

文章编号:1673-2049(2017)06-0059-06

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

汤红卫, 顾 炜

(山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:针对钢筋锈蚀使钢筋混凝土结构的抗震性能和耐久性能退化,并且对结构动力特性产生影响的现象,采用电化学加速锈蚀方法,通过法拉第定律控制锈蚀程度,将钢筋的理论锈蚀率分为5%,10%,15%三个锈蚀阶段,在实验室中模拟了钢筋混凝土梁中钢筋的锈蚀过程。根据悬臂梁的自由振动衰减特性,采用自由衰减法采集了钢筋混凝土梁的固有频率和阻尼比,研究了钢筋锈蚀对钢筋混凝土梁固有频率和阻尼比的影响。结果表明:钢筋锈蚀对钢筋混凝土梁的固有频率和阻尼比有显著影响,钢筋混凝土梁的固有频率随着钢筋锈蚀程度的加深而呈减小趋势,阻尼比随着钢筋锈蚀程度的加深而呈增大趋势,因此阻尼比可以作为损伤指标用于混凝土结构腐蚀损伤检测。

关键词:钢筋混凝土结构;钢筋锈蚀;动力特性;固有频率;阻尼比

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Experimental Study on Effect of Reinforcement Corrosion on Natural Frequency and Damping Ratio of Reinforced Concrete Structures

TANG Hong-wei, GU Wei

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In view of reinforcement corrosion degrading earthquake-resistance performance and durability of reinforced concrete structures and effecting their dynamic properties as well, natural corrosion process of reinforcement was simulated in the laboratory using accelerated electrochemical corrosion technique and controlling corrosion degree with Faraday's Law, and the theoretical corrosion degree of steel is divided into three stages: 5%, 10% and 15%. The effects of reinforcement corrosion on natural frequency and damping ratio of reinforced concrete structures were examined by means of free vibration attenuation characteristics of cantilever beams and the free attenuation method. The results show that reinforcement corrosion has great effects on natural frequency and damping ratio of reinforced concrete beam, the damping ratio increases with the corrosion level while natural frequency decreases. The damping ratio can be used as the damage index for the concrete structure corrosion damage detection.

Key words: reinforced concrete structure; reinforcement corrosion; dynamic property; natural frequency; damping ratio

收稿日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51008182)

作者简介:汤红卫(1965-),男,江苏常州人,教授,E-mail:tanghongwei@sdu.edu.cn。

0 引言

混凝土结构因其节能、经济而成为目前应用较为广泛的结构形式之一,但是由于其材料自身和使用环境的特点,使得混凝土结构存在严重的耐久性问题,给各国带来了巨大的经济损失^[1]。Metha^[2]指出钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的首要原因。钢筋锈蚀导致钢筋截面减小,使混凝土保护层胀裂甚至脱落,削弱钢筋与混凝土之间的黏结性能,使结构的承载能力降低^[3]。当前针对钢筋锈蚀机理及影响因素、锈蚀钢筋的力学性能、锈蚀后钢筋混凝土结构承载能力等方面的研究较多,而对钢筋锈蚀对结构动力特性影响研究相对较少。钢筋锈蚀不仅使结构的承载能力降低,也使结构的刚度发生改变,进而导致结构动力特性发生变化^[4]。结构动力特性的变化可以用于结构健康监测^[5],因而,开展钢筋锈蚀对混凝土结构动力特性影响的研究是十分必要的。

由于在自然条件下钢筋锈蚀是一个漫长的过程,本文采用电化学加速锈蚀方法^[6-7],在实验室中模拟钢筋混凝土梁结构中钢筋的锈蚀过程,然后通过动力试验测量不同锈蚀阶段钢筋混凝土梁的动力响应。根据测量的动力响应数据,计算不同锈蚀阶段钢筋混凝土梁的固有频率和阻尼比。通过对计算结果的比较和分析,得出钢筋锈蚀对钢筋混凝土梁固有频率和阻尼比的影响。

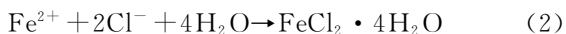
1 理论基础

1.1 钢筋加速锈蚀试验原理

由于在自然条件下混凝土中的钢筋锈蚀周期较长,各种能够加速锈蚀的试验方法不断受到重视^[8]。最常用的是电化学加速锈蚀方法:用钢筋作为阳极,用铜片作为阴极,通过外接电源,从而达到加速锈蚀的目的。

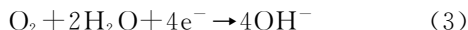
电化学加速锈蚀主要包括以下 4 个过程:

(1) 阳极反应:钢筋中的铁释放电子变成+2 价铁离子,同时生成水溶性氯化铁,使钢筋表面钝化膜被破坏,其反应式为

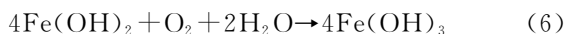


(2) 电子传输:阳极钢筋释放的电子向阴极铜片传送。

(3) 阴极反应:阴极区由混凝土孔隙液中扩散进来的氧气和电解质溶液中的水吸收从阳极钢筋传送过来的电子发生还原反应,其反应式为



(4) 锈产物生成:阳极区生成的 Fe^{2+} 沿着混凝土孔隙向电解质溶液迁移、扩散;阴极区生成的 OH^- 也顺着混凝土孔隙向钢筋表面迁移;然后 OH^- 与 Fe^{2+} 反应生成难溶的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 。与此同时,水溶性氯化铁同样分解成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,并进一步氧化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,其反应式为



钢筋锈蚀程度由其锈蚀深度衡量,而要控制钢筋的锈蚀深度则需要控制锈蚀过程中的电流密度和锈蚀时间。

根据法拉第定律,钢筋的平均锈蚀深度为

$$l = \frac{MI t}{F \gamma} \quad (7)$$

式中: l 为钢筋的锈蚀深度; M 为铁的相对原子质量; I 为锈蚀过程中的电流密度; t 为锈蚀的时间; F 为法拉第常量,其值为 $96\,490 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$; γ 为钢筋的密度,其值为 $7.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

钢筋的锈蚀率计算公式如下

$$\eta = 1 - \frac{(R - 2l)^2}{R^2} \quad (8)$$

式中: η 为钢筋的锈蚀率; R 为钢筋的直径。

1.2 阻尼比的提取

阻尼比的测量方法可以分为时域和频域两大类^[9-10],主要有自由衰减法^[11]、修正的自由衰减法^[12]、半功率带宽法^[13]等,其中自由衰减法因其简便易行而被广泛应用。本文试验采用自由衰减法提取钢筋混凝土梁的阻尼比,其基本原理如下。

单自由度系统有阻尼自由振动的基本方程为

$$m\ddot{y} + c\dot{y}(t) + ky(t) = 0 \quad (9)$$

式中: m 为质量; c 为阻尼系数; k 为刚度; y 为位移。

令 $\omega = \sqrt{k/m}$, 阻尼比 $\zeta = c/(2m\omega)$, 则式(9)可写成

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega\dot{y}(t) + \omega^2 y(t) = 0 \quad (10)$$

在低阻尼或小阻尼情况下,即 $\zeta < 1$ 或 $c < 2m\omega$, 式(10)的解为

$$y(t) = A e^{-\zeta\omega t} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (11)$$

式中: A 为振幅; ω_d 为有阻尼的固有频率; φ 为初相。

图 1 为结构自由振动衰减曲线。若由试验测得此曲线,即可用来确定阻尼比。考虑两相邻幅值,在 t_i 时刻,幅值 $y_i = A e^{-\zeta\omega t_i}$; 经过一个有阻尼自振周期 T_d , 幅值 $y_{i+1} = A e^{-\zeta\omega(t_i + T_d)}$ 。两相邻幅值比的自然

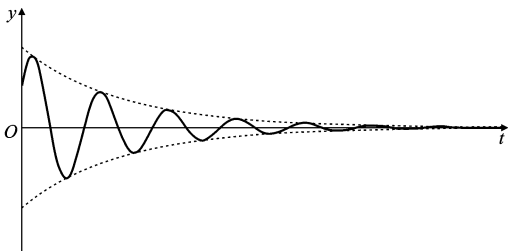


图 1 自由振动衰减曲线

Fig. 1 Decay Curve of Free Vibration

对数称为对数递减率 δ ,即

$$\delta = \ln\left(\frac{y_i}{y_{i+1}}\right) = \zeta \omega T_d = \zeta \omega \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (12)$$

由式(12)可得阻尼比

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{y_i}{y_{i+1}}\right) \sqrt{1-\zeta^2} \quad (13)$$

考虑到实际结构的阻尼比是小于 0.2 的数,取 $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$,则式(13)可简化为

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{y_i}{y_{i+1}}\right) \quad (14)$$

为了获得 ζ 更高的精度和避免偶然因素产生的误差,可以量测相隔 n 个周期的 2 个幅值 y_i 和 y_{i+n} ,可得阻尼比的计算公式为

$$\zeta = \frac{1}{2n\pi} \ln\left(\frac{y_i}{y_{i+n}}\right) \quad (15)$$

2 钢筋混凝土梁动力测试试验

2.1 试件制作

自行设计并制作了 2 根钢筋混凝土 T 形试验梁(I, II 号梁),如图 2 所示。T 形梁总长为 1 350 mm,翼缘长 600 mm,截面尺寸为 600 mm×100 mm,梁肋长 1 250 mm,截面尺寸为 100 mm×100 mm。整个试件中只使用 1 根通长钢筋,钢筋总长为 1 500 mm,其中与混凝土黏结的长度为 1 350 mm。由于试验过程中只锈蚀这根通长钢筋,为了防止箍筋和架立筋对试验结果的影响,所有箍筋和架立筋均采用树脂纤维材料。混凝土等级为 C20,钢筋选用直径为 10 mm 的一级圆钢。

2.2 钢筋加速锈蚀试验

本文采用电化学加速锈蚀方法,采用 30 V 的稳压直流电源,其中阳极与钢筋相连,阴极为铜板。为避免钢筋与水直接接触产生不均匀锈蚀,在钢筋混凝土梁下方放置 2 块枕木。钢筋混凝土梁上方铺 1 层浸水海绵,其作用是促使溶液穿透混凝土达到钢筋的位置。钢筋加速锈蚀装置如图 3 所示。由于裸露在外的钢筋需要连接电线,为避免与水接触,在其

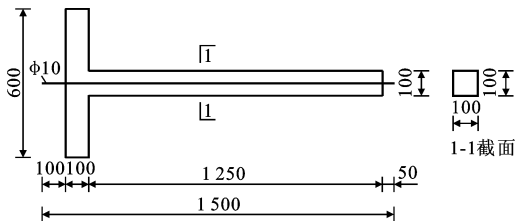


图 2 试验梁尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of Test Beam (Unit:mm)

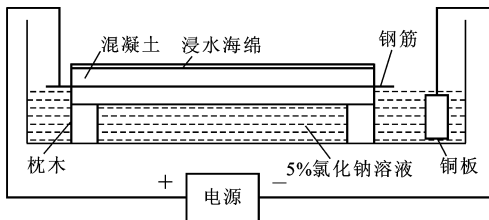


图 3 钢筋加速锈蚀装置

Fig. 3 Accelerated Corrosion Device of Steel Bar

上包裹直径 12 mm 的热缩套,并利用热风机将热缩套紧紧地包裹在钢筋的表面,如图 4 所示。

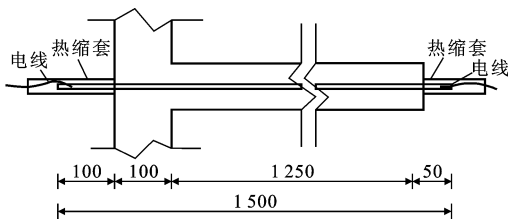


图 4 钢筋外围的处理(单位:mm)

Fig. 4 Peripheral Processing of Steel Bar (Unit:mm)

本文试验分 3 个阶段锈蚀钢筋,分别设钢筋锈蚀率为 5%,10%,15%。根据式(7),(8)计算,得到 3 个锈蚀阶段的电流密度、电流和通电时间,如表 1 所示。

表 1 不同锈蚀阶段的电流密度、电流和通电时间

Tab. 1 Current Density, Current Magnitude and Polarization Time in Different Corrosion Stages

锈蚀率/%	电流密度/(mA·cm ⁻²)	电流/A	通电时间/d
5	0.6	0.28	6.6
10	0.6	0.28	6.7
15	0.6	0.28	6.9

I 号梁各阶段锈蚀完成后的状况如图 5 所示,从图 5 可以看出,随着锈蚀程度的不断加深,钢筋混凝土梁上的裂缝持续开展,直至形成贯穿性裂缝。

2.3 钢筋混凝土梁动力测试

钢筋混凝土梁的动力测试流程如图 6 所示,试验仪器包括小皮锤、加速度传感器、积分电荷放大器、信号采集器等。



(a) $\eta=0\%$



(b) $\eta=5\%$



(c) $\eta=10\%$



(d) $\eta=15\%$

图 5 I 号梁不同锈蚀阶段状况

Fig. 5 Conditions of Beam I in Different Corrosion Stages

试验过程如下:将 T 形梁用 2 个螺栓通过翼缘预留的 2 个孔和地面预留的缝固定于水平地面。试验开始时,通过小皮锤在钢筋混凝土悬臂梁的端部施加一个锤击,利用固定在悬臂梁测点上的加速度传感器测量此时悬臂梁的加速度响应。加速度传感

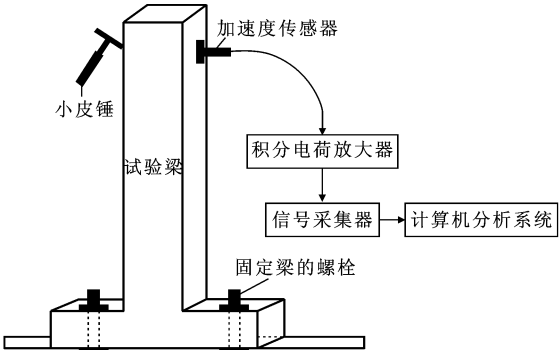


图 6 动力测试流程

Fig. 6 Flow of Dynamic Testing

器与梁端部距离为 100 mm。

3 试验结果分析

3.1 动力测试数据

为方便对构件进行横向比较,在采集梁的加速度响应时,测量时间统一取为 800 ms。I, II 号梁在锈蚀率为 0%, 5%, 10%, 15% 四个锈蚀阶段分别采集 5 组加速度响应,其中 I 号梁在锈蚀率为 0% 的锈蚀阶段 5 组加速度响应曲线如图 7 所示。

3.2 阻尼比

根据公式(15),分别计算出 2 根梁在 4 个锈蚀阶段每次测试的阻尼比,并对 5 次测试结果取平均值,阻尼比的变化趋势见图 8。

从图 8 可以看出, I 号梁和 II 号梁 4 个锈蚀阶段阻尼比的基本趋势是随着锈蚀程度的加深而增大,表明锈蚀损伤会使结构阻尼比增加。分析其中原因可以归为以下 2 点:

(1)开始锈蚀时,由于钢筋的锈蚀使得钢筋的直径慢慢减小,钢筋和混凝土之间的黏结力减小,取而代之的是两者之间的摩擦力,因此钢筋混凝土梁的阻尼比逐渐增大。

(2) I 号梁在锈蚀率为 10% 和 15% 两个锈蚀阶段阻尼比基本保持不变,原因可能为 I 号梁在锈蚀率为 10% 的锈蚀阶段已经形成贯穿性裂缝,继续锈蚀对裂缝开展影响不大,因而阻尼比基本保持不变。

3.3 固有频率

I, II 号梁的固有频率由频谱图得到,固有频率的变化趋势如图 9 所示。

从图 9 可以看出, I 号梁和 II 号梁的固有频率总体呈下降趋势,原因可以归结如下:开始锈蚀时,由于钢筋和混凝土之间出现裂隙,二者间的结合不

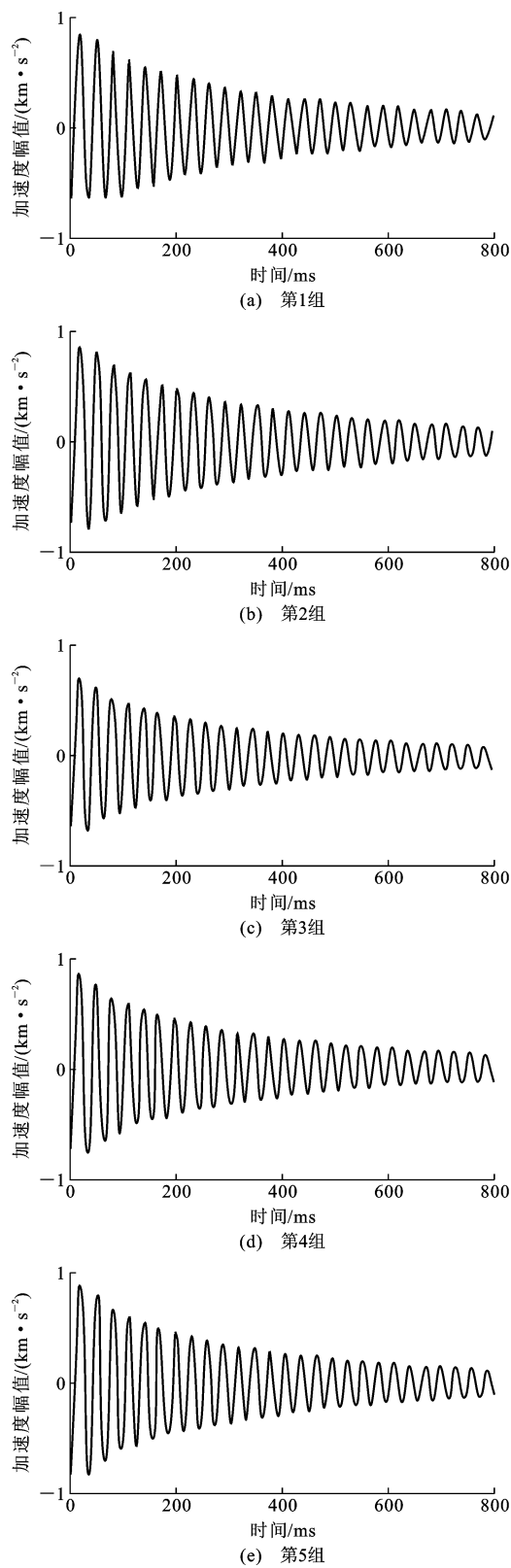


图 7 I 号梁在 0% 锈蚀阶段的加速度响应曲线
Fig. 7 Acceleration Response Curves of Beam I in 0% Corrosion Stage

再紧密,使整个钢筋混凝土梁的刚度降低,从而导致钢筋混凝土梁固有频率减小。

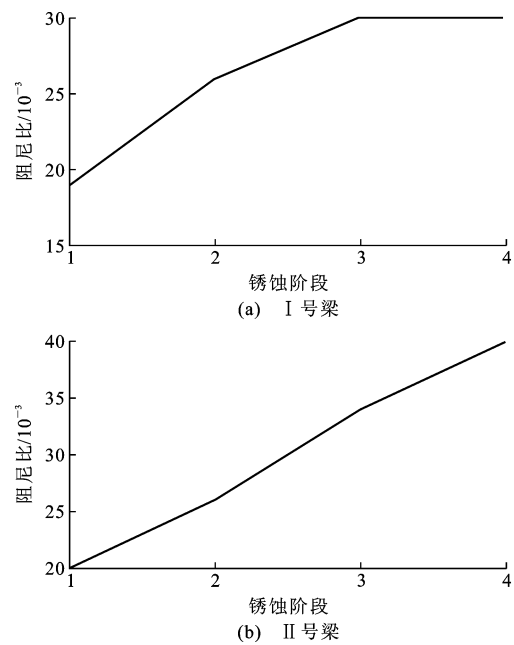


图 8 钢筋混凝土梁阻尼比
Fig. 8 Damping Ratios of Reinforced Concrete Beams

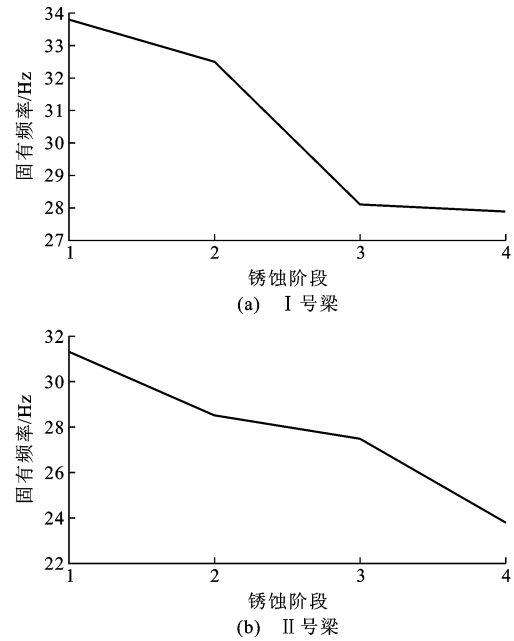


图 9 钢筋混凝土梁固有频率
Fig. 9 Natural Frequencies of Reinforced Concrete Beams

4 结 语

本文研究了钢筋锈蚀对钢筋混凝土梁固有频率和阻尼比的影响。采用电化学加速锈蚀方法获得不同锈蚀阶段的钢筋混凝土梁,并对其做动力测试试验。试验表明,利用钢筋混凝土悬臂梁的自由振动衰减特性测试其固有频率和阻尼比是行之有效的方法。试验发现,钢筋混凝土梁的阻尼比随着钢筋锈

蚀程度的加深呈增大趋势,固有频率随着钢筋锈蚀程度的加深呈减小趋势。钢筋锈蚀对钢筋混凝土梁动力特性有显著影响,由于阻尼比随着锈蚀损伤程度的加深而增大,可以推断阻尼比能作为损伤指标用于混凝土结构腐蚀损伤检测。

参考文献:

References:

- [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):371-380,403.
JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. State-of-the-art on Durability of Concrete Structures[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2002, 36(4): 371-380,403.
- [2] METHA P K. Durability of Concrete — Fifty Years of Progress[C]//ACI. Durability of Concrete: Second International Conference. Montreal: ACI, 1991: 1-31.
- [3] 惠云玲,李 荣,林志伸,等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑,1997,27(6):14-18,57.
HUI Yun-ling, LI Rong, LIN Zhi-shen, et al. Experimental Studies on the Property Before and After Corrosion of Rebars in Basic Concrete Members[J]. Industrial Construction, 1997, 27(6): 14-18, 57.
- [4] 曾 力,郭院成,张 彬. 部分锈蚀钢筋混凝土结构动力特性的数值分析[J]. 世界地震工程,2009,25(1):12-15.
ZENG Li, GUO Yuan-cheng, ZHANG Bin. Numerical Analysis of Dynamic Characteristics of Partly Corroded Reinforced Concrete Structures[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(1): 12-15.
- [5] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [6] AL-SULAIMANI G J, KALEEMULLAH M, BASUNBUL I A. Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members[J]. Structural Journal, 1990, 87(2): 220-231.
- [7] ALMUSALLAM A A, AL-GAHTANI A S, AZIZ A R, et al. Effect of Reinforcement Corrosion on Flexural Behavior of Concrete Slabs[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(3): 123-127.
- [8] 李 果,戴靠山,袁迎曙. 钢筋混凝土耐久性实验方法研究[J]. 淮海工学院学报:自然科学版,2002,11(3):56-59.
LI Guo, DAI Kao-shan, YUAN Ying-shu. A Study on the Experimental Methods for the Durability Performance of Reinforced Concrete[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Science Edition, 2002, 11(3): 56-59.
- [9] JEARY A P. Damping in Structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 72: 345-355.
- [10] STASZEWSKI W J. Identification of Damping in MD-OF Systems Using Time-scale Decomposition [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 203(2): 283-305.
- [11] CHOPRA A K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001.
- [12] HUANG F L, WANG X M, CHEN Z Q, et al. A New Approach to Identification of Structural Damping Ratios[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(1): 144-153.
- [13] BERT C W. Material Damping: An Introductory Review of Mathematic Measures and Experimental Technique[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 29(2): 129-153.