

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.02.012

基于 IDA 的渡槽结构地震易损性分析

马颖¹, 刘中山¹, 张天宇²

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046;

2. 黄河水资源保护科学研究院, 河南 郑州 450004)

摘要: 渡槽结构是由槽身、槽墩和支座等相互关联的构件组成的结构系统。强震作用下, 仅用单一构件的地震易损性来评价渡槽结构系统的地震易损性, 往往会高估渡槽的抗震能力。为研究渡槽结构系统的地震易损性, 以一座三跨等距简支梁式渡槽为研究对象, 基于 OpenSEES 平台建立了有限元动力分析模型, 采用增量动力分析法 (IDA) 计算了槽墩、盖梁处板式橡胶支座以及槽台处聚四氟滑板支座三种构件的横槽向地震易损性; 然后, 分别通过一阶界限法和二阶界限法, 建立了渡槽结构系统地震易损性曲线, 并进行了对比分析。结果表明, 地震作用下, 渡槽结构的板式橡胶支座与聚四氟滑板支座相比槽墩更容易发生损伤; 渡槽结构的系统易损性大于单一构件的易损性; 二阶界限法所得结构失效概率区间均位于一阶界限法上下界之间, 相比一阶界限法, 采用二阶界限法建立的系统易损性曲线来评估渡槽结构的抗震性能更为合理。

关键词: 渡槽; 地震易损性; 构件; 界限估计法; 增量动力分析法 (IDA)

中图分类号: TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)02—0078—06

Seismic Fragility Analysis of Aqueduct Structure Based on IDA Method

MA Ying¹, LIU Zhongshan¹, ZHANG Tianyu²

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China;

2. Yellow River Water Resources Protection Institution, Zhengzhou, He'nan 450004, China)

Abstract: The aqueduct structure is a structural system composed of the aqueduct body, piers and bearing. Under earthquake action, evaluating the system seismic fragility of the aqueduct structure only by the seismic fragility of a single component will overestimate the seismic capability of the aqueduct. In order to analyze the systematic seismic fragility of aqueduct structure, a three-span equidistance simply supported beam aqueduct was taken as the research object and a finite element dynamic analysis model has been established based on OpenSEES platform. The transverse seismic fragility of pier, plate rubber bearing at cover beam and PTFE slide bearing at abutment has been calculated by incremental dynamic analysis (IDA). Then, the seismic fragility curves of aqueduct structure system are established by the first-order and second-order boundary methods respectively, and are compared and analyzed. The results show that the rubber plate bearing and PTFE slide bearing of aqueduct structure are more likely to be damaged than the pier under earthquake action. The system fragility of aqueduct structure is greater than that of single component. The structural failure probability intervals obtained by the second-order boundary method are between the upper and lower bounds of the first-order boundary method. Compared with the first-order boundary method, the system fragility curve established by the second-order boundary method is more reasonable to evaluate the seismic performance of aqueduct structures.

Keywords: aqueduct; seismic fragility; component; boundary method; incremental dynamic analysis (IDA)

收稿日期: 2021-11-19

修稿日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51408223); 国家自然科学基金面上项目 (52008186); 河南省重点研发与推广专项 (212102310935); 河南省高等学校重点科研项目计划 (22A560003)

作者简介: 马颖 (1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事水工、桥梁与结构工程抗震研究工作。E-mail: maying123@ncwu.edu.cn

渡槽作为一种重要的输水建筑物,在解决我国水资源时空分布不均的问题上发挥了重要作用。强震作用下,渡槽发生的损伤或破坏可能会导致输水进程中断,给沿线城市和居民造成经济损失和生活不便。开展地震易发区渡槽结构的抗震性能研究,对其抗震设计和灾后恢复与重建都具有重要意义^[1]。地震易损性分析从概率的角度进行地震风险评估,可以描述结构在给定地震动强度下发生不同程度破坏的可能性或者超过某一极限状态的失效概率,目前已经广泛应用于水工建筑物的抗震性能分析领域^[2-4]。

渡槽结构是由槽身、槽墩和支座等构件组成的结构系统,仅考虑单一构件的地震易损性往往会高估渡槽结构系统的抗震性能。基于传统可靠度理论^[5]的系统易损性分析,其核心在于多维标准正态分布函数的求解,采用直接积分的方法可以求得分布函数的精确解,但对于构件较多的复杂结构系统计算效率过低。Cornell^[6]提出的一阶界限估计法可以通过计算结构失效概率上下界来估计结果,但该方法无法考虑不同构件之间相互联系,导致界限范围较宽且误差较大。Hunter^[7]提出的二阶界限法考虑了不同构件之间的相关性,改进了一阶界限法的不足,可以取得相对较窄的估计区间。Nielson^[8]提出了一种基于蒙特卡洛模拟的系统易损性分析方法,但该方法需要大量的样本抽样,计算效率较低。目前,对于渡槽结构系统的地震易损性分析,多采用界限估计法、Copula 函数等方法,也有部分学者仅从构件的角度来评价渡槽结构系统的地震易损性。张士博^[9]对单柱式钢筋混凝土槽墩进行地震易损性分析,并在此基础上对渡槽进行了时变可靠度分析和地震风险分析。张建伟等^[10]引入 Copula 函数描述渡槽结构的构件相关性,并基于排架和橡胶支座的易损性曲线建立了串联系统下渡槽结构的系统易损性曲线。Cheng 等^[11]基于弯曲柱和橡胶支座两种构件的地震易损性,采用界限估计法建立了渡槽结构的系统易损性曲线。

本研究以一座三跨等距简支梁式渡槽为研究对象,基于 OpenSEES 平台建立了渡槽纤维模型,通过增量动力分析法(IDA)计算了槽墩、盖梁处板式橡胶支座和槽台处聚四氟滑板支座三种构件的横槽向地震易损性,最后通过一阶界限法和二阶界限法对渡槽结构进行系统易损性分析,并对计算结果进行了分析比较。

1 地震易损性分析方法

1.1 构件易损性

渡槽结构的地震易损性是指给定的地震动强度

下,地震需求达到或超越结构能力的概率。对于单个构件,不同损伤状态下的地震易损性可以表示为:

$$P_i = P[S_d/S_c \geq 1] \quad (1)$$

式中: S_d 表示地震需求; S_c 表示结构能力。

基于 IDA 的渡槽结构地震易损性分析,其基本流程如下:首先建立渡槽的有限元模型,通过拉丁超立方抽样(LHS)建立多个渡槽样本,然后选取合适的地震动记录,确定地震动强度指标并对地震动进行调幅,将调幅后的地震动样本与渡槽样本随机组合进行动力时程分析,根据地震响应结果与损伤指标,基于选定的易损性函数建立不同构件的地震易损性曲线。

需求能力比曲线拟合法^[12]假设地震易损性曲线符合对数正态分布,其易损性函数表达式为^[13]:

$$P_i = 1 - \Phi\left(\frac{\ln I - \lambda}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\lambda}{\sigma}\right) \quad (2)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; λ 和 σ 分别表示 $\ln(S_d/S_c)$ 的均值和标准差,其表达式如下:

$$\lambda = a[\ln(IM)]^2 + b\ln(IM) + c \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{S_r/(N-2)} \quad (4)$$

式中:IM 为地震动强度指标; a 、 b 和 c 为回归分析参数; S_r 为离散点的残差平方和; N 为离散点数量。

1.2 系统易损性

渡槽作为复杂的结构系统,包含槽身、槽墩和支座等多个组成部分,强震作用下,任一构件都可能发生不同程度的破坏,不考虑各构件之间的相互联系,则无法合理评估渡槽整体的地震易损性。因此有必要采用系统易损性来分析渡槽结构在不同地震动强度下的抗震性能。本研究基于可靠度理论,假定渡槽系统符合串联模型。

1.2.1 一阶界限法

一阶界限法通过计算上下界来逼近整个结构系统的失效概率。对于渡槽串联模型,其估计区间为^[6]:

$$\max_{i=1}^n [P_i] \leq P_{\text{sys}} \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i] \quad (5)$$

式中: P_i 表示渡槽结构中第 i 个构件发生破坏的概率; P_{sys} 表示渡槽结构系统的失效概率; n 表示构件总数量。

1.2.2 二阶界限法

对于实际的渡槽结构而言,一阶界限估计法因为没有考虑构件之间的相关性且界限过宽而无法满足工程需求,而二阶界限法很好地解决了这一问题,其界限估计区间可表示为^[7]:

$$P_1 + \sum_{i=2}^n \max(P_i - \sum_{j=1}^{i-1} P_{ij}, 0) \leq P_{\text{sys}} \quad (6)$$
$$\leq \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=2}^n \max(P_{ij})$$

式中: P_1 为渡槽结构中单个构件发生破坏的概率; P_i 表示渡槽结构中第 i 个构件发生破坏的概率(P_1 除外); P_{ij} 表示第 i 个和第 j 个构件同时发生破坏的概率; n 表示构件总数量。

假设所有变量符合正态分布,则两个构件同时失效的概率 $P_{ij} = P(F_i \cap F_j)$ 可表示为 $\Phi(-\beta_i, -\beta_j, \rho)$,对于二维正态分布函数,可以直接通过数值积分进行求解,也可以根据相关文献的近似公式进行计算。研究表明^[14],不同构件的排列顺序对于二阶界限法计算所得的系统易损性有较大影响,当 P_i 按照概率大小顺序排列时,可以得到相对理想的窄区间。

2 渡槽算例

2.1 有限元模型的建立

选取南水北调中线工程某三跨简支梁式渡槽作为研究对象。渡槽上部结构为每跨 28 m 的矩形槽身,下部结构采用双柱槽墩,盖梁和横梁组成的 H 型排架结构,槽墩横截面为直径 0.8 m 的圆形截面,槽墩底部与地基固结,盖梁上设有板式橡胶支座,槽台处支座采用聚四氟滑板支座,渡槽的数值计算模型如图 1(a) 所示。

渡槽槽身采用 C50 混凝土,弹性模量为 3.45×10^4 MPa;排架采用 C30 混凝土,弹性模量为 3.00×10^4 MPa;钢筋均采用 HPB300 钢筋,弹性模量为 2.1×10^5 MPa。

有限元动力分析模型基于 OpenSEES 开放平台建立,对于简支梁式渡槽结构,下部支撑结构的抗震能力影响着渡槽整体的安全性,双柱墩排架作为渡槽重要的下部结构,在强震作用下具有较高的地震易损性^[15-16],故采用非线性梁柱单元模拟槽墩,以考虑槽墩的弹塑性破坏。渡槽各构件的本构模型如图 1(b) 所示,槽墩混凝土采用基于修正 Kent-Park 模型的 Concret02 材料,槽墩钢筋采用基于 Menegotto-Pinto 模型的 Steel02 材料,槽墩的纤维截面划分为保护层和核心区两个部分,提高核心区混凝土的抗压强度以模拟箍筋的作用;板式橡胶支座采用基于线性模型的零长度单元模拟,聚四氟滑板支座按双线性模型考虑,采用理想弹塑性支座单元模拟。排架横梁、盖梁及槽身均采用弹性梁柱单元模拟。渡槽的设计水深为 2.21 m,槽内水体采用附加质量模型^[17]进行模拟。

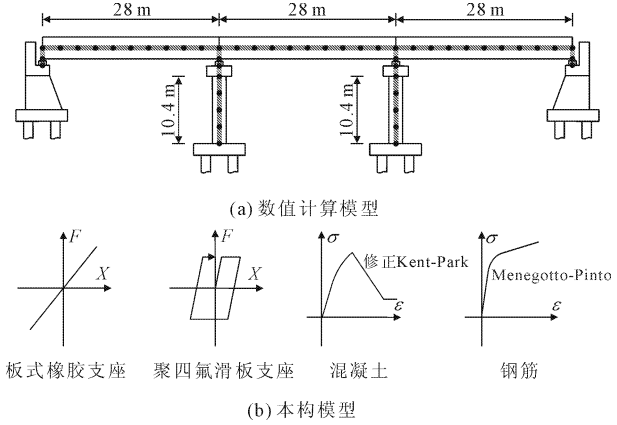


图 1 渡槽有限元动力分析模型

2.2 结构的不确定性

渡槽结构的不确定性主要从结构尺寸和材料参数两个部分进行考虑。本研究考虑的结构不确定性参数主要包括渡槽槽墩的混凝土重度、纵筋直径、墩柱直径、保护层厚度以及渡槽结构的阻尼比,假定这 5 个参数符合正态分布^[18],如表 1 所示。通过拉丁超立方抽样建立 10 个渡槽样本,以考虑结构参数的不确定性。

表 1 模型不确定性参数及其分布

参数	混凝土 重度 /(kN·m ⁻³)	纵筋 直径 /mm	墩柱 直径 /m	保护层 厚度 /m	阻尼比
均值	25	16	0.8	0.03	0.05
变异系数	0.100	0.035	0.050	0.050	0.280
分布形式	正态分布	正态分布	正态分布	正态分布	正态分布

2.3 地震动的选取

地震易损性分析需要选取足够数量的地震波以考虑地震动的不确定性,基于 IDA 的结构地震易损性分析,选取 10~20 条地震动记录便可达到一定的精度^[19]。增量动力分析法(IDA)的基本原理是将地震动参数调幅到指定强度,从而得到结构在不同地震动强度下的结构需求^[20-21]。

渡槽工程地处 II 类场地,抗震设防烈度为 VII 度,设计基本地震加速度值为 0.1g,以《水工建筑物抗震设计标准》^[22](GB 51247—2018)中的设计反应谱为目标谱,从 PEER 强震数据库中选取 20 条远场地震动记录,所选地震波的反应谱、均值谱以及设计反应谱的拟合情况如图 2 所示。选取地面峰值加速度(PGA)作为地震动强度指标,以 0.1g 为步长,将 20 条地震动记录统一调幅至 0.1g~1.0g,共建立 200 条地震动样本。目前,对于渡槽结构抗震性能的研究主要包括横槽向和顺槽向两个方面^[23-25],本

研究采用水平地震动研究渡槽结构横槽向的地震易损性。

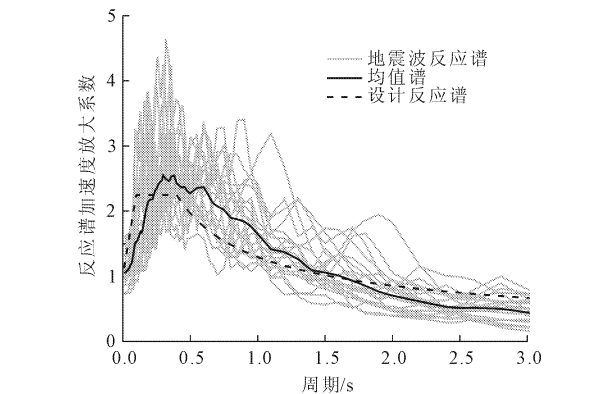


图 2 反应谱拟合情况

2.4 损伤指标的定义

地震作用下,渡槽的损伤程度可划分为轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏四个等级^[26]。为不同构件定义合适的损伤指标,对合理评估不同损伤状态下各构件的地震易损性至关重要。墩顶位移角作为变形能力指标对于具有不同剪跨比的桥墩具有较好的一致性^[27-28],可以直观、简便地反映墩柱的变形能力。因此选取墩顶位移角作为损伤指标,具体定义如下:

$$\delta = \frac{\Delta}{L}$$

(7)

式中: Δ 为墩顶位移; L 为墩高。

参考相关研究^[29]将双柱墩转换为单柱墩,根据墩柱变形能力的确定性计算模型^[30]计算出不同损伤状态下墩顶位移角的界限值。

渡槽结构的支座构件起到了支承上部结构的作用,对于不同的支座类型,不同学者采用的损伤指标各有差异。分别选取剪切应变 γ ^[31] 和滑动位移 u ^[32] 作为板式橡胶支座和聚四氟滑板支座的损伤指标,具体参数见表 2。

表 2 损伤状态及损伤指标

破坏程度	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
槽墩 δ	0.0089	0.0142	0.0252	0.0454
板式橡胶支座 $\gamma/\%$	100	150	200	250
聚四氟滑板支座 u/m	0.09	0.15	0.20	0.30

3 渡槽系统易损性分析

3.1 构件易损性曲线

采用调幅后的 200 条地震波样本和 10 个渡槽样本随机匹配进行非线性时程分析,得到渡槽各构件的地震需求参数,以完全破坏状态为例,根据式 (3),基于地震需求与结构能力的比值,即需求能力比(S_d/S_c)与地震动参数进行对数回归分析,得到拟合函数与标准差如表 3 所示,将计算结果代入式 (2)可以求得各构件在不同损伤状态时的失效概率,建立的渡槽构件地震易损性曲线见图 3。

表 3 需求能力比对数回归分析结果

构件	拟合函数	标准差
槽墩	$\lambda = 0.0109\ln(\text{PGA})^2 + 1.7319\ln(\text{PGA}) + 0.1449$	0.7033
板式橡胶支座	$\lambda = -0.1586\ln(\text{PGA})^2 + 0.2539\ln(\text{PGA}) + 0.1478$	0.2559
聚四氟滑板支座	$\lambda = -0.0025\ln(\text{PGA})^2 + 1.1519\ln(\text{PGA}) + 0.7720$	0.4963

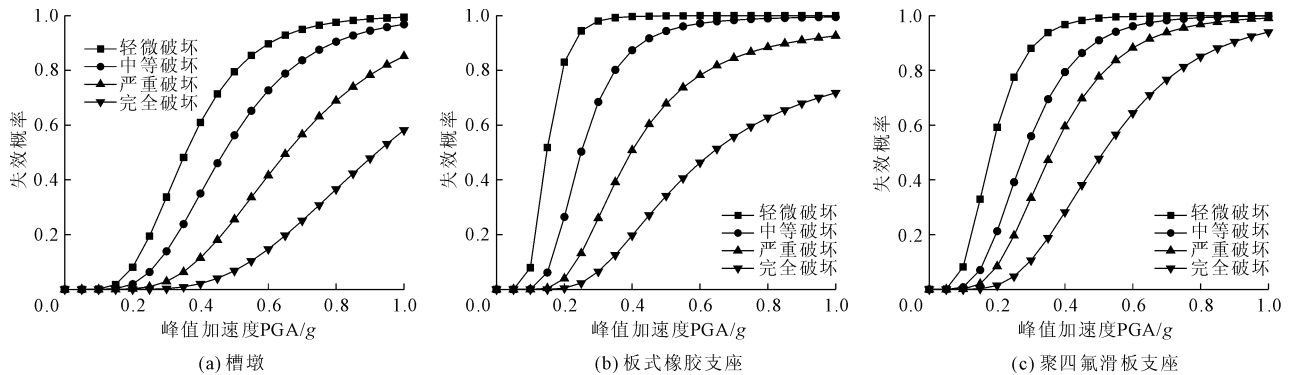
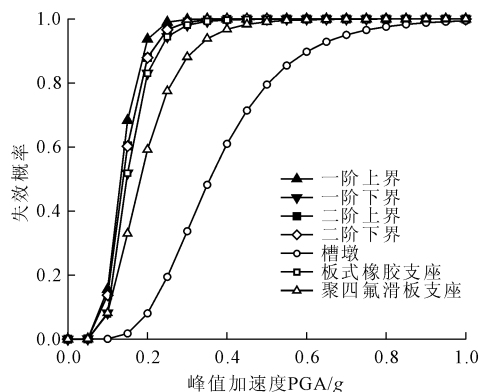


图 3 渡槽构件易损性曲线

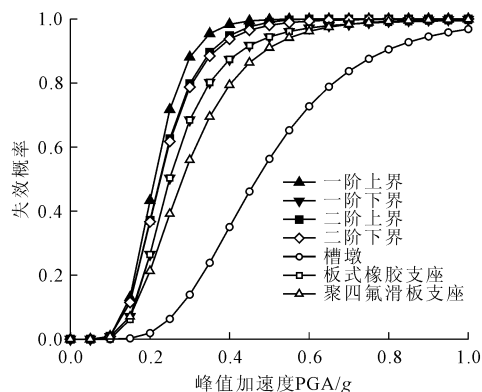
由图 3 可知,随着 PGA 的增大,不同构件的失效概率都在逐步增加。当 $\text{PGA} < 0.1g$ 时,槽墩基本不发生损伤,板式橡胶支座和聚四氟滑板支座则最

可能处于完好或轻微破坏状态,基本满足抗震设计要求。当 PGA 位于 $0.1g \sim 0.2g$ 之间时,两种支座发生轻微破坏的概率迅速提升,但基本不会发生完

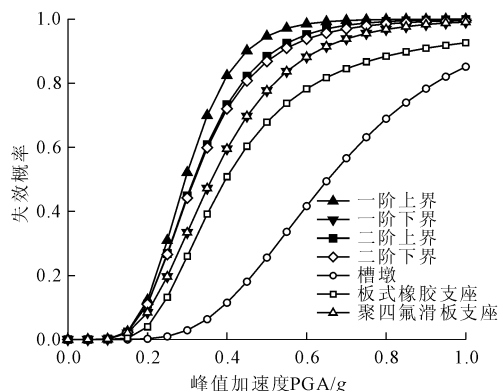
全破坏。当 $\text{PGA} > 0.2g$ 时,三种构件均可能发生不同程度的破坏。同等地震强度与性能水平下,两种支座相比槽墩更容易发生破坏,在轻微和中等破坏两种状态下,盖梁处板式橡胶支座的易损性大于槽台处聚四氟滑板支座,在严重和完全破坏状态下,聚四氟滑板支座较板式橡胶支座更容易发生损伤。



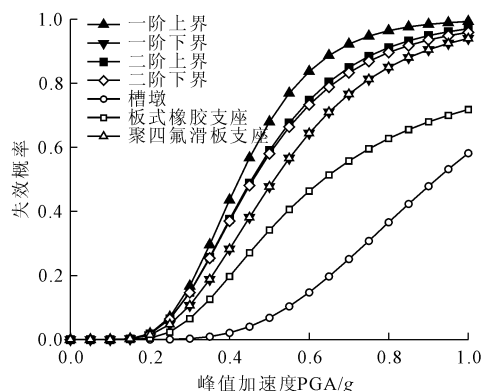
(a) 轻微破坏



(b) 中等破坏



(c) 严重破坏



(d) 完全破坏

图 4 渡槽系统易损性曲线

由图 4 可知,当 $\text{PGA} = 0.2g$ 时,四种损伤状态下,渡槽各构件的最大失效概率分别为 83.0%、26.5%、8.4%、1.4%,与一阶界限法下界重叠,比二阶界限法下界对应的失效概率(87.9%、36.7%、11.0%、1.8%)均小,这表明,渡槽结构系统相比单一构件更容易发生损伤。由此可知,对于渡槽这种包含多个构件的复杂结构系统,仅用单个构件的失效概率来评估渡槽系统的抗震性能是不合理的。

对比不同界限估计法建立的系统易损性曲线,可以发现,基于一阶界限法计算结果得到的失效概率区间较宽,单独采用上界或下界来评估渡槽系统的地震易损性会低估或高估渡槽结构的抗震性能,难以同时满足工程在经济与安全两方面的需求。基于二阶界限法得到的上下界,在四种损伤状态下均位于一阶界限法所得区间内,其上下界最大偏差分别为 0.3%、1.4%、1.8%、2.0%,这表明二阶界限法计

3.2 系统易损性曲线

本研究假设渡槽结构符合串联模型,根据渡槽结构的构件易损性曲线,分别通过一阶界限法、二阶界限法对渡槽结构进行系统易损性分析,并将构件易损性曲线和系统易损性曲线放在同一图中进行比较,其结果如图 4 所示。

算结果较为理想,可以取得较窄的失效概率区间。

4 结 论

本研究以一座三跨等距简支梁式渡槽为例,基于 OpenSEES 平台建立了渡槽纤维模型,通过 IDA 法建立了渡槽结构的构件易损性曲线,通过一阶界限法和二阶界限法建立了渡槽结构的系统易损性曲线,得到的主要结论如下:

(1) 同等地震动强度下,盖梁处板式橡胶支座和槽台处聚四氟滑板支座的失效概率均高于槽墩;渡槽系统的失效概率高于任一单个构件,用单个构件的地震易损性来评估渡槽结构系统的地震易损性是不合理的。

(2) 一阶界限法原理简单且应用方便,但所得区间宽度过大,不适用于实际工程,而二阶界限法可以取得相对理想的窄区间,更适合渡槽结构的系统

易损性分析。

(3) 本研究仅考虑了槽墩,盖梁处板式橡胶支座与槽台处聚四氟滑板支座三种构件对渡槽结构系统地震易损性的影响,实际工程中渡槽结构更为复杂,还包含槽台,止水带等其它可能发生损伤的构件,其结构系统也非简单的串联模型,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Liu C Q, Fang D J, Zhao L J. Reflection on earthquake damage of buildings in 2015 Nepal earthquake and seismic measures for post-earthquake reconstruction [J]. Structures, 2021, 30: 647-658.
- [2] 沈怀至,金峰,张楚汉. 基于性能的重力坝-地基系统地震易损性分析[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 86-91.
- [3] 姚霄雯,蒋建群,刘国华. 基于拱冠位移的拱坝地震易损性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013(10): 1839-1845.
- [4] 王笃波,刘汉龙,于陶,等. 基于变形的土石坝地震易损性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 814-819.
- [5] Hohenbichler M, Rackwitz R. First-order concepts in system reliability [J]. Structural Safety, 1983, 1(3): 177-188.
- [6] Cornell C A. Bounds on the reliability of structural systems[J]. Journal of the Structural Division, 1967, 93(1): 171-200.
- [7] Hunter D. An upper bound for the probability of a union [J]. Journal of Applied Probability, 1976, 13(3): 597-603.
- [8] Nielson B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [9] 张士博. 渡槽槽墩的地震损伤分析与风险评价[D]. 保定:河北农业大学, 2009.
- [10] 张建伟,张帅,张翌娜,等. 基于Copula函数的渡槽结构地震动易损性分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2019, 39(6): 1277-1283, 1364.
- [11] Cheng G, Zhang Y, Huang J, et al. Vulnerability analysis of aqueduct structure based on boundary method [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 567(1): 012036.
- [12] Pan Y, Agrawal A K, Ghosn M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York state[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 689-699.
- [13] 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.
- [14] Nowak A S, Collins K R. Reliability of Structures[M]. Boston: McGraw-Hill Book Company, 2000.
- [15] 张社荣,冯奕,王高辉. 强震作用下大型排架式U型渡槽的损伤破坏分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 37-43.
- [16] 石岩,李军,秦洪果,等. 桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 134-154.
- [17] 苏小凤. 考虑水体质量双槽式渡槽结构地震反应研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2014.
- [18] 吴文朋. 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, 2016.
- [19] Shome N, Cornell C A. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[R]. Report No. RMS-35, RMS Program. Stanford University, Stanford, CA, 1999.
- [20] 方登甲,刘成清,杨鲸津. 高层建筑钢斜交网格筒结构地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(7): 1063-1069.
- [21] 刘成清,杨鲸津,赵必大. 基于增量动力分析(IDA)方法的斜交网格结构抗震性能分析[J]. 钢结构(中英文), 2019, 34(8): 37-40, 45.
- [22] 水工建筑物抗震设计标准:GB 51247—2018[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.
- [23] 李遇春,张龙. 渡槽抗震计算若干问题讨论与建议[J]. 水电能源科学, 2013, 31(11): 136-139.
- [24] 黄劲柏,蒋海英,潘崇仁. 克孜河预应力渡槽工程顺槽向抗震减震技术方案研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 124-129.
- [25] 徐建国,王露安,崔军豪,等. 地震作用下双槽渡槽半主动变阻尼控制分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(6): 7-14.
- [26] HAZUS-MH2. 1. Multi-hazard Loss Estimation Methodology: Earthquake Model HAZUS - MH2. 1 Technical Manual[M]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2012: 7-8.
- [27] 马颖,孙治国,王东升,等. 基于变形能力的钢筋混凝土槽墩约束箍筋用量评价[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 57-62.
- [28] 马颖,王东升,解河海,等. 基于Bayesian理论的弯剪破坏钢筋混凝土柱变形能力概率模型[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 216-226.
- [29] 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.
- [30] 曾武华,王逢朝,卓卫东. 基于概率的圆形RC桥墩性能指标量化分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 202-206.
- [31] Zhang J, Huo Y. Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method [J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1648-1660.
- [32] 李立峰,吴文朋,黄佳梅,等. 地震作用下中等跨径RC连续梁桥系统易损性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 152-160.