基于点云数据的高陡岩质边坡结构面识别与稳定性分析

奚望[1]，陈宜伟[2]，张文广[3]，边林松[1]，门林[1]，梁鹏飞[1]，周博[3*]

1. 中铁十九局集团广州工程有限公司，广州 511400；
2. 中国铁建投资集团有限公司，北京 100855；
3. 华中科技大学土木与水利工程学院，武汉 430074

第一作者，E-mail：55911275@qq.com

* 通信作者，E-mail：zhoubohust@hust.edu.cn

2023-12-01 收稿；2024-03-21 修回；2024-03-29 接受

基金项目：中铁十九局集团有限公司项目“基于 BIM 数字孪生技术的岩溶地区桥梁桩基精细化设计与智慧施工”（0231242361）

中图分类号：P642.2　　文章编号：2096-8523(2025)04-0330-10　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230667

摘　要：结构面分布对岩体的工程与力学性质具有重要影响，准确获取结构面信息对于分析岩体特性及其稳定性具有重要意义。通过三维激光扫描技术获取某高陡岩质边坡三维点云数据，通过对点云数据进行滤波前处理，采用开源程序 Discontinuity Set Extractor（DSE）对点云数据进行半自动化识别与分类，获取边坡岩体结构面的产状、迹长、间距等关键参数信息及点云聚类信息。通过对点云聚类信息进行拟合分析得到其概率分布模型并建立岩体的离散裂隙网络（DFN）模型，进一步基于点云数据采用“Rhino-Griddle-3DEC”联合建模方法建立了高陡岩质边坡的三维块体离散元模型，通过离散元模拟分析了该边坡的稳定性与潜在失稳区域。结果表明：在重力作用下，边坡整体安全系数约为 1.5，坡顶突出危岩体竖向位移较大且安全系数较小，为潜在失稳区域。因此，采用该方法识别获取的结构面参数信息能够较好地反映岩体工程力学性质，对高陡岩质边坡稳定性分析与评价具有重要指导意义。

关键词：高陡岩质边坡；点云数据；结构面识别；离散裂隙网络模型；稳定性分析

岩体结构包括结构面和结构体 2 个要素，结构面分布特征对岩体的工程性质具有重要影响，获取岩体结构面信息对岩体稳定性分析具有重要意义[1-2]。近年来三维激光扫描技术，因其具有测量距离远、采样点速度快、点定位精度高、无接触测量等优势，使得非接触获取结构面的信息成为发展趋势[3-4]。国内外众多学者将三维激光扫描技术应用于高陡岩质斜坡的地质调查工作中，如获取岩石裂缝信息[5-6]、岩体露头信息[7-8]和岩体结构面信息[9-14]。

随着大数据分析与机器学习算法的快速发展，基于点云数据获取岩体结构面参数信息已成为了一个前沿热点方向[15-16]。三维激光扫描技术采用目标物体表面大量采样点三维坐标的点数据集来表达其空间几何特征，并采用相关算法来实现结构面的自动化识别和表征[17-19]。例如：RIQUELME 等[20-21]基于三维点云数据提出了一种计算连续性和非连续性结构面间距的算法，并开发了开源程序 Discontinuity Set Extractor（DSE），实现了高陡边坡结构面间距信息的半自动化提取和表征，并对比了识别结果和现场调查结果，验证了该方法的可靠性。KONG 等[22]提出了三维点云数据对岩体结构面进行自动识别解译方法，获取了结构面的产状、迹长和间距等信息。

著录信息：奚望，陈宜伟，张文广，等. 基于点云数据的高陡岩质边坡结构面识别与稳定性分析 [J]. 地质科技通报，2025，44(4)：330-339.
XI Wang, CHEN Yiwei, ZHANG Wenguang, et al. Recognition of structural planes and stability analysis of highly steep rock slopes on 3D point cloud data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 330-339.

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

杨辉[23]基于三维点云数据重建隧道掌子面三维地质模型，识别了隧道掌子面的岩体结构面信息和迹线信息。官东林等[24]基于三维激光扫描实现了钻孔的三维重建与可视化。张野等[25]提出了一种基于数字钻孔影像智能分割结构面的方法，实现了结构面几何信息的量化分析。YE 等[26]通过计算点云数据的法向量，用点法向量对点云进行赋色，实现了结构面识别及产状信息的提取。WANG 等[27]采用区域生长法，自动识别和提取了点云数据中岩体裂缝的范围、方位信息。但现有算法在识别结构面参数的过程中面临一些难点，例如平面过度分割、平面边界难以准确划分、难以识别与去噪、计算成本高等[28-32]。

另一方面，针对岩体中节理裂隙分布的随机性特点，一般采用离散裂隙网络（discrete fracture network model，简称 DFN）模型来表征节理裂隙的分布特征，通过统计节理裂隙的几何参数来表征其概率分布模型，并生成与实际节理裂隙具有相似统计规律的随机节理裂隙模型[33-34]，可用于岩质边坡稳定性分析。LI 等[35]通过现场测量某岩质边坡获取的节理产状、大小和位置分布特征得到了其模型参数并构建了真实的随机 DFN 模型，并研究了 DFN 分布特征对岩质边坡稳定性的影响。此外，大量学者[36-39]采用离散元法建立了反映岩体节理分布特征的 DFN 模型，研究了不同节理参数（如内摩擦角和节理密度等）对岩质边坡稳定性的影响。总的来说，DFN 模型在表征岩体节理分布特征上具有突出优势，可用于分析结构面分布特征对边坡稳定性的影响。

为此，本研究通过三维激光扫描获取某高陡岩质高边坡的点云数据，借助于开源的 DSE 程序实现岩体结构面参数的半自动化识别，获取结构面的产状、迹长及间距信息等关键参数，通过获取的结构面信息建立该岩体的 DFN 模型和岩质边坡三维离散元模型，分析边坡的安全系数和潜在失稳区域，并与现场调查结果进行对比，以验证该方法的可靠性与准确性。

1　研究区地质概况

1.1　研究区域与结构面识别原理

研究区域为河南省登封市嵩山风景区法王寺东南约 600 m 的一处高陡岩质高边坡，采用三维激光扫描技术获取了一定范围的点云数据。地面三维激光扫描系统主要包括激光测距系统、激光扫描仪和 CCD 相机，三维激光扫描仪的控制器控制着距离测量和激光扫描，使其相互配合通过扫描头完成对目标物体的点云数据采集，最后将采集的点云数据储存在存储器中。三维激光扫描主要包括准备工作、控制测量、点云数据采集、点云拼接等步骤。通过三维激光扫描获取的点云数据如图 1 所示。综合考虑点云数据的分布情况、结构面分布特点及识别效率，选择了左下角岩体节理分布明显的点云数据进行后续的结构面识别与边坡稳定性分析，该区域长宽高分别为 23，17，31 m，采用“布料”算法对点云数据进行滤波处理[40]，处理后共得到该研究区域 159 940 个点云数据集。

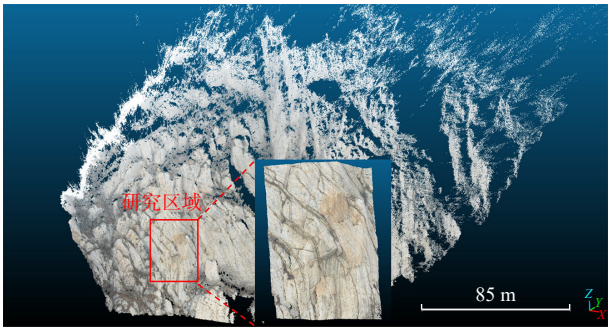


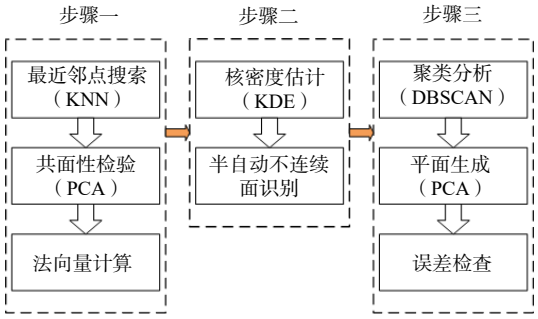
图 1　研究区域岩质高边坡的三维点云数据

Fig. 1　3D point cloud data of a highly steep rock slope

临兴地区面积约为 2 600 km^2，呈一东高西低的单斜构造，研究区西部地层较为平缓，东部因吕梁山隆起而抬升，地层倾角增大[25-26]。临兴地区铝土岩发育于石炭系本溪组（C_2b）底部，不整合于下伏奥陶系马家沟组碳酸盐岩之上，与上覆二叠系太原组（P_1t）呈整合接触关系。其中，本溪组为上石炭统沉积地层，厚 30 ~ 70 m，主要受到海西运动的影响，顶部发育 8$^{\#}$+9$^{\#}$煤层，常作为与太原组分界的标识层，中部以深灰色泥岩以及黑色碳质泥岩为主，夹有浅灰色灰岩、灰白色砂岩以及薄煤层，底部发育灰白色铝土岩。

本研究采用开源的 DSE 程序对点云数据进行结构面的半自动化识别，并获取结构面的产状、迹长及间距信息，主要步骤可分为 3 部分，如图 2 所示。主要算法的基本原理介绍如下：

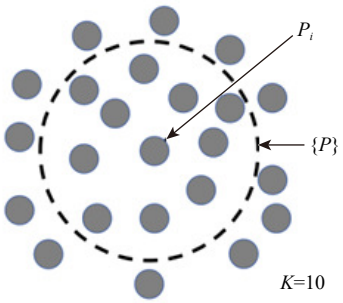
（1）最近邻点搜索　如图 3 所示，对于岩体三维点云数据中的任意原始点 P_i，首先搜索附近具有相同特征的若干点形成点云集$\{P\}$，以$\{P\}$所形成的最佳拟合平面的法向量作为原始点 P_i 的法向量。DSE 采用的最近邻点搜索方式是以点个数搜索，这种方法将搜索到指定的 K 个与原始点 P_i 最相近的邻点组成点云集$\{P\}$，通常 DSE 中采用邻点搜索个数 K 值建议为 30。



KNN. k nearest neighbor search(k 最近邻搜索算法); KDE. kernel density estimation(核密度估计法, 用于估计随机变量的概率密度函数); DBSCAN. density-based spatial clustering of applications with noise(基于密度的聚类分析算法); PCA. principal component analysis(主成分分析法, 一种数据降维算法)

图 2　DSE 识别结构面步骤

Fig. 2　Procedures of structural plane recognition via DSE



P_i. 岩体三维点云数据中的任意原始点; {P}. 原始点附近具有相同特征的若干点形成的点云集; K. 邻点搜索个数

图 3　最近邻点搜索算法算法示意图

Fig. 3　Diagram of the nearest neighbor searching algorithm

(2)共面性检验　在计算点云集{P}的法向量之前, 需要检验所有点云是否位于同一平面, DSE 采用主成分分析法(principal component analysis, 简称 PCA)实现这一功能, 并将偏离该平面的点云数据排除出点云集。

(3)法向量计算　当点云集{P}近似分布在同一平面之后, 可以通过最小二乘法拟合出最佳的平面方程及其单位法向量。

(4)产状计算　得到最佳拟合平面的单位法向量之后, 根据葛云峰等[11]提出的基于单位法向量的产状计算公式即可求取岩体结构面在大地坐标系中的倾向和倾角。

(5)核密度估计　使用 matlab 平台自带的核密度估计法(kernel density estimation, 简称 KDE)函数, 可基于有限的样本推断总体数据的分布, 根据估计的概率密度函数, 可以得到数据分布的聚集区域。基于各点云集{P}的法向量, 可以得到结构面的赤平投影图, 用于判断优势结构面产状。

(6)半自动不连续面识别　通过人为设置以下 3 个参数来调整识别结果的准确性: ①不连续面间的最小夹角, 该参数可以将多组不连续面明显区别开来, 建议值一般为 20°; ②最大不连续面数量, 可根据现场测量结合点云数据初步确定不连续面的组数, 避免识别分组过多; ③点云集与不连续面的最大夹角, 该参数可以过滤掉分布过于离散、不属于任何不连续面的点云集, 保证识别结果精确有效, 建议值一般为 30°。

(7)聚类分析　采用基于密度的聚类分析算法(density-based spatial clustering of applications with noise, 简称 DBSCAN), 通过将紧密相连的样本划为一类, 得到一个聚类样本, 通过将各组紧密相连的样本划分为不同的类别, 就可以得到最终的聚类结果。此步骤中可以人为设置单个聚类搜索临近点的最小数量来调整聚类效果, 该参数的建议值为 50。点云集、优势结构面、聚类的关系如图 4 所示。

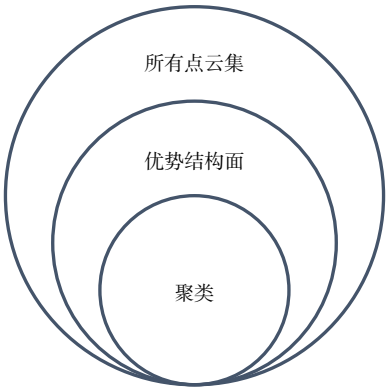


图 4　点云集、优势结构面、聚类关系示意图

Fig. 4　Relations among the point cloud set, principal structural plane and cluster

1.2　结构面产状识别

将研究区三维点云坐标数据导入 DSE 程序中进行解译识别, 计算分析得到优势结构面产状分布信息, 如图 5 所示。DSE 程序可以自动消除不连续噪声区域, 自动滤去了 16 121 个点云数据, 共识别分析了 143 819 个点云。可以看出该边坡主要包含 2 组优势结构面, 优势结构面产状及所占点云数量百分比如表 1 所示。

1.3　结构面尺寸统计分析

为了更准确地统计获取每组结构面的概率分布特征, 将每组优势结构面中包含 50 个点云以上的聚类纳入统计范围, 并将每个聚类面积等效为同等面积的圆之后计算得到的直径来表征结构面的尺寸。通过 origin 软件建立每组结构面直径大小的频率分

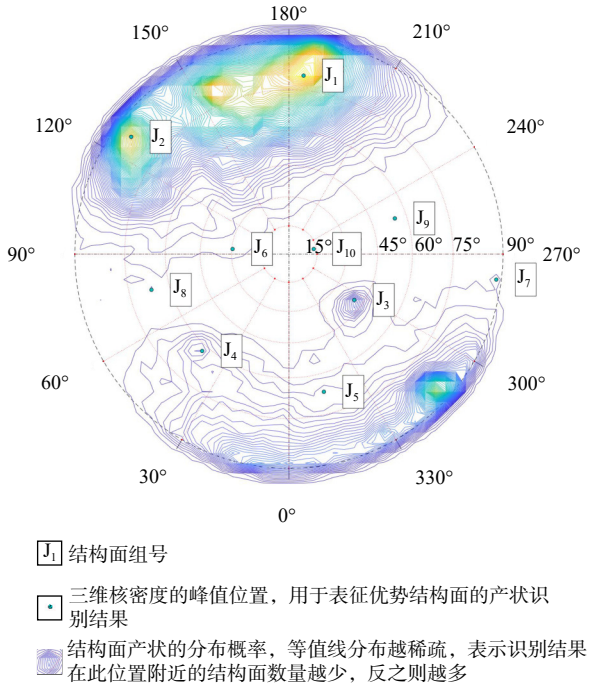


图 5　结构面极点密度图

Fig. 5　Density of the poles of the structural plane

表 1　结构面产状

Table 1　Structural planes orientation

结构面组号	倾向/(°)	倾角/(°)	点云数量百分比/%
J_1	184.7	79.8	51.32
J_2	126.6	85.1	34.48
J_3	305.0	41.0	0.87
J_4	41.9	62.5	3.26

布柱状图，再对每组数据进行拟合得到每组结构面的概率分布模型及决定系数(R^2)，统计结果如图 6 所示。2 组优势结构面的尺寸均服从负指数分布，R^2 分别为 0.92 和 0.82，表明拟合结果较好。

1.4　结构面间距统计分析

DSE 程序可基于点云聚类信息计算结构面间距信息，同时计算完全连续和不完全连续 2 种情况的结构面间距。DSE 程序通过聚类分析将每组结构面包含的聚类视为产状一致的平面，并且计算三维空间距离最近的 2 组结构面的法向间距，其原理如图 7 所示。图 7a 假定所有结构面为完全连续的无限大的平面，此时距离结构面 J_1 最近的为结构面 J_2，计算得到的结构面间距分别为 22, 18, 25, 26 cm。图 7b 则将所有结构面视为有限大小的、不完全连续的平面，此时距离结构面 J_1 最近的为结构面 J_3，计算得到的结构面间距分别为 40, 51, 26, 43 cm。2 种间距计算方式得到的结构面法向间距信息如表 2 所示。根据 2 种结构面间距计算原理可知，采用不完全连续的方式计算得到的结构面间距通常大于或等于采用完全连续的方式计算得到的结果。

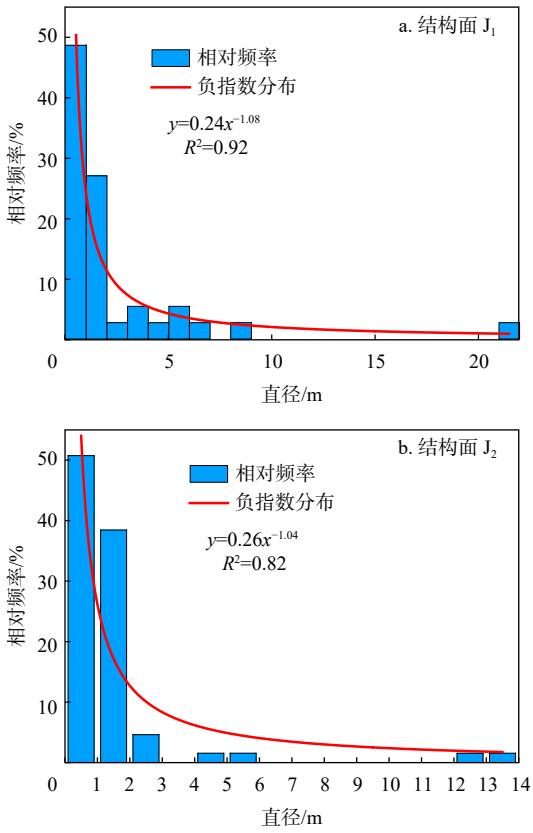


图 6　结构面直径的概率分布统计

Fig. 6　Probability distribution statistics of the structural plane diameter

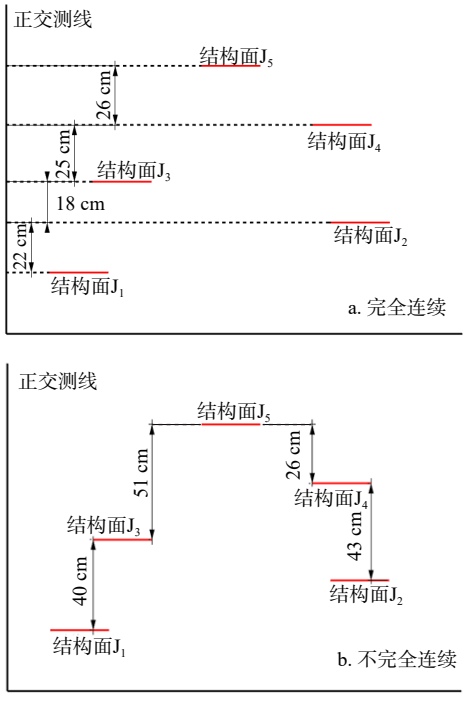


图 7　结构面间距计算原理

Fig. 7　Calculation principles of structural surface spacing

表 2　结构面法向间距

Table 2　Normal spacing of structural planes

优势结构面组号	计算方式	最小值/m	最大值/m	平均值/m	标准差
J_1	完全连续	0.01	2.13	0.37	0.53
	不完全连续	0.05	5.30	0.82	1.01
J_2	完全连续	0.01	0.78	0.23	0.19
	不完全连续	0.02	3.43	0.81	0.62

2　岩质边坡稳定性分析

2.1　三维地形离散元建模

将研究区域的点云数据导入 Rhino 中建立三维地质模型，具体操作流程如图 8 所示，主要包括以下步骤：①输入处理好的点云坐标数据，通过点云嵌面操作生成由点控制的三角形网格；②选中三角网格进行曲面布帘操作，框选需要建模的点云范围，生成平滑的边坡地形曲面；③选择该地形曲面进行挤出拉伸，构建边坡实体三维模型；④选择多重曲面进行修剪操作，生成规则的实体模型，便于在建模过程中设置边界条件设定；⑤采用四面体重构网格，生成坡体网格模型；⑥检查网格大小分布是否均匀合理；⑦通过 Griddle 插件，选择适用于 3DEC 软件的网格格式并输出，即完成了边坡模型的建立。建立完成的三维块体离散元数值模型如图 9 所示，模型尺寸大小为 15.5 m×24 m×24 m，共计生成 1 103 个块体单元，可以看出该边坡模型能够在一定程度上反映实际的地形条件。

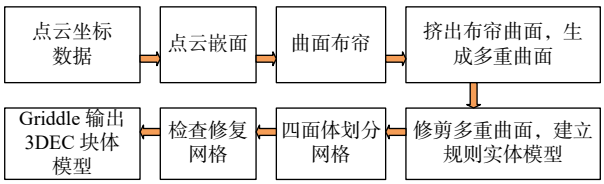


图 8　边坡三维地质模型建模流程图

Fig. 8　Processes of 3D model reconstruction

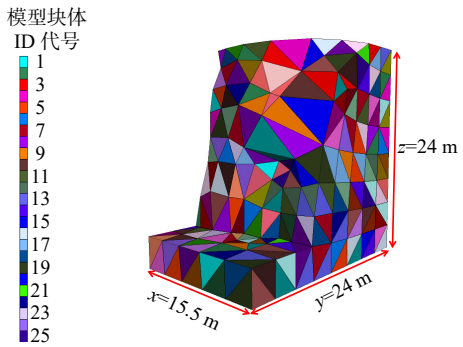


图 9　岩质高边坡三维离散元模型

Fig. 9　3D DEM model of the rock slope

2.2　岩体力学行为模拟

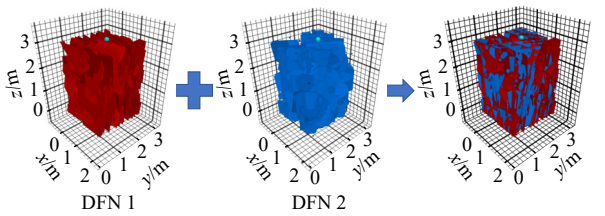
(1)离散裂隙网络（DFN）模型

本研究采用 3DEC 软件内置命令生成 DFN 模型，需要确定的节理参数包括产状、位置、尺寸和密度。产状采用常用的 F 分布(fisher)，位置采用随机分布(uniform)，尺寸则根据前文结构面尺寸拟合分析结果，采用负指数分布函数(power-law)。密度采用线密度($P10$)，考虑到实际条件下，结构面的分布并不是完全连续分布的，因此选用非连续方式计算得到的结构面法向间距，在模型中心位置布设一条竖直的测线，根据结构面的倾角及法向间距，经换算确定结构面沿竖直测线方向的线密度。详细的 DFN 模型参数如表 3 所示，DFN 模型及测线示意图如图 10 所示，共计生成了 1 043 条结构面。

表 3　岩体 DFN 模型参数

Table 3　Parameters for DFN model

优势结构面组号	属性	分布	参数
J_1	产状	F分布	倾向：184.7°，倾角：79.8°，K=100
	位置	随机分布	在空间中均匀分布
	尺寸	负指数分布	指数：1.08，尺寸范围：0.5 ~ 21 m
	密度	$P10$	0.21
J_2	产状	F分布	倾向：126.6°，倾角：85.1°，K=100
	位置	随机分布	在空间中均匀分布
	尺寸	负指数分布	指数：1.04，尺寸范围：0.5 ~ 13 m
	密度	$P10$	0.11



x, y, z 分别为 DFN 模型长、宽、高

图 10　2 组优势结构面的 DFN 模型

Fig. 10　DFN models of two dominant joints

(2)岩体力学参数及边界条件

数值模型包含岩块与结构面两部分，本研究采用理想弹塑性本构模型和摩尔–库伦破坏准则来模拟岩块的变形破坏行为，结构面采用库伦滑移模型，并默认 2 组结构面力学参数一致。

采用 DFN 表征节理裂隙时，所有节理都被简化为大小有限的圆盘状，但在 3DEC 中，块体不能被分割，因此所有圆盘状节理都延伸为贯穿模型的节理，圆盘内部为真实裂隙，圆盘外部为虚拟裂隙，如图 11 所示，通过对两部分赋予不同的属性参数来保证虚拟节理与完整岩体具有相同的强度与变形特性。

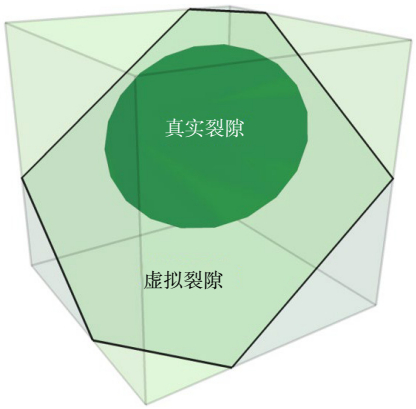


图 11　DFN 节理圆盘裂隙示意图

Fig. 11　Schematic diagram of a fissure disc in a DFN

根据现场地勘资料并参考 LI 等[35]对结构面参数的选取依据，岩块与结构面参数总结在表 4 中。对于边坡模型约束，边界条件设定为模型底部采用固定约束，四周为单向水平方向固定约束，顶部为自由边界。初始地应力平衡仅考虑坡体自重，重力加速度取 9.8 m/s^2。

2.3　岩质边坡稳定性分析

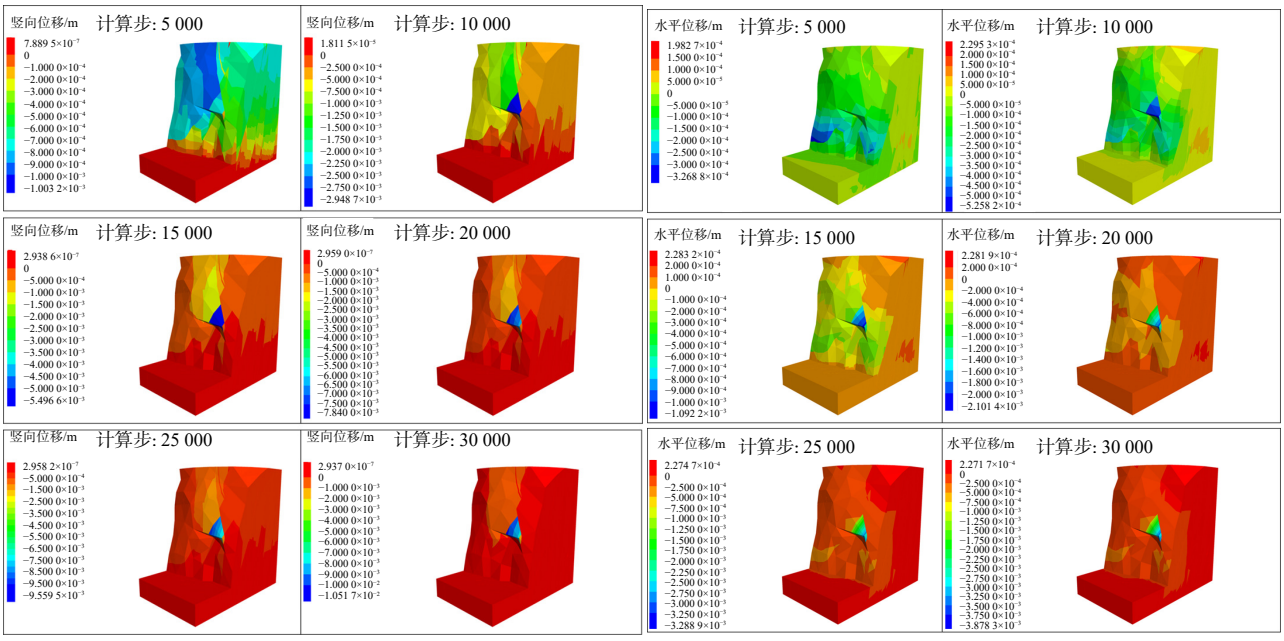
根据前文数值模型、参数选取与边界条件，首先采用块体离散元模拟进行位移分析，在重力作用下进行初始平衡计算，收敛条件为不平衡应力比达到 10^{-5}，选取了计算步分别为 5 000，10 000，15 000，20 000，25 000 和 30 000 的位移场结果进行分析，如图 12 所示，可知在重力作用下，边坡的位移变形以竖向位移为主，且随着计算步的增加，边坡位移逐渐增大，计算到 30 000 步时，最大水平位移为 3.88 mm，最大竖向位移为 10.52 mm。

进一步采用强度折减法模拟分析该岩质高边坡的稳定性，收敛条件为不平衡应力比，设置为 10^{-5}。边坡安全系数分布云图如图 13a 所示，可知边坡整体的安全系数为 1.5，而坡中右侧临空位置处局部岩体安全系数最小(约为 0.2)，容易发生局部失稳，这与位移场结果一致。放大坡中右侧临空位置处的云图如图 13b 所示，经随机节理裂隙的切割后，处于临空状态的部分岩体与边坡分离，在重力作用下发生

表 4　岩块和结构面物理力学参数

Table 4　Physical and mechanical parameters of rock blocks and structural planes

参数名称	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/GPa	泊松比	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	剪切刚度/(GPa·m^{-1})	法向刚度/(GPa·m^{-1})
岩块	2 600	14.1	0.26	9.79	5.595	9	35	4	—	—
真实裂隙	—	—	—	—	—	0	30	0	3.0	9
虚拟裂隙	—	—	—	—	—	9	35	4	559.5	1 398



a. 竖向位移场　　b. 水平位移场

图 12　坡体位移场云图

Fig. 12　Displacement contours of the slope

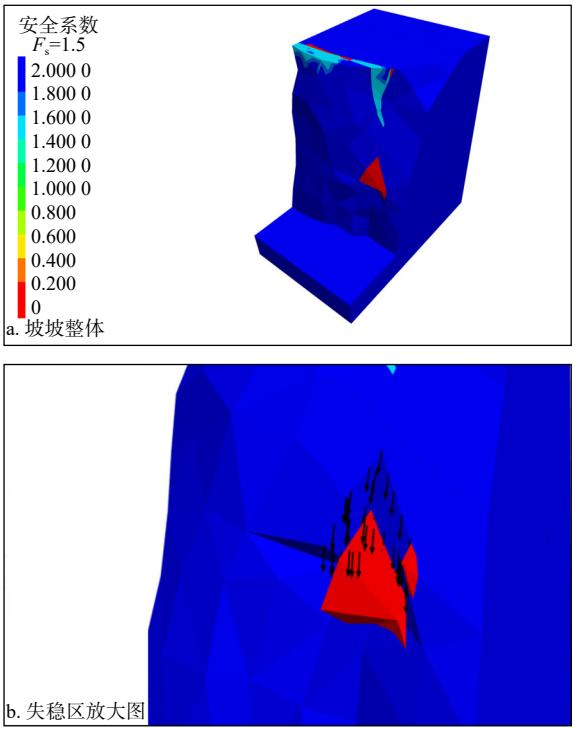


图 13　坡体安全系数分布云图

Fig. 13　Contours of the safety factor of the slope

容易发生失稳塌落现象，稳定性差。经随机节理裂隙切割后，原来相对完整的边坡岩体会变成体积更小的相对独立的岩石块体，且由于随机节理裂隙的黏聚力和抗拉强度比原岩更小，因此容易发生岩体的局部失稳。总体来说，该区域为该岩质边坡的潜在失稳区域，灾害形式为典型的高位危岩体崩塌灾害。

根据现场扫描的点云图像也可对边坡的潜在失稳区域作定性判断，如图 14 所示，边坡中部位置岩体处于凌空状态，且左右两侧各发育了一条较长的节理裂隙，节理裂隙宽度大，部分岩体风化后形成了灰褐色的碎屑填充物，具有脱落的风险，容易形成岩体崩塌灾害，这与数值模拟计算得到的潜在失稳区域较吻合，从而验证了该方法的可靠性。

3　结　论

(1)对点云数据的分析结果表明研究区共包含 2 组优势结构面，产状分别为 184.7°∠79.8°和 126.6°∠85.1°，2 组结构面的迹长均服从负指数分布，平均法向间距分别为 0.82 m 和 0.81 m。

(2)基于拟合分析得到的 DFN 模型并采用“Rhino-Griddle-3DEC”联合建模方法能够建立高陡岩质边坡的三维离散元模型，采用三维块体离散元模拟可以较好地分析岩质边坡的安全系数和潜在失稳区域。

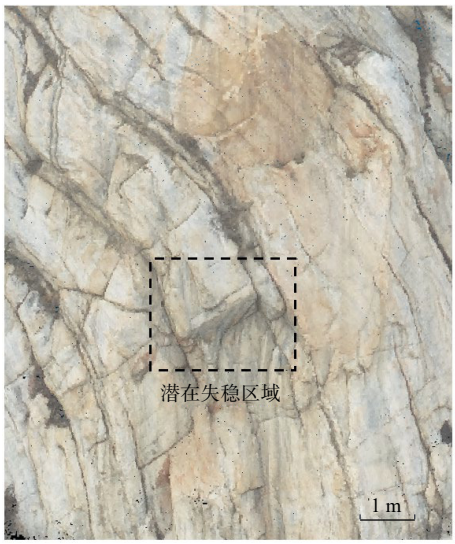


图 14　边坡潜在失稳区域

Fig. 14　Potential failure area of the slope

(3)该岩质边坡的整体安全系数为 1.5，在重力作用下主要发生纵向位移，坡中右侧临空位置处更易发生失稳，这与现场调查结果较一致。主要原因是经随机节理裂隙的切割后，处于临空状态的部分岩体易与坡体分离，且由于节理裂隙的黏聚力和抗拉强度比原岩更小，大大降低了该区域岩体的工程力学性质，容易形成高位岩体的崩塌灾害。

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] 陈洪江. 土木工程地质 [M]. 第 2 版. 北京：中国建材工业出版社，2010.
CHEN H J. Civil engineering geology[M]. Second Edition. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2010.（in Chinese with English abstract）

[2] 刘佑荣，唐辉明. 岩体力学 [M]. 北京：化学工业出版社，2009.
LIU Y R, TANG H M. Rock mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.（in Chinese with English abstract）

[3] 董秀军. 三维空间影像技术在地质工程中的综合应用研究 [D]. 成都：成都理工大学，2015.
DONG X J. Research of comprehensive application of three-dimensional image technology in geologic engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.（in Chinese with English abstract）

[4] 董秀军，黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(增刊 2)：3629-3635.
DONG X J, HUANG R Q. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3629-

3635.（in Chinese with English abstract）

[5] FARDIN N, FENG Q, STEPHANSSON O. Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 329-335.

[6] 王鑫. 基于地面激光扫描的裂缝面提取及构造古剪应变张量的聚类分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WANG X. The extraction of fracture surfaces based on terrestrial laser scanning and the clustering analysis of tectonic paleo shear strain tensors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.（in Chinese with English abstract）

[7] HACK H R G K, AZZAM R, CHARLIER R. Engineering geology for infrastructure planning in Europe: A European perspective[M]. Berlin, New York: Springer, 2004.

[8] 赵佳斌. 基于摄影测量三维点云的结构面识别及三维渗流管网模型研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
ZHAO J B. Structural plane identification and 3D seepage pipe network model based on photogrammetry 3D point cloud[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.（in Chinese with English abstract）

[9] HE B S, DING L Q, SUN P. The application of 3D laser scanning technology in rock joint sets identification[J]. Journal of China Institute Water Resource and Hydropower Research, 2007, 5(1): 43-48.

[10] 朱云福. 基于三维激光扫描数据的岩体结构面识别方法研究及系统研制 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
ZHU Y F. The theory and system development of discontinuity identification based on 3D laser scanning data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.（in Chinese with English abstract）

[11] 葛云峰, 夏丁, 唐辉明, 等. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3050-3061.
GE Y F, XIA D, TANG H M, et al. Intelligent identification and extraction of geometric properties of rock discontinuities based on terrestrial laser scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3050-3061.（in Chinese with English abstract）

[12] 徐俊, 谢礼明, 刘宇, 等. 基于三维激光扫描的岩体结构面识别与块体分析 [J]. 人民长江, 2021, 52(增刊 1): 309-312.
XU J, XIE L M, LIU Y, et al. Rock structural face identification and block analysis based on 3D laser scanning[J]. Yangtze River, 2021, 52(S1): 309-312.（in Chinese with English abstract）

[13] 陈娜. 基于三维激光扫描的边坡岩体结构信息提取和变形监测研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
CHEN N. The structural information and deformation monitoring of rock slope based on 3D laser scanning technology[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.（in Chinese with English abstract）

[14] 宁浩. 基于三维激光扫描的岩体结构面识别与信息提取 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
NING H. Recognition and information extraction of rock mass structural plane based on 3D laser scanning[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.（in Chinese with English abstract）

[15] 许度, 冯夏庭, 李邵军, 等. 激光扫描隧洞变形与岩体结构面测试技术及应用 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1336-1343.
XU D, FENG X T, LI S J, et al. In-situ testing technique for tunnel deformation and structural plane of rock mass based on contactless laser scanning method and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1336-1343.（in Chinese with English abstract）

[16] 吴翔. 基于三维激光点云的岩体结构面几何信息提取研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
WU X. Research on geometric information extraction of rock mass discontinuity based on 3D laser point cloud[D]. Changchun: Jilin University, 2022.（in Chinese with English abstract）

[17] FENG Q, FARDIN N, JING L, et al. A new method for in situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(1): 3-25.

[18] ARMESTO J, ORDÓÑEZ C, ALEJANO L, et al. Terrestrial laser scanning used to determine the geometry of a granite boulder for stability analysis purposes[J]. Geomorphology, 2009, 106(3/4): 271-277.

[19] ABELLÁN A, VILAPLANA J M, CALVET J, et al. Rockfall monitoring by terrestrial laser scanning: Case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(3): 829-841.

[20] RIQUELME A J, ABELLÁN A, TOMÁS R, et al. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds[J]. Computers & Geosciences, 2014, 68: 38-52.

[21] RIQUELME A J, ABELLÁN A, TOMÁS R. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds[J]. Engineering Geology, 2015, 195: 185-195.

[22] KONG D H, WU F Q, SAROGLOU C. Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds[J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105442.

[23] 杨辉. 基于三维激光扫描点云数据的隧道掌子面岩体结构面识别方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
YANG H. Method for identification of rock discontinuities in tunnel face from 3D point clouds based on 3D laser scanning[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.（in Chinese with English abstract）

[24] 官东林, 文国军, 王玉丹, 等. 基于线激光扫描的岩石激光钻孔的三维重建和可视化 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 173-183.
GUAN D L, WEN G J, WANG Y D, et al. 3D reconstruction and visualization for laser drilling hole on rock based on line laser scanning[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3): 173-183.（in Chinese with English abstract）

[25] 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）

[26] YE Z, XU Q, LIU Q, et al. Application of unmanned aerial vehicle

oblique photogrammetry to investigation of high slope rock structure[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1739-1746.

[27] WANG X, ZOU L J, SHEN X H, et al. A region-growing approach for automatic outcrop fracture extraction from a three-dimensional point cloud[J]. Computers & Geosciences, 2017, 99: 100-106.

[28] GUO J T, LIU S J, ZHANG P N, et al. Towards semi-automatic rock mass discontinuity orientation and set analysis from 3D point clouds[J]. Computers & Geosciences, 2017, 103: 164-172.

[29] 梁玉飞, 裴向军, 崔圣华, 等. 基于地面三维激光点云的滑坡破坏边界岩体结构特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1209-1225.
LIANG Y F, PEI X J, CUI S H, et al. Analysis of rock mass structure characteristics of landslide boundaries based on ground 3D laser point cloud[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1209-1225. (in Chinese with English abstract)

[30] 王培涛, 覃拓, 黄正均, 等. 基于三维点云的岩体结构面信息快速化识别方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 503-519.
WANG P T, QIN T, HUANG Z J, et al. Fast identification of geometric properties of rock discontinuities based on 3D point cloud[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 503-519. (in Chinese with English abstract)

[31] DAGHIGH H, TANNANT D D, DAGHIGH V, et al. A critical review of discontinuity plane extraction from 3D point cloud data of rock mass surfaces[J]. Computers & Geosciences, 2022, 169: 105241.

[32] GE Y F, CAO B, TANG H M. Rock discontinuities identification from 3D point clouds using artificial neural network[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(3): 1705-1720.

[33] 宋琨, 孙驰, 安冬, 等. 数字钻孔全景影像中结构面特征智能识别方法 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(5): 17-22.
SONG K, SUN C, AN D, et al. Intelligent identification method for rock discontinuities properties by digital borehole panoramic images[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(5): 17-22. (in Chinese with English abstract)

[34] 荆少东, 许国辉, 吴尚彬, 等. 基于三维精细化数值模型的地下油库水封安全评价 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 1-11.
JING S D, XU G H, WU S B, et al. Assessment of the water-sealed safety of underground crude oil storage based on a three-dimensional refined numerical model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 1-11. (in Chinese with English abstract)

[35] LI Y C, CHEN J P, ZHOU F J, et al. Stability evaluation of rock slope based on discrete fracture network and discrete element model: A case study for the right bank of Yigong Zangbu Bridge[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(4): 1423-1441.

[36] LIU B, HE K, HAN M, et al. Dynamic process simulation of the Xiaogangjian rockslide occurred in shattered mountain based on 3DEC and DFN[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134: 104122.

[37] JIA L, CAI J S, WU L, et al. Influence of fracture geometric characteristics on fractured rock slope stability[J]. Applied Sciences, 2023, 13(1): 236.

[38] ZHANG H J, WU S C, ZHANG Z X, et al. Reliability analysis of rock slopes considering the uncertainty of joint spatial distributions[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 105566.

[39] 蒋水华, 陈佳栋, 邹宗毅, 等. 基于通用椭圆盘模型及 3DEC 实现的节理岩质边坡稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1610-1622.
JIANG S H, CHEN J D, ZOU Z Y, et al. Stability analysis of jointed rock slopes based on a universal elliptical disc model and its realization in 3DEC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1610-1622. (in Chinese with English abstract)

[40] ZHANG W M, QI J B, WAN P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 501.

Summary for “基于点云数据的高陡岩质边坡结构面识别与稳定性分析”

Recognition of structural planes and stability analysis of highly steep rock slopes on 3D point cloud data

XI Wang[1]，CHEN Yiwei[2]，ZHANG Wenguang[3]，BIAN Linsong[1]，MEN Lin[1]，LIANG Pengfei[1]，ZHOU Bo[3*]

1. Guangzhou Engineering Co., Ltd. of China Railway 19th Bureau Group, Guangzhou 511400, China；
2. China Railway Investment Group Co., Ltd., Beijing 100855, China；
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

First author，E-mail：55911275@qq.com

* Corresponding author， E-mail：zhoubohust@hust.edu.cn

Abstract：[**Objective**] The distribution of structural planes plays a significant role in determining the engineering and mechanical properties of rock masses. Accurately obtaining information of structural planes is crucial for analyzing the characteristics and stability of rock masses. [**Methods**] 3D point cloud data of a highly steep rock slope were acquired via 3D laser scanning technology. After filtering and preprocessing of the point cloud data, the open-source program Discontinuity Set Extractor (DSE) was then used to semiautomatically recognize and classify the point cloud data, obtaining key parameters and clustering information of the structural planes of rock slopes, such as attitude, trace length, and spacing. By fitting the point cloud clustering information, a probability distribution model was created, and a discrete fracture network (DFN) model was established. Furthermore, a 3D block discrete element model of the steep slope was developed via the "Rhino-Griddle-3DEC" integrated modeling method, which is based on point cloud data. The model investigated the stability of the slope and potential failure areas. [**Results**] Under gravity conditions, the safety factor of the entire slope is approximately 1.5, and the potentially unstable area is the dangerous rock mass located at the top of the slope. [**Conclusion**] Therefore, the structural plane parameters identified by this method can better reflect the engineering properties of the rock mass, providing important guidance for the analysis and evaluation of the stability of highly steep rock slopes.

Key words: highly steep rock slope； point cloud data；structural plane recognition；discrete fracture network；stability analysis

Received：2023-12-01；Revised：2024-03-21；Accepted：2024-03-29

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230667