

文章编号:1007-9629(2011)06-0839-05

配筋对钢筋混凝土阻尼性能的影响

梁超锋¹, 刘铁军², 邹笃建²

(1. 绍兴文理学院 土木工程系, 浙江 绍兴 312000; 2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 采用混凝土的 Kelvin 阻尼模型和复阻尼模型, 对钢筋混凝土阻尼参数进行了分析, 推导得到了弹性阶段弯曲振动时钢筋混凝土阻尼性能的理论折减系数. 研究了弯曲振动时钢筋混凝土损耗因子与配筋率、激励频率间的关系. 结果表明: 钢筋混凝土损耗因子随配筋率的增加和激励频率的提高而下降, 且初始下降较快, 而后渐趋平缓. 将试验数据与理论折减系数进行对比分析, 发现在配筋率较高时, 理论折减系数与实测阻尼变化趋势接近, 而在配筋率较低时, 由于未考虑素混凝土的阻尼性能与激励频率的关系, 两者间存在一定的偏差.

关键词: 配筋; 阻尼模型; 损耗因子; 理论折减系数

中图分类号: TU528.571 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.023

Effect of Bar Arrangement on Damping Behavior of Reinforced Concrete

LIANG Chao-feng¹, LIU Tie-jun², ZOU Du-jian²

(1. Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Damping parameters of material and structure are of great influence on structural response and damage. It is necessary to investigate the effects of steel bar on the damping behavior of reinforced concrete. On the basis of Kelvin damping model and complex damping model, the dynamical parameters analysis of material damping was carried out to obtain the theoretical reduction factor of damping capacity of the reinforced concrete when the reinforced concrete beam was on bending vibration in the elastic stage. The experimental investigation was carried out to study the relationships among loss tangent, excitation frequency and reinforcement ratio. The experimental results show that the loss tangent of material is decreased with the increasing reinforcement ratio and excitation frequency. The initial decrease is rapid, and then become smooth. In addition, the comparative analysis was done among experimental results, numerical results and theoretical reduction factor. It is found that the theoretical reduction factor is close to measured damping value when the reinforcement ratio is high. However, when the reinforcement ratio is low, there are some deviations between theoretical reduction factor and measured damping value due to ignoring the contribution of plain concrete materials.

Key words: bar arrangement; materials' damping model; loss tangent; theoretical reduction factor

阻尼反映了材料或结构的耗能能力, 对结构的振动反应尤其是共振反应及结构损伤有重要的影响, 因而材料和结构阻尼参数的合理取值十分重要. 结构阻尼的取值, 需要考虑材料阻尼性能. 混凝土是

收稿日期: 2010-08-23; 修订日期: 2011-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878070); 国家自然科学基金重点资助项目(50938001); 广东省自然科学基金资助项目(9151064101000066); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1110184)

第一作者: 梁超锋(1980—), 男, 浙江绍兴人, 绍兴文理学院讲师, 硕士. E-mail: liangchaofeng@zscas.edu.cn

通信作者: 刘铁军(1976—), 男, 内蒙古包头人, 哈尔滨工业大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: liutiejun@hit.edu.cn

土木工程广泛应用的建筑材料,且通常与钢筋协同工作.尽管有不少学者在混凝土材料的阻尼性能、影响因素、阻尼增强方法、阻尼测试技术等方面进行了研究^[1-4],但在钢筋对混凝土阻尼性能的影响规律方面研究较少.Wen 等^[5]研究了钢筋及钢筋的表面处理对水泥砂浆阻尼能力的影响;石建军等^[6]研究表明,钢筋对混凝土阻尼性能有显著的影响,随配筋率增加而降低,试件配筋率的变化对阻尼比影响不大;文捷等^[7]通过数值分析表明,在相同应力幅值下,钢筋混凝土轴向振动单位体积耗能随配筋率增加而降低;Razak 等^[8]研究了腐蚀对钢筋混凝土梁自振频率和模态阻尼比的影响,发现钢筋的凹凸与锈蚀可增加阻尼比.

本文采用混凝土的 Kelvin 阻尼模型和复阻尼模型,通过动力学分析,得到了弹性阶段钢筋混凝土梁弯曲振动阻尼性能的理论折减系数;试验研究了不同配筋率对混凝土损耗因子的影响;基于试验数据,对比分析了钢筋对混凝土阻尼性能的影响规律.

1 混凝土的 2 种阻尼模型

混凝土尤其是阻尼增强混凝土,是一种既具有弹性固体性质且又表现出黏性流体特征的黏弹性材料,可用以下 2 种阻尼模型来描述.

1.1 Kelvin 阻尼模型

$$\sigma_c = E_c \epsilon + \mu_c \dot{\epsilon} \quad (1)$$

式中: E_c 为混凝土的弹性模量(Pa); μ_c 为混凝土的黏滞系数(Pa·s); ϵ 为混凝土的正应变; $\dot{\epsilon}$ 为混凝土的正应变率(s^{-1}); σ_c 为混凝土的正应力(Pa).

1.2 复阻尼模型

$$\sigma_c = E^* \epsilon = (E_c + iE_c'')\epsilon = (1 + i\eta)E_c \epsilon \quad (2)$$

式中: E^* 、 E_c 、 E_c'' 分别为混凝土的复模量(Pa),弹性模量(Pa),损耗模量(Pa); η 为混凝土的损耗因子, $\eta = E_c''/E_c$.

2 配筋对混凝土阻尼性能影响的理论推导

2.1 配筋对弯曲振动混凝土损耗因子的影响

以钢筋混凝土简支梁跨中受简谐集中力为例进行理论推导.

2.1.1 结构模型与基本假设

结构模型如图 1,梁的宽×高×长为 $b \times h \times l$,在梁跨中施加一简谐激励力.

基本假设:(1)简支梁均质且各向同性;(2)简支梁处于弹性小变形阶段,混凝土材料与钢筋间黏结完好;(3)简支梁 $l/h > 10$,忽略剪切变形影响.

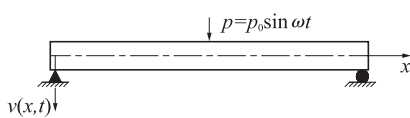


图 1 三点弯曲梁

Fig. 1 Three-point bending beam

2.1.2 本构方程

考虑简支梁处于弹性小变形阶段,钢筋的应力-应变关系为线性,忽略其阻尼耗能,故钢筋的本构方程为:

$$\sigma_s = E_s \epsilon \quad (3)$$

式中: σ_s 为钢筋的正应力(Pa); E_s 为钢筋的弹性模量(Pa).

2.1.3 变形方程

根据材料力学理论,弹性小变形时:

$$\epsilon(x, z, t) = -z v''(x, t) \quad (4)$$

式中: $\epsilon(x, z, t)$ 为 t 时刻 x 截面处距中性轴坐标为 z 点处的正应变; $v''(x, t)$ 为梁振动位移 $v(x, t)$ 对 x 的二阶导数.

2.1.4 物理方程

将式(2)~(4)代入下式:

$$M(x, t) = \int_{A_c} \sigma_c(x, z, t) z dA_c + \int_{A_s} \sigma_s(x, z, t) z dA_s \quad (5)$$

式中: $M(x, t)$ 为 t 时刻位置 x 处的截面弯矩(N·m); A_c 、 A_s 分别为梁在位置 x 处混凝土横截面面积(m^2),钢筋的横截面面积(m^2).

整理得:

$$-[(E_c I_c + E_s I_s) + i\eta E_c I_c] \times v''(x, t) = M(x, t) \quad (6)$$

将式(1),(3),(4)代入式(5),整理得:

$$-(E_c I_c + E_s I_s) v''(x, t) - \mu_c I_c \dot{v}''(x, t) = M(x, t) \quad (7)$$

式中: $I_c = \int_{A_c} z^2 dA_c$ 为混凝土截面惯性矩(m^4); $I_s = \int_{A_s} z^2 dA_s$ 为钢筋对中性轴的惯性矩(m^4); $\dot{v}''(x, t)$ 为 $v''(x, t)$ 关于时间 t 的一阶导数.

2.1.5 动力学方程

取梁微段 dx ,受力分析如图 2(其中 Q 表示剪力),令 $E_c I_c + E_s I_s = E_e I_e$, $\bar{\eta} = \eta \theta$, $\theta = E_c I_c / E_e I_e$,由受力平衡,并考虑式(6),整理得三点弯曲梁复阻尼振动方程为:

$$\bar{m} \ddot{v}(x, t) + E_e I_e (1 + i\bar{\eta}) \times v^{(4)}(x, t) = p(x, t) \quad (8)$$

式中: $\bar{m}$ 为梁的线质量(kg/m); $v^{(4)}(x,t)$ 为梁振动位移对 x 的四阶导数(m^{-3}); $\ddot{v}(x,t)$, $p(x,t)$ 分别为 t 时刻位置 x 处梁振动位移对时间的二阶导数(m/s^2),梁上线荷载(N/m)。

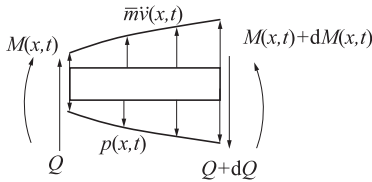


图 2 梁微段受力分析

由图 2 受力平衡,并考虑式(7),整理得三点弯曲梁 Kelvin 阻尼振动方程:

$$\bar{m} \ddot{v}(x,t) + \mu_c I_c \dot{v}^{(4)}(x,t) + E_c I_c v^{(4)}(x,t) = p(x,t) \tag{9}$$

2.1.6 配筋对弯曲振动混凝土损耗因子的影响

求解三点弯曲梁复阻尼振动方程(8)得:

$$\tilde{\eta} = \eta\theta = \frac{\eta E_c I_c}{E_c I_c + E_s I_s} = \tan \delta_1 \tag{10}$$
$$E_c'' = \frac{2l^3 p_0 \sin \delta_1}{\pi^4 I_c y_0} \tag{11}$$

式中: p_0, y_0 分别为梁跨中简谐激励力幅值(N),稳态位移反应幅值(m); δ_1 为梁稳态位移反应滞后激励力的相位角。

由式(10)可知,钢筋混凝土复合损耗因子 $\tilde{\eta}$ 与素混凝土损耗因子 η 的比值为 θ (即理论折减系数),其数值小于 1,表明钢筋使混凝土的阻尼性能下降. 尽管钢筋的存在并不影响损耗模量 E_c'' 的表达式,但会使梁的刚度增加, y_0 减小, $\sin \delta_1$ 减小,在其他参数不变的情况下, $E_c'' = \tilde{\eta} E_c$ 也减小,即梁往复振动一周的耗能减小。

2.2 配筋对弯曲振动混凝土试件阻尼比的影响

三点弯曲梁 Kelvin 阻尼振动方程(9)的振型分解法求解可参考文献[9]. 设梁的振动位移 $v(x,t) = \sum_{i=1}^n T_i(t) X_i(x)$,其中 $T_i(t)$ 为与时间 t 相关的第 i

个广义坐标, $X_i(x)$ 为与位置 x 相关的第 i 阶振型(m). 将式(9)两边同乘振型 $X_j(x)$,并沿梁长积分,考虑振型的正交性,整理得:

$$\ddot{T}_j + \frac{\mu_c I_c}{E_c I_c} \omega_j^2 \dot{T}_j + \omega_j^2 T_j = \int_0^l p(x,t) X_j(x) dx / 0.5 \bar{m} l \tag{12}$$

式中: ω_j 为钢筋混凝土试件第 j 阶自振圆频率; $T_j, \dot{T}_j, \ddot{T}_j$ 分别为第 j 个广义坐标及其对时间 t 的一阶和二阶导数。

令 $\mu_c I_c \omega_j^2 / E_c I_c = 2\tilde{\xi}_j \omega_j$,其中 $\tilde{\xi}_j$ 为钢筋混凝土试件第 j 阶阻尼比,则:

$$2\tilde{\xi}_j = \mu_c I_c \omega_j / E_c I_c \tag{13}$$

将文献[10]中的关系式 $\mu_c = \eta E_c / \omega_j$ 代入式(13)得:

$$2\tilde{\xi}_j = \eta\theta = \tilde{\eta} \tag{14}$$

$$\tilde{\xi}_j = \xi_j \theta \tag{15}$$

式中: ξ_j 为素混凝土试件第 j 阶阻尼比。

由式(15)可知,钢筋混凝土受弯试件 $\tilde{\xi}_j$ 与相应素混凝土受弯试件 ξ_j 的比值等于理论折减系数 θ 。

3 配筋对混凝土阻尼性能的影响及对比分析

3.1 配筋对弯曲振动混凝土损耗因子的影响

3.1.1 原材料

本试验采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥;砂子为中砂,Ⅱ区级配;石子粒径为 5~10 mm,连续级配. 单位体积混凝土中水泥 480 kg,水 200 kg,砂 638 kg,石子 1 042 kg。

3.1.2 试件设计

考虑三点弯曲梁式材料阻尼测试装置[4]的要求以及规范对钢筋间距、配筋率的要求,设计试件尺寸为 100 mm×100 mm×1 200 mm,采用 HPB235 钢筋,配筋形式、位置及试件编号 A1~A3 见图 3,每组试件 2 根。

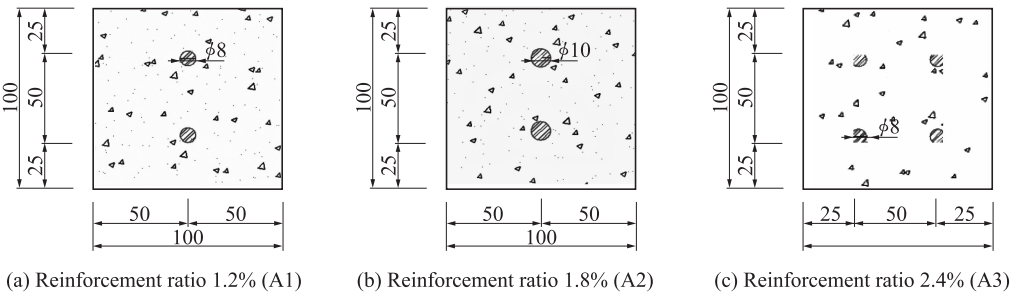


图 3 试件配筋图

Fig. 3 Bar arrangement of specimens(size: mm)

3.1.3 试验结果

在混凝土阻尼测试过程中,由激振器在简支梁跨中施加交变力,由非接触式激光位移传感器测量梁中点的位移信号,由力传感器测量交变力信号,再由数据采集系统将这些信号自动保存于计算机,经数据处理可得位移滞后于力的相位角 δ_1 及相应的损耗因子 $\bar{\eta}$. 测试数据取 2 根试件的平均值,测试结果见图 4,5.

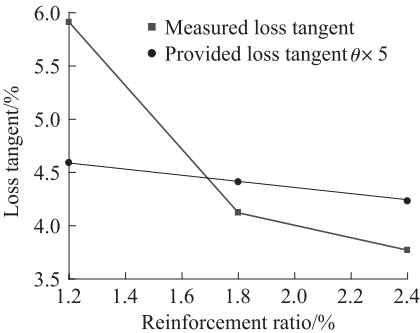


图 4 钢筋混凝土 $\bar{\eta}$ 与配筋率的关系

Fig. 4 Relationship between loss tangent and reinforcement ratio at test frequency 1.0 Hz

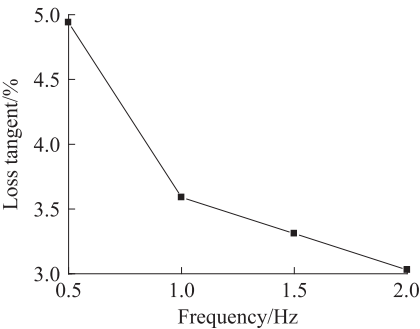


图 5 试件 A3 的 $\bar{\eta}$ 与激励频率的关系

Fig. 5 Relationship between loss tangent and excitation frequency of member A3

由图 4 可见,纵筋的变化对钢筋混凝土损耗因子影响明显,当配筋率 ρ (钢筋截面面积与试件横截面面积之比) 为 1.2%~1.8% 时,损耗因子下降较快,而后趋于平缓. 由图 5 可见,钢筋混凝土损耗因子随激励频率的提高而降低,且在较低频率时下降较快,而后渐趋平缓,其影响规律与配筋率的影响规律类似.

由式(10)可知,弯曲振动钢筋混凝土的损耗因子 $\bar{\eta} = \eta\theta$, 而 θ 与钢筋的抗弯刚度有关. 经计算,试件 A1, A2, A3 的 θ 分别为 0.918, 0.883, 0.847. 假设素混凝土的损耗因子为 0.05, 则 $\bar{\eta}$ ($=0.05\theta$) 随配筋率的变化大致呈线性下降 (见图 4), 在配筋率较高时,其下降趋势与实测结果接近,在配筋率较低时存在一定偏差. 分析其原因,可能是由于假设素混凝土

损耗因子为定值 ($\eta=0.05$) 所致,事实上,损耗因子还与频率相关 (见图 5). 随配筋率的增加,不仅 θ 减小,而且还提高了试件频率,同时也使素混凝土本身的损耗因子下降. 综合考虑 η, θ 的变化,可得到比较理想的 $\bar{\eta}$ 随配筋率的变化规律.

3.2 对比分析配筋率对弯曲振动试件阻尼比的影响

文献[6]采用自由振动衰减法对钢筋混凝土进行了阻尼值试验,得到了不同配筋率对钢筋混凝土阻尼比的影响规律. 樊海涛等^[11]利用文献[6]中的试验数据,经过线性拟合,得到了如下表达式:

$$\xi_{\rho} = (1 - 0.072\rho)\xi_{\rho_0} = \lambda\xi_{\rho_0} \tag{16}$$

式中: ξ_{ρ} 为配筋率为 ρ 时钢筋混凝土的阻尼比; ξ_{ρ_0} 为素混凝土的阻尼比; $\lambda = 1 - 0.072\rho$ 为纵筋配筋率对钢筋混凝土阻尼比的折减系数.

θ, λ 及实测阻尼比变化趋势 δ (实测阻尼比除以 1.89) 与配筋率关系见图 6. 由图 6 可见, θ 随配筋率的提高呈线性下降,且与 λ 的偏差较小; 在配筋率较高 ($\rho \geq 2\%$) 时, θ 与 δ 接近, 在配筋率较低 ($\rho \approx 1\%$) 时,由于阻尼比随配筋率下降较快,偏差较大,类似于损耗因子与配筋率的关系.

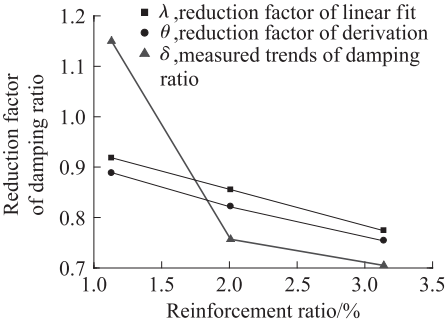


图 6 阻尼比折减系数与配筋率的关系

Fig. 6 Relationship between reduction factor of damping ratio and reinforcement ratio

4 结论

(1)通过动力学分析,得到了弹性阶段弯曲振动钢筋混凝土阻尼性能的理论折减系数,该系数表明配筋会导致试件刚度增加,从而引起阻尼性能的下降.

(2)随着配筋率的增加,钢筋混凝土损耗因子逐渐减小,且在配筋率低时减幅较大,而后渐趋稳定. 随激励频率的增加,钢筋混凝土损耗因子逐渐减小,初始减幅较大,而后渐趋稳定.

(3)钢筋混凝土阻尼性能的理论折减系数随配筋率的增加大致呈线性下降,在配筋率较高时,与实测阻尼性能变化趋势接近,但在配筋率较低时,偏差较大.

参考文献:

[1] CHUNG D D L. Structural composite materials tailored for damping[J]. Journal of Alloys and Compounds,2003,355(1): 216-223.

[2] OU Jin-ping, LIU Tie-jun, LI Ji-long. Dynamic and seismic property experiments of high damping concrete and its frame models[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Master,2008,23(1):1-6.

[3] 柯国军,郭长青,胡绍全. 混凝土阻尼比研究[J]. 建筑材料学报,2004,7(1):35-40.

KE Guo-jun, GUO Chang-qing, HU Shao-quan. Study on the damping ratio of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004,7(1):35-40. (in Chinese)

[4] 欧进萍,刘铁军,梁超锋. 复合纤维增强混凝土阻尼测试装置开发与试验研究[J]. 实验力学,2006,21(4):403-409.

OU Jin-ping, LIU Tie-jun, LIANG Chao-feng. Development of damping measuring instrument and experimental research for hybrid fiber reinforced concretes[J]. Journal of Experimental Mechanics,2006,21(4):403-409. (in Chinese)

[5] WEN Si-hai, CHUNG D D L. Enhancing the vibration reduction ability of concrete by using steel reinforcement and steel surface treatments[J]. Cement and Concrete Research,2000, 30(2):327-330.

[6] 石建军,胡绍全,柯国军. 钢筋混凝土材料阻尼值的实验研究[J]. 四川建筑科学研究,2003,29(3):14-15.

SHI Jian-jun, HU Shao-quan, KE Guo-jun. Experimental research on damping of reinforced concrete[J]. Building Science Research of Sichuan,2003,29(3):14-15. (in Chinese)

[7] 文捷,王元丰. 钢筋混凝土轴压构件材料阻尼计算及应用公式[J]. 振动与冲击,2007,26(6):14-16.

WEN Jie, WANG Yuan-feng. Computation and formula for material damping of concrete components under axial cycle load[J]. Journal of Vibration and Shock,2007,26(6):14-16. (in Chinese)

[8] 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.

[9] 梁超锋,刘铁军. 混凝土材料粘滞系数的测试技术及试验研究[J]. 混凝土,2008(3):45-47.

LIANG Chao-feng, LIU Tie-jun. Testing technique and experimental research on concrete's viscous coefficient[J]. Concrete,2008(3):45-47. (in Chinese)

[10] 梁超锋,欧进萍. 结构阻尼与材料阻尼的关系[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(1):49-55.

LIANG Chao-feng, OU Jin-ping. Relationship between structural damping and material damping[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 49-55. (in Chinese)

[11] 樊海涛,何益斌,肖宏彬. 钢筋混凝土建筑非线性阻尼性能及阻尼比表达式研究[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(3): 85-90.

FAN Hai-tao, HE Yi-bin, XIAO Hong-bin. Study on non-linear damping performance and damping ratio formula of reinforced concrete buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2005,25(3):85-90. (in Chinese)