

# 近场地震作用下大跨高墩连续刚构桥易损性分析

孙永江

(甘肃路桥公路投资有限公司,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**近场地震作用对于大跨高墩连续刚构桥的破坏性更强。该文以某新建大跨高墩连续刚构桥为依托,考虑近场地震动下桥梁的地震需求概率,运用OpenSees对该连续刚构桥进行时程分析,通过云图法获得桥梁结构在近场地震下的响应,基于结构的曲率需求概率模型对桥梁进行易损性分析。结果表明:大跨高墩连续刚构桥在PGA较低时结构曲率需求概率响应集中,在较大PGA作用下结构的曲率需求概率降低。在近场的罕遇与特罕遇地震作用下,桥墩出现严重损伤和完全破坏的概率几乎为零,桥梁结构在设防场地能达到中震可修、大震不倒的要求。

**关键词:**连续刚构桥;近场地震;易损性分析;云图法

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

## Fragility Analysis of Continuous Rigid Frame Bridge with High Piers and Long Span Subjected to Near-Field Earthquakes

SUN Yongjiang

(Gansu Luqiao Highway Investment Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** Near-field earthquakes are more destructive to the continuous rigid frame bridge with high piers and long span. Based on a new-built continuous rigid frame bridge with high piers and long span, considering the seismic demand probability of bridges under near-field earthquakes, this paper utilized OpenSees to analyze the time history of the bridge. The structure response of the bridge under near-field earthquakes was obtained by the nephogram method, and the vulnerability of the bridge under earthquake was analyzed based on the curvature demand probability model of the structure. The results show that the probability response of curvature demand of a continuous rigid frame bridge with high piers and long span is concentrated when the PGA is low, and the probability response of curvature demand is reduced when the PGA is large. Under the action of near-field rare and extremely rare earthquakes, the probability of serious damage and complete failure of bridge piers is almost zero, and the bridge structure can be repaired in medium earthquakes and cannot collapse in strong earthquakes.

**Keywords:** continuous rigid frame bridge; near-field earthquake; vulnerability analysis; nephogram method

## 0 引言

西部地质环境和地势条件复杂,能够跨越崇山峻岭、高原沟壑及深沟峡谷等复杂地理条件的各种类型桥梁数量逐渐增多,特别是高墩大跨度连续刚构桥作为一种常见的跨越深沟或江河的结构形式得到了广泛应用。由于大跨度高墩连续刚构桥的墩柱

高度通常较一般桥梁高,在地震作用下高墩柱的地震响应更加剧烈并最终导致桥梁结构的整体安全性能受到影响,故对墩柱抗震性能的研究成为该类桥梁抗震的关键。

杜玲等<sup>[1]</sup>以高桥墩简化模型为基础,从高桥墩结构固有频率分析,可以识别出它的弹性失稳荷载;肖明洋<sup>[2]</sup>提出了一种新的曲率损伤指标,考虑了动轴力

效应对桥墩延性的影响,用以判定该类型桥梁主墩在震动作用下的损伤状态;李杨<sup>[3]</sup>对近断层地震震动作用下的连续梁桥进行了易损性分析,研究了多维强度指标对桥梁结构抗震性能的影响。基于多性能极限状态相关性与主余震统计关系,陈彦江等<sup>[4]</sup>提出了一种评估桥梁系统地震易损性的新方法,考虑了桥梁的桥墩和支座的易损性所受地震的影响。

中国西部地区断层活跃区域较多,且近场地震动对结构造成的破坏更大,因此对所处区域内桥梁的抗震性能提出了更高要求。在近场地震动作用下如何保证大跨高墩连续刚构桥的结构安全性,是目前亟待解决的重要工程问题<sup>[5]</sup>。本文以某新建大跨高墩连续刚构桥为研究对象,建立 OpenSees 有限元模型,通过云图法分析结构在不同地震指标下的损伤状态,分析连续刚构桥梁在地震动作用下不同抗震能力的需求概率,得到桥梁的易损性曲线,为大跨高墩连续刚构桥抗震理论分析提供参考。

## 1 分析模型和地震动选择

### 1.1 工程概况及模型的建立

西北地区某新建大跨高墩连续刚构桥,跨径布置为:(75+3×140+75)m,如图1所示。选取该桥第二联建立有限元数值分析模型,依据地震区划图及《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)<sup>[6]</sup>相关规定,该桥的抗震设防烈度为Ⅷ度,所处区域对应的 $a_{PGA}$ (Peak Ground Acceleration)为0.1g,特征周期为0.45s。主梁为混凝土变截面连续箱梁,采用强度等级为C55的混凝土;桥墩为变截面薄壁空心矩形墩,其截面形状如图2所示,混凝土强度等级为C50。由于地震作用力主要由中间主墩承担,故易损性分析以连续刚构桥中间5<sup>#</sup>桥墩为需求概率分析的研究对象,其墩高为156m。

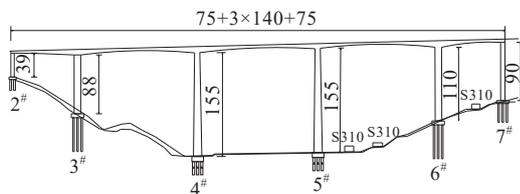


图1 桥梁立面图(单位:m)

Figure 1 Elevation view of bridge(unit:m)

采用 OpenSees 有限元软件建模,把连续刚构上部分考虑成弹性单元;由于需要考虑桥墩弹塑性变

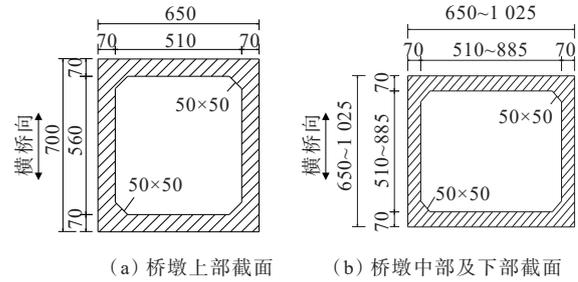


图2 5<sup>#</sup>桥墩变截面(单位:mm)

Figure 2 Variable section of pier 5<sup>#</sup>(unit:mm)

形对其进行时程分析计算得到结构的需求概率,故采用弹塑性纤维梁柱单元来模拟墩柱;通过把桥墩分为保护层混凝土、核心区混凝土以及钢筋材料三部分进行建模,从而反映各部分不同受力性能,使其更加符合实际工程。其中,采用 Concrete 01 的本构模型模拟混凝土,采用 Steel 02 的本构模型模拟钢筋。

### 1.2 地震动选择

为了研究近场地震动作用下大跨高墩连续刚构桥的能力需求概率,选取合适的地震波是进行准确弹塑性时程分析的前提。根据场地条件所对应规范中的结构设计加速度反应谱<sup>[6]</sup>,文献[7-10]所述相关地震动选取方法,从美国太平洋 PEER 的地震数据库选取合适的地震动,且所选地震动有以下特征:以结构所处场地的平均剪切波速  $V_{S30}$  为选择标准;所选地震动的断层距均小于 30 km 的临界值;选取的记录台站必须处在自由场地,排除结构对地震动记录的干扰;为了使云图法计算回归曲线时更加精确,选取  $a_{PGA}$  为 0.1g~1.0g 的地震动。

选取具有上述特征的 40 条地震动,其设计加速度反应谱与已选地震动的反应谱对比如图 3 所示,所选地震波反应谱与场地反应谱较为吻合。

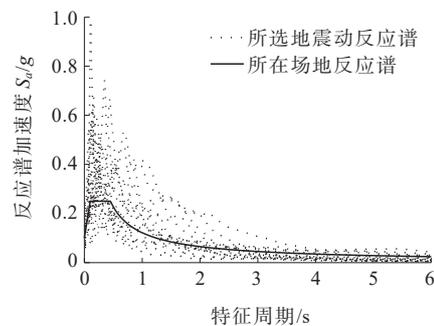


图3 地震动反应谱对比

Figure 3 Comparison of seismic response spectra

## 2 易损性分析理论

结构的地震动易损性分析是表示结构在某强度地

震动作用下到达或超过某一特定性能指标的条件概率<sup>[11-13]</sup>。易损性分析的超越概率表达式如下:

$$F_i(x) = P[D \geq C | I_i = X], I = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $D$ 、 $C$ 分别为所求结构的地震需求及抗震能力。

假定上式中变量 $D$ 和 $C$ 均为独立的随机变量, $D$ 和 $C$ 的随机变量服从正态分布,由此可以通过功能函数 $Z$ 表示如下式:

$$Z = \ln C - \ln D \quad (2)$$

式中: $Z$ 服从正态分布。

可以将地震易损性函数转变成关于 $Z$ 的结构功能失效概率,如式(3)所示:

$$P(LS/I_M) = P_f(Z \leq 0) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\mu_\sigma}\right) \quad (3)$$

式中: $LS$ 为结构的极限状态; $I_M$ 为地震强度参数; $\mu_Z$ 及 $\mu_\sigma$ 分别为所求的结构功能需求指标的均值与方差,两者之比的负数称为可靠指标。

通过带入变量 $D$ 、 $C$ ,式(3)可以等效表示为:

$$P_f(Z \leq 0) = \Phi\left(\frac{\ln \mu_d - \ln \mu_c}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}\right) \quad (4)$$

式中: $\mu_d$ 与 $\beta_d^2$ 分别为地震需求的均值及方差; $\mu_c$ 与 $\beta_c^2$ 分别为抗震能力的均值及方差。

为得到地震需求对结构进行时程分析,将结构地震需求与标准破坏等级损伤指数联立,得到数据与地震强度参数绘制在直角坐标系中,对离散点进行直线回归拟合,获得标准差 $\sigma$ 与均值 $\mu$ 。式(4)化简为:

$$\Phi\left(\frac{\ln \mu_d - \ln \mu_c}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}\right) = \Phi\left[\frac{S_a}{\sigma}\right] \quad (5)$$

$$S_a = a \ln(I_M) + b \quad (6)$$

将非线性动力时程分析得到的地震需求与损伤极限状态对应的损伤指标取比值,如 $S_a = \ln(\mu_d/\mu_c)$ ,将其与地震动强度绘制在对数坐标系中,得到能力需求比拟合方程如式(6), $a$ 、 $b$ 为回归系数。 $\sigma = \sqrt{S_r/(n-2)}$ , $S_r$ 为拟合曲线的残差平方和, $n$ 为所测地震波的样本数。

本文使用云图法<sup>[14-15]</sup>计算概率性地震需求,即在给定地震强度 $I_M$ 下通过有限元分析得到桥梁结构的地震需求。与现在易损性分析时常用IDA方法相比,云图法可以在计算过程中减少非线性时程分析的计算量,地震响应方差不会随着常量 $I_M$ 的变化而变化,且不用考虑地震动调幅带来的损伤指数的误

差影响。

### 3 桥梁结构的易损性分析

#### 3.1 基于曲率的概率需求模型

基于性能的抗震设计方法以“多级抗震设防”为核心思想,根据HAZUS99(1999)<sup>[16]</sup>的规定,桥梁结构在地震动作用下的破坏状态划分为5级,依次为:基本完好、轻微损伤、中等损伤、严重破坏和完全破坏。这些破坏等级对应表1所示4种极限破坏状态,损伤指标就是对桥梁结构的极限状态做出的定量描述,也是衡量其破坏程度的界限值,现行的可描述桥梁结构破坏状态的损伤指标较多,本文采用桥墩曲率作为不同极限损伤状态的目标评判标准,通过Xtract软件对该大跨高墩连续刚构桥的桥墩墩底截面进行弯矩-曲率分析,以桥墩曲率作为判断依据得到不同极限状态相应的曲率,如表1所示。

表1 墩柱曲率损伤指标

Table 1 Curvature damage index of pier columns

损伤状态	墩底截面曲率	损伤状态	墩底截面曲率
轻微损伤	0.000 53	严重损伤	0.002 66
中等损伤	0.000 72	完全破坏	0.005 21

采用选取的40条地震波,通过对该桥有限元模型分别输入地震动进行非线性动力时程分析,并得到不同地震动作用下该桥5<sup>#</sup>墩墩底峰值曲率。从非线性时程分析结果中分别得到地震作用下墩柱的响应曲率最大值,根据40条地震动作用下的墩底峰值曲率与地震响应 $a_{PGA}$ 的对应关系,采用云图法得到地震响应云图并对其进行线性回归拟合,计算墩柱在不同 $a_{PGA}$ 取值时的地震响应——均值与方差。在近场地震动作用下,墩底曲率概率需求的响应云图及线性回归曲线如图4所示。

通过对比分析,从线性拟合的结果可以看出:结构的地震响应在 $a_{PGA}$ 较低范围内密集分布在直线两端,在较高 $a_{PGA}$ 作用下结构的曲率响应主要分散在直线下端。表明大跨高墩连续刚构桥的墩柱在 $a_{PGA}$ 较低的时候结构曲率需求概率响应集中,在较大 $a_{PGA}$ 地震动作用下结构的曲率需求概率降低。

由图4可知:大跨连续刚构桥在轻微和中度破坏地震需求时,结构的抗震能力响应分散较广, $\ln(a_{PGA})$ 在-5~0的范围内都存在响应,即任何 $I_M$ 参数下都存在两种破坏的可能性。在严重破坏和完全破坏中

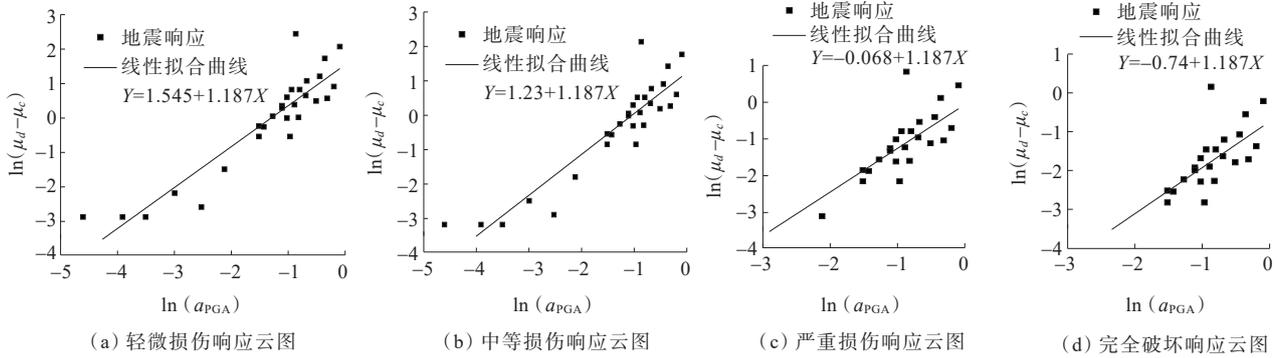


图4 概率需求的响应云图

Figure 4 Response cloud of probability demand

结构抗震能力响应较集中,  $\ln(a_{PGA})$  在  $-2 \sim 0$  的范围内响应明显, 即当  $a_{PGA}$  较大的时候才存在严重和完全破坏的可能性。大跨连续刚构桥的抗震能力在设防范围内存在严重和完全破坏的可能性较小, 符合抗震要求。

### 3.2 连续刚构桥易损性分析

根据上述的概率响应云图, 得到该桥墩柱的极限状态及其曲率概率地震需求模型, 将式(6)代入式(5)计算出给定  $a_{PGA}$  条件下墩柱各极限状态的失效概率, 将所得结果数据点相连接得到该桥桥墩的易损性曲线, 如图5所示。

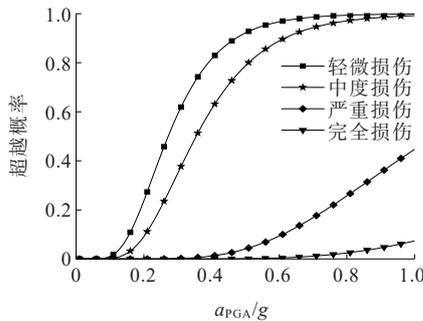


图5 地震作用下桥墩易损性曲线

Figure 5 Vulnerability curve of bridge piers under earthquake action

图5表明: 总体来看, 在近场地震动作用下, 在  $0.1g \sim 0.4g$  近场地震动作用时, 该桥墩容易产生轻微及中等程度的损伤, 但是引发严重和完全损伤的概率相对较低, 且损伤概率与地震动强度呈正相关关系, 符合客观事实。从局部进一步分析, 当  $0.7g$  的  $a_{PGA}$  作用时, 中等损伤对应的概率为  $90\%$ , 严重损伤和完全破坏对应的损伤概率则分别为  $20\%$  和  $0$ , 从而证明该连续刚构桥的桥墩在大震作用下具备良好的抗震能力。

结构在遭受  $0.1g$  的设防地震时, 仅存在发生轻微破坏的概率, 在场地的  $0.3g$  罕遇地震作用时, 结构发生严重和完全损伤破坏概率低于  $1 \times 10^{-7}$ , 远低于规范要求的  $1.3 \times 10^{-6}$ [6]; 在极罕遇地震  $a_{PGA}$  为  $0.4g$  时, 结构发生轻微损伤概率在  $80\%$ , 发生中度破坏概率在  $60\%$ , 而严重损伤和完全破坏概率低于  $1 \times 10^{-5}$ , 在大震作用下结构的轻微和中度破坏概率较高。桥梁结构在设防场地下能达到中震可修、大震不倒的要求。

## 4 结论

基于桥梁的 OpenSees 有限元模型, 使用云图法对近场地震动作用下西北地区某高墩大跨连续刚构桥梁的易损性概率进行分析研究, 得到以下主要结论:

(1) 大跨高墩连续刚构桥梁在  $a_{PGA}$  较低时结构曲率需求概率响应集中, 在较大  $a_{PGA}$  作用下结构的曲率需求概率降低, 即在设防地震范围内, 桥梁仅发生轻微破坏, 造成严重损伤和完全破坏的可能性较小。

(2) 结构各损伤状态的超越概率随着地震动强度的增大而逐渐增加, 在近场地震动作用下, 桥梁结构发生轻微损伤和中等损伤的概率较大, 但发生严重损伤和完全破坏的概率较低, 桥墩具有较好的抗震变形能力。

(3) 在罕遇和特罕遇近场地震动作用下桥墩出现严重损伤和完全破坏的概率低于规范值, 大跨高墩连续刚构桥桥墩在近场地震动作用下具有良好的抗震性能。

### 参考文献:

### References:

- [1] 杜玲, 李范春. 西部高墩大跨径桥梁桥墩的失稳荷载

- 别方法[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(2):304-314.
- DU Ling, LI Fanchun. Research of buckling load identification method about piers of western high pier long-span bridges[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2016,24(2):304-314.
- [2] 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.
- [3] 李杨.近场地震作用下钢筋混凝土桥梁的地震易损性分析[D].天津:天津大学,2014.
- LI Yang. Seismic vulnerability analysis of reinforced concrete bridges subjected to near-fault ground motion [D].Tianjin:Tianjin University,2014.
- [4] 陈彦江,郝朝伟,何浩祥,等.考虑主余震序列的高墩刚构桥地震易损性分析[J].工程抗震与加固改造,2015,37(4):132-138,146.
- CHEN Yanjiang, HAO Chaowei, HE Haoxiang, et al. Seismic vulnerability analysis of continual rigid-bridge with high piers considering mainshock-aftershock earthquake sequences[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2015,37(4):132-138,146.
- [5] 陈彦江,郝朝伟,闫维明,等.考虑行波效应的高墩刚构桥地震易损性分析[J].世界地震工程,2016,32(3):179-184.
- CHEN Yanjiang, HAO Chaowei, YAN Weiming, et al. Seismic vulnerability analysis for high pier rigid bridge considering traveling wave effect[J]. World Earthquake Engineering,2016,32(3):179-184.
- [6] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Specifications for seismic design of highway bridges:JTG/T 2231-01—2020 [S].Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2020.
- [7] DE MARTINO A, LANDOLFO R, MAZZOLANI F M. The use of the Ramberg-Osgood law for materials of round-house type[J].Materials and Structures,1990,23(1):59-67.
- [8] WILLIAMS M S, SEXSMITH R G. Seismic damage indices for concrete structures:a state-of-the-art review[J]. Earthquake Spectra,1995,11(2):319-349.
- [9] MACKIE K, STOJADINOVIC B. Seismic demands for performance-based design of bridges[R]. Berkeley: University of California,2003.
- [10] MANDER J B, DHAKAL R P, MASHIKO N, et al. Incremental dynamic analysis applied to seismic financial risk assessment of bridges[J].Engineering Structures,2007,29(10):2662-2672.
- [11] 王其昂,吴子燕,贾兆平.桥梁系统地震多维易损性分析[J].工程力学,2013,30(10):192-198.
- WANG Qi'ang, WU Ziyan, JIA Zhaoping. Multi-dimensional fragility analysis of bridge system under earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 192-198.
- [12] 李鹏,曾娟,高榕,等.近远场地震下大跨度连续刚构桥地震易损性分析[J].铁道建筑,2020,60(12):5-9,14.
- LI Peng, ZENG Juan, GAO Rong, et al. Near-and far-field seismic vulnerability analysis of long-span continuous rigid frame bridge[J].Railway Engineering,2020,60(12):5-9,14.
- [13] 赵金钢,贾宏宇,李晰,等.基于实际场地和碰撞双重效应的高墩大跨连续刚构桥易损性分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(1):64-74.
- ZHAO Jingang, JIA Hongyu, LI Xi, et al. Fragility analysis of high-pier and long-span continuous rigid frame bridge based on double effects of the actual site and collision[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2019,47(1):64-74.
- [14] 李谦.增量动力分析方法的研究及其应用[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
- LI Qian. Study and application of incremental dynamic analysis method[D].Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2011.
- [15] 吕大刚,于晓辉,潘峰,等.基于改进云图法的结构概率地震需求分析[J].世界地震工程,2010,26(1):7-15.
- LYU Dagang, YU Xiaohui, PAN Feng, et al. Probabilistic seismic demand analysis of structures based on an improved cloud method[J].World Earthquake Engineering, 2010,26(1):7-15.
- [16] HAZUS99. User's manual[S]. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency,1999.