

# 肋拱式渡槽耐震时程法性能评估及易损性分析\*

曹克磊<sup>1</sup>, 汤长兴<sup>2</sup>, 冯智超<sup>2,3</sup>, 张建伟<sup>1</sup>, 赵瑜<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046)

(2. 华北水利水电大学土木与交通学院 郑州, 450045)

(3. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京, 100024)

**摘要** 为解决不同地震强度下渡槽结构的抗震性能评估问题,对肋拱式渡槽进行了研究。首先,将优化合成的 3 条适用于渡槽结构非线性动力时程分析的耐震时程加速度曲线作为地震动输入,研究强震作用下渡槽结构动力响应、损伤演化规律和失效模式等性能特征,明确其抗震薄弱部位及局部构件损伤等级,并构建了结构系统易损性曲线;其次,采用位移延性比和曲率延性比对肋拱式渡槽结构的局部构件进行损伤评估;最后,依据二阶界限法所绘制的易损性曲线对渡槽系统进行失效概率评估。研究结果表明:耐震时程为 20 s 时,肋柱和拱肋分别表现出轻微破坏状态、中等破坏状态和完全破坏状态,肋柱位置越靠近跨中越容易破坏,且拱肋相较于肋柱更容易破坏;肋柱的损伤发展规律大致相同,拱肋出现不同损伤破坏状态的时刻均早于肋柱;渡槽系统轻微破坏、中等破坏的概率均达到 99.9%,严重破坏的概率为 39.49%~44.33%,完全破坏的概率为 11.26%~12.56%,说明肋拱式渡槽的抗震性能良好。

**关键词** 肋拱式渡槽;耐震时程法;损伤破坏特征;损伤评价;易损性分析

**中图分类号** TV312

## 引言

渡槽<sup>[1]</sup>作为我国南水北调工程<sup>[2]</sup>中重要的输水建筑之一,在跨越河渠、溪谷、洼地或滩地等特殊地形时起到了关键性作用。渡槽结构在设计过程中需考虑风荷载、温度效应、水荷载以及地震荷载等作用带来的影响,其中地震荷载相对于其他荷载具有持时短、破坏力强等特点,强震作用通常会对渡槽结构造成损伤破坏<sup>[3]</sup>。因此,开展不同地震强度作用下渡槽结构的抗震性能分析具有重要的工程价值和现实意义。

目前,对于结构抗震性能方面的研究主要采用多条带分析<sup>[4-6]</sup>(multiple stripes analysis, 简称 MSA)、增量动力分析<sup>[7-9]</sup>(incremental dynamic analysis, 简称 IDA)以及耐震时程分析<sup>[10-12]</sup>(endurance time analysis, 简称 ETA)等方法。相比于 MSA 和 IDA,ETA 能通过对给定目标反应谱构造地震动强度随持时不断增大的人工加速度时程曲线来减少计算时长,在满足一定精度的条件下大大提高了计算效率,因此受到国内外学者的广泛青睐。文献

[13-14]分别对地下车站和桥梁进行了 ETA 和 IDA,通过对比 2 种方法的地震反应特征证明了 ETA 的高效性与有效性。Xu 等<sup>[15]</sup>利用 ETA 研究了某大坝加固前后高拱坝地震反应指标的相关性,讨论了悬臂加固对地震反应指标的影响。张社荣等<sup>[16]</sup>发现,ETA 比 IDA 能更加高效、准确地预测不同地震强度下沥青混凝土心墙沙砾石坝抗震性能的动力响应。Sun 等<sup>[17]</sup>为验证 ETA 在水工拱形隧道中的适用性,以 IDA 在不同地震烈度下的分析结果作为基准,开展了对应的 ETA 法非线性动力分析,并与 IDA 进行了比较,结果表明,ETA 能够用于该类隧道的快速非线性动力分析和抗震性能评估。Mohsenian 等<sup>[18]</sup>采用 ETA 对地震序列下隧道型混凝土结构抗震性能进行评估,其结果精确,并可显著降低计算成本。Estekanchi 等<sup>[19-20]</sup>验证了耐震时程法(endurance time method, 简称 ETM)在研究钢框架结构抗震分析中的高效性与准确性,结果表明:ETM 能在不同激励水平下以合理的精度估计全响应历史分析的结果,并预估各损伤指标的平均值。

\* 国家自然科学基金资助项目(52279133);河南省自然科学基金资助项目(252300421557);天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室开放基金资助项目(HESS-2230)

收稿日期:2023-11-17;修回日期:2024-01-04

Bai等<sup>[21]</sup>基于ETM研究了不同的混凝土-结构相互作用体系,得出较好的地震反应。Ashrafifar等<sup>[22]</sup>基于ETM对桥梁的地震易损性和恢复力进行评估,发现随着地震烈度和龄期的增加,桥梁的抗震回弹性减小,不确定性增大。综上可知,目前涉及耐震时程法抗震性能评估方面的研究成果多聚焦于地下结构、大坝、隧道、建筑结构及桥梁等,缺乏基于耐震时程法的渡槽抗震性能评估。

笔者以长岗坡渡槽为研究对象,建立了地基-渡槽-水体三者耦合的非线性有限元模型,开展基于耐震时程法的肋拱式渡槽结构抗震性能评估,分析肋拱式渡槽结构的动力响应特征及损伤演化过程,揭示其抗震薄弱部位、破坏模式及损伤失效机理,对肋拱式渡槽的局部构件进行损伤破坏状态评价,并通过构建易损性曲线实现对肋拱式渡槽结构抗震性能的系统分析与评估。

## 1 耐震时程法基本理论与合成方法

### 1.1 耐震时程法基本原理

耐震时程法是一种仅需一次非线性时程分析即可得到结构在不同地震强度下的地震响应的高效抗震性能评估方法,其关键是要获得地震强度随时间均匀增加的耐震时程曲线。为能够获取更真实的地震响应结果,合成耐震时程曲线需要具有真实地震动记录的基本特性,即合成的耐震时程曲线所对应的加速度反应谱能在目标时刻( $t_{\text{target}}$ )达到预设反应谱值。加速度反应谱值与持续时间 $t$ 的关联性可表示为

$$S_{aT}(T, t) = \frac{t}{t_{\text{target}}} S_{aC}(T) \quad (1)$$

其中: $S_{aT}(T, t)$ 为 $0 \sim t$ 时刻的加速度反应谱值; $t_{\text{target}}$ 为目标时间点; $S_{aC}(T)$ 为目标的反应谱值; $T$ 为结构的自振周期; $t$ 为任意时间点。

依据加速度反应谱构建出目标位移反应谱,即

$$S_{uT}(T, t) = \frac{t}{t_{\text{target}}} S_{aC}(T) \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

其中: $S_{uT}(T, t)$ 为 $0 \sim t$ 时刻的位移反应谱。

获得1条反应谱值和持续时间呈完全意义线性相关的耐震时程曲线,需要同时满足式(1)、式(2)的要求,但在每个时间点都满足难以实现,因而该问题可转换为无约束变量的优化问题<sup>[23]</sup>,即

$$\min F(\ddot{u}_g) = \int_0^{T_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \{ [S_a(T, t) - S_{aT}(T, t)]^2 + \alpha [S_u(T, t) - S_{uT}(T, t)]^2 \} dt dT \quad (3)$$

其中: $\ddot{u}_g$ 为需要合成的耐震时程曲线; $\alpha$ 为位移谱的权重系数; $S_{aT}(T, t)$ 、 $S_u(T, t)$ 分别为周期为 $T$ 时 $\ddot{u}_g$ 在任意 $t$ 时刻的加速度反应谱和位移反应谱。

基于单自由度系统中加速度反应谱和位移反应谱的相关性,为方便计算,本研究仅选取加速度反应谱作为优化的目标反应谱,取位移谱权重系数 $\alpha$ 为0。

### 1.2 易损性分析原理

结构的地震易损性分析是评价结构抗震性能的有效方法之一,其核心是分析不同地震强度作用下达到或超过某破坏状态的条件概率,并以概率的形式评估结构的抗震性能。地震易损性的表达方式有2种,即地震易损性指标矩阵和地震易损性曲线。其中,易损性曲线因其直观、高效而被广泛采纳。对于渡槽系统易损性分析,可通过界限估计法将所有构件的易损性函数联合起来,获得整体结构失效概率的上下界来近似估计系统失效概率。一阶界限法和二阶界限法是目前常用的2种界限估计法,在桥梁易损性研究中应用较为广泛。考虑到渡槽与桥梁结构的相似性,可借鉴桥梁系统的易损性分析成果来开展渡槽系统的易损性分析。

#### 1.2.1 一阶界限法

一阶界限法通过计算整体结构失效概率的最大值和最小值,得到系统失效概率的近似区间。对于各个构件之间为正相关的渡槽串联模型,若把各个构件视为完全相关的情况,界限估计区间的下界可表示为 $1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_{fi}]$ ;若把各个构件视为完全独立的情况,界限估计区间的上界可表示为 $\max_{i=1}^n [P_{fi}]$ 。

失效概率区间的计算式为

$$\max_{i=1}^n [P_{fi}] \leq P_{\text{sys}} \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_{fi}] \quad (4)$$

其中: $P_{\text{sys}}$ 为渡槽系统的失效概率; $P_{fi}$ 为第 $i$ 个构件的失效概率; $n$ 为构件数量。

#### 1.2.2 二阶界限法

一阶界限法将结构构件视为完全相关或完全不相关,仅考虑单个构件的失效概率,得到的界限估计区间较宽。文献[24-25]提出了考虑不同构件失效模式之间的失效概率的二阶界限法,即

$$P_{j1} + \sum_{i=2}^n \max \left( P_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} P_{fij} \right) \leq P_{sys} \leq \sum_{i=1}^n P_{fi} - \sum_{i=2}^n \max ( P_{fij} ) \quad (5)$$

求解  $P_{fi}$  的过程是二维正态积分,其计算量大,一般采用近似求解。高精度的近似计算式为

$$P_{fi} \approx \begin{cases} \max [ P_A, P_B ] + \min [ P_A, P_B ] \left( \frac{\pi - \arccos(\rho_{ij})}{\pi} \right) & (\rho_{ij} \geq 0) \\ \min [ P_A, P_B ] \left( \frac{\pi - \arccos(\rho_{ij})}{\pi} \right) & (\rho_{ij} < 0) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$P_A = \Phi(-\beta_i) \Phi \left( -\frac{\beta_j - \rho_{ij} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (7)$$

$$P_B = \Phi(-\beta_j) \Phi \left( -\frac{\beta_i - \rho_{ij} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (8)$$

$$P_{fi} = \Phi(-\beta_i) \quad (9)$$

$$\rho_{ij} = \text{cov}(X_i, X_j) / \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \quad (10)$$

其中:  $\beta_i, \beta_j$  为可靠度;  $\rho_{ij}$  为构件  $i$  和  $j$  的相关系数;  $X_i, X_j$  分别为构件  $i$  和  $j$  的地震需求;  $\text{cov}(X_i, X_j)$  为构件  $i$  和  $j$  的协方差;  $\sigma_{X_i}, \sigma_{X_j}$  分别为构件  $i$  和  $j$  的标准差。

### 1.3 耐震时程加速度曲线合成

本研究选取《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247—2018)中的设计反应谱作为目标反应谱。水工建筑物标准设计反应谱如图 1 所示。为了更好地优选出有效的耐震时程曲线,以选定的目标反应谱(场地特征周期  $T=0.35$  s, 阻尼比为 5%)为基础,通过 Matlab 编程优化合成 3 条适用于渡槽结构非线性动力时程分析的耐震时程加速度曲线。优化合成地震持时为 20 s,且只有上升段的 3 条人工耐震时程曲线。耐震时程加速度曲线及加速度反应谱如图 2 所示。可以看出,耐震时程曲线的峰值加速度均随地震持时的增加而不断增大,即地震强度随持时增长不断加强,且耐震时程曲线不同时间段(0~5 s、0~10 s、0~15 s 及 0~20 s)的加速度谱与目标谱吻合较好,达到了耐震时程曲线的优化要求。

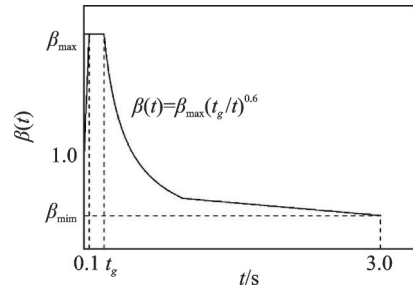
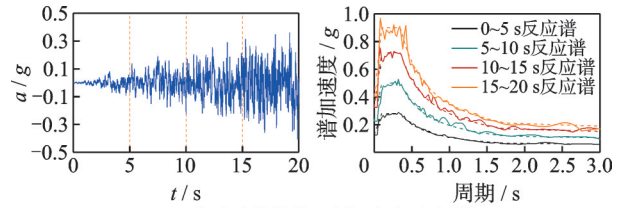
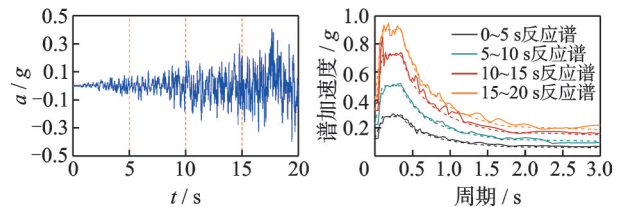


图 1 水工建筑物标准设计反应谱

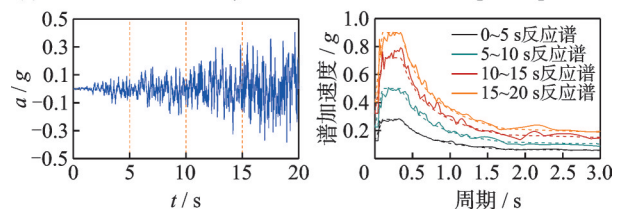
Fig.1 Response spectrum of the standard design of hydraulic building



(a) 耐震时程曲线1及加速度反应谱  
(a) Endurance time history curve 1 and acceleration response spectrum



(b) 耐震时程曲线2加速度反应谱  
(b) Endurance time history curve 2 and acceleration response spectrum



(c) 耐震时程曲线3加速度反应谱  
(c) Endurance time history curve 3 and acceleration response spectrum

图 2 耐震时程加速度曲线及加速度反应谱

Fig.2 Endurance time history acceleration curve and acceleration response spectrum

## 2 肋拱式渡槽三维有限元模型的建立

以广东省长岗坡肋拱式渡槽为研究对象,该渡槽全长为 5 200 m,槽身宽为 6 m,高为 2.2 m。其中,钢筋混凝土渡槽长为 3 450 m,单个拱跨度最大为 51 m,其槽底比降为 1/1 500,结构垂直高度最大为 37 m,设计输水流量为 25 m<sup>3</sup>/s。本研究选取长岗坡肋拱式渡槽中的某一典型跨段,建立“槽体-水体-肋拱支墩-地基”多位一体的三维精细化有限元仿真模型。模型中渡槽的支墩、连接梁、小腹拱、肋柱、拱肋及槽体等构件均采用三维实体单元(C3D8R),水体采用 MASS 单元,构件之间通过绑

定约束来连接。仿真模型建立过程中主要通过在中  
间跨渡槽两端各延伸 1/2 跨渡槽来实现相邻跨渡槽  
对中间跨渡槽的力学性能的影响。模型中地基深度  
( $z$  向)取结构高度的 2 倍,地基长度( $x$  向)取结构纵  
向长度的 1.5 倍,地基宽度( $y$  向)取结构横向宽度  
的 2 倍。为提高有限元计算的精度及收敛性,渡槽模  
型均采用规则的六面体单元划分网格,整个模型共  
有 33 642 个单元。材料参数见表 1。

表 1 材料参数

Tab.1 Material Parameters

部位	弹性模量/GPa	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
槽体	30.0	2 450	0.3
小拱腹	32.5	2 400	0.3
肋柱和肋拱梁	32.5	2 450	0.3
支墩	30.0	2 500	0.3
水体	—	1 000	—

本研究将优化合成的 3 条耐震时程曲线分别作  
为地震动输入荷载,通过三向地震动输入方式开展  
渡槽结构动力时程分析,研究地震作用下肋拱式渡  
槽结构损伤累积失效过程及失效模式。考虑到结构  
的对称性,仅对 1/2 跨中渡槽的各部件进行结果分  
析,并对不同构件进行编号。渡槽结构有限元模型  
如图 3 所示。所选区域每排均有 4 根肋柱,沿  $y$  轴正  
方向依次排布的为 1、2、3、4 号肋柱;所选区域有 4  
条拱肋,沿  $y$  轴正方向依次排布的为 1、2、3、4 号  
拱肋。

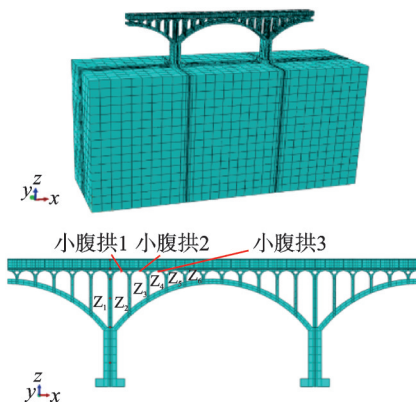
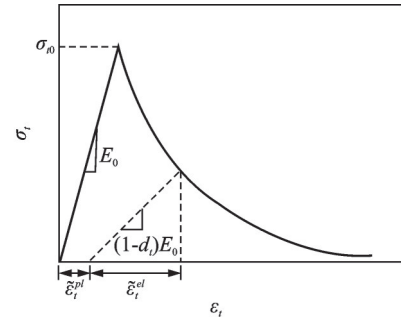


图 3 渡槽结构有限元模型

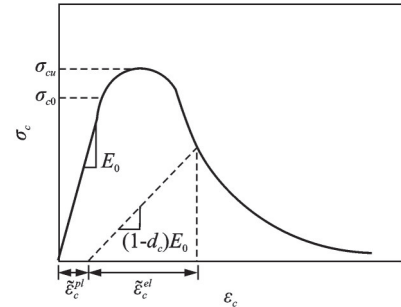
Fig.3 Finite element model of the aqueduct structure

本研究以混凝土损伤塑性模型<sup>[26]</sup>为理论基础,  
研究强震作用下肋拱式渡槽结构的损伤演化机理,  
该模型考虑了混凝土的拉压刚度恢复效应,并引入  
拉压损伤因子和刚度恢复因子。混凝土应力-应变  
关系曲线如图 4 所示。



(a) 单轴受拉应力-应变关系曲线

(a) Uniaxial tensile stress-strain relationship curves



(b) 单轴受压应力-应变关系曲线

(b) Uniaxial compression stress-strain relationship curve

图 4 混凝土应力-应变关系曲线

Fig.4 Concrete stress-strain relationship curve

### 3 基于耐震时程法的肋拱式渡槽结构 动力响应及损伤破坏模式

#### 3.1 基于耐震时程法的渡槽结构动力响应

肋柱  $Z_1$ 、 $Z_3$  和  $Z_5$  位移时程曲线如图 5 所示。渡  
槽拱脚曲率时程曲线如图 6 所示。由图可知,肋柱  
(顶部、底部)的相对位移最大值和拱脚曲率均随耐  
震持时的增加而不断增大,这与耐震时程法的基本  
理念一致。为了更好地表征渡槽结构动力响应随耐  
震持时递增而增大的特征,选取绝对值最大曲线作  
为耐震时程模拟结果,并将绝对值最大曲线的平均  
值用于耐震时程法的响应结果分析。

由图 5 可知,在相同的地震持时区间内肋柱的  
位移响应存在显著差异,位移响应随其高度的降低  
而呈逐渐递减趋势(肋柱位置越靠近跨中高度越  
低)。在 0~20 s 的耐震持时区间内,肋柱  $Z_1$ 、 $Z_3$  和  
 $Z_5$  的累积最大位移响应分别达到 0.092 0、0.019 2 和  
0.001 1 m,渡槽结构在短耐震持时内承受的地震荷  
载未超过其承载能力,结构处于线弹性状态;随着耐  
震持时的增加地震强度也不断提升,响应曲线趋于  
平缓,结构处于非线性过渡阶段;当结构响应值增长  
的规律不呈现出指数增长时,结构进入非线性阶  
段。肋柱  $Z_3$  的地震响应曲线在 0~12.5 s 区间内呈

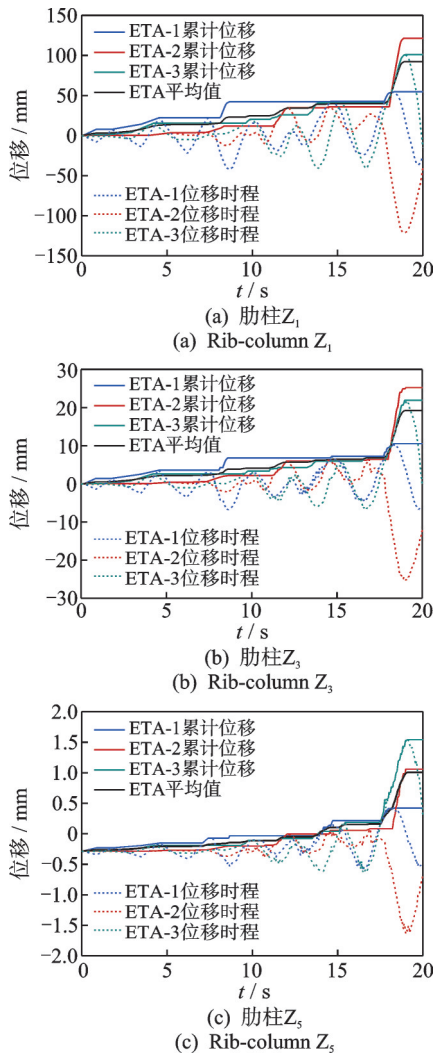


图5 肋柱 $Z_1$ 、 $Z_3$ 和 $Z_5$ 位移时程曲线

Fig.5 Displacement time curve of rib-column  $Z_1$ 、 $Z_3$  and  $Z_5$

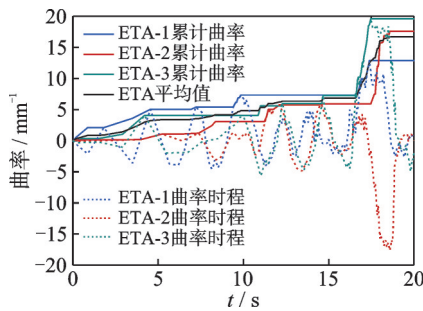


图6 渡槽拱脚曲率时程曲线

Fig.6 Aqueduct arch foot curvature time course curve

现出近似线性的平稳增长;12.5~15 s 区间内结构响应由近似线性增长逐渐向非线性增长过渡;当耐震持时达到15 s后,地震响应呈现明显的指数增长,且曲线相邻平台段之间的响应值突增,说明结构完全进入非线性阶段。

由图6可知,拱脚的曲率响应规律同肋柱的位移响应规律类似,在0~5.03 s 区间内处于线弹性阶

段,5.03~9.37 s 区间内表现为平稳过渡段,之后进入非线性阶段(具体为9.37~12.31 s 呈指数增长,12.31~16.53 s 曲率响应较为平缓,16.53 s 之后曲率响应值突增)。

### 3.2 基于耐震时程法的渡槽结构损伤破坏特征及破坏模式

以耐震时程曲线3作为地震激励荷载,对渡槽结构的损伤演化过程进行分析。为更好地明晰渡槽的损伤破坏模式及抗震薄弱部位,本研究将构件的受拉损伤因子达到0.799及以上时定义为严重损伤,在0.509~0.799之间定义为中度损伤,在0.291~0.509之间定义为轻微损伤,在0~0.291之间定义为极轻微损伤。

肋拱式渡槽结构整体损伤发展过程如图7所示。由图可知:当耐震持时为9.75 s时,槽体、肋柱 $Z_2$ ~ $Z_4$ 出现轻微损伤,肋柱 $Z_1$ 上端出现小范围严重损伤,拱脚以及跨中肋柱 $Z_5$ 、 $Z_6$ 出现严重损伤;当耐震持时为10.38 s时,槽体侧板及顶板出现严重损伤且损伤范围持续扩大;肋柱损伤范围延伸至拱肋,拱脚处出现严重损伤且损伤范围逐渐增大;当耐震持时为13.99 s时,支墩上部的槽体侧板出现由下至上

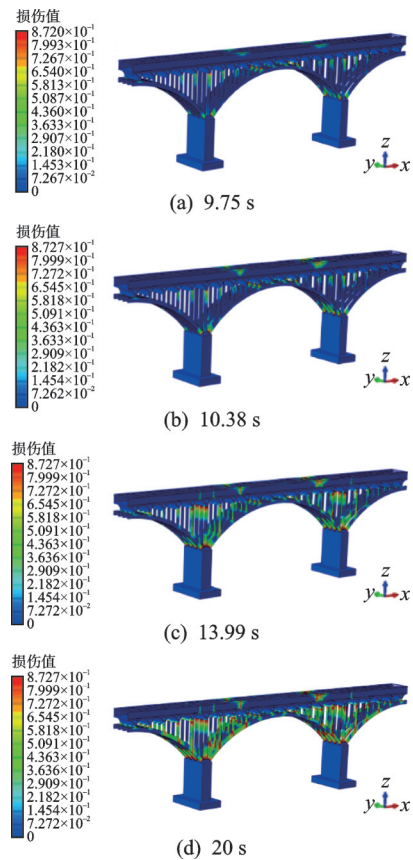


图7 肋拱式渡槽结构整体损伤发展过程

Fig.7 Overall damage development of the rib-arch aqueduct structure

延伸的线型损伤,其中槽体最先出现损伤并逐渐由上至下延伸至整个侧板,肋柱出现严重损伤的范围持续扩大,且主要集中在上下两端及肋柱与拱肋交界处,拱肋的损伤由拱脚向拱顶持续发展;当耐震持时为 20 s 时,槽体、肋柱及拱肋均出现较大范围的严重损伤。综上所述,肋拱式渡槽结构最先出现损伤和严重损伤的部位均集中在槽体、肋柱和拱脚,其中肋柱与拱肋拱脚处损伤最为严重,说明这些部位是肋拱式渡槽结构的抗震薄弱区域,在抗震设计及加固过程中应重点关注。

### 4 基于耐震时程法的渡槽结构构件损伤评估及系统易损性分析

#### 4.1 基于耐震时程法的渡槽结构构件损伤评估

为了更直观地表征不同耐震持时下渡槽结构的累积损伤程度,采用肋柱位移延性比和拱肋曲率延性比对肋拱式渡槽结构的局部构件进行损伤评估。肋柱位移延性比及拱肋曲率延性比与耐震时间的关系曲线分别如图 8、9 所示。由图可知,渡槽构件在不同耐震持时下的损伤指标和损伤状态存在显著差异,渡槽肋柱及拱肋在不同耐震持时下的损伤破坏状态主要表现为轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏,这也说明基于耐震时程法的渡槽结构构件损伤评估能够准确预测渡槽结构某一时刻的损伤状态。限于篇幅,文中仅给出了肋柱  $Z_1$ 、 $Z_3$  和  $Z_5$  的位移延性比图,具体评估结果如下。

1) 肋柱  $Z_1$  在 18.49 s 时刻达到轻微破坏状态,在 13.26 s 之前的位移延性比曲线呈近似线性增长,而 13.77~17.73 s 区间内位移延性比曲线出现较长的平台段,说明在该区间内  $Z_1$  由线性状态逐渐过渡到非线性状态,在 17.75~18.97 s 区间内  $Z_1$  的位移延性比从 0.52 突增至 1.2,表明其在此阶段的非线性特征更显著。肋柱  $Z_3$  在 13.27 s 和 18.00 s 时刻分别达到轻微破坏状态和中等破坏状态,位移延性比曲线在 13.77~17.73 s 区间内开始出现由平台段向小的阶梯状变化的趋势,即表现出由过渡段逐渐向非线性阶段发展的趋势。肋柱  $Z_5$  在 7.92、9.73、18.3 和 18.74 s 时刻分别达到轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏,位移延性比曲线在 13.77~17.73 s 区间内不再是平台段,表明肋柱  $Z_5$  的非线性特征明显。肋柱  $Z_1$ 、 $Z_3$  和  $Z_5$  越靠近跨中达到不同破坏状态的时刻越早,进入非线性阶段的时间越早,且 20 s 时

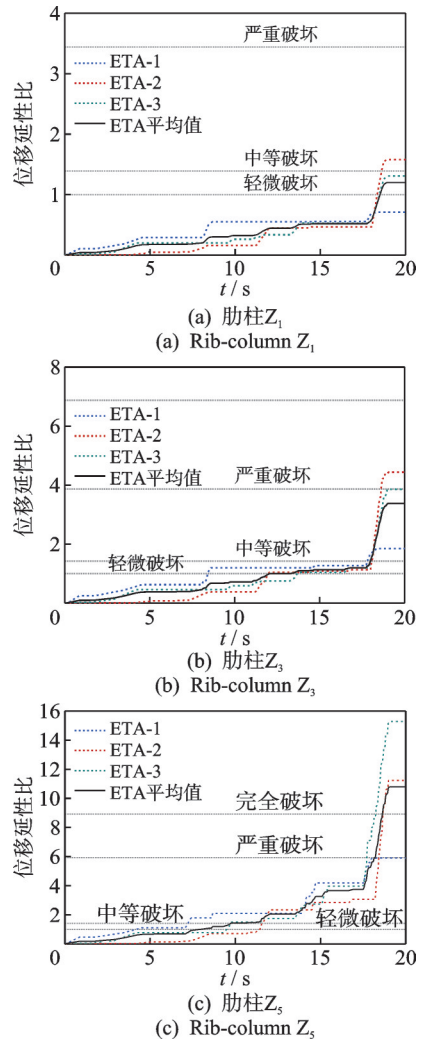


图 8 肋柱位移延性比与耐震时间的关系曲线

Fig.8 Relationship between displacement ductility ratio of rib-columns and seismic time-history duration

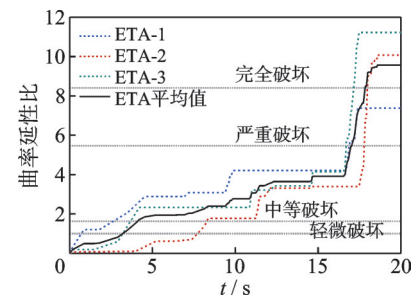


图 9 拱肋曲率延性比与耐震时间的关系曲线

Fig.9 Relationship between curvature ductility ratio of arch ribs and seismic time-history duration

的位移延性比越大,表现出肋柱越靠近跨中越容易破坏的规律。

2) 肋柱  $Z_5$  和拱肋在达到中等破坏后需经历较长的耐震时间才会由中等破坏发展到严重破坏,然而在由严重破坏进入到完全破坏状态所经历的耐震时间较短,说明渡槽构件在达到中等破坏后仍具有

较强的抗破坏能力,但构件一旦出现严重破坏后仍持续受荷载就会迅速发展为完全失效破坏。拱肋出现不同损伤破坏状态的时刻均早于肋柱,说明拱肋较肋柱更容易破坏。

#### 4.2 基于耐震时程法的渡槽结构系统易损性分析

为了更好地表征构件损伤破坏对渡槽结构体系的影响,本研究以失效概率最高的拱肋和肋柱 $Z_6$ 为分析对象,将其在不同损伤状态下的易损性曲线与采用一阶界限法和二阶界限法求得的系统易损性曲线进行对比分析。渡槽顺槽向易损性曲线如图10所示。由图可知:在相同损伤等级下构件的失效概率均未超过渡槽系统失效概率,说明渡槽系统比构件更容易发生破坏;渡槽系统易损性的下界曲线与拱肋易损性曲线相重合,这是因为系统易损性下界曲线的建立是基于所有构件都完全相关,只要系统内有任一构件发生破坏则其他构件均会迅速破坏,即下界曲线是由最容易发生破坏的构件来决定的。综上可知,采用构件易损性来评估渡槽系统的失效概率是不合理的,会理想化放大渡槽系统的抗震性能,不利于渡槽结构抗震安全评估。

由图10还可以看出,采用二阶界限法求得的易损性曲线的界限区间明显小于一阶易损性曲线。轻微破坏状态下,采用二阶界限法求得易损性曲线的最大界限差值为0.009 8,较一阶界限法(最大界限差值为0.062 9)的界限宽度减小84%。中等破坏状态下,采用二阶界限法求得易损性曲线的最大界限差值为0.018 82,较一阶界限法(最大界限差值为0.150 5)的界限宽度减小87.5%。严重破坏状态下,采用二阶界限法求得易损性曲线的最大界限差值为0.048 4,较一阶界限法(最大界限差值为0.281 4)的界限宽度减小82.8%。完全破坏状态下,采用二阶界限法求得易损性曲线的最大界限差值为0.012 98,较一阶界限法(最大界限差值为0.069 2)的界限宽度减小81.2%。因此,采用二阶界限法求得的易损性曲线对渡槽系统损伤破坏状态更敏感,评估结果更准确。

基于二阶界限法绘制的耐震时程法易损性曲线可知,渡槽系统发生轻微破坏、中等破坏的概率均达到99.9%,而发生严重破坏和完全破坏的失效概率范围分别为39.49%~44.33%和11.26%~12.56%,说明肋拱式渡槽具有较好的抗震性能,不易发生倒塌破坏。

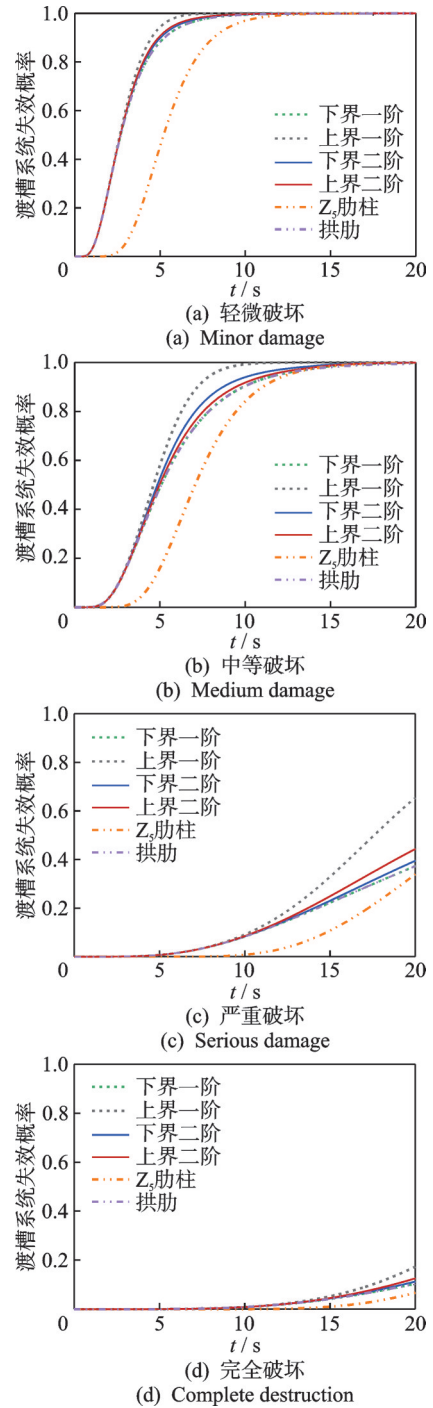


图10 渡槽顺槽向易损性曲线

Fig.10 Fragility curve of the aqueduct trough in the down channel direction

## 5 结论

1) 研究了渡槽结构损伤演化特征。拱肋的主要破坏模式如下:拱脚的背面最先出现损伤,随后向拱脚腹部发展,并由拱脚腹部向拱顶发展;与肋柱 $Z_2$ 交界的拱肋腹部易出现损伤,并向肋柱及拱脚发展;拱肋与肋柱 $Z_3$ ~ $Z_6$ 交界处易出现损伤,并向四周发展。

2) 量化评估了渡槽肋柱与拱肋的损伤破坏状态,研究表明,肋柱越矮其位移响应越小。渡槽肋柱、拱肋的地震响应关系主要表现为:响应曲线在短耐震持时内近似线性增长,构件处于线弹性状态;随耐震时间的持续增加响应曲线趋于平缓,构件处于非线性过渡阶段;当构件响应值呈指数性增长时,构件处于非线性阶段。耐震时间为20 s(即谱加速度为0.9g)时,肋柱 $Z_1$ 达到轻微破坏状态, $Z_3$ 达到中等破坏状态, $Z_5$ 和拱肋均达到完全破坏状态,但拱肋达到轻微破坏、中等破坏、严重破坏及完全破坏状态的时间均早于肋柱 $Z_5$ ,说明拱肋相较于肋柱更容易破坏。

3) 评估了渡槽结构的易损性。肋柱的位置越靠近跨中易损性越大,且拱肋的易损性大于肋柱的易损性;渡槽肋柱与拱肋在中等破坏状态和严重破坏状态下的易损性曲线区间较大,表明构件在达到中等破坏后,具有较高的安全储备,不易进一步破坏。不同破坏状态下采用二阶界限法绘制的易损性曲线上、下界宽度较一阶界限法减小80%以上,这主要是由于二阶界限法考虑了构件之间的相关性,能更精确地预估渡槽系统的易损性。采用二阶界限法预测出渡槽系统发生轻微破坏和中等破坏的失效概率均达到99.9%,严重破坏的失效概率达39.49%~44.33%,完全破坏的失效概率达11.26%~12.56%,说明肋拱式渡槽具有较好的抗震性能。

### 参 考 文 献

- [1] 张建伟,付杰,赵瑜,等. 水体-结构-地基耦联的泵站出水塔地震响应分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 128-135.  
ZHANG Jianwei, FU Jie, ZHAO Yu, et al. Seismic response analysis of outlet tower based on water-structure-foundation coupling system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11): 128-135. (in Chinese)
- [2] 刘孟凯,关惠,郭辉,等. 南水北调中线工程封冻期间闸门群开度控制器改进设计[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 90-97.  
LIU Mengkai, GUAN Hui, GUO Hui, et al. Improved design of opening controller of gate group during freezing period for the middle route of south-to-north water transfer project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17): 90-97. (in Chinese)
- [3] 顾培英,王岚岚,邓昌,等. 我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 1-8.  
GU Peiying, WANG Lanlan, DENG Chang, et al. A review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 1-8. (in Chinese)
- [4] 徐斌,张旭,庞锐,等. 基于变形和稳定的高心墙堆石坝抗震性能分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 31-38.  
XU Bin, ZHANG Xu, PANG Rui, et al. Seismic performance analysis of high core-wall rockfill dams based on deformation and stability[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10): 31-38. (in Chinese)
- [5] 靳聪聪,迟世春,聂章博. 基于地震变形易损性的高土石坝抗震安全分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 334-343.  
JIN Congcong, CHI Shichun, NIE Zhangbo. Seismic safety analysis of high earth rock dams based on seismic deformation vulnerability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 334-343. (in Chinese)
- [6] BAKER J W. Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis[J]. Earthquake Spectra, 2019, 31(1): 579-599.
- [7] PANG R, XU B, KONG X J, et al. Seismic fragility for high CFRDs based on deformation and damage index through incremental dynamic analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 104: 432-436.
- [8] ZHONG Z L, SHEN Y Y, ZHAO M, et al. Seismic fragility assessment of the Daikai subway station in layered soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132: 106044.
- [9] 孙奔博. 近断层强震作用下高沥青混凝土心墙坝动态响应分析及抗震性能评价[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [10] BASIM M C, ESTEKANCHI H E. Application of endurance time method in performance-based optimum design of structures[J]. Structural Safety, 2015, 56: 52-67.
- [11] TAVAZO H A, RANJBARAN A. Fragility analysis of 3D reinforced concrete frames based on endurance time method with derived standard deviation[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2017, 11(4): 1750011.
- [12] ALEGRE A, OLIVEIRA S, MENDES P, et al. Seismic safety assessment of arch dams using an ETA-based method with control of tensile and compressive

- damage[J]. *Water*, 2022, 14(23): 3835.
- [13] 甄立斌, 史跃波, 钟紫蓝, 等. 基于耐震时程分析法的高效地下结构地震易损性分析[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(4): 777-784.  
ZHEN Libin, SHI Yuebo, ZHONG Zilan, et al. Efficient seismic fragility of underground structures using endurance time analysis method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4): 777-784. (in Chinese)
- [14] HUANG J D, TAN P, ZHANG Y, et al. Endurance time analysis of seismic performances of long-span continuous rigid-frame bridges with corrugated steel webs[J]. *Structures*, 2022, 43: 990-1001.
- [15] XU Q, ZHANG T R, CHEN J Y, et al. The influence of reinforcement strengthening on seismic response and index correlation for high arch dams by endurance time analysis method[J]. *Structures*, 2021, 32: 355-379.
- [16] 张社荣, 杜敏, 王超, 等. 沥青混凝土心墙砂砾石坝耐震时程法性能评估[J]. *水力发电学报*, 2022, 41(10): 128-139.  
ZHANG Sherong, DU Min, WANG Chao, et al. Seismic performance assessment of asphalt concrete core sand-gravel dams based on endurance time analysis[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41(10): 128-139. (in Chinese)
- [17] SUN B, DENG M J, ZHANG S R, et al. Application of the endurance time methodology on seismic analysis and performance assessment of hydraulic arched tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 115: 104022.
- [18] MOHSENIAN V, GHARAEI-MOGHADDAM N, HAJIRASOULIHA I. Seismic performance assessment of tunnel form concrete structures under earthquake sequences using endurance time analysis[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 40: 102327.
- [19] ESTEKANCHI H E, RIAHI H T, VAFAI A. Application of endurance time method in seismic assessment of steel frames[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(9): 2535-2546.
- [20] ESTEKANCHI H E, ARJOMANDI K, VAFAI A. Estimating structural damage of steel moment frames by endurance time method[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(2): 145-155.
- [21] BAI J L, JIN S S, ZHAO J X, et al. Seismic performance evaluation of soil-foundation-reinforced concrete frame systems by endurance time method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 118: 47-51.
- [22] ASHRAFIFAR J, ESTEKANCHI H. Life-cycle seismic fragility and resilience assessment of aging bridges using the endurance time method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 164: 107524.
- [23] ESTEKANCHI H E, VALAMANESH V, VAFAI A. Application of endurance time method in linear seismic analysis[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(10): 2551-2562.
- [24] HUNTER D. An upper bound for the probability of a union[J]. *Journal of Applied Probability*, 1976, 13(3): 597-603.
- [25] DITLEVSEN O. Narrow reliability bounds for structural systems[J]. *Journal of Structural Mechanics*, 1979, 7(4): 453-472.
- [26] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.



**第一作者简介:**曹克磊,男,1990年5月生,博士、讲师。主要研究方向为水工结构抗震与抗爆防护。曾发表《波纹钢夹角对复合结构损毁效应的影响研究》(《振动、测试与诊断》2025年第45卷第3期)等论文。

E-mail: caokelei456@163.com