基于随机场理论的土石坝边坡可靠度分析与风险管控

宋　庆
中国水利水电建设工程咨询西北有限公司　陕西　西安　710000

摘　要：针对土石坝岩土参数的空间变异性，本文引入随机场理论构建精细化数值模型，以弥补传统确定性分析的不足。通过对比中心点法、局部平均法等离散方法，建立了基于随机场的边坡可靠度分析流程，并结合蒙特卡洛模拟法计算失效概率。在此基础上，构建风险矩阵对边坡失稳后果进行量化评估与等级判定。最后，从设计、施工及运行全生命周期提出动态风险管控策略。研究表明，该方法能更真实地反映土石坝边坡安全状态，为工程风险防控提供科学依据。

关键词：土石坝；边坡稳定；随机场理论；风险管控

引言：土石坝作为水利水电工程的重要组成部分，其边坡稳定性直接关系到工程安全与下游人民生命财产安全。然而，受沉积环境、地质构造及施工扰动等因素影响，坝体及坝基岩土体的力学参数（如黏聚力、内摩擦角）表现出显著的空间随机性与非均匀性。传统的确定性分析方法往往采用单一安全系数，忽略了参数空间变异带来的潜在风险，难以准确量化边坡的真实安全储备。随机场理论能够有效刻画岩土参数的空间相关性与随机波动特征，为边坡可靠度分析提供了更为科学的工具。本文旨在基于随机场理论，探讨土石坝边坡的可靠度分析方法与风险管控策略，通过构建精细化随机模型与风险评价体系，实现对边坡失稳风险的精准识别与全周期动态管控，以期提升土石坝工程的安全管理水平。

1 随机场理论基本概念与建模方法

1.1 随机场理论的基本概念与统计特征

随机场理论是基于随机过程拓展的空间随机变量分析理论，核心用于描述工程场地中岩土参数随空间位置变化的随机不均匀性，弥补了传统确定性模型和单点随机模型的缺陷。在土石坝边坡工程中，土体容重、黏聚力、内摩擦角等核心力学参数并非固定数值，受沉积环境、地质作用、施工扰动等因素影响，呈现显著的空间随机波动特性，随机场理论可精准刻画这一空间变异规律。随机场的核心统计特征包含均值、方差、变异系数、自相关函数与相关距离，其中均值与方差反映参数整体波动水平，变异系数量化参数离散程度，自相关函数与相关距离决定了空间参数的关联特性。合理确定各类统计特征参数，是构建精准岩土随机场模型、保障后续边坡分析精度的基础，也是衔接岩土参数随机性与工程稳定性分析的关键前提。

1.2 随机场的离散方法

随机场离散是将连续的空间随机参数场转化为有限数量离散随机变量的过程，是实现随机场数值建模与工程计算的核心步骤，离散精度直接决定土石坝边坡数值模拟的准确性。目前岩土工程领域主流的随机场离散方法包含中心点法、局部平均法、谱分解法与正交展开法，各类方法适配不同的工程场景与计算精度需求[1]。中心点法操作简便、计算效率高，通过单元中心点参数代表整个单元特性，适用于初步估算与低精度模拟；局部平均法考虑单元空间平均效应，可有效降低离散误差，贴合岩土参数空间渐变特性，是边坡工程常用方法；谱分解法与正交展开法适配复杂空间随机场，可精准模拟参数高频波动特性，但计算流程更为复杂。在土石坝边坡建模中，需结合边坡尺寸、网格精度与参数变异特征选取离散方法，平衡计算精度与运算效率。

1.3 土石坝边坡随机场建模

土石坝边坡随机场建模以坝体、坝基岩土力学参数的空间随机性为核心，依托随机场离散技术与数值模拟平台构建精细化随机数值模型。建模前期需依托工程勘察数据、室内试验结果，统计土体黏聚力、内摩擦角、渗透系数等关键参数的统计分布类型、变异系数与空间相关距离，确定随机场基础参数体系。随后结合土石坝边坡几何形态与地质分层特征，划分精细化数值网格，通过优选的离散方法将岩土参数随机场映射至各网格单元，实现参数空间随机赋值。建模过程中需充分考虑坝体填筑分层、坝基岩土分层的差异性，区分不同土层的参数随机特征，避免统一参数建模导致的计算偏差。最终构建的随机场模型可真实还原土石坝边坡岩土参数的空间非均匀性，为边坡可靠度分析、风险评估提供贴合实际工程的数值基础。

2 土石坝边坡可靠度分析方法

2.1 可靠度分析的基本概念与功能函数构建

土石坝边坡可靠度是指边坡在规定施工与运行期限内，在各类荷载与地质条件作用下，保持整体稳定、不发生失稳破坏的概率，是量化边坡安全储备、评估工程安全性的核心指标，区别于传统单一安全系数的确定性评价模式。可靠度分析通过考虑岩土参数、荷载条件的随机性，规避了确定性分析忽略参数波动的弊端，可精准反映边坡真实安全状态。功能函数是边坡可靠度分析的核心核心公式，以边坡稳定极限状态为判别标准，一般定义为抗滑力矩与滑动力矩的差值，或抗剪强度与剪切应力的差值。当功能函数数值大于0时，边坡处于稳定状态；小于0时边坡失稳破坏；等于0时处于极限平衡状态。功能函数构建需结合土石坝边坡失稳模式，综合自重、渗流、水压等荷载因素，依托极限平衡理论完善函数表达式，保障可靠度计算的合理性[2]。

2.2 边坡可靠度分析的常用方法

土石坝边坡可靠度分析经过长期发展，形成了多种适配不同工程场景的计算方法，各类方法在计算精度、运算效率、适用条件上存在明显差异。其中，一次二阶矩法是最基础的分析方法，通过对功能函数进行泰勒级数一阶展开，依托均值与方差计算可靠指标与失效概率，计算简便、适用性广，但针对非线性较强的边坡功能函数存在一定精度误差。二次二阶矩法优化了非线性误差问题，通过二阶展开提升计算精度，适用于复杂边坡工程。蒙特卡洛模拟法依托大量随机抽样模拟参数波动，计算结果精准、适配性极强，可处理各类非线性、非正态随机问题，是土石坝边坡高精度可靠度分析的主流方法，但存在抽样量大、运算耗时的问题。此外，响应面法通过构建近似功能函数替代复杂隐式函数，有效平衡计算精度与效率，广泛应用于大型土石坝边坡可靠度计算。

2.3 基于随机场理论的边坡可靠度分析流程

基于随机场理论的土石坝边坡可靠度分析，突破了传统随机变量模型忽略参数空间变异的局限，形成了精细化、系统化的分析体系。整体分析流程分为四大核心步骤，首先开展基础数据整理，通过工程试验与勘察数据统计岩土参数的统计特征与空间相关参数，完成随机场参数标定。其次依托土石坝边坡数值模型，采用适配的离散方法构建岩土参数随机场，实现参数空间随机赋值，建立随机数值计算模型。随后结合边坡稳定极限平衡条件构建功能函数，选取适配的可靠度计算方法，通过数值迭代计算获取边坡可靠指标与失稳失效概率。最后对计算结果进行校验分析，对比传统确定性分析结果，明确岩土参数空间变异对边坡稳定性的影响规律，量化边坡在随机参数场下的安全储备与失效风险，为后续风险评价与管控提供精准的数据支撑。

3 土石坝边坡风险识别与风险评价

3.1 边坡风险的基本概念与评价指标

土石坝边坡风险是指边坡在施工、运行全周期内，受岩土参数变异、渗流作用、降雨冲刷、人为扰动等内外因素影响，发生失稳滑移、坍塌破坏，并造成人员伤亡、经济损失、工程损毁等不良后果的综合概率与损失程度。风险评价区别于单纯的可靠度分析，不仅关注边坡失稳的发生概率，更侧重量化失稳带来的各类损失，实现概率与后果的双重评估[3]。边坡风险核心评价指标主要包含失效概率、风险损失值、风险等级三大核心指标，其中失效概率表征风险发生的可能性大小，依托随机场可靠度分析结果获取；风险损失值量化失稳造成的直接、间接经济损失与安全损失；风险等级为综合评价指标，结合概率与损失程度划分风险层级，是工程风险管控的核心依据，可直观反映土石坝边坡的整体风险水平。

3.2 边坡失稳后果评估

土石坝边坡失稳后果评估是风险评价的核心环节，主要针对边坡滑移、坍塌破坏引发的各类损失进行系统化、定量化分析，为风险等级判定与管控策略制定提供依据。失稳后果主要分为三类，一是直接工程损失，包括坝体边坡破损、防渗结构损毁、工程设备损坏等直接经济损耗，是最直观的损失类型；二是间接衍生损失，涵盖边坡失稳引发的坝体渗漏、水位异常、工程停工等问题，造成的工期延误、运维成本增加等间接经济损失；三是安全与环境损失，包括人员伤亡、周边农田损毁、水体污染、生态破坏等不可逆损失。评估过程中需结合边坡失稳规模、发生位置、工程运行状态，区分轻微滑移、局部坍塌、整体失稳等不同破坏模式的损失差异，全面量化各类损失数值，保障风险评估的完整性与真实性。

3.3 边坡风险矩阵与风险等级判定

风险矩阵法是土石坝边坡风险等级判定的核心方法，通过耦合边坡失稳发生概率与失稳后果损失两大核心要素，构建二维风险评价矩阵，实现风险的分级量化与精准判定。风险矩阵横向为失稳概率等级，结合随机场可靠度计算结果，将失效概率划分为极低、低、中、高、极高五个层级；纵向为失稳后果等级，依据经济损失、安全影响、环境破坏程度划分为轻微、一般、较大、严重、特大五个等级。通过矩阵交叉匹配，可将土石坝边坡整体风险划分为低风险、中风险、高风险、极

高风险四个等级。低风险代表边坡稳定性良好，无需专项管控；中风险需加强监测排查；高风险与极高风险边坡存在重大安全隐患，需立即采取加固、整改措施。该方法操作直观、分级清晰，适配土石坝工程的风险管控需求。

4 基于随机场理论的风险管控策略

4.1 风险管控的基本原则与框架

基于随机场理论的土石坝边坡风险管控，遵循“预防为主、精准管控、全程覆盖、动态优化”的核心原则，彻底区别于传统经验化管控模式，依托参数空间随机特性与风险量化结果实现精细化治理。其中，预防为主原则聚焦风险源头，通过预判岩土参数空间变异、渗流场变化等核心诱因，提前规避边坡失稳隐患；精准管控原则依托随机场可靠度与风险评价数据，针对不同区域、不同风险等级的边坡制定差异化管控方案；全程覆盖原则贯穿工程设计、施工、运行全生命周期，实现全阶段风险防控；动态优化原则则根据现场监测数据实时更新随机场参数，动态调整管控策略。整体管控框架分为风险识别、量化评估、分级管控、动态监测、优化整改五大模块，形成闭环管控体系。该体系不仅全面提升土石坝边坡工程的安全防控水平，还能有效避免过度防护造成的资源浪费，在保障工程安全的同时实现经济效益的最优化。

4.2 设计阶段的风险管控策略

土石坝边坡设计阶段是风险源头管控的关键阶段，需依托随机场理论精准预判岩土参数空间变异带来的稳定性风险，从设计层面规避结构性、随机性安全隐患。在前期勘察设计中，需增加岩土参数取样密度，精准统计不同区域土体力学参数的统计特征与空间相关距离，构建贴合场地实际的随机场模型，优化边坡坡度、填筑厚度、防渗结构等核心设计参数[4]。针对随机场模拟中识别的高风险区域，优化边坡断面形式，增设排水廊道、防渗层、护坡结构等防护设施，降低渗流与土体变异引发的失稳风险。同时，基于随机场可靠度计算结果，合理预留安全储备，摒弃传统固定安全系数的保守设计模式，实现安全与经济性的平衡。此外，需完成设计阶段风险预判报告，明确潜在风险点，为后续施工、运行阶段管控提供设计依据。

4.3 施工阶段与运行阶段的风险管控策略

土石坝边坡施工与运行阶段的风险管控聚焦动态防控与隐患整改，结合随机场参数动态更新特性，实现全周期风险闭环治理。施工阶段需严格把控填筑材料质量与施工工艺，减少人为施工扰动引发的土体参数变异，针对施工期降雨、基坑开挖等临时工况，开展实时随机场风险验算，对临时高风险区域采取临时支护、排水导流等应急措施，同步做好施工监测数据记录。运行阶段需建立常态化监测体系，实时采集边坡位移、渗流压力、土体含水率等数据，动态更新岩土参数随机场模型与风险评价结果。针对低风险区域开展定期巡检维护，中风险区域强化监测频次，高风险区域立即实施加固补强、防渗处理等整改措施，同时建立风险预警机制，根据动态风险等级发布预警信息，保障土石坝边坡长期运行安全。

结束语

本文系统探讨了基于随机场理论的土石坝边坡可靠度分析与风险管控体系。通过引入随机场理论，克服传统方法忽略岩土参数空间变异性的缺陷，实现对边坡稳定性的精细化评估。研究明确了从随机场建模、可靠度计算到风险矩阵判定的完整流程，并提出涵盖设计优化、施工控制与运行监测的全生命周期管控策略。结果表明，基于随机场的风险管控方法能有效识别潜在隐患，实现风险的动态预警与分级治理。未来研究可进一步结合智能监测技术，提升随机场参数反演的实时性，为土石坝的长效安全运行提供更坚实的理论支撑。

参考文献

[1]沈金明.基于多重克里金方法的土石坝边坡可靠度分析[J].东北水利水电，2023，41(4):62-65.

[2]林贵鑫.土石坝材料力学参数随机反演及沉降变形可靠度分析[J].江西水利科技,2025,51(3):191-196.

[3]宋来福,孔宪京,徐斌,等.基于Copula函数的土石坝三维坝坡稳定可靠度分析[J].大连理工大学学报,2021,61(1):92-103.

[4]赵生华,李红军.基于蒙特卡洛法的土石坝坝坡稳定分析研究[J].水利水电技术，2021,52(7):167-174.