

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 地震作用下大型渡槽结构输水功能可靠性分析

张威<sup>1</sup>, 王博<sup>2a</sup>, 徐建国<sup>2a</sup>, 黄亮<sup>2b</sup>

(1. 河南财经政法大学 工程管理与房地产学院, 郑州 450046; 2. 郑州大学 a. 水利科学与工程学院;  
b. 土木工程学院, 郑州 450001)

**摘要:**大型钢筋混凝土渡槽作为生命线类水工结构,其输水功能可靠性至关重要。然而,一方面混凝土材料的力学性能表现出显著的随机性与非线性特征,另一方面渡槽结构在服役期内可能遭受不确定的灾害性地震作用,对渡槽结构的服役安全带来威胁。为此,采用混凝土随机损伤力学模型量化混凝土随机性与非线性耦联下渡槽结构的动力响应,并基于概率密度演化理论给出了渡槽结构输水功能可靠性分析方法。以某实际大型钢筋混凝土渡槽结构为例,详述了渡槽结构输水功能可靠性分析的原理和实现流程。研究表明,概率密度演化理论可以准确高效地对渡槽结构输水功能可靠性进行评估;不同设计水准下渡槽结构的输水功能可靠性指标存在一定的差异,在设计初期应予以合理考虑。

**关键词:**渡槽;输水功能;可靠性;随机损伤演化;概率密度演化理论;抗震分析

**中图分类号:**TV312;TV672 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0144-09

## Water-conveyance functional reliability analysis of large-scale aqueduct structures subjected to earthquake excitations

Zhang Wei<sup>1</sup>, Wang Bo<sup>2a</sup>, Xu Jianguo<sup>2a</sup>, Huang Liang<sup>2b</sup>

(1. School of Engineering Management and Real Estate, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, P. R. China; 2a. School of Water Science and Engineering; 2b. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

**Abstract:** Large scale reinforced concrete aqueduct, as a lifeline hydraulic structure, the reliability of its water transport function is very important. However, on one hand, the mechanical property of concrete is equipped with remarkable randomness and nonlinearity. On the other hand, the aqueduct structures may inevitably suffer from uncertain disastrous earthquake actions during service life, posing a great threat to their service safety. To these ends, the present paper proposed a quantification framework for the water-conveyance reliability assessment of the aqueduct structures by incorporating the stochastic damage mechanics model of concrete and the probability density evolution method. The principle and implementation procedures of the developed framework were illustrated in detail on an actual large-scale RC aqueduct structure. The results show that the probability density evolution theory can accurately and

**收稿日期:**2019-10-10

**基金项目:**国家自然科学基金(51579226);河南省科技攻关项目(142102310535)

**作者简介:**张威(1983-),男,博士,主要从事结构抗震分析与可靠性研究,E-mail:zw419064719@163.com。

**Received:**2019-10-10

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51579226); Henan Science and Technology Program (No. 142102310535)

**Author brief:** Zhang Wei (1983-), PhD, main research interests: seismic and reliability of structures, E-mail: zw419064719@163.com.

efficiently evaluate the reliability of aqueduct structure water conveyance function. The water-conveyance reliability varies with the change of pre-defined seismic fortifications, which should be reasonably accounted for in early design phases.

**Keywords:** aqueduct; hydraulic function; reliability; random damage evolution; probability density evolution method; analysis of antiseismic performance

渡槽结构具有排洪、导流和跨流域调水等多种功能,是重要的输水建筑物,渡槽结构的正常服役与抗洪排涝、农业灌溉和居民的日常饮水等休戚相关<sup>[1-2]</sup>。渡槽槽身之间的伸缩缝,一般采用橡胶类等强度较弱的止水材料连接。然而,不少渡槽结构处于地震高烈度区,在强烈地震作用下,渡槽槽身节段间极易发生错动,使止水拉裂<sup>[3]</sup>,引发槽内水体大面积泄漏,甚至全线输水中断。不仅如此,泄漏水体冲刷槽墩底部,迫使基底土壤处于饱和状态,也会引发渡槽结构二次破坏乃至局部或整体坍塌;在北方寒冷地域,还可能引起槽墩和桩基等的冻胀破坏<sup>[4]</sup>。因此,深入研究伸缩缝止水在地震作用下的动力响应及其对渡槽结构输水功能可靠性和服役安全的影响具有重要意义。

在渡槽结构设计中,一般直接依据设计规程<sup>[5]</sup>给定渡槽槽身节段之间伸缩缝的宽度及其变化限值,这种处理忽略了混凝土材料自身的变异性对结构抗震性能产生的影响。事实上,在施工工序、工艺和环境温度等综合因素的影响下,混凝土结构的力学性能存在较大差异。周浩<sup>[6]</sup>研究发现,混凝土弹性模量 10% 的初始变异性可能导致悬臂梁结构的静力挠度变异性高达 18%~55% 左右。考虑混凝土材料随机性因素的影响,混凝土结构在确定性强烈地震作用下会产生截然不同的倒塌破坏模式<sup>[7]</sup>,其在强烈地震动激励下发生动力响应的变异性也很可能会更加显著。另一方面,混凝土自身表现出高度复杂的非线性力学行为,经典的弹性、弹塑性力学均难以客观全面地反映混凝土的基本力学性能<sup>[8]</sup>。在渡槽结构抗震分析时充分考虑混凝土材料的随机性与非线性特征,对开展渡槽结构输水功能可靠性研究具有重要的意义。因此,笔者采用混凝土随机损伤力学模型<sup>[9]</sup>综合反映渡槽结构混凝土材料内秉的随机性与非线性力学行为。在渡槽结构抗震可靠性分析方面,较为广泛的是采用经典随机模拟方法<sup>[1, 10-13]</sup>,然而,计算效率问题限制了这一方法在渡

槽结构动力可靠性分析中的应用<sup>[14]</sup>。近年来,李杰等<sup>[15]</sup>提出的概率密度演化方法为解决复杂工程结构系统的可靠性分析提供了新的可行路径。与随机模拟方法相比,概率密度演化方法从根本上解决了可靠性分析中随机性与非线性耦合带来的困难,并已成功应用于上海中心大厦、上海浦东广电中心等超高层建筑结构的抗震可靠性评估<sup>[16]</sup>。笔者将援引概率密度演化理论进行渡槽结构的输水功能可靠性分析。

为了研究渡槽结构输水功能可靠性与渡槽结构止水布置之间的关系,以某大型渡槽结构为例,基于随机损伤力学建立反映混凝土力学性能随机性和非线性的耦联模型,并结合概率密度演化方法<sup>[17-18]</sup>,建立了大型渡槽结构输水功能可靠性分析方法,探究了渡槽结构止水横向错动位移对渡槽结构输水功能可靠性的影响,提出了设计建议。

## 1 渡槽结构模型

### 1.1 渡槽有限元分析模型

南水北调中线工程某大型钢筋混凝土渡槽结构<sup>[14]</sup>如图 1 所示,基于 OpenSEES 建立其有限元分析模型,如图 2 所示。在建模中,考虑箍筋约束对混凝土力学行为的影响,约束区混凝土强度和延性的提升可通过约束围压求得<sup>[19]</sup>,同时考虑钢筋材料的 Bauschinger 效应。由于墩系、槽身等构件是在不同工序施工下完成的,因此,应考虑各构件混凝土材料力学性质的随机性。渡槽结构力学性能参数(基本随机变量)包括:混凝土抗压强度  $f_{c,r1}$  (C50)、 $f_{c,r2}$  (C30)、 $f_{c,r3}$  (C30)和结构阻尼比  $\zeta$  共计 4 个随机变量,各变量取值及物理意义见表 1。

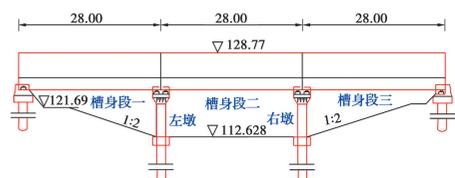


图 1 渡槽结构立面简图

Fig. 1 Schematic of the aqueduct structure

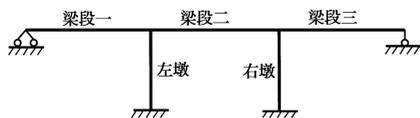


图 2 渡槽有限元模型

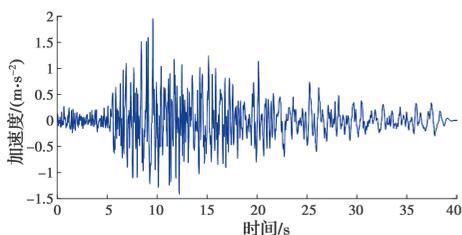
Fig. 2 Finite element model of the aqueduct

表 1 渡槽结构的随机变量

Table 1 Random variables of aqueduct structure

随机变量	均值	变异系数	分布类型
$f_{c,r1}$ (槽身)	50 MPa	0.15	正态分布
$f_{c,r2}$ (左墩系)	30 MPa	0.17	正态分布
$f_{c,r3}$ (右墩系)	30 MPa	0.17	正态分布
$\zeta$	0.05	0.20	对数正态

为了研究渡槽结构止水在抗震设防烈度 8 度地震作用下的响应规律,拟采用与该渡槽所在场地类型接近的二类场地下 Chi Chi 地震波,并将地震动的加速度幅值调至  $0.2g$ ,沿横槽向施加一致激励。地震动加速度调幅后的加速度时程和相应的反应谱分别如图 3 和图 4 所示。渡槽结构槽墩排架底部与地基固结,盆式橡胶支座设置于两墩顶。为了提高渡槽结构地震响应分析的精度和效率,采用开源 OpenSEES 平台<sup>[20-21]</sup>,基于纤维梁单元建立渡槽结构的有限元模型。槽内设计水深  $2.21\text{ m}$ ,采用附加质量法<sup>[22]</sup>将水体固结于槽身考虑水体对渡槽结构动力响应的影响。

图 3 Chi Chi 地震加速度时程曲线 ( $0.2g$ )Fig. 3 Chi Chi earthquake time history curve ( $0.2g$ )

## 1.2 渡槽结构伸缩缝及有限元建模

渡槽结构采用压板式止水模式<sup>[23-24]</sup>,设计伸缩缝的宽度为  $40\text{ mm}$ 。在承受  $0.06\text{ MPa}$  水压力以及张开  $40\text{ mm}$ 、横向错动  $40\sim 60\text{ mm}$ 、竖向位移  $40\text{ mm}$  三向位移联合作用下具有稳定可靠的止水效果,能满足渡槽结构正常运行要求。如图 5 所示,止水带厚  $7\text{ mm}$ ,U 形鼻子半圆环的内、外半径分别为  $8\text{ mm}$ 、 $15\text{ mm}$ ,鼻高  $50\text{ mm}$ ,使变形环节的展开长度不小于接缝三向位移的矢径,达到可吸收接缝位移而不会

在止水带中产生较大应力的目的。止水带表面还布置了勒筋和燕尾,以提高抗绕渗能力并达到固定效果。止水带与底部混凝土间采用 GB 胶板粘接。

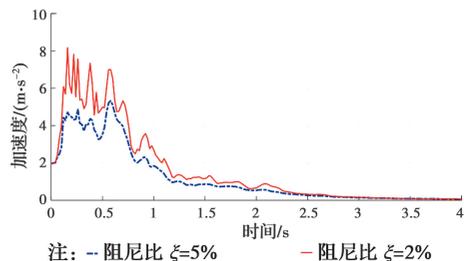
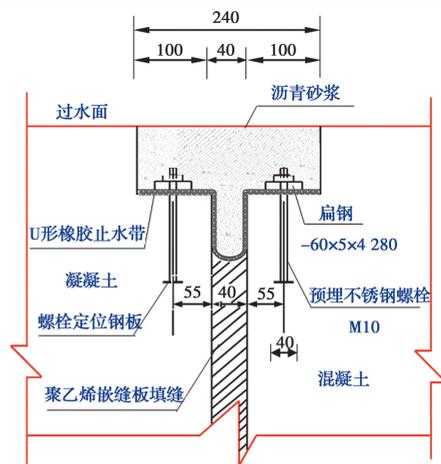
图 4 Chi Chi 地震动加速度反应谱 ( $0.2g$ )Fig. 4 Chi Chi earthquake acceleration response spectrum ( $0.2g$ )

图 5 橡胶止水示意图 (单位: mm)

Fig. 5 Sketch of the rubber water stop (unit: mm)

橡胶止水材料弹性模量为  $6.1\text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.49$ ,密度为  $1\times 10^3\text{ kg/m}^3$ 。在有限元分析模型中,采用零长单元来模拟橡胶止水,三向刚度均取值为  $6.1\text{ MPa}$ 。

## 1.3 混凝土随机损伤本构关系模型

已有研究表明,混凝土随机损伤本构模型可基本全面地反映混凝土材料的典型非线性和随机特性<sup>[9]</sup>。基于此,选用该模型模拟渡槽结构中混凝土,以期探究考虑混凝土材料随机性影响下渡槽结构输水功能可靠性规律。不失一般性,可将混凝土任一代表性体积元抽象为如图 6 所示的并联微弹簧系统<sup>[9]</sup>,且单根微弹簧服从理想弹脆性应力-应变关系,通过考察细观微弹簧的随机断裂,进而可得混凝土材料的随机损伤演化规律。

通过微弹簧的随机断裂可将损伤表示为

$$D = \frac{A_t}{A_0} = \frac{n}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(\epsilon - \Delta_i) \quad (1)$$

式中: $A_f$ 为断裂的面积; $A_0$ 为初始总面积; $n$ 表示在当前荷载作用下断裂的弹簧根数; $N$ 为弹簧总数; $\Delta_i$ 为第*i*根弹簧的断裂应变; $H(\cdot)$ 表示 Heaviside 函数; $\varepsilon$ 为应变变量。

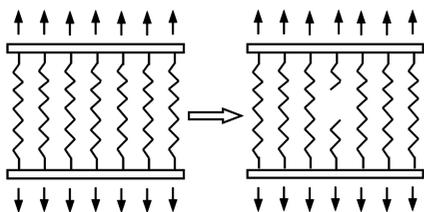


图6 细观随机断裂模型

Fig. 6 Microscale random fracture model

令弹簧总数趋于无穷,损伤变量可按随机积分形式表述为

$$D = \int_0^1 H[\varepsilon - \Delta(x)] dx \quad (2)$$

式中: $D$ 为混凝土损伤因子; $\Delta(x)$ 为一维断裂应变随机场; $x$ 为空间坐标。

基于连续介质损伤力学理论<sup>[9, 16]</sup>,混凝土材料的一维损伤本构关系可表达为

$$\sigma = (1 - D) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为混凝土应力; $E_0$ 为混凝土初始弹性模量; $\varepsilon^p$ 为混凝土塑性应变。

该模型可采用如图7所示的曲线表达在一维反复加、卸载条件下混凝土的应力-应变力学行为。

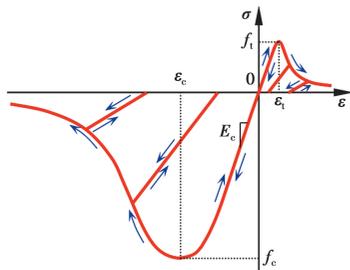


图7 混凝土一维损伤本构关系

Fig. 7 One-dimensional damage constitutive relationship of concrete

对于箍筋约束区混凝土,可通过修正损伤演化函数式(2)来反映约束作用对有效弹性应变发展和损伤演化的减缓效应,即约束混凝土的损伤演化函数表示为<sup>[16]</sup>

$$D = \int_0^1 H[\gamma\varepsilon - \Delta(x)] dx \quad (4)$$

式中: $\gamma$ 为减缓系数<sup>[9]</sup>。

为了兼顾大型渡槽结构随机结构地震响应分析的精度和效率,采用纤维梁单元模拟渡槽结构各部

件,进而建立其整体有限元分析模型。

## 2 渡槽结构输水功能可靠性分析方法

### 2.1 渡槽随机结构分析的概率密度演化方法

考虑结构自身特性和外部激励的随机性<sup>[18]</sup>,可将渡槽结构的运动方程广义表达为

$$\mathbf{M}(\Psi) \ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}(\Psi) \dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{f}(\Psi, \mathbf{U}(t)) = \mathbf{F}(\Psi, t) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{C}$ 分别为渡槽结构的质量矩阵和阻尼矩阵; $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{U}}(t)$ 和 $\mathbf{U}(t)$ 分别为渡槽结构响应的加速度、速度和位移矢量; $\mathbf{f}(\mathbf{U}, t)$ 和 $\mathbf{F}(t)$ 分别为渡槽结构的恢复力和外部荷载矢量; $\Psi = (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n)$ 为渡槽结构包含的所有随机参数矢量; $n$ 为基本随机变量的个数; $t$ 为时间。

设 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ 为渡槽结构中感兴趣的响应量,则依据概率守恒原理,渡槽结构随机动力响应的概率密度满足偏微分方程<sup>[17-18]</sup>

$$\frac{\partial p_{X\Psi}(x, \psi, t)}{\partial t} + \dot{\mathbf{X}}(\psi, t) \frac{\partial p_{X\Psi}(x, \psi, t)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

式中: $\dot{\mathbf{X}}(\psi, t)$ 为响应量的广义速度。

式(6)的初始条件为

$$p_{X\Psi}(x, \psi, t) \big|_{t=0} = \delta(x - x_0) p_{\Psi}(\psi) \quad (7)$$

式中: $x_0$ 为 $x$ 的初始值, $\delta(\cdot)$ 为 Dirac delta 函数。

式(6)即为广义概率密度演化方程,揭示了渡槽结构响应的概率信息随时间的演化规律。通过求解式(5)~式(7),可获得渡槽结构响应量的概率密度函数

$$p_X(x, t) = \int_{\Omega_{\Psi}} p_{X\Psi}(x, \psi, t) d\psi \quad (8)$$

进而得到给定阈值下 $X_{lim}$ 的渡槽结构时变可靠度

$$R(t) = \int_{X < X_{lim}} p_X(x, t) dx \quad (9)$$

### 2.2 与蒙特卡洛模拟方法的比较研究

为了验证概率密度演化方法在渡槽结构可靠性分析中的适用性,分别采用蒙特卡洛模拟和概率密度演化方法计算渡槽结构的随机动力响应,并进行对比研究。采用 GF 偏差选点方法<sup>[25]</sup>,优化选取 200 个离散代表性样本点集开展基于概率密度演化方法的随机结构分析,并进行 10 000 次蒙特卡洛模拟,分别获取结构响应的统计矩信息。

对于蒙特卡洛模拟,前  $k$  阶响应统计矩可按式(10)、式(11)计算。

$$\mathbb{E}[X(t)] = \frac{1}{N_{MCS}} \sum_{i=1}^{N_{MCS}} X_i(t) \quad (10)$$

$$\mathbb{E}[(X(t) - \mathbb{E}[X(t)])^k] = \frac{1}{N_{MCS}} \sum_{i=1}^{N_{MCS}} (X_i(t) - \mathbb{E}[X(t)])^k \quad (11)$$

其中: $\mathbb{E}$ 为期望算子; $N_{MCS}$ 为蒙特卡洛方法分析次数; $k=2,3,4,\dots$ 。对于概率密度演化方法,前 $k$ 阶响应的统计矩计算公式为

$$\mathbb{E}[X(t)] = \sum_{i=1}^{N_{PDEM}} P_i X_i(t) \quad (12)$$

$$\mathbb{E}[(X(t) - \mathbb{E}[X(t)])^k] = \sum_{i=1}^{N_{PDEM}} P_i (X_i(t) - \mathbb{E}[X(t)])^k \quad (13)$$

式中: $N_{PDEM}$ 为基于概率密度方法选点的代表点个数, $k=2,3,4,\dots$ 。

分析中取 $N_{MCS}=10\ 000$ ; $N_{PDEM}=200$ , $P_i$ 为第 $i$ 个代表点对应的赋得概率,可由Voronoi定义计算求得<sup>[25]</sup>。需要指出的是,在概率密度演化方法中,代表点通过数学理论上的论证与优化,使得仅采用少量“优质”的代表性点便能获得足够精确的随机响应,并极大地提高了计算的效率。这与传统的蒙特卡洛方法采用大量非优化的随机样本点思路不同。

依据止水相对位移的前4阶统计矩,对比图8、图9(图中MCS代表蒙特卡洛方法,PDEM代表概率密度演化方法,下同)可知,概率密度演化方法计算结果具有与蒙特卡洛方法相同的高精度特性。概率密度演化方法仅需要200次确定性分析,而传统的蒙特卡洛模拟却需要数千上万次的分析成本(如文中采用的10 000次)。可见,概率密度演化方法在精度满足要求的情况下,计算效率上具有显著的优势。

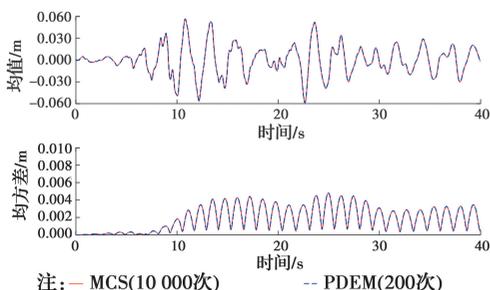


图8 第1阶、2阶矩对比图

Fig. 8 Comparison of the first and second order moments

为了深入分析渡槽结构动力响应的更多概率信息,图10给出了基于概率密度演化方法的截口概率

密度函数与基于蒙特卡洛方法的截口响应直方图对比,图11给出了不同时刻下的概率分布函数(图中3条实线为基于概率密度演化方法的计算结果和经验分布函数(图中三角、矩形和圆形标识为基于蒙特卡洛方法的计算结果))。

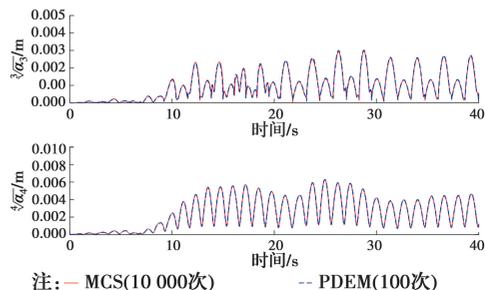


图9 第3阶、4阶矩对比图

Fig. 9 Comparison of the first and second order moments

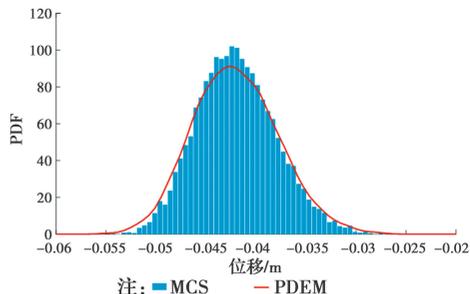


图10 截口概率密度函数与截口响应直方图对比

Fig. 10 Comparison of intercept probability density function and intercept response histogram

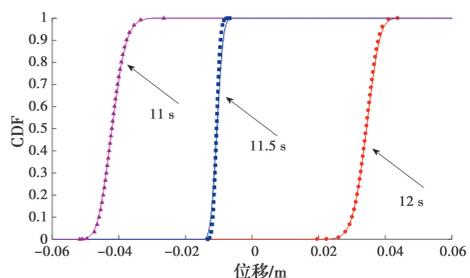


图11 概率分布函数和经验分布函数图对比

Fig. 11 Comparison of probability distribution function and empirical distribution function

图10和图11所示的概率密度函数与概率分布函数均为求解广义概率密度演化方程所得,而基于蒙特卡洛方法的经验分布函数则由式(14)计算所得。

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n I\{x_q \leq x\} \quad (14)$$

式中: $I\{\cdot\}$ 为示性函数。由于基于蒙特卡洛方法的计算结果受带宽影响,因此,图10中直方图不能

用于反映结构响应的密度演化信息;而基于概率密度演化方法,通过对概率密度演化方程的求解,可以获得结构响应的截面概率密度函数(如图 11 所示),这也就自然解决了传统的基于矩方法导致概率信息不封闭的问题。

### 2.3 渡槽结构输水功能可靠性分析流程

采用 GF 偏差选点方法<sup>[25]</sup>选取若干渡槽随机结构样本,并计算相应的赋得概率。以此为基础,采用某实际地震波对渡槽结构进行横槽向地震动激励,得到一组确定性地震响应分析结果。利用概率密度演化方法对渡槽结构随机地震响应数据进行处理,可获取渡槽结构止水处响应量的概率密度演化信息。通过与吸收边界条件相结合,可开展渡槽结构的输水功能可靠性分析。渡槽结构随机动力响应分析与可靠性求解流程如图 12 所示。

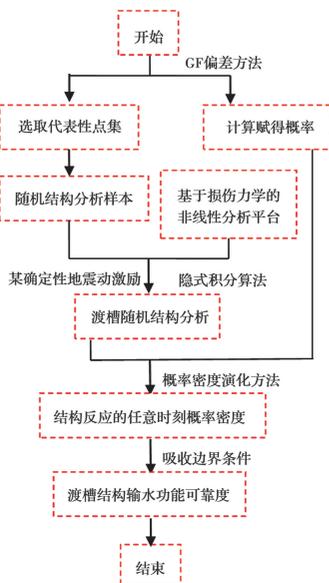


图 12 随机结构分析与可靠性评估流程

Fig. 12 Flow chart of stochastic structural analysis and reliability assessment

## 3 渡槽结构输水功能可靠性

在渡槽输水过程中,相邻槽身之间结构止水的横向错动是造成渡槽止水处漏水的主要因素。基于此,重点分析在地震作用下渡槽结构“相邻槽身之间止水横向错动( $D_r$ )”的响应规律,建立  $D_r$  与渡槽结构输水功能可靠性之间的关联机制。

全部随机结构样本  $D_r$  的时程曲线如图 13 所示。由图 13 可知,结构响应随着损伤演化和非线性程度的发展产生了一定的随机涨落。这一涨落效应

在渡槽结构处于初始弹性阶段或弱非线性状态(约前 10 s)表现得并不明显;然而,随着地震动激励引起的渡槽结构损伤累积,渡槽结构的非线性程度加剧,对随机性的扰动变得愈加敏感,并随着激励的变化产生显著的涨落效应(约 10~40 s 之间)。由图 13 还可发现,有少部分样本结构的位移响应超越了 40~60 mm 的临界值。显然,在渡槽结构的抗震设计中,忽略混凝土材料力学性质随机性的影响有可能导致结构抗震分析与设计的不合理,对渡槽结构的输水功能安全带来风险。

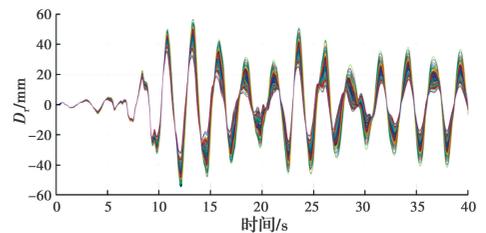


图 13 Chi Chi 地震作用下全部样本  $D_r$  的时程曲线

Fig. 13 Time history curves of all samples  $D_r$  under earthquake action

分别采用两种不同的有限差分算法,即 Lax-Wendroff(L-W)差分格式和总变差减小(Total Variation Diminishing, TVD)差分格式<sup>[17, 26]</sup>,求解  $D_r$  响应的概率密度演化方程,获得了渡槽结构时程响应的均值和均方差(StD)曲线,如图 14 所示。尽管 L-W 差分格式具有二阶精度,但在结构响应概率密度函数的不连续点处具有震荡现象并使得某些情况下的计算失真<sup>[27]</sup>,因此,该方法仅在验证 TVD 格式差分精度时使用。图 14 中两种算法结果吻合一致,说明在采用 TVD 格式差分算法求解概率密度演化方程中的差分时间步长取值合理。为了提高差分求解的精度,采用无振荡 TVD 格式的高阶精度差分算法求解概率密度演化方程。

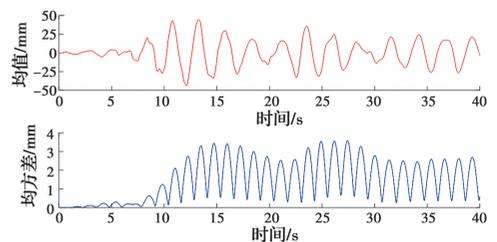


图 14  $D_r$  的均值和均方差曲线

Fig. 14 Mean and mean square deviation curves of  $D_r$

图 15 和图 16 分别给出了渡槽槽身节段一与槽身节段二之间相对位移响应的概率密度随时间演化

的曲面图和等值线图。由图 15 和图 16 可见,渡槽结构的位移响应随时间呈现出随机涨落效应。这一渡槽结构地震响应的丰富概率信息,可用于表达  $D_r$  随时间的波动规律,为开展渡槽结构输水功能可靠性分析奠定了基础。

图 17 为 3 个典型时刻的概率密度曲线。显然,该概率密度函数形状不规则,且分布的宽度和形状随时间发展均发生不断变化。这意味着渡槽结构在地震激励下的动力响应是复杂多变的随机损伤演化过程,混凝土材料力学性能的随机性导致了渡槽结构在地震作用下响应的随机涨落效应,并表现在  $D_r$  随时间的变化上。因此,在渡槽结构输水功能设计中需考虑混凝土材料随机性的影响,这对开展渡槽结构止水的抗震性能研究大有裨益。

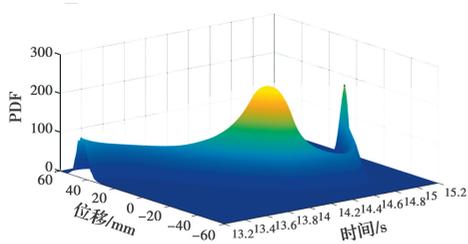


图 15 概率密度曲面

Fig. 15 Probability density surface

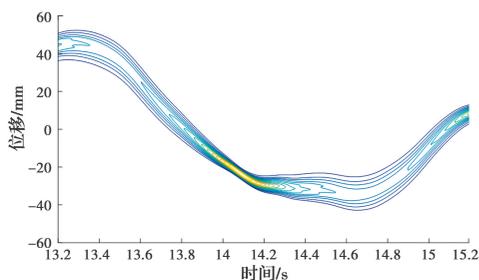


图 16 概率密度等值线

Fig. 16 Probability density contour

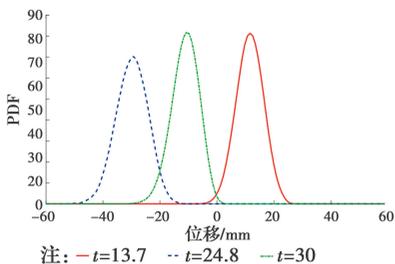


图 17 不同截口概率密度函数

Fig. 17 Probability density function of different intercept

获得渡槽结构止水动力响应的概率密度信息后,施加与失效阈值相应的吸收边界条件,可求得渡

槽结构输水功能的可靠性指标。在  $0.2g$  地震激励下,对渡槽槽身节段一与节段二之间相对位移阈值  $D_r$  分别取 40、45、50、55、60 mm,可计算其在不同阈值下的可靠度,如表 2 所示。5 个阈值下渡槽结构输水功能的可靠度曲线如图 18 所示,渡槽结构的输水功能可靠度随时间呈现阶梯式下降的规律。在 5 个不同失效阈值下,渡槽结构输水功能可靠度迥异,也从侧面说明了失效阈值对输水功能可靠性的影响较大。

表 2 渡槽结构输水功能可靠度

Table 2 The water transfer reliability of aqueduct structure

$D_r$ /mm	可靠度/%	$D_r$ /mm	可靠度/%
60	100.00	45	44.34
55	99.31	40	7.63
50	86.93		

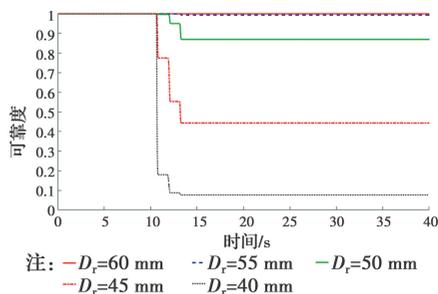


图 18 渡槽输水功能可靠度曲线

Fig. 18 The water transfer reliability curve of aqueduct

在渡槽结构止水的抗震设计时,一般取失效阈值为 50 mm 作为设计指标。上述研究表明,当设定渡槽结构止水失效阈值为 50 mm 时,在幅值为  $0.2g$  的 Chi Chi 地震波横槽向激励下,渡槽结构的输水功能可靠度为 86.93%。

## 4 结论

基于混凝土随机损伤力学模型和概率密度演化理论,提出了渡槽结构输水功能可靠性分析方法。主要研究结论如下:

1) 与经典随机结构分析方法相比,基于概率密度演化理论的可靠度分析更加高效且精准,该方法能够获得渡槽结构在地震动激励下的完备概率密度信息。

2) 渡槽结构止水相对位移限值是影响渡槽结构输水功能可靠性的重要因素,寻求提高止水相对位移失效阈值是提高输水功能有效途径。

3)考虑混凝土材料参数的随机性会使渡槽结构止水在同地震激励下的位移响应出现显著变异特性。因此,在渡槽结构抗震设计中应合理考虑混凝土力学性质随机性的影响。

### 参考文献:

- [1] 吴剑国, 金伟良, 张爱晖, 等. 基于马氏链样本模拟的渡槽结构系统可靠度分析[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 985-990.  
WU J G, JIN W L, ZHANG A H, et al. System reliability analysis of aqueduct structure based on Markov chain sample simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 985-990. (in Chinese)
- [2] 楼梦麟, 洪婷婷, 朱玉星. 预应力渡槽的竖向振动特性和地震反应[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 436-442, 450.  
LOU M L, HONG T T, ZHU Y X. Vertical dynamic characteristics and seismic response of prestressed aqueduct [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 436-442, 450. (in Chinese)
- [3] 夏富洲. 渡槽水毁及其它破坏的修复[J]. 人民长江, 2000, 31(3): 17-19, 50.  
XIA F Z. Repairing of aqueduct damage by water and other failures [J]. Yangtze River, 2000, 31(3): 17-19, 50. (in Chinese)
- [4] 刘杰胜, 吴少鹏, 米轶轩. 大型渡槽伸缩缝止水材料与结构研究[J]. 水科学与工程, 2009(2): 9-11.  
LIU J S, WU S P, MI Y X. The research of sealing materials and sealing structure of expansion joint in the large scale aqueduct [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2009(2): 9-11. (in Chinese)
- [5] 董安建, 李现社. 水工设计手册 [M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.  
DONG A J, LI X S. Hydraulic design manual [M]. 2nd edition. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese)
- [6] 周浩. 混凝土结构随机倒塌分析理论与整体可靠性研究[D]. 上海: 同济大学, 2018.  
ZHOU H. Theoretical study on stochastic collapse analysis and anti-seismic global reliability of concrete structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2018. (in Chinese)
- [7] ZHOU H, LI J, REN X D. Multiscale stochastic structural analysis toward reliability assessment for large complex reinforced concrete structures [J]. International Journal for Multiscale Computational Engineering, 2016, 14(3): 303-321.
- [8] 李杰, 冯德成, 任晓丹, 等. 混凝土随机损伤本构关系工程参数标定与应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1099-1107.  
LI J, FENG D C, REN X D, et al. Calibration and application of concrete stochastic damage model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(8): 1099-1107. (in Chinese)
- [9] 李杰, 吴建营, 陈建兵. 混凝土随机损伤力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
LI J, WU J Y, CHEN J B. Stochastic damage mechanics of concrete structures [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [10] 解伟, 陈爱玖, 李树山, 等. 涵洞式渡槽可靠度分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(4): 90-92.  
XIE W, CHEN A J, LI S S, et al. Reliability analysis of culvert aqueduct [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(4): 90-92. (in Chinese)
- [11] 徐建国, 王博, 陈淮, 等. 大型渡槽结构非线性地震响应可靠性分析[J]. 人民长江, 2009, 40(21): 87-90.  
XU J G, WANG B, CHEN H, et al. Seismic reliability assessment of nonlinear large-scale aqueduct [J]. Yangtze River, 2009, 40(21): 87-90. (in Chinese)
- [12] 安旭文, 朱曦. 罕遇地震下渡槽槽架结构弹塑性侧移的可靠度分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(5): 604-607.  
AN X W, ZHU T. Reliability analysis of elastoplastic displacements of aqueduct structure under infrequent earthquake [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(5): 604-607. (in Chinese)
- [13] 刘章军, 方兴. 大型渡槽结构随机地震反应与抗震可靠度分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(9): 77-81.  
LIU Z J, FANG X. Stochastic earthquake response and seismic reliability analysis of large-scale aqueduct structures [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(9): 77-81. (in Chinese)
- [14] 张威, 王博, 徐建国, 等. 随机地震作用下大型渡槽结构可靠性求解方法[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 113-120.  
ZHANG W, WANG B, XU J G, et al. Solution to reliability of large aqueduct structures subjected to random earthquake ground motions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10): 113-120. (in Chinese)

- [15] 李杰, 陈建兵. 概率密度演化理论的若干研究进展 [J]. 应用数学和力学, 2017, 38(1): 32-43.  
LI J, CHEN J B. Some new advances in the probability density evolution method [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(1): 32-43. (in Chinese)
- [16] 周浩, 李杰. 基于不同本构模型的混凝土结构地震倒塌对比分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(9): 8-18.  
ZHOU H, LI J. Comparison study on seismic collapse of concrete structures with different constitutive models [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 8-18. (in Chinese)
- [17] CHEN J B, LI J. Dynamic response and reliability analysis of non-linear stochastic structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(1): 33-44.
- [18] LI J, CHEN J B. Stochastic dynamics of structures [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [19] 宋鹏彦, 陈建兵, 万增勇, 等. 混凝土框架结构随机地震反应概率密度演化分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 117-123.  
SONG P Y, CHEN J B, WAN Z Y, et al. Probability density evolution analysis of stochastic seismic response of concrete frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 117-123. (in Chinese)
- [20] KABA S, MAHIN S A. Refined modeling of reinforced concrete columns for seismic analysis [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1984.
- [21] MAHASUVERACHAI M. Inelastic analysis of piping and tubular structures [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1982.
- [22] 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.  
SU X F. Research on seismic response of double-body aqueduct structure considering water mass [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [23] 冯光伟, 程德虎, 李明新, 等. 大断面 U 形预制渡槽止水构件试验与设计优化[J]. 人民长江, 2013, 44(16): 39-42, 50.  
FENG G W, CHENG D H, LI M X, et al. Test and design optimization for water-seal member of large precast U-type pre-stressed aqueduct [J]. Yangtze River, 2013, 44(16): 39-42, 50. (in Chinese)
- [24] 曾金鸿. 东深供水改造工程渡槽伸缩缝新型止水结构设计施工[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(3): 35-37.  
ZENG J H. Design and construction of a new sealing structure for aqueduct expansion joints in Dong-Shen water supply reconstruction project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(3): 35-37. (in Chinese)
- [25] CHEN J B, YANG J Y, LI J. A GF-discrepancy for point selection in stochastic seismic response analysis of structures with uncertain parameters [J]. Structural Safety, 2016, 59: 20-31.
- [26] LI J, CHEN J B. Probability density evolution method for dynamic response analysis of structures with uncertain parameters [J]. Computational Mechanics, 2004, 34(5): 400-409.
- [27] 陈建兵, 李杰. 随机结构复合随机振动分析的概率密度演化方法[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 90-95.  
CHEN J B, LI J. The probability density evolution method for compound random vibration analysis of stochastic structures [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 90-95. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)