

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904083

考虑冲刷影响的川藏线连续梁桥横向地震易损性分析*

何海峰¹, 魏凯¹, 何成²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031; 2. 四川汶马高速公路有限责任公司, 四川成都 610041)

摘要:冲刷将减小土体对桥梁基础的横向支撑作用,削弱桥梁结构刚度,进而影响桥梁结构的动力学特性和抗震性能,因此有必要研究冲刷对桥梁结构抗震性能的影响。以川藏线常见的三跨连续梁桥为工程背景,利用有限元软件SAP2000建立桥梁结构有限元模型,利用m法考虑桩土相互作用,讨论了冲刷深度变化对桥梁结构动力学特性的影响。选取曲率延性作为桥墩和桩基的损伤指标,考虑材料和几何非线性,通过增量动力分析方法得到不同横向地震动强度下桥墩和桩基的峰值曲率,建立了不同冲刷深度下桥墩、桩基在轻微损伤、中等损伤、严重损伤以及完全破坏状态下的地震易损性曲线。研究表明:冲刷深度增加将增大桥梁结构自振周期;桥墩在各损伤状态下的损伤概率随冲刷深度的增大而不断减小;冲刷深度较小时,桩基的损伤概率随冲刷深度增加而增大,但当冲刷深度超过某一值时,桩基的损伤概率反而有所减小。

关键词:冲刷;动力学特性;地震易损性曲线;桥墩;桩基

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0441-07

Lateral Seismic Fragility Analyses of the Continuous Beam Bridge on the Sichuan-Tibet Route Considering Scour Effect

HE Haifeng¹, WEI Kai¹, HE Cheng²

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Wenchuan Maerkang Highway Limited Liability Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: The scour effect will weaken the lateral support of the bridge foundation, which reduces the structural stiffness, and thus it will affect the dynamic characteristics and seismic performance of the bridge structure. Therefore, it is necessary to study the seismic performance of the bridge considering scour effect. A three-span continuous beam bridge on the Sichuan-Tibet route was used as an example, and the finite element model of the bridge was established by SAP2000. The m method was used to simulate the pile-soil interaction. The influence of scouring depths on the dynamic characteristics of the bridge structure was discussed. The curvature ductility was selected as the damage index of the pier and pile foundation. The incremental dynamic analyses were used to obtain the peak curvature of the pier and pile foundation under different lateral ground motion intensities considering the material

* 收稿日期:2019-04-26;修回日期:2019-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51708455)资助

作者简介:何海峰(1995—),男,硕士研究生。主要从事深水大跨桥梁、桥梁抗震研究。E-mail: hhf3201@163.com

通讯作者:魏凯(1984—),男,副教授,博士。主要从事深水大跨桥梁、桥梁抗震研究。E-mail: kaiwei@home.swjtu.edu.cn

and geometric nonlinearity. The seismic fragility curves of the pier and pile foundation under the slight damage, medium damage, severe damage, and complete damage state were established under different scouring depths, respectively. The results show that the scouring effect will increase the natural vibration period of the bridge structure; the seismic damage probability of the pier reduces with the increase of scouring depths; when the scouring depth is small, the seismic damage probability of the pile foundation increases with the increase of scouring depths. When the scouring depth exceeds a certain value, the seismic damage probability of the pile foundation may reduce.

Keywords: scour effect; dynamic characteristics; seismic fragility curves; pier; pile foundation

引 言

桥梁是交通运输网络中的生命线,在使用运营期间可能遭受多种自然灾害的影响。地震是威胁桥梁结构安全的主要自然灾害之一,其造成的桥梁倒塌事故已屡见不鲜。同时,冲刷是造成桥梁损毁的另一主要自然灾害,冲刷形成的冲刷坑主要导致桥梁桩基入土深度减小,削弱土体对桩基的约束作用,从而降低桥梁结构刚度^[1],进而影响桥梁结构的抗震性能^[2-4]。因此,对于处于强震区且受冲刷影响显著的桥梁结构,如何考虑冲刷对其抗震性能的影响,一直是国内外学者高度关注的问题。

Z.Wang等^[5]研究了冲刷深度变化对桥梁结构地震易损性的影响,研究结果表明,完全破坏状态下,随着冲刷深度增加,桥梁桩基的地震易损性有增大的趋势,但当冲刷深度增加到某一值时,桩基的地震易损性可能会减小,但没有研究不同损伤状态下冲刷深度变化的影响;梁发云等^[6]运用地震易损性分析方法,定义了桥梁结构的不同损伤状态,研究了冲刷深度变化对桥梁桩基地震易损性的影响,认为冲刷深度增加将增大桥梁桩基在各损伤状态下的损伤概率,但没有研究冲刷对桥墩地震易损性的影响;G.G.Prasad等^[7]研究了冲刷深度变化对桥梁桩基在不同损伤状态下损伤概率的影响,认为冲刷深度增加将使得桩基的损伤概率非线性增大,当冲刷深度超过某一临界值时,这种增大的幅度将显著减小,但没有研究冲刷对桥墩地震易损性的影响;刘兵等^[8]研究了冲刷深度变化对桥梁桩基、桥墩地震易损性的影响,认为冲刷深度增大将使得桥梁桩基在不同损伤状态下的失效概率增加,而桥墩在不同损伤状态下的失效概率减小。目前我国正在大力推进川藏铁路及高速公路建设,其中桥梁占

比非常高,然而川藏沿线处于强震区,区域内河流具有水力梯度大,洪水频发的特点,桥梁基础冲刷问题十分突出。同时,我国桥梁抗震计算常采用最大冲刷深度作为计算依据,而现有研究表明,桥梁最不利地震响应不一定出现在最大冲刷深度处^[4-5]。因此,对于处于强震区且冲刷显著的川藏线桥梁,综合考虑冲刷深度变化对川藏线桥梁地震易损性的影响,为川藏线桥梁抗震计算提供依据,对保证川藏线桥梁的顺利建成及正常运营具有重要意义。

综上,本文以川藏线常见的中小跨径连续梁桥为工程背景,研究了冲刷深度变化对桥梁结构动力学特性的影响,利用增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)方法计算桥梁地震响应,通过地震易损性分析理论,得到不同冲刷深度下桥墩、桩基在各损伤状态下的地震易损性曲线,综合讨论了冲刷深度变化对桥墩、桩基地震易损性的影响。

1 地震易损性分析方法

1.1 地震易损性分析原理

地震易损性指结构在某一特定的地震动强度下发生破坏的概率^[9],可以用如下条件概率的形式来表示:

$$P_f = P(S_d - S_c \geq 0 | IM) \quad (1)$$

式中, P_f 为失效概率; IM 为地震动强度指标; S_d 为结构的地震响应峰值; S_c 为结构的承载力。

现有研究中,一般假设 S_d 和 S_c 均服从对数正态分布,即 $\ln(S_d) \sim N(\mu_d, \beta_d)$, $\ln(S_c) \sim N(\mu_c, \beta_c)$ 。故根据概率论知识, $\ln(S_d) - \ln(S_c)$ 也服从对数正态分布,即:

$$\ln(S_d) - \ln(S_c) \sim N(\mu_d - \mu_c, \beta_c^2 + \beta_d^2) \quad (2)$$

同时(1)式可等价转化为:

$$P_f = P[\ln(S_d) - \ln(S_c) \geq 0 | IM] \quad (3)$$

根据C.A.Cornell等^[10]的研究,结构地震响应峰值 S_d 与地震动强度 IM 存在以下关系:

$$\ln(S_d) = a \cdot \ln(IM) + b \quad (4)$$

联立(1)~(4)得:

$$P_t = \Phi \left[\frac{a \cdot \ln(IM) + b - \ln(\mu_c)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (5)$$

式中, Φ 为标准正态分布函数。

现有研究中常见的地震动强度 IM 指标主要有地面峰值加速度 PGA 和谱加速度 S_a 。 S_a 作为地震动强度指标时与结构地震损伤的关联性更高, 离散性更小。但考虑到我国抗震设计规范中的地震设防烈度与 PGA 存在相关性, 同时 PGA 相比 S_a 较为简单易得, 因此, 本文仍采用 PGA 作为地震动强度指标, 现有研究指出, 采用 PGA 作为地震动强度指标时, 式(5)中 $\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}$ 可取 0.5^[11]。 μ_c 取不同的值代表不同的结构损伤状态。利用大量非线性时程分析得到多个 $[\ln(IM), \ln(S_a)]$ 样本点, 通过线性回归即可得到 a, b 的值, 进而最终得到结构的地震易损性曲线。

1.2 损伤指标的确定

进行地震易损性分析时, 需要指定某一损伤指标来定义不同的结构损伤状态。本文采用曲率延性作为桥墩、桩基的损伤指标。曲率延性系数为桥墩或桩基截面在不同破坏状态时的截面曲率与截面首次屈服曲率的比值。根据 H.Hwang 等^[12] 的建议, 本文取桥墩和桩基的轻微损伤、中等损伤、严重损伤及完全破坏状态时的曲率分别对应于桥墩和桩基截面内首根钢筋屈服、等效屈服、截面混凝土最大压应变为 0.004 及截面完全破坏时的曲率。为简化计算, 本文忽略桥墩和桩基间的协调作用, 通过弯矩—曲率分析, 即可得到桥墩和桩基处于不同损伤状态下的临界曲率值, 见表 1 和表 2。

表 1 桥墩的曲率延性

Table 1 Curvature ductility of the pier

破坏状态	曲率/ m^{-1}	曲率延性
微小损伤	0.001 735	1.00
中等损伤	0.002 428	1.40
严重损伤	0.006 818	3.93
完全破坏	0.023 400	13.49

表 2 桩基的曲率延性

Table 2 Curvature ductility of the pile foundation

损伤状态	曲率/ m^{-1}	曲率延性
微小损伤	0.001 552	1.00
中等损伤	0.002 130	1.37
严重损伤	0.006 737	4.34
完全破坏	0.021 400	13.79

1.3 地震波的选择

为得到式(5)中 a, b 的值, 需要进行多次非线性时程分析, 得到不同地震动强度下桥梁结构的地震响应峰值, 从而为线性回归分析提供足够的样本点。本文从美国太平洋地震研究中心选取符合桥址区场地特性的 10 条地震波, 采用地面峰值加速度 PGA 作为地震动强度指标。考虑到地震易损性分析要求地震动强度的分布范围尽可能广泛, 因此本文采用 IDA 方法, 对 10 条地震波乘以一系列比例系数进行调幅, 从而得到不同强度的地震波, 每一条地震波调幅后的地震动强度 PGA 为 0.2g~1.2g, 步长为 0.2g。最后考虑地震波沿不同深度土弹簧一致输入, 并从横桥向输入至桥梁结构, 同时考虑几何非线性和材料非线性, 将调幅后的 60 条地震波输入桥梁结构进行非线性时程分析, 进而得到不同地震动强度下桥墩和桩基的峰值曲率。

2 工程背景及数值建模

2.1 工程背景

如以图 1 所示, 工程背景为川藏线中常见的桥跨布置为 3×40 m 的连续梁桥。该连续梁桥上部结构为预应力混凝土箱梁。桥墩为圆柱墩, 墩高为 9 m, 直径为 2.0 m。采用单桩基础, 桩基直径为 2.2 m, 入土深度为 25 m。土层材料为中砂。桥墩

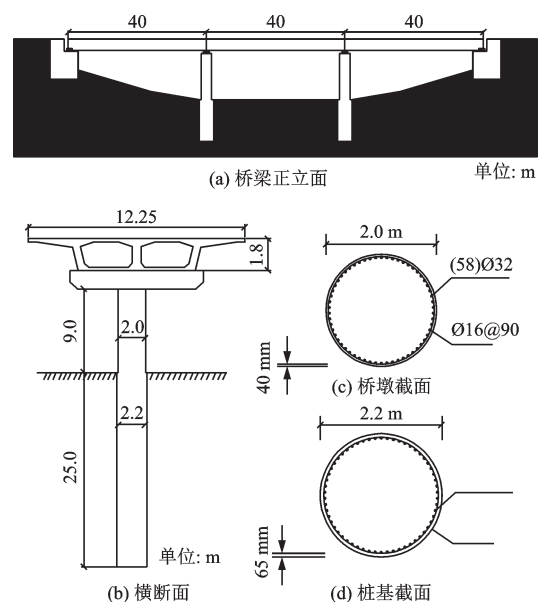


图 1 桥梁模型

Fig.1 Bridge model

和桩基均采用 C30 混凝土,纵筋为直径 32 mm 的 HRB400 钢筋,共 58 根环向等间距分部,箍筋直径为 16 mm,螺旋布置,间距为 90 mm。二者区别仅在于保护层厚度的差异,桥墩和桩基的保护层厚度分别为 40 mm 和 65 mm。

2.2 考虑冲刷的桥梁数值建模

本文利用有限元软件 SAP2000 建立连续梁桥的有限元模型。主梁和盖梁采用弹性梁单元模型。桥墩支座和桥台支座分别为板式橡胶支座和滑板橡胶支座,根据《公路桥梁抗震设计细则》^[13]的规定,分别采用线性连接单元和 Wen 塑性连接单元模拟,二者的本构关系如图 2 和图 3 所示。桥墩和桩基是地震作用下桥梁结构的容易发生损伤的薄弱部位,本文采用纤维塑性铰模型模拟二者在地震作用下的弹塑性特性。纤维铰模型中混凝土采用 Mander 模型,箍筋以内为约束混凝土,箍筋以外部分为保护层混凝土,采用非约束混凝土模型,纵向钢筋本构包括弹性、理想塑性以及应变强化三个阶段。对于桥墩,只在墩底设置塑性铰,由于不确定地震作用下桩基峰值地震响应的发生位置,沿桩身一定范围内布置分部塑性铰,如图 4 所示,本文在桩顶以下 12 m 范围内设置塑性铰,有限元计算表明,入土深度在 12 m 以上的桩段在地震作用下仍处于弹性阶段,因而这样的布置是合理的。

采用 m 法考虑桩土相互作用,将桩周土体简化

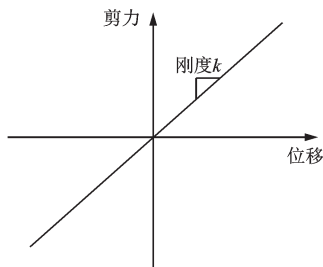


图2 板式橡胶支座线性模型
Fig.2 Linear model of laminated rubber bearing

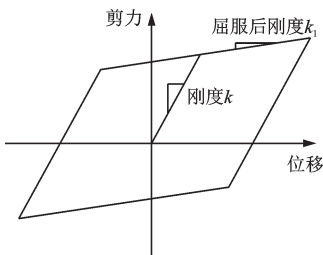


图3 Wen塑性单元塑性
Fig.3 Properties of Plastic Wen

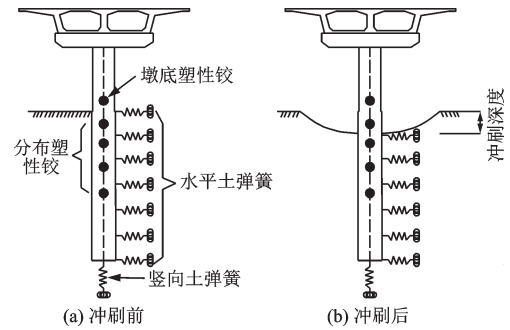


图4 冲刷模拟示意
Fig.4 Simulation of the scour effect

为沿桩身分布的弹簧单元,如图 4 所示。根据《公路桥涵地基与基础设计规范》^[14],水平弹簧刚度 k_v 和竖向弹簧刚度 k_h 的计算公式如下:

$$k_v = C_0 A_0 \quad (6)$$

$$k_h = m b_0 z \quad (7)$$

式中, C_0 为桩基地面竖向地基系数 (MN/m^4); A_0 为桩基地面受力面积 (m^2); m 为地基系数随深度变化的比例系数 (MN/m^4); b_0 为桩基的计算宽度 (m); z 为桩基的入土深度 (m)。

桥址区地基以中砂为主,故本文取 $m=C_0=12 \text{ MN}/\text{m}^4$ 。为考虑冲刷深度变化对桥梁地震易损性的影响,将桩基每隔 1 m 划分一个单元。如图 4 所示,通过删减对应的节点弹簧考虑冲刷深度的变化。例如,当冲刷深度为 2 m 时,则在有限元模型中删除地面以下 2 m 范围内的节点弹簧,同时修改剩余节点弹簧的刚度即可。本文考虑冲刷深度为 0~3 m 时,步长为 1 m。

3 数值分析结果及讨论

3.1 模态分析

首先利用有限元软件 SAP2000 对各冲刷深度下的桥梁模型进行模态分析,探讨冲刷深度变化对桥梁结构动力学特性的影响。图 5 给出了桥梁结构前四阶自振周期随冲刷深度的变化情况。各冲刷深度下前四阶振型分别为一阶横向振动、一阶纵向振动、主梁扭转和桥墩纵向弯曲。如图 5 所示,随着冲刷深度的增大,桥梁前四阶自振周期不断增大。例如,当冲刷深度为 3 m 时,桥梁前四阶自振周期分别较未冲刷时增大了 5.6%、5.1%、1.2% 和 16.4%,这主要是因为冲刷使得土体对桥梁基础的约束作用减弱,从而桥梁侧向刚度降低,自振周期延长。

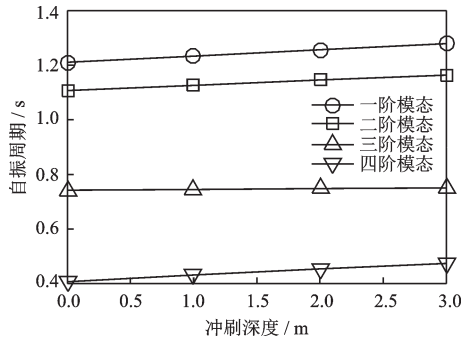


图5 冲刷深度对自振周期的影响

Fig.5 Influence of scouring depths on the natural vibration period

同时,当冲刷深度增加时,第四阶自振周期显著增大,第三阶自振周期增幅很小。这主要是因为第四阶振型主要表现为桥墩的振动,而冲刷深度的改变显著降低了桥墩的侧向刚度,因此其增幅最为显著;第三阶振型为主梁扭转,桥墩几乎不参与振动,因而冲刷对其影响很小。综上,冲刷深度增加将改变桥墩及桩基的侧向刚度,显著影响桥墩和桩基的动力学特性,进而改变桥梁结构抗震性能,因此必须考虑冲刷深度变化对桥梁结构动力学特性的影响。

3.2 地震易损性分析

根据IDA方法进行非线性时程分析,对于每一冲刷深度下的桥梁有限元模型,将调幅得到的60条地震波输入桥梁结构进行非线性时程分析,从而得到60个相应的曲率延性系数,将60个曲率延性系数的对数 $\ln(S_d)$ 与对应地面峰值加速度的对数 $\ln(PGA)$ 进行线性回归分析,如图6和图7所示,即可得到式(4)中 a 、 b 的值(见表3和表4),进而可得到桥梁结构的地震易损性曲线。图8给出了未冲刷时桥墩和桩基的地震易损性曲线,如图8所示,随着地面峰值加速度 PGA 的增大,桥墩和桩基在各损伤状态下的损伤概率不断增大。当 PGA 较小时(小于 $0.2g$),桥梁结构可能尚处于弹性变形阶段,桥墩和桩基在各损伤状态下的损伤概率随 PGA 增大的趋势并不明显。当 PGA 持续增加,桥梁结构逐渐进入弹塑性变形阶段,桥墩和桩基的损伤概率显著增大,例如当 PGA 从 $0.5g$ 增大至 $0.8g$ 时,桩基发生中等损伤的概率从 0.0737 增大至 0.616 ,增大了 734% 。当 PGA 继续增大时,桥梁结构进入塑性阶段,塑性变形将消耗大量的地震能量,因而桥墩和桩基的损伤概率随 PGA 增大的趋势再次减弱。例

如,当 PGA 从 $0.8g$ 增大至 $1.0g$ 时,桩基发生中等损伤的概率从 0.616 增大至 0.881 ,仅增大了 43% 。

同理,根据表3和表4中给出的不同冲刷深度下桥梁结构概率模型中的拟合参数,将得到的拟合曲线

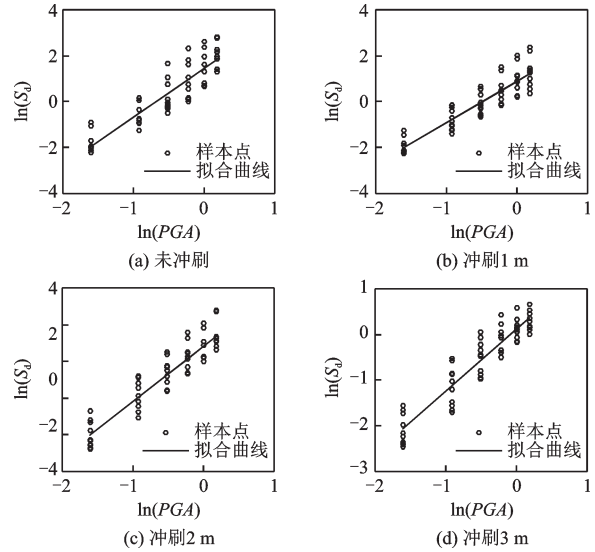


图6 桥墩拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of the pier

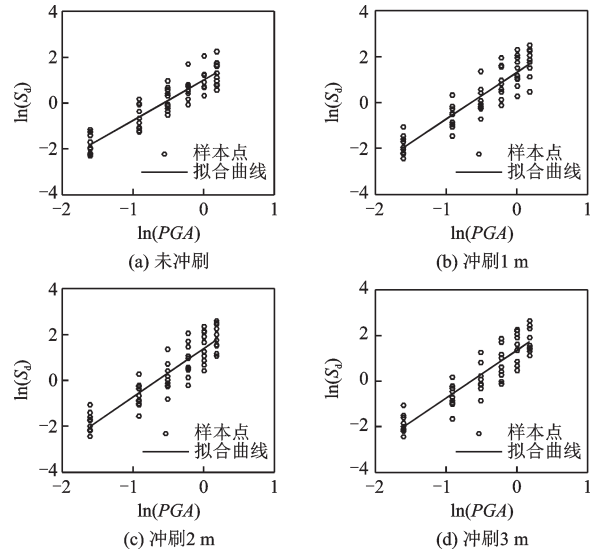


图7 桩基拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of the pile foundation

表3 概率模型参数(桥墩)

Table 3 Parameters of the probabilistic model of the pier

冲刷深度/m	拟合参数		拟合优度
	a	b	
0	2.130 8	1.446 8	0.830 7
1	1.804 0	0.882 5	0.835 2
2	1.504 2	0.408 9	0.857 9
3	1.358 2	0.122 4	0.872 1

表4 概率模型参数(桩基)

Table 4 Parameters for the probabilistic model of the pile foundation

冲刷深度/m	拟合参数		拟合优度
	<i>a</i>	<i>b</i>	
0	1.757 7	0.994 0	0.839 1
1	2.035 2	1.307 2	0.830 8
2	2.100 2	1.375 7	0.830 3
3	2.079 9	1.341 0	0.832 7

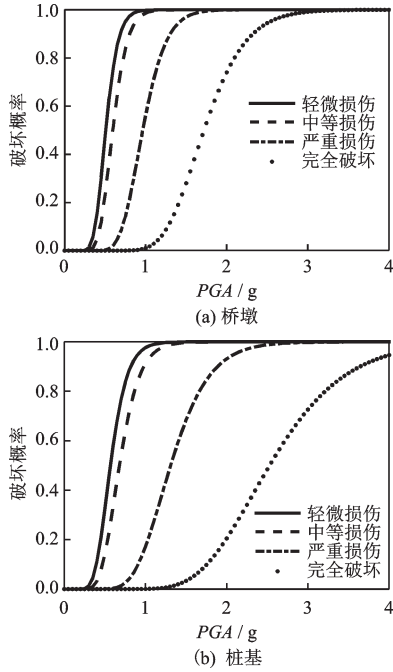


图8 未冲刷时的地震易损性曲线

Fig.8 Seismic fragility curves at the scour depth of 0 m

参数代入式(5),并结合桥墩和桩基处于不同损伤状态下的临界曲率值,即可得到不同冲刷深度下桥墩和桩基在不同损伤状态下的地震易损性曲线,进而可讨论冲刷深度变化对桥梁结构地震易损性的影响。

图9和图10分别给出了冲刷深度变化对桥墩和桩基在各损伤状态下损伤概率的影响。如图9所示,随着冲刷深度的增加,桥墩在各损伤状态下的损伤概率不断降低,例如当 $PGA=0.5g$ 时,冲刷深度为0~3 m时(步长为1 m),桥梁发生轻微损伤的概率分别为0.31、0.13、0.06、0.03。由图10可见,当冲刷深度较小时,桥梁桩基在各损伤状态下的损伤概率随冲刷深度的增加而增大。例如,当冲刷深度从0 m增大至2 m, $PGA=0.5g$ 时,桥梁桩基发生中等损伤的概率从0.11增大至0.17,增大了54.5%。但当冲刷深度增大至3 m时,桥梁桩基在各损伤状态下的损伤概率反而较冲

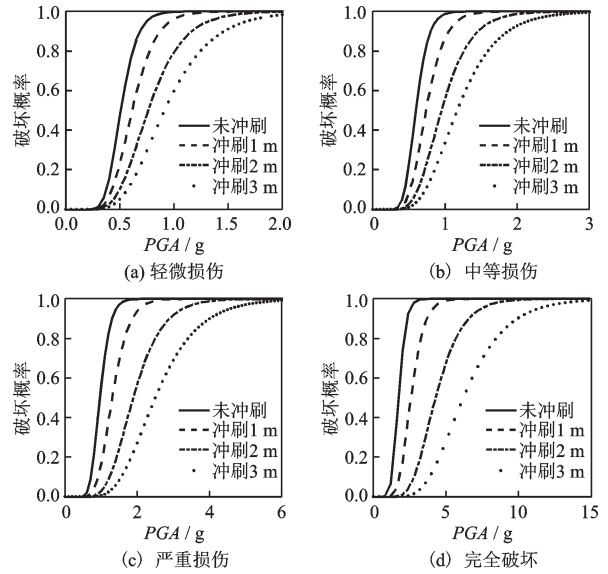


图9 桥墩的易损性曲线

Fig.9 Seismic fragility curves of the pier

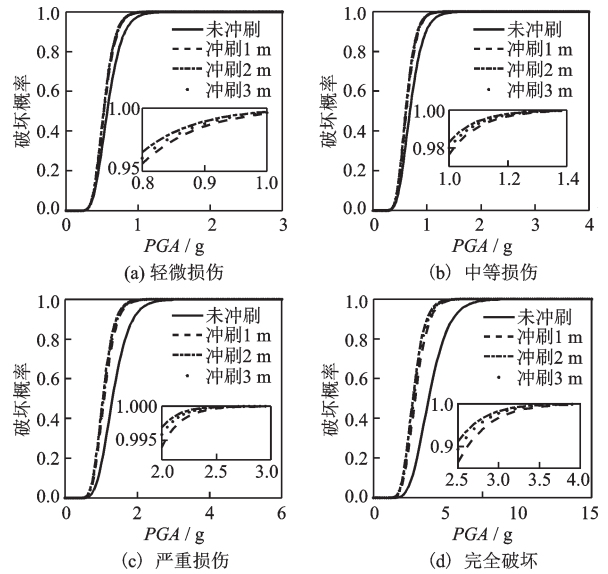


图10 桩基的易损性曲线

Fig.10 Seismic fragility curves of the pile foundation

刷深度为2 m时有所减小,例如当 $PGA=0.5g$,冲刷深度为3 m时桥梁桩基发生中等损伤的概率为0.16,较冲刷深度为2 m时降低了5.8%。这主要是因为冲刷深度增加对桥梁结构主要有两种作用效果,第一是削弱土体对桥梁基础的侧向约束作用,降低桥梁结构刚度,使得桥梁桩基在地震作用下更容易发生变形,从而更容易发生破坏。另一方面,冲刷深度增加将增大桥梁结构的自振周期,由于地震波能量一般集中在低周期、高频率的范围内,自振周期的延长相当于对桥梁结构起到了隔振的作用,这一点对桥梁抗震是有利的。因此桥梁桩基在地震作用下的损伤概率随冲

刷深度变化的趋势将取决于上述两种作用效果哪一种占据主导,当冲刷深度处于0~2 m时,第一种效果为主要影响因素,因而桩基损伤概率随冲刷深度的增加而增大,当冲刷深度增大至3 m时,受第二种作用效果的影响,桩基损伤概率反而有所降低。

综上所述,当冲刷深度增大时,由于桥墩的损伤概率不断降低而桩基的损伤概率整体上有增大的趋势,桥梁结构在地震作用下的破坏位置可能由桥墩向桩基转移,然而桥梁抗震设计中桩基一般按能力保护构件设计而桥墩一般按延性构件设计,冲刷效应的存在将造成桩基更容易在地震作用下破坏,这与桥梁抗震设计的初衷是不符的,因而需要高度重视冲刷对桥梁桩基地震易损性的影响,同时应注意随着冲刷深度的增加,桩基在各损伤状态下的损伤概率不一定是单调递增的,当冲刷深度超过某一值时,桥梁桩基在地震作用下的损伤概率可能会有所减小,因此传统的采用最大冲刷深度进行抗震计算的方法并不完全合理,设计时应充分考虑多级冲刷深度对桥梁结构地震易损性的影响。

4 结 论

通过有限元软件SAP2000建立某川藏线三跨连续梁桥数值模型,采用地震易损性分析方法研究了冲刷深度变化对桥梁结构抗震性能的影响规律。主要结论如下:

(1) 冲刷深度增加使得桥梁结构刚度减小,自振周期增大。

(2) 桥墩在各损伤状态下的损伤概率随冲刷深度的增加而减小。

(3) 当冲刷深度较小时,连续梁桥桩基的地震损伤概率随冲刷深度增加而增大,但当冲刷深度超过某一限值时,桥梁桩基在地震作用下的损伤概率反而会有所降低。

由于冲刷深度增大使得桥墩的损伤概率不断减小而桩基在地震作用下的损伤概率较未冲刷时显著增大,因此冲刷效应可能导致桥梁结构在地震作用下的破坏位置由桥墩向桩基转移,故设计计算时必须考虑冲刷对桥梁桩基地震易损性的不利影响。同时注意到冲刷深度超过某一值时,桩基在地震作用下的损伤概率可能降低,因而传统的采用最大冲刷深度进行抗震计算并不完全合理,应考虑多级冲刷深度对桥梁桩基地震易损性的影响。

参考文献:

- [1] Xuan G, Wu Y, Guo Y. Time-dependent seismic fragility analysis of bridge systems under scour hazard and earthquake loads [J]. *Engineering Structures*, 2016, 121: 52-60.
- [2] Blanco G, Ye A, Wang X W, et al. Parametric pushover analysis on elevated RC pile-cap foundations for bridges in cohesionless soils [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001328.
- [3] Wang X, Ye A, He Z, et al. Quasi-static cyclic testing of elevated RC pile-cap foundation for bridge structures [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21 (2) : 4015042.
- [4] 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 A J, Zhang X G, Liu W A. Effects of riverbed scouring depth on the seismic response of bridges on pile foundation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(3): 58-62.(in Chinese)
- [5] Wang Z, Dueñas-Osorio L, Padgett J E, et al. Influence of scour effects on the seismic response of reinforced concrete bridges [J]. *Engineering Structures*, 2014, 76: 202-214.
- [6] 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): 13-19.
Liang F Y, Liu B, Li J R. Seismic fragility analysis of bridge pile foundation considering scour effect [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(1): 13-19.(in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 刘兵,梁发云,彭君.地震与洪水作用下桥墩基础易损性曲线与回归分析[J].*结构工程师*, 2016, 32(6): 155-161.
Liu B, Liang F Y, Peng J. Fragility analysis and parameters regression of bridge foundation under the combined action of earthquake and flood[J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(6): 155-161.(in Chinese)
- [9] 李宏男,成虎,王东升.桥梁结构地震易损性研究进展述评[J].*工程力学*, 2018, 35(9): 1-16.
Li H N, Cheng H, Wang D Sh. A review of advances in seismic fragility research on bridge structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 1-16.(in Chinese)
- [10] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines[J]. *Structural Engineering*, 2002, 128(4): 526-533.
- [11] Agency F E M. Hazards99 user's manual[R]. Washington DC: [s.n.], 1999.
- [12] Hwang H, Jernigan J B, Lin Y W. Evaluation of seismic damage to memphis bridges and highway systems [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2000, 5(4): 322-330.
- [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.
- [14] 公路桥涵地基与基础设计规范:JTG D63—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.

(本文责编:周小潭)