

DOI: 10.11779/CJGE2016S2043

# 高地应力作用下岩石和地下硐室的动态力学行为和响应

廖志毅<sup>1, 2</sup>, 朱建波<sup>2, 3, 4</sup>, 唐春安<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学岩石破裂与失稳研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 香港理工大学土木与环境工程学系, 香港; 3. 天津大学建筑工程学院水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 4. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 采用基于 FEM 和连续损伤力学的 RFPA 数值模拟软件, 首先从实验室尺度出发, 建立了模拟的 SHPB (split Hopkinson pressure bar) 数值模型, 分析了不同初始地应力作用下岩石材料的动态力学特性。数值模拟结果表明, 岩石的动态压缩强度随着埋深与初始水平地应力与垂直地应力比值  $K$  的增加而增加。随后, 从岩石工程尺度, 考虑岩体内的不连续节理面的影响。建立动荷载作用下节理岩体地下硐室数值模型, 系统分析了柱面波和平面波在节理岩体内部的传播规律以及节理力学性质和空间分布对地下硐室动态响应的影响。研究表明, 除节理面处透反射和岩体损伤破坏导致的波衰减外, 柱面波存在额外的几何衰减。同时, 节理的力学性质与空间分布直接决定了应力波在节理面处的透反射规律, 从而进一步影响了地下硐室的破坏程度与硐室壁处 PPV (Peak particle velocity) 结果。

**关键词:** 有限元; 初始地应力; 节理岩体; 动态压缩强度; 硐室动态响应

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0260-06

**作者简介:** 廖志毅(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: jianbo.zhu@polyu.edu.hk。

## Dynamic behavior and response of rock and underground openings subjected to high initial stresses

LIAO Zhi-yi<sup>1, 2</sup>, ZHU Jian-bo<sup>2, 3, 4</sup>, TANG Chun-an<sup>1</sup>

(1. Institute of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The FEM and continuous damage mechanics-based numerical code RFPA is selected as the research tool. First of all, from the view of laboratory scale, numerical SHPB (split Hopkinson pressure bar) system is established to investigate the dynamic behavior of rocks under in-situ stresses. The derived results show that the dynamic compressive strength of rock increases with the increasing depth and parameter  $K$  which is defined as the ratio of horizontal stress to vertical one. Subsequently, from the view of rock engineering scale, dynamic response of underground openings under plane and cylindrical wave disturbances are numerically investigated. In the numerical model, the properties and distribution of rock joints are fully taken into consideration. The simulated results indicate that the additional attenuation of cylindrical waves occurs as the propagation distance increases in addition to the wave attenuation caused by rock and joint damage and wave reflection and transmission along joint surfaces. Moreover, it is found that the properties and distribution of joints directly determine the wave reflection and transmission along joint surfaces, which will further influence the damage degree and PPV (peak particle velocity) results of the underground openings.

**Key words:** FEM; in-situ stress; jointed rock mass; dynamic compressive strength; dynamic behavior of underground opening

## 0 引言

随着人们对地下空间、资源等方面的需求逐渐提升, 岩石工程逐步的朝深部发展。尤其是在中国西部, 由于该地区地质条件复杂, 节理等地质构造较为发育。同时, 岩石工程普遍面临着高烈度及高地应力等现象。因此, 研究在初始地应力作用下岩石的动态力学特性

以及动荷载作用下节理岩体地下硐室的动态响应具有重大的科学与工程意义。

基金项目: 中国香港研究资助项目 (25201814); 国家自然科学基金项目 (41402241); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2014CB047103)

收稿日期: 2016-05-19

从小尺度出发, 目前, SHPB (split Hopkinson pressure bar) 实验系统被广泛地用于测定岩石材料的动态力学特性<sup>[1-2]</sup>。另外, 一些学者对 SHPB 装置进行了改进, 在施加动载荷之前对岩石试样施加初始静荷载。从而研究动静组合作用下岩石的动态力学特性<sup>[3-5]</sup>。

从工程尺度上看, 岩体内广泛的分布着节理等不连续面。由于节理面的存在, 岩石工程问题变得更为复杂。尤其是在受到动荷载作用时 (爆炸、地震等), 节理面处将发生复杂的透反射现象。应力波作用下地下硐室的动态响应将受到节理面力学性质和空间分布等因素的影响。在节理岩体波传播方面, 张秀丽等<sup>[6]</sup>通过 DDA 方法研究了节理对爆炸波传播的影响。李娜娜<sup>[7]</sup>等通过 SHPB 试验分析了不同节理接触面面积以及接触面几何分布对波传播特性的影响。Zhu 等<sup>[8]</sup>研究了不同节理力学性质以及空间分布对波传播的影响。在节理岩体地下硐室动态响应方面, Deng 等<sup>[9-10]</sup>系统分析了爆炸应力波在节理岩体的波衰减以及动载荷作用下不同节理力学性质及空间分布对地下硐室稳定性的影响。

针对岩石/岩体在动荷载作用下力学特性这一广泛关注的问题, 尤其是其本身处于一定初始地应力作用下的情况下。本文采用有限元数值软件 RFPA (rock failure process analysis), 在充分考虑岩石材料的非均匀特性以及损伤演化过程的基础上, 研究了其在动荷载作用下的力学特性。首先, 从小尺度岩石材料出发, 建立了模拟的 SHPB (split Hopkinson pressure bar) 模型, 分析了不同初始地应力作用下, 岩石材料的动态力学特性。随后, 建立动荷载作用下节理岩体地下硐室模型, 分析了不同应力波形式及岩体结构面特性下地下硐室的动态响应。

1 初始地应力下岩石动态特性分析

在岩体工程中, 岩体本身承受着一定的初始地应力作用。尤其是对于高埋深地下工程而言, 初始地应力对岩体的影响不可忽视。当岩体受到动荷载作用时 (爆炸、地震等), 其动态力学特性将随着岩体埋深的变化而改变。

初始地应力由初始水平地应力  $\sigma_h$  和初始垂直地应力  $\sigma_v$  组成。通常采用  $\sigma_h$  和  $\sigma_v$  的比值  $K$  来描述两者之间的关系。Brown<sup>[11]</sup>等收集了大量实测数据并加以整理, 得到  $\sigma_v$  是由岩体的埋深决定, 平均 0.027 MPa/m。同时, 系数  $K$  在不同埋深下服从一种双曲线关系:

$$0.3 + \frac{100}{Z} < K(Z) < 0.5 + \frac{1500}{Z}, \quad (1)$$

式中,  $Z$  为岩体埋深。

动态压缩强度作为一种评判岩石动态力学性能的重要参数, 本节从小尺寸岩石材料出发, 通过建立模拟的 SHPB 模型, 分析不同初始地应力作用下岩石动态压缩强度的变化规律。

1.1 数值模型

数值模型采用模拟的 SHPB 系统, 如图 1 所示。关于该数值模型的准确性已在作者之前的研究中得到验证<sup>[12]</sup>。在本文的研究中, 首先, 初始垂直和水平地应力分别以静态轴压与围压的形式施加在 SHPB 系统中 (图 1 (a))。动荷载在静荷载 (初始垂直和水平地应力) 施加完毕以后, 通过一个矩形冲头撞击入射杆左侧而激发 (图 1 (b))。矩形冲头、入射杆和透射杆直径为 30 mm, 长度分别为 120, 1000, 800 mm。为了获得理想的具有缓慢上升阶段的入射波波形, 模型入射杆左侧放置了一枚 C11000 铜片。同时, 透射杆右边界采用了人工无反射边界, 剔除了边界处反射应力波对数值模拟准确性的影响。模型相关材料参数如表 1 所示。

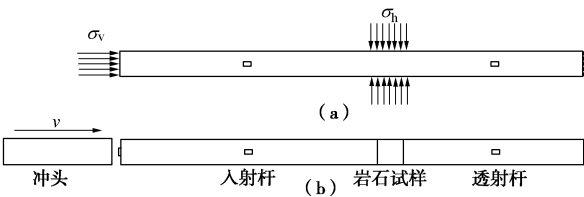


图 1 数值模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of numerical model

表 1 材料参数

Table 1 Material properties

| 材料 | 弹性模量<br>/GPa | 单轴抗拉强度<br>/MPa | 泊松比  | 密度<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|----|--------------|----------------|------|------------------------------|
| 岩石 | 90           | 58             | 0.23 | 2300                         |
| 杆  | 200          | 2500 (屈服强度)    | 0.28 | 8100                         |
| 铜片 | 117          | 750 (屈服强度)     | 0.35 | 8930                         |

1.2 不同埋深  $Z$  下系数  $K$  的影响

本小节考虑了在不同埋深下岩石的动态压缩强度特性。不同埋深所对应系数  $K$  的变化范围由式 (1) 决定。图 2 为不同埋深  $Z$  下岩石动态压缩强度与系数  $K$  关系。从数值模拟结果中看出, 岩石的动态压缩强度随着系数  $K$  的增加而增加。这是由于随着系数  $K$  增加, 初始水平地应力随之增加。从而阻碍了岩石侧向变形的趋势, 导致了岩石动态压缩强度的提高。另外, 在相同系数  $K$  增量下, 岩石动态压缩强度的增量随着埋深的增加而增加。这也表明了初始水平地应力对岩石动态力学性能的影响程度是随着埋深的增加而增大的。

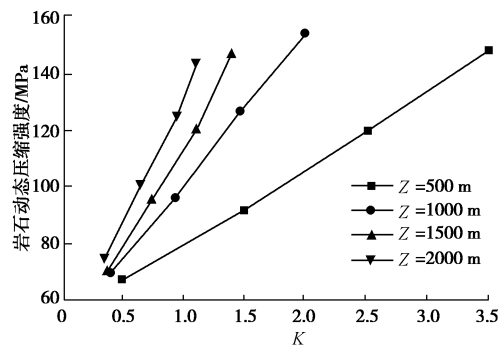


图 2 不同埋深  $Z$  下岩石动态压缩强度与系数  $K$  关系

Fig. 2 Dynamic compressive strength of rock vs.  $K$  for different  $Z$

1.3 不同系数  $K$  下埋深  $Z$  的影响

本小节分析了在不同系数  $K$  下,埋深  $Z$  对岩石动态压缩强度的影响。在系数  $K$  保持一定时,所对应的岩石埋深范围由公式 1 反算得出。图 3 为不同系数  $K$  下岩石动态压缩强度与埋深的关系。数值结果表明,岩石动态压缩强度随着埋深的增加而增加。同时,在相同埋深增量情况下,岩石动态压缩强度的增长速率随着系数  $K$  的增加而增加。这是由于在相同增量的埋深情况下,随着系数  $K$  的增加,初始水平地应力增量也随之增加。其对岩石侧向变形的限制更为明显,从而导致岩石动态压缩强度增加。

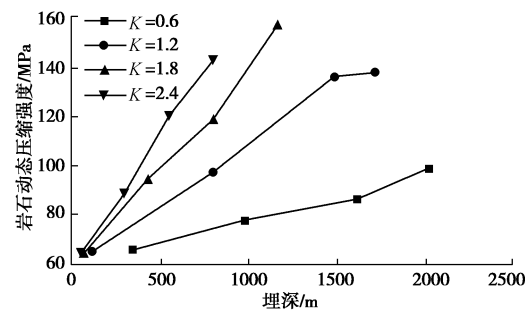


图 3 不同系数  $K$  下岩石动态压缩强度与埋深  $Z$  关系

Fig. 3 Dynamic compressive strength of rock vs.  $Z$  for different  $K$

2 节理岩体地下硐室动态响应分析

实际岩体工程中,由于节理的存在,往往使工程所面临的问题变得更为复杂。尤其是在受到动荷载扰动时,节理面处将发生复杂的透反射现象。同时,随着节理力学特性及空间分布发生变化,波在节理处的透反射能力也将随之改变。因此,研究节理岩体地下硐室动态响应应具有非常重大的科学与工程意义。

PPV (peak particle velocity), 作为岩体工程中常用的判断指标,被广泛地运用于判定地下硐室的稳定性。本节通过建立节理岩体地下硐室模型,分析了不同应力波类型、节理力学特性以及空间分布下地下硐室的破坏形式及 PPV 的变化规律。

2.1 数值模型

采用的数值模型如图 4 所示。模型尺寸为  $50\text{ m} \times 60\text{ m}$ 。直径为  $10\text{ m}$  的圆形地下硐室位于模型中心深  $45\text{ m}$  处。一组长度为  $30\text{ m}$ , 间距为  $3\text{ m}$  的平行节理从上至下,水平分布于模型中间。动荷载施加于模型的顶部,并分别考虑了平面波和柱面波对地下硐室动态响应的影响。4 个关键点  $A \sim D$  分别位于地下硐室的顶部、右侧、底部和左侧,用于监测地下硐室的动态响应过程。另外,为了避免模型四周反射的应力波对数值结果准确性的影响,本文对模型左右及下边界进行了人工无反射处理。需要说明的是,考虑到人工无反射边界处理方法的精确性,模型两侧均预留了一部分完整岩体,延长反射应力波到达地下硐室所需的时间,进一步减小了其对地下硐室的影响。加载应力波选取为三角波,持续时间为  $0.002\text{ s}$ , 振幅为  $80\text{ MPa}$ 。

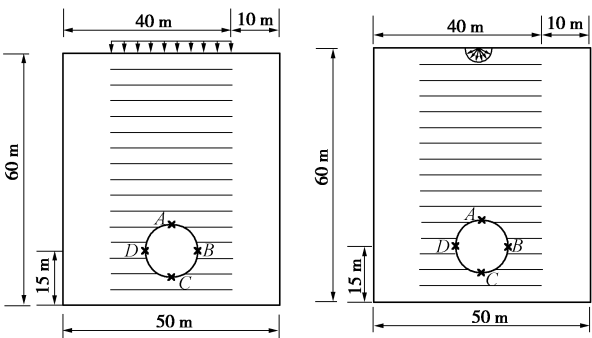


图 4 数值模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of numerical models

应力波在节理面处的透反射是一个复杂的过程。Goodman 单元作为一种常用的接触单元法,能够有效地处理不连续面受力时的接触问题<sup>[13]</sup>。在本文的数值分析中,通过在每排节理处插入 Goodman 单元来处理节理面的受力过程。岩石与节理的力学参数如表 2 所示。

表 2 材料参数

Table 2 Material properties

| 材料 | 弹性模量/GPa | 单轴抗压强度/MPa | 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 泊松比  | 初始法向                                    | 初始切向                                    |
|----|----------|------------|--|------|---|---|
|    |          |            |  |      | 刚度/( $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 刚度/( $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ) |
| 岩石 | 65       | 200        | 2120                                   | 0.25 | —                                       | —                                       |
| 节理 | —        | —          | —                                      | —    | 50                                      | 25                                      |

本节首先分析了柱面波与平面波对地下硐室动态响应的影响(2.2 节)。随后,系统分析了在平面波作用下节理力学参数和空间分布对地下硐室破坏形式以及 PPV 的影响(2.3 节~2.5 节)。在所有的参数分析中,除了所分析的参数,其他所有参数的取值均保持不变。

## 2.2 应力波类型的影响

对于绝大多数动荷载类型(爆炸和地震等),生成的应力波在岩体内从震源位置以柱面波的形式向四周传播。其能量随着传播距离呈几何衰减(与传播距离的平方成反比)。然而,对于远场的应力波,则近似的认为其以平面波的形式传播。

节理岩体中应力波能量的衰减主要由于以下 3 个方面:①岩石与节理损伤破坏消耗了应力波的能量;②节理面处应力波的透反射阻碍了其一部分能量的传递;③对于柱面波而言,随着传播距离的增加,其本身就存在一定的几何衰减。因此,为了区分柱面波本身的几何衰减和节理面处透反射导致的波衰减。首先分析了无损伤情况下,节理岩体与完整岩体内柱面波的衰减过程。图 5 给出了节理岩体与完整岩体内透射系数与柱面波传播距离的关系。其中,透射系数 $|T|$ 定义为透射波的振幅与入射波振幅的比值。可以看出,节理岩体中的透射系数小于完整岩体中的透射系数。这是由于在节理岩体中,节理会对应力波造成额外的波衰减。观察两者的差值可以发现,由节理引起的波衰减百分比服从先减小,后几乎保持一致的趋势。在本次工况中,节理所引起的波衰减最大百分比约为 14.6%。

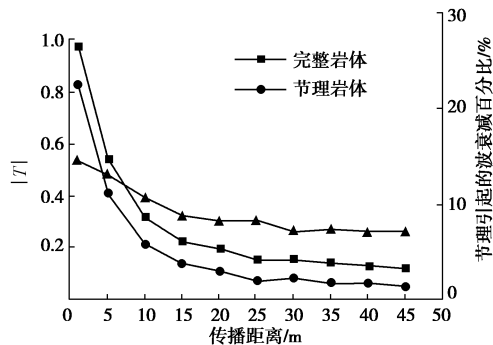


图 5 柱面波作用下 PPV 与传播距离关系曲线

Fig. 5 PPV vs. propagation distance of cylindrical waves

随后,分别考虑了震源相对模型顶部中点向左偏移量为 0, 3, 6, 9, 12 m 情况下的地下硐室的动态响应。数值模拟结果发现(图 6),随着震源与模型顶部中点距离的增加,地下硐室周围关键点 A~D 处 PPV 随之减小。尤其是关键点 B 和 C(地下硐室右侧与底部)处最为明显。

## 2.3 不同节理法向刚度的影响

节理的法向刚度 $k_n$ 对节理面处的透反射系数存在至关重要的影响。随着 $k_n$ 的提高,节理面处的透射系数随之提高。图 8 为不同 $k_n$ 下地下硐室的剪应力图,不同颜色对应了不同的剪应力水平。从数值模拟结果中可以看出,当 $k_n$ 相对较小时( $k_n = 1 \text{ GPa/m}$ ),节理面处透射能力很弱,应力波在模型顶部来回反射。导

致自由面附近破坏严重。然而,随着 $k_n$ 增加,透射系数增加,透射应力波能量增加。从而地下硐室的破坏程度也随之增加。图 7 描述了关键点 A~D 处 PPV 与 $k_n$ 的关系曲线。可以看出,随着 $k_n$ 的提高,地下硐室处 PPV 增大。当 $k_n$ 大于一个定值,节理面处的透射系数为 1,从而地下硐室处 PPV 保持不变。

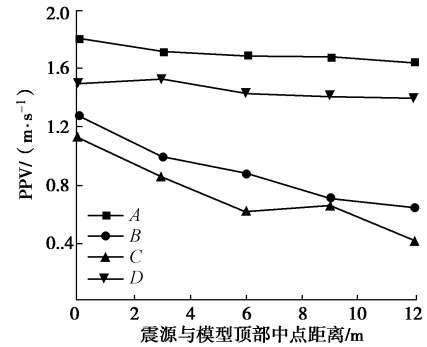


图 6 柱面波作用下 PPV 与震源位置关系曲线

Fig. 6 PPV vs. distance from center of top surface

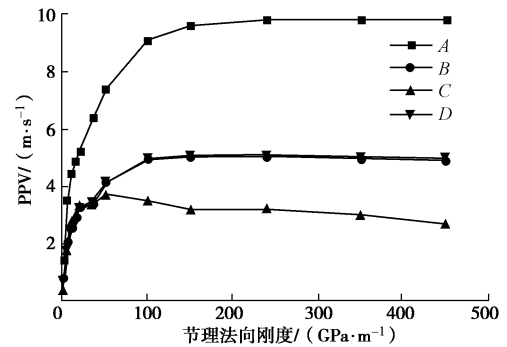


图 7 PPV 与节理法向刚度关系曲线

Fig. 7 PPV vs. joint normal stiffness

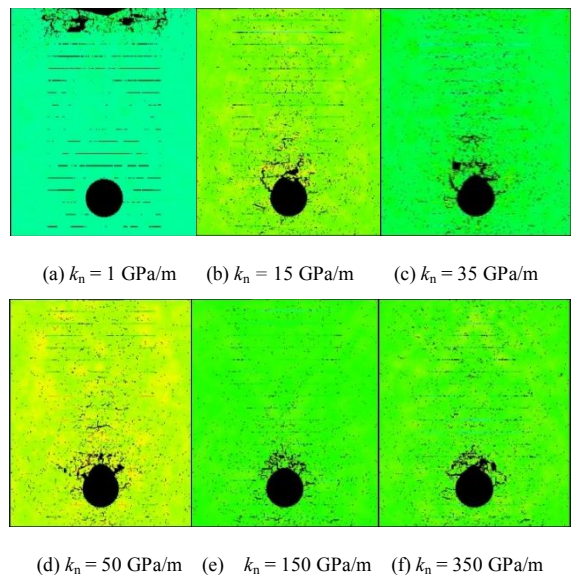


图 8 不同节理法向刚度下地下硐室破坏图

Fig. 8 Failure patterns of underground openings with different joint normal stiffnesses



2.4 不同节理间距的影响

图 10 为不同节理间距  $S$  下地下硐室的剪应力图, 不同颜色对应了不同的剪应力水平。图 9 为对应不同工况下地下硐室关键点  $A \sim D$  处 PPV 变化规律曲线。从数值模拟结果可以看出, 地下硐室顶部的破坏程度呈先减小后增大的趋势。关键点  $A$  (硐室顶部) 处 PPV 的变化情况也可以得到相同的规律。PPV 随着节理间距的增加呈明显的先减小后增大。当节理间距  $S$  等于 3 m 和 4.5 m 时, 硐室顶部的 PPV 达到最低值。然而, 关键点  $B \sim D$  (硐室左右两侧与底部) 处 PPV 则没有明显的变化规律。尤其是硐室底部, 该处 PPV 在相对较小的范围内无规则的变化。

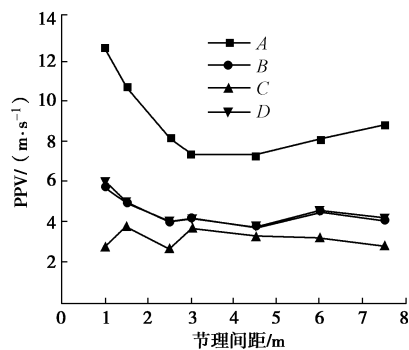


图 9 PPV 与节理间距关系曲线

Fig. 9 PPV vs. joint spacing

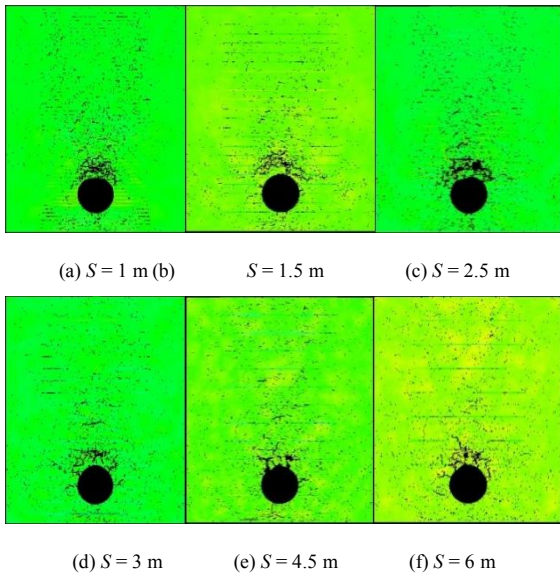


图 10 不同节理间距下地下硐室破坏图

Fig. 10 Failure patterns of underground openings with different joint spacings

2.5 不同节理倾角的影响

图 12 为不同节理倾角  $\theta$  下岩体的剪应力图, 不同颜色对应了不同的剪应力水平。从数值模拟的结果可以看出, 地下硐室的破坏区域主要集中在硐室上方。同时, 随着节理倾角的增加, 硐室的破坏程度先减小

后增大。另外, 当节理倾角  $\theta$  处于  $30^\circ \sim 75^\circ$  范围内时, 地下硐室的破坏主要集中于硐室的左上方。从图 11 的结果中也可以看出, 地下硐室关键点  $A$ 、 $B$  和  $D$  (硐室顶部以及左右两侧) 处 PPV 随着节理倾角的增大而呈现出先减小后增大的趋势。而关键点  $C$  (硐室底部) 处 PPV 随着节理倾角的增大而呈现出先减小后几乎保持不变的趋势。

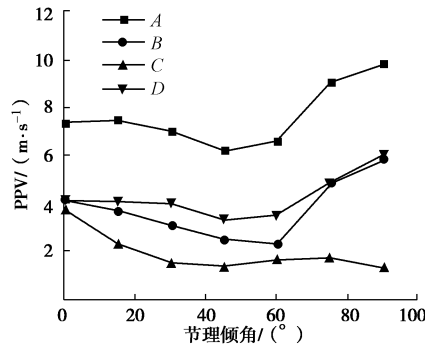


图 11 PPV 与节理倾角关系曲线

Fig. 11 PPV vs. joint orientation

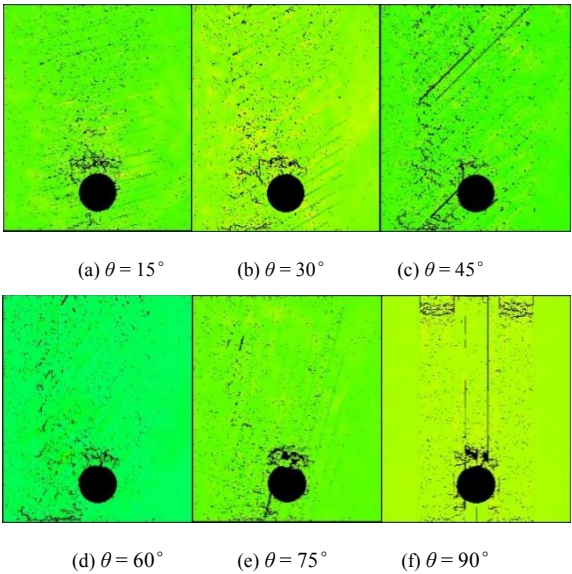


图 12 不同节理倾角下地下硐室破坏图

Fig. 12 Failure patterns of underground openings with different joint orientations

3 结 论

本文采用有限元数值模拟软件 RFPA, 针对岩体工程所面临的高初始地应力及高烈度的问题。首先, 建立了 SHPB 数值模型, 分析了不同初始地应力作用下岩石的动态特性。随后, 对动荷载作用下节理岩体地下硐室动态响应做出了系统的研究。得到了以下 3 点结论。

(1)初始地应力对岩石动态强度特性具有显著地影响。岩石埋深以及系数  $K$  的增加均会导致岩石动态

压缩强度的增加。同时,在相同增量的埋深(系数 $K$ )下,岩石动态压缩强度的增量也随着系数 $K$ (埋深)的增加而增加。

(2)柱面波在岩体内的衰减由节理和岩石材料的破坏、节理面处的透反射和其本身的几何衰减三方面导致的。同时,不同柱面波震源位置对地下硐室 PPV 结果具有显著影响。

(3)节理的力学性质(节理法向刚度)与空间分布(节理间距和倾角)对地下硐室的动态响应具有直接的影响。其决定了应力波在节理面处的透反射能力。进而对地下硐室的破坏形式及 PPV 情况造成影响。

### 参考文献:

- [1] KOLSKY H. Stress wave in solids[M]. New York: Dover, 1963.
- [2] 王 斌, 李夕兵, 尹士兵, 等. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 1003 - 1009. (WANG Bin, LI Xi-bing, YIN Tu-bing, et al. Split Hopkinson pressure bar(SHPB) experiments on dynamic strength of water-saturated sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 1003 - 1009. (in Chinese))
- [3] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(7): 1387 - 1395. (LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, YE Zhou-yuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1387 - 1395. (in Chinese))
- [4] 李夕兵, 宫凤强, 高 科, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 251 - 260. (LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, GAO Ke, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 251 - 260. (in Chinese))
- [5] LI X, ZHOU Z, YE Z, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**: 1387 - 1395.
- [6] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声, 等. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(3): 717 - 721. (ZHANG Xiu-li, JIAO Yu-yong, LIU Quan-sheng, et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(3): 717 - 721. (in Chinese))
- [7] 李娜娜, 李建春, 李海波, 等. 节理接触面对应力波传播影响的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(10): 1994 - 2000. (LI Na-na, LI Jian-chun, LI Hai-bo, et al. SHPB experiment on influence of contact area of joints on propagation of stress wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(10): 1994 - 2000. (in Chinese))
- [8] ZHU J, DENG X, ZHAO X, et al. A numerical study on wave transmission across multiple intersecting joint sets in rock masses with UDEC [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, **46**: 1429 - 1442.
- [9] DENG X, CHEN S, ZHU J, et al. UDEC-AUTODYN hybrid modeling of a large-scale underground explosion test [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, **48**(2): 737 - 747.
- [10] DENG X, ZHU J, CHEN S, et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **43**: 88 - 100.
- [11] BROWN E, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1978(4): 211 - 215.
- [12] LIAO Z, ZHU J, XIA K, et al. Determination of dynamic compressive and tensile behavior of rocks from numerical tests of split Hopkinson pressure and tension bars [J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, DOI: 10.1007/s00603-016-0954-8.
- [13] GOODMAN R, TAYLOR R, BREKKE T. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1968, **94**(3): 637 - 660.

(责任编辑 孙振远)