

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.018

# 深水高桩承台基础损伤分析模型研究\*

张学峰

(交通运输部公路科学研究所,北京 100088)

**摘要:**深水高桩承台基础结构柔,长期处于深水激流恶劣工作环境中,对其进行准确而有效的损伤分析非常重要。首先对深水高桩承台基础受力变形特征进行分析,找出单桩损伤与弯矩曲率的关系,在Park-Ang的双参数损伤模型基础上建立了适用于深水高桩承台基础损伤曲率模型,并给出5种损伤程度的定量描述;应用美国加州大学伯克利分校的钢筋混凝土试件损伤模型试验结果进行分析和对比,验证了损伤曲率模型的损伤程度划分是符合桩基实际受力变形损伤的,最后通过工程实例的实践应用验证了损伤曲率模型的可行性和工程适用性。

**关键词:**深水高桩承台基础;损伤分析;损伤曲率模型;损伤程度

**中图分类号:** TU443   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0633-06

## Research on Damage Analysis Model of Deep Water High Pile Cap Foundations

ZHANG Xuefeng

(Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Due to the soft structure and long-term exposure in the harsh working environment of deep water, the deep water high pile cap foundations are prone to damage. Accurate and effective damage analysis on the high pile cap foundations is important. Firstly, authors analyzed the deformation characteristics of the deep water high pile cap foundations and found the relationship between the damage and the curvature of bending moment of a single pile. Then the damage curvature model suitable for deep water high pile cap foundations is established, and a quantitative description of five damage degrees is given based on Park-Ang's two-parameter damage model. The reinforced concrete specimens damage test results between the University of California at Berkeley and the damage analysis model proposed in this study are analyzed and compared. It is verified that the damage degree of the damage curvature model proposed in this paper is consistent with the actual stress deformation of the pile foundations. Finally, the feasibility and engineering applicability of the damage curvature model are verified by engineering examples.

**Keywords:** deep water high pile cap foundations, damage analysis, damage curvature model, damage degree

\* 收稿日期:2018-08-28;修回日期:2018-10-16

基金项目:交通运输部建设科技项目(2013318223380)资助

作者简介:张学峰(1979-),男,副研究员,博士。主要从事公路桥梁地基基础、抗震、加固研究。Email:28144484@qq.com

# 引言

深水高桩承台基础结构柔,受基础冲刷、水介质动力等影响易造成损伤,对其进行有效的损伤分析一直是跨江海大桥健康、安全运营的难点。目前还没有专门针对深水高桩承台基础进行损伤分析的研究,但相关研究已经开展很多并取得了一定成果:①基于材料层次的损伤分析模主要研究成果有:杜永峰等<sup>[1]</sup>综合考虑变形和能量的双参数损伤模型对其上部结构进行了易损性分析;F.G. Zheng等<sup>[2]</sup>通过对基础损伤力学的研究,提出了一种新的混凝土裂缝失效塑性损伤模型;杨慧等<sup>[3]</sup>提出基于残余应力的复合阻尼模型。②基于构件层次的损伤分析模型主要研究成果有:陈宇等<sup>[4]</sup>通过桥墩构件损伤模型定义桥梁结构整体损伤准则,建立了多介质体作用下桥梁结构的地震损伤分析方法;③基于结构层次的损伤分析模型主要研究成果有:M. Z. M. Saleemuddin等<sup>[5]</sup>引入刚度损伤指数,用于表征不同结构的RC框架的损伤;吴子燕等<sup>[6]</sup>提出仅考虑最大变形影响和综合考虑最大位移加损伤累积影响的两种损伤模型;郭力等<sup>[7]</sup>为了满足大跨结构健康监测和状态评估的需要,提出了计算结构损伤破坏的微宏观多尺度损伤模型;姬慧等<sup>[8]</sup>将损伤变量概念从材料推广到了构件和结构建立了一种塑性损伤模型,用来进行混凝土框架结构的抗震分析;吕杨等<sup>[9]</sup>和L. Song等<sup>[10]</sup>分别利用有限元软件对结构物损伤进行仿真模拟分析。

随着基于性能设计理论的发展,损伤分析模型在建立性能目标量化准则和加固决策方面受到重视,损伤分析模型的建立以及验证大多是以建筑结构为基础,鲜有桥梁结构,研究表明不同损伤模型确定的损伤指数差异较大<sup>[11]</sup>。因此,深水高桩承台基础损伤分析模型有待做针对性的研究,才能满足工程需要。

## 1 深水高桩承台基础构件损伤分析模型

### 1.1 深水高桩承台基础受力性能分析

深水高桩承台基础通常是高承台群桩基础,群桩基础中单桩水中部分可认为是两端固定约束,受到轴向力及水平力作用,其内力和曲率如图1所示。

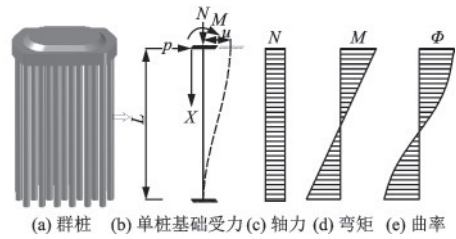


图1 内力和曲率

Fig.1 Internal force and curvature

由弯矩和曲率的关系式,任意截面的曲率计算公式为:

$$\phi(x) = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (1)$$

式中, $\phi(x)$ 为任意截面曲率; $M(x)$ 为任意截面弯矩; $E$ 为混凝土弹性模量; $I(x)$ 为任意截面惯性矩。

当桩基处于弹性阶段,桩基截面弯曲刚度 $EI$ 为常数,曲率沿高度方向为三角形分布。当桩基受力进入塑性状态,桩基截面弯曲刚度沿高度方向呈现非均匀分布,从而得到桩基截面曲率沿桩基高度方向呈曲线形状分布。

### 1.2 深水高桩承台基损伤曲率模型

混凝土构件损伤机理比较复杂,受多重因素影响,国内外学者提出了不同的损伤分析模型,主要从变形和耗能两方面确定构件损伤指数,经过学者们不断改进和完善,对结构动力损伤分析需要从最大变形和累积耗能两方面联合考虑才能更加真实的反映构建的损伤状况。Park-Ang损伤模型<sup>[12]</sup>是钢筋混凝土构件双参数地震损伤模型,采用最大位移和滞回耗能线性组合的损伤指数表达式为:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int d\epsilon}{Q_y \delta_u} \quad (2)$$

式中, $\delta_m$ 为地震作用下构件的最大变形; $\delta_u$ 为单调荷载作用下构件的极限变形; $Q_y$ 为构件屈服强度; $\int d\epsilon$ 为累计塑性耗能; $\beta$ 为组合参数,一般为0~0.85。

考虑到深水高桩承台基础材料参数和几何尺寸的不确定性,根据群桩单桩受力变形分析,桩基截面曲率能够代表桩基受力变形发生损伤到破坏全过程的受力特性,本文在Park-Ang的双参数损伤模型的基础上提出桩基损伤曲率分析模型,该模型适应于水中部分桩基长径比大于3的钢筋混凝土桩基础,公式如下:

$$D_i = (1 - \beta) \frac{\phi - \phi_{cr}}{\phi_u - \phi_{cr}} + \beta \frac{\int d\epsilon}{M(\phi_u - \phi_{cr})} \quad (3)$$

$$\beta = (-0.447 + 0.24n_0 + 0.314\rho_i) \times 0.7^{e_0} \quad (4)$$

式中,  $D_i$  为第  $i$  个桩基的损伤指数;  $\phi$  为桩端截面曲率;  $\phi_{cr}$  为桩体混凝土开裂时的曲率;  $\phi_u$  为桩体极限破坏状态下的曲率;  $\beta$  为组合参数;  $[d\epsilon]$  为为循环加载的累积滞回耗能;  $M$  为桩端截面弯矩;  $n_0$  为轴压比;  $\rho_i$  为纵筋配筋率,  $\rho_i < 0.75\%$  时取为  $0.75\%$ ;  $\rho_w$  为体积配箍率。

本文在已有研究成果基础上, 根据桩基础各阶段受力损伤特征和模型试验结果将桩基损伤程度分为 5 个: 完好、轻微、中等、严重、破坏, 具体损伤程度定量描述见表 1, 桩基损伤程度划分如图 2 所示。

表 1 桩基损伤程度定量描述

Table 1 The quantitative description of the damage degree of pile foundations

损伤程度	定量描述	备注
完好	$D_i < \frac{\phi_d}{\phi_u}$	$\phi_d$ 为 $\epsilon_c = \epsilon_{td} = \frac{f_{td}}{E_c}$ 对应曲率
轻微	$\frac{\phi_d}{\phi_u} \leq D_i < \frac{\phi_{cr}}{\phi_u}$	$\phi_{cr}$ 为 $\epsilon_c = \epsilon_{tk} = \frac{f_{tk}}{E_c}$ 对应曲率
中等	$\frac{\phi_{cr}}{\phi_u} \leq D_i < \frac{\phi_y}{\phi_u}$	$\phi_y$ 为 $\epsilon_s = \epsilon_y = \frac{f_{sk}}{E_s}$ 对应曲率(按《公路桥梁抗震设计细则》 <sup>[13]</sup> 附录 B.0.1 计算)
严重	$\frac{\phi_y}{\phi_u} \leq D_i < 1.0$	$\phi_u$ 为 $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ 对应曲率(按《公路桥梁抗震设计细则》 <sup>[13]</sup> 附录 B.0.2 计算)
破坏	$D_i \geq 1.0$	

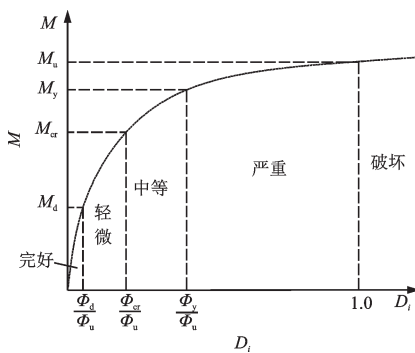


图 2 桩基损伤程度划分

Fig.2 The damage degree of pile foundations

## 2 桩基损伤模型试验数据分析

美国加州大学伯克利分校科研机构 PEER 进行了大量钢筋混凝土试件损伤模型试验和研究, 并收

集了美国、日本、新西兰等国科研机构进行的钢筋混凝土试件实验数据, 形成了钢筋混凝土试件性能试验数据库, 为科研人员提供了大量有价值的试验数据, 本文水中桩基础基本为圆形截面, 其受力变形与实验对象相似, 选取其中两个圆形截面试件数据进行本文损伤分析模型试验对比分析研究。

### 2.1 模型试验概述

美国加州大学伯克利分校科研机构模型试验加载装置如图 3 所示, 试件加载历程如图 4 所示。

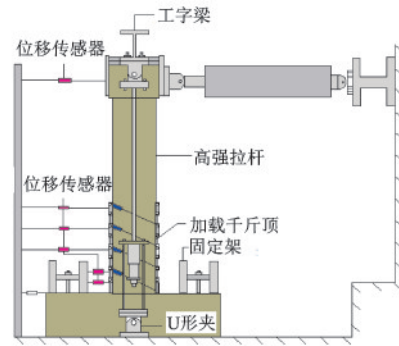


图 3 加载装置

Fig.3 Loading device diagram

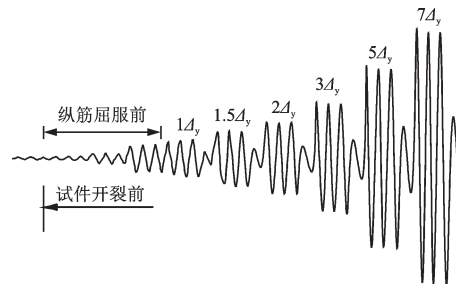


图 4 试验加载历程

Fig.4 Test loading history chart

### 2.2 模型试验测试结果

Leh407 试件在开始加载小位移荷载作用下开始出现微小裂纹, 随着荷载的加大, 裂缝数量增多, 当试件顶部位移达到 15.2 mm 时纵向钢筋出现屈服, 当加载到 17 周时箍筋外部混凝土出现剥落, 试件发生中等破坏; 当施加循环荷载达到第 29 周时混凝土完全剥落, 之后继续加载, 核心混凝土逐步被压碎, 纵筋开始出现屈服变形, 接着纵筋、箍筋被拉断, 试件破坏。Leh1015 试件在刚开始位移较小时就已经出现细小裂纹, 随着荷载逐步加大, 裂缝长度逐步发展, 数量开始增多; 当试件顶部位移达到

76.7 mm时纵向钢筋开始屈服,当加载到13周时箍筋外部混凝土出现剥落,试件发生中等破坏;当施加循环荷载达到第21周时混凝土完全剥落,之后继

续加载,核心混凝土逐步被压碎,纵筋开始出现屈服变形,接着纵筋、箍筋被拉断,试件破坏。试件破坏数据见表2,试件损伤破坏状态如图5所示。

表2 试件混凝土破坏数据  
Table 2 Specimen concrete failure data

试件编号	$\Delta_{yi}$	箍筋外部混凝土初始剥落			核心混凝土初始压碎		箍筋外部混凝土剥落范围	
		$\Delta^a$	$h_{spall}^b$	$\epsilon_{spall}^d$	$\Delta^a$	$\epsilon_{core}^f$	$L_{spall}^c$	$L^e/\%$
Leh407	15.2	38	114	-0.006 4	127	0.020 7	254	10
Leh1015	76.7	191	229	-0.003 9	635	-0.028 7	660	11

注: $\Delta_{yi}$ 为纵筋屈服对应水平位移; $\Delta^a$ 为加载周期; $h_{spall}^b$ 为箍筋外部混凝土出现剥落的高度范围; $\epsilon_{spall}^d$ 为试件在 $h_{spall}^b$ 处的压应变; $\epsilon_{core}^f$ 为核心混凝土压应变; $L_{spall}^c$ 为箍筋外部混凝土初始剥落长度范围; $L^e$ 为 $L_{spall}^c/L$

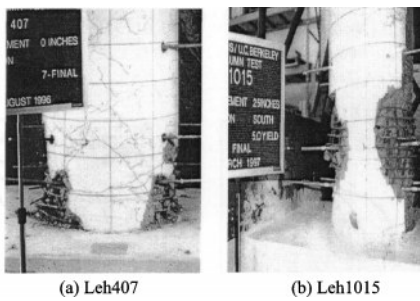


图5 试件损伤破坏照片

Fig.5 Specimen damage failure photos

### 2.3 损伤模型对比分析

根据试验结果对本文提出的曲率损伤模型与PARK模型和M-PARK模型进行对比分析<sup>[12]</sup>(图6)。从图6中可以看出损失曲率模型与PARK模型和M-PARK模型得出的损伤指数是一致的。

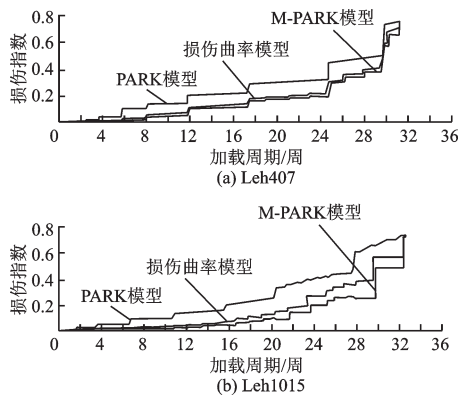


图6 损伤模型对比

Fig.6 Damage model comparison chart

### 2.4 模型试验小结

根据上述2组模型试验测试结果可以看出桩基

受到不同大小的水平力致使每组模型试验桩出现不同程度的损伤,不同水平力对应于桩端产生不同弯矩作用和弯矩曲率,根据各工况桩基开裂程度表明本文提出的曲率模型对桩基损伤进行分析是适用的,能够真实的反映桩基实际受荷损伤程度。

## 3 工程实例分析

### 3.1 工程概况

杭州湾跨海大桥之北航道桥是一座双塔双索面的斜拉桥,桥梁全长为908 m,跨径组合为70 m+160 m+448 m+160 m+70 m,主墩底下设置26根直径为3.1 m的钻孔灌注桩基础,平均桩长为125 m,承台为六边形圆倒角整体式承台,尺寸为48.5m×23.7m×6.0 m。本文选取主墩B10群桩基础中一单桩进行受力损伤分析(图7)。

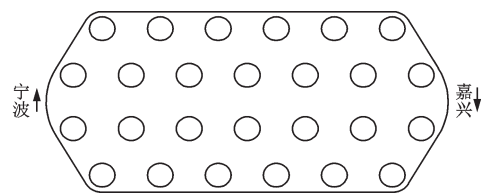


图7 B10墩群桩平面布置

Fig.7 B10 pier group pile layout

### 3.2 主塔基础损伤受力分析

本文采用MidasCivi软件对工程实例进行计算分析,完成了杭州湾跨海大桥之北航道桥B10主墩地震动时程分析,墩身和桩基础采用C30混凝土,纵筋采用II级钢筋,箍筋采用I级钢筋,建立计算模型

如图8所示。大桥设计荷载等级为汽车一超20级,地震基本烈度为Ⅵ度,设计按Ⅶ度设防,地震时程分析采用EI Centro地震波模拟,如图9所示。



图8 计算模型

Fig.8 Calculation model

深水高桩承台基础竖向主要承受主墩自重、上部结构恒载和活载,因活载占比例较小,为简化计算将活载按恒载统一计算,这样在损伤分析中桩基顶面所受轴力 $N$ 可以认为是不变的常值,利用计算结果根据损伤模型 $D_i = (1 - \beta) \frac{\phi - \phi_{cr}}{\phi_u - \phi_{cr}} + \beta \frac{\int d\epsilon}{M(\phi_u - \phi_{cr})}$ 可以计算出每根桩基相应的损伤指数 $D_i$ ,本桥主墩桩基在水平地震作用下各桩基受力

$$\phi_{u1} = \frac{\left[ (2.826 \times 10^{-3} + 6.850\epsilon_{cu}) - (8.575 \times 10^{-3} + 18.638\epsilon_{cu}) \left( \frac{P}{f'_c A_g} \right) \right]}{D} \quad (7)$$

$$\phi_{u2} = \frac{\left[ (1.635 \times 10^{-3} + 1.179\epsilon_s) + (28.739\epsilon_s^2 + 0.656\epsilon_s + 0.010) \left( \frac{P}{f'_c A_g} \right) \right]}{D} \quad (8)$$

式中, $\phi_u$ 为桩基截面极限曲率,1/m; $P$ 为桩基截面竖向荷载,kN; $f'_c$ 为混凝土抗压强度标准值,kN/m<sup>2</sup>; $A_g$ 为桩基截面面积,m<sup>2</sup>; $\epsilon_s$ 为钢筋极限拉应变,可取 $\epsilon_s = 0.09$ ; $\epsilon_{cu}$ 为约束混凝土的极限压应变,可按式计算:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{kh} \epsilon_{cu}^R}{f'_{cc}} \quad (9)$$

式中, $\rho_s$ 为约束钢筋的体积含筋率; $f_{kh}$ 为箍筋抗拉强度标准值,(kN/m<sup>2</sup>); $f'_{cc}$ 为约束混凝土的峰值应力,(kN/m<sup>2</sup>); $\epsilon_{cu}^R$ 为约束钢筋的折减极限应变, $\epsilon_{cu}^R = 0.09$ 。

本桥主墩桩基在水平地震作用下各桩基受力变形一致,由损伤模型得: $D_i = D_1 = (1 -$

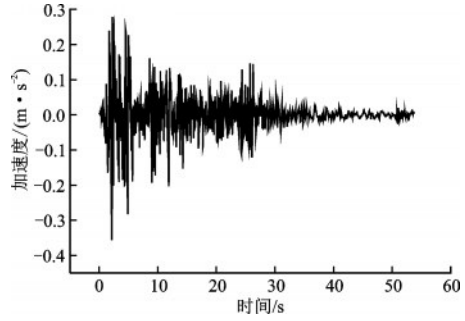


图9 EI Centro地震波时程

Fig.9 EI Centro seismic time history

变形一致,故只需计算出一个桩基的损伤指数 $D_i$ ,经过计算得主墩基础整体损伤指数 $D = D_i$ 对应表1可以确定损伤指数对应的损伤程度。 $\phi_{cr}$ 为 $\epsilon_c = \epsilon_{tk} = \frac{f_{tk}}{E_c}$ 对应曲率,经计算 $\phi_{cr} = 0.0084$ 。

根据《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[13]</sup>式B.0.1-2得:

$$\phi_y = \frac{2.213\epsilon_y}{D} = 0.0157 \quad (5)$$

式中, $\phi_y$ 为桩基截面屈服曲率,1/m; $\epsilon_y$ 为钢筋的屈服应变; $D$ 为桩基截面直径,m。

根据《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[13]</sup>式B.0.2-1和式B.0.2-1得:

$$\phi_u = \min(\phi_{u1}, \phi_{u2}) = 0.0608 \quad (6)$$

$$\beta \frac{\phi - \phi_{cr}}{\phi_u - \phi_{cr}} + \beta \frac{\int d\epsilon}{M(\phi_u - \phi_{cr})} = 0.23 \text{ 主墩基础整体}$$

损伤指数 $D = D_i = 0.23$ 。由 $\frac{\phi_{cr}}{\phi_u} = 0.14 \leq D_i <$

$\frac{\phi_y}{\phi_u} = 0.26$ ,由表1可以确定该桥墩选取的桩基在地

震荷载作用下对应的损伤程度为中等,同样我们可以分析任意荷载作用下桩基对应的损伤指数,从而可以得到相应的损伤程度。

## 4 结论

(1)根据深水高桩承台基础受力变形特征进行

分析,找出单桩损伤与弯矩曲率的关系,建立了适用于深水高桩承台基础损伤曲率模型,并给出5种损伤程度的定量描述。

(2)应用钢筋混凝土试件损伤模型试验结果进行分析和比对,验证了本文提出的损伤曲率模型的损伤程度划分能够真实反映桩基实际受荷损伤程度。

(3)通过工程实例应用验证了本文提出的损伤曲率模型是可靠的,该损伤曲率分析模型使用方便,计算简单快捷,各标度临界值有规范可依,便于在实际工程中推广应用。

### 参考文献:

- [1] 杜永峰,丁雅杰,黄小宁.地基不均匀沉降对基础隔震结构地震易损性的影响[J].工程抗震与加固改造,2017(6):79-86.  
Du Y F, Ding Y J, Huang X N. Influence of uneven foundation settlement on seismic vulnerability of foundation isolation structure[J]. Engineering Seismic and Reinforcement Engineering, 2017 (6) : 79-86. (in Chinese)
- [2] Zheng F G, Wu Z R, Gu C S, et al. A plastic damage model for concrete structure cracks with two damage variables [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(11):2 971-2 980.
- [3] 杨慧,闫维明,何浩祥.基于残余应力的复合阻尼模型及在RC梁损伤分析中的应用[J].振动工程学报,2017,30(3):432-441.  
Yang H, Yan W M, He H X. Composite damping model based on residual stress and its application to RC beam damage analysis [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(3): 432-441. (in Chinese)
- [4] 陈宇,李忠献,李宁.多介质体作用下近海桥梁的地震损伤分析[J].土木工程学报,2015(10):91-98.  
Chen Y, Li Zh X, Li N. Seismic damage analysis of offshore bridges under multi-medium media[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(10): 91-98. (in Chinese)
- [5] Saleemuddin M Z M, Sangle K K. Seismic damage assessment of reinforced concrete structure using non-linear static analyses[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(4): 1 319-1 330.
- [6] 吴子燕,赵宇,杨海峰,等.支持结构状态评估的损伤模型研究[J].郑州大学学报(工学版),2009,30(4):9-13.  
Wu Z Y, Zhao Y, Yang H F, et al. Research on damage model supporting structural state assessment [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering), 2009, 30(4): 9-13. (in Chinese)
- [7] 郭力,李兆霞,陈志文.面向结构状态评估的多尺度损伤模型[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(5):1 047-1 051.  
Guo L, Li Zh X, Chen Zh W. Multi-scale damage model for structural state assessment [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40 (5): 1 047-1 051. (in Chinese)
- [8] 姬慧,李雁英.混凝土框架结构抗震分析的塑性损伤模型[J].工程抗震与加固改造,2011,33(6):18-22.  
Ji H, Li Y Y. Plastic damage model for seismic analysis of concrete frame structures [J]. Engineering Journal of Seismic and Reinforcement, 2011, 33 (6) : 18-22. (in Chinese)
- [9] 吕杨,刘喆,李忠献.考虑桩-土相互作用的不等高墩桥地震响应分析[J].振动与冲击,2016,35(23):114-120.  
Lyu Y, Liu Zh, Li Zh X. Seismic response analysis of unequal pier bridge considering pile-soil interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35 (23) : 114-120. (in Chinese)
- [10] Song L, Wu M, Wang J, et al. Seismic damage analysis of the outlet piers of arch dams using the finite element sub-model method [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 15(3):617-626.
- [11] 陆本燕,刘伯权,吴涛,等.基于RC桥梁墩柱的地震损伤模型比较分析[J].土木工程学报,2010,43(增1):186-191.  
Lu B Y, Liu B Q, Wu T, et al. Comparative analysis of seismic damage models based on RC bridge piers [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (Sup 1) : 186-191. (in Chinese)
- [12] 付国,刘伯权,邢国华.基于有效耗能的改进Park-Ang双参数损伤模型及其计算研究[J].工程力学,2013,30(7):84-90.  
Fu G, Liu B Q, Xing G H. Improved Park-Ang two-parameter damage model based on effective energy dissipation and its computational calculation [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 84-90. (in Chinese)
- [13] 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.  
Guidelines for seismic design of highway bridges: JTG/T B02-01—2008 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2008. (in Chinese)

(本文责编:池营营)