

混凝土梁桥动力特性对耐久性指标的灵敏度

张立业, 孙利民

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 根据简支梁的振动频率和振型函数, 建立了基于监测信息条件下的可靠度功能函数. 采用可靠性的灵敏度分析方法, 研究材料参数和截面几何参数对混凝土梁桥振动频率的影响. 理论分析表明, 振动频率对钢筋弹性模量的灵敏度低于对混凝土弹性模量的灵敏度, 对混凝土截面惯性矩的灵敏度低于对钢筋截面惯性矩的灵敏度. 算例表明, 振动频率对钢筋腐蚀的灵敏度高于对跨中损伤的灵敏度; 当钢筋腐蚀程度和跨中损伤程度分别为 5%, 10%, 15% 和 20% 时, 钢筋腐蚀引起的 1 阶振动频率变化率是跨中损伤引起的 1 阶振动频率变化率的 1.94, 1.85, 1.80 和 1.74 倍.

关键词: 梁桥; 频率; 振型; 钢筋腐蚀; 损伤

中图分类号: U447

文献标志码: A

Sensitivity of Concrete Girder Bridge Dynamic Behaviors on Durability Index

ZHANG Liye, SUN Limin

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to frequency of vibration and vibration mode function of simply supported beam, the reliability functional function was established based on monitoring information. The reliability sensibility analysis method was used to study the influence of materials parameters and cross section geometry parameters on frequency of vibration. Theoretical analysis shows that the sensitivity of frequency of vibration on the reinforcement elastic modulus is lower than that on the concrete elastic modulus. The sensitivity of frequency of vibration on the moment of inertia of cross-section of concrete is lower than that on the moment of inertia of cross-section of reinforcement. The numerical example demonstrates that the sensitivity of frequency of vibration on the reinforcement corrosion is higher than that on the mid-span damage. When the reinforcement corrosion degree and the damage severity are 5%, 10%, 15% and 20%

respectively, the reinforcement corrosion caused by the first-order frequency of vibration variation rate are 1.94 times, 1.85 times, 1.80 times and 1.74 times as much as that caused by mid-span damage of the first-order frequency of vibration variation rate.

Key words: girder bridge; frequency of vibration; mode shapes; reinforcement corrosion; damage

受桥梁结构使用时间延长, 北方地区道路上大量使用除冰盐, 海洋环境下氯离子侵蚀等的影响, 混凝土桥梁结构中的钢筋腐蚀不断加剧. 研究表明: 钢筋腐蚀后腐蚀物体积将膨胀 2~4 倍, 导致承载能力急剧下降. 很多学者对混凝土桥梁结构的耐久性能进行了研究, 尤其是在钢筋的腐蚀机理^[1]、腐蚀条件下的钢筋混凝土本构关系方面, 研究都比较深入. 金伟良等^[2]通过“电渗-恒电流-干湿循环”的加速锈蚀方法, 研究了持续荷载与氯离子作用下钢筋混凝土梁的力学性能, 表明随着持续荷载的增加, 钢筋的平均锈蚀率提高, 梁的极限承载能力下降. 周海俊等^[3]建立了混凝土梁桥在锈蚀疲劳作用下的结构抗力退化模型, 并指出在分析混凝土梁桥可靠度时, 应考虑车辆反复作用对结构抗力退化的影响. 田浩等^[4]研究了混凝土碳化和钢筋锈蚀的发展规律等.

桥梁结构的健康监测与检测需要进行动力测量, 识别桥梁结构的模态参数, 进而对桥梁损伤程度和可靠度进行评估^[5-6]. 国内外在基于模态参数的桥梁结构损伤诊断方法方面的研究已经比较成熟^[7-8], 主要包括基于频率的诊断方法、基于振型的诊断方法以及基于频率和振型综合的诊断方法. 然而, 结构的振动频率往往受到环境等因素的影响^[9], 但目前还缺乏有关桥梁结构模态参数长期性能演化规律的研究成果, 对影响混凝土桥梁结构模态参数的耐久

收稿日期: 2014-11-10

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036305); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ11B01)

第一作者: 张立业(1981—), 男, 博士后, 工学博士, 主要研究方向为结构健康监测与可靠度. E-mail: zhangliye@tongji.edu.cn

通讯作者: 孙利民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构健康监测与结构振动控制.

E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

性指标的敏感因素研究不足,在利用模态参数进行损伤诊断和状态评估时,无法考虑结构耐久性的影响,使动力测量得到的模态参数在桥梁结构健康监测的应用上受到了限制。

本文根据简支梁的振动频率及振型函数,基于可靠度理论及健康监测信息,建立了混凝土梁桥结构耐久性的功能函数,并对功能函数进行灵敏度分析,得出影响混凝土梁桥结构耐久性的各基本变量的灵敏度.借助有限元方法,分析混凝土梁桥中钢筋腐蚀及跨中损伤时的模态参数,发现混凝土梁桥结构中钢筋腐蚀比跨中损伤对振动频率更为敏感,为桥梁结构健康监测时,采用模态参数进行损伤诊断和状态评估提供了参考依据。

1 混凝土梁桥结构耐久性的功能函数

混凝土梁桥结构中钢筋腐蚀使钢筋的有效面积减少,腐蚀物体积膨胀使混凝土结构开裂,加速钢筋腐蚀并使混凝土结构的承载能力降低^[10-11].钢筋腐蚀同样会引起混凝土结构动力参数的变化.为研究钢筋腐蚀对混凝土梁桥结构动力参数的影响,由动力分析可知,简支梁的振动频率和振型函数分别为

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{EI/\bar{m}L^4} \quad (1)$$

$$\phi_n(x) = A_n \sin(n\pi x/L) \quad (2)$$

式中: ω_n 为第 n 阶频率; E 为弹性模量; I 为截面惯性矩; \bar{m} 为单位长度的质量; L 为梁长; $\phi_n(x)$ 为第 n 阶振型函数; A_n 为由初始条件确定的常数。

在对既有混凝土梁桥结构进行健康监测或检测时,测量的振动频率和振型函数可表示为

$$\omega_{Mn} = n^2 \pi^2 \sqrt{E_M I_M / \bar{m}_M L_M^4} \quad (3)$$

$$\phi_{Mn}(x) = A_n \sin(n\pi x/L_M) \quad (4)$$

式中: ω_{Mn} , E_M , I_M , \bar{m}_M , L_M , $\phi_{Mn}(x)$ 分别为混凝土梁桥结构监测得到的第 n 阶频率、弹性模量、截面惯性矩、单位长度的均匀质量、梁长和监测得到的振型函数.本文主要研究材料性能退化和截面衰减对模态参数的影响.由式(4)可知,振型函数只与初始条件和梁长有关.根据大量的桥梁结构健康监测数据及桥梁检测经验,钢筋腐蚀引起的损伤多为轻微的、均匀的损伤,这种损伤对振型函数的影响非常小,故不再对振型函数进行讨论,只对振动频率进行分析。

混凝土梁桥结构由钢筋和混凝土两种材料组成,因此式(3)可表示为

$$\omega_{Mn} = n^2 \pi^2 \sqrt{(E_{Mc} I_{Mc} + E_{Ms} I_{Ms}) / \bar{m}_M L_M^4} \quad (5)$$

式中: E_{Mc} 和 E_{Ms} 分别为混凝土和钢筋的弹性模量; I_{Mc} 和 I_{Ms} 分别为混凝土和钢筋的截面惯性矩。

混凝土梁桥结构材料性能的劣化,使其动力参数也会发生相应的变化,其变化的幅度影响到结构的安全性.这里定义第 n 阶频率的可靠度功能函数为如下:

$$Z_n = \omega_{Mn} - \xi_\omega \omega_n \quad (6)$$

式中: ξ_ω 为结构频率容许变化的系数,根据工程结构的安全冗余度和经验确定。

上述可靠度功能函数反映了混凝土梁桥结构性能发生退化时振动频率的变化情况,其中 $Z_n > 0$ 表示结构处于可靠状态; $Z_n < 0$ 表示结构处于不可靠状态; $Z_n = 0$ 表示结构处于临界状态.根据式(6),可分析出基于结构振动频率监测的可靠度指标和失效概率.因本文主要对振动频率监测的敏感因素进行分析,这里暂不做进一步的讨论。

混凝土梁桥结构在使用过程中,其材料性能会发生变化,钢筋腐蚀会使钢筋的有效面积降低,截面的惯性矩发生变化.因此,在进行耐久性可靠度分析时,将结构的弹性模量和截面惯性矩作为基本随机变量.假设材料的弹性模量和截面惯性矩均服从正态分布,且分布参数分别为 $E_M \sim N(\mu_{E_M}, \sigma_{E_M})$, $I_M \sim N(\mu_{I_M}, \sigma_{I_M})$.

2 动力参数对耐久性指标的灵敏度分析

2.1 混凝土梁桥振动频率对材料性能参数的灵敏度

灵敏度的定义为基本变量分布参数的变化引起的分析目标变化的比率,在数学上灵敏度是用分析目标对基本变量分布参数的偏导数来表达的。

混凝土梁桥结构中钢筋发生腐蚀,使钢筋的截面惯性矩降低,腐蚀物体积膨胀引起混凝土开裂,使混凝土的截面惯性矩也降低,若不考虑钢筋和混凝土材料本身弹性模量的变化,引入如下参数变量 Q ,即

$$Q = \left[E_{Mc} (\bar{I}_{Mc} + \Delta I_{Mc}) + E_{Ms} (\bar{I}_{Ms} + \Delta I_{Ms}) \right] / \bar{m}_M L_M^4 \quad (7)$$

式中: \bar{I}_{Mc} 和 \bar{I}_{Ms} 分别为混凝土和钢筋截面惯性矩的初始值; ΔI_{Mc} 和 ΔI_{Ms} 分别为混凝土和钢筋截面惯性矩的变化值。

则式(5)可表示为

$$\omega_{Mn} = n^2 \pi^2 \sqrt{Q} \quad (8)$$

梁桥结构在使用过程中,单位长度的均匀质量

\bar{m}_M 和梁长 L_M 可认为是不变的,但材料性能是变化的,且是随机的. 因此,将钢筋和混凝土的弹性模量作为基本的随机变量,则功能函数对混凝土弹性模量和钢筋弹性模量的灵敏度可分别表示为

$$\frac{\partial Z_n}{\partial E_{Mc}} = \frac{\partial Z_n}{\partial \omega_{Mn}} \frac{\partial \omega_{Mn}}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial E_{Mc}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_n}{\partial E_{Ms}} = \frac{\partial Z_n}{\partial \omega_{Mn}} \frac{\partial \omega_{Mn}}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial E_{Ms}} \quad (10)$$

简化起见,只讨论式(9)和式(10)中的最后一项,即

$$\frac{\partial Q}{\partial E_{Mc}} = (\bar{I}_{Mc} + \Delta I_{Mc}) / \bar{m}_M L_M^4 \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial E_{Ms}} = (\bar{I}_{Ms} + \Delta I_{Ms}) / \bar{m}_M L_M^4 \quad (12)$$

因钢筋的截面惯性矩小于混凝土的截面惯性矩,有

$$\frac{\partial Q}{\partial E_{Ms}} < \frac{\partial Q}{\partial E_{Mc}} \quad (13)$$

因此,混凝土梁桥振动频率对钢筋弹性模量的灵敏度要低于对混凝土弹性模量的灵敏度.

2.2 混凝土梁桥振动频率对截面几何参数的灵敏度

由上述分析可得,功能函数对钢筋截面几何参数和混凝土截面几何参数的灵敏度分别为

$$\frac{\partial Z_n}{\partial \Delta I_{Mc}} = \frac{\partial Z_n}{\partial \omega_{Mn}} \frac{\partial \omega_{Mn}}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial \Delta I_{Mc}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial Z_n}{\partial \Delta I_{Ms}} = \frac{\partial Z_n}{\partial \omega_{Mn}} \frac{\partial \omega_{Mn}}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial \Delta I_{Ms}} \quad (15)$$

简化起见,只讨论式(14)和式(15)中的最后一项,即

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta I_{Mc}} = E_{Mc} / \bar{m}_M L_M^4 \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta I_{Ms}} = E_{Ms} / \bar{m}_M L_M^4 \quad (17)$$

因钢筋的弹性模量大于混凝土的弹性模量,则

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta I_{Mc}} < \frac{\partial Q}{\partial \Delta I_{Ms}} \quad (18)$$

因此,混凝土梁桥振动频率对混凝土截面惯性矩的灵敏度要低于对钢筋截面惯性矩的灵敏度.

3 算例

简支梁长 5.0 m,截面宽度 0.4 m,高度 0.2 m,拉、压区分别布置 3Φ22 mm 的主筋,箍筋直径为 10 mm. 混凝土弹性模量为 3.0×10^4 MPa,钢筋弹性模量为 2.1×10^5 MPa,混凝土密度为 $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,钢筋密度为 $7\,850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

建立分离式有限元模型对钢筋腐蚀进行模拟. 混凝土采用 SOLID65 单元,主筋和箍筋采用 PIPE20 单元. 混凝土和钢筋的有限元模型如图 1 所示.

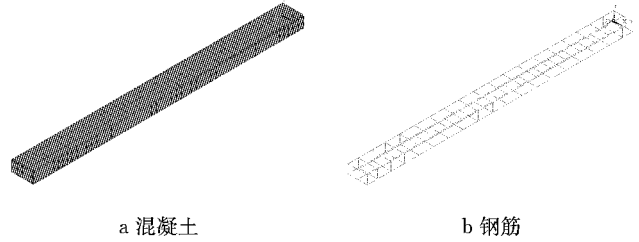


图 1 混凝土和钢筋的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of reinforcement concrete girder

钢筋腐蚀会使钢筋的有效面积降低,钢筋的强度以及钢筋和混凝土的黏结性也降低,其中钢筋有效面积的降低是主要因素,因此采用钢筋有效面积的降低程度来模拟钢筋的腐蚀程度. 不同腐蚀程度的振动频率计算结果见表 1.

表 1 不同腐蚀程度的振动频率

Tab. 1 Frequency of vibration of different corrosion degrees

阶次	f/Hz				
	未腐蚀	腐蚀程度			
		5%	10%	15%	20%
竖向 1 阶(Y1)	15.483	15.427	15.372	15.315	15.257
横向 1 阶(X1)	36.604	36.507	36.408	36.307	36.203
竖向 2 阶(Y2)	56.939	56.703	56.463	56.219	55.972
横向 2 阶(X2)	117.690	117.380	117.050	116.730	116.390
竖向 3 阶(Y3)	118.890	118.440	117.980	117.510	117.030
竖向 4 阶(Y4)	159.560	159.190	158.800	158.400	158.000
竖向 5 阶(Y5)	227.120	226.330	225.520	224.700	223.860
横向 3 阶(X3)	237.930	237.360	236.780	236.180	235.570
竖向 6 阶(Y6)	335.830	334.690	333.520	332.330	331.120
横向 4 阶(X4)	386.710	385.950	385.170	384.370	383.540

由表 1 可知,随着钢筋腐蚀程度的增加,各阶振动频率均发生了变化,腐蚀程度越大,振动频率变化的程度越明显. 可见,在进行梁桥 7 结构动力检测时需考虑钢筋腐蚀对结构振动频率的影响.

大量研究表明^[12-13],结构发生局部损伤时,其振动频率也会随之变化. 为了对比说明腐蚀程度对振动频率的影响程度,分析了算例梁跨中截面发生不同程度损伤时的振动频率. 损伤位置见图 2.

这里将混凝土材料的弹性模量分别降低 5%, 10%, 15%, 20% 来模拟相应的损伤程度. 振动频率计算结果见表 2.

由表 1 和表 2 可知,钢筋混凝土梁在其内部钢筋发生腐蚀和跨中截面发生损伤时,其振动频率均

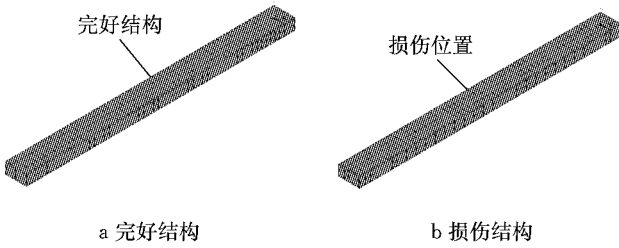


图 2 完好和损伤结构的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of intact and damaged structure

发生了变化,在相同的腐蚀程度和跨中损伤程度情况下,其各阶振动频率的比较如图 3 所示。

由图 3 可知,钢筋腐蚀、跨中损伤时的竖向振动

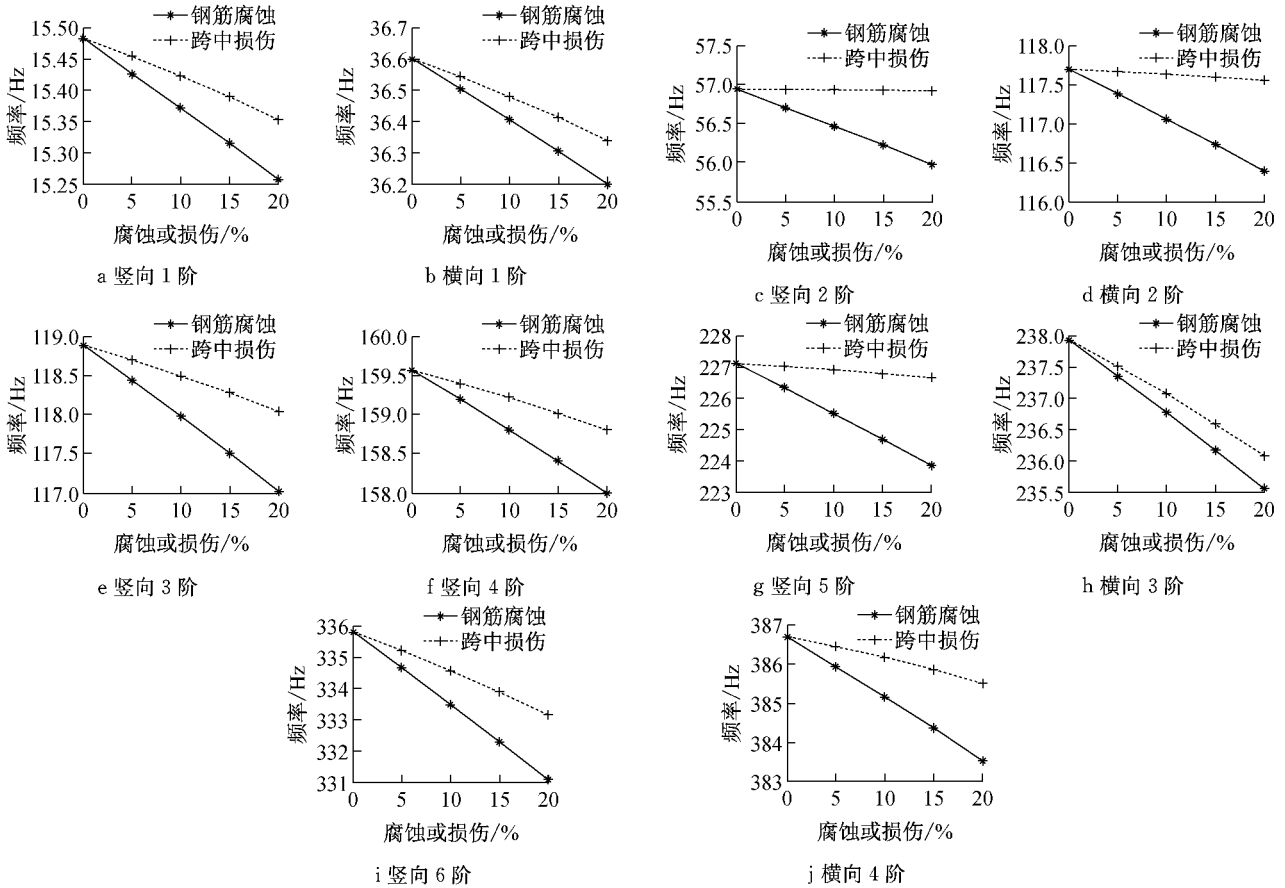


图 3 钢筋腐蚀和跨中损伤时各阶振动频率

Fig. 3 Frequency of vibration at reinforcement corrosion and mid-span damage

频率和横向振动频率均随腐蚀或受损程度的升高而降低,并且,钢筋腐蚀后振动频率的降低程度要比跨中损伤后振动频率的降低程度大。

由图 4 可以看出,在钢筋腐蚀程度和跨中损伤程度分别为 5%,10%,15%和 20%的情况下,考虑竖向和横向振动时,钢筋腐蚀对振动频率的降低程度比跨中损伤对振动频率的降低程度大。可知,钢筋腐蚀对梁桥振动频率的影响高于局部损伤对梁桥振

表 2 不同损伤程度的振动频率

Tab. 2 Frequency of vibration of different damage severities

阶次	f/Hz				
	未损伤	损伤程度			
		5%	10%	15%	20%
竖向 1 阶(Y1)	15.483	15.454	15.423	15.389	15.353
横向 1 阶(X1)	36.604	36.546	36.482	36.414	36.339
竖向 2 阶(Y2)	56.939	56.935	56.930	56.924	56.918
横向 2 阶(X2)	117.690	117.660	117.630	117.590	117.550
竖向 3 阶(Y3)	118.890	118.700	118.490	118.280	118.040
竖向 4 阶(Y4)	159.560	159.390	159.210	159.010	158.800
竖向 5 阶(Y5)	227.120	227.020	226.910	226.790	226.650
横向 3 阶(X3)	237.930	237.520	237.080	236.600	236.090
竖向 6 阶(Y6)	335.830	335.230	334.590	333.910	333.180
横向 4 阶(X4)	386.710	386.460	386.180	385.870	385.520

动频率的影响。

由图 5 可以看出,在钢筋腐蚀程度分别为 5%,10%,15%和 20%的情况下,结构的 1 阶振动频率分别变化了 0.362%,0.717%,1.090%和 1.460%;而在跨中同等程度损伤的情况下,结构的 1 阶振动频率则分别变化了 0.187%,0.388%,0.607%和 0.840%。可知,当钢筋腐蚀程度和跨中损伤程度分别为 5%,10%,15%和 20%时,钢筋腐蚀引起的结构 1 阶振动频率变化率是跨中损伤引起的结构 1 阶

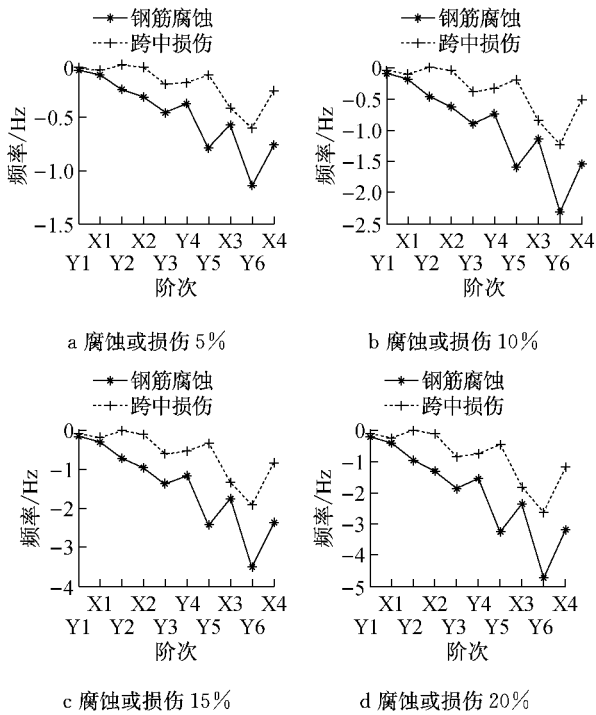


图 4 钢筋腐蚀和跨中损伤的振动频率比较

Fig.4 Comparison of frequency of vibration between reinforcement corrosion and mid-span damage

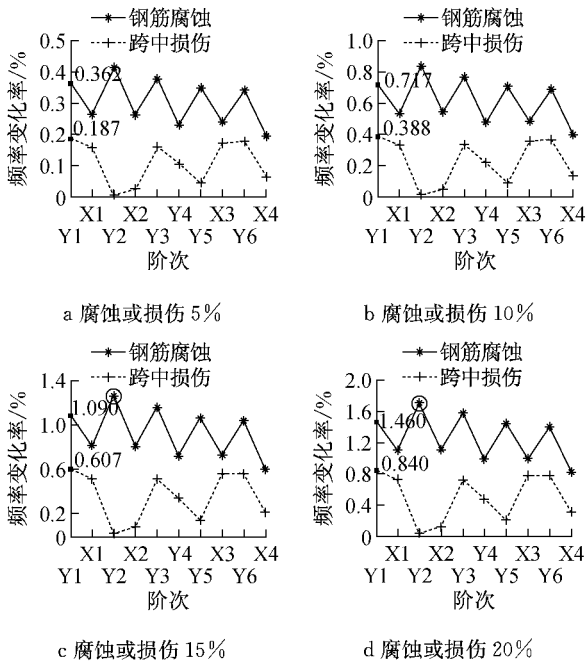


图 5 钢筋腐蚀和跨中损伤对频率的绝对变化率

Fig.5 Reinforcement corrosion and mid-span damage of absolute changing rate of frequency of vibration

振动频率变化率的 1.94, 1.85, 1.80 和 1.74 倍. 因此, 钢筋腐蚀对振动频率的影响程度比跨中损伤对振动频率的影响程度明显.

为对比分析钢筋腐蚀与跨中损伤对振动频率的影响, 表 3~6 给出了各阶频率变化以及频率变化

率. 由表 3~6 可明显看出, 钢筋腐蚀对各阶振动频率的影响均高于跨中损伤对振动频率的影响. 因此, 在桥梁结构动力测量时应充分考虑钢筋腐蚀的影响.

表 3 钢筋腐蚀与跨中损伤 5% 的频率对比

Tab.3 Comparison of reinforcement corrosion and mid-span damage (5%)

阶次	频率变化/Hz		频率变化率/%	
	钢筋腐蚀	跨中损伤	钢筋腐蚀	跨中损伤
竖向 1 阶(Y1)	-0.056	-0.029	-0.362	-0.187
横向 1 阶(X1)	-0.097	-0.058	-0.265	-0.158
竖向 2 阶(Y2)	-0.236	-0.004	-0.414	-0.007
横向 2 阶(X2)	-0.310	-0.030	-0.263	-0.025
竖向 3 阶(Y3)	-0.450	-0.190	-0.379	-0.160
竖向 4 阶(Y4)	-0.370	-0.170	-0.232	-0.107
竖向 5 阶(Y5)	-0.790	-0.100	-0.348	-0.044
横向 3 阶(X3)	-0.570	-0.410	-0.240	-0.172
竖向 6 阶(Y6)	-1.140	-0.600	-0.339	-0.179
横向 4 阶(X4)	-0.760	-0.250	-0.197	-0.065

表 4 钢筋腐蚀与跨中损伤 10% 的频率对比

Tab.4 Comparison of reinforcement corrosion and mid-span damage (10%)

阶次	频率变化/Hz		频率变化率/%	
	钢筋腐蚀	跨中损伤	钢筋腐蚀	跨中损伤
竖向 1 阶(Y1)	-0.111	-0.060	-0.717	-0.388
横向 1 阶(X1)	-0.196	-0.122	-0.535	-0.333
竖向 2 阶(Y2)	-0.476	-0.009	-0.836	-0.016
横向 2 阶(X2)	-0.640	-0.060	-0.544	-0.051
竖向 3 阶(Y3)	-0.910	-0.400	-0.765	-0.336
竖向 4 阶(Y4)	-0.760	-0.350	-0.476	-0.219
竖向 5 阶(Y5)	-1.600	-0.210	-0.704	-0.092
横向 3 阶(X3)	-1.150	-0.850	-0.483	-0.357
竖向 6 阶(Y6)	-2.310	-1.240	-0.688	-0.369
横向 4 阶(X4)	-1.540	-0.530	-0.398	-0.137

表 5 钢筋腐蚀与跨中损伤 15% 的频率对比

Tab.5 Comparison of reinforcement corrosion and mid-span damage (15%)

阶次	频率变化/Hz		频率变化率/%	
	钢筋腐蚀	跨中损伤	钢筋腐蚀	跨中损伤
竖向 1 阶(Y1)	-0.168	-0.094	-1.085	-0.607
横向 1 阶(X1)	-0.297	-0.190	-0.811	-0.519
竖向 2 阶(Y2)	-0.720	-0.015	-1.265	-0.026
横向 2 阶(X2)	-0.960	-0.100	-0.816	-0.085
竖向 3 阶(Y3)	-1.380	-0.610	-1.161	-0.513
竖向 4 阶(Y4)	-1.160	-0.550	-0.727	-0.345
竖向 5 阶(Y5)	-2.420	-0.330	-1.066	-0.145
横向 3 阶(X3)	-1.750	-1.330	-0.736	-0.559
竖向 6 阶(Y6)	-3.500	-1.920	-1.042	-0.572
横向 4 阶(X4)	-2.340	-0.840	-0.605	-0.217

4 结论

本文在简支梁振动频率及振型函数的基础上,

表 6 钢筋腐蚀与跨中损伤 20% 的频率对比

Tab. 6 Comparison of reinforcement corrosion and mid-span damage (20%)

阶次	频率变化/Hz		频率变化率/%	
	钢筋腐蚀	跨中损伤	钢筋腐蚀	跨中损伤
竖向 1 阶(Y1)	-0.226	-0.130	-1.460	-0.840
横向 1 阶(X1)	-0.401	-0.265	-1.096	-0.724
竖向 2 阶(Y2)	-0.967	-0.021	-1.698	-0.037
横向 2 阶(X2)	-1.300	-0.140	-1.105	-0.119
竖向 3 阶(Y3)	-1.860	-0.850	-1.564	-0.715
竖向 4 阶(Y4)	-1.560	-0.760	-0.978	-0.476
竖向 5 阶(Y5)	-3.260	-0.470	-1.435	-0.207
横向 3 阶(X3)	-2.360	-1.840	-0.992	-0.773
竖向 6 阶(Y6)	-4.710	-2.650	-1.402	-0.789
横向 4 阶(X4)	-3.170	-1.190	-0.820	-0.308

基于结构健康监测进行分析,建立了结构的可靠度功能函数,并对材料参数和截面几何参数的灵敏度进行了分析。

研究表明,混凝土梁桥结构的振动频率对钢筋弹性模量的灵敏度要低于对混凝土弹性模量的灵敏度;混凝土梁桥结构的振动频率对混凝土截面惯性矩的灵敏度要低于对钢筋截面惯性矩的灵敏度。

借助有限元分析,得出混凝土梁桥结构的竖向和横向振动频率均随腐蚀程度和跨中损伤程度的升高而降低,且钢筋腐蚀时比跨中损伤时降低的程度大;当钢筋腐蚀程度和跨中损伤程度分别为 5%, 10%, 15% 和 20% 时,钢筋腐蚀引起的结构 1 阶振动频率变化率是跨中损伤引起的结构 1 阶振动频率变化率的 1.94, 1.85, 1.80 和 1.74 倍。

因此,在进行结构动力检测时,应充分考虑钢筋腐蚀对结构振动频率的影响。

参考文献:

- [1] 延永东,金伟良,王海龙,等.干湿交替作用下氯离子在开裂混凝土中的输运规律[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(5):2060.
YAN Yongdong, JIN Weiliang, WANG Hailong, *et al.* Chloride transport in cracked concrete under wet-dry cycling condition [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(5):2060.
- [2] 金伟良,王毅.持续荷载与氯盐作用下钢筋混凝土梁力学性能试验[J].浙江大学学报:工学版,2014,48(2):221.
JIN Weiliang, WANG Yi. Experimental study on mechanics behaviors of reinforced concrete beams under simultaneous chloride attacks and sustained load [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(2): 221.
- [3] 周海俊,米红雨,谭也平.锈蚀-疲劳作用下的砼梁桥失效概率分析[J].深圳大学学报:理工版,2010,27(1):109.
ZHOU Haijun, MI Hongyu, TAN Yeping. Failure probability analysis of reinforced concrete bridges under coupled corrosion fatigue effects [J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2010, 27(1): 109.
- [4] 田浩,李国平,刘杰,等.受力状态下混凝土试件碳化试验研究[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(2):200.
TIAN Hao, LI Guoping, LIU Jie, *et al.* Experimental research on carbonation of forced concrete specimens [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 200.
- [5] Hu S L J, Wang S Q, Li H J. Cross-modal strain energy method for estimating damage severity [J]. Journal of Engineering Mechanics-Asce, 2006, 132(4): 429.
- [6] Bolton R, Sikorsky C, Park S, *et al.* Modal property changes of a seismically damaged concrete bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(4): 415.
- [7] 顾培英,丁伟农.模态试验在梁损伤诊断中的应用研究[J].振动与冲击,2004,23(3):62.
GU Peiying, DING Weinong. Application of modal test in diagnosing damage of beam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(3): 62.
- [8] Huth O, Feltrin G, Maeck J, *et al.* Damage identification using modal data: experiences on a prestressed concrete bridge [J]. Journal of Structural Engineering-Asce, 2005, 131(12): 1898.
- [9] 闵志华,孙利民.环境因素对混凝土结构特征参数影响的试验分析[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(12):1739.
MIN Zhihua, SUN Limin. Test analysis of environmental effect on concrete structural feature parameters [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(12): 1739.
- [10] Roelfstra G, Hajdin R, Adey B, *et al.* Condition evolution in bridge management systems and corrosion-induced deterioration [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(3): 268.
- [11] 易伟建,孙晓东.锈蚀钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[J].土木工程学报,2007,40(3):6.
YI Weijian, SUN Xiaodong. Experimental investigation on the fatigue behavior of corroded RC beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 6.
- [12] 顾培英,陈厚群,李同春,等.用应变模态技术诊断梁结构的损伤[J].地震工程与工程振动,2005,23(4):50.
GU Peiying, CHEN Houqun, LI Tongchun, *et al.* Application of strain mode in diagnosing damage to beam [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 23(4): 50.
- [13] Ismail Z, Ibrahim Z, Ong A Z C, *et al.* Approach to reduce the limitations of modal identification in damage detection using limited field data for nondestructive structural health monitoring of a cable-stayed concrete bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(6): 867.