

矩形渡槽槽身结构时变可靠度分析

杨霖¹,李宗利^{1,2},尚洪彬¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:为分析服役期内渡槽安全度变化,将时间离散法引入渡槽结构时变可靠度计算中。基于工程实例,建立矩形渡槽槽身纵向和横向两个方向3个部位的承载力和抗裂极限状态方程以计算时变可靠度,用蒙特卡罗法的计算结果验证其精度,并与动态可靠度法计算结果进行比较。结果表明:渡槽结构纵向承载力可靠度随服役年限下降,尤其在服役后期降幅远大于横向承载力,纵向承载力极限状态为渡槽寿命的控制状态;纵向和横向抗裂可靠度较承载力可靠度下降均较慢;由于初始值不高,底板抗裂可靠度在服役后期略低于目标值;时间离散法计算结果整体误差相对较小,尤其对服役后期的结构安全性评价更精确,其计算精度比动态可靠度法更高,因此,应用时间离散法进行渡槽可靠度计算和安全性评价更为合理。

关键词:矩形渡槽;安全性评价;时变可靠度;时间离散法;动态可靠度法

中图分类号:TV672.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0105-06

Time-varying reliability analysis of a rectangular aqueduct body structure//YANG Lin¹, LI Zongli^{1,2}, SHANG Hongbin¹(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. KeyLaboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to analyze the safety change of an aqueduct in service, the time-discretization method was introduced into the time-varying reliability calculation of the aqueduct structure. Based on a project case, the bearing capacity and crack resistance limit state equation of the rectangular adueduct body were established for three parts in the transverse and longitudinal direction, and the time-varying reliability was calculated. Its accuracy was verified by comparing the calculation results of Monte Carlo method, and compared with the calculation results of dynamic reliability method. The results show that the reliability of the longitudinal bearing capacity of the aqueduct structure decreases with the service life, especially in the later stage of service the decline is much greater than the transverse bearing capacity, indicating that the limit state of the longitudinal bearing capacity is the control state of the aqueduct life. Both the longitudinal and transverse crack resistance reliability decline is slower compared with the bearing capacity reliability. The crack resistance reliability of the bottom plate is slightly lower than the target value in the later stage of service due to the low initial value. The overall calculation error of the time-discretization method is relatively small, especially for the safety evaluation of the structure in the later stage of service. Compared with the dynamic reliability method, the calculation result of the time-discretization method is more accurate. It is more reasonable to use the time-discretization method for the reliability calculation and safety evaluation for aqueducts.

Key words: rectangular aqueduct; safety evaluation; time-varying reliability; time-discretization method; dynamic reliability method

可靠度分析法是渡槽结构安全性评价的一种重要方法,也是制定现行结构设计规范的理论基础。开展薄壁渡槽槽身结构时变可靠度分析是科学、精确地维护和加固渡槽的基础。渡槽所承受的水荷

载、温度等荷载效应随时间变化,材料的性能也因耐久性劣化而变化,任一时段的可靠度变化必定会影响下一时段的可靠度,因此可靠度指标具有明显时变特性。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405101)
作者简介:杨霖(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构可靠度研究。E-mail:yanglin611@nwfufu.edu.cn
通信作者:李宗利(1967—),男,教授,博士,主要从事水工结构与岩土工程稳定分析理论研究。E-mail:bene@nwsuaf.edu.cn

目前,渡槽结构可靠度研究多为静态可靠度或体系可靠度,以及抗震可靠度的研究^[1-2]。而运用时变可靠度理论对渡槽结构进行安全性评价的研究不多,且主要以动态可靠度法为主。动态可靠度法是考虑参数随时间变化的性质,在静态可靠度法的可靠度指标中引入时间相关函数,得到考虑参数随时间变化的简易时变可靠度计算方法。该方法理论简单、计算方便,得到了广泛使用。常佳等^[3]采用动态可靠度法和蒙特卡罗法等对渡槽结构多失效模式进行了系统可靠性评估。祝彦知等^[4]基于动态可靠度法,将模糊可靠度理论引入渡槽时变可靠度计算中,丰富了该方法的内容。但该方法存在未考虑时段内失效概率的相互影响、计算结果精度低等缺点。秦权等^[5]从理论层面对动态可靠度法的问题进行了分析。时变可靠度理论还包含众多的分支方法^[6-8],各有优劣,但大多存在理论复杂、计算困难等问题。

时间离散法的原理是将结构服役期离散成数个时间序列,将抗力及荷载变化的随机过程用离散时段内的随机变量来表示,并假定各时段相互独立,以此来求解服役期内的时变可靠度。贡金鑫等^[9]提出了一种基于上述原理的离散时间时变可靠度方法,并直接给出了时变可靠度高维积分的计算方法,得到了一个简易的时变可靠度极限状态方程,该方法便于工程应用、计算简单且与现行规范相协调。王新刚等^[10]基于贡金鑫等^[9]提出的方法,建立循环次数与时间的关系,引入机械工程中的疲劳剩余强度公式,为疲劳荷载下的结构时变可靠度计算提供基础。Jiang等^[11-12]引入类似静态可靠度计算中的验算点法、非正态变量当量正态化和非独立变量正交化的思想,极大地丰富了该方法的内容。严宇飞等^[13]将前述方法得到的极限状态方程与蒙特卡罗重要抽样法相结合,得到一种高精度、高效率的时变可靠度计算方法。

综上所述,目前的渡槽结构时变可靠度计算方法由于精度低、理论复杂导致应用困难。时间离散法因其精度较高、理论完备的特点,已得到广泛证明,但很少被用于渡槽结构的时变可靠度计算的相关研究。本文将时间离散法引入渡槽结构时变可靠度计算中,建立渡槽易损伤的纵向和横向两个方向3个部位的承载力与抗裂极限状态方程,并结合实例与蒙特卡罗法和动态可靠度法进行对比,以期证明本文所用方法对渡槽结构安全性评价和寿命预测有较高的精度。

1 时变可靠度计算方法

根据结构设计原理,实际工程结构设计中各类

参数往往具有随机性,且大部分抗力和荷载具有随机过程性^[14],因此可靠度也具备不可忽视的随机过程性。

1.1 时间离散法

时间离散法是一种应用较广的时变可靠度精确计算方法,其原理是将抗力和荷载随机过程在服役期 T 内,离散成 m 段的等距时段 $\tau=T/m$ 。时段内抗力取为时段中值 R_i ,可变荷载取时段内最大荷载值 Q_i ,并将各时段间关系视为串联系统。基于时间离散法的结构时变可靠度功能函数推导过程可查阅文献^[9]。

1.2 槽身极限状态方程

本文仅考虑基本荷载组合作用,包括结构自重、校核水重和校核水压力。近似将该空间薄壁结构简化为纵向和横向两个方向的平面问题,采用结构力学法得到截面内力分布,再根据内力分布图确定典型断面进行承载力和抗裂分析^[15]。槽身整体结构的刚度和内力特性对裂缝敏感度很高,一旦开裂还会影响渡槽正常使用,因此一般严格按照DL/T 5057—2009《水工混凝土结构设计规范》的二级裂缝控制等级设计,不允许出现开裂。根据渡槽易破坏点^[16]的内力分布特点可知,纵向跨中、横向侧墙底部和底板端部3处属于控制断面,故建立这3个断面的承载力和抗裂极限状态方程。

需要说明的是,后续所建立的极限状态方程中, $Z_i(i=1,2,\dots,6)$ 为基于动态可靠度法和蒙特卡罗法计算的时变可靠度极限状态功能函数;而 $g_i(i=1,2,\dots,6)$ 则为基于时间离散法计算的极限状态功能函数。

1.2.1 纵向计算

a. 纵向抗弯:纵向简化为简支梁,承受均布荷载 q_x ,为可变荷载 q_Q 与永久荷载 q_C 之和,其最大弯矩位于跨中截面,钢筋混凝土渡槽槽身纵向承载力计算截面可以简化为T形截面计算,抗弯承载力极限状态方程的功能函数为

$$Z_1 = \varphi_s f_y A_s \left(h_0 - \frac{\varphi_s f_y A_s}{2 \varphi_c f_c b} \right) - \frac{1}{8} q_x L^2 \quad (1)$$

式中: f_y, f_c 分别为钢筋抗拉强度标准值与混凝土抗压强度标准值; φ_c, φ_s 分别为混凝土抗压和钢筋抗拉强度衰减函数; A_s 为纵向钢筋有效截面积; b 为等效受压区翼缘顶宽; h_0 为等效混凝土有效截面高度; L 为跨度。基于时间离散法的槽身纵向抗弯承载力极限状态方程为

$$g_1 = -\frac{1}{\alpha_T} \ln \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp \left[-\alpha_T \varphi_s f_y A_s \left(h_0 - \frac{f_y A_s}{2 \varphi_c f_c b} \right) \right] \right\} - \frac{1}{8} (q_C + q_Q) L^2 \quad (2)$$

式中: α_T 为符合极值 I 型分布的时段最大荷载概率分布函数参数。

b. 纵向抗裂:纵向的正常使用极限状态验算主要考虑槽身纵向受弯,导致混凝土开裂。按二级裂缝控制,抗裂极限状态方程按照工字形截面受弯构件进行分析,计算式为

$$Z_2 = \gamma_m \varphi f_t \frac{I_0}{h - y_0} - \frac{1}{8} q_z L^2 \quad (3)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度标准值; φ 为混凝土抗拉强度衰减函数; γ_m 为结构纵向截面抵抗矩塑性系数,此处按照受弯构件、工字形截面考虑,乘以与截面高度有关的修正系数,为 $\gamma_m = 1.267$; I_0 为换算截面对重心轴的惯性矩; y_0 为换算截面重心轴至受压边缘的距离; h 为截面高度。基于时间离散法的渡槽纵向抗裂时变可靠度极限状态方程为

$$g_2 = -\frac{1}{\alpha_T} \ln \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp \left[-\alpha_T \left(\gamma_m \varphi f_t \frac{I_0}{h - y_0} \right) \right] \right\} - \frac{1}{8} (q_c + q_q) L^2 \quad (4)$$

1.2.2 横向计算

横向计算取沿槽长方向 1.0 m 槽身为研究对象,并按平面问题进行分析。拉杆截面尺寸小,刚度相对较小,杆端作铰链考虑,故为一次超静定结构。但相对而言,拉杆对整体安全性影响不大,故只考虑其对上述两者的作用力而不考虑其破坏。根据力法求解拉杆赘余力,单位长度下其数值等于拉杆拉力:

$$X_1 = \frac{1}{h_1} \left[\frac{1}{6} \gamma h_1^3 - \frac{\gamma h_1^3 \mu_{23}}{45} - \frac{(\gamma h_1^3 + \gamma_h \delta) l^2 \mu_{21}}{3} \right] \quad (5)$$

其中

$$\mu_{21} = \frac{3J_{21}}{h_1} \left/ \left(\frac{3J_{21}}{h_1} + \frac{J_{23}}{l} \right) \right.$$

$$\mu_{23} = \frac{3J_{23}}{l} \left/ \left(\frac{3J_{21}}{h_1} + \frac{J_{23}}{l} \right) \right.$$

式中: h_1 为渡槽水深; δ 为底板厚度; l 为渡槽两边侧墙中心线的距离; γ 为水的容重; γ_h 为混凝土容重; J_{21} 为侧墙截面惯性矩, $J_{21} = u^3/12$; u 为侧墙厚度; J_{23} 为底板截面惯性矩, $J_{23} = \delta^3/12$ 。

1.2.2.1 侧墙

侧墙承载力计算的控制断面为侧墙底部,本算例渡槽侧墙计算侧墙底部轴力相对于弯矩较小,可知为大偏心受拉构件,其承载力极限状态方程为

$$Z_3 = \varphi_s f_y A_s (h_0 - a') - N_c e' \quad (6)$$

其中

$$e' = \frac{h}{2} - a' + \frac{M_c}{N_c}$$

$$N_c = \frac{q_z (3h_1 y^2 - 2y^3)}{2h_1^3} - \gamma_h u y$$

$$M_c = X_1 y - \frac{\gamma h^3}{6}$$

式中: a' 为受压钢筋合力点至受压区边缘的距离; e' 为轴力作用点至受压钢筋合力点的距离; y 为拉杆中心线至侧墙底部距离; M_c 、 N_c 为拉杆中心线到侧墙计算截面处的弯矩与轴力。

基于时间离散法的侧墙承载力极限状态方程为

$$g_3 = -\frac{1}{\alpha_T} \ln \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp \left[-\alpha_T \varphi_s f_y A_s (h_0 - a') \right] \right\} - \frac{q_z (3h_1 y^2 - 2y^3)}{2h_1^3} + \gamma_h t y \quad (7)$$

抗裂极限状态仍以侧墙底部为控制断面,且以偏心受拉构件进行抗裂验算,因此侧墙底部抗裂极限状态方程为

$$Z_4 = \frac{\gamma_m \varphi f_t A_0 W_0}{e_0 A_0 + \gamma_{mc} W_0} - N_c \quad (8)$$

式中: γ_{mc} 为侧墙的截面抵抗矩塑性系数,按照受弯矩形截面构件取值并乘以修正系数,为 1.705; W_0 为换算截面对受拉边缘的弹性抵抗矩; A_0 为换算截面积; e_0 为轴向压力对截面重心的偏心距, $e_0 = M_c / N_c$ 。

基于时间离散法的槽身侧墙抗裂极限状态方程为

$$g_4 = -\frac{1}{\alpha_T} \ln \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp \left[-\alpha_T \left(\frac{\gamma_m \varphi f_t A_0 W_0}{e_0 A_0 + \gamma_{mc} W_0} \right) \right] \right\} - N_c \quad (9)$$

1.2.2.2 底板

底板端部在组合荷载作用下会产生最大的负弯矩及相应轴力,属于大偏心受拉构件,其承载力极限状态方程为

$$Z_5 = A_s \varphi_s f_y (h_0 - a') - \left[-\frac{\gamma h^3}{6} + 20\gamma h_1^2 + (y - 40) X_1 \right] \quad (10)$$

基于时间离散法的槽身底板承载力极限状态方程为

$$g_5 = -\frac{1}{\alpha_T} \ln \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp \left[-\alpha_T \varphi_s f_y A_s (h_0 - a') \right] \right\} - \left[-\frac{\gamma h^3}{6} + 20\gamma h_1^2 + (y - 40) X_1 \right] \quad (11)$$

对于底板抗裂极限状态,按照大偏心受拉构件建立极限状态方程为

$$Z_6 = \frac{\gamma_m \varphi f_t A_0 W_0}{e_0 A_0 + \gamma_{md} W_0} - \frac{\gamma h^2}{2} + X_1 \quad (12)$$

式中 γ_{md} 为偏心受拉构件截面抵抗矩塑性系数,取为 1.705。

基于时间离散法的底板抗裂极限状态方程为

$$g_6 = -\frac{1}{\alpha_T} \ln \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \exp \left[-\alpha_T \left(\frac{\gamma_m \varphi_i f_i A_0 W_0}{e_0 A_0 + \gamma_{md} W_0} \right) \right] \right\} - \frac{\gamma h^2}{2} + X_1 \quad (13)$$

2 工程实例分析

一简支梁式钢筋混凝土渡槽,单跨长度10.10 m,槽身为无拉杆矩形截面,设计流量为4.38 m³/s,校核流量为5.26 m³/s,总高度和宽度分别为2.55 m和3.60 m,槽身内高为2.05 m,宽为3.0 m,底板及侧墙的厚度均为0.2 m。槽身结构材料整体采用C30混凝土,纵向受力钢筋为HRB335,横向受力钢筋为HPB300,矩形渡槽槽身横截面尺寸如图1所示。

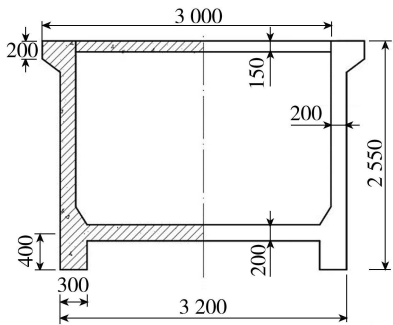


图1 矩形渡槽槽身横截面尺寸(单位:mm)

2.1 统计参数分析

2.1.1 抗力统计参数分析

工程结构的抗力不确定性包含3个方面:几何尺寸的不确定性、计算模式的不确定性和材料性能的不确定性。本文仅考虑材料性能的不确定性,认为其他两个方面为定值。

材料性能的不确定性在一定程度上反映了结构抗力的不确定性,材料的性能是随时间变化的随机过程,常常将抗力随机过程表示为初始抗力随机变量 R_0 与时间 t 的函数形式。常见的抗力衰减函数有指数型、对数型和幂函数型等。本算例所处地区的衰减函数适用幂函数,同时考虑钢筋起锈时间 t_c 影响,其形式^[9]为

$$\begin{cases} \varphi_c(t) = \varphi_i(t) = 1 - 8.0 \times 10^{-7} t^3 \\ \varphi_y(t) = \begin{cases} 1 & t < t_c \\ 1 - 2.2 \times 10^{-6} (t - t_c)^3 & t \geq t_c \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

抗力参数,本文选取对结构安全性影响较大的混凝土抗拉和抗压强度标准值及钢筋抗拉和抗压强度标准值抗力随机变量,相关参数统计值^[13,17-18]见表1,除水深变量为极值I型分布外,其他变量均为正态分布。

2.1.2 荷载效应统计参数分析

本算例荷载组合为:结构自重+校核水重+校核

统计参数	抗拉和抗压强度标准值/MPa		C30 混凝土标准值/MPa		水深/mm
	二级钢筋	一级钢筋	抗压强度	抗拉强度	
均值	368.5	330.0	28.341	2.9746	1760
标准差	25.795	23.1	3.607	0.6842	88

水压力(静水压力),后两者即为水荷载。考虑到尺寸和容重的变异性很小,故槽身结构自重的变异性也很小,在此可做定值处理。按照GB 50199—2013《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》,水荷载可作为可变荷载考虑。横向水压力是静水压力,直接作用在内壁上。显然水荷载直接与水位有关,因此本文将水位取为随机变量,认为水位近似符合极值I型分布,其余相关参数的统计值见表1。

2.2 槽身时变可靠度结果与分析

本渡槽设计使用年限为50 a,为5级水工次要建筑物,安全级别为Ⅲ级,按照GB 50199—2013《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》,延性结构承载力目标可靠度为2.7,正常使用极限状态目标可靠度为1.0。运用Matlab分别编写基于时间离散法、动态可靠度法和蒙特卡罗法的计算程序,按照上述的槽身结构极限状态方程及统计参数分布进行计算,并取锈蚀开始时间为20 a,求得槽身纵向和横向两个方向3个部位的承载力和抗裂时变可靠度。

为证明本文采用的时间离散法的合理性,以侧墙承载力为例,进一步将时间离散法、动态可靠度法和蒙特卡罗法的计算结果进行比较,侧墙承载力时变可靠度如图2所示,需要说明的是,图中可靠度为负值,意味着失效概率大于0.5。由图2可见,与蒙特卡罗法相比,时间离散法与动态可靠度法的结果变化趋势基本一致,但是两者误差相差较大。前者误差由服役5 a时的3%逐步上升到15 a时的最大值3.7%,再逐步下降到41 a附近时出现重合;后者误差则从5 a时的3%逐步上升到40 a时的最大值11%,而后减小到50 a时的10%。可见,在服役早期两者误差相近,两者误差差距随着服役年限的增加趋于扩大,两者最大误差之比达到近3倍。整体上看,时间离散法结果均小于动态可靠度法,服役后

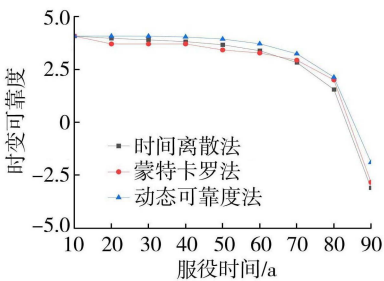


图2 不同方法计算的侧墙承载力时变可靠度

期甚至出现低于蒙特卡罗法的结果,对结构后期的安全性评价更加保守。以上分析说明,时间离散法比动态可靠度法的精度更高,比蒙特卡罗法的计算效率更高,是对渡槽结构进行时变可靠度分析的一种适宜方法。

时间离散法计算的矩形渡槽承载力和抗裂时变可靠度结果见图 3。由图 3 可知,在承载力可靠度方面,纵向承载力虽在服役早期较高,服役 5 a 时为 5.45,远高于目标可靠度,但在服役 30 a 后显著下降,最大 5 a 降幅达到了 0.94,最终下降到 50 a 时的 2.40,低于目标可靠度。而横向两个部位的承载力可靠度 5 a 降幅则一直保持在 0.05 以下。可见由于受到钢筋和混凝土强度双重抗力衰减因素影响,纵向承载力极限状态为渡槽寿命的控制状态。在抗裂可靠度方面,纵向、侧墙和底板的抗裂可靠度降幅均较承载力可靠度要小,最大 5 a 降幅分别约为 0.05、0.14 和 0.14。且底板抗裂极限状态的早期可靠度为 1.73,与目标可靠度差距并不大,致使在服役 50 a 时达到了 0.98,略低于目标可靠度。因此,建议在服役后期加强对渡槽纵向承载力和底板抗裂能力的维护和补强工作。

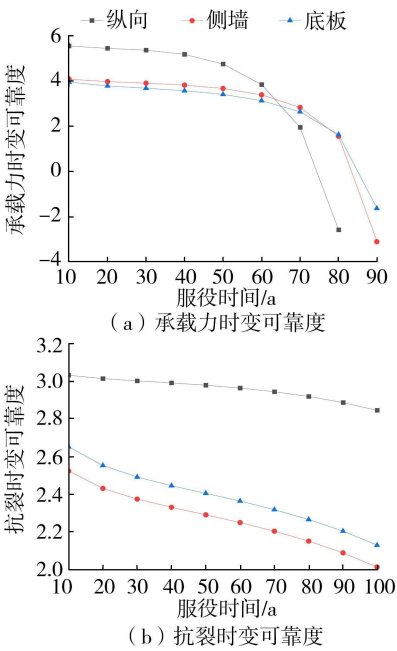


图 3 时间离散法计算的矩形渡槽不同部位承载力
和抗裂时变可靠度

3 结 语

本文从工程实例出发,建立了矩形渡槽结构纵向和横向两个方向 3 个部位的承载力和抗裂极限状态方程,引入时间离散法对渡槽结构时变可靠度进行计算分析,并基于 3 种方法编写了 Matlab 程序,还结合蒙特卡罗法对动态可靠度法的计算结果进行了对比验证。结果显示,矩形渡槽结构纵向承载力

极限状态的可靠度下降速度远大于横向承载力极限状态,由于受到钢筋和混凝土强度双重抗力衰减因素影响,纵向承载力极限状态为矩形渡槽寿命的控制状态,建议在服役后期加强对结构的养护。动态可靠度法最大误差比时间离散法大近 3 倍,且在服役后期,时间离散法对于结构安全性评价的结果更加保守,突出了时间离散法对渡槽可靠度计算和安全性评价的适用性,同时证实动态可靠度法存在精度低的缺陷,建议慎重选择使用。

参考文献:

[1] 罗日洪,黄锦林,李兆恒. 基于改进 FCE 的渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):162-169. (LUO Rihong, HUANG Jinlin, LI Zhaozheng. Comprehensive safety evaluation of aqueduct based on improved FCE method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(2):162-169. (in Chinese))

[2] 雷杰,金伟良,张爱晖. 下承式桁架拱渡槽的结构可靠度分析[J]. 水利水电科技进展,2005,25(1):37-40. (LEI Jie, JIN Weiliang, ZHANG Aihui. Reliability analysis of structure of open-spandrel truss-arch type prestressed aqueduct[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2005,25(1):37-40. (in Chinese))

[3] 常佳,祝彦知,纠永志,等. 在役钢筋混凝土渡槽多失效模式时变可靠度分析[J]. 人民黄河,2022,44(1):139-143. (CHANG Jia, ZHU Yanzhi, JIU Yongzhi, et al. Time-varying reliability analysis of multi-failure modes of reinforced concrete aqueducts in service[J]. Yellow River,2022,44(1):139-143. (in Chinese))

[4] 祝彦知,尚峰,纠永志. 在役钢筋混凝土渡槽时变模糊可靠度分析[J]. 水利水电技术,2019,50(2):128-132. (ZHU Yanzhi, SHANG Feng, JIU Yongzhi. Time dependent fuzzy reliability analysis of in-service reinforced concrete aqueduct[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(2):128-132. (in Chinese))

[5] 秦权,贺瑞,杨小刚. 在时变结构可靠度领域中有必要澄清一个错误概念[J]. 工程力学,2009,26(8):201-204. (QIN Quan, HE Rui, YANG Xiaogang. Clarification of a wrong concept in the field of time-varying structural reliability[J]. Engineering Mechanics,2009,26(8):201-204. (in Chinese))

[6] LI Jie, GAO Xiangling. Probability density evolution method and its application in life-cycle civil engineering[J]. Structure and Infrastructure Engineering,2014,10(7):921-927.

[7] 陈建兵,李杰. 基于概率密度演化方法的随机结构可靠度分析[J]. 计算力学学报,2004,21(3):285-290. (CHEN Jianbing, LI Jie. Reliability analysis of stochastic structures based on probability density evolution method

- [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(3):285-290. (in Chinese))
- [8] ANDRIEU-RENAUD C, SUDRET B, LEMAIRE M. The PHI2 method; a way to compute time-variant reliability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 84(1):75-86.
- [9] 贡金鑫, 赵国藩. 考虑抗力随时间变化的结构可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(5):43-51. (GONG Jinxin, ZHAO Guofan. Reliability analysis for deteriorating structures [J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(5):43-51. (in Chinese))
- [10] 王新刚, 张义民, 王宝艳. 机械零部件的动态可靠性分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(11):1510-1514. (WANG Xingang, ZHANG Yimin, WANG Baoyan. Dynamic reliability analysis of mechanical components [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(11):1510-1514. (in Chinese))
- [11] JIANG C, HUANG X P, WEI X P, et al. A time-variant reliability analysis method for structural systems based on stochastic process discretization [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2017, 13(2):173-193.
- [12] 黄新萍, 姜潮, 韩旭. 针对非线性极限状态方程的时变可靠度分析[J]. 力学学报, 2014, 46(2):264-272. (HUANG Xinping, JIANG Chao, HAN Xu. A time-variant reliability analysis method for non-linear limit-state functions [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(2):264-272. (in Chinese))
- [13] 严宇飞, 李方义. 基于蒙特卡洛重要抽样法的结构时变可靠性分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(6):104-112. (YAN Yufei, LI Fangyi. Time-variant reliability analysis of structures based on important sampling Monte Carlo method [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2021, 35(6):104-112. (in Chinese))
- [14] 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. 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))
- [15] 金伟良. 工程结构可靠度:理论、方法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2022.
- [16] 赵文华, 陈德亮, 颜其照, 等. 渡槽[M]. 2版. 北京:水利电力出版社, 1989.
- [17] 董玉茹. 预制带肋复合墙板抗弯性能可靠度分析[D]. 济南:山东大学, 2021.
- [18] 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 Jianguo, JIN Weiliang, ZHANG Aihui, 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))
- (收稿日期:2022-06-24 编辑:俞云利)
- +++++
- (上接第72页)
- [18] 宋娃丽, 尤建, 狄方殿, 等. 钢板桩围堰结构有限元模型优化[J]. 科技通报, 2017, 33(12):208-211. (SONG Wali, YOU Jian, DI Fangdian, et al. Optimization of finite element model in the steel sheet pile cofferdam [J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(12):208-211. (in Chinese))
- [19] 李国栋, 哈岸英, 钟小彦, 等. 基于 Fluent 的渗流场数值模拟分析[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(3):317-320. (LI Guodong, HA Anying, ZHONG Xiaoyan, et al. Numerical simulation of seepage field based on Fluent [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3):317-320. (in Chinese))
- [20] 夏颂军. 深厚软弱地质条件下钢板桩围堰设计[J]. 世界桥梁, 2016, 44(6):17-22. (XIA Songjun. Design of steel sheet pile cofferdam under deep and weak geological condition [J]. World Bridges, 2016, 44(6):17-22.)
- [21] 刘建东, 杨志木, 刘中锋. 钢板桩围堰施工关键技术[J]. 中国高新科技, 2020(11):83-84. (LIU Jiandong, YANG Zhimu, LIU Zhongfeng. Key technologies of steel sheet pile cofferdam construction [J]. China High-Tech, 2020(11):83-84. (in Chinese))
- [22] 梁瑛, 曹文豪, 季宪军, 等. 成都粘土泥浆流变模型探讨[J]. 山地学报, 2021, 39(2):218-225. (LIANG Ying, CAO Wenhao, JI Xianjun, et al. Discussion on the rheological model of Chengdu clay slurry [J]. Mountain Research, 2021, 39(2):218-225. (in Chinese))
- [23] JEONG S W, LEROUEIL S, LOCAT J. Applicability of power law for describing the rheology of soils of different origins and characteristics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(9):1011-1023.
- [24] QIANG Yan, WEI Liejiang, LUO Xiaomei, et al. Heat transfer and flow structures of laminar confined slot impingement jet with power-law non-Newtonian fluid [J]. Entropy, 2018, 20(10):800.
- [25] LU Liang, LONG Shirang, ZHU Kangwu. A numerical research on vortex street flow oscillation in the double flapper nozzle servo valve [J]. Processes, 2019, 7(10):721.
- [26] LU Hao, ZHANG Lizhi, CAI Rongrong. Numerical investigation on thermophoretic deposition of particles in turbulent duct flow with conjugate heat transfer: analysis of influencing factors [J]. Building Simulation, 2020, 13(2):387-399.
- (收稿日期:2022-07-28 编辑:俞云利)