

文章编号: 1000-4750(2017)12-0048-11

# 考虑锈蚀黏结退化的 钢筋混凝土桥墩抗震性能分析

成 虎<sup>1</sup>, 李宏男<sup>1,2</sup>, 王东升<sup>3</sup>, 李 超<sup>1</sup>, 付 兴<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部, 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168; 3. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘 要:** 受氯离子腐蚀作用影响, 钢筋混凝土结构的抗震性能在其服役期内会发生退化。以钢筋混凝土桥墩为例, 采用 OpenSees 有限元软件模拟了非锈蚀足尺桥墩的振动台试验以及锈蚀缩尺桥墩的拟静力试验结果, 后者引入了氯离子腐蚀作用模型, 同时考虑了桥墩的纵筋力学性能衰减以及粘结退化问题。随后基于概率地震需求模型对足尺桥墩的三种纵筋腐蚀工况进行了易损性分析。研究表明: 采用非线性梁柱单元与零长度截面单元串联方式建立的数值模型能够有效模拟钢筋混凝土桥墩的足尺振动台试验结果和缩尺锈蚀拟静力试验结果; 当纵筋腐蚀率较小时, 纵筋的性能退化对墩顶最大位移影响不大, 但基底剪力和基底弯矩下降明显; 轻微破坏状态下, 桥墩的抗震性能受纵筋锈蚀的影响不明显, 随着破坏程度的加深, 纵筋锈蚀对桥墩抗震性能的影响逐渐显著, 较小的腐蚀率能导致桥墩的破坏概率发生较为明显的提高。研究内容可为考虑全寿命周期内性能退化的钢筋混凝土结构抗震设计提供参考。

**关键词:** 钢筋混凝土桥墩; 氯离子腐蚀; 粘结退化; 概率地震需求分析; 易损性分析

中图分类号: U443.22 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0584

## SEISMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMN CONSIDERING BOND DETERIORATION CAUSED BY CHLORIDE ION INDUCED CORROSION

CHENG Hu<sup>1</sup>, LI Hong-nan<sup>1,2</sup>, WANG Dong-sheng<sup>3</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, FU Xing<sup>1</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

3. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The seismic performance of RC structures declines due to the chloride ion induced corrosion in their life cycles. By means of the software OpenSees, numerical models were built to simulate the test results of a full-scale RC bridge column tested on the shake table and some corroded reduced-scale RC columns tested under quasi-static loadings. According to existing investigations on the model of chloride ion induced corrosion, the degradation of the mechanical property of longitudinal reinforcement and bond deterioration were both considered in the numerical models of corroded RC columns. Then fragility analysis was performed based on the probabilistic seismic demand model for three cases of full-scale RC bridge columns, considering different percentage of the corroded mass relative to the initial mass of the longitudinal reinforcement. The results show

收稿日期: 2016-08-03; 修改日期: 2016-12-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0701108); 国家自然科学基金项目(51478074); 国家自然科学基金青年基金项目(51408223)

通讯作者: 成 虎(1989-), 男, 江苏人, 博士生, 主要从事近海桥梁工程结构抗震研究(E-mail: hoocheng@163.com).

作者简介: 李宏男(1957-), 男, 辽宁人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 主要从事工程结构抗震、抗风、健康监测与诊断研究(E-mail: hnli@dlut.edu.cn);

王东升(1974-), 男, 内蒙古人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁及结构工程抗震研究(E-mail: dswang@dlmu.edu.cn);

李 超(1989-), 男, 河北人, 博士生, 主要从事近海桥梁全寿命抗震性能评价研究(E-mail: lichao17007@163.com);

付 兴(1988-), 男, 辽宁人, 博士生, 主要从事大跨高耸结构抗震、抗风研究(E-mail: fuxing@mail.dlut.edu.cn).

that: the numerical model established by parallel connecting the zero-length section element to the nonlinear beam-column element can simulate the test results effectively; when the corroded mass of the longitudinal reinforcement is minor, the maximum top displacement of the column is not sensitive to the degradation of the mechanical property of longitudinal reinforcement, but the maximum base shear force and moment decrease obviously; When the damage degree of the column is slight, the corrosion of longitudinal reinforcement affects the structural seismic performance negligibly. When the damage condition becomes severer, the effect of the corrosion of longitudinal reinforcement is more obvious. A minor corrosion of longitudinal reinforcement increases the damage probability observably. The study can provide a reference for the seismic design of reinforced concrete structures when considering the performance degradation in the life cycle.

**Key words:** reinforced concrete bridge column; chloride ion induced corrosion; bond deterioration; probabilistic seismic demand analysis; fragility analysis

桥墩作为桥梁的主要抗侧力构件,其抗震能力直接关系着桥梁结构的破坏程度以及震后的救援工作能否顺利开展。震害经验表明,通常主梁在地震中保持弹性,震害较轻;墩柱破坏较为严重。如1994年Northridge地震、1995年Kobe地震以及1999年Chi Chi地震中的大量桥梁震害。

传统的抗震能力设计通常假定结构性能在其服役期内是不变的,从而忽略了环境因素的影响,导致结构在未达到服役年限便退出工作或需要进行大规模的维修加固来维持其正常使用功能。对于近海环境和除冰盐大量使用的地区,氯离子腐蚀效应是影响桥梁结构性能退化最主要的因素之一。目前,针对氯离子腐蚀导致的钢筋混凝土桥梁结构抗震性能退化的问题,国内外学者已开展了适量的研究。Simon等<sup>[1]</sup>以一座典型的钢筋混凝土桥梁为例,研究了钢筋截面积折减和混凝土保护层开裂对结构强度和刚度退化的影响; Ghosh和Padgett<sup>[2]</sup>考虑桥墩和支座的腐蚀问题,建立了桥梁的时变易损性曲线; Choe等<sup>[3]</sup>在氯离子腐蚀概率模型的基础上建立钢筋混凝土柱的概率性承载能力退化模型,并进行了地震易损性分析; Biondini等<sup>[4]</sup>从概率的角度研究了腐蚀环境下的钢筋混凝土桥梁整个生命周期内的抗震性能。随着服役期的增长,桥墩抗弯强度和延性的改变直接影响着桥梁的地震响应; Dong等<sup>[5]</sup>提出了地震作用下桥梁结构时变性的评估方法,在考虑氯离子腐蚀以及洪水冲刷对结构易损性影响的基础上,从社会、环境和经济等方面进行了量化分析,对选择最佳维修方案具有参考价值。Guo等<sup>[6]</sup>考虑了氯离子腐蚀下近海桥梁性能退化的问题,研究了结构剩余服役期内基于时变的抗震需求和地震易损性。李立峰等<sup>[7]</sup>分析了氯离子腐蚀作用

下高墩桥梁的时变易损性。Wu等<sup>[8]</sup>基于构件和系统易损性函数对中等跨径混凝土斜拉桥的抗震性能进行了评估。李宁等<sup>[9]</sup>考虑桥梁结构和地震动的不确定性问题,采用基于向量地震动强度参数的易损性曲面来评估钢筋混凝土桥墩的损伤状态。通过总结现有的研究成果发现,目前考虑氯离子腐蚀对钢筋混凝土结构抗震性能退化影响的研究主要存在两个问题: 1) 大多数有限元数值模型忽略了钢筋混凝土的粘结滑移问题。事实上,墩底的纵筋滑移问题对钢筋混凝土结构的地震响应影响不应忽视<sup>[10]</sup>; 2) 考虑氯离子腐蚀对钢筋混凝土桥墩抗震性能的影响时,往往对纵筋直径和强度进行折减,忽略了钢筋锈蚀引起的粘结退化问题。

国内外学者围绕钢筋混凝土墩柱的抗震性能问题展开了大量的试验研究<sup>[11-13]</sup>,尽管在其过程中考虑了氯离子的腐蚀作用<sup>[12-13]</sup>,但大多以拟静力试验为主。受实验条件和设备所限,制作足尺墩柱试件进行考虑腐蚀的振动台试验的研究存在着一定的难度。因此,有必要从数值的角度开展研究。

本文结合现有的氯离子腐蚀作用模型,同时考虑了钢筋混凝土桥墩的纵筋力学性能衰减以及粘结退化问题。暂不考虑氯离子腐蚀对混凝土和箍筋力学性能的影响,有观点认为<sup>[14]</sup>,桥墩承受了较大的竖向压力,墩身横向裂缝难以发展,从而减轻了箍筋的腐蚀程度。本文基于OpenSees平台,通过数值模拟方法进行了考虑腐蚀修正的钢筋混凝土桥墩抗震性能分析。由于缺少考虑腐蚀作用的足尺振动台试验和强震观测结果,首先,分别通过无锈蚀足尺钢筋混凝土桥墩振动台试验以及锈蚀缩尺墩柱拟静力试验的结果与数值模拟结果进行对比,验证了数值模型的可靠性; 随后,基于氯离子腐蚀

原理,拓展了考虑腐蚀修正的数值模型,建立起三种纵筋腐蚀工况,并分析对比了连续输入6条地震波后的结构响应;最后,基于概率地震需求模型对三种腐蚀工况的钢筋混凝土桥墩进行了易损性分析。

## 1 考虑氯离子腐蚀作用的模型修正

氯离子腐蚀作用是导致钢筋混凝土结构在全寿命周期内抗震性能退化的主要原因之一。由于服役年限的增长,钢筋混凝土结构的材料性能将随着腐蚀程度的加深而严重退化。尤其对于近海环境和大量使用除冰盐的地区,考虑氯离子的腐蚀作用能更真实地反映钢筋混凝土结构抗震性能的时变性问题。本文侧重考虑了氯离子腐蚀效应引起的钢筋直径和屈服强度的变化,以及钢筋与混凝土的粘结退化。

### 1.1 钢筋力学性能的腐蚀修正

氯离子腐蚀效应对钢筋力学性能的影响主要体现在钢筋的直径和强度的退化。国内外学者对此开展了大量研究<sup>[15-17]</sup>,本文参考了Du等<sup>[17]</sup>基于实验研究所提出的氯离子腐蚀作用下钢筋直径和强度随时间变化的退化公式:

$$f_y^* = (1.0 - \beta_y Q_{\text{corr}}) f_y \quad (1)$$

$$f_u^* = (1.0 - \beta_u Q_{\text{corr}}) f_u \quad (2)$$

$$d_s^* = \sqrt{1.0 - Q_{\text{corr}}} \cdot d_s \quad (3)$$

式中:  $f_y$ 、 $f_u$  和  $d_s$  分别为未锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度和直径;  $\beta_y$  对于光圆钢筋取 0.49, 螺纹钢取 0.12;  $\beta_u$  对于光圆钢筋取 0.65, 螺纹钢取 0.15;  $Q_{\text{corr}}$  为钢筋锈蚀率(钢筋锈蚀损失的质量与原始质量之比)。

### 1.2 粘结滑移模型的腐蚀修正

针对墩底的纵筋粘结滑移问题,Zhao等<sup>[18]</sup>提出的 Bond\_SP01 模型考虑了节点屈服应变渗透效应。其中,屈服滑移量  $s_y$  是该模型中的关键参数。在统计了大量变形钢筋拔出实验的结果后,通过线性回归分析得到了钢筋屈服滑移量的计算式:

$$s_y = 2.54 \left( \frac{d_s}{8437} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} (2\alpha + 1) \right)^{1/\alpha} + 0.34 \quad (4)$$

式中:  $\alpha = 0.4$ ;  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度。

潘志宏等<sup>[19]</sup>假定钢筋屈服前节点内钢筋应变沿锚固长度近似直线分布,忽略混凝土变形的影响,推导了节点内钢筋屈服时加载端的滑移计算

式,如式(5)所示。并通过实验数据对比了分别由式(4)和式(5)计算的加载端滑移量,分析表明,式(4)和式(5)的计算结果与试验结果比值的相关系数分别为 0.9 和 0.95,从而验证了式(5)的合理性。

$$s_y = \left[ \frac{d_s f_y^2}{10 E_s \sqrt{f'_c}} \right]^{0.714} \quad (5)$$

式中,  $E_s$  为钢筋的弹性模量。

袁迎曙等<sup>[20]</sup>通过腐蚀钢筋的拔出试验对典型粘结应力-滑移曲线进行了修正,得到了锈蚀钢筋的粘结滑移关系。随后,潘志宏等<sup>[19]</sup>在考虑节点屈服应变渗透效应的模型基础上,引入锈蚀钢筋粘结滑移关系,对 Zhao 等提出的钢筋屈服滑移量进行了腐蚀修正,以方便用于 OpenSees 有限元软件计算:

$$s_y^* = \left[ \frac{d_s f_y^2 (1 - 7.365 Q_{\text{corr}})^{0.4}}{10 E_s \Phi_u \sqrt{f'_c}} \right]^{0.714} \quad (6)$$

式中:  $\Phi_u = 1 - K_u Q_{\text{corr}}$  为粘结强度退化系数;  $K_u = 10.544 - 1.586(C/d_s)$  根据试验结果统计分析所得<sup>[20]</sup>;  $C$  为混凝土保护层厚度。

由式(6)计算所得的钢筋锈蚀率与对应的屈服滑移量关系如图1所示。由图易知,随着钢筋锈蚀率的增大,屈服滑移量增大趋势显著。

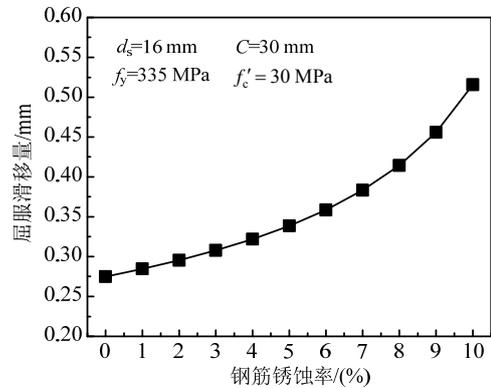


图1 屈服滑移量与钢筋锈蚀率关系

Fig.1 Relationship of yield slip and longitudinal steel corrosion

## 2 数值验证

尽管现有的钢筋混凝土墩柱的抗震性能试验考虑了氯离子的腐蚀作用<sup>[12-13]</sup>,但多以拟静力试验为主,且对足尺腐蚀墩柱进行振动台试验存在一定难度。因此,有必要从数值的角度开展研究。

基于 OpenSees 有限元软件建立数值模型,采用非线性梁柱单元与零长度截面单元串联的组合方式,考虑了墩底的纵筋粘结滑移<sup>[18]</sup>(如图2所示),

分析过程中考虑  $P-\Delta$  效应。为验证数值模型的合理性，分别对足尺非腐蚀桥墩的振动台试验结果和缩尺腐蚀墩柱的拟静力试验结果进行数值模拟。其中，采用 Steel02 模拟钢筋材料的本构；粘结滑移材料则通过 Bond\_SP01 进行模拟；而混凝土材料的本构采用 Concrete01 和 Concrete04 均能得到较好的模拟结果。

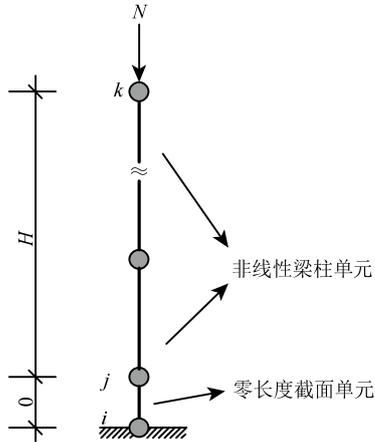


图2 钢筋混凝土桥墩有限元模型

Fig.2 Finite element model of RC bridge column

## 2.1 足尺桥墩振动台试验模拟

### 2.1.1 试验简介

选取一足尺钢筋混凝土桥墩试验结果进行数值模拟，该试验结果取自 2010 年由 PEER 和 NEES 在美国加州大学圣地亚哥分校举办的足尺桥墩振动台实验盲测竞赛。桥墩高 7.315 m，为圆形截面，直径 1.219 m，配置 18 根直径为 35.8 mm 的纵筋；箍筋直径 15.9 mm，间距 152.4 mm；墩顶承受集中质量 250 t，保护层厚度为 50.8 mm。实验过程中，对该足尺桥墩进行了连续 6 条地震波的加载，且间隔采用白噪声激励，以识别结构的动力特性。因逐条加载的地震动强度范围较广，足尺桥墩从最初的弹性状态达到了最终的近乎倒塌状态，动力加载过程如表 1 所示。

### 2.1.2 数值模拟结果与实验结果对比

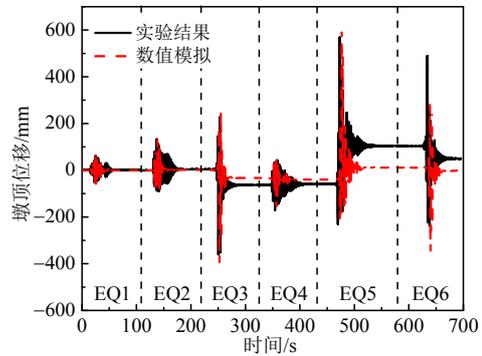
以墩顶位移、基底剪力和基底弯矩为主要分析对象，将采用前述方法所得到的数值模拟结果与实验结果、以及盲测竞赛中三位获胜选手(Winner-R、Winner-EP1 和 Winner-EP2)所提交的结果进行了对比。

图 3 所示为本文数值模拟与实验所得的时程曲线对比情况。由图 3 易知，对于残余位移的模拟效果并不理想，如何较好地模拟振动台实验的残余位

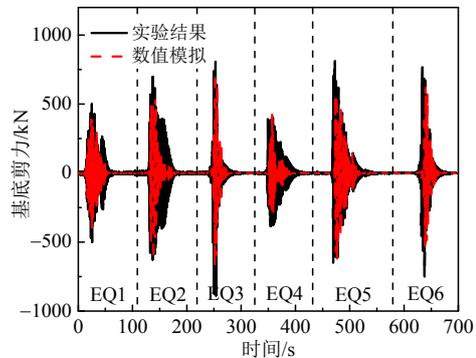
表 1 加载序列

Table 1 Test sequence

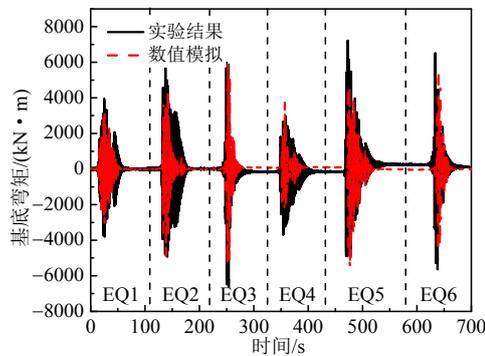
加载顺序	动力荷载编号	地震波文件	PGA/g
1	White Noise No.1	—	0.1680
2	EQ1	AGW090.AT2	0.1992
3	White Noise No.2	—	0.1680
4	EQ2	CLS090.AT2	0.4093
5	White Noise No.3	—	0.1680
6	EQ3	LGP000.AT2	0.5264
7	White Noise No.4	—	0.1680
8	EQ4	CLS090.AT2	0.4539
9	White Noise No.5	—	0.1680
10	EQ5	TAK000.AT2	0.5333
11	White Noise No.6	—	0.1680
12	EQ6	LGP000.AT2	0.5115
13	White Noise No.7	—	0.1680



(a) 墩顶位移



(b) 基底剪力



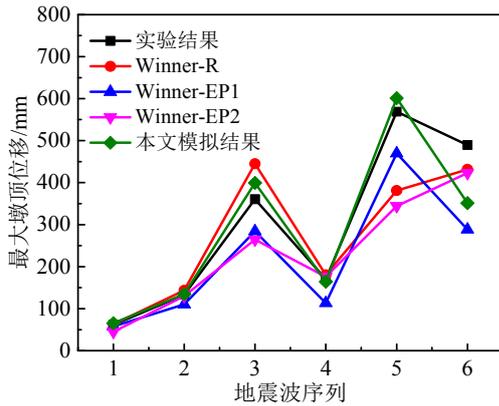
(c) 基底弯矩

图 3 结构响应时程曲线

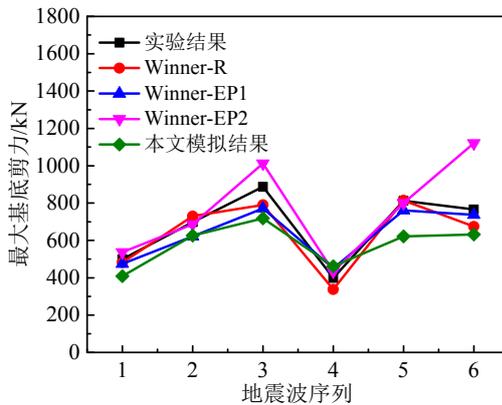
Fig.3 Time history curves of structural responses

移还存在一定的困难<sup>[21-22]</sup>。除此之外，所模拟的墩顶位移、基底剪力和基底弯矩的时程曲线均与实验结果较为接近。

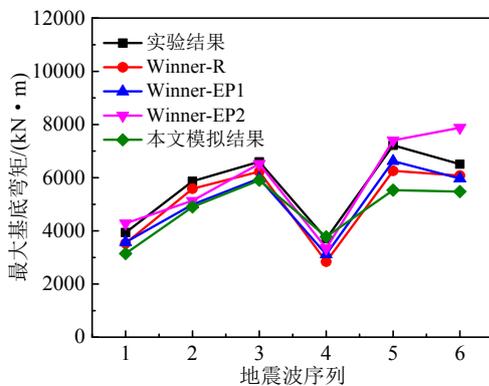
为进一步验证模拟的精度，分别提取了对应的结构最大响应值，与实验测定值、获胜选手的预测值进行了模拟误差的对比，如图 4 和图 5 所示。由图 5 可知，墩顶位移、基底剪力和基底弯矩最大值的模拟误差大多在 20% 以下，认为本文的模拟结果精度可以接受。



(a) 最大墩顶位移



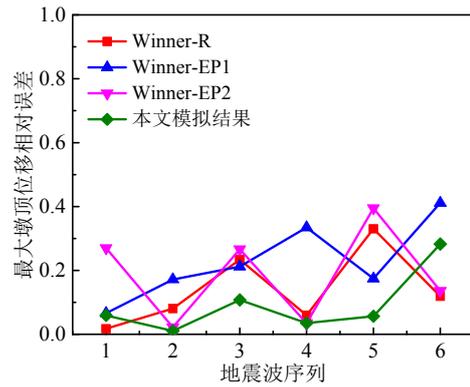
(b) 最大基底剪力



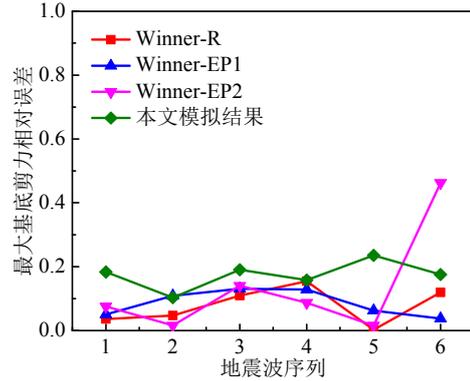
(c) 最大基底弯矩

图 4 结构最大响应

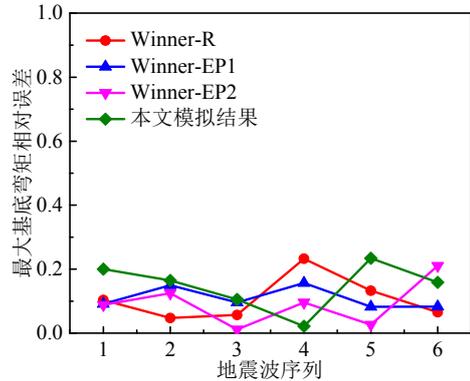
Fig.4 Maximum structural responses



(a) 最大墩顶位移相对误差



(b) 最大基底剪力相对误差



(c) 最大基底弯矩相对误差

图 5 结构最大响应相对误差

Fig.5 Relative error of the maximum structural responses

## 2.2 缩尺锈蚀桥墩拟静力试验模拟

### 2.2.1 试验简介

朱杰<sup>[12]</sup>等设计制作了 8 个钢筋混凝土圆柱试件，以研究不同腐蚀程度下墩柱的性能退化问题。试件高 1250 mm，加载高度为 1100 mm；圆形截面，直径 300 mm。墩柱共配置 6 根直径为 16 mm 的 HRB335 螺纹钢筋，配筋率为 1.707%；箍筋采用直径为 8 mm 的 HPB235 圆钢，螺旋配箍，保护层厚度为 30 mm。加载时混凝土标准立方体抗压强度平均值为 30.43 MPa，纵筋 HRB335 屈服强度 355.626 MPa，极限强度 538.245 MPa，箍筋 HPB235

屈服强度 230.677 MPa, 极限强度 384.460 MPa。试验中采用通电快速锈蚀法加速钢筋锈蚀, 各试件中钢筋锈蚀情况如表 2 所示。数值模拟过程中, 主要考虑纵筋直径和屈服强度的折减、以及粘结滑移的腐蚀退化问题, 具体参数如表 3 所示。

表 2 钢筋腐蚀试验锈蚀率  
Table 2 Test data of steel corrosion

试件编号	实测锈蚀率均值/(%)	理论锈蚀率/(%)
0	0.00	0.00
C5	3.83	5.00
C5-40	3.99	5.00
C5-60	4.45	5.00
C10	8.00	10.00
C10-40	8.41	10.00
C10-60	7.96	10.00
CG10	7.16	10.00

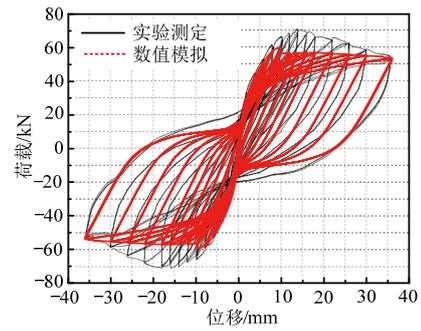
表 3 腐蚀试件的钢筋材料参数  
Table 3 Parameters of steel for corroded specimens

试件	$Q_{corr}$	$d_s^*/mm$	$f_y^*/MPa$	$f_u^*/MPa$	$s_y^*/mm$
C0	0.00	16.00	355.63	538.25	0.288
C5	3.83	15.69	353.99	535.15	0.334
C5-40	3.99	15.68	353.92	535.02	0.337
C5-60	4.45	15.64	353.73	534.65	0.344
C10	8.00	15.35	352.21	531.79	0.434
C10-40	8.41	15.31	352.04	531.46	0.450
C10-60	7.96	15.35	352.23	531.82	0.432
CG10	7.16	15.42	352.57	532.46	0.406

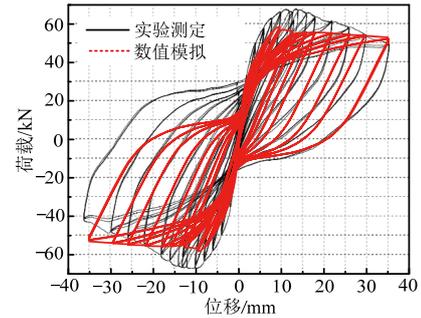
### 2.2.2 滞回曲线对比

以滞回曲线为主要考察对象, 数值模拟与试验结果对比如图 6 所示。总体而言, 模拟与试验的滞回曲线基本特征相似, 大部分模拟结果与试验测定值较为接近, 但少量试件的承载力和初始刚度模拟效果不太理想(如 C5、5-60 和 C10-40)。究其原因, 可能是数值模型与试验试件之间的差异性所导致的: 1) 模拟过程中, 由于数值模型和材料均对称, 所得的滞回曲线具有较好的对称性, 而试验得到的滞回曲线明显不对称, 这可能是由于试件的制作偏差引起的; 2) 试验试件中, 氯离子对钢筋的腐蚀作用是不均匀的, 而在数值建模过程中对锈蚀钢筋的直径和强度进行了均匀折减, 从而造成了数值模型中材料参数的取值与试验试件存在一定的出入。

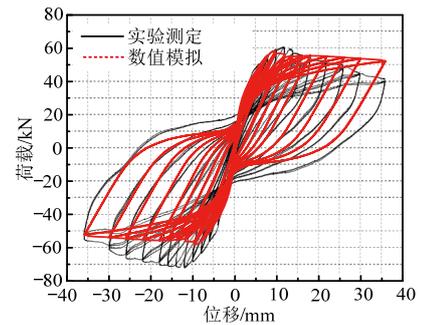
通过对足尺非锈蚀桥墩振动台试验以及缩尺锈蚀桥墩拟静力试验的有效模拟, 验证了数值模型的合理性, 为从数值角度研究足尺锈蚀钢筋混凝土桥墩的抗震性能分析提供了依据。



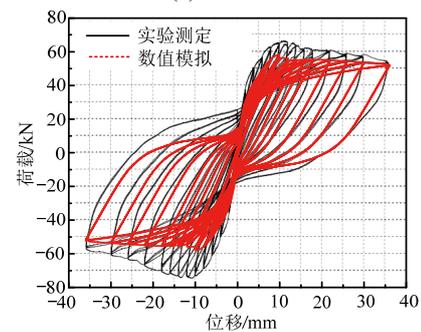
(a) C0



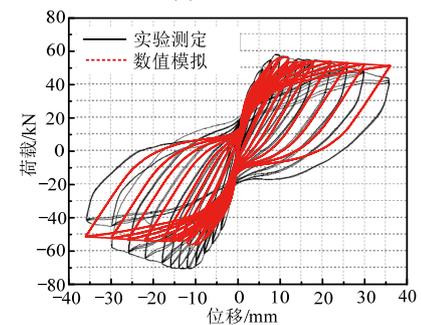
(b) C5



(c) C5-40



(d) C5-60



(e) C10

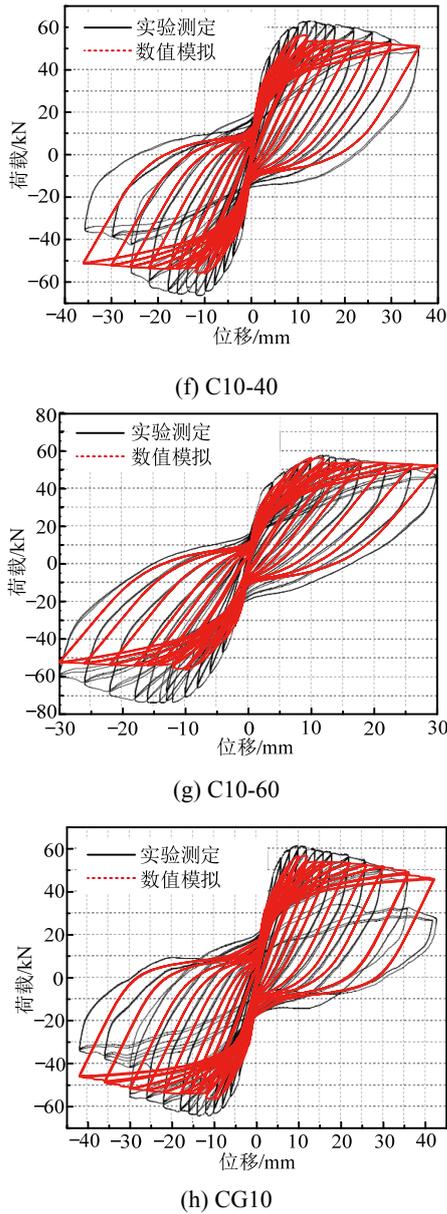


图 6 试验与模拟滞回曲线对比

Fig.6 Comparison of hysteretic curves between tests and simulations

### 3 足尺锈蚀钢筋混凝土桥墩数值模型

已有的氯离子腐蚀对钢筋混凝土结构抗震性能影响的研究中,通常只考虑钢筋强度及截面的锈蚀问题,而忽略了氯离子腐蚀对钢筋粘结滑移的影响。在本文分析中,为了更准确地反映桥墩在氯离子腐蚀后的抗震性能,利用 OpenSees 软件,实现了同时考虑钢筋强度和截面锈蚀以及钢筋锈蚀引起的粘结退化问题。

鉴于锈蚀钢筋的粘结滑移关系是在试验的基础上对典型粘结应力-滑移曲线修正所得,而试验的平均锈蚀率范围为 0%~10%<sup>[20]</sup>;且根据 Choe 等<sup>[3]</sup>

的研究结果,对于处于海洋环境浪溅区的混凝土结构,氯离子侵蚀导致的钢筋直径折减 10%是其在服役期的退化上限值。因此,本文基于 NEES 足尺振动台试验模型,建立了钢筋锈蚀率分别为 0%、6%和 10%三种工况下腐蚀足尺桥墩数值模型。

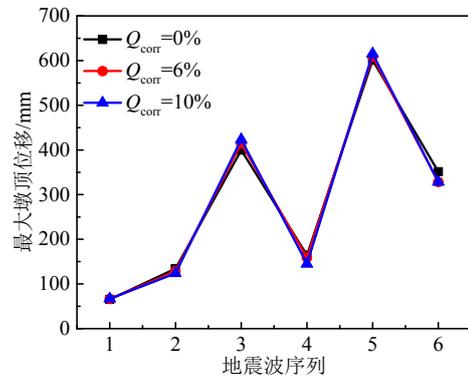
考虑氯离子腐蚀的钢筋混凝土桥墩数值模型中,通过式(1)~式(3)和式(6)对 Steel02 和 Bond\_SP01 材料的参数进行腐蚀修正,各参数如表 4 所示。除此之外,其余模型参数与足尺桥墩动力实验的数值模型(钢筋锈蚀率为 0%)一致。

表 4 不同锈蚀程度下钢筋的材料参数

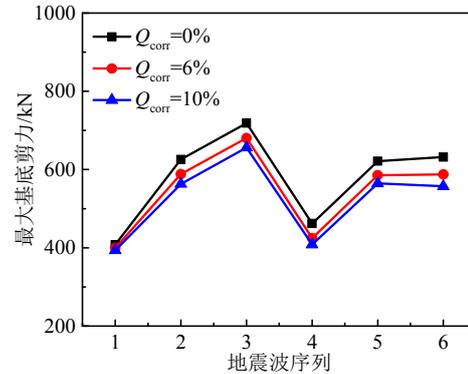
Table 4 Parameters of steel for different corrosion cases

工况	$Q_{corr}/(\%)$	$d_s^*/\text{mm}$	$f_y^*/\text{MPa}$	$f_u^*/\text{MPa}$	$s_y^*/\text{mm}$
1	0	35.80	518.00	706.00	1.30
2	6	34.71	514.27	699.65	1.80
3	10	33.96	511.78	695.41	3.14

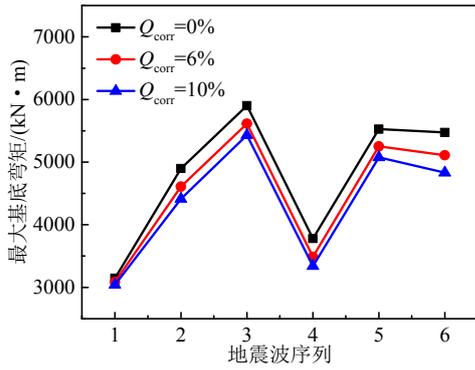
对三种腐蚀工况下的桥墩数值模型输入如表 1 所示的地震波,分别对比了墩顶最大位移、最大基底剪力和最大基底弯矩,结果如图 7 所示。为了更直观地反映纵筋锈蚀对墩顶最大位移、最大基底剪力和最大基底弯矩的影响情况,以  $Q_{corr}=0\%$  为参考工况,计算了锈蚀率分别为 6%和 10%时的结构响应与参考工况的差值百分比,如表 5~表 7 所示。表中数值为负表示相比参考工况呈减小趋势。



(a) 最大墩顶位移



(b) 最大基底剪力



(c) 最大基底弯矩

图 7 不同腐蚀率下结构的峰值响应

Fig.7 Structural peak responses for different corrosion cases

表 5 不同纵筋锈蚀程度下墩顶最大位移差值百分比 / (%)

Table 5 Discrepancy of maximum displacement for different corrosion cases

地震波序列	1	2	3	4	5	6
$Q_{corr}=6\%$	1.43	-4.54	3.80	-3.44	1.32	-6.64
$Q_{corr}=10\%$	2.39	-7.84	5.97	-11.81	2.41	-6.59

表 6 不同纵筋锈蚀程度下最大基底剪力差值百分比 / (%)

Table 6 Discrepancy of maximum base shear for different corrosion cases

地震波序列	1	2	3	4	5	6
$Q_{corr}=6\%$	-2.12	-5.98	-5.31	-8.10	-5.81	-7.03
$Q_{corr}=10\%$	-3.62	-10.03	-8.70	-11.61	-9.14	-11.80

表 7 不同纵筋锈蚀程度下最大基底弯矩差值百分比 / (%)

Table 7 Discrepancy of maximum bending moment for different corrosion cases

地震波序列	1	2	3	4	5	6
$Q_{corr}=6\%$	-1.95	-5.91	-4.86	-7.67	-4.99	-6.64
$Q_{corr}=10\%$	-3.34	-9.92	-8.00	-11.63	-8.16	-11.73

由表 5~表 7 可知，纵筋锈蚀对墩顶最大位移、最大基底剪力和最大基底弯矩的影响较为显著，尤其是最大基底剪力和最大基底弯矩，随着腐蚀率的增大而出现较为明显地下降。当纵筋锈蚀率为 10% 时，下降程度可达 11%，说明忽略纵筋的锈蚀问题，将高估结构的承载能力。

## 4 腐蚀钢筋混凝土桥墩易损性分析

地震易损性分析是指结构在承受不同强度的地震作用下，发生不同程度破坏的可能性。换言之，是指结构达到或超过某一极限状态(性能水平)的超越概率，这从概率的角度定量地描述了工程结构的抗震性能，从宏观的角度描述了地震动强度与结构破坏之间的关系<sup>[23]</sup>。

对前文所建立的三种腐蚀工况下的桥墩模型

进行非线性时程分析，通过输入强度分布范围较广的地震波样本以对桥墩处于不同腐蚀程度的地震易损性。

### 4.1 输入地震记录

用于地震易损性分析的地震记录来源于 Baker 等<sup>[24]</sup>的研究工作。选取了其中的 40 条地震记录，每条记录均有两个水平方向分量，合计 80 条地震波。该组地震波为宽频带地震动，目标震级为 7 级，震中距 10 km。80 条地震波的震级-峰值加速度 (PGA) 关系如图 8 所示，震级范围 6 级~8 级，峰值加速度为 0.1 g~1.1 g，所选地震波的强度分布范围较广，避免了对原始地震动记录进行比例缩放所引起的原有记录频谱特性的改变<sup>[25]</sup>。

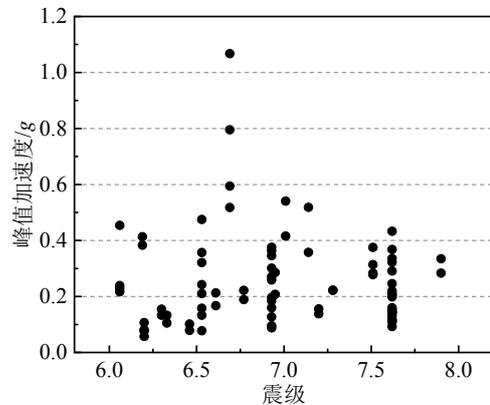


图 8 80 条地震记录震级-峰值加速度关系

Fig.8 Relationship between Magnitude and PGA of 80 Earthquake Records

分别对前述三种腐蚀工况进行动力时程分析，在 80 条地震动作用下，计算不同腐蚀程度下结构的响应。

### 4.2 基于概率地震需求分析的线性拟合

Cornell 等<sup>[26]</sup>给出了结构地震需求参数 EDP 与地震动强度指标 IM 之间的近似关系式：

$$EDP = a(IM)^b \quad (7)$$

或

$$\ln(EDP) = \ln a + b \ln(IM) \quad (8)$$

式中， $a$  和  $b$  为统计回归系数。

Padgett 等<sup>[27]</sup>对用于概率地震需求模型的地震动强度指标进行了对比分析，综合考虑了地震易损性分析的效率、精度、实用性以及风险的可计算性等，选择了 PGA 作为地震动强度指标。因此，本文同样采用该指标进行分析。根据美国地震损失评估软件 HAZUS99 用户手册<sup>[28]</sup>对桥梁破坏状态的定义，分为无破坏、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏五个破坏状态，对应着四个极限状态以

区分破坏状态的界限范围。采用曲率延性  $\mu$  作为墩柱的破坏状态指标已被广泛应用于桥梁结构地震易损性分析中, 其值为动力时程分析所得的墩柱最大曲率与 Pushover 分析中的墩柱屈服曲率之比。当曲率延性值取为 1、2、4、7 时, 分别对应墩柱的轻微破坏极限状态、中等破坏极限状态、严重破坏极限状态和完全破坏极限状态<sup>[29]</sup>。

以 PGA 作为地震动强度指标, 以曲率延性作为墩柱的地震需求参数, 故式(8)可写作:

$$\ln(\mu) = \ln a + b \ln(\text{PGA}) \quad (9)$$

通过对结构响应数据点进行线性拟合, 可得到不同腐蚀率下的统计回归系数, 整理如表 8 所示。图 9 以  $Q_{\text{corr}}=10\%$  为例展示了线性拟合的结果。

表 8 线性回归分析参数统计

Table 8 Parameters of Linear Regression Analysis

$Q_{\text{corr}}(\%)$	$\ln a$	$b$	$R^2$
0	2.9047	1.7784	0.5191
6	3.0009	1.7936	0.5275
10	3.0613	1.7988	0.5316

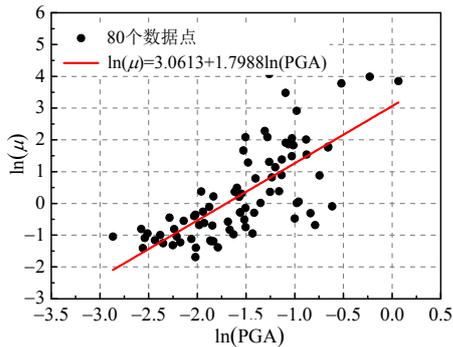


图 9 曲率延性的回归分析( $Q_{\text{corr}}=10\%$ )

Fig.9 Regression analysis of curvature ductility ( $Q_{\text{corr}}=10\%$ )

#### 4.3 绘制易损性曲线

结构的失效概率  $P_f$  即为地震需求超过结构抗力的概率, 参考 Hwang 和刘晶波等<sup>[30]</sup>采用的生成易损性曲线的方法, 可知:

$$P_f = \Phi \left( \frac{-\ln(\tilde{\mu}_c / \tilde{\mu}_d)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right) \quad (10)$$

式中:  $\tilde{\mu}_c$  为结构抗力, 即各极限破坏状态对应的取值;  $\tilde{\mu}_d$  为地震需求, 即地震作用下结构的响应;  $\beta_c$  和  $\beta_d$  分别为结构抗力和地震需求的对数标准差。根据 HAZUS99<sup>[28]</sup>, 当选取 PGA 作为地震动强度指标时,  $\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2} = 0.5$ 。而  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布函数:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (11)$$

将根据式(9)拟合所得的不同腐蚀率下墩柱的曲率延性与 PGA 关系式代入式(10), 可得:

$$P_f = \Phi \left( \frac{\ln[18.2603 \cdot (\text{PGA})^{1.7784} / \tilde{\mu}_c]}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right), Q_{\text{corr}} = 0\% \quad (12)$$

$$P_f = \Phi \left( \frac{\ln[20.1038 \cdot (\text{PGA})^{1.7936} / \tilde{\mu}_c]}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right), Q_{\text{corr}} = 6\% \quad (13)$$

$$P_f = \Phi \left( \frac{\ln[21.3557 \cdot (\text{PGA})^{1.7988} / \tilde{\mu}_c]}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right), Q_{\text{corr}} = 10\% \quad (14)$$

将分别对应墩柱的轻微破坏极限状态、中等破坏极限状态、严重破坏极限状态和完全破坏极限状态的曲率延性极限值  $\tilde{\mu}_c$  (1、2、4 和 7) 代入式(12)~式(14), 即可得到不同腐蚀率下桥墩遭受不同地震强度时达到各个破坏状态的失效概率, 绘制成易损性曲线, 如图 10 所示。

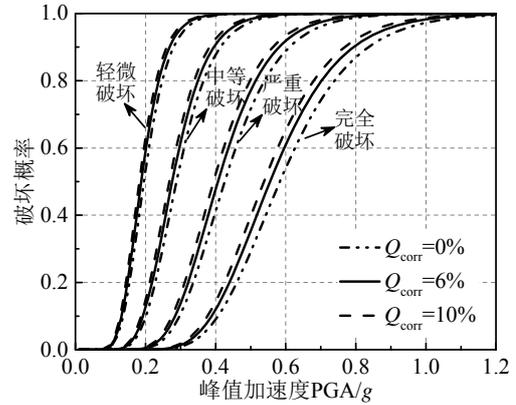


图 10 不同锈蚀程度下钢筋混凝土桥墩地震易损性曲线

Fig.10 Fragility curves of RC bridge columns for different corrosion cases

由图 10 可知, 桥墩达到轻微破坏状态时, 其抗震性能受钢筋锈蚀的影响不大。随着破坏程度的加深, 相同强度地震作用下, 钢筋锈蚀率越大, 桥墩的破坏概率越高。以完全破坏状态为例, 当 PGA 达到 0.6 g 时, 钢筋锈蚀率 0%、6% 和 10% 对应的破坏概率分别为 54%、61% 和 65%, 说明较小的腐蚀情况能导致桥墩的破坏概率发生较为明显地提高, 忽略钢筋的锈蚀问题, 将提高结构设计和使用的风险。

## 5 结论

本文模拟了足尺非锈蚀桥墩的振动台试验以及缩尺锈蚀桥墩的拟静力试验, 通过数值结果与实验结果的对比较验证了模型的可靠性。同时, 在考虑氯离子腐蚀效应引起的纵筋性能退化和墩底粘结

退化的基础上,分析对比了腐蚀修正模型和初始模型在连续输入6条地震波后的结构响应。最后,基于概率地震需求模型对三种腐蚀工况的钢筋混凝土桥墩进行了易损性分析。主要结论如下:

(1) 基于OpenSees平台,采用非线性梁柱单元与零长度截面单元串联的方式所建立的数值模型能够有效模拟足尺钢筋混凝土桥墩的振动台实验结果以及缩尺锈蚀桥墩的拟静力试验结果。

(2) 对于处于近海环境和大量使用除冰盐的地区,氯离子的腐蚀效应将导致结构抗震性能退化。当腐蚀情况不严重时,墩顶最大位移对钢筋的性能退化并不敏感,而最大基底剪力和最大基底弯矩随着腐蚀率的增大出现较为明显地下降,说明忽略钢筋的锈蚀问题,将提高结构设计和使用上的风险。

(3) 轻微破坏状态下,桥墩的抗震性能受钢筋锈蚀的影响不大,随着破坏程度的加深,钢筋锈蚀对桥墩抗震性能的影响逐渐显著;严重破坏和完全破坏状态下,较小的腐蚀情况能导致桥墩的破坏概率发生较为明显地提高。

本文工作可为考虑全寿命周期内性能退化的钢筋混凝土结构抗震设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ghosh J, Padgett J E. Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 136(12): 1497—1511.
- [3] 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.
- [4] Biondini F, Camnasio E, Palermo A. Lifetime seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(7): 880—900.
- [5] Dong Y, Frangopol D M, Saydam D. Time-variant sustainability assessment of seismically vulnerable bridges subjected to multiple hazards [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(10): 1451—1467.
- [6] Guo A, Yuan W, Lan C, et al. Time-dependent seismic demand and fragility of deteriorating bridges for their residual service life [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, 13(8): 2389—2409.
- [7] 李立峰, 吴文朋, 胡思聪, 刘守苗. 考虑氯离子侵蚀的高墩桥梁时变地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(1): 163—170.  
Li Lifeng, Wu Wenpeng, Hu Sicong, Liu Shoumiao. Time-dependent seismic fragility analysis of high pier bridge based on chloride ion induced corrosion [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(1): 163—170. (in Chinese)
- [8] Wu W, Li L, Shao X. Seismic assessment of medium-span concrete cable-stayed bridges using the component and system fragility functions [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(6): 04016027.
- [9] 李宁, 李杨, 李忠献. 基于向量IM的钢筋混凝土桥墩地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(1): 58—63, 71.  
Li Ning, Li Yang, Li Zhongxian. Seismic vulnerability analysis of reinforced concrete bridge piers based on vector-valued intensity measure [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(1): 58—63, 71. (in Chinese)
- [10] 成虎, 李宏男, 王东升. 弯曲破坏型钢筋混凝土桥墩地震变形成分及影响因素[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(1): 62—68.  
Cheng Hu, Li Hongnan, Wang Dongsheng. Seismic deformation components and influential factors of RC bridge columns suffering from flexural failure [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(1): 62—68. (in Chinese)
- [11] Lehman D E, Moehle J P. Seismic performance of well-confined concrete bridge columns [M]. University of California, Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2000.
- [12] 朱杰. 受腐蚀钢筋混凝土墩柱的性能退化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
Zhu Jie. Degradation of capacity of the corroded reinforced concrete columns [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 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 chlorides ions corrosion effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(11): 70—77. (in Chinese)
- [15] Ma Y F, Zhang J R, Wang L, et al. Probabilistic prediction with Bayesian updating for strength degradation of RC bridge beams [J]. *Structural Safety*, 2013, 44: 102—109.
- [16] Zhang W P, Song X B, Gu X L, et al. Tensile and fatigue behavior of corroded rebars [J]. *Construction and*

- Building Materials, 2012, 34: 409—417.
- [17] Du Y G, Clark L A, Chan A H. Residual capacity of corroded reinforcing bars [J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(3): 135—147.
- [18] Zhao J, Sritharan S. Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures Concrete Structures [J]. ACI structural journal, 2007, 104(2): 133—141.
- [19] 潘志宏, 李爱群, 孙义刚. 反复荷载下锈蚀黏结退化的 RC 结构数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 362—367.  
Pan Zhihong, Li Aiqun, Sun Yigang. Numerical simulation of reinforced concrete structures under cyclic loads: the effects of bond deterioration due to reinforcement corrosion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(3): 362—367. (in Chinese)
- [20] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 47—52, 96.  
Yuan Yingshu, Jia Fuping, Cai Yue. The structural behavior deterioration model for corroded reinforced concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 47—52, 96. (in Chinese)
- [21] Qu Z. Predicting nonlinear response of an RC bridge pier subjected to shake table motions [C]// Proceedings 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering (9CUEE), Tokyo, Japan, 2012: 1717—1724.
- [22] Cheng H, Li H N, Wang D S, et al. Research on the influencing factors for residual displacements of RC bridge columns subjected to earthquake loading [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(8): 2229—2257.
- [23] 于晓辉, 吕大刚. 基于云图-条带法的概率地震需求分析与地震易损性分析[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 68—76.  
Yu Xiaohui, Lü Dagang. Probabilistic seismic demand analysis and seismic fragility analysis based on a cloud-stripe method [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 68—76. (in Chinese)
- [24] Baker J W, Lin T, Shahi S K, et al. New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2011.
- [25] 马海滨, 卓卫东, 林杰, 邢文杰, 谷音, 孙颖. 基于云图法的规则桥梁概率地震需求模型[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊 1): 119—124.  
Ma Haibin, Zhuo Weidong, Lin Jie, Xing Wenjie, Gu Yin, Sun Ying. A probabilistic seismic demand model for regular highway bridges by cloud approach [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(Suppl 1): 119—124. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] Padgett J E, Nielson B G, DesRoches R. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(5): 711—725.
- [28] Federal Emergency Management Agency. HAZUS99 User's Manual [M]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1999: 202—208.
- [29] Choi E, DesRoches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. Engineering Structures, 2004, 26(2): 187—199.
- [30] Hwang H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 47—51.  
Hwang H, Liu Jingbo. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 47—51. (in Chinese)