

基于悬臂梁法的重力坝地震反应分析

成鑫¹, 岑威钧¹, 刘清利², 马纪²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021)

摘要:以某抽水蓄能电站下水库重力坝为例,根据振型分解反应谱法基本理论,采用悬臂梁法开展大坝自振特性和地震反应计算,得到自振频率、振型、加速度、动应力和抗滑稳定性等动力反应,并与有限元法计算结果进行了比较。结果表明:悬臂梁法和有限元法计算所得大坝基频相对误差为4.24%;在正常蓄水位和设计地震工况下,两种方法计算所得坝体顺河向加速度沿坝高分布规律基本一致,加速度极值相对误差为2.13%;两种方法得到的大坝静动叠加后垂直正应力分布规律和极值相近;悬臂梁法计算的沿建基面的抗滑稳定安全系数大于有限元法计算结果;悬臂梁法动力反应计算简单,成果合理可靠,对快速开展重力坝抗震安全性分析具有实用价值。

关键词:重力坝;振型分解反应谱法;悬臂梁法;有限元法;动力反应

中图分类号:TV642.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)03-0105-06

Seismic response analysis of gravity dam based on cantilever beam method//CHENG Xin¹, CEN Weijun¹, LIU Qingli², MA Ji²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: Taking the gravity dam of the lower reservoir of a pumped storage power station as an example, according to the basic theory of the mode decomposition response spectrum method, the natural vibration characteristics and seismic response of the dam were calculated using the cantilever beam method. The dynamic responses such as natural vibration frequency, modal shape, acceleration, dynamic stress and anti-sliding stability were obtained, and the results were compared with those calculated using the finite element method. The results show that the relative error between the dam fundamental frequency values calculated by the cantilever beam method and the finite element method is 4.24%. Under the normal water level and design earthquake conditions, the distribution law of the dam acceleration along the river calculated by both methods is basically the same, and the relative error of the acceleration extreme value is 2.13%. The distribution patterns and extreme values of the vertical normal stress of dam after static and dynamic superposition obtained from both methods are similar. The safety factor of anti-sliding stability along the foundation surface calculated by the cantilever beam method is greater than that calculated by the finite element method. The dynamic response calculation of the cantilever beam method is simple, and the results are reasonable and reliable, which is of practical value for the rapid seismic safety analysis of gravity dams.

Key words: gravity dam; mode decomposition response spectrum method; cantilever beam method; finite element method; dynamic response

重力坝设计时必须充分考虑各种荷载对大坝安全的影响,特别是对具有抗震要求的重力坝,需要采用快捷合理的方法进行重力坝地震反应计算,确保大坝的安全性和稳定性。材料力学法作为一种传统的结构分析方法,因其简便性和适用性而被长期应用于工程实践。NB 35047—2015《水电工程水工建筑物抗震设计规范》规定:材料力学法是重力坝动力分析和抗震设计的基本方法,计算结果可作为衡量

重力坝强度的主要依据,同时可采用有限元法作为辅助方法。混凝土重力坝抗震计算时一般可只考虑顺河向地震作用,两岸陡坡坝段宜同时考虑顺河向和横河向的水平地震作用。材料力学法将重力坝视为一支撑于半无限弹性地基上的变截面悬臂梁,采用平截面假定求解地震作用下大坝动力反应,故也称为悬臂梁法。悬臂梁法因其便捷性和高效性,成为重力坝地震响应计算的经典方法。刘国明^[1]采

基金项目:国家自然科学基金项目(51009055)
作者简介:成鑫(2000—),男,硕士研究生,主要从事重力坝抗震安全分析研究。E-mail:1310782748@qq.com
通信作者:岑威钧(1977—),男,教授,博士,主要从事土石坝抗震、水工结构安全分析研究。E-mail:hhucwj@163.com

用不等间距划分悬臂梁法计算了古田溪宽缝重力坝的自振周期,通过与平面应力问题有限元法计算结果进行对比,验证了悬臂梁法的准确性。李同春等^[2]分别采用有限元等效应力法和悬臂梁法对4个重力坝典型部位等效动应力进行了计算分析,研究表明有限元等效应力法能更准确地反映坝踵、坝趾和坝体折坡处的应力集中现象。刘美令^[3]以重力坝溢流坝段为研究对象,采用材料力学法计算了设计和校核地震作用下坝体关键部位的应力,结果表明坝体抗拉和抗压强度满足规范要求。吴雨蝶^[4]采用悬臂梁法、反应谱法和时程分析法计算了碾压混凝土重力坝动力响应,结果表明3种方法计算所得坝体应力分布和抗滑稳定系数变化规律基本一致。沈均榕等^[5]采用悬臂梁法对8个不同体形的重力坝进行地震反应计算,结果表明悬臂梁法计算结果准确性受坝体形状、坝高和宽高比等影响。Leclerc等^[6]基于刚体平衡和梁理论编制了CADAM程序,并进行了重力坝应力分析,计算了裂纹长度和安全系数,为重力坝稳定性评价提供依据。Løkke等^[7]考虑大坝-水-地基相互作用,采用梁理论进行了重力坝动应力计算,并对坝体下游面动应力计算提出修正因子。唐嘉博等^[8]采用基于 Cosserat 连续体理论的三维 Mohr-Coulomb 弹塑性模型开展了重力坝抗滑稳定分析,结果表明该方法计算的抗滑稳定安全系数受有限元网格影响较小。虽然悬臂梁法是水工建筑物抗震设计规范规定的基本动力计算方法,但在实际工程中的应用研究较少,与有限元法^[9-14]的对比验证成果不够充分。

本文基于振型分解反应谱理论,考虑地震动水压力和地基弹性的影响,采用悬臂梁法^[15]对某抽水蓄能电站下水库重力坝进行大坝自振特性和地震反应的计算,并将计算结果与有限元法结果进行对比,以期为中低重力坝的抗震设计提供参考。

1 工程概况

我国某抽水蓄能电站枢纽建筑物主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房系统和地面开关站等组成,按电站装机容量确定工程等别为一等,工程规模为大(1)型。工程抗震设防类别为甲类,地震基本烈度为Ⅶ度,100年超越概率2%和100年超越概率1%水平向地震加速度时程曲线的峰值分别为 2.25 m/s^2 和 3.02 m/s^2 。下水库挡水建筑物采用碾压混凝土重力坝,最大坝高57.50 m,坝顶高程594.50 m,建基面高程537.00 m,正常蓄水位591.00 m,死水位565.00 m。图1为该抽水蓄能电

站下水库重力坝典型断面图。

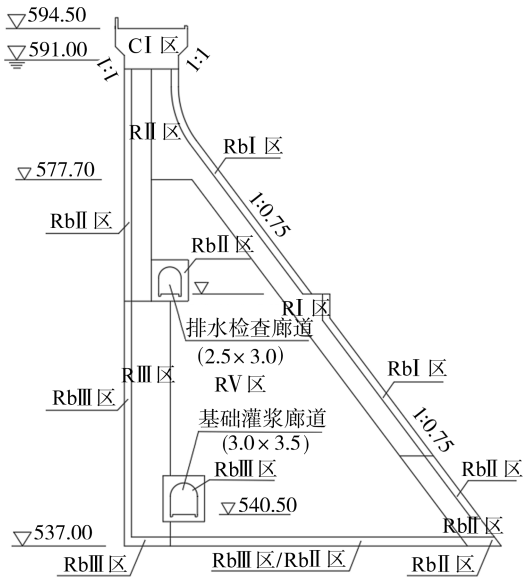


图1 抽水蓄能电站下水库重力坝典型断面(单位:m)

2 计算模型及计算条件

2.1 计算模型

采用悬臂梁法计算下水库挡水坝段地震动力反应时,取单位宽度(1 m)坝体作为计算对象,沿坝高将坝体等间距分为20层,每层高度约为2.875 m。同时,建立下水库挡水坝段三维有限元网格,计算域范围为大坝上游侧、下游侧和建基面以下均取约2倍坝高。地基地部施加固定约束,其余方向设置连杆约束。有限元网格剖分主要采用八节点六面体等参单元。图2为下水库挡水坝段三维有限元网格,共有节点数60093个,单元数52830个,其中坝体节点数17479个,单元数15110个。

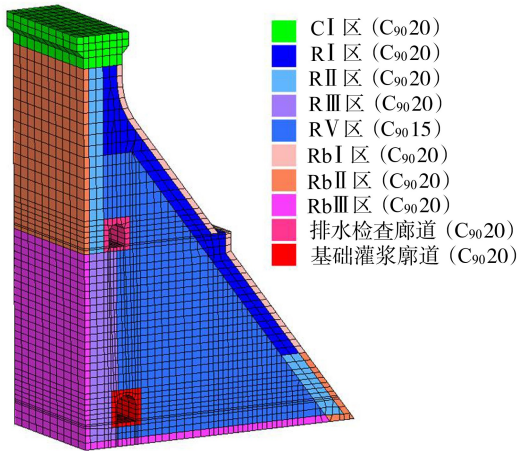


图2 坝体三维有限元网格

2.2 动力计算参数

根据NB/T 35026—2022《混凝土重力坝设计规范》第7.4.4条,坝体混凝土的静力弹性模量计算值取为混凝土试件弹性模量的0.6~0.7倍,本文取

0.67 倍。

重力坝动力计算时,坝体混凝土动态弹性模量标准值取值可较其静态标准值提高 50%;其动态抗拉强度的标准值可取其动态抗压强度标准值的 10%。表 1 为下水库挡水坝段动力计算参数。

向地震作用,其中竖向设计地震加速度代表值取水水平的 2/3。

3 大坝地震反应分析

3.1 自振特性

分别采用悬臂梁法和有限元法进行下水库挡水坝段自振特性计算,表 2 为大坝段前 5 阶自振频率及相应的振型参与系数。由表 2 可知,悬臂梁法和有限元法计算所得大坝基频分别为 4.25、4.43 Hz,对应基本周期分别为 0.24、0.23 s,相对误差为 4.24%。由于悬臂梁法对坝体施加约束较多,因此悬臂梁法计算所得大坝自振周期略小于有限元法。有限元法计算所得大坝第 2 阶振型为竖向振动,第 1、3、4 阶振型为顺河向振动,与悬臂梁法的第 1、2、3 阶振型相对应,且均为水平向振动。对于低阶振型,悬臂梁法计算结果较准确,与有限元法接近,而高阶振型往往伴随着更复杂的模态耦合和局部振动现象,悬臂梁法只考虑水平向地震作用,因此两种方法得到的高阶振型有一定的差异,但大坝地震反应主要由低阶振型组合贡献,高阶振型的影响有限,计算所得坝体动力反应误差相对较小。大坝振型参与系数未出现过大大值,且绝对值随着振型阶数的增加而逐渐减小,表明下水库挡水坝段质量、刚度沿高程分布均匀,具有较好的振动特性。

悬臂梁法计算时,沿坝高将坝体细分为水平条块,每一水平条块基于各分区材料的弹性模量、密度和比例等计算综合弹性模量。坝体混凝土弹性模量采用综合弹性模量,可有效降低坝体材料分区对结果的影响,减小相对误差,从而更准确地反映坝体地震反应。

根据 NB/T 35026—2022《混凝土重力坝设计规范》要求,下水库挡水坝段沿建基面抗滑稳定分析时,采用抗剪断强度公式,其中抗剪断摩擦系数 $f' = 1.1$,抗剪断黏聚力 $c' = 0.9$ MPa。

2.3 计算工况与荷载

抽水蓄能电站下水库重力坝动力计算时,通常选取 4 个组合工况:正常蓄水位+设计地震、正常蓄水位+校核地震、死水位+设计地震和死水位+校核地震。本文以重力坝挡水坝段在正常蓄水位+设计地震工况下的动力反应为例,展示悬臂梁法计算成果,并与有限元法计算结果进行比较验证。

荷载组合包括坝体自重、静水压力(上游水位 591.00 m,下游无水)、扬压力、淤沙压力、浪压力、土压力和地震作用。

工程区地震基本烈度为Ⅶ度,下水库重力坝抗震设计标准按 100 年超越概率 2%,地震动峰值加速度为 2.25 m/s^2 ,地震荷载反应谱采用标准设计反应谱。反应谱参数为:阻尼比 10%,标准设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{\max} = 2.0$,特征周期 $T_g = 0.25\text{ s}$ 。

悬臂梁法计算坝体动力反应时,仅考虑水平向地震作用。有限元法计算时,同时考虑水平向和竖

图 3 为悬臂梁法计算所得坝体截面形心处的前 5 阶振型水平位移。其中,振型水平位移采用归一法进行处理,各高程位移为与坝顶位移的相对值。图 4 为有限元法计算所得下水库挡水坝段前 5 阶振型。

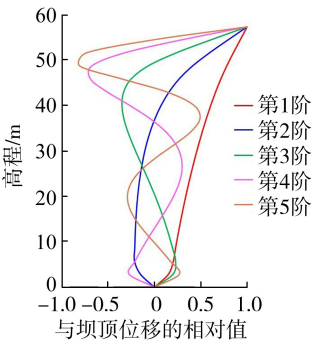


图 3 挡水坝段前 5 阶振型水平位移(悬臂梁法)

表 2 下水库挡水坝段前 5 阶自振频率及振型参与系数

振型阶数	悬臂梁法			有限元法			
	自振频率/Hz	自振周期/s	顺河向参与系数	自振频率/Hz	自振周期/s	顺河向参与系数	竖向参与系数
1	4.25	0.24	2.16	4.43	0.23	187.08	45.41
2	10.03	0.10	-1.73	9.02	0.11	-68.17	226.95
3	19.77	0.05	0.67	9.93	0.10	113.39	46.85
4	40.88	0.02	-0.15	17.05	0.06	61.35	26.38
5	69.79	0.01	0.05	27.51	0.04	-3.15×10 ⁻⁹	2.86×10 ⁻¹⁰

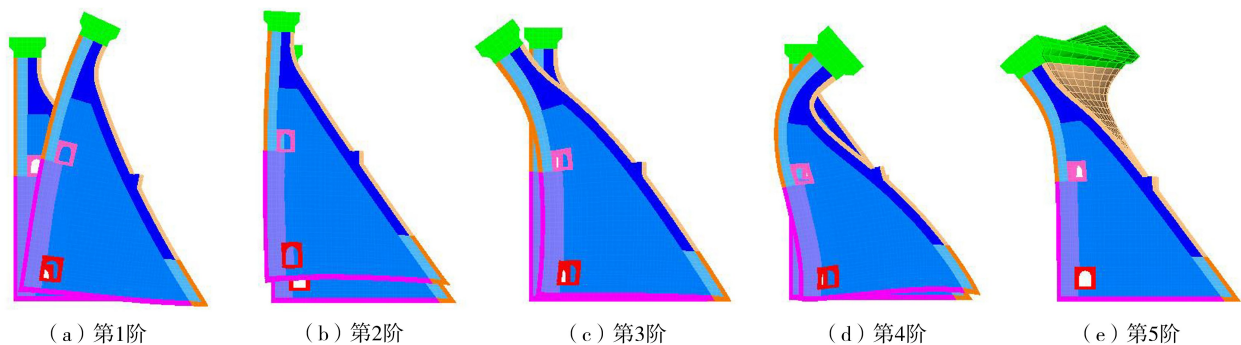


图4 挡水坝段前5阶振型(有限元法)

3.2 加速度

表3为正常蓄水位+设计地震工况下悬臂梁法和有限元法计算所得的下水库挡水坝段顺河向加速度极值及放大系数。悬臂梁法计算时只考虑水平向地震作用,有限元法计算时同时考虑水平向和竖向地震作用。由表3可见,悬臂梁法和有限元法计算所得大坝顺河向加速度极值分别为13.41、13.13 m/s²,相应的放大系数分别为5.96、5.84,极值均位于坝顶。悬臂梁法只考虑水平向地震作用,未充分考虑竖向地震和高阶振型对加速度响应的影响,但是坝体地震响应主要由低阶振型贡献,高阶振型影响较小,因此悬臂梁法计算所得加速度结果仍有较高的准确性,与有限元法计算的坝顶加速度的相对误差仅为2.13%。

表3 大坝顺河向加速度极值

方法	极值/(m/s ²)	放大系数	位置
悬臂梁法	13.41	5.96	坝顶
有限元法	13.13	5.84	坝顶

图5为正常蓄水位+设计地震工况下悬臂梁法和有限元法计算所得下水库挡水坝段顺河向加速度放大系数沿坝高分布曲线。由图5可知,悬臂梁法和有限元法计算所得大坝顺河向加速度放大系数沿坝高分布规律基本一致,随着大坝高程的增加,加速度放大系数逐渐增大,均在坝顶处达到极大值。

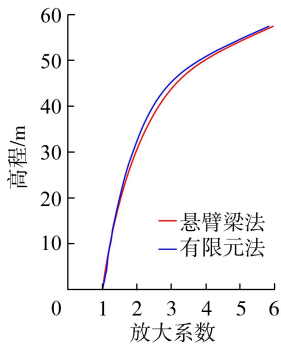


图5 大坝顺河向加速度放大系数分布

3.3 动应力

表4为正常蓄水位+设计地震工况下水库挡水

坝段特征部位静动叠加后的应力极值。其中,“静+动”表示静应力和动应力包络值相加,“静-动”表示静应力和动应力包络值相减。应力以拉为正,以压为负。

表4 大坝特征部位应力极值 单位:MPa

特征部位	悬臂梁法垂直正应力		有限元法垂直正应力	
	静+动	静-动	静+动	静-动
坝踵	0.98	-1.78	2.15	-2.95
坝趾	-0.25	-2.33	-1.12	-2.48
下游折坡处	1.19	-1.62	1.09	-1.53

图6为正常蓄水位+设计地震工况下分别采用悬臂梁法和有限元法计算所得的大坝静动叠加后垂直正应力沿坝高分布曲线。由图6可知,两种方法计算所得大坝静动叠加后垂直正应力沿坝高分布规律基本一致,在坝踵、坝趾和下游面折坡处等特征部位的坝体应力分布有明显变化。由于悬臂梁法假定水平截面的垂直正应力呈直线分布,计算所得应力只能反映上、下游面应力的平均值,无法反映局部应力骤变,相比之下,有限元法能更准确反映坝体上、下游面应力分布。对于坝踵和坝趾等特征部位,有限元法通过网格的细分,能更准确反映坝踵和坝趾处的应力集中现象。

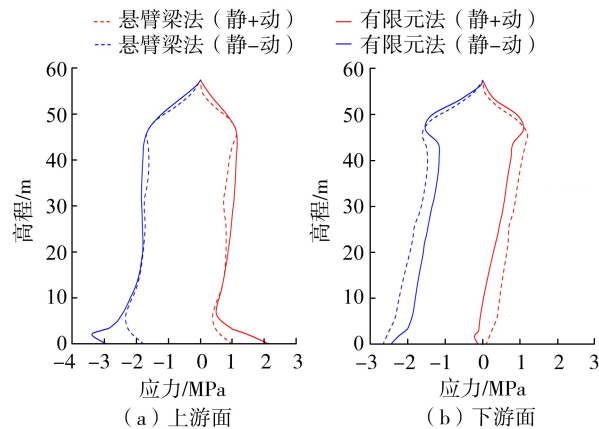


图6 静动叠加后大坝垂直正应力分布

图7为有限元法和有限元等效力法计算所得坝基面竖向正应力分布曲线。由图7可知,采用有限元等效力法计算后,坝踵附近拉应力极值显著

减小,拉应力区宽度小于坝踵至帷幕中心线的距离,满足规范要求。

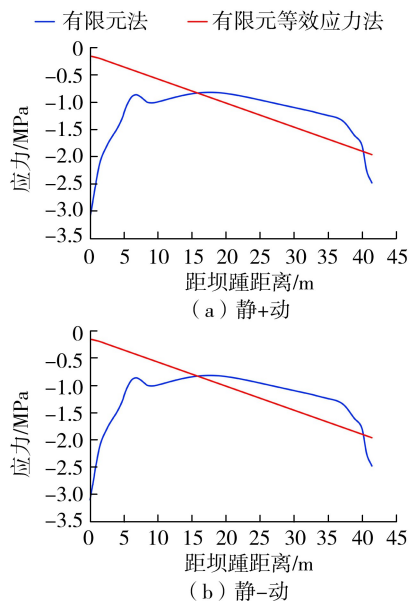


图7 静动叠加后挡水坝段坝基面竖向正应力分布

3.4 建基面抗滑稳定性

大坝沿建基面的动力抗滑稳定性计算时,选取单位宽度(1 m)重力坝为研究对象,同时考虑静力荷载和动力荷载作用。根据NB/T 35026—2022《混凝土重力坝设计规范》第7.2条的要求,结构重要性系数 γ_0 取1.1,设计状况系数 ψ 取0.85,承载力极限状态结构系数 γ_d 取0.65。正常蓄水位+设计地震工况下,悬臂梁法计算所得作用效应为17763.17 kN,结构抗力为56025.63 kN,结构抗力作用比值为3.15,大于1.0,满足规范要求。

采用有限元法进行建基面抗滑稳定分析时,以坝基面上下游方向为积分路径,计算得到坝基面切向合力为20374 kN,法向合力为49365 kN。按照抗剪断强度公式计算,大坝沿建基面的动力抗滑稳定安全系数为2.42,满足规范要求。

相比有限元法,由于悬臂梁法计算时不考虑竖向地震作用,按稳定最不利原则组合后,计算所得结构抗力偏大,作用效应不变,因此沿建基面的抗滑稳定安全系数偏大。

4 结论

a. 悬臂梁法和有限元法计算所得大坝基频相对误差为4.24%,说明悬臂梁法具有可靠性与准确性。大坝振型参与系数绝对值随着振型阶数的增加而减小,且未出现过大大值,符合一般规律。

b. 悬臂梁法和有限元法计算所得下水库挡水坝段加速度沿坝高分布规律基本一致,坝体加速度随着大坝高程的增加而增大,两种方法计算结果相

对误差为2.13%。

c. 悬臂梁法和有限元法计算所得下水库挡水坝段静动叠加后垂直正应力分布规律及极值符合一般规律。悬臂梁法只能求得上、下游坝面垂直正应力平均值。采用线弹性有限元法计算坝踵垂直应力时,拉应力区宽度小于坝踵至帷幕中心线的距离,满足规范要求。

d. 悬臂梁法和有限元法计算所得下水库挡水坝段沿建基面的抗滑稳定均满足规范要求。由于悬臂梁法计算时不考虑竖向地震作用,因此沿建基面的抗滑稳定安全系数大于有限元法计算结果。

e. 悬臂梁法作为一种传统的动力分析方法,原理清晰、计算简便,在中小型重力坝的抗震设计中具有广泛的应用潜力,特别是在工程初期方案比选阶段,悬臂梁法可快速开展重力坝抗震计算,为坝型设计优化提供依据。对于形状规则、高宽比适中的中低重力坝,大坝地震反应主要由低阶振型组合贡献,高阶振型的影响有限,悬臂梁法可较准确地计算坝体动力响应。

参考文献:

- [1] 刘国明. 古田溪一级重力坝悬臂梁振型分解反应谱法抗震计算[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 31-35. (LIU Guoming. Cantilever seismic calculation of mode-superposition response spectrum method for the gravity dam of Gutianxi first cascade[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 31-35. (in Chinese))
- [2] 李同春, 胡继刚, 赵兰浩, 等. 基于反应谱法重力坝有限元等效动应力响应分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 19-22. (LI Tongchun, HU Jigang, ZHAO Lanhao, et al. FE equivalent dynamic stress analysis based on response spectrum method for gravity dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 19-22. (in Chinese))
- [3] 刘美令. 混凝土重力坝的地震反应分析及边坡稳定分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [4] 吴雨蝶. 重力坝抗震设计计算方法研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.
- [5] 沈均榕, 刘晓青. 坝体形状对悬臂梁法计算重力坝地震反应的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(10): 52-54. (SHEN Junrong, LIU Xiaoqing. Influence of gravity dam shape on seismic response by using cantilever beam method[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 52-54. (in Chinese))
- [6] LECLERC M, LÉGER P, TINAWI R. Computer aided stability analysis of gravity dams—CADAM[J]. Advances in Engineering Software, 2003, 34(7): 403-420.
- [7] LØKKE A, CHOPRA A K. Response spectrum analysis of

- concrete gravity dams including dam-water-foundation interaction[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(8):04014202.
- [8] 唐嘉博,马刚,涂承义,等. 基于 Cosserat 理论的三维弹塑性模型及其在重力坝抗滑稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1702-1712. (TANG Jiabo, MA Gang, TU Chengyi, et al. Three-dimensional elastic-plastic model based on Cosserat theory and its application in anti-sliding stability analysis of gravity dams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1702-1712. (in Chinese))
- [9] 刘银勇,林潮宁,刘晓青,等. 基于有限元重力坝抗滑稳定静动力可靠度快速求解方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(6): 8-13. (LIU Yinyong, LIN Chaoning, LIU Xiaoqing, et al. Fast solution method for static and dynamic reliability of gravity dam anti-sliding stability based on Finite Element Method [J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2023, 45(6): 8-13. (in Chinese))
- [10] 佟大威,杨传会,余佳,等. 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 91-98. (TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, et al. Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 91-98. (in Chinese))
- [11] 张社荣,张耀飞,王超,等. 基于统一场景的重力坝极端动力灾害链传递混合模拟方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 1-9. (ZHANG Sherong, ZHANG Yaofei, WANG Chao, et al. Hybrid simulation method of extreme dynamic disaster chain transfer for gravity dams based on unified scene [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 1-9. (in Chinese))
- [12] 韩彰,苏怀智,李慧. 考虑渗流体力的某大坝地震响应仿真分析[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 70-76. (HAN Zhang, SU Huaizhi, LI Hui. Simulation analysis of seismic response for a dam considering seepage force [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 70-76. (in Chinese))
- [13] 何梦佳,陈波,刘庭赫,等. 基于有限元分析的特高拱坝实时风险率模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 113-122. (HE Mengjia, CHEN Bo, LIU Tinghe, et al. Real-time risk rate model for extra-high arch dams based on finite element analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 113-122. (in Chinese))
- [14] 程井,韦锦鹏,李宗樾,等. 基于 Neumann 展开随机有限元的混凝土重力坝结构可靠度分析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 46-50. (CHENG Jing, WEI Jinpeng, LI Zongyue, et al. Structure reliability analysis of concrete gravity dams using Neumann expansion stochastic finite element method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 46-50. (in Chinese))
- [15] 王良琛. 混凝土坝地震动力分析[M]. 北京:地震出版社, 1981.

(收稿日期:2024 - 05 - 27 编辑:俞云利)

(上接第 98 页)

- [33] XU Hai, PAERL H W, QIN Boqiang, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology and Oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
- [34] HUANG Lei, FANG Hongwei, HE Guojian, et al. Effects of internal loading on phosphorus distribution in the Taihu Lake driven by wind waves and lake currents [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 760-773.
- [35] XUE Zongpu, ZHU Wei, CHENG Lin, et al. Wind-driven hydrodynamic characteristics of Lake Taihu, a large shallow lake in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(17): 26123-26140.
- [36] 丁文浩,李云,徐世凯,等. 变化风场下太湖表层湖流特征及其对蓝藻迁移的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 58-65. (DING Wenhao, LI Yun, XU Shikai, et al. Characteristics of surface lake current and its effect on cyanobacteria migration in Lake Taihu under changing wind field [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 58-65. (in Chinese))
- [37] ZHAO Dehua, JIANG Hao, CAI Ying, et al. Artificial regulation of water level and its effect on aquatic macrophyte distribution in Taihu Lake [J]. PLoS One, 2012, 7(9): e4483.
- [38] CAO Hongye, HAN Ling, LI Liangzhi. A deep learning method for cyanobacterial harmful algae blooms prediction in Taihu Lake, China [J]. Harmful Algae, 2022, 113: 102189.
- [39] ZHOU Qichao, CHEN Wei, SHAN Kun, et al. Influence of sunlight on the proliferation of cyanobacterial blooms and its potential applications in Lake Taihu, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(3): 626-635.
- [40] ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al. Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss [J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4319-4331.

(收稿日期:2024 - 04 - 09 编辑:熊水斌)