

动载下节理岩体破坏过程的数值试验研究

李超¹, 刘红岩^{1,2}, 阎锡东¹

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 节理岩体是工程中最常见的一类岩体, 其在地震、爆炸等动载下的力学响应及破坏过程对相关工程安全性的影响至关重要。采用基于有限元应力分析和统计损伤理论开发的动态版 RFPA2D 数值模拟软件, 对动载下节理岩体的动态破坏过程进行了模拟, 重点讨论了节理条数、节理贯通度、节理倾角及应力波峰值对岩体动态破坏过程的影响规律。计算结果表明, 断续节理岩体动态破坏过程及破坏强度与节理构造形态、应力波峰值密切相关。相同动载下, 随着节理条数的增加, 岩体破坏程度以及应力波能量损失增强, 但当节理条数超过一定值后, 岩体破坏程度及应力波能量损失逐渐趋于稳定; 节理贯通度较小时, 岩体破坏程度较低且破坏单元自上而下均匀分布。随着节理贯通度的增加, 岩体破坏增强, 且破坏主要出现于节理上部岩体; 节理倾角较小时, 节理上部岩体破坏严重, 易形成次生贯通裂纹。随着节理倾角增加, 破坏范围逐渐变大, 不易形成次生贯通裂纹; 倾角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时, 岩体破坏效果最佳; 动载荷的峰值越大, 试样的破坏越严重。当峰值达到一定值时, 节理附近发育出多条裂隙并向上下方不断发展而导致岩体完全破坏。在不同节理贯通度工况下与岩石霍布金森压杆 (SHPB) 试验结果进行比较, 结论吻合, 证明该数值模拟的可行性和结论的可靠性。

关键词: 动载; 节理岩体; 数值试验; 节理性质; AE 累积数

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增2-0655-10

Numerical experiment of failure process of jointed rock mass under dynamic loading

LI Chao¹, LIU Hong-yan^{1,2}, YAN Xi-dong¹

(1. College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Engineering, Tibet University, Lasa, Tibet 850000, China)

Abstract: The jointed rock mass is the most common kind of rock in the practical engineering, therefore the jointed rock's mechanical response and failure process under dynamic loading such as earthquake and explosion is crucial to the safety of the relevant engineering. Based on the finite element stress analysis and the microscopic damage mechanics, numerical code RFPA2D is developed to simulate the failure process of intermittent jointed rock mass subjected to dynamic loading. The failure characteristics of intermittent jointed rock mass with different numbers of joints, different joint discontinuity degrees and different joint dip angles under different amplitudes of stress wave are studied respectively. The numerical results show that the failure process and failure extent of intermittent jointed rock mass is closely related to the parameters of joints and amplitudes of stress wave. Under the same dynamic loading, with the increase of the number of joints, fragmentation degree of the rock mass and stress wave energy grows clearly at first, but to a certain number, the fragmentation degree and stress wave energy tends to be stable gradually. When the joint discontinuity degree is little, the fragmentation degree of rock mass is low and the failed units uniformly distributed from top to bottom relatively. With the increase of the length of joint, the fragmentation degree of rock mass becomes more and more serious, and the failed units mainly appear in the rock above the joint. When the joint dip angle is little, the upper rock is fractured more obviously and easy to form new cracks relatively. With the increase of the joint dip angle, the damage range expanded, and the rock mass is more difficult to form new cracks. Besides, the fracture effect of rock mass with a joint dip angle of $45^\circ \sim 60^\circ$, is the best. The more amplitude of stress wave is, the more serious the fragmentation degree of rock specimen is. When the amplitude of stress wave reaches a certain value, multiple cracks will be formed near the joint and extend upward and downward, which will cause the rock

收稿日期: 2014-12-06

基金项目: 中国地质大学(北京)基本科研业务费专项资金(No.2-9-2014-019); 国家自然科学基金(No.41002113/41162009); 教育部科学技术研究重点项目(No.2111175)。

第一作者简介: 李超, 男, 1990年生, 硕士研究生, 主要为地质工程中的力学问题研究。E-mail: colin_lichao@163.com

通讯作者: 刘红岩, 男, 1975年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: lhyan1204@126.com

mass to fully fracture. Finally, the damage of rocks with different joint discontinuity degrees is compared with the damage of split Hopkinson pressure bar test. This method is proved to be reasonable and reliable by the similar conclusion.

Keywords: dynamic loading; jointed rock mass; numerical experiment; joint property; accumulative amounts of AE

1 引言

地震、工程爆破及冲击荷载作用下岩石边坡、地下洞室、建筑基础的稳定性在岩土工程中十分重要^[1-2],而节理岩体在自然界中广泛分布,其力学特性及破坏机制显得尤为重要。许多学者对此进行了较为深入的研究^[3-5]。Wu 等^[6]经过现场测试,深入分析了节理数目等因素对爆炸应力波传播效应影响。谢冰^[7]、李夕兵等^[8]研究分析了岩体在动载下的损伤特性,并建立了多种损伤本构模型^[7-8]。

Kolsky 提出的 SHPB (分离式 Hopkinson 压杆, split hopkinson pressure bar) 被广泛应用于测试材料动态压缩力学性能^[9-10]。刘红岩等^[11]用 SHPB 相似材料试验深入研究了节理特征对岩体动态破坏模式及强度的影响规律,但由于试验方法周期长、费用高,且由于试验材料、设备等差异,往往会造成试验结果离散型大,在很多情况下难以满足实际工程需要。而数值模拟技术具有周期短、费用低、可重复性好等优点,在该类问题研究中得到了广泛应用。

基于有限元应力分析和统计损伤理论开发的动态版 RFPA2D 数值模拟软件^[12]不仅很好地考虑了岩石微元强度服从随机分布的特点,而且能够很好地考虑岩体中的节理、裂隙等宏观缺陷,是一种采用连续介质力学理论求解非连续介质力学问题的数值方法,在岩体破坏模拟中得到了较为广泛的应用。左宇军等^[13]研究了动载荷作用下应力波延续时间、应力波峰值和围压对完整岩石破坏的影响,反映了完整岩石的动态破坏规律,但由于实际工程岩体都含有节理,节理对岩体动态破坏的影响仍是亟待解决的一个重要问题。廖志毅等^[14]模拟分析了节理岩体在刀具动态荷载作用下的损伤破裂过程,探讨了节理间距和节理角度的影响,但还不甚全面,如节理贯通度、节理条数等对岩体破坏过程的影响还亟待深入研究。本文采用动该软件对断续节理岩体的动态力学特性进行更为深入地研究,以探讨节理条数、节理贯通度、节理倾角及应力波峰值对岩体动态破坏过程的影响规律,进而为相关岩体工程设计提供参考。有关 RFPA2D 动态分析部分详细的描述和验证工作,见文献[15-16]。

2 RFPA 原理简介

在动力有限元分析求解过程中,根据 Hamilton

变分原理,利用有限元法进行空间离散处理之后,动力方程^[14]为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = Q \quad (1)$$

式中: $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u 分别为 t 时刻的位移、速度和加速度向量; K 、 M 、 C 分别为系统的刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵。利用 Newmark 方法引入不同时刻速度 $\dot{a}_{t+\Delta t}$ 和位移 $a_{t+\Delta t}$ 关系,最后可得到微分方程:

$$\hat{K}a_{t+\Delta t} = \hat{Q}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

式中:

$$\hat{K} = K + \frac{1}{\beta\Delta t^2}M + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}C \quad (3)$$

$$\hat{Q}_{t+\Delta t} = Q_{t+\Delta t} +$$

$$M \left[\frac{1}{\beta\Delta t^2}(a_{t+\Delta t} - a_t) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{a}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{a}_t \right] +$$

$$C \left[\frac{\gamma}{\beta\Delta t}(a_{t+\Delta t} - a_t) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{a}_t + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{a}_t \right] \quad (4)$$

式中: β 、 γ 为 Newmark 方法的积分系数。当 $\gamma \geq 0.5$ 、 $\beta \geq 0.25(\gamma + 0.5)^2$ 时, Newmark 方法无条件稳定。

RPFA 软件是一个以弹性力学为应力分析工具,以弹性损伤理论及最大拉应力(应变)破坏准则和摩尔-库仑准则为介质变形和破坏分析模块的岩石破裂过程分析系统。计算分析中岩石介质是由许多尺寸相同的矩形单元组成,这些单元可以看成 4 节点的四边形等参数单元。单元的力学性质呈非均匀的统计分布,引入 Weibull 统计分布函数进行描述,并通过设置材料的均匀性系数来控制材料力学性质的离散程度。以一个应力波或初始速度作为输入,按照时间步长进行逐步分析。在每个时间步必须要考虑质量和加速度对于力学平衡的影响,用弹性动力有限元程序进行应力分析。随着细观单元应力的不断增加,当其满足某一所给的强度阈值时,细观单元开始发生损伤。RFPA 系统通过最大拉应力(应变)准则来判断单元是否发生拉伸损伤,通过摩尔-库仑准则判断单元是否发生压缩或者剪切损伤。当基质单元变形达到某个阈值时,即单元受到损伤,其力学性质要发生突变,承载能力急剧下降,弹性模量也渐进式降低。当单元发生断裂后,即完全破坏,则用弹性模量极低的基元性质取代原

有的实体基元的性质。不仅使得模型在总体特性上能够反映因单元破裂引起的物理特性的改变, 又不改变模型的数学结构。破坏后后处理图上该单元以黑色显示为裂纹。

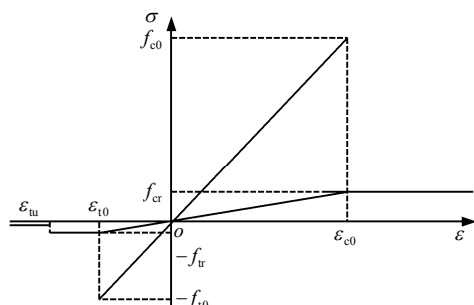


图 1 数值模型单元在单轴应力状态下的弹性损伤本构模型

Fig.1 Elastic damage constitutive law of an element under uniaxial stress state

图 1 为单元在单轴应力状态下的弹性损伤本构关系。图中, f_c 、 f_t 分别为单元的单轴抗压、抗拉强度; f_{cr} 、 f_{tr} 分别为单元相变后的残余强度。根据图 1 中的单元本构关系, 从细观损伤角度入手, 当细观单元承受的应力达到给定的抗拉极限值时单元发生拉伸损伤, 此时损伤参量应满足:

$$D = \begin{cases} 0, & (\varepsilon \leq \varepsilon_{t0}) \\ 1 - \frac{\lambda \varepsilon_{t0}}{\varepsilon}, & (\varepsilon_{t0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \\ 1, & (\varepsilon \geq \varepsilon_{tu}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ 为单元残余强度系数; ε_{t0} 、 ε_{tu} 分别为弹性极限拉伸应变和单元极限拉伸应变, 即认为基元介质的破裂性质呈现出弹-脆性行为。在弹性应变期间, 认为单元没有损伤。随着拉应变的增大, 当拉应变达到弹性极限拉伸应变 ε_{t0} 时, 单元开始进入脆性破坏阶段。进入脆性破坏阶段单元开始损伤, 且损伤 D 随拉应变的增大而增加。当拉应变达到单元极限拉伸应变 ε_{tu} 时, 认为单元完全破坏。

当细观单元承受的应力达到压缩或剪切准则时, 有

$$F = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_3 \geq f_c \quad (6)$$

则认为单元发生压缩或剪切损伤。此时单元损伤参量满足:

$$D = \begin{cases} 0, & (\varepsilon_1 < \varepsilon_{c0}) \\ 1 - \frac{\lambda \varepsilon_{c0}}{\varepsilon}, & (\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{c0}) \end{cases} \quad (7)$$

一旦单元发生损伤, 其弹性模量按照式 (8) 弱化:

$$E = (1 - D) E_0 \quad (8)$$

式中: E 、 E_0 分别为损伤后和损伤前的弹性模量。

3 数值模型

根据岩体常规的力学性能测试要求, 选取的试样模型尺寸为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。设定数值试样单元尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 采用摩尔-库仑强度准则。由于单元的非均匀性, 为防止造成破裂从动荷载接触的软弱单元开始, 在模型上下各加一块等宽, 5 mm 厚的垫板。垫板采用强度极大且高度均匀的材料, 使应力波得以有效、均匀传播到试样中, 下部垫板固定。岩体中的宏观节理采用空洞材料。岩石、节理及垫板的力学模拟参数见表 1。

表 1 力学参数

Table 1 Mechanical parameters

项目	弹性模量 /GPa	单轴抗压强度 /MPa	密度 /(kg/m ³)	泊松比	内摩擦角 /(°)
岩石	30	150	2 800	0.25	30
垫板	1 500	1 500	7 800	0.3	30
节理	1	1	1 000	0.3	

本文主要研究以下 4 种工况, (1) 节理条数不同, 分别取为 0、1、2、3、5 条等 5 种情况, 采用倾角为 45° 、1/2 贯通节理, 节理垂直间距为 20 mm 。(2) 节理倾角不同, 分别取为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 等 5 种情况, 采用 1/2 贯通的单节理。(3) 节理贯通度不同, 分别取为 1/4、1/2、4/5 等 3 种情况, 采用倾角为 45° 的单节理。这里的节理贯通度是指节理在水平方向投影长度占试样宽度的比例, 其中, 45° 、1/2 贯通单节理数值模型如图 2 所示。

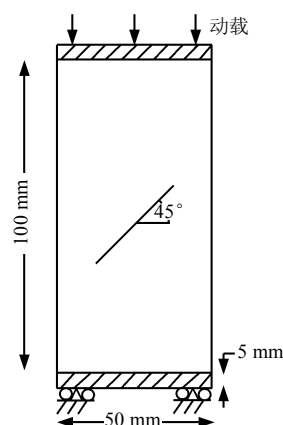


图 2 数值模型

Fig.2 Numerical model

(4) 动态荷载峰值不同, 采用如图 3 所示持续时间均为 $2\ \mu\text{s}$ 的动态三角应力波, 分别取其峰值强度为 30、50、80 MPa 三种情况。动态荷载按 0.1 微秒/步加载, 为充分考虑应力波在岩体内部的传播及作用时间, 取总计算时间为 $50\ \mu\text{s}$ 。

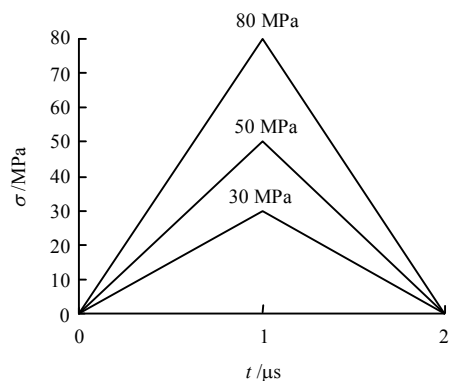


图 3 不同峰值强度的动态应力波
Fig.3 Dynamic stress wave of different amplitudes

4 数值模拟结果及分析

为了较清晰地说明动载下岩体破坏的一般规律, 首先以倾角为 45° 、 $1/2$ 贯通的单节理岩体, 施加峰值为 50 MPa 的动态应力波的情况为例进行说明。动态应力波自上而下传播, 可由图 4 的数值模拟结果中得到试样破坏过程的最大剪应力分布图, 越亮的部位表示该处所受最大剪应力值越大, 黑色则表示该单元以已破坏。通过分析获得以下规律: (1) 在加载板上施加的应力波为平面波, 传播过程中波前为平面, 考虑了边界反射的影响, 在平面波两侧会尾随侧面边界的反射波, 见图 4(a); (2) 应力波未传播到节理面时, 左右两侧发生应力波反射作用, 产生剪切波和拉伸波, 且由于岩体材料的非均匀性使得岩体内部存在许多软弱的缺陷, 缺陷区域的力学性质弱于其他区域, 当应力波传播到该区域时容易产生破坏, 进而在试样上部形成一些破坏单元。这些微破裂呈散状, 未相互贯通发展成为宏观裂纹; (3) 应力波接触到节理面后, 节理的存在改变了应力波的传播路径, 应力波在节理面处发生反射和透射现象。由于节理的弹性模量远低于岩石, 所以透射能量很小, 而以反射为主。当反射波与向下的后续应力波以及侧面反射波相遇时, 应力波将由压缩波转变成拉伸波。岩体的抗拉强度远低于抗压强度, 导致在拉伸区域很容易造成破坏, 并且破坏单元相互贯通, 因此在节理面上方形成与节理面近似平行的宏观裂纹。见图 4(d); (4) 节理面反射了大部分传播到该位置处的应力波, 阻碍了其

向下传播。只有绕过节理面的应力波以及极少部分透射应力波继续向下传播, 因此通过节理后, 应力波的强度被削弱, 导致岩体下半部分的破坏程度明显小于上半部分; (5) 在节理的两端形成高应力区, 破坏相对集中。到 $45\ \mu\text{s}$ 时, 节理两端已经发育出新的裂纹。应力波经底面反射, 又造成岩体下部形成一些新的破坏单元; (6) 在应力波传播过程中, 还伴随有能量损失。一方面节理反射了大量应力波, 另一方面, 透射过程中节理面吸收了部分应力波能量。因此节理存在很大程度上削弱了应力波的能量。选取试样顶部和底部的最大主应力波形图, 见图 5。应力波到达 A 点时, 其最大主应力产生一个巨大的跃迁。随着应力波远离, 波峰逐渐降低。经过 $31\ \mu\text{s}$, 应力波从试样顶部传至试样底部, B 点主应力形成跃迁。由于传播过程中的衰减, 波峰值由 A 点的 11.7 MPa, 衰减至 B 点的 6.6 MPa, 衰减

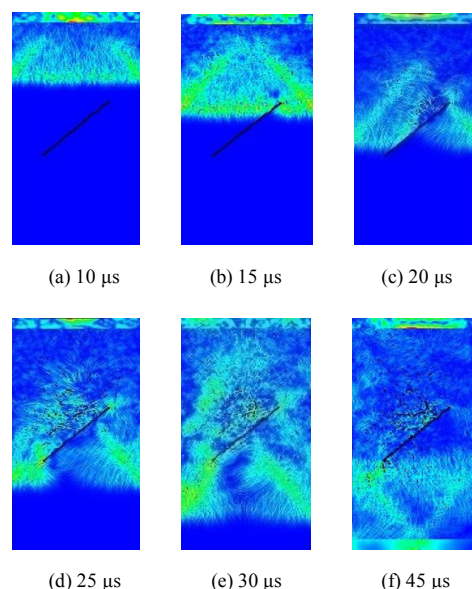


图 4 岩体试样破坏过程(45° , $1/2$ 贯通单节理)
Fig.4 Rock mass failure process
(rock with a 45° , $1/2$ discontinuity degree joint)

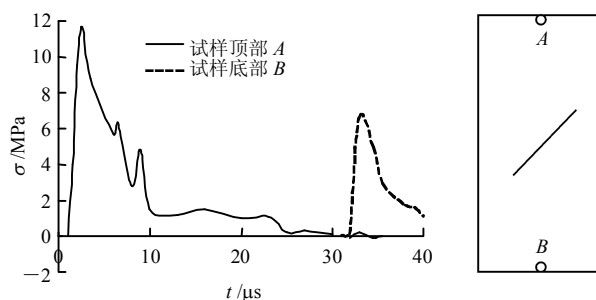


图 5 试样顶部和底部最大主应力
Fig.5 Maximum principal stress wave curves
at top and bottom of the specimen

率约为 44%。

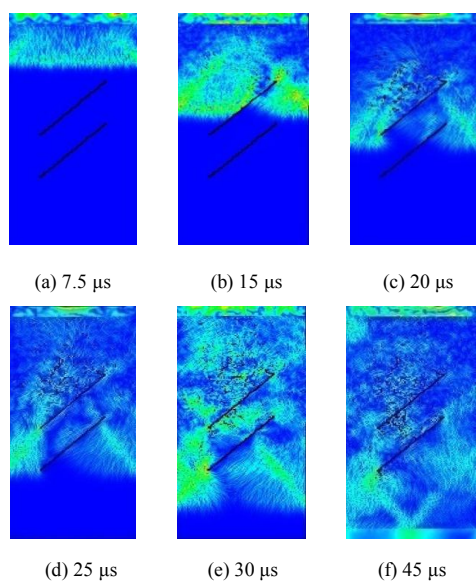
4.1 节理数

本节讨论施加相同载荷, 应力波峰值为 50 MPa, 试样分别含有 0、1、2、3、5 条 1/2 贯通的 45° 节理, 节理间距为 20 mm。

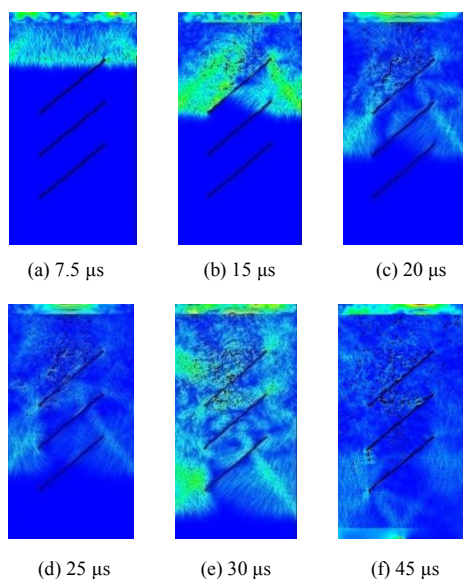
图 6、7 分别为 2 条和 3 条节理时的部分破坏过程剪应力分布。对比图 4 与图 5、6 可以看出, 随着节理条数的增加, 岩体破坏逐步增强。1 条节理时, 岩体的破坏单元相对较少且以散状分布为主; 2 条节理时, 破坏单元数明显增加, 到 20 μs 时已经出现贯通裂纹的趋势。不仅在节理上部 and 两端出现

裂纹, 两节理之间也出现大量破坏单元并且形成裂纹; 3 条节理时, 破坏进一步加强, 20 μs 时节理上部已经出现明显裂纹, 之后不断有新的裂纹产生。分析认为, 当节理条数较多时, 最上面的节理面离岩体顶端较近, 应力波传递到节理面的过程中消耗的能量较少, 导致节理面反射的拉应力波能量值较高, 节理面上方的拉破坏区域较大, 上部岩体的破坏程度会加剧。另外一个原因, 应力波在节理面之间的多次反射也加强了节理面之间岩石的破坏。因此, 随着节理条数的增加, 岩体破坏程度随之明显增强。但是, 由于应力波总能量有限, 当节理条数增加到一定程度后, 岩体破坏程度不会持续加剧。

当岩石在荷载下发生微破裂时, 一部分应变能以弹性波的形式释放出来, 称为岩石的声发射 (AE), AE 数能反映岩体单元的破坏情况, 正比于岩体破坏单元数^[17]。比较不同节理条数的岩体破坏过程 AE 累积数曲线, 如图 7 所示。从图中可以看出, 当从无节理增至 1~3 条节理时, AE 数明显不断增加, 即破坏明显增强, 但增加的幅度越来越小。超过 3 条节理以后, 随着节理数增加, AE 数趋于稳定, 并没有明显的增加, 说明节理数对岩体破坏程度的影响有一个饱和值, 超过这个饱和值后, 节理数的影响很小, 与文献[11]的 SHPB 试验中岩体强度会随节理数增加而降低, 并逐渐趋于稳定的结论一致。



(1) 2 条节理岩体



(2) 3 条节理岩体

图 6 含 2~3 条节理岩体破坏过程剪应力
Fig.6 Shear stresses of failure processes
of rock specimen with 2-3 joints

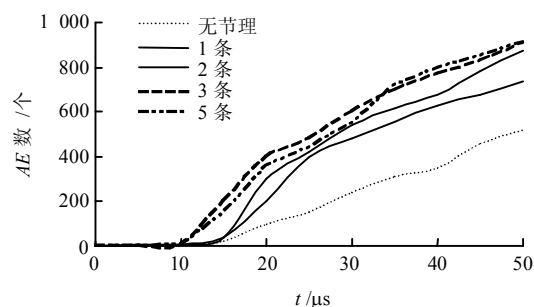


图 7 不同节理数的岩体 AE 累积数比较

Fig.7 Comparison of accumulative amounts of AE of
rock specimen with different numbers of joints

此外, 对比 45 μs 时不同节理数试样的剪应力图可以发现, 应力波从试样顶端经节理面传至试样底部后, 节理数较少时试样亮部越多, 即高应力区较大, 应力波相对仍具有较高能量。而节理数较多时, 应力波传至底部后剪力图中亮部较少, 即高应力区较小, 应力波能量较小, 说明节理数越多, 对应力波能量消耗越明显, 阻碍应力波向下传播。

图 8 为图 5 中试样底部 B 点在不同节理数试样中的最大主应力峰值。当试样完整无节理时, B 点最大主应力峰值为 9.5 MPa。而有 1、2、3、5 条节理时 B 点最大主应力峰值分别为 6.6、5.1、4.8、4.6 MPa, 约为无节理试样的 69%、54%、50%、48%。可见节理面的存在极大地消耗应力波能量, 阻碍了应力波的向下传播。节理条数较少时阻碍作用变化明显, 随着节理条数的增加, 阻碍作用趋于稳定。在实际工程中, 一方面要避免节理造成的失稳, 另一方面可以利用节理、裂隙隔离冲击波造成的危害。

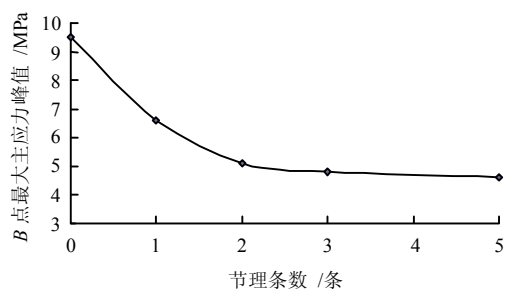


图 8 不同节理数的岩体底部最大主应力峰值

Fig.8 Peak values of maximum principal stress in rock specimen bottom with different numbers of joints

4.2 节理贯通度

在上述相同荷载条件下分别采用 1/4、1/2 和 4/5 贯通的 45° 单节理试样, 节理贯通度指节理在水平方向投影长度占试样宽度的比例。

图 9、10 分别为 1/4 和 4/5 贯通条节理时的部分破坏过程的剪应力分布图。对比图 5 与图 9、10 可以看出, 当节理贯通度较小时, 岩体破坏程度比较小。整体的破坏单元数不多, 且分布较为均匀, 都呈散状, 未相互贯通。分析认为, 这是由于节理较短, 造成的应力波反射区域较小, 因此对应力波向下传播的阻碍较小。当节理足够短时, 最终可将试件视为无节理的完整岩块。随着节理长度增加, 岩体破坏增强。从图 10 中可以看出, 25 μ s 时节理面上方已经开始出现与节理面平行的裂隙。45 μ s 时节理面上方出现新的水平裂隙, 节理面的两端也发育出新的裂隙。原因是当节理较长时应力波反射区域大, 形成大面积的拉伸破坏区, 造成节理上部岩体破坏严重, 由于绝大部分应力波被节理反射, 节理下部岩体得到有效保护, 破坏较小, 且由于节理较长, 节理两侧空间狭小, 绕过节理的应力波更易在此形成高应力区, 导致节理两端破坏较为严重, 发育出新的裂纹。从图 11 可以明显看出, 随着节理

长度增加, 岩体破坏单元累积数增加, 即破坏更严重, 与上述分析一致。对于 1/4 贯通节理岩体, 由于节理较短, 对应力波的影响较小, AE 数的增长较为均匀; 1/2 和 4/5 贯通节理时, 节理相对较长, 对应力波影响较大, 导致应力波接触到节理后岩体的 AE 数迅速增加, 即岩体破坏程度迅速加剧。总之, 节理越长, 岩体破坏越严重。节理短时, 破坏单元分布均匀, 节理较长时, 破坏主要集中在节理上方及两侧。

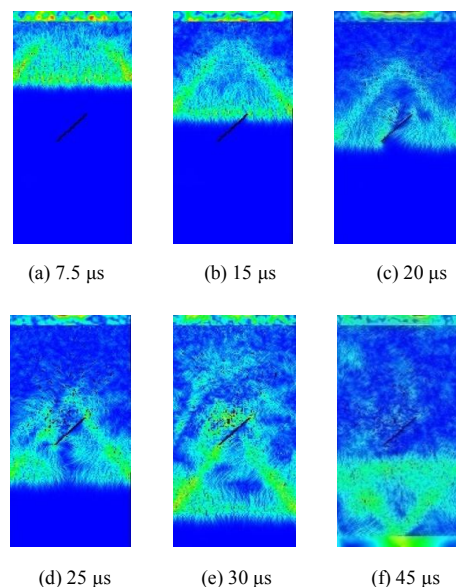


图 9 1/4 贯通节理岩体破坏过程剪应力

Fig.9 Shear stresses of failure processes of rock specimen when joint discontinuity degree is 1/4

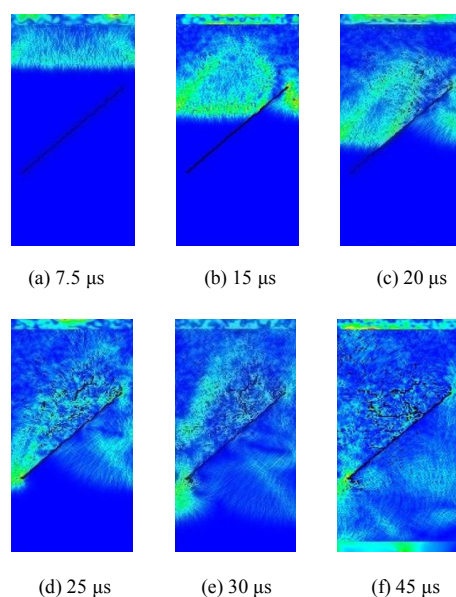


图 10 4/5 贯通节理岩体破坏过程剪应力

Fig.10 Shear stresses of failure processes of rock specimen when joint discontinuity degree is 4/5

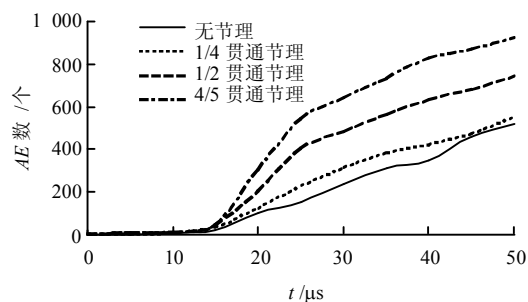


图 11 不同贯通度节理岩体 AE 累积数比较

Fig.11 Comparison of accumulative amounts of AE of rock specimen with different discontinuity degrees of joints

4.3 节理倾角

相同荷载情况下分别采用 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 的节理岩体试样, 由于施加的动载应力波是自上往下传播的, 节理在横向投影长度比节理竖向投影长度对应力波影响更为显著, 为降低这种影响, 将节理贯通度设为定值 1/2。图 12 为不同节理岩体破坏过程部分剪应力图。

不同节理倾角影响应力波传播方向。由图 12(1)可见, 当倾角较小时, 经节理面反射后的应力波整体向上传播, 易与后续应力波在节理面上部形成拉伸破坏区, 并发育出贯通裂纹。而节理下部岩体得到了有效保护, 导致破坏主要集中在节理上部岩体, 而节理下部岩体较为完整; 由图 12(3)可见, 当节理倾角较大时, 经反射后的应力波整体仍向下传播, 不易形成拉伸破坏区, 没有出现贯通裂纹, 但可以有效地破坏节理下部岩体。导致破坏单元分布广且较为均匀。

由图 12(2)、12(3)可见, 不同倾角节理长度不同, 倾角较大时, 60° 节理面相对 30° 更长, 形成的拉伸破坏范围更大, 而总能量有限, 破坏单元较难形成相互贯通形成裂纹, 以散状分布为主。

图 13 为加载至 $50 \mu\text{s}$ 时不同倾角节理试样的 AE 数累积数。从图中可以看出, 倾角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, 岩体破坏程度不断增加, $45^\circ \sim 60^\circ$ 间达到最大, 继续增加倾角, 能量值则开始减小, 说明节理倾角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时破岩效果相对最佳。

4.4 应力波峰值

对 45° 、1/2 贯通单节理分别施加峰值为 30、50、80 MPa 的动态荷载。图 14 为不同应力波峰值时岩体破坏过程剪应力图。从图 14(1)中可以看出, 动载下应力波峰值较低时, 能量较弱, 导致岩体破坏程度较低, 拉伸区能量较弱, 无法形成贯通的裂

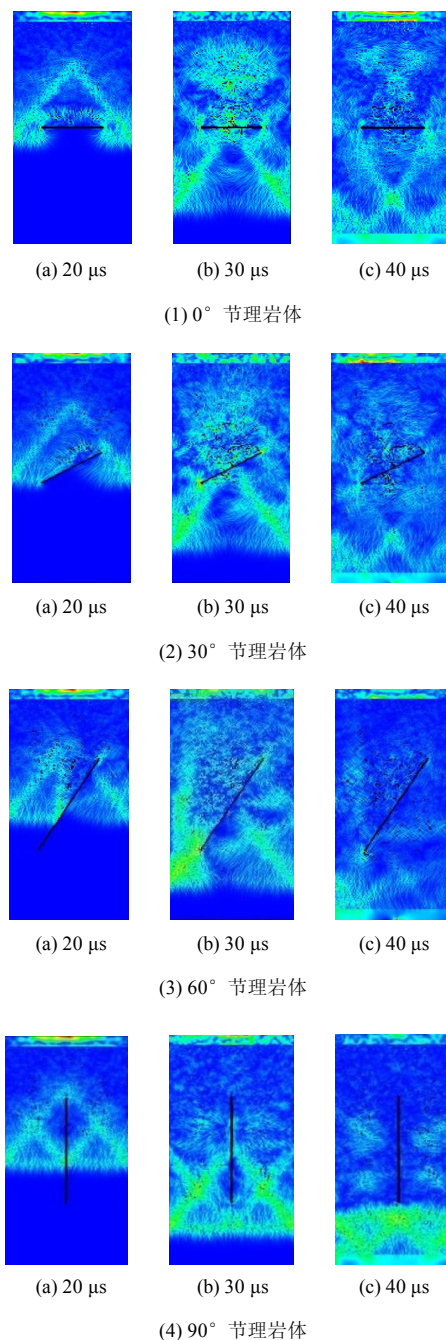


图 12 节理倾角不同时破坏过程剪应力
Fig.12 Shear stresses of failure processes of rock specimen with different joint dip angles

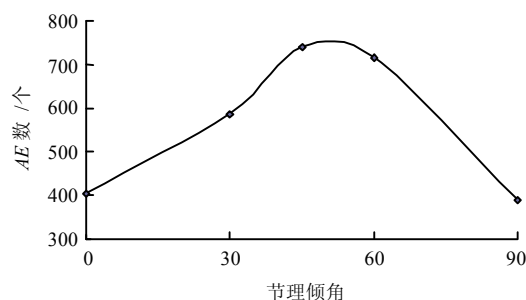


图 13 不同节理倾角岩体加载至 $50 \mu\text{s}$ 时 AE 累积数对比
Fig.13 Comparison of amounts of AE between rocks with different joint angles at time of $50 \mu\text{s}$

纹。节理面反射和吸收了部分应力波,极大削弱了应力波的能量,使之不足以有效破碎节理下部岩体,破坏单元主要呈散装集中在节理上部。随着应力波峰值增大,岩体破坏明显加强见图 14 (2), 15 μs 时已经在试件上部形成大量零散破坏单元;拉伸破坏效应明显,25 μs 时形成明显贯通裂纹,之后向上下两端发展;应力波经节理的削弱作用后,依然可以有效破碎节理下部岩体;应力波经试样底面反射后,使节理下部岩体的破坏单元数进一步增加。当

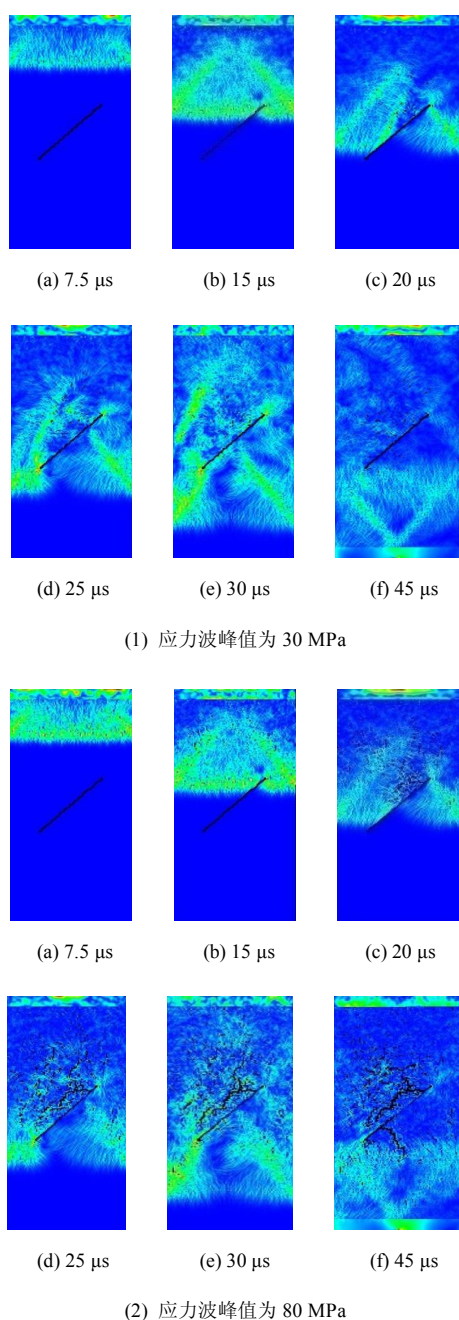


图 14 岩体破坏过程剪应力

Fig.14 Shear stresses of failure process of rock specimen when amplitude of stress waves are 30 and 80 MPa prespectively

应力波峰值足够大时,节理面附近发育出的次生裂纹会向上下方发展,最终使岩体完全粉碎性破坏。

通过图 15 中不同应力波峰值的 AE 累积数对比可见,50 μs 时,应力波峰值 30 MPa 时岩体 AE 累积数为 197;50 MPa 时 AE 累积数增加到 740 个,为前者的 3.76 倍;80 MPa 时 AE 累积数达到 1 864 个,为 30 MPa 时的 9.5 倍。说明应力波峰值对岩体破坏有着十分显著的影响。

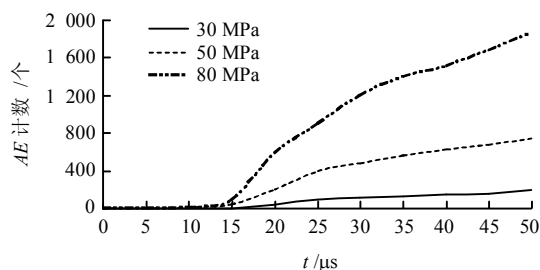


图 15 不同应力波峰值岩体 AE 累积数比较

Fig.15 Comparison of accumulative amounts of AE of rock specimen with different amplitudes of stress wave

5 验证

为验证上述数值模拟的合理性,将结果与文献[11]中的节理岩体动态破坏的 SHPB 相似材料试验结果进行对比。

在 RFPA 数值试验中,不同节理性质时试样 AE 数的变化可以体现出节理对试样破坏程度的影响规律。根据细观力学,节理试样损伤变量可以定义为

$$D_1 = \frac{N_j - N_r}{N_r} \quad (9)$$

式中: N_r 、 N_j 分别为完整岩石和节理岩体 AE 数。在 SHPB 试验中不同节理性质下试样峰值强度损伤的变化同样反映出试样的损伤程度规律,损伤变量可以定义为

$$D_2 = \frac{\sigma_r - \sigma_j}{\sigma_r} \quad (10)$$

式中: σ_r 、 σ_j 分别为完整岩石和节理岩体的峰值强度。按照如上定义方法,对两种方法中含单条 45° 不同贯通度节理岩体试样的损伤变量进行对比分析。

如图 16 所示,节理贯通度对试件损伤有较大影响,中心 1/4、1/2、4/5 贯通及全贯通时,本文方法所得岩体损伤 D_1 分别为 0.06、0.43、0.77、0.95; SHPB 试验中岩体损伤 D_2 分别为 0.05、0.26、0.72、

0.83, 两者数据变化规律基本吻合。两种方法都反映出随着节理贯通度增大, 岩体损伤增强。且贯通度较小时, 损伤增速较慢; 贯通度较大时, 损伤增速也较快。由于采用的是两种不同的方法, 测量不同的参数, 两者的所得损伤还不能完全吻合, 但两种方法都总结出相同的规律及结论, 证明了本文 RFPA 数值模拟试验的可行性和结论的可靠性。

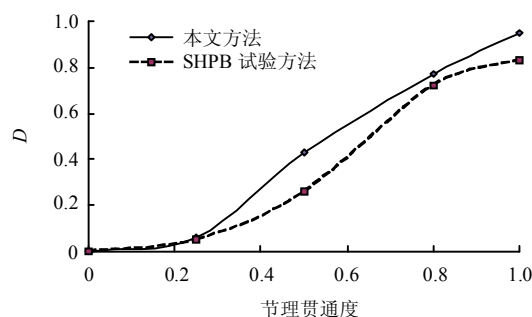


图 16 两种方法中不同节理贯通度试样损伤对比
Fig.16 Comparison of damage of rock with different joint discontinuity degrees

6 结 论

(1) 节理条数越多, 岩体试样的破坏程度以及应力波传播过程中的能量消耗越大, 当节理条数增加到一定数量后, 岩体破坏程度以及应力波能量损失将趋于稳定, 变化很小。

(2) 节理贯通度较小时, 节理对应力波传播的影响不明显, 岩体破坏程度较小, 且破坏单元分布均匀。当节理贯通度足够小时, 节理岩体可视为完整岩块。随着节理贯通度的增加, 岩体破坏程度逐渐增强, 由于节理对应力波的反射, 一定程度上减轻了对节理下部岩体的破坏。岩体破坏区域主要集中在节理上端及两侧。

(3) 不同倾角节理对应力波的传播有较大影响。节理倾角较小时, 拉伸破坏效应明显, 破坏主要集中在节理上端且易发育形成贯通节理; 倾角较大时, 破坏单元范围广, 呈均匀的散状分布, 不易发展形成贯通节理。节理倾角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时, 岩体破坏效果最佳。

(4) 应力波峰值对岩体破坏影响显著。应力波峰值越大, 岩体的破坏程度越大。当应力波峰值足够大时, 裂纹会由节理向上下方不断发展, 最终使岩体发生完全粉碎性破坏。

(5) 选取不同节理贯通度工况下试样损伤与

SHPB 试验中试样损伤结果进行对比, 损伤变化规律基本吻合。

参 考 文 献

- [1] DHAWAN K R, SINGH D N, GUPTA I D. Dynamic analysis of underground openings[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2004, 37(4): 299—315.
- [2] KUMSAR H, AYDAN O, ULUSAY R. Dynamic and static stability assessment of rock slopes against wedge failures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, 33(1): 31—51.
- [3] PYRAK-NOLTE L J, MYER L R, COOK N G W. Transmission of seismic waves across single nature fracture[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(6): 8617—8613.
- [4] PYRAK-NOLTE L J. The seismic response of fractures and the interrelation among fracture properties[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1996, 33(8): 787—802.
- [5] CAI J G, ZHAO J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(4): 661—682.
- [6] WU Y K, HAO H, ZHOU Y X, et al. Propagation characteristics of blast-induced shock waves in a jointed rock mass[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1998, 17(6): 407—412.
- [7] 谢冰. 岩体动态损伤特性分析及其在基础爆破安全控制中的应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [8] 李夕兵, 王卫华, 马春德. 不同频率载荷作用下的岩石节理本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 247—253.
- LI Xi-bing, WANG Wei-hua, MA Chun-de. Constitutive model of rock joints under compression loads with different frequencies[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 247—253.
- [9] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. *Proceedings of the Physical Society B*, 1949, 62(11): 676—700.
- [10] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(1): 471—478.
- [11] 刘红岩, 邓正定, 王新生, 等. 节理岩体动态破坏的

- SHPB 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 659—665.
- LIU Hong-yan, DENG Zheng-ding, WANG Xin-sheng, et al. Similar material test study of dynamic failure of jointed rock mass with SHPB[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 659—665.
- [12] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] 左宇军, 唐春安, 朱万成, 等. 动载荷作用下岩石破坏过程的数值试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 887—892.
- ZUO Yu-jun, TANG ChunAN, ZHU Wan-cheng, et al. Numerical test on failure process of rock subjected to dynamic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 887—892.
- [14] 廖志毅, 梁正召, 杨岳峰, 等. 刀具动态作用下节理岩体破坏过程的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1147—1155.
- LIAO Zhi-yi, LIANG Zheng-zhao, YANG Yue-feng, et al. Numerical simulation of fragmentation process of jointed rock mass induced by a drill bit under dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 35(6): 1147—1155.
- [15] CHAU K T, ZHU W C, TANG C A, et al. Numerical simulations of failure of brittle solids under dynamic impact using a new computer program_DIFAR[J]. **Key Engineering Materials**, 2004, 261—263 : 239—244.
- [16] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43 (2): 236—252.
- [17] TANG Chun-an, XU Xiao-he. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function[J]. **Journal of Seismological Research**, 1990, 13(2): 203—213.

山地蓄水地质灾害治理工程

著译者: 康景文 谢强 陈云 版次: 第一版开本: 小 16 开 页数: 366 装帧: 平膜 定价: 58.00

出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: 978-7-112-17515-4 出版时间: 2015-04

【内容简介】山区河流水位的急剧涨落、特别是山区河流水库运行引起的水位涨落以及移民新城镇修建等人类活动, 会迅速持续改变河流岸坡的原始水文地质环境, 导致地质灾害的发生或复活。山区河流地质灾害具有自身的特点和规律, 其治理工程亦须与其特点相适应。近年来, 特别是山区河流水库的大量兴建, 我国对此类地质灾害进行了大规模的勘察治理, 积累了十分丰富的资料, 对其进行系统整理和总结, 无论在学术研究上还是工程实践中都是非常必要的。本书以典型山区河流蓄水区域为背景, 对所搜集到的 1065 处地质灾害工点 (包括 162 个滑坡、404 个塌岸、123 个边坡、376 个危岩体) 的勘察、设计、监测、检测资料进行分类统计、研究总结, 系统地论述了山区河流地质灾害的治理技术, 并以部分典型工程为例进行说明。本书文字浅显、叙述详细, 可供岩土工程专业人员和大专院校学生参考。

【读者对象】 岩土工作者和大专院校岩土工程类专业的学生

【目录】第 1 章地质环境 第 2 章地质灾害特征及主要影响因素 第 3 章地质灾害勘查技术 第 4 章地质灾害治理技术 第 5 章地质灾害治理典型工程检测技术 第 6 章地质灾害及治理工程监测技术 第 7 章地质灾害数据库及辅助设计系统 参考文献