

考虑渗透系数空间变异性的超高心墙 堆石坝渗流分析

黄伟杰¹, 庞锐², 徐明洋², 黄凯³, 陈建国³, 赵鹏⁴

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 广西壮族自治区水利科学研究院, 广西 南宁 530023; 4. 郑州安源工程技术有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为探究超高心墙堆石坝多组防渗材料空间变异性对渗流安全的影响, 根据建立的随机渗流分析模型, 对某超高心墙堆石坝内多组防渗材料的渗透系数进行空间离散, 系统研究坝体和坝基内渗流控制指标的演变规律。结果表明: 心墙渗透系数的变异系数每增加 0.1, 其最大水力坡降的均值增大 9.8%, 远高于帷幕灌浆和天然坝基。同时考虑基岩与帷幕灌浆的随机渗流特性后, 帷幕前压力水头的最大值与仅考虑帷幕灌浆时增大了 5%, 坝基材料的空间变异性对帷幕灌浆渗流安全有一定影响。忽视防渗体的空间变异性, 会高估防渗结构的渗流安全状态。

关键词: 超高心墙堆石坝; 空间变异性; 渗透系数; 防渗结构; 非侵入式随机渗流分析

中图分类号: TV698.23

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0143-07

Seepage Characteristics Analysis of Super-high Core Rockfill Dam Considering Spatial Variability of Hydraulic Parameters

HUANG Weijie¹, PANG Rui², XU Mingyang², HUANG Kai³, CHEN Jianguo³, ZHAO Peng⁴

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

3. The Water Conservancy Research Institute of Guangxi, Nanning, Guangxi 530023, China;

4. Zhengzhou Anyuan Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450000, China)

Abstract: In order to analyze the influence of spatial variability of multiple impervious materials on seepage safety of super-high core rockfill dam, according to the established random seepage model, the seepage coefficient of multi-anti-seepage structure in super-high core rockfill dam is spatially discrete, and the seepage control index in the dam body and foundation is systematically analyzed. The results show that the mean value of the maximum hydraulic slope increases about 9.8% when the permeability variation coefficient of the caution wall increases by 0.1, which is much higher than curtain grouting and natural dam foundation. In addition, considering the random seepage characteristics of bed-rock and curtain grouting, the maximum pressure water head before curtain grouting increases by 5% compared with only considering curtain grouting. The influence of spatial variability of dam foundation materials on the seepage safety of curtain grouting should not be ignored. The results show that the spatial variability of impervious body has adverse effects on seepage safety in both steady and unsteady seepage conditions.

Keywords: super-high core rockfill dam; spatial variability; hydraulic parameters; anti-seepage structure; non-intrusive random seepage analysis

收稿日期: 2023-08-26

修稿日期: 2023-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(52379117; 52279096; 52279125)

作者简介: 黄伟杰(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程防灾减灾。E-mail: m15778112587@163.com

通讯作者: 庞锐(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工岩土工程风险评估与防灾减灾方面的教学和科研工作。

E-mail: pangrui@dlut.edu.cn

渗透性是超高心墙堆石坝的重要安全指标,抗渗性是防渗结构的核心性能指标^[1]。然而,受物质组成、沉积条件等地质作用和人工不可控因素的影响,心墙堆石坝防渗结构的水力参数在空间分布上具有较强的变异性,其对高坝渗透性能的影响机制尚不明朗,有待进一步探明。

已有针对坝体土体参数空间变异性的研究主要基于三方面,即材料参数的统计学分布规律、随机场的空间离散方法和随机数值模拟。首先,基于土体参数在空间上的异质性,统计学上采用高斯及非高斯分布来描述其分布规律^[2-6]。其次,基于参数统计规律的随机场空间离散方法,如局部平均法、中点法、Karhunen-Loeve 级数展开法等进行的土体参数研究也已被广泛开展^[7-10]。此外,还有基于非侵入式的随机分析,该方法将随机场分析与确定性数值分析进行了解耦,因其限制较小而应用较广^[11-13]。然而,基于上述研究,进一步建立适用于高土石坝的非侵入式随机渗流分析框架的文献却鲜有报道。即当前针对超高心墙堆石坝防渗结构水力参数统计特征的研究尚存不足。

当前,已有较多针对单一材料水力参数的空间变异性的相关研究^[14-16]。其中,Phoon 等^[4]的研究表明对数正态分布对土水特征曲线参数的拟合效果最佳;Cho^[14]对某土坝(5 m 高)的渗透系数以符合对数正态分布的特性进行随机场离散,主要研究了浸润面及渗流量等渗流控制指标的变化规律;Tan 等^[16]使用中点法对某土坝(13.7 m 高)渗透系数、土水特征曲线参数以对数正态分布随机场进行离散,并系统研究了参数离散程度及相关距离对土坝非稳态渗流特性的影响。但上述研究的对象主要为不包含复杂材料分区的低坝,缺少针对高坝防渗结构,特别是具有耦合随机渗流特性的高心墙坝心墙-灌浆-地基这一复杂防渗组合结构的关注。

综上,基于中点法随机场离散和非饱和渗流分析,提出适用于超高心墙坝的非侵入式随机渗流分析模型,研究超高心墙堆石坝内各防渗材料水力参数空间变异性对渗流安全的影响,并进一步研究多防渗材料随机场耦合情况下渗流控制指标的变化规律,为超高心墙堆石坝的渗流安全控制提供依据。

1 非侵入式随机渗流分析

1.1 水力参数随机性

超高心墙堆石坝内,堆石料、过渡料、心墙、灌浆和地基等材料的水力参数受物质组成等影响均具有

不同程度的空间变异性。鉴于堆石料、过渡料等非防渗材料的渗透系数与防渗结构相差超过至少两个数量级,非防渗材料水力参数的空间变异性对坝内渗流特性的影响可以忽略,因此主要考虑心墙、帷幕灌浆和坝基等材料的空间变异性对渗流控制指标的影响。其中,坝基天然防渗体受风化、沉积环境的影响,水力参数在空间分布上具有较强的不可控性和变异性,心墙和灌浆等人工防渗体则主要受物质微观不确定性和施工质量影响,具有一定的空间变异性。

1.2 中点法随机场离散

中点法随机场离散具有实现简单,几何模型适配能力强,可模拟高斯及非高斯随机场等优点^[11]。在中点法的基础上,该研究对超高心墙堆石坝不同材料的水力参数进行随机场离散。

1.2.1 水力参数的自相关函数

土体参数在不同位置上具有一定的自相关性,其可通过多种自相关函数来进行描述。采用指数型自相关函数对水力参数的自相关性进行考虑,其公式如下:

$$\rho(Z_1, Z_2) = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{l_h^2}\right) + \left(\frac{y^2}{l_v^2}\right)\right] \quad (1)$$

式中: ρ 表示随机场离散空间内任意两点的自相关系数; Z 表示随机场离散空间点的位置坐标; x 和 y 分别表示两点沿 x 轴和 y 轴的空间距离; l_h 和 l_v 分别表示随机场在水平向和垂直向上的自相关距离。

参考相关的研究成果^[5],随机渗流分析中的水平自相关距离均取 30 m,垂直相关距离均取为 3 m。

1.2.2 中点法非高斯随机场离散

首先,在随机场网格与确定性渗流分析有限元网格一致的基础上,按渗流分析所使用的有限元网格的空间坐标信息生成标准正态随机样本 R ;然后,根据所选取的自相关型函数,选取式(1)指数型函数,获取空间任意两点位置渗透系数的自相关系数矩阵 χ ,并对 χ 进行乔列斯基分解, $L_1 L_1^T = \chi$,获得下三角阵 L_1 ;再按式(2)得到考虑自相关性的标准高斯随机场 F ;最终,根据式(3)的等概率变换公式可将标准高斯随机场 F 转换为所需要的非高斯型随机场 P 。

$$F = L_1 \cdot \chi \quad (2)$$

$$P = G_i^{-1}\{\phi[F]\} \quad (3)$$

式中: $G_i^{-1}(\cdots)$ 是非高斯分布边缘分布的逆函数, $\phi(\cdots)$ 是标准正态分布的累计分布函数。

1.3 非饱和和渗流计算

高心墙堆石坝作为挡水结构,坝体内渗流模式以非稳态非饱和渗流为主,其渗流控制方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[K_x(\phi)\frac{\partial \phi}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[K_y(\phi)\frac{\partial \phi}{\partial y}\right]=0\quad(4)$$

式中:φ 为水头; K_x 和 K_y 为水平和垂直饱和渗透系数,在不考虑渗透系数各向异性情况下 K_x = K_y。

在非饱和状态下,渗透系数与饱和度和基质吸力相关。通过土-水特征曲线(SWCC)描述,SWCC 的强非线性特性对非饱和和渗流计算的收敛性和模拟结果影响较大。

1.4 随机渗流分析流程

Abaqus 具有随机场二次开发简易、批量计算能力强和操作便捷等优点,在进行非侵入式随机渗流分析中优势明显。在上述非稳态、非饱和和渗流分析软件基础上,建立与 Matlab 交互的高心墙坝非侵入式随机渗流分析方法,流程如图 1,其主要包含以下

- 四步:
- (1) 建立渗流模型。根据几何空间信息,建立超高心墙堆石坝的数值模型,并在完成网格的离散后输出模型。
 - (2) 水力参数随机场离散。首先,利用(1)内输出的模型,结合水力参数的统计信息,使用中点法分别对需要考虑空间变异性的材料及其相关参数进行随机场离散,并最终组合形成批量非侵入式随机渗流计算文件。
 - (3) 随机渗流计算。非侵入式随机分析需要多次调用渗流分析软件进行非饱和、非稳态渗流计算,而 Abaqus 提供的批量计算功能和便捷的外部调用功能可实现非侵入式随机渗流批量计算的目的。
 - (4) 渗流分析结果后处理。由于随机渗流的初步计算结果无法直接提取水力坡降、截面流量以及自由水面等渗流安全控制指标的信息,需进行一定后处理操作,获取上述渗流控制指标。

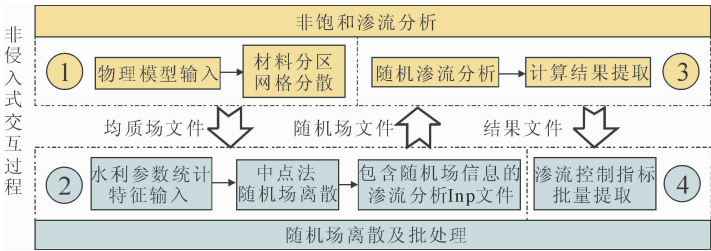


图 1 非侵入式随机渗流分析流程

2 超高心墙堆石坝案例

以某超高砾石土心墙堆石坝为例,该坝坝顶高程 2 902 m,最大坝高 315 m,上游最高蓄水至高程 2 895 m 处,下游水位高程为 2 600 m。坝体包含堆石料、过渡料、反滤料、心墙和接触粘土等材料,坝基则由帷幕灌浆、弱卸荷、弱风化上带、弱风化下带和微风化岩体构成,其中帷幕灌浆深度为 126 m,灌至相对不透水的微风化岩体内,具体空间分布如图 2 所示。该坝内部包含心墙、帷幕灌浆和天然地基等防渗性能较好的防渗结构,则以上述防渗结构为主

要对象,结合所提出的非侵入式随机渗流分析模型,进行单一材料渗透系数空间变异及多组材料渗透系数空间变异性耦合的随机渗流分析。

土-水特征曲线(如图 3 所示)SWCC 是超高心墙堆石坝内非饱和和渗流分析的重要根基,其对渗流分析收敛速度和计算结果均有较大影响,而图 2 内心墙在非饱和和渗流情况下所使用的 SWCC 曲线根据相关试验结果进行拟定^[18]。坝体及坝基内各分区材料的参数如表 1 和表 2 所示。

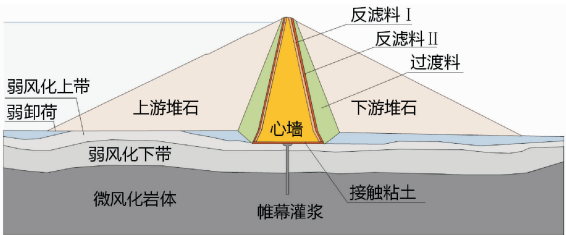


图 2 超高心墙堆石坝材料分区

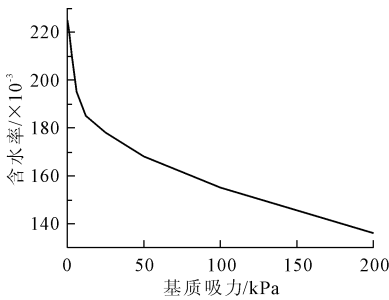


图 3 心墙的土-水特征曲线

材料取均值时,坝体及坝基内的等势线如图 4 所示,其中坝体内水头的落差集中在心墙内部,坝基内水头落差集中在帷幕灌浆附近。因此,心墙、帷幕灌浆及与帷幕灌浆接触的坝基的渗流需要重点关注。此外,为了降低随机场数量对结果的影响,本文内以离散 100 个随机场为基础进行统计分析^[16]。

表 1 坝体内材料渗透系数

材料	均值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	变异系数
心墙	7.0×10^{-8}	0.1、0.3、0.6
反滤料 I	4.0×10^{-6}	—
反滤料 II	4.0×10^{-4}	—
接触粘土	6.0×10^{-9}	—
上游堆石料	9.0×10^{-4}	—
下游堆石料	2.0×10^{-3}	—

表 2 坝基内材料渗透系数

材料	均值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	变异系数
帷幕灌浆	1.0×10^{-7}	0.1、0.5、1
弱卸荷	5.0×10^{-5}	—
弱风化上带	3.0×10^{-6}	0.1、0.5、1
弱风化下带	7.5×10^{-7}	0.1、0.5、1
微风化岩体	2.5×10^{-7}	0.1、0.5、1

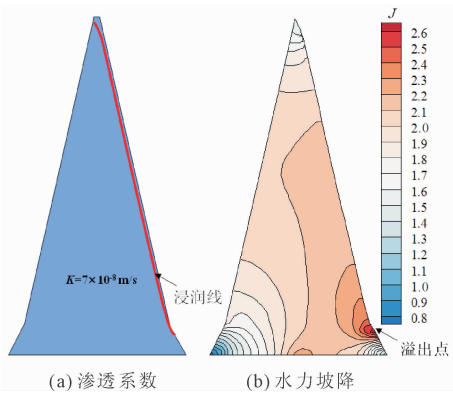


图 4 均质场的水力坡降

3 随机渗流分析结果

3.1 空间变异性对心墙稳态渗流的影响

水力坡降是被广泛的用于判断土体是否发生渗透破坏的临界条件,是渗流安全控制中的重要指标之一,此外,渗透流量的变化也可反映防渗结构的安全状态。考虑坝体和坝基的分区情况较为复杂,仅选取心墙的上述渗流安全指标进行展示。在不考虑各分区材料空间变异性的条件下,渗流主要控制指标水力坡降的计算结果如图 4 所示,其与心墙渗透系数变异系数 (Cov) 取 0.6 时的结果(见图 5)相比,

水力坡降的整体分布存在明显差异,水力坡降受渗透系数空间变异性的影响在空间分布上具有一定随机性,但溢出点的位置和心墙底部水力坡降的分布规律受到的影响相对较小。

心墙内最大水力坡降和心墙内流量的概率密度函数 PDF(Probability Density Function) 如图 6 和图 7 所示,PDF 基本符合对数正态分布的特征。心墙内最大水力坡降在 3.17 ~ 5.43 的范围内,均值为 3.97,变化幅度为均值的 56.9%;心墙中部截面的渗流量在 $49.3 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m}) \sim 67.9 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 的范围,且均值为 $57.6 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$,变化幅度为均值的 31.6%。上述结果表明心墙水力参数的空间变异性对心墙渗流控制指标具有较大影响。

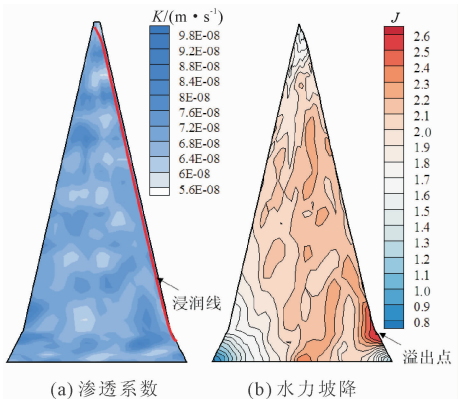


图 5 随机场的水力坡降

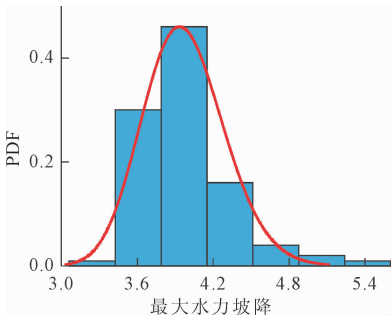


图 6 最大水力坡降的概率密度分布 ($Cov = 0.6$)

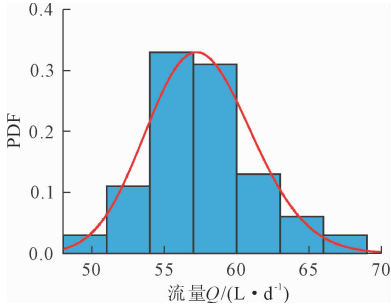


图 7 渗流流量的概率密度分布 ($Cov = 0.6$)

3.2 单一材料稳态随机渗流特性

针对高心墙堆石坝内坝体和坝基防渗结构多且复杂的特点,首先单独考虑坝体内心墙、帷幕灌浆和微风化岩体空间变异性对各自渗流安全控制指标的影响。其中,不同材料渗透系数的变异系数范围按表 1 和表 2 确定。各防渗结构的渗流安全控制指标的变化规律如图 8 所示,其中心墙、帷幕灌浆和微风化岩体的水力坡降和流量在渗透系数空间变异性影响下表现出不同的变化规律:

(1) 心墙、帷幕灌浆和微风化岩体内最大水力坡降的演变规律存在差异。心墙内 $Cov=0.1$ 时,最大水力坡降范围为 2.25~2.86,而 $Cov=0.6$ 时,该范围升到 3.13~5.02,两个范围之间不存在任何交

集,最大水力坡降范围的偏移量极大(Cov 每提升 0.1,均值偏移约 9.8%)。而帷幕灌浆和微风化岩体内均不存在最大水力坡降范围偏移过大的情况(Cov 每提升 0.1,均值偏移均小于 3%)。这意味着心墙空间变异性对渗流安全的影响明显高于帷幕灌浆和微风化岩体。

(2) 心墙渗透系数在空间上的变异程度较大时,对心墙的渗流安全有不利影响。参考英菲尔尼罗坝和双江口坝的允许平均水力坡降值 4.1 和 4.0^[1],若以允许平均水力坡降 4.0 为标准,当内心墙材料的渗透系数在空间上的变异系数超过 0.3 后,心墙坡降最大区域(溢出点附近)发生渗流破坏的概率会大幅度上升。

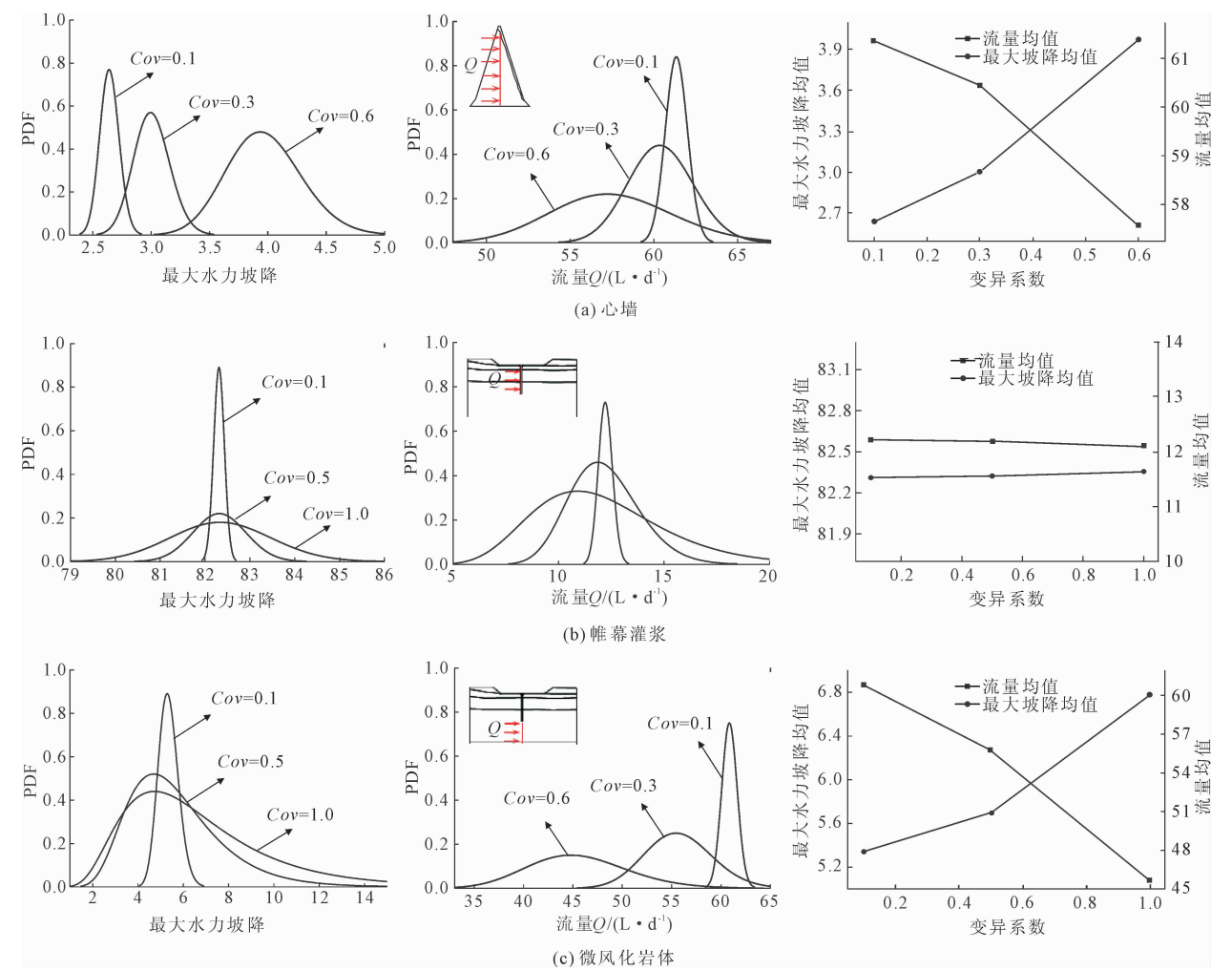


图 8 不同材料的随机渗流分析结果

(3) 心墙、帷幕灌浆和微风化岩体内渗流流量均随着变异系数的增大而降低。与最大水力坡降的变化规律相反,变异系数每增大 0.1,心墙、帷幕灌浆和微风化岩体内的流量均值将降低约 13%、8%

和 16%。

(4) 变异系数的增大,将导致各渗流安全控制指标的离散范围增大。其中,变异系数每增大 0.1,心墙、帷幕灌浆和微风化岩体内最大水力坡降的离

散范围分别增大约 39%、55%、44%；而流量的离散范围分别增大约 71%、164%、206%。值得注意的是，心墙渗流控制指标的离散范围增加量均小于帷幕灌浆和微风化岩体。

由以上结果可知，变异系数每增大 0.1，心墙的最大水力坡降具有最大的均值偏移量，以及最小的离散范围增量，这意味着心墙渗透系数的变异程度对坝体渗流安全状态尤为重要。

3.3 多组材料稳态随机渗流耦合特性

心墙、帷幕灌浆和天然地基共同构成的复杂防渗组合结构为超高心墙堆石坝的渗流安全提供了重要保障，然而，不同防渗结构的随机渗流组合影响鲜有研究。由于心墙与帷幕灌浆、基岩之间随机渗流特性的相互影响很小，可忽略不计，因此在此主要分析帷幕灌浆与微风化岩体、弱风化岩体之间的随机渗流耦合效应。与仅考虑帷幕灌浆渗透系数空间变异性（单一材料工况）不同，在此考虑基岩材料与帷幕灌浆空间变异性的耦合影响（多组材料耦合工况），为便于展示，基岩内材料和帷幕灌浆取相同的变异系数，且帷幕灌浆的最大水力坡降和流量变化如图 9 和图 10 所示。结果表明：相较于单一材料工况，考虑多组材料耦合渗流后，最大水力坡降降低

3.1%，平均流量则增大约 4.2%。可见忽视多防渗材料的耦合作用，会明显低估帷幕灌浆内的流量，而高估水力坡降。

4 结 论

本文基于中点法随机场离散和非饱和渗流分析，建立了非侵入式随机渗流分析框架，系统研究了 300 m 级超高心墙堆石坝的非饱和随机渗流特性，得到以下结论：

（1）相较于均质场，考虑渗透系数空间变异性后，防渗结构的水力坡降、流量等渗流安全指标在空间上也具有一定随机性。且渗流安全指标受水力参数空间变异性影响的程度在不同空间位置上有一定的差异，例如心墙中间部位的水力坡降、浸润线受随机场的影响较强，而心墙底部的影响则相对较弱。

（2）仅考虑材料自身渗透系数空间变异性的影响时，较大的变异系数会使心墙、灌浆和地基的最大水力坡降均值增大，说明忽视防渗结构的随机变异性会使结构处于相对危险的状态。针对心墙，将变异系数控制在一定范围内可以显著控制该不利影响。

（3）不同防渗结构的渗流安全指标随变异系数的增大表现出不同的演变规律。具体地，渗透系数变异系数每增大 0.1，心墙最大水力坡降均值将提升 9%，而帷幕灌浆和微风化岩体均值的提升小于 3%，说明空间变异性对心墙的影响明显大于帷幕灌浆和微风化岩体。此外，三者流量均表现出会随变异系数增大而减小的特征。实际工程中，心墙部位对水力参数随机性的响应最敏感，需重点关注。

（4）与仅考虑单一材料随机渗流相比，多组材料随机渗流耦合情况下，帷幕灌浆处的水力坡降、渗流量和帷幕灌浆前压力水头的最大值和离散范围均偏大，忽视水力参数空间变异性的影响对超高坝的安全防护不利，应在确定性分析基础上以放大系数的形式考虑该影响。

参考文献：

- [1] 张宗亮. 高土石坝筑坝技术与设计方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [2] 唐小松, 李典庆, 周创兵, 等. 不完备概率信息条件下边坡可靠度分析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1027-1034.
- [3] 李 芃. 合肥市非饱和黏土的空间变异性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [4] Phoon K K, Santoso A, Quek S T. Probabilistic analysis

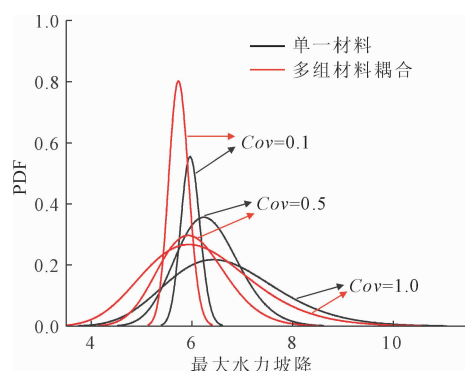


图 9 最大水力坡降的概率密度分布图

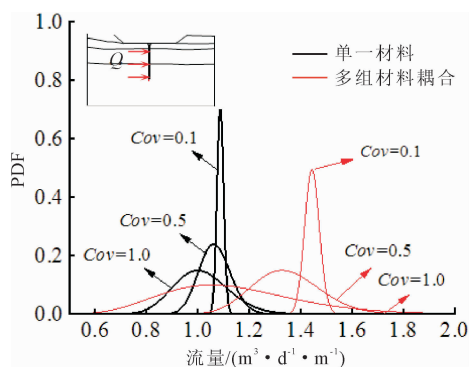


图 10 渗流流量的概率密度分布

- of soil-water characteristic curves [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(3):445-455.
- [5] 吴越,刘东升,孙树国,等. 岩土强度参数正态-逆伽马分布的最大后验估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2019,38(6):1188-1196.
- [6] Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Han Xiangwei, et al. Spatial variability of soil parameters of the van genuchten model at a regional scale [J]. Clean Soil Air Water, 2015,43(2):271-278.
- [7] Al-Bittar T, Soubra A H. Bearing capacity of strip footings on spatially random soils using sparse polynomial chaos expansion[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(13):2039-2060.
- [8] Wu Shihhsuan, Ou Changgu, Ching Jianye, et al. Reliability-based design for basal heave stability of deep excavations in spatially varying soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2012, 138(5):594-603.
- [9] 张抒,唐辉明,刘 晓,等. 基于饱和渗透系数空间变异结构的斜坡渗流及失稳特征[J]. 地球科学, 2018,43(2):622-634.
- [10] Li Yichuan, Pang Rui, Xu B, et al. GPDEM-based stochastic seismic response analysis of high concrete-faced rockfill dam with spatial variability of rockfill properties based on plastic deformation [J]. Computers and Geotechnics, 2021,139(12):104416.
- [11] 李典庆,蒋水华,周创兵. 基于非侵入式随机有限元法的地下洞室可靠度分析[J]. 岩土工程学报,2012, 34(1):123-129.
- [12] 董 辉,黄润秋,罗 潇,等. 堆积碎石土斜坡浅表入渗的空间分布与变异性研究[J]. 岩土工程学报, 2017,39(8):1501-1509.
- [13] Santoso A M, Phoon K K, Quek S T. Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides [J]. Computers & Structures, 2011,89(11-12):893-900.
- [14] Cho Sungeum. Probabilistic stability analysis of rainfall induced landslides considering spatial variability of permeability[J]. Engineering Geology, 2014,171:11-20.
- [15] 薛 阳,吴益平,苗发盛,等. 库水升降条件下考虑饱和渗透系数空间变异性的白水河滑坡渗流变形分析[J]. 岩土力学,2020,41(5):1709-1720.
- [16] Tan X, Wang X, Khoshnevisan S. Seepage analysis of earth-rock dams considering spatial variability of hydraulic parameters[J]. Engineering Geology,2017,288:60-269.
- [17] 刘 印. 饱和-非饱和土体渗流分析及其工程应用[D]. 上海:同济大学,2009.
- [18] 卢 斌,谢兴华,吴时强,等. 超高心墙坝非稳定渗流三维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2018,40(S2):73-76.

(上接第106页)

- [16] Soon N W, Lee L M, Khun T C, et al. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2013,17(4):718-728.
- [17] Qabany A A, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [J]. Geotech, 2013,63(4):331-339.
- [18] Dejong J T, Mortensen B M, Martinez B C. Bio-mediated soil improvement [J]. Ecological Engineering, 2010,36(2):197-210.
- [19] Soon N W, Lee L M, Khun T C, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014,14(5):04014006
- [20] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [21] Kim D, Park K. Effects of ground conditions on microbial cementation in soils[J]. Materials, 2013,7(1):143-156.
- [22] Cui Mingjie, Zheng Junjie, Zhang Ruijie, et al. Influence of cementation level on the strength behavior of bio-cemented sand[J]. Acta Geotechnical, 2017,12(5):971-986.
- [23] 李艺隆,国 振,徐 强,等. 海水环境下 MICP 胶结钙质砂干湿循环试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(9):1740-1749.
- [24] Tian Xu, Xiao Hua, Li Zhi, et al. Experimental study on the strength characteristics of expansive soils improved by the MICP method [J]. Geofluids, 2022:3089820.
- [25] 郑俊杰,宋 杨,赖汉江,等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2019,41(1):15-21.