

考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝随机有限元分析

贺林林^{1,2}, 聂葳杰¹, 刘璇¹, 金勇¹, 梁越^{1,2}, 刘洋³

(1. 重庆交通大学河海学院; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心; 3. 重庆科技大学土木与水利工程学院)

摘要:针对堆石料流变随机有限元分析中未充分考虑模型参数空间变异性的问题,以某面板堆石坝工程为例,建立了考虑堆石料流变效应的面板堆石坝确定性有限元数值计算模型,采用 Cholesky 协方差分解法生成流变模型参数随机场,借助 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互实现可以考虑材料参数空间变异性的非侵入式随机有限元交互计算,并利用蒙特卡罗法进行面板堆石坝应力变形响应指标的统计分析。结果表明:相比于基于单一确定性材料参数的坝体有限元分析,考虑流变特性的随机有限元分析得到的应力和变形值偏于安全,各项指标极值差异在 2%~6% 之间,超标概率均超过 50%;采用考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元分析方法更符合工程实际,可以提高面板堆石坝变形预测的可靠性。

关键词:面板堆石坝;堆石料;流变模型;参数空间变异性;随机有限元法

中图分类号:TV641.4⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0042-09

Stochastic finite element analysis of concrete-faced rockfill dam considering spatial variability of rockfill rheological model parameters//He Linlin^{1,2}, Nie Weijie¹, Liu Xuan¹, Jin Yong¹, Liang Yue^{1,2}, Liu Yang³(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University; 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology)

Abstract: To address the insufficient consideration of spatial variability of rockfill rheological model parameters in stochastic finite element analysis, taking an actual concrete-faced rockfill dam (CFRD) project as an example, a deterministic finite element model considering the rheological effects of rockfill materials was established. The Cholesky covariance decomposition method was employed to generate random fields of rheological model parameters. Through the integrated interaction of ABAQUS, MATLAB, and Python, a non-intrusive stochastic finite element calculation accounting for the spatial variability of material parameters was achieved. The Monte Carlo method was then used to perform statistical analyses of the stress and deformation responses of the CFRD. The results show that, compared with the finite element analysis based on a single set of deterministic material parameters, the stochastic finite element analysis considering rheological properties yields more conservative stress and deformation estimates. The differences in the extreme values of various indicators range from 2% to 6%, and the exceedance probabilities for all indicators are all greater than 50%. The proposed stochastic finite element method incorporating the spatial variability of rockfill rheological model parameters is more consistent with actual engineering conditions and can improve the reliability of deformation predictions for CFRDs.

Key words: concrete-faced rockfill dam; rockfill material; rheological model; parameter spatial variability; stochastic finite element method

随着面板堆石坝坝高提升、填筑分区增多和堆石料复杂性增强,面板堆石坝变形时空分布与演化特性呈现显著的非线性与不确定性,因此,面板堆石坝变形分析与控制在设计施工与运行维护中至关重要。

此外,在荷载长期作用下,堆石材料由于颗粒破碎、重排、颗粒强度劣化等原因,会发生持续时间较长的流变变形,这种变形使坝体的应力和变形进一步发生显著变化,存在较大安全隐患。孔维耀等^[1]

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52379097);重庆市自然科学基金创新发展联合基金重点项目(CSTB2024NSCQ-LZX0114);重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0873)

作者简介:贺林林(1983—),女,副教授,博士,主要从事港口海岸及近海工程结构设计理论与计算方法研究。E-mail:helinl@126.com
通信作者:刘洋(1982—),男,正高级工程师,博士,主要从事水工结构设计、计算及健康诊断研究。E-mail:liuyang99132@163.com

基于原位观测资料对公伯峡面板堆石坝沉降值进行分析,发现流变引起的最大沉降值达 210 mm,约为坝高的 0.16%,流变特性显著。邴能惠^[2]通过天生桥一级面板堆石坝位移实测数据分析得出,该坝体在施工期和运行期的变形量均较大,持续时间较长,堆石体的流变变形是面板顶部与垫层脱空并出现大量裂缝的重要原因。张丙印等^[3]通过实测数据反演得到流变模型参数,并计算得到不考虑堆石体流变变形特性时坝体最大沉降量与原型观测的最大沉降量相差 1.5 m,而考虑堆石体流变变形特性时计算结果与原型观测结果符合较好,说明流变变形对坝体沉降具有显著影响。

堆石体的流变变形是公认的导致坝体后期变形较大的主要原因之一^[4-5]。目前,堆石坝流变变形的预测方法主要有两类:一是利用现场变形观测数据,通过曲线拟合方法预测流变变形;二是建立堆石料流变模型预测流变变形。由于堆石体的实际物理力学参数在空间上往往存在一定的差异性和不确定性^[6-7],而传统有限元分析假定堆石料本构模型参数均质化,忽略了材料参数的空间变异性的影响,导致变形预测结果与实际观测值存在一定的偏差^[3,8]。随机有限元结合了传统有限元分析的精确性与自身随机分析的全面性,能够在考虑材料参数空间变异性的基础上,对堆石坝的结构变形响应进行更为准确的预测^[9-10]。已有研究表明堆石料材料参数在空间分布上存在不确定性,并采用随机有限元法研究材料参数空间变异性对坝体应力变形的影响。例如:朱晟等^[11]基于空间随机场理论,开展了两河口心墙堆石坝级配模型参数的空间变异性研究,结果表明考虑级配参数空间变异性的随机有限元计算结果相比于确定性有限元计算结果均不同程度地增大;Chi 等^[12]基于观音岩心墙堆石坝填筑期的现场干密度监测数据及室内三轴试验结果,建立了干密度与邓肯-张 $E-B$ 模型参数相关的随机场模型,研究表明考虑参数空间变异性的有限元分析结果与反演模拟结果更为一致,有助于提高大坝变形计算的准确性;白国炜等^[13]基于随机场理论,构建了糯扎渡心墙堆石坝的材料参数空间变异性模型,并进行了静、动力随机有限元分析,结果表明施工质量较高的大坝,竣工期最大沉降和蓄水期坝顶最大变形倾度的标准差和超标概率较小;蔡新合等^[14]基于渗流-流变耦合模型对覆盖层地基进行了随机有限元分析,进而讨论了参数空间变异性对面板堆石坝长期变形的影响。

以上研究证明了随机场理论在变形分析中的可行性及合理性,但现有考虑材料物理特性与模型参

数空间变异性的随机有限元分析多是针对堆石坝结构动力响应、坝体沉降等方面的研究,针对堆石料流变模型参数空间变异性的堆石坝流变变形预测研究相对较少,多数没有全面考虑参数空间变异性的影响。鉴于此,本文在已有研究的基础上,基于正交试验法对流变模型参数进行敏感性分析,采用协方差分解法生成模型参数随机场,通过 ABAQUS、MATLAB、Python 三方交互实现可以考虑材料参数空间变异性的非侵入式随机有限元交互计算,并利用蒙特卡罗法进行面板堆石坝位移响应指标的统计分析,系统考虑材料流变模型参数空间变异性对面板堆石坝的影响,以提高变形预测的合理性,为面板堆石坝确定性结构响应安全评价体系的建立提供参考。

1 随机有限元分析方法

本文所采用的非侵入式随机有限元分析方法,其核心思想是将传统确定性有限元分析与随机分析过程相分离,在确定的相关距离、自相关函数及变异系数下,采用协方差矩阵分解法得到堆石料参数随机场,然后将需要考虑空间变异性的参数映射到面板堆石坝传统确定性有限元模型中,在简化计算量和提高计算效率的同时可以获得可靠的数值仿真结果,实现传统有限元分析精确性与随机分析全面性的结合。

1.1 模型参数随机场的生成

在随机有限元分析中,确定单元网格的材料参数是实现随机有限元分析的关键步骤,综合考虑相关性与随机性,是实现面板堆石坝材料参数空间随机场合理构建的前提。鉴于对数正态随机场在模拟正值模型参数方面的优势,本文将筑坝堆石料材料参数均拟定为服从对数正态分布的随机变量^[15-16]。对数正态随机场可通过协方差矩阵分解法来模拟,具体步骤如下:

步骤 1 令随机场单元与有限元单元一致,将模型划分为 n_e 个单元,根据有限元计算网格单元坐标,利用 MATLAB 计算各单元中心点坐标 (x_i, y_i, z_i) ,其中 i 为有限元单元编号, $i=1, 2, \dots, n_e$ 。

步骤 2 采用拉丁超立方样本构成独立标准正态随机样本矩阵 $\mathbf{A}$;经过 n 次随机抽样(n 为随机模拟次数),可以得到 m 个列向量。

步骤 3 对标准正态空间等效互相关系数矩阵 $\mathbf{L}_1 \mathbf{L}_1^T = \mathbf{R}_0$ 进行 Cholesky 分解,由 $\mathbf{L}_1 \mathbf{L}_1^T = \mathbf{R}_0$ 得到三角矩阵 $\mathbf{L}_1$,与样本矩阵 $\mathbf{A}$ 相乘,可得相关标准高斯随机场 $\mathbf{H}_0$:

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{L}_1 \mathbf{A} \tag{1}$$

步骤4 通过等概率变换方法将 H_D 转换为相关非高斯随机场 H_i :

$$H_i = G_i^{-1}(\Phi(H_D)) \tag{2}$$

式中: $G_i^{-1}(\cdot)$ 为非高斯分布边缘累积分布的逆函数; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布累积分布函数; 下标 i 为正态变量。对 H_D 取指数, 便可得到对数正态随机场 H_{Di} :

$$H_{Di} = L_i A L_i^T \tag{3}$$

$$\sigma_{lni} = \sqrt{\ln(1 + (\sigma_i/\mu_i)^2)} \tag{4}$$

$$\mu_{lni} = \ln\mu_i - \sigma_{lni}^2/2 \tag{5}$$

式中: μ_i 为正态变量 i 的均值; σ_i 为正态变量 i 的标准差; μ_{lni} 为对数正态变量 lni 的均值; σ_{lni} 为对数正态变量 lni 的标准差。

步骤5 以上过程实现了一次对数正态随机场的建立, 对于步骤2中的 m 次随机抽样结果, 将步骤3和步骤4进行 m 次重复, 即实现了对数正态随机场的 m 次模拟与建立。

1.2 三方交互随机有限元的实现方法

基于 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互, 根据随机场协方差分析方法理论, 可实现随机有限元分析。三方交互实现的原理为采用 MATLAB 脚本语言和 Python 脚本语言编制脚本生成堆石料流变模型参数空间变异性随机场, 将其作为材料参数赋值给有限元软件中的计算模型, 进而开展随机有限元数值模拟并完成蒙特卡罗模拟计算。

基于 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互实现随机有限元模拟的步骤如下: ①采用 Python 脚本语言在 ABAQUS 中获取面板堆石坝模型堆石料网格和节点信息, 输出模型 inp 文件; ②采用 MATLAB 语言编制的随机场模拟程序, 根据网格和节点信息、相关距离、标准差和相关函数生成随机场向量; ③通过修改 inp 文件关键字, 将随机场向量作为材料参数映射到 ABAQUS 的有限元单元; ④由 MATLAB 批量修改 inp 文件, 采用 Python 脚本在 ABAQUS 中批量提交计算 inp 文件, 并提取计算结果。随机有限元计算流程见图1。

1.3 蒙特卡罗模拟方法

对于很多实际工程项目来说, 蒙特卡罗模拟需要进行大量的随机采样, 以得到较为精确的随机结果, 因此计算成本比较高。为节省随机有限元模拟时间, 提高计算效率, 在实际蒙特卡罗模拟过程中, 通常选取能够表征结构响应特点的指标, 并将指标的滑动平均值或滑动标准差随模拟次数的变化曲线达到“平稳”之后的模拟次数作为蒙特卡罗随机模拟次数。

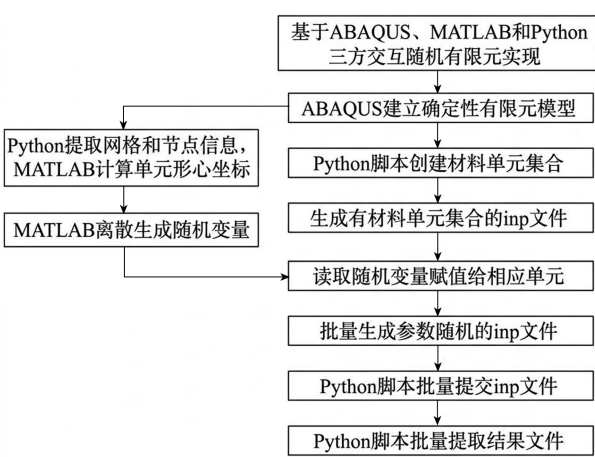


图1 随机有限元计算流程

1.4 分布方式检验与超标概率分析

正态概率分布图是由标准正态分布的分位数为横坐标、样本值为纵坐标的散点图。通过比较测试样本数据的分位数与已知分布线来检验数据的分布是否服从正态分布。若正态概率分布图中的数据点近似沿一条直线分布, 则说明测试样本数据满足正态分布, 否则不满足正态分布。

将随机场计算得到的应力变形结果与确定性参数计算得到的结果进行比较, 定义随机参数作用下堆石坝流变变形响应的概率(P)^[9,14]为坝体流变计算中参数最大值未超过设计值的计算次数与有限元模拟次数的比值。

2 有限元分析模型的建立

2.1 依托工程

本文依托某一典型面板堆石坝工程开展考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝随机有限元分析。该工程等级为 I 等大(1)型, 其挡水建筑物为混凝土面板堆石坝, 坝顶高程为 553.00 m, 坝顶宽度为 10 m, 最大坝高 73 m, 坝顶长度 150 m, 坝体分区示意图见图2。

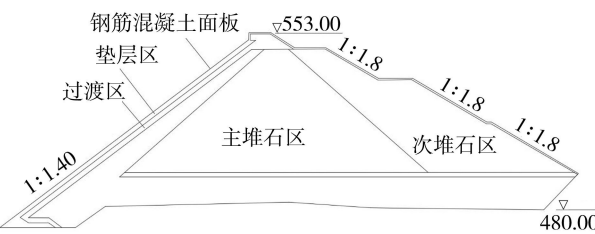


图2 某面板堆石坝典型剖面示意图(单位:m)

为提高建模效率, 本文基于该面板堆石坝的实际工程特征进行合理简化, 并建立相应的数值模型, 计算中不考虑基础的影响, 将坝基面上节点3个方向均进行约束, 坝体及左右两岸端顺河向垂直断面节点取坝轴线向约束。坝体整体取10个横断面, 网格节

点总数共 19024 个,单元总数 18428 个,其中混凝土面板单元 1748 个,单元类型采用六面体八节点缩减积分单元(C3D8R);堆石体单元 16680 个,单元类型采用六面体八节点单元(C3D8),如图 3 所示。面板与坝体之间采用 Goodman 单元连接^[17-18]。采用生死单元法^[10,19]模拟大坝填筑施工过程,逐级施加荷载,坝体变形计算分为 18 个荷载步。具体加载过程如下:荷载步 1~13 施加堆石料自重荷载,荷载步 14 施加堆石坝面板的自重荷载;荷载步 15~17 水库蓄水至高程 537.00 m(正常高水位),荷载步 18 计算流变变形。

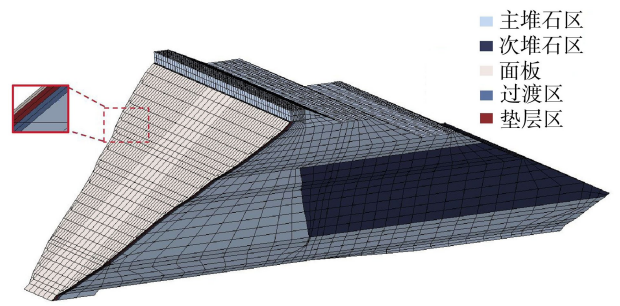


图 3 面板堆石坝网格划分

计算时,堆石料的本构模型采用邓肯-张 $E-B$ 模型,垫层区、过渡区、主堆石区和次堆石区模型参数取值如表 1 所示。混凝土面板按线弹性材料考虑,弹性模量 $E=15\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.18$,密度 $\rho=2.4\text{ g/cm}^3$ 。

表 1 坝体各分区邓肯-张 $E-B$ 模型参数

分区	$\rho/(g/cm^3)$	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	R_f	K
垫层区	2.20	48.4	0	0.88	1496
过渡区	2.14	52.3	0	0.88	1429
主堆石区	2.12	43.1	0	0.78	1000
次堆石区	2.09	38.0	0	0.63	556

分区	n	K_b	m	$\Delta\varphi$	K_{ur}
垫层区	0.29	412	0.21	5.2	2995
过渡区	0.29	433	0.23	8.9	2860
主堆石区	0.43	355	0.34	4.7	1975
次堆石区	0.36	240	0.20	9.1	550

注: φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; R_f 为破坏比; K 为切线模量参数; n 为切线模量指数; K_b 为体积模量参数; m 为体积模量指数; $\Delta\varphi$ 为摩擦角降低值; K_{ur} 为卸载再加载模量。

2.2 七参数流变模型

工程领域常用的流变模型包括三参数模型、双屈服面模型、九参数幂级数模型和七参数模型等^[20]。其中,改进的七参数模型通过同时考虑围压和剪应力效应,能更准确地模拟流变增量随时间递减的特性,且该模型理论完善、参数相对较少,在工程实践中应用广泛。本文采用七参数流变模型考虑堆石料流变效应。七参数流变模型将流变速率分解为体积流变速率 $\dot{\varepsilon}_v$ 和剪切变形速率 $\dot{\varepsilon}_s$:

$$\dot{\varepsilon}_v = \alpha \dot{\varepsilon}_{vf} (1 - \dot{\varepsilon}_{vf} / \dot{\varepsilon}_{sf}) \tag{6}$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \alpha \dot{\varepsilon}_{sf} (1 - \dot{\varepsilon}_{sf} / \dot{\varepsilon}_{sf}) \tag{7}$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{vf}$ 、 $\dot{\varepsilon}_{sf}$ 分别为 t 时刻已经累计的体积流变和剪切流变; $\dot{\varepsilon}_{vf}$ 为最终体积流变; $\dot{\varepsilon}_{sf}$ 为最终剪切流变; α 为堆石料第一天产生的流变应变占最终总流变应变的比例。为便于分析,对垫层区、过渡区和次堆石区 3 个材料分区的七参数流变模型参数值与次堆石区料取相同值^[21]。在参考同类工程基础上,根据有关试验结果^[20] 确定七参数流变模型参数取值如表 2 所示。

表 2 坝体各分区七参数流变模型参数取值

分区	$\alpha/10^{-3}$	$b/10^{-4}$	$c/10^{-4}$	$d/10^{-3}$	m_1	m_2	m_3
主堆石区	6	4	2.0	3.5	0.76	0.63	0.54
次堆石区	6	4	3.8	4.0	0.66	0.56	0.60

注: b 为体积流变参数; c 为剪切流变参数; d 为应力水平参数; m_1 为体积时间参数; m_2 为剪切时间参数; m_3 为后期衰减参数。

3 随机有限元实现及验证

3.1 基于正交试验的流变模型参数敏感性分析

七参数流变模型中 7 个参数对面板堆石坝应力变形均具有一定的影响^[22]。在进行流变模型计算分析时,基于有限元模型和正交试验法对流变模型参数进行了正交试验,对坝体竖向位移极值 s_w 、水平位移极值 s_v 和轴向位移极值 s_u 进行敏感性分析,正交试验因素水平如表 3 所示。通过极差分析法对面板堆石坝长期变形后的位移极值进行分析,结果见图 4。由图 4 可知, b 、 m_1 、 m_2 对位移的极差值较大,说明三者对坝体 s_w 、 s_v 、 s_u 影响较显著,而 α 、 c 、 d 、 m_3 对位移的影响较小,故可将 b 、 m_1 、 m_2 作为考虑随机场模拟参数空间变异性分析的重点。

表 3 正交试验因素水平

因素水平	$\alpha/10^{-3}$	$b/10^{-4}$	$c/10^{-4}$	$d/10^{-3}$	m_1	m_2	m_3
1	5.4	3.6	1.8	3.15	0.684	0.567	0.486
2	6.0	4.0	2.0	3.50	0.760	0.630	0.540
3	6.6	4.4	2.2	3.85	0.836	0.693	0.594

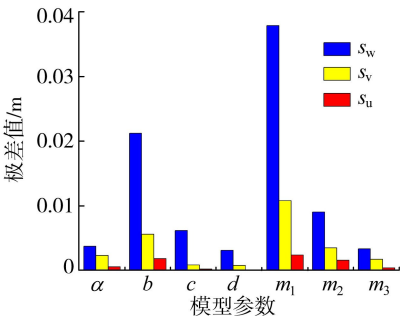


图 4 模型敏感性分析结果

3.2 随机场参数与数字特征确定

随机场理论主要通过土体参数的均值、方差、自相关函数以及自相关距离来描述岩土体在空间中的分布情况。针对参数随机场自相关距离,文献[23-

24]统计了土体参数波动范围的取值情况,堆石坝各分区采用的材料在物理力学性质上虽存在一定差异,但其整体差异较小。根据文献[25-27],堆石坝水平自相关距离一般设置为30~150 m,竖向自相关距离一般为水平距离的1/3~1/20。综合考虑,拟定本文堆石料竖向自相关距离为10 m、水平自相关距离为40 m。

针对参数随机场变异系数,根据文献[28]对堆石坝流变参数的反演分析结果,主堆石料的流变参数变异系数小于0.25,而次堆石料的小于0.35。考虑到主堆石区为坝体变形的主要区域,且其设计和施工要求较为严格,参考已有文献取值情况,设置该区域的流变参数变异系数为0.1,其余分区设为0.2。主、次堆石区料随机参数见表4。

表4 主、次堆石区料随机参数

材料	m_1 均值	b 均值	m_2 均值	变异系数
主堆石区料	0.76	0.0004	0.63	0.1
次堆石区料	0.66	0.0004	0.56	0.2

材料	竖向自相关 距离/m	水平自相关 距离/m	分布类型
主堆石区料	10	40	对数正态分布
次堆石区料	10	40	对数正态分布

在随机场模型中,一般采用理论自相关函数来描述堆石料同一分区中两个不同空间位置处参数之间的自相关性。由于高斯型自相关函数具有较好的平稳性^[16],本文选用高斯型自相关函数进行表征。

3.3 面板堆石坝随机有限元应力变形分析

以参数 m_1 为例,对堆石料流变模型参数随机场进行随机模拟,一次随机模拟得到的随机参数场如图5所示,可见,本文流变模型参数随机场基本符

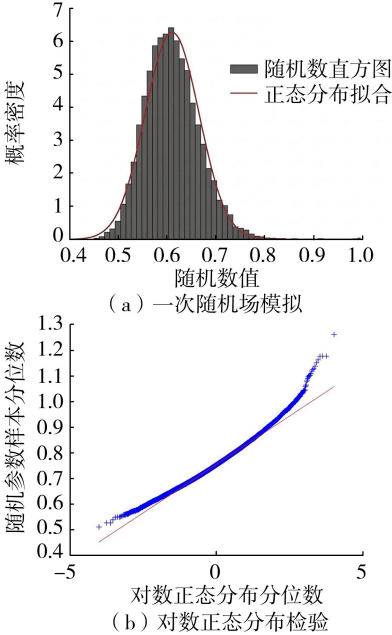


图5 随机参数 m_1 概率统计规律

合对数正态分布,表明计算结果可靠。

图6为随机参数一次典型实现结果,图7为随机有限元计算得到的考虑堆石料流变模型参数随坝体标准断面应力变形的一次抽样计算结果,可见考虑堆石料流变模型参数空间变异性后面板堆石坝的应力变形计算结果仍符合一般规律,表明了计算结果的可靠性。

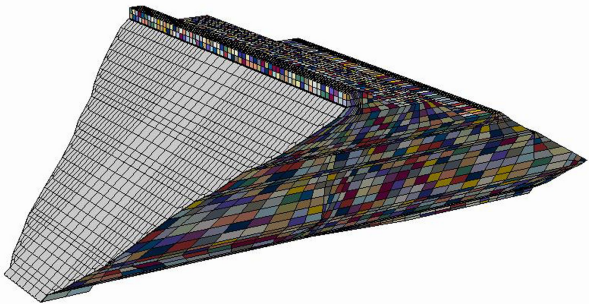


图6 随机参数一次典型实现结果

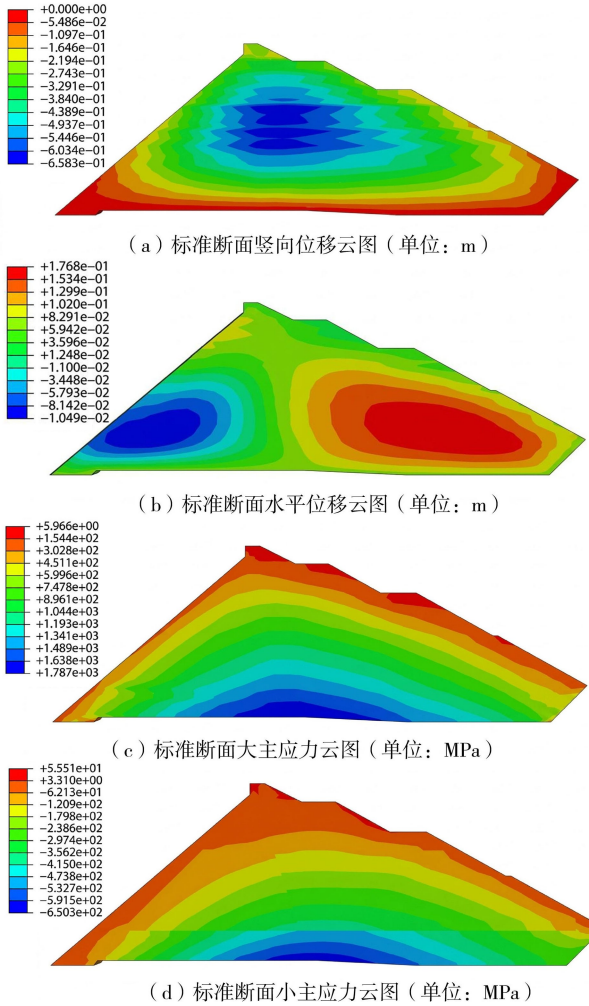


图7 随机有限元一次抽样计算结果

3.4 蒙特卡罗模拟次数的确定

蒙特卡罗方法的精度主要依赖于模拟次数,模拟次数的多少将直接决定模拟结果的真实性和过多的模拟次数会增加计算成本,因此需进行计算结

果收敛性检验。以参数 m_1 、 b 为例,将坝体竖向位移极值作为坝体响应值,对响应结果进行平均处理,绘制出平均响应值随模拟次数的变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可见,随着模拟次数的增加坝体位移响应值逐渐趋于稳定,并且当模拟次数小于 100 次时,竖向位移极值的均值变化幅度较大,当模拟次数超过 100 次并逐渐增加时,坝体响应趋于稳定。因此,本文选定 200 次模拟计算作为计算标准,对不同工况进行 200 次随机场计算,以保证所得到的结果具有足够的准确性和可靠性。

4 有限元分析结果

基于上述 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互开展考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝应力变形分析,评估流变模型参数空间变异性对坝体应力变形的影响情况。

对面板堆石坝位移极值敏感性较高的流变模型参数 m_1 、 b 、 m_2 同时进行随机有限元分析,结果如

图 9 和图 10 所示,图 10 中虚线为均一参数确定性有限元分析的结果。

由图 9 可知,各响应值的正态概率分布图上的点可以较好地用直线拟合,满足正态分布。由此进一步表明堆石料流变模型参数满足对数正态分布时,坝体应力变形极值分布基本满足正态分布,表明上述分析结果合理可靠。

根据各坝体响应值均值表征的随机有限元计算结果,将图 10 中考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝长期变形计算结果统计于表 5。由表 5 可知,考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元计算得到的面板堆石坝响应极值均比确定性有限元计算结果略大。根据文献[29]统计的已建面板堆石坝监测数据,同级别坝高的面板堆石坝施工后坝体最大沉降范围为 0.24~0.69 m,本文随机有限元计算结果变化范围在此区间之内,并与同级别坝高的计算结果基本相符^[30-31]。其中,竖向位移极值、水平位移极值、大主应力极值和小主应力极值的极值差异分别为 5.16%、3.86%、2.74%、

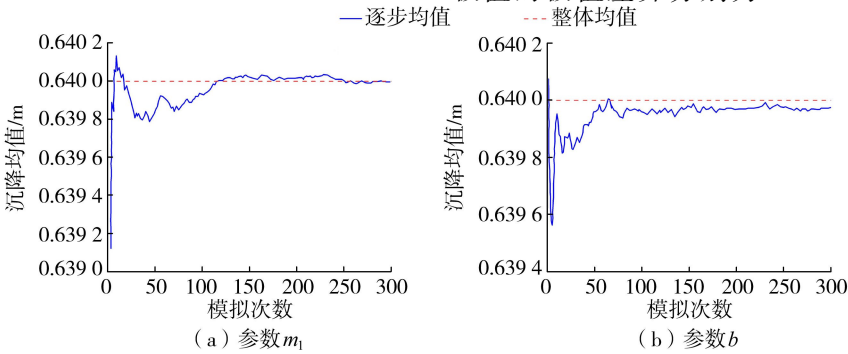


图 8 竖向位移极值的均值随模拟次数的变化

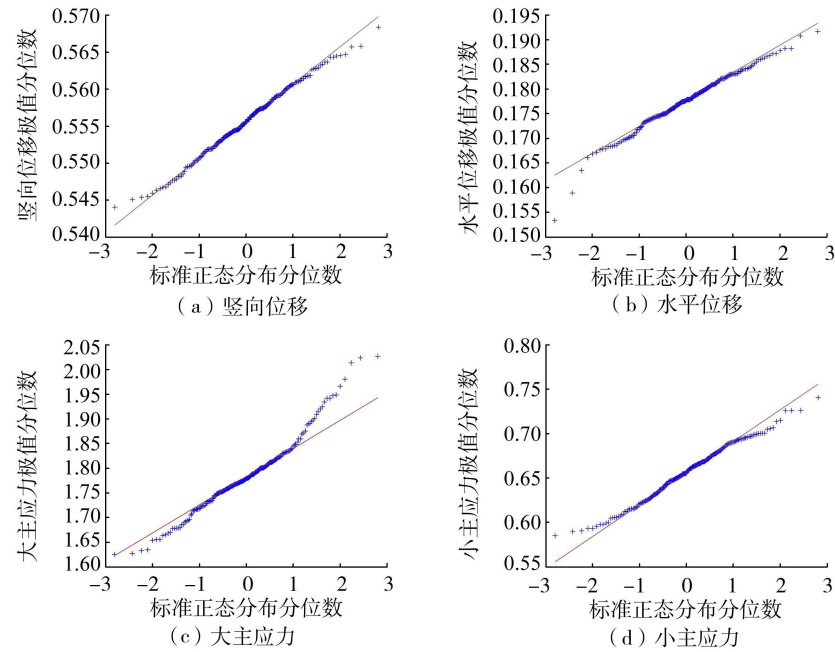


图 9 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝应力变形极值正态概率分布检验结果

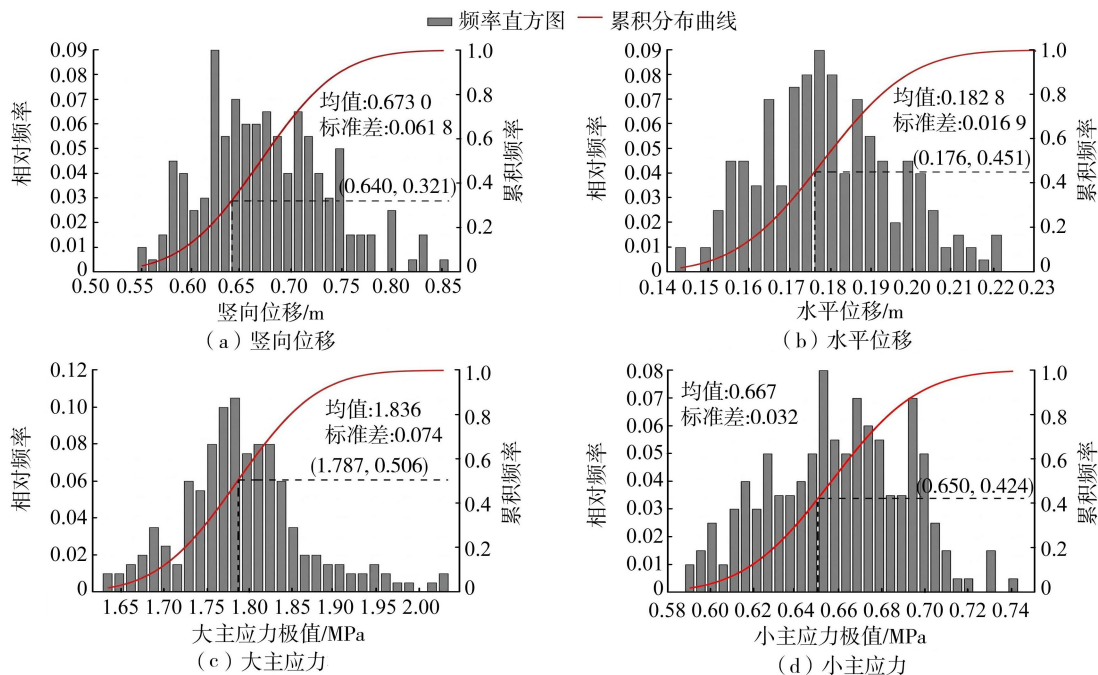


图 10 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝应力变形极值频率分布

表 5 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元计算结果

指标	极值差异/%	超标概率/%
竖向位移极值	5.16	67.9
水平位移极值	3.86	54.9
大主应力极值	2.74	50.4
小主应力极值	2.61	57.6

2.61%。与忽略堆石料流变模型参数空间变异性的确定性有限元相比,随机有限元的应力变形结果偏大在 2%~6%之间,计算结果偏于安全,提高了坝体的安全性。从超标概率计算结果看,若设计阶段忽略这种材料不确定性对结构进行设计分析,则有 67.9%的可能性会低估坝体竖向位移极值,54.9%的可能性会低估上下游最大水平位移,50.4%的可能性会低估坝体大主应力最大值,57.6%的可能性会低估坝体小主应力最大值。由此可见,考虑堆石料流变模型参数空间变异性的变形分析可以提高坝体应力变形预测的可靠性,有效降低因忽略材料不确定性而导致的预测偏差,对保障面板堆石坝的长期稳定性具有重要意义。

5 结 论

a. 依托确定性面板堆石坝三维有限元数值计算模型,通过正交试验参数敏感性分析,从七参数流变模型中筛选出了对坝体三向位移影响程度较高的 3 个模型参数,分别为 m_1 、 b 、 m_2 。

b. 对考虑堆石料流变及参数空间变异性的面板堆石坝模型进行随机有限元计算,得到流变模型参数随机场基本符合对数正态分布;蒙特卡罗统计

分析结果表明,面板堆石坝随机有限元计算得到的应力变形结果符合一般变形规律,当随机模拟至 200 次时,坝体各响应值达到统计稳定。

c. 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元计算结果与确定性有限元计算结果相比,堆石坝标准断面的竖向位移极值差异为 5.16%,水平位移极值差异为 3.86%,大主应力极值差异为 2.74%,小主应力极值差异为 2.61%,且各指标超标概率均超过 50%。由此可见,随机有限元计算结果偏于安全,考虑堆石料流变模型参数的空间变异性可提高变形预测的可靠性。

参考文献:

- [1] 孔维耀,王子健,王玉洁,等.公伯峡面板堆石坝堆石料流变特性反演分析[J].水利水电科技进展,2013,33(5):26-30. (Kong Weiyao, Wang Zijian, Wang Yujie, et al. Back analysis of rheological deformation characteristics of Gongboxia concrete-faced Rockfill Dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5):26-30. (in Chinese))
- [2] 郇能惠.高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J].岩土工程学报,2007,29(8):1143-1150. (Li Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8):1143-1150. (in Chinese))
- [3] 张丙印,师瑞锋.流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J].岩土力学,2004,25(8):1179-1184. (Zhang Bingyin, Shi Ruifeng. Influence of creeping on separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rock-fill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8):1179-1184.)

- 2004,25(8):1179-1184. (in Chinese))
- [4] 迟世春,王腾腾,贾宇峰.堆石料颗粒的延迟破碎时间研究[J].岩土工程学报,2024,46(12):2602-2609. (Chi Shichun, Wang Tengting, Jia Yufeng. Delayed crushing time for particles of rockfill materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46 (12):2602-2609. (in Chinese))
- [5] 温立峰,李锋,吴莉.渗流-流变耦合作用下深覆盖层面板堆石坝性状演化规律[J].西北水电,2023(5):7-14. (Wen Lifeng, Li Feng, Wu Li. Seepage-creep coupling analysis of concrete face rockfill dam built on alluvium foundation[J]. Northwest Hydropower, 2023 (5): 7-14. (in Chinese))
- [6] Feng Wenquan, Chi Shichun, Jia Yufeng. Random finite element analysis of a clay-core-wall rockfill dam considering three-dimensional conditional random fields of soil parameters [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159:105437.
- [7] Chen Hui, Liu Donghai. Stochastic finite element analysis of rockfill dam considering spatial variability of dam material porosity[J]. Engineering Computations, 2019, 36 (9):2929-2959.
- [8] 章荣军,于同生,郑俊杰.材料参数空间变异性对水泥固化淤泥填筑路堤稳定性影响研究[J].岩土工程学报,2018,40(11):2078-2086. (Zhang Rongjun, Yu Tongsheng, Zheng Junjie. Influences of spatial variability of material properties on stability of embankment filled with cement-stabilized mud [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11):2078-2086. (in Chinese))
- [9] 郭晴,刘东海,陈辉.空间差异性下沥青混凝土心墙坝应力与变形的随机有限元分析[J].长江科学院院报,2019,36(11):140-146. (Guo Qing, Liu Donghai, Chen Hui. Stress and deformation of asphalt concrete core wall dam in consideration of spatial difference: stochastic finite element analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36 (11): 140-146. (in Chinese))
- [10] 胡长明,田明辉,朱武卫,等.考虑蠕变模型参数空间变异性的高贴坡变形预测[J].应用力学学报,2025,42(4):850-859. (Hu Changming, Tian Minghui, Zhu Wuwei, et al. Deformation prediction of high sticking slope considering the spatial variability of creep model parameters [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2025, 42(4):850-859. (in Chinese))
- [11] 朱晟,卢知是.考虑级配空间随机特性的堆石坝变形应力分析[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):543-549. (Zhu Sheng, Lu Zhishi. Deformation and stress analysis of rockfill dams considering spatial randomness of gradation parameter [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6):543-549. (in Chinese))
- [12] Chi Shichun, Feng Wenquan, Jia Yufeng, et al. Application of the soil parameter random field in the 3D random finite element analysis of Guanyinyan composite dam [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17:e01329.
- [13] 白国伟,贾宇峰,相彪.基于随机场理论的糯扎渡大坝随机有限元分析[J].人民长江,2025,56(7):174-180. (Bai Guowei, Jia Yufeng, Xiang Biao. Stochastic finite element analysis on Nuozhadu core-wall rockfill dam based on random field theory [J]. Yangtze River, 2025, 56(7): 174-180. (in Chinese))
- [14] 蔡新合,周恒,黎康平,等.覆盖层地基参数空间变异性对面板堆石坝长期变形的影响[J].水力发电,2025,51(10):22-30. (Cai Xinhe, Zhou Heng, Li Kangping, et al. Influence of spatial variability of overburden foundation parameters on long-term deformation of face rockfill dams [J]. Water Power, 2025, 51(10):22-30. (in Chinese))
- [15] 陆雪妮,朱晟.考虑级配参数空间变异性的堆石坝随机有限元分析[J].水力发电,2022,48(6):81-89. (Lu Xueni, Zhu Sheng. Stochastic finite element analysis of rockfill dam considering spatial variability of gradation parameters [J]. Water Power, 2022, 48(6):81-89. (in Chinese))
- [16] 袁艳玲,郭琴琴,周正军,等.考虑参数相关的高心墙堆石坝材料参数反分析[J].岩土力学,2017,38(增刊1):463-470. (Yuan Yanling, Guo Qinqin, Zhou Zhengjun, et al. Back analysis of material parameters of high core rockfill dam considering parameters correlation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1):463-470. (in Chinese))
- [17] 杨鸽,何展国,甘龙厚,等.考虑蠕变及水力耦合效应的高面板坝系统可靠度[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(8):1218-1228. (Yang Ge, He Zhanguo, Gan Longhou, et al. System reliability analysis of a high concrete-faced rockfill dam considering creep effects and hydro-mechanical coupling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(8):1218-1228. (in Chinese))
- [18] 朱安龙,张胤,廖洁,等.大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J].水利水电科技进展,2020,40(1):48-55. (Zhu Anlong, Zhang Yin, Liao Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):48-55. (in Chinese))
- [19] 刘东海,张钊,陈辉.填筑形象对土石坝结构性态影响的精细有限元分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):514-522. (Liu Donghai, Zhang Zhao, Chen Hui. Precise finite element analysis on influence of construction appearances to earth-rock dam structural behaviors [J]. Journal of Hohai University (Natural

- Sciences), 2019, 47(6): 514-522. (in Chinese))
- [20] 王瑞骏, 李阳, 丁占峰. 堆石料流变模型参数敏感性分析的正交试验法[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 245-252. (Wang Ruijun, Li Yang, Ding Zhanfeng. The sensitivity analysis of seven-parameter rockfill rheological model based on the orthogonal test method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 245-252. (in Chinese))
- [21] 陈生水, 阎志坤, 傅中志, 等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 1949-1958. (Chen Shengshui, Yan Zhikun, Fu Zhongzhi, et al. Evaluation of safety performance of extremely high slab-faced gravel dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 1949-1958. (in Chinese))
- [22] 李国英, 米占宽, 傅华, 等. 混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1712-1716. (Li Guoying, Mi Zhankuan, Fu Hua, et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1712-1716. (in Chinese))
- [23] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 508-518. (Jiang Shuihua, Li Dianqing, Zhou Chuangbing, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 508-518. (in Chinese))
- [24] Tan Xiaohui, Wang Xue, Khoshnevisan S, et al. Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 260-269.
- [25] Zhu Bin, Pei Huaifu, Yang Qing. Reliability analysis of submarine slope considering the spatial variability of the sediment strength using random fields [J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 340-350.
- [26] 李占超, 侯会静. 大坝安全监控指标理论及方法分析[J]. 水力发电, 2010, 36(5): 64-67. (Li Zhanchao, Hou Huijing. Theory and methods on dam safety monitoring indexes [J]. Water Power, 2010, 36(5): 64-67. (in Chinese))
- [27] Chen Jianyun, Liu Pengfei, Xu Qiang, et al. Seismic analysis of hardfill dams considering spatial variability of material parameters [J]. Engineering Structures, 2020, 211: 110439.
- [28] 马春辉. 基于离散元的堆石料宏细观参数智能反分析及其工程应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [29] 温立峰, 柴军瑞, 许增光, 等. 面板堆石坝性状的初步统计分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1312-1320. (Wen Lifeng, Chai Junrui, Xu Zengguang, et al. Preliminary statistical analysis of behavior of concrete face rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1312-1320. (in Chinese))
- [30] 谢晓华, 李国英. 成屏混凝土面板堆石坝应力变形分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 243-246. (Xie Xiaohua, Li Guoying. Stress-deformation analysis of Chengping concrete-faced rockfill dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 243-246. (in Chinese))
- [31] 朱纯祥, 梁林林, 唐国峰. 莲花混凝土面板堆石坝监测成果分析[J]. 水力发电, 2000(4): 49-52. (Zhu Chunxiang, Liang Linlin, Tang Guofeng. Analysis on the observation results of Lianhua concrete facing rockfill dam [J]. Water Power, 2000(4): 49-52. (in Chinese))
- (收稿日期: 2025-05-20 编辑: 熊水斌)
- +++++
- (上接第 41 页)
- [29] Li Chengjun, Wu Yacen, Lin Haijun, et al. ECG denoising method based on an improved VMD algorithm [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 22725-22733.
- [30] Xu Deming, Wang Yuan, Huang Jingqi, et al. Multi-step prediction model enhanced by adaptive denoising and encoder-decoder for shield machine cutterhead torque in complex conditions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 158: 106398.
- [31] 张宏瑞, 江超, 盛金保, 等. 基于 IJTIL-WELM 的混凝土坝变形自适应预测方法[J]. 水利水电工程学报, 2026(3): 128-137. (Zhang Hongrui, Jiang Chao, Sheng Jinbao, et al. Adaptive method for predicting concrete dam deformation based on IJTIL-WELM [J]. Hydro-Science and Engineering, 2026(3): 128-137. (in Chinese))
- [32] Zhu Qiannan, Chang Pengxia, Zhu Tian, et al. Daily streamflow interval predictions up to 30 days ahead based on multi-timescale nested strategy and multi-objective walrus optimizer [J]. Journal of Hydrology, 2025, 652: 132646.
- [33] Wang Shaowei, Gu Chongshi, Liu Yi, et al. Displacement observation data-based structural health monitoring of concrete dams: a state-of-art review [J]. Structures, 2024, 68: 107072.
- [34] 陈斯煜, 盛金保, 林潮宁, 等. 基于 OVMD 的大坝变形监测数据预处理方法[J]. 水利水电工程学报, 2025(3): 139-147. (Chen Siyu, Sheng Jinbao, Lin Chaoning, et al. A preprocessing method for dam deformation monitoring data based on OVMD [J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(3): 139-147. (in Chinese))
- (收稿日期: 2025-06-17 编辑: 俞云利)