

真实侵蚀路径下焊钉锈蚀过程及承载能力演化特性

霍宁宁¹, 房涛², 阮欣¹, 李越¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 安徽省交通控股集团有限公司, 合肥 231200)

摘要: 通过 6 个焊钉连接件的氯盐侵蚀退化试验及推出试验, 探究钢板组合梁焊钉连接件锈蚀后的静力性能。模拟桥面除冰盐环境下“环境—混凝土—钉头”氯盐侵蚀路径, 试验完成后焊钉三维扫描重建结果表明, 焊钉钉头部位锈蚀最严重, 钉身部位锈蚀相对较轻。基于焊钉三维扫描重建的有限元模拟和试验结果揭示, 在“环境—混凝土—钉头”侵蚀路径下, 随着焊钉锈蚀程度的加深, 连接件的承载性能、极限滑移和整体刚度均逐渐降低。根据试验结果拟合得到了考虑焊钉钉头和钉身锈蚀率的连接件抗剪承载力修正公式及连接件荷载—滑移曲线计算公式。从公式可以看出, 相较于钉头部位, 钉身部位的锈蚀更易引起连接件抗剪性能的降低。

关键词: 焊钉; 锈蚀; 推出试验; 三维扫描重建; 荷载—滑移曲线

中图分类号: U443. 32

文献标志码: A

Corrosion Process and Bearing Capacity Evolution Characteristics of Welding Studs Under Real Corrosion Path

HUO Ningning¹, FANG Tao², RUAN Xin¹, LI Yue¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 231200, China)

Abstract: This paper presents the static property of steel plate composite beam welded connections after corrosion degradation caused by chloride salt exposure. The degradation test involves the use of six studs, and the results of the test are used to explore the effects of rust on connections' mechanical properties. The chloride salt corrosion path of environment-concrete-stud head in a bridge deicing salt environment is simulated. After the test is completed, the three-dimensional scanning reconstruction of studs shows that the stud heads are the most severely

corroded, while the corrosion on stud shafts is relatively mild. The finite element simulation based on the three-dimensional scanning reconstruction of studs and experimental results reveal that as the degree of stud rust increases along the environment-concrete-stud head corrosion path, the connection's bearing capacity, ultimate slip, and overall stiffness gradually decrease. According to test results, a corrected formula for the shear bearing capacity of the connection and a corrected formula for the load-slip curve of the connection, considering the rust rates of stud heads and stud shafts, are derived. The formulas show that compared with stud heads, the rust on stud shafts is more likely to cause a reduction in the connection's shear resistance.

Keywords: studs; corrosion; push-out test; three-dimensional scanning reconstruction; load-slip curve

钢板组合梁桥是中小跨径梁桥中经济性较高的桥型之一。相对于全混凝土结构桥梁, 钢板组合梁具有较小的自重及较快的施工速度; 相对于全钢结构桥梁, 钢板组合梁合理地发挥了钢材受拉、混凝土受压的材料优势, 降低了建设成本。同时, 预制拼装技术是目前提高桥梁建设质量及速度的核心, 实现预制装配化施工的钢板组合梁桥施工速度快、工业化程度高, 已经在国内有了较多的实践应用^[1]。随着钢板组合梁桥先后投入运营, 因耐久性问题引起的结构长期性能退化已经被越来越重视。我国的气候环境多样, 氯离子侵蚀是影响钢板组合梁桥耐久性的主要形式^[2]。

钢—混凝土组合结构中剪力连接件是保证钢与混凝土 2 种材料协同工作的必要部件。剪力连接件锈蚀直接导致混凝土板与钢梁的层间抗剪承载能力降低, 影响组合梁桥的承载能力^[3]。剪力连接件可

收稿日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(52078367); 安徽交控集团研究项目(GN2020-06-3051, GN2020-06-3052)

第一作者: 霍宁宁, 博士生, 主要研究方向为桥梁耐久性、长期性能退化与评估。E-mail: nxhnn@163.com

通信作者: 阮欣, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁设计理论与方法、长期性能保持与提升。

E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

靠性直接决定钢-混凝土组合梁的极限承载能力^[4]。已有很多学者针对焊钉连接件锈蚀后静力性能开展研究,得到了一些共识性结论^[5-9]。焊钉锈蚀使得连接件极限承载力降低、抵抗剪切变形的能力减小,引起结构性能退化和耐久性降低。

荣学亮等^[5]开展了焊钉从结合部开始锈蚀和焊钉从钉头部位开始锈蚀2种不同路径的锈蚀和推出试验,分析了2种侵蚀路径对连接件承载性能和变形能力的影响。结果表明,焊钉在从结合部开始锈蚀的侵蚀路径下,连接件承载性能下降更多。因此,很多学者针对锈蚀焊钉连接件性能的相关研究采用从焊钉结合部开始锈蚀或先将焊钉锈蚀再浇筑试件的方式,从而达到更理想的焊钉锈蚀状态。然而,氯盐通过桥面混凝土向下渗入引起焊钉锈蚀是不容忽视的氯盐侵蚀路径,尤其是在除冰盐环境下。焊钉锈蚀形态分析大多为传统的目测加称重方法,缺乏更精确高效的手段。Xu等^[9]采用三维扫描的方式将焊钉锈蚀形态重建,结合相关软件算法,可以实现对焊钉不同截面损失率的计算,但缺乏对连接件性能影响的进一步分析。基于此,针对钢板组合梁实际工程特点,开展材料种类、构件尺寸、氯盐侵蚀路径更贴合实际的焊钉连接件锈蚀退化试验,结合三维扫描重建技术,探究锈蚀后焊钉连接件静力性能。

1 真实侵蚀路径下焊钉快速锈蚀试验

1.1 试验方案设计

为了模拟组合结构中焊钉连接件的真实环境侵蚀情况,需要关注组合桥面板中环境氯盐等侵蚀离子的侵蚀形式和输入方向。如图1所示,组合结构桥面板服役过程中环境水分和侵蚀离子主要从上表面面向内侵蚀,并首先对焊钉钉头位置产生影响。因此,模拟“环境—混凝土—钉头”侵蚀路径,分析长期服役退化程度对焊钉力学行为的影响。

目前研究混凝土钢筋锈蚀的方法主要有自然环境锈蚀、人工气候模拟锈蚀、通电加速锈蚀等。从锈蚀形态特征来看,自然环境锈蚀和通电加速锈蚀都会形成坑蚀。前者锈蚀速度慢,钢筋径向表面不均匀,坑蚀更明显;后者锈蚀速度快,总体为均匀锈蚀^[10]。从黏结强度和力学性能来看,通电加速锈蚀试件的力学性能较差,黏结强度损失较大,并随着电流密度的增大而加剧^[11-12]。

考虑试验时间和可操作性,采用阳极加速锈蚀的方式对试件腐蚀退化。将试件设计为对称布置的

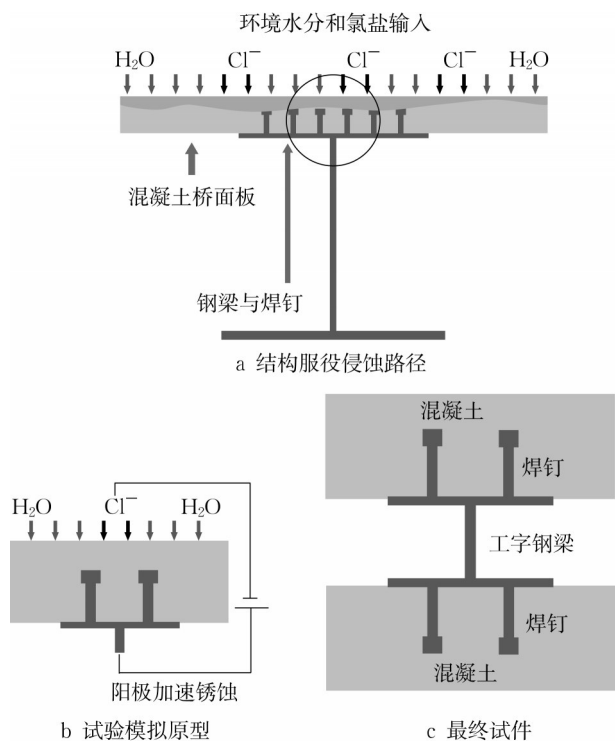


图1 真实侵蚀路径下组合结构试件设计

Fig.1 Design of composite structure specimen under real corrosion path

2个混凝土侵蚀区域、中间工字钢梁和焊钉的形式。

具体试验流程如图2所示。试验过程主要包括3个步骤:①制备氯盐溶液浸泡单侧混凝土表面,通过恒流直流电源进行试件单侧加速侵蚀;②翻转试件,将另一侧浸泡于氯盐溶液中,同样采用恒流直流电源加速侵蚀,直至两侧焊钉锈蚀状态达到试验预设程度;③将试件直立,通过液压试验机对工字钢梁进行竖向加载,直至试件发生损伤。

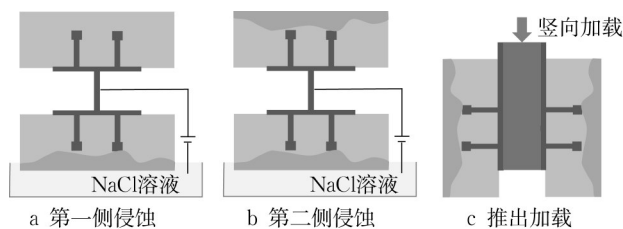


图2 试验流程

Fig.2 Test process

1.2 焊钉连接件试件制作

制作6个完全相同的连接件。工字钢梁翼缘板厚20 mm,腹板厚16 mm;焊钉直径为22 mm,高度为200 mm,单侧均布置4个焊钉,间距为130 mm;混凝土块尺寸为260 mm×500 mm×450 mm;每侧混凝土块内布置2层钢筋网,主筋直径为20 mm,间距

为 150 mm,箍筋直径为 9 mm,钢筋网间距为 175 mm;混凝土保护层厚度为 50 mm,钢筋网与焊钉之间无接触。试件尺寸如图 3 所示。

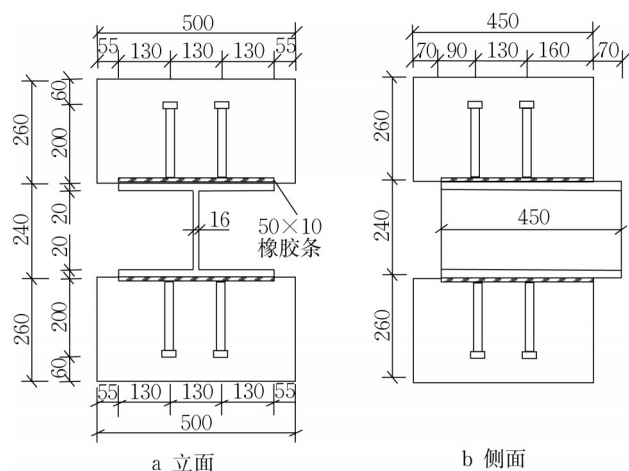


图3 试件尺寸(单位:mm)

Fig.3 Specimen size (unit:mm)

工字钢梁材料为 Q345qD 高强钢,焊钉材料为 ML15 铝合金,钢筋型号为 HRB400,混凝土强度为 C55。试件加工完成后,依次开展连接构造氯盐侵蚀退化试验及承载性能试验,直至试件破坏。其中,2 个试件作为对照组,不进行氯盐侵蚀退化试验,编号为 O-1~2;2 个试件开展焊钉低锈蚀率退化试验,编号为 H-1~2;2 个试件开展焊钉高锈蚀率退化试验,编号为 C-1~2。

1.3 氯盐侵蚀退化试验方案

试验采用恒电流法实现推出试件内焊钉的快速锈蚀。加速锈蚀焊钉的具体做法为:将养护到龄期的试件泡入氯化钠溶液中若干天后,将连接焊钉的导线与恒定直流电源的正极相连,外置的铜网(泡入氯化钠溶液中)与恒定直流电源的负极相连,通过氯化钠溶液形成回路,使阳极的焊钉锈蚀^[13]。根据通电时间和电流密度,利用法拉第定律较准确地计算焊钉的锈蚀率。

法拉第定律可以表述为:电池中电极上发生化学变化的物质的量与通过该电极的电量成正比。若通过指定电极的电量为 Q ,相应发生化学变化的物质的量为 n ,则

$$Q=nF \quad (1)$$

式中, F 为法拉第常数。

若焊钉的质量为 m ,锈蚀电流为 I ,则在时间 t 内焊钉锈蚀的质量损失为

$$m_{\text{损}}=Mn=M\frac{Q}{F}=MI\frac{t}{F} \quad (2)$$

式中: M 为金属的相对分子质量或相对原子质量。时间 t 内焊钉锈蚀率为

$$\eta=\frac{m_{\text{损}}}{m} \quad (3)$$

通过控制直流电流的大小,结合式(2)可计算出焊钉达到不同锈蚀率所需的通电时间 t 。本试验中退化电流及通电时间如表 1 所示,计算得到电流密度为 $1.4\sim 3.6 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

表1 焊钉退化恒电流法参数

Tab.1 Parameters of galvanostatic method for stud degradation

试验分类	试验编号	锈蚀电流/A	锈蚀时间/h	焊钉目标锈蚀率/%
无退化	O			
退化-1	H	0.8	240	5.5
退化-2	C	2.1	240	14.4

采用恒电流法对焊钉进行锈蚀退化的装置如图 4 所示。在试件一侧焊钉锈蚀程度达到预期后,采用桁车将试件翻转进行另一侧焊钉通电锈蚀。



图4 氯盐侵蚀试验装置照片

Fig.4 Chloride corrosion test setup photos

1.4 抗剪承载性能试验方案

H、C 组试件完成锈蚀退化后,与 O 组试件一起开展抗剪承载性能试验。采用推出试验方法,即两侧对称加载的方式,如图 5 所示。通过对工字钢梁翼缘板施加推压力 q 来测试焊钉的受力性能。试验加载时在混凝土块下铺设细砂垫层,以此保证推压力能够均匀地传递给每根焊钉。

试验采用一次加载破坏模式。加载初期由荷载控制,滑移量达到 2 mm 后实施位移控制,以每 0.5 mm 的位移增量进行加载。采用直线位移传感器测量钢翼缘板和混凝土块之间的相对滑移,每个试件布置 8 个位移计,如图 6 所示。测试系统主要包括数据采集箱、计算机、位移计等。加载过程中观察试件变形情况及试件破坏形态,并绘制荷载-滑移曲线。

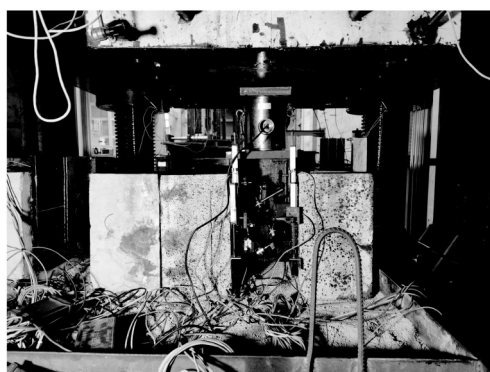
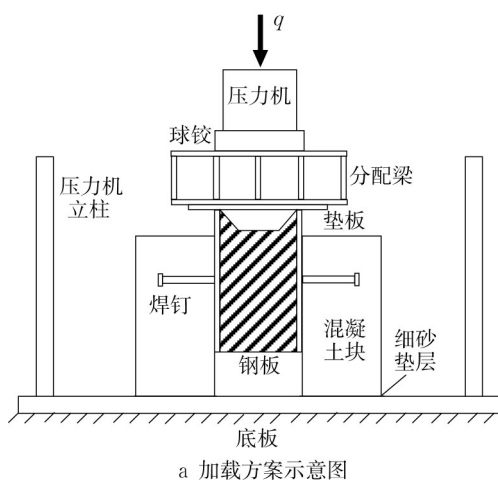


图5 试件加载方案与现场照片

Fig.5 Test loading scheme and field photos

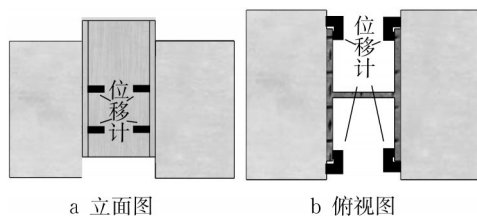


图6 焊钉滑移测试布置方案

Fig.6 Arrangement plan for stud slip test

2 有限元模型建立

2.1 焊钉三维扫描重建

试件加载破坏后,破碎混凝土并取出试件中的焊钉,通过三维扫描重建得到锈蚀后焊钉的三维形态。

通过多视角、多层次的拍摄获取一组高重复率的焊钉照片,提取各照片的特征点,由匹配计算获得焊钉表面密集点的三维坐标。基于点云文件生成网格,建立焊钉的三维模型,如图7所示。

创建比例尺并设置参考距离,计算焊钉锈蚀前后三维模型指定部位的体积,从而可以得到焊钉锈蚀率,计算式为

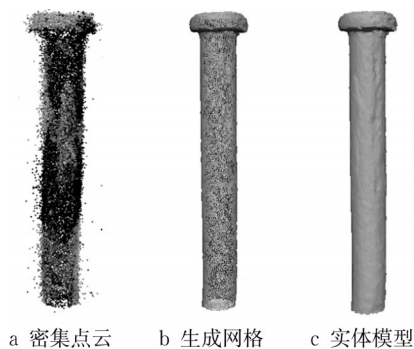


图7 焊钉三维模型

Fig.7 Three-dimensional model of studs

$$\eta = \frac{m_{\text{损}}}{m} = \frac{\rho(V_0 - V_c)}{\rho V_0} = \frac{V_0 - V_c}{V_0} \quad (4)$$

式中: V_0 、 V_c 为焊钉锈蚀前后的体积; ρ 为焊钉密度。由于推出试验中焊钉在根部被剪断,产生明显的塑性变形,因此在焊钉锈蚀率计算时统一不考虑焊钉根部 10 mm 部分。

2.2 推出试验模型建立

为了简化建模过程和提高计算效率,建立 1/2 有限元模型。模型中混凝土和焊钉采用三维实体单元模拟,钢筋采用线单元模拟。将重建得到的焊钉三维形态导入有限元软件中生成锈蚀焊钉模型,如图8所示。模型中材料强度均按试验实测强度取值。

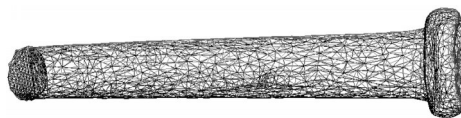


图8 锈蚀焊钉模型

Fig.8 Model of corroded studs

混凝土部分采用塑性损伤本构模型,钢材部分采用基于 von Mises 屈服函数的塑性模型。图9中, $f_{c,r}$ 、 $f_{t,r}$ 分别为混凝土的轴向抗压和抗拉强度, $\epsilon_{c,r}$ 、 $\epsilon_{t,r}$ 分别为 $f_{c,r}$ 和 $f_{t,r}$ 所对应的应变, $\epsilon_{c,r}$ 为 $0.5f_{c,r}$ 对应的应变, f_{sy} 、 f_{su} 为钢材的屈服强度和极限强度, ϵ_{sy} 、 ϵ_{su} 分别为 f_{sy} 和 f_{su} 对应的应变。具体参数取值如表2所示。

建模时将焊钉与工字钢梁绑定,工字钢梁与混凝土接触面采用面-面接触关系模拟,接触面切向采用罚函数,摩擦因数取 0.4,法向采用硬接触。焊钉和混凝土块的接触采用混凝土块挖孔处理,混凝土块挖孔内壁与焊钉表面通过接触对设为绑定方式。在 1/2 模型对称面上施加对称约束,底部施加固定约束。工字钢梁顶面采用位移加载,为了达到与试验完全一致的目的,在钢板顶面上沿 z 轴正方向施加均匀位移荷载,加载速率为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。有限元模型如图10所示。

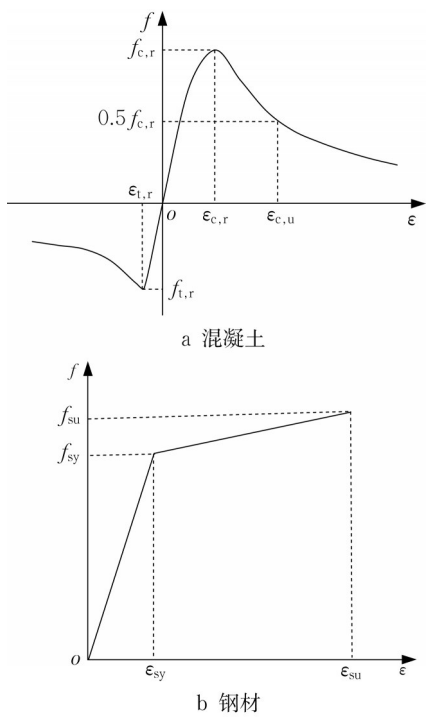


图 9 材料本构模型

Fig.9 Material constitutive models

表 2 材料本构模型参数取值

参数	取值
$f_{c,r}/\text{MPa}$	56.8
$f_{t,r}/\text{MPa}$	4.2
$\epsilon_{c,r}$	0.002 2
$\epsilon_{c,u}$	0.001 8
f_{sy}/MPa	180
f_{su}/MPa	380
ϵ_{sy}	0.001 5
ϵ_{su}	0.065 0

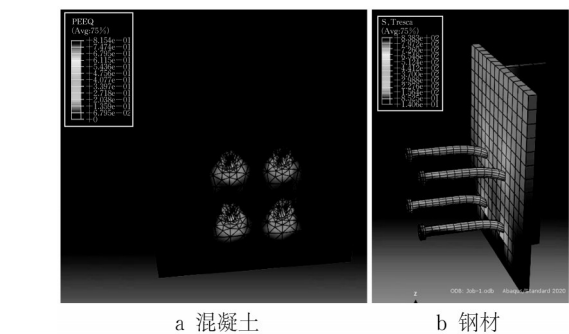


图 10 有限元模型

Fig.10 Finite element model

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

所有试件的加载破坏过程基本一致。当加载至

0.30*P*~0.35*P*(*P*为试件极限承载力)时,局部位置的工字钢梁腹板与混凝土开始分离,如图 11a 所示。加载中期,随着荷载的增加,分离区域不断扩大,分离角度也有所增加。在弹性阶段后,滑移增加变快,焊钉经过一段时间的剪切变形后破坏,根部剪断(见图 11b),构件失效。工字钢梁与混凝土界面发生明显分离,由于试件混凝土块厚度较大,混凝土仅在焊钉受剪侧呈现局部压碎(见图 11d),混凝土表面完好,没有出现裂缝。试验过程中出现 2 次焊钉断裂响声,第 1 次断裂声后荷载突然下降后持平,直至所有焊钉被剪断。

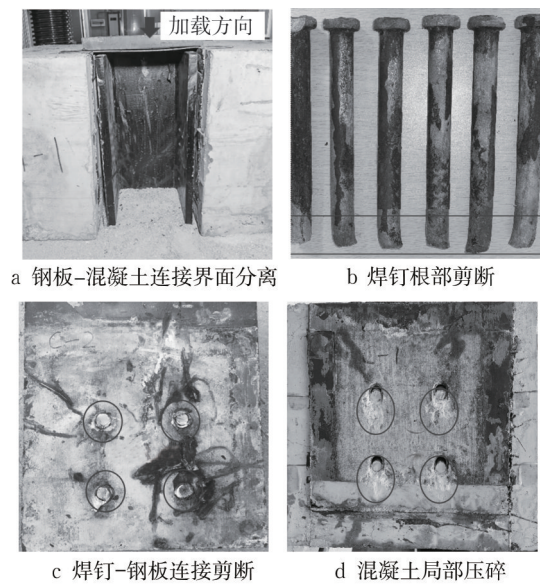


图 11 最终破坏模式

Fig.11 Final failure mode

3.2 结果分析

各组焊钉平均锈蚀率、抗剪承载力、变形等指标统计结果如表 3 所示。3 组试件的荷载-滑移曲线如图 12 所示。可以看到,试验结果与有限元模拟结果吻合较好,说明焊钉真实状态三维重建模型合理可行。

表 3 各组试验结果

Tab.3 Test results of each group				
试件分组	平均锈蚀率/%	抗剪承载力/kN	极限滑移/mm	剪切刚度/(kN·mm ⁻¹)
O组		224	10.0	374
H组	1.93	215	10.0	361
C组	8.85	180	7.6	306

对比分析可知,焊钉发生锈蚀后,连接件极限承载力出现不同程度的降低。平均锈蚀率为 1.93% 时,极限承载力较无锈蚀试件降低 4%;平均锈蚀率

为8.85%时,极限承载力较无锈蚀试件降低20%。随着锈蚀率的增加,试件极限承载力呈现线性退化趋势。锈蚀率达到8.85%时,随着极限承载力的降低,试件的极限滑移也随之下降,试件整体刚度减小。随着荷载的增加,试件刚度减小,刚度退化速率不断增大,处于加速退化的加载状态。

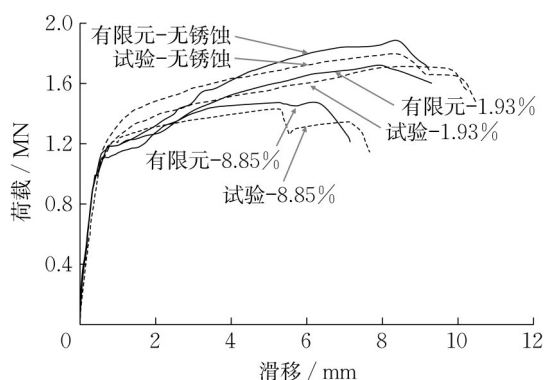


图12 荷载-滑移曲线

Fig.12 Load-slip curve

C组、H组代表性焊钉锈蚀形态如图13所示。由于锈蚀形态存在差异,因此C组、H组焊钉钉头、钉身锈蚀率有较大不同。总体来看,C组16根焊钉锈蚀后平均锈蚀率为8.85%,H组16根焊钉锈蚀后平均锈蚀率为1.93%,C组锈蚀程度更高。从焊钉锈蚀分布来看,钉头部位锈蚀最严重,钉身部位锈蚀较轻。C组焊钉钉头锈蚀率为20.13%,而钉身锈蚀率仅为5.66%;H组焊钉钉头锈蚀率为10.24%,而钉身锈蚀率仅为0.91%。这是因为本试验中引起焊钉锈蚀的氯离子侵蚀扩散路径为:氯盐溶液中氯离子进入混凝土表面,向钉头部位扩散,导致钉头集中锈蚀;随后,氯离子沿钉身扩散,导致钉身逐步锈蚀。

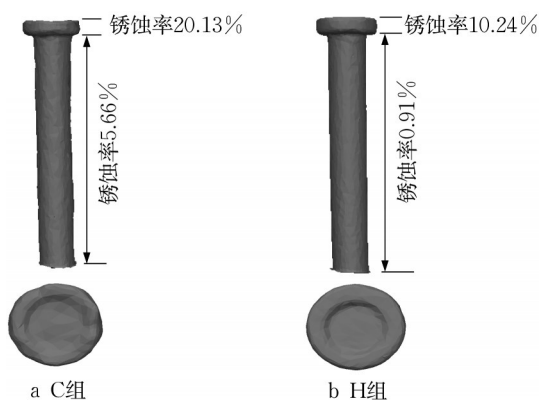


图13 焊钉锈蚀形态

Fig.13 Corrosion morphology of studs

4 锈蚀焊钉连接件承载性能计算公式

4.1 锈蚀焊钉连接件抗剪承载力修正公式

在焊钉连接件的推出试验中,焊钉受拉剪组合作用,以剪切为主。焊钉连接件的破坏形态分为混凝土破坏和焊钉剪断。当混凝土材料强度较低时,推出试件的破坏形式为焊钉附近混凝土局部受压破坏。随着混凝土强度的提高,加之在混凝土板中加大配筋以增强约束作用,推出试件的破坏形式通常为焊钉剪断破坏或者焊缝破坏。当试件的破坏形式为焊缝破坏时,焊钉的抗剪承载力不能得到充分发挥,因此这种破坏形式应当尽量避免。对于焊钉抗剪承载力设计,《钢结构设计规范》(GB 50017—2017)中规定

$$V_u = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s f_u \quad (5)$$

式中: A_s 为焊钉横截面积; E_c 为混凝土弹性模量; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; f_u 为焊钉极限抗拉强度。

已有研究表明^[14-16],当无锈蚀焊钉连接件发生焊钉钉杆剪断破坏时,其极限承载力可采用下式计算:

$$N_{vu} = 3A_s f_u \left(\frac{E_c}{E_s} \right)^{0.4} \left(\frac{f_{cu}}{f} \right)^{0.2} \quad (6)$$

式中: N_{vu} 为焊钉极限抗剪承载力; f 为焊钉材料屈服强度; E_s 为焊钉材料弹性模量; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

从试验结果可以看出,随着焊钉锈蚀率的增加,构件的抗剪承载力逐渐退化,退化特征基本呈线性退化,推出试验结果及抗剪承载力拟合曲线如图14所示。

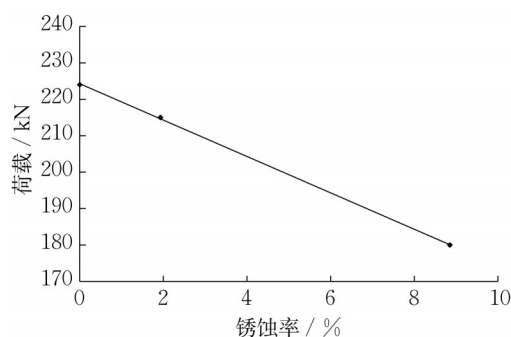


图14 焊钉锈蚀连接件抗剪承载力拟合曲线

Fig.14 Fitting curve of shear bearing capacity of corroded stud connectors

根据拟合曲线可以得到焊钉锈蚀连接件抗剪承载力退化规律为

$$N_{vu} = N_{v0} - 4.99\eta \quad (7)$$

式中, N_{v0} 为未锈蚀连接件抗剪承载力, 可取各连接件抗剪承载力均值。

若将焊钉锈蚀率分为钉头和钉身 2 个部位来描述, 则可以得到

$$\eta = 0.12\eta_H + \eta_S \quad (8)$$

式中: η_H 为焊钉钉头锈蚀率; η_S 为焊钉钉身锈蚀率。式(8)适用于直径 22 mm、长度 200 mm 的标准焊钉, 这也是目前组合桥梁中应用较多的焊钉。

将式(8)代入式(7), 进一步得到锈蚀后焊钉连接件抗剪承载力计算式为

$$N_{vu} = N_{v0} - 4.99(0.12\eta_H + \eta_S) \quad (9)$$

可以看出, 与钉头部位相比, 钉身部位锈蚀更易引起连接件抗剪承载力的降低。相较于已有研究成果^[7], 该公式能够表明焊钉不同部位锈蚀对抗剪承载力的影响。

4.2 锈蚀焊钉连接件荷载-滑移曲线修正公式

1971 年, Ollgaard 等^[17]提出了用于描述焊钉连接件荷载-滑移本构关系的计算式:

$$N_v = N_{vu}(1 - e^{0.71\Delta})^{0.4} \quad (10)$$

式中: N_v 为加载下焊钉连接件剪力; Δ 为相对滑移。根据荷载-滑移曲线的变化特征, 考虑到锈蚀焊钉连接件的极限承载力随锈蚀率的变化, 为了能够对所有推出试验数据进行拟合, 结合 Ollgaard 等^[17]提出的荷载-滑移计算式, 定义锈蚀焊钉连接件荷载-滑移计算式为

$$\frac{N_v}{N_{vu}} = a(1 - e^{b\Delta})^c \quad (11)$$

式中, a 、 b 、 c 为表征锈蚀焊钉荷载-滑移曲线的特征参数。对推出试验结果归一化后进行参数拟合分析, 拟合结果及试验测点如图 15 所示。

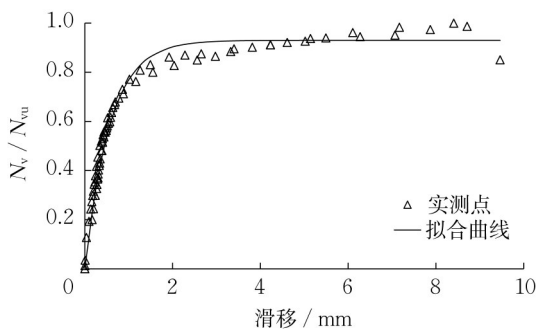


图 15 焊钉锈蚀连接件荷载-滑移拟合曲线

Fig.15 Load-slip fitting curve of corroded stud connectors

拟合得到 a 、 b 、 c 的数值分别为 0.93、1.78、1.04, 则锈蚀焊钉荷载-滑移曲线为

$$\frac{N_v}{N_{vu}} = 0.93(1 - e^{-1.78\Delta})^{1.04} \quad (12)$$

从拟合结果可以看出, 拟合结果相较于试验实测结果, 滑移发展较快, 荷载发展偏慢, 拟合曲线的发展趋势与连接件荷载-滑移实测曲线吻合良好, 因此可以采用式(12)计算焊钉锈蚀连接件的荷载-滑移关系。考虑锈蚀焊钉抗剪承载力的退化规律, 将式(9)代入式(12), 可进一步得到锈蚀焊钉连接件荷载-滑移曲线计算式为

$$N_v = 0.93(N_{v0} - 0.60\eta_H - 4.39\eta_S)(1 - e^{-1.78\Delta})^{1.04} \quad (13)$$

5 结论

(1) 焊钉发生锈蚀后, 连接件极限承载力出现不同程度的降低。随着锈蚀率的增加, 试件极限承载力呈现线性退化趋势。平均锈蚀率为 1.93% 时, 极限承载力较无锈蚀试件降低 4%; 平均锈蚀率为 8.85% 时, 极限承载力较无锈蚀试件降低 20%。同时, 锈蚀后试件的极限滑移减少, 整体刚度变小。这些变化将引起结构性能的退化和耐久性的降低, 在实际工程中应对此加以重视。

(2) 从焊钉锈蚀分布来看, 钉头部位锈蚀最严重, 钉身部位锈蚀较轻。C 组焊钉钉头锈蚀率为 20.13%, 而钉身锈蚀率仅为 5.66%; H 组焊钉钉头锈蚀率为 10.24%, 而钉身锈蚀率仅为 0.91%。本试验中引起焊钉锈蚀的氯离子侵蚀扩散路径为: 氯盐溶液中氯离子进入混凝土表面, 向钉头部位扩散, 导致钉头集中锈蚀; 随后, 氯离子沿钉身扩散, 导致钉身逐步锈蚀。

(3) 基于锈蚀焊钉三维扫描重建结果建立有限元模型, 得到的荷载-滑移曲线与试验结果基本吻合, 说明焊钉真实状态三维重建模型合理可行。

(4) 试验结果归一化后进行参数拟合分析, 得到锈蚀焊钉连接件抗剪承载力修正公式及锈蚀焊钉连接件荷载-滑移曲线计算公式。可以看出, 相较于钉头部位, 钉身部位锈蚀更易引起连接件抗剪承载力的降低。

作者贡献声明:

霍宁宁: 数据收集, 数据分析, 实验调查, 方法论, 初稿撰写。

房涛: 概念设计, 论文撰写。

阮欣: 概念设计, 方法论, 资金获取。

李越: 数据收集, 实验调查, 论文撰写。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述:2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1.
Editorial Department of *Journal of China Highway and Transportation*. Review of academic research on bridge engineering in China: 2021 [J]. *Journal of China Highway and Transportation*, 2021, 34(2): 1.
- [2] 陈艾荣, 冯师蓉, 马如进. 基于退化机理的混凝土桥梁耐久性环境区划 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2014, 42(3): 331.
CHEN Airong, FENG Shirong, MA Rujin. Environmental zoning of concrete bridge durability based on degradation mechanism [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(3): 331.
- [3] 苏庆田, 吴冲, 何武超. 上海长江大桥索梁锚固区疲劳试验研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(8): 179.
SU Qingtian, WU Chong, HE Wuchao. Fatigue test research on the anchorage area of cable beams of Shanghai Yangtze River Bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 179.
- [4] 匡亚川, 余志武, 龚匡晖. 栓钉锈蚀与抗剪承载力试验研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2013, 37(2): 381.
KUANG Yachuan, YU Zhiwu, GONG Kuanghui. Experimental study on stud corrosion and shear capacity [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2013, 37(2): 381.
- [5] 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.
RONG Xueliang, HUANG Qiao, REN Yuan. Experimental study on static performance and fatigue resistance of stud connectors after corrosion [J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2013, 46(2): 10.
- [6] 吴麟. 栓钉锈蚀钢-混凝土组合梁性能试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WU Lin. Experimental study on performance of stud-corroded steel-concrete composite beams [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [7] 熊辉, 阳亮, 曹国辉. 长期荷载作用下锈蚀栓钉连接件卸载后静力试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1524.
XIONG Hui, YANG Liang, CAO Guohui. Static test study of corroded stud connectors after unloading under long-term load [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(6): 1524.
- [8] 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.
ZHANG Haipeng, CHEN Ju, JIN Weiliang, *et al.* Study on fatigue properties of steel-concrete composite beams with corroded studs [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(5): 89.
- [9] XU Xiaoqing, HE Dongyang, ZENG Shanwen, *et al.* Effect of concrete cracks on the corrosion of headed studs in steel and concrete composite structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 293: 123440.
- [10] 干伟忠, 金伟良, 高明赞. 混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 41.
GAN Weizhong, JIN Weiliang, GAO Mingzan. Study on the applicability of accelerated corrosion testing of steel bars in concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(2): 41.
- [11] 郑山锁, 杨建军, 郑跃, 等. 锈蚀钢筋混凝土粘结滑移性能综述 [J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1221.
ZHENG Shansuo, YANG Jianjun, ZHENG Yue, *et al.* A review on bond-slip behavior of corroded steel reinforced concrete [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(S2): 1221.
- [12] SAIFULLAH M, CLARK L A. Effect of corrosion rate on the bond strength of corroded reinforcement [C]//Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Proceedings of an International Conference. Hannover: TIB, 1994: 591-602.
- [13] 吴庆, 章鑫森. 通电锈蚀钢筋砼梁结构性能退化的试验研究 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2004, 24(4): 16.
WU Qing, ZHANG Xinsen. Experimental study on structural performance degradation of reinforced concrete beams with electrical corrosion [J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2004, 24(4): 16.
- [14] 丁敏, 薛伟辰, 王骅. 钢-高性能混凝土组合梁栓钉连接件抗剪性能的试验 [J]. 工业建筑, 2007, 37(8): 9.
DING Min, XUE Weichen, WANG Hua. Experiment on shear performance of steel-high performance concrete composite beam stud connectors [J]. *Industrial Architecture*, 2007, 37(8): 9.
- [15] 王倩, 刘玉擎. 焊钉连接件抗剪承载力试验研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2013, 41(5): 659.
WANG Qian, LIU Yuqing. Experimental study on shear capacity of welded stud connectors [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(5): 659.
- [16] 聂建国, 谭英, 王洪全. 钢-高强混凝土组合梁栓钉剪力连接件的设计计算 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1999, 39(12): 94.
NIE Jianguo, TAN Ying, WANG Hongquan. Design and calculation of stud shear connections for steel-high strength concrete composite beams [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1999, 39(12): 94.
- [17] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete [J]. *Engineer Journal of AISC*, 1971, 8(2): 55.