

钢筋锈蚀对 RC 固端梁振动特性的影响*

徐略勤^{1,2}, 陈叙先¹, 周建庭², 王佩¹, 高鹏¹, 阳珊清¹

(1. 重庆交通大学土木工程学院 重庆, 400074)

(2. 重庆交通大学省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室 重庆, 400074)

摘要 为了揭示钢筋锈蚀对钢筋混凝土(reinforced concrete, 简称 RC)固端梁振动特性的影响, 制作了纵筋直径分别为 14 mm 和 16 mm 的 2 组梁 S-14 和 S-16, 每组 4 片, 一共 8 片。以 0%, 5%, 10% 和 15% 为目标锈蚀率对 2 组梁开展电化学加速锈蚀试验, 基于受迫振动法测试了 2 组梁的振动特性, 分析了交流电和环境振动两个干扰因素对测试准确性的影响, 研究了纵筋锈蚀率、直径对 RC 固端梁振动特性的影响规律, 探讨了荷载、截面刚度与频率之间的关联。结果表明: 干扰因素对固端梁频率的影响可忽略, 但对阻尼比有一定的影响, 尤其是环境振动最大可产生 43.62% 的偏差; 随着纵筋锈蚀率的增大, 固端梁的频率不断下降, S-14 和 S-16 梁的最大降幅分别达 16.89% 和 8.13%, 且纵筋直径越小, 频率的降幅和降速越大; 2 组梁的阻尼比随纵筋锈蚀率的变化规律不一样, 从测试结果的可重复性、稳定性和规律性来看, 频率均优于阻尼比; 随着锈蚀率的增大, 固端梁荷载和频率表现出类似的下降规律, 两者表现出良好的指数关系, 固端梁截面刚度的变化率是其振动频率变化率的 2 倍。

关键词 RC 固端梁; 振动特性; 受迫振动法; 钢筋锈蚀; 纵筋直径; 截面刚度

中图分类号 TU375.1

引言

钢筋混凝土结构因取材方便、造价廉低且具有较好的耐久性、耐火性等优点, 被广泛运用于各种工程结构中。钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构耐久性下降的重要原因之一, 其不仅会导致钢筋有效面积减小, 还会使保护层混凝土开裂以及钢筋与包围混凝土之间的黏结损失, 而且钢筋锈蚀后的维修更换不易处理。及时准确地掌握结构由于钢筋锈蚀而产生的性能损伤, 对正确评估结构的安全等级非常重要^[1]。振动频率、模态振型和阻尼比等动力特性是结构物理属性的函数, 结构因锈蚀等原因发生损伤和性能退化, 往往会导致其动力特性发生相应的改变^[2]。监测结构动力特性的变化简便可行, 可为描述结构的健康状况提供良好的参考。

通过监测结构动力特性的变化来识别损伤一直是研究热点, 其中根据梁的固有频率和模态振型变化来识别损伤尤其受到关注^[3-4]。这些研究通常将梁的损伤假想为 1 条或多条非闭合裂缝^[2], 从而将问题转变为开裂梁的振动分析问题^[5-6]。实际上, RC 梁开裂的原因不尽相同, 由钢筋锈蚀所引起的开裂

形态与开裂梁的假设并不完全一致。为了明确钢筋锈蚀的影响规律, 不少学者以 RC 梁的阻尼比为考察参数展开研究。文献[7-9]通过模态试验发现, 随着钢筋锈蚀率的增大, RC 梁的阻尼比出现了明显增大。Razak 等^[10]通过对 3 根足尺 RC 梁的模态测试发现, 钢筋锈蚀会导致高阶模态的阻尼比增大, 但第 1 阶模态的阻尼比反而减小。汤红卫等^[11]对悬臂 RC 梁进行试验, 发现钢筋锈蚀会导致构件的阻尼比增大。除了阻尼比以外, 刘燕^[12]实测发现, 钢筋锈蚀导致 RC 梁的振动基频出现下降。Zhang 等^[13]通过试验发现, RC 梁的振动频率随着钢筋锈蚀率的增大而下降, 认为振动频率可作为 RC 梁的健康监测指标。可以看到, 由于钢筋锈蚀机理较为复杂, 其对结构动力特性的影响目前尚未形成一致的认识, 进一步明确钢筋锈蚀与结构动力特性的关系, 对基于动力测试的损伤识别技术的发展非常重要。

笔者利用电化学加速锈蚀法制作了 2 组共 8 片 RC 梁, 通过受迫振动试验对不同纵筋锈蚀率和不同纵筋直径的 RC 固端梁进行动力特性测试, 得到固端梁的 1 阶模态参数(包括振动基频和阻尼比), 以此研究 RC 固端梁动力特性与纵筋锈蚀之间的关

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600300, 2018YFB1600301); 重庆英才计划资助项目(cstc2022ycjh-bgzxm0133); 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJQN201900737); 研究生科研创新资助项目(2021S0020)

收稿日期: 2022-01-03; 修回日期: 2022-04-18

系,探讨以振动基频和阻尼比来评估RC固端梁锈蚀程度的可能性和合理性。

1 试验概况

1.1 锈蚀RC梁的设计与制备

8片RC试验梁的长×高×宽均为160 cm×18 cm×12 cm,其尺寸与配筋如图1所示。试验梁的混凝土采用C30,纵筋保护层厚度为2 cm,梁底受拉纵筋为2根HRB400钢筋(直径分别为14 mm和16 mm),梁顶架立纵筋为2根HPB300钢筋(直径均为10 mm),箍筋为直径6 mm的HPB235钢筋。8片试验梁根据其纵筋直径的大小分为2组(S-14和S-16),每组4片梁。

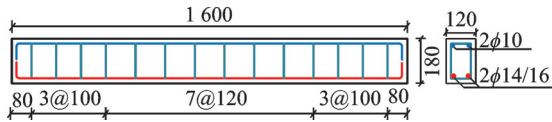


图1 试验梁的尺寸与配筋(单位:mm)

Fig.1 Dimensions and reinforcement of test beams (unit:mm)

采用电化学加速锈蚀法对梁底受拉纵筋进行快速锈蚀,其过程如图2所示。电源正极与纵筋相连,负极与放置在梁底面中轴线上的碳棒相连。正式通电锈蚀前,将试验梁置于浓度为5%的氯化钠溶液中浸泡48 h。为保证锈蚀效果,氯化钠溶液的淹没深度超过梁高的1/3。在试验设计时,目标锈蚀率分别定为0%,5%,10%和15%,因此2组梁分别命名为S-14-0, S-14-5, S-14-10, S-14-15和S-16-0, S-16-5, S-16-10, S-16-15。

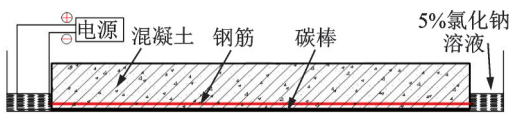


图2 电化学加速锈蚀过程

Fig.2 Electrochemical accelerated corrosion process

根据目标锈蚀率,利用法拉第定律计算出通电时间^[15]为

$$t = ZF\eta_r m / IM \quad (1)$$

其中: t 为通电持续时间; Z 为反应电极的化合价,即Fe变成 Fe^{2+} 所消耗的电子数,其值为2; F 为法拉第常数,其值为96 487 C/mol; η_r 为纵筋目标锈蚀率; m 为纵筋总质量; I 为外加电流强度; M 为铁的摩尔质量,其值为56 g/mol。

按照式(1)计算得到通电持续时间,由于纵筋和

箍筋的绝缘措施受到损坏等原因,实测纵筋锈蚀率远低于目标值,加速锈蚀结果如表1所示。

表1 加速锈蚀结果

Tab.1 Results of electrochemical accelerated corrosion

编号	$\eta_r / \%$	$\Delta m_t / g$	I / A	t / h	$\Delta m_m / g$	$\eta_m / \%$
S-14-0	0	0	0	0	0	0
S-14-5	5	190.8	2.91	69.1	24.7	0.65
S-14-10	10	380.8	2.91	138.0	101.2	2.66
S-14-15	15	572.9	2.91	207.6	222.2	5.82
S-16-0	0	0	0	0	0	0
S-16-5	5	248.9	2.91	78.9	28.8	0.58
S-16-10	10	498.6	2.91	158.0	174.7	3.50
S-16-15	15	745.0	2.91	236.1	348.2	7.01

Δm_t 为纵筋理论损失质量; Δm_m 为纵筋实测损失质量; η_m 为纵筋实际锈蚀率

1.2 振动特性测试方法

采用人工激励下的受迫振动来获取试验梁的1阶振动基频、阻尼比及振型等模态参数。由于试验梁较短,基频较大,振动信号易受干扰,简支边界会在支承处带来额外的干扰,导致测试结果不可靠。因此,在加速锈蚀试验结束后,将试验梁两端通过混凝土基座固结,动力特性试验如图3所示。测试仪器包括橡皮锤、加速度传感器和信号采集器。5个加速度传感器安装于梁顶中轴线6等分点位置,从左向右依次记为1#~5#。利用橡皮锤在3#与4#传感器中间位置对梁体施加竖直锤击,并通过信号采集器记录各个加速度传感器的响应信号。由于梁体刚度较大,橡皮锤等工具一般很难激发出试件的高阶模态,因此笔者重点研究RC固端梁的基本振动模态。本试验采用江苏东华公司开发的DHDAS动态信号采集系统对加速度响应信号进行谱分析,使用快速傅里叶变换处理时程响应。为了保证测试结果的可靠性,每次采集6组数据,并以平均值作为最

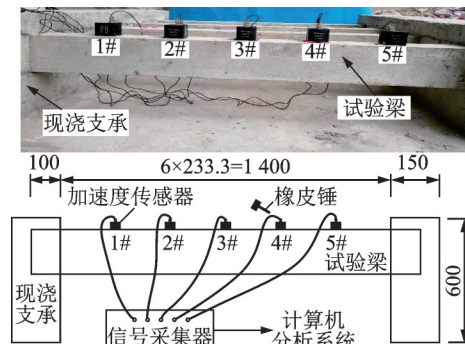


图3 动力特性试验(单位:mm)

Fig.3 Dynamic characteristic tests (unit:mm)

终的结果。实测表明,根据 1#~5#加速度传感器所得到的振动基频和阻尼比结果无明显差异,下面仅以 3#传感器的分析结果进行研究。

2 试验结果分析

2.1 干扰因素的影响分析

在对 S-14 组试验梁第 1 次采集到的数据进行模态分析时,发现所有频谱图中在 50 Hz 及其倍数处均存在明显异常峰值,初步判断这是因为实验室交流电的频率所导致,交流电测试结果的影响如图 4 所示。为了消除该影响,将试验仪器与地线相连接,重新进行了测试。由图 4(a)可见,频谱图中的异常峰值全部被消除,频率-加速度曲线光滑流畅,试验梁的 1 阶频率峰值更加明显,交流电的存在虽然会产生额外的异常峰值,但基本不影响试验梁的频谱曲线特征。由图 4(b)可见,交流电对 S-14 组试验梁基本模态参数的影响非常小,仅试验梁 S-14-15 的阻尼比在有无交流电的影响下略有差异,但也基本可以忽略。

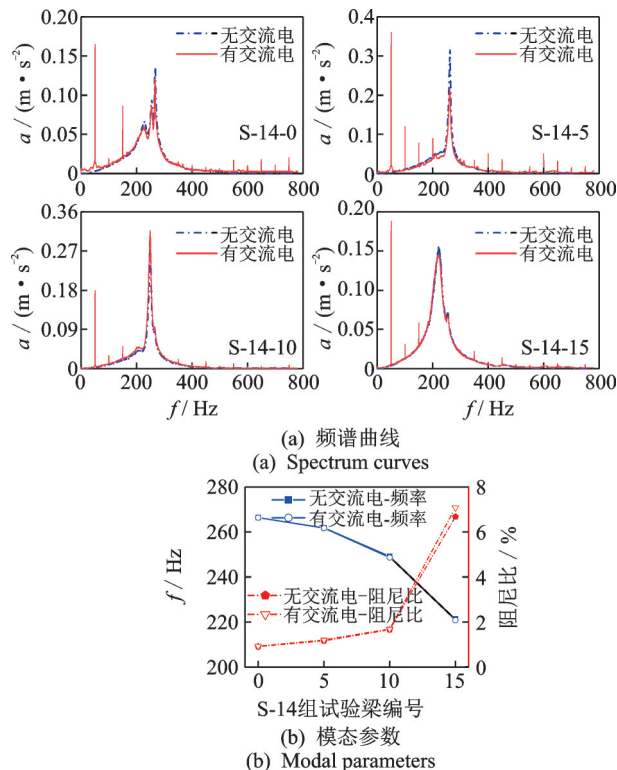


Fig.4 Effect of alternating current on test results

由于试验梁基本频率较高,采用人工激励的方式受到很多干扰。为了保证结果的可靠性,本试验还对不同环境的影响进行对比测试。选取实验室

2 个不同运作状态:①仅有本试验在开展;②有其他试验在同步开展,中间间隔 2 d,分别用 D1 和 D2 表示。实验室环境对测试结果的影响如图 5 所示。由图可见,环境振动干扰对 2 组梁的实测结果均有一定的影响。对于 S-14 组来说,环境振动干扰对 4 片梁的基本频率影响很小,2 条曲线基本重合;但对 4 片梁的阻尼比影响较大,尤其是 S-14-10 和 S-14-15,前者在 2 种环境下相差 43.62%,后者在 2 种环境下相差 28.22%。对于 S-16 组来说,环境振动干扰对 4 片梁的基本频率和阻尼比的影响均较小,S-16-0 的基本频率在 2 种环境下虽有一定差异,但相差仅为 1.73%。总的来说,环境干扰对 RC 固端梁频率测试结果的影响可以忽略,对阻尼比虽有一定的影响,但不会改变阻尼比测试结果的变化规律。

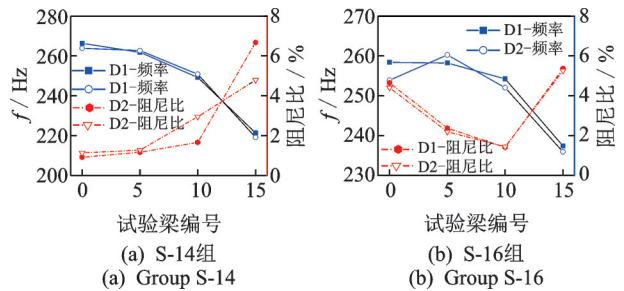


Fig.5 Effect of laboratory environment on test results

在实际工程中,由于结构或构件振动模态参数的测试精度容易受外界各种干扰因素的影响,导致实测结果的可靠性下降。本试验的对比分析表明,在一定范围内,交流电和环境振动对模态参数识别的不利影响是可控的。

2.2 锈蚀率的影响分析

本节均以无交流电和无实验室振动干扰测试结果对象进行分析。S-14 和 S-16 试验梁在 3#传感器处测得的锈蚀率对加速度响应曲线的影响如图 6 所示。利用图 6 曲线进行傅里叶变换得到频谱图,锈蚀率对频谱曲线的影响如图 7 所示。由于每次手动锤击的强度无法保持完全一致,因此图 6 中的响应曲线在幅值和衰减规律上差别不一,很难得到有效的结论;但从图 7 的频谱曲线中可明显发现受拉纵筋的锈蚀对固端梁振动基频的影响规律。总体来看,纵筋锈蚀率越高,振动基频下降越明显。

图 8 为锈蚀率对模态参数的影响。由图可见,2 组试验梁振动基频的 6 次实测结果非常接近,阻尼比的 6 次实测结果总体也比较接近,但各次间的差

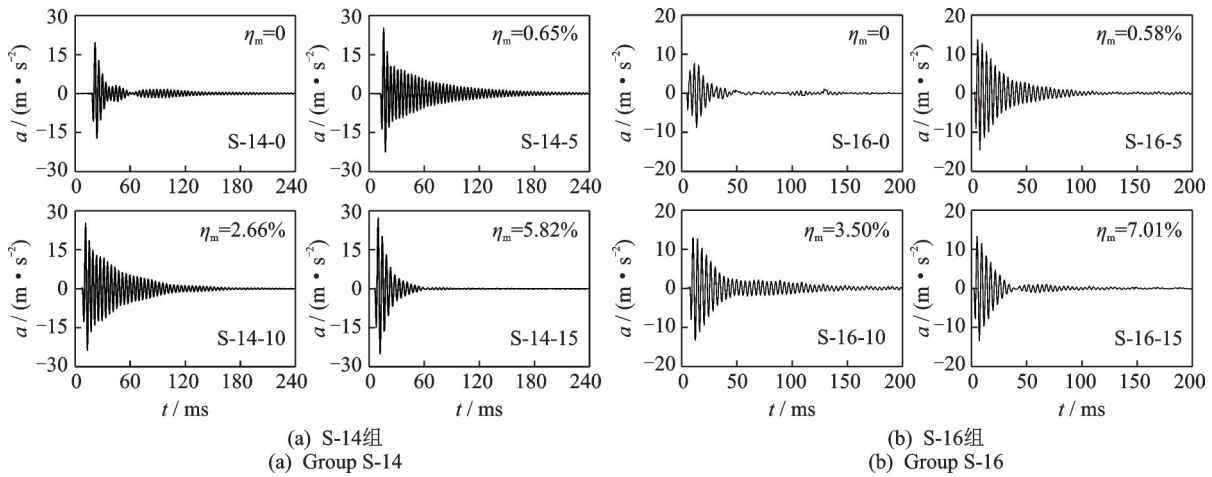


图 6 锈蚀率对加速度响应曲线的影响

Fig.6 Effect of corrosion ratios on acceleration response curves

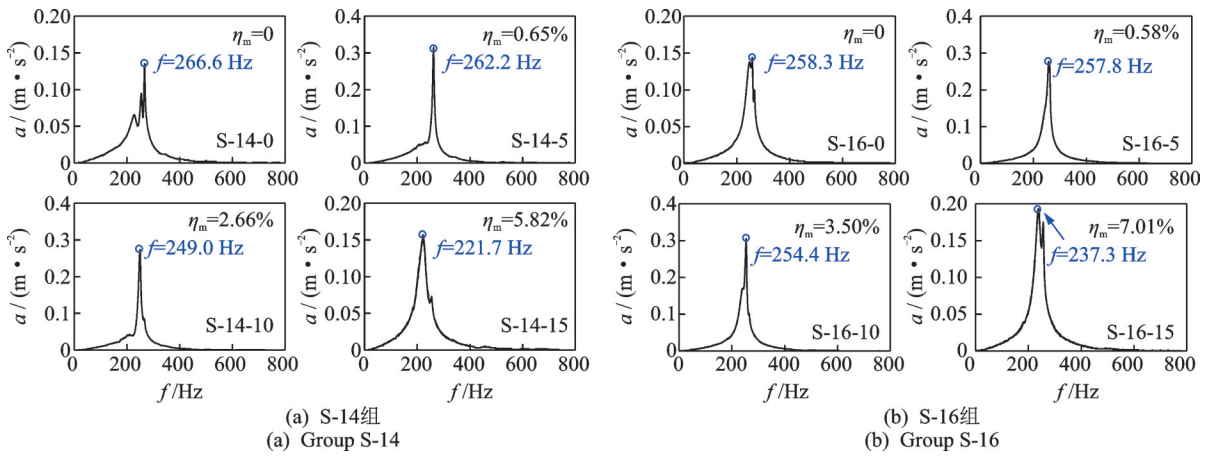


图 7 锈蚀率对频谱曲线的影响

Fig.7 Effect of corrosion ratios on frequency spectrum curves

异明显比频率高,尤其在锈蚀率较大时,如 S-16-15 的 6 次阻尼比在 4.57%~6.79% 之间,最大相差 32.76%。可见,从测试结果的稳定性来看,振动基频相对更可靠。从锈蚀率的影响来看,2 组梁的振动基频均随受拉纵筋锈蚀率的增大而下降,S-14 组的 4 片梁从 266.4 Hz(无锈)降至 221.4 Hz(5.82% 锈蚀率),降幅为 16.89%;S-16 组的 4 片梁从 258.4 Hz(无锈)降至 237.4 Hz(7.01% 锈蚀率),降幅为 8.13%。2 组梁的阻尼比随受拉纵筋锈蚀率的变化规律有所不同,S-14 组 4 片梁的阻尼比随锈蚀率的增大先缓慢增大后突然剧增,数值从 0.91% 增至 6.67%,增大了 6.33 倍;S-16 组 4 片梁的阻尼比则先减后增,从 4.65% 降至 1.41%,而后又增至 5.37%。对比已有研究可知,S-14 组的阻尼比实测规律与文献[7,9,11]的结论是一致的,而 S-16 组则与文献[8]的结论相一致。文献[10]认为,RC 梁 1 阶模态阻尼比随着纵筋锈蚀率的增大而减小,高阶模态阻尼比随着纵筋锈蚀率的增大而增大。通常认为,钢

筋锈蚀后,其表面产生的氧化物会导致钢筋体积膨胀,在混凝土开裂前使得钢筋与混凝土之间的黏结更密实,而当锈胀进一步发展后,钢筋周围的混凝土因承受环向拉力而呈现开裂状态,削弱了钢筋和混

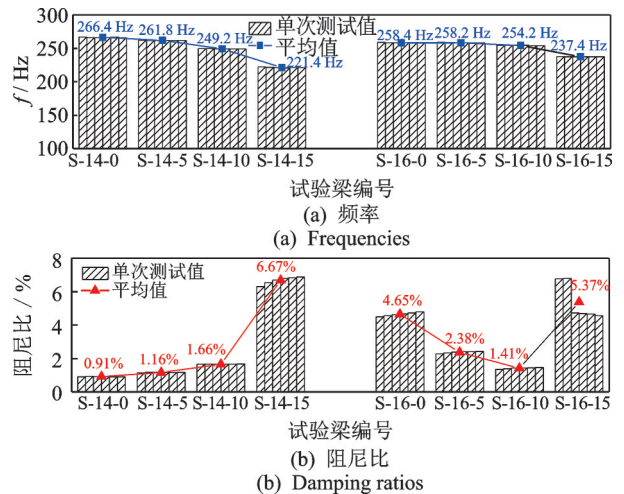


图 8 锈蚀率对模态参数的影响

Fig.8 Effect of corrosion ratio on modal parameters

凝土之间的黏结。因此,锈蚀对RC结构振动特性的影响机理较为复杂。从本试验结果来看,不论是在可重复性和稳定性方面,还是在变化规律性方面,固端梁的振动基频都更加可靠。

2.3 纵筋直径的影响分析

S-14和S-16的受拉纵筋分别是直径为14mm和16mm的HRB400钢筋(纵筋率分别为1.7%和2.2%)。纵筋直径对模态参数的影响如图9所示。由图9(a)可见,在不同纵筋直径下,RC固端梁振动基频的下降规律是一致的,但下降速度明显不同。若定义降幅比为降幅/锈蚀率增量,当纵筋直径为14mm时,固端梁的频率降幅比为2.90;当纵筋直径为16mm时,频率降幅比为1.16。可见,纵筋直径越大,固端梁振动基频对锈蚀的敏感程度越小。在相同锈蚀率下,固端梁的纵筋直径越大,其振动基频下降越缓慢。在无锈状态下,采用不同纵筋直径的固端梁的频率非常接近,直径为14mm的频率甚至略大,因此简单认为“钢筋直径越大,其对梁体截面刚度的贡献也越大”不够科学。由于混凝土材料的离散性,本研究的观测结论还需更多的试验样本来进一步验证。由图9(b)可见,纵筋直径对固端梁阻尼比的影响规律不明显,在2种直径下阻尼比表现出完全不同的变化趋势,文献[10]也认为,阻尼比不能作为一个可靠的指标来表征纵筋锈蚀的影响。

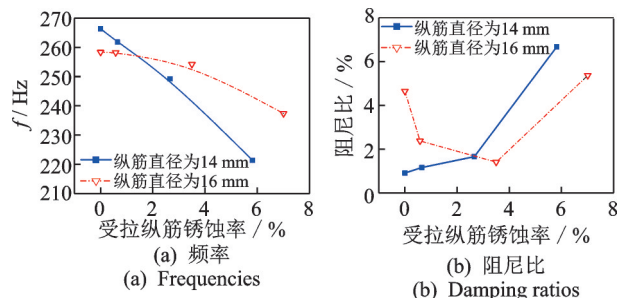


图9 纵筋直径对模态参数的影响

Fig.9 Effect of longitudinal steel diameter on modal parameters

3 荷载与频率的关系

振动测试结束后,对2组梁进行了静力破坏性加载,静力加载方式与结果如图10所示。受限于实验室加载条件,加载前将固端梁重新从混凝土基座中取出,然后按照简支梁4点受力的方式进行加载,如图10(a)所示。由图10(b,c)可看出,2组梁基本都以剪切或剪弯区下缘混凝土沿纵筋劈裂破坏为主,简支梁和固端梁的剪力分布是相同的,但固端梁会承受较大的负弯矩,因此按简支4点加载方式得到的极限荷载不一定能准确对应固端梁的极限承载能力。由于极限荷载与纵筋锈蚀关系密切^[4],而纵筋锈蚀又与振动特性紧密关联,因此探讨极限荷载与振动特性的关系对研究RC结构承载能力劣化及其合理表征有一定的参考价值。

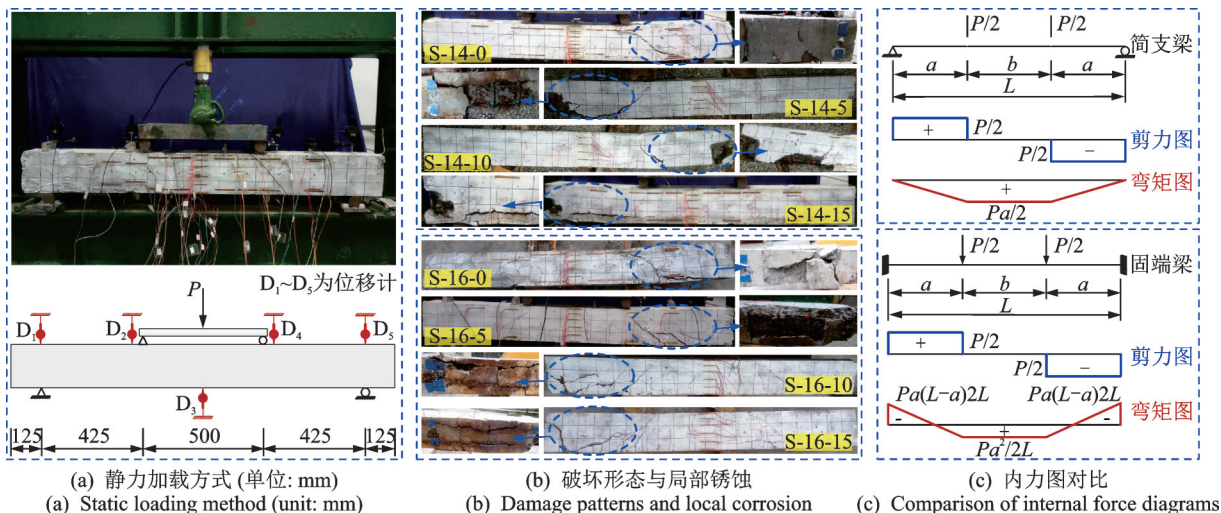


图10 静力加载方式与结果

Fig.10 Static loading pattern and results

荷载与频率的关系分析如图11所示。在图11(a)中,纵坐标“标准化参数”是指锈蚀后的荷载(频率)/未锈蚀时的荷载(频率)。可以看到,随着锈蚀率的增大,2组梁的荷载和频率均下降,但荷载的下

降速度先快后慢,而频率的下降速度先慢后快,显示出较明显的相关性。在图11(b)中, f_c 和 P_c 分别为锈蚀后的频率和荷载, f_0 和 P_0 分别为未锈蚀时的频率和荷载。由图可见,当分别采用 $1-P_c/P_0$ 和 $1-f_c/f_0$

作为横、纵坐标轴,2组梁的荷载和频率显示出更加良好的相关性。采用指数函数进行拟合时,相关性系数达到0.997 3。由于数据样本较小以及支承条件的不对应,RC固端梁荷载与频率的关系还有待进一步验证。

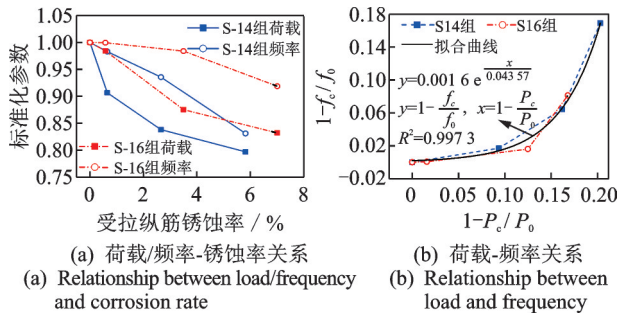


图11 荷载与频率的关系分析
Fig.11 Analysis on relationship between load and frequency

4 截面刚度与频率的关系

截面弯曲刚度的变化是RC梁性能劣化的重要指标之一。随着纵筋锈蚀的发展和锈蚀产物体积的变化,纵筋与混凝土之间的黏结状态首先会变得更紧密,然后随着混凝土开裂而受到削弱,这一过程会导致RC梁的截面刚度发生相应的改变。若忽略纵筋锈蚀所导致的梁体质量变化,则RC梁的振动频率主要由其截面刚度和支承边界条件所决定。

等截面固端梁如图12所示,假设等RC固端梁的计算跨径为L,线质量为m,截面弯曲刚度为EI,梁体振动挠度方程为 $w(x,t) = \varphi(x) \sin(\omega t + \theta)$,其中 $\varphi(x)$ 为满足位移边界条件的近似振型函数,则振动动能为

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L m \dot{w}^2 dx = \frac{1}{2} \omega^2 \cos^2(\omega t + \theta) \int_0^L m \varphi^2(x) dx \quad (2)$$

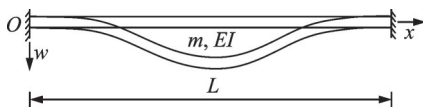


图12 等截面固端梁
Fig.12 Fixed-end beam with constant cross section

势能为

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{1}{2} \sin^2(\omega t + \theta) \int_0^L EI \left[\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \right]^2 dx \quad (3)$$

根据能量守恒原理^[14],有 $T_{\max} = V_{\max}$,则

$$\frac{1}{2} \omega^2 \int_0^L m \varphi^2(x) dx = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left[\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \right]^2 dx \quad (4)$$

根据固端梁的几何和力学边界条件,假设挠曲函数为 $\varphi(x) = A \left(\frac{x^2}{L^2} - 2 \frac{x^3}{L^3} + \frac{x^4}{L^4} \right)$,代入式(4),可得固端梁1阶圆频率为

$$\omega = \frac{22.45}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (5)$$

因此,固端梁1阶振动频率为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{11.225}{\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (6)$$

可以看到,在理想情况下,固端梁的1阶振动频率 $f \propto \sqrt{EI}$ 。对式(6)左、右取平方,然后分别进行微分,则有

$$2f \delta f = \left(\frac{11.225}{\pi L^2} \right)^2 \frac{\delta EI}{m} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7),可得

$$2 \delta f / f = \delta EI / EI \quad (8)$$

由式(8)可知,固端梁截面刚度的变化率理论上是其振动频率变化率的2倍。截面刚度与频率的关系如图13所示,给出了2组梁6次实测值及其平均值的散点图,其中的斜对角实线是通过式(8)绘制的,斜对角虚线表示 $\delta f / f$ 与 $\delta EI / EI$ 的关系偏离式(8) $\pm 10\%$ 的误差界限。由图可见,2组梁由 $\delta f / f$ 和 $\delta EI / EI$ 组成的散点基本都位于斜对角实线上,尤其是S-16组。在S-14组中,部分结果偏离了斜对角实线,但也都在10%的误差界限以内。可见,由受拉纵筋不同锈蚀程度所导致的RC固端梁频率f和截面弯曲刚度EI的变化规律与式(8)的理论结果吻合良好,表明通过振动频率的变幅来表征固端梁截面刚度的改变是可行的。

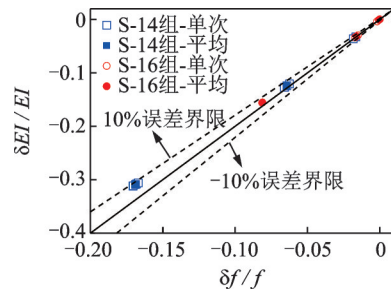


图13 截面刚度与频率的关系
Fig.13 Relationship between section stiffness and frequency

5 结论

1) 交流电虽然会产生有规律的异常峰值,但不会影响频率和阻尼比的实测结果。环境振动对频率

的影响很小,但对阻尼比的影响较大,最大可产生43.62%的偏差。这两种干扰因素都不会改变钢筋锈蚀对固端梁模态参数的影响规律。

2) 对不同锈蚀率下各试验梁的重复试验表明,频率的6次测试结果都非常接近,而阻尼比的6次测试结果则相差较明显,尤其当钢筋锈蚀率较大时,测试偏差可达32.76%,表明固端梁的频率测试在可重复性和结果稳定性方面均优于阻尼比。

3) 随着锈蚀率的增大,固端梁的频率不断下降,S-14和S-16这2组梁的最大降幅分别为16.89%和8.13%,降幅比(降幅/锈蚀率增量)分别为2.90和1.16,表明纵筋直径越小,频率的降幅和降速越大。2组梁的阻尼比变化规律不一致,S-14组随锈蚀率的增大而增大,S-16组则先减后增,表明固端梁阻尼比随锈蚀率的规律性不如频率。

4) 随着锈蚀率的增大,固端梁荷载和频率表现出类似的下降规律,采用 $1-P_c/P_0$ 和 $1-f_c/f_0$ 作为横、纵坐标轴时,荷载和频率表现出良好的指数关系,相关性系数高达0.9973。

5) 固端梁截面刚度 EI 的变化率理论上是其振动频率 f 变化率的2倍,实测结果表明,由钢筋锈蚀所导致的 $\delta f/f$ 与 $\delta EI/EI$ 的关系与理论关系吻合良好,误差在10%以内。

参 考 文 献

- [1] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报(工学版),2002,36(4):27-36,59. JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. State-of-the-art on durability of concrete structures [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(4): 27-36, 59. (in Chinese)
- [2] CAPOZUCCA R. A reflection on the application of vibration tests for the assessment of cracking in PRC/RC beams[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 508-518.
- [3] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2):91-105.
- [4] 赵新. 锈蚀钢筋混凝土梁工作性能的试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
- [5] ZHENG T X, JI T J. An approximate method for determining the static deflection and natural frequency of a cracked beam [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(11):2654-2670.
- [6] BENEDETTI A, PIGNAGNOLI G, TAROZZI M.

Damage identification of cracked reinforced concrete beams through frequency shift[J]. Materials and Structures, 2018, 51(6):1-15.

- [7] 邓志方. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土梁模态参数影响的试验研究[D]. 南宁:广西大学,2013.
- [8] 梁超锋,刘铁军,肖建庄,等. 钢筋及其锈蚀对混凝土构件阻尼的影响[J]. 工程力学,2017,34(3):101-107. LIANG Chaofeng, LIU Tiejun, XIAO Jianzhuang, et al. Effect of reinforcement and corrosion on damping capacity of concrete members [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3):101-107. (in Chinese)
- [9] 高鹏,周建庭,阳珊清,等. 锈蚀固端梁动力特性试验研究[J]. 混凝土,2020,9:15-18. GAO Peng, ZHOU Jianting, YANG Shanqing, et al. Research on the influence of corrosion on the dynamic characteristics of reinforced concrete fixed-end beams [J]. Concrete, 2020, 9:15-18. (in Chinese)
- [10] RAZAK H A, CHOI F C. The effect of corrosion on the natural frequency and modal damping of reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2001, 23(9): 1126-1133.
- [11] 汤红卫,顾炜. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构固有频率和阻尼比影响的试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017,34(6):59-64. TANG Hongwei, GU Wei. Experimental study on effect of reinforcement corrosion on natural frequency and damping ratio of reinforced concrete structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(6):59-64. (in Chinese)
- [12] 刘燕. 基于静动力特性的区段锈蚀梁损伤研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [13] ZHANG Y, CHENG Y, TAN G, et al. Natural frequency response evaluation for RC beams affected by steel corrosion using acceleration sensors [J]. Sensors, 2020, 20(18):1-17.
- [14] 宋一凡. 桥梁结构动力学[M]. 北京:人民交通出版社, 2020:2-4.



第一作者简介:徐略勤,男,1983年7月出生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁抗震与结构动力学。曾发表《Maintaining bridge alignment during seismic events: shear key design and implementation guidelines》(《Journal of Bridge Engineering》2020, Vol.25, No.5)等论文。

E-mail: xulueqin@163.com