

梁发云, 刘兵, 李静茹. 考虑冲刷作用效应桥梁桩基地震易损性分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 0013-0019. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0013

LIANG Fa-yun, LIU Bing, LI Jing-ru. Seismic Fragility Analysis of Bridge Pile Foundation Considering Scour Effect [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 0013-0019. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0013

考虑冲刷作用效应桥梁桩基地震易损性分析^①

梁发云¹, 刘 兵¹, 李静茹²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学数学系, 上海 200092)

摘要:冲刷造成桩周土体的剥蚀将会削弱土体对桩基的侧向支撑能力, 冲刷效应会对桥梁桩基的地震易损性产生影响, 因此有必要对冲刷和地震共同作用下桥梁桩基的易损性进行研究。利用 SAP2000 软件建立三维桥梁有限元模型, 通过非线性时程分析得到桥梁桩基地震响应峰值。采用概率性地震需求分析方法, 建立不同冲刷深度下桥梁桩基地震易损性模型, 在地震易损性函数假设为对数正态分布函数的基础上, 通过回归分析得到概率模型中的参数, 进而得到不同冲刷深度下桥梁桩基在不同破坏状态所对应的地震易损性曲线, 并分析冲刷深度对桩基破坏概率的影响。研究结果表明: 随着冲刷深度的增加, 桥梁桩基在地震作用下的破坏概率显著增加。

关键词:冲刷效应; 地震; 共同作用; 桩基; 地震易损性曲线

中图分类号: U442.5⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)01-0013-07

DOI: 10.3969/j.issn.1013-0019.2017.01.0013

Seismic Fragility Analysis of Bridge Pile Foundation Considering Scour Effect

LIANG Fa-yun¹, LIU Bing¹, LI Jing-ru²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Mathematics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The erosion of soil by scour around a pile weakens the lateral support in bridge foundations and this phenomenon has an effect on the seismic vulnerability of bridge pile foundations. Therefore, it is important to study the seismic fragility of bridge piles in the presence of scour. We used SAP2000 software to establish a three-dimensional finite element bridge model in the presence of scour. Damage occurs more readily at bridge piers and pile foundations and these components may become plastic during earthquakes. As such, we simulated these components using an elasto-plastic connection unit. We simulated the mechanical behavior of the soil using nonlinear p - y springs and modeled the loss of soil by removing the p - y springs above the scour surface. We selected 80 acceleration time histories of seismic waves that conformed to site II, and then translated the acceleration time history of each seismic wave into the displacement time history. We then applied the displacement time history to the p - y springs and carried out a nonlinear time history analysis on the bridge model. We obtained the seismic response of the bridge and recorded

① 收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91315301-05); 中央高校基金科研业务费专项资金

作者简介: 梁发云(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: fyliang@tongji.edu.cn。

the maximum response of the bridge pile under each seismic wave. Using a probabilistic seismic demand analysis approach, we developed an analytical seismic vulnerability model of the bridge pile at different scour depths. We used curvature ductility as a damage index, and according to Hwang's suggestion, defined different damage states of the pile foundation. We obtained the boundaries of damage states by applying moment-curvature analysis to the pile cross section, thus obtaining quantitative data of the different damage states of the pile foundation. On this basis, we assumed that lognormal distribution functions were suitable for developing fragility functions, and we used regression analysis to estimate the parameters in the seismic fragility functions. We established the seismic fragility curves of the pile under different scour depths, and then discussed the influence of scour depth on the probability of the pile damage. The results show that with increasing scour depth, the probability of seismic damage to bridge pile foundations increases. Therefore, special attention should be paid to the adverse influence of scour when designing earthquake-resistant bridge pile foundations.

Key words: scour effect; earthquake; combined action; pile foundation; seismic fragility curve

0 引言

桥梁是交通工程的重要枢纽,其在整个服役期间可能会遭受各种自然灾害的作用,其中地震和洪水是导致桥梁损毁的两类主要灾害^[1-2]。地震造成的桥梁损毁屡见不鲜,如唐山地震、台湾集集地震以及汶川地震均造成了大量的桥梁损毁,而洪水冲刷可能会进一步加剧桥梁在地震作用下的危险性。Wardhana 等^[3]研究表明,1989—2000 年间在美国发生的 503 起桥梁工程事故中,由洪水和冲刷造成的事故分别多达 165 起和 78 起。统计资料表明,在美国有超过 50% 的桥梁破坏与洪水冲刷有关^[4]。

冲刷导致桥墩基础裸露或覆土高程降低,削弱了地基土对桥梁桩基础的侧向支撑作用^[5]。而冲刷引起的土体卸载等必然会对桥梁基础的动力特性产生影响,如何考虑桥梁基础冲刷对其地震反应的影响一直是困扰桥梁工程设计的难题^[6]。地震具有极大的随机性和不确定性,不同的地震波作用下,即使具有相同的地面峰值加速度,桥梁地震响应也可能差很多,因此单一地震波作用下的结构地震响应并不能完全反映出其中的一般规律^[7]。而地震易损性分析则是通过分析大量地震波,从概率的层面反映工程结构的抗震性能,目前已经成为评估桥梁结构地震风险强有力的工具。

地震易损性通常是指在一特定的地震烈度作用下,结构达到某一损伤程度的超越概率。国内外学者对单一灾害作用下桥梁地震易损性的研究比较充分。Dutta 等^[8]、Barron 等^[9]利用能力谱方法对结构进行分析,通过回归分析得到桥梁地震易损性曲线。Mander 等^[10]采用静力弹塑性分析方法求取不

同类型桥梁地震易损性曲线。Karim 等^[11]将桥墩简化为单自由度动力系统,选择 Kobe 和 North-bridge 等地震记录,通过非线性时程分析获得桥梁地震响应数据,同时选用 Park 等^[12]提出的破坏准则来定义结构的损伤状态,从而建立桥梁的地震易损性曲线。

虽然对于桥梁地震易损性的研究较多,但对地震和洪水冲刷等多重灾害作用下桥梁的易损性分析并不充分。Prasad 等^[13]对洪水作用下桥梁地震易损性进行了初步研究,得到不同冲刷深度下桥墩的地震易损性曲线,但未研究冲刷对桩基地震易损性曲线的影响。Wang 等^[14]研究了冲刷和地震共同作用下桥墩和桩基的地震易损性,认为随着冲刷深度的增加桥墩的地震易损性降低,而桩基的地震易损性增加,但对桥梁的不同破坏状态未进行定义,不能得到各个破坏状态所对应的桥梁地震易损性曲线。

冲刷造成的桥梁基础侧向支撑能力的降低必然会对桥梁地震响应产生影响,因此有必要对冲刷作用下桥梁地震易损性进行研究。本文采用群桩基础,考虑桩土的相互作用,建立三维桥梁有限元模型,以研究冲刷对桩基地震易损性曲线的影响,并通过定义桩基的破坏状态,得到不同破坏状态桥梁桩基的地震易损性曲线。

1 桥梁地震易损性曲线建立过程

确定桥梁地震易损性的方法主要有经验法、解析法和混合法^[15]。本文采用解析法,其建立过程如下:(1)利用 SAP2000 有限元软件建立相应的桥梁三维模型;(2)定义桥梁的损伤状态获得相应定量的

损伤指标;(3)选择地震波,并将其输入桥梁模型进行非线性时程计算;(4)统计每一条地震波作用下桥梁桩基最大地震响应;(5)通过回归分析估计概率模型中的参数,进而得到桥梁地震易损性曲线;(6)改变冲刷深度重复上述过程,得到不同冲刷深度(本文分别取冲刷深度为 0、2 及 4 m,相当于 0、0.1 及 0.2 倍桩长)下桥梁地震易损性曲线。

2 桥梁有限元模型的建立

2.1 桥梁简况

本文研究的桥梁是在文献[16]所采用桥梁的基础上扩充得到的,如图 1 所示。其主要参数如下:主梁为 3×30 m 预应力混凝土简支 T 梁(每孔 4 片梁),主梁高 2.0 m,桥面总宽 8.0 m,采用 C40 混凝土;盖梁为 1.5 m×1.5 m 的矩形梁,总长 8.0 m,采用 C30 混凝土;桥墩为单柱式,柱截面为直径 2.0 m 圆形截面,柱高 7.0 m,纵筋采用直径 32 mm 的二级钢筋,共 40 根等间距环向分布,保护层厚度为 60 mm,箍筋采用直径 10 mm 的一级钢筋,螺旋布置,间距为 150 mm;基础采用群桩基础,基桩直径 0.8 m,桩距 2.5 m,桩长 20 m,纵筋采用直径 25 mm 的二级钢筋,共 16 根等间距环向分布,保护层厚度为 40 mm,箍筋采用直径 8 mm 的一级钢筋,螺旋布置,间距为 150 mm;承台为 8 m×4 m×2 m 的混凝土板。

2.2 桥梁有限元模型

采用SAP2000软件建立三维桥梁有限元模型

(图 2)。桥梁上部结构在地震期间基本保持弹性,桥梁破坏主要是地面运动引发下部结构的摇晃和不同桥墩之间的相对位移造成的^[17],因此主梁、盖梁采用弹性梁单元模拟。主梁与桥台之间采用活动盆式支座,根据《公路桥梁抗震设计细则(JTG/TB02-01-2008)》^[18],该支座可用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟。本文以 SAP2000 中的 Wen 塑性连接单元模拟,该单元的属性如图 3 所示;主梁与桥墩之间固结。承台刚度较大,认为其在地震中表现为刚性,用具有线质量的刚性杆模拟其质量分布;桥墩和桩

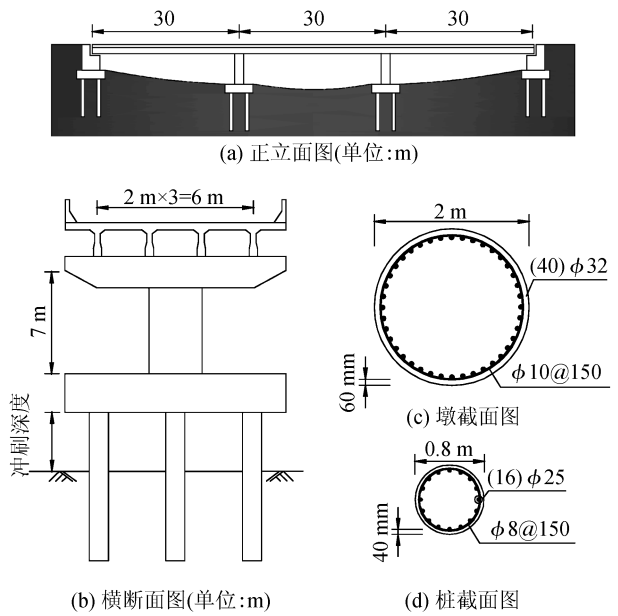


图 1 桥梁模型

Fig.1 Bridge model

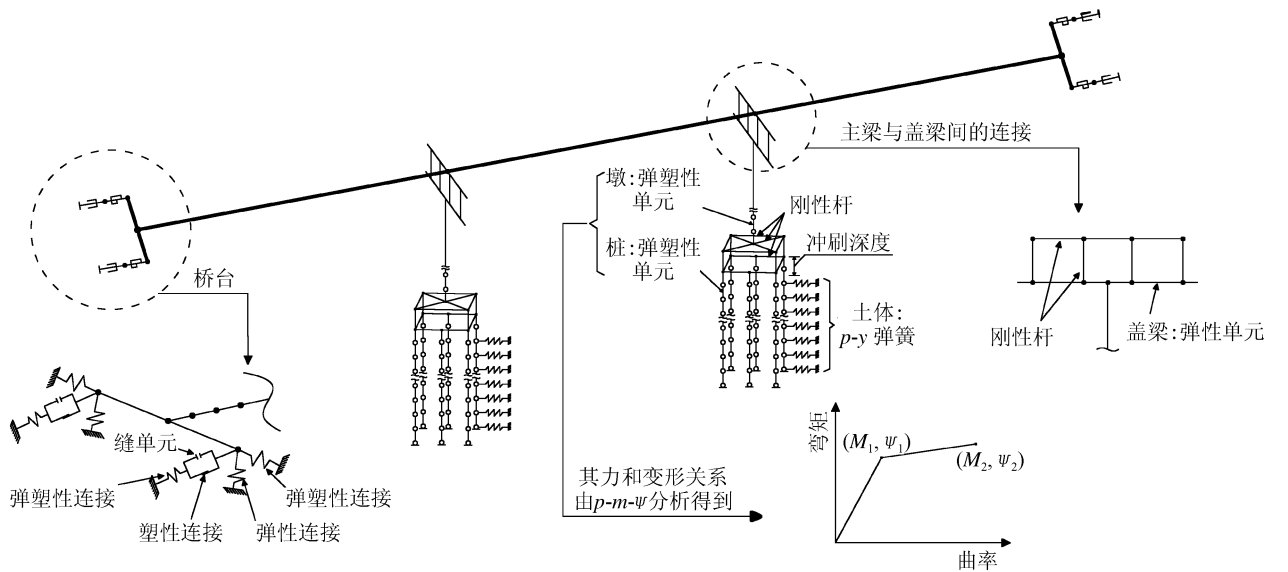


图 2 三维桥梁有限元模型

Fig.2 Three-dimensional finite element model of bridge

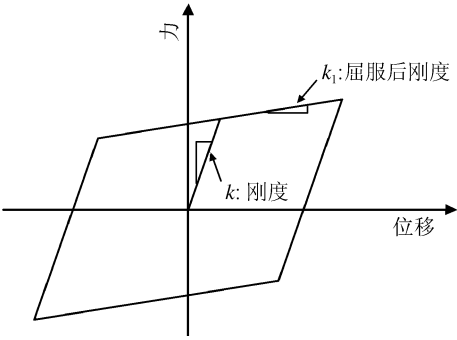


图 3 Wen 塑性单元属性

Fig.3 The properties of Wen plastic element

基础是薄弱的部位,用多线性随动塑性连接单元(其力学行为与金属中常见的随动硬化行为相似)来模拟其非线性,该单元的力和变形关系通过 p - m - Ψ 分析(截面弯矩曲率分析)得到。 p - m - Ψ 分析过程为:在桥墩或桩所对应的钢筋混凝土截面两端同时施加轴力和弯矩,并逐渐增加弯矩直至混凝土截面破坏,得到截面的弯矩曲率关系。

2.3 土体 p - y 曲线的获得

地震作用下,土体对桩基础的影响超出弹性拉压范围,本文采用 p - y 曲线模拟桩周土的应力应变关系。 p - y 曲线根据美国石油规范——API 规范新法确定如下:砂土单位桩长极限水平抗力可按式计算:

当 $z \leq z_r$ 时:

$$P_u = (C_1 z + C_2 d) \gamma d \tag{1}$$

当 $z > z_r$ 时:

$$P_u = C_3 \gamma z d \tag{2}$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 均为系数,可按 API 规范^[19] 中图 6.8.6-1 取值; z 为地面以下桩的任一深度(m); z_r 为极限水平土抗力转折点的深度(m); P_u 为地面以下 z 深度处极限水平土抗力标准值(kPa); d 为桩径(m); γ 为土的重度(kN/m³)。

砂土中桩的 p - y 曲线在缺乏现场试验资料时可按下式确定:

$$P = \phi P_u \tanh\left(\frac{kz}{\phi P_u} y\right) \tag{3}$$

式中: P 为地面以下 z 深度处水平土抗力标准值(kPa); y 为地面以下 z 深度处土体的水平位移(m); ϕ 为计算系数,当为周期荷载时可取 0.9; k 为土体抗力初始模量,可由 API 规范查出。

2.4 桩土相互作用的模拟

为了模拟桩土相互作用,沿桩身每隔一定深度设置一个 p - y 弹簧;地基土用多线性 Takeda 塑性

连接单元进行模拟(该单元力学模型与随动硬化模型相似,但使用了基于 Takeda 模型的滞回环)。冲刷作用下土体的剥蚀通过去掉冲刷面以上土弹簧来模拟,例如:冲刷深度为 2.0 m,去掉土体表面以下 2.0 m 范围内的土弹簧,并修改剩余土弹簧的参数,进而模拟桥梁的冲刷现象。土体分层情况如表 1 所列。

表 1 土体分层情况

Table 1 The properties of soil layers

土层厚度 /m	土体类型	土体重度 /(kN · m ⁻³)	摩擦角 /(°)
2	细砂①	17.5	25
4	细砂②	19.5	30
4	中砂①	18.5	30
6	中砂②	20.0	30
10	粗砂	20.5	33

3 损伤状态的定义和桥梁地震分析

3.1 损伤指标的确定

以往研究中不同学者采用不同的地震需求参数对桥梁的极限状态进行定义。Choi 等^[20] 建议利用曲率延性作为损伤指标,进而定义桥墩破坏状态;Hwang 等^[21] 利用位移延性为损伤指标来界定桥墩的各个损伤状态。由于对桩基破坏状态的界定比较匮乏,本文采用曲率延性作为损伤指标来界定桩基的破坏状态。曲率延性为各个破坏状态时桩基截面的界限曲率与截面首次屈服曲率的比值。根据 Hwang 的建议,本文认为桩基的微小破坏、中等破坏、严重破坏及完全破坏的界限分别对应于桩基内部钢筋达到首次屈服、等效屈服、桩基截面混凝土最大应变为 0.002 及截面完全破坏。通过 p - m - Ψ 分析得到各个破坏状态(微小破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏)桩截面所对应的界限曲率,其具体数据如表 2 所列。

表 2 桩的曲率延性

Table 2 The curvature ductility of pile

破坏状态	曲率/m ⁻¹	曲率延性
微小破坏界限	0.003 44	1.00
中等破坏界限	0.004 43	1.29
严重破坏界限	0.008 50	2.47
完全破坏界限	0.025 01	7.27

进行 p - m - Ψ 分析时,混凝土采用 Mander 模型(箍筋以内采用约束混凝土,保护层采用非约束混凝土),钢筋采用双线性硬化本构模型(应力应变曲线分为弹性、理想塑性、应变强化三个阶段),计算一定轴压下钢筋混凝土截面的弯矩曲率关系,并将截面

的弯矩曲率曲线等效为双线性关系,如图 4 所示(本文有限元模型中模拟桩基所采用的弹塑性连接单元的本构关系据此定义)。

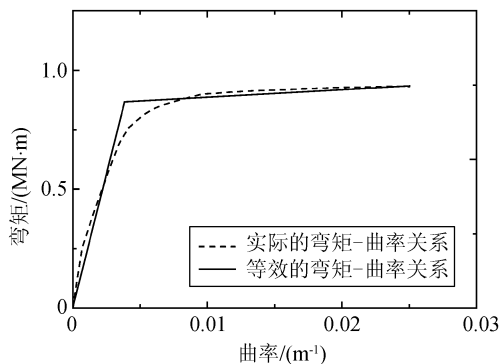


图 4 弯矩曲率等效双线性关系图

Fig.4 Relation diagram of equivalent bilinear moment-curvature

3.2 桥梁地震分析

3.2.1 地震波的选取

建筑抗震设计规范规定:采用时程分析法时,应按建筑场地类别选用地震波。因此从美国太平洋地震研究中心选取符合 II 类场地的地震波,采用地震易损性分析普遍采用的 PGA (地面峰值加速度)作为地震强度指标,以实际观测到的地震加速度作为地震动输入。在强度过小的地震作用下,结构尚处于弹性范围而未发生任何损伤,因此对其地震波进行峰值调整,使地震波的 PGA 广泛分布于 $0.1g \sim 1.5g$ 之间。采取横向输入的方式,将上述生成的 80 个地震动样本输入到桥梁模型中进行非线性时程计算。

3.2.2 桩基的地震响应

以一条 PGA 为 $0.79g$ (50 年内超越概率为 10%) 的地震波加速度时程为例,利用 SeismoSignal 软件通过时域积分将加速度时程转换为位移时程,在桩基对应的每个土弹簧处输入位移时程。计算得出冲刷深度为 0、2 及 4 m 时桩基(边桩)最大曲率分别为 0.002 57、0.005 22 及 0.011 21,可见桩基础的最大曲率随着冲刷深度的增加而增加,对应桥面处侧向位移分别为 108.1 mm、129.1 mm、137.7 mm。在以上 80 条地震波样本作用下,桩基最大曲率均随着冲刷深度的增加而增加,其随冲刷深度的变化如图 5 所示。

4 地震易损性函数

结构的地震易损性曲线是在不同地震动强度 IM 下,结构反应 S_d 超过损伤所定义的结构承载力

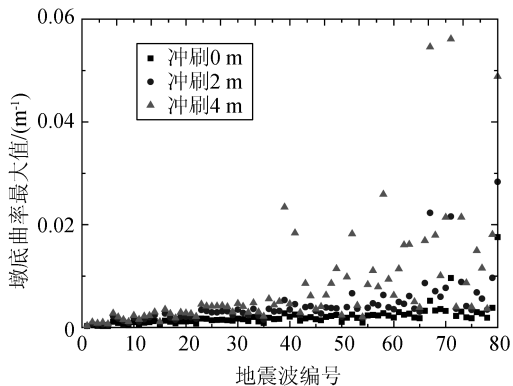


图 5 桩基最大曲率

Fig.5 The maximum curvature of pile foundation

S_c 的条件概率,即:

$$P_f = P[S_d \geq S_c] \quad (4)$$

研究表明,结构在不同地震动作用下的 S_d 和 S_c 均服从对数正态分布^[22],则式(4)可化为:

$$P_f = P[S_d \geq S_c] = P[\ln(S_d) - \ln(S_c) \geq 0] \quad (5)$$

由于 $\ln(S_d)$ 和 $\ln(S_c)$ 均服从正态分布,因此 $\ln(S_d) - \ln(S_c)$ 亦服从正态分布 $N(\mu, \delta^2)$,即:

$$\ln(S_d) - \ln(S_c) \sim N(\mu, \delta^2) \quad (6)$$

其中: $\mu = \mu_d - \mu_c$; $\delta^2 = \delta_d^2 + \delta_c^2$ 。

求解结构反应 S_d 超过结构承载力 S_c 的条件概率转化为确定结构的地震需求 S_d 对数正态分布函数特征值 μ_d 和 δ_d 以及地震能力 S_c 对数正态分布函数特征值 μ_c 和 δ_c 。

根究 Cornell^[23] 的建议,结构反应 S_d 与地震动 IM 服从如下关系:

$$\ln(S_d) = b \cdot \ln(IM) + a \quad (7)$$

结构反应 S_d 对数正态分布函数的标准差 δ_d 的近似估计为:

$$\delta_d \cong \sqrt{\frac{\sum \{\ln(S_{d_i}) - [b \cdot \ln(IM_i) + a]\}^2}{N - 2}} \quad (8)$$

其中: S_{d_i} 为第 i 个地震所对应的结构反应; IM_i 为第 i 个地震动峰值。

由式(5)~(7)可得:

$$\begin{aligned} P_f &= P[\ln(S_d) - \ln(S_c) \geq 0] = \\ &= P\left[\frac{(\ln(S_d) - \ln(S_c)) - \mu}{\delta} \geq \frac{-\mu}{\delta}\right] = \\ &= \Phi\left(\frac{\mu}{\delta}\right) = \Phi\left[\frac{b \cdot \ln(IM) + a - \mu_c}{\sqrt{\delta_d^2 + \delta_c^2}}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布。

本文不考虑模型的不确定性($\delta_c = 0$),认为桥梁的地震能力是确定的,因此式(9)简化为:

$$P_i = \Phi\left(\frac{b \cdot \ln(IM) + a - \mu_c}{\delta_d}\right) \quad (10)$$

5 地震易损性曲线

根据式(7)将上述 80 个地震波样本算得的桥梁桩基最大曲率延性的对数 $\ln(S_{\mu d})$ 和其对应的 PGA 的对数进行拟合;不同冲刷深度(0 m、2 m 及 4 m)时的拟合曲线如图 6 所示,相应拟合参数如表 3 所列。可以看出参数 a 、 b 均随着冲刷深度的增加而增加,表明相同的地震强度(IM)作用下,冲刷深度越大桩基反应 S_d 越大。将表 3 中的数据带入式(10),即可得到不同冲刷深度下桥梁桩基的地震易

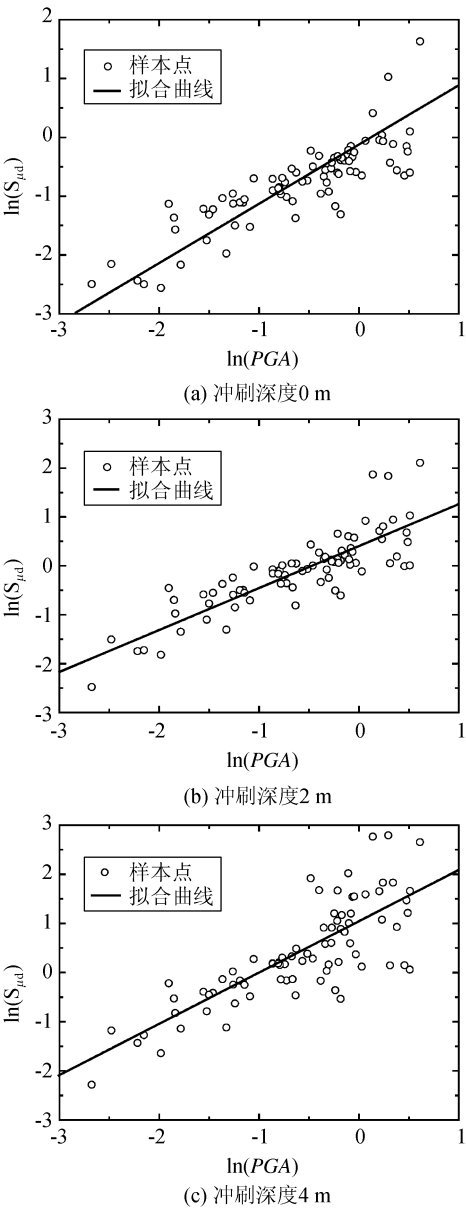


图 6 不同冲刷深度时拟合曲线

Fig.6 The fitting curves at different scour depths

表 3 概率模型中的参数

冲刷深度/m	拟合参数		
	a	b	δ_d
0	-0.310 8	0.789 0	0.382 5
2	0.397 9	0.844 6	0.419 9
4	1.006 3	1.051 9	0.611 6

损性曲线。冲刷深度为 4 m 时,桥梁桩基的地震易损性曲线如图 7 所示。从图中可以看出:随着地面峰值加速度 PGA 的增加,桥梁桩基的破坏概率显著增加。当 PGA 较小(例如小于 $0.1g$)时,桥梁桩基可能尚处于弹性阶段,其破坏概率较小且变化较小;当 PGA 中等(例如介于 $0.2g$ 和 $0.5g$)时,桥梁桩基可能进入弹塑性状态,其破坏概率增加较快;当 PGA 较大(例如超过 $0.6g$)时,桥梁桩基可能进入塑性状态,桩基的大变形吸收部分能量,其破坏概率虽然增加,但其增加速率减慢。

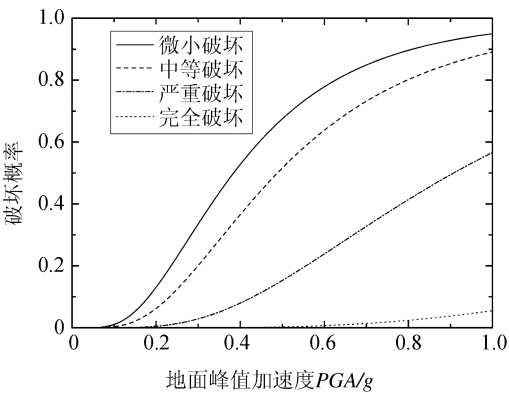


图 7 冲刷深度 4 m 时桩基地震易损性曲线

Fig.7 Seismic vulnerability curves of the pile foundation at the scour depth of 4 m

不同冲刷深度下,桥梁桩基的地震易损性曲线如图 8 所示。从图中可见随着冲刷深度的增加,桥梁桩基的破坏概率大幅度增加。土体的剥蚀导致其对桩基侧向支撑的削弱,将增加桩基在地震作用下的不安全性,例如当 $PGA=0.6g$,在未发生冲刷时,桥梁桩基发生微小破坏的概率为 0.031 0;当冲刷深度为 2 m 时,其破坏概率增加到 0.468 2;当冲刷深度为 4 m 时,其破坏概率为 0.778 4。因此在实际工程中要特别注意冲刷对桩基产生的不利影响。

6 结论

本文利用 SAP2000 有限元软件建立三维桥梁有限元模型,研究冲刷对桥梁桩基地震易损性的影响,得到如下结论:

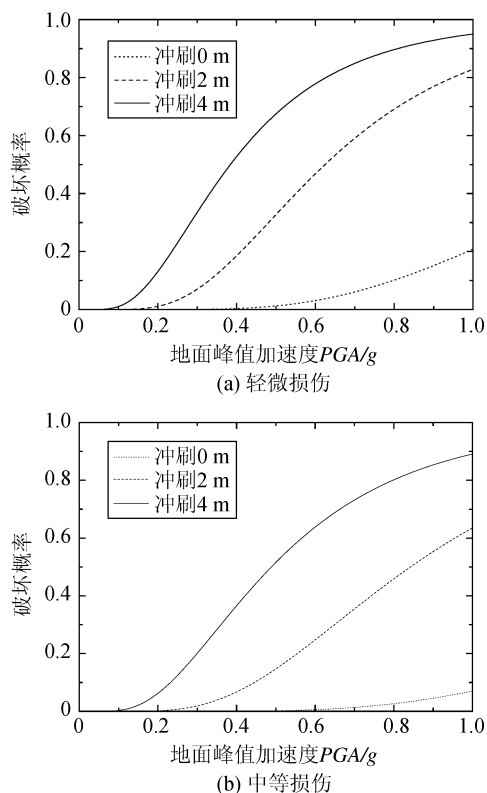


图8 不同冲刷深度时桩基地震易损性曲线

Fig.8 Seismic vulnerability curves of the pile foundation at different scour depths

(1) 基于概率性地震需求模型,针对常规的群桩基础桥梁,进行完整的地震易损性分析研究,并得到桥梁桩基地震易损性曲线。随着地面峰值加速度的增加,不同损伤状态桥梁桩基的破坏概率逐渐增加,其增加速率先变快后变缓。

(2) 研究冲刷深度变化对桥梁桩基地震易损性的影响,发现随着冲刷深度的增加,桥梁桩基的破坏概率大幅度增加,表明土体的剥蚀导致其对桩基侧向支撑的削弱,将增加桩基在地震作用下的危险性。

参考文献(References)

- [1] Banerjee S, Prasad G G. Seismic Risk Assessment of Reinforced Concrete Bridges in Flood-prone Regions[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9(9): 952-968.
- [2] Ghosn M, Moses F, Wang J. Highway Bridge Design for Extreme Events[R]. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 489. Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy Press, 2003.
- [3] Wardhana K, Hadipriono F C. Analysis of Recent Bridge Failures in the United States[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3): 144-150.

- [4] Lagasse P F, Clopper P E, Zevenbergen L W, et al. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP Report 593): Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour[R]. Transportation Research Board, Washington DC, 2007.
- [5] Liang F Y, Bennett C R, Parsons R L, et al. A Literature Review on Behavior of Scoured Piles under Bridges[C]// Orlando: International Foundation Congress and Equipment Expo, ASCE, 2009, GSP186: 482-489.
- [6] 叶爱君, 张喜刚, 刘伟岸. 河床冲刷深度变化对大型桩基桥梁地震反应的影响[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 58-62.
YE Ai-jun, ZHANG Xi-gang, LIU Wei-an. Effects of Riverbed Scouring Depth on the Seismic Response of Bridges on Pile Foundations[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 58-62. (in Chinese)
- [7] 孙才志, 赵雷, 王菲. 大跨度多塔斜拉桥随机地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 911-918.
SUN Cai-zhi, ZHAO Lei, WANG Fei. Stochastic Seismic Responses of a Large-span Multi-tower Cable-stayed Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 911-918. (in Chinese)
- [8] Dutta A, Mander J B. Seismic Vulnerability Analysis of Highway Bridges[R]. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 2000
- [9] Barron R, Reinhorn A. Spectral Evaluation of Seismic Fragility of Structures[R]. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 2000.
- [10] Mander J B. Fragility Curve Development for Assessing the Seismic Vulnerability of Highway Bridges[M]. Research Progress and Accomplishments, Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1999: 1-11.
- [11] Karim K R, Yamazaki F. Effect of Earthquake Ground Motions on Fragility Curves of Highway Bridge Piers Based on Numerical simulation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(12): 1839-1856.
- [12] Park Y J, Ang A H-S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1985, 111(4): 722-739.
- [13] Prasad G G, Banerjee S. The Impact of Flood-induced Scour on Seismic Fragility Characteristics of Bridges[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2013, 17(6): 803-828.
- [14] Wang Z H, Leonardo D O, Jamie E P. Influence of Scour Effects on the Seismic Response of Reinforced Concrete Bridges[J]. Engineering Structures, 2014, 76: 202-214.
- [15] 周奎, 李伟, 余金鑫. 地震易损性分析方法研究综述[J]. 地震工程与工程震动, 2011, 31(1): 106-113.
ZHOU Kui, LI Wei, YU Jin-xing. Review of Seismic Fragility Analysis Methods[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(1): 106-113. (in Chinese)

[9] Shinozuka M. Random Process with Evolutionary Power[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1970, 96 (EM4): 543-555.

[10] Shinozuka M, Deodatis G. Stochastic Process Models for Earthquake Ground Motion[J]. Probabilistic Engrg Mech, 1988, 3(3): 114-123.

[11] Kanai K. Semi-empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground[Z]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 1957.

[12] Tajimi H. A Statistical Model of Determining the Maximum Response of a Steucture During An earthquake[C]//Proc. of the 2nd WCEE, Tokyo-Kyoto, Japan.

[13] 江近仁, 陆钦年, 孙景江, 等. 强震运动谱的统计特性[C]//国家地震局工程力学研究所研究报告(编号 87-032). 1987. JIANG Jin-Ren, LU Qin-Nian, SUN Jing-Jiang. Statistical Properties of Strong Motion Spectrum[C]// Research Report, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (Serial Number: 87-032). 1987. (in Chinese)

[14] 曾波, 邢彦富, 刘章军. 基于概率演化的渡槽结构抗震分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 991-996. ZHEN Bo, XING Yan-fu, LIU Zhang-jun. Seismic Analysis of Large-scale Aqueduct Structures Based on the Probability Density Evolution method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 991-996. (in Chinese)

[15] 杜修力, 陈厚群. 地震动随机模拟及其参数确定方法[J]. 地震动与工程振动, 1994, 14(4): 1-5. DU Xiu-li, CHEN Hou-qun. Random Simulation and Its Parameter Determination Method of Earthquake Ground Motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 1-5. (in Chinese)

[16] 张敏政. 近场地震动工程参数的估计[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1986. ZHANG Min-zheng. Estimation of Near-fault Earthquake Engineering Parameters[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1986. (in Chinese)

[17] 魏颖. 地震加速度图的合成[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学所, 1987. WEI Ying. Synthetic of Seismic Acceleration Graphs[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1987. (in Chinese)

[18] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems [M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.



(上接 19 页)

[16] Song S T, Wang C Y, Huang W H. Earthquake Damage Potential and Critical Scour Depth of Bridges Exposed to Flood and Seismic Hazards under Lateral Seismic Loads[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(4): 579-594.

[17] 李鸿晶, 陆铭, 温增平, 等. 汶川地震桥梁震害的特征[J]. 南京工业大学学报, 2009, 31(1): 24-29. LI Hong-jing, LU Ming, WEN Zeng-ping, et al. Characteristics of Bridge Damages in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2009, 31(1): 24-29. (in Chinese)

[18] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008. JTG/T B02-01-2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese).

[19] API Recommended Practice 2A-WSD (RP2A). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Off-shore Platforms-Working Stress Design[R]. Washington, DC, American Petroleum Institute, 2000.

[20] Choi E S, Desroches R, Nielson B. Seismic Fragility of Typical Bridges in Moderate Seismic Zones[J]. Engineering Structures, 2004, 26(2): 187-199.

[21] Hwang H, Jernigan J, Lin Y. Evaluation of Seismic Damage to Memphis Bridges and Highwaysystems[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(4): 322-330.

[22] 郑山锁, 马德龙, 刘洪珠. 汶川地区震后钢筋混凝土框架结构的地震易损性研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 131-137. ZHENG Shan-suo, MA De-long, LIU Hong-zhu. Seismic Vulnerability of Post-earthquake Reinforced Concrete Frame Structures in the Wenchuan Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 131-137. (in Chinese)

[23] 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, ASCE, 2002, 128(4): 526-533.