

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.007

近场地震作用下库区深水钢筋混凝土高墩地震易损性分析*

赵金钢¹, 杜斌¹, 孔德文¹, 贾宏宇², 谢明志²

(1. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 西南交通大学土木学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为研究近场地震作用下库区深水钢筋混凝土高墩的概率损伤特性, 以90 m高的矩形空心薄壁钢筋混凝土深水高墩为研究对象, 综合考虑桥墩设计参数和近场地震动的随机性, 基于OpenSees软件建立深水高墩有限元模型, 开展不同水深的7种工况(水深:0、15、30、45、60、75、90 m)下, 顺桥向和横桥向近场地震激励的增量动力非线性分析。以截面临界曲率值为损伤指标, 研究深水高墩的易损性。结果表明: 各工况下, 轻微损伤、中等损伤和严重损伤阶段的损伤概率均随地震波峰值加速度的增加而增大, 并且当峰值加速度达到1.0g时损伤概率达到最大, 而完全损伤阶段的损伤概率则在峰值加速度为0.5g时出现峰值点; 近场地震顺桥向激励时, 墩身中上部和墩底区域均较容易损伤, 而横桥向激励时仅墩底区域较容易损伤; 当水深超过45 m后, 高墩最大损伤概率变化不大且截面曲率概率需求基本一致, 45 m水深为深水高墩显著水深。因此, 应重点分析水深达到高墩高度一半时深水高墩的损伤情况。

关键词: 钢筋混凝土深水高墩; 近场地震动; 地震易损性; 动水压力; 附加质量

中图分类号: U442.5⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0055-12

Seismic Fragility Analysis of Deep-water Reinforced Concrete High-pier in Reservoir Area under Near-fault Earthquakes

ZHAO Jingang¹, DU Bin¹, KONG Dewen¹, JIA Hongyu², XIE Mingzhi²

(1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the damage probability characteristics of deep-water reinforced concrete high-pier in reservoir areas under near-fault earthquakes, a rectangular hollow thin-wall reinforced concrete deep-water high-pier with the height of 90 m is taken as the research object. Considering the randomness of design parameters of the bridge pier and the randomness of near-fault earthquakes, the deep-water high-pier finite element model is built based on the software OpenSees, and the incremental dynamic nonlinear analyses in the longitudinal and transverse directions are carried out on near-fault seismic excitation considering seven different water depths (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 m). The vulnerability of the deep-water high-pier is studied by using the critical curvature values of the cross sec-

* 收稿日期:2019-01-07;修回日期:2019-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(11602061)、贵州省土木工程一流学科建设项目(QYNYL[2017]0013)、四川省科技计划项目(2017JY0514)资助

作者简介: 赵金钢(1984—),男,副教授,博士。主要从事钢筋混凝土高墩地震易损性分析相关研究。E-mail:jgzhaog@gzu.edu.cn

通讯作者: 杜斌(1982—),男,副教授,博士。主要从事钢筋混凝土桥梁结构耐久性分析相关研究。E-mail:419901302@qq.com

tions as the damage parameters. The results show that the damage probability of slightly damaged, moderately damaged, seriously damaged stages increases with the increase of peak ground acceleration (PGA), and the damage probability reaches a maximum when the PGA reaches 1.0 g. While the peak value of the damage probability of the completely damage stage occurs when the PGA is 0.5 g. When the near-fault earthquake excitation is along the longitudinal direction, both middle-upper and bottom areas of the high-pier are easier to damage. The bottom area of the high-pier is easier to damage when the near-fault earthquake excitation is along the transverse direction. When the water depth exceeds 45 m, the maximum damage probability of the high-pier changes slightly and the probability demand value of cross section is basically identical. The water depth of 45 m is the significant water depth of the deep-water high-pier. Therefore, it is recommended to analyze the damage situation of deep-water high-piers when the water depth reaches half of the high-pier height.

Keywords: deep-water reinforced concrete high-pier; near-field ground motion; seismic vulnerability; hydrodynamic pressure; added-mass

引 言

为了满足经济发展的需要,西南地区修建了大量跨越深沟峡谷和水电站库区的深水高墩桥梁,最著名的是云南小湾水电站库区的滂街渡大桥,该桥主墩入水深度 166 m,是世界上水深最深的桥梁。此外,西南地区处于喜马拉雅地震带上,属高烈度地震频发区域,该区域的桥梁抗震防灾性能要求更高。特别是深水高墩桥梁,地震荷载使水体与桥墩相互作用,提高了深水高墩桥梁的地震响应,增大了深水高墩桥梁发生损伤破坏的概率。例如,2008年汶川大地震中,四川紫坪铺水电站库区的庙子坪大桥,强震作用使该桥部分水下墩发生开裂破坏,严重影响了桥梁结构的安全性。因此,研究地震荷载作用下深水桥梁的水-桥墩之间的相互作用并确定深水高墩的易损位置是非常必要的。

关于地震动作用下水体与工程结构相互作用问题,H. M. Westergaard^[1]提出地震荷载作用下拱坝结构的动水压力分布计算公式,将动水压力等效为坝体的附加质量,从而分析水-结构的流固耦合效应。该方法的提出极大地简化了结构流固耦合问题,但是该方法仅适用于大体积结构的动水压力分析。因此,J. R. Morison等^[2]提出了Morison公式计算分析光滑圆柱体所受的波浪力,并经过学者的反复修正,最终应用于桥梁墩柱等尺寸与波长比小于0.15的水下结构动水压力作用分析中,并被各国抗震规范广泛采用。其中:黄信等^[3]应用Morison公式计算动水压力,对30 m高墩的深水桥墩进

行了地震响应分析,研究表明动水压力增大了桥墩的地震响应,其影响随相对水深的增大而增强;李悦等^[4]以最大墩高为117 m的多跨连续刚构桥为研究对象,采用Morison公式分析了动水与桥墩的相互作用,结果表明动水对深水大跨刚构桥自振特性的影响不容忽视,并有必要考虑不同类型地震动作用下动水对结构内力的影响;江辉等^[5]以某典型深水桥梁为研究对象分析了不同水深下桥墩自振特性及脉冲型近场地震下的响应特征,并对比研究了Morison公式、日本规范和辐射波浪理论等5种代表性的解析-数值方法用于深水桥梁抗震分析的准确性。由于地震动荷载、墩柱材料特性和截面尺寸等均存在随机性,使得深水桥梁的地震响应不可避免地具有随机性。因此,江辉等^[6]以主墩墩高为30 m的连续刚构桥为研究对象,研究了深水环境下连续刚构桥的概率性地震损伤特性,结果表明深水环境显著增大连续刚构桥在不同地震动水平下的破坏超越概率;陈宇等^[7]采用Morison公式考虑桥墩动水压力效应,对主墩高度为46 m的近海连续刚构桥进行地震损伤分析,研究表明水-结构相互作用增大了桥梁的损伤指数;洗巧玲等^[8]以墩高为22 m的多跨深水隔震桥梁为研究对象,分别采用PSDM法和IDA法对桥梁系统和墩柱等关键构件进行地震易损性分析,并对比了两种方法分析结果的准确性。综上,现有研究表明动水压力对深水桥梁的自振特性和地震响应的影响不容忽视,但是由于地震作用下,深水桥墩与周围水体耦合振动的复杂性,使得对深水桥梁地震易损性分析的相关研究开展尚少,并且现有深水桥梁易损性分析多集中

于中低墩桥梁。

因此,本文以我国西南地区一座高度为90 m的库区深水高墩桥梁为研究对象,采用Morison公式计算地震动作用下不同水深时高墩所受的动水压力,并采用易损性分析方法分别对顺桥向和横桥向近场地震动作用下深水高墩的损伤概率进行分析,研究不同水深下库区深水高墩的易损性,所得结论可为库区深水高墩在近场地震动作用下的抗震设计和加固维修提供依据,对深水高墩桥梁抗震设计理论的发展具有重要的实际意义。

1 动水压力模拟

1.1 Morison公式

1950年,J. R. Morison等^[2]提出小尺寸圆形截面海工结构柱关于动水压力的半经验半解析的计算模型,因其简单易行,故被国内外学者广泛应用于计算地震荷载作用下深水墩柱受到的地震动水压力作用。

根据Morison公式,单位高度的小尺寸圆截面柱体受到的动水压力为:

$$F_w = \rho V \ddot{u} + (C_M - 1) \rho V (\ddot{u} - \ddot{x} - \ddot{x}_g) + \frac{1}{2} C_D \rho A_\rho [(\dot{u} - \dot{x} - \dot{x}_g)|(\dot{u} - \dot{x} - \dot{x}_g)] \quad (1)$$

式中, ρ 为水体密度; V 为墩柱排开水的体积; \ddot{u} 、 \dot{u} 分别为运动水体的绝对加速度和绝对速度; \ddot{x} 、 \dot{x} 分别为结构振动的相对加速度值和相对速度值; \ddot{x}_g 、 \dot{x}_g 分别为地震动实际加速度和速度; C_M 为动水惯性力系数; C_D 为动水黏滞阻尼系数; A_ρ 为单位长度柱体垂直于水体流动方向的投影面积。

由于地震荷载为持时较短的强烈作用,水体相对结构运动的速度可以忽略,因此,可认为 $\ddot{u} = \dot{u} = 0$,则式(1)可写为:

$$F_w = -(C_M - 1) \rho V (\ddot{x} + \ddot{x}_g) - \frac{1}{2} C_D \rho A_\rho [(\dot{x} + \dot{x}_g)|(\dot{x} + \dot{x}_g)] \quad (2)$$

又因为地震动作用下,结构的动水阻尼力相对于动水惯性力的影响可以忽略不计,那么就可以忽略动水阻尼力的影响,则式(2)可进一步写为:

$$F_w = -(C_M - 1) \rho V (\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (3)$$

根据式(3)便可计算墩柱外域水对墩柱的动水压力,但是实际深水高墩多采用空心截面,为克服空心墩柱受到的巨大静水压力及内部空腔所产生

的浮力影响,通常会在空心墩柱侧壁开孔让墩柱内部充满水,因此对于空心截面墩柱还应考虑墩柱内域水的动水压力作用,则式(3)可写为:

$$F_w = -(M_1 + M_2)(\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (4)$$

式中, M_1 为空心墩柱外域动水附加质量, $M_1 = (C_M - 1) \rho V$,根据文献[9]取 $C_M = 2$; M_2 为空心墩柱内域动水附加质量,可取为柱体内部空心部分充满的水的质量。

1.2 矩形空心截面墩柱附加动水质量计算

Morison公式是基于圆形截面墩柱推导得到,而公路高墩桥梁中广泛应用的是矩形截面墩柱,那么可以将其等效为圆形截面墩柱后,再计算单位高度上的外域附加动水质量。等效圆形截面直径可取与水体运动方向垂直的矩形截面边长 D ,根据文献[10],矩形截面单位高度的外域附加动水质量计算公式为:

$$M'_1 = K_c (D/B) M_1 \quad (5)$$

$$K_c = 0.94732 + \frac{2.59648}{1 + \left(\frac{D/B}{0.09516}\right)^{0.54638}} \quad (6)$$

式中, M'_1 、 M_1 分别为矩形截面、等效圆形截面墩柱迎水面单位高度所受的外域附加动水质量; D 为与水体运动方向垂直的矩形截面边长; B 为与水体运动方向一致的矩形截面边长; K_c 为修正系数,适用范围为 $0.1 \leq D/B \leq 10$ 。

地震作用下,深水墩柱的动力平衡方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g + F_w \quad (7)$$

式中, M 为桥墩结构的质量矩阵; C 为桥墩结构的阻尼矩阵; K 为桥墩结构的刚度矩阵。

将公式(4)代入式(7)中可得:

$$(M + M_1 + M_2)\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -(M + M_1 + M_2)\ddot{x}_g \quad (8)$$

由式(8)可见,采用附加质量的概念对深水空心桥墩进行抗震分析,即:将外域和内域动水压力转化为随桥墩一起运动的附加质量。

可通过在矩形空心截面墩柱有限元模型的节点上施加附加动水质量模拟墩柱受到的地震动水压力。因此,有限元模型的 i 节点上施加的附加动水质量为 i 节点上下相邻单元的附加动水质量和的一半,即:

$$M_i = \frac{1}{2} \rho [K_c (D/B) V_j + V_j] \quad (9)$$

式中, i 为施加附加动水质量的节点号; V_j 为第 j 个

空心矩形墩柱单元的等效圆形截面外轮廓排开水的体积; V_j 为第 j 个空心墩柱单元的空心部分体积。

2 钢筋混凝土深水高墩有限元模型

2.1 工程背景

本文依托工程实例为我国西南地区某跨越水电站库区的公路桥梁,受水电站蓄水水位控制,该桥最大墩高为 90 m,桥梁上部结构采用 6×40 m 的预应力混凝土简支 T 梁,下部结构中 1#、2#、5#墩为实体墩,3#、4#墩为空心薄壁墩,两岸桥台均采用 U 型桥台,全桥布置如图 1 所示。本文以高 90 m 的 3#墩为研究对象,研究近场地震作用下,考虑不同水深对钢筋混凝土深水高墩地震易损性的影响,3#墩的立面布置如图 2 所示。由图 2 可见,3#墩为空心变截面墩,壁厚为 60 cm,横桥向宽度由墩底到墩顶按 1:50 的比例从 6.4 m 渐变为 2.8 m,顺桥向宽度采用 5 m 的固定尺寸;墩底和墩顶 1.5 m 范围内为实心段,并在墩身中部设置两道间隔 29 m 的横隔板,钢筋混凝土高墩采用 C40 混凝土和 HRB400 钢筋建造。

2.2 有限元模型

基于有限元软件 OpenSees,建立 3#墩的三维

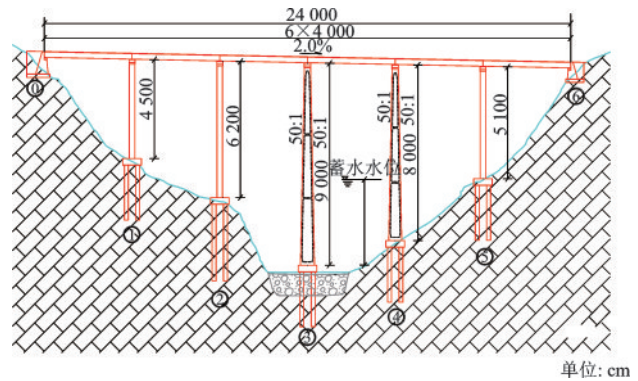


图 1 全桥布置

Fig.1 Layout of the bridge

空间有限元模型。地震动荷载作用下,桥梁上部结构产生的惯性力主要由桥墩承受,导致桥墩产生较大弯矩并进入弹塑性状态。为了较为准确地模拟桥墩的弹塑性力学行为,本文采用基于柔度法弹塑性梁柱单元(NonlinearBeamColumn)结合纤维截面(Fiber Section)建立深水高墩有限元模型,每个单元取 4 个高斯积分点,单元长度取 0.4~0.6 m,将深水高墩模型离散为 179 个单元,并取各单元中点处的截面尺寸作为单元尺寸,其中横隔板、墩顶和墩底实心段采用实心截面模拟,墩身空心段采用空心截面模拟;由于箍筋的约束作用,将墩柱混凝土分为无约束混凝土、约束混凝土和钢筋纤维三部分,本文采用 Concrete02 模型来模拟无约束混凝土和约

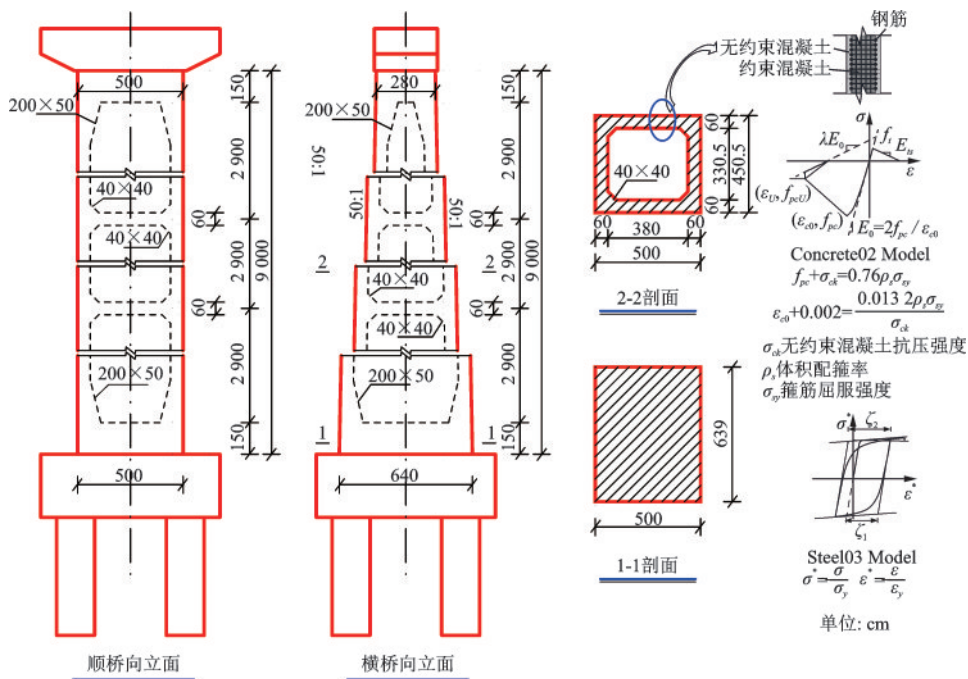


图 2 3#墩立面

Fig.2 Elevation of the 3# pier

束混凝土特性、Steel02 模型模拟纵向钢筋, Concrete02 模型和 Steel02 模型的本构关系, 如图 2 所示。由于当前国内外桥梁抗震设计规范中, 仅《日本公路桥梁抗震规范》^[11] 给出了空心矩形截面的箍筋约束混凝土本构关系, 因此, 本文采用《日本公路桥梁抗震规范》^[11] 计算实心 and 空心矩形截面箍筋约束混凝土强度 f_{pc} 和约束混凝土达到最大压缩应力时的应变 ϵ_{c0} (图 2), 并代入 Concrete02 模型中来模拟约束混凝土特性。

为了考虑桥梁上部结构的影响, 本文将一跨简支梁的自重和铺装荷载等效为集中质量施加在墩顶节点, 并将墩身节点上下相邻单元质量和的一半作为质量点施加在相应节点上模拟墩身分布质量; 由于在地震荷载作用下, 桥墩和水体之间将会产生动力相互作用, 导致桥墩的动力特性发生改变, 并且 1.2 节研究表明可以采用附加质量法模拟深水高墩所受动水压力, 因此本文分别采用式(9)计算了 7 种水深工况对应的附加动水质量(水深 $h=0, 15, 30, 45, 60, 75$ 和 90 m , 0 m 表示无水状态), 并将附加动水质量施加在深水高墩有限元模型对应节点上模拟不同水深工况下深水高墩所受到的地震动水压力; 高阶振型对深水高墩桥梁地震需求的贡献显著增大^[12], 因此采用 $0.9T_1$ 和 $0.25T_1$ (T_1 为高墩基本周期) 对应的结构振型圆频率计算 Rayleigh 阻尼^[13];

此外, 高墩结构的几何非线性不容忽视, 通过 P-Delta 效应的坐标转化方法考虑几何非线性; 由于该桥桥位处地质条件良好, 因此墩底边界条件采用固结约束模拟。

3 高墩设计参数随机变量与近场地震波的选取

钢筋混凝土高墩施工过程和材料配制等因素的不确定性, 使得钢筋混凝土深水高墩设计参数具有随机性, 而且地震也具有随机性。结构设计参数和地震的双重不确定性使得深水高墩地震响应具有不确定性。因此, 本文考虑了高墩设计参数的随机性和近场地震动不确定性对深水高墩近场地震动易损性的影响。

3.1 高墩设计参数随机变量的选取

桥墩本身的材料特性、截面尺寸、结构质量和阻尼比等设计参数的随机性会导致钢筋混凝土深水高墩动力响应的随机性。设计参数众多, 本文化繁为简, 从对地震响应随机性影响的重要性出发, 基于现有研究成果, 选取了混凝土容重、抗压强度、截面尺寸等 11 个随机变量, 并确定了其概率分布类型和分布特征, 见表 1。

表 1 随机变量参数
Table 1 Random variable parameters

序号	随机变量	均值	标准差	变异系数	分布类型
1	混凝土容重 ^[14] /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	26.25	2.625	0.1	正态分布
2	混凝土抗压强度 ^[15] /MPa	33.33	3.999 6	0.12	对数正态分布
3	无约束混凝土峰值压应变 ^[16]	0.002	0.000 4	0.2	对数正态分布
4	截面长度 ^[17] /m	5	0.1	0.02	正态分布
5	截面宽度 ^[17] /m	2.8~6.4	0.056~0.128	0.02	正态分布
6	保护层厚度 ^[17] /m	0.043 35	0.015 3	0.3	正态分布
7	纵筋截面面积 ^[17] / m^2	6.15e-4	1.85e-5	0.03	正态分布
8	纵向钢筋屈服强度 ^[18] /MPa	452	31.64	0.07	对数正态分布
9	箍筋间距 ^[17] /m	0.099(0.198)	0.007(0.014)	0.07	正态分布
10	钢筋弹性模量 ^[15] /MPa	2.0e5	6.0e3	0.03	对数正态分布
11	阻尼比 ^[19]	0.045	0.012 5	0.25	正态分布

3.2 近场地震波的选取

地震的发生具有时间和空间的随机性, 使得桥位处地震波的频谱特性、持时和振幅等地震波特性和随机性, 从而引起钢筋混凝土深水高墩动力响

应的不确定性。因此, 选取能够反映地震波频谱特性不确定性的近场地震波, 对钢筋混凝土深水高墩进行增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA), 是当前进行地震易损性分析时常用的方法。速度脉冲是近场地震波区别于远场地震波的典型

特性,本文采用MATLAB的统计工具箱对S. Shahi等^[20]确定的243条近场地震波的速度脉冲幅值和周期进行统计分析,确定速度脉冲幅值和周期均服从广义极值分布,概率拟合曲线如图3所示。综合考虑计算成本和反映近场地震动随机性的需要,本文选取了50条近场地震波,其脉冲幅值和周期分布如图3所示,阻尼比为5%、峰值加速度为1.0g时近场地震波的加速度反应谱如图4所示。由图3和图4可见,选取的近场地震波的速度脉冲幅值和周期包

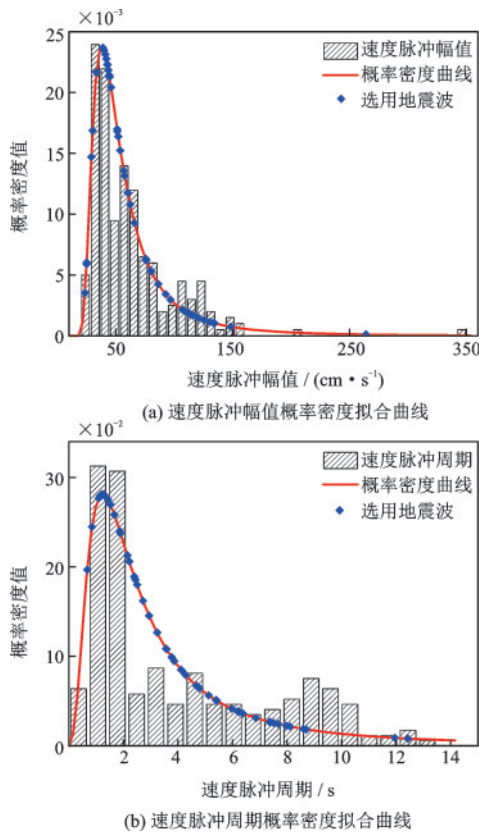


图3 速度脉冲幅值和周期概率密度拟合曲线

Fig.3 Probability density fitting curves of the velocity pulse amplitude and period

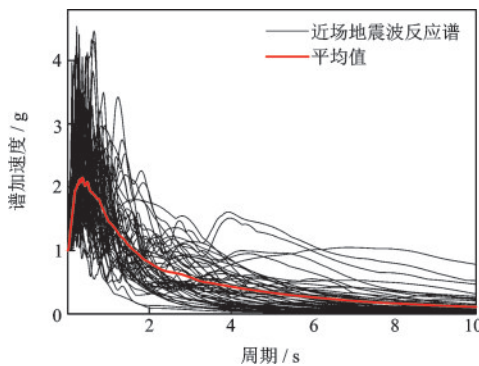


图4 近场地震波反应谱曲线

Fig.4 Response spectra of the near-field seismic waves

含范围较广,能反映近场地震波的特性,表征其不确定性。

4 损伤指标

地震动荷载作用下,钢筋混凝土高墩的破坏一般属于弯曲破坏,并且在破坏过程中会产生较大的塑性变形使得高墩保护层混凝土剥落、混凝土压碎、纵向钢筋屈服。文献[21]中研究表明,高墩桥梁的墩底曲率与墩顶位移之间不存在同步变化关系,墩顶位移不能表征结构的损伤,应以截面曲率作为高墩损伤指标。因此,本文以截面曲率作为钢筋混凝土深水高墩的损伤指标,并根据将深水高墩损伤阶段划分为:无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏五个损伤阶段,各损伤阶段之间的临界曲率见表2。采用Xtract软件对钢筋混凝土深水高墩各截面进行轴压荷载作用下的非线性分析,得到截面顺桥向和横桥向的弯矩—曲率曲线,确定横桥向和顺桥向的截面临界曲率取值,弯矩—曲率曲线和临界曲率如图5所示。

表2 桥墩损伤阶段划分及损伤准则

Table 2 Damage stage classification and damage criteria of piers

破坏阶段	损伤准则
无损伤	$\varphi < \varphi'_y$
轻微损伤	$\varphi'_y \leq \varphi < \varphi_y$
中等损伤	$\varphi_y \leq \varphi < \varphi_d$
严重损伤	$\varphi_d \leq \varphi < \varphi_u$
完全破坏	$\varphi \geq \varphi_u$

注: φ'_y 为钢筋首次屈服时对应的截面曲率; φ_y 为截面等效屈服曲率; φ_d 为混凝土压应变达到0.004时对应的截面曲率; φ_u 为截面极限曲率

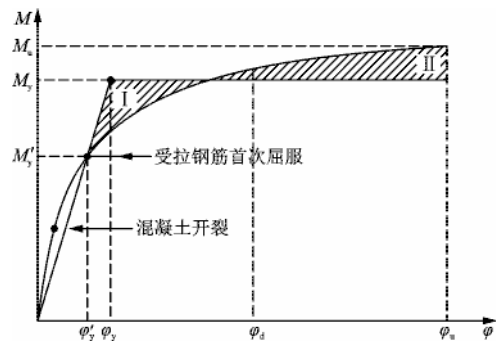


图5 截面弯矩—曲率关系

Fig.5 Moment-curvature relationship of cross section

5 钢筋混凝土深水高墩地震易损性分析流程

考虑高墩设计参数和近场地震动的随机性,建立不同水深工况的钢筋混凝土深水高墩有限元模型,并对顺桥向和横桥向近场地震动作用下的深水高墩模型进行IDA分析,获得深水高墩各截面的曲率响应最大值,按下述流程进行钢筋混凝土深水高墩地震易损性分析:

(1)假定3.1节中确定的各随机变量之间不具有相关性,采用拉丁超立方抽样方法对随机变量进行抽样,并随机组合后得到50组随机变量数据,采用OpenSees软件按照第2节方法建立钢筋混凝土高墩有限元模型,同时按式(9)计算水深 h 分别为0、15、30、45、60、75、90 m时的附加动水质量,并将附加动水质量施加在深水高墩模型对应节点上模拟不同水深工况下深水高墩的地震动水压力。

(2)对3.2节中选取的50条近场地震波进行调幅处理,使之加速度峰值分别达到0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g、0.6g、0.7g、0.8g、0.9g和1.0g,由此可得到50组近场地震波样本(共500条)。

(3)将不同水深工况下的深水高墩有限元模型分别与调整后的50组近场地震波随机组合,按照顺桥向和横桥向地震动输入方向采用OpenSees软件进行IDA分析,并记录墩身各截面的最大曲率响应值。

(4)采用Xtract计算高墩各截面轴压荷载作用下顺桥向和横桥向的弯矩—曲率曲线,并确定截面各损伤阶段的临界曲率值。

(5)以地震波峰值加速度为自变量,分别计算顺桥向和横桥向近场地震动输入时各水深工况下钢筋混凝土深水高墩各截面超过(4)中确定的临界曲率值的条件概率。

(6)绘制易损性云图,并分析顺桥向和横桥向近场地震动输入时,水深对钢筋混凝土深水高墩地震易损性的影响。

6 深水高墩地震易损性分析

结构地震易损性表示在给定强度水平的地震

激励荷载作用下,结构的地震需求超过损伤阶段量化指标界限值的条件概率。现有研究表明,可假定相同峰值加速度地震动作用下结构动力需求 D 服从对数正态分布^[22],即 $\ln D$ 服从正态分布,则条件概率 $P(D \geq d | IM)$ 为:

$$P(D \geq d | IM) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln d - \ln \bar{D}}{\beta_{D|IM}}\right) \quad (10)$$

式中, \bar{D} 为结构地震需求中位值; d 为结构损伤阶段量化指标界限值; $\beta_{D|IM}$ 为地震动强度水平为 IM 时,结构需求的条件标准差; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

易损性云图采用不同颜色表征深水高墩各个截面在各损伤阶段的损伤概率随地震强度和截面距离墩底高度(简称截面高度)的变化情况,具有简单、直观、易理解的优点。因此,本文取地震动强度水平 IM 为近场地震动加速度峰值 PGA ,根据第5节中钢筋混凝土深水高墩地震易损性分析流程和式(10)计算分析顺桥向和横桥向近场地震动作用下,深水高墩各截面在不同水深时的损伤概率,并绘制易损性云图,如图6和图7所示。同时,本文绘制了3#墩的1-1截面和2-2截面(图2)在不同水深工况下的易损性曲线,以对比分析深水高墩墩底和墩身中部截面损伤概率随水深的变化规律,如图8中所示。

由图6可见,近场地震动顺桥向输入时,轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤四个损伤阶段的最大损伤概率均随水深的增加而增大,当水深达到45 m时损伤概率达到最大值,分别为57%、54%、50%和13%;水深超过45 m后,各损伤阶段的最大损伤概率虽略有减小但变化不大,并且由图8也可看出,当水深超过45 m时,1-1截面和2-2截面的各损伤阶段的损伤概率相差较小。不同水深工况的对比表明,钢筋混凝土深水高墩墩底和墩身中上部区域均容易损伤,并且随着水深的增加,各损伤阶段损伤概率较大(相对于各损伤阶段的最大损伤概率)的区域自墩身中上部和墩底区域逐渐向墩身中下部区域扩展,损伤概率较大区域的长度逐渐增大,如当水深达到90 m时,轻微损伤、中等损伤和严重损伤三个损伤阶段的损伤概率超过40%的区域长度在峰值加速度达到1.0g时达到最大,分别为77.3、48.8和28.9 m,而发生完全损伤的概率超过8%的区域长度在峰值加速度为0.5g时最大,为

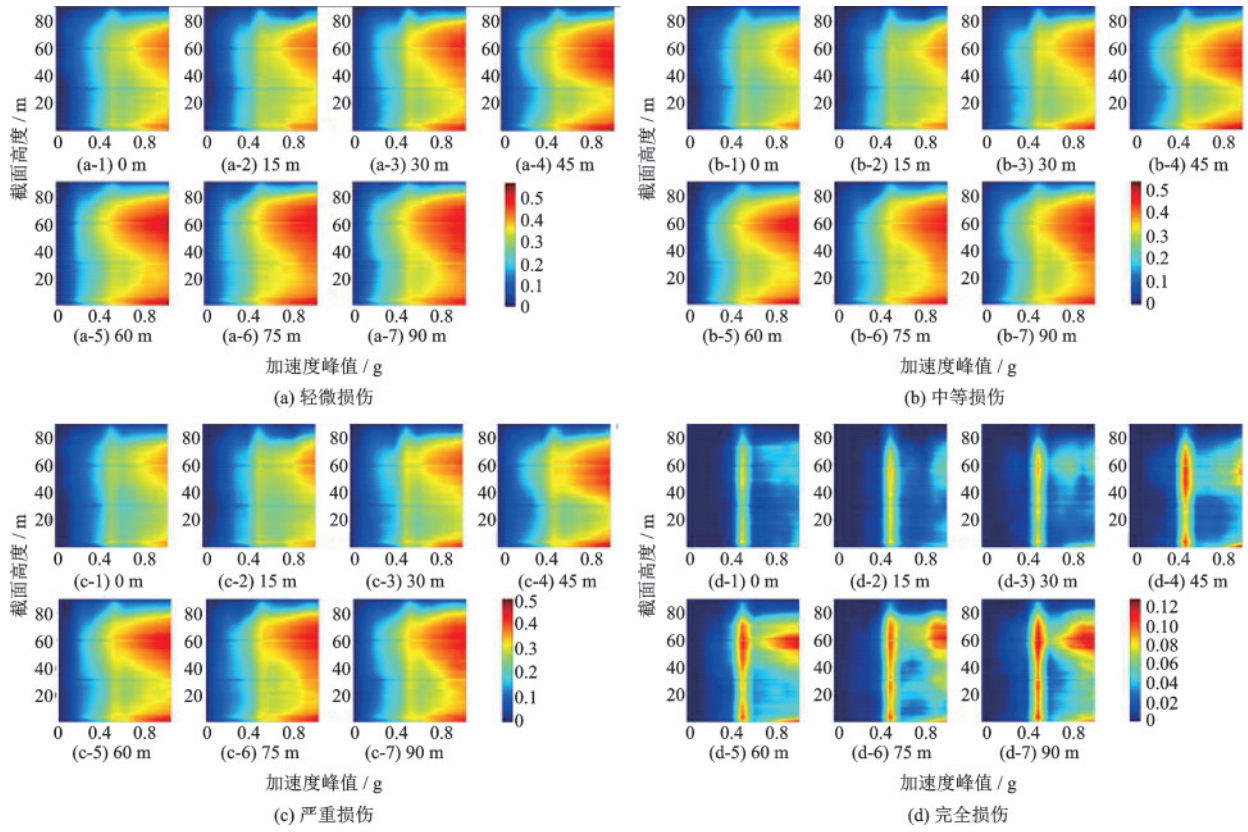


图6 顺桥向地震易损性云图

Fig.6 Contour of seismic vulnerability in the longitudinal direction

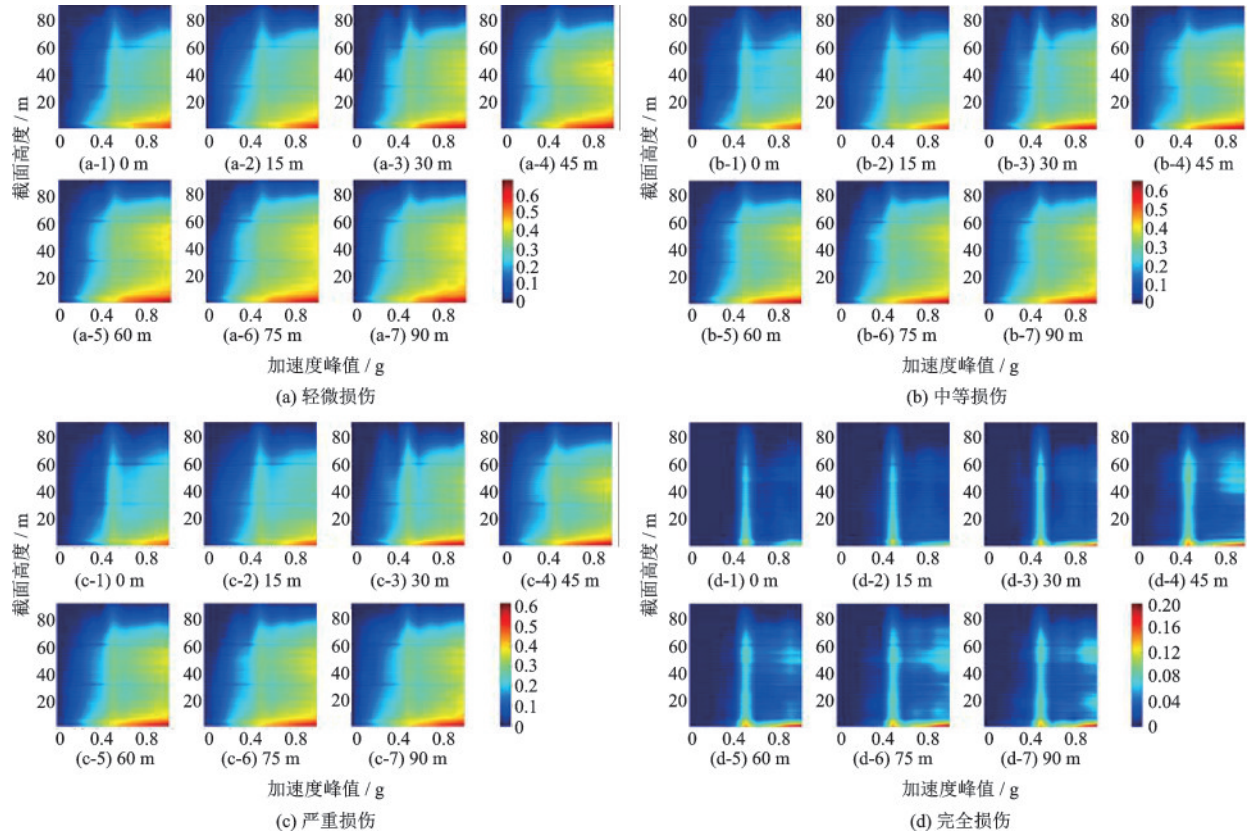


图7 横桥向地震易损性云图

Fig.7 Contour of seismic vulnerability in the transvers direction

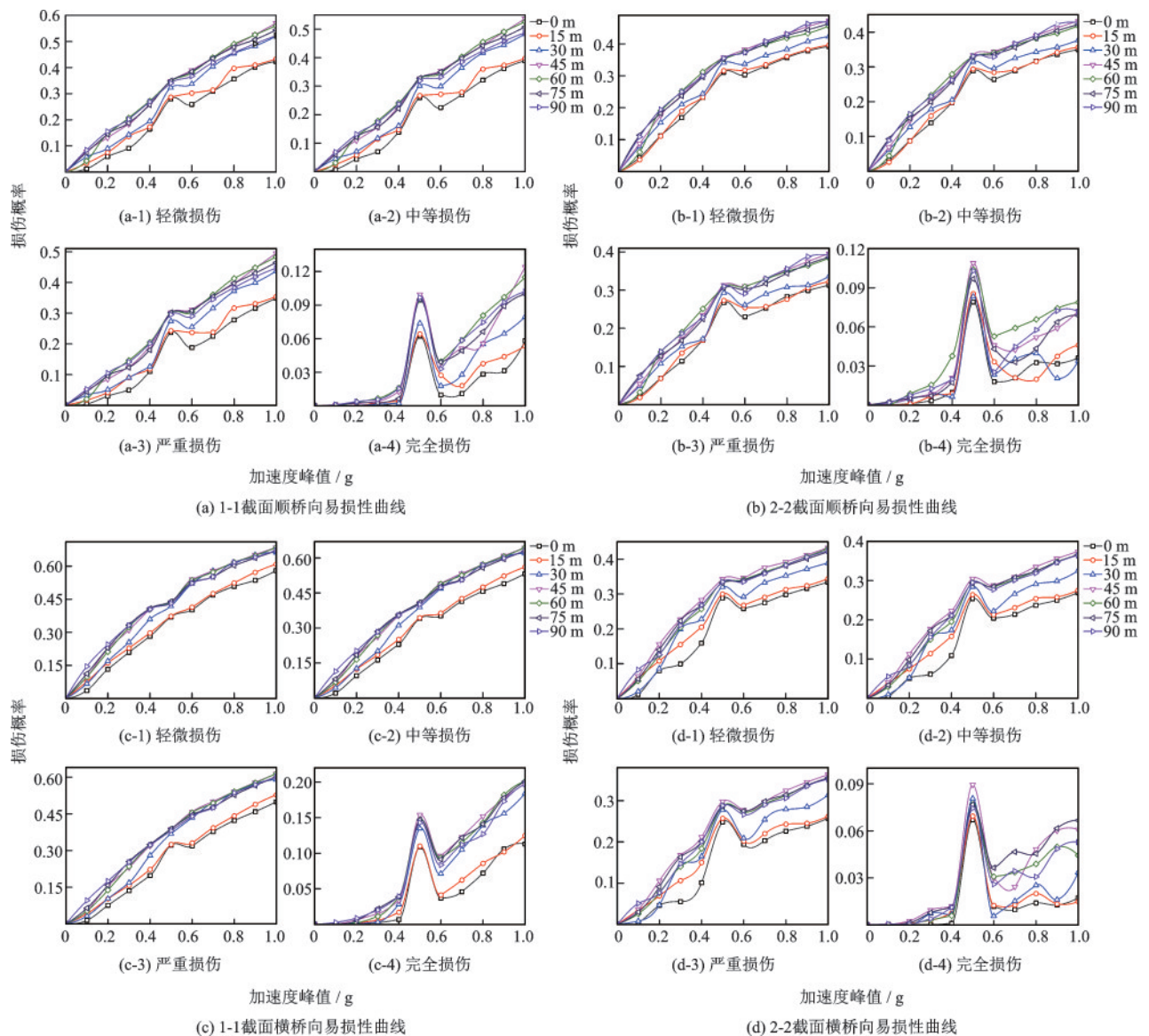


图8 易损性曲线对比分析

Fig.8 Comparative analysis of vulnerability curves

77.8 m;当水深小于45 m时,完全损伤阶段在峰值加速度为0.5g时损伤概率最大且损伤概率较大的区域集中在墩身中上部区域,而当水深超过45 m后,墩身中上部和墩底区域在峰值加速度大于0.5g时均出现损伤概率较大的区域,并且随着水深的增加,损伤概率较大的区域由墩身中上部向墩底逐渐扩展,同时由图8也可看出,1-1截面和2-2截面的损伤概率在峰值加速度达到0.5g时出现峰值点,但是当水深超过45 m时,1-1截面的损伤概率将继续随峰值加速度的增加而增大,并最终大于0.5g时对应的损伤概率,而2-2截面的损伤概率均小于0.5g对应的损伤概率。

由图7可见,近场地震动横桥向输入时,钢筋

混凝土深水高墩墩底区域最容易发生损伤,并且当水深为45 m、峰值加速度达到1.0g时,轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤四个损伤阶段的最大损伤概率达到最大,分别为69%、64%、61%和20%,当水深超过45 m时各损伤阶段的最大损伤概率差别不大,并且由图8也可看出,水深超过45 m后,1-1截面和2-2截面的各损伤阶段的损伤概率相差较小;随着水深的增加,相同峰值加速度下,深水高墩各损伤阶段的损伤概率较大的区域自墩底向墩身中部扩展,如当水深为90 m时,轻微损伤、中等损伤和严重损伤三个损伤阶段的损伤概率超过40%的区域长度在峰值加速度达到1.0g时达到最大,为57.1、17.3和8.8 m,而发生完全损伤的概

率超过8%的区域长度在峰值加速度为0.5g时最大,为39 m;同时由图8可看出,1-1截面和2-2截面轻微损伤、中等损伤和严重损伤阶段的损伤概率随峰值加速度的增加不断增大,而发生完全损伤的损伤概率在峰值加速度达到0.5g时出现峰值点,但是当水深超过45 m时,1-1截面的损伤概率将继续随峰值加速度的增加而增大,并最终大于0.5g时对应的损伤概率,而2-2截面的损伤概率均小于0.5g对应的损伤概率。

通过对地震波周期、深水高墩固有周期的对比并结合式(10)分析发现,峰值加速度为0.5g时部分近场地震波周期与深水高墩固有周期接近,增大了深水高墩的动力响应,从而使得深水高墩的地震需求中位值 \bar{D} 和条件标准差 $\beta_{D|IM}$ 均大于0.5g相邻峰值加速度地震波作用下深水高墩地震需求的统计参数值,导致图6~图8的易损性云图和易损性曲线均在0.5g处出现峰值。

7 深水高墩概率地震需求分析

概率地震需求模型(Probabilistic Seismic Demand Model, PSDM)是建立地震动强度与结构地震需求之间的概率统计关系,根据C. A. Cornell等^[22]建议,结构地震需求中值 D 与地震动强度水平 IM 之间满足如下关系:

$$D = a(IM)^b \quad (11)$$

式中, a 、 b 为未知参数,通过回归分析得到。

以深水高墩截面曲率 φ 为结构地震需求、取地震动强度水平 IM 为近场地震动加速度峰值 PGA ,并对式(11)两边取自然对数,可得:

$$\ln(\varphi) = b \ln(PGA) + \ln(a) \quad (12)$$

限于篇幅,本文对图2中3#墩的1-1截面和2-2截面的不同水深工况的概率地震需求模型进行了回归拟合,如图9中所示。

由图9可见,顺桥向和横桥向近场地震动输入时,各工况下1-1截面和2-2截面曲率的地震概率需求值均随峰值加速度的增加而增大;水深为0 m和15 m时的概率需求模型基本一致,水深30 m工况下1-1截面和2-2截面在峰值加速度为0.1g时的曲率地震概率需求值与水深为0 m时基本一致,并随峰值加速度值的增加概率需求值不断增大,当峰

值加速度值达到1.0g时与水深为45 m的曲率概率需求值基本一致;当水深分别为60 m、75 m和90 m工况时,1-1截面和2-2截面的曲率概率需求模型与水深45 m工况的截面曲率概率需求模型相差较小。

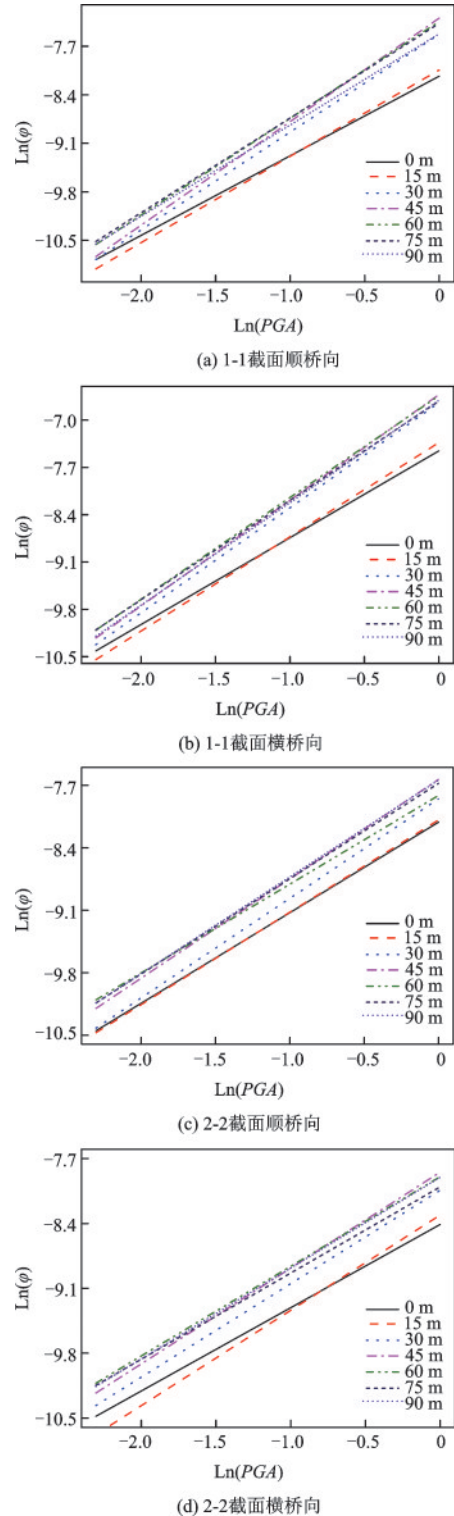


图9 概率地震需求模型对比

Fig.9 Comparison of probabilistic seismic demand models

8 结 论

(1)顺桥向和横桥向近场地震动作用下,深水高墩轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤阶段的最大损伤概率,均随水深的增加而增大,当水深达到45 m时,最大损伤概率达到最大;水深超过45 m后,最大损伤概率与45 m时差别不大,并且水深大于45 m时,高墩截面曲率的概率需求基本一致。45 m正好是墩高的一半,因此,可将达到高墩高度一半的水深作为深水高墩易损性分析的显著水深。

(2)顺桥向近场地震激励下,因高墩的高阶振型影响,四个损伤阶段墩身中上部和墩底区域损伤概率均较大。因附加动水质量的贡献,损伤概率较大的区域随水深的增加由墩身中上部和墩底区域逐渐向墩身中下部区域扩展。当水深90 m、峰值加速度达到1.0g时,轻微损伤、中等损伤和严重损伤阶段损伤概率较大的区域长度达到最大,而完全损伤阶段在峰值加速度为0.5g时损伤概率较大的区域长度达到最大。

(3)横桥向近场地震作用下,四个损伤阶段墩底区域最容易损伤,并随水深的增加,损伤概率较大区域,由墩底区域向墩身中部逐渐扩展,当水深达到90 m、峰值加速度达到1.0g时,轻微损伤、中等损伤和严重损伤阶段损伤概率较大区域长度达到最大,而完全损伤阶段在峰值加速度为0.5g时损伤概率较大区域长度达到最大。

本文所得结论可为水电站库区的空心薄壁矩形钢筋混凝土高墩公路桥梁的抗震设计和震后损伤评估、加固维修提供建议。

参考文献:

- [1] Westergaard H M. Water pressure on dams during earthquake[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933,98(2):418-433.
- [2] Morison J R, Johnson J W, Schaaf S A. The force exerted by surface waves on piles[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950,2(5):149-154.
- [3] 黄信,李忠献.动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响[J].土木工程学报,2011,44(1):65-73.
Huang X, Li Zh X. Influence of hydrodynamic pressure

- on seismic response of bridge piers in deep water[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(1):65-73. (in Chinese)
- [4] 李悦,王克海,李茜,等.动水对深水大跨刚构桥地震响应影响[J].公路交通科技,2011,28(12):76-81.
Li Y, Wang K H, Li Q, et al. Effect of hydrodynamic force on long-span deep-water rigid frame bridge in earthquake[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011,28(12):76-81. (in Chinese)
- [5] 江辉,王宝喜,白晓宇,等.近场地震下深水桥墩响应特性及动水效应计算方法检验[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(4):48-57.
Jiang H, Wang B X, Bai X Y, et al. Response property of deep-water bridge pier under near-fault earthquakes and inspection of calculation methods of hydrodynamic effect[J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2016,36(4):48-57. (in Chinese)
- [6] 江辉,金佳敏,王志刚,等.基于IDA的深水连续刚构桥桥墩概率性地震损伤特性[J].中国公路学报,2017,30(12):89-100.
Jiang H, Jin J M, Wang Zh G, et al. Probabilistic seismic damage characteristics for piers of deep-water continuous rigid frame bridge based on IDA method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017,30(12):89-100. (in Chinese)
- [7] 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,2015,48(10):91-98.
Chen Y, Li Zh X, Li N. Seismic damage analysis of coastal continuous rigid-framed bridges considering multiple mediums [J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(10):91-98. (in Chinese)
- [8] 洗巧玲,冯俊迎,崔杰.基于PSDM和IDA法的深水隔震桥梁地震易损性分析比较[J].广州大学学报(自然科学版),2016,15(2):1-6.
Xian Q L, Feng J Y, Cui J. A comparative study on the seismic vulnerability of the deep-water isolated bridge based on the PSDM and the IDA methods[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2016,15(2):1-6. (in Chinese)
- [9] 海港水文规范:JTJ 213—98[S].北京:人民交通出版社,1998.
Hydrologic code for seaports: JTJ 213—98 [S]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese)
- [10] 赖伟.地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D].上海:同济大学,2004.

- Lai W. Dynamic performances of deep-water bridges under earthquake and wave[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.(in Chinese)
- [11] 道桥示方书·同解说·V 耐震设计篇[S]. 东京:日本道路协会,2012.
Design specification of highway bridges part V seismic design[S]. Tokyo: Japan Road Association, 2012. (in Chinese)
- [12] 徐德利. 动水压力影响下的高墩连续刚构桥地震易损性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
Xu D L. Seismic vulnerability analysis of high pier continuous rigid bridge under the influence of hydrodynamic pressure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. 2018. (in Chinese)
- [13] 扶长生. 抗震工程学-理论与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
Fu Ch Sh. Earthquake engineering-theory and practice [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.(in Chinese)
- [14] Ellingwood B, Galambos T V, MacGregor J G, et al. Development of a probability based load criterion for American national standard A58-Building code requirements for minimum design loads in building and other structures [M]. Washington DC: National Bureau of Standards, 1980.
- [15] Joint Committee on Structural Safety. Probabilistic modal code [M/OL]. Internet Publication, 2011; <http://www.jcss.eth.ch>.
- [16] 吴文鹏. 考虑不确定性的钢筋混凝土桥梁地震易损性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2015.
Wu W P. Seismic fragility of reinforced concrete bridges with consideration of various sources of uncertainty [D]. Changsha: Hunan University, 2015.(in Chinese)
- [17] 马文英,周玉娟. 地震荷载动力分析与工程结构可靠度设计原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
Ma W Y, Zhou Y J. Seismic load dynamic analysis and reliability design principle for engineering structures [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese)
- [18] 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.(in Chinese)
- [19] Nielson B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones [D]. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [20] Shashi S, Baker J. Pulse classifications from NGA West2 database[DB/OL]. 2012; https://web.stanford.edu/~bakerjw/pulse_classification_v2/Pulse-like-records.html.
- [21] 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):845-878.
Dong J, Shan D Sh, Zhang E H, et al. Seismic fragility of irregular continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 845-878. (in Chinese)
- [22] 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.

(本文责编:池营营)