

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.012

基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计

佟大威,杨传会,余佳,王佳俊,王星

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:为解决重力坝优化设计以截面尺寸作为唯一设计变量,缺乏考虑材料属性对重力坝优化设计影响的问题,综合经济、抗震安全进行重力坝多目标优化设计方法研究,构建了综合经济、抗震安全指标的多因素评价体系;采用 ABAQUS 软件对重力坝进行有限元静动力分析,基于计算结果采用变权功效系数法进行量化评价;采用 XGBoost-PSO 算法进行寻优得到最终优化方案。实例验证结果表明:多目标优化方案与初始方案相比,在经济、抗震安全指标上都得到了明显改善;相比传统单目标优化模式,经济、安全多目标优化更适用于抗震安全要求高的重力坝工程。

关键词:重力坝;体型优化;多目标;变权原理;XGBoost-PSO 算法

中图分类号:TV314

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2023)03-0091-08

Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO

TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, WANG Jiajun, WANG Xing

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to solve the problem that the optimal design of the gravity dam takes the section size as the only design variable and lacks consideration of the influence of material properties on the optimal design of the gravity dam, this paper studies the multi-objective optimization method of gravity dam comprehensively considering the economy and seismic safety. Firstly, the multi-factor evaluation system with comprehensive economy and safety indicators is put forward; secondly, based on the ABAQUS software, the static and dynamic model of the gravity dam are analyzed, and then the variable-weight efficiency coefficient method is used for the quantitative evaluation based on the calculation results of finite element analysis; finally, the XGBoost-PSO algorithm is used for optimum seeking to obtain the final optimization scheme. The validation results of real projects show that the economy and seismic safety indexes of the optimized scheme have been significantly improved compared with the initial scheme. Compared with the traditional single-objective optimization method, the economic and safety indexes of the multi-objective optimization is more suitable for gravity dam projects with high seismic safety requirements.

Key words: gravity dam; shape optimization; multi-objective; variable weight principle; XGBoost-PSO algorithm

当前重力坝体型优化设计是在满足应力、稳定的前提下寻求断面面积最小、经济更优的设计方案。在目标函数选取上采用经济指标单目标优化模式,对于安全指标仅以不超过安全限值的形式作为约束条件施加在内,缺乏考虑安全可靠度,尤其是抗震下的安全性能对于优化评价的影响^[1-2]。随着目前国内在建及拟建重力坝坝址地震强度越来越高,有必要在优化过程中考虑工程抗震性能,提高工程抗震能力。关于拱坝优化研究,已在强震区的工程安全、经济综合性能等方面开展了相应探索^[3-4],为重力坝安全、经济多目标优化思路提供了良好借鉴。此外,以往优化设计以截面尺寸作为唯一的设计变量,缺乏考虑材料属性对重力坝优化设计的影响。研究表明,混凝土抗拉强度、弹性模量等材料指标对结构自振特性、应力变形有着显著影响^[5-6]。由此,有必要综合考虑材料属性指标对重力坝优化设计的影响。

结构优化设计为一类非线性多峰值全局最优问题,对于该类问题的求解,智能优化算法拥有比传统方法更佳的性能。李恒^[7]基于遗传算法进行重力坝优化设计,与 ANSYS 等软件自带优化方法相比坝体材料更为

基金项目:国家自然科学基金雅鲁江联合基金(U1965207, U1865204);天津市自然科学基金(19JCYBJC22600)

作者简介:佟大威(1982—),男,副教授,博士,主要从事结构仿真与抗震研究。E-mail: tongdw@tju.edu.cn

引用本文: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.

节省,更大程度上提高了经济性。苏国韶等^[8]将人工蜂群算法应用于重力坝体型优化设计,优化效果明显且适应性良好,寻优效率高。张建华等^[9]基于并行性鲸鱼优化算法对渡槽槽身结构进行了优化设计,取得更稳定的性能和更快的收敛速度。鉴于 XGBoost 模型在拟合问题中的良好性能^[10-11],以及 PSO 算法对于解决工程结构优化问题的良好适用性,本文将 XGBoost 作为 PSO 适应度函数的代理模型,采用 XGBoost-PSO 算法对重力坝结构进行优化设计分析,以国内西南强震区某重力坝为例,构建了断面尺寸、材料属性多因素评价体系,提出考虑经济、抗震安全的重力坝体型多目标优化设计方法,以期能为强震区重力坝体型优化设计提供思路和方法借鉴。

1 重力坝体型优化设计数学模型

重力坝体型多目标优化问题可表示为

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}) = (f_1(\boldsymbol{X}), f_2(\boldsymbol{X}), \dots, f_m(\boldsymbol{X}))$$

(1)

$$\text{s. t. } \begin{cases} a \leq B(\boldsymbol{X}) \leq c \\ \sigma \leq [\sigma] \\ k \leq [k] \\ L \leq [L] \end{cases}$$

(2)

其中

$$\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

式中: $\boldsymbol{X}$ 为由设计变量组成的向量; n 为设计变量个数; $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X})$ 为目标函数向量,其元素是 m 个标量分目标函数,其中,经济指标用断面面积表示,抗震安全指标通过结构计算方法求解; $a \leq B(\boldsymbol{X}) \leq c$ 为几何约束条件, a, c 为几何约束上下限; $\sigma \leq [\sigma]$ 为应力约束条件, σ 为应力, $[\sigma]$ 为容许应力; $k \leq [k]$ 为稳定约束, k 为抗滑稳定安全系数, $[k]$ 为抗滑稳定安全系数限值; $L \leq [L]$ 为损伤约束, L 为损伤长度, $[L]$ 为损伤长度限值。

1.1 设计变量

设计变量 x_1, x_2, x_3, x_4 分别为上游折坡点横距离、上游折坡点纵距离、下游折坡点横距离和混凝土抗拉强度,如图 1 所示,其中 H 为大坝总高度, h 为坝前水位, b 为坝顶宽度。

1.2 约束条件

a. 几何约束:正常运行工况下应满足重力坝设计规范及其他施工要求^[12],地震工况下的约束条件更为严格。综合规范及实际工程经验,几何约束包括上游坡比 r_u 约束、下游坡比 r_d 约束和变量非负约束:

$$\begin{cases} 0 \leq r_u \leq 0.4 \\ 0.5 \leq r_d \leq 0.9 \\ x_i > 0 \end{cases}$$

(3)

b. 应力约束:静力状态下,坝踵应力不超过许用拉应力 $[\sigma_+]$,坝趾应力应不大于坝趾容许压应力 $[\sigma_-]$ 。

c. 稳定约束: $k \leq [k]$, k 为按抗剪强度公式计算的坝基面稳定安全系数, $[k]$ 值参考文献^[12]。

d. 损伤约束:地震工况下坝体损伤不超过限值,例如坝踵损伤长度不能波及灌浆帷幕,坝头部位不允许发生贯穿损伤。

1.3 目标函数

以往重力坝体型优化设计追求工程经济最省,本文将抗震安全指标作为目标函数之一,基于经济、抗震安全指标进行多目标优化设计,兼顾考虑重力坝“造价节省”和“安全性能增强”的多目标优化需求。

a. 经济指标。坝体混凝土造价在工程造价中占有相当比重,取单位坝宽混凝土方量(即坝体断面面积 S)作为经济指标(式(4)),断面面积由截面几何参数确定。

$$f_1(\boldsymbol{X}) = S$$

(4)

其中

$$S = \frac{1}{2} x_1 x_2 + \frac{1}{2} (b + x_3) h + \frac{1}{2} b \left[2(H - h) + \frac{bh}{x_3 + b} \right]$$

b. 安全指标。相比于静力安全指标,重力坝设计过程中更关注坝体在地震动作用下的安全状态,坝体

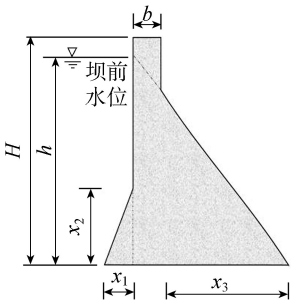


图 1 截面及设计变量

Fig.1 Section and design variables

若经历地震过程后依然表现良好,基本可以判断其在静力作用下也处于安全状态,因此本文在安全指标的选取上以动力指标为准。基于混凝土损伤理论,建立能够反映损伤与能量特性的混凝土塑性损伤模型(CDP模型)^[13],分别从材料损伤和能量耗散角度对抗震安全进行评价。考虑到坝踵部位防渗帷幕及排水孔安全至关重要,过大的震后损伤可能使大坝的帷幕结构和排水性能受损,导致基底扬压力提升,进而威胁坝体安全稳定,因此选取坝踵基础面屈服裂缝长度 L (简称坝踵断裂长度) 作为安全指标之一(式(5))。当 CDP 模型的损伤值 d 达到 0.6 以上时,视为混凝土材料发生屈服断裂,从而判定坝踵断裂范围^[14]。基于能量等效性假设^[15]计算损伤值(式(6))。

$$f_2(\mathbf{X}) = L \tag{5}$$

$$d = 1 - \sqrt{\sigma / (E_0 \varepsilon)} \tag{6}$$

式中: E_0 为弹性模量; ε 为应变。

此外,地震对结构的作用实质上是一种能量的传递、转化与耗散的过程,地震波输入给坝体的能量越多,造成的混凝土损伤越严重,结构越危险,超过结构耗能能力时将产生破坏。基于能量角度探究地震动力响应及抗震性能,是一种从结构整体性能出发的重要抗震安全评价方法。本文选取损伤耗散能 E ^[16] 作为目标函数之一:

$$f_3(\mathbf{X}) = E \tag{7}$$

其中

$$E = \int_0^T \frac{d_T - d_0}{1 - d_0} \sigma \varepsilon_{el} dT \quad \varepsilon_{el} = \sigma / E_0$$

式中: d_T 、 d_0 分别为 T 时刻和初始时刻的损伤值; ε_{el} 为弹性应变。

2 经济、抗震安全多指标综合评价体系

在对目标函数进行筛选与分层的基础上,构建了重力坝优化评价指标体系如图 2 所示。

2.1 变权功效系数法量化分析

以 S 、 L 和 E 为指标对优化效果进行综合评价,采用功效系数法量化各试验方案的优化效果:

$$D = \sum_{j=1}^3 w_j d_j / \sum_{j=1}^3 w_j \tag{8}$$

式中: D 为总功效系数; w_j 为第 j 项评价指标的权重; d_j 为第 j 项评价指标的功效系数。

S 、 L 和 E 3 个评价指标均为随着数值增大越不利于坝体的经济安全,各单项功效系数越小,因此均属于极小型变量,此时各单项功效系数为

$$d_j = \begin{cases} \frac{x_{j,h} - x_j}{x_{j,h} - x_{j,s}} a' + b' & x_j \leq x_{j,h} \\ 1 & x_j > x_{j,h} \end{cases} \tag{9}$$

式中: x_j 为第 j 项评价指标计算结果; $x_{j,h}$ 为满意值; $x_{j,s}$ 为不允许值; a' 和 b' 为调整系数,本文分别取为 60、40。

然而传统的功效系数法权重是固定的,无法考虑权重由于评价指标数值变化引发的变化^[17]。本文采用均衡函数的变权公式对权重进行改进:

$$w'_j = \frac{w_j c_j^{\alpha'-1}}{\sum_{j=1}^3 (w_j c_j^{\alpha'-1})} \tag{10}$$

式中: α' 为分类参数,对于本文重力坝优化方案评价而言,随着评价指标数值增大,对大坝优化效果的影响程度越大,因此取 $\alpha' > 1$,参考文献[17]的研究取 $\alpha' = 1.5$; c_j 为第 j 项评价指标的标准转化量。

2.2 AHP-熵权法确定组合权重

基于 AHP-熵权法^[18]对评价指标权重 w_j 进行计算。运用层次分析法构造两两判断矩阵并经过一致性检验,得到评价指标的主观权重 $\alpha = (0.480, 0.405, 0.115)$,采用熵权法经过熵值、熵权计算得到评价指标的客观权重 $\beta = (0.414, 0.286, 0.300)$;将主、客观权重进行综合($\mathbf{W} = 0.5\alpha + 0.5\beta$)求得 S 、 L 、 E 的权重 $\mathbf{W} =$

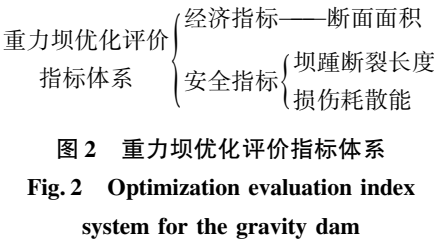


图 2 重力坝优化评价指标体系
Fig. 2 Optimization evaluation index system for the gravity dam

(0.447,0.346,0.207)。

3 XGBoost-PSO 算法寻优分析

在有限元分析及综合评价基础上,对试验方案进行寻优分析获取最终优化方案。鉴于 XGBoost 模型在拟合应用中的良好性能,以及 PSO 算法对于工程结构优化问题的良好适用性,将 XGBoost 模型作为 PSO 适应度函数的代理模型,采用 XGBoost-PSO 算法对重力坝结构进行优化分析。

3.1 XGBoost 模型

XGBoost 模型是在梯度提升算法(gradient boosting, GDBT)的基础上优化而来^[19]。与神经网络模型(ANN)、随机森林模型(RF)等传统机器学习模型相比,XGBoost 模型具有准确度高、不易过拟合、可扩展性强等特点。以决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE 为评价指标,对 XGBoost 模型、线性回归模型(LR)、ANN 模型和 RF 模型进行比较,结果见表 1。由表 1 可知,XGBoost 模型的 R^2 和 RMSE 均最优,ANN 模型和 RF 模型次之,LR 模型的表现不及其他模型,表明 XGBoost 模型在回归应用中具有良好的拟合性能。

为分析 XGBoost 模型拟合性能随数据集规模大小的变化规律,分别取 80、120、160、200、240、280、320、360、400、430 的数据量进行回归分析,得到不同训练样本数的学习曲线。如图 3 所示,在样本数量达到 300 后时,预测评价指标(R^2 、RMSE)均渐趋于稳定,拟合性能趋于良好,表明本文数据集规模满足精度要求。

3.2 PSO 算法

PSO 算法是一种模仿鸟类等群体智能觅食行为的启发式算法^[20-21]。该算法以鸟类群体为建模对象,“群体”中每一个鸟类个体被视为一个“粒子”,代表算法所优化问题的一种解决方案,所有“粒子”构成了问题的解空间。在算法迭代过程中,粒子 d_0 飞行的方向由群体经验(即“群体”中所有粒子的最优位置 P_g)及个体经验(即个体“粒子”所经历过的最优位置 P_d)共同决定;每次迭代时,“粒子”将产生新的速度 v_d 及方向,并计算新的个体适应度 p_d 及全局适应度 p_g ,当适应度满足预设条件后迭代结束,同时得到问题的全局最优解。

4 实例验证

4.1 工程概况

国内西南强震区某重力坝为碾压混凝土重力坝,最大坝高为 185 m,坝址区地震基本烈度为Ⅷ度,设计地震动峰值加速度高达 0.445g,位居国内已建及在建混凝土重力坝之首,抗震安全性是该工程建设与运行过程中高度关注的问题。以河床非溢流坝段(7 号坝段)为研究对象,兼顾考虑体积节省和抗震性能的实际工程需求,开展考虑经济、抗震安全的重力坝体型多目标优化设计研究。

计算荷载条件包括:坝体自重、静水压力、扬压力、淤沙压力、地震荷载以及地震动水压力。坝顶宽度为 16.0 m,坝底高程为 1970.0 m,上游水位 2 150.0 m,下游水位坝前淤沙高程 2 024.0 m,淤沙浮容重为 8 kN/m³,内摩擦角为 12°,建基面抗剪参数:摩擦系数 $f'=1.07$,黏聚力 $c'=1.15$ MPa。坝体混凝土采用混凝土塑性损伤模型(CDP 模型),密度为 2 400 kg/m³,静态、动态弹性模量分别为 28 GPa、42 GPa,泊松比为 0.167;地基岩体采用弹性模型,密度为 2 760 kg/m³,静态、动态弹性模量均为 10.5 GPa,泊松比为 0.23。初始方案坝体-地基有限元模型见图 4,扬压力沿坝基面的分布情况见图 5。

动力计算中采用 100 a 超越概率为 2% 的场地相关反应谱作为目标谱,经过人工地震波拟合得到顺河向、垂直向加速度时程曲线归一化图形(图 6)。考虑行波效应和地基能量辐射影响,采用黏弹性人工边界进行动力边界的模拟^[22]。

表 1 模型预测效果对比分析

Table 1 Comparison analysis of the prediction effect of models

模型	R^2	RMSE
XGBoost	0.87	0.81
LR	0.69	1.23
ANN	0.74	1.12
RF	0.79	1.01

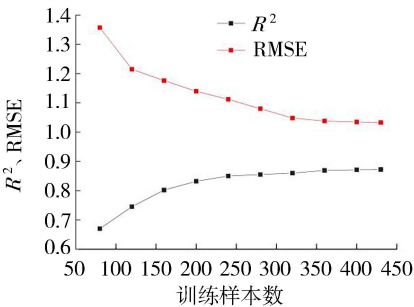


图 3 XGBoost 模型学习曲线

Fig.3 Learning curve of XGBoost model

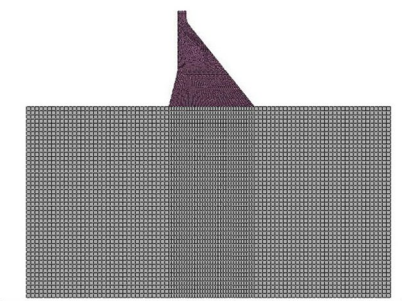


图 4 初始方案坝体-地基有限元模型

Fig. 4 FEM model of dam-foundation of initial scheme

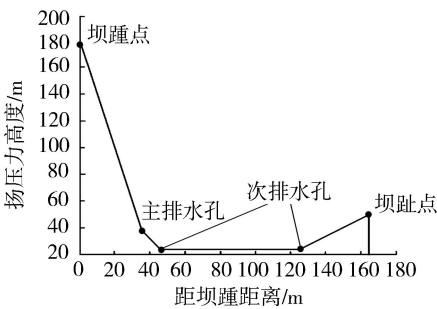


图 5 扬压力分布

Fig. 5 Distribution of uplift pressure

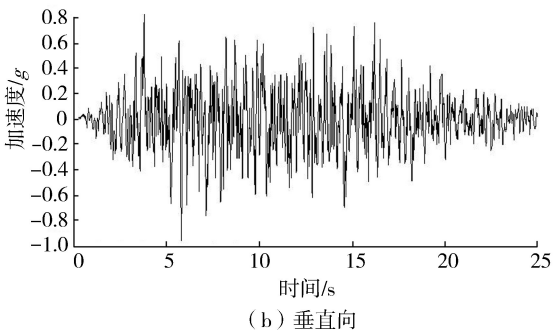
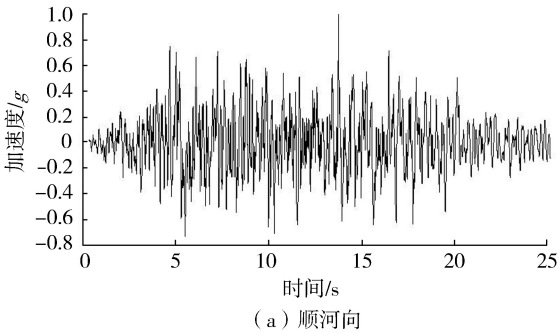


图 6 顺河向、垂直向加速度时程

Fig. 6 Time history of acceleration along the river and vertical direction

4.2 结构优化设计

基于选定的设计变量 $x_1 \sim x_4$ (上游折坡点横距离、上游折坡点纵距离、下游折坡点横距离和混凝土抗拉强度),采用正交抽样方法建立了 360 组变量组合试验方案。

采用 ABAQUS 软件进行重力坝有限元静动力计算,并提取各试验方案的 S 、 L 、 E 。基于经济、抗震安全综合评价体系及改进功效系数法,计算得全部方案的优化效果 D 值,从低到高排序后绘制折线图(图 7)。如图 7 所示,初始方案 D 值为 71.0,仅超过样本空间中 15.6% 的样本,在整个样本空间中表现并不理想,尚有很多方案在经济、安全综合性能上优于初始方案。最后,针对样本空间基于 XGBoost-PSO 算法进行寻优分析,获取优化效果 D 值达到最大时的设计变量 X ,得到最终优化方案。图 8 为优化效果 D 随迭代次数的变化曲线。 D 优化值为 85.6,对应设计变量 $X=(23.6,67.3,113.2,178.3)$ 。

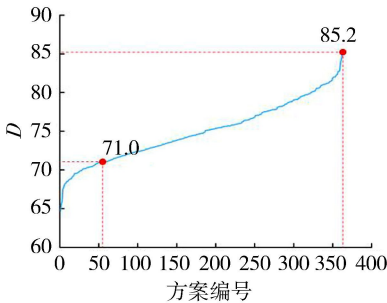


图 7 试验方案优化效果排序

Fig. 7 Ranking of optimization effect of test schemes

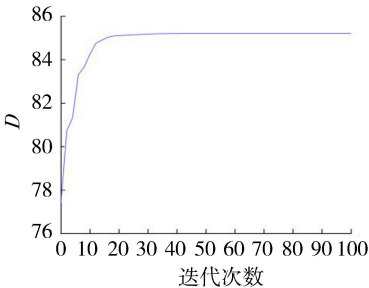


图 8 PSO 算法迭代过程

Fig. 8 Iteration process of PSO algorithm

4.3 优化结果分析

4.3.1 优化方案与初始方案对比

初始剖面形态为 $x_1=17.5\text{ m}$, $x_2=70\text{ m}$, $x_3=132\text{ m}$;优化剖面形态为 $x_1=23.6\text{ m}$, $x_2=67.3\text{ m}$, $x_3=113.2\text{ m}$,相比初始剖面呈现下游坡度变陡、上游坡度变缓的趋势;对于混凝土抗拉强度参数,优化前后二者相近(初始方案为 1780 kPa,优化方案为 1783 kPa)。有限元计算结果表明,优化方案断面面积 $S=1.27\text{ 万 m}^2$,相比初

始方案 1.42 万 m² 节约混凝土方量 10.6%; 断裂长度 $L=10.2$ m, 相比初始方案 16.7 m 减小了 38.9%; 耗散能 $E=1.43$ MJ, 产生损伤耗散能与初始方案 (1.35 MJ) 相当。

优化前后坝体损伤状态如图 9 所示, 随着上游坡度变缓, 有效改善了坝踵部位应力状态, 震后坝踵损伤范围明显缩小; 上游折坡位置出现一定程度损伤, 但控制在较小范围内, 不至于产生屈服断裂, 因此, 优化后坝体几何空间布局的协调性得到增强。优化方案在静力作用下的竖向应力分布见图 10(a), 坝体整体呈现受压状态, 应力分布良好, 且在安全范围内; 顺河向位移分布见图 10(b), 其中最大位移 2.03 cm (含坝基位移 1.58 cm、坝体位移 0.45 cm) 发生在坝顶部位, 朝向下流, 处于正常范围内。相比初始方案, 优化方案更经济、安全, 有效提高了该重力坝工程的经济、安全综合性能。

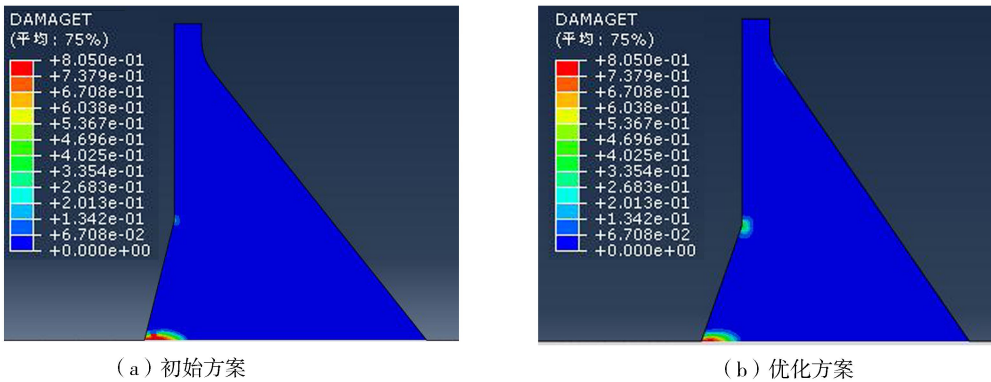


图 9 优化前后损伤状态云图

Fig. 9 Cloud map of damage state before and after optimization

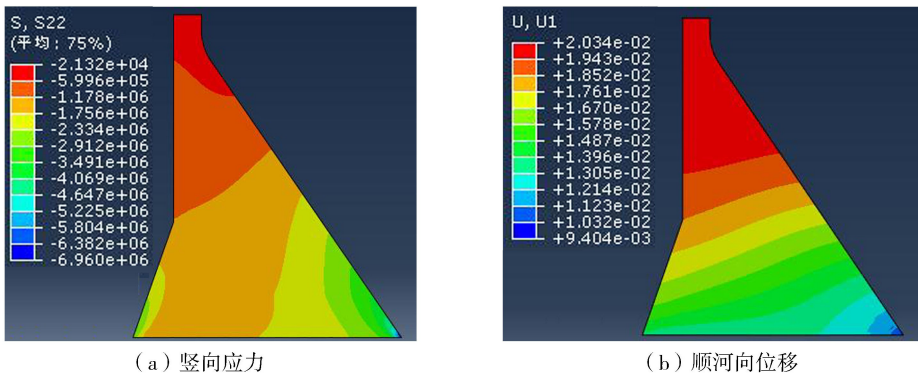


图 10 优化方案竖向应力、顺河向位移云图

Fig. 10 Vertical stress and displacement along the river in optimized scheme

4.3.2 多目标与单目标优化模式对比

经济指标单目标优化模式下的剖面形态为 $x_1=21.1$ m、 $x_2=71.6$ m、 $x_3=104.2$ m, 如图 11 所示, 与多目标

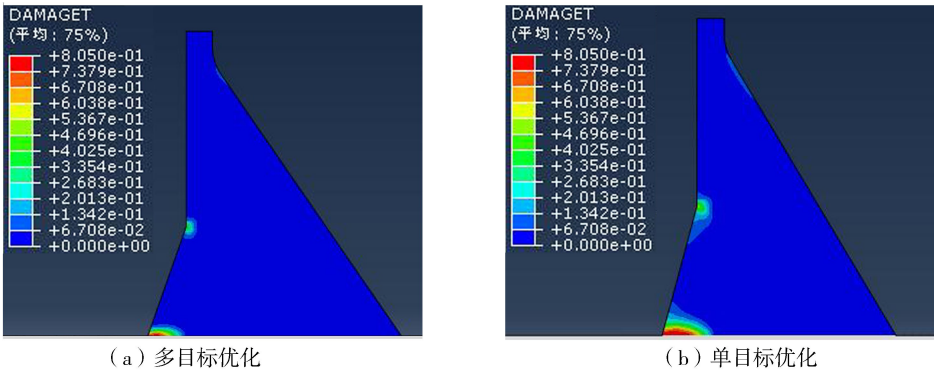


图 11 不同优化模式损伤状态云图

Fig. 11 Cloud map of damage state under different optimization modes

优化相比,单目标优化剖面的上下游坡度更陡,断面面积进一步减小,可节约更多的混凝土方量;但其震后安全状态表现不佳,坝踵损伤范围大于多目标优化方案,甚至超过初始方案,且上游折坡的损伤程度进一步加剧,以上均将对坝体抗震安全性能产生一定威胁。因此,单目标优化方案虽然具有更优的经济性,但不具备优良的安全性能,并不适用于该类对抗震安全性能要求高的重力坝工程。

5 结 论

a. 提出了综合经济、抗震安全指标的重力坝多目标优化设计研究方法,构建了断面尺寸、材料属性多变量体系,建立了经济、抗震安全综合评价体系,基于 ABAQUS 软件实现了重力坝有限元静动力分析,基于变权功效系数法实现了优化设计的量化评价,提出 XGBoost-PSO 算法实现了重力坝多目标优化的寻优分析。

b. 在回归分析中,相比神经网络模型(ANN)、随机森林模型(RF)及线性回归模型(LR),XGBoost 模型在决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 指标上均有最优的表现,证明 XGBoost 模型具有优良的拟合性能。样本学习曲线表明,在样本数量达到 300 后时,预测评价指标(R^2 、RMSE)均渐趋于稳定,拟合性能趋于良好,本文选取的数据集规模满足精度要求。

c. 国内西南强震区某重力坝实例分析结果表明,相比原始方案,优化方案节约混凝土方量 10.6%,并使震后坝基断裂长度减小 38.9%,明显提高了工程的经济、安全综合性能。相比多目标优化模式,经济指标单目标优化模式可节约更多混凝土方量,但震后坝基损伤范围明显扩大,上游折坡位置损伤程度进一步加剧,对坝体安全状态产生一定威胁,相比之下,经济、安全多目标优化更适用于该类对抗震安全要求高的重力坝工程。

参考文献:

[1] 祁顺彬,王向东. 考虑开裂约束的重力坝体型优化设计[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 106-109. (QI Shunbin, WANG Xiangdong. Shape optimization design of gravity dam considering crack constraint[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 106-109. (in Chinese))

[2] 崔乃文,王向东. 基于混凝土损伤和断裂力学的重力坝体型优化设计研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 347-353. (CUI Naiwen, WANG Xiangdong. Research on optimization design of gravity dam based on concrete damage and fracture mechanics[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 49(3): 347-353. (in Chinese))

[3] 谢能刚,孙林松,包家汉,等. 基于无私合作博弈模型的拱坝体型多目标优化设计[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1109-1114. (XIE Nenggang, SUN Linsong, BAO Jiahao, et al. Multi-objective optimization design of arch dam shape based on unselfish cooperation game model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(9): 1109-1114. (in Chinese))

[4] 谢能刚,孙林松,王德信. 静力与动力荷载下高拱坝体型多目标优化设计[J]. 水利学报, 2001, 32(10): 8-11. (XIE Nenggang, SUN Linsong, WANG Dexin. Multi-objective optimization of high arch dam shape under the actions of static and dynamic load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(10): 8-11. (in Chinese))

[5] POURAMINIAN M, POURBAKHSIAN S, FARSANGI E N. Reliability assessment and sensitivity analysis of concrete gravity dams by considering uncertainty in reservoir water levels and dam body materials[J]. Civil and Environmental Engineering Reports, 2020, 1(30): 1-17.

[6] ALEMBAGHERI M, SEYEDKAZEMI M. Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(1): 41-58.

[7] 李恒. 基于 ANSYS 的关门嘴子水库重力坝设计与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

[8] 苏国韶,钱坤. 人工蜂群算法在重力坝断面优化设计中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(11): 223-225. (SU Guoshao, QIAN Kun. Optimal design of gravity dam section using artificial bee colony algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(11): 223-225. (in Chinese))

[9] 张建华,李静,林潮宁,等. U 型渡槽参数化有限元建模与智能优化设计研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 75-81. (ZHANG Jianhua, LI Jing, LIN Chaoning, et al. Study on parametric finite element modelling and intelligent optimal design of U-shaped aqueduct[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 75-81. (in Chinese))

[10] 吴娟,朱跃龙,金松,等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 542-551. (WU Juan, ZHU Yuelong, JIN Song, et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake)[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6): 542-551. (in Chinese))

[11] 刘敬文,白金朋,王建,等. 基于 XGBoost 的初始地应力场修正反演法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 101-108. (LIU

Jingwen,BAI Jinpeng,WANG Jian,et al. A modified inversion method of initial geo-stress field based on XGBoost algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):101-108. (in Chinese))

[12] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范:SL319-2005[S] 北京:中国水利水电出版社,2005.

[13] LEE J, FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 27(9): 937-956.

[14] 郭明. 混凝土塑性损伤模型损伤因子研究及其应用[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 128-132. (GUO Ming. Research and application of damage factor in concrete plastic-damage model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology Urban Science, 2011, 28(3): 128-132. (in Chinese))

[15] LI H, YIN X, WANG G. Research on UPFs-based viscoelastic artificial boundary element and ground motion input method[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2017, 33(2): 24-32.

[16] 张社荣,王超,孙博. 基于能量耗散的重力坝地震响应时频特征分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 167-175. (ZHANG Sherong, WANG Chao, SUN Bo. Time-frequency characteristics of seismic responses for gravity dams based on energy dissipation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 167-175. (in Chinese))

[17] 谢荣晖,吴学平,吴雅佩. 基于TOPSIS变权模糊模型的混凝土坝结构安全评价[J]. 水力发电, 2016, 42(11): 68-71. (XIE Ronghui, WU Xueping, WU Yapei. Structure safety assessment of concrete dam based on variable weights fuzzy model of TOPSIS[J]. Water Power, 2016, 42(11): 68-71. (in Chinese))

[18] 刘宇彬,刘建华. 基于层次分析法和熵权法的电网风险评估[J]. 电力科学与工程, 2013(11): 37-43. (LIU Yubin, LIU Jianhua. Risk assessment of power networks based on AHP and entropy weight method[J]. Electric Power Science and Engineering, 2013(11): 37-43. (in Chinese))

[19] CHEN Tianqi, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system [C]// Proceedings of the 22nd Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2016: 785-794.

[20] 韩峰,徐磊,张太俊. 坝基岩体力学参数的 PSO-ABAQUS 联合反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 321-325. (HAN Feng, XU Lei, ZHANG Taijun. Combined inversion of mechanical parameters of rock mass of dam foundation using particle swarm optimization method and ABAQUS[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(4): 321-325. (in Chinese))

[21] 张石,郑东健,陈卓研. 基于改进 PSO-RF 算法的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):39-44. (ZHANG Shi, ZHENG Dongjian, CHEN Zhuoyan. Dam deformation prediction model based on improved PSO-RF algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):39-44. (in Chinese))

[22] 刘晶波,谷音,杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006,28(9): 1070-1075. (LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(9): 1070-1075. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-23 编辑:刘晓艳)

(上接第 71 页)

[34] 周一敏,黄雅媛,刘凯,等. 典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响[J]. 环境科学,2022,43(5):2732-2740. (ZHOU Yimin,HUANG Yayuan,LIU Kai,et al. Effects of typical iron and manganese minerals on Arsenic speciation and enzyme activities in paddy soil[J]. Environmental Science,2022,43(5):2732-2740. (in Chinese))

[35] 徐梅华,顾明华,王驷臻,等. 锰对土壤砷形态转化及水稻吸收砷的影响[J]. 生态环境学报,2022,31(4):802-813. (XU Meihua,GU Minghua,WANG Chengzhen,et al. Effect of manganese on Arsenic speciation in soil and Arsenic migration to rice [J]. Ecology and Environmental Sciences,2022,31(4):802-813. (in Chinese))

[36] 林龙勇,阎秀兰,杨硕. 铁铈氧化物对土壤 As(V)和P的稳定化效果[J]. 环境科学,2019,40(8):3785-3791. (LIN Longyong,YAN Xiulan,YANG Shuo. Stabilizing effects of Fe-Ce Oxide on soil As(V) and P[J]. Environmental Science,2019, 40(8):3785-3791. (in Chinese))

[37] 刘梓清,杨继刚,吴子涵,等. 植物根系限制重(类)金属吸收/转运的因素及其机制[J]. 农业现代化研究,2021,42(2): 284-293. (LIU Ziqing, YANG Jigang, WU Zihan, et al. Factors restraining uptake/translocation of heavy metals (metalloids) related with plant roots and its mechanisms[J]. Research of Agricultural Modernization,2021,42(2):284-293. (in Chinese))

[38] XING Xigang,DING Shiming,LIU Ling,et al. Direct evidence for the enhanced acquisition of phosphorus in the rhizosphere of aquatic plants:a case study on *Vallisneria natans*[J]. Science of the Total Environment,2018,616/617:386-396.

(收稿日期:2022-05-06 编辑:胡新宇)