

基于非连续变形分析的岩体断裂破坏过程研究

蔡明智

(长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114)

摘要: 工程修建会破坏岩体结构, 导致岩体结构的稳定性下降, 因此需要对其检测, 以保证工程施工的安全性; 在此背景下, 研究基于非连续变形分析的岩体断裂破坏过程; 该研究以某隧道工程对山体的破坏为例, 分析了该处岩体结构特征; 利用探地雷达技术获取岩体裂隙的非连续变形参数, 构建岩体的非连续数值模型并将变形参数插入到模型当中; 对模型施加荷载, 模拟分析岩体的非连续变形情况并量化岩体断裂破坏程度, 包括裂隙的发展、岩体的位移以及稳定性系数, 实现岩体断裂破坏过程自动检测; 结果表明: 裂隙均沿着虚拟节理持续扩展, 最终将整个岩体分割为了三个块体, 其中有条裂隙形成了贯穿裂, 使得岩体发生断裂; 块体 1、块体 2 的断裂破坏过程主要发生在垂直方向; 块体 3 的断裂破坏过程主要发生在水平方向; 岩体整体稳定性在逐渐下降, 从最初的基本稳定到 100 d 时之间下降到稳定性差的程度。

关键词: 非连续变形分析; 岩体断裂破坏过程; 探地雷达技术

Research on Rock Mass Fracture and Failure Process Based on Discontinuous Deformation Analysis

CAI Mingzhi

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Engineering construction can damage the rock mass structure, causing the decrease of its stability. Therefore, it is necessary to detect it to ensure the safety of engineering construction. In this context, the process of rock mass fracture and failure based on discontinuous deformation analysis is studied. The damage of a tunnel project to a mountain is taken as an example to analyze the structural characteristics of the rock mass. The ground penetrating radar technology is used to obtain the discontinuous deformation parameters of the rock fracture, construct the discontinuous numerical model of the rock mass, and insert the deformation parameters into the model. The load is applied to the model, the discontinuous deformation of the rock mass is simulated and analyzed to quantify the rock mass fracture and failure degree, including the development of cracks, displacement of the rock mass, and stability coefficient, which achieves the automatic detection of the rock mass fracture and failure process. The results show that the cracks continue to expand along the virtual joint, ultimately dividing the entire rock mass into three blocks, with two cracks forming through cracks, causing the rock mass to fracture. The fracture process of block 1 and block 2 mainly occurs in the vertical direction; The fracture process of block 3 mainly occurs in the horizontal direction. The overall stability of the rock mass gradually decreases from the initial basic stability to poor stability in 100 days.

Keywords: discontinuous deformation analysis; process of rock mass fracture and failure; ground penetrating radar technology

0 引言

公路工程、水利工程、岩石开采、矿产资源开采等都是不得不进行的地质破坏活动。在这些工程修建过程中, 为方便施工, 降低施工难度, 都会对修建位置处的岩体进行平整、挖掘、甚至爆破^[1]。这些施工活动会导致周围原有地质岩体受到极大的震动, 从而产生大量的裂隙。这些裂隙会直接破坏岩体结构的稳定性和完整性, 随着工程的推进, 这些裂隙极易继续发展, 最终发展成为岩体断裂。裂隙岩体属于危岩的一种, 为保证施工安全, 避免发生坍塌施工, 分析施工周围岩体的断裂破坏过程是十分必要的^[2]。通过对岩体断裂破坏过程研究能够及时了解裂隙岩体发展状态和岩体强度变化, 从而为灾害预警、工程安全

施工提供了重要的决策依据。

在上述背景下, 关于岩体断裂破坏机制和规律的分析在很多专业文献中都得到了具体解答。例如, 陈云飞等人利用瞬变电磁物法分析了危岩体变形特征, 通过数值模拟分析了该处岩体在三种不同工况下的破坏过程, 从而得出随着时间的推移, 岩体的稳定性系数与最大位移量的变化情况^[3]。朱大鹏等人对爆破后的桩周岩体破坏模式进行了分析, 建立了岩体的网格模型, 对其施加爆破荷载, 绘制岩体位移及其速度与时间的线性曲线, 计算了破坏模式下的稳定性^[4]。李见波等人构建了底板破坏数值模型, 通过数值模拟方法分析了其岩体变形破坏特征与机制并绘制了位移曲线^[5]。上述方法均对岩体稳定性进行了分析, 但对破坏性的量化不足, 在安

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-07-11。

作者简介: 蔡明智(1998-), 男, 硕士研究生。

引用格式: 蔡明智. 基于非连续变形分析的岩体断裂破坏过程研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 310-315.

全防护的实施方面具有一定的局限性。

结合前人研究经验,进行基于非连续变形分析的岩体断裂破坏过程研究。本研究以某隧道工程对山体的破坏为案例,对该处岩体的结构特征进行了分析。为了获取岩体裂隙的非连续变形参数,采用了探地雷达技术。通过这些变形参数插入到岩体的非连续数值模型中,构建了一个真实反映岩体情况的模型。接下来,对模型施加荷载,模拟分析岩体的非连续变形情况,并量化岩体断裂破坏程度。具体包括裂隙的发展、岩体的位移以及稳定性系数等指标。通过这样的分析,可以实现对岩体断裂破坏过程的自动检测。应用此方法,能够更准确地模拟和预测岩体的破坏行为。这对于隧道工程等领域的安全评估和风险管理具有重要意义,为岩体危险性监测提供参考方案。

1 工程概况

为降低施工难度、缩短施工工期,公路工程修建经常需要穿越山体,也就是公路隧道。隧道,即贯穿山体两面的通道。隧道工程需要将山体中的岩体挖走,因此经常需要进行爆破操作。这一过程中,在粉碎了目标岩体的同时,也对周围岩体造成了一定振荡,导致没有裂隙的岩体出现裂隙,本身有裂隙的岩体裂隙极大^[6]。为保证施工安全性,对周围岩体的断裂破坏过程进行自动检测具有重要的现实意义。基于此,以某隧道工程为例,进行基于非连续变形分析的岩体断裂破坏过程自动检测。工程及岩体位置如图 1 所示。

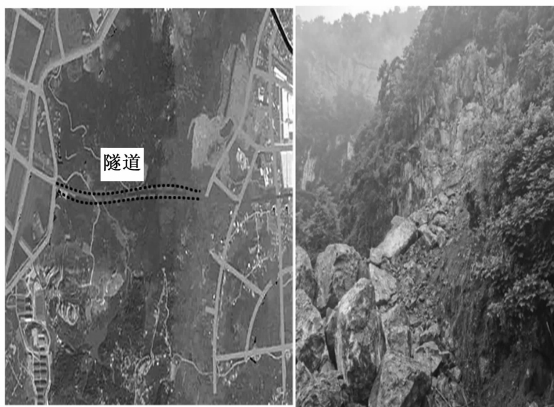


图 1 工程及岩体位置图

基于该山体的勘察资料,工程及危岩岩体位于褶皱带上,所在位置处地层结构主要由 4 层组成,即粉质黏土、碎石土,二叠系玄武岩及其风化层。本次研究的目标岩体由大小不等的岩块和碎屑组成,呈现非连续性特征,具体情况如表 1 所示。

2 岩体非连续变形研究

所研究的目标岩体具有整体非连续性结构特征,这意味着岩体内存在着不连续的裂隙和断层。在岩体变形、发展到裂隙再到断裂破坏的过程中,这些非连续性结构特征也会随之产生。

表 1 岩体特征统计表

特征	说明
碎裂体块径/m	1~3
分布高程/m	2 740~3 046
分布面积/10 ⁴ m ²	3.95
推测厚度/m	3~13
估算体积/10 ⁴ m ³	40
特征描述	上游侧呈碎裂状、镶嵌状、局部散体状结构,下游侧表层岩体呈弯折倾倒状,目前整体基本稳定

首先,岩体的变形是指在外力作用下,岩体发生形状、大小和位置的变化。由于岩体内部存在不连续的裂隙和断层,变形过程中这些裂隙和断层会承受不同的应力分布,导致岩体的局部位移和形变。随着变形的发展,岩体中的裂隙会逐渐扩展和发展。裂隙的形成通常是由岩体内部的应力集中引起的,这种应力集中会导致裂隙的扩张和延伸。裂隙的发展过程中,岩体内部的非连续性结构特征进一步加剧。最终,当裂隙发展到一定程度时,岩体可能会发生断裂破坏。断裂破坏是指岩体内部裂隙的扩展和连接,导致岩体的完全破坏和解体。这一过程中,岩体的非连续变形特征表现为裂隙的扩展、岩体的位移和形态变化。

因此,从变形到裂隙再到断裂破坏的过程中,岩体整体结构的非连续性特性会随之产生相应的非连续变形特征。这些特征对于岩体工程的安全评估和风险管理具有重要意义。

岩体的非连续变形过程是一个复杂且动态的过程,实时检测其变形情况具有较大的难度和高昂的成本。由于岩体内部的非连续性结构特征,裂隙和断层的分布复杂且多变,导致实时监测非常具有挑战性。因此,一般情况下,在进行初次检测后,获得基础数据的基础上,通过模拟分析来实现岩体断裂破坏过程的非连续变形检测。初次检测通常采用各种现场勘测技术,如激光扫描、测量仪器和遥感技术等,以获取岩体的基础数据。这些数据包括岩体的几何形态、裂隙分布、位移信息等。这些基础数据为后续的模拟分析提供了依据和参考。通过将基础数据输入到数值模型中,结合岩体力学参数和加载条件,可以进行模拟分析,对岩体的断裂破坏过程进行仿真和预测。在模拟分析中,可以使用计算机模拟方法,如有限元分析、离散元法等,来模拟岩体的非连续变形行为。通过这种模拟分析方法,能够更好地理解岩体的非连续变形过程,预测和评估岩体的断裂破坏行为,并量化岩体的稳定性和风险。虽然无法实现实时检测,但通过模拟分析,可以在较低的成本和资源消耗下,获得对岩体非连续变形的重要信息和指导^[7]。

具体过程分为 3 个步骤,即岩体裂隙变形检测、非连续数值模型构建、非连续变形分析。下面针对这 3 个步骤进行具体分析。

2.1 岩体裂隙非连续变形检测

通过岩体裂隙检测结果了解目标岩体的初始状态,为非连续数值模型的构建奠定基础^[8]。岩体表面的裂隙通常

相对容易检测,因为它们直接暴露在外部环境中,可以通过目视观察或使用各种非接触式检测技术进行检测。然而,掩埋在地下或者岩体内部的裂隙则不容易直接检测。这些裂隙可能位于岩体深处、隐藏在土壤或岩层之间,或者存在于岩体内部的微小裂缝中。由于无法直接观察到这些裂隙,传统的非接触式检测方法往往无法有效应用。为了检测掩埋在地下或内部的裂隙,需要采用一些特殊的探测技术。其中,地球物理勘探技术是一种常用的方法。例如,地震勘探、电法勘探、重力勘探等技术可以通过测量岩体内部的物理属性差异,间接推断出裂隙的存在和分布情况。本研究中,利用探地雷达技术进行岩体裂隙检测^[9]。

探地雷达技术是一种非侵入性的地球物理勘探技术,用于探测和成像地下结构和目标。它利用电磁波的辐射和接收来获得地下的信息。在探地雷达技术中,发射器会发送一个短脉冲的电磁波信号,这个信号会穿过地下并与地下的目标或结构相互作用。当信号遇到介质的边界、土壤、岩石、水位或其他地下目标时,部分能量会被反射回到探地雷达接收器。通过测量反射信号的时间延迟、幅度和频率特征,可以推断出地下目标的位置、形态和特性。探地雷达技术具有以下几个优点:1) 非侵入性:探地雷达技术无需对地下进行开挖或钻探,可以在不破坏地表的情况下获取地下信息;2) 高分辨率:探地雷达技术能够提供高分辨率的地下图像,可以检测到小尺寸的目标和细微的地下结构;3) 宽频段:探地雷达技术可以工作在不同的频段,从低频到高频,适用于不同的勘探深度和目标类型^[10];4) 实时性:探地雷达技术可以实时获取地下数据,并进行快速分析。

探地雷达天线的布局原则:

1) 平衡布局:在天线布线时,应尽量保持布线均匀并保持平衡,以确保较好的信号接收和传输性能。

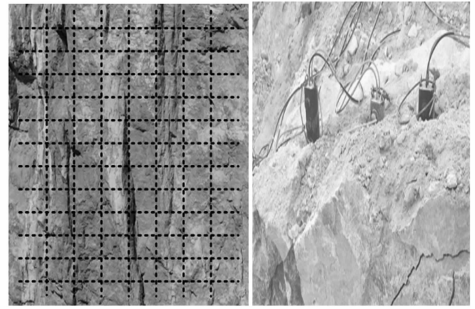
2) 互相交叉:为了避免数据采集中的死角和盲区,相邻天线之间应该有明显的重叠与交叉,确保完整覆盖和精确勘测。

3) 密度布置:天线的布置密度要根据实际勘测需求和目标深度来确定,需要保证足够的覆盖范围以获得高质量的数据。

在勘测线路上安排多个平行、等距离的天线,并且每个天线之间错开一定距离,以增加勘测覆盖范围,实现较大覆盖范围的勘测,如图 2 所示。

根据岩体分布特征,共布置了 7 条纵测线、10 条横测线。纵测线与横测线交叉形成的探测方格边长为 30 cm,整个探测区域的长 5.2 m、宽 2.7 m、高 8.6 m。通过沿纵横交叉的探测点收集雷达数据,并通过数据处理和分析来获得岩体内部的信息,如岩层分布、裂隙状况等。根据实际情况,可以对探测点的布置密度、采样间距等进行调整,以满足具体的实际需求。

当布设法雷达天线向岩体发射高频电磁波时,电磁波会沿着岩体传播并与遇到的不同介质界面发生反射、折射



(a) 测线布局

(b) 测线布设现场

图 2 雷达天线布设示意图

或透射。这些界面可以是裂缝、孔洞、岩层边界或其他存在电性差异的地质结构。当电磁波遇到裂缝、孔洞等界面时,由于介质特性的变化,部分电磁波能量会被反射回来,形成反射波。这些反射波的强度、时间延迟和频率特征等信息包含了地下结构的相关信息。利用传感器,如接收天线或探测器,可以接收到这些反射波信号^[11]。传感器记录下来的信号包含了从不同深度反射回来的电磁波信息。通过对接收到的信号进行分析和处理,可以获得地质结构、形态和裂隙深度等参数。分析方法包括时间域分析、频域分析、多次反射分析等。通过比较不同反射波的时间延迟和幅度变化,可以推断出裂隙的深度和形态,并进一步了解岩体的地质结构特征^[10]。其中,裂隙长度和在岩体中的埋藏深度计算公式如下:

1) 裂隙长度:

$$L = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

式中, L 为裂隙长度; v 为电磁波传播速度; Δt 为反射波走时。其中,反射波走时可以根据所在介质的特性,计算出信号在该介质中的传播速度。在大部分情况下,可以使用标准介质的传播速度来近似计算。

2) 裂隙深度:

$$H = \frac{v \cdot \hat{t}}{2} \quad (2)$$

其中:

$$\hat{t} = t_1 + t_2 \quad (3)$$

式中, H 为裂隙深度; \hat{t} 为电磁波从发出到回收总共经历的传播时间; t_1 为电磁波正向传播时间; t_2 为电磁波回收时间^[12]。以上参数可以通过探测器自带计时功能获得。

2.2 非连续数值模型构建

非连续数值模型构建的技术原理基于离散化、非连续面表示、数值模拟求解等步骤。首先,通过将岩体空间进行离散化,将岩体划分为有限数量的单元或网格;然后,对每个单元或网格定义适当的参数来表示非连续面的几何形状、面积、倾向、滑动规律等。采用数值模拟进行求解,通过迭代计算模拟岩体的力学行为和非连续面的变形行为。非连续数值模型构建过程如下:

1) 利用 GOCAD 软件构建基础的探测区域三角网格模

型：首先，通过 GOCAD 软件创建一个基础的三维探测区域模型，如图 3 所示。这可以包括岩体的几何形状、边界条件和其他相关的地质信息。使用 GOCAD 软件可以对模型进行编辑、调整和优化，以满足具体的研究需求。



图 3 三角网格模型

2) 获取裂隙特征参数：在前一章节中获得的裂隙特征参数，包括裂隙的长度 L 、深度 H 、位置、形态、倾向、间距等信息。这些参数可以通过实地调查、测量仪器、图像处理软件等手段获取。

3) 将裂隙特征参数插入到三角网格模型：利用 GOCAD 软件或其他相关软件，将裂隙特征参数与基础的三角网格模型进行融合。这可以通过将裂隙的位置和形态信息与三角网格模型中相应的区域进行匹配和插值来实现。根据裂隙的参数，可以在三角网格模型中定义裂隙的几何形状、大小和分布。

4) 建立非连续数值模型：通过将裂隙特征参数插入到三角网格模型中，建立非连续数值模型，如图 4 所示^[13-14]。这意味着在模型中引入了裂隙的非连续性结构特征，包括裂隙的几何形态（长度和深度）、位置和分布。这样，数值模拟可以更准确地考虑岩体中的裂隙对应力和变形的影响。

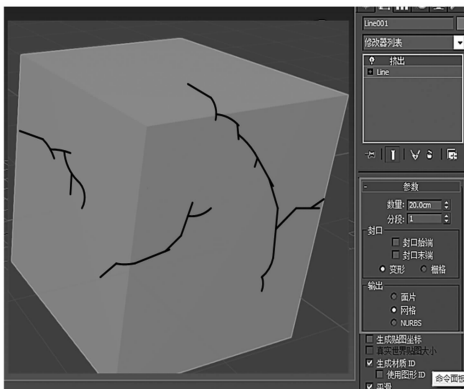


图 4 非连续数值模型

从图 4 中可以看出，初始岩体模型上存在三条裂隙带，将整体岩体切割成了多个块体。

2.3 非连续变形下的破坏量化分析

岩体本身的重量和重力作用是裂隙发展和断裂破坏的重要因素之一。由于岩体自身的重力，裂隙受到不断的应

力和变形，随着时间的推移可能会继续扩展和演化。这种裂隙的发展过程被称为自然断裂。此外，在施工过程中，岩体可能会受到一定的外力，加速裂隙的发展和断裂破坏过程。施工活动如爆破、挖掘、钻孔等会引入额外的应力和变形，进一步激活或扩大已存在的裂隙。同时，施工过程中的振动和震动也可能导致裂隙的扩展和破坏。当岩体裂隙发展到一定程度时，裂隙之间的连接可能变得足够弱，岩体就会发生断裂破坏。这种破坏通常以岩体内部的裂缝扩展和岩块的分离为特征，可能伴随着岩体的位移、坍塌和崩塌等现象^[15]。本研究以上述建立的非连续数值模型为基础，进行非连续变形模拟，然后基于模拟结果，对岩体断裂破坏进行量化。

整个过程如下：首先导入岩体非连续数值模型以及岩体相关参数，包括重度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角、泊松比等^[16-17]。以上参数可以通过实验室测试来获取。使用标准试验方法，如压缩试验、剪切试验、拉伸试验等，来测量岩石的弹性模量、黏聚力、内摩擦角和泊松比等参数。这些参数通常以量值形式给出，并可用于构建数值模型。接下来，将岩体近似为均质、连续、各向同性的介质并采用虚拟节理将岩体模型进行离散处理，得到若干块体，块体之间通过给虚拟节理赋以一个较高的强度进行粘结^[15]。然后，建立每一个块体的位移方程，即：

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ q \end{pmatrix} = \mathbf{T}_i [\mathbf{F}_i] \quad (4)$$

其中：

$$\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} 1, 0, -(y - y_0), x - x_0, 0, \frac{(y - y_0)}{2} \\ 0, 1, -(x - x_0), y - y_0, 0, \frac{(x - x_0)}{2} \\ 0, 0, -(z - z_0), xy - yy_0, 0, \frac{(z - z_0)}{2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_i = \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ q_0 \\ c_0 \\ d_x \\ d_y \\ d_{xy} \end{pmatrix}^T \quad (6)$$

式中， i 表示块体序号， $\begin{pmatrix} u \\ v \\ q \end{pmatrix}$ 为点 (x, y) 的位移， \mathbf{F}_i 为位移变换矩阵， \mathbf{T}_i 为位移矢量，点 (x_0, y_0) 为块体的重心， (u_0, v_0, q_0) 为块体的刚体平移， c_0 为块体的转动惯量。 (d_x, d_y) 为块体沿 x, y 轴的法向应力， d_{xy} 为块体的切向应变。上述参数是在 GOCAD 软件模拟下输出的数值。

在非连续数值模型中，一旦释放荷载并解位移方程，可以计算得到块体的位移和应力分布。当块体受到荷载作

用时, 应力会在岩体内部传递和分布。通过解位移方程, 可以得到岩体中不同位置的位移响应。位移的大小和方向反映了岩体的变形情况, 可以用来分析岩体的稳定性和断裂破坏的潜在机制。随着荷载的增加, 当块体的应力达到其破坏强度时, 岩体内部的应力集中会导致虚拟节理转变为真实节理。在这个过程中, 块间的虚拟节理会被扩展为真实的节理面, 从而形成新的裂隙。这种节理转变和裂隙扩展的机制是岩体破坏的关键。一旦裂隙开始产生和扩展, 岩体的强度会降低。裂隙的扩展可以进一步削弱岩体的结构, 导致岩体的位移、坍塌和崩塌等破坏现象的出现。这也加大了岩体的不稳定性和风险。通过对非连续数值模型进行荷载释放、位移求解以及裂隙演化的分析, 可以更好地理解岩体的破坏机制和行为^[18-20]。

最后根据裂隙扩展情况以及块体位移情况, 计算岩体的稳定性系数和完整性系数, 实现岩体断裂破坏程度的量化。量化公式如下:

$$P = \sum \frac{1}{W_i \sin \vartheta_i + U_i \cos \vartheta_i \cdot (\beta_i D_i + W_i \cos \vartheta_i \tan \theta_i + U_i \sin \alpha_i \tan \theta_i)} \quad (7)$$

式中, P 为岩体的稳定性系数; β_i 为第 i 个块体的黏聚力; W_i 为第 i 个块体的垂直荷载; U_i 为第 i 个块体的下滑力; θ_i 为第 i 个块体的内摩擦角; ϑ_i 为第 i 个块体的倾角。上述物理力学参数为实验室测得, 垂直荷载、倾角等为现场勘测获得。岩体稳定性系数 P 主要划分为 5 个等级, 具体如表 2 所示。

表 2 岩体稳定性系数等级表

稳定性系数	对应等级
$P \leq 25$	稳定性差
$25 < P \leq 50$	稳定性较差
$50 < P \leq 75$	基本稳定
$75 < P \leq 100$	稳定

3 岩体断裂破坏的非连续变形检测结果

基于章节 2 研究的岩体非连续变形检测方法, 得出研究区目标岩体的断裂破坏的非连续变形检测结果。

3.1 岩体裂隙发展

在释放荷载后, 最终岩体上的 3 条裂隙发展情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 3 条裂隙均沿着虚拟节理持续扩展, 最终将整个岩体分割为了 3 个块体, 其中有两条裂隙形成了贯穿裂, 也就是使得岩体发生断裂, 第 1 条裂隙的深度从初始末端 2.63 m, 发展到了 4.36 m, 长度从 2.62 m 延伸到了 5.88 m; 第 3 条裂隙的深度从初始末端 1.74 m, 发展到了 2.98 m, 长度从 1.41 m 延伸到了 4.35 m。而第 2 裂隙则没有发展成为断裂, 深度从初始末端 1.68 m, 发展到了 2.53 m, 长度从 0.75 m 延伸到了 2.33 m。

3.2 块体位移量

裂隙的发展, 最终将岩体分割为了 3 个块体。图 6 为三维方向上的 3 个块体位移量变化曲线图。

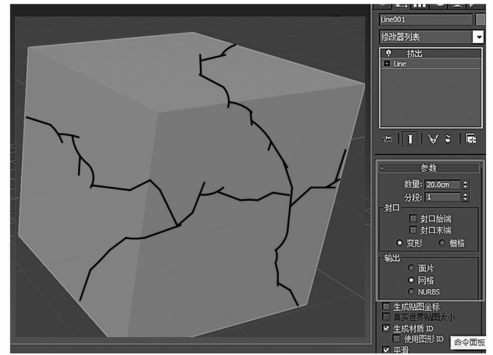


图 5 岩体三条裂隙

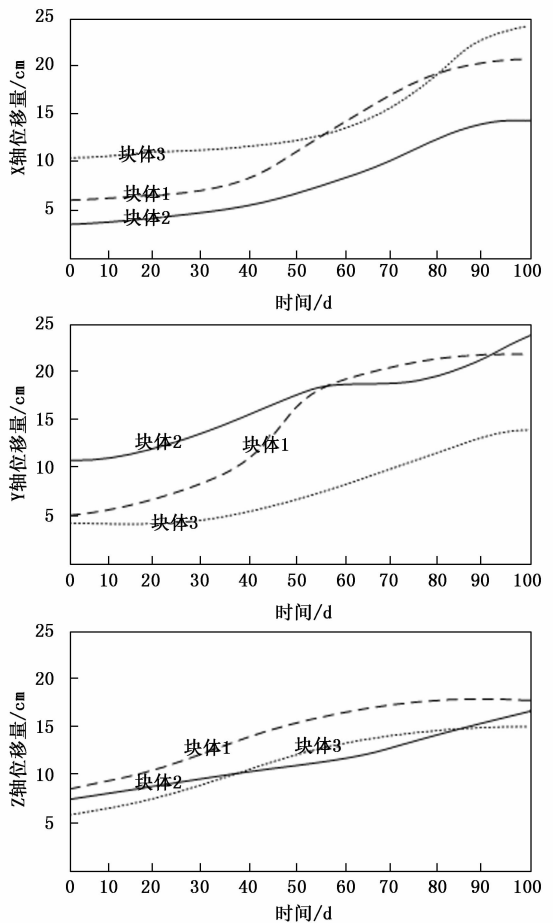


图 6 块体位移量变化曲线图

从图 6 中可以看出, 块体 1、2、3 在 X 轴、Y 轴、Z 轴上均有不同程度的位移, 其中块体 1 在 X 轴、Y 轴上均呈现出先缓慢增长再快速增长后缓慢增长的趋势, 在 Z 轴上增长较为平缓, 在 100 d 时位移量达到最大, 分别为 20、20.5、16 cm。块体 2 在 Y 轴上呈现出先缓慢增长再快速增长后缓慢增长的趋势, 在 X 轴、Z 轴上增长较为平缓, 在 100 d 时位移量达到最大, 分别为 11、23.5、15 cm。块体 3 在 X 轴上呈现出先缓慢增长再快速增长后缓慢增长的趋势, 在 Y 轴、Z 轴上增长较为平缓, 在 100 d 时位移量达到最大, 分别为 24、12、14 cm。最终块体 1、块体 2 在 Y 轴上

位移量要大于 X 轴和 Z 轴上，说明这两个块体的断裂破坏过程主要发生在垂直方向；而块体 3 在 X 轴上位移量要大于 Y 轴和 Z 轴上，说明这该块体的断裂破坏过程主要发生在水平方向。Z 轴上则相差不大。造成块体非连续变形产生在不同方向原因是有两个：一是受到所处地质结构的影响，二是受到岩体所在区域坡度的影响。

3.3 岩体稳定性系数

按照式 (7) 计算岩体稳定性系数，结果如图 7 所示。

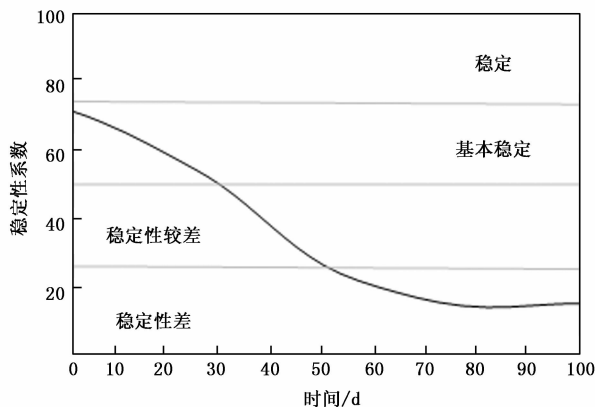


图 7 岩体稳定性系数

根据图 7 显示的岩体整体稳定性随时间的变化，可以观察到稳定性逐渐下降的趋势。这表明该岩体在断裂破坏过程中处于持续进行的状态。随着时间的推移，岩体内部的应力和变形积累，导致岩体的稳定性逐渐降低，从最初的基本稳定到 100 d 时之间下降到稳定性差的程度。

岩体的断裂破坏过程是一个渐进的过程，可能受多种因素影响，包括岩体的物理性质、结构特征、外界荷载等。断裂破坏的持续进行意味着岩体内部的裂隙不断扩展和演化，进一步削弱岩体的强度和稳定性。如果不采取相应的防护措施，岩体的断裂破坏将直接影响施工的安全性。不稳定的岩体可能导致岩体坍塌、滑动、崩塌等现象，给施工工作带来严重的风险。此外，岩体的断裂破坏还可能对周围环境造成不利影响，例如引发地质灾害、损坏工程设施等。为了确保施工的安全性，必须采取适当的防护措施来应对岩体的断裂破坏。

4 结束语

很多野外工程施工极有可能破坏岩体结构，导致地质灾害的发生。基于这种情况，在工程施工过程中，进行往往会进行岩体状态监测。在此背景下，进行基于非连续变形分析的岩体断裂破坏过程自动检测研究。该研究中利用非连续变形理论，借助探地雷达并结合非连续变形模拟分析法，分析了岩体位移、裂隙发展以及稳定性系数等参数的变化，明确了岩体断裂破坏过程，为工程安全防护奠定了重要基础。然而，本研究仍存在不足之处，即本研究只分析了常规工况情况下的断裂破坏过程，因此在下一阶段研究中将继续深入研究降雨等特殊工况下的岩体断裂破

坏过程，以进一步提高研究的全面性。

参考文献：

- [1] 唐红梅, 周福川, 闫凝, 等. 线场分析法在断续周期裂纹岩体拉伸断裂破坏中的优化应用 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (6): 105-112.
- [2] 王俊林, 惠进, 宋金鸿, 等. 光电转台旋转变压器接线自动检测设计 [J]. 电子设计工程, 2023, 31 (5): 174-178.
- [3] 陈云飞, 张鹏, 黄波林, 等. 考虑岩体劣化的库岸典型危岩体破坏过程与长期稳定性分析 [J]. 地质力学学报, 2022, 28 (6): 938-947.
- [4] 朱大鹏, 何磊. 爆破荷载下桩周岩体破坏模式及稳定性研究 [J]. 安全与环境工程, 2022, 29 (4): 196-204.
- [5] 李见波, 尹尚先. 近奥灰薄隔水层底板岩体变形破坏机制研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49 (12): 173-179.
- [6] 张风达. 深部煤层底板岩体能量演化特征及卸荷劣化破坏机制研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40 (2): 346-353.
- [7] 黄锋, 周洋, 郑艾辰, 等. 软硬互层岩体力学及变形特性的离散元模拟 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (4): 1146-1156.
- [8] 赵光明, 刘崇岩, 许文松, 等. 扰动诱发高应力卸荷岩体破坏特征实验研究 [J]. 煤炭学报, 2021, 46 (2): 412-423.
- [9] 陈冲, 张宜虎, 范雷, 等. 高陡边坡灌浆岩体变形模量测试及评价 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (11): 108-114.
- [10] 李鑫宇, 王鹏毅, 夏双志, 等. 一种广域稀布雷达低旁瓣波束形成方法 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (5): 271-277.
- [11] 向志强, 刘波, 江少锋. “低慢小”目标的雷达与光电复合探测跟踪方法 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (5): 34-40, 47.
- [12] 孙浩然, 兰天, 杨小鹏. 基于 Kirchhoff 的 MIMO 探地雷达成像方法 [J]. 信号处理, 2022, 38 (2): 276-284.
- [13] 孙琪皓, 马凤山, 刘港, 等. G109 国道拉萨—羊八井段喀努纳危岩体变形破坏模式及稳定性分析 [J]. 工程地质学报, 2021, 29 (2): 495-507.
- [14] 卫林芳, 王桂霞, 陈德财. 非连续 Kummer 边值问题解的相似构造法 [J]. 内蒙古师范大学学报 (自然科学汉文版), 2023, 52 (1): 95-101.
- [15] 伍永平, 汤业鹏, 解盘石, 等. 含煤线夹矸岩体力学特性及变形破坏特征的数值实验 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39 (6): 1198-1209.
- [16] 吴家耀, 陈浩, 徐建荣, 等. 白鹤滩拱坝左岸坝基变形特征及机理分析 [J]. 人民黄河, 2021, 43 (5): 137-141, 148.
- [17] 姚奇, 李小双, 李启航. 多变降雨入渗—开挖卸荷耦合下岩体变形特征研究 [J]. 中国矿业, 2023, 32 (4): 91-99.
- [18] 张平松, 孙斌杨, 许时昂, 等. 煤系上覆地层移动变形钻孔多参数监测技术 [J]. 煤炭学报, 2022, 47 (8): 2907-2922.
- [19] 李全生, 李晓斌, 张凯, 等. 基于“空天地”一体化技术的岩层采动损伤监测与应用 [J]. 煤炭学报, 2023, 48 (1): 402-413.
- [20] 刘国阳, 孟海怡, 宁宝宽, 等. 基于三维非连续变形分析的巨石崩塌运动研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (1): 246-256.