耦合确定性与随机结构面的岩质边坡概率稳定性分析

常志璐[1a,1b]，向晖[2]，余琦[1a]，钟敏[1a]，蒋水华[1a*]，关宏涛[2]，孟京京[1a]，黄发明[1a]

1. 南昌大学 a. 工程建设学院；b. 资源与环境学院，南昌 330031；
2. 中建铁路投资建设集团有限公司，北京 102600

第一作者，E-mail：zhiluchang@ncu.edu.cn

* 通信作者，E-mail：sjiangaa@ncu.edu.cn

2024-07-11 收稿；2024-09-11 修回；2024-10-22 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(52222905, 42407241)；江西省自然科学基金资助项目(20242ACB221001, 20232ACB204031, 20224ACB204019, 20242BAB20241)；江西省水利科技计划资助项目(202325ZDKT07, 202426ZDKT12)

中图分类号：P642.22　　文章编号：2096-8523(2025)02-0002-12　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240388

摘　要：岩质边坡广泛发育确定性结构面和随机结构面，使得岩体具有不连续性和非均质性特征，直接影响边坡的稳定性、变形特征和破坏模式。然而，目前研究较少同时考虑确定性结构面和随机结构面网络对岩质边坡概率稳定性分析和破坏机制的影响。采用离散元方法和结构面网络模拟技术，构建了边坡确定性结构面和随机结构面耦合分析模型，并基于此提出了边坡概率稳定性分析方法，最后以简化岩质边坡模型和锦屏一级水电站左岸坝肩边坡(天然和开挖工况)为例，验证了该方法的有效性。结果表明：(1)提出的方法不仅可以准确模拟确定性结构面与随机结构面网络，而且实现了结构面网络与边坡模型耦合建模；(2)同时考虑确定性结构面和随机结构面边坡概率稳定性分析方法可以获得边坡稳定系数概率分布图，计算结果更全面并符合工程实际；(3)随机结构面网络在开挖边坡工况下对边坡稳定性影响更显著，并且控制边坡的失稳路径和破坏机制。研究成果可为制定岩质边坡开挖和支护方案提供参考，同时为地质灾害防治提供理论依据。

关键词：岩质边坡；随机结构面；网络模拟；确定性结构面；概率稳定性分析

随着大型水库和公路修建、矿山开采等工程建设活动的陆续开展，出现了大量的岩质边坡。岩质边坡稳定性分析是保障工程设施正常施工和安全运行的基础，一旦发生边坡失稳，将会造成重大的人员伤亡和经济损失。岩质边坡内部广泛发育的结构面使得岩体具有不连续性、非均质性和各向异性，直接控制边坡的稳定性、变形特征和破坏模式[1-3]。因此，研究岩体结构面发育特征及其对岩质边坡稳定性的影响对于边坡防护和避免灾害损失具有重要的理论意义和工程价值。

根据结构面发育特征和对边坡稳定性的影响，谷德振[4]将结构面划分为 5 个级别，如表 1 所示。在此基础上，徐光黎等[5]指出Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ级结构面在自然岩质边坡中出露数量有限，且空间分布位置确定，可通过野外调查逐一勘测出来，因而属于确定性结构面。针对确定性结构面对边坡稳定性的影响，研究者[6-7]主要考虑了软弱夹层和断层等对边坡稳定性的作用机制。例如，李韬等[8]采用通用离散元程序(universal distinct element code，简称 UDEC)软件研究了断层和顺坡向错动带对白鹤滩水电站左岸坝基边坡变形和整体稳定性的影响。樊鸿志等[9]采用正交对照法揭示了软弱夹层埋深、倾角、数量及夹层间结构面间距对边坡稳定性和变形规律的影响。而Ⅴ和Ⅳ级结构面具有数量多、分布广泛和随机性

著录信息：常志璐，向晖，余琦，等. 耦合确定性与随机结构面的岩质边坡概率稳定性分析 [J]. 地质科技通报，2025，44(2)：2-13.
CHANG Zhilu, XIANG Hui, YU Qi, et al. Probabilistic stability analysis of rock slopes with coupled determining and random discontinuities[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 2-13.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

表 1　结构面分级

Table 1　Classification of discontinuities

结构面级别	特性		
	代表性结构面	发育情况	影响作用
Ⅰ级	深大断裂带	延伸数十公里、至少切穿一个构造层、宽度在数米以上	控制区域岩体稳定性
Ⅱ级	不整合面、原生软弱夹层、断层等	延伸数百米以上、宽度不超过3～5 m	组合控制岩体稳定性
Ⅲ级	断层、风化夹层、破碎带、层间错动等	延伸数百米范围、宽度约1 m	控制块体滑移机理
Ⅳ级	节理、层面、片理面等	延伸数米范围，不超过20～30 m、无明显宽度	影响岩体破坏方式、力学性质和应力分布情况
Ⅴ级	微小节理等	延展性极差、无厚度差别	影响岩块的强度和破坏方式

强的特点。由于Ⅴ级结构面主要影响岩块强度和变形特性，对岩体不产生直接影响，故本研究不作考虑。而Ⅳ级随机结构面主要包括节理、层面等，相互之间的交切关系极为复杂，仅靠野外露头调查难以一一查明，是本研究主要考虑的随机结构面类型。

准确表征随机结构面的几何参数分布特征，进而模拟结构面网络模型是进行岩质边坡稳定性分析的关键[10-11]。目前研究主要采用的结构面三维网络模拟技术，能够较好地还原岩体结构面的分布情况并清晰地揭示岩体的结构特征、变形特性和力学行为[12-13]。国内外学者[14-17]针对岩体节理裂隙分布形式的定量描述开展了大量研究工作，揭示了岩体裂隙分布形态参数遵循统计学规律，并开发了离散裂隙网络(discrete fracture network，简称 DFN)方法，促进了结构面网络模拟研究和岩质边坡稳定性分析。如贾超等[18]开发了节理裂隙网络模拟程序，并与离散元软件结合研究了其在地下洞室工程中的应用情况。郭亮等[19]在模拟随机结构面的基础上，融入部分实测确定性结构面建立了“随机-确定”耦合模型，并研究了该模型在裂隙岩体渗流中的作用。FADAKAR AlGHALANDIS[20]基于 MATLAB 开发了可用于模拟二维、三维随机裂隙网络的开源软件 Alghalandis 离散裂隙网络工程(Alghalandis discrete fracture network engineering，简称 ADFNE)。孙书伟等[21]基于非接触摄影测量技术和 Monte-Carlo 原理提出了一种岩质边坡结构面三维随机网络模拟方法。ZHENG 等[22]将裂隙的中心点、尺寸和方位角作为变量，建立了通用椭圆盘模型来模拟岩体裂隙网络。ZHANG 等[23]提出了一种基于 Dijkstra 最短路径算法和贝叶斯 Bootstrap 法的三维结构面连通率计算方法。综上，虽然学者们对结构面网络模拟技术进行了进一步发展和完善，包括从二维拓展到三维，结构面形态、结构面网络的修正等，出现了很多结构面网络模拟及可视化的程序，为较好地模拟结构面网络并用于边坡稳定性分析奠定了基础。然而，鲜有研究同时模拟边坡内部确定性结构面和随机结构面网络，并探究其对边坡概率稳定性和破坏机制的影响规律，并且如何在准确模拟确定性结构面和随机结构面网络的基础上进行岩质边坡概率稳定性分析仍是一项关键技术难题。

为此，本研究提出一种同时考虑确定性结构面和随机结构面网络的岩质边坡概率稳定性分析方法。首先利用 Rhino 软件建立岩质边坡三维数值模型，然后根据结构面现场信息，采用 DFN 模型分别构建确定性结构面和随机结构面网络，并在三维离散元程序(three dimension distinct element code，简称 3DEC)中实现边坡模型与结构面网络的耦合，最后进行边坡稳定性分析。以一简化岩质边坡模型为例，研究随机结构面网络对边坡稳定性的影响。然后依托锦屏一级水电站左岸坝肩边坡工程，研究随机结构面几何参数的不确定性对天然边坡与开挖边坡 2 种工况进行概率稳定性分析。

1　确定性和随机结构面网络模拟

1.1　结构面网络模拟方法

目前，进行结构面网络模拟的方法有很多，Itasca 公司开发的离散元软件 3DEC 不仅可以模拟结构面网络，还能将结构面与边坡模型耦合并进行稳定性分析[24-25]。但 3DEC 软件依赖命令流操作，前处理操作繁琐，构建复杂边坡难度大。而 Rhino 软件建模功能强大，可通过 Griddle 插件直接生成 3DEC 软件需要的模型文件[26-27]。因此，本研究充分结合二者的优势，以 Rhino 进行复杂边坡建模，以 3DEC 进行三维结构面网络模拟，最后在 3DEC 软件中实现耦合并进行边坡稳定性分析。

借助 3DEC 软件模拟离散裂隙网络时，需假设以下条件：①结构面模拟采用 Baecher 圆盘模型；②结构面被视为光滑平直，在研究区内产状保持一致；③结构面服从泊松分布，即结构面中心点均匀地

分布于研究区中；④在整个模拟区域内，每组结构面的分布都符合同一概率模型。

目前主要采用以下 3 种方式构建随机结构面网络模型：①使用 JSET 命令直接切割块体，以倾角、倾向及起始点确定结构面位置，并通过节理数目和间距等参数自动生成其他平行节理。该方法操作简单，但是局限性较强，通常用来构造辅助结构面。②通过实测露头面得到优势结构面分组，并确定概率分布函数，利用 3DEC 软件中 DFN template 命令创建节理集，需要输入的关键字参数和其可设置的分布特征如表 2 所示。通过 DFN template 命令创建节理集之后由 DFN generate 命令生成结构面，通过设定结构面生成范围来避免边缘效应，并需要设置终止条件来控制结构面数量，包括固定结构面数量、线密度、面密度、体密度、自定义终止条件等。该方法可以快速生成大量的随机裂隙，是构建离散裂隙网络常用方法。③通过 3DEC 中的 GEOMETRY 和 DFN 命令，并结合其他编程软件来实现，即首先借助 MATLAB 或 Python 等工具生成符合预期分布的结构面几何形状，然后将模拟的各组结构面空间位置数据导出，并由 GEOMETRY set 命令在 3DEC 中转换为相应地质面集，最后使用 DFN gimport 命令生成对应的 DFN 集合。该方法操作复杂，需要多款软件协同完成。综上，本研究采用方式②进行结构面网络模拟。

表 2　DFN template 参数及分布设置

Table 2　Parameters and distribution of the DFN template

分布特征	结构面参数		
	产状	空间位置	尺寸
高斯分布	√	√	√
均匀分布	√	√	√
bootstrapped	√	√	√
fish自定义	√	√	√
power-law	/	/	√
fisher	√	/	/

1.2　确定性与随机结构面网络耦合建模框架

根据随机结构面几何参数特征（如倾向、倾角、开度和迹长等）服从一定分布规律的特征，并且确定性结构面的空间分布和产状等信息较明确，本研究提出了确定性与随机结构面网络耦合建模框架，如图 1 所示，具体包括：

（1）结构面基础信息获取

基于结构面实地勘测资料，进行确定性和随机结构面分组，并获取结构面空间位置、产状和迹长等参数的分布特征。

（2）随机结构面模拟

根据随机结构面的几何分布特征，利用 1.1 节中介绍的方式②在 3DEC 中编写 fish 代码生成随机结构面集，从而得到初步的离散裂隙网络模型。

（3）确定性结构面模拟

基于确定性结构面的位置信息、产状和迹长数据，利用 3DEC 中 DFN addfracture 命令生成结构面；

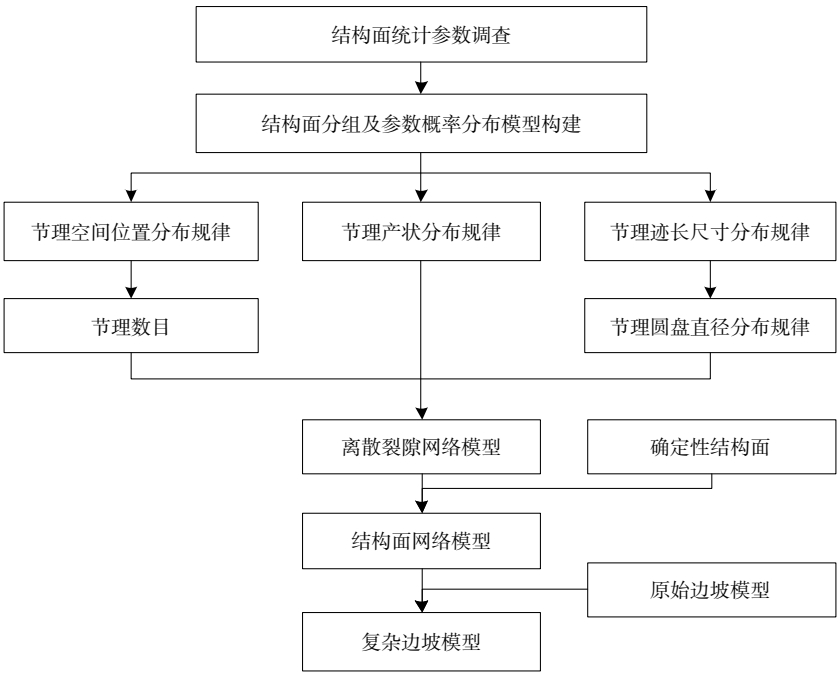


图 1　确定性与随机结构面网络耦合建模框架

Fig. 1　Coupling modelling framework for determining and random discontinuity networks

而对于较复杂的确定性结构面，需要先简化为若干多边形获取其顶点坐标，再结合 3DEC 的 GEOMETRY polygon 命令自定义一个或多个几何图形集，接着采用 call 命令调用该文件导入结构面数据，最后通过 DFN gimport 命令生成对应结构面。

(4)确定性与随机结构面网络耦合建模

基于 Rhino 软件构建的原始边坡模型，利用 3DEC 软件中切割命令 JSET 将结构面网络与原始边坡模型进行耦合，图 2 给出了裂隙边坡生成示意图。为避免微小裂隙对切割效果和计算效率的影响，需要提前过滤尺寸过小的结构面。本研究通过定义一个函数遍历每组结构面的每条裂隙，并设置需要过滤的迹长下限来删除多余裂隙。然后，根据各组结构面 id 利用 JSET dfn id 命令分别进行模型切割，一般先用尺寸较小的随机结构面切割边坡模型，再用确定性结构面进行切割。

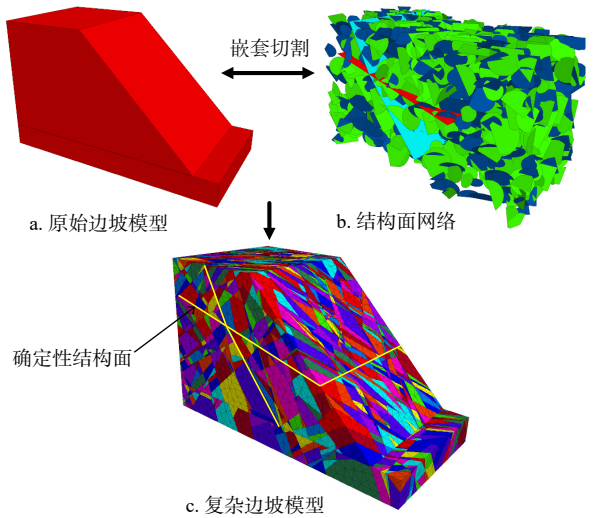


图 2　裂隙边坡生成示意图

Fig. 2　Diagram of fracture slope formation

2　离散元强度折减法基本原理

2.1　离散单元法基本原理

离散单元法的基本思想是假设岩体由若干离散块体组合，各块体间通过相应的接触关系连接，并随着块体的平移、转动而改变。与求解连续介质力学问题不同的是，由于离散块体之间没有变形协调约束，只需满足物理方程和运动方程[28-29]。

物理方程即本构方程，假定不同块体间相互作用力的法向分力 F_n 与块体间法向位移 U_n 成正比，如下：

$$F_n = k_n \times U_n, \tag{1}$$

式中：k_n 为法向刚度系数。

相应的切向分力 F_s 与块体间切向位移 U_s 有如下关系：

$$F_s = k_s \times U_s, \tag{2}$$

式中：k_s 为切向刚度系数。

运动方程由牛顿第二运动定律建立，每个单元块体会通过接触对周围块体产生相互作用力，通过该块体单元在各方向上受到的作用力以及自重应力等其他应力场产生外力，求得其合力 $F_{合}$ 和合力矩 M，再由牛顿第二定律求得其加速度并可确定单位时间步长 Δt 内的位移，如下：

$$a = F_{合}/m, \tag{3}$$

式中：a 为加速度；m 为块体质量。

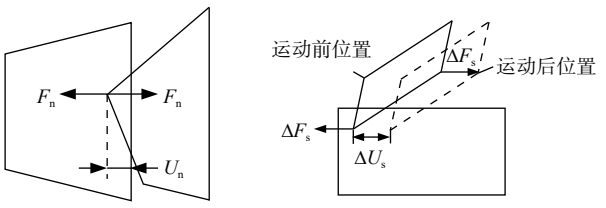
对块体加速度运用向前差分方法进行积分便可得到块体单元的速度和位移量，如下：

$$V(t_1) = V(t_0) + a\Delta t, \tag{4}$$

$$U(t_1) = U(t_0) + V(t_1)\Delta t, \tag{5}$$

式中：t_0 为初始时刻；$V(t_0)$ 为 t_0 时刻的速度；$V(t_1)$ 为 t_1 时刻的速度；$U(t_0)$ 为 t_0 时刻的位移；$U(t_1)$ 为 t_1 时刻的位移。

离散单元法通过按时步迭代计算求解，遍历所有块体集合，直到每一块体单元的不平衡力和力矩为零[30]。块体单元间的相互作用力如图 3 所示。



F_n. 不同块体间相互作用力的法向分力；U_n. 块体间法向位移；F_s. 不同块体间相互作用力的切向分力；ΔF_s. F_s 的增量，表示剪力；ΔU_s. U_s 的增量，表示两离散单元间的相对位移

图 3　块体单元间相互作用力示意图

Fig. 3　Diagram of the interaction forces between block elements

2.2　离散元强度折减法基本原理

离散元强度折减法的基本思想是将岩土体抗剪强度指标(黏聚力 c 和内摩擦角 φ)除以一个折减系数 F_t 得到一组新的参数 c'和 φ'，再将新的抗剪强度参数代入软件中进行计算，通过不断改变折减系数直到边坡达到临界破坏状态为止，此时的折减系数 F_t 即为边坡稳定系数(foctor of stability)FOS[31-32]，计算表达式如下：

$$c' = \frac{c}{F_t}, \tag{6}$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_t}\right), \tag{7}$$

式中：F_t 为折减系数；c'、φ' 分别为折减后的黏聚力和内摩擦角。

利用强度折减法进行边坡稳定性分析的关键一步是判别边坡达到临界破坏状态，本研究采用计算不收敛作为边坡失稳判据，最大不平衡力比率取 1.0×10^{-5}。如果在求解过程中最大不平衡力不能在给定的收敛准则下收敛，则表明此时的应力分布不满足 Mohr-Coulomb 屈服准则，在该强度折减系数下边坡发生失稳破坏。

3　案例分析

3.1　简化岩质边坡模型

为了探究随机结构面网络对岩质边坡稳定性的影响并验证本研究提出方法的有效性，参考文献 [33-34]，并选取与文献 [33-34] 中相同尺寸的简化岩质边坡模型进行分析，如图 4 所示。该模型高 12 m，宽 20 m，边坡坡高 10 m，边坡坡脚为 45°。假设该边坡包含 2 组随机结构面和 1 条倾角为 35°的确定性结构面，各组随机结构面的几何参数分布特征如表 3 所示。

根据 Itasca 公司的 3DEC Version 5.2 使用手册[35]可知：虽然 DFN 模型中生成的节理裂隙是面积有限的圆形，但是在 3DEC 中使用 JSET 命令进行块体切割时，由于块体不能被部分切割，所以生成的节理必然要比 DFN 模型中节理大。这点可以通过对环形节理内外部分分别设置不同的节理材料属性来解决。首先，对节理切割后的块体采用 GENERATE edge 命令划分网格，将每个切割后的块体再细分成若干个四面体状次级块体，在整个切割面上形成接触单元；然后使用 CHANGE 命令赋予圆盘内外节理以不

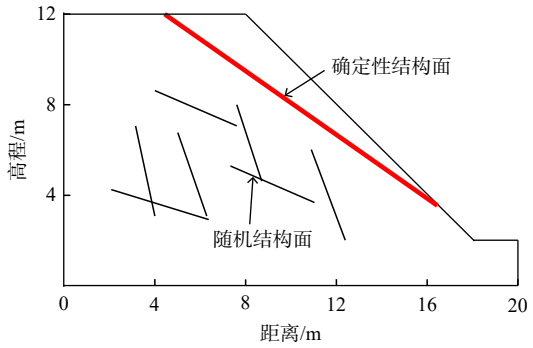


图 4　岩质边坡简化模型

Fig. 4　Simplified model of a rock slope

表 3　随机结构面参数及分布特征

Table 3　Parameters and distribution characteristics of random discontinuities

组别	倾角/(°)			迹长/m			空间位置	
	分布特征	均值 μ	标准差 σ	分布特征	均值 μ	标准差 σ	分布特征	面密度
J_1	对数正态	80.5	6.32	对数正态	1.72	1.35	均匀	0.25
J_2	正态	39.1	8.47	负指数	2.48	1.70	均匀	0.25

同的材料特性；最后用 PROPERTY 命令对不同材料赋相应的力学参数，对圆盘范围外的节理力学参数赋一个大值，形成不可破坏、不可滑动、不可分离的虚拟节理；对圆盘内的节理赋正常的材料参数值。边坡岩体材料选择 Mohr-Coulomb 屈服准则，结构面材料选择 Coulomb 滑动模型。岩体及结构面力学参数取值分别如表 4，5 所示。

表 4　简化岩质岩体力学参数取值

Table 4　Values of rock mass mechanics parameters of simplified rock slope

重度γ/(kN·m^{-3})	体积模量 B/GPa	剪切模量 G/GPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
20.0	1.0	0.3	200.0	50.0

表 5　简化岩质结构面力学参数取值

Table 5　Values of the discontinuity mechanics parameters of simplified rock slope

	法向刚度 K_n/(GPa·m^{-1})	切向刚度 K_s/(GPa·m^{-1})	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
DFN	20.0	2.0	15.0	29.4
确定性结构面	10.0	1.0	5.0	35.0

在参数赋值完成后，对边坡模型施加边界条件。其中，坡面采用自由边界，底部采用位移边界，束缚边坡底部 3 个方向（X、Y、Z）的速度和位移均为 0。此外，边坡侧面施加法向位移约束边界条件，边坡水平速度为 0，且侧面竖直方向（Z 方向）为自由边界。在竖直 Z 方向施加竖直向下的重力加速度，采用 3DEC 内置的强度折减法进行求解计算。根据上述方法和模型参数并选取网格长度（*edge*）为 0.6，采用 3DEC 生成的不含 DFN 边坡模型和含 DFN 边坡模型如图 5 所示。

考虑边坡只存在确定性结构面的情况，计算得到的边坡稳定系数为 1.03。为说明随机结构面 DFN 模型对边坡稳定性的影响，本研究随机生成 100 组不同 DFN 模型，分别计算边坡稳定系数并进行概率分析，计算结果如图 6 所示，可以看出，边坡稳定系数最大值为 1.205，最小值为 0.783，均值为

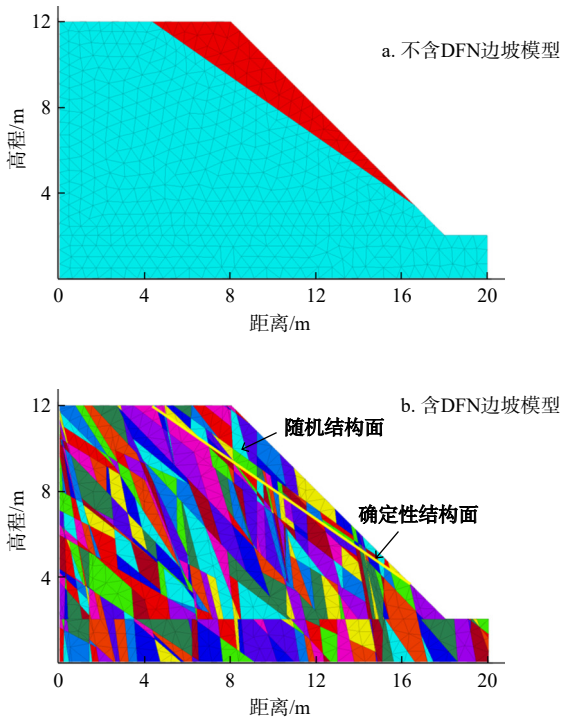


图 5　3DEC 生成边坡模型图

Fig. 5　Slope model diagrams generated by 3DEC

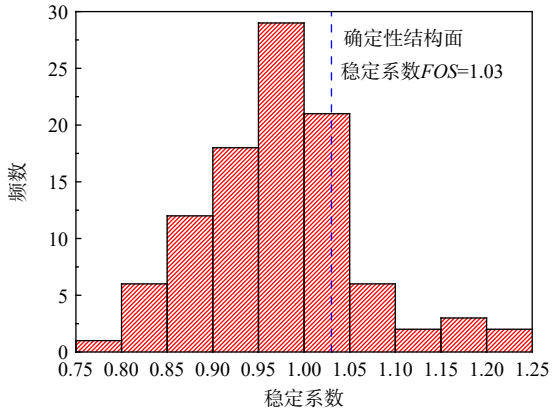


图 6　考虑 DFN 的 100 组边坡稳定系数概率分布图

Fig. 6　Probability distributions of 100 groups of slope stability coefficients considering the DFN

0.971, 标准差为 0.084。对比发现考虑随机结构面后得到的边坡稳定系数小于只考虑确定性结构面的边坡稳定系数, 更加符合工程实际情况, 说明随机结构面网络对边坡稳定性具有重要影响。其主要原因包括: ①随机结构面是岩体力学参数和边坡稳定性的控制因素, 岩质边坡中大量发育的随机结构面会明显降低岩体的强度参数和结构的完整性, 使得边坡的稳定性降低。②随机结构面的倾角、迹长等几何参数具有不确定性, 使得边坡随机结构面组合关系更加复杂, 进而影响边坡破坏潜在滑面的空间位置和形态。例如, 在该边坡模型中, 相比只考虑确定性结构面的情况, 同时考虑 2 组随机结构面和 1 组确定性结构面时, 边坡潜在滑面的位置和形态的不确定性更大, 使得稳定系数变化更明显。③随机结构面空间分布也会影响岩质边坡的稳定性, 当随机结构面空间分布较稀疏, 连通性较差, 边坡的稳定性较好。反之, 当随机结构面空间分布密集, 结构面间的连通性更好, 岩桥更短且易形成贯通滑面, 使得边坡的稳定系数较小。

3.2　锦屏一级水电站左岸边坡案例

3.2.1　工程概况

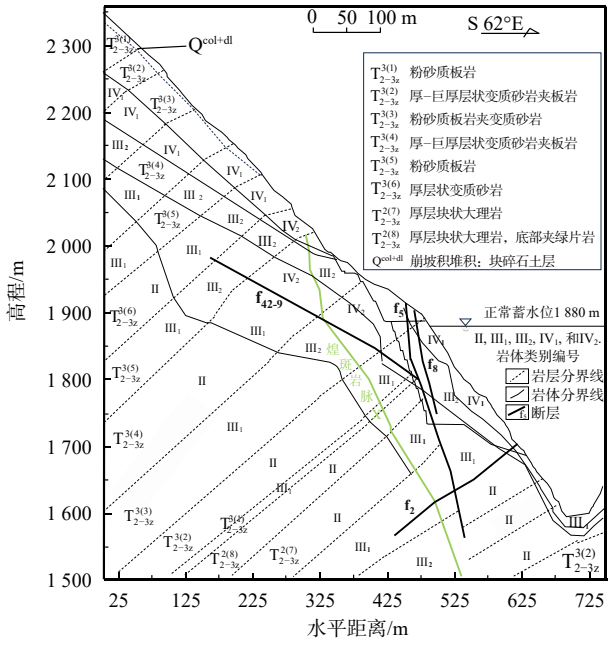
锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内, 坝址区左岸开挖边坡高程 1 990 m 以上为倾倒变形体, 开挖边坡高程 1 820 ~ 1 990 m 之间主要发育为砂板岩地段, 高程 1 820 m 以下为大理岩出露段。由于边坡内部结构面相互切割, 左岸坝头部位边坡岩体条件较差, 变形失稳模式复杂。发育的确定性结构面主要包括陡倾坡外的断层 f_5 和 f_8, 缓倾坡外的断层 $f_{42\text{-}9}$, 以及近 SN 走向的煌斑岩脉 X。此外坡体内还发育 4 组随机裂隙: ①N0° ~ 35°E/NW∠30° ~ 45°, 层面裂隙, ②N50° ~ 70°E/SE∠50° ~ 80°, ③SN ~ N30°E/SE∠60° ~ 80°, ④N30° ~ 50°W/SW∠60° ~ 80°。根据结构面分级表(表 1), 将边坡岩块Ⅳ$_2$ 岩体、Ⅳ$_1$ 岩体、Ⅲ$_2$ 岩体、Ⅲ$_1$ 岩体和Ⅱ岩体 5 类。为充分考虑开挖坡体的地质结构代表性, 选择了左岸Ⅱ$_1$-Ⅱ'$_1$ 计算剖面。Ⅱ$_1$-Ⅱ'$_1$ 剖面工程地质剖面图及开挖前边坡实物图如图 7 所示。

3.2.2　左岸Ⅱ$_1$-Ⅱ'$_1$ 剖面计算模型构建

本研究计算模型坐标系 X 轴正方向为 NE28°, Y 轴正方向为 NW62°, Z 方向以竖直向上为正。计算范围为: 横向(水平)方向取 753 m, 竖直方向高程 1 500 ~ 2 350 m。主要考虑天然边坡和开挖 2 种工况, 采用 Rhino 软件建立天然边坡模型并进行网格划分后导入 3DEC 软件中, 共建立了 8 913 个块体, 节点个数 2 928。在天然边坡模型基础上, 将结构面导入并切割边坡模型, 得到天然边坡计算模型如图 8a 所示。边坡在开挖过程中断层 f_8 被完全挖除, 断层 f_2, f_5 和 $f_{42\text{-}9}$ 均有部分被挖除, 开挖后边坡计算模型如图 8b 所示。计算模型底部采用固定约束, 左右两侧采用法向约束, 以自重应力作为模型初始应力场。

3.2.3　模型参数取值

参照锦屏一级坝基岩体质量分级建议值[36] 进行模型参数取值。其中块体采用 Mohr-Coulomb 本构关系, 结构面采用面接触 Coulomb 滑移模型。岩体及结构面力学参数如表 6, 7 所示。



a. II_1-II_1'(0+135 m)工程地质剖面图



b. 边坡开挖前实物图

图 7　II_1-II_1' 工程地质剖面 (a) 图及边坡开挖前实物图 (b)

Fig. 7　Engineering geological profile of section II_1-II_1' (a) and a photograph of the physical slope (b)

3.2.4　天然和开挖工况边坡稳定性分析

(1)确定性结构面条件下边坡稳定性分析

在天然边坡和开挖边坡计算模型基础上，采用 3DEC 软件内置的强度折减法进行求解，计算只考虑确定性结构面条件下的边坡稳定性情况。天然边坡和开挖边坡位移云图以及潜在失稳路径如图 9 所示，可以看出：边坡整体呈现出向坡外的变形，且主要发生在表层岩体及软弱结构面处。天然边坡稳定系数为 1.08，最大位移约 1.87 mm，由于天然边坡中断层 f_8 外侧岩体呈现出阻滑作用，潜在失稳路径主要由断层 f_5 与Ⅳ$_1$ 级岩体破坏路径组成。由于潜在滑动体前沿剪出口阻滑岩体被挖除，确定性结构面在开挖

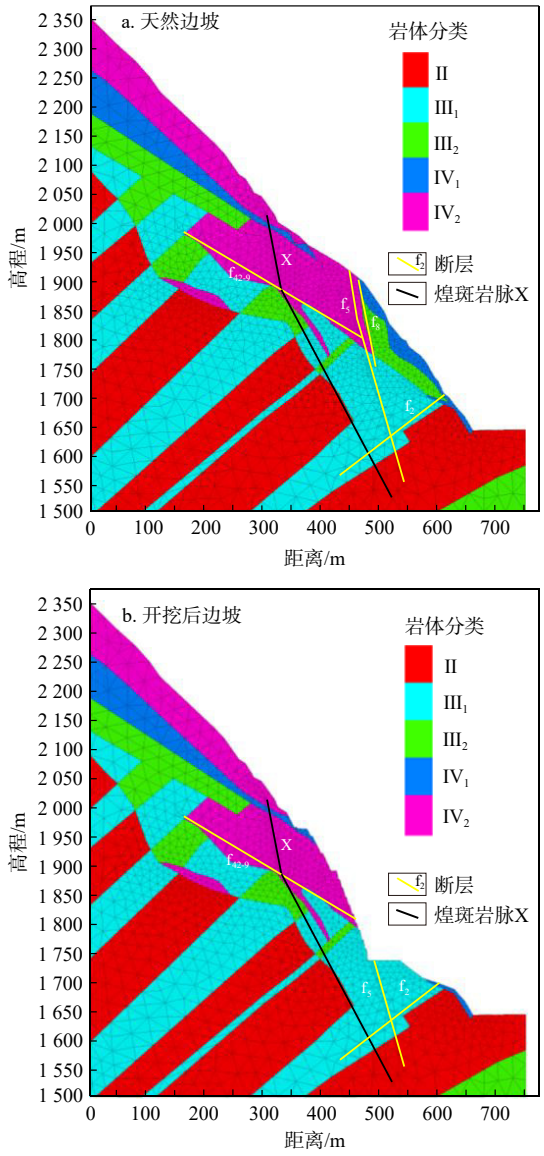


图 8　天然边坡 (a) 和开挖后边坡 (b) 计算模型

Fig. 8　Calculation model diagram of the natural slope (a) and excavation slope (b)

表 6　锦屏一级水电站左岸边坡岩体参数取值

Table 6　Values of the rock mass mechanics parameters of left bank shoulder slope of Jinping Ⅰ Hydropower Station

岩体类别	弹性模量 E/GPa	泊松比	重度γ/(kN·m^{-3})	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
Ⅳ$_2$岩体	1.90	0.300	27	400	30.96
Ⅳ$_1$岩体	2.50	0.300	27	600	34.99
Ⅲ$_2$岩体	5.50	0.275	27	900	45.57
Ⅲ$_1$岩体	10.50	0.250	27	1 500	46.94
Ⅱ岩体	23.50	0.225	27	2 000	53.47

表 7　锦屏一级水电站左岸边坡结构面参数取值

Table 7　Values of the discontinuity mechanics parameters of left bank shoulder slope of Jinping Ⅰ Hydropower Station

结构面	法向刚度 K_n/(GPa·m^{-1})	切向刚度 K_s/(GPa·m^{-1})	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
煌斑岩脉X	6.0	6.0	20.0	16.7
断层$f_{42\text{-}9}$	4.0	4.0	20.0	16.7
断层f_5	5.0	5.0	20.0	16.7
断层f_8	5.0	5.0	20.0	16.7
断层f_2	5.0	5.0	20.0	16.7

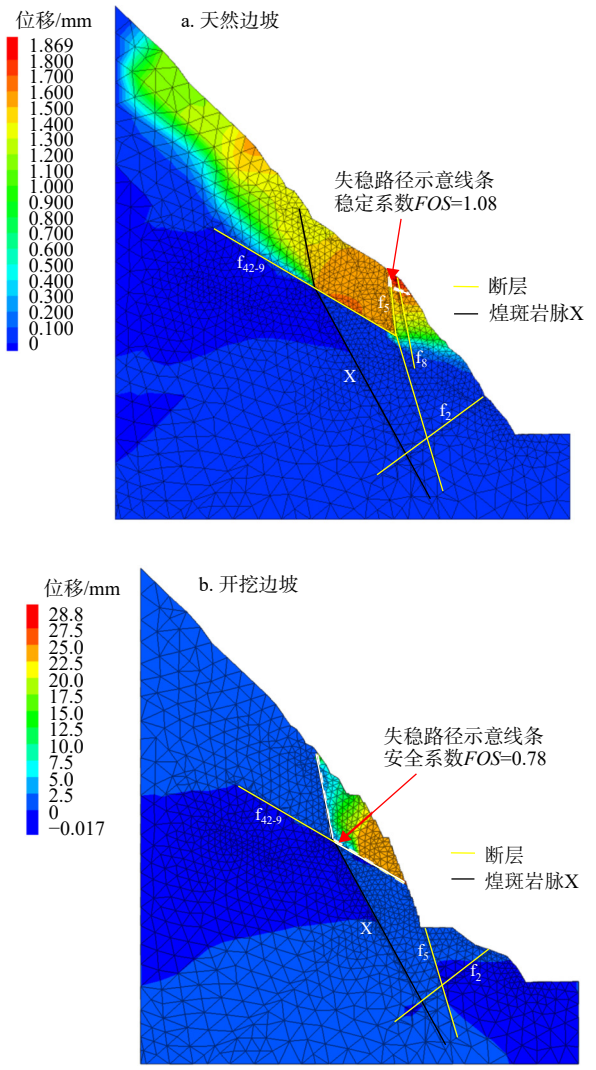


图 9　考虑确定性结构面天然边坡 (a) 和开挖边坡 (b) 位移云图

Fig. 9　Displacement cloud maps of natural slope (a) and excavation slope (b) considering determining discontinuities

面上出露的范围增大，边坡位移大幅增加，开挖后边坡稳定系数为 0.78，最大位移约 28.8 mm，最大位移区域集中在断层 $f_{42\text{-}9}$ 剪出口附近上层岩体，潜在失稳路径主要由煌斑岩脉 X 与断层 $f_{42\text{-}9}$ 组成。本研究模拟结果与漆祖芳等[36]和蒋水华等[37]的研究结论一致，说明本研究建立的确定性结构面边坡模型的准确性，可在此基础上研究随机结构面网络对岩质边坡稳定性的影响。

(2)确定性和随机结构面下边坡稳定性分析

参考雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告[38]提供的工程地质资料，并结合文献 [39-41] 以及根据实测结构面分布情况统计的结构面几何参数特征，综合确定边坡节理裂隙模拟范围介于高程 1 800 ~ 1 950 m 之间，节理裂隙黏聚力取 20 kPa，内摩擦角取 21.8°，节理裂隙几何参数统计特征如表 8 所示。

表 8　节理裂隙几何参数统计特征

Table 8　Statistical characteristics of the geometry

组号	统计特征	均值μ	标准差σ	分布类型
1	倾角/(°)	48.17	11.27	正态
	迹长/m	26.21	3.32	负指数
2	倾角/(°)	61.26	8.11	对数正态
	迹长/m	2.50	0.33	正态
3	倾角/(°)	59.05	5.99	正态
	迹长/m	2.49	0.37	正态
4	倾角/(°)	70.01	11.30	均匀
	迹长/m	3.07	1.62	正态

在考虑确定性结构面边坡模型的基础上，同时模拟 4 组随机节理裂隙并研究其对边坡稳定性的影响。通过随机结构面网络模拟方法，分别对天然边坡和开挖边坡随机生成 100 组不同的 DFN 模型，然后进行边坡稳定概率分析，计算结果如图 10 所示。从图 10a 可以看出：天然边坡 100 组 DFN 模型的边坡稳定系数最大值、最小值、平均值和标准差分别为 1.182, 0.932, 1.098 和 0.042，对比考虑确定性结构面边坡的稳定系数可知，随机节理裂隙对自然边坡稳定性影响较小，且边坡在天然工况下较为稳定。从图 10b 可以看出：在开挖边坡工况中，100 组 DFN 模型的边坡稳定系数的最大值、最小值、平均值和标准差分别为 0.900, 0.544, 0.713 和 0.083，并且大部分的模拟结果小于只考虑确定性结构面条件下的稳定系数，说明随机节理裂隙在边坡开挖过程中对边坡稳定性影响更显著。

为了更直观地与只考虑确定性结构面条件下边坡稳定性分析结果进行对比，在 100 组 DFN 模型中选取边坡稳定系数与只考虑确定性结构面条件下稳定系数相近的 2 个 DFN 边坡模型，边坡位移云图及潜在失稳路径如图 11 所示。通过与图 9 的结果对

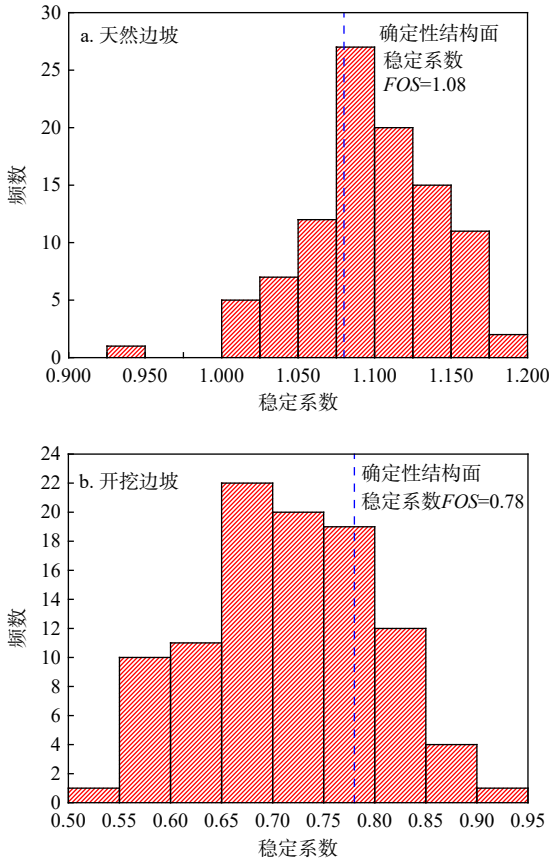


图 10　考虑 DFN100 组天然 (a) 和开挖 (b) 边坡稳定系数分布图

Fig. 10　Probability distributions of 100 groups of natural (a) and excavation (b) slope stability coefficients considering the DFN

比可以发现: 同时考虑确定性结构面与随机节理裂隙分布时, 断层 f_5 后侧边坡表层位置处的随机节理裂隙广泛发育, 并且贯通形成潜在滑移路径的后缘拉裂面。断层 f_5 与 f_8 前缘表层岩体位移最大, 约为 2.22 mm, 进而构成潜在滑移路径的前缘滑面, 最终导致天然边坡的潜在滑坡区域增大。与只考虑确定性结构面的开挖边坡失稳路径不同的是, 在煌斑岩脉 X 与断层 $f_{42\text{-}9}$ 相交区域的随机节理裂隙会发生贯通, 形成新的潜在滑移面。因此, 开挖边坡的潜在失稳路径由煌斑岩脉 X、随机节理裂隙贯通面及断层 $f_{42\text{-}9}$ 共同组成。上述结果说明随机结构面网络不仅直接控制着边坡的潜在滑移面, 而且也会对边坡的失稳路径和破坏机制产生影响。与天然边坡相比, 工程开挖增大了随机结构面对边坡整体稳定性的影响。所以, 在进行岩质边坡稳定性分析和后期加固时, 除了考虑岩体中存在的确定性结构面外, 也需要重点考虑随机结构面网络对边坡稳定性的不利影响。

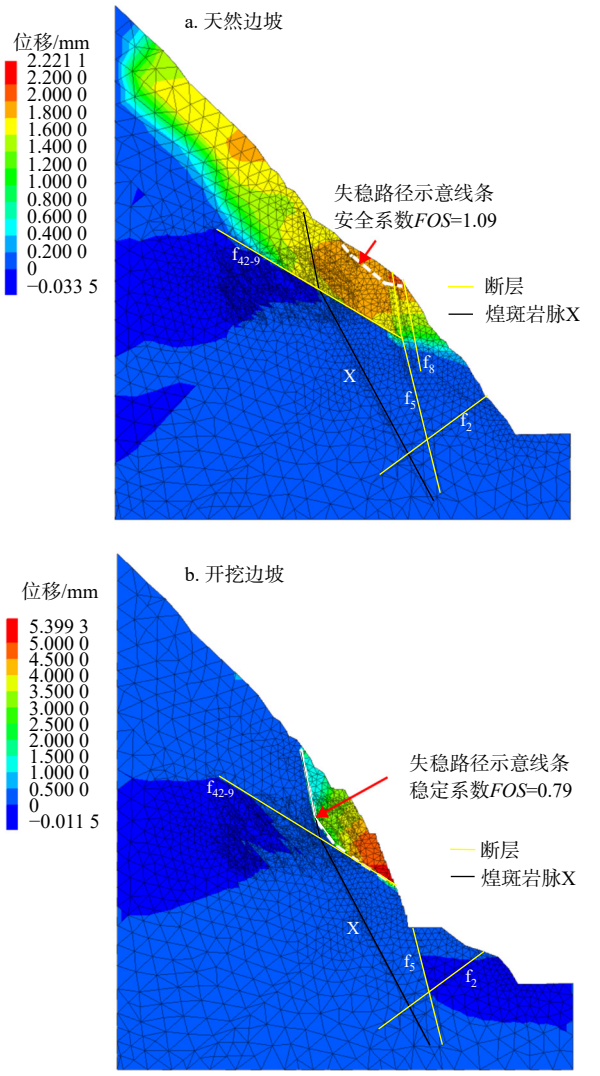


图 11　考虑 DFN 模型的天然边坡 (a) 和开挖边坡 (b) 位移云图

Fig. 11　Displacement cloud maps of natural slope (a) and excavation slope (b) considering the DFN model

4　结论

(1)提出了确定性与随机结构面网络耦合建模框架, 通过在 3DEC 软件中编写 fish 代码可以模拟确定性与随机结构面网络, 并利用 JSET 切割命令进行结构面与边坡模型耦合, 进而通过剖面内迹线分布特征验证结构面模拟的准确性。

(2)提出了同时考虑确定性和随机结构面的边坡概率稳定性分析方法, 并以简化岩质边坡模型为例验证了方法的有效性, 进而获得了考虑随机结构面边坡稳定系数概率分布图, 揭示了随机结构面网络对岩质边坡稳定性的影响。

(3)依托锦屏一级水电站左岸坝肩边坡工程实例, 揭示了确定性和随机结构面网络对自然与开挖

工况下边坡稳定性及破坏模式的影响，随机结构面网络在边坡开挖过程中对边坡稳定性影响更显著，并且也会改变潜在滑移体后缘拉裂面分布，进而影响边坡的破坏模式和失稳机制。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 张野，陈金桥，李炎隆. 基于多深度模型的钻孔结构面智能识别与量化分析 [J]. 地质科技通报，2023，42(6)：31-41.
ZHANG Y，CHEN J Q，LI Y L. Intelligent recognition and quantitative analysis of borehole hydraulic geological images utilizing multiple deep learning models[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2023，42(6)：31-41.（in Chinese with English abstract）

[2] SHANG J，WEST L J，HENCHER S R，et al. Geological discontinuity persistence：Implications and quantification[J]. Engineering Geology，2018，241：41-54.

[3] 孙书伟，李圆，杨晓锐，等. 不同岩层倾角顺倾层状岩质边坡破坏机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(7)：1607-1620.
SUN S W，LI Y，YANG X R，et al. Study on the failure mechanism of rock slopes with dipped layered structures under various rock dip conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(7)：1607-1620.（in Chinese with English abstract）

[4] 谷德振. 岩体工程地质力学基础 [M]. 北京：科学出版社，1979.
GU D Z. Foundation of rock mass engineering geomechanics[M]. Beijing：Science Press，1979.（in Chinese）

[5] 徐光黎，唐辉明，杜时贵. 岩体结构模型与应用 [M]. 武汉：中国地质大学出版社，1993.
XU G L，TANG H M，DU S G. Modelling of rock mass structures and its applications[M]. Wuhan：China University of Geosciences Press，1993.（in Chinese）

[6] 宋洋，马旭琪，赵常青，等. 隐伏非贯通软弱夹层岩质边坡剪切蠕变特征及稳定性研究 [J]. 岩土工程学报，2024，46(4)：755-763.
SONG Y，MA X Q，ZHAO C Q，et al. Shear creep characteristics and stability of rock slopes with concealed noninterpenetrated weak interlayer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2024，46(4)：755-763.（in Chinese with English abstract）

[7] SUN C，JIN C Z，WANG L G，et al. Creep damage characteristics and slip law of weak-layer mudstone in an open mining slope[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2023，82(10)：399.

[8] 李韬，徐奴文，戴峰，等. 白鹤滩水电站左岸坝肩开挖边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学，2018，39(2)：665-674.
LI T，XU N W，DAI F，et al. Stability analysis of left bank abutment slope at Baihetan Hydropower Station subjected to excavation[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(2)：665-674.（in Chinese with English abstract）

[9] 樊鸿志，王光进，蓝蓉，等. 露天矿山岩质边坡软弱夹层赋存状态影响边坡稳定性规律研究 [J]. 重庆大学学报，2024，47(4)：22-33.
FAN H Z，WANG G J，LAN R，et al. Influence of the occurrence state of soft interlayer on the rock slope of open-pit mine[J]. Journal of Chongqing University，2024，47(4)：22-33.（in Chinese with English abstract）

[10] BAN L R，WANG Z F，DU W S，et al. Investigation on the physical mechanism of cavity percentage dependent shear strength for rock joints considering the real contact joint surface[J]. Rock Mechanics Bulletin，2023，2(4)：100064.

[11] 杨超，徐光黎，申艳军，等. 基于结构面网络模拟的节理岩质边坡可靠性分析 [J]. 工程地质学报，2014，22(6)：1221-1226.
YANG C，XU G L，SHEN Y J，et al. Joint network simulation based reliability analysis for jointed rock slopes[J]. Journal of Engineering Geology，2014，22(6)：1221-1226.（in Chinese with English abstract）

[12] 葛云峰，唐辉明，王亮清，等. 大数量非贯通节理岩体离散元数值模拟实现方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2017，36(增刊 2)：3760-3773.
GE Y F，TANG H M，WANG L Q，et al. Realization method of discrete element numerical simulation of large number of non-persistent jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2017，36(S2)：3760-3773.（in Chinese with English abstract）

[13] 程锦波，夏露，于青春. 基于三维裂隙网络模拟和单孔压水试验的裂隙张开度确定方法 [J]. 地质科技通报，2024，43(4)：262-272.
CHENG J B，XIA L，YU Q C. Determination method of fracture aperture based on three-dimensional fracture network simulation and water injection tests[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2024，43(4)：262-272.（in Chinese with English abstract）

[14] 陈剑平. 三维网络结构岩体力学架构与展望 [J]. 工程地质学报，2022，30(1)：21-36.
CHEN J P. Framework and expectation of three dimensional network structural rock mechanics[J]. Journal of Engineering Geology，2022，30(1)：21-36.（in Chinese with English abstract）

[15] 张乔威. 深切河谷高陡岩质边坡岩体结构面参数估计及稳定性分析 [D]. 合肥：合肥工业大学，2021.
ZHANG Q W. Parameter estimation of rock mass structure surface and stability analysis on high and steep rock slopes in deep valleys[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2021.（in Chinese with English abstract）

[16] 陈剑平. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术 [J]. 岩土工程学报，2001，23(4)：397-402.
CHEN J P. 3-D net work numerical modeling technique for random discontinuities of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2001，23(4)：397-402.（in Chinese with English abstract）

[17] LI M，DENG H，TU G X. A study of rock mass properties based on discrete fracture network modeling and compression damage process[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2024，83(10)：402.

[18] 贾超，王志鹏，朱维申. 节理网络模拟的程序实现及其在地下洞室中的动态响应分析 [J]. 岩土力学，2011，32(9)：2867-2872.
JIA C，WANG Z P，ZHU W S. Program for joint network simulation and its application to dynamic response analysis of under-

ground caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2867-2872. (in Chinese with English abstract)

[19] 郭亮, 李晓昭, 周扬一, 等. 随机与确定耦合的裂隙岩体结构面三维网络模拟 [J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2636-2644.
GUO L, LI X Z, ZHOU Y Y, et al. Three-dimensional network simulation of fractured rock mass discontinuities based on stochastic-deterministic coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2636-2644. (in Chinese with English abstract)

[20] FADAKAR ALGHALANDIS Y. ADFNE: Open source software for discrete fracture network engineering, two and three dimensional applications[J]. Computers & Geosciences, 2017, 102: 1-11.

[21] 孙书伟, 王玉凯, 庞博. 一种岩质边坡结构面三维随机网络模拟方法 [J]. 矿业科学学报, 2018, 3(5): 461-469.
SUN S W, WANG Y K, PANG B. A method of 3D network modeling of discontinuities in rock slope[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(5): 461-469. (in Chinese with English abstract)

[22] ZHENG J, GUO J C, WANG J C, et al. A universal elliptical disc (UED) model to represent natural rock fractures[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(2): 261-270.

[23] ZHANG W, LAN Z G, MA Z F, et al. Determination of statistical discontinuity persistence for a rock mass characterized by non-persistent fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 126: 104177.

[24] CHEN D H, CHEN H E, ZHANG W, et al. An analytical solution of equivalent elastic modulus considering confining stress and its variables sensitivity analysis for fractured rock masses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(3): 825-836.

[25] 黄少平, 晏鄂川, 尹晓萌, 等. 不同临空条件的层状反倾岩质边坡倾倒变形几何特征参数影响规律 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 159-165.
HUANG S P, YAN E C, YIN X M, et al. Action law of geometrical characteristic parameters in the anti-dip rock slopes under different free face condition[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(1): 159-165. (in Chinese with English abstract)

[26] 石满生, 许威, 张美道. 基于 Rhino-Griddle-Flac3D 的矿体建模与地表稳定性分析 [J]. 金属矿山, 2020(8): 182-187.
SHI M S, XU W, ZHANG M D. Orebody modeling and surface stability analysis based on Rhino-Griddle-Flac3D[J]. Metal Mine, 2020(8): 182-187. (in Chinese with English abstract)

[27] SONG W H, JIAO H C, XU X T, et al. An optimized modeling for in situ stresses based on Rhino accurate modeling and large-scale transverse isotropic theory[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 691.

[28] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems[J]. Proocedings of the Symposio of the International Society of Rock Mechanics, Nancy 2, 1971, 8: 552.

[29] 吴建文, 张恒, 孙建春, 等. 不连续岩体中的隧道施工全过程离散单元法仿真研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1379-1385.
WU J W, ZHANG H, SUN J C, et al. Simulation study of tunnel construction process in discontinuous rock by discrete element method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1379-1385. (in Chinese with English abstract)

[30] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
CAI M F. Rock mechanics and engineering[M]. Second Edition. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)

[31] 宁宇, 徐卫亚, 郑文棠. 应用离散元强度折减对复杂边坡进行稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 569-574.
NING Y, XU W Y, ZHENG W T. Application in complicated high slope with strength reduction method based on discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 569-574. (in Chinese with English abstract)

[32] 江巍, 闫金洲, 欧阳晔, 等. 边坡稳定性强度折减颗粒离散元法分析的细观参数标定策略 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(5): 50-60.
JIANG W, YAN J Z, OUYANG Y, et al. Calibration of micro parameters of particles in granular discrete element method to assess slope stability by strength reduction method[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(5): 50-60. (in Chinese with English abstract)

[33] 雷远见, 王水林. 基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性 [J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1693-1698.
LEI Y J, WANG S L. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDEC[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1693-1698. (in Chinese with English abstract)

[34] 蒋水华, 欧阳苏, 冯泽文, 等. 基于结构面参数概率分布更新的节理岩质边坡可靠性分析 [J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2589-2599.
JIANG S H, OUYANG S, FENG Z W, et al. Reliability analysis of jointed rock slopes using updated probability distributions of structural plane parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2589-2599. (in Chinese with English abstract)

[35] Itasca Consulting Group, Inc.. Online contents for 3 dimensional distinct element code[M]. 3DEC Version 5.2. Minneapolis, Minnesota, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2016.

[36] 漆祖芳, 姜清辉, 唐志丹, 等. 锦屏一级水电站左岸坝肩边坡施工期稳定分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 531-538.
QI Z F, JIANG Q H, TANG Z D, et al. Stability analysis of abutment slope at left bank of Jinping-I Hydropower Project during construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 531-538. (in Chinese with English abstract)

[37] 蒋水华, 魏博文, 李聪. 考虑锚索腐蚀性能退化的边坡可靠度分析 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 90-95.
JIANG S H, WEI B W, LI C. Slope reliability analysis considering corrosion-induced degradation of cables' performance[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 90-95. (in Chinese with English abstract)

[38] 国家电力公司成都勘测设计研究院. 雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告 [R]. 成都: 国家电力公司成都勘测设计研究院, 2003.
POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited. Feasibility study report of Yalong River Jingpin Hydropower Station[R]. Chengdu: POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, 2003. (in Chinese)

[39] 汪小刚, 贾志欣, 张发明, 等. 岩体结构面网络模拟原理及其工程应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
WANG X G, JIA Z X, ZHANG F M, et al. Simulation principle of rock mass structural plane network and its engineering application[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese)

[40] QI S W, WU F Q, ZHOU Y D, et al. Influence of deep seated discontinuities on the left slope of Jinping I Hydropower Station and its stability analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 69(3): 333-342.

[41] HUANG R Q, LIN F, YAN M. Deformation mechanism and stability evaluation for the left abutment slope of Jinping I Hydropower Station[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 69(3): 365-372.

Summary for “耦合确定性与随机结构面的岩质边坡概率稳定性分析”

Probabilistic stability analysis of rock slopes with coupled determining and random discontinuities

CHANG Zhilu[1a, 1b], XIANG Hui[2],
YU Qi[1a], ZHONG Min[1a], JIANG ShuiHua[1a*], GUAN Hongtao[2],
MENG Jingjing[1a], HUANG Faming[1a]

1a. School of Infrastructure Engineering; 1b. School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. China State Construction Railway Investment & Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102600, China

First author, E-mail: zhiluchang@ncu.edu.cn

* Corresponding author, E-mail: sjiangaa@ncu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Stability analysis of rock slopes is crucial for ensuring the normal construction and safe operation of engineering facilities. Instability of slopes can cause severe casualties and economic losses. The widespread presence of determining and random discontinuities within rock slopes leads to rock mass discontinuity and heterogeneity, significantly affecting slope stability, deformation characteristics, and failure modes. Therefore, studying the development characteristics of discontinuities and their influence on slope stability is vital for slope protection and disaster prevention. However, existing studies rarely consider both determining discontinuities and random discontinuity networks when constructing rock slope models for probabilistic stability analysis and failure mechanisms. [**Methods**] In this study, a three-dimensional numerical slope model was constructed using Rhino software. The discrete fracture network (DFN) model was applied to generate both determining and random discontinuity networks based on field discontinuity data. A coupling analysis model for random discontinuities was then developed by integrating the slope model and discontinuity networks via 3DEC software. A probabilistic stability analysis method was proposed to analyze the effects of random discontinuities on slope stability. Finally, the proposed method was demonstrated using a simplified rock slope model to assess the impact of random discontinuity networks on slope stability, along with a probabilistic stability analysis of the left bank shoulder slope of the Jinping I Hydropower Station under natural and excavated slope conditions. [**Results**] The results indicate that (1) The proposed method effectively and accurately simulates both the deterministic and random discontinuity networks, as well as coupling the discontinuity network with the rock slope model. (2) The probabilistic distribution of the slope stability coefficient can be obtained, and the results are more comprehensive and aligned with engineering practice. (3) The random discontinuity network has a greater impact on slope stability under excavated slope conditions and alters the failure path and instability mechanism of the rock slope. [**Conclusion**] The research results provide references for excavation and support schemes for rock slopes in engineering practice and offer a theoretical basis for geological disaster prevention and control.

Key words: rock slope; random discontinuity; network simulation; determining discontinuity; probabilistic stability analysis

Received: 2024-07-11; Revised: 2024-09-11; Accepted: 2024-10-22

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240388