基于非接触测量楔形危岩体稳定性快速评价

张航[1]，胡海瑞[2]，朱杰清[2]，胡彬[3]，葛云峰[3*]，陈钱[3]

1. 福建中核汇能能源有限公司，福州 350000；
2. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司，福州 350000；
3. 中国地质大学（武汉），武汉 430074

第一作者，E-mail：804017998@qq.com

* 通信作者，E-mail：geyunfeng@cug.edu.cn

2024-08-30 收稿；2024-10-21 修回；2024-10-23 接受

基金项目：国家自然科学基金项目（42477177）；湖北省自然科学基金计划联合基金重点项目（2024AFD005）

中图分类号：TV223.1　　文章编号：2096-8523（2025）02-0067-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240496

摘　要：基于传统接触式测量无法满足楔形危岩体施工快速高效安全需求的现状，本研究采用非接触测量的方法获取与分析楔形危岩体参数，通过得到的参数分析楔形危岩体在不同工况下的稳定性。以某抽水蓄能电站上水库楔形危岩体为例，在工程地质野外精细调查的基础上，开展了三维激光扫描野外测量，获取了楔形危岩体高精度点云数据。采用最小二乘法拟合得到临空面所在的平面，确定楔形体所在边坡的坡角和坡高。运用局部点云拟合的办法确定法向量，将得到的法向量通过计算求出结构面产状。结合 Alpha Shapes 方法计算得出危岩体体积，利用刚体极限平衡法对楔形危岩体进行稳定性评价。结果表明：在天然、暴雨和地震工况下，楔形危岩体的稳定性系数分别为：1.131（基本稳定）、0.896（不稳定）和 0.917（不稳定）。本研究将非接触测量与智能识别运用到楔形危岩体的稳定性评价中，整体用时 102 min，大大提高了稳定性评价效率并降低了工程施工的风险，为今后危岩体稳定性的快速评价提供了新方法。

关键词：楔形危岩体；稳定性评价；非接触测量；智能识别；极限平衡法

我国是地质灾害发生较多的国家，据中华人民共和国应急管理部统计，2023 年我国共发生崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害 3 666 起，而发育不稳定边坡和危岩体是滑坡与崩塌的主要诱因。因此，加强对危岩体和不稳定边坡的研究，了解其形成机制以及做好预防措施，可以极大限度地减小其带来的危害。其中，降雨和地震是诱发危岩体滑坡的重要原因[1-5]。

通过对危岩体进行量测的方法可以计算危岩体的尺寸、产状、构造等信息，有利于进行危岩体的稳定性评价，从而对边坡和危岩体的工程施工方案作出指导。

传统危岩体测绘手段主要通过罗盘、测绳和皮尺等传统工具和人工测量的办法获取危岩体的尺寸与结构面信息。但这种方法采集范围与数据精度有限，同时测绘过程中往往需要物理接触地质实体，操作不便，且容易受到地形、天气等因素制约，工作人员可能面临巨大安全风险。

为解决传统方法的不足，非接触测量技术应运而生。其中，三维激光扫描技术作为非接触测量的常见技术，能够快速获取地形的表面特征高精度、高密度的点云数据，为复杂地质环境下危岩体三维信息的获取提供了一种颇具效率的手段[6-8]。

在结构面的智能识别与产状提取方面：GE 等[9]通过改进区域生长法从三维点云提取结构面的几何特性从而获取产状信息；DELIVERIS 等[10] 基于扫描边坡获得的点云数据，通过 3 种不同的软件进行比

著录信息：张航，胡海瑞，朱杰清，等. 基于非接触测量楔形危岩体稳定性快速评价［J］. 地质科技通报，2025，44（2）：67-77.
ZHANG Hang, HU Hairui, ZHU Jieqing, et al. Rapid analysis of the stability of a wedge-shaped unstable rock mass on the basis of non-contact measurements［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44（2）: 67-77.

© 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

较，发现 3 种软件在安全系数和坍塌机制的动力学方面都显示出良好的一致性；宣程强等[11] 从数字表面模型提取结构面从而获取产状；郭登上等[12] 将三维点云的边坡产状提取应用到了工程实际；葛云峰等[13] 利用改进后的区域生长法和解析几何理论实现了岩体结构面的智能提取；林松等[14] 通过最优邻域局部熵方法对点云进行了精简；刘昌军等[15] 对点云数据进行了三维重建，并采用模糊 C 均值聚类方法对结构面的产状进行分类，从而获得了结构面的分类结果。这些研究从不同角度采取不同方法提取了岩体结构面和产状，对非接触测量的发展产生了不可磨灭的作用，但对滑塌型潜在楔形危岩体稳定性评价的应用不充分。本研究集各家所长进一步提高了识别和提取效率。

在危岩体体积计算方面：GUO 等[16] 基于 Alpha 模型提取表面作为多边形网格，从而生成了适用于模型计算的紧凑型模型，为如今的 Alpha Shapes 计算方法奠定了基础；吕国芳等[17] 采用 Alpha Shapes 的方法计算出几何模型的体积；张鹤等[18] 改进上述方法，采用分段计算的方法进一步精确模型体积；DOS SANTOS 等[19] 根据局部点间距估计每条边的局部参数，提出对于不同密度变化的点云数据采取不同的参数，得到了复杂情况下点云体积计算的方法；AL-MESTAREHI 等[20] 提出了一种基于 Alpha Shapes 改进的建模新方法，其中数据由不均匀分布在体积中的点组成，而不仅仅是分布在表面上的点。这些研究基于 Alpha Shapes 进行了改进，在不同程度上对特定物体的点云数据进行了更细致的体积计算，本研究针对危岩体采取了相应改进，更加结合工程实际。

因此，本研究以天津市蓟州区龙潭沟楔形危岩体为例，结合三维激光扫描技术在危岩体调查和结构面智能识别方面的应用[21-22]，基于危岩体的点云数据对结构面进行识别并采用局部点云拟合提取结构面产状[23-25]，同时采用 Alpha Shapes 对危岩体体积进行评估，从而得出危岩体稳定性分析有关的参数。最后通过极限平衡法计算在自然工况、暴雨工况和地震工况下楔形危岩体的稳定性系数[26-30]。

1　研究区概况

1.1　研究区地质概况

根据天津龙潭沟（青山岭）抽水蓄能电站规划报告，该抽水蓄能电站站址位于天津市境内，在地貌上属侵蚀剥蚀中、低山区（图 1）。研究区位于暖温带半湿润大陆性季风气候区，四季分明，雨热同季，年均气温为 11.5℃，年降水量为 678.6 mm，霜冻期约为 195 d。此处山脊绵延，大型沟谷发育，地势北高南低，相对高差 300 ~ 800 m。地形切割强烈，地势陡峻，岩体节理裂隙发育，可见崩塌、卸荷裂缝、岩溶等不良地质现象，地质条件较为复杂。研究区的大地构造位置位于华北准地台燕山台褶带的南缘，该地区褶皱和断裂构造非常发育。该区域主要呈现出太古宙、中–新元古界以及第四系松散堆积物地层的裸露特征，同时分布有印支早期、燕山早期侵入岩，研究区主体岩性为石英砂岩。岩体在层面以及节理裂隙的切割下易形成不利稳定的空间组合，在其自身的重力作用下，经过风化和卸荷作用的催化，形成了多个危岩体，甚至可能引发落石和崩塌[31-40]。

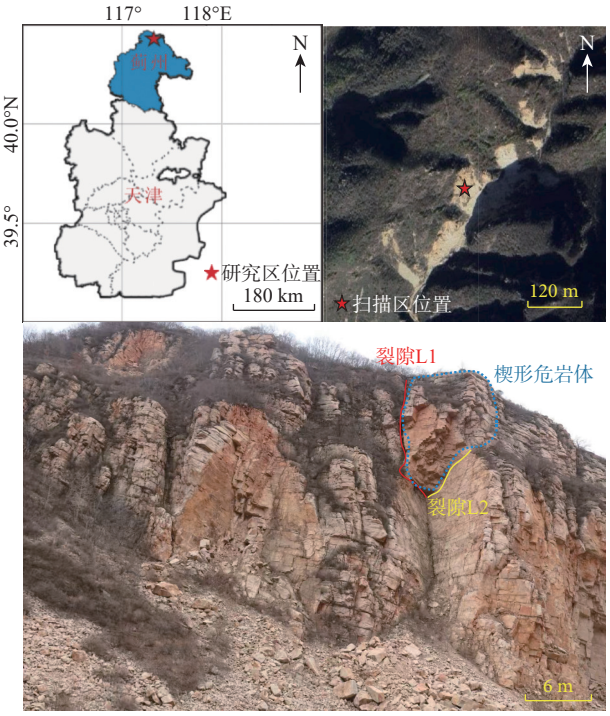


图 1　扫描区域位置

Fig. 1　Scanning area position

该区域的地下水类型主要包括松散岩类中的孔隙水、碳酸盐岩层中的岩溶裂隙水以及浅层基岩中的风化裂隙水。松散岩类中的孔隙水主要分布在第四系的松散堆积物中，这些水体具有强烈的径流和丰富的水量，主要由大气降水和地表水补给，且季节性变化明显。岩溶裂隙水主要赋存于磨盘峪蓄水构造，含水岩组为中元古界雾迷山组白云岩，广泛分布于整个工程区段内。基岩裂隙水在基岩裂隙中随机分布，径流缓慢而动态变化巨大，通过蒸发和缓慢下

渗的方式进行排泄。地下水对危岩稳定性的影响较小。

1.2 楔形危岩体基本特征

楔形危岩体位于上水库北井峪东侧约 400 m 处的一条冲沟内，库区范围内沟谷以“V”字型为主，上游坝坡 1∶1.75，下游坝坡 1∶1.5。正常蓄水位为 710 m，死水位为 678 m。该地段地形条件复杂，楔形危岩体所在的山体是近乎垂直的危岩带，楔形危岩体母岩为石英砂岩，边坡长度约 63 m，坡高介于 24 ~ 38 m 之间。层面产状 223°∠22°，其上节理发育，受其中 2 条主要裂隙 L1，L2 切割，加之块体下部岩体的重力作用与溶蚀作用，在高位临空面形成“悬挂式”楔形危岩体，其分布高程 230 ~ 290 m，最大落差约 40 m。楔形危岩体呈不规则块体，周围植被发育，岩体物理风化明显，变形破坏方式为滑坡。

经实地调查，该楔形危岩体坡脚可见明显的滑坡碎屑堆积，其中最大块石直径可达 0.5 m。如遇较大降雨、地震或附近人类工程活动等其他不利因素，极有可能导致局部或整个楔形危岩体发生滑坡，影响坡下道路的畅通与过往行人及车辆的安全。

1.3 楔形危岩体稳定性影响因素

危岩体的影响因素以外部因素为主，主要包括地形地貌、地层岩性、地质构造以及气象、降雨等控制因素。针对本研究区域附近拟修建一座抽水蓄能电站的现实需求，应重点考虑楔形危岩体受工程建设与建成水库实际运行影响衍生的工程地质问题，根据历史地质资料和现场考察，研究区危岩体的影响因素为暴雨工况下裂隙水压力和地震下的地震力。

楔形体破坏在工程实践中较常见。本研究的对象是抽水蓄能电站库岸旁的一处楔形危岩体，岩体质地坚硬且结构完整，理论上稳定性应较高。然而，由于断层切割，局部形成了楔形块体，并出现了破坏迹象。由于该处人迹罕至，并未采取任何防护措施，具有一定的危险系数，有必要开展危岩体稳定性评价。鉴于高陡边坡上危岩体数据采集困难，本研究采用三维激光扫描技术进行危岩体特征识别和结构面信息采集，以为危岩体的治理和设计提供可靠数据。

2 楔形危岩体坡体结构智能识别

2.1 楔形危岩体点云数据采集与预处理

如图 2 所示，由于危岩体位于高位，无法对其进行实地调查，因此工程人员的经验估计误差较大，难以满足后期分析需求（如危岩体尺寸、控制结构面产状等）。为此，选择了加拿大 Optech 公司生产的



图 2 危岩体数据采集现场照片

Fig. 2 Unstable rock mass data collection site photos

Polaris LR 三维激光扫描仪进行扫描，该仪器采样速率为 50 万点/s，采样间距为 1 mm，远距离测量精度小于 15 mm，能有效控制点云精度。扫描过程中使用 RTK-GPS 测量特征点的大地坐标，以便后期对点云数据进行地理配准[3]。仪器详细技术参数见表 1。

主要针对研究区楔形体露头处进行三维激光数据测量，共采集点云数量 120 033 619 个，数据大小 1.79 GB，平均分辨率为 4 mm。很明显坡面点云数据并不完整，且其上植被点云杂乱分布，会严重降低危岩体形貌构建的精度，进而影响相应楔形体特征信息的准确提取。另外，初始点云的大数值坐标可能造成结构面信息的错误识别。因此在采集完点云数据之后，需要对点云数据进行包括坐标转换、点云简化与植被滤波的预处理，最后输出工程需要的工作点云。经过预处理后，点云共计 400 000 个，处理后的点云如图 3 所示。点云采集用时 23 min，点云预处理用时 27 min。

2.2 楔形危岩体特征数据提取

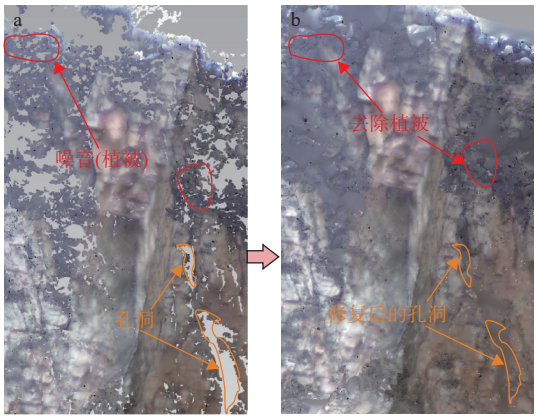
2.2.1 楔形危岩体几何形状参数量测

将楔形体从坡面点云中单独提取出来，并使用

表 1 三维激光扫描仪主要参数

Table 1 Main parameters of 3D laser scanner

参数	指标
最大测距/m	2 000
最小测距/m	1.5
最大测点速率/(点·s^{-1})	500 000
扫描视场角/(°)	360 × 120
测距原理	脉冲
波长/nm	1 550
激光等级	1
激光头转动机制	摆动反射镜
光束直径	36 mm @ 100 m 20 mm @ 50 m
工作温度/℃	−20 ~ 50



a. 原始点云; b. 修复后的点云

图 3　点云数据预处理结果

Fig. 3　Result of point cloud preprocessing

Delaunay 三角剖分算法对其进行三维重建。通过对封装模型的内生性缺陷进行改善, 可以获得高质量三维地质体封闭模型。如图 4 所示, 提取出楔形体长 24.38 m, 宽 19.82 m, 高 35.17 m, 使用最小二乘法拟合出一个平面作为临空面, 计算得出该楔形体临空面的坡脚坡度 α=83.4°, 坡高 H=41.7 m, 左右结构面交线的倾角 β=71.0°。计算模型拟合用时 16 min。

2.2.2　结构面智能识别与提取

(1)点云产状与法向量的确定

针对露头点云数据(图 5)需要提取结构面的产状, 在几何空间中, 只需要知道结构面所在平面的法向量即可确定其产状:

$$\begin{cases} \alpha_i = \operatorname{arccot}\left(\dfrac{\sqrt{x_i^2+y_i^2}}{z_i}\right) \\ \beta_i = \operatorname{arccot}\left(\dfrac{x_i}{y_i}\right) \end{cases}, \tag{1}$$

式中: x_i, y_i, z_i 均为第 i 个结构面的法向量; α_i, β_i 分别为第 i 个结构面的倾向和倾角[3]。

目前常用的点向量估计方法为局部点云拟合, 通过设置一个固定的半径 r 或邻近点数 k, 利用范围内的邻近点进行法向估计, 如果不同邻近点确定的平面差值在设置允许范围内, 则这些临近点视为在同一个平面内, 根据该平面进行法向量估计[4]。通过手动选择半径 r 或临近点数 k 的办法较难控制精度和可靠性, 且步骤较多, 常见的解决方法是通过点云的局部集合特征来设置点云的最优邻域估计, 得到最优邻域解后, 基于该邻域进行主成分分析法(principal components analysis, 简称 PCA)法向量的估计。

根据最小二乘法, 对点云构成的 K-D Tree 空间索引后建立局部邻域, 对点云中任意一点 P_i 与其邻近点数 k 的平面拟合公式为:

$$P(\boldsymbol{n},d) = \arg\min_{(\boldsymbol{n},d)} \sum_{i=1}^{k} (\boldsymbol{n}\cdot P_i - d)^2, \tag{2}$$

式中: P 为拟合的平面; $\boldsymbol{n}$ 为平面 P 的法向量; d 为原点与平面 P 之间的距离。

设正定矩阵 $\boldsymbol{M}_1$:

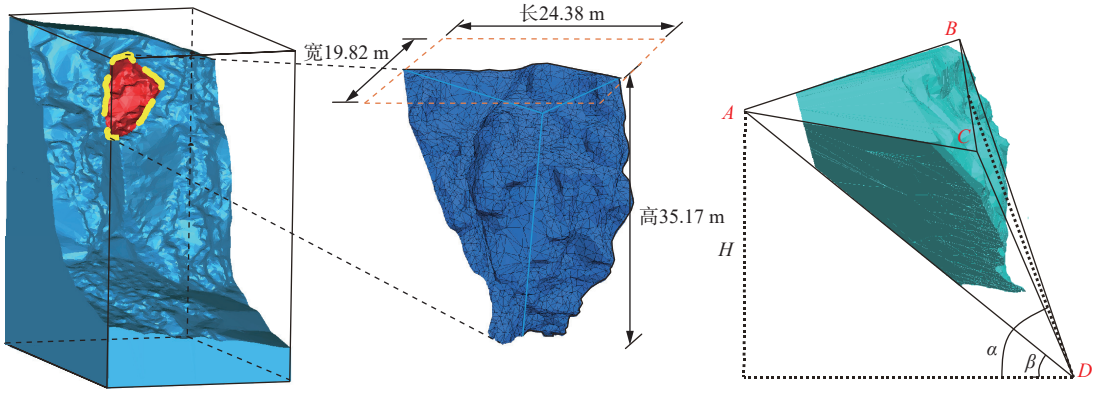
$$\boldsymbol{M}_1 = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^{\mathrm{T}} \\ e_2^{\mathrm{T}} \\ e_3^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

式中: e_1, e_2, e_3 均为 $\boldsymbol{M}_1$ 的特征向量; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为 $\boldsymbol{M}_1$ 的特征值。

通过对拟合得到的平面进行协方差矩阵的特征值分解, 可以求得平面的法向量, 即对应于最小特征值 $\boldsymbol{M}_2$ 的特征向量[5]:

$$\boldsymbol{M}_2 = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} (P_{ij} - \overline{P_i}) g (P_{ij} - \overline{P_i})^{\mathrm{T}}, \tag{4}$$

式中: $\overline{P_i}$ 为 P_i 在该邻域的重心; P_{ij} 为 P_i 在 j 处的重心。



A, B, C, D 为楔形体的端点; α 为楔形体临空面的坡脚坡度; β 为左右结构面交线的倾角; H 为坡高; 下同

图 4　楔形体三维模型

Fig. 4　3D model of wedge

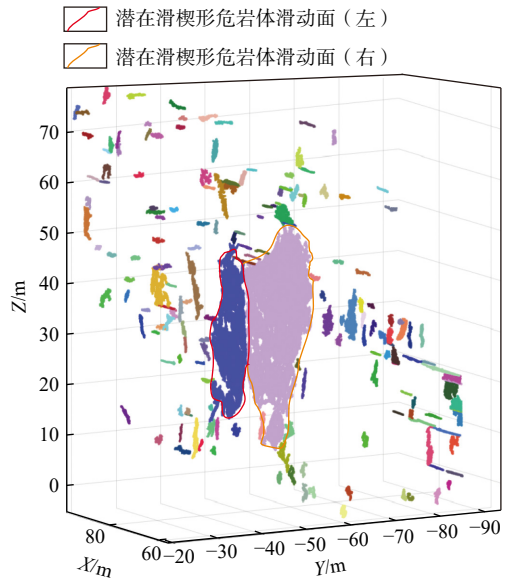


图 5　危岩体结构面群聚结果

Fig. 5　Discontinuities clustering result of unstable rock mass

局部邻域熵[6]：

$$E_\eta = -\eta_1 \ln(\eta_1) - \eta_2 \ln(\eta_2) - \eta_3 \ln(\eta_3),$$

式中：

$$\begin{cases} \eta_1 = \dfrac{\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_1}} \\ \eta_2 = \dfrac{\sqrt{\lambda_2} - \sqrt{\lambda_3}}{\sqrt{\lambda_1}} \\ \eta_3 = \dfrac{\sqrt{\lambda_3}}{\sqrt{\lambda_1}} \end{cases}, \tag{5}$$

式中：η_1，η_2，η_3 均为相关参数，代表特征值间的关系。

综上，计算点云法向量和产状的步骤如下：

①在邻域内设置临近点数的上限 k_{max} 和下限 k_{min}，设置步长 k_Δ=100，随机取一点 P_i 对其构建空间索引进行邻域搜索，找出其在一个平面的点，视为邻域点。

②调用 PCA 算法，以 k_{min}=500 为初始化搜索邻域点数，计算点 P_i 的局部协方差特征值和特征向量，计算局部邻域熵。

③重新进行邻域搜索，直到邻域点数达到 k_{max}=10 000。

④选取最小信息熵作为邻域最优解。

⑤提取法向量并计算得出产状。

计算得出，右结构面的产状为 300°∠62°，左结构面的产状为 43°∠83°。智能识别用时 7 min。

（2）岩体结构面群聚划分

要对岩体的结构面进行群聚划分，常见的方法有 DBSCAN（density-based spatial clustering of applications with noise），K 均值（k-means clustering algorithm），C 均值聚类法等方法。由于点云数据为非凸样本集，k-means 无法满足聚合要求，C 均值聚类法需要人工控制簇的数量和模糊指数，存在主观性偏差。因此，DBSCAN 是对本数据进行群聚划分的最好选择。

DBSCAN 是一种密度聚类算法，需要考虑到邻域半径（ε）和最小点数（P_{min}）来描述样本的紧密程度。邻域半径用于描述当前点临近区域的半径阈值，最小点数用于描述邻域半径内点的最小个数。如果某一点的邻域内包含了 P_{min} 个点，则其为核心点。在核心点邻域内的其余点均为可达点。核心点与其可达点构成了一个结构面。同时，不在核心点邻域内的任何点视为离群点，作删除处理，得到的群聚结果如图 5 所示。

2.2.3　楔形危岩体体积计算

本研究利用 Alpha Shapes 算法计算危岩体体积，Alpha Shapes 算法可以为 1 组二维点创建 1 个边界面，或者可以为 1 组三维点创建 1 个边界三维体。二维 Alpha 形状是由平面上的点集 P 以及在点集外部滚动的圆的半径参数 α 决定的多边形。三维 Alpha 形状则是由空间中的点集 P 以及在点集外部滚动的球的半径参数 α 决定的三维体。理论上存在当半径参数 $\alpha \to \infty$ 时，Alpha Shapes 生成点集 P 的三维凸包；当半径参数 α=0 时，Alpha Shapes 生成 1 个空集；当半径参数 α 取值适当时，Alpha Shapes 生成凹处与孔洞，精细化程度提升。将点云集转换为闭合多边形后，可以从闭合多边形估计出物体的体积。在切割出楔形危岩体时额外分出一小块碎屑作为拟合是否失真的判别标准，在拟合不失真的情况下，半径参数越大越接近真实情况。

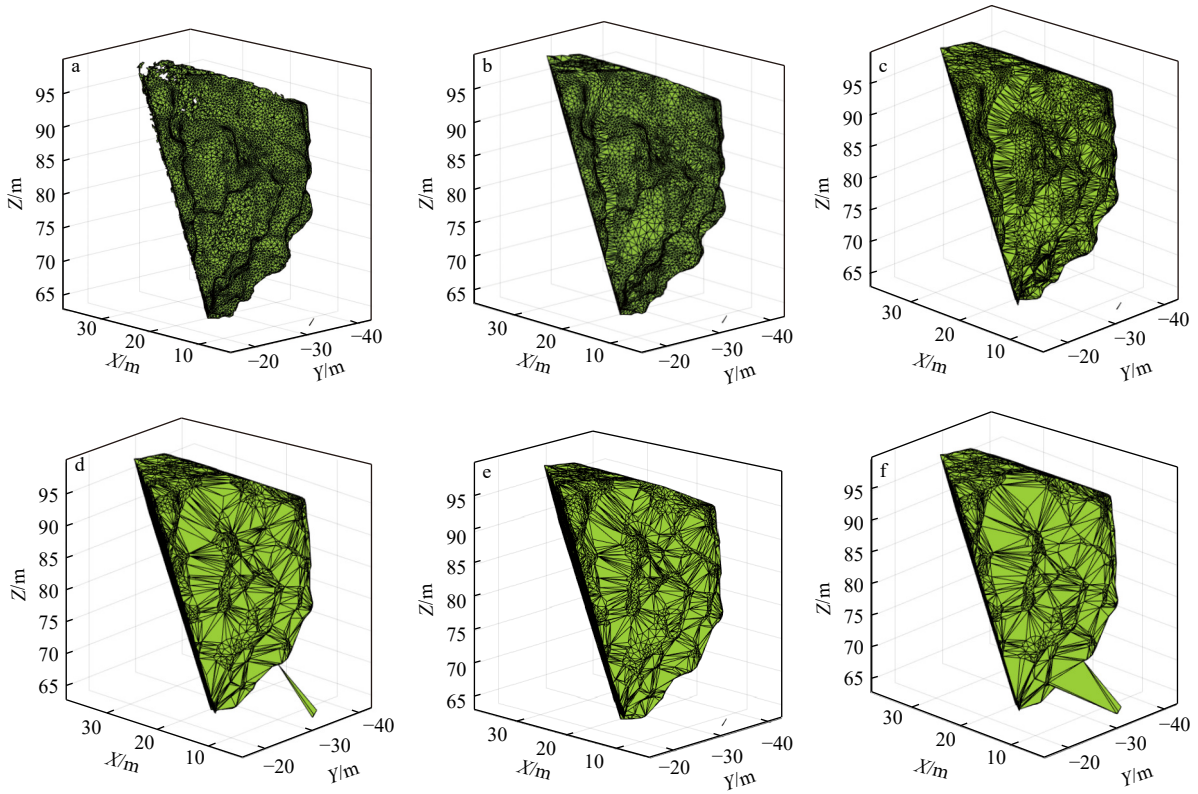
如图 6 所示，通过调整半径参数 α 并对比拟合出的三维体选择出合适的参数并计算出体积。

根据拟合结果，当 α<5 时，α 越大，产生的裂隙和空洞越少，越接近真实的危岩体形态；当 α>5 时，预留在右下角的碎屑发生强烈变形，表明拟合结果出现失真的情况，无法作为结果进行参考，因此选择 α=4 时的结果作为计算结果，此时危岩体体积为 5 406.5 m^3。危岩体体积计算用时 8 min。

3　楔形危岩体稳定性评价

3.1　楔形危岩体稳定性定性分析

影响岩质边坡稳定性的因素有很多，包括岩性、岩石结构、构造、工程地质、水文地质和环境地质条



a. α=0.5, 楔形危岩体体积 V=1 505.9 m^3; b. α=1, V=4 692.9 m^3; c. α=2, V=5 196.0 m^3; d. α=4, V=5 406.5 m^3; e. α=5, V=5 503.6 m^3; f. α=6, V=5 609.4 m^3

图 6　不同半径参数 α 拟合结果

Fig. 6　Results of fitting with different radius parameters α

件等, 其中岩石控制结构面起决定性作用。通过赤平投影法分析, 可以识别出对边坡起主要控制作用的结构面和次要结构面, 从而快速判定岩质边坡的结构类型, 并进一步确定边坡变形破坏的滑动方向、形状和规模[13]。

根据前文中测得的危岩体切割裂隙的信息, 进行赤平投影分析。如图 7 所示, 楔形体岩层内倾, 倾角约 30°, 这一岩层对坡体稳定性有利。然而, 楔形体后壁主要受裂隙控制, 危岩带坡面结构面较为发育。裂隙 L1 和 L2 的组合交线与坡面方向斜交, 交线的倾角小于坡角, 因此裂隙 L1 和 L2 构成不利组合, 可能导致楔形体沿裂隙 L1 和 L2 的组合交线发生局部滑移破坏。结合现场调查, 楔形体的破坏模式主要为滑坡, 裂隙 L1 和 L2 与层理面的组合关系将岩体切割, 这不利于坡体的稳定。危岩体稳定性定性分析用时 6 min。

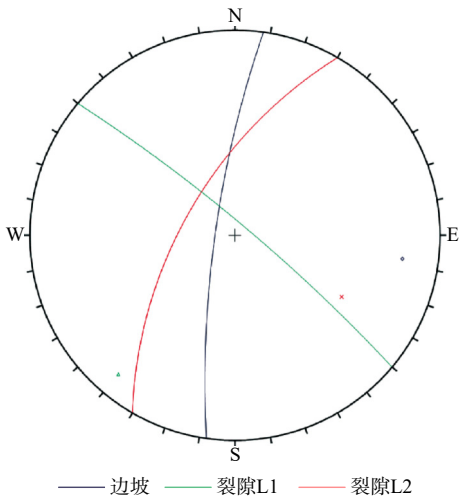


图 7　危岩体赤平投影分析

Fig. 7　Akira projection analysis of unstable rock mass

3.2　楔形危岩体稳定性定量分析

研究区的楔形危岩体存在滑坡风险, 通过模型计算可以对危岩体的稳定系数进行定量评估。

3.2.1　计算模型确定

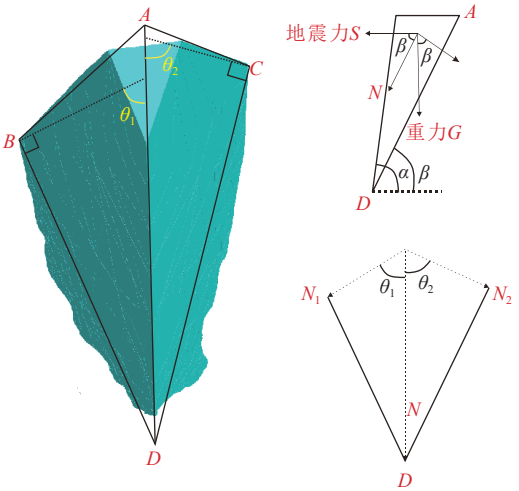
参考《水电工程危岩体工程地质勘察与防治规程》(NB/T10137-2019)附录 A 中滑塌式失稳破坏进行分析。根据附录 E.0.1 规定, 应当参照《水电水利工程边坡工程地质勘察技术规程》(DL/T5337-2006)进行稳定性计算。由于 DL/T5337-2006 已作废, 现参考《水电水利工程边坡工程地质勘察技术规程》(NB/T10513-2021)G.3 楔形体滑动分析进行稳定性计算, 稳定性计算模型如图 8 所示。

由于需要考虑到暴雨和地震对楔形危岩体稳定

性造成的影响，需对计算公式进行适当的更改。现计算公式如下：

$$\begin{cases} N = G\cos\beta\ (\text{不考虑地震力}) \\ N = G\cos\beta - S\sin\beta\ (\text{考虑地震力}) \end{cases}, \quad (6)$$

式中：N 为外力在左右滑动面交线上的垂直分量，kN；G 为楔形体自重，kN；β 为交线的倾角，°；S 为考虑地震力时，水平震动对楔形体产生的力，kN，S=K×G，K 为地震水平系数。



A, B, C, D 为楔形危岩体的端点；N 为外力在左右滑动面交线上的垂直分量；G 为楔形体自重；β 为交线的倾角；S 为考虑地震力时，水平震动对楔形体产生的力；N_1, N_2 分别为 N 投影到左右滑动面法线上的垂直分量；θ_1, θ_2 分别为 N 与左右滑动面法线的夹角

图 8　楔形体稳定性计算模型

Fig. 8　Computational modelling of wedge stability

$$\begin{cases} N_1 = \dfrac{N\sin\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)} \\ N_2 = \dfrac{N\sin\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_2)} \end{cases}, \quad (7)$$

式中：N_1, N_2 分别为 N 投影到左右滑动面法线上的垂直分量，kN；θ_1, θ_2 分别为 N 与左右滑动面法线的夹角，°。

$$F_s = N_1 tg\varphi_1 + N_2 tg\varphi_2 + C_1 S_{\triangle ACD} + C_2 S_{\triangle ABD}, \quad (8)$$

式中：F_s 为 2 个滑动面的抗滑力，kN；φ_1, φ_2 分别为 2 个滑动面的摩擦角，°；C_1, C_2 分别为 2 个滑动面的黏聚力，MPa；$S_{\triangle ABD}$ 和 $S_{\triangle ACD}$ 分别为 2 个滑动面的面积，m^2。

危岩体稳定性系数 η 的计算公式为：

$$\begin{cases} \eta = \dfrac{F_s}{G\sin\beta}(\text{不考虑地震力}) \\ \eta = \dfrac{F_s}{G\sin\beta + S\cos\beta}(\text{考虑地震力}) \end{cases}。 \quad (9)$$

对楔形危岩体进行稳定性评估时，将综合分析危岩体特征及其各种荷载情况。选定以下 3 种组合工况进行计算和评价：①天然工况，自重（天然状态）；②暴雨工况，自重（饱和状态）；③地震工况，自重（天然状态）+水平地震力。

3.2.2　计算参数选取

根据计算，N 与左右滑动面法线的夹角 θ_1=57°，θ_2=63°，危岩体体积为 5 406.5 m^3，交线的倾角 β=71.0°，$\triangle ACD$ 的面积为 2 656.3 m^2，$\triangle ABD$ 的面积为 2 602.4 m^2。

楔形危岩体的物理力学性质及参数的选择是基于野外调查、实验结果和地区经验综合确定的。

（1）岩体的容重参数选取以岩石试验资料为依据。天然容重根据室内试验结果确定，而饱和容重则根据地方经验确定。具体值如下：天然容重为 27.0 kN/m^3，饱和容重为 27.1 kN/m^3。

（2）为了得到岩石的黏聚力与摩擦角，开展了多组结构面直剪实验，并使用莫尔–库仑破坏准则拟合黏聚力和摩擦角，拟合结果如图 9 所示：天然状态下黏聚力为 20.26 kPa，摩擦角为 30.59°；饱和状态下黏聚力为 16.74 kPa，摩擦角为 20.76°。

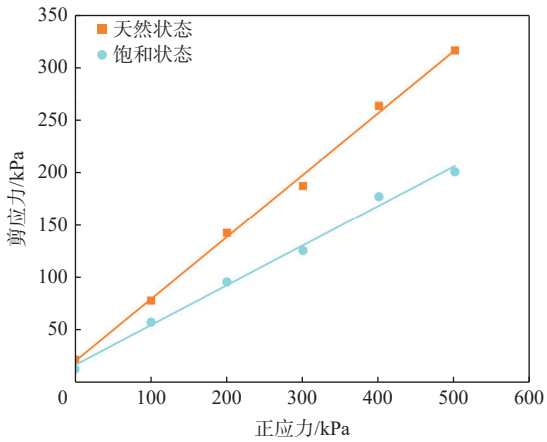


图 9　结构面直剪试验结果

Fig. 9　Result of straight shear test on discontinuity

（3）地震系数。根据《中国地震动参数区划图》（GB18306-2015），研究区域所在地点地震动峰值加速度为 0.15 g（g 为重力加速度），地震动反应谱特征周期值为 0.45 s，根据《构筑物抗震设计规范》（GB50191-2012），天津市蓟县的设防烈度划分为 7 度，根据《建筑与市政工程抗震通用规范》（GB55002-2021），水平地震影响系数最大值为 0.12。

3.2.3　稳定性计算结果与分析

根据危岩体稳定性系数计算结果，按照《水电水利工程边坡工程地质勘察技术规程》（DL/T5337-2006）6.4.4 中危岩体稳定程度等级划分表（表 2），3 种工况

表 2　边坡抗滑稳定设计安全系数

Table 2　Design safety coefficients for slope stability against sliding

稳定性系数η	稳定状态
η<1.0	不稳定
1.0≤η<1.05	欠稳定
1.05≤η<1.15	基本稳定
η≥1.15	稳定

下各危岩体的稳定性评价见图 10。稳定性计算用时 15 min。

通过图 10 稳定性计算结果分析，在天然工况下，楔形危岩体稳定性系数为 1.131，处于基本稳定状态；在暴雨工况下，楔形危岩体稳定性系数为 0.896，处于不稳定状态；在地震工况下，楔形危岩体稳定性系数为 0.917，处于不稳定状态，这与地质调查以及定性分析的结果一致。

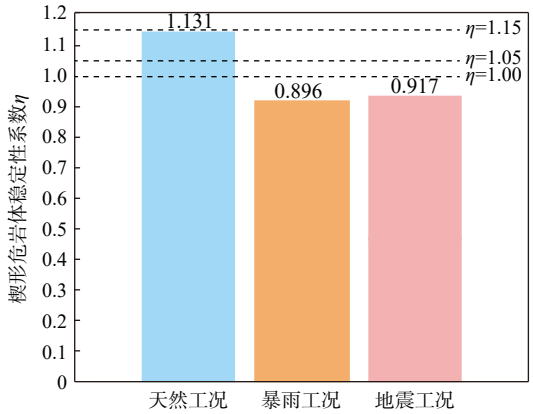


图 10　稳定性计算结果

Fig. 10　Stability calculation results

根据计算分析结果可以看出在暴雨和地震工况下楔形危岩体存在滑坡的可能，为抽水蓄能电站的建设施工产生了安全隐患。尤其是研究区所在地接近唐山，位于华北平原地震带上，因此该楔形危岩体极有可能受到地震的影响。且施工过程中可能会采用爆破的手段，使得楔形危岩体受到扰动而滑落。因此采取相应的支护手段或绕避措施可有效预防楔形危岩体滑坡对工程施工造成干扰。

4　结　论

（1）通过三维激光扫描仪对楔形危岩体提取点云数据，利用非接触测量并对数据进行处理，对楔形危岩体在不同工况下的稳定性进行了快速评价。点云采集用时 23 min，点云预处理用时 27 min，计算模型拟合用时 16 min，智能识别用时 7 min，楔形体体积计算用时 8 min，稳定性定性分析用时 6 min，稳定性计算用时 15 min，总计耗时 102 min。相比传统方法，本方法所需时间大大减少，且安全高效。

（2）运用三维激光扫描技术能够获取对斜坡表面进行详细建模的数据，并通过直接量测精确获取楔形危岩体的空间信息。同时基于局部点云拟合和 DBSCAN 等，智能识别并提取楔形危岩体结构面产状等信息，通过设置不同的 Alpha 半径参数，结合模拟出的楔形危岩体与实际危岩体形状进行对比，选出合适的半径参数（α=4）并计算出体积 5 406.5 m^3，为楔形危岩体的稳定性评价、防治措施等提供了可靠的基础资料。

（3）采用刚体极限平衡法对楔形危岩体在天然、暴雨及地震 3 种工况下的稳定性进行了计算，为工程防治做出了指导性建议，可根据所要应对的不同工况采取不同的防治手段。

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] 卢操，晏鄂川，张瑜，等. 降雨作用下青石镇政府后山堆积层滑坡渗流与稳定性 [J]. 地质科技通报，2020，39(2)：139-147.
LU C，YAN E C，ZHANG Y，et al. Seepage and stability of the colluvial landslide on the back hill of Qingshi Town Government under rainfall[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2020，39(2)：139-147.（in Chinese with English abstract）

[2] 唐军峰，唐雪梅，肖鹏，等. 库水位升降与降雨作用下大型滑坡体渗流稳定性分析 [J]. 地质科技通报，2021，40(4)：153-161.
TANG J F，TANG X M，XIAO P，et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under water-level fluctuation and rainfall[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2021，40(4)：153-161.（in Chinese with English abstract）

[3] 杜文杰，盛谦，付晓东，等. 地震作用下岩羊村滑坡稳定性与失稳机制研究 [J]. 岩土力学，2020，41(7)：2461-2469.
DU W J，SHENG Q，FU X D，et al. Dynamic stability analysis and failure mechanism of Yanyang Village landslide under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics，2020，41(7)：2461-2469.（in Chinese with English abstract）

[4] 李泊良，张帆宇. 降雨和地震条件下浅层黄土滑坡三维稳定性评价 [J]. 工程科学学报，2022，44(3)：440-450.
LI B L，ZHANG F Y. Three-dimensional stability evaluation of shallow loess landslides under rainfall and earthquake conditions[J]. Chinese Journal of Engineering，2022，44(3)：440-450.（in Chinese with English abstract）

[5] 杨校辉，周廷昱，刁显锋，等. 江水冲刷与降雨耦合作用下堆积体滑坡模型试验 [J]. 兰州大学学报（自然科学版），2022，58(4)：483-491.
YANG X H，ZHOU T Y，DIAO X F，et al. A model test of accumulation landslide under the coupling effect of river erosion and

rainfall[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(4): 483-491. (in Chinese with English abstract)

[6] 刘涛, 张明, 王立朝, 等. 甘肃舟曲江顶崖古滑坡形成演化机理与堆积体稳定性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 266-278.
LIU T, ZHANG M, WANG L C, et al. Formation and evolution mechanism of the ancient landslide and stability evaluation of the accumulation body in Jiangdingya, Zhouqu County, Guansu Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 266-278. (in Chinese with English abstract)

[7] 仝德富, 谭飞, 苏爱军, 等. 基于多源数据的谭家湾滑坡变形机制及稳定性评价 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 162-170.
TONG D F, TAN F, SU A J, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Tanjiawan landslide based on multi-source data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 162-170. (in Chinese with English abstract)

[8] 张占忠, 陈富强, 刘亚林, 等. 基于遥感技术的嘉黎江巴变形体稳定性评价与分析 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 28-37.
ZHANG Z Z, CHEN F Q, LIU Y L, et al. Stability evaluation and analysis of the Jiangba deformed body in Jiali County based on remote sensing technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 28-37. (in Chinese with English abstract)

[9] GE Y F, TANG H M, XIA D, et al. Automated measurements of discontinuity geometric properties from a 3D-point cloud based on a modified region growing algorithm[J]. Engineering Geology, 2018, 242: 44-54.

[10] DELIVERIS A V, ZEVGOLIS I E, KOUKOUZAS N C. Numerical modelling of slope stability in open pit lignite mines: A comparative study[J]. Bulletin of the Geological Society of Greece, 2017, 50(2): 671.

[11] 宣程强, 章杨松, 许文涛. 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 75-83.
XUAN C Q, ZHANG Y S, XU W T. Extraction of the discontinuity orientation from a digital surface model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 75-83. (in Chinese with English abstract)

[12] 郭登上, 谢谟文, 刘卫南, 等. 基于三维点云的边坡岩体结构面提取方法与应用 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(5): 197-202.
GUO D S, XIE M W, LIU W N, et al. Extraction method of structural plane of slope rock mass based on 3D point cloud and its application[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(5): 197-202. (in Chinese with English abstract)

[13] 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)

[14] 林松, 田林亚, 毕继鑫, 等. 基于最优邻域局部熵的点云精简算法 [J]. 测绘工程, 2021, 30(5): 12-17.
LIN S, TIAN L Y, BI J X, et al. Point cloud simplification algorithm based on local entropy of optimal neighborhood[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(5): 12-17. (in Chinese with English abstract)

[15] 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚. 基于激光点云数据的岩体结构面全自动模糊群聚分析及几何信息获取 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 358-364.
LIU C J, DING L Q, SUN D Y. Automatic fuzzy clustering analysis and geometric information acquisition of rock mass discontinuities based on laser point cloud data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 358-364. (in Chinese with English abstract)

[16] GUO B N, MENON J, WILLETTE B. Surface reconstruction using alpha shapes[J]. Computer Graphics Forum, 1997, 16(4): 177-190.

[17] 吕国芳, 郭和杰. 基于 Alpha Shape 的三维模型体积研究 [J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(1): 160-165.
LÜ G F, GUO H J. Volume research of 3D model based on alpha shape[J]. Computing Technology and Automation, 2023, 42(1): 160-165. (in Chinese with English abstract)

[18] 张鹤, 李东升, 陈爱军. Alpha-Shapes 分段改进算法在三维模拟树枝体积扫描测量中的应用 [J]. 中国测试, 2021, 47(3): 49-58.
ZHANG H, LI D S, CHEN A J. Application of Alpha-Shapes segmentation improvement algorithm in 3D simulation of branch volume scanning measurement[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(3): 49-58. (in Chinese with English abstract)

[19] DOS SANTOS R C, GALO M, CARRILHO A C. Extraction of building roof boundaries from LiDAR data using an adaptive alpha-shape algorithm[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(8): 1289-1293.

[20] AL-MESTAREHI B, OBAIDAT M. Creating a complete model of the Wooden pattern from laser scanner point clouds using Alpha Shapes[J]. Jordan Journal of Civil Engineering, 2019, 13(2): 42-57.

[21] NI W D, TANG H M, LIU X, et al. Dynamic stability analysis of wedge in rock slope based on kinetic vector method[J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(4): 749-756.

[22] WANG S F, ZHANG Z X, HUANG X, et al. Generalized block theory for the stability analysis of blocky rock mass systems under seismic loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(5): 2747-2769.

[23] GE Y F, CAO B, CHEN Q, et al. Rock joint detection from 3D point clouds based on colour space[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2023, 56(4): qjegh2023-012.

[24] ZHOU Y D, ZOU P, WANG F F, et al. Study on high and steep slope stability and slope angle optimization of open-pit based on limit equilibrium and numerical simulation[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(6): 5737-5753.

[25] 夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 等. 北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 28-34.
XIA X H, LIU D C, LI Y Q, et al. Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 28-34. (in Chinese with English abstract)

[26] 苏国韶, 刘本朝, 刘友能, 等. 危岩体稳定性分析三维极限平衡

法 [J]. 金属矿山, 2025, (1): 72-80.
SU G S, LIU B C, LIU Y N, et al. Three-dimensional limit equilibrium method for stability analysis of dangerous rock mass[J]. China Industrial Economics, 2025, (1): 72-80.(in Chinese with English abstract)

[27] 张兴秋, 邓正定, 舒佳军. 多频次爆破扰动对倾倒式危岩体稳定性影响分析 [J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(4): 561-569.
ZHANG X Q, DENG Z D, SHU J J. Influence analysis of frequent blasting disturbance on the stability of toppling perilous rocks[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024, 15(4): 561-569. (in Chinese with English abstract)

[28] 周洪福, 冯治国, 石胜伟, 等. 川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 112-119.
ZHOU H F, FENG Z G, SHI S W, et al. Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 112-119. (in Chinese with English abstract)

[29] HAN Y J, HORSFIELD B, CURRY D J. Control of facies, maturation and primary migration on biomarkers in the Barnett Shale sequence in the Marathon 1 Mesquite well, Texas[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 85: 106-116.

[30] 文海家, 张岩岩, 付红梅, 等. 降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 15-29.
WEN H J, ZHANG Y Y, FU H M, et al. Research status of instability mechanism of rainfall-induced landslide and stability evaluation methods[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 15-29. (in Chinese with English abstract)

[31] 周伟, 马啸, 陈文毅, 等. 华北平原蓟县系雾迷山组碳酸盐岩热储岩体原位环境下力学特性研究 [J]. 地学前缘, 2024, 31(6): 95-103.
ZHOU W, MA X, CHEN W Y, et al. Carbonates of the wumishan formation, Jixian system in the North China Plain: Mechanical properties under in situ geothermal conditions[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(6): 95-103. (in Chinese with English abstract)

[32] 魏永民, 王娟. 天津沧县隆起蓟县系雾迷山组热储尾水回灌地温场变化特征分析 [J/OL]. 桂林理工大学学报, 2024: 1-8. (2024-07-31). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GLGX20240729002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
WEI Y M, WANG J. Analysis on the variation characteristics of geothermal field of thermal storage tailwater recharge in Wumishan Formation of Jixian system in Cangxian uplift, Tianjin[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-8. (2024-07-31). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GLGX20240729002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.(in Chinese)

[33] 刘帅, 朱杰勇, 杨得虎, 等. 不同降雨工况条件下的崩滑地质灾害危险性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 253-267.
LIU S, ZHU J Y, YANG D H, et al. Geological hazard risk assessment of collapse and landslide under different rainfall conditions[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 253-267. (in Chinese with English abstract)

[34] 赵方彬, 王运生, 寇瑞斌, 等. 四川珙县下软上硬山岭地貌斜坡地震动响应特征 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 279-287.
ZHAO F B, WANG Y S, KOU R B, et al. Seismic dynamic response characteristics of the lower soft and upper hard mountain slopes in Gongxian, Sichuan[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 279-287. (in Chinese with English abstract)

[35] GE Y F, CHEN W X, YE Y, et al. Experimental study on the influence of morphological parameters on kinematics of rockfall trajectory[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(8): 324.

[36] WANG J M, ZHANG Y B, YU P C, et al. Dynamic process study of earthquake-induced landslides applying an improved discontinuous deformation analysis method considering site response[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(7): 5427-5446.

[37] YIN Y P, WANG L Q, ZHANG W G, et al. Research on the collapse process of a thick-layer dangerous rock on the reservoir bank[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(3): 109.

[38] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 1-13.
TANG H M. Advance and prospects of major landslides prediction and forecasting[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[39] GUO C B, ZHANG Y S, LI X, et al. Reactivation of giant jiangdingya ancient landslide in Zhouqu County, Gansu Province, China[J]. Landslides, 2020, 17(1): 179-190.

[40] LI Q Q, CHEN F L, WU S Q, et al. A simple and effective evaluation method for lacustrine shale oil based on mass balance calculation of Rock-Eval data[J]. Applied Geochemistry, 2022, 140: 105287.

Summary for “基于非接触测量楔形危岩体稳定性快速评价”

Rapid analysis of the stability of a wedge-shaped unstable rock mass on the basis of non-contact measurements

ZHANG Hang[1]，HU Hairui[2]，ZHU Jieqing[2]，HU Bin[3]，GE Yunfeng[3*]，CHEN Qian[3]

1. Fujian CNNP Rich Energy Co., Ltd, Fuzhou 350000, China；
2. China Power Construction Group Fujian Power Survey and Design Institute Co., Ltd, Fuzhou 350000 , China；
3. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

First author，E-mail：804017998@qq.com

* Corresponding author， E-mail: geyunfeng@cug.edu.cn

Abstract：[**Objective**] With the frequent occurrence of landslide disasters in China, it is crucial to enhance research on unstable rock masses and slopes. Traditional analysis methods have limitations in quantifying certain factors, necessitating improvements. This paper adopts a non-contact measurement method to obtain and analyze parameters of wedge-shaped unstable rock masses and assess their stability under different working conditions. [**Methods**] Taking the wedge-shaped unstable rock mass in the upper reservoir of a pumped storage power station as an example, this study reveals the basic features and stability-influencing factors of the unstable rock mass based on detailed engineering geological field investigations. A long-distance 3D laser scanning system was used to collect high-precision point cloud data of the slope. Through preprocessing, spatial parameters of the wedge-shaped unstable rock mass were obtained. The critical surface plane was determined using least-squares fitting to calculate the slope angle and height of the wedge-shaped body. Local point cloud data were fitted to determine the normal vector, which was then used to calculate discontinuity orientations. The Alpha shape method was employed to calculate the volume of the unstable rock mass, with the most suitable radius parameter determined by comparing it with the actual unstable rock mass. The stability of the unstable rock mass was evaluated using the limit equilibrium method. [**Results**] The results show that under natural conditions, the stability coefficient of the wedge-shaped unstable rock mass is 1.131, indicating an essentially stable state; under rainstorm conditions, the stability coefficient drops to 0.896, indicating instability; and under seismic conditions, the stability coefficient is 0.917, also indicating instability. [**Conclusion**] This paper applies non-contact measurement and intelligent recognition techniques to the stability analysis of wedge-shaped unstable rock masses. The total analysis time was 102 minutes, significantly improving the efficiency of stability analysis and reducing risks associated with engineering construction. The proposed method provides a reliable alternative for assessing the stability of complex geological structures, enhancing safety and reliability in geotechnical engineering projects.

Key words: wedge-shaped unstable rock mass； stability evaluation； non-contact measurement； intelligent identification；limit equilibrium method

Received：2024-08-30；Revised：2024-10-21；Accepted：2024-10-23

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240496