

基于全寿命周期与材料劣化的桥梁抗震可靠度研究

朱坤¹, 颜鹏飞¹, 谭慧², 刘国坤^{3*}

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430052; 2. 昆明冶金高等专科学校, 云南 昆明 650300;
3. 湖南工程学院, 湖南 湘潭 411104)

摘要:为研究桥梁服役期间材料性能劣化对抗震性能的影响, 该文基于钢筋锈蚀原理和菲克第二定律, 分析了钢筋与混凝土材料性能的劣化规律, 并得到了橡胶支座性能随时间的退化规律, 结合地震易损性与危险性理论, 提出了桥梁抗震可靠度计算方法。以一座钢筋混凝土箱形梁桥为例, 计算得到了该桥的地震易损性曲线、危险性曲线以及全寿命周期内的抗震可靠度。研究表明: ① 不同损伤状态下桥梁超越概率均随着峰值加速度 a_{PGA} 的增大而不断增大, 其中墩柱与支座共同劣化对桥梁地震损伤影响最大, 墩柱劣化对桥梁地震损伤的影响大于支座劣化; ② 桥梁服役年限越长, 同一地震烈度下的桥梁超越概率越大, 但增加的幅度随服役时间的增长而不断减小; ③ 随着服役时间的增加, 桥梁在各损伤状态下的抗震可靠度指标不断减小, 其中, 墩柱与支座共同劣化下的桥梁抗震可靠度下降最为明显, 仅墩柱劣化相较于仅支座劣化对桥梁抗震可靠度的影响更大; ④ 桥梁服役时间越长, 考虑材料性能劣化与不考虑材料性能劣化的抗震可靠度差值越大。

关键词: 桥梁; 材料性能劣化; 抗震可靠度; 地震易损性曲线; 地震危险性曲线
中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A

Seismic Reliability of Bridge Considering Material Deterioration during Whole Life Cycle

ZHU Kun¹, YAN Pengfei¹, TAN Hui², LIU Guokun^{3*}

(1. The Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430052, China;
2. Kunming Metallurgy College, Kunming, Yunnan 650300, China; 3. Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, Hunan 411104, China)

Abstract: In order to study the influence of material property deterioration on the seismic performance of bridges during service, based on the principle of steel corrosion and Fick's second law, this paper analyzed the deterioration law of steel and concrete material properties and obtained the degradation law of rubber bearing properties over time. According to the theory of seismic vulnerability and risk, a method was established to calculate the seismic reliability of bridges. With a reinforced concrete box girder bridge in China as an example, the seismic vulnerability curve, risk curve, and seismic reliability during the whole life cycle of the bridge were calculated. The research shows that: ① The bridge transcendence probability increases with the increase in peak acceleration a_{PGA} under different damage conditions. The common deterioration of the pier column and bearing has the greatest influence on the seismic damage of the bridge, and the influence of pier column deterioration on the seismic damage of the bridge is greater than that of bearing deterioration; ② A longer service life of the bridge means a greater bridge transcendence probability under the same seismic intensity, but the increasing range decreases with the increase in service time; ③ With the increase in service time, the seismic reliability index of the bridge under various damage conditions decreases continuously. Among them, the seismic reliability of the bridge under the common deterioration of pier column and bearing decreases most

收稿日期: 2024-12-08(修改稿)

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目(编号: 22B0737); 湖南省重点实验室开放基金项目(编号: 18KC02)

作者简介: 朱坤, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 893214280@qq.com

*通信作者: 刘国坤, 男, 博士, 副教授. E-mail: 1425541054@qq.com

obviously. Pier column deterioration alone has a greater influence on the seismic reliability of the bridge than that of bearing deterioration alone; ④ A longer service time of the bridge indicates a greater seismic reliability difference between bridges with and without material deterioration considered.

Keywords: bridge; material property deterioration; seismic reliability; seismic vulnerability curve; seismic risk curve

0 引言

近年来,随着经济的快速发展,中国兴建了大量桥梁。桥梁在服役年限内,不可避免地会受到外界环境的侵蚀以及地震等灾害的影响^[1-4]。然而,传统的桥梁抗震设计通常未考虑外界环境的侵蚀导致材料性能劣化及其对桥梁抗震性能退化的影响,为保证桥梁在其服役年限内的抗震性能,往往需要投入巨大的经济成本对桥梁进行抗震加固。因此,在桥梁的全寿命周期内,研究桥梁材料性能退化对其抗震性能的影响具有重要意义。

近年来,国内外学者对氯盐侵蚀引起钢筋混凝土桥梁抗震性能退化的问题进行了大量研究^[5-9]。Simon等^[10]研究了外界氯化物侵蚀作用下,钢筋锈蚀导致钢筋强度退化以及混凝土保护层剥落导致其刚度退化的规律,并分析了材料退化对桥梁地震易损性和地震响应的影响;Choe等^[11]基于氯化物导致钢筋锈蚀的概率模型以及和时间相关的钢筋锈蚀速率,建立了考虑锈蚀影响的钢筋混凝土柱承载力退化模型,并对影响钢筋混凝土柱的可靠性参数进行了敏感性分析,研究结果显示:钢筋锈蚀将显著影响混凝土柱的抗震性能;李超等^[12]、李宏男等^[13]基于腐蚀电流密度理论,建立了氯化物侵蚀下钢筋锈蚀程度模型,并对桥梁进行了Pushover和增量动力分析,进而对桥梁的抗震性能进行了研究;周敦等^[14]通过氯离子电化学加速侵蚀钢筋混凝土构件的试验和拟静力加载试验,得到了氯离子侵蚀前后钢筋混凝土构件抗震性能指标的变化规律,并采用双参数模型对构件的地震损伤进行了分析。然而,上述研究大多仅考虑氯离子侵蚀对桥梁墩柱的影响,较少考虑桥梁全寿命周期内支座劣化对其抗震性能的影响,且目前对于考虑材料性能退化的桥梁全寿命周期抗震可靠度的研究较少。因此,在桥梁全寿命周期内,研究考虑支座和墩柱劣化的桥梁抗震可靠度具有一定的应用价值,可为桥梁全寿命周期内的抗震性能评估以及抗震性能设计提供一定的理论依据。

基于此,本文根据钢筋锈蚀原理和菲克第二定律,分析了钢筋与混凝土材料性能的劣化规律,并得

到了橡胶支座性能随时间的退化规律,根据地震易损性与危险性理论,建立了计算桥梁抗震可靠度的方法。为验证该方法的有效性,以一座钢筋混凝土箱形梁桥为例,计算得到了该桥的地震易损性曲线、危险性曲线以及全寿命周期内的抗震可靠度。

1 材料性能退化分析

桥梁结构在服役期间通常会遭受外部环境的影响,从而导致材料性能的退化。其中,钢筋锈蚀引起的混凝土结构退化是材料性能退化最显著的表现^[15]。因此,在研究退化桥梁的抗震可靠度之前,有必要对钢筋锈蚀导致材料性能退化规律进行分析。

1.1 钢筋初始锈蚀时间分析

钢筋锈蚀主要是由氯离子的侵入导致的,钢筋初始锈蚀时间可以根据菲克第二定律来确定,其数学表达式如式(1)所示^[16]:

$$C_{cl}(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t}} \right) \right] \quad (1)$$

式中: C_{cl} 为混凝土结构中氯离子溶度; x 为锈蚀深度; t 为锈蚀时间; C_s 为结构表面氯离子溶度; D_{cl} 为氯离子扩散系数; $\operatorname{erf}()$ 为误差调整函数。

当 x 等于混凝土保护层厚度,并且 $C_{cl} \geq$ 临界氯离子溶度 C_{cr} 时,钢筋发生锈蚀。故可得到钢筋锈蚀的初始时间为:

$$t_{cr} = \frac{x^2}{4D} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right) \right]^2 \quad (2)$$

1.2 钢筋力学性能退化分析

目前,相关学者对锈蚀作用下的钢筋力学性能进行了较多研究^[17-18]。对于钢筋力学性能的退化,本文主要考虑钢筋直径与屈服强度的退化,假定钢筋为均匀锈蚀,那么锈蚀后的钢筋直径 $D(t)$ 可表示为^[19]:

$$D(t) = \begin{cases} D_0 - i_{corr}(t - t_{cr}), & t > t_{cr} \\ D_0, & t \leq t_{cr} \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_0 为钢筋初始直径; i_{corr} 为锈蚀速率^[20]; t_{cr} 为开裂时间。

那么,锈蚀后的钢筋屈服强度以及极限强度则可表示为:

$$\begin{cases} f_{y1} = \frac{1 - 1.196\beta_{s1}}{1 - \beta_{s1}} f_{y0} \\ f_{n1} = \frac{1 - 1.201\beta_{s2}}{1 - \beta_{s2}} f_{n0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_{y0} 、 f_{y1} 分别为钢筋锈蚀前与锈蚀后的屈服强度; f_{n0} 、 f_{n1} 分别为钢筋锈蚀前和锈蚀后的极限强度; β_{s1} 为屈服强度折减系数,通常取0.004 9; β_{s2} 为极限强度折减系数,通常取0.006 5。

经计算并参考相关文献^[18-19],钢筋锈蚀随时间变化的性能参数如表1所示。

表1 钢筋锈蚀随时间变化的性能参数

Table1 Performance parameter changes of steel bar corrosion with time

时间/年	锈蚀率/%	钢筋直径/mm	屈服强度/MPa
≤20	0.00	28.00	381.60
40	0.12	26.64	376.59
60	0.34	22.82	366.21
80	0.51	19.52	358.06
100	0.64	16.69	352.08

1.3 混凝土力学性能退化分析

当钢筋锈蚀到一定程度时,锈蚀产物的累积会引起混凝土保护层的开裂甚至剥落,进而严重影响混凝土抗压强度。因此,为研究锈蚀对混凝土抗压强度的影响,本文采用Coronelli等^[21]建立的锈蚀后混凝土抗压强度折减模型,如式(5)所示:

$$f_{ccor} = \frac{f_c}{1 + 0.1\epsilon_1/\epsilon_0} \quad (5)$$

式中: f_{ccor} 、 f_c 分别为锈蚀后与锈蚀前的混凝土抗压强度; ϵ_1 、 ϵ_0 分别为锈蚀混凝土平均拉应变、锈蚀前混凝土峰值应变,其中 ϵ_1 可根据式(6)计算:

$$\epsilon_1 = \frac{nw_{cor}}{b_0} \quad (6)$$

式中: n 为锈蚀钢筋根数; b_0 为锈蚀前钢筋截面宽度; w_{cor} 为裂缝宽度,可按式(7)计算:

$$w_{cor} = 2\pi(\nu_{cor} - 1)H_r \quad (7)$$

式中: ν_{cor} 为锈蚀钢筋膨胀系数,本文取 $\nu_{cor}=4$ ^[7]; H_r 为锈蚀深度。

经计算并参考相关文献^[21],混凝土退化随时间变化的性能参数如表2所示。

1.4 橡胶支座性能退化分析

随着服役时间的增加,橡胶支座不可避免地存在一定的老化现象。根据Itoh等^[22]橡胶支座加速老

表2 混凝土退化随时间变化的性能参数

Table 2 Performance parameter changes of concrete degradation with time

时间/年	约束系数K	峰值应变 ϵ_{cc}	极限应变 ϵ_{cu}
≤20	1.099 1	0.002 2	0.016 7
40	1.051 8	0.002 1	0.010 7
60	1.017 3	0.002 0	0.006 2
80	1.003 3	0.002 0	0.004 4
100	1.000 0	0.002 0	0.004 0

化的试验结果,可得到橡胶支座应变势能 E_{SE} 的表达式:

$$E_{SE} = E_{SE,0} \left(c_s \sqrt{t_a} + 1 \right) \quad (8)$$

式中: $E_{SE,0}$ 为初始应变势能; c_s 为应变势能的相关系数; t_a 为加速老化时间。

由于式(8)为橡胶支座加速老化试验的结果,故需要将其转化为自然老化下的表达式,Le等^[23]建立了加速老化时间与自然老化时间的关系式,如式(9)所示:

$$\ln\left(\frac{t_a}{t_f}\right) = \frac{E_a}{Q} \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_a} \right) \quad (9)$$

式中: t_f 为自然老化时间; E_a 为活化能,本文取 $E_a=95$ kJ/mol; Q 为气体常数,取 8.3 mol·K; T_f 、 T_a 分别为加速老化试验中的绝对温度和自然条件下的绝对温度。

Mase等^[24]根据胡可材料模型,得到了剪切模量与应变势能之间的关系,如式(10)所示:

$$E_{SE} = G \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \quad (10)$$

式中: G 为剪切模量; λ 为应变指标。

因此,橡胶支座的剪切模量可由其应变势能来表示,如式(11)所示:

$$\frac{G_t}{G_0} = \frac{E_{SE}}{E_{SE,0}} \quad (11)$$

式中: G_0 为橡胶支座初始剪切模量; G_t 为服役时间 t 时,支座的剪切模量。

2 桥梁抗震可靠度计算模型

2.1 结构可靠度基本理论

结构可靠度 Z 是指结构在规定时间和条件下,完成预定功能的能力,通过与结构荷载效应和结构抗力相关的功能函数表示,如式(12)所示:

$$Z = R - S \quad (12)$$

式中： R 为结构抗力； S 为结构荷载效应。

由于结构性能的不确定性，通常将结构可靠度表示为概率形式^[25]：

$$P_f = P[Z < 0] = \iint_{R < S} f_R(r) \cdot f_S(s) ds dr \quad (13)$$

式中： P_f 为结构的失效概率； $f_R(r)$ 、 $f_S(s)$ 分别为结构抗力和结构荷载效应的概率密度函数。

若通过式(13)的数值积分直接计算结构的失效概率将十分麻烦，为此，引入可靠度指标 β 来代替失效概率，表达式如式(14)所示：

$$\beta(t) = \Phi^{-1}[1 - P_f(t)] \quad (14)$$

式中： Φ 表示标准正态累积分布函数。

2.2 结构抗震可靠度分析

结构抗震可靠度是衡量其可靠性的定量指标。与结构可靠度相似，结构抗震可靠度可通过两个综合变量地震需求 D 与抗震能力 C 来表示，基于式(13)和首超准则可得到地震荷载作用效应超越结构抗力的概率 P_f ，即超越概率，如式(15)所示^[26]：

$$P_f = \sum P[C \leq D | a_{PGA} = x] = \int F_R(x) | dH(x) | \quad (15)$$

式中： a_{PGA} 为地面峰值加速度； $F_R(x)$ 、 $H(x)$ 分别为地震易损性函数和地震危险性函数。

由式(15)可知：求解结构抗震失效概率的关键在于得到结构地震易损性函数以及危险性函数。根据结构可靠性原理以及参考相关文献^[27]，结构的地震易损性函数可表示为：

$$F_R(x) = \Phi \left[\frac{\ln(S_D/S_C)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_D^2}} \right] \quad (16)$$

式中： S_D 、 S_C 分别为地震需求和结构抗震能力的中位值； β_D 、 β_C 分别为地震需求和结构抗震能力的对数标准差，由于本文采用 a_{PGA} 作为地震动强度指标，故 $\sqrt{\beta_C^2 + \beta_D^2}$ 可取为0.5^[28]。

对于地震危险性函数 $H(x)$ ，参考Cornell等^[29]的研究成果可知：

$$H(x) = k_0 \cdot x^{-k} \quad (17)$$

式中： k_0 、 k 均为形状系数，可分别根据式(18)和式(19)计算得到：

$$k = \frac{\ln(v_1/v_2)}{\ln(I_{IM2}/I_{IM1})} \quad (18)$$

$$\ln(k_0) = \frac{[\ln(I_{IM1}) \cdot \ln(v_2) - \ln(I_{IM2}) \cdot \ln(v_1)]}{\ln(I_{IM1}/I_{IM2})} \quad (19)$$

式中： I_{IM} 为地震动强度指标； v_1 、 v_2 分别为 I_{IM1} 和 I_{IM2} 下的地震动年发生平均概率，可根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)^[30]得到。

考虑材料劣化的桥梁抗震可靠度分析流程如图1所示。

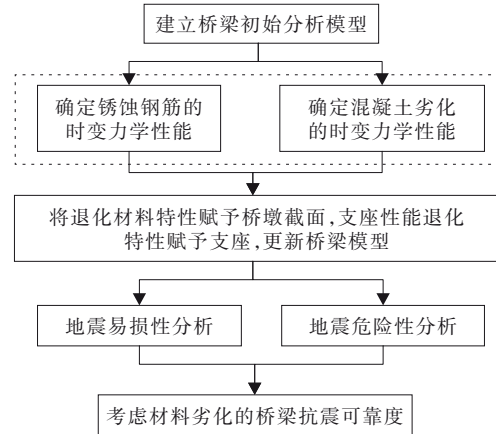


图1 考虑材料劣化的桥梁抗震可靠度分析流程
Figure 1 Seismic reliability analysis process for bridges considering material degradation

3 算例分析

3.1 工程背景

本文以某典型的钢筋混凝土箱形梁桥作为工程实例，桥梁跨径组合为3×30 m，桥面宽度为13 m，主梁采用C50混凝土；桥墩采用实心圆形截面、双柱式桥墩，截面直径为1.5 m，纵筋与箍筋均采用HRB335级钢筋，其中纵筋直径为28 mm，共48根，箍筋直径为12 mm，间距为80 mm，桥墩采用C30混凝土，支座采用普通板式橡胶支座；设计使用年限为100年，抗震设防烈度为8度，该桥的横断面图如图2所示。

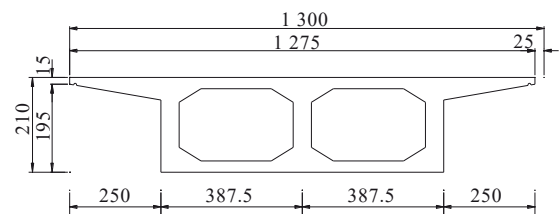


图2 算例桥梁横断面示意图(单位:cm)

Figure 2 Bridge cross-section in example (unit: cm)

采用OpenSees建立该桥有限元模型，在地震作用下，主梁往往发生刚体运动，主梁截面均处于弹性状态，依据能力保护抗震设计理念，桩基和承台均可

按照弹性阶段设计,故可将其视为弹性状态,因此可采用弹性梁柱单元模拟主梁、桩基和承台;桩基和土之间的相互作用通常会增大结构的自振周期,从而影响结构的地震响应,故可采用桩基土弹簧模拟桩-土之间的相互作用;零长度单元可在空间6个自由度方向定义非线性或线性的力与位移之间的关系,故可采用零长度单元来模拟支座。

3.2 桥梁地震易损性分析

桥梁地震易损性分析的关键在于如何定义结构的损伤指标,故需要建立合理的桥梁损伤评价体系,以准确地描述桥梁的损伤状态,进而得到桥梁结构的地震易损性曲线。通常情况下,桥梁损伤状态主要包括:轻微损伤、中等损伤、严重损伤以及完全破坏。支座与墩柱的损伤指标如表3所示。

作为桥梁结构抵抗地震作用的重要组成部分,支座与墩柱的材料性能退化均会对桥梁全寿命周期的抗震性能产生影响。因此,本文分别考虑了3种工况(工况1:支座劣化;工况2:墩柱劣化;工况3:支座与墩柱共同劣化),对该桥服役100年的地震易损性曲线进行了对比分析,结果如图3所示。

表3 墩柱与支座的损伤指标评定

Table 3 Evaluation of damage indexes of pier column and bearing

损伤程度	支座处剪应变 γ	墩柱处弯矩曲率 λ
轻微损伤	$100\% < \gamma \leq 150\%$	$0.003 < \lambda \leq 0.01$
中等损伤	$150\% < \gamma \leq 200\%$	$0.01 < \lambda \leq 0.025$
严重损伤	$200\% < \gamma \leq 550\%$	$0.025 < \lambda \leq 0.08$
完全破坏	$\gamma > 250\%$	$\lambda > 0.08$

从图3可以看出:不同工况、不同损伤状态下的桥梁超越概率均随着地面峰值加速度 a_{PGA} 的增大而不断增大;分析同一损伤状态下不同工况的桥梁超越概率可知,支座与墩柱共同劣化(即工况3)时桥梁的地震易损性曲线上升最为明显,其次依次为仅墩柱劣化(工况2)、仅支座劣化(工况1)以及无劣化,例如在中等损伤状态、 $a_{PGA}=0.5$ 的情况下,支座与墩柱共同劣化、仅墩柱劣化、仅支座劣化和无劣化的超越概率依次为0.59、0.33、0.25和0.11,表明支座与墩柱共同劣化是导致桥梁地震损伤的最主要因素,并且墩柱劣化对桥梁地震损伤的影响大于支座劣化。

3.3 桥梁地震危险性分析

由于该桥的抗震设防烈度为8度,通过式(17)~

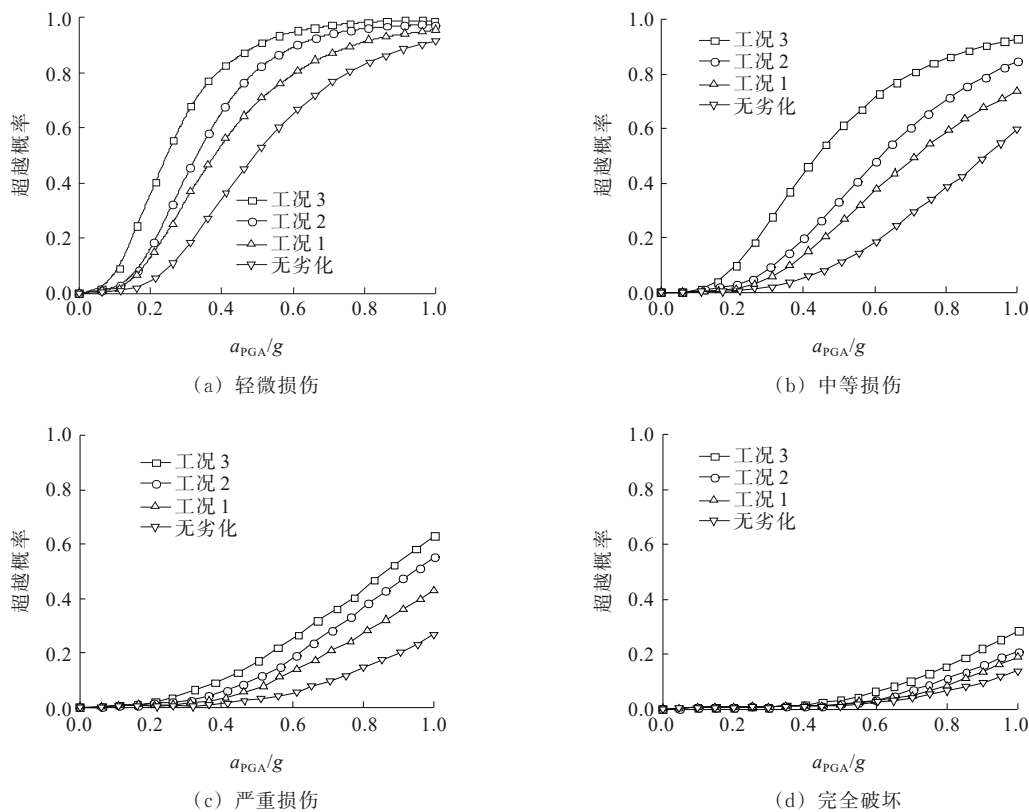


图3 算例桥梁全寿命周期内的地震易损性曲线

Figure 3 Seismic vulnerability curves of bridge during its whole life cycle

(19),可计算得到该桥在各服役年内不同地震烈度下的地震危险性曲线,如图4所示。

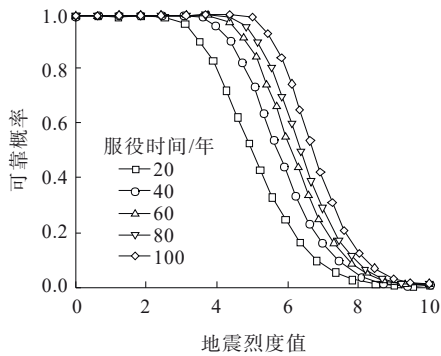


图4 算例桥梁在不同服役年限内的地震危险性曲线
Figure 4 Seismic risk curves of bridge in different service life

从图4可以看出:当地震烈度较小时,桥梁服役年限的增长对其超越概率几乎无影响,但当地震烈度大于某一临界值时,桥梁服役年限越长,同一地震烈度下的桥梁超越概率越大,但增加的幅度随着服役时间的增长而不断减小,例如当地震烈度为6时,桥梁服役20年、40年、60年、80年和100年的超越概

率分别为0.25、0.42、0.56、0.67和0.75,其中超越概率依次增加了0.17、0.14、0.11、0.08;当超越概率相同时,桥梁服役时间越长,地震烈度值也越大,但地震烈度增加的幅度随服役时间的增长而减小。

3.4 全寿命周期内的抗震可靠度分析

为分析桥梁抗震性能退化对其可靠度的影响,根据式(15),并通过3.2节与3.3节得到的地震易损性曲线和危险性曲线,可计算得到桥梁在不同服役年限内的抗震可靠度,如图5所示。

从图5可以看出:随着服役时间的增加,桥梁在各损伤状态下的抗震可靠度指标不断减小,其中,墩柱与支座共同劣化下的桥梁抗震可靠度下降最为明显,对比构件单独劣化时的抗震可靠度指标可知,墩柱劣化相较于支座劣化更为严重,例如桥梁在服役80年、严重损伤的状态下,墩柱与支座共同劣化、墩柱劣化、支座劣化和无劣化的抗震可靠度指标依次为3.62、3.81、4.09和4.21;随着服役时间的增加,考虑材料性能劣化(即墩柱与支座共同劣化)与不考虑材料性能劣化的抗震可靠度差值越来越大,例如对于中等损伤状态,桥梁服役20年、40年、60年、80年和100年时,考虑材料性能劣化与不考虑材料性能劣

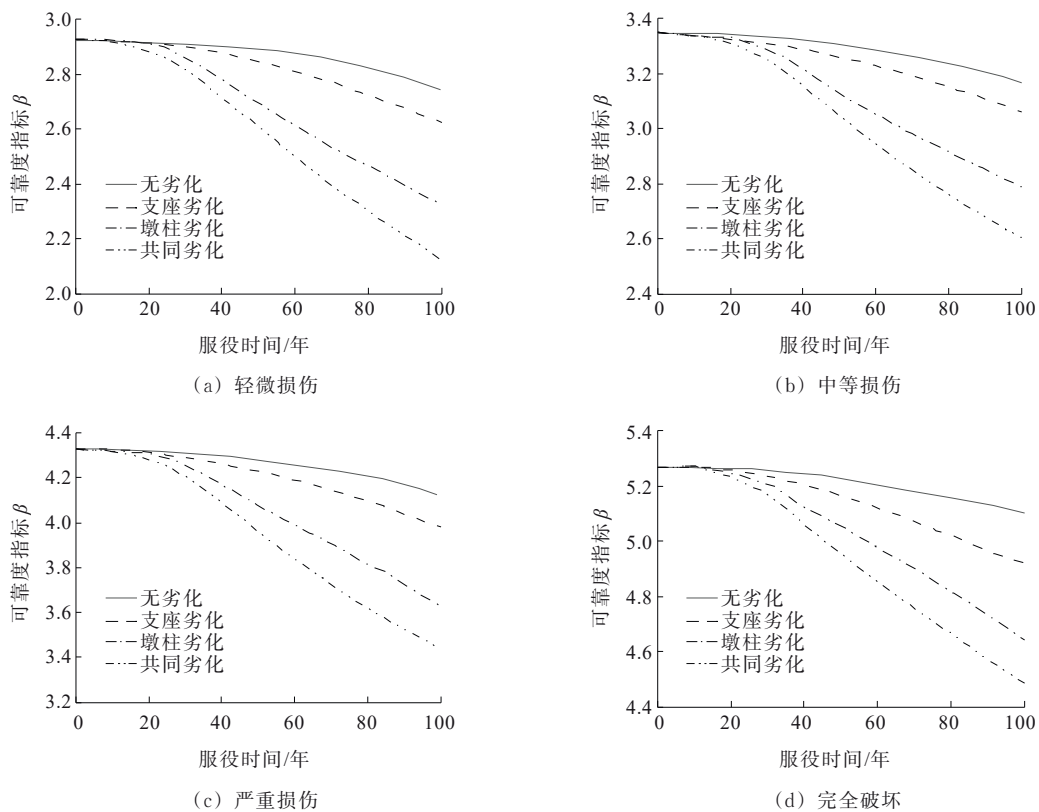


图5 算例桥梁全寿命周期内的抗震可靠度

Figure 5 Seismic reliability of bridge during its whole life cycle

化的抗震可靠度指标差值分别为0.04、0.17、0.35、0.48和0.56,主要是由于服役时间越长,材料性能劣化越严重,同时地震作用下的易损性曲线与危险性曲线也越大,因此,对于服役桥梁的抗震性能评估,考虑桥梁全寿命周期内材料性能的劣化是十分有必要的,同时也可作为桥梁的抗震设计提供一定的参考依据。

4 结论

本文根据钢筋锈蚀原理和菲克第二定律,分析了钢筋与混凝土材料性能的劣化规律,并得到了橡胶支座性能随时间的退化规律。随后,基于地震易损性与危险性理论,构建了计算桥梁抗震可靠度的方法,以一座钢筋混凝土箱形梁桥为算例,计算得到了该桥的地震易损性曲线、危险性曲线以及全寿命周期内的抗震可靠度,得出以下结论:

(1) 分析地震易损性曲线可知,不同损伤状态下桥梁超越概率均随着峰值加速度 a_{PGA} 的增大而不断增大,其中,墩柱与支座共同劣化对桥梁地震损伤影响最大,墩柱劣化对桥梁地震损伤的影响大于支座劣化单独作用时的影响。

(2) 分析地震危险性曲线可知,桥梁服役年限越长,同一地震烈度下的桥梁超越概率越大,但增加的幅度随服役时间的增长而不断减小。

(3) 随着服役时间的增加,桥梁在各损伤状态下的抗震可靠度指标不断减小,其中,墩柱与支座共同劣化下的桥梁抗震可靠度下降最为明显,仅墩柱劣化相较于仅支座劣化对桥梁抗震可靠度的影响更大。

(4) 桥梁服役时间越长,考虑材料性能劣化与不考虑材料性能劣化的抗震可靠度差值越大,服役20年、40年、60年、80年和100年,二者的差值分别为0.04、0.17、0.35、0.48和0.56。

参考文献:

References:

- [1] 管嘉达,陈兴冲,张熙胤.特殊复杂场地条件下桥梁结构地震易损性研究现状及发展趋势分析[J].世界地震工程,2022,38(1):127-138.
GUAN Jiada, CHEN Xingchong, ZHANG Xiyin. Summary and prospect of research on seismic vulnerability of bridge structures under special complex site conditions[J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(1): 127-138.
- [2] 邹向农,龙俊贤,陈宇翔,等.腐蚀预应力混凝土桥梁抗力退化预测方法[J].中外公路,2019,39(3):84-89.
ZOU Xiangnong, LONG Junxian, CHEN Yuxiang, et al. Prediction method of resistance degradation for corroded prestressed concrete bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3): 84-89.
- [3] 彭建新,周鹏程,程小康,等.饱和混凝土结构裂缝区氯离子扩散模型研究[J/OL].中外公路,1-9[2024-10-31].http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20241031.1340.002.html.
PENG Jianxin, ZHOU Pengcheng, CHENG Xiaokang, et al. Study on chloride ion diffusion model in crack zones of saturated concrete structure[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-9[2024-10-31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20241031.1340.002.html.
- [4] 王强,张亚州.纵向墩高差对桥梁抗震响应的影响研究[J].中外公路,2022,42(6):152-156.
WANG Qiang, ZHANG Yazhou. Study on influence of longitudinal height difference of piers on bridge seismic performance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 152-156.
- [5] 李喜梅,付阿雄.考虑材料劣化钢筋混凝土梁桥抗震性能分析[J].兰州理工大学学报,2021,47(3):139-145.
LI Ximei, FU Axiang. Seismic performance analysis of reinforced concrete beam bridges considering material deterioration[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2021, 47(3): 139-145.
- [6] 张童.腐蚀与冻融环境下钢管混凝土墩柱静力及结构抗震性能研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
ZHANG Tong. Study on static and seismic performance of concrete-filled steel tubular piers under corrosion and freeze-thaw environment[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [7] 陈光,陈俊成,周彤,等.锈蚀钢筋混凝土墩柱抗震性能试验和数值分析[J].公路工程,2021,46(5):15-23.
CHEN Guang, CHEN Juncheng, ZHOU Tong, et al. Analysis of seismic performance of corroded RC pier[J]. Highway Engineering, 2021, 46(5): 15-23.
- [8] YANG S Y, SONG X B, JIA H X, et al. Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 319-327.
- [9] 张爱丽,郭颜凤,孙红.腐蚀环境下外加剂对混凝土耐久性的影响[J].中外公路,2022,42(6):202-205.
ZHANG Aili, GUO Yanfeng, SUN Hong. Influence of admixtures on durability of concrete in corrosive environment[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 202-205.
- [10] SIMON J, BRACCI J M, GARDONI P. Seismic response and fragility of deteriorated reinforced concrete bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(10): 1273-1281.
- [11] CHOE D E, GARDONI P, ROSOWSKY D, et al. Probabilistic capacity models and seismic fragility

- estimates for RC columns subject to corrosion[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(3): 383-393.
- [12] 李超,李宏男.考虑氯离子腐蚀作用的近海桥梁结构全寿命抗震性能评价[J].振动与冲击,2014,33(11):70-77.
LI Chao, LI Hongnan. Life-cycle aseismic performance evaluation of offshore bridge structures considering chloride ions corrosion effect[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 70-77.
- [13] 李宏男,张宇,李钢.考虑氯离子腐蚀作用的近海桥梁结构地震反应分析[J].土木工程学报,2015,48(7):112-122.
LI Hongnan, ZHANG Yu, LI Gang. Nonlinear seismic analysis of offshore bridges considering chloride ions corrosion effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(7): 112-122.
- [14] 周救,张洋,姜永存,等.氯离子侵蚀后桥墩的抗震性能及损伤指标研究[J].振动与冲击,2022,41(15):263-272.
ZHOU Mi, ZHANG Yang, JIANG Yongcun, et al. Aseismic performance and damage index of pier after chloride ion erosion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 263-272.
- [15] 李克非,廉慧珍,邸小坛.混凝土结构耐久性设计原则、方法与标准[J].土木工程学报,2021,54(10):64-71,96.
LI Kefei, LIAN Huizhen, DI Xiaotan. Durability design of concrete structures: Principle, method and standard[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 64-71, 96.
- [16] CUSSON D, LOUNIS Z, DAIGLE L. Benefits of internal curing on service life and life-cycle cost of high-performance concrete bridge decks: A case study[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(5): 339-350.
- [17] 徐港,张懂,刘德富,等.氯盐环境下混凝土中锈蚀钢筋力学性能研究[J].水利学报,2012,43(4):452-459.
XU Gang, ZHANG Dong, LIU Defu, et al. Research on mechanical properties of corroded steel bar in concrete under chloride environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 452-459.
- [18] FERNANDEZ I, BAIRÁN J M, MARÍ A R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and σ - ϵ behavior[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 772-783.
- [19] 赵珺,牛荻涛.在役钢筋混凝土连续刚构桥梁抗震性能评估[J].中国公路学报,2014,27(9):74-81.
ZHAO Jun, NIU Ditao. Seismic performance evaluation for reinforced concrete continuous rigid frame bridge in service[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 74-81.
- [20] BERTO L, VITALIANI R, SAETTA A, et al. Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena[J]. Structural Safety, 2009, 31(4): 284-297.
- [21] CORONELLI D, GAMBAROVA P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(8): 1214-1224.
- [22] ITOH Y, GU H S. Prediction of aging characteristics in natural rubber bearings used in bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(2): 122-128.
- [23] LE HUY M, EVRARD G. Methodologies for lifetime predictions of rubber using arrhenius and WLF models[J]. Die Angewandte Makromolekulare Chemie, 1998, 261/262(1): 135-142.
- [24] MASE G T, SMELSER R E, MASE G E. Continuum mechanics for engineers[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [25] ANG A H, DE LEON D. Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures[J]. Structural Safety, 1997, 19(1): 91-103.
- [26] 胡思聪.考虑氯离子侵蚀的桥梁地震易损性及抗震加固策略研究[D].长沙:湖南大学,2018.
HU Sicong. Seismic fragility assessment and seismic retrofit scheme of bridges considering chloride attack[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [27] CHOI E, DESROCHES R, NIELSON B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones[J]. Engineering Structures, 2004, 26(2): 187-199.
- [28] 黄香健,陈双庆,王华,等.冲刷作用下钢管混凝土拱桥地震易损性分析[J].公路工程,2022,47(5):40-46, 112.
HUANG Xiangjian, CHEN Shuangqing, WANG Hua, et al. Seismic vulnerability analysis of CFST arch bridge under scour[J]. Highway Engineering, 2022, 47(5): 40-46, 112.
- [29] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526-533.
- [30] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Specification for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.