

海洋环境下锈裂钢筋混凝土构件截面抗弯刚度识别

吴 瑾¹ 吴胜兴² 程吉昕³

(1.南京航空航天大学土木工程系,江苏 南京 210016;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;
3.连云港大陆桥国际商务投资发展有限公司,江苏 连云港 222001)

摘要 钢筋混凝土结构锈裂后的构件截面刚度是表征锈裂损伤程度的重要指标.根据模态频率变化与弯曲刚度变化的关系,提出了锈裂钢筋混凝土结构构件截面抗弯刚度识别的方法,绘制锈裂损伤后抗弯刚度识别图.根据实测模态频率可以识别出锈裂钢筋混凝土构件抗弯刚度.通过弯曲试验实测锈裂构件抗弯刚度,结果与识别结果吻合较好.

关键词 钢筋锈蚀;抗弯刚度;模态频率;识别;海洋环境

中图分类号 TG172 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2004)05-0569-04

由于混凝土的碱性,混凝土中钢筋表面存在一层稳定的钝化膜,但在海洋环境下,由于氯离子侵蚀,可能破坏钝化膜,导致钢筋锈蚀.钢筋锈蚀体积膨胀使得混凝土保护层开裂或剥落,从而导致结构性能劣化,如降低结构的承载力,减小截面的抗弯刚度及明显削弱结构的耐久性等.钢筋混凝土结构锈裂后的构件截面刚度是表征锈裂损伤程度的重要指标,是计算锈裂钢筋混凝土结构或构件变形的主要参数.钢筋锈蚀引起的混凝土开裂或剥落是沿着构件的纵向,而荷载引起的混凝土开裂是沿着构件的横向,所以两者的刚度变化是完全不同的.混凝土碳化可能发生均匀锈蚀,而氯离子侵蚀可能发生非均匀锈蚀,因此非均匀锈蚀构件截面刚度沿构件长度是变化的,但变刚度构件的变形计算比较复杂.为了应用方便,取构件平均截面刚度作为等效刚度近似计算.目前钢筋混凝土结构锈裂损伤对构件截面抗弯刚度影响的研究较少^[1,2].本文根据模态频率变化与弯曲刚度变化的关系,提出锈裂钢筋混凝土结构构件截面抗弯刚度识别的方法,并通过弯曲试验进行验证.

1 基本理论

由结构动力学,等截面梁弯曲时自由振动微分方程

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

设 $y(x, t) = Y(x)T(t)$,代入式(1)得

$$\frac{EI}{\bar{m}} \cdot \frac{Y^{(4)}(x)}{Y(x)} = - \frac{T^{(2)}(t)}{T(t)} = \omega^2$$

则式(1)分解为两个常微分方程

$$T^{(2)}(t) + \omega^2 T(t) = 0 \quad (2)$$

$$Y^{(4)}(x) - \lambda^4 Y(x) = 0 \quad (3)$$

其中

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 \bar{m}}{EI}}$$

式(2)的解为

$$T(t) = a \sin(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

式(3)的解为

$$Y(x) = C_1 \operatorname{ch} \lambda x + C_2 \operatorname{sh} \lambda x + C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x \quad (5)$$

根据边界条件,可以写出包含待定系数 $C_1 \sim C_4$ 的 4 个齐次方程.为了求得非零解,方程的系数行列式

为零,得到确定 λ 的特征方程.因此各阶模态频率取决于杆件的支承条件(边界条件)、截面刚度、单位长度质量.表1列出不同支承条件下杆件的各阶模态频率^[3].

表1 不同支承条件下构件各阶模态频率

Table 1 Modal frequencies of elements with different supports

支承条件	f_1	f_2	f_3	f_n	解的类型
两端简支	$\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$2\pi\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$\frac{9\pi}{2}\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$\frac{n^2\pi}{2}\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	精确解
两端固定	$3.57\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$9.80\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$19.26\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$\frac{\left(n+\frac{1}{2}\right)^2\pi}{2}\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	近似解
一端固定 一端铰支	$2.45\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$7.95\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$16.58\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$\frac{\left(n+\frac{1}{4}\right)^2\pi}{2}\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	近似解
一端固定 一端自由	$0.56\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$3.51\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$9.82\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$\frac{\left(n-\frac{1}{2}\right)^2\pi}{2}\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	近似解

当结构损伤时,构件截面刚度发生改变,从而引起结构或构件模态频率的改变,因此结构或构件模态频率的变化大小反映结构的损伤程度.两端支承构件的 n 阶模态频率为^[1]

$$f_n = A \sqrt{EI}$$

(6)

式中: E ——弹性模量; I ——截面惯性矩; A ——系数.

由式(6)得

$$f_n^2 = A^2 EI$$

(7)

式(6)两边对 EI 取偏微分

$$2f_n \frac{\partial f_n}{\partial EI} = A^2 \qquad 2f_n \delta f_n = \left(\frac{f_n^2}{EI}\right) \propto EI$$

因此

$$2\left(\frac{1}{f_n}\right) \delta f_n = \left(\frac{1}{EI}\right) \propto EI$$

(8)

根据式(8)可做出弯曲刚度下降与各阶频率减小的关系图线,由实测结构的模态频率可识别出损伤结构构件截面刚度.

2 试 验

2.1 试验概况

试验包括现场试验和室内试验两部分.现场试验是对连云港西大堤钢筋混凝土护栏结构中南侧小柱现场进行原位振动试验,共取4根小柱,其中LYG-1、LYG-2未出现锈裂,作为对比用,LYG-3、LYG-4出现不同程度锈裂.室内试验是从现场拆卸南侧小柱,在试验室做成两端固定构件后进行振动试验,共取3根小柱,MT-1、MT-2、MT-3出现不同程度锈裂.构件截面尺寸50 mm×80 mm,内配1 $\varnothing$ 10钢筋.构件锈裂情况见表2^[4].

表2 试验构件锈裂损伤情况

Table 2 Corrosion damage of tested elements

试验类别	构件代号	最大裂缝宽度/mm	裂缝长度/mm	钢筋锈蚀率/%
现场试验	LYG-3	0.85	350	—
	LYG-4	0.35	150	—
室内试验	MT-1	2.00	10 $\times$ 有剥落)	12.60
	MT-2	0.40	201	9.75
	MT-3	1.00	150	5.75

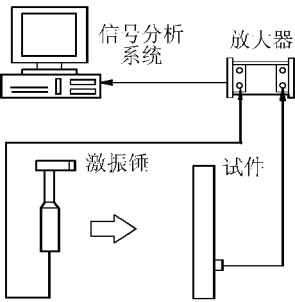


图1 试验装置

Fig.1 Experiment set-up

本试验采用CRASV4.3振动及动态信号分析系统为主要测量设备.图1是测量系统设备连接框图.试验采用单输入方式,激振工具是激振锤,激振信号通过固定在激振锤上的力传感器,经放大器放大后接入动态试验和信号分析系统.结构的响应信号,由固定于结构各个测点上的加速度传感器,经放大器放大后也接入动态试验和信号分析系统.为了提高量测精度,采取以下几个措施^[5-6](a)激振方式.依据测试结构的特点,采用了简单实用的激振锤激振方式,试验中所用的是YDL-1型力传感器激振锤.根据结构的刚度和测试频率范围,激振锤外加了一附加质量.(b)输入、输出信号的采集和放大.首

先确定测试的频率范围.根据理论计算确定测量频率量程为 0 ~ 1 000 Hz ,然后在正式测量前 ,调整通道的量程范围 ,一般使测试信号在量程范围内.力锤为固定的信号输入通道 ,力信号由力传感器采集 ,经放大器放大后接入信号分析系统.结构的响应信号 ,由测点上的 YD 103 型加速度传感器采集 ,经 YE 5858 放大器放大后接入信号分析系统.(c)对测试信号进行抗混滤波、加窗处理(试验中通道加力窗、响应信号加指数窗)以防信号泄漏 ,对信号进行平均处理(试验中的平均次数为 10 次)以降低随机噪声的影响等.试验获得的时域测量信号 ,由动态试验和信号分析系统经抗混滤波、信号的模数转换、数字滤波和傅立叶变换后 ,以数字化的频域信号形式存储于计算机的硬盘中 ,以便模态分析.

2.2 试验模态频率

通过对结构响应信号的采集处理 ,得到结构的频响函数 ,运用模态分析方法获取结构的模态频率.本文采用的是南京汽轮技术开发公司研制的 CRASV 4.3 模态分析软件.分析过程主要包括频响函数的拟合和模态的获取两个部分 ,试验测得的模态频率见表 3.

2.3 构件支承条件

现场试验南侧小柱为预制构件 ,采用砂浆现场拼接安装.现场检查发现 ,小柱在上下扶手中填嵌不密实 ,上下端可能发生位移与转角 ,因此将支承条件模拟为弹性支座.室内试验构件为两端固定.

3 锈裂钢筋混凝土构件截面刚度识别

3.1 截面刚度识别图及识别结果

假定刚度降低 10% ~ 70% ,采用 ANSYS 计算出前三阶模态频率 ,绘制成锈裂构件截面刚度识别图 ,即构件刚度损失与频率变化关系图 ,见图 2.根据表 3 实测频率由图 2 得 :LYG-3 刚度损失 50% ~ 65% ,LYG-4 刚度损失 35% ~ 40% ,MT-1 刚度损失 50% ~ 60% ,MT-2 刚度损失 30% ~ 50% ,MT-3 刚度损失 20% ~ 40% .

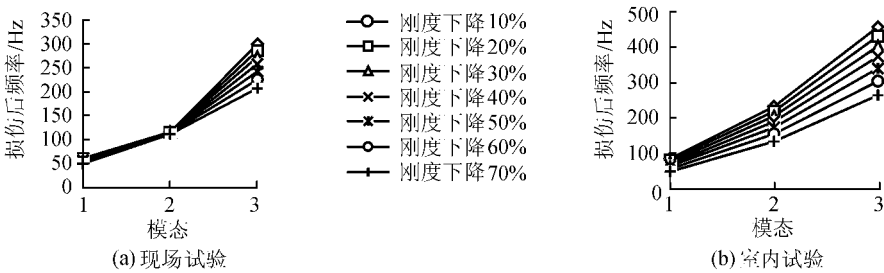


图 2 构件刚度识别

Fig.2 A chart for stiffness identification of components

3.2 识别结果的验证

为了验证锈裂构件刚度识别的结果 ,将室内试验试件的两固定端去掉 ,通过弯曲试验量测跨中挠度 ,反演构件的实际刚度.实测的 MT-1 ,MT-2 ,MT-3 荷载挠度曲线见图 3.由钢筋混凝土基本理论可知 ,当荷载 P 在

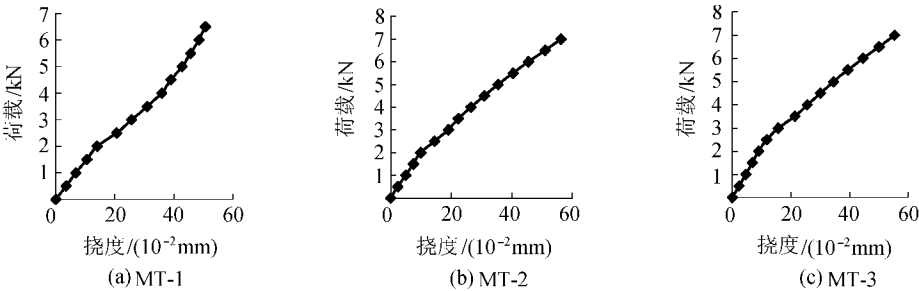


图 3 荷载挠度曲线

Fig.3 Load-deflection curves

$0.3P_U \sim 0.4P_U$ (P_U 为极限荷载)内时,混凝土基本处于弹性阶段,荷载和挠度关系基本为直线.根据图 3,取 $P = 0.3P_U$ 内为近似直线段,由实测挠度按结构力学公式求得构件的刚度实测值,见表 4.表中刚度计算值按未损伤截面求得.

由表 4 可知:MT-1 刚度降低 48.71% ~ 51.53%,MT-2 刚度降低 27.3% ~ 30.2%,MT-3 刚度降低 20.68% ~ 24.14%,这与识别的结果基本一致,从而证明了该方法的正确性与有效性.

4 结 论

根据锈裂损伤后模态频率降低与抗弯刚度降低的关系,绘制锈裂损伤后抗弯刚度识别图,由实测模态频率可以识别出锈裂钢筋混凝土构件抗弯刚度.通过弯曲试验求得构件实测抗弯刚度,证明了该方法的可靠性.该方法可用于海洋环境下锈裂损伤后钢筋混凝土构件抗弯刚度识别.

参考文献:

[1] ABDUL H R, CHIO F C. The effect of corrosion on the natural frequency and modal damping of reinforced concrete beams[J]. Engineering Structures, 2001 23 :1126—1133.

[2] 任宝双,钱家茹,聂建国.在用钢筋混凝土简支桥面梁受弯刚度估算[J].工业建筑, 2001 31(1):13—15.

[3] 奥克松 B,坦福熙 H,约翰逊 O,等.结构振动的图表计算法[M].黄纪文译.北京:机械工业出版社,1992.226—227.

[4] 吴瑾.海洋环境下钢筋混凝土结构锈裂损伤评估研究[D].南京:河海大学,2003.

[5] 左鹤声,彭玉莺.振动试验模态分析[M].北京:中国铁道出版社,1995.233—253.

[6] 傅志方.振动模态分析与参数识别[M].北京:机械工业出版社,1990.84—100.

Identification of sectional flexural stiffness for corroded and cracked reinforced concrete components in marine environment

WU Jin¹, WU Sheng-xing², CHENG Ji-xin³

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
3. Lianyungang Daluqiao International Commercial Affairs and Investment Corporation, Lianyungang 222000, China)

Abstract The sectional flexural stiffness is the important index for assessment of the damage to corroded and cracked reinforced concrete components. In this paper, a method for identification of the sectional flexural stiffness of reinforced concrete components was proposed, and a corresponding diagram for identification was plotted based on the relationship between the variations of modal frequency and flexural stiffness, thus, the flexural stiffness of corroded and cracked reinforced concrete components could be identified according to the measured modal frequency. The flexural stiffness measured with flexural tests was in good agreement with the identified result.

Key words reinforcement corrosion; flexural stiffness; modal frequency; identification; marine environment

表 4 构件刚度实测值与计算值

Table 4 Measured and calculated stiffness of components				
构件名称	荷载 P /kN	挠度实测值 / 10^{-3} mm	刚度实测值 / 10^{10} N·mm ²	刚度降低 /%
MT-1	0.5	35	2.712	50.15
	1.0	68	2.792	48.71
	1.5	106	2.686	50.63
	2.0	144	2.637	51.53
MT-2	0.5	24	3.955	27.30
	1.0	49	3.874	28.79
	1.5	75	3.797	30.20
	2.0	99	3.835	29.50
MT-3	0.5	22	4.315	20.68
	1.0	46	4.127	24.14
	1.5	68	4.188	23.01
	2.0	90	4.219	22.44

注:刚度计算值 $5.44/10^{10}$ N·mm².