

张智,李小军,兰日清,等.斜交连续刚构桥桥墩地震易损性分析[J].地震工程学报,2020,42(6):1391-1401.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1391

ZHANG Zhi, LI Xiaojun, LAN Riqing, et al. Seismic Fragility Analysis of the Piers of a Skewed Continuous Rigid-frame Bridge [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1391-1401. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1391

斜交连续刚构桥桥墩地震易损性分析

张智^{1,2}, 李小军^{1,3}, 兰日清⁴, 宋辰宁^{1,2}

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省高校土木结构防灾减灾协同创新中心, 山东 济南 250101;
3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 4. 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089)

摘要:以美国西部地区某斜交公路连续刚构桥为研究对象,研究其不等高墩易损性差异以及斜交角的改变对桥墩地震易损性的影响。考虑桥梁结构参数和地震动的不确定性,选取100条地震动,沿纵桥向输入,生成“结构-地震动”样本库,以地震动峰值加速度(PGA)为强度指标(IM),利用OpenSees软件对结构进行非线性时程分析得到桥墩动力响应,而后以桥墩曲率延性比衡量桥梁破坏状态,在确定桥墩损伤指标的基础上,采用可靠度理论得到各桥墩的地震易损性曲线,判断桥墩的损伤模式、损伤特点。在此基础上,改变桥梁斜交角度进行易损性分析,得到斜交角变化对桥墩地震易损性的影响。研究表明:该桥最矮墩发生损伤的概率大于其他桥墩,桥墩最先进入塑性的是墩顶和墩底区域;不同斜交角对桥墩的地震响应影响显著,各墩损伤破坏排序与斜交桥结构构造特点有关,同一排架墩的两侧墩柱易损性呈现与角度变化趋势相反的排列,损伤越严重,趋势越明显;对于此不等高的斜交刚构桥,最矮墩为其抗震薄弱环节,斜交角越大,越应该关注钝角处矮墩的损伤情况,并提高其设计标准,在进行斜交刚构桥抗震设计中应予以重视。

关键词: 刚构桥; 不等高墩; 斜交角; 易损性分析; 曲率

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1391-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1391

Seismic Fragility Analysis of the Piers of a Skewed Continuous Rigid-frame Bridge

ZHANG Zhi^{1,2}, LI Xiaojun^{1,3}, LAN Riqing⁴, SONG Chenning^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, Shandong, China;

2. Shandong Co-Innovation Center for Disaster Prevention and Mitigation of Civil Structures, Ji'nan 250101, Shandong, China;

3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

4. China IPPR International Engineering Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: With an actual skewed continuous rigid-frame highway bridge in the western US chosen as the research object, this paper investigated the impact of differences in the vulnerability of unequal height

收稿日期: 2019-06-07

基金项目:国家重点研发计划“海域地震区划关键技术研究”(2017YFC1500404);北京市自然科学基金“深厚土层地基上典型曲线桥抗震性能分析方法研究”(8172049);国家自然科学基金项目“重大工程结构抗震与减震控制”(51421005);山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目“立交桥结构地震灾变特性及复合减震方法研究”(XTM201904)

第一作者简介:张智(1990-),女,博士,讲师,研究方向为桥梁抗震。E-mail: zhangzhil399@163.com。

通信作者:李小军(1965-),男,博士,长江学者特聘教授,博士研究生导师,研究方向为结构工程与防灾减灾工程。

E-mail: beerli@vip.sina.com。

piers and the skew angle on the seismic fragility of piers. The model sample database was generated using 100 ground motions inputted in the longitudinal direction of the bridge considering the uncertainties of structural parameters and ground motion. Then, with peak ground acceleration taken as the intensity measure, the seismic responses of each pier were obtained via nonlinear time history analysis using OpenSees. The curvature ductility ratio of piers was defined to measure the damage state of the bridge. After the pier damage indexes were derived, seismic fragility curves of piers were obtained with reliability theory, and the damage modes and characteristics of piers were judged. On this basis, fragility analysis was performed by changing the skew angle, and the impact of this change on the seismic fragility of piers was obtained. This study found that the damage probability of the shortest pier was greater than that of the other piers, and the top and the bottom of piers first entered the plastic stage. The seismic responses of bridge were influenced significantly by skew angle, and the damage sequence of each pier was related to the characteristics of the bridge structure. The fragility of two-side pier columns at the same bent pier was opposite the variation trend of the skew angle; serious damage corresponded to an obvious trend. The skewed rigid-frame bridge with unequal height was weak in the shortest pier. Moreover, as the skew angle increases, the damage of the short pier at an obtuse angle should be given more attention and enhanced design criteria should be developed, especially for the seismic design of skewed rigid-frame bridges.

Keywords: rigid frame bridge; unequal height piers; skew angle; fragility analysis; curvature

0 引言

斜交桥能够克服复杂地形的限制以保持桥梁整体线型的连续性,对空间和线型布置有着良好的适应性,能适应复杂的城市交通网^[1]。相对于直线桥梁,斜交桥的几何不规则性致使其受力更加复杂,易发生地震灾害如桥面旋转、支座受力不均、剪力键失效、局部倒塌、易落梁等,比直线桥更为严重^[2],1992年 Cape Mendocino/Petrolia 地震,Painter Street 立交桥发生了较为明显的主梁旋转^[3];1971年 San Fernando 地震,Foothill Boulevard 立交桥中间桥墩损坏严重^[4];1994年 Northridge 地震,Gavin Canyon 立交桥由于主梁发生过多的相对位移导致桥台与支座脱离^[5];2010年 Chile 地震,Lo Echeveres 斜交桥桥面旋转使其承担过多的横向位移,剪力键受力过大,破坏失效^[6]。连续刚构桥是斜交桥一种主要的结构形式。对连续刚构桥而言,其水平力可以分配到各个主墩上,而不需要像连续梁桥设置制动墩承受水平地震力,但由于墩柱高度的差异,导致斜交刚构桥桥墩在地震中损伤特征可能会不一样。

桥梁的地震易损性通常可以用易损性曲线描述,这些曲线可以表示地震作用下结构反应超过规定损伤破坏极限状态的条件概率。近年来国内外学者多采用理论分析方法建立地震易损性模型。Hwang 等^[7]基于可靠度理论给出了一种地震作用下钢筋混凝土结构易损性曲线的系统性分析方法;

Nielson 等^[8]采用数值分析方法建立了美国中南部地区典型三跨连续梁桥的易损性模型;郭军军等^[9]对考虑桥台性能连续梁桥地震易损性进行研究,采用可靠度理论得到各个构件的地震易损性曲线;吴培涛^[10]用传统可靠度方法对曲线梁桥进行抗震性能评估,研究了地震动输入方向、支座形式对桥梁构件和整体的易损性影响;董俊等^[11]对非规则连续刚构桥进行易损性分析,建立了典型非规则公路桥梁的地震易损性理论模型。此外,斜交角度的变化对斜交桥易损性的影响显著,Shamsabadi 等^[12]研究了考虑土-桥台-基础相互作用的斜交桥的抗震性能,指出斜交桥易受主梁旋转的影响,主梁旋转对斜交角变化敏感;Apirakvorapinit 等^[13]对某斜交桥的上部结构进行一系列的时程和静力弹塑性分析,结果表明随着斜交角的增大临界应力也随之增大;Meng 等^[4]研究了斜交混凝土箱梁桥的地震反应,考虑了上部结构柔度、边界条件、斜交角和刚度偏心对桥梁性能的影响,指出桥梁受到斜交角变化影响较明显。综上,在斜交桥刚构桥地震易损性的研究方面,其墩身在地震作用下的损伤模式、损伤特点、易损伤部位等均少有研究。斜交刚构桥的结构形式导致其在地震作用下的动力响应规律、震后损伤情况等与其他桥梁有所差异,该类桥梁各构件特别是桥墩的损伤规律、易损伤部位判定、结构加固等都是急需研究和解决的问题。

基于此,本文以美国西部地区一座五跨连续斜交刚构桥——Hwy46/Cholame Creek 桥(以下简称 Cholame Creek 桥)为研究对象,针对其不等高排架墩进行地震动作用下的易损性分析,建立桥墩在地震作用下的易损性曲线,对比分析斜交角的改变对其地震易损性的影响,并找出最易损伤部位,为类似桥梁的抗震设计、施工以及震后损伤识别提供依据。

1 地震易损性分析方法

易损性曲线表示在特定地震动强度参数 (IM) 下,桥梁构件的抗震需求(D) 达到或超越自身实际抗震能力(C) 的概率,即

$$P_r = P[D \geq C \mid IM] \tag{1}$$

概率地震需求模型描述的是结构地震需求参数与地震动强度指标之间的关系,基于结构动力时程分析结果,利用该模型便可获得桥梁结构易损性曲线。Cornell 等^[14] 在假设结构地震需求参数 (EDP) 服从对数正态分布的前提下,利用回归分析研究了地震需求中位数(S_d) 与地震动强度参数 IM 之间的关系,即

$$\ln(S_d) = \ln a + b \ln(IM) \tag{2}$$

式中: a 、 b 均为回归系数。由于结构在每种地震动强度下对应唯一的结构需求,则结构地震需求的离散度 $\beta_{E|IM}$ 为

$$\beta_{E|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln e_i - (\ln a + b \ln IM_i)]^2}{n - 2}} \tag{3}$$

式中: e_i 为桥梁结构在第 i 个地震动作用下的地震动需求峰值; IM_i 为第 i 个地震动强度峰值; n 为地震动总数。假定构件的需求和抗震能力均服从对数正态分布,所以特定阶段的失效概率可表示为

$$P(D \geq C \mid IM) = \Phi\left(\frac{\ln(S_d/S_c)}{\sqrt{\beta_{E|IM}^2 + \beta_c^2}}\right) \tag{4}$$

式中: $\Phi(x)$ 为标准正态累计分布函数; S_c 为某种极限状态结构抗震能力中位数; β_c 为桥梁构件抗震能力对数标准差。根据 HAZUS99^[15],当易损性曲线以峰值加速度(PGA) 为自变量时, $\sqrt{\beta_{E|IM}^2 + \beta_c^2}$ 取为 0.5。

2 斜交刚构桥计算模型

Cholame Creek 桥初建于 1954 年,1979 年加宽 3.35 m^[17],位于 D 类场地^[18],横跨圣安德列亚斯断层,该区域地震活动频繁。加州地震调查局(CGS) 在此处布置 50 个强震仪,见图 1。跨径布置为五跨

6.4 m+3×8.5 m+6.4 m,斜交角 4°,上部结构为混凝土桥面板,长 39.6 m,宽 13.4 m,厚 0.53 m,采用 C40 混凝土;下部结构为多排墩支承,2~5 号排架墩(Bent. 2~Bent. 5)高分别为 1 m、4 m、4 m、2.2 m,桥墩纵向配筋率为 1.7%,配箍率为 0.75%,纵筋和箍筋均采用 HRB335,采用 C30 混凝土(图 2)。本文以加宽后的 Cholame Creek 桥为研究对象,研究这类非规则桥梁的地震易损性。

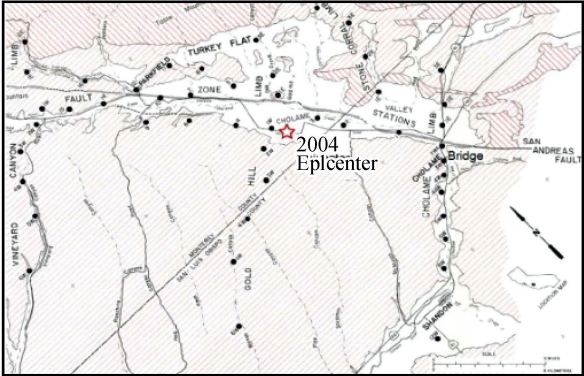


图 1 桥址和强震仪分布^[16]

Fig.1 Bridge location and strong motion array locations^[16]

使用 OpenSees 软件建立全桥的三维有限元模型,主梁用弹性梁单元模拟^[19]。已有研究表明,在满足一定原则的基础上,采用空间梁格进行建模是合理、可行的^[20]。弹性梁梁格尺寸定为 2 m,桥墩采用弹塑性纤维单元模拟,单元中钢筋和混凝土材料被赋予了相应的本构关系,其中混凝土选取 Kent-Scott-Park 单轴材料模型(Concrete02 Material),忽略截面弯曲、轴力与剪切的耦合效应及剪切非线性效应,利用 OpenSees 中 Section Aggregator 功能来实现截面剪切、扭转效应的模拟。钢筋的本构关系模型选用模型 Giuffre-Menegotto-Pinto (Steel01)^[21]。参考 Caltrans 规范考虑桥台土效应的被动线性刚度^[22],且考虑桩基与桥台土的联合刚度,建立等效线性弹簧来模拟桥台处的被动土压力,桩土相互作用采用“m”法计入^[17]。

根据 2004 年 Parkfield 地震中,Cholame Creek 桥东部 Cholame 2W 处的自由场加速度记录以及 1~6 号桥面加速度、位移记录,将有限元计算结果与实际记录进行对比,检验有限元模型的准确度。以桥面 2 号、3 号、6 号记录为例,由图 3、图 4 有限元计算得到的桥面加速度、位移时程曲线与实际记录的时程曲线吻合较好,证明了模型建立以及有限元计算方法的合理性和准确性。

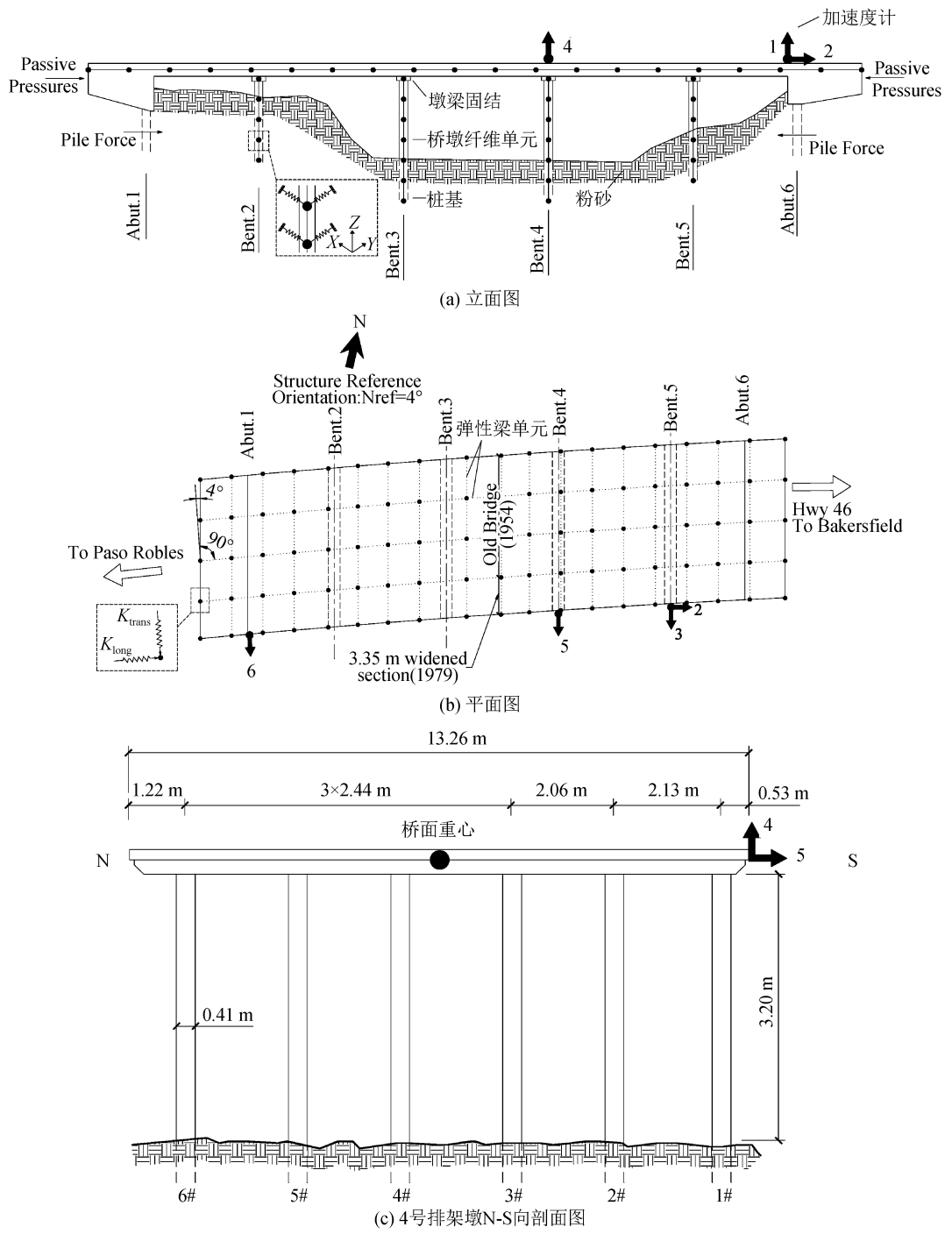


图 2 斜交桥桥型布置图

Fig.2 The layout of skew bridge

3 斜交桥-地震动系统的不确定性

3.1 地震动的不确定性

根据桥梁所处 D 类场地类型,以规范^[23]中的设计反应谱为目标反应谱^[24],从太平洋地震研究中心的“PEER 数据库”中选出土层平均剪切波速 v_{s30} 介于 180~360 m/s 之间、震级在 6.5~7.5 之间的地震动 100 条。图 5 给出了阻尼比为 5% 的目标谱加

速度曲线、平均谱加速度曲线及加减标准差曲线。通过对比可见,平均谱与目标谱吻合较好,且所选地震动的反应谱基本处于均值加减标准差之间。大部分峰值加速度 (PGA) 为 0.1g~1.0g (g 为重力加速度)。

常见的地震动强度指标 (IM) 主要有峰值加速度 (PGA) 和以结构基本自振周期对应的谱加速度 (SA),前者非常直观,对中长周期结构不能有效地

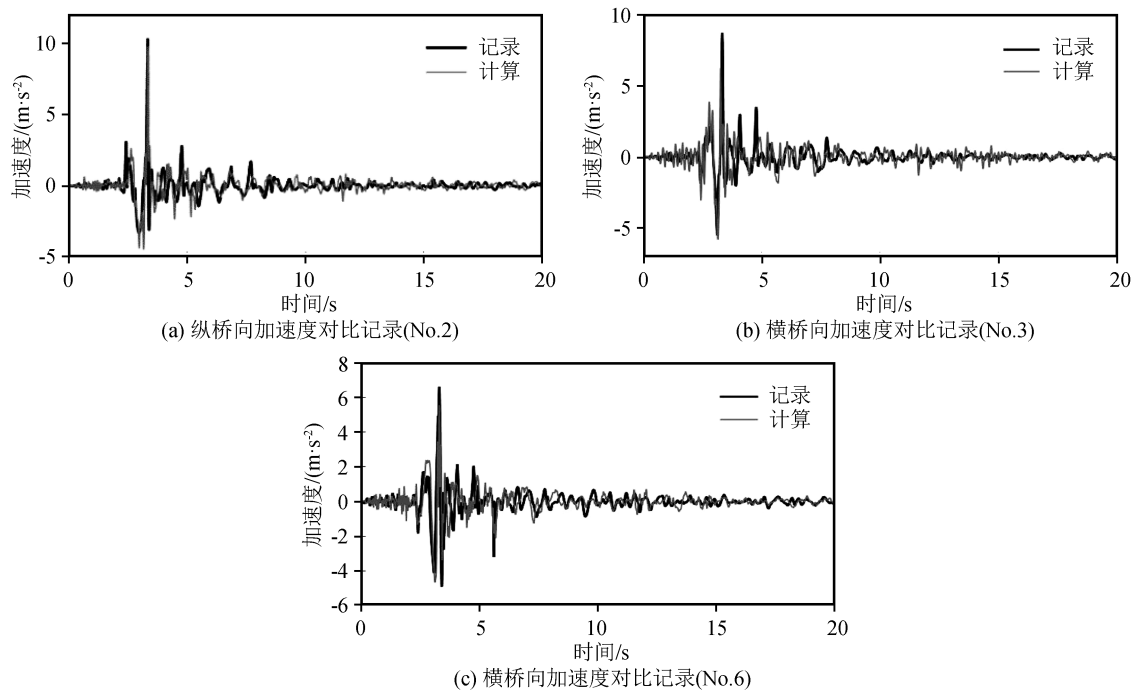


图 3 测点加速度对比记录

Fig.3 Comparison of measured acceleration records

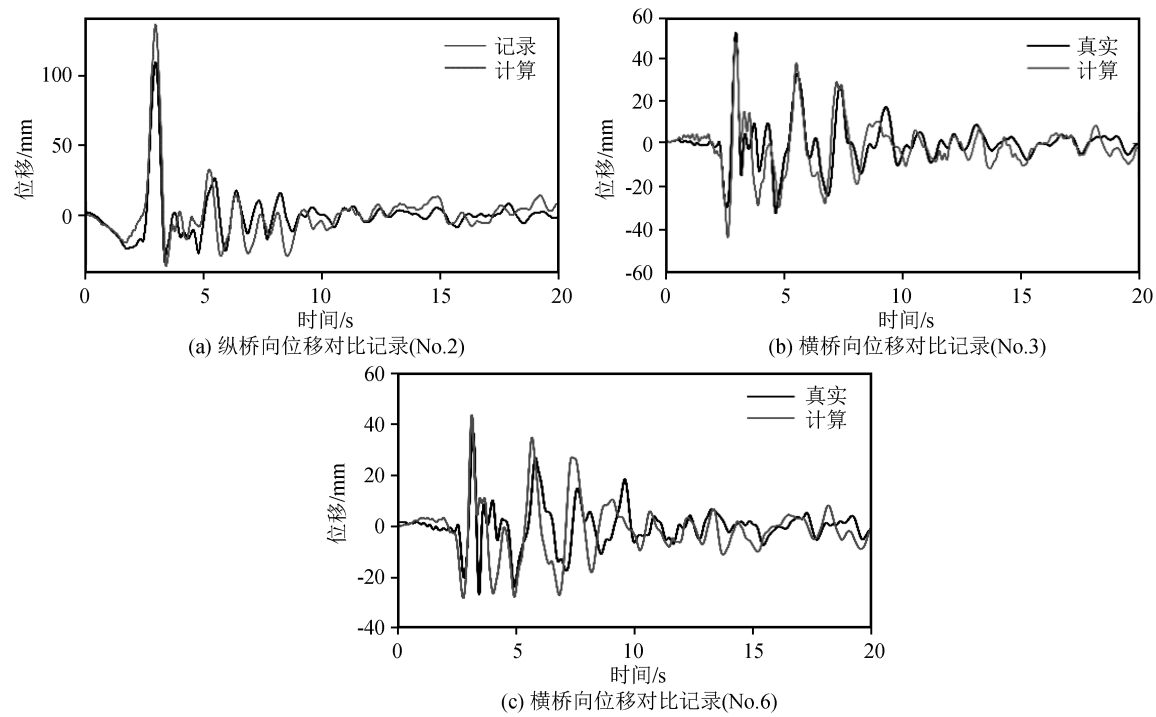


图 4 测点位移对比记录

Fig.4 Comparison of measured displacement records

减小地震反应的离散性这一点可以通过获取足够数量的地震动弥补;后者具有更加清晰的力学意义,同时考虑了结构的动力特性与地面运动的动力特性^[25]。限于篇幅,本文选择峰值加速度(PGA)为地震动强度指标,研究地震动沿桥梁纵向输入的情况,

不考虑横、竖向地震动的影响。

3.2 材料强度的随机性

桥梁本身的不确定性主要与建筑材料的不确定性有关,即与混凝土和钢筋的变异性有关^[26]。根据Cholame Creek 桥的混凝土材料抗压强度和钢筋材

料的屈服强度概率分布,确定易损性分析的不确定性参数,如表 1 所列。

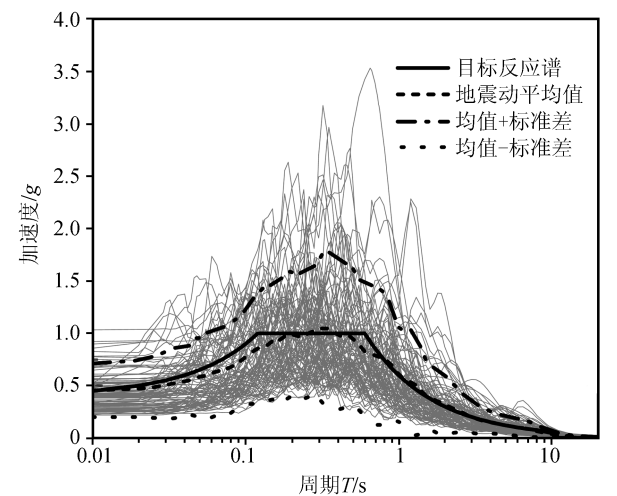


图 5 目标反应谱及 100 条地震动反应谱

Fig.5 Target response spectrum and response spectra of 100 ground motions

表 1 随机变量统计信息			
Table 1 Statistical information of random variable			
随机变量	均值/MPa	变异系数	分布类型
桥墩抗压强度 C30	29.1	0.17	正态分布
桥面抗压强度 C40	38.8	0.17	正态分布
钢筋屈服应力 HRB335	335	0.07	对数正态分布

4 桥墩损伤指标的确定

4.1 桥墩破坏类型

为了确定损伤指标,首先需要确定不同高度墩柱的破坏类型。结构最矮墩为 2 号排架墩所在墩柱,易发生剪切破坏或弯剪破坏,是整个桥梁最关键的部位,选取 2 号排架墩中的 6 号墩抗剪能力与抗剪需求进行比较^[27],见图 6。结果表明,2 号排架墩有足够的抗剪强度承受水平向地震动,其破坏形式为弯曲破坏,与地震中 2 号排架墩墩顶产生裂缝、纵向钢筋屈服这一塑性破坏类型相符。同理可得 3~5 号排架墩破坏形式为弯曲破坏。

4.2 桥墩损伤指标

Cholame Creek 桥为非规则连续刚构桥,2~5 号排架墩均属于顶端固结的多柱式桥墩,由于受上部结构和相邻桥墩的约束,桥墩的内力分布比较复杂,反弯点位置不稳定,不能等效为悬臂墩以考虑其抗震性能^[11],因此,本文采用曲率 ϕ 作为桥墩损伤指标,桥墩控制截面损伤指标列于表 2,损伤状态和损伤指标描述列于表 3。图 7 给出了 2~5 号排架墩在各地震动作用下墩身截面最大曲率平均值沿高度的分布情况。对比各排架墩曲率,最大曲率位于

墩顶和墩底,曲率沿墩高呈两头大、中间小的“K”型分布;2 号排架墩墩高是 3 号、4 号的 1/4,最大曲率约是 3 号、4 号的 10 倍,即墩高越小,曲率越大;由于斜交角较小,各排架墩 1 号~6 号墩柱曲率沿墩高变化相差不大,柱中曲率近乎一致,即该桥斜交(4°斜交角)这一结构特征对墩柱曲率影响不大。

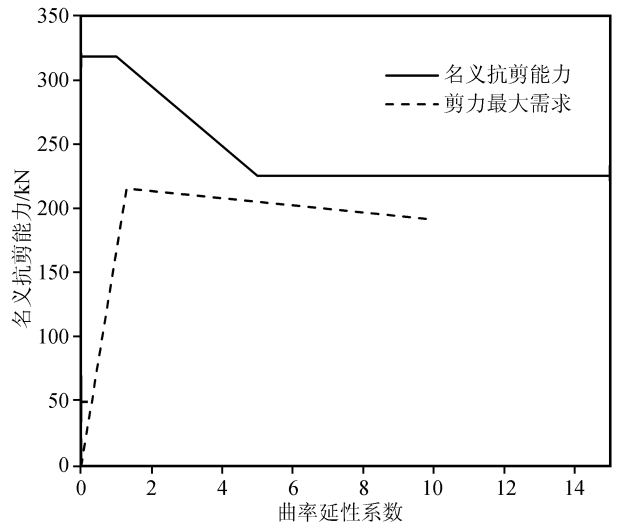


图 6 2 号排架墩-6 号墩失效时的延性

Fig.6 Ductility of failure of pier No.6 at Bent.2

表 2 桥墩控制截面损伤指标					
Table 2 Values of damage index of control sections of piers					
结构部位	损伤指标(曲率 $10^{-6}/\text{mm}$)				
	ϕ_1	ϕ_y	ϕ_c	ϕ_u	
Bent.2	1 号墩墩顶	8.88	11.63	41.5	67.62
	1 号墩墩底	8.87	11.71	41.4	67.51
	6 号墩墩顶	9.59	12.39	51.30	58.05
	6 号墩墩底	9.61	12.39	51.30	57.96
Bent.5	1 号墩墩顶	8.87	11.67	42.72	67.66
	1 号墩墩底	8.91	11.72	42.5	67.15
	6 号墩墩顶	9.57	12.38	50.55	58.39
	6 号墩墩底	9.61	12.43	52.07	57.94

注: ϕ_1 为纵向钢筋首次屈服时的曲率; ϕ_y 为等效屈服曲率; ϕ_c 为承载力最大时曲率; ϕ_u 为核心混凝土压碎时的曲率。

表 3 损伤状态及损伤指标描述 ^[28]		
Table 3 Damage status and description of damage index ^[28]		
损伤状态	损伤描述	损伤指标
无损伤	微裂缝产生	$\phi \leq \phi_1$
轻微损伤	外缘纵筋首次屈服	$\phi_1 \leq \phi \leq \phi_y$
中等损伤	控制截面塑性铰形成	$\phi_y \leq \phi \leq \phi_c$
严重损伤	墩柱强度开始退化	$\phi_c \leq \phi \leq \phi_u$
完全破坏	核心混凝土压碎	$\phi > \phi_u$

5 桥墩易损性分析

5.1 概率地震需求模型

利用 OpenSees 有限元软件进行非线性时程分析,采用选定的 100 条地震动逐一输入,得到各桥墩

的地震需求响应,提取桥墩控制截面的曲率峰值,并拟合出能力需求比(曲率延性比)与相应地震动峰值加速度(PGA)的直线。限于篇幅,图 8 列举了 Cholame Creek 桥中等损伤状态下 2 号、5 号排架墩

6 号墩墩底控制截面的概率地震需求模型,并通过回归分析得到曲率延性比平均值的表达式。

5.2 Cholame Creek 桥墩易损性

得到墩柱能力需求比的拟合直线后,根据易损

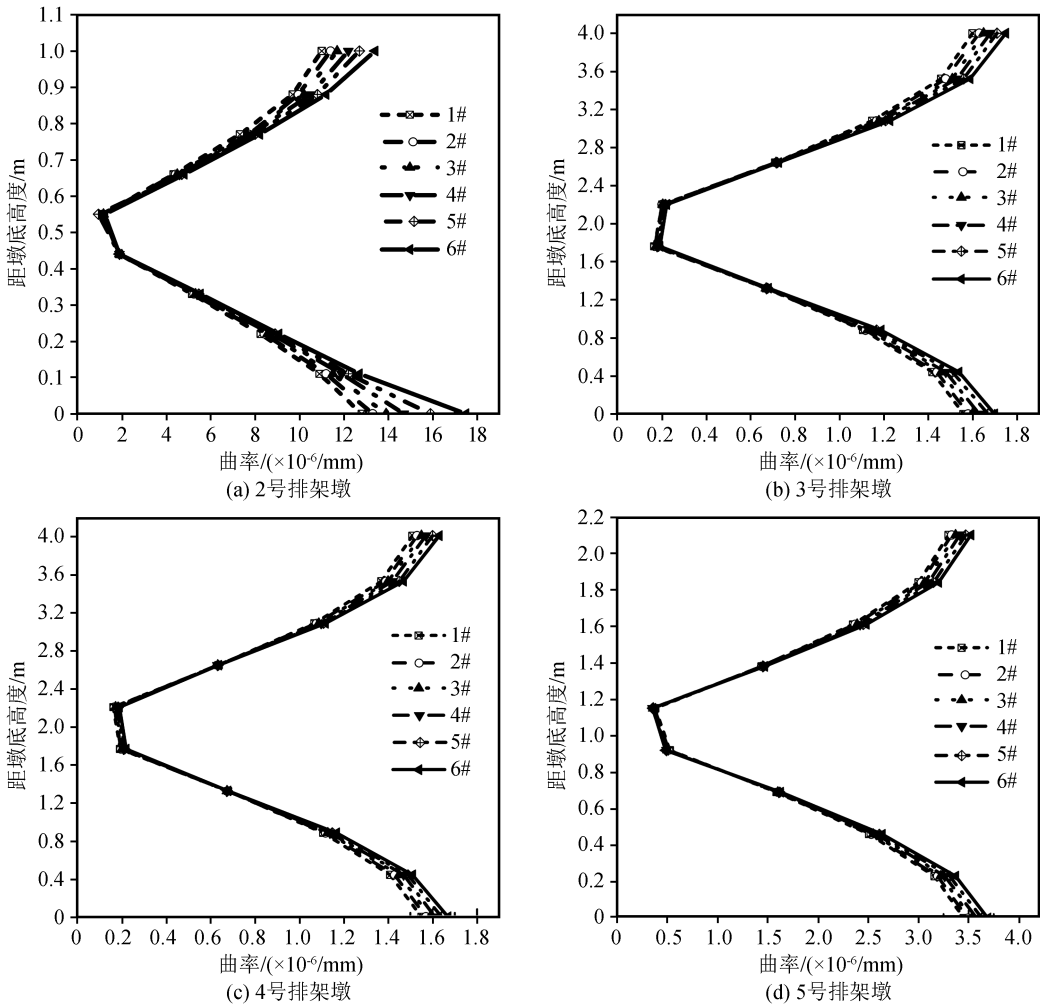


图 7 各桥墩最大曲率平均值分布

Fig.7 Average maximum curvature of bridge piers

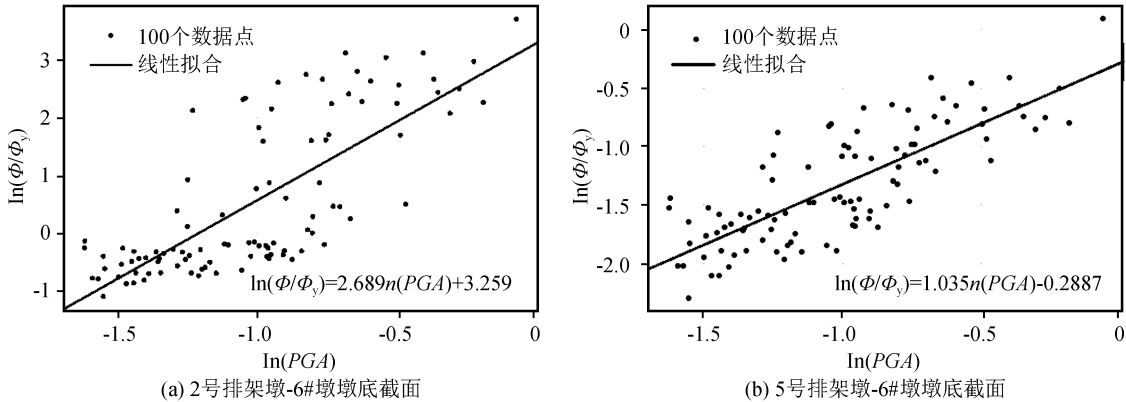


图 8 桥墩控制截面地震响应回归分析

Fig.8 Seismic response regression analysis of the control sections of piers

性曲线的定义计算桥墩控制截面在不同地震水平下的损伤概率,形成各自的易损性曲线。结合图 7,以

2 号、5 号排架墩 1#、6# 墩柱为例进行易损性分析。其易损性曲线如图 9 所示。

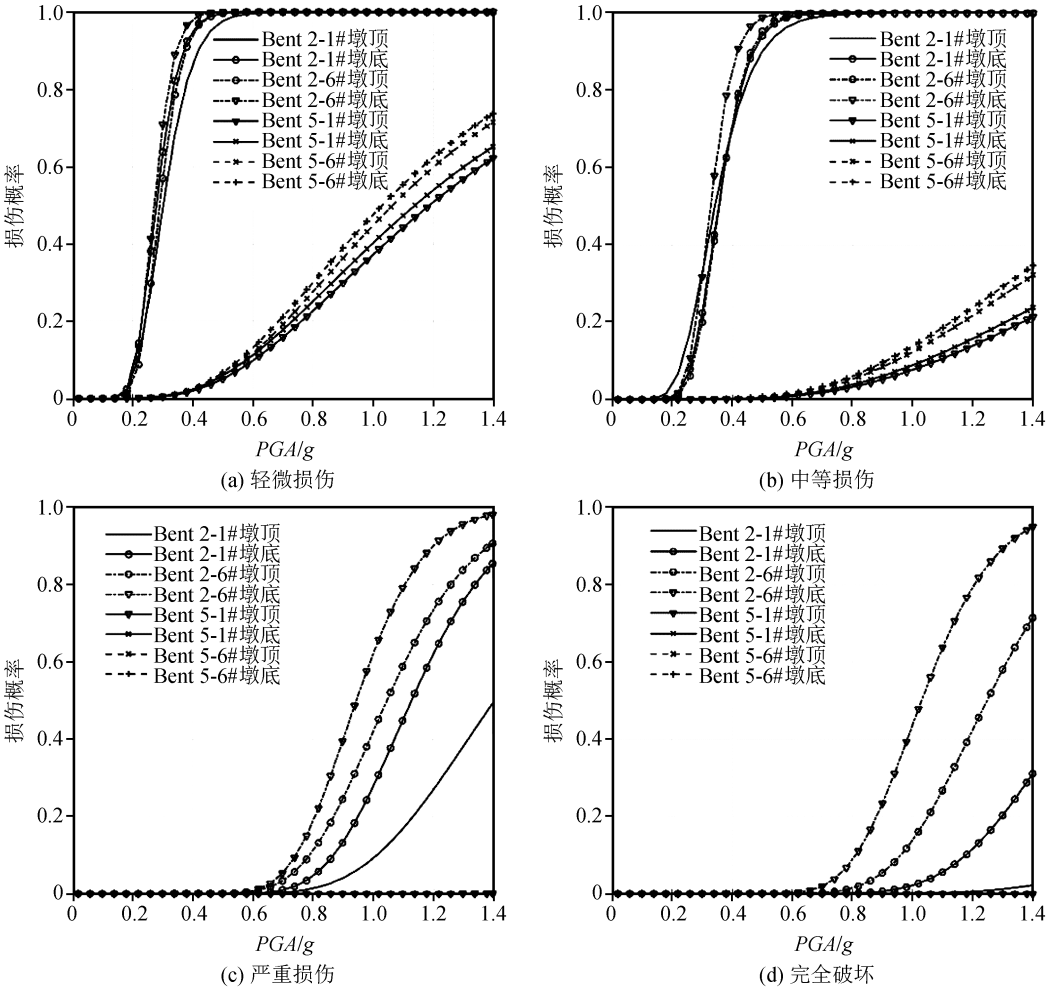


图 9 桥墩易损性曲线
Fig.9 Fragility curves for piers

由图 9 可见,不同控制截面易损性曲线的形状相似,各控制截面损伤概率都随地震动峰值加速度(PGA)的增加而增加,当地震动峰值加速度较大时($PGA>0.2g$),2 号排架墩与 5 号排架墩损伤概率差别显著,2 号排架墩更易损伤。对于轻微损伤状态,2 号排架墩控制截面损伤概率几近一致,5 号排架墩控制截面损伤概率虽相差不大,但可以看出轻微损伤概率按照 6#墩底>6#墩顶>1#墩底>1#墩顶排列;对于中等损伤状态,2 号排架墩中 6#墩底最易发生中等损伤,其他三个控制截面损伤概率接近,5 号排架墩控制截面易损性排序与轻微损伤相同;对于严重损伤和完全破坏状态,5 号排架墩控制截面发生损伤的概率较小,2 号排架墩各控制截面损伤概率差别显著,按照 6#墩底>6#墩顶>1#墩底>1#墩顶排列。

综上所述可以发现,对同一排架墩而言,轻微损伤和中等损伤时,不同墩柱不同位置损伤概率均很小,随着损伤等级的提高,不同墩柱不同位置损伤概率差别逐渐明显,差值逐渐增大;对于两组排架墩而言,墩高越小,越容易损伤;对于同一墩柱而言,墩底比墩顶更易损伤。

5.3 改变斜交角对桥墩易损性的影响

为了研究斜交角的改变对桥墩易损性的影响,在 5.2 小节基础上,改变斜交角为 24° 和 44° ,分别计算结构的动力响应。通过计算,各桥墩最大曲率平均值分布规律与斜交角为 4° 时相同,由于篇幅所限,以 2 号排架墩的 1# 和 6# 墩顶和墩底的控制截面为例,分析计算在轻微损伤和严重损伤状态下的桥墩易损性。其易损性曲线如图 10 所示。

由图10可见,斜交角的改变对桥墩截面的损伤

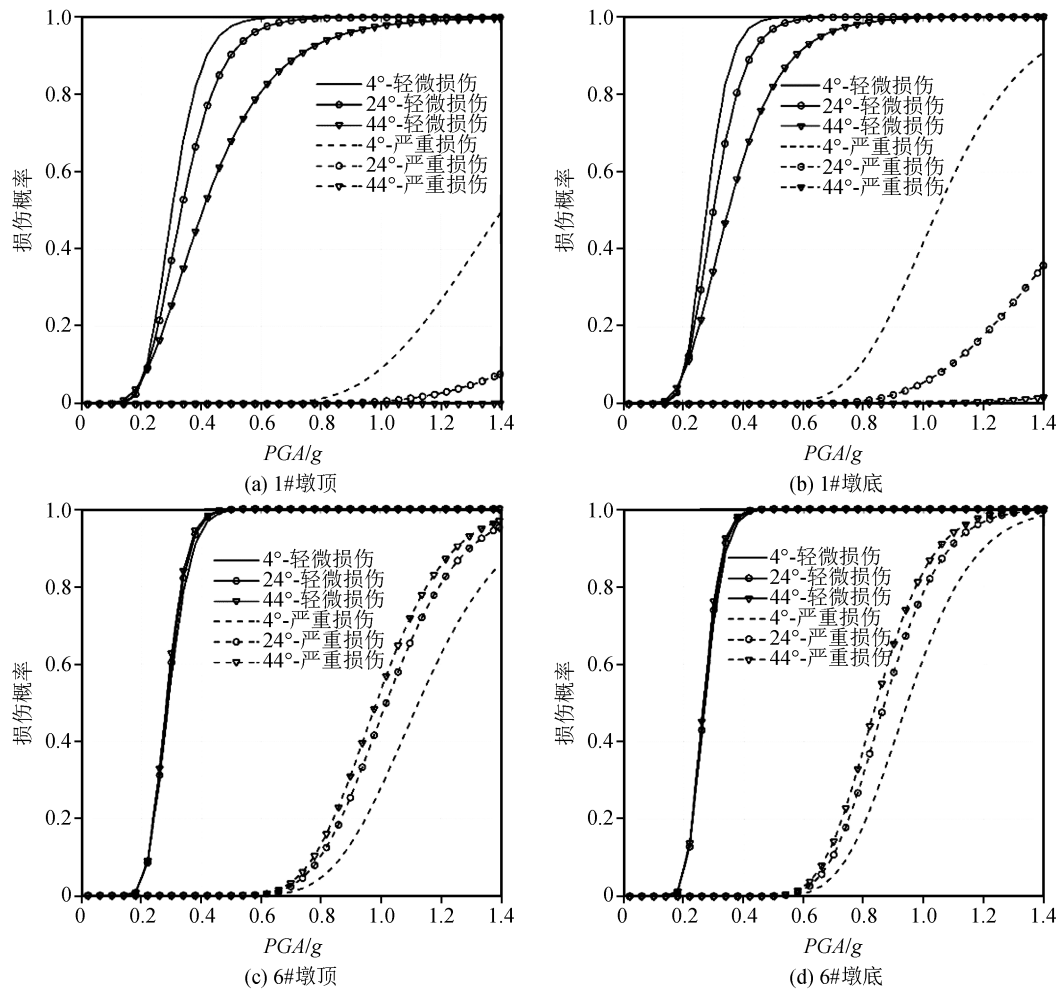


图 10 2 号排架墩控制截面易损性曲线

Fig.10 Fragility curves for the control sections of the piers at Bent.2

概率有显著的影响。1#墩控制截面,在轻微损伤和严重损伤状态下,斜交角的改变对易损性的影响相似,斜交角 4°最易损伤,24°次之,44°最不易损伤;6#墩控制截面,在轻微损伤状态下,易损性曲线几近一致,而在严重损伤状态下,斜交角的改变对易损性的影响与 1#墩相反,斜交角 44°最易损伤,4°最不易损伤,且损伤概率均大于 1#墩。这与斜交桥结构构造特点有关,斜交角越大,桥面纵轴线的垂线与支承边夹角越大,处在钝角处的 6#墩比处在锐角处的 1#墩距离桥面重心更近;且斜交角的存在使得桥梁主要振型不再是单纯的平动,而是平动和绕矮墩扭转的组合,随着斜交角的增大,地震动输入方向与桥梁纵轴线的夹角也随之增大,扭转现象更严重,这些因素使得各桥墩地震响应、易损性分布规律存在差异。

综上所述可以发现,6#墩比 1#墩更易损伤,且随着斜交角的增大,同一排架墩的两侧墩柱易损性呈

现与角度变化趋势相反的排列,损伤越严重,趋势越明显;斜交角 44°时 6#墩最易损伤,即对于此不等高的斜交刚构桥,最矮墩为其抗震薄弱环节,斜交角越大,越应该关注钝角处矮墩的损伤情况,加强并改进其设计标准。

6 结论

本文针对 Cholame Creek 桥进行了 OpenSees 有限元模拟,通过实际地震记录验证了数值模拟的准确性。纵桥向地震动作用下,考虑了桥梁结构参数和地震动的不确定性,以地震动峰值加速度(PGA)为强度指标(IM),研究了斜交刚构桥各桥墩易损性差异以及斜交角的改变对桥墩地震易损性的影响,分析了不等高排架墩的损伤规律,明确了该类桥梁的最易损伤部位和抗震薄弱环节,得到以下结论:

(1) 当地震动峰值加速度较大时(PGA >

0.2g),墩柱损伤概率差别显著;对同一排架墩而言,轻微损伤和中等损伤时,不同墩柱不同位置损伤概率均很小,随着损伤等级的提高,不同墩柱不同位置损伤概率差别逐渐明显、差值逐渐增大,墩底比墩顶更易损伤;对于不等高排架墩而言,墩高越小,越容易损伤。

(2) 不同斜交角对桥墩的地震响应有显著的影响,各墩易损性排序、大小与斜交桥结构构造特点有关,位于钝角处桥墩比锐角处桥墩更易损伤,且随着斜交角的增大,同一排架墩的两侧墩柱易损性呈现与角度变化趋势相反的排列,损伤越严重,趋势越明显。

(3) 对于不等高的斜交刚构桥来说,最矮墩为其抗震薄弱环节;斜交角越大,越应该关注钝角处矮墩的损伤情况,加强并改进其设计标准。

除采用峰值加速度(PGA)外,还可采用谱加速度(SA)作为地震动强度指标(IM),但该斜交桥随着斜交角的增大,桥梁的不规则现象更加明显,其高阶振型对结构反应的影响可能变得重要,要选择合适的自振周期用于确定 SA 会遇到困难。谱烈度(SI)、0.2 s 处谱加速度($S_{a0.2}$)、1.0 s 处谱加速度($S_{a1.0}$)均可以作为地震动强度指标(IM),找到合适的地震动参数来表达斜交桥结构反应和易损性曲线,需要开展进一步研究。此外,本文地震动沿桥梁纵向输入,为单向地震动作用,并没有考虑单向地震动输入方向或双向、三向地震动对斜交刚构桥的影响,后续研究中应针对改变地震动输入方向与斜交桥纵轴夹角,或同时考虑纵、横、竖向地震动作用进一步开展工作。

参考文献(References)

- [1] 邓振飞,吴庆雄.斜、弯桥跨分析的广义梁格法[M].北京:人民交通出版社,1998.
DENG Zhenfei, WU Qingxiong. Generalized Beam-Grid Method for Analysis of Skew and Curved Bridge Spans[M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [2] KAWASHIMA K, UNJOH S, HOSHIKUMA J, et al. Damage Characteristic of Bridges Due to 2010 Chile Earthquake[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE), 2010, 66(1): 386-396.
- [3] GOEL R K, CHOPRA A K. Evaluation of Bridge Abutment Capacity and Stiffness during Earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 1997, 13(1): 1-23.
- [4] MENG J Y, LUI E M. Seismic Analysis and Assessment of a Skew Highway Bridge[J]. Engineering Structures, 2000, 22

(11): 1433-1452.

- [5] KAVIANIJOPARI P. Performance-based Seismic Assessment of Skewed Bridges[D]. University of California, 2011.
- [6] YASHINSKY M, OVIEDO R, ASHFORD S A. Performance of Highway and Railway Structures during the February 27, 2010 Maule Chile Earthquake [R]. EERI/PEER/FHWA Bridge Team Report, 2010.
- [7] H. Hwang, 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.
H. HWANG, LIU Jingbo. Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 47-51.
- [8] NIELSON B G, DESROCHES R. Analytical Seismic Fragility Curves for Typical Bridges in the Central and Southeastern United States[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(3): 615-633.
- [9] 郭军军, 钟剑, 袁万城, 等. 考虑桥台性能影响的连续梁桥地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(4): 532-537.
GUO Junjun, ZHONG Jian, YUAN Wancheng, et al. Seismic Fragility Analysis of a Continuous Bridge Considering The performance of Abutments[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(4): 532-537.
- [10] 吴培涛. 曲线连续梁桥的地震易损性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
WU Peitao. Seismic Fragility Analysis of Curved Continuous Girder Bridge[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [11] 董俊, 单德山, 张二华, 等. 非规则连续刚构桥地震易损性分析[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 845-851, 878.
DONG Jun, SHAN Deshan, ZHANG Erhua, et al. Seismic Fragility of Irregular Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 845-851, 878.
- [12] SHAMSABADI A, ROLLINS K. Three-dimensional Nonlinear Continuum Seismic Soil-structure Interaction Analysis of Skewed Bridge Abutments [M]// Numerical Methods in Geotechnical Engineering. [S.l.]: CRC Press, 2014: 933-938.
- [13] APIRAKVORAPINIT P, MOHAMMADI J, SHEN J. Analytical Investigation of Potential Seismic Damage to a Skewed Bridge[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2012, 17(1): 5-12.
- [14] 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.
- [15] HAZUS99 User's Manual[S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 1999.
- [16] MCJUNKIN, R D, SHAKAL AF. Geologic Map of the Burnett Peak Quadrangle, Monterey and San Luis Obispo Counties, California[R]. US Geological Survey, 1989.
- [17] BOARDMAN B T, SANCHEZ A V, MARTIN G, et al. Seismic response of the Hwy 46/Cholame Creek Bridge during the 2004 Parkfield Earthquake[J]. National Seismic Confer-

ence on Bridges & Highways,2006.

[18] Inc 2003 International Building Code[S].International Code Council,2003.

[19] 湛敏,王军文,闫聚考.三跨斜交简支梁桥动力计算模型简化方法研究[J].振动与冲击,2017,36(17):231-237.

ZHAN Min,WANG Junwen,YAN Junkao.Simplified Method of Dynamic Calculation Model for a 3-span Simply Supported Skewed Girder Bridge[J].Journal of Vibration and Shock, 2017,36(17):231-237.

[20] KEOGH D L,OBRIEN E J.Recommendations on the Use of a 3-D Grillage Model for Bridge Deck Analysis[J].Structure Engineering Review,8(4):357-366

[21] 周长东,曾绪朗,潘庆龙.高耸混凝土烟囱土-结构相互作用地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(3):140-150.

ZHOU Changdong,ZENG Xulang,PAN Qinglong.Seismic Response Analysis of High-rise RC Chimney Including Soil-structure Interaction[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2016,36(3):140-150.

[22] Seismic Design Criteria Version 1.3[S].State of California Department of Transportation,2004.

[23] NEHRP Recommended Provisions (National Earthquake Hazards Reduction Program) for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures[S].Washington,D.C.: Building Seismic Safety Council,2001.

[24] 余湛,石树中,沈建文,等.从中国、美国、欧洲抗震设计规范谱的比较探讨我国的抗震设计反应谱[J].震灾防御技术,2008,3(2):136-144.

YU Zhan,SHI Shuzhong,SHEN Jianwen,et al.Discussing the Seismic Response Spectrum of China from the Comparison of Seismic Codes of China,American and Europe[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2008,3(2):136-144.

[25] 肖明洋.高墩混凝土连续刚构桥地震易损性分析[D].成都:西南交通大学,2013.

XIAO Mingyang.Seismic Vulnerability Analysis for Concrete Continuous Rigid Bridge with High Piers [D].Chengdu: Southwest Jiaotong University,2013.

[26] 李吉涛,杨庆山,刘阳冰.多点地震激励下大跨连续钢构桥易损性分析[J].振动与冲击,2013,32(5):75-80.

LI Jitao,YANG Qingshan,LIU Yangbing.Fragility Analysis of Long Span Continuous Rigid Frame Bridge under Multi-support Excitations[J].Journal of Vibration and Shock,2013,32(5):75-80.

[27] 张菊辉.基于数值模拟的规则梁桥墩柱的地震易损性分析[D].上海:同济大学,2006.

ZHANG Juhui.Study on Seismic Vulnerability Analysis of Normal Beam Bridge Piers Based on Numerical Simulation [D].Shanghai:Tongji University,2006.

[28] HWANG H,LIU J B,CHIU Y H.Seismic Fragility Analysis of Highway Bridge[R].Champaign:The University of Center for Earthquake Research and Information,2001:1-117.