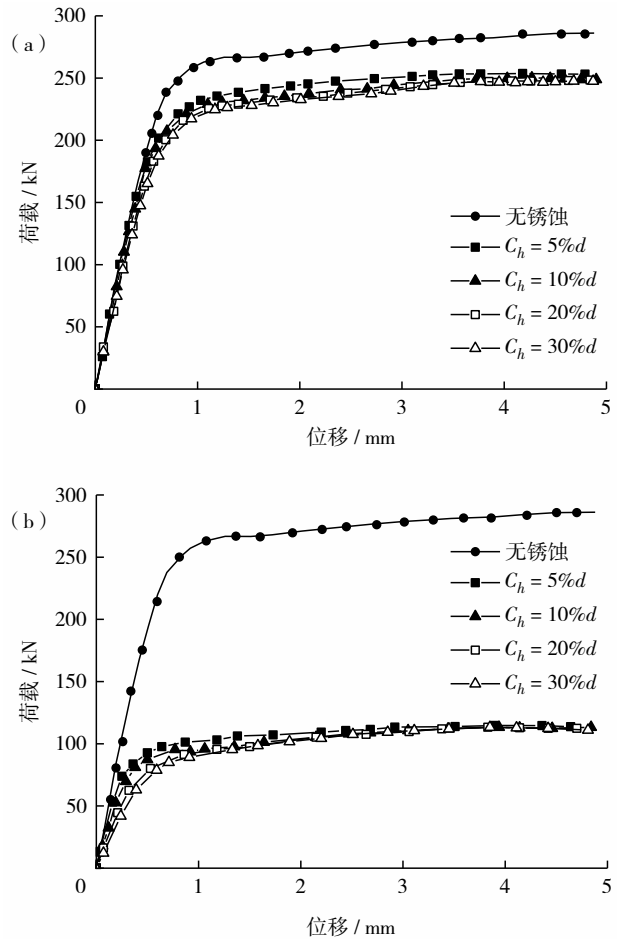


图7 不同锈蚀深度的荷载-位移曲线 (a) $C_d = 5\%d$; (b) $C_d = 25\%d$

Fig. 7 Load-slip curve under different corrosion depth. (a) $C_d = 5\%d$ and (b) $C_d = 25\%d$ at C_h of 0 (solid circle), 5% h (solid square), 10% h (solid triangle), 20% h (square), and 30% h (triangle).

不同锈蚀高度(C_h)时栓钉连接件承载力随锈蚀深度的变化可扫描论文末页右下角二维码, 查看补充材料图S1. 图8给出了不同锈蚀深度 C_d 的栓钉连接件抗剪刚度随锈蚀高度的变化曲线. 由补充材料图S1和图8可见, 栓钉连接件的抗剪承载力和抗剪刚度随锈蚀深度(C_d)的增加, 大致呈现线性下降趋势. 锈蚀高度超过10% h 后, 栓钉连接件的抗剪刚度随锈蚀高度增加大致呈非线性降低.

2.2 四种不同锈蚀形态对比

为分析锈蚀形态对栓钉连接件抗剪承载力和抗剪刚度的影响, 图9和图10分别给出了不同锈蚀深度和锈蚀高度下A、B、C和D四类不同锈蚀形态下

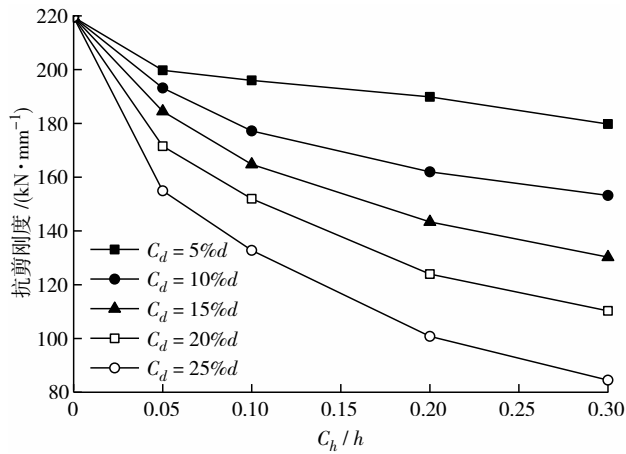


图 8 抗剪刚度随锈蚀高度变化

Fig. 8 Shear stiffness vs. corrosion height at C_d is 5% d (solid square), 10% d (solid circle), 15% d (solid triangle), 20% d (square), and 25% d (circle).

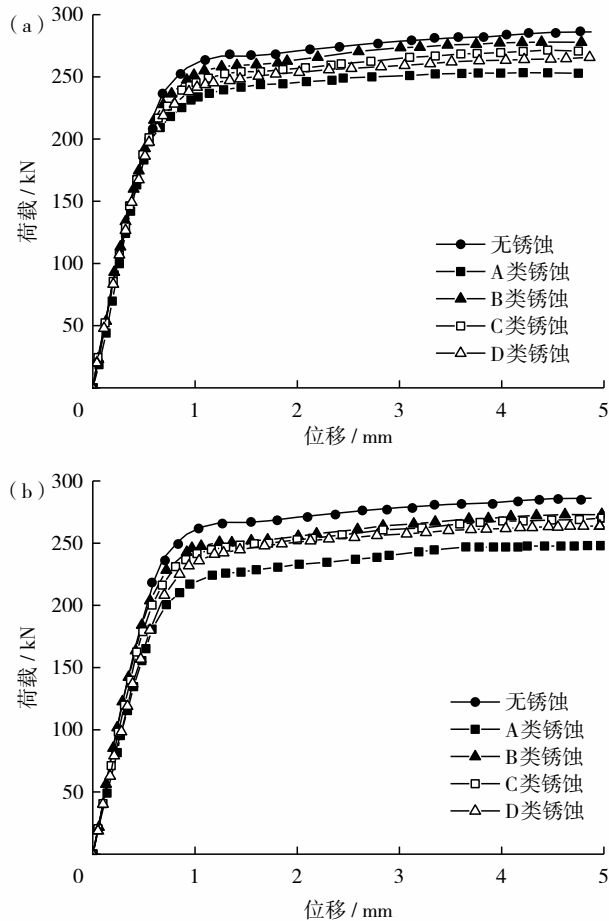


图 9 不同锈蚀形式的荷载-位移曲线 ($C_d = 5\%d$) (a) $C_h = 5\%h$; (b) $C_h = 30\%h$

Fig. 9 Load-slip curve of different corrosion forms for $C_d = 5\%d$. (a) $C_h = 5\%h$ and (b) $C_h = 30\%h$ at corrosion types of none (solid circle), A (solid square), B (solid triangle), C (square), and D (triangle).

栓钉连接件荷载-位移曲线.

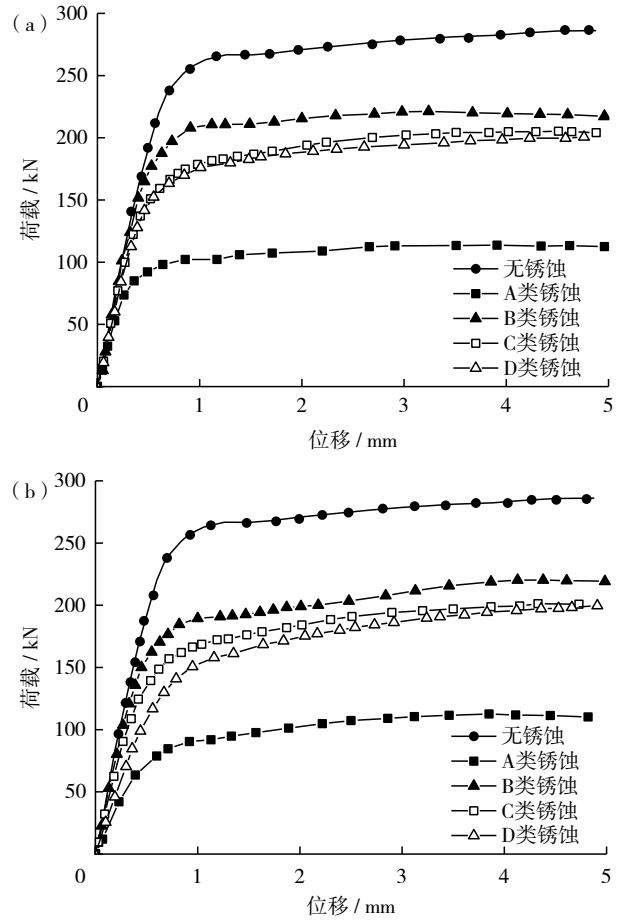


图 10 不同锈蚀形式的荷载-位移曲线 ($C_d = 25\%d$)

(a) $C_h = 5\%h$; (b) $C_h = 30\%h$

Fig. 10 Load-slip curve of different corrosion forms for $C_d = 25\%d$. (a) $C_h = 5\%h$ and (b) $C_h = 30\%h$ at corrosion types of none (solid circle), A (solid square), B (solid triangle), C (square), and D (triangle).

由图 9 和图 10 可见, 对于同一锈蚀深度和锈蚀高度, 无论那种锈蚀形态都会导致栓钉的抗剪承载力和抗剪刚度降低. 其中, A 类均匀圆环锈蚀引起的承载力和刚度降低程度最大, B 类受压区半圆环锈蚀引起的承载力和刚度降低程度最小, C 类和 D 类引起的承载力和刚度降低程度接近. 相同的锈蚀深度和锈蚀高度, A 类锈蚀对栓钉的截面面积和惯性矩削弱最严重, 导致栓钉的抗剪、抗弯承载力和刚度显著降低.

2.3 锈蚀栓钉抗剪性能退化机理

钢混组合梁中栓钉连接件受力复杂, 可能同时会受压、拉、弯和剪等作用力. 在推出试件中, 剪力通过栓钉根部混凝土的受压作用直接传到混凝土

板中, 栓钉后侧的混凝土与栓钉表面产生挤压, 主要表现为压碎, 栓钉前侧的混凝土在根部与栓钉脱离, 刚度和约束作用减小, 主要表现为钉帽部位受压而使栓钉受弯作用明显. 栓钉连接件的受力机理见图 11.

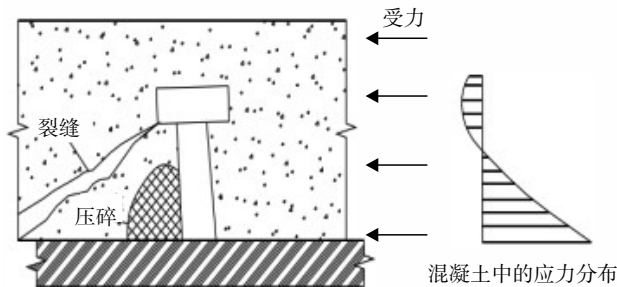


图 11 栓钉连接件的受力机理

Fig. 11 Mechanical behavior of stud connectors.

栓钉受剪破坏和混凝土受压破坏是两种主要破坏形式. 栓钉受剪破坏时, 承载力主要来自于受剪面积. 栓钉受力较大的位置出现在根部 0~10 mm 内, 栓钉根部受到的剪应力和拉应力均最大, 会先进入屈服. 随着荷载增加, 栓杆变形增加, 杆身应力增大, 最终栓钉根部发生剪断破坏.

《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》给出的栓钉剪断破坏的承载力为

$$V_{\text{sud}} = 0.7A_s f_{\text{su}} \quad (1)$$

其中, A_s 为栓钉钉杆横截面面积; f_{su} 为栓钉抗拉强度设计值.

栓钉抗剪刚度 K_{ss} 为

$$K_{\text{ss}} = 13d_{\text{ss}} \sqrt{E_c f_{\text{ck}}} \quad (2)$$

其中, d_{ss} 为栓钉杆部直径; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值.

栓钉的锈蚀深度 C_d 越大, 引起栓钉有效截面积 A_s 减小越多, 抗剪承载力降低的越多. 在式(1)基础上, 按最不利的 A 类均匀锈蚀, 经过数据拟合得出栓钉锈蚀后承载力为

$$V_{\text{c, sud}} = 0.55d_{\text{ss}}^2 (1 - C_d) (1 - 2C_d) f_{\text{su}} \quad (3)$$

弹性阶段栓钉与混凝土的相对滑移由混凝土压缩和栓钉杆身弯曲变形两部分组成, 锈蚀发生时一方面引起栓钉直径减小, 另一方面锈蚀物引起混凝土支撑刚度减小. 锈蚀高度 C_h 会影响栓钉弯曲变形和剪切变形, 进而影响栓钉抗剪刚度. 按最不利的 A 类均匀锈蚀来看, 经过数据拟合得出栓钉锈蚀抗剪刚度为

$$K_{\text{c, ss}} = (1 - C_d)^2 (1 + C_d) (1 - 2C_h)^{2C_d} K_{\text{ss}} \quad (4)$$

由式(4)可得到不同锈蚀深度和锈蚀高度下的栓钉抗剪刚度(表 1). 由表 1 可见, 式(4)计算结果与有限元分析结果很接近.

表 1 抗剪刚度公式(4)计算值
Table 1 Shear stiffness by equation 4

C_d/d	C_h/h	$K_{\text{c, ss}}$ (有限元)/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$K_{\text{c, ss}}$ (计算)/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$K_{\text{c, ss}}$ (有限元)/ $K_{\text{c, ss}}$ (计算)
0.25	0.30	88.3	84.5	1.04
0.25	0.20	112.4	100.8	1.11
0.25	0.10	134.6	132.8	1.01
0.25	0.05	144.8	154.9	0.93
0.20	0.30	117.1	110.3	1.06
0.20	0.20	137.7	124.0	1.11
0.20	0.10	154.5	152.0	1.02
0.20	0.05	162.0	171.5	0.94
0.15	0.30	138.9	130.2	1.07
0.15	0.20	156.8	143.4	1.09
0.15	0.10	171.0	164.8	1.04
0.15	0.05	177.1	184.5	0.96
0.10	0.30	163.2	153.2	1.07
0.10	0.20	177.0	162.0	1.09
0.10	0.10	187.5	177.2	1.06
0.10	0.05	191.9	193.2	0.99
0.05	0.30	190.2	179.8	1.06
0.05	0.20	198.1	189.9	1.04
0.05	0.10	203.9	196.0	1.04
0.05	0.05	206.3	199.8	1.03

栓钉沿杆长的应力分布决定了锈蚀高度的影响范围是靠近根部 0~10 mm. 因此提高栓钉连接件耐久性的主要措施是阻断腐蚀介质从钢梁和混凝土的结合界面侵蚀路径, 降低栓钉根部锈蚀风险.

3 结 论

1) 通过合理建模, 基于有限元方法开展栓钉连接件数值模拟与试验测试结果吻合较好, 数值试验可用于锈蚀栓钉抗剪性能分析.

2) 栓钉锈蚀深度 C_d 越大, 引起栓钉有效截面积减小越多, 抗剪承载力降低的越多. 当栓钉锈蚀高度相同时, 随着锈蚀深度的增加, 抗剪承载力大致呈线性下降.

3) 锈蚀高度 C_h 会影响栓钉弯曲变形和剪切变形, 进而影响栓钉抗剪刚度. 栓钉沿杆长的应力分布决定了锈蚀高度的影响范围是靠近根部 0~10 mm. 锈蚀高度为 10 mm 时抗剪承载力降到最低, 而抗剪刚度会随锈蚀高度 C_h 增加而降低.

4) 均匀圆环锈蚀对栓钉抗剪性能影响程度最大, 其次是受拉半圆环锈蚀, 影响程度最低的是受压半圆环锈蚀.

5) 提高钢混组合结构栓钉连接件耐久性的主要措施是阻断腐蚀介质从钢梁和混凝土的结合界面侵蚀路径, 降低栓钉根部锈蚀风险.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078424)

作者简介: 王亮(wangliang-cree@qq.com), 中铁二院工程集团有限责任公司工程师. 研究方向: 桥梁工程设计.

引文: 王亮, 魏欢博, 高亚杰, 等. 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.

参考文献 / References:

- [1] 卫星, 肖林, 温宗意, 等. 钢-混组合结构桥梁 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊1): 107-119.
WEI Xing, XIAO Lin, WEN Zongyi, et al. State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43 (Suppl. 1): 107-119. (in Chinese)
- [2] 文强. 高速铁路无砟轨道大跨组合结构桥梁应用研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(2): 54-59.
WEN Qiang. Application research on the long-span composite structure bridge on high-speed railway ballastless track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(2): 54-59. (in Chinese)
- [3] 肖林, 卫星, 温宗意, 等. 钢-混组合结构桥梁 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 168-182.
XIAO Lin, WEI Xing, WEN Zongyi, et al. State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42 (5): 168-182. (in Chinese)
- [4] 张弘. 钢-混凝土组合梁负弯矩区抗裂设计及剪力键耐久性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- ZHANG Hong. Research on anti-cracking design and shear key durability of steel-concrete composite beams in negative moment region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [5] CAO Guohui, YANG Liang, ZHANG Wang, 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.
- [6] 曹国辉, 曹一青, 周超, 等. 栓钉锈蚀后钢-混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(11): 129-135.
CAO Guohui, CAO Yiqing, ZHOU Chao, et al. Study on bending resistance of steel-concrete composite beams after stud corrosion [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(11): 129-135. (in Chinese)
- [7] 王凯, 刘小玲, 汪炳. 带锈蚀栓钉的组合梁疲劳后抗弯承载力影响因素分析[J]. 宁波大学学报理工版, 2023, 36(5): 51-57.
WANG Kai, LIU Xiaoling, WANG Bing. Analysis of influencing factors on flexural capacity of composite beams with corroded studs after fatigue [J]. Journal of Ningbo University Natural Science & Engineering Edition, 2023, 36(5): 51-57. (in Chinese)
- [8] 曹国辉, 廖世杰, 彭鹏, 等. 腐蚀与荷载耦合作用下钢-混凝土组合梁长期变形研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1): 32-40, 88.
CAO Guohui, LIAO Shijie, PENG Peng, et al. Long-term deformation of steel-concrete composite beams subjected to coupling effect of corrosion and loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1): 32-40, 88. (in Chinese)
- [9] 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.
ZHANG Haipeng, CHEN Ju, JIN Weiliang, et al. Fatigue behavior of steel-concrete composite beams with corroded stud [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5): 89-95. (in Chinese)
- [10] 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.
KUANG Yachuan, TAO Li, HE Yuhao. Fatigue life prediction model of corroded studded steel-concrete composite beam [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2021, 52(3): 770-778. (in Chinese)
- [11] 何东洋. 腐蚀环境与低周循环荷载下栓钉连接件抗剪

- 性能退化规律研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2022.
- HE Dongyang. Study on the degradation law of shear performance of headed stud connectors under corrosion environment and low cycle loading [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [12] 李咏灿. 氯离子侵蚀下陶粒混凝土组合剪力键抗剪性能研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2021.
- LI Yongcan. Study on the shear resistance of ceramsite concrete composite shear connector after chlorine ion corroded [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 魏欢博. 腐蚀环境下钢-混结合梁栓钉连接件服役性能退化规律研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- WEI Huanbo. Study on degradation law of service performance of bolted connections in steel concrete composite beams under corrosive environment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [14] 张爱平. 钢-混组合结构栓钉连接件抗剪性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- ZHANG Aiping. Research on shear behavior of stud connectors in steel-concrete composite structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [15] XUE Wen, CHEN Ju, ZHU Jihua. Behaviour of corroded single stud shear connectors [J]. Materials, 2017, 10 (3): 276.
- [16] WANG Bing, LIU Xiaoling, DU Jiantao. Experimental research and simulation on the mechanical performance degradation of corroded stud shear connectors [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 2846467.
- [17] 吴彩霞, 于大伟. 荷载对钢-混凝土连接锈蚀栓钉力学性能影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(3): 199-205.
- WU Caixia, YU Dawei. Research on mechanical properties of load on steel-concrete corroded [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 199-205. (in Chinese)
- [18] 陈立斌. 荷载与环境耦合作用下基于栓钉表面特征的疲劳性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2022.
- CHEN Libin. Study on fatigue performance of stud based on surface characteristics under coupling load and environment [D]. Changsha: Central South University, 2022. (in Chinese)
- [19] 朱浩云, 乔文靖, 杨帆, 等. 强腐作用下钢板组合梁栓钉退化机理的研究与有限元分析[J]. 公路, 2022, 67(1): 109-117.
- ZHU Haoyun, QIAO Wenjing, YANG Fan, et al. Research on degradation mechanism and finite element analysis of steel plate composite beam stud under strong corrosion [J]. Highway, 2022, 67(1): 109-117. (in Chinese)
- [20] GUAN Yanhua, WU Jiajie, SUN Renjuan, et al. Shear behavior of short headed studs in steel-ECC composite structure [J]. Engineering Structures, 2022, 250: 113423.
- [21] TU Xi, WU Ye. Numerical analysis on corrosion and mechanical performance of shear stud connector in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 363: 129816.
- [22] 戴李俊. 冻融-腐蚀影响下钢混组合梁栓钉连接件竞争失效机理[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- DAI Lijun. Competitive failure mechanism of stud connectors of steel-concrete composite beams under the influence of freeze-thaw & corrosion [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [23] XIAO Lin, WEI Xing, DAI L, et al. Push-out test of headed stud connectors subjected to freeze-thaw cycles and artificial corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2023, 376: 131011.
- [24] 洪舒贤, 郑帆, 邢锋, 等. 锈蚀速率对混凝土中锈蚀产物渗透的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2023, 40(3): 320-325.
- HONG Shuxian, ZHENG Fan, XING Feng, et al. Influence of corrosion rate on rust penetration in concrete [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(3): 320-325. (in Chinese)

【中文责编:坪梓;英文责编:之聿】



补充材料