

# 除冰盐环境下在役 RC 桥墩时效地震易损性研究

童申家<sup>1</sup>, 黄勇<sup>2</sup>, 李红涛<sup>2</sup>, 苟强<sup>1</sup>, 何坤<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 山西省祁临高速公路有限责任公司, 山西 祁县 030904)

**摘要:** 为研究除冰盐环境下在役 RC 桥墩结构抗震性能时效性, 以我国北部地区某高速路段在役 RC 桥墩氯离子含量检测数据为基础, 考虑氯离子扩散系数的时变性, 构建适用于除冰盐环境下的氯离子扩散修正模型, 并结合氯离子侵蚀对材料性能劣化的影响, 进行在役 RC 桥墩时效地震易损性分析, 计算地震作用下桥墩达到或超过某种特定损伤状态的失效概率。结果表明: 在相同的地震作用下, 随服役时间的增加, 桥墩达到或超过某种特定损伤状态下的失效概率显著增大; 桥墩从严重破坏至完全破坏的过渡延性最优, 即桥墩在达到严重破坏时不会快速倒塌。

**关键词:** 在役 RC 桥墩; 除冰盐环境; 氯离子侵蚀; 抗震性能评估; 易损性分析

中图分类号: TU422.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)03-0315-06

## Study on aging seismic vulnerability of in-service RC bridge piers in deicing salt environment

TONG Shenjia<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>2</sup>, LI Hongtao<sup>2</sup>, GOU Qiang<sup>1</sup>, HE Kun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shanxi Qilin Expressway Limited Liability Company, Shanxi Qixian 030904, China)

**Abstract:** In order to study the timeliness of seismic performance of in-service RC bridge pier structures in deicing salt environment, Based on the chloride ion content detection data of the in-service RC bridge pier in a highway section in northern China, Considering the time variability of the chloride diffusion coefficient, Construct a modified chloride ion diffusion model suitable for deicing salt environment, and combine the effects of chloride ion erosion on the degradation of material properties to perform ageing seismic vulnerability analysis of active RC bridge pier. Calculate failure probability of bridge pier reaching or exceeding a certain damage state under earthquake. The results show that under the same earthquake, With the increase of service time, the probability of failure of a bridge pier reaching or exceeding a certain damage state increases significantly. The ductility of the bridge pier from severe damage to complete damage is optimal, that is, the bridge pier will not collapse quickly when it reaches severe damage.

**Key words:** in-service RC bridge pier; deicing salt environment; chloride ion erosion; seismic performance assessment; vulnerability analysis

随着我国经济的快速发展, 桥梁对于我国的现代化进程起着不可替代的作用。目前, 我国的钢筋混凝土桥梁已经达到了桥梁总数的 90% 以上<sup>[1]</sup>。而由于桥梁使用环境不良导致的钢筋混凝土劣化问题日渐严重。近年来, 国内外学者研究发现海洋环境下的混凝土结构, 氯离子侵蚀造成的钢筋失效概率强于混凝土碳化<sup>[2-4]</sup>, 并建立基于地震损伤的锈蚀钢筋混凝土构件恢复力模型<sup>[5-6]</sup>。

位于我国北方地区道路和桥梁在冬季常常会被冰雪覆盖, 为保证人们的出行安全, 市政部门通常会采用采用喷洒除冰盐或者融雪剂的方法以清除道

路积雪, 除冰盐中含有的氯化物很容易造成钢筋和混凝土的腐蚀, 导致其材料力学性能降低。目前, 国内外对除冰盐环境下在役桥梁的结构抗震性能时效性变化的研究较少。

鉴于此, 本文以我国北部地区某高速路段在役钢筋混凝土桥墩氯离子含量检测数据研究为基础, 在传统的氯离子扩散模型基础上, 考虑了氯离子扩散系数的时变性, 构建适用于除冰盐环境下的氯离子扩散修正模型, 并结合氯离子侵蚀对材料性能劣化的影响, 计算地震作用下桥墩达到或超过某种特

收稿日期: 2019-09-05

修改稿日期: 2020-03-25

基金项目: 山西省交通运输厅科技计划项目(SJ-2016-16);

第一作者: 童申家(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为桥梁与隧道工程. E-mail:13991336070@163.com;

通信作者: 何坤(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为桥梁与隧道工程. E-mail:1473170267@qq.com.

定损伤状态的失效概率。

## 1 除冰盐环境下氯离子扩散模型的修正

### 1.1 Duracrete 氯离子扩散模型

Duracrete 模型<sup>[7]</sup>在传统的氯离子扩散模型基础上,考虑了扩散系数的时变性,并结合施工,环境等因素的影响,提出了改进的氯离子扩散模型,如式(1)所示。

$$C(x,t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{k_e k_i k_c D_0 (t_0)^n (t) (1-n)}} \right) \right] \quad (1)$$

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\theta^2} d\theta$$

式中:  $C(x, t)$  为  $t$  时刻至  $x$  深度处氯离子的浓度;  $C_s$  为处于混凝土表面位置处氯离子的浓度;  $k_e$  为环境影响修正系数(其中,大气、浪溅和潮汐环境为 0.676,浸没环境为 0.325);  $k_i$  为不同试验方法的修正系数;  $k_c$  为不同养护条件的修正系数;  $n$  为时间退化系数。

### 1.2 除冰盐环境下氯离子扩散修正模型

在 Duracrete 模型中,对海洋环境下氯离子扩散行为研究较多,但针对我国北方地区除冰盐环境下的氯离子扩散, Duracrete 模型并无明确的计算模型,故以我国北部某高速路段在役钢筋混凝土桥墩氯离子含量检测数据为基础,建立除冰盐环境下氯离子扩散修正模型。

由 Duracrete 模型计算出除冰盐环境下环境影响修正系数的计算公式如式(2),其余参数的取值如表 1 所示。

$$k_{ie} = \frac{x^2}{k_i k_c D_0 (t_0)^n (t)^{1-n}} \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_x}{C_s} \right) \right]^2 \quad (2)$$

式中:  $x$  为取样深度, cm;  $C_x$  为至  $x$  深度处氯离子的浓度, %;  $t_0$  为基准期,取 28 d,约合 0.076 7 年;  $t$  为服役年限,年;其它指标如上式所示。

表 1 Duracrete 模型中各参数的取值

Tab. 1 Values of parameters in the Duracrete model

参数	分布类型	均值	标准差
$D_0/\text{mm}^2 \cdot \text{年}^{-1}$	正态分布	220.9	25.4
$C_s/\%$	正态分布	0.3	0.01
$K_i$	正态分布	0.832	0.024
$K_c$	Beta	0.8	0.1
$n$	正态分布	0.362	0.245

对我国北部地区某高速路段兰村大桥、洪善公铁立交桥、尹回惠济河大桥和马牧汾河大桥 4 座典

型桥梁的桥墩钻孔取粉样进行氯离子含量检测,以其检测数据为依据计算环境影响修正系数  $k_{ie}$ 。得到除冰盐环境下的环境影响修正系数  $\bar{k}_{ie}$  为 0.845,标准差为 0.06。

在除冰盐环境下氯离子扩散模型中的  $k_{ie} = 0.845$ ,  $k_i = 0.832$ ;  $k_c = 0.8$ , 得到除冰盐环境下的氯离子扩散模型如式(3)所示,各指标意义同前。

$$C(x,t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{\bar{k}_{ie} k_i k_c D_0 (t_0)^n (t) (1-n)}} \right) \right] \quad (3)$$

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\theta^2} d\theta$$

## 2 基于氯离子侵蚀钢筋混凝土劣化模型

### 2.1 锈蚀钢筋直径和力学性能劣化模型

当钢筋表面的氯离子浓度  $C_x$  达到钢筋的氯离子临界浓度  $C_{crit}$  (取值 0.6%) 时,  $x$  等于保护层厚度  $d$  时,钢筋的截面损失可认为由钢筋直径减少导致的,一般认为  $t_{corr}$  时刻钢筋开始锈蚀。  $t$  时刻的钢筋直径  $d(t)$  和锈蚀率  $\rho_s$  计算公式由式(4)、式(5)所示。

$$d(t) = \begin{cases} d_0, & t \leq t_{corr} \\ d_0 - 2\lambda(t - t_{corr}), & t_{corr} < t \leq t_{corr} + \frac{d_0}{2\lambda} \\ 0, & t > t_{corr} + \frac{d_0}{2\lambda} \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho_s = \frac{d_0^2 - d^2(t)}{d_0^2} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $d(t)$  为至  $t$  时刻钢筋的直径;  $d_0$  为钢筋的初始直径;  $\lambda$  为年锈蚀速率;  $R$  为锈蚀影响系数,服从均值为 3.0,标准差为 0.33 的正态随机变量;  $i_{corr}$  为电流腐蚀密度,服从均值为 1,标准差为 0.2 的正态随机变量;  $\rho_s$  为钢筋锈蚀率。

氯离子侵蚀导致钢筋锈蚀以后,钢筋凹凸不平的表面会出现应力集中现象,从而导致钢筋力学性能发生变化<sup>[8]</sup>,此时钢筋的屈服强度可按式(6)表示:

$$f_{yc} = \begin{cases} f_y, & t \leq t_{corr} \\ (0.986 - 1.199 \rho_s) f_y, & t > t_{corr} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f_y$  为钢筋完好的屈服强度;  $f_{yc}$  为钢筋锈蚀的屈服强度。

### 2.2 损伤混凝土力学性能退化模型

如式(7)所示为 Coronelli, D<sup>[9]</sup> 等多位学者经研究得到受腐蚀损伤后的混凝土强度。

$$f_c = \frac{f_{c0}}{\left\{1 + K \frac{n_{bars} [2\pi(v_{rs} - 1)x]}{b_0 \epsilon_{c0}}\right\}} \quad (7)$$

式中:  $f_{c0}$  为腐蚀前混凝土抗压强度;  $K$  为钢筋粗糙程度及直径大小相关系数, 取值为 0.1;  $\epsilon_{c0}$  为受压混凝土时的峰值应变, 取值为 0.002;  $b_0$  为腐蚀前混凝土结构截面宽度;  $n_{bars}$  为纵向钢筋的数量;  $v_{rs}$  为腐蚀后混凝土的体积膨胀率, 取值为 2;  $x$  为受腐蚀混凝土的腐蚀深度, 均由式(3)推导得出。

### 3 在役 RC 桥墩时效地震易损性分析

#### 3.1 桥墩损伤指标的确定

评估地震作用下桥墩的损伤常采用与位移相关的量来定义损伤指标, 桥墩的损伤指标依据 Hwang<sup>[10]</sup> 的研究报告, 将其定义为桥墩的相对位移延性比, 具体定义如式(8)所示。

$$\mu_d = \Delta / \Delta_{cy1} \quad (8)$$

式中:  $\mu_d$  为桥墩的相对位移延性比;  $\Delta$  为在地震响应分析中墩顶的最大相对位移;  $\Delta_{cy1}$  为钢筋首次屈服时的相对位移。

采用 Xtract 软件对截面在最不利轴力作用下弯矩-曲率进行分析, 如式(9)~(12)所示, 确定损伤指标。

$$\mu_{cy1} = \frac{\Delta_{cy1}}{\Delta_{cy1}} = 1 \quad (9)$$

$$\mu_{cy} = \frac{\Delta_{cy}}{\Delta_{cy1}} = \frac{\frac{1}{3}\varphi_y L^2}{\frac{1}{3}\varphi'_y L^2} = \frac{\varphi_y}{\varphi'_y} \quad (10)$$

$$\Delta_{c4} = \Delta_{cy} + \Delta_{p4} = \frac{1}{3}\varphi_y L^2 + \theta_{p4} \left( L - \frac{1}{2}L_p \right) \quad (11)$$

$$\mu_{c4} = \frac{\Delta_{c4}}{\Delta_{cy1}} \quad (12)$$

式中:  $L$  为桥墩高度, cm;  $\Delta_{cy1}$  为钢筋首次屈服时的屈服位移, cm;  $\Delta_{cy}$  为桥墩截面等效屈服时的墩顶相对位移, cm;  $\Delta_{c4}$  为桥墩截面边缘混凝土应变达到 0.004 时的墩顶相对位移, cm;  $\theta_{p4}$  为桥墩的塑性铰转,  $\theta_{p4} = L_p(\varphi_u \text{ 为 } \varphi_y)$ ;  $\varphi_y$  为钢筋首次屈服曲率;  $\varphi'_y$  为钢筋等效屈服曲率;  $L_p$  为等效塑性铰长度, cm。

我国公路桥梁抗震设计细则<sup>[11]</sup> 规定  $L_p$  取式(13)、(14)两式得出的较小值。

$$L_p = 0.08L + 0.02f_y d_s \quad (13)$$

$$L_p = \frac{2}{3}b \quad (14)$$

式中:  $d_s$  为纵向钢筋的直径, cm;  $b$  为矩形截面短边大小或圆形的截面直径, cm;  $f_y$  为纵向钢筋抗拉强度标准值, MPa。

#### 3.2 时效易损性分析

地震作用具有强随机性, 在役 RC 桥墩的材料损伤在空间和时间上也具有随机性和随机过程性, 所以抗震性能评估方法应采用概率的方法才更为合理<sup>[12-13]</sup>。以传统的时+变地震易损性模型为基本模型, 除考虑地震动参数以外, 进一步考虑钢筋力学性能和混凝土力学性能随时间的劣化, 将条件概率公式修正如式(15)所示。

$$P_f = P(\mu_d \geq S_c | IM = a, d_s = d_s(t), f_y = f_y(t), f_c = f_c(t)) \quad (15)$$

式中:  $d_s = d_s(t)$  为锈蚀钢筋在  $t$  时刻的直径;  $f_y = f_y(t)$  为锈蚀钢筋在  $t$  时刻的屈服强度;  $f_c = f_c(t)$  为损伤混凝土在  $t$  时刻的抗压强度。

研究发现, 在地震作用下易损性曲线服从对数正态分布<sup>[14-15]</sup>。即结构的抗震能力和地震需求服从对数正态分布, 如式(16)所示。

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln(a_t) + b_t \ln(IM) - \ln(S_c)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right) \quad (16)$$

式中:  $P_f$  为不同损伤状态时的失效概率;  $IM$  为地震动强度, 在本研究中采用地震动峰值加速度  $PGA$ ;  $s_c$  为结构的抗震能力;  $\beta_c$  为结构抗震能力对数标准差;  $\beta_d$  为地震需求在给定  $IM$  时对应的条件对数标准差;  $a_t$ ,  $b_t$  为回归系数, 通过拟合地震需求和地震动强度的回归曲线得到。

### 4 除冰盐环境下 RC 桥墩时效易损性分析

#### 4.1 工程背景

试验模型选自我国北部地区某高速路段连续梁桥(3×22 m), 如图 1 所示, 为桥梁立面图。桥墩为实心圆形墩, 墩高为 11.7 m, 桥墩直径为 2 m, 支座布置方式为中部设固定墩一个, 墩顶设置固定支座, 其余各墩均为纵向活动墩, 墩顶设置纵向活动支座。主梁采用 C50 混凝土, 墩柱采用 C30 混凝土。下部桥墩箍筋和纵筋均采用 HRB335, 其中箍筋直径为 16 mm, 纵筋直径为 32 mm, 箍筋纵向间距为 10 cm, 地质条件为 II 类场地, 如图 2 所示, 为墩柱的配筋方案图。

#### 4.2 材料性能随服役年限的劣化

为简化分析条件, 假设箍筋和纵筋均采用相同的锈蚀条件, 仅通过考虑两者保护层厚度的不同来区分其初始锈蚀时间的差异。只考虑氯离子

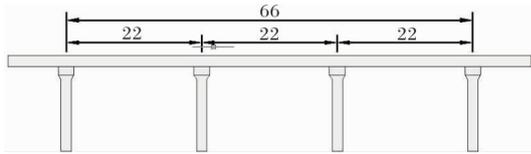


图 1 桥梁立面布置

Fig. 1 Bridge facade layout

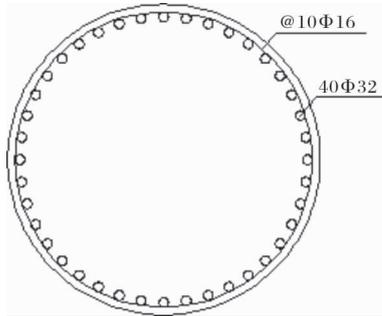


图 2 墩柱配筋

Fig. 2 Pier column reinforcement

对桥墩的影响, 纵筋的初始屈服强度  $f_y$  取值 335 MPa, 直径为 32 mm; 箍筋的初始屈服强度  $f_y$  取值 335 MPa, 直径为 16 mm. 取 100 年服役期内间隔为 20 年的 5 个时间点进行分析, 由式(3)~式(6)可以得到各时间点对应的材料参数如表 2、表 3 所示.

表 2 纵筋和箍筋在不同时间段的锈蚀率

Tab. 2 Corrosion rate of longitudinal ribs and stirrups at different time periods

$t/a$	20	40	60	80	100
纵筋 $\rho_s/\%$	5.7	17.9	29.3	39.8	49.4
箍筋 $\rho_s/\%$	20.5	42	60.1	74.8	86.2

由计算结果可知, 钢筋的锈蚀率随服役时间增加而不断增大, 箍筋与纵筋相比距离混凝土表面更近, 故箍筋锈蚀速率较纵筋锈蚀更快.

表 3 纵筋和箍筋在不同时间段的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of longitudinal ribs and stirrups at different time periods

$t/a$		0	20	40	60	80	100
纵筋	$f_{yc}/\text{MPa}$	335	335	283	235	191	151
	$d_s/\text{mm}$	32	32	30	28	26	24
箍筋	$f_{yc}/\text{MPa}$	335	275	185	108	45	7
	$d_s/\text{mm}$	16	15	13	11	9	7

由计算结果可知, 非约束混凝土的抗压强度随服役时间的增加逐渐降低, 与此同时, 箍筋发生锈蚀, 约束混凝土的抗压强度逐渐趋于非约束混凝土的抗压强度, 由式(7)可得到混凝土强度的时变劣化规律, 如表 4 所示.

表 4 混凝土强度劣化规律

Tab. 4 Deterioration of concrete strength

$t/a$	0	20	40	60	80	100
$f_c/\text{MPa}$	32.4	26.8	22.8	20	17.6	15.8

将其数值代入式(9)~(12), 可计算得到桥墩损伤指标, 将各损伤阶段对应的破坏状态如表 6 所示:

4.3 确定桥墩的损伤指标

在确定损伤指标时, 由 Xtract 软件进行弯矩-曲率分析得到的参数如表 5 所示:

表 5 弯矩-曲率分析得到的参数

Tab. 5 Parameters obtained by bending moment-curvature analysis

确定损伤指标需要的参数	分析得到的墩底截面数据
首次屈服曲率 $\phi'_y$	$1.289\text{E}-3\text{m}^{-1}$

续表 5

确定损伤指标需要的参数	分析得到的墩底截面数据
等效屈服曲率 $\phi_y$	$1.708\text{E}-3\text{m}^{-1}$
混凝土压应变 $\epsilon_c = 0.004$ 时的曲率 $\phi_{c1}$	$3.023\text{E}-3\text{m}^{-1}$

表 6 桥墩相对位移延性比定义的破坏状态

Tab. 6 Destruction states defined by the relative displacement ductility ratio of piers

破坏状态	破坏准则
基本完好	$\mu_d \leq 1$
轻微破坏	$1 < \mu_d \leq 1.325$
中等破坏	$1.325 < \mu_d \leq 1.616$
严重破坏	$1.616 < \mu_d \leq 4.616$
完全破坏	$\mu_d > 4.616$

4.4 时效易损性分析

本文算例桥梁的动力分析研究将依据 OpenSees 建立有限元模型, 共选取 15 条地震波进行 IDA 分析, 算例桥梁设防烈度为 8 度, 以地震峰

值加速度 PGA 为横坐标, 桥墩的失效概率为纵坐标, 绘制各个服役年限的地震易损性曲线. 损伤状态分为以下四种状态: 轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏. 如图 3 所示.

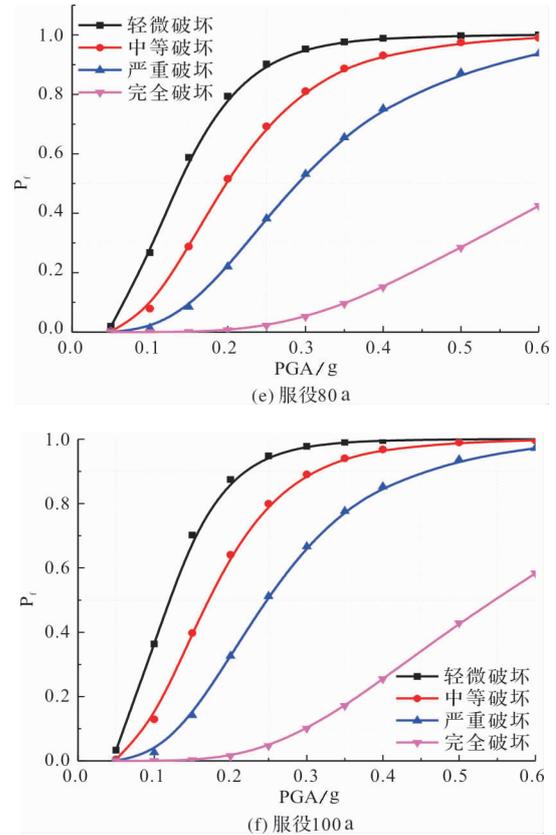
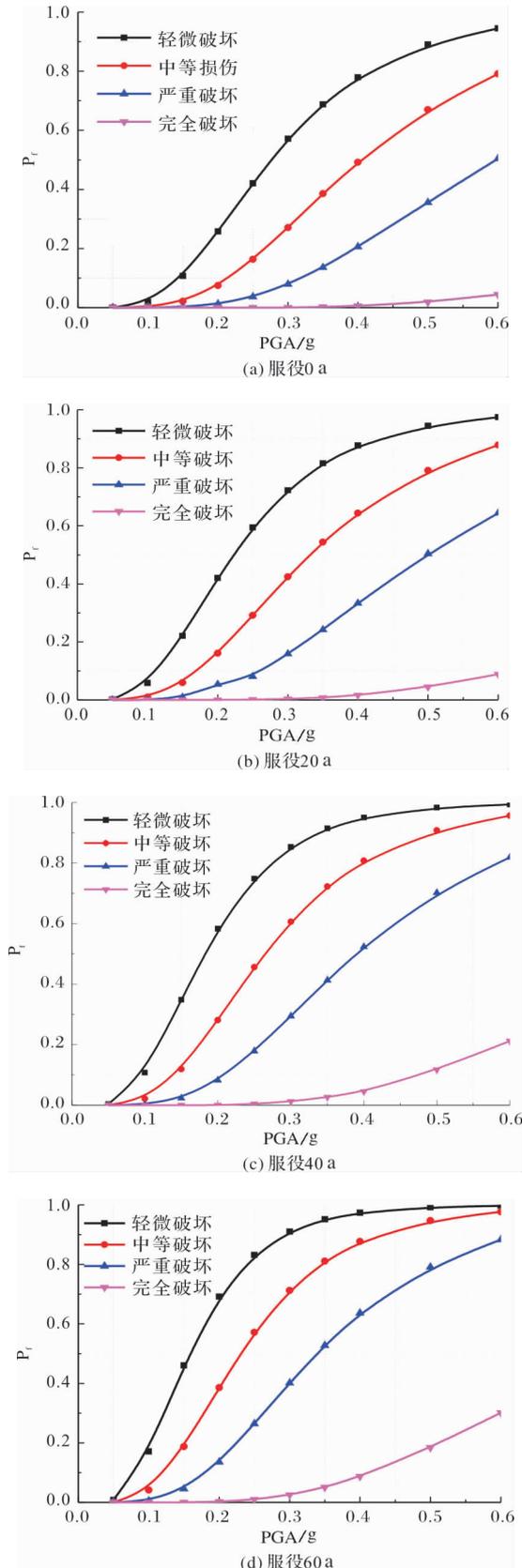


图 3 桥墩地震易损性曲线

Fig. 3 Seismic vulnerability curve of bridge pier

由图 3 可知, 当地震动峰值为一定值时, 各种破坏类型在桥墩服役 0 年时所发生的概率最低, 尽管随着桥墩服役时间的增长, 各种破坏类型发生的概率在逐渐增大, 桥墩服役 100 年后发生各种破坏的概率达到最大值. 由此说明, 在相同的地震作用下, 随服役时间的增加, 桥墩达到或超过某种特定损伤状态下的失效概率显著增大.

服役时间在(0~100)a 之间, 桥墩的地震易损性曲线在轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏 4 个破坏状态之间有一定的间隔, 且概率值依次降低, 说明桥墩在发生这 4 种破坏状态时表现出较好的延性. 桥墩在轻微破坏、中等破坏、严重破坏的易损性曲线间隔较小, 而严重破坏和完全破坏的易损性曲线间隔较大, 说明桥墩在严重破坏和完全破坏之间过渡时表现出的延性能力要优于前 3 种破坏状态, 即桥墩在达到严重破坏时不会很快就倒塌.

### 5 结论

(1) 结合我国北部地区某高速路段在役 RC 桥墩的氯离子含量检测数据, 以 Duracrete 氯离子侵入模型为基本模型, 对该模型进行修正, 得到了基于除冰盐环境下的环境影响修正系数  $k_{ie} = 0.845$ ,

并建立了除冰盐环境下的氯离子扩散修正模型。

(2)以考虑氯离子侵蚀效应下材料性能劣化的在役 RC 桥墩为研究对象,通过对墩柱截面进行弯矩-曲率分析,用桥墩的相对位移延性比确定桥墩在地震作用下的损伤状态。

(3)基于概率的方法,提出了考虑耐久性损伤的 RC 桥墩地震易损性分析模型。根据研究结果可知,当地震作用相同时,随服役时间的增加,桥墩达到或超过某种特定损伤状态下的失效概率显著增大;桥墩从严重破坏至完全破坏的过渡延性最优,即桥墩在达到严重破坏时不会快速倒塌。

### 参考文献 References

- [1] 周履. 桥梁耐久性发展的历史与现状[J]. 桥梁建设, 2000(4):58-61.  
ZHOU Lü. History and current status of bridge durability development[J]. Bridge construction, 2000(4): 58-61.
- [2] 赵尚传. 海洋环境中氯离子侵蚀与混凝土碳化诱发钢筋锈蚀失效概率的对比分析[J]. 公路, 2008(4):163-166.  
ZHAO Shangchuan. Comparative analysis of chlorine ion erosion and concrete carbonation induced corrosion failure probability in marine environment[J]. highway, 2008(4):163-166.
- [3] 梁岩, 罗小勇. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4):202-209.  
LIANG Yan, LUO Xiaoyong. Research on restoring force model of corroded reinforced concrete compression members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4):202-209.
- [4] AKIYAMA M, FRANGOPOL D M, MATSUZAKI H. Life-cycle Reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(15):1671-1687.
- [5] WALRAVEN, JOOST C, Stoelhorst. Model code for service life design. bulletin 34 [M]. Dick Taylor & Francis Ltd, 2008.
- [6] 余红发, 孙伟, 马海燕, 等. 盐湖地区钢筋混凝土结构使用寿命的预测模型及其应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(4):638-642.  
YU Hongfa, SUN Wei, MA Haiyan, et al. Prediction model of service life of reinforced concrete structures in salt lake area and its application[J]. Journal of Southeast University ( Natural Science Edition), 2002, 32(4):638-642.
- [7] 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, 2017.  
HU Sicong. Study on seismic vulnerability and seismic strengthening strategy of bridges considering chloride ion erosion[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [8] 张平生, 卢梅, 李晓燕. 锈蚀钢筋的力学性能[J]. 工业建筑, 1995, 25(9):41-44.  
ZHANG Pingsheng, LU Mei, LI Xiaoyan. Mechanical properties of corroded steel bars[J]. Industrial Building, 1995, 25(9):41-44.
- [9] CORONELLI D, GAMBAROVA P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2004, 130(8):1214-1224.
- [10] HWANG H, LIU J B, CHIU Y H. Seismic fragility analysis of highway bridges [R]. Mid-America Earthquake Center Technical Report, 2001:47-54.
- [11] 重庆交通科研设计院. 公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.  
Chongqing Communications Research and Design Institute. Seismic design rules for highway bridges:JTG/T B02-01-2008[S]. Beijing:China Communications Press, 2008.
- [12] 冯杰. 桥梁结构地震易损性分析研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.  
FENG Jie. Analysis of seismic vulnerability of bridge structures[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2010.
- [13] 靳晓燕, 阮建涛. 不同墩高对钢筋混凝土桥梁抗震性能影响[J]. 公路工程, 2018, 43(4):139-144.  
JIN Xiaoyan WAN Jiancou. Influence of Different Pier Heights on Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridges[J]. Road construction, 2018, 43(4):139-144.
- [14] 姚蓓, 张启伟. 钢斜拉桥运营期耐久性与易损性监测[J]. 中外公路, 2016, 36(1):90-94.  
YAO Pei, ZHANG Qiwei. Durability and vulnerability monitoring of steel cable-stayed bridges during operation period [J]. Chinese and Foreign Roads, 2016, 36(1):90-94.
- [15] 吴文朋. 考虑不确定性的钢筋混凝土桥梁地震易损性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.  
WU Wenpeng. Study on seismic vulnerability of reinforced concrete bridges considering uncertainties [D]. Changsha: Hunan University, 2016.

(编辑 吴海西 沈波)